



第八届轻型商用制冷技术产学研融合会议

直线压缩机
及其制冷技术研究进展

中国科学院理化技术研究所

唐明生 副研究员

2023年4月

报告提要

研究背景

直线压缩机研究进展

补气性能实验研究

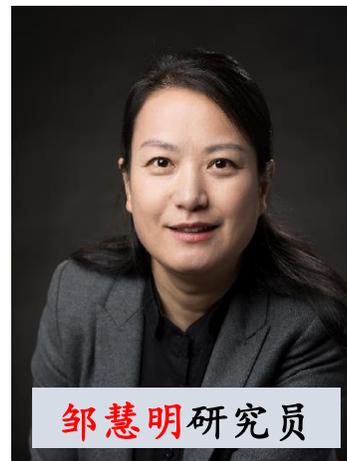
展望与总结

研究背景

中国科学院理化技术研究所——热力过程节能技术中心



田长青 研究员



邹慧明 研究员



唐明生 副研究员



张海南 副研究员

制冷与人工环境研究团队

现有职工26名 (正高4名, 项正1名, 副高13名)、研究生20余名、技术人员20余名





研究背景

坚持围绕国家“双碳战略”发展需求

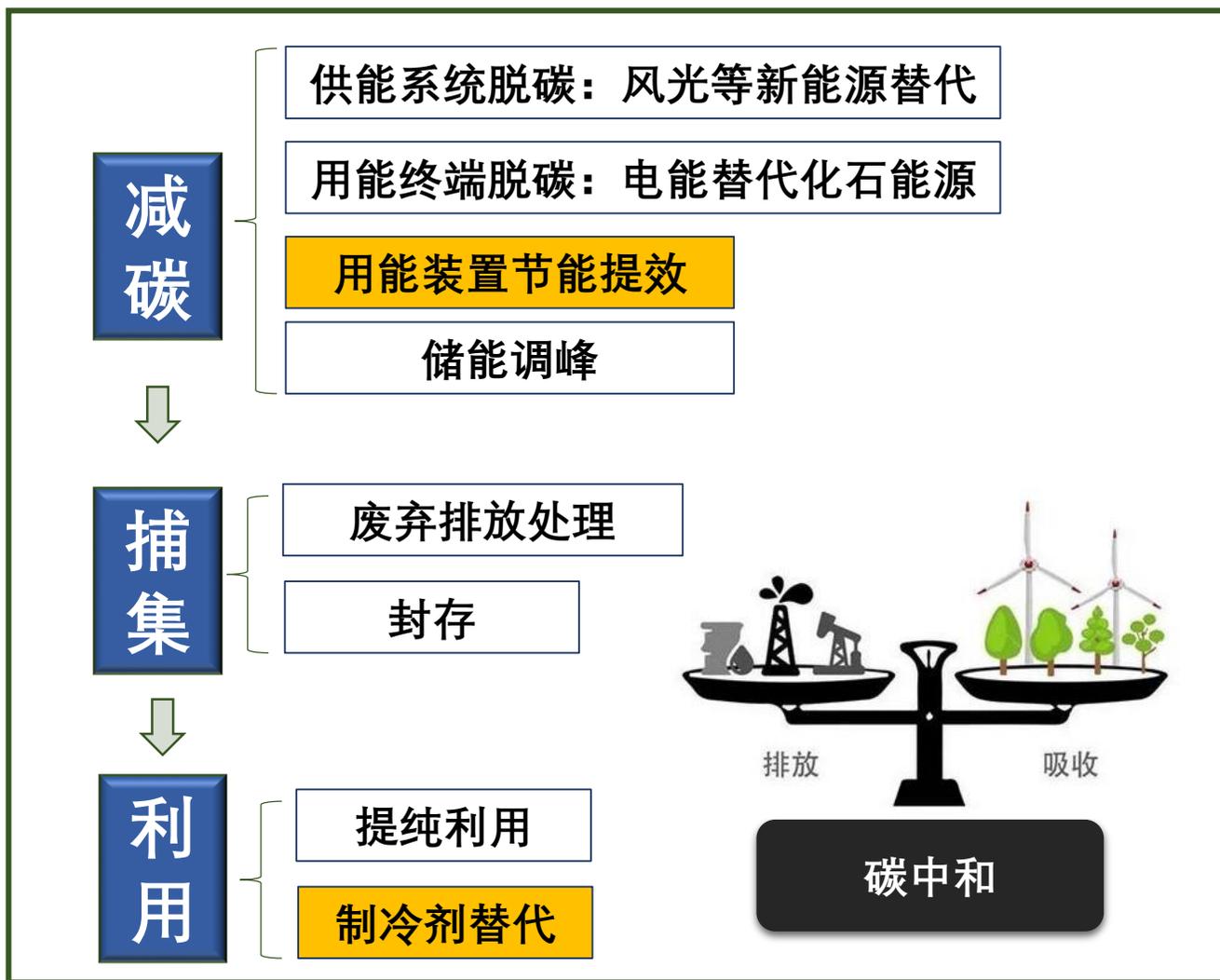
热力过程
低碳化发展

高效制冷供热
深低冷、普冷、热泵

储能
储冷、储热、发电

碳捕集
温室气体
回收、再生、利用

研究背景



环保工质替代



提高能效

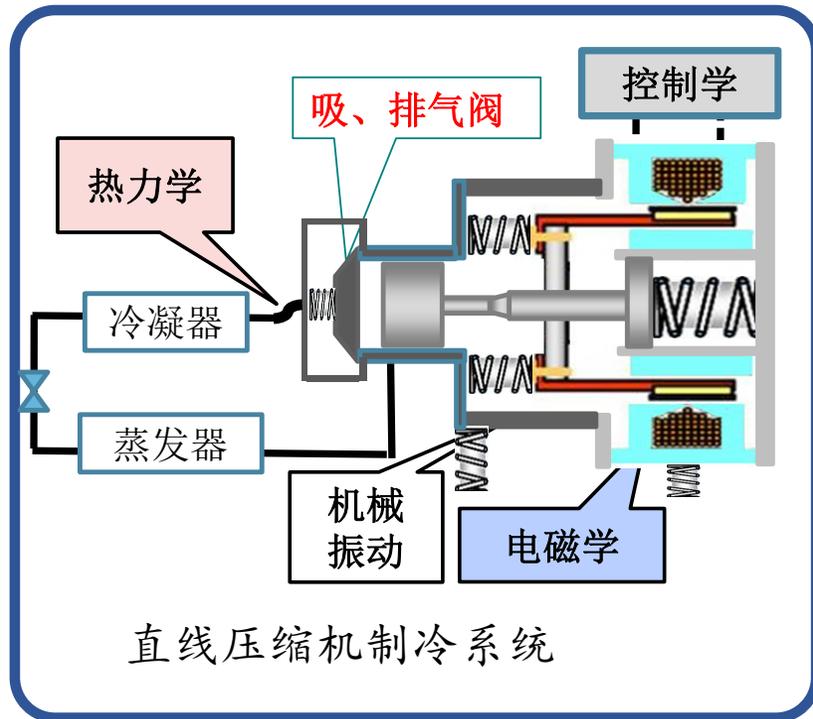
适应环保工质的高效压缩机节能技术是双碳目标下重要机遇

研究背景—直线压缩机

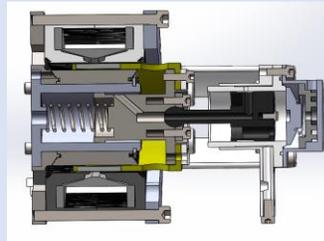
研究
难点

- 典型的多自由度**机-电-热多场耦合**结构
- 与制冷循环构成复杂的**非线性时变**系统

问题挑战



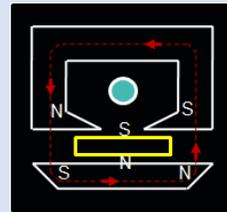
结构创新



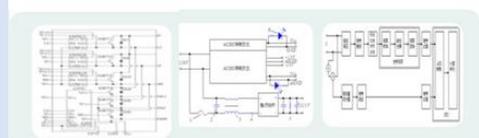
稳定性理论



运行状态感知



控制方法



功率模块
IPM

供电电路

测量电路

深入理论与独特的技术创新是实现其应用的必要前提

报告提要

研究背景

直线压缩机研究进展

补气性能实验研究

展望与总结

研究进展

R600a直线压缩机

冰箱



R600a
100~250W

- 变容量直线压缩机及控制器
- 冰箱额定工况COP达2.09
- 40~100%变容量高精度控制



报告编号: PY-19-103 共 8 页 第 6 页

MA 170010110145 CNAS TESTING CNAS L0783

检验报告

产品名称: 电动机-压缩机
 检验类别: 委托检验
 受托单位: _____
 委托单位: 中国科学院理化技术研究所

中家院(北京)检测认证有限公司
(中国家用电器检测所)

| 序号 | 检验项目 | 技术要求 | 标准值 | 检验结果 | |
|-------|---------------------------------------|---|-----|--------|----|
| | | | | 1# | 结论 |
| 1 | 制冷量 W | 在下表规定的试验温度条件下, 制冷量不小于名义值 90%。 名义值 —— W | — | 163.48 | — |
| | | 冷凝温度 54.4±0.3 °C | — | | |
| | | 蒸发温度 -23.3±0.2 °C | — | | |
| | | 过冷温度 32.2±0.3 °C | — | | |
| | | 吸气温度 32.2±0.3 °C | — | | |
| 寿命后 W | 环境湿度 32.0±1 °C | — | — | — | |
| | 在上表规定的试验温度条件下, 制冷量下降不应超过额定值 5% | — | — | — | |
| 2 | 输入功率 W | 实测输入功率值不应超过额定值的 115%。 额定值 —— W | — | 87.8 | — |
| | 工作电流 A | 实测工作电流值不应超过额定值的 110%。 额定值 —— A | — | 0.54 | — |
| 3 | 性能系数 (COP) | 寿命前 | — | 2.09 | — |
| | | 寿命后 | — | | |
| | | 名义制冷量 W | — | | |
| | | 名义性能系数 (COP) MW | — | | |
| 寿命后 | 在寿命表中表 6 规定的试验温度条件下, 性能系数下降不应超过额定值 5% | — | — | — | |

1. 电动机—压缩机型号: LC2019_6_1
 2. 冲程: 12.5mm; 转速频率: 64.8Hz; 电压: 179.5V

研究进展

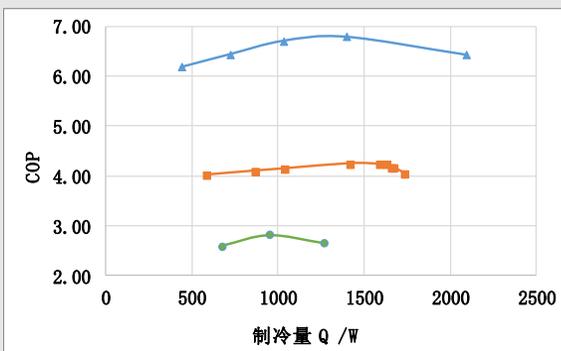
R290直线压缩机

冷柜用

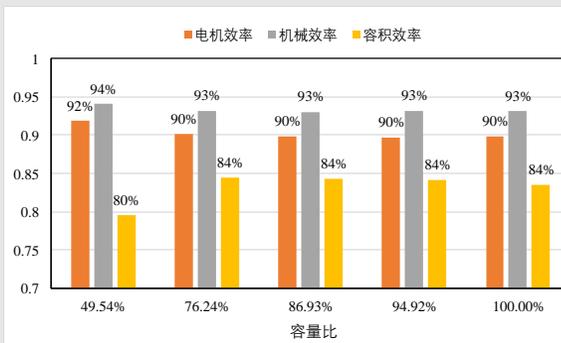
- 额定工况
- 29.4mm气缸
- 制冷量:672W
- COP: 1.97



- 制冷COP: 4.23, (额定制冷工况)
- 制热COP: 3.20, (低温制热工况)
- 25%出力, 效率衰减小于5%

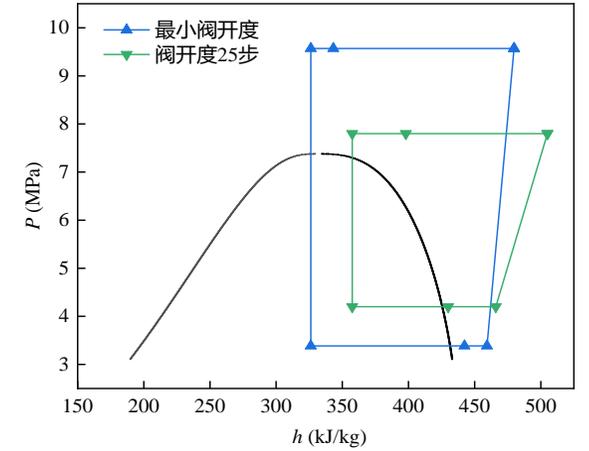
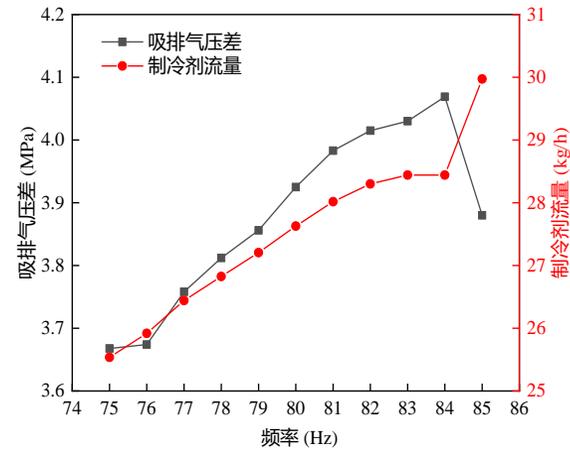
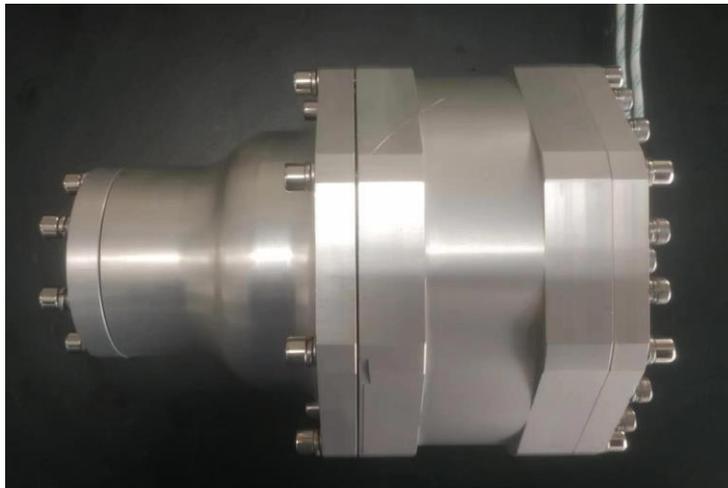


空调用



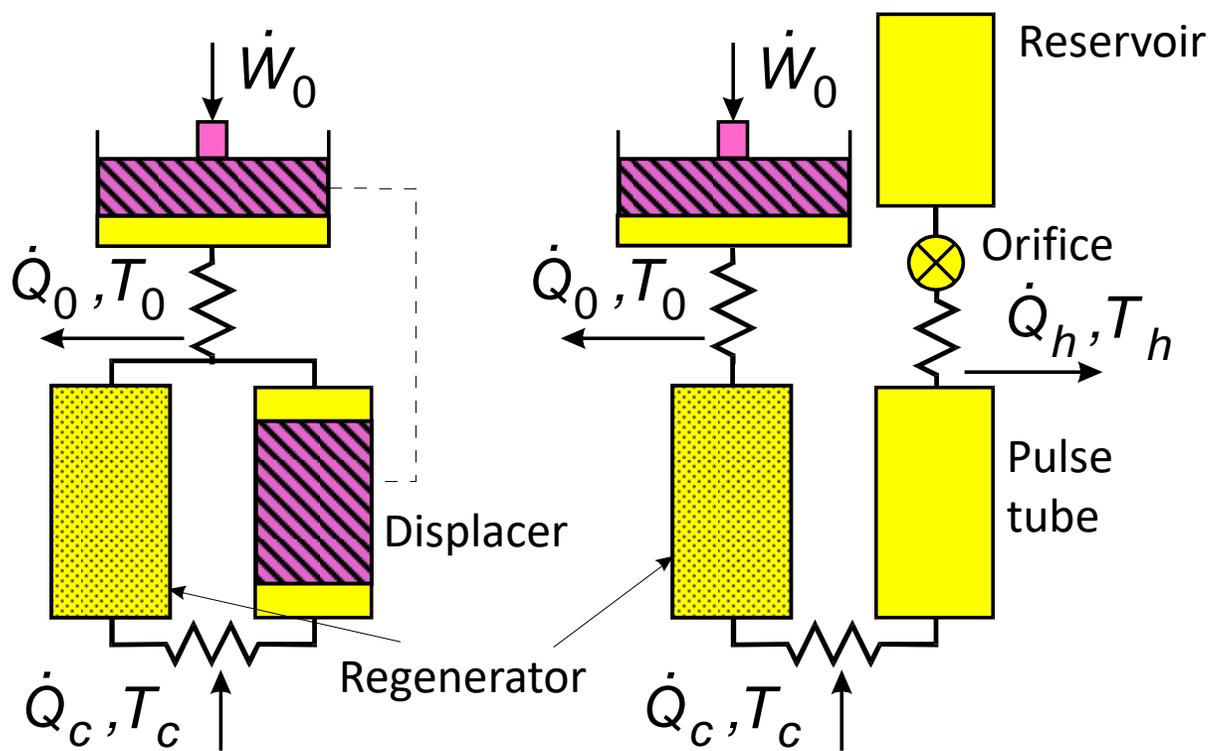
研究进展

CO₂直线压缩机



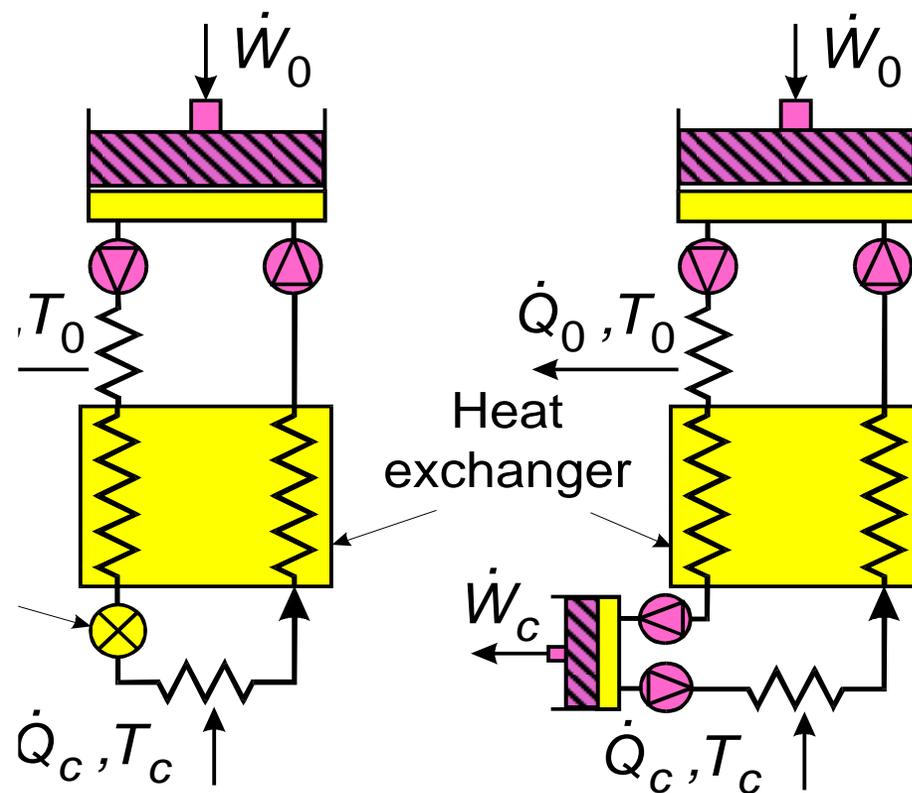
□ 生物技术及医学的发展——深低温保存

□ 低温制冷机技术——无油直线压缩机



(a) 斯特林制冷

(b) 脉冲管制冷

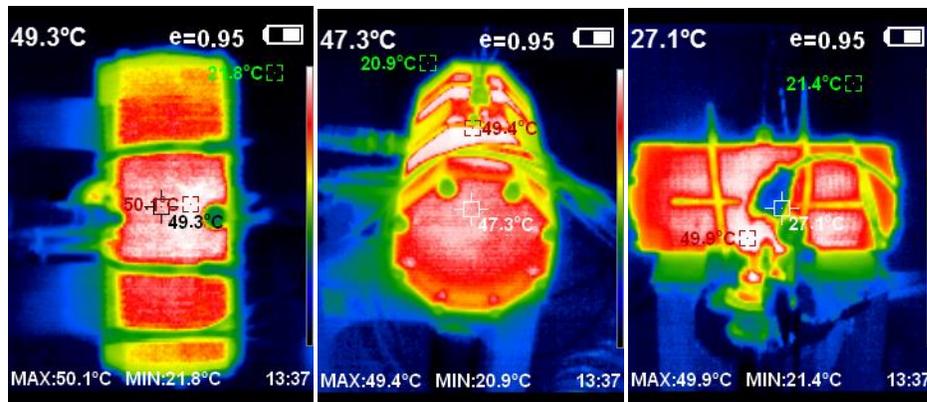
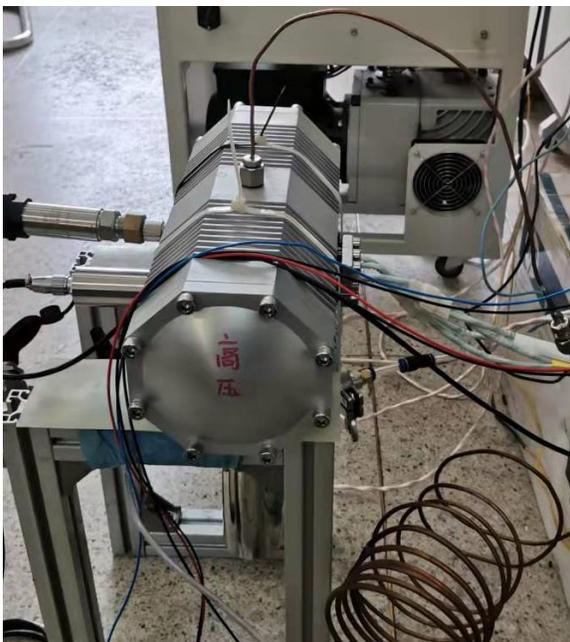


(c) J-T节流制冷循环

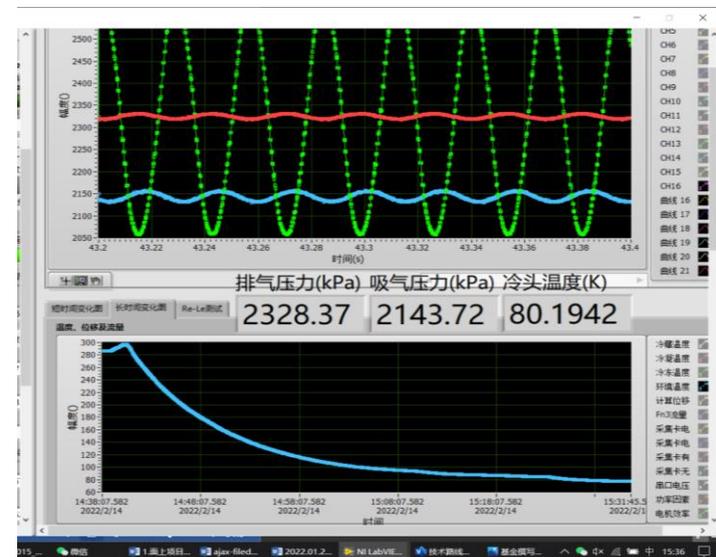
(d) 逆布雷顿循环

研究进展

氦气 (He) 直线压缩机 (无油)



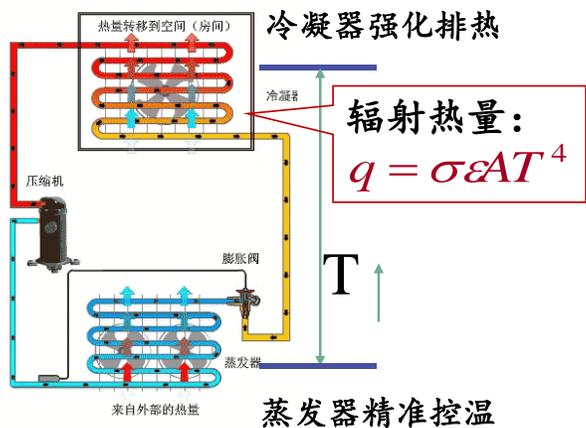
- 制冷机冷头无负荷最低温度45K;
- 2.2MPa充气压力, 36Hz运行频率, 300W输入功时制冷量4W@80K; 330W输入功制冷量9.2W@117.5K;
- 3.1MPa充气压力, 292W输入功制冷量6.4W@93.4K; 330W输入功制冷量6.4W@91.6K; 382W输入功制冷量6.4W@86.4K;



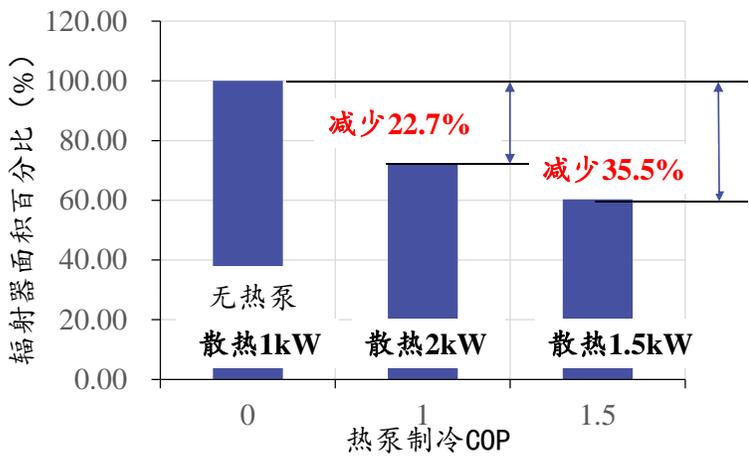
研究进展

空间热控用有阀直线压缩机（无油）

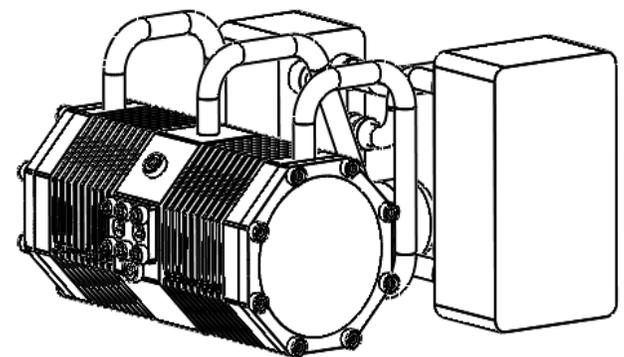
基于热泵的热排散技术



传统热控辐射散热技术



- ◆ 当热泵比重量低于 $10\text{kg} / \text{kW}$ 制冷量，就可以保证系统减重；
- ◆ 热泵集成热管理系统辐射板面积可以减少 28-58%，系统重量减少 2-28% [1]。
- ◆ 开发重力无关的蒸气压缩式热泵系统，无油压缩机是关键



高真空

- 运动部件阻尼增大或者卡死
- 热阻加大，传热面可能点接触

微重力

- 气-液分离困难
- 压缩机回油润滑困难
- 压缩机启动易出现液击
- 气液两相流动换热关联式不足
- 地面进行模拟实验困难

大温跨

- 高压比
- 高排气温度
- 多工质多流程

□ R600a工质，60℃温升测试工况 (蒸发温度 T_e / 冷凝温度 T_c : -15℃ / 45℃)，制热 COP ≈ 2.6

报告提要

研究背景

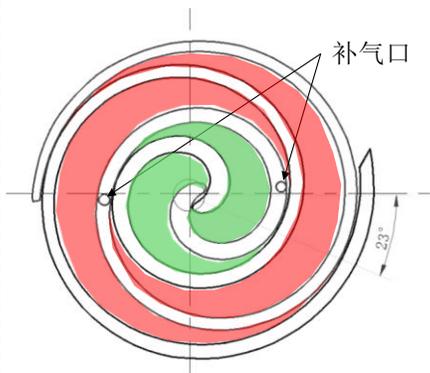
直线压缩机研究进展

补气性能实验研究

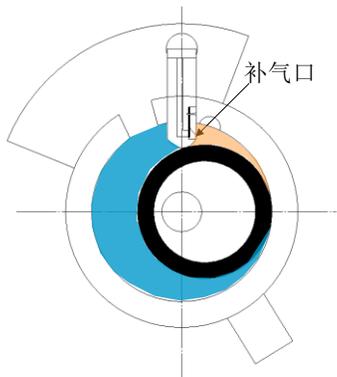
展望与总结

思路的提出

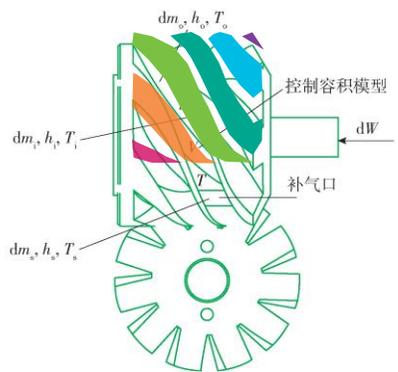
涡旋式



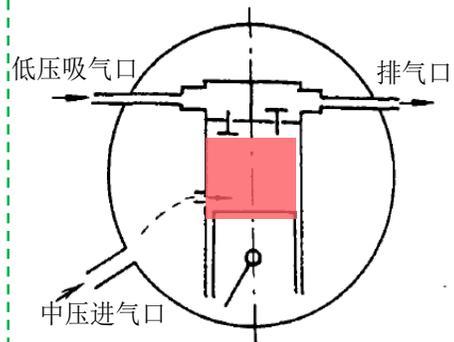
转子式



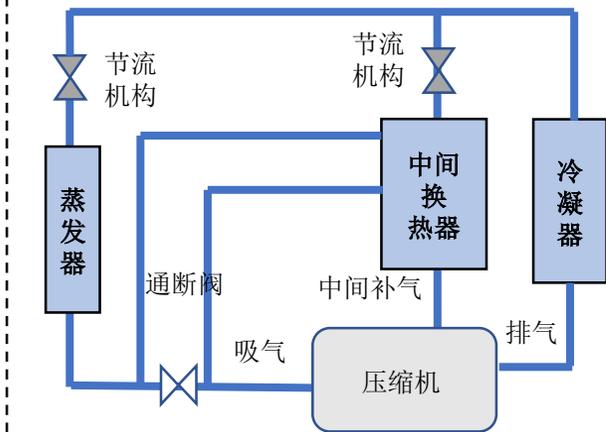
螺杆式



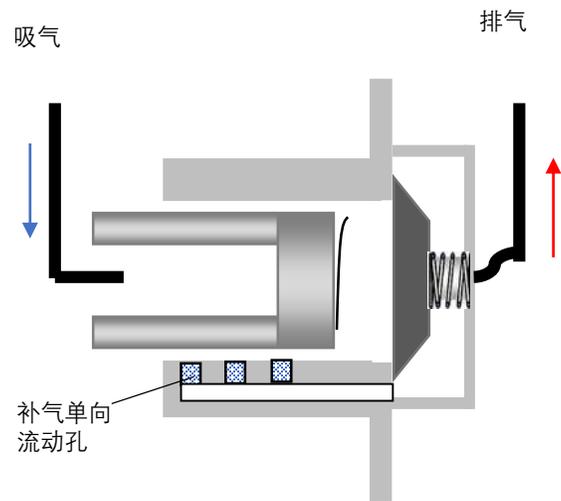
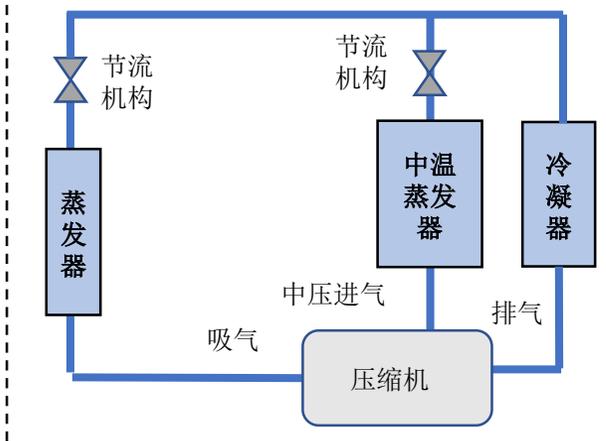
活塞式



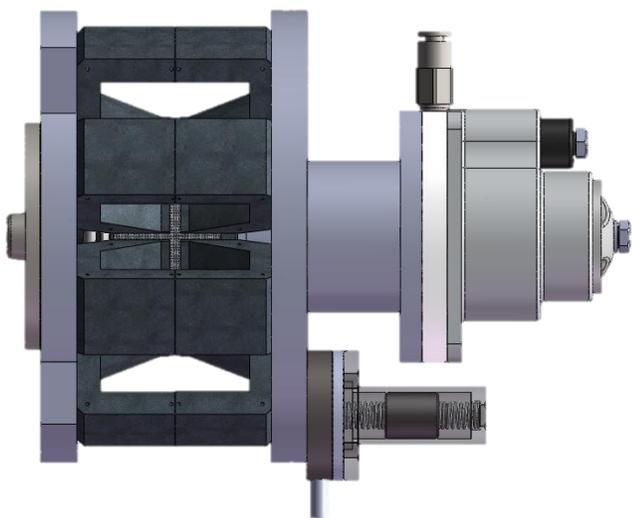
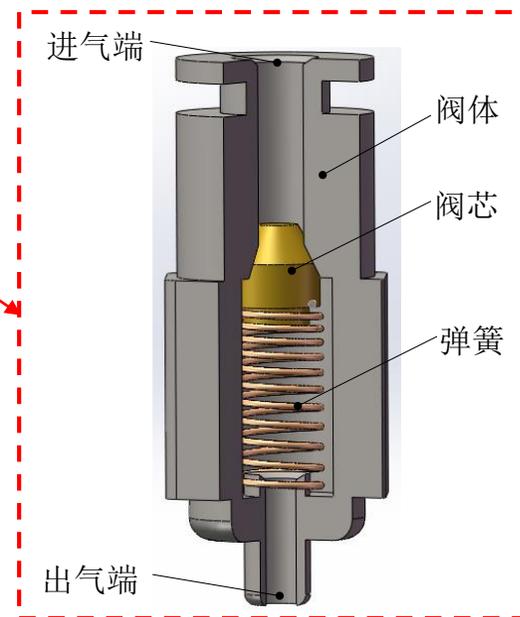
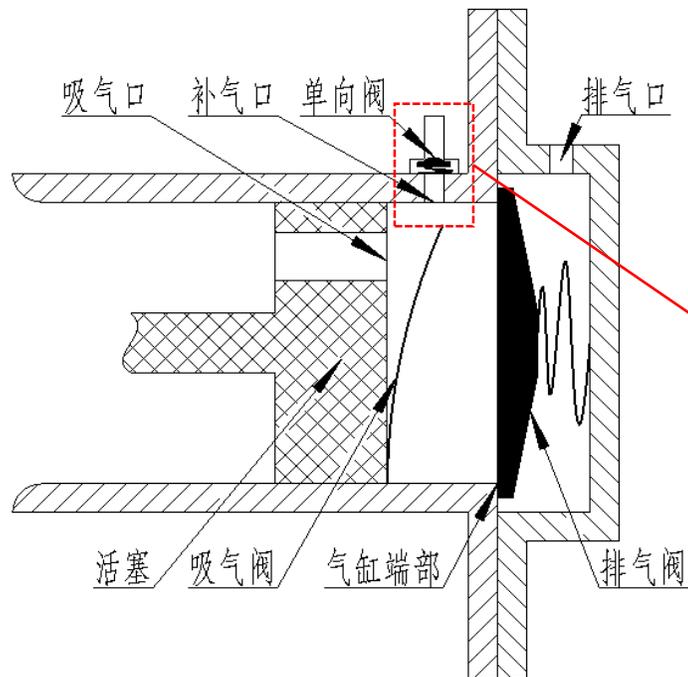
补气式低温热泵



双温区制冷

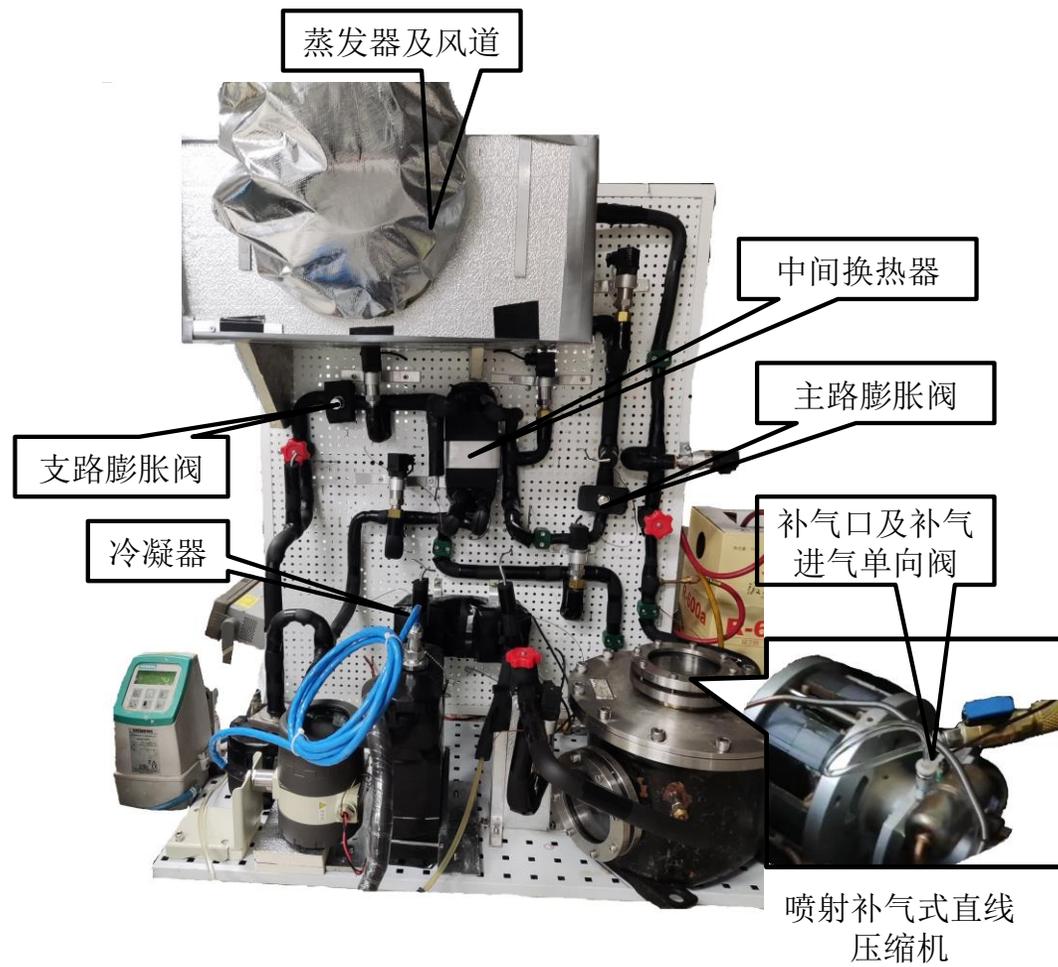
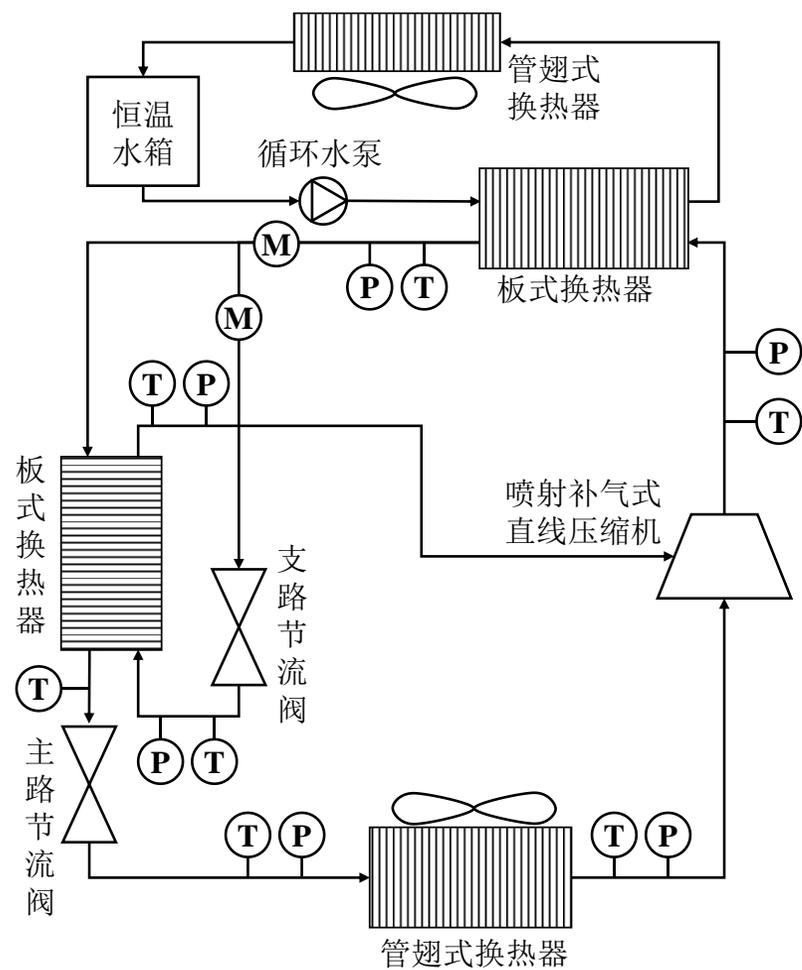


实验研究



| 参数 | 值 |
|--------------------------|-----|
| 补气口直径 d_1 (mm) | 2.0 |
| 补气口中心距离TDC(mm) | 6.5 |
| 补气口形状 | ○ |
| 补气阀导通压差 Δp (kPa) | 5.0 |

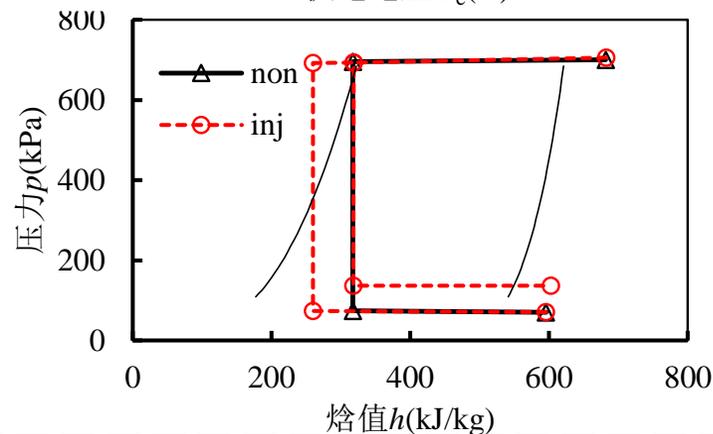
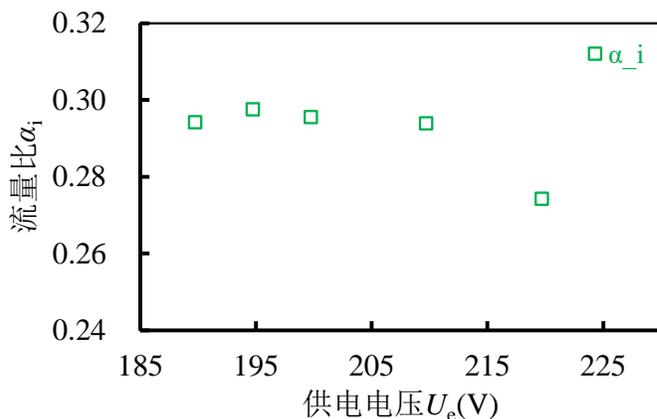
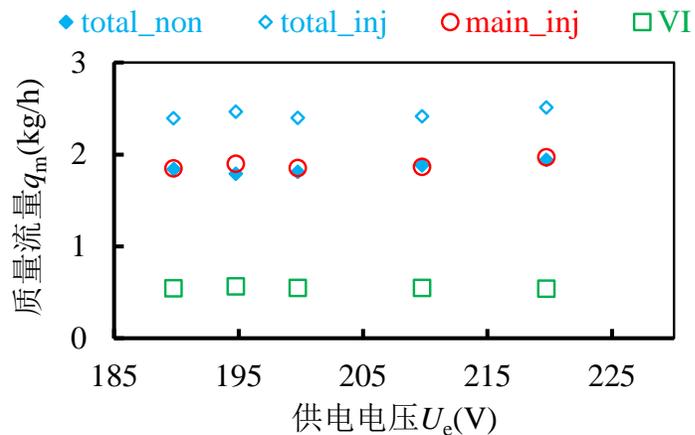
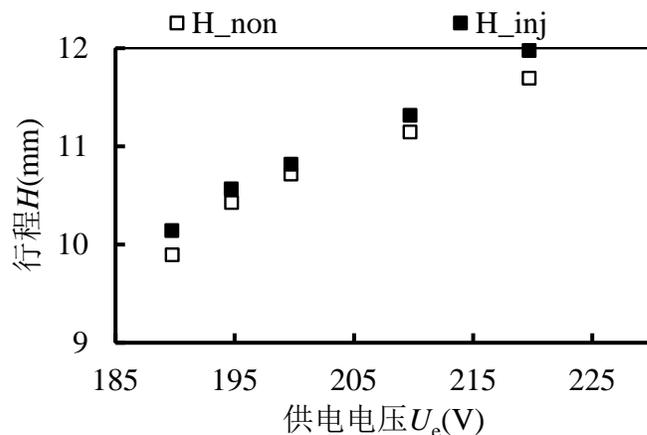
实验研究



性能实验研究

电压影响分析

1.电压调节特性：吸气压力100 kPa，排气压力700 kPa，补气压力280kPa

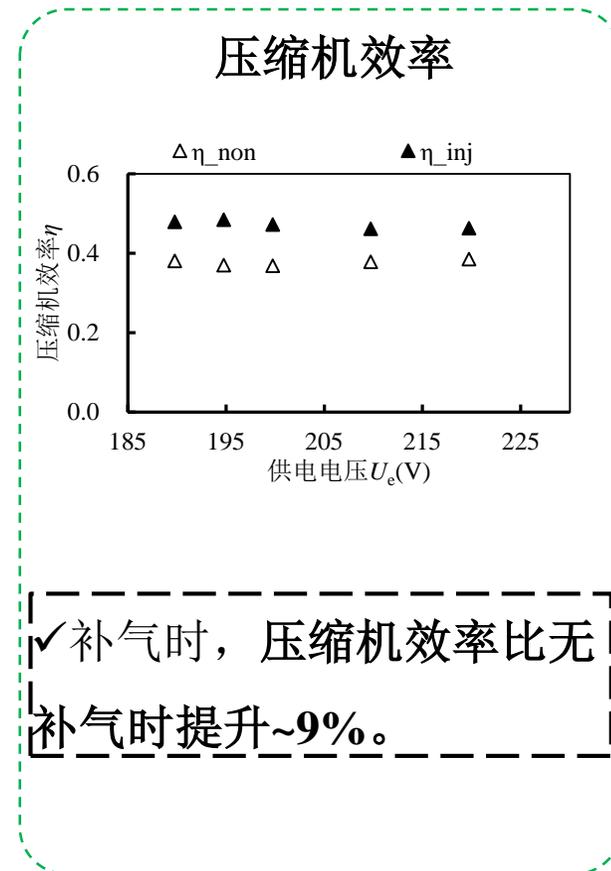
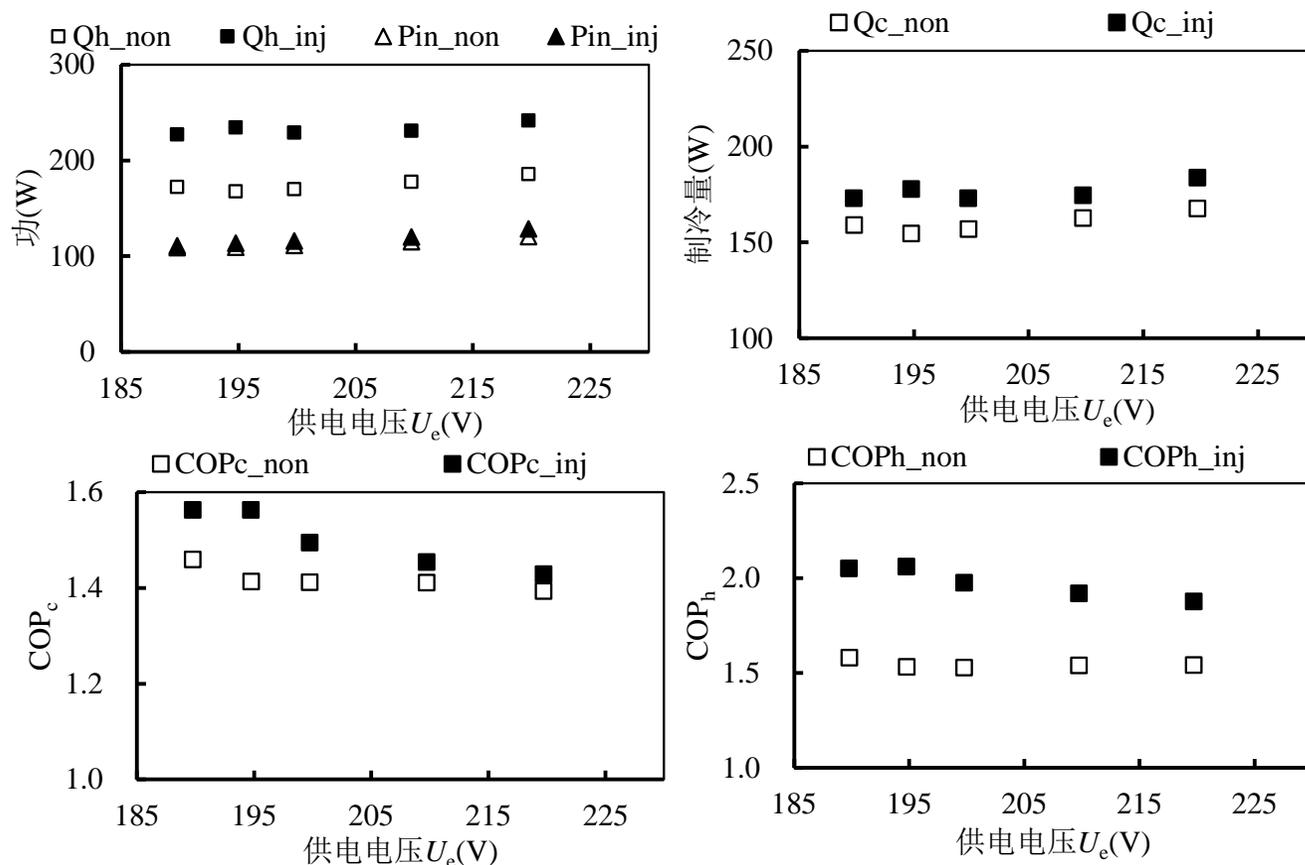


- ✓行程增大，主路质量流量略有升高，而支路质量流量基本保持不变，总排量增大；
- ✓相同工况条件下，相比于无补气，活塞行程增大；
- ✓补气时，主路制冷剂的过冷度增大，单位低压工质的制冷量增加；
- ✓补气出口过热度大，补气对压缩过程无显著冷却效果。

性能实验研究

1.电压调节特性：吸气压力100 kPa，排气压力700 kPa，补气压力280kPa

电压影响分析



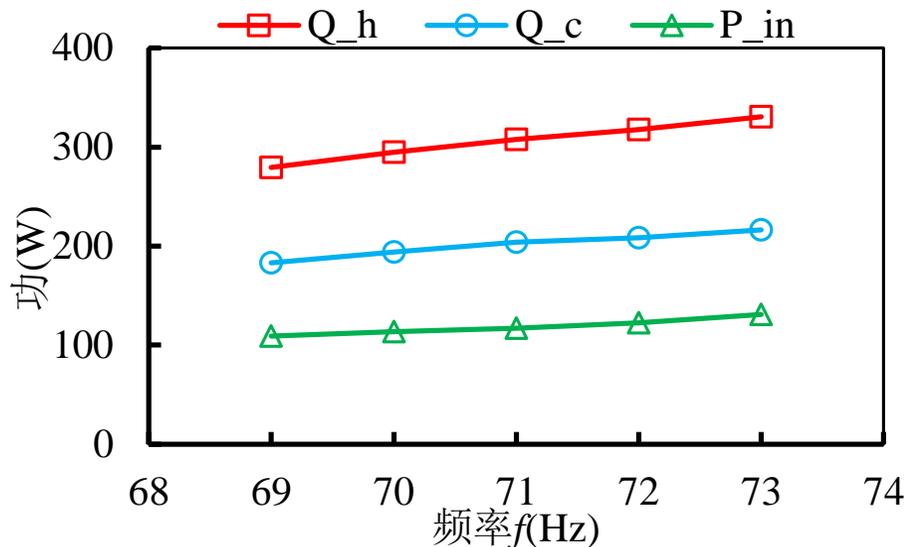
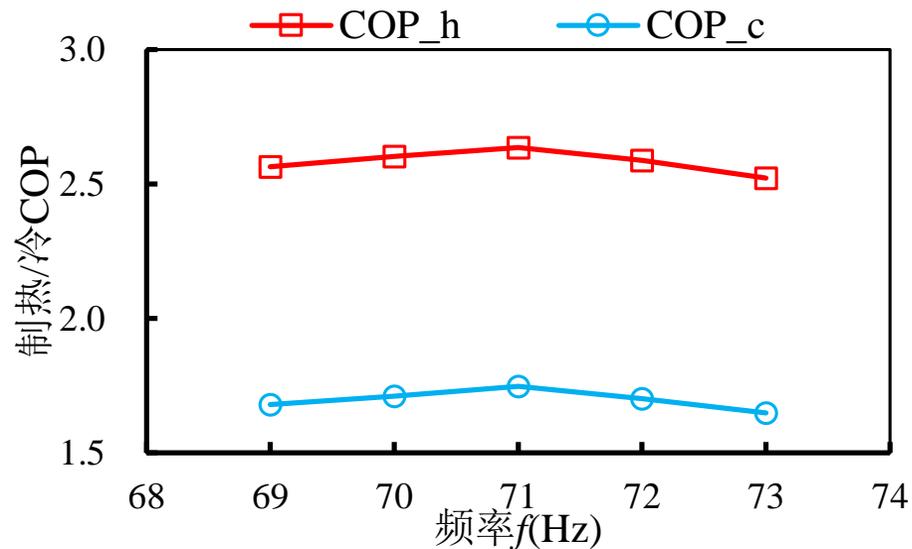
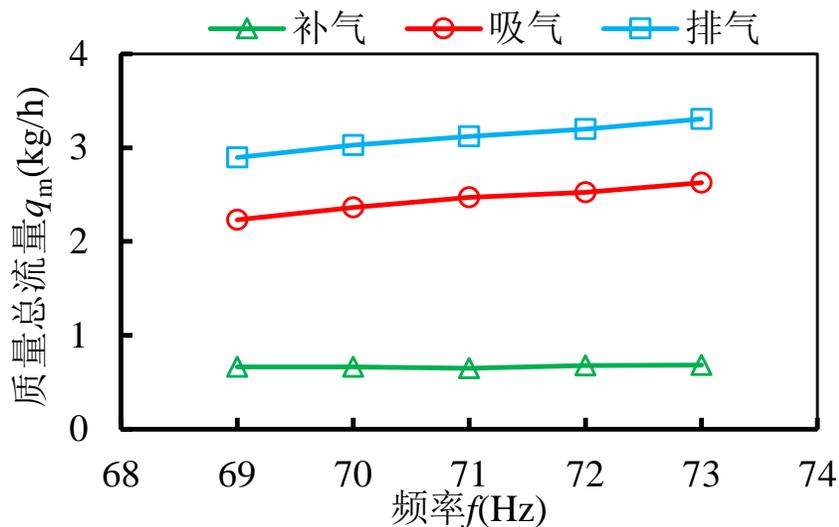
✓补气时，压缩机效率比无补气时提升~9%。

✓系统制热量显著提升，制热COP先基本不变，后下降，相比于无补气提升22% +；
✓补气时，压缩机效率比无补气时提升~9%

性能实验研究

2. 频率调节特性：吸气压力70 kPa，排气压力630 kPa，补气压力175kPa

频率影响分析

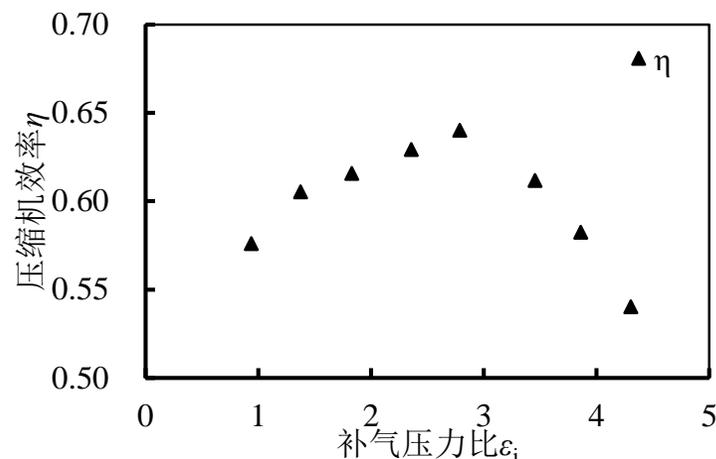
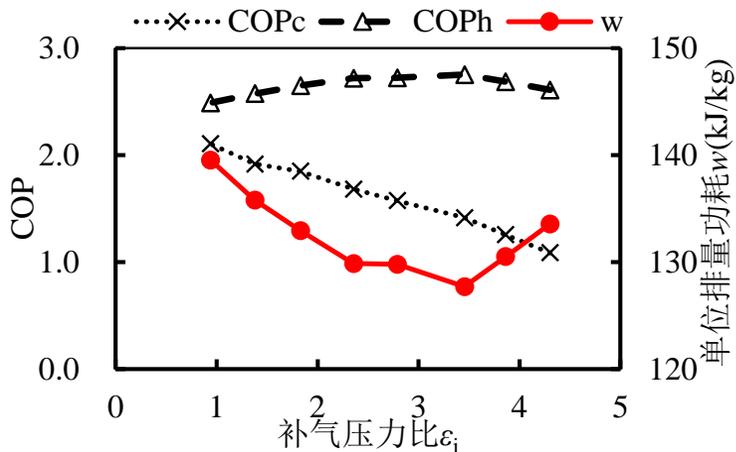
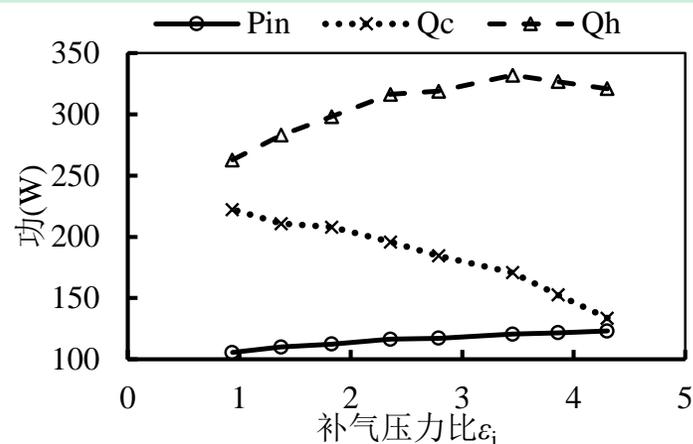
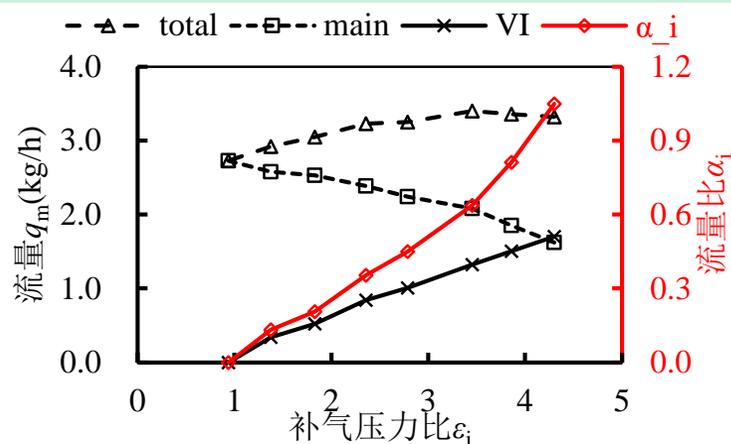


- ✓ 补气支路流量保持不变，主路质量流量增大，补气比减小，系统的总流量增大；
- ✓ 压缩机功耗增大，系统制热/冷量增加，频率越高，制热/冷量越大；
- ✓ 制热COP和制冷COP均先增后减。

性能实验研究

1. 变补气压力：吸气压力70 kPa，排气压力630 kPa

工况影响分析



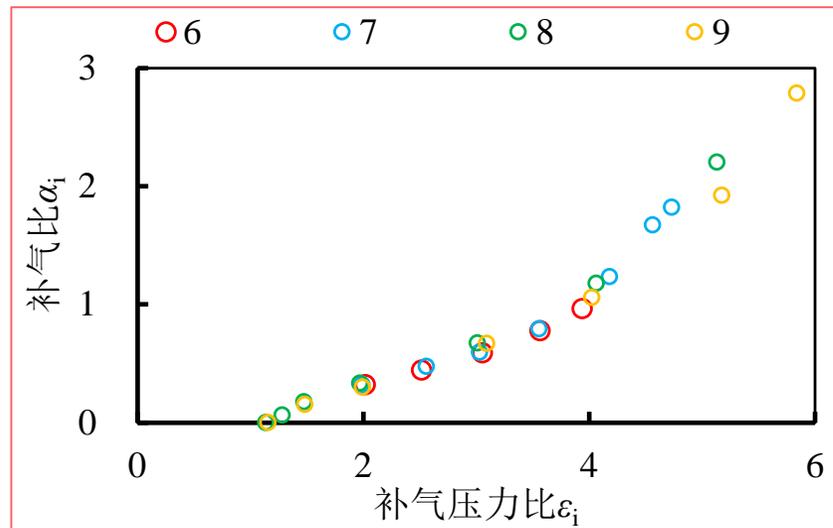
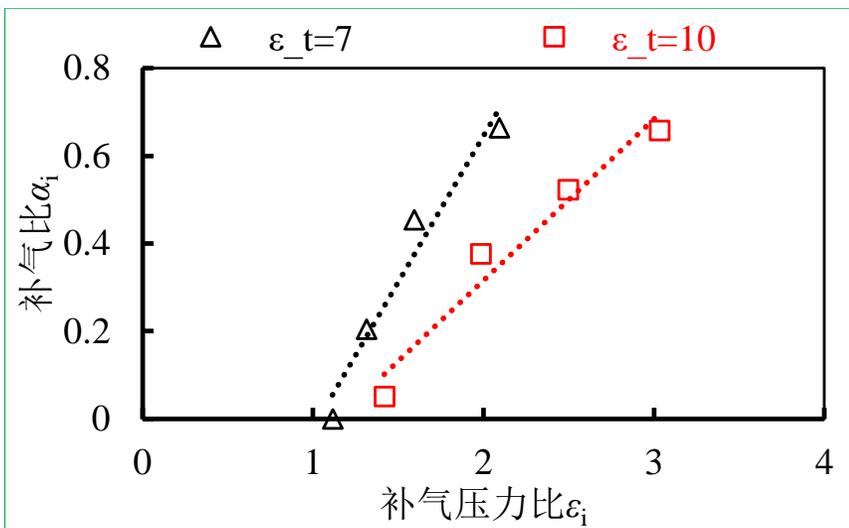
- ✓ 补气支路流量提升，主路流量下降，总流量增大；功耗增大，单位压缩功耗先减后增；
- ✓ 该工况下，制热量和COP先升高后降低，而制冷量及其COP逐渐减小；
- ✓ 压缩机效率先增后减，在补气压力比为2.8时达到最大值。

性能实验研究

2.变吸气压力：吸气压力70kPa、100kPa，补气压力70~210kPa，排气压力700 kPa

3.变排气压力：吸气压力70 kPa，补气压力比1~6，排气压力420~630 kPa

工况影响分析



- ✓补气比随补气压力比呈线性增大；
- ✓相同补气压力比条件下，吸气压力越大，补气压力越高，补气比随补气压力比的增长率越大。
- ✓排气压力对压缩机吸、补气流量比无影响，不同排气压力下补气比随补气压力比的斜率几乎相等，约为0.52。

实验研究小结

(1) 直线压缩机补气增大了压缩机腔内平均压力，改变了固有频率，同样电压下压缩机功耗增加，在特定工况下压缩效率比不补气有一定的提升。

(2) 给定工况下存在最优的工作频率，需要电压和频率协同调节。

(3) 变工况时，也存在最佳的补气压力，需要通过补气阀来调节。

报告提要

研究背景

直线压缩机研究进展

补气性能实验研究

展望与总结

总结与展望

低GWP工质将成为未来小型制冷装置的主流工质，应用前景广阔但技术难度也大。

容积效率优势使直线压缩机在R600a，R290，CO₂等自然工质应用中具有很好的技术优势。

在深低温冷冻、航天空间热控、量子技术极低温等领域也具有良好的发展前景。

总结与展望

中国科学院理化技术研究所—热力过程节能技术中心



面向国民经济主战场



我们一直在努力

2023



April日月生 (唐明生)

北京 海淀



感谢聆听，敬请指导

唐明生

中国科学院理化技术研究所

邮编：100190

地址：北京市海淀区中关村东路29号

电话：133 3118 6658，010-82543697

Email: tangmingsheng@mail.ipc.ac.cn

