



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制冷与低温研究所

2022年10月24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。



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。



① 单级斯特林制冷机,制冷量达1000W、4000W@77K;

性能处于国际先进和国内领先水平

② 二级斯特林制冷机,制冷量达50W@20K or 138W@30K。











- 常用液氮,最低至65K左右
- 降温速度快













4、基于斯特林制冷机的超导磁体冷却系统









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 无振动及电	降温速度可控,磁体温度均匀, 磁干扰,系统可循环使用 。

・控制方程	主要参数	数值	
$\frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial r} = 0$		气体工质	氦气
$\partial t \partial x$ $\partial (\rho u) \partial (\rho u^2) \partial p \nabla^2 u$	$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda}{c_n} \frac{\partial T}{\partial x}\right) - \Phi = 0$	工作压力	1-5 bar
$\frac{1}{\partial t} + \frac{1}{\partial x} = \frac{1}{\partial x} + \frac{1}{\partial x^2}$		铜基磁体重量	500 kg
・制冷机	• 磁体及换热器	铁基磁体重量	1500 kg
$Q_{\text{cooler}} = k_{\text{cooler}} \cdot A_{\text{cooler}} \cdot \Delta T_{\text{coolerm}} =$	$k_{\rm MRI} \cdot A_{\rm MRI} \cdot \Delta T_{\rm MRIm} = m_{\rm MRIm} \cdot h_{\rm MRIm} -$	磁体流道横截面积	0.3 m ²
$m_{ m coolerin} \cdot h_{ m coolerin} - m_{ m coolerout} \cdot h_{ m coolerout}$	$m_{\rm MRIout} \cdot n_{\rm MRIout} = m_{\rm MRI} \cdot c_{\rm MRI} \cdot \Delta I_{\rm MRI}.$	磁体换热面积	6.1 m ²
$T_{\text{cooler}} \ge 202 \text{ K}$ 时, $Q_{\text{cooler}} = 2.761 2 \cdot T_{\text{cooler}} + 957.763 2.$	Nu = $\frac{(f/8)(\text{Re}-1000) \text{Pr}}{1+12.7\sqrt{f/8}(\text{Pr}^{2/3}-1)} [1+(\frac{d}{l})^{2/3}]c_{\text{f}}.$	制冷机管束换热面积	0.07 m ²
202 K>T _{cooler} ≥77 K时,	Nu=2.337 33+0.621 $18 \cdot R$ -0.026 $57 \cdot R^2$.	管段长度	11 m
$Q_{\text{cooler}} = 4.783 \ 73 \cdot T_{\text{cooler}} + 553.068 \ 32.$ $T_{\text{cooler}} < 77 \text{ K B}^{+}.$	$c_{\rm f} = (T_{\rm f}/T_{\rm w})^{0.45}$	管径	45 mm
$Q_{\text{cooler}} = 21.812 \ 15 \cdot T_{\text{cooler}} - 761.181 \ 29.$	$f = (1.82 \lg Re - 1.64)^{-2}$	目标降温温度	60 K

实验测试系统

低温氦气泵

٠

- 运行压力1.5~25bar
- 设计转速15000rpm
- 设计流量5~20m³/h
- 设计扬程50~300m
 - 工作温度20~300K

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。

数值模型预测:基于自主开发的两级斯特林制冷机,可以进一步降低磁体温度到40K以下温区,能够减少液氦消耗量80%以上。

5、克劳特公司企业概况

Xo

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。

Xo

克劳特低温公司致力于低温领域的科技创新、高新装备制造以及系统解决方案的提供,可为超导冷却、气体液化和提纯、BOG回收等产业和行业群体提供先进的设备和系统解决方案。

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

低温液氮泵和低温氦气泵

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

Xo

换热器产品照片

工作温度: -271.5℃ 扇形翅片式超低温氦气负压换热器

5、江苏克劳特低温技术有限公司产品照片

Xo

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

高效壳管式换热器 (气--液换热)

超低温液氦液氢调节阀

感谢各位专家和行业同仁!

