

文章编号: 1002-1582(2011)04-0412-06

## 基于 SiC 材料的大长宽比长条型 反射镜轻量化结构设计\*

陈涛伟<sup>1,2</sup>, 何欣<sup>1</sup>, 付亮亮<sup>1</sup>, 刘强<sup>1</sup>, 王忠善<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

(2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘 要:** 介绍了一种大长宽比长条型反射镜的轻量化结构设计方法。讨论了反射镜的材料选择和轻量化结构形式, 同时在轻量化设计过程中引入拓扑优化方法, 以反射镜柔性变形为设计约束, 以最小体积为设计目标, 经过迭代计算得到最优结果。根据优化结果, 建立反射镜的三维实体模型, 并利用 MSC. Patran 软件建立反射镜的有限元模型, 对影响反射镜自重变形的各项参数给出了详细的分析和讨论, 包括径厚比的选择、支撑点位置、轻量化形式等, 得到了各参数对反射镜面形精度的影响曲线。根据反射镜的加工工艺特点给出了一种合理的轻量化结构形式, 轻量化率达到了 70%, 轻量化后反射镜的质量为 12.5kg。面形误差的 RMS 值小于  $\lambda/50$  ( $\lambda = 632.8\text{nm}$ ) 满足设计要求。

**关 键 词:** 大长宽比; 轻量化; SiC 材料; 拓扑优化; 有限元分析

中图分类号: TH706 文献标识码: A

## Lightweight structure design of large strip mirror based on SiC material

CHEN Taowei<sup>1,2</sup>, HE Xin<sup>1</sup>, FU Liangliang<sup>1</sup>, LIU Qiang<sup>1</sup>, WANG Zhongshan<sup>1</sup>

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

(2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** According to the demands of high quality reflection mirrors for space telescopes, a design method of lightweight structure for large strip space using mirror is proposed, and the selection of materials, aspect ratio of diameter to thickness, light-weighting structure, as well as the position of support points are discussed. The topology method is introduced into the design, taking general flexibility as design constraint, minimum volume as design objective, after iterations, a better structure is gotten. According to the result of topology optimization, a parameter structure model is established using the finite element method. As the results of the analysis, some curves are presented. A lightweight structure for the large strip SiC mirror is given, the mass of the mirror is 12.5kg and the lightweight ratio reaches 70%. The surface figure accuracy is superior to  $\lambda/50$  RMS ( $\lambda = 632.8\text{nm}$ ), which can fulfil the demand of the design.

**Key words:** large strip mirror; lightweight; SiC material; topology optimization; finite element analysis

\* 收稿日期: 2010-12-27; 收到修改稿日期: 2011-03-23

E-mail: twchen1102@yahoo.com.cn

作者简介: 陈涛伟(1987-) 男, 硕士研究生, 主要从事空间相机反射镜支撑结构的研究。

通信联系人: 何欣。E-mail: hexinxp@yahoo.com.cn

## 0 引言

反射镜支撑技术是研究高分辨率空间相机的关键技术之一。大长宽比长条形反射镜因其长宽比大,使支撑结构的设计变得非常困难。反射镜镜体的轻量化是整个反射镜支撑结构设计的基础和关键,在保证动、静态刚度和强度的前提下,必须对空间光学系统结构进行最大程度的轻量化<sup>[1]</sup>。一个具有高比刚度的镜体轻量化结构可以大大降低反射镜的支撑难度。空间应用的反射镜采用轻量化结构的目的是为了降低镜坯的质量,提高镜坯的比刚度。降低反射镜的质量对空间应用反射镜来说具有非常重要的意义。反射镜轻量化后可以减小热惯性,提高热控效率;降低动载荷,减轻支撑结构的压力,提高动态特性。但是随着轻量化率的增加,虽然反射镜的比刚度在提高,但其结构的绝对刚度会有一定程度的下降,镜面对支撑应力的敏感度也在提升。因此,轻量化的结构形式需要综合考虑镜坯的外形特征、各种轻质镜坯结构的刚度情况、支撑结构的分布、轻量化加工的工艺性、镜面抛光的工艺性等多方面的因素,并通过工程分析对镜坯厚度、镜面厚度、筋的宽度等一系列参数进行优化,得到一个具备最佳比刚度的轻量化镜坯。本文主要研究大长宽比(长宽比为5:1)长条型反射镜镜坯的轻量化结构形式,反射镜尺寸为700mm×140mm,镜面为球面,拟采用背部四点且不过定位的支撑方式。

## 1 反射镜拓扑优化结构设计

### 1.1 反射镜拓扑优化的 SIMP 模型

连续体拓扑优化的方法主要有变密度法、均匀化法和变厚度法。变密度法是一种常用的拓扑优化方法,属于材料描述方法,其基本思想是人为地引入一种假想的密度可变的材料,材料物理参数(如许用应力、弹性模量)与材料密度间的关系也是人为假定的。优化时以材料密度为拓扑设计变量,这样结构拓扑优化问题被转换为材料的最优分布问题。变密度法与采用尺寸变量相比,它更能反映拓扑优化的本质特征。变密度法中常用的插值模型主要有: SIMP(Solid Isotropic Microstructure with Penalization) 和 RAMP(Rational Approximation of Material Properties)。SIMP 或 RAMP 通过引入惩罚因子对中间密度值进行惩罚,使中间密度值向 0/1 两端聚集,使连续变量的拓扑优化模型能很好地逼近 0-1 离散变量的优化模型,这时中间密度单元对应一个很小的弹性模量,对结构刚度矩阵的影响变得很小。

目前变密度法在多工况应力约束下,在平面结构、三维连续体结构等拓扑优化设计问题中,取得了一定的成效<sup>[2]</sup>。拓扑优化的 SIMP 方法假设材料密度在单元内是常数,并以其为设计变量,而材料特性是用单元密度的指数函数来模拟的<sup>[3]</sup>。

在一定的材料用量条件下,寻找具有某种度量的最大刚度(结构的最小柔度)的结构材料最佳分布形式,以结构的柔度作为目标函数,体积为约束,数学模型如下:

$$\begin{cases} \min: f(x) = V = fV_0 = \sum_{e=1}^N x_e v_e \\ \text{s. t. :} \\ C(x) = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \sum_{e=1}^N (x_e)^p \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_0 \mathbf{u}_e \leq C^* \\ \mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{F} \\ 0 \leq x_{\min} \leq x_e \leq x_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中:目标函数定义为结构的总体积  $V$ ;  $C(x)$  为结构的总体柔度;  $\mathbf{F}$  为力向量;  $\mathbf{U}$  为位移列阵;  $\mathbf{K}$  为结构总刚度矩阵;  $V_0$  为整个设计域的初始体积;  $f$  为优化体积比;  $V$  为结构优化后的结构体积;  $V_e$  为优化后的单元体积;  $x$  为设计变量;  $x_e$  为单元设计变量;  $x_{\max}$  为单元设计变量上限;  $x_{\min}$  为单元设计变量下限,引入密度  $x_{\min}$  下限的目的是防止单元刚度矩阵奇异;  $p$  为惩罚因子;  $N$  为结构离散单元总数。

### 1.2 反射镜拓扑优化模型求解

采用 Altair HyperWorks 软件作为拓扑优化工具。在拓扑优化初始模型中,如图 1 所示,反射镜后表面轮廓为平面,以反射镜前表面上点的静变形来表征反射镜的柔度,设置反射镜在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向上的自身重力作用,以最小体积为目标,经过 418 次迭代,得到的优化结果如图 2 所示。

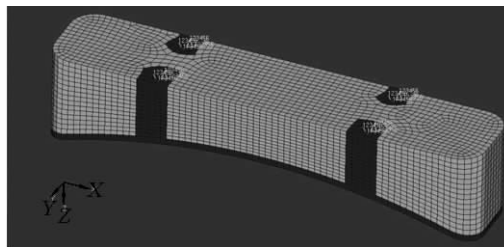


图 1 用于拓扑优化的反射镜有限元模型

由优化结果给出的轻量化结构在  $Y$  向并不是一个对称结构,这是因为设置工况时仅施加了沿  $Y$  向正向的自重作用。拓扑优化的结果并不能直接应用于工程设计当中,但却可以给设计人员指示一种最优的设计方向。

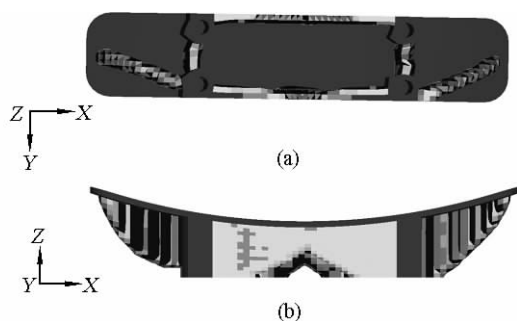


图 2 反射镜拓扑优化计算结果

## 2 镜坯的轻量化方案设计

### 2.1 材料的选择

现今用于空间应用的常用反射镜材料及其物理特性如表 1 所示。对比几种材料可以发现,碳化硅材料具有较高的弹性模量、适中的密度、较高的导热系数、较小的热膨胀系数和耐热冲击性,因此具有较高的比刚度及高度的尺寸稳定性等一系列优秀的物理性质<sup>[4]</sup>。同时还要综合考虑反射镜柔性支撑组件材料间的热特性匹配。本文所研究的反射镜采用碳化硅(SiC)作为镜坯材料。目前,碳化硅已被广泛应用于反射镜的制造,其加工工艺也比较成熟。

表 1 常用光学材料的物理特性<sup>[5]</sup>

| 参数                                   | SiC  | Be    | Al    | Zerodur | 熔石英   | 期望值 |
|--------------------------------------|------|-------|-------|---------|-------|-----|
| 密度 $\rho/(g/cm^3)$                   | 3.14 | 1.84  | 2.71  | 2.53    | 2.23  | 低   |
| 弹性模量 $E/GPa$                         | 420  | 303   | 69    | 92.9    | 74    | 高   |
| 泊松比 $\nu$                            | 0.16 | 0.12  | 0.33  | 0.24    | 0.167 | 低   |
| 拉伸强度 $MPa$                           | 375  | —     | 310   | 57      | —     | 高   |
| 导热率 $\lambda/(W/mK)$                 | 180  | 216   | 167   | 1.64    | 1.13  | 高   |
| 线胀系数 $\alpha/10^{-6}K^{-1}$          | 2.4  | 11.5  | 23.9  | 0.05    | 0.55  | 低   |
| 比热 $Cp/(J/kg \cdot K)$               | 680  | 1925  | 896   | 821     | 787   | 低   |
| 比刚度 $(E/\rho)/(GNm/kg)$              | 136  | 168   | 26    | 37      | 29    | 高   |
| 热扩散率 $D/(10^{-6}m^2/s)$              | 84.3 | 60.98 | 68.78 | 0.79    | 0.70  | 高   |
| 稳态畸变 $(\alpha/\lambda)/(10^{-8}m/W)$ | 1.2  | 5.3   | 14.3  | 3.0     | 288   | 低   |
| 瞬态畸变 $(\alpha/D)/(10^{-8}m/W)$       | 0.03 | 0.19  | 0.35  | 0.06    | 4.66  | 低   |

### 2.2 反射镜后表面轮廓选择

国内外对大长宽比长条型反射镜的研究相对较少,反射镜镜坯的前表面是球面反射面,后表面的轮廓可以选择平面、凹面、凸面、单拱、双拱和锥形等。合理的反射镜背部轮廓可以有效地提高镜坯的比刚度。确定反射镜外形轮廓需要同时考虑反射镜的支撑结构形式,支撑点的布置限定了后表面的形状。

根据反射镜的拓扑优化结果,本文选择了锥形的后表面形状,如图 3 所示。

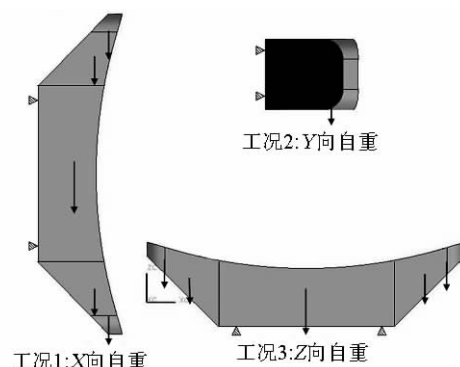


图 3 反射镜外形轮廓以及在 X、Y、Z 三个方向上的自身重力作用示意图

### 2.3 反射镜轻量化形式

传统的反射镜轻量化形式有背部封闭式、背部开放式和泡沫夹层式等。背部开放式结构是在反射镜背部排布一定几何分布的加强筋阵列来达到轻量化的目的。背部封闭式结构与泡沫夹层式结构都涉及到后面板的粘接工艺,制造成本和工艺难度相比于背部开放式都要高很多。背部开放式结构的轻量化孔可以有三角形、四边形、六边形和圆弧形等形式。一些研究表明,三角形孔的结构刚度、轻量化率、工艺特性等综合性能较好<sup>[6]</sup>。本文选择了背部开放式轻量化形式,采用三角形加强筋阵列。轻量化后的反射镜几何模型如图 4 所示。

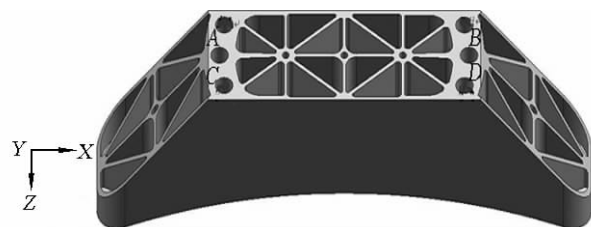


图 4 背部开放式轻量化结构模型

图中 A、B、C、D 为四个支撑点的位置

### 2.4 碳化硅(SiC)材料反射镜制备加工

相比于传统的反射镜材料,碳化硅材料所具有的高硬度、高弹性模量等特性,使得碳化硅材料反射镜的光学加工难度很大。目前美国、俄罗斯、法国等国家具有先进的碳化硅材料反射镜制备加工技术,我国仅有为数不多的几家单位可以完成碳化硅材料反射镜的加工。常用的碳化硅镜坯制备工艺有热等静压烧结碳化硅(HIP-SiC)、反应烧结碳化硅(RB-SiC)和化学沉积碳化硅(CVD-SiC)三种。上海硅酸盐研究所、哈尔滨工业大学和长春光机所等单位均具有制备碳化硅反射镜镜坯的能力,其中哈尔滨工业大学和上海硅酸盐研究所具有制备 500 mm 以上

的碳化硅材料反射镜镜坯的能力。

长春光机所 2003 年研制出了 FSGJ-II 非球面数控加工中心,它是一台建立在计算机控制光学表面成型技术(CCOS)基础上集快速铣磨成型、研磨、抛光以及在线检测于一体的非球面自动制造中心,其最大的加工直径可达 1200 mm,面形精度优于 10 nm RMS,表面粗糙度小于 2 nm(微晶玻璃)<sup>[7]</sup>。范锫等人利用该加工中心成功完成了一块 510mm × 310mm 船型碳化硅材料平面反射镜的加工,加工后在有效口径内反射镜面精度 RMS 值达到了  $\lambda/20$  ( $\lambda = 632.8\text{nm}$ )<sup>[8]</sup>。本文设计的碳化硅材料反射镜将由上海硅酸盐研究所制作镜坯,长春光机所光学加工中心的 FSGJ-II 非球面数控加工中心完成镜面的机床加工。

### 3 有限元分析及轻量化结构参数设计

影响反射镜轻量化结构比刚度的主要参数包括反射镜的径厚比、前表面的厚度、支撑点的位置以及加强筋的厚度和三角形轻量化孔的布局等。各参数对轻量化结构的比刚度影响程度不同。由于长宽比很大,反射镜在  $X$  方向(长度方向)抵抗自重变形的能力相对于  $Y$  向(宽度方向)和  $Z$  向(厚度方向)都较弱。

关于反射镜的径厚比,针对圆形反射镜,Roberts<sup>[9-11]</sup>等人研究了其径厚比  $D_t$  ( $D/t$ ) 与自重变形的关系,并给出了经验公式:

### 4 数据分析

计算结果表明,针对大长宽比长条型反射镜,反射镜的中心厚度越大,即径厚比越小,反射镜的面形精度越好,如图 7 所示。这是因为增加反射镜的中心厚度,提高了反射镜的刚度,可以有效地降低自重对面形精度的影响。随着反射镜厚度的增加,反射镜在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向上的最大静变形不断增加,以  $Y$  向最大变形最为敏感(图 6),这是因为随着反射镜厚度的增加,镜体自身重力以及其重心距离支撑点的距离都在不断增加,自重对支撑点的倾覆力矩增大,导致静变形变大。而随着反射镜前表面厚度的增加,面形精度有变差的趋势(图 9),但由于在镜面加工过程中“网格效应”的存在,故反射镜前表面厚度不宜取值太小。本文采用的背部 4 点且不过定位支撑方式是在背部三点支撑形式的基础上扩展的,当支撑点的位置跨距在 340mm 处时,镜面面形精度最好(图 11)。相比于径厚比对面形精度的影响,前表面厚度和支撑点的位置在一定范围内的变化对反

$$\delta = \frac{3\rho g D_t^2 D^2}{256E} \quad (2)$$

式中:  $\delta$  为最大自重变形,单位为  $\mu\text{m}$ ;  $\rho$  为材料的密度,单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,单位为  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $D$  为圆盘直径,单位为  $\text{m}$ ;  $E$  为材料弹性模量,单位为  $\text{GPa}$ ;  $D_t$  为径厚比。从公式中可以看出,对于圆形反射镜,自重变形与材料的比刚度成反比,与径厚比的平方成正比。针对大长宽比长条形反射镜,同样可以以此经验公式作为参考,初步选定反射镜的径厚比为 10:1。

通过 MSC. Patran 软件建立有限元模型,并对其进行分析计算。有限元模型采用 tet10 单元自动划分,如图 5 所示。在对裸镜进行分析时,对支撑点设置 6 自由度全约束,得到了各参数在一定范围内变化时对反射镜自重变形的影响曲线(图 6 ~ 图 11)。



图 5 反射镜有限元模型

射镜的面形精度影响要小得多。轻量化结构的各参数取值如表 2 所示。

表 2 轻量化结构的各参数取值

| 参数     | 中心厚度 | 支点跨距 | 筋厚 | 前表面厚度 |
|--------|------|------|----|-------|
| 初始值/mm | 75   | 350  | 5  | 10    |
| 优化后/mm | 120  | 340  | 5  | 8     |

优化后反射镜的面型误差如表 3 所示。

表 3 轻量化后反射镜在自身重力作用下的面形误差

| 参数     | 工况 1 ( $1g-X$ ) | 工况 2 ( $1g-Y$ ) | 工况 3 ( $1g-Z$ ) |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|
| PV/nm  | 28.128          | 2.982           | 8.059           |
| RMS/nm | 6.718           | 0.392           | 2.250           |

### 5 结 论

本文设计了一种大长宽比长条型反射镜的轻量化结构,面形误差满足设计要求,轻量化率达到了 70%。轻量化后反射镜的质量为 12.5kg。在轻量化设计过程中引入了拓扑优化方法,能快速有效地确定轻量化设计方向。通过有限元分析得到了在一定条件范围内反射镜中心厚度(即径厚比)、支撑点距离、前表面厚度(镜面厚度)对反射镜面形误差的影响曲线,对长条型反射镜的轻量化结构设计具有重

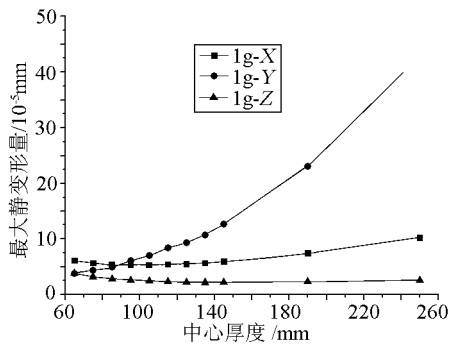


图 6 中心厚度对最大自重变形量的影响

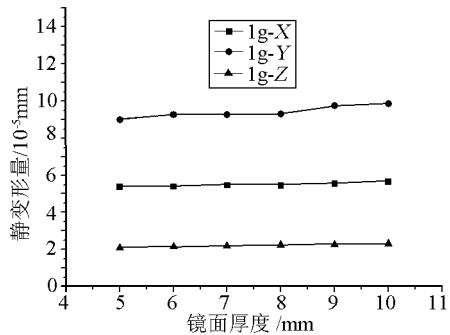


图 8 前表面厚度对最大自重变形量的影响

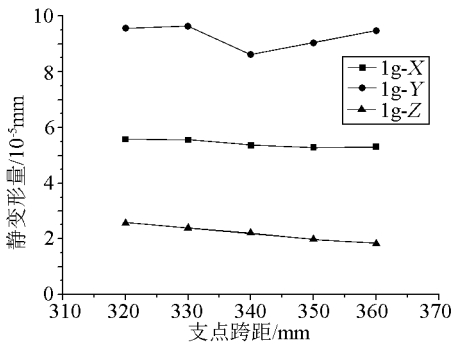


图 10 支撑点跨距对最大自重变形量的影响

要的参考意义。通过计算分析结果,发现径厚比对大长宽比长条型反射镜面误差影响最大,在条件允许的情况下,最大程度的增加反射镜的中心厚度,可以有效地降低反射镜在自重作用下的面型误差。

#### 参考文献:

- [1] 吴清文. 空间相机中主镜的轻量化技术及其应用[J]. 光学·精密工程, 1997, 5(6): 69—80.  
WU Qing-wen. Light-weight technology and its application of primary mirror in space camera [J]. Optics and Precision Engineering, 1997, 5(6): 69—80.
- [2] Zhou M, Pagaldipti N, Thomas H L, et al. An integrated approach to topology, sizing, and shape optimization [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization (S1615-147X), 2004, 26: 308—317.
- [3] 关英俊, 辛宏伟, 赵贵军, 等. 空间相机主支撑结构拓扑优化设计[J]. 光学·精密工程, 2007, 15(8): 1157—1163.  
GUAN Ying-jun, XIN Hong-wei, ZHAO Gui-jun, et al. Topologic optimization design for main supporting structure of space camera

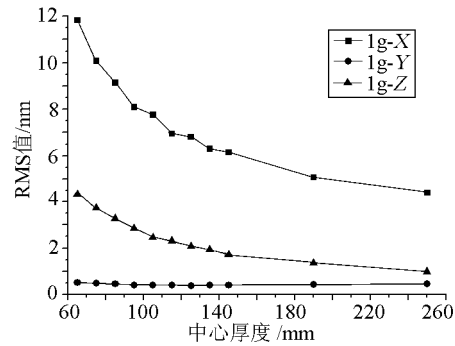


图 7 中心厚度对反射镜面形精度的影响

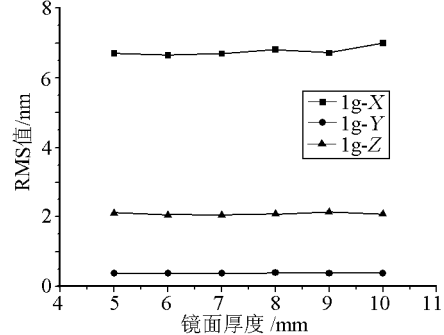


图 9 前表面厚度对反射镜面形精度的影响

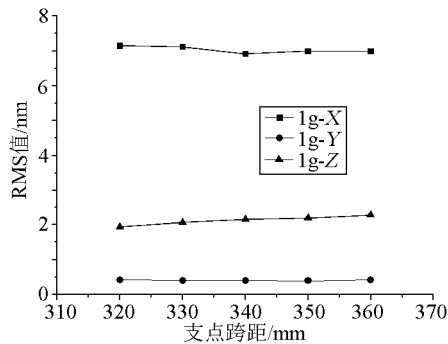


图 11 支撑点跨距对反射镜面形精度的影响

[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(8): 1157—1163.

- [4] 张学军, 李志来, 张忠玉. 基于 SiC 材料的空间相机非球面反射镜结构设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 577—582.  
ZHANG Xue-jun, LI Zhi-lai, ZHANG Zhong-yu. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(5): 577—582.
- [5] 鲍赫, 李志来. 长条形 SiC 反射镜轻量化及支撑结构设计[J]. 光学技术, 2008, 34(4): 593—596.  
Bao He, LI Zhi-lai. Design of the strip SiC mirror supporting structure and lightweight [J]. Optical Technique, 2008, 34(4): 593—596.
- [6] 邓伟杰, 郑立功, 张学军, 等. 离轴非球面数控抛光路径的自适应规划[J]. 光学·精密工程, 2009, 17(1): 65—71.  
DENG Wei-jie, ZHENG Li-gong, ZHANG Xue-jun, et al. Adaptive programming algorithm for generating polishing tool-path in computer controlled optical surfacing [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(1): 65—71.
- [7] 范锦. 大口径碳化硅质反射镜数控光学加工的研究[D]. 北京:

- 中国科学院研究生院(2000级理学博士) 2004.
- FAN Di. The study on CCOS of large diameter SiC mirrors [D]. Beijing: The Graduate School of Chinese Academy of Science, 2004.
- [8] 韩媛媛, 张宇民, 韩杰才, 等. 碳化硅反射镜轻量化结构优化设计[J]. 光电工程 2006, 33(8): 123—126.
- HAN Yuan-yuan, ZHANG Yu-min, HAN Jie-cai, et al. Optimum design of lightweight silicon carbide mirror [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(8): 123—126.
- [9] FRIEDMAN E. Photonics Rules of Thumb [M]. New York: McGraw Hill, 2003.
- [10] PARKS R E. Engineering with lightweight mirrors [C]. Proceedings of SPIE, 1985, 571.
- [11] ANDERSON D. Gravity deflections of lightweighted mirrors [C]. Proceedings of SPIE, 1982, 332.
- [12] 颜昌翔, 许杰, 彭岩. 离轴三反空间光学望远镜系统的杂光抑制[J]. 光学·精密工程 2010, 18(2): 289—293.
- YAN Chang-xiang, XU Jie, PENG Yan. Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(2): 289—293.
- [13] 王富国, 杨洪波, 赵文兴, 等. 1.2m SiC 主镜轻量化设计与分析[J]. 光学·精密工程 2009, 17(1): 85—91.
- WANG Fu-guo, YANG Hong-bo, ZHAO Wen-xing, et al. Lightweight design and analysis of a 1.2 m SiC primary mirror [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(1): 85—91.
- [14] 程相文, 林福严, 孙新民. 四轴球体研磨机的研磨均匀性[J]. 光学·精密工程 2009, 17(12): 3022—3027.
- CHENG Xiang-wen, LIN Fu-yan, SUN Xin-min. Lapping uniformity of four-shaft-ball lapping machine [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(12): 3022—3027.
- [15] 宋立强, 杨世模, 陈志远. 空间太阳望远镜中的轻量化镀膜研究[J]. 光学·精密工程 2009, 17(1): 58—63.
- SONG Li-qiang, YANG Shi-mo, CHEN Zhi-yuan. Study on lightweight beryllium mirror of space solar telescope [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(1): 58—63.