

文章编号 1674-2915(2011)02-0118-06

空间遥感器中大口径 SiC 主镜的轻量化设计

董吉洪, 王克军, 李延春, 王海萍

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 考虑到反射镜质量、尺寸对载荷敏感度、加工困难程度和总成本的影响, 阐述了对空间遥感器大口径主镜进行轻量化设计与优化的必要性。叙述了主镜轻量化技术的一般规律, 对几种轻量化方式进行了比较并给出了网格筋大小的确定公式。结合具体工程的主镜设计, 针对 SiC 材料的空间反射镜提出了一种背部半封闭、三角形孔的轻量化形式, 用迭代方法完成了轻量化设计, 并制作了 $\phi 660$ mm 轻量化 SiC 反射镜。提出的设计方式解决了单镜轻量化方式存在的不足, 使单镜满足了质量小、刚度大的要求, 为今后大口径 SiC 主镜的轻量化技术提供了借鉴和参考。

关键词: 空间遥感器; 主镜; 轻量化

中图分类号: TP73; TH703 文献标识码: A

Lightweight design of large-aperture SiC primary mirrors for space remote sensors

DONG Ji-hong, WANG Ke-jun, LI Yan-chun, WANG Hai-ping

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In consideration of the effects of the mass and sizes of primary mirrors on the load sensitivity, mirror processing and the cost of space remote sensors, the necessity of lightweight for primary mirrors in space remote sensors was introduced, and the lightweight technology was comprehensively summarized. The general rule of the lightweight technology for primary mirrors was described, the different methods of lightweight were compared and the formula for a grid size were given. For a practical project, a SiC primary mirror with half symmetric sandwich structure and a triangular aperture was designed by the iterative method. It overcomes the shortcomings of traditional design method and realizes a single mirror with light mass and excellent rigidity. This method provides a reference for the lightweight technology of large-aperture SiC primary mirrors for the future.

Key words: space remote sensor; primary mirror; lightweight

收稿日期: 2010-10-21; 修订日期: 2010-12-23

1 引言

在现代高技术条件下,空间遥感器在战略侦察、导弹预警和商业探察方面扮演着日益重要的角色。优质轻型的光学反射镜是空间遥感器的核心关键元件,其主要特点在于^[1~9]:镜体材料有很好的热稳定性;镜体的重力变形很小,即结构布局合理;材料的可加工性好,有良好的机械加工和光学加工性能,可获得所需要的形状和表面粗糙度。

碳化硅材料具有较高的弹性模量、适中的密度、较小的热膨胀系数、较高的导热系数和耐热冲击性,因此具有高的比刚度及高度的尺寸稳定性等优点,是空间光学遥感器反射镜体的理想选择材料,近些年来,被广泛应用于空间反射镜镜坯的制备。

本文针对大口径 SiC 主镜的发展现状,进一步研究了它的轻量化形式。提出了一种背部半封闭、三角形孔的轻量化设计,并制作了 $\phi 660$ mm 轻量化 SiC 反射镜。文中提出的轻量化设计方式可为今后大口径 SiC 主镜的轻量化设计提供借鉴和参考。

2 大口径 SiC 主镜轻量化技术

2.1 大口径 SiC 主镜轻量化的必要性

对于空间遥感器来说,不同的几何尺寸所带来的不仅是遥感器对载荷的敏感程度的不同,它将同时引入制造技术乃至总成本的不同。主镜的口径越大,所需投入的人力物力就越多。一般来讲,仪器重量大约与主镜口径的 2.4 次方成正比,而价格大约与口径的 2 次方成正比。传统的实心镜在口径为 500 mm 时分辨力达到一个极限,大于 500 mm 后,随着口径的增大,对提高分辨力的收益将愈来愈小。因此,当口径 > 500 mm 时,必须采用轻量化技术。

从动力学角度看,主镜重量的增加,不仅将使主镜组件的动力学特性下降,而且会使空间遥感器整机的重量增加,导致整机自然频率 f_n 下降,削弱其抵抗外界振动的能力,遥感器的其他技术

指标也将受到一定程度的影响^[4,5]。所以减小主镜重量,不仅能改善自身性能,还可以提高空间遥感器光机系统对力学环境的适应性。

从静力学角度看,当主镜水平放置时,由于重力引起的镜面变形与其直径的 4 次方成正比,与厚度平方成反比。要使主镜的变形量恒定,直径 D 增大时,厚度 h 必须相应地以平方的形式增大^[6]。但增大主镜的口径,不仅主镜本身的重量大大增加,其支撑等相关结构的尺寸和重量也将增大,从而整机的重量将大幅度地增加,这在航天应用上往往是不允许的。所以在采用大口径主镜时,必须采取适当措施减轻主镜的重量并设计出合适的支撑方式,尽量增大主镜组件及空间遥感器的结构比刚度,从而提高其结构力学性能。

采用轻量化主镜的现代大型空间遥感器,不仅减小了运载质量、提高了整机刚度、减小了结构的重力变形,而且降低了总成本。

2.2 大口径 SiC 主镜的轻量化原则

反射镜轻量化结构形式决定了反射镜最终的使用性能,包括抗变形能力、热性能、减重比以及表面的光学质量等。合理地选择其轻量化形式是在满足上述性能条件下的优化过程。通常反射镜轻量化的结构形式有以下几种:传统轻量化结构 (single-arch 或 double-arch)、背部开放式结构 (open back)、背部封闭式结构 (sandwich) 等,结构示意图如图 1 所示。

通过对上述几种轻量化方式的比较,可以得出如下结论:

(1) 从刚度角度讲,背部开放式结构、背部封闭式结构等形式的反射镜要远优于传统轻量化结构,其中背部封闭式结构效果最好。

(2) 背部开放式结构与未轻量化的实体镜相比刚度变化不大,当径厚比 $> 1:7$ 时反而有所下降。

(3) 在相同刚度前提下,背部开放式结构反射镜厚度要比未轻量化的实体镜厚约 20%,而背部封闭式结构反射镜可以比实体镜厚度薄 20%。

对于轻量化反射镜,其前面板厚度通常为 3~8 mm(视材料及加工方法而定),光学加工时在压力作用下,轻量化孔的位置会产生弹性变形,从而导致去除量下降,最终在光学表面形成“网

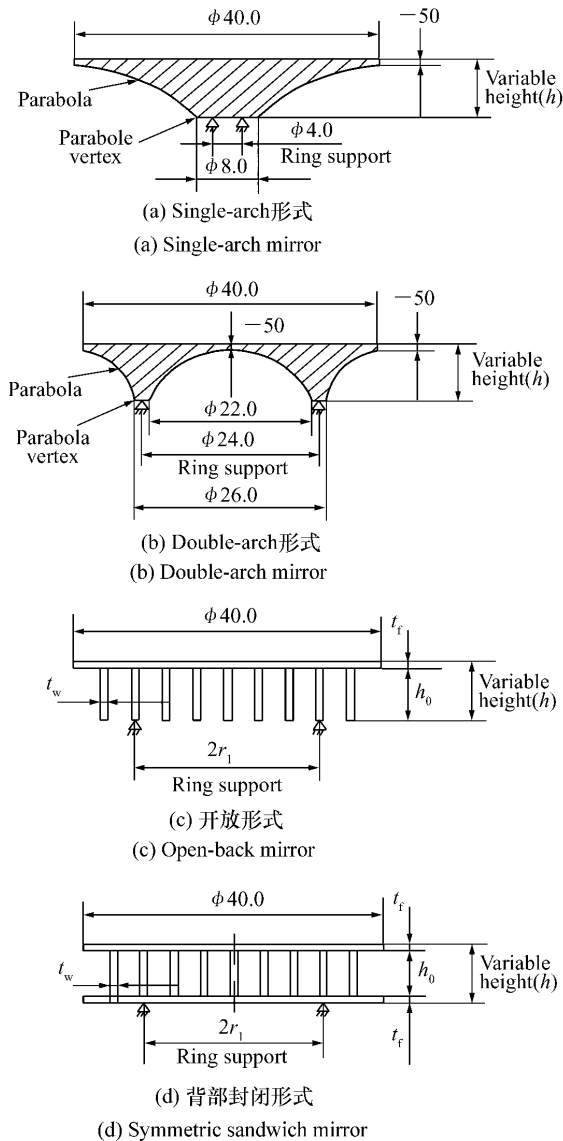


图 1 反射镜轻量化结构示意图(单位: mm)
Fig. 1 Lightweight structure of reflector(Unit: mm)

格效应”。“网格效应”的存在会影响系统的成像质量。

研究表明,“网格效应”与轻量化孔分布形式、材料刚度、抛光压力等因素密切相关,Vukobratovich^[11]给出了如下经验公式:

$$\delta = \frac{pB^4}{\psi \left(\frac{Et_r^3}{12(1-v^2)} \right)}, \quad (1)$$

式中 δ 为最大网格变形量 p 为材料泊松比 p 为抛光压力 B 为轻量化孔内接圆直径 E 为材料弹性模量 t_r 为反射镜前面板厚度 ψ 网格效应常

数。

网格效应常数 ψ 与轻量化孔的形式有关,见表 1。

表 1 网格效应常数 ψ 与轻量化孔的关系

Tab. 1 Relation of ψ and lightweight aperture

轻量化孔的形式	ψ
三角形孔	0.001 51
正方形孔	0.001 26
六角形孔	0.001 11

可以看出,当其他条件相同时,三角形孔的“网格效应”要低于其他两种形式,这一点可以用来指导设计。

3 空间传感器大口径 SiC 主镜的优化设计

根据以上大口径 SiC 主镜轻量化的设计准则对某型号项目的 $\Phi 660$ mm 通光口径的 SiC 主镜进行了轻量化设计。由于反射镜的通光孔径较大,为更加有效地对反射镜镜体结构进行优化设计,迅速地找到其结构较佳的材料分布,降低重量,提高轻量化率,本文采用了拓扑优化设计法。

3.1 大口径 SiC 主镜轻量化方式的选择

根据实际的工程经验,反射镜的轻量化方式可以分为矩形结构、蜂窝结构、三角形结构,以及三者的互相结合等。根据工程经验,蜂窝结构的轻量化结构的材料去除率最大,而反射镜的刚度最低;三角形结构的轻量化结构的材料去除率最小,而反射镜的刚度最高;矩形结构的轻量化结构的材料去除率居中,而反射镜的刚度也居中。但根据不同的加工形式和空间尺寸限制条件等特殊的限制条件,反射镜的轻量化形式也具有相对性,具体问题应具体分析。本文对在研工程任务的反射镜进行了研究,分别对矩形、三角形的轻量化形式进行了优化设计,从中找到了最合理的结构形式。

3.1.1 矩形结构的轻量化形式

设加强筋的最小厚度为 4 mm,为最小可加工厚度见图 2,最厚的尺寸不限。由于反射镜镜面

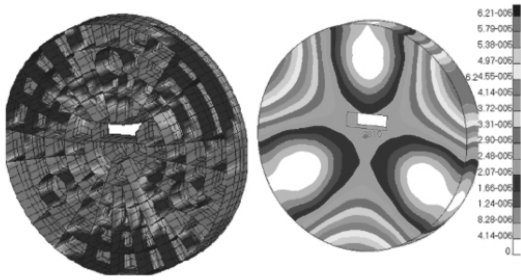


图 2 矩形孔优化

Fig. 2 Optimization of rectangular aperture

尺寸由光学加工确定,所以选择除镜面以外全部筋为可设计区。将反射镜结构的体积和在 Z 轴方向重力作用下的变形作为响应函数,全部可设计区的可变空间 ≥ 4 mm,重量 ≤ 27 kg。

通过优化 28 次迭代后,计算结果收敛,最终材料分布见图 2。图中,网格密度低的地方,加强筋厚度为基本可加工厚度,网格密度高的地方,网格厚度可增加至 5 mm。由优化结果可知,优化后的重量 ≤ 27.6 kg,略高于重量的约束。按优化后的结果对其进行了实体建模,反射镜结构面形精度 ≤ 57 nm(见图 6),实体重量 26.5 kg。

3.1.2 三角形结构的轻量化形式

三角形轻量化形式的优化与矩形结构的优化方式基本相同,经过优化,优化重量 ≤ 29 kg,三角形孔优化见图 3。

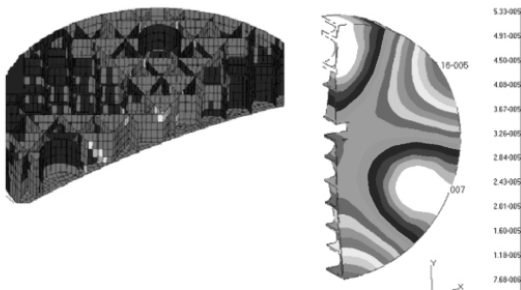


图 3 三角形孔优化

Fig. 3 Optimization of triangular aperture

3.2 结果与讨论

具体的优化与分析表明,反射镜的优化方式中,矩形孔形式的刚度适中,轻量化率适中;三角形的刚度最大,但轻量化率稍低。通过优化结果的比较可以得出如下结论:

刚度优先,选取三角形网格。

反射镜的厚度对刚度有直接影响,厚度越厚,Z 向刚度越好,Y 向刚度没有本质性变化。

反射镜面形精度的好坏还与加强筋网格的密度有关,网格密度大时,刚度较高,但重量增加较快。

与各方向刚度有关的另外一项重要因素是支撑点的分布圆的大小,即支撑点的中心距反射镜中心的距离。通常认为,反射镜的支撑都有一个较为平衡的位置,为了寻找此位置,可以通过不断修正支撑点的位置并经多次计算比较取得。

在支撑点支撑的区域,加强筋的厚度适当增加对 Z 向的刚度较为有利,而其他区域加强筋的厚度适当减薄对刚度没有明显的影响,但可以有效地减小重量。

两种轻量化方式的面形和重量的对比结果见表 2。

表 2 两种轻量化方式的面形和重量

Tab. 2 Surface shapes and weights of two lightweight ways

	Y 向面 形/mm	Z 向面 形/mm	重量/kg
矩形孔结构轻量化	29	62	27
三角形孔结构轻量化	33	53	29

3.3 大口径 SiC 主镜的轻量化实施

由表 2 可知,两种轻量化方式均较重,反射镜

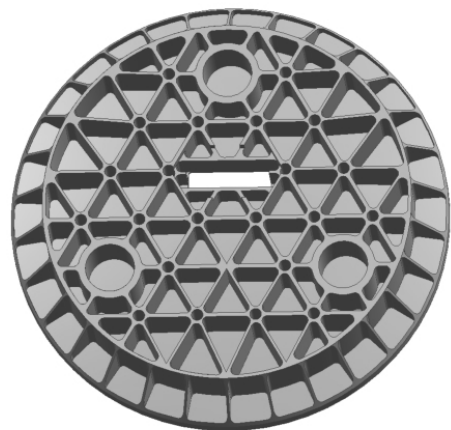


图 4 内部的轻量化结构

Fig. 4 Internal lightweight structure

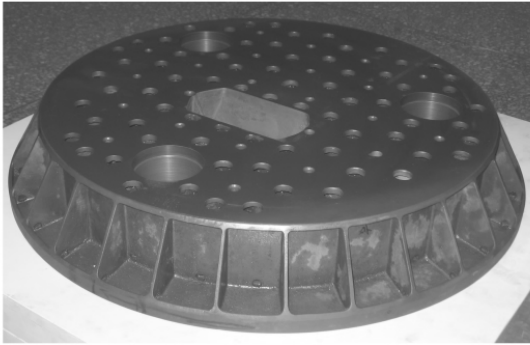


图5 实际的镜坯

Fig. 5 Actual mirror billet

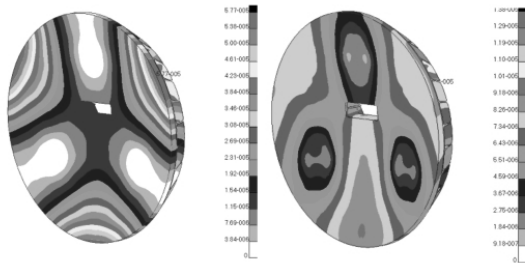


图6 重力变形云图

Fig. 6 Contour plot of gravity deformation

重量都在 26 kg 左右,因此还需进一步进行优化。总结优化过程可以看出,两种优化方式加强筋厚度的分布基本一致。对反射镜进行倒楞,配合以加强筋,结合加强筋镜体材料的分布规律,有可能进一步降低重量,其内部的轻量化结构如图 4 所示^[9-12],实际的镜坯如图 5 所示,反射镜的重力变形云图如图 6 所示,实际的优化结果如表 3 所示。

表3 实际优化结果

Tab.3 Actual optimized results

	Y 向面形/nm	Z 向面形/nm	重量/kg
最终模型	9	50	24

4 结 论

针对 SiC 材料空间反射镜的轻量化要求,提出了一种背部半封闭、三角形孔的轻量化形式,设计并制作了应用于型号项目的 $\phi 660$ mm 轻量化 SiC 反射镜。

此种轻量化形式的提出,有效地解决了单种轻量化方式存在的不足,综合了多种轻量化方式各自的优点,使单镜达到了质量小且刚度大的状态,为大口径反射镜的支撑及提高整机动态刚度创造了有利的条件。

参考文献:

- [1] FRIEDMAN E, MILLER J L. *Photonics Rules of Thumb* [M]. 2nd ed. New York: McGraw Hill, 2003.
- [2] PARKS R E, WORTLEY R W, CANNON J E. Engineering with lightweight mirrors [J]. *SPIE*, 1990, 1236: 735-743.
- [3] PLUMMER R, BRAY D. Guidelines for design of supersic silicon carbide mirror substrates and precision components [J]. *SPIE*, 2002, 4771: 265-275.
- [4] YODER Jr P R. *Opto-Mechanical System Design* [M]. 3rd ed. Bellingham: SPIE Press, 1993.
- [5] YODER Jr P R. *Mounting Optics in Optical Instruments* [M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press, 2002.
- [6] YODER Jr P R. Axial Stresses with toroidal lens-to-mount interface [J]. *SPIE*, 1991, 1553: 1-11.
- [7] AHMAD A. *Handbook of Optomechanical Engineering* [M]. New York: CRC Press, 1997.
- [8] 朱灯林, 陈俊伟, 俞洁, 等. 结构拓扑优化设计的研究现状及其应用 [J]. *机械制造及其自动化*, 2005, 34(6): 7-11.
ZHU D L, CHEN J W, YU J *et al.*. Developments of structure topology design and its application in structure design [J]. *Machine Building & Automation*, 2005, 34(6): 7-11. (in Chinese)
- [9] 胡大千. 一种大型轻重量反射镜的结构优化计算 [J]. *光学机械*, 1980(6): 31-38.
HU D Q. Structural optimization calculation for large lightweight reflection mirror [J]. *Opt. and Mechanics*, 1980(6): 31-38. (in Chinese)
- [10] 裴云天, 刘正兴. 用于空间光学仪器的镜子的轻量化研究 [J]. *中国空间科学技术*, 1991(6): 11-16.
PEI T Y, LIU ZH X. Research on lightweight of mirror applied for space opto-instrument [J]. *Chinese Space Sci. and*

Technol., 1991(6): 11-16. (in Chinese)

- [11] 吴清文, 卢铿. 球面主反射镜基体形状选择[J]. 光学精密工程, 1995, 3(6): 60-65.
WU Q W, LU E. Selection of substratum shapes of spherical primary reflection mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995, 3(6): 60-65. (in Chinese)
- [12] 吴清文, 许彪. 空间光学遥感器主反射镜背部形状的选择[J]. 空间科学学报, 1997, 17(2): 172-177.
WU Q W, XU B. Selection of substratum shapes of spherical primary for space optical remote sensor[J]. *Chinese J. Space Sci.*, 1997, 17(2): 172-177. (in Chinese)

作者简介: 董吉洪(1972—), 男, 吉林长春人, 研究员, 主要从事空间遥感器的结构稳定性、空间遥感器的精密结构设计和空间遥感器的小型化及轻量化设计方面的研究。E-mail: dongjihong2002@sohu.com

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊, A4开本; 刊号: ISSN 2095-1531/CN 22-1400/04; 国内外公开发行, 邮发代号: 国内 12-140, 国外 BM6782。

- ★ 中国科技核心期刊
- ★ 中国光学学会光电技术专业委员会会刊
- ★ 中国学术期刊(光盘版)源期刊

报道内容: 基础光学、发光理论与发光技术、光谱学与光谱技术、激光与激光技术、集成光学与器件、纤维光学与器件、光通信、薄膜光学与技术、光电子技术与器件、信息光学、新型光学材料、光学工艺、现代光学仪器与光学测试、光学在其他领域的应用等。

发稿类型: 学术价值显著、实验数据完整的原创性论文; 研究前景广阔, 具有实用、推广价值的技术报告; 有创新意识, 能够反映当前先进水平的阶段性研究简报; 对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告; 以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

本刊已和国际知名组织达成合作办刊意向, 因此 2012 年本刊只发表英文撰写的学术论文, 欢迎投稿、荐稿。

主管单位: 中国科学院
主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
编辑出版: 《中国光学》编辑部
投稿网址: <http://chineseoptics.net.cn>
邮件地址: chineseoptics@ciomp.ac.cn
zgxcn@126.com
联系电话: 0431-86176852; 0431-84627061
传 真: 0431-84627061
编辑部地址: 长春市东南湖大路 3888 号(130033)