北京正负电子对撞机重大改造工程中 超导磁体电流引线设计

张小斌¹,王 莉¹,贾林祥²

(1. 哈尔滨工业大学 低温与超导技术研究所,黑龙江 哈尔滨 150001;2. 美国布鲁海文国家实验室,纽约 11973)

摘要:北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPC II)中超导聚焦四极磁体(SCQ)共有 6 对电流引线,输送 4 种不同大小的电流。超导探测器磁体(SSM)由 1 对 4 000 A 的电流引线输送电流。本文为 SCQ 和 SSM 两个超导磁体设计多层套管结构的电流引线。引线通过在低温端增加大质量铜座的方法来延长 当冷却氦气消失时低温端温度上升到超导导线失超温度的时间。给出了多层套管结构电流引线稳态与 非稳态大型 CFD 软件 Fluent6.0 数值模拟结果。

关键词:北京正负电子对撞机重大改造工程;超导磁体;电流引线;CFD 中图分类号:TB69 文献标识码:A 文章编号:1000-6931(2006)05-0579-05

Design of Current Leads for Beijing Electron and Positron Collider Upgrade

ZHANG Xiao-bin¹, WANG Li¹, JIA Lin-xiang²

 Institute of Cryogenics and Superconductivity Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973, USA)

Abstract: For Beijing Electron-Positron Collider Upgrade (BEPC []), six pairs of current leads with four different currents were used for superconducting quadruple magnets (SCQ) and a pair of 4 000 A current leads were used for the superconducting solenoid magnet (SSM). Multi-tube current leads for SCQ and SSM magnets were designed. The special feature of the leads is that a copper block is added to the cold end of the leads to delay the time for runaway in case of the cooling helium being interrupted. The numerical simulation results on steady and unsteady thermal processes by CFD software package Fluent6.0 are also presented.

Key words: BEPC []; superconducting magnets; current leads; CFD

为实现北京正负电子对撞机亮度两个数 工程(BEPCⅡ)使用了3套超导磁体,分别 量级的增加,北京正负电子对撞机重大改造 是1对超导聚焦四极磁体(SCQ),2个超导

作者简介:张小斌(1976—),男,浙江嵊州人,博士研究生,制冷与低温工程专业

收稿日期:2005-07-19;修回日期:2006-03-21

基金项目:北京正负电子对撞机重大改造工程低温系统工程设计资助项目(EDQQ25500317)

加速腔(SRF)和1个超导螺线管探测器磁体 (SSM)。其中,SSM和 SCQ磁体在第1对 撞厅,由1台500 W/4.5 K 氦制冷机冷却。 SCQ超导磁体通过6 对电流引线输送4种 不同的电流,分别是1 对设计电流为 1600 A的电流引线、2 对设计电流为630 A 的电流引线、单根150 A 的电流引线和5 根 75 A 的电流引线。SSM 超导磁体采用两相 氦间接冷却,由1 对设计电流为4000 A 的 电流引线输送电流。

电流引线连接液氦温区的超导磁体和室温 电源,是超导磁体低温系统的主要部件之一。 通过电流引线的漏热主要包括导热和电阻引起 的焦尔热,是低温系统的主要静态热负荷^[1,2]。 优化的电流引线存在最优化的参数 $\Gamma = IL/A$ 使总漏热最小,这里 I 是设计电流,L 和 A 分 别是引线长度和横截面积。用于 BEPC II 超导 磁体的电流引线理论优化已完成^[3],接下来便 是根据理论优化结果进行结构设计。多层套管 结构的电流引线首先成功应用于美国布鲁海文 (Brookhaven)国家实验室 g-2 超导磁体上^[4,5], 本文对该结构进行改进。

1 SCQ 超导磁体电流引线设计

在 BEPC II 中,两个强聚焦能力的四极超 导磁体插入到 SSM 超导磁体里,对称放置在对 撞点两边,用来压缩对撞点 β 函数和提供可调 强磁场。为最大程度减少粒子探测时立体角损 失,尽可能减小粒子束有效对撞横截面积,SCQ 超导磁体以及低温系统设计得十分紧凑。SCQ 超导磁体低温系统的控制阀箱放在 SSM 磁体 两边,通过多通道传输管线与 SCQ 磁体相联。 相同长度的 6 对电流引线热端共享法兰,冷端 共享氦气室,组合成引线塔。其中,1600和 630 A 电流引线采用多层套管结构,由 3 根薄 壁嵌套铜管和 1 根不锈钢插入管组成。不锈钢 插入管不带电,只用来增加最里层铜管的冷却 流道,管内塞玻璃丝棉来阻尼热声振荡。由于 电流较小,150 和 75 A 电流引线分别只由2 根、 1 根铜管组成。表 1 列出 SCQ 超导磁体 6 对 电流引线的设计几何参数^[3]。其中:∳为外径; *d* 为厚度;*A* 为横截面积。

图 1 为 SCQ 超导磁体电流引线塔结构示 意图。引线塔安装在阀箱中央,可方便地从阀 箱真空室中垂直提出。每根引线通过 G-10 材 料绝缘后固定在热端法兰上。法兰上面的部件 包括不同大小的电源接线板、引线与制冷系统 绝缘的 G-10 绝缘子以及各种传感器的数据线 接头。在冷端,每根电流引线通过 G-10 绝缘 子与氦气室连接。为了补偿不同的热收缩,绝 缘子后面安装有波纹管。

来自杜瓦压力为 2.7×10⁵ Pa、温度为 4.35 K、流量为 30 g/s 的过冷氦在氦气室中进 行分配,0.32 g/s 过冷氦冷却电流引线,余下的 通过多通道传输管线冷却超导磁体。多通道传 输管线包含从超导磁体到电流引线的过渡超导 导线。为使引线塔拆卸方便,多通道传输线的 真空管路和低温传输管线都通过法兰分成两部 分,过渡超导导线在低温管线里通过铜板夹接。 这样,断开多通道传输管线及过渡超导导线,引 线塔和低温氦气室分离后便可将引线塔垂直从 阀箱中提出。

图 2 为 SCQ 超导磁体 1 600 A 电流引线的 截面图。它主要由 VCR 接头、G-10 绝缘子、铜 座、多层套管和厚壁总管组成。低温氦通过相邻 套管间的环形冷却通道对流冷却导电铜管。

表 1 SCQ 超导磁体电流引线几何参数

Table 1	Operating	parameters	of	current	leads	for	SCQ)
---------	-----------	------------	----	---------	-------	-----	-----	---

设计电流/A	数量	ϕ_1/mm	d_1/mm	ϕ_2/mm	d_2/mm	ϕ_3/mm	d_3/mm	ϕ_4/mm	d_4/mm	A/mm^2
1 600	2	28.6	0.9	25.4	0.9	22.22	0.9	19.05	0.5	207.9
630	4	19.05	0.65	15.88	0.65	12.7	0.7	9.52	0.5	95
150	1	7.94	0.65	4.76	0.6					22.7
75	5	6.35	0.8							13.9



图 1 SCQ 超导磁体引线塔结构示意图 Fig. 1 Scheme of lead tower for SCQ magnet

相邻套管间距离设计成不到 1 mm,以加强对 流换热,同时可有效缩小套管间的局部温差。 流量计和控制阀安装在引线热端,用来控制和 监视氦气流量,避免引线低温端温度过热。数 值模拟结果表明,冷却氦气压力降小于 300 Pa^[3]。引线两端铜座由几个叠加的小铜块 组成,最外面的铜块包裹其他铜块,内部的每个 铜块轴向钻有小孔,上下表面有凹槽,以组成流 动通道。来自前面小孔的部分冷却氦气通过表 面凹槽进入到环形冷却通道,剩余的进入小孔 再进行分配,直至氦气分配完毕。铜座的另一 重要功能是,当冷却氦气突然消失时,延长引线 低温端温度上升到超导导线失超温度的时间。

制造电流引线的技术困难在于铜座焊接, 特别是低温端铜座。一般采用不同焊料真空钎 焊的方法。焊接时,应注意以下几个问题: 1)须保证足够大的接触面积,以减小接触电 阻;2)须保证焊接强度,以抵抗引线从室温冷 却到低温时的热应力;3)要求外面焊缝有足够 好的低温密封性,以防止高压冷却氦渗漏。

2 SSM 超导磁体电流引线设计

SSM 超导磁体的大型薄壁超导螺线管磁体由焊接在圆柱形支撑表面的冷却管路间接冷却。电流引线约需消耗 0.4 g/s 两相氦,其余两相氦在冷却管内强迫对流。单根 4 000 A 的电流引线由 3 根与 SCQ 磁体同样的 1 600 A 电流引线并联组成。图 3 所示为 SSM 磁体电流引线塔结构示意图。同样,该引线塔安装在阀箱真空室中央,高于阀箱表面部分被设计安装在专用的真空罩中。辅助支撑用来加强引线大电流接线板强度。过渡超导导线被两铜板夹接后与铜座底部连接,为使超导导线充分冷却,铜夹板间还应有冷却管路。

图 4 示出其中 4 000 A 电流引线的截面。 除端部铜座并排焊接 3 套相同1 600 A嵌套铜 管外,基本结构与 SCQ 超导磁体 1 600 A 电流 引线的相似。

需要说明的是,由于后来方案改变,SSM 超导磁体电流引线最后采用了另一设计。

3 数值模拟

电流引线结构设计完成后,利用大型计算 流体力学(CFD)软件 Fluent6.0 对该引线的稳 态、非稳态热行为进行了数值模拟。多层套管 和两端铜座被简化成轴对称二维模型。引线冷 端温度为 4.5 K,热端为 300 K,冷却氦气入口 温度为 4.5 K。由于焦尔热是温度的函数,是 非线性内热源,因此,在模拟中需编写 C 语言 程序与 Fluent6.0 内部程序连接,来建模焦耳 热的影响。图 5 示出 SCQ 超导磁体 1 600 A 电流引线输送不同大小电流时的温度曲线。



图 2 SCQ 超导磁体 1 600 A 电流引线截面图 Fig. 2 Cutaway view of 1 600 A current lead for SCQ magnet

电压传感器

氦入口-

温度传感器

铜夹板

图 3

电流接线板

出口

辅助支撑

真空罩

山 広 传 感 器

氨入日

SSM 超导磁体引线塔结构示意图

温度传感器



0.8

1.0

图 5中同时示出了基于冷却流体和电流引线理 想换热条件的理论优化结果^[3],比较可见,两者 吻合得较好。从图 5 可看出,该电流引线输送 2 200 A时的最高温度不超过 400 K,可安全使 用。图 6、7 分别示出了 630 和 150 A 电流引线 不同电流时温度分布的数值模拟结果。可以看 出,在一定过载下它们都能安全使用。电流引 线低温端与超导导线连接,因此,另一重要问题 是,冷却氦气突然消失时低温端温度上升到超 导导线失超温度的时间。图 8 示出了1 600 A 电流引线低温端温度在冷却氦气断流后非稳态 温度变化数值模拟结果。结果显示,低温端温 度上升到 NiTi 合金超导导线失超温度(无外磁 场) 9.3 K 的时间约为 94 s。表 2 列出了 SCQ 超导磁体所有电流引线由数值模拟得到的运行 参数。









图 7 不同电流时 150 A 电流引线沿无量纲长度的温度分布

Fig. 7 Steady temperature distribution along scaled length of 150 A lead carrying different currents

$$q_m \!=\! 0.8 \! imes \! 10^{-5} \ \mathrm{kg/s}$$



图 8 冷却氦气消失时 1 600 A 电流引线 低温端温度随时间的变化

Fig. 8 Temperature variation with time at cold end of copper block of 1 600 A lead in case of helium interrupted

表 2 SCQ 超导磁体电流引线运行参数

Table 2	Operating	parameters of	current	leads i	for	SCQ	magnets
---------	-----------	---------------	---------	---------	-----	-----	---------

设计电流/A	质量流量 $q_m/$	$10^{-6}\Gamma/$	漏热 / (延行时间(
	$(mg \cdot s^{-1})$	$(\mathbf{A} \cdot \mathbf{m}^{-1})$	Fluent6.0	理论计算[3]	
1 600	88	5.89	1.06	1.04	94
630	35	5.8	1.08	1.04	175
150	8	5.8	1.1	1.04	770
75	4.15	5.84	1.07	1.04	2 200

4 结论

本文主要为 BEPC II 的 SCQ 和 SSM 超导 磁体设计多层套管结构的电流引线。受空间限 制,该电流引线为引线塔结构,考虑了安装、维 修等问题。单根大电流引线采用多层套管结 构,结构简单,换热效率高,当冷却氦气消失时, 该引线的低温端温度上升到超导导线失超温度 的时间较长。数值模拟结果显示,该结构的电 流引线运行温度分布和理论分析的基本一致。 下一步工作将是对该电流引线进行测试。

参考文献:

 [1] MAEHATA K, KAWASAKI S, ISHIBASHI
K, et al. Operational performance of spiral-fin current leads [J]. Cryogenics, 1993, 33 (7): 680-685.

- [2] WESCHE R, FUCHS A M. Design of superconducting current leads[J]. Cryogenics, 1994, 34 (2): 145-154.
- [3] ZHANG Xiaobin, YAO Zanli, WANG Li, et al. Numerical analyses on transient thermal process of gas-cooled current leads in BEPC [] [J]. Advances in Cryogenic Engineering, 2004, 49: 937-943.
- [4] GREEN M A, JIA L X. A design method for multiple tube gas-cooled electrical leads for the g-2 superconducting magnets [J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1994, 41: 573-578.
- [5] JIA L X. Design parameters for gas-cooled electrical leads of the g-2 magnets[J]. Cryogenics, 1994, 34(ICEC Suppl): 631-634.