



·粒子束及加速器技术·

CSNS-II 靶站质子束窗结构设计与优化分析*

王广源^{1,2}, 刘磊^{1,2}, 刘仁洪^{1,2}, 康玲^{1,2}, 张俊嵩^{1,2}, 宁常军^{1,2}, 余洁冰^{1,2}, 陈佳鑫^{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)

摘 要: 中国散裂中子源 (CSNS) 靶站质子束窗位于环到靶站输运线 (RTBT) 与靶站交接面, 起到隔离加速器高真空和靶站氦气环境的作用。随着束流功率提高, 目前质子束窗单层膜结构形式已无法满足 CSNS-II 500 kW 的高功率需求, 因此开展 CSNS-II 质子束窗研制, 设计出双层膜中间通水的冷却结构, 完成质子束窗双层膜的薄膜半径、薄膜厚度、水冷槽长度与宽度、对流换热系数等各参数对质子束窗温升与热应力的影响分析。通过冷却水需求分析得出, 冷却水流速需大于 15 L/min。通过质子束窗主体的流固耦合分析, 消除箱体内部死水区域。最终优化后质子束窗薄膜位置最高温度 47.8 °C, 薄膜位置最高热应力 30.758 MPa。通过 FLUKA 软件对质子束窗材料的辐照损伤性能进行分析, 在每年 5000 h 工作时长、500 kW 高功率束流的辐照下, 辐照损伤 DPA 计算值为 1.285 DPA, 质子束窗的安全使用寿命在 7 年以上。

关键词: 质子束窗; 热分析; 流固耦合分析; 辐照损伤

中图分类号: TL99

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230176

Structure design and optimization analysis of proton beam window in target station for CSNS-II

Wang Guangyuan^{1,2}, Liu Lei^{1,2}, Liu Renhong^{1,2}, Kang Ling^{1,2}, Zhang Junsong^{1,2},
Ning Changjun^{1,2}, Yu Jiebing^{1,2}, Chen Jiaxin^{1,2}

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

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

Abstract: The proton beam window of the CSNS target station is located at the interface between the Ring to Target Beam Transport (RTBT) line and the target station, which can isolate the high vacuum of the accelerator and the helium environment of the target station. With the increase of the beam power of CSNS-II, the single-layer film structure of the proton beam window can no longer meet the high power of 500 kW, so the upgrading and development of the CSNS-II proton beam window are carried out. The structure design of the CSNS-II proton beam window is emphasized, and the cooling structure with water in the middle of the double-layer membrane is designed. The influence of the parameters of proton beam window, such as film radius, film thickness, length and width of water cooling tank, and convection heat transfer coefficient, on the temperature rise and thermal stress of the proton beam window was analyzed. Analysis on cooling water demand shows that the cooling water flow rate should be greater than 15 L/min. Through the fluid structure coupling analysis of the main body of the proton beam window, the dead water area inside the box is eliminated. The maximum temperature of the optimized proton beam window film is 47.8 °C. The maximum thermal stress at the film position is 30.758 MPa. The radiation damage performance of proton beam window material is analyzed by FLUKA software. Under the irradiation of 5000 h of operation per year and 500 kW high power beam current, the calculated value of DPA of radiation damage per year is 1.285 DPA, and the life of proton beam window is more than 7 years.

Key words: proton beam window, thermal analysis, fluid structure coupling analysis, irradiation damage

* 收稿日期: 2023-06-12; 修订日期: 2023-10-31

基金项目: 集主动减振技术的大行程纳米调姿系统研究基金项目 (12105308)

联系方式: 王广源, gywang@ihep.ac.cn。

通信作者: 刘磊, liu@ihep.ac.cn。

中国散裂中子源(CSNS)是我国“十一五”期间重点建设的大型科技基础设施项目,是世界四大散裂中子源之一,它主要由一台 80 MeV 负氢离子直线加速器、一台 1.6 GeV 快循环质子同步加速器、直线到环运输线(LRBT)、环到靶站运输线(RTBT)、一个靶站、多台谱仪及其相应的配套设施组成。负氢离子束通过直线加速器加速至 80 MeV,经 LRBT 运输线注入快循环质子同步加速器(RCS),加速至 1.6 GeV 后经 RTBT 运输线引出轰击钨靶,释放出中子,供用户开展实验研究中子,供用户开展实验研究^[1-5]。RTBT 用来传输从快循环同步加速器环引出的高功率质子束流到靶站,RTBT 管道内为高真空环境,而靶站系统为氦气环境。靶站质子束窗(PBW)位于 RTBT 运输线与靶站交接面处,起到隔离加速器高真空和靶站氦气环境的作用。面处,起到隔离加速器高真空和靶站氦气环境的作用。

1 CSNS-II 质子束窗整体结构

靶站质子束窗在 CSNS 中的安装位置如图 1 所示,束窗上游为运输线 RTBT 靶前 24 m 段,下游与靶站氦容器相连。靶站质子束窗在隧道中的安装通道环境如图 2 所示,隧道插件是质子束窗在隧道中的安装通道,质子束窗通过隧道中的束窗安装定位盒进行定位。质子束窗两侧充气波纹管分别与上下游进行镜面密封(加速器侧充气波纹管与快卸密封结构的镜面配合密封,靶站侧充气波纹管与束窗安装定位盒中的镜面配合密封)。质子束窗顶部为屏蔽铁,对质子束窗进行辐射屏蔽。

质子束窗系统结构如图 3 所示,其中焊接窗口为质子束窗核心部件,如图 4 所示,窗口主体采用铝合金 A5083-O,束窗两侧充气波纹管均采用 S31603。为了提高焊接质量,窗口主体与充气波纹管之间采用 S31603-A5083-O 复合板进行过渡法兰焊接。

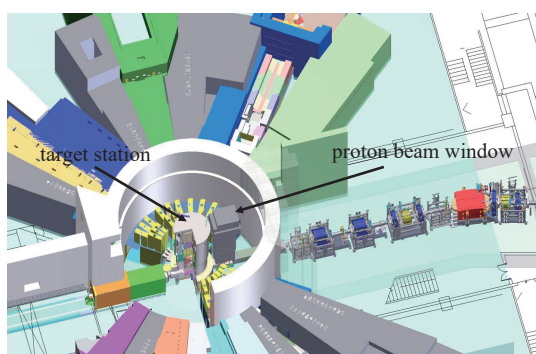


Fig. 1 Installation position of proton beam window (PBW)
图 1 质子束窗安装位置

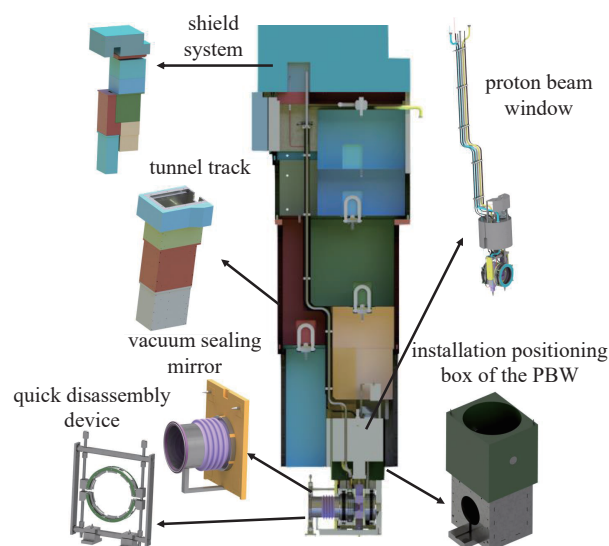


Fig. 2 Installation channel of PBW
图 2 质子束窗安装通道环境

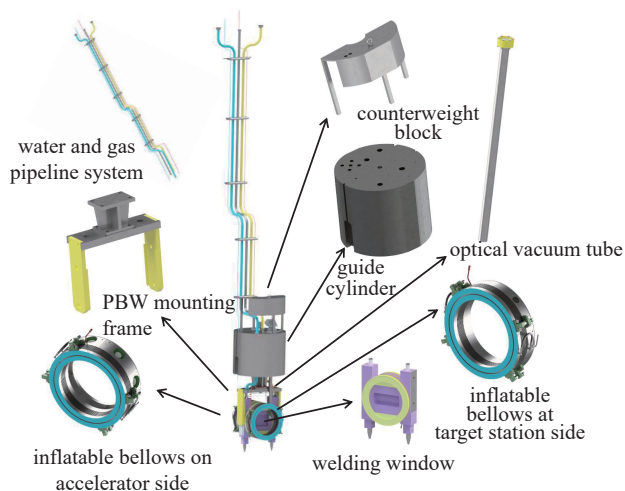


Fig. 3 Structure of the PBW
图 3 靶站质子束窗系统结构

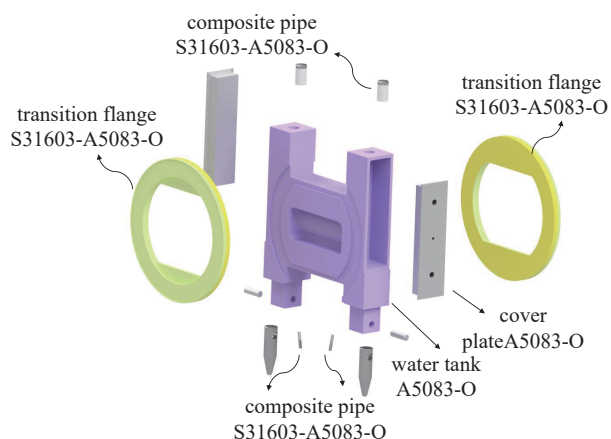


Fig. 4 Material composition of welding window
图 4 焊接窗口结构与材料成份

2 主窗体的结构设计

CSNS 一期质子束窗采用单层膜结构形式, 水冷槽在膜的上下两侧, 该冷却方式为对质子束窗的间接冷却方式, 如图 5(a) 所示^[6]。CSNS 一期质子束窗的设计功率为 100 kW, 而随着功率逐步提升, CSNS-II 期功率将达到 500 kW。为分析该单层膜结构承受的功率极限, 进行相应热分析。通过 Bethe-Bloch 公式计算能量损失, 公式表述为^[7]

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right) = 4\pi N_a r_e^2 m_e c^2 z_i^2 \left(\frac{Z}{A}\right) \left(\frac{1}{\beta^2}\right) \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 r^2 \beta^2}{I}\right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \quad (1)$$

式中: N_a 为阿伏伽德罗常数; r_e 为经典电子半径; m_e 为电子静止质量; c 为光速; z_i 为入射粒子电荷数; Z 、 A 分别为介质原子的质量数与原子序数; β 为带电粒子的速度与光速的比值; r 为带电粒子的洛伦兹因子, $r = 1/\sqrt{1-\beta^2}$; I 为电离常数, 对于质量数大于 12 的元素, $I \approx (10 \text{ eV} \pm 1 \text{ eV}) \times Z$; δ 为密度效应项, $\delta = \lg r$ 。

计算出不同功率下束流在质子束窗上的能量损失, 即热沉积功率, 如式(2)所示

$$E = n_p \frac{dE}{dX} t = \frac{P_b}{E_p} \left(\frac{dE}{dX}\right) \rho t \quad (2)$$

式中: n_p 为质子总数; P_b 为束流功率; E_p 为单个质子能量; ρ 为束窗薄膜材料密度, t 为束窗薄膜厚度。

通过 ANSYS 软件分别计算出单层膜质子束窗在不同功率下束窗的最高温度及最高热应力, 见表 1。

表 1 不同功率束窗的功率损失及热应力

Table 1 Power loss and thermal stress of PBWs under different beam power

beam power/kW	lost power/W	maximum temperature/°C	maximum stress/MPa
100	67.5	61.7	58.9
170	114.0	83.8	80.1
200	135.0	93.4	93.4
240	162.0	106.1	110.4
300	202.0	125.0	136.0
500	337.5	195.1	230.6

前期课题组对质子束窗材料 A5083-O 进行性能测试, 材料在 100 °C 高温拉伸实验下的屈服强度为 150 MPa。当温度达到 150 °C 时, 材料将出现明显的蠕变情况^[8]。考虑 1.5 倍安全系数, CSNS 一期单层膜质子束窗将不能承受高于 200 kW 的束流功率。

为提高束窗对束流功率的承受能力, CSNS-II 期质子束窗采用双层膜的圆弧结构形式, 如图 5(b) 所示, 水冷槽在两膜之间, 采取直接冷却方式, 提高束窗对束流功率的承受能力。

3 CSNS-II 质子束窗双层膜结构优化设计

对质子束窗双层膜进行结构-稳态热应力耦合分析, 分别对双层膜结构中曲面圆弧半径 R 、真空侧薄膜厚度 t_1 、氦气侧薄膜厚度 t_2 、水槽宽度 t_3 、水槽长度 H 这 5 个参数进行优化调整, 如图 6 所示, 尽可能降低质子束窗最高温度及热应力。优化过程中质子束窗中间水路的绝对压力为 0.5 MPa, 氦气侧的绝对压力为 0.1 MPa, 真空侧绝对压力为 0 Pa, 冷却水的对流换热系数, 取工程常用值 5000 W/(m²·K), 对 5 个结构参数分别取 $R=50 \text{ mm}$ 、 $t_1=2 \text{ mm}$ 、 $t_2=2 \text{ mm}$ 、 $t_3=3 \text{ mm}$ 、 $H=$

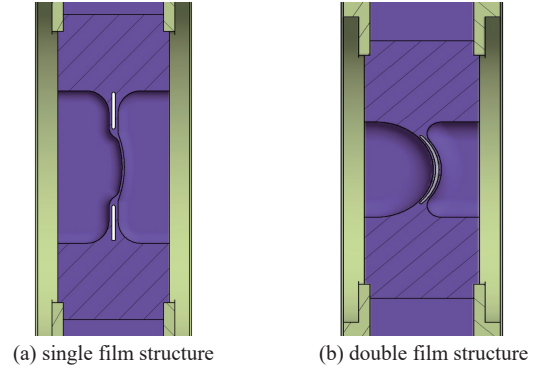


Fig. 5 Two structures of CSNS PBW

图 5 两种质子束窗单层膜与双层膜结构对比

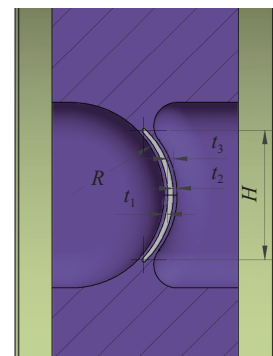


Fig. 6 Structural parameter distribution

图 6 双层膜结构参数图

80 mm 作为基准值,进行单因数分析,结果如图 7 所示。其中,圆弧半径 R 越小,质子束窗薄膜的最大应力越小;薄膜厚度增大会增加束窗上的热沉积功率,导致温度上升,而薄膜过薄会使薄膜应力增大,其最优值为真空侧薄膜厚度 $t_1=1.2$ mm,氦气侧薄膜厚度 $t_2=1.1$ mm(考虑到薄膜的可加工性以及冷却水对薄膜的冲刷腐蚀影响,研制工艺选取薄膜厚度均为 2 mm);水冷槽长度 H 过小,会降低薄膜边缘的冷却性能,导致热应力增大,当长度大于 70 mm 时,温度与热应力基本不变。由于仿真中对流换热系数为固定值,冷却效果与水的接触面积相关,增大冷却水槽宽度所能增加的水接触面积较小,因此对温度、热应力均没有产生较大影响。

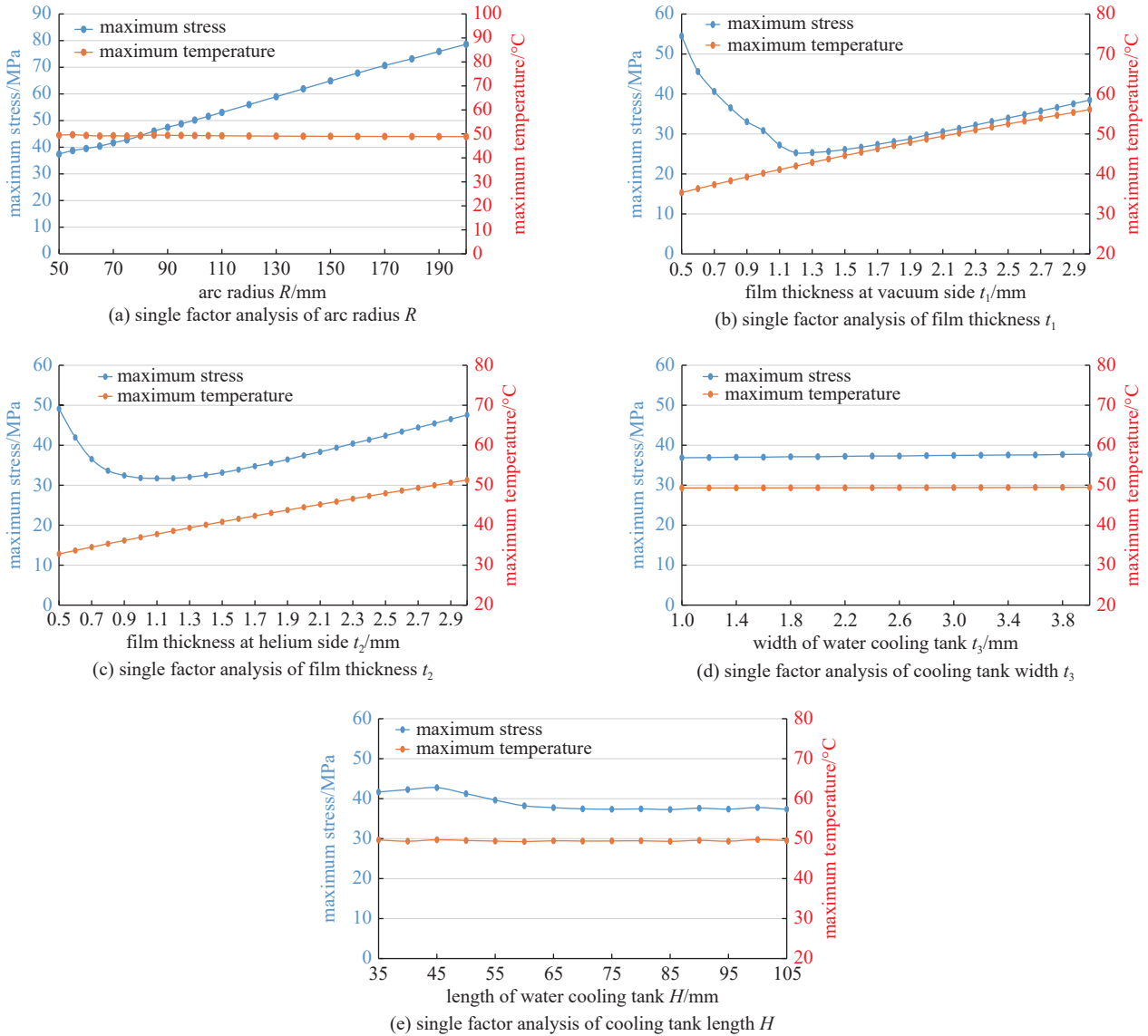


Fig. 7 Single factor analysis of PBW double film structure

图 7 质子束窗双层膜结构参数的单因素分析

4 CSNS-II 质子束窗冷却水需求分析

水流速的变化会引起对流换热系数的变化,因此对对流换热系数进行单因素分析,如图 8 所示。随着对流换热系数的增大,温度及热应力均出现快速下降,对流换热系数的取值对计算结果影响明显,当对流换热系数小于 $5000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时,束窗最大应力与温度急速上升,因此对流换热系数应尽可能大于此值。

质子束窗的冷却水流量与对流换热系数之间存在一定的关系,分别通过式(4)至式(6)计算水流的普朗特数、雷诺数、努赛尔准数与对流换热系数的关系^[9],获得束窗在不同冷却水流量下的对流换热系数,计算结果如图 9 所示。当入口流速为 $15 \text{ L}/\text{min}$ 时,对流换热系数达到 $5083 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,随着入口流速的提高,会进一步提高换热效率。

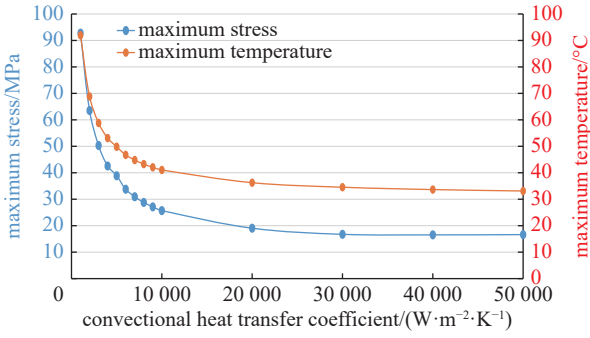


Fig. 8 Single factor analysis of convective heat transfer coefficient
图 8 对流换热系数的单因素分析

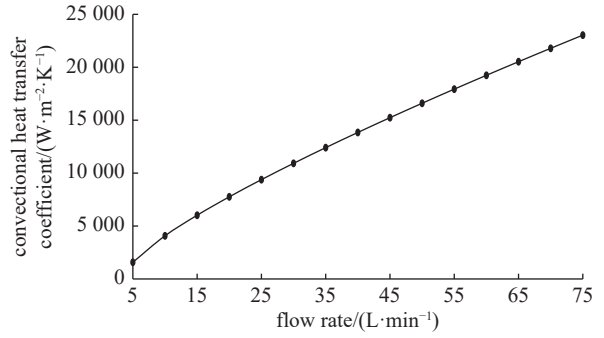


Fig. 9 Convective heat transfer coefficient vs flow rate at the entrance
图 9 入口流速与对流换热系数关系

普朗特数为

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad (3)$$

式中: c_p 为冷却水比热容; μ 为动力粘度; λ 为水导热系数。

雷诺数为

$$Re = \frac{\bar{u} \rho d_s}{\mu} \quad (4)$$

式中: \bar{u} 为冷却槽内的平均流速; d_s 为双层膜等效水力直径。

努赛尔准数计算式为

$$Nu = \begin{cases} 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \left(1 - \frac{6 \times 10^5}{Re^{1.8}}\right) & (2300 < Re < 10000) \\ 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} & (Re > 10000) \end{cases} \quad (5)$$

对流换热系数为

$$K = \frac{\lambda Nu}{d_s} \quad (6)$$

5 CSNS-II 质子束窗流固耦合分析

对质子束窗进行冷却水流速 15 L/min 时的流固耦合分析^[10-11], 分析结果如图 10 至图 13 所示。质子束窗薄膜位置最高温度 47.8 °C (温升 17.8 °C), 薄膜位置最高热应力 30.758 MPa。双层薄膜中心平均流速为 0.961 m/s, 薄膜中心对流换热系数仿真值为 5450 W/(m²·K), 与公式计算结果相近。从流线图可知, 双层膜中水流为层流状态, 流动平稳。但水箱底部存在缓慢流动的涡流, 容易形成死水状态, 由于质子束窗处于高放射性区域, 死水区域容易造

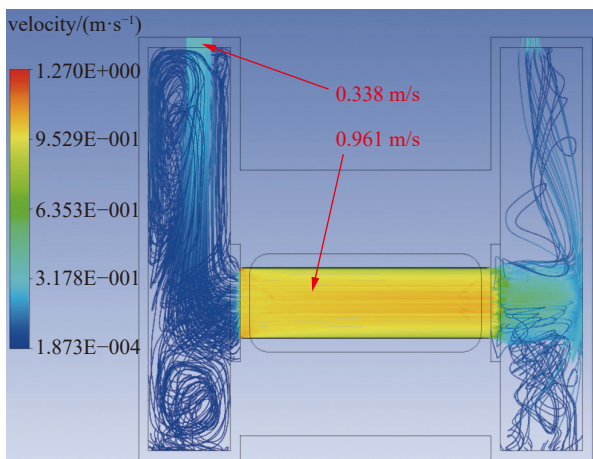


Fig. 10 Streamline diagram
图 10 质子束窗内部水流线图

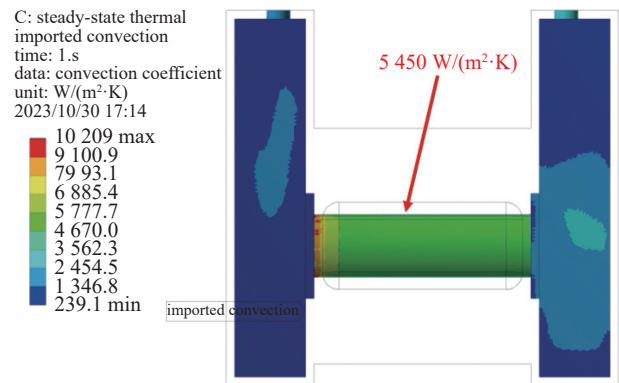


Fig. 11 Convective heat transfer coefficient distribution diagram
图 11 对流换热系数分布图

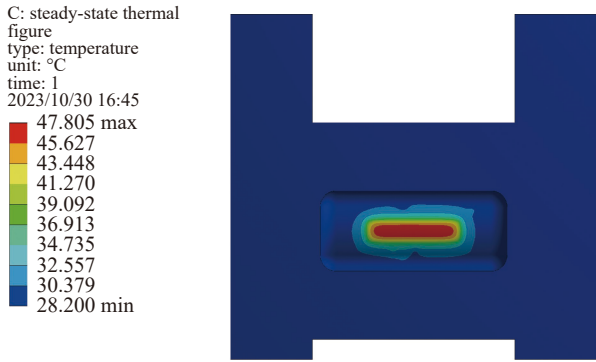


Fig. 12 Temperature distribution diagram of the PBW

图 12 质子束窗温度分布图

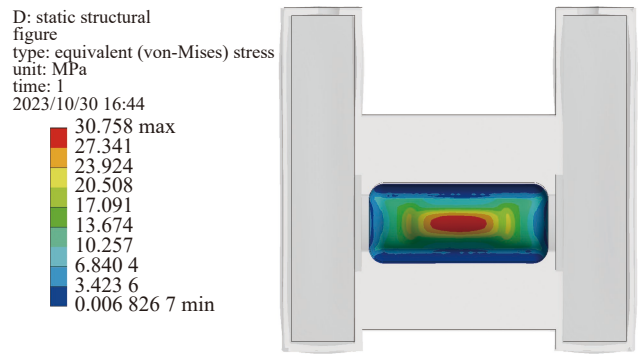


Fig. 13 Stress distribution diagram of the PBW

图 13 质子束窗薄膜应力分布图

成辐射剂量的累积,通过缩减水箱底部空间以及水箱容积,避免死水区域的产生,缩减水箱前后结果对比如图 14 和图 15 所示,水箱底部涡流消除。

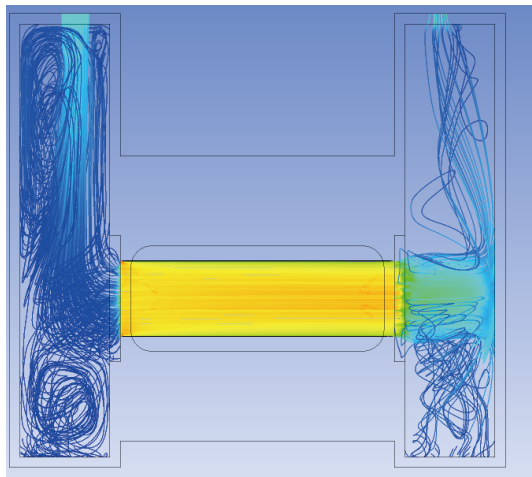


Fig. 14 Streamline diagram before volume reduction

图 14 削减箱底容积前的水流线图

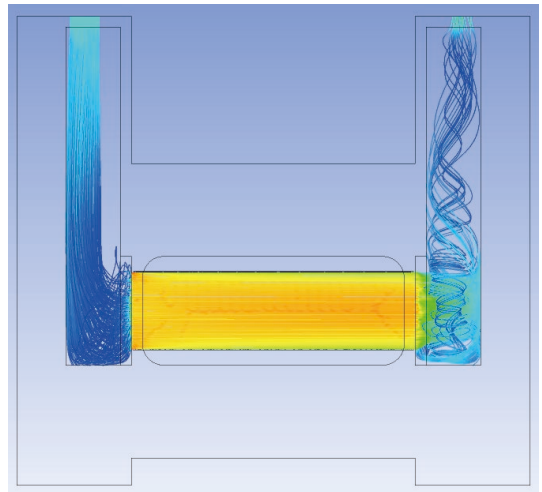


Fig. 15 Streamline diagram after volume reduction

图 15 削减箱底容积后的水流线图

6 CSNS-II 质子束窗辐照损伤分析

辐照损伤原子平均离位(DPA)的物理意义是材料受辐射为一定剂量时,材料的每个点阵原子发生离位的次数,DPA 是衡量辐射损伤的重要指标,是辐照损伤计算的一种规范和衡量辐照效应的评价标准。采用 FLUKA 软件模拟质子束窗的辐照损伤^[12-13]。由于束斑形状近似于双高斯分布的中心均匀化处理,为了便于软件仿真分析,分别进行三种束斑形状分析,包括:(a)双高斯分布光斑 $\sigma_x=27\text{ mm}$, $\sigma_y=6.3\text{ mm}$; (b)宽 $\pm 60\text{ mm}$,高 $\pm 13\text{ mm}$ 的矩形束斑; (c)矩形光斑保守分析(缩小 20% 面积)。

3 种束斑分别在 100 kW 的束流功率下,每年运行 5000 h 的工况下,DPA 计算结果分别为 0.58 DPA、0.209 DPA、0.257 DPA,如图 16 所示。当束流功率为 500 kW 时,DPA 计算结果可等价于 2.9 DPA、1.045 DPA、1.285 DPA。质

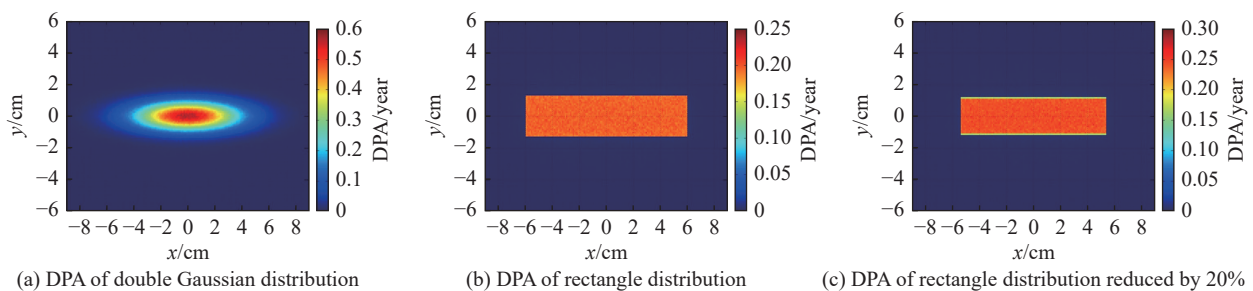


Fig. 16 DPA analysis results under different size

图 16 不同光斑尺寸下的 DPA 分析结果

子束窗结构材料 A5083-O 拥有 10 DPA 的使用寿命^[14-15], 而 CSNS-II 均匀化处理后的束流光斑近似于矩形光斑, 以矩形光斑保守分析 1.285 DPA 结果作为依据, 则质子束窗在束流辐照下安全使用寿命为 7.8 年。

7 结 论

设计出靶站质子束窗的结构形式并分析单层膜质子束窗的最高承受功率, 通过对 CSNS-II 质子束窗的升级研制, 设计出双层膜中间通水的冷却结构。完成质子束窗双层膜的薄膜半径、薄膜厚度、水冷槽长度与宽度、对流传热系数等各参数对质子束窗温升与热应力的影响分析。其中圆弧半径 R 越小, 质子束窗薄膜的最大应力越小, 从整体结构考虑选取 $R=50$ mm; 薄膜厚度的最优值为真空侧薄膜厚度 $t_1=1.2$ mm, 氦气侧薄膜厚度 $t_2=1.1$ mm; 冷却水槽宽度 t 的变化对束窗温度及热应力均没有产生较大影响, 而水冷槽长度大于 70 mm 时, 已具备足够的散热能力, 温度与热应力基本不变。通过质子束窗主体的流固耦合分析, 消除箱体内部死水区域, 并求得冷却水流速需大于 15 L/min。优化后质子束窗薄膜位置最高温度 47.8 °C, 薄膜位置最高热应力 30.758 MPa。通过质子束窗材料的辐照损伤性能分析可知, 在每年 5000 h 工作时长, 500 kW 高功率束流的辐照下, 每年辐照损伤 DPA 计算值为 1.285 DPA, 质子束窗的安全使用寿命可达 7 年以上。

参考文献:

- [1] Wei Jie, Chen Hesheng, Chen Yanwei, et al. China Spallation Neutron Source: design, R&D, and outlook[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2009, 600(1): 10-13.
- [2] Wei Jie, Fu Shinian, Tang Jingyu, et al. China Spallation Neutron Source—an overview of application prospects[J]. Chinese Physics C, 2009, 33(11): 1033-1042.
- [3] Wang Sheng, Fang Shouxian, Fu Shinian, et al. Introduction to the overall physics design of CSNS accelerators[J]. Chinese Physics C, 2009, 33(S2): 1-3.
- [4] Chen Hesheng, Wang Xunli. China's first pulsed neutron source[J]. Nature Materials, 2016, 15(7): 689-691.
- [5] Liu Huachang, Peng Jun, Gong Keyun, et al. The design and construction of CSNS drift tube linac[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 911: 131-137.
- [6] Wang Haijing, Liu Weibin, Qu Huamin, et al. Thermal analysis and optimization of proton beam window for the CSNS[J]. Chinese Physics C, 2013, 37: 077001.
- [7] 王梓豪, 屈化民, 朱东辉, 等. 环-靶站输运线末端准直器的研究[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 055104. (Wang Zihao, Qu Huamin, Zhu Donghui, et al. Collimator at end of ring to target beam transport[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 055104)
- [8] Wang Haijing, Zhu Donghui, Qu Huamin, et al. Material test of proton beam window for CSNS[C]//Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference. 2015: 2927-2930.
- [9] 朱道义, 孙红, 吴洪特. 套管换热器的强化效果试验研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2010, 7(3): 197-199. (Zhu Daoyi, Sun Hong, Wu Hongte. Experimental study on the effect of enhanced heat transfer in tube-in-tube heat exchanger[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2010, 7(3): 197-199)
- [10] 解元玉. 基于 ANSYS Workbench 的流固耦合计算研究及工程应用[D]. 太原: 大原理工大学, 2011. (Xie Yuanyu. FSI calculation of research based on ANSYS Workbench and engineering applications[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011)
- [11] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (Wang Fujun. Computational fluid dynamics analysis—principles and applications of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004)
- [12] 于全芝, 殷雯, 梁天骄. 中国散裂中子源靶站重要部件的辐照损伤计算与分析[J]. 物理学报, 2011, 60: 052501. (Yu Quanzhi, Yin Wen, Liang Tianjiao. Calculation and analysis of DPA in the main components of CSNS target station[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60: 052501)
- [13] Korkut T, Korkut H. FLUKA simulations of DPA in 6h-SiC reactor blanket material induced by different radiation fields frequently mentioned in literature[J]. Journal of Fusion Energy, 2013, 32(1): 66-70.
- [14] Harada M, Watanabe N, Konno C, et al. DPA calculation for Japanese spallation neutron source[J]. Journal of Nuclear Materials, 2005, 343(1/3): 197-204.
- [15] Meigo S I, Ooi M, Harada M, et al. Radiation damage and lifetime estimation of the proton beam window at the Japan Spallation Neutron Source[J]. Journal of Nuclear Materials, 2014, 450(1/3): 141-146.