大冷量斯特林低温制冷机及其在超导冷却系统中的应用研究

报告人：孙大明

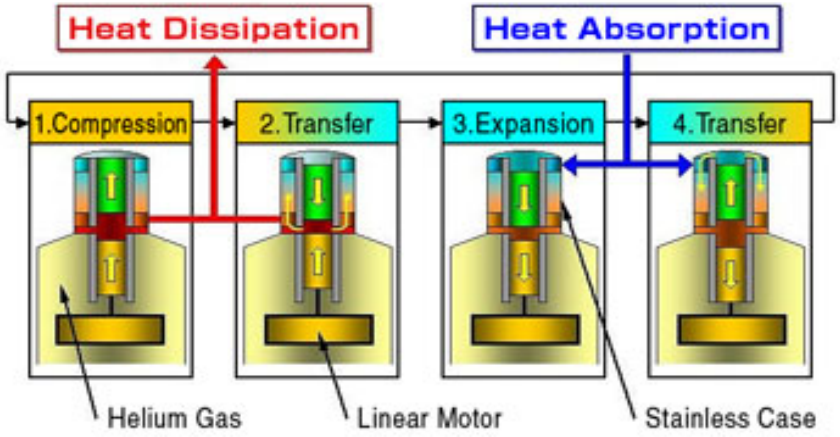
江苏克劳特低温技术有限公司

浙江大学能源工程学院

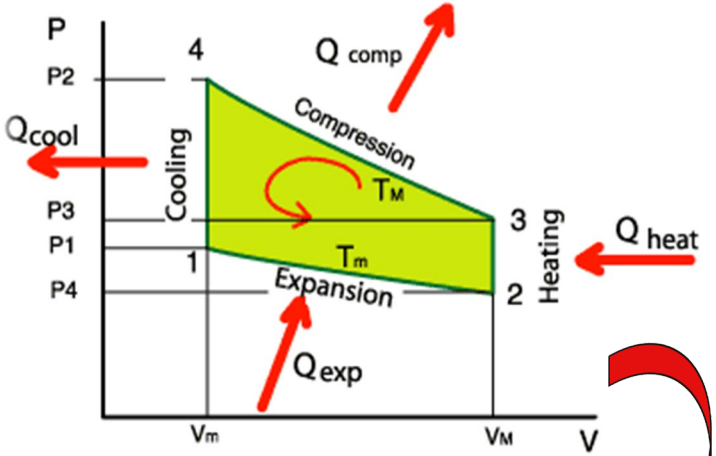
2023年10月23日

1、斯特林制冷机工作原理

1816年，苏格兰人O.R.Stirling提出了斯特林循环；1834年John Heshel提出将斯特林热机循环用作制冷循环；1862年，Kirk将其逆循环用于制冷，称为逆向斯特林循环，也称为斯特林制冷循环。



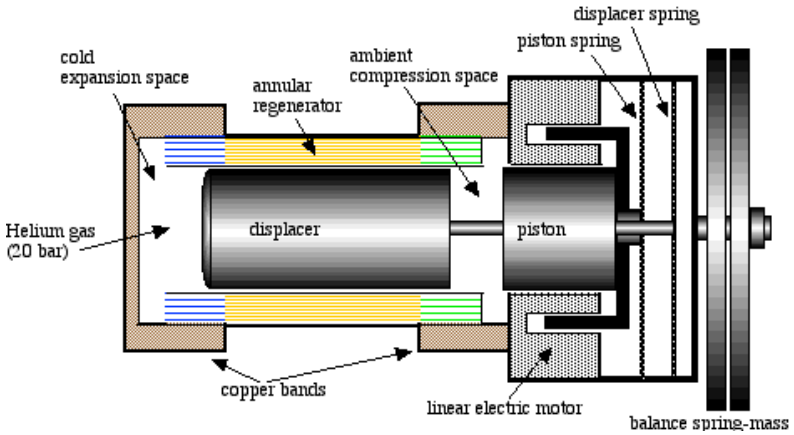
斯特林制冷机循环示意图



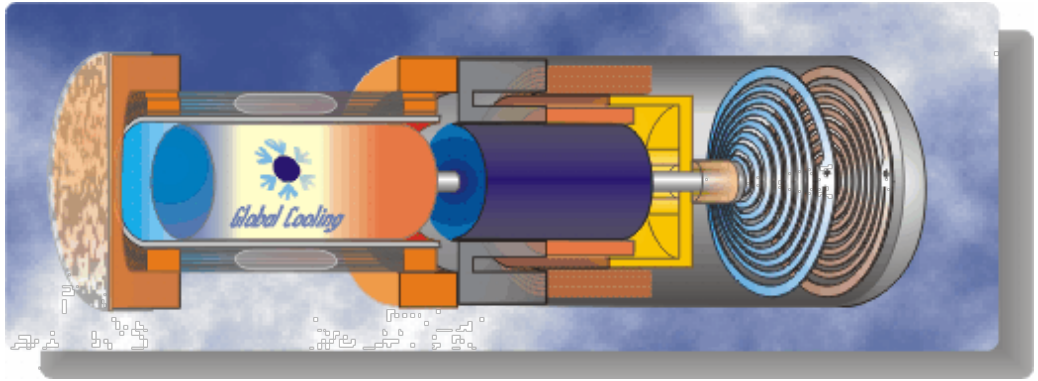
斯特林制冷机循环P-V图

3 → 4 等温压缩：气体温度保持不变，向外界放出热量 Qcop，容积减小到Vm，压力升高到P2；
4 → 1 定容放热：气体容积保持不变，流经回热器填料被冷却，温度降低到T1，压力降低到P1；
1 → 2 等温膨胀：气体温度保持不变，从外界吸收热量 Qexp，容积增大到VM，压力降低到P4；
2 → 3 定容吸热：气体容积保持不变，流经回热器填料被加热，温度升高到T3，压力升高到P3。

1、斯特林制冷机工作原理



斯特林制冷机结构示意图



斯特林制冷机运行演示动画

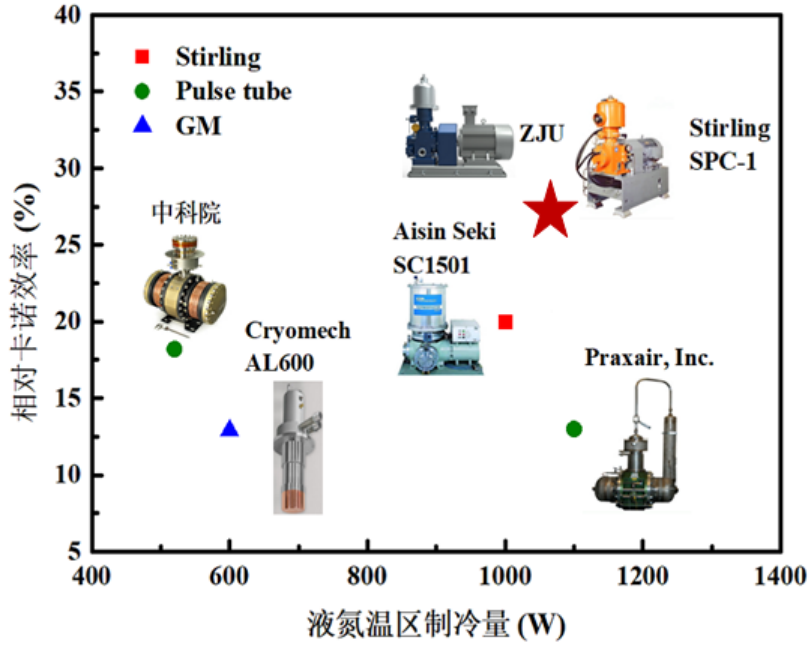
在斯特林制冷机工作过程中，内部气体工质通过壳体与外界保持独立，压缩腔和膨胀腔通过回热器相连，电机推动活塞在气缸内往复运动。在气体力、电磁力和弹簧力等力的作用下，排出器与活塞间能够维持合适的相位差，从而获得制冷效应，将电能最终转化为热势能。

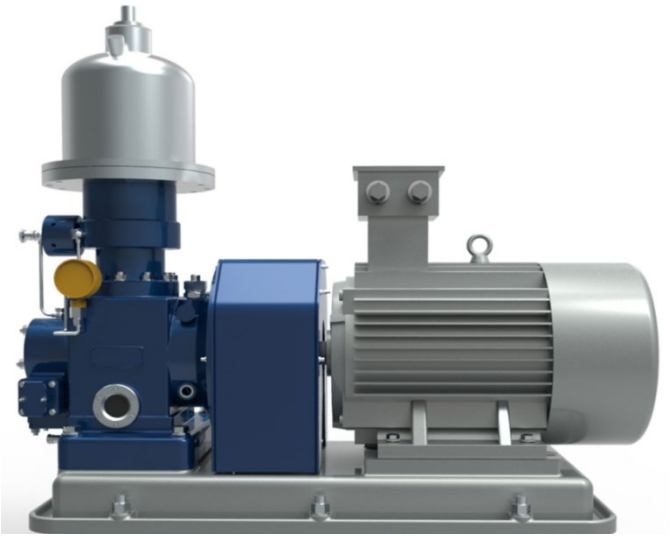
2、江苏克劳特低温公司的斯特林制冷机产品

① 单级斯特林制冷机，制冷量达1000W、4000W@77K；

② 二级斯特林制冷机，制冷量达50W@20K or 138W@30K 。

性能处于国际先进和国内领先水平





3、超导磁体冷却系统

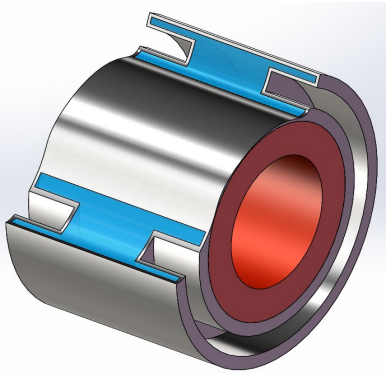
超导磁体冷却方法

低温液体浸泡

- 主要利用低温液体潜热
- 常用液氮，最低至65K左右
- 降温速度快

局限性

- 资源损耗大，成本高
- 冷却温度有限
- 降温过程几乎不可控



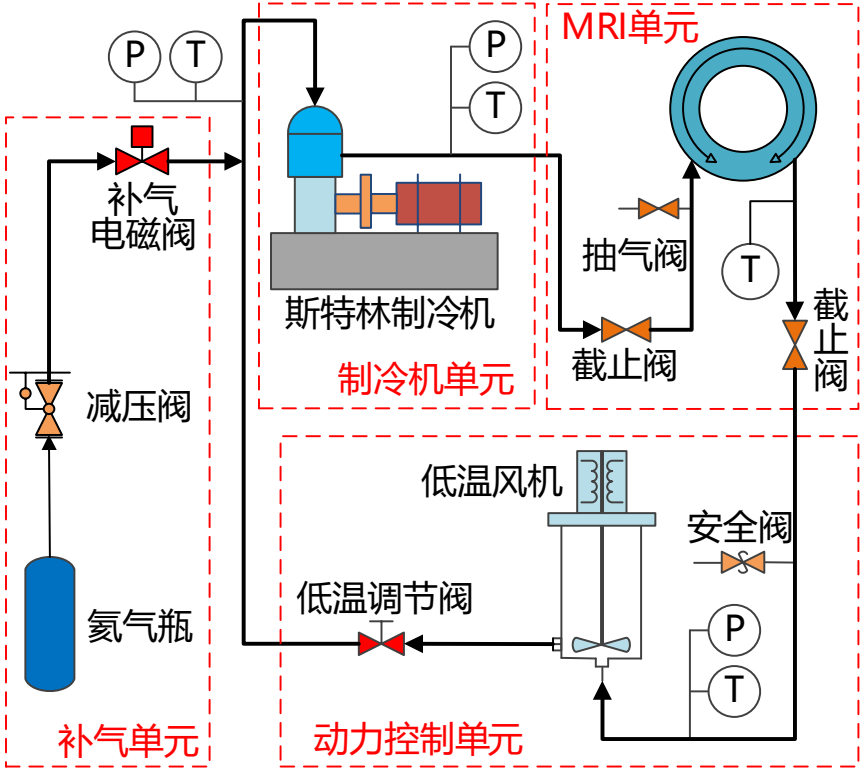
制冷机导热冷却

- 固体导热连接冷端与磁体
- 常用GM制冷机等
- 温度控制精准且温区广

局限性

- 冷量小，效率低
- 焦耳热，运行振动，电磁干扰
- 磁体温度均匀性低

4、基于斯特林制冷机的超导磁体冷却系统



制冷机单元	使用实验室自行研制的大冷量单级斯特林制冷机，可在室温~60 K提供足够的冷量。
动力控制单元	驱动管内氦气循环并进行流量控制，所有设备置于冷箱中防止外界漏热。
补气单元	用于初始阶段充注氦气，并在系统降温过程中补气以维持系统压力。
MRI单元	低温氦气进入MRI设备的换热腔冷却磁体，出口温度传感器监测温度。

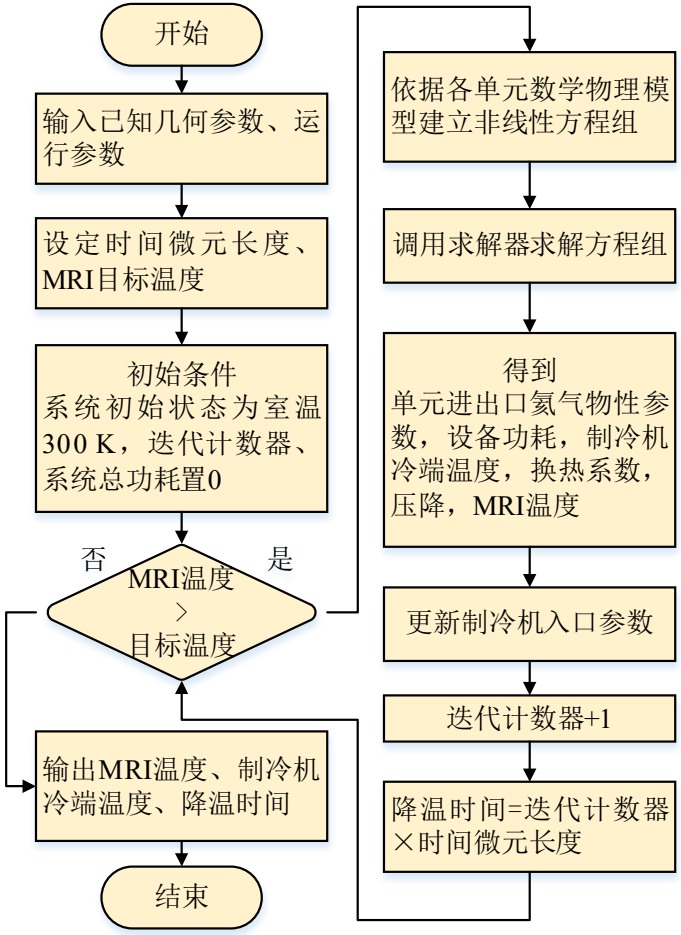
冷却快速且降温速度可控，磁体温度均匀，无振动及电磁干扰，系统可循环使用。

4、基于斯特林制冷机的超导磁体冷却系统

制冷机单元	使用实验室自行研制的大冷量单级斯特林制冷机，可在室温~60 K提供足够的冷量。
动力控制单元	驱动管内氦气循环并进行流量控制，所有设备置于冷箱中防止外界漏热。
补气单元	用于初始阶段充注氦气，并在系统降温过程中补气以维持系统压力。
MRI单元	低温氦气进入MRI设备的换热腔冷却磁体，出口温度传感器监测温度。

冷却快速且降温速度可控，磁体温度均匀，无振动及电磁干扰，系统可循环使用。

4、数学物理模型



假设条件

- 冷质量2.0吨，系统初始温度为室温300 K
- 降温过程划分为等步长时间微元，微元视为稳态
- 管路压降只考虑氦气的沿程阻力损失
- 管道漏热率基于实验结果取定值为1 W/m
- 氦气流经调节阀的热力过程视为等焓过程
- 冷箱真空度可低至10^{-3} Pa，忽略冷箱漏热
- 磁体外部流道为工字型，划分为多块矩形处理

4、数学物理模型

- **控制方程**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}=0$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x}=-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\frac{\nabla^2 u}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u T)}{\partial x}-\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\lambda}{c_p}\frac{\partial T}{\partial x}\right)-\Phi=0$$

- **制冷机**

$$Q_{\text{cooler}}=k_{\text{cooler}}\cdot A_{\text{cooler}}\cdot \Delta T_{\text{coolerm}}=m_{\text{coolerin}}\cdot h_{\text{coolerin}}-m_{\text{coolerout}}\cdot h_{\text{coolerout}}$$

$T_{\text{cooler}}\geqslant 202$ K 时，

$Q_{\text{cooler}}=2.761\,2\cdot T_{\text{cooler}}+957.763\,2.$

$202\text{ K}>T_{\text{cooler}}\geqslant 77$ K 时，

$Q_{\text{cooler}}=4.783\,73\cdot T_{\text{cooler}}+553.068\,32.$

$T_{\text{cooler}}<77$ K 时，

$Q_{\text{cooler}}=21.812\,15\cdot T_{\text{cooler}}-761.181\,29.$

- **磁体及换热器**

$$k_{\text{MRI}}\cdot A_{\text{MRI}}\cdot \Delta T_{\text{MRIm}}=m_{\text{MRIin}}\cdot h_{\text{MRIin}}-m_{\text{MRIout}}\cdot h_{\text{MRIout}}=m_{\text{MRI}}\cdot c_{\text{MRI}}\cdot \Delta T_{\text{MRI}}.$$

$$\text{Nu}=\frac{(f/8)(\text{Re}-1000)\,\text{Pr}}{1+12.7\sqrt{f/8}(\text{Pr}^{2/3}-1)}[1+(\frac{d}{l})^{2/3}]c_{\text{f}}.$$

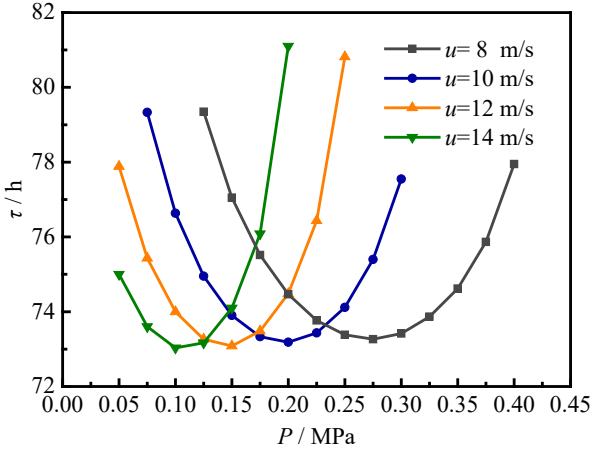
$$\text{Nu}=2.337\,33+0.621\,18\cdot R-0.026\,57\cdot R^2.$$

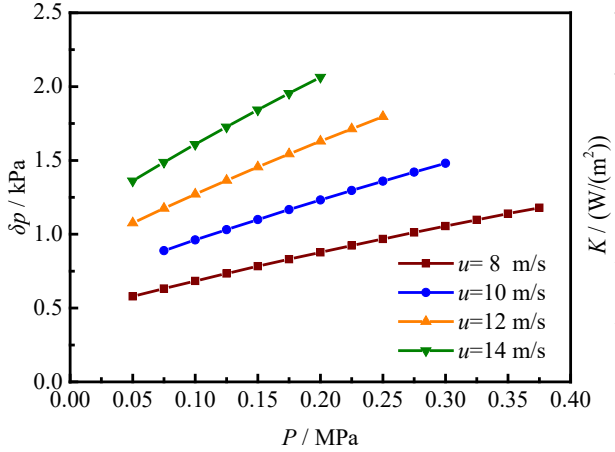
$$c_{\text{f}}=(T_{\text{f}}/T_{\text{w}})^{0.45}$$

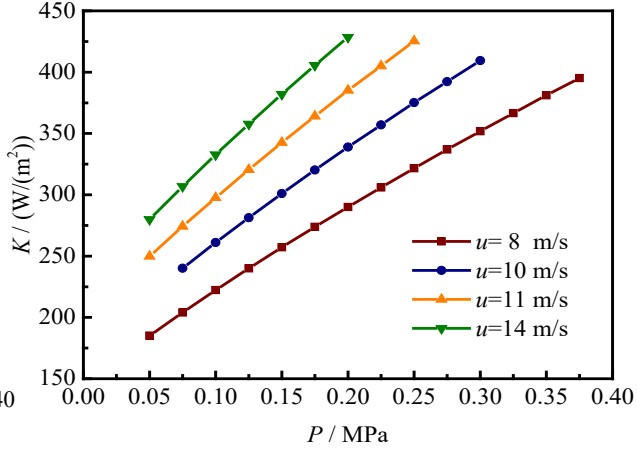
$$f=(1.82\lg Re-1.64)^{-2}$$

主要参数	数值
气体工质	氦气
工作压力	1-5 bar
铜基磁体重量	500 kg
铁基磁体重量	1500 kg
磁体流道横截面积	0.3 m^2
磁体换热面积	6.1 m^2
制冷机管束换热面积	0.07 m^2
管段长度	11 m
管径	45 mm
目标降温温度	60 K

4、模拟结果



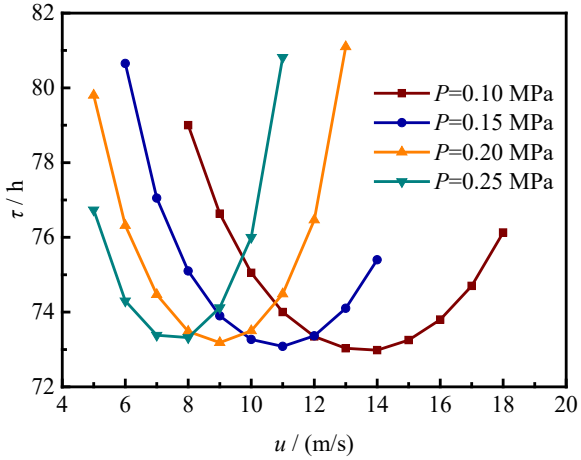


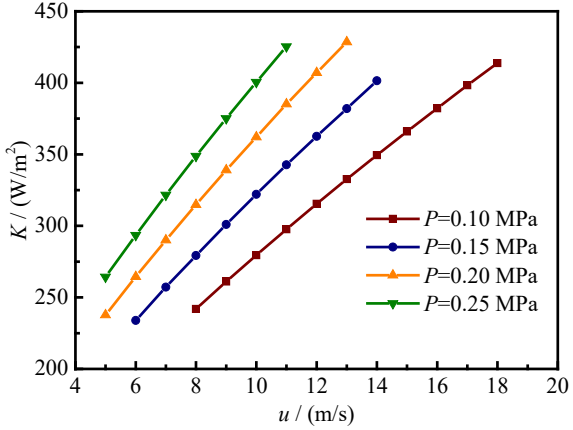


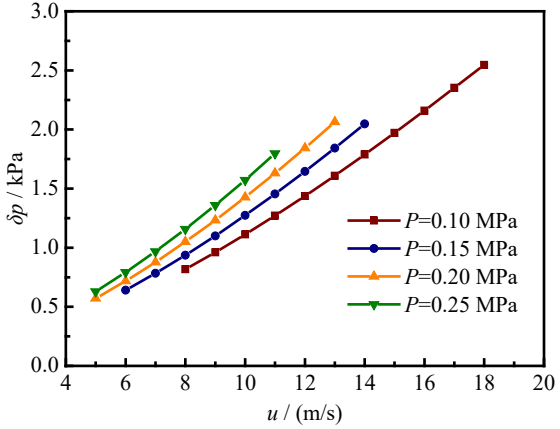
氦气工作压力的影响

- 不同体积流速下，存在最优工作压力，以使降温时间最短。
- 在体积流速相对较大时，对应的最优工作压力越小。
- 不同工作压力和体积流速最优点下，降温时间相差很小。
- 压力对降温时间的影响主要体现于对流阻和传热性能2方面。
- 压力增加导致流阻增加，进而导致风机处焓增升高，进而对最低降温温度不利。

4、模拟结果







氦气体积流速的影响

- 不同工作压力下，存在最优体积流速，以使降温时间最短。
- 在工作压力相对较大时，对应的最优体积流速越小。
- 不同工作压力和体积流速最优点下，降温时间相差很小。
- 流速对降温时间的影响主要体现于对流阻和传热性能2方面。
- 流速增加导致流阻增加，进而导致风机处焓增升高，进而对最低降温温度不利。

4、应用案例

实验测试系统

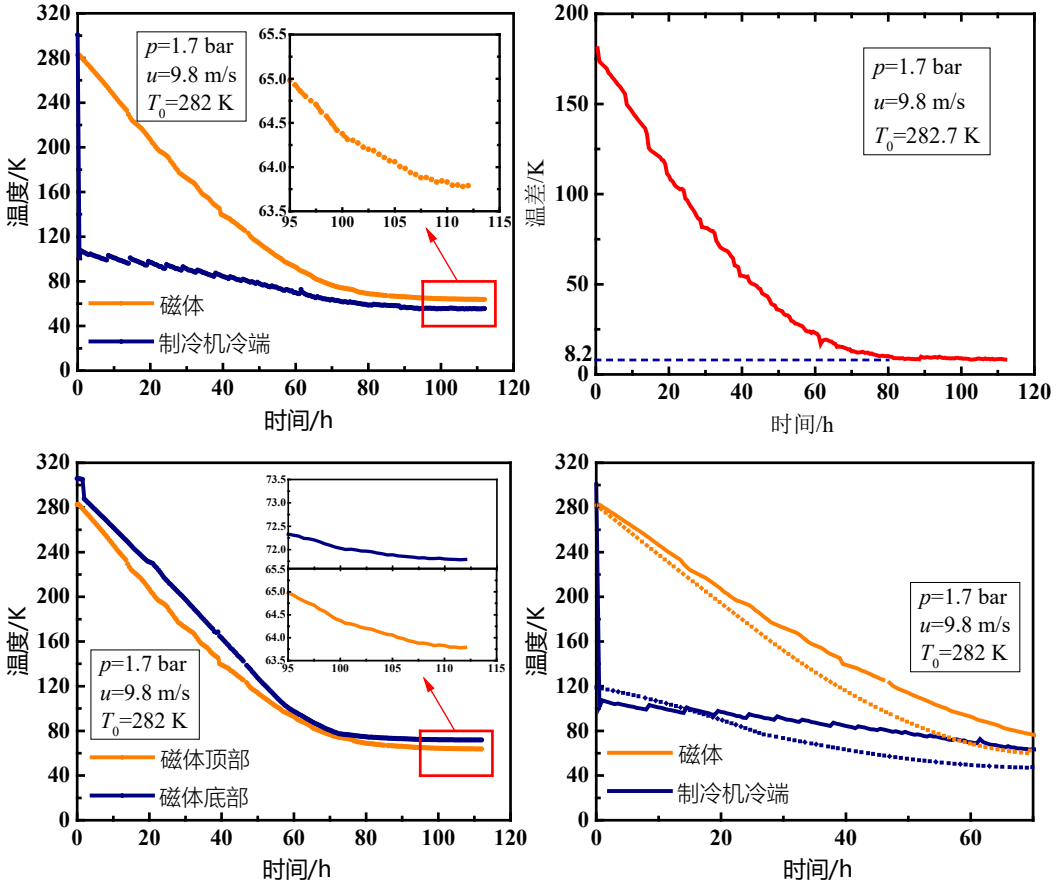
kW级斯特林制冷机

- 整体式β型
- 曲柄连杆结构
- 冷端高真空绝热
- 降温速率快，启动迅速
- 1000W@77K
- 额定电功率11kW

低温氦气泵

- 运行压力1.5~30bar
- 设计转速15000rpm
- 设计流量5~20m³/h
- 设计扬程50~300m
- 工作温度20~300K

4、实验测试结果



- 压力1.7 bar，体积流速9.8 m/s的条件下，磁体由室温降温至77 K所需时间为69.5 h，用时112 h可达60 K。
- 降温过程中，磁体温度均匀性较好，最大温度差约为26 K。
- 数值模型可以较好地预测降温过程，计算得到的磁体和制冷机降温曲线与实验结果相差不大，降温时间的计算相对误差为-15.1%。

4、研究总结

提出了一种基于千瓦级斯特林制冷机的MRI超导磁体冷却方法，在利用斯特林制冷机优良降温特性的同时，可降低冷却过程中的资源损耗，增强降温过程的可控性。

搭建有限时间元数值模型并开展数值设计，结果表明气体压力和流速对降温效果影响明显，且存在最优解可使系统冷却时间最短。

搭建了基于千瓦级斯特林制冷机的MRI超导磁体冷却系统并开展了初步的实验研究，结果表明2吨重磁体由室温降至液氮温度仅需69.5h，112h可降至最低温度60K。

近期与MRI磁体厂家合作，基于自主开发的单级斯特林制冷机+GM制冷机（相当于二级斯特林），将磁体温度连续降温到20K以下温度，能够减少液氦消耗量80%以上。

5、克劳特公司企业概况

江苏克劳特低温技术有限公司位于江苏省常州市国家级高新技术开发区，公司成立于2014年，注册资金3500万，是一家致力于低温工程和能源装备研发、生产、销售、服务于一体的高新技术企业。2018 年获评为国家级高新技术企业。

紫明低温科技的产品系列

大冷量斯特林制冷机

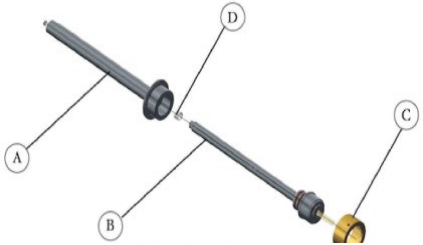
自由活塞斯特林制冷机

低温液体泵/氦气泵

低温氢氦调节阀

低温氢氦截止阀

低温止回阀



真空绝热快接头
Bayonet

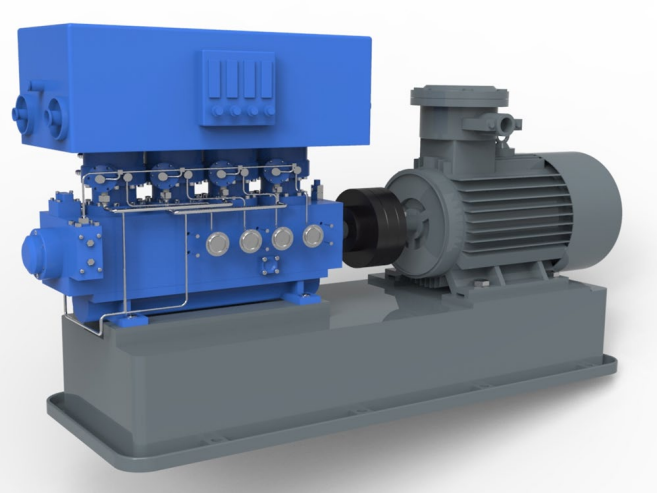
气体液化器

5、江苏克劳特低温技术有限公司产品照片

大冷量斯特林低温制冷机

制冷量：1100 W @ 77 K

单缸单级斯特林低温制冷机



制冷量：4500 W @ 77 K

四缸单级斯特林低温制冷机

制冷量: 50 W@ 20 K, 138 W@30 K

单缸两级斯特林低温制冷机

5、江苏克劳特低温技术有限公司产品照片

低温液氮泵和低温氦气泵

液氮泵

低温氦气泵

超低温氨气、氢气调节阀

5、江苏克劳特低温技术有限公司产品照片

工作温度：-271.5℃ 翅片管式超低温氦气负压换热器

换热器翅片芯体

换热器总装照片

换热器产品照片

5、江苏克劳特低温技术有限公司产品照片

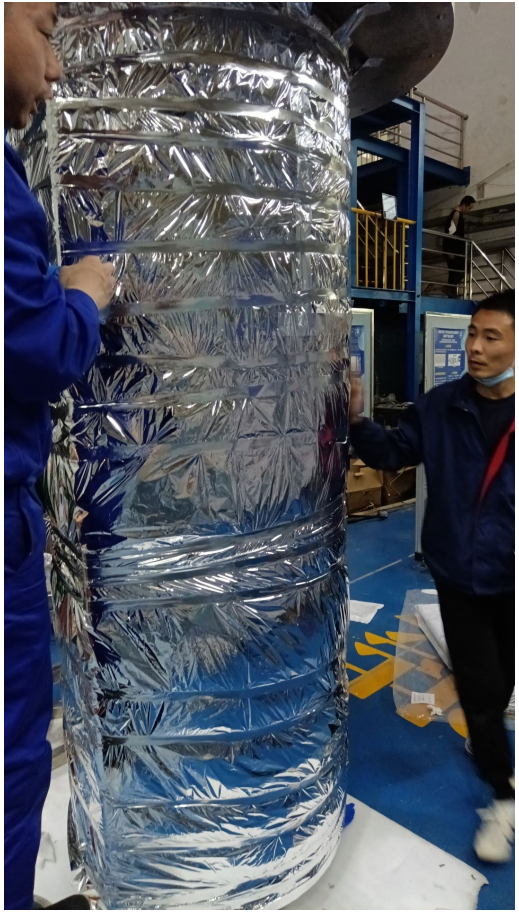
工作温度：-271.5℃　　扇形翅片式超低温氦气负压换热器

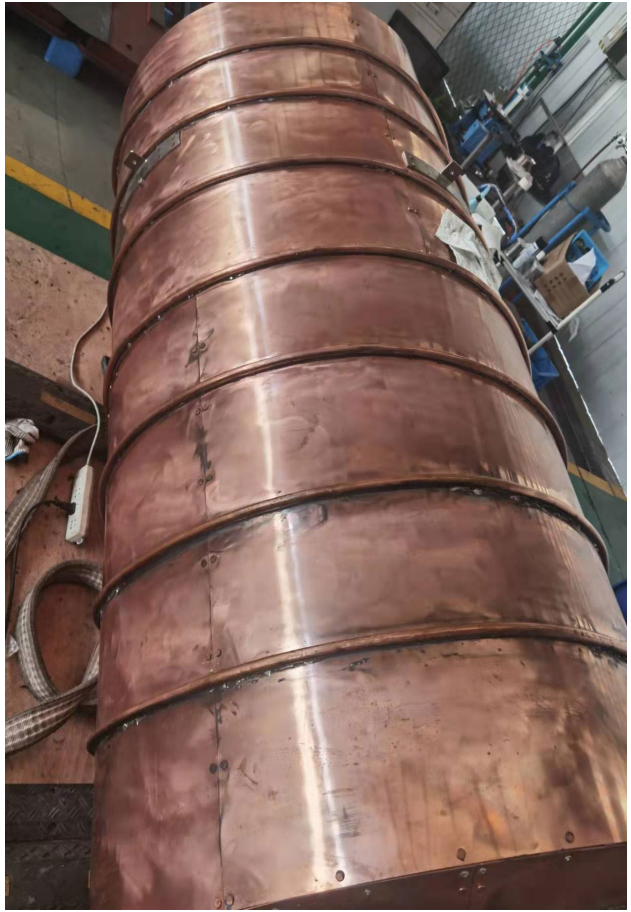
换热器翅片芯体

换热器总装照片

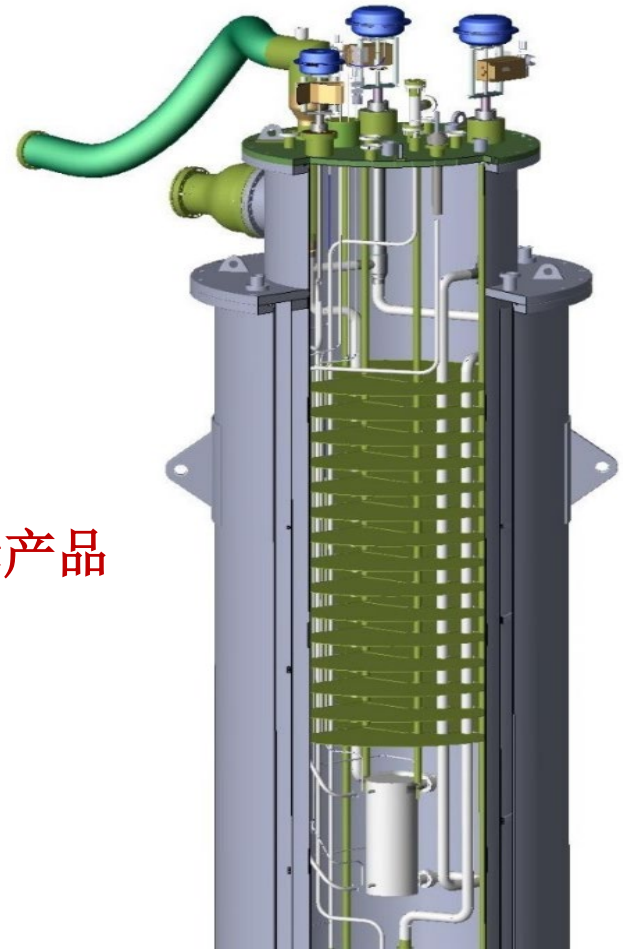
换热器产品照片

4K温区液氦垂测杜瓦





4K温区低温容器和系统



低温冷箱成套产品

Cryote
克劳特低温

浙江大学
Zhejiang University

感谢各位专家和行业同仁！