

## 高热负载 X 射线反射镜多段复合冷却方法优化

王震<sup>1</sup>, 佟亚军<sup>1</sup>, 董晓浩<sup>2</sup>, 刘芳<sup>1\*</sup><sup>1</sup>上海科技大学大科学中心, 上海 201210;<sup>2</sup>中国科学院上海高等研究院上海光源科学中心, 上海 201204

**摘要** 高重复频率的自由电子激光和低发射度的同步辐射衍射极限环光源对反射镜的热变形提出了更高的要求。针对上海硬 X 射线自由电子激光装置 (SHINE) 高热平均功率的特点和波前保持的需求, 计算了第一条光束线中第一面反射镜 M1 在不同能量点下的热功率分布, 并建立了有限元热学和结构耦合分析模型进行了 M1 的热变形计算和波前传播模拟。最终, 采用多段冷却和复合使用的方式对反射镜冷却进行了优化设计, 使得在入射光能量为 7.0 keV、掠入射角为 4.0 mrad 的情况下的额定热功率从 0.48 W 提高到了 3.06 W, 工作重复频率提升了 6.4 倍。光学模拟结果显示, 在其他不同特定能量点下额定热功率也有 2.0~8.3 倍的提升。

**关键词** X 射线光学; 光学设计; 有限元; 热分析; 高度残差; 冷却

中图分类号 O434.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2334003

## Optimal Compound Multi-Segment Cooling Method for High-Heat-Load X-Ray Mirrors

Wang Zhen<sup>1</sup>, Tong Yajun<sup>1</sup>, Dong Xiaohao<sup>2</sup>, Liu Fang<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Center for Transformative Science, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;<sup>2</sup>Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China

**Abstract** Light sources such as high-repetition-rate free-electron lasers and low-emittance synchrotron radiation diffraction-limited storage rings place higher demands on the thermal deformations of the mirrors. Given the high average thermal power and the wavefront preservation demand of the Shanghai high repetition rate XFEL and extreme light facility (SHINE), the thermal power distribution on the first mirror named M1 for the first beamline at different energy points is calculated. A finite-element analysis model with thermal and structural coupling is built to calculate the thermal deformation of M1 and conduct wavefront propagation simulation. Finally, the mirror cooling design is optimized by multi-segment cooling and compound utilization. The results show that when the incident light has an energy of 7.0 keV and an grazing angle of 4 mrad, the rated thermal power is improved from 0.48 W to 3.06 W, and the working repetition rate is enhanced by 6.4 times accordingly. According to the optical simulation results, the rated thermal power is also increased by 2.0 to 8.3 times at other energy points.

**Key words** X-ray optics; optical design; finite element; thermal analysis; height residual error; cooling

## 1 引言

X 射线因其波长短等特点, 成为了在原子、分子尺度上揭示物质结构和生命现象的理想工具。X 射线自发现以来就成为了科学研究的重点, 目前与 X 射线相关的诺贝尔科学奖已经超过 15 个, 在生命科学、物质科学、能源科学和环境科学多个领域中作出了巨大贡

献, 对生命、物质、化学和工业等多个学科的发展方向与世界科学发展路径产生了深远的影响。随着社会的发展和科研的需求, X 射线光源的发展也从最初的 X 光管发展到同步辐射光源再到目前的同步辐射衍射极限环<sup>[1-2]</sup>与 X 射线自由电子激光 (XFEL)<sup>[3-4]</sup>。XFEL 具有高亮度、高相干性和超短脉冲的特性, 为科学研究提供了前所未有的探测手段<sup>[5-6]</sup>。

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-05-29; 录用日期: 2022-06-16

基金项目: 上海市科技创新行动计划 (19142202800)、上海市科技重大专项 (2017SHZDZX02)

通信作者: liufang@shanghaitech.edu.cn

XFEL 高亮度和高相干性的特点对 X 射线的传输过程提出了极其苛刻的要求,包括耐损伤、高稳定性和波前保持<sup>[7-8]</sup>。为了将 XFEL 的高亮度、高相干性的特点传输到实验站中,对反射镜的综合面形精度要求通常需要达到 1 nm(均方根)以下<sup>[9-10]</sup>。反射镜的面形精度主要受到光学元件加工、夹持支撑、重力变形<sup>[11]</sup>和热变形的影响。新一代高重复频率 XFEL 的高平均功率的特点会导致光学元件上的热负载非常大,一种解决方案是通过后续的主动镜面压弯装置来进行面形补偿,但即便如此,其温度的不均匀所导致的热畸变依然是影响波前的重要因素。为此,科研人员也进行了非常多的研究工作,如:Zhang 等<sup>[12]</sup>分析了不同冷却接触方式和光学元件截面形状对热变形的影响;为了进一步减小热变形对光学元件的影响,Cocco 等<sup>[13]</sup>在采用了冷却光学元件的同时又增加了多个加热器来主动调节温度梯度,以进一步降低面形误差。

上海硬 X 射线自由电子激光(SHINE)装置<sup>[14]</sup>是我国在建的首台高重复频率 XFEL 装置,一期共建 3 条光束线和 10 条实验站。其中,第一条光束线(FEL-I)的整个光束传输系统全长约为 1200 m,为硬 X 射线高分辨共振散射实验站(HSS)、单分子/单颗粒相干衍射实验站(CDS)和极端光物理实验站(SEL)三个实验站提供光束,工作能量范围为 3~15 keV。FEL-I 的光学系统包括复合折射率透镜(CRL1、CRL2、CRL3)、偏移镜组(M1、M2a 和 M2b)、晶体单色器(DCM)和用于聚焦到实验站的 Kirkpatrick-Baez(KB)系统(EM1、EM2、M3、EM3、M4、EM4、EM5 和 EM6 等)。其中,偏移镜组的作用是对 X 光进行偏移,根据不同 X 光能量的反射率特性,采用 M1 与 M2a 组合的方式对 3~7 keV 能量范围内的 X 光进行偏移,采用 M1 与 M2b 组合的方式对 6~15 keV 能量范围内的 X 光进行偏移。其他光学元件根据实验站的运行需求可移入/移出光路。

由于 SHINE 装置的光束线平均传输功率可达到 1000 W 以上,故对反射镜热变形的要求更加苛刻。本文针对 SHINE 装置 FEL-I 的第一面反射镜 M1 的热负

载分布和需求,建立了有限元分析(FEA)模型,对 M1 反射镜的冷却结构进行了分析和优化设计,以提高光束线的传输性能。

## 2 FEL-I M1 光学元件热负载

FEL-I 及其对应的实验站光路布局示意图如图 1 所示。M1 的热负载来源于三部分,即自发辐射、FEL 基波吸收和 FEL 谐波吸收。第一部分是插入件的自发辐射,根据表 1 提供的加速器电子束团参数,计算了在 7.0 keV 时插入件产生的自发辐射功率密度分布,如图 2(a)所示。这部分发散角非常大,可以充满整块镜子,并且比较均匀的分布在 FEL 的周围。在 1000 mm×4 mm 范围内的吸收总功率约为 1 W,功率密度为 0.26 mW/mm<sup>2</sup>。第二部分是源于 FEL 的基波,可根据表 2 中的参数来计算,7.0 keV 的 FEL 基波如图 2(b)所示。这部分是按照光学元件 B<sub>4</sub>C 镀层吸收率为 1% 计算的。因为 XFEL 光束传输系统需要传输 6 $\sigma$ ( $\sigma$  为高斯分布的方差)的光束,所以它几乎是完整的高斯形状分布在 M1 反射镜上。这部分在 7.0 keV 时总吸收功率为 18 W,最大功率密度为 0.08 W/mm<sup>2</sup>。实际上通过自放大自发辐射(SASE)产生的 FEL 光的影响因素非常多,这也就导致这部分的结果具有极大的不确定性,这里给出的基波吸收是可能的最大值。第三部分来自于 FEL 的高次谐波,图 2(c)展示了 7.0 keV 的三次谐波分布。与基波相比,高次谐波含量的不确定性更大<sup>[15]</sup>,在硬 X 射线波段通常认为在 0.1%~1.0% 之间,本计算中按照 1.0% 进行保守估计,高次谐波的发散角按照基波的 1/3 来估算。从图 2(c)中可以看出,高次谐波的功率密度高达 0.8 W/mm<sup>2</sup>,且集中在基波的中心位置处,总吸收功率也为 18 W。图 2(d)为 M1 反射镜上所有吸收热负载的分布。同样的方式可得到 FEL-I 光束线主要几个特定能量点在 1 MHz 工作频率下的吸收热负载分布,如图 3 所示(后续无特殊注明情况下所有的计算都是在 FEL-I 光束线的工作频率为 1 MHz 下进行)。

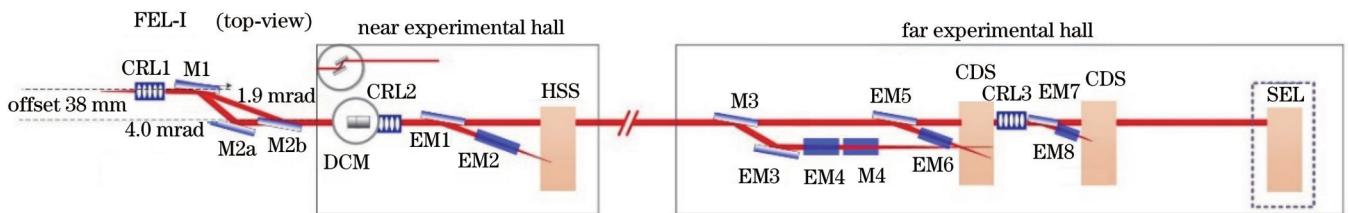


图 1 SHINE 装置 FEL-I 光束线光路示意图  
Fig. 1 Layout of FEL-I beamline in SHINE

## 3 有限元分析模型介绍

根据 FEL-I 光束线 M1 上的光斑分布和需求,反射镜所需要的光接收面长度为 950 mm,宽度为 40 mm,镀层采用 B<sub>4</sub>C 膜。FEA 的反射镜模型采用长

度为 1000 mm、宽度为 50 mm、厚度为 60 mm 的单晶硅基底,在光学表面附近加工一个凹槽用于放置液态铜铳合金,在铜铳合金里插入无氧铜冷却片进行导热,其中铜片和硅不直接接触,以减少冷却片振动对反射镜的影响。在无氧铜片的另一端采用内径为 8 mm 的冷

表 1 自发辐射模拟对应的加速器参数

Table 1 Parameters for accelerator used in simultaneous radiation simulation

Device	Parameter	Value
Electron beam	Electron energy /GeV	8
	Bunch charge /pC	100
	Average current /mA	0.1
	Peak current /A	1000
	Pulse duration /fs	100
	Emittance /( $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$ )	0.4
	Repetition rate /MHz	1
Undulator	Peak magnetic field /T	1
	Period /mm	26
	Undulator length /m	4
	Number of segments	42
	Distance between segments /m	1

表 2 不同光子能量下的光源参数

Table 2 Light source parameters under different photon energies

Photon energy /keV	3.0	7.0	12.4	15.0
Bunch charge /pC	100	100	100	100
Electron energy /GeV	5	8	8	8
Pulse energy / $\mu\text{J}$	930	1800	394	60
Source size (FWHM) / $\mu\text{m}$	49	48	50	50
Source divergence (FWHM) / $\mu\text{rad}$	5.5	2.7	1.7	1.3

镜的  $B_4C$  镀层的厚度仅为 50 nm,因此在 FEA 中省略掉  $B_4C$  镀层。FEA 单元采用四面体和六面体网格,共 826308 个节点和 350241 个单元,具体反射镜冷却结构和 FEA 模型如图 4 所示。在分析过程中,首先利用 ANSYS 稳态热分析模块<sup>[16]</sup>计算出反射镜的温度分布,再将反射镜温度作为结构分析模块中的热负载,计算反射镜 M1 的热畸变,进一步计算出反射镜 M1 光学表面子午线的热变形面形数据。

却水管进行冷却,将反射镜上的热量缓释。由于反射

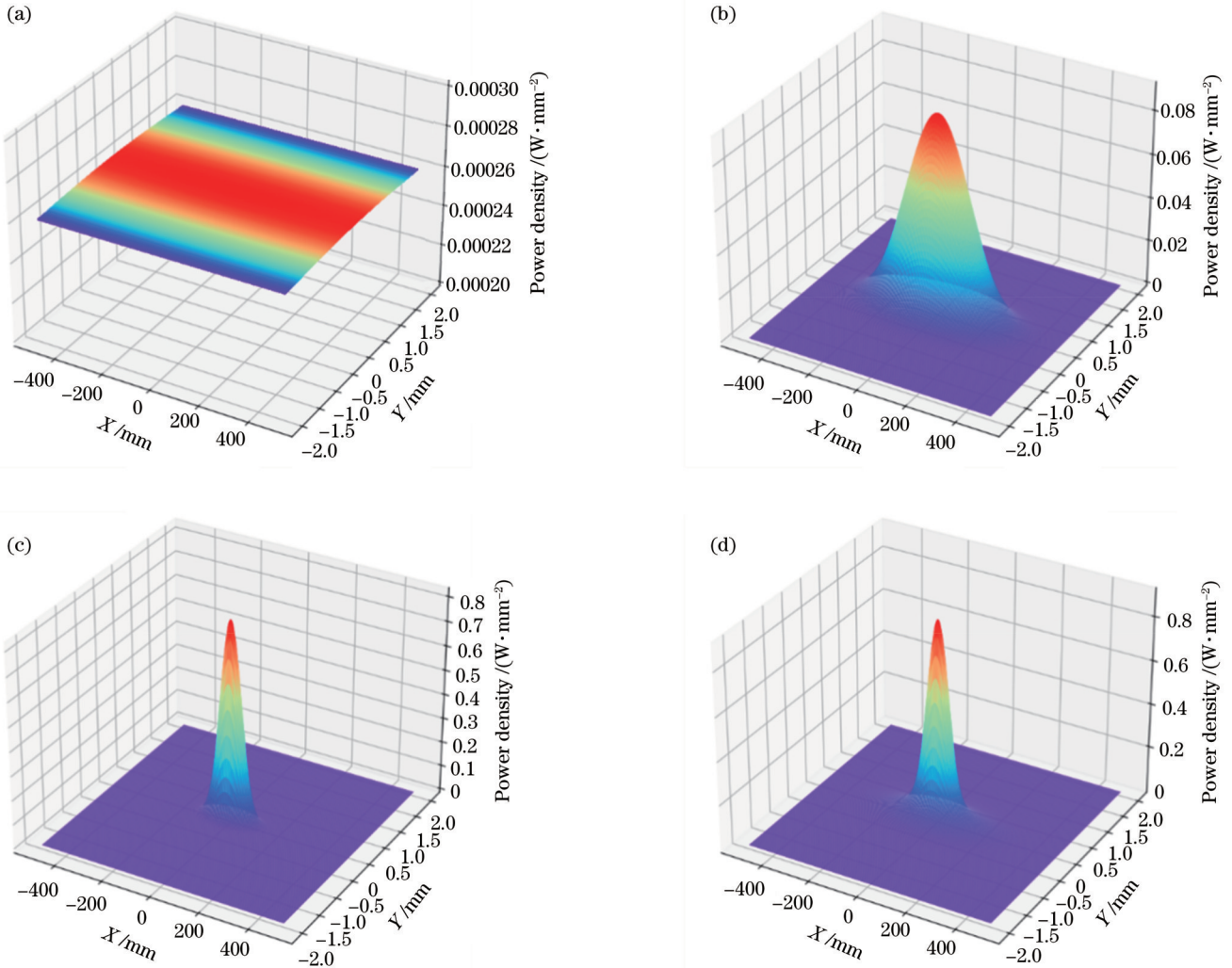


图 2 M1 镜在 1.9 mrad 掠入射角下能量为 7.0 keV 时的吸收功率密度分布。(a)自发辐射;(b) FEL 基波辐射;(c)三次谐波辐射;(d)总功率

Fig. 2 Absorbed power density distribution of M1 at energy of 7.0 keV with grazing angle of 1.9 mrad. (a) Spontaneous radiation; (b) FEL fundamental radiation; (c) third harmonic radiation; (d) total power

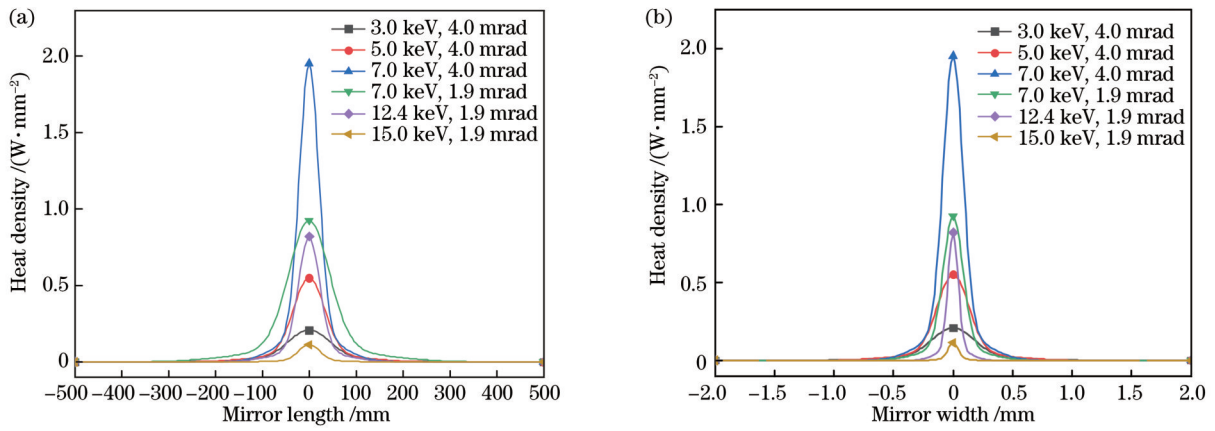


图 3 M1 中各特征能量点上的热负载分布。(a)反射镜子午方向;(b)反射镜弧矢方向

Fig. 3 Heat load distribution at each characteristic energy point in M1. (a) Meridian direction of reflector; (b) sagittal direction of reflector

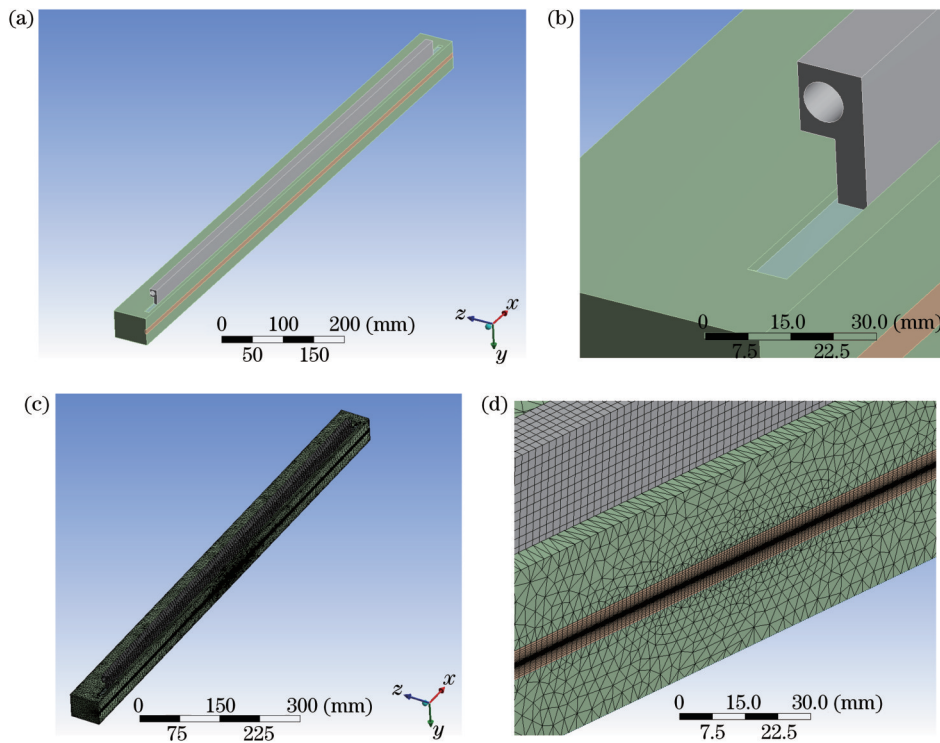


图 4 反射镜冷却模型及 FEA 模型。(a)反射镜冷却结构;(b)反射镜冷却结构放大图;(c)反射镜冷却结构的 FEA 模型;(d)反射镜冷却结构 FEA 模型的放大图

Fig. 4 Mirror cooling model and FEA model. (a) Mirror cooling structure; (b) enlarged view of mirror cooling structure; (c) FEA model of mirror cooling structure; (d) enlarged view of FEA model of mirror cooling structure

FEA 中材料的参数如表 3 所示。反射面吸收的热功率通过直接导入第 2 章描述的热分布加载,铜管

与钢镓、钢镓与单晶硅接触面的热阻抗为  $150000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ , 冷却水温度为  $30 \text{ C}$ , 流速为

表 3 FEA 中材料的参数  
Table 3 Material parameters in FEA

Material	Density / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Elastic modulus / GPa	Yield stress / MPa	Poisson ratio	Thermal conductivity / $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	Thermal expansion coefficient at temperature of 300 K / $(10^{-6} \text{ K}^{-1})$
Silicon	2329	112.4	120	0.28	148	2.50
Copper	8900	110.0	220	0.34	391	1.75
In/Ga	6350				28	

1.5 L/min, 水管内壁膜系数为  $3177 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。由于该夹持机构为低应力结构, 故该反射镜的机械约束采用 ANSYS 默认的弱弹簧约束, 进而求解出近似无约束的反射镜热变形。

### 4 M1 反射镜热变形计算及优化

#### 4.1 反射镜面形评判依据

针对激光的波前评判主要通过斯特列尔比( $S_R$ )来评判<sup>[17-19]</sup>。因此, 在本文的面形评判中, 将 ANSYS 计算的热变形数据导入到开源的自由电子激光光束传输模块 WPG<sup>[20-21]</sup>中进行波动光学模拟, 并以最优斯特列尔比作为评判标准。

#### 4.2 常规冷却下的反射镜面形计算

对于常规的反射镜冷却, 采用的冷却片长度为 900 mm, 根据第 3 章描述的计算模型, 得到反射镜在 7.0 keV 能量 X 射线以 1.9 mrad 入射情况下的温度分布如图 5 所示。各特定能量条件下的面形如图 6 所示, 拟合后的高度残差如表 4 所示。

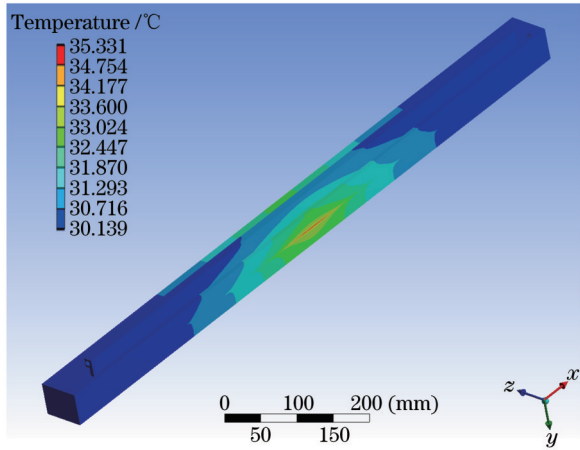


图 5 能量为 7.0 keV 的射线以 1.9 mrad 掠入射角作用到 M1 反射镜后的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution after ray with energy of 7.0 keV incident on M1 mirror at grazing angle of 1.9 mrad

#### 4.3 M1 反射镜冷却优化设计

为了优化冷却结构, 本文研究了冷却片长度对反射镜面形的影响。由于 WPG 光学模拟的工作量大, 因此在冷却系统优化的初期, 先以 FEL 光强分布的半峰全宽(FWHM)区域内的热变形高度误差值作为初步优化目标, 来减少优化时间和提高效率, 得到优化结构后再进行 WPG 光学模拟以判断最终优化结果。将 7.0 keV 时的热负载分布加载到光学元件上, 改变冷却片的长度从 55 mm 到 47 mm, 得到反射镜在子午线方向的热变形曲线和拟合后的高度残差分别如图 7 和图 8 所示。可以发现, 在 7.0 keV 能量的 X 光以 4.0 mrad 入射的情况下, 冷却片的优化长度为 53 mm。采用同样的方式得到各特定能量下冷却片的优化冷却长度, 如表 5 所示。

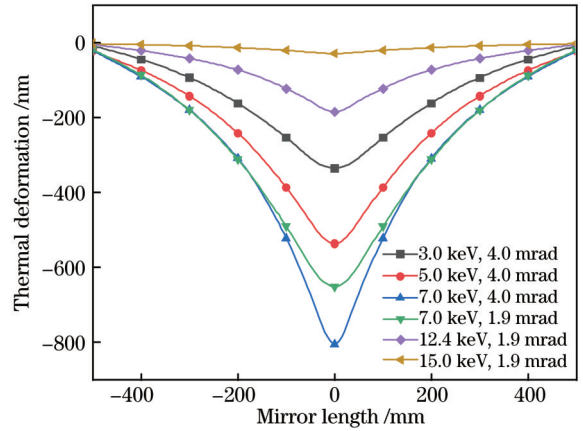


图 6 M1 反射镜各特定能量点下子午方向的热变形  
Fig. 6 Thermal deformation of M1 mirror in meridional direction at each characteristic energy point

表 4 不同能量下 M1 反射镜的  $S_R$   
Table 4  $S_R$  of M1 mirror under different energies

Energy /keV	Grazing angle /mrad	Total heat / W	Simulated $S_R$
3.0	4.0	18.90	0.17
5.0	4.0	28.60	0.12
7.0	4.0	38.20	0.15
7.0	1.9	37.10	0.16
12.4	1.9	9.23	0.29
15.0	1.9	1.72	0.70

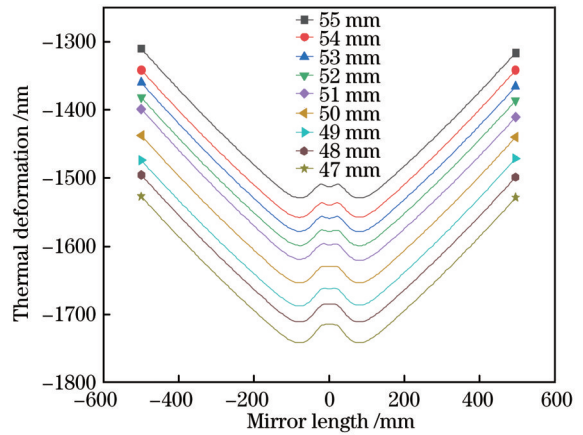


图 7 不同冷却片长度下能量为 7.0 keV 的 X 光以 4.0 mrad 掠入射角作用到 M1 反射镜后的热变形

Fig. 7 Thermal deformation after X-ray with energy of 7.0 keV incident on M1 mirror at grazing angle of 4.0 mrad under different cooling fin lengths

针对冷却片的优化长度和实验站需求, 将 7.0 keV 能量的 X 光以 4.0 mrad 入射作为第一优先级, 5.0 keV 能量的 X 光以 4.0 mrad 入射作为第二优先级。选取冷却长度为 53、109、148 mm, 在工程实施上采取对称的 5 段冷却片冷却, 如图 9 所示。对于该优化后的结构重新采用第 3 章的热分析模型进行热分析

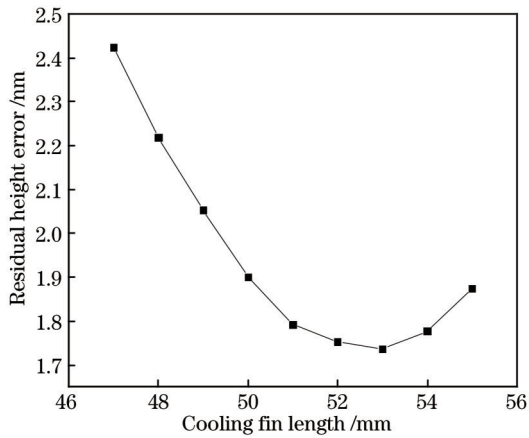


图 8 不同冷却片长度下能量为 7.0 keV 的 X 光以 4.0 mrad 掠入射角作用到 M1 反射镜后的高度残差

Fig. 8 Residual height error after X-ray with energy of 7.0 keV incident on M1 mirror at grazing angle of 4.0 mrad under different cooling fin lengths

表 5 各特定能量下的优化冷却片长度

Table 5 Optimum cooling fin lengths under different energies

Energy / keV	Grazing angle / mrad	Optimum cooling fin length / mm
3.0	4.0	156
5.0	4.0	109
7.0	4.0	53
	1.9	148
12.4	1.9	64
15.0	1.9	65

计算,并对计算得到的面形数据拟合后的残差进行光学模拟,得到的优化后的斯特列尔比结果如表 6 所示。统计结果显示,优化后的冷却结构在各个能量下的光学质量相比于原来的冷却结构均有明显提升。

具体的冷却方式为:

1) 能量为 7.0 keV、掠入射角为 4.0 mrad 的 X 光,

表 6 综合优化后各特定能量下的  $S_R$

Table 6  $S_R$  under different energies after comprehensive optimization

Energy / keV	Grazing angle / mrad	Total heat / W	Simulated $S_R$
3.0	4.0	18.90	0.30
5.0	4.0	28.60	0.26
7.0	4.0	38.20	0.35
	1.9	37.10	0.27
12.4	1.9	9.23	0.60
15.0	1.9	1.72	0.93

## 5 结 论

分析了 SHINE 装置 FEL-I 光束线 M1 反射镜在多个特定能量点下的热变形,并采用多段冷却的方式优化了特定能量点处的面形残差。采用波动光学模拟软

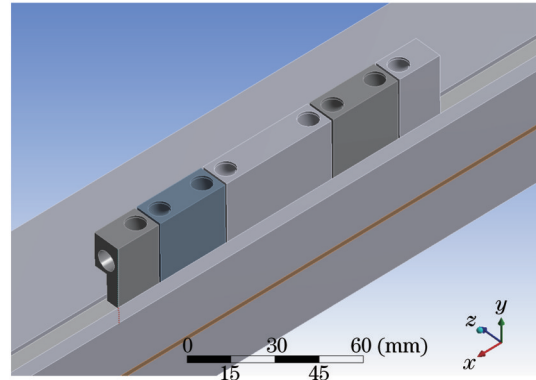


图 9 多段复合型冷却结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of multi-stage compound cooling structure

能量为 12.4 keV、掠入射角为 1.9 mrad 的 X 光和能量为 15.0 keV 的 X 光采用中间 1 段冷却片冷却,冷却长度为 53 mm;

2) 能量为 5.0 keV、掠入射角为 4.0 mrad 的 X 光采用中间 3 段冷却片冷却,冷却长度为 109 mm;

3) 能量为 7.0 keV、掠入射角为 1.9 mrad 的 X 光和能量为 3.0 keV、掠入射角为 4.0 mrad 的 X 光采用全部 5 段冷却片冷却,冷却长度为 148 mm。

## 4.4 讨 论

对于整个 FEL-I 光束线传输系统,按照 Maréchal 判据,将  $S_R=0.82$  作为判断依据。然而,考虑到光束线传输中存在多个光学元件,故针对 M1 反射镜,将  $S_R=0.96$  作为其工作阈值。对比表 4 和表 6 可以发现,在 1 MHz 的工作重复频率下,各能量点的  $S_R$  依然小于 0.96。为了进一步得到可承载重复频率,将 ANSYS 计算得到的热变形数据除以一定的系数来模拟降低自由电子激光重复频率后的热变形数据。热功率下的热变形可以看成线性变化,优化前后各能量点在达到  $S_R=0.96$  时对应的可承载热负载和运行重复频率如表 7 所示。

件 WPG 模拟计算了斯特列尔比。结果显示,优化后 FEL 光束的传输在最关键的能量为 7.0 keV、掠入射角为 4 mrad 的 X 光入射情况下的额定热负载相较优化之前提高了 6.4 倍,其他特征点的额定热负载也有 2.0~8.3 倍的提高,从而进一步提升了 SHINE 装置的

表 7  $S_r=0.96$  时优化前后的可承载热负载和运行重复频率Table 7 Nominal heat load and working repetition rate before and after optimization at  $S_r=0.96$ 

Energy /keV	Grazing angle / mrad	Before Optimization		After Optimization		Repetition rate ratio
		Total heat / W	Repetition rate / kHz	Total heat / W	Repetition rate / kHz	
3.0	4.0	0.63	33.3	1.89	100	3.0
5.0	4.0	0.57	20.0	1.57	55	2.8
7.0	4.0	0.48	12.5	3.06	80	6.4
	1.9	0.62	16.7	1.86	50	3.0
12.4	1.9	0.37	40.0	3.07	333	8.3
15.0	1.9	0.43	250.0	0.86	500	2.0

可承载运行重复频率。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Hettel R. DLSR design and plans: an international overview[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2014, 21(5): 843-855.
- [3] Emma P, Akre R, Arthur J, et al. First lasing and operation of an ångstrom-wavelength free-electron laser [J]. Nature Photonics, 2010, 4(9): 641-647.
- [4] 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.
- [5] Kim K J, Huang Z R, Lindberg R. Synchrotron radiation and free-electron lasers: principles of coherent X-ray generation[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [6] Pellegrini C, Marinelli A, Reiche S. The physics of X-ray free-electron lasers[J]. Reviews of Modern Physics, 2016, 88(1): 015006.
- [7] Cocco D, Spiga D, Klisnick A, et al. Wavefront preserving optics for diffraction-limited storage rings and free-electron lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11111: 111110G.
- [8] Church E L, Takacs P Z. Specification of surface figure and finish in terms of system performance[J]. Applied Optics, 1993, 32(19): 3344-3353.
- [9] LCLS-II. LCLS-II final design report[R]. Menlo Park: SLAC National Accelerator Lab, 2015.
- [10] Bean R J, Aquila A, Samoylova L, et al. Design of the mirror optical systems for coherent diffractive imaging at the SPB/SFX instrument of the European XFEL[J]. Journal of Optics, 2016, 18(7): 074011.
- [11] Vannoni M, Freijo-Martin I. Installation and commissioning of the European XFEL beam transport in the first two beamlines from a metrology point of view[J]. The Review of Scientific Instruments, 2019, 90(2): 021701.
- [12] Zhang L, Cocco D, Kelez N, et al. Optimizing X-ray mirror thermal performance using matched profile cooling [J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2015, 22(5): 1170-1181.
- [13] Cocco D, Hardin C, Morton D, et al. Adaptive shape control of wavefront-preserving X-ray mirrors with active cooling and heating[J]. Optics Express, 2020, 28(13): 19242-19254.
- [14] 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]//FEL2017: 38th International Free-Electron Laser Conference, August 20-25, 2017, Santa Fe, NM, USA. Berlin: JACoW Publishing, 2017: MOP055.
- [15] Schneidmiller E A, Yurkov M V. Photon beam properties at the European XFEL[R]. Hamburg: Deutsches Elektronen-Synchrotron, 2011.
- [16] Ansys[EB/OL]. [2021-02-03]. <https://www.ansys.com/>.
- [17] Mahajan V N. Strehl ratio for primary aberrations in terms of their aberration variance[J]. Journal of the Optical Society of America, 1983, 73(6): 860-861.
- [18] Cocco D, Spiga D. Wavefront preserving optics for diffraction-limited storage rings and free-electron lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11111: 37-46.
- [19] Cocco D. Recent developments in UV optics for ultra-short, ultra-intense coherent light sources[J]. Photonics, 2015, 2(1): 40-49.
- [20] Samoylova L, Buzmakov A, Chubar O, et al. WavePropaGator: interactive framework for X-ray free-electron laser optics design and simulations[J]. Journal of Applied Crystallography, 2016, 49(4): 1347-1355.