

# X 射线干涉光刻偏转聚焦系统热载影响与分析

高飒飒<sup>1,2</sup> 卢启鹏<sup>1</sup> 彭忠琦<sup>1</sup> 龚学鹏<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 为缩短实验前的等待时间,减小热辐射对光学元件的损伤以及热变形对实验的影响,充分利用同步辐射 X 射线获得稳定有效的实验结果,对 X 射线干涉光刻(XIL)光束线偏转聚焦系统进行了热-结构耦合分析。针对上海光源(SSRF)的光源参数,计算偏转聚焦系统所受的热功率密度分布,在此基础上对偏转聚焦系统在相同载荷、不同边界条件下进行了瞬态热平衡分析,得到双柱面镜 M1、M2 达到热平衡所需的时间、温度分布,并做了比较分析。结果表明,对 XIL 光束线上偏转聚焦系统的 M1、M2 采用间接水冷方式可削弱热载效应,达到热平衡的时间分别由 8677 s 和 7850 s 缩短到 960 s 和 840 s,最高温度分别由 182.73 °C 和 129.73 °C 降低到 57.94 °C 和 47.29 °C,此时的最大面形误差分别为 7.23  $\mu\text{rad}$  和 9.24  $\mu\text{rad}$ ,缩短了从开机到实验的等待时间,在提高实验效率的同时能够获得稳定有效的实验结果。

**关键词** X 射线光学;功率密度分布;热平衡;面形误差;有限元分析

**中图分类号** TH744.1; TB24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1234001

## Analysis of Heating Effect on XIL Deflection Focus System

Gao Sasa<sup>1,2</sup> Lu Qipeng<sup>1</sup> Peng Zhongqi<sup>1</sup> Gong Xuepeng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** In order to shorten the waiting time before experiment, reduce the damage caused by heat radiation and lower the influence of thermal deformation on the experiment, thermo-mechanical analysis of deflection focus system is carried out by making full use of synchrotron radiation X-ray to obtain stable and effective experimental results. Based on the main parameters of Shanghai synchrotron radiation facility (SSRF), the thermal power density distribution absorbed by deflection focus system on X-ray interference lithography (XIL) line is calculated. Then dynamic thermal equilibrium analysis is carried out under the conditions: without water cooling, with water cooling and thermal radiation. Finite element analysis is used to perform the thermo-mechanical analysis of M1, M2 in order to obtain parameters such as the time required for thermal equilibrium and the temperature gradient distribution. Results indicate that the thermal load effect on M1, M2 of deflection focus system can be weakened by indirect water cooling structure. Thermal equilibrium durations of M1, M2 get dropped substantially from 8677 s and 7850 s to 960 s and 840 s, respectively. The highest temperatures reduce from 182.73 °C, 129.73 °C to 57.94 °C, 47.29 °C, respectively. Meanwhile, the biggest slope errors are 7.23  $\mu\text{rad}$ , 9.24  $\mu\text{rad}$ , respectively. The waiting time from operating to experiment is shortened, which can improve the efficiency greatly and ensure steady and effective experimental results.

**Key words** X-ray optics; power density distribution; thermal equilibrium; slope error; finite element analysis

**OCIS codes** 340.6720; 340.7470; 350.6830

**收稿日期**: 2012-06-07; **收到修改稿日期**: 2012-07-13

**基金项目**: 国家自然科学基金(11079035)和应用光学国家重点实验室开放基金(O9Q33FQ091)资助课题。

**作者简介**: 高飒飒(1986—),女,博士研究生,主要从事同步辐射光束线关键技术方面的研究。

E-mail: gaosa8608@163.com

**导师简介**: 卢启鹏(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事光谱仪器及同步辐射光束线关键技术等方面的研究。

E-mail: luqp@ciomp.ac.cn(通信联系人,中国光学学会会员号:1309129)

## 1 引言

X 射线干涉光刻(XIL)利用两束或多束相干 X 光的干涉条纹对光刻胶进行曝光,是一种新型的先进微纳加工技术,可以加工几十甚至几个纳米周期的结构。第三代同步辐射光源的高通量和良好的相干性为发展高分辨和高产出的 XIL 技术提供了物质基础。上海光源(SSRF)X 射线干涉光刻光束线站利用其现有的高亮度相干 X 射线,采用偏转聚焦系统(双柱面镜)从软 X 射线扫描显微光束线波荡器中引出一条分支光束线,构建 X 射线干涉光刻光束线站。

近 20 年来,随着以大流强和高能量为特征的同步辐射装置的相继建成以及插入件技术的成熟,高热负载光学元件的损伤和热变形已成为限制光束线性性能进一步提高的瓶颈之一<sup>[1]</sup>。为充分利用同步辐射装置产生的 X 射线,国际上已对高热负载光学元件的热缓释展开了多层次研究,目前已形成低功率密度用水冷却,高功率密度用液氮冷却的共识<sup>[2]</sup>。由于各个同步辐射装置具有不同的光谱分布以及使用的插入件类型和参数不同,同一个同步辐射装置上不同光束线的光谱分布也相差甚远。因此在光束线设计和光学元件的研制过程中需要用数值模拟的方法分析光学元件在热负载状态下达到热平衡的时间以及面形误差,进而确定开机后偏转聚焦系统达到最佳工作状态所需时间,从而保证实验中获得稳定有效的实验结果。

为实现这一目标,针对 SSRF 的光源参数,本文计算分析了 XIL 光束线偏转聚焦系统双柱面镜所受的热功率密度分布及其在热载下达到热平衡的时间,进而得出其温度场分布及相应的面形误差,以在光束线设计过程中将热负载更加合理地分配在各光学元件之间,为光束线工程设计和实际操作提供强有力的理论依据。

## 2 偏转聚焦系统热功率密度计算

XIL 光束线偏转聚焦系统由双柱面镜 M1、M2 组成,如图 1 所示。柱面镜 M1 使入射光沿水平方向偏转,主要用于调整偏转角度,降低下游热负载,同时具有高频滤波作用。柱面镜 M2 反射面与 M1 相对,使光束以  $10^\circ$  掠入射,主要作用是去除高次谐波,调整偏转及聚焦准直。

光束线中的光学元件,由于承受波荡器的辐射功率,会在光学镜面上形成不均匀的热载分布,产生

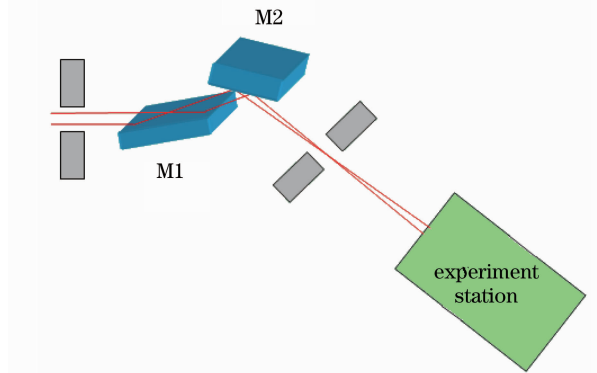


图 1 XIL 光束线光学布局示意图

Fig. 1 Schematic diagram of XIL beam-line

面形误差,影响成像质量。针对 SSRF 储存环的主要参数,在 XIL 实验中线偏振情况下,计算了 X 射线入射到 M1、M2 上的热功率密度分布,并将其加载到 M1、M2 镜面上计算分析光学元件在热负载状态下的面形误差<sup>[3]</sup>。SSRF 储存环的主要参数如表 1 所示<sup>[4]</sup>。

表 1 上海光源储存环的主要参数

Table 1 Main parameters of storage ring of SSRF

Parameter	Value
Energy $E/\text{GeV}$	3.5
Circumference /m	432
Emittance $\epsilon/(\text{nm}\cdot\text{rad})$	3.90
Coupling coefficient $\kappa$	0.01
Current /mA	200~300
Number of cells	20

当入射光的能量为 92.5 eV 时,用 SPECTRA 8.0 分析软件计算在柱面镜 M1 位置的垂直接收功率密度分布,再按 M1 反射面与水平面的夹角把功率密度分布展宽到柱面镜 M1 的反射面上。转化后柱面镜 M1 上的热载荷分布如图 2 所示。被柱面镜

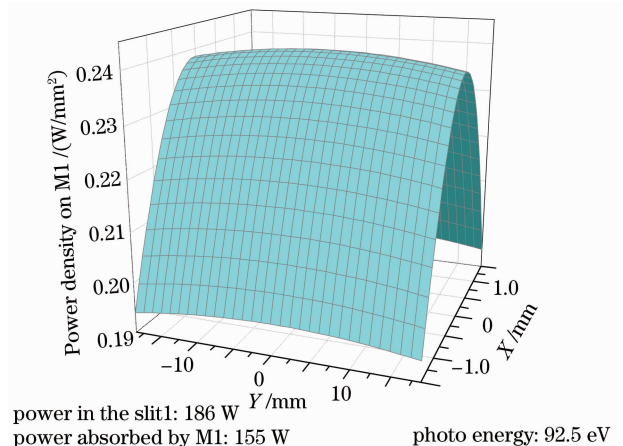


图 2 柱面镜 M1 吸收功率密度分布

Fig. 2 Power density distribution on M1

M1 吸收的功率为 155 W, 最大吸收功率密度为  $0.24 \text{ W/mm}^2$ 。进一步计算可得柱面镜 M2 上的功率密度分布, 如图 3 所示, 被柱面镜 M2 吸收的功率为 30 W, 最大吸收功率密度为  $0.29 \text{ W/mm}^2$ 。

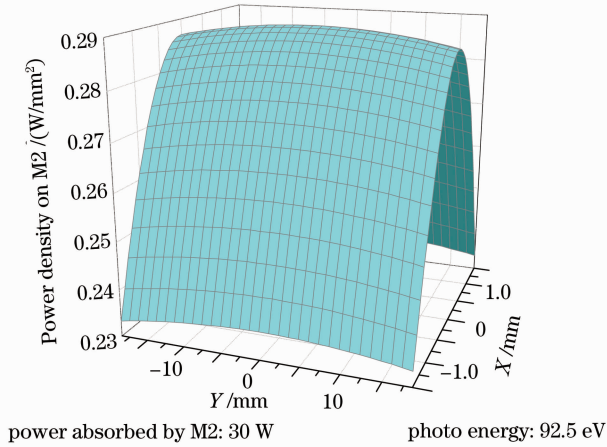


图 3 柱面镜 M2 吸收功率密度分布

Fig. 3 Power density distribution on M2

### 3 偏转聚焦系统的热载影响分析

#### 3.1 热分析的基本理论

为了深入地研究热功率密度对偏转聚焦系统双柱面镜镜面的影响及所采取的冷却方案, 采用有限元分析软件 ANSYS 对镜面进行热分析, 获取其达到热平衡所需的时间、温度分布及其他物理参数, 并模拟镜面的变形情况。ANSYS 热分析基于能量守恒原理的热平衡方程, 用有限元法计算各节点的温度值, 进而求解其他相关量。ANSYS 热分析包括热传导、热对流及热辐射三种热传递方式<sup>[5~8]</sup>。

热传导可以定义为完全接触的两个物体之间或一个物体的不同部分之间由于温度梯度而引起的内能交换, 遵循传导傅里叶定律

$$q^* = -k \frac{dT}{dx}, \quad (1)$$

式中  $q^*$  为热流密度 ( $\text{W/m}^2$ ),  $k$  为导热系数 [ $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ], “-”表示热量向温度降低的方向流动。

热对流是指固体的表面与其周围介质之间由于温差引起的热交换。热对流引起的热通量用牛顿冷却方程来描述:

$$q^* = h(T_s - T_B), \quad (2)$$

式中  $h$  为膜传热系数,  $T_s$  为固体表面的温度,  $T_B$  为周围介质的温度。

热辐射指物体发射电磁能被其他物体吸收转变为热的热交换过程。工程上通常考虑两个或者两个以上物体之间的辐射, 它们之间的热传递用斯蒂芬-

玻尔兹曼方程来表示:

$$q = \varepsilon \sigma A_i F_{ij} (T_i^4 - T_j^4), \quad (3)$$

式中  $q$  为热流率,  $\varepsilon$  为辐射率,  $\sigma$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,  $A_i$  为辐射面  $i$  的面积,  $F_{ij}$  为由辐射面  $i$  到辐射面  $j$  的形状系数,  $T_i$ 、 $T_j$  分别为辐射面  $i$ 、 $j$  的绝对温度。

由于所分析的热载涉及以上三种传热类型, 故将三种热传递方式进行综合考虑, 可最大限度地模拟偏转聚焦系统的真实状态, 提高工程分析精度。

#### 3.2 热平衡时间

XIL 束线站开机运行后, 由于承受波荡器的辐射功率, 双柱面镜 M1、M2 的反射面上会形成不均匀的热载分布, 镜面逐渐由冷变热, 产生动态面形误差, 使光斑处于不稳定状态, 影响成像质量, 不能获取稳定有效的实验结果。因此, XIL 进行正常实验时需要使各光学元件处于热平衡状态, 调整双柱面镜 M1、M2 的相对入射角使通量输出最大, 从而达到最佳工作状态。借助 ANSYS 对双柱面镜进行瞬态热平衡分析, 可以得到其达到热平衡的时间, 以此来确定开机经过多长时间后进行实验, 进而获得稳定有效的实验结果。

由于双柱面镜与其固定支撑等均为线或面接触, 在超高真空条件下, 没有冷却结构时, 只需考虑热辐射散热边界条件<sup>[9,10]</sup>。有限元分析中, 点面间的热辐射采用表面效应单元 SURF152 模拟, 柱面镜的材料为单晶硅, 热辐射率近似为 1, 镜体处于不锈钢灰体封闭环境中 (热辐射率 0.3, 常温  $22^\circ\text{C}$ ), 镜体各面向外辐射散热<sup>[11]</sup>。在该边界条件下, 对柱面镜 M1 的热平衡过程进行瞬态分析, 得到其达到热平衡时间和温度分布曲线如图 4 所示。在没有水冷的情況下达到热平衡所需的时间为 8677 s。由于

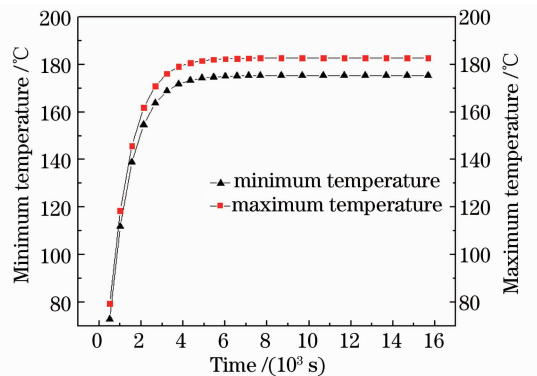


图 4 仅考虑热辐射时 M1 的平衡时间

Fig. 4 Temperature versus time for M1 under radiation cooling

反射面的有效照射面积较小,因此在达到热平衡状态后,光照区域的温度要大于非光照区域,在镜面上存在一个平衡的温度场,其最高温度为 182.73 °C,最低温度为 175.39 °C。

在辐射散热基础上,采用间接冷却的方式,建立如图 5 所示的几何模型,柱面镜夹在两个无氧铜块之间,无氧铜块内设有冷却管道,通 30 °C 的冷却水,用强迫对流换热模式进行冷却,柱面镜通过热传导把吸收的 X 射线所转化的热量传递给冷却水得以冷却。柱面镜 M1 尺寸为 40 mm×55 mm×150 mm,中间的长条形区域为有效照射面积。经过优化,无氧铜块尺寸为 20 mm×20 mm×100 mm。M1 反射面吸收的热功率为 155 W,照射在反射面中心 3 mm×140 mm 的区域内。通过计算,得出 M1 达到热平衡所需的时间约 980 s,平衡时最高温度为 57.94 °C,最低温度为 50.48 °C,如图 6 所示。

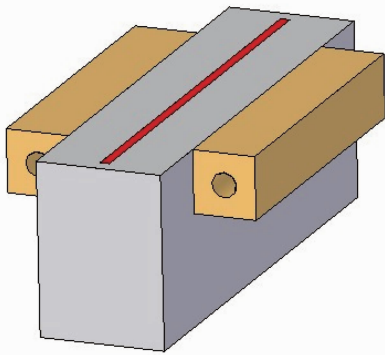


图 5 侧冷结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of cooling device

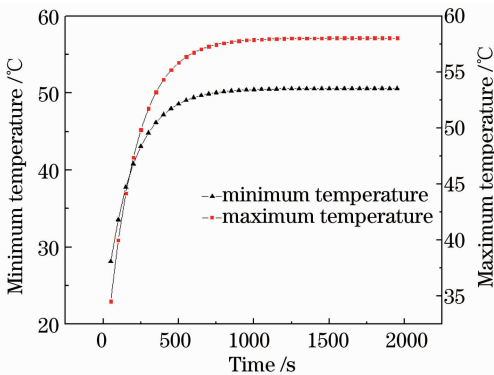


图 6 考虑热辐射和冷却时 M1 的平衡时间

Fig. 6 Temperature versus time for M1 under radiation and convection cooling

同理,可以得到上述两种情况下 M2 达到热平衡的时间及温度变化曲线,分别如图 7、图 8 所示。可以看出,M2 达到热平衡的时间由 7850 s 减小到 840 s,平衡时的最高温度由 129.73 °C 降低到 47.29 °C。

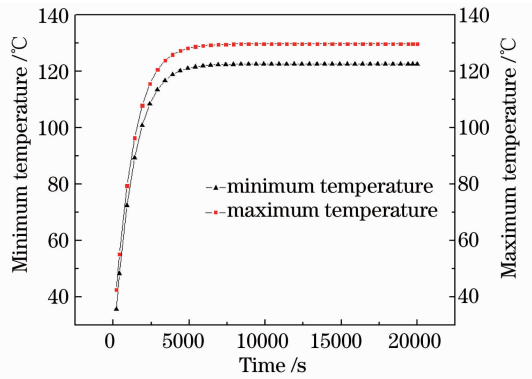


图 7 仅考虑热辐射时 M2 的平衡时间

Fig. 7 Temperature versus time for M2 under radiation cooling

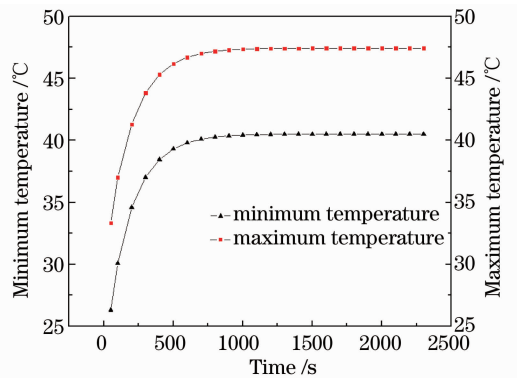


图 8 考虑热辐射和冷却时 M2 的平衡时间

Fig. 8 Temperature versus time for M2 under radiation and convection cooling

计算结果表明,采用冷却结构后,柱面镜 M1、M2 达到热平衡的时间在很大程度上得以缩减,热平衡时的最高温度和最低温度均得以大幅度降低。可见,M1、M2 采用间接水冷方式可削弱热载效应,很快达到热平衡,有效提高实验效率,同时也减小了长时间热辐射对光学元件造成的损伤。

### 3.3 温度场与形变场

在光束线中,很多元件都会受到同步辐射热载的影响,对于偏转聚焦镜来说,达到热平衡状态后,由于温度场的存在,镜面会发生一定的热致形变,作为反射型元件,镜面元件的热变形会造成反射面的面形误差,从而影响光束的空间性质,降低成像质量。因此,在光束线设计过程中需要研究温度场对形变场的影响,并确定平衡后光学元件的面形误差。

在超高真空条件下,不采用冷却措施时,对 M1 进行稳态热分析,由于结构的对称性,取 1/4 结构进行分析,用 Table 表加载方式加载非均匀功率密度<sup>[12]</sup>,计算出热功率作用下的温度场分布,如图 9(a) 所示。采用间接冷却方式,利用图 5 所建立的冷却

模型,铜块内通 30 ℃ 的冷却水,膜系数为  $1.0 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{℃})$ ,得到热功率作用下的温度场分布如图 9(b)所示。对比图 9(a)和(b),采用冷却结

构后,平衡时的最高温度从 188.68 ℃ 降低到 58.06 ℃,镜子的整体温度大幅下降。

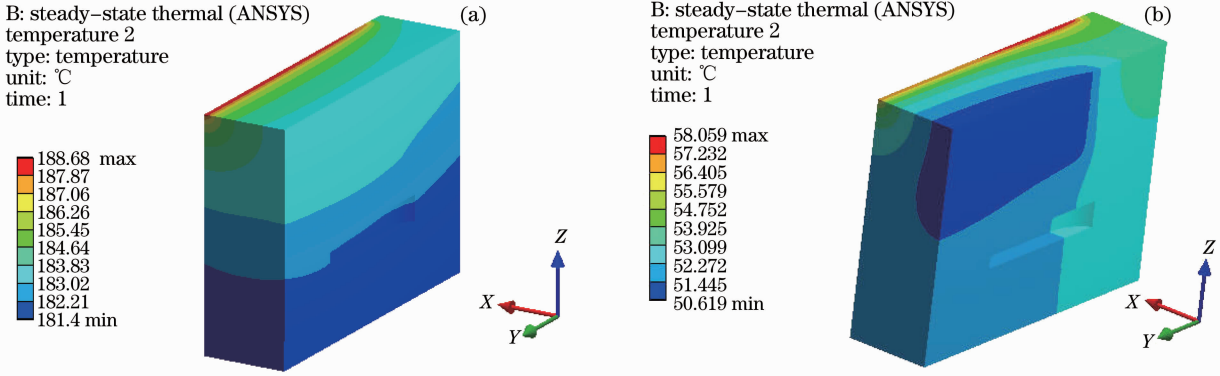


图 9 M1 在热功率作用下的温度场分布。(a)不考虑冷却时 M1 的温度场;(b)考虑冷却时 M1 的温度场

Fig. 9 Temperature distribution of M1. (a) Without water cooling; (b) with water cooling

通常固体在受热影响下的变形情况可以用热弹性力学来研究,其对象为微小区域,基本方程为<sup>[13]</sup>

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} - \frac{1}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\rho h}{k} - \frac{E\alpha T_0}{(1-2\nu)k} \times \frac{\partial(e_x + e_y + e_z)}{\partial t} = 0, \quad (4)$$

式中  $T$  为温度,  $\kappa$  为热扩散系数,  $k$  为导热系数,  $\rho$  为材料密度,  $h$  为体热源密度,  $E$  为杨氏弹性模量,  $\alpha$  为热膨胀系数,  $\nu$  为泊松比,  $T_0$  为参考温度,  $e_x, e_y, e_z$  分别为  $x, y, z$  方向的压应变。

(4)式表示形变场和温度场是相互耦合的,但在接近稳态情况下,形变场对温度场的影响趋于 0,这时解热变形问题可先求解热问题,再将得到的结果作为形变问题的载荷,求解形变,最终得到热作用下的形变结果。将以上热分析得到的温度梯度作为载荷进行结构分析。采用 ANSYS 软件的耦合场技术

对 M1 做热应力分析,在分析过程中除了采用对称约束外,还固定约束几何对称面交线与镜体下表面交点的位移为零,即 M1 的变形是纯热应变。

光学元件热变形的大小用其表面斜率误差来表征,其中斜率误差定义为光学元件表面平行 X 射线入射方向中心线在 X 射线照射范围内的斜率误差<sup>[14,15]</sup>。利用 ANSYS 后处理功能得到镜体表面中心线(垂直于 X 射线入射方向)的形变分布,进而得到变形的斜率误差,得到没有冷却和有冷却时的结果分别如图 10(a)、(b)中对应曲线所示(没有指明的情况下,斜率误差均为 1/2 有效长度上的倾斜误差)。可以看出,没有冷却时最大变形为  $19.51 \mu\text{m}$ ,沿长度方向的最大面形误差为  $15.54 \mu\text{rad}$ 。当采用冷却结构时,最大变形为  $3.71 \mu\text{m}$ ,沿长度方向的最大面形误差为  $7.23 \mu\text{rad}$ 。同理,可以得到 M2 表面中心线(垂直于 X 射线入射方向)形变分布和变形的斜率误差,

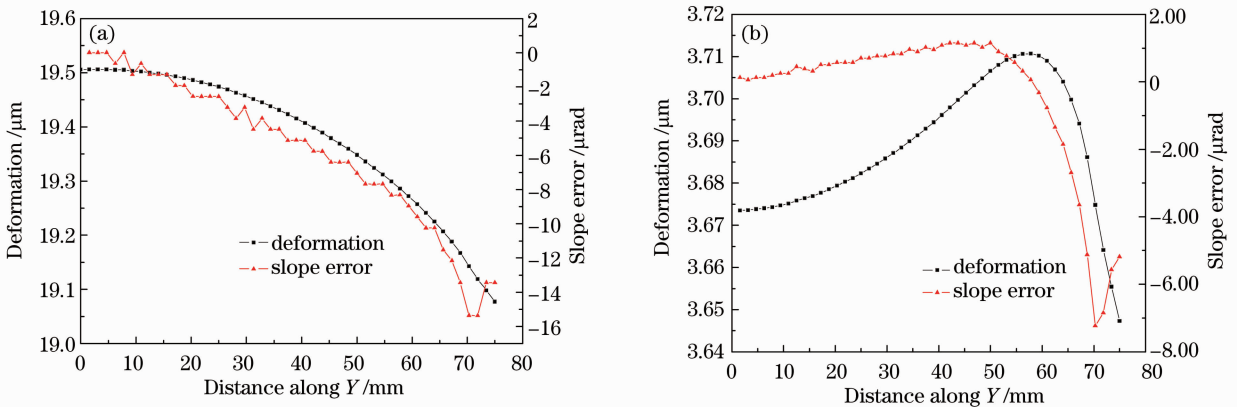


图 10 M1 在 Z 向的热形变、面形误差。(a)无冷却时 M1 在 Z 向的热形变、面形误差;

(b)有冷却时 M1 在 Z 向的热形变、面形误差

Fig. 10 Distribution of thermal distortion along the center line of M1. (a) Without water cooling; (b) with water cooling

结果如图 11 中对应曲线所示。无冷却时最大变形为  $14.50 \mu\text{m}$ , 沿长度方向的最大面形误差为  $18.47 \mu\text{rad}$ 。

采用冷却结构后, 最大变形为  $1.45 \mu\text{m}$ , 沿长度方向的最大面形误差为  $9.24 \mu\text{rad}$ 。

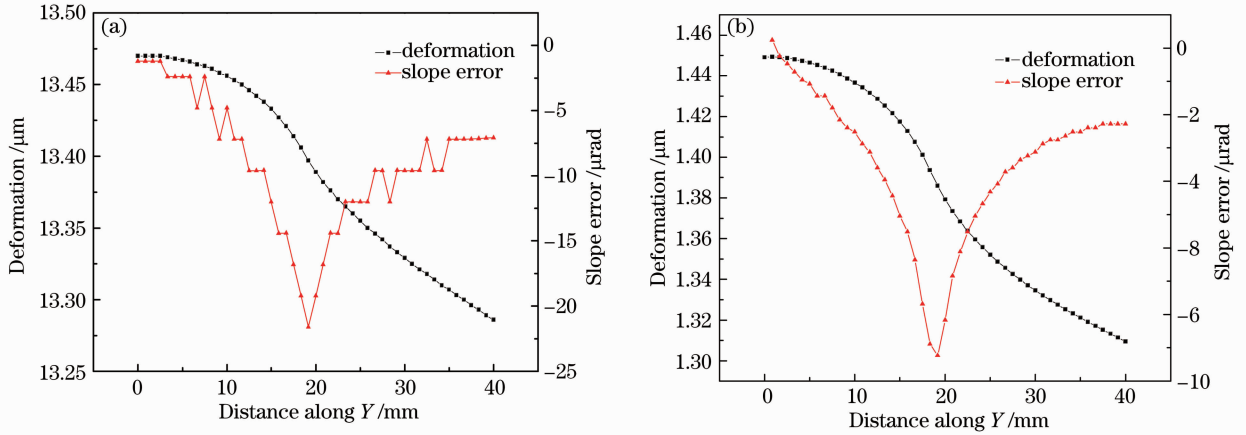


图 11 M2 在 Z 向的热形变、面形误差。(a)无冷却时 M2 在 Z 向的热形变、面形误差;  
(b)有冷却时 M2 在 Z 向的热形变、面形误差

Fig. 11 Distribution of thermal distortion along the center line of M2. (a) Without water cooling; (b) with water cooling

可以看出, 采用冷却结构后, M1 和 M2 在热载作用下的变形量和面形误差得到明显降低, 证明该冷却结构有效可行, 满足 XIL 光束线的使用要求。

双柱面镜 M1、M2 做了热-结构耦合分析, 得到 M1、M2 达到热平衡所需时间、温度分布及由此产生的热变形与面形误差等。研究表明, XIL 光束线偏转聚焦系统 M1、M2 采用间接水冷方式可削弱热载效应, 达到热平衡的时间分别由 8677 s 和 7850 s 缩短到 960 s 和 840 s, 最高温度分别由  $182.73 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $129.73 \text{ }^\circ\text{C}$  降低到  $57.94 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $47.29 \text{ }^\circ\text{C}$ , 此时对应的最大面形误差分别为  $7.23 \mu\text{rad}$  和  $9.24 \mu\text{rad}$ , 缩短了从开机到进行实验的等待时间, 在提高实验效率的同时能够获得稳定有效的实验结果。采用非均匀加载方式加载功率密度, 并将热传导、热对流及热辐射三种热传递方式进行综合考虑, 最大程度地模拟仿真了该结构在热载下的真实状态, 提高了工程分析精度。目前, XIL 偏转聚焦系统已完成在线安装调试, 并投入使用。

镜面因受热载而产生了热态面形误差。主要有两方面的因素: 1) 照射表面上的温度梯度。由于镜面 M1 和 M2 上功率辐照密度较低, 不会因此产生很大的温度梯度而使镜面局部隆起, 因此这一因素可以忽略。2) 横向截面上的温度梯度。直接照射镜子表面和背面之间存在温度差, 受热后自上而下产生不同的线膨胀, 使镜子沿纵向发生弯曲。弯曲变形为<sup>[16]</sup>

$$\Delta_{\text{thermal}} = \frac{C}{2\pi} \frac{\alpha}{\kappa} \frac{P_{\text{abs}}}{w} \left[ \frac{\theta_i}{h_z} x - \frac{1}{3} \left( \frac{\theta_i}{h_z} \right)^3 x^3 \right], \quad (5)$$

式中  $C$  为常数,  $C = 1$  为镜子无冷却情况,  $C = 0.5$  为侧面冷却,  $\frac{\alpha}{\kappa} = 1.67 \times 10^{-8} \text{ m/W}$ ,  $\alpha$  为热膨胀系数,  $\kappa$  为热传导率,  $P_{\text{abs}}$  为镜面辐照功率,  $w$  为镜面照射宽度,  $h_z$  为光束垂直方向的高度。

在 X 射线照射区域  $0 \leq x \leq 0.14 \text{ m}$  的镜面子午长度内, 计算得到 M1 和 M2 的最大面形误差分别约为  $7 \mu\text{rad}$  和  $9 \mu\text{rad}$ , 与 ANSYS 分析计算的结果一致, 满足实验要求。因此, 偏转聚焦系统双柱面镜 M1、M2 采用间接水冷方式可削弱热载效应, 满足 XIL 光束线使用要求。

## 4 结 论

研究了偏转聚焦系统的热平衡时间和热载性能, 运用有限元分析软件 ANSYS 对偏转聚焦系统

## 参 考 文 献

- 1 D. H. Bilderback, A. K. Freund, G. S. Knapp *et al.*. The historical development of cryogenically cooled monochromators for third-generation synchrotron radiation sources [J]. *J. Synchrotron Radiation*, 2000, **7**(2): 53~60
- 2 Wang Naxiu, Zhu Yi, Fu Yuan. Simulation of thermal distortion of DCM crystal indirectly cooled by LN<sub>2</sub> [J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2006, **30**(8): 802~805  
王纳秀, 朱毅, 傅远. 液氮间接冷却晶体单色器第一晶体热变形模拟计算[J]. *高能物理与核物理*, 2006, **30**(8): 802~805
- 3 Baozhong Mu, Zhanshan Wang, Shengzhen Yi *et al.*. Study of X-ray Kirkpatrick-Beaz imaging with single layer [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(5): 452~454
- 4 Wang Naxiu. Research on Cooling Technique of SR Beamline Components and Application of Cooling Technique [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006. 1~4

- 王纳秀. 同步辐射光束热缓释技术研究及冷却技术的应用[D]. 上海:中国科学院上海应用物理研究所, 2006. 1~4
- 5 Zhang Chaohui. ANSYS Thermal Analysis and Example Analysis [M]. Beijing: China Railway Press, 2007. 19~20
- 张朝晖. ANSYS 热分析教程与实例解析[M]. 北京:中国铁道出版社, 2007. 19~20
- 6 Zhang Jianfeng, Wang Cuiling, Wu Yuping. Application of ANSYS in heat analysis[J]. *Energy for Metallurgical Industry*, 2004, **23**(9): 9~12
- 张建峰, 王翠玲, 吴玉萍. ANSYS 有限元分析软件在热分析中的应用[J]. *冶金能源*, 2004, **23**(9): 9~12
- 7 Lian Tianhong, Wang Shiyu, Guo Zhen *et al.*. Temperature field analysis of laser medium with rough surface heat conduction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0614001
- 连天虹, 王石语, 过 振等. 粗糙热传导表面下激光介质温度场的计算分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0614001
- 8 Lu Chao, Yuan Renmin, Luo Tao *et al.*. Characteristic scale analysis of atmospheric optical turbulence in simulating convective boundary layer with water tank [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0201002
- 卢 超, 袁仁民, 罗 涛等. 模拟的对流边界层光学湍流的特征尺度分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0201002
- 9 A. M. Khounsary, D. Chojnowski, L. Assoufid *et al.*. Thermal contact resistance across a copper-silicon interface[C]. *SPIE*, 1997, **3151**: 45~51
- 10 M. Asano, J. Ogata, Y. Yosinaga. Quantitative evaluation of contact thermal conductance in a vacuum as a result of simulating the effect of cooling[C]. *SPIE*, 1993, **1739**: 652~656
- 11 M. Dormiani. Finite element analysis of a SiC mirror receiving synchrotron radiation[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1988, **266**(1-3): 507~512
- 12 Bo Yi Creation. ANSYS 9.0 Classical Advanced Analysis Technology and Example Explanation [M]. Beijing: China's Water Conservancy and Hydropower Press, 2005. 22~33
- 博弈创作室. ANSYS 9.0 经典产品高级分析技术与实例详解[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005. 22~33
- 13 Dong Xiaohao, Feng Liangjie, Xu Chaoyin. Testing and calculation analysis of heating effect on U7C DCM at NSRL[J]. *Nuclear Techniques*, 2006, **29**(1): 6~10
- 董晓浩, 凤良杰, 徐朝银. NSRL-U7C 双晶单色器热载影响与计算分析[J]. *核技术*, 2006, **29**(1): 6~10
- 14 Lu Qipeng, Gao Sasa, Peng Zhongqi. Slope error analysis and compensation for synchrotron radiation horizontal deflexed mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(11): 2644~2650
- 卢启鹏, 高飒飒, 彭忠琦. 同步辐射水平偏转压弯镜面形误差分析与补偿[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(11): 2644~2650
- 15 Li Yun, Xing Tingwen. Surface error of optical components extended with non-uniform rational B-spline surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0722001
- 李 云, 邢廷文. 采用非均匀有理 B 样条曲面延展光学元件面形误差[J]. *光学学报*, 2012, **32**(7): 0722001
- 16 B. A. Boley, J. H. Weiner. Theory of Thermal Stresses[M]. Malabar: R. E. Krieger, 1985

栏目编辑: 李文喆