

文章编号 1004-924X(2017)05-1242-08

X 射线聚焦望远镜镜片黏接装配 的数值模拟和分析

贺鹏飞¹, 尤佳伟¹, 戴 瑛^{1*}, 沈正祥^{2,3}, 王占山^{2,3}

- (1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092;
2. 同济大学 先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200092)

摘要:对采用圆锥嵌套 Wolter-I 型结构的 X 射线聚焦望远镜在装配过程中产生的面形偏差进行了模拟和分析。首先, 利用 ANSYS 有限元软件建立二维模型。然后, 以实际装配步骤和夹具为加载和边界条件, 通过分析不同半径镜片的装配过程, 得到了面形偏差与三根压条的载荷关系曲线, 由此优选出了不同半径镜片对应的最佳装配载荷。分析显示: 除对应的最大面形偏差外, 优选出的装配载荷均可控制在 $0.1 \mu\text{m}$ 以内, 满足装配精度要求, 而且对应装配载荷下玻璃镜片的最大 Mises 应力也均小于玻璃的强度极限, 不会在装配过程中失效。此外, 建立了三维分析模型并与二维简化模型分析结果进行了比较。结果显示: 计算偏差主要集中在镜片的前、后两端约 5 mm 范围内, 最大偏差为 $2.3 \mu\text{m}$; 镜片中段两种模型的计算偏差小于 $0.03 \mu\text{m}$, 表明提出的二维简化模型可以用于玻璃镜片装配的快速面形偏差分析和载荷确定。文中对镜片装配过程的分析可为提高装配精度提供理论依据。

关键词: X 射线聚焦望远镜; 镜片装配; 面形偏差; 载荷分析; 有限元法

中图分类号: TH743; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172505.1242

Numerical simulation and analysis of X-ray focusing telescope in mounting process

HE Peng-fei¹, YOU Jia-wei¹, DAI Ying^{1*}, SHEN Zheng-xiang^{2,3}, WANG Zhan-shan^{2,3}

- (1. School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics,
Tongji University, Shanghai 200092, China;
 2. Key Laboratory of Advanced Micro-structure Materials of the Ministry of Education,
Tongji University, Shanghai 200092, China;
 3. Institute of Physical Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)
- * Corresponding author, E-mail: ydai@tongji.edu.cn

Abstract: The surface errors in mounting process of a mirror used in the X-ray focusing telescope with a nested conical approximation Wolter-I type structure was simulated and analyzed for an X-ray Timing and Polarization (XTP) satellite. Firstly, the 2-D finite element model was established based on ANSYS. Then, by taking the actual jig and mounting process as loading and boundary conditions,

收稿日期: 2016-09-12; 修订日期: 2016-11-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11427804); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

the curvilinear relationship between surface error and loading on three bars was obtained through the analysis of mounting process of the mirror with different radii and the optimized loadings according to different mirrors were selected. Analysis results show that the minimum surface error is less than $0.1 \mu\text{m}$ according to the optimized loading and satisfies the accuracy requirement. Moreover, the maximum stresses in the mirror are less than the ultimate strength of glass and maintain the reliability in mounting process. A 3-D model was established to compare with the 2-D model for deviation analysis. Results show that the main calculating deviation is $2.3 \mu\text{m}$ at front and back sections of the mirror in length about 5 mm. The calculating deviation at middle of mirror is less than $0.03 \mu\text{m}$. The research show that the 2-D model could be used in the fast surface error analysis and loading confirmation. According to the analysis of mirror mounting process, the accurate mechanics analysis could provide academic bases and references for improving mounting accuracy.

Key words: X-ray focusing telescope; mirror mounting; surface error; loading analysis; finite element method

1 引言

X射线聚焦望远镜主要用于观测X射线双星和活动星系核的宽波段能谱和时变,研究极端条件下物质的行为和物理规律,包括在强引力场、强磁场下物质的运动规律和基本物理过程以及在高密度下物质的状态方程^[1]。基于X射线全反射原理,美、日、欧洲各国先后制作了不同Wolter-I型结构的聚焦望远镜,如Chandra望远镜^[2]、牛顿X射线多镜望远镜(XMM-Newton)^[3]、国际X射线天文台(IXO)望远镜^[4]、Astro-H望远镜^[5-7]等。这些望远镜都采用了Wolter-I型结构,但在镜片表面的镀膜、集光面积、角分辨率等方面有较大差别。核分光望远镜阵列(NuSTAR)在圆锥嵌套Wolter-I型结构的基础上开发了热弯玻璃镜片基底工艺,在保证精度的前提下不仅降低了成本,还将能带提高到 80 keV ^[8-11]。我国的X射线时变和偏振探测卫星(X-ray Timing and Polarization, XTP)作为硬X射线调制望远镜(Hard X-ray Modulation Telescope, HXMT)的后续项目,采用了类似NuSTAR望远镜的圆锥嵌套Wolter-I型结构和热弯玻璃镜片基底工艺,设计的角分辨率在 $1'$ 左右^[12-14]。

X射线聚焦望远镜的光学系统最初采用的是Wolter-I型结构。为了提高性能,后来发展出了嵌套Wolter-I型结构,但由于其高制作成本和难度,故在不明显降低性能的前提下,多采用圆锥嵌套Wolter-I型结构^[15-17]。在装配方面, Mauro

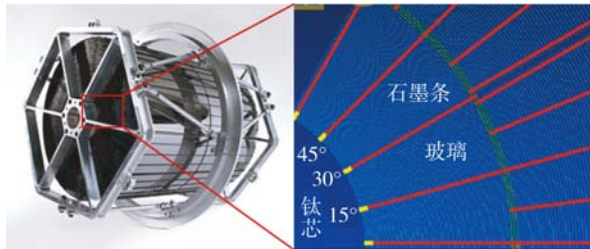
Ghigo等人给出了冷弯镜片组装的方法^[18]、IXO使用了模块化的装调方法^[19-20]、NuSTAR则采用的超薄玻璃反射镜,以钛为芯轴,通过石墨垫片和环氧树脂为连接体实现集成^[2]。XTP中的X射线聚焦望远镜以NuSTAR为基础,内部以钛为芯轴支撑体,由热弯镜片逐层黏结在石墨垫条上(见图1a)构成^[1]。测试实验表明,望远镜光学性能的好坏主要由每层镜片的几何误差以及装配偏差的大小决定。目前,镜片的几何误差可通过黏结前的计算机全息(CGH)检测技术进行质量检查控制^[22],而装配过程产生的偏差在线检测很困难,工艺探索周期长,成本高。因此,本文针对X射线聚焦望远镜的镜片装配过程,采用ANSYS有限元软件研究了镜片曲率和装配载荷对结构面形偏差的影响,建立了二维模型,并与实际装配完成前后的镜片面形偏差进行比较,为装配的优化工艺提供技术支持。

2 镜片装配工艺简介

XTP项目中的X射线聚焦望远镜采用圆锥曲面的Wolter-I型结构,其光路结构如图1(b)所示。

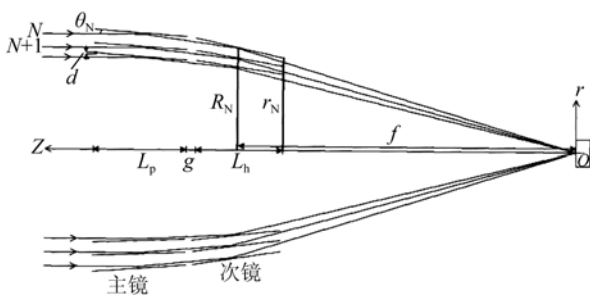
由图1(a)可知主、次镜由多层镜片叠合而成,每层镜片角度约 60° ,共6片。主、次镜的轴向长度 L_p 、 L_h 约为 100 mm ,石墨条的上表面曲率与主、次镜对应层的曲率设计值相同,石墨条宽度为 2 mm ,角度间隔为 14.1° 。表1为第一层主镜的结构尺寸,对应锥度为 0.2916° 和 0.4332° 。

由于主、次镜锥度不大,因此装配时采用的是热弯后的柱面玻璃。



(a)望远镜结构示意图

(a)Schematic diagram of structure of telescope



(b)光路结构示意图

(b)Schematic diagram of light path

图 1 圆锥嵌套 Wolter-I 型 X 射线天文望远镜的结构和光路结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure and light path for nested conical Wolter-I X-ray astronomical telescope

黏接装配时的工装见图 2,压条导轨装在芯轴上,压条只能沿圆盘上的导轨运动,压条顶端的管嘴与气缸管道相连,气缸充气产生的压力通过压条均匀地施加在被黏面上,因此黏结压力的大小由气缸的充气气压决定^[1]。

表 1 主镜第一层尺寸数据

Tab. 1 Dimensions of the first layer of primary mirror

掠入射角度/(°)	主镜前端设计半径/mm	主镜前端石墨条厚度/mm	主镜后端设计半径/mm	主镜后端石墨条厚度/mm
0.291 6	82.770 2	0.437 7	82.261 2	0.433 2

装配时需将热弯后的柱面玻璃放置在涂抹胶水的石墨条上,再将压条沿导轨置于玻璃表面,加压,使玻璃与石墨条充分接触,直至胶水固化,再移除压条。每片玻璃镜片都有 5 根石墨条做支撑,压条的加压顺序是先中间再逐次向两边压实。

由于柱面玻璃是平板玻璃,是用我们给定半

径的模具通过热弯而成的,其半径与装配半径不完全一致,另外安装面实际为圆锥面,因此玻璃在装配时会因变形而产生面形偏差。若变形过大,很可能超出安装的精度要求。图 3 为 R81 mm 柱面玻璃装配后的面形偏差,最大值达到了 17.1 μm,已超出了设计安装精度要求。

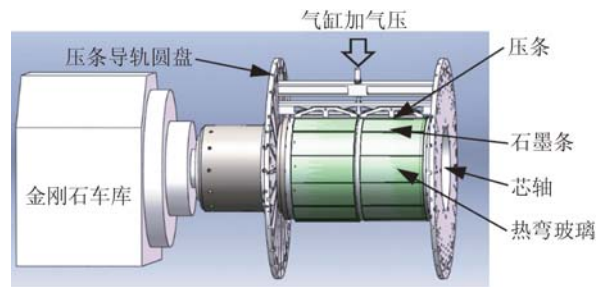


图 2 镜片黏接装配示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mirror mounting

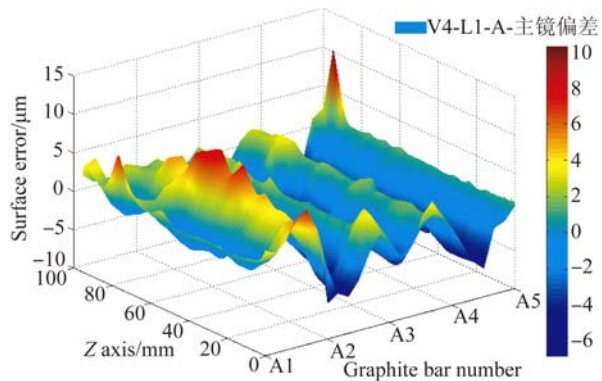


图 3 R81 mm 柱面玻璃装配后的面形偏差

Fig. 3 Surface errors of mounted cylindrical mirror with radius of 81 mm

由此可知,在玻璃镜片的黏接装配过程中,除玻璃自身的面形质量问题外,采用的工艺也会引入安装偏差,完全用实验的方法研究安装工艺的影响是不现实的,故考虑采用有限元分析,模拟黏接装配过程中面形偏差形成的量级和影响因素,给出黏接装配会产生的偏差,找出提高装配精度的方向。

3 玻璃镜片黏接装配过程的数值模拟

3.1 二维模型及分析结果

由于钛管芯轴的刚度相对玻璃和石墨条较高,装配过程中变形极小,因此在建模时不考虑芯

轴,直接将石墨条与芯轴的接触面简化为固定约束;又由于轴向锥度很小,只有 0.2916° ,所以这里先将结构简化为二维平面应变问题进行分析,以便提高计算效率。接着进一步考虑结构的对称性,建立二维模型,如图 4 所示。

图 4 中的 1 号压条即为中间压条,装配分析时首先通过该压条将玻璃压在石墨条上,而后按次序压下两侧的 2 号和 3 号压条,每次也都需将玻璃镜片压到石墨条上,最后再移除三根压条(参见图 5)。采用接触算法分析了与石墨条的黏接过程。在胶水固化前,两接触面法向采用不分离接触,切向可滑移;在固化后,将不分离接触转变为绑定接触,两接触面在法向和切向都无相对运动,模拟胶水固化效果。

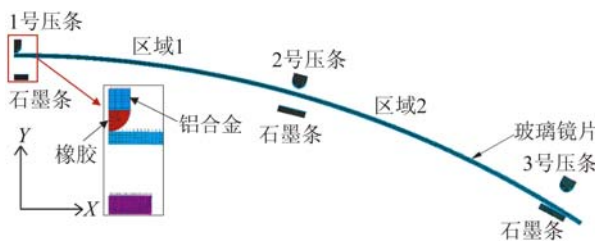


图 4 二维黏接分析有限元模型(镜片曲率半径为 75 mm)
Fig. 4 2-D finite element model of mounting analysis (mirror with a radius of 75 mm)

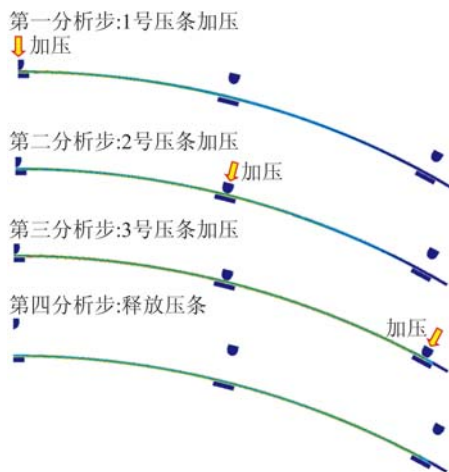


图 5 装配过程的有限元分析步骤
Fig. 5 Steps of finite element analysis in mounting process

各材料的性能参数见表 2。有限元分析采用 ANSYS 软件,单元采用 Plane183,接触面采用 target169 和 contal72,有限元网格见图 4。

表 2 主要材料参数

Tab. 2 Parameters of main materials

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	强度极限 σ /MPa
玻璃	72.9	0.208	60
石墨	14.9	0.28	65
橡胶压条	0.0078	0.47	90
铝	72.0	0.33	228

由于望远镜为多层嵌套结构,若根据每层玻璃的半径制作热弯模具,造价太高,也不现实。所以本文在允许的面形偏差范围 $3\ \mu\text{m}$ 以内,选择了一种模具制作的圆柱形玻璃,可以适用于多种装配半径的要求。基于本实验条件,选取的热弯玻璃的曲率半径有 R75 mm、R77 mm、R79 mm、R81 mm、R83 mm 和 R85 mm。与装配半径 R82.5157 mm(主镜中面半径)相较,前四种半径小,最后两种大,R81mm 和 R83mm 的玻璃镜片与装配半径相近。

对于曲率半径小的玻璃镜片,通常对 1 号压条施加一个适当的、恒定的载荷即可将其下的玻璃与石墨条压合。施加在 2 号和 3 号压条上的载荷要大于 1 号压条,且满足一定的比例才能在 2 号压条载荷给定的情况下,使得面形的径向偏差最小。面形的径向偏差由第四分析步结束时,玻璃镜片的面形与装配半径之差计算获得,即:

$$\Delta d = \sqrt{X^2 + Y^2} - R, \quad (1)$$

其中: X 和 Y 为黏接后玻璃镜片下表面的 X 、 Y 方向坐标, R 为装配时的曲率半径。

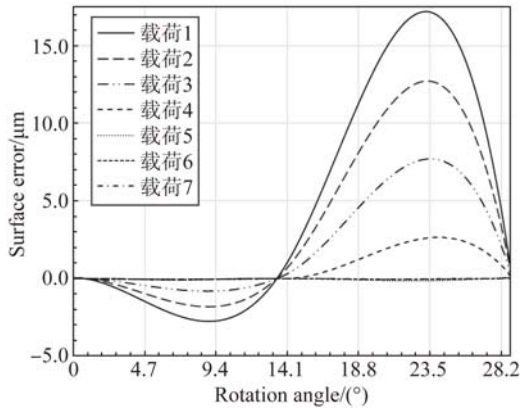
曲率半径大的玻璃镜片与小半径情况类似,只是 1 号压条上的载荷需略微增加,以防 2、3 号压条加压后,1 号压条上的压力不足而引起的分离。

以 R75 mm 和 R85 mm 热弯玻璃的装配为例。经过反复试算,获得 R75 mm 玻璃镜片 1 号压条处的压合载荷为 17.5 N; R85 mm 玻璃镜片 1 号压条处的压合载荷为 5.8 N,但它会随 2 号压条压合载荷的增大而略有升高,以防止镜片与石墨条脱开。

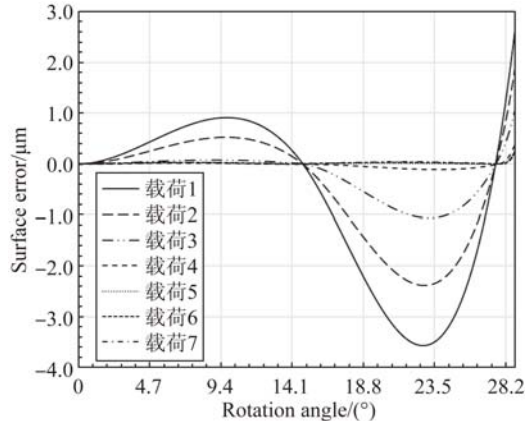
2 号压条处需施加比 1 号压条更大的载荷才能确保压合的实现;而 3 号压条处的压合载荷比 2 号压条处更大。需要注意的是 2 号压条处的压合载荷有个下限,它是保证压合的最小载荷。3 号压条的载荷亦是如此。但当 2 号压条选取大于下限的压合载荷时,3 号压条的压合载荷下限也

会随之提高,在文中的计算中,3号压条所施载荷均取与2号压条载荷对应的压合载荷下限。

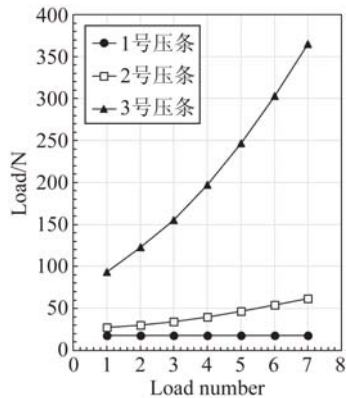
图 6(a)和(b)为 1、2、3 号压条处不同压合载荷下玻璃镜片径向面形偏差 Δd 关于转角的分布情况,其中的载荷编号对应的载荷数值见图 6(c)和(d)。



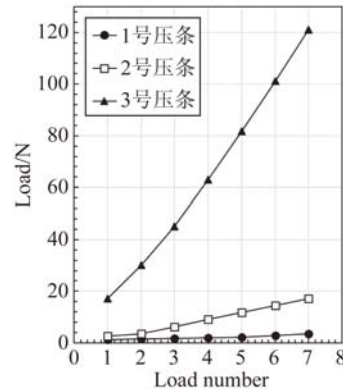
(a)不同载荷下 R75 mm 镜片黏接后的径向面形偏差
(a) Surface errors in radical direction for mirror with a radius of 75 mm under different loadings



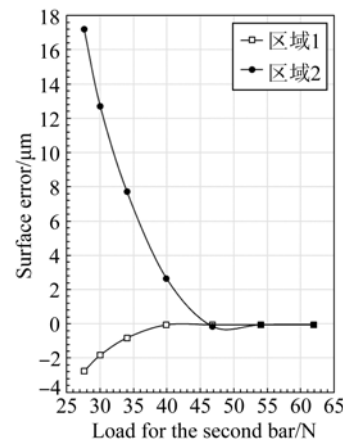
(b)不同载荷下 R85 mm 镜片黏接后的径向面形偏差
(b) Surface errors in radical direction for mirror with a radius of 85 mm under different loads



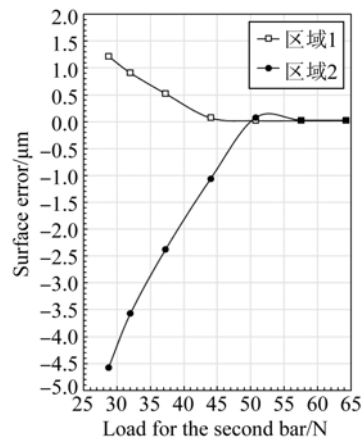
(c)R75 mm 镜片 3 根压条处的载荷
(c) Loading on three bars of mirror with a radius of 75 mm



(d)R85 mm 镜片 3 根压条处的载荷
(d) Loading on three bars of mirror with a radius of 85 mm



(e)R75 mm 镜片压条载荷与最大面形偏差的关系
(e) Relationship between surface error and loading of mirror with a radius 75 mm



(f)R85 mm 镜片压条载荷与最大面形偏差的关系
(f) Relationship between surface error and loading of mirror with a radius of 85 mm

图 6 R75 mm 和 R85 mm 玻璃镜片装配中的压条载荷、对应的径向面形偏差以及压条载荷与最大面形偏差的关系

Fig. 6 Diagram of loadings, surface errors and their relationships with mirrors with radii of 75 mm and 85 mm

由图 6(a)和(b)可见,提高 2 号压条上的压合载荷有助于 1、2 号区域面形偏差的降低;当 2 号压条上的载荷在 50 N(载荷 5→6,见图 6(c))和 15 N(载荷 4→5,见图 6(d))左右时,区域 2 处的镜面变形会出现翻转,这意味着该载荷下的玻璃镜片装配偏差最小。载荷 1~7 下镜片区域 1 和 2 处面形偏差的最大值关于 2 号压条的载荷绘于图 6(e)和(f)中,由图可见,1 号区域面形偏差的最大值(取绝对值)是随 2 号压条载荷的增加而单调减小的;区域 2 的最大/小值则有由正/负到负/正的转变,因此可把曲线与零线交点处的载荷选出,定为最佳的装配载荷。

表 3 R75 mm~R85mm 玻璃镜片最佳装配载荷及对应的最大装配应力

Tab. 3 The optimized load and maximum stress in mounting process of mirror with radii of 75 mm to 85 mm

玻璃镜片半径/mm	75	77	79	81	83	85
1号压条施加载荷/N	17.5	12.4	7.7	3.2	1.3	5.8
2号压条施加载荷/N	46.8	34.8	24.0	8.7	2.6	15.3
3号压条施加载荷/N	246.4	184.8	128.0	47.5	17.2	85.4
玻璃镜片 Max Mises 应力/MPa	13.2	9.6	6.3	2.5	0.74	3.70

3.2 三维模型及分析结果

如前文所言,主、次镜是有一定锥度的三维结构,采用二维模型进行装配分析与实际情况有偏差,本节采用三维模型进行玻璃镜片装配过程分析,并与二维模型分析结果得到的偏差做了比较,以检验二维模型所得结果的有效性。

三维的有限元模型如图 7 所示,单元采用 Solid186,接触面单元采用 target170 和 conta174。

装配过程的分析步骤同二维模型(参见图 5)。对 6 种玻璃镜片施加表 3 中所列压条载荷。

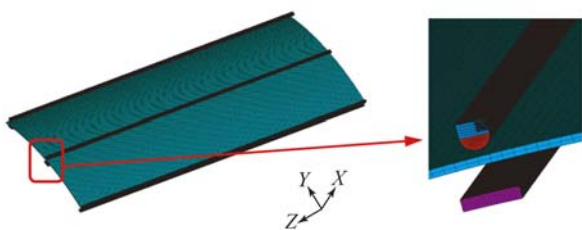
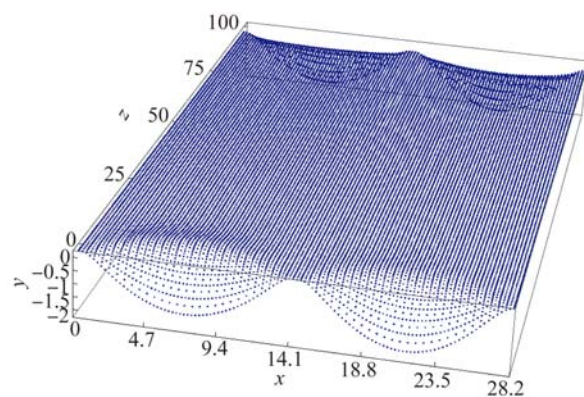


图 7 三维黏接分析有限元模型

Fig. 7 3-D finite element model of mounting analysis

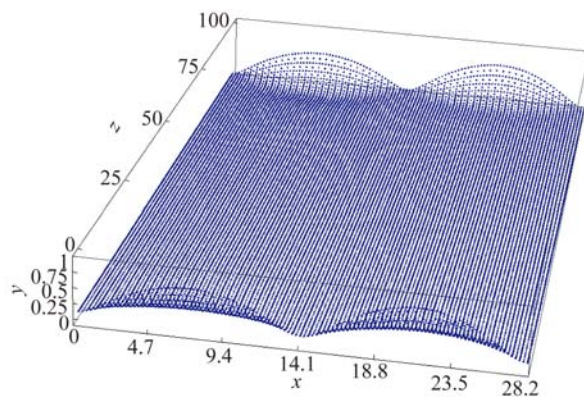
图 8 为半径 75 mm 和 85 mm 镜片的面形偏差,由图 8(a)和(b)可见,在镜片的前、后端,由于外部没有石墨条的支撑和约束作用,与内部镜片相比,其曲率改变相对较难,故偏差较大,最大偏差如图 8(c)。R75 mm 镜片半径与装配半径相差最大,前、后端的面形偏差也较大,约 $2.3 \mu\text{m}$ 。实验取端部面形偏差最大点,沿镜片轴向观察面形偏差的分布情况,见图 8(d)。由图 8(d)也可发现,前、后端的面形偏差虽相对较大,但分布在端部 5 mm 范围内,除此区域外的内部面形偏差均在 0.1 mm 以内,且基本不变,图 8(e)展示了中截面上二维和三维模型计算所得面形偏差,比较可知,两种模型的计算偏差在 $0.03 \mu\text{m}$ 以内,所以采用二维模型进行镜片的装配过程分析是可行的,而且计算量小、速度快。

图 9 为半径 75 mm 和 85 mm 镜片的 Mises 应力分布图,高应力区分布在镜片前端和末端,最大值为 15.4 MPa 和 4.8 MPa,均低于玻璃的强度极限。除镜片前、后端区域外,应力数值与二维模型的计算结果非常一致。



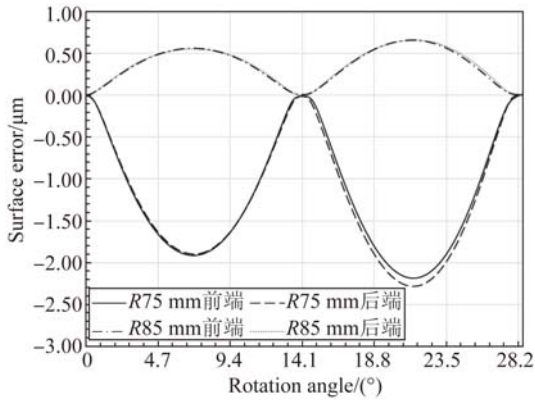
(a) R75 mm 玻璃镜片

(a) Mirror with a radius of 75 mm



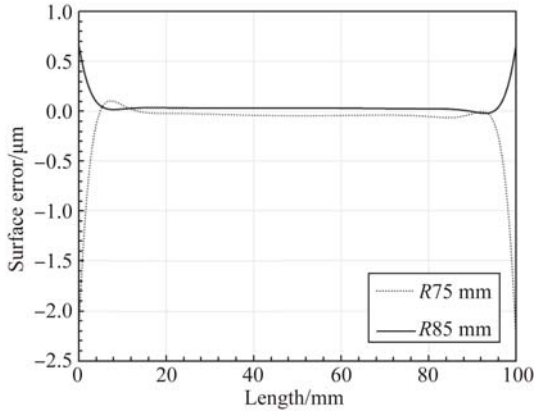
(b) R85 mm 玻璃镜片

(b) Mirror with a radius of 85 mm



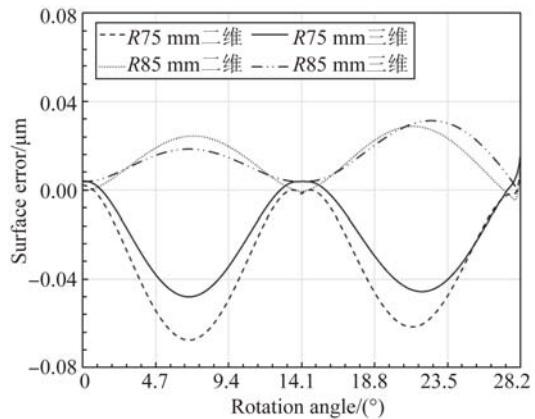
(c) 镜片前端和后端的的面形偏差

(c) Surface errors between front section and section back of mirror



(d) 沿镜片轴向的面形偏差分布情况

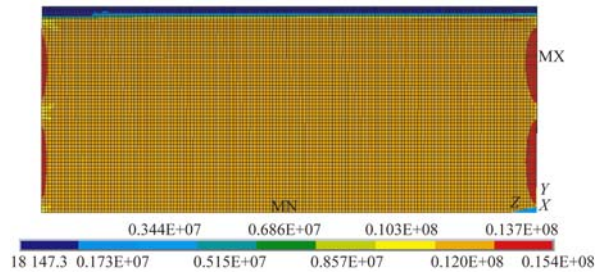
(d) Distribution of surface errors in axial direction



(e) 中截面上二维和三维模型面形偏差的计算结果比较
(e) Deviation of surface errors between 2-D and 3-D models in middle section

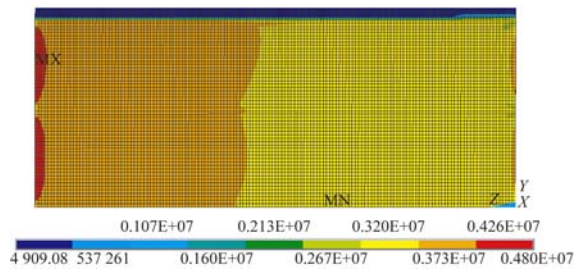
图 8 R75 mm 和 R85 mm 镜片装配过程三维模型模拟所得面形偏差的分布及其与二维计算结果的比较

Fig. 8 Distribution of surface errors in 3-D model and the deviation compared with that of 2-D model for mirrors with radii of 75 mm and 85 mm



(a) R75 mm 镜片

(a) Mirror with a radius of 75 mm



(b) R85 mm 镜片

(b) Mirror with a radius of 85 mm

图 9 R75 mm 和 R85 mm 镜片的 Mises 应力分布图

Fig. 9 Distribution of Mises stresses of mirrors with radii of 75 mm and 85 mm

4 结 论

本文基于圆锥嵌套 Wolter-I 型结构的 X 射线聚焦望远镜装配工艺,利用 ANSYS 建立二维模型,分析了玻璃镜片在装配过程中产生的面形偏差。对选取的 6 种半径的玻璃镜片进行了装配载荷和面形偏差的关系计算和分析,以面形偏差小于 3~4 μm 为标准,优选出了不同半径镜片所对应的最佳装配载荷。同时获得的还有镜片上的最大 Mises 应力,因其值均远小于玻璃的强度极限,故得出的结论对应选定的装配载荷,玻璃镜片不会发生装配破坏。

用三维模型分析装配过程的结果与二维分析模型得到结果的差异主要在镜片的前、后两端,但区域不大,占镜片总长度的 5%;除端部区域外,两种模型的分析结果没有差别,说明二维分析模型可以用于面形偏差分析和装配载荷的确定。

此外,上述分析表明,装配时压条加压大小非常关键,它直接影响玻璃镜片的变形和最终的面形偏差,而施加压力的大小需要基于准确的力学分析。

参考文献:

- [1] SHEN Z X, WANG X Q, WANG K, *et al.*. Development of X-ray multilayer telescope optics for XTP mission [J]. *SPIE*, 2016, 9905: 990520.
- [2] WEISSKOPF M C, TANANBAUM H D, VAN SPEYBROECK L P, *et al.*. Chandra X-ray observatory (CXO): overview [J]. *SPIE*, 2000, 4012: 2-16.
- [3] ASCHENBACH B. In-orbit performance of the XMM-Newton X-ray telescopes: images and spectra [J]. *SPIE*, 2002, 4496: 8-22.
- [4] MCCLELLAND R S, ROBINSON D W. Design concept for the international X-ray observatory flight mirror assembly [C]. *IEEE Aerospace Proc.*, 2009:1-8.
- [5] TANAKA Y, INOUE H, HOLT S S. The X-ray astronomy satellite ASCA (Initial Results from ASCA) [J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 1994, 46(3): L37-L41.
- [6] SHIBATA R, ISHIDA M, KUNIEDA H, *et al.*. X-ray telescope onboard Astro-E. II. ground-based X-Ray characterization [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(22): 3762-3783.
- [7] BAVDAZ M, RANDO N, WILLE E, *et al.*. ESA-led ATHENA/IXO optics development status [J]. *SPIE*, 2011, 8147: 81470C.
- [8] HAILEY C J, CHRISTENSEN F E, CRAIG W W, *et al.*. Overview of segmented glass optics development for the Constellation-X hard X-ray telescope [J]. *SPIE*, 2003, 4851: 519-527.
- [9] JIMENEZ-GARATE M A, HAILEY C J, CRAIG W W, *et al.*. Thermal forming of glass microsheets for x-ray telescope mirror segments [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(4): 724-735.
- [10] KOGLIN J E, CHEN C M H, CHONKO J C, *et al.*. Hard X-ray optics: from HEFT to NuSTAR [J]. *SPIE*, 2004, 5488: 856-867.
- [11] CRAIG W W, AN H J, BLAEDEL K L, *et al.*. Fabrication of the NuSTAR flight optics [J]. *SPIE*, 2011, 8147: 81470H.
- [12] WANG Z S, SHEN Z X, MU B Z, *et al.*. Development of the X-ray timing and polarization telescope optics [J]. *SPIE*, 2014, 9144: 91441E.
- [13] CHEN S H, MU B Z, MA S, *et al.*. Design of hard X-ray focusing telescope with a large field-of-view [J]. *SPIE*, 2014, 9272: 92721R.
- [14] MU B Z, XIE Y C, CHEN SH, *et al.*. Tolerance analysis on nested conical Wolter-I X-ray telescope [J]. *SPIE*, 2012, 8443: 844340.
- [15] PETRE R, SERLEMITSOS P J. Conical imaging mirrors for high-speed X-ray telescopes [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(12): 1833-1837.
- [16] SERLEMITSOS P J. Conical foil X-ray mirrors: performance and projections [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(8): 1447-1452.
- [17] 刘宏颖,穆宝忠,王占山. Wolter-I型X射线天文望远镜的光学设计[J]. *光学仪器*, 2012, 34(6): 31-36.
- [18] LIU H Y, MU B Z, WANG Z S. Optical design of Wolter-I X-ray astronomical telescope [J]. *Optical Instruments*, 2012, 34(6): 31-36. (in Chinese)
- [19] GHIGO M, PROSERPIO L, BASSO S, *et al.*. Slumping technique for the manufacturing of a representative x-ray grazing incidence mirror module for future space missions [J]. *SPIE*, 2013, 8884: 88841Q.
- [20] PETRE R, BREGMAN J, BAUTZ M, *et al.*. The NASA X-ray mission concepts study [J]. *SPIE*, 2012, 8443: 84431I.
- [21] SMITH R K, BOOKBINDER J, GARCIA M, *et al.*. Science metrics for a NASA large optic X-ray microcalorimeter mission [J]. *SPIE*, 2012, 8443: 84431J.
- [22] KOGLIN J E, AN H J, BLAEDEL K L, *et al.*. NuSTAR hard X-ray optics design and performance [J]. *SPIE*, 2009, 7437: 74370C.
- [23] 马顺翔,王占山. 用于柱面镜面形检测的CGH的设计与误差分析[J]. *光学仪器*, 2015, 37(5): 419-425.
- [24] MA S X, WANG Z S. Design and production error analysis of CGH for testing the cylinder surface [J]. *Optical Instruments*, 2015, 37(5): 419-425. (in Chinese)

作者简介:



贺鹏飞(1962—),男,陕西佳县人,教授,博士生导师,1983年、1986年、1992年于西安交通大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事材料微结构力学性能表征和优化问题研究。E-mail: ph232@tongji.edu.cn



戴瑛(1966—),女,江苏南通人,教授,博士生导师,1988年、1991年于西安交通大学分别获得学士、硕士学位,1995年于同济大学获得博士学位,主要从事计算力学和结构数值仿真。E-mail: ydai@tongji.edu.cn