



大科学装置中的关键低温装备研究

报告人：孙大明

浙江大学

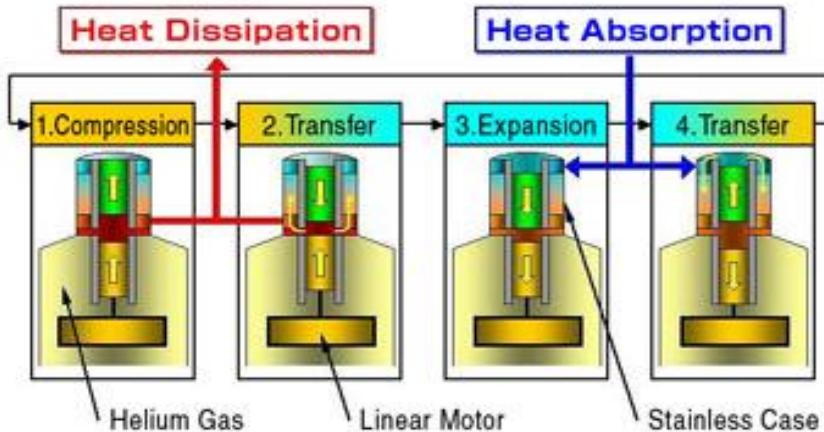
浙江紫明低温科技有限公司

江苏克劳特低温技术有限公司

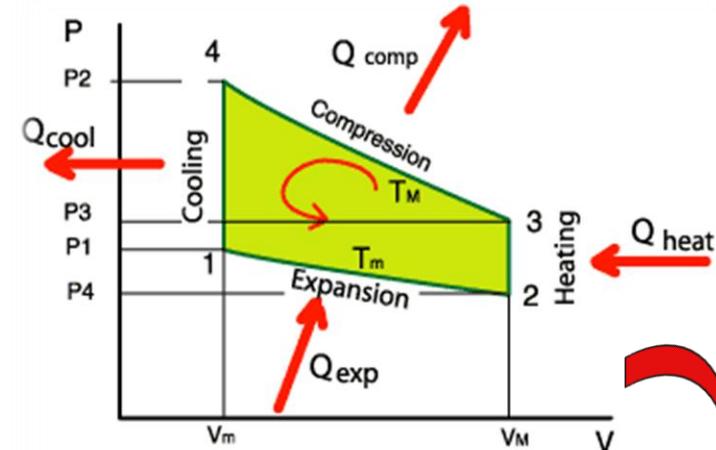
2025年11月07日

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

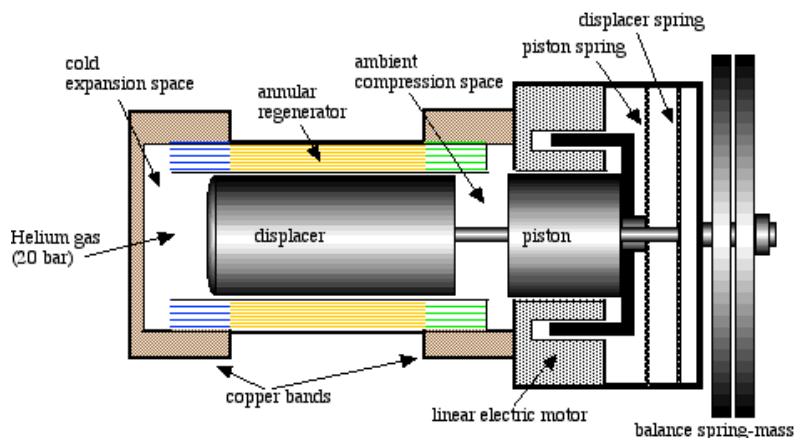
3 → 4 等温压缩：气体温度保持不变，向外界放出热量 Q_{cop} ，容积减小到 V_m ，压力升高到 P_2 ；

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 T_1 ，压力降低到 P_1 ；

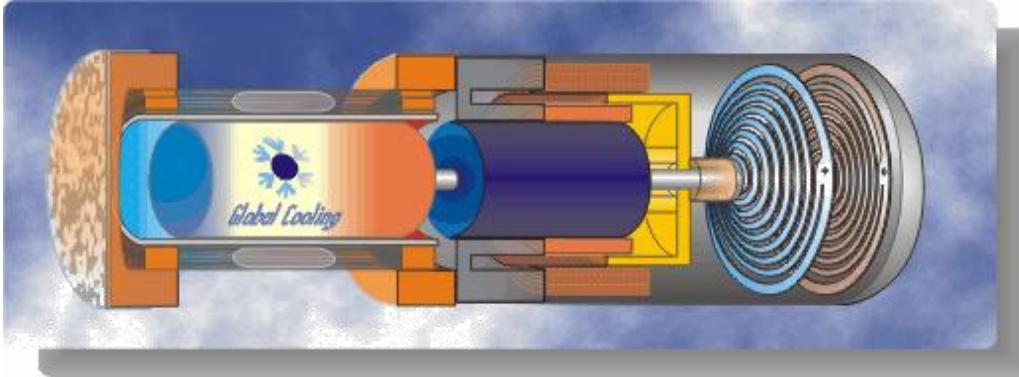
1 → 2 等温膨胀：气体温度保持不变，从外界吸收热量 Q_{exp} ，容积增大到 V_M ，压力降低到 P_4 ；

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 T_3 ，压力升高到 P_3 。

1、斯特林制冷机工作原理



斯特林制冷机结构示意图



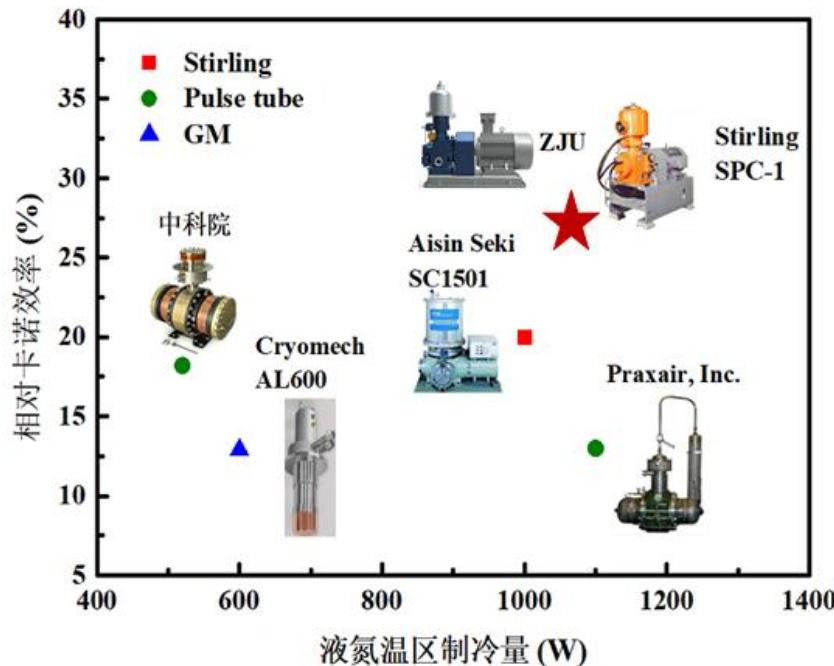
斯特林制冷机运行演示动画

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、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 140W@30K。

性能处于国际先进和国内领先水平



斯特林制冷机照片

3、超导磁体冷却系统



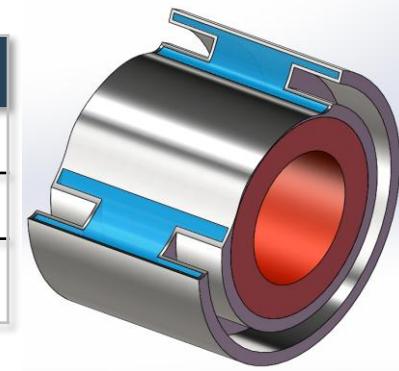
超导磁体冷却方法

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

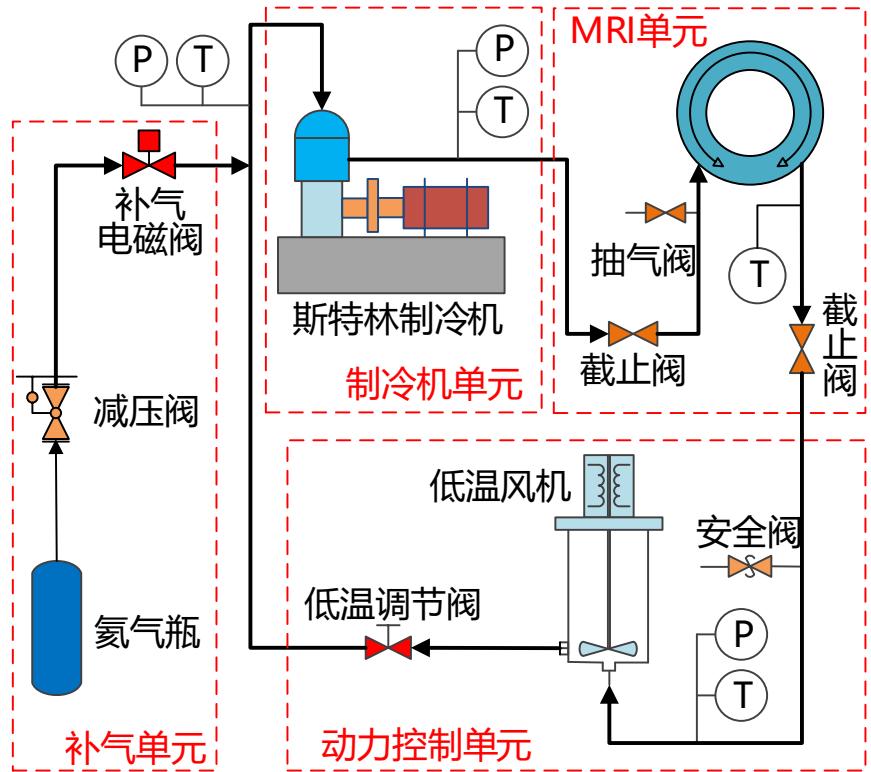
- 固体导热连接冷端与磁体
- 常用GM制冷机等
- 温度控制精准且温区广

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

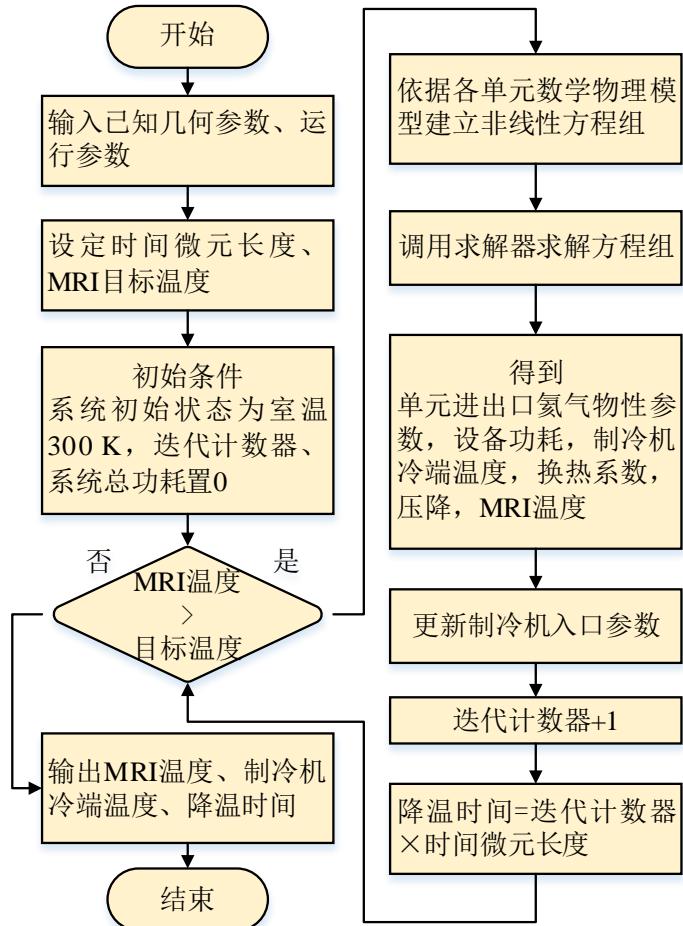
用于初始阶段充注氦气，并在系统降温过程中补气以维持系统压力。

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、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
- 冷箱真空调度可低至 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

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

$T_{\text{cooler}} \geq 202 \text{ K}$ 时,

$$Q_{\text{cooler}} = 2.7612 \cdot T_{\text{cooler}} + 957.7632.$$

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

$$Q_{\text{cooler}} = 4.78373 \cdot T_{\text{cooler}} + 553.06832.$$

$T_{\text{cooler}} < 77 \text{ K}$ 时,

$$Q_{\text{cooler}} = 21.81215 \cdot T_{\text{cooler}} - 761.18129.$$

• 磁体及换热器

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

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

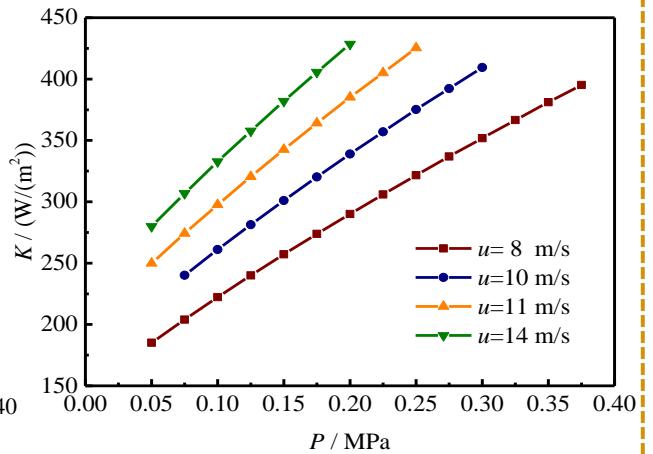
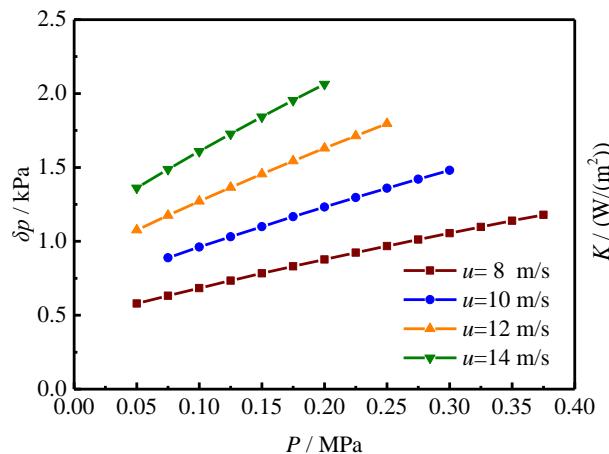
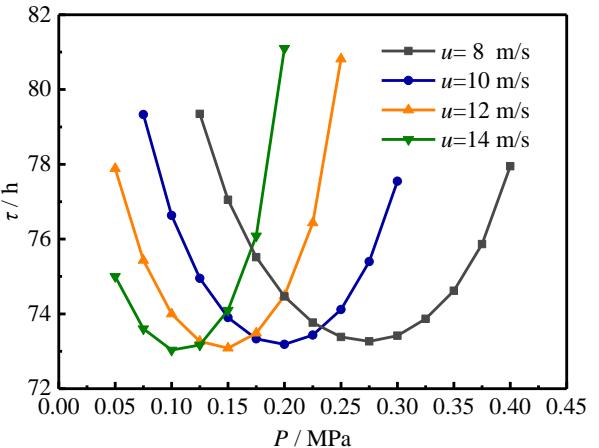
$$Nu = 2.33733 + 0.62118 \cdot R - 0.02657 \cdot R^2.$$

$$c_f = (T_f/T_w)^{0.45}$$

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

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

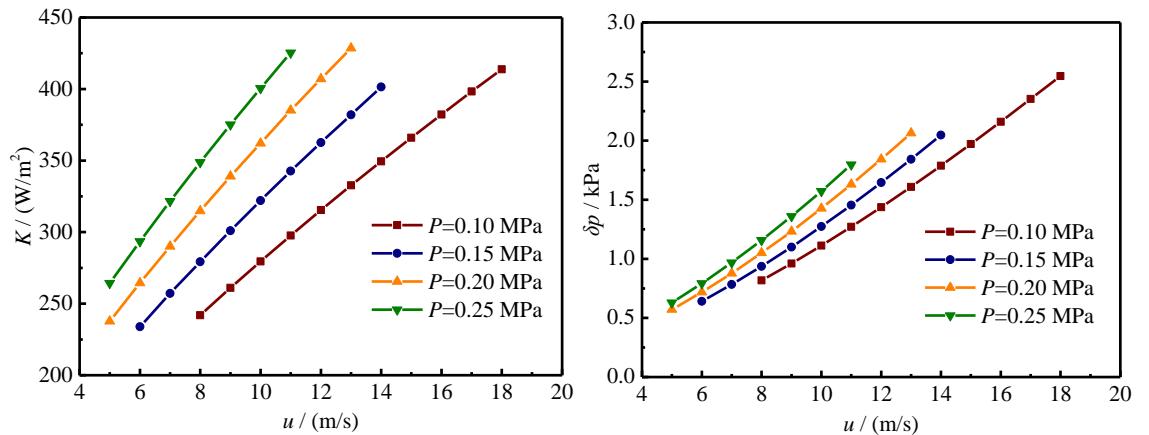
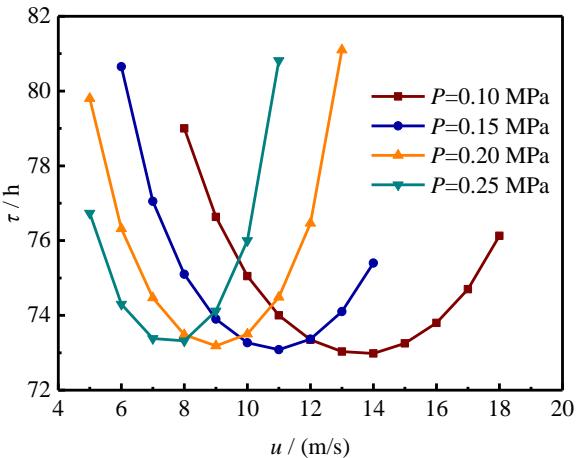
4、模拟结果



氢气工作压力的影响

- 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



氢气体积流速的影响

- 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、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

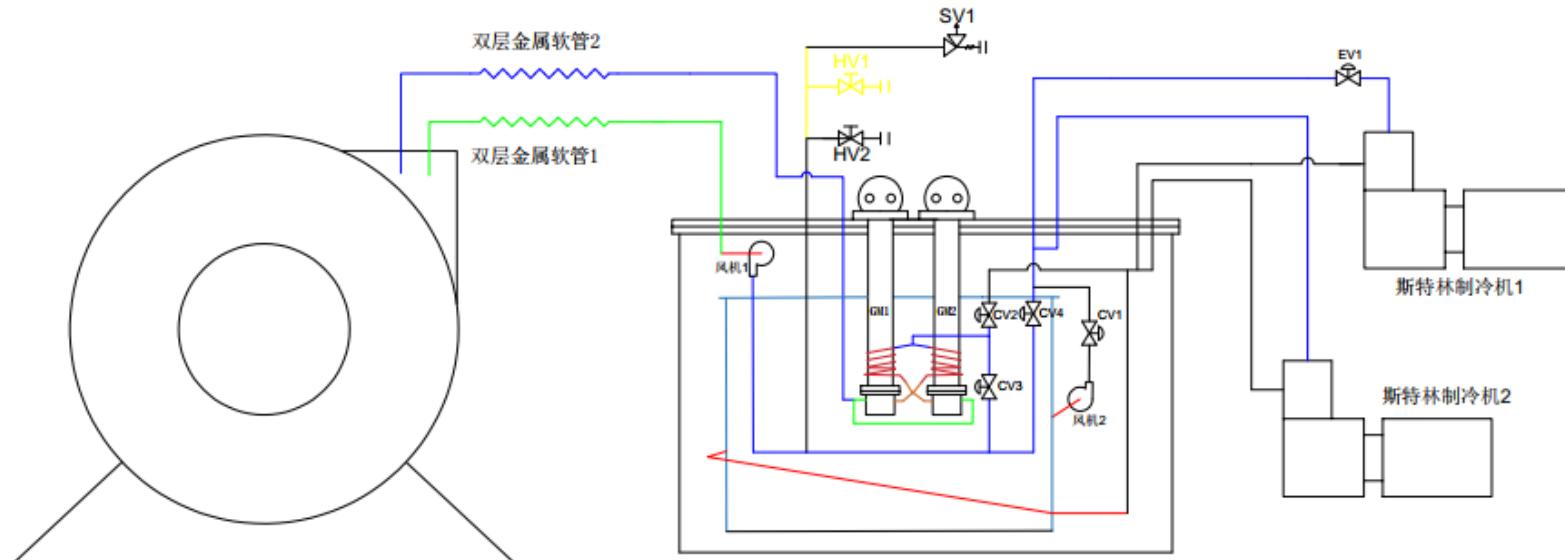
低温氦气进入MRI设备的换热腔冷却磁体，出口温度传感器监测温度。

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。



系统介绍

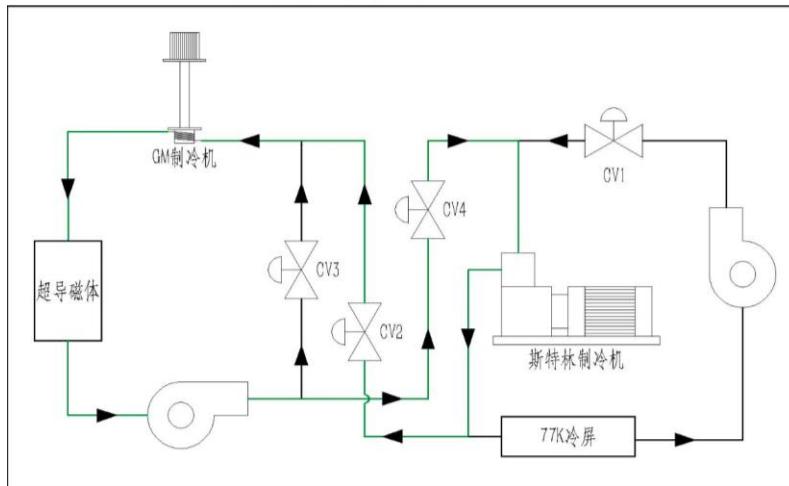
◆ 系统流程图





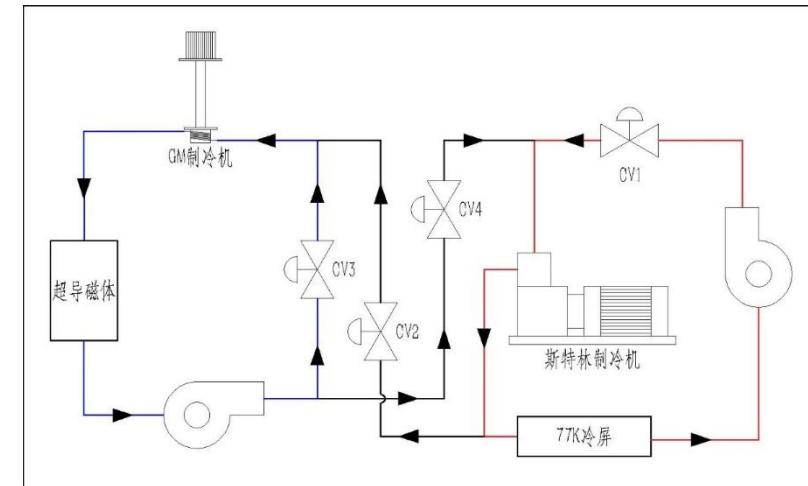
系统介绍

◆ 工况切换原理示意图



双机预冷模式

(CV1/CV3关闭, CV2/CV4开启)



单机冷却模式

(CV2/CV4关闭, CV1/CV3开启)



无负载降温测试

◆ 现场照片

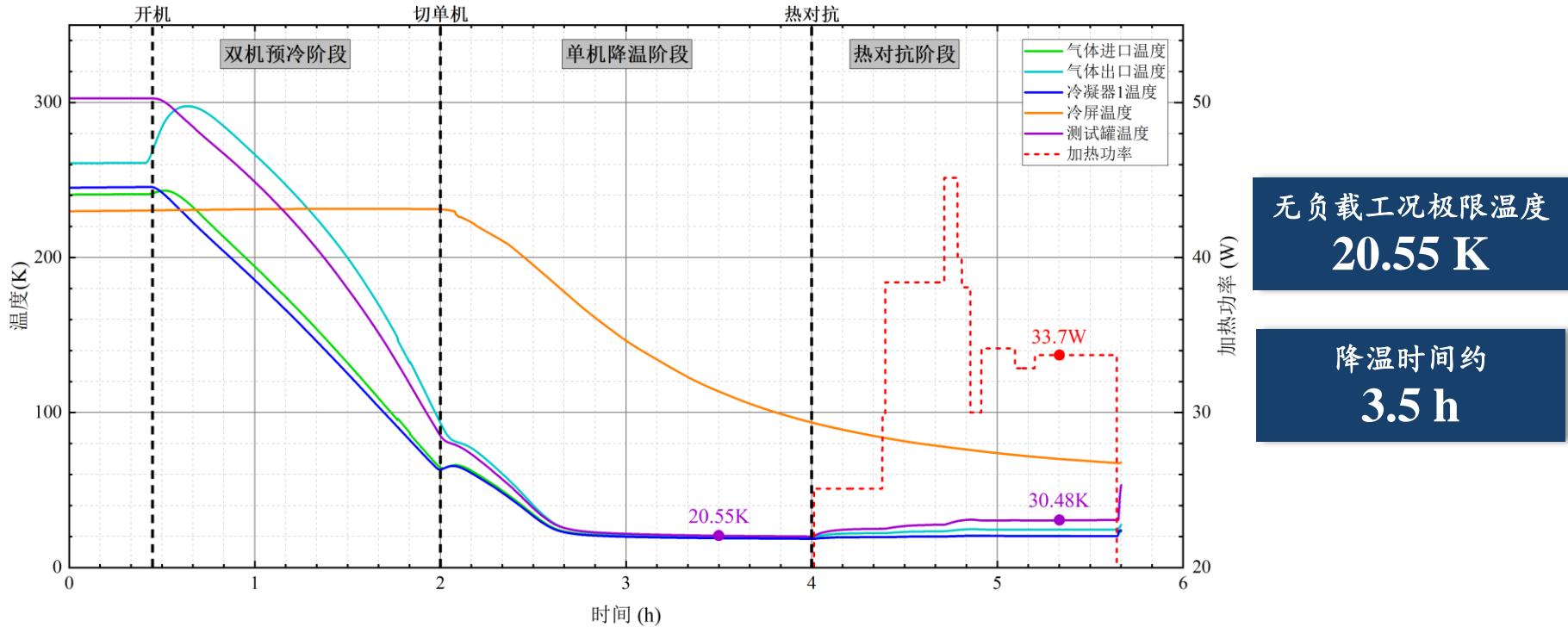


超导磁体降温系统无负载测试台



无负载降温测试

◆ 降温曲线



无负载测试降温曲线



2T磁体负载降温测试

◆ 现场照片

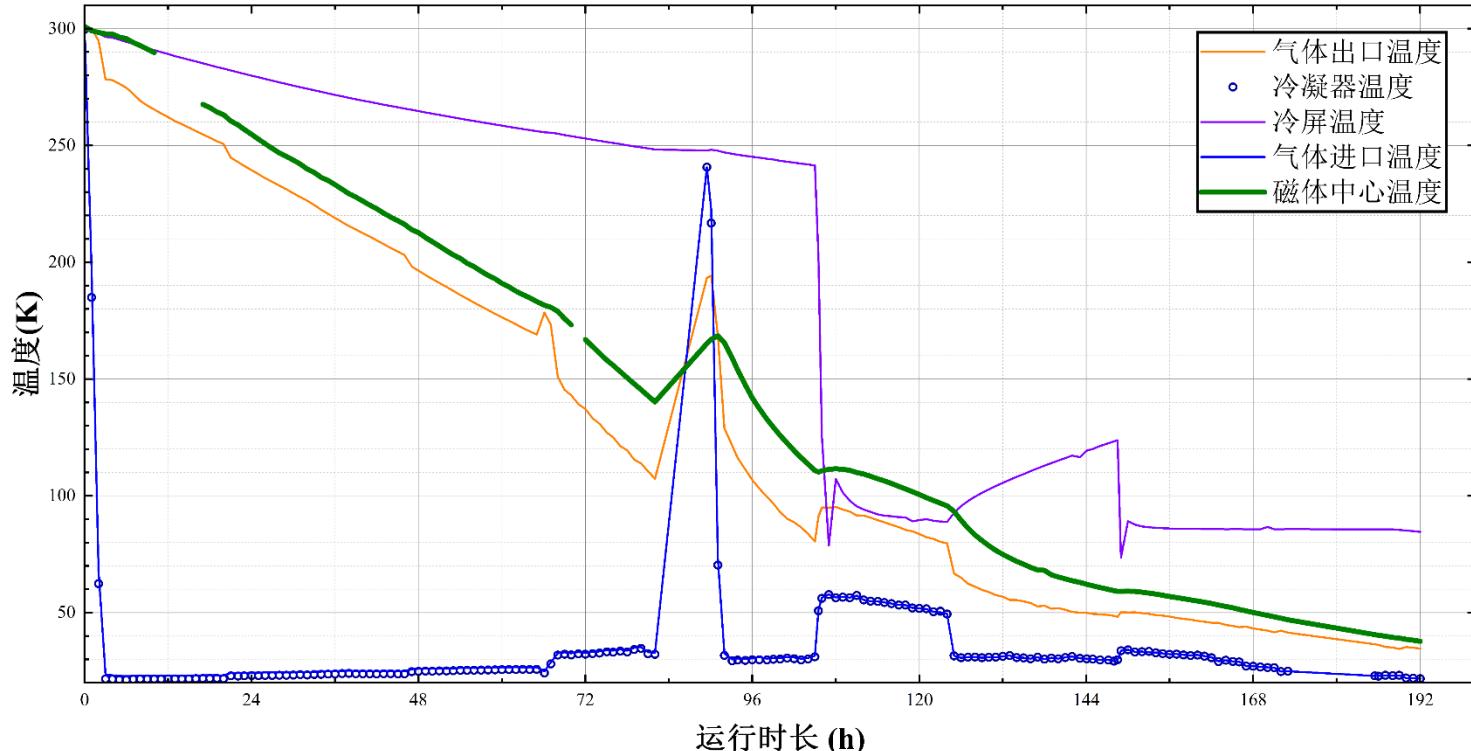


2T磁体降温测试台



2T磁体负载降温测试

◆ 降温曲线



2T磁体测试降温曲线

可达成温度
< 40 K

降温时间
<8 day

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77K温度需60h，144h可降至最低温度40K。

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温区，能够减少液氦消耗量80%以上。

5、企业概况

浙江紫明低温科技

COMPANY PROFILE

作为国内低温设备研发生产的引领者，紫明低温在超低温领域攻克多项“卡脖子”技术，**填补了国内空白**，打破了美日欧等国对我国技术的垄断，是**国内唯一一家在大冷量斯特林制冷机、超低温阀门、超低温泵方面全面具备研发和生产制造能力的企业**。先后获得了创新型中小企业、科技型中小企业、高新技术企业等荣誉资质，积累了**70余项专利**，其中发明专利近20项。已发展成为国内低温领域具有一定影响力的高科技企业。

2025年获评为种子独角兽企业。

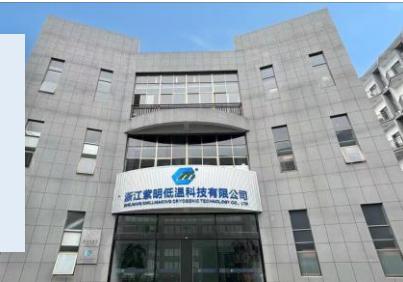
杭州运营中心

研发技术中心、营销中心、综合管理中心和财务中心



绍兴制造中心

占地面积5600平米
拥有生产工厂和清洁车间



常州制造基地

占地面积3800平米





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



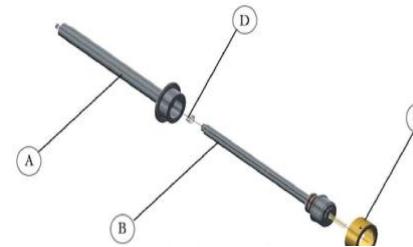
低温氢氦调节阀



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



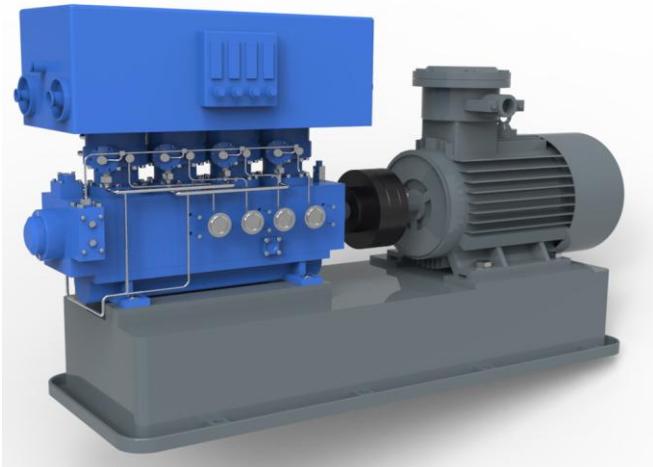
制冷机系列产品



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

阀门系列产品

超低温氦气、氢气调节阀





低温泵系列化产品



低温液氮泵和低温氦气泵



液氮(氢、氦)泵



低温氦气泵



负压换热器产品



工作温度: -271.5°C 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



负压换热器产品



工作温度: -271.5°C

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

用低温技术提升能源品质和效率

紫明低温的2025年——

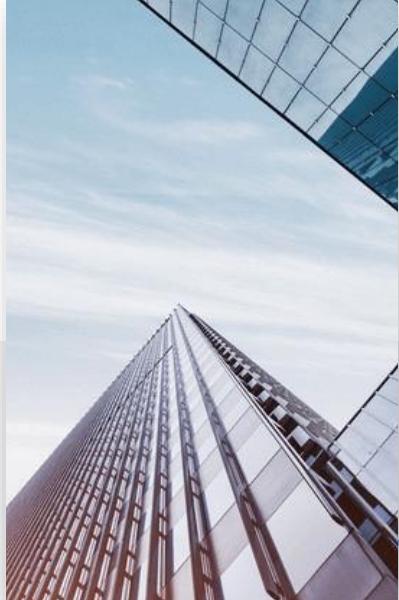


紫明低温的产品在中国聚变能源行业的渗透率高于70%。

2025年7月20日，国家电网全球首台环形超导电抗器通过型式试验。

2025年5月，南方电网汕头南澳岛
160千伏超导直流限流器挂网运行。

紫明低温突破卡脖子技术，替代进口，
为项目建设提供关键装备，保护了国家产业链安全。



CIPC'2025



浙江大学
Zhejiang University

感谢领导和专家的帮助！

紫明低温

联系电话：400-685-6776

公司地址：杭州市西湖区吉园街6号



愿景与使命：致力于用低温技术提升能源品质和效率，推动人类社会进步。