



上海第二工业大学

冷链用相变蓄冷材料的研发与工程应用

汇报人：于伟

上海第二工业大学

可再生能源材料先进技术与制备教育部重点实验室

上海先进热功能材料工程技术研究中心

2025.8.26



CONTENT

目录

1

冷链行业痛点

2

相变蓄冷原理及对比

3

相变蓄冷材料的研发

4

工程应用测试

5

研究总结

1. 冷链行业痛点



上海第二工业大学

行业现状

- 自疫情席卷以来，全球能源行业受到能源价格上涨的严重打击，解决能源发展问题成为当务之急
- 目前，随着我国物流业技术的日益完善和先进，网购不再局限于传统的日用品，还引入了各种蔬菜水果、鲜肉、鱼虾等生鲜食品，在消费升级驱动下，生鲜食品市场前景愈发广阔。



流通链条较长

时间长、环节多、效率低



流通成本高

农产品储运/保鲜成本高



损耗率高

农产品储藏周期短

蔬菜/肉类损耗率 9% | 水果/水产损耗率 11% | 农产品加价率 35-55%

1. 冷链行业痛点



上海第二工业大学

随着新零售模式的出现和生鲜电商的快速崛起，**冷链物流**也迎来了快速发展期，中国生鲜电商正呈现爆发式增长的势头。尽管国外对生鲜农产品配送的研究起步较早，但对生鲜电子商务配送和协同机制的研究较少，近年来国内对生鲜冷链行业的研究有增无减。

难点

困难与挑战

- 生鲜质量难以把控
- 农产品腐烂严重
- 缺乏稳定的低温环境
- 建库成本高，成本回收难
- 传统冷库能耗大，电费费用高



需求

技术突破

- ✓ 新鲜度达标
- ✓ 腐烂率降低
- ✓ 维持稳定的低温环境
- ✓ 能源供需时空平衡
- ✓ 冷库能耗降低，费用减少



需求

针对冷链行业生鲜质量难把控、稳定低温环境缺失、能耗高等痛点。**相变蓄冷材料**在生鲜电商冷链物流的“**存储**”及“**最后一公里**”配送环节，具备广阔应用前景

2. 相变蓄冷的原理



上海第二工业大学

原理

- 相变蓄冷技术是一种利用物质在相变过程中吸收或释放潜热来实现能量储存和温度调节的技术
- 其核心原理基于物质在固态、液态、气态之间相互转化时伴随的能量变化



热量释放



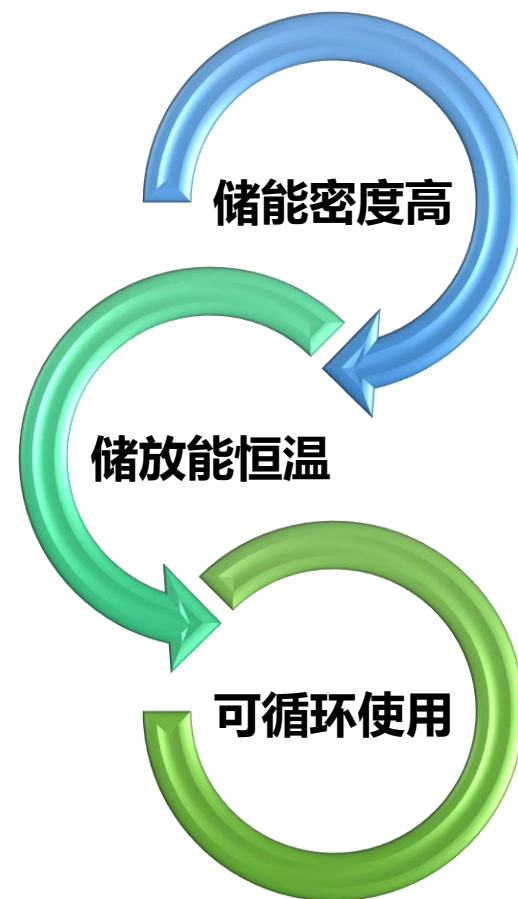
热量吸收

精准控温锁鲜

优于传统装备，温
度波动小，干耗小

绿色安全储能

错峰用电利于电网安全运行，
峰谷电价利于降低运行成本



2. 相变蓄冷vs机械制冷



技术说明

- 相变蓄冷技术是通过相变储冷装置释放冷量，抵消空间内的热量，达到维持低温的目的，有恒温保湿保鲜的特点。可利用夜间低谷电价储冷，白天释放，降低电网高峰负荷，提升电网运行效率
- 机械制冷是当前最成熟，最广泛应用的一种制冷方法，市场普及率高，但温度波动大，能耗高

VS

		机械式制冷温控技术
温度波动值		±1.7℃
温度控制精度		±3℃
箱内相对湿度		制冷机产生冷风对储存货物易形成风干
货品24小时失重	鲜花	2%~3%
	水果	0.7%~1%
	肉	0.2%~3%
	蘑菇	2%~3%
货品平均保存期	嫩叶蔬菜	4~5天
	成熟桃子	6~7天
	牛肉	15~20天
20吨蔬菜运输120小时水分损失		6%~8%
节能环保		噪声污染、消耗柴油、价格较高

		蓄冷式温控技术
温度波动值		±0.2℃
温度控制精度		±1.5℃
箱内相对湿度		90%~100%
货品24小时失重	鲜花	0.3%~0.5%
	水果	0.2%~0.3%
	肉	0.04%~0.05%
	蘑菇	0.2%~0.3%
货品平均保存期	嫩叶蔬菜	>30天
	成熟桃子	>30天
	牛肉	>30天
20吨蔬菜运输120小时水分损失		0.2%~0.5%
节能环保		利用谷电、削峰填谷、价格较低

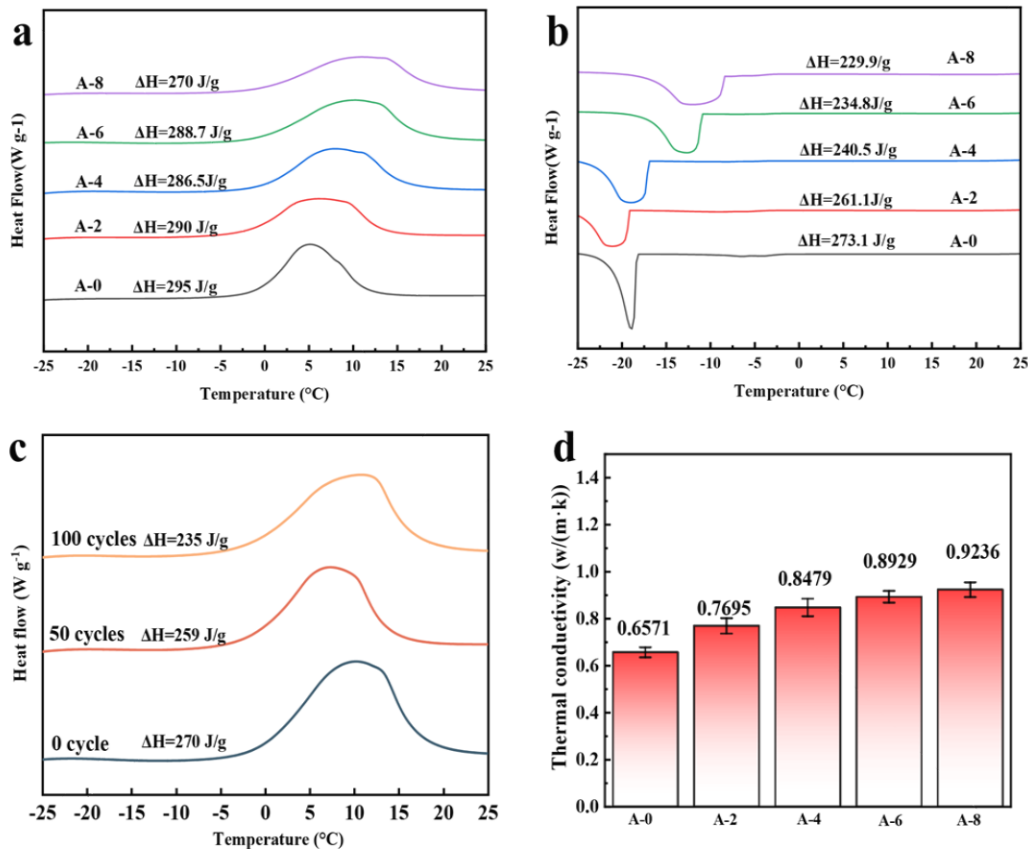
3. 相变蓄冷材料的研发



上海第二工业大学

研究内容一

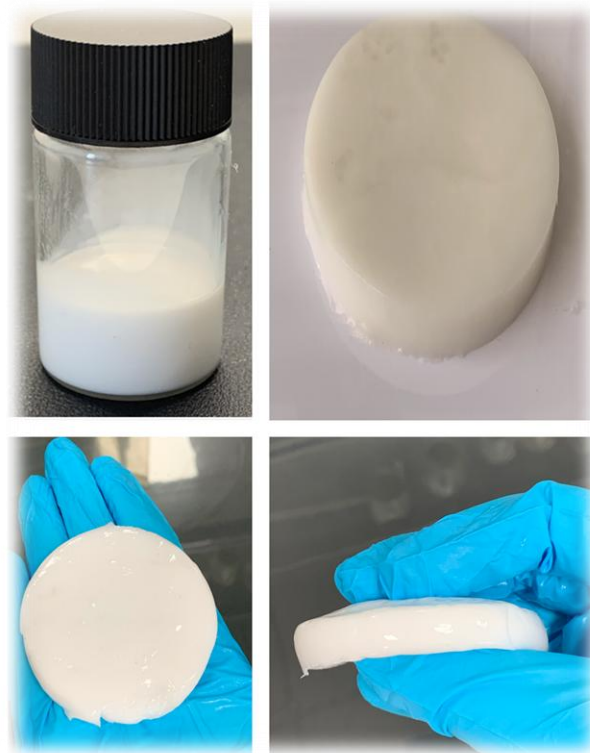
团队研发了一款相变温度为 -2°C 的相变凝胶，解决了**传统相分离**和**过冷度高**的问题。材料实现了**高焓值** ($270\text{--}290\text{J/g}$)、**低过冷度** ($0\text{--}5^{\circ}\text{C}$)、**高导热率** ($0.9236\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) 以及良好稳定性 (循环100次焓值降低13%，抗泄漏，热稳定)



热性能提升：通过DSC曲线表明，随着含量增加，A0-A8的熔化焓稳定在约 $270\text{--}290\text{J/g}$ ，结晶过冷度显著降低，A8组过冷度最低，热性能优越。

循环稳定性与热导率：经过100次循环后，焓值仅降13%，稳定性良好。同时A8组的热导率可达 $0.9236\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

相变凝胶的实物图



3. 相变蓄冷材料的研发



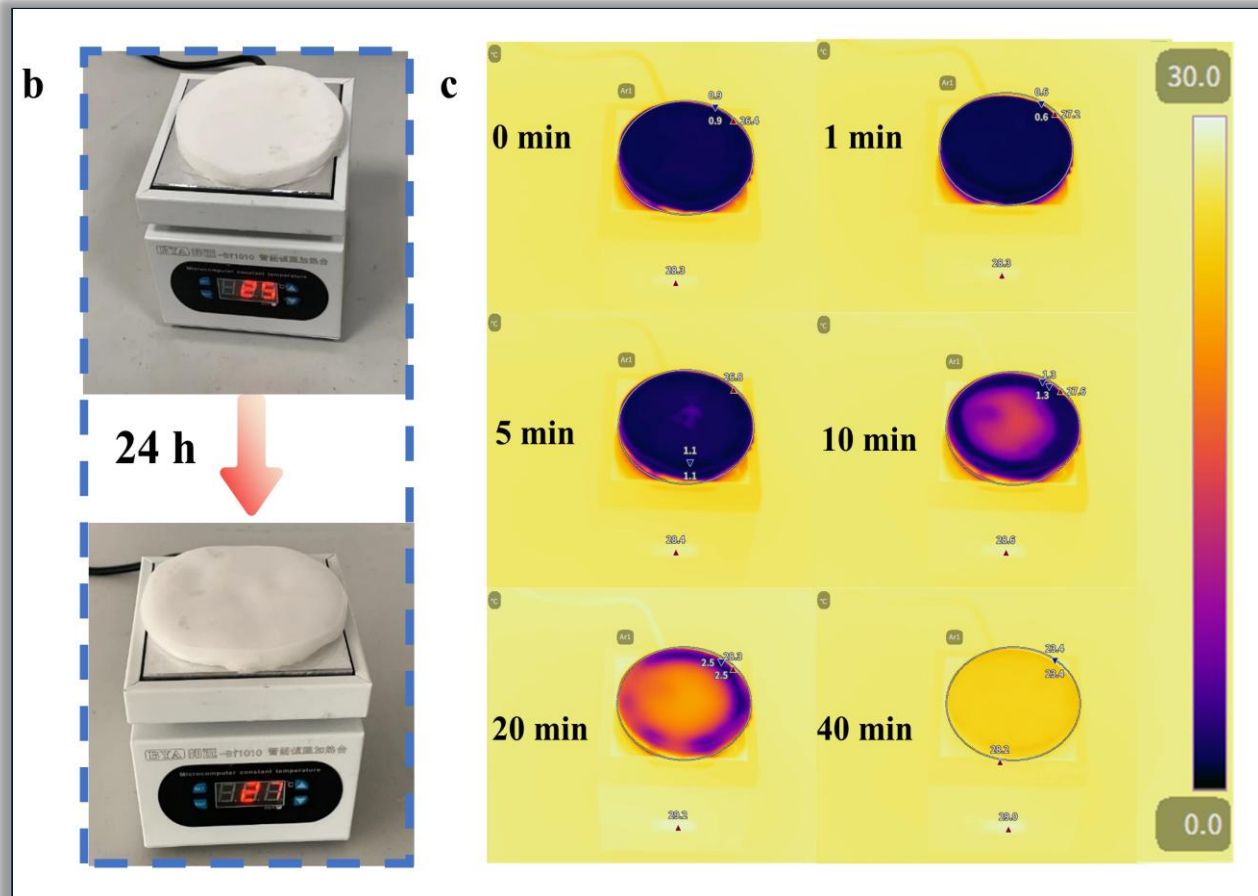
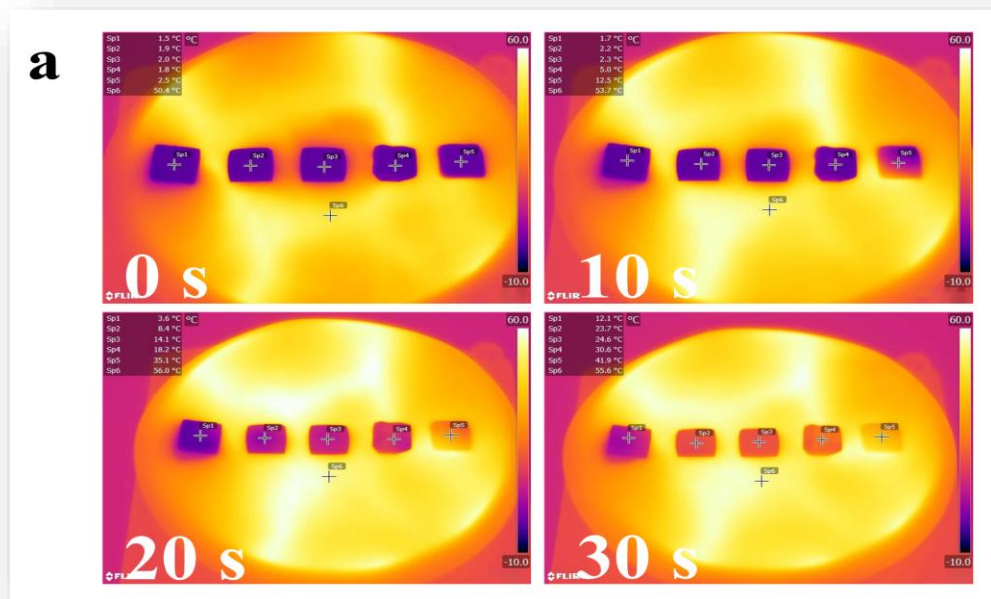
上海第二工业大学

相变凝胶的热响应和稳定性分析

(a) 红外热像仪捕捉到的A组所有样品的温度响应

(b) 样品融化状态放置24h后的变化图

(c) 红外热像仪捕捉到的样品在25°C加热台上的温度响应



随着加热时间的推移（0s至30s），A组所有凝胶样品表面温度逐步升高。其中最右侧A8样品的热响应速率明显提高，表面升温最快，显示出较高的热传导效率。同时将样品放在25°C室温下静置24h，形态未出现明显坍塌和分层现象。最后将样品放置在25°C加热台上记录温度响应，进一步证实了材料的稳定性

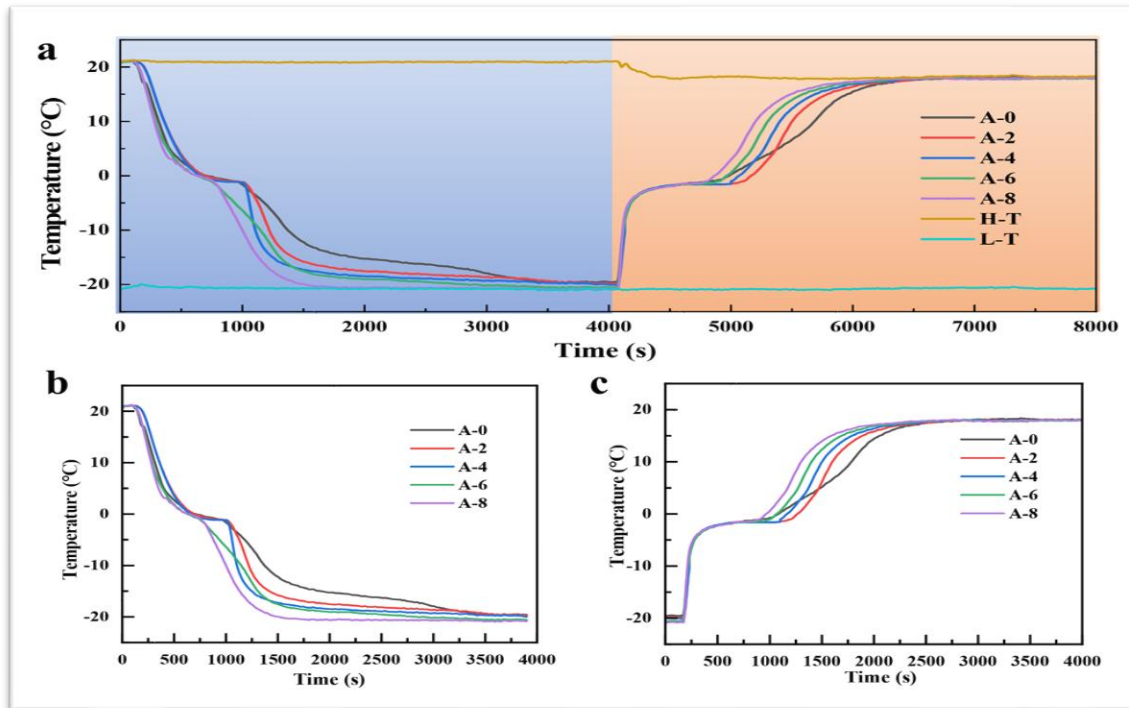
3. 相变蓄冷材料的研发



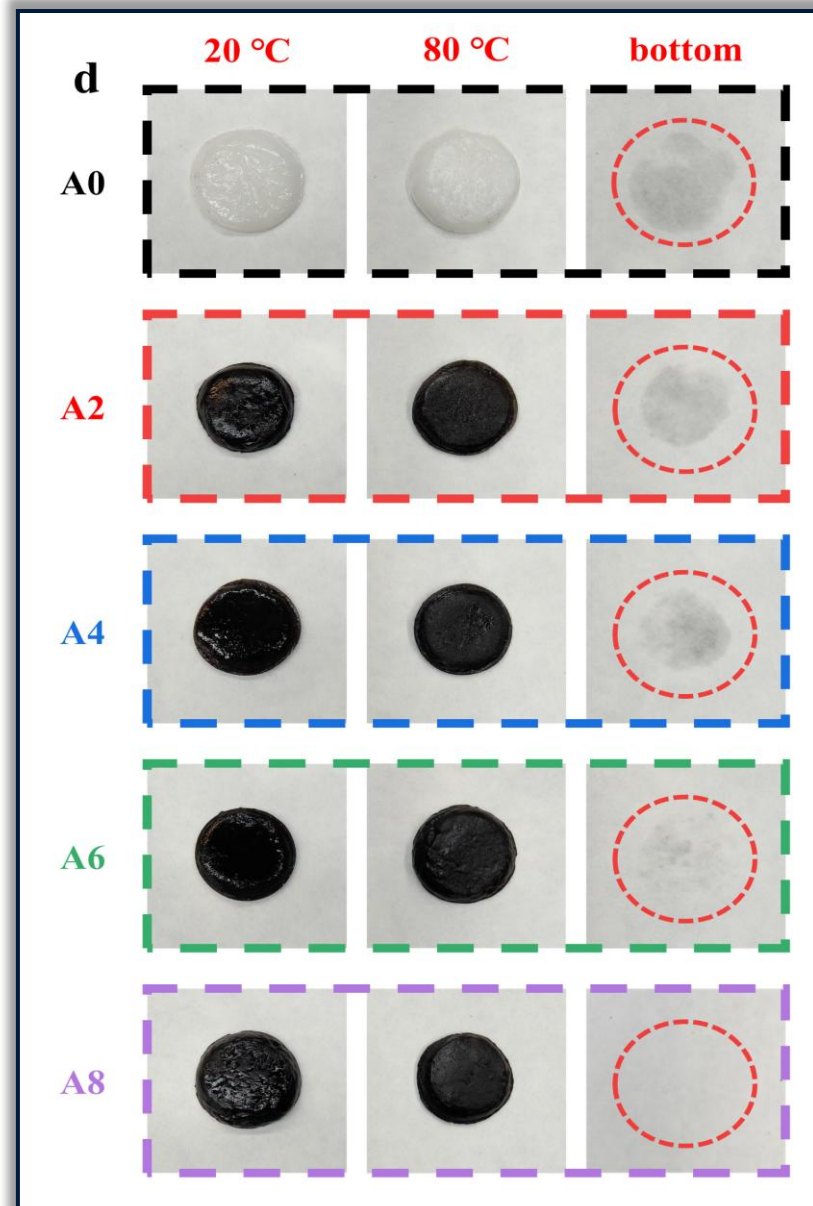
上海第二工业大学

相变凝胶的步冷实验和泄露性能分析

(a-c) A组所有样品的步冷曲线 (d) A组所有样品在不同温度下的泄露性能测试



- 通过步冷曲线可以得出，A8组由于具备更高导热通路表现出更加优异的相变响应速度和较低过冷度，在低温下快速结晶，为相变储能实现高效、可控的热管理提供了保障
- 为了评估相变凝胶在高温状态下的形态保持和泄露抑制效果，本研究对A组样品进行了高温加热测试，可以发现A8组的凝胶网络致密度和稳定性是更优的，有效抑制相变材料在高温状态下的流动泄露，增强耐热性。



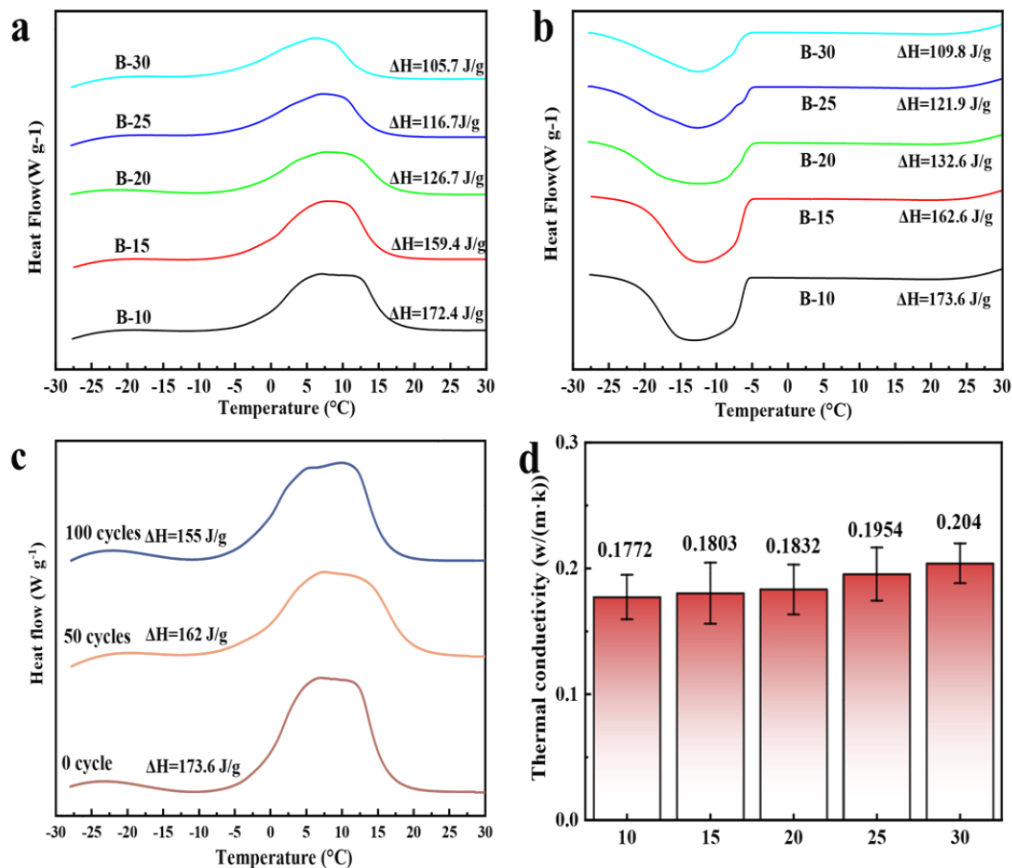
3. 相变蓄冷材料的研发



上海第二工业大学

研究内容二

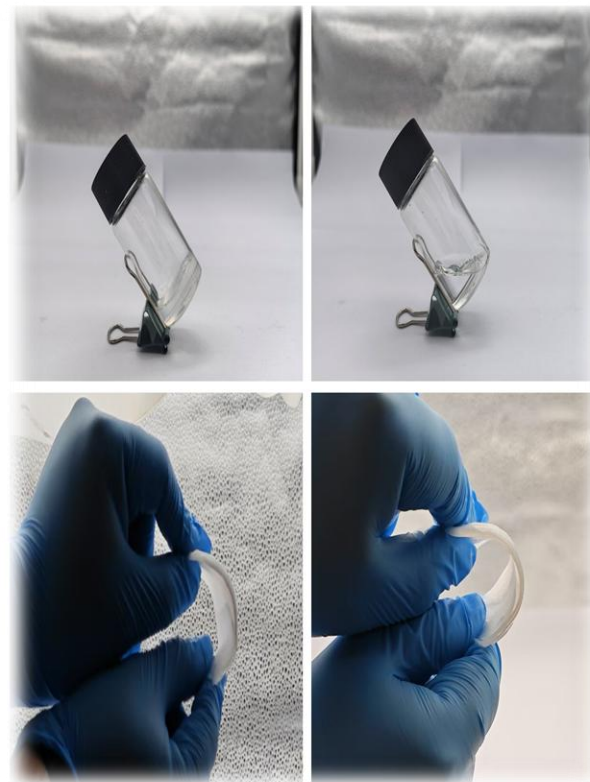
本研究进一步提出了“**弹性骨架限域+共晶温区调控**”的协同设计思路，构建兼具宽温域适配性与形态可塑性的复合材料。成功研发出一款相变温度为 -3°C 左右的相变凝胶，实现了热性能、力学性能和稳定化的优化，为低温相变蓄冷材料的结构设计、性能调控提供了理论依据和实验路径



热性能提升：通过DSC曲线表明，随着含量增加，B组样品的熔化焓稳定在约 $105.7\text{-}173.6\text{J/g}$ ，结晶过冷度无明显变化，其中B10组热性能突出

循环稳定性与热导率：经过100次循环后，焓值仅降10%，稳定性良好。同时B组的热导率也呈现轻微上升趋势

相变凝胶的实物图



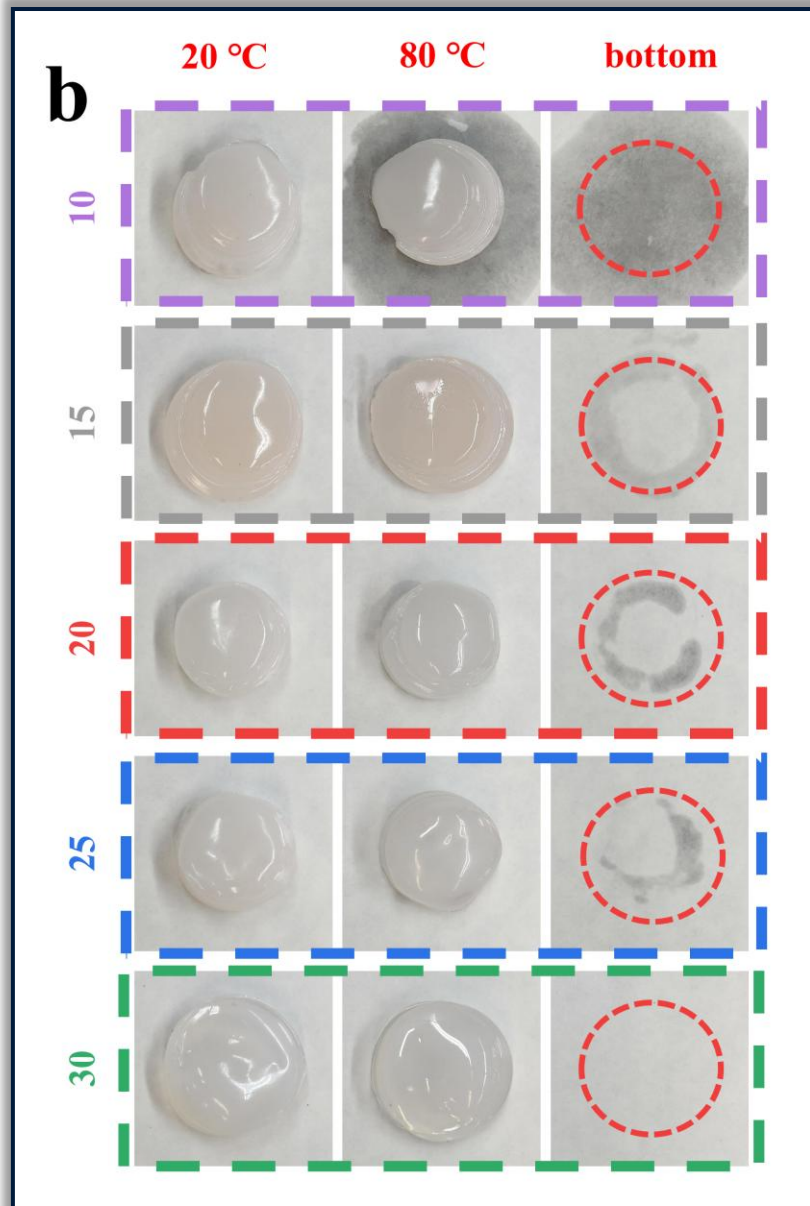
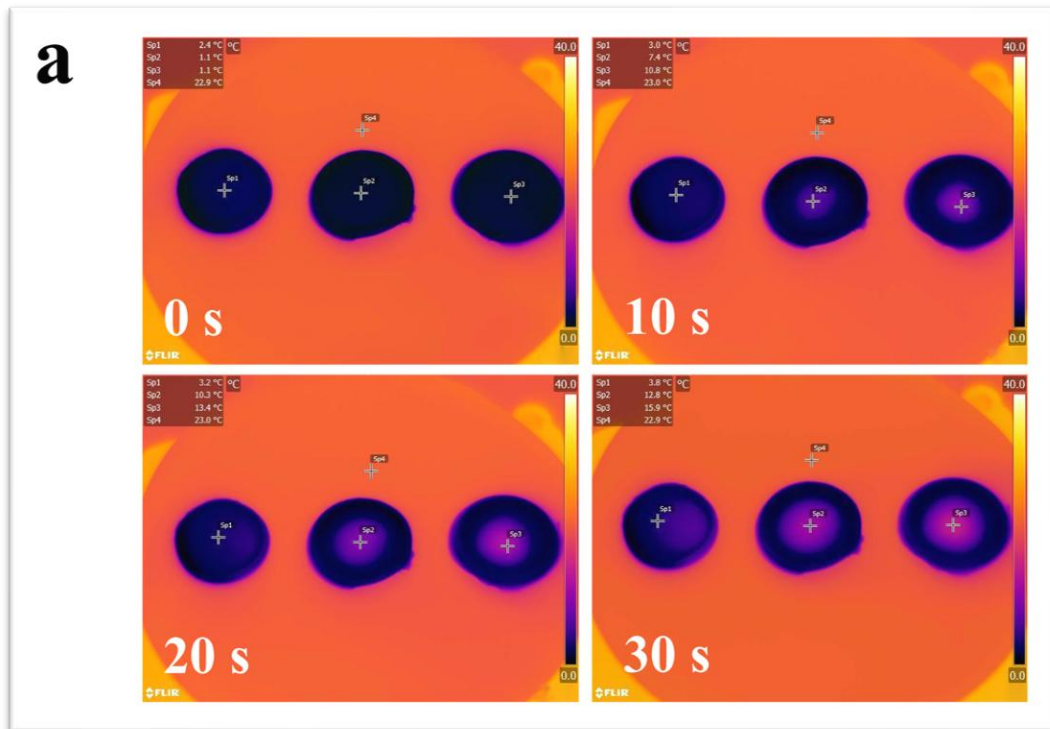
3. 相变蓄冷材料的研发



上海第二工业大学

相变凝胶的热响应和泄漏性能分析

(a) 红外热像仪捕捉到的B组所有样品的温度响应 (b) B组所有样品在不同温度下的泄漏性能测试



- 随着加热时间的推移 (0s至30s)，记录了B组三种样品的表面热场演化过程。最右侧的B30组表面温升最为迅速，反应其热缓冲能力的削弱；而B10组温升最缓慢，是导热性、储热能力与热缓冲性能兼具的理想构型
- 为了评估相变凝胶在高温状态下的形态保持和泄漏抑制效果，本研究对B组样品进行了高温加热测试，可以发现B30组具备有效封装，可抑制相变材料在高温下的泄漏现象

3. 相变蓄冷材料的研发

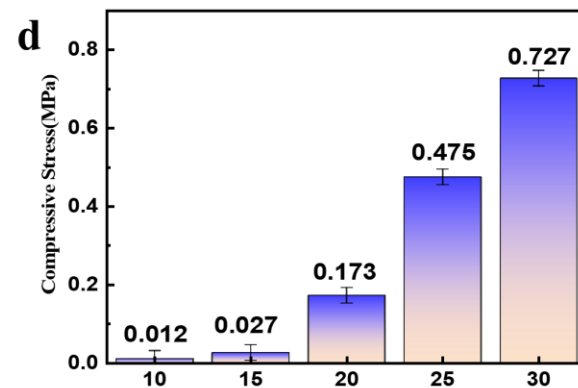
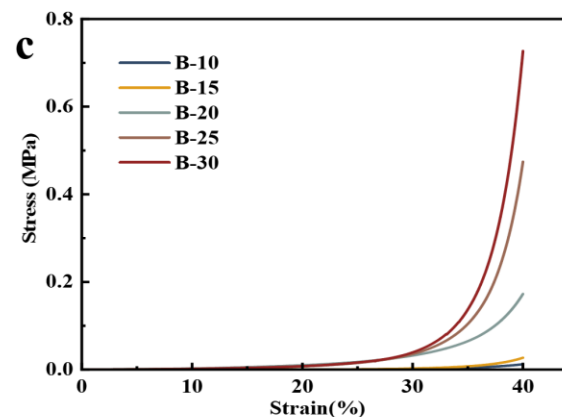
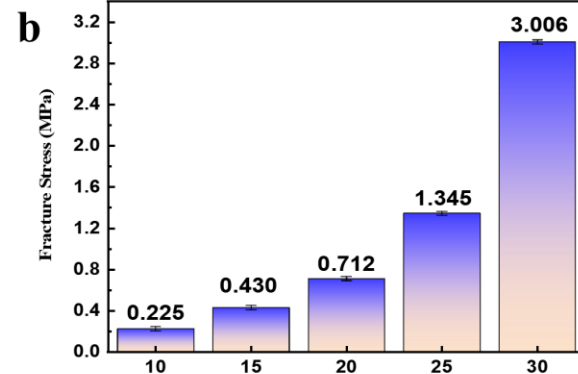
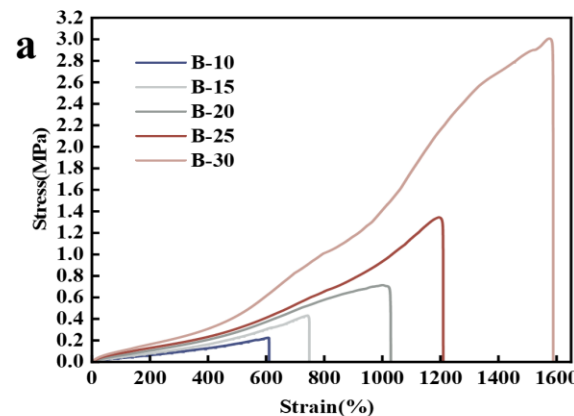


上海第二工业大学

相变凝胶拉伸压缩力学性能分析

(a-b) B组所有样品的拉伸应力-应变曲线

(c-d) B组所有样品的压缩应力-应变曲线



随着加热时间的推移（0s至30s），A组所有凝胶样品表面温度逐步升高。其中最右侧A8样品的热响应速率明显提高，表面升温最快，显示出较高的热传导效率。同时将样品放在25℃室温下静置24h，形态未出现明显坍塌和分层现象。最后将样品放置在25℃加热台上记录温度响应，进一步证实了材料的稳定性

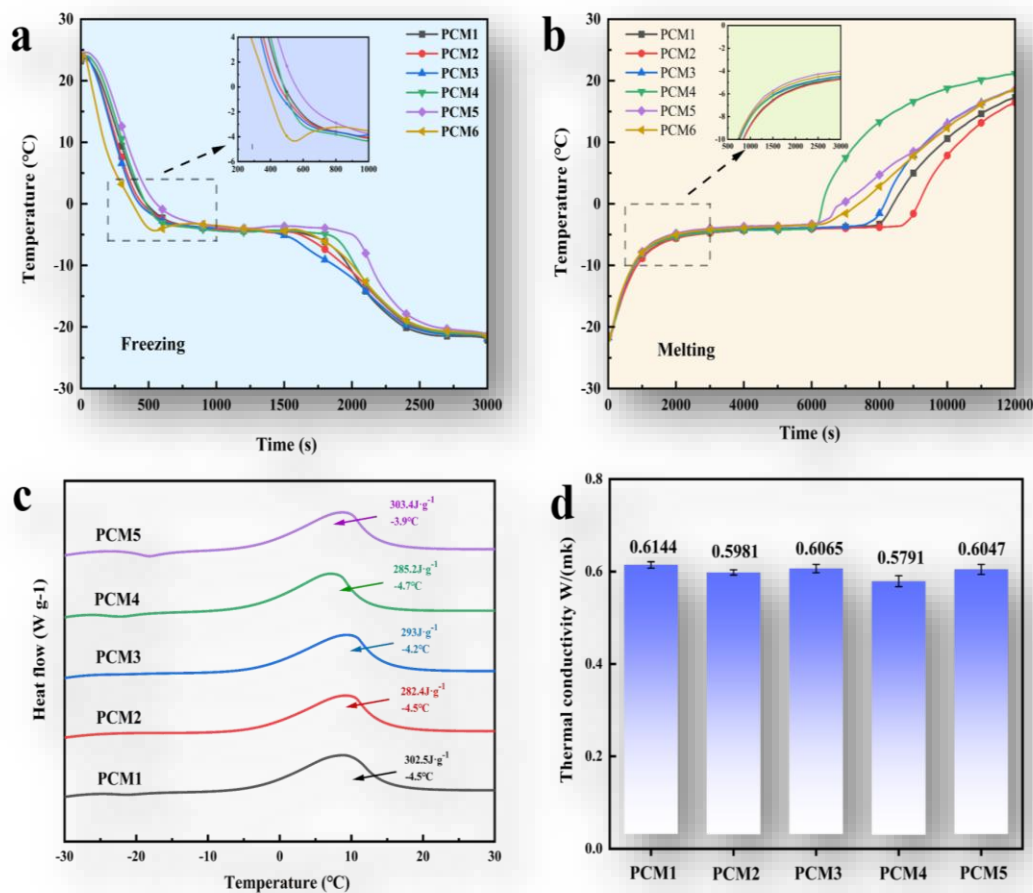
3. 相变蓄冷材料的研发



上海第二工业大学

研究内容三

团队研发了五种相变**潜热高、成本低、循环稳定性好**的凝胶型相变蓄冷材料。相变温度范围为-3至-5℃，相变潜热为280~310J/g，热导率范围为0.58至0.61W/(m·K)，为易腐食品的预冷和短距离冷链运提供了有效的解决方案



步冷曲线：通过步冷曲线表明，PCM1-5组样品的结晶温度和起始熔化温度均稳定在约-5℃左右，结晶过冷度无明显变化

DSC测试与热导率：五种PCM的相变焓值均在280~310J/g，表现出高焓值的特点。同时5组的热导率也均在0.6左右，综合来看PCM1性能较优

相变凝胶的实物图

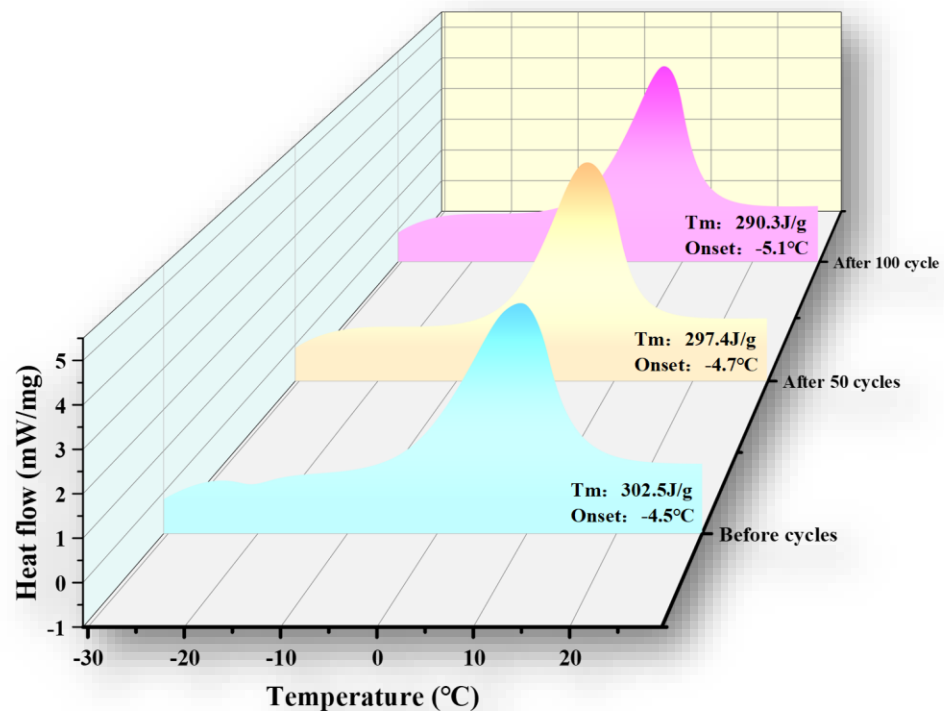
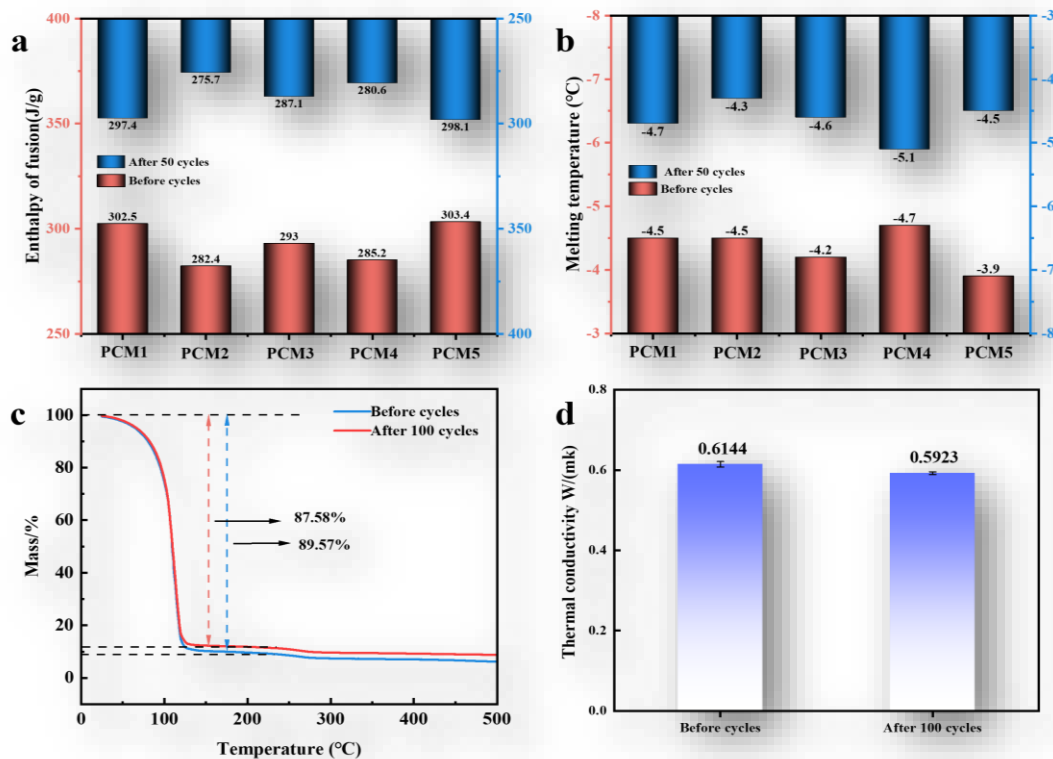


3. 相变蓄冷材料的研发



上海第二工业大学

相变蓄冷凝胶稳定性分析



从图中a和b可以看出五种不同PCM在经历50次循环后，材料的相变潜热和起始熔融温度整体浮动变化不大，其中PCM1的变化浮动是最小的。最后针对PCM1来进行100次循环的热重分析和热导率以及DSC分析，进一步证实了材料的循环稳定性良好

4. 工程应用测试



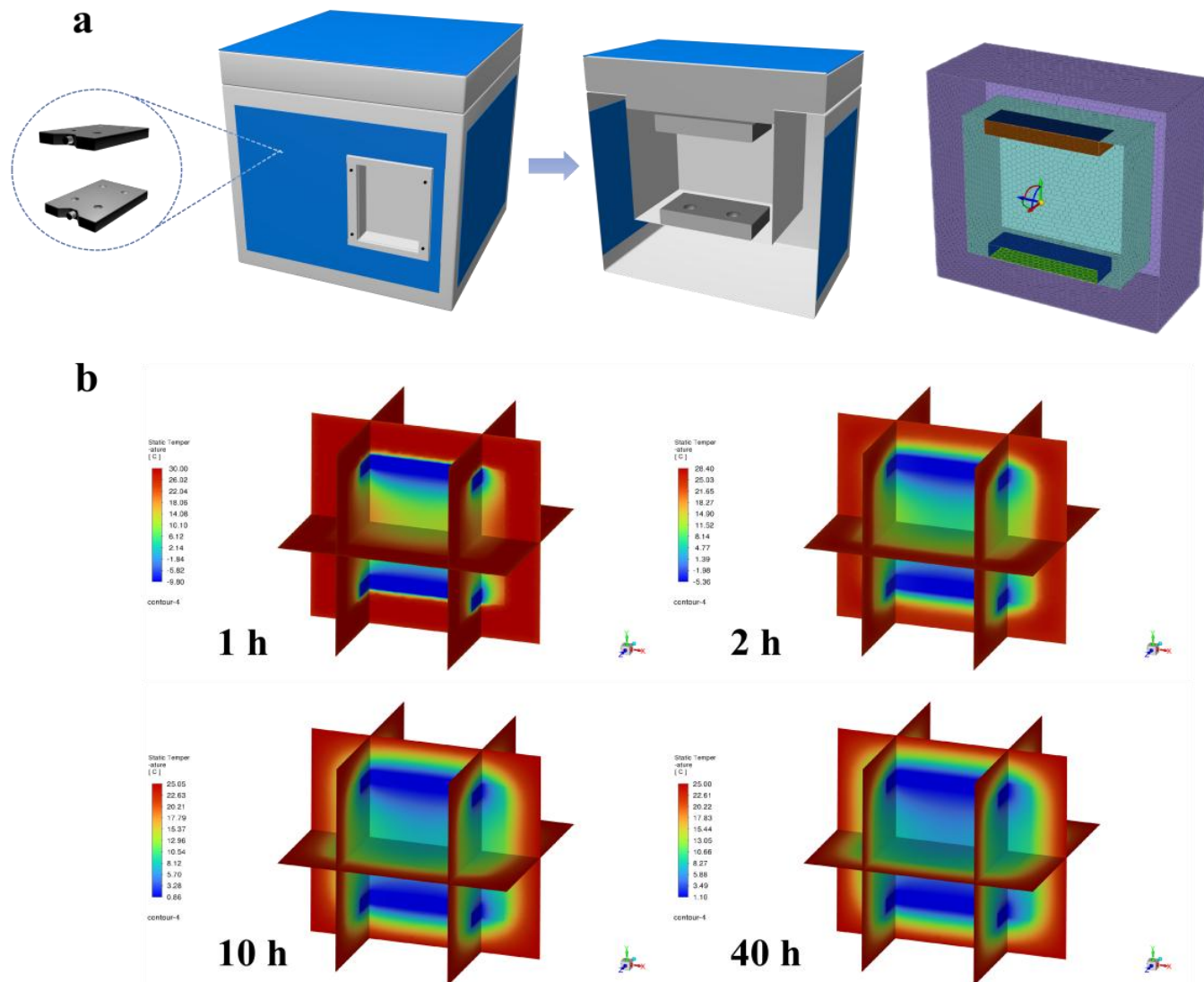
真空绝热医疗冷链箱PCM有限元融化模拟

01 模型构建:

构建真空绝热医疗冷链箱模型 (a), 内置两块PCM相变材料冰砖 (总重量为1Kg), 利用fluent mesh进行网格划分, 为模拟提供基础

02 温度分布模拟:

温度分布场云图 (b) 显示, 在40小时内, 箱内温度变化平缓, PCM有效延缓温度上升, 维持低温环境

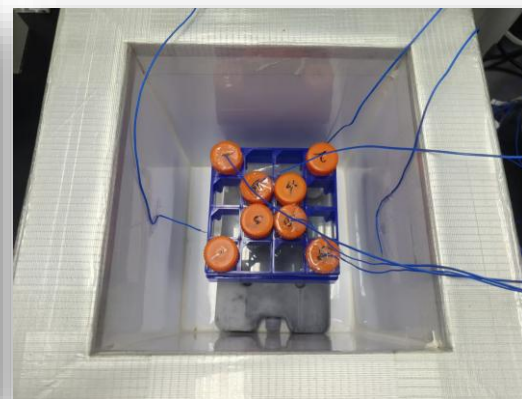
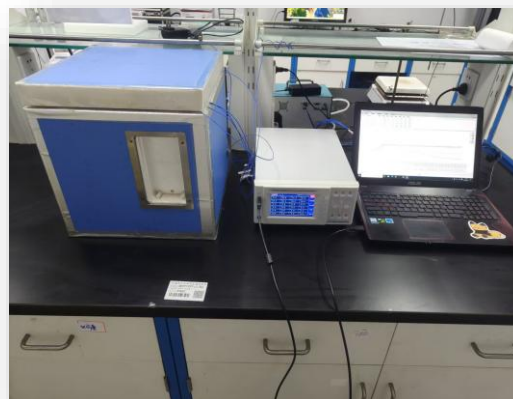


4. 工程应用测试



上海第二工业大学

a

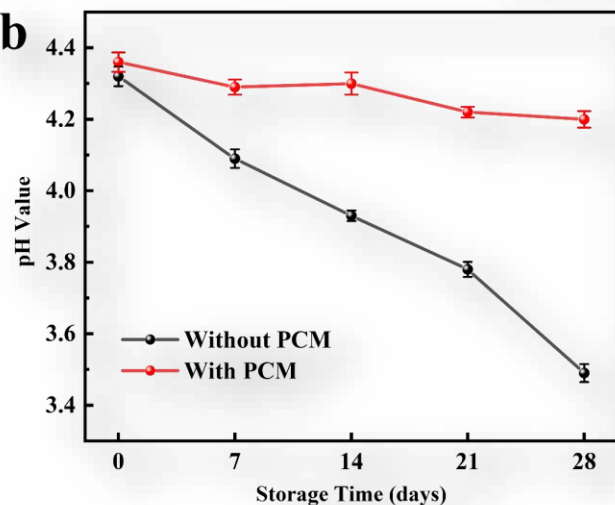


实验系统搭建：构建真空绝热箱储藏实验系统

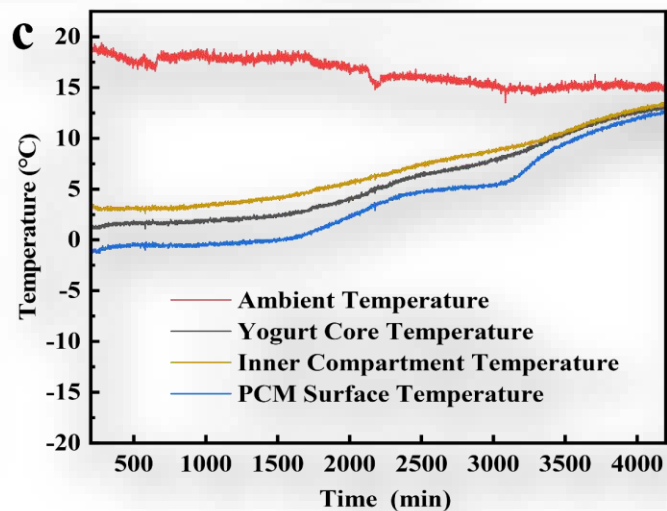
(a) , 用于开展酸奶储存实验, 对比有无 PCM 时的酸奶保存情况

实验结果显著： pH 变化曲线 (b) 显示, 有 PCM 时酸奶 pH 下降更缓; 温升曲线 (c) 表明, 箱内温度波动小, PCM 能够有效长时间维持目标低温环境 (2~8 °C)

b



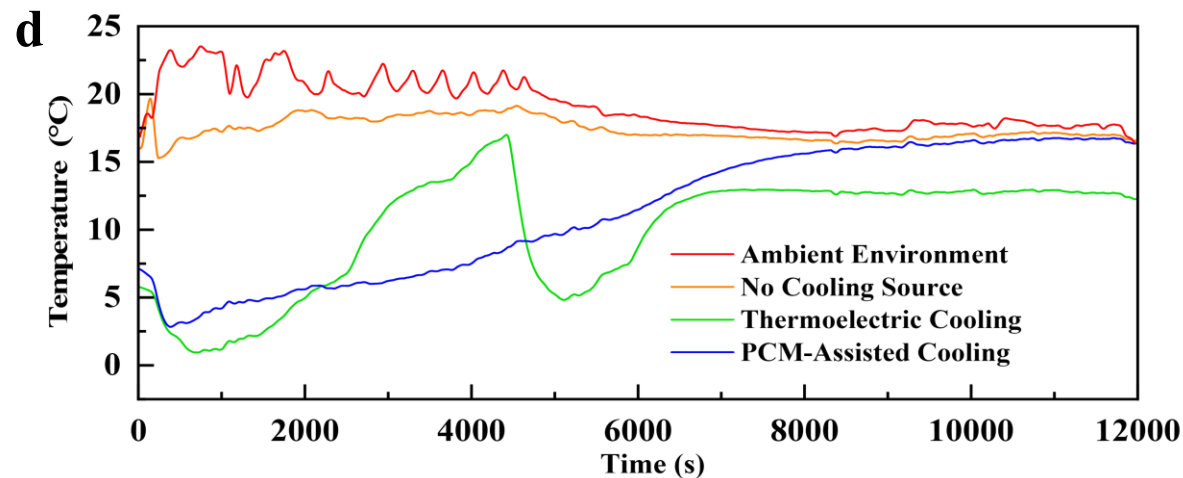
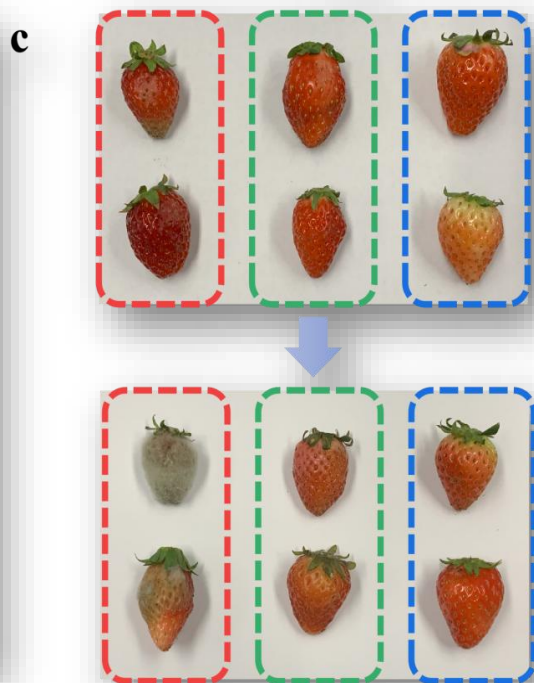
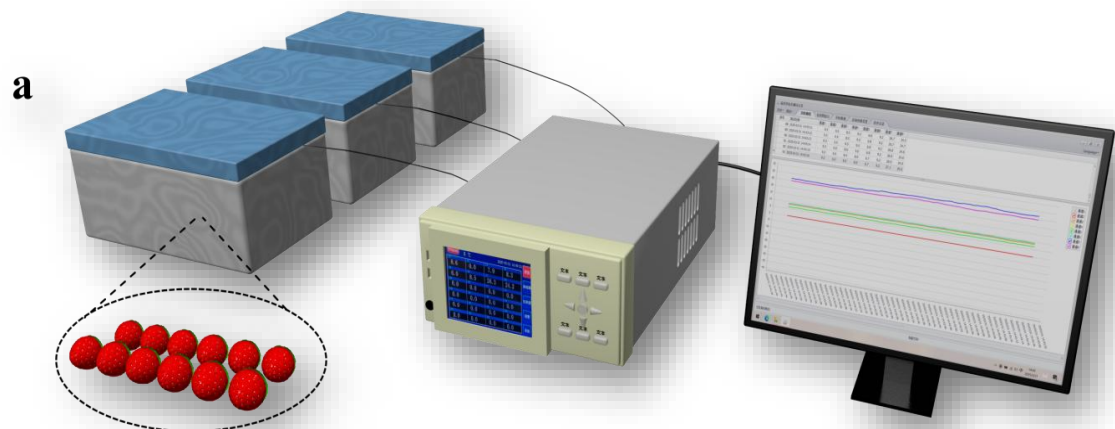
c



4. 工程应用测试



上海第二工业大学



实验设置与过程：搭建 EPP 泡沫保温箱实验系统

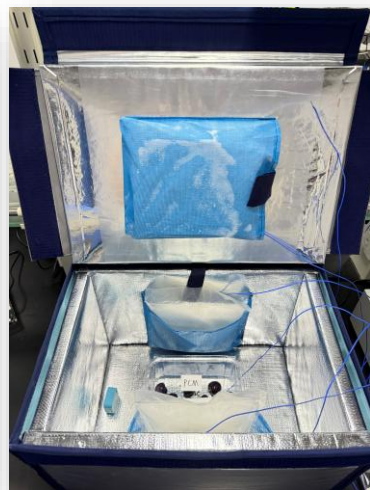
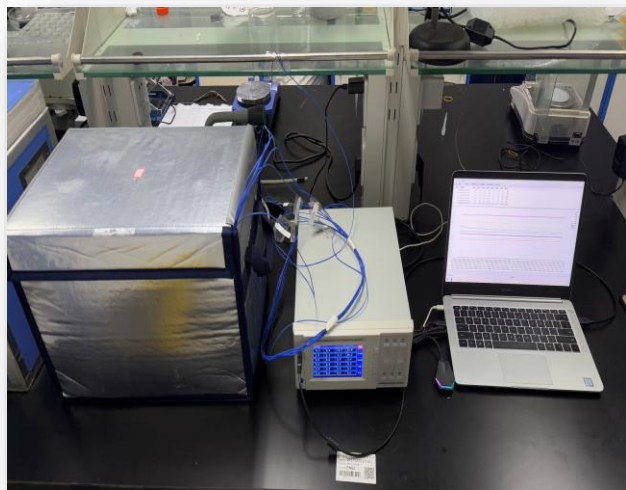
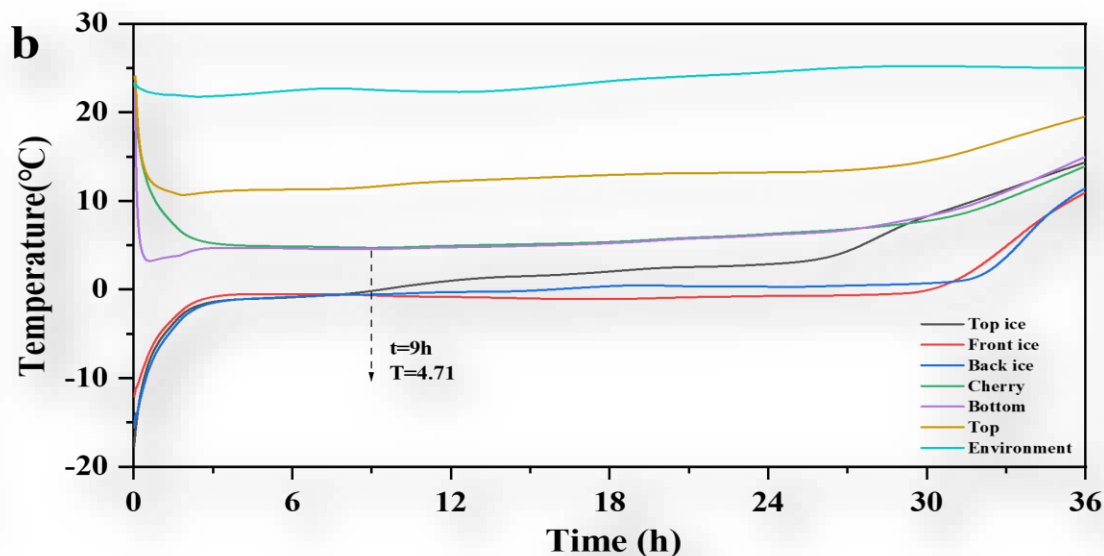
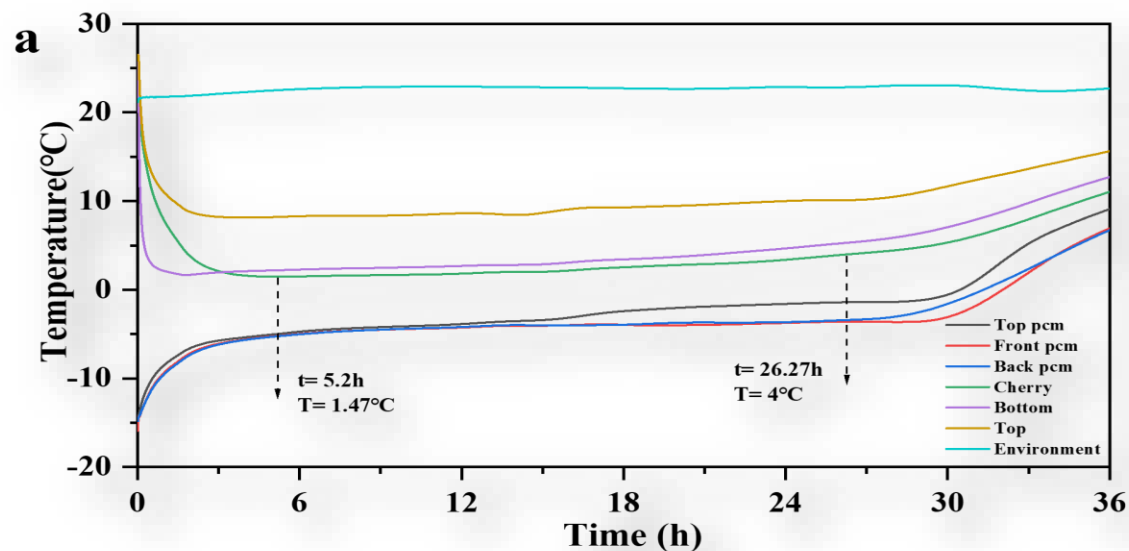
(a) , 分别设置三组进行进行对照, 半导体制冷箱体、PCM 箱体和无冷源箱体 (b) , 进行生鲜 (草莓) 冷藏实验, 观察一周内草莓状态变化

实验结果对比：经过一周后 (c) , PCM 箱体中草莓状态明显优于无冷源箱体, 温升曲线 (d) 显示其控温效果接近半导体制冷, 且比半导体制冷更加缓和

4. 工程应用测试



上海第二工业大学



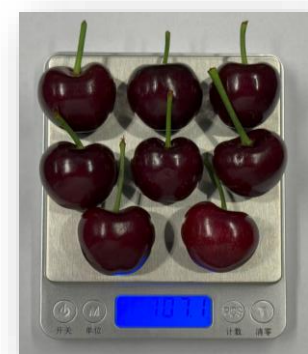
实验系统搭建：搭建保温绝热箱储藏实验系统，用于开展车厘子储存实验，对比用 PCM 和冰的车厘子温度储存情况，观察5天内车厘子状态变化

实验结果对比：从图中的温升曲线 (a) 和 (b) 发现使用PCM时，车厘子的温度在5.2h的时候，温度达到最低的1.47°C，持续到26.27h时，达到温度4°C，很好地适合车厘子的储藏条件 (0-4摄氏度)；而使用冰袋时，温度在9h的时候达到了最低的4.71°C，高于PCM时的温度

4. 工程应用测试



上海第二工业大学



107.1g



↓1.5g



108.9g



↓6.1g



105.2g



↓14.5g



105.6g



102.8g



90.7g

研究结论

该研究聚焦冷链用相变蓄冷材料的研发与工程应用，旨在解决冷链行业痛点。当前冷链行业面临能源价格上涨、生鲜市场扩大但农产品储藏周期短、流通链条长、成本高、损耗率高等问题，且存在生鲜质量难把控、缺乏稳定低温环境、能耗高等难点，而相变蓄冷材料应用前景广阔。相变蓄冷技术利用物质相变时的能量变化实现控温，相比机械制冷，在温度波动、控制精度、湿度保持、货品保鲜及节能环保等方面更具优势。项目团队研发了多款性能优良的相变蓄冷材料，包括相变温度 -2°C 、 -3°C 左右及 -3 至 -5°C 的相变蓄冷材料，这些材料在焓值、过冷度、导热率、稳定性等方面表现突出。工程应用测试显示，在真空绝热医疗冷链箱、酸奶、草莓、车厘子等的储存或运输中，相变蓄冷材料能有效维持低温环境，保鲜效果良好，能够为冷链行业发展提供了有效解决方案。



敬请各位专家批评指正



于伟

上海 浦东新区



扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。

