



引用格式:何培新,胡晓龙,郑燕,等.中国浓香型白酒“增己降乳”研究与应用进展[J].轻工学报,2018,33(4):1-12.

中图分类号:TS261.4 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2018.04.001

文章编号:2096-1553(2018)04-0001-12

# 中国浓香型白酒“增己降乳”研究与应用进展

## Research and application progress of "Ethyl Caproate-increasing and Ethyl Lactate-decreasing" in brewing of Chinese Luzhou-flavor liquor

何培新<sup>1</sup>,胡晓龙<sup>1</sup>,郑燕<sup>1</sup>,沈祥坤<sup>2</sup>,李绍亮<sup>3</sup>,李学思<sup>3</sup>,范海报<sup>4</sup>  
HE Peixin<sup>1</sup>,HU Xiaolong<sup>1</sup>,ZHENG Yan<sup>1</sup>,SHEN Xiangkun<sup>2</sup>,LI Shaoliang<sup>3</sup>,  
LI Xuesi<sup>3</sup>,FAN Haibao<sup>4</sup>

1. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院,河南 郑州 450001;
2. 河南省食品工业科学研究所有限公司,河南 郑州 450003;
3. 河南宋河酒业股份有限公司,河南 鹿邑 477265;
4. 河南皇沟酒业有限责任公司,河南 永城 476600

1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2. He'nan Food Industry Science Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;
3. He'nan Songhe Distillery Co., Ltd., Luyi 477265, China;
4. He'nan Huanggou Liquor Co., Ltd., Yongcheng 476600, China

**摘要:**适当增加浓香型白酒中己酸乙酯的质量浓度,降低乳酸乙酯的质量浓度,即“增己降乳”,是提高浓香型白酒品质的有效途径。从己酸乙酯和乳酸乙酯的化学性质与生物合成机理、“增己降乳”相关的微生物及其应用、“增己降乳”综合技术措施等方面对已有文献进行梳理发现:己酸乙酯和乳酸乙酯分别由己酸和乳酸与乙醇通过酯化作用生成,己酸和乳酸分别是这两种酯生物合成的底物;己酸菌、甲烷菌、酯化菌、乳酸菌和酵母菌等都是与“增己降乳”直接或间接相关联的微生物,单独或复合使用这些微生物制剂可以取得明显的“增己降乳”的效果;此外,白酒企业因地、因时制宜,采取科学建造窖池、优化窖泥配方、提高大曲质量、做好清洁卫生、调整入池条件、精细蒸馏操作、低温缓慢发酵等综合措施,也有助于实现“增己降乳”。未来应深入研究不同生产条件下,乳酸菌、降乳菌等“增己降乳”相关微生物的种群演替规律;采用人工培养方法和宏基因组学等免培养技术,系统研究与揭示浓香型白酒酿造过程中各种微生物的生长繁殖和代谢活动规律。以科学发展的态度,规范白酒产业化管理,保持“增己”和“降乳”的合理与适度,从而创造出具有自身特色、适应产品消费结构变化的品牌产品。

### 关键词:

浓香型白酒;己酸乙酯;乳酸乙酯;“增己降乳”

### Key words:

Luzhou-flavor liquor;  
ethyl caproate;  
ethyl lactate;  
"Ethyl Caproate-increasing and Ethyl Lactate-decreasing"

收稿日期:2018-06-19

基金项目:2018年度河南省重大科技专项项目(181100211400)

作者简介:何培新(1970—),男,河南省民权县人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为发酵工程。

**Abstract:** Appropriately increasing the mass concentration of ethyl caproate and lowering that of ethyl lactate in Luzhou-flavor liquor, i. e. "Ethyl Caproate-increasing and Ethyl Lactate-decreasing", is an effective way to improve the quality of Luzhou-flavor liquor. From the aspects of the chemical properties and biosynthesis of ethyl caproate and ethyl lactate, the related microorganisms of "Ethyl Caproate-increasing and Ethyl Lactate-decreasing", and the main technical measures of "Ethyl Caproate-increasing and Ethyl Lactate-decreasing", the existing literatures were sorted out. Ethyl hexanoate and ethyl lactate are formed by caproic acid and lactic acid and ethanol through esterification, respectively. Caproic acid and lactic acid are substrates for the biosynthesis of these two esters. Caproic acid, methanogen, esterified bacteria, lactic acid bacteria and yeasts are all directly or indirectly relate to the "Ethyl Caproate-increasing and Ethyl Lactate-decreasing". The application of these microbial preparations alone or in combination can achieve an obvious effect of "Ethyl Caproate-increasing and Ethyl Lactate-decreasing". In addition, in order to achieve the purpose of "Ethyl Caproate-increasing and Ethyl Lactate-decreasing", Luzhou-flavor liquor companies apply some comprehensive measures according to the local conditions and fermented time, such as scientific construction of the wine cellar fermentation tank, optimization of the pit mud, improvement the quality of Daqu, cleaning and hygienism, adjustment of the conditions of fermentation tank, fine distillation operation, and slow fermentation under low temperature, i. e. In the future, we should study the population succession of lactic acid bacteria, lactobacilli, i. e. related to "Ethyl Caproate-increasing and Ethyl Lactate-decreasing" under different production conditions. And use artificial culture method and metagenomics and other culture-free techniques to systematically study and reveal the laws of growth, reproduction and metabolism of various microorganisms through the brewing process of Luzhou-flavor liquor. And the industrialization management of liquor will be regulated with the attitude of scientific development to maintain "Ethyl Caproate-increasing" and "Ethyl Lactate-decreasing" reasonably and appropriately, thus ultimately create their branded products with own characteristics and adapt to changes in product consumption structure.

## 0 引言

中国白酒历史悠久,工艺独特,独具民族特色,为世界六大蒸馏酒之一. 基于酿造工艺和风格的差异,中国白酒分为浓香型、酱香型、清香型和米香型四种基本香型,其中,浓香型白酒在中国白酒市场上处于主导地位,产、销量均占70%左右<sup>[1-2]</sup>. 浓香型白酒是以粮谷为原料,经泥窖固态发酵、蒸馏、陈酿、勾兑而成,是一种以己酸乙酯为主复合香的白酒<sup>[3]</sup>. 浓香型白酒含有120余种酯类,以己酸乙酯、乳酸乙酯、乙酸乙酯和丁酸乙酯这四大酯最为重要<sup>[4]</sup>. 己酸乙酯为浓香型白酒的主体呈香物质,是浓香型白酒中含量最高的酯,各种国家标准均对己酸乙酯的含量范围或上、下限作了硬性规定. 例如,国标规定,高度优级白酒(酒精度41% vol ~

68% vol)的己酸乙酯质量浓度范围为1.2 ~ 2.8 g/L,而低度优级白酒(酒精度25% vol ~ 40% vol)的己酸乙酯质量浓度范围为0.7 ~ 2.2 g/L<sup>[3]</sup>. 乳酸乙酯也是浓香型白酒的主要香味成分之一,适量的乳酸乙酯不仅对己酸乙酯有助香作用,还能对白酒香味起到缓冲、平衡的作用,使酒体醇厚、谐调、绵甜、味长. 当前,浓香型白酒的国家标准尚未对乳酸乙酯的质量浓度做出任何硬性规定,但业界普遍认为,浓香型白酒中己酸乙酯和乳酸乙酯保持适当的比例(如1:0.5~0.9),能使主体香突出,香、味协调,酒体典型性强;乳酸乙酯过高,酒的香气较短淡,主体香受抑,香味失调,并有闷甜感;乳酸乙酯过低,酒味欠浓厚,酒体欠完整<sup>[4-5]</sup>.

从浓香型白酒企业的生产实际出发,适当增加浓香型白酒中己酸乙酯的质量浓度,降低

乳酸乙酯的质量浓度(即所谓的“增己降乳”或“增己抑乳”),使酒中的四大酯比例恰到好处,是很多白酒企业多年来提高浓香型白酒品质的主要措施<sup>[6]</sup>. 本文将从己酸乙酯和乳酸乙酯的化学性质与生物合成机理、与“增己降乳”相关的微生物及其应用、“增己降乳”综合技术措施等方面,综述我国浓香型白酒“增己降乳”的研究与应用进展,以为浓香型白酒的生产管理、理论研究和技术开发工作提供借鉴.

## 1 己酸乙酯和乳酸乙酯的化学性质与生物合成机理

### 1.1 己酸乙酯和乳酸乙酯的化学性质

己酸乙酯沸点高(161.9 ~ 168 °C),比重小于水(相对密度 0.869),不溶于水,但溶于乙醇、乙醚等多种有机溶剂. 在蒸馏时,己酸乙酯主要存在于酒精度高的酒液里,酒尾中仅有 10% ~ 20%,在酒醅中残留一小部分,其总提取

率在 90% 左右.

乳酸乙酯沸点 154 °C (低于己酸乙酯),比重略大于水(相对密度 1.03). 乳酸乙酯自身化学结构含有羟基和羰基,能与多种成分发生亲和作用,如能与水、醇类和酯类等混溶,因此挥发性较差. 在蒸馏中,乳酸乙酯的流出规律是酒尾 > 酒身 > 酒头,仅有小部分乳酸乙酯被拖带入酒中,大部分乳酸乙酯仍留在酒醅或酒尾中<sup>[4,7-8]</sup>.

### 1.2 己酸乙酯和乳酸乙酯的生物合成机理

己酸乙酯和乳酸乙酯分别由己酸和乳酸与乙醇通过酯化作用生成,因此,己酸和乳酸分别是这两种酯生物合成的底物. 在浓香型白酒酿造过程中,己酸和乳酸的生成对酒中己酸乙酯和乳酸乙酯的含量具有直接影响<sup>[9]</sup>.

**1.2.1 己酸和己酸乙酯的合成** 对于芽孢梭菌(*Clostridium* spp.)等微生物,己酸通过 $\beta$ -氧

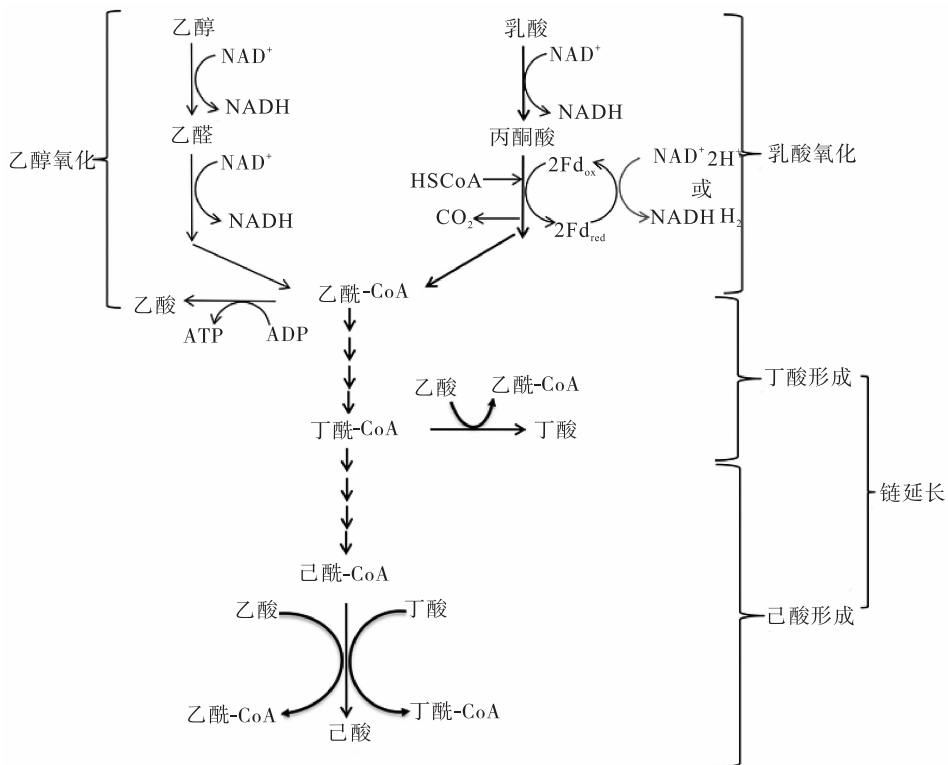


图 1 己酸的生物合成途径

Fig. 1 The biosynthetic pathway of hexanoic acid

化逆循环进行的羧酸链延长过程而合成. 在该过程中,乙醇或乳酸作为电子供体,经过氧化反应合成乙酰辅酶 A,提供己酸合成所需的电子和还原力. 在丁酰辅酶转移酶等一系列酶的催化下,乙酰辅酶 A 首先与乙酸缩合为丁酸;再经己酰辅酶 A 转移酶等的催化作用,乙酰辅酶 A 与丁酸缩合为己酸(见图 1)<sup>[10-11]</sup>. 相对于乳酸,使用乙醇作为电子供体合成己酸在热力学方面具有能量增益的优势<sup>[11]</sup>.

一般说来,己酸乙酯的生物合成主要有三种方式. 一是由己酸和乙醇通过酯酶的酯合成(酯化)反应生成己酸乙酯<sup>[12]</sup>,催化该酯化反应的酯酶主要存在于酵母菌和霉菌. 而当酵母菌和霉菌共同作用时,己酸乙酯的合成量显著高于这两类微生物的单独作用<sup>[12-16]</sup>. 二是己酸与乙醇通过乙酰己酸转移酶催化形成己酸乙酯. 酯酶为胞外酶,而乙酰己酸转移酶为胞内酶,相对而言,乙酰己酸转移酶催化合成己酸乙酯的能力较强<sup>[12,16-17]</sup>. 三是以乙酸乙酯为受体,加入乙醇变为丁酸乙酯,然后再与乙醇发生反应,合成己酸乙酯<sup>[17-18]</sup>. 第三种己酸乙酯的生物合成方式存在于细菌中,合成反应主要在兼性厌氧和厌氧条件下进行. 参与浓香型白酒酿造的微生物种群数量巨大,种群演替过程复杂,这就决定了浓香型白酒己酸乙酯生物合成的复杂性.

**1.2.2 乳酸和乳酸乙酯的合成** 乳酸是浓香型白酒发酵酒醅中主要的有机酸,是浓香型白酒中最重要的呈味剂和味道改良剂,也是固态法白酒新酒老熟的老熟剂和酒体稳定剂<sup>[8]</sup>. 乳酸合成途径主要有同型乳酸发酵和异型乳酸发酵两种类型. 进行同型乳酸发酵的乳酸菌都存在糖酵解途径(EMP 途径),EMP 途径的终产物丙酮酸在乳酸脱氢酶作用下形成乳酸. 同型乳酸发酵不需要 O<sub>2</sub>,一个葡萄糖分子可产生两个乳酸分子和两个 ATP 分子. 一些进行异型乳酸

发酵的乳酸菌因缺乏 EMP 途径中若干重要酶(如醛缩酶和异构酶),故其利用葡萄糖进行分解代谢和产能时,必须依赖戊糖磷酸途径. 在异型乳酸发酵中,葡萄糖的分解产物除乳酸外,还有乙醇、乙酸和 CO<sub>2</sub> 等多种代谢产物,产生的 ATP 也仅为同型乳酸发酵的一半<sup>[19]</sup>.

在浓香型白酒酿造过程中,乳酸乙酯的生成是多种微生物共同发生代谢作用的结果. 乳酸菌代谢产生的乳酸和酵母菌代谢产生的乙醇是乳酸乙酯合成的前体. 乳酸经转酰基酶活化成乳酰辅酶 A,再在酯化酶的作用下与乙醇合成乳酸乙酯. 在浓香型白酒酿造过程中,控制乳酸菌的数量可以有效降低乳酸生成量,不仅能有效减少乳酸和乙醇酯化生成乳酸乙酯的量,同时也有利于酵母菌的酒精发酵,提高出酒率<sup>[20]</sup>.

## 2 与“增己降乳”相关的微生物及其应用

在浓香型白酒酿造过程中,与“增己降乳”直接或间接相关联的微生物种类繁多,包括己酸菌、甲烷菌、酯化菌、乳酸菌和降乳菌等. 在实际生产应用中,单独或复合使用这些相关微生物制剂,强化浓香型白酒酿造发酵过程,可以取得明显的“增己降乳”效果.

### 2.1 己酸菌

己酸菌是浓香型白酒生产中的重要产酸微生物,大量存在于窖泥、黄水、酒醅中,不仅能促进己酸和己酸乙酯的合成,而且还能促进戊酸、庚酸等多种微量成分的生成,形成浓香型大曲酒的独特风味,因此在一定程度上左右着浓香型白酒的品质和风格<sup>[17]</sup>. 目前发现能产己酸的微生物主要为梭菌纲(*Clostridia*)中的芽孢梭菌属细菌. J. Zheng 等<sup>[21]</sup>采用变性梯度凝胶电泳技术研究了泸州老窖不同窖龄的窖池窖泥中微生物的多样性,发现克鲁氏梭菌(*C. kluyveri*)、

耳涡形梭菌(*C. cocleatum*)和泸型梭菌(*C. Lushun*)为主要的产己酸微生物. 曾田等<sup>[22]</sup>通过基于原核微生物 16S rRNA 基因 V4 可变区的高通量测序分析发现,河南某浓香型白酒企业正常发酵窖池的窖底泥样品中,产己酸菌群优势微生物除了芽孢梭菌以外,还有瘤胃球菌属(*Ruminococcus*)细菌,二者含量可达窖底泥样品中微生物总量的 75.7%.

己酸菌能代谢产生己酸乙酯等浓香型白酒的风味物质,有利于提高浓香型白酒的风味. 因此,在浓香型白酒生产管理中,应主动创造有利于己酸菌生长繁殖的营养和环境条件,促进己酸菌的生长繁殖和己酸、己酸乙酯等风味物质的合成. 从优质窖泥分离获得己酸菌,经扩大培养获得己酸菌液( $1 \sim 2 \times 10^8$  CFU/mL),用于灌窖、培养窖泥,可达到浓香型白酒生产“增己降乳”的目的. 李洪祥等<sup>[23]</sup>研究发现,灌窖选择入窖发酵 9 d 后最为恰当,这时酒醅入窖带入的大量  $O_2$  被消耗殆尽,前期曲霉、酵母的代谢发酵又积累了 3% vol ~ 5% vol 的酒精,窖内环境开始有利于己酸菌的繁殖和代谢. 这可能是因为人工培养窖泥时加入己酸菌培养液,可增加窖泥中己酸菌的接种数量,缩短窖泥成熟时间<sup>[23-25]</sup>. 杨喜军<sup>[24]</sup>研究发现,酒醅出窖后,用己酸菌液加酒尾喷洒窖壁,促进了窖泥的老熟,减缓窖泥退化,是稳定酒质的又一举措. 将己酸菌扩大培养后,添加适当比例的乙酸钠、母糟、老窖泥等物质,制备窖泥功能菌液,用于人工培养老窖泥,在浓香型白酒生产中用作窖底泥和窖壁泥使用,可大大提高新车间窖池产酒的己酸乙酯的质量浓度<sup>[25-27]</sup>.

总之,将人工己酸菌液用于窖泥培养和窖池维护,是浓香型白酒生产实践中最常采用的“增己”措施,可有效提高白酒的品质.

## 2.2 甲烷菌

甲烷菌是可以代谢  $H_2$ , CO 和少数简单有

机物进而生成甲烷的严格厌氧古生菌,是厌氧消化过程中的最后一组成员. 在没有外源受氢体的情况下,甲烷菌在严格厌氧条件下将发酵性细菌、产氢产乙酸菌和同型产乙酸菌代谢的产物同乙酸和  $H_2/CO_2$  一起,转化为  $CH_4$ ,  $CO_2$  和水,使有机物在厌氧条件下的分解作用得以顺利完成<sup>[19]</sup>. 黄丹等<sup>[28]</sup>从窖龄为 20 a 的老熟窖泥中分离到 1 株产氢产乙酸菌,与 *C. mesophilum* 的同源性高达 99%,该细菌在各种发酵条件下均能产生  $H_2$ , 乙酸和丁酸. 在浓香型白酒酿造中,甲烷菌主要存在于窖泥中,与己酸菌为互利共生关系. 甲烷菌在窖内起生态平衡的作用,促进己酸菌的生长繁殖. 白酒行业一般把己酸菌和甲烷菌的共栖种统称为窖泥己酸菌. 窖泥质量的好坏,不仅与窖泥中的己酸菌有关,也与甲烷菌密切关联<sup>[17,29]</sup>. 颜昌轩<sup>[30]</sup>研究发现,鉴于甲烷菌与己酸菌的互利共生关系,将甲烷菌和己酸菌共发酵技术应用于白酒酿造,可显著提高浓香型白酒的优质品率. 另外,甲烷菌与产酸菌在代谢上表现出的“种间氢转移”关系,有利于窖池内存在的各种产氢型发酵,进而促进有机酸的生成,有效提高己酸乙酯等的酯含量. 窖泥中甲烷菌的量与乙酸菌的富集程度可作为老窖泥的标志,也可反映窖泥质量的优劣.

由此可见,甲烷菌与其他菌群的互利共生关系,对浓香型白酒酿造中“增己”至关重要. 然而,在浓香型白酒酿造过程中,关于甲烷菌等古生菌的种群变化规律与甲烷菌对白酒中己酸乙酯等风味酯类质量浓度的影响等基础研究还很薄弱,亟待加强.

## 2.3 酯化菌

酯化菌是具有酸、醇酯化特殊功能的特定微生物的统称<sup>[31]</sup>. 白酒行业所称的酯化酶(Esterase, E. C. 3. 1. 1. 1, 亦称羧基酯酶)具有催化合成低级脂肪酸酯(碳原子小于 12 个)的

功能<sup>[32-33]</sup>. 白酒行业研究较多的酯化菌包括酵母菌、霉菌和细菌<sup>[31,34]</sup>. 酯化酵母包括酿酒酵母属 (*Saccharomyces*)、汉逊酵母属 (*Hansenula*)、假丝酵母属 (*Candida*)、酒香酵母属 (*Brettanomyces*) 和球拟酵母属 (*Torulopsis*) 等<sup>[35-37]</sup>. 霉菌主要有红曲霉、根霉、曲霉 (*Aspergillus*)<sup>[38-41]</sup> 等; 尤其是红曲霉, 除产生酯化酶外, 还代谢产生糖化酶、液化酶、果胶酶、蛋白酶、纤维素分解酶和酒化酶等, 在浓香型白酒酿造过程中具有很高的应用价值<sup>[37,42]</sup>. 胡晓龙等<sup>[38]</sup> 从五粮液大曲中分离筛选到 3 株红曲霉, 其中 M1 菌株酯化酶活性最高, 其产酯化酶固态培养的最适温度和 pH 值分别为 33 °C 和 3.5. 已报道的主要细菌类群包括血红鞘氨醇单胞菌 (*Sphingomonas sanguinis*) 和葡萄球菌 (*Staphylococcus sp.*)<sup>[43-44]</sup>. 在发酵中后期, 芽孢杆菌会大量增殖, 成为酒醅中的优势菌体, 也是重要的酯化产香菌之一<sup>[31,37,45]</sup>. 刘阳<sup>[45]</sup> 通过在培养基中添加底物三丁酸甘油酯, 从中、高温大曲中初步筛选得到产酯化酶细菌 11 株; 以乙醇和己酸为底物, 其中 10# 菌株表现出最高酯化酶催化活力, 采用形态学、生理生化特征和 16S rDNA 序列分析的方法, 将 10# 菌株鉴定为地衣芽孢杆菌 (*Bacillus licheniformis*).

在有乙醇和相应有机酸底物 (如己酸、乳酸等) 存在的条件下, 酯化菌会促进己酸乙酯和乳酸乙酯的合成. 施安辉等<sup>[6]</sup> 研究发现, 把红曲霉或球拟酵母的酯化酶制剂与大曲粉一起入窖发酵, 酯化酶在窖中分布均匀, 接触面积增大, 有利于醇酸酯化的进行, 使己酸等有机酸尽可能多地转化为己酸乙酯等相应的酯类. 朱弟雄<sup>[46]</sup> 研究发现, 利用 1 a 新窖和 12 a 成熟窖, 在度夏压排时和压排后的粮醅中添加酯化红曲, 优级酒率均有不同程度的提高. 在度夏后第一排添加酯化红曲, 试验组基酒的己酸乙酯质量浓度提高 9% ~ 16%, 风味成分显著改善, 更

趋平衡协调; 并对后续酒醅发酵出好酒有良好的促进作用, 具有明显的“增己降乳”效果. 全细胞酯化曲 (酶) 是一种活性很高的南极假丝酵母 (*Candida antarctica*) 脂肪酶 B, 能高效快速地将黄水酒尾中的有机酸生物合成相应的芳香酯. 刘义刚等<sup>[47]</sup> 研究发现, 在浓香型白酒生产中, 将生物酯化液应用于酒醅串蒸 (粮糟串蒸和丢糟串蒸), 可有效“增己”, 全面提升基酒等级; 将生物酯化液直接蒸馏, 可生产高酯调味酒, 酯香浓郁、纯正协调、醇甜净爽; 除了含有较高的酯类物质外, 生物酯化液还含有较丰富的有益功能菌和酯化酶, 可直接应用于回窖发酵, 也可用于养窖和人工老窖生产等.

酯化菌的种群多样性和丰富度决定了浓香型白酒“增己降乳”工作的复杂性, 而如何有效利用丰富的酯化菌菌种资源, 又将为浓香型白酒“增己降乳”提供新的可能和实现途径.

## 2.4 乳酸菌

传统的乳酸菌是一类发酵糖类原料产生乳酸的细菌之统称. 除了传统的乳酸菌以外, 酵母菌、霉菌、芽孢杆菌和其他一些细菌都可代谢产生乳酸<sup>[8,48]</sup>. 栗连会<sup>[49]</sup> 采取高通量测序技术和克隆文库分析, 解析了泸州老窖酿造过程酒醅中乳酸菌的群落变化规律, 发现乳酸菌的生物量在整个发酵过程中始终保持上升的趋势, 同时保持着群落的多样性且不断演替; 酒醅中的大部分乳酸菌来源于大曲, 而耐酸乳杆菌 (*L. acetotolerans*) 来源于窖泥. 谢玉球等<sup>[8]</sup> 研究发现, 各种乳酸菌在白酒发酵过程中发生着复杂的种群演替. 乳酸菌在浓香型白酒发酵中的作用主要有: 1) 为固态法白酒发酵微生物提供必需营养物质, 促进酿酒微生物的生长、繁殖; 2) 促进美拉德反应, 有利于香味物质的形成; 3) 产生的乳酸和细菌素拮抗部分杂菌的代谢活动, 保持和改善白酒酿造微生态环境的稳定与协调; 4) 合成乳酸和乙酸, 还能代谢生成以

丙酸、丁酸、己酸和己酸乙酯为主的多种风味物质; 5) 多种乳酸菌混合生长与繁殖, 有利于提高酿酒微生物的生物活性, 有利于各种酿酒菌株充分发挥协同效应, 以保证固态法白酒发酵的顺利进行<sup>[4,8]</sup>。

乳酸菌在浓香型白酒酿造中的作用, 不局限于产生生物合成乳酸乙酯的底物乳酸, 进而不利于“降乳”那么简单, 而是对整个发酵过程多种风味物质的生成产生复杂的影响。这种现象暗示了浓香型白酒“增己降乳”工作的复杂性。

## 2.5 降乳菌

在浓香型白酒酿造过程中, 乳酸的过量积累会造成白酒中乳酸乙酯质量浓度过高; 而且, 窖池中过量的乳酸还可以与钙、铁离子形成乳酸钙和乳酸铁, 造成窖池板结和窖泥退化<sup>[5]</sup>。乳酸乙酯性质稳定, 不易分解, 要降解乳酸乙酯必须降低其前体物质乳酸<sup>[49]</sup>。乳酸降解菌(降乳菌)是指能够利用乳酸作为碳源或者电子受体的微生物, 经常栖息在大曲、窖泥、黄水、酒醅或出窖的糟醅之中<sup>[4]</sup>。降乳菌可以利用乳酸生成乙酸、丙酸、丁酸等香气前体物质, 进而合成多种重要的酯类物质, 增加白酒中的香气成分<sup>[37]</sup>。栗连会<sup>[49]</sup>的分子研究发现, 泸州老窖发酵酒醅中降乳菌表现出生物多样性, 从酒醅中可分离得到芽孢梭菌属、土孢杆菌属(*Terrisporobacter*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、泥杆菌属(*Ilyobacter*)、脱硫肠杆菌属(*Desulfotomaculum*)、葡萄球菌属(*Staphylococcus*)和拉乌尔菌属(*Raoultella*)共7个属17种降乳菌, 其中以芽孢梭菌居多。曾田等<sup>[22]</sup>的高通量测序研究发现, 河南省某浓香型白酒酒企窖泥中降乳菌群的优势微生物主要集中在厚壁菌门的芽孢杆菌属, 芽孢梭菌属, 孢厌氧杆菌属(*Sporanaerobacter*), *Soehngenia*, 颤螺旋菌属(*Oscillospira*), *Ruminococcus*, 类芽孢杆菌属(*Paenibacillus*), *Cal-*

*dicoprobacter*, *Sedimentibacter*, *Dorea*, 粪球菌属(*Coprococcus*), *Tepidimicrobium*等12个属。

丙酸菌(*Propionibacterium* spp.)作为降菌的代表菌株, 为兼性厌氧杆菌, 一般栖息在大曲或窖泥之中, 在30~32℃和pH值为4.5~7.0环境下生长和发酵良好。在厌氧条件下, 丙酸菌可利用乳酸、葡萄糖等基质生成丙酸、乙酸和CO<sub>2</sub>。在乳酸和糖类共存的酿酒过程中, 丙酸菌往往先利用乳酸, 而对糖的利用率较低, 其降乳率有的可高达90%以上<sup>[4]</sup>。鉴于丙酸菌等降乳菌代谢的特异性, 在浓香型白酒实际生产中, 有针对性地引入降乳菌或者阶段性创造有利于降乳菌生长繁殖的营养和环境条件, 将会有效达到“降乳”的目的。李大和<sup>[51]</sup>研究发现, 丙酸菌液使用量0.15%~2.0%, 在窖池中乳酸形成高峰期(约入窖20d)投菌, 连续投菌两排以上, 乳酸乙酯最大降低41.8%。国内某酒厂应用丙酸菌等后酒质明显提高, 乳酸乙酯降低30.9%, 己酸乙酯提高31.1%, 乙酸乙酯提高17.9%, 丁酸乙酯提高6.9%。采用“降乳菌”与人工老窖工艺相结合的措施, “增己降乳”的效果更为明显<sup>[6]</sup>。

目前, 降乳菌菌剂还没有广泛应用于浓香型白酒的实际生产。随着理论研究的不断深入, 人们对参与浓香型白酒酿造的微生物种类与其作用的认识不断加强, 降乳菌的应用有望得以普及。

## 2.6 复合使用功能菌

在浓香型白酒酿造中, 复合使用己酸菌、酯化菌、产酯酵母、降乳菌等功能菌, 相互取长补短, 能更有效地“增己降乳”, 提高酒质<sup>[6]</sup>。李大和<sup>[51]</sup>研究发现, 丙酸菌与人工老窖、强化制曲和其他提高酒质的技术措施相结合, 能更有效地达到“增己降乳”的目的。将己酸菌与酵母菌、细菌、霉菌进行混合培养, 制备成混合己酸菌液应用于窖泥制作和窖泥养护中, 能有效地

提高出酒率和优质酒率<sup>[26]</sup>。郭本跃<sup>[52]</sup>研究发现,将生香活性干酵母、耐高温酒精活性干酵母、己酸菌液和糖化酶混合运用于浓香型曲酒生产,可以“增己降乳”,提高出酒率和名优酒率<sup>[52]</sup>。徐希望等<sup>[53]</sup>研究发现,在浓香型白酒生产中,丙酸菌液在母糟入窖时均匀喷雾施加,己酸菌液在清扫池壁干净后均匀喷洒到窖壁窖泥上,同时利用丙酸菌的“降乳”和己酸菌的“增己”功能,达到“增己降乳”、提高酒质的目的。复合酯化酶生态菌剂含有耐酸强、产己酸的梭状芽孢杆菌,强化了有机酸酯化酶活性,糖化微生物以根霉和酸性曲霉为主,发酵能力强,含有高产酸性蛋白酶微生物,是生物酶和活菌体的生态混合体,可强化传统大曲的发酵功能和生香功能,促使发酵过程平稳持久。张志刚等<sup>[54]</sup>研究发现,将复合酯化酶生态菌剂应用于浓香型白酒生产,可生产高酯调味酒,提高浓香型白酒的出酒率和提优率,改善浓香型白酒厂的产品结构,具有较高的应用价值。在浓香型白酒酿造的不同阶段,复合使用多种具有“增己”和“降乳”作用的功能菌,对提高白酒品质具有重要作用,这也是我国浓香型白酒生产现代化的重要内容。

### 3 “增己降乳”的综合技术措施

“增己降乳”是很多浓香型白酒企业长期以来面临的重要技术问题。在“增己降乳”中,“增己”和“降乳”相互联系、相互制约。企业一般以“增己”为主、“降乳”为辅,要保持二者间比例关系的合理与适度。目前,我国白酒企业大多从实际情况出发,因地、因时制宜,采取科学建造窖池、优化窖泥配方、提高大曲质量等综合措施,以收到“增己降乳”的效果<sup>[4,5,55]</sup>。

#### 3.1 科学建造窖池,增加接触面积

建造窖池,要根据生产实际需要,最大限度地增大窖体表面积。在窖池容积一定的情况下,

窖池表面积随窖池长、宽比例变化而变化。窖池长宽比越大,表面积也越大。为了便于生产操作、利于窖池的坚固性和安全性,一般窖池长宽比确定为1.5~2:1,深度以1.8~2 m为宜<sup>[5,55-56]</sup>。窖池中使用人工老窖泥板,增加酒醅与窖泥的接触面积,使己酸菌的数量和其活动场所均相应地增加,能显著地提高原酒中己酸乙酯的质量浓度<sup>[57]</sup>。詹炳耀等<sup>[58]</sup>研究发现,在窖池中加入香泥板发酵,增加40%酒醅与窖泥的接触面积,也可大幅度提高原酒中己酸乙酯的质量浓度,达到有效“增己”的目的。

#### 3.2 优化窖泥配方,科学养护窖泥

人工培养窖泥的配方必须因地制宜,做到科学合理。在材料选择方面,可充分利用酿酒的优质黄水、酒尾、底锅水、大曲粉、酒醅、乙醇、老窖泥培养液等下脚料,科学养护窖泥,使窖泥中的水分、酸度、氮源、碳源、有效磷、钾和腐殖质等始终保持良好的态势<sup>[5,6,17,55-56]</sup>,有利于窖泥中己酸菌和甲烷菌的生长繁殖,维持“增己”的细菌种群的多样性和丰富度。

#### 3.3 提高大曲质量,控制大曲用量

大曲在生产发酵升温过程中,要做到前缓、中挺、后缓落。要适时翻曲,掌握收堆时间和温度,保证曲霉、根霉、酵母菌占绝对优势,乳酸菌处于劣势。曲块贮存时码放不能过紧,要留适当的通风孔,保持曲库的通风、干燥,有利于曲块水分的释放。生产中要使用陈曲,并应根据入池温度和入池淀粉来调整用曲量。适当增大粗颗粒曲粉比例,有利于缓慢发酵、缓慢生酸<sup>[5,51,55]</sup>。保持大曲中乳酸菌的适当比例,对浓香型白酒科学“降乳”比较有利。

#### 3.4 降低用水硬度,做好清洁卫生

白酒酿造对酿酒用水要求很高。一般来讲,偏软和中性的水对酿酒有利;硬度大的水易使窖池板结,并影响酒醅风格。因此,要对酿造用水进行处理,将硬度大的水变成偏软或中性的



水. 固态白酒酿造工艺操作是敞开式的, 酒醅与空气、生产工具、设备、晾堂等直接接触易感染杂菌(特别是乳酸菌), 造成乳酸和乳酸乙酯升高. 因此, 一定要严格要求车间与环境的清洁卫生. 用蒸气或沸水冲洗工具、甑桶和生产晾堂, 以减少乃至杜绝杂菌、乳酸菌的侵入. 此外, 使固体和液体酒糟场地远离生产车间, 粉碎车间采取除尘装置以减少粉尘飞扬, 天天清扫车间内外, 天天清除鼓风凉板下的“死角”, 及时清理锅底水和晾床底下的残留酒醅, 注意工人的个人卫生等措施, 都可取得明显的“降乳”效果<sup>[4-6, 51, 55, 59-60]</sup>.

科学用水可延缓窖泥老化, 维持己酸菌和甲烷菌群稳定性, 有利于“增己”; 而规范化生产管理, 做好清洁卫生工作, 则可有效降低乳酸菌的污染, 对“降乳”有利.

### 3.5 因地、因时制宜, 调整入池条件

目前, 我国浓香型白酒大多采取开放发酵模式, 受自然气候条件的影响较大. 根据不同生产季节的环境条件, 因地、因时制宜, 调整入池淀粉含量、水分、温度、酸度、含氧量等入池条件和大曲用量, 保持糟醅良好风格, 既有利于“增己”, 又有利于“降乳”, 可有效维持与提高浓香型白酒品质<sup>[5, 51, 55, 59-60]</sup>.

**3.5.1 入池淀粉含量** 根据入池温度, 控制入池原料的淀粉含量不要过高或过低. 一般来讲, 旺季(冬季)入池淀粉控制在 18%~20%, 淡季(夏季)控制在 15%~18% 为宜.

**3.5.2 入池水分** 旺季入池水分 53%~54%, 淡季 55%~56% 为宜; 北方酌情增加 2%~3%; 蒸馏前, 酒醅的含水量在 51% 左右对提高己酸乙酯质量浓度有利. 生产正常时, 在许可的范围内入池水分尽量用下限, 有利于保证酒的品质.

**3.5.3 入池温度** 入池温度要根据地温来定, 不能强行降温. 淡季一般采取热平地温(或低

于地温 1℃左右), 旺季以 16~18℃为宜.

**3.5.4 入池酸度** 入池酸度影响微生物的生长繁殖, 从而影响正常发酵和生香. 入池酸度旺季一般为 1.7~1.8, 淡季以 2.0 左右为宜.

**3.5.5 入池含氧量** 谷壳用量偏高会使酒醅含氧量增大, 利于乳酸菌而不利于己酸菌生长繁殖. 因此, 在正常生产许可情况下, 谷壳用量采用下限. 单粮生产旺季以 20%~22%, 淡季以 18%~19% 为宜; 多粮生产分别增加 2%~3%. 夏天加强踩窖, 冬天适当踩窖, 维持酒醅适当的氧气含量, 限制乳酸菌的生长繁殖, 促进己酸菌等厌氧菌的生长繁殖, 对产酒和生香有利.

**3.5.6 大曲用量** 大曲用量过大或过小均对白酒品质不利. 多粮生产, 南方酒企旺季用曲量一般为 23%~25%, 淡季适当减少 2%~3%; 北方一般用曲量在 25% 左右. 曲粉要撒均匀, 摊晾时间一般以每甑 30 min 左右, 及时入池.

**3.5.7 糟醅质量** 要保持糟醅良好的风格, 必须根据入池温度和不同地区生产条件, 以及对酒质的要求等, 调整好粮糟比. 正常的粮糟比旺季为 1:4.0~4.5, 淡季为 1:5.0~5.5 为宜. 从形态上看, 糟醅应符合疏松不燥、熟而不腻、有弹性、有肉头, 保持母糟的水份、酸度、淀粉的正常值.

### 3.6 强化清窖管理, 低温缓慢发酵

封窖泥要用黄水、酒尾、底锅水、老窖泥培养液等拌合均匀, 确保其含有充分的营养成分, 踩至柔熟. 严禁用生水、锅炉水、冷凝器内的水拌合封窖泥. 封窖密封厚度旺季不低于 15 cm, 淡季不低于 20 cm. 坚持清窖 10 d 以上, 保障窖池密封良好, 做好周围清洁卫生工作. 科学清窖管理可有效延缓窖泥老化, 维持相对厌氧发酵, 利于“增己”. 尽可能做到低温缓慢发酵, 控制窖池内最高温度在 30~35℃. 滴窖在 20 h 左右, 做到勤舀黄水, 利于降酸和降乳<sup>[5, 51, 55, 61]</sup>.

### 3.7 精细蒸馏操作, 创新蒸馏工艺

做到单人装甑, 轻撒匀铺, 真正实现缓火蒸

馏. 一般来讲,  $2.0 \text{ m}^3$  左右的甑桶, 上甑时间以每甑 40 min 左右为宜, 有利于提取高浓度酒精和香味成分, 同时也有利于减少酒中的乳酸乙酯质量浓度. 装甑汽压坚持“两头小、中间大”的原则, 即装甑开始和结束时, 装甑汽压不超过 0.04 MPa, 装到中间时不超过 0.06 MPa. 按不同馏分酒的品质和酒度的高低, 量质分段摘酒. 摘酒浓度高, 乳酸乙酯质量浓度低, 己酸乙酯质量浓度高. 因此, 后段酒比前段酒乳酸乙酯要高几倍, 特别是酒尾中乳酸乙酯质量浓度更高. 坚持量质分段摘酒, 分级贮存, 入库基酒酒精度以大于 63% vol 为宜<sup>[4,5,55,59-61]</sup>.

杨平等<sup>[62]</sup>研究发现, 在甑桶醅层高度和结构设计方面, 单位质量糟醅的蒸馏效率随醅层高度的增加逐渐升高. 醅层高度相同时, 小直径的甑桶蒸馏效率大于大直径甑桶; 甑桶的高径比较大时有利于强化蒸馏, 能达到“增己降乳”的目的. 陈全庚等<sup>[63-65]</sup>研究发现, 相对于水封甑蒸馏系统, 采用气封甑蒸馏系统的蒸馏效果更好, 产酒率平均提高 5% 以上, 同时具有“增己”和“降乳”的明显功效. 总之, 实行科学发酵管理, 精细蒸馏操作, 是提高浓香型白酒产品的品质和有效“增己降乳”的重要保证.

## 4 结语

长期以来, “增己降乳”一直是我国很多浓香型白酒企业面临的主要技术问题. 我国浓香型白酒以开放式和自然发酵为主的生产方式决定了在酿造过程中, 大量与“增己降乳”相关的己酸菌、甲烷菌、酯化菌、乳酸菌和降乳菌等微生物存在着复杂的种群演替. 因此, 在严格生产管理的基础上, 加强理论研究, 深入认识浓香型白酒酿造过程中参与“增己降乳”的微生物类群及其种群演替规律, 找寻有用且高效的“增己降乳”菌株, 并将其合理运用到浓香型白酒酿造过程中, 是主动实现科学“增己降乳”目标

的基石. 随着微生物组学技术的发展, 有必要综合采用人工培养方法和宏基因组学等免培养技术, 系统地揭示浓香型白酒酿造过程中各种微生物的生长繁殖和代谢活动规律. 浓香型白酒企业更须因地、因时制宜, 以科学发展的态度, 规范白酒产业化管理, 保持“增己”和“降乳”的合理与适度, 不断创造出具有自身特色、适应产品消费结构变化的品牌产品, 才能让历史悠久、工艺独特、独具民族特色的浓香型白酒发展更好、走得更远.

## 参考文献:

- [1] 王延才. 中国酒业形势[J]. 酒·饮料技术装备, 2016(3): 12.
- [2] ZHAO J S, ZHENG J, ZHOU R Q, et al. Microbial community structure of pit mud in a Chinese strong aromatic liquor fermentation pit[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2012, 11(4): 356.
- [3] 中国国家标准委员会. 浓香型白酒: GB/T 10781.1—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [4] 李维青. 浓香型白酒与乳酸菌、乳酸、乳酸乙酯[J]. 酿酒, 2010, 37(3): 90.
- [5] 赖登辉, 梁诚. 系统论对浓香型白酒生产中“增己降乳”的解析及应用[J]. 酿酒科技, 2008(8): 104.
- [6] 施安辉, 刘积和, 曲维祺, 等. 当前浓香型白酒增己降乳的微生物学技术[J]. 中国酿造, 2001(3): 8.
- [7] 张彬, 武绪敬, 陈清让. 锅底添加酒精串蒸工艺的探讨[J]. 酿酒科技, 2003(2): 47.
- [8] 谢玉球, 钟雨, 谢旭, 等. 乳酸菌在固态法白酒生产中的地位与作用[J]. 酿酒科技, 2008(11): 83.
- [9] 沈怡方. 白酒生产技术全书[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998.

- [10] ZHU X,ZHOU Y,WANG Y,et al. Production of high-concentration *n*-caproic acid from lactate through fermentation using a newly isolated *Ruminococcaceae* bacterium CPB6 [J]. *Biotechnology for Biofuels*,2017,10: 102.
- [11] CAVALCANTE W De A,LEITÃO R C,GEHRING T A,et al. Anaerobic fermentation for *n*-caproic acid production:a review[J]. *Process Biochemistry*,2017,54:106.
- [12] 赵华,赵树欣,李颖宪,等. 酵母菌己酸乙酯生物合成与代谢控制育种[J]. *酿酒科技*,1998(4): 24.
- [13] 刘雪,杨爱华,张学梅,等. 华根霉生物酶法合成己酸乙酯条件的研究[J]. *酿酒科技*,2017(2): 57.
- [14] 詹美榕,丁俊竹,丛方地,等. 调节黑曲霉脂肪酶催化合成己酸乙酯的探索[J]. *酿酒科技*,2016(12): 28.
- [15] 赵华,赵树欣,李颖宪,等. 微生物酶法合成己酸乙酯的研究[J]. *天津轻工业学院学报*,1999(1): 15.
- [16] 周恒刚. 漫谈己酸乙酯的酯化[J]. *酿酒科技*,1998(3): 18.
- [17] 唐瑞. 己酸菌、窖泥与浓香型白酒之间的关系[J]. *酿酒*,2005,32(4): 24.
- [18] 章克昌. 酒精与蒸馏酒工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社,2002.
- [19] 何培新. 高级微生物学[M]. 北京: 中国轻工业出版社,2017.
- [20] 孟东,梁辉. 浓香型白酒乳酸乙酯的产生及控制方法[J]. *江苏食品与发酵*,2003(2): 21.
- [21] ZHENG J,LIANG R,ZHANG L,et al. Characterization of microbial communities in strong aromatic liquor fermentation pit muds of different ages assessed by combined DGGE and PLFA analyses [J]. *Food Research International*,2013,54(1): 660.
- [22] 曾田,胡晓龙,马兆,等. 浓香型白酒窖泥中“增己降乳”原核微生物群落多样性解析[J]. *轻工学报*,2017,32(6): 12.
- [23] 李洪祥. 己酸菌培养液使用小议[J]. *酿酒科技*,2002(5): 40.
- [24] 杨喜军. 黑轻80号己酸菌在我厂白酒生产中的应用[J]. *黑龙江发酵*,1982(1): 31.
- [25] 施安辉. 在白酒酿造中己酸菌C1应用方法的对比试验[J]. *中国酿造*,1983,2(6): 25.
- [26] 管健,廖蓓,李兆飞,等. 白酒功能菌的功能特性及应用研究[J]. *中国酿造*,2017,36(8): 1.
- [27] 彭文明,周敬慧,刘娟. 己酸菌复合菌液在浓香型白酒生产中的应用[J]. *中小企业管理与科技(中旬刊)*,2014(20): 311.
- [28] 黄丹,刘超兰,张文学,等. 白酒发酵窖泥中一株产氢细菌的分离及其代谢特性分析[J]. *酿酒科技*,2013(12): 21.
- [29] 邓杰,卫春会,边名鸿,等. 浓香型白酒不同窖龄窖池窖泥中古菌群落结构分析[J]. *食品科学*,2017,38(8): 37.
- [30] 颜昌轩. 甲烷菌在浓香型白酒生产中的作用(简报)[J]. *西南大学学报(自然科学版)*,1989,11(5): 481.
- [31] 梁龙元,王露,薛栋升. 白酒酿造中酯酶及己酸乙酯的研究进展[J]. *酿酒*,2018,45(1): 17.
- [32] 任道群,唐玉明,姚万春,等. 酯化酶动力学研究[J]. *酿酒科技*,2006(6): 39.
- [33] ARANDA J,CERQUEIRA N M F S A,FERNANDES P A,et al. The catalytic mechanism of carboxylesterases: a computational study [J]. *Biochemistry*,2014,53(36): 5820.
- [34] 施安辉,张文璞,徐恩润,等. 酯酶的微生物类群、酯化特性及应用前景[J]. *山东食品发酵*,2001(2): 17.
- [35] SMART K. *Brewing yeast fermentation performance* [M]. Oxford: Blackwell Science Ltd, A Blackwell Publishing Company,2003.
- [36] 王治国,夏明星,管清先,等. 应用产酯酵母提

- 高浓香型白酒质量的研究[J]. 酿酒科技, 1994(4): 13.
- [37] 侯小歌, 王俊英, 李学思, 等. 浓香型白酒糟醅及窖泥产香功能菌的研究进展[J]. 微生物学通报, 2013, 40(7): 1257.
- [38] 胡晓龙, 赵东, 葛隐, 等. 五粮液大曲中产酯化酶红曲霉的分离及酯化酶的纯化[J]. 酿酒, 2011, 38(3): 35.
- [39] 黄丹, 储玉龙, 尚志超, 等. 大曲酯化酶根霉菌的分离及产酶条件研究[J]. 食品与发酵科技, 2010, 46(3): 30.
- [40] 滕巍, 李国莹, 刘小波, 等. 大曲中产酯化酶菌株的分离鉴定及固体发酵工艺优化[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(9): 971.
- [41] 李绍亮, 李学思, 侯小歌, 等. 宋河酒曲中主要霉菌的鉴定及其产酶特性的研究[J]. 酿酒, 2016, 43(6): 24.
- [42] 镇达, 尚玲, 陈茂彬. 红曲霉酯化酶特性及在白酒酿造中的应用研究[J]. 酿酒科技, 2009(1): 62.
- [43] 黄丹, 张强, 严芳, 等. 浓香型大曲中酯化酶细菌的分离鉴定及产酶条件研究[J]. 中国酿造, 2009(8): 57.
- [44] 张秀红, 刘秋林, 孔健, 等. 一株产酯化酶细菌的筛选[J]. 酿酒科技, 2012(6): 56.
- [45] 刘阳. 中高温大曲中产酯化酶细菌的选育[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2013.
- [46] 朱弟雄, 涂向勇. 酯化红曲在浓香型白酒生产度夏压排中的应用研究[J]. 酿酒科技, 2010(5): 82.
- [47] 刘义刚, 周治全, 周超, 等. 全细胞酯化曲(酶)在生物酯化液中的应用[J]. 酿酒科技, 2016(2): 72.
- [48] 姚惟琦, 陈茂彬, 镇达, 等. 浓香型白酒酒醅中乳酸菌分离及其对模拟固态发酵的影响[J]. 酿酒, 2010, 37(3): 37.
- [49] 栗连会. 泸型酒酒醅中乳酸菌和乳酸降解菌的多样性和代谢特性[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- [50] 孙超, 刘勇. 白酒生产中乳酸菌的分布及主要代谢产物[J]. 中国酿造, 2012, 31(5): 1.
- [51] 李大和. 浓香型曲酒乳酸乙酯偏高的原因及解决措施[J]. 酿酒科技, 2007(2): 100.
- [52] 郭本跃. 生香 ADY, TH-AADY, 己酸菌液和糖化酶混合使用提高浓香型曲酒的质量[J]. 酿酒科技, 2002(5): 87.
- [53] 徐希望, 徐世江, 谢恩举. 利用丙、己酸菌液双喷雾实现增己降乳的研究[J]. 酿酒科技, 1996(6): 43.
- [54] 张志刚, 周爱江. 复合酯化酶生态菌剂在浓香型白酒中的应用研究[J]. 酿酒科技, 2006(5): 55.
- [55] 赖登辉. 浓香型白酒生产中“增己降乳”科学、合理性的研究[J]. 酿酒, 2007, 34(5): 4.
- [56] 詹炳耀. 浓香型大曲酒“增己抑乳”问题的探讨与研究[J]. 黑龙江发酵, 1982(3): 34.
- [57] 戴自鸣, 汪俊英. “增己减乳”的一项技术措施(摘要)[J]. 酿酒, 1982(4): 38.
- [58] 詹炳耀, 郭宗武. 低度张弓大曲酒[J]. 黑龙江发酵, 1981(4): 12.
- [59] 冯雅芳, 张永利. 凤型酒生产过程降乳措施探讨[J]. 酿酒, 2015, 42(6): 89.
- [60] 田以清, 牛学士. 浅谈增己降乳提高浓香型白酒质量[J]. 酿酒科技, 1992(6): 22.
- [61] 钟玉叶, 崔如生. 洋河酒厂的多粮工艺创新[J]. 酿酒, 2007, 34(5): 28.
- [62] 杨平, 涂荣坤, 钱志伟, 等. 甑桶醅层高度及结构设计对蒸馏效率及酒质的影响研究[J]. 酿酒科技, 2012(10): 94.
- [63] 陈全庚, 陈珊, 黄应华, 等. 气封甑和水封甑蒸馏对比试验研究[J]. 酿酒科技, 2012(4): 88.
- [64] 陈全庚, 孙庆文, 黄应华, 等. 应用白酒气态处理新技术提高蒸馏提香效果和原酒品质的生产实验[J]. 酿酒科技, 2013(1): 65.
- [65] 孙庆文, 陈全庚, 侯勇, 等. 气封甑蒸馏效果分析研究[J]. 酿酒科技, 2014(4): 57.



引用格式:侯小歌,张杰,孙忠科,等.大曲产酯化酶芽孢菌的分离鉴定及其发酵条件优化研究[J].轻工学报,2018,33(4):13-20.

中图分类号:TS261.1 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2018.04.002

文章编号:2096-1553(2018)04-0013-08

# 大曲产酯化酶芽孢菌的分离鉴定及其发酵条件优化研究

## Isolation, identification and fermentation conditions optimization of an esterase-producing *Bacillus* strain from Daqu

侯小歌<sup>1</sup>,张杰<sup>1</sup>,孙忠科<sup>1</sup>,李童<sup>1</sup>,李学思<sup>2</sup>,闫培勋<sup>2</sup>,胡炳义<sup>1</sup>  
HOU Xiaoge<sup>1</sup>,ZHANG Jie<sup>1</sup>,SUN Zhongke<sup>1</sup>,LI Tong<sup>1</sup>,LI Xuesi<sup>2</sup>,YAN Peixun<sup>2</sup>,  
HU Bingyi<sup>1</sup>

### 关键词:

产酯化酶芽孢菌;大曲;酯化酶;分离鉴定;发酵条件优化

1. 周口师范学院 生命科学与农学学院,河南 周口 466001;

2. 河南省宋河酒业股份有限公司,河南 鹿邑 477265

1. College of Life Science and Agriculture, Zhoukou Normal University, Zhoukou 466001, China;

2. He'nan Songhe Distillery Co., Ltd., Luyi 477265, China

### Key words:

esterase-producing  
*Bacillus* strain;  
Daqu;  
esterifying enzyme;  
isolation and  
identification;  
fermentation condition  
optimization

**摘要:**以宋河大曲为分离源,采用加热和稀释涂布法富集、分离芽孢菌,利用透明圈法和摇瓶发酵法筛选产酯化酶菌株,结合形态学、生理生化特征和 16S rDNA 序列分析,对高产酯化酶菌株进行初步鉴定,并对其发酵条件进行优化,共分离初筛出 81 株产酯化酶芽孢菌,复筛出一株高产菌株 SPEO-28,初步鉴定为地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)。该菌株最优产酯化酶发酵条件为:以淀粉为碳源, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 为氮源,初始 pH 值为 6.0,在 47 °C 条件下发酵 3 d。在此条件下,菌株产酯化酶活力达到 22.83 U/mL,比优化前提高了 82.6%。

收稿日期:2018-05-17

基金项目:河南省科技厅科技攻关项目(182102110008;172102410055);周口师范学院中青年骨干教师资助项目

作者简介:侯小歌(1977—),女,河南省禹州市人,周口师范学院副教授,主要研究方向为发酵工程。

**Abstract:** Using Songhe Daqu as the separation source, the spores were enriched and isolated by heating and dilution coating method. The esterase-producing strains were screened by transparent circle method and flask shaking fermentation method. Combined with morphology, physiological and biochemical characteristics and 16S rDNA sequence analysis, the high-yield esterase-producing *Bacillus* strain was initially identified and its fermentation conditions were optimized. A total of 81 strains of esterase-producing strains were screened and a high-yield esterase-producing strain SPEO-28 was screened out, which was initially identified as *Bacillus licheniformis*. The optimal esterification enzyme fermentation conditions of this strain were as follows: starch as carbon source and  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  as nitrogen source, initial pH value of 6.0, fermentation at 47 °C for 3 d. Under this condition, the esterase activity of the strain reached 22.83 U/mL, which was 82.6% higher than that before optimization.

## 0 引言

酯化酶亦称为羧基酯酶,是一类混合酶的统称,包括酯合成酶、酯分解酶、脂肪酶等,它们能够水解有机物中的羧酯键,还能催化合成一些低级脂肪酸酯,因此,在白酒行业中习惯把它们统称为酯化酶。自然界中的许多微生物,如细菌、酵母菌和霉菌等,都可以产生酯化酶<sup>[1-3]</sup>。

中国白酒是世界六大蒸馏酒之一,采用酿酒加曲的独特工艺。大曲作为中国白酒发酵的糖化剂、发酵剂和增香剂,富含微生物和多种酶类,其品质的好坏直接或间接影响成品酒的品质和产量<sup>[4-5]</sup>。研究表明,大曲酶类有一小部分来源于原料本身,其余大部分均为制曲过程中来自于自然界的大量微生物。微生物代谢酶类主要包括蛋白酶、淀粉酶、酯化酶、纤维素酶、果胶酶等。其中,酯化酶是催化白酒香气物质形成与香味物质转化的主要酶类<sup>[6-7]</sup>。目前,对于大曲产酯化酶微生物种类的研究大多集中在产香酵母、红曲霉(*Monascus purpureus*)、根霉(*Rhizopus* spp.)等真菌的某些种属<sup>[1-3]</sup>,而对于大曲中产酯化酶的芽孢细菌鲜有报道。黄丹等<sup>[8]</sup>从南方酿酒大曲中分离出一株产酯化酶细菌,经鉴定其为嗜热葡糖苷酶芽孢杆菌(*Geobacillus thermoglucosidasius*),表明大曲芽孢菌具有产酯化酶的功能。大曲芽孢菌具有耐受极端环境的特性,研究大曲芽孢菌的代谢产物(香气物质

或其前体物如有机酸、乙偶姻等)和产酯化酶功能,对生产优质大曲和酿造优质白酒均具有重要意义<sup>[9-10]</sup>。传统中国大曲制备工艺一般经历三个阶段,即原料混合成型期、发酵期和干燥期。根据发酵最高温度(大于60~65 °C,50~60 °C,40~50 °C)将大曲分为高温大曲、中高温大曲和中温大曲三种,由于大曲微生物受发酵温度、制曲工艺、环境气候等条件影响,故南方大曲和北方大曲微生物种群也存在细微差异<sup>[11-12]</sup>。宋河浓香型白酒虽然是北方豫酒的典型代表,但对其大曲微生物的研究成果不多。鉴于此,本文拟以宋河酒中高温大曲为分离源,分离筛选并鉴定产酯化酶芽孢菌,同时对筛选菌株的产酯化酶发酵条件进行优化,以期浓香型的制曲生产和糟醅发酵提供优良的产香菌种,同时为改进工业制曲工艺提供技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与培养基

中高温大曲,取自河南省宋河酒业股份有限公司;麸皮,购自周口市面粉厂;玉米粉、淀粉、黄豆粉,购自周口市万果园超市。

牛肉膏蛋白胨培养基<sup>[13]</sup>:牛肉膏3 g/L,蛋白胨10 g/L,NaCl 5 g/L,琼脂粉20 g/L,pH取自然值,勿须调整。

种子液培养基:牛肉膏蛋白胨培养基,不加琼脂粉。

发酵培养基<sup>[8]</sup>:葡萄糖 10 g/L,蛋白胨 10 g/L,  $K_2HPO_4$  1.0 g/L,  $MgSO_4$  0.3 g/L,  $FeSO_4$  0.01 g/L, KCl 0.5 g/L,  $MnSO_4$  0.3 g/L, pH = 7.4 ~ 7.6.

筛选培养基:在发酵培养基的基础上再添加质量浓度为 0.4% 的三丁酸甘油酯和质量浓度为 2% 的琼脂粉.

糖发酵基础培养基<sup>[13]</sup>:蛋白胨 10 g/L, NaCl 5 g/L, pH = 7.4, 每 100 mL 培养基中加入 1 mL 质量浓度为 1.6% 的溴甲酚紫.

上述培养基灭菌条件均为在 121 °C 条件下高压灭菌 30 min.

## 1.2 主要试剂与仪器

主要试剂:牛肉膏,天津英博生化公司产;蛋白胨,北京奥博星公司产;NaCl, KCl, NaOH, 葡萄糖,天津科密欧生化公司产;  $K_2HPO_4$ , 郑州派尼试剂公司产;  $MgSO_4$ ,  $FeSO_4$ ,  $MnSO_4$ , 天津化学试剂公司产;三丁酸甘油酯,合肥博美生物科技有限公司产;尿素,天津凯通化学试剂科技有限公司产;  $NH_4NO_3$ , 天津风船化学试剂科技有限公司产. 以上试剂均为分析纯.

主要仪器:JJ - CJ - 2FD 型洁净工作台,苏州市金净科技有限公司产;PL203 型电子天平,博特勒 - 托利多仪器(上海)有限公司产;LDZX - 75KB 型立式压力蒸汽灭菌器,上海申安医疗器械厂产;DHP - 9272 型电热恒温培养箱,上海一恒科学仪器有限公司产;H1850R 型台式高速冷冻离心机,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司产;ZHWHY - 2102 型恒温培养摇床,上海智诚有限公司产;PHS - 3E 型 pH 计,上海佑科仪器仪表有限公司产.

## 1.3 实验方法

**1.3.1 产酯化酶菌株的富集、分离与筛选** 于无菌条件下称取 10 g 大曲粉,加入盛有 90 mL 无菌水的三角瓶(加玻璃珠数颗)中,置于电炉上加热至沸腾,保持 10 min,以杀死细菌营养细

胞和富集芽孢菌.待三角瓶冷却后,取 1 mL 上清液加入到 9 mL 无菌水中,以此做梯度稀释至  $10^{-7}$ .分别取 0.2 mL 后 3 个稀释度的菌悬液均匀涂布于筛选培养基平板上,于 37 °C 条件下倒置培养 24 ~ 48 h,观察菌落周围的透明圈情况.挑选产透明圈且具有细菌独特形态特征的单菌落,接种于牛肉膏蛋白胨培养基试管斜面,于 37 °C 条件下培养 24 h,4 °C 贮藏备用.

将纯菌株点种在筛选培养基上,于 37 °C 条件下培养 24 ~ 48 h,测量菌落直径  $d/mm$  和透明圈的直径  $D/mm$ ,并计算  $D/d$  值,选择比值较大的初筛菌株进行摇瓶发酵复筛.分别挑取三环初筛菌株接入 30 mL 种子液培养基中,于 37 °C 条件下,以 140 r/min 摇瓶培养 16 h,测定种子液  $OD_{600}$  值,并调节种子液  $OD_{600}$  值均为 0.80.取种子液 10 mL 加入 200 mL/500 mL 三角瓶发酵培养基中,于 37 °C 条件下,以 140 r/min 培养 3 d.取发酵液 50 mL,于 10 °C 条件下,以 8000 r/min 离心 10 min,上清液即为胞外粗酶液,测定其酯化酶活力.

**1.3.2 菌株的分类与鉴定** 形态学和生理生化特征鉴定:以培养 24 h 的试管斜面为种子,观察复筛菌株的菌落特征;对菌株进行革兰氏染色,镜检染色结果和芽孢特征<sup>[10-11]</sup>.相关项目的生理生化测定按照张纪忠《微生物分类学》要求进行<sup>[14]</sup>.

16S rDNA 序列分析:复筛菌株基因组 DNA 采用 SK8255 试剂盒(上海生工生物工程有限公 司产,简称上海生工)进行提取.以菌株基因组 DNA 为模板,采用通用引物 7F (5'-GAGATTTGATCCTGGCT-3') 和 1540R (5'-AGGAGGTGATCCAGCCGCA-3') 进行 16S rDNA 的 PCR 扩增.扩增反应体系为 25  $\mu$ L (5  $\times$  buffer 含  $Mg^{2+}$  2.5  $\mu$ L, dNTP 1.0  $\mu$ L, F 引物, R 引物各 0.5  $\mu$ L, Taq 酶 0.2  $\mu$ L, DNA 模板 0.5  $\mu$ L, 加双蒸水至 25.0  $\mu$ L). PCR 循环条件:预变性,

98 ℃ 3 min;30 个循环,98 ℃ 25 s,55 ℃ 25 s,72 ℃ 60 s;修复延伸,72 ℃ 10 min;至 4 ℃ 时终止反应. PCR 产物测序由上海生工完成. 测序得到的序列在 NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) 上通过 BLAST 程序与基因库中已知 16S rDNA 序列进行同源性比对分析.

**1.3.3 酯化酶活力的测定** 酯化酶在有机溶剂中以乙醇和己酸为底物催化合成己酸乙酯,用 NaOH 溶液滴定反应液,根据酸的消耗量计算酯化酶活力. 胞外粗酶液酯化酶活力的测定参考黄丹等的方法<sup>[8]</sup>.

酶活力单位定义:在测定条件下每 min 消耗 1 μmol 己酸所需要的酶量为 1 个酶活力单位.

**1.3.4 复筛菌株发酵条件优化**

**1.3.4.1 单因素试验设计** 以酯化酶活力为指标,研究复筛菌株分别在不同发酵时间(1 d, 2 d,3 d,4 d,5 d)、不同碳源(玉米粉,淀粉,葡萄糖,麸皮,蔗糖)、不同氮源(黄豆粉,硝酸铵,蛋白胨,尿素)、不同发酵温度(32 ℃,37 ℃,42 ℃,47 ℃,52 ℃,57 ℃)、不同初始 pH 值(5.0,6.0,7.0,8.0,9.0)条件下对酯化酶活力的影响,并确定最优的产酶发酵单因素条件.

**1.3.4.2 正交试验设计** 以发酵温度(A)、初始 pH 值(B)、碳源(C)、氮源(D)为影响因素,酯化酶活力为指标,分别选择 3 个酯化酶活力较高的水平设计四因素三水平  $L_9(3^4)$  正交试验,表 1 为正交试验因素水平表.

**1.3.5 数据分析** 试验数据采用 Excel 2003 处理. 所有试验均重复 3 次,结果取平均值. 采用 SPSS 16.0 软件通过 T 检验进行单因素显著性分析,采用正交助手 V 3.1 软件对正交试验的结果进行显著性分析.

**2 结果与分析**

**2.1 产酯化酶芽孢菌的分离与筛选**

从宋河酒中高温大曲中共分离得到 81 株

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of the orthogonal experiment

水平	因素			
	A/℃	B	C	D
1	42	5.0	玉米粉	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>
2	47	6.0	麸皮	黄豆粉
3	52	7.0	淀粉	尿素

产透明圈菌株,典型菌株产透明圈情况见图 1,初步镜检均为产芽孢细菌.

对 81 株芽孢菌的  $D/d$  值进行统计分析,发现  $D/d$  值在 0 ~ 2.0 范围内的菌株有 55 株,占菌株总数的 67.9%;在 2.0 ~ 3.0 范围内的菌株有 18 株,占菌株总数的 22.2%;大于 3.0 的菌株有 8 株,占菌株总数的 9.9%. 挑取  $D/d$  值较大的 10 株芽孢菌进行摇瓶发酵复筛,这些产酯化酶菌株的复筛结果见表 2. 由表 2 可知,菌株摇瓶发酵产酶活力与初筛  $D/d$  值之间不存在严格的线性关系,原因可能是初筛和复筛时生长条件与培养基组成发生了改变<sup>[15]</sup>,但  $D/d$  值较大的两株菌株 SPEO-30 和 SPEO-28,在复筛时仍表现出较高的产酯化酶能力,故选择产酯化酶活力较高的菌株 SPEO-28 为复筛菌



图 1 典型菌株产透明圈情况

Fig. 1 Production of transparent circles by typical strains



表2 产酯化酶菌株的复筛结果

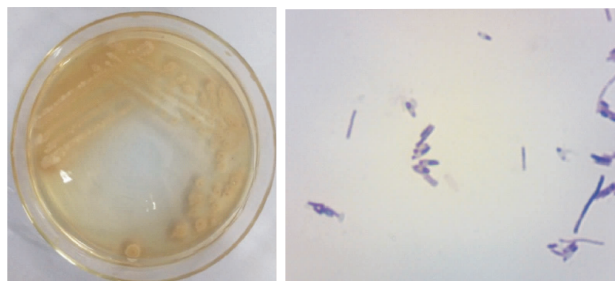
Table 2 Re-screening results of esterase-producing strains

菌株编号	D/d 值	酯化酶活力/(U · mL <sup>-1</sup> )
SPEO-1	2.21	10.01
SPEO-22	2.75	10.08
SPEO-23	3.10	9.58
SPEO-24	3.37	10.97
SPEO-27	3.29	9.51
SPEO-28	3.88	12.52
SPEO-29	3.05	9.72
SPEO-30	4.33	11.76
SPEO-34	3.33	9.11
SPEN-14	3.36	9.54

株,并对该菌株进行分类鉴定和产酯化酶发酵条件优化.

## 2.2 酯化酶高产菌株的分类鉴定

酯化酶高产菌株 SPEO-28 的菌落形态和镜检细胞形态结果见图 2. 由图 2 可知,该菌株菌落呈浅黄色,圆形,边缘不整齐,表面干燥;革兰氏染色呈阳性;次端生芽孢. 菌株 SPEO-28 的生理生化特征鉴定结果见表 3. 由表 3 可知,菌株 SPEO-28 产过氧化氢酶;在质量分数 2%、5% 和 7% 的盐浓度环境下均能生长;可利用葡萄糖、阿拉伯糖、木糖、甘露糖;可水解淀粉;V.P 试验呈阳性. 根据《微生物分类学》的分类标准<sup>[12]</sup>,初步鉴定该菌株为地衣芽孢杆菌 (*Bacillus licheniformis*).



a)菌落形态

b)细胞形态

图2 菌株 SPEO-28 的菌落形态和细胞形态

Fig. 2 Morphology of colony and cells of strain SPEO-28

表3 菌株 SPEO-28 生理生化特征鉴定结果

Table 3 Results of physiological and biochemical characteristic of strain SPEO-28

测定项目	菌株 SPEO-28
革兰氏染色	+
过氧化氢酶	+
2% 盐	+
5% 盐	+
7% 盐	+
pH = 5.7	+
可水解淀粉	+
葡萄糖	+
阿拉伯糖	+
木糖	+
甘露糖	+
V.P 试验	+

将该菌株的 PCR 产物测序结果提交 NCBI 数据库进行比对,发现相似性达到 100% 的比对序列均来自地衣芽孢杆菌. 综合考虑形态学、生理生化特征和分子鉴定结果,将菌株 SPEO-28 初步鉴定为地衣芽孢杆菌.

## 2.3 菌株 SPEO-28 产酯化酶发酵条件优化

### 2.3.1 发酵时间对菌株 SPEO-28 产酯化酶活力的影响

取菌株 SPEO-28 的种子液 1 mL,接入液体发酵培养基(30 mL/100 mL 三角瓶),于 37 °C,140 r/min 条件下发酵培养,每 24 h 取样一次,发酵时间对菌株 SPEO-28 产酯化酶活力的影响如图 3 所示(曲线上方不同小写字母表示存在显著性差异( $P < 0.05$ ),下同). 由图 3 可知,发酵前 3 d,菌株 SPEO-28 产酯化酶活力呈直线上升趋势;发酵 3 d 时,菌株 SPEO-28 产酯化酶活力达到最大值,且该时期产酯化酶活力明显高于其他时期( $P < 0.05$ );发酵 3 d 后,菌株 SPEO-28 产酯化酶活力开始下降. 有研究报道,多数产酶芽孢菌在 16 ~ 20 h 可达到稳定期,24 h 后进入衰减期,产酶期通常发生在菌株生长的中后期或后期<sup>[16]</sup>,本研究菌株 SPEO-28 的产酯化酶期就发生在菌株生长后期.

**2.3.2 发酵温度对菌株 SPEO - 28 产酯化酶活力的影响** 选择发酵时间为 3 d,其他发酵条件不变,设计 32 ~ 57 °C 发酵温度范围来考察不同温度对菌株 SPEO - 28 产酯化酶活力的影响,结果如图 4 所示. 由图 4 可知,菌株 SPEO - 28 在 57 °C 高温时仍具有较高的产酯化酶活力,且在 42 ~ 57 °C 高温发酵范围内,菌株 SPEO - 28 产酯化酶活力差异不显著 ( $P > 0.05$ ),52 °C 时菌株 SPEO - 28 产酯化酶活力最强,达 12.68 U/mL,因此,选择最优的发酵产酯化酶温度为 52 °C. 该菌株能耐受高温的产酯化酶发酵温度,可能与芽孢菌本身具有耐受高温环境的特性有关,同时也利于酯化酶稳定<sup>[17]</sup>.

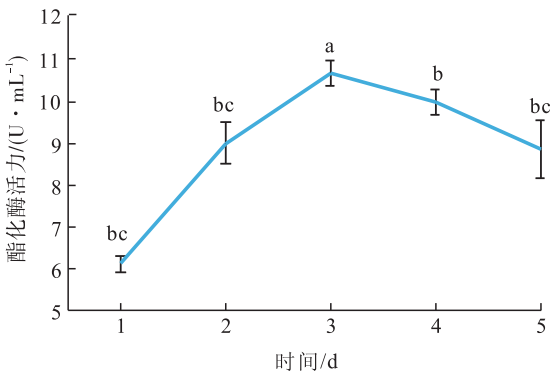


图 3 发酵时间对菌株 SPEO - 28 产酯化酶活力的影响

Fig. 3 Effects of fermentation time on the esterase activity by strain SPEO-28

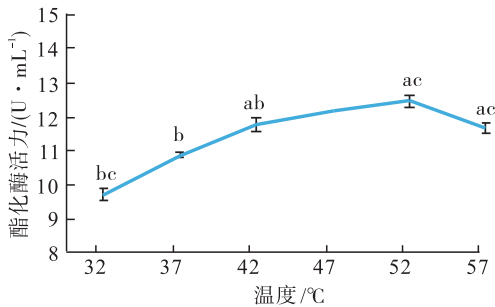


图 4 发酵温度对菌株 SPEO - 28 产酯化酶活力的影响

Fig. 4 Effects of fermentation temperature on the esterase activity by strain SPEO-28

**2.3.3 碳源对菌株 SPEO - 28 产酯化酶活力的影响** 保持其他发酵条件不变,分别用质量浓度为 1% 的玉米粉、麸皮、淀粉、葡萄糖、蔗糖代替原发酵培养基中的碳源,于 52 °C 条件下发酵 3 d,碳源对菌株 SPEO - 28 产酯化酶活力的影响如图 5 所示. 由图 5 可知,不同碳源均会影响菌株 SPEO - 28 的产酯化酶活力,麸皮和淀粉的影响较为显著 ( $P < 0.05$ ). 以麸皮为碳源时,菌株 SPEO - 28 的产酯酶活力最强,可达 19.99 U/mL,原因可能是麸皮中的营养成分能促进菌株的吸收利用. 此外,与其他碳源相比,麸皮作为淀粉质粮食加工的副产品,来源广泛且产量较大,作为微生物的营养成分,不但可提高微生物的发酵效率,而且还可提高其自身附加值,降低发酵成本.

**2.3.4 氮源对菌株 SPEO - 28 产酯化酶活力的影响** 在选择上述最佳发酵条件的基础上,分别添加质量浓度为 1% 的黄豆粉,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 尿素, 蛋白胨代替原发酵培养基中的氮源,考察菌株的发酵产酯化酶活力,氮源对菌株 SPEO - 28 产酯化酶活力的影响如图 6 所示(柱形上方不同小写字母表示存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ),下同). 由图 6 可知,以  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  为氮源时,菌株 SPEO - 28 产酯化酶活力最强,且与其他 4 种氮源相比影响较为显著 ( $P < 0.05$ ). 由此

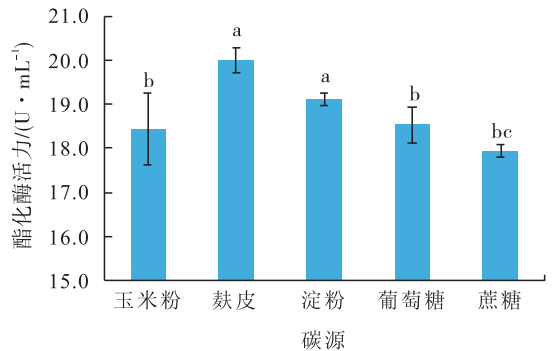


图 5 碳源对菌株 SPEO - 28 产酯化酶活力的影响

Fig. 5 Effects of carbon source on the esterase activity by strain SPEO-28

可知,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  有利于菌株 SPEO-28 酯化酶的胞外分泌。

**2.3.5 初始 pH 值对菌株 SPEO-28 产酯化酶活力的影响** 以  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  为氮源, 麸皮为碳源, 其他条件不变, 分别调节发酵液初始 pH 值为 5.0, 6.0, 7.0, 8.0 和 9.0, 于 52 °C, 140 r/min 条件下摇床发酵 3 d. 初始 pH 值对菌株 SPEO-28 产酯化酶活力的影响如图 7 所示. 由图 7 可知, 发酵初始 pH 值在 5.0 ~ 8.0 范围内, 菌株 SPEO-28 产酯化酶活力没有明显差异 ( $P > 0.05$ ); 该 pH 值范围内的酯化酶活力均大于 20.0 U/mL, 表明该菌株在中性发酵液附近较大的 pH 值范围内均具有较高的产酯化酶能力, 尤其是初始 pH 值为 6.0 时最适宜。

**2.3.6 菌株 SPEO-28 产酯化酶发酵条件正交试验优化结果与方差分析** 菌株 SPEO-28

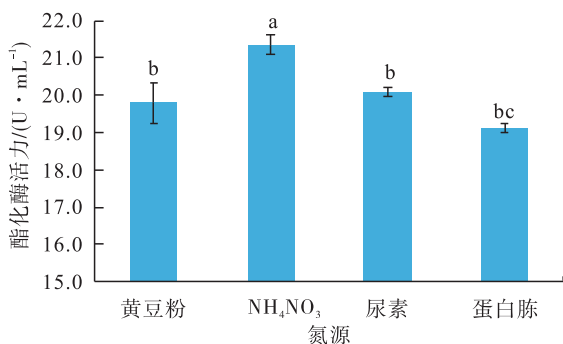


图 6 氮源对菌株 SPEO-28 产酶活力的影响

Fig. 6 Effects of nitrogen source on the esterase activity by strain SPEO-28

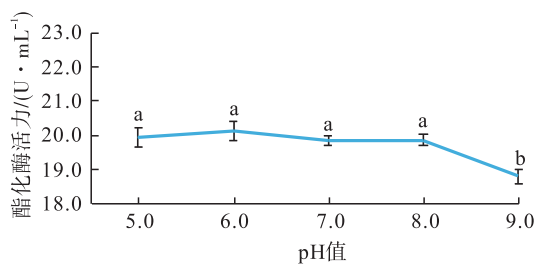


图 7 初始 pH 值对菌株 SPEO-28 产酯化酶活力的影响

Fig. 7 Effects of initial pH value on the esterase activity by strain SPEO-28

产酯化酶发酵条件的正交试验设计方案与结果见表 4, 方差分析见表 5。

由表 4 和表 5 可知, 对菌株 SPEO-28 产酯化酶活力影响程度从大到小的顺序依次为初始 pH 值 > 氮源 > 碳源 > 发酵温度, 最优组合为  $A_2B_2C_3D_1$ , 且初始 pH 值、碳源和氮源对该菌株产酯化酶活力均有显著性影响. 所得出的该菌株产酯化酶最优发酵条件为: 以淀粉为碳源,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  为氮源, 初始 pH 值为 6.0, 在 47 °C 条件下发酵 3 d. 在此发酵条件下, 菌株 SPEO-28 的酯化酶活力达到 22.83 U/mL, 比优化前提高了 82.6%, 酯化酶活力和优化后的酯化酶活力

表 4 正交试验设计方案、结果及其极差分析

Table 4 Orthogonal test design scheme, results and range analysis

试验号	因素				酯化酶活力/ (U · mL <sup>-1</sup> )
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	18.79
2	1	2	2	2	20.49
3	1	3	3	3	20.81
4	2	1	2	2	17.86
5	2	2	3	1	22.83
6	2	3	1	3	19.25
7	3	1	3	3	19.10
8	3	2	1	2	19.25
9	3	3	2	1	22.67
$K_1$	20.030	15.583	19.097	21.430	
$K_2$	19.980	20.857	20.340	19.613	
$K_3$	20.304	20.910	20.913	19.307	
R	0.360	2.327	1.816	2.123	

注:  $K, R$  为正交试验极差分析

表 5 正交试验结果的方差分析

Table 5 Analysis of variance on results of orthogonal design

因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性
A	0.228	2	1.000	19.000	
B	10.584	2	46.421	19.000	*
C	5.175	2	22.697	19.000	*
D	7.903	2	34.662	19.000	*
误差	0.230	2			

注: \* 表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

提高程度均高于从浓香型大曲分离筛选到的高产酯化酶血红鞘氨醇单胞菌 (*Sphingomonas sanguinis*)<sup>[18]</sup>, 表明菌株 SPEO-28 具有潜在的实际应用价值。

### 3 结论

本文采用加热和稀释涂布法, 从宋河酒中高温大曲中共分离得到 81 株产酯化酶芽孢菌, 摇瓶发酵复筛出产酯化酶活力较高的菌株 SPEO-28, 结合形态学、生理生化特征和 16S rDNA 序列分析将其鉴定为地衣芽孢杆菌 (*Bacillus licheniformis*)。采用单因素试验和正交试验优化了菌株 SPEO-28 的产酯化酶发酵培养条件, 发现初始 pH 值、碳源和氮源对该菌株产酯化酶活力均有显著性影响, 得出该菌株产酯化酶最优发酵条件为: 以淀粉为碳源,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  为氮源, 初始 pH 值为 6.0, 在 47 °C 条件下发酵 3 d。在此发酵条件下, 菌株 SPEO-28 产酯化酶活力达到 22.83 U/mL, 比优化前提高了 82.6%, 具有潜在的工业应用价值。本研究成果有望为浓香型白酒的制曲生产和糟醅发酵提供优良的产香菌种, 同时为改进工业制曲工艺提供技术参考。

### 参考文献:

- [1] 李大和, 刘念, 李国红. 浓香型大曲酿造中酯化菌研究的现状与展望[J]. 酿酒科技, 2008(2): 92.
- [2] 张楷正, 黄海. 浓香型白酒酿造中的酯化酶研究及应用进展[J]. 酿酒科技, 2016(2): 93.
- [3] 滕巍, 李国莹, 刘小波, 等. 大曲中产酯化酶菌株的分离鉴定及固体发酵工艺优化[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(9): 971.
- [4] XU Y, WANG D, FAN W, et al. Traditional Chinese biotechnology [J]. Adv Biochem Eng Biot, 2010, 122: 189.
- [5] ZHENG X, TABRIZI M R, ROBERT NOUT M J, et al. Daqu: A traditional Chinese liquor fermentation starter [J]. J Inst Brew, 2011, 117: 82.
- [6] 范文来, 徐岩. 大曲酶系研究的回顾与展望 [J]. 酿酒, 2000(5): 21.
- [7] 侯小歌, 王俊英, 李学思, 等. 浓香型白酒糟醅及窖泥产香功能菌的研究进展 [J]. 微生物学通报, 2013, 40(7): 1257.
- [8] 黄丹, 方春玉, 储玉龙, 等. 一株酯化酶细菌的分离、鉴定及代谢产物特征 [J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2010, 23(3): 321.
- [9] YAN Z, ZHENG X, CHEN J, et al. Effect of different *Bacillus* strain on the profile of organic acids in a liquid culture Daqu [J]. Institute of Brewing and Distilling, 2013, 119: 78.
- [10] WU Q, XU Y. Transcriptome profiling of heat-resistant strain *Bacillus licheniformis* CGM-CC3962 producing Maotai flavor [J]. J Agric Food Chem, 2012, 60(8): 2033.
- [11] WANG C L, SHI D J, GONG G L. Microorganisms in Daqu: A starter culture of Chinese Maotai-flavor liquor [J]. World J Microbiol Biotechnol, 2008, 24: 2183.
- [12] LI X R, MA E B, YAN L Z, et al. Bacterial and fungal diversity in the starter production process of fen liquor, a traditional Chinese liquor [J]. Journal of Microbiology, 2013, 51(4): 431.
- [13] 蔡信之, 黄君红. 微生物学实验 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 203.
- [14] 张纪忠. 微生物分类学 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1990: 67.
- [15] 鄢洪德, 汪钊, 李光伟. 产酯酶微生物菌种的筛选研究 [J]. 工业微生物, 2007, 37(6): 44.
- [16] 刘阳. 中高温大曲中产酯化酶细菌的选育 [D]. 合肥: 安徽工程大学, 2013: 27.
- [17] ATESLIER Z B B, METIN K. Production and partial characterization of novel thermostable esterase from a thermophilic *Bacillus* sp. [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2006, 38(5): 628.
- [18] 黄丹, 张强, 严芳, 等. 浓香型大曲中酯化酶细菌的分离鉴定及产酶条件研究 [J]. 中国酿造, 2009(8): 57.



引用格式:胡晓龙,李聪聪,何培新,等.酪丁酸梭菌 RL1 产丁酸发酵条件优化研究[J].轻工学报,2018,33(4):21-28.

中图分类号:TS261.1 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2018.04.003

文章编号:2096-1553(2018)04-0021-08

# 酪丁酸梭菌 RL1 产丁酸发酵条件优化研究

## Optimization of fermentation conditions for the production of butyric acid by *Clostridium tyrobutyricum* RL1

胡晓龙<sup>1</sup>,李聪聪<sup>1</sup>,何培新<sup>1</sup>,李学思<sup>2</sup>,曹振华<sup>2</sup>,李红<sup>3</sup>

HU Xiaolong<sup>1</sup>,LI Congcong<sup>1</sup>,HE Peixin<sup>1</sup>,LI Xuesi<sup>2</sup>,CAO Zhenhua<sup>2</sup>,LI Hong<sup>3</sup>

1. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院,河南 郑州 450001;

2. 河南省宋河酒业股份有限公司,河南 鹿邑 477265;

3. 五粮液集团有限公司,四川 宜宾 644000

### 关键词:

浓香型白酒窖泥;酪丁酸梭菌;丁酸;发酵条件优化

1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. He'nan Songhe Distillery Co., Ltd., Luyi 477265, China;

3. Wuliangye Group Co., Ltd., Yibin 644000, China

### Key words:

Luzhou-flavor liquor pit mud; *Clostridium tyrobutyricum*; butyric acid; optimization of fermentation condition

**摘要:**以从浓香型白酒窖泥中分离得到的酪丁酸梭菌 RL1 (*Clostridium tyrobutyricum* RL1) 为研究对象,采用单因素试验结合正交试验优化菌株产丁酸的发酵条件。结果表明,酪丁酸梭菌 RL1 的最优产丁酸发酵条件为:发酵培养基初始 pH = 6.8,装液量 100%,培养温度 34 °C,接种量 3% (体积分数),还原剂为硫代乙醇酸钠且其添加量为 0.5 g/L。在该发酵条件下,酪丁酸梭菌 RL1 的丁酸产量可达 10.66 g/L,较优化前提高了 41.76%。

收稿日期:2018-06-19

基金项目:中国轻工业浓香型白酒固态发酵重点实验室开放基金项目(2017JJ012);郑州轻工业学院博士科研基金资助项目(2016BSJJ018);郑州轻工业学院大学生科技活动项目

作者简介:胡晓龙(1984—),男,河南省开封市人,郑州轻工业学院讲师,博士,主要研究方向为白酒酿造。

通信作者:何培新(1970—),男,河南省商丘市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为发酵工程。

**Abstract:** The fermentation conditions of *Clostridium tyrobutyricum* RL1 isolated from Luzhou-flavor liquor pit mud for the production of butyric acid was optimized using one-factor experiment combined with orthogonal experiment. The results showed that the optimal yield of butyric acid fermentation of *Clostridium tyrobutyricum* RL1 was the initial pH value 6.8, the volume of culture media 100%, the culture temperature 34 °C, the inoculation amount 3% (volume fraction) and the dosage of the deoxidizer (sodium thioglycolate) 0.5 g/L. Under the optimal fermentation conditions, the production of butyric acid by *Clostridium tyrobutyricum* RL1 reached 10.66 g/L, which was 41.76% higher than that before optimization.

## 0 引言

丁酸既是浓香型白酒中重要的呈香物质之一,又可作为浓香型白酒其他重要呈香物质(如丁酸乙酯和己酸等)的合成前体<sup>[1-2]</sup>。此外,丁酸也是一种合成其他香料物质和精细化工产品的重要原料。丁酸及其衍生物被广泛应用于化工、食品、医药、动物饲料和化妆品等行业,全世界每年的丁酸市场需求量在  $8 \times 10^4$  t 以上,具有广阔的市场<sup>[3-8]</sup>。丁酸的生产方法主要有化学合成法和微生物发酵法。从经济角度看,以丁醛氧化法为主的化学合成法因其低廉的生产成本而具有较大优势,是目前工业化生产丁酸的主要方法<sup>[9-10]</sup>。但是,随着化石能源的日渐枯竭和化石燃料带来的严重污染,微生物发酵法因其温和的反应条件、低污染的发酵过程和可再生性等独特优势越来越受到业界的青睐<sup>[3,11-12]</sup>。与石油基化学法相比,微生物发酵法在未来将具有巨大的市场发展潜力。

目前,微生物发酵法生产丁酸所采用的菌株主要是厌氧细菌,包括梭菌(*Clostridium* spp.)、丁酸杆菌(*Butyribacterium* spp.)、梭杆菌(*Fusobacterium* spp.)、真杆菌(*Eubacterium* spp.)、丁酸弧菌(*Butyrivibrio* spp.)、产黑色素拟杆菌(*Bacteroides melaninogenicus*)、溃蚀密螺旋体(*Treponema phagedenis*)和不解糖消化链球菌(*Peptostreptococcus asaccharolyticus*)等<sup>[13-14]</sup>。其中以对梭菌属的酪丁酸梭菌(*C. tyrobutyricum*)和丁酸梭菌(*C. butyricum*)研究较多<sup>[8,15]</sup>。笔者前期从河南某浓香型白酒企业的窖泥样品

中分离得到 8 种梭菌,其最高相似菌分别为 *C. tyrobutyricum*, *C. acetobutylicum*, *C. butyricum*, *C. sporogenes*, *C. bifermentans*, *C. indolis*, *C. kluyveri*, *C. cadaveris* 和 *C. bifermentans*<sup>[16]</sup>。其中,酪丁酸梭菌产丁酸能力最强,丁酸梭菌次之,其他梭菌产丁酸能力相对较弱。鉴于丁酸微生物发酵法的巨大发展潜力,本研究以源自窖泥的丁酸高产菌株酪丁酸梭菌 RL1 (*C. tyrobutyricum* RL1) 为出发菌株,采用单因素试验结合正交试验优化其产丁酸的发酵条件,以期为微生物发酵法生产丁酸提供理论和技术支持。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

供试菌株:酪丁酸梭菌 RL1,从河南某浓香型白酒企业窖泥中分离获得,保存于郑州轻工业学院发酵工程研究室。

种子活化培养基:梭菌增强培养基(RCM 培养基)<sup>[17]</sup>。

发酵培养基:葡萄糖 30 g/L,蛋白胨 10 g/L,牛肉膏 10 g/L,酵母膏 3 g/L,NaCl 5 g/L,醋酸钠 3 g/L,半胱氨酸盐酸盐 0.5 g/L, pH = 6.8,于 121 °C 条件下高压灭菌 20 min;葡萄糖单独灭菌,灭菌条件同上,在使用前与其他成分混合。

主要试剂:丁酸、2-乙基丁酸,均为色谱纯,购自日本 TCI 公司;其余试剂均为市售,分析纯。

### 1.2 主要仪器和设备

LDZX-50KBS 型立式压力蒸汽灭菌器,上海申安医疗器械厂产;C-11 型厌氧产气袋,

C-41 型培养袋,日本三菱公司产;ME204E 型电子天平,梅特勒-托利多仪器有限公司产;SHP-250 型智能生化培养箱,上海鸿都电子科技有限公司产;SW-CJ-ID 型超净工作台,苏州净化设备有限公司产;TGL-16G 型离心机,上海安亭科学仪器厂产;7820A 型气相色谱仪,HP-INNOWAX 型毛细管色谱柱(30 m × 0.255 mm × 0.25 μm),美国安捷伦公司产。

### 1.3 实验方法

**1.3.1 酪丁酸梭菌 RL1 种子制备** 取 -20 °C 甘油管保藏的酪丁酸梭菌 RL1 菌种 300 μL,接种于装有 10 mL RCM 培养液的试管中,置于厌氧培养袋内,于 37 °C 条件下培养 24 h,即为一级种子。再在前期研究的基础上,以体积分数 5% 的接种量将一级种子转接至工作体积为 100 mL 的厌氧瓶中,于 37 °C 条件下培养 12 h,即为二级种子。

**1.3.2 酪丁酸梭菌 RL1 生长曲线与丁酸产量曲线绘制** 在前期研究的基础上,将二级种子液按体积分数 5% 的接种量接种至盛有 95 mL 已灭菌的 RCM 培养液(pH = 6.8)的厌氧瓶中,于 37 °C 条件下厌氧静置培养。分别测定培养 0 h,4 h,6 h,8 h,10 h,12 h,16 h,20 h,24 h,28 h,32 h,36 h,40 h,44 h 和 48 h 发酵液的菌体浓度(600 nm 波长处的 OD 值),绘制酪丁酸梭菌 RL1 的生长曲线。同时,测定培养 0 h,8 h,16 h,24 h,36 h 和 48 h 发酵液中的丁酸浓度,绘制酪丁酸梭菌 RL1 的丁酸产量曲线。

#### 1.3.3 发酵液中丁酸浓度测定

**1.3.3.1 丁酸标准曲线绘制** 采用一元线性回归分析方法绘制丁酸标准曲线<sup>[18]</sup>。准确称取 2.500 0 g 丁酸于容量瓶中,并用 RCM 培养基定容至 50 mL,配制成质量浓度为 50 mg/mL 的丁酸母液,分别量取 0.1 mL,0.2 mL,0.5 mL,1.0 mL 和 1.6 mL 丁酸母液于干净的 10 mL 容量瓶中,并向每个容量瓶加 40 μL 的 2-乙基丁酸作为内标,

用 RCM 液体培养基定容至刻度线,分别配制成质量浓度为 0.5 mg/mL,1.0 mg/mL,2.5 mg/mL,5.0 mg/mL 和 8.0 mg/mL 的丁酸标准溶液,经乙醚萃取和孔径为 0.22 μm 的微孔滤膜过滤后上样色谱柱。以标准溶液的浓度为纵坐标,丁酸与 2-乙基丁酸的峰面积比为横坐标,绘制丁酸标准曲线。

**1.3.3.2 待测液预处理** 吸取 15 mL 发酵液,于 10 000 r/min 条件下离心 10 min,吸取 10 mL 上清液,加 25 μL 质量浓度为 72% 的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 进行酸解,释放有机酸,再加 40 μL 2-乙基丁酸作为内标并充分混匀,经乙醚萃取和孔径为 0.22 μm 的微孔滤膜过滤即得待测液。

**1.3.3.3 气相色谱条件确定** 采用气相色谱仪进行发酵液中丁酸浓度检测。色谱条件参照陈兴杰等<sup>[19]</sup>报道的条件并稍作修改,即进样口温度 200 °C,柱箱起始温度 100 °C,保持 1 min;以 10 °C/min 的升温速率升至 220 °C,保持 2 min;检测器温度 250 °C;气体流量: H<sub>2</sub> 35 mL/min,空气 400 mL/min,尾吹气 20 mL/min;进样方式为分流进样,分流面积比为 20:1;进样体积 1 μL。

#### 1.3.4 单因素试验

**1.3.4.1 最适接种量的确定** 分别以体积分数为 1%,3%,5%,7% 和 9% 的接种量将活化好的二级种子液接入已灭菌的发酵培养基中(每组试验 3 个平行,下同),于 37 °C 条件下培养 48 h,测定各发酵液中的丁酸质量浓度。

**1.3.4.2 最适装液量的确定** 设厌氧瓶最大工作体积为 100%,分别向厌氧瓶中装入工作体积为 30%,50%,80% 和 100% 的发酵培养基,以 3% (以下若无特殊说明,均指体积分数) 的接种量接入二级种子液,于 37 °C 条件下恒温培养 48 h,测定各发酵液中的丁酸质量浓度。

**1.3.4.3 最适培养温度的确定** 向装液量为 100% 的发酵培养基中,以 3% 的接种量接入二

级种子液,分别于 26 ℃, 30 ℃, 32 ℃, 34 ℃, 36 ℃, 37 ℃, 40 ℃ 和 44 ℃ 条件下培养 48 h, 测定各发酵液中的丁酸质量浓度.

#### 1.3.4.4 最适发酵培养基初始 pH 值的确定

用浓度为 3 mol/L 的 HCl 和 6 mol/L 的 NaOH 溶液将培养基初始 pH 值分别调为 4.0, 5.0, 6.2, 6.5, 6.8, 7.1, 7.4, 7.7, 8.0 和 9.0, 以 3% 的接种量接入二级种子液, 于 32 ℃ 条件下恒温培养 48 h, 测定各发酵液中的丁酸质量浓度.

#### 1.3.4.5 最适还原剂的确定

选择半胱氨酸盐, FeSO<sub>4</sub>, 硫代乙醇酸钠, Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> 和 Na<sub>2</sub>S 5 种还原剂作为发酵液中的除氧剂, 其初始添加量均为 0.5 g/L, 以 3% 的接种量接入二级种子液, 发酵培养基装液量为 100%, 于 32 ℃ 条件下培养 48 h, 测定各发酵液中的丁酸质量浓度.

#### 1.3.4.6 最适还原剂添加量的确定

依据最适还原剂的确定试验结果, 分别以 0 g/L, 0.1 g/L, 0.5 g/L, 1.0 g/L, 2.0 g/L, 4.0 g/L, 8.0 g/L, 10 g/L 和 12 g/L 的添加量将最适还原剂加入发酵培养基中, 以 3% 的接种量接入二级种子液, 发酵培养基装液量为 100%, 于 32 ℃ 条件下培养 48 h, 测定各发酵液中的丁酸质量浓度.

#### 1.3.5 正交试验

在单因素试验的基础上, 采用正交试验优化酪丁酸梭菌 RL1 在静置培养条件下获得最优丁酸产量的发酵条件. 本试验选取培养温度(A)、发酵培养基初始 pH 值(B)和装液量(C)3 个对丁酸合成影响较大的因素, 综合其最佳条件设计 L<sub>9</sub>(3<sup>3</sup>) 正交试验, 以确定在上述 3 个因素的作用下酪丁酸梭菌 RL1 产丁酸的最优组合. 表 1 为正交试验因素水平表.

#### 1.3.6 数据分析

采用单因素方差分析方法(ANOVA)比较同一发酵培养条件下的不同水平对酪丁酸梭菌 RL1 产丁酸能力的显著性影响( $P < 0.05$  为影响显著, 否则为不显著).

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of the orthogonal experiment

水平	因素		
	A/℃	B	C/%
1	32	6.5	50
2	34	6.8	80
3	36	7.1	100

## 2 结果与分析

### 2.1 丁酸标准曲线

按实验方法中的步骤绘制的丁酸标准曲线见图 1, 其回归方程为  $y = 5.9716x + 0.4495$ , 其相关系数  $R^2$  为 0.9987, 表明该曲线纵横坐标所代表的参数具有较好的相关性, 可以准确定量发酵液中丁酸的质量浓度.

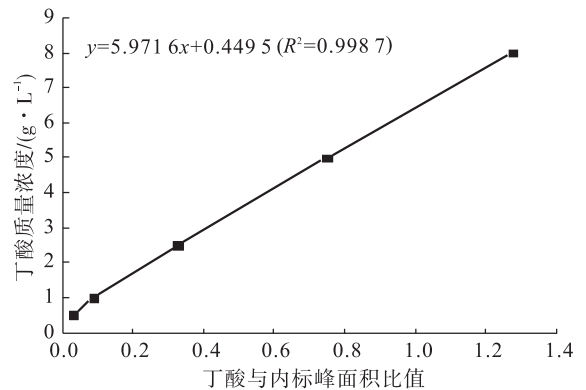


图 1 丁酸标准曲线

Fig. 1 The standard curve of butyric acid

### 2.2 酪丁酸梭菌 RL1 生长曲线与丁酸产量曲线

酪丁酸梭菌 RL1 生长曲线与丁酸产量曲线见图 2. 由图 2 可知, 酪丁酸梭菌 RL1 的发酵培养生长过程可以分为三个阶段: 0 ~ 4 h 内生长缓慢, 4 ~ 16 h 内快速增殖, 16 h 后该菌体生长趋于稳定, 菌体浓度在 32 h 达到最大值, 表明该菌株的生长曲线具有典型的延滞期、对数期和稳定期. 发酵液中丁酸浓度在 8 ~ 24 h 呈快速增长趋势, 24 h 后增幅缓慢, 趋于平稳. 酪丁酸梭菌 RL1 合成丁酸的动力学模型为生长偶联型, 这对今后利用该菌株高产丁酸具有指



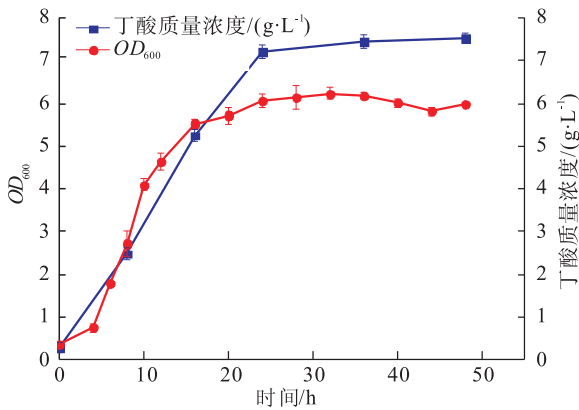


图2 酪丁酸梭菌 RL1 生长曲线与丁酸产量曲线

Fig. 2 Growth curve and butyric acid production curve of *Clostridium tyrobutyricum* RL1

导意义,即可采用有利于细胞生长的培养条件并适当延长该菌株的对数生长期。

### 2.3 单因素试验结果与分析

接种量、装液量、培养温度、发酵培养基初始 pH 值、还原剂和最适还原剂添加量对酪丁酸梭菌 RL1 合成丁酸的影响试验结果见图 3。其中,曲线上方不同小写字母表示不同条件下存在显著性差异( $P < 0.05$ )。

**2.3.1 接种量对酪丁酸梭菌 RL1 合成丁酸的影响** 接种量对酪丁酸梭菌 RL1 合成丁酸的影响见图 3a)。总体上讲,接种量对酪丁酸梭菌 RL1 产丁酸能力影响较小。随着接种量增加,该菌株的丁酸产量先升高,然后下降并逐渐趋于稳定。当接种量为 3% 时,发酵液中的丁酸质量浓度最大,达到 8.24 g/L。因此,酪丁酸梭菌 RL1 的最适接种量为 3%。

**2.3.2 装液量对酪丁酸梭菌 RL1 合成丁酸的影响** 装液量对酪丁酸梭菌 RL1 合成丁酸的影响见图 3b)。菌株在不同装液量条件下培养获得的丁酸产量存在显著差异( $P < 0.05$ ):当装液量为 30% 时,发酵液中丁酸质量浓度仅为 0.50 g/L,显著低于其他装液量时的丁酸产量;随着装液量的增加,丁酸质量浓度显著提高,当装液量为 50% 时,丁酸质量浓度为 6.86 g/L,

约为装液量 30% 时的 14 倍;当装液量大于 50% 时,丁酸的生成量仍一直增加,但增幅越来越小;当装液量为 100% 时,发酵液中丁酸质量浓度达到最大值 8.24 g/L。酪丁酸梭菌 RL1 发酵时的丁酸产量之所以随装液量增加而增加,这主要是由于该菌株通过厌氧发酵产生丁酸,厌氧瓶中的  $O_2$  含量随着装液量的增加而减少,进而导致装液量多的培养基中氧化还原电位相对较低,有利于该菌株的生长繁殖;同时,该菌株在生长过程中产生大量的气体,更易将发酵瓶中的残氧通过输液管排出,能更快地为该菌株提供一个厌氧环境。因此,选取 100% 的装液量为最适装液量。

**2.3.3 培养温度对酪丁酸梭菌 RL1 合成丁酸的影响** 培养温度对酪丁酸梭菌 RL1 合成丁酸的影响见图 3c)。在不同的培养温度下,该菌株的丁酸产量差异显著( $P < 0.05$ ),并且随温度升高呈先上升后下降的趋势。30 ~ 37 °C 为丁酸发酵的适宜温度区间,在 32 °C 时丁酸产量达到最大值 8.92 g/L。而培养温度高于 37 °C 或低于 30 °C 时发酵液中丁酸质量浓度均显著下降( $P < 0.05$ ),表明过高或过低的培养温度对酪丁酸梭菌 RL1 的丁酸合成代谢均有显著影响。此外,与文献报道的 *C. tyrobutyricum* ATCC25755 等菌株最适发酵丁酸温度不同<sup>[20-21]</sup>,酪丁酸梭菌 RL1 最适产丁酸温度为较低的 32 °C,这可能是由于该菌株经过较低温度环境的窖泥窖池长期驯化,已具有了与 *C. tyrobutyricum* ATCC25755 等其他菌株不同的生理特征所致。因此,选取 32 °C 为最适培养温度。

**2.3.4 发酵培养基初始 pH 值对酪丁酸梭菌 RL1 合成丁酸的影响** 发酵培养基初始 pH 值对酪丁酸梭菌 RL1 合成丁酸的影响见图 3d)。在发酵过程中,pH 值可以通过影响培养基中营养物质的解离和吸收、细胞膜通透性与胞内外酶活性等,进而影响微生物的生长和代谢活力。

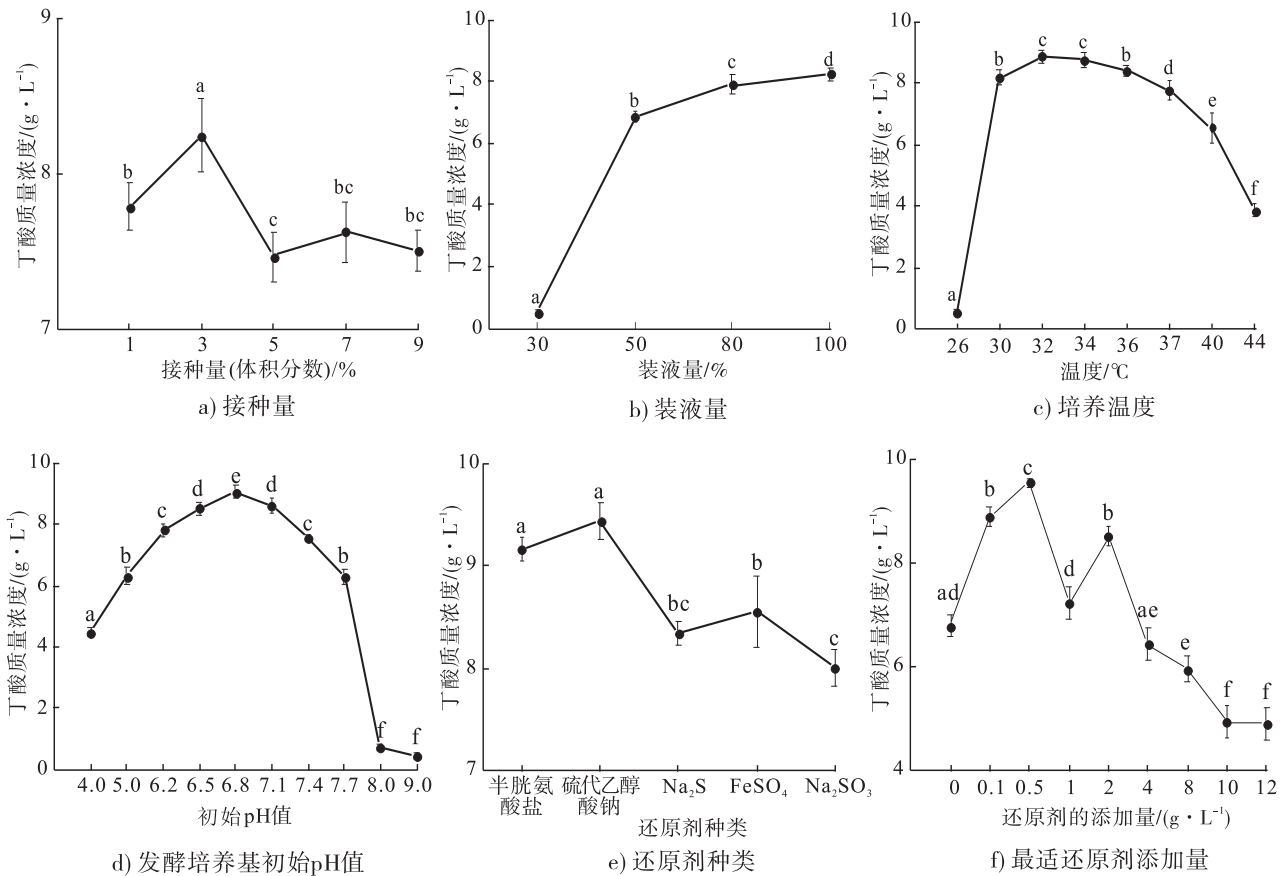


图3 酪丁酸梭菌 RL1 发酵单因素试验结果

Fig. 3 Single factor experiment analysis of fermentation conditions of *Clostridium tyrobutyricum* RL1

由图 3d)可知,酪丁酸梭菌 RL1 的丁酸产量随培养基初始 pH 值升高呈先上升后下降的趋势,当 pH 值为 6.5~7.1 时,丁酸产量显著较高(>8 g/L),其中当 pH 值为 6.8 时,丁酸质量浓度达到最大值 9.05 g/L.此外,相对于碱性环境(pH > 7.7),该菌株在酸性环境(pH = 4.0)能产生更多的丁酸,此时丁酸质量浓度约为 pH 值为 8.0 时的 6 倍.综上,酪丁酸梭菌 RL1 在酸性(4.0 < pH < 7.0)环境下较碱性(pH > 7.7)环境下的丁酸产量明显更高,菌株在近中性 pH 条件下也能合成较多丁酸,且最适 pH 值为 6.8.因此,选取 pH 值为 6.8 为最适发酵培养基初始 pH 值.

**2.3.5 还原剂对酪丁酸梭菌 RL1 合成丁酸的影响** 还原剂对酪丁酸梭菌 RL1 合成丁酸的

影响见图 3e).厌氧条件是保证酪丁酸梭菌 RL1 进行生长繁殖和丁酸发酵的重要前提,因此,添加合适的还原剂可以降低培养基中溶解氧的浓度,促进菌株生长和代谢产物丁酸的生成.由图 3e)可知,5 种还原剂对丁酸生成量的影响大小依次为:硫代乙醇酸钠 > 半胱氨酸盐 > FeSO<sub>4</sub> > Na<sub>2</sub>S > Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>,当硫代乙醇酸钠作为还原剂时发酵液中丁酸质量浓度最大,为 9.43 g/L.因此,选取硫代乙醇酸钠为最适还原剂.

**2.3.6 最适还原剂添加量对酪丁酸梭菌 RL1 合成丁酸的影响** 最适还原剂硫代乙醇酸钠的添加量对酪丁酸梭菌 RL1 合成丁酸的影响见图 3f).酪丁酸梭菌 RL1 的丁酸产量随硫代乙醇酸钠添加量的升高呈现先上升后下降的趋

势,当添加剂量为 0.5 g/L 时,丁酸质量浓度达到最大值,为 9.53 g/L. 因此,选取 0.5 g/L 为还原剂硫代乙醇酸钠的最适添加量.

## 2.4 正交试验结果

在单因素试验的基础上,采用  $L_9(3^3)$  正交试验优化菌株的发酵培养条件,正交试验设计方案与结果见表 2.

表 2 正交试验设计方案与结果

Table 2 Orthogonal test design scheme and results

试验号	因素			丁酸质量浓度/ (g · L <sup>-1</sup> )
	A	B	C	
1	1	1	1	8.67
2	1	2	2	9.63
3	1	3	3	7.94
4	2	1	2	9.48
5	2	2	3	10.66
6	2	3	1	7.69
7	3	1	3	9.58
8	3	2	1	8.02
9	3	3	2	8.64
$K_1$	26.24	27.73	24.38	
$K_2$	27.83	28.31	27.75	
$K_3$	26.24	24.27	28.18	
$k_1$	8.75	9.24	8.13	
$k_2$	9.28	9.44	9.25	
$k_3$	8.75	8.09	9.40	
R	0.53	1.35	1.27	

由表 2 可知,以发酵液中丁酸浓度为指标,通过极差分析确定各影响因素的主次顺序为:发酵培养基初始 pH 值 > 装液量 > 培养温度,最优组合为  $A_2B_2C_3$ ,即当发酵培养基初始 pH 值为 6.8,装液量为 100%,培养温度为 34 ℃ 时,酪丁酸梭菌 RL1 产丁酸能力最强. 综合单因素试验和正交试验结果可知,酪丁酸梭菌 RL1 产丁酸的最优发酵条件为:发酵培养基初始 pH = 6.8,装液量 100%,培养温度 34 ℃,接种量 3%,还原剂为硫代乙醇酸钠且其添加量为 0.5 g/L. 优化后发酵液中的丁酸质量浓度可达 10.66 g/L,较优化前的 7.52 g/L 提高了 41.76%.

## 3 结论

本文以源自浓香型白酒窖泥的酪丁酸梭菌 RL1 为出发菌株,分别考察接种量、装液量、培养温度、发酵培养基初始 pH 值、还原剂及其添加量 6 个因素,采用单因素试验结合正交试验对菌株产丁酸的发酵条件进行了优化研究. 酪丁酸梭菌 RL1 产丁酸的最优发酵条件为:发酵培养基初始 pH = 6.8,装液量 100%,培养温度 34 ℃,接种量 3%,还原剂为硫代乙醇酸钠且其添加量为 0.5 g/L. 在该发酵条件下,酪丁酸梭菌 RL1 的丁酸产量可达 10.66 g/L,较优化前提高了 41.76%,其产丁酸条件的优化效果显著.

本研究有望缓解化石能源日渐枯竭和化石燃料严重污染带来的压力,为运用微生物发酵法生产丁酸提供理论与技术支持,从而推进微生物发酵法生产丁酸的产业化进程.

## 参考文献:

- [1] FAN W, QIAN M C. Identification of aroma compounds in Chinese 'Yanghe Daqu' liquor by normal phase chromatography fractionation followed by gas chromatography/olfactometry [J]. Flavour and Fragrance Journal, 2006, 21 (2): 333.
- [2] WEIMER P J, STEVENSON D M. Isolation characterization and quantification of *Clostridium kluyveri* from the bovine rumen [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2012, 94 (2): 461.
- [3] WANG J, LIN M, XU M, YANG S T. Anaerobic fermentation for production of carboxylic acids as bulk chemicals from renewable biomass [J]. Adv Biochem Eng Biotechnol, 2016, 156: 323.
- [4] LUO H, GE L, ZHANG J, et al. Enhancing butanol production under the stress environments of co-culturing *Clostridium acetobutylicum*/*Saccharomyces cerevisiae* integrated with

- exogenous butyrate addition [ J ]. Plos One, 2015, 10( 10 ):e0141160.
- [ 5 ] LUO H, ZENG Q, HAN S, et al. High-efficient *n*-butanol production by co-culturing *Clostridium acetobutylicum* and *Saccharomyces cerevisiae* integrated with butyrate fermentative supernatant addition [ J ]. World J Microbiol Biotechnol, 2017, 33( 4 ):76.
- [ 6 ] RICHTER H, QURESHI N, HEGER S, et al. Prolonged conversion of *n*-butyrate to *n*-butanol with *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* in a two-stage continuous culture with in-situ product removal [ J ]. Biotechnology & Bioengineering, 2012, 109( 4 ):913.
- [ 7 ] TASHIRO Y, TAKEDA K, KOBAYASHI G, et al. High butanol production by *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4 in fed-batch culture with pH-stat continuous butyric acid and glucose feeding method [ J ]. Journal of Bioscience & Bioengineering, 2004, 98( 4 ):263.
- [ 8 ] 周丽春. 米糠纤维床反应器固定化发酵产丁酸的研究 [ D ]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [ 9 ] MAITI S, BRAR S K, VERMA M, et al. Chapter 7—butyric acid: A platform chemical for biofuel and high-value biochemicals [ M ] // Brar S K, Sarma S J, Pakshirajan K. Platform Chemical Biorefinery. Amsterdam: Elsevier Inc, 2016: 119.
- [ 10 ] YANG X, TANG S, LU T, et al. ChemInform abstract: sulfonic acid resin—Catalyzed oxidation of aldehydes to carboxylic acids by hydrogen peroxide [ J ]. Journal of Energy Chemistry, 2013, 44( 4 ):659.
- [ 11 ] IVAN B, PETER W. Microbial production of short chain fatty acids from lignocellulosic biomass: Current processes and market [ J ]. Biomed Research International, 2016 ( 1 ): 8469357.
- [ 12 ] REPHAELI A, ZHUK R, NUDELMAN A. Pro-drugs of butyric acid from bench to bedside: Synthetic design mechanisms of action and clinical applications [ J ]. Drug Development Research, 2010, 50( 3/4 ):379.
- [ 13 ] ZIGOVA J, STURAIK E. Advances in biotechnological production of butyric acid [ J ]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2000, 24( 3 ):153.
- [ 14 ] 邓名荣, 郭俊, 朱红惠. 微生物催化生产丁酸研究进展 [ J ]. 中国生物工程杂志, 2009, 29( 3 ):117.
- [ 15 ] 江凌. 纤维床固定化酪丁酸梭菌发酵廉价生物质生产丁酸的研究 [ D ]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [ 16 ] 何培新, 李聪聪, 胡晓龙, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 的浓香型白酒窖泥中可培养 *Clostridium* spp. 挥发性代谢物成分分析 [ J ]. 轻工学报, 2017, 32( 6 ):1.
- [ 17 ] HU X L, DU H, XU Y. Identification and quantification of the caproic acid-producing bacterium *Clostridium kluyveri* in the fermentation of pit mud used for Chinese strong-aroma type liquor production [ J ]. International Journal of Food Microbiology, 2015, 214:116.
- [ 18 ] 于平, 陈凯飞, 朱祺, 等. 重组大肠杆菌生物合成  $\gamma$ -氨基丁酸的发酵条件优化 [ J ]. 中国食品学报, 2018( 6 ):112.
- [ 19 ] 陈兴杰, 吴攀攀, 徐敏瑞, 等. 窖泥己酸菌和丁酸菌联合接种发酵液有机酸检测与分析 [ J ]. 酿酒, 2017, 44( 3 ):60.
- [ 20 ] 项宜娟. 纤维床固定化酪丁酸梭菌产丁酸的研究 [ D ]. 杭州: 浙江理工大学, 2010.
- [ 21 ] 高振, 江凌, 朱丽英, 等. 纤维床固定化酪丁酸梭菌发酵大薯渣水解液生产丁酸的研究 [ J ]. 安徽农业科学, 2012, 40( 33 ):16302.



引用格式:梁瑜海,李冬,吴青,等.曝气上流式污泥床中亚硝化颗粒污泥的微生物特征[J].轻工学报,2018,33(4):29-36.

中图分类号:X703;TS97 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2018.04.004

文章编号:2096-1553(2018)04-0029-08

# 曝气上流式污泥床中 亚硝化颗粒污泥的微生物特征

## The microbial characteristics of partial nitrosated granular sludge in the aerated upflow sludge bed

梁瑜海<sup>1</sup>,李冬<sup>2</sup>,吴青<sup>2</sup>,张杰<sup>2,3</sup>

LIANG Yuhai<sup>1</sup>,LI Dong<sup>2</sup>,WU Qing<sup>2</sup>,ZHANG Jie<sup>2,3</sup>

1. 华南农业大学 资源环境学院,广东 广州 510642;

2. 北京工业大学 水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室,北京 100124;

3. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150090

1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2. Key Laboratory of Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

### 关键词:

曝气上流式污泥床;  
亚硝化;颗粒污泥;  
微生物特征;  
高通量测序

### Key words:

aerated upflow sludge  
bed;partial nitrosation;  
granular sludge;  
microbial characteristics;  
high-throughput  
sequencing

**摘要:**采用高通量测序技术,对曝气上流式污泥床中亚硝化颗粒污泥的微生物特征进行研究,结果表明:相对于初始接种的絮状污泥,污泥的 Shannon 指数由 3.869 上升到 4.590,这说明亚硝化颗粒污泥的微生物种群的多样性更显著;污泥中 *Nitrosomonas* 菌属的相对丰度由 12.08% 减少到 6.15%,*Nitrobacter* 菌属的相对丰度由 5.43% 减少到 0.32%,这说明亚硝化颗粒污泥的亚硝化稳定性也更好.

收稿日期:2018-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51708229);国家重大科技专项水专项项目(2012ZX07202-005)

作者简介:梁瑜海(1986—),男,广西壮族自治区崇左市人,华南农业大学副教授,博士,主要研究方向为环境污染治理新技术.

**Abstract:** The high-throughput sequencing technology was used to study the microbial characteristics of nitrated granular sludge in aerated upflow sludge bed. The results showed that compared with the initial inoculated flocculent sludge, the sludge Shannon index increased from 3.869 to 4.590, which indicated the microbial population diversity of nitrated granular sludge was more significant, and the relative abundance of *Nitrosomonas* in the sludge was reduced from 12.08% to 6.15%, and the relative abundance of *Nitrobacter* was reduced from 5.43% to 0.32%, which also indicated the nitrosation stability of nitrated granular sludge was better.

## 0 引言

自养脱氮工艺是基于亚硝化反应和厌氧氨氧化反应的新型脱氮工艺<sup>[1]</sup>. 与传统的硝化-反硝化脱氮工艺相比, 自养脱氮工艺具有节省曝气能耗、无需外加碳源、污泥产量低和脱氮效率高等优点<sup>[2-3]</sup>. 目前, 全球已建成并正在运行100多座采用自养脱氮工艺的水厂<sup>[4]</sup>, 但这些水厂处理的都是高氨氮污水. 如果自养脱氮工艺成功应用于常温低氨氮城市生活污水的处理, 可使污水处理厂的能源自给率达到90%, 这将是污水处理工艺技术的重大突破<sup>[5-7]</sup>.

要实现这一目标, 稳定的亚硝化反应是基础, 还必须解决自养污泥流失和亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>B</sub>)不易被抑制的问题. 亚硝化颗粒污泥是一种具有亚硝化性能的好氧颗粒污泥, 它具有沉降性能好、单位体积微生物量大、抗冲击负荷能力强和亚硝化性能稳定等优点, 可以很好地解决以上两个问题, 为实现稳定亚硝化提供了可能. 国内外研究者对此展开了很多研究, 但主要集中在序列间歇式活性污泥法SBR反应器中<sup>[8-10]</sup>, 对连续流亚硝化颗粒污泥的研究较少且偏重工艺<sup>[11]</sup>, 关于连续流反应器中亚硝化颗粒污泥的微生物特征还未见报道. 因此, 本文拟采用高通量测序技术, 对曝气上流式污泥床(AUSB)中亚硝化颗粒污泥的微生物特征进行研究, 从微观的角度分析常温低氨氮条件下实现稳定亚硝化的原因, 以期推动自养脱氮工艺在低氨氮城市污水处理领域中的应用.

## 1 材料与方法

### 1.1 主要试剂与设备

主要试剂: NaHCO<sub>3</sub>, HgI<sub>2</sub>, KI, NaOH, C<sub>4</sub>O<sub>6</sub>H<sub>4</sub>KNa, C<sub>12</sub>H<sub>14</sub>N<sub>2</sub>·2HCl, C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S, NH<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>H和HCl, 均为分析纯, 购自福晨(天津)化学试剂有限公司.

主要仪器: UV755B型紫外可见分光光度计, 上海佑科仪器仪表有限公司产; 5B-6CV8.0型COD测定仪, 北京连华科技发展有限公司产; Multi 340型水质多参数测定仪, 德国WTW公司产.

### 1.2 实验装置

实验所用AUSB反应器由有机玻璃制成, 内径100 mm, 高1800 mm, 总容积20 L, 有效容积12 L, 实验装置简图见图1. 由图1可知, 反应器底部设有进水口和曝气盘, 采用蠕动泵连续进水, 用转子流量计调节曝气量, 水流和曝气方向为上向流. 反应器顶部出水区装有可分别分离气体、液体、固体的三相分离器 and 出水口.

### 1.3 生活污水和污泥样品的主要指标及其测定方法

反应器接种絮状污泥后开始进生活污水, 水温为18~24℃, 主要水质指标如下: COD 220~460 mg/L, 氨氮60~100 mg/L, 亚硝酸盐氮0~1 mg/L, 硝酸盐氮0~3 mg/L, 碱度(以CaCO<sub>3</sub>计)404~542 mg/L, pH值7.2~7.4.

实验中量取接种的絮状污泥样品(AU1)和稳定运行的亚硝化颗粒污泥样品(AU2)各10 mL, 参照文献[10]的方法提取DNA, 进行高通量测序. AU1取自某污水处理厂曝气池,

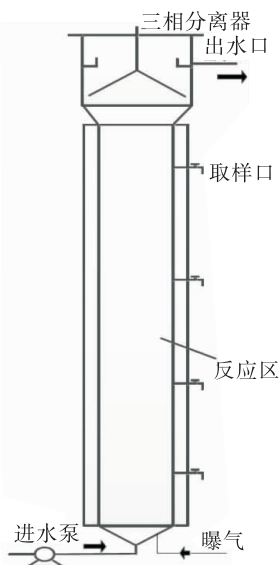


图1 实验装置简图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental reactor

并经 SBR 反应器高氨氮(200 mg/L)驯化,使其亚硝化率(亚硝酸盐氮生成量/亚硝酸盐氮生成量和硝酸盐氮生成量之和)维持在 90% 左右,污泥平均粒径为 207  $\mu\text{m}$ . AU2 取自反应器稳定运行期间(接种污泥后第 65 d),其亚硝化率在 90% 左右,污泥平均粒径为 518  $\mu\text{m}$ .

氨氮的测定采用纳氏试剂分光光度法(测定波长 420 nm),亚氮测定采用 N-1-萘基乙二胺分光光度法(测定波长 540 nm),硝氮的测定采用紫外分光光度法(测定波长 220 nm 和 275 nm);COD 采用快速消解法测定;溶解氧、pH 值和温度采用水质多参数测定仪测定.

#### 1.4 微生物特征分析方法

将所提取的 DNA 样品送交上海生工生物工程技术有限公司进行高通量测序. 高通量测序 PCR 所用的引物为 Miseq 测序平台的 V3-V4 通用引物 341F/805R(融合 341F: CCTA-CACGACGCTCTCCGATCTNCCTACGGG NGCC WGCAG; 融合 805R: GACTGGAGTTCCTTG-GCACC CGAGA AT TCCAGACTA CHVGGG-TATCTAATCC). PCR 体系如下: 10 ng 的 DNA 模板, 5  $\mu\text{L}$  的  $10 \times$  buffer, 0.5  $\mu\text{L}$  的 dNTPs

(10 mmol/L), 0.5  $\mu\text{L}$  的正义引物和反义引物(50  $\mu\text{mol/L}$ ), 0.5  $\mu\text{L}$  的 Plantium Taq 酶(5 U/ $\mu\text{L}$ ), 无菌水补至 50  $\mu\text{L}$ . PCR 结束后,对 PCR 产物进行琼脂糖电泳,采用琼脂糖回收试剂盒(cat:SK8131)对 DNA 进行回收. 回收产物用 Qubit 2.0 定量,根据测得的 DNA 浓度,将所有样品按照 1:1 的比例进行混合,充分振荡至其均匀. 该混合样品可用于后续样品建库(加测序标签)与测序. 所得序列与 Silva 数据库比对,genus 相似度值设为 0.95, phylum 水平设为 0.8.

## 2 结果与讨论

### 2.1 微生物种群多样性变化

经高通量测序后, AU1 获得 15 143 条有效序列, AU2 获得 13 486 条有效序列. 对获得的序列进行聚类分析,将相似性为 97% 的序列划分为同一个操作分类单元(OTU),每个 OTU 接近一个微生物的物种. AU1 中的 OTU 数量为 758 个, AU2 中的 OTU 数量为 890 个,其中,有 329 个 OTU 是两个样品共有的,有 429 个 OTU 被淘洗出反应器,产生了 561 个新的 OTU. 这表明进水水质由高氨氮向低氨氮转变,污泥状态由絮状污泥向颗粒污泥转变的过程中,污泥的微生物种群特征发生了明显的变化.

要分析反应器的种群多样性,只分析 OTU 的数量不够准确,还要考虑每个 OTU 中序列的数量. Shannon(香农)指数是衡量微生物多样性的一个指标,实际公式为  $H = - \sum P_i \times \ln P_i$ ,其中  $P_i$  为各种群物种数与样本总物种数的比值. 图 2 为污泥样品中微生物的 Shannon 指数. 从图 2 可以看出,随着序列数量的增加,种群多样性变化趋于平缓,这表明有效序列的数量足够进行分析. AU1 的 Shannon 指数为 3.869, AU2 的 Shannon 指数为 4.590. 由于 AU1 是在高氨氮无有机物条件下对其亚硝化性能进行驯化,

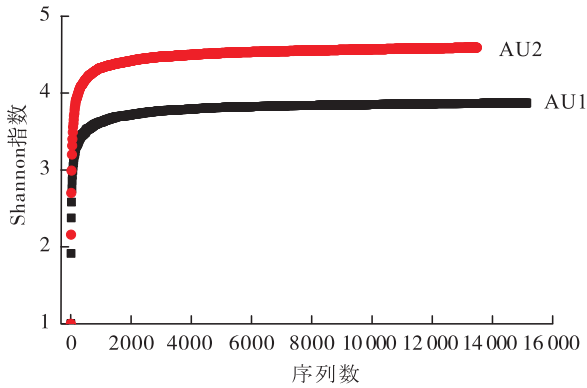


图2 污泥样品中微生物的 Shannon 指数

Fig. 2 The Shannon index of microorganisms in sludge samples

所以其微生物多样性较少. 虽然颗粒化过程理论上会降低污泥的微生物种群多样性, 但是生活污水有机物的引入会促使异养菌生长, 因此, AU2 中的微生物种群多样性比 AU1 中的显著.

## 2.2 门水平的微生物种群结构

图3为污泥样品在门水平层级上的微生物特征. 由图3可以看出, 通过与 Silva 数据库比对, AU1 和 AU2 中, 除了未分类微生物 (unclassified) 外, 在门水平相对丰度排前 10 位的微生物是一样的, 只是所占比例的排位有所变化, 其中变形菌门 (*Proteobacteria*) 的相对丰度由 67.52% 减少到 35.92%, 疣微菌门 (*Verrucomicrobia*) 的相对丰度由 5.48% 减少到 4.54%, 拟杆菌门 (*Bacteroidetes*) 的相对丰度由 5.31% 增加到 23.92%, 浮霉菌门 (*Planctomycetes*) 的相对丰度由 3.20% 减少到 1.25%, 绿菌门 (*Chlorobi*) 的相对丰度由 2.20% 增加到 7.76%, 厚壁菌门 (*Firmicutes*) 的相对丰度由 2.01% 减少到 1.12%, 异常球菌-栖热菌门 (*Deinococcus-Thermus*) 的相对丰度由 1.68% 减少到 0.20%, 绿弯菌门 (*Chloroflexi*) 的相对丰度由 1.55% 增加到 2.30%, 酸杆菌门 (*Acidobacteria*) 的相对丰度由 1.41% 增加到 2.78%, 芽单胞菌门 (*Gemmatimonadetes*) 的相对丰度由

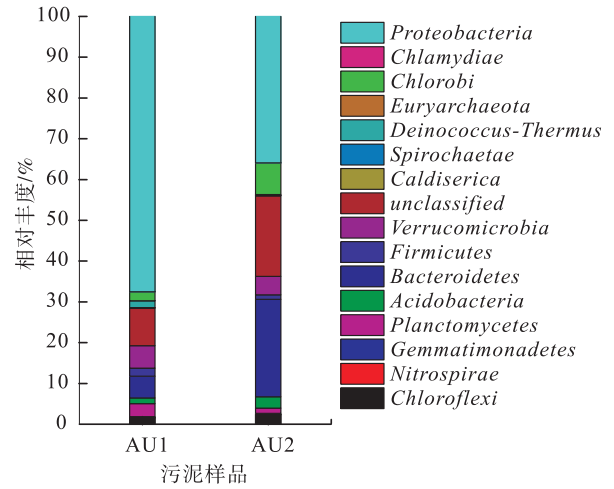


图3 污泥样品在门水平层级上的微生物特征

Fig. 3 The microbial characteristics of sludge samples at the Phylum level

0.23% 增加到 0.27%. 其中 *Proteobacteria* 在 AU1 和 AU2 中都处于首位, 表明 *Proteobacteria* 细菌与污水处理密切相关, 这与已有研究中的结论一致<sup>[12]</sup>. *Proteobacteria* 的相对丰度在 AU2 中所占比例下降了 31.6%, 这也表明在引入生活污水后, 反应器的微生物群落发生了较大变化, 多样性增强, 单一菌种所占比例下降明显. 在 AU2 中 *Bacteroidetes* 上升到第二位, 是因为反应器引入的生活污水包括人类粪便污水, 而 *Bacteroidetes* 是人类粪便中的主要菌群. *Planctomycetes* 一般与厌氧氨氧化相关, 引入生活污水后, 反硝化菌与其竞争, 导致其所占比例减少. *Chlorobi* 为不产氧的光合细菌, 可以利用硫化物作为电子供体, 进行光合作用, 而生活污水中含有较多硫元素, 故其所占比例增加. *Deinococcus-Thermus* 是一类在极端环境中生长的细菌, AU1 处在高氨氮条件下, 故其所占比例较大; AU2 处在氨氮浓度较低条件下, 其他门的细菌更易生长, 其所占比例下降. 除以上几个门以外, 其他门的细菌所占比例变化不大.

## 2.3 属水平的微生物种群结构

图4为污泥样品中的优势菌属对比图. 由



图4可以看出,AU1和AU2中相对丰度排名前十的优势菌属中,*Arenimonas*属<sup>[13]</sup>的相对丰度所占比例由31.64%减少到4.26%,*uncultured\_Caulobacteraceae*属<sup>[14]</sup>的相对丰度由3.03%减少到0.08%,它们均属于好氧异养菌,主要功能是降解有机物.引入生活污水后,如果优势菌属所占比例下降明显,其原因可能是这个菌属的细菌主要降解内源呼吸的有机物,在其他简单有机物较多时失去竞争优势.*Chthoniobacter*属<sup>[15]</sup>的相对丰度由4.21%减少到2.19%,*Limnobacter*属<sup>[16]</sup>的相对丰度由3.51%减少到2.54%,它们属于好氧异养菌,其所占比例下降与污泥样品整体的微生物多样性增加有关.*Azoarcus*属的相对丰度由3.63%减少到0.25%,属于兼性反硝化菌<sup>[17]</sup>,适合在好氧和厌氧交替的絮状污泥中生长;由于AU2内部的结构适合专门的缺氧反硝化菌的生长,其所占比例下降.*Truepera*属的相对丰度由1.68%减少到0.20%,其属于反硝化菌<sup>[18]</sup>,适合在内源

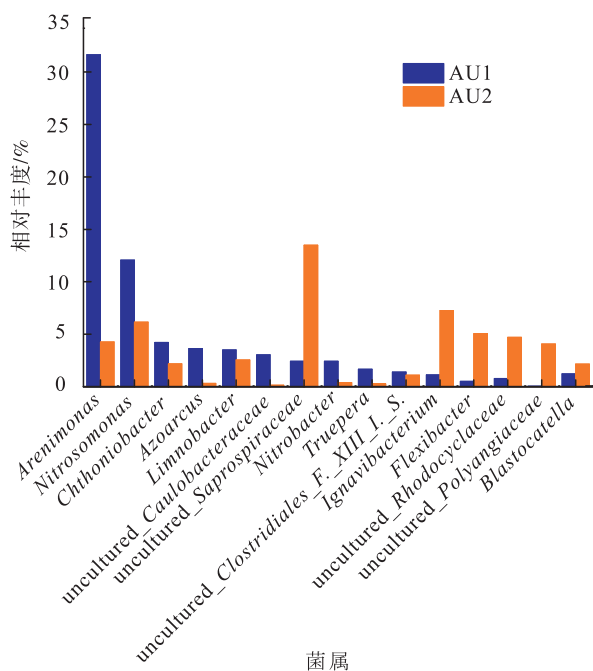


图4 污泥样品中的优势菌属对比图

Fig.4 The comparative map of dominant bacteria of sludge samples

反硝化的条件下生长,引入生活污水后,其所占比例下降明显.*uncultured\_Clostridiales\_F.\_XIII.1.\_S.*属<sup>[19]</sup>的相对丰度由1.41%减少到1.02%,其属于厌氧异养菌,其占比下降与污泥样品整体的微生物多样性增加有关.以上菌属所占比例的下降,表明这些菌属不太适应常温低氨氮的水质条件和AU2的颗粒结构.

*uncultured\_Saprospiraceae*属的相对丰度由2.44%增加到13.5%,其属于异养菌<sup>[20]</sup>,其占比在AU2中处于首位,表明这种细菌非常适合生长在AU2中.*Ignavibacterium*属的相对丰度由1.14%增加到7.27%,其属于反硝化菌<sup>[21]</sup>,其占比在AU2中排名第二,表明这种细菌在AU2中是占优势的反硝化菌属.*Flexibacter*属的相对丰度由0.44%增加到5.05%,其属于好氧异养菌<sup>[22]</sup>,表明这种细菌非常适合生长在生活污水中.*uncultured\_Rhodocyclaceae*属的相对丰度由0.72%增加到4.7%,其属于反硝化菌<sup>[23]</sup>,同时还有利于污泥絮凝<sup>[24]</sup>,这使得其在AU2中的比例增加.*uncultured\_Polyangiaceae*属的相对丰度由0.01%增加到4.08%,其属于可降解死细胞的异养菌<sup>[25]</sup>,同时还可以分泌多种代谢产物,有利于维持AU2结构的稳定.*Blastocatella*属的相对丰度由1.22%增加到2.17%,其属于异养菌,同时还有利于污泥絮凝<sup>[24]</sup>.以上菌属所占比例都有所增加,而且很多都是从非优势菌属变成优势菌属,表明这些菌属非常适应常温低氨氮的水质条件,其中有很多菌属的功能还有利于维持AU2的结构.

*Nitrosomonas*属的相对丰度由12.08%减少到6.15%,其属于好氧氨氧化菌(AOB),主要功能是将氨氮氧化成亚硝酸盐氮,是亚硝化工艺中最重要的功能菌属.由于进水的氨氮浓度降低,同时有机物浓度增加,促使异养菌生长,*Nitrosomonas*属的相对丰度所占比例下降,其占比在AU2中排名第三,表明虽然存在好氧

异养菌的竞争,但 AOB 仍然是 AU2 中的优势菌属。*Nitrobacter* 属的相对丰度由 5.43% 减少到 0.32%, 属于亚硝酸盐氧化菌 (NOB), 主要功能是将亚硝酸盐氮氧化成硝酸盐氮, 是亚硝化工艺中需要抑制的菌种。虽然 AU1 的亚硝化率在 90% 以上, 但是高氨氮所产生的高游离氨只是抑制了 NOB 的活性, 并没有将其淘洗出反应器, NOB 的占比依旧很高, 这就使得 AU1 的亚硝化具有不稳定性。而在 AU2 中, NOB 的占比比较低, 这也表明 AU2 具有更好的亚硝化稳定性。以上两种菌属是亚硝化反应中最受关注的两种菌属, AOB 是完成亚硝化反应的基础, NOB 是破坏亚硝化稳定性的重要因素。从样品中它们占比的变化情况可知, AU2 的亚硝化稳定性比 AU1 更好。

#### 2.4 生活污水稳定亚硝化的原因分析

对比两种污泥所处的高氨氮条件, AUSB 反应器中 AU2 失去了高游离氨抑制 NOB 的有效手段, 但反应器不仅在宏观效果上有稳定的高亚硝化率, 在微观的微生物种群占比方面也展示出更好的亚硝化稳定性。究其原因, 主要有以下几个方面: 1) 反应器的进水采用的是生活污水, 其中含有大量有机物, 反应器进水的 COD 为 220 ~ 460 mg/L, 好氧异养菌降解有机物会消耗大量的溶解氧, 同时形成颗粒局部低氧的微环境, NOB 在与好氧异养菌和 AOB 竞争溶解氧中处于劣势地位。有机物的存在还有利于反硝化菌的生长, NOB 在与反硝化菌竞争亚硝酸盐氮中也处于劣势地位。而 NOB 生长的两种底物是溶解氧和亚硝酸盐氮, 它同时受到这两种底物的竞争性抑制, 使得种群所占比例迅速下降, AUSB 反应器中亚硝化性能更加稳定。2) AU2 的颗粒结构也有利于维持亚硝化性能。AU2 的颗粒外层生长的是对氧亲和力最高的好氧异养菌, 它能消耗溶解氧并降解有机物。同时 AU2 沿其粒径方向存在传质阻力, 使得颗粒次

外层形成低溶解氧的环境, 有利于使生长在次外层的 AOB 在与 NOB 的竞争中取得优势。颗粒内部的厌氧区域也有利于反硝化菌的生长, 既可以与 NOB 竞争亚硝酸盐氮, 又可以将 NOB 产生的硝氮去除, 保持反应器宏观亚硝化率的稳定。3) AU2 的沉降性能极好, 可以有效防止污泥的流失, 保持 AOB 种群数量的稳定。以上因素共同作用, 使得 AUSB 反应器中的颗粒污泥可以实现常温低氨氮条件下稳定的亚硝化。

### 3 结论

本文采用高通量测序技术, 对比分析了 AU1 和 AU2 中微生物种群特征, 得出如下结论:

1) AU1 的 Shannon 指数为 3.869, AU2 的 Shannon 指数为 4.590, 表明 AU2 的微生物种群多样性比 AU1 显著。

2) 污泥中 *Nitrosomonas* 菌属的相对丰度 AU1 为 12.08% 而 AU2 为 6.15%, *Nitrobacter* 菌属的相对丰度 AU1 为 5.43% 而 AU2 为 0.32%, 这表明 AU2 的亚硝化稳定性比 AU1 更好。究其原因, 主要是进水中含有大量有机物, 并且 AU2 的颗粒结构和良好的沉淀性能也有利于维持污泥的亚硝化稳定性。

本文的研究结果为亚硝化反应器的宏观调控提供了微观基础, 将其用于工程实践, 可进一步推动自养脱氮工艺在低氨氮城市污水处理领域的应用。

#### 参考文献:

- [1] SIEGRIST H, SALZGEBER D, EUGSTE J, et al. Anammox brings WWTP closer to energy autarky due to increased biogas production and reduced aeration energy for N-removal[J]. *Water Science and Technology*, 2008, 57(3):383.
- [2] VAN DONGEN U, JETTEN M S M, LOOSDRECHT M C M V. The SHARON®-anam-

- mox<sup>®</sup> process fortreatment of ammonium rich wastewater[J]. *Water Science and Technology*, 2001, 44(1):153.
- [3] THIRD K A, SLIEKERS A O, KUENEN J G, et al. The CANON system (completely autotrophic nitrogen-removal over nitrite) under ammonium limitation: Interaction and competition between three groups of bacteria[J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2001, 24(4):588.
- [4] LACKNER S, GILBERT E M, VLAEMINCK S E, et al. Full-scale partial nitrification/anammox experiences—an application survey [J]. *Water Research*, 2014, 55:292.
- [5] 彭永臻, 邵和东, 杨延栋, 等. 基于厌氧氨氧化的城市污水处理厂能耗分析[J]. *北京工业大学学报*, 2015, 41(4):621.
- [6] KHIEWWIJIT R, TEMMINK H, RIJNAARTS H, et al. Energy and nutrient recovery for municipal wastewater treatment: How to design a feasible plant layout? [J]. *Environ Modell Softw*, 2015, 68:156.
- [7] SCHAUBROECK T, CLIPPELEIR H D, WEISENBACHER N, et al. Environmental sustainability of an energy self-sufficient sewage treatment plant: Improvements through DEMON and co-digestion[J]. *Water Res*, 2015, 74:166.
- [8] 高景峰, 周建强, 彭永臻. 处理实际生活污水短程硝化好氧颗粒污泥的快速培养[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(10):1604.
- [9] 钱飞跃, 刘小朋, 张念琦, 等. 协同调控 C/N 负荷提升好氧颗粒污泥亚硝化性能[J]. *化工学报*, 2016, 67(9):3946.
- [10] LIANG Y H, LI D, ZENG H P, et al. Rapid start-up and microbial characteristics of partial nitrification granular sludge treating domestic sewage at room temperature [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 196:741.
- [11] 吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 等. 连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制[J]. *环境科学*, 2016, 37(4):1472.
- [12] 季斌, 陈威, 樊杰, 等. 好氧颗粒污泥的微生物研究进展[J]. *科学通报*, 2017, 62(23):2639.
- [13] XU L, SUN J Q, LIU X, et al. *Arenimonas soli* sp. nov., isolated from saline-alkaline soil[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2017, 67(8):2829.
- [14] CORTÉS-LORENZO C, DEL MAR SÁNCHEZ-PEINADO M, OLIVER-RODRÍGUEZ B, et al. Two novel strains within the family Caulobacteraceae capable of degradation of linear alkylbenzene sulfonates as pure cultures [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, 85:62.
- [15] KANT R, VAN PASSEL M W J, PALVA A, et al. Genome sequence of *Chthoniobacter flavus* Ellin428, an aerobic heterotrophic soil bacterium[J]. *Journal of Bacteriology*, 2011, 193(11):2902.
- [16] NGUYEN T M, KIM J. *Limnobacter humi* sp. nov., a thiosulfate-oxidizing, heterotrophic bacterium isolated from humus soil, and emended description of the genus *Limnobacter* Spring et al. 2001 [J]. *Journal of Microbiology*, 2017, 55(7):508.
- [17] RHEE S K, LEE G M, YOON J H, et al. Anaerobic and aerobic degradation of pyridine by a newly isolated denitrifying bacterium [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, 63(7):2578.
- [18] 鲁航, 信欣, 管蕾, 等. 部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析[J]. *环境科学*, 2016, 37(12):4741.
- [19] VAN DEN BERG E M, ELISÁRIO M P, KUENEN J G, et al. Fermentative bacteria

- influence the competition between denitrifiers and DNRA bacteria[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017(8): 1684.
- [20] YUAN S S, GAO M M, ZHU F P, et al. Disintegration of aerobic granules during prolonged operation [J]. *Environmental Science-Water Research & Technology*, 2017, 3(4): 757.
- [21] LI E, LU S. Denitrification processes and microbial communities in a sequencing batch reactor treating nanofiltration (NF) concentrate from coking wastewater[J]. *Water Science and Technology*, 2017, 76(12): 3289.
- [22] MURAMATSU Y, KAMAKURA Y, TAKAHASHI M, et al. Reclassification of *Flexibacter tractuosus* NBRC 15981T as *Marivirga hare-nae* sp. nov. in the family Flammeovirgaceae [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2017, 67(6): 1937.
- [23] ISHII S, YAMAMOTO M, KIKUCHI M, et al. Microbial populations responsive to denitrification-inducing conditions in rice paddy soil, as revealed by comparative 16S rRNA gene analysis[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75(22): 7070.
- [24] 王晓用, 谭洪新, 罗国芝, 等. 生物絮凝反应器处理水产养殖废水的中试研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2016, 25(6): 884.
- [25] 李曙光. 粘细菌的环境分布、季节演替及其相互作用[D]. 济南: 山东大学, 2014.



引用格式:赵大洲. 改性香蕉皮对废水中  $\text{Pb}^{2+}$  的循环吸附性能研究[J]. 轻工学报, 2018, 33(4): 37-41.

中图分类号: X52; TQ041.8; TS97 文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1553.2018.04.005

文章编号: 2096-1553(2018)04-0037-05

# 改性香蕉皮对废水中 $\text{Pb}^{2+}$ 的循环吸附性能研究

## Study on the cyclic adsorption performance of $\text{Pb}^{2+}$ by modified banana peel

赵大洲

ZHAO Dazhou

陕西学前师范学院 化学与化工系, 陕西 西安 710100

Department of Chemistry and Chemical Engineering, Shaanxi Xueqian Normal University, Xi'an 710100, China

### 关键词:

改性香蕉皮;  $\text{Pb}^{2+}$ ; 循环吸附

### Key words:

modified banana peel;  
 $\text{Pb}^{2+}$ ; cyclic adsorption

**摘要:**以香蕉皮为原料用乙酸对其进行改性,得到改性香蕉皮吸附剂,将改性香蕉皮吸附剂用作吸附载体,考察其对废水中  $\text{Pb}^{2+}$  的循环吸附性能。结果表明:用乙酸对香蕉皮进行改性能明显提高其比表面积和孔体积,为废水中  $\text{Pb}^{2+}$  的吸附提供了有利的条件;改性香蕉皮吸附剂对废水中  $\text{Pb}^{2+}$  的吸附性能更好,吸附效率达到 97.9%, 4 次循环吸附后,其吸附效率仍可保持在 92.1%。

收稿日期: 2017-11-30

基金项目: 2017 年度基础教育教学改革专项课题项目(17JC002); 陕西学前师范学院双语教学示范课程《环境化学》资助项目; 陕西学前师范学院 2018 年公共通识教育选修课程《纳米科技与生活》建设资助项目; 陕西学前师范学院“基础化学实验”教学团队资助项目

作者简介: 赵大洲(1985—), 男, 山西省朔州市人, 陕西学前师范学院副教授, 博士, 主要研究方向为功能无机化合物的合成与应用。

**Abstract:** The banana peel was used as raw material and modified with acetic acid to obtain modified banana peel adsorbent. The modified banana peel adsorbent was used as adsorption carrier to investigate its cyclic adsorption performance of  $Pb^{2+}$  in wastewater. The results showed that the modification of banana peel with acetic acid could significantly increase the specific surface area and pore volume, and provide favorable conditions for the adsorption of  $Pb^{2+}$  in wastewater. The modified banana peel adsorbent had better adsorption capacity for  $Pb^{2+}$  in wastewater. The adsorption efficiency reached 97.9%, and the adsorption efficiency was still up to 92.1% after 4 cycles of adsorption.

## 0 引言

随着现代工业的飞速发展,人类的生存环境越发成为 21 世纪公众关注的焦点.除了目前全球都重视的雾霾问题外,含重金属离子的废水的污染问题同样是亟待解决的难题之一.含重金属离子的废水污染性非常强,即便其重金属离子含量不多,也会产生不容忽视的影响.重金属离子毒性具有一定的长期性与持续性,可以通过人类日常饮用水与食物链的不断积累、生物的浓缩、生物的放大等作用,对人类的健康构成威胁<sup>[1-3]</sup>.含  $Pb^{2+}$  的废水主要来源于电镀、涂料、塑料、印刷、农药、陶瓷、摄影、有色金属采选和冶炼、铅化合物工业、电池制造业等行业<sup>[4-7]</sup>.

正常人每日摄取  $Pb^{2+}$  的含量需控制在 0.1~0.15 mg,一旦超过该标准,就会使肾功能受损;会使体内糖、蛋白质代谢发生紊乱,引发尿蛋白症、糖尿病;会进入呼吸道,引起肺炎、肺气肿;会作用于消化系统,引起肠胃炎.铅中毒者常常伴有贫血,骨骼中有过量铅积累会使骨骼软化、变形、折断、萎缩,甚至会引起骨癌症.因此,迫切需要寻找一种低价且有效的处理方法使得废水中的  $Pb^{2+}$  含量达到排放标准.

常见的废水处理方法为化学法,包括化学沉淀法、离子交换法、电解法<sup>[8]</sup>等.这些方法存在成本高、有副作用等问题,因此,价廉环保的生物吸附法引起了研究者的广泛关注.生物吸附法常见的有果皮吸附法和藻类吸附法.果皮作为生活垃圾会对生活环境造成污染,也因

无法体现其作用而造成资源浪费.若能将果皮制成生物吸附材料,用于对废水中的重金属离子进行吸附处理,则可变废为宝,达到以废治废的目的. J. Anwar 等<sup>[9]</sup>进行了改性香蕉皮吸附剂的制备和对重金属  $Ge^{2+}$  和  $Pb^{2+}$  的吸附性能研究,其吸附量分别为 5.71 mg/g 和 2.18 mg/g. G. Annadurai 等<sup>[10]</sup>通过强酸处理香蕉皮对含  $Pb^{2+}$  废水进行吸附研究发现,在一定条件下具有可观的吸附量(7.97 mg/g).胡巧开等<sup>[11]</sup>利用香蕉皮吸附剂对工业废水中的重金属  $Cr^{6+}$  进行吸附研究,吸附效率可达 91.5%.冯宁川<sup>[12]</sup>研究了化学改性后橘子皮对重金属离子的吸附,实验结果表明,经过化学改性后的橘子皮在重金属离子的吸附上呈现出更高的适用性.鉴于此,本文拟研究改性处理后的香蕉皮吸附剂对废水中  $Pb^{2+}$  的循环吸附效果,以期废水处理吸附材料提供新的研究思路.

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂与仪器

主要试剂:KOH,  $HNO_3$ ,  $H_2SO_4$ , HCl, 国药集团有限公司产;异丙醇,冰乙酸,  $Pb(NO_3)_2$ , 北京化工厂产.以上均为分析纯.香蕉皮,二次蒸馏水,陕西学前师范学院化学实验室制.

主要仪器:JEOL JSM-6700 F 型场发射扫描电子显微镜,日本电子公司产; Nicolet Impact-410 FTIR 型红外光谱仪,美国 Nicolet 公司产; Perkin-Elmer 2400 CHN Elemental Analyzer 型元素分析仪,美国珀金埃尔默公司产. Micromeritics ASAP 2010 sorptometer 型自动

物理吸附仪,美国 Micromeritics 公司产。

## 1.2 实验方法

**1.2.1 香蕉皮改性** 首先称取 200 g 香蕉皮,将其洗净、剪碎置于 250 mL 去离子水中搅拌 1 h,离心分离,所得固体样品置于 55 °C 恒温烘箱中干燥 24 h 至恒重,研磨成粉末,得到香蕉皮吸附剂。然后称取 1 g 上述香蕉皮吸附剂样品,将其置于 12 mL 醇酸洗液 ( $V(\text{乙醇}):V(\text{乙酸})=5:1$ ) 中持续搅拌 6 h,离心分离;最后,将固体样品置于 90 °C 烘箱中干燥 24 h,得到改性香蕉皮吸附剂。

**1.2.2 改性香蕉皮吸附剂对废水中  $\text{Pb}^{2+}$  的循环吸附方法** 配制  $\text{Pb}^{2+}$  质量浓度为 600 mg/L 的  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  溶液;称取 0.1 g 改性香蕉皮吸附剂,置于 50 mL 上述  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  溶液中,调节溶液 pH 值为 6.5,常温下搅拌 7 h,离心分离,保存滤液,以待检测。吸附  $\text{Pb}^{2+}$  的改性香蕉皮吸附剂(改性香蕉皮吸附剂 -  $\text{Pb}^{2+}$ ) 分别经过 0.5 mol/L HCl 和 0.5 mL/L KOH 溶液处理后,调节溶液 pH 值为 6.5,以待循环使用。

**1.2.3 循环吸附能力表征** 取吸附后的滤液进行 ICP 检测,改性香蕉皮吸附剂对  $\text{Pb}^{2+}$  多次循环吸附能力的表征采用如下方法:

$$\eta = (C_i - C) / C_i \times 100\%$$

其中,  $\eta$  表示吸附效率,  $C_i$  和  $C$  分别表示初始溶液和吸附后溶液中  $\text{Pb}^{2+}$  的质量浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )。

## 1.3 测试条件

采用 SEM 对样品的表面形貌进行表征:将样品置于硅片上,喷金,加速电压 30 kV;使用 FTIR 对样品的结构进行分析:KBr 压片,室温下,测量范围 400 ~ 4000  $\text{cm}^{-1}$ ;  $\text{N}_2$  吸附 - 脱附数据采集在液氮条件下于 -196 °C 下进行实验,测试前样品经 150 °C 真空处理,比表面积采用 BET 方法计算,孔径分布采用 BJH 方法计算,孔容采用 t-plot 方法计算。

## 2 结果与讨论

### 2.1 样品表面形貌分析

图 1 为香蕉皮改性前后香蕉皮吸附剂的 SEM 图。从图 1 中可以清晰地观察到,二者均呈粗糙多孔结构。图 1b) 中内部插图 of 改性香蕉皮吸附剂的高分辨 SEM 图,由该图可以看出,改性香蕉皮吸附剂的多孔结构更为疏松,这为吸附  $\text{Pb}^{2+}$  提供了有利条件。

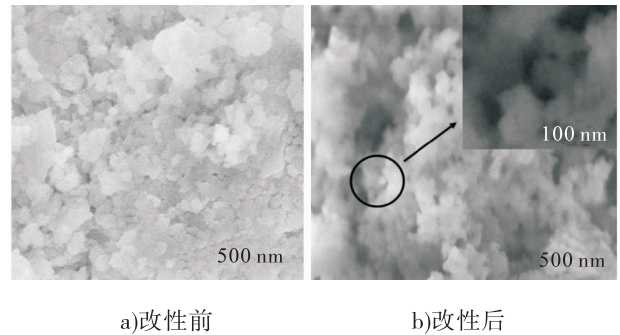


图 1 改性前后香蕉皮吸附剂的 SEM 图

Fig. 1 SEM images of banana peel adsorbent before and after modification

### 2.2 样品的结构分析

图 2 为香蕉皮吸附剂、改性香蕉皮吸附剂的 FTIR 图。由图 2 可知,二者在 3340 ~ 3650  $\text{cm}^{-1}$  处出现的较强衍射峰均归属于 -OH 的振动吸收峰,在 2850  $\text{cm}^{-1}$  和 2951  $\text{cm}^{-1}$  处出现的衍射峰均归属于 - $\text{CH}_x$  的对称和不对称吸收峰,在 1451  $\text{cm}^{-1}$  处出现的衍射峰归属于芳香环的吸收峰,与氧原子连接后,芳香环的反对称振动引起的吸收峰出现在 1559  $\text{cm}^{-1}$  处。从改性香蕉皮吸附剂的 FTIR 图可以明显观察到,在 1100  $\text{cm}^{-1}$  处出现的较强衍射峰归属于羧基中的 C=O 振动吸收峰,在 1250  $\text{cm}^{-1}$  处出现的较强衍射峰归属于羧基中的 C-OH 振动吸收峰,这说明香蕉皮已经成功被改性。

### 2.3 样品对废水中 $\text{Pb}^{2+}$ 的循环吸附性能分析

图 3 为香蕉皮吸附剂、改性香蕉皮吸附剂和改性香蕉皮吸附剂 -  $\text{Pb}^{2+}$  这三种样品的吸

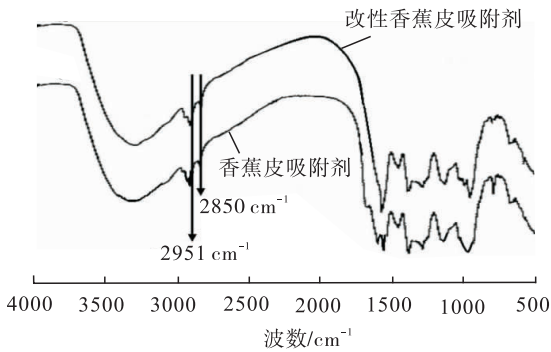


图2 改性前后香蕉皮吸附剂的 FTIR 图  
Fig. 2 FTIR spectra of banana peel adsorbent before and after modification

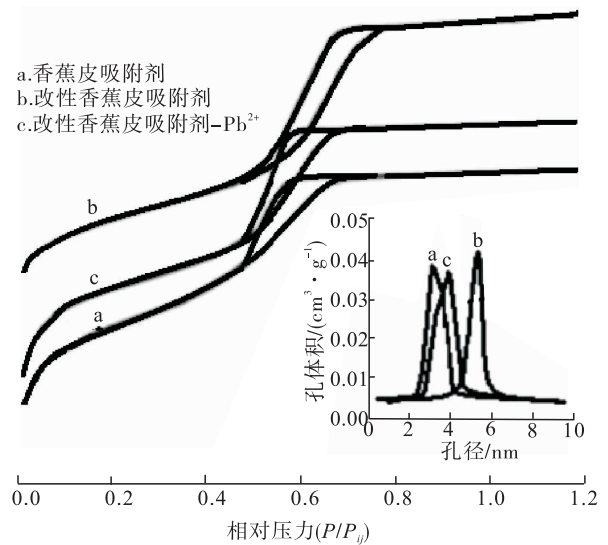


图3 改性前后香蕉皮吸附剂和  
改性香蕉皮吸附剂 - Pb<sup>2+</sup> 三种样品的  
吸附 - 脱附等温曲线图

Fig. 3 Adsorption-desorption isotherm curves of three samples of banana peel adsorbent before and after modification, modified banana peel adsorbent-Pb<sup>2+</sup>

附 - 脱附等温曲线图(内部的插图为三种样品对应的孔径分布曲线). 从图 3 中可以看出, 三种样品均属于 IV 型等温线, 孔径分布很窄, 表明三种样品均具有典型的介孔结构. 表 1 为这三种吸附剂样品的相关数据. 由表 1 可知, 香蕉皮吸附剂的比表面积、孔体积和平均孔径分别为 488 m<sup>2</sup>/g, 0.35 cm<sup>3</sup>/g 和 2.9 nm; 改性后, 其参数分别升高到 858 m<sup>2</sup>/g, 0.76 cm<sup>3</sup>/g 和 4.6 nm, 较大的比表面积和孔体积也为吸附 Pb<sup>2+</sup> 提供了有利的条件. 改性香蕉皮吸附剂吸附 Pb<sup>2+</sup> 后, 比表面积、孔体积和平均孔径分别下降到 508 m<sup>2</sup>/g, 0.52 cm<sup>3</sup>/g 和 3.3 nm.

表 1 三种吸附剂样品的相关数据

Table 1 Data on three adsorbent samples

样品	BET 比表面积 / (m <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> )	孔体积 / (cm <sup>3</sup> · g <sup>-1</sup> )	孔径 / nm
香蕉皮吸附剂	488	0.35	2.9
改性香蕉皮吸附剂	858	0.76	4.6
改性香蕉皮吸附剂 - Pb <sup>2+</sup>	508	0.52	3.3

表 2 香蕉皮改性前后的吸附数据

Table 2 The adsorption data of the banana peel before and after modification

项目	香蕉皮吸附剂	改性香蕉皮吸附剂循环吸附次数/次			
		1	2	3	4
初始 Pb <sup>2+</sup> 浓度 / (mg · L <sup>-1</sup> )	600	600	600	600	600
吸附后 Pb <sup>2+</sup> 浓度 / (mg · L <sup>-1</sup> )	54.5	12.5	19.0	35.4	47.5
吸附效率 / %	90.9	97.9	96.8	94.1	92.1

取吸附后的滤液进行 ICP 检测, 香蕉皮改性前后的吸附数据见表 2. 由表 2 可知, 香蕉皮改性前后的吸附剂对 Pb<sup>2+</sup> 离子的吸附效率分别为 90.9% 和 97.9%, 4 次循环吸附后的吸附效率可达 92.1%, 高于文献中的吸附效率 (90.2%)<sup>[9]</sup>, 这说明通过改性有效地提高了香蕉皮吸附剂对重金属 Pb<sup>2+</sup> 离子的吸附能力.

### 3 结论

本文用乙酸对香蕉皮吸附剂进行改性, 并以所得改性香蕉皮吸附剂作为吸附载体, 对废水中重金属离子 Pb<sup>2+</sup> 的吸附性能进行研究. 结果表明: 改性后的香蕉皮吸附剂的比表面积、孔

体积和平均孔径分别由原来的 488 m<sup>2</sup>/g, 0.35 cm<sup>3</sup>/g 和 2.9 nm 升高到 858 m<sup>2</sup>/g, 0.76 cm<sup>3</sup>/g 和 4.6 nm, 较大的比表面积和孔体



积为吸附  $\text{Pb}^{2+}$  提供了有利的条件. 通过改性能有效提高香蕉皮吸附剂对重金属  $\text{Pb}^{2+}$  离子的吸附能力, 改性后的香蕉皮吸附剂对  $\text{Pb}^{2+}$  离子的吸附效率由原来的 90.9% 升高到 97.9%, 4 次循环吸附后的吸附效率仍可达 92.1%, 高于文献中的吸附效率(90.2%).

利用改性香蕉皮吸附剂对废水中的重金属离子进行吸附, 为废水中重金属的处理提供了新的吸附材料, 是一项既环保又经济的举措, 具有很好的实践意义和推广价值.

### 参考文献:

- [1] 张淑琴, 童仕唐. 活性炭对重金属离子铅镉铜的吸附研究[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(4): 91.
- [2] ZHANG P Y, ZHANG Q, WHISTLER R. L-arabinose release from arabinoxylan and arabinogalactan under potential gastric acidities [J]. Cereal Chemistry, 2003, 80(3): 252.
- [3] 许振, 李云春, 姜友军, 等. 核桃壳粉对水溶液中  $\text{Pb}^{2+}$  的吸附[J]. 环境工程学报, 2012, 6(12): 4504.
- [4] 徐海生, 赵元凤, 吕景才. 水环境中重金属的生物积累研究及应用[J]. 四川环境, 2006, 25(3): 101.
- [5] 李宝磊, 朱天菊, 刘光全, 等. 实验室重金属废水
- 水处理研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(1): 75.
- [6] 李延秀, 刘学文, 马国立. 实验室废水处理装置研究与设计[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(15): 216.
- [7] 鲍金勇, 赵建国, 杨公明. 我国水果果皮的利用现状和前景[J]. 食品研究与开发, 2005, 20(1): 186.
- [8] KONG W, REN J, WANG S, et al. Removal of heavy metals from aqueous solutions using acrylic-modified sugarcane bagasse-based adsorbents: equilibrium and kinetic studies [J]. Bioresources, 2014, 9(2): 3184.
- [9] ANWAR J, SHAFIQUE U, UZ-ZAMAN W, et al. Removal of  $\text{Pb}(\text{II})$  and  $\text{Cd}(\text{II})$  from water by adsorption on peels of banana [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(6): 1752.
- [10] ANNADURAI G, JUANG R S, LEE D J. Adsorption of heavy metals from water using banana and orange peels [J]. Water Science and Technology, 2003, 47(1): 185.
- [11] 胡巧开, 余中山. 改性香蕉皮吸附剂对六价铬的吸附[J]. 工业用水与废水, 2012, 43(5): 67.
- [12] 冯宁川. 橘子皮化学改性及对重金属离子吸附行为的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.



引用格式:张肖静,傅浩强,张楠,等.低基质厌氧氨氧化滤柱的快速启动及稳定运行[J].轻工学报,2018,33(4):42-49.

中图分类号:X703.1;TS97 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2018.04.006

文章编号:2096-1553(2018)04-0042-08

# 低基质厌氧氨氧化滤柱的快速启动及稳定运行

## Rapid start-up and stable operation of low-matrix Anammox filtration for treating low nitrogen sewage

张肖静<sup>1</sup>,傅浩强<sup>1</sup>,张楠<sup>1</sup>,张玉国<sup>2</sup>,翟含飞<sup>1</sup>,郑淑滑<sup>1</sup>,张涵<sup>1</sup>,  
郑凯伟<sup>1</sup>

ZHANG Xiaojing<sup>1</sup>,FU Haoqiang<sup>1</sup>,ZHANG Nan<sup>1</sup>,ZHANG Yuguo<sup>2</sup>,ZHAI Hanfei<sup>1</sup>,  
ZHENG Shuhua<sup>1</sup>,ZHANG Han<sup>1</sup>,ZHENG Kaiwei<sup>1</sup>

1. 郑州轻工业学院 环境污染治理与生态修复河南省协同创新中心,河南 郑州 450001;

2. 安阳化学工业集团有限责任公司,河南 安阳 455000

1. He'nan Collaborative Innovation Center of Environmental Pollution Control and Ecological Restoration, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. Anyang Chemical Industry Group Co., Ltd., Anyang 455000, China

**摘要:**在 21.0~26.0 ℃ 条件下,将普通活性污泥接种于火山岩生物滤柱,通过调整三个实验阶段的参数,研究 Anammox 反应器的快速启动及其在低氨氮条件下的稳定运行策略。结果表明:第 I 阶段为高氨氮、高碱度运行,水力停留时间从 1.7 h 增加至 6 h,总氮去除效果不理想,反应器没有启动成功;第 II 阶段为高氨氮、低碱度运行并添加预过滤装置降低进水溶解氧,第 101 d 时,反应器出水出现明显的脱氮效果,总氮去除率约为 40%,反应器启动成功;第 III 阶段为低氨氮、低碱度稳定运行,总氮去除率最高达 89%,出水总氮质量浓度为 11 mg/L,出水氨氮达到《城镇污水处理厂污染物综合排放标准》(GB18918—2002)一级 A 出水标准,在该条件下,通过控制较低 DO 值和适宜的 pH 值,可在一定温度范围内实现低基质 Anammox 反应器的快速启动及稳定运行。

### 关键词:

厌氧氨氧化;火山岩生物滤柱;溶解氧;废水处理

### Key words:

Anammox; volcanic rock biological filtration; DO; wastewater treatment

收稿日期:2018-02-05

基金项目:国家自然科学基金项目(41701569);河南省大学生创新实验项目(201710462002)

作者简介:张肖静(1986—),女,河南省开封市人,郑州轻工业学院讲师,博士,主要研究方向为环境污染治理新技术。

**Abstract:** The ordinary activated sludge was inoculated into the volcanic rock biological filtration at 21.0 ~ 26.0 °C. The parameters of the three experimental stages were adjusted to investigate the rapid start-up of the Anammox reactor and its stable operation strategy under low ammonia nitrogen conditions. The results showed that the first stage was high ammonia nitrogen and high alkalinity operation, the hydraulic retention time increased from 1.7 h to 6 h, the total nitrogen removal effect was not satisfactory, the reactor didn't start successfully; the second stage was high ammonia nitrogen and low alkalinity. The pre-filtration unit was operated and added to reduce the dissolved oxygen in the influent. On the 101st day, the effluent of the reactor showed obvious denitrification effect, the total nitrogen removal rate was about 40%, the reactor started successfully. The third stage was stable operation with low ammonia nitrogen and low alkalinity, the total nitrogen removal rate was up to 89%, the total effluent nitrogen was 11 mg/L, and the effluent nitrogen reached the first-class A effluent standard of the "Integrated Emission Standard for Pollutants in Urban Sewage Treatment Plants" (GB18918-2002). By controlling the lower DO value and the appropriate pH value, the rapid start-up and stable operation of the low-matrix Anammox reactor could be achieved within a certain temperature range.

## 0 引言

近年来,随着污水处理资源化要求的提出,对污水处理的要求不断提高,厌氧氨氧化(Anammox)工艺在主流废水-城市污水处理中的应用受到越来越多的关注.所谓 Anammox,是指近年来发现的一种新型脱氮路径,即在厌氧条件下,厌氧氨氧化菌以氨氮作为电子供体,亚硝酸盐氮为电子受体,将氨氮和亚氮同时转化为氮气,进而完成脱氮的过程.相比传统的硝化-反硝化工艺,以 Anammox 反应为主体单元的自养脱氮工艺可以节省 60% 的能耗、90% 的温室气体排放和 100% 的有机碳源,同时具有污泥产量低、无二次污染等优点<sup>[1-3]</sup>,被认为是目前最为经济有效的脱氮工艺.

研究表明,Anammox 微生物适合在高温、高氨氮条件下生长<sup>[4]</sup>.然而 Anammox 菌生长缓慢,尤其在常温低氨氮的城市污水中更加难以富集,导致该条件 Anammox 工艺的启动及稳定运行非常困难.因此,如何在常温、低氨氮条件下运行 Anammox 工艺仍有待进一步研究<sup>[5-6]</sup>.Anammox 生物滤柱能够承受低基质所带来的高水力负荷并实现对低氨氮进水的处理<sup>[7]</sup>,因此,本文拟采用上向流火山岩生物滤柱反应器,

研究 Anammox 反应器的快速启动,以及在低氨氮条件下的稳定运行策略,以期推动该工艺在常温、低氨氮废水处理中的应用,实现主流废水的高效低耗处理.

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂与仪器

主要试剂:( $\text{NH}_4$ )<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (优级纯), NaNO<sub>2</sub> (优级纯), NaHCO<sub>3</sub> (分析纯), MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O (分析纯), KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (分析纯), CaCl<sub>2</sub> (分析纯), 以上试剂均购自阿拉丁试剂有限公司.

主要仪器:TU1810 型紫外分光光度计,北京普析通用仪器有限公司产;Multi3430 型便携式多参数水质测定仪,德国 WTW 公司产.

### 1.2 接种污泥

接种污泥为普通活性污泥,混合液悬浮固体 MLSS (mixed liquor suspended solids) 为 4.2 g/L,混合液挥发性悬浮固体 MLVSS (mixed liquid volatility suspended solids) 为 3.1 g/L,接种量为 1 L.实验用水为人工配水,主要成分如下:( $\text{NH}_4$ )<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 为 471.4 ~ 235.7 mg/L,提供氨氮;NaHCO<sub>3</sub> 为 2 685.3 ~ 1 678.3 mg/L,提供碱度;MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 为 150 mg/L;KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 为 68 mg/L;CaCl<sub>2</sub> 为 68 mg/L.

### 1.3 反应器装置

本实验装置为一上向流火山岩生物滤柱,反应器材质为聚丙烯;滤柱高为 20.4 cm,直径为 12.5 cm,有效容积为 2 L;填料为火山岩(粒径为 0.6~0.8 mm),填料高度为 12 cm,填料填充比为 60%。废水通过蠕动泵抽至生物滤柱底部,流经火山岩填料后经顶部排出。反应器设置及其工作原理如图 1 所示,Anammox 滤柱的运行参数见表 1。

整个实验包含三个阶段:其中阶段 I 为高氨氮、高碱度运行;阶段 II 为高氨氮、低碱度运行;阶段 III 为低氨氮、低碱度的稳定运行。

### 1.4 分析方法

氨氮测定采用纳氏试剂分光光度法;亚氮

测定采用 N-1-萘基乙二胺分光光度法;硝氮测定采用紫外分光光度法;pH 值、DO(溶解氧)值和温度采用 WTW 多参数测定仪测定。

主要计算公式如下:

$$\text{氨氮去除率} = \frac{\text{进水氨氮质量浓度} - \text{出水氨氮质量浓度}}{\text{进水氨氮质量浓度}} \times 100\%$$

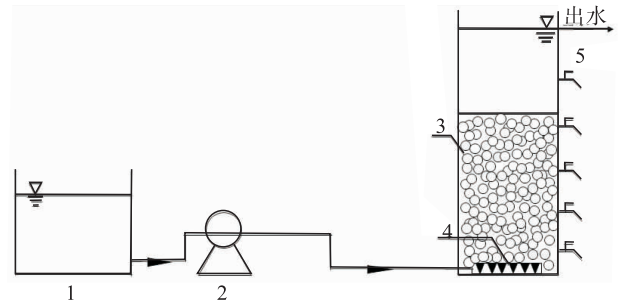
$$\text{总氮去除率} = \frac{\text{进水总氮质量浓度} - \text{出水总氮质量浓度}}{\text{进水总氮质量浓度}} \times 100\%$$

$$\text{总氮去除负荷} = \frac{\text{进水总氮质量浓度} - \text{出水总氮质量浓度}}{\text{容积/流量}}$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 高氨氮、高碱度启动运行阶段

在反应的第 I 阶段,为快速培养出 Anammox 菌,反应器采用高氨氮高碱度的启动方式,运行总时间为 60 d。启动初期采用较大流速,当水力停留时间(HRT)为 1.7 h 时,污泥外观无变化,污泥量亦无明显变化。图 2 为阶段 I 反应器内三氮变化情况。由图 2 可知,仅有一小部分的氨氮转化为亚氮,总氮去除率处于低水平状态,这说明刚接种的污泥活性较差。在高氨氮的进水条件下,微生物的活性较差,导致其繁殖速率慢,微生物生长量少,分泌的胞外聚合物较



1. 进水箱 2. 进水泵 3. 火山岩填料 4. 布水环 5. 取样口

图 1 反应器设置及其工作原理图

Fig. 1 The setup and operating principle schematic of the reactor

表 1 Anammox 滤柱的运行参数

Table 1 Operating parameters of Anammox filter column

阶段	运行时间/d	进水氨氮质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	进水亚氮质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	碱度/(mg·L <sup>-1</sup> )	水力停留时间(HRT)/h	进水 pH 值	出水 pH 值	出水温度/°C	调整策略
I	1~15	100.21	99.27	1600	1.7	7.97	8.00	26.0	—
	16~45	99.89	99.93	1600	3	8.00	8.05	25.3	延长 HRT
	46~60	99.82	99.91	1600	6	7.99	7.99	26.0	延长 HRT
	61~75	100.21	101.23	1200	6	7.90	7.97	23.4	降低碱度
II	76~107	100.03	99.58	1200	6	7.92	7.99	23.7	滤柱预过滤(降 DO)
	108~131	101.22	99.60	1200	6	7.90	7.97	23.4	正常运行
III	132~165	49.76	49.33	1000	3	7.87	7.94	21.4	低氨氮运行

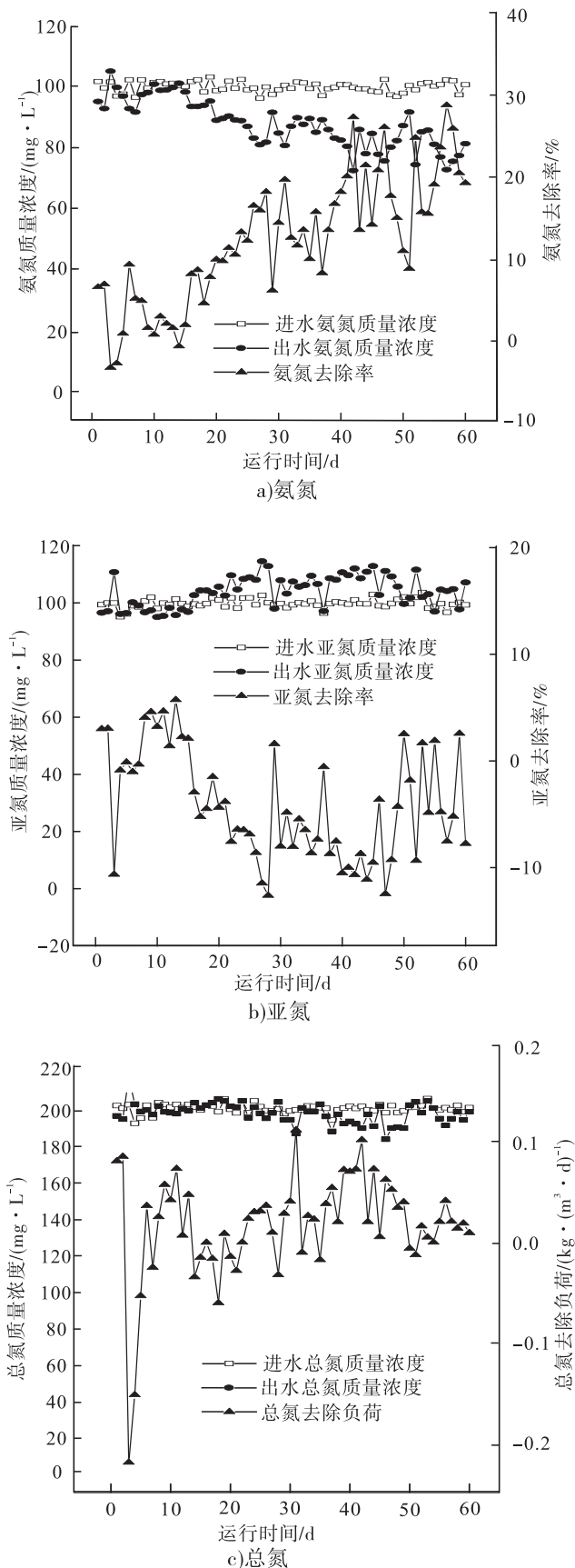


图2 阶段I反应器内三氮变化情况

Fig. 2 The trinitrogen changes of phase I in the reactor

少,污泥无法聚集到一起,表现为部分微生物被冲出反应器,微生物浓度减小.此外,在新环境中,微生物需要适应环境,部分微生物无法适应新环境而死亡.在第3 d时,出水总氮质量浓度高于进水总氮,这可能是由于一部分微生物死亡解体导致系统内总氮含量增加.

在第16 d时,为避免微生物流失,增加 *HRT* 至3 h,反应器继续运行,由图2可知,此阶段氨氮有部分被氧化.出水氨氮质量浓度较第 I -1 阶段有所降低,由进水的100 mg/L降至80 mg/L左右,而亚氮质量浓度不仅没有降低反而上升,出水亚氮质量浓度达到110 mg/L,出水总氮质量浓度和进水总氮质量浓度基本一致,因此,此阶段 Anammox 菌仍不具备活性.亚氮的增加可能是进水中带有部分溶解氧,将氨氮氧化为亚氮所致.同时通过测定出水硝氮含量有所上升可知,在该条件下亚硝化菌 NOB (Nitrite-oxidizing bacteria) 表现出一定的活性.

第46 d继续延长 *HRT* 至6 h,氨氮进一步被氧化为亚氮,导致出水亚氮质量浓度增加,同时出水总氮质量浓度开始出现波动.吴立波等<sup>[8]</sup>研究表明,在滤柱反应装置内,通过调节 *HRT* 发现,当 *HRT* > 8 h 时,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的去除率都在80%以上.张健等<sup>[9]</sup>研究表明,当 *HRT* 为6 h 时,系统能取得较理想的出水效果, TN 去除率为76%,处理能力最高, TN 容积去除负荷为  $1.82 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ . 但本实验结果表明,在 *HRT* 为6 h 的运行条件下,总氮去除效果仍未达到理想状态.

Anammox 菌代谢慢,生长周期长,随着 *HRT* 的延长,反应器并没有启动成功,说明影响启动的因素并不是 *HRT*,初步认为可能是由于进水中碱度过高所致,因此下一阶段决定降低进水碱度.

## 2.2 高氨氮、低碱度启动运行阶段

在第 I 阶段结束时,微生物一直没有活性,

基本没有脱氮效果. 考虑到反应器的进水碱度过高, 因此在第 II 阶段, 降低碱度至 1200 mg/L. 在第 15 d 时, 进水总氮质量浓度为 200 mg/L, 出水总氮质量浓度为 192 mg/L, 在这个过程的反应器中虽然出现总氮去除的情况, 但是去除效果不明显. 考虑到 Anammox 菌是厌氧微生物, 对 O<sub>2</sub> 十分敏感, 而测得反应器中溶解氧较高, 因此需要降低反应器的溶解氧, 但本实验采用直接配水后通过泵注入反应器, 未进行除氧处理, 进水中的溶解氧直接进入反应器. 另外, 因需监测反应器各类运行参数, 无法完全密封反应器, 使其直接暴露于外界空气中, 亦会导致反应器的溶解氧较高, 因此, 在进入 Anammox 滤柱之前, 使进水流经一没有挂膜的火山岩滤柱, 利用其中存在的微生物降解水中溶解氧, 出水再进入实验滤柱. 图 3 为阶段 II 反应器内三氮变化情况. 在该阶段反应器运行期间, 通过测量反应器的运行参数发现, 经过前一个反应器的“过滤”, 反应器的溶解氧明显比前一个反应器的低, 反应器出水中的溶解氧降低至 0.5 mg/L 以下. 之后, 反应器开始出现脱氮效果, 且后续脱氮效果不断增强. 反应器的出水总氮质量浓度由原来的约 200 mg/L 逐渐降至 120 mg/L 左右, 总氮去除率约为 40%. 由图 3 可知, 在这个阶段, 反应器脱氮效果基本不变, 进入稳定运行阶段, 总氮去除负荷接近 0.40 kg/(m<sup>3</sup>·d), 总氮去除率达到 40%, 出水氨氮质量浓度为 50 mg/L, 出水亚氮质量浓度为 60 mg/L. 在低 DO 值的运行条件下, Anammox 反应器成功启动, 这说明 DO 值是启动 Anammox 反应器的关键因素之一.

### 2.3 低氨氮、低碱度稳定运行阶段

在第 II 阶段反应器启动成功, 稳定运行并维持有一定的脱氮效果. 由于期望反应器可以在低氨氮条件下稳定运行, 所以需要继续调整反应运行条件, 反应启动至第 132 d 时, 降低进

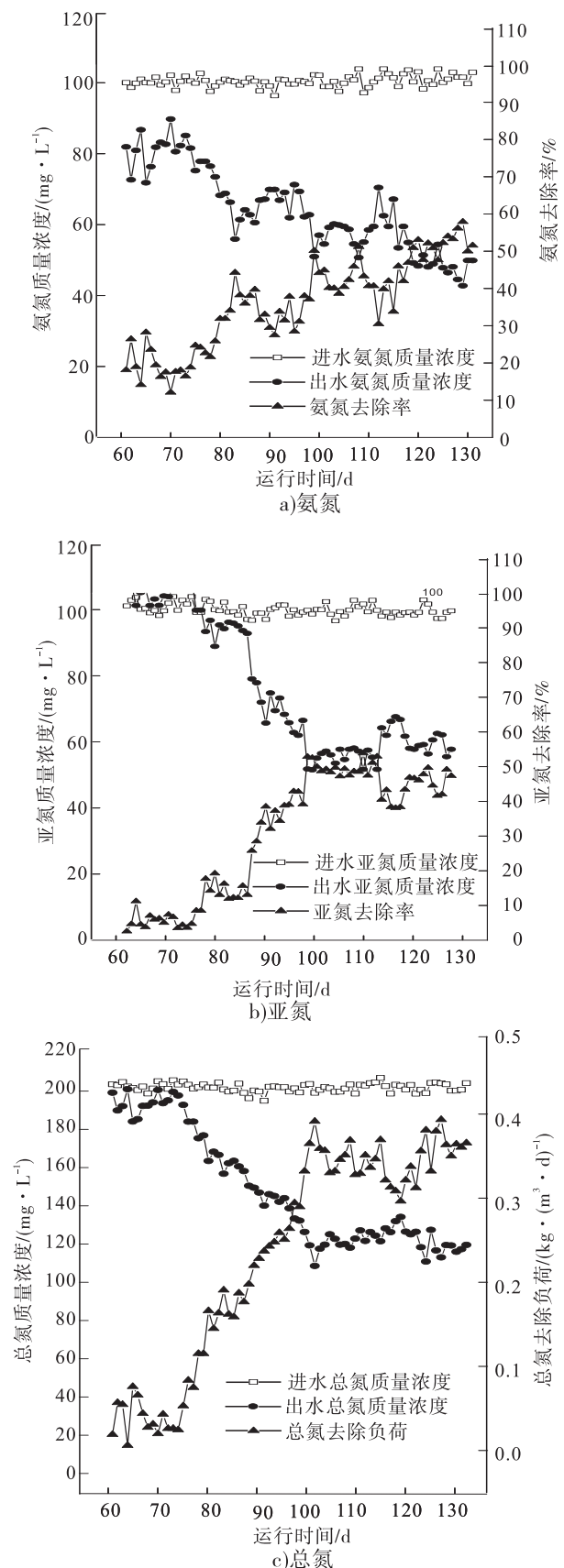


图 3 阶段 II 反应器内三氮变化情况

Fig. 3 The trinitrogen changes of phase II in the reactor

水氨氮质量浓度,进水氨氮质量浓度由原来的 100 mg/L 调整为 50 mg/L,同时增大反应器的流量,减小 *HRT* 以保证反应器是在相同的总氮负荷条件下运行,该阶段反应器内三氮变化情况如图 4 所示.由图 4 可以看出,在此阶段,反应器脱氮效果明显,出水氨氮质量浓度迅速下降,由 25 mg/L 下降到 7 mg/L 左右,但是运行并不稳定,脱氮效果出现波动,总氮去除率始终维持在 40%.从该阶段的第 10 d 起,反应器的总氮去除率迅速上升,该阶段后期,出水氨氮和出水亚氮质量浓度基本维持在 4.5 mg/L 和 2.5 mg/L 左右,总氮去除率一直维持在较高值,最高达到 89%.

反应器初期在高氨氮、高碱度下运行,此时 Anammox 活性受到抑制.之后尝试通过降低碱度和缩短 *HRT* 等措施,提高厌氧氨氧化菌的活性,但效果并不明显.考虑到氧气抑制厌氧氨氧化反应,因此采取降低 DO 的措施,反应器开始出现脱氮效果,随着 Anammox 活性的提升,微生物开始大量繁殖.在此之后连续运行 24 d 后,总氮去除率达到 40%,且可连续稳定运行 32 d,并在滤柱内发现红色的 Anammox 污泥颗粒,因此认为 Anammox 成功启动.之后使反应器在低氨氮基质下运行,缩短 *HRT*,降低碱度,同时控制反应器内的 pH 值、温度和 DO 值等均在适宜厌氧氨氧化菌生长的范围,总氮去除率呈现逐步上升趋势,总氮去除率最高达 89%,出水总氮质量浓度为 11 mg/L,出水氮素达到《城镇污水处理厂污染物综合排放标准》(GB18918—2002)一级 A 出水标准,出水氨氮质量浓度为 3~8 mg/L,出水亚氮质量浓度为 1~7 mg/L,总氮去除负荷接近  $0.40 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,Anammox 颗粒成功富集,故认为反应器启动后可以在低氨氮条件下稳定运行.

从以上三个阶段的实验结果可以看出,在此过程中,随着反应器稳定运行,氨氮去除率最

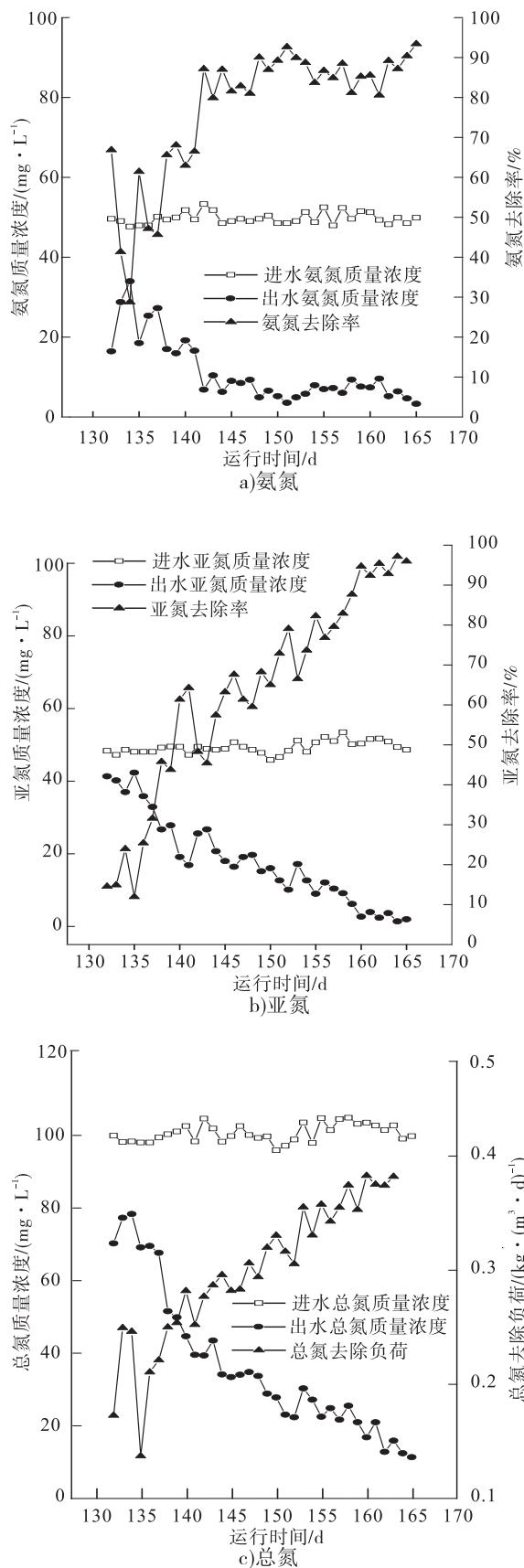


图 4 阶段 III 反应器内三氮变化情况

Fig. 4 The trinitrogen changes of phase III in the reactor

先升高,说明 AOB 最先表现出活性,有大量的氨氮被氧化为亚氮,这时亚氮含量升高,即 Anammox 反应的基质增加. 在反应器的后期运行阶段, Anammox 菌的活性逐步增强,亚氮去除率随之提高. 说明此时反应器里的 Anammox 菌成为主要的微生物,将氨氮和亚氮同时转化为  $N_2$  得以去除.

#### 2.4 启动过程关键影响因素分析

pH 值对酶反应的影响显著,过高或过低的 pH 值都对 Anammox 菌的活性产生不利影响<sup>[10]</sup>,使酶遭到不可逆的破坏,因此控制反应过程的 pH 值至关重要. Anammox 反应过程需要耗酸,实验中将碱作为缓冲剂来调整反应器内 pH 值. 在本实验第 I 阶段,采取高碱度的运行条件,微生物的活性较差,总氮去除效果不明显,总氮去除率低于 5%,因为有研究表明 Anammox 反应的最适 pH 值范围在 7.8 ~ 8.0<sup>[11]</sup>,因此,在本实验第 II 阶段将碱度由 1600 mg/L 降至 1200 mg/L 时, pH 值为 7.94,系统出水总氮出现去除情况,但效果仍不明显. Anammox 菌是一类严格厌氧的微生物类群,对  $O_2$  非常敏感. 孙艳波等<sup>[12]</sup> 研究发现, Anammox 菌对于反应器中溶解氧的抗性具有一定的阈值,当氧分压高于 5% 时,将会对 Anammox 系统的运行效能和稳定性产生毒害作用. 在实验初期,反应器直接暴露于空气中,导致其中含有较高溶解氧. 第 II 阶段经过同一类型的反应器过滤进水溶解氧,使进水的溶解氧降低到 0.5 mg/L 以下,总氮去除率逐渐增加,最高可达到 44%,表明 Anammox 菌的活性大幅提升. 活性得到提升之后的 Anammox 菌对于溶解氧具有一定的抵抗能力,去掉预处理滤柱后,仍然具备较好的脱氮效果,这说明富集后的 Anammox 菌达到一定数量后,能够抵制不良环境. 第 III 阶段反应器进水从高氨氮改为低氨氮之后,总氮去除率大幅提升,最终总氮去除率稳定在 80% ~ 89%,出水

氨氮质量浓度基本维持在 3 ~ 8 mg/L,出水亚氮质量浓度在 1 ~ 7 mg/L,总氮去除负荷接近  $0.40 \text{ kg}(\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ . 温度主要体现在对 Anammox 菌活性的影响,研究者通过测定不同温度下的 Anammox 反应速率,认为 Anammox 菌最佳生存温度为 30 ~ 35 °C<sup>[13]</sup>. 实验装置的温度随季节变化而有所不同,本实验从夏季一直延续到深秋,实验装置的温度从 26 °C 降至 21 °C,但反应器在其他条件的综合作用下克服了温度低的影响,说明滤柱在高氨氮和低氨氮的情况下,控制较低的 DO 值和适宜 pH 值,可以在一定温度范围内,成功启动.

### 3 结论

本文在 21.0 ~ 26.0 °C 条件下将普通活性污泥接种于火山岩生物滤柱,将整个实验过程分为高氨氮、高碱度,高氨氮、低碱度和低氨氮、低碱度三个阶段,通过调整各阶段实验参数,研究了 Anammox 反应器的快速启动及其在低氨氮条件下的稳定运行策略. 结果表明,在低氨氮、低碱度条件下,通过控制较低 DO 值和适宜 pH 值这两个关键影响因素,可在一定温度范围 (21.0 ~ 26.0 °C) 内实现低基质 Anammox 反应器的快速启动及稳定运行. 本文所提出的低基质厌氧氨氧化的快速启动策略,有利于推动厌氧氨氧化工艺在低基质废水中的应用,实现主流废水的高效低耗处理.

#### 参考文献:

- [1] TERADA A, ZHOU S, HOSOMI M. Presence and detection of anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) bacteria and appraisal of anammox process for high-strength nitrogenous wastewater treatment: a review [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2011, 13(6): 759.
- [2] KARTAL B, KUENEN J G, VAN LOOSDRECHT M C M. Sewage treatment with anammox [J].



- Science,2010,328(5979):702.
- [3] 鲍林林,赵建国,李晓凯,等. 常温低基质厌氧氨氧化反应器启动及其稳定性[J]. 环境工程学报,2013,3(7):981.
- [4] 张肖静,李冬,梁瑜海,等. MBR-CANON 工艺处理生活污水的快速启动及群落变化[J]. 哈尔滨工业大学学报,2014,46(4):25.
- [5] 张肖静,李冬,梁瑜海,等. 氨氮浓度对 CANON 工艺性能及微生物特性的影响[J]. 中国环境科学,2014,34(7):1715.
- [6] 李冬,苏庆岭,梁瑜海,等. CANON 颗粒污泥高效脱氮及处理生活污水试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2015,47(8):79.
- [7] 高伟楠,李冬,吴迪,等. 厌氧氨氧化滤柱处理生活污水及稳定性[J]. 中国大学学报(自然科学报),2014,6(45):2112.
- [8] 付丽霞,吴立波,张怡然,等. 低含量氨氮污水厌氧氨氧化影响因素研究[J]. 水处理技术,2010,36(4):50.
- [9] 张健,陈益明,邱凌峰,等. *HRT* 与进水基质浓度对 Anammox 反应器效能影响研究[J]. 环境工程,2016,34(2):58.
- [10] 陈重军,冯宇,汪瑶琪,等. 厌氧氨氧化反应影响因素研究进展[J]. 生态环境学报,2016,25(2):346.
- [11] 孙文汗,杨继刚. 厌氧氨氧化的启动与影响因素[J]. 辽宁化工,2013,42(6):732.
- [12] 孙艳波,周少奇,李秋生,等. 氮素负荷及高温冲击对 UASB-ANAMMOX 反应器的运行影响[J]. 化工进展,2009,9(28):1672.
- [13] 游少鸿,李小霞,解庆林,等. 厌氧氨氧化影响因素实验研究[J]. 工业水处理,2009,10(29):27.

## 本刊数字网络传播声明

本刊已许可中国知网、万方数据资源系统、维普网、博看网、超星、中国科技论文在线、中教数据库等在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。其相关著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我刊上述声明。



引用格式:刘亚莉,张潍然,张永海,等. 喷油螺杆压缩机用油气分离器滤芯出口孔径对分离特性的影响[J]. 轻工学报,2018,33(4):50-56.

中图分类号:TQ051 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2018.04.007

文章编号:2096-1553(2018)04-0050-07

# 喷油螺杆压缩机用油气分离器滤芯出口孔径对分离特性的影响

## Influence on the outlet aperture size of the filter element of the oil gas separator on the separation characteristics of the fuel injection screw compressor

**关键词:**

喷油螺杆压缩机; 油气分离器滤芯; 出口孔径; 大涡模拟; Rosin-Rammler 函数; 离散相模型

刘亚莉,张潍然,张永海,陈宇慧,王会林,董华东

LIU Yali, ZHANG Weiran, ZHANG Yonghai, CHEN Yuhui, WANG Huilin, DONG Huadong

**Key words:**

fuel injection screw compressor; filter element of oil gas separator; outlet aperture size; large eddy model; Rosin-Rammler function; discrete phase model

郑州轻工业学院 能源与动力工程学院, 河南 郑州 450002

College of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China

**摘要:**采用大涡模拟分三种出口孔径的模型,对喷油螺杆空压机用油气分离器滤芯的一次分离筒内的流场进行了对比分析.结果表明:出口孔径的尺寸对切向速度和轴向速度分布有一定的影响;对自由涡和强制涡区域、上行流下行流的数值、二次流的程度和油滴的分布等均产生一定的影响;综合各项因素可知,2 mm 出口孔径有较好的分离效果.

收稿日期:2017-10-24;修回日期:2018-01-06

基金项目:河南省科技攻关计划项目(152102210148);河南省高等学校重点科研项目(16A530015);郑州轻工业学院研究生科技创新基金项目(2016044)

作者简介:刘亚莉(1964—),女,河北省唐山市人,郑州轻工业学院教授,主要研究方向为化工过程机械.

**Abstract:** The large eddy simulation model was divided into three outlet apertures. The flow field in the primary separation cylinder of the oilgas separator filter element for the fuel injection screw air compressor was compared and analyzed. The results showed that the outlet aperture size was tangential speed and axis. It had a certain influence on the velocity distribution; it had certain influence on the free vortex and the forced vortex region, the value of the upstream flow, the degree of the secondary flow and the distribution of the oil droplets. Based on various factors, the 2 mm aperture outlet had a good separation effect.

## 0 引言

油气分离是一种非均相物系的分离,是石油、化工和环保等工程中重要的单元操作之一<sup>[1]</sup>. 在喷油螺杆空压机系统中,油气分离器主要由外分离筒和滤芯两部分组成,其中滤芯又包括多出口金属挡板和内部过滤材料两部分. 在分离过程中,多出口金属挡板和外分离筒组成一次分离筒,一次分离的效果对内部过滤材料的二次分离效果有重要影响. 由于分离器内部流动复杂,用试验或解析的方法研究流动状况非常困难,近年来,随着计算机硬件和 CFD 技术的不断进步<sup>[2-3]</sup>,在该方面的研究更加便捷.

油气分离器内部的旋转流场中,切向速度产生的离心力是分离的基本前提,轴向速度定义了分离空间<sup>[4]</sup>,径向速度则是分离过程的一个次要因素<sup>[5]</sup>. 以流场湍流数值模拟为主,研究分离器内流体的流动规律,进而优化分离器的结构,具有重要的工程应用价值<sup>[6]</sup>. X. Gao 等<sup>[7-8]</sup>通过数值模拟研究表明,进口速度和出气筒长径比对分离效率有一定的影响,进口速度和长径比越大,分离效率越高. 袁惠新等<sup>[9]</sup>对比了不同进口流量下分离器对不同粒径石蜡液滴的分离效率,进口流量增加,分离效率也增加. 马欣等<sup>[10]</sup>研究了排气管外延伸长度对旋风分离器性能的影响,随着排气管外延伸长度的增加,分离器内压降随之减小,有利于分离. 疏志勇等<sup>[11]</sup>研究了二次风风速对分离效果的影响,二次风可有效削减二次流现象,二次风风速增

加,分离效率增大. 目前,对影响油气分离器分离性能的因素之研究主要集中在进口速度、流量排气管长度等方面,而对于出口孔径的研究很少. 现有的湍流数值模拟方法有直接数值模拟、雷诺平均模拟和大涡模拟. 大涡模拟在复杂流动的模拟中被广泛认为是一种非常有前景的湍流数值模拟方法<sup>[12]</sup>. J. J. Derksen 等<sup>[13-14]</sup>对分离器进行大涡模拟计算,得到了比较准确的平均流场和速度场脉动. 周力行<sup>[15]</sup>分别用大涡模拟和雷诺平均模拟对旋流两相流切向速度和脉动速度进行了模拟分析,结果表明大涡模拟更加接近实验值.

本文拟采用大涡模拟对不同出口孔径的三种喷油螺杆压缩机用油气分离器的内部流场进行研究,通过对流场速度和油滴颗粒分布的分析,得到出口孔径尺寸对分离特性的影响,为优化一次分离筒的设计提供一定的参考依据.

## 1 结构模型

滤芯示意图如图 1 所示. 图 2 为多出口一次分离筒结构模型,该模型为 32 个出口孔径相同的出口直排模型. 本文将建立孔径分别为 1.5 mm, 2 mm, 4 mm 的三种出口直排模型,并对其进行分离特性的研究. 油气分离器一次分离装置结构由外分离筒、进气管和内置隔筒组成. 外分离筒高度 195 mm,直径 65 mm;内置隔筒高度 65 mm,直径 32.5 mm. 油气混合物从进气管进入分离器,在重力、惯性和离心力的作用下,油滴绕着内置隔筒做圆周运动,从而被分离出来.



图1 滤芯示意图

Fig.1 Filter element diagram

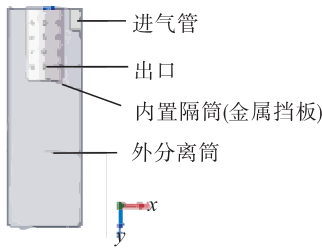


图2 多出口一次分离筒结构模型

Fig.2 Structure model of multiple outlet primary separation cylinder

## 2 数值模拟方法

### 2.1 大涡模拟控制方程

大涡模拟的控制方程,即滤波后的 Navier-Stokes 方程为

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \bar{u}_i) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j) =$$

$$- \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

$\sigma_{ij}$  为因分子黏性而产生的应力张量

$$\sigma_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right]$$

亚格子 SGS(sub-grid scale) 应力封闭模型为

$$\tau_{ij} = \bar{\rho} \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \cdot \bar{u}_j$$

在涡黏模型中,亚格子应力张量  $\tau_{ij}$  与滤波

后的应变速率张量  $\bar{S}_{ij}$  关系为

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\mu_t \bar{S}_{ij}$$

其中,  $\mu_t$  为亚格子涡黏系数,  $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ .

在计算时采用 Smagorinsky-Lily 模型,  $\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}|$ ,  $L_s$  为网格的混合长度,  $|\bar{S}| = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}$ .

在 Fluent 中  $L_s = \min(\kappa d, C_s V^{1/3})$ , 其中  $\kappa$  为 von Kármán 常数,  $d$  为到最近壁面的距离, Smagorinsky 常数  $C_s = 0.1$ <sup>[16]</sup>,  $V$  为计算单元的体积.

### 2.2 模拟条件设置

1) 模型选择: 压缩空气作为气相连续相采用大涡模型, 油滴作为液相离散相采用离散相模型.

2) 边界条件: 油气混合物进口采用 velocity-inlet 边界, 进口速度设为 14.4 m/s, 水力直径设为 0.013 m, 湍流强度设为 4.9%, 油气混合物出口设为 outflow 边界. 油气分离器进口壁面和出口壁面边界设为 escape 边界条件, 进口管壁面和内筒壁面采用 reflect 边界条件, 外筒壁面和底面采用 trap 边界条件.

3) 油滴分布设置: 油滴分布设置采用 Rosin-Rammler 分布函数. 油滴粒径分布如表 1 所示, max diameter 设为 50  $\mu\text{m}$ , min diameter 设为 1  $\mu\text{m}$ , mean diameter 设为 30  $\mu\text{m}$ .

4) 时间步长设置为  $1 \times 10^{-4}$  s<sup>[17]</sup>.

表1 油滴粒径分布

Table 1 Distribution of oil droplet size

粒径范围/ $\mu\text{m}$	1 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50
占总颗粒数的比例/%	6.0	24.0	33.2	24.0	12.8

### 3 结果与讨论

#### 3.1 不同孔径模型的切向速度分布

图3给出了 $x=0$ 截面切向速度分布云图。由图3可以看出,分离器漩涡的轴心与其几何轴心并不完全重合,这反映了分离器流场由于入口的不对称而表现出流场的不对称性。图4给出了三种孔径模型在 $x=0$ 截面和 $z=0.11\text{ m}$ 截面交线上的切向速度分布图,切向速度满足一般油气分离器的准自由涡规律:从壁面开始沿半径减小,切向速度缓慢增大,在某一径向位置达到最大值,然后急剧降低。图4表明,三种模型的切向速度均为负值,因为,切向速度正方向是由“右手定则”来判断的:当四指指向气流旋转方向时,大拇指的指向即为切向速度的方向。由此得出切向速度的方向与轴负方向一致,故大部分流体切向速度为负值。三种模型的最大切向速度和最大切向速度的位置、自由涡区域同强制涡区域有所不同,其中,2 mm出口孔径的模型最大切向速度较大,数值为7.8 m/s,1.5 mm和4 mm出口孔径模型分别为6.5 m/s和7.0 m/s。2 mm出口孔径模型的切向速度产生的强制涡区域也较广,有助于颗粒的分离。

#### 3.2 不同孔径模型的轴向速度分布

三种孔径模型(沿径向的)轴向速度分布如图5所示。轴向速度的方向平行于 $z$ 轴,轴向速度等于0的截面称为零值面,零值面把流动区域分为上行流和下行流。图5中正值为下行流,负值为上行流。下行流会对油滴产生一个向下的作用力,有利于油滴的分离;上行流会造成二次流现象,影响油滴的分离效果。其中,2 mm孔径的上行流轴向速度整体数值较小,最大值为1.5 m/s,而1.5 mm和4 mm孔径模型的上行流轴向速度最大值分别为2.3 m/s和2.5 m/s,因此,三种出口孔径模型中,2 mm孔径模型相较于其他两种孔径不易出现二次流现象,有利于油滴的沉降。与传统的旋风分离器排气管出口位置不同,本装置的排气挡板底部为筒壁,当气流的负向速度卷起油滴向上运动时,会碰到滤芯金属挡板的底部壁面,这有助于油滴被分离出来。

#### 3.3 不同孔径模型的压力分布

油气分离器内的压力分布包括动、静压的转换和压力损失两个方面。压力损失主要包括压缩空气与分离器壁面接触产生的摩擦能量损

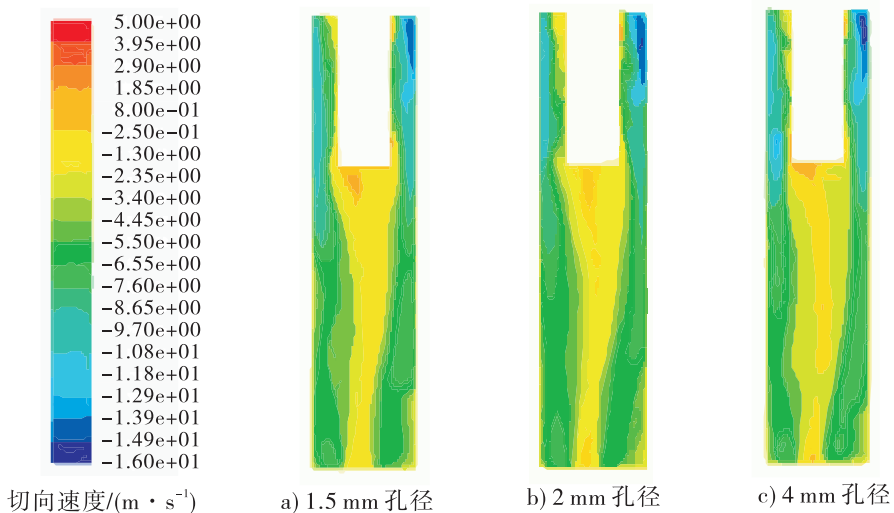


图3  $x=0$ 截面切向速度分布云图

Fig. 3 Contours of tangential velocity in  $x=0$  section

失和旋转运动造成的能量损失. 压力损失不是设计时需要参考的一个指标, 在很多情况下, 在对能耗没有太大的要求时, 则可以忽略压力损失, 而主要考虑分离器的分离性能. 图6为三种孔径模型总压分布云图, 从中可以看出不同孔径模型压力分布有较大的不同, 4 mm 孔径模型的压力分布较小. 压力一般不作为油气分离器设计的参考.

### 3.4 不同孔径模型的油滴颗粒分布

图7为三种孔径模型内部不同时刻停留的油滴分布. 从图7可以看出, 油滴直径对分离有

一定影响: 在0.03 s时, 不同直径的油滴都有分布而且数量较多, 说明大部分油滴还没有被分离, 在0.10 s时, 分离筒内剩余的油滴数量减少, 直径也明显减小, 说明大直径的油滴较容易被分离; 油滴分布的位置也有所不同, 在0.03 s时, 大部分油滴都集中在内置隔筒周围, 随着分离进行, 在0.10 s时, 不同模型中油滴数量明显少了许多, 油滴分布的位置也发生了变化. 其中, 2 mm 孔径模型在分离末段油滴颗粒相对较少, 所以分离效果相对较好.

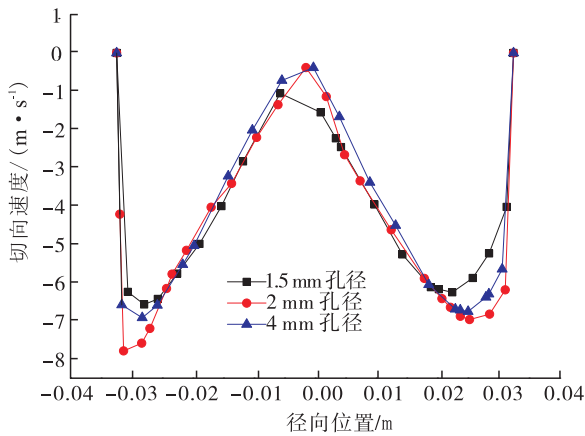


图4 三种孔径模型(沿径向的)切向速度分布图( $x=0, z=0.11\text{ m}$ )

Fig.4 Tangential velocity profiles of three aperture models(along the meridional direction) ( $x=0, z=0.11\text{ m}$ )

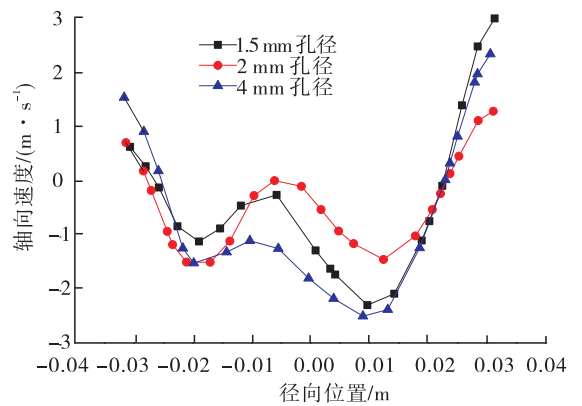


图5 三种孔径模型(沿径向的)轴向速度分布图( $x=0, z=0.11\text{ m}$ )

Fig.5 Axial velocity profiles of three aperture models(along the meridional direction) ( $x=0, z=0.11\text{ m}$ )

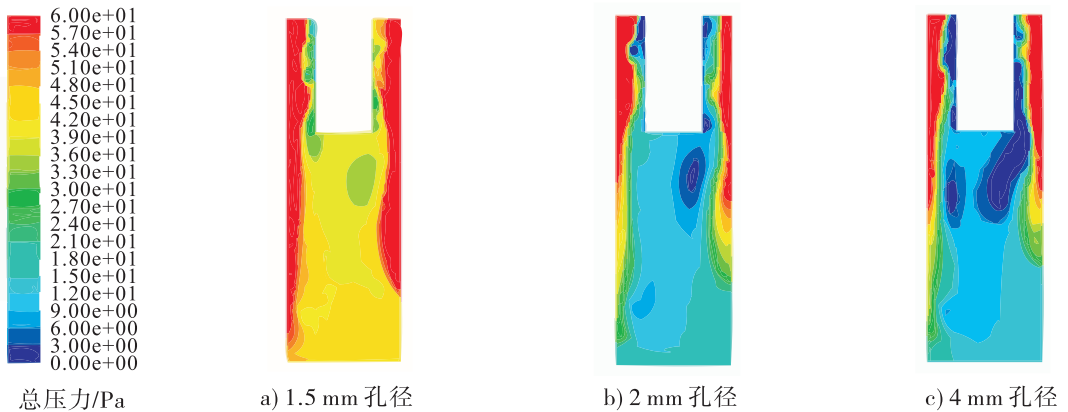


图6 三种孔径模型总压分布云图( $x=0$  截面)

Fig.6 Contours of total pressure of three aperture models( $x=0$  section)

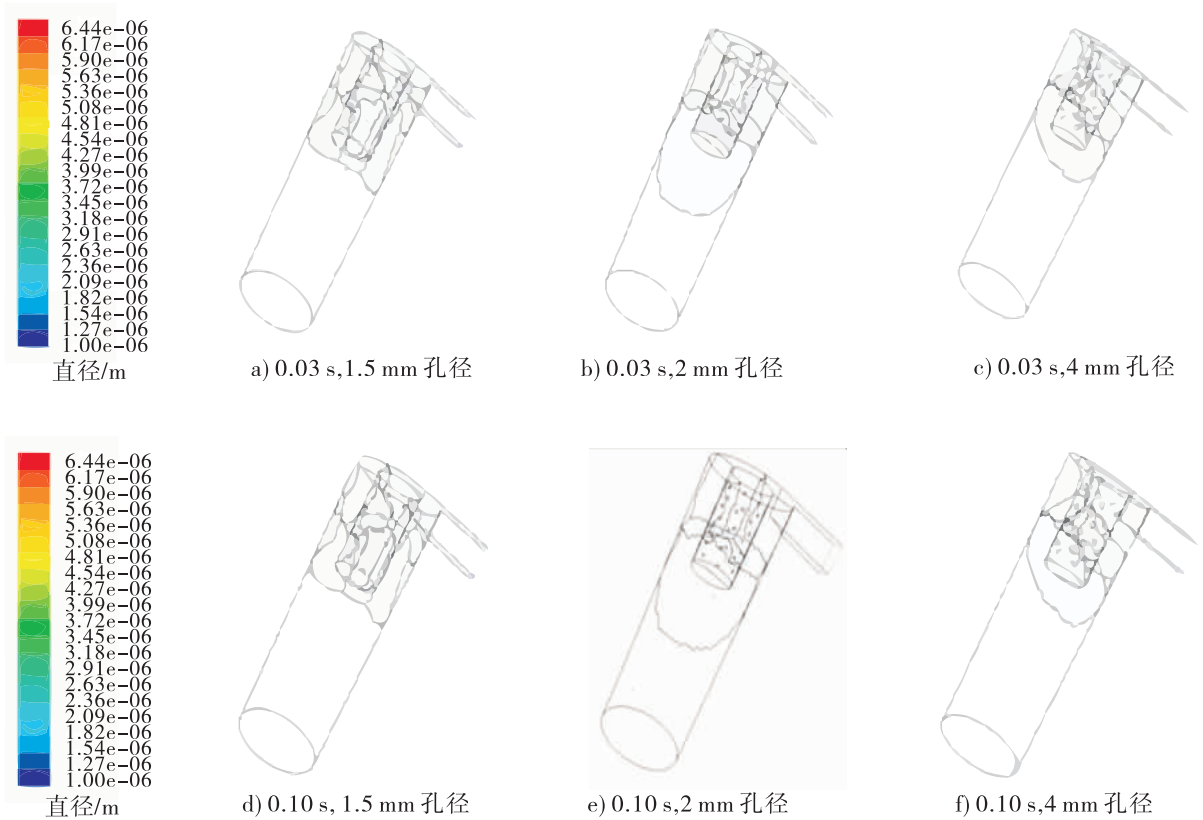


图7 三种孔径模型不同时刻颗粒分布图

Fig. 7 Trajectories of oil droplets at different times of three aperture models

## 4 结论

本文采用大涡模拟对喷油螺杆压缩机用油气分离器滤芯不同出口孔径大小的三种模型的切向速度、轴向速度和油滴颗粒分布的模拟数据进行分析,得出以下结论。

1) 切向速度分布体现了自由涡和强制涡的特点,中心的强制涡区有利于分离油滴;外部的自由涡区易于捕捉分离出来的油滴.不同出口孔径的最大切向速度及其位置略有不同,导致自由涡和强制涡区域也略有差异,对分离的效果产生一定的影响。

2) 轴向速度对二次流影响较大,其中,上行流容易造成二次流现象,不利于油滴的分离;下行流对油滴沉降起到很好的作用,有利于油滴的分离。

3) 压力分布对油气分离性能影响不大,在

油气分离器设计中不作为参考指标。

4) 分离初始阶段,不同直径油滴分布较多,分离末段,油滴分布数量减少,大直径油滴基本被完全分离;在分离末段,不同出口孔径的分离器中油滴颗粒的分布数量和停留位置也有不同。

综合切向、轴向速度和颗粒分布,出口孔径大小对分离效果影响不是太明显,2 mm 出口孔径相较于其他两种孔径模型对一次分离的效果略有提高.一次分离效果的提高,易使较多的油滴在进入二次分离材料前被分离,可减轻二次分离的负担。

## 参考文献:

- [1] 戚俊清,刘亚莉,许培援,等.斜板沉降器板间距对处理负荷的影响[J].郑州轻工业学院学报,1999,14(4):51.

- [2] 王瑞金,张凯,王刚. Fluent 技术基础与应用实例[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- [3] 李文静. 天然气旋流气液分离器的数值模拟[D]. 北京:中国石油大学,2009.
- [4] WANG Z, YI M A, JIN Y. Droplet coalescence and breakup and its influence factors in vane-guided hydrocyclone [J]. *Ciesc Journal*, 2011, 62(2):399.
- [5] BERGSTRÖM J, VOMHOFF H. Experimental hydrocyclone flow field studies [J]. *Separation & Purification Technology*, 2007, 53(1):8.
- [6] 王海刚,刘石. 用雷诺应力模型计算旋风分离器中气-固两相流动[J]. *工程热物理学报*, 2004(S1):191.
- [7] GAO X, CHEN J, FENG J, et al. Numerical and experimental investigations of the effects of the breakup of oil droplets on the performance of oil-gas cyclone separators in oil-injected compressor systems [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2013, 36(7):1894.
- [8] GAO X, CHEN J, FENG J, et al. Numerical investigation of the effects of the central channel on the flow field in an oil-gas cyclone separator [J]. *Computers & Fluids*, 2014, 92(9):45.
- [9] 袁惠新,方毅,付双成. 天然气脱蜡旋风分离器分离效率的模拟[J]. *化工进展*, 2014, 33(1):43.
- [10] 马欣,徐洋洋,徐洋,等. 排气管外延伸长度对旋风分离器性能的影响[J]. *过程工程学报*, 2016, 16(6):915.
- [11] 疏志勇,钱付平,郭旺. 基于 OpenFOAM 模拟二次风对旋风分离器性能的影响[J]. *过程工程学报*, 2017, 17(2):217.
- [12] 张兆顺. 湍流大涡数值模拟的理论和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [13] DERKSEN J J. Separation performance predictions of a Stairmand high-efficiency cyclone [J]. *Aiche Journal*, 2010, 49(6):1359.
- [14] GRONALD G, DERKSEN J J. Simulating turbulent swirling flow in a gas cyclone: A comparison of various modeling approaches [J]. *Powder Technology*, 2011, 205(1/3):160.
- [15] 周力行. 旋流气粒两相流动的研究[J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(5):1028.
- [16] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [17] CHUAH T G, GIMBUN J, CHOONG T S Y. A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics [J]. *Powder Technology*, 2006, 162(2):126.





引用格式:刘旭玲,李松晶. 气动微流控芯片 PDMS 电磁微阀设计与性能研究[J]. 轻工学报, 2018,33(4):57-65.

中图分类号:TH137.52 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2018.04.008

文章编号:2096-1553(2018)04-0057-09

# 气动微流控芯片 PDMS 电磁微阀设计与性能研究

## Design and characterization study on PDMS electromagnetic microvalve for pneumatic lab-on-a-chip

刘旭玲<sup>1</sup>,李松晶<sup>2</sup>

LIU Xuling<sup>1</sup>,LI Songjing<sup>2</sup>

1. 郑州轻工业学院 机电工程学院,河南 郑州 450002;

2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001

1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

### 关键词:

气动微流控芯片;电磁微阀;流场仿真;出口流量

### Key words:

pneumatic lab-on-a-chip; electromagnetic microvalve; flow fluid simulation; outlet flow rate

**摘要:**针对常规电磁阀和阀组结构复杂、尺寸巨大,很难与微流控芯片进行集成的问题,采用新型阀体材料高弹 PDMS,设计了一种新型电磁微阀.通过 Fluent 软件嵌入 UDF 函数对典型驱动压力下不同阀口开度电磁微阀的静、动态流量特性进行数值仿真,并对开关和脉冲宽度调制(PWM)两种模式下电磁微阀流量特性进行了实验研究,结果表明:在驱动频率相等的情况下,电磁微阀流量与压差呈正比;当压差一定时,电磁微阀流量与驱动频率呈反比,电磁微阀平均流量与占空比呈正比;电磁微阀出口流量与阀口开度呈正比.所设计的电磁微阀流量控制精度高、封装成本低,能够提高微流控芯片的集成化程度和控制性能.

收稿日期:2017-03-16;修回日期:2017-12-22

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51175101);郑州轻工业学院博士科研基金项目(2016BSJJ015)

作者简介:刘旭玲(1981—),女,河南省周口市人,郑州轻工业学院讲师,博士,主要研究方向为微流体驱动与控制、自动化测控系统.

通信作者:李松晶(1970—),女,黑龙江省哈尔滨市人,哈尔滨工业大学教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为微泵、气动微阀、微流控驱动装置.

**Abstract:** In view of the complicated structure and the large size of the regular electromagnetic valve and valve block and the difficulty in their integration with micro-fluidic chip, a new type of the electromagnetic microvalve was designed using PDMS, a new type of valve body. The numerical simulation of the static and dynamic flow rate characteristics of the electromagnetic microvalves with different valve-openings was made by Fluent software with UDF function under typical driving pressure. And experiment was made on the flow characteristics of electromagnetic microvalves under On-Off model and PWM model. The results showed that under the same driving pressure, electromagnetic valve flow was proportional to its pressure difference; under the same pressure difference, the average flow of electromagnetic valve was inversely proportional to its driving frequency and its opening flow was proportional to its duty cycle. The designed electromagnetic microvalve had high flow control precision, low cost of encapsulation and could improve the integration and control of pneumatic micro-fluidic chip.

## 0 引言

微流控芯片大规模集成(mLSI),指的是在几 $\text{cm}^2$ 大小的芯片上集成上百、甚至上千个微阀、微泵、微混合器等功能部件,进行各种化学反应和生物分析,用以取代常规化学或生物实验室的一种技术平台<sup>[1]</sup>. 哈佛大学 Quake 研究组<sup>[2]</sup>提出微流控芯片超大规模集成(mVLSI),进一步提高了微流控系统的集成度和使用率. 高密度气动微流控芯片的驱动和控制离不开外部气路控制系统的作用,目前外部气路控制系统组成元件中的电磁阀和阀组仍然使用常规尺寸<sup>[3-4]</sup>,与微流控芯片本身相比,结构复杂、尺寸巨大,很难与微流控芯片进行集成,不便于携带<sup>[5-6]</sup>,因而成为气动微流控芯片系统进一步高度集成化的瓶颈.

气动微流控芯片外部微阀是微流控系统一个新的研究热点. 本文将针对气动微流控芯片控制系统的需求,提出一种微型化、结构简单、易于封装、省时、费用低、易与气动微流控芯片集成的电磁微阀设计方案,并对其性能进行分析,为进一步提高气动微流控芯片系统的集成化程度提供参考.

## 1 电磁微阀结构设计与工作原理

### 1.1 电磁微阀

针对现有电磁微阀结构复杂,尺寸巨大的

问题,要实现小尺寸、高集成度的设计目标,本设计采用高弹 PDMS 新型阀体材料,替代常规电磁阀采用的金属、聚酰亚胺、聚碳酸酯等硬质材料,电磁微阀的 PDMS 阀膜也可充当弹垫,以提高其密封性能.

本文设计的电磁微阀由电磁驱动器和阀体组成,电磁微阀结构和工作状态如图 1 所示. 当电磁驱动器未通电时,由于弹簧的预紧力推动阀芯,阀芯下压上层 PDMS 阀膜,阀膜向下变形,堵塞阀口,电磁微阀处于关闭状态,如图 1a) 所示;当驱动器通电时,产生的电磁吸力克服弹簧弹力,阀芯上移,上层阀膜形变恢复,电磁微阀打开,如图 1b) 所示,微流道导通;当电磁驱动器断电时,阀芯被弹簧的恢复力推向上层 PDMS 阀膜,阀膜向下变形,电磁微阀关闭,使微流道切断. 电磁微阀属于常闭阀,气动微流控芯片系统紧急断电时,常闭阀可以迅速切断气路,防止因气路系统压力过高而损坏气动微流控芯片系统.

阀膜在运动过程中主要受到电磁力、阀腔内流体的反作用力和阀膜本身材料性质的弹力等力的作用. 电磁微阀阀腔流体运动结构模型如图 2 所示. 其中, $w$  为电磁微阀宽度, $d$  为电磁微阀长度,阀膜沿  $z$  轴作上下往复运动以打开或关闭阀门. 根据电磁微阀的结构和运动特征,设定以下边界条件: $x, y$  方向阀腔内壁固

定,边界不存在滑移; $z$  方向,阀腔底面固定,上表面与阀膜接触,阀膜沿  $z$  方向做往复运动,阀腔高度设为  $h$ ,并满足边界条件  $z = 0$  或  $z = h$  时, $x$  方向和  $y$  方向流速  $u = v = 0$ 。

在微尺度下,宏观流体力学的连续性方程和纳维 - 斯托克斯方程仍然适用<sup>[7]</sup>。仅在速度接近或超过声速的特殊情况下才考虑气体的可压缩模型,气体在大多数情况下可以采用不可压缩模型,因此本文在研究中仍将工作介质视为不可压缩气体。

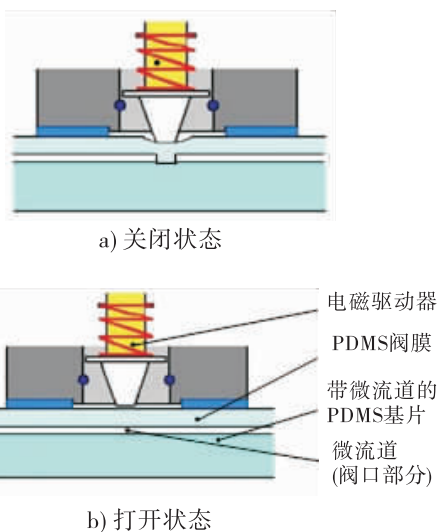


图 1 电磁微阀结构和工作状态示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of structure and working states of the electromagnetic microvalve

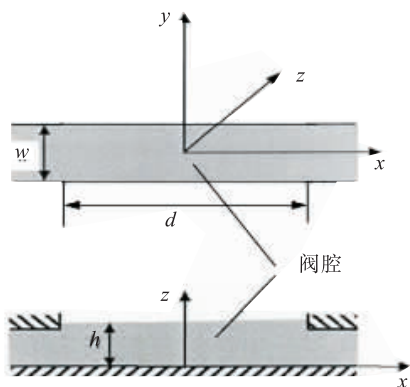


图 2 电磁微阀阀腔流体运动结构模型

Fig. 2 Model of the valve-chamber fluid of the electromagnetic microvalve

## 1.2 电磁驱动器

电磁微阀采用的电磁驱动器属于吸入式电磁铁,能提供导磁率较高的磁通路,衔铁与铁芯之间气隙的磁压降在整个磁通路中占主导地位,电磁驱动器磁路示意图见图 3<sup>[8-9]</sup>。

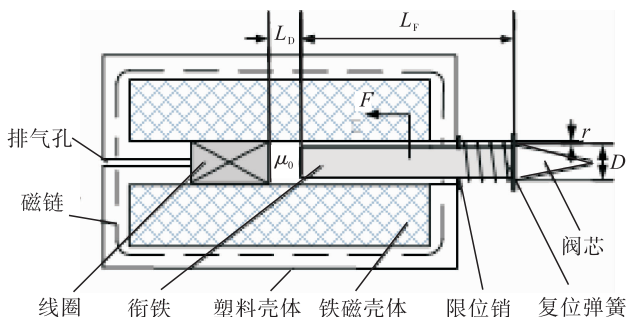


图 3 电磁驱动器磁路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of magnetic circuit for the electromagnetic actuator

动铁上的拉力由定铁与动铁之间的拉力和绕组与动铁间的拉力组成。动铁与定铁之间的拉力

$$F_1 = \frac{\mu A}{2f} \left( \frac{In}{L} \right)^2 \quad (1)$$

式中, $\mu$  为空气磁导率 / ( $H \cdot m^{-1}$ );  $A$  为动铁截面积 /  $m^2$ ;  $f$  为漏磁系数,无量纲;  $I$  为线圈电流 /  $A$ ;  $n$  为线圈匝数,无量纲;  $L$  为磁通路长度 /  $m$ 。

其中,空气导磁率  $\mu = 1.257 \times 10^{-6} H/m$ ,若只考虑空气导磁率而不考虑磁路中其余部分的导磁率及其长度,式 (1) 可写成

$$F_1 = 6.285 \times 10^{-7} \frac{A}{f} \left( \frac{In}{L_A} \right)^2$$

式中, $L_A$  为气隙最大长度。

绕组与动铁间的拉力  $F_2$  产生原理如下:把一根铁棒插入一个不带外壳或定铁的螺线管中,铁棒受到的拉力就是  $F_2$ 。对于给定的线圈来说,拉力与流过线圈的电流呈正比。当铁棒插到线圈长度的 40% ~ 80% 之间时,受拉力最大<sup>[10]</sup>。在这段距离上,拉力几乎不变,其大小可表示为

$$F_2 = \frac{KAIn}{L_c}$$

式中,  $K$  为系数, 取决于线圈尺寸、磁路饱和程度和动铁的长度与材料, 通常假定  $K = 1.75$ ;  $L_c$  为线圈长度; 吸入式电磁铁的漏磁系数一般假定为  $f = 1$ , 故可忽略不计。

动铁受到的总拉力  $F$  为

$$F = F_1 + F_2 = 1.75 AIn \left( \frac{1}{L_c} + 3.6 \times 10^{-2} \frac{In}{L_A^2} \right)$$

## 2 电磁微阀流场仿真方法

### 2.1 电磁微阀阀口模型与网格划分

为了对电磁微阀前后流场的流速、压力分布情况进行仿真, 在电磁微阀外部建立了较大的区域作为电磁微阀外部入口和出口的流动区域, 电磁微阀阀口模型网格划分如图 4 所示, 其中,  $AB = EF = 90 \mu\text{m}$ ,  $BC = DE = 14.95 \text{ mm}$ ,  $CG = HD = 5 \mu\text{m}$ ,  $GH = 100 \mu\text{m}$ ,  $FA = 30 \text{ mm}$ 。

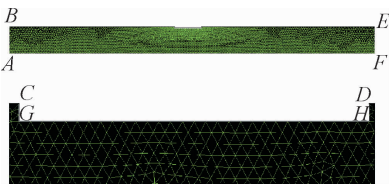


图 4 电磁微阀阀口模型网格划分  
(阀口开度为 90%)

Fig. 4 Model meshing of the electromagnetic microvalve port (valve-opening is 90%)

将几何模型导入到有限元软件 ANSYS 中的 Gambit 进行网格划分, 网格划分的质量决定仿真结果的准确性, 由于电磁微阀入口处、出口处和电磁微阀阀芯下部变形区域上的速度流场和压力变化比较大, 为了准确反映流场的变化情况, 对这几个部分的网格进行加密, 其余部分网格相对稀疏。三角形网格具有更好的配合性, 因而整个模型都采用三角形网格进行划分。

### 2.2 流场边界条件的确定

本文采用多相流中的混合模型, 其中  $AB$

为电磁微阀入口, 边界条件为压力入口 (pressure inlet), 压力值为电磁微阀的仿真入口压力;  $AB, BC, DE, FA$  均为无滑移边界壁面 (wall);  $EF$  为压力出口 (pressure outlet) 压力值为  $0 \text{ kPa}$ ;  $GH$  为运动壁面 (moving wall);  $CG, DH$  为变形壁面 (deforming wall)。

## 3 实验条件

### 3.1 实验件封装

电磁驱动器用磁铁作基材, 具有塑料外壳, 阀芯也是塑料材质, 由超精密加工设备制作完成 (由哈尔滨工业大学气动中心加工制造), 电磁微阀封装实物如图 5a) 所示。阀体结构包括上层 PDMS 平膜、具有微流道的下层 PDMS 厚膜, 如图 5b) 所示。平膜薄而柔软, 用作阀膜, 而且能够充当弹垫的作用, 电磁微阀关闭时防止漏气。阀体采用制造气动微流控芯片系统常用的高弹性材料 PDMS, 不仅因为高弹 PDMS 材料透明便于肉眼对齐封装, 而且封装的多个电磁微阀组成阀组能够作为一个模块, 便于与气动微流控芯片系统进行整体集成。

电磁微阀的封装尺寸由驱动器的尺寸决定, 但是为了测试电磁微阀的性能, 便于与外部供应气路连接, 采用微流道长度  $30 \text{ mm}$ 。电磁微阀实验件尺寸参数如下: 驱动器长、宽、高分别为  $20.5 \text{ mm}, 9.8 \text{ mm}, 12 \text{ mm}$ ; 阀芯直径  $1 \text{ mm}$ , 阀芯传递力  $0.5 \text{ N}$ ; 微流道长、宽、深分别为  $30 \text{ mm}, 0.5 \text{ mm}, 0.1 \text{ mm}$ ; PDMS 平膜厚度  $0.5 \text{ mm}$ , PDMS 平膜基质: 固化剂 =  $15 : 1$ ; PDMS 厚膜厚度  $5 \text{ mm}$ , PDMS 厚膜基质: 固化剂 =  $8 : 1$ 。电磁微阀的封装尺寸仅为  $30 \text{ mm} \times 17.5 \text{ mm} \times 9.8 \text{ mm}$ 。

### 3.2 电磁微阀测试装置

电磁微阀特性测试装置原理如图 6 所示, 由被测试电磁微阀、微小气体流量传感器、微小压力传感器、激光微位移传感器、压缩氮气源、

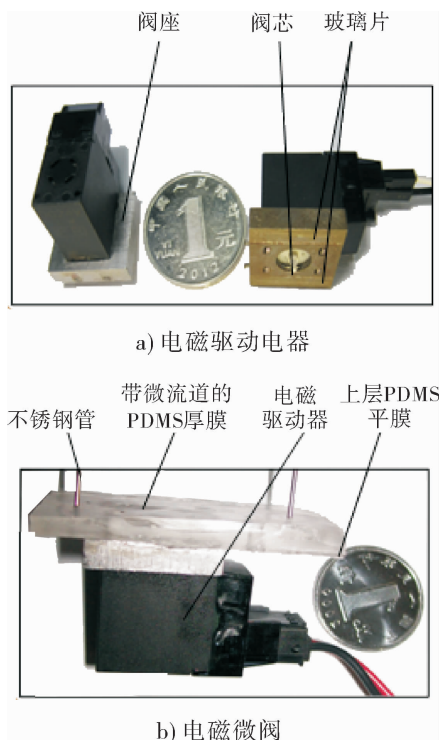


图 5 电磁微阀封装实物图

Fig. 5 Pictures of the packaged electromagnetic microvalve

传感器动态测量范围为  $\pm 400 \text{ mL/min}$ , 能承受的气体压力最高可超过  $29 \text{ psi}$  ( $200 \text{ kPa}$ ), 最小分辨率可精确到  $0.0143 \text{ mL/min}$ , 采用简单的 COM 串口方式与计算机进行通信, 电源电压为  $12 \text{ V}$ , 耗能低. 它具有体积小、响应快、测量精度高优点, 可以满足测试气体微流量动态变化的要求.

选用 Kulite 公司的 XCL-080 型压阻式微小压力传感器 (电源电压为  $9 \text{ V}$ ) 来测量电磁微阀所承受的压力. 它体积小、响应快、测量精度高, 头部直径  $2 \text{ mm}$ , 工作量程  $200 \text{ kPa}$ , 可以满足电磁微阀实验系统的需求.

选用上海游然传感科技有限公司生产的 EVT-18C 型单点式铝合金力传感器, 其量程为  $0 \sim 3 \text{ N}$ , 测量精度可达  $1\%$ . 力传感器为电阻应变式称重传感器, 其利用电阻应变片变形时电阻也随之改变的原理工作. 主要由弹性元件、电阻应变片、测量电路和传输电缆四部分组成. 力传感器输出信号为  $0 \sim 10 \text{ V}$  电压, 多次不加力时测量, 零点漂移电压为  $-0.86 \text{ V}$ .

数据采集系统采用研华 PCI-1710-CE 采集卡, 它具有 16 路模拟量输入端口和 2 路模拟量输出端口, 能够满足系统需求. 采用差分接法采集压力传感器输出信号, 可有效抑制干扰信号. 模拟输入端口信号采集范围选择  $0 \sim 10 \text{ V}$ .

## 4 电磁微阀性能分析

### 4.1 电磁微阀驱动力测试结果分析

使用力传感器对电磁驱动器出力进行测量, 电磁驱动器驱动力测量实验装置如图 7 所示.

经过 6 次重复测量, 电磁驱动器出力平均值为  $0.844 \text{ N}$ , 各测量值均大于电磁驱动器驱动力仿真值和设计需求值. 电磁驱动器驱动力结果如下: 实验测量平均值  $0.844 \text{ N}$ , 仿真值

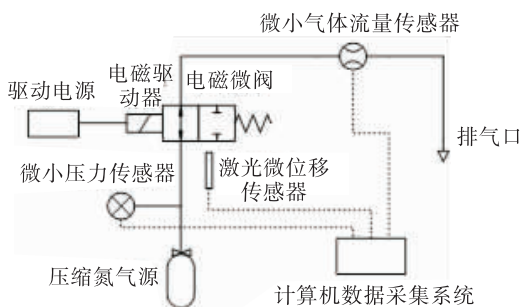


图 6 电磁微阀测试原理图

Fig. 6 Test principle schematic diagram of the electromagnetic microvalve

计算机数据采集系统等组成. 从高压氮气瓶出来的高压气体与普通减压阀、精密减压阀相连, 通过微小压力传感器得到电磁微阀两端压力差, 通过调节减压阀得到不同工况下气体的控制压力, 气体经过电磁微阀后进入到微小气体流量传感器, 最后排入大气.

实验所采用的 ASF1430 型微小气体流量

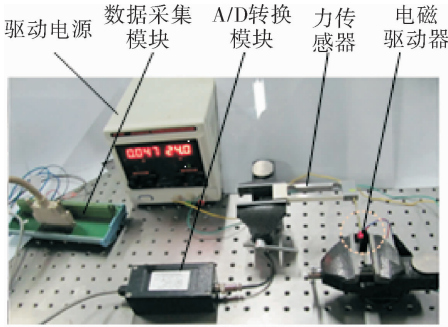


图7 电磁驱动器驱动力测量实验装置

Fig. 7 Experimental setup for testing the spool actuated force

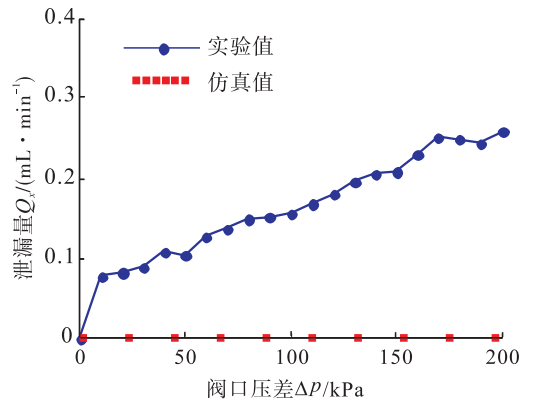


图8 电磁微阀泄漏量示意图

Fig. 8 The sketch map of leak flow rate of the electromagnetic micrvalve

0.881 N,理论计算值 0.983 N,设计需求值 0.220 N.

考虑 PDMS 电磁微阀最高承受气压 280 kPa,阀芯直径 1 mm,阀芯受到的最大反作用力为 0.220 N,因此电磁微阀驱动力在任何情况下都能够关闭电磁微阀.

### 4.2 电磁微阀静态流量结果分析

施加电压和去掉电压后,电磁微阀处于打开或关闭状态.电磁微阀完全关闭时所测流量是电磁微阀的泄漏量,是反映产品控制精度的非常重要的一项指标.

电磁微阀泄漏量如图 8 所示,图 8 中虚线代表泄漏量仿真值在任何压力下均为 0,这是忽略实际因素所致.气体泄漏量基本与压差大小成正比,但是从测量结果看,压差达到 200 kPa 时,电磁微阀泄漏量仅为 0.259 mL/min,这是因为柔软坚韧的 PDMS 阀膜充当了防止漏气的胶垫,而且流量传感器本身最小分辨率为 0.014 7 mL/min.相比同行业电磁微阀,泄漏量较低,电磁微阀截止性能良好.

图 9 描述了电磁微阀在完全打开状态下,出口流量与所加压力呈线性关系.矩形微流道平均流量公式为

$$\bar{Q} = \frac{\Delta p r_0^2}{8 \mu l}$$

其中,Δp 为流体单元两端压力差,r<sub>0</sub> 为矩形管

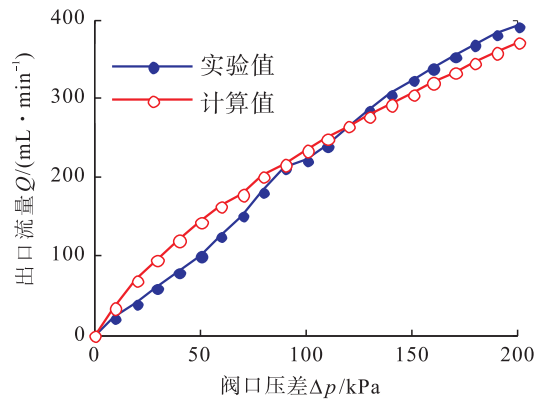


图9 电磁微阀完全打开状态下出口流量

Fig. 9 Flow rate under fully open state of the electromagnetic micrvalve

道水力半径,μ 是流体动力黏度,l 为流经长度.

从实验结果和理论公式对比可以看出,实验结果完全与期望的一样呈线性关系.斜率反映的是电磁微阀在完全打开状态下,微流道尺寸结构一定时,由材料原因形成的流阻大小.从图 9 中可以看出,当压差大于 120 kPa,流量试验值大于计算值,这是由于 PDMS 在高压下变形扩充,使得整个流道变大,从而使电磁微阀流量变大.

### 4.3 不同模式流量的特性与结果分析

电磁驱动电磁微阀有两种工作模式,开关模式和脉冲宽度调制(PWM)模式<sup>[12-13]</sup>,其流量特性也具有不同的特点.

**4.3.1 开关模式** 在开关模式下,改变压差范围 0 ~ 200 kPa,改变电磁驱动器的驱动频率范围 0 ~ 50 Hz,步长 5 Hz,测量电磁微阀出口流量。

图 10 直观地表达了不同压差下电磁微阀驱动频率与出口流量之间的关系,并通过数字证明了其间的比例线性关系.从图 10 可以看出,在驱动频率相同的情况下,电磁微阀流量与压差呈正比;当电磁微阀入口、出口压差一定时,电磁微阀流量与驱动频率呈反比,即驱动频率越高,电磁微阀出口流量越小.其原因是:当驱动频率较高,给驱动器通断电时,电磁微阀并没有完全打开或完全关闭,因此导致电磁微阀出口流量下降.占空比为 0.5,压差为 120 kPa,驱动频率 1 Hz 时,电磁微阀最大出口流量可达到 233.2 mL/min.

**4.3.2 PWM 模式** 在 PWM 模式下,占空比  $DC = t_{on}/T$ ,其中, $t_{on}$ 是一个周期内高电平时间, $T$ 是信号周期.电磁微阀流量  $Q = Q_{FS} \times DC$ ,其中  $Q_{FS}$ 是满标度流量,即  $DC = 1$  时电磁微阀流量.电磁微阀工作在 PWM 模式下,驱动电压是方波信号,改变驱动信号占空比,在各种压差下分别对电磁微阀平均流量进行测量。

图 11 直观地表达了电磁驱动电磁微阀平均流量、压差、占空比之间的关系.从图中可以

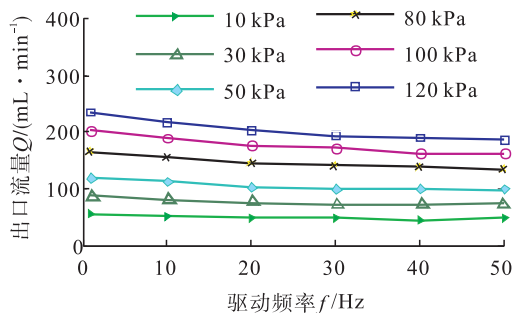


图 10 电磁微阀流量-压差-驱动频率实验结果

Fig. 10 Experimental results of flow rate-pressure differential-actuated frequency of the electromagnetic microvalve

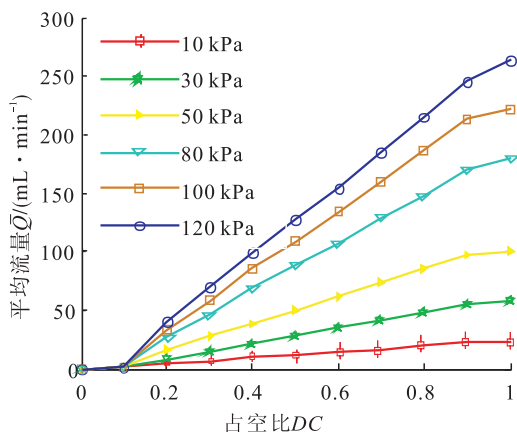


图 11 电磁微阀流量-压差-占空比实验结果

Fig. 11 Experimental results of flow rate-pressure differential-duty cycle of the electromagnetic microvalve

看出,占空比越小则平均流量越小,这是因为占空比越小,相当于在固定时间内电磁微阀关闭的时间长,而电磁微阀处于打开状态的时间则短.当占空比取极限值 0 时,电磁微阀相当于完全关闭,理论平均流量也为 0.占空比越大,电磁微阀平均流量也就越大,即电磁微阀处于完全打开状态。

当占空比小于 0.1 时,电磁微阀的平均气流量在三种压差下均小于 0.2 mL/min,因此在图中显示结果几乎为 0.这是因为电磁微阀阀口平均开度很小,流体黏性起主要作用,相当于流阻比较大,压差一定时,流量则较小.当占空比大于 0.1,压差一定时,电磁微阀平均流量与占空比呈线性关系,可为电磁微阀的 PWM 闭环控制创造良好条件.占空比有很小的改变时,流量相应地就会有较大比例的改变,这使得测量流量有很高的分辨率。

图 12 描述了压差为 100 kPa 时,不同驱动频率下电磁微阀出口流量与占空比特性实验数据与仿真结果比较, $f_a$ 是给电磁微阀施加 PWM 脉冲信号的频率.由图 12 可知,在  $0.45 < DC < 0.95$  这段范围内,电磁阀出口流量仿真值略低于实验值;其他范围内,实验值与仿真值相差无

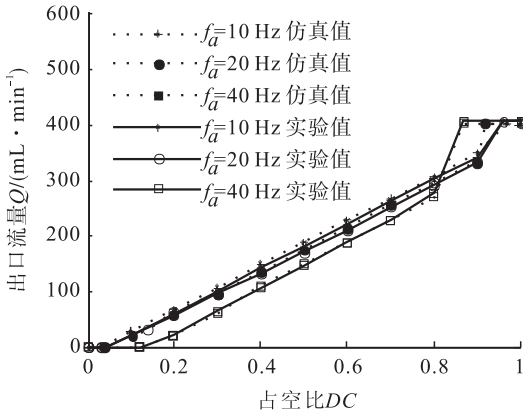


图 12 不同驱动频率和占空比下电磁微阀出口流量特性 (阀口压差为 100 kPa)

Fig. 12 Flow rate characteristics of the electromagnetic microvalve port under different actuated frequency and duty cycles (pressure differential is 100 kPa)

几,而且从总体趋势上看,出口流量仿真值与实验值都与占空比呈正比,与理论模型一致.

### 4.3.3 不同阀口开度下电磁微阀流量特性

由于电磁微阀属于开关型电磁阀,很难让阀芯处于某一种开度的状态,因此设计了手动驱动装置.利用手动旋转螺栓 M3 \* 30 (GB 818—85)的方式,精确控制阀芯的位移,以获得阀口开度,从而测量在各个阀口开度下电磁微阀出口流量.

不同阀口开度下的出口流量特性如图 13 所示.从图 13 可以看出,阀口开度较小的情况下,实验值均小于仿真值.当阀口开度趋近于 1 时,实验值趋近于仿真值.这是由于电磁微阀阀口开度较小时,手动装置很难精确控制阀芯的距离,测量误差有些过大.但是手动实验装置为开关型电磁微阀各阀口开度下流量测量提供了一种方法.

## 5 结论

本文采用新型阀体材料高弹 PDMS,设计和封装了一种面向气动微流控芯片的电磁微

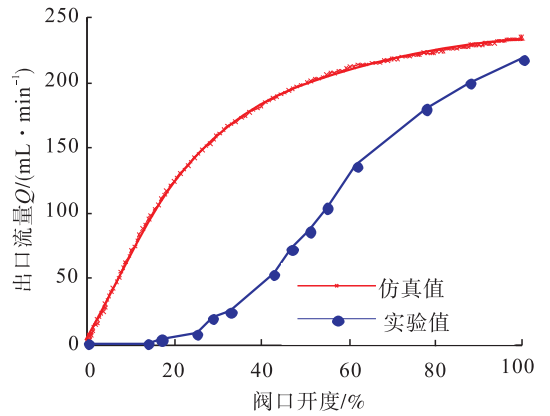


图 13 不同阀口开度下的出口流量特性 (阀口压差为 100 kPa)

Fig. 13 Flow rate characteristics of the electromagnetic microvalve port under different valve-openings (pressure differential is 100 kPa)

阀,封装尺寸仅为 30 mm × 17.5 mm × 9.8 mm.利用 Fluent 二次开发功能 UDF 编程对电磁微阀流场进行的仿真表明,电磁微阀出口流量与理论模型趋于一致.

对电磁微阀的性能进行实验研究,在开关模式下控制驱动频率、PWM 模式下控制占空比和不同阀口开度下对电磁微阀流量进行测试.将实验数据与仿真结果进行对比,发现:在驱动频率相等的情况下,电磁微阀流量与压差呈正比;当压差一定时,电磁微阀流量与驱动频率呈反比,电磁微阀平均流量与占空比呈正比;电磁微阀出口流量与阀口开度呈正比.

本文研究结果对电磁微阀的设计和测量具有较强的指导意义和参考价值,电磁微阀可以完全取代气动微流控芯片外部气路控制系统中常规电磁阀和阀组,提高气动微流控芯片系统的整体集成度,实现真正意义上的便携功能.

### 参考文献:

[1] HONG J W,QUAKE S R. Integrated nanoliter systems [J]. Nature Biotechnology, 2003, 21 (10):1179.



- [2] ARACI I E, QUAKE S R. Microfluidic very large scale integration (mVLSI) with integrated micromechanical valves [J]. *Lab on a Chip*, 2012(12):2803.
- [3] SACKMANN E K, FULTON A L, BEEBE D J. The present and future role of microfluidics in biomedical research [J]. *Nature*, 2014, 507(7491):181.
- [4] THORSEN T, MAERKL S J, QUAKE S R. Microfluidic large-scale integration [J]. *Science*, 2002, 298(5593):580.
- [5] LIU X, LI S. An electromagnetic microvalve for pneumatic control of microfluidic systems [J]. *Journal of Laboratory Automation*, 2014, 19(5):444.
- [6] ANJEWIERDEN D, LIDDIARD G A, GALE B K. An electrostatic microvalve for pneumatic control of microfluidic systems [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2012, 22(2):025019.
- [7] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [8] HOLZBOCK W G. Electromagnetic actuator servo valves [C] // *Proceedings of the Forth National Fluid Power Systems and Controls Conference*. [S. l.]:[s. n.], 1977.
- [9] 李松晶, 刘旭玲, 贾伟亮. 气动电磁微阀的仿真研究[J]. *液压与气动*, 2013(7):6.
- [10] 丁玉红. 一种小型直流电磁铁的结构设计[J]. *机电元件*, 2008, 28(4):34.
- [11] 张振, 章巧芳. 高压喷嘴的射流仿真研究[J]. *机电工程*, 2013, 30(2):185.
- [12] BINTORO J S, HESKETH P J. An electromagnetic actuated on/off microvalve fabricated on top of a single wafer [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005 (15):1157.
- [13] NGUYEN T T. One-cycle-controlled PWM for on-off valve and pneumatic actuation system [D]. Irvine: University of California, 2005.



引用格式:郭王策,王欢,张涛,等. 基于有限元的索网天线结构误差分析[J]. 轻工学报, 2018,33(4):66-72.

中图分类号:V443+.4 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2018.04.009

文章编号:2096-1553(2018)04-0066-07

# 基于有限元的索网天线结构误差分析

## Analysis of structure error for cable net antenna based on the finite element

郭王策<sup>1,2</sup>,王欢<sup>1,2</sup>,张涛<sup>2</sup>,杜雪林<sup>2</sup>

GUO Wangce<sup>1,2</sup>,WANG Huan<sup>1,2</sup>,ZHANG Tao<sup>2</sup>,DU Xuelin<sup>2</sup>

### 关键词:

索网天线;结构误差;  
制造误差;型面精度;  
有限元

### Key words:

cable net antenna;  
structure error;  
manufacturing error;  
surface accuracy;  
finite element

1. 中航光电科技股份有限公司,河南 洛阳 471003;

2. 西安电子科技大学 机电工程学院,陕西 西安 710071

1. AVIC Jonhon Optron Technology Co., Ltd., Luoyang 471003, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China

**摘要:**通过力密度迭代方法得到了索网天线的结构模型,等效地利用高斯分布模拟了制造误差和热变形误差,构建了索网天线结构误差分析的有限元模型. 以制造公差和工作温度为变量,通过具体算例分析了结构误差对索网天线型面偏差的影响,并与使用蒙特卡洛法单独分析索网天线制造误差产生的型面偏差进行比较,结果表明,该方法对结构误差的分析具有准确性和可行性,可以用来评估结构误差对天线型面精度的影响.

收稿日期:2017-07-04 修回日期:2017-12-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51775404)

作者简介:郭王策(1992—),男,陕西省铜川市人,中航光电科技股份有限公司技术员,西安电子科技大学硕士研究生,主要研究方向为星载天线结构与结构误差分析.

通信作者:杜雪林(1984—),男,河北省石家庄市人,西安电子科技大学博士研究生,主要研究方向为多体系统动力学.

**Abstract:** The structural model of the cable antenna was obtained by the force density iterative method. The Gaussian distribution was used to simulate the manufacturing error and thermal deformation error. The finite element model of the cable network structure error analysis was constructed. Taking the manufacturing tolerance and working temperature as variables, the influence of structural error on the antenna surface deviation of the cable was analyzed by a specific example. And comparison was made with the profile deviation analyze caused by the analysis of the cable antenna manufacturing error with the Monte Carlo method. The results showed that the method had the accuracy and feasibility of structural error analysis, which could be used to evaluate the impact of the structural error to the antenna profile accuracy.

## 0 引言

近年来,由于经济和军事需要,太空活动越来越频繁,受制于运载能力的限制,大口径可展开索网天线受到更多的青睐<sup>[1-10]</sup>. 索网天线主要包括五部分:环形桁架、前索网面、后索网面、竖向拉索和金属反射网,它是一种前、后索网面对称的天线结构,如图1所示. 在动力装置驱动下,索网天线可以平稳地展开,达到设计的天线构型.

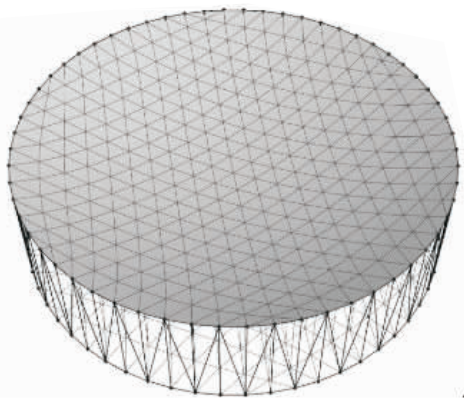


图1 索网天线

Fig. 1 Cable net antenna

索网天线前索网面背后附着的金属反射网主要用来实现信号的接收与发送,因此,前索网面的型面精度是影响天线电性能的主要因素之一. 对于大口径索网天线来说,较大的结构误差(如制造误差、热变形误差等)会严重影响天线的性能<sup>[7-11]</sup>. 在误差研究的初期,通过固有频率倒数之和来计算天线型面偏差,但此方法准

确性比较低,因此很少使用<sup>[8]</sup>. 2003年, M. Mehem<sup>[9]</sup>通过蒙特卡洛法单独地分析了天线制造误差对天线精度的影响,但未考虑热变形误差因素的影响. H. Tanaka<sup>[11]</sup>提出了根据天线增益来判断索网天线的型面偏差的方法,主要用于成型后索网天线的误差检测,不能用于设计的起始阶段,存在较大的局限性. 范叶森等<sup>[12]</sup>基于整体坐标迭代法分析了索段长度误差对索网天线精度的影响,但该算法比较繁琐且也未考虑热变形误差的影响. 目前,蒙特卡洛分析法<sup>[9]</sup>是分析制造误差的较好选择,但考虑到太空环境下天线的工作温度变化极大,索网天线易产生热变形,蒙特卡洛分析法未分析热变形对索网天线型面精度的影响,有一定的局限性.

鉴于此,本文拟运用有限元法整体分析制造误差和热变形误差对索网天线型面精度的影响,以全面评估结构误差对天线性能的影响.

## 1 索网天线的结构模型

对索网天线结构作误差分析,首先是给定索网面索段预拉力  $T_0$ ,通过力密度迭代方法进行索网天线设计<sup>[13]</sup>,得到索网天线的结构模型. 选取索网天线前索网面局部进行分析,见图2.

索网面节点  $i$  与  $j$  通过预拉力为  $T_j$  的索段相连接,索网面内部节点受力平衡

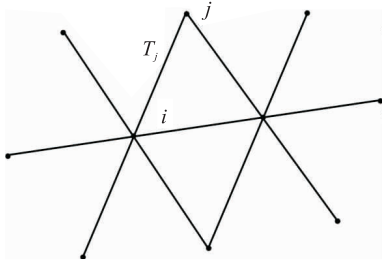


图2 索网面局部节点

Fig. 2 Part node of cable net

$$\sum_{j=1}^{c_i} T_j (X_j - X_i) / l_{ij} = f_{ix} \quad (1)$$

式①为节点*i*在*X*方向的力平衡方程,类似地,在*Y, Z*方向同样适用。

将索段力密度系数  $q_j$  带入到力平衡方程中,即索网面方程①转化为

$$\sum_{j=1}^{c_i} q_j (X_j - X_i) = f_{ix}$$

索网面内部节点处于力平衡中,也就是节点合力  $f_{xi} = 0$ 。本文要求所有索段具有相同的预拉力  $T_u = const$ ,则力平衡方程拥有唯一解,由此确定索网天线的结构模型。

## 2 结构误差的计算方法

### 2.1 制造误差的计算方法

对于索网天线来讲,结构误差主要包括制造误差和热变形误差两部分。根据相关经验,制造误差是一种随机分布,一般服从高斯分布。根据  $3 - \sigma$  准则,通过合理分配可以模拟制造误差。

$$L_M = L_{00} + \frac{R_j}{6} \quad (2)$$

式中,  $L_M = [L_1^1, L_1^2, L_1^3, \dots, L_1^j]^T$  为索网面索段实际长度,  $j$  为索段编号;  $L_{00}$  为各个索段的理论放样长度;  $R_j$  为通过标准高斯分布得到的随机数。

式②将制造误差等效地分配到索网天线每一个索段上。改变索段的放样长度,也就改变了索段张力,这样就有效地模拟了索段制造误

差对索网天线的影响。

### 2.2 热变形误差的计算方法

索网天线在轨工作时,由于太阳辐射、地球反射、地球阴影等因素的影响,天线工作温度变化大,不可避免地造成索网天线的热变形。这直接影响索网天线的形面精度,进而影响索网天线的电性能。因此,研究工作温度对索网天线精度的影响非常重要。首先,需要计算出索网天线工作温度的区间<sup>[14]</sup>:

$$T_{\max} = \left( \frac{q_{\text{IR}} \varepsilon_{\text{IR}} \sin^2 \rho + G_s \alpha_s (1 + \chi K_\alpha \sin^2 \rho)}{2 \varepsilon_{\text{IR}} \sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$T_{\min} = \left( \frac{q_{\text{IR}} \sin^2 \rho}{2 \sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$$

式中,  $q_{\text{IR}}$  为地球每平方米的红外发射量,  $\varepsilon_{\text{IR}}$  为天线表面的红外发射率,  $\rho$  为地球的角半径,  $G_s$  为太阳能辐射通量,  $\alpha_s$  为太阳表面吸收率,  $\chi$  为太阳直接辐射通量的反射率,  $K_\alpha$  为由于地球为球形所造成反射能损耗的修正系数,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数。

索网天线工作温度发生变化时,索网天线结构易产生变形。索网天线索网面由绳索组成,根据热弹性应变理论<sup>[15]</sup>,在一定的范围内索段长度的变化与温差之间是线性关系:

$$\varepsilon_T = \frac{L_T - L_{01}}{L_{01}} \quad (3)$$

$$\varepsilon_T = \alpha (T - t_{01}) \quad (4)$$

式中,  $\varepsilon_T$  为工作温度等于  $T$  时的线应变,  $L_T$  为工作温度等于  $T$  时索段长度,  $L_{01}$  为常温下的放样长度,  $\alpha$  为材料的热膨胀系数,  $t_{01}$  为标准大气压下初始参考温度。

通常,  $\alpha$  的值与材料有着密切的关系,但由于受制造等多方面因素的影响,确定索段材料热膨胀系数准确值非常困难。文献[16]给出了芳纶热膨胀系数的一个区间  $[a, b]$ , 为合理地确定材料的热膨胀系数,本文认为  $\alpha$  在一定的区间内服从高斯分布:

$$\alpha = \alpha_t + \frac{R}{3} \quad (5)$$

式中,  $\alpha_t$  表示参考温度为  $t$  时材料的热膨胀系数,  $R$  为基于高斯分布产生的随机数.

工作温度的变化会引起索网天线材料的热膨胀变形, 为了更有效地分析温差对索网天线的影 响, 公式 ③④⑤ 可以较为方便地计算索网天线网面索段的变形.

### 3 结构误差模拟与分析

#### 3.1 结构误差的模拟

根据上述计算, 结构误差可以等效为索网天线索段长度的变化. 因此, 制造误差和热变形误差可以整体地等效为索段长度的变化, 这有利于全面分析结构误差对索网反射面型面精度的具体影响.

$$\Delta L = \Delta L_M + \Delta L_T$$

$$\Delta L_M = L_M - \Delta L_{00}$$

$$\Delta L_T = L_T - \Delta L_{01}$$

式中,  $\Delta L$  和  $\Delta L_M$  分别为结构误差和制造误差引起的索网天线单元变化值,  $\Delta L_T$  为温度变化引起的索网天线索段长度的变化值.

#### 3.2 索网天线预拉力与型面精度

结构误差的存在会使索网天线失去原有的理想平衡状态, 索网天线索段单元的预拉力也会随之发生相应变化. 索网天线中每个索段单元与两个节点相连,  $i, j$  为索网面中的节点, 如图 3 所示. 将结构误差等效地转化为索段长度的变化, 重新计算索网天线各个索段的预拉力.

$$L_{i,j} = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2}$$

$$T_{i,j} = EA_{ij}\varepsilon_{ij} \quad \varepsilon_{ij} = \frac{L_{ij} - L_0}{L_0}$$

式中,  $L_{i,j}$  为之间的索段长度;  $X, Y, Z$  为相应的索段节点的坐标值;  $T_{ij}$  为索段  $i, j$  之间的预拉力;  $A_{ij}$  为索段  $i, j$  的横截面积;  $E$  为索段之间材料的弹性模量;  $\varepsilon_{ij}$  为索段  $i, j$  的线应变;  $L_0$  为索段放样长度.

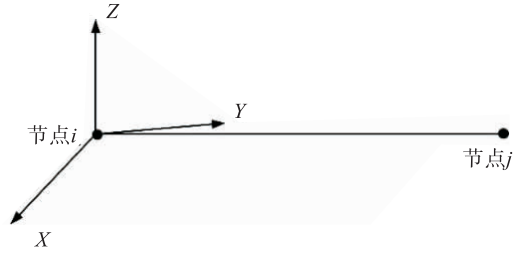


图 3 索网天线节点

Fig. 3 Cable net antenna node

考虑索网天线索段由芳纶绳索组成, 而索段单元只能承受拉力, 因此索段的线应变  $\varepsilon_{ij}$  应取非负值, 避免出现索段松弛等严重问题.

通常采用型面偏差来描述索网反射面的型面精度, 通过实际节点坐标与理想节点坐标偏移的均方根误差来计算:

$$\delta_{ms} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2 + \Delta Z_i^2) / m}$$

式中,  $m$  为自由节点的总数;  $\Delta X, \Delta Y$  和  $\Delta Z$  为索网面实际节点与理想节点的坐标之差.

$\delta_{ms}$  用来描述索网面的型面偏差,  $\delta_{ms}$  值越小, 索网天线的精度越高.

### 4 索网天线结构误差的分析步骤

索网天线是目前比较成熟的一种星载天线形式. 随着频率波段的提高, 对天线反射面要求也越来越苛刻. 本文对索网天线的结构误差进行模拟分析, 主要步骤如下:

1) 以得到的索网天线结构为模型, 根据结构误差的模拟方法, 合理地模拟天线的制造误差及热变形误差, 准确地计算出索网天线各个索段单元的实际长度.

2) 构造包含结构误差的索网天线有限元模型, 进行索网天线变形分析, 得到了新的索网天线平衡结构.

3) 以制造公差和工作温度为变量, 分析结构误差对索网天线结构的影响, 明确结构误差与型面精度、变形位移之间的关系.

### 5 算例验证

本文以索网天线为研究对象,天线采用前、后索网面对称的旋转抛物面天线形式,其结构参数如下:天线口径  $D = 12\text{ m}$ , 焦径比为  $0.6$ , 初始预拉力  $F = 100\text{ N}$ , 以索段最大拉力比  $forceration = F_{\max}/F_{\min} = 0.001$  为收敛准则. 为了进行结构误差的模拟与分析, 补充一些必要的数据: 索段单元直径  $d = 1\text{ mm}$ , 材料的弹性模量  $E = 20\text{ GPa}$ , 参考温度  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ . 在此基础上, 在 Mathematica 10.2 平台下, 对结构误差进行模拟、分配, 计算出结构误差分析所需要的数据. 同时, 在 ANSYS 15.0 平台下, 构建天线有限元误差模型, 计算结构变形位移. 图 4 给出了工作温度  $T = -70\text{ }^\circ\text{C}$ , 制造公差为  $M = 0.1\text{ mm}$  时, 天线的变形位移云图/mm.

由图 4 可知, 当工作温度为  $-70\text{ }^\circ\text{C}$ , 制造公差为  $0.1\text{ mm}$  时, 索网天线的结构已经改变, 此时天线的最大位移由  $0$  增加到  $0.277\text{ mm}$ , 索网天线的型面偏差变为  $0.132\text{ mm}$ . 可以得出, 在结构误差的影响下, 天线结构发生了微小变形, 导致型面精度下降.

为进一步了解结构误差对索网天线型面精度的影响, 就要具体分析结构误差引起的天线型面偏差. 结构误差主要分为制造误差和热变形误差两类. 制造误差的分布主要是由天线实际制造时的制造公差决定的, 而热变形误差主要是由天线工作温度变化造成的. 下面分别以制造公差和工作温度为变量, 分析天线结构误差产生的型面偏差. 为避免样本过少对实验结果的较大影响, 根据式③④, 选取三个小组样本, 其工作温度分别为  $-70\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $110\text{ }^\circ\text{C}$ . 对每个小组样本, 取不同的制造公差(分别为  $0.1\text{ mm}$ ,  $0.3\text{ mm}$ ,  $0.5\text{ mm}$ ) 进行结构误差分析, 结果见表 1.

由表 1 可以看出不同结构误差下的索网天线型面偏差分布情况. 随着天线制造公差的增大, 表 1 中的天线型面偏差都在不断地增大, 只是增加幅度有所不同: 当工作温度相同时, 随着制造公差的增大, 型面偏差变大, 天线的型面精度下降; 当制造公差相同, 且工作温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$  时, 天线的型面偏差较小, 即此时的结构误差对天线影响较小, 这是因为  $20\text{ }^\circ\text{C}$  的工作温度接近天线制造时的参考温度, 即是说此时天线热变

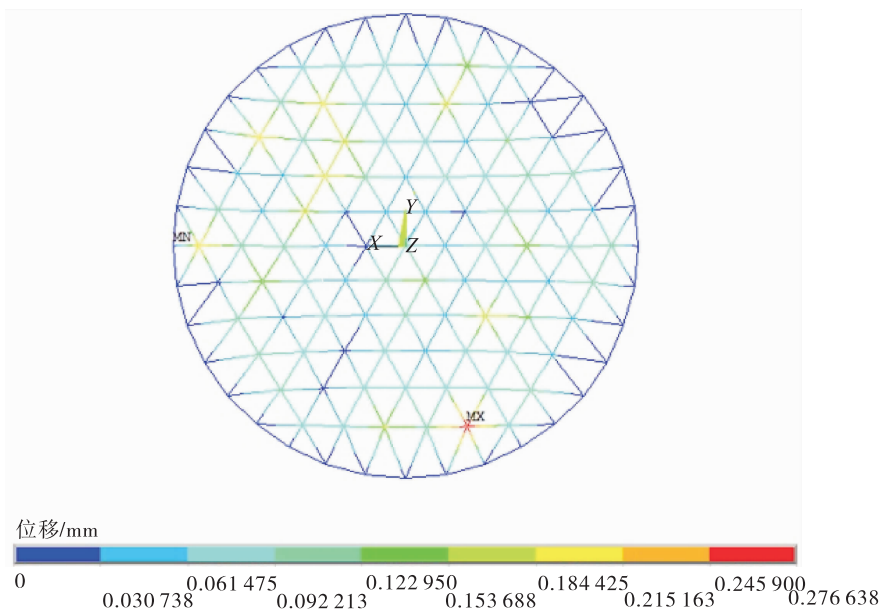


图 4 索网天线变形位移云图

Fig. 4 Deformation and displacement cloud map of cable net antenna

表1 结构误差分析

Table 1 Structure error analysis mm

工作温度/℃	制造公差	最大变形位移	型面偏差
-70	0.1	0.277	0.132
	0.3	0.552	0.232
	0.5	1.133	0.523
20	0.1	0.201	0.069
	0.3	0.533	0.201
	0.5	0.959	0.431
110	0.1	0.401	0.135
	0.3	0.562	0.241
	0.5	1.001	0.514

形误差较小.因此,结构误差整体引起的型面偏差较小.

对于设计得很好的索网天线结构模型,当没有考虑结构误差(制造误差与热变形误差)时,索网天线为平衡结构,最大变形位移为0;当考虑结构误差时,索网天线的结构被改变,天线结构发生变形,表1中的最大变形位移均大于0.同时,从中可以看出,天线的最大变形位移越大,天线的型面偏差越大.

此外,笔者又使用蒙特卡洛法利用有限元对索网天线制造误差单独进行了分析,而没有考虑热变形误差,以进一步验证本文结构误差干扰分析方法的可行性和有效性.蒙特卡洛分析法对天线制造公差的分析结果见表2.

通过将表2与表1对比发现,表1中的索网天线型面偏差基本都大于表2中的形面偏差值,这是因为本文的结构误差分析包含了热变形误差和制造误差,而蒙特卡洛法(表2)只分析了制造误差.由表1和表2可以看出,索网天

表2 蒙特卡洛法误差分析

Table 2 Error analysis of

Monte Carlo method		mm
制造公差	变形最大位移	型面偏差
0.1	0.202	0.070
0.3	0.512	0.201
0.5	0.905	0.421

线的工作温度接近于参考温度时,结构误差引起的型面偏差接近蒙特卡洛型面偏差值,这说明本文结构误差分析方法是有效的、可行的.

## 6 结论

本文通过高斯分布合理地模拟了索网天线的结构误差分布,包括制造误差和热变形误差,运用有限元模型对索网天线的结构误差进行分析,计算结构误差对索网天线型面精度的影响.最后,通过算例分析了结构误差对索网面型面精度的影响,通过与蒙特卡洛法单独分析制造误差产生的型面偏差的对比,验证了本文结构误差分析方法的有效性和可行性.

综合考虑,天线的型面偏差主要是由结构误差,即制造误差和热变形误差造成的.制造误差的分布取决于天线的制造公差,天线制造公差的选取,一方面要保证天线满足型面精度要求,另一方面取决于制造工艺水平和经济性.因此本文给出的不同结构误差下天线型面偏差分布的情况,具有一定的工程参考价值.

## 参考文献:

- [1] THOMAS M W. Historical perspectives on the development of deployable reflectors [C]//The 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structure Dynamics and Materials Conference. Reston VA: AIAA, 2009: 2605.
- [2] 李团结, 张琰, 段宝岩. 周边桁架可展开天线展开过程运动分析及控制[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2007, 34(6): 916.
- [3] 杨东武, 仇原鹰, 段宝岩. 索网式天线结构预拉力优化的新方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2008, 35(2): 319.
- [4] ORIKASA T, MIURA A, HIROYUKI T, et al. A study of large reflector antenna mounted on communication satellite for satellite terrestrial mobile communication system [C]//31st AIAA

- International Communications Satellite Systems Conference. Reston VA: AIAA, 2013: 5649.
- [5] SHI H, YANG B, FANG H. Offset-feed surface mesh generation for design of space deployable mesh reflectors [C] // 14th AIAA Gossamer Spacecraft Forum. Reston VA: AIAA, 2013: 1526.
- [6] 李团结, 周懋花, 段宝岩. 可展天线的柔性索网结构找形分析方法[J]. 宇航学报, 2008, 29(3): 794.
- [7] LOPATIN A V, RUTKOVSKAYA M A, GANTOVNIK V B. Accuracy analysis of the reflective surface of the umbrella-type antenna [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2008, 45(1): 149.
- [8] HEDGEPEETH J M. Influence of fabrication on the surface accuracy of large antenna structures [J]. AIAA Journal, 1982, 20(5): 680.
- [9] MEHEM M. Methods of analyzing surface accuracy of large antenna structures due to manufacturing tolerance [C] // Proceeding of 44th AIAA/ASMW/ASCE/AHS/ASC Structures, Structure Dynamics and Materials Conference. Norfolk: AIAA, 2003.
- [10] MEGURO A, HARADA S, WATANABE M. Key technologies for high-accuracy large mesh antenna reflectors [J]. Acta Astronautica, 2003, 53: 899.
- [11] TANAKA H. Surface error estimation and correction of a space antenna based on antenna gain analyses [J]. Acta Astronautica, 2011, 68: 1062.
- [12] 范叶森, 马小飞, 李正军, 等. 绳索长度误差对索网天线网面精度影响的分析方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 64.
- [13] MORTEROLLE S, MAURIN B, QUIRANT J, et al. Numerical form-finding of geotensoid tension truss for mesh reflector [J]. Acta Astronautica, 2012, 76: 154.
- [14] TIBERT G. Deployable tensegrity structures for space applications [R]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2002: 147 - 150.
- [15] 王洪纲. 热弹性力学概论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.
- [16] 李同起, 王成扬. 影响芳纶纤维及其复合材料性能的因素和改善方法 [J]. 高分子材料科学与工程, 2003, 19(5): 5.





引用格式:张志远,赵幸,靳晔. 基于生物激励神经网络的清洁机器人遍历路径规划算法的改进[J]. 轻工学报,2018,33(4):73-78.

中图分类号:TP24;TS976.14 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2018.04.010

文章编号:2096-1553(2018)04-0073-06

# 基于生物激励神经网络的 清洁机器人遍历路径规划算法的改进

## Improvement of traversal path planning algorithm of cleaning robot based on biologically inspired neural network

张志远,赵幸,靳晔

ZHANG Zhiyuan, ZHAO Xing, JIN Ye

郑州轻工业学院 机电工程学院,河南 郑州 450002

College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry,  
Zhengzhou 450002, China

### 关键词:

清洁机器人; 路径规划; 生物激励神经网络

### Key words:

cleaning robot;  
path planning;  
biologically inspired  
neural network

**摘要:**针对基于生物激励神经网络的清洁机器人遍历路径规划算法的遍历面积重复率和遍历路径总长度均较大的问题,对该算法进行了改进:在脱困算法中,采用实时监测机器人邻域神经元状态的方法,使机器人脱困路径缩短;引入邻域神经元状态准则,使机器人在遇到孤岛障碍物避障时,先沿障碍物边沿遍历。仿真结果表明,改进算法可以有效降低遍历面积重复率、遍历路径总长度和转弯次数。

收稿日期:2018-02-07

基金项目:河南省重点科技攻关项目(17210210057);郑州轻工业学院星空众创空间孵化项目

作者简介:张志远(1978—),男,河南省唐河县人,郑州轻工业学院副教授,博士,主要研究方向为轻工机械自动化、控制仪器仪表。

**Abstract:** In view that the traversal area repetition rate and the total length of the traversal path of the traversal path planning algorithm of the cleaning robot based on the biologically inspired neural network are large, the algorithm was improved. In the relief algorithm, the method of real-time monitoring of the neurons in the neighborhood of the robot was adopted to shorten the path for the robot to get out of difficulty. The state criteria of neighboring neurons were introduced to make the robot traverse along the edge of the obstacle traversal when obstructing obstacles in an island. Simulation results showed that the improved algorithm could effectively reduce the traversal area repetition rate, the total length of the traversal path and the number of turning.

## 0 引言

随着科学技术的发展和人们生活水平的提高,智能清洁机器人逐渐进入千家万户,其路径规划算法也越来越受到重视. 路径规划一般分为两种:一种是点到点的路径规划,它要求机器人能够在工作区间内找到一条从始点到终点的路径<sup>[1-2]</sup>,使机器能够依此路径从始点顺利到达终点且不会在行进过程中碰到障碍物;另一种是完全遍历路径规划,它要求机器人在工作空间内找到一条可以遍历环境中每一个可行点的路径<sup>[2-3]</sup>,使机器人在结束运行时能遍历工作环境中的任意一个可通行点. 对清洁机器人而言,其路径规划主要是完全遍历路径规划<sup>[3]</sup>. 目前有很多方法被用于清洁机器人的完全遍历路径规划,例如随机遍历算法、单元分解法、基于模板的模型法等<sup>[4]</sup>. 随机遍历算法覆盖原理简单、易于实现,但存在较大的重复遍历区域;单元分解法运用在障碍物较多的工作环境中时,划分区域较多,导致重复遍历区域过多;基于模板的模型法由于其模板匹配局限性高,设计时往往需要实地考察遍历环境. S. X. Yang等<sup>[5]</sup>将神经动力学网络模型应用于移动机器人的路径规划中,提出了一种基于生物激励神经网络的算法,该算法对环境的依赖性不大,即使在障碍物较多的环境中,也能很好地对工作区域进行遍历. 但是,该算法在清洁机器人进入死区时,脱困路径较长,且遇到孤岛障碍物时的避障规划路径较长,这使得机器人的遍历面积重

复率和遍历路径总长度均较大. 鉴于此,本文拟在脱困算法中实时监测机器人邻域神经元状态,同时引入邻域神经元状态准则,对基于生物激励神经网络的清洁机器人遍历路径规划算法进行改进,以缩短机器人的脱困路径和避障规划路径,从而降低遍历路径总长度.

## 1 基于生物激励神经网络的遍历路径规划算法与问题

神经动力学网络模型有如下形式<sup>[5-7]</sup>:

$$\frac{dx_i}{dt} = -Ax_i + (B - x_i)S_i^e - (D + x_i)S_i^i \quad (1)$$

式中, $x_i$ 表示第*i*个神经元的状态; $A$ 是指神经元活性的衰减率, $B$ 和 $D$ 分别是神经元活性状态的上限和下限,它们都是非负常数; $S_i^e, S_i^i$ 分别表示神经元的兴奋输入和抑制输入.

文献[5]将式(1)所示模型引入移动机器人的路径规划,得到模型<sup>[6-8]</sup>

$$\frac{dx_i}{dt} = -Ax_i + (B - x_i)([I_i]^+ + \sum_{j=1}^k w_{ij}[x_j]^+) - (D + x_i)[I_i]^-$$

式中, $[I_i]^+ + \sum_{j=1}^k w_{ij}[x_j]^+$ 为神经元的兴奋输入, $[I_i]^+ = \max(0, I_i)$ ;  $[I_i]^-$ 为神经元的抑制输入, $[I_i]^- = \max(0, -I_i)$ ;  $w_{ij}$ 为两个神经元间的连接权值.

$E$ 是一个远大于 $B$ 的正常数, $I_i$ 为第*i*神经元的外部输入. 若第*i*神经元为目标点  $I_i = E$ ; 若第*i*神经元为障碍物  $I_i = -E$ ; 否则  $I_i = 0$ . 图

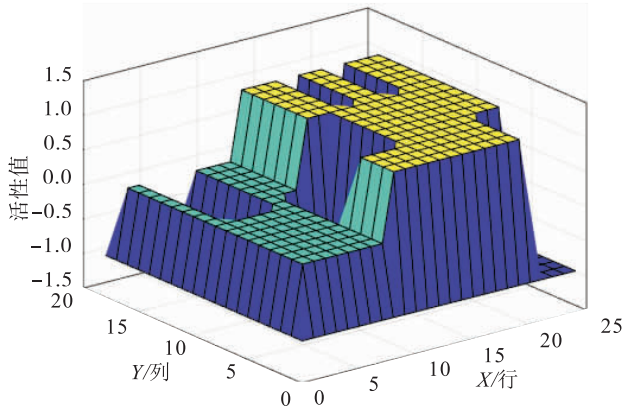


图1 生物激励神经网络产生的激励场景

Fig. 1 The activity landscape generated by the biologically inspired neural network

1 为利用该方法产生的激励场景。

由图1可知,未遍历区域的神经元活性很大,用波峰表示;障碍物的活性值很小,为负值,用波谷表示;已遍历区域障碍物的神经元活性为0,介于波峰与波谷之间。

假设  $p_c$  为当前机器人在工作空间的位置,  $p_n$  为机器人下一时刻的运动位置。若将此算法用于点对点的路径规划,则  $p_n$  由下式确定:

$$p_n \leftarrow x_{p_n} = \max \{x_j, j = 1, 2, \dots, k\} \quad (2)$$

若此算法用于完全遍历路径规划时,则  $p_n$  由下式确定<sup>[9]</sup>:

$$p_n \leftarrow x_{p_n} = \max \{x_j + cy_j, j = 1, 2, \dots, k\} \quad (3)$$

其中,  $c$  是一个大于0的常数;  $k$  表示邻域神经元的总数;  $y_j = 1 - \Delta\theta_j/\pi$ , 这里的  $\Delta\theta_j \in [0, \pi]$ , 表示当前时刻与下一时刻的方向角改变的绝对值。

由式(3)可知,机器人遍历路径规划具体生成过程如下:

- 1) 计算出机器人当前位置各个邻域神经元活性值的大小,并取其中的最大值;
- 2) 判断邻域神经元活性值的最大值是否大于机器人当前位置所在神经元的活性值,若小于,则机器人陷入死区,机器人首先计算出距死区位置最近且活性值大于0的神经元位置作

为脱困目标点,然后利用式(2)中的算法进行脱困;若大于等于,则机器人的下一步移动位置即为邻近神经元中具有最大活性值的神经元所在的位置。

3) 将机器人下一步移动位置作为机器人新的当前位置,判断是否完成遍历,若未完成遍历,跳转到第1步;若完成遍历,结束算法。

根据生物激励神经网络遍历路径规划算法的原理,运用 Matlab 软件在计算机中建立一个  $25 \times 20$  栅格地图,来模拟机器人的工作环境。设定机器人起始栅格的坐标为(2,2),则由生物激励神经网络遍历路径规划算法得到的遍历路径如图2所示,其中“\*”代表工作环境中的障碍物,“o”表示机器人的起点和终点位置,“△”表示机器人陷入死区时的脱困路径。机器人结束遍历时所处栅格的坐标为(24,18),这是由算法决定的。

由图2可知,采用基于生物激励神经网络算法基本可以成功避开障碍物,并完成对工作环境的遍历,规划的路径也较为合理。但是规划路径有较大的重复区域(图中的“△”区域),导致清扫效率降低。在A处虽能完成对任务区域的完全遍历,但规划路径较长,不利于遍历路径

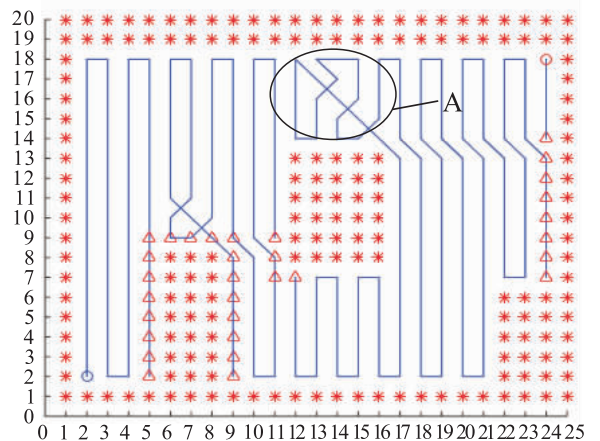


图2 基于生物激励神经网络的规划路径

Fig. 2 The path planned based on biologically inspired neural network

总长度的降低.

当机器人进入坐标为(5,2)的栅格时,机器人便进入死区.脱困算法首先计算出工作环境中距死区位置最近且活性值大于0的神经元位置(即坐标为(9,2)的栅格),将其作为脱困路径规划的目标点,即脱困位置;然后机器人从死区位置移动到脱困位置后,继续按原算法清扫.这种算法虽然可以解决机器人“死区”问题,但从图2中也可以看出,在机器人未到达脱困位置前,在(5,9)位置时就已经脱困,而机器人移动到(9,2)位置后再按原算法进行遍历会造成某些区域的重复遍历.在图2中的A处,当机器人对孤岛障碍物避障时,会根据算法向活性值最大的神经元行进,这导致其无法沿着障碍物边沿行进,使得此处的遍历路径长度增加.这种向最大活性值的神经元行进的运动准则称为邻域神经元最大活性值准则.

## 2 算法的改进

### 2.1 脱困算法的改进

当机器人进入死区时,机器人首先会在环境地图中找到距离死区最近且活性值大于0的神经元作为脱困目标点,然后运用式②所示的点对点的路径规划方法,使机器人向脱困目标点移动.若机器人当前位置和脱困目标点位置一致时,则结束脱困算法.但由于机器人得到的脱困目标点并不一定是最优的脱困位置,因此使用该算法所规划的脱困路径较长.经过大量实验可知,机器人的最优脱困位置总在机器人从死区位置到脱困目标点的路径上.因此可以在机器人向目标脱困点移动的过程中,实时检测机器人当前位置邻域神经元的状态以判断其是否脱困,从而在规划的脱困路径上寻找到最优的脱困位置,及时脱困,并结束脱困算法.

由上述对脱困算法的改进可知,改进前的脱困算法的判断条件是清扫机器人是否到达脱

困目标点;改进后的脱困算法的判断条件是检测邻域神经元中是否存在活性值大于0的神经元.运用改进后的脱困算法可以使机器人在向脱困目标点移动的过程中,每走一个栅格便检测该栅格所对应的邻域神经元状态.若邻域神经元中存在活性值大于0的神经元,则表示机器人的当前位置即为最优脱困位置.寻找到最优脱困位置后,机器人就结束脱困算法,返回遍历算法继续对未遍历部分进行遍历.

### 2.2 孤岛障碍物避障规划

由生物激励神经网络算法的原理可知,机器人下一步的运动位置完全是由邻域神经元的活性值大小决定的.因此当机器人遇到孤岛障碍物避障时,就会出现如图2中A处的路径.机器人向倾斜方向运动,造成后续的规划路径较长.为减短机器人的规划路径,规定当机器人进行孤岛障碍物避障时,首先沿着障碍物边缘行走,然后再执行原算法,使机器人的孤岛障碍物避障规划路径为图3所示的理想路径.

在此引入一种新的机器人行进准则,称为邻域神经元状态行进准则(见图4),并规定神经元状态行进准则优先级高于邻域神经元最大活性值准则.机器人首先检测邻域神经元各个神经元状态(障碍物、未遍历区域、可遍历区域)的分布情况,然后再确定下一步的行动位置.

图4中黑色栅格表示机器人当前位置,灰色部分表示障碍物位置.由图4a)可知,当机器人在向下运动过程中,检测到 $1^{\#}$ 和 $4^{\#}$ 位置为障碍物、且 $6^{\#}$ 和 $7^{\#}$ 位置为未遍历区域时,无论邻域神经元中的活性值如何,机器人首先沿着障碍物方向向下移动,到达 $7^{\#}$ 位置后规定下一步移动方向向左.由图4b)可知,当机器人向上运动过程中,检测 $4^{\#}$ 和 $6^{\#}$ 位置为障碍物、且 $1^{\#}$ 和 $2^{\#}$ 位置为未遍历区域时,无论邻域神经元中的活性值如何,机器人首先沿着障碍物方向向上移动,

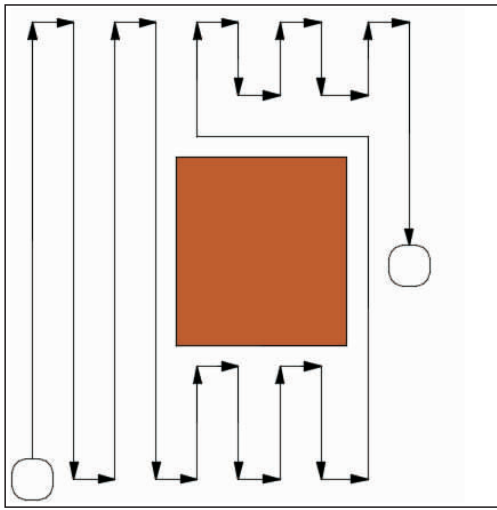
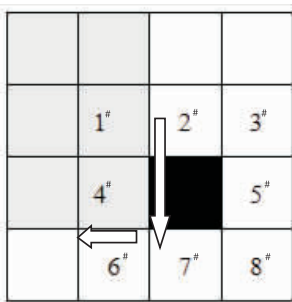
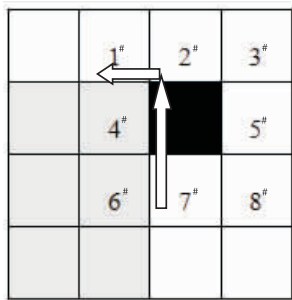


图3 理想的避障规划路径

Fig. 3 Ideal obstacle avoidance planning path



a) 向下运动时的准则



b) 向上运动时的准则

图4 邻域神经元状态准则示意图

Fig. 4 Schematic diagram of neighboring neuron status criteria

到达 2# 位置后规定下一步移动方向向左.

### 3 仿真实验分析

#### 3.1 遍历路径规划评价指标

为了对改进前后算法所产生的遍历路径规

划的优劣进行比较,引入以下 3 个路径规划评价指标.

##### 1) 遍历面积覆盖率

遍历面积覆盖率是指机器人完成遍历时,实际遍历区域与任务遍历区域面积的比值.假设  $S_c$  表示实际遍历区域面积,  $S$  表示任务遍历区域面积,  $c$  表示遍历面积覆盖率,则三者之间的关系可以表示为

$$c = \frac{S_c}{S}$$

##### 2) 遍历面积重复率

遍历面积重复率是指机器人完成遍历时,重复遍历区域和任务遍历区域面积的比值.假设  $S_p$  表示重复遍历区域面积,  $S$  表示任务遍历区域面积,  $P$  表示遍历面积重复率,则三者之间的关系可以表示为

$$P = \frac{S_p}{S}$$

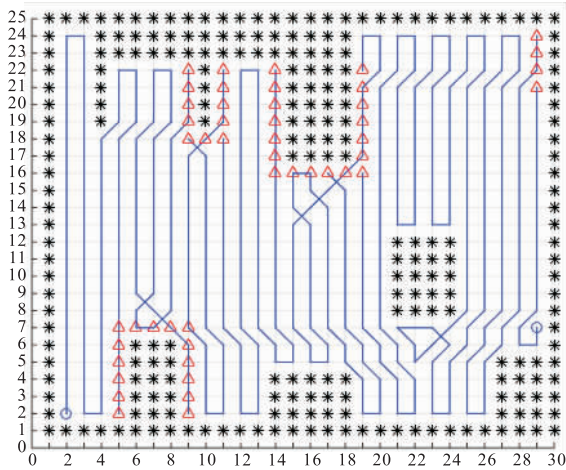
##### 3) 遍历路径总长度

遍历路径总长度是指机器人用尽可能短的路径完成对整个任务区域的遍历,遍历路径总长度的大小直接反映了遍历方法的合理性.

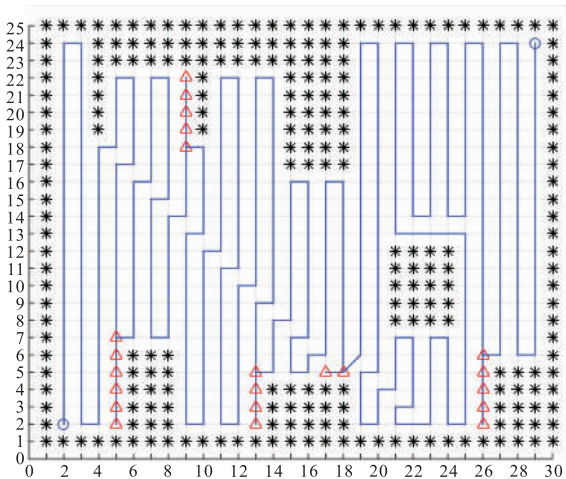
### 3.2 结果分析

用 Matlab 设定一个  $30 \times 25$  的栅格的环境地图,图中每个栅格都代表一个神经元,设定机器人的起始点坐标为  $(2, 2)$ ,分别利用生物激励神经网络算法和改进后的算法使机器人对整个设定环境进行遍历.图 5a) 为采用生物激励神经网络算法得到的规划路径,图 5b) 为采用改进后的算法得到的规划路径,表 1 为生物激励神经网络算法改进前后遍历路径性能指标结果.从图 5 可以直观地看出,采用改进算法得到的脱困路径较神经网络算法得到的脱困路径较短,减少了由于脱困算法而导致的机器人对工作环境的重复遍历面积,并且对孤岛障碍物避障规划路径也更优.

由表 1 可以看出,改进前后的算法均能 100%



a) 改进前的算法产生的路径



b) 改进后的算法产生的路径

图5 生物激励神经网络算法改进前后  
遍历路径规划对比

Fig. 5 Comparison of path planning before and  
after improvement of biologically inspired  
neural network algorithm

表1 生物激励神经网络算法改进  
前后遍历路径性能指标

Table 1 Traversal path performance indicators  
before and after improvement of biologically  
inspired neural network algorithm

规划方法	遍历面积 覆盖率/%	遍历面积 重复率/%	转弯 总数/次	遍历路径 总长度/步
原算法	100	10.38	158	574
改进算法	100	4.23	100	544

地完成对工作环境的遍历,但改进后的算法遍历面积重复率由原算法的 10.38% 降到了 4.23%,转弯次数也从原来的 158 次降到了 100 次,同时遍历路径的总长度也降低了 30 步.这说明改进后的算法产生的规划路径优于改进前的算法产生的规划路径.

### 4 结语

本文对基于生物激励的神经网络的清洁机器人遍历路径规划算法进行了改进:采用实时监测机器人邻域神经元状态来判断其是否脱困,以减短机器人的脱困路径;采用邻域神经元状态准则,使机器人在遇到孤岛障碍物避障时,先沿障碍物边沿遍历.对改进前后生物激励神经网络算法仿真所得到的规划路径进行比较分析,结果表明,改进后的算法在保证机器人遍历完成率为 100% 的前提下,能够减少遍历面积重复率、遍历路径总长度和转弯次数.

本文对清洁机器人遍历算法的研究是在静态的室内环境进行的,而在实际的工作环境中,通常会存在一些可以移动的障碍物,如行走的人、宠物、运行的玩具车等.因此下一步的研究需要进一步对该算法进行完善,使其在具有动态移动障碍物的环境中也能对设定区域达到很好的遍历效果.

### 参考文献:

[1] 高瑜,过金超,崔光照.一种改进的多机器人路径规划自适应人工势场法[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版),2013,28(6):77.

[2] 范莉丽,王奇志.改进的生物激励神经网络的机器人路径规划[J]. 计算机技术与发展,2006,16(4):19.

[3] 李瑞峰,张超,黄超,等.清扫机器人路径规划的研究[J]. 机械设计与制造,2012(12):160.

(下转第 85 页)



引用格式:陈建明,张盼盼.灰色BP神经网络模型在电力系统短路电流峰值预测中的应用[J].轻工学报,2018,33(4):79-85.

中图分类号:TM713 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2018.04.011

文章编号:2096-1553(2018)04-0079-07

# 灰色BP神经网络模型 在电力系统短路电流峰值预测中的应用

## Application of grey BP neural network model in short circuit current peak prediction of power system

陈建明,张盼盼

CHEN Jianming, ZHANG Panpan

关键词:

电力系统;短路电流  
峰值预测;灰色模型;  
BP神经网络;全局协  
调性保护

华北水利水电大学 电力学院,河南 郑州 450045

College of Electric Power, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China

Key words:

power system; short  
circuit current  
peak prediction;  
grey model;  
BP neural network;  
global coordination  
protection

**摘要:**针对灰色预测模型在电力系统短路电流峰值预测中因数据迭代不合理而不能充分利用新的有效信息的问题,提出了一种适合电力系统的灰色BP神经网络动态预测模型.该模型通过引入动态的数据迭代模型,以最小相对误差为目标参数对传统灰色模型进行改进.通过Matlab/Simulink搭建电力系统短路故障模型进行仿真分析,获得不同初相角下电力系统短路时的电流数据;将短路电流、故障初相角、灰色模型预测结果和其相对残差作为BP神经网络的输入对改进的灰色模型进行训练,得到最终的短路电流峰值预测模型.验证实验表明,该模型能够快速、准确地预测短路电流峰值,适用于原始样本点少、非线性特征显著和随机性强的复杂系统.

收稿日期:2018-05-21

作者简介:陈建明(1962—),男,河南省洛阳市人,华北水利水电大学教授,主要研究方向为检测技术与自动化装置.

**Abstract:** In view of the unreasonable data iteration and the problem that the new effective information can not be fully utilized of the grey prediction model in the short circuit current peak prediction of power system, a grey BP neural network dynamic prediction model was proposed to adapt for power system. By introducing the dynamic data iteration model, the traditional gray model was improved with the minimum relative error as the target parameter. The short circuit fault model of power system was built by Matlab/Simulink for simulation analysis, and the current data of short circuit of power system under different initial phase angles were obtained. The improved grey model was trained by the short circuit current, the fault initial angle, the prediction result of the grey model and its relative residuals as the input of training BP neural network to obtain the final prediction model of the short circuit current peak. Verification experiments showed that the model could achieve fast and accurate prediction of short circuit current peaks, and was suitable for complex systems with few original sample points, significant nonlinear features and strong randomness.

## 0 引言

随着电力系统网络规模日益庞大,随之而来的短路故障也变得越来越复杂,给工人检修和自动化装置设置都带来了很大的困难. 电力系统的故障定位与故障类型识别有利于故障的小范围隔离与快速检修<sup>[1]</sup>,对电网故障的全面综合诊断有着重要的意义. 因此,国家电力主管部门在综合分析各方面因素后,对现代电力系统和智能电网各级断路器及其保护系统提出了智能化全局协调性保护的要求.

针对短路故障的研究方法较多,文献[2-5]分别运用了小波算法与形态学相结合的算法、BP神经网络、基于广义回归神经网络的方法、遗传算法与BP神经网络相结合的方法. 短路电流在极短的时间内达到最大,不及时有效地切断故障部分会对电器设备及其他线路产生很大的危害<sup>[6]</sup>,所以对短路故障电流峰值进行预测可以提高全局的协调保护能力与水平. 但目前对短路故障电流的峰值进行预测的文献却非常少,方法也很有限. 文献[7]采用最小二乘法对短路电流的峰值进行曲线拟合,此法易实现、实时性好,但存在预测准确性不稳定的问题. 文献[8]采用的是人工神经网络的方法,但由于短路故障电流峰值受很多不确定参数的影响,要想获得较高的预测精度,需要训练

十分庞大的神经网络数据,因此无法在短时间内充分利用有限的信号特征对短路电流峰值的增长趋势进行准确预测,也就无法实现对电力系统的保护.

电力系统发生短路故障的随机性高,很多信息没有固定特征,与灰色预测模型的特征相吻合. 但是,单一的预测方法容易在某一方面表现出明显的劣势,所以本文拟建立BP神经网络与灰色模型相结合的预测模型,充分发挥它们各自的长处,弥补不足<sup>[9]</sup>,以期提高预测精度,减少预测时间,更好地满足实践中的需要.

## 1 短路故障分析

电力系统发生短路故障后,短路电流呈非周期性变化,瞬时值中包含大量的信息,这些信息分为周期性分量和非周期性分量,其中非周期性分量按照指数规律衰减,衰减的速度由时间常数  $\tau = L_1/R_1$  决定<sup>[10]</sup>. 为了获得电力系统中发生短路故障时电流的特征,将传统的短路故障电路图进行简化,经过综合分析可以得出故障出现时电流的瞬时值表达式为

$$i^*(t) = Q \sin(\omega t + \alpha - \varphi_1) + [\sin(\alpha - \varphi_2) - Q \sin(\alpha - \varphi_1)] e^{(R_1/L_1)t}$$

其中,  $i^*(t)$  为短路电流标么值,  $\omega$  为角频率,  $\alpha$  为短路故障电压初相角,  $R_1$  和  $L_1$  为电源侧等效

电阻和电感,  $Q = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2}$ .



### 1.1 仿真模型的建立

电力系统的物理模型有很多,为了得到出现短路故障时的电流数据,本文选用图 1 所示的短路故障模型,这里仅列举了部分电力参数<sup>[11]</sup>.

物理模型搭建后,通过 Matlab/Simulink 电力系统工具箱对该模型进行仿真(见图 2),以获取全相角范围内短路故障发生时的电流数据,为随后的模型预测提供原始数据.

### 1.2 仿真波形分析

短路故障仿真结果如图 3 所示.由图 3 可知,随着故障发生时初相角的改变,短路故障电流的波形和第一峰值也随之改变,这说明短路电流峰的第一峰值与故障发生时的相角有着不可分割的联系.这就要求我们在对短路电流的峰值进行预测时,应当将初相角的变化作为控制条件加以考虑.

## 2 灰色 BP 神经网络模型的建立

### 2.1 传统灰色模型及其改进

电力系统发生短路故障后,电源侧电力参数的变化关系可以表示为一阶微分方程:

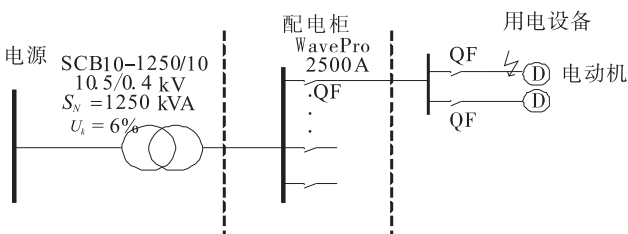


图 1 短路故障模型

Fig. 1 The model of short circuit fault

$$\frac{dl}{dt} + \frac{R}{L}I = \frac{1}{L}U(t)$$

短路微分方程用灰色预测理论求解后可以表示为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b\sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

其中,  $a$  和  $b$  都为待求微分方程常系数,由  $R, L, U_m$  确定. 再将式 (1) 离散化可得

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b\sin(\omega k + \varphi) \quad (2)$$

其中,  $\omega = 2\pi f$  为数字角频率,  $k(k \geq 0)$  是采样点序号.

传统的灰色预测模型以  $x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\}$  为灰色预测方程 (2) 的初始数据, 带入后可得到预测结果为

$$\hat{x}^{(1)}(k) = [x^{(1)}(1) - \frac{b}{\sqrt{a^2 + \omega^2}}\sin(\omega \times N_0 + \gamma - \beta)] \times e^{-a(k-N_0)} + \frac{b}{\sqrt{a^2 + \omega^2}}\sin(\omega k + \gamma - \beta) \quad (3)$$

其中,  $\beta = \arctan\omega/a; k = 1, 2, \dots, n + t, t$  是预测步长.

灰色预测模型实质上是一种累加计算,用以弱化原始数据的随机性<sup>[12]</sup>. 在原始数据中并不是所有的数据都对预测精度有直接影响,对预测结果影响较小的数据,如何为其加入新的预测信息建立一个动态的预测模型才是预测的核心. 鉴于这种情况,从采样点  $N_0$  后开始,在下次数据迭代时改变固有的等维顺序迭代模型,

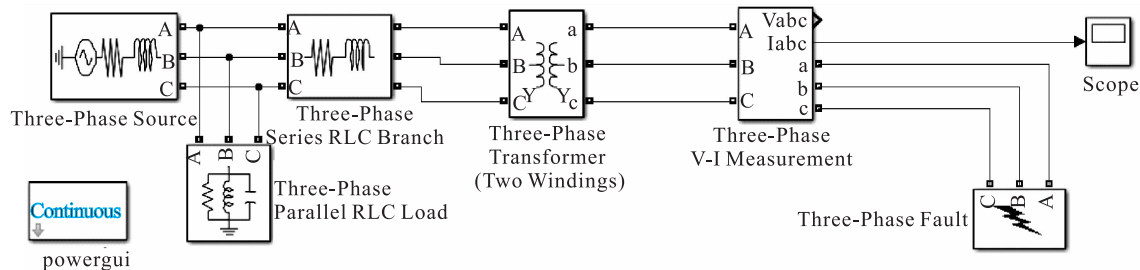


图 2 短路故障仿真模型

Fig. 2 Simulation model of short circuit fault

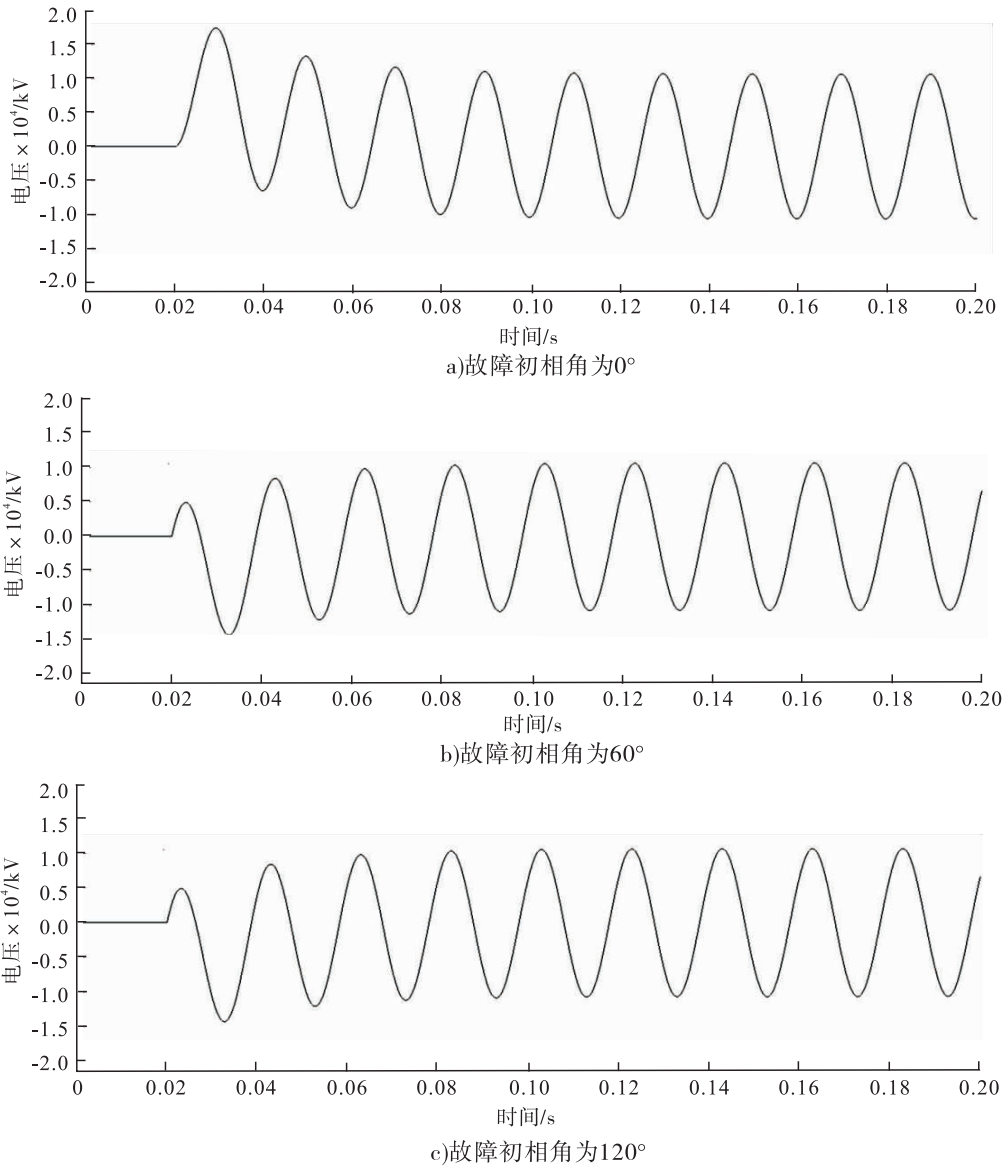


图3 短路故障仿真结果图

Fig. 3 Short circuit fault simulation diagrams

对不同时刻的数据进行合理的取舍,将关联性不大、信息不重要的点舍去(一般是每次迭代开始的几个点),增加相邻序列中一定数量的点,既可以缩短预测时间也可以提高预测精度。

本文在传统灰色模型的基础上经过多次建模分析,建立了动态的灰色预测模型,即采用“去  $d$  加  $d$ ”的动态结构,在每轮开始循环预测时去掉该序列中  $d$  个旧的原始数据,同时向后顺延  $d$  个新的预测数据。另外,从模型预测的结果来看,不同的  $d$  值对应的预测精度也不一样,

需要在编程时增加判断过程,选择快速性好、精度高的作为结果输出。

在传统的灰色模型递推过程中,每组以固定的数进行循环预测,所以循环的起始点在不断改变。改进后的模型不仅起点发生了变化而且也不具有连续性,所以,式③的初始迭代点和  $N_0$  的值都需要实时调整。为了使预测数据点和原始数据点保持一致,需要增加递推因子  $N_0 = N_0 + d$ 。

然后,通过引入目标函数  $Z$ ,动态选择预测

精度高的那对  $[a, b]$ , 目标函数为

$$Z = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left[ \frac{|x^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k)|}{x^{(1)}(k)} \right]$$

最后,根据新模式的结构,设从  $m$  点开始取值,则预测值序列改写为

$$\hat{x}^{(1)}(k) =$$

$$\left[ x^{(1)}(m) - \frac{b}{\sqrt{a^2 + \omega^2}} \sin(\omega \times N_0 + \gamma - \beta) \right] \times e^{-a(k-N_0-m)} +$$

$$\frac{b}{\sqrt{a^2 + \omega^2}} \sin(\omega(k-m+1) + \gamma - \beta)$$

改进后的灰色模型对预测数据的结构进行了调整,对样本数据进行了合理的取舍,在预测过程中选择关联性较高的数据加入每轮预测,不仅可以提高预测的精度而且还可以缩短预测时间,符合智能电网“准确性高、实时性好”的要求。

## 2.2 灰色 BP 神经网络模型及其预测流程

每个预测模型都有自己的长短处和适用的场所,将这些模型以适当的方法结合起来就能够做到优势互补,得到比单一模型更高的预测精度<sup>[13]</sup>。灰色预测模型的长处是所要求的原始预测数据非常少,而 BP 神经网络具有很好的自学习、自组织能力。所以,改进后的灰色预测模型可将不同时刻联系更为密切的数据加入进去,帮助 BP 神经网络有效降低错误学习的时间,能够更加有效地进行训练,提高预测的精度。

BP 神经网络的训练过程以系统误差的平方为目标函数,采用梯度下降法实现预测。计算误差是沿着从输入到输出逐层传递的方向进行的,而更新系统的权值和阈值则按照相反的方向进行<sup>[14]</sup>。正常运行时,输入数据以隐含层为媒介传向输出节点,然后经过一系列的非线性变换,产生输出结果。若实际输出值与期望输出值之间的差值大于设定的允许误差,则训练开始转换方向,该过程以隐含层为中介向输入层

传递,根据误差的大小来逐级调整各个单元的权值。通过调整输入节点与隐含层节点、隐含层与输出层节点的联接强度和阈值,使系统误差沿梯度方向下降最快,最后经过多次不同样本的学习,得到与最小误差相对应的网络参数,上述过程就是对该系统的训练过程<sup>[15]</sup>。此时获得的神经网络能够针对与样本具有类似特征的输入数据进行预测,使输出误差达到最小。

改进后的灰色模型获得的预测结果作为 BP 神经网络的输入进行训练,克服了 BP 网络原本需要大量相关数据才能进行准确预测的缺点。同时,把灰色模型预测时产生的误差  $e$  也作为影响因素考虑进去,所以该灰色 BP 神经网络模型的输入内容包括短路电流、初相角、灰色模型预测结果和相对残差 4 项。灰色 BP 神经网络模型预测流程图如图 4 所示。

## 3 验证实验结果分析

为了验证改进后的灰色 BP 神经网络模型

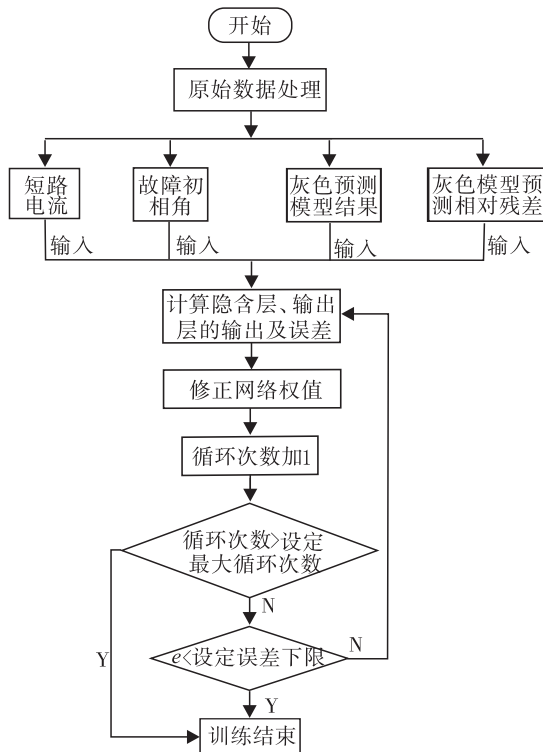


图 4 预测流程图

Fig. 4 Forecast flow chart

较之传统灰色模型的优越性,从预测时间和预测精度上对这两种模型进行对比分析.灰色BP神经网络预测模型在训练过程中,将 $0^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 210^\circ, 250^\circ, 310^\circ$ 作为数据样本进行训练,把 $15^\circ$ 数据用作最后的测试样本.分析指标预测精度为

$$p = 100 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |\Delta(k)|$$

传统的灰色模型是以固定长度的等维顺序迭代方式进行预测,迭代次数较多,平均为33次.改进后的动态灰色模型根据迭代的次数因子 $d$ 值不同其迭代次数有所不同:当 $d=2$ 时,需要循环24次到达短路故障电流的峰值;当 $d=3$ 时,需要循环的次数是17次.

传统的BP神经网络需要大量的数据训练才能得到较为准确的预测结果,对应的是较长的预测时间.将改进后的灰色模型得到的数据用于BP神经网络训练,减少了训练网络所需的数据,从而缩短了预测时间.图5和图6分别为 $d=2$ 和 $d=3$ 时,BP神经网络模型对故障初相角为 $15^\circ$ 的预测结果,预测精度分别为99.54%和98.51%.从图5和图6可以看出,改进后的训练模型能够很好地预测短路电流的走向.当 $d=2$ 时,预测时间为 $3.68 \times 10^{-5}$  s,小于改进前的预测时间 $5.56 \times 10^{-4}$  s;当 $d=3$ 时,预测时间为 $6.12 \times 10^{-5}$  s,小于改进前的预测时间 $4.71 \times 10^{-4}$  s;当 $d>3$ 时,预测时间更短,但是牺牲了预测精度,在实践中,可以根据需要自行选择.

对预测结果的分析表明,改进后的灰色模型所需的预测数据大大减少,从而加速了BP神经网络的训练过程,缩短了预测时间,提高了预测精度,充分发挥了两种预测模型各自的优势.

## 4 结语

为利用有限的电流信息对预测点的短路电

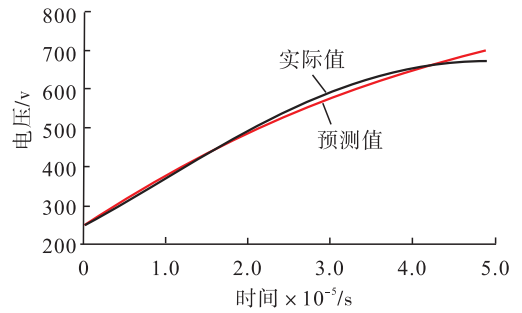


图5  $d=2$ 时的预测结果

Fig. 5 Prediction results with  $d=2$

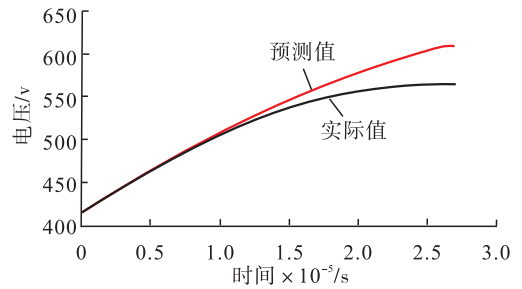


图6  $d=3$ 时的预测结果

Fig. 6 Prediction results with  $d=3$

流峰值进行预测,实现电力系统的全局选择性保护,本文针对灰色预测模型在电力系统短路电流峰值预测中因数据迭代不合理而不能充分利用新的有效信息的问题,提出了一种适合电力系统的灰色BP神经网络动态预测模型.该模型在预测过程中选择关联性较高的数据加入每轮预测,实现了灰色模型预测数据的结构调整,进而通过BP神经网络对新灰色预测模型进行训练,使它们相互配合,充分发挥每个模型的长处.预测结果表明,该模型对短路电流的峰值有很好的预测效果,能够对短路电流数据进行快速预测,为电力系统的全局协调保护提供依据.另外,这种模型也为电力系统其他数据类型少、随机性高、符合正弦规律特征的故障预测案例提供了参考.

## 参考文献:

[1] 缪希仁,吴晓梅. 低压系统多层次短路电流早

- 期检测与预测[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11):177.
- [2] 陈丽安,张培铭. 基于形态小波的低压系统短路故障早期检测[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10):24.
- [3] 张丽萍,陈俊杰,缪希仁,等. 环网配电系统短路故障早期辨识研究[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(2):68.
- [4] 赵阳,魏新劳,冯越. 用于混合式断路器的神经网络故障电流检测方法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(1):53.
- [5] 吴晓梅,缪希仁. 低压系统多层级短路故障早期检测辨识研究[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(9):38.
- [6] 鄧萍,缪希仁,吴晓梅. 低压系统短路故障建模及电流预测技术[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7):39.
- [7] 刘洪涛,赵朋洋,张灿煜,等. 基于 Matlab 的电力系统短路故障下暂态稳定性的仿真与分析[J]. 科技资讯, 2017, 15(3):51.
- [8] 陈志英,陈丽安,缪希仁,等. 低压配电系统选择性保护短路电流峰值早期预测的算法研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2015, 43(3):359.
- [9] 王新普,周想凌,邢杰,等. 一种基于改进灰色BP神经网络组合的光伏出力预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18):81.
- [10] 产焰萍,缪希仁,邱荣华,等. 低压系统短路故障早期辨识及其技术实现[J]. 电器与能效管理技术, 2017(1):25.
- [11] 于群,曹娜. MATLAB/Simulink 电力系统建模与仿真[M]北京:机械工业出版社, 2011.
- [12] 周志刚,郭科,陈丽红. 时序数据预测的灰色神经网络技术[J]. 统计与决策, 2007(1):128.
- [13] 王守相,张娜. 基于灰色神经网络组合模型的光伏短期出力预测[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19):37.
- [14] 林方圆,苏建徽,赖纪东. 光伏系统直流故障电弧识别方法研究[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(12):7.
- [15] 马辉,孙颖桃,肖艳,等. 基于灰色-BP神经网络组合模型的水位预测案例[J]. 人民黄河, 2016, 38(12):89.

(上接第 78 页)

- [4] 吕战永,曹江涛. 自反馈生物激励神经网络机器人路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(16):255.
- [5] YANG S X, MENG M. Neural network approaches to dynamic collision-free trajectory generation[J]. IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics (Part B: Cybernetics), 2001, 31(3):302.
- [6] 李伟莉,赵东辉. 基于栅格法与神经元的机器人全区域覆盖算法[J]. 机械设计与制造, 2017(8):232.
- [7] 范莉丽,王奇志,孙富春. 生物激励神经网络路径规划仿真研究与改进[J]. 北京交通大学学报, 2006, 30(2):84.
- [8] 吕后勇. 室内机器人全覆盖路径规划方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
- [9] 胡正伟. 清扫机器人定位及路径规划研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2010.



引用格式:张树义,刘冬红,丛培根.非扩张半群与变分不等式公共解的黏滞迭代逼近[J].轻工学报,2018,33(4):86-100.

中图分类号:O177.91 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2018.04.012

文章编号:2096-1553(2018)04-0086-15

# 非扩张半群与变分不等式公共解的黏滞迭代逼近

## Viscosity iterative approximation of common solutions for nonexpansive semigroups and variational inequalities

### 关键词:

非扩张半群;变分不等式;隐式和显式黏滞迭代算法;可逆-强单调

### Key words:

nonexpansive semigroups; variational inequality; implicit and explicit viscous iterative algorithms; inverse-strongly monotone

张树义,刘冬红,丛培根

ZHANG Shuyi, LIU Donghong, CONG Peigen

渤海大学 数理学院,辽宁 锦州 121013

College of Mathematics and Physics, Bohai University, Jinzhou 121013, China

**摘要:**使用非扩张半群隐式和显式黏滞迭代算法,在 Hilbert 空间中建立了非扩张半群的公共不动点集与具有强单调映象的变分不等式解集的公共元素的强收敛定理,从而推广和改进了相关文献中的结果.

收稿日期:2017-07-02

基金项目:国家自然科学基金项目(11371070)

作者简介:张树义(1960—),男,辽宁省锦州市人,渤海大学教授,主要研究方向为非线性泛函分析.

**Abstract:** Using the implicit and explicit viscous iterative algorithms for nonexpansive semigroups, convergence theorem of the common elements of the set of common fixed points of nonexpansive semigroups and the set of variational inequalities with a strongly monotone maps were established in Hilbert space, which generalized and improved the results in related literature.

变分不等式理论被广泛应用于运筹学与控制论、非线性规划、数理统计、优化理论、工程技术、经济模型等各个领域,而黏滞迭代也已被广泛用于非扩张映象不动点与变分不等式问题公共元素的求解方面. 为了寻找非空凸子集上非扩张映象的不动点集与强单调映射变分不等式解集的公共元素,本文拟考虑更为一般的非扩张半群隐式和显式黏滞迭代算法,在 Hilbert 空间中建立非扩张半群的公共不动点集与具有强单调映象的变分不等式解集的公共元素的强收敛定理.

## 1 预备知识

设  $H$  是实 Hilbert 空间,其内积和范数分别表示为  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  和  $\| \cdot \|$ ,  $C$  为  $H$  的非空闭凸子集,用  $P_C$  表示  $H$  到  $C$  上的度量投影.  $\forall x, y \in H, P_C$  满足

$$\| P_C x - P_C y \|^2 \leq \langle x - y, P_C x - P_C y \rangle \quad (1)$$

从而  $P_C$  是非扩张的,而且  $P_C x \in C$  有如下性质:  $\langle x - P_C x, P_C x - z \rangle \geq 0, \forall z \in C$ .

设  $A: C \rightarrow H$  是非线性映象. 经典的变分不等式问题是寻求  $u \in C$ , 使得  $\langle Au, v - u \rangle \geq 0$  对  $\forall v \in C$  成立, 记为  $VI(C, A)$ . 根据变分不等式问题, 有

$$u \in VI(C, A) \Leftrightarrow u = P_C(u - \lambda Au), \forall \lambda > 0$$

**定义 1** 如果  $\forall u, v \in C$ , 有  $\langle Au - Av, u - v \rangle \geq 0$ , 则称  $A$  是单调的. 如果存在  $\alpha > 0$ , 使得对  $\forall x, y \in C$ , 有  $\langle x - y, Ax - Ay \rangle \geq \alpha \|Ax - Ay\|^2$ , 则称映象  $A$  是  $\alpha$ -可逆-强单调的.

如果  $B$  是  $C$  到  $H$  上的  $\alpha$ -可逆-强单调映象, 则  $B$  是  $\frac{1}{\alpha}$ -Lipschitz 连续的. 对  $\forall x, y \in C$ ,  $\lambda > 0$ , 有

$$\| (I - \lambda B)x - (I - \lambda B)y \|^2 \leq \|x - y\|^2 + \lambda(\lambda - 2\alpha) \|Bx - By\|^2 \quad (2)$$

若  $\lambda < 2\alpha$ , 则  $I - \lambda B$  是  $C$  到  $H$  内的非扩张映象.

**定义 2** i) 映射  $S: C \rightarrow C$  称为非扩张的, 若  $\forall x, y \in C$ , 有  $\|Sx - Sy\| \leq \|x - y\|$ , 用  $F(S)$  表示  $S$  的不动点集.

ii) 若存在常数  $\bar{\gamma} > 0$ , 使得  $\langle Ax, x \rangle \geq \bar{\gamma} \|x\|^2, \forall x \in C$ , 算子  $A$  称为强正的.

iii) 集值映象  $Q: H \rightarrow 2^H$  称为单调的, 若对一切  $x, y \in H, f \in Qx$  和  $g \in Qy$ , 有  $\langle x - y, f - g \rangle \geq 0$ , 则称单调映象  $Q: H \rightarrow 2^H$  是最大的; 若  $Q$  的图像  $G(Q)$  不真包含在其他单调映射的图像中, 单调映象  $Q$  是最大的, 当且仅当对任意的  $(x, f) \in H \times H$ , 如果对每个  $(y, g) \in G(Q)$ , 都有  $\langle x - y, f - g \rangle \geq 0$  成立, 就蕴含  $f \in Qx$ ; 令  $B$  是一个  $C$  到  $H$  内的可逆-强单调映象, 令  $N_C v$  是如下的正规锥:

$$N_C v = \{w \in H : \langle v - u, w \rangle \geq 0, \forall u \in C\}. \text{ 定义 } Qv = \begin{cases} Bv + N_C v, v \in C \\ \emptyset, v \notin C \end{cases}, \text{ 则 } Q \text{ 是最大单调的, 且 } 0 \in$$

$Qv$ , 当且仅当  $v \in VI(C, B)$ .

**定义3** 映象  $f: C \rightarrow C$  称为压缩的,若存在  $\alpha(0 < \alpha < 1)$ ,对一切  $x, y \in C$ ,都有  $\|f(x) - f(y)\| \leq \alpha \|x - y\|$ .

**定义4** 映象  $f: C \rightarrow C$  被称为具有这类  $C_{\Psi(s)}$  的弱压缩映象,如果存在一连续且递增函数  $\Psi: [0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$ ,  $\Psi(s) > 0, \forall s > 0, \Psi(0) = 0, \lim_{s \rightarrow \infty} \Psi(s) = +\infty$ , 且对  $\forall x, y \in C$ , 有  $\|f(x) - f(y)\| \leq \|x - y\| - \Psi(\|x - y\|)$ .

**注1** 显然,具有常数  $\alpha$  的压缩映象一定是弱压缩映象,其中  $\Psi(s) = (1 - \alpha)s$ ;反之,一般不成立.

文献[1]中,映象  $Ax = \sin x: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  是具有  $\Psi(s) = \frac{s^2}{8}$  的弱压缩映象,但是  $A$  不是压缩映象,事实上,假如  $A$  是具有  $\alpha \in (0, 1)$  的压缩映象,则  $\forall x, y \in [0, 1]$ , 有  $|\sin x - \sin y| \leq \alpha |x - y|$ . 由于  $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1, \varepsilon = 1 - \alpha, \exists \delta > 0, 0 < x < \delta$ , 有  $\left| \frac{\sin x}{x} - 1 \right| < 1 - \alpha$ , 因此  $\alpha < \left| \frac{\sin x - \sin 0}{x - 0} \right|$ , 即  $\alpha |x - 0| < |\sin x - \sin 0|$ , 矛盾. 因此  $A$  不是压缩映象.

**定义5** 映象集合  $S = \{T(t) : t \in \mathbb{R}^+\} : C \rightarrow C$  被称为非扩张半群,如果满足下列条件

- i)  $T(0)x = x, \forall x \in C$ ;
- ii)  $T(s + t)x = T(s)T(t)x, \forall x \in C$  和  $\forall s, t \in \mathbb{R}^+$ ;
- iii)  $\forall x \in C$ , 映象  $t \rightarrow T(t)x$  对  $t \in \mathbb{R}^+$  是连续的;
- iv)  $\|T(t)x - T(t)y\| \leq \|x - y\|, \forall t \geq 0, \forall x, y \in C$ .

**定义6** 空间  $X$  称为满足 Opial 条件,如果对每个  $x$  中弱收敛于  $x \in X$  的序列  $\{x_n\}$  有  $\liminf_{n \rightarrow \infty} \|x_n - x\| < \liminf_{n \rightarrow \infty} \|x_n - y\|, \forall y \in X, y \neq x$ .

为了寻找非扩张映象  $S$  的不动点集与变分不等式解集的公共元素,文献[2]引入下列迭代过程:

$$x_{n+1} = \alpha_n x_n + (1 - \alpha_n) SP_C(x_n - \lambda_n Ax_n)$$

文献[2]证明了,如果  $F(S) \cap VI(C, A)$  非空,且当  $\{\alpha_n\}$  和  $\{\lambda_n\}$  满足一定的条件时,则该序列  $\{x_n\}$  弱收敛于  $z \in F(S) \cap VI(C, A)$ . 文献[3]研究了迭代过程

$$x_{n+1} = \alpha_n f(x_n) + (1 - \alpha_n) SP_C(x_n - \lambda_n Ax_n)$$

并通过该黏滞逼近获得了强收敛定理,其中  $f$  是具系数  $\alpha(0 < \alpha < 1)$  的压缩映象. 近年来,文献[4]引入如下一族非扩张映象的黏滞迭代过程:

$$x_{n+1} = \alpha_n \gamma f(x_n) + \beta_n x_n + ((1 - \beta_n)I - \alpha_n A) W_n x_n$$

其中,  $f$  是具有这类  $C_{\Psi(s)}$  的弱压缩映象,  $W_n$  是  $W$  映象. 对于非扩张半群不动点的迭代逼近问题,文献[5]考虑了下列迭代序列:

$$x_{n+1} = \alpha_n f(x_n) + \beta_n x_n + (1 - \alpha_n - \beta_n) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds$$

他们证明了这种迭代序列强收敛于非扩张半群  $S$  的公共不动点,其中  $f$  是具系数  $\alpha(0 < \alpha < 1)$  的压缩映象. 文献[6]引入了下列迭代序列:



$$x_{n+1} = \alpha_n \gamma f(x_n) + (I - \alpha_n A) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds$$

并证明迭代的收敛性. 文献[7]引入了如下迭代:

$$x_{n+1} = \alpha_n \gamma f(x_n) + \beta_n x_n + ((1 - \beta_n)I - \alpha_n A) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds$$

其中 $f$ 是具系数 $\alpha(0 < \alpha < 1)$ 的压缩映象. 另外,文献[8-25]研究了一些非线性映象不动点的迭代收敛性问题. 受上述工作启发,本文拟考虑具有可逆强单调映象与带有误差项的非扩张半群的隐式和显式这两种黏滞迭代算法:

$$\begin{aligned} x_n &= \alpha_n \gamma f(x_n) + (I - \alpha_n A) P_C (I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds + e_n \\ x_{n+1} &= \alpha_n \gamma f(P_C (I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds) + \beta_n x_n + \\ &((1 - \beta_n)I - \alpha_n A) P_C (I - \lambda_n B_2) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds + d_n \end{aligned}$$

其中, $f$ 是具有这类 $C_{\psi(s)}$ 的弱压缩映象; $\{e_n\}, \{d_n\}$ 是 $C$ 中的序列. 在适当的条件下,建立非扩张半群不动点集与变分不等式解集的公共元素的强收敛性定理,以期该研究结果能够推广和改进一些文献<sup>[2-3,5-7]</sup>的结果.

为了证明主要结果,需要下列一些引理.

**引理 1**<sup>[11]</sup> 设 $(X, d)$ 是完备度量空间, $T: X \rightarrow X$ 是弱压缩映象,则 $T$ 在 $X$ 中有唯一不动点.

**引理 2**<sup>[26]</sup> 设 $A$ 是Hilbert空间 $H$ 上具有系数 $\bar{\gamma} > 0$ 的强正有界线性算子,且 $0 < \rho \leq \|A\|^{-1}$ ,则 $\|I - \rho A\| \leq 1 - \rho \bar{\gamma}$ .

**引理 3**<sup>[27]</sup> 设 $C$ 是Hilbert空间 $H$ 的非空有界闭凸子集, $\{T(s) : 0 \leq s < \infty\}$ 是 $C$ 到 $C$ 的非扩张半群,则对 $\forall h \geq 0$ ,有 $\limsup_{t \rightarrow +\infty} \sup_{x \in C} \left\| \frac{1}{t} \int_0^t T(s) x ds - T(h) \left( \frac{1}{t} \int_0^t T(s) x ds \right) \right\| = 0$ .

**引理 4** 设 $H$ 是Hilbert空间, $C$ 是 $H$ 的闭凸子集, $f: C \rightarrow C$ 具有这类 $C_{\psi(s)}$ 的弱压缩映象, $A$ 是强正有界算子且具有系数 $\bar{\gamma} > 0$ ,则对 $0 < \gamma < \bar{\gamma}, x, y \in C$ ,有

$$\langle x - y, (A - \gamma f)x - (A - \gamma f)y \rangle \geq (\bar{\gamma} - \gamma) \|x - y\|^2 + \gamma \Psi(\|x - y\|) \|x - y\|$$

**证明** 因 $A$ 是具有系数 $\bar{\gamma} > 0$ 的强正有界算子,所以 $x, y \in C$ ,有

$$\langle x - y, A(x - y) \rangle \geq \bar{\gamma} \|x - y\|^2$$

又 $\langle x - y, \gamma fx - \gamma fy \rangle \leq \gamma \|x - y\|^2 - \gamma \Psi(\|x - y\|) \|x - y\|, x, y \in C$ ,据此有

$$\begin{aligned} \langle x - y, (A - \gamma f)x - (A - \gamma f)y \rangle &= \langle x - y, A(x - y) \rangle - \langle x - y, \gamma fx - \gamma fy \rangle \geq \\ &(\bar{\gamma} - \gamma) \|x - y\|^2 + \gamma \Psi(\|x - y\|) \|x - y\| \end{aligned}$$

**引理 5**<sup>[28]</sup> 设 $\{a_n\}, \{b_n\}$ 和 $\{c_n\}$ 是3个非负实数列,且满足条件

$$a_{n+1} \leq (1 - \omega_n) a_n + b_n + c_n, \forall n \geq n_0$$

其中, $n_0$ 是某一非负整数, $\omega_n \in (0, 1), \sum_{n=0}^{\infty} \omega_n = \infty, b_n = o(\omega_n), \sum_{n=0}^{\infty} c_n < \infty$ ,则 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$ .

**引理 6** 设 $H$ 是实Hilbert空间中,则 $x, y \in H$ ,有 $\|x + y\|^2 \leq \|x\|^2 + 2\langle y, x + y \rangle$ .

## 2 主要结果

**定理 1** 设  $C$  是 Hilbert 空间  $H$  的非空闭凸子集,  $S = \{T(s) : 0 \leq s < \infty\}$  是  $C$  到  $C$  的非扩张半群,  $B$  是  $C$  到  $H$  的  $\alpha$ -可逆-强单调映象, 使得  $F = F(S) \cap VI(C, B) \neq \emptyset$ . 如果  $f$  是  $C \rightarrow C$  具有  $C_{\Psi(s)}$  的弱压缩映象,  $A$  是  $C \rightarrow C$  以  $\bar{\gamma} > 0$  为系数的强正有界线性算子, 使得  $0 < \gamma < \bar{\gamma}$ ,  $\{\alpha_n\}$  是  $(0, 1]$  中的数列,  $\{t_n\}$  是  $(0, \infty)$  中的序列,  $\{e_n\}$  是  $C$  中的序列,  $\{\lambda_n\}$  是  $[a, b]$  中的序列, 满足  $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = 0, \lim_{n \rightarrow \infty} t_n = +\infty, \|e_n\| = o(\alpha_n), 0 < a < b < 2\alpha, \{x_n\}$  是由下式生成的序列:

$$x_n = \alpha_n \gamma f(x_n) + (I - \alpha_n A) P_C (I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds \tag{③}$$

则  $\{x_n\}$  强收敛于  $z \in F$ , 且  $z$  是变分不等式  $\langle \gamma f(z) - Az, p - z \rangle \leq 0, \forall p \in F$  的解.

**证明** 因为  $\|e_n\| = o(\alpha_n)$ , 所以存在  $\xi_n \geq 0, \xi_n \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$ , 使得  $\|e_n\| = \alpha_n \xi_n$ , 而且存在  $G > 0$ , 使得  $\xi_n \leq G$ . 下面首先证明  $\{x_n\}$  是良定的, 令

$$g_{\alpha_n}(x) = \alpha_n \gamma f(x_n) + (I - \alpha_n A) P_C \left( (I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x ds \right) + e_n$$

则  $g : C \rightarrow C$ , 因为  $\alpha_n \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$ , 可设对  $n \geq 1$ , 有  $\alpha_n < \|A\|^{-1}$ . 由引理 2 可知

$$\begin{aligned} \|g_{\alpha_n}(x) - g_{\alpha_n}(y)\| &\leq \alpha_n \gamma \|x - y\| - \alpha_n \gamma \Psi(\|x - y\|) + \\ &\left\| (I - \alpha_n A) P_C (I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x ds - P_C (I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) y ds \right\| \leq \\ &\alpha_n \gamma \|x - y\| - \alpha_n \gamma \Psi(\|x - y\|) + \|I - \alpha_n A\| \left\| \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x ds - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) y ds \right\| \leq \\ &(1 - \alpha_n (\bar{\gamma} - \gamma)) \|x - y\| - \alpha_n \gamma \Psi(\|x - y\|) \leq \|x - y\| - \alpha_n \gamma \Psi(\|x - y\|) \end{aligned}$$

因此  $g_{\alpha_n}$  是  $C$  到  $C$  的具有这类  $C_{\alpha_n \gamma \Psi(s)}$  的弱压缩映象. 由引理 1 可知, 对每一  $n \in N$ , 存在唯一的  $x_n \in C$ , 使得

$$x_n = \alpha_n \gamma f(x_n) + (I - \alpha_n A) P_C (I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds + e_n$$

因此  $\{x_n\}$  是良定的. 然后证明  $\{x_n\}$  是有界的. 取  $u \in F$ , 则  $u = P_C(u - \lambda B u)$ . 由引理 4 可知

$$\begin{aligned} \|x_n - u\| &\leq \alpha_n \|\gamma f(x_n) - Au\| + \\ &(I - \alpha_n A) \left\| (I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds - (I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) u ds \right\| + \|e_n\| \leq \\ &\alpha_n \|\gamma f(x_n) - Au\| + (I - \alpha_n A) \left\| \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) u ds \right\| + \|e_n\| \leq \\ &\alpha_n \|\gamma f(x_n) - \gamma f(u)\| + \alpha_n \|\gamma f(u) - Au\| + \|(I - \alpha_n A)\| \|x_n - u\| + \|e_n\| \leq \\ &\alpha_n \gamma \|x_n - u\| - \gamma \alpha_n \Psi(\|x_n - u\|) + (I - \alpha_n \bar{\gamma}) \|x_n - u\| + \alpha_n \|\gamma f(u) - Au\| + \|e_n\| = \\ &(I - \alpha_n (\bar{\gamma} - \gamma)) \|x_n - u\| - \gamma \alpha_n \Psi(\|x_n - u\|) + \alpha_n \|\gamma f(u) - Au\| + \|e_n\| \end{aligned}$$

据此有  $\|x_n - u\| \leq \frac{\|\gamma f(u) - Au\| + G}{\bar{\gamma} - \gamma}$ , 即  $\{x_n\}$  是有界的, 从而  $\{P_C(I - \lambda_n B)x_n\}, \{Ax_n\},$

$\{f(x_n)\}, \left\{P_C(I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds\right\}$  也是有界的. 另一方面, 由 ②③ 式可得

$$\begin{aligned} \|x_n - u\|^2 &\leq \left( \alpha_n \|\gamma f(x_n) - Au\| + (1 - \alpha_n \bar{\gamma}) \left\| P_C(I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds - u \right\| + \|e_n\| \right)^2 \leq \\ &\alpha_n \|\gamma f(x_n) - Au\|^2 + (1 - \alpha_n \bar{\gamma}) \left\| P_C(I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds - u \right\|^2 + \|e_n\|^2 + \\ &2\alpha_n \|\gamma f(x_n) - Au\| \left\| P_C(I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds - u \right\| \leq \\ &\alpha_n \|\gamma f(x_n) - Au\|^2 + (1 - \alpha_n \bar{\gamma}) \|x_n - u\|^2 + (1 - \alpha_n \bar{\gamma}) \lambda_n (\lambda_n - 2\alpha) \|Bx_n - Bu\|^2 + \\ &2\alpha_n \|\gamma f(x_n) - Au\| \|x_n - u\| + 2\alpha_n \|e_n\| \|\gamma f(x_n) - Au\| + 2\|e_n\| \|x_n - u\| \end{aligned}$$

因此有

$$\begin{aligned} - (1 - \alpha_n \bar{\gamma}) a(b - 2\alpha) \|Bx_n - Bu\|^2 &\leq \alpha_n \|\gamma f(x_n) - Au\|^2 + 2\alpha_n \|\gamma f(x_n) - Au\| \|x_n - u\| - \\ &\alpha_n \bar{\gamma} \|x_n - u\|^2 + 2\alpha_n \|e_n\| \|\gamma f(x_n) - Au\| + 2\|e_n\| \|x_n - u\| \end{aligned}$$

由  $\alpha_n \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$  和  $\{x_n\}, \{f(x_n)\}$  有界, 可得  $\|Bx_n - Bu\| \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$ . 令  $y_n = P_C(I - \lambda_n B)x_n$ , 再由 ① 式, 有

$$\begin{aligned} \|y_n - u\|^2 &\leq \langle (I - \lambda_n B)x_n - (I - \lambda_n B)u, y_n - u \rangle = \\ &\frac{1}{2} \{ \|(I - \lambda_n B)x_n - (I - \lambda_n B)u\|^2 + \|y_n - u\|^2 - \|x_n - y_n - \lambda_n (Bx_n - Bu)\|^2 \} \leq \\ &\frac{1}{2} \{ \|y_n - u\|^2 + \|x_n - u\|^2 - \|y_n - x_n\|^2 + 2\lambda_n \langle x_n - y_n, Bx_n - Bu \rangle - \lambda_n^2 \|Bx_n - Bu\|^2 \} \end{aligned}$$

因此,  $\|y_n - u\|^2 \leq \|x_n - u\|^2 - \|x_n - y_n\|^2 + 2\lambda_n \|x_n - y_n\| \|Bx_n - Bu\|$ , 进而有

$$\begin{aligned} \|x_n - u\|^2 &\leq \alpha_n \|\gamma f(x_n) - Au\|^2 + (1 - \alpha_n \bar{\gamma}) \|y_n - u\|^2 + 2\alpha_n \|\gamma f(x_n) - Au\| \|y_n - u\| + \\ &2\alpha_n \|e_n\| \|\gamma f(x_n) - Au\| + 2\|e_n\| \|x_n - u\| \leq \\ &\alpha_n \|\gamma f(x_n) - Au\|^2 + (1 - \alpha_n \bar{\gamma}) \|x_n - u\|^2 - (1 - \alpha_n \bar{\gamma}) \|x_n - y_n\|^2 + \\ &2(1 - \alpha_n \bar{\gamma}) \lambda_n \|x_n - y_n\| \|Bx_n - Bu\| + 2\alpha_n \|\gamma f(x_n) - Au\| \|y_n - u\| + \\ &2\alpha_n \|e_n\| \|\gamma f(x_n) - Au\| + 2\|e_n\| \|x_n - u\| \end{aligned}$$

于是

$$\begin{aligned} (1 - \alpha_n \bar{\gamma}) \|x_n - y_n\|^2 &\leq \alpha_n \|\gamma f(x_n) - Au\|^2 - \alpha_n \bar{\gamma} \|x_n - u\|^2 + \\ &2(1 - \alpha_n \bar{\gamma}) \lambda_n \|x_n - y_n\| \|Bx_n - Bu\| + 2\alpha_n \|\gamma f(x_n) - Au\| \|y_n - u\| + \\ &2\alpha_n \|e_n\| \|\gamma f(x_n) - Au\| + 2\|e_n\| \|x_n - u\| \end{aligned}$$

由于  $\alpha_n \rightarrow 0, \|Bx_n - Bu\| \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$ , 所以  $\|x_n - y_n\| \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$ . 由 ③ 式, 有

$$\left\| x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds \right\| \leq \alpha_n \left\| \gamma f(x_n) - A \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds \right\| + \|e_n\| \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$$

故

$$\left\| y_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds \right\| \leq \|x_n - y_n\| + \left\| x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds \right\| \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$$

因  $\{y_n\}$  有界, 所以存在  $\{y_n\}$  的子列  $\{y_{n_i}\}$  弱收敛于  $z$ . 因  $\left\| y_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds \right\| \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$ , 可知

$\frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds$  弱收敛于  $z$ .

要证  $z \in F(S) \cap VI(C, B)$ , 首先证明  $z \in VI(C, B)$ , 令  $Qv = \begin{cases} Bv + N_C v, v \in C \\ \emptyset, v \notin C \end{cases}$ , 则  $T$  是最大单

调的. 令  $(v, w) \in G(Q)$ , 因为  $w - Bv \in N_C v, y_n \in C$ , 所以有  $\langle v - y_n, w - Bv \rangle \geq 0$ . 另一方面, 因  $y_n = P_C(I - \lambda_n B)x_n$ , 所以  $\langle v - y_n, y_n - (x_n - \lambda_n Bx_n) \rangle \geq 0$ , 进而  $\langle v - y_n, Bx_n + \frac{y_n - x_n}{\lambda_n} \rangle \geq 0$ . 由于  $\langle v - y_n, Bv - By_{n_i} \rangle \geq 0$ , 可知

$$\begin{aligned} \langle v - y_{n_i}, w \rangle &\geq \langle v - y_{n_i}, Bv \rangle \geq \langle v - y_{n_i}, Bv \rangle - \langle v - y_{n_i}, Bv_{n_i} + \frac{y_{n_i} - x_{n_i}}{\lambda_{n_i}} \rangle = \\ &\langle v - y_{n_i}, Bv - By_{n_i} \rangle + \langle v - y_{n_i}, By_{n_i} - Bx_{n_i} \rangle - \langle v - y_{n_i}, \frac{y_{n_i} - x_{n_i}}{\lambda_{n_i}} \rangle \geq \\ &\langle v - y_{n_i}, By_{n_i} - Bx_{n_i} \rangle - \langle v - y_{n_i}, \frac{y_{n_i} - x_{n_i}}{\lambda_{n_i}} \rangle \end{aligned}$$

在上式中令  $i \rightarrow \infty$ , 有  $\langle v - z, w \rangle \geq 0$ . 由于  $Q$  是最大单调的, 因此  $z \in Q^{-1}\{0\}$ , 从而  $z \in VI(C, B)$ . 其次证明  $z \in F(S)$ . 因为 Hilbert 空间满足 Opial 条件, 若  $T(s)z \neq z$ , 由

$$\begin{aligned} \left\| y_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds \right\| \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty) \text{ 和引理 3 可知 } \liminf_{i \rightarrow \infty} \| y_{n_i} - z \| < \liminf_{i \rightarrow \infty} \| y_{n_i} - T(s)z \| \leq \\ \liminf_{i \rightarrow \infty} \left[ \left\| y_{n_i} - \frac{1}{t_{n_i}} \int_0^{t_{n_i}} T(s)y_{n_i} ds \right\| + \left\| \frac{1}{t_{n_i}} \int_0^{t_{n_i}} T(s)y_{n_i} ds - T(s) \left( \frac{1}{t_{n_i}} \int_0^{t_{n_i}} T(s)y_{n_i} ds \right) \right\| + \right. \\ \left. \left\| T(s) \left( \frac{1}{t_{n_i}} \int_0^{t_{n_i}} T(s)y_{n_i} ds \right) - T(s)z \right\| \right] \leq \liminf_{i \rightarrow \infty} \| y_{n_i} - z \| \end{aligned}$$

矛盾. 故  $z \in F(S)$ , 于是  $z \in F$ . 由  $\{x_n\}$  有界和  $\|x_n - y_n\| \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$ , 必有子列  $\{x_{n_i}\}$  弱收敛于  $z$ . 由 ③ 式, 有

$$\begin{aligned} \|x_n - z\|^2 &\leq \alpha_n \langle \gamma f(x_n) - Az, x_n - z \rangle + \\ &\langle (I - \alpha_n A) \left( P_C(I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds - z \right), x_n - z \rangle + \langle e_n, x_n - z \rangle \leq \\ &\alpha_n \langle \gamma f(x_n) - Az, x_n - z \rangle + (1 - \alpha_n \bar{\gamma}) \|x_n - z\|^2 + \|e_n\| \|x_n - z\| \end{aligned}$$

于是

$$\|x_n - z\|^2 \leq \frac{1}{\bar{\gamma} + \frac{1}{2}\xi_n} \langle \gamma f(x_n) - Az, x_n - z \rangle + \frac{1}{2}\xi_n =$$

$$\frac{1}{\bar{\gamma} + \frac{1}{2}\xi_n} \left\{ \langle \gamma f(x_n) - \gamma f(z), x_n - z \rangle + \langle \gamma f(z) - Az, x_n - z \rangle + \frac{1}{2}\xi_n \right\} \leq$$

$$\frac{1}{\bar{\gamma} + \frac{1}{2}\xi_n} \left\{ \gamma \|x_n - z\|^2 - \gamma \Psi(\|x_n - z\|) \|x_n - z\| + \langle \gamma f(z) - Az, x_n - z \rangle + \frac{1}{2}\xi_n \right\}$$

所以  $\|x_n - z\|^2 \leq \frac{\langle \gamma f(z) - Az, x_n - z \rangle + \frac{1}{2}\xi_n}{\bar{\gamma} + \frac{1}{2}\xi_n - \gamma}$ . 特别地, 有

$$\|x_{n_i} - z\|^2 \leq \frac{\langle \gamma f(z) - Az, x_{n_i} - z \rangle + \frac{1}{2} \xi_{n_i}}{\bar{\gamma} + \frac{1}{2} \xi_{n_i} - \gamma}$$

因  $\{x_{n_i}\}$  弱收敛于  $z$ , 所以  $x_{n_i} \rightarrow z$ .

下面证明  $z$  是变分不等式  $\langle (A - \gamma f)z, z - p \rangle \leq 0, p \in F$  的解. 因为

$$\begin{aligned} (A - \gamma f)x_n &= -\frac{1}{\alpha_n}(I - \alpha_n A)\left(x_n - P_C(I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds - e_n\right) \\ p &= P_C(I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)p ds \end{aligned}$$

所以有

$$\begin{aligned} &\langle (A - \gamma f)x_n, x_n - p \rangle \leq \\ &-\frac{1}{\alpha_n} \langle (I - \alpha_n A)(x_n - P_C(I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds), x_n - p \rangle + \frac{1}{\alpha_n} \langle e_n, x_n - z \rangle = \\ &-\frac{1}{\alpha_n} \langle (x_n - P_C(I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds) - (p - P_C(I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)p ds), x_n - p \rangle + \\ &\langle A(I - P_C(I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) ds)x_n, x_n - p \rangle + \frac{1}{\alpha_n} \langle e_n, x_n - p \rangle \end{aligned}$$

又因为  $P_C(I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) ds$  是非扩张的, 所以  $I - P_C(I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) ds$  是强单调的,

因此

$$\langle (x_n - P_C(I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds) - (p - P_C(I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)p ds), x_n - p \rangle \geq 0$$

进而有

$$\langle (A - \gamma f)x_n, x_n - p \rangle \leq \langle A(I - P_C(I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) ds)x_n, x_n - p \rangle + \xi_n \|x_n - p\| \quad (4)$$

注意到  $z = P_C(I - \lambda_n B) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)z ds$ ,  $\{x_n\}$  有界及  $\xi_n \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$ . 在 (4) 式中用  $n_i$  代替  $n$  并

令  $i \rightarrow \infty$ , 可得

$$\langle (A - \gamma f)z, z - p \rangle = \lim_{i \rightarrow \infty} \langle (A - \gamma f)x_{n_i}, x_{n_i} - p \rangle \leq 0 \quad (5)$$

即  $z \in F$  是该变分不等式的解.

最后证明唯一性. 假若存在  $\{x_n\}$  的另一个子列  $\{x_{n_i}\}$  弱收敛于  $z^*$ , 则  $z^* \in F$ . 类似地, 可以证明

$$\langle (A - \gamma f)z^*, z^* - p \rangle \leq 0, p \in F \quad (6)$$

将 (5) 式和 (6) 式相加, 并使用引理 4 可得

$$(\bar{\gamma} - \gamma) \|z - z^*\|^2 + \gamma \Psi(\|z - z^*\|) \|z - z^*\| \leq \langle z - z^*, (A - \gamma f)(z - z^*) \rangle \leq 0$$

由于  $\forall s > 0, \Psi(s) > 0, \Psi(0) = 0$ , 因此  $\|z - z^*\| = 0$ , 即  $z = z^*$ , 故  $x_n \rightarrow z (n \rightarrow \infty)$ . 证毕.

**定理 2** 设  $C$  是 Hilbert 空间  $H$  的非空闭凸子集,  $S = \{T(s) : 0 \leq s < \infty\}$  是  $C$  到  $C$  的非扩张半群,  $B_i (i = 1, 2)$  是  $C$  到  $H$  的  $\alpha_i$ -可逆-强单调映象, 使得  $F = F(S) \cap VI(C, B_1) \cap VI(C, B_2) \neq \emptyset$ . 如果  $f$  是  $C \rightarrow C$  具有这类  $C_{\psi(s)}$  的弱压缩映象,  $A$  是  $C \rightarrow C$  以  $\bar{\gamma} > 0$  为系数的强正有界线

性算子,使得  $0 < \gamma < \bar{\gamma}$ ,  $\{\alpha_n\}$  与  $\{\beta_n\}$  分别是  $(0, 1]$  和  $[0, \beta]$  中的实数列,  $\{t_n\}$  是  $(0, \infty)$  中的序列,  $\{\lambda_n\}$  是  $[a, b]$  中的实数列,  $\{d_n\}$  是  $C$  中序列, 满足下列条件:

- i)  $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = 0, \lim_{n \rightarrow \infty} t_n = +\infty$ ;
- ii)  $0 < a < b < 2\alpha, \beta < 1$ ;
- iii)  $\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n = \infty$ ;
- iv)  $\sum_{n=1}^{\infty} |\alpha_{n+1} - \alpha_n| < \infty$ ;
- v)  $\sum_{n=1}^{\infty} |\beta_{n+1} - \beta_n| < \infty$ ;
- vi)  $\sum_{n=1}^{\infty} |\lambda_{n+1} - \lambda_n| < \infty$ ;
- vii)  $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{|t_{n+1} - t_n|}{t_{n+1}} < \infty$ ;
- viii)  $\sum_{n=1}^{\infty} \|d_n\| < \infty$ .

对  $x_0 \in C$ , 则  $\{x_n\}$  是由下式生成的序列

$$\begin{aligned}
 x_{n+1} = & \alpha_n \gamma f \left( P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds \right) + \beta_n x_n + \\
 & ((1 - \beta_n)I - \alpha_n A) P_C(I - \lambda_n B_2) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds + d_n
 \end{aligned} \tag{7}$$

且  $\{x_n\}$  强收敛于  $q \in F$ , 其中  $q = P_F(\langle I - A \rangle + \gamma f)(q)$  是下面变分不等式的解

$$\langle \gamma f(q) - Aq, p - q \rangle \leq 0, \forall p \in F \tag{8}$$

**证明** 因  $A$  是  $C$  上的强正有界线性算子, 所以可设  $\|A\| = \sup\{|\langle Ax, x \rangle| : x \in C, \|x\| = 1\}$ . 又因为  $\alpha_n \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$ ,  $0 < \beta_n \leq \beta$ , 不失一般性, 可设对  $\forall n \geq 1$ , 有  $\alpha_n \leq (1 - \beta_n) \|A\|^{-1}$ . 由于  $\langle ((1 - \beta_n)I - \alpha_n A)x, x \rangle = 1 - \beta_n - \alpha_n \langle Ax, x \rangle \geq 1 - \beta_n - \alpha_n \|A\| \geq 0$ , 可得

$$\begin{aligned}
 \|(1 - \beta_n)I - \alpha_n A\| &= \sup\{\langle ((1 - \beta_n)I - \alpha_n A)x, x \rangle : x \in C, \|x\| = 1\} = \\
 &= \sup\{1 - \beta_n - \alpha_n \langle Ax, x \rangle : x \in C, \|x\| = 1\} \leq 1 - \beta_n - \alpha_n \bar{\gamma}
 \end{aligned}$$

下面首先证明  $\{x_n\}$  有界. 取  $u \in F$ , 则

$$\begin{aligned}
 \|x_{n+1} - u\| &= \left\| \alpha_n \gamma f \left( P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds \right) + \beta_n x_n + \right. \\
 & \left. ((1 - \beta_n)I - \alpha_n A) P_C(I - \lambda_n B_2) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds + d_n - u \right\| = \\
 & \left\| \alpha_n \left( \gamma f \left( P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds \right) - Au \right) + \beta_n (x_n - u) + \right. \\
 & \left. ((1 - \beta_n)I - \alpha_n A) \left( P_C(I - \lambda_n B_2) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds - u \right) + d_n \right\| \leq \\
 & \alpha_n \left\| \gamma f \left( P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds \right) - Au \right\| +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \beta_n \|x_n - u\| + \|(1 - \beta_n)I - \alpha_n A\| \|x_n - u\| + \|d_n\| \leq \\
& \alpha_n \left\| \gamma f\left(P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds\right) - \gamma f(u)\right\| + \alpha_n \|\gamma f(u) - Au\| + \\
& \beta_n \|x_n - u\| + \|(1 - \beta_n)I - \alpha_n A\| \|x_n - u\| + \|d_n\| \leq \\
& \gamma \alpha_n \|x_n - u\| - \gamma \alpha_n \Psi\left(\|P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds - u\|\right) + \beta_n \|x_n - u\| + \\
& (1 - \alpha_n \bar{\gamma} - \beta_n) \|x_n - u\| + \alpha_n \|\gamma f(u) - Au\| + \|d_n\| = \\
& (1 - \alpha_n(\bar{\gamma} - \gamma)) \|x_n - u\| - \gamma \alpha_n \Psi\left(\|P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds - u\|\right) + \\
& \alpha_n \|\gamma f(u) - Au\| + \|d_n\|
\end{aligned}$$

于是对  $\forall n \geq 0$ , 有

$$\|x_n - u\| \leq \max\left\{\|x_0 - u\|, \frac{\|\gamma f(u) - Au\|}{\bar{\gamma} - \gamma}\right\} + \sum_{i=1}^n \|d_i\| < \infty$$

即  $\{x_n\}$  有界, 进而  $\left\{\frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds\right\}, \left\{B_2 \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds\right\}, \{Ax_n\}, \left\{f\left(P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds\right)\right\}$  都是有界的.

其次证明  $\|x_{n+1} - x_n\| \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$ . 因为

$$\begin{aligned}
& \left\|P_C(I - \lambda_{n+1} B_2) \frac{1}{t_{n+1}} \int_0^{t_{n+1}} T(s)x_{n+1} ds - P_C(I - \lambda_n B_2) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds\right\| \leq \\
& \left\|(I - \lambda_{n+1} B_2) \frac{1}{t_{n+1}} \int_0^{t_{n+1}} T(s)x_{n+1} ds - (I - \lambda_n B_2) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds\right\| \leq \\
& \left\|\frac{1}{t_{n+1}} \int_0^{t_{n+1}} T(s)x_{n+1} ds - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds\right\| + \left\|\lambda_n B_2 \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds - \lambda_{n+1} B_2 \frac{1}{t_{n+1}} \int_0^{t_{n+1}} T(s)x_n ds\right\| \leq \\
& \frac{1}{t_{n+1}} \int_0^{t_{n+1}} \|T(s)x_{n+1} - T(s)x_n\| ds + \left(\frac{1}{t_{n+1}} - \frac{1}{t_n}\right) \int_0^{t_n} \|T(s)x_n - T(s)u\| ds + \\
& \frac{1}{t_{n+1}} \int_{t_n}^{t_{n+1}} \|T(s)x_n - T(s)u\| ds + \left\|\lambda_n B_2 \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds - \lambda_{n+1} B_2 \frac{1}{t_{n+1}} \int_0^{t_{n+1}} T(s)x_n ds\right\| \leq \\
& \|x_{n+1} - x_n\| + \frac{2|t_{n+1} - t_n|}{t_{n+1}} \|x_n - u\| + |\lambda_n - \lambda_{n+1}| M_1
\end{aligned}$$

其中  $M_1 = \sup\left\{\left\|B_2 \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds\right\|, n \geq 0\right\}$ . 所以

$$\begin{aligned}
\|x_{n+2} - x_{n+1}\| &= \left\|\alpha_{n+1} \gamma f\left(P_C(I - \lambda_{n+1} B_1) \frac{1}{t_{n+1}} \int_0^{t_{n+1}} T(s)x_{n+1} ds\right) + \beta_{n+1} x_{n+1} + \right. \\
&\quad \left. ((1 - \beta_{n+1})I - \alpha_{n+1} A) P_C(I - \lambda_{n+1} B_2) \frac{1}{t_{n+1}} \int_0^{t_{n+1}} T(s)x_{n+1} ds + d_{n+1} - \right. \\
&\quad \left. \alpha_n \gamma f\left(P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds\right) - \beta_n x_n - ((1 - \beta_n)I - \alpha_n A) P_C(I - \lambda_n B_2) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds - d_n\right\| = \\
&\left\|((1 - \beta_{n+1})I - \alpha_{n+1} A) \left(P_C(I - \lambda_{n+1} B_2) \frac{1}{t_{n+1}} \int_0^{t_{n+1}} T(s)x_{n+1} ds - P_C(I - \lambda_n B_2) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds\right) + \right. \\
&\quad \left. (\alpha_{n+1} - \alpha_n) A P_C(I - \lambda_n B_2) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds - (\beta_{n+1} - \beta_n) A P_C(I - \lambda_n B_2) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds + \right. \\
&\quad \left. d_{n+1} - d_n\right\|
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \gamma [ \alpha_{n+1} ( f(P_C(I - \lambda_{n+1}B_1) \frac{1}{t_{n+1}} \int_0^{t_{n+1}} T(s)x_{n+1} ds) - f(P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds) ) + \\
& f(P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds) (\alpha_{n+1} - \alpha_n) + \beta_{n+1}(x_{n+1} - x_n) + (\beta_{n+1} - \beta_n)x_n ] \Big\| + \| d_{n+1} - d_n \| \leq \\
& (1 - \beta_{n+1} - \alpha_{n+1} \bar{\gamma} \| P_C(I - \lambda_{n+1}B_2) \frac{1}{t_{n+1}} \int_0^{t_{n+1}} T(s)x_{n+1} ds - P_C(I - \lambda_n B_2) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds \| + \\
& \beta_{n+1} \| x_{n+1} - x_n \| + \gamma \alpha_{n+1} \| P_C(I - \lambda_{n+1}B_1) \frac{1}{t_{n+1}} \int_0^{t_{n+1}} T(s)x_{n+1} ds - P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds \| ) - \\
& \gamma \alpha_{n+1} \Psi ( \| P_C(I - \lambda_{n+1}B_1) \frac{1}{t_{n+1}} \int_0^{t_{n+1}} T(s)x_{n+1} ds - P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds \| ) + \\
& 2 ( |\beta_n - \beta_{n+1}| + |\alpha_n - \alpha_{n+1}| ) M + \| d_{n+1} - d_n \| \leq \\
& (1 - \alpha_{n+1} (\bar{\gamma} - \gamma)) \| x_{n+1} - x_n \| + \frac{4M |t_{n+1} - t_n|}{t_{n+1}} + \\
& 2M ( |\beta_n - \beta_{n+1}| + |\alpha_n - \alpha_{n+1}| ) + 2M_1 |\lambda_{n+1} - \lambda_n| + \| d_{n+1} - d_n \|
\end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
M &= \max \left\{ \sup_{n \geq 0} \left\| (A + I) P_C(I - \lambda_n B_2) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds \right\|, M_1, \right. \\
& \left. \sup_{n \geq 0} \| x_n \| + \| u \|, \sup_{n \geq 0} \gamma \left\| f(P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds) \right\| \right\}
\end{aligned}$$

于是由引理 5 可得  $\| x_{n+1} - x_n \| \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$ , 令  $y_n = P_C(I - \lambda_n B_2)x_n$ , 则  $\| y_{n+1} - y_n \| \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$ . 由于

$$\| x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds \| \leq \| x_n - x_{n+1} \| + \| \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds - x_{n+1} \| \leq \| x_n - x_{n+1} \| +$$

$$\alpha_n \| \gamma f(P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds) - A \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds \| + \beta_n \| x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds \|$$

所以

$$\begin{aligned}
& \| x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds \| \leq \frac{1}{1 - \beta_n} \| x_n - x_{n+1} \| + \\
& \frac{\alpha_n}{1 - \beta_n} \| \gamma f(P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds) - A \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds \|
\end{aligned}$$

因为  $\alpha_n \rightarrow 0, \| d_n \| \rightarrow 0, \| x_{n+1} - x_n \| \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$ , 故  $\| x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds \| \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$ .

另一方面, 由 ② 式可得

$$\begin{aligned}
\| y_n - u \|^2 &= \| P_C(I - \lambda_n B_2)x_n - P_C(I - \lambda_n B_2)u \|^2 \leq \| (1 - \lambda_n B_2)x_n - (I - \lambda_n B_2)u \|^2 \leq \\
& \| x_n - u \|^2 + \lambda_n (\lambda_n - 2\alpha) \| B_2 x_n - B_2 u \|^2 \tag{9}
\end{aligned}$$

由 ⑦ 式和引理 6, 有

$$\begin{aligned}
& \| x_{n+1} - u \|^2 \leq \| \alpha_n \gamma f(P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds) + \\
& \beta_n x_n + ((1 - \beta_n)I - \alpha_n A) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds + d_n - u \|^2 =
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
& \left\| \alpha_n \left( \gamma f(P_C(I - \lambda_n B_1)) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds \right) - Au \right\| + \\
& \left\| \beta_n \left( x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) y_n ds \right) + (I - \alpha_n A) \left( \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) y_n ds - u \right) + d_n \right\|^2 \leq \\
& \left\| (I - \alpha_n A) \left( \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) y_n ds - u \right) + \beta_n \left( x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) y_n ds \right) \right\|^2 + \\
& 2\alpha \left\| \gamma f(P_C(I - \lambda_n B_1)) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds - Au \right\| \left\| x_{n+1} - u \right\| + \left\| d_n \right\| \leq \\
& (1 - \alpha_n \bar{\gamma}) \left\| y_n - u \right\|^2 + 2\beta_n (1 - \alpha_n \bar{\gamma}) \left\| y_n - u \right\| \left\| x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) y_n ds \right\| + \\
& \beta_n^2 \left\| x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) y_n ds \right\|^2 + \left\| d_n \right\| + \\
& 2\alpha_n \left\| \gamma f(P_C(I - \lambda_n B_1)) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds - Au \right\| \left\| x_{n+1} - u \right\| \leq \\
& \left\| y_n - u \right\|^2 + 2\beta_n (1 - \alpha_n \bar{\gamma}) \left\| y_n - u \right\| \left\| x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) y_n ds \right\| + \\
& \beta_n^2 \left\| x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) y_n ds \right\|^2 + \left\| d_n \right\| + \\
& 2\alpha_n \left\| \gamma f(P_C(I - \lambda_n B_1)) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds - Au \right\| \left\| x_{n+1} - u \right\| \tag{10}
\end{aligned}$$

因此由 ⑨ 式和 ⑩ 式,有

$$\begin{aligned}
\left\| x_{n+1} - u \right\|^2 & \leq \left\| x_n - u \right\|^2 + \lambda_n (\lambda_n - 2\alpha) \left\| B_2 x_n - B_2 u \right\|^2 + \\
& 2\beta_n (1 - \alpha_n \bar{\gamma}) \left\| y_n - u \right\| \left\| x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) y_n ds \right\| +
\end{aligned}$$

$$\beta_n^2 \left\| x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) y_n ds \right\|^2 + 2\alpha_n \left\| \gamma f(P_C(I - \lambda_n B_1)) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds - Au \right\| \left\| x_{n+1} - u \right\| + \left\| d_n \right\|$$

于是

$$\begin{aligned}
& -\alpha(b - 2\alpha) \left\| B_2 x_n - B_2 u \right\|^2 \leq (\left\| x_{n+1} - u \right\| + \left\| x_n - u \right\|) (\left\| x_{n+1} - x_n \right\|) + \\
& 2\beta_n (1 - \alpha_n \bar{\gamma}) \left\| y_n - u \right\| \left\| x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) y_n ds \right\| + \beta_n^2 \left\| x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) y_n ds \right\|^2 + \\
& 2\alpha_n \left\| \gamma f(P_C(I - \lambda_n B_1)) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds - Au \right\| \left\| x_{n+1} - u \right\| + \left\| d_n \right\|
\end{aligned}$$

因为  $\alpha_n \rightarrow 0$ ,  $\left\| d_n \right\| \rightarrow 0$ ,  $\left\| x_{n+1} - x_n \right\| \rightarrow 0$ ,  $\left\| x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) y_n ds \right\| \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$ ,  $\{y_n\}$ ,

$\{f(P_C(I - \lambda_n B_1)) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s) x_n ds\}$  有界,所以有  $\left\| B_2 x_n - B_2 u \right\| \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$ . 由 ① 式有

$$\begin{aligned}
& \left\| y_n - u \right\|^2 \leq \langle (I - \lambda_n B_2) x_n - (I - \lambda_n B_2) u, y_n - u \rangle = \\
& \frac{1}{2} \{ \left\| (I - \lambda_n B_2) x_n - (I - \lambda_n B_2) u \right\|^2 + \left\| y_n - u \right\|^2 - \left\| (I - \lambda_n B_2) x_n - \right. \\
& \left. (I - \lambda_n B_2) u - (y_n - u) \right\|^2 \} \leq \frac{1}{2} \{ \left\| y_n - u \right\|^2 + \left\| x_n - u \right\|^2 -
\end{aligned}$$

$$\|y_n - x_n\|^2 + 2\lambda_n \langle x_n - y_n, B_2x_n - B_2u \rangle - \lambda_n^2 \|B_2x_n - B_2u\|^2 \}$$

进而

$$\|y_n - u\|^2 \leq \|x_n - u\|^2 - \|x_n - y_n\|^2 + 2\lambda_n \|x_n - y_n\| \|B_2x_n - B_2u\| \tag{11}$$

由 ⑩ 和 ⑪ 式,有

$$\begin{aligned} \|x_{n+1} - u\|^2 &\leq \|x_n - u\|^2 - \|x_n - y_n\|^2 + 2\lambda_n \|x_n - y_n\| \|B_2x_n - B_2u\| + \\ &2\beta_n(1 - \alpha_n\bar{\gamma}) \|y_n - u\| \|x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds\| + \beta_n^2 \|x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds\|^2 + \\ &2\alpha_n \|\gamma f(P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds) - Au\| \|x_{n+1} - u\| + \|d_n\| \end{aligned}$$

因此

$$\begin{aligned} \|x_n - y_n\|^2 &\leq (\|x_{n+1} - u\| + \|x_n - u\|)(\|x_{n+1} - x_n\|) + 2\lambda_n \|x_n - y_n\| \|B_2x_n - B_2u\| + \\ &2\beta_n(1 - \alpha_n\bar{\gamma}) \|y_n - u\| \|x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds\| + \beta_n^2 \|x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds\|^2 + \\ &2\alpha_n \|\gamma f(P_C(I - \lambda_n B_1) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds) - Au\| \|x_{n+1} - u\| + \|d_n\| \end{aligned}$$

再由  $\alpha_n \rightarrow 0, \|d_n\| \rightarrow 0, \|x_{n+1} - x_n\| \rightarrow 0, \|B_2x_n - B_2u\| \rightarrow 0, \|x_n - \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds\| \rightarrow$

$0(n \rightarrow \infty)$ , 可得  $\|x_n - y_n\| \rightarrow 0(n \rightarrow \infty)$ , 从而

$$\|\frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds - y_n\| \leq \|x_n - y_n\| + \|\frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)y_n ds - x_n\| \rightarrow 0(n \rightarrow \infty)$$

因为对  $\forall x, y \in C$ , 有

$$\begin{aligned} \|P_F(\gamma f + (I - A))x - P_F(\gamma f + (I - A))y\| &\leq \gamma \|x - y\| - \gamma\Psi(\|x - y\|) + \\ &(1 - \bar{\gamma}) \|x - y\| = (1 - (\bar{\gamma} - \gamma)) \|x - y\| - \gamma\Psi(\|x - y\|) \end{aligned}$$

所以  $P_F(\gamma f + (I - A))$  是具有这类  $C_{\gamma\Psi(s)}$  的弱压缩映象. 因此根据引理1, 存在唯一不动点  $q \in C$ , 使得  $q = P_F(\gamma f + (I - A))q$ , 进而  $q \in F$ . 下面证明  $q$  是变分不等式 ③ 的唯一解. 假设  $q_1$  和  $q_2$  是变分不等式 ③ 的两个解, 即  $\langle (\gamma f(q_1) - Aq_1), p - q_1 \rangle \leq 0, \langle (\gamma f(q_2) - Aq_2), p - q_2 \rangle \leq 0$ , 将上述不等式相减, 并使用引理4 可得

$$(\bar{\gamma} - \gamma) \|q_1 - q_2\|^2 + \gamma\Psi(\|q_1 - q_2\|) \|q_1 - q_2\| \leq \langle (Ag - \gamma f)q_1 - (Ag - \gamma f)q_2, q_1 - q_2 \rangle \leq 0$$

由于  $\forall s > 0, \Psi(s) > 0, \Psi(0) = 0$ , 所以  $\|q_1 - q_2\| = 0$ , 即  $q_1 = q_2$ , 因此  $q$  是变分不等式 ③ 的唯一解.

下面证明  $\limsup_{n \rightarrow \infty} \langle \gamma f(q) - Aq, x_n - q \rangle \leq 0$ . 取  $\{x_n\}$  的一个子列  $\{x_{n_i}\}$ , 使得  $\limsup_{n \rightarrow \infty} \langle \gamma f(q) - Aq, x_{n_i} - q \rangle = \lim_{i \rightarrow \infty} \langle \gamma f(q) - Aq, x_{n_i} - q \rangle$ . 又由  $\{y_n\}$  的子列  $\{y_{n_i}\}$  有界, 存在  $\{y_{n_i}\}$  的一个子列  $\{y_{n_{i_j}}\}$  弱收敛于  $z$ . 不失一般性, 可设  $y_{n_i} \rightarrow z$ . 现证  $z \in F(S) \cap VI(C, B_1) \cap VI(C, B_2)$ .

首先由定理1 的证明易知  $z \in F(S)$ . 其次令  $Q_i v = \begin{cases} B_i v + N_c v, v \in C \\ \emptyset, v \notin C \end{cases}$ , 其中  $i = 1, 2$ , 则  $Q_i (i =$

$1, 2)$  是最大单调的, 由定理1 的证明易知  $z \in VI(C, B_1) \cap VI(C, B_2)$ , 从而  $z \in F(S) \cap VI(C, B_1) \cap VI(C, B_2)$ . 再由  $\|x_n - y_n\| \rightarrow 0(n \rightarrow \infty)$ , 可知  $x_{n_i} \rightarrow z(i \rightarrow \infty)$ . 因  $q = P_F(\gamma f + (I -$

A)  $q$ , 有

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \langle \gamma f(q) - Aq, x_n - q \rangle = \lim_{t \rightarrow \infty} \langle \gamma f(q) - Aq, x_n - q \rangle = \langle \gamma f(q) - Aq, z - q \rangle \leq 0$$

令  $\zeta_n = \max \{ \langle \gamma f(q) - Aq, x_n - q \rangle, 0 \}$ , 则易知  $\zeta_n \geq 0$  且  $\lim_{n \rightarrow \infty} \zeta_n = 0$ .

最后证明  $x_n \rightarrow q (n \rightarrow \infty)$ . 事实上由 ⑦ 式和引理 6, 有

$$\begin{aligned} \|x_{n+1} - q\|^2 &= \|\alpha_n(\gamma f(P_C(I - \lambda_n B_1)) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds) - Aq\| + \beta_n(x_n - q) + \\ &\quad ((1 - \beta_n)I - \alpha_n A)(P_C(I - \lambda_n B_2)) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds - q + d_n\|^2 \leq \\ &\|\beta_n(x_n - q) + ((1 - \beta_n)I - \alpha_n A)(P_C(I - \lambda_n B_2)) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds - q\|^2 + \\ &2\alpha_n \langle \gamma f(P_C(I - \lambda_n B_1)) \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} T(s)x_n ds - Aq, x_{n+1} - q \rangle + 2\langle d_n, x_{n+1} - q \rangle \leq \\ &[(1 - \beta_n - \alpha_n \bar{\gamma}) \|x_n - q\| + \beta_n \|x_n - q\|]^2 + 2\alpha_n \gamma \|x_n - q\| \|x_{n+1} - q\| - \\ &2\alpha_n \gamma \Psi(\|x_{n+1} - q\|) + 2\alpha_n \langle \gamma f(q) - Aq, x_{n+1} - q \rangle + 2\|d_n\| \|x_{n+1} - q\| \leq \\ &(1 - \alpha_n \bar{\gamma})^2 \|x_n - q\|^2 + \alpha_n \gamma (\|x_n - q\|^2 + \|x_{n+1} - q\|^2) + \\ &2\alpha_n \langle \gamma f(q) - Aq, x_{n+1} - q \rangle + \|d_n\| (1 + \|x_{n+1} - q\|^2) \end{aligned}$$

因  $1 - \|d_n\| - \alpha_n \gamma \rightarrow 1 (n \rightarrow \infty)$ , 所以  $\exists n_1 > 1, \forall n > n_1$ , 有  $\frac{1}{2} < 1 - \|d_n\| - \alpha_n \gamma < 1$ . 进

而有

$$\begin{aligned} \|x_{n+1} - q\|^2 &\leq \frac{(1 - \alpha_n \bar{\gamma})^2 + \alpha_n \gamma}{1 - \|d_n\| - \alpha_n \gamma} \|x_n - q\|^2 + \frac{\|d_n\|}{1 - \|d_n\| - \alpha_n \gamma} + \\ &\frac{2\alpha_n}{1 - \|d_n\| - \alpha_n \gamma} (\gamma f(q) - Aq, x_{n+1} - q) = \\ &\left(1 - \frac{2\alpha_n(\bar{\gamma} - \gamma)}{1 - \|d_n\| - \alpha_n \gamma}\right) \|x_n - q\|^2 + \frac{\|d_n\|}{1 - \|d_n\| - \alpha_n \gamma} (1 + \|x_n - q\|^2) + \\ &\frac{2\alpha_n}{1 - \|d_n\| - \alpha_n \gamma} \left(\langle \gamma f(q) - Aq, x_{n+1} - q \rangle + \frac{\alpha_n \bar{\gamma}^2}{2} \|x_n - q\|^2\right) \leq \\ &(1 - 2\alpha_n(\bar{\gamma} - \gamma)) \|x_n - q\|^2 + 2\|d_n\| (1 + K) + 4\alpha_n(\xi_{n+1} + \alpha_n K) \end{aligned}$$

其中  $K = \left(1 + \frac{\bar{\gamma}^2}{2}\right) \sup_{n \geq 0} \|x_n - q\|^2$ . 取  $a_n = \|x_n - q\|^2, b_n = 4\alpha_n(\xi_{n+1} + \alpha_n K), c_n = 2\|d_n\| (1 + K)$ ,

$\omega_n = 2\alpha_n(\bar{\gamma} - \gamma)$ , 由引理 5 可知  $x_n \rightarrow q (n \rightarrow \infty)$ .

### 3 结语

本文引入更为一般的非扩张半群隐式和显式黏滞迭代算法, 在 Hilbert 空间中建立了非扩张半群的公共不动点集与具有强单调型映象的变分不等式解集的公共元素的强收敛定理, 推广并改进了相关文献中的结果, 其对研究非线性变分不等式解的存在性与迭代收敛性问题, 具有重要的理论意义.

## 参考文献:

- [1] ALBER Y I, GUERRE-DELABRIERE S. Principles of weakly contractive maps in Hilbert spaces[J]. Oper Theory and Appl, 1997, 98:7.
- [2] TAKAHASHI W, TOYODA M. Weak convergence theorems for nonexpansive mappings and monotone mappings[J]. J Optim Theory Appl, 2003, 118:417.
- [3] CHEN J M, ZHANG L J, FAN T G. Viscosity approximation methods for nonexpansive mappings and monotone mappings[J]. J Math Anal Appl, 2007, 334:1450.
- [4] RAZAMI A, YAZDI Y. An iterative method for a family nonexpansive mappings[J]. Math Reports, 2014, 16(66):7.
- [5] PLUBTIENG S, PUNPAENG R. Fixed-point solutions of variational inequalities for nonexpansive semigroups in Hilbert spaces[J]. Math Comput Modell, 2008, 48(1-2):279.
- [6] PLUBTIENG S, WANGKEEREE R. A general viscosity approximation method of fixed point solutions of variational inequalities for nonexpansive semigroups in Hilbert spaces[J]. Bull Korean Math Soc, 2008, 45(4):717.
- [7] ZHANG D, QIN X, GU F. Approximation of common fixed points of nonexpansive semigroups in Hilbert spaces[J]. Journal of Applied Mathematics, doi:10.1155/2012/417234.
- [8] 张树义. 一致 Lipschitz 渐近  $\varphi_i$ -型拟伪压缩映象多步平行迭代算法的收敛性[J]. 系统科学与数学, 2013, 33(11):1233.
- [9] 张树义, 宋晓光. 非 Lipschitz 有限族集值广义渐近  $\varphi$ -半压缩映象的强收敛定理[J]. 系统科学与数学, 2014, 34(9):1051.
- [10] 张树义. 赋范线性空间中渐近拟伪压缩型映象不动点的修改的广义 Ishikawa 迭代逼近[J]. 应用数学学报, 2011, 34(5):886.
- [11] 张树义, 赵美娜, 李丹. 渐近半压缩映象具混合型误差的迭代收敛性[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2015, 16(3):165.
- [12] 赵美娜, 张树义, 赵亚莉. 有限族广义一致伪 Lipschitz 映象公共不动点的迭代收敛性[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2017, 30(1):7.
- [13] 张树义, 李丹, 丛培根. 增生算子零点的迭代逼近[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2017, 18(2):1.
- [14] 赵美娜, 张树义, 郑晓迪. 一类算子方程迭代序列的稳定性[J]. 轻工学报, 2016, 31(6):100.
- [15] 林媛, 张树义, 李丹. Banach 空间中渐近非扩张型映象 Reich-Takahashi 迭代序列的收敛性[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2017, 18(3):185.
- [16] 赵美娜, 张树义, 赵亚莉. 渐近伪压缩型映象不动点的迭代逼近[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(15):264.
- [17] 张树义, 李丹, 林媛, 等. 非自渐近非扩张型映象具误差的 Reich-Takahashi 粘滞迭代逼近[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2017, 18(3):287.
- [18] 张树义, 林媛, 郑晓迪. 强增生映像零点的迭代逼近[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2017, 40(2):127.
- [19] 李丹, 张树义, 丛培根.  $\varphi$ -强增生算子方程解的 Noor 三步迭代收敛率的估计[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2017, 33(3):193.



引用格式:丛培根,张芯语,张树义. 概率度量空间中一类平方型映象的公共不动点定理与泛函方程组解的存在性[J]. 轻工学报,2018,33(4):101-108.

中图分类号:O189.2 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2018.04.013

文章编号:2096-1553(2018)04-0101-08

# 概率度量空间中一类平方型映象的公共不动点定理与泛函方程组解的存在性

## Common fixed point theorems for a class of twice power type mappings in probabilistic metric spaces and existence of solutions for functional equations

关键词:

非阿基米德 Menger 概率度量空间;平方型映象;交换映象;相容映象;公共不动点;泛函方程组

Key words:

nonarchimedean Menger probabilistic metric space; twice power type mapping; commuting mapping; compatible mapping; common fixed point; functional equations

丛培根,张芯语,张树义

CONG Peigen, ZHANG Xinyu, ZHANG Shuyi

渤海大学 数理学院, 辽宁 锦州 121013

College of Mathematics and Physics, Bohai University, Jinzhou 121013, China

摘要:在概率度量空间中研究一类平方型映象的公共不动点的存在性,在一定条件下,建立了这类平方型映象的公共不动点定理,从而改进和推广了有关文献中的相应结果,并讨论了起源于动态规划的一类泛函方程组解的存在性和唯一性,对研究各类算子方程解的存在性和唯一性具有重要意义.

收稿日期:2018-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目(11371070);渤海大学研究生创新基金项目(YJC20170036)

作者简介:丛培根(1993—),男,辽宁省葫芦岛市人,渤海大学硕士研究生,主要研究方向为非线性泛函分析.

通信作者:张树义(1960—),男,辽宁省锦州市人,渤海大学教授,主要研究方向为非线性泛函分析.

**Abstract:** In the space of probabilistic metrics, the existence of common fixed points for a class of twice power type mapping was studied. Under certain conditions, the common fixed-point theorems of such twice power type mappings were established, and the related results in some references were improved and generalized. And the existence and uniqueness of solutions of a class of functional equations that originated from dynamic programming were discussed, which was of great significance to study the existence and uniqueness of solutions for all kinds of operator equations.

概率度量空间是利用分布函数来表示两点之间的距离,它是度量空间的一种推广,将在完备度量空间中获得的不动点的存在性定理推广到概率度量空间是非常重要和有意义的工作. 本文拟在非阿基米德概率度量空间中研究一类平方型 Altman 映象的公共不动点的存在性,证明新的不动点定理,从而改进和推广文献中的相应结果. 作为应用,本文亦欲讨论起源于动态规划的一类泛函方程组解的存在性和唯一性.

### 1 预备知识

文献[1 - 3] 在概率度量空间中研究了可交换映象和相容映象的公共不动点的存在性. 文献[4] 在完备度量空间  $(X, d)$  中证明了一个映象  $S$  的不动点的存在性:  $d(Sx, Sy) \leq h(d(x, y))$ , 其中,  $h$  是从  $[0, +\infty)$  到自身的递增函数且满足如下条件:

- i)  $0 < h(t) < t, t \in (0, +\infty)$ ;
- ii) 函数  $p(t) = t/(t - h(t))$  递减;
- iii) 对  $t_1 > 0$ , 积分  $\int_0^{t_1} p(t) dt < +\infty$ .

注1 由条件 i) 和  $h$  的递增性可知,  $h(0) = 0$ , 且  $h(t) = t \Leftrightarrow t = 0$ .

文献[5 - 7] 推广了文献[4] 中的结果, 文献[8] 研究了 Ciric-Altman 型映象的不动点的存在性. 近年来, 文献[9 - 20] 研究了若干非线性映象不动点的存在性.

设  $R$  为全体实数集,  $R_+$  为非负实数,  $D$  为全体分布函数.

定义1 设  $X$  是非空集,  $F: X \times X \rightarrow D$ , 若满足下面条件(对  $x, y \in X$ , 分布函数  $F(x, y)$  记为  $F_{x,y}$ ), 则称  $(X, F)$  为非阿基米德概率度量空间:

- I)  $F_{x,y}(t) = 1, \forall t > 0$ , 当且仅当  $x = y$ ;
- II)  $F_{x,y} = F_{y,x}, \forall x, y \in X$ ;
- III)  $F_{x,y}(0) = 0, \forall x, y \in X$ ;
- IV) 若  $F_{x,y}(t) = 1, F_{y,z}(s) = 1$ , 则  $F_{x,z}(\max\{t, s\}) = 1, \forall x, y, z \in X$ .

定义2 三元组  $(X, F, \Delta)$  称为非阿基米德 Menger 概率度量空间, 若  $(X, F)$  是一非阿基米德概率度量空间,  $\Delta$  是满足下列条件的  $\Delta$  - 范数:

$$V) F_{x,z}(\max\{t, s\}) \geq \Delta(F_{x,y}(t), F_{x,z}(s)), \forall t, s \in R_+, \forall x, y, z \in X$$

记  $K = \{g \mid g \cdot [0, 1] \rightarrow R_+ \text{ 是连续的、严格递减的, } g(1) = 0, g(0) < +\infty\}$

定义3 非阿基米德 Menger 概率度量空间  $(X, F, \Delta)$  称为  $(C)_g$  型非阿基米德 Menger 概率度量空间, 如果存在  $g \in K$ , 使得  $\forall x, y, z \in X, \forall t \geq 0$ , 有  $gF_{x,y}(t) \leq gF_{x,z}(t) + gF_{z,y}(t)$ .

**定义 4** 非阿基米德 Menger 概率度量空间  $(X, F, \Delta)$  称为  $(D)_g$  型非阿基米德 Menger 概率度量空间,若存在  $g \in K$ ,使得  $g(\Delta(s, t)) \leq g(s) + g(t), \forall s, t \in [0, 1]$ .

**引理 1**<sup>[2]</sup> a) 如果非阿基米德 Menger 概率度量空间  $(X, F, \Delta)$  是  $(D)_g$  型的,则  $(X, F, \Delta)$  也是  $(C)_g$  型的. b) 如果  $(X, F, \Delta)$  是非阿基米德 Menger 概率度量空间,且  $\Delta \geq \Delta_1$ , 其中  $\Delta_1(a, b) = \max\{a + b - 1, 0\}$ , 则  $(X, F, \Delta)$  是  $(D)_g$  型的,其中  $g(t) = 1 - t, t \in [0, 1]$ .

假设  $X$  是完备  $(D)_g$  型非阿基米德 Menger 概率度量空间,则有如下定义和引理.

**定义 5** 设  $A$  和  $S$  是  $X$  到自身的映象,  $A$  和  $S$  称为相容的,若  $\lim_{n \rightarrow \infty} gF_{ASx_n, SAx_n}(t) = 0, \forall t > 0$ , 其中  $\{x_n\}$  是  $X$  中序列,  $\lim_{n \rightarrow \infty} Ax_n = \lim_{n \rightarrow \infty} Bx_n = u \in X$ .

**引理 2** 设  $S, A: X \rightarrow X$  是相容映象, 如果  $Az = Sz, z \in X$ , 则  $ASz = SAz$ .

**证明** 令  $x_n = z, n \geq 0$ , 则  $\lim_{n \rightarrow \infty} Ax_n = \lim_{n \rightarrow \infty} Sx_n = Az$ , 由映象  $S, A$  的相容性可知  $gF_{ASz, SAz}(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} gF_{ASx_n, SAx_n}(t) = 0, \forall t > 0$ .

因此  $gF_{ASz, SAz}(t) = 0, \forall t > 0$ , 进而  $ASz = SAz$ .

证毕.

## 2 主要结果

**定理 1** 设  $A, B, P$  和  $Q$  均为从  $X$  到自身的连续映象, 满足  $AP = PA, BQ = QB$ , 且  $\forall x, y \in X, t > 0$ , 有

$$\begin{aligned} (gF_{APx, BQy}(t))^2 \leq & H((gF_{x, y}(t))^2, gF_{x, APx}(t)gF_{y, BQy}(t), gF_{x, BQy}(t)gF_{y, APx}(t), \\ & gF_{y, APx}(t)gF_{y, BQy}(t), gF_{x, y}(t)gF_{x, APx}(t), gF_{x, APx}(t)gF_{y, APx}(t)) \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $H: R_+^6 \rightarrow R_+$  对每一变量都是非减的函数.

若  $\forall t > 0, \max\{H(t, t, 0, 2t, t, 2t), H(t, 0, t, 0, 0, 0)\} = h(t)$  满足条件 i) — iii), 则存在  $u \in X$ , 满足  $Au = Bu = Pu = Qu = u$ .

**证明**  $\forall x_0 \in X$ , 设  $x_{2n+1} = APx_{2n}, x_{2n+2} = BQx_{2n+1}, n = 0, 1, 2, \dots$ , 由式 (1) 可得

$$\begin{aligned} (gF_{x_{2n+1}, x_{2n}}(t))^2 = & (gF_{APx_{2n}, BQx_{2n+1}}(t))^2 \leq \\ & H((gF_{x_{2n}, x_{2n-1}}(t))^2, gF_{x_{2n}, x_{2n+1}}(t)gF_{x_{2n-1}, x_{2n}}(t), gF_{x_{2n}, x_{2n}}(t)gF_{x_{2n-1}, x_{2n+1}}(t), \\ & gF_{x_{2n-1}, x_{2n+1}}(t)gF_{x_{2n-1}, x_{2n}}(t), gF_{x_{2n}, x_{2n-1}}(t)gF_{x_{2n}, x_{2n+1}}(t), gF_{x_{2n}, x_{2n+1}}(t)gF_{x_{2n-1}, x_{2n+1}}(t)) \end{aligned} \quad (2)$$

若存在  $t_0 > 0$ , 使得  $gF_{x_{2n}, x_{2n+1}}(t_0) > gF_{x_{2n-1}, x_{2n}}(t_0)$ , 由式 (2) 可得

$$(gF_{x_{2n+1}, x_{2n}}(t_0))^2 \leq H((gF_{x_{2n}, x_{2n+1}}(t_0))^2, (gF_{x_{2n}, x_{2n+1}}(t_0))^2, 0,$$

$$2(gF_{x_{2n}, x_{2n+1}}(t_0))^2, (gF_{x_{2n}, x_{2n+1}}(t_0))^2, 2(gF_{x_{2n}, x_{2n+1}}(t_0))^2) = h(gF_{x_{2n}, x_{2n+1}}(t_0))^2 < (gF_{x_{2n}, x_{2n+1}}(t_0))^2$$

与自身矛盾. 故对  $\forall t > 0$ , 有  $gF_{x_{2n}, x_{2n+1}}(t) \leq gF_{x_{2n-1}, x_{2n}}(t)$ , 从而对  $\forall t > 0$ , 由式 (2) 可得

$$(gF_{x_{2n+1}, x_{2n}}(t))^2 \leq H(gF_{x_{2n}, x_{2n-1}}(t))^2, (gF_{x_{2n}, x_{2n-1}}(t))^2, 0,$$

$$2(gF_{x_{2n}, x_{2n-1}}(t))^2, (gF_{x_{2n}, x_{2n-1}}(t))^2, 2(gF_{x_{2n}, x_{2n-1}}(t))^2) = h((gF_{x_{2n}, x_{2n-1}}(t))^2)$$

类似地, 可以证明对  $\forall t > 0$ , 有  $(gF_{x_{2n+1}, x_{2n}}(t))^2 \leq h((gF_{x_{2n+1}, x_{2n}}(t))^2)$ . 因此对  $\forall t > 0$ , 有

$$(gF_{x_n, x_{n+1}}(t))^2 \leq h((gF_{x_{n-1}, x_n}(t))^2)$$

下面证明  $\{x_n\}$  为  $X$  中的 Cauchy 序列.

记  $s_n(t) = gF_{x_n, x_{n+1}}(t)$ , 如果对某个  $n$ , 有  $s_{2n}(t) = gF_{x_{2n+1}, x_{2n}}(t) = 0, \forall t > 0$ , 则  $x_{2n+1} = x_{2n}$ , 进而  $APx_{2n} = BQx_{2n-1} = x_{2n} = u$ .

由式 ① 可得

$$(gF_{APu, BQu}(t))^2 \leq H((gF_{u,u}(t))^2, gF_{u, APu}(t)gF_{u, BQu}(t), gF_{u, BQu}(t)gF_{u, APu}(t), gF_{u, APu}(t)gF_{u, BQu}(t), gF_{u,u}(t)gF_{u, APu}(t), gF_{u, APu}(t)gF_{u, APu}(t)) = H = (0, 0, 0, 0, 0, 0) = h(0) = 0$$

于是  $APu = BQu$ . 进而可得

$$(gF_{Pu,u}(t))^2 = (gF_{APPu,u}(t))^2 = (gF_{APPu, BQu}(t))^2 \leq H((gF_{Pu,u}(t))^2, 0, (gF_{Pu,u}(t))^2, 0, 0, 0) \leq h((gF_{Pu,u}(t))^2), \forall t > 0$$

这表明  $gF_{Pu,u}(t) = 0, \forall t > 0$ , 于是  $Pu = u$ . 类似地, 有  $Qu = u$ . 因此  $Au = APu = u = BQu = Bu$ . 由式 ① 容易证明  $u$  是  $A, B, P, Q$  的唯一公共不动点. 同理, 如果对某个  $n$ , 有  $s_{2n-1}(t) = gF_{x_{2n-1}, x_{2n}}(t) = 0, \forall t > 0$ , 则  $A, B, P, Q$  也存在唯一公共不动点. 故若对某个  $n$ , 有  $s_n(t) = gF_{x_n, x_{n+1}}(t) = 0, \forall t > 0$ , 则  $A, B, P, Q$  存在唯一公共不动点. 因此以下可设  $\forall n \geq 0, s_n(t) > 0, \forall t > 0$ . 于是对  $\forall t > 0$ , 有  $s_n^2(t) \leq h(s_{n-1}^2(t)) < s_{n-1}^2(t), \forall n \in Z^+$  (非负正数集). 因此对  $\forall t > 0, \{s_n(t)\}$  是关于  $n$  严格递减的正数列, 故对  $\forall t > 0, \{s_n(t)\}$  收敛.  $\forall m, n \in Z^+, n \leq m$ , 由条件 i) 和 ii) 可得

$$(gF_{x_n, x_m}(t))^2 \leq \sum_{i=n}^{m-1} (gF_{x_i, x_{i+1}}(t))^2 = \sum_{i=n}^{m-1} s_i^2(t) = \sum_{i=n}^{m-1} \frac{s_i^2(t)(s_i^2(t) - s_{i+1}^2(t))}{s_i^2(t) - s_{i+1}^2(t)} \leq \sum_{i=n}^{m-1} \frac{s_i^2(t)(s_i^2(t) - s_{i+1}^2(t))}{s_i^2(t) - h(s_{n-1}^2(t))} \leq \sum_{i=n}^{m-1} \int_{s_{i+1}^2(t)}^{s_i^2(t)} \frac{y}{y - h(y)} dy = \int_{s_m^2(t)}^{s_n^2(t)} \frac{y}{y - h(y)} dy = \int_{s_m^2(t)}^{s_n^2(t)} p(y) dy$$

由  $\forall t > 0, \{s_n(t)\}$  收敛的结果和条件 iii) 可得  $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{s_n^2(t)}^{s_{n+1}^2(t)} p(y) dy = 0$ , 从而可知  $\{x_n\}$  是  $X$  中的 Cauchy 列. 令  $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = u \in X$ , 再由  $A, B, P$  和  $Q$  连续得  $APu = \lim_{n \rightarrow \infty} APx_{2n+2}, BQu = \lim_{n \rightarrow \infty} BQx_{2n+1}$ , 进而  $u = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n+2} = \lim_{n \rightarrow \infty} BQx_{2n+1} = BQu = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} APx_{2n} = APu$ . 因  $AP = PA$ , 由 ① 式可得

$$(gF_{Pu,u}(t))^2 = (gF_{APPu,u}(t))^2 = (gF_{APPu, BQu}(t))^2 \leq H((gF_{Pu,u}(t))^2, 0, (gF_{Pu,u}(t))^2, 0, 0, 0) \leq h((gF_{Pu,u}(t))^2), \forall t > 0$$

这表明  $gF_{Pu,u}(t) = 0, \forall t > 0$ , 于是  $Pu = u$ . 类似地, 有  $Qu = u$ . 因此  $Au = APu = u = BQu = Bu$ . 由式 ① 容易证明  $u$  是  $A, B, P, Q$  的唯一公共不动点.

注2 本文定理1与文献[1]中定理2.1相比较, 本文定理1不要求  $H$  的连续性, 从而没有使用文献[1]中的引理1.1, 也没有使用文献[1]中的引理1.2.

如果用  $H$  的连续性代替映象连续性, 则有下列结果.

定理2 设  $A, B, P$  和  $Q$  均为从  $X$  到自身的映象, 满足  $AP = PA, BQ = QB$ , 且  $\forall x, y \in X, t > 0$ , 有

$$(gF_{APx, BQy}(t))^2 \leq H((gF_{x,y}(t))^2, gF_{x, APx}(t)gF_{y, BQy}(t), gF_{x, BQy}(t)gF_{y, APx}(t), gF_{y, APx}(t)gF_{y, BQy}(t), gF_{x,y}(t)gF_{x, APx}(t), gF_{x, APx}(t)gF_{y, APx}(t)) \tag{③}$$

其中,  $H: R_+^6 \rightarrow R_+$  对每一变量都是非减的上半连续函数,  $\forall t > 0, \max\{H(t, t, 0, 2t, t, 2t), H(t, 0, t, 0, 0, 0)\} = h(t)$  满足条件 i) — iii), 则存在  $u \in X$ , 满足  $Au = Bu = Pu = Qu = u$ .



**证明**  $\forall x_0 \in X$ , 设  $x_{2n+1} = APx_{2n}, x_{2n+2} = BQx_{2n+1}, n = 0, 1, 2, \dots$ . 由定理 1 证明可知  $\{x_n\}$  是  $X$  中的 Cauchy 列. 令  $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = u \in X$ , 由式 ③ 可得

$$\begin{aligned} (gF_{APu, x_{2n}}(t))^2 &= (gF_{APu, BQx_{2n-1}}(t))^2 \leq \\ &H((gF_{u, x_{2n-1}}(t))^2, gF_{u, APu}(t)gF_{x_{2n-1}, x_{2n}}(t), gF_{u, x_{2n}}(t)gF_{x_{2n-1}, APu}(t), \\ &gF_{x_{2n-1}, APu}(t)gF_{x_{2n-1}, x_{2n}}(t), gF_{x_{2n-1}, u}(t)gF_{u, APu}(t), gF_{u, APu}(t)gF_{x_{2n-1}, APu}(t)), \forall t > 0 \end{aligned}$$

令  $n \rightarrow \infty$  并取上极限, 有

$$(gF_{APu, u}(t))^2 \leq H(0, 0, 0, 0, 0, (gF_{u, APu}(t))^2) \leq h(gF_{u, APu}(t))^2, \forall t > 0$$

据此可得  $gF_{APu, u}(t) = 0, \forall t > 0$ , 进而  $u = APu$ , 同理可得  $u = BQu$ . 因  $AP = PA$ , 由式 ③ 可得

$$\begin{aligned} (gF_{Pu, u}(t))^2 &= (gF_{APPu, u}(t))^2 = (gF_{APPu, BQu}(t))^2 \leq \\ &H((gF_{Pu, u}(t))^2, 0, (gF_{Pu, u}(t))^2, 0, 0, 0) \leq h((gF_{Pu, u}(t))^2), \forall t > 0 \end{aligned}$$

这表明  $gF_{Pu, u}(t) = 0, \forall t > 0$ , 则  $Pu = u$ , 同理有  $Qu = u$ . 因此

$$Au = APu = u = BQu = Bu$$

由式 ③ 容易证明  $u$  是  $A, B, P, Q$  的唯一公共不动点.

**注 3** 定理 2 证明没有使用文献[1]中的引理 1.1 和引理 1.2.

**定理 3** 设  $A, B, S$  为  $X$  到自身的连续映象, 满足  $A(X) \cup B(X) \subset S(X)$ ,  $A$  和  $B$  分别与  $S$  相容, 且  $\forall t > 0; x, y \in X$ , 有

$$\begin{aligned} (gF_{Ax, By}(t))^2 &\leq H(gF_{Sx, Ax}(t)gF_{Sy, By}(t), gF_{Sx, By}(t)gF_{Sy, Ax}(t), \\ &gF_{Sy, Ax}(t)gF_{Sx, By}(t), gF_{Sy, Ax}(t)gF_{Sy, By}(t)) \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $H: R_+^4 \rightarrow R_+$  对每一变量都是非减的,  $\forall t > 0, H(t, t, a_1 t, a_2 t) = h(t)$  满足条件 i) — (iii),  $a_1, a_2 \in \{0, 1, 2\}$ , 且  $a_1 + a_2 = 2$ , 则  $A, B, S$  有唯一公共不动点.

**证明** 因  $A(X) \cup B(X) \subset S(X), \forall x_0 \in X$ , 取  $\{x_n\} \in X$ , 使得  $Ax_{2n} = Sx_{2n+1}, Bx_{2n+1} = Sx_{2n+2}, n = 0, 1, 2, \dots$ . 由定理 1 容易证明  $\{Sx_n\}$  是  $X$  中 Cauchy 序列. 令  $Sx_n \rightarrow u (n \rightarrow \infty)$ , 则有  $Ax_{2n} \rightarrow u, Bx_{2n+1} \rightarrow u (n \rightarrow \infty)$ . 因  $S$  是连续的,  $SAx_{2n} \rightarrow Su (n \rightarrow \infty)$  因  $A$  与  $S$  相容, 有  $ASx_{2n} \rightarrow Su (n \rightarrow \infty)$ . 再由  $A$  连续可得  $Su = \lim_{n \rightarrow \infty} SAx_{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} ASx_{2n} = Au$ .

因  $S$  是连续的,  $SBx_{2n+1} \rightarrow Su (n \rightarrow \infty)$ . 因  $B$  与  $S$  相容, 有  $BSx_{2n+1} \rightarrow Su (n \rightarrow \infty)$ . 再由  $B$  连续可得  $Su = \lim_{n \rightarrow \infty} SBx_{2n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} BSx_{2n+1} = Bu$ . 由  $Su = Au = Bu$  和引理 2 可得  $SAu = ASu, SBu = BSu$ , 则由式 ④ 可得

$$\begin{aligned} (gF_{ASu, Su}(t))^2 &= (gF_{ASu, Bu}(t))^2 \leq H(gF_{SSu, ASu}(t)gF_{Su, Bu}(t), gF_{SSu, Bu}(t)gF_{Su, ASu}(t), \\ &gF_{SSu, ASu}(t)gF_{SSu, Bu}(t), gF_{Su, ASu}(t)gF_{Su, Bu}(t)) \leq \\ &H(0, (gF_{ASu, Su}(t))^2, 0, 0) = h((gF_{ASu, Su}(t))^2), \forall t > 0 \end{aligned}$$

因此有  $gF_{ASu, Su}(t) = 0, \forall t > 0$ , 这表明  $ASu = Su$ . 类似地, 有  $SSu = Su$ . 由此可得  $SSu = SAu = ASu = Su = BSu$ . 因此  $Su$  是  $A, B, S$  的公共不动点. 由式 ④ 易证  $Su$  是  $A, B, S$  的唯一公共不动点.

**注 4** 与文献[1]中定理 2.2 相比较, 本文定理 3 不要求  $H$  的连续性, 所以不必使用文献[1]中的引理 1.1 和引理 1.2.

设  $R = (-\infty, +\infty)$ ,  $X$  和  $Y$  是实 Banach 空间,  $S \subseteq X$  为状态空间,  $D \subseteq Y$  为决策空间,  $B(S)$  是

S上的全体有界实函数,  $x$  和  $y$  分别为状态向量和决策向量,  $T$  为过程变换,  $f(x)$  为具有初始状态  $x$  的最优返回. 下面利用定理 3, 讨论起源于动态规划的泛函方程的解的存在性和唯一性.

$$f_i(x) = \underset{y \in D}{opt} \{ u(x, y) + G_i(x, y, f_i(T(x, y))) \} \tag{5}$$

其中,  $i = 1, 2, 3, x \in S, opt = \sup$  或  $opt = \inf, u : S \times D \rightarrow R, T : S \times D \rightarrow S, G_i : S \times D \times R \rightarrow R$ . 对  $h, k \in B(S), t > 0$ , 定义  $F_{h,k}(t) = e^{-\frac{d(h,k)}{t}}$ , 其中  $d(h, k) = \sup \{ |h(x) - k(x)| : x \in S \}$ . 对  $\forall a, b \in [0, 1]$ , 取  $\Delta(a, b) = \max \{ a + b - 1, 0 \}$ , 则易知  $(B(S), F, \Delta)$  是完备的  $(D)_g$  型非阿基米德 Menger 概率度量空间, 进而由引理 1 可知  $(B(S), F, \Delta)$  也是完备的  $(C)_g$  型非阿基米德 Menger 概率度量空间, 其中  $g : [0, 1] \rightarrow [0, \infty), g(x) = 1 - x, \forall x \in [0, 1]$ .

定理 4 设

1)  $u, G_i (i = 1, 2, 3)$  有界.

$$2) 1 - e^{-\frac{|G_i(x,y,t) - G_i(x,y,t)|}{t}} \leq \sqrt{\frac{H(gF_{A_3x,A_1x}(t)gF_{A_3y,A_2y}(t), gF_{A_3x,A_2y}(t)gF_{A_3y,A_1x}(t), gF_{A_3x,A_1x}(t)gF_{A_3x,A_2y}(t), gF_{A_3y,A_1x}(t)gF_{A_3x,A_2y}(t))}{H(gF_{A_3x,A_1x}(t)gF_{A_3y,A_2y}(t), gF_{A_3x,A_2y}(t)gF_{A_3y,A_1x}(t), gF_{A_3x,A_1x}(t)gF_{A_3x,A_2y}(t), gF_{A_3y,A_1x}(t)gF_{A_3x,A_2y}(t))}}$$

其中,  $x \in S, y \in D; k, h \in B(S), k \neq h, t > 0, g : [0, 1] \rightarrow [0, \infty), g(x) = 1 - x, \forall x \in [0, 1]$ .

$H : R_+^4 \rightarrow R_+$  对每一变量是非减的,  $\forall t > 0, H(t, t, a_1t, a_2t) = \bar{h}(t)$  满足条件 i) — iii),  $a_1, a_2 \in \{0, 1, 2\}$ , 且  $a_1 + a_2 = 2$ , 此外, 有

$$A_i w_i(x) = \underset{y \in D}{opt} \{ u(x, y) + G_i(x, y, w_i(T(x, y))) \}, x \in S, w_i \in B(S), i = 1, 2, 3$$

3)  $A_1(B(S)) \cup A_2(B(S)) \subset A_3(B(S))$ .

4) 对  $A_i (i = 1, 2, 3)$ , 满足任意的  $\{\gamma_n\}_{n \geq 1} \subset B(S), \gamma \in B(S)$ , 有

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \sup_{x \in S} |\gamma_n(x) - \gamma(x)| = 0 \Rightarrow \limsup_{n \rightarrow \infty} \sup_{x \in S} |A_i \gamma_n(x) - A_i \gamma(x)| = 0$$

5) 对任意的  $\{\mu_n\}_{n \geq 1} \subset B(S)$ , 如果存在  $\mu \in B(S)$ , 当

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \sup_{x \in S} |A_i \mu_n(x) - \mu(x)| = \limsup_{n \rightarrow \infty} \sup_{x \in S} |A_3 \mu_n(x) - \mu(x)| = 0, i = 1, 2$$

有

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \sup_{x \in S} (F_{A_i \mu_n(x), A_j A_i \mu_n(x)}(t)) = 0, \forall t > 0$$

则泛函方程组 (5) 在  $B(S)$  中存在唯一解.

证明 对任意的  $h, k \in B(S)$ , 定义  $d(h, k) = \sup \{ |h(x) - k(x)|, x \in S \}$ , 则  $(B(S), d)$  为完备度量空间. 由 1) 可知,  $A_i : B(S) \rightarrow B(S), i = 1, 2, 3$ , 由 4) 和 5) 可知,  $A_1, A_2, A_3$  是连续的, 并且  $A_1$  与  $A_3, A_2$  与  $A_3$  是相容的. 若  $opt = \sup$ , 则由 2) 中  $A_i w_i(x)$  的定义可知, 对任意的  $h, k \in B(S), x \in S$ , 对任意的  $\varepsilon > 0$ , 存在  $y, z \in D$ , 使下列不等式成立:

$$\begin{aligned} A_1 k(x) &< u(x, y) + G_1(x, y, k(T(x, y))) + \varepsilon \\ A_2 h(x) &< u(x, z) + G_2(x, z, h(T(x, z))) + \varepsilon \\ A_1 k(x) &\geq u(x, z) + G_1(x, z, k(T(x, z))) \\ A_2 h(x) &\geq u(x, y) + G_2(x, y, h(T(x, y))) \end{aligned}$$

据此可得

$$\begin{aligned} G_1(x, z, k(T(x, z))) - G_2(x, z, h(T(x, z))) - \varepsilon &< A_1 k(x) - A_2 h(x) < \\ G_1(x, y, k(T(x, y))) - G_2(x, y, h(T(x, y))) + \varepsilon \end{aligned}$$

进而可得

$$d(A_1k, A_2h) = \sup_{x \in S} |A_1k(x) - A_2h(x)| \leq |G_1(x, z, k(T(x, z))) - G_2(x, z, h(T(x, z)))| + \varepsilon$$

令  $\varepsilon \rightarrow 0$ , 得

$$d(A_1k, A_2h) \leq |G_1(x, z, k(T(x, z))) - G_2(x, z, h(T(x, z)))|$$

于是对  $\forall t > 0$ , 有

$$1 - e^{-\frac{d(A_1k, A_2h)}{t}} \leq 1 - e^{-\frac{|G_1(x, z, k(T(x, z))) - G_2(x, z, h(T(x, z)))|}{t}}$$

因此对  $\forall t > 0$ , 由条件 2) 得

$$g(F_{A_1k, A_2h}(t)) \leq \sqrt{\frac{H(gF_{A_3x, A_1x}(t)gF_{A_3y, A_2y}(t), gF_{A_3x, A_2y}(t)gF_{A_3y, A_1x}(t), gF_{A_3x, A_1x}(t)gF_{A_3x, A_2y}(t), gF_{A_3y, A_1x}(t)gF_{A_3x, A_2y}(t))}{gF_{A_3x, A_1x}(t)gF_{A_3x, A_2y}(t), gF_{A_3y, A_1x}(t)gF_{A_3x, A_2y}(t)}}} \quad (6)$$

若  $opt = \inf$ , 与上面证明过程类似, 可知式 (6) 成立. 于是由定理 3 可知  $A_1, A_2, A_3$  有唯一的公共不动点  $v \in B(S)$ , 即  $v$  为泛函方程组 (5) 的唯一公共解.

### 3 结语

本文将度量空间 Altman 型映象的不动点定理移植到概率度量空间上, 在概率度量空间中建立了一类平方型 Altman 映象的公共不动点的存在性定理, 从而改进和推广了有关文献中的相应结果, 并用概率度量空间这一不动点定理讨论了起源于动态规划的一类泛函方程解的存在性和唯一性, 在各类算子方程解的存在性和唯一性方面具有重要的研究意义.

### 参考文献:

- [1] 胡新启, 刘丁酉. 概率度量空间中相容映象的不动点定理[J]. 武汉汽车工业大学学报, 1996, 18(5): 85.
- [2] CHO Y J, KANG S M, CHANG S S. Coincidence point theorems for nonlinear hybrid contractions in non-archimedean Menger probabilistic metric spaces[J]. Demonstratio Math, 1995, 28(1): 19.
- [3] 张石生. 不动点理论及其应用[M]. 重庆: 重庆出版社, 1984.
- [4] ALTMAN M. An integral test for series and generalized contractions[J]. Amer Math Monthly, 1975, 82(8): 827.
- [5] 张树义, 衣立红, 邵颖. Altman 型映象的公共不动点[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2008, 7(6): 401.
- [6] 张树义, 赵美娜, 李丹. 关于平方型 Altman 映象的公共不动点定理[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2015, 14(4): 472.
- [7] 赵美娜, 张树义, 郑晓迪. 2-距离空间中 Altman 型映象的公共不动点定理[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 1.
- [8] 赵美娜, 张树义, 郑晓迪. Ciric-Altman 型映射的不动点定理[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2016, 35(6): 79.
- [9] ZHANG S Y, WANG L, SHIN S H, et al. Common fixed point theorems for a pair of orbitally contraction mapping[J]. Fixed Point Theory and Applications, 2003(5): 191.
- [10] 林媛, 丛培根, 张树义. 广义 C-映象不动点的存在性[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2017, 16(2):

66.

- [11] 林媛,张树义. 2-距离空间中带有对称函数的非唯一不动点定理[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2017,18(5):572.
- [12] 张树义,宋晓光,栾丹.  $\Phi$ -压缩映象的公共不动点定理[J]. 北华大学学报(自然科学版),2014,15(2):167.
- [13] 万美玲,张树义,郑晓迪. 2-距离空间中非唯一不动点定理[J]. 轻工学报,2017,32(4):105.
- [14] 张树义,林媛.  $\Phi$ - $\varphi$ -型压缩映象不动点的存在性[J]. 北华大学学报(自然科学版),2016,17(1):1.
- [15] 张树义,赵美娜,刘冬红. 弱相容映射的几个新的公共不动点定理[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2015,14(6):852.
- [16] 刘冬红,张树义,郑晓迪. 2-距离空间中一类压缩型映象的不动点定理[J]. 南通大学学报(自然科学版),2016,15(2):68.
- [17] 赵美娜,张树义. 关于2-渐近正则映象的一个注记[J]. 鲁东大学学报(自然科学版),2016,32(3):193.
- [18] 赵美娜,张树义,郑晓迪. 2-距离空间中 Fisher 型映象的公共不动点定理[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版),2016,15(6):632.
- [19] 赵美娜,张树义,郑晓迪. 关于非唯一不动点的一个注记[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版),2017,16(3):321.
- [20] 张树义,赵美娜,丛培根. 模糊度量空间中  $\Phi$ -压缩型映象不动点定理及应用[J]. 南通大学学报(自然科学版),2017,16(3):66.

(上接第100页)

- [20] 林媛,丛培根,张树义. 带混合误差的粘滞迭代算法的强收敛定理[J]. 南阳师范学院学报(自然科学版),2017,16(9):15.
- [21] 丛培根,张芯语,张树义. 两有限族映象迭代序列的稳定性[J]. 鲁东大学学报(自然科学版),2017,33(4):296.
- [22] 张树义,赵美娜,丛培根. 广义渐近 S-半压缩型映象迭代逼近[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2017,38(4):399.
- [23] 刘冬红,张树义,丛培根. 渐近伪压缩型半群不动点的隐式迭代逼近[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2017,36(6):105.
- [24] 林媛,张树义,丛培根. 渐近非扩张型映象具有误差的迭代收敛性[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2017,35(4):513.
- [25] 李丹,张树义,赵美娜.  $\Phi$ -伪压缩映象迭代序列的收敛性与稳定性[J]. 烟台大学学报(自然科学与工 程),2017,30(2):79.
- [26] MARINO G, XU H K. A general iterative method for nonexpansive mappings in Hilbert spaces[J]. J Math Anal Appl,2006,318(1):43.
- [27] SHIMIZU T, TAKAHASHI W. Strong convergence to common fixed points of nonexpansive mappings[J]. J Math Anal Appl,1997,211(1):71.
- [28] LIU L S. Ishikawa and Mann iterative process with errors for nonlinear strongly accretive mappings in Banach spaces[J]. J Math Anal Appl,1995,194(1):114.