

制冷机直接冷却式小型超导磁体测试装置研制

江勇^{1,2}, 许皆平¹, 张正臣¹, 崔剑¹, 李明¹, 季现凯¹

(1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201204; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 成功研制了一套制冷机直接冷却式小型超导磁体测试装置, 该测试装置特点为: G-M 制冷机直接冷却超导磁体; 便于拆装的机械结构; 设计电流 500A; 常导电流引线采用无氧铜与黄铜的组合设计结构; 实时采集记录温度、电阻、电流电压等数据; 人性化的上位机用户操作界面。对比国内外同类装置, 测试装置性能达到国际领先水平。

关键词: G-M 制冷机; 低温恒温器; 电流引线; 测试装置; 超导磁体

Development of a cryogen-free test facility for small superconducting magnets

Jiang Yong^{1,2}, Xu Jieping¹, Zhang Zhengchen¹, Cui Jian¹, Li Ming¹, Ji Xiankai¹

(1. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The development of cryogen-free test facility for small superconducting magnets was completed with characteristics of cryocooler conduction-cooled superconducting magnets, easily-dismounting structure, nominal current 500A, a pair of multi-stage current leads, real-time data collecting and recording, humanized user interface. Its performance reached the international advance level.

Keywords: G-M refrigerator, Cryostat, Current lead, Test facility, Superconducting magnets

1 引言

波荡器是第三代同步辐射光源的关键设备, 目前基本上所有的同步辐射光源现役的波荡器主要为永磁波荡器。超导波荡器具有磁场强度高、周期长度小等特点, 因而可以用来产生高强度和高亮度的 X 射线(同步辐射光), 大幅提升同步辐射光源的性能。目前国外许多研究机构已经开展了超导波荡器原理设计和实验研究工作, 并将其作为下一代插入件的发展方向。

作为世界先进的中能第三代同步辐射光源, 上海光源已经开展了“超导波荡器模型机研制”项目并承接了国家自然科学基金面上项目“超导波荡器磁体关键技术研究”。

为了配合开展项目的需要, 我们研制了一套制冷机直接冷却式小型超导磁体低温试验通用测试装置。该测试装置包括三部分: 低温恒温器系统、测量控制系统和超导磁体电源系统。下面主

要介绍测试装置设计及调试。

2 低温恒温器系统

综合考虑恒温器的用途及主要测试样品(小型超导磁体)的工作温度、工作电流等关键参数, 对小型超导磁体测试装置恒温器提出以下技术指标, 见表 1。

根据恒温器的设计指标, 完成了恒温器的热设计^[1,2]。如图 1 所示为恒温器的冷源为小型 G-M 制冷机(1W@4.2K, 40W@45K)。其特点如下:

(1) 设置了防辐射冷屏并在辐射冷屏外层包裹多层绝热材料 MLI (Multi-Layer Insulation)^[3-6]。冷屏与制冷机一级冷头相连, 利用冷屏做电流引线、测量控制信号线、拉杆等的热隔断。

(2) 电流引线采用二元电流引线设计结构^[7,8]。二元电流引线采用常导铜电流引线与高温超导(HTS)电流引线的组合结构, 利用高温超

收稿日期: 2014-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(11275254)资助。

作者简介: 江勇(1987-), 男, 硕士生, 研究方向为低温与超导技术。

导电流引线的导热性能差、焦耳热小等特点,可以大大减小二级冷头的漏热。

表 1 低温恒温器设计指标

Tab.1 Design indicators of cryostat

恒温器技术指标	
工作环境	无低温液体
工作温度 /K	<5
制冷功率	1W@4.2K 40W@45K
工作电流 /A	0 ~ 500
真空压力 /Pa	低于 10^{-2}
工作寿命 /h	>10
重量 /kg	<500
试样尺寸/mm	<200 × 100 × 100

(3) 真空设计压力低于 1×10^{-2} Pa,这时可以忽略剩余气体漏热。

(4) 拉杆材料采用导热率低材料^[9]。不锈钢、环氧玻璃纤维等材料。

(5) 二级冷头与超导磁体间通过导热系数高的柔性材料(一般采用无氧铜或银材料)连接。传热面间可以涂一层薄薄的低温传热脂(Apiezon N)或铜片,减小传热热阻。

(6) 恒温器内各个关键部位布置有温度传感器(Cernox),实时监控温度。

(7) 恒温器内制冷机一、二级冷头附近布置有相当功率大小的加热器。可以测试同环境下制冷机冷头相对输出功率。

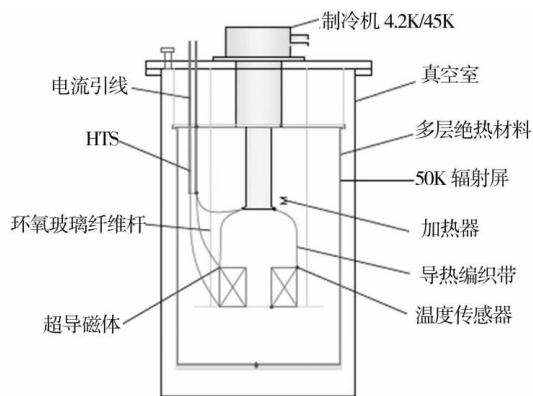


图 1 热设计示意图

Fig.1 Schematic of heat design

完成了恒温器的机械结构设计,如图 2 所示为低温恒温器三维效果图。真空室直径 600mm,

高 1200mm。真空室顶法兰上预留两对电流引线接口、真空抽口、测量引线接口和真空测量接口等。真空室圆筒预留一对磁场测量接口。低温恒温器各部件材料属性见表 2。

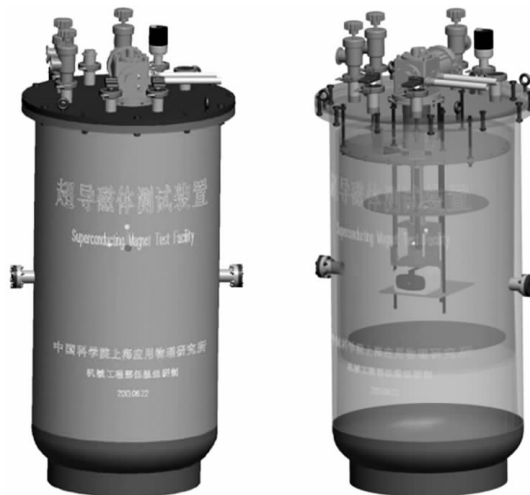


图 2 低温恒温器三维效果及透视图

Fig.2 3D effect drawing and perspective of cryostat

表 2 恒温器各部件材料

Tab.2 Materials of cryostat

名称	数量	材料	质量/kg
真空椭圆封头	1	304L 不锈钢	13.88
不锈钢圆筒	1	304L 不锈钢	45.16
顶法兰圈	1	304L 不锈钢	17.38
顶法兰	1	304L 不锈钢	56.47
冷屏法兰	1	紫铜	5.87
冷屏圆筒	1	3003 铝	6.91
多层绝热	1	镀铝涤纶、玻璃纤维	0.05
拉杆	6	环氧玻璃纤维	0.4
KF40	8	不锈钢	1.22
CF40	2	不锈钢	0.72
G-M 制冷机	1		18.5
共计			200 kg

基于 Ansys - workbench 的热电耦合参数化设计模块及各种材料随温度变化的物性参数,模拟计算了恒温器静态热负荷(0A 电流)及 500A 电流下的热负荷,制冷机一级热负荷汇总见表 3;二级热负荷汇总见表 4。制冷机一、二级热负荷均未超过在设计温度下的制冷功率。

表3 制冷机一级热负荷汇总

Tab.3 Sum of heat load of first stage

名称	数量	热负荷	
		0A /W	500A /W
G10 支杆	6	0.44	0.44
电流引线	2	26.4	49.6
冷屏辐射	1	7	7
测量引线	40	0.2	0.2
其他		0	0
共计		约 34W	约 58W

表4 制冷机二级热负荷汇总

Tab.4 Sum of heat load of second stage

名称	数量	热负荷	
		0A /mW	500A /mW
G10 支杆	3	7.95	7.95
电流引线	2	155	155
磁体辐射	1	30	30
测量引线	40	6	6
引线接头	2	0	~
其他		0	0
共计		约 200mW	200mW ~

3 测量控制系统

基于小型超导磁体测试装置的测量控制系统要求是:能够实时采集记录测试装置恒温器内各部

表5 测量控制系统技术指标

Tab.5 Design indicators of measuring control systems

	范围	精度	采集频率 /Hz	记录频率 /Hz
温度	3 ~ 350K	0.1K	1 ~ 10	0.03 ~ 10
电阻	0 ~ 1000Ω	0.1mΩ	1 ~ 10	0.03 ~ 10
电压	-10 ~ 10V	5mV	1 ~ 100	1 ~ 100
真空压力	10 ⁻⁵ ~ 10 ⁵ Pa	10 ⁻⁶ Pa	1	0.03
加热器	0 ~ 50W	0.1W	1	0.03 ~ 10
超导电源	0 ~ 500A	0.5A	1	1

件的温度、真空度以及线圈电阻、电压等数据;远程控制仪器仪表;上位机用户操作软件界面直观、简洁易于操作 提出了测量控制系统的设计指标,见表5。选配了合适型号的仪器仪表及超导电源。并基于 NI-LabVIEW 程序开发软件,编写计算机测量控制程序,设计了直观简洁、人性化的上位机用户操作界面,如图3所示。

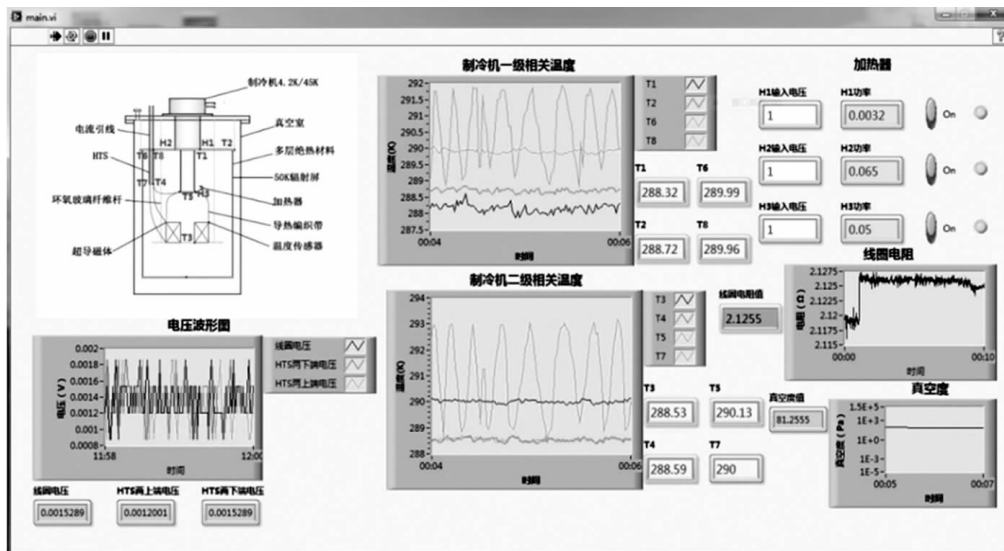


图3 测试装置测上位机用户操作界面

Fig.3 User interface of test facility

4 测试装置调试及实验

测试装置经过一年时间的设计、加工组装,最

终于2013年9月24日搭建完成。如图4所示。对各系统进行了调试并完成了NbTi短样临界电流测试实验。



图 4 制冷机直接冷却式小型超导磁测试装置

Fig. 4 Cryogen - free test facility for small superconducting magnets

4.1 测试装置调试

首先对测量控制系统进行了调试,确认了测量控制系统均能达到设计要求;其后,对测试装置进行了降温调试,记录了降温过程中恒温器各部件温度随时间变化值,见表 6。

表 6 降温过程恒温器各部件温度变化

Tab.6 Temperature of cryostat components in cooling process

恒温器部件	0H	9H	15H	30H
一级冷头温度 /K	280.2	31.4	31.4	31.3
铜冷屏温度 /K	283.6	35.0	35.0	35.0
左 HTS 上端温度 /K	284.4	47.1	47.3	47.2
右 HTS 上端温度 /K	285.0	43.8	43.8	43.7
二级冷头温度 /K	284.2	4.5	3.7	3.65
磁体温度 /K	284.0	5.1	4.2	3.97
左 HTS 下端温度 /K	284.4	6.2	5.3	5.1
右 HTS 下端温度 /K	285.0	6.1	5.2	4.98

表 7 模拟热对抗法实验数据

Tab. 7 Data of heat simulation experiment

恒温器部件	363A	20 W	31 W
	失超时	平衡状态	衡状态
一级冷头温度 /K	45.0	31.4	47.6
铜冷屏温度 /K	47.1	35.5	50.2
左 HTS 上端温度 /K	52.3	45.8	58.7
右 HTS 上端温度 /K	54.6	47.9	57.1

我们在制冷机一级冷头附近安装有 0 ~ 100W 功率的加热器,通过调节加热器功率可以

模拟在静态热负荷的基础上,额外增加热负荷对恒温内各部件平衡温度的影响,即焦耳热对恒温器各部件的影响。对比不同运行电流下的平衡温度,可以确定电流引线的真实发热功率。记录了加热器发热功率为 20W 及 31W 工况下的平衡温度; NbTi 短样不同励磁电流下的温度,见表 7。

4.2 NbTi 短样临界电流测试实验

我们进行了 NbTi 超导短样临界电流测试实验。实验目的:检验测试装置加载电流能力以及低温超导线与 HTS 电流引线的连接水平。低温超导线与 HTS 电流引线的接触电阻发热是制冷机二级热负荷的重要来源。

试验中,超导电源失超保护电压阈值设置为 2V,以 50A/Min 励磁电流速率加载电流直至失超发生。NbTi 短样的临界电流大于 500A@ 4.2K。失超时,电流为 363A,其相应的励磁电流、电压曲线,如图 5 所示。励磁过程中恒温器内制冷机一

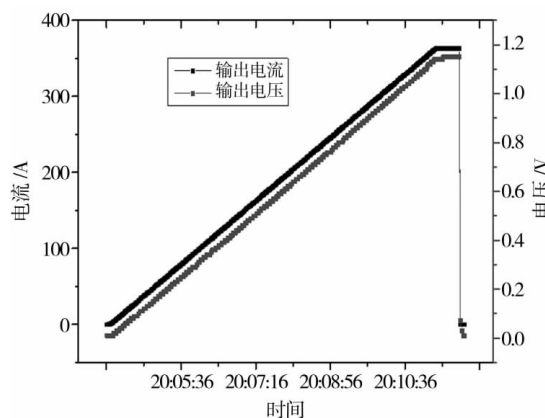


图 5 NbTi 短样励磁电流、电压曲线

Fig. 5 NbTi short - sample exciting current and voltage

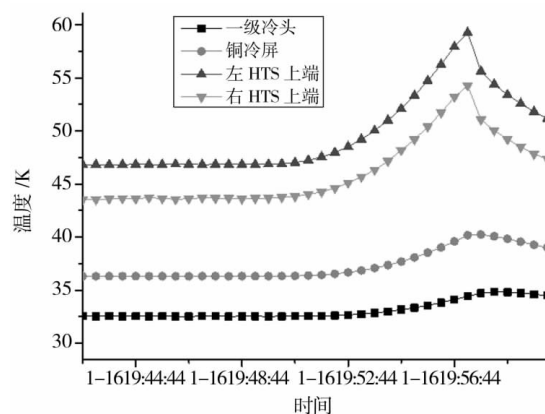


图 6 励磁过程制冷机一级相关部件温度变化曲线

Fig. 6 Temperature of first stage in magnetizing process

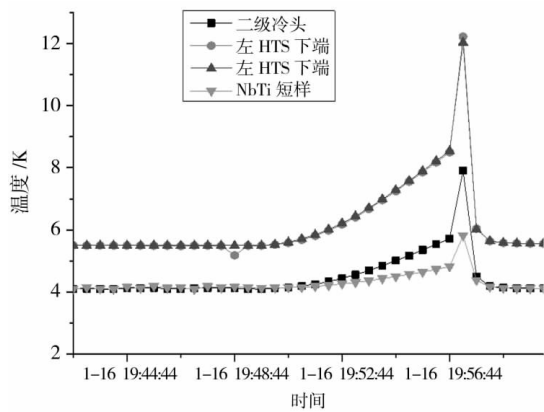


图 7 励磁过程制冷机二级相关部件温度变化曲线

Fig. 7 Temperature of second stage in magnetizing process

表 8 失超过程中恒温器各部件温度变化

Tab. 8 Temperature variation of cryostat components in quench process

部件名称	励磁前	第一励磁
	0A 平衡温度	363A 失超温度
一级冷头温度 /K	32.5	45.0
冷屏上端温度 /K	36.3	47.1
左 HTS 上端温度 /K	46.8	52.3
右 HTS 上端温度 /K	43.7	54.6
二级冷头温度 /K	4.1	7.9
NbTi 短样温度 /K	4.1	5.8
左 HTS 下端温度 /K	5.5	12.2
右 HTS 下端温度 /K	5.5	12.0

级相关部件温度变化如图 6 所示; 制冷机二级相关部件温度变化如图 7 所示, 失超前后具体温度变化见表 8。

从图 7 中, 我们可以发现温度曲线在 HTS 电流引线下端(低温端接头处)温度为 8.5K 有跳跃变化, 说明有失超发生。可见干冷测试装置的载流能力与 HTS 电流引线低温端的接头处的焦耳热大小直接相关。只需改进超导线材连接工艺, 测试装置载流能力将得到进一步提高。

5 结论

在上海光源低温组全体成员的合作下, 完成

了制冷机直接冷却式小型超导磁体测试装置的设计、加工、组装及调试。并在此测试装置上进行了 NbTi 超导短样测试实验, 验证了测试装置的性能。现对测试装置研制工作及实验研究结果进行如下总结:

(1) 制冷机直接冷却式小型超导磁体测试装置研制成功。试样最低稳定温度达到 4K, 励磁电流达 363A。为超导波荡器的研制打下了基础。

(2) 大电流运行下, 制冷机二级热负荷主要为 HTS 电流引线及低温超导线接头处的焦耳热。

参考文献

- [1] 赵保志, 严陆光, 王秋良, 等. 6T NbTi 传导冷却超导磁体系统杜瓦容器的研制 [J]. 低温物理学报, 2005 (2): 179 - 184.
- [2] 张楷浩, 邱利民, 甘智华, 等. 制冷机传导冷却的超导磁体冷却系统研究进展 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2012 (7): 1213 - 1226.
- [3] Kang D H, Lorente S, Bejan A. Constructal distribution of multi-layer insulation [J]. International Journal of Energy Research, 2013, 37 (2): 153 - 160.
- [4] Rogti F, Ferhat M. Effect of temperature on trap depth formation in multi-layer insulation: Low density polyethylene and fluorinated ethylene propylene [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104 (3): 031605 - 031605 - 4.
- [5] Feller J R, Johnson W L. Dependence of multi-layer insulation thermal performance on interstitial gas pressure [J]. Advances in Cryogenic Engineering, 2012, 57a/57b: 1434/47 - 54.
- [6] Abu - Hijleh B, Abu - Qudais M. Thermal insulation behavior of a multi-layer orthotropic cylinder [J]. Energy, 1998, 23 (1): 43 - 49.
- [7] Yamaguchi S, Emoto M, Kawahara T, et al. A proposal of multi-stage current lead for reduction of heat leak [J]. Advances in Superconductivity, 2012, 27: 448 - 451.
- [8] Choi Y S, Kim M S. Performance test of current lead cooled by a cryocooler in low temperature superconducting magnet system [J]. Physica C - Superconductivity and Its Applications, 2013, 494: 355 - 359.
- [9] 黄礼凯, 王秋良, 赵保志, 等. 1.5T MRI 超导磁体低温容器的拉杆设计与校核 [J]. 低温与超导, 2011, (5): 22 - 27.