

医用重离子加速器薄壁真空室研制

罗成^{1,2,3,4}, 杨伟顺^{2,3,4}, 谢文君^{2,4}, 李长春^{2,3}, 柴振^{2,3}, 朱小荣²,
刘建龙², 焦纪强², 万亚鹏², 蔺晓建², 马向利², 张喜平², 蒙峻^{2,3,4,*}, 陈叔平¹

(1. 兰州理工大学 石油化工学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 中国科学院 近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 惠州离子科学研究中心, 广东 惠州 516003)

摘要:中国科学院近代物理研究所研制的医用重离子加速器装置是我国第1台拥有自主知识产权的医用重离子加速器,其高频脉冲二极磁铁使用 RAMPING 工作模式且磁场上升速率为 1.6 T/s,所以安装在高频脉冲磁铁内的真空室采用一种薄壁加筋结构不锈钢真空室以减少涡流对离子束稳定性的影响。然而由于薄壁加筋不锈钢真空室占用磁铁气隙尺寸偏大,不仅造成了磁铁造价成本偏高,更是提高了运维成本。基于以上原因,本文提出陶瓷内衬薄壁(0.3 mm)真空室,并研制了原理样机。测试结果表明:样机真空度进入了 10^{-10} Pa 量级范围,并可有效减小磁铁气隙,是未来加速器薄壁真空室的发展方向。

关键词:医用重离子加速器装置;薄壁真空室;薄壁加筋;陶瓷内衬

中图分类号:TL56

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2020)11-2245-07

doi:10.7538/yzk.2019.youxian.0798

Development of Thin-wall Vacuum Chamber for Heavy Ion Medical Accelerator

LUO Cheng^{1,2,3,4}, YANG Weishun^{2,3,4}, XIE Wenjun^{2,4}, LI Changchun^{2,3}, CHAI Zhen^{2,3},
ZHU Xiaorong², LIU Jianlong², JIAO Jiqiang², WAN Yapeng², LIN Xiaojian²,
MA Xiangli², ZHANG Xiping², MENG Jun^{2,3,4,*}, CHEN Shuping¹

(1. School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

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

4. Huizhou Research Center of Ion Sciences, Huizhou 516003, China)

Abstract: Heavy Ion Medical Machine (HIMM), developed by the Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, is the first medical heavy ion accelerator with independent intellectual property rights in China. Because the RAMPING mode was used for high frequency pulse dipole magnets of HIMM and the rising rate of magnetic field is 1.6 T/s, the vacuum chamber installed in the high frequency pulsed magnet is a

收稿日期:2019-10-29;修回日期:2019-12-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11675235)

作者简介:罗成(1983—),男,湖南岳阳人,高级工程师,博士研究生,从事加速器超高/极高真空获得技术研究

*通信作者:蒙峻, E-mail: mengjun@impcas.ac.cn

网络出版时间:2020-03-23;网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20200320.1321.004.html>

thin-wall stainless vacuum chamber with reinforcing ribs to reduce the influence of eddy current on the ion beam stability. However, the gap size of magnet occupied by thin-wall stainless vacuum chamber with reinforcing ribs is too large, and it not only causes the high cost of magnets, but also greatly improves the maintenance cost. Based on these reasons, a new thin-wall vacuum chamber (0.3 mm) with ceramic lining was put forward and the prototype was designed and manufactured. The test results show that the obtained pressure of the prototype is in the order magnitude of 10^{-10} Pa, and the magnet gap can be effectively reduced. And it is the development direction of thin-wall vacuum chamber of accelerator in the future.

Key words: heavy ion medical machine; thin-wall vacuum chamber; thin wall with reinforcing rib; ceramic lining

目前质子或重离子治癌已成为全球放射治疗领域中研究的前沿和热点。科研成果和临床试验表明:重离子束具有独特的深度剂量分布(Bragg 峰)和高相对生物学效应,与常规放疗射线相比,用于治癌时具有对健康组织损伤最小、对癌细胞杀伤效果最佳、可在线监控照射位置及剂量等优势,被誉为当代最理想的放疗用射线^[1-2]。由中国科学院近代物理研究所研制的医用重离子加速器装置(HIMM)是我国第1台拥有自主知识产权的医用重离子加速器,该加速器由 ECR 离子源产生 C^{5+} 束^[3],经低能束运线注入到回旋加速器^[4-6],由回旋加速器引出能量为 6.23 MeV/u 的束流,经中能线注入到同步加速器,同步加速器将 C^{5+} 粒子通过剥离膜转化为 C^{6+} ,其引出能量为 120~400 MeV/u^[7-8]。最后,束流经高能线传输至治疗终端。

根据束流储存寿命对真空环境的要求,同步加速器真空度在非烘烤状态下为 2×10^{-7} Pa,中能及高能束运线真空度为 1×10^{-5} Pa。由于同步加速器中的高频脉冲二极磁铁采用 RAMP-ING 工作模式且磁场上升速率为 1.6 T/s^[9],所以安装在高频脉冲二极磁铁气隙中的真空室通常采用薄壁低磁或无磁不锈钢或陶瓷材料制作以减少加速器真空室涡流对离子束稳定性的影响。对此,德国 GSI 的 Kraemer 等^[10-14]提出了薄壁加筋结构设想,并将总长 3.45 m、壁厚 0.3 mm 的 3.33° 不锈钢真空室成功应用于 SIS100 低温真空系统中;中国科学院高能物理研究所的董海义等^[15]采用玻璃粘结方法,制造了长约 3 m、壁厚 8.5 mm 的 15° 氧化铝陶瓷真空室。然而采用玻璃粘结方式制作的陶瓷真空

室因壁太厚,导致磁铁之间的气隙大,且废品率高、造价昂贵。本文借鉴薄壁加筋结构思想,并根据同步加速器高频脉冲磁铁自身物理特点,采用 5 段拼接方式,制造总长 3.3 m、筋高 5 mm、壁厚 1 mm 的 45° 薄壁加筋不锈钢真空室,并应用于武威重离子治癌装置中;针对在实际运行过程中由于薄壁加筋不锈钢真空室占用磁铁气隙尺寸偏大,造成的磁铁造价成本偏高,磁铁电源运维成本过大等问题,提出陶瓷内衬薄壁(0.3 mm)真空室,并制作原理样机。

1 薄壁加筋结构二极磁铁真空室

为满足 HIMM 装置束流包络要求,高频脉冲二极磁铁真空室有效孔径有两种截面尺寸,其中,常规二极磁铁真空室截面尺寸为 140 mm×60 mm;特殊二极磁铁真空室尺寸为 (70+120) mm×60 mm,截面形状为跑道形,弧长为 3.3 m,与此同时,考虑到磁铁工作模式为脉冲形式,磁场上升速率为 1.6 T/s,二极磁铁真空室采用壁厚 1 mm 316L 不锈钢和 2 mm 筋板的薄壁加筋结构。为减小加工制造难度,将 45° 弯段真空室用 5 个直段拼焊成,同时加大截面尺寸弥补弦弧差异,常规二极磁铁真空室的截面变为 153 mm×60 mm,特殊二极磁铁真空室的截面变为 203 mm×60 mm。运用有限元分析的方法,分别对两种截面的真空室进行真空状态时应力和变形模拟计算。图 1a 为常规二极磁铁真空室的应力和变形,筋板高 5 mm、间距 30 mm,最大变形为 0.14 mm,最大应力为 112 MPa;图 1b 为特殊二极磁铁真

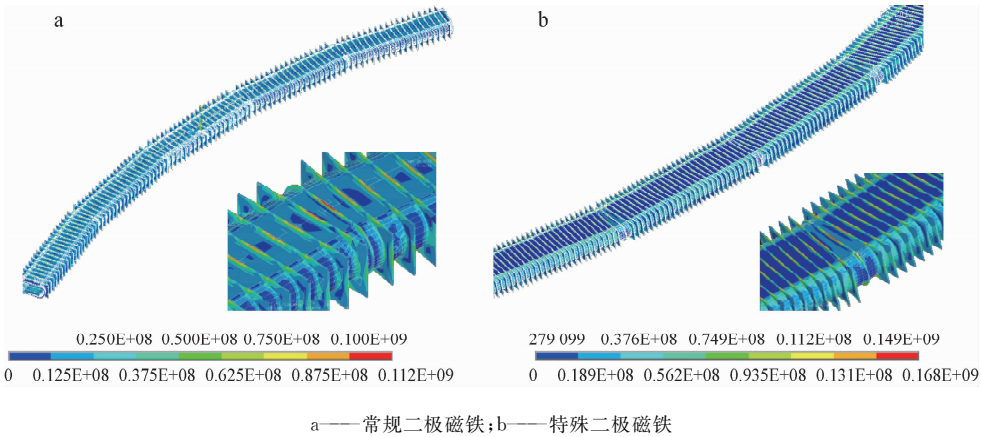


图 1 薄壁加筋结构不锈钢真空室应力分析

Fig.1 Stress analysis of thin-wall vacuum chamber with reinforcing rib

空室的应力和变形,筋板高5 mm、间距19 mm,最大变形为 0.38 mm,最大应力为 168 MPa,均在 316L 不锈钢弹性变形范围内且最大变形也满足工程应用中真空室变形不超过 0.5 mm 的技术要求。

图 2 为薄壁加筋结构不锈钢真空室示意图,目前,该类型真空室整体平面度可控制在 0.5 mm 以下,各项真空性能在武威 HIMM 运行过程中表现非常稳定。

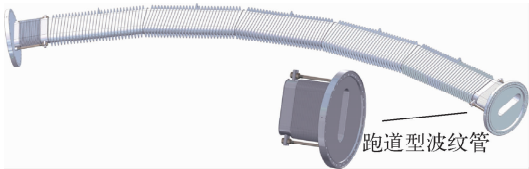


图 2 薄壁加筋结构不锈钢真空室结构示意图

Fig.2 Structural sketch of thin-wall vacuum chamber with reinforcing rib

对于高频脉冲二极磁铁,磁铁励磁安匝数及功率损耗与磁极气隙 gap 有关^[16],即励磁电流 $I \propto \text{gap}$,功率损耗 $P \propto \text{gap}^2$ 。因此在磁铁设计时,磁铁的工作气隙在满足加速器工作要求的前提下应尽可能小,以使磁铁尺寸减小,且使励磁功率呈指数减小。由于薄壁加筋结构不锈钢真空室壁厚和筋高共占二极磁铁气隙 12 mm,在实际运行过程中造成了磁铁造价成本偏高,且提高了运维成本。基于以上原因,在未来治癌装置中,提出陶瓷内衬薄壁(0.3 mm)真空室。

2 陶瓷内衬薄壁真空室

2.1 陶瓷内衬薄壁真空室结构设计

陶瓷内衬薄壁(0.3 mm)真空室结构如图 3 所示,将跑道型陶瓷管(钇稳定氧化锆)衬于薄壁真空室内,利用陶瓷大的抗压能力抵抗大气压强,以确保薄壁真空室的最大变形满足物理要求。与此同时,在真空室内壁上加工定位压痕,以确保陶瓷在管道内不产生偏移。陶瓷截面尺寸为 195 mm×46.2 mm,陶瓷厚 2 mm,不锈钢壁厚 0.3~0.4 mm,陶瓷和不锈钢壁的厚度共占用二极磁铁气隙 4.8 mm,较薄壁加筋结构节约了 7.2 mm 的空间。陶瓷侧面单边厚度8 mm,同时侧面各开直径 2 mm 的抽气孔。所有面与面之间的接触处均需光滑过渡,以避免应力集中。

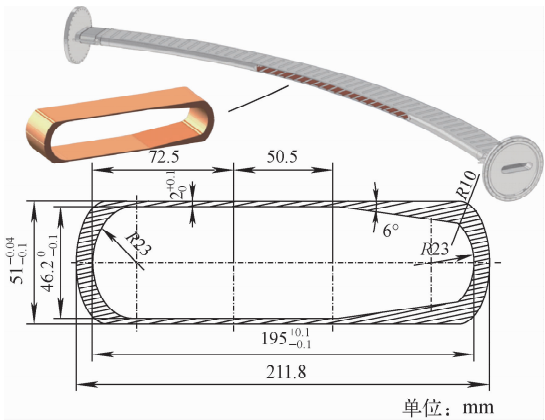
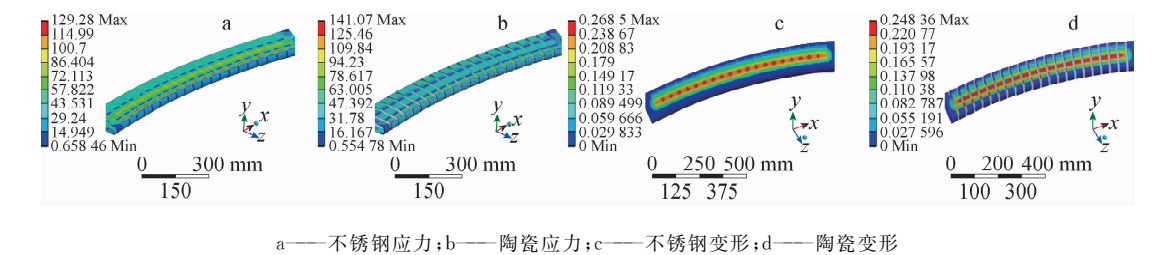


图 3 陶瓷内衬薄壁真空室结构示意图

Fig.3 Structural sketch of thin-wall vacuum chamber with ceramic lining

图 4 为陶瓷内衬薄壁真空室力学分析图, 不锈钢和陶瓷的最大应力分别约为 129 MPa 和 141 MPa, 远低于不锈钢的屈服强度和陶瓷的抗弯强度, 另外, 不锈钢和陶瓷的最大变形分别

约为 0.27 mm 和 0.25 mm, 满足工程应用中真空室变形不超过 0.5 mm 的技术要求。所以陶瓷内衬薄壁真空室的稳定性和安全性可得到保障。表 1 列出陶瓷材料在 20 ℃ 下的力学性能^[17]。



a——不锈钢应力;b——陶瓷应力;c——不锈钢变形;d——陶瓷变形

图 4 陶瓷内衬薄壁真空室力学分析

Fig. 4 Mechanics analysis of thin-wall vacuum chamber with ceramic lining

表 1 陶瓷材料在 20 ℃ 下的力学性能

Table 1 Mechanical property of ceramic material at 20 ℃

材料	表观密度/ (g · cm ⁻³)	抗压强度/ MPa	抗弯强度/ MPa	弹性模量/ GPa
氧化铝(99%)	3.9	3 500	350	380
钇稳定氧化锆	5.9	2 200	800	200

2.2 陶瓷内衬薄壁真空室制作

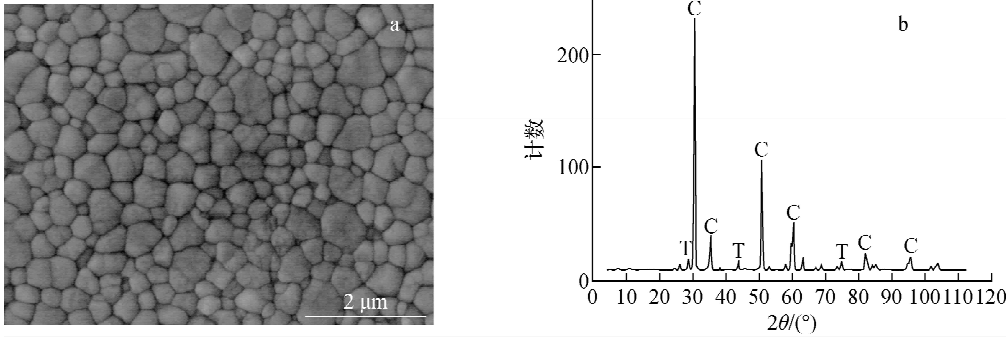
1) 钇稳定氧化锆陶瓷烧结工艺^[18]

将氧氯化锆、硝酸钇加入聚乙烯醇溶液(黏合剂)中,搅拌均匀后,加入戊二醛溶液,在温度 45 ℃ 左右条件下搅拌 9~14 min,得到凝胶,其中,氧氯化锆与硝酸钇的摩尔比为 97 : 3;将凝胶取出,置于氨水中浸泡 15~20 h 后烘干水分,烘干温度 90~110 ℃,得到氧化钇稳定的氧

化锆粉体。将获得的干燥粉体置于合金模具中,压制成型,获得烧结前驱物。将烧结前驱物装入容器进行烧结,烧结温度为 1 460~1 480 ℃,保温 2 h。将所得的钇稳定氧化锆粉体取样分别做扫描电镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)晶体结构分析,其结果如图 5 所示。从图 5a 可看出,粉体样品颗粒结合较好,均匀致密,无明显团聚现象。从图 5b 可看出,晶体结构以最为稳定的立方相为主,是较为理想的氧化锆粉体(分别对应于国际标准 PDF 卡、27-0997 和 07-0337 卡)。

2) 陶瓷内衬薄壁真空室焊接

将 45°薄壁(0.3 mm)真空室分成两段(每段 22.5°),每段分割为上、下各一半,采用特殊工装对不锈钢真空室整形完成后,再加工定位压痕;将已烧结完成的陶瓷管放置于真空室中。每段的上、下各半真空室采用氩弧焊进行焊接,



a——SEM 照片;b——XRD 图谱

图 5 钇稳定氧化锆粉体物相分析

Fig. 5 Phase analysis of yttrium stabilized zirconia powder

两段 22.5°真空室采用电子束焊进行对焊。百分表置于已制作完成的陶瓷内衬薄壁真空室中心进行抽空变形值测试,经过多次抽空、放气,陶瓷内衬薄壁真空室在真空状态下的最大变形为 0.2 mm,与理论计算值基本相符。

3 陶瓷内衬薄壁真空室真空性能测试

3.1 跑道型陶瓷管真空出气率测量

采用双通道气路转换法^[19-20]对跑道型陶瓷管样品进行材料放气率测量。首先对样品进行 300 °C 真空烘烤,烘烤时间 48 h,当烘烤结束样品温度降至室温后,开始进行出气率测试,测试时间为 48 h。图 6 为钇稳定氧化锆材料真空出气率测试结果。从图 6 可看出,氧化锆陶瓷材料降至室温 48 h 后的出气率为 4.08×10^{-10} Pa·L·s⁻¹·cm⁻²,满足大型加速器超高和极高真空系统的使用要求。

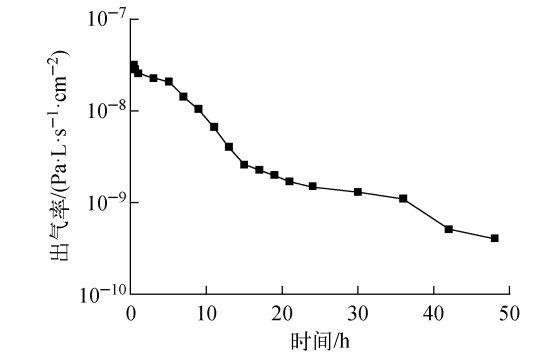


图 6 氧化锆陶瓷材料常温下的真空出气率
Fig. 6 Outgassing rate of zirconia ceramic material at room temperature

3.2 陶瓷内衬薄壁真空室极限真空测试

陶瓷内衬薄壁真空室极限真空测试装置如图 7 所示,陶瓷内衬薄壁真空室两侧均配置抽气泵室,与 HIMM 或强流重离子加速器(HIAF)^[21-22]实际真空排气系统设计方案一致。采用钛升华泵(抽速 3 000 L/s)和溅射离子泵(PST-400AXII)作为主抽泵。升华泵主要用于抽除残余气体中的 H₂、CO 等,三极型溅射离子泵抽除残存的少量 Ar 及 CH₄,两者配合使系统达到极高真空;粗抽系统选用涡轮分子泵+无油干泵机组来获得高真空系统,并用于系统的烘烤排气及检漏;真空度测量采用

CM52 真空计,配用 IE514 规管(测量范围为 $2\times10^{-10}\sim1\times10^{-2}$ Pa)。对测试装置进行 300 °C × 48 h 在线真空烘烤,当烘烤结束,测试系统冷却至室温 48 h 后,测得规管 A、B 真空度 $p_A=6.9\times10^{-10}$ Pa, $p_B=5.65\times10^{-10}$ Pa,两者规管读数的不同可能是由规管个体差异导致的。然而在加速器真空系统实际运行过程中两个真空泵站还附带另一侧的真空系统排气,实际真空系统真空度结果较测试结果差。采用 MOLflow⁺^[23] 软件,将不锈钢材料出气率设置为 5×10^{-11} Pa·L·s⁻¹·cm⁻²^[22],对陶瓷内衬薄壁真空室压力分布进行模拟计算,结果如图 8 所示。从计算结果可知,陶瓷内衬薄壁真空室中间真空度最高约 3.3×10^{-9} Pa。导致中间真空度有偏差的原因

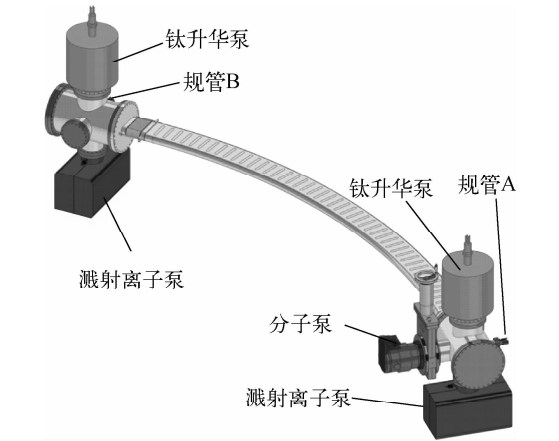


图 7 陶瓷内衬薄壁真空室极限真空测试装置示意图
Fig. 7 Schematic diagram of ultimate vacuum testing device for thin-wall vacuum chamber with ceramic lining

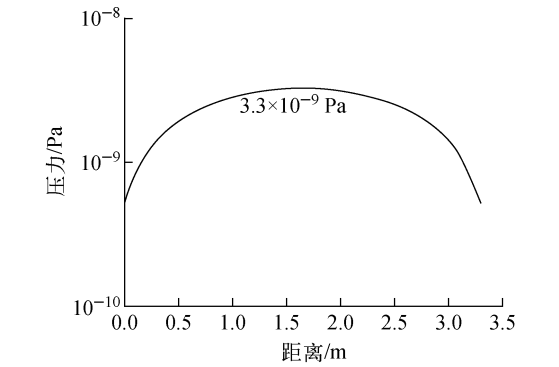


图 8 陶瓷内衬薄壁真空室压力分布
Fig. 8 Pressure distribution of thin-wall vacuum chamber with ceramic lining

可能是由于真空室内一定数量的陶瓷管,相比于薄壁加筋结构不锈钢真空室,真空室内的材料放气量明显会增大。为让二极磁铁真空室内任意点真空度小于 1×10^{-9} Pa,以满足 HIAF 极高真空系统的使用要求,目前正在开展陶瓷内衬薄壁真空室内表面吸气剂成膜技术研究。

4 结论

本文利用钇稳定氧化锆陶瓷高强度、良好韧性的特点,提出了陶瓷内衬薄壁真空室的新方法,并制造了原理性样机,其中陶瓷壁厚 2 mm,不锈钢壁厚 0.3 mm,陶瓷和不锈钢壁的厚度共占用二极磁铁气隙 4.8 mm,相比于薄壁加筋结构,节约了 7.2 mm 的空间。对钇稳定氧化锆陶瓷进行了真空出气率测量,该材料室温 48 h 后的真空出气率为 4.08×10^{-10} Pa · L · s⁻¹ · cm⁻²,满足大型加速器超高和极高真空系统的使用要求,原理样机极限真空度可进入 10^{-10} Pa 量级范围。然而陶瓷内衬薄壁真空室内部还包括陶瓷材料的出气量,相较于薄壁加筋结构,真空压力梯度会增大。与此同时,陶瓷内衬薄壁真空室在应用于强流重离子加速器超高和极高真空系统过程中,还需考虑陶瓷真空室带来束流阻抗的问题,因此,后期将开展陶瓷内衬薄壁真空室内吸气剂成膜和钇稳定氧化锆陶瓷镀金技术研究以降低真空室束流阻抗。

参考文献:

- [1] BELLI M, BETTEGA D, CALZOLARI P, et al. Effectiveness of monoenergetic and spread-out bragg peak carbon-ions for inactivation of various normal and tumour human cell lines[J]. Journal of Radiation Research, 2008, 49(6): 597-607.
- [2] MA C C. Proton and carbon ion therapy[J]. Medical Physics, 2013, 40(5): 057301.
- [3] CAO Y, LI J Q, SUN L T, et al. An all permanent magnet electron cyclotron resonance ion source for heavy ion therapy[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(2): 02A960.
- [4] 郝焕锋,赵红卫,姚庆高,等. 医用重离子回旋加速器引出系统设计[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(11): 2 991-2 994.
- HAO Huanfeng, ZHAO Hongwei, YAO Qing-gao, et al. Design of the extraction system of heavy ion medical cyclotron[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(11): 2 991-2 994(in Chinese).
- [5] 张建川,周德泰,李运杰,等. HIMM 回旋加速器控制系统中连锁保护功能设计与实现[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(12): 125107-1-125107-5.
- ZHANG Jianchuan, ZHOU Detai, LI Yunjie, et al. Design of the interlock function for HIMM cyclotron control system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(12): 125107(in Chinese).
- [6] KITAGAWA A, MURAMATSU M, SEKIGUCHI M, et al. Status report on electron cyclotron resonance ion sources at the Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(2): 1 061-1 063.
- [7] MENG J, LUO C, CHAI Z, et al. Use of combined sputter ion and NEG pumps in the heavy ion medical machine[J]. Vacuum, 2015, 114(1): 108-113.
- [8] ZHANG Jinquan, SONG Mingtao, WEI Baowen, et al. Design of synchrotron for hadron therapy[J]. Chinese Physics C, 2007, 31(12): 1 122-1 125.
- [9] ZHANG X, YANG W, HAN S, et al. The main dipole magnets design and test of HIMM project [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4): 1-4.
- [10] KRAEMER A. Challenges of the FAIR Vacuum System[C] // IPAC2012. [S. 1.]: [s. n.], 2012.
- [11] KRÄMER A, BELLACHIOMA M C, KOLLMUS H, et al. The vacuum system of FAIR accelerator facility[C] // EPAC2006. [S. 1.]: [s. n.], 2006.
- [12] SHIM S Y, KAUSCHKE M, KRÄMER A, et al. Thermal analysis of UHV beam tube of SIS100 for FAIR[C] // ICEC2008. [S. 1.]: [s. n.], 2008.
- [13] SPILLER P J, BALSS R, BLEILE A, et al. Status of the FAIR synchrotron projects SIS18 upgrade and SIS100[C] // IPAC2014. [S. 1.]: [s. n.], 2014.
- [14] WILFERT S, KRAEMER A, KOLLMUS H, et al. Details of the cryogenic vacuum system of

- SIS100 at FAIR[C]// IVC 2010. [S. 1.]: [s. n.], 2010.
- [15] DONG H Y, HONG S, LI Q, et al. The vacuum system of the China spallation neutron source[J]. Vacuum, 2018, 154(1): 75-81.
- [16] 赵籍九,尹兆升. 粒子加速器技术[M]. 北京:高等教育出版社,2006:57-60.
- [17] FRIALIT®-DEGUSSIT® Zirconium oxide material properties[DB/OL]. 2011. <http://c685503041.bj.wezhan.cn/zro2>.
- [18] 利剑,陈兰桂,蒋永洪. 氧化钇稳定的氧化锆粉体的制备方法:中国,CN105503181A[P]. 2016-04-20.
- [19] 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.
- FANG Yan, ZENG Xiangpo, ZHANG Dixin, et al. design of measurement apparatus for material outgassing rate by orifice conductance method [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2010, 30(3): 66-69(in Chinese).
- [20] SAITO K, SATO Y, INAYOSHI S, et al. Measurement system for low outgassing materials by switching between two pumping paths[J]. Vacuum, 1996, 47(1): 749-752.
- [21] YANG J C, XIA J W, XIAO G Q, et al. High Intensity heavy ion Accelerator Facility (HIAF) in China[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2013, 317(1): 263-265.
- [22] LUO C, LI P, XIE W J, et al. Application of compact NEG-sputter ion pump combination in UHV system of HIAF[J]. Vacuum, 2018, 157(1): 159-165.
- [23] KERSEVAN R, PONS J L. Introduction to MOLFLOW⁺: New GPU-based Monte Carlo for simulating molecular flows[J]. J Vac Sci Technol A, 2009, 27(4): 1 017-1 023.