

# 高热负载 X 射线自由电子激光复合折射 透镜的热分析

王 震 佟亚军 刘 芳  
(上海科技大学 大科学中心 上海 201210)

**摘要** 上海硬 X 射线自由电子激光装置(Shanghai High-repetition-rate XFEL and Extreme Light Facility, SHINE)具有高亮度、全相干性和高重复频率等特点。对于高重复硬 X 射线进行聚焦时,复合折射透镜(Compound Refractive Lens, CRL)需要承受高热负载,甚至会出现由高热应力引起的光学器件性能失效问题。为了确保 CRL 聚焦镜的热应力在许可限定范围内和 CRL 聚焦镜在高重复 X 射线下保持良好的光学性能,采用有限元方法(Finite Element Method, FEM)进行热分析,优化了 X 射线的最大许可重频,以降低 CRL 聚焦镜出现高热应力的风险,从而有效预防其光学性能的失效。通过优化设计,当光子能量为 7 keV 时, CRL 聚焦镜最大热应力降低了 93%,从 1 008 MPa 降低至 74 MPa,有效预防了 CRL 聚焦镜高热应力问题。在实现 X 射线工作重复频率最大化和控制其热应力在许可范围内的同时,也确保了 CRL 聚焦镜在高重复频率下保持其良好的光学性能。

**关键词** 复合折射透镜, 有限元分析, 热分析, 热应力, 高重频

**中图分类号** TL99

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240172

**CSTR:** 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240172

## Thermal analysis of compound refractive lenses for high heat load X-ray free-electron-laser

WANG Zhen TONG Yajun LIU Fang

(Center for Transformative Science, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China)

**Abstract** [Background] The Shanghai High-repetition-rate XFEL and Extreme Light Facility (SHINE) is characterized by high brightness, full coherence, and high repetition rates. For focusing high-repetition-rate hard X-rays, compound refractive lenses (CRL) must withstand significant heat loads, which can potentially lead to optical performance failure due to high thermal stress. [Purpose] This study aims to optimize the maximum allowable repetition rate of X-ray beams while maintaining thermal stress within permissible limits to ensure reliable optical performance of CRLs under high-repetition-rate operation. [Methods] Firstly, a finite element method (FEM) was employed to perform thermal-structural coupled analysis of beryllium CRLs with various internal spherical radii (0.3 mm, 1.0 mm, 2.0 mm, and 5.8 mm) under different photon energies (5 keV, 7 keV, and 15 keV). Then, the maximum thermal stress and temperature distributions were systematically evaluated under the initial 1 MHz repetition rate condition. Finally, the repetition rates were optimized to keep the maximum thermal stress below the

上海硬 X 射线自由电子激光装置项目和活细胞结构与功能成像等线站工程项目(No.31011505505885920161A2101001)资助

第一作者:王震,男,1979 年出生,2012 于德国雅德应用科技大学获硕士学位,研究领域为机械工程

通信作者:刘芳, E-mail: liufang@shanghaitech.edu.cn

收稿日期:2024-06-17, 修回日期: 2024-09-23

Supported by the Shanghai High Repetition Rate XFEL and Extreme Light Facility, and Shanghai XFEL Beamline Project (No. 31011505505885920161A2101001)

First author: WANG Zhen, male, born in 1979, graduated from Jade University of Applied Sciences (Germany) with a master's degree in 2012, focusing on mechanical engineering

Corresponding author: LIU Fang, E-mail: liufang@shanghaitech.edu.cn

Received date: 2024-06-17, revised date: 2024-09-23

permissible threshold of 120 MPa (50% of beryllium's yield strength), with special focus on the central region of the lens where stress concentration occurs. **[Results]** Analysis results show that CRLs with internal radius  $R=0.3$  mm experience a maximum thermal stress of 1 008 MPa at 7 keV photon energy at 1 MHz repetition rate, far exceeding the permissible limit. After optimization, the maximum thermal stress is reduced by 93% to 74 MPa by lowering the repetition rate to 100 kHz. The maximum temperature decreases from 201 °C to 36.6 °C, an 82% reduction. For larger radius CRLs ( $R=5.8$  mm), the optimized repetition rate could be increased to 500 kHz for 7 keV X-rays while maintaining thermal stress below the threshold. **[Conclusions]** By optimizing the repetition rate according to CRL geometry and beam energy, thermal stress can be effectively controlled within safe limits. Increasing the internal spherical radius of CRLs from 0.3 mm to 5.8 mm allows for higher repetition rates (from 100 kHz to 500 kHz for 7 keV photons), thereby enhancing operational capabilities while ensuring reliable optical performance and structural integrity.

**Key words** Compound refractive lens, Finite element method, Thermal analysis, Thermal stress, High repetition rate

硬X射线自由电子激光装置(Shanghai High-repetition-rate XFEL aNd Extreme Light Facility, SHINE)项目中要建设一台能量为8 GeV的连续波超导直线加速器、产生0.4~25 keV光子能量范围的3条自由电子激光波荡器线、3条光束线;超高峰值亮度和平均亮度X射线自由电子激光(X-ray Free Electron Laser, XFEL)脉冲的重复频率可达1 MHz、超快脉冲小于10 fs。目前拟建设首批10个实验站,

具备纳米级超高空间分辨能力和飞秒级超快时间分辨能力。其中FEL-I光束线包含三个实验站,如图1所示,包含硬X射线散射和光谱学实验站(Hard X-ray Scattering and Spectroscopy End-station, HSS),单分子和粒子的相干衍射实验站(Coherent Diffraction End-station for Single Molecules and Particles, CDS)和极端光实验站(End-Station of Extreme Light, SEL)<sup>[1-3]</sup>。

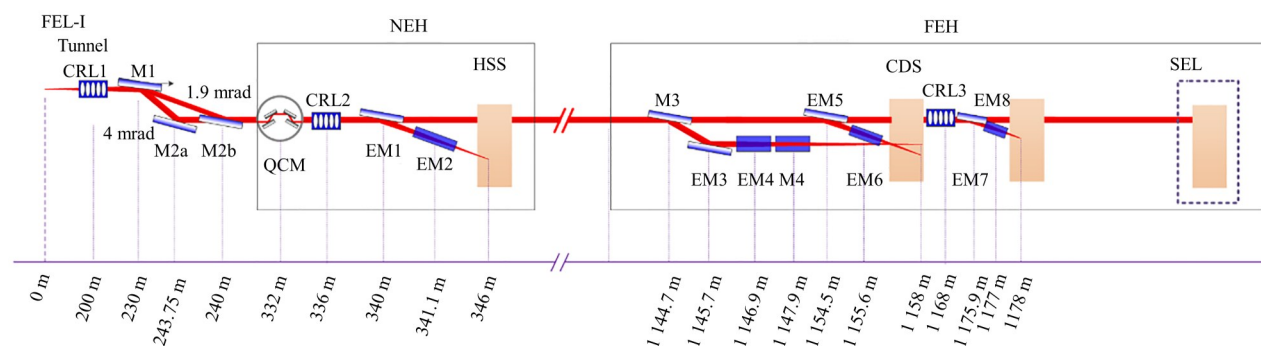


图1 FEL-I光束线设计  
Fig.1 Layout of the optical design in Beamline FEL-I

硬X射线自由电子激光(X-ray Free-Electron Laser, XFEL)作为一种革命性的光源,为科学研究提供了前所未有的机遇。这种光源在物理、化学、生物医学以及材料科学等多个领域具有广泛的应用,特别是在非晶态结构分析、超快动力学过程研究以及复杂分子结构解析等方面展现出独特的优势。XFEL能够产生具有高度相干性和可调谐性的X射线脉冲,使得XFEL成为探索物质内部结构和动态过程的理想工具<sup>[4-8]</sup>。

然而,XFEL技术的发展同时也带来了一系列技术挑战,尤其是在光学元件的设计和应用方面。在XFEL系统中,复合折射透镜(Compound

Refractive Lens, CRL)扮演着至关重要的角色。通过其独特的多级结构设计,能够有效地聚焦硬X射线,实现高分辨率成像和精确的光子能量选择,使其成为XFEL光束线中不可或缺的组成部分<sup>[9-12]</sup>。

CRL聚焦镜在聚焦X射线的过程中,将吸收的能量转化为热能,使其材料本身温度升高。当对高重复频率下的X射线进行聚焦时,在长时间的热累积效应作用下会造成CRL聚焦镜的高热应力以及由其引发的光学性能失效等问题。CRL聚焦镜的高热应力会引起材料的弹/塑性变形,间接改变了器件结构,影响了其几何精度、材料折射率、光束聚焦特性和光束的传播路径,最终会导致光束聚焦不准和

成像质量的降低<sup>[13-14]</sup>。

在高热负载长期作用下,持续的热膨胀可能引发CRL聚焦镜内部热应力累积,可能诱发微裂纹和结构缺陷等高温应力问题,损害CRL聚焦镜的光学性能完整性。随着时间的推移,高重复频率的高热负荷加速CRL聚焦镜的老化,进而缩短其使用寿命。在高热负载引发的高温应力和高温作用下,最终导致可能加速CRL聚焦镜的光学性能失效,其光学性能稳定性和结构可靠性会受到严重影响。例如在欧洲同步辐射光源前端的CRL聚焦镜热分析研究过程中,通过扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)方法可以明显观察到CRL聚焦镜内部有细微的结构损伤,同时也通过有限元方法理论验证了CRL聚焦镜在高温负载下存在高温应力引发的微结构损伤问题。因此,预防CRL聚焦镜的高温应力对于确保XFEL系统高效稳定运行至关重要<sup>[15-18]</sup>。

本文通过对硬X射线自由电子激光装置中CRL聚焦镜的热分析研究,采用有限元方法分析并研究了CRL聚焦镜在高重复频率下可能出现的高温和高热应力问题,以此来预测CRL聚焦镜高温应力问题。通过优化X射线重复频率的方法来控制CRL聚焦镜的温度和热应力,实现有效预防CRL聚焦镜高温应力问题,并且确保CRL聚焦镜在优化后的高重复频率范围内具有良好的聚焦性能。通过CRL聚焦镜热分析和重复频率优化,为硬X射线自由电子激光装置的工程建设提供了坚实的理论技术支持。

## 1 有限元模型介绍

为了深入研究CRL聚焦镜高温应力问题,采用有限元分析(Finite Element Method, FEM)方法对高热负载下的CRL聚焦镜的温度和热应力问题进行研究。

### 1.1 CRL聚焦镜结构设计

由于X射线对已知物质的折射率均小于1且接近1,因此和常规的可见光聚焦方式相反,需要使用凹面镜对X射线聚焦。另外,由于其折射率小,为了实现有效的聚焦,通常将多个凹面镜叠在一起实现对应焦距的需求。CRL聚焦镜结构包含外侧的Kovar固定结构和内嵌CRL聚焦镜,其具体结构如图2所示。外侧Kovar环对CRL聚焦镜进行结构固定,其外径为12 mm,内径为6 mm,厚度为2 mm,如图2(a)所示。内嵌的CRL聚焦镜内径为6 mm,两侧内球面半径、厚度 $Z_L$ 和中心球面距离根据不同能量点不同聚焦性能要求分别进行设计,如图2(b)所示。当CRL聚焦镜需要满足能量点7 keV和15 keV的X射线聚焦时,其内球面的半径分别为0.3 mm和1 mm,其CRL聚焦镜厚度和两侧内球面的最短距离分别为0.7 mm和30  $\mu\text{m}$ 。当CRL聚焦镜需要对能量点5 keV、7 keV和15 keV的X射线进行聚焦时,其内球面半径增加至2 mm和5.8 mm,其CRL聚焦镜厚度和两侧内球面的最短距离分别为1 mm和30  $\mu\text{m}$ 。具体CRL的聚焦镜结构设计和应用的能量点如表1所示。

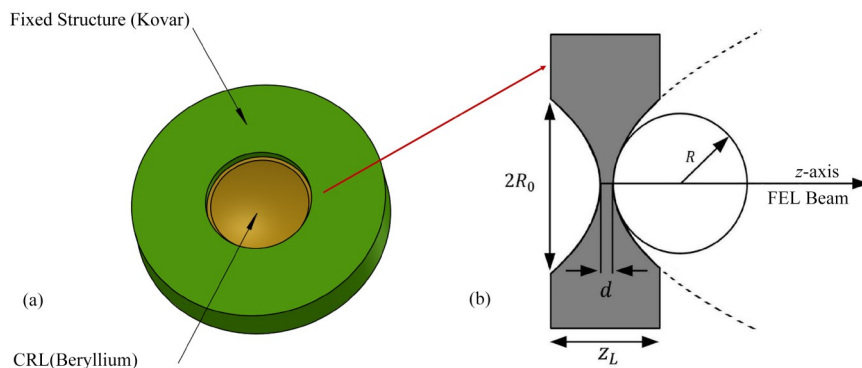


图2 复合折射透镜结构设计示意图 (a) 复合折射透镜结构包含Kovar固定结构和CRL聚焦镜, (b) CRL聚焦镜设计要素  
Fig.2 Diagram of compound refractive lens (CRL) structural design (a) Compound refractive lens structure includes a Kovar fixing structure and a CRL focusing mirror, (b) Design parameters of the CRL

### 1.2 有限元模型和材料

在有限元分析过程中,采用1/4有限元分析模型,包含CRL聚焦镜和Kovar固定结构,如图3(a)所示。采用扫描方式对CRL聚焦镜和Kovar固定结构

进行六面体网格划分,以此来确保有限元模型的网格质量和CRL聚焦镜中心位置的网格精度要求。当CRL聚焦镜对X射线进行聚焦时,由于X射线的热流密度峰值位于CRL聚焦镜中心位置并且该位置的热流密度变化最大,所以在中心点会出现热应

表1 CRL聚焦镜结构设计参数  
Table 1 Parameter of Compound Refractive Lens (CRL) structural design

| 半径 $R$ / mm | 形状 Shape | 材料 Material | 镜厚 $Z_L$ / mm | 中心厚度 $D$ / $\mu\text{m}$ | 光子能量 Photo energy / keV |
|-------------|----------|-------------|---------------|--------------------------|-------------------------|
| 0.3         | Parabola | Beryllium   | 0.7           | 30                       | 7、15                    |
| 1.0         | Parabola | Beryllium   | 0.7           | 30                       | 7、15                    |
| 2.0         | Parabola | Beryllium   | 1.0           | 30                       | 5、7、15                  |
| 5.8         | Parabola | Beryllium   | 1.0           | 30                       | 5、7、15                  |

力集中。因此,CRL 聚焦镜中心位置网格必须足够细化(如图 3(b)),才能更加能够更精准分析 CRL 聚  
焦镜中心位置的热应力集中温度和热应力值情况,为后期的高热问题评估提供足够精准的理论数据。

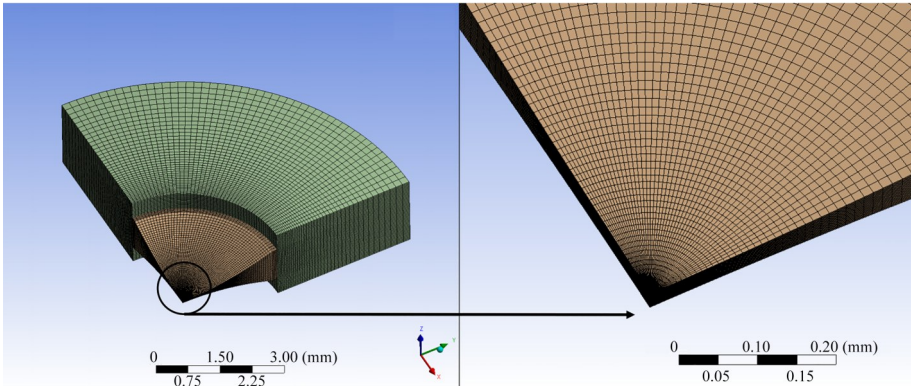


图3 带有 Kovar 固定结构的 CRL 聚焦镜网格模型(a),以及放大的 CRL 聚焦镜中心位置有限元网格(b)  
Fig.3 Mesh model of compound refractive lens (CRL) with Kovar fixation structure (a), magnified finite element mesh at the CRL center (b)

CRL 聚焦镜 Beryllium(铍)和固定结构 Kovar 材  
料参数如表 2 和图 4 所示,其中铍的热膨胀系数和热  
导率系数如图 4 所示。

表2 有限元模型中的应用 材料参数  
Table 2 Material properties applied for FE-Model

| 材料<br>Material | 密度<br>Density<br>/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | 弹性模量<br>Elastic modulus<br>/ GPa | 泊松比<br>Poisson's<br>ratio | 屈服强度<br>Yield stress<br>/ MPa | 热膨胀系数<br>Thermal expansion<br>coefficient / $^{\circ}\text{C}^{-1}$ | 热导率<br>Thermal conductivity<br>/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ |
|----------------|--------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Beryllium      | 1 850                                            | 303                              | 0.1                       | 240                           | Fig.4(a)                                                            | Fig.4(b)                                                                                |
| Kovar          | 8 360                                            | 138                              | 0.317                     | 345                           | $5.5\times 10^{-6}$ (25 $^{\circ}\text{C}$ )                        | 17.3                                                                                    |

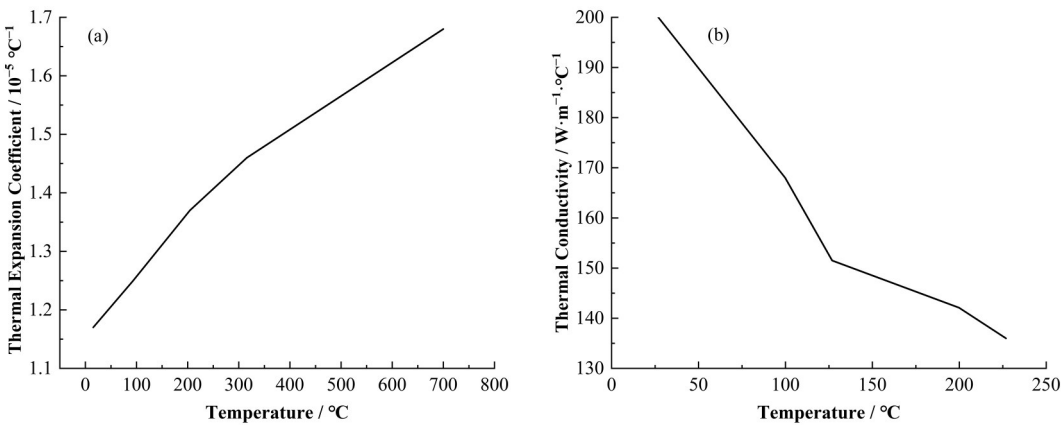


图4 铍的热膨胀系数(a)和热导率系数(b)<sup>[19]</sup>  
Fig.4 Non-linear thermal expansion coefficient (a) and conductivity coefficient (b) of beryllium<sup>[19]</sup>



### 1.3 有限元分析边界条件

在初步有限元热分析过程中,对CRL的固定结构外环直接施加温度为20℃作为边界条件来模拟水温冷却<sup>[17-18]</sup>,后续过程可以进一步根据冷却管路的设计采用对流换热模型进行计算。热流密度峰值较大的两个工况分别为5 keV能量点和7 keV能量点,其1 MHz时峰值分别为141 W·mm<sup>-3</sup>和177.5 W·mm<sup>-3</sup>,如图5所示。采用不同规格的CRL

聚焦镜对不同能量点的X射线进行聚焦时所吸收的热量统计如表3所示,其中15 keV能量点下所吸收的热量为最小。对于CRL和Kovar之间的接触热导率,通过ANSYS自身的推荐值为114 710 W·m<sup>-2</sup>·°C<sup>-1</sup><sup>[20]</sup>。考虑到CRL聚焦镜和Kovar固定结构之间的非充分接触性,所以CRL聚焦镜与Kovar固定环之间的接触热导率按照推荐值的50%计算,即定义为57 355 W·m<sup>-2</sup>·°C<sup>-1</sup>。

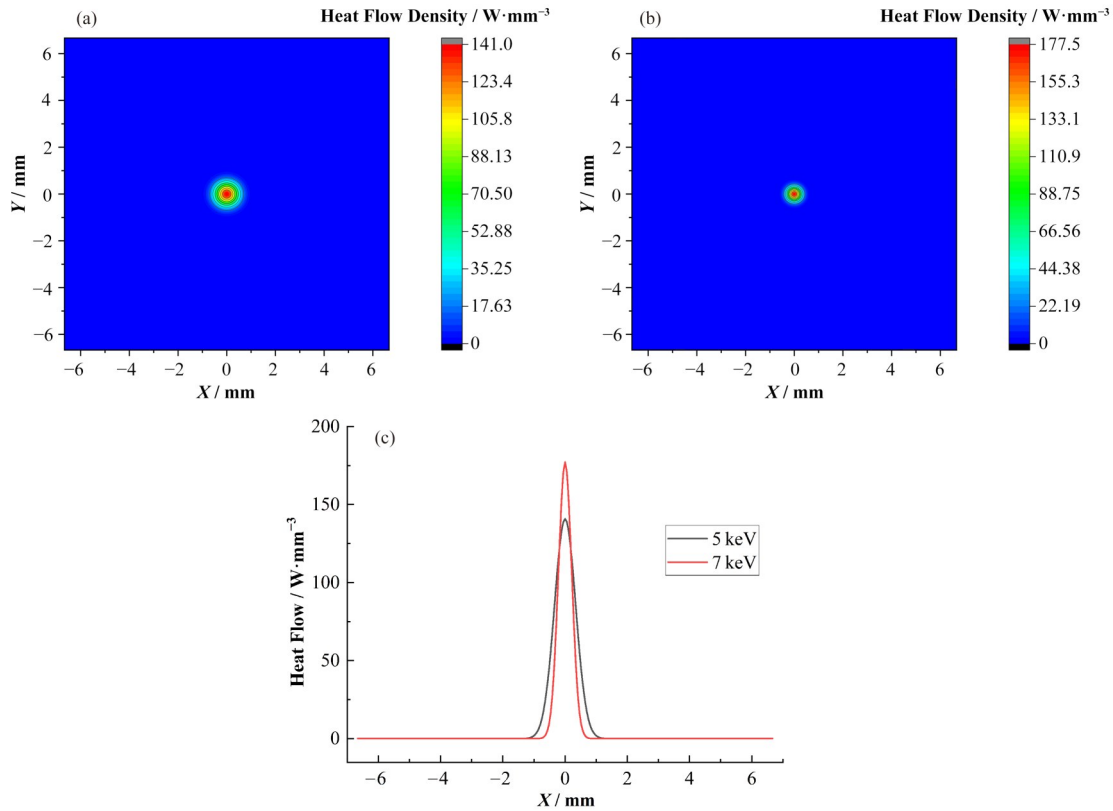


图5 光子能量5 keV (a)、7 keV (b)热流密度分布以及热流密度高斯分布(c)(彩图见网络版)

Fig.5 Heat flow density distribution at photon energy 5 keV (a), 7 keV (b), the Gaussian distribution of heat flow density (c) (color online)

表3 不同规格CRL在不同能量点下所吸收的热负载  
Table 3 The thermal load absorbed by CRLs of different specifications at different photon energy

| 半径 $R$ / mm | 热负载 Heat load / W |       |        |
|-------------|-------------------|-------|--------|
|             | 5 keV             | 7 keV | 15 keV |
| 0.3         | /                 | 3.82  | 0.008  |
| 1           | /                 | 1.54  | 0.004  |
| 2           | 15.04             | 3.84  | 0.012  |
| 5.8         | 7.2               | 2.32  | 0.008  |

备注:“/”表示该规格的CRL对该能量点没有应用

Note: “/” indicates that the CRL of the specification has no application at the energy point.

## 2 热分析结果和讨论

### 2.1 许可温度和许可热应力判定依据

铍作为CRL聚焦镜材料,对X射线聚焦系统有着非常关键的作用。为了确保CRL聚焦镜的光学性能有效性,其许可热应力判定标准主要依据材料的许可温度极限值和屈服强度。根据欧洲RX Optics公司的实际工程经验,CRL聚焦镜的许可温度极限值为400℃。另外依据欧洲自由电子激光经验以及可能出现的高热应力问题,CRL聚焦镜的许可热应力极限阈值限定为120 MPa,为铍材料屈服强度240 MPa的50%<sup>[21]</sup>。因此,为了避免CRL聚焦镜在进行X射线聚焦过程中出现高热应力问题,必

须结合铍的许可温度极限值和许可热应力极限阈值进行综合评判。

## 2.2 1 MHz重复频率CRL聚焦镜热分析

通过对1 MHz高重复频率下的CRL聚焦镜进行热固耦合分析发现,当CRL聚焦镜在进行能量点为5 keV或者7 keV的X射线进行聚焦时,其中心位置的热应力值均超出铍的许可热应力标准120 MPa。理论上CRL聚焦镜会发生弹塑性变形,其高热应力将会影响其光学性能的有效性。另外,各种规格的CRL聚焦镜对能量点为15 keV的X射线进行聚焦时的热应力和温度均低于判定标准,后续不再对15 keV工况下的高热问题进行论述。

从图6可以发现,对于内球面半径小于2 mm规格的CRL聚焦镜进行1 MHz重复频率下能量点为7 keV的X射线进行聚焦时,在高热负载和热流密度变化较大(图5(c)所示)的综合作用下,CRL聚焦镜中心位置的热应力均超出了铍材料的许可热应力标准120 MPa和材料的抗拉强度370 MPa,会发生弹塑性变形和材料结构破裂等情况。对于内球面半径大于等于2 mm规格的CRL聚焦镜进行1 MHz重复频率下能量点为5 keV和7 keV的X射线进行聚焦时,CRL聚焦镜中心点的高热应力均超出了铍材料的许可热应力标准120 MPa。特别是CRL聚焦镜对1 MHz重复频率下能量点为7 keV的X射线进行聚焦时,其中心位置热应力值设置超出了材料的抗拉强度370 MPa,理论上该工况下的CRL聚焦镜中心位置也会发生弹塑性变形和发生材料结构破裂。

同时发现,随着CRL聚焦镜内球面半径增加,对相同重复频率下相同能量点的X射线进行聚焦时,其CRL聚焦镜的热应力值和温度在降低。例如

能量点7 keV,随着内球面半径从0.3 mm增加至5.8 mm时,CRL聚焦镜的最大热应力值从1 008 MPa降低至215 MPa。并且随着光子能量从5 keV上升至7 keV时,相同规格的CRL聚焦镜对较高能量点的X射线所吸收的热量在减少,其最大热应力和温度也在下降。

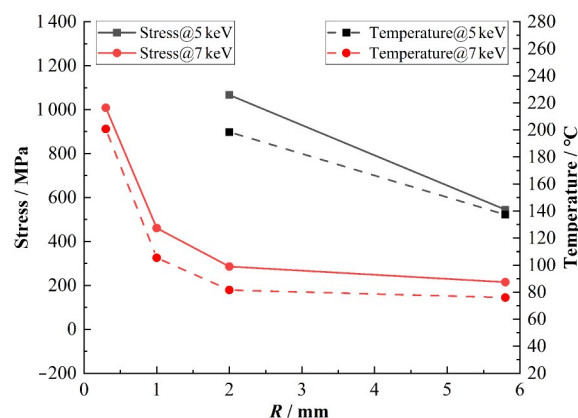


图6 CRL聚焦镜在1 MHz重复频率下的热应力值和温度随球面半径的变化

Fig.6 Variations of thermal stress and temperature of the CRL with spherical radius under the 1 MHz repetition rate

通过图7和图8可以发现,当CRL聚焦镜进行X射线聚焦时,其中心位置在热流密度峰值作用下单位体积吸收的能量最多,导致CRL聚焦镜中心位置的温度变化最大。同时CRL聚焦镜中心位置的热流密度变化最大(如图5(c)所示),导致该位置出现最大热应变以及相应的最大热应力。所以,厚度只有30  $\mu\text{m}$ 的CRL聚焦镜中心位置会首先出现热应力集中现象和更容易出现高热应力引发的光学性能失效等问题,该结论与欧洲同步辐射光源的CRL光学性能失效研究结果相吻合<sup>[17]</sup>。

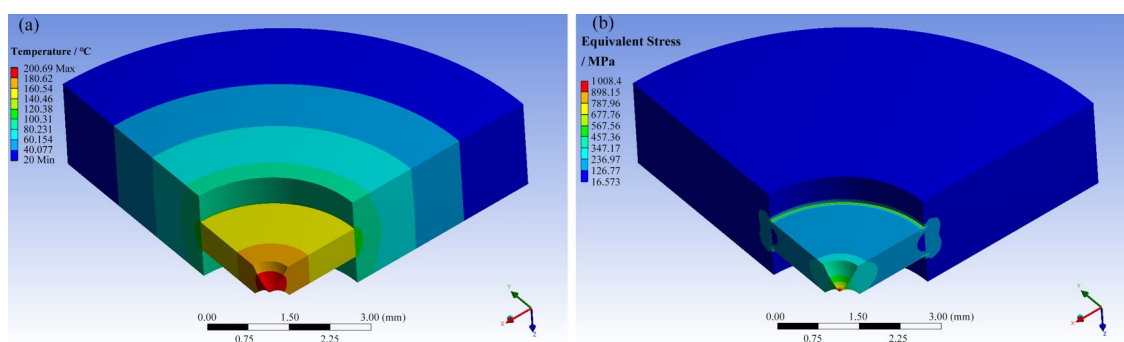


图7 半径 $R=0.3$  mm能量点7 keV时CRL聚焦镜的温度(a)和热应力(b)分布云图(彩图见网络版)

Fig.7 Temperature (a) and thermal stress (b) distribution contour of the CRL within  $R=0.3$  mm and photo energy 7 keV under the 1 MHz repetition rate (color online)

根据上述CRL聚焦镜热固耦合分析结果可知,当CRL聚焦镜对1 MHz高重复频率下5 keV和7 keV能量点的X射线进行聚焦时,CRL聚焦镜中心位置的热应力值理论上已经超过其许可热应力标

准,预测会出现高热应力问题。为了保证高热负载下CRL聚焦镜仍然具有良好的光学性能和防止高热应力和光学性能失效等问题的出现,对硬X射线自由电子激光装置中的CRL聚焦镜优化设计是非

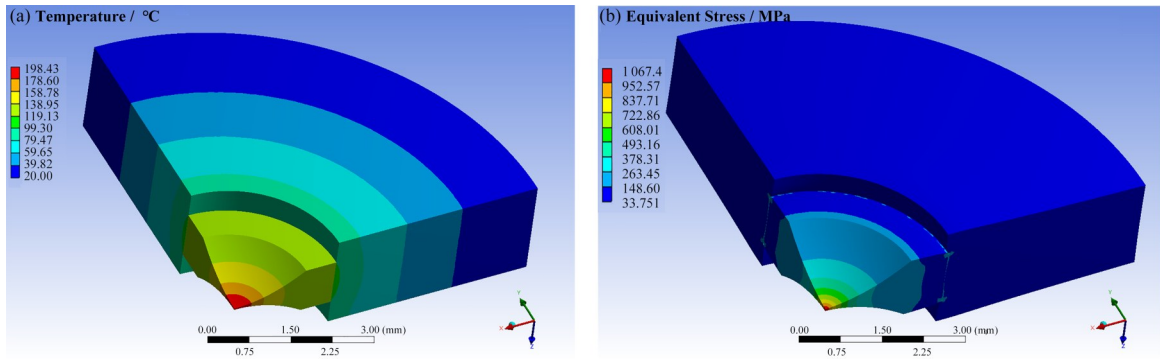


图8 半径 $R=2$  mm能量点5 keV时CRL聚焦镜的温度(a)和热应力(b)分布云图(彩图见网络版)  
Fig.8 Temperature (a) and thermal stress (b) distribution contour of the CRL within  $R=2$  mm and photo energy 5 keV under the 1 MHz repetition rate (color online)

常必要的。

### 2.3 CRL聚焦镜重复频率优化设计

从热分析结果来看,造成CRL聚焦镜中心位置高温和高热应力的本质是由于硬X射线的高平均热功率和高热流密度所导致。所以,解决CRL聚焦镜高热应力问题的最直接方法就是通过降低X射线的重复频率来实现降低X射线的平均热功率。通过优化最大许可重复频率,确保CRL聚焦镜对高重复频率下不同能量点的X射线进行有效聚焦的同时,依然保持良好的光学性能稳定性和结构完整性。

经过对不同规格的CRL聚焦镜在不同能量点下的最大许可重复频率优化和综合性高热应力评估,最终得出的重复频率优化结果如图9所示。确保CRL聚焦镜不出现高热应力问题的情况下,随着CRL聚焦镜的内球面半径 $R$ 从0.3 mm增加至5.8 mm时,7 keV能量点的许可重复频率从100 kHz上升至500 kHz。同样,5 keV能量点的许可重复频率从 $R=2$  mm时的100 kHz上升至 $R=5.8$  mm时200 kHz。

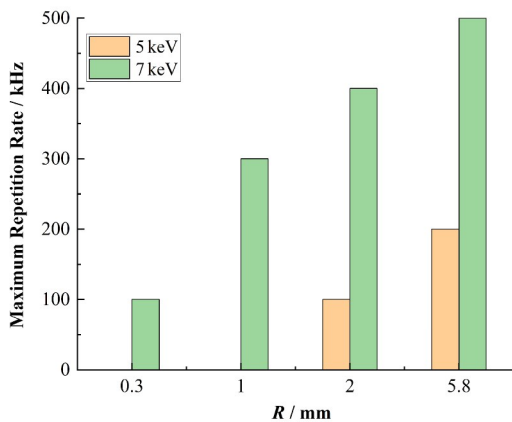


图9 CRL聚焦镜的最大许可重复频率优化结果(彩图见网络版)

Fig.9 Optimized maximum repetition rate of the CRL (color online)

优化后的CRL聚焦镜,在对最大许可重复频率下对各个能量点的X射线进行有效聚焦时的最大热应力和最高温度均控制在其许可阈值范围内,如图10所示,其最大热应力为118 MPa,最高温度为47.2 °C。从分析结果可以发现,内球面半径 $R=0.3$  mm的CRL聚焦镜在最大许可重复频率为100 kHz时对能量点7 keV的X射线聚焦时,其最大热应力值只有74 MPa。相对于优化前的最大热应力1 008 MPa,CRL聚焦镜最大热应力被降低了93%。同样,该规格的CRL聚焦镜最高温度从优化前的201 °C降低到优化后的36.6 °C,最高温度被降低了82%。

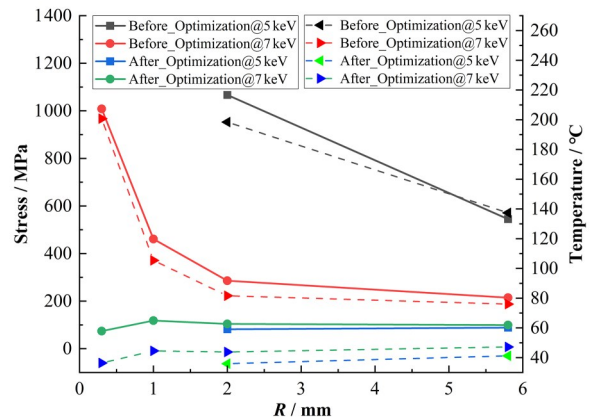


图10 优化前后的CRL最大热应力值和最高温度  
Fig.10 Thermal stress and temperature comparison before and after optimization

### 2.4 讨论

当CRL聚焦镜对高重复频率下硬X射线进行聚焦时,由于CRL聚焦镜本身的结构设计和硬X射线高平均热功率的原因,可能会造成CRL聚焦镜的高热应力和光学性能失效等问题。为了确保CRL聚焦镜能对各个能量点的X射线进行有效聚焦,以及保持高重复频率下CRL聚焦镜的光学性能有效



性结构稳定性,可以通过优化最大许可重复频率来预防CRL聚焦镜高热应力问题。同时,在条件允许的情况下增加CRL聚焦镜的内球面半径,会改善CRL聚焦镜的高热应力和温度,同时也可以实现许可重复频率的提升。

### 3 结语

硬X射线自由电子激光具有高平均热功率的特点,所以对高重复频率下CRL聚焦镜的高热应力问题研究是非常必要的。通过有限元方法对高重复频率高热负载CRL聚焦镜的热应力和温度场进行研究,从理论上有效预防高热负载下CRL聚焦镜的高热应力问题,确保其保持良好的光学性能和结构完整性,对硬X射线自由电子激光装置具有一定实际工程意义。

由于X射线的热流密度呈高斯分布状,CRL聚焦镜中心位置的热流密度达到较大和热流密度变化最大,从而导致CRL聚焦镜的中心位置出现最大热应力以及应力集中现象。对于厚度最薄的CRL聚焦镜中心位置,在高热负载作用下更加容易出现高热应力和聚焦失效等问题。

为了确保硬X射线自由电子激光装置中的CRL聚焦镜在高热负载下仍然具有良好的光学性能和结构完整性,通过优化其最大许可重复频率或者改善CRL聚焦镜的内球面设计,可以有效预防和缓解高热应力问题。在实现许可重复频率最大化的同时,也确保其能够对X射线进行有效聚焦,对高重复频率自由电子激光装置的稳定运行具有重要意义。

**作者贡献声明** 王震负责研究有限元分析、数据整理、文章的起草和最终版本的修订;佟亚军负责研究的提出及设计;刘芳负责最终版本的检查和修订。

### 参考文献

- Huang Z R, Kim K J. Review of X-ray free-electron laser theory[J]. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, 2007, **10**(3): 034801. DOI: 10.1103/physrevstab.10.034801.
- Zhu Z Y, Zhao Z T, Wang D, *et al.* SCLF: an 8-GeV CW SCRF Linac-based X-ray FEL facility in Shanghai[C]. Santa Fe, NM, USA: FEL, 2017: 182 – 184. DOI: 10.18429/JACOW-FEL2017-MOP055.
- Liu T, Huang N S, Yang H X, *et al.* Status and future of the soft X-ray free-electron laser beamline at the SHINE [J]. *Frontiers in Physics*, 2023, **11**: 72368. DOI: 10.3389/fphy.2023.1172368.
- Eriksson M, van der Veen J F, Quitmann C. Diffraction-limited storage rings – a window to the science of tomorrow[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014, **21**(5): 837 – 842. DOI: 10.1107/s1600577514019286.
- Hettel R. DLSR design and plans: an international overview[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014, **21**(5): 843 – 855. DOI: 10.1107/s1600577514011515.
- Emma P, Akre R, Arthur J, *et al.* First lasing and operation of an ångström-wavelength free-electron laser [J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(9): 641 – 647. DOI: 10.1038/nphoton.2010.176.
- 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**: 540 – 544. DOI: 10.1038/NPHOTON.2012.141.
- Kim K J, Huang Z R, Lindberg R. *Synchrotron radiation and free-electron lasers*[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2017. DOI: 10.1017/9781316677377.
- Pellegrini C, Marinelli A, Reiche S. The physics of X-ray free-electron lasers[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2016, **88**: 015006. DOI: 10.1103/revmodphys.88.015006.
- Snigirev A, Kohn V, Snigireva I, *et al.* A compound refractive lens for focusing high-energy X-rays[J]. *Nature*, 1996, **384**(6604): 49 – 51. DOI: 10.1038/384049a0.
- Filseth S B, Elleaume P, Kiocke T, *et al.* Refractive lens for high-energy X-rays focusing[C]. *SPIE Proceedings*, 1997, **3151**: 164 – 170.
- 钟长游, 汪启胜, 刘科, 等. BL17U短波长X射线聚焦方案优化[J]. *核技术*, 2018, **41**(5): 050102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.050102.
- ZHONG Changyou, WANG Qisheng, LIU Ke, *et al.* Optimized focusing plan for short X-ray wavelengths mode at BL17U in SSRF[J]. *Nuclear Techniques*, 2018, **41**(5): 050102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.050102.
- Kujala N, Makita M, Liu J, *et al.* Characterizing transmissive diamond gratings as beam splitters for the hard X-ray single-shot spectrometer of the European XFEL[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2019, **26**(3): 708 – 713. DOI: 10.1107/s1600577519003382.
- Siewert F, Löchel B, Buchheim J, *et al.* Gratings for synchrotron and FEL beamlines: a project for the manufacture of ultra-precise gratings at Helmholtz Zentrum Berlin[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2018, **25**(1): 91 – 99. DOI: 10.1107/s1600577517015600.
- Snigirev A, Kohn V, Snigireva I, *et al.* Focusing high-



- energy X-rays by compound refractive lenses[J]. Applied Optics, 1998, **37**(4): 653. DOI: 10.1364/ao.37.000653.
- 16 Elleaume P. Optimization of compound refractive lenses for X-rays[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1998, **412**: 483–506.
- 17 RXOPTICS GmbH. Refractive optical devices[ED/OL]. <https://www.rxoptics.de>.
- 18 Zhang L, Snigirev A A, Snigireva I I, *et al*. Thermo-mechanical analysis and design optimization of front-end compound refractive lens[C]. Design and Microfabrication of Novel X-ray Optics II, SPIE Proceedings, 2004. DOI: 10.1117/12.568105.
- 19 Wang Y Z, Dong X H, Hu J. Feasibility analysis of sapphire compound refractive lenses for advanced X-ray light sources[J]. Frontiers in Physics, 2022, **10**: 908380. DOI: 10.3389/fphy.2022.908380.
- 20 Ansys. Ansys fluent, fluid simulation software[ED/OL]. <https://www.ansys.com>.
- 21 AZoM. Materials science community[ED/OL]. <https://www.azom.com>.