

文章编号 1004-924X(2007)11-1704-08

空间太阳望远镜中铍摆镜的有限元分析与应用

宋立强^{1,2}, 杨世模¹, 陈志远¹

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:根据空间镜面材料选择原则进行了摆镜材料优选,研制了用于空间太阳望远镜相关跟踪器中的铍摆镜,建立了铍摆镜有限元模型并进行了力学分析。重点分析了铍摆镜在承受惯性载荷和温度载荷情况下的力学性能,对其在不同工况条件下的面形和内部应力的变化做了对比。最后,与同结构碳化硅材料摆镜在上述载荷情况下的力学性能进行类比分析,结果表明:铍摆镜受到惯性和温度载荷作用时引起镜体内部应力小于材料本身的屈服强度,力学性能优于碳化硅摆镜,其面形精度:RMS为 2.18×10^{-6} mm, PV为 1.69×10^{-5} mm,一阶谐振频率为1 609 Hz。该摆镜结构设计合理,计算结果满足相关跟踪器使用要求,已经得到铍摆镜镜坯。

关键词:空间太阳望远镜;相关跟踪器;摆镜;铍;有限元分析

中图分类号:TH751 文献标识码:A

Finite element analysis and application of beryllium tip-tilt mirror in space solar telescope

SONG Li-qiang^{1,2}, YANG Shi-mo¹, CHEN Zhi-yuan¹

(1. *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;*
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In order to improve dynamic range and effective bandwidth of the correlation tracker in a space solar telescope, the beryllium was optimally chosen as a space mirror material to fabricate a tip-tilt mirror of correlation tracker. The finite element model of the beryllium mirror was established and the mechanical properties of the tip-tilt mirror under inertia and temperature loads was analyzed. Then, the surface figure and inner stress of the tip-tilt mirror under different working conditions were investigated. Finally, the mechanical properties between same structure mirror of beryllium and silicon carbide were compared. The analysis results show that the final RMS surface figure error of 2.18×10^{-6} mm and PV of 1.69×10^{-5} mm are obtained, the resonant frequency is 1 609 Hz. The beryllium mirror substrate has already obtained, and its optics process is proceeding. The results indicate that analysis results satisfy the technology requirements of the tip-tilt mirror of the correlation tracker. The inner stress of the mirror is less than yield strength of beryllium material when the tip-tilt is under inertia and temperature loads, the analysis results of beryllium tip-tilt mirror are better

收稿日期:2007-07-15;修订日期:2007-08-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No:10778628)

than that of silicon carbide tip-tilt mirror.

Key words: space solar telescope; correlation tracker; tip-tilt mirror; beryllium; finite element analysis

1 引 言

摆镜是空间太阳望远镜相关跟踪器中的核心部件之一,在其光学系统中做二维摆动使光束受控地产生快速、小角度变化以补偿因卫星振动而引起的图像抖动。相关跟踪系统的动态范围、精度由摆镜的动态范围、精度决定,有效带宽也受到摆镜谐振频率的影响,摆镜综合性能的好坏直接决定相关跟踪系统的使用性能,而摆镜的综合性能直接受镜面材料、镜体结构等因素的影响,因此,摆镜的材料选择、结构优化设计及有限元分析非常重要。

天文仪器中常用的镜面材料有碳化硅(SiC)、微晶玻璃、超低膨胀玻璃等,而新型镜面材料—铍(Be)与其它镜面材料相比具备一定优势,具有密度小、比刚度大、热变形系数小、材料各向同性、尺寸稳定性好等优点。对于重量和性能要求十分重要的摆镜来说,铍是空间光学系统首选的镜面材料。铍镜在发达国家的天文仪器中已得到成功应用,如美国的 JWST^[1]、ITTT^[2]、日本的 JAMI^[3]、欧南台的 VLT^[4] 等项目。我国对铍镜应用研究起步较晚,上个世纪末期在资源一号、风云一号卫星上应用了工作在红外波段的铍扫描镜^[5-6]。目前正在研制的风云四号卫星也应用了工作在红外波段的铍镜,但铍镜进口于俄罗斯^[7]。另外,铍镜也多用于军事装备,发达国家对铍镜研制技术严格封锁,使得我国自主研制铍镜十分必要。

本文针对空间太阳望远镜相关跟踪器中的摆镜,在国内首次进行了工作在可见光波段的铍镜研究,重点进行了摆镜材料优选、有限元分析、同结构铍摆镜与 SiC 摆镜进行对比分析,特别是对摆镜在惯性载荷和温度载荷情况下的面形变化及应力分布进行了详细研究。

2 摆镜的材料优选与结构设计

摆镜材料性能和结构的优劣直接决定摆镜和

相关跟踪系统的使用性能,选择性能优异的镜面材料 and 设计合理的镜体结构十分重要。

2.1 摆镜材料选择

摆镜材料选择需要考虑相关跟踪系统的光学要求、环境要求,以及镜面材料性能和生产成本等因素。空间太阳望远镜所在的环境为太空环境,使用条件是微重力或无重力,低温或者是大温差,同时要考虑到发射时对整个系统的要求。因此,选取摆镜材料时主要考虑以下几个因素^[8-10]:(1)比刚度(弹性模量 E /密度 ρ)大;(2)热稳定系数(热膨胀系数 α /热导率 κ)小;(3)材料本身稳定性好;(4)易于加工,等等。

在天文仪器反射镜材料(如表 1)中,金属铍与其它镜面材料相比具备一定优势:铍的密度最小,约为 SiC 等材料的 2/3;铍的比刚度最大,是 SiC 的 1.5 倍,是其它镜面材料的 4~6 倍;铍作为空间镜面材料既减轻了镜体质量,又减轻了支撑系统的质量,可降低仪器的发射成本;铍的比热容也最高,当温度变化时,镜体能很快达到热平衡,避免因温度梯度导致镜体扭曲变形;铍材作为金属其工艺性能良好,可以直接进行机械加工。因此,铍是下一代空间光学系统中首选的镜面材料。

表 1 反射镜材料性能对比^[11]

Tab. 1 Comparison of performance on reflector materials

镜面材料	密度 ρ (g/cm ³)	弹性模量 E (GPa)	热膨胀系数 α (10 ⁻⁶ /K)	热导率 κ (W/mK)	比刚度 E/ρ (GN·m/kg)	热变形系数 α/κ
铍	1.85	287	11.3	216	155	0.052
烧结碳化硅	3.04	330	2.4	170	112	0.014
微晶玻璃	2.53	92	-0.09	1.6	36.4	0.056
超低膨胀玻璃	2.21	67	0.015	1.30	30.3	0.012
铝	2.70	68	22.5	167	25.2	0.13
硅	2.33	131	2.6	156	56.2	0.017
熔石英	2.19	73	0.50	1.40	33.3	0.36

2.2 摆镜结构设计及有限元分析

摆镜要做二维摆动,镜体质量的减轻可使支撑系统的质量和功耗降低;摆镜质量的降低还可以提高系统的动力学性能,提高系统有效带宽,因此摆镜需要轻量化。反射镜轻量化有对称型、背部封闭型和背部开放型等。从局部来看,轻量化孔的形式通常有三角孔、四边形孔(矩形孔)、六边形孔(蜂窝形孔)和扇形轻量化结构等^[12-13]。结合生产加工工艺并通过分析,选择了扇形作为摆镜轻量化形式,支撑方式采用周边三点压边支撑。利用有限元软件对铍摆镜结构进行优化,优化后的结构尺寸如表 2 所示。

建立有限元模型如图 1,进行有限元分析,摆镜装卡后的分析结果如表 3,此结果不仅满足相关跟踪器中摆镜 $PV \leq \lambda/10$ 、 $RMS \leq \lambda/40$ 、机械谐振频率 ≤ 950 Hz 的技术要求,而且也优于相同结构 SiC 材料摆镜,如表 3。

表 2 铍摆镜的结构尺寸

Tab.2 Dimensions of beryllium tip-tilt mirror structure

符号	D	D_1	D_2	D_3	H	H_1	H_2	H_3	H_4
尺寸/mm	84	88	78	36	8	3	2.5	3	3

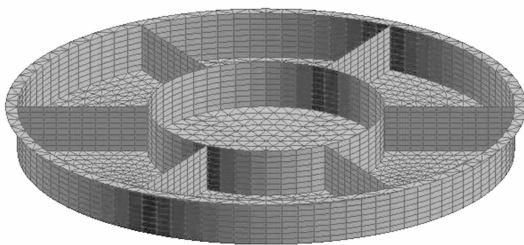


图 1 摆镜的有限元模型

Fig.1 Finite element model of tip-tilt mirror

表 3 相同结构的铍和 SiC 摆镜的分析结果

Tab.3 Analysis results of beryllium and silicon carbide tip-tilt mirrors in the same structure

摆镜材料	RMS/mm	PV/mm	一阶谐振频率/Hz	质量/g	转动惯量/($kg \cdot mm^2$)
铍	2.18×10^{-6}	1.69×10^{-5}	1 609	47.88	53.44
碳化硅	2.20×10^{-6}	1.66×10^{-5}	1 461	87.57	96.20

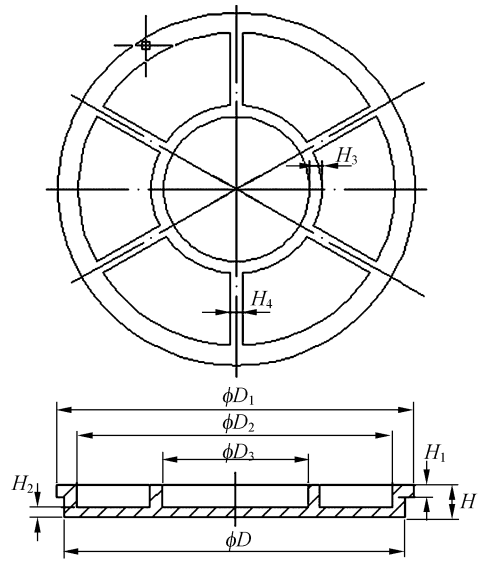


图 2 摆镜结构图

Fig.2 Structure of tip-tilt mirror

3 摆镜受惯性载荷和热载荷作用的分析

空间太阳望远镜所在的特殊工作环境会影响摆镜的面形及内部应力分布,其主要影响因素惯性载荷和热载荷都会影响摆镜的光学性能。分析摆镜在上述两种因素作用下的变形及应力变化情况,对于相关跟踪系统设计和结构分析具有重要的参考价值。

3.1 惯性载荷对摆镜的影响

将连续的轴对称弹性体离散为单元组合体,对图 3 所示的其中一个单元 A 来说, $\{u_r, u_z\}$ 为节点位移向量 Δ 。

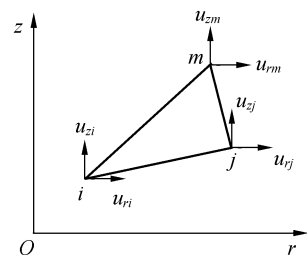


图 3 单元示意图

Fig.3 Element sketch

弹性体的单元内能公式可写为^[14]:

$$I = \iint \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} r dr dz - \iint \mathbf{f}^T \mathbf{p} r dr dz . \quad (1)$$

总体位能公式: $I = I(u_{1r}, u_{1z}, u_{2r}, u_{2z}, \dots, u_m, u_{nz})$, 使得此泛函函数取得的极小值的位移集必定满足平衡方程和边界条件。根据矩阵形式二次型的微商公式, 得该泛函函数的变分为:

$$\partial I / \partial u_r = 0, \partial I / \partial u_z = 0 \quad (r=1, 2, \dots, n) . \quad (2)$$

这样即可获得以总体刚度矩阵为系数, 以总体节点位移为未知量的线性代数方程组。求解该方程组, 即为各节点的变形量, 再代入几何方程和物理方程, 即可求得各单元内的应变和应力, 从而掌握铍摆镜受惯性载荷作用时的变形及内部应力分布情况。

3.2 温度载荷对摆镜的影响

当温度场作用到摆镜有限元模型上时, 主要是要对物理方程进行修正, 对应的等效节点载荷的表达式为^[15]:

$$\mathbf{R} = \iint \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0 r dr dz , \quad (3)$$

式中, \mathbf{B} 为应变矩阵, \mathbf{D} 为弹性矩阵, $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ 为热胀冷缩引起的初应变向量。对所描述的连续弹性体来说, 三维连续弹性体的稳态温度场的温度分布 $T(x, y, z)$ 可满足方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho Q = 0 . \quad (4)$$

其边界条件为:

$$\lambda (\partial T / \partial N) = \alpha (T_0 - T) , \quad (5)$$

式中, λ 为材料的导热系数, Q 为物体内部的热源密度, α 为膨胀系数, T_0 为介质在镜片表面附近的温度。再由温度场的变分原理, 推导出以各节点温度为未知量, 以总体温度刚性矩阵为系数的线性代数方程组, 并求解, 可获得三维连续弹性体内各节点的温度, 再代入有热载荷后的总体位能表达式, 即可求得三维连续弹性体的变形及内部的应力分布, 从而掌握铍摆镜受温度载荷时的变形及内部应力分布情况。

3.3 有限元分析及结果

3.3.1 同结构铍摆镜和 SiC 摆镜受不同惯性载荷作用的分析结果

当摆镜仅受到惯性载荷作用, 加速度为 9.8, 19.6, 49.98, 147, 196, 294, 392 m/s² 时的等效应力和最大变形部分数据如表 4, 摆镜变形云图举例如图 4~7。

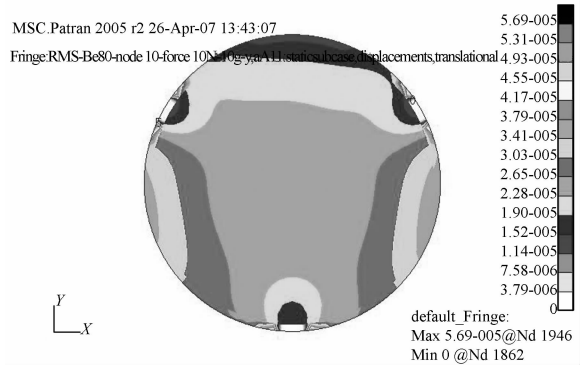


图 4 铍摆镜 10g(y)的变形
Fig. 4 Deformation of 10g(y)

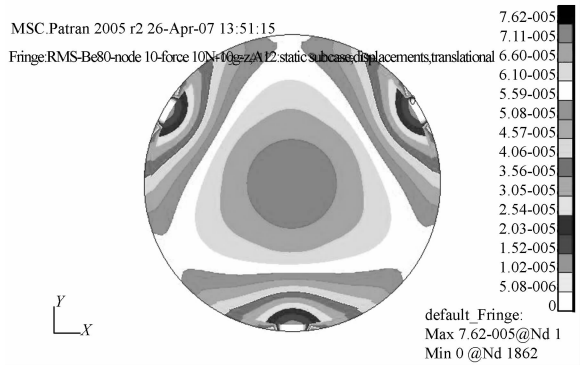


图 5 铍摆镜 10g(z)的变形
Fig. 5 Deformation of 10g(z)

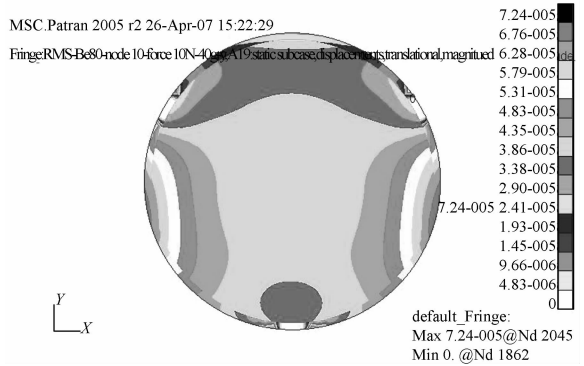


图 6 铍摆镜 40g(y)的变形
Fig. 6 Deformation of 40g(y)

根据计算数据并对比铍材的物理性能可知, 摆镜内部的最大主应力均小于铍材的屈服强度, 这说明铍材作为摆镜材料可以承受以上加速载荷。以加速度载荷分别为 10g、40g 为例的变形和应力分布情况如图 4~7 所示, 惯性载荷施加在摆镜 y、z 方向时(其中 z 向为轴向, x、y 为径向),

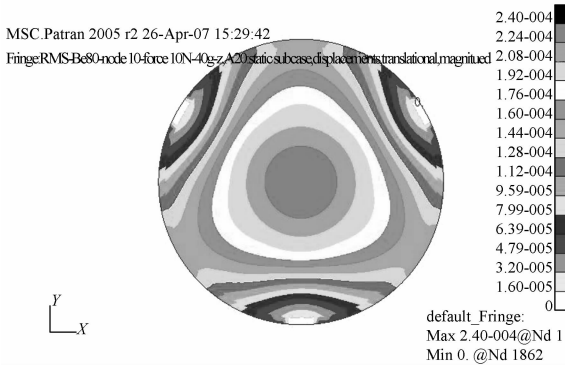


图 7 铍摆镜 40g(z) 的变形
Fig. 7 Deformation of 40g(z)

其 z 向的变形较大。摆镜承受 y 向惯性载荷时，摆镜两侧的变形最大；摆镜承受 z 向惯性载荷时，摆镜中心区域的变形最大。

为了对比目前应用较为广泛的 SiC 镜面材料进行铍摆镜与同结构 SiC 摆镜力学性能对比，现列举 SiC 摆镜承受 z 向惯性载荷为：10g、20g、40g，进行有限元分析。从表 4 的分析结果可以看出，铍摆镜模型单元节点位移值、等效应力以及变形均方差值都优于同结构 SiC 摆镜，这是由于铍材的比刚度大于 SiC 材料，所以当铍摆镜受到惯性载荷时表现出来的力学性能要优于同结构 SiC 摆镜。

表 4 铍和 SiC 摆镜受到惯性载荷的分析结果
Tab. 4 Analysis results of Be and SiC tip-tilt mirrors under inertia loads

摆镜材料	惯性载荷 / (m/s ²)	等效应力/Pa		镜体最大变形量 /mm	镜体变形量均方根值/mm
		最大	最小		
铍	1g (z 向)	2.68×10 ⁶	0	5.57×10 ⁻⁵	3.73×10 ⁻⁶
铍	2g (y 向)	2.68×10 ⁶	0	5.58×10 ⁻⁵	3.84×10 ⁻⁶
铍	2g (z 向)	2.68×10 ⁶	0	5.59×10 ⁻⁵	4.89×10 ⁻⁶
铍	10g (y 向)	2.73×10 ⁶	0	5.68×10 ⁻⁵	5.85×10 ⁻⁶
铍	10g (z 向)	2.74×10 ⁶	0	7.62×10 ⁻⁵	1.46×10 ⁻⁵
碳化硅	10g (z 向)	2.85×10 ⁶	0	8.46×10 ⁻⁵	1.71×10 ⁻⁵
铍	20g (y 向)	2.80×10 ⁶	0	5.83×10 ⁻⁵	9.52×10 ⁻⁶
铍	20g (z 向)	2.82×10 ⁶	0	1.30×10 ⁻⁴	2.79×10 ⁻⁵
碳化硅	20g (z 向)	2.96×10 ⁶	0	1.50×10 ⁻⁴	3.31×10 ⁻⁵
铍	40g (y 向)	2.93×10 ⁶	0	6.62×10 ⁻⁵	1.76×10 ⁻⁵
铍	40g (z 向)	2.98×10 ⁶	0	2.40×10 ⁻⁴	5.50×10 ⁻⁵
碳化硅	40g (z 向)	3.20×10 ⁶	0	2.80×10 ⁻⁴	6.53×10 ⁻⁵

3.3.2 同结构铍摆镜和 SiC 摆镜受热载荷作用的分析结果

对铍摆镜在承受温度载荷作用范围为 -40~70 °C 时(设仪器无热控)，分别进行有限元分析，摆镜变形情况举例如图 8~11 所示。镜体主要变形发生在夹持部位，镜面的变形和内部最大主应力如表 5 所示。当镜体仅受到温度载荷时，摆镜内部最大主应力小于铍材的屈服强度，铍材作为

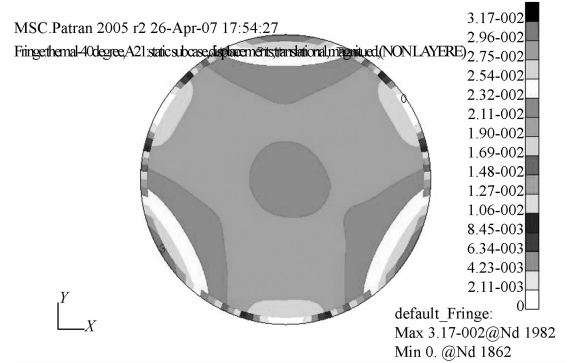


图 8 铍摆镜在 -40 °C 的变形
Fig. 8 Deformation of -40 °C

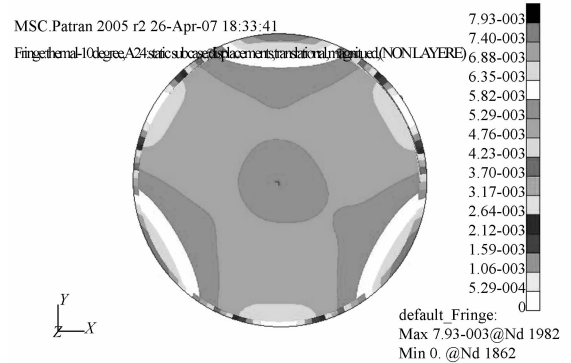


图 9 铍摆镜在 -10 °C 的变形
Fig. 9 Deformation of -10 °C

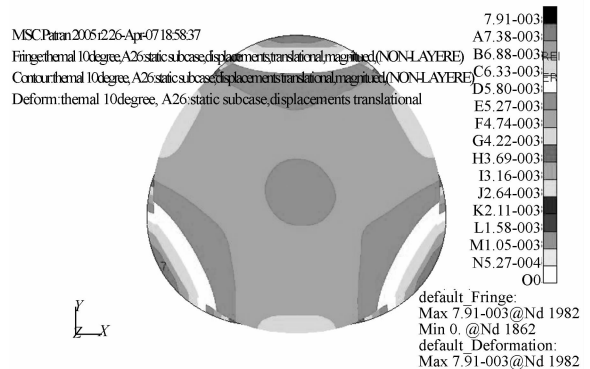


图 10 铍摆镜在 10 °C 的变形
Fig. 10 Deformation of 10 °C

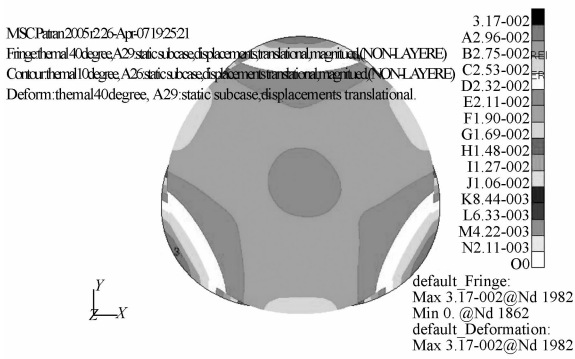


图 11 铍摆镜在 40 °C 的变形

Fig. 11 Deformation of 40 °C

表 5 铍和 SiC 摆镜镜体温度为 -40~70 °C 的分析结果
Tab. 5 Analysis results of Be and SiC tip-tilt mirrors under -40~70 °C

摆镜材料	温度/载荷	等效应力/Pa		面形变化/mm		镜面 RMS /mm
		最大	最小	最大	最小	
铍	-40 °C	3.31 × 10 ⁸	1.30 × 10 ⁶	-3.34 × 10 ⁻³	-2.14 × 10 ⁻²	3.39 × 10 ⁻³
碳化硅	-40 °C	7.69 × 10 ⁷	7.43 × 10 ⁴	2.97 × 10 ⁻³	-4.16 × 10 ⁻³	1.61 × 10 ⁻³
铍	-20 °C	1.66 × 10 ⁸	6.47 × 10 ⁵	-1.67 × 10 ⁻³	-1.07 × 10 ⁻²	1.69 × 10 ⁻³
铍	-10 °C	8.37 × 10 ⁷	3.22 × 10 ⁵	-8.40 × 10 ⁻⁴	-5.36 × 10 ⁻³	8.47 × 10 ⁻⁴
碳化硅	-10 °C	2.00 × 10 ⁷	1.99 × 10 ⁴	7.28 × 10 ⁻⁴	-1.06 × 10 ⁻³	4.03 × 10 ⁻⁴
铍	0 °C	2.67 × 10 ⁶	0	-1.10 × 10 ⁻⁵	-2.71 × 10 ⁻²	2.10 × 10 ⁻⁶
铍	10 °C	8.11 × 10 ⁷	3.28 × 10 ⁵	5.32 × 10 ⁻³	8.18 × 10 ⁻⁴	8.46 × 10 ⁻⁴
碳化硅	10 °C	2.05 × 10 ⁷	1.40 × 10 ⁴	1.01 × 10 ⁻³	-7.67 × 10 ⁻⁴	4.01 × 10 ⁻⁴
铍	20 °C	1.63 × 10 ⁸	6.53 × 10 ⁵	1.07 × 10 ⁻²	1.65 × 10 ⁻³	1.69 × 10 ⁻³
铍	40 °C	3.28 × 10 ⁸	1.30 × 10 ⁶	2.13 × 10 ⁻²	3.30 × 10 ⁻³	3.39 × 10 ⁻³
碳化硅	40 °C	7.84 × 10 ⁷	7.34 × 10 ⁴	4.11 × 10 ⁻³	-3.01 × 10 ⁻³	1.61 × 10 ⁻³
铍	60 °C	4.93 × 10 ⁸	1.95 × 10 ⁶	3.20 × 10 ⁻²	4.96 × 10 ⁻³	5.08 × 10 ⁻³
铍	70 °C	5.75 × 10 ⁸	2.28 × 10 ⁶	3.73 × 10 ⁻²	5.79 × 10 ⁻³	5.92 × 10 ⁻³
碳化硅	70 °C	1.36 × 10 ⁸	1.29 × 10 ⁵	7.21 × 10 ⁻³	5.25 × 10 ⁻³	2.82 × 10 ⁻³

摆镜材料可以承受以上温度载荷。摆镜 x 或 y 方向的变形量相近。对于同结构 SiC 摆镜其温度载荷为 -40 °C、-10 °C、10 °C、40 °C、70 °C 进行了有限元分析。由于铍材的热学性能稍劣于 SiC 材料,在摆镜承受温度载荷时,铍摆镜所表现出来的力学性能就稍劣于同结构 SiC 材料摆镜。

3.3.3 铍材与 SiC 作为摆镜材料的结果分析与铍摆镜的研制

为了进一步认识铍与 SiC 作为摆镜材料的力学与热学性能,进行了铍摆镜与同结构 SiC 摆镜力学性能对比,同时掌握了 SiC 摆镜承受惯性载荷和温度载荷时的内部应力分布和面形情况。由于铍材在镜面材料中具有优异的力学性能,当铍摆镜受到惯性载荷时,其力学性能优于同结构 SiC 摆镜。而从铍材与 SiC 材料的热学性能看,由于铍材的热学性能稍劣于 SiC 材料,在摆镜承受温度载荷时,铍摆镜的力学性能就稍劣于同结构 SiC 材料摆镜。分析结果符合两种镜面材料性能特点。而从摆镜的应用环境出发,相关跟踪器位于空间环境并具有温控措施,温度环境能够得到有效保障,两种材料均满足技术要求,但结合表 3 可以看出,铍摆镜的谐振频率较高,可以提高系统有效带宽,其质量仅是同结构 SiC 摆镜的 51.25%,其转动惯量仅是同结构 SiC 摆镜的 55.55%,对于摆镜支撑系统设计和质量要求很高的空间天文仪器,铍材占据明显优势。所以对于空间天文仪器中应用力学性能尤为重要的镜面材料来说,铍材无疑是相关跟踪器摆镜材料乃至空间天文仪器镜面材料的首选。

根据摆镜优化结果和研制方案,进行铍摆镜研制,已经利用热等静压工艺和机械加工得到铍摆镜镜坯,如图 12 所示,目前正在进行光学加工,相关实验和检测结果将在后续工作中给出。

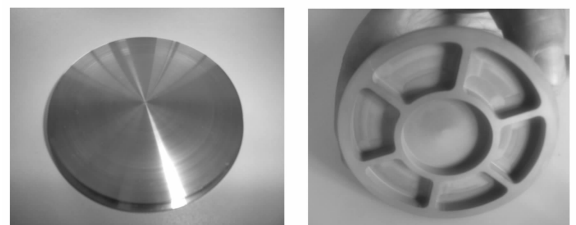


图 12 铍摆镜镜坯

Fig. 12 Substrates of beryllium tip-tilt mirror

4 结 论

本文针对空间太阳望远镜相关跟踪器中的摆镜进行了材料优选,建立了有限元模型,进行了力学分析,并对铍摆镜受到惯性载荷和温度载荷作用下的状况进行了有限元分析,同时与同结构 SiC 材料摆镜进行力学性能类比。结果表明,铍摆镜分析结果达到相关跟踪系统应用技术水平,其面形精度:RMS 为 2.18×10^{-6} mm, PV 为 1.69×10^{-5} mm,一阶谐振频率为 1 609 Hz。在

空间特殊的工作环境中,受到惯性载荷和温度载荷作用时引起镜体内部应力小于材料本身的屈服强度,说明铍材可以承受上述载荷。两种载荷相比,温度载荷对摆镜面形的影响较大。所以,铍摆镜的综合性能优于 SiC 摆镜,铍作为相关跟踪器摆镜材料更具优势。进行了铍摆镜研制,已经完成铍摆镜镜坯,正在光学加工。本文不仅对空间太阳望远镜相关跟踪器中摆镜进行了分析和研制,也为铍镜应用到我国空间天文仪器中提供了重要参考。

参考文献:

- [1] SEERY B D. The James Webb Space Telescope (JWST): Hubble's scientific and technological successor[J]. *SPIE*, 2003, 4850: 170-178.
- [2] STAHL H P, RADACSI D. Fabrication and testing of the ITTT beryllium secondary mirror [J]. *SPIE*, 1977, 3134: 62-71.
- [3] JAMES L B, MILUTIN P. Design and analysis of a beryllium three-mirror anastigmat telescope for the Japanese Advanced Meteorological Imager (JAMI) [J]. *SPIE*, 2005, 5658: 91-102.
- [4] CAYREL M. Use of beryllium for the VLT secondary mirror [J]. *SPIE*, 1996, 2857: 86-98.
- [5] 郑亲波,胥学荣.风云一号气象卫星遥感仪器的光学设计[J]. *红外研究*, 1990, 9 (2): 91-98.
ZHENG Q B, XU X R. Optical design of VHRSR for FY-1 meteorological satellite [J]. *Chin. J. Infrared Res.*, 1990, 9 (2): 91-98. (in Chinese)
- [6] 李大耀.资源一号卫星的红外相机和 CCD 相机[J]. *中国航天*, 1999, 11: 13-15.
LI D Y. Infrared and CCD camera of ZY-1 satellite [J]. *Aerospace China*, 1999, 11: 13-15. (in Chinese)
- [7] 葉虎勇,陈桂林.地球同步轨道三轴稳定卫星的扫描镜设计及考虑[J]. *红外技术*, 2003, 25(6): 1-9.
YE H Y, CHEN G L. A real-time image processing system based on TMS320C6201 [J]. *Infrared Technology*, 2003, 25(6): 1-9. (in Chinese)
- [8] 张锐.空间化反射镜及其支撑系统的研究[D].中国科学院研究生院博士论文,2006.
ZHANG R. *Researches on space mirror and supporting system* [D]. Doctoral Dissertation of Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [9] 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(5): 69-80.
WU Q W. Light-weight technology and its application of primary mirror in space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(5): 69-80. (in Chinese)
- [10] 宋春涛,李英才.空间指向摆镜的轻量化研究[J]. *光子学报*, 1998, 27(4): 377-381.
SONG CH T, LI Y C. Design of space lightweight pointing mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, 27(4): 377-381. (in Chinese)

- [11] ZHANG X J, ZHANG Z G, ZHENG L G, *et al.*. Manufacturing and testing SiC aspherical mirrors in space telescopes [J]. *SPIE*, 2005, 6024: 1-5.
- [12] 吴清彬,陈时锦,董中. 参数优化方法在轻质反射镜结构设计中的应用[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(5): 467-471.
WU Q B, CHEN SH J, DONG ZH. Optimization of parameters structural design of lightweight reflector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5): 467-471. (in Chinese)
- [13] 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.
ZHANG G, ZHAO W X. Analysis on structural parameters of light-weighted mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 48-53. (in Chinese)
- [14] 赵洪波,樊学武,李英才. 航天侦察系统中的碳化硅指向摆镜的有限元分析[J]. *光学技术*, 2003, 29(4): 387-390.
ZHAO H B, FAN X W, LI Y C. Finite elements analysis of the SiC pointer mirror in space scouting system [J]. *Optical Technology*, 2003, 29(4): 387-390. (in Chinese)
- [15] 蒋有谅. 有限元法基础[M]. 北京:国防工业出版社,1980: 145-147.
JIANG Y L. *Foundation of Finite Element* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1980: 145-147. (in Chinese)

作者简介:宋立强(1975—),男,吉林长春人,中国科学院国家天文台博士研究生,研究方向为空间天文仪器中的反射镜研制与结构分析方面的研究。E-mail:slqzhy@sina.com;slq@sst.bao.ac.cn

导师简介:杨世模(1954—),男,北京人,中国科学院国家天文台研究员,研究方向为空间天文仪器总体结构的设计与分析。E-mail:ysm@bao.ac.cn