

热载荷下 LEYBOLD G-M 制冷机制冷性能测试

唐志, 黄廷庆, 汪良斌

(中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 简要介绍了高温超导传导冷却的意义和 G-M (Gifford-McMahon) 制冷机的制冷原理。对高温超导传导冷却用 G-M 制冷机的空载降温过程, 热载荷下的工作过程进行实验分析。总结了制冷机性能测试中的实验过程及方法, 解决了实验中的一些问题。

关键词: 传导冷却; G-M 制冷机; 性能测试

Test of the cooling performance of LEYBOLD G-M cooler under thermal load

Tang Zhi Huang Tingqing Wang Liangbin

(Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract This paper briefly presented the significance of conduction cooling on HTS (high temperature superconductor) and the cooling principle of G-M (Gifford-McMahon) cooler. This study included the experiments and analysis of the cooling process with and without the thermal load of the G-M cooler for the conduction cooling on HTS. This paper summarized the process and methods of the experiments in detail and resolved some problems in the performance test.

Keywords Conduction cooling; G-M cooler; Performance test

1 引言

超导磁体的冷却主要有两种方法: 液体冷却和传导式直接冷却。传统的冷却方法为低温液体(液氦、液氮)冷却, 超导磁体浸泡在低温液体中, 以保证其有效地工作。直接冷却是利用 G-M 等制冷机的冷头与超导磁体装置中的电流引线和磁体连接, 对被冷却对象进行传导冷却^[1]。直接冷却不同于低温液体冷却模式的特点在于^[2]: 它省去了低温液体冷却方式中庞大的低温系统与设备, 同时消除了低温液体蒸发所带来的危险, 使整个系统更加紧密、安全、有效。在 20K 的运行温度下, 高温超导磁体具有更高的综合性能^[3], 这个温区主要应用制冷机传导冷却, 因此要求所使用的制冷机在 20K 能达到一定的冷量。

G-M 制冷机是用绝热膨胀法制冷, 属于闭式循环制冷机^[4]。G-M 制冷机系统由压缩机和膨胀机两大部分组成, 相互之间用挠性软管和自密封接头连接。压缩机的作用是给膨胀机提供一定压力的纯净氦气流。膨胀机由气缸、回热器及推移活塞等组成。G-M 制冷机的特点是转速

低、振动小, 免维修时间及使用寿命长, 因此在小型低温领域获得了广泛的应用。

我们正在研制传导冷却高温超导磁体系统, 对磁体系统的热负荷进行计算并综合考虑后, 选取了 LEYBOLD G-M 制冷机, 冷头型号为 10MD, 压缩机型号为 6000MD^[5]。其工作指标是二级冷头在 20K 温度下最大功率达到 16W, 一级冷头在 80K 温度下达到 80W。

2 实验方法

实验装置见图 1。

温度计采用小型陶瓷封装铂电阻温度计, 测量范围在 1.2K - 300K。加工了紫铜块热沉(见图 1), 温度计插入热沉的小孔, 温度计表面涂抹真空脂与三氧化二铝粉末的混合物。热沉通过冷头上的螺纹孔用螺钉固定在冷头上。安装结束后, 温度计引线在冷头上缠绕多匝以达到热沉的效果。温度计采用四线制接法, 采用 DGH 型多路高精度恒流源提供 1mA 电流, 通过电压测量引线、获取信号, 并通过数据采集系统转化为电阻阻

收稿日期: 2010-05-16

作者简介: 唐志 (1987-), 男, 硕士生, 主要研究方向为低温与超导电工技术。All rights reserved. <http://www.cnki.net>

值及温度值。

加热器采用订制的环形电阻丝加热器,其加热电压由 TDGC2-2 交流变压器提供。小功率的加热器一般由直流电源供电,此型号的制冷机一级冷头功率较大,实验室条件无法满足,因此采用交流变压器供电。加热器与冷头的接触面加铜片以保证其传热效果。

紫铜制做的冷屏安装在一级冷头上,通过螺钉紧密接触,接触面垫铜片防止由于空隙造成的接触传热不良等问题出现。冷屏外部包裹多层铝箔,并在铝箔上插多个小孔,增强抽真空的效果。实验准备结束后,进行安装调试,杜瓦抽真空和实验测量。

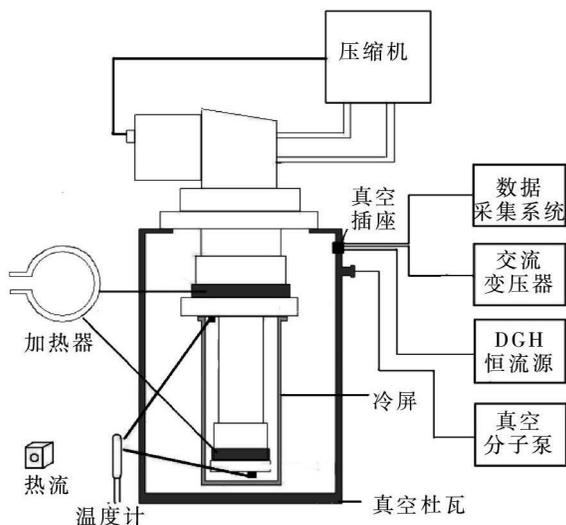


图 1 实验装置简图

Fig 1 Diagram of experiment devices

3 实验数据分析

实验空载降温过程如图 2 所示,以 $t = 24\text{min}$ 为界,

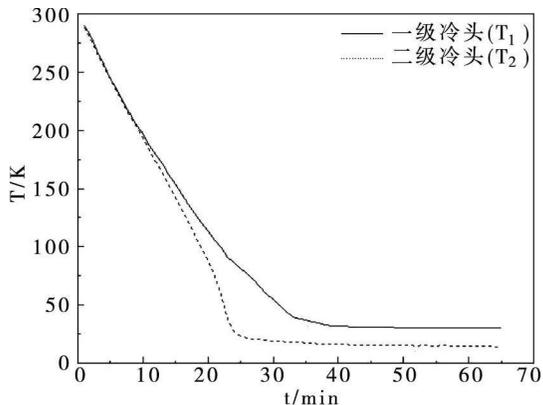


图 2 空载降温曲线

Fig 2 Cooling curves without thermal load

为界,二级冷头开始进入缓慢降温过程,温度 $T_2 = 22\text{K}$,最终达到并稳定在实验所要求的 20K 以下的温度, $T_2 = 14\text{K}$ 。一级冷头 T_1 在 33 分钟进入缓慢降温,并最终稳定在 30K 。

两级冷头温度稳定一段时间后,开始进入热负载过程。一级冷头通入 80W 的热量,二级冷头通入 16W 的热量,过程如图 3 所示。加入负载后两级温度同时上升,经过一个先升后降的热平衡过程后,在 $t = 90\text{min}$ 左右进入温度稳定阶段,二级冷头温度维持在 21K ,一级冷头 $T_1 = 52\text{K}$ 。

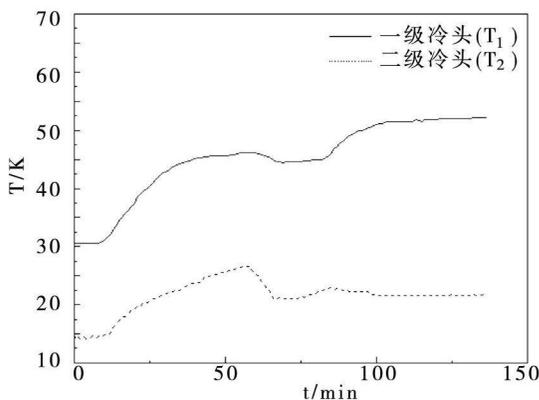


图 3 热载荷下工作过程曲线

Fig 3 Working process curves under thermal load

在实验准备阶段,温度计的安装至关重要。制冷机冷头提供了用于插装温度计的小孔,实验最初阶段,我们将温度计通过铜片包裹塞入小孔,由于实验进行中冷头垂直于地面,温度计自身的重力、热胀冷缩及运行中的震动等问题都可能会造成温度计的松动,从而产生热阻,因此产生了与图 2 有差异的实验结果,如图 4 所示。制冷机二

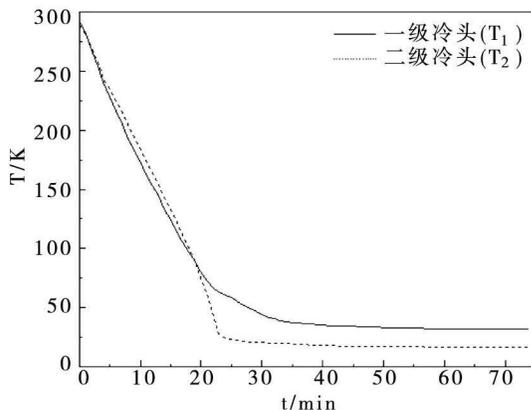


图 4 与实际不符的降温实验结果

Fig 4 Unnormal cooling experimental result

级冷头的空载测量稳定温度只能达到 17K ,与图

2 中的测量产生了 3K 的误差。在装置回温后, 改变了安装方式, 采用如图 1 所示的加热沉的安装方法, 实验效果得到了改善。影响温度测量的因素主要还有真空辐射漏热, 由于测量过程中, 始终保持对真空度的监测, 真空度维持在 10^{-5} Pa 的水平, 可以忽略真空对测量结果的影响, 产生上述误差的主要原因归结为温度计安装问题。因此, 在同类实验中, 应做好温度计的接触和热沉, 避免产生测量误差。

4 结论

根据实验结果和分析可得出以下几个结论:

①测试结果达到二级冷头 21K 时有 16W 的冷量, 一级冷头 52K 时有 80W 的冷量。LEYBOLD G-M 制冷机的各项性能指标基本满足我们的高温超导磁体传导冷却的需要。②实验测量中温度计的安装方式直接影响制冷性能的测量, 应引起足

够的注意。实验方法过程及问题解决的经验可供同行参考。③本文提供的实验数据可供选用同类型 G-M 制冷机参考。

参考文献

- [1] 吴钢, 等. G-M 制冷机在高温超导磁体储能磁体直接冷却中的应用研究 [J]. 低温与超导, 2004, 32 (1): 9-13.
- [2] 王惠龄, 饶荣水, 李敬东, 等. 超导电力低温技术展望 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(17): 65-68.
- [3] Toshinari Ando, Satoshi Ishii, Hideo Yoshinuma. Design of the high- T_c superconducting tf coil for the tight aspect ratio tokamak power reactor (VECTOR) [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(2): 1481-1484.
- [4] 边绍雄. 小型低温制冷机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [5] LEYBOLD G-M 制冷机说明书 [Z].

(上接第 3 页)

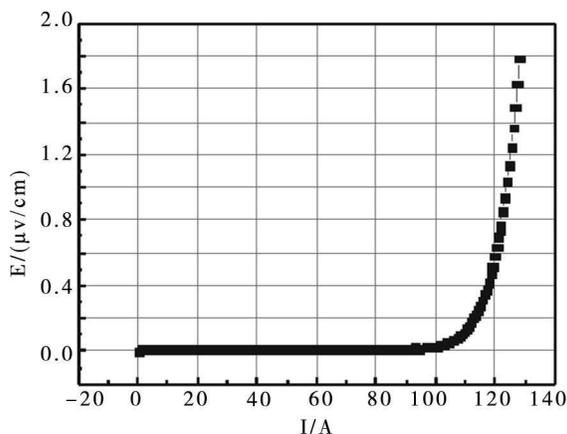


图 7 焊接后 Bi2223/Ag 的临界电流曲线

Fig 7 The Bi2223/Ag critical current curve after soldered

5 结论

将图 7 和图 6 对比可以看出, 在焊接前后 Bi2223/Ag 的临界电流均为 122A, 未发生变化, 焊接中高温超导带材 Bi2223 未被破坏, 这种焊接工艺可行。

参考文献

- [1] 王正道, 王温泉. Bi 系 2223 高温超导带材力学性质 [J]. 低温工程, 2006(1): 55-59.
- [2] Torii Shinji, Akita Shirabe, Iijima Yasuhiko, et al. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001 (11): 1844-1847.
- [3] Yukikazu Iwasa. Microampere flux pumps for superconducting NMR magnets- Part I. Basic concept and microtesla flux measurement [J]. Cryogenics, 2001, 41: 385-391.
- [4] 张博, 余运佳, 王秋良. 高温超导磁体指数损耗分析 [J]. 低温物理学报, 2006(2): 57-62.
- [5] Yukikazu Iwasa. HTS magnets stability, protection, cryogenics, economics, currents stability/protection activities at FBML [J]. Cryogenics, 2003, 43: 303-316.
- [6] Vysotsky V S, Ilyin Yu A, Kiss T, et al. Thermal quench study in HTSC pancake coil [J]. Cryogenics, 2000, 40: 9-17.
- [7] 王银顺, 赵祥, 韩军杰, 等. 一种 (新型结构) 复合超导带材 [P]. 专利申请号: (No. 200410048208.8).
- [8] Stenvall A, Koepke A, Lehtonen J, et al. Current transfer length revisited [J]. Superconductor Sciences and Technology, 2007, 20: 92-99.