



核科学与工程

无氧铜表面处理在束流准直器中的应用*

余洁冰^{1,2,3}, 谭彪^{1,2}, 康玲^{1,2}, 刘磊^{1,2}, 王鹏程^{1,2}, 翁旭东⁴,
陈佳鑫^{1,2}, 聂小军^{1,2}, 王广源^{1,2}, 王明^{1,2}, 宁常军^{1,2},
刘仁洪^{1,2}, 张俊嵩^{1,2}, 于永积^{1,2}

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 2. 散裂中子源科学中心, 广东 东莞 523803; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 合肥科电物理设备制造有限公司, 合肥 230031)

摘 要: 束流准直器作为加速器的关键部件, 用于吸收不在预定轨道的束晕粒子。因良好的电导率和良好的准直效率, 铜被广泛应用于准直器中作为挡块材料。通常, 挡块位于超高真空环境中, 承受高功率束流载荷冲击, 其不同表面处理工艺直接影响传热性能及放气率。为评估无氧铜表面处理工艺对相关性能的影响, 分别对其进行表面化学腐蚀发黑处理、高温氧化处理以及仅机械加工处理, 结果表明: 无氧铜表面发黑处理后, 其热辐射系数明显增加, 同时也伴随着放气率的明显增加; 而通过高温氧化处理后的铜块, 其表面热辐射系数与仅机械加工后的铜块差异不大, 放气率有一定程度的增加。以散裂中子源二期项目中的动量准直器为研究对象, 在一定的束流载荷作用下, 挡块选用发黑无氧铜, 可将其最高温度控制在 125 °C 以下, 同时增加两台离子泵可使该准直器所在区域真空度满足运行要求。

关键词: 束流准直器; 无氧铜; 表面处理; 热辐射系数; 表面放气率

中图分类号: TL503.7; O328

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.230129

Application of oxygen-free copper surface treatment in beam collimator

Yu Jiebing^{1,2,3}, Tan Biao^{1,2}, Kang Ling^{1,2}, Liu Lei^{1,2}, Wang Pengcheng^{1,2}, Weng Xudong⁴,
Chen Jiaxin^{1,2}, Nie Xiaojun^{1,2}, Wang Guangyuan^{1,2}, Wang Ming^{1,2}, Ning Changjun^{1,2},
Liu Renhong^{1,2}, Zhang Junsong^{1,2}, Yu Yongji^{1,2}

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

2. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Hefei Keye Electrical Physical Equipment Manufacturing Co., Ltd, Hefei 230031, China)

Abstract: As a key component of accelerators, beam collimators are used to absorb the beam halo particles that are not in the predetermined orbit. Due to its good conductivity and collimation efficiency, copper is widely used in beam collimators as the absorber material. In general, absorbers are located in ultra-high vacuum environment, and also loaded with high beam power, different surface treatment processes of the absorber will directly affect its heat transfer performance and vacuum performance. To evaluate the effect of the surface treatment of oxygen-free copper, the surface chemical corrosion blackening treatment, high temperature oxidation treatment and mechanical processing treatment are carried out respectively. The test results show that the thermal radiation coefficient and outgassing rate of copper blocks are increased obviously with surface blackening, however, the surface heat radiation coefficient of the copper blocks after high temperature oxidation is close to that of the machined copper block, while the outgassing rate increases a little. Taking the CSNS-II momentum collimator as the research object, with the beam load, blackening oxygen-free copper is used as the absorber, the maximum temperature can be controlled below 125 °C, and the pressure of the collimator can meet the operation requirements by adding two ion pumps.

Key words: beam collimator, oxygen-free copper, surface treatment, thermal radiation coefficient, outgassing rate

* 收稿日期: 2023-05-12; 修订日期: 2023-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(11975253, 12105296); 广东省自然科学基金项目(2018A030313959)

联系方式: 余洁冰, yujb@ihep.ac.cn。

通信作者: 谭彪, tanbiao@ihep.ac.cn。

束流准直器作为加速器的关键部件,用于散射或吸收不在预定轨道的束晕粒子,从而使其他区域的束流损失控制在 1 W/m 以内,进而满足加速器日常维护的需求^[1-7]。准直器材料的选择需考虑多种因素:(1)良好的热稳定性,即在高功率束流载荷的冲击下,能稳定服役较长时间;(2)良好的准直效率,即散射或吸收束晕粒子的能力较强;(3)良好的电导率,避免因阻抗问题引起束流不稳定^[8]。

相对于钨等重金属来说,铜的中子产额相对低一些,但其具有良好的电导率、热导率和准直效率,因而被广泛应用于各加速器中作为准直器挡块材料^[9-14]。由于挡块位于超高真空环境中,其高功率束流的冲击作用下,热量传递主要通过热传导和热辐射实现。在以往的设计中,准直器主要通过对传热结构进行优化设计^[5-7],从而降低挡块的温升,而关于材料的热辐射性能提升应用研究较少。辐射率是物体本身的热物性之一,它的数值变化仅与物体的种类、性质和表面状态有关。文献^[15]指出,纯金属表面氧化后,它的辐射率将大大增加,极端氧化的表面和很粗糙的表面辐射性能近于绝对黑体。本文分别对表面发黑处理、表面氧化处理及仅机械加工这3种无氧铜块进行了研究,并基于测试结果对散裂中子源二期工程(CSNS-II)中的动量准直器进行了热分析和真空度模拟计算。

1 无氧铜样品的制备

制作无氧铜发黑样品、氧化样品及机械加工样品,样品尺寸为 50 mm (长) $\times 50 \text{ mm}$ (宽) $\times 20 \text{ mm}$ (高),所有样品的制备均包含以下几个步骤:(1)无氧铜机械加工;(2)表面抛光处理至表面粗糙度 R_a 可达 1.6 以下;(3)酸洗,去除表面氧化层;(4)酒精脱水。基于以上四个步骤,无氧铜发黑样品和氧化样品的制备还需做进一步处理。

通常无氧铜的发黑方法包含化学腐蚀法、热喷涂法和直接喷涂法等^[16-18],因化学溶液腐蚀法得到的表面平整度较好,且性质稳定,因此本实验中发黑样品选用化学溶液腐蚀法进行制备。在前四个步骤基础上,采用硫化钾与水的混合溶液作为氧化剂,处理温度为 $50 \text{ }^\circ\text{C}$,时间为 3 min 。

无氧铜氧化样品的制备采用加热氧化法,通过加热板对样品进行加工,加热温度设定为 $350 \text{ }^\circ\text{C}$,加热速率为 $5 \text{ }^\circ\text{C/min}$,加热环境为大气状态,四周做保温处理,加热完成后保温 1 h 。制作的3种样品如图1所示。

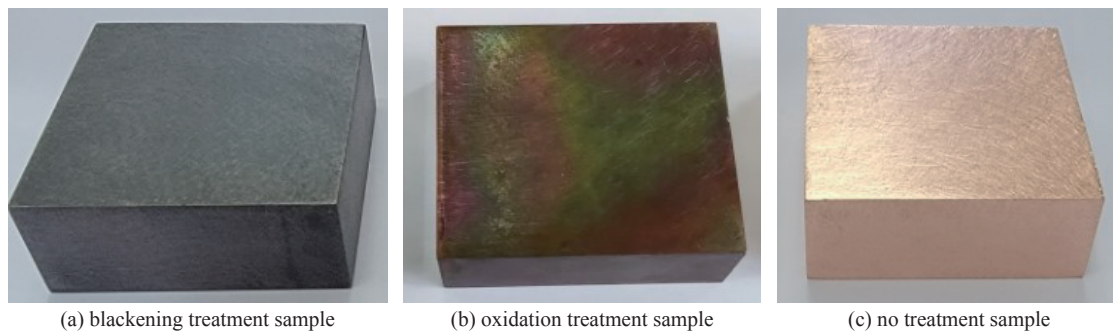


Fig. 1 Oxygen-free copper samples

图 1 制备的 3 种无氧铜样品

2 无氧铜样品热辐射系数及表面放气率的测定

2.1 热辐射系数测定

基于 GB/T 7287-2008《红外辐射加热器试验方法》,开展了3种无氧铜样品真空状态下的热辐射系数测试。为避免准直器因挡块温度过高而导致热应力过大,在准直器结构设计中,通常采用水冷或者风冷的方式将挡块工作温度控制在一定范围内,从而使整体结构的应力满足使用要求。目前,CSNS中使用的准直器温度均不超过 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[19],选取 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 这3个温度点,分别对3种样品的热辐射系数进行测试,测试结果如图2所示,其中发黑无氧铜样品的热辐射系数明显大于氧化处理样品和机械加工样品的热辐射系数,且其随温度增加,热辐射系数随之增加,并处于相对稳定的状态,而氧化处理无氧铜样品和机械加工无氧铜样品

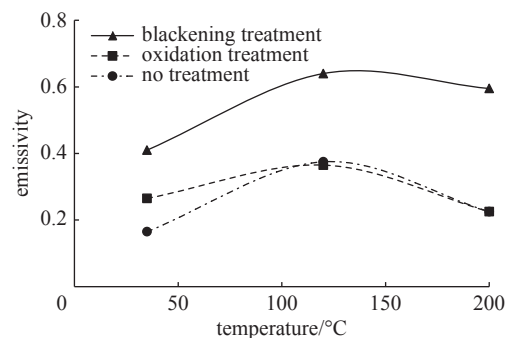


Fig. 2 Emissivity of three oxygen-free copper samples at different temperatures

图 2 3 种无氧铜样品在不同温度下的热辐射系数

的热辐射系数均出现随温度先增加后急剧减小的趋势。

2.2 放气率测定

材料的放气率直接影响加速器束流的寿命, 根据测试原理不同, 材料放气率的测试有定容法、收集法、称重法和小孔流导法等^[20-24]。相较于其他测试方法, 小孔流导法精度更高, 因此, 无氧铜样品的表面放气率测试选用小孔流导法。将无氧铜样品置于真空容器中, 用已知流导的小孔抽气, 测量小孔上下游的动态平衡压力, 从而计算出材料的放气率, 测试装置如图 3 所示。图 4 为放气率测试结果, 从图中可以看出: 对无氧铜表面氧化和发黑处理后, 其表面放气率均明显增加, 其中发黑处理后的无氧铜样品比仅机械加工的无氧铜样品放气率高 1 个量级。

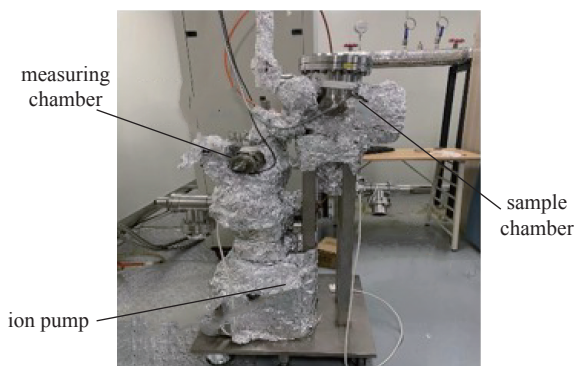


Fig. 3 Test of the outgassing rate of blackened oxygen-free copper sample

图 3 发黑无氧铜样品表面放气率测试

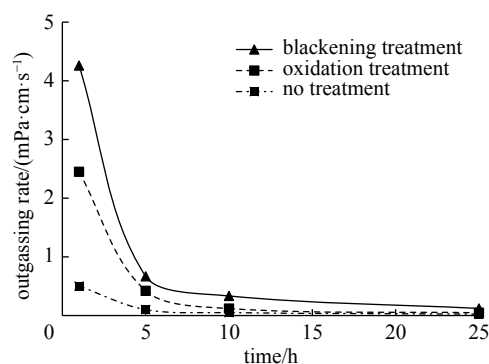


Fig. 4 Outgassing rate of the three oxygen-free copper samples

图 4 三种无氧铜样品表面放气率测试结果

基于不同处理的无氧铜样品热辐射系数及表面放气率测试, 发黑无氧铜对挡块热传导有积极作用, 若使用发黑无氧铜, 需对挡块热传递和准直器及其周围设备整体的真空度进行综合评估。

3 发黑无氧铜在 CSNS-II 动量准直器中应用的可行性分析

3.1 挡块热分析

随着 CSNS-II 束流功率的提升, 为减小快循环同步加速器(RCS)4个弧区的束流损失, 需在注入区下游的弧区增加 1 个动量准直器, 从而将束损控制在动量准直器及其下游附近区域。动量准直器包含多个挡块, 材料均为无氧铜, 且在水平方向能独立运动。

为评估无氧铜发黑处理对挡块传热性能的影响, 使用有限元分析软件, 对功率沉积最大的挡块进行热分析。单个挡块沉积的最大功率为 225 W, 尺寸为 600 mm(长)×200 mm(宽)×160 mm(高), 因挡块位于真空盒内部, 热量的传递仅通过挡块表面的热辐射实现。其中未作处理的无氧铜表面热辐射系数为 0.23, 发黑处理的无氧铜表面热辐射系数为 0.64。热分析结果如图 5 所示, 图 5(a)为无氧铜未经处理的温度分布云图, 图 5(b)为无氧铜表面发黑处理后的温度分布云图, 对比发现, 发黑处理对动量准直器挡块的热传递有明显效果。

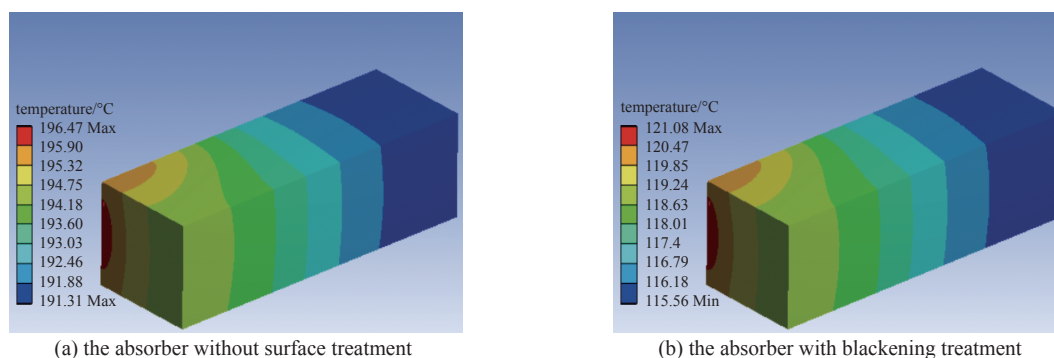


Fig. 5 Temperature distribution of the collimator absorber with different surface treatment

图 5 不同表面处理下的动量准直器挡块温度分布云图

相较于 CSNS 横向束流准直器^[5-7], 动量准直器挡块的外形尺寸大, 最大质量高达 171 kg。因挡块需在水平方向运动, 为保证其运动精度, 支撑机构位于挡块正下方。若采用水冷方案, 将不可避免地存在真空内管路焊接的情况, 一旦水路泄漏, 直接影响真空系统甚至加速器的整体运行。由于挡块工作于高辐射环境, 维护困难且成本高,

稳定可靠的结构设计至关重要,因此,仅对挡块表面发黑处理是一种简单有效且可行的方案。

3.2 准直器所在区段真空度模拟计算

动量准直器作为一台新增的设备,按照计划将安装在注入区下游的弧区,简称 R_1 区段,该区段总长约 32.15 m,各设备以准直器预留位置对称分布,现装有 600 L 和 1000 L 离子泵各两台,冷阴极规 3 个,具体位置如图 6 所示。获取加速器停机、两侧阀门关闭情况下 CCG03 和 CCG04 的读数,使用三维软件对弧区设备的真空区域进行简化,选取 R_1 区段的一半模型,动量准直器中挡块除面向束流的平面外,其余平面均做发黑处理,采用 molflow2.8.5 软件对该区段真空度进行模拟,将整个区段平均分成 100 等分。图 7 为动量准直器不增加离子泵和增加两台 600 L 的离子泵时真空度结果。根据 CSNS 真空技术要求,常温下弧区各处真空度不得超过 5.0×10^{-6} Pa,动量准直器挡块发黑处理后,需增加 2 台 600 L 的离子泵才能保证该区段真空度满足要求。

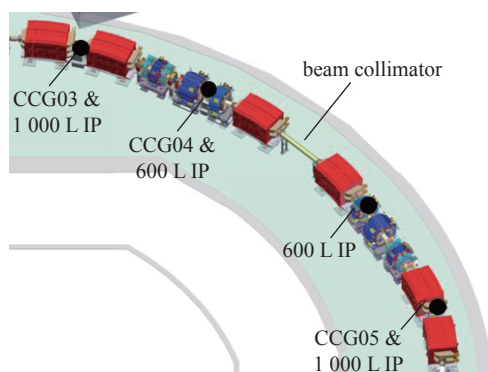


Fig. 6 Distribution of the ion pumps and cold cathode gauges in R_1 section

图 6 R_1 区段离子泵及冷阴极规分布

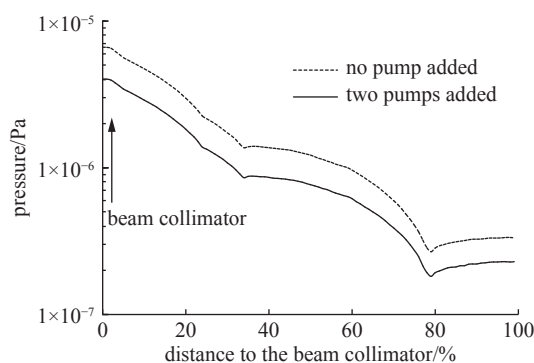


Fig. 7 Distribution of pressure in half of the R_1 section with different conditions

图 7 不同情况下 1/2 的 R_1 区段真空度分布

基于动量准直器挡块热分析及其所在区段真空度模拟结果,可以对挡块局部区域进行发黑处理,使挡块在高功率束流载荷作用下的温度控制在 $125\text{ }^\circ\text{C}$ 以下,不需要额外增加风冷及水冷机构,同时还需在该设备中增加 2 台离子泵才能使其真空度满足加速器运行要求。

4 结论

本文首次针对表面处理后的无氧铜样品开展热辐射系数和表面放气率测试,结果表明,不同表面处理工艺对这两个系数的影响较大,其中表面发黑处理产生的影响最为显著,相较于未经处理的无氧铜样品,表面发黑处理后的样品热辐射系数达 2 倍以上,而表面放气率的提升也达一个数量级。以散裂中子源二期工程中的动量准直器为研究对象,从热分析和真空度两个方面,评估了动量准直器中挡块材料选用发黑无氧铜的可行性,开拓了无氧铜表面处理在准直器中的应用。

参考文献:

- [1] Yamamoto K, Kinsho M. Development of the collimator system for the 3 GeV rapid cycling synchrotron[C]//Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference. 2005: 1365-1367.
- [2] Wei Tao, Qin Qing. Design of the two-stage collimation system for CSNS/RCS[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2006, 566(2): 212-217.
- [3] 魏涛. 中国散裂中子源快循环同步加速器束损研究[D]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2008: 53-55. (Wei Tao. Beam loss studies on the rapid cycling synchrotron of China Spallation Neutron Source[D]. Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008: 53-55)
- [4] Wang Na, Wang Sheng, Huang Nan, et al. The design of beam collimation system for CSNS/RCS[C]//Proceedings of HB2010. 2010: 572-575.
- [5] 余洁冰, 吴青彪, 吴焯, 等. CSNS/RCS 次级准直器吸收体的冷却设计[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 085105. (Yu Jiebing, Wu Qingbiao, Wu Xuan, et al. Cooling design of secondary collimator absorbers at CSNS/RCS[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 085105)
- [6] 邹易清, 康玲, 屈化民, 等. 中国散裂中子源快循环同步加速器主准直器的设计与研究[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(3): 741-745. (Zou Yiqing, Kang Ling, Qu Huamin, et al. Chromatic correction for CSNS/RCS and nonlinear effects of chromaticity sextupoles[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(3): 741-745)
- [7] Zou Yiqing, Wang Na, Kang Ling, et al. Thermal analysis and cooling structure design of the primary collimator in CSNS/RCS[J]. Chinese Physics C, 2013, 37: 057004.
- [8] 杨建权. 超级质子对撞机SPPC束流准直方法的研究[D]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2019: 81-83. (Yang Jianquan. Collimation method studies for

- the SPPC[D]. Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019: 81-83)
- [9] Smith H V, Adams D J, Jones B, et al. Activation models of the ISIS collectors[C]//Proceedings of 5th International Particle Accelerator Conference. 2014: 893-895.
- [10] Yamamoto K. The beam collimator system of J-PARC rapid cycling synchrotron[C]//Proceedings of HB2008. 2008: 1-55.
- [11] Yamamoto K, Okazaki M, Hirooka Y, et al. Present status of beam collimation system of J-PARC RCS[C]//Proceedings of EPAC 2006. 2006: 3200-3202.
- [12] Ishibashi T, Terui S, Suetsugu Y, et al. Movable collimator system for SuperKEKB[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2020, 23: 053501.
- [13] Bertarelli A, Dallochio A, Gentini L, et al. Mechanical engineering and design of the LHC Phase II collimators[C]//Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference. 2010: 1683-1685.
- [14] Boccard C, Dallochio A, Bertarelli A, et al. Embedded collimator beam position monitors[C]//Proceedings of the 10th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators. 2011: 80-82.
- [15] 葛绍岩. 金属及其他物质的热辐射性质表[M]. 北京: 科学出版社, 1958. (Ge Shaoyan. Thermal radiation properties of metals and other substances[M]. Beijing: Science Press, 1958)
- [16] 许令顺, 李勇, 徐中堂, 等. 几种不同铜表面发黑技术的对比[J]. 中国表面工程, 2013, 26(6): 75-79. (Xu Lingshun, Li Yong, Xu Zhongtang, et al. Comparison of several different blacken technologies of copper surface[J]. *China Surface Engineering*, 2013, 26(6): 75-79)
- [17] 张忠诚, 张红兵. 黄铜表面的发黑处理研究[J]. 中国表面工程, 2003, 16(1): 41-42,48. (Zhang Zhongcheng, Zhang Hongbing. Study on surface blackening treatment of brass[J]. *China Surface Engineering*, 2003, 16(1): 41-42,48)
- [18] 刘彬云, 薛怀玉, 王群, 等. 环保型非甲醛化学镀铜发黑问题初探[J]. 印制电路信息, 2007(3): 48-50. (Liu Binyun, Xue Huaiyu, Wang Qun, et al. Environmentally friendly non-formaldehyde PTH darkness preliminary investigation[J]. *Printed Circuit Information*, 2007(3): 48-50)
- [19] Yu Jiebing, Xu Shouyan, Wu Qingbiao, et al. Operation status of CSNS/RCS transverse collimation system[C]//Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference. 2021: 1862-1864.
- [20] 关玉慧, 宋洪, 董海义, 等. 常见放气率测试方法的量化比较[J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(6): 524-530. (Guan Yuhui, Song Hong, Dong Haiyi, et al. Measurement of low outgassing-rate in self-developed pumping-path switching algorithm: a methodological study[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2020, 40(6): 524-530)
- [21] 张涤新, 曾祥坡, 冯焱, 等. 材料放气率测量方法评述[J]. 真空, 2010, 47(6): 1-5. (Zhang Dixin, Zeng Xiangpo, Feng Yan, et al. Review of measuring methods of outgassing rate[J]. *Vacuum*, 2010, 47(6): 1-5)
- [22] 郭迪舟, 张军辉, 蒙峻, 等. 基于双通道方法对不锈钢高温出气性能的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2011, 31(3): 368-371. (Guo Dizhou, Zhang Junhui, Meng Jun, et al. Evaluation of high temperature outgassing rates of stainless steel in method of switching between two pumping paths[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2011, 31(3): 368-371)
- [23] 冯焱, 曾祥坡, 张涤新, 等. 小孔流导法材料放气率测量装置的设计[J]. 宇航计测技术, 2010, 30(3): 66-69. (Feng Yan, Zeng Xiangpo, Zhang Dixin, et al. Design of measurement apparatus for material outgassing rates by orifice conductance method[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2010, 30(3): 66-69)
- [24] 曾祥坡, 张涤新, 冯焱, 等. 小孔流导法测量材料放气率研究[J]. 真空, 2010, 47(3): 55-58. (Zeng Xiangpo, Zhang Dixin, Feng Yan, et al. Study on measuring outgassing rate of materials via orifice throughput method[J]. *Vacuum*, 2010, 47(3): 55-58)