

深低温 SiC 空间反射镜背部与侧面支撑结构对比

李 晟, 范 斌, 王伟刚, 李 康

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘 要: 在深低温下的反射镜及其支撑结构设计中, 温度变化作用下的面形精度是空间反射镜性能的重要影响因素。以温度变化作用下的面形 RMS 为性能指标, 基于碳化硅反射镜不同支撑结构和不同材料搭配形式下对空间反射镜的面形变化进行对比研究。首先, 在深低温下对背部支撑和侧面支撑的以下两种情况进行仿真分析: (a) 反射镜和支撑结构都用碳化硅制造; (b) 反射镜用碳化硅制造, 支撑结构用其他材料制造。仿真分析得到在 (a) 条件下背部支撑结构能获得更好的面形, 在 (b) 条件下, 侧面支撑结构能获得更好的面形; 然后对侧面支撑结构中不同材料搭配情况下对面形精度的影响进行研究, 对面形 RMS 与反射镜材料的线膨胀系数, 支撑结构材料的线膨胀系数和反射镜材料与支撑结构材料的线膨胀系数之差的绝对值之间的关系用多元线性回归方法进行统计分析, 研究其影响程度, 分析得到线膨胀系数之差的绝对值对面形精度 RMS 的影响更大。研究取得的成果和研究思路对今后的深低温光学反射镜及其支撑结构设计提供参考。

关键词: 深低温; 空间反射镜; 支撑结构; 热应力变形; 有限元仿真

中图分类号: TH751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0214003

Comparison of back supporting structure and side supporting structure of space mirror manufactured by silicon carbide in cryogenic environment

Li Sheng, Fan Bin, Wang Weigang, Li Kang

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: In the design of mirror and its supporting structure in cryogenic environment, the surface accuracy under the temperature variation is an important factor affecting the performance of the space mirror. The surface shape RMS under the temperature change was taken as the performance index, and the surface shape variation of the space mirror was compared and studied based on the different supporting structures of the mirror manufactured by silicon carbide and the collocation forms of different materials. Firstly, the following two conditions of back support and lateral support were simulated and analyzed in cryogenic environment: (a) the mirror and the supporting structure was made of silicon carbide; (b) the mirror was made of silicon carbide and the supporting structure was made of other materials. Simulation analysis shows that the back support structure can obtain a better surface shape

收稿日期: 2019-10-11; 修订日期: 2019-11-21

作者简介: 李晟(1995-), 男, 硕士生, 主要从事空间低温光学结构设计方面的研究。Email: li2014sheng@163.com

导师简介: 范斌(1972-), 女, 研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事空间遥感器总体设计方面的研究。Email: fanbin508@163.com

under condition (a), and the lateral support structure can obtain a better surface shape under condition (b). Then, the influence of the side supporting structure on the surface accuracy under different material matching conditions was studied. The relationship among the RMS and the CTE (coefficient of linear thermal expansion) of mirror material, the CTE of supporting structure materials, the absolute value of the difference between the CTE of mirror material and the CTE of supporting structure materials was analyzed using multivariate linear regression method. The analysis result shows that the absolute value of the difference between the CTE of mirror material and the CTE of supporting structure materials has greater influence on the RMS. The research results and ideas provide reference for the design of cryogenic optical mirror and its supporting structure in the future.

Key words: cryogenic; space mirror; supporting structure; deformation due to thermal stress; finite element simulation

0 引言

深低温光学技术能通过深低温真空罐将光学元件及其支撑结构的温度降低,以有效减少背景光子通量,提高探测器的灵敏度。在深低温下的反射镜及其支撑结构设计中,温度变化作用下的面形精度是空间反射镜性能的重要影响因素。

国际上从 20 世纪开始已经着手实施了以哈勃望远镜(Hubble Space Telescope, HST)任务为代表的一批重大的空间天文观测工程,为后续的科研任务积累了宝贵的经验^[1-4]。对于空间天文探测而言,光学反射镜的面形精度和位置精度是直接影响探测质量的关键因素。而对于反射镜而言,其支撑结构的设计成为保障空间遥感器在各种环境包括发射环境和轨道环境下的适应性的重要工作。当前深低温下的主反射镜的支撑形式主要为背部三点支撑和侧面三点支撑^[5-6]。

背部支撑通过背部开孔的形式,在开孔处与热膨胀系数相近的柔性结构相连接,背部支撑既可以较好的平衡大口径反射镜的重力,又能一定程度上消除反射镜镜面由于温度变化引起的热变形。由于反射镜的背部支撑,通过三点背部支撑可以衍生出很多支撑结构,在大口径反射镜的支撑中应用较多。韩国科学院 H.Kihm 等人提出将反射镜背部表面或侧缘直接粘接 hexapod 柔性支撑元件的结构形式^[7]。俄罗斯采用在反射镜背部加工盲孔,安装柔性支撑的结构形式。

侧面支撑即在反射镜侧面安装支撑结构,或者

直接将反射镜侧面与支撑结构用胶粘在一起, SOFIA 望远镜采用侧面支撑和背部支撑相结合的支撑方式,该支撑结构中侧面支撑为三个 A-Frame 柔性结构,柔性结构固定在侧面的安装环上。韩国 Hagyong Kihm 等人在 1 000 mm 的微晶玻璃反射镜侧面加工了三个凸台,用一块平行反射镜背部的底板为定位基准,实现了一种柔性侧面支撑结构。吴清文等设计了一套能够实现自由度解耦的支撑结构,实现 800 mm×240 mm×80 mm 长条形反射镜的侧面六点支撑^[8]。Kihm 等设计了可调柔性双脚架支撑结构用 800 mm 微晶玻璃反射镜的侧面支撑^[9]。

从前人的研究可以看出当前对主反射镜及其支撑结构的研究主要针对在室温条件下的重力作用下支撑结构形式的设计和优化^[10],对于深低温反射镜支撑结构形式选择和反射镜材料与支撑结构材料搭配选择的研究很少。文中即是针对在深低温环境下的空间反射镜支撑结构形式和材料搭配进行研究。

当前用于制造空间反射镜的材料^[11]主要有碳化硅^[12-20],铝合金^[21-23],铍^[24-25],微晶玻璃^[26],石英玻璃,ULE 玻璃等。相对于其他几种,碳化硅具有以下优势:(1) 热膨胀系数小,抗热震性十分好;(2) 比刚度较大,可以减小反射镜镜片的厚度和通过蜂窝状结构从而达到轻量化目的;(3) SiC 还具有较好的热传导性,当空间环境温度发生改变时,镜片内部很容易达到平衡,不会引起太大的热应力,对环境适应能力强。基于以上优势,文中使用碳化硅作为反射镜材料,在深低温下分别以碳化硅,铝合金 6061,殷钢和钛合金 TC4 作为支撑结构材料。

文中以温度变化作用下的面形 RMS 为性能指标, 基于反射镜不同支撑结构和不同材料搭配形式下对 300 mm 口径空间反射镜的面形变化进行对比研究。文中首先通过仅在重力作用下的仿真分析对背部支撑和侧面支撑结构在常温下的面形变化进行对比研究; 然后对同一种材料搭配形式下的两种支撑结构形式在重力和温度变化的环境下进行分析, 分析不同材料搭配形式下的支撑结构选择方法; 最后, 对侧面支撑结构中面形 RMS 与反射镜材料的线膨胀系数, 支撑结构材料的线膨胀系数和反射镜材料与支撑结构材料的线膨胀系数之差的绝对值进行多元线性回归分析, 研究其影响程度。

1 背部支撑与侧边支撑的对比研究

文中依据某型号模型进行反射镜的几何设计, 参考已有的文献资料对 bipod 进行几何设计, 结构设计信息如表 1 所示, 支撑形式如图 1 和图 2 所示。

表1 反射镜和支撑结构几何信息

Tab.1 Geometric information of the mirror and support structure

Aperture	Mirror shape	Radius of curvature
300 mm	Paraboloid	1 125 mm
Thickness	Lightweight method	Supporting structure
30 mm	Regular hexagonal hole	Bipod



图 1 侧面支撑结构

Fig.1 Lateral supporting structure

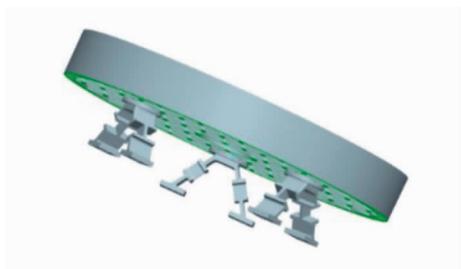


图 2 背部支撑结构

Fig.2 Back supporting structure

1.1 仅在重力作用下两种支撑结构的对比

反射镜在地面进行加工, 装调和发射的过程中面形主要受到重力的影响, 因此仅在重力影响下的反射镜镜面变形也是对两种支撑结构进行对比研究的重要指标之一。文中对模型分别施加沿光轴方向和与光轴方向垂直的重力载荷, 所用材料的相关力学性能参数如表 2 所示。

文中符号使用注释如下所示。

SiC: 碳化硅; Al6061: 铝合金 6061; TC4: 钛合金 TC4; Invar: 殷钢

文中采用的材料符号和相关性能数据均与表 2 保持一致。

表 2 相关结构材料的力学性能数据

Tab.2 Mechanical properties data of structural materials

Materials	Young's modulus/MPa	Poisson's ratio	Density/g·cm ⁻³
SiC	476 000	0.16	3.2
Al6061	77 000	0.33	2.7
TC4	125 000	0.34	4.51
Invar36	140 000	0.3	8.1

经过仿真计算, 仅在沿光轴方向的重力作用下的不同支撑结构形式的面形结果对比如表 3 所示, 仅在垂直光轴方向的重力作用下的不同支撑结构形式的面形结果对比如表 4 所示。

表 3 仅在沿光轴方向重力支撑下两种支撑结构的面形

Tab.3 Surface shape of the two support structures only under the gravity parallel to the optical axis

Material matching forms	Side supporting structure		Back supporting structure	
	RMS/nm	PV/nm	RMS/nm	PV/nm
A/B				
SiC/TC4	6.204	40.81	2.359	9.628
SiC/Invar	6.208	40.85	2.36	9.637
SiC/Al	6.244	41.12	2.396	9.684
SiC	7.643	52.51	2.376	9.473

表 4 仅在垂直光轴方向重力支撑下两种支撑结构的面形

Tab.4 Surface shape of the two supporting structures only under the gravity perpendicular to the optical axis

Material matching forms	Side supporting structure		Back supporting structure	
	RMS/nm	PV/nm	RMS/nm	PV/nm
A/B				
SiC/TC4	2.099	23.75	5.739	26.98
SiC/Invar	2.26	25.63	5.903	27.77
SiC/Al	1.808	19.71	5.299	25.13
SiC	1.574	12.76	6.728	33.18

其中 RMS(Root Mean Square)代表面形的均方根大小,PV(Peak to Valley)表示的是峰谷值。A/B 表示以 A 为反射镜材料,B 为支撑结构材料的设计形式,下文与之一致。

从表 3~4 的数据可以看出,仅在沿光轴方向的重力作用下,背部支撑结构相对于侧面支撑结构能获得更好的面形。仅在与光轴垂直方向的重力载荷作用下,侧面支撑结构相对于背部支撑结构能获得更好的面形。文中研究验证了当前在工程上的结论,不同的重力方向对应于不同形式的重力卸载方式,因此在对反射镜进行加工装调时,在不同的工况条件,应选择不同的重力卸载条件。

1.2 平行光轴方向重力和热弹性共同作用下两种支撑结构的对比研究

在仿真过程中,对两种支撑结构分别同时施加温度变化载荷和沿光轴方向的重力载荷。文中采用的热膨胀系数定义如下:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_{293\text{ K}}} \times 10^{-4} \quad (1)$$

式中: $\Delta L = L_{293\text{ K}} - L_T$, $L_{293\text{ K}}$ 和 L_T 分别代表材料在 293 K 和温度 T 的长度。

文中所使用的材料随温度变化的热膨胀系数值如表 5 所示。

首先对支撑结构材料和反射镜材料都使用碳化硅的支撑结构模型进行仿真分析。

表 5 材料的热膨胀系数

Tab.5 Thermal expansion coefficients of materials

Temperature T/K	SiC	Al6061	TC4	Invar
40	2.3	41.2	17.1	3.89
60	2.296 6	40.185	16.85	3.871
77	2.3	38.9	16.38	3.85
100	2.3	36.5	15.4	3.59
120	2.253 9	34.006	14.07	3.236
150	2.1	29.5	11.8	2.6
180	1.834	24.192	9.417	1.968
200	1.6	20.3	7.8	1.6
220	1.334 8	16.2	6.139	1.286
2	0.93	9.7	3.6	0.881

从图 3 可以看出,对于全碳化硅结构,使用背部支撑结构比侧面支撑的面形变化效果更优。

然后比较在不同材料搭配的情况下支撑结构形式对面形的影响。反射镜使用 SiC,支撑结构材料使用殷钢和钛合金 TC4。

从图 4 和图 5 可以分析得出在深低温光学结构

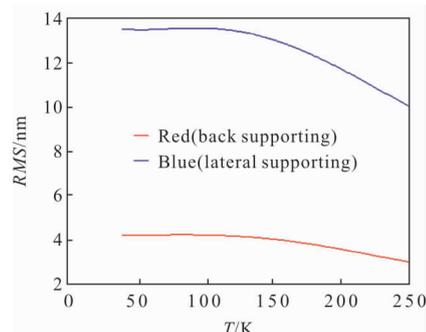


图 3 反射镜和支撑结构都使用碳化硅时的镜面面形对比
Fig.3 Mirror surface shape contrast when both mirror and supporting structure use silicon carbide

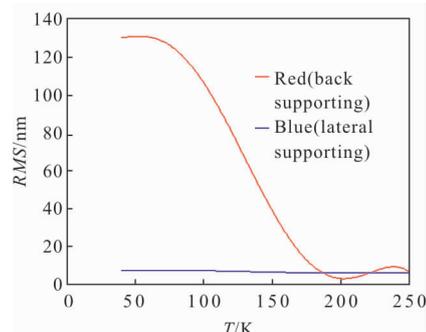


图 4 SiC/Invar 结构的面形对比
Fig.4 Mirror surface shape contrast when applying SiC/Invar structure

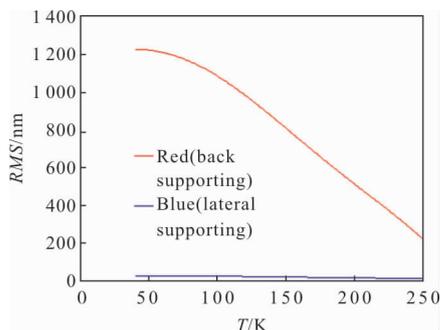


图 5 SiC/TC4 结构的面形对比

Fig.5 Mirror surface shape contrast when applying SiC/TC4 structure

设计中,当反射镜使用碳化硅制造,支撑结构材料用其他材料时,侧面支撑结构对温度变化的适应性更好。

1.3 垂直光轴方向重力和热弹性共同作用下两种支撑结构的对比研究

在仿真过程中,对两种支撑结构分别同时施加温度载荷和垂直于光轴方向的重力载荷。

首先对比支撑结构材料和反射镜材料分别使用碳化硅的支撑结构模型进行仿真分析。结果如图 6 所示。

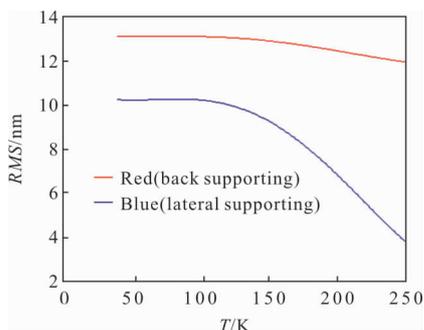


图 6 反射镜和支撑结构都使用碳化硅时的镜面面形对比

Fig.6 Mirror surface shape contrast when both mirror and support structure use silicon carbide

从图 6 可以看出,与图 3 反映的结论相反,对于全碳化硅结构,使用侧面支撑结构比背部支撑的面形变化效果更优,这是因为在深低温环境中,对于材料一体化设计结构,不存在材料热匹配的问题,重力在对面形的影响中占主导地位。

然后比较在不同材料搭配的情况下支撑结构形式对面形的影响。反射镜使用 SiC,支撑结构材料分别使用殷钢和钛合金 TC4。

Yoder P R.指出^[27],在降温过程中,支撑结构在边缘接触的光学件中产生的径向压力可以按照公式(2)评估:

$$S_R = -K_4 K_5 \Delta T \quad (2)$$

其中

$$K_4 = \frac{\alpha_M - \alpha_G}{\frac{1}{E_G} + \frac{D_G}{2E_M t_c}} \quad (3)$$

$$K_5 = 1 + \frac{2\Delta r}{D_G \Delta T (\alpha_M - \alpha_G)} \quad (4)$$

式中: α_M 为镜座即支撑结构(通常是金属)的热膨胀系数; α_G 为光学材料(玻璃,陶瓷,金属或者复合材料)的热膨胀系数。

D_G 为光学件的外径,在这里是支撑点所在圆的直径, t_c 是光学件边缘外正对着的镜座壁厚, Δr 是径向间隙。应当注意,降温时, ΔT 是负值。将公式(3)、(4)代入公式(2)中,以外径 D_G 为自变量,径向压力 S_R 对 D_G 连续求导可得,在外径范围内,径向压力 S_R 随着外径的增大而减小,径向压力越小,由此产生的位移变形更小。由此可说明,在降温过程中,当反射镜使用碳化硅制造,支撑结构材料用其他材料时,侧面支撑形式相对于背部支撑形式而言对温度变化会有更好的适应性。接下来进行仿真分析来验证这一结论。仿真结果如图 7~8 所示。

从图 7 和图 8 可以分析得出在深低温光学结构设计中,当反射镜使用碳化硅制造,支撑结构材料用其他材料时,侧面支撑结构对温度变化的适应性更好,且变化趋势与图 4 和图 5 的变化趋势非常相似。与上文理论分析的结论吻合。

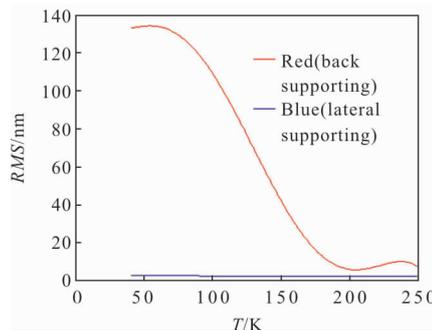


图 7 SiC/Invar 结构的面形对比

Fig.7 Mirror surface shape contrast when applying SiC/Invar structure

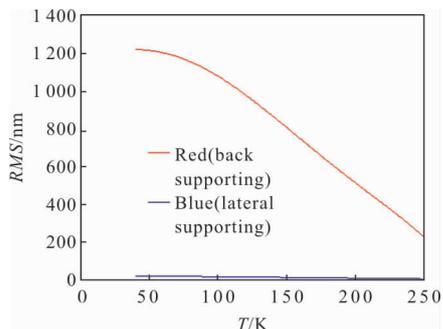


图 8 SiC/TC4 结构的面形对比

Fig.8 Surface shape contrast when applying SiC/TC4 structure

从图 4~8 的结果可分析得到在深低温的环境下,当反射镜使用碳化硅制造,支撑结构用其他材料时,温度变化在对面形的影响中占主导地位。

2 侧面支撑方式中材料搭配对面形的影响的研究

以上的研究表明当使用同一材料制造反射镜及其支撑结构时,深低温下的面形变化最小。但在实际加工时,碳化硅一体化加工难度很大,加工带来的面形误差较大,因此实际工程中支撑结构往往采用不同的材料加工。通过前文的对比,可以得出在反射镜材料和支撑结构材料不一样的情况下,使用侧面支撑结构反射镜能得到更好的面形。文中将对侧面支撑结构中材料的不同搭配情况下面形变化与反射镜材料的热膨胀系数,支撑结构材料的热膨胀系数以及热膨胀系数之差的绝对值之间的关系进行研究。

由公式(2)~(4)可以推导出,径向压力随着两种材料之间的热膨胀系数之差的增大而增大。下面通过仿真结果数据进行分析。

文中采用多元线性回归方法来研究三种因素对面形精度的影响程度。

图 9 反映的是以 SiC 为反射镜材料,以 Invar 为支撑结构材料的面形 RMS 变化。图 9(a)和图 9(b)分别代表 SiC 和殷钢的线膨胀系数(相对于 293 K 的长度的变化量)随温度的变化量,无量纲;图 9(c)中 delta 代表的是两种材料的线膨胀系数之差的绝对值随温度的变化;图 9(d)中 RMS 代表镜面面形随温度的变化。从图 9(c)和 9(d)中可直观地看出 RMS 的变趋势与 delta 的变化趋势相近。

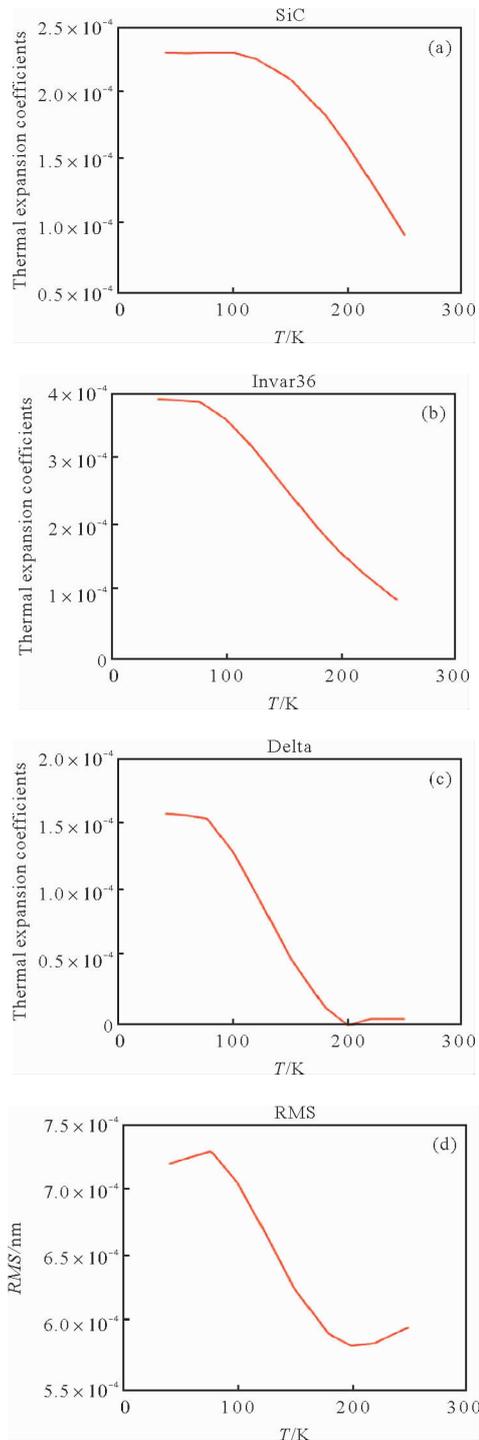


图 9 RMS 与材料热膨胀系数的关系

Fig.9 Relationship between RMS and thermal expansion coefficient of materials

以 SiC, Invar 的线膨胀系数和两者之差的绝对值这三者为自变量,以 RMS 为因变量进行多元线性回归。其结果如下:

$$b=[5.549\ 8\ 1.734\ 3\ -1.587\ 0\ 2.476\ 2] \quad (5)$$

可得多元线性回归之后的方程如下：

$$RMS=5.549\ 8+1.734\ 4\alpha_{SiC}-1.587\ 0\alpha_{Invar}+2.476\ 2\alpha_{|\delta|} \quad (6)$$

$$stats=[0.998\ 2\ 38550.610\ 2\ 4.439\ 9\times 10^{-284}\ 5.982\ 7\times 10^{-4}] \quad (7)$$

$$bint=\begin{bmatrix} 5.469\ 7 & 1.370\ 4 & -1.909\ 0 & 2.167\ 3 \\ 5.629\ 9 & 2.098\ 3 & -1.265\ 1 & 2.785\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： α_{SiC} 为碳化硅的膨胀系数； α_{Invar} 为殷钢的线膨胀系数； $\alpha_{|\delta|}$ 为碳化硅和殷钢的线膨胀系数之差的绝对值； b 为参数估计值，第一个值为常数项，第二个值为 α_{SiC} 的系数，第三个值为 α_{Invar} 的系数，第四个值为 $\alpha_{|\delta|}$ 的系数，系数的绝对值越大代表这个自变量对因变量影响程度越大。 $bint$ 为 b 的置信区间， r 为残差向量， $stats$ 第一个值是相关系数，其值越趋近 1，代表回归方程越显著；第二个值是检验回归方差显著性的 F 统计量的值，第三个值是对应于所得 F 统计量的概率，第四个是估计误差的方差。

残差向量和残差的置信区间如图 10 所示。

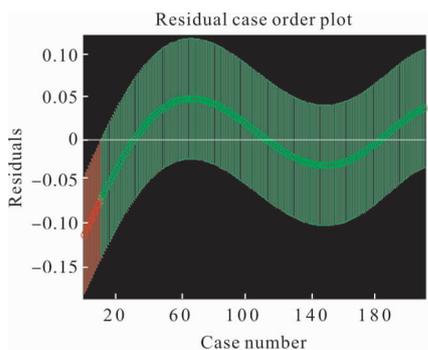


图 10 残差与残差置信区间分布图

Fig.10 Distribution of residuals and confidence intervals for residuals

从图10可以看出，除开头段少数数据外，其余绝大部分数据的残差离零点较近，且残差的置信区间均包含零点，这说明回归模型 $RMS=5.549\ 8+1.734\ 3\alpha_{SiC}-1.587\ 0\alpha_{Invar}+2.476\ 2\alpha_{|\delta|}$ 能非常好地符合原始数据。

分析以上信息， $\alpha_{|\delta|}$ 的系数的绝对值最大，说明在以 SiC 为反射镜材料，以 Invar 为支撑结构材料

的反射镜设计形式中，对面形 RMS 影响最大的是两者线膨胀系数之差的绝对值，即 $\alpha_{|\delta|}$ 。

在其他的材料搭配形式中，结果如图 11~12 所示。

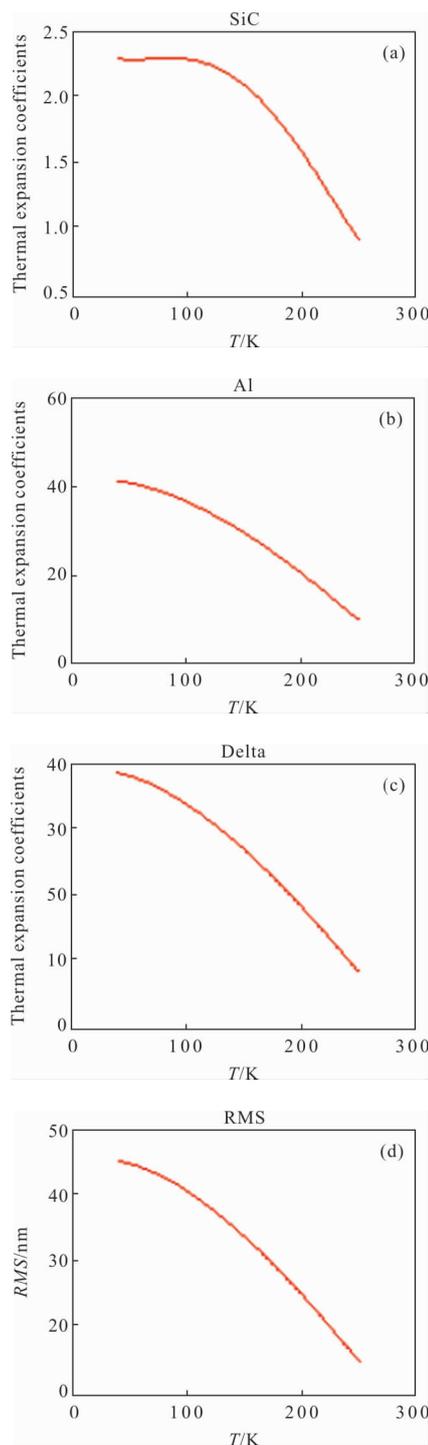


图 11 以 SiC 为镜片材料，铝合金 6061 为支撑结构材料
Fig.11 Mirror is made of silicon carbide when support structure is made of Al6061

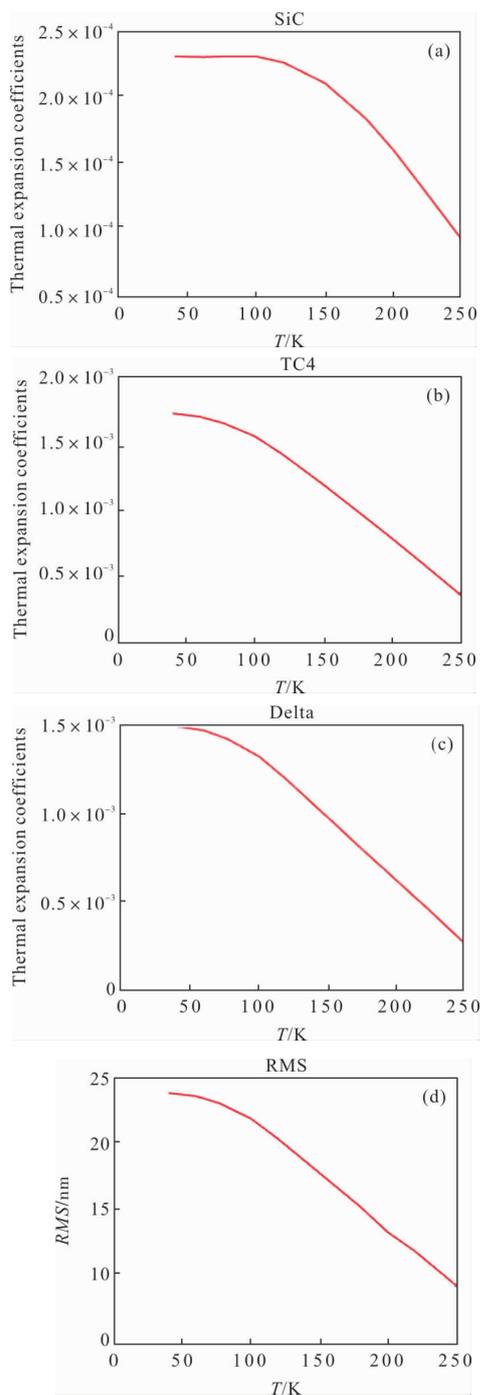


图 12 以 SiC 为镜片材料,钛合金 TC4 为支撑结构材料
Fig.12 Mirror is made of silicon carbide when support structure is made of TC4

同样进行多元线性回归分析之后得到的结果如表 6 所示。

图 13 表示 SiC/TC4 结构的残差与残差置信区间分布图,图 14 表示 SiC/Invar 结构的残差与残差置信区间分布图。

表 6 SiC/TC4 和 SiC/Al6061 进行多元线性回归拟合后的参数

Tab.6 Data of SiC/TC4 and SiC/Al6061 obtained using multiple linear regression methods

Regression coefficients	SiC/TC4	SiC/Al6061		
	5.982 6	6.105 2		
<i>b</i>	0	0		
	0.139 7	0.257 4		
	1.035 92	-0.741 6		
	0.999 9	0.999 999		
<i>stats</i>	1 281 183.522 6	1.169 2×10 ⁸		
	0	0		
	0.0017	5.363 8×10 ⁻⁵		
<i>bint</i>	5.940 70	6.024 40	6.097 90	6.112 40
	0.096 4	0.183 0	0.248 3	0.266 5
	-1.083 2	-0.987 3	0.732 1	0.751 1

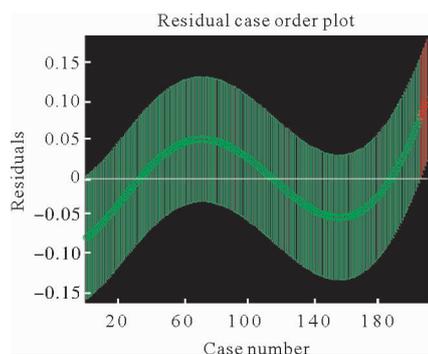


图 13 残差与残差置信区间分布图
Fig.13 Distribution of confidence intervals for residuals and residuals

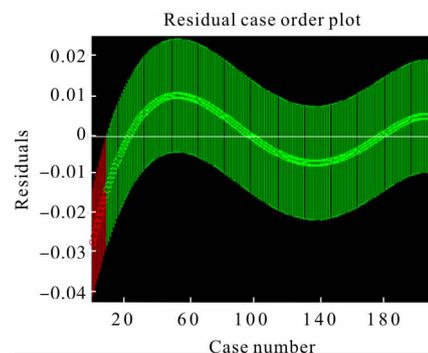


图 14 残差与残差置信区间分布图
Fig.14 Distribution of residuals and confidence intervals for residuals

从以上的分析可以看出,在侧面支撑结构中,支撑结构材料的选择对反射镜镜面的面形精度有重要的影响。多元线性回归分析的结果表明,在侧面支撑结构中,在对面形的影响方面,相对于其他两者,反射镜材料和支撑结构材料的线膨胀系数之差的绝对值对面形 RMS 的影响更大。

3 结 论

针对深低温光学结构设计中反射镜支撑结构设计问题,选择碳化硅为反射镜设计材料,以温度变化作用下的镜面面形 RMS 为性能指标,主要采用有限元仿真分析和多元线性回归统计分析的方法进行研究。首先比较仅在重力作用下背部支撑结构与侧面支撑结构面形效果,仿真分析得到在平行于光轴的重力作用下,背部支撑结构相对于侧面支撑结构能获得更好的面形精度;而在垂直于光轴的重力作用下,侧面支撑结构相对于背部支撑结构能获得更好的面形精度;然后仿真分析在温度变化载荷和重力载荷共同作用下的面形变化,分析得到在平行于光轴的重力作用下,背部支撑结构相对于侧面支撑结构能获得更好的面形精度,而在垂直于光轴的重力作用下,侧面支撑结构相对于背部支撑结构能获得更好的面形精度;当反射镜材料和支撑结构材料不一样时,侧面支撑结构能获得更好的面形精度;最后对侧面支撑结构形式不同材料搭配情况下对面形精度的影响进行研究,对面形 RMS 与反射镜材料的线膨胀系数,支撑结构材料的线膨胀系数,反射镜材料与支撑结构材料的线膨胀系数之差的绝对值进行多元线性回归分析,仿真结果表明反射镜材料与支撑结构材料的线膨胀系数之差的绝对值对面形精度 RMS 的影响更大。这一结论对今后深低温光学结构设计的热匹配问题有较大的参考价值。研究取得的成果及研究思路对今后深低温空间反射镜的设计,制造加工,装调和面型检测提供有价值的参考。

参考文献:

- [1] Marco Barbera, Teresa Mineo, Stefano Basso, et al. The mirror module design for the cryogenic X-ray imaging spectrometer on board ORIGIN [C]//SPIE, 2011, 8076: 80760A.
- [2] Laura E Coyle, Taylor S Chonis, Koby Z Smith, et al. Optical assessment of the James Webb Space telescope primary and secondary mirror cryogenic alignment with a Hartmann test[C]//SPIE, 2018, 10706: 107061Q.
- [3] Derek J Edinger, Paul V Mammini, Anantha Rao. Cryogenic mirror mounts for use on JWST's NIRCam instrument[C]//SPIE, 2005, 5904: 59040A.
- [4] Brian E Catanzaro, Steven J Connell, Mark Mimovich, et al. Cryogenic (70 K) measurement of an all-composite 2-m-diameter mirror [C]//SPIE, 2001, 4444: 238-257.
- [5] Zeng Yongqian, Fu Danying, Sun Jiwen, et al. Summary of support structure patterns of large mirror for space remote sensor [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2006, 27(2): 18-22. (in Chinese).
- [6] Guo Jiang, He Xi. Design of support for primary mirror of space remote sensing camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(9): 1642-1647. (in Chinese)
- [7] Kihm H, Yang H S. Design optimization of a 1-m lightweight mirror for a space telescope [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 72-72.
- [8] Wu Qingwen, Tao Jiasheng, Song Zhaohui. Multi-point support pattern of a high precision lightweight rectangular mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(6): 61-65. (in Chinese)
- [9] Kihm H, Yang H S, Moon I K, et al. Adjustable bipod flexures for mounting mirrors in a space telescope[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(32): 7776-7783.
- [10] Zhang Bowen, Wang Xiaoyong, Zhao Ye, et al. Progress on support technique of space-based large aperture mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1113001. (in Chinese)
- [11] Liu Tao, Zhou Yiming, Jiang Yuesong. Research and application of foreign space mirror material [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2013, 34(5): 90-99. (in Chinese)
- [12] Peter A Jones, Donald A Gildner. Cryogenic performance of a passive lightweight mirror[C]//SPIE, 1998, 3356: 883-891.
- [13] Kenneth J Triebes, Lynn W Huff, Charles D Cox, et al. Cryogenic optical performance of a lightweighted 20-inch SiC mirror and indications for thermal strain

- homogeneity and hysteresis [C]//SPIE, 1995, 2543: 213–218.
- [14] Takashi Onaka, Hidehiro Kaneda, Mitsunobu Kawada, et al. Cryogenic silicon carbide mirrors for infrared astronomical telescopes: lessons learnt from AKARI for SPICA [C]//SPIE, 2013, 8837: 88370K.
- [15] Ron Eng, James R. Carpenter, et al. Cryogenic performance of a lightweight silicon carbide mirror[C]// SPIE, 2005, 5868: 58680Q.
- [16] James B Hadaway, Ron Eng, H Philip Stahl, et al. Cryogenic performance of lightweight SiC and C/SiC mirrors [C]//SPIE, 2004, 5487: 1019–1029.
- [17] Christopher Chrzanowski, Charles Frohlich, Badri Shirgur, et al. Design and structural/optical analysis of a kinematic mount for the testing of silicon carbide mirrors at cryogenic temperatures[C]//SPIE, 2004, 5528: 204–214.
- [18] Hidehiro Kaneda, Masataka Naitoh, Tadashi Imai, et al. Cryogenic optical testing of an 800 mm lightweight C/SiC composite mirror mounted on a C/SiC optical bench [J]. *Applied Optics*, 2010, 49: 3941–3948.
- [19] Hidehiro Kaneda, Takao Nakagawa, Takashi Onaka, et al. Cryogenic optical measurements of 12 – segmentbonded carbon–fiber–reinforced silicon carbide composite mirror with support mechanism [J]. *Applied Optics*, 2008, 47: 1122–1128.
- [20] Hidehiro Kaneda, Takashi Onaka, Mitsunobu Kawada, et al. Cryogenic optical testing of sandwich–type silicon carbide mirrors [J]. *Applied Optics*, 2003, 42: 708–714.
- [21] Daniel Vukobratovich, Ken Don, Richard E Sumner. Improved cryogenic aluminum mirrors[C]// SPIE, 1998, 3435: 9–18.
- [22] Jan Kinast, Ralph Schlegel, Knut Kleinbauer, et al. Manufacturing of aluminum mirrors for cryogenic applications [C]//SPIE, 2018, 10706: 107063G.
- [23] Kwijong Park, Bongkon Moon, Dae–Hee Lee, et al. Performance analysis for mirrors of 30 cm cryogenic space infrared telescope [J]. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 2012, 29(3): 321–328.
- [24] Stephen E Kendrick, Robert J Brown, Scott Streetman, et al. Lightweighted beryllium cryogenic mirrors for both monolithic and segmented space telescopes [C]// SPIE, 2003, 4850: 241–253.
- [25] Stephen E Kendrick, Timothy Reed, Scott Streetman, et al. Design and test of semirigid beryllium mirrors for lightweighted space applications: SBMD cryogenic performance update and AMSD design approach [C]// SPIE, 2001, 4198: 221–229.
- [26] Stephanie Behar–Lafenetre, Thierry Lasic, Roger Viale, et al. Highly light –weighted ZERODUR mirror and fixation for cryogenic applications [C]//Sixth International Conference on Space Optics, 2006, 10567: 1056717.
- [27] Yoder P R. *Opto–Mechanical Systems Design* [M]. 3rd ed. Zhang Haixian, Cheng Yunfang, translated. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)