

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

(1. *Institute of Cryogenics and Superconductivity Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*; 2. *Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973, USA*)

Abstract: For Beijing Electron-Positron Collider Upgrade (BEPC II), 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 II; superconducting magnets; current leads; CFD

为实现北京正负电子对撞机亮度两个数量级的增加,北京正负电子对撞机重大改造

工程(BEPC II)使用了3套超导磁体,分别是1对超导聚焦四极磁体(SCQ),2个超导

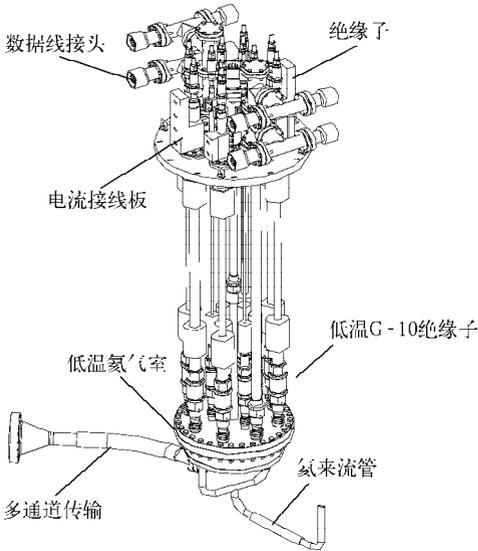


图1 SCQ 超导磁体引线塔结构示意图

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。由于焦耳热是温度的函数,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。

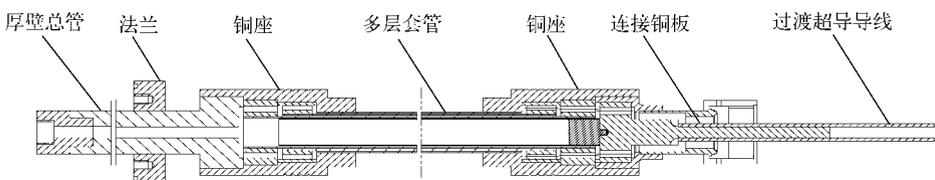


图2 SCQ 超导磁体 1 600 A 电流引线截面图

Fig.2 Cutaway view of 1 600 A current lead for SCQ magnet

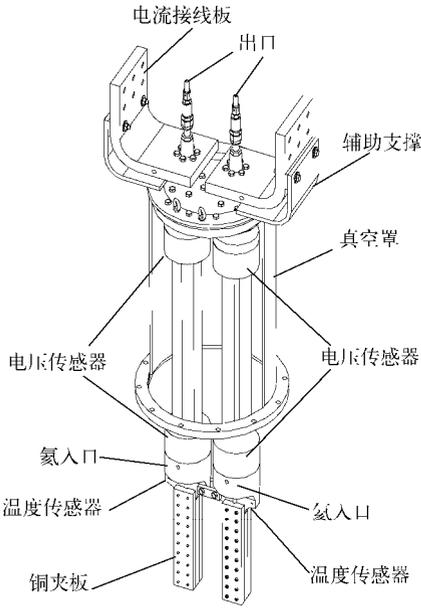


图3 SSM超导磁体引线塔结构示意图

Fig. 3 Scheme of lead tower for SSM magnet

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。

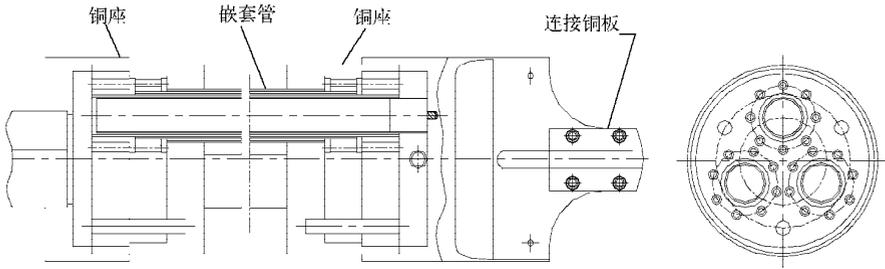


图4 SSM超导磁体4 000 A电流引线截面图

Fig. 4 Cutaway view of 4 000 A current lead for SSM magnet

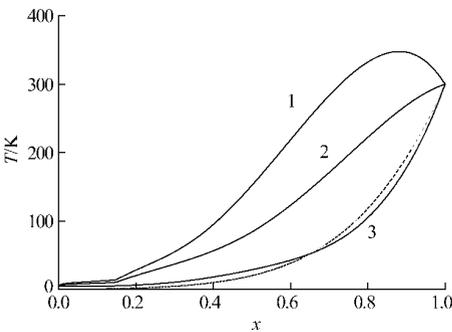


图5 不同电流时1 600 A电流引线沿无量纲长度的温度分布

Fig. 5 Steady temperature distribution along scaled length of 1 600 A lead carrying different currents
 $q_m = 8.8 \times 10^{-5}$ kg/s
 实线——Fluent6.0;虚线——理论计算
 1——2 200 A;2——2 000 A;3——1 600 A

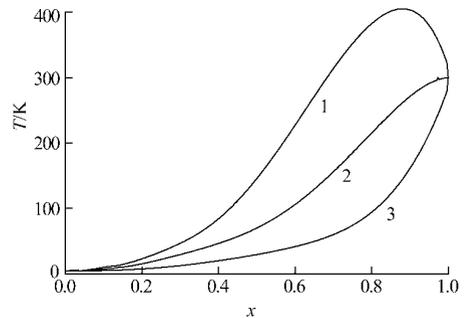


图6 不同电流时630 A电流引线沿无量纲长度的温度分布

Fig. 6 Steady temperature distribution along scaled length of 630 A lead carrying different currents
 $q_m = 3.5 \times 10^{-5}$ kg/s
 1——850 A;2——700 A;3——630 A

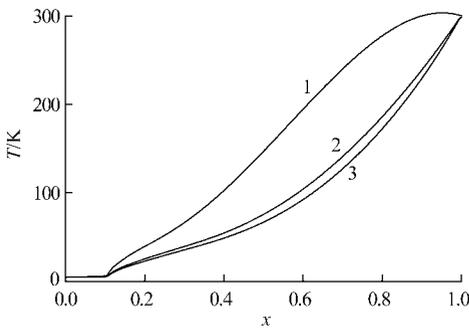


图7 不同电流时 150 A 电流引线沿无量纲长度的温度分布
Fig. 7 Steady temperature distribution along scaled length of 150 A lead carrying different currents

$$q_m = 0.8 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$$

1—220 A; 2—180 A; 3—150 A

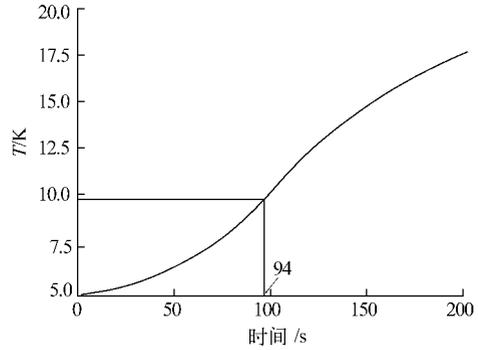


图8 冷却氦气消失时 1 600 A 电流引线低温端温度随时间的变化

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 for SCQ magnets

设计电流/A	质量流量 q_m / ($\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$)	$10^{-6} \Gamma$ / ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)	漏热 / ($\text{W} \cdot \text{kA}^{-1}$)		延迟时间 /s
			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 II [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.