

文章编号:1004-4213(2010)05-0876-5

蜂窝椭圆反射镜的孔结构设计研究

于坤,张长瑞,曹英斌,刘荣军

(国防科学技术大学 航天与材料工程学院 新型陶瓷纤维及其复合材料国防科技重点实验室,长沙 410073)

摘要:应用有限方法进行了蜂窝椭圆反射镜的轻量化孔结构设计研究.研究了离散单元尺寸对离散误差的影响,分析了六方形孔形状下孔排布形式和孔尺寸对蜂窝椭圆反射镜的各项性能的影响.结果表明 6 mm 的离散单元尺寸对应着较小的离散误差;孔尺寸对质量、转动惯量和加工变形的影响较大,孔排布形式和孔尺寸对热变形的影响高于对自重变形的影响;80 mm 孔尺寸的第四种形式是最优的孔结构形式.

关键词:孔排布形式;孔尺寸;有限元方法;设计

中图分类号:TH751

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103905.0876

0 引言

作为新一代的反射镜材料,短切碳纤维增强碳化硅复合材料(C/SiC 复合材料)具有低密度、低热膨胀、高热导、轻量化加工容易实现、制备工艺相对简单、组分可设计、性能可调节等优点,这使其成为现代反射镜的重要候选材料^[1-3].

空间相机上应用的反射镜一般需要进行轻量化,但不同的轻量化结构形式对应着不同的性能^[4-5].目前,由于材料制备工艺的限制,反射镜结构形式的研究主要是基于刚度较差的背部开口结构开展,而独特的连接工艺使得 C/SiC 复合材料可以实现刚度更好的蜂窝结构的制备^[6-7],这便使得针对 C/SiC 复合材料开展蜂窝反射镜的结构设计具有更加现实的意义.

孔设计是蜂窝结构设计的重要内容^[8].目前反射镜的孔设计主要是基于孔形状开展,还未见有孔排布形式的研究,反射镜的设计指标也以质量、自重变形等为主^[9-11].本文以六方形孔作为研究对象,综合考察了不同孔排布形式、不同孔尺寸下 C/SiC 复合材料蜂窝椭圆反射镜的质量、转动惯量、自重变形、加工变形和热变形,最后选出了优化的孔排布形式和孔尺寸.

1 材料参量、性能参量、孔排布形式以及设计方法

C/SiC 复合材料由多孔 C/C 素坯和气相 Si 经气相反应工艺制备,采用的 C/C 素坯密度的密度为

$1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,渗硅后制备出的 C/SiC 复合材料样品的密度、弹性模量和泊松比分别为 $2.90 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、259.18 GPa 和 0.21,并以此作为孔结构设计材料参量.

对于椭圆反射镜,由于存在面形准确度和轻量化的要求,因此在蜂窝椭圆反射镜的孔镜结构设计中要考虑:质量、转动惯量、自重变形、加工变形和热变形等参量^[12-14].

蜂窝椭圆反射镜存在多种孔排布形式,这源于其外观尺寸的不对称(椭圆镜的长、短轴分别为 700 mm 和 500 mm)和支撑方式的对称(短轴边缘侧向支撑),经研究,六方形孔的主要排布形式见图 1.

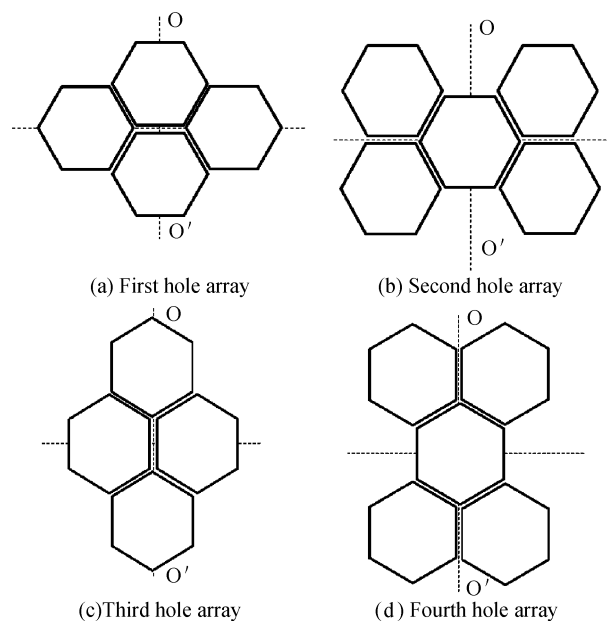


图 1 蜂窝椭圆反射镜六方形孔形状的不同排布形式
Fig. 1 Different array of hexagonal hole shape of honeycombed elliptical mirror

蜂窝椭圆反射镜的孔结构选用结构有限单元法和热有限单元法,前者用于分析反射镜的质量、转动惯量、自重变形和加工变形,而后者用于分析反射镜的热变形。

2 结果与讨论

2.1 离散误差分析及离散单元尺寸选取

为了提高蜂窝椭圆反射镜的孔结构设计的分析准确度,应尽可能地降低结构离散误差,因而在进行椭圆反射镜的孔结构设计之前,应进行蜂窝椭圆反射镜的离散误差的研究。

1) 离散误差分析

离散误差分为几何离散误差和物理离散误差^[15],几何离散误差是由离散后的组合体与原有结构在几何形状上的差异所引起。物理离散误差是由选用的插值函数与真实函数之间的差异所产生。

离散误差主要受离散单元类型和离散单元尺寸的影响,较小的离散单元尺寸和较高阶次的插值函数(单元阶次)可获得较小的离散误差。为了减小蜂窝椭圆反射镜这种复杂结构的几何离散误差和物理离散误差,本文选取了具有高阶插值函数的空间四面体单元 Solid 92 来离散椭圆反射镜,因此离散误差主要由离散单元尺寸决定。

离散误差的大小要通过不同尺寸所对应的性能参量差异得以体现。结合椭圆反射镜的性能参量可知,几何离散误差主要通过质量和转动惯量来反映,而物理离散误差是由自重变形、加工变形和热变形来反映。

2) 离散单元尺寸对几何离散误差的影响

由图 1 可知,不同离散单元尺寸的几何离散误差主要通过质量和转动惯量来反映,为此进行了不同离散单元尺寸下蜂窝椭圆反射镜的质量和转动惯量研究,结果见图 2。

由图 2 可以看出:随着离散单元尺寸的降低,蜂窝椭圆反射镜的质量有降低的趋势,较高的离散单元尺寸下($EI > 6$ mm)质量较高,说明此时的离散单

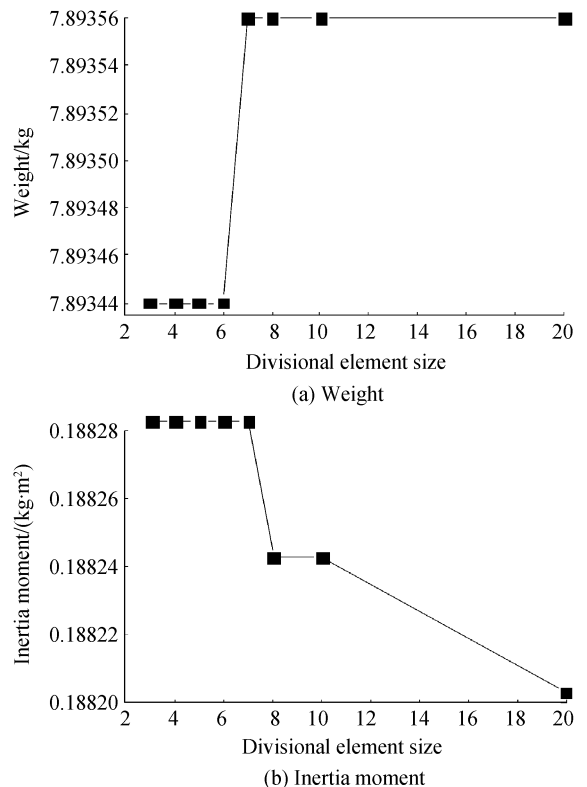


图 2 不同离散单元尺寸下蜂窝椭圆反射镜的质量和转动惯量

Fig. 2 Weight and inertia moment of honeycombed elliptical mirror under different divisional element sizes

元尺寸引起的几何离散误差较大,而在离散单元尺寸 ≤ 6 mm时,质量较小且保持恒定,说明此范围的离散单元尺寸对应着较小的几何离散误差。

随着离散单元尺寸的降低,蜂窝椭圆反射镜的转动惯量有升高的趋势,在较高的离散单元尺寸下($EI > 7$ mm),转动惯量较小,而离散单元尺寸 ≤ 7 mm时,转动惯量保持恒定。

因此,在离散单元尺寸 ≤ 6 mm时,椭圆反射镜的质量和转动惯量均保持恒定,对应着较小的几何离散误差,并且也可以看出,质量能更好地反映离散单元尺寸对几何离散误差的影响。

3) 离散单元尺寸对物理离散误差的影响

由 1) 可知,不同离散单元尺寸的物理离散误差

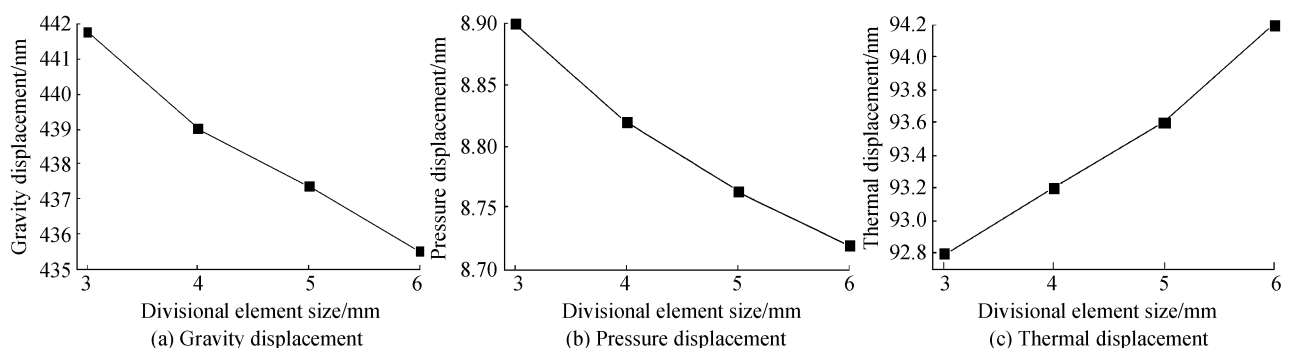


图 3 不同离散单元尺寸下蜂窝椭圆反射镜的自重变形、加工变形以及热变形

Fig. 3 Gravity displacement, pressure displacement and thermal displacement of honeycombed elliptical mirror under different meshing sizes

主要通过自重变形、加工变形和热变形来反映,为此进行了不同离散单元尺寸下蜂窝椭圆反射镜的自重变形、加工变形和热变形研究,结果见图 3。

由图 3 可以看出:随着离散单元尺寸的降低,自重变形和加工变形不断增加,热变形不断降低,但 6 mm 离散单元尺寸下的三类变形(自重变形、加工变形、热变形)与近真值(拟合线的截距)的差异较小(2.79%、4.04%和 3.09%),说明 6 mm 离散单元尺寸下的物理离散误差已较小。

由式(2)和(3)的结果可知,选用 6 mm 离散单

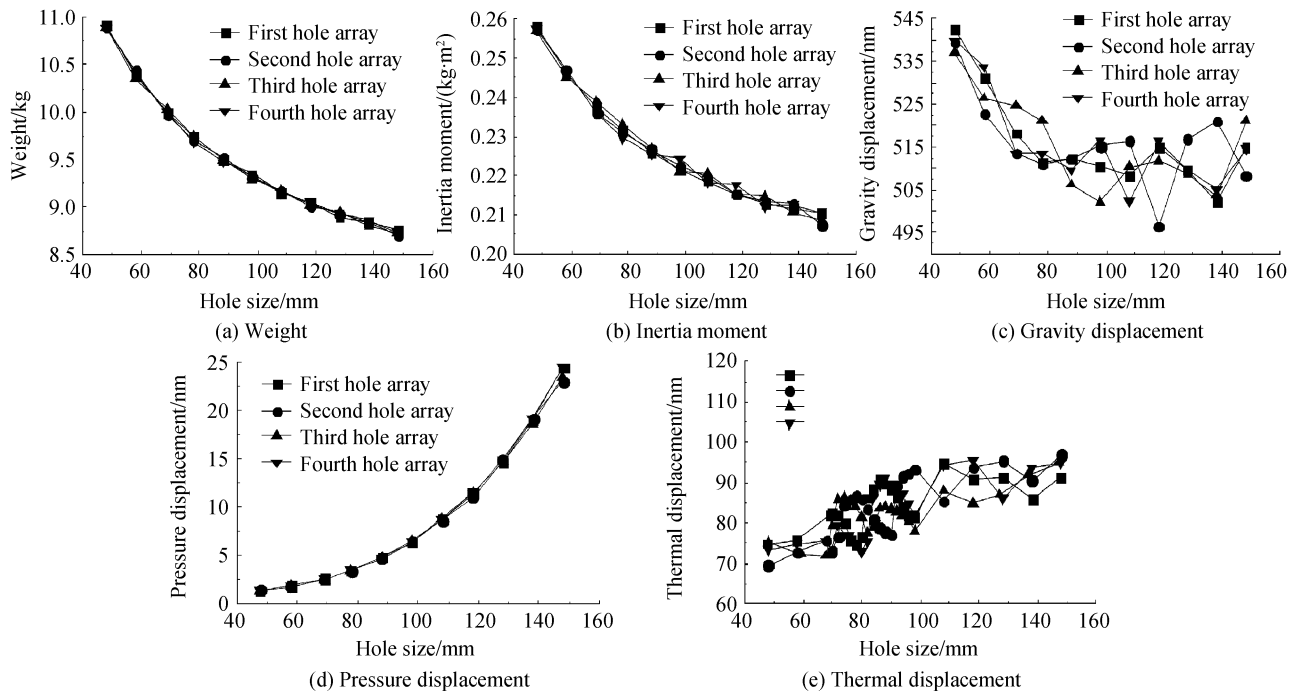


图 4 不同六方形孔排布形式和孔尺寸对蜂窝椭圆反射镜的质量、转动惯量、自重变形、加工变形和热变形的影响
 Fig. 4 Effect of different hole array and hole size on the weight, inertia moment, gravity displacement, pressure displacement and thermal displacement with hexagonal hole shape

由图 4 可以看出:随着孔尺寸的增大,质量、转动惯量均不断降低,而加工变形不断增大,热变形有不断增加的趋势,但变化存在波动,自重变形有降低的趋势,在孔尺寸较大时存在波动.在孔尺寸一定时,不同排布形式的质量、转动惯量和加工变形差异较小,而自重变形和热变形的差异较大。

在考察的孔尺寸范围内,较小的孔尺寸对应着较小的加工变形,因而可以提高面形准确度,但此时较高的质量和转动惯量使得轻量化性能较差;较大的孔尺寸对应着较小的质量和转动惯量,进而可以提高轻量化性能,但此时较高的加工变形和热变形使得面形准确度较差,因此为了兼顾轻量化性能和面形准确度,应选择适中的孔尺寸。

在考察的孔尺寸范围内,不同孔排布形式的热变形的变化幅度(26~40%)要大大高于自重变形的变化幅度(6.5~8.0%),因而孔尺寸的选取可能主

元尺寸的空间四面体单元对蜂窝椭圆反射镜结构进行离散时对应着较小的几何离散误差和物理离散误差,能够保证蜂窝椭圆反射镜的孔结构的设计准确度,因而以下便应用 6 mm 离散单元尺寸的空间四面体单元进行了蜂窝椭圆反射镜的孔结构设计。

2.2 孔结构设计研究

六方形孔形状下不同孔排布形式和孔尺寸时蜂窝椭圆反射镜的质量、转动惯量、自重变形、加工变形和热变形结果见图 4。

要由热变形所决定.由图 4(e)可以看出,不同孔排布形式下的热变形均在某一中间孔尺寸下出现极小值,因而相应的孔尺寸可能对应着最优的面形准确度.四种孔排布形式下出现极小热变形值的孔尺寸(临界孔尺寸)以及相应的热变形和自重变形结果如表 1。

表 1 四种孔排布下的极小热变形值孔径及相应的热变形结果

Table 1 Thermal displacement and gravity displacement of four kinds of hole array in critical hole sizes with hexagonal hole shape

Hole array number	Hole diameter/mm	Thermal displacement/nm	Gravity displacement/nm
1	78	74.67	511.48
2	90	77.08	506.08
3	82	77.32	514.03
4	80	72.95	512.20

由表 1 可以看出,不同孔排布形式所对应的临界孔尺寸处于 78~90 mm,孔尺寸的差异较小,因而相应的转动惯量和加工变形的差异较小,最优的孔结构形式主要由热变形和自重变形决定,相比于第四种孔排布形式在其临界孔下的性能,三种孔排布形式在各自的临界孔尺寸下的热变形的升高幅度在 2.35~6.01%,明显高于不同孔排布形式在各自的临界孔尺寸下的自重变形差异(-1.20~0.36%),说明选用第四种孔排布形式及相应的临界孔径可以获得较好的面形准确度,进而对应着较优的综合性能。

选择第四种孔排布形式及 80 mm 的孔尺寸可以获得较好的面形准确度以及较优的综合性能,因而是最优的六方形孔设计形式。

3 结论

1) 选用 6 mm 离散单元尺寸的空间四面体单元离散蜂窝椭圆反射镜结构时对应着较小的几何离散误差和物理离散误差,可取得较高的孔结构设计的分析准确度。

2) 孔尺寸对加工变形、质量和转动惯量的影响较大,应选择适中的尺寸来兼顾面形准确度和轻量化性能。

3) 孔排布形式对热变形的影响要高于对自重变形的影响,因而最优的孔结构设计形式由热变形决定。

4) 80 mm 孔尺寸的第四种六方形排布形式可获得最低的热变形和较小的自重变形,同时可以较好地兼顾质量、转动惯量和加工变形,因而是较优的孔结构设计形式。

参考文献

- [1] BOY J, KROEDEL M. CeSiC light-weight SiC composite for optics and structures[C]. *SPIE*, 2005, **5868**:07-1-6.
- [2] ZBIGNIEW S, RAK A. Process for C_f/SiC composites using liquid polymer infiltration[J]. *J Am Ceram Soc*, 2001, **84**(10): 2235-2239.
- [3] DEYERLER N, PAILER, WAGNER R. Ultra-lightweight mirrors: recent developments of C/SiC[C]. *SPIE*, 2000, **4003**: 73-79.
- [4] 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.
- [5] 韩媛媛, 张宇民, 韩杰才, 等. 碳化硅轻量化结构优化设计[J]. *光电工程*, 2006, **33**(8): 123-126.
- [5] ZHANG Ge, ZHAO Wen-xing. Analysis on structural parameters of light-weighted mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(1): 48-53.
- 张舸, 赵文兴. 轻型反射镜镜体结构参数的分析[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(1): 48-53.
- [6] DEVILLIERS C. CeSiC: a new technology for lightweight and cost effective space instrument structures and mirror[C]. *SPIE*, 2005, **5868**: 15-1-11.
- [7] KROEDEL M, KUTTER G S, DEYERLER M. Short carbon-fiber reinforced ceramic CeSiC for optomechanical applications[C]. *SPIE*, 2003, **4837**: 576-588.
- [8] GUO Shao-wen, WANG Wu-yi, ZHANG Guang-yi, et al. Lightweight mirror technology for space optical systems[J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(4): 78-82.
- 国绍文, 王玉义, 张广义, 等. 空间光学系统反射镜轻量化技术综述[J]. *光学仪器*, 2005, **27**(4): 78-82.
- [9] CHU Chang-bo, ZHOU Shao-xiang. Stiffness analysis of carbon-fiber reinforced composite mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 240-243.
- 初昶波, 周绍祥. 碳纤维增强复合材料反射镜的刚度分析[J]. *光子学报*, 2004, **33**(2): 240-243.
- [10] LI Fu, RUAN Ping, ZHAO Bao-chang. Study on the surface deformation of flat reflector under gravity load[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 272-275.
- 李福, 阮萍, 赵葆常. 重力作用下平面反射镜变形研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2): 272-275.
- [11] GUO Xi-qing, WANG Yue-yong. Analysis of structural forms of lightweight hole for heavy-caliber mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, **8**(6): 518-521.
- 郭喜庆, 王悦勇. 大口径反射镜几种轻量化孔结构形式的分析[J]. *光学精密工程*, 2000, **8**(6): 518-521.
- [12] CHENG Jing-quan. Mechanics and design of space telescope[M]. Beijing: Science Press, 2003: 72-73.
- 程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 72-73.
- [13] ZENG Yong-qiang, FU Dan-ying, SUN Ji-wen, et al. Summary of support structure patterns of large mirror for space remote sensor[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, **27**(2): 18-22, 27.
- 曾勇强, 傅丹鹰, 孙纪文, 等. 空间传感器大口径反射镜支撑结构型式综述[J]. *航天返回与遥感*, 2006, **27**(2): 18-22, 27.
- [14] WU Qing-bin, CHEN Shi-jin, DONG Shen. Thermal optimum design for lightweight primary mirror of space remote sensor[J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(5): 562-564, 567.
- 吴清彬, 陈时锦, 董申. 光学传感器轻质反射镜的结构-热优化设计[J]. *光学技术*, 2003, **29**(5): 562-564, 567.
- [15] DU Ping-an, Gan E-zhong, YU Ya-ting. Mechanics, modeling and application of finite element method[M]. Beijing: National Industrial Press, 2004: 109-110.
- 杜平安, 甘娥忠, 于亚婷. 有限元法-原理、建模及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 109-110.

Hole Design Of Honeycombed Elliptical Mirror

YU Kun, ZHANG Chang-ruì, CAO Ying-bin, LIU Rong-jun

(*State Key Laboratory of Advanced Fibers & Composites, College of Aerospace & Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

Abstract: Design of lightweight hole of honeycombed elliptical mirror is investigated by means of finite element method. Divisional errors of different divisional element sizes are studied, and the effects of hole array and hole diameter on different performance of honeycombed elliptical mirror is analyzed. The results show that smaller divisional error is acquired with divisional element size of 6 mm; weight, inert moment and pressure displacement are significantly influenced by hole diameter; hole array and hole diameter have great effect on thermal displacement than gravity displacement; the third hexagonal hole array with hole diameter of 80 mm is selected out as optimum hole design.

Key words: Hole array; Hole diameter; Finite element method; Design



YU Kun was born in 1979. Now, he is working towards the Ph. D. degree, and his research interests focus on fabrication and design of reflecting mirror.



ZHANG Chang-ruì was born in 1955. As a professor and Doctoral Supervisor, his major research interests focus on ceramics and ceramics matrix composites.