

低碳冷链制冷技术装备及工艺研究进展

汇报人：刘圣春

2024年4月8-10日

中国·北京



汇报 提纲

一、冷链背景及意义

二、冷链能源系统关键技术研究

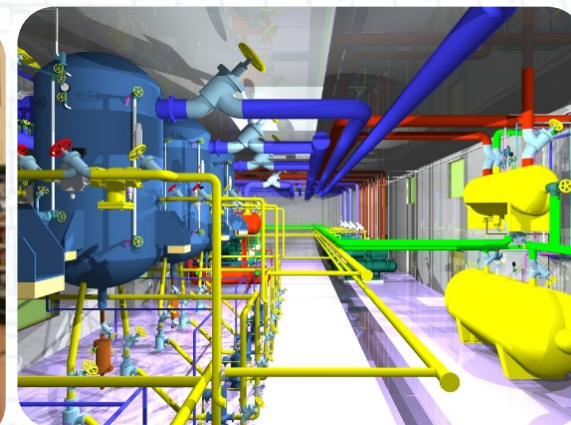
三、冷链工艺过程关键技术研究

四、冷链环境关键技术研究

五、冷链物流管理关键技术研究

1

冷链背景及意义



1.1 冷链背景

冷链物流：以冷冻工艺为基础、制冷技术为手段，使冷链物品从生产、流通、销售到消费者的各个环节中始终处于规定的温度环境下，以保证冷链物品质量，减少冷链物品损耗的物流活动。



《“十四五”冷链物流发展规划》中明确指出我国冷链行业面临的困难：

(1) 产业升级和扩大内需亟待开拓冷链物流发展新空间。

(2) 冷链产品安全和疫情防控对冷链物流要求显著提高。

(3) 冷链物流迫切需要科技创新和数字转型。

(4) 冷链物流需满足高水平对外开放需求。

(5) “碳达峰碳中和”对冷链物流低碳化发展提出新任务。

□ 发展冷链物流已经成为国家战略

□ 冷链物流体系成为国家的重要基础设施



明确“建设现代物流体系，加快发展冷链物流，畅通国内大循环”的国家战略。



全面建成现代冷链物流体系，设施网络、技术装备、服务质量达到世界先进水平，行业监管和治理能力基本实现现代化。

形成内外联通的“四横四纵”国家冷链物流骨干通道网络，发挥通道沿线国家骨干冷链物流基地、产销冷链集配中心基础支撑作用。

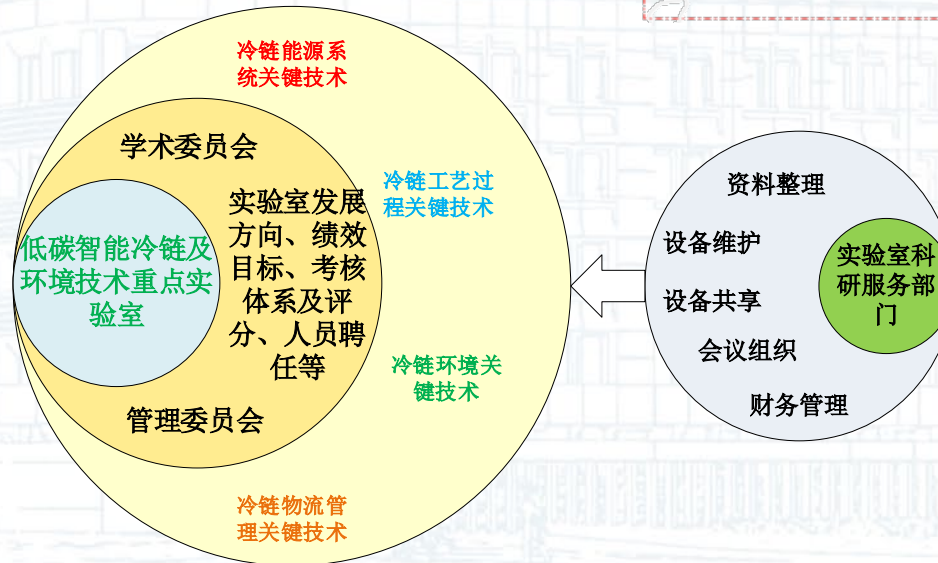
1.2 学科定位

➤ 对冷链物流过程中涉及的**装备、工艺、管理、商业**等方面的重大**关键科学技术问题**进行研究攻关，服务于国家中长期发展战略。

- 开拓**冷链物流**发展新空间
- 冷链产品**安全**和**疫情防控**
- 冷链物流**科技创新**和**数字转型**
- 冷链物流行业“**双碳**”任务

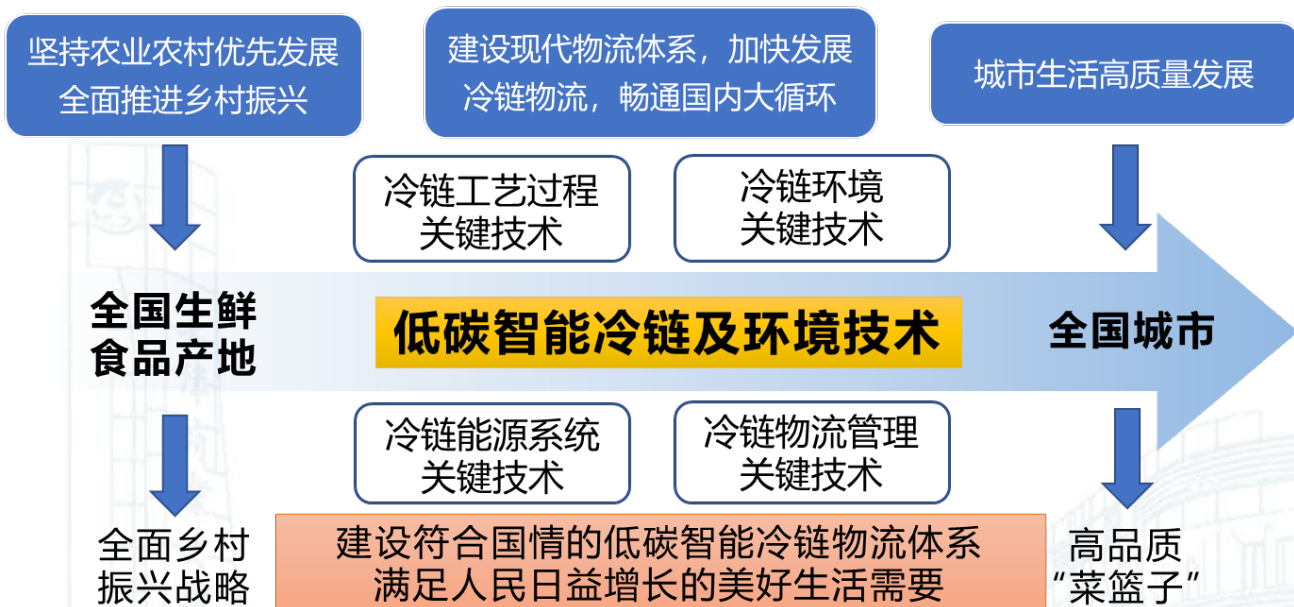
➤ 主要任务

- 实现**冷链能源系统**高效、环保、经济运行
- 全面提升**冷链物流食品品质**
- 保障**冷链环境安全**，打造近零碳冷链
- 实现**冷链信息化智慧化**
- 加速**冷链物流高端人才**的培养

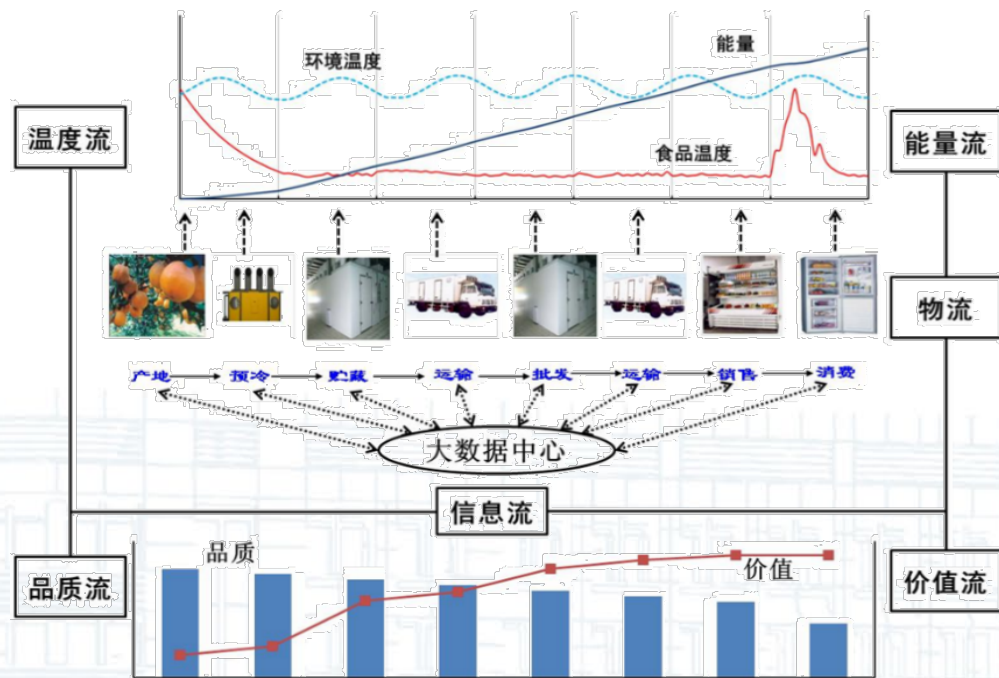


科研组织管理构架

1.3 目的及意义



低碳智能冷链及环境技术研究关键点



低碳智能冷链及环境技术前沿课题

1 冷链能源系统关键技术

- 绿色工质循环及部件
- 清洁能源及储能技术
- 新型保温、蓄能材料

2 冷链工艺过程关键技术

- 易腐产品保质工艺
- 生鲜产品冷环境保存
- 食品速冻、干燥技术

3 冷链环境系统关键技术

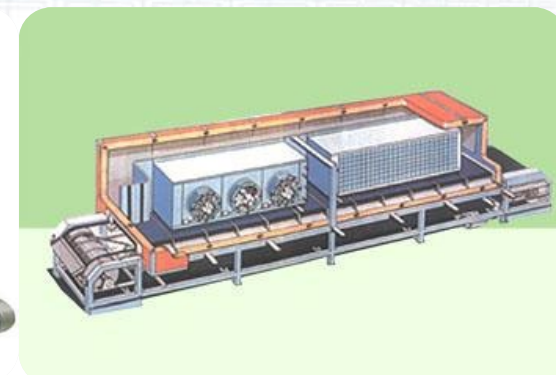
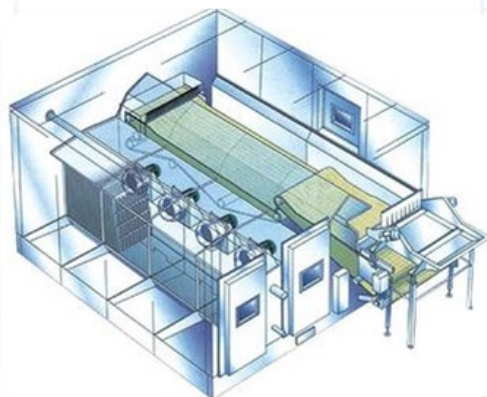
- 冷链环境消杀技术
- 冷链废弃物供能系统
- 冷链微环境精准控制

4 冷链物流管理关键技术

- 冷链物流风险管理
- 冷链物流减损管理
- 冷链物流设施规划

2

冷链能源系统关键技术研究



2.1 传热传质机理研究

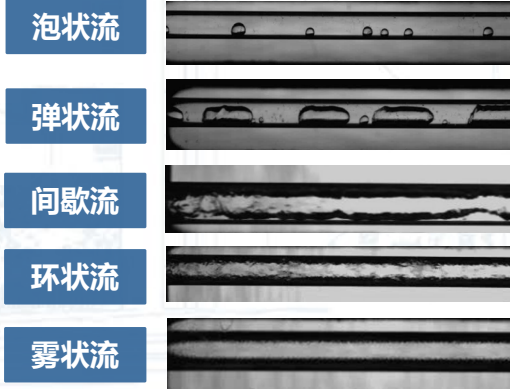
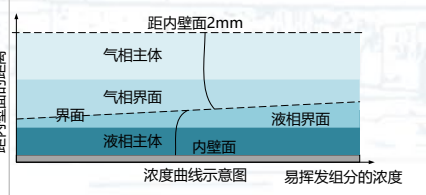
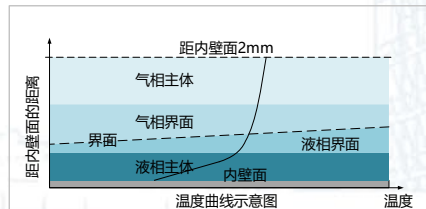
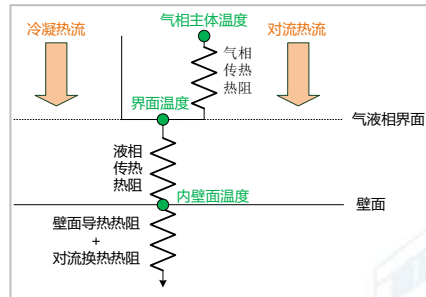
非共沸工质相变传热传质

■ 两相及超临界传热特性基础研究

- ✓ 纯质、非共沸工质
- ✓ 超临界、流动沸腾、流动冷凝
- ✓ 常规通道、微通道
- ✓ 流型、流动、传热

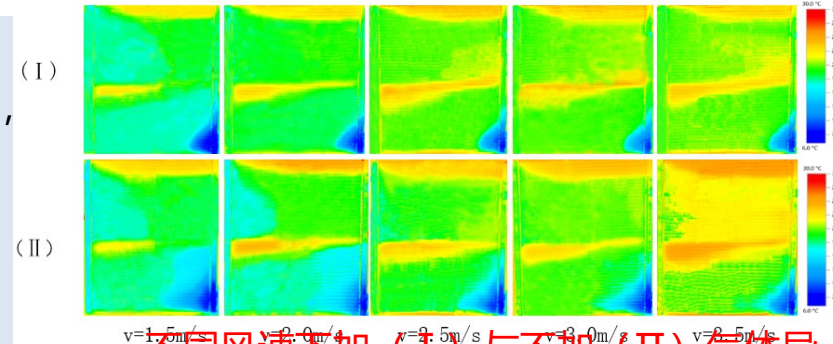
■ 大温度滑移非共沸工质两相传质特性基础研究

- ✓ 组分迁移规律
- ✓ 传质阻力影响
- ✓ 显热阻力影响

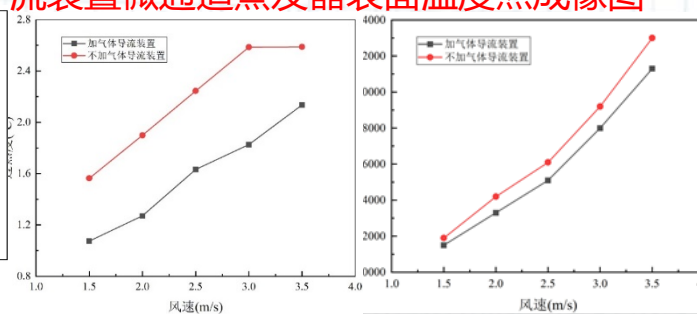
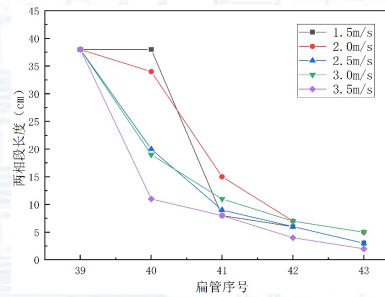
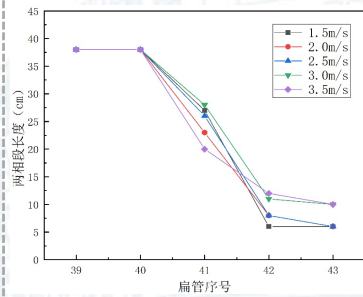


微通道蒸发器气体导流强化换热研究

研究内容：采用实验研究的方法，引入导气装置将蒸发器的气态工质导出，研究气体导流对微通道蒸发器换热性能、流动特性的影响，对蒸发器出口过热度、蒸发器压降、两相段长度的改善作用。



不同风速下加 (I) 与不加 (II) 气体导流装置微通道蒸发器表面温度热成像图



加气体导流装置

不加气体导流装置

出口过热度

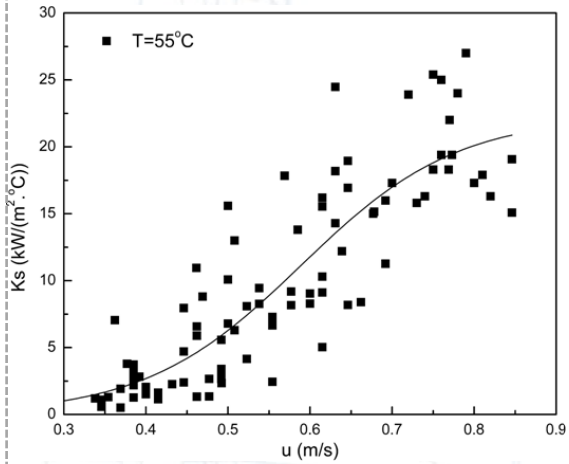
压降

结论：加气体导流装置的微通道蒸发器，与不加气体导流装置相比，出口制冷剂过热度降低（风速1.5 m/s时，降幅最高达45.4%。），压降较小（最高降幅达7.4%），两相段长度增加（最高增幅达87.3%）。

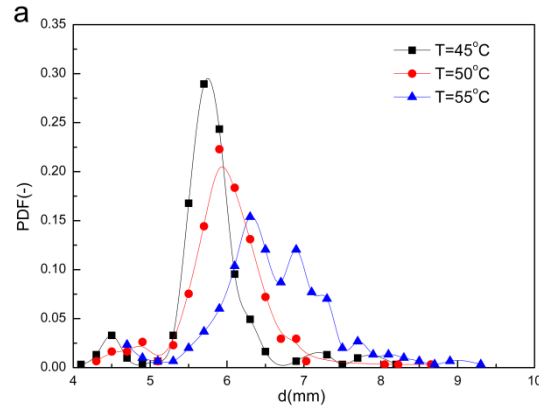
2.1 传热传质机理研究

戊烷与水直接接触蒸发传热特性研究

利用高速摄像系统、红外热成像系统对戊烷在连续相水中的泡滴汽化率对传热系数的影响进行了研究



泡滴上升速度对传热系数的影响

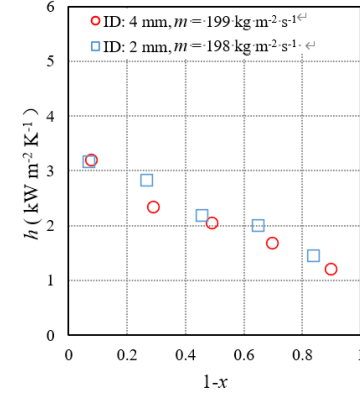
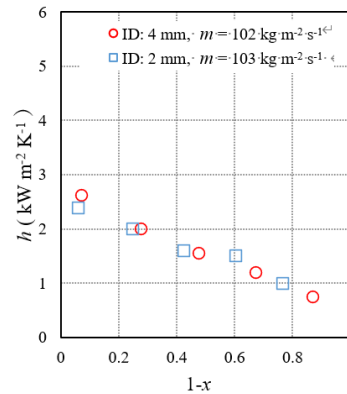


温度对泡滴尺寸分布的影响 ($G=5L/h$)

在温度较低的情况下，随着温度的增加，戊烷液滴更容易汽化，泡滴直径增加

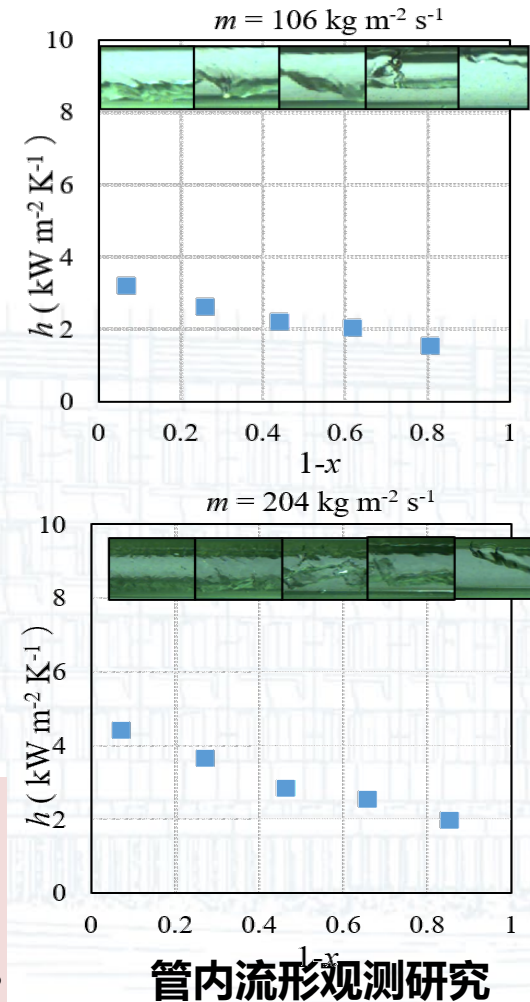
微通道管内冷凝传热传质特性

研究内容：对R1234yf/R32在内径为2mm的微通道试管中的冷凝传热传质特性进行了实验研究



ID 2 mm 和 4 mm 范围内 R1234yf/R32的冷凝HTC比较

结论：汽液界面的湍流在低质量流速下变成层流，HTC主要取决于液膜的厚度和热物理性质。在高质量流量下，汽液界面的湍流显著增强，HTC将显著增加。

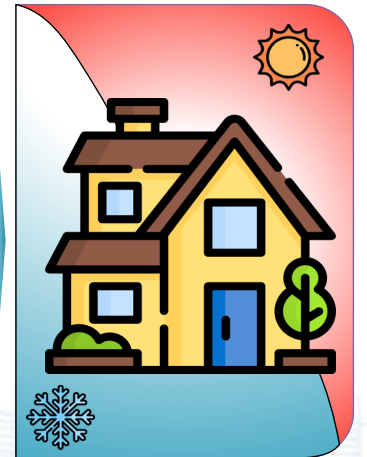
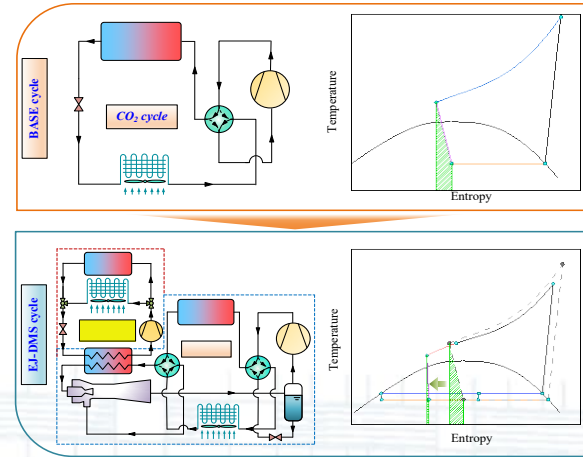
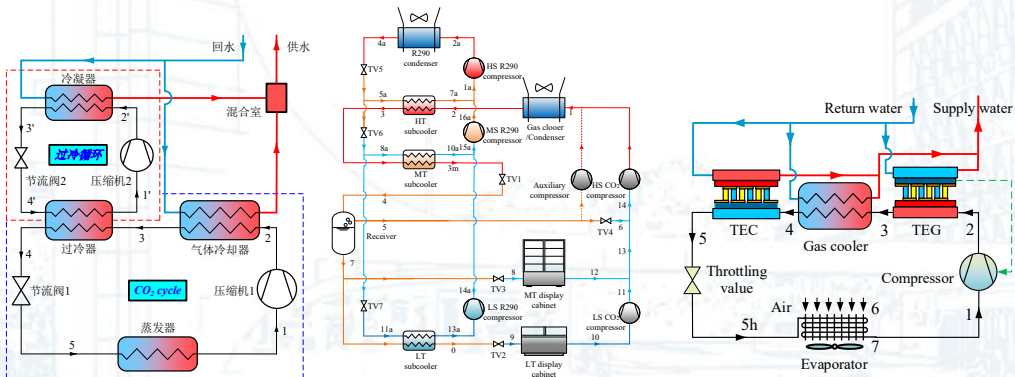


管内流形观测研究

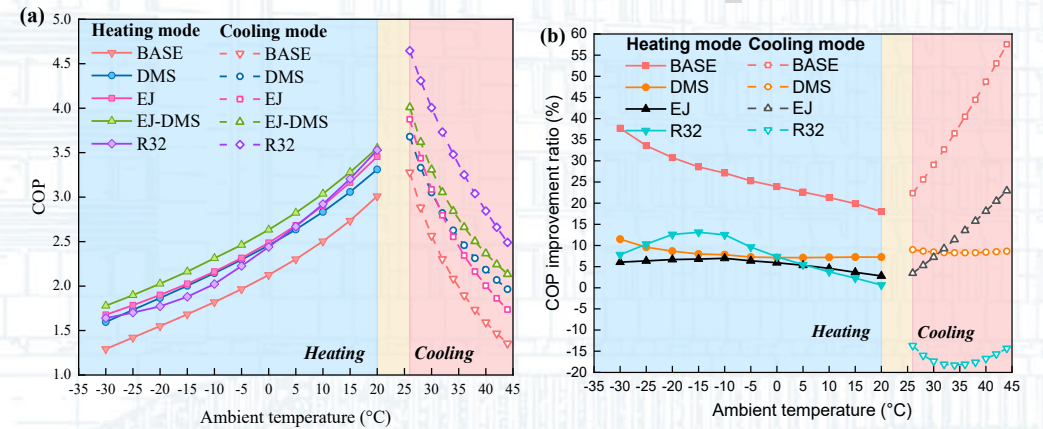
2.2 绿色环保制冷剂应用及研发

热力系统构建

- 机械过冷CO₂制冷系统
- 机械过冷CO₂热泵供暖系统
- 多级机械过冷跨临界CO₂增压制冷系统
- 采用非共沸工质的机械过冷CO₂制冷热泵系统
- 双压蒸发跨临界CO₂余热回收高温热泵系统
- 多级热电过冷CO₂热泵供暖系统
- 双压冷凝双压蒸发热泵系统
- 非共沸工质双压冷凝热泵系统
- 非共沸工质双压冷凝-双压蒸发高温热泵
-

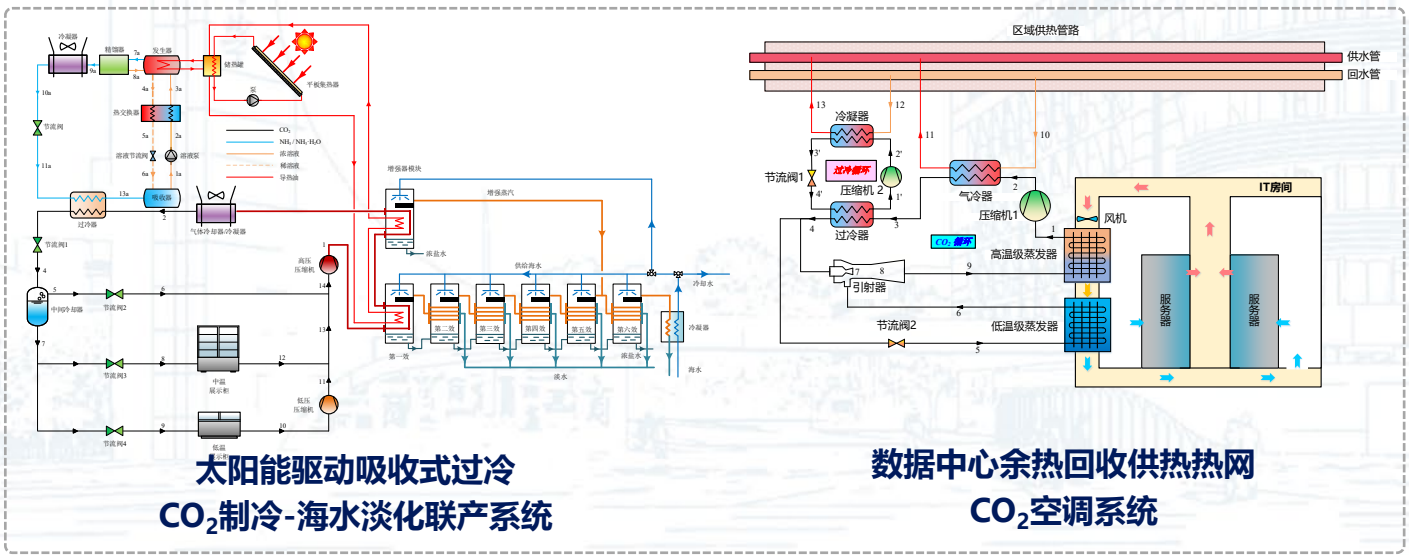
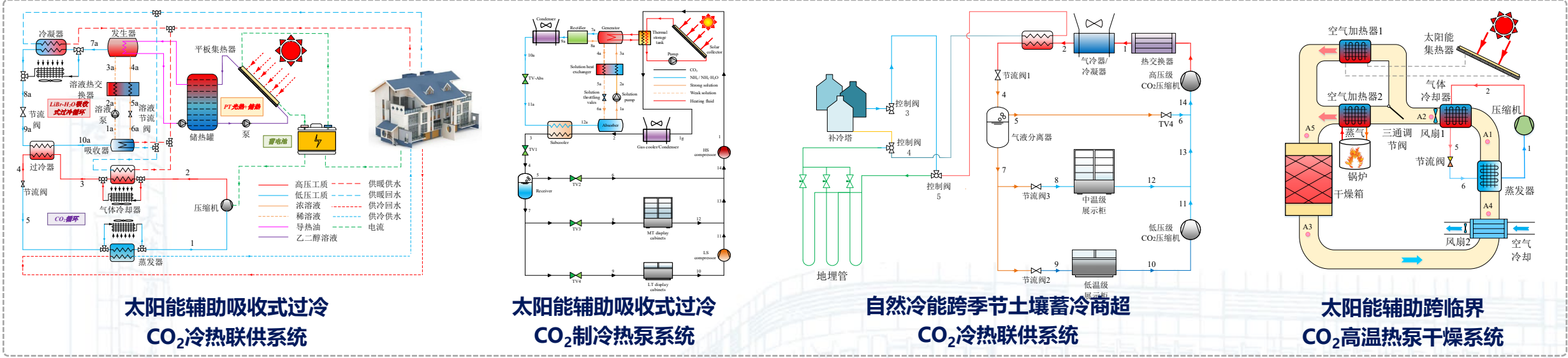


集成引射器和机械过冷的CO₂系统原理



不同系统的COP及COP改善率对比

2.2 绿色环保制冷剂应用及研发

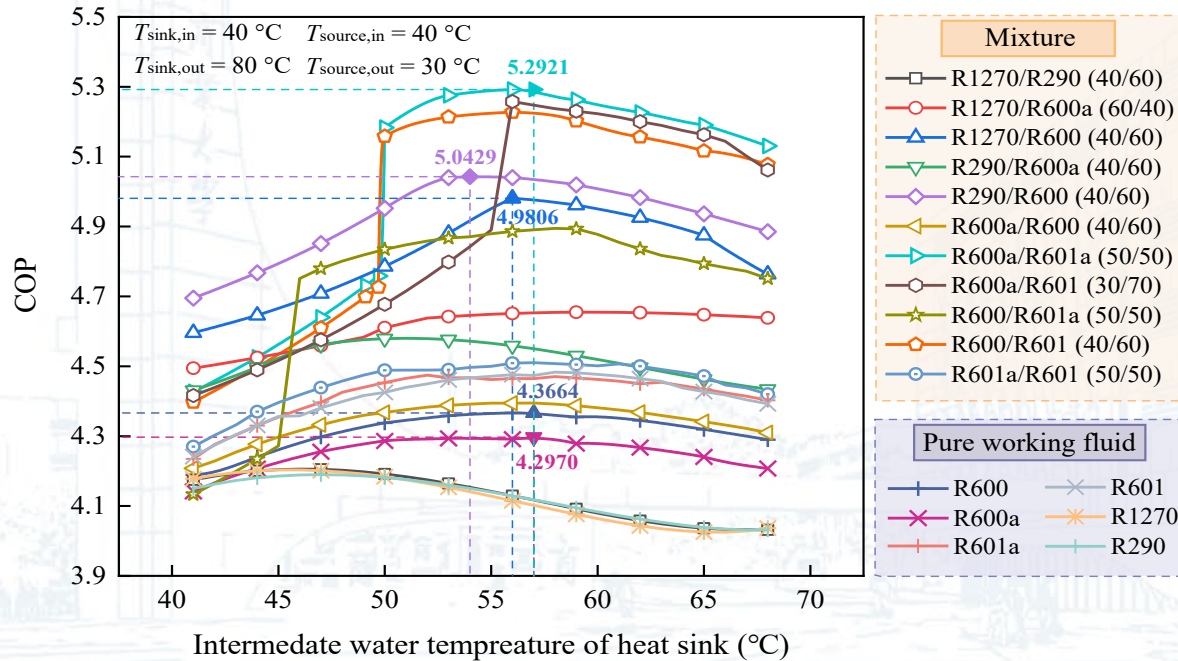
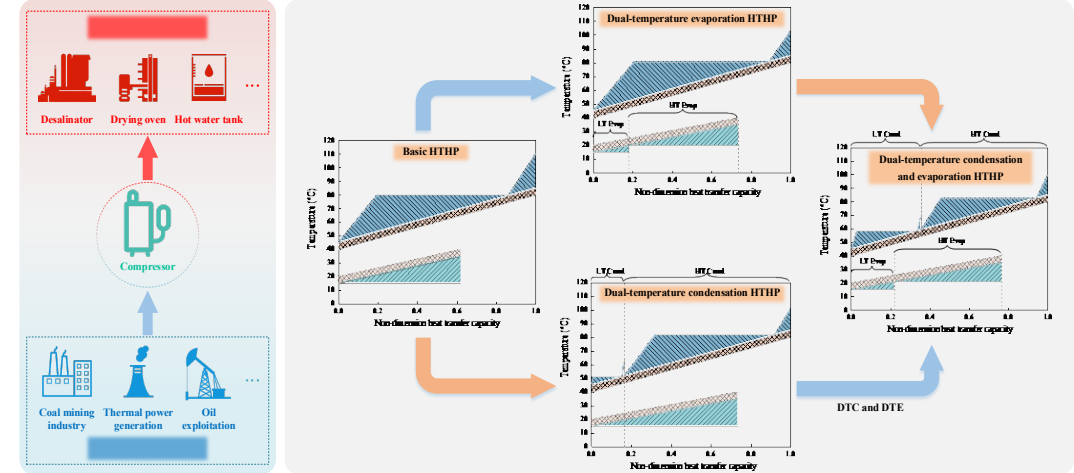


- **多来源:** 太阳能光伏光热、自然冷能、压缩机排气及数据中心余热
- **多场景:** 民用、商用、工业、建筑
- **多产出:** 冷、热、电、淡水
- **多目标:** 能效、能源消耗、碳排放、成本
- **多跨度:** 跨季节、白天-夜晚
-

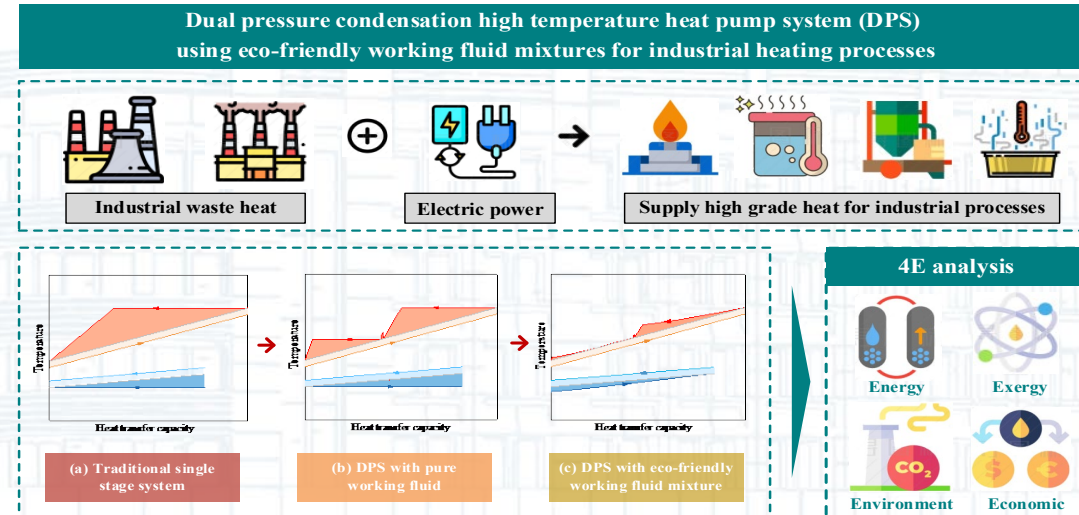
2.3 复叠式制冷/热泵技术研究

新型高效高温热泵循环构建

研究内容：采用数值模拟的方法，提出双温冷凝和双温蒸发一体化的概念，结合引射器和两级压缩技术，提出了两种新的高温热泵系统。提出了两级压缩两级冷凝结合内换热器(IHX)，采用环保混合物对热空气或热水进行串联加热的HTHP系统。



不同工质的系统COP随中间水温变化的对比



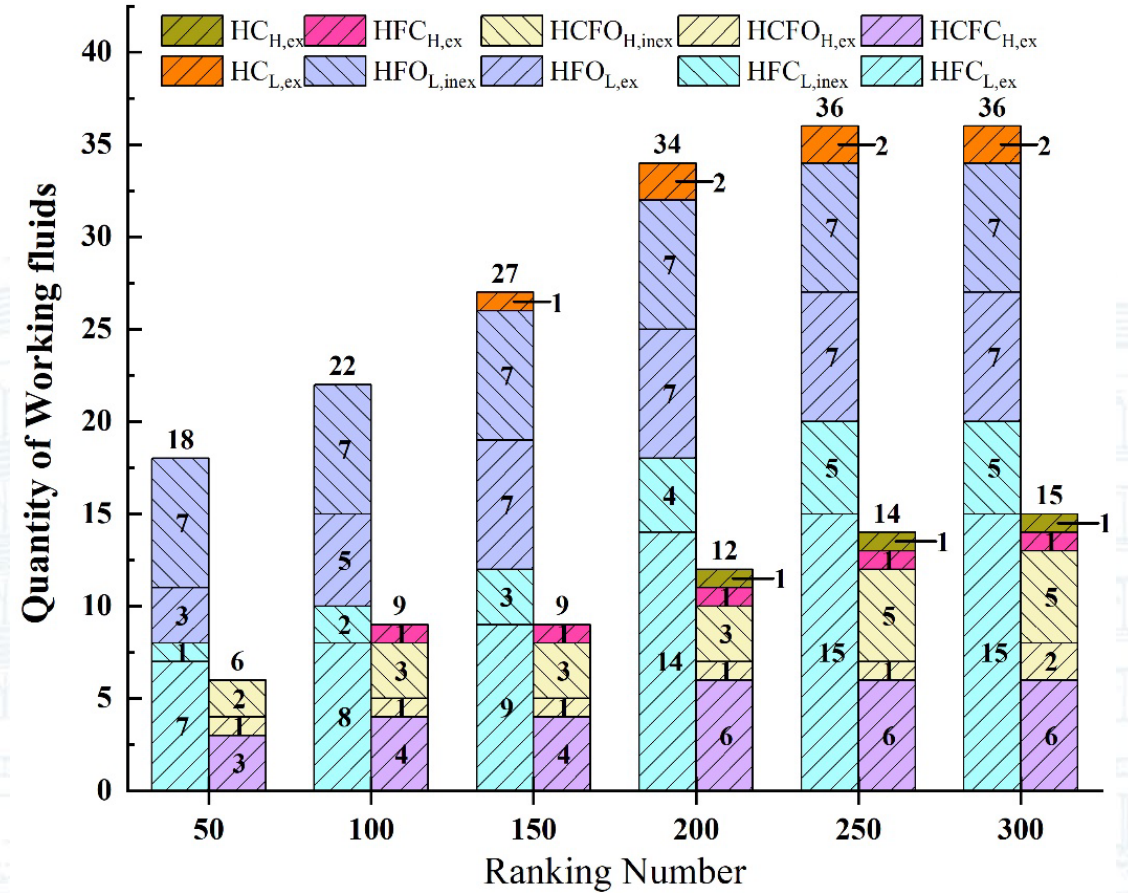
- 该两种新型热泵系统COP较于常规双温冷凝热泵系统均得到了一定的提升。
- 该两级压缩两级冷凝结合内换热器，可显著降低传热不可逆性损失，进一步提高HTHP的整体性能。

2.3 复叠式制冷/热泵技术研究

基于基团贡献法的复叠式热泵新型潜在工质的设计

研究内容：采用实验与模拟相结合的方法，探究不同基团贡献法对复叠式热泵模型热力计算的影响，并采用Joback方法、回溯算法，获取复叠式热泵在不同热源温度和加热温度下的最佳工质对。

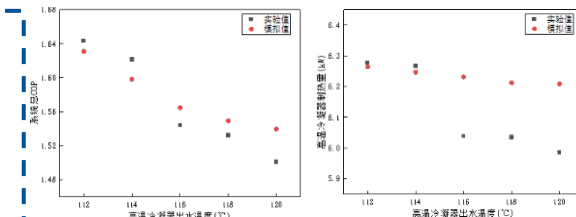
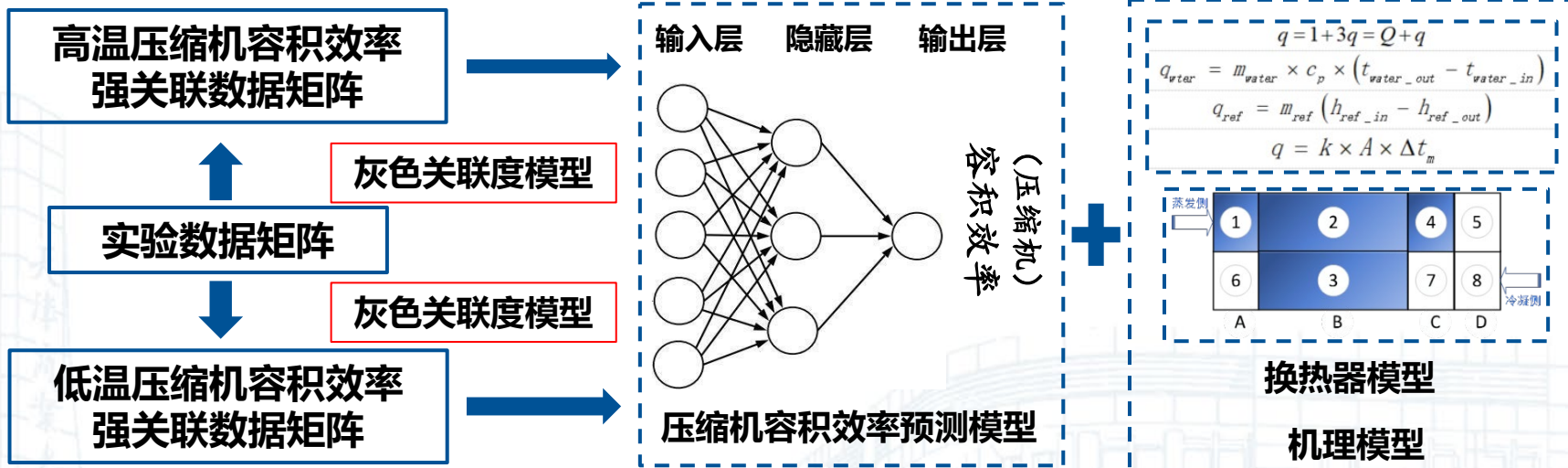
结论：R1243、R1243yf、R1243zf、R143b、R281fa和R161等工质应首选作为低温工质，R263fa和R126zd作为高温工质表现出了最佳的性能和匹配灵活性。



LTWFs和 HTWFs 分布特征

2.3 复叠式制冷/热泵技术研究

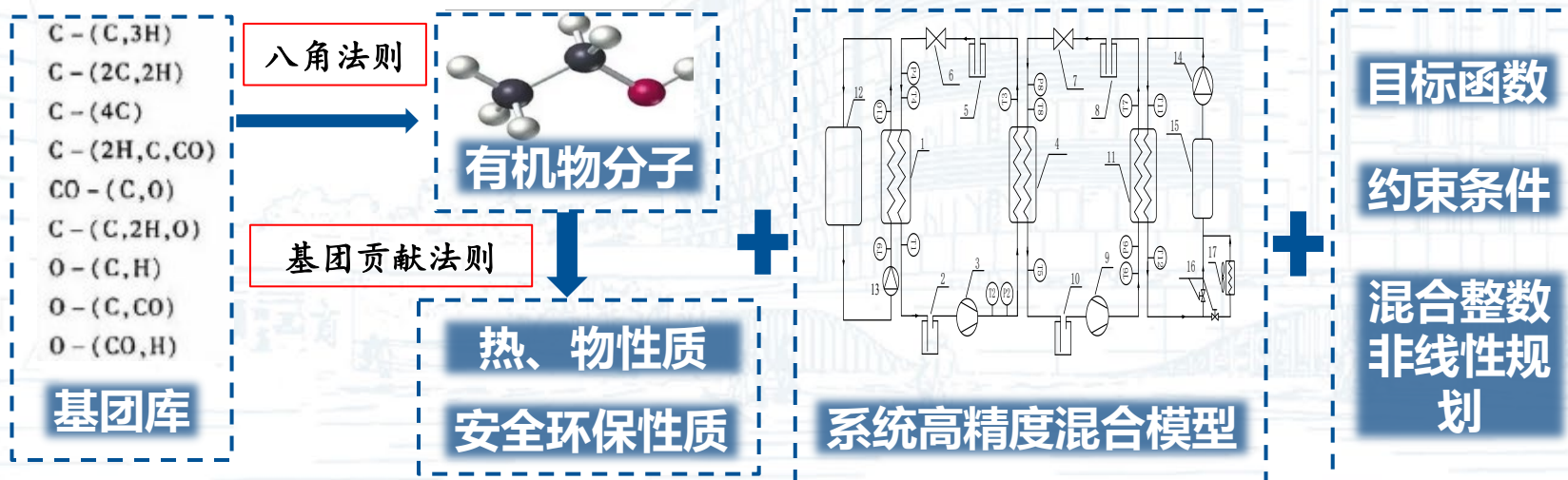
复叠式热泵高精度建模难



■ 多工况下，COP、制热量最大预测误差为4.93%、5.52%

■ 多温区系列工质对筛选与测试

适用工质对协同筛选机制少



■ 20°C-50°C 升温至 120-150°C，实现最高100°C温升，COP为1.8-2.0

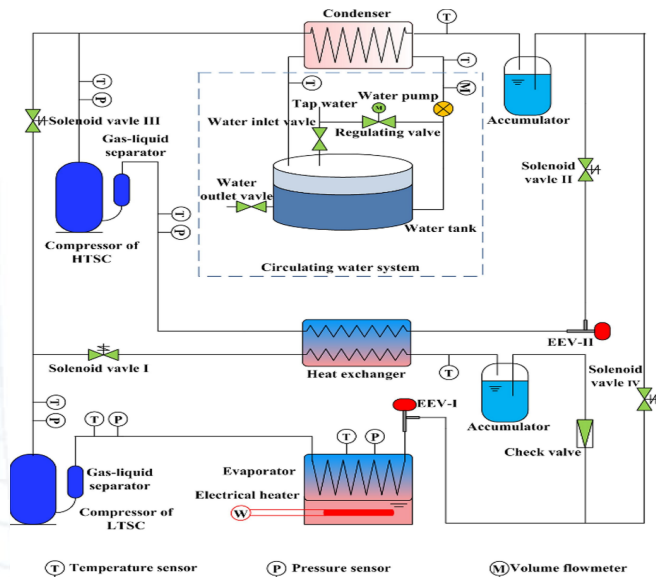


2.3 复叠式制冷/热泵技术研究

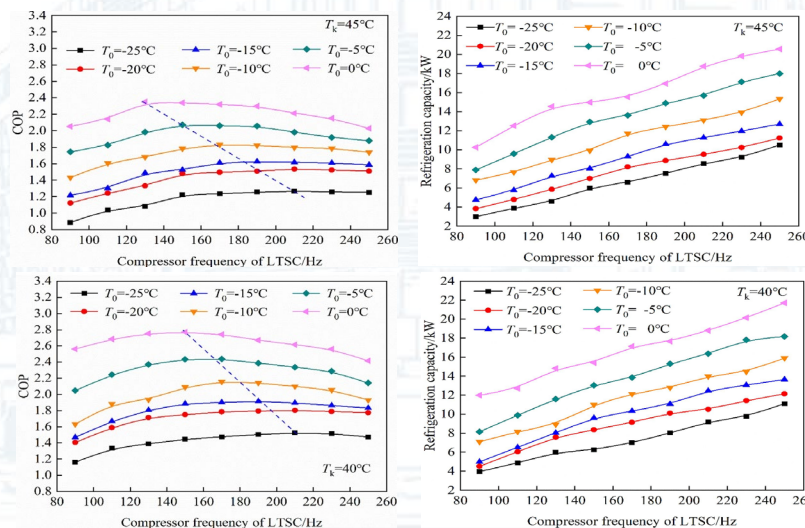
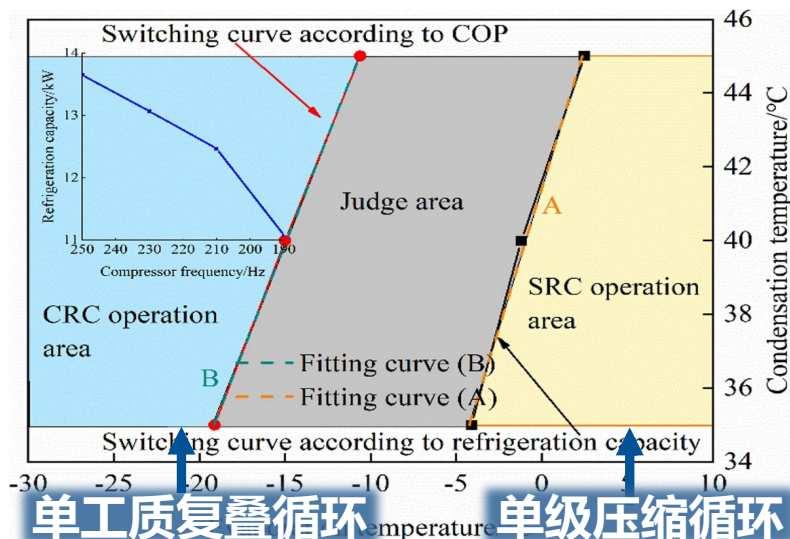
传统制冷/热泵系统功能单一

单级制冷/热泵系统大温差运行效率低

工况调节不稳定



单制冷剂双模制冷/热泵系统



系统变容量调控策略

制冷工况

T_{evp} 从 -35°C 上升至 10°C 时, T_{cd} 为 $35/40/45$ 时, $\text{COP} = 0.98-3.54/1.20-4.27/1.42-5.20$

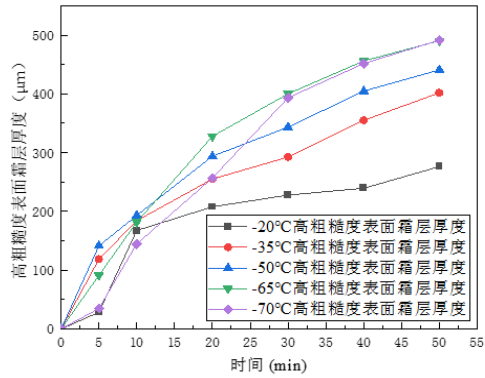
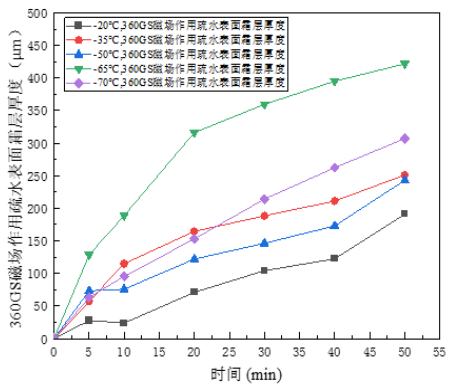
热泵工况

$T_{cd} = 46^{\circ}\text{C}$, $T_{evp} = -35^{\circ}\text{C}$, $\text{COP} > 1.8$, 排放温度 $< 120^{\circ}\text{C}$, 压缩比 < 5.0

2.4 低温冷表面结霜特性与融霜技术

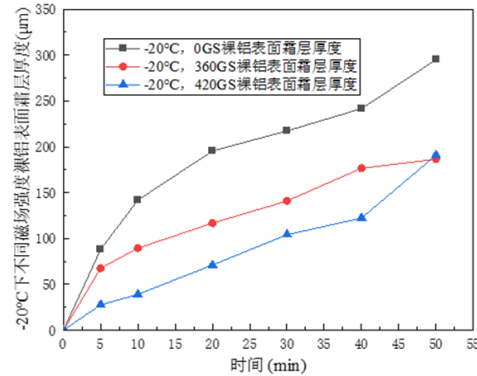
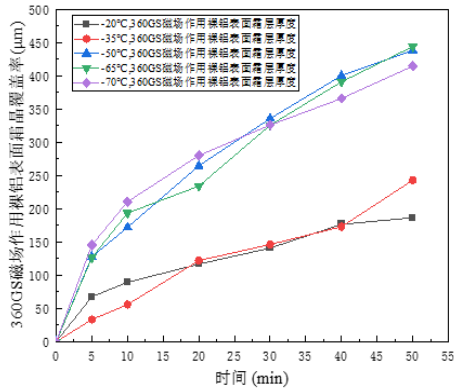
低温冷表面结霜特性影响因素研究

研究内容：利用3D视频显微镜，通过搭建可视化试验台，对低温冷表面结霜过程进行了研究



无论是否考虑磁场，裸铝表面的霜层厚度都大于疏水表面

在一定磁场范围内，液滴尺寸随磁场强度的增大而变小

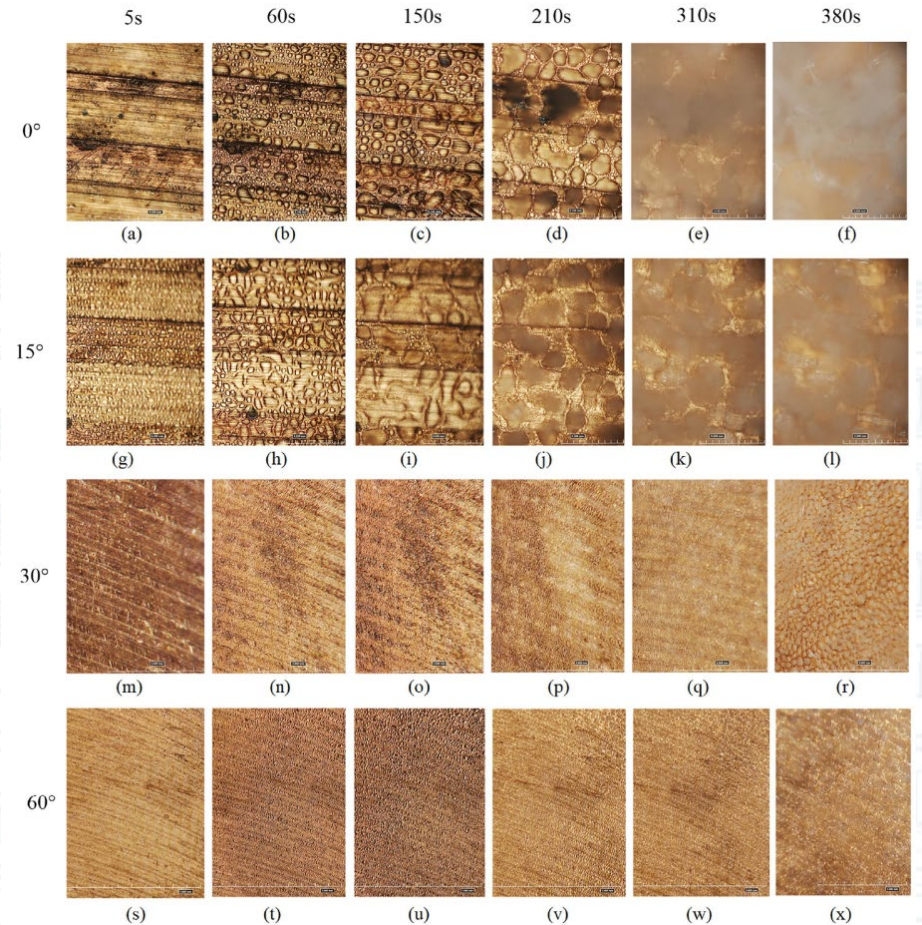


-20 °C, 360 GS, 5 min时，疏水性表面霜层厚度为裸铝表面霜层厚度40.2%

冷表面温度越低，较小的液滴凝结在冷表面上，冻结时间也就越短

360 GS磁场作用下疏水表面霜层厚度

-20 °C裸铝表面不同磁场强度作用下霜层厚度



2.4 低温冷表面结霜特性与融霜技术

基于灰度图理论的除霜技术

基于图像处理技术的理论和基础，开发基于灰度图理论的新型除霜控制方法，提出一个蒸发器结霜特征无量纲参数 St 用以表征蒸发器表面的结霜程度，并且结合结霜图片灰度对比度归一化参数 ξ 共同确定系统临界除霜时间，实现精准除霜。

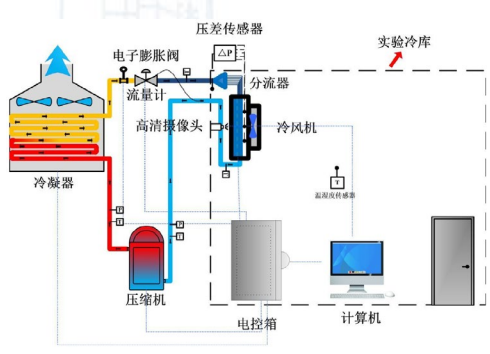


图 2-1 制冷系统实验台

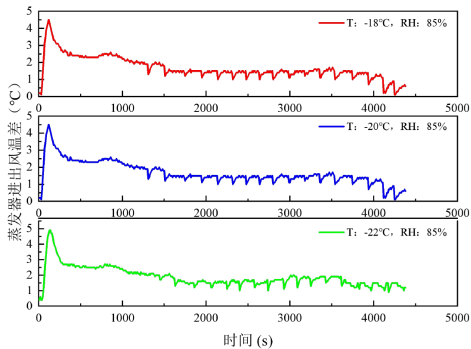
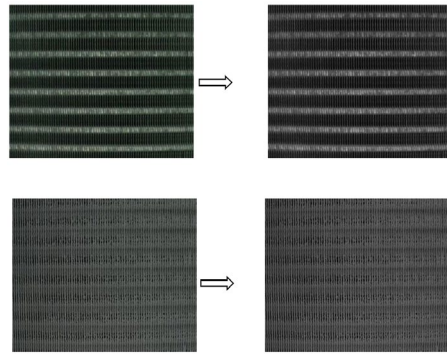


图 2-5 不同结霜工况下蒸发器进出风温差变化



(a) 摄像头采集原图片 (b) 处理后的灰度图片

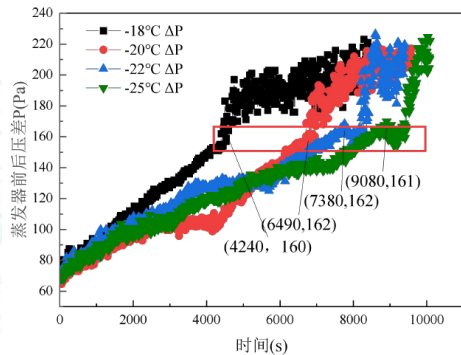
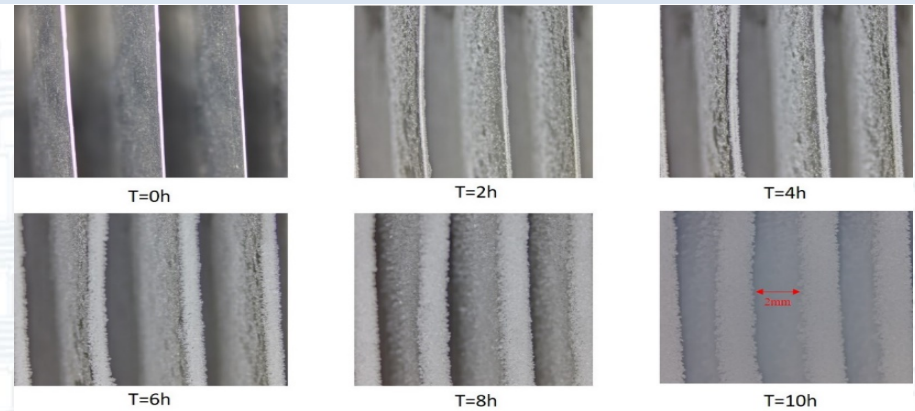


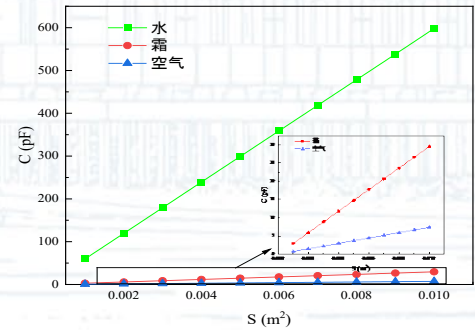
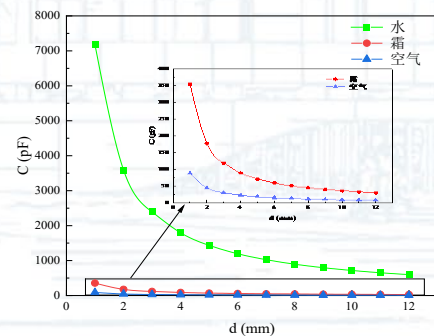
图 4-3 不同结霜工况下蒸发器前后 ΔP 变化

基于平行板电容器原理的智能除霜控制研究

通过实验研究的方法，结合平行板电容器技术与CCD数码显微镜，观察冷库蒸发器翅片表面霜层及其变化，并采用可编程逻辑控制器对冷库除霜进行实时控制，实现按照冷库运行要求进行精准除霜，提高按需除霜能力、降低除霜能耗。



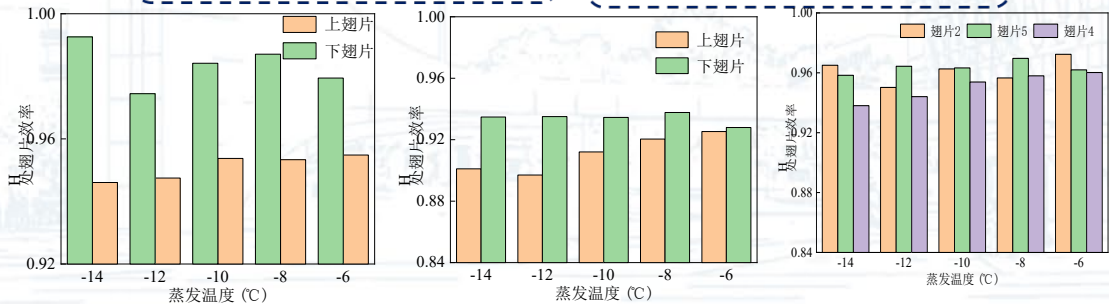
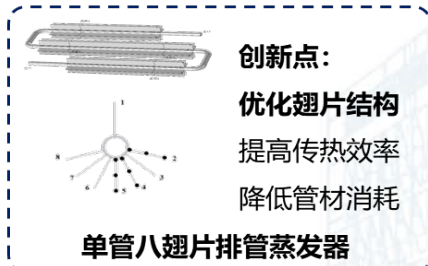
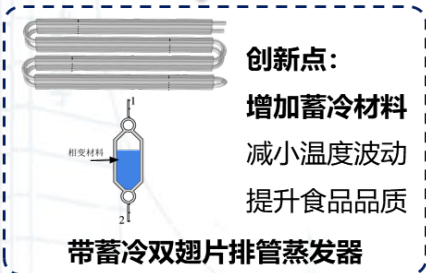
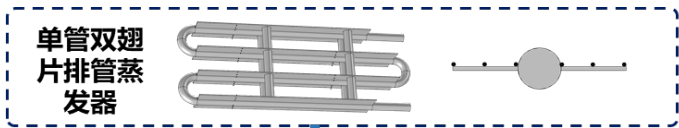
新型电容原理除霜控制法蒸发器霜层图



2.5 制冷装备关键部件

带蓄冷翅片排管蒸发器

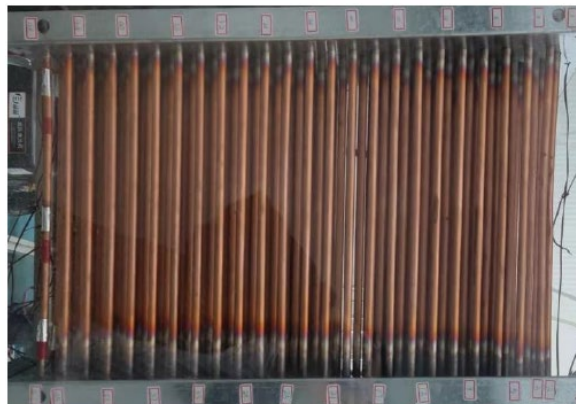
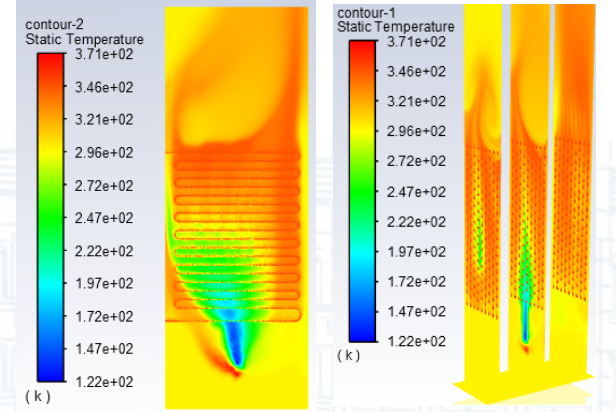
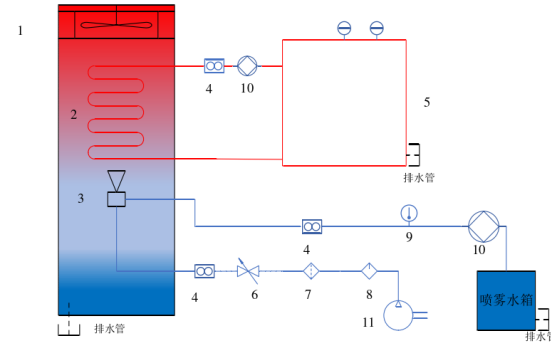
温度波动对于贮藏货物品质有显著影响，将蓄冷技术与蒸发器结合，可以利用蓄冷材料减少库温波动，同时起到强化换热的作用。



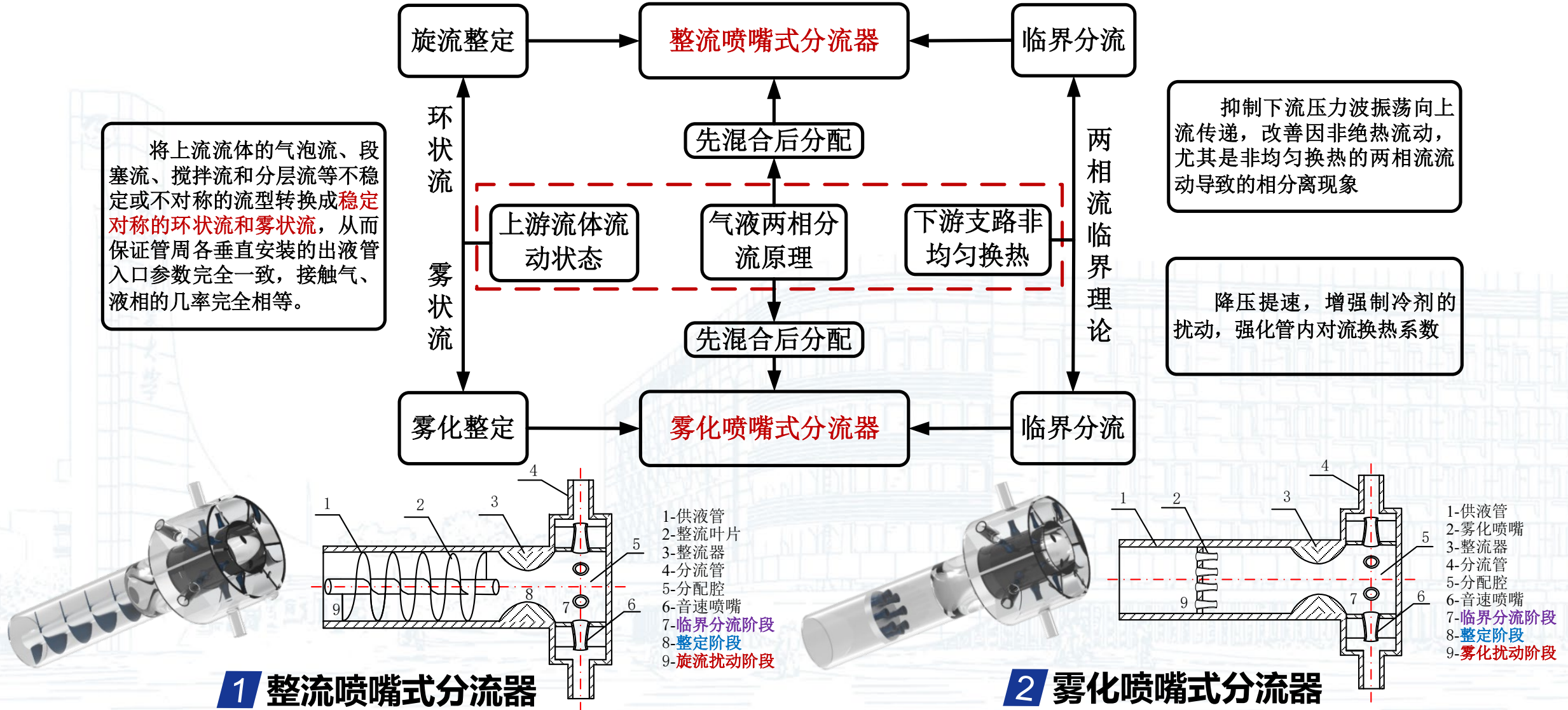
蓄冷型双翅片排管、双翅片排管、八翅片排管 η 随蒸发温度的变化

空气辅助式喷嘴冷却传统蒸发式冷凝器

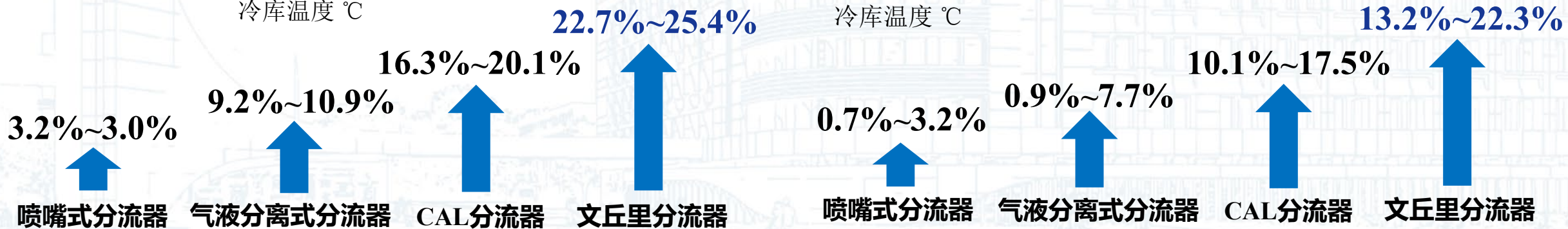
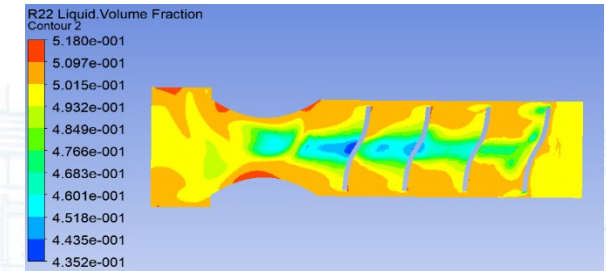
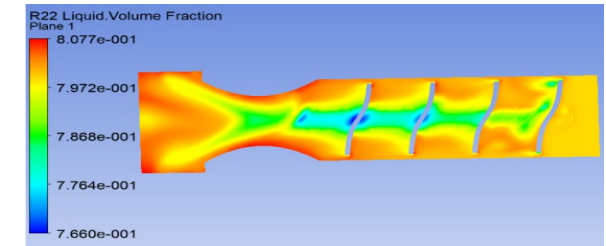
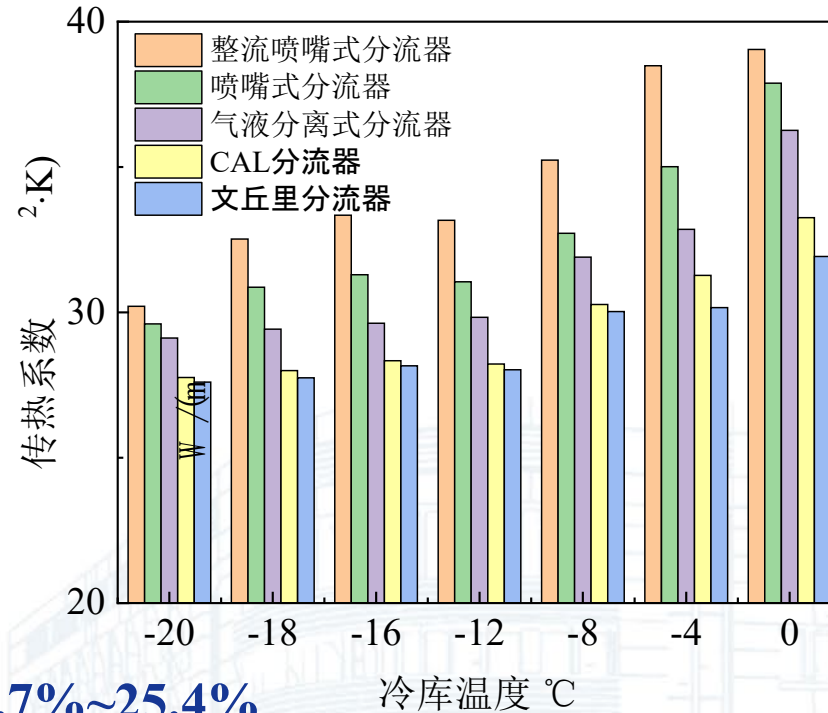
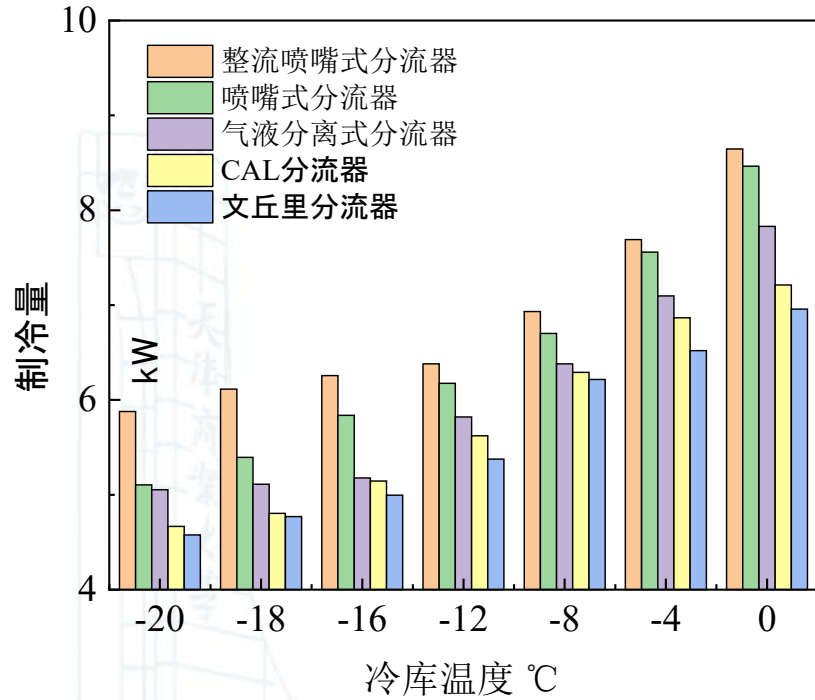
随着喷雾辅助空气压力的增大，雾滴粒径逐渐降低，蒸发速率加快；随着喷雾水流量增大，系统传热传质性能先增大后趋于平缓。



2.5 制冷装备关键部件



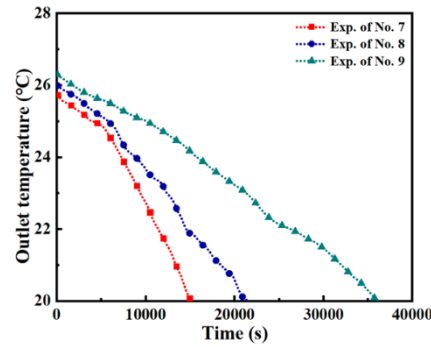
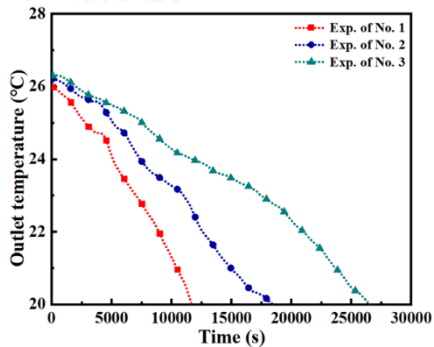
2.5 制冷装备关键部件



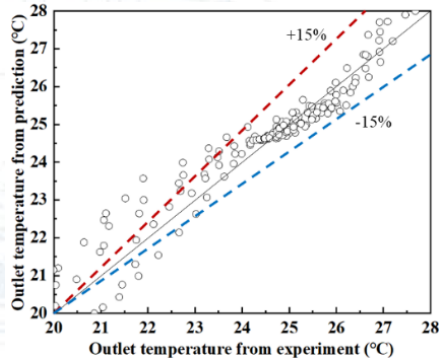
2.6 相变蓄冷技术

气泡流驱动下相变储能装置的传热特性研究

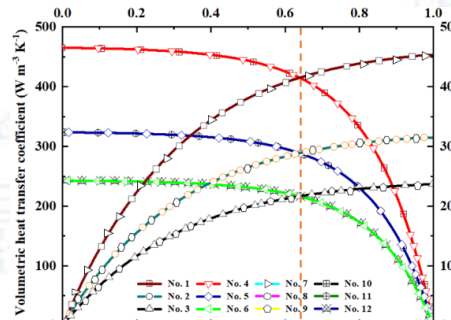
研究内容：通过实验和数值模拟相结合探究了气泡流驱动下相变储能装置的传热特性，利用模型假设对气泡流驱动下储能装置中的相变过程和体积传热系数进行预测。



不同输入温度下出口温度测量结果



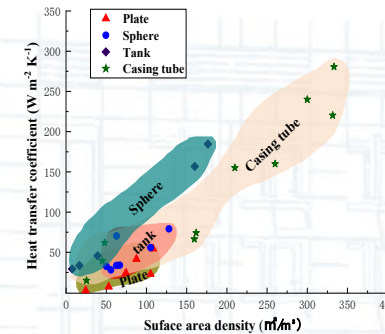
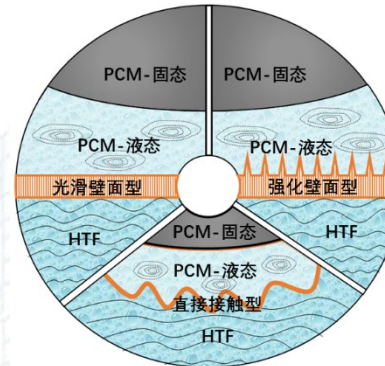
动态解析模型的框架



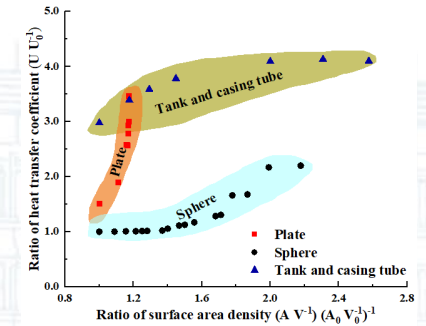
不同工况下体积传热系数随液相体积分数的变化

不同传热界面类型潜热储能器件传热性能估算研究

研究内容：分析不同LTES器件PCM与传热流体（HTF）之间传热界面（HTI）的整体对流传热系数，通过比较传热系数分析界面结构对传热性能的影响；回顾了增强机制，讨论每种类型的LTES设备的局限性。



不同HTI的分类 不同形态光滑HTI型的比表面积密度及对应的整体对流传热系数



不同形式增强型的表面积整体对流换热系数比

- 通过增加HTI在PCM侧的传热面积以形成增强的HTI类型，与平滑HTI相比，可以提高LTES器件的传热性能；
- HTF和PCM之间的密度差可以形成浮力驱动流动，从而增强了液体PCM的流动性。直接接触式LTES设备显示最高的整体传热性能，表面积密度与导热油运行时的液滴尺寸和质量流量密切相关。

2.6 相变蓄冷技术

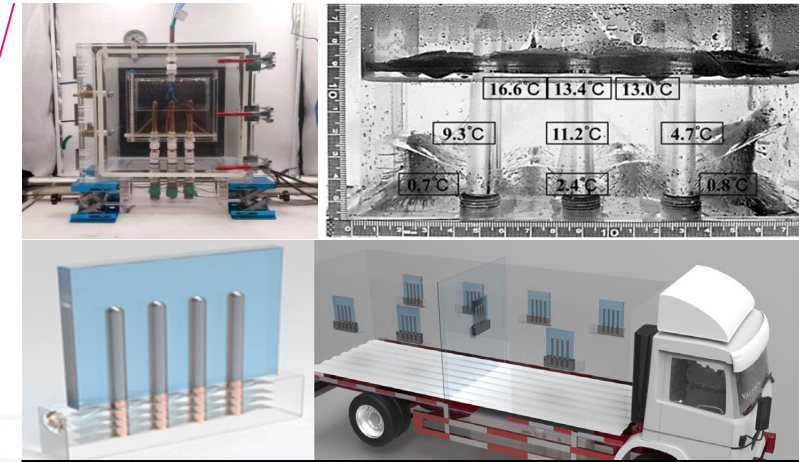
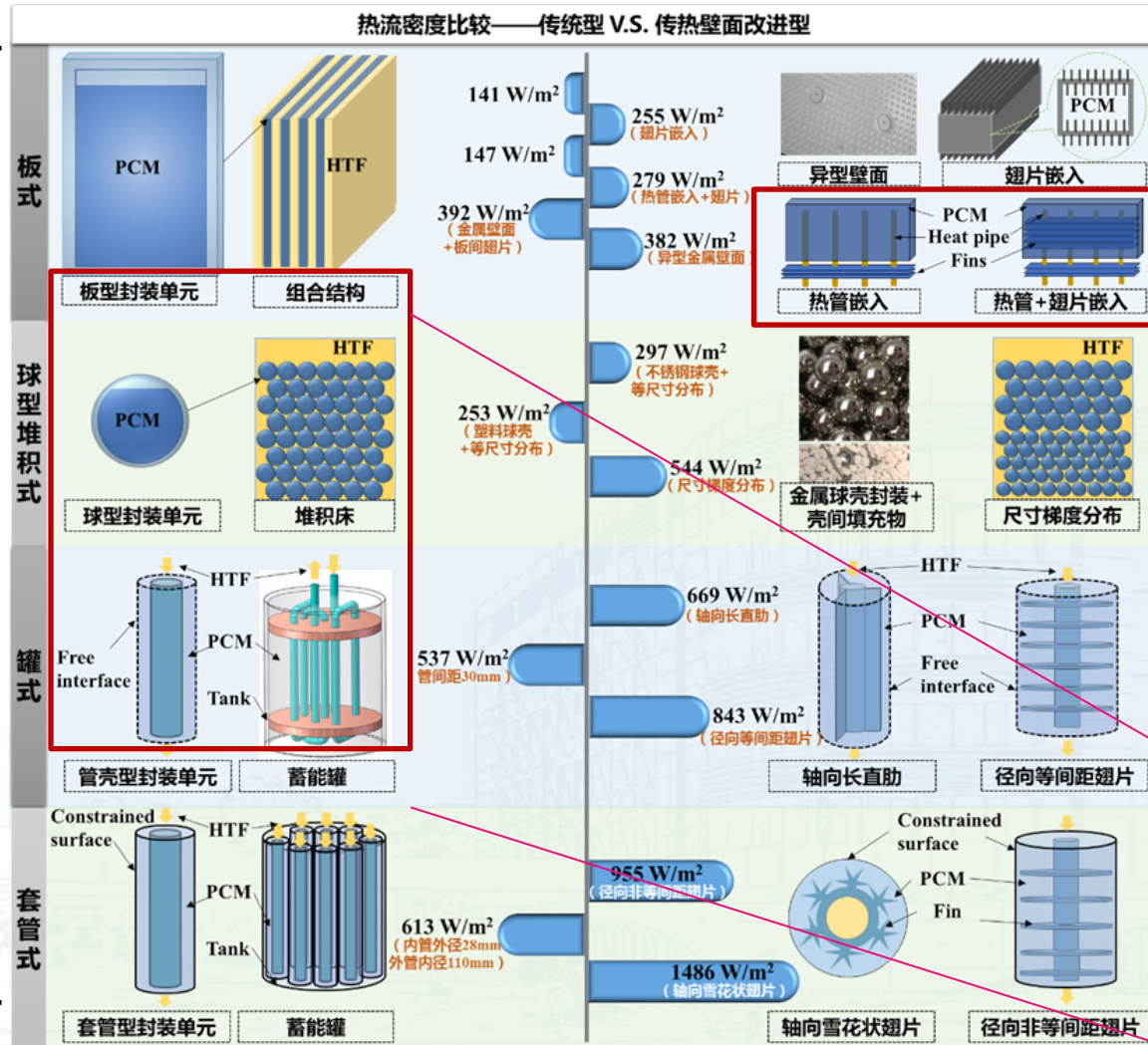
技术优点

- 利用相变材料潜热进行充/释能
- 具有较高的蓄能密度, 达到25~73 kWh m⁻³
- 稳定的运行温度
- 较长的循环使用寿命

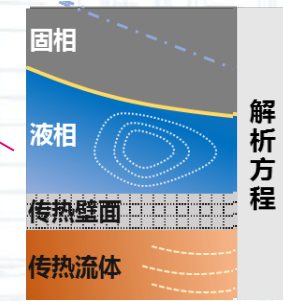
面临的技术问题

- 液-固相变过程
- 液相流动性差
- 相变材料导热系数低
- **传热性能差**
- 热分层、相分离

传热性能强化方法概览



热管嵌入式相变蓄冷板：强化充/释冷传热过程，利于与环境匹配控制



解析方程

$$\gamma \frac{dm_{PCM}}{dt} + C_{PCM}|T_1 - T_{PCM}| \frac{dm_{PCM}}{dt} = \text{能量守恒方程}$$

$$\varepsilon(t) \dot{m}_{HTF} C_{HTF} |T_{HTF,in} - T_{PCM,s}|$$

$$\varepsilon(t) = 1 - \exp[-NTU(t)] \quad \text{传热效率表达式}$$

$$NTU(t) = 1/[R_{total}(t) \dot{m}_{HTF} C_{HTF}] \quad \text{传热单元数表达式}$$

$$R_{total}(t) = R_{PCM}(t) + R_{wall} + R_{HTF} \quad \text{传热热阻表达式}$$

相变材料与传热流体间的解析建模：动态角度预测传热过程，实现装置整体传热过程的快速计算，利于装置控制及优化

2.6 相变蓄冷技术

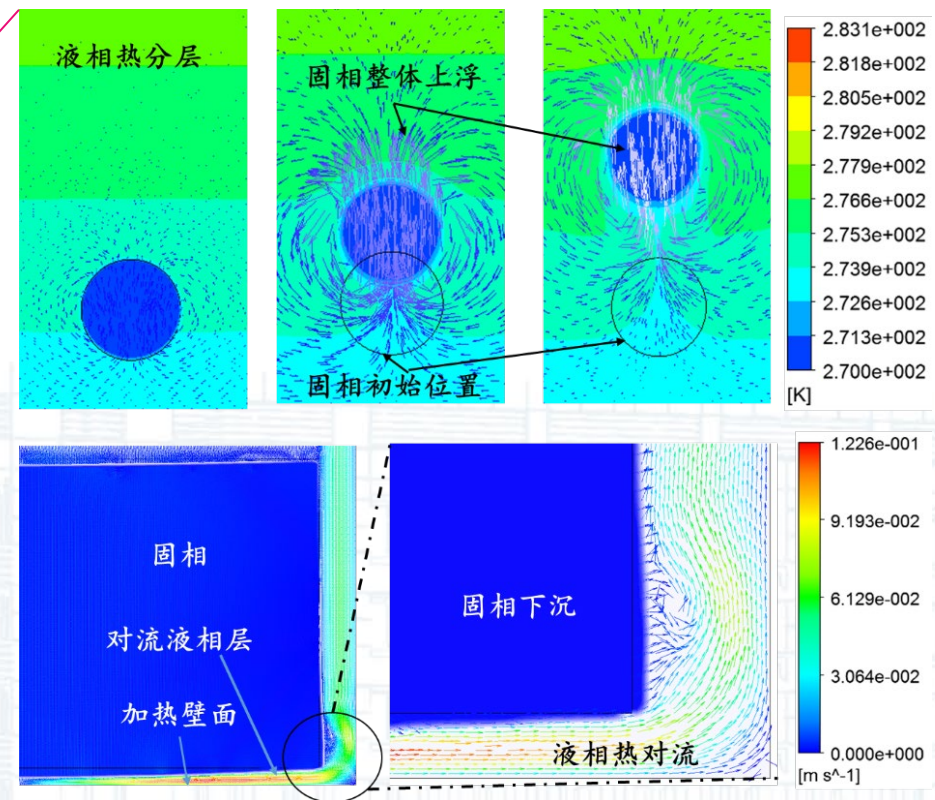
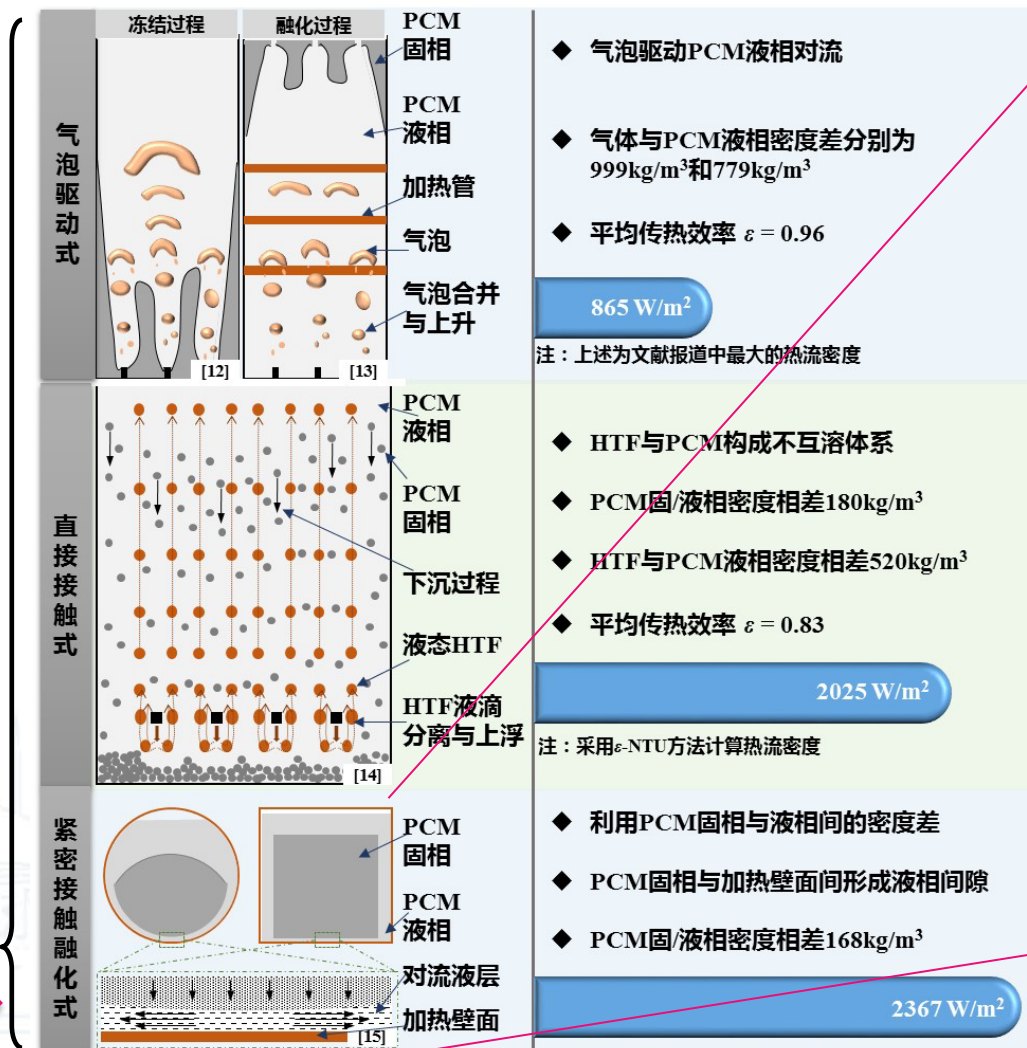
技术优点

- 利用相变材料潜热进行充/释能
- 具有较高的蓄能密度, 达到 $25\sim 73 \text{ kWh m}^{-3}$
- 稳定的运行温度
- 较长的循环使用寿命

面临的技术问题

- 液-固相变过程
- 液相流动性差
- 相变材料导热系数低
- 传热性能差
- **热分层、相分离**

流动性改善方法概览

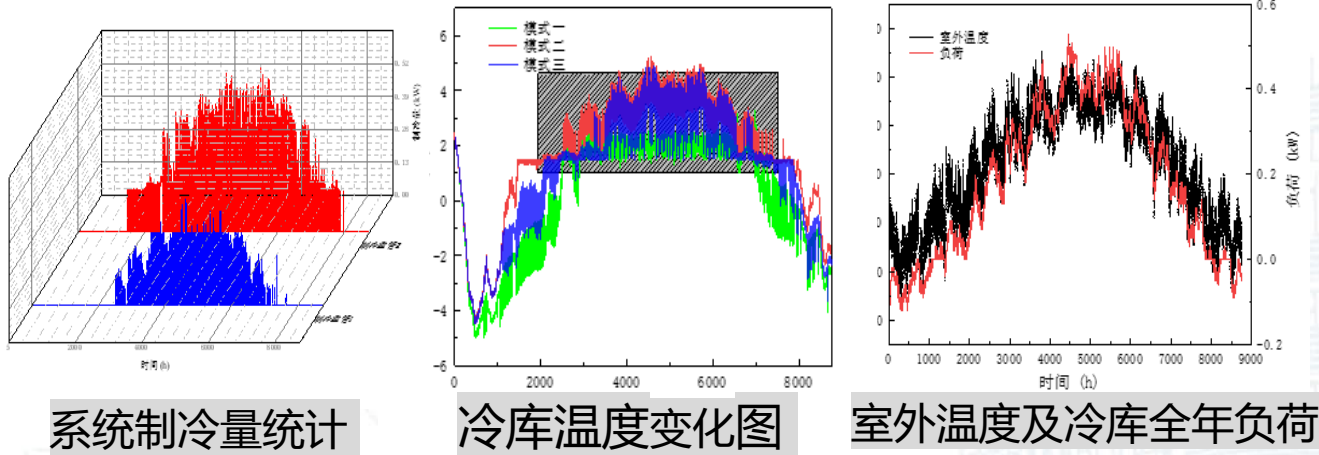


紧密接触融化 (Close contact melting) 的相界面跟踪模拟研究：采用连续介质假设实现了液-固密度差情况下的动态融化过程模拟，利于分析流动性改善的影响因素

2.7 可再生能源利用

光伏冰蓄冷冷库系统数值模拟及生命周期评价

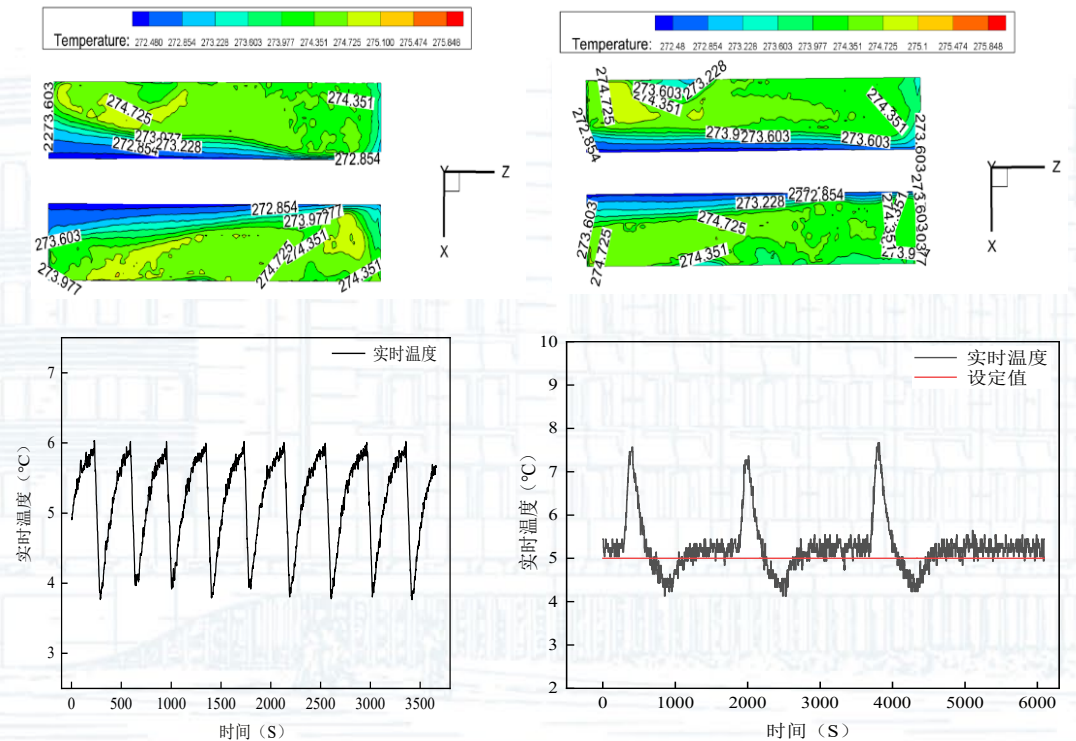
研究内容：通过模拟对比探究冷库系统运行性能与环境温度以及光照之间的匹配关系，并深入研究三种模式下冷库运行特性及光伏蓄能型冷库系统可行性与实用价值。搭建冷库全生命周期各阶段碳排放计算模型，核算冷库全生命周期各阶段的碳排放量。



- ❑ 光伏冰蓄冷冷库系统可以在满足冷库温度设定的前提下，降低电能的消耗起到节能减排的作用；
- ❑ 冷库在加入光伏板及蓄冷箱后可大大降低冷库运行阶段碳排放量；
- ❑ 冷库全生命周期各阶段碳排放量从小到大依此为：建筑施工阶段、建筑拆除阶段、建筑运行阶段、建材生产运输阶段。

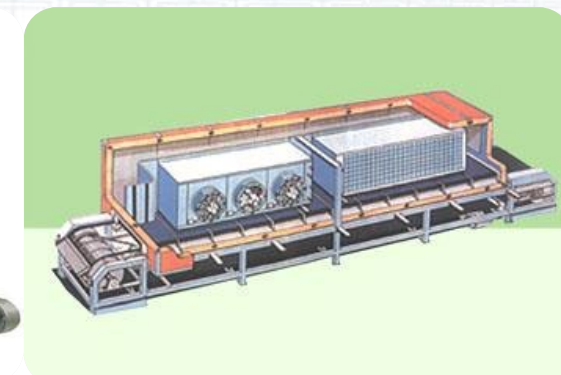
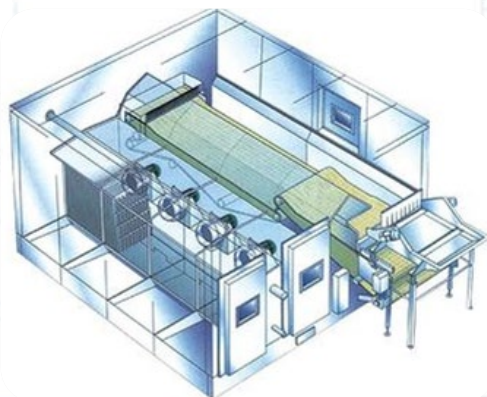
自然冷源贮藏库气流组织及控制策略研究

研究内容：针对自然冷源贮藏库的自然冷源供冷系统和控制系统进行优化设计，包括自然冷源引入引出结构的设计优化、自然冷源贮藏库监控系统的设计搭建、自然冷源引入策略的探索优化。

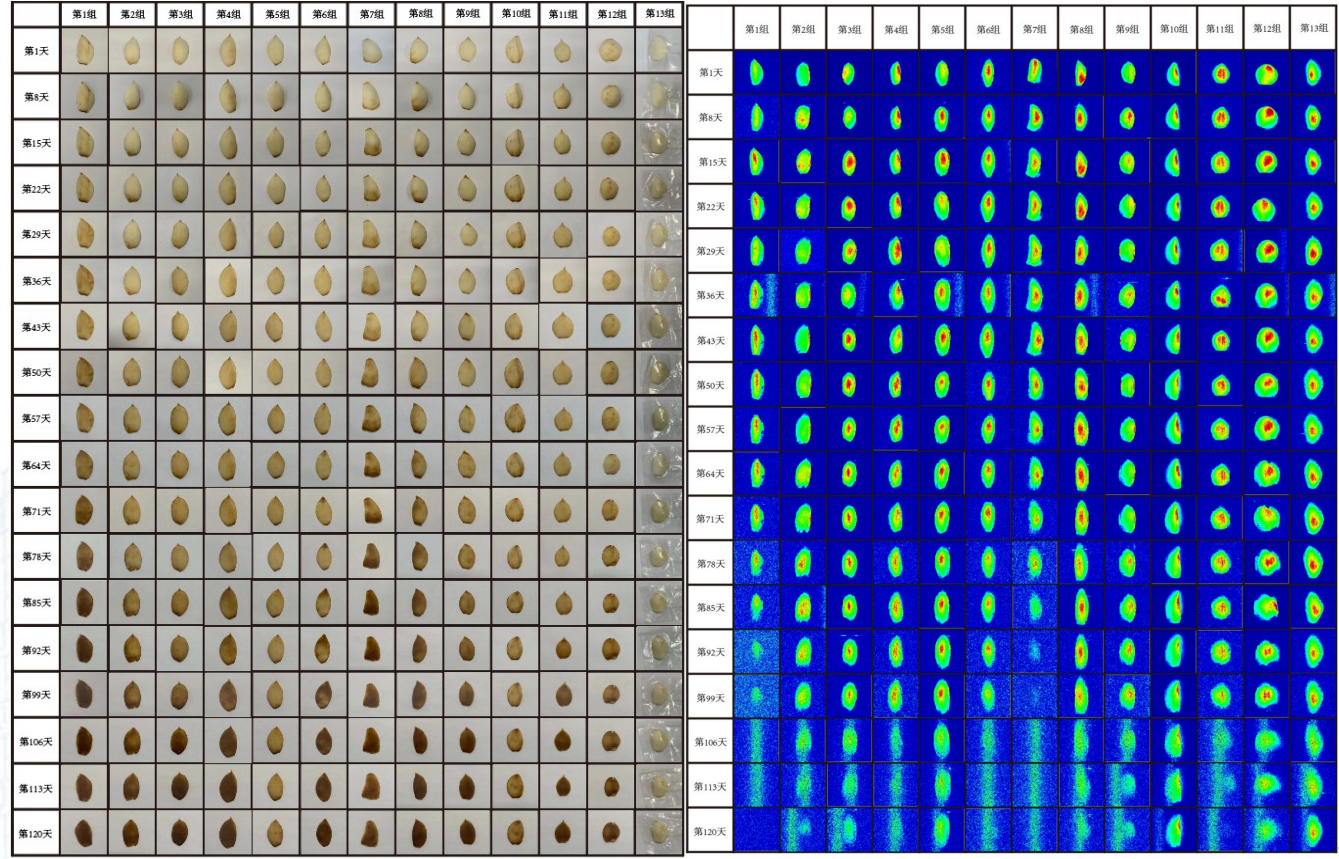
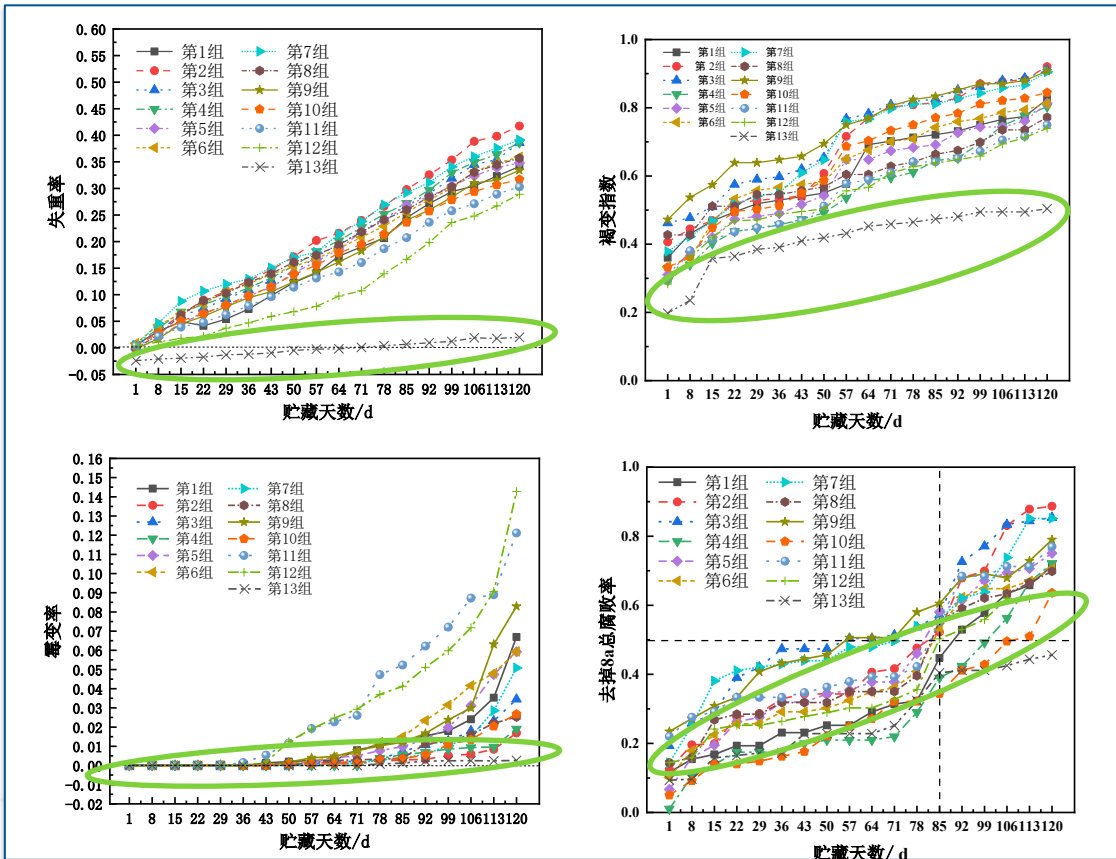


3

冷链工艺过程关键技术研究



3.1 生物保鲜及真空保鲜对果蔬贮藏过程的影响研究



不同保鲜方式下失重率、褐变指数、霉变率和腐败率变化

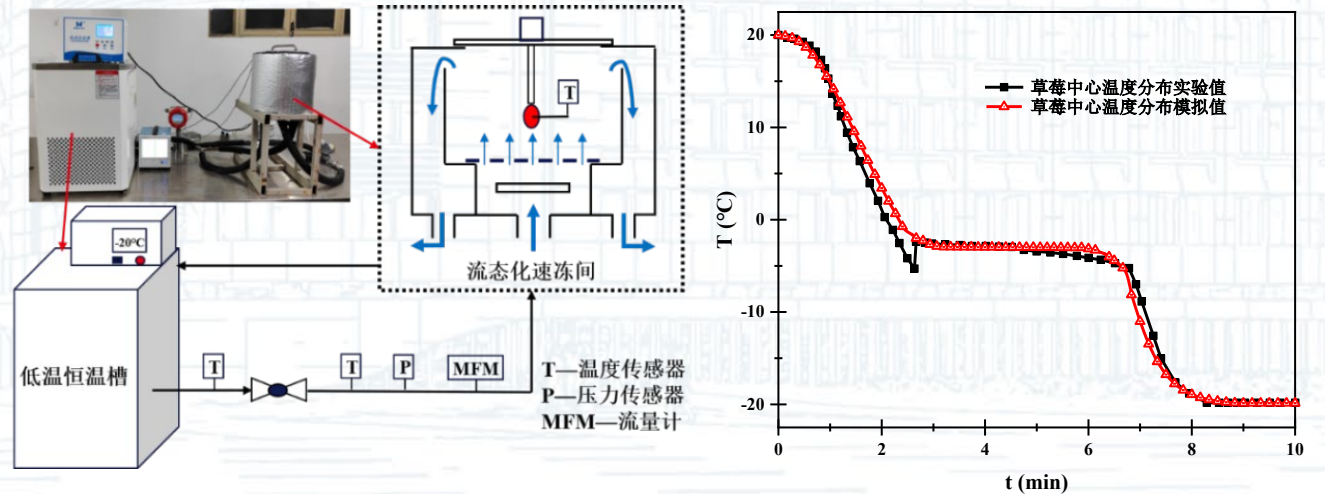
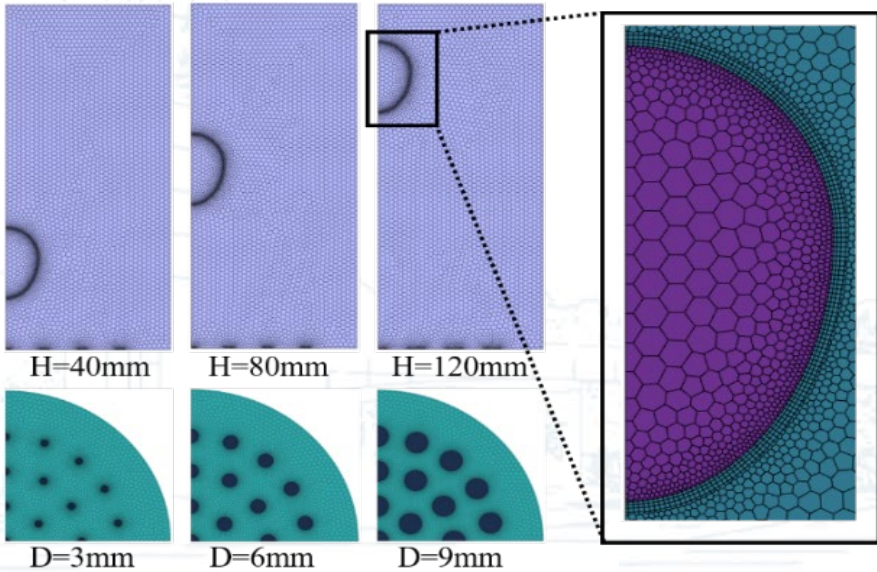
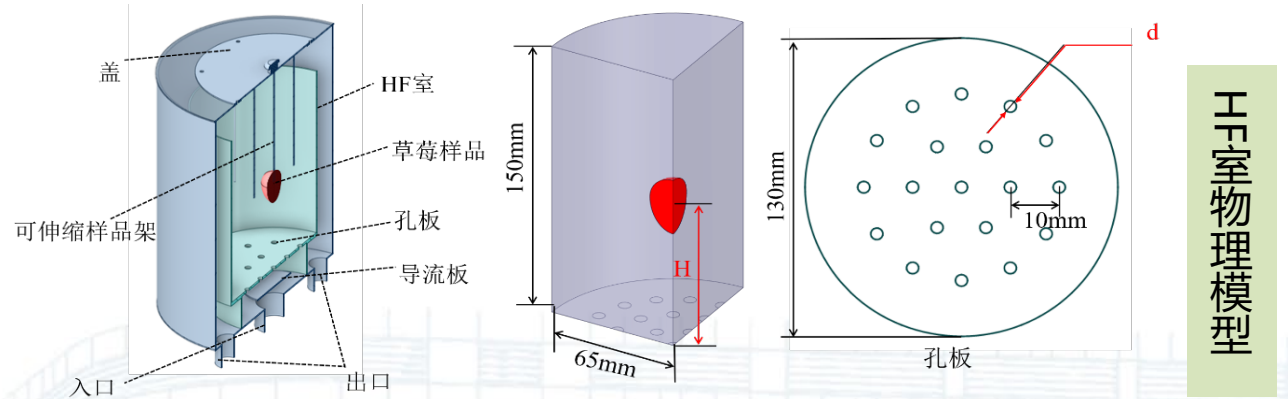
不同保鲜方式下鲜百合片贮藏期间实物图及磁共振成像图像

对比13组低温生物保鲜及真空保鲜实验发现，真空低温贮藏显著减少了百合失重率、褐变指数、霉变率和腐败率的影响，研究的低温真空复合保鲜法，将兰州百合贮藏期从3个月提升至6个月。

3.2 食品冻结技术

CaCl₂溶液中草莓流态化速冻过程的影响

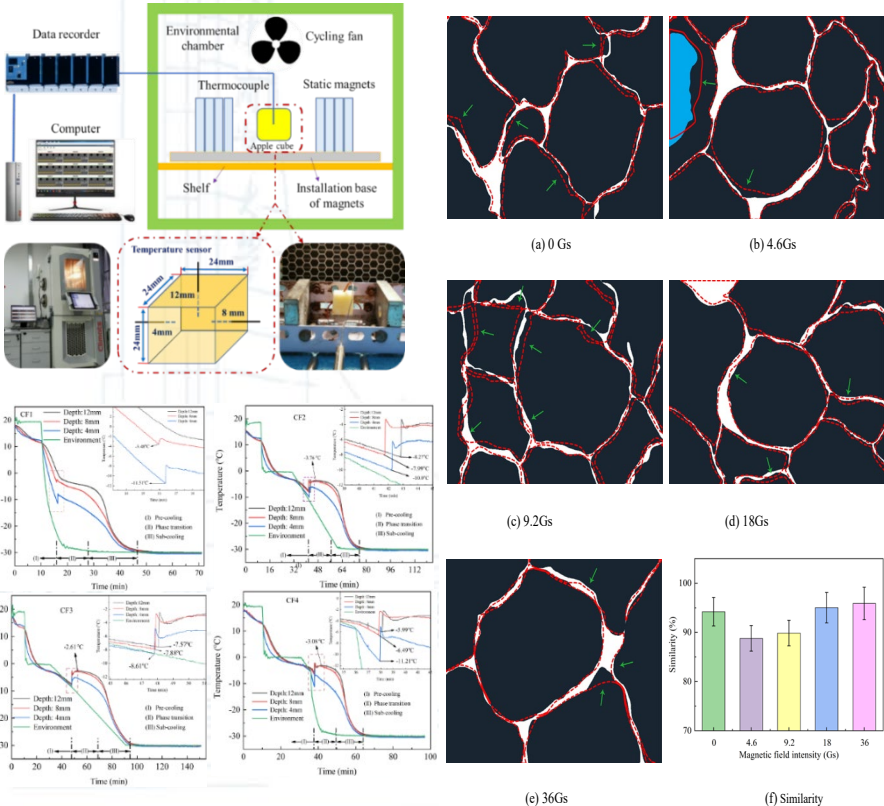
- 通过CFD Fluent对CaCl₂溶液中草莓流态化速冻过程进行数值模拟，分析几何布置对冻结过程传热传质的影响。
- 建立了HF过程的实验装置，通过实验与数值模拟结果进行比较



3.2 食品冻结技术

关键理论

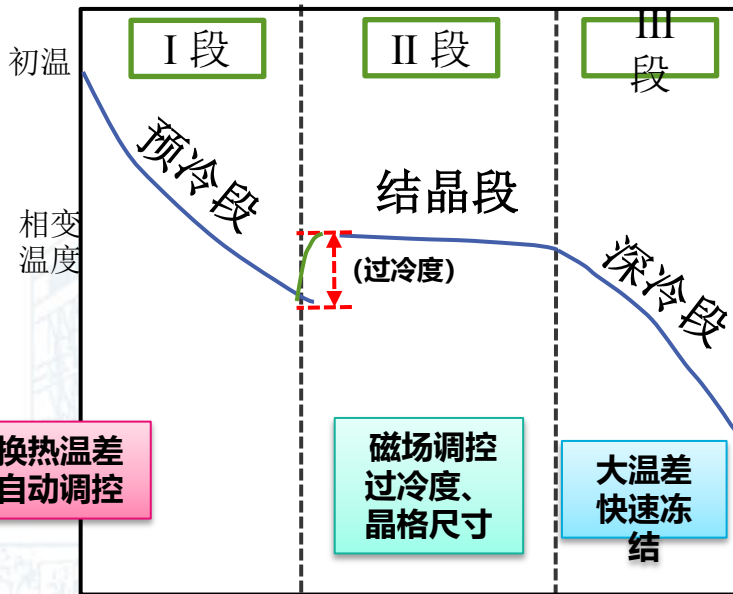
电/磁场多协同微晶化机制



电磁场协同冷冻微晶化技术

新技术

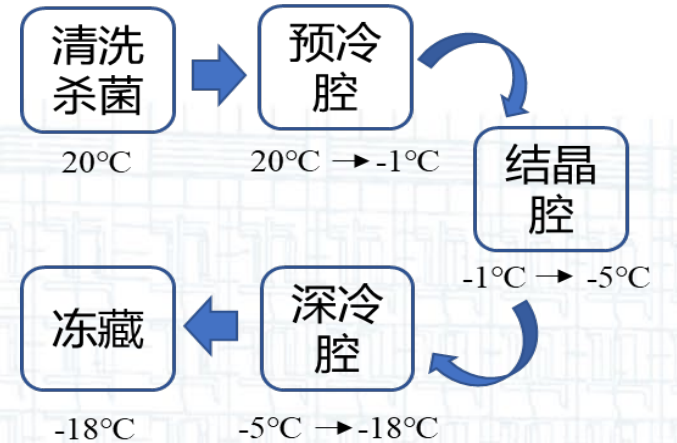
三段式磁场微晶化冷冻技术



三段式磁场微晶化冷冻技术

新应用

微晶化冷冻产业化技术规程



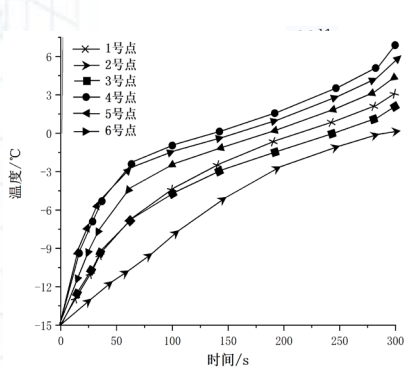
3.3 冻结食品解冻技术

不同条件下射频解冻技术研究

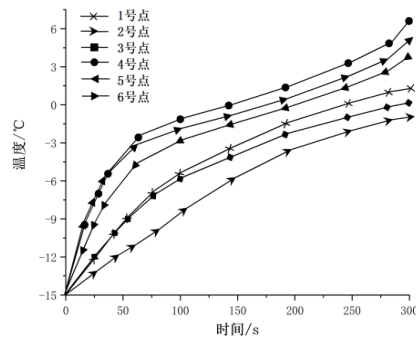
采用实验和COMSOL模拟的方法对冷冻羊后腿肉的射频解冻过程进行研究

射频解冻实验研究

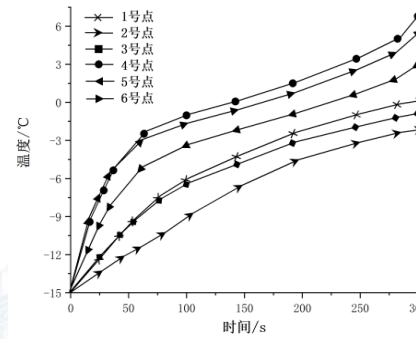
射频解冻数值模拟



(b)2cm



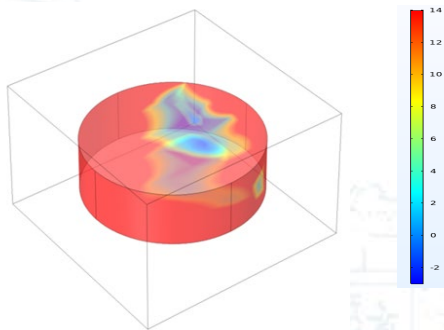
(b)2.5cm



(b)3cm

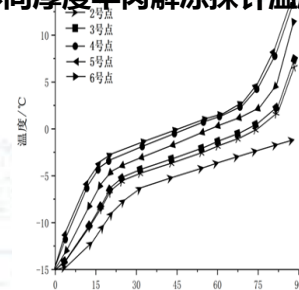
不同厚度的羊肉表面的温度分布存在明显的差异，2cm厚度的羊肉解冻后温度均匀性最好，2.5cm厚度的羊肉解冻后温度均匀性一般，3cm厚度的羊肉解冻后局部过热现象明显。

当相对湿度为90%时，由于环境相对湿度较高，肉块边角处由于加热而干燥的现象得到缓解，使得肉块的汁液损失率降低。



(a)整体温度分布

不同厚度羊肉解冻探针温度变化图



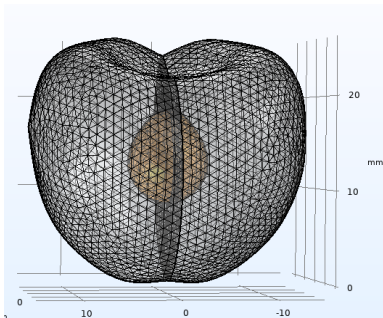
(b)探针温度变化图

微波解冻温度场及各探针温度变化图

- 在-20~10°C范围内，羊肉的介电常数随温度的升高而增大，在-20~-10°C范围内缓慢增大，在-10~-1°C范围内快速增大；在-1~10°C范围内，羊肉的介电常数基本不变。
- 对于射频解冻不同厚度的肉块，厚度越小的肉块解冻后温度更均匀，解冻后品质差别不大。

3.4 低温电磁场耦合保鲜技术

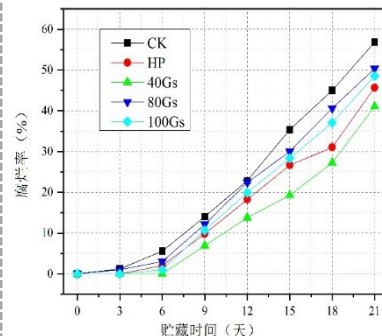
樱桃水预冷传热模型及实验台



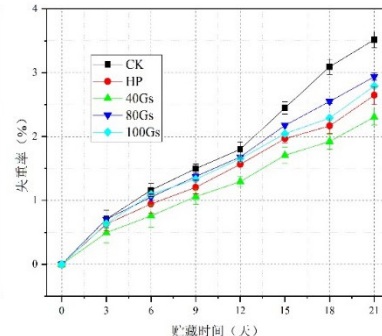
樱桃水预冷传热模型

低温电磁水预冷试验台

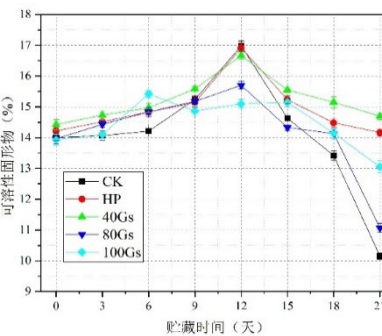
实验研究



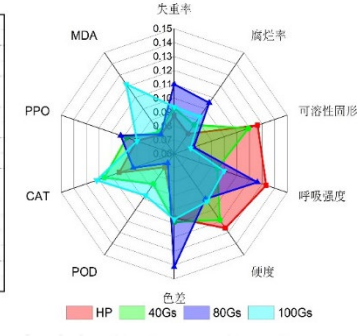
腐烂率



失重率

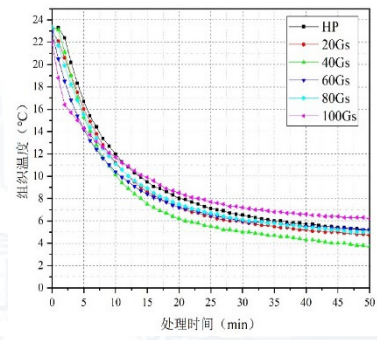
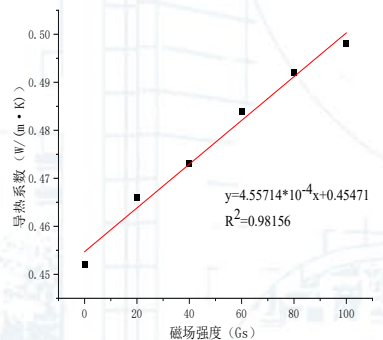


可溶性固形物



性能指标

实验研究



适宜强度的电磁处理可有效提高果蔬水预冷效率

□ 40Gs磁场强度作用下水预冷处理腐烂率、失重率指标均低于对照组，保鲜效果最佳

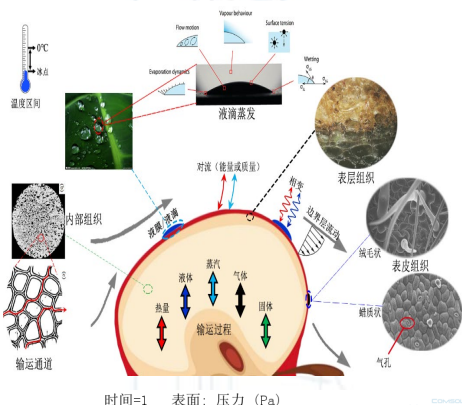
□ 低温电磁场耦合保鲜技术不仅可实现果蔬的精准水预冷工艺优化，同时基于磁化效应，可有效提高预冷效率及保鲜品质，解决了水预冷工艺差引发的系统高能耗问题，同时有效缓解了果蔬水预冷后保鲜品质差的现状，具有显著的经济社会效益

□ 国家自然科学基金：电磁场影响果蔬水预冷过程热质传递特性与病原菌活性的机理研究 (项目资助号: No.51906178)

3.5 冰温保鲜机理与高精度环控技术开发

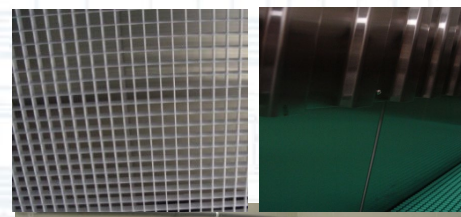
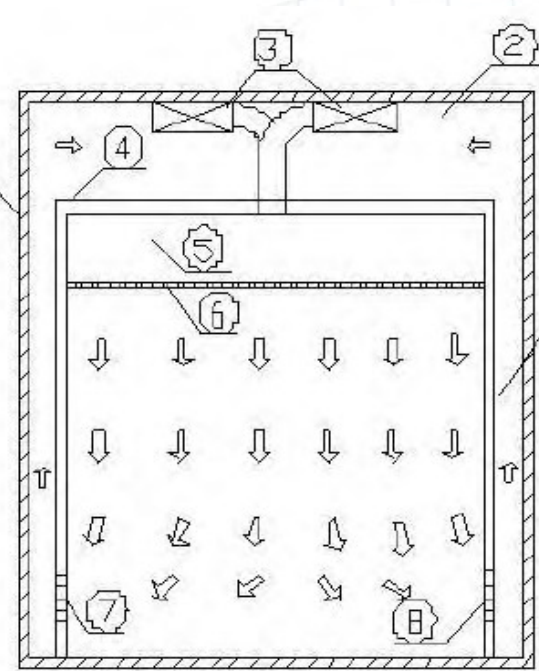
- 弱势差下果蔬传热传质过程；
- 果蔬适应低温环境机理。

- 采用夹套结构提高围护结构的抗热干扰能力；通过静压箱结构将冷空气的动压转化为静压，实现冷量的均匀输送。
- 采用压缩机变频技术或多机器并联技术，通过先进控制算法，实现制冷系统制冷量与冷库热负荷的实时匹配。

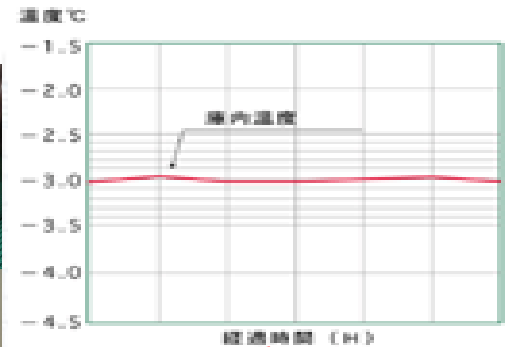


自适应抗冷害调控技术

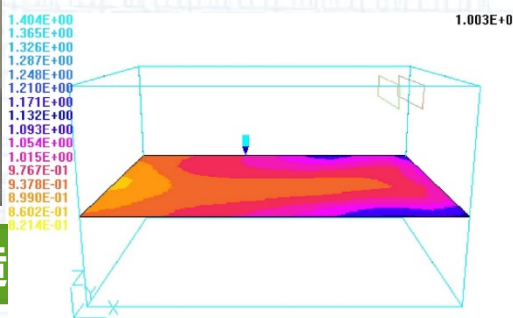
预冷	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 快速去除田间热 	
抗冷害驯化	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 分子诱控 ◆ 激发酶活 ◆ 胶质相变 	
冰温贮藏	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 低温抑制生理活动 ◆ 精准控温调控水分迁移 	<p>温度： $-0.7^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$</p>



围护结构一体化构造

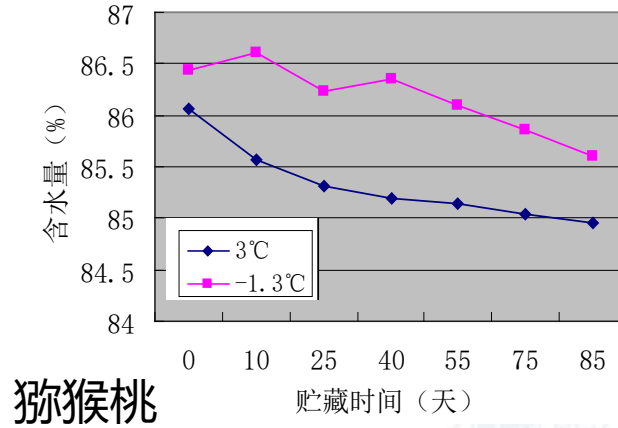
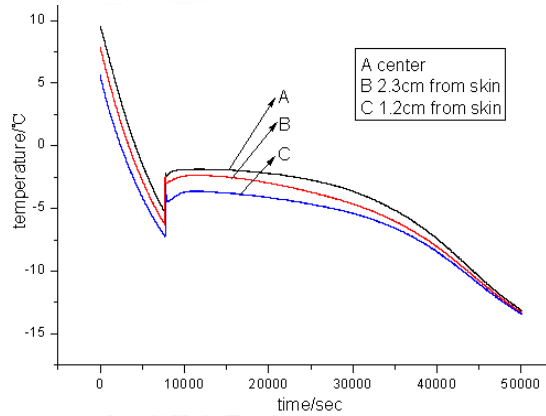


控温精度达0.05°C



3.5 冰温保鲜机理与高精度环控技术开发

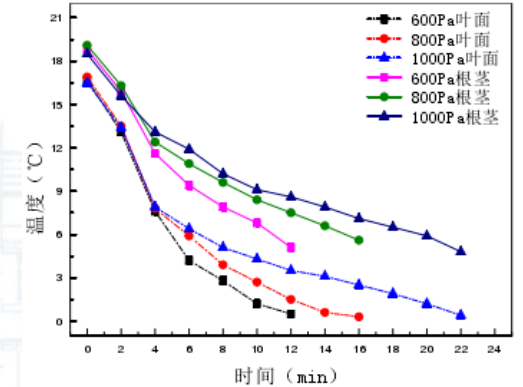
冰温贮藏保鲜技术



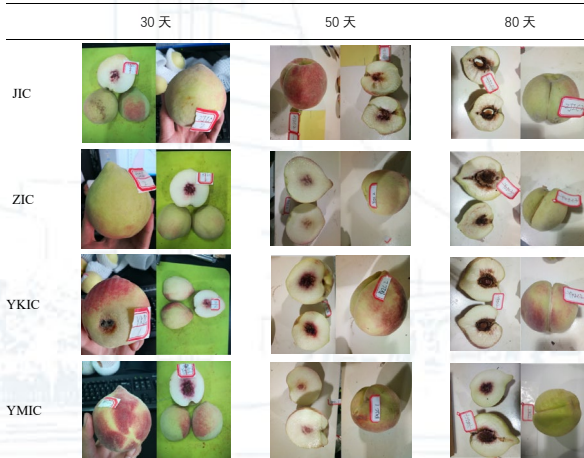
猕猴桃

冰温真空干燥技术

- 保持良好的组织结构；冰温诱导，提高品质
- 抑制微生物生长，延长贮藏期



自主开发的冰温真空干燥装备



深州蜜桃



鸭肉 (-1°C, 10天)



传统干燥



冰温真空干燥



传统干燥

VS

枸杞



冰温真空干燥

3.5 冰温保鲜机理与高精度环控技术开发

冰温保鲜

冰温保鲜 — 油菜



类别	青椒	豆角	大葱	白菜	西兰花	芹菜	生菜	油菜	枸杞
普通冷藏	25天	15天	15天	20天	30天	30天	15天	15天	7天
冰温储藏	55天	40天	30天	55天	60天	60天	40天	60天	45天

VS

传统保鲜



普通冷藏保鲜 - 油菜

普通冷藏 **15天**左右腐烂率达到 **10%**

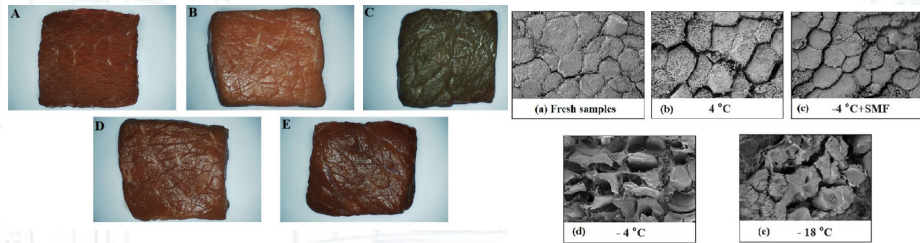
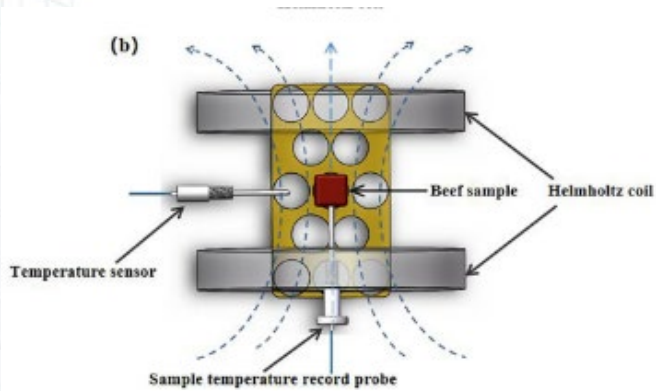
冰温储藏则储藏 **60天** 才会出现腐烂现象

3.6 物理场保鲜技术

磁场辅助保鲜

水分子有一定的极性，在磁场的作用下可以发生一定的偏转，从而影响生鲜食品的冻结相变过程。

物理场辅助保鲜技术



与常规方法相比，磁场可以显著增大冻结过程中的过冷度，降低肉的滴水损失。

光照保鲜工艺

- 不同光源光谱特性研究
- 不同果蔬光敏性研究



高压静电场保鲜技术

电磁对食品中水分子状态和微生物都有一定的影响，恰当的电场还有消杀作用。



对照 高压静电场



实验用高压静电场保鲜装备

3.7 绿色安全保鲜剂

微生物源保鲜剂

植物源保鲜材料

酵母: 筛选出两种有较高抑菌活性的生防酵母菌—隐球酵母菌YC-5和假丝酵母菌YC-9, 可有效减少贮藏期腐烂率。

细菌: 筛选出枯草芽孢杆菌B579、B001、解淀粉芽孢杆菌B1和HB-2, 分析了挥发性抑菌物质、抑菌蛋白, 研究了保鲜时效性。

- 以丁香、肉桂、芥末、香茅为原料, 研究不同提取方法对精油成分的影响, 确定了适宜的提取工艺及参数。
- 明确精油对采后主要致病菌 (灰霉菌和青霉) 的单独和复合抑制效应, 对果蔬保鲜效果的影响。

芽孢杆菌菌粉

筛选→亲缘鉴定→拮抗作用→抑菌蛋白→保鲜效果

防腐

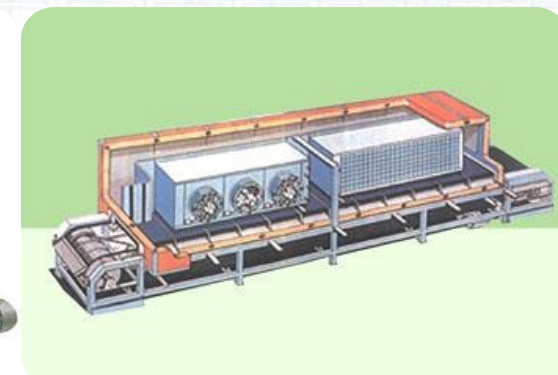
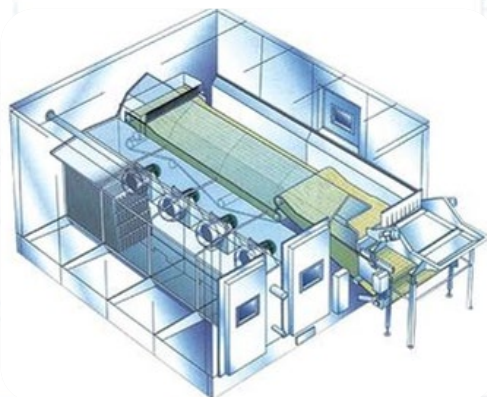
抑芽

驱虫

植物原料→不同提取方式→植物精油→离体效果→剂型开发→保鲜研究

4

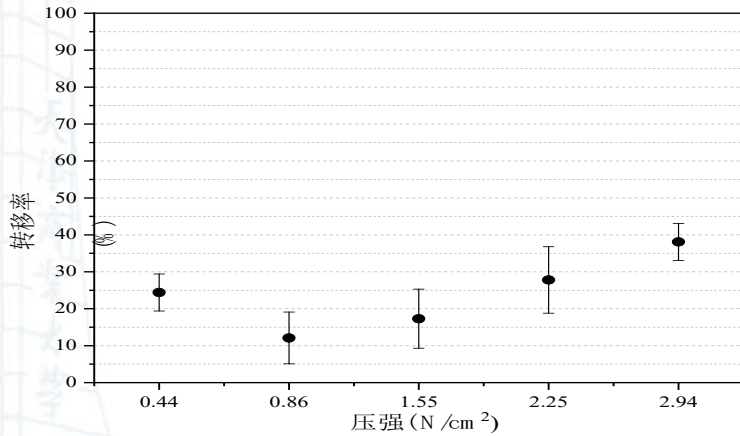
冷链环境关键技术研究



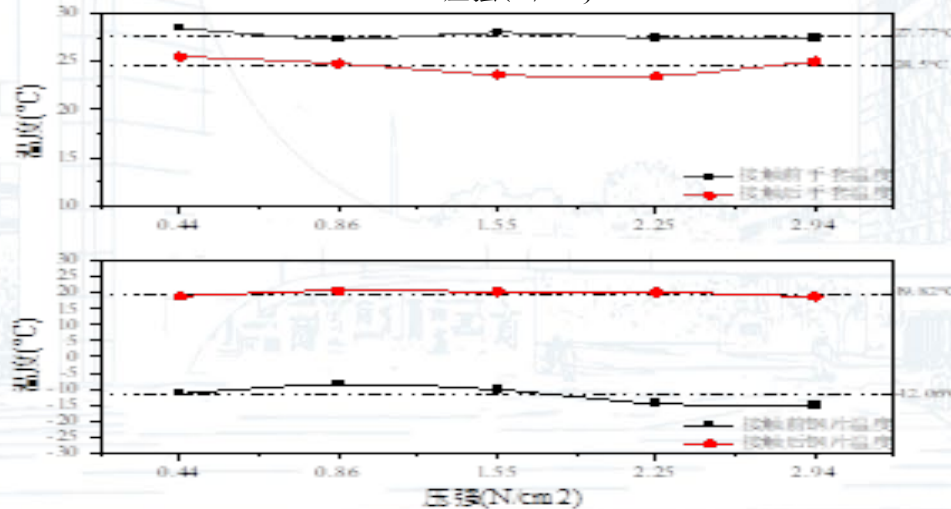
4.1 冷链环境病原微生物防控

微生物在冷链低温环境中的传播特性研究

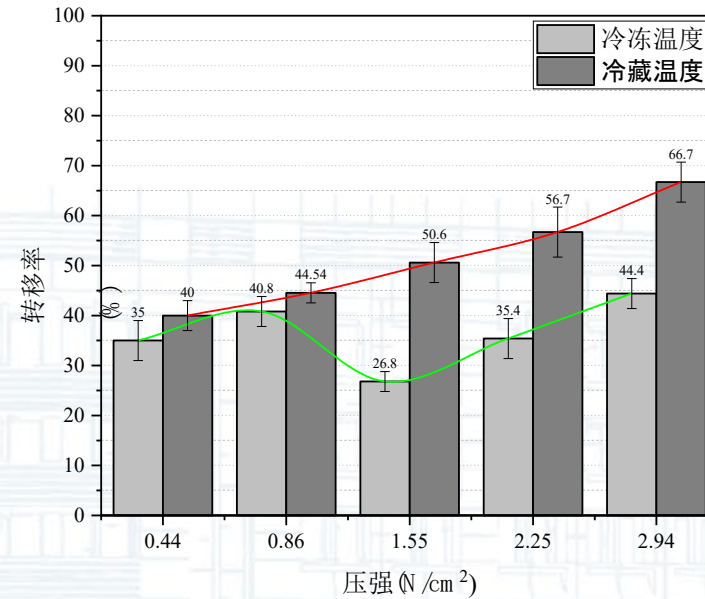
橡胶手套的转移率与接触压力的关系



不同压力下的转移率



棉质手套的转移率与接触压力的关系



棉质手套在不同温度下的转移率的对比图

针对微生物在冷链环境中的传播问题，探究冷表面上通过表面接触的二次传播规律，同时去建立微生物冷表面上接触传播的预测模型

4.1 冷链环境病原微生物防控



表面消杀模块

- UVC-LED消杀技术
- 便携式手持紫外消杀装置

智能负压净化通风模块

- 紫外辐照+等离子体电子束
- 智能新风排风负压一体机开发
- 核心疏水分子筛无机多孔催化+碳基环保消杀材料



集装箱内部消杀模块

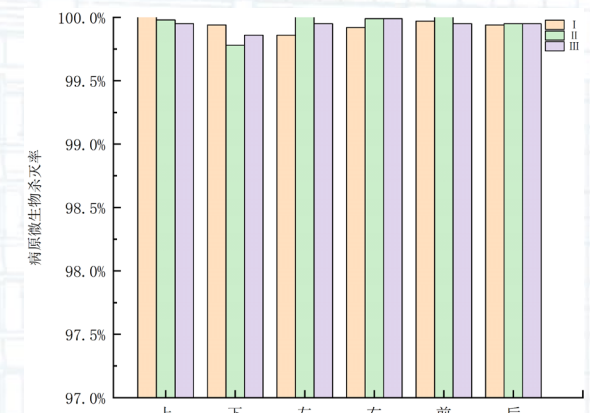
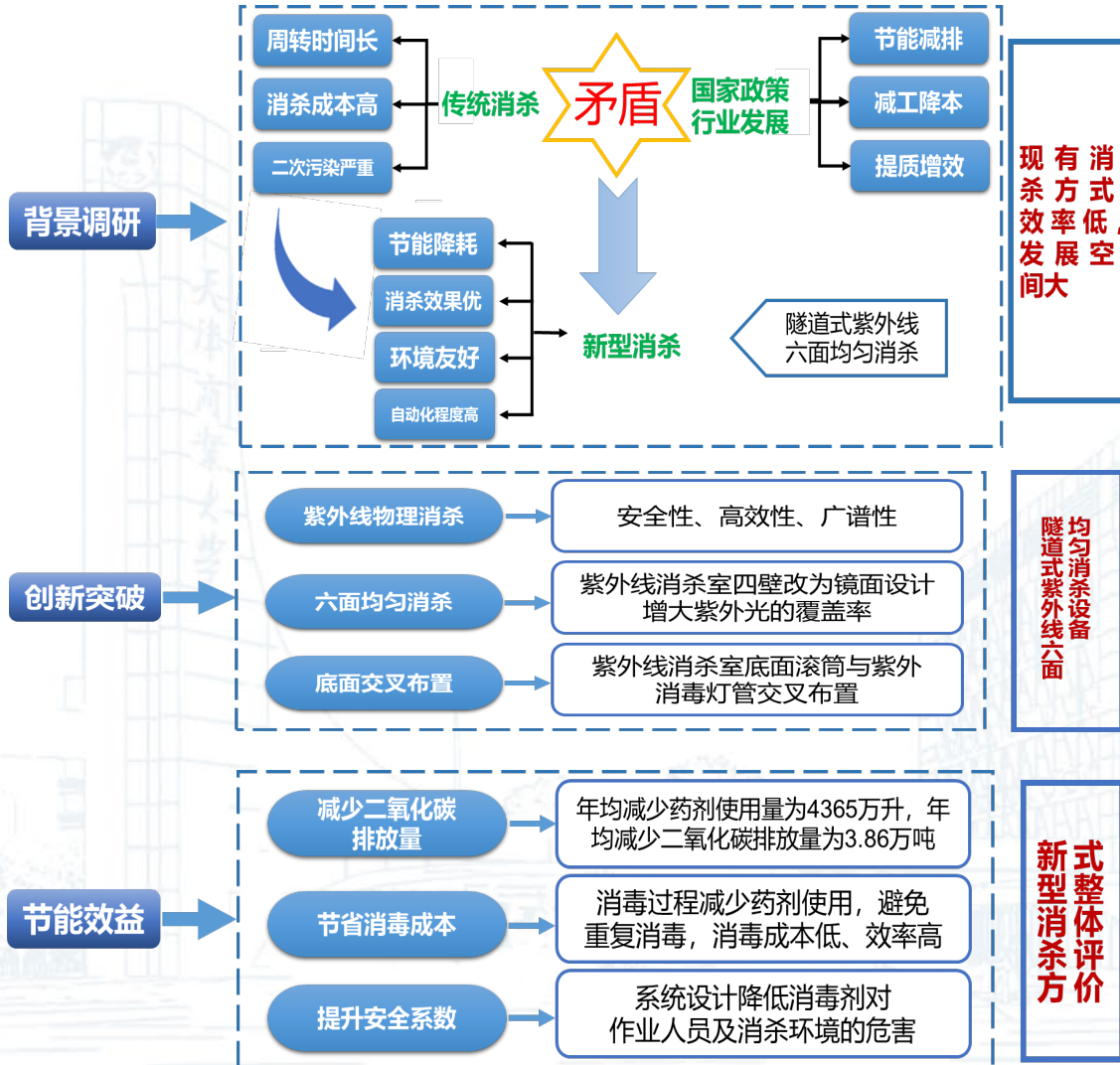
“五位一体”消杀模块

- 防护服的化学药剂喷淋
- 缓冲间“五位一体”空气净化技术
- 智能新风负压系统、洁净空气输送管路、空气净化消毒系统和功能材料的联合

外包装六面消杀模块

- 紫外与光催化耦合技术、复合波准分子灯紫外消杀技术、链条式自动六面消杀装置开发

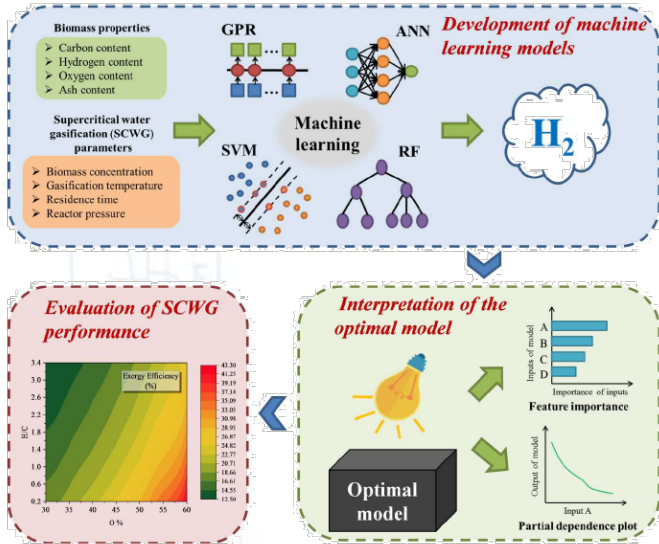
4.1 冷链环境病原微生物防控



□ 货品六面试验菌落杀灭率均大于**99.9%**

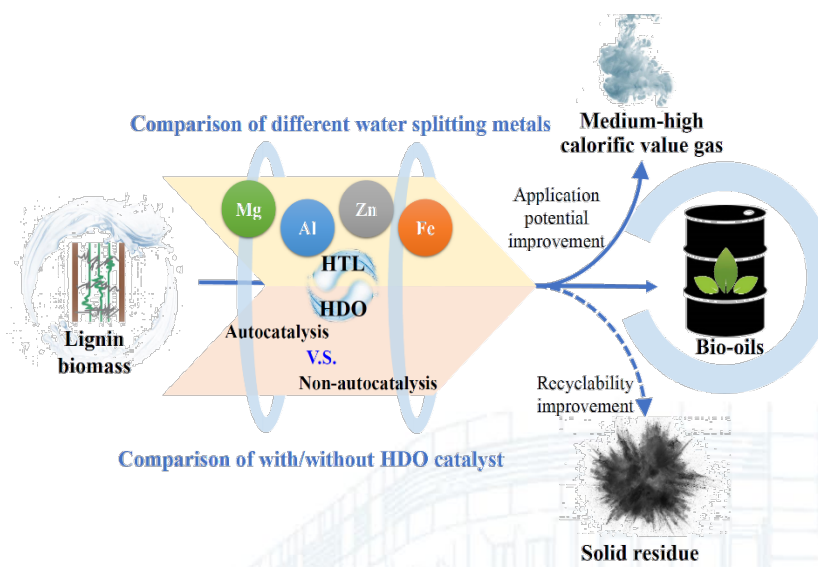
□ 每件货物消杀时间可减少至**15s**以内

4.2 冷链物流固废能源利用技术研究



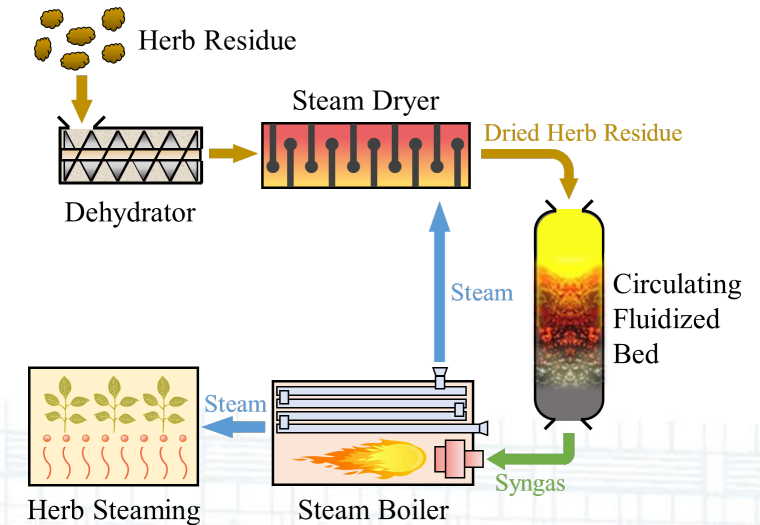
能源化过程数值建模^[1]

- ❑ 冷链固废反应过程机器学习建模
- ❑ 利用敏感性分析赋予黑箱模型可解释性



热解-提质制油^[2]

- ❑ 冷链固废热解-提质制备车用油
- ❑ 通过催化剂研发提高生物油品质与产率



湿基原料干燥-气化-燃烧回用^[3]

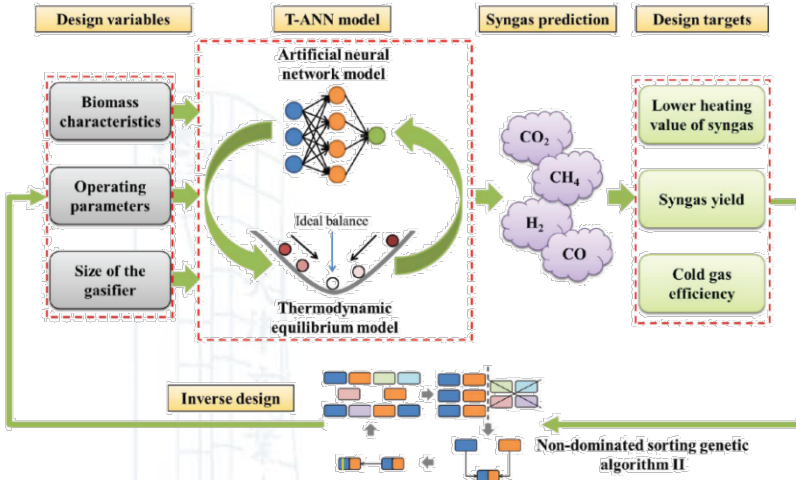
- ❑ 湿基冷链固废气化制备燃气，燃气燃烧用于原料干燥
- ❑ 物质流与能量流评估优化

[1] Sheng Zhao, Jian Li, Chao Chen, Beibei Yan, Junyu Tao*, Guanyi Chen. Interpretable machine learning for predicting and evaluating hydrogen production via supercritical water gasification of biomass[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 316: 128244.

[2] Jian Wang, Zibiao Liu, Jian Li, Beibei Yan, Junyu Tao*, Zhanjun Cheng, Guanyi Chen. In-situ hydrodeoxygenation of lignin via hydrothermal liquefaction with water splitting metals: Comparison between autocatalytic and non-autocatalytic processes[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 47(11): 7252-7262.

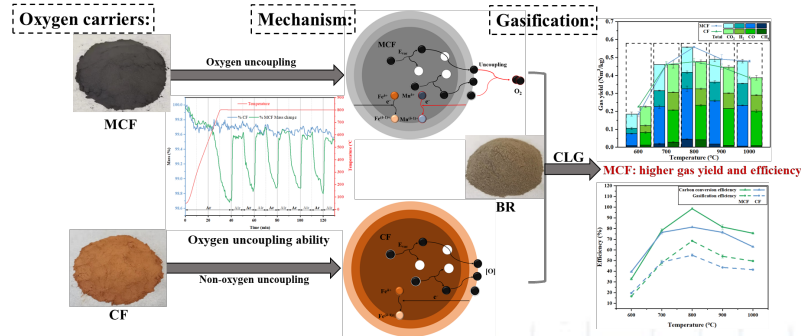
[3] Lei Dong, Junyu Tao**, Zhaoling Zhang, Beibei Yan, Zhanjun Cheng*, Guanyi Chen. Energy utilization and disposal of herb residue by an integrated energy conversion system: A pilot scale study[J]. Energy, 2021, 215: 119192.

4.2 冷链物流固废能源利用技术研究



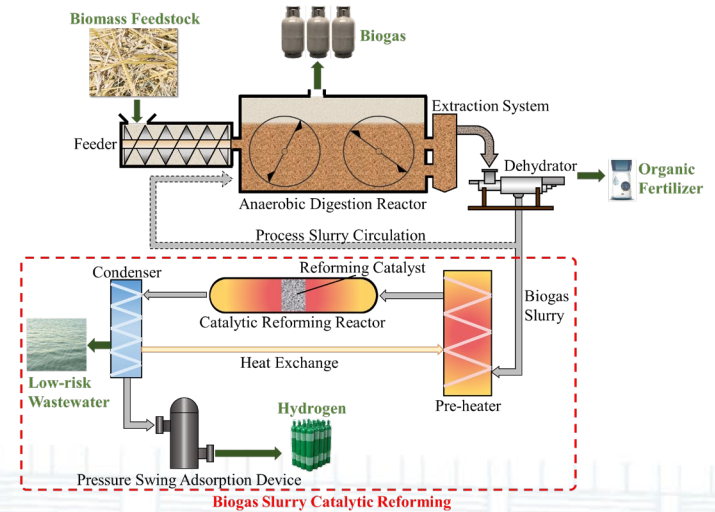
反向设计与优化^[1]

- 机器学习模型与启发式算法结合，对冷链固废气化过程进行高自由度优化



化学链气化制氢^[2]

- 冷链固废化学链气化制氢
- 通过载氧体优化提高原料转化率与氢气产率



厌氧发酵-催化重整耦合利用^[3]

- 冷链固废厌氧消化产沼气，沼渣液热化学催化重整制氢
- 能量与环境效益全面评估优化

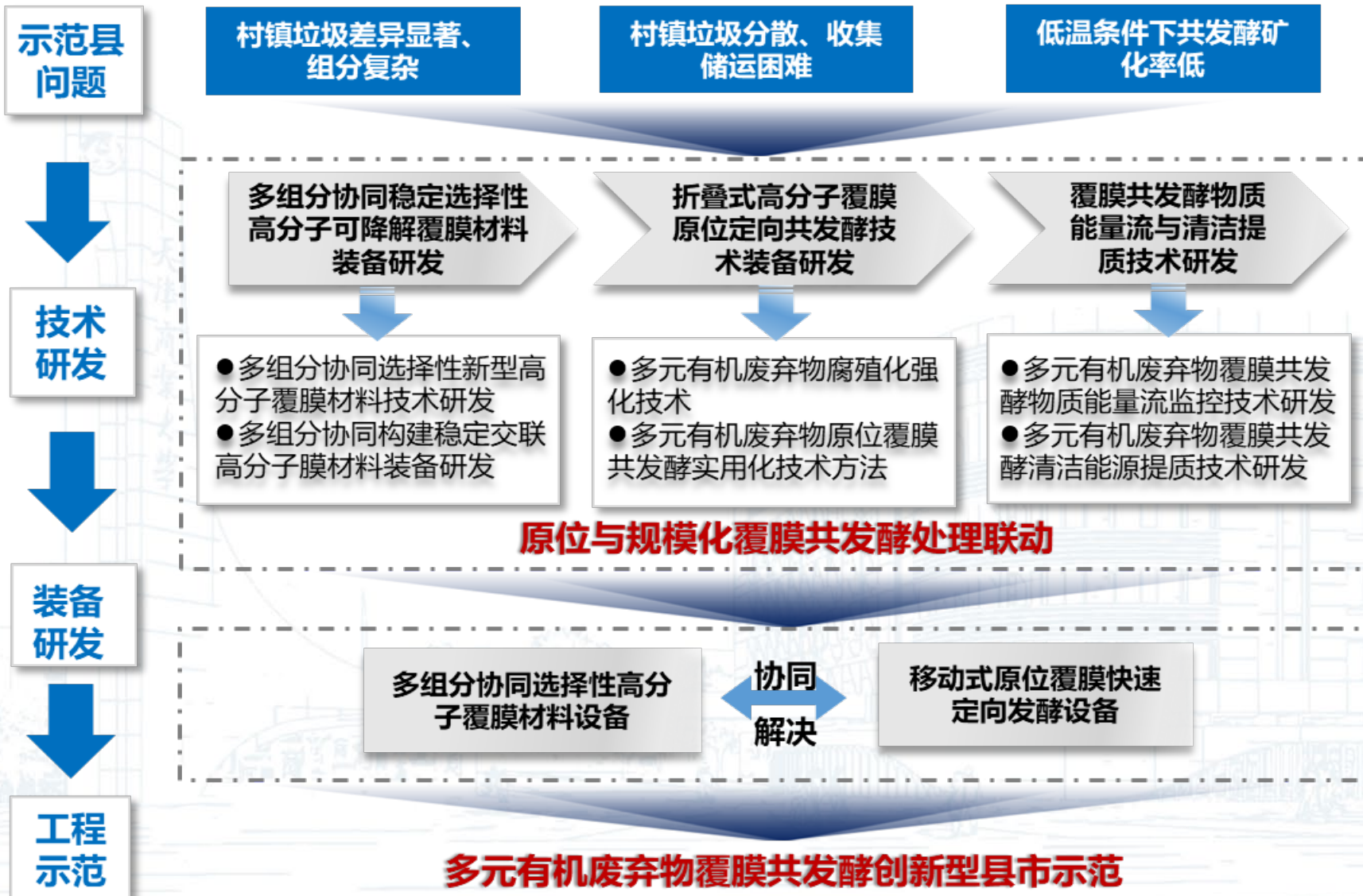
[1] Beibei Yan, Sheng Zhao, Jian Li, Guanyi Chen, Junyu Tao*. A conceptual framework for biomass gasifier design using a semi-empirical model and heuristic algorithm[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 427: 130881.

[2] Beibei Yan, Zibiao Liu, Jian Wang, Yadong Ge, Junyu Tao*, Zhanjun Cheng*, Guanyi Chen. Mn-doped $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ oxygen carrier for chemical looping gasification of biogas residue: Effect of oxygen uncoupling[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 446: 137086.

[3] Junyu Tao, Jian Li, Beibei Yan*, Guanyi Chen*, Zhanjun Cheng, Wanqing Li, Fawei Lin, Lian Hou. Catalytic Reforming: A Potentially Promising Method for Treating and Utilizing Wastewater from Biogas Plants[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(1): 577-585.

4.3 全冷链多元有机废弃物覆膜共发酵利用技术

成果示范推广及应用前景



□ 山东寿光集成示范



尾菜收集与循环利用示范示范基地

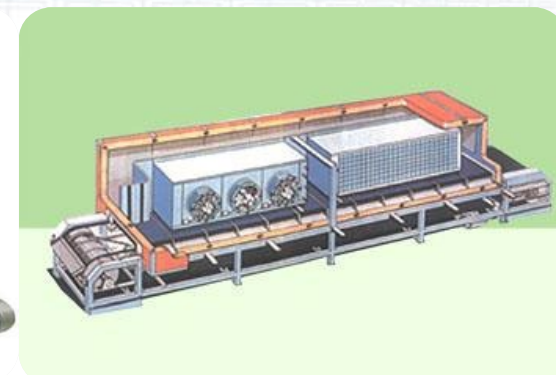
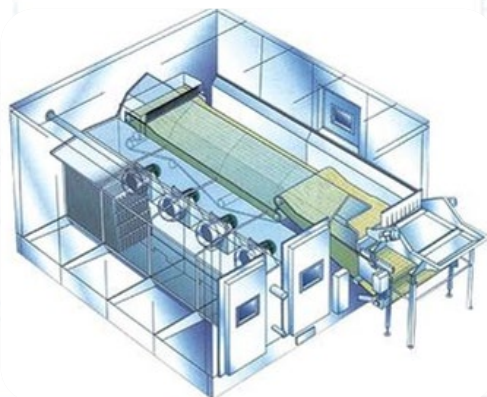
□ 辽宁喀左示范基地



设施尾菜田间原位发酵田模式

5

冷链物流管理关键技术研究



5.1 冷链碳足迹

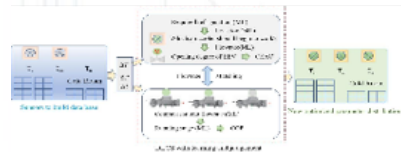
冷链碳足迹计算及减排技术研究

研究内容：针对冷链各环节能耗碳排放高的问题，进行碳排放计算方法和节能减碳关键技术研究。

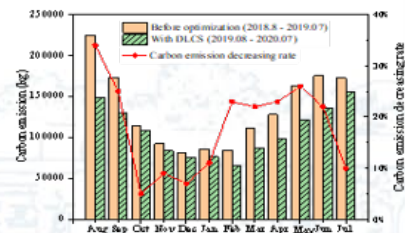
研究结论：碳排放计算方法确定冷库贮藏环节减碳率达19.95%、末端配送环节减碳率97.95%-98.78%。



冷库低碳节能控制技术研究

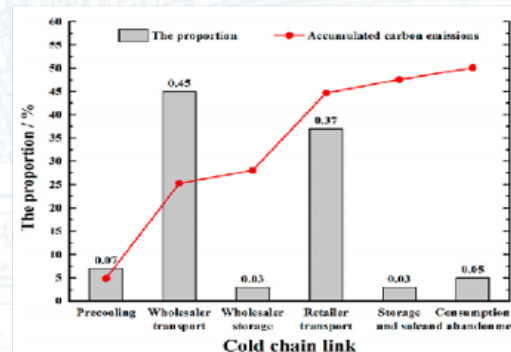


冷库压缩机组、节流装置和冷风机电态联动控制优化

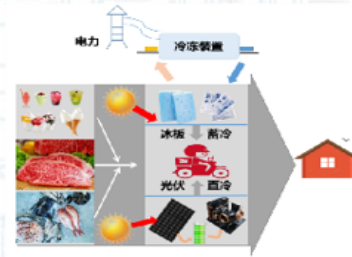


年减碳
320840kg
减碳率19.95%

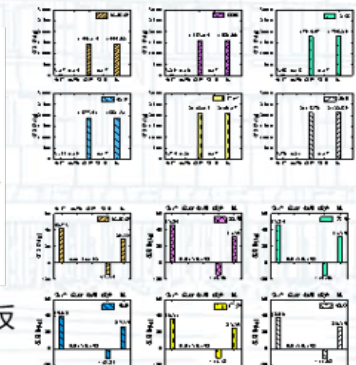
冷链配送环节碳排放计算



冷链末端小批量配送中低碳技术研究



5座典型城市光伏直冷和冰板蓄冷对比减排
97.95%~98.78%

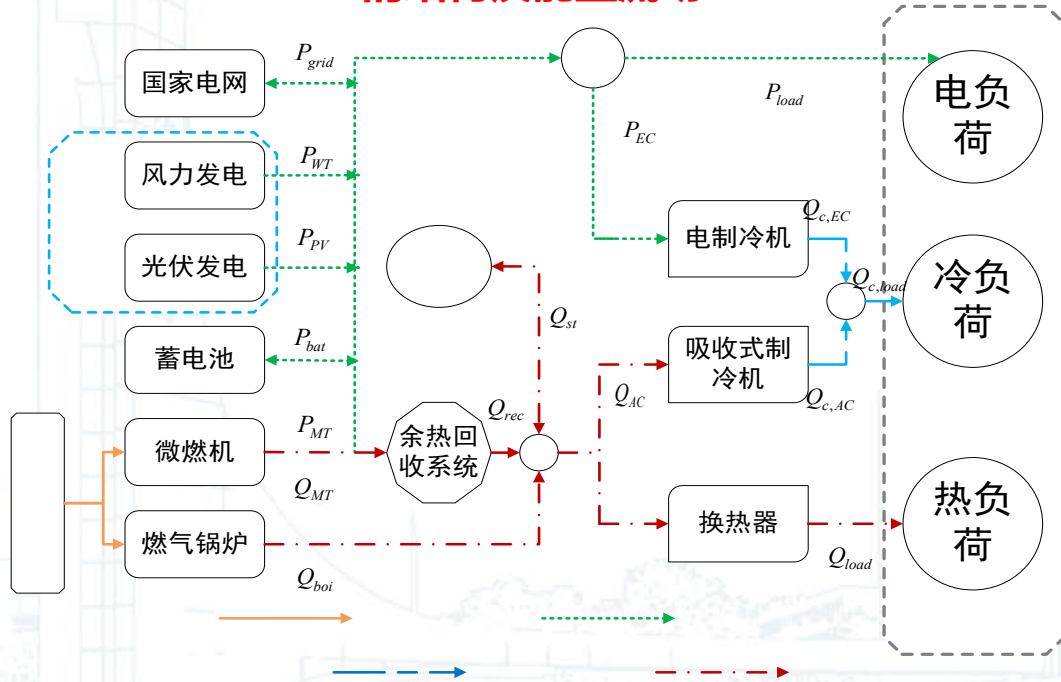


5.1 冷链碳足迹

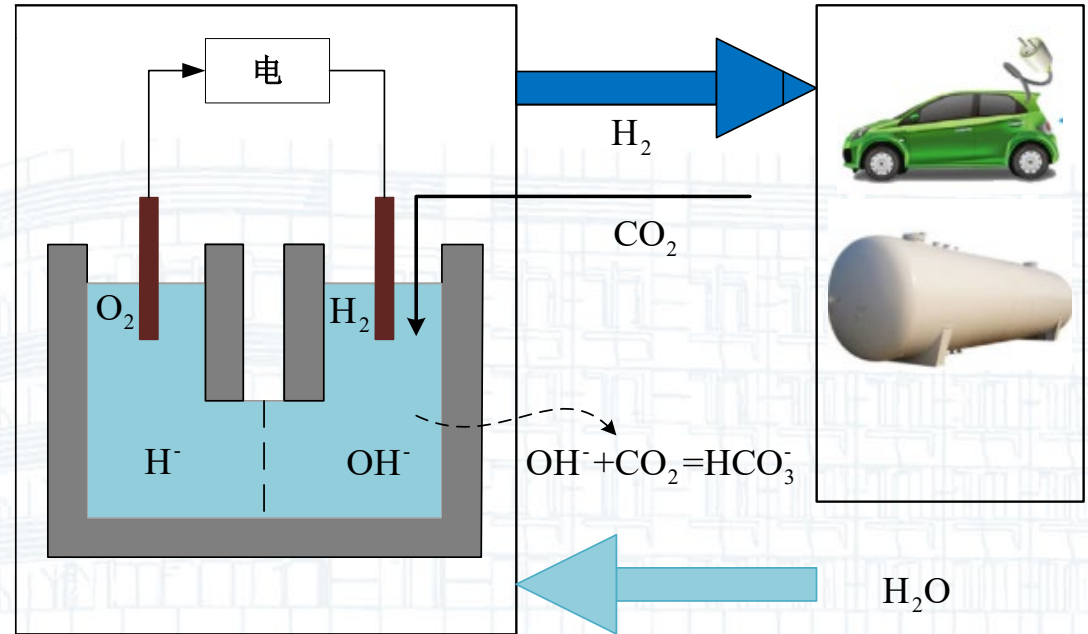
基于碳税的综合能源系统优化调度研究

研究内容：针对节能减排的能源转型发展要求，引入碳税将CO₂排放的环境问题转换为经济成本问题，并建立以运行成本最低为目标函数的优化调度模型；基于氢能源的发展前景，利用电解水的特征又提出了一种具有“负碳排放”特征的IES。

IES的结构及能量流动



二氧化碳吸收方案



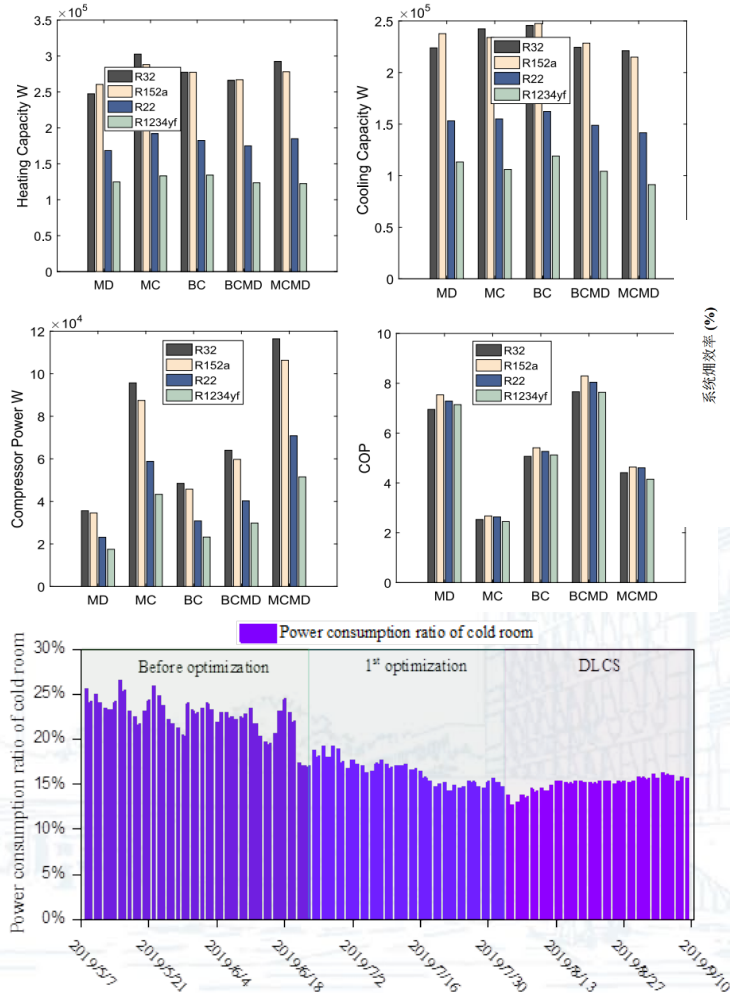
- 等碳税更适合较低成本条件下实现减排，为约束CO₂排放和IES的调度提供了参考；相对于传统的CCHP系统，IES是可以达到节能减排效果的；
- 电解槽制氢过程中会产生大量碱性溶液，可以有效吸收二氧化碳。

5.1 冷链碳足迹

新式冷链系统及控制优化

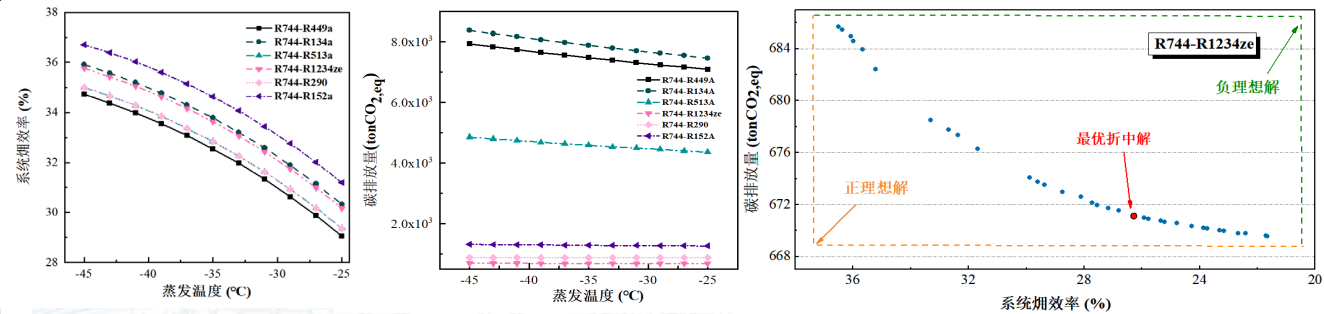
研究内容

- 提出一种基于热泵的综合能源供应系统，可利用系统冷凝器中的热量和蒸发器中的制冷量；
- 提出动态联动控制策略（DICS），可以有效降低冷库能耗和碳排放；
- 研究低温差换热技术，获得不同蒸发器换热温差、不同风速等条件对性能参数的影响规律。



制冷系统低碳优化研究

研究内容：采用复叠系统为研究对象，低温循环制冷剂为R744、高温循环采用六种不同制冷剂，建立以系统焓效率和碳排放为目标函数的数学模型，分析采用不同高温循环制冷剂的运行状态。



制冷剂对	蒸发温度/°C	蒸发器换热温差 /°C	焓效率/%	碳排放量 /tonCO ₂ ,eq
R744-R449a	-25.03	5.53	28.62	7171.59
R744-R134a	-25.63	5.16	30.34	7487.60
R744-R513a	-25.34	5.26	29.23	4364.48
R744-R1234ze	-25.38	9.68	26.26	671.16
R744-R290	-33.92	13.45	25.68	866.96
R744-R152a	-25.31	6.91	29.54	1256.79

5.2 冷链装备数字孪生与智能化



制冷系统运营企业

- 实时监控
- 保冷库节能
- 保食品品质
- 保冷库安全



制冷设备商

- 大数据故障分析
- 设备工艺改进



工程公司

- 设备维修记录管理
- 设备故障精准定位
- 远程故障诊断
- 设备备件管理



系统租户

- 货品品质安全监控

智能信息平台



数字化冷库大数据价值发现

- ✓ 冷库温湿度智能远程监控
- ✓ 冷库能耗优化
- ✓ AFDD自动故障检测与诊断
- ✓ 设备健康管理与故障预警
- ✓ 制冷工艺改进
- ✓ 食品冰温保鲜技术



温湿度

能耗监控

压缩机

冷风机

冷凝器

控制阀

冷库门磁

视频监控

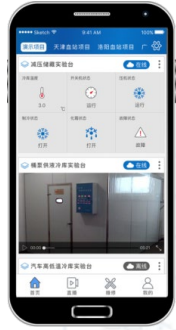
压力容器

制冷剂气体浓度探测

托盘

叉车

5.2 冷链装备数字孪生与智能化



制冷系统运营企业

- 实时监控
- 保冷库节能
- 保食品品质
- 保冷库安全



制冷设备商

- 大数据故障分析
- 设备工艺改进



工程公司

- 设备维修记录管理
- 设备故障精准定位
- 远程故障诊断
- 设备备件管理



系统租户

- 货品品质安全监控

智能信息平台



数字化冷库大数据价值发现

- ✓ 冷库**温湿度**智能远程监控
- ✓ 冷库**能耗**优化
- ✓ **AFDD**自动故障检测与诊断
- ✓ 设备**健康管理**与故障预警
- ✓ 制冷**工艺**改进
- ✓ 食品**冰温**保鲜技术



温湿度

能耗监控

压缩机

冷风机

冷凝器

控制阀

冷库门磁

视频监控

压力容器

制冷剂气体
浓度探测

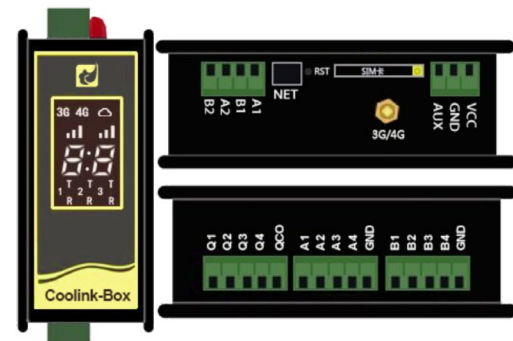
托盘

叉车

5.2 冷链装备数字孪生与智能化



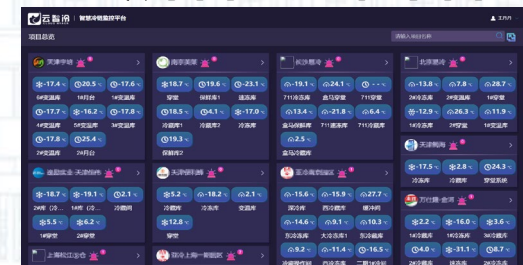
冷链数字化建设及应用



工业级智能硬件



冷库智慧运维平台



自动化冷库仓储及智慧运维平台

5.2 冷链装备数字孪生与智能化

保鲜工艺需要依托制冷装备实现，连通生鲜农产品冷链保鲜工艺和制冷装置运行状态，实现冷链保鲜工艺与冷链装备的自适应动态匹配，实现冷链装备与保鲜工艺联动，保障农产品综合品质，降低冷链能耗。



结束语

冷链发展正面临挑战与新的机遇，双碳背景下的高效节能绿色制冷系统和乡村振兴产业将成为未来产业发展的重要方向，我们也将在此领域继续努力！

