**文章编号** 1004-924X(2017)10-2607-07

# 4 m 口径 SiC 反射镜原位检测用静压支撑系统

胡海飞<sup>1,2</sup>\*,赵宏伟<sup>2</sup>,刘振宇<sup>1</sup>,罗 霄<sup>1</sup>,张学军<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.吉林大学 机械科学与工程学院,吉林长春 130025)

摘要:研制了一套用于4mSiC反射镜原位检测的静压支撑系统,以降低超大口径SiC反射镜离线检测的风险,提高其制造效率。首先,推导了单元刚度的解析式,确定了其中关键因素;然后,对支撑单元进行抽样测试,结合解析式预测了支 撑群组中单元的工作刚度。最后,通过密封性测试和反射镜原位检测,验证了支撑系统的稳定性;通过有限元模拟,计算 了系统的重力卸载面形精度。结果表明:5个单元连组时,单元刚度约为1.9 kN/mm,刚度值分布在±3%误差区间;独 立单元刚度可高至15 kN/mm;3种分组单元刚度预测值分别为1.7,1.1和0.8 kN/mm。支撑系统空载时管路压强变 化缓慢,表明密封性良好;用该系统支撑4m反射镜时,11天内高度绝对变化量小于50 μm,相对变化量小于20 μm。54 个单元刚度随机分布时,镜面面形高阶残差(RMS)为20 nm。提出的系统基本满足原位检测的稳定性和精度要求。 关键词:超大SiC反射镜;原位光学检测;静压支撑系统;刚度差异;面形精度 中图分类号;TH743;TH703 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20172510.2607

# Hydrostatic support system for in-situ optical testing of a 4 m aperture SiC mirror

HU Hai-fei<sup>1,2\*</sup>, ZHAO Hong-wei<sup>2</sup>, LIU Zhen-yu<sup>1</sup>, LUO Xiao<sup>1</sup>, ZHANG Xue-jun<sup>1</sup>

 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
 School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China) \* Corresponding author, E-mail: huf@ciomp.ac.cn

**Abstract**: A set of hydrostatic support system for a 4 m SiC mirror in-situ testing was designed to reduce the risk of ultra-large mirror off-line testing and to improve fabrication efficiency. Firstly, the analytical formula for calculating support stiffness was derived, and its main factor was found. Then, some support samples were tested, and the support stiffness of a single support unit in different groups was predicted by combining the sample results and analytical formula. Finally, the stability of the support system was evaluated by pressurization test and in-situ testing, and the mirror surface precision with its gravity offloaded by the support system was calculated by finite element simulation. Results show that the average stiffness is about 1.9 kN/mm with a relative difference among support units about 3% when 5 units are linked together, the stiffness for a single unit isolated is as high as 15

收稿日期:2017-06-02;修订日期:2017-06-22.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61210015, No. 61605202)

kN/mm, and 3 kinds of unit stiffness in the support system are 1.7, 1.1 and 0.8 kN/mm respectively. Moreover, pressurization test shows a slow pressure change, which indicates that the system is well sealed. When the hydrostatic system was used for a 4 m mirror, the height changes rise up and down within 50  $\mu$ m in 11 days, and the relative change is less than 20  $\mu$ m. When the mirror is supported on 54 units with stiffness difference by 3% randomly, the surface RMS is less than 20 nm. The proposed system meets the requirement of in-situ optical testing for precision and stability.

Key words: ultra-large SiC mirror; in-situ optical testing; hydrostatic support system; stiffness difference; figure accuracy

# 1 引 言

碳化硅(SiC)陶瓷作为光学反射镜介质材 料,具有较高的弹性模量、适中的密度、较小的热 膨胀系数和较高的导热系数,因此与传统反射镜 材料相比,SiC 具有较高的比刚度和热稳定 性<sup>[1-2]</sup>。经过多年的工艺研究和应用实践,SiC 已 普遍用作光学望远设备的反射镜材料。而人们为 了追求更高的相机分辨力和成像质量,不断提出 更大口径反射镜的需求,给 SiC 反射镜研制带来 了巨大挑战<sup>[2]</sup>。

目前,国外尺寸最大的 SiC 反射镜是焊接式 3.5 m 口径的 Herscher 红外望远镜主镜<sup>[3]</sup>,相关 发达国家针对大口径 SiC 反射镜均实行严格禁运 政策。我国在 SiC 反射镜方面经过多年的自主研 发,硕果累累,并于最近成功研制了世界上最大口 径的单体式 SiC 镜坯,其口径达到 4 m 量级<sup>[4]</sup>。 该 4 m SiC 反射镜目前已经完成镜面初加工,正 处于研磨-抛光阶段<sup>[5-8]</sup>。

传统的反射镜加工多采用离线检测方式,需 要频繁拆卸、移动和调整工件进行光学检测<sup>[9]</sup>。 当工件尺寸达到4m时,镜面单次加工周期长, 镜体转运、翻转和复位均极为困难,无法满足快速 精密制造的要求。传统的拆卸移动工件的检测方 式是阻碍数字化光学制造整体效率提高的主要原 因之一。而原位加工检测技术可使光学制造与检 测过程在同一设备上完成,工件经过1次安装便 可进行加工与测量工作,可避免重复定位误差,减 少生产辅助时间,提高了生产效率和加工精度。 在原位检测系统中往往不具备使用望远镜系统镜 室支撑的条件,只能单独研制一套简单、稳定而精 密的光学制造支撑系统<sup>[10-11]</sup>。借鉴在2m口径 轻量化 SiC 反射镜光学加工中获得的经验,本课 题组研制了一套 54 点静压支撑系统用于立式原 位光学检测,提供与镜室接近的轴向检测边界条 件。由于支撑点数迅速增多后支撑单元的生产和 组装过程更难控制,支撑单元的刚度差异对系统 性能的影响更为复杂。受双缸液压支撑刚度分析 的启发<sup>[12]</sup>,本文从理论上分析了单缸静压支撑刚 度的影响因素,进一步抽取了部分样品的刚度进 行测试,结合二者结果预测了工作群组中支撑单 元的实际刚度,考虑刚度差异后对支撑系统性能 进行评估,并讨论了制造支撑系统与镜室支撑系 统的切换关系。

## 2 系统集成

4 m 望远镜主镜的总体设计方案是 54 点液 压 whiffletree 支撑方案,每个液压单元额外并联 1 个支撑力精调机构,以实现实时的主动光学面 形校正;其中心两圈所有支点的支撑力相同,次外 圈支撑力相同,最外圈支撑力相同。考虑到实际 光学检测过程中,可能需要微调主镜姿态,设计出 用于 4 m 反射镜光学加工的静压支撑系统,如图 1 所示。支撑系统含 4 圈总共 54 个支撑单元,分 成 5 组:中心两圈连成一组;次外圈单独一组;最 外圈分成 3 组,以便在必要时对镜体进行姿态调 整,每组 8 个支撑单元,如图 1(a)所示。最外圈 分 3 组可实现镜体轴向位置和两向倾角微调。

在每个组中,第一个入口节点连接动力装置, 最后一个出口节点连接回收装置,节点之间安装 了一个快速插拔液压阀,以备某个节点出现故障 时便于维修和替换。安装和集成后的静压支撑系 统及4 m SiC 反射镜如图 1(b)所示。

静压支撑系统还是加工支撑系统的一部分, 在加工过程中的特性为:(1)支撑单元的轴向刚度 足以抵抗轴向加工载荷;(2)支撑单元无侧向刚



(a)静压管路连接方案

(a) Distribution and link scheme of hydrostatic support elements



(b)原位检测状态的 4 m SiC 反射镜(b)4 m SiC mirror at original state

图 1 用于 4m 反射镜加工检测的静压支撑系统

Fig. 1 Hydrostatic support system for fabrication and test of 4 m aperture SiC mirror

度,故加工支撑系统还包括一套侧限位系统;(3) 磨盘尺寸大于支撑跨距,后者又是轻量化 SiC 无 筋面板的数倍,在磨盘压力作用下的镜面变形(即 压印效应)主要取决于 SiC 轻量化面板的径厚 比——这一事实在此前 2 m SiC 反射镜的加工实 践中已被证实;(4)在最后的修形阶段,采用磁流 变、离子束等低应力抛光技术,可有效抑制压印效 应的幅值,实现 nm 精度的修形。

### 3 支撑刚度预测

#### 3.1 理论计算

图 2 为构成静压支撑系统的支撑单元的剖面 图。静压支撑缸体的工作半径为 R,膜片卷积宽 度为 C,膜片可拉伸部分总长为 l,膜厚为 t。 膜片承载产生工作压强 P 和张力 F 后,膜片



图 2 支撑单元剖面及其受力分析

Fig. 2 Cross-section and force analysis of support element

被拉伸了 dl,缸盖下降 ds,则在静压缸行程内,造 成的液体体积压缩量为:

$$\mathrm{d}V = \pi R^2 \,\mathrm{d}s - \pi RC \Big(\frac{\mathrm{d}s + \mathrm{d}l}{2}\Big). \tag{1}$$

静压支撑的刚度计算公式为:

$$S = \frac{dF}{ds} = \frac{\pi^2 R^2 (R - C) (R - C/2)}{V/K + \pi R C^2 l/4Et},$$
 (2)

其中:E为膜片的等效轴向弹性模量,K为液体介质的体积模量。当静压支撑缸体内部含气体时, 根据玻-马定律,在等温条件下气体常数  $P_0^*V_0^* = C$ ,工作压强造成的空气体积变化为:

$$\mathrm{d}V^{a} = V^{a} - V^{a}_{0} = \frac{P^{a}_{0}V^{a}_{0}}{P} - V^{a}_{0} = -\frac{\mathrm{d}P}{P}V^{a}_{0}.$$
 (3)

这部分体积被液体替代,此时对应的静压支 撑刚度为:

$$S = \frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}s} = \frac{\pi^2 R^2 (R - C) (R - C/2)}{V_{\mathrm{f}}/K + (\pi R C^2 l/4 E t + V_0^a/P)}.$$
 (4)

由式(4)可知,支撑刚度与以下因素有关:

(1) 静压缸结构的几何尺寸 R,C;

(2) 滚动膜片的长度 l、厚度 t 和弹性模量 E;

(3) 液压介质的密封体积  $V_{\rm f}$  和体积模量  $K_{\rm f}$ ;

(4) 液压介质的初始含气量 V<sup>8</sup> 和工作压强 P。

给定反射镜和管路连接方式,上述参数中只 有 *V*<sup>®</sup> 是未知的,可以通过试验进行反演。

3.2 工作刚度预测

为反演 V<sub>0</sub>,设计支撑单元的刚度测试试验, 如图 3(a)所示。回路中首尾相连串联了 5 个支 撑单元,测试条件与工作条件一致,具体为:(1)关 闭所有阀门获得确定的工作液体体积;(2)将试验 机横梁下压到工作载荷;(3)模拟加工中的典型工 况,18 s内加载到 500 N,对应试验机加载速率约 为 14  $\mu$ m/s,采样频率为 4 Hz。取力-变形曲线的 20%~40%段斜率拟合值作为刚度估计值,多次 测量取平均值后获得各个支撑单元的刚度如表 1 所示。



(a)**连组刚度测试** (a)Stiffness test



(b)Stiffness as a function of volume

图 3 支撑单元的刚度测试与预测

Fig. 3 Stiffness test and evaluation of support elements

单元	次数	刚度/	方差/	偏差/%
		$(N \cdot mm^{-1})$	$(N \cdot mm^{-1})$	
1	2	1 935	22	-0.5
2	4	1 978	56	1.7
3	5	1 918	14	-1.4
4	3	2 002	16	2.9
5	2	1 890	8	-2.7
均值		1944		

表1 支撑刚度测试结果 Tab.1 Result of stiffness test of support elements

从表1可以看到,5个支撑单元的刚度值比 较接近,最大为2002 N/mm,最小为1890 N/ mm,5个单元的刚度平均值为1944 N/mm,各支 撑刚度相对平均刚度的误差均在3%以内,具有 较好的一致性,将对均力型支撑系统产生积极 贡献。

进一步,取出其中的3号单元进行单独测试, 通过改变横梁初始力(对应不同初始压强),发现 其刚度值大约为8.7~16 kN/mm,如表2所示。 通过插值得到3号单元在工作载荷下的刚度约为 15 kN/mm。

表 2 单个支撑刚度随初始压强的变化

Tab. 2 Stiffnesses of single support element under different original pressures

<b>初始力</b> /N	刚度/(N•mm <sup>-1</sup> )
100	8 693
200	11 113
245	13 221
300	15 588
357	16 191

表 2 说明,相比 5 个支撑单元连组,单个支撑 单元的刚度高出一个数量级,且通过增加工作压 强可一定程度上提高结构的支撑刚度。为预测实 际工作条件下的支撑刚度,将各个参数的实测值 输入式(4),得到不同气体含量下支撑单元的刚 度,如图 3(b)所示。图中包括 3 号单元刚度值、5 个单元连组刚度值及相应的密封体积,可以发现 实测值与气体含量 0.24%的曲线吻合最好,推断 按现行工艺流程安装的液压管路的含气量约为 0.24%。据此得到外圈 3 组、每组 8 个支撑单元 的刚度预测值为 1.7 kN/mm,次外圈 12 个支撑 单元的刚度预测值为 1.1 kN/mm,最里圈和次里 圈支撑单元的刚度预测值为 0.8 kN/mm。

采用更小的气泡体积间隔可进行更细致的分 析,但意义不大。从图 3(b)可以看到,实际液体 中气体体积比约为 0.002,在几组支撑工作体积 下对应的刚度差异不大。由此可以预见,这种刚 度差异造成的支撑面形误差是微小的,主要为环 带形式,不会带来难以校正的大幅值高阶面形 误差。

# 4 性能评价

该静压支撑系统的性能主要体现为稳定性和 精度。其中稳定性与系统的密封性能有关,精度 与支撑系统的重力卸载精度有关。

#### 4.1 密封性/稳定性

空载情况下系统的密封性表现为管路压强随 时间的变化,加载情况下密封性则表现为工件的 姿态稳定程度。使用量程 100 kPa、C3 精度的 Rosemount 压力变送器跟踪管路的压强,得到支 撑系统的空载密封性,如图 4(a)所示。依据极个 别残次支撑单元样品的密封经验,若静压缸体的 密封性较差,管路压强将在几秒钟内迅速降至0~ 10 kPa,而由图 4(a)可见,对 9 个和 48 个支撑单 元分别连组测试时,连续测量 1~2 天,管路压强 变化均较为缓慢,且周围环境中无可见液体漏出, 证明密封性良好。



(a)空载管路密封性

(a)Pressure within D95 hydrostatic supports



(b)工件 11 天稳定性



图 4 静压支撑系统的密封性和稳定性

Fig. 4 Sealing and stability of hydrostatic support system

基于自研摆臂轮廓仪<sup>[13]</sup>的面形测量数据,取 出半径 2.02 m 处(精密铣磨特征面,不参与光学 加工)方位角分别为 0°,120°和 240°3 个控制点的 镜面坐标,跟踪工件在 11 天内的姿态稳定性,如 图 4(b)所示。该支撑系统支撑状态下 4 m SiC 反射镜 11 天的镜体绝对高度变化小于 50  $\mu$ m,镜 面相对变化小于 20  $\mu$ m,满足光学检测的工件稳 定性要求。

#### 4.2 支撑精度

基于 MSC. Patran 建立的 4 m SiC 反射镜的 有限元模型如图 5 所示,其中静压支撑单元用 54 个 CBUSH 单元模拟,整个模型总计 29 286 个单 元,25 278 个节点,立式检测中镜体承受轴向 重力。



**图** 5 4m SiC 反射镜的有限元模型



CBUSH 单元刚度的选取对于面形有着重要 的影响,计算支撑刚度按前述相对误差 $\pm 3\%$ 的随 机分布情形,得到的面形拟合结果如图 6 所示。 幅值最大的 4 阶像差均为回转对称形式和低阶像 散,幅值在 100 nm 以内,可由镜室主动光学系统 校正<sup>[5-6]</sup>。扣除最大的 4 阶 Zernike 形式的面形 误差后,相应的面形误差 RMS 为 20 nm,约为  $\lambda/32$ ,略高于要求的  $\lambda/40$ 。

管路连接方案依总体设计方案要求而定,并 适当考虑了镜体光学加工和检测的实际情况,客 观上又有效利用了联组误差平均效应。从图 3(b)可见,多个支撑单元互联会显著增加液压介 质的体积,匀化气泡量、零部件制造误差和膜片拉 伸模量差异对支撑刚度的影响。当54个支撑单 元刚度一致时,面形误差对支撑刚度不敏感,镜面 的支撑面形 RMS 为17 nm,这是支撑系统的性能



(a)FEA 面形拟合结果

(a)Fitting result of Finite Element Analysis(FEA)



(b)校正最大的4种误差
(b)Surface profile after aberration correction
图 6 原位检测静压支撑系统的支撑精度
Fig. 6 Accuracy of hydrostactic support system

极限。图 6(b)假设的±3%随机分布误差是根据 实测的 5 个支撑联组测试结果推断的,实际联组

#### 参考文献:

- [1] 赵文兴,张舸. 特大尺寸轻型碳化硅镜坯烧结工艺研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(11): 2838-2842.
  ZHAO W X, ZHANG G. Study on sintering process of ultra-large-scale lightweight SiC mirror blank[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(11): 2838-2842. (in Chinese)
- [2] 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 X J, LI ZH L, ZHANG ZH Y. Space telecope aspherical mirror structure design based on SiC material[J]. In frared and Laser Engineering,

的支撑单元数最少为 8,分布误差会更小,支撑性 能介于这两种状态之间,即 17~20 nm RMS。由 此表明静压支撑系统具有较高的精度。

当面形精度进入亚波长量级时,可通过起吊 反射镜和旋转角度测量对比检测面形的方式验证 支撑系统的精度。由于超大工件的转运和起吊存 在巨大风险,该操作不能多次进行。

# 5 结 论

本文对 4 mSiC 主镜检测用静压支撑系统进 行了刚度分析和性能测试。试验和分析结果表 明:分组工作时各群组支撑单元的刚度预测值分 别为 1.7,1.1 和 0.8 kN/mm,个体之间的相对误 差约为 3%;支撑系统空载时管路压强变化缓慢, 密封性良好;承载 4 m SiC 反射镜时,镜体高度在 11 天内的绝对变化量小于 50  $\mu$ m,镜面相对变化 小于 20  $\mu$ m,满足光学检测的工件稳定性要求; 54 个支撑单元刚度随机分布条件下,镜体支撑面 形的高阶残差为 20 nm,易于镜室主动光学系统 开展校正<sup>[5-6]</sup>,必要时还可对给定的支撑刚度进行 布局优化以到达更好的支撑效果。

由于反应烧结成形后的 SiC 镜坯在整体尺寸 和细节特征上均与设计方案稍有偏差,因此在镜 面精抛光的中后期需要启用各单元的支撑力调节 功能,并在适当的时机变换镜体-支撑系统的相对 角度,然后进行精度验证。验收前还应对反射镜 进行镜室试装,启用镜室主动光学系统的高阶面 形校正功能,最终实现对加工质量的评估。

2007, 36(5): 577-582. (in Chinese)

- SEIN E, TOULEMONT Y, SAFA F, et al.. A *q*3.5m diameter SiC telescope for Herschel mission [J]. SPIE, 2003, 4850; 606-618.
- [4] ZHANG G, ZHAO W X, ZHAO R C, et al.. Fabricating large-scale mirrors using reaction-bonded silicon carbide[EB/OL]. SPIE Newsroom, http://spie.org/ newsroom/6582-fabricating-large-scale-mirrors-usingreaction-bonded-silicon-carbide ? ArticleID = x119942 & highlight=x2422. (2016-08-09).
- [5] LAN B, WU X X, LI J F, et al.. Influence of axial-force errors on the deformation of the 4 m lightweight mirror and its correction[J]. Applied Optics, 2017, 56(3): 611-619.

- [6] 吴小霞,李剑锋,宋淑梅,等.4 m SiC 轻量化主镜的主动支撑系统[J].光学精密工程,2014,22
  (9):2451-2457.
  WU X X, LI J F, SONG S M, *et al.*. Active support system for 4 m SiC lightweight primary mirror
  [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2451-2457. (in Chinese)
  [7] 李剑锋,吴小霞,邵亮.大口径 SiC 主镜主动支撑
- 研究及促动器设计[J]. 红外与激光工程,2016,45 (7):0718003.

LIJF, WUXX, SHAOL. Study on active support for large SiC primary mirror and force actuator design [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0718003. (in Chinese)

[8] 刘振宇,李龙响,曾雪峰,等.大口径非球面反射 镜误差分离组合加工技术[J].光学精密工程, 2017,25(4):813-819.

> LIU ZH Y, LI L X, ZENG X F, *et al.*. Fabrication of large aspheric mirror using multi-mode polishing based on error separation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 813-819. (in Chinese)

[9] 徐宏,关英俊. 空间相机 1 m 口径反射镜组件结构 设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6): 1488-1495.

> XU H, GUAN Y J. Structural design of 1 m diameter space mirror component of space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1488-1495.

#### 作者简介:



胡海飞(1984一),男,江西瑞金人,博士 研究生,助理研究员,2007 年于华中科 技大学获得学士学位,2010 年于大连 理工大学获得硕士学位,主要从事原位 光学检测支撑系统设计、光机结构集成 分析和优化等方面的研究。E-mail: huhf@ciomp.ac.cn (in Chinese)

 [10] 胡海飞,罗霄,辛宏伟,等. 超大口径光学制造均 力支撑布局优化[J]. 光学学报,2014,34(4):
 0422003.
 HU H F, LUO X, XIN H W, et al.. Layout op-

timization of equal-force supports for ultra-large optical fabrication[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0422003. (in Chinese)

- [11] 胡海飞,罗霄,戚二辉,等.超大口径光学制造的 静压支撑系统集成与控制[J].光学学报,2015, 35(8):0822001.
  HUHF,LUOX,QIEH,etal.. System integration and control of the hydrostatic supports for manufacturing ultra-large optics[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8):0822001. (in Chinese)
- [12] 李剑锋.望远镜主镜支撑用液压缸研究与设计 [J].长春理工大学学报:自然科学版,2014,37 (3):32-37.

LIJF. Research and design of cylinder used as the primary mirror support of telescope[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology:Natural Science Edition, 2014, 37(3): 32-37. (in Chinese)

[13] XIONG L, LUO X, LIU Z Y, et al.. Swing arm profilometer: analytical solutions of misalignment errors for testing axisymmetric optics[J]. Optical Engineering, 2016, 55(7): 074108.

#### 导师简介:



赵宏伟(1976一),男,吉林九台人,教授,博士生导师,主要从事原位测试原 理技术与仪器装备等方面的研究。Email:hwzhao@jlu.edu.cn