

BES III束流管温度场的数值模拟及实验研究

郑莉芳¹, 王立¹, 纪全², 李勋锋³, 刘建平^{1,4}

(1. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049;
3. 中国科学院 工程热物理所, 北京 100190; 4. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072)

摘要:束流管安装在北京谱仪(BES III)子探测器漂移室的内筒,新一代北京正负电子对撞机(BEPC II)在运行时将会有更多的同步辐射和高次模辐射热负荷作用于束流管的内表面,过高的热量和过大的温度变化幅度将会影响漂移室的正常粒子的探测。本文对束流管温度场进行了有限元数值模拟和实验研究,并对漂移室内筒的内壁面温度进行了数值分析。结果表明,当束流管内壁辐射热负荷在0~750 W变化时,设定束流管的中心管冷却油和外延管冷却水的进口温度分别为291.4 K和291.6 K,可将漂移室内筒的内壁温度控制在292.8~293.9 K,满足(293±2) K的要求,保证了BES III的精确粒子探测和BEPC II的正常运行。

关键词: BES III; 束流管; 温度; 数值模拟; 实验

中图分类号: TL817.9; TK124

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2014)04-0734-06

doi: 10.7538/yzk.2014.48.04.0734

Numerical Simulation and Experimental Study of Temperature Field of BES III Beam Pipe

ZHENG Li-fang¹, WANG Li¹, JI Quan², LI Xun-feng³, LIU Jian-ping^{1,4}

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

4. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The beam pipe is installed in the inner cylinder of the drift chamber (DC) which is one of the detectors of Beijing Spectrometer III (BES III). There will be much more heat on the inner surface of the beam pipe, which is mainly from synchrotron radiation and high order mode radiation when the new generation Beijing Electron and Positron Collider (BEPC II) is operating. Continuous high temperature or large temperature fluctuation can cause the DC to detect particles abnormally. Therefore, the temperature field of the beam pipe was researched by means of the finite elements simulation and experiments, and the temperature of the inner wall of the DC inner cylinder was studied based on the numerical analysis. The result shows that the

收稿日期: 2013-01-25; **修回日期:** 2013-05-24

基金项目: 中国科学院重大项目基金资助项目(KJ95T-03); 中央高校基本科研业务费资助项目(FRF-TP-12-072A); 北京高等学校青年英才计划资助项目(YETP0365)

作者简介: 郑莉芳(1978—), 女, 河南温县人, 副教授, 博士, 机械电子工程专业

temperature of the cooling oil and cooling water for the central pipe and the extending pipe of the beam pipe should be set on 291.4 K and 291.6 K respectively when the radiation heat on the inner surface of the beam pipe is 0-750 W. On this condition, the inner surface temperature of the DC inner cylinder can be controlled in the range of 292.8-293.9 K, which satisfies the requirement of (293 ± 2) K and provides guarantee for the BES III detecting particles accurately and the BEPC II operating normally.

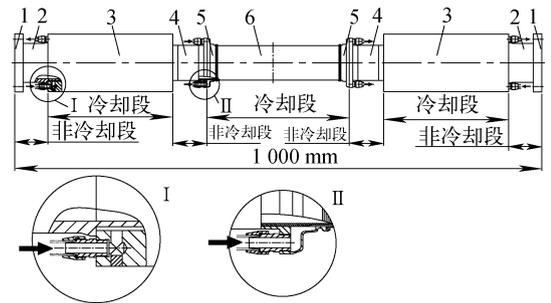
Key words: BES III; beam pipe; temperature; numerical simulation; experiment

新一代北京正负电子对撞机(BEPC II)及其探测器——北京谱仪(BES III)已建造成功^[1],目前,BEPC II在1.89 GeV束流能量下,对撞亮度达 $3.01 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,在 τ -粲物理研究领域处于国际领先水平。束流管位于BES III的中心位置,安装在BES III子探测器漂移室的内筒,两端与加速器连接,正负电子经直线加速器和储存环加速聚焦后,在束流管中碰撞并产生次级粒子,次级粒子穿出束流管,利用BES III进行粒子探测以探索新的物理现象。由于亮度大幅度提高,BEPC II运行时将会有更多的辐射热负荷作用于束流管内表面,这些热负荷主要来自同步辐射光和高次模辐射光,其热功率随磁铁的安装精度、束流控制精度和束流性质的改变而改变,其中,高次模辐射光在束流管内壁全表面均匀分布,其功率最大不超过600 W,同步辐射光在束流管内壁沿轴线方向呈2 mm宽的窄带分布,最大不超过150 W。位于束流管外部的BES III子探测器漂移室利用其内部场丝进行粒子探测,过高的热量会在漂移室内产生过高的本底,过大的温度变化幅度会使场丝产生严重老化,甚至使粒子探测变得不可能。因此,物理实验对束流管外壁温度提出严格要求,使漂移室内筒的内壁面温度控制在 (293 ± 2) K,以保证漂移室的正常工作。本文对具有冷却功能束流管的温度场进行数值模拟及实验研究,并对漂移室内筒的内壁面温度进行数值分析。

1 束流管结构

图1为BES III束流管的结构,束流管长1 000 mm、内径63 mm,根据粒子探测实验对探测区和非探测区的不同物质量要求,束流管采取分段式设计,由1个中心管和两个外延管组成,两个外延管分别位于中心管的左右

两端,结构对称。中心管由外铍管、内铍管、两个铝放大腔、两个过渡银环组成,内铍管厚0.8 mm,外铍管厚0.6 mm,二者套装形成间隙为0.8 mm的冷却腔,冷却介质一号电火花油从左侧放大腔进入,流经冷却腔,从右侧放大腔流出,实现对中心管的冷却。外延管由内铜管、外铜管及真空法兰组成,内铜管与外铜管套装在一起,左右两端密封焊接,形成一长236 mm、间隙2 mm的封闭冷却腔。内铜管外壁对称分布的两个长226 mm的筋板将冷却腔分为两个通道,在靠近中心管的一端,两个冷却通道相通形成合成腔,冷却介质去离子水从1个冷却通道进入,流向合成腔,再从另一冷却通道流出,实现对外延管的冷却^[2]。束流管为真空焊接结构,结构中存在非冷却段,包括法兰、部分内铜管、过渡银环,其余部分均为冷却段。



1——法兰;2——内铜管;3——外铜管;
4——过渡银环;5——铝放大腔;6——内铍管和外铍管

图1 BES III束流管结构

Fig. 1 Structure of beam pipe in BES III

2 束流管温度分析

2.1 束流管温度场的有限元模拟

采用ANSYS软件对束流管温度场进行有限元模拟,根据束流管的水平对称结构,建立1/2三维对称体积模型,单元类型为fluid142,

不同材料指定不同的材料特性。取高次模辐射功率和同步辐射功率的最大值分别为 600 W 和 150 W, 赋予冷却介质流量和温度不同值, 得到束流管不同的温度场。当中心管的冷却油流量 $Q_1 = 8 \text{ L/min}$ 、进口温度为 291.4 K, 外延管的冷却水总流量 $Q_2 = 8 \text{ L/min}$ 、进口温度为 291.6 K, 且均分于左右外延管时, 束流管温度分布示于图 2。

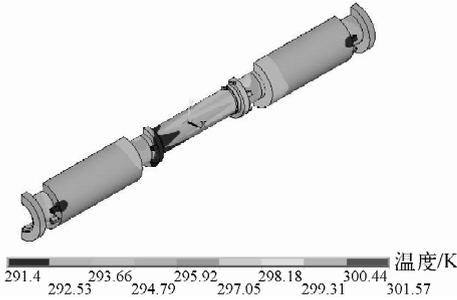


图 2 束流管温度分布云图

Fig. 2 Temperature nephogram of beam pipe

从图 2 可看出, 束流管外壁温度的最低点位于冷却段, 为 291.5~295.0 K, 铍管外壁面的最低温度为 291.5 K, 铜管外壁面的最低温度为 292.3 K; 束流管外壁温度的最高点位于非冷却段, 法兰、过渡银环和铜管局部位置外壁温度超过 295.0 K, 过渡银环外壁温度最高, 除个别点达 298.3 K 外, 绝大部分为 295.0~297.0 K。

2.2 束流管外壁温度对漂移室内筒温度的影响

在束流管外壁温度研究结果的基础上对漂移室内筒内壁面温度进行研究。将束流管冷却段与非冷却段对应的漂移室内筒视为两个个体, 假设二者间无热传递, 对其温度进行保守计算。

图 3 为束流管外壁面与漂移室内筒的热交换示意图。对于过渡银环, 其外壁面为壁面 1, 温度 $T_{w1} = 298.3 \text{ K}$, 直径 $d_1 = 69 \text{ mm}$ 。漂移室内筒的内壁面为壁面 2, 温度为 T_{w2} , 直径 $d_2 = 126 \text{ mm}$ 。壁面 1 和壁面 2 之间为空气。漂移室内筒的外壁面为壁面 3, 温度为 T_{w3} , 直径 $d_3 = 128 \text{ mm}$, 漂移室内筒外围充满体积比为 3:2 的 He 和 C_3H_8 混合气体, 工作温度 $T_f = 293 \text{ K}$ ^[3-4]。

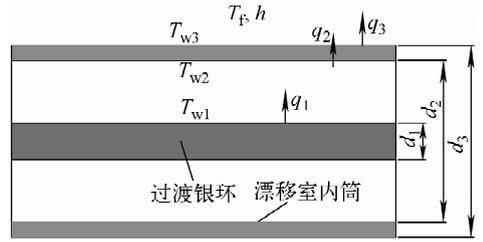


图 3 束流管外壁面与漂移室内筒的热交换示意图
Fig. 3 Schematic diagram of heat exchange between out wall of beam pipe and DC inner cylinder

过渡银环与漂移室内筒的传热过程包括 3 个环节。

1) 壁面 1 与壁面 2 之间的热传递。壁面 1 与壁面 2 之间空间狭小, 其热传递为环状夹层的自然对流换热, 单位长度的换热量为 $q_1 \text{ (W/m)}$ 。

$$q_1 = \frac{2\pi\lambda_e(T_{w1} - T_{w2})}{\ln(d_2/d_1)} = \frac{2\pi\lambda_1 \cdot 0.18(Gr \cdot Pr)^{1/4}(T_{w1} - T_{w2})}{\ln(d_2/d_1)} = \frac{2\pi\lambda_1 \cdot 0.18(g\alpha_v\delta^3 \Delta T/\nu^2 Pr)^{1/4}(T_{w1} - T_{w2})}{\ln(d_2/d_1)} \quad (1)$$

式中: λ_1 为空气的流体热导率, 取 $0.0259 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$; 普朗特数 $Pr = 0.703$; ν 为运动黏度系数, 取 $15.06 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; 体胀系数 $\alpha_v = 1/297 \text{ K}$; 因 T_{w2} 介于 T_{w1} 和 T_f 之间, 保守取 $T_{w2} = T_f = 293 \text{ K}$, 则 $\Delta T = T_{w1} - T_{w2} = 298.3 \text{ K} - 293 \text{ K} = 5.3 \text{ K}$; Gr 为格拉晓夫数, $Gr = \frac{g\alpha_v\delta^3 \Delta T}{\nu^2} = 1.78 \times 10^4 \in (10^3, 10^8)$; λ_e 为当量热导率, $\lambda_e = \lambda_1 \cdot 0.18 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/4} = 0.04931 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。则式(1)可写为:

$$q_1 = \frac{2\pi \times 0.04931 \times (298.3 - T_{w2})}{\ln \frac{0.126}{0.069}} = 0.5145(298.3 - T_{w2}) \quad (2)$$

2) 壁面 2 到壁面 3 的热传递。漂移室内筒为圆柱筒, 壁面 2 到壁面 3 的热传递为圆筒壁导热, 单位长度的换热量为 $q_2 \text{ (W/m)}$ 。

$$q_2 = \frac{2\pi\lambda_2(T_{w2} - T_{w3})}{\ln(d_3/2)} \quad (3)$$

式中, 漂移室圆筒材料碳纤维环氧树脂复合材料的热导率 λ_2 为 $11.4 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 则式(3)可写为:

$$q_2 = 4\ 545.998\ 3(T_{w2} - T_{w3}) \quad (4)$$

3) 壁面 3 与混合气体的热传递。壁面 3 与混合气体的热传递为大空间自然对流换热方式, 单位长度的换热量为 q_3 (W/m)。

$$q_3 = \pi d_3 h(T_{w3} - T_f) \quad (5)$$

式中, h 为壁面 3 的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。漂移室内大空间自然对流属于层流流动, $Nu=12.9$, 根据 He 和 C_3H_8 的热物性以及混合气体的物性计算公式^[5]可得到, 体积比为 3:2 的 He、 C_3H_8 混合气体热导率 $\lambda_3=0.064\ W/(m \cdot K)$, 则 $h = Nu \frac{\lambda_3}{d_3} \approx 6.5\ W/(m^2 \cdot K)$, 则 q_3 可写为:

$$q_3 = 2.613\ 8(T_{w3} - 293) \quad (6)$$

热传递稳定时, 通过串联着的 3 个传热环节的热流量是相同的, 即 $q_1 = q_2 = q_3$, 联立式 (2)、(4)、(6) 可求得 $T_{w2} = 293.872\ 1\ K \approx 293.9\ K$, 即过渡银环对应的漂移室内筒内壁温度为 293.9 K。对于温度最低的铍管和铜管, 同理可得到其对应的漂移室内筒内壁温度分别为 292.8 K 和 293.0 K, 即当束流管内壁辐射热负荷为 750 W 时, 漂移室内筒的内壁面温度为 292.8~293.9 K。当束流管内壁辐射热负荷为 0 W 时, 同样取中心管冷却油和外延管冷却水的进口温度分别为 291.4 K 和 291.6 K, 可得到对应漂移室内筒的内壁温度为 292.8~293.0 K。总之, 漂移室内筒的内壁温度可控制在 292.8~293.9 K, 满足 $(293 \pm 2)\ K$ 的要求。

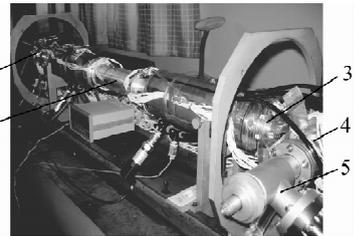
3 束流管温度场实验研究

为保证 BEPC II 和 BES III 束流管高度安全可靠运行, 需加工束流管模型件进行实验研

究, 为降低实验成本, 模型件中铍管材料由防锈铝代替, 40 mm 过渡银环材料由 35 mm 铝环和 5 mm 银环材料代替。依托束流管模型件, 模拟束流管实际工作状态, 对束流管表面温度进行测量。

3.1 实验台的搭建

BEPC II 运行中束流管内腔为真空, 无自然对流传热, 因此, 实验过程中需使束流管内部保持真空。图 4 为束流管温度测量实验台, 束流管通过两套直通密封端头、一套四通密封端头、两个真空玻璃视窗来实现加热源的的安装固定和束流管内腔的密封, 真空泵对束流管内腔抽真空, 并通过真空计监测其真空度。建造束流管冷却系统^[6], 冷却介质一号电火花油和去离子水分别流过中心管和外延管, 实现对束流管的冷却。



1——直通密封端头; 2——束流管; 3——直通密封端头; 4——四通密封端头; 5——真空泵连接件

图 4 束流管温度测量实验台

Fig. 4 Measurement experimental table of beam pipe temperature

加热管(带)位置和温度测点分布如图 5 所示, 采用石英加热管模拟高次模辐射热源, 加热管两端固支, 位于束流管中心轴线, 有效加热长度与束流管长度相同, 为 1 000 mm, 电阻为

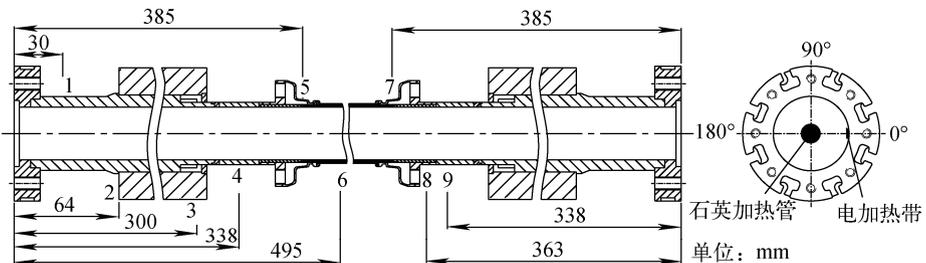


图 5 加热管(带)位置和温度测点分布

Fig. 5 Distribution of heating elements and measuring temperature elements

73.5 Ω。采用电加热带模拟同步辐射热源,电加热带宽 2 mm、厚 0.2 mm、长 1 000 mm,平行束流管轴向贴在束流管内壁,其电阻为 17.96 Ω。采用 DH1718E 型双路跟踪稳压电源调节加热管和加热带的加热功率,其电压与电流测量误差均为 2.5%。

为保证束流管内腔的高真空度,加热管和加热带的电源线从两端引线孔引出后,用 914 密封胶注满引线孔(图 6),且电源线平行穿出,不能彼此交叉,以免产生间隙,为避免电源线外覆的绝缘塑料因收缩而产生间隙,将电源线中间段的绝缘塑料外皮去除,露出金属线芯使之与密封胶充分接触,实现束流管内腔的完全密封。

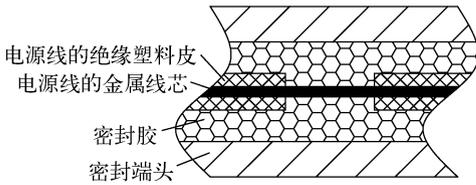


图 6 电源线穿出引线孔示意图

Fig. 6 Schematic diagram of power supply line passing through hole

3.2 测量方法及误差分析

束流管外壁温度测点主要分布于非冷却段,轴向共有 9 个截面位置分布有测点,每个截面的测点只分布在 0°、90°、180° 3 个位置,分别对应同步辐射位置、同步辐射旋转 90° 位置和同步辐射对面位置。

采用铂电阻测温元件对束流管外壁温度进行测量,测温误差 $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ 为 $0.15 + 0.002|T|$,尺寸为 $1\text{ mm} \times 1.5\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$,取其轴向测温定位误差为 $\pm 5\text{ mm}$ 。采用 XSL 系列智能巡回检测报警仪进行温度显示,并与计算机通讯,其基本相对误差小于 0.2%。

温度测量系统各环节对测量结果带来的误差可分为铂电阻温度片和温度巡检仪分别引起的相对误差 $\delta_{\text{片}}$ 和 $\delta_{\text{仪}}$ 。其中铂电阻温度片最大量程为 50°C ,相对误差 $\delta_{\text{片}} = \frac{0.15 + 0.002|T|}{T} = \frac{0.15 + 0.002 \times 50}{50} \times 100\% = 0.5\%$,温度巡检仪最大相对误差 $\delta_{\text{仪1}} = 0.2\%$,DH1718E 型双

路跟踪稳压电源的电压与电流测量误差均为 2.5%,则其加热功率的最大误差 $\delta_{\text{仪2}} = \frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U} = 2.5\% + 2.5\% = 5\%$ 。

则温度测量的最大相对误差为:

$$\delta = \sqrt{\delta_{\text{片}}^2 + \delta_{\text{仪1}}^2 + \delta_{\text{仪2}}^2} \times 100\% = \sqrt{0.005^2 + 0.002^2 + 0.05^2} \times 100\% = 5.03\%$$

4 实验结果与有限元计算结果的比较

实验中,设定冷却油和冷却水的流量均为 8 L/min,进口温度分别为 291.4 K 和 291.6 K,加热管功率 $Q_{\text{H}} = 600\text{ W}$,加热带功率 $Q_{\text{s}} = 150\text{ W}$,对束流管模型件外壁温度进行测量。在与实验相同的条件下对束流管模型件的温度场进行有限元模拟计算,将实验测量值与理论计算值进行比较,如图 7 所示。

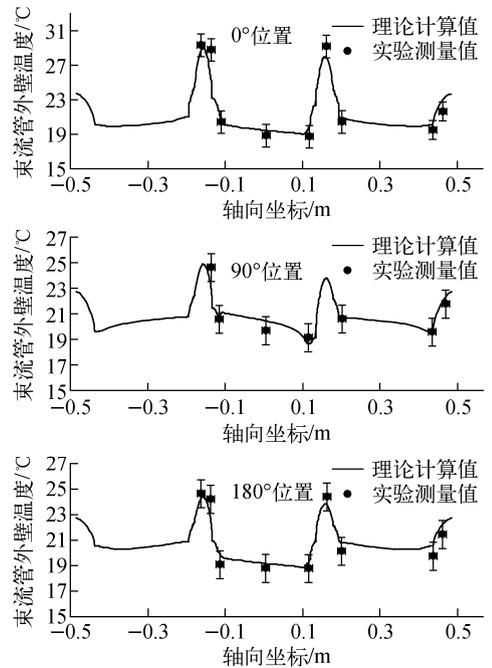


图 7 束流管外壁温度实验测量值与理论计算值的比较

Fig. 7 Comparison of calculation and experiment temperatures

束流管外壁温度的实验测量值与理论计算值相比,仅有 1 个测量值的绝对误差为 -1.71°C ,相对误差为 -5.94% ,其余误差均在 $\pm 5.03\%$ 内,平均误差为 2.48%,均方根为 2.76%,实验测

量值与理论计算值吻合较好,说明了束流管有限元模型建立和实验测量结果的可靠性,也进一步验证了对束流管温度场和漂移室内筒内壁温度分析的正确性。

5 结论

针对 BEPC II 运行时有更多的辐射热负荷作用于束流管内表面,从数值模拟和实验两个方面对 BES III 束流管和漂移室内筒内壁温度进行研究,当束流管内壁辐射热负荷在 0~750 W 变化时,设定中心铍管冷却油和外延铜管冷却水的进口温度分别为 291.4 K 和 291.6 K,可将漂移室内筒的内壁温度控制在 292.8~293.9 K。目前 BES III 束流管正在 BEPC II 中安全运行,为 BEPC II 的正常运行和 BES III 的精确粒子探测提供保障。

参考文献:

- [1] BES III Collaboration. Design and construction of the BES III detector[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2010, 614(3): 345-399.
- [2] ZHENG Lifang, WANG Li, WU Ping, et al. Structure design of the Beijing Spectrometer III beam pipe[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(3): 1-6.
- [3] QIN Zhonghua, CHEN Yuanbo, SHENG Huayi, et al. Beam test of a full-length prototype of the BES III drift chamber with the readout electronics[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007, 571(3): 612-621.
- [4] LIU Jianbei, QIN Zhonghua, WU Linghui, et al. A beam test of a prototype of the BES III drift chamber in magnetic field[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2006, 557(2): 436-444.
- [5] 沈维道,郑佩芝,蒋淡安,等. 工程热力学[M]. 北京:高等教育出版社,1999:90-102.
- [6] 郑莉芳,纪全,李勋锋,等. 基于 PLC 的 BES III 束流管冷却系统自动监控系统的设计[J]. 核电子学与探测技术,2010,30(1):124-129.

ZHENG Lifang, JI Quan, LI Xunfeng, et al. Design of auto-monitoring and control system of cooling system for BES III beam pipe based on PLC[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, 30(1): 124-129(in Chinese).