

HUST-PTF 质子治疗装置能量选择段 真空设计与仿真

陈奥特 刘旭 王健 梁志开 刘开锋 秦斌

(华中科技大学 应用电磁工程研究所 武汉 430074)

摘要 能量选择段是华中科技大学质子治疗装置束流线的重要组成部分,其位于回旋加速器下游,包含四极铁组、kicker磁铁、降能器以及DBA(Double Bending Achromatic)消色散段等几个部分。该段真空室种类和插入件较多,且在降能器下游辐射剂量较大,增加了真空系统设计与选型的难度。根据系统设计要求,该段动态真空度需好于 5×10^{-4} Pa。本文利用MOLFLOW软件对能量选择段真空系统进行模拟,分析不同工况下的压强分布,并对各类真空室进行力学强度校核。仿真结果显示:能量选择段真空度均好于 4.14×10^{-5} Pa,比系统设计要求高一个量级,且各类真空室的机械形变小于0.3 mm,不会引起额外的束损。因而,该段真空室的动态真空度和机械强度均可满足系统设计要求。

关键词 真空系统, 能量选择段, 真空室, MOLFLOW, 束流输运线

中图分类号 TB753

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.120503

Design and simulation of vacuum system in energy selection section for HUST-PTF

CHEN Aote LIU Xu WANG Jian LIANG Zhikai LIU Kaifeng QIN Bin

(Institute of Applied Electromagnetic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract [Background] Energy selection section (ESS) is an important part of the beam line of Huazhong University of Science and Technology Proton Therapy Facility (HUST-PTF). It is located downstream of the cyclotron and includes a set of quadrupoles, a kicker magnet system, an energy degrader system and a double bending achromatic (DBA) section. Various types of vacuum pipe and several inserts are placed in this section. What's worse, large radiation exists in the downstream of the degrader. [Purpose] This study aims at the design of the vacuum system and the selection of the vacuum pump to satisfy system requirements for better than 5×10^{-4} Pa dynamic vacuum pressure. [Methods] First of all, the ESS vacuum system was simulated by Monte Carlo method in the MOLFLOW software. Then the pressure distributions under different working conditions were analyzed, and the mechanical strength of various vacuum pipe was calculated and checked. [Results] The simulation results show that the pressure in the ESS is lower than 4.14×10^{-5} Pa, an order of magnitude better than the system requirement. The mechanical deformation of various vacuum pipes is less than 0.3 mm, avoiding the extra beam loss. [Conclusions] Both of the dynamic vacuum pressure and the mechanical strength can meet the design requirements.

Key words Vacuum system, Energy selection section, Vacuum chamber, MOLFLOW, Beam line

国家重点研发计划(No.2016YFC0105305)、国家自然科学基金(No.1975107)、华中科技大学学术前沿青年团队资助

第一作者: 陈奥特, 男, 1996年出生, 2018年毕业于华中科技大学, 研究方向为粒子加速器技术及其应用

通信作者: 刘旭, E-mail: lxhustliu@hust.edu.cn

收稿日期: 2019-08-14, 修回日期: 2019-10-08

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2016YFC0105305), National Natural Science Foundation of China (No.11975107), Program for HUST Academic Frontier Youth Team

First author: CHEN Aote, male, born in 1996, graduated from Huazhong University of Science and Technology in 2018, focusing on particle accelerator technology and applications

Corresponding author: LIU Xu, E-mail: lxhustliu@hust.edu.cn

Received date: 2019-08-14, revised date: 2019-10-08

基于质子束入射深度与剂量分布的“布拉格峰”特性,因而质子治疗被认为是当今精准和高效的癌症治疗方法之一。目前,华中科技大学正在开展基于超导回旋加速器的质子放疗装置(Huazhong University of Science and Technology Proton Therapy Facility, HUST-PTF)研发,该装置是一个多室的质子治疗系统,包含一个固定束治疗室和两个旋转束治疗室。250 MeV 质子束由超导回旋加速器引出后,经过降能器作用后束流能量调节至 70~240 MeV,降能后的质子束传输至各个治疗室,用于开展癌症的放射治疗^[1]。真空系统减少了束流与空气分子之间的碰撞并降低束流损失,是实现质子束精准治疗的重要保障。因此,为了获得较好的束流品质,HUST-PTF 装置束流输运线动态真空度需好于 5×10^{-4} Pa。本文针对质子治疗装置中能量选择段真空系统开展设计研究,该段主要包含交变聚焦四极铁组、kicker 磁铁、降能器和消色散 DBA(Double Bending Achromatic)段。该段真空室总长约 13.6 m,真空室类型和插入件较多。若采用传统的真空理论公式计算,则相对复杂且精度较低。

MOLFLOW 是由欧洲核子研究组织(Conseil Européenn pour la Recherche Nucléaire, CERN)开发的真空计算软件,基于蒙特卡罗原理模拟计算超高真空条件下复杂形状真空室的静态压强,运行时追踪虚拟气体分子从气体注入或热解吸位置到吸收(一般为泵)的轨迹,并计算得到关于压强的收敛解^[2]。因此本文利用理论公式计算得到真空泵初步布局,并在 MOLFLOW 软件建立空气域模型,进行真空抽气模拟,同时也对各种类型真空室进行力学分析,验证其机械强度。

1 能量选择段布局及真空设计需求

能量选择段布局如图 1 所示,主要部件及功能:1)四极铁组:降能器前三个四极磁铁对质子束进行交变聚焦,并在降能器中心形成束腰;2)kicker 磁铁:对质子束进行快速偏转,在点扫描过程中实现 Beam On/Off 功能;3)降能器:为一对楔形石墨块,完成质子束能量调节,并结合一组准直器控制散射后质子束的尺寸及发射角;4)DBA 段:包含能量狭缝,控制质子束动量分散,并在出口实现消色散。

整体的真空度要求取决于系统对于束流寿命和束流损失的需求,质子在注入时的空间电荷效应较强,主要问题是束流势阱俘获残余气体中的电子从而导致束流被中和^[3],这里参考其他类似质子治疗装置,要求整体动态真空度要优于 5×10^{-4} Pa。

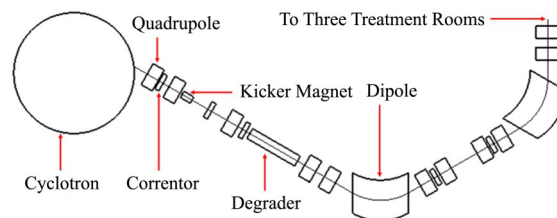


图1 能量选择段器件布局

Fig.1 Layout of the energy selection section for HUST-PTF

2 能量选择段真空系统总体设计考虑

能量选择段包含 4 种类型真空室:二极铁真空室、四极铁真空室、降能器真空室、kicker 磁铁真空室。其中,二极铁与四极铁部分真空室截面形状分别为矩形和圆形,并在二极铁真空室两侧增加波纹管进行过渡,补偿真空管道制造和安装误差。由于降能器处束流损失和辐射剂量较大,因此降能器系统真空室材料选用辐射活化剂量较小的铝合金。在降能器内部,楔形块和环形准直器材料为定制高纯石墨(密度 $1.95 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$),常温石墨和烘烤后石墨的放气率在兰州空间技术物理研究所测量得到^[4],另外两个准直器材料为铜。对于 kicker 磁铁的真空室,为了避免涡流效应引起的温升,导致真空室热变形和气载过大,因此采用氧化铝陶瓷材料。由于本系统中质子束能量小于 250 MeV,流强小于 500 nA,所以本系统真空室并不考虑光电解吸气载,主要考虑热解吸气载。综上所述,对以上材料进行气载统计如表 1 所示。

每段真空室的焊缝和密封总漏率 Q 小于 $5.7 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$,共 25 段,远小于材料的热解吸气载。因此进行泵抽速计算和分布时主要考虑材料的气载。根据长直管道真空分布模型^[5],管道内压强分布如图 2 所示,计算泵间距。

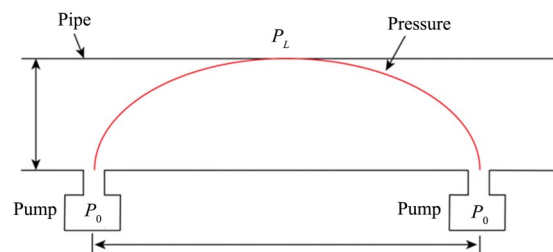


图2 长直管道真空分布模型

Fig.2 Pressure distribution model of long straight pipeline

$$P_L - P_0 = \frac{BLq}{2C} \quad (1)$$

式中:距离泵口 L 处压强为 P_L , Pa; 泵口压强为 P_0 , Pa; B 为管道截面周长, m; q 为材料解吸率, $\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; C 为流导, $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ 。参考真空系统设

表1 各类真空室内材料气载总计
Table 1 Material outgassing in the vacuum pipe

材料 Material	内壁面积 Inner wall area / cm ²	解吸率 Desorption rate / Pa·L·(cm ² ·s) ⁻¹
不锈钢 Stainless steel	35 301.9	3.06×10 ⁻⁸
铝合金 Aluminum alloy	13 523.7	1.83×10 ⁻⁶
无氧铜 Oxygen free copper	933.1	1.3×10 ⁻⁸
石墨(常温) Graphite (normal temperature)	1 116.6	5.7×10 ⁻⁸
石墨(烘烤) Graphite (high temperature)	1 116.6	1.2×10 ⁻⁷
氧化铝陶瓷 Alumina ceramic	498.48	8.8×10 ⁻⁶

计规范及其他相关真空系统设计,平均静态真空度要优于动态真空度一到半个数量级,因此取 P_L 为 5×10^{-5} Pa,计算得到 L 为11.2 m,考虑到弯转段的流导损失以及系统压强分布尽量均匀这一原则,将泵间距取为6.3 m。以6.3 m泵间距计算抽速公式^[6]如下:

$$P_L \times S_e = q \times A \times L_p \quad (2)$$

式中: A 为单位长度的真空室内表面积,m²,取 8.2×10^{-3} m²; S_e 为泵抽速,L·s⁻¹; L_p 为泵间距,m;材料解析率 q 取为 6×10^{-7} Pa·L·(cm²·s)⁻¹。代入相关参数,可以计算得到所需真空泵抽速为62 L·s⁻¹。真空室内残余气体成分主要为水蒸气,本系统对气体成分无特殊的要求,但考虑到降能器在工作过程中,因束流能量沉积而导致其温度升高,放气量较大,若选用离子泵则较易出现饱和,需要停机烘烤,因此在能量选择段选择涡轮分子泵作为主真空泵。对照市场上常用泵型号,选择安捷伦分子泵TwisTorr 84 FS,其抽速为67 L·s⁻¹,接口法兰为DN63CF。

从分段抽气、降低故障影响和加快真空恢复等角度出发,在回旋加速器后端束流入口处和降能器出口处分别设置插板阀,并在抽气口处设置角阀和真空规分别用于真空室的预抽、检漏和真空监测。

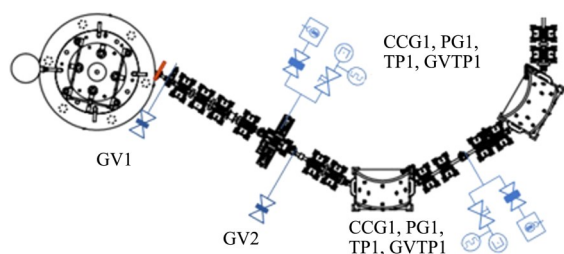


图3 能量选择段真空布局(CCG-冷阴极规,PG-皮拉尼规,TP-涡轮分子泵,GV-插板阀)

Fig.3 Vacuum component layout of the energy selection section (CCG-cold cathode gauge, PG-pirani, TP-turbomolecular pump, GV-gate valve)

3 真空室结构分析

对于四极铁而言,束流包络形状控制较好,采用

圆形管道,内径为 $\varnothing 73$ mm,壁厚2.5 mm;而在二极磁铁内水平方向束流包络较大,因此采用矩形管道,内壁截面尺寸为95 mm×68 mm;对于Kicker磁铁,由于采用的氧化铝陶瓷材料硬度大,脆性大,加工为矩形截面容易导致边角处的出现裂纹,因此制作成“跑道形”结构,如图4所示,单位为mm。

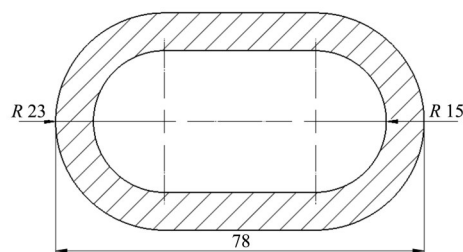


图4 陶瓷真空室截面

Fig.4 Cross-section of the ceramic vacuum chamber

考虑到抽真空后的外界大气压力的影响,需要对真空室进行力学分析来检验其结构强度。由于圆形管道受力均匀,结构强度较好,因而本文研究对象为矩形真空室、陶瓷真空室和降能器真空室,并在ANSYS中进行力学分析和强度计算,结果如图5所示。

三者的最大形变分别为:0.259 mm、0.000 5 mm和0.010 mm。可以看出,kicker磁铁和降能器真空室形变较小,而二极铁内真空室形变较大。在二极铁内,质子束半径为14 mm(1σ),真空室内壁有效尺寸需至少包含 2σ 束流,因而实际真空室内壁高度需大于56 mm,则在该形变下仍能够满足束流输运要求。

4 MOLFLOWS 模拟分析

4.1 降能器真空模拟分析

降能器内部结构如图6所示,其主要功能是通过控制石墨楔形块的相对运动来改变束流阻挡厚度,从而达到控制束流能量的目的^[7]。降能器中的石墨材料为多孔结构,束流能量沉积会导致其温度

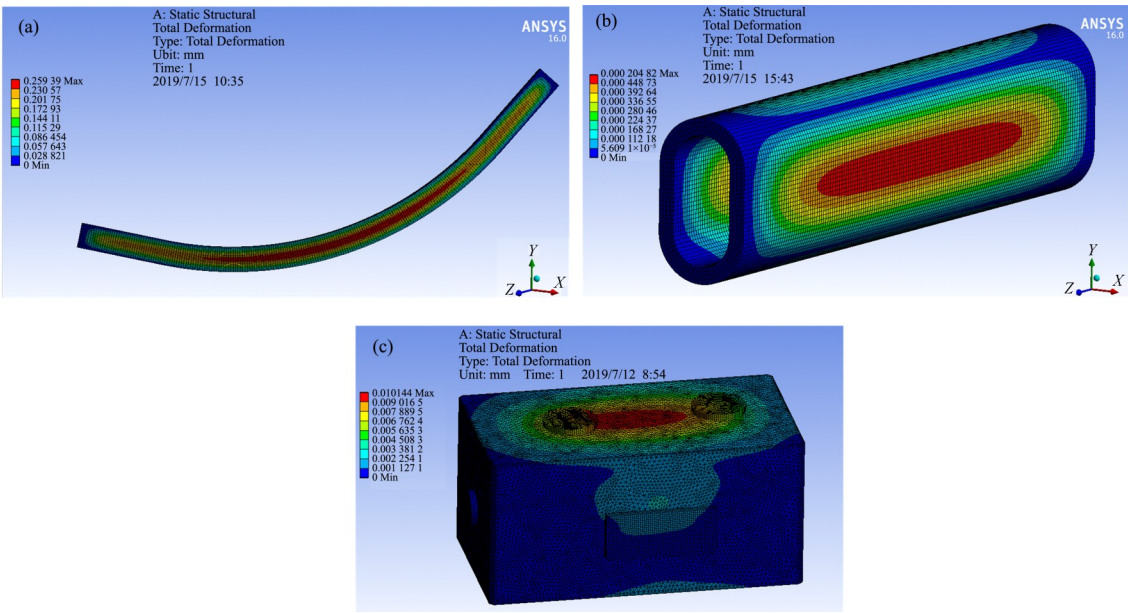


图5 二极铁(a)、Kicker 磁铁(b)和降能器(c)真空室形变分析
Fig.5 Vacuum chamber deformation analysis for dipole iron (a), Kicker magnet (b) and energy reducer (c)

升高,并释放出孔内气体,且在运行时铝合金真空室热负载较其他真空室大,因此有必要对降能器进行单独的模拟分析。

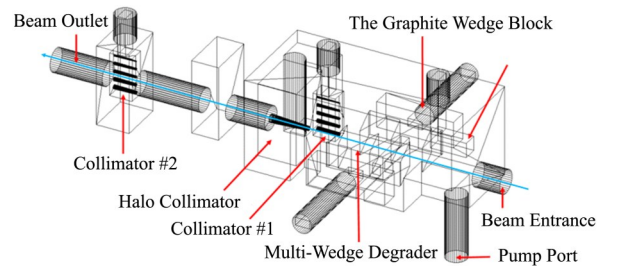


图6 降能器真空室布局图
Fig.6 Component layout in the degrader vacuum chamber

当束流进入降能器后与石墨楔形块作用后,辐照剂量呈“喇叭”形向下游传播。因此为了减少泵受到的辐照,增加泵的使用寿命,同时考虑已有的物理器件布局,将真空泵设置在束流入口与石墨楔形块之间。

降能器工作时,通过调节楔形块间距来改变出

射束流能量,且间距与束流能量成反比。其中间距最大为开始抽气的状态,间距最小时,楔形块流阻最大,此时楔形块间距间的真空度最差。因此,分别针对不同的楔形块间距和是否进行烘烤,分为4种工况(表2)进行真空模拟。值得说明的是,在该模拟中只考虑降能器系统,并未考虑其上下游真空泵的抽气影响。第一种工况压强分布图如图7所示,其余情况压强分布云图类似。

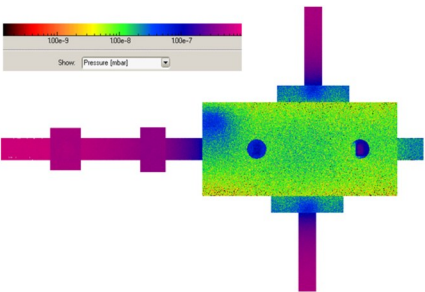


图7 降能器真空室内壁压强分布
Fig.7 Pressure distribution diagram of degrader vacuum chamber internal

表2 降能器各部分压强最大值
Table 2 The maximum pressure of each part of the degrader

楔形块间距值 Wedge value / mm	是否烘烤 Bake or not	楔形块间隙 Wedge block gap / Pa	准直器 1 Collimator No.1 / Pa	准直器 2 Collimator No.2 / Pa
42.4	是 Yes	3.39×10^{-6}	1.11×10^{-4}	1.06×10^{-3}
42.4	否 No	3.55×10^{-6}	1.13×10^{-4}	1.41×10^{-3}
10.08	是 Yes	3.04×10^{-5}	1.01×10^{-4}	1.23×10^{-3}
10.08	否 No	3.16×10^{-5}	1.12×10^{-4}	1.60×10^{-3}

由表2中的实验测量数据,烘烤后的石墨放气率相比未烘烤石墨高半个数量级,但石墨材料气载所占降能器总体气载的比例较小,因而楔形块间隙处的真空度前者仅略低于后者;而准直器1和2与楔形块之间的真空仅通过环形准直器小孔进行联通,联通处流阻较大,因而石墨块是否烘烤对这个区域真空度影响不大。

扁缝形管道流导公式^[5]如下:

$$U = 309K_b \frac{ab^2}{L} \quad (3)$$

式中: U 为流导; K_b 为修正系数; a 、 b 、 L 分别为扁缝的几何尺寸。其中 b 为扁缝的宽度,也即楔形块间距。由此得到楔形块间距最大(42.4 mm)时流导约为间距最小(10.08 mm)时的16倍,因此认为楔形块间距最大时其间隙内真空度要明显优于楔形块间距最小的情况,表2所示的软件模拟结果与理论分析相符合。

考虑到降能器内分子泵距离准直器2较远,且与准直器1间隔一个环形准直器的狭长圆孔,因此准直器2处真空较准直器1差,分析与软件模拟结果匹配,需在其下游增加分子泵进行辅助抽气。

4.2 能量选择段总体真空模拟分析

对能量选择段进行整体真空模拟,各部分管道布局如图8所示。

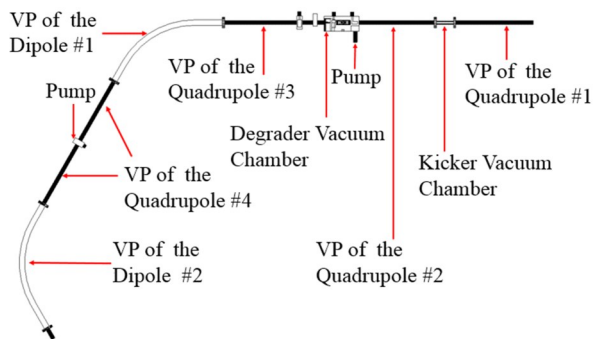


图8 能量选择段真空管道布局
Fig.8 Layout of vacuum pipe in the energy selection section

由上文分析可得,降能器内楔形块间距和石墨解吸率对整体分布基本无影响,因此对整体的压强分布分析时,取降能器工作状态为楔形块间距最大,石墨为常温。各段最大压强如表3所示,压强分布图如图9所示。

由图9可以看出,压强分布在 $5 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-7}$ Pa,较为均衡。从表3中可以看出,各段管道真空度均好于 4.14×10^{-5} Pa,且压强最大位置出现在四极铁圆管道第一段和第三段,与理论计算分析预估的位置相近,因此认为当前真空方案能够满足能量选择段

动态真空度优于 5×10^{-4} Pa的要求。

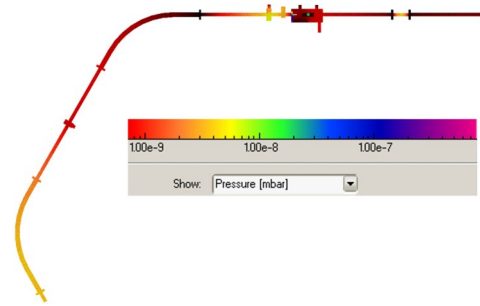


图9 能量选择段压强分布
Fig.9 Pressure distribution of the energy selection section

表3 能量选择段各部最大压强
Table 3 Maximum pressure of each part in the energy selection section

各区域名称 Name of each area	最大压强 Maximum pressure / Pa
Kicker 真空室 Kicker vacuum chamber	2.09×10^{-5}
四极铁圆管道1 VP of the quadrupole #1	4.14×10^{-5}
四极铁圆管道2 VP of the quadrupole #2	2.02×10^{-5}
降能器真空室 Degradation vacuum chamber	3.16×10^{-5}
四极铁圆管道3 VP of the quadrupole #3	2.91×10^{-5}
二极铁矩形管道1 VP of the dipole #1	1.70×10^{-5}
四极铁圆管道4 VP of the quadrupole #4	7.28×10^{-6}
二极铁矩形管道2 VP of the dipole #2	2.64×10^{-5}

5 结语

本文主要介绍了HUST-PTF装置中束流输运线能量选择段真空系统的设计过程与模拟方法。能量选择段包含各类多极磁铁、Kicker磁铁以及降能器系统,几乎涵盖了质子治疗系统中各类元件,且降能器系统内部件工作时放气率较大,需要对其进行详细的真空度模拟与分析。本文结合真空理论公式,并利用MOLFLOW软件对能量选择段总体以及单独的降能器系统进行真空模拟与分析,各部分真空度均好于 5×10^{-5} Pa,当前的真空设计方案能够满足系统真空度的要求。同时,对于真空室也进行了力学分析,其中Kicker磁铁和降能器真空室形变小于0.01 mm,虽然二极磁铁真空室形变0.259 mm较大,但束流在垂直方向的尺寸较小,余量足够,因而该形变对束流输运无影响。

参考文献

- 1 Qin B, Chen Q S, Fan M, *et al.* Design and development of the beamline system for a proton therapy facility[C]. Proceedings of IPAC2019, Melbourne, Australia, 2019: 3488 – 3490. DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2019-THPMP017.
- 2 Kersevan R, Ady M, CERN, *et al.* Recent developments of Monte-Carlo codes molflow+ and synrad+ [C]. Proceedings of IPAC2019, Melbourne, Australia, 2019: 1327 – 1330. DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPMP037.
- 3 汤启升, 王志山, 李雪军. 上海质子治疗装置同步环真空布局及真空室设计[J]. 原子能科学技术, 2015, **49** (z2): 529–532. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.S1.0529.
TANG Qisheng, WANG Zhishan, LI Xuejun. Synchronous ring vacuum layout and vacuum chamber design of Shanghai proton therapy device[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, **49**(z2): 529–532. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.S1.0529.
- 4 石纯石墨和镀氧化铝石墨材料出气试验[S]. 国家低温容器质量监督检验中心, 2018.
Gas production test of pure graphite and alumina-coated graphite materials[S]. National Low Temperature Container Quality Supervision and Inspection Center, 2018.
- 5 达道安. 真空设计手册[M]. 第三版. 北京: 国防工业出版社, 2004.
DA Daoan. Vacuum design handbook[M]. Third Edition. Beijing: National Defence Industry Press, 2004.
- 6 张海鸥, 王志山. 上海光源(SSRF)输运线真空系统设计[J]. 真空科学与技术学报, 2007, **27**(6): 553–556. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7126.2007.06.021.
ZHANG Haiou, WANG Zhishan. Design of vacuum system for Shanghai Light Source (SSRF) transport line [J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2007, **27** (6): 553 – 556. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-7126. 2007.06.021.
- 7 Liang Z K, Liu K F, Qin B, *et al.* Design and optimization of an energy degrader with a multi-wedge scheme based on Geant4[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2018, **890**: 112–118. DOI: 10.1016/j.nima.2018.01.073.