

双吸气活塞式压缩机及其制冷系统

报告人：许树学 副研究员

北京工业大学

2023年4月9日

Tel:13810094996; xsx@bjut.edu.cn



CONTANTS

- 1、背景
- 2、型式与发展
- 3、双吸气制冷系统
- 4、样机与实验
- 5、结论

1、背景

- 1、2022年我国冰箱总销量7000万台，同比下降11.9%。但，出口增长很快，2021年中国冰箱出口量达到峰值，**出口量比重首次超过50%**。
- 2、万元以上**高端冰箱**发展很快，销售额超过30%。
- 3、我国目前冷库总量已经与美国持平，但人均拥有量只占美国的1/4，**发展空间存在**。
- 4、**环保和节能**是冷链物流行业中，冰箱、冷库设备发展的趋势。



2、型式与发展

家用冰箱

新的制冷方式

磁制冷冰箱

磁热效应与载热流体配合，实现室温制冷

弹热制冷冰箱

在32℃的条件下维持10.7℃的冷藏温度。

新型工质

R290

加粗毛细管，工质充注减小，制冷速度提升。

R1234yf

压缩机能力变大，制冷速度提升，排气温度高。

R290+R600a

温度滑移改善了换热过程。

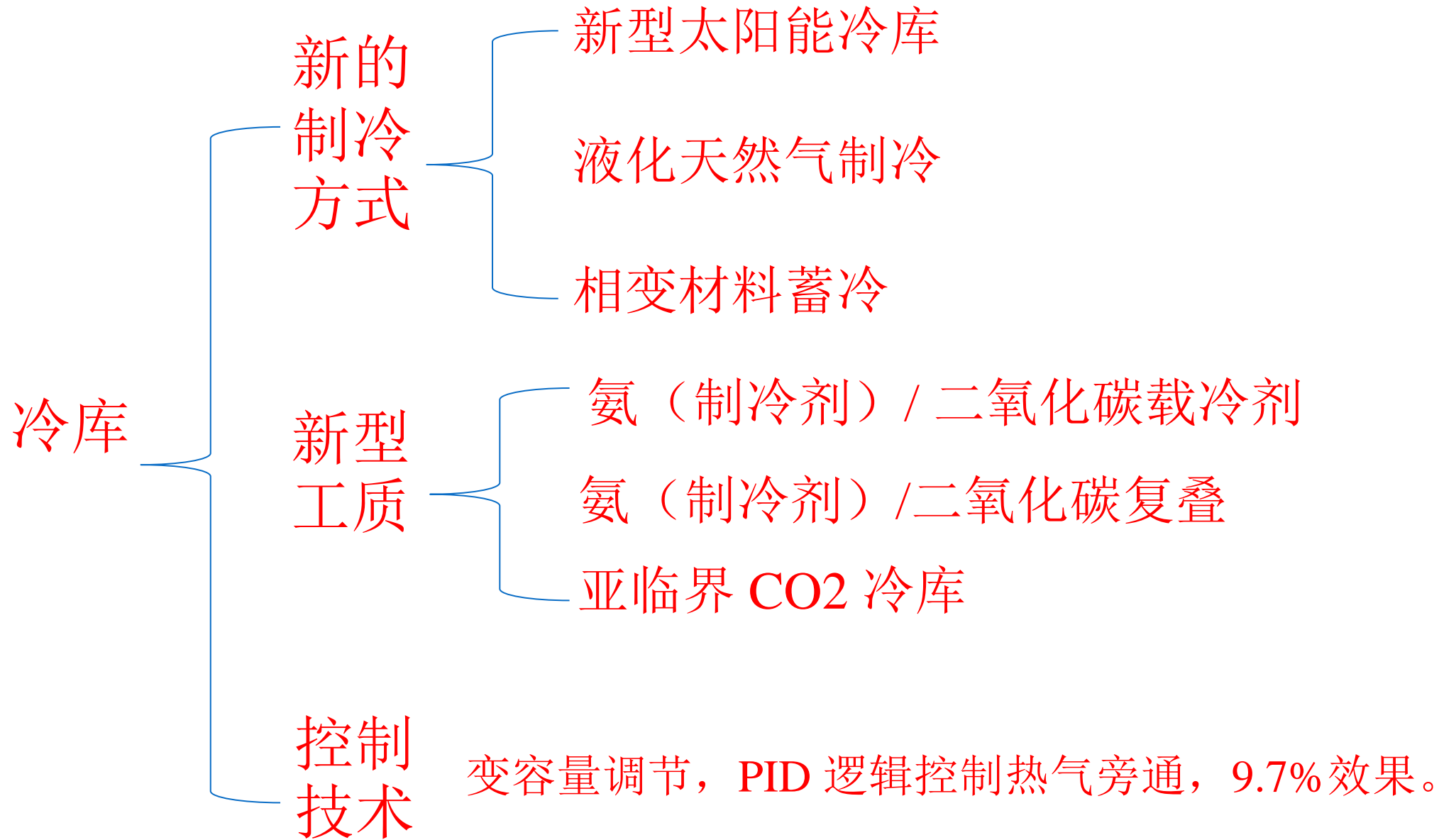
控制技术

冰箱压缩机变频，约10%的效果。在无霜冰箱，变工况优势明显。

新压缩机

大压缩机（1匹甚至更大），线性压缩机。

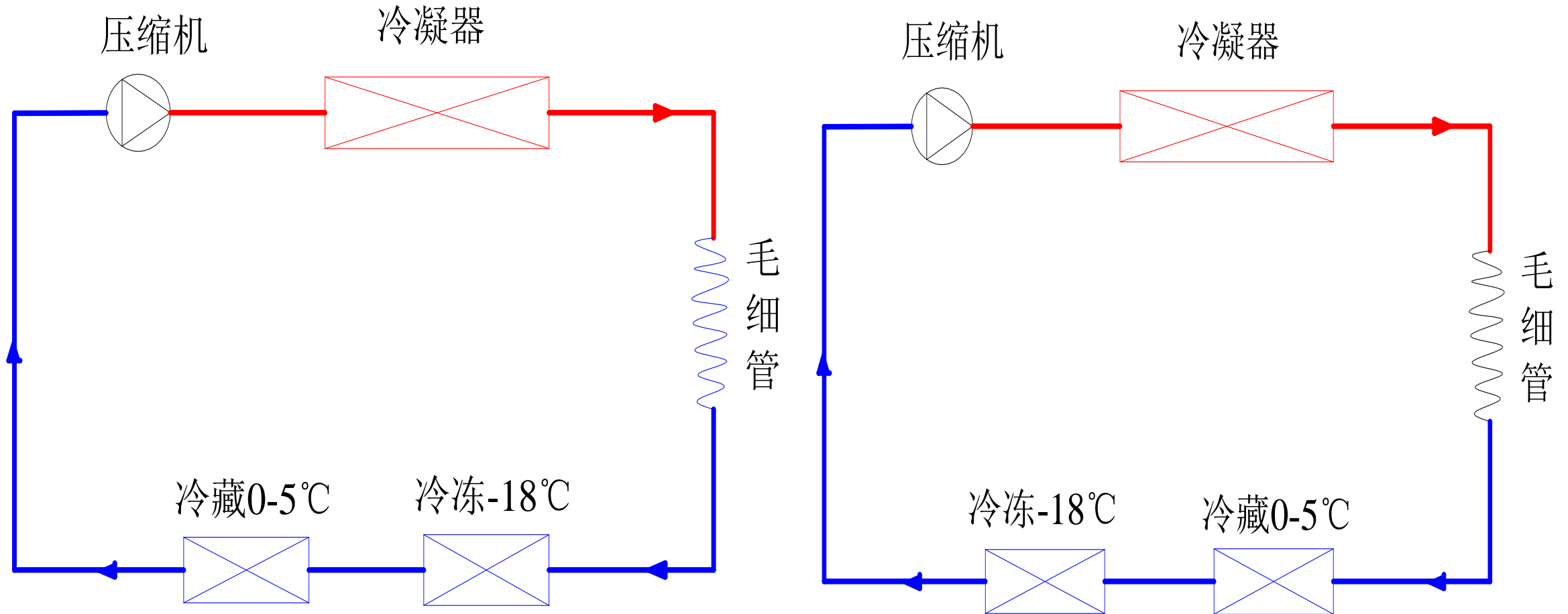
2、型式与发展

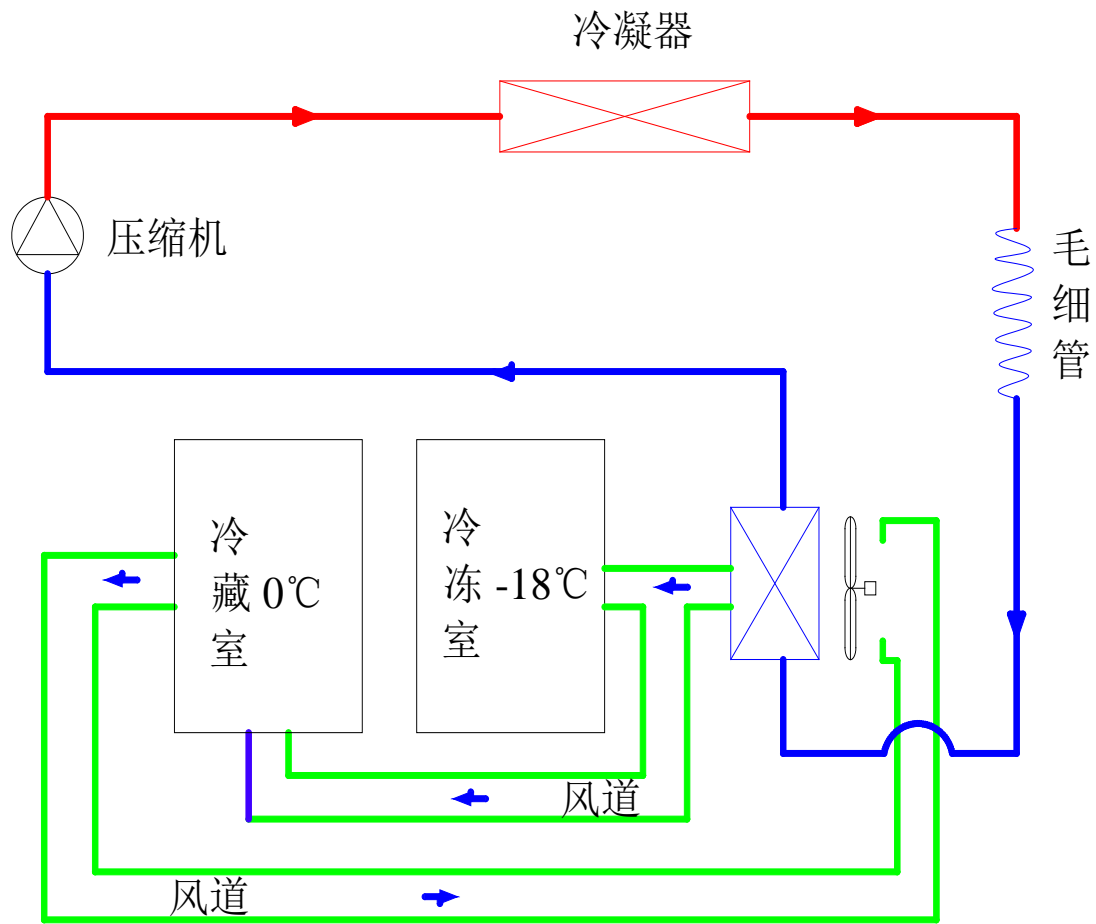


2.1、现有的制冷循环

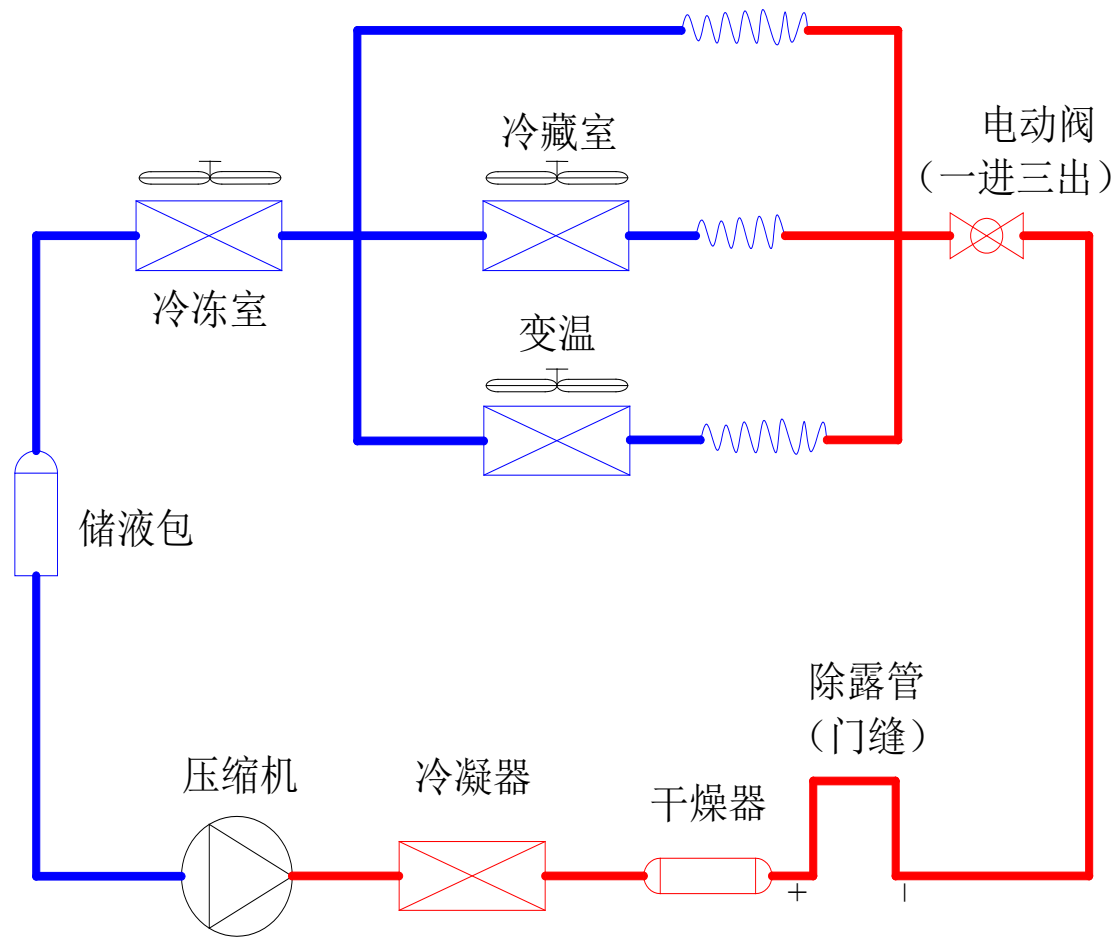
尽管在冷冻冷藏领域，制冷方法有所发展，但目前占主流的依然是基于**往复式活塞压缩机**的多温区型式。比如：

单节流冰箱，单个毛细管进入串联的冷冻蒸发器和冷藏蒸发器





单毛无霜冰箱



多毛无霜冰箱

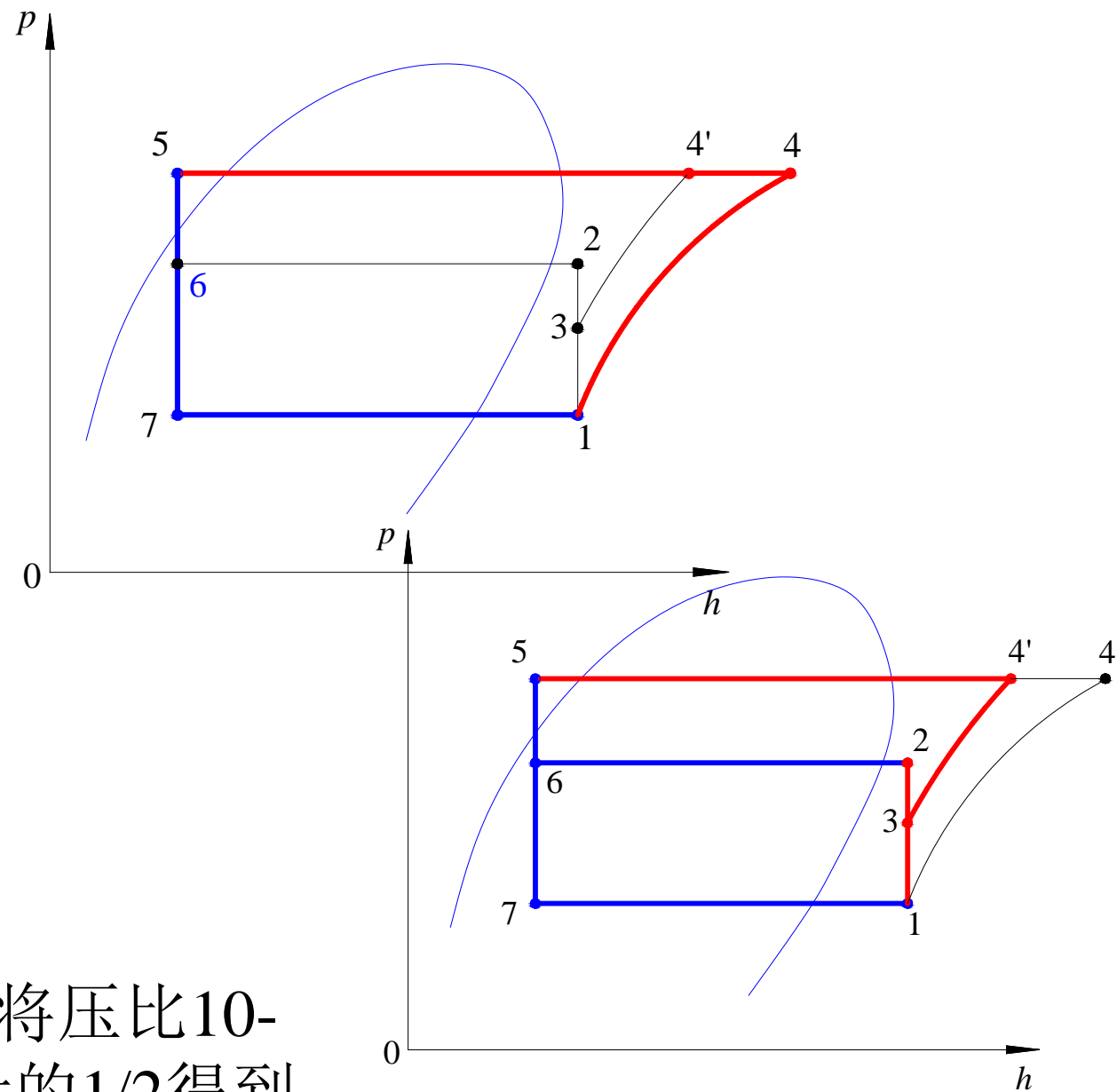
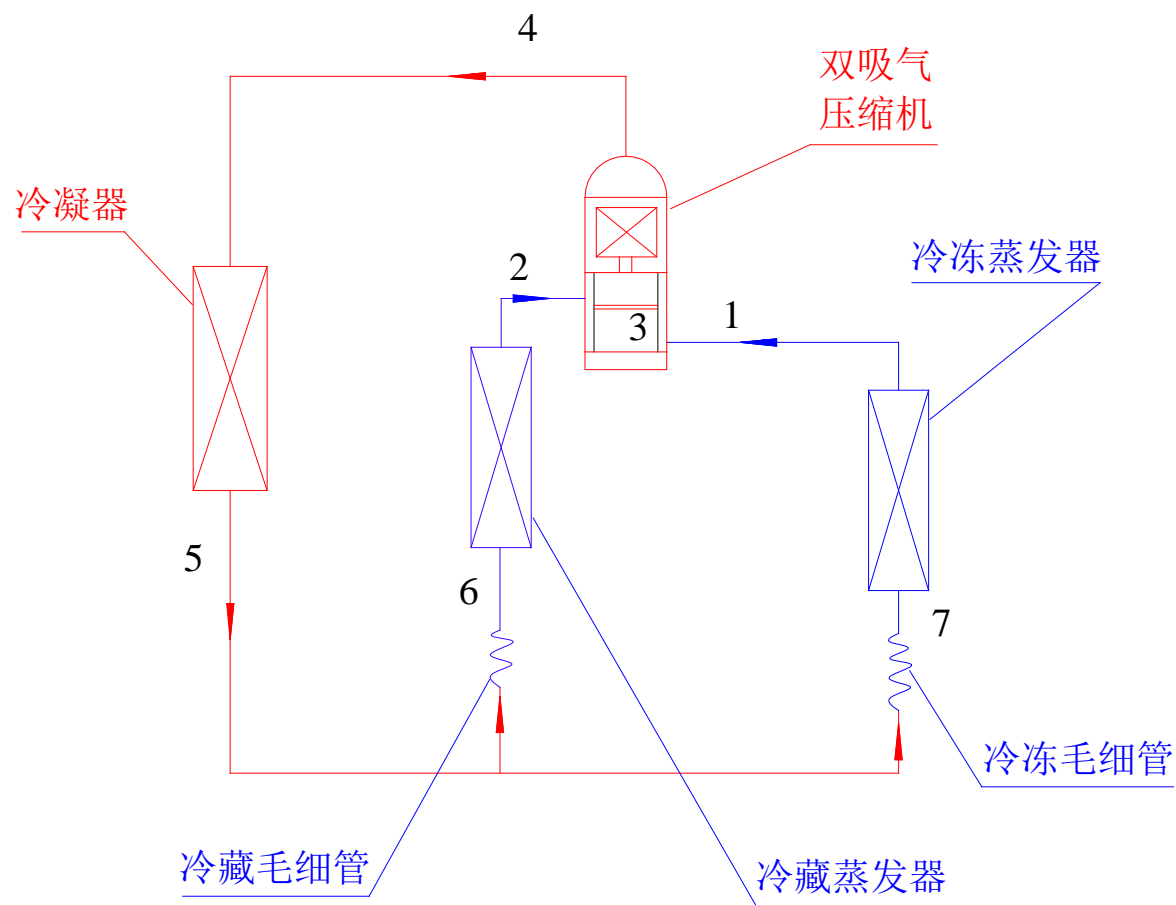
2.2、存在的问题

单个压缩机提供2个以上的温度，是通过在单一低温（冷冻室温度）上将低温升温后变成较高的低温（冷藏室温度），从热力学角度看不符合高效功热转换原理。

多个毛细管能形成多个蒸发温度，在温控器作用下，不同压力、温度流体混合，平衡反复被打破和重新建立，也会降低热力学完善度。

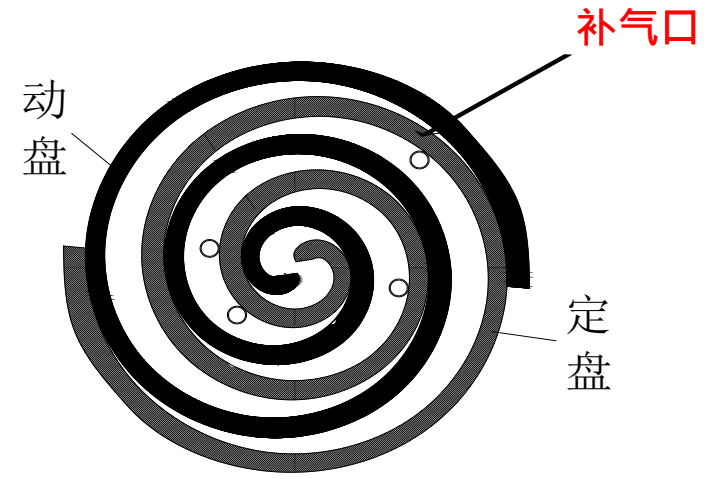
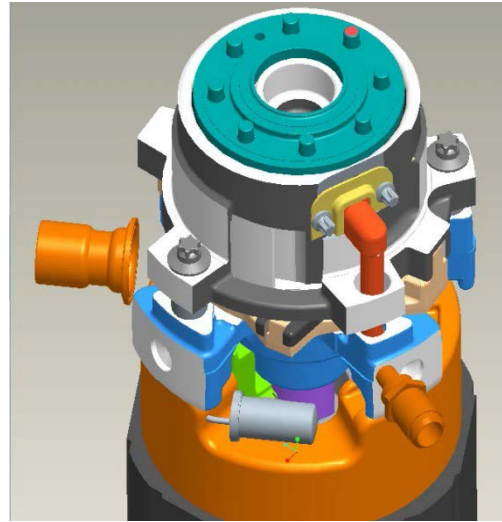
多路进气（经济器系统）应用在热泵供暖中效果很好，是否可以借鉴到冰箱压缩机中？

3、双吸气冰箱

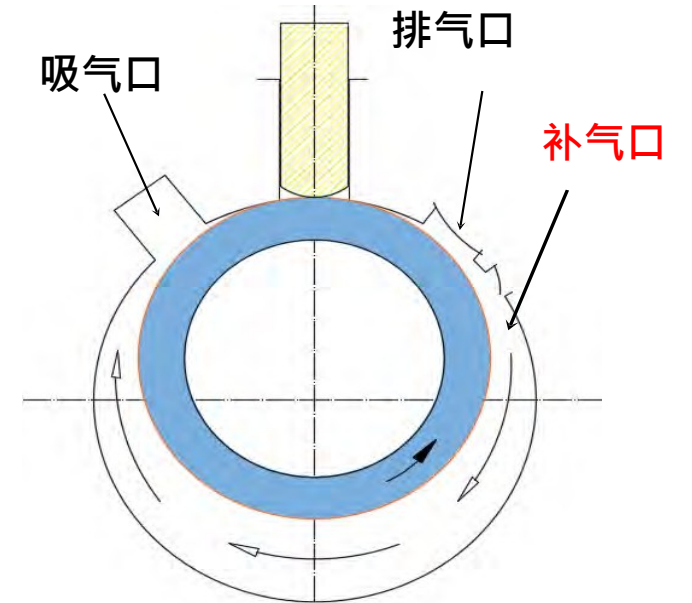
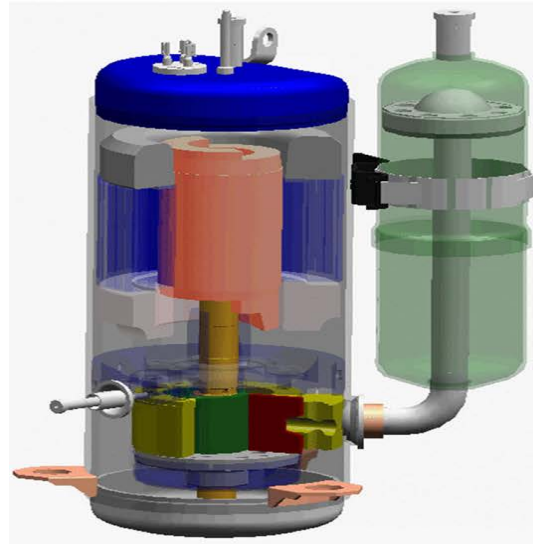


单压缩机双吸气，有两个蒸发温度，将压比10-12降低为5-7，相应功率减半。输气量的1/2得到改善，总能效估计也许会有较大幅度提升。

涡旋压缩机辅助进气较容易实现，原因在于其封闭内压缩的特殊结构。

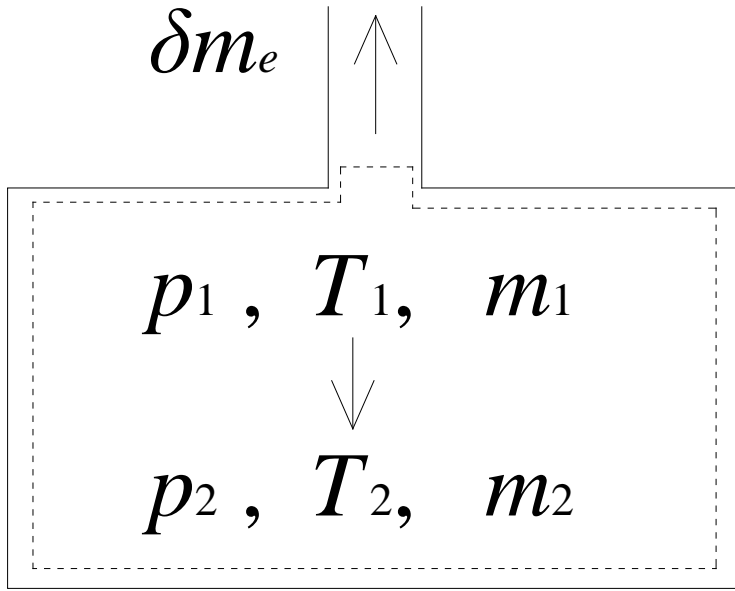


滚动活塞压缩机也可以改造成带辅助进气，达到增容提效的目的，可通过阀切换等实现。



由于构造原理不同，活塞压缩机改造为双吸气，需要通过仿真计算和实验，解决流量分配、第二进气口设计的技术问题。

*关键问题之1: 活塞压缩机双进气的模拟



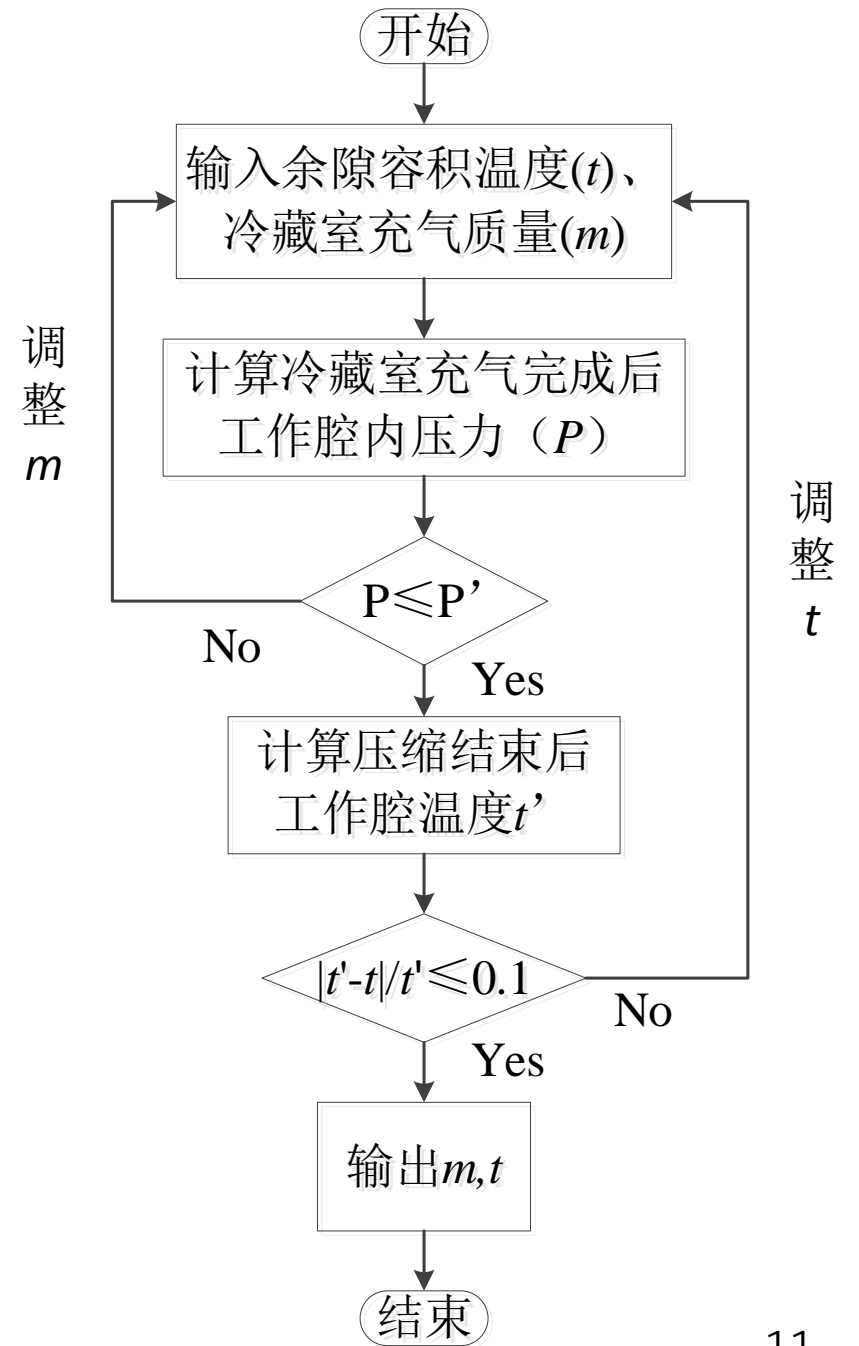
假定为控制界面移动的
刚性容器充气

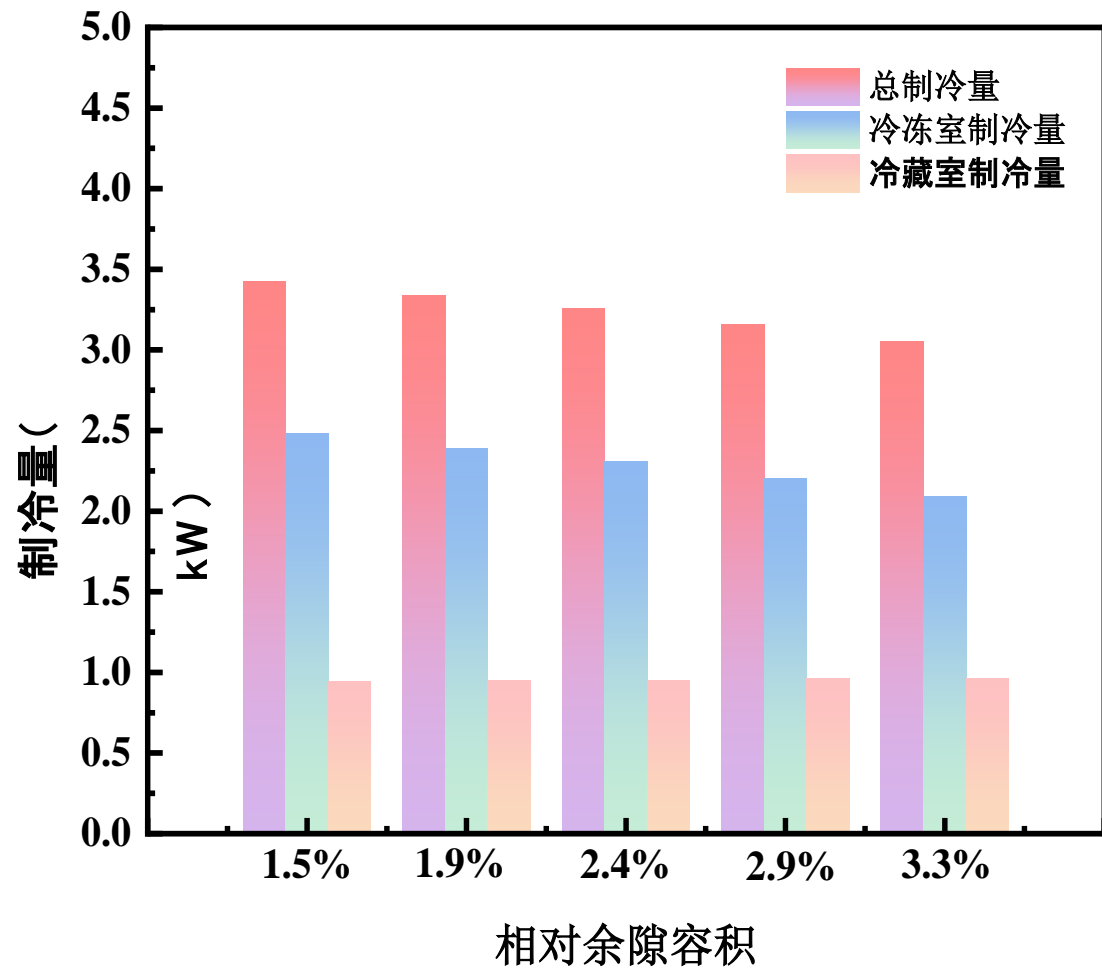
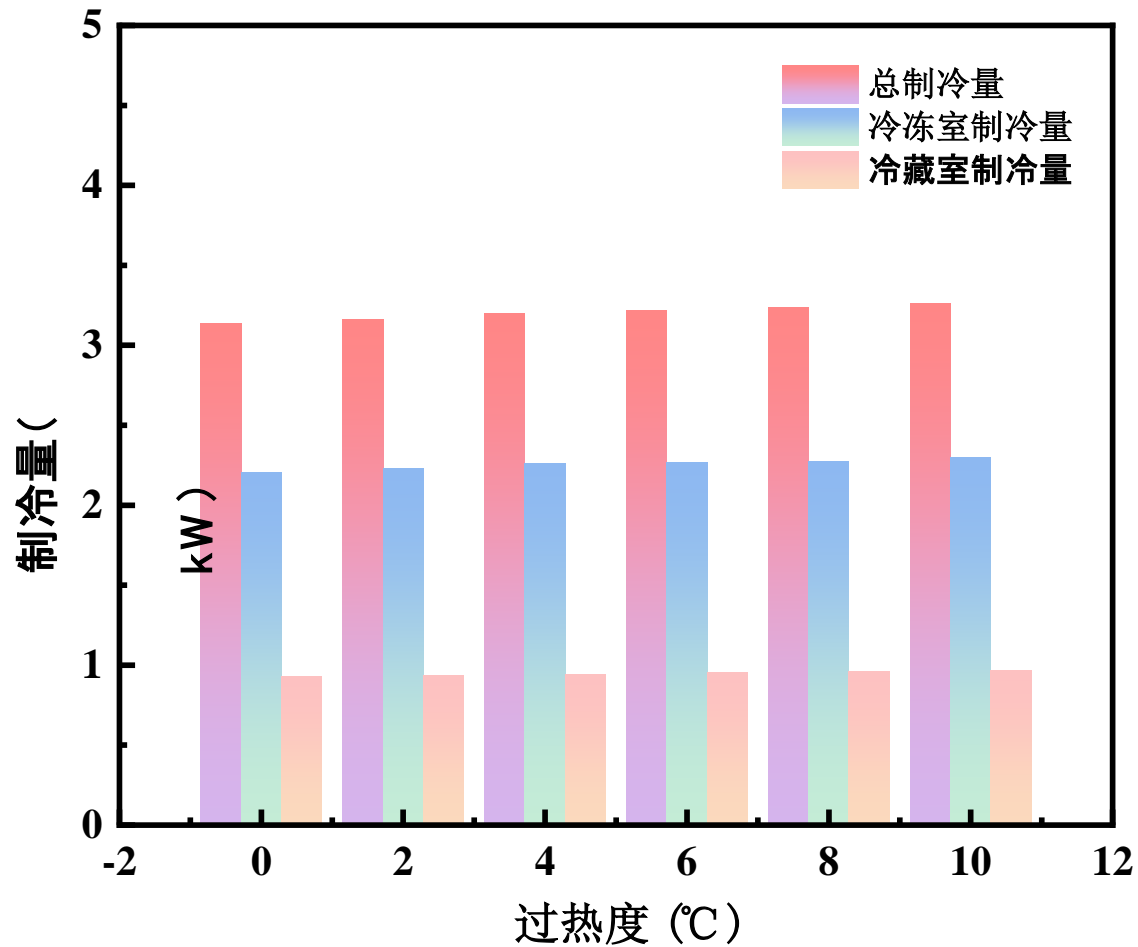
$$h_2 = \frac{m_1' h_1' + m_1 h_1}{m_1 + m_1'}$$

$$v_2 = \frac{V}{(m_1 + m_1')}$$

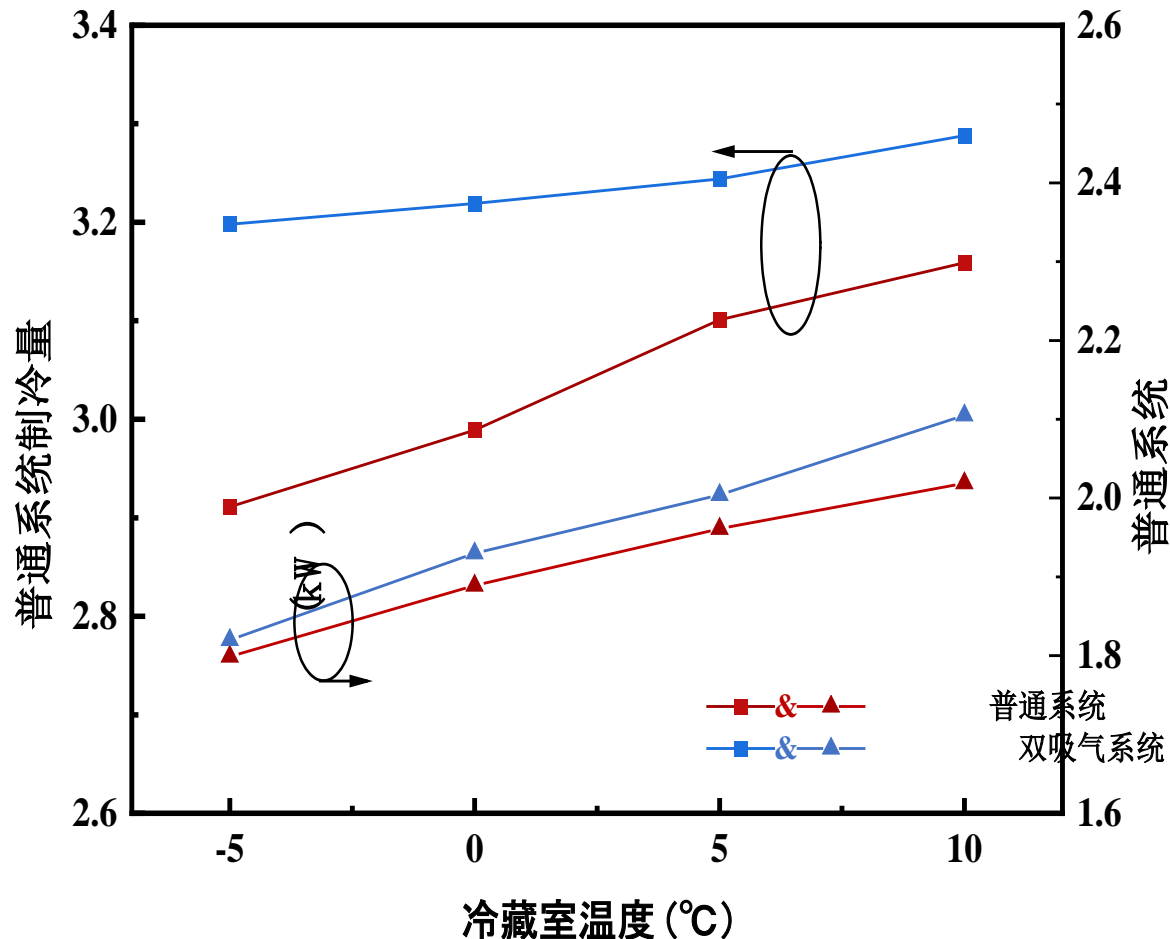
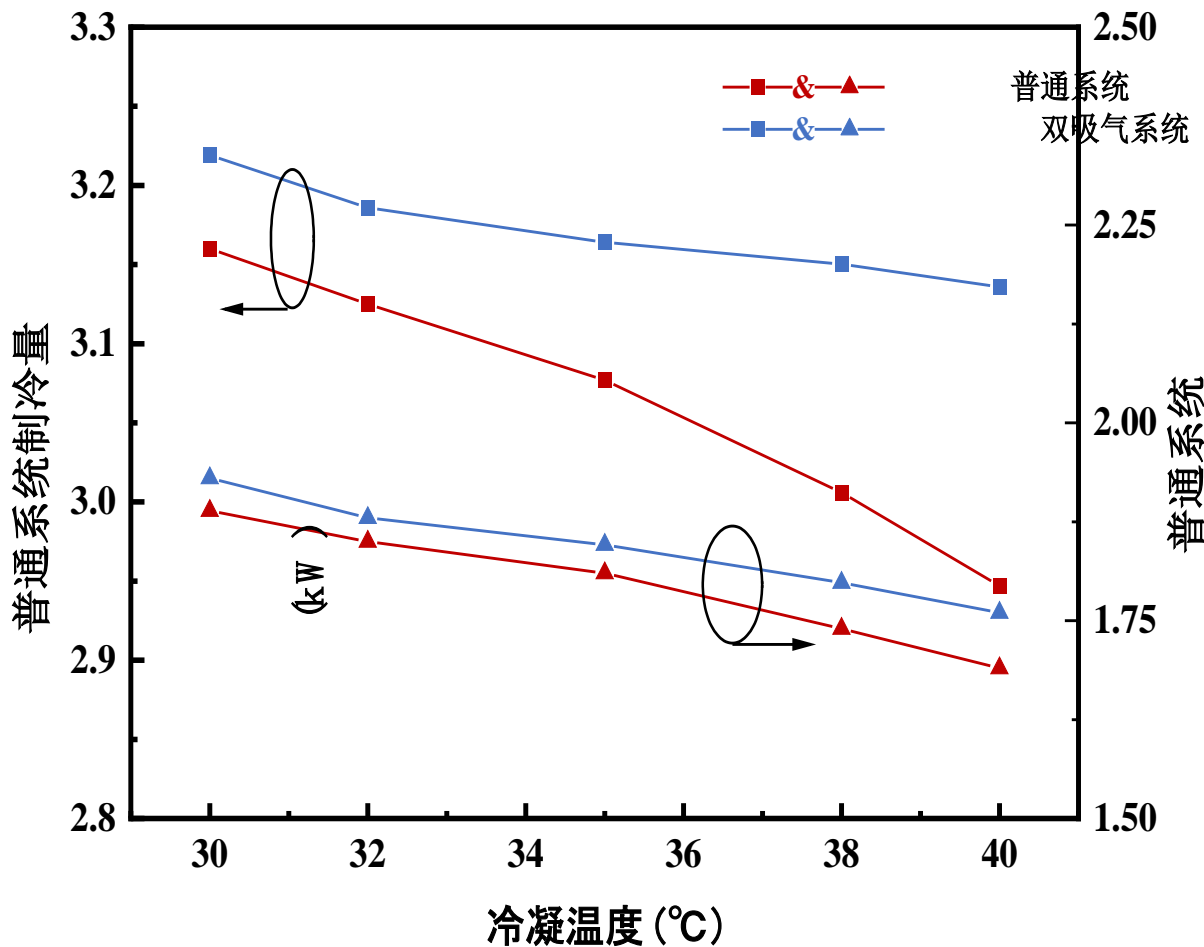
$$t' = T_{S0} \left(\frac{P_0}{P_{S0}} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

建立实际气体的混合、
膨胀、压缩模型





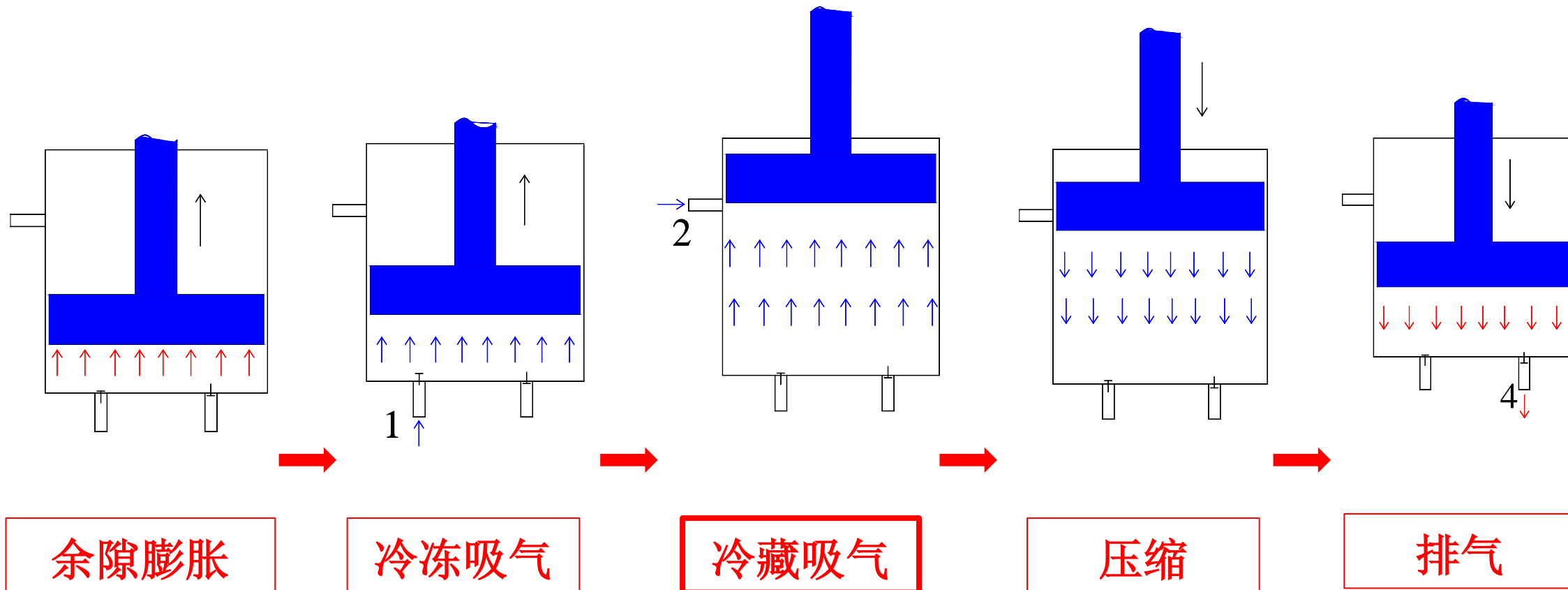
- 1、双吸气**过热度**0 °C-12 °C，变化对制冷量影响较小；
- 2、**相对余隙容积**的影响很大，冷冻制冷量**减小**而冷藏有**小幅度上升**。

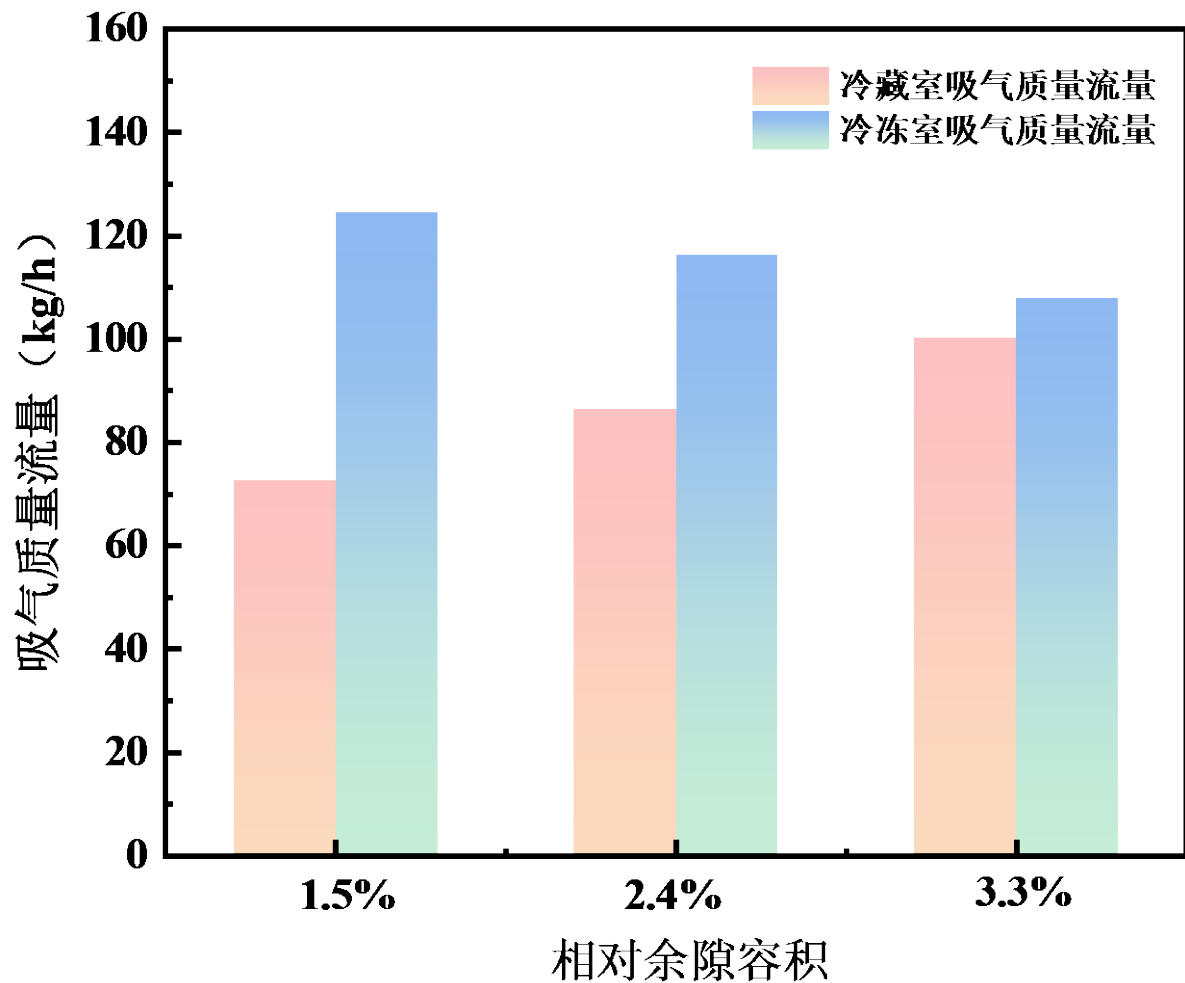
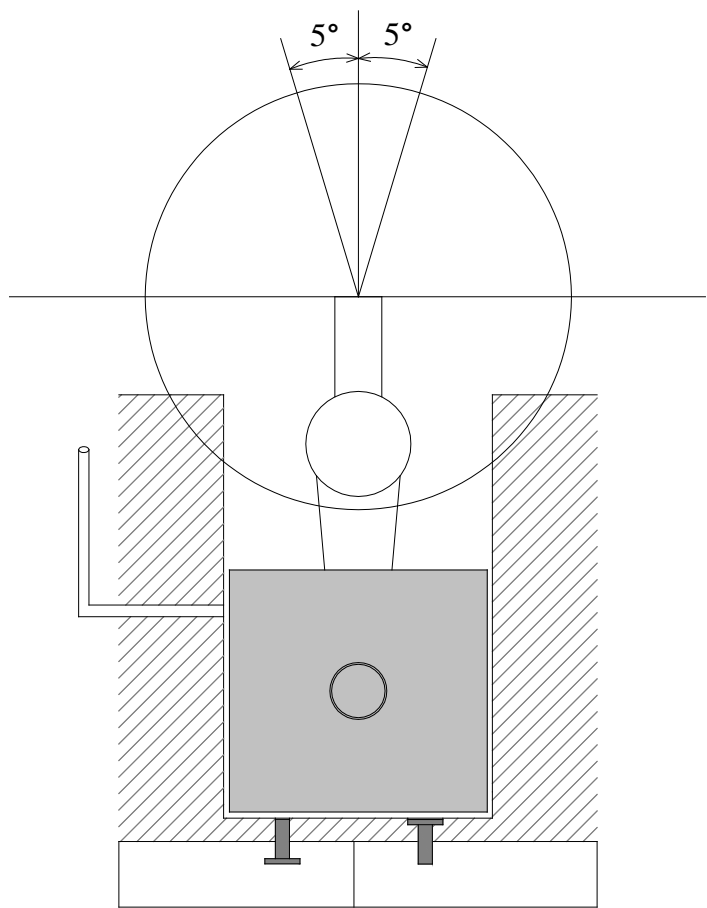


- 1、双吸气较单吸气制冷COP可提高15-20%；
- 2、高冷凝温度、低冷藏温度双吸气的优势明显。

*关键问题之2： 第二进气口位置的设计

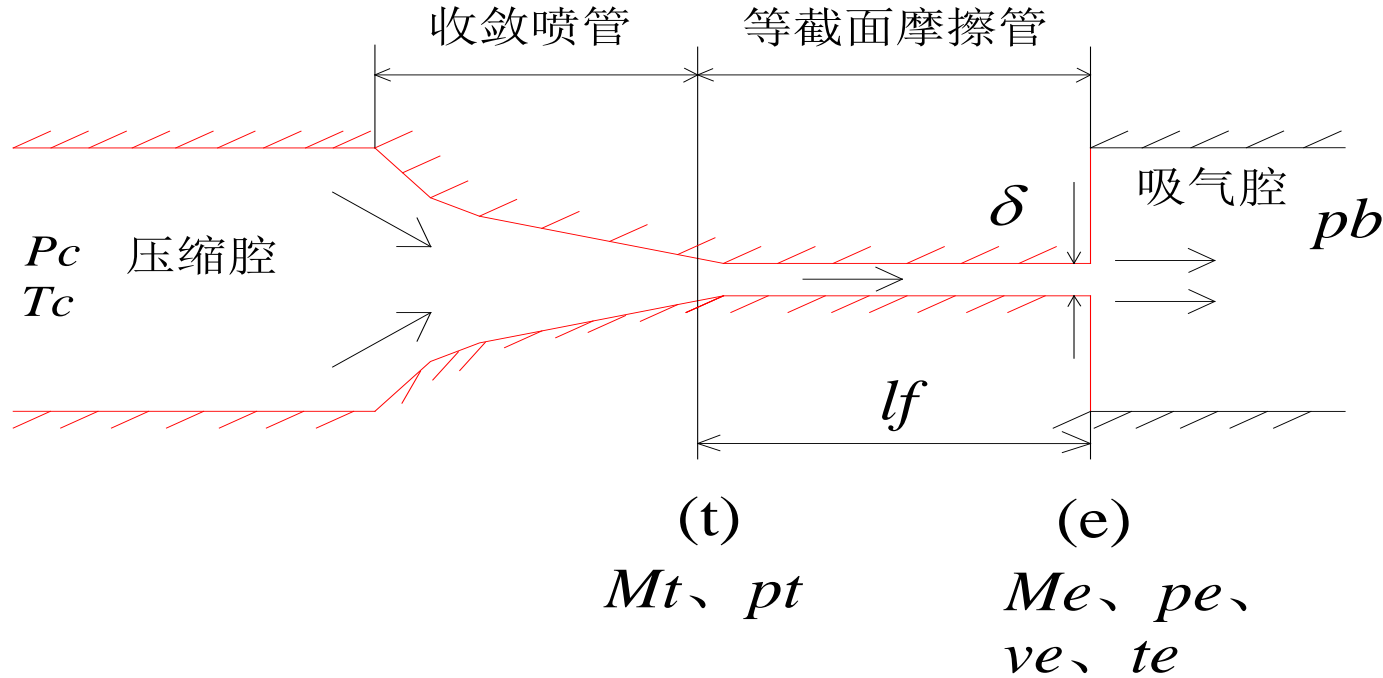
须从研究活塞压缩机的工作过程出发





通过计算活压机曲轴的转速、转角，在压缩机下止点位置开设第二进气口，此时**吸气容积腔达到最大**，同时活塞回转堵塞第二进气口**防止倒流**。第二进气口流量能够满足冷藏制冷量的需要。

*关键问题之3：第二进气口形状的设计



$$D = \frac{4H\delta}{2}(H + \delta)$$

$$\lambda \frac{l_f}{2\delta} = \frac{1}{kM_t^2} \left(\frac{M_e^2 - M_t^2}{M_e^2} \right) + \frac{k+1}{2k} \ln \left[\frac{M_t^2 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_e^2 \right)}{M_e^2 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_t^2 \right)} \right]$$

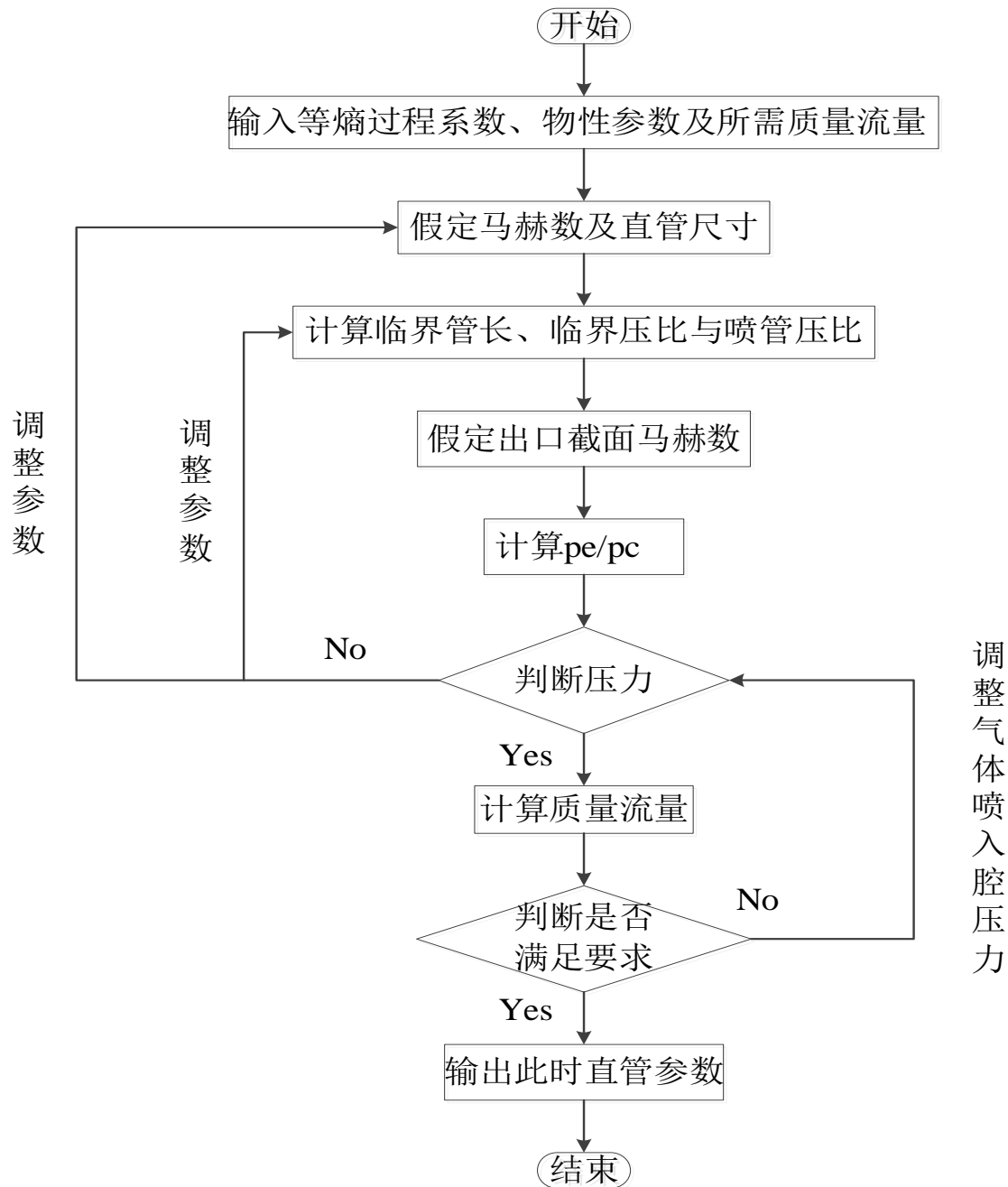
$$\lambda \frac{l_f}{2\delta} = \frac{1 - M_t^2}{kM_t^2} + \frac{k+1}{2k} \ln \left[\frac{(k+1)M_t^2}{2 + (k-1)M_t^2} \right]$$

$$\frac{p_t}{p_e} = \frac{1}{M_t} \left(\frac{k+1}{2 + (k-1)M_t^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{p_c}{p_t} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M_t^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

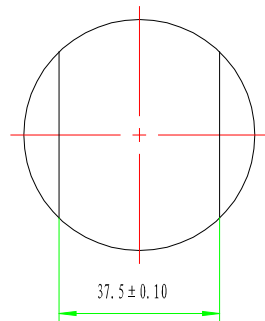
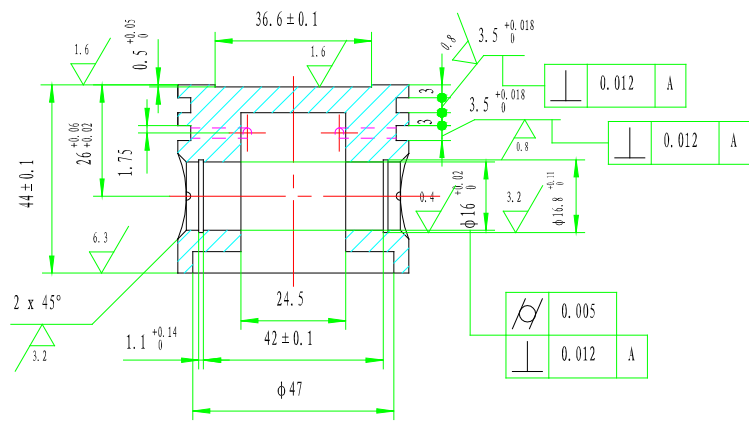
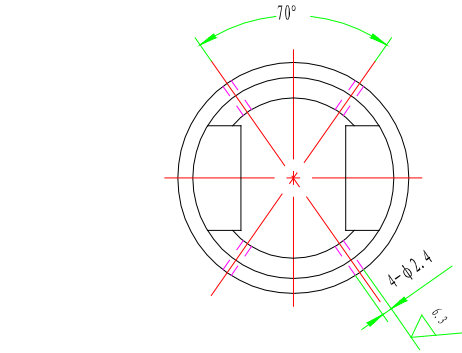
$$\lambda \frac{l_f'' - l_f}{2\delta} = \frac{1 - M_e^2}{kM_e^2} + \frac{k+1}{2k} \ln \left[\frac{(k+1)M_e^2}{2 + (k-1)M_e^2} \right]$$

进气口物理模型看成经过较长狭窄通道的气体流动，气体流经管道产生的摩擦忽略不计，此时的简化模型为：无摩擦的收敛喷管和有摩擦的等截面直管的组合。

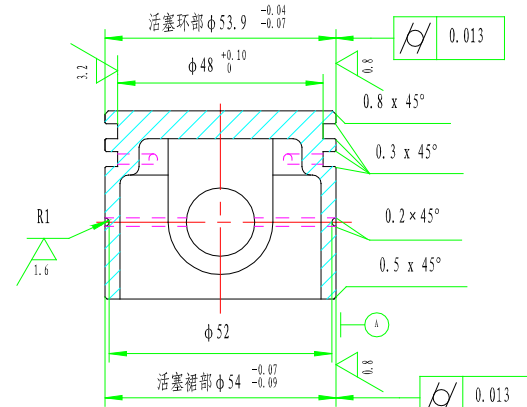


- 1、根据**最大进气量**计算质量流量。
- 2、假定 t 截面的**马赫数 M_t** 及直管尺寸。
- 3、带入假定马赫数 M_t 对**临界管长、临界压比和喷管压比**进行计算。
- 4、对 e 出口截面马赫数 M_e 进行假定并带入计算总压力比，将得到的总压力比与理论循环中得到的气体喷入腔（即吸气后气缸内）压力、气体来源腔压力比**进行比较，调整**。
- 5、按此时吸气管规格对**质量流量**进行计算，如果满足所需质量流量，则可输出管的参数；如果不能，则改变管路。
- 6、**输出进气口结构尺寸**。

对设计进行原理性实验。通过解析某型号的活塞压缩机结构图，确定第二吸气口开设的具体方案。



| 气缸直径/mm | 活塞行程/mm | 缸数 | 转速 r/min | 气缸容积/cm ³ | 理论输气量 m ³ /h |
|---------|---------|----|----------|----------------------|-------------------------|
| 54 | 46 | 2 | 1440 | 105.35 | 18.203 |



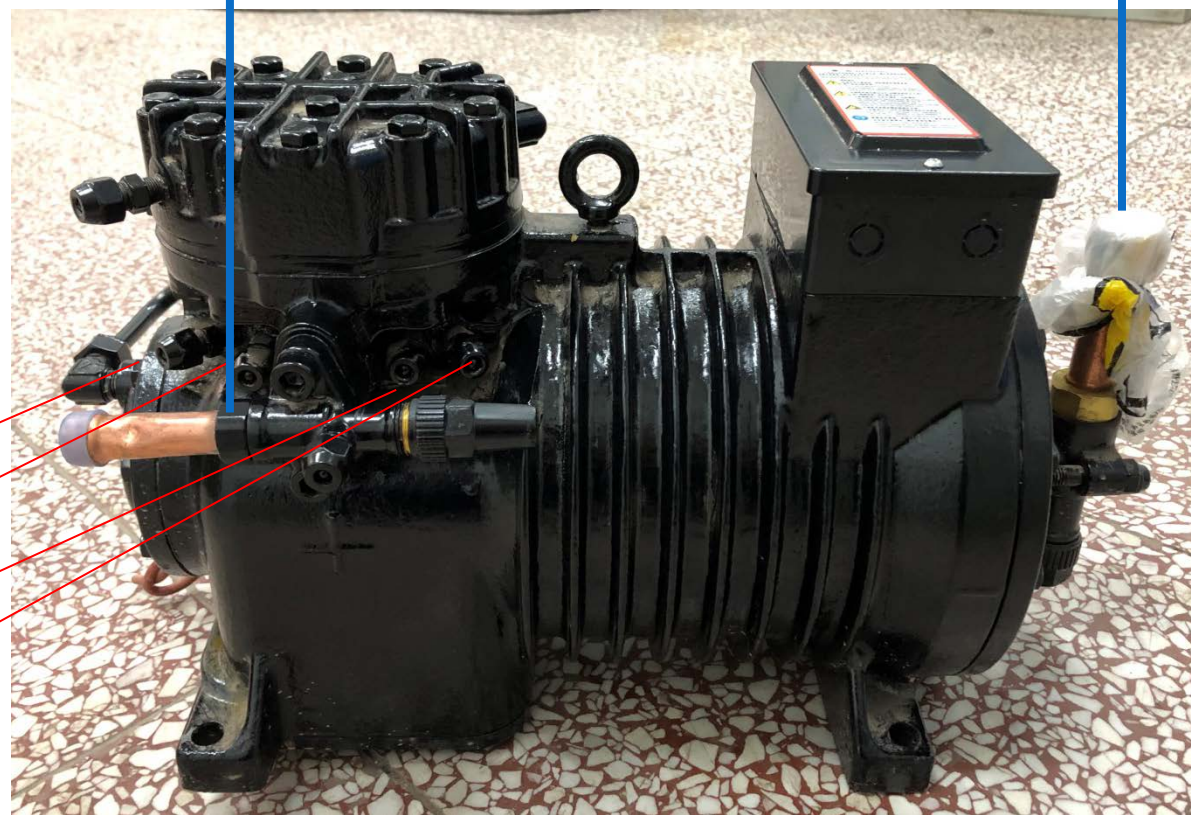
- 技术要求
- 1、铝活塞毛坯材料：金属模低压铸造铝合金，合金牌号ZL109。化学成分（%）：Si（11.0-13.0）、Cu（0.8-1.3）、Mg（0.8-1.3）、Zn（0.1以下）、Mn（0.1以下）、Fe（0.8以下）、Ni（0.8-1.5）、Ti（0.2以下），残留Al。按GB/T1173-95规定，机械性能（热处理后）：抗拉强度 $\sigma_b \geq 241\text{MPa}$ ，布氏硬度HB ≥ 100 。
 - 2、毛坯材料不得使用含镁（Mg）大于2%的铝合金。
 - 3、成品铝活塞表面应光洁，不得有毛刺、划伤或磕碰痕迹，不允许有气孔和裂纹。
 - 4、铝活塞成品重量应一致，其重量差应小于2%。

| 活塞 | | | | | | AC8B低压铸造铝合金 | |
|----|----|----|-------|----|-------|-------------|------|
| 标记 | 类数 | 分区 | 更改文件号 | 签名 | 年、月、日 | 阶段标记 | 重量 |
| 设计 | | | 标准化 | | | | 0.27 |
| 审核 | | | | | | | 1:1 |
| 工艺 | | | 批准 | | | 共张 | 第张 |
| | | | | | | BF5-05-004 | |

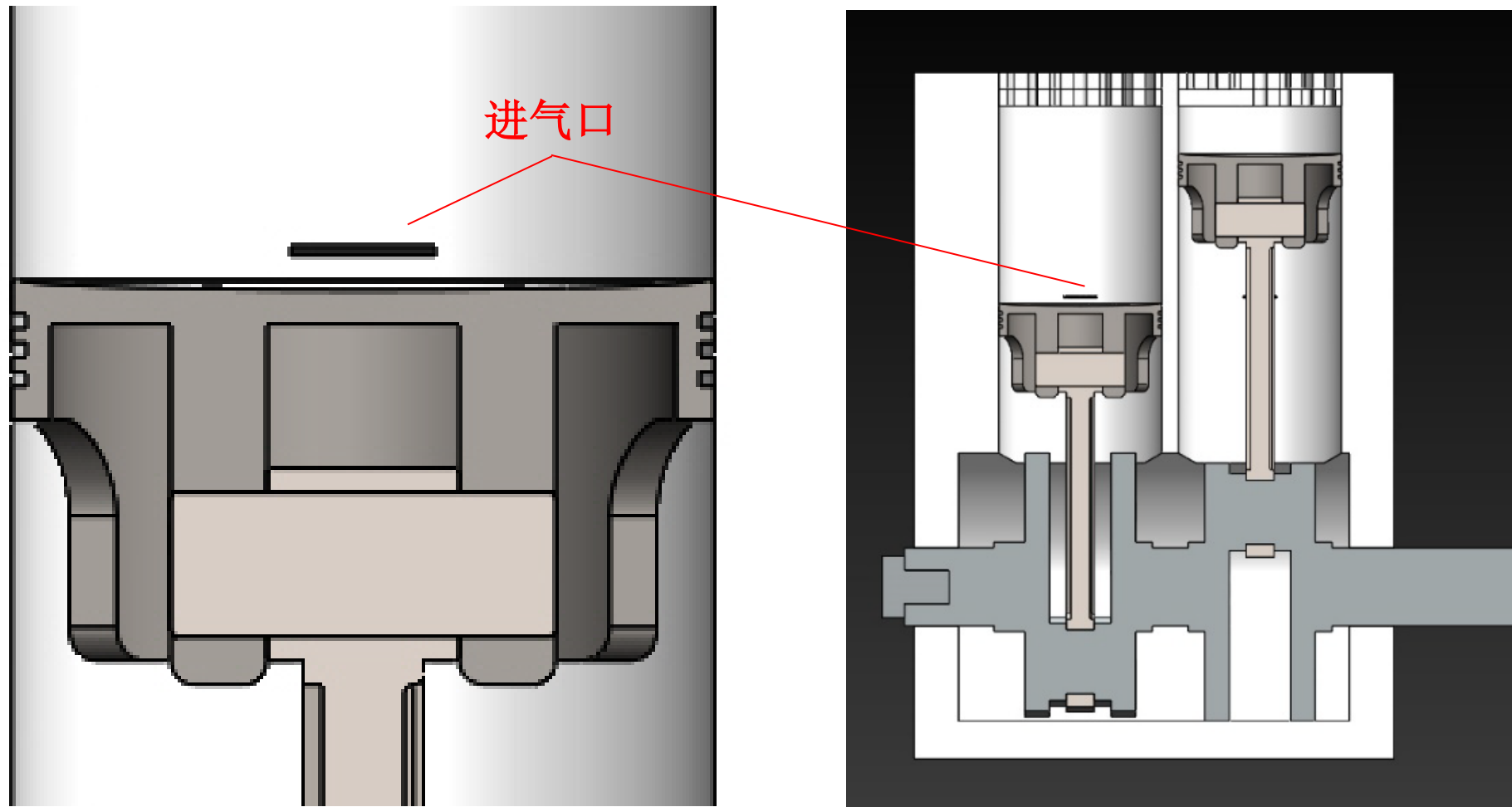


排气口

第一进气口

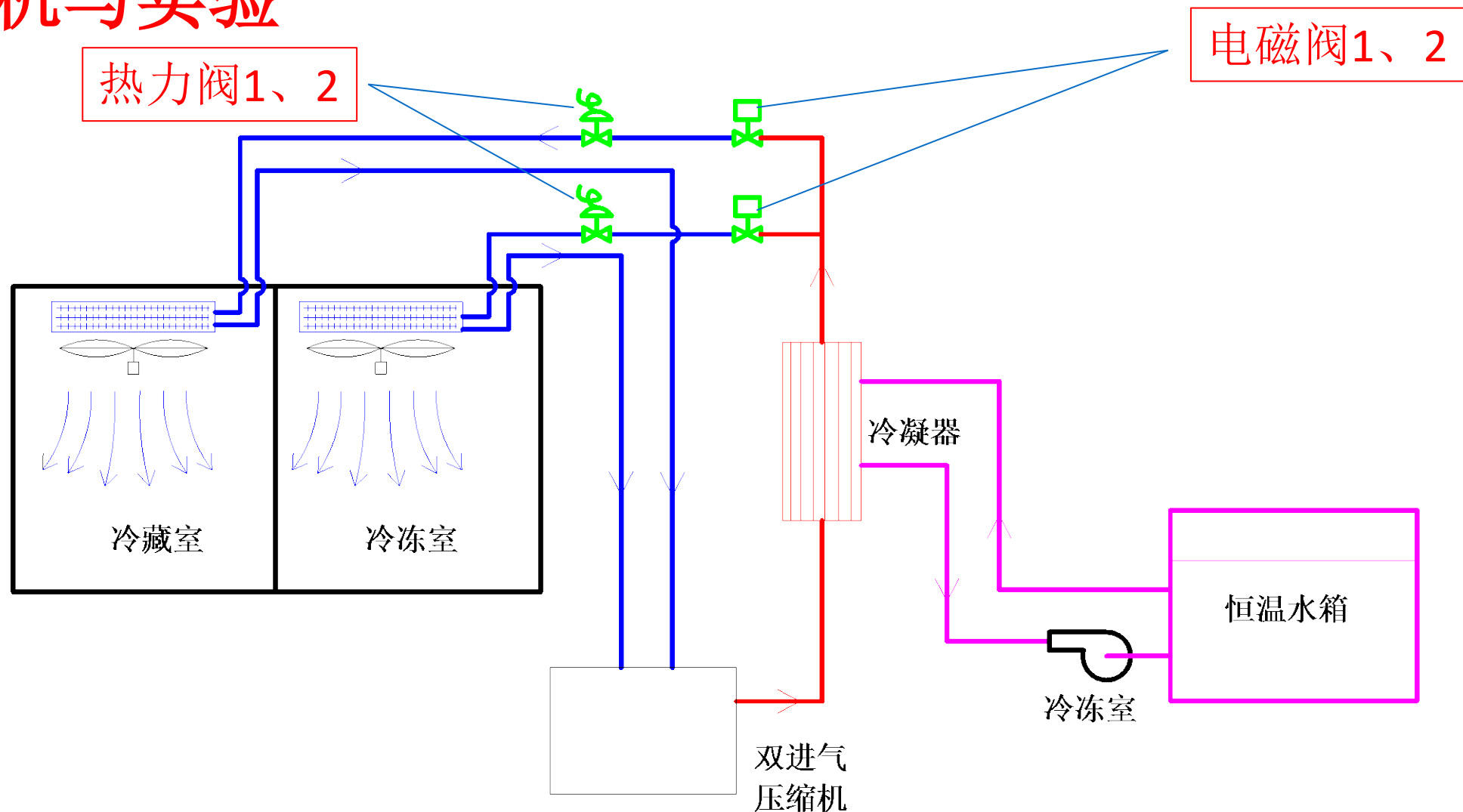


第二进气口



发现，圆形进气口容易开设但进气口尺寸不容易满足流量要求，或者直径过大容易漏气。条缝型效果较好：30mm*4mm，所需管数为4根，在冷凝温度为30℃时可进入质量流量为33.207kg/h。

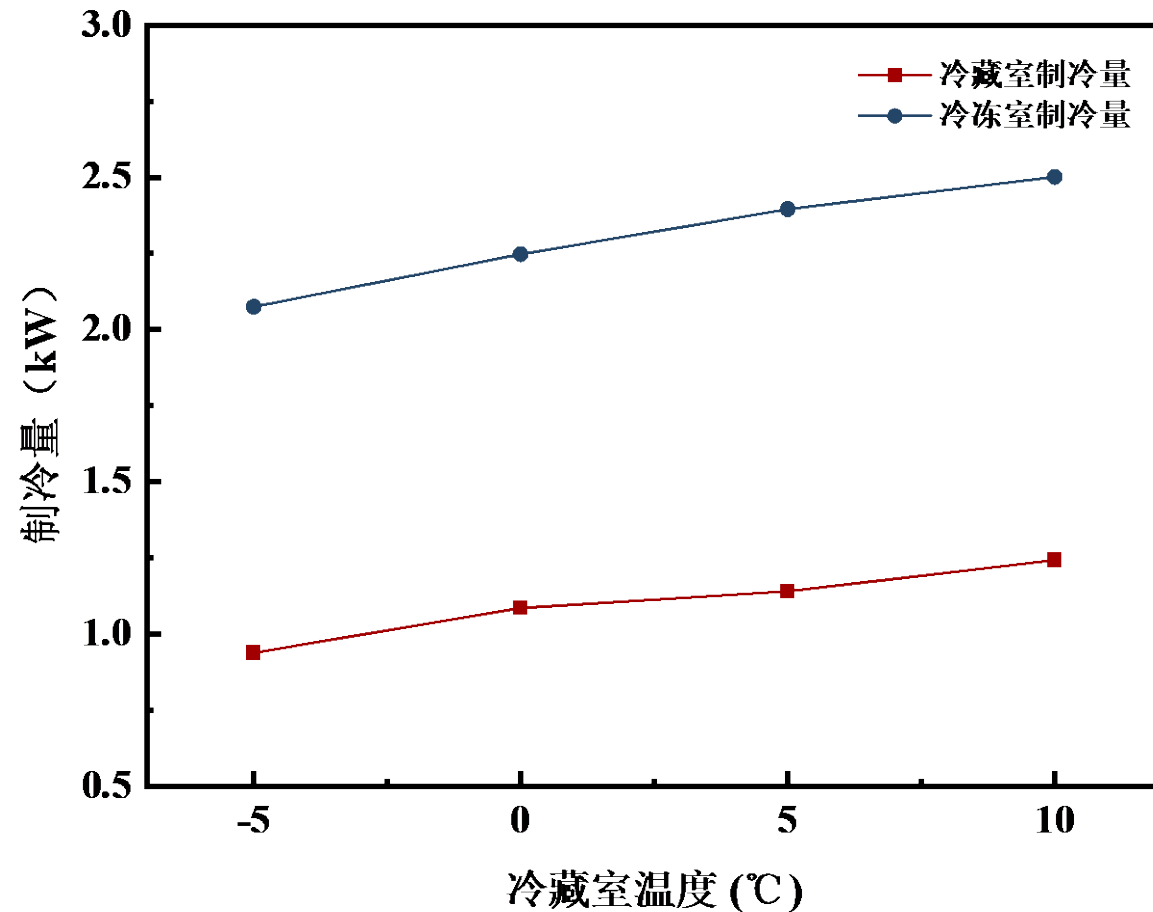
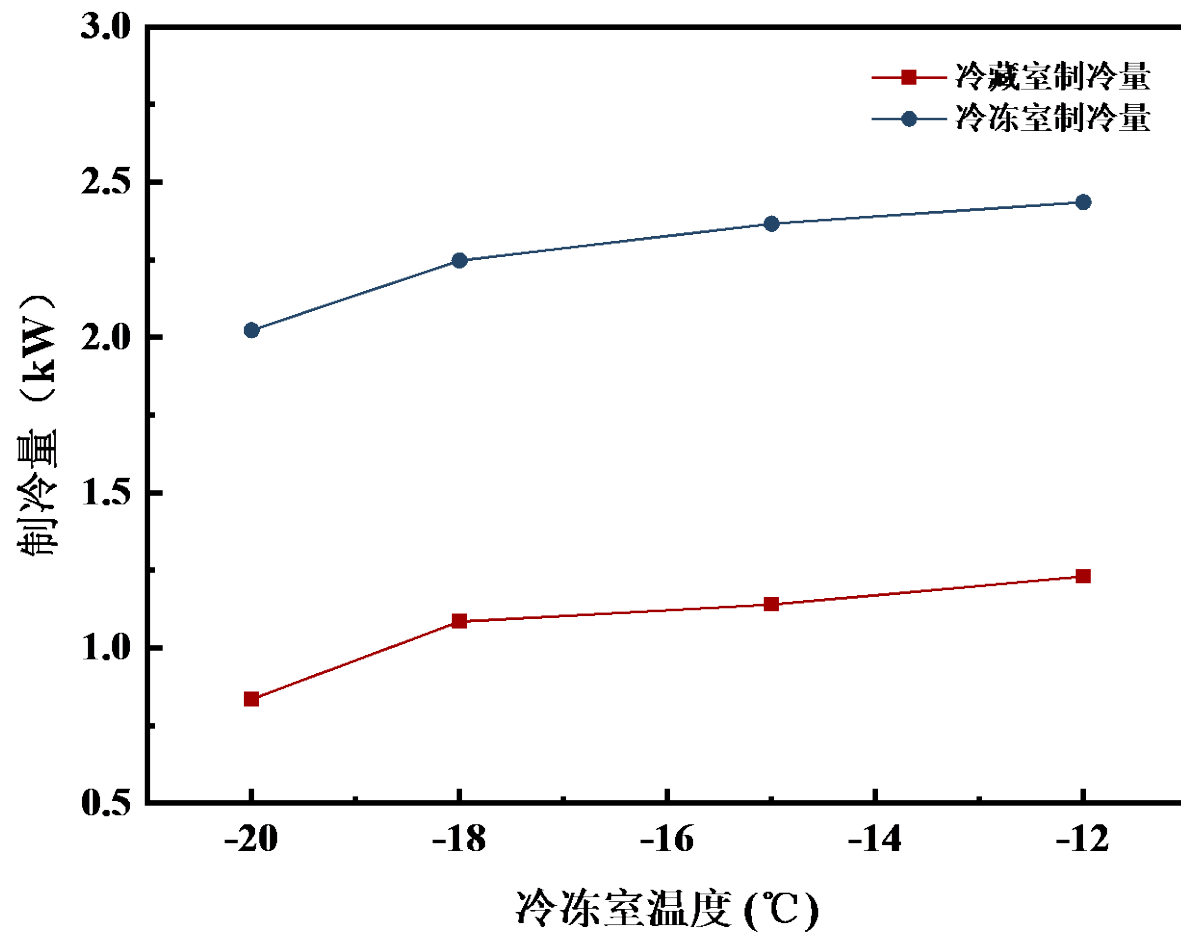
4、样机与实验



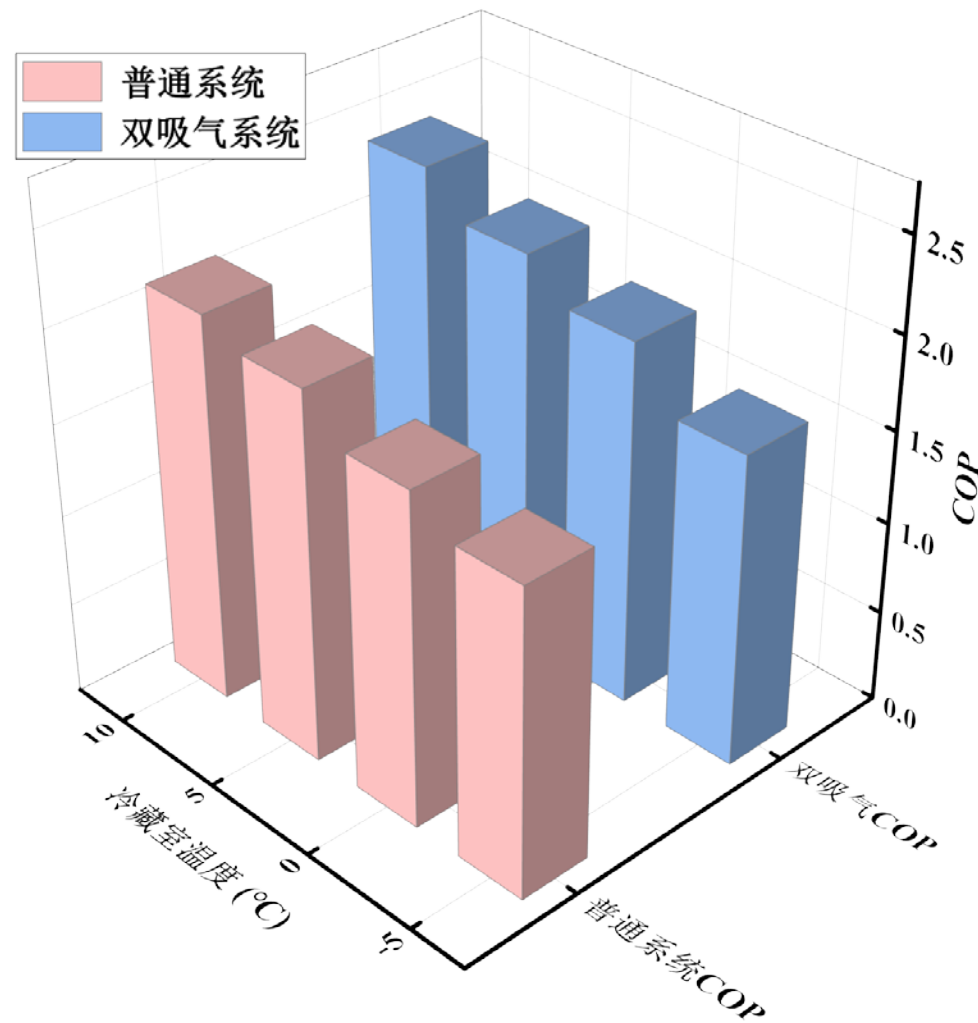
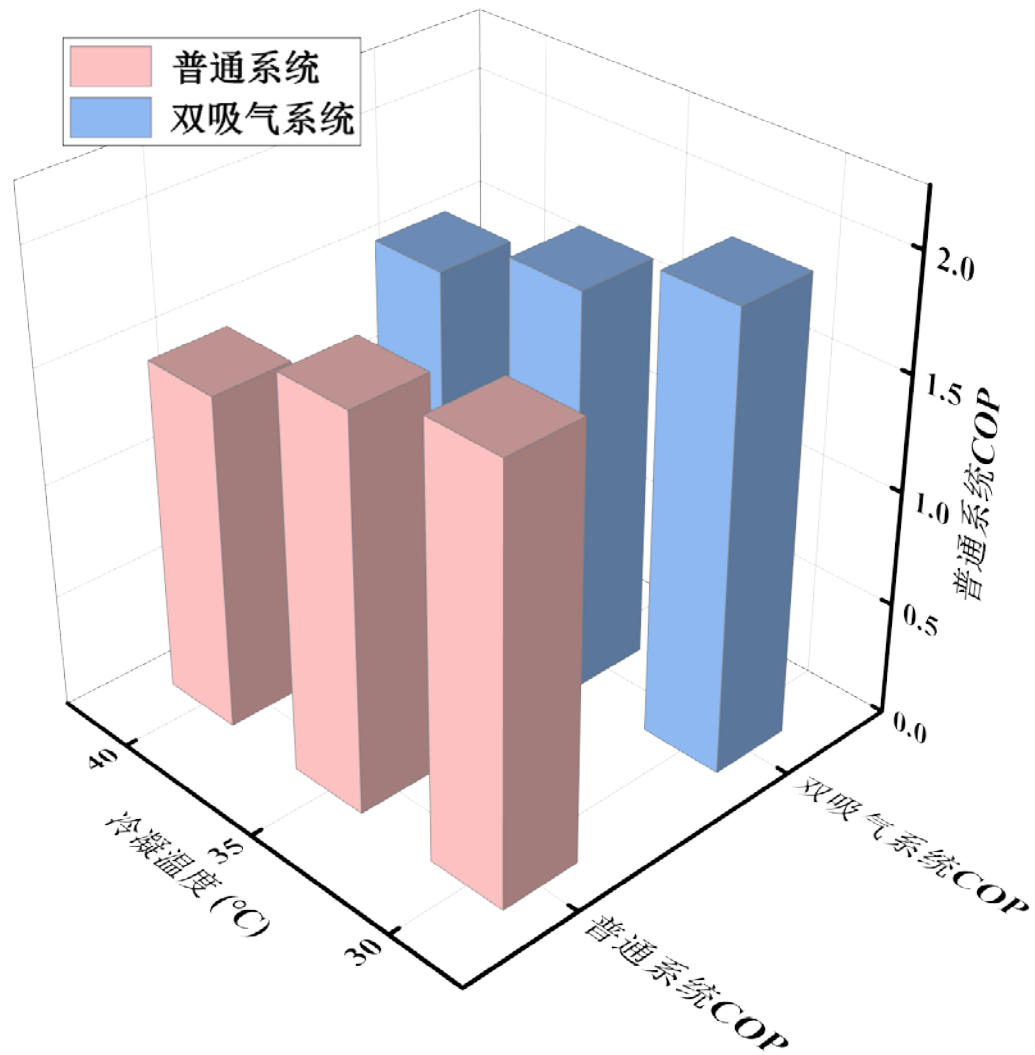
搭建实验台，包括**冷冻、冷藏2个环境控制室**，**2个膨胀阀**，每路加上**电磁阀**，根据温度控制其开闭。**恒温水箱**恒定冷凝温度，冷凝压力和过冷度。



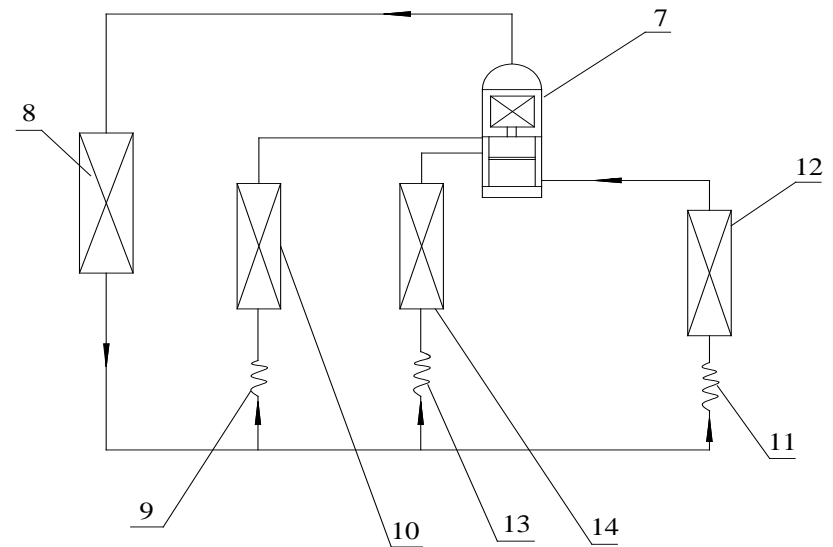
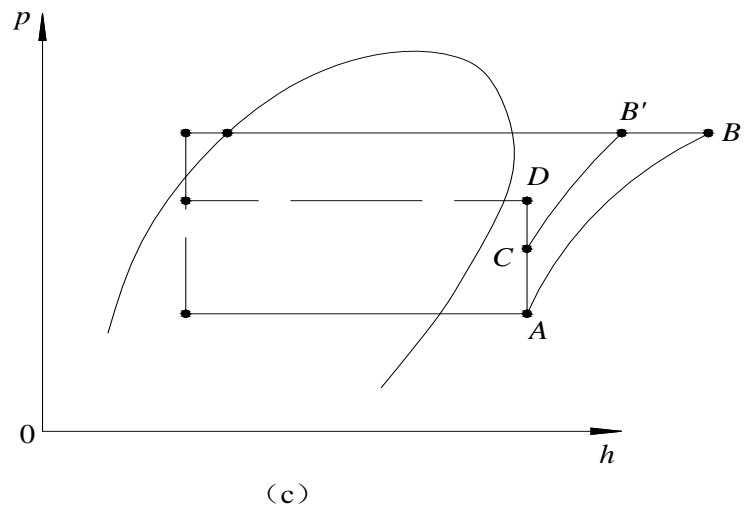
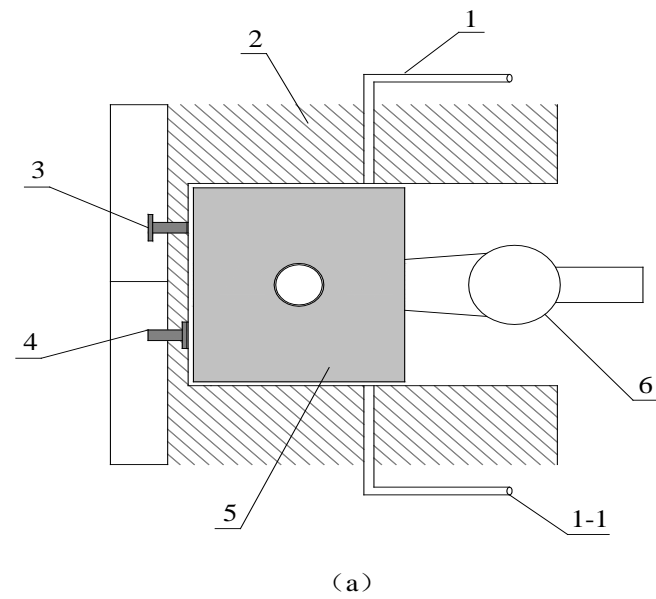
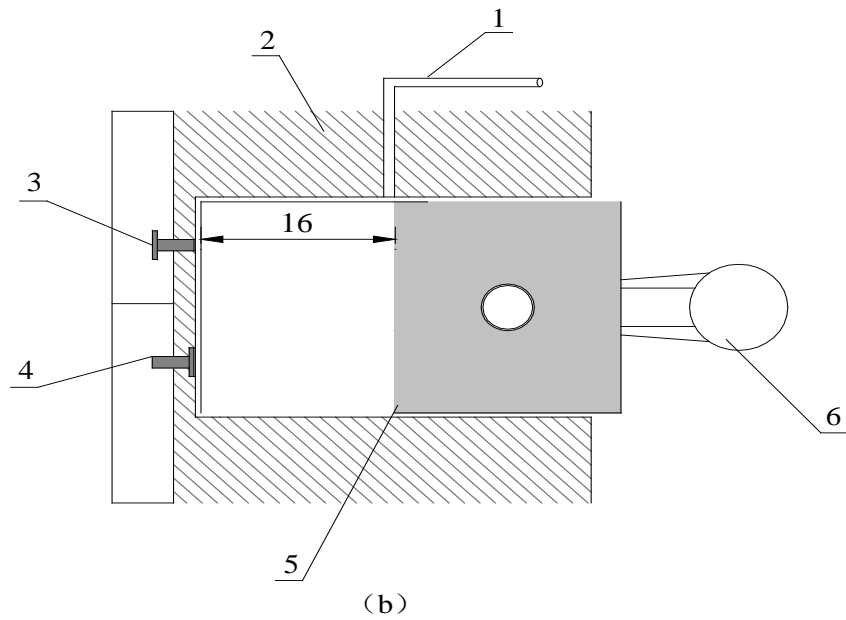
- 1、设定温度包括**冷冻室温度**和**冷藏室温度**；
- 2、两室的开关受**温控器**控制，当冷负荷小时，系统启停运行，实际运行结果是两室分别启停或都达到温度压缩机**停机**；
- 3、稳定较高负荷时**不停机**。



改变冷藏室温度-5 °C—10 °C，和冷冻室的温度-20 °C—-12 °C，考察两室的制冷量变化，冷冻室冷量2.0-2.5kW，冷藏室0.6-1.2kW。



单吸气冰箱和双吸气的比较，在冷凝温度30°C-40°C范围内，-18 °C（-5°C-10°C）均可保证稳定的制冷量，双吸气较单吸气制冷COP提高约2%-12%。



考虑：1、控制需要研究，否则无法产品化。2、是否可以尝试3个温区？

4、结论

- 1、冷藏冷冻行业**新型制冷方式的**有望在双碳背景下发挥作用；
- 2、活塞式制冷机双吸气制冷较现有单吸气有**节能效果**；
- 3、**控制和系统优化设计**是走向应用的下一步。

欢迎提出宝贵
意见!