



天津商业大学
TIANJIN UNIVERSITY OF COMMERCE



第七届“中国制冷空调专业产学研论坛”
2025. 08. 26-27 西安

自然工质CO₂冷冻冷藏系统及装置开发

汇报人：代宝民

研究团队：刘圣春 代宝民

天津商业大学机械工程学院

dbm@tjcu.edu.cn

2025. 08. 26



汇报 目录

一、背景介绍

二、CO₂制冷系统构建研究

三、CO₂制冷系统样机开发

四、CO₂制冷系统产业服务

五、结论及展望



汇报 目录

一、背景介绍

二、CO₂制冷系统构建研究

三、CO₂制冷系统样机开发

四、CO₂制冷系统产业服务

五、结论及展望

1. 背景介绍

1.1 政策法规

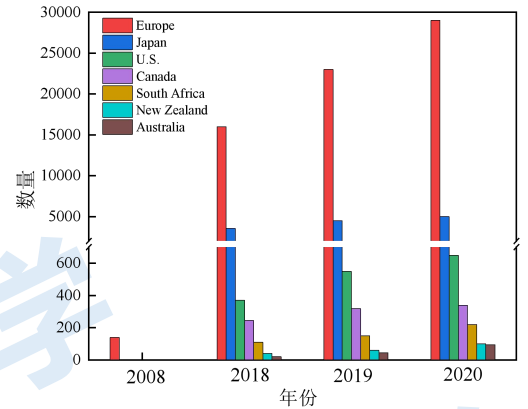
- 2025年4月23日，生态环境部《中国履行〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉国家方案（2025—2030年）》
- 2020年9月22日，3060双碳目标
- 2019年6月13日，七部委《绿色高效制冷行动方案》
- 2016年11月4日《巴黎协议》正式生效
- “加速淘汰HCFCs”调整案，2020年削减35%，2025年削减67.5%

2020年CO₂跨界设备数量

CO₂ transcritical installations in the world



CO₂跨界设备数量发展



中华人民共和国生态环境部

Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China

中国履行《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》
国家方案（2025—2030年）

中华人民共和国中央人民政府

国务院 总理 新闻 政策 互动 服务 数据 国情 国家政务服务

中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要

2021-03-13 07:16 来源：新华社

【字体：大 中 小】 打印 分享

新华社北京3月12日电

中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要



中华人民共和国中央人民政府

www.gov.cn

国务院 总理 新闻 政策 互动 服务 数据

首页 > 信息公开 > 国务院文件 > 商贸、海关、旅游 > 其他

索引号：000014349/2021-00126 主题分类：商贸、海关、旅游\其他
发文机关：国务院办公厅 成文日期：2021年11月26日
标题：国务院办公厅关于印发“十四五”冷链物流发展规划的通知
发文字号：国办发〔2021〕46号 发布日期：2021年12月12日
关键词：

国务院办公厅关于印发
“十四五”冷链物流发展规划的通知
国办发〔2021〕46号

□ 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

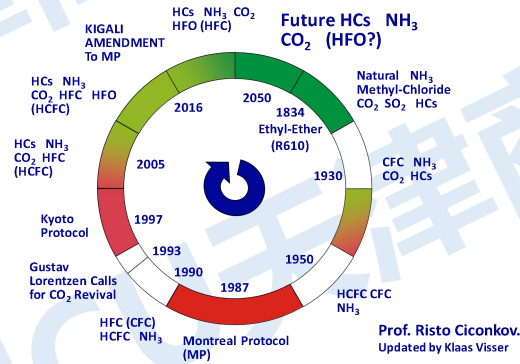
1. 背景介绍

1.2 自然工质CO₂优缺点

优势

在众多自然工质中，CO₂由于其安全环保的优势最具代表性和竞争力

- GWP = 1、ODP = 0
- 无毒不可燃、廉价易获取
- 压缩比较小、良好的运输性质
- 放热过程温度滑移



热泵热水器



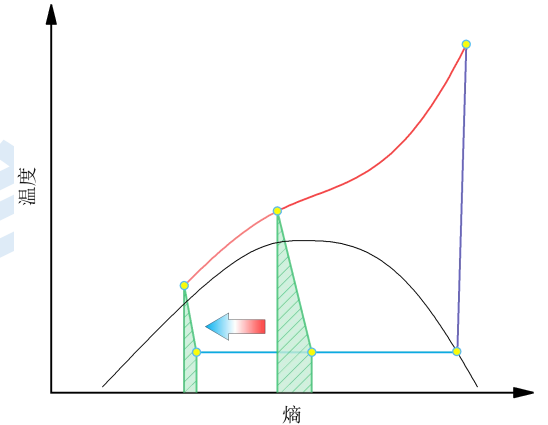
空气源热泵



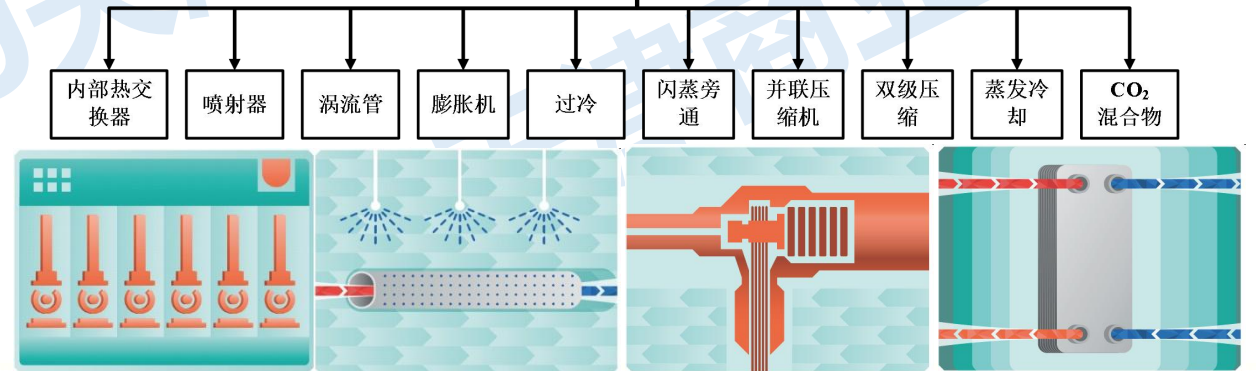
商超冷冻冷藏

劣势

- ❑ 制冷：温暖及炎热地区，CO₂不能充分冷却，节流损失大
- ❑ 供暖：回水温度≥30℃，CO₂系统用于供暖效率低，工况不匹配
- ❑ 气冷器出口温度高、排气压力高、节流损失大，跨临界CO₂循环效率低于常规制冷剂系统



跨临界CO₂循环优化技术

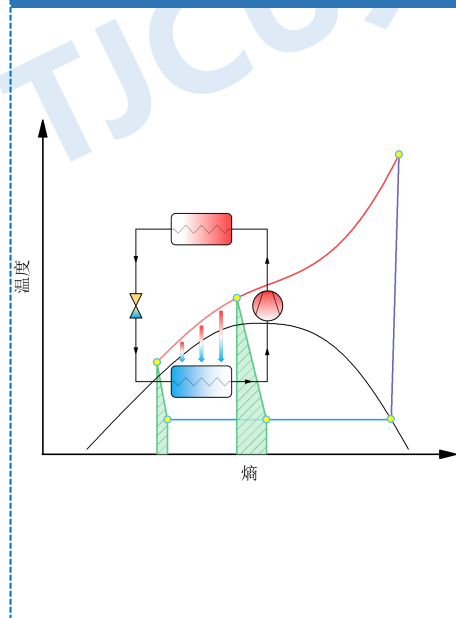


1. 背景介绍

1.3 过冷方案

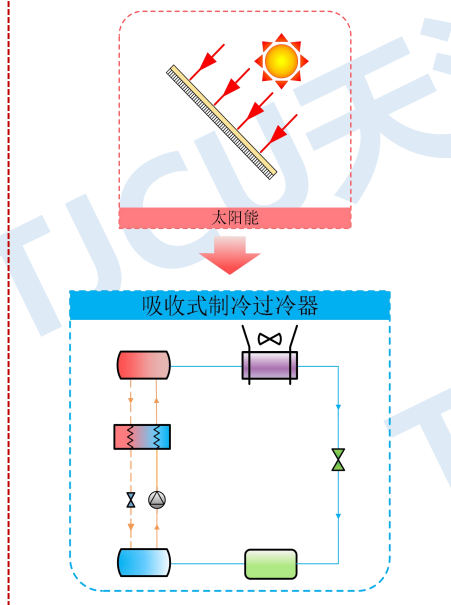
电驱动

机械过冷CO₂系统

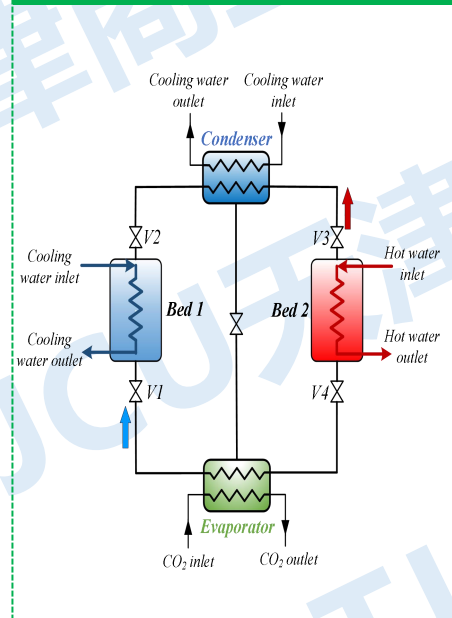


热驱动

吸收过冷CO₂系统

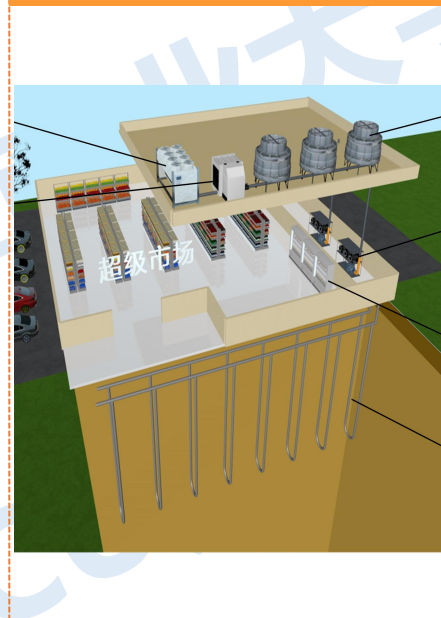


吸附过冷CO₂系统

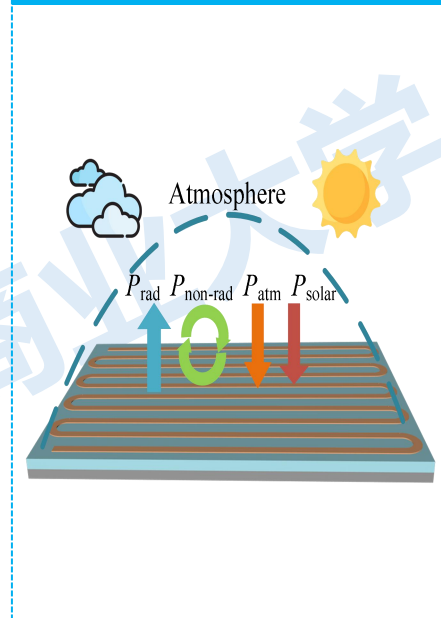


自然冷源驱动

土壤蓄冷过冷CO₂系统



天空辐射过冷CO₂系统





汇报 目录

一、背景介绍

二、CO₂制冷系统构建研究

三、CO₂制冷系统样机开发

四、CO₂制冷系统产业服务

五、结论及展望



基于过冷技术的 CO₂制冷系统构建

电驱动过冷CO₂ 系统

2.1.1 机械过冷CO₂系统

- 机械过冷CO₂商超制冷系统
- 机械过冷跨临界CO₂冷热联供系统
- 基于引射器+机械过冷的全年 CO₂供冷供热系统

热驱动过冷CO₂ 系统

2.2.1 吸收式过冷CO₂制冷系统

2.2.2 太阳能驱动吸附过冷CO₂商超制冷系统

自然冷源驱动过 冷CO₂系统

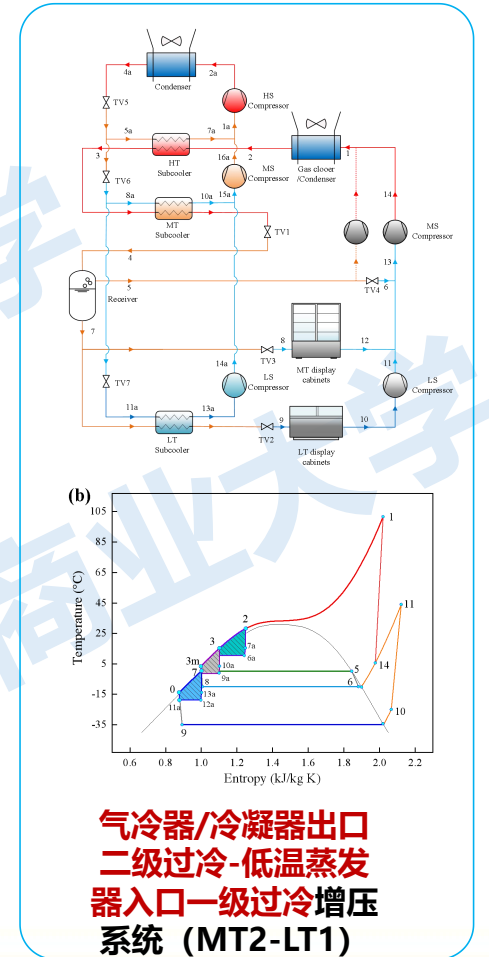
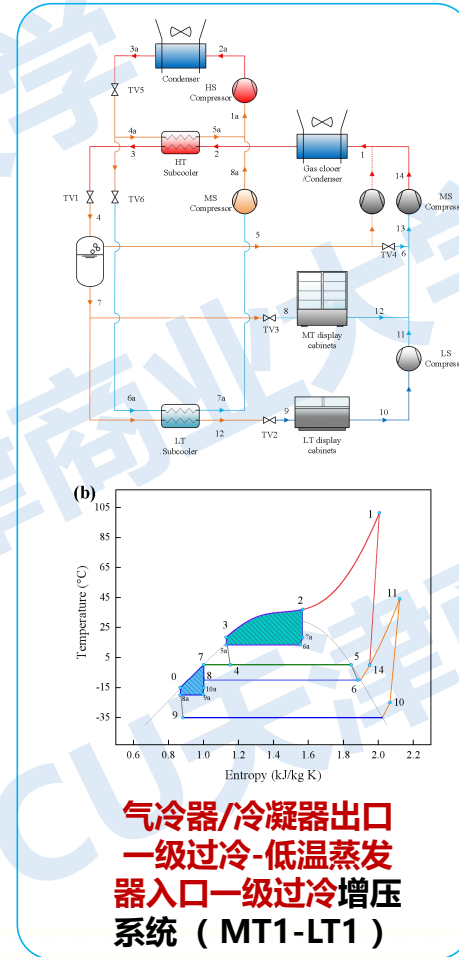
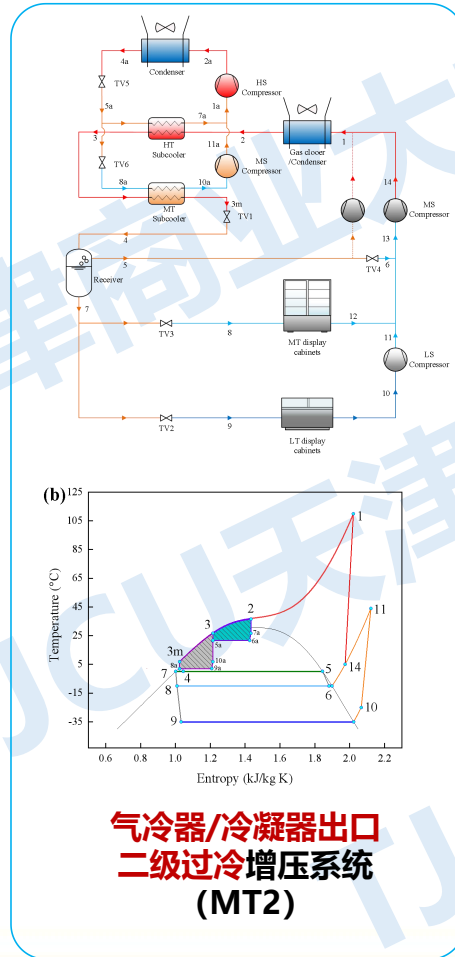
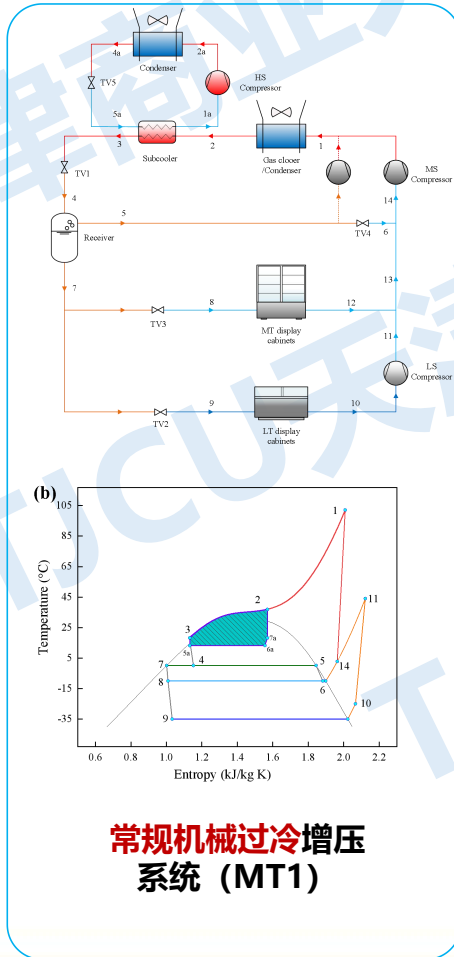
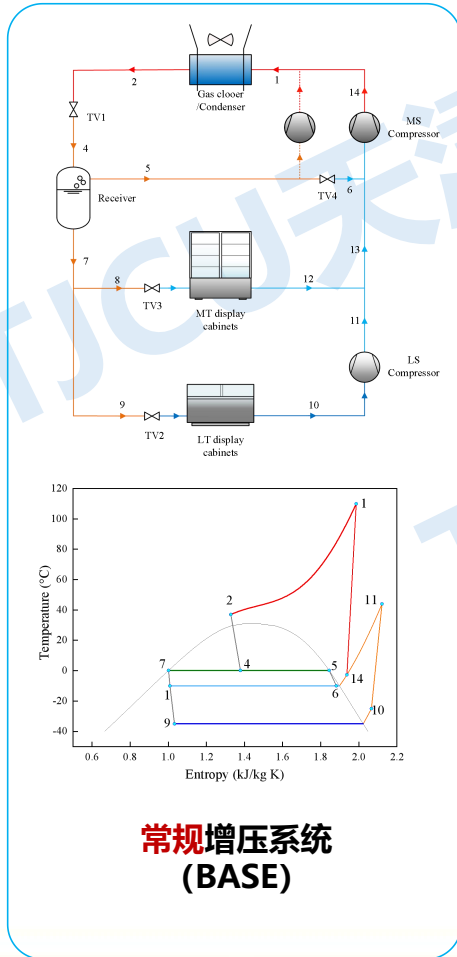
2.3.1 天空辐射过冷CO₂商超制冷系统

2.3.2 土壤蓄冷过冷CO₂制冷系统

- 土壤蓄冷过冷CO₂ 商超制冷系统

2.1.1 商超机械过冷CO₂增压系统

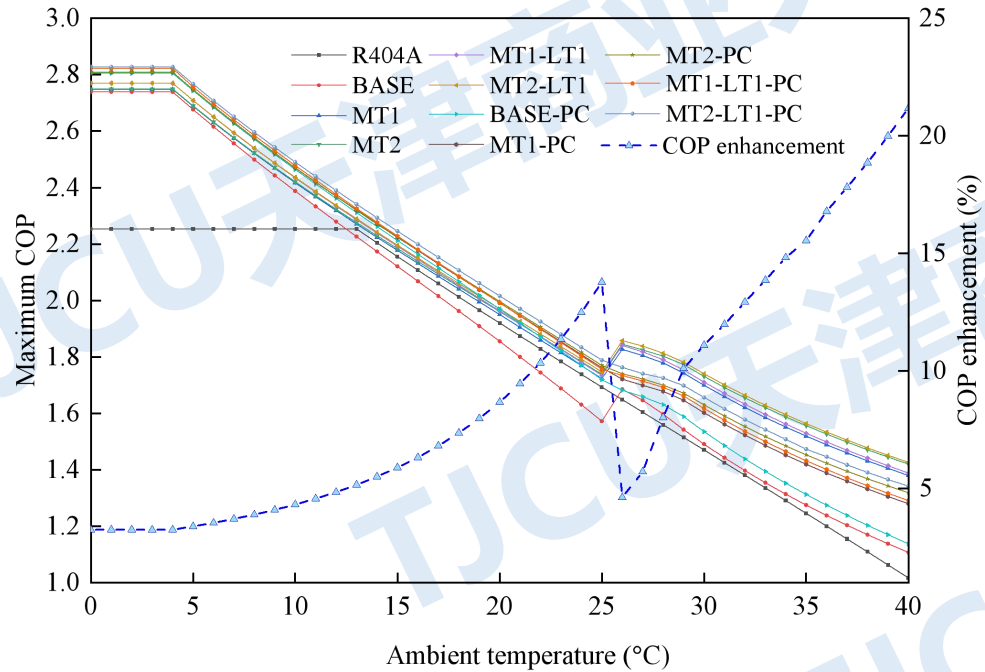
模型建立





2.1.1 商超机械过冷CO₂增压系统

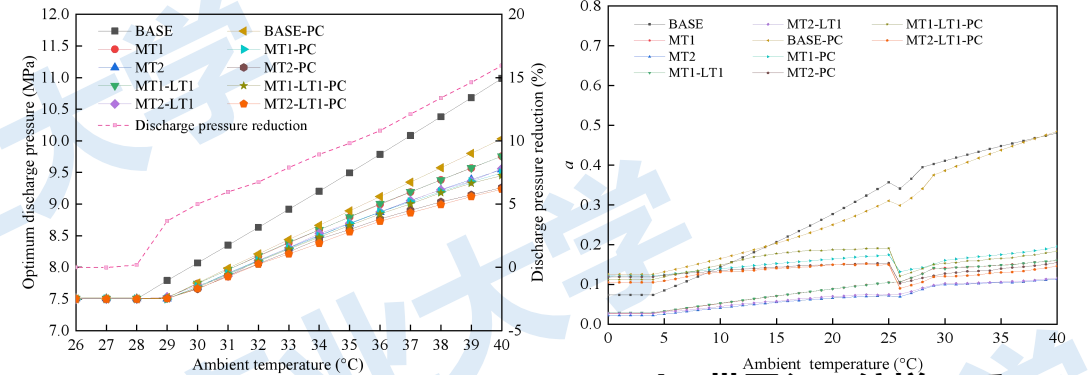
COP



10种CO₂增压系统与R404A系统COP比较

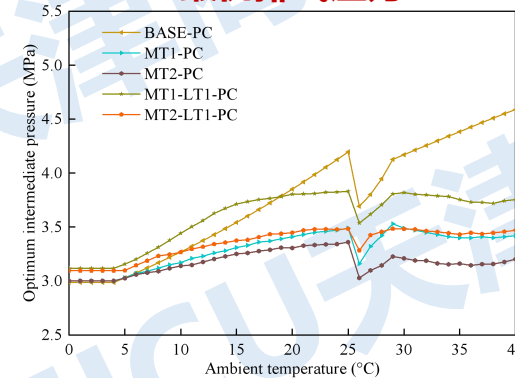
- ◆ **亚临界区域：平行压缩系统性能系数高于无平行压缩；**
跨临界区域：平行压缩系统性能系数
低于无平行压缩。
- ◆ **增压系统在有平行压缩和无平行压缩的两个系统进行切换，使系统性能达到最优。**

关键参数

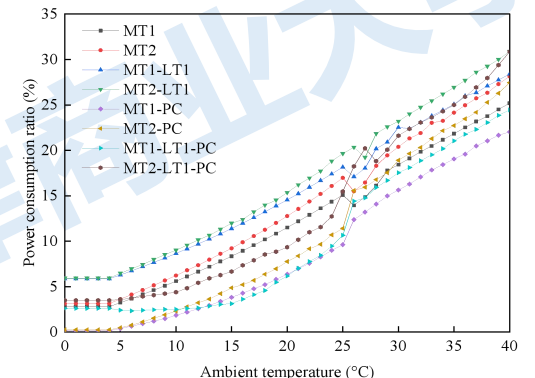


(a) 所有增压系统
最优排气压力

(b) 带平行压缩增压系
统最优中间压力



(c) 气液分离器旁通流量比
随环境温度变化规律



(d) 机械过冷回路和增压系统
压缩机耗功比

2.1.1 商超机械过冷CO₂增压系统

1. **Dai Baomin**, et al. Exergy, carbon footprint and cost lifecycle evaluation of cascade mechanical subcooling CO₂ commercial refrigeration system in China. *Journal of Cleaner Production*, 2024: 434, 140186. (SCI一区, Top期刊, IF = 11.1)
2. **Dai baomin**, et al. Annual energetic evaluation of multi-stage dedicated mechanical subcooling carbon dioxide supermarket refrigeration system in different climate regions of China using genetic algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 333:130119. (SCI一区, Top期刊, IF = 11.1)
3. ..., **Dai Baomin***, Performance analysis of two-stage compression transcritical CO₂ refrigeration system with R290 mechanical subcooling unit. *Energy*. 2019;189:116143. (SCI二区, Top期刊, IF = 9)
4. **Dai Baomin**, et al. Energetic performance of transcritical CO₂ refrigeration cycles with mechanical subcooling using zeotropic mixture as refrigerant, *Energy*, 2018, 150: 205-221. (SCI二区, Top期刊, IF = 9)
5. 代宝民, 等. 商超自然工质CO₂制冷系统增效技术及碳减排预测. *华电技术*, 2021, 43(11):74-84.
6. 代宝民, 等. 机械过冷CO₂跨临界制冷循环性能理论分析. *制冷学报*, 2018, 39(01): 13-19.



基于过冷技术的 CO₂制冷系统构建

电驱动过冷CO₂ 系统

2.1.1 机械过冷CO₂系统

- 机械过冷CO₂商超制冷系统
- 机械过冷跨临界CO₂冷热联供系统
- 基于引射器+机械过冷的全年 CO₂ 供冷供热系统

热驱动过冷CO₂ 系统

2.2.1 吸收式过冷CO₂制冷系统

2.2.2 太阳能驱动吸附过冷CO₂商超制冷系统

自然冷源驱动过 冷CO₂系统

2.3.1 天空辐射过冷CO₂ 商超制冷系统

2.3.2 土壤蓄冷过冷CO₂ 制冷系统

- 土壤蓄冷过冷CO₂ 商超制冷系统

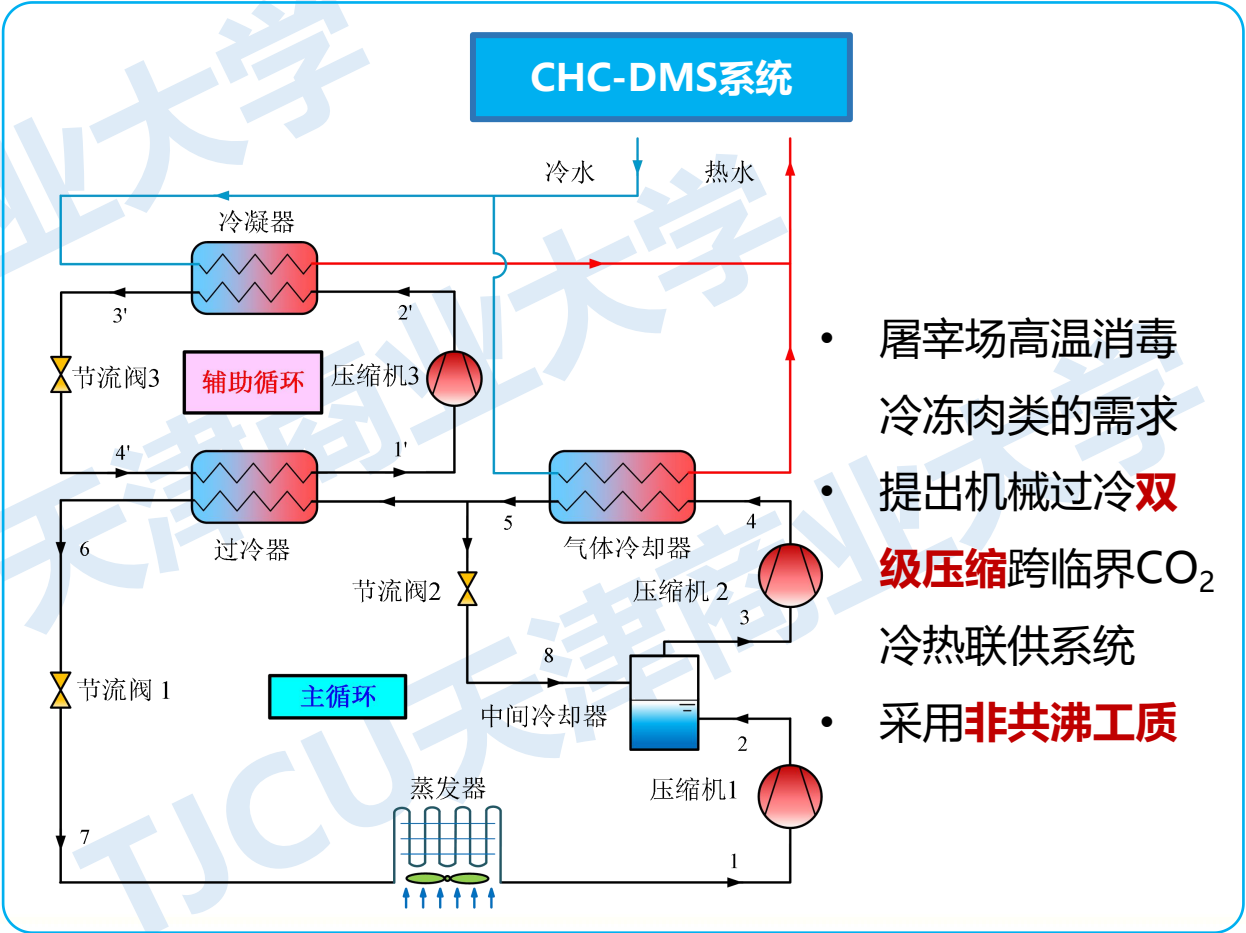


2.1.2 机械过冷跨临界CO₂冷热联供系统

新型双级压缩冷热联供系统仿真优化



□ 食品加工行业（生鲜制冷、消毒，牛奶巴氏消毒、冷藏）

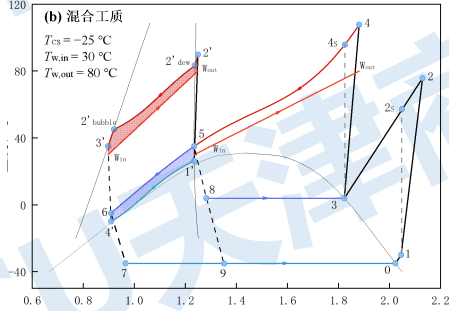
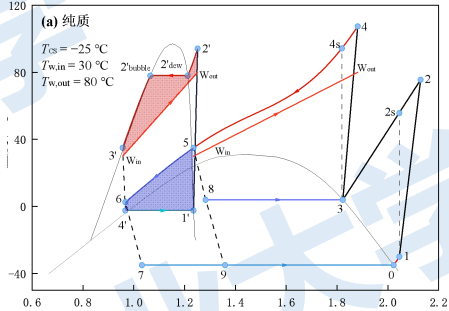


2.1.2 机械过冷跨临界CO₂冷热联供系统

● 系统描述和制冷剂选择

| 制冷剂 | 物理性质 | | | 安全特性 | | | | 环保特性 | | |
|-------|-------|---------------------|---------------------|----------------------|------------|---------|------|-------|-----|-----|
| | 分子量 | T _b (°C) | T _c (°C) | P _c (MPa) | OEL (PPMv) | LEL (%) | 安全等级 | 大气寿命 | ODP | GWP |
| R744 | 44.01 | -78.4 | 31.1 | 7.38 | 5000 | None | A1 | >50 | 0 | 1 |
| R1270 | 42.08 | -47.7 | 92.4 | 4.66 | 660 | 2.0 | A3 | 0.001 | 0 | -20 |
| R290 | 44.10 | -42.1 | 96.7 | 4.25 | 2500 | 2.1 | A3 | 0.041 | 0 | ~20 |
| R161 | 48.06 | -37.6 | 102.2 | 5.09 | - | 3.8 | - | 0.21 | 0 | 12 |
| R600a | 58.12 | -11.7 | 134.7 | 3.63 | 800 | 1.7 | A3 | 0.019 | 0 | ~20 |
| R600 | 58.12 | -0.49 | 151.9 | 3.8 | 1000 | 1.85 | A3 | - | 0 | 0.1 |
| R601 | 72.15 | 36.1 | 196.5 | 33.58 | | | A3 | | 0 | 4 |

对于采用非共沸混合工质的DMS子系统，制冷剂的**选择和组分比例**对系统性能有重要影响。考虑到环保性能，选择GWP较低的碳氢化合物作为DMS子系统**中非共沸制冷剂的组分**。

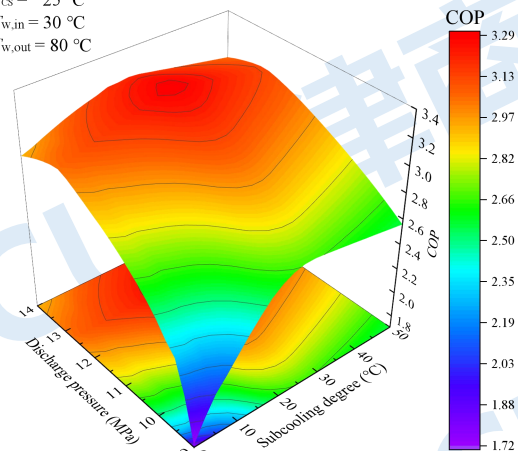


- 主循环采用
 - 双级压缩
 - 中间完全冷却的方式
 - 降低压缩比
- 机械过冷循环中采用
 - 非共沸工质
 - 形成良好的温度匹配
 - 提升系统能效
 - 冷冻间温度：-25℃
 - 进水温度：30℃
 - 出水温度：80℃

2.1.2 机械过冷跨临界CO₂冷热联供系统

新型双级压缩冷热联供系统仿真优化

$T_{cs} = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $T_{w,in} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $T_{w,out} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$

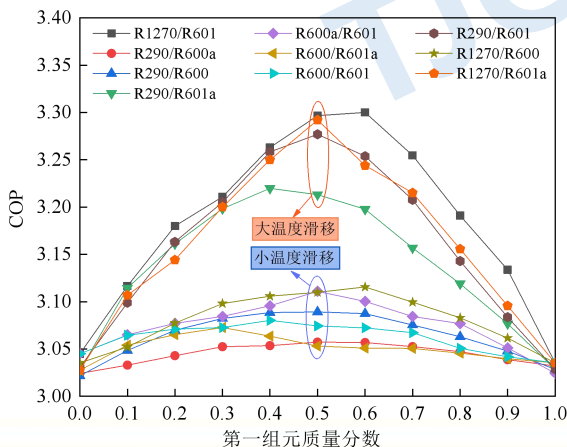


COP的优化

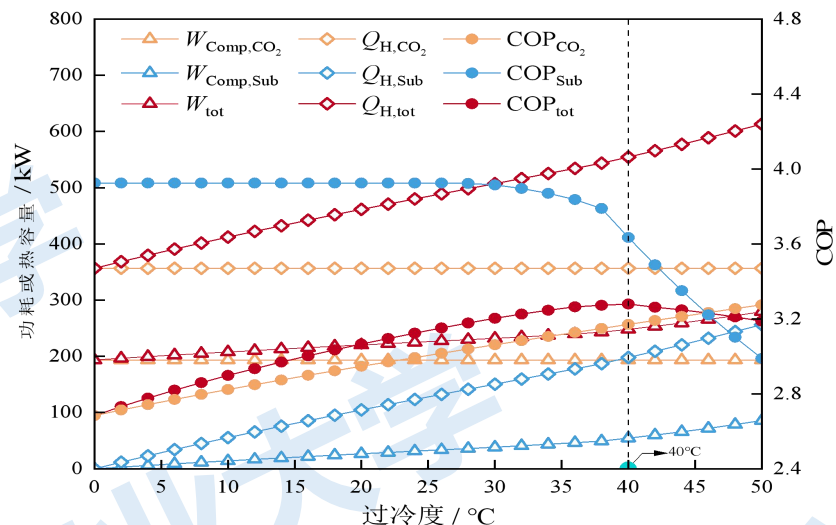
- COP随排气压力和过冷度变化
- 存在一个**最优值**
- **最佳状态点:**
 - $p_h = 12.45\text{ MPa}$; $\Delta T_{SC} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - $COP_{max} = 3.28$

COP随组元组分变化

- 工质温度滑移不同COP差异明显
- 温度滑移越大, COP越大
- 最佳工质为R1270/R601(60/40)
- 系统的最大COP为3.30

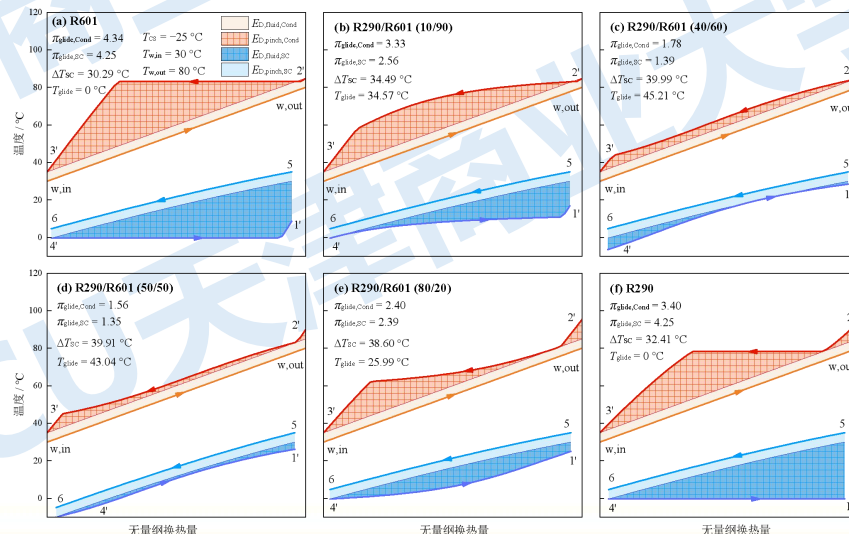


过冷度的影响



- 当过冷度在40°C左右时, COP_{Tot} 最大。各子系统的COP增长趋势不同

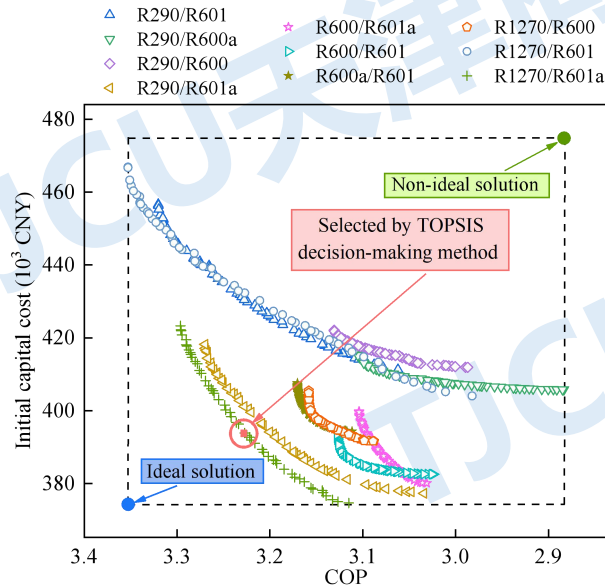
温度匹配



2.1.2 机械过冷跨临界CO₂冷热联供系统

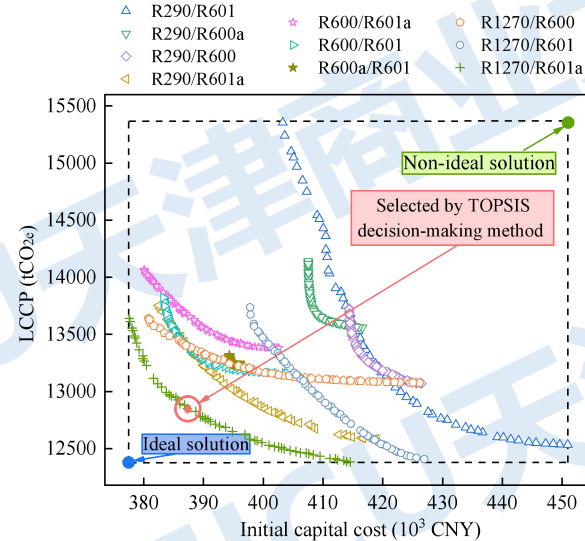
新型双级压缩冷热联供系统仿真优化

双目标优化: COP-ICC



- R1270/R601a (54/46)
- 排气压力: 12.87 MPa
- 过冷度: 37.51°C
- COP=3.23
- ICC = 39.39万元

双目标优化: ICC-LCCP



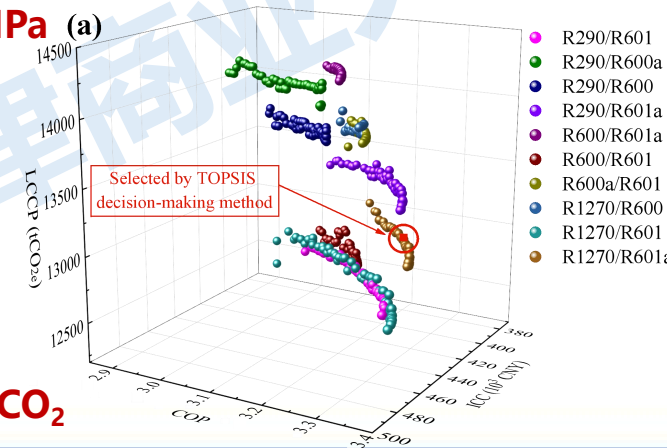
- R1270/R601a (59/41)
- 排气压力: 12.76 MPa
- 过冷度: 38.01°C
- ICC=38.73万元
- LCCP=12848.50 吨CO₂

1. Dai Baomin, et al, Multi-objective optimization analysis of combined heating and cooling transcritical CO₂ system integrated with mechanical subcooling utilizing hydrocarbon mixture based on machine learning. *Energy Conversion and Management*, 2024:118057. (SCI一区, Top期刊, IF = 10.4)
2. 代宝民, 等.非共沸工质辅助过冷CO₂冷热联供系统的热力学性能分析. *化工学报*, 2023, 74(S1):64-73. (EI检索)

最优工况状态及参数:

- 组元: R1270/R601a
- 排气压力: 12.86 MPa
- 过冷度: 37.50°C
- 组分: 53/47
- COP=3.22
- ICC=39.33万元
- LCCP=12315.41吨CO₂

三目标优化: COP-ICC-LCCP





基于过冷技术的 CO₂制冷系统构建

电驱动过冷CO₂ 系统

2.1.1 机械过冷CO₂系统

- 机械过冷CO₂商超制冷系统
- 机械过冷跨临界CO₂冷热联供系统
- 基于引射器+机械过冷的全年 CO₂ 供冷供热系统

热驱动过冷CO₂ 系统

2.2.1 吸收式过冷CO₂制冷系统

2.2.2 太阳能驱动吸附过冷CO₂商超制冷系统

自然冷源驱动过 冷CO₂系统

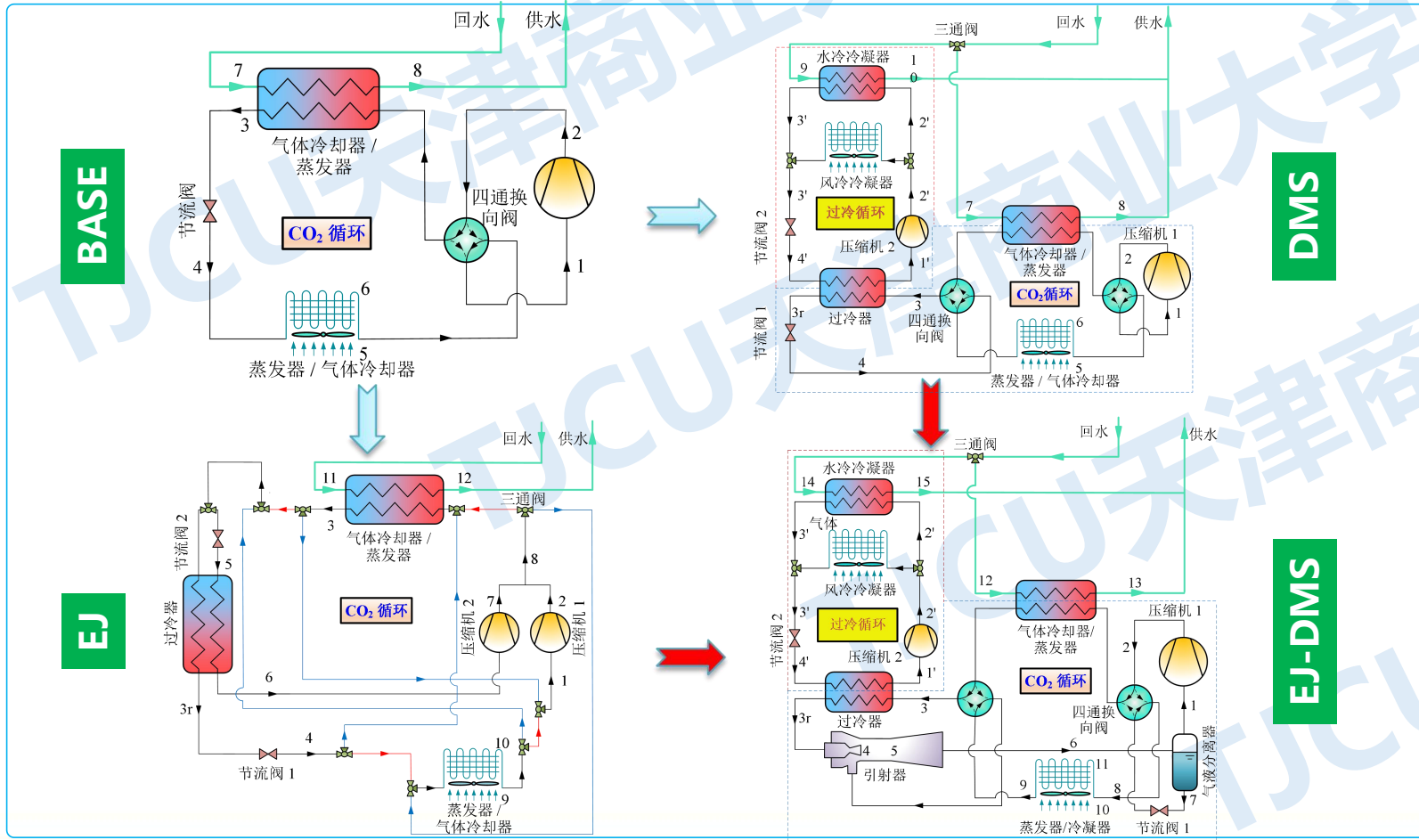
2.3.1 天空辐射过冷CO₂ 商超制冷系统

2.3.2 土壤蓄冷过冷CO₂ 制冷系统

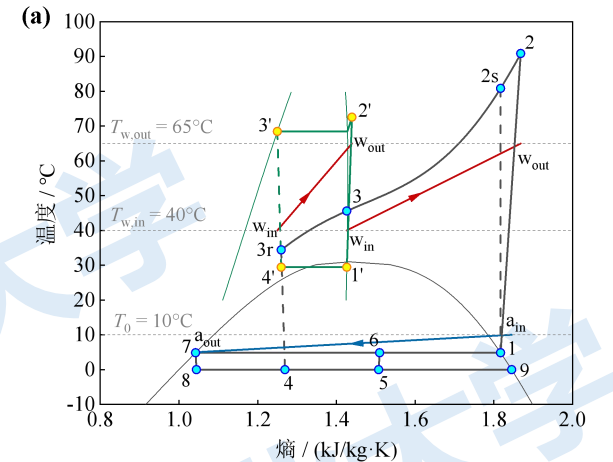
- 土壤蓄冷过冷CO₂ 商超制冷系统

2.1.3 基于引射器+机械过冷的全年 CO₂ 供冷供热系统

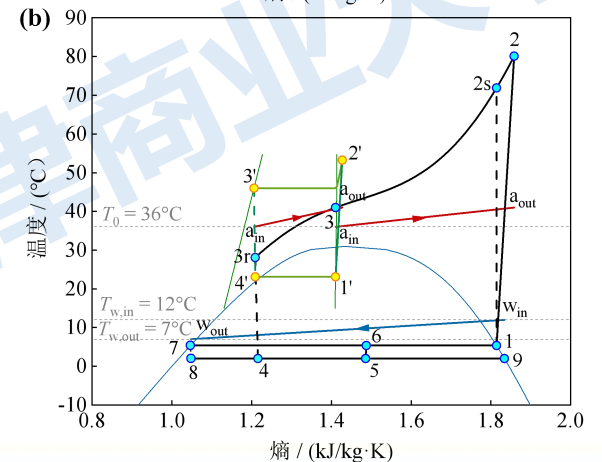
系统描述



制热模式



制冷模式



2.1.3 基于引射器+机械过冷的全年 CO₂ 供冷供热系统

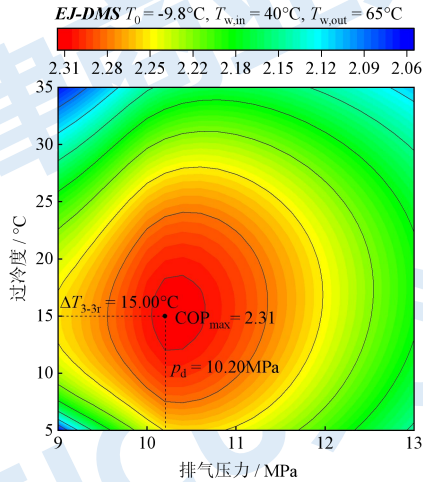
结果分析

➤ 热力学分析

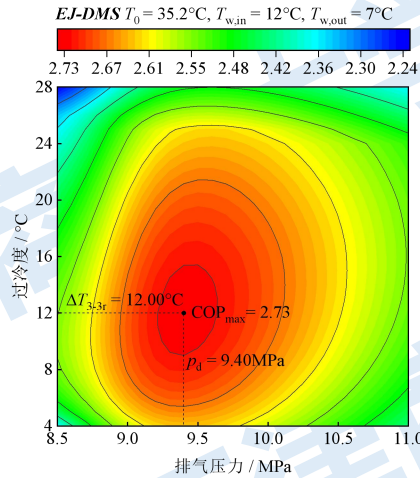
COP随排气压力和过冷度的变化

- 影响因素:
- (1) 排气压力
 - (2) 过冷度

制热模式



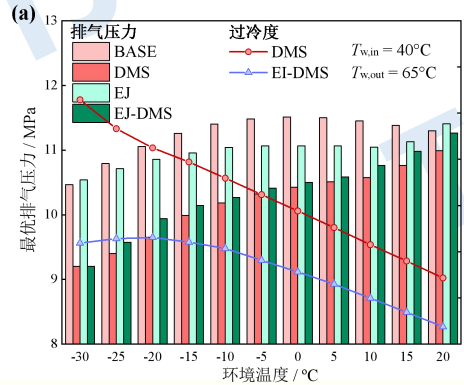
制冷模式



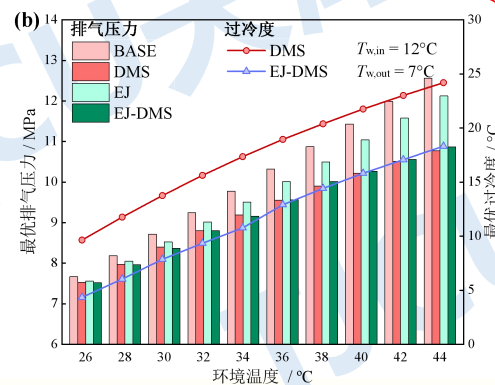
最优排气压力和最优过冷度

- 遗传算法优化

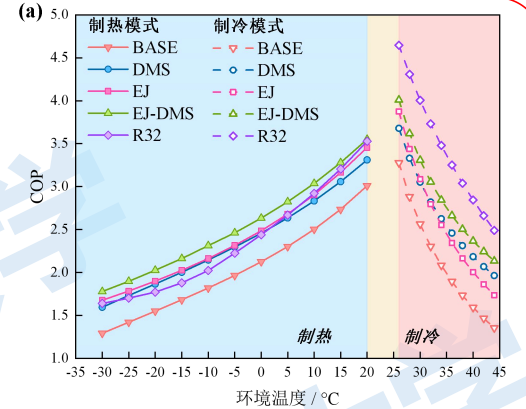
制热模式



制冷模式



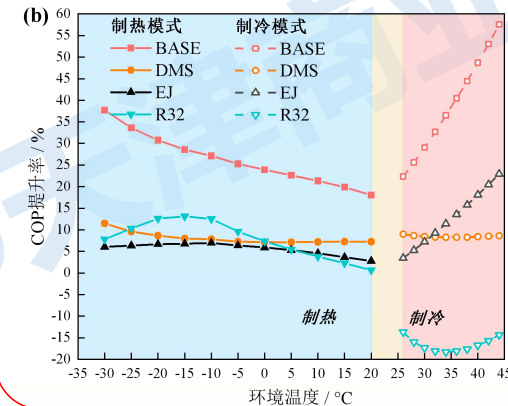
最大COP



□ 制热模式: $\text{COP}_{\text{EJ-DMS}} > \text{COP}_{\text{others}}$

□ 制冷模式: $\text{COP}_{\text{EJ-DMS}}$ 仅低于 COP_{R32}

COP提升率

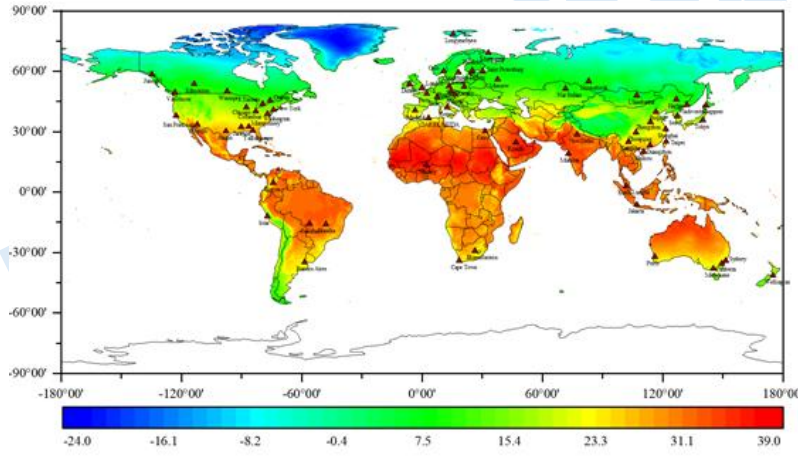


2.1.3 基于引射器+机械过冷的全年 CO₂ 供冷供热系统

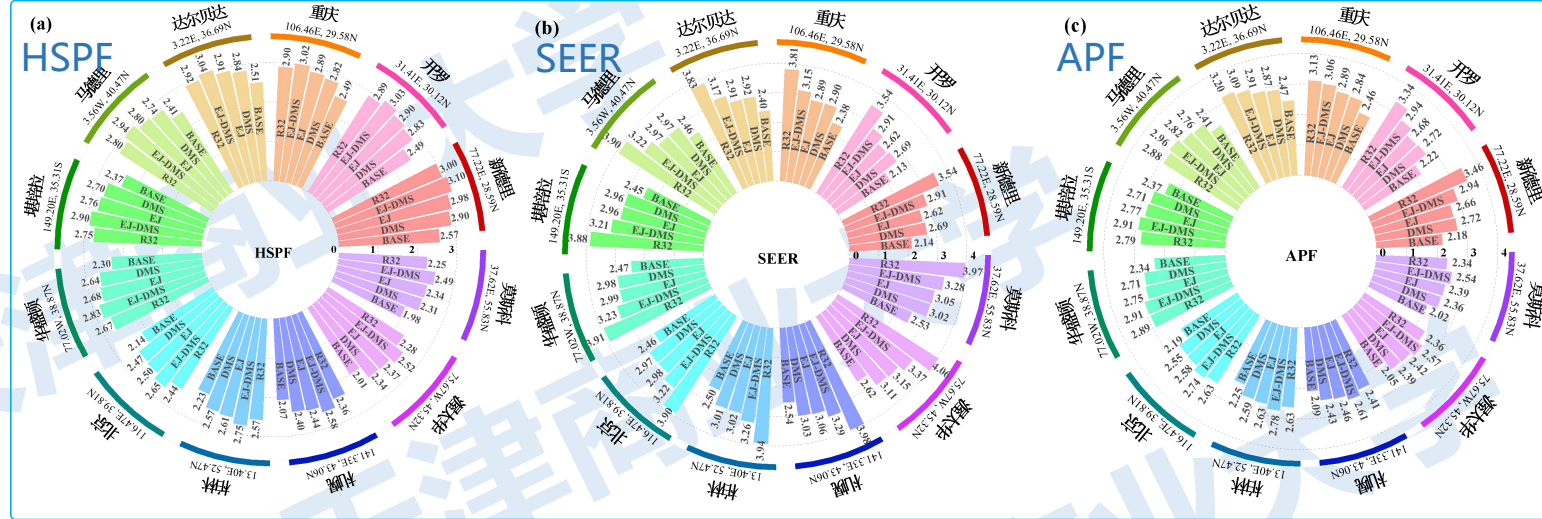
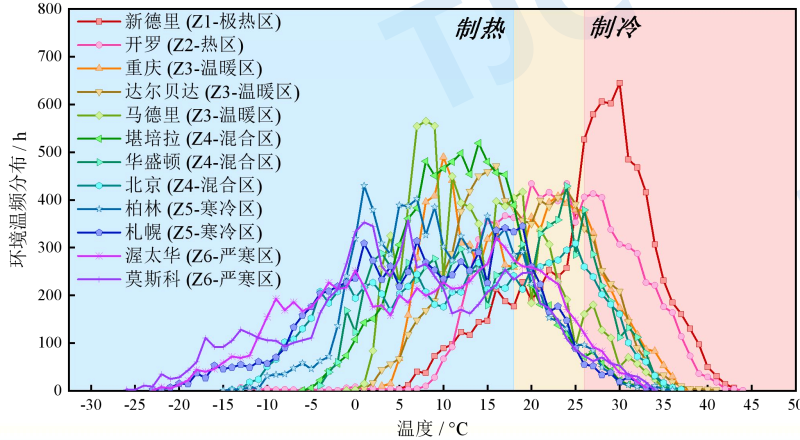
结果分析

➤ 季节与全年性能系数分析

70个典型城市



12个代表城市



1. 代宝民, 等.集成引射器与机械过冷的CO₂冷热联供系统性能分析[J].*制冷学报*,2023,44(06):69-76+109.
2. **Dai Baomin**, et al, CO₂ system integrated with ejector and mechanical subcooling: A comprehensive assessment. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 234, 121269. (SCI二区, Top期刊, IF = 6.4)



基于过冷技术的 CO₂制冷系统构建

电驱动过冷CO₂ 系统

2.1.1 机械过冷CO₂系统

- 机械过冷CO₂商超制冷系统
- 机械过冷跨临界CO₂冷热联供系统
- 基于引射器+机械过冷的全年 CO₂ 供冷供热系统

热驱动过冷CO₂ 系统

2.2.1 吸收式过冷CO₂制冷系统

2.2.2 太阳能驱动吸附过冷CO₂商超制冷系统

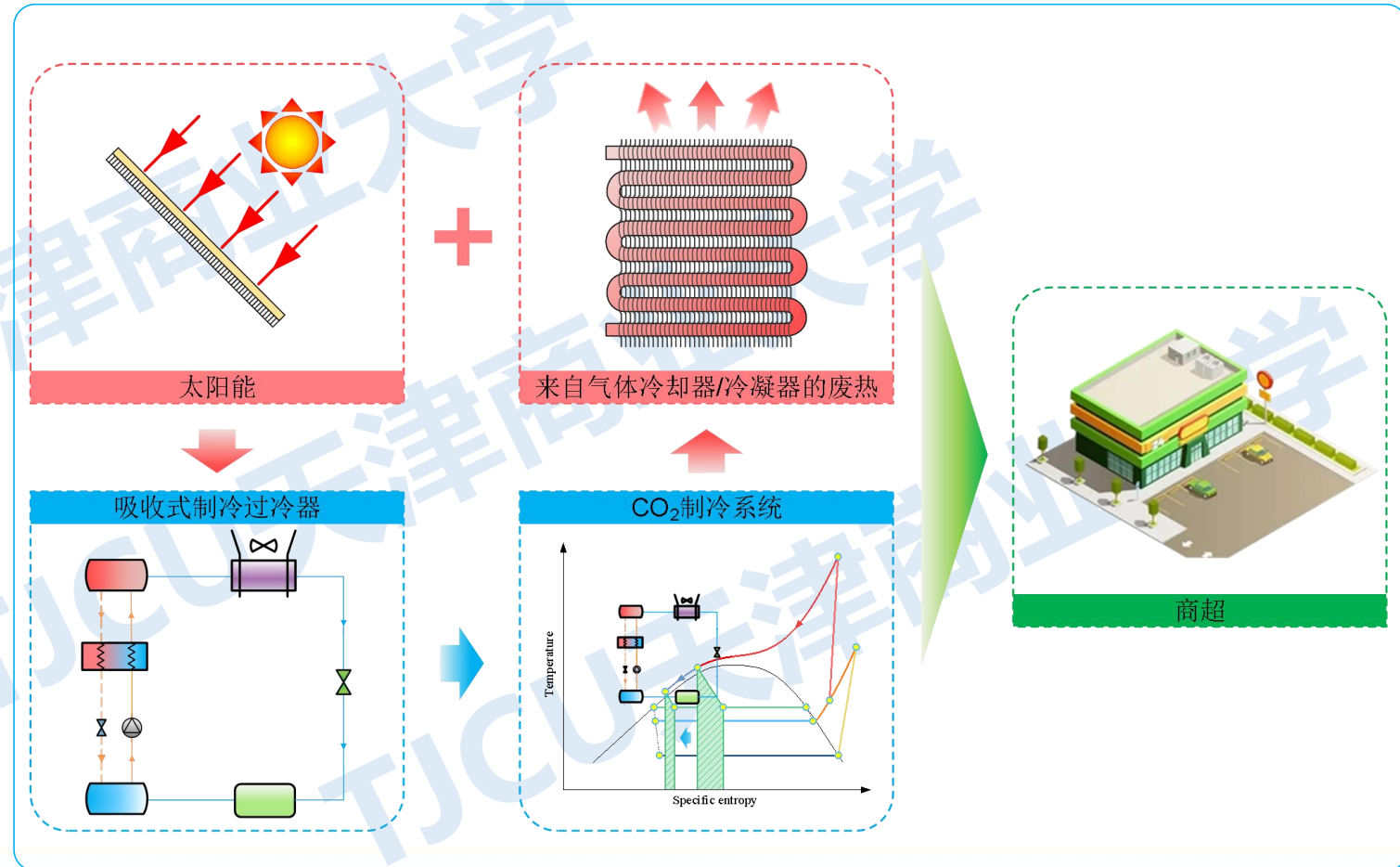
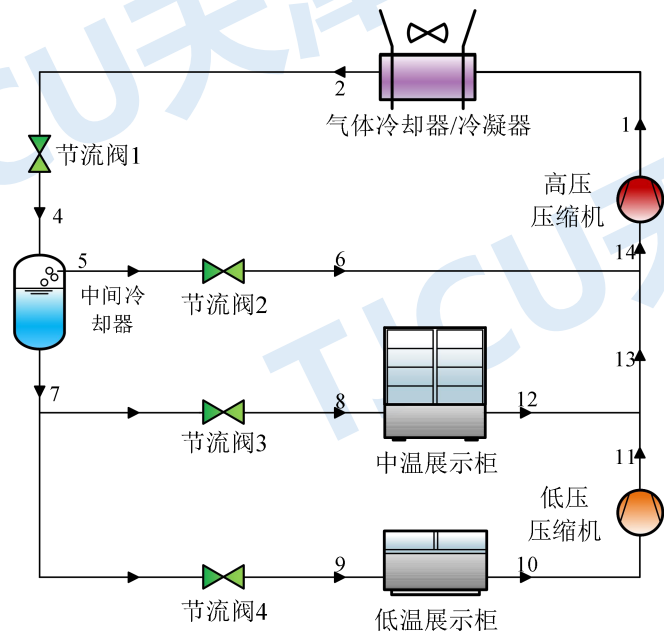
自然冷源驱动过 冷CO₂系统

2.3.1 天空辐射过冷CO₂ 商超制冷系统

2.3.2 土壤蓄冷过冷CO₂ 制冷系统

- 土壤蓄冷过冷CO₂ 商超制冷系统

2.2.1.1 系统描述

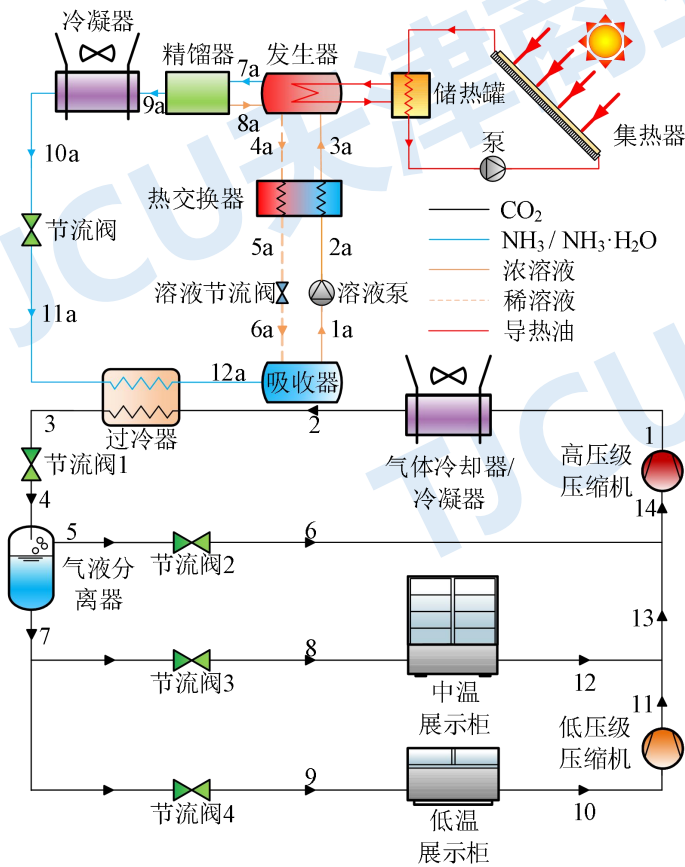


2.2.1 吸收式过冷 CO_2 制冷系统

2.2.1.1 系统描述

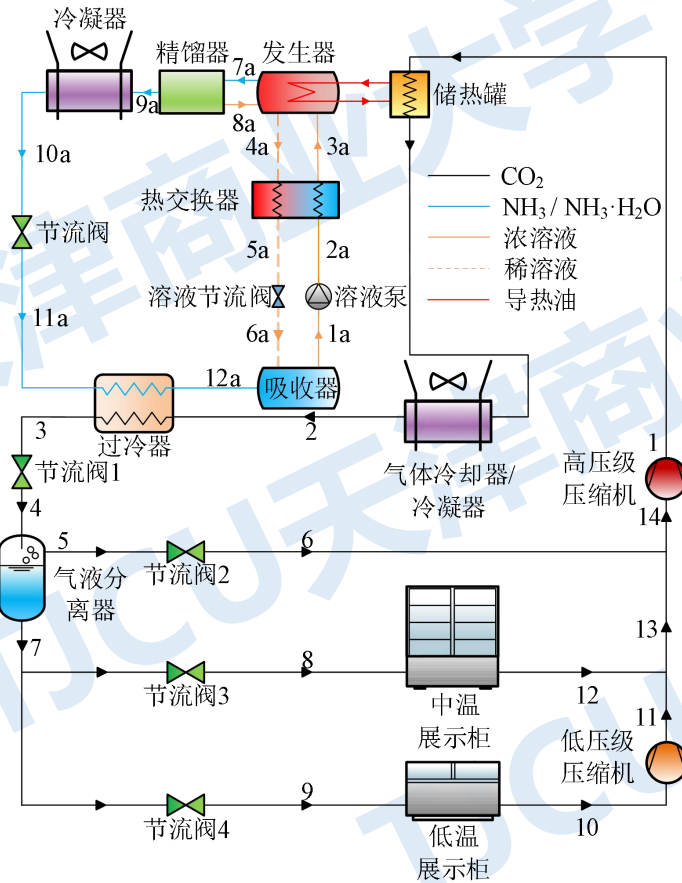
太阳能驱动 NH_3 - H_2O 吸收式过冷 CO_2 增压制冷系统

(SE)



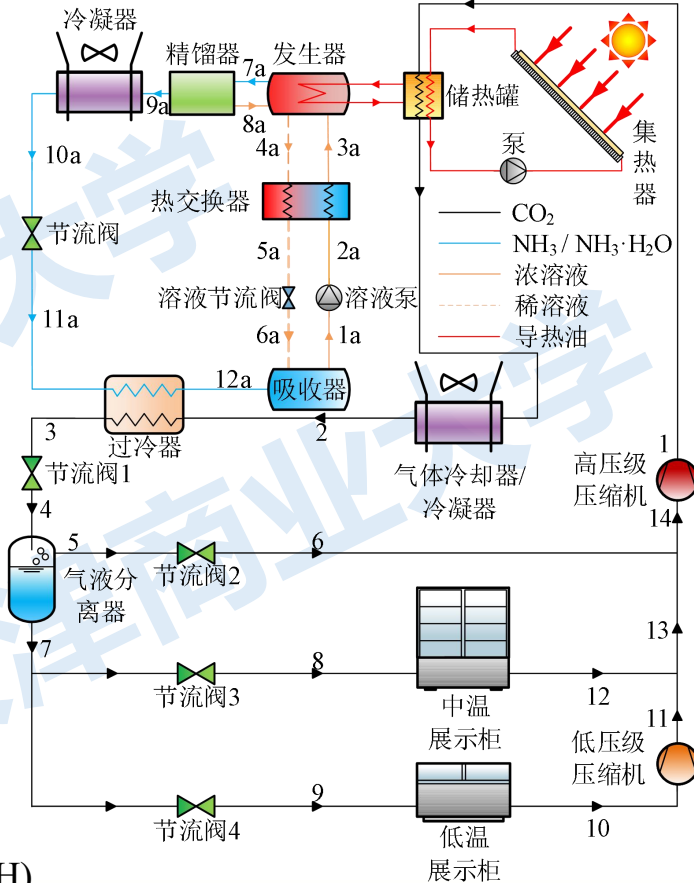
废热驱动 NH_3 - H_2O 吸收式过冷 CO_2 增压制冷系统

(WH)



混合式热驱动 NH_3 - H_2O 吸收式过冷 CO_2 增压制冷系统

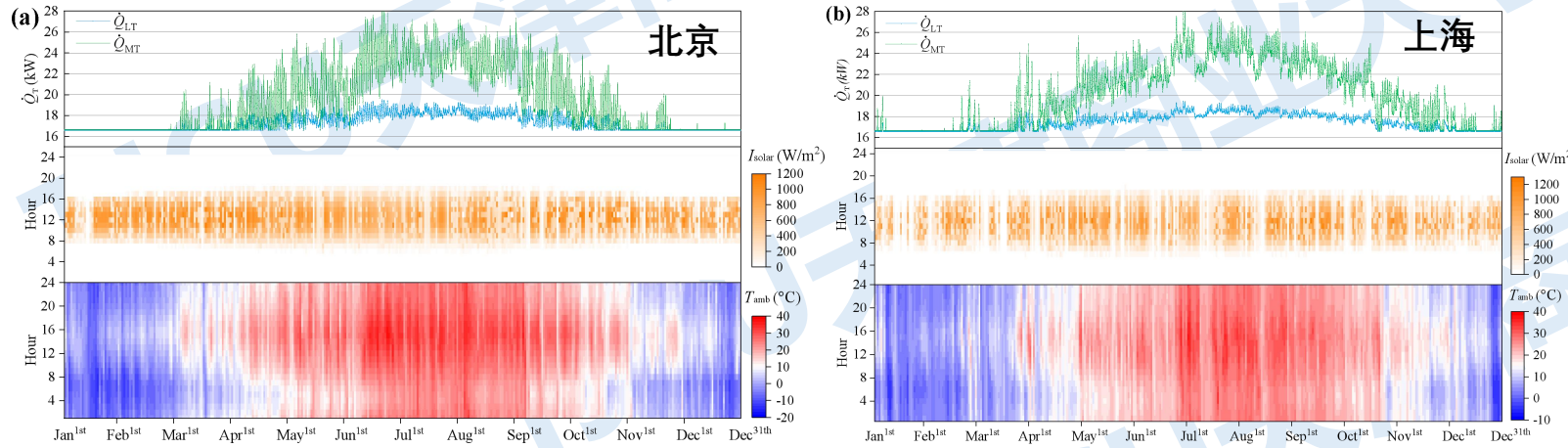
(SE+WH)



2.2.1 吸收式过冷CO₂制冷系统

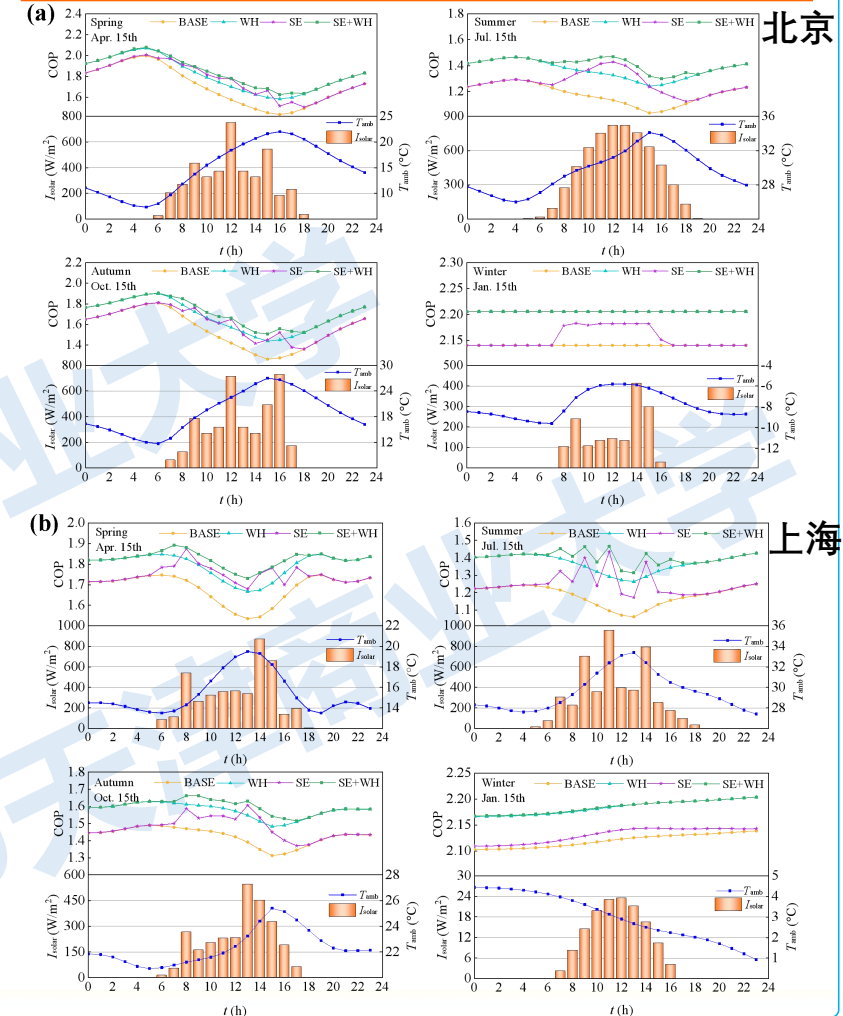
2.2.1.3 结果分析

典型城市的年每小时制冷负荷和环境参数



1. **Dai Baomin**, et al. Hybrid solar energy and waste heat driving absorption subcooling supermarket CO₂ refrigeration system: Energetic, carbon emission and economic evaluation in China. *Solar Energy*, 2022, 247, 123-145. (SCI二区, Top期刊, IF = 6.7)

COP、环境温度和太阳辐射强度在对应于四季的典型日子中的变化





基于过冷技术的 CO₂制冷系统构建

电驱动过冷CO₂ 系统

2.1.1 机械过冷CO₂系统

- 机械过冷CO₂商超制冷系统
- 机械过冷跨临界CO₂冷热联供系统
- 基于引射器+机械过冷的全年 CO₂ 供冷供热系统

热驱动过冷CO₂ 系统

2.2.1 吸收式过冷CO₂制冷系统

2.2.2 太阳能驱动吸附过冷CO₂商超制冷系统

自然冷源驱动过 冷CO₂系统

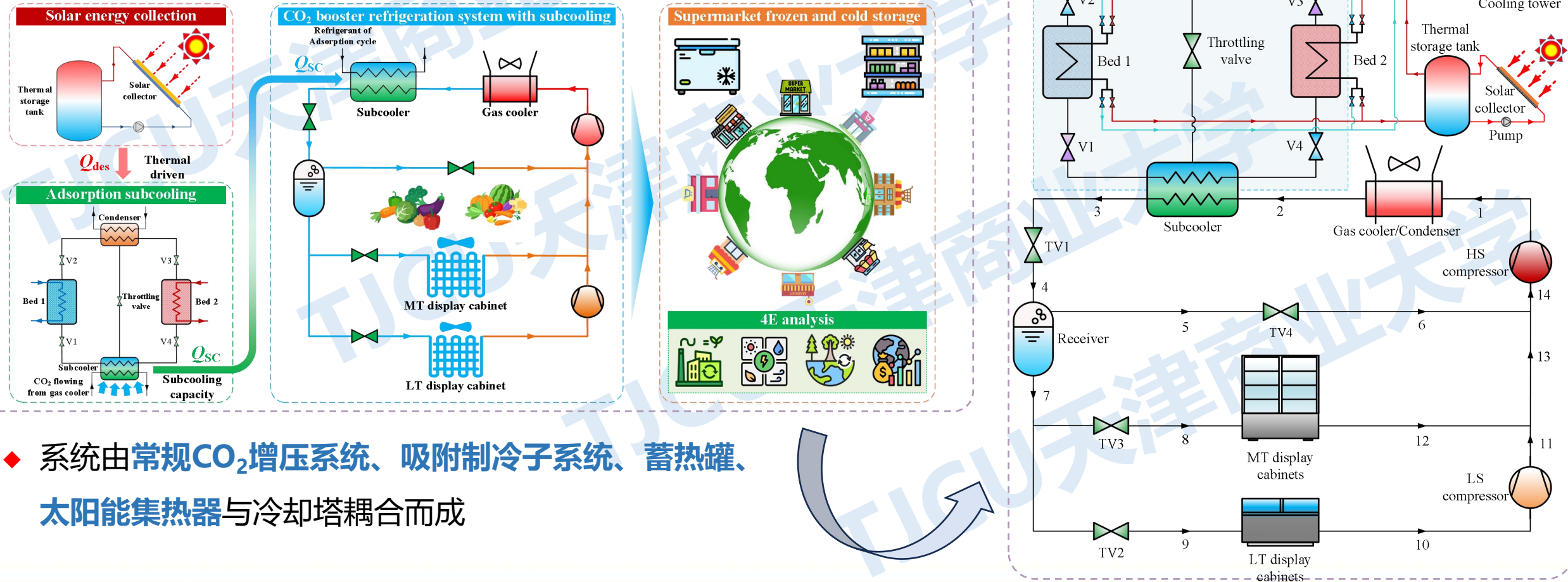
2.3.1 天空辐射过冷CO₂ 商超制冷系统

2.3.2 土壤蓄冷过冷CO₂ 制冷系统

- 土壤蓄冷过冷CO₂ 商超制冷系统

2.2.2 太阳能驱动吸附过冷CO₂商超制冷系统

2.2.2.1 系统描述



- ◆ 系统由常规CO₂增压系统、吸附制冷子系统、蓄热罐、太阳能集热器与冷却塔耦合而成

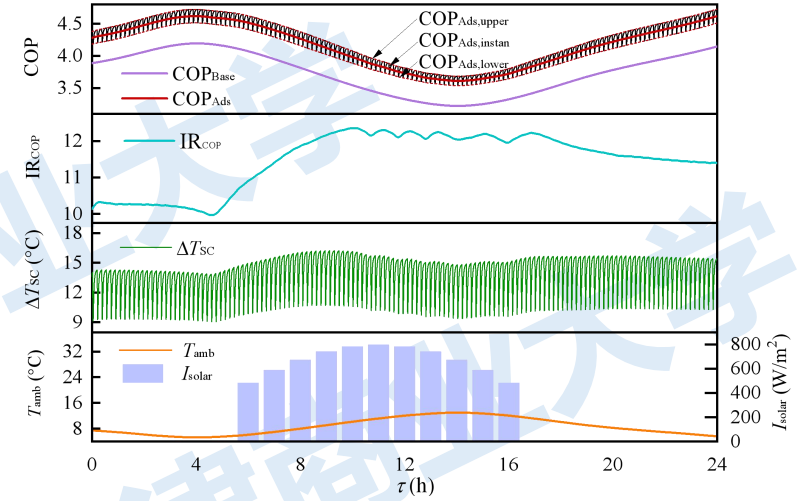
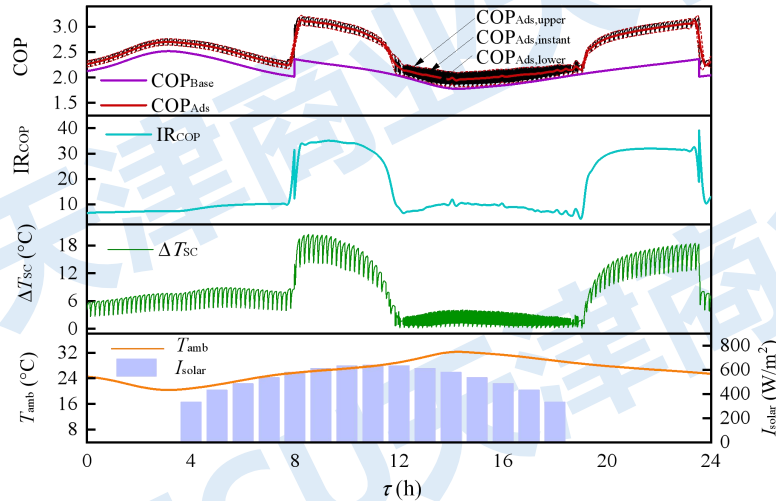
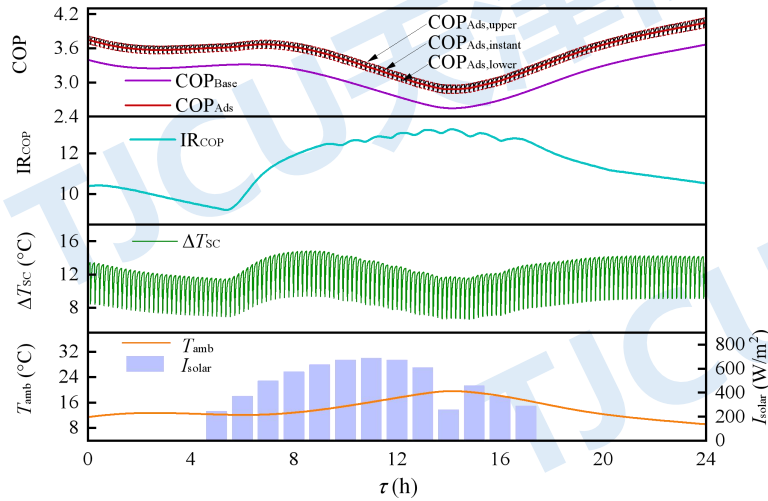


2.2.2 太阳能驱动吸附过冷CO₂商超制冷系统

2.2.2.3 结果分析

北京-典型日

性能系数



□ 选取北京气候条件下**春夏秋**三个典型日

□ 受吸附式过冷系统影响，增压系统**过冷度**发生**周期性变化**，**COP**也呈现**周期性波动**

□ 由于高温条件下需对排气压力进行优化，**春秋季COP波动变化相对夏季更平稳**

□ 春秋季COP提升率在**8%至13%**之间，受环境温度与太阳辐射强度影响；夏季COP提升率在**1%至50.9%**之间，主要受环境温度影响

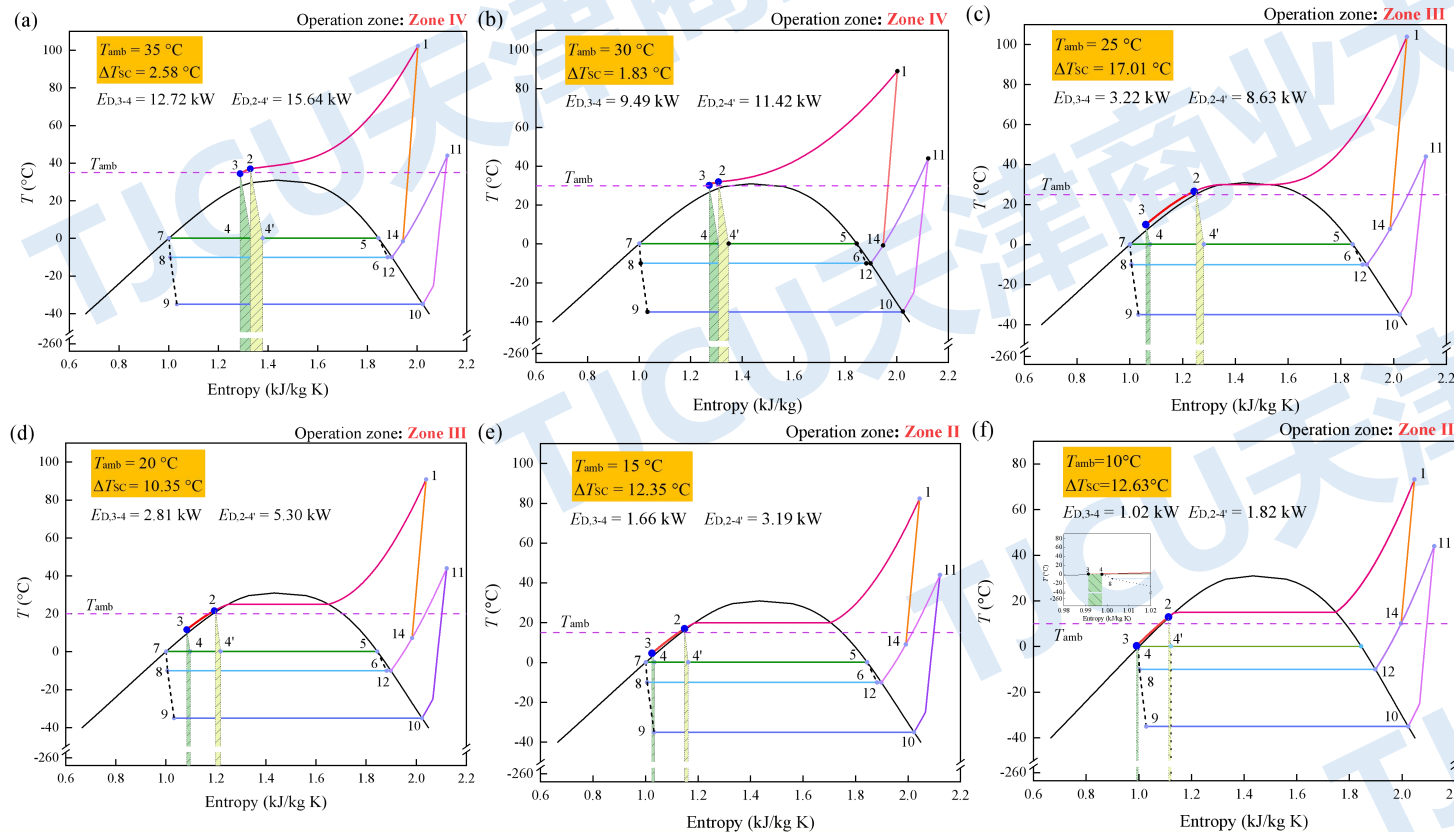


2.2.2 太阳能驱动吸附过冷CO₂商超制冷系统

2.2.2.3 结果分析

北京-典型日

温焓图



□选取35℃、30℃、25℃、20℃、15℃、10℃

六个典型温度与其对应平均过冷度

□环境温度在30℃时，过冷度最低

□在III区温度范围内（17℃~25℃）过冷度变

化大，且随温度升高而增大



基于过冷技术的 CO₂制冷系统构建

电驱动过冷CO₂ 系统

2.1.1 机械过冷CO₂系统

- 机械过冷CO₂商超制冷系统
- 机械过冷跨临界CO₂冷热联供系统
- 基于引射器+机械过冷的全年 CO₂ 供冷供热系统

热驱动过冷CO₂ 系统

2.2.1 吸收式过冷CO₂制冷系统

2.2.2 太阳能驱动吸附过冷CO₂商超制冷系统

自然冷源驱动过 冷CO₂系统

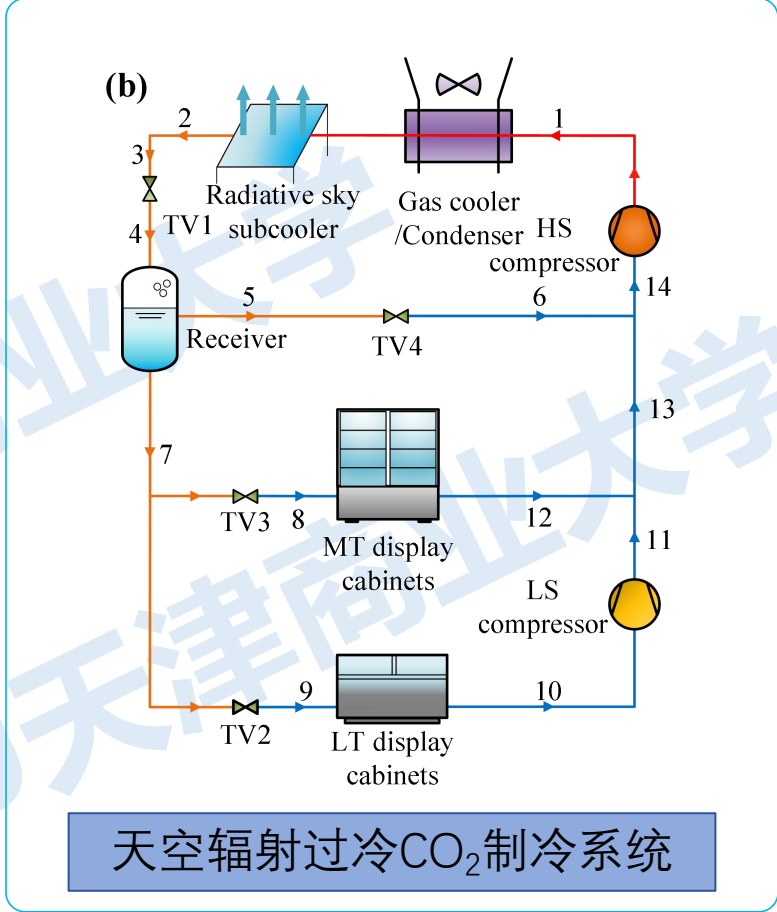
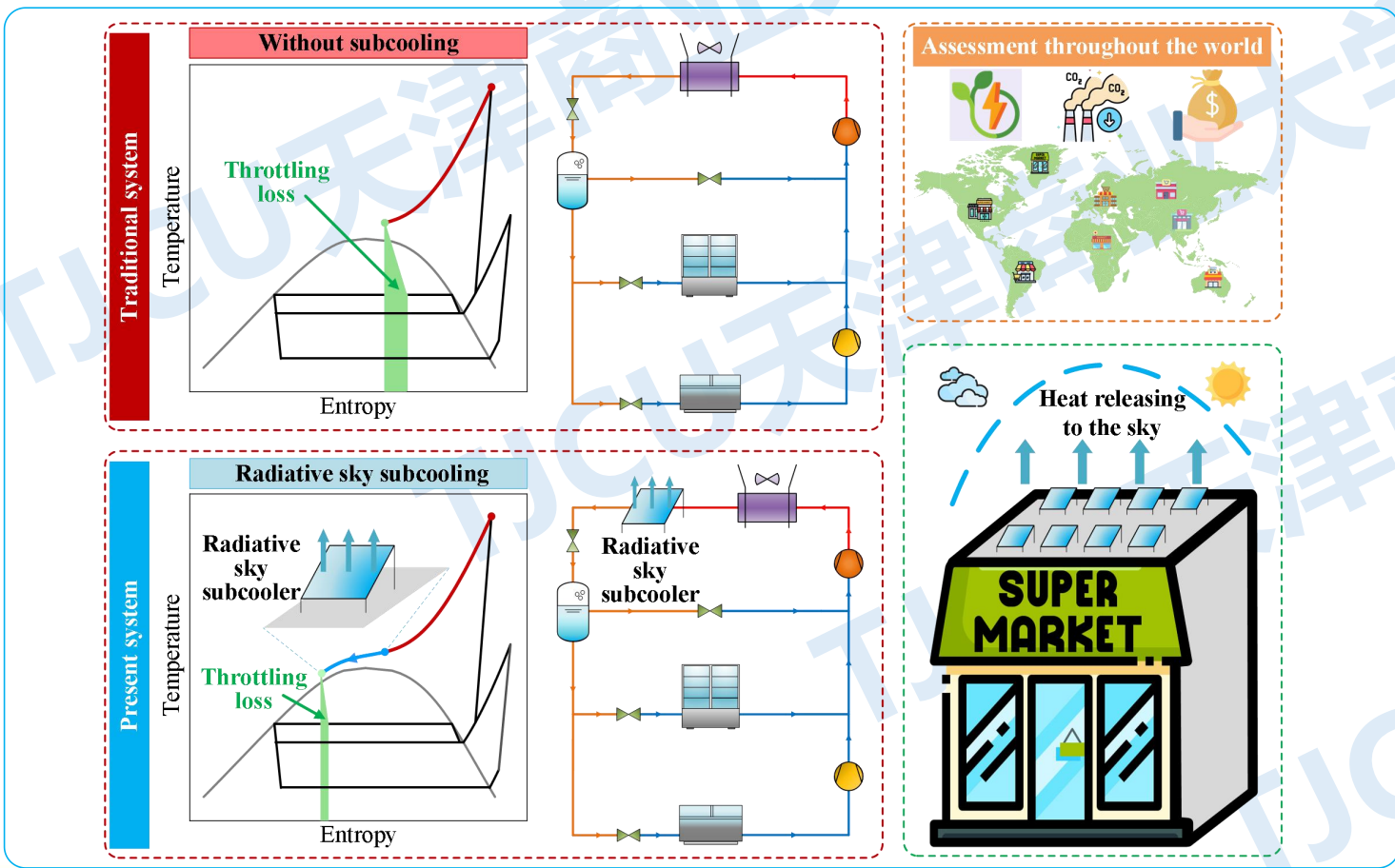
2.3.1 天空辐射过冷CO₂ 商超制冷系统

2.3.2 土壤蓄冷过冷CO₂ 制冷系统

- 土壤蓄冷过冷CO₂ 商超制冷系统

2.3.1 天空辐射过冷CO₂ 商超制冷系统

2.3.1.1 系统描述



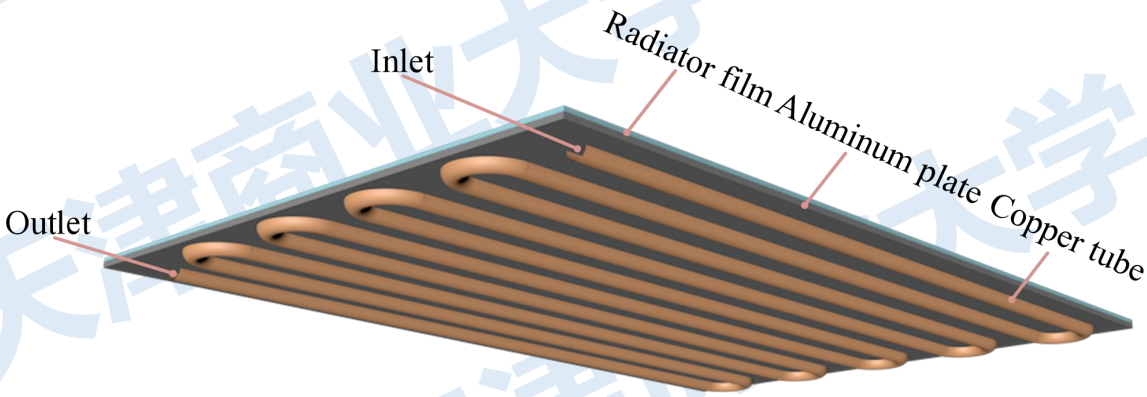
2.3.1 天空辐射过冷CO₂ 商超制冷系统

2.3.1.2 模型建立

系统结构参数

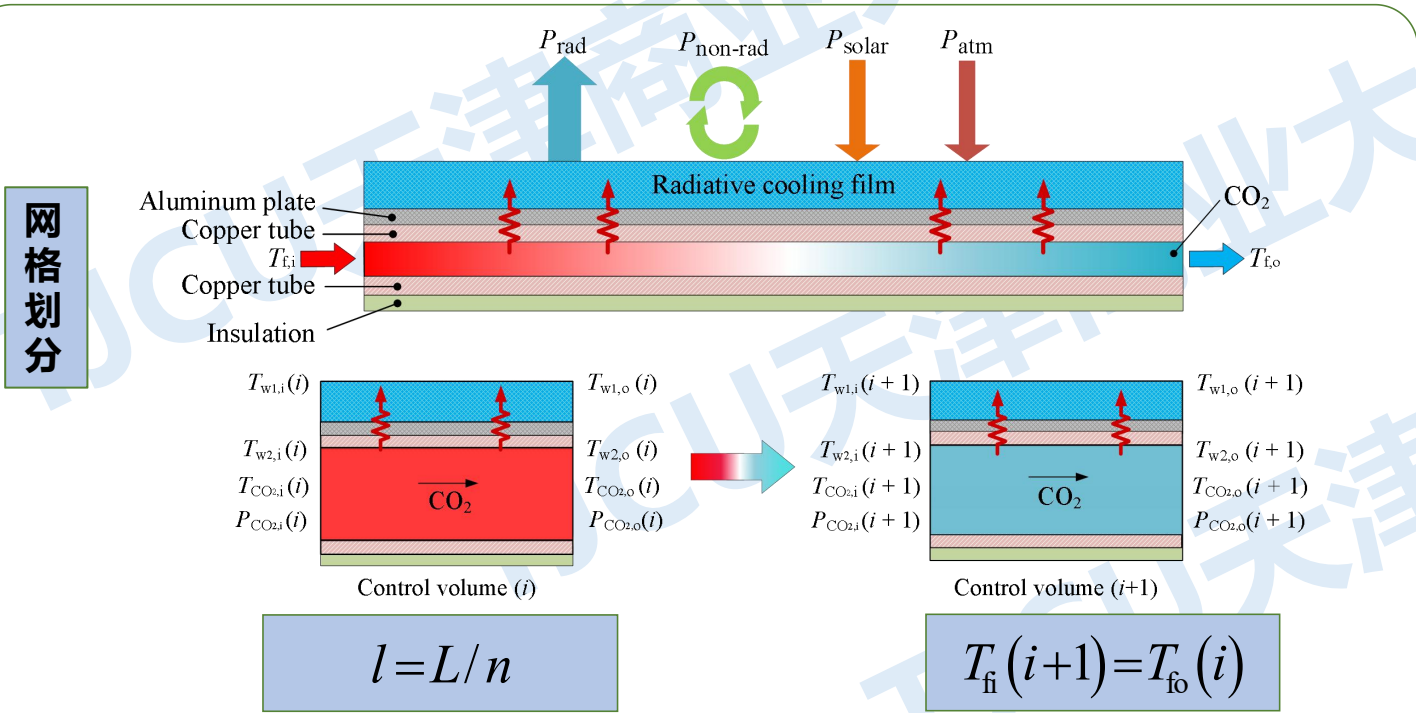
| 名称 | 物理参数 | 数值 | 单位 |
|---------|------------------|-------------------|----------------------|
| 天空辐射表面 | 材料 | PMMA | - |
| | 面积 A_{rc} | 200 | m ² |
| | 长度 L_p | 56.1 | m |
| | 厚度 σ_{rc} | 300 | μm |
| | 导热系数 k_{rc} | 0.2 | W/(m K) |
| 换热管 | 材料 | Cu | - |
| | 导热系数 k_{cu} | 397 | W/(m K) |
| | 壁厚 σ_{cu} | 1.5 | mm |
| | 外径 D_o | 9.52 | mm |
| 二氧化碳制冷剂 | 对流换热系数 h_f | 60 | W/(m ² K) |
| 室外空气 | 换热系数 h_{con} | $5.7+3.8v_{wind}$ | W/(m ² K) |

模型假设



2.3.1 天空辐射过冷CO₂ 商超制冷系统

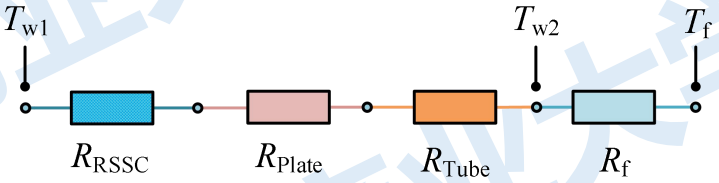
2.3.1.1 系统描述



- 对过冷器进行一维传热过程假设，为提高计算数据的准确性与稳定性，不考虑CO₂流体在径向流动方向的热扰动影响
- 对天空辐射过冷器沿流体流动方向进行轴向线性均匀离散分析其换热过程

热流网路模型与热阻计算模型

- 在所建天空辐射过冷器物理模型与网格划分模型的基础上建立热流平衡方程，沿热量传递的方向依次建立温度节点并计算热阻



$$R_r = \frac{1}{h_r}$$

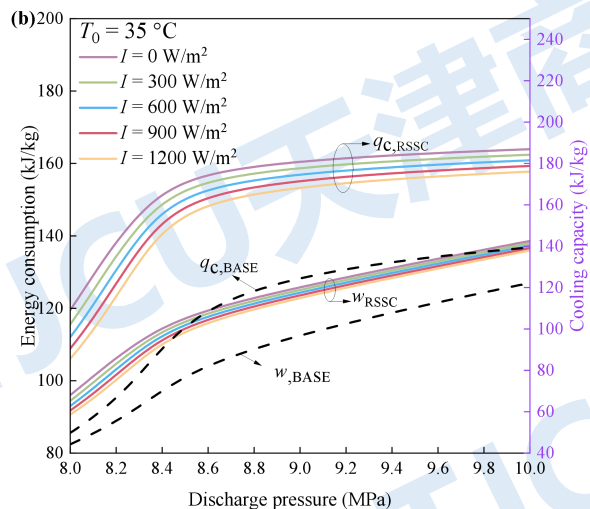
$$R_{con} = \frac{1}{h_{con}}$$

$$R_{rc} = \frac{\sigma_{rc}}{k_{rc}}$$

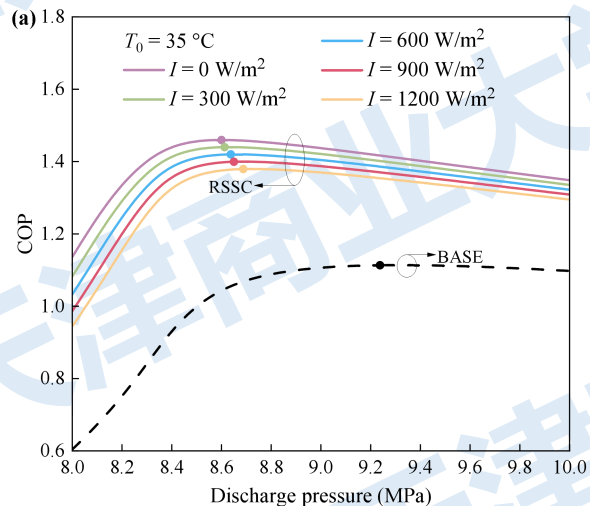
$$R_{tot} = R_{con} + R_{rc} + R_r + R_f$$

2.3.1 天空辐射过冷CO₂ 商超制冷系统

2.3.1.3 结果分析

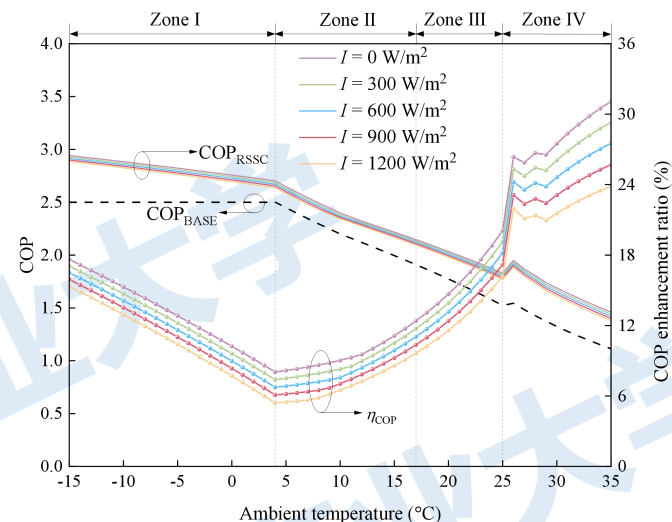


耗功随排气压力的变化



COP随排气压力的变化

- 太阳辐射强度为600W/m²，环境温度为35℃时COP随排气压力的变化呈先增大后减小的趋势，存在**最大COP**；
- 环境温度一定的情况下，制冷量先快速后缓慢增大，系统的耗功**逐渐增大**；
- 随着太阳辐射强度的增大，系统耗功**逐渐增大**，COP**逐渐减小**；



COP

- RSSC的**COP**始终大于BASE；
- COP提升率随着**环境温度**的升高整体呈增大的趋势；
- COP提升率和**太阳辐射强度**呈负相关；



基于过冷技术的 CO₂制冷系统构建

电驱动过冷CO₂ 系统

2.1.1 机械过冷CO₂系统

- 机械过冷CO₂商超制冷系统
- 机械过冷跨临界CO₂冷热联供系统
- 基于引射器+机械过冷的全年 CO₂ 供冷供热系统

热驱动过冷CO₂ 系统

2.2.1 吸收式过冷CO₂制冷系统

2.2.2 太阳能驱动吸附过冷CO₂商超制冷系统

自然冷源驱动过 冷CO₂系统

2.3.1 天空辐射过冷CO₂ 商超制冷系统

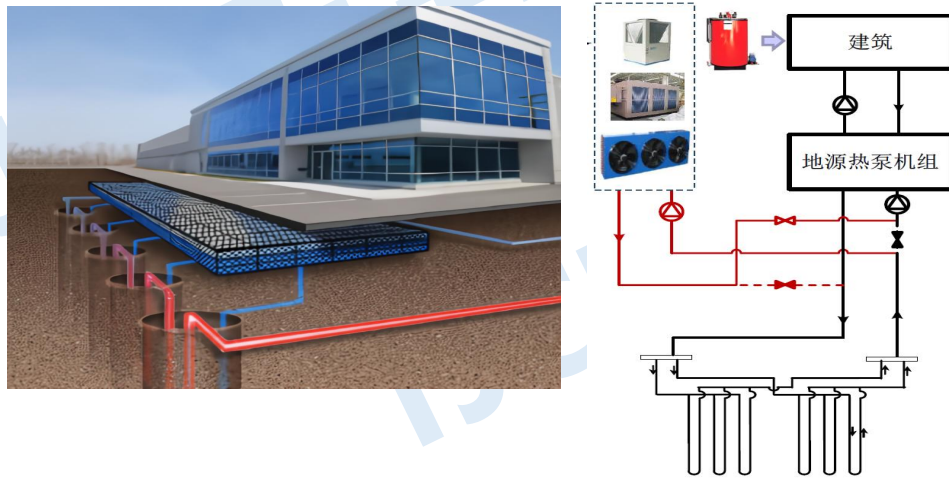
2.3.2 土壤蓄冷过冷CO₂ 制冷系统

- 土壤蓄冷过冷CO₂ 商超制冷系统

2.3.2 土壤蓄冷过冷CO₂ 商超制冷系统

系统描述

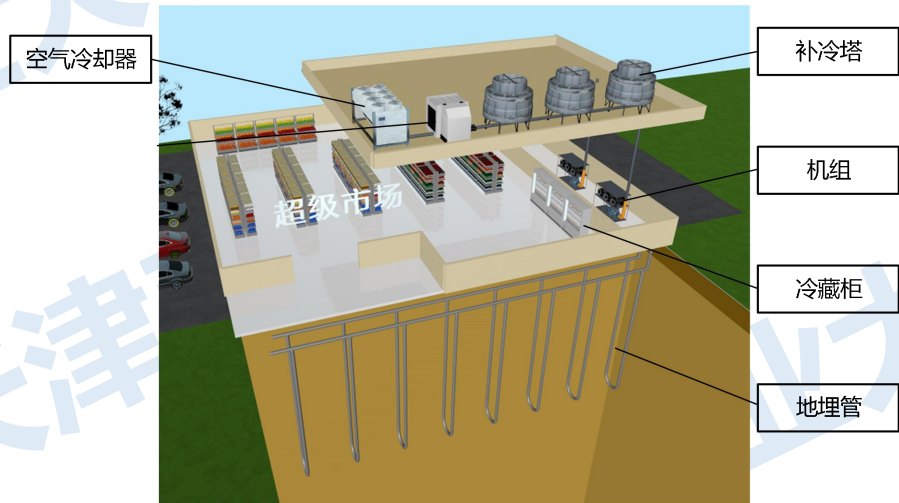
常规地源热泵



- ❑ 国外：20世纪80年代，土壤源热泵迅速发展
- ❑ 国内：1989年最早研究土壤源热泵

- 地下季节性蓄能有利于**可再生能源的高效利用**
- **有效解决**可再生能源与运行系统在**时间、空间和强度上的不匹配特性**
- **克服**短期蓄能系统的**不稳定性**和**低效率**

跨季节土壤蓄冷过冷系统

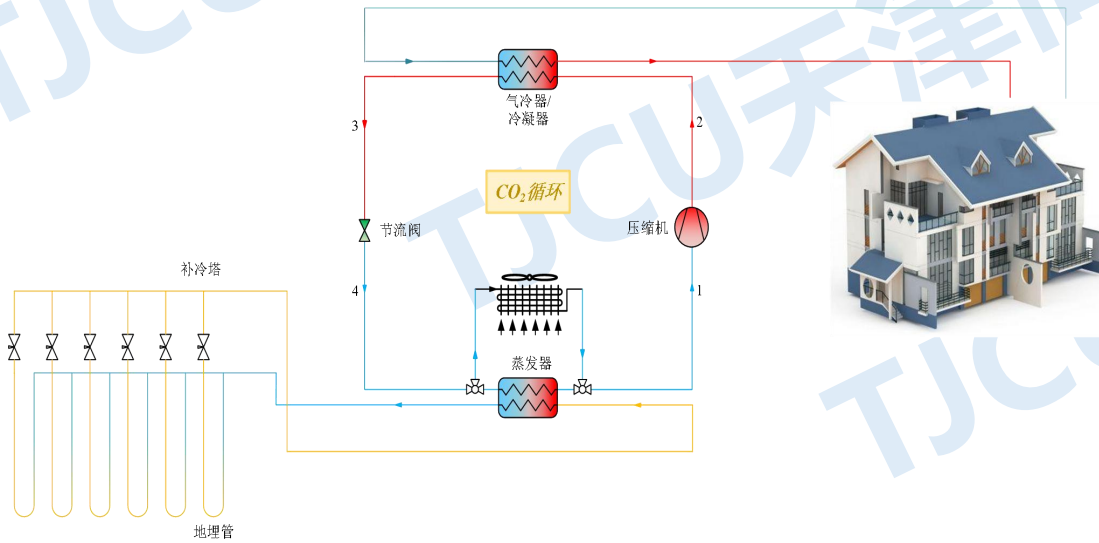


- ❑ 创新性地利用冬季冷能，通过土壤进行跨季节储存，并用于自然工质CO₂过冷

2.3.2 土壤蓄冷过冷CO₂ 商超制冷系统

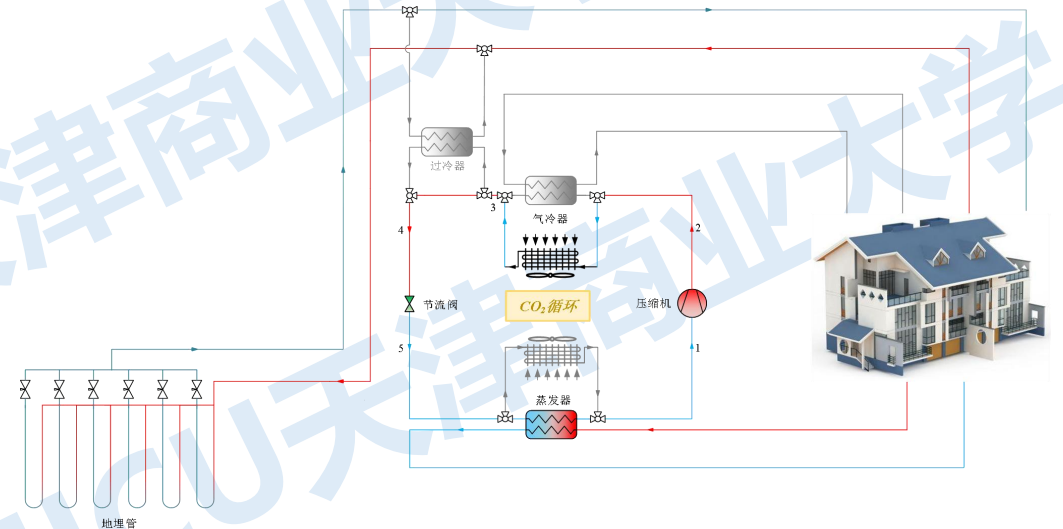
模式一

$T_{\text{amb}} < 18\text{ }^{\circ}\text{C}$
SECS 系统为建筑供暖



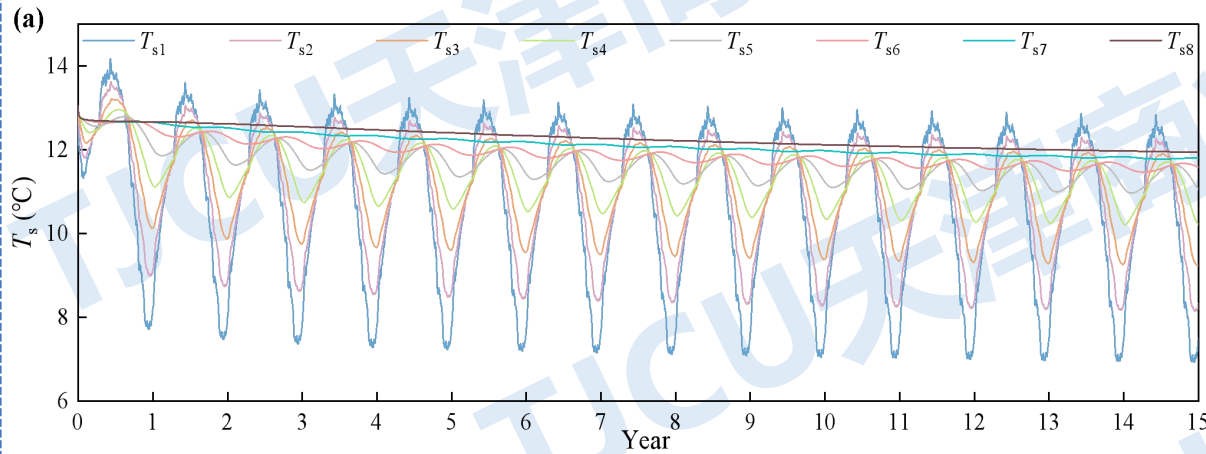
模式二

$T_{\text{amb}} > 26\text{ }^{\circ}\text{C}$
SECS 系统和CO₂ 制冷循环为建筑提供冷量

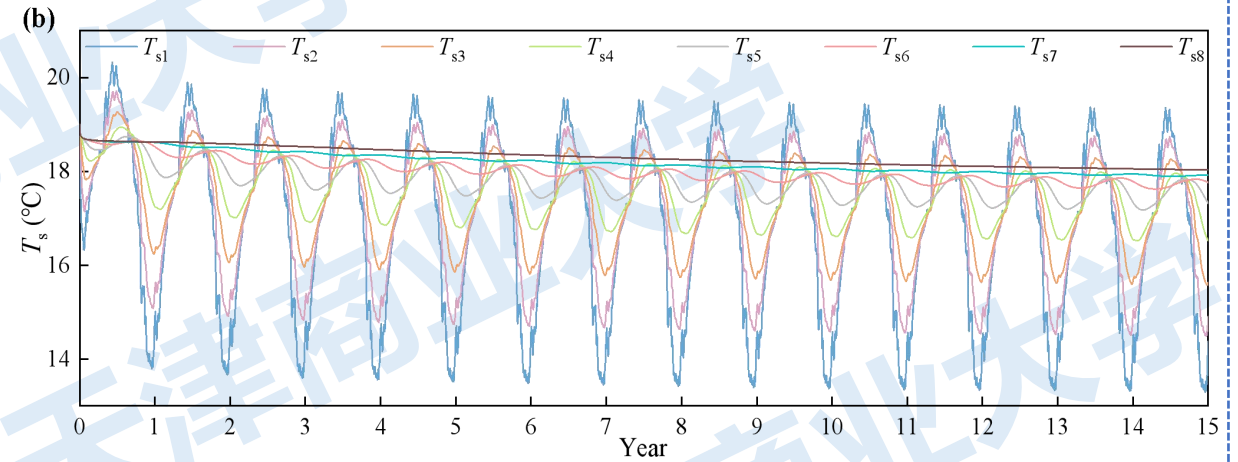


2.3.2 土壤蓄冷过冷CO₂ 商超制冷系统 结果分析

15年运行结果分析



北京



上海

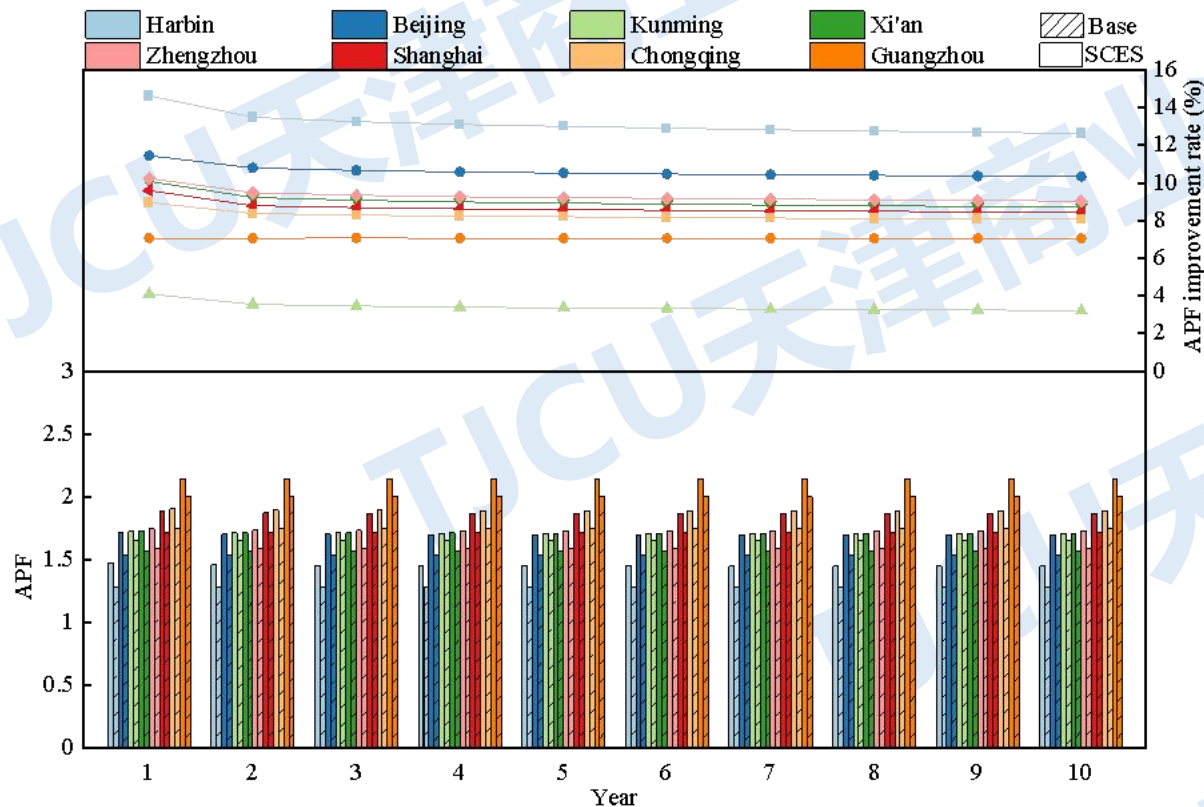
- 埋管近处的温度波动较大，而埋管远处的温度波动较小，且随着时间推移温度逐渐下降，出现冷累积现象。
- 八个土层在第一年和最后一年的平均温度分别为 13.05°C 和 10.21°C。15 年间温度下降了 2.84°C。



2.3.2 土壤蓄冷过冷CO₂ 商超制冷系统

结果分析

全年性能系数



- SCES系统的APF随时间的增加呈现出**不规律变化**。
- 八个城市SCES系统的APF分别比Base系统都显著提高，提高率**3.21~14.62%**。
- 冬季时蒸发器侧温度降低，因此系统的耗功增加，而夏季的过冷度得到增加，系统的耗功减少，进而出现冷量堆积。
- 该系统更适合在低纬度地区使用。



汇报 目录

一、背景介绍

二、CO₂制冷系统构建研究

三、CO₂制冷系统样机开发

四、CO₂制冷系统产业服务

五、结论及展望

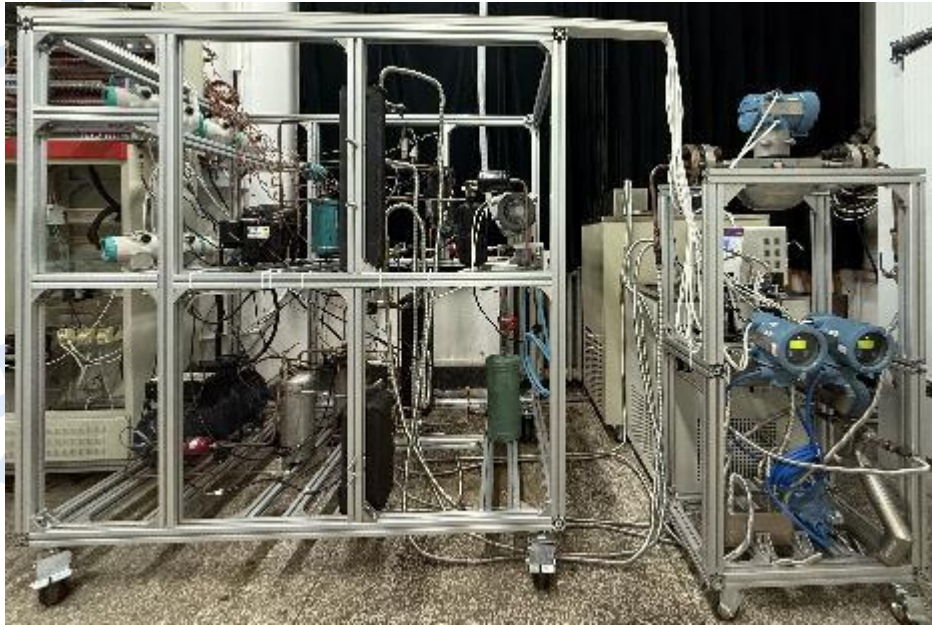
3.1 CO₂制冷系统原理样机



机械过冷系统 (V1.0)

原理样机包括:

- 跨临界CO₂子系统 (主循环)
- 机械过冷子系统 (机械过冷循环)



机械过冷系统 (V1.1)

- 水路系统
- 数据采集系统
- 控制系统

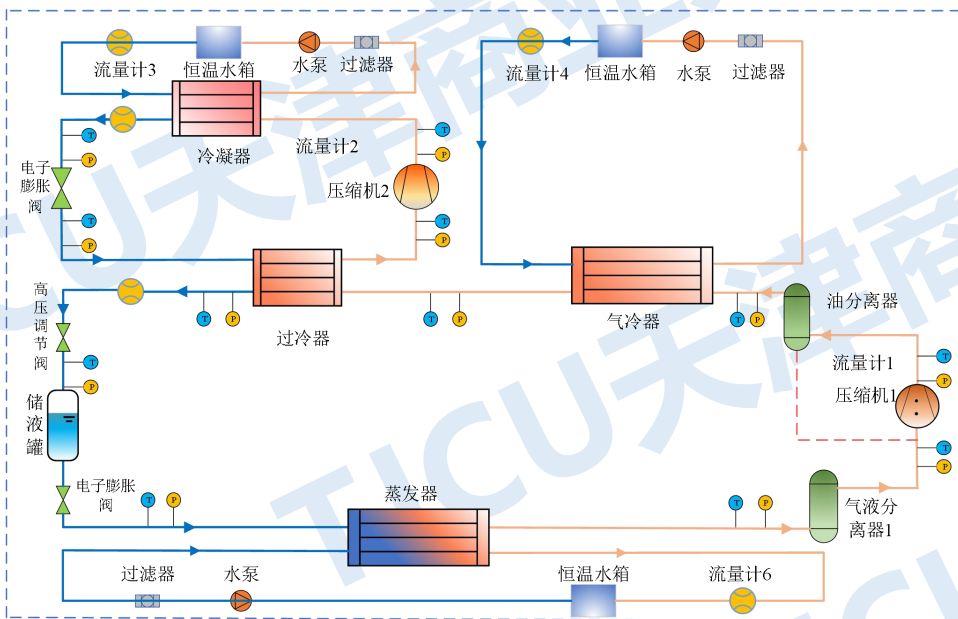


**补气增焓+
机械过冷系统
(V2.0)**

3.1 CO₂制冷系统原理样机

3.1.1 CO₂机械过冷系统 (1.0版本)

实验系统原理图



实验台



V1.0版本

针对CO₂制冷热泵系统节流损失过大的问题，采用机械过冷的方式进行解决。在主循环中耦合一个蒸汽压缩系统对气冷器出口CO₂进行过冷，降低节流前的温度和焓值，加强换热，提升系统能效。过冷器同时相当于是机械过冷循环的蒸发器。

本实验装置由：

- 跨临界CO₂子系统 (主循环)
- 机械过冷子系统 (机械过冷循环)

- 水路系统
- 数据采集系统
- 控制系统

3.1 CO₂制冷系统原理样机

3.1.1 CO₂机械过冷系统（1.0版本）



CO₂压缩机



R290压缩机

- 主循环采用的压缩机：**都凌活塞式跨临界CO₂压缩机**
- 机械过冷循环采用的压缩机：**松下转子压缩机**

| 设备名称 | 类型 | 主要参数 |
|---------------------|--------|-----------------|
| CO ₂ 压缩机 | 活塞式压缩机 | 型号：CD180H |
| | | 额定转速：1450 r/min |
| | | 额定排气量1.12 m³/h |
| | | 匹数：1.8 HP |
| R290压缩机 | 转子式压缩机 | 型号：7SD110ZAC61 |
| | | 匹数：0.8 HP |
| | | 输入功率：540 W |
| | | 制冷量：1990 W |

实验台中的
换热器均采用同轴套管
式换热器



换热器

同轴套管换热器的优点：

- 结构简单
- 承压能力强
- 应用范围广
- 可通过提高两侧流体流速增大换热系数
- 传热效果好

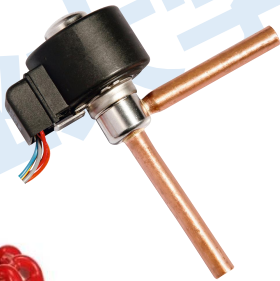
电子膨胀阀：三花电子膨胀阀

手动节流阀：针阀

节流部分采用并联式设置成两路：

一路采用手动节流阀进行手动控制另一路节流装置由背压阀，储液罐，电子膨胀阀组成

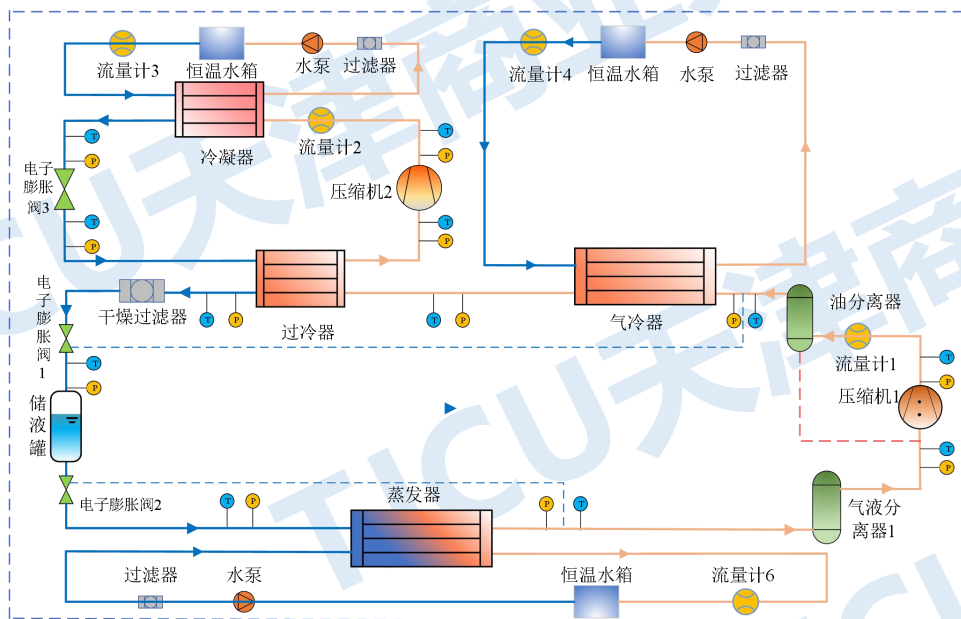
节流阀



3.1 CO₂制冷系统原理样机

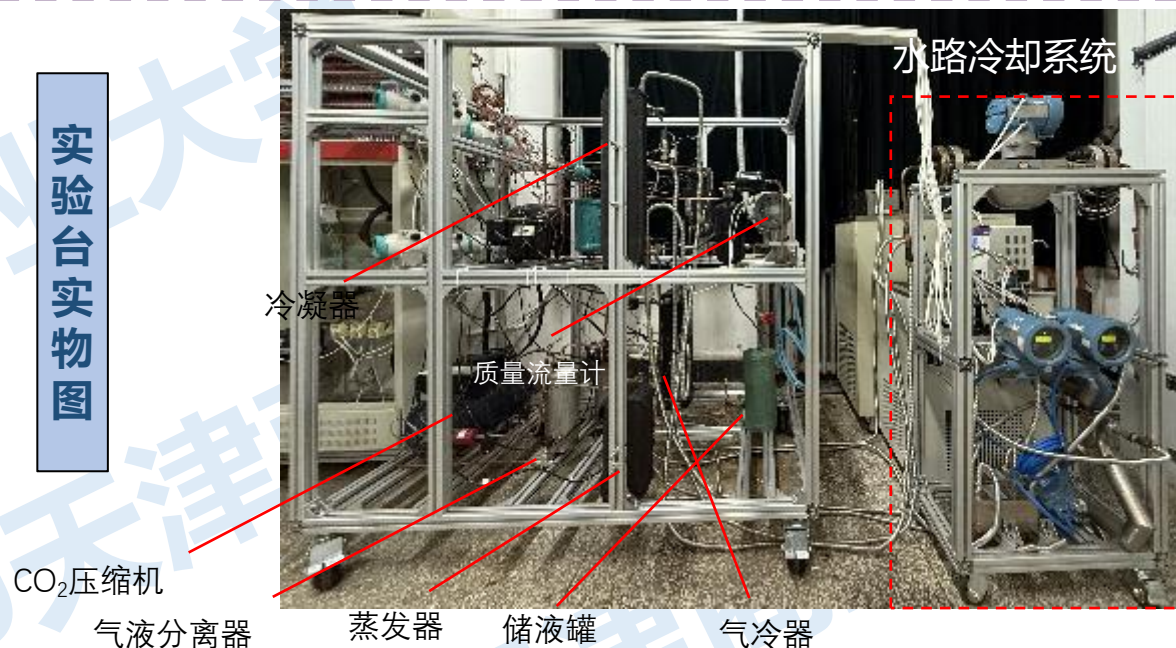
3.1.2 CO₂机械过冷系统 (1.1版本)

实验系统原理图



针对CO₂制冷热泵系统节流损失过大的问题，采用机械过冷的方式进行解决。在主循环中耦合一个蒸汽压缩系统对气冷器出口CO₂进行过冷，降低节流前的温度和焓值，加强换热，提升系统能效。过冷器同时相当于是过冷循环的蒸发器。

实验台实物图



V1.1版本

实验样机装置构成:

- ❑ 跨临界CO₂子系统 (主循环)
- ❑ 机械过冷子系统 (机械过冷循环)

- ❑ 水路系统
- ❑ 数据采集系统
- ❑ 控制系统

3.1 CO₂制冷系统原理样机

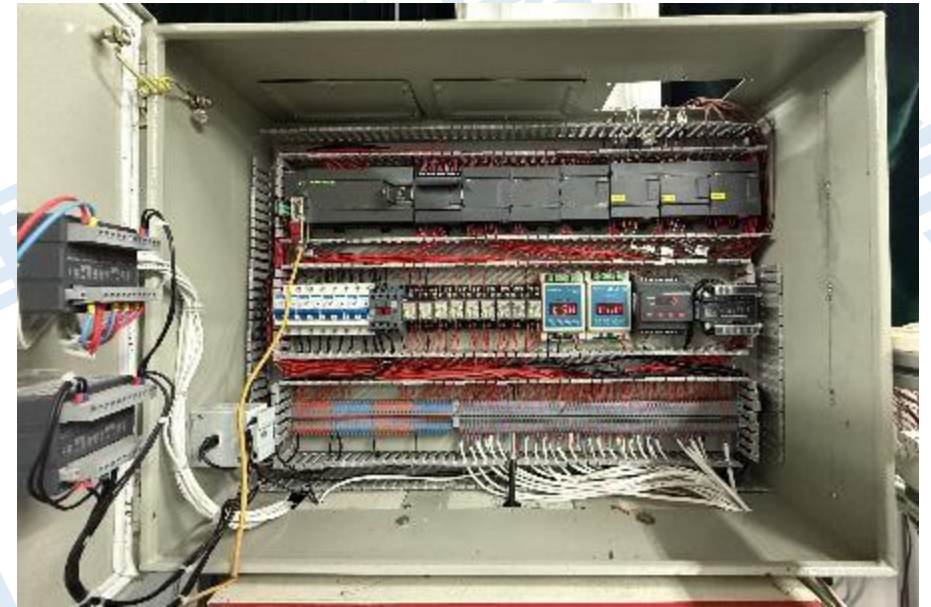
3.1.2 CO₂机械过冷系统 (1.1版本)

V1.1版本PLC控制系统

控制网络系统



PLC与电控柜实物图



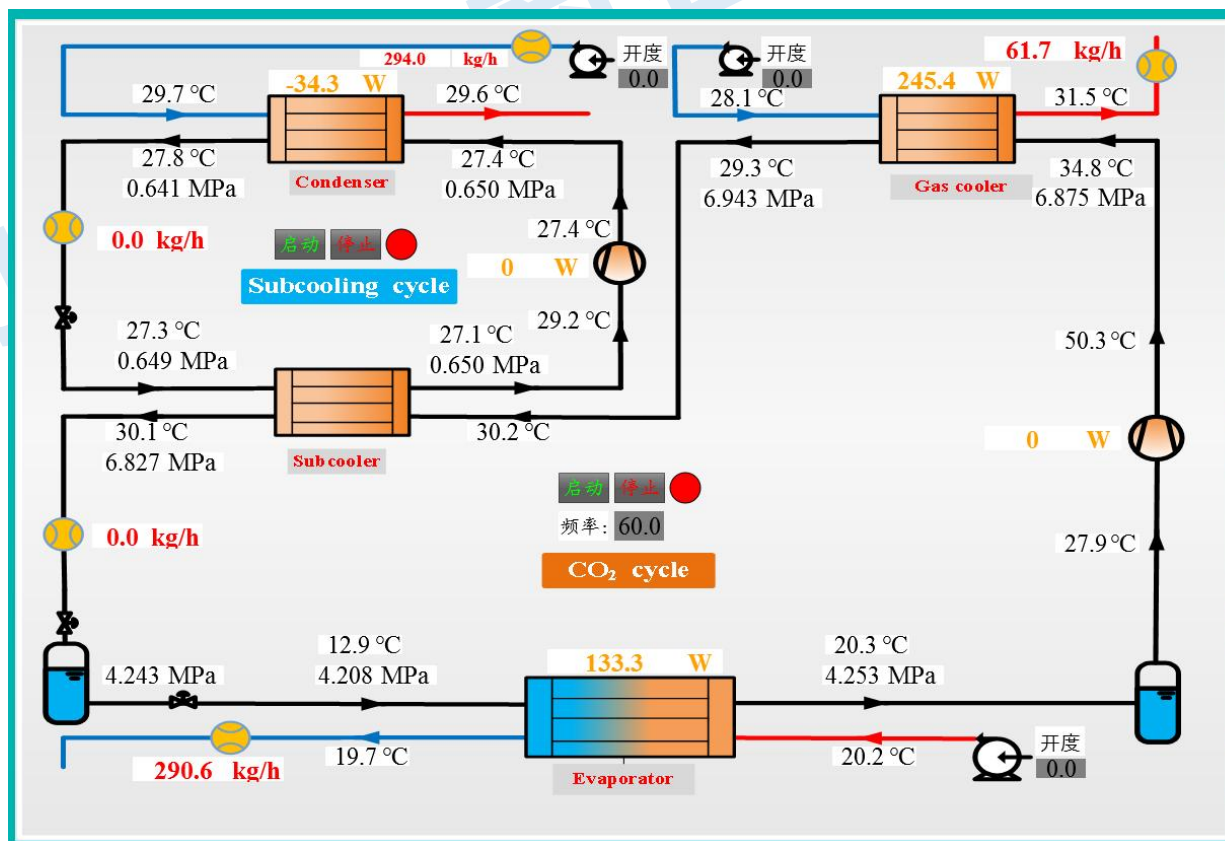


3.1 CO₂制冷系统原理样机

3.1.2 CO₂机械过冷系统 (1.1版本)

控制界面

控制界面



| | |
|------------|--------|
| EV自动 | EV手动 |
| 设定辅助循环过热度: | 0.0 |
| 实际辅助循环过热度: | -2.9 |
| 设定辅助循环开度: | 50.0 |
| R134a过冷度: | 0.9 |
| 气冷器水侧比热: | 4200.0 |
| 冷凝器水侧比热: | 4200.0 |
| 蒸发器水侧比热: | 3300.0 |
| 总制热量: | 211.1 |
| 总功率: | 0 |
| 辅助循环COP: | -34.29 |
| Base_COP: | 0.00 |
| 总COP: | 0.00 |



3.1 CO₂制冷系统原理样机

3.1.3 CO₂机械过冷系统 (2.0版本)

实验系统原理图



模式一

模式二

采用**机械过冷加补气增焓系统**，在主循环中耦合一个蒸汽压缩系统对气冷器出口CO₂进行过冷，降低节流前的温度和焓值，经济器出口与压缩机一级排气汇合对压缩机进行补气，显著增强系统制热能力与能效

实验台实物图



实验样机装置构成：**V2.0版本**

- **跨临界CO₂子系统** (主循环)
- **机械过冷子系统** (机械过冷循环)
- **补气增焓系统** (主循环)

- 水路系统
- 数据采集系统
- 控制系统

3.1 CO₂制冷系统原理样机

3.1.3 CO₂机械过冷系统 (2.0版本)



CO₂压缩机



R290压缩机

- 主循环采用的压缩机：**松下双转子CO₂压缩机**
- 过冷循环采用的压缩机：**海立转子压缩机**

| 设备名称 | 类型 | 主要参数 |
|---------------------|--------|-------------------------|
| CO ₂ 压缩机 | 转子压缩机 | 型号C-CV163L0A/804 393 60 |
| | | 额定转速：60r/s |
| | | 匹数：2HP |
| | | 额定制冷量：3700 W |
| R290压缩机 | 转子式压缩机 | 型号：WHP03300PRKQA6JT6 |
| | | 额定转速：10~120r/s |
| | | 输入功率：710 W |
| | | 制热量：3380 W |

电子膨胀阀



电磁阀



控制器



质量流量计

- 采用的是E+H质量流量计：
- 承压能力强 (160Bar)
 - 应用范围广
 - 精准度高



压力变送器





3.1 CO₂制冷系统原理样机

3.1.3 CO₂机械过冷系统 (2.0版本)

V2.0版本PLC控制系统

控制界面



PLC与电控柜实物图

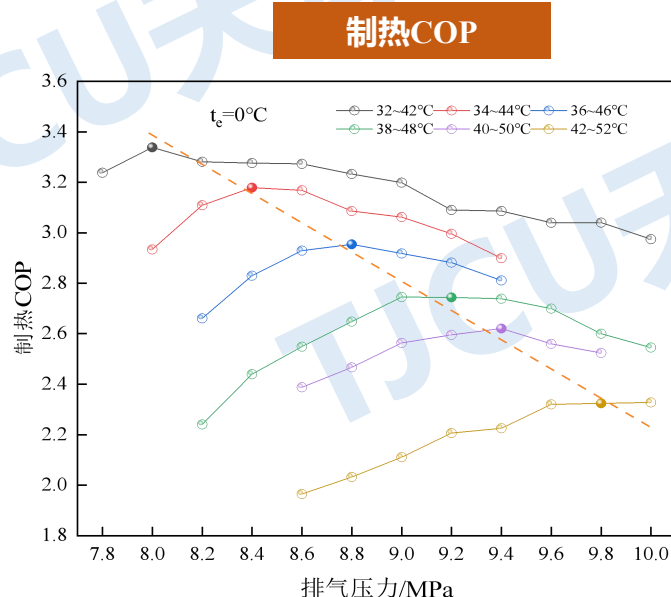


V2.0版本

3.2 CO₂原理样机测试结果

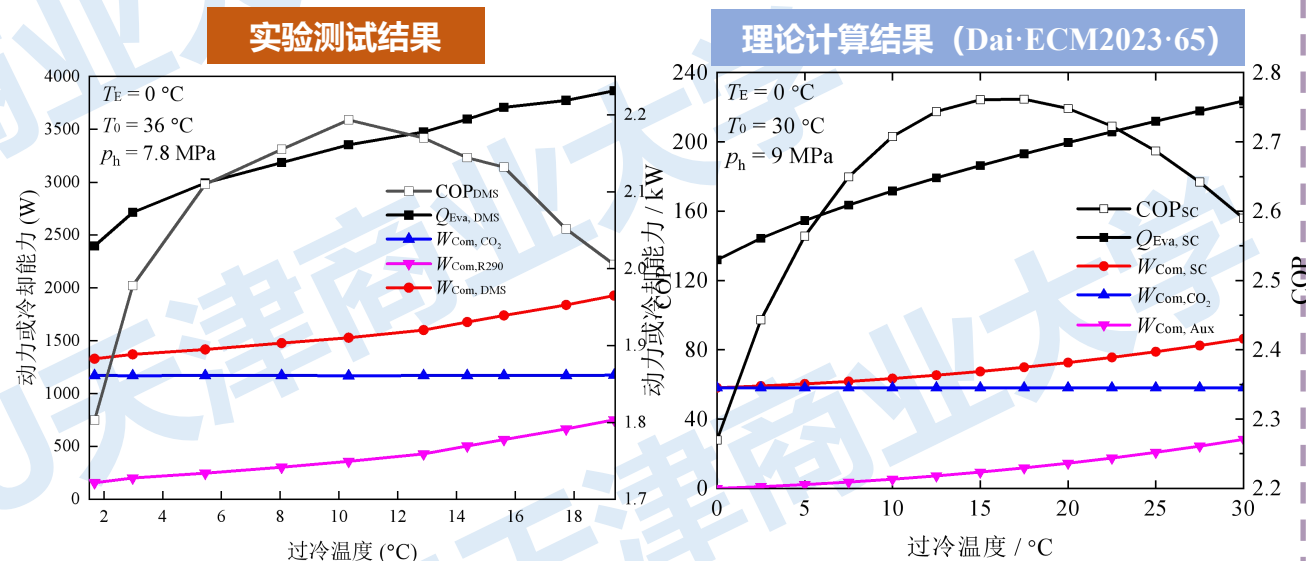
3.2.1 结果分析 (基于R290机械过冷-单级压缩CO₂系统)

COP随排气压力变化关系



□ 最优工况, COP随着排气压力先增大后减小, 存在最优排气压力

性能参数随过冷度的变化关系



□ COP、制冷量、总耗功 CO₂压缩机功耗和R290压缩机功率随过冷度的变化规律



3.3 CO₂制冷系统现场测试

3.3.1 CO₂制冷系统现场测试系统



机组位置

室外集成机组



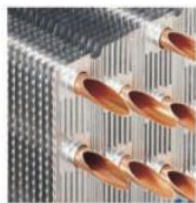
室内商超冷库



压缩机



油位平衡器



气冷器



气冷器风扇



数据采集箱



冷库控制箱



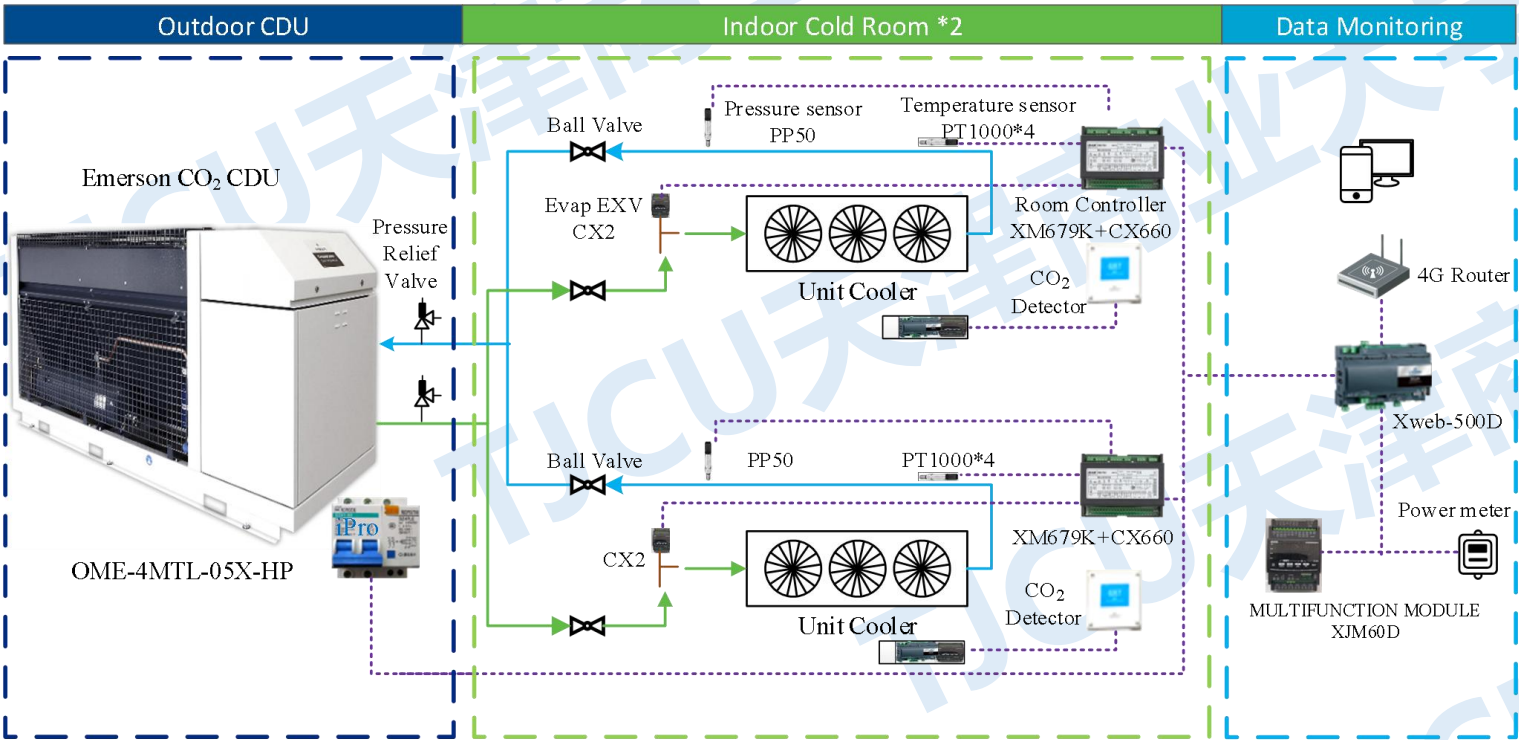
CO₂浓度仪



电子膨胀阀

3.3 CO₂制冷系统现场测试

3.3.1 CO₂制冷系统现场测试系统



跨临界CO₂测试系统图

试验台建在江苏苏州的一家商场，为两台中温冰柜提供冷量，以保证冰柜内的食物品质。

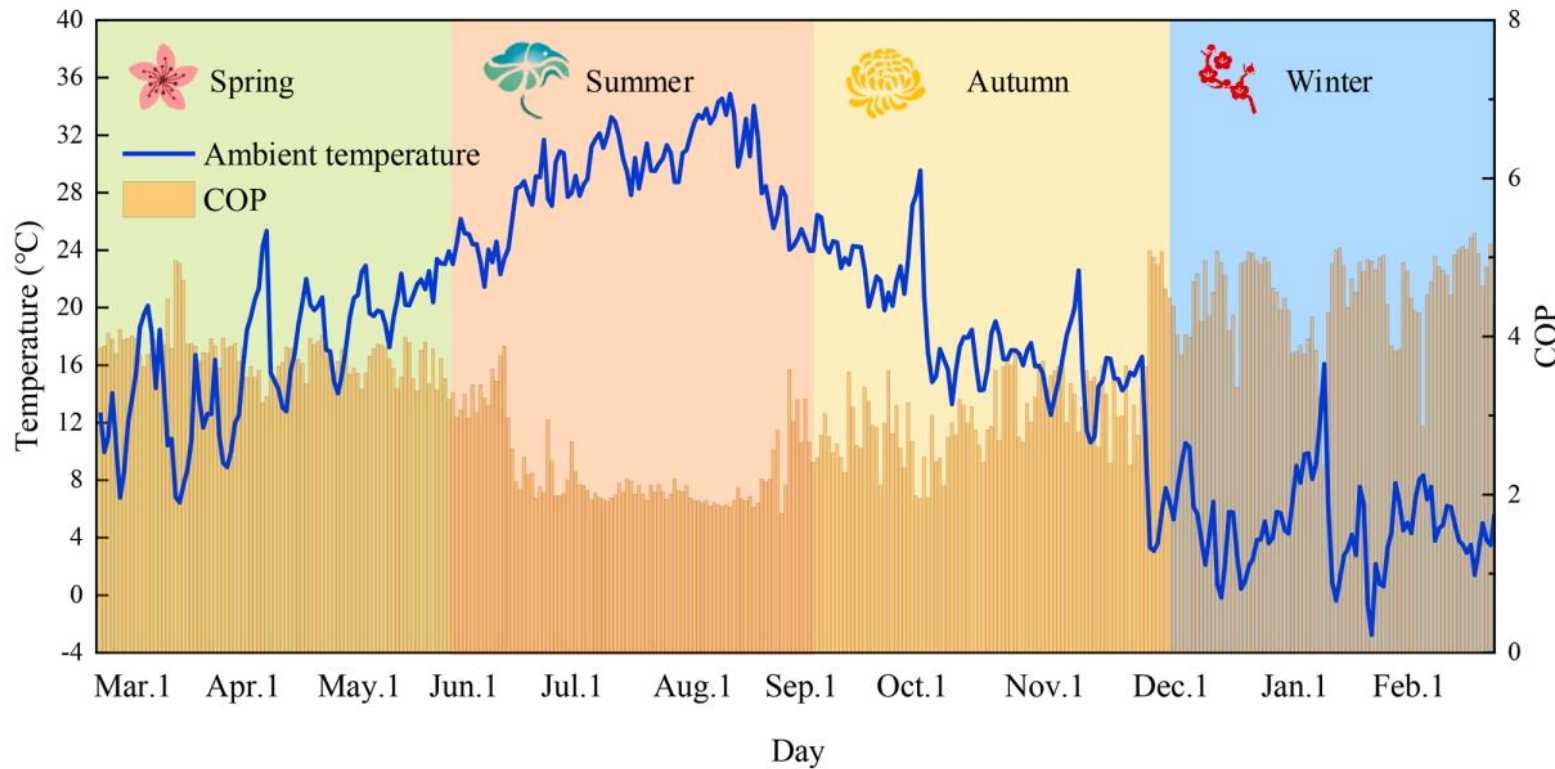
传感器的测量精度及测量范围

| 测量参数 | 测量仪器 | 测量范围 | 测量精度 |
|------|-------|---------------|------------|
| 温度 | 热电偶 | -40 - 145℃ | ±0.5 °C |
| 压力 | 压力变送器 | 0.0 - 16.0MPa | ±0.096 MPa |
| 耗功 | 功率计 | 0 - 6kW | ±0.5% |

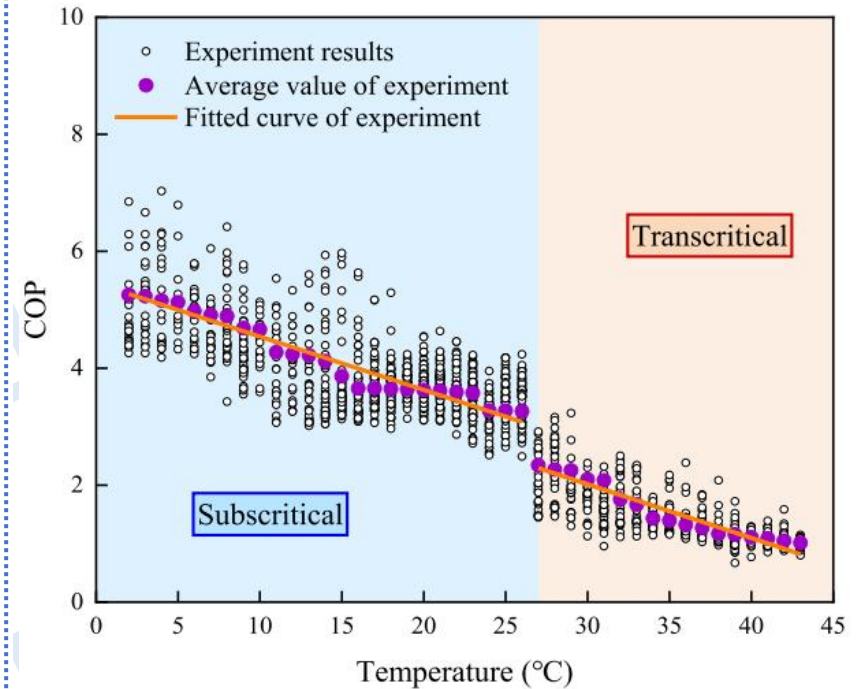
系统的运行参数需要通过温度传感器、压力变送器、功率计等设备进行监测和采集。所有的测量仪器都经过了校准，以确保测量的准确性。

3.3 CO₂制冷系统现场测试

3.3.2 CO₂制冷系统现场测试结果



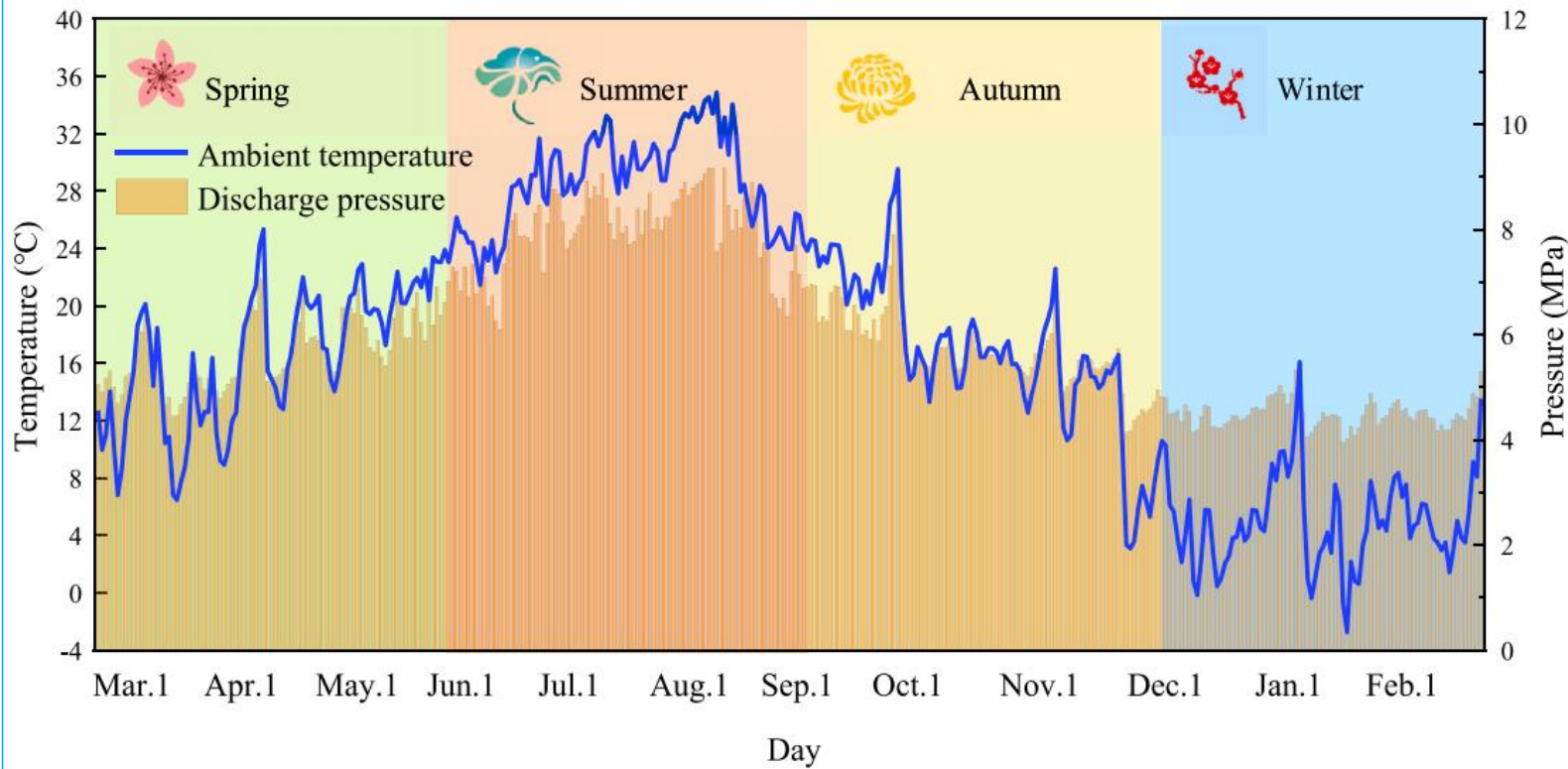
- COP 的变化趋势与环境温度相反，随着环境温度的升高，COP呈现出下降趋势。
- 当系统运行时间处于6月~8月时，系统进入跨临界模式，此阶段COP下降显著。



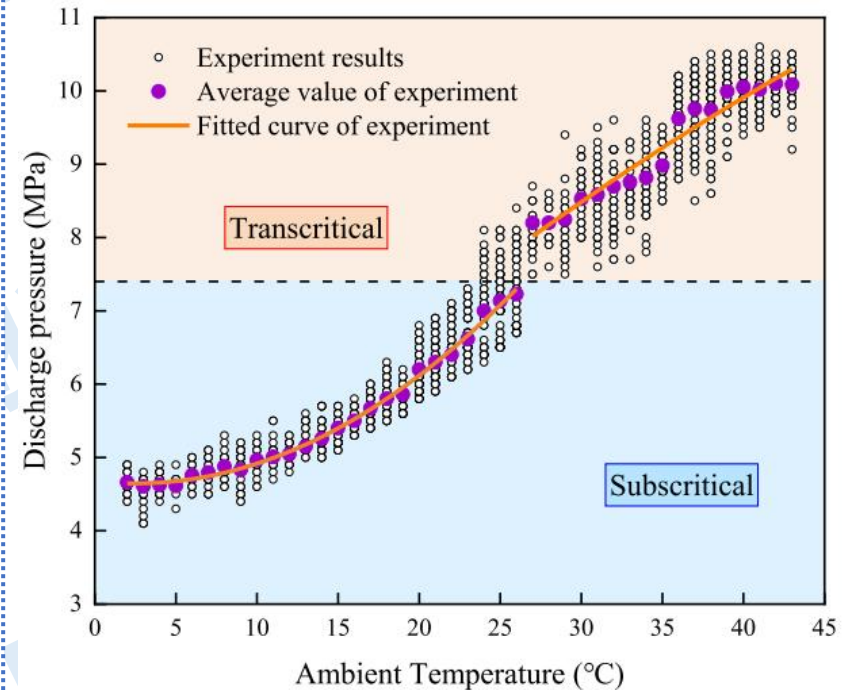
- 随着环境温度的升高，COP呈现出连续下降的趋势

3.3 CO₂制冷系统现场测试

3.3.2 CO₂制冷系统现场测试结果



- 排气压力的变化趋势与环境温度相同，随着环境温度的升高而升高。
- 随着夏季平均温度的升高，排气压力也不断增大，冬季则相反。



- 当环境温度处于27°C时，运行模式发生转变，排气压力有阶跃性变化



汇报 目录

一、背景介绍

二、CO₂制冷系统构建研究

三、CO₂制冷系统样机开发

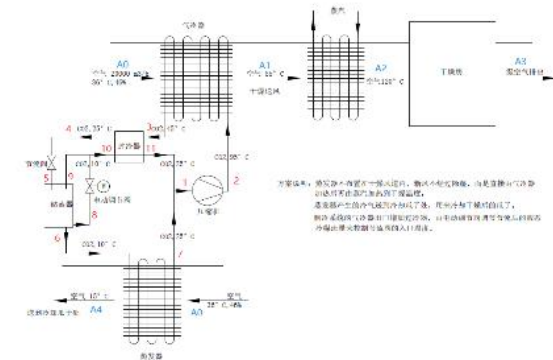
四、CO₂制冷系统产业服务

五、结论及展望



4.1 CO₂制冷系统产业化应用

食品行业CO₂热泵烘干



工业及生物医药领域跨临界CO₂冷热联供



CO₂冷热联供系统远程监控
年节约运行费用2000万

氯碱行业CO₂冷热联供



300kWCO₂制热实验台架

明胶生产过程CO₂供冷供热





4.1 CO₂制冷系统产业应用

串联回水机械过冷CO₂热泵系统



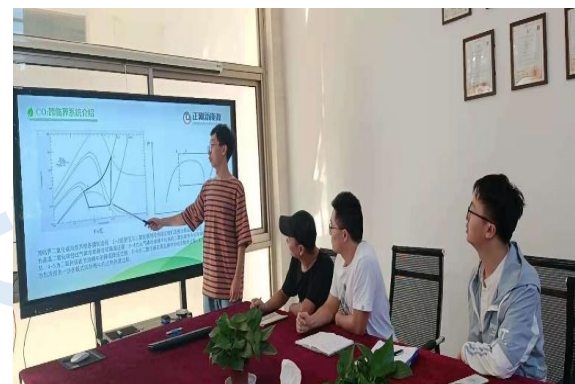
机械过冷CO₂冷热联供系统在工业干燥领域应用



- 适用场合：采用机械过冷CO₂热泵技术解决实际**烘干和制冷**的应用场景
- 机械过冷循环工质：R134a



4.2 CO₂制冷系统产教融合



为了促进校企合作，培养学生的动手实践能力，学校与：

- 艾默生环境优化技术（苏州）有限公司
- 上海汉钟精机有限公司
- 青岛海容商用冷链股份有限公司
- 安徽正刚新能源科技有限公司

等企业联合成立天津商业大学研究生校外实践基地。



4.3 CO₂制冷系统行业培训

中国制冷维修行业工商用二氧化碳（CO₂）制冷设备专项培训项目



- 培训项目平台的建设目前已经完成并投入使用，包括培训教材资源的建设、培训课程资源的建设、培训实训平台建设以及培训师资团队建设
- 截止2021年10月，共组织了15期培训，培训总人数419人，并且全部通过考核

4.4 CO₂制冷系统研发成果



- (1) 代宝民, 齐海峰, 刘圣春, 张鹏, 赵谱, 赵晓璇, 刘笑, 漆乐. 一种多温区多联供系统, 2024-06-17, 中国, ZL201910834729.1. (发明, 授权)
- (2) 代宝民, 马牧宇, 郭梦迪, 王璐, 何小敏, 杨和澄. 基于双四通换向阀的跨临界CO₂三联供舒适系统, 2024-05-31, 中国, ZL201910767093.3. (发明, 授权)
- (3) 代宝民, 齐海峰, 刘圣春, 张鹏, 孙悦桐, 刘笑, 赵谱, 赵晓璇. 一种多级蒸发冷凝机械过冷跨临界CO₂中高温热泵系统: 2024-02-20 中国, ZL 201910834751.6 (发明, 授权)
- (4) 代宝民, 郝云樱, 杨海宁, 钱家宝, 冯一宁, 曹钰. 一种双温区多级过冷CO₂制冷系统, 2023-11-28, 中国, ZL202010071124.4. (发明, 授权)
- (5) 代宝民, 窦萬斌, 冯一宁, 钱家宝, 郝云樱, 曹钰, 杨海宁. 一种太阳能吸收引射复合跨临界CO₂制冷系统, 2023-11-03, 中国, ZL202010069090.5. (发明, 授权)
- (6) 代宝民, 窦萬斌, 钱家宝, 曹钰, 杨海宁, 郝云樱, 冯一宁. 一种吸收压缩引射复合梯级过冷跨临界CO₂冷热联供系统, 2023-11-07, 中国, ZL202010069096.2. (发明, 授权)
- (7) 代宝民, 冯一宁, 曹钰, 杨海宁, 钱家宝, 郝云樱. 一种引射节流双温区CO₂制冷系统及应用, 2023-10-27, 中国, ZL202010070587.9. (发明, 授权)
- (8) 代宝民, 刘圣春, 李晓欢, 刘坤, 王海丹, 张梦华, 常虹. 一种余热驱动吸收式制冷辅助过冷的CO₂汽车空调, 2023-09-01, 中国, ZL201710598975.2 (发明, 授权)
- (9) 代宝民, 刘圣春, 王海丹, 李晓欢, 刘坤, 张梦华, 常虹. 吸收式与热电制冷协同辅助过冷的CO₂船用制冷系统, 2023-07-25, 中国, ZL 201710599006.9. (发明, 授权)
- (10) 代宝民, 钱家宝, 冯一宁, 郝云樱, 杨海宁, 曹钰. 一种跨临界双级过冷引射二氧化碳系统及应用, 2022-11-15, 中国, ZL202010069108.1. (发明, 授权)
- (11) 代宝民, 杨海宁, 郝云樱, 曹钰, 冯一宁, 钱家宝. 一种引射增压梯级过冷跨临界CO₂系统及应用, 2024-03-26, 中国, ZL202010069095.8. (发明, 授权)
- (12) 代宝民, 赵谱, 赵晓璇, 漆乐, 孙悦桐, 刘笑. 一种多级压缩多冷凝器中间完全冷却热泵干燥系统, 2024-04-04, 中国, ZL201910834774.7. (发明, 授权)

4.4 CO₂制冷系统研发成果



- **获奖：**节能减排竞赛全国一等奖、《制冷学报》优秀论文、天津市科技进步三等奖
- **论文：**科技论文100余篇，SCI(EI)收录40余篇
- **著作：**5部
 - (1) 代宝民等. 机械过冷CO₂制冷热泵技术. 天津, 天津大学出版社, 2023.
 - (2) ...代宝民. 自然工质二氧化碳制冷与热泵循环原理的研究与进展. 北京: 科学出版社, 2017.



汇报 目录

一、背景介绍

二、CO₂制冷系统构建研究

三、CO₂制冷系统样机开发

四、CO₂制冷系统产业服务

五、结论及展望



5. 结论及展望

5.1 结论

- 通过利用不同过冷技术可提升CO₂制冷系统性能
- 针对特性冷热需求场景，**就地取材、因地制宜**，选取合适的过冷技术

5.2 展望

- 进一步开展机械过冷CO₂制冷实验室性能测试，完善系统优化控制
- 开发工程样机（采暖、制热、制冷）两联供系统，实现商业化应用
- 进行土壤源跨季节蓄冷、天空辐射、太阳能驱动吸收吸附系统的实验研究



天津商业大学
TIANJIN UNIVERSITY OF COMMERCE



感谢专家同行 敬请批评指正

感谢国家自然科学基金 (52576017, 52476085, 51806151, 51776140), 国家重点研发计划 (2021YFE0116100), 中国生态环境部对外合作与交流中心专项 (自然工质CO₂, 碳氢制冷剂R290), 天津市自然科学基金 (24JCZDJC00390, 23JCZDJC00250, 20JCQNJC00600) 对本研究工作的资助!