

微气泡法水合物高效相变储能机理及系统开发

主讲人：程传晓，2019年11月25日，14:30–17:00，工程楼407室

1. 背景简介

- ✓ “十三五” 规划中重点指出-发展高效蓄能新技术；
 - ✓ 蓄冷系统是**用户侧调峰**的重要手段；
 - ✓ 蓄冷技术在**大空间、大功率**用冷系统节能效果显著；
 - ✓ **冷链物流行业飞速发展**亟需高效的蓄冷材料及装备；
 - ✓ 峰谷电价差、节约制冷设备投入、稳定冷能输出是蓄冷技术发展的**三大基石,市场潜力巨大!**
- 水合物是一种新型高效相变储能材料，是由客体气体分子(CH₄, CO₂, H₂, R134a等气体)与主体水分子通过氢键作用在一定温度和压力下生成的一种类冰状的固态物质(如图1所示)，由于其相变温度与制冷系统高度匹配（相变温度**0-15℃**可调），相变潜热高(**302-464 KJ/Kg**)，1m³水合物可储存**180m³**的气体，是一种性能良好的新型相变储能材料，目前该技术在在**蓄冷、气体分离、气体储运、水质净化**等领域有广泛的应用前景。

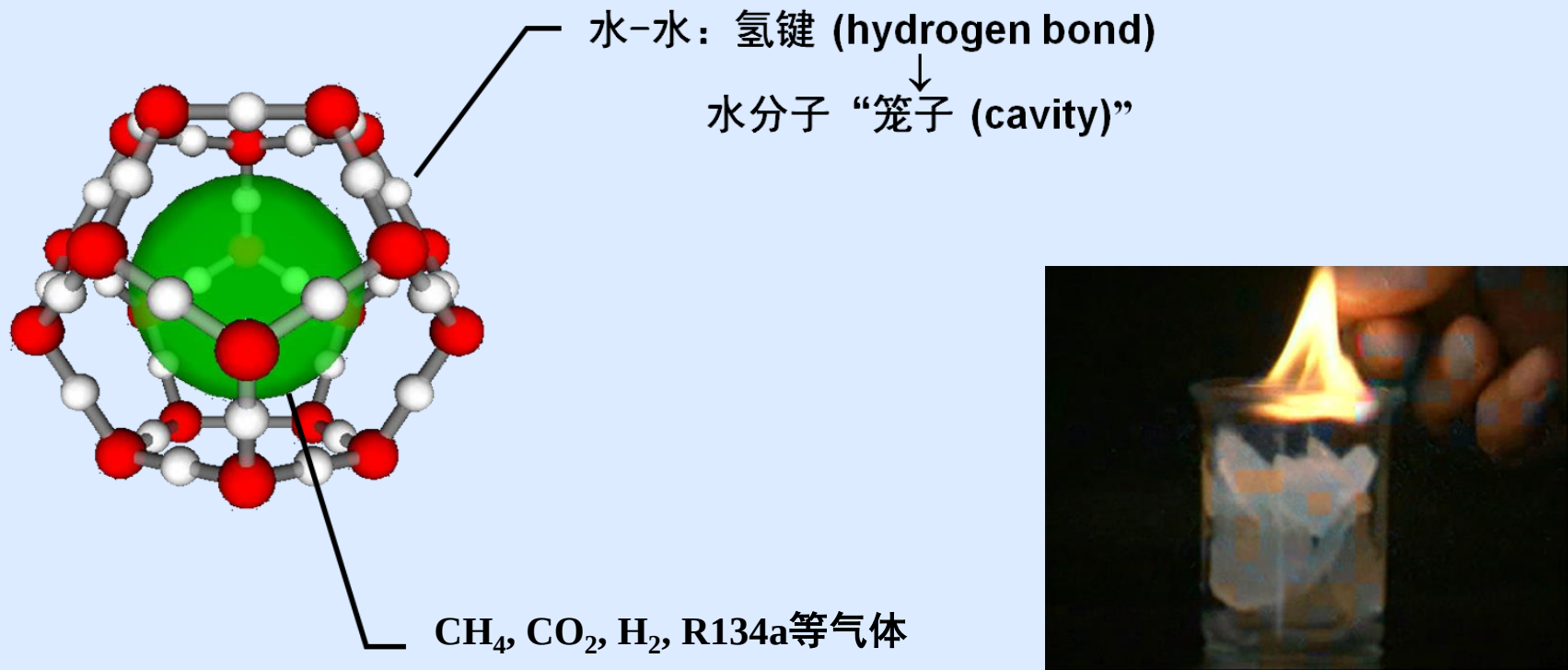


图1. 水合物形成结构示意图

2. 研究内容及方法

2.1 制冷剂水合物沸腾冷凝高效相变蓄冷技术及系统

基于制冷剂密度比水大及沸腾冷凝特性，通过微小热量扰动使蓄冷罐底部液态制冷剂沸腾，产生的制冷剂气泡在蓄冷罐中过冷水中上升，由于增加了气液交界面强化了传热传质，制冷剂气泡在上升过程中直接生成了水合物，未完全生成水合物的制冷剂气体在蓄冷罐上部冷凝并沉入蓄冷罐底部，依次循环直至反应完毕。该系统能够使**气液交界面和传热传质得到了数量级上的提高**，水合物相变蓄冷速率得到了数量级上的提升，有效**解决了相变过程中过冷度大、蓄冷不稳定**等问题，目前已将该方法（如图2和图3所示）申请专利并将最新成果发表在**Renewable and Sustainable Energy Reviews**（中科院一区TOP，影响因子10.56）。

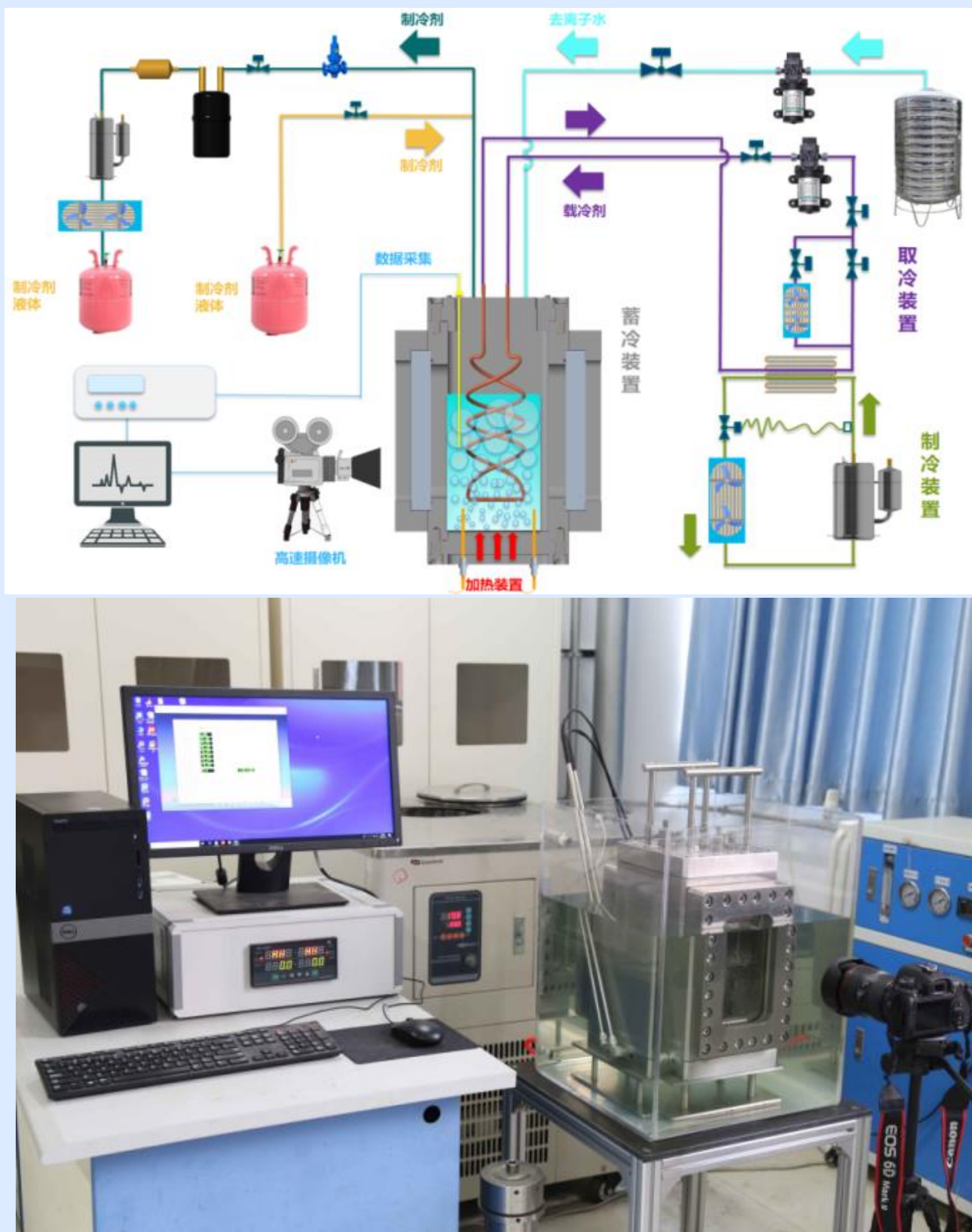


图2. 制冷剂水合物沸腾冷凝蓄冷系统图

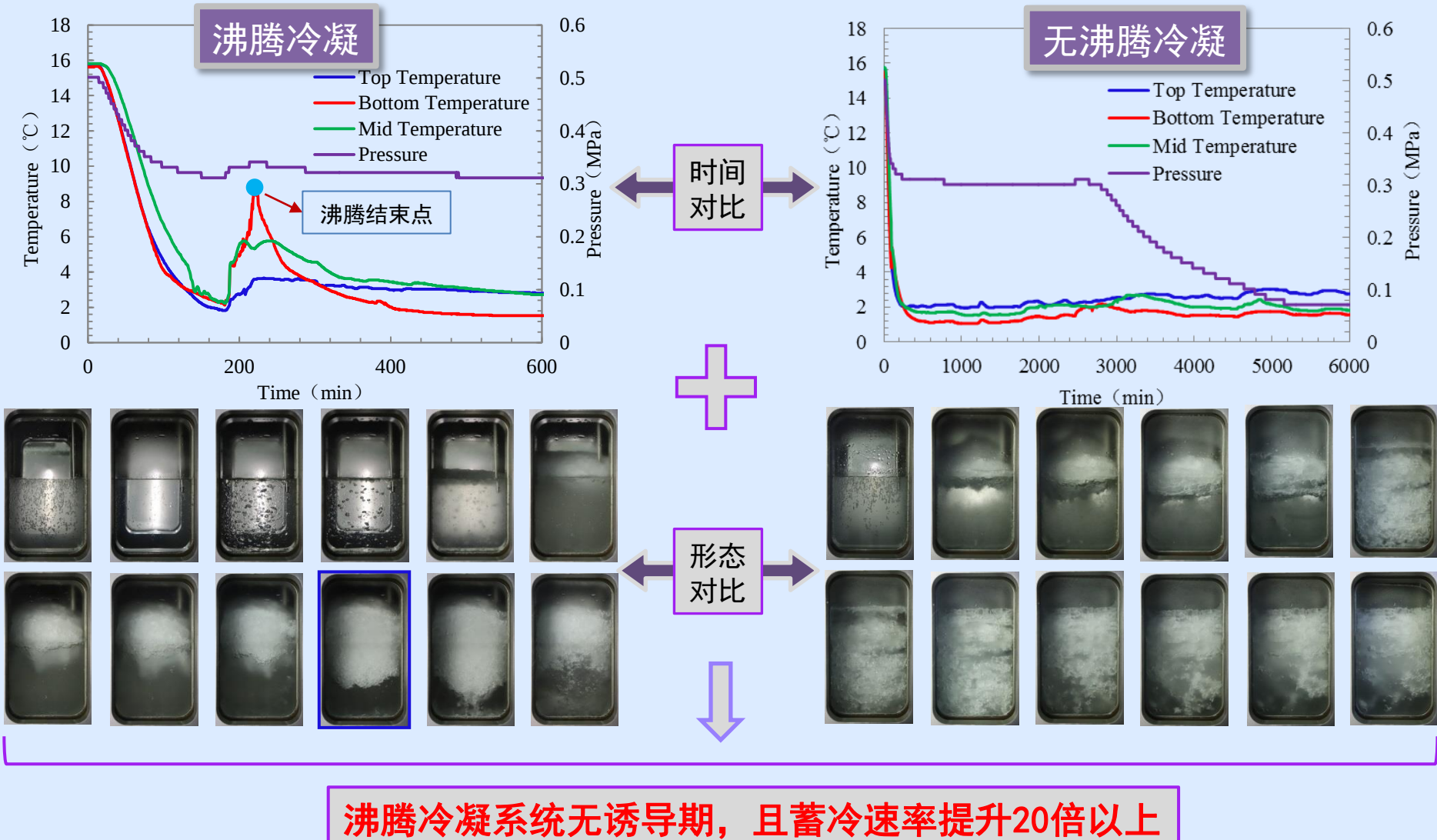


图3. 制冷剂水合物沸腾冷凝蓄冷实验验证结果

核心创新点一：构建了高效的制冷剂沸腾冷凝强化水合物法相变蓄冷系统，显著提高气液交界面及系统内部传热传质，蓄冷速率得到数量级提升，解决常规蓄冷系统蓄冷速率低这一关键问题。

核心创新点二：构建压力和温度双重驱动力强化取冷速率驱动机制（如图4所示），解决传统取冷仅依赖温度驱动缺点，取冷速率得到数量级提升，且循环蓄冷取冷稳定性及能效显著提升（如图5所示），解决蓄冷系统取冷效率低及蓄冷不稳定这一关键问题。

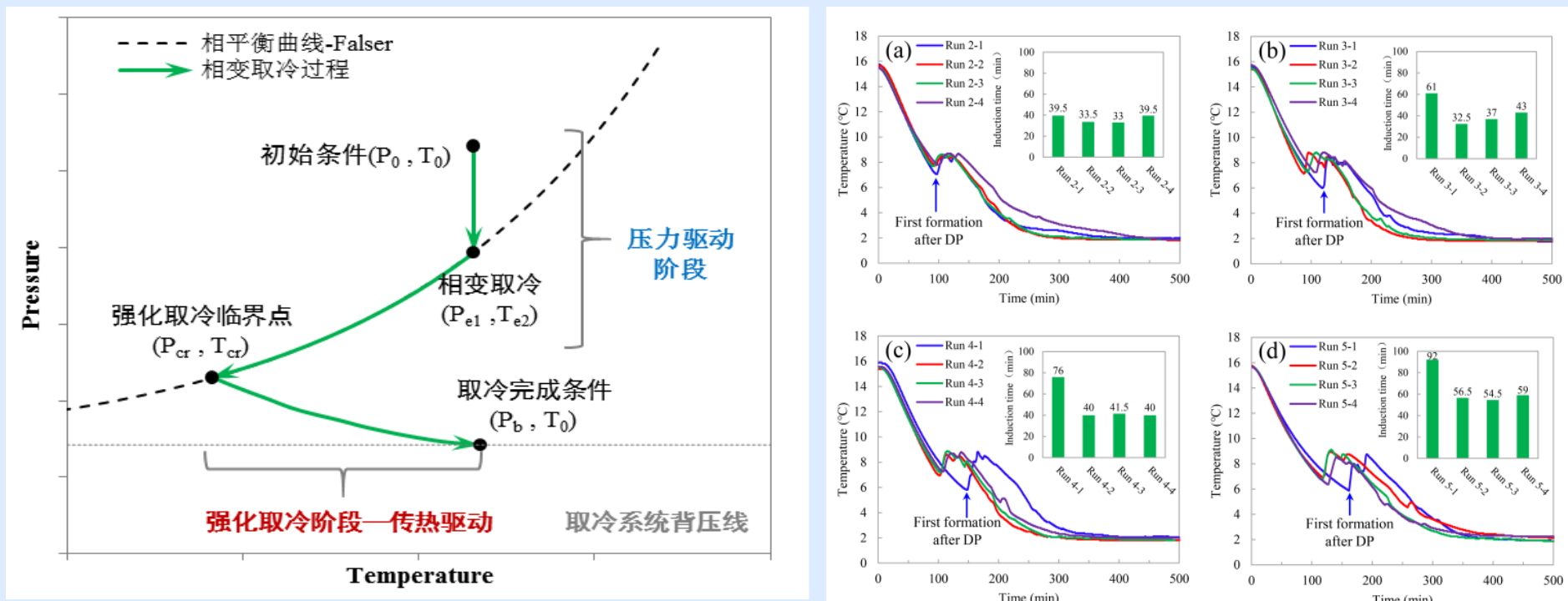


图4. 温度压力双驱动分解水合物原理及不同降压分解实验

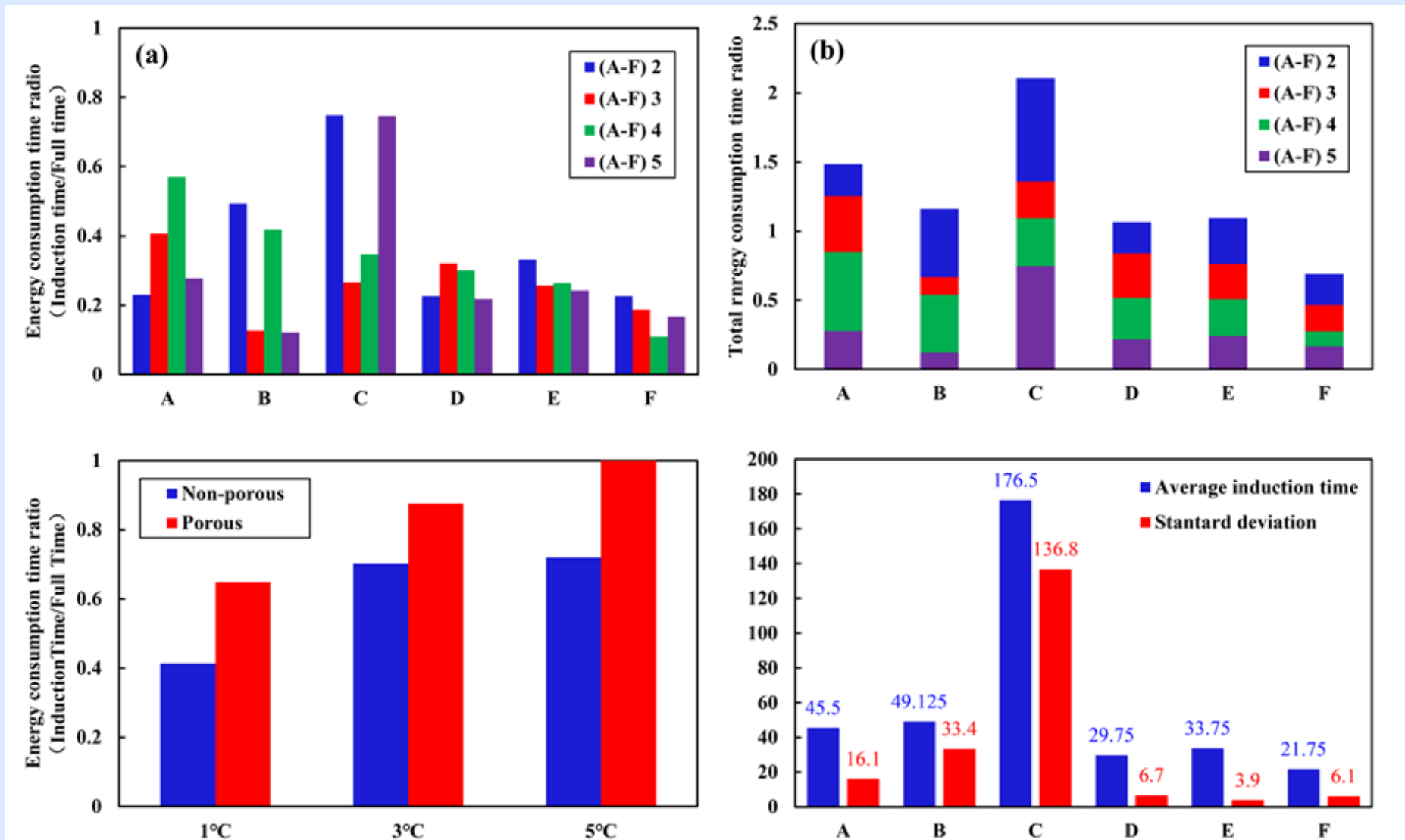


图5. 水合物法循环蓄冷能效及稳定性分析

2.2 微气泡法水合物强化生成机理研究

通过原位液体投射电镜等可视化方法和水合物原位生成可视化实验发现了水合物分解水中微纳米气泡的存在（如图6所示），通过系列实验证明微纳米气泡的生成和赋存是影响水合物二次生成记忆效应的关键因素，该理论得到了众多学者的认可。微气泡作为一种气液融合强化技术，能够从数量级上提高气液交界面、强化传热传质，为水合物强化生成提供重要的理论支撑。

核心创新点：基于微气泡理论，提出了微气泡强化制冷剂水合物二次生成记忆效应强化水合物生成作用机制，显著缩短了水合物蓄冷二次生成诱导期，解决了制冷剂水合物蓄冷过程随机性和不稳定性问题。

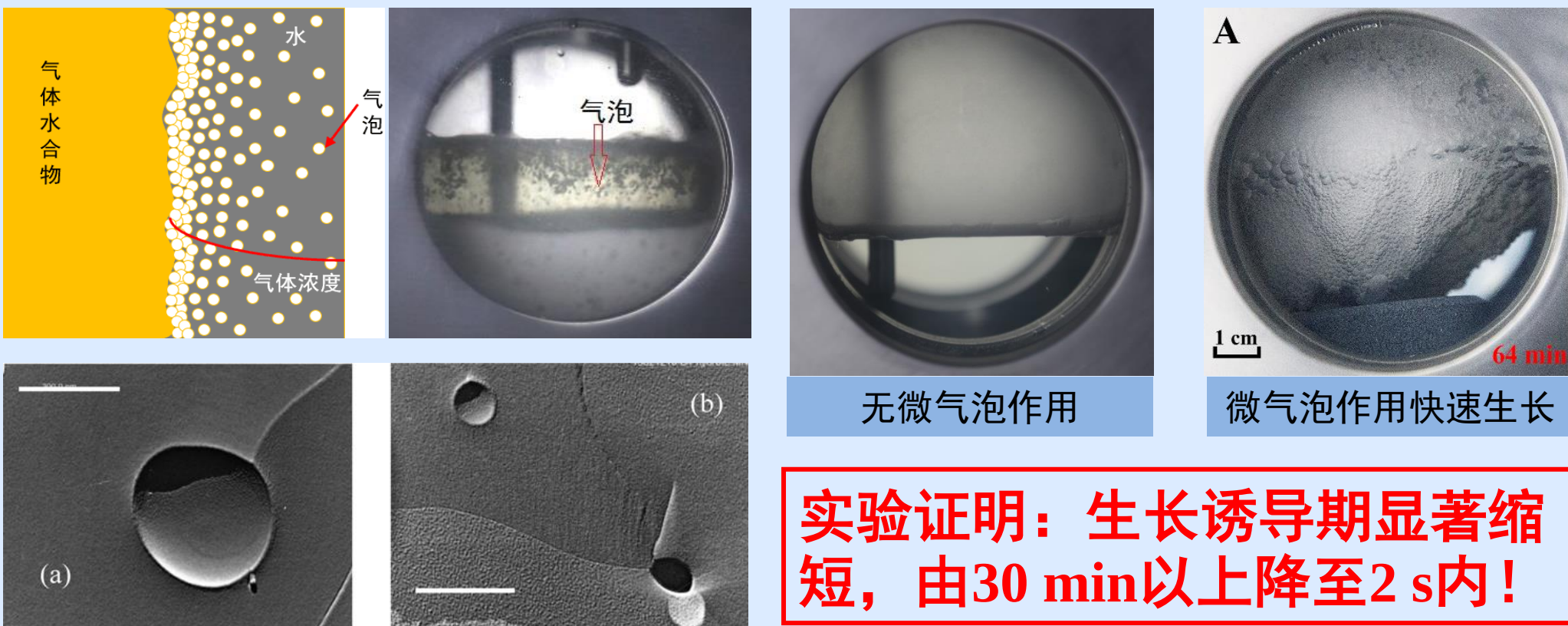


图6. 水合物分解过程微气泡的产生及实验检测结果

2.3 “Magic Ice-新一代气肥” CO₂水合物高效储运技术

目前，我国农业大棚保有量在1亿个以上，而CO₂在现代农业大棚系统中增产、提质效果显著（增产30%以上），水合物法是CO₂封存及储运的新手段，具有合成条件温和、便于储运、储气效率高等优势，水合物技术与现代化大棚气肥的结合，将是未来解决碳循环的一个重要突破点！

核心创新点：首次提出水合物技术与现代化大棚气肥技术相融合技术，基于高效水合物生成技术，极大降低了二氧化碳储运成本（1MPa以内，5℃左右，显著低于干冰和高压气瓶，成本缩减50%以上），真正实现二氧化碳的资源化高效利用，实现碳高效循环。

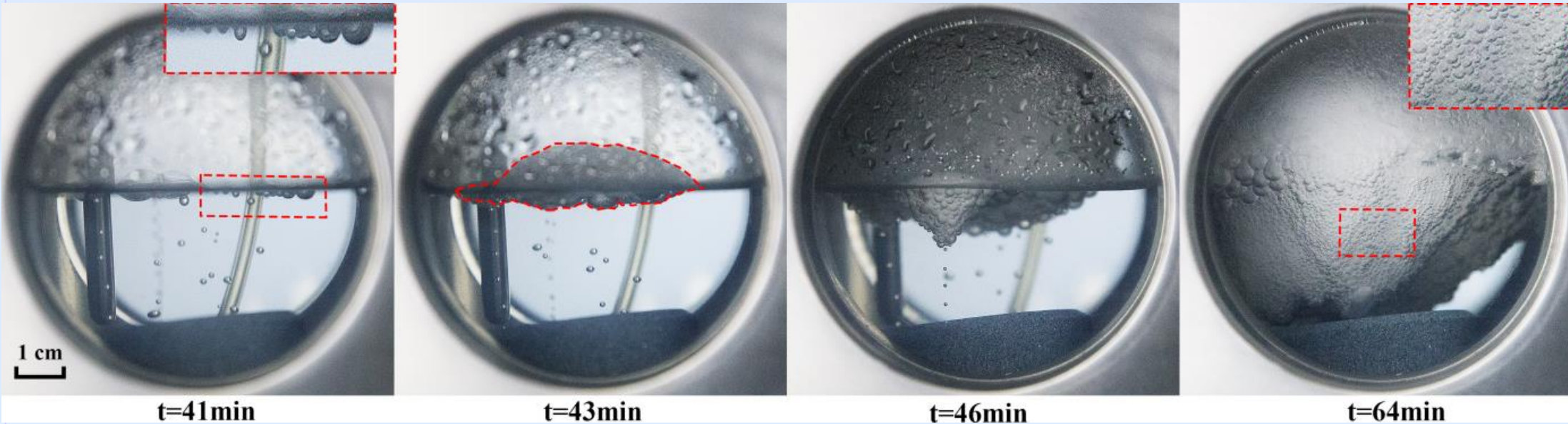


图7. 微气泡法二氧化碳快速生长模式

3. 总结与展望

- （1）围绕水合物强化生成技术，已形成了初步的技术优势，尤其是在水合物高效蓄冷方面，围绕该技术发表高水平SCI论文5篇，并得到了“河南省青年托举项目”支持。
- （2）水合物法CO₂高效储运技术与气肥技术相融合，将是未来二氧化碳资源化利用的重要方向之一。
- （3）基于现有的超声波与微纳米气泡技术，开展强化水合物生成全产业链应用开发，如：将气体分离和储运技术与光催化和生物质气化技术融合！