

文章编号:1004-4213(2011)06-0933-4

温度和支撑方式对 1.2 m SiC 主镜面形的影响分析

王富国

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要:为了研究温度和支撑方式对大口径 SiC 主镜用于地基望远镜的影响,基于 1.2 m SiC 主镜建立了有限元模型,分析了主镜在被动支撑和自由膨胀时,恒定温度场,轴向温度梯度,径向温度梯度和内外温差等对主镜面形的影响.结果表明,存在温度梯度时,支撑方式影响不明显,无论是被动支撑还是自由膨胀,镜面面形均很大.在达到热平衡后,即稳态温度场下,支撑方式的影响明显,只有在主镜自由膨胀时,温度对主镜面形的影响比较小,镜面的 $RMS < 0.02 \text{ nm}/^\circ\text{C}$.因此如果主镜采用柔性支撑或浮动支撑方式,大口径 SiC 主镜可以应用在地基望远镜中.

关键词:温度;支撑方式;SiC 主镜;面形

中图分类号:TH745

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114006.0933

0 引言

主镜作为望远镜的核心部件,其综合性能的优劣直接影响望远镜的成像质量、使用寿命和可靠性等.而主镜材料是影响主镜性能的重要因素之一,特别是地基望远镜主镜的设计趋势是大口径、轻量化,同时要求主镜材料具有优异的机械性能和物理性能.所以,选择综合性能优异的主镜材料对地基大口径望远镜来说具有重要意义^[1-4].

碳化硅材料由于具有比刚度大、导热性好、优异的光学性能和易于轻量化等优点,已经在高分辨力空间遥感器中得到应用,但口径一般较小,并且处于一个封闭的环境中,容易进行热控^[5-8].近年来,随着制备 SiC 反射镜工艺的进步,国外已经能够制备轻量化的大口径 SiC 反射镜.例如已经由欧空局反射升空的 Herschel 全 SiC 红外太空望远镜系统^[9],其主镜由 12 个外径为 3.5 m、内径约为 120 mm 的烧结 SiC 扇形体焊接而成,结构质量仅 210 kg.

但是作为地基大口径望远镜的主镜材料,国内外报道较少.美国 2.7 m 望远镜 SOFIA 的主镜曾考虑采用由俄罗斯研制的 SiC 材料^[10],后来由于人为的原因,该主镜没有研制成功.而且地基望远镜观

测时是裸露在空气中的,望远镜从封闭在圆顶中到裸露在空气中,存在着温度的变化,这种温度的差异对主镜面形的影响如何直接决定了 SiC 主镜能否应用于地基大口径望远镜中.如果采用类似空间望远镜的热控系统,不可避免的对镜面视宁度和圆顶视宁度带来不利影响.

为了论证大口径 SiC 材料的主镜能否应用于地基大口径望远镜中,必须进行充分的分析.本文基于长春光机所自行研制的 1.2 m SiC 主镜,详细分析了温度和支撑方式对主镜面形的影响,论证了 SiC 主镜应用在地基大口径望远镜中的可行性,对支撑方式提出了合理化建议.

1 主镜参数和有限元模型

本文中分析的 SiC 主镜见文献[1],该 SiC 材料的主镜也是国内制造的最大口径的 SiC 主镜,其制造方法不同于 Herschel 的焊接工艺,而是采用反应烧结法制造.主镜的形状为平凹型,边缘厚度 130 mm,曲率半径 3 600 mm,中心孔直径 300 mm,面板厚度 10 mm,筋厚 6 mm,重量 122.8 Kg,轻量化率 66.25%,设计参量和设计过程见文献[1],SiC 材料的物理性质如表 1.

表 1 SiC 主镜材料的性能参量
Table 1 SiC Primary mirror material attribute

Material	Density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Young's modulus/(GPa)	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion/ $(10^{-6} \text{ mm} \cdot \text{K}^{-1})$	Coefficient of heat conduction/($\text{W} \cdot \text{m} \cdot \text{K}$)
SiC	3.05	392	0.25	2.6	156

第一作者:王富国(1979—),男,助理研究员,博士,主要研究方向为光机系统设计和有限元仿真. Email:wfg109@163.com
收稿日期:2010-08-10;修回日期:2010-10-06

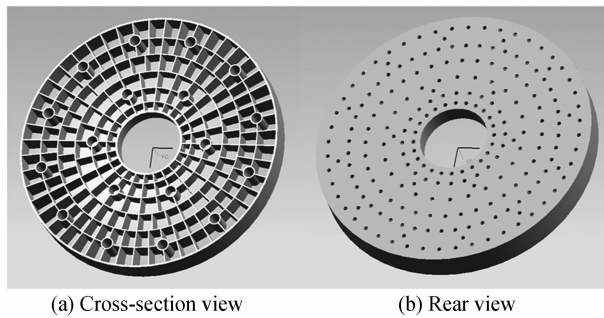


图 1 1.2 m SiC 主镜结构示意图

Fig. 1 Structural sketch of lightweight primary mirror

本文利用有限元软件 Patran 建立了主镜的有限元模型,模型采用壳单元和手工划分网格,为了提高分析准确度,采用比较大的网格密度,共划分四边形和三角形单元 36 252 个,图 2 为有限元模型。

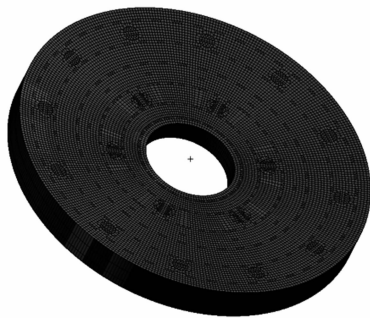


图 2 主镜的有限元模型

Fig. 2 The primary mirror finite element model

2 稳态温度场对主镜面形的影响

稳态温度场指主镜处于一个恒定的温度场中,主镜已经达到热平衡状态,由于不存在温差,所以这种温度状态下对主镜面形的影响主要是主镜整体变形。

为了模拟主镜在被动支撑和自由膨胀时的状态,约束工况如下:被动支撑时,背部十八点全部约束;自由膨胀时,约束主镜背部十八点在光轴方向(y 向)的位移,对主镜 x 轴上的点约束 z 向位移,对主镜 z 轴上的点约束 x 向位移。需要说明的是,主镜必须关于 x 轴和 z 轴对称。

分析时不考虑重力对主镜面形的影响,材料特性为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的特性,即 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为参考温度,主镜不受温度影响,为理想面形。分别分析了主镜在几种温度下的镜面变形,计算结果如表 2。

从分析结果可以看出,在恒定温差场下,支撑方式对主镜面形的影响非常大,被动支撑方式由于完全限制了主镜的变形,造成了主镜的面形受温度影响非常明显, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度变化就可以造成主镜面形变化 $\lambda/6$,对于成像系统来说,这是不可以使用的。但是如果让主镜尽量自由的膨胀,这样温度对主镜面形的影响就非常小,可以忽略不计。

表 2 不同稳态温度下的镜面变形

Table 2 The primary mirror surface figure of different steady state temperature field

Steady temperature field/ $^{\circ}\text{C}$	Passive support		Free expansion	
	Pv/nm	Rms/nm	v/nm	Rms/nm
30	414.9	52.4	0.081 3	0.012 9
25	203.8	26.1	0.040 6	0.006 5
0	851.8	106.2	0.162 6	0.025 9
-10	1 274.1	158.9	0.244 2	0.038 9
-20	1 665.1	208.5	0.325 4	0.051 9
-30	2 061.9	261	0.407 1	0.066 1

3 温度梯度对主镜面形的影响

当镜子的表面和内部存在温差时,内外部温差产生的应力能使镜面变形并改变表面的曲率半径,尤其是靠近外部的区域,会出现所谓的“塌边”或“翘边”的现象,这一温度效应称为“边缘效应”。马克苏托夫给出了一个经验公式 $\phi = E \cdot q / \alpha$, E 为材料的弹性模量; q 为导热率; α 为热胀系数。 ϕ 是表征材料在减小边缘效应方面的一个参数, ϕ 值越大,相应的材料在减小边缘效应方面对镜面越有利。

当望远镜从封闭在圆顶中到裸露在大气中,由于圆顶内和外部大气温度的不一致,在主镜镜体中可能会存在轴向温度梯度、径向温度梯度和内外温差等,分别分析了三种不同温度梯度对主镜面形的影响。

3.1 轴向温度梯度的影响

当主镜从圆顶中到裸露在大气中,由于温度不一致,可能导致主镜存在轴向、径向和内外温差,这些温差肯定会对主镜的面形造成影响。

设主镜在光轴方向上两表面存在温度梯度,先把主镜假设为平面镜考虑,此时左右两边直径差 $\Delta D = D\alpha\Delta T$,主镜弯曲的曲率半径为 $R = d / (\alpha\Delta T)$,矢高为 $\Delta H = D^2\alpha\Delta T / (8d)$,其中 D 为主镜的直径, d 为主镜的厚度, ΔT 为两表面的温差, α 为主镜的热膨胀系数。

对于焦距为 f 的球面镜和抛物镜,矢高 $H = D^2 / (16f)$ 。对矢高求导,并代入上式 ΔH 中,得: $\Delta f = 2f^2\alpha\Delta T / d$ 。由此可知,当主镜的两边存在温差时,会使主镜的曲率半径和焦距发生变化。由于主镜所处的周围环境不同程度地存在温度的不均匀性,从而使得主镜曲率的变化在镜面上各点不一致,即使很小的曲率不一致性也会引起显著的像散。主镜直径越大、膨胀系数越大、相对厚度越小、温差越大,对像质的影响越大^[2]。

利用建立的有限元模型,分析了主镜 4 °C 的轴向温差,被动支撑和自由膨胀时的面形,约束条件同上,表 3 为不同轴向温差下的镜面变形.

表 3 不同轴向温差下的镜面变形

Table3 The primary mirror surface figure of different axial direction temperature gradient

Axial direction temperature gradient/(°C)	Temperature distribution/(°C)	Passive support		Free expansion	
		Pv/nm	Rms/nm	Pv/nm	Rms/nm
1	Optical surface 20.5	517.5	147.58	579.3	160.7
	rear surface 19.5				
2	Optical surface 21	716.62	293.68	1 159.7	321.4
	rear surface 19				
3	Optical surface 21	1 707.12	441.11	1 739.1	482.1
	rear surface 18				
4	Optical surface 22	2 071.76	590.33	3 219.6	642.8
	rear surface 18				

3.2 径向温度梯度的影响

主镜径向温度梯度是指主镜在半径方向上存在温度差,明显表现在主镜内外径上有温差.这种情况下温度梯度对主镜的影响与主镜的安装结构和主镜所处的环境有关,对于背部支撑的主镜这种象差较为严重,可能会导致像散和彗差等像差,径向温度梯

度对主镜的影响既复杂又难以控制,因此工程设计时必须对其给以高度重视.

利用建立的有限元模型,分析了主镜 4°C 的径向温差时,被动支撑和自由膨胀时的面形,约束条件同上,表 4 为不同径向温差下的镜面变形.

表 4 不同径向温差下的镜面变形

Table 4 The primary mirror surface figure of different radial direction temperature gradient

Radial direction temperature gradient/(°C)	Temperature distribution/(°C)	Passive support		Free expansion	
		Pv/nm	Rms/nm	Pv/nm	Rms/nm
1	Inner ring 20	170.05	37.65	176.50	37.35
	external ring 19				
2	Inner ring 19	341.65	75.42	350.80	74.71
	external ring 21				
3	Inner ring 22	529.36	113.32	527.27	112.65
	external ring 19				
4	Inner ring 23	669.90	151.17	702.39	149.72
	external ring 19				

3.3 内外温度梯度对主镜面形的影响

主镜的半径和厚度都比较大,可能同时存在轴向温差和径向温差,综合表现的结果就是主镜的外表面和内部存在着温差,这种温差会导致主镜不均

匀的变形,矢高和半径越大,变形越明显.

利用建立的有限元模型,分析了主镜几种内外温差时,被动支撑和自由膨胀时的面形,约束条件同上.

表 5 内外温度梯度下的镜面变形

Table 5 The primary mirror surface figure of different internal-external temperature gradient

Internal-external temperature gradient/(°C)	Temperature distribution/(°C)	Passive support		Free expansion	
		Pv/nm	Rms/nm	Pv/nm	Rms/nm
0.5	Exterior surface 20.5	93.18	17.8	118.28	20.56
	inner 19				
1	Exterior surface 20.5	186.8	35.7	236.66	41.12
	inner 19.5				
2	Exterior surface 21	373.65	71.4	475.03	82.23
	inner 19				
3	Exterior surface 21	559.07	107.2	709.98	123.36
	inner 18				

从分析结果看,无论是被动支撑还是自由膨胀,温度梯度对主镜的面形影响均比较大,而且这种变形不是支撑方式所带来的,而是温度梯度造成的影响,这种温度梯度直接造成主镜不可以使用.如果采用热

控的方式,可能会造成主镜的镜面视宁度和圆顶视宁度都变坏,对像质的影响很明显.由于 SiC 材料的导热性好,达到热平衡的时间短,可以在主镜达到热平衡后再进行观测,就可以克服温度梯度的影响.

4 结论

在稳态温度场中,支撑方式对主镜面形的影响非常的明显,如果支撑方式不当,限制主镜的膨胀,特别是径向方向的膨胀,会使主镜的面形很差,不能使用.所以对没有采用热控的地基大口径 SiC 主镜支撑时,不能采用被动支撑的方式,应该采用浮动支撑或者柔性支撑,并且在支撑材料的选择上尽量使之与主镜的热膨胀系数相匹配,这样可以尽量使主镜自由膨胀,减小由于支撑方式带来的对主镜面形的影响.

在主镜存在轴向和内外温差时,被动式支撑和自由膨胀时,对主镜面形的影响基本一致,说明存在温差时,支撑方式不是影响面形的重要因素,而且存在无论何种温度梯度,主镜的面形均不理想,需要等到主镜达到热平衡后才可以应用.

对于不采用热控措施的 1.2 m SiC 主镜,达到热平衡后,在采取柔性支撑或者浮动支撑的情况下,可以应用在地基大口径望远镜中.

参考文献

- [1] WANG Fu-guo, YANG Hong-bo, ZHAO Wen-xing, *et al.* Lightweight design and analysis for a 1.2 m SiC primary mirror[J]. *Optics And Precision Engineering*, 2009, **17**(1): 212-221.
王富国,杨洪波,赵文兴,等. 1.2 m SiC 主镜轻量化设计与分析[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(1): 212-221.
- [2] WU Qing-wen, LU E, WANG Jia-qi, *et al.* A study on static thermal properties of primary mirror[J]. *Optics And Precision Engineering*, 1996, **4**(6): 47-53.
吴清文,卢锴,王家骐,等. 主镜稳定温度场特性分析[J]. *光学精密工程*, 1996, **4**(6): 47-53.
- [3] CHEN Rong-li, GENG Li-yin, MA Zhen, *et al.* Thermal analysis and design for high resolution space telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 154-157.
陈荣利,耿利寅,马臻,等. 空间相机的热分析和热设计[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1): 154-157.
- [4] ZHANG Xu-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.
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.
- [5] WANG Fu-guo, YANG Hong-bo, ZHAO Wen-xing, *et al.* Lightweight design and analysis for a 1.2m SiC primary mirror [J]. *Optics And Precision Engineering*, 2009, **17**(1): 212-221.
王富国,杨洪波,赵文兴,等. 1.2 米 SiC 主镜轻量化设计与分析[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(1): 212-221.
- [6] SHEN Zhen-feng, GAO Jin-song, CHEN Hong, *et al.* Performance and reliability evaluation for the surface modification of space used silicon carbide mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2353-2358.
申振峰,高劲松,陈红,等. 空间用 SiC 反射镜表面改性的性能和可靠性评估[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2353-2358.
- [7] YANG Yi, ZHANG Wei, CHEN Shi-jin. Study on the thermal optics property of primary mirror applied on a space telescope[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(1): 144-147.
杨怿,张伟,陈时锦. 空间望远镜主镜的热光学特性分析[J]. *光学技术*, 2006, **32**(1): 144-147.
- [8] GU Bo-zhong, ZUO Heng. The thermal analysis of the primary mirror of 1m infrared solar telescope at Yunnan observatory[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2008, **5**(1): 83-90.
顾伯忠,左恒. 云南天文台 1 m 红外望远镜的主镜热力学分析[J]. *天文研究与技术*, 2008, **5**(1): 83-90.
- [9] TOULEMONT Y, PASSVOGEL T, PILLBRAT G, *et al.* The 3.5 m all SiC telescope for HERSCHEL[C]. *SPIE*, 2004, **5487**: 1119-1128.
- [10] PETROVSKY G T, TOLSTOY M N, LJUBARSKY S V, *et al.* A 2.7-meter-diameter silicon carbide primary mirror for the SOFIA telescope[J]. *SPIE*, 1994, **2199**: 1119-1128.

Study on the Influence of Temperature and Support Style to the 1.2m SiC Primary Mirror Surface Figure

Wang Fu-guo

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

Abstract: A 1.2 m SiC primary mirror FEA model was built to analyze temperature and support style effects on the large aperture SiC primary mirror, which was applied to the ground based on telescope. With the primary mirror in passive support and free expansion, influences of steady state temperature field, axial direction temperature gradient, radial direction temperature gradient, and internal-external temperature gradient to primary mirror surface figure were analyzed. The result indicates that the influences of the support style are not obvious, whether passive support or free expansion, and the primary mirror surface figure is big with temperature gradient. When achieving heat balance, the influence of the support style is obvious only when the primary mirror free expand, and the temperature influence is small, surface figure $RMS < 0.02 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. If the primary mirror adopts flexibility or floating support style, the large aperture SiC primary mirror can be applied to the ground based telescope.

Key words: Temperature; Support style; SiC primary mirror; Surface figure