



·粒子束及加速器技术·

大连先进光源束流垃圾桶屏蔽设计及热工分析*

鄂得俊, 黄礼明, 刘昌奇, 陶凯

(深圳综合粒子设施研究院, 广东 深圳 518107)

摘要: 基于蒙特卡罗模拟软件 FLUKA 和有限元软件 COMSOL 对大连先进光源 (DAL S) 束流垃圾桶的设计进行了初步研究。采用 FLUKA 软件进行了束流垃圾桶和主体建筑的建模, 理论公式和模拟计算保证径向和轴向束流垃圾桶沉积能量在 99% 以上, 计算中引入减方差技巧, 降低计算结果的统计误差, 相应的计算结果的误差在 5% 以内。同时计算给出侧墙和顶板位置的辐射剂量率的大小, 侧墙两边的剂量率大小分别为 1.84 $\mu\text{Sv/h}$ 和 1.15 $\mu\text{Sv/h}$, 顶板位置处的剂量率大小约为 1.14 $\mu\text{Sv/h}$, 保证了工作人员的安全与健康。利用 COMSOL 软件计算束流入射情况下束流垃圾桶的温度分布和热应力的分布, 得到稳态情况下束流垃圾桶的最高温度为 55.1 $^{\circ}\text{C}$, 最大热应力大小为 54.5 MPa, 小于材料的熔点和屈服强度, 保证束流垃圾桶在装置运行过程中的稳定性。

关键词: 束流垃圾桶; 大连先进光源; 辐射屏蔽计算; 热工计算

中图分类号: TL99

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230286

Dalian Advanced Light Source beam dump radiation shielding design and thermal analysis

E Dejun, Huang Liming, Liu Changqi, Tao Kai

(Institute of Advanced Science Facilities, Shenzhen 518107, China)

Abstract: A preliminary study of the design of the beam dump for the Dalian Advanced Light Source (DAL S) was studied with the Monte Carlo simulation software FLUKA and the finite element software COMSOL. The modeling of the beam dump and the main building was carried out using FLUKA software. Both theoretical formulas and simulation calculations ensured that the energy deposited radially and axially in the beam dump was above 99%. The reduced variance technique was introduced in the calculation to reduce the statistical error of the calculation results, and the error of the corresponding calculation results was within 5%. To ensure the safety of the staff during the operation stage, the dose rates at the side walls and the top plate were calculated using FLUKA software simulations, and the dose rates at the two side walls were 1.84 $\mu\text{Sv/h}$ and 1.15 $\mu\text{Sv/h}$, respectively, and the dose rate at the top plate was 1.14 $\mu\text{Sv/h}$, which ensures the safety and health of the staff. Using the finite element software COMSOL, the maximum temperature of the beam dump under the steady state condition was 55.1 $^{\circ}\text{C}$, and the corresponding maximum thermal stress was 54.5 MPa, which are less than the melting point and yield strength of the material respectively. The stability of the beam dump during the operation of the device is ensured.

Key words: beam dump, Dalian Advanced Light Source, radiation shielding calculation, thermal engineering calculation

大连先进光源 (DAL S) 全称为“高重复频率极紫外自由电子激光装置”, 是一套工作在极紫外 (含软 X 射线) 波段的高重复频率自由电子激光装置, 将超导加速器技术、超快激光技术、高灵敏度探测技术等^[1-3] 紧密结合起来, 有望成为世界上独特的综合性基础科学研究平台, 满足国家在重大科研方面的需求。束流垃圾桶作为大连光源预研项目中重要的加速器设备^[4-5], 电子束流在系统调束和收集废束过程中直接被束流垃圾桶收集, 高能电子轰击会形成很强的辐射剂量, 同时高能电子与加速器的结构材料相互作用, 产生光子与加速器材料发生光核反应产生中子, 若屏蔽措施方案欠佳, 则会对工作人员甚至公众产生放射性危险, 在加速器辐射防护设计中, 束流垃圾桶的设

* 收稿日期: 2023-08-23; 修订日期: 2023-12-22

联系方式: 鄂得俊, edejun@mail.iasf.ac.cn。

通信作者: 陶凯, taokai@mail.iasf.ac.cn。

计是非常重要的的一环^[6-8]。

高能电子加速器的束流垃圾桶的主要功能是吸收废弃的高能电子束流,在设计的过程中需要选择合适的靶材料高效地吸收束流,同时需要对电子与靶材料相互作用产生的大量的中子、光子等次级粒子加以屏蔽,确保隧道内的辐射安全。从辐射防护角度来说,束流垃圾桶在设计过程中一方面要最大限度地有效沉积电子束流及其携带的能量,另一方面要对其自身进行辐射屏蔽,使得束流沉积吸收过程中产生的辐射剂量不对周围设备、环境和人员安全产生负面影响^[9-11]。从热工水力角度来说,束流轰击束流垃圾桶的时候,在高功率、高能量、高频率电子束的轰击下,要及时将能量导走,否则束流垃圾桶会发生应力形变,导致束流垃圾桶出现变形,最终导致辐射事故的发生,对加速器工作人员造成危害^[12-13]。根据上述束流垃圾桶的功能,粒子加速器束流垃圾桶可以分为两个部分^[14-15]——“吸收体”和“屏蔽体”。吸收体主要吸收电子束的能量,屏蔽体主要屏蔽电子束在与吸收体作用时产生的光子或者高能时发生光核反应产生的中子,在设计过程中需要综合考虑材料、结构和尺寸的影响。

本文主要针对大连先进光源电子束最大功率 800 W,最大电子能量 8 MeV,最大重复频率 1 MHz 的调束垃圾桶进行了设计,采用蒙特卡罗软件 FLUKA 计算了大连先进光源束流垃圾桶的能量沉积和辐射剂量率的大小,采用有限元软件 COMSOL 对束流垃圾桶开展了热工计算,给出了温度和热应力的变化,为后续高功率、高能量、高重复频率的束流垃圾桶的设计提供重要理论参考。

1 计算方法

1.1 理论模型

大连先进光源电子束测试平台的整体布局如图 1 所示,由超导电子直线加速器、束流传输线、束流垃圾桶等构成。电子束测试平台在电子束调束阶段,束流损失主要损失在电子枪和超导加速器后面的调束垃圾桶内,整机测试阶段,束流损失主要在分支线和主线束流垃圾桶处,因此束流垃圾桶是大连先进光源束流测试平台中最重要的源项,同时束流垃圾桶的设计也是加速器工程中最重要的一环。以 CM00 束流垃圾桶为计算对象,根据物理设计要求,电子束入射束流垃圾桶最大电荷量 100 pC,最大电子能量 8 MeV,最大重复频率 1 MHz,束流垂直入射束流垃圾桶,加速器束流为高斯分布,保守起见横向均方根 $\sigma_x = \sigma_y = 0.25$ mm。

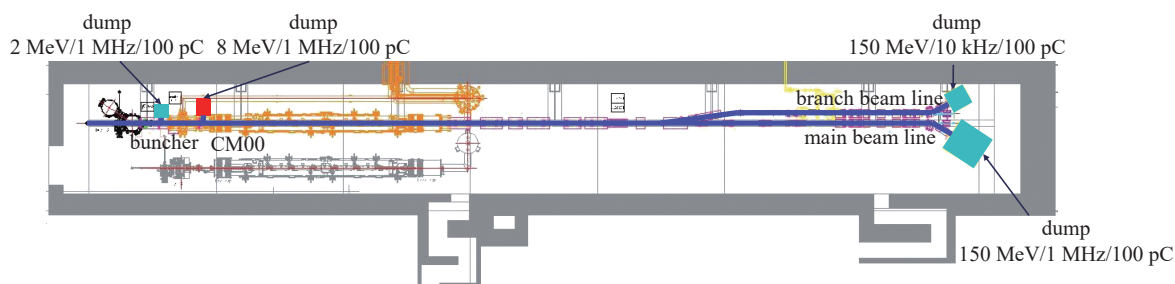


Fig. 1 Beam dump distribution of Dalian Advanced Light Source

图 1 大连先进光源束流垃圾桶分布

1.2 源项

欧洲电子同步加速器(DESYS)的一份设计报告^[15]中的经验公式给出了不同核心吸收体材料所需要的尺寸的大小,给出了束流垃圾桶吸收 99% 以上的电子束能量的时候,所需要的径向尺寸 $L_{99\%}$ 和轴向尺寸 $R_{99\%}$ 。

$$L_{99\%} = \left(1.52 \times \ln \left(\frac{E_0}{\text{MeV}} \right) - 4.1 \times \ln \left(\frac{E_c}{\text{MeV}} \right) + 17.6 \right) X_0 \quad (1)$$

式中: E_0 为电子的入射能量, E_c 为临界能量, X_0 为辐射长度,表征入射粒子能量达到初始能量的 $1/e$ 时所经过的长度,相应的计算公式如下

$$X_0 = \frac{716A}{Z(Z+1) \ln \left(\frac{287}{\sqrt{Z}} \right) \rho} \quad (2)$$

式中: Z 为入射物质的质子数, A 为入射物质的相对原子质量, ρ 为入射物质的密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。

束流垃圾桶的核心吸收体径向方向的电子电磁簇射程度由莫里埃半径 R_M 来度量,莫里埃半径的计算如下:

$$R_M \approx \frac{21.2}{E_c} X_0 \quad (3)$$

径向方向电子的能量吸收率要达到 99% 以上需要的物质半径大小为 $5R_M$ 。

根据 James^[8] 的研究, 在考虑到导热系数、熔点、热膨胀系数和屈服强度等关键性能参数, 只有铍、石墨、铝和铜是核心吸收体的材料选择。但是由于铍的成本高、机械性能差和材料的后处理问题, 铍不太适合做核心吸收体, 因此在束流垃圾桶设计中不考虑。表 1 给出了石墨、铝和铜三种材料的物理性质和辐射特性的对比, 其中 T_{melt} 为材料的熔点, T_{op} 为最高工作温度, E 为弹性模量, α 为热膨胀系数, $\sigma_{0.2}$ 为屈服强度, σ_u 为抗拉强度。由于石墨的加工和焊接技术的限制需要开展大量的工作, 因此选择核心吸收体的材料为铝和铜。铜具有较高的熔点、优越的热导率和较低的热膨胀系数, 但是其光核反应的阈值 (^{65}Cu 的阈值为 9.9 MeV) 低于铝材料 (阈值为 13.1 MeV)。但是考虑到工艺布局, 在电子束能量为 8 MeV 的时候, 铝的轴向尺寸的大小为 47.94 cm, 加上束流垃圾桶和真空管的连接空间, 其长度要远大于工程实际的 50 cm, 同时从设计加工、工程造价和加工工艺等角度出发束流垃圾桶的核心吸收体的材料选择为铜。

表 1 石墨、铝和铜的物理性质和辐照特性的对比

Table 1 Physical properties and irradiation properties of graphite, aluminum and copper

| material | Z | A | density | E_c/MeV | X_0/cm | R_M/cm | $R_{99\%}/\text{cm}$ | $L_{99\%}/\text{cm}$ | $T_{\text{melt}}/^\circ\text{C}$ | $T_{\text{op}}/^\circ\text{C}$ | E/GPa | $\alpha(10^{-6} \text{K}^{-1})$ | $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$ | σ_u/MPa |
|----------|----|-------|---------|------------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| C | 6 | 12.01 | 1.71 | 75.9 | 25.10 | 7.0 | 35.0 | 383 | 3800 | 500~600 | 13 | 7(6~8) | - | 60 |
| Al | 13 | 26.98 | 2.70 | 40 | 8.89 | 4.7 | 23.5 | 159 | 660 | ≤ 250 | 70 | 26 | 200~400 | 80~120 |
| Cu | 29 | 63.54 | 8.96 | 18.8 | 1.44 | 1.6 | 8.0 | 30 | 1083 | ≤ 200 | 120 | 17 | 150~400 | 60~100 |

利用经验公式(1)和(3)给出了 CM00 废束桶在 8 MeV 的电子束入射下的铜核心吸收体的径向尺寸大小为 8 cm, 轴向尺寸大小为 13 cm, 利用上述公式给出了吸收体的一个初步结构, 相应的束流垃圾桶外围的屏蔽 γ 射线和电子的屏蔽体的材料选择为铁材料, 根据机械物理布局图, 在满足实际工程需要的前提下, 对于束流垃圾桶外围的屏蔽体进行了确定, 最终束流垃圾桶整体的结构大小为半径 20 cm、长度 50 cm。

1.3 热工计算

根据 DESY 计算报告中给出的, 束流垃圾桶核心吸收体中最大的平衡温度 (ΔT_{eq}) 的位置在 $r = 0$ 、 $z = t_{\text{max}}$ 的位置, 相应的大小为

$$\max(\Delta T_{\text{eq}}) = \Delta T_{\text{eq}}(r = 0, z = t_{\text{max}}) = \frac{1}{4\pi\lambda} \frac{dP}{dz}(t_{\text{max}}) \ln\left(1 + \frac{R^2}{2\sigma^2(t_{\text{max}})}\right) \quad (4)$$

式中: P 为束流沉积在吸收体的功率, t_{max} 为电磁级联的最大轴向位置, $\frac{dP}{dz}(t_{\text{max}}) = \max\left(\frac{dP}{dz}\right)$ 可以通过公式得到。但是由于电子束的能量为 8 MeV, 小于铜的临界能量 18.8 MeV, 因此上述公式不适用于计算该束流垃圾桶的平衡温度, 需要采用有限元软件进行相应的仿真计算。

接下来利用 FLUKA 软件对电子束入射废束桶进行了相应的模拟计算, 利用 USRBIN 计数卡统计得到电子束在废束桶内能量沉积 (ENERGY) 的分布, 相应的总的网格为 800 万个热源, 然后将这 800 万个热源作为有限元软件 COMSOL 计算固体传热的初始条件, 利用 COMSOL 软件对其进行了热工计算。

2 结果及其讨论

2.1 屏蔽计算

利用蒙特卡罗程序 FLUKA 软件的 USRBIN 计数卡对束流垃圾桶的能量沉积进行了计算, 计算了轴向和径向的能量沉积率的大小, 满足能量沉积在 99% 以上。为了使得墙外的剂量率满足限值, 在工艺满足的条件下, 需要不断迭代计算, 直到墙外的剂量率可以满足要求, 利用蒙特卡罗软件 FLUKA 对于大连先进光源及其 CM00 束流垃圾桶进行了建模, 相应的建模如图 2 所示。图 3 给出了在 8 MeV 的束流入射束流垃圾桶时隧道内的辐射剂量率的大小。在屏蔽计算过程中, 为了提高计算效率, 在计算模型中引入了两种减方差技巧, 分别是区域重要性抽样 (Region Importance Biasing, BIASING) 和平均自由程抽样 (Mean Free Path Biasing, LAM-BIAS) 方法。区域重要性抽样通过给每个区域设置一个重要性, 控制运输粒子在区域内的运输, 当粒子进入感兴趣的区域时, 通过使粒子分裂从而更多的粒子进入统计区, 而对于粒子不感兴趣的区域, 通过轮盘赌的方式减少粒子抽样。平均自由程抽样方

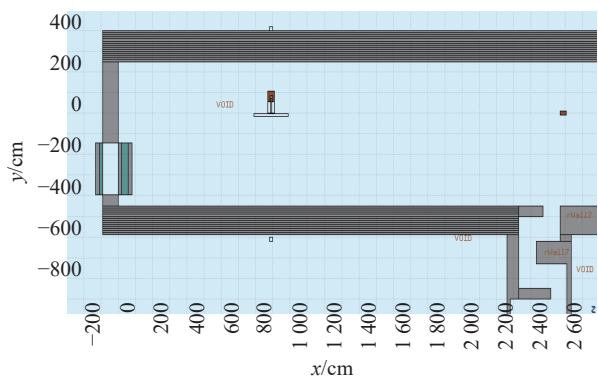


Fig. 2 Beam dump model of Dalian Advanced Light Source

图 2 大连先进光源束流垃圾桶物理建模

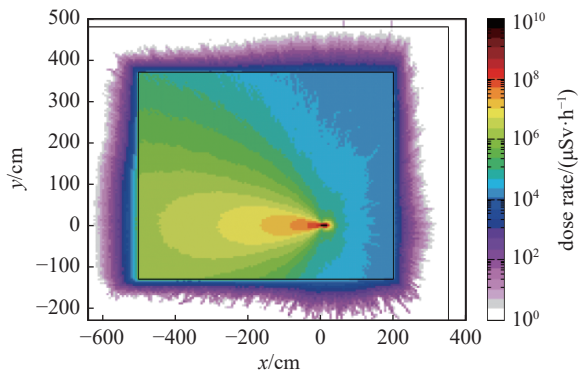
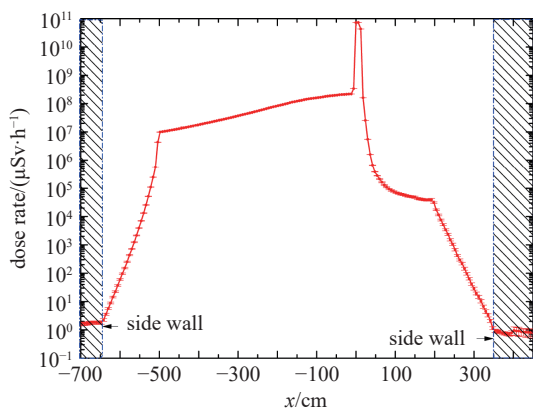


Fig. 3 Two-dimensional dose rate distribution of Dalian Advanced Light Source

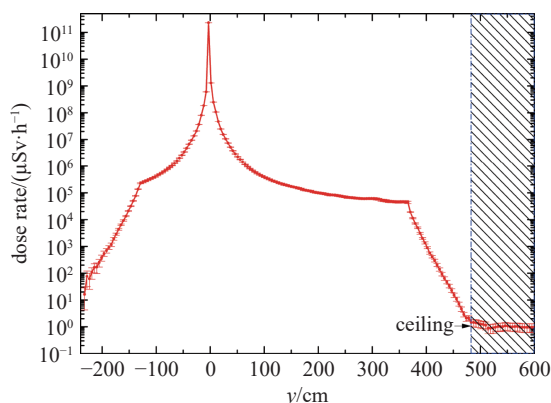
图 3 大连先进光源束流垃圾桶附近的剂量率二维分布

法通常适用于抽样不稳定核的衰变长度、二次衰变粒子的方向以及强子、光子和缪子的非弹性碰撞中自由程的抽样,当束流的能量越高的时候,产生的光子越多,会增加光核反应的作用概率,从而提高抽样效率。通过引入两种减方差技巧,提高了计算效率。

利用 FLUKA 软件进行了计算,给出了侧墙外的剂量的大小,由图 4(a)可知,束流垃圾桶反冲方向(左侧墙)的剂量率的大小为 1.84 $\mu\text{Sv/h}$,而束流垃圾桶正对方向(右侧墙)由于束流垃圾桶的屏蔽吸收,剂量率的大小为 1.15 $\mu\text{Sv/h}$ 。按照国标《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中的规定,对于放射性工作人员的年平均有效剂量值为 20 mSv,屏蔽设计中其受照射剂量通常约束在剂量限值的 10%~30%之间,在实际计算中按照每年 5 mSv 进行考虑。在保守考虑下,侧墙外人员驻留时间最大为 2000 h,其剂量率应小于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$;顶墙外人员偶然居留,按照每年 1000 h 计算,其剂量率应小于 5 $\mu\text{Sv/h}$ 。



(a) the side wall position



(b) the ceiling position

Fig. 4 Magnitude of dose rate outside the side walls and the ceiling

图 4 侧墙外和顶板处的剂量率大小

在加速器日常的运行维护阶段,工作人员有时候需要在顶板进行作业,因此需要保证顶板处的剂量率的大小也在剂量安全限值以下。因此需要计算顶板处的剂量率的大小,图 4(b)给出了顶板处的剂量率的大小,由图 4(b)可知,顶板处的剂量率为 1.45 $\mu\text{Sv/h}$,低于给定的剂量限值 5 $\mu\text{Sv/h}$,通过上面的计算可知侧墙和顶板处的剂量率都在剂量限值以下,保障了工作人员的人身安全。

2.2 热工计算

利用有限元软件 COMSOL 对电子束轰击下束流垃圾桶的稳态热力学进行了计算分析,给出了温度分布和热应力的大小。在计算的过程中从蒙特卡罗 FLUKA 模拟中得到电子束在束流垃圾桶的能量沉积(GeV/cm^3)的分布大小,然后将其转换为功率(W/m^3)的大小,总共有 800 万个热源,相应的热源的分布如图 5 所示,将三维体源作为边界条件输入 COMSOL 软件,相应地给出了稳态下温度分布和热应力的大小。

图 6 给出了束流垃圾桶在电子束入射稳态情况下,束流垃圾桶整体的温度分布和热应力的大小。从图 6 可知

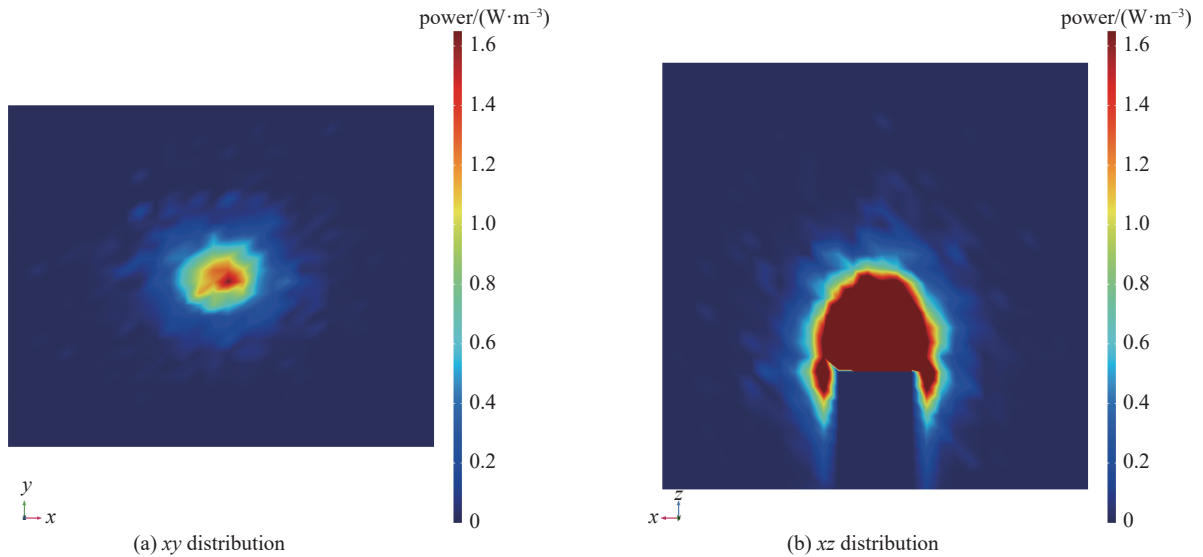


Fig. 5 Heat source distribution during the electron beam steady state

图5 电子束稳态运行时束流垃圾桶的热源分布

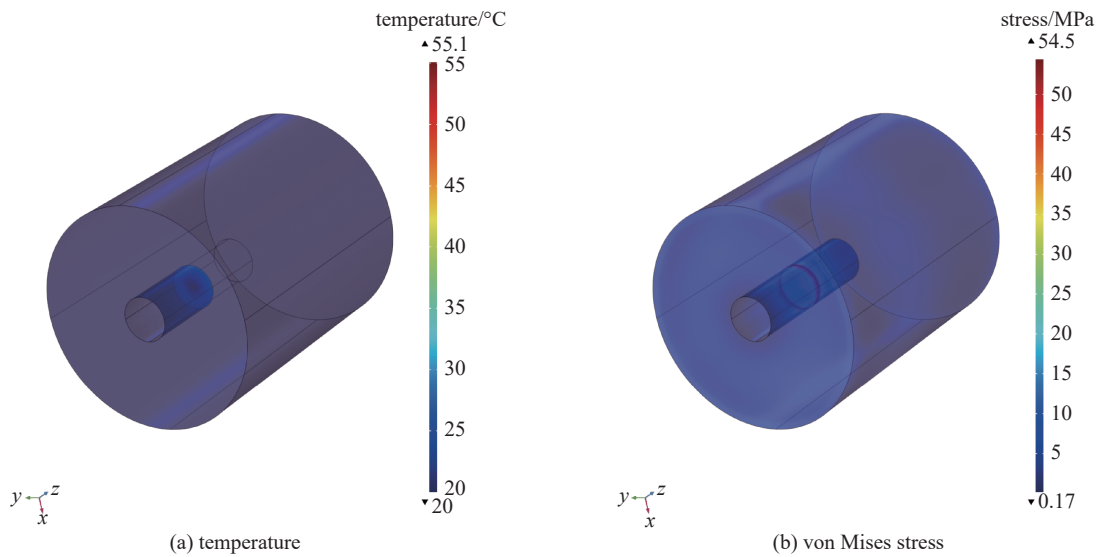


Fig. 6 Beam dump temperature and thermal stresses in the steady state

图6 稳态情况下束流垃圾桶的温度和热应力的分布

在电子束流入射稳态情况下,束流垃圾桶的最高温度为 55.1 °C,远低于核心吸收体铜的熔点,同时给出了热应力的分布,相应的大小为 54.5 MPa,而铜材料的屈服强度为 300 MPa,可知在电子束流入射情况下,束流垃圾桶不会产生明显的形变,可以保证束流垃圾桶的结构稳定性。

3 结论

束流垃圾桶是保障大型粒子加速器安全稳定运行不可或缺的重要组成部分,其构造可以分为吸收体和屏蔽体两部分,需要针对性地对其材料、结构、储存、热工进行设计。本论文完成了大连先进光源束流垃圾桶的整体设计,从辐射屏蔽和热工计算两方面进行了考虑,利用有限元软件 COMSOL 软件进行了设计,相应计算结果符合工程要求,为大科学装置束流垃圾桶的设置提供了设计思路。

利用 FLUKA 软件开展了束流垃圾桶和主体建筑的建模,理论计算和模拟计算保证了径向和轴向束流垃圾桶沉积的能量都在 99% 以上,给出了大连先进光源侧墙和顶板位置的辐射剂量率的大小,侧墙两边的剂量率大小分别为 1.84 $\mu\text{Sv/h}$ 和 1.15 $\mu\text{Sv/h}$,顶板处的剂量率的大小为 1.14 $\mu\text{Sv/h}$,相应的剂量率大小都在剂量限值 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 和 5 $\mu\text{Sv/h}$ 以下,保障了工作人员的安全与健康。在稳态情况束流入射束流垃圾桶时,束流垃圾桶的最高温度为 55.1 °C,相应的最大热应力为 54.5 MPa,小于材料的熔点和屈服强度,保障了束流垃圾桶在装置运行过程中的可靠性。

束流垃圾桶在大科学装置建设运行过程中扮演着重要的角色,本文为大科学装置束流垃圾桶的设计提供了有益的技术参考,有利于加速器辐射防护技术的进一步发展,保障了大科学装置的稳定运行和工作人员的安全和健康。

参考文献:

- [1] Decking W, Abeghyan S, Abramian P, et al. A MHz-repetition-rate hard X-ray free-electron laser driven by a superconducting linear accelerator[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(6): 391-397.
- [2] Ishikawa T, Aoyagi H, Asaka T, et al. A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-ångström region[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(8): 540-544.
- [3] Huang Zhirong, Lindau I. SACLA hard-X-ray compact FEL[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(8): 505-506.
- [4] 徐玉海, 王光宏, 李哲夫, 等. 上海硬 X 射线自由电子激光装置调试用束流收集桶的设计[J]. 辐射防护, 2020, 40(6): 510-515. (Xu Yuhai, Wang Guanghong, Li Zhefu, et al. Design of beam dump for the commissioning at SHINE facility[J]. *Radiation Protection*, 2020, 40(6): 510-515)
- [5] 吴青彪, 王庆斌. 用 FLUKA 程序模拟设计中国散裂中子源的束流垃圾桶结构[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(s1): 996-1000. (Wu Qingbiao, Wang Qingbin. Using FLUKA code to simulate and design the beam dumps' structure of CSNS[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2007, 47(s1): 996-1000)
- [6] Jung N S, Lee H S, Oh J H, et al. Radiation shielding design of the PAL-XFEL[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2015, 66(3): 425-431.
- [7] Jung N S, Kim M H, Bae O, et al. Assessment of the radiation dose level of the PAL-XFEL hard X-ray beamlines under accident conditions[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2018, 73(8): 1061-1067.
- [8] Liu Xianghong, Bazarov I, Dunham B M, et al. A high average power beam dump for an electron accelerator[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, 709: 37-43.
- [9] García M, Ogando F, López D, et al. IFMIF/EVEDA beam dump shielding: optimized design of the front part[C]//Proceedings of the 2nd International Particle Accelerator Conference. 2011.
- [10] Shi T, Sun D, Jovanovic I, et al. Optimization of the electron beam dump for a GeV-class laser electron accelerator[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2021, 176: 109853.
- [11] Iglesias D, Arranz F, Arroyo J M, et al. The IFMIF-EVEDA accelerator beam dump design[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2011, 417(1/3): 1275-1279.
- [12] Kamiya J, Saha P K, Yamamoto K, et al. Thermal analysis of injection beam dump of high-intensity rapid-cycling synchrotron in J-PARC[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2017, 869: 84-94.
- [13] Kumar V, Harvey M, Wendel M, et al. Thermal loading analysis of the ring injection dump for the Spallation Neutron Source facility[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, 1006: 165380.
- [14] 石瀚琦, 王庆斌, 马忠剑, 等. CEPC 直线加速器束流垃圾桶初步设计[J]. 核技术, 2019, 42: 100204. (Shi Haoyu, Wang Qingbin, Ma Zhongjian, et al. Preliminary design of beam dump for CEPC-linac[J]. *Nuclear Techniques*, 2019, 42: 100204)
- [15] Maslov M, Schmitz M, Sychev V. Layout considerations on the 25GeV/ 300kW beam dump of the XFEL project[R]. Germany: DESY, 2006.