



·粒子束及加速器技术·

# 一种高重频废束桶束窗的设计及热结构分析\*

张 浩<sup>1</sup>, 黄礼明<sup>1</sup>, 赵 峰<sup>2</sup>, 林涵文<sup>1</sup>, 常仁超<sup>1</sup>, 魏建平<sup>1</sup>,  
鄂得俊<sup>1</sup>, 尉 伟<sup>1</sup>, 陶 凯<sup>1</sup>, 杨家岳<sup>1</sup>, 张未卿<sup>1</sup>

(1. 深圳综合粒子设施研究院, 广东 深圳 518107; 2. 中国科学院 大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023)

**摘 要:** 深圳中能高重频 X 射线自由电子激光(S<sup>3</sup>FEL)将建设成为全球唯一软 X 射线波段的高重频自由电子激光。废束桶是 S<sup>3</sup>FEL 装置的重要设备, 在系统调束中发挥着重要作用。废束桶束窗是废束桶的重要组成部分, 用于隔离和保护加速器超高真空环境。本文对几种常用的废束桶束窗材料进行了对比分析, 最终选择铍作为束窗的材料, 并依此设计了一种带有水冷结构的束窗。通过蒙特卡罗方法计算得到不同厚度束窗的沉积功率, 采用有限元分析方法对不同厚度的束窗进行热结构计算与分析, 得到厚度为 1.6 mm 的水冷铍窗效果最佳, 其最大温度为 121.6 °C, 低真空为 1 Pa 时的最大应力与中心变形分别为 198.7 MPa 和 0.000 82 mm, 低真空为 101 325 Pa 时的最大应力与中心变形分别为 204.2 MPa 和 0.097 mm, 结果均满足使用要求。此研究为 S<sup>3</sup>FEL 的废束桶束窗设计提供了重要的理论依据。

**关键词:** 自由电子激光; 高重频; 废束桶; 束窗; 有限元分析

中图分类号: TL503.1

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220350

## Design and thermal structure analysis of a dump beam window for high repetition frequency

Zhang Hao<sup>1</sup>, Huang Liming<sup>1</sup>, Zhao Feng<sup>2</sup>, Lin Hanwen<sup>1</sup>, Chang Renchao<sup>1</sup>, Wei Jianping<sup>1</sup>,  
E Dejun<sup>1</sup>, Wei Wei<sup>1</sup>, Tao Kai<sup>1</sup>, Yang Jiayue<sup>1</sup>, Zhang Weiqing<sup>1</sup>

(1. Institute of Advanced Science Facilities, Shenzhen 518107, China;

2. Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Shenzhen Superconducting Soft X-ray Free Electron Laser (S<sup>3</sup>FEL) will be the only high repetition frequency free electron laser in soft X-ray band in the world. Dump, playing an important role in system beam tuning, is an important equipment of S<sup>3</sup>FEL device. As an important component of dump, dump beam window is used to isolate and protect the ultra-high vacuum environment of the accelerator. In this paper, several commonly used materials for dump beam window are compared and analyzed, beryllium is finally chosen as the material. A dump beam window with water-cooled structure is designed using beryllium. The deposition power of beam window with different thickness is calculated by Monte Carlo method. The thermal-mechanical simulations based on the finite element analysis method show that the water-cooled beryllium window with a thickness of 1.6 mm is the best and meet the application requirements. Its maximum temperature is 121.6 °C. The maximum stress and central deformation at low vacuum of 1 Pa are 198.7 MPa and 0.000 82 mm respectively. The maximum stress and central deformation at low vacuum of 101 325 Pa are 204.2 MPa and 0.097 mm respectively. The present study provides a critical theoretical basis for the design of dump beam window in S<sup>3</sup>FEL.

**Key words:** free electron laser, high repetition frequency, dump, beam window, finite element analysis

自由电子激光于 1971 年首次提出, 是基于真空中自由电子产生的辐射激光<sup>[1]</sup>。目前国内外已研制出多台自由电子激光装置, 包括美国 LCLS、欧洲 XFEL、日本 SACLA、韩国 PAL-XFEL、上海 SXFEL、大连 DCLS 等<sup>[2-7]</sup>。深圳

\* 收稿日期: 2022-10-20; 修订日期: 2022-11-30

基金项目: 深圳市科技计划资助项目 (JCYJ20220530140807017)

联系方式: 张 浩, zhanghao@mail.iasf.ac.cn。

通信作者: 尉 伟, weiwei@mail.iasf.ac.cn。

中能高重复 X 射线自由电子激光(S<sup>3</sup>FEL)将采用先进的超导加速器,提供高重复频率、高亮度、飞秒级超短时间脉冲、高相干性、多用户的软 X 射线光源,满足国家在重要科学领域的重大需求。废束桶<sup>[8]</sup>作为 S<sup>3</sup>FEL 的重要设备,在系统调束中发挥着重要作用。废束桶束窗是废束桶的重要组成部分,用于隔离和保护加速器超高真空环境。系统运行时,电子束流首先打在束窗上并穿过,之后进入废束桶的屏蔽体内。在此过程中,由于束窗的阻拦部分电子束会沉积在束窗上,引起束窗的温升,同时引起结构强度的变化,因此束窗设计需要综合考虑材料、结构和厚度等多方面因素<sup>[9]</sup>。

在束窗设计中,束窗材料要求具有较好的热传导能力、较高的机械强度、较少的能量沉积和较低的放气率,此外束窗材料还要具备良好的加工和焊接性能<sup>[10-11]</sup>。目前,国内外光源项目中用于束窗材料的包括铍、无氧铜、钛合金、铝合金等<sup>[9]</sup>。由于电子束会沉积在束窗上引起束窗的温升,因此,还要对束窗添加冷却结构。水具有成本低、热力学性能优良、化学性质稳定和冷却系统简单等优点,成为最常用的冷却介质<sup>[12]</sup>。

S<sup>3</sup>FEL 处于初期研究阶段,需要进行关键技术的研究。本文主要针对电子束最大功率 15 kW,最大电子能量 120 MeV,最大重复频率 1 MHz 的废束桶束窗进行设计,对几种常用的废束桶束窗材料进行了对比分析,最终选择铍作为束窗的材料,并依此设计了一种带有水冷结构的束窗。采用蒙特卡罗软件 FLUKA<sup>[13-15]</sup> 计算束窗的沉积功率。采用有限元分析软件 Ansys<sup>[16]</sup> 对束窗进行热结构计算得出温度、应力和变形结果,分析优化得出最佳的束窗结构,为后续 S<sup>3</sup>FEL 的废束桶束窗设计提供重要理论参考。

## 1 束窗能量分布

根据物理设计要求,电子束最大功率 15 kW,最大电子能量 120 MeV,最大重复频率 1 MHz,束流在束窗表面呈现二维高斯分布,束窗中心与高斯分布中心重合,束流能量分布函数可表示为

$$f(x,y) = \frac{P}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)} \quad (1)$$

式中:  $P$  为束流在束窗上的沉积功率,单位为 W;  $\sigma_x, \sigma_y$  分别为高斯分布的标准差,根据物理设计均取 0.84 mm;  $x, y$  分别为以束窗中心为原点的二维平面坐标。根据高斯公式可计算得出,束流的最大能量在束窗中心位置,离中心越远分布的能量越少,束流在 3 倍标准差范围内的功率约为束窗沉积功率的 99.5%。

## 2 束窗材料选择

对于束窗材料的选择,需要综合考虑材料的热力学性能、机械性能和可加工性。一般要求具有较好的热传导能力、较高的机械强度、较少的能量沉积和较低的放气率,此外束窗材料还要具备良好的加工和焊接性能。国内外光源建设项目中选用的材料包括:钛合金(Ti-6Al-4V)、铝合金(A5083)、不锈钢(316L)、无氧高导铜(OFHC)和纯铍(Be)等<sup>[9]</sup>,其物性参数可通过工程材料数据库网上(<http://www.matweb.com>)查到,如表 1 所示。

表 1 材料物性参数

Table 1 Material physical parameters

material	density/ (kg·m <sup>-3</sup> )	elastic modulus/ GPa	Poisson's ratio	yield stress/ MPa	thermal conductivity/ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	thermal expansion coefficient/°C <sup>-1</sup>
Ti-6Al-4V	4430	113.8	0.360	880	6.7	8.6×10 <sup>-6</sup>
A5083	2660	71.0	0.330	145	117.0	23.0×10 <sup>-6</sup>
316L	7980	193.0	0.300	290	15.0	12.0×10 <sup>-6</sup>
OFHC	8940	115.0	0.343	340	391.0	17.7×10 <sup>-6</sup>
Be	1844	303.0	0.100	240/345	216.0	12.0×10 <sup>-6</sup>

通过表 1 可以看出,铍在机械强度、导热性能方面具有较高的综合性能。这里铍窗存在两种屈服强度,硬铍为 345 MPa,软铍为 240 MPa。由于束窗材料密度越大,沉积能量就会越大,因此铍的能量沉积有较大优势<sup>[17]</sup>。此外,铍可通过钎焊的方式同不锈钢或铜进行焊接,其在温度低于 300 °C 的放气率很低<sup>[18]</sup>,电子束透过铍窗沉积的能量较低。综合考虑下,选用铍作为束窗的材料。

## 3 束窗结构设计

通过表 1 可得,铍与不锈钢 316L 的热膨胀系数一致,而实际加工中材料热膨胀系数不一致可能导致束窗密封

不严,因此束窗采用不锈钢 316L 真空管中钎焊铍窗的设计,同时钎焊铍窗的不锈钢管两侧与法兰焊接形成组件。束窗的结构设计如图 1 所示。铍窗上游为高真空侧,下游为低真空侧(通过波纹管与废束桶连接),在高真空侧真空管内设置凸台,强化铍窗结构,避免铍窗两侧压差导致铍窗结构破坏。

根据物理设计要求,束窗有效直径为 100 mm,考虑到凸台的设计,因此铍窗直径为 110 mm。此外,凸台外侧设置水冷通道,在真空管竖直方向分别焊接进、出水管(内径 6 mm,外径 8 mm),保证下进上出的水流方式。

#### 4 束窗沉积功率计算

在束流通过束窗的过程中,部分电子束会沉积在束窗上,产生沉积功率,沉积功率可以按如下公式进行计算<sup>[19]</sup>

$$q = \frac{nP}{E} \left( \frac{dE_e}{dx} + \frac{dE_n}{dx} \right) \quad (2)$$

式中:  $q$  为束窗沉积能量,单位为 W/mm;  $E$  为电子束能量,单位为 MeV;  $P$  为电子束功率,单位为 W;  $n$  为安全系数;  $dE_e/dx$ ,  $dE_n/dx$  分别为电子和质子损失的能量,单位为 MeV/mm。因此,束窗的总沉积功率为式(2)中的  $q$  与束窗厚度的乘积。

电子束透过束窗的沉积功率同样可通过蒙特卡罗粒子输运程序 FLUKA 软件近似计算得出,蒙特卡罗计算是基于反复抽取随机数计算问题结果的方法。根据来流电子束参数,通过 FLUKA 软件对不同厚度(1~3 mm)铍窗的沉积功率进行计算,结果如图 2 所示。

根据图 2 可以得出,随着厚度的增大,电子束在束窗上的沉积功率呈线性趋势随之增大。而沉积功率的增大会导致束窗温度的升高,进而使得结构的热应力不断增大,因此需对束窗模型进行热结构耦合计算并优化。

#### 5 有限元计算与分析

根据上述计算的沉积功率,代入束流能量高斯分布函数中,采用有限元分析软件 Ansys 进行热结构分析,计算其温度、应力与变形。首先对束窗模型进行简化,省去进出水管,保留凸台外侧的水冷通道,结构如图 3 所示。

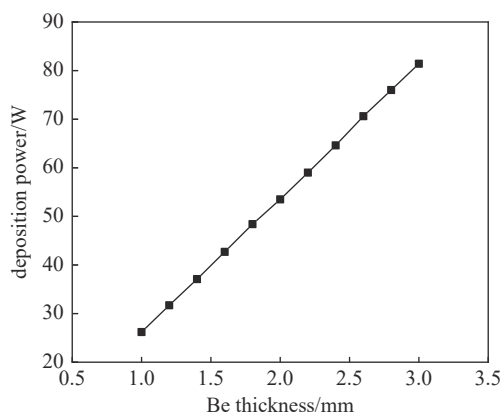


Fig. 2 Deposition power of beryllium window

图 2 铍窗沉积功率

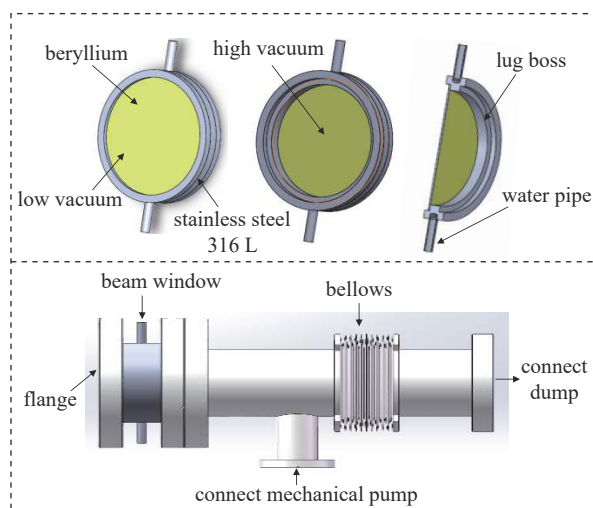


Fig. 1 Model of beam window

图 1 束窗模型

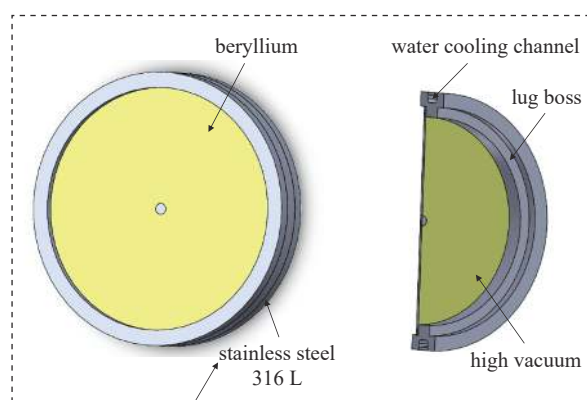


Fig. 3 Simplified model of beryllium window

图 3 束窗简化模型

束窗材料为铍,真空管材料为 316L,其物性参数见表 1。采用自由网格进行划分,根据实际使用情况确定边界条件,空气自然对流换热系数一般为 5~25 W/(m<sup>2</sup>·K)<sup>[9]</sup>,考虑到束窗结构与空气接触较为充分,且距离废束桶存在一定空间,因此真空管外壁设置空气对流换热系数 10 W/(m<sup>2</sup>·K)。水冷通道壁面设置水冷换热系数,取经验数值 5000 W/(m<sup>2</sup>·K)<sup>[19]</sup>。束窗高真空侧设置高斯热源,通过 Mechanical APDL 将高斯热源公式转化为 APDL 命令并插入 Steady state thermal 模块中计算温度分布。之后将温度计算结果导入 Static Structural 模块进行热结构耦合计算,模

型整体添加重力,真空管两端采用固定约束,束窗高真空侧压力为  $1 \times 10^{-6}$  Pa,低真空侧压力为 1 Pa,真空管外壁面压力为 101 325 Pa。此外还考虑到束窗低真空侧真空度变差,极限为 101 325 Pa 的情况,其他约束相同。厚度 1 mm 铍窗的温度和两种应力计算结果如图 4 所示。

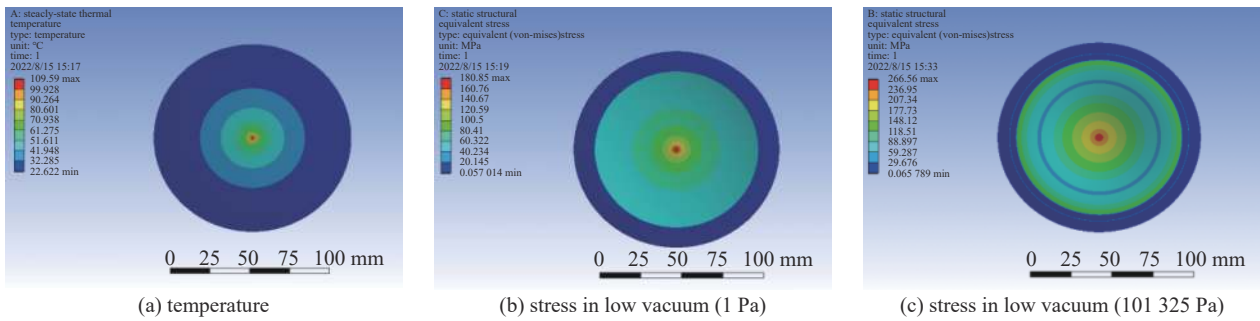


Fig. 4 Temperature and stress of 1 mm beryllium window

图 4 1 mm 铍窗的温度与应力

束窗的厚度除了与温度相关之外,还与结构强度有直接关系。束窗厚度越大,结构强度越好,但铍窗上沉积的能量也越多,伴随着温度的不断升高,会产生一定的热应力导致结构强度变差,这两者是相互矛盾的,因此需要对束窗厚度进行优化分析。针对不同厚度的铍窗进行计算,其最大温度、最大应力与中心变形的结果如图 5 所示。

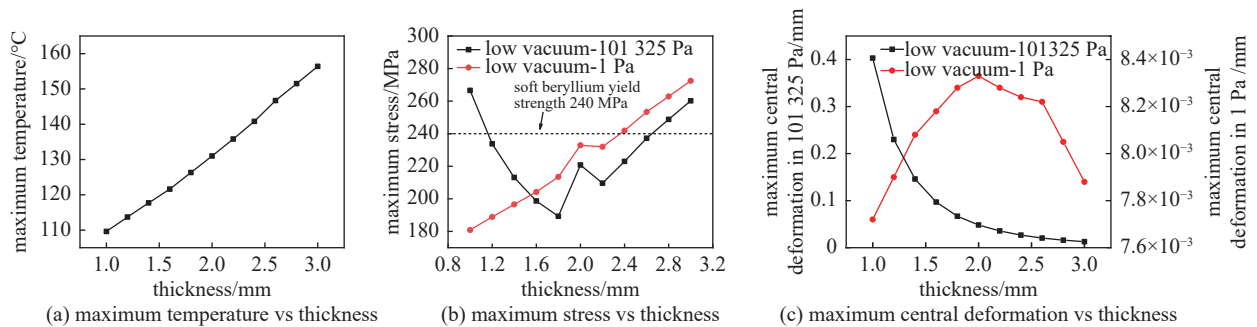


Fig. 5 Maximum temperature, maximum stress and center deformation beryllium window with different thickness

图 5 不同厚度铍窗的最大温度、最大应力和中心变形

由图 5 可以得出,随着铍窗厚度的不断增大,在温度变化方面,电子束通过其产生的沉积功率不断增加,导致最大温度随之不断增大;在应力变化方面,低真空侧为 1 Pa 情况下的最大应力不断增加,而低真空为 101 325 Pa 情况下的最大应力总体呈现先降低后增大的趋势。这是由于低真空侧为 1 Pa 情况下,铍窗的应力主要来源于温度的升高,而低真空为 101 325 Pa 的情况,铍窗两侧压差同样会对铍窗产生影响,两者的双重作用使得铍窗应力出现先降后升的趋势;在中心变形变化方面,低真空侧为 1 Pa 情况下,中心变形呈现先升高后降低的趋势,但变形量很小可忽略不计。低真空侧为 101 325 Pa 情况下,中心变形不断降低,降低量前期变化明显,后期趋近平稳。

综合上述最大温度、最大应力和中心变形变化趋势分析,温度远远低于铍的熔点(1273 °C),并且铍的放气率很低,不会对真空造成太大的影响。中心变形总体来看变形量很小,尤其在低真空侧为 1 Pa 情况下基本忽略不计。重点主要在最大应力方面,通过上述的计算结果可以得出,厚度在 1.2~2.2 mm 的区间内,应力都小于软铍的屈服强度 240 MPa,但两种情况的应力都要尽可能低于屈服强度,因此厚度 1.6 mm 的铍窗效果最佳。1.6 mm 铍窗计算结果如图 6 所示,其最大温度为 121.6 °C,低真空侧为 1 Pa 情况下最大应力为 198.7 MPa,中心变形为 0.0082 mm;低真空侧为 101 325 Pa 情况下最大应力为 204.2 MPa,中心变形为 0.097 mm。

## 6 结论

本文设计了一种高重频废束桶束窗,采用不锈钢 316L 真空管中钎焊铍窗的方式,铍窗上游为高真空侧,下游为低真空侧。在高真空侧真空管内设置凸台强化铍窗结构,凸台外围设置水冷通道增强束窗换热。通过比较不同材料物性参数,选取最佳束窗材料。采用蒙特卡罗方法获得束窗的沉积能量,通过有限元分析方法计算不同厚度束窗的温度、应力和变形情况,分析得出 1.6 mm 铍窗效果最佳,其最大温度为 121.6 °C,低真空侧为 1 Pa 情况下最大应力为 198.7 MPa,中心变形为 0.008 2 mm;中心低真空侧为 101 325 Pa 情况下最大应力为 204.2 MPa,中心变形

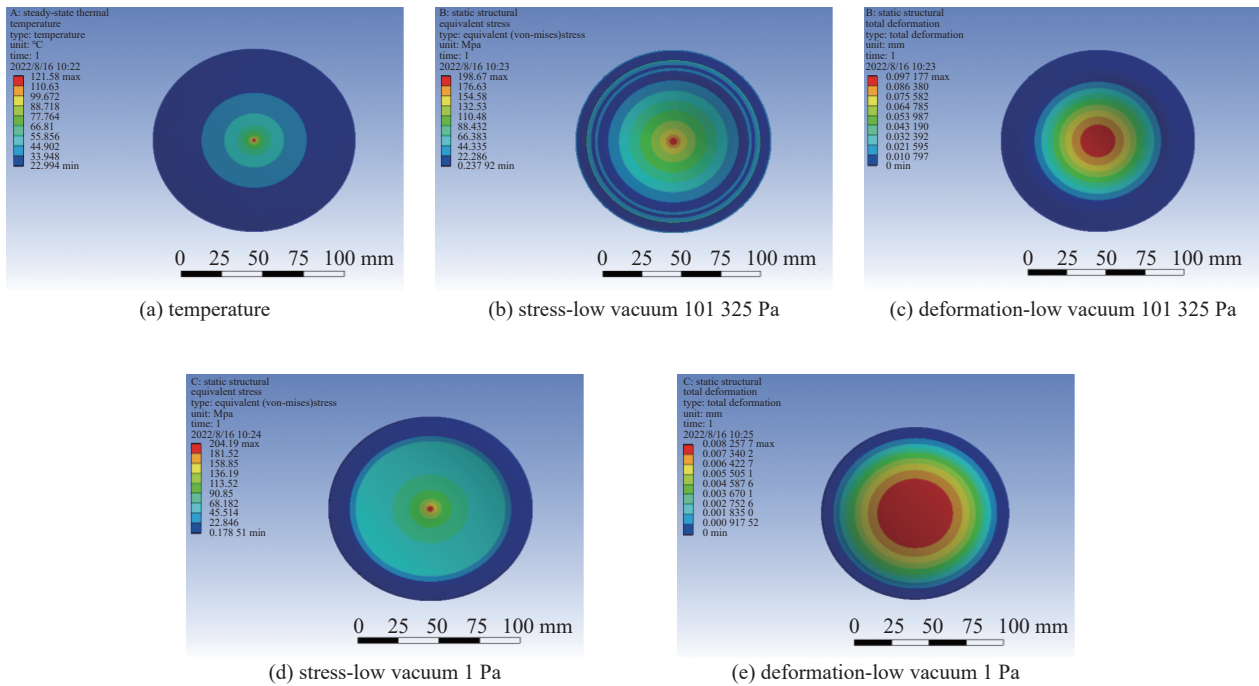


Fig. 6 Temperature, stress and central deformation of 1.6 mm beryllium window

图 6 1.6 mm 铍窗的温度、应力和中心变形

为 0.097 mm, 结果小于材料屈服强度, 验证了束窗结构的安全性。

本文研究为 S'FEL 的废束桶束窗设计提供了理论依据, 后续将分析束斑大小、光束偏移及低真空侧压力对废束桶束窗的影响, 进行废束桶束窗的优化工作。

#### 参考文献:

- [1] Madey J M J. Stimulated emission of bremsstrahlung in a periodic magnetic field[J]. *Journal of Applied Physics*, 1971, 42(5): 1906-1913.
- [2] Herrmann S, Boutet S, Duda B, et al. CSPAD-140k: a versatile detector for LCLS experiments[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, 718: 550-553.
- [3] Geloni G, Saldin E, Samoylova L, et al. Coherence properties of the European XFEL[J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12: 035021.
- [4] Pile D. X-rays: first light from SACLA[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(8): 456-457.
- [5] Park S H, Yoon J, Kim C, et al. Scientific instruments for soft X-ray photon-in/photon-out spectroscopy on the PAL-XFEL[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2019, 26(4): 1031-1036.
- [6] 范伟杰, 冯超, 赵明华. 上海软X射线自由电子激光外种子运行模式的模拟研究[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 031016. (Fan Weijie, Feng Chao, Zhao Minghua. Simulation studies of external seeding schemes for Shanghai soft X-ray free electron laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 031016)
- [7] 姜岩秀, 巴音贺希格, 赵旭龙, 等. 自由电子激光器用极紫外波段平面变栅距光栅[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(8): 2117-2124. (Jiang Yanxiu, Bayanheshig, Zhao Xulong, et al. Plane holographic varied-line-space grating for DCLS in EUV region[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(8): 2117-2124)
- [8] 李迪开, 曹磊峰, 池云龙, 等. 95 MeV射频电子直线加速器辐射防护分析[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 064008. (Li Dikai, Cao Leifeng, Chi Yunlong, et al. Radiation protection analysis of 95 MeV RF electron linac[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 064008)
- [9] 聂小军, 刘磊, 康玲, 等. 一种废束站束窗结构设计及优化[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 105105. (Nie Xiaojun, Liu Lei, Kang Ling, et al. Structure design and optimization of a dump beam window[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 105105)
- [10] 马文静, 赵壮, 王思慧, 等. 合肥先进光源前端光子吸收器的设计及热分析[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 104007. (Ma Wenjing, Zhao Zhuang, Wang Sihui, et al. Design and thermal analysis of front-end photon absorber at HALF[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 104007)
- [11] 陈丽萍. 上海光源储存环光子吸收器结构与研制[J]. *真空科学与技术学报*, 2009, 29(5): 546-551. (Chen Liping. Photon absorber development for storage ring of Shanghai Synchrotron Radiation Facility[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2009, 29(5): 546-551)
- [12] 李勇军. 上海光源高热负载前端区的系统设计与研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海应用物理研究所), 2016. (Li Yongjun. Design and study of high heat load front-end at SSRF[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences), 2016)
- [13] Böhlen T T, Cerutti F, Chin M P W, et al. The FLUKA code: developments and challenges for high energy and medical applications[J]. *Nuclear Data Sheets*, 2014, 120: 211-214.
- [14] Ahdida C, Bozzato D, Calzolari D, et al. New capabilities of the FLUKA multi-purpose code[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 9: 788253.

- [15] Battistoni G, Boehlen T, Cerutti F, et al. Overview of the FLUKA code[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 82: 10-18.
- [16] 张朝晖. ANSYS12.0热分析工程应用实战手册[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010. (Zhang Chaohui. ANSYS12.0 practical handbook for the engineering thermal analysis[M]. Beijing: China Railway Press, 2010)
- [17] 武红利. C-ADS HEBT末段真空质子束窗与准直器相关物理问题研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014. (Wu Hongli. Investigation of proton beam window and collimator of high energy proton beam transport line of C-ADS[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014)
- [18] 陈旭, 杨新建, 齐京, 等. 金属Be真空出气性能的测试[J]. *真空科学与技术*, 2002, 22(6): 459-462. (Chen Xu, Yang Xinjian, Qi Jing, et al. Study of vacuum degassing behavior of beryllium[J]. *Vacuum Science and Technology (China)*, 2002, 22(6): 459-462)
- [19] 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.