



基于斯特林制冷机的 MRI磁体冷却系统的初步实验研究

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

2021年11月8日

目录



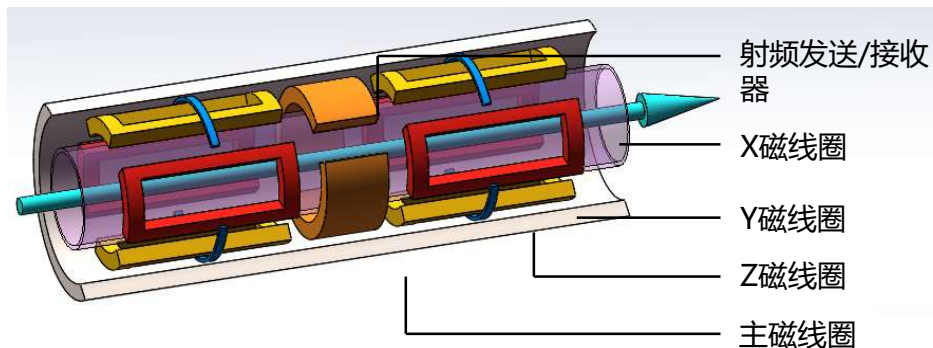
- ❖ 研究背景
- ❖ 系统设计
- ❖ 数值计算
- ❖ 测试实验
- ❖ 结 论
- ❖ 公司介绍

1.研究背景

磁共振成像技术 Magnetic Resonance Imaging (MRI)

一种生物磁自旋成像技术，诞生于20世纪70年代。从外部施加磁场，自旋运动的原子核收到射频脉冲后产生信号并由接收线圈检测，经计算机处理转换可在屏幕上显示图像，广泛应用于临床检测、探井、考古、无损探伤、非金属材料结构分析等领域。

当前MRI设备装备的高场强磁体均为低温超导磁体，冷却至液氮温度达到超导状态可以减小电流损耗、增加磁场稳定性和强度。



1. 研究背景



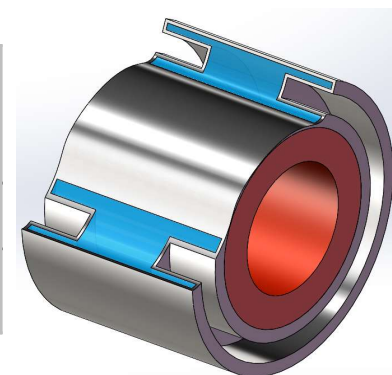
超导磁体冷却

低温液体浸泡

- 主要利用低温液体潜热
- 常用液氮，最低至63 K
- 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

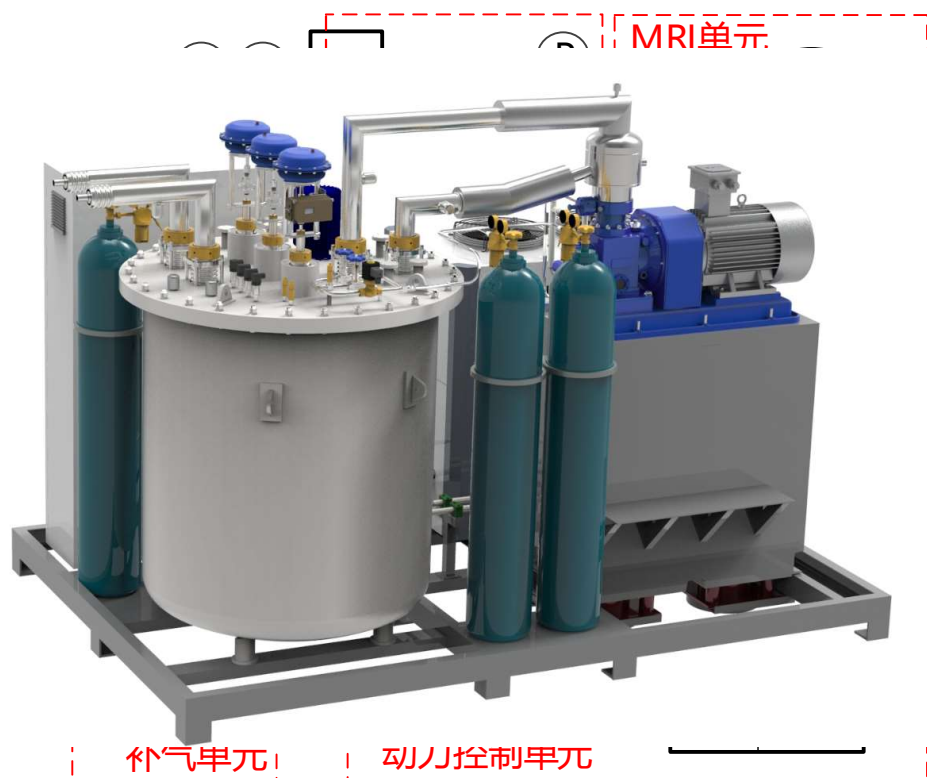


目录



- ❖ 研究背景
- ❖ 系统设计
- ❖ 数值计算
- ❖ 测试实验
- ❖ 结 论
- ❖ 公司介绍

2.系统设计



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

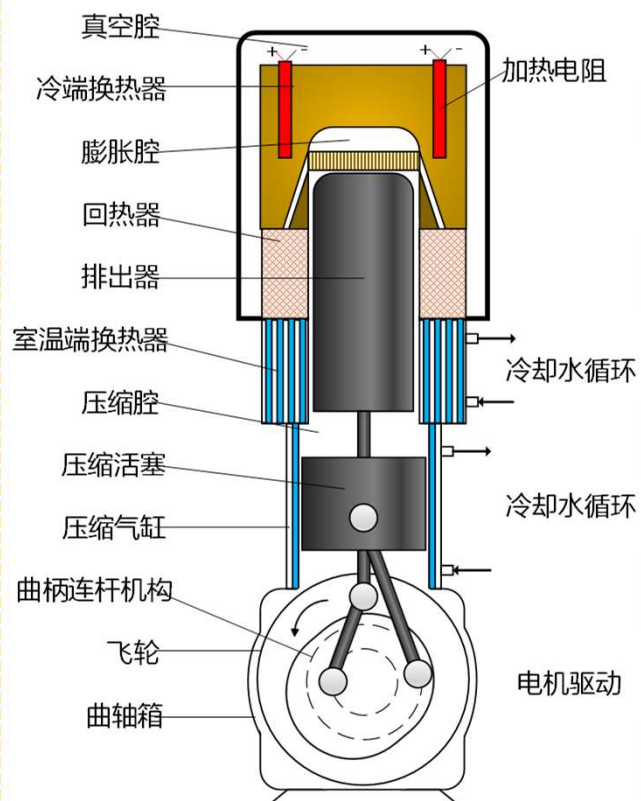
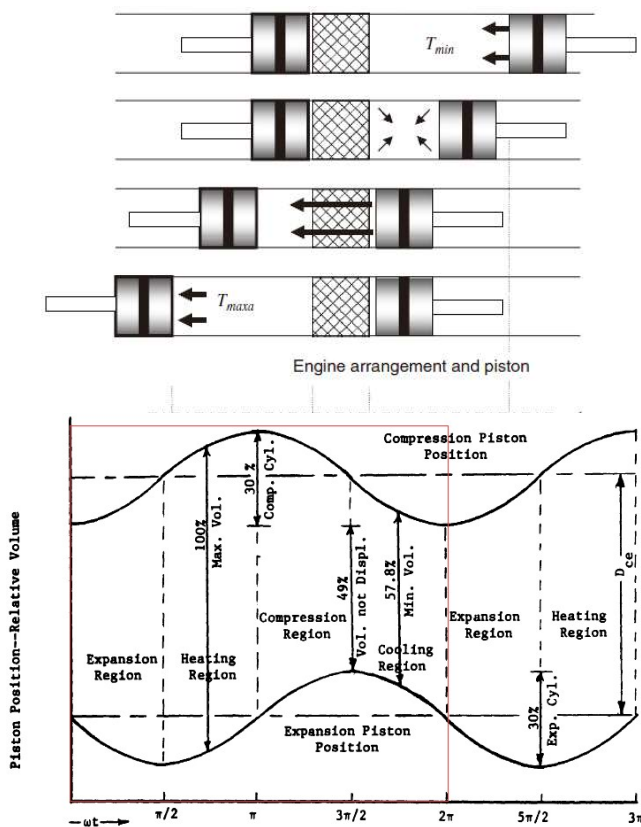
用于初始阶段充注氦气，并在系统降温过程中补气以维持系统压力。

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。

2.系统设计



制冷机结构	整体式β型
室温端换热器	管壳式水冷
冷端换热器	狭缝翅片
回热器	不锈钢丝网
动力机构	旋转电机
气体工质	氦气
充气压力	2.0-2.8 MPa
制冷量	>1000 W@77 K
电机额定功率	11 kW
电机转速	1450 r/min

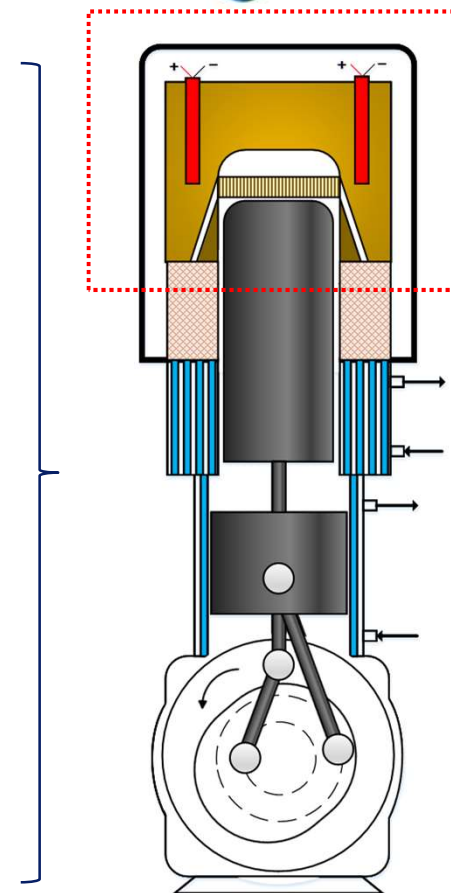
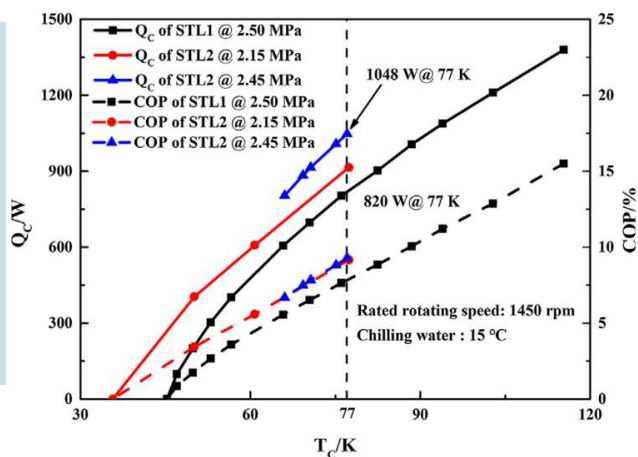
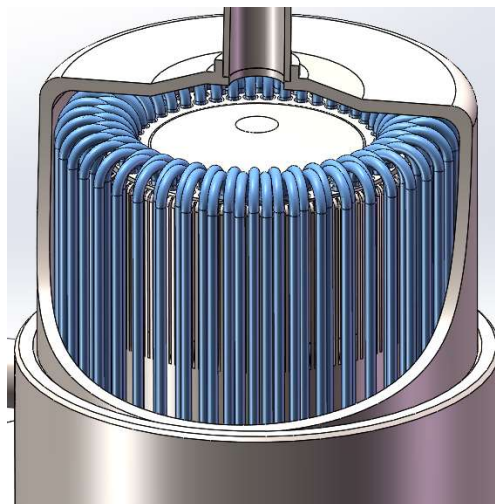
2.系统设计

冷端管式换热器结构

- 不锈钢毛细管束，分两排交错排列，可与气体充分换热；
- 管径2.5 mm，壁厚0.4 mm，共90根；
- 单相流氦气强制对流，换热系数可达500 W/m²以上。

千瓦级单级斯特林制冷机实验性能曲线

- 制冷量可达1048 W@77 K，相对卡诺效率26.1%，最低制冷温度可至35 K，处于国际领先水平；
- 在中石化LNG加气站中成功用于BOG回收，节能减排效果显著。

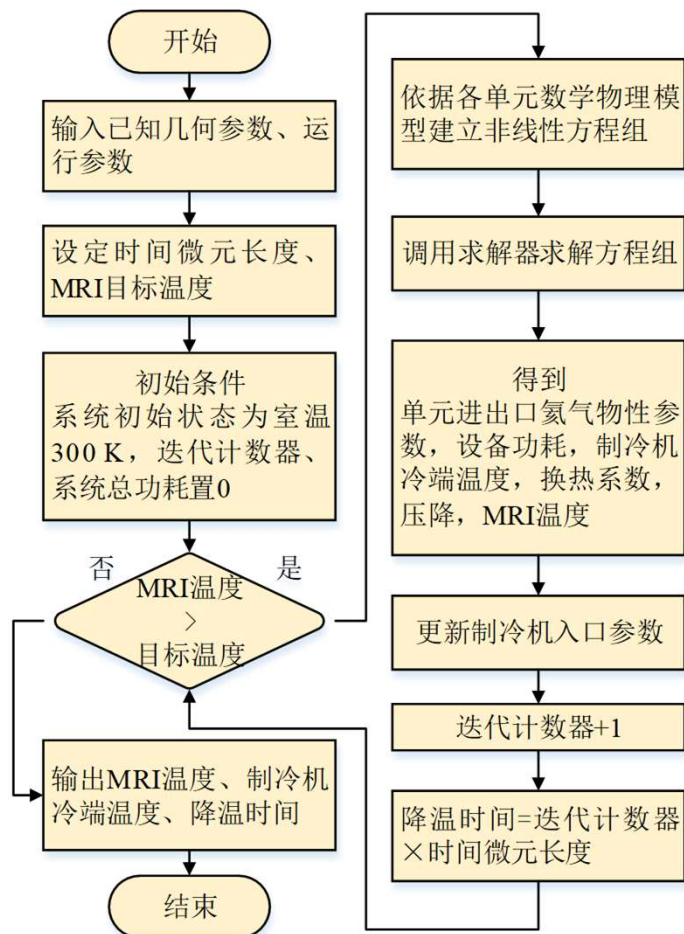


目录



- ❖ 研究背景
- ❖ 系统设计
- ❖ 数值计算
- ❖ 测试实验
- ❖ 结 论
- ❖ 公司介绍

3.模型计算



假设条件

- 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

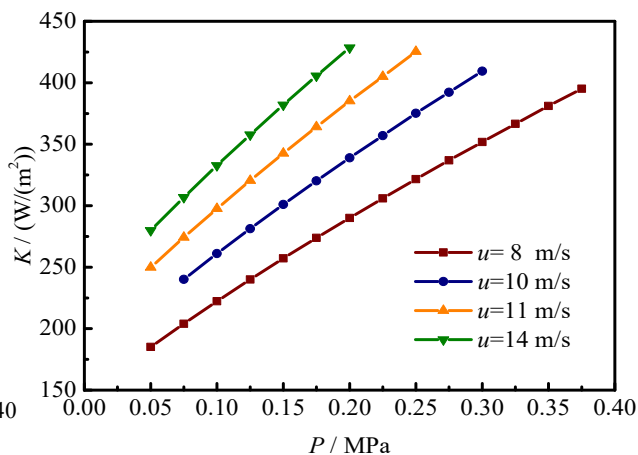
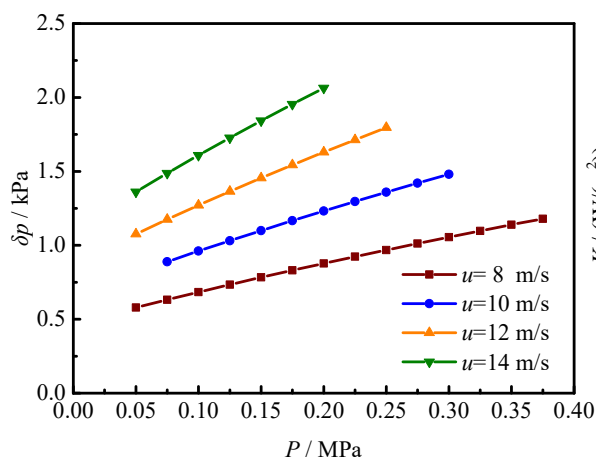
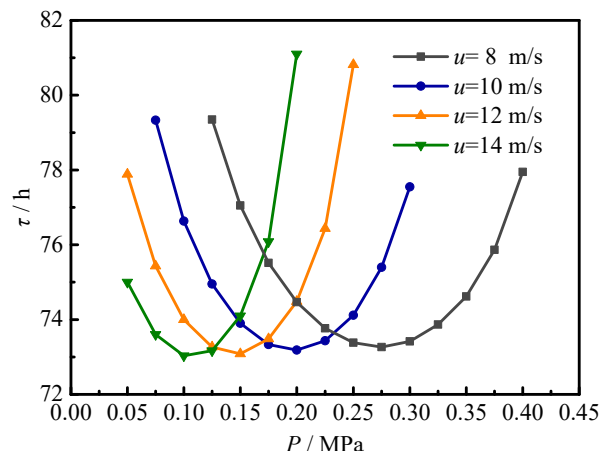
3.模型计算



<p>• 控制方程</p> $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\nabla^2 u}{\partial x^2}$ $\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \Phi = 0$	
<p>• 制冷机</p> $Q_{\text{cooler}} = k_{\text{cooler}} \cdot A_{\text{cooler}} \cdot \Delta T_{\text{coolem}} = m_{\text{coolerin}} \cdot h_{\text{coolerin}} - m_{\text{coolerout}} \cdot h_{\text{coolerout}}$ <p>$T_{\text{cooler}} \geq 202 \text{ K}$ 时,</p> $Q_{\text{cooler}} = 2.7612 \cdot T_{\text{cooler}} + 957.7632$ <p>$202 \text{ K} > T_{\text{cooler}} \geq 77 \text{ K}$ 时,</p> $Q_{\text{cooler}} = 4.78373 \cdot T_{\text{cooler}} + 553.06832$ <p>$T_{\text{cooler}} < 77 \text{ K}$ 时,</p> $Q_{\text{cooler}} = 21.81215 \cdot T_{\text{cooler}} - 761.18129$	<p>• 磁体及换热器</p> $k_{\text{MRI}} \cdot A_{\text{MRI}} \cdot \Delta T_{\text{MRIin}} = m_{\text{MRIin}} \cdot h_{\text{MRIin}} - m_{\text{MRIout}} \cdot h_{\text{MRIout}} = m_{\text{MRI}} \cdot c_{\text{MRI}} \cdot \Delta T_{\text{MRI}}$ $\text{Nu} = \frac{(f/8)(\text{Re}-1000)\text{Pr}}{1+12.7\sqrt{f/8}(\text{Pr}^{2/3}-1)} \left[1 + \left(\frac{d}{l}\right)^{2/3} \right] c_f$ $\text{Nu} = 2.33733 + 0.62118 \cdot R - 0.02657 \cdot R^2$ $c_f = (T_f/T_w)^{0.45}$ $f = (1.82 \lg \text{Re} - 1.64)^{-2}$

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

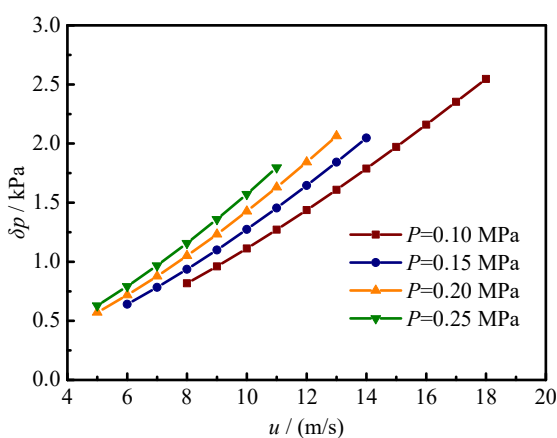
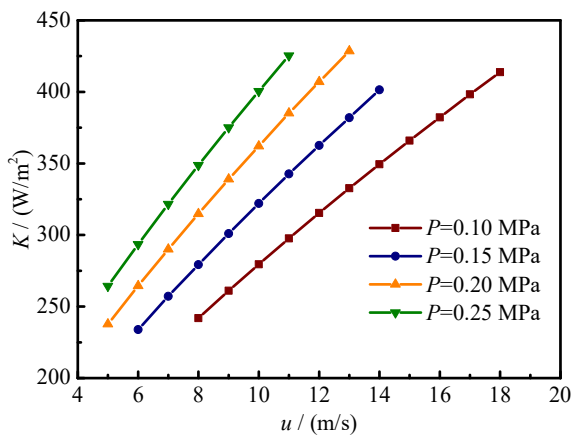
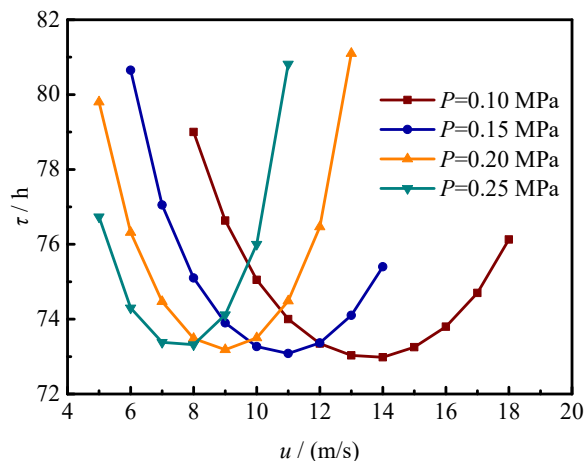
3.模型计算



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在对流阻和传热性能2方面
- 压力增加导致流阻增加，进而导致风机处焓值升高，进而对最低降温温度不利

3.模型计算



氨气体积流速的影响

- 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

目录



- ❖ 研究背景
- ❖ 系统设计
- ❖ 数值计算
- ❖ 测试实验
- ❖ 结 论
- ❖ 公司介绍

4.测试实验



磁体

真空软管

低温离心风机

真空管

斯特林制冷机

实验测试系统



kW级单缸斯特林制冷机

- 整体式β型
- 曲柄连杆结构
- 冷端高真空绝热, $<10^{-3}$ Pa
- 降温速率快, 启动迅速
- 1048W@77K, 相对卡诺效率26.1%
- 额定电功率11kW, 转速1450转每分钟

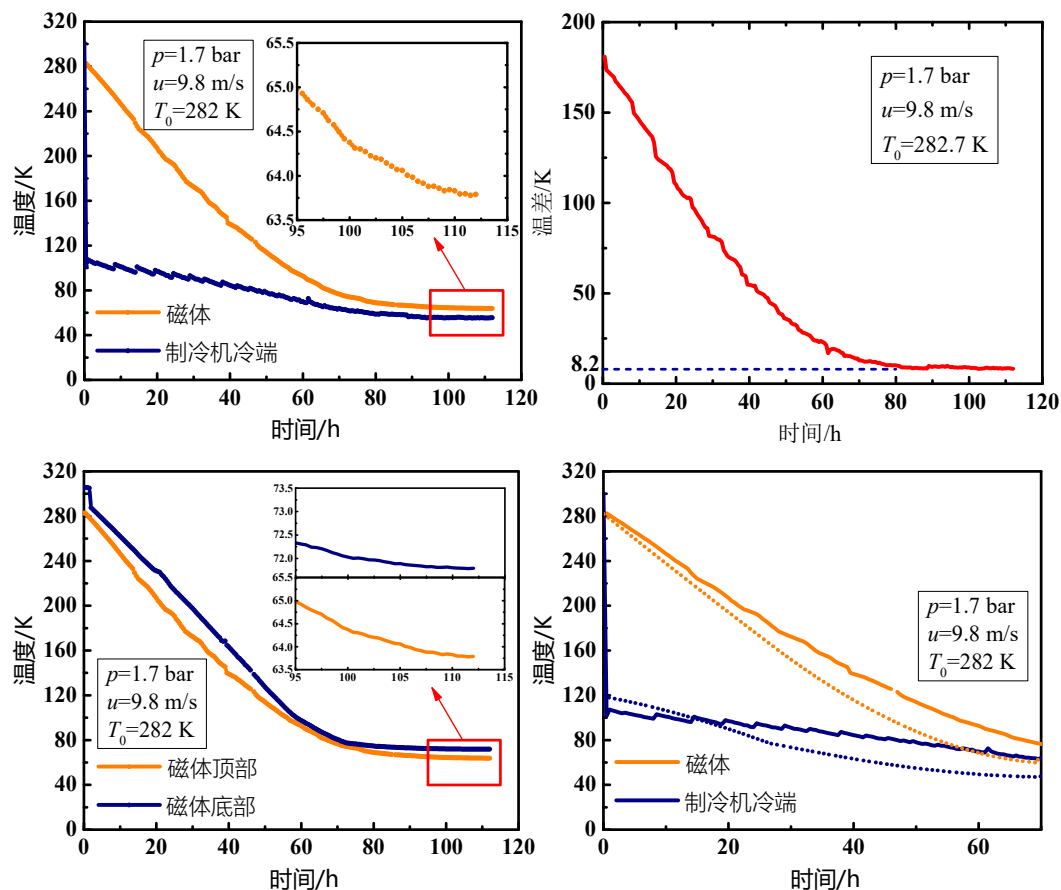


低温离心风机

- 运行压力1.5~2.5bar
- 设计转速15000rpm
- 设计流量80m³/h
- 设计扬程700m
- 工作温度20~300K

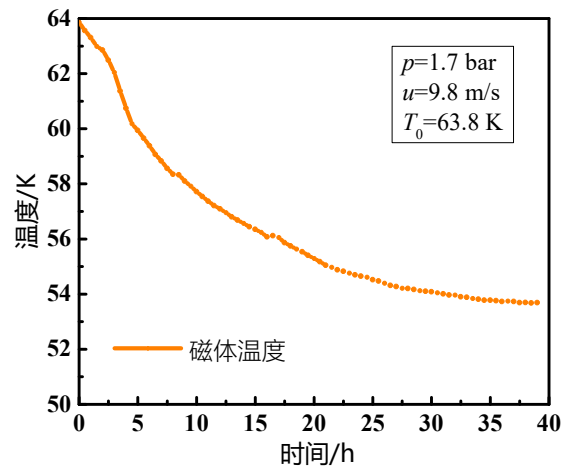
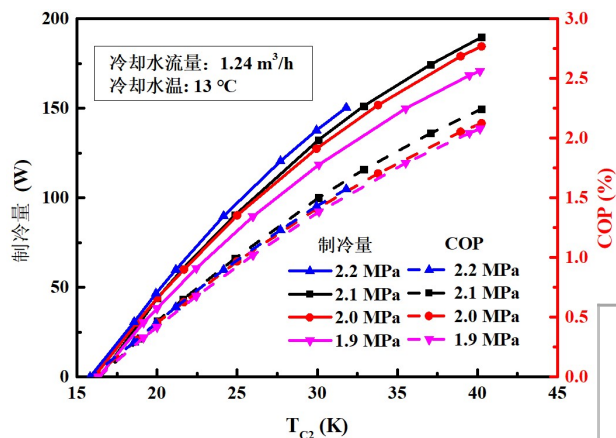


4.测试实验



- 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时长69.5 h，总时长112 h 可达最低温度63.8 K
- 降温开始阶段，制冷机与磁体之间的温差可达180K以上，随降温过程温差逐渐减小，在温度几乎稳定阶段，温差约为8.2K
- 制冷机温度在降温过程中温度会随时间出现偶尔的上升，原因在于高温补气导致热量引入，但磁体热容较大，所以磁体的温度波动不明显
- 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.测试实验



- 基于千瓦级单级斯特林制冷机，实验室自主研发了两级斯特林制冷机，制冷量47.4 W@ 20 K，138 W@30 K。

- 基于验证的数值模型，计算两级斯特林制冷机冷却MRI磁体系统的降温曲线，可将磁体进一步降低到40K温区。

目录



- ❖ 研究背景
- ❖ 系统设计
- ❖ 数值计算
- ❖ 测试实验
- ❖ 结 论
- ❖ 公司介绍

5.结论



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63.8K。

数值模型预测，基于自主研发的两级斯特林制冷机，可以进一步降低磁体温度到40K温区，能够在更大程度上减少液氦降温的损耗。

目录



- ❖ 研究背景
- ❖ 系统设计
- ❖ 数值计算
- ❖ 测试实验
- ❖ 结 论
- ❖ 公司产品介绍

公司介绍



江苏克劳特低温技术有限公司



江苏克劳特低温技术有限公司是由浙江大学工业技术转化研究院孵化的低温装备制造领域的高科技企业，是国家级高新技术企业。主要设备产品有：大冷量斯特林低温制冷机，液氮温区低温调节阀，低温泵，低温循环风机，低温系统解决方案。

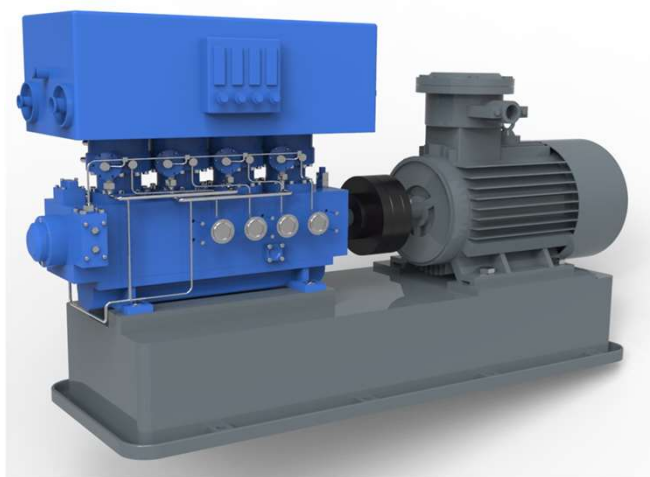
克劳特公司产品介绍



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: 47.4 W @ 20 K, 138 W @ 30 K
单缸两级斯特林低温制冷机

克劳特公司产品介绍



低温泵和冷氦气循环风机



液氮离心泵



低温离心风机

克劳特公司阀门产品介绍

超低温液氦液氢调节阀



克劳特公司阀门产品介绍



超低温调节阀

气动低温阀测试系统：
漏热、密封、寿命、静态/动态性能



克劳特公司阀门产品介绍



超低温调节阀

低温调节阀应用场景



克劳特公司阀门产品介绍



部分应用案例

序号	应用单位/场合	DN值	温度范围	备注
1	中科院理化所	DN32/DN25	20K	透平控制
2	中国航天科技集团1院	DN65/DN50	20K	低温流体控制
3	兰州近代物理研究所	DN15	4K	低温流体控制
4	中科院理化所	DN1/DN2	1.8K	手动调节
5	中科院理化所	DN6	4K	试验平台
6	中科院理化所	DN6~DN25	77~4K	液氮制冷机
7	中科院理化所	DN32	常温	气体管理系统
8	中科院高能所	DN30, DN40	4K	氦射流器试验台
9	LNG液化系统	DN8~DN25	110K	LNG流体
10	中科院理化所	DN8~DN120	2K~4K~300K	氦制冷机液化器
11	兰州近代物理研究所	DN6~DN40	2K~4K	2K冷箱
12	中科院高能所	DN10~DN40	2K~4K	加速器超流氦系统
13	中科院高能所	DN20~DN40	2K~4K	4K氦制冷机
14	中国航天科技集团8院	DN20~DN50	4K~77K	航天试验台
15	中科院高能所	DN10~DN50	2K~4K	北京正负电子对撞机装置上全时运行

克劳特公司阀门产品介绍



低温压力管道元件制造资质

中华人民共和国
特种设备制造许可证
Manufacture License of Special Equipment
People's Republic of China
(压力管道元件)

编号: TS271064N-2020

单位名称: 江苏克劳特低温技术有限公司
单位地址: 江苏省常州市新北区河海中路 85 号
制造地址: 江苏省常州市新北区河海西路 538 号国展机电园 17 号楼

经审查, 获准从事下列压力管道元件的制造:

级别	类别	品种	备注
A 级	压力管道特种 元件	元件组合装置	限燃气调压装置
B 级			限减温减压装置
A2(2) 级	压力管道阀门	金属阀门	限调节阀

审批机关: 国家质量监督检验检疫总局
有效期至: 2020 年 10 月 13 日

发证机关: 国家质量监督检验检疫总局
发证日期: 2016 年 10 月 14 日
变更日期: 2017 年 6 月 19 日

国家质量监督检验检疫总局制

特种设备型式试验证书
(压力管道元件)

证书编号: TSX71002520171089

制造单位: 江苏克劳特低温技术有限公司
注册地 址: 江苏省常州市新北区河海中路 85 号
制造地 址: 江苏省常州市新北区河海西路 538 号国展机电园 17 号楼
设备类 别: 压力管道阀门—金属阀门
产品名称 (品种): 气动低温调节阀
产品型 号: PCCV-5040 DN50 PN40, PCCV-6540 DN65 PN40。
型式试验报告编号: 2017TSFM177, 2017TSFM178

经型式试验, 确认符合 TSG D7002-2006《压力管道元件型式试验规则》的要求。本证覆盖以下型号规格产品:

公称压力 \leq PN4.0MPa、公称尺寸 DN50~DN100mm,
适用温度 $-196^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ 的低温调节阀 (气动)。

国家泵阀产品质量监督检验中心 合肥通用机电产品检测院有限公司
2017 年 3 月 6 日



浙江大学
Zhejiang University

谢谢大家!