

大尺寸 SIC 空间反射镜离子束加工热效应分析与抑制

许艳军¹, 赵宇宸^{1,2}, 沙巍¹, 齐光¹

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 离子束加工中从离子源射出的高速离子撞击光学反射镜表面, 离子的动能转化成热能以及中和灯丝的热辐射作用, 使反射镜温度急剧升高。反射镜温升过快, 会导致柔性连接结构胶结部位发生不可逆的非线性变化, 并且热膨胀使实际加工位置和理想加工位置发生偏移, 增加了加工误差, 因此需要对加工过程中产生的热效应进行抑制。提出了通过规划加工路径和增强散热的方法, 增强加工过程的散热, 控制反射镜的温度。针对 600 mm×260 mm 的某主反射镜, 对增强散热前后不同加工路径的离子束加工进行了研究和有限元分析。分析表明: 加工路径的选择、增强散热对反射镜的温度分布有较大影响, 增强散热前, 采用横栅格加工路径, 反射镜最高温度为 35.8 ℃, 对应全口径 $PV = \lambda/5$, 采用分区纵栅格加工路径, 反射镜最高温度则达到 52 ℃, $PV = \lambda/10$ 。增强散热后, 不同加工路径离子束加工中, 反射镜温度均有所下降, 采用横向栅格加工路径反射镜温度最高为 28.2 ℃, 对应全口径 $PV = \lambda/20$, 采用分区纵栅格加工路径反射镜温度最高为 41 ℃, $PV = \lambda/7$ 。通过对比, 最终采用增强散热的横栅格加工路径的加工方式。对优选的加工路径进行了试验验证, 试验结果与仿真结果一致。结果表明: 优化加工路径, 增强散热措施能够抑制离子束加工的热效应, 为离子束加工热效应抑制提供理论基础。

关键词: 空间反射镜; 离子束加工; 热效应; 抑制

中图分类号: TH703 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)08-2556-06

Analysis and suppression of thermal effects of ion beam processing for large-size SIC space mirror

Xu Yanjun¹, Zhao Yuchen^{1,2}, Sha Wei¹, Qi Guang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The high-speed ion emits from the ion source during the ion beam processing impacts the optical mirror surface, thermal energy deposited inside the mirror which comes from kinetic energy and radiation of filament, makes the mirror temperature rise sharply. When the temperature of the mirror rises sharply, it could make cement of flexible components change irreversibly and nonlinearly, and the actual machining position is not the ideal position due to expansion, so it is necessary to suppress the thermal effect. A method of machining path planning and heat conduction enhancement was proposed to control the temperature of the mirror. For a primary mirror of 600 mm×260 mm, research and finite element

收稿日期: 2013-12-05; 修订日期: 2014-01-03

基金项目: 国家 863 计划(863-2-5-1-13B)

作者简介: 许艳军(1976-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事空间相机热设计及优化方面的研究。Email:xuyj@ciomp.ac.cn

analysis were carried out for ion beam processing with different processing paths before and after heat conduction enhancement, which shows that the path selection and heat conduction enhancement have serious effects to the mirror. Before heat conduction enhancement, the maximum temperature of the mirror was 35.8 °C, $PV = \lambda/5$ when horizontal grid-shape machining path was used, and the maximum temperature of the mirror was 52 °C, $PV = \lambda/10$ when vertical grid-shaped machining path was used. After heat conduction enhancement, the temperature of mirror about all machining path declined, the maximum temperature of the mirror was 28.2 °C, $PV = \lambda/20$, when horizontal grid-shape machining path was used and increasing the heat conduction path, the maximum temperature of the mirror was 52 °C, $PV = \lambda/10$, when vertical grid-shaped machining path was used. By contrast, the method of horizontal grid-shape machining path was used and the heat conduction path was increased finally. The optimal path was tested experimentally. The results agree with the simulative result, and it shows that optimizing the processing path and enhancing heat conduction measures can suppress the thermal effect of ion beam processing. This research provides theoretical basis for the thermal effects suppression of ion beam processing.

Key words: TMA space camera; ion beam processing; thermal effect; suppress

0 引言

航天技术的高速发展使空间光学遥感器的分辨率越来越高,对光学反射镜镜面形精度提出了更高的要求。传统的研抛加工方法对镜面的面形控制精度较差,且加工效率低,不足以满足面形加工速度及精度的需求。离子束加工是采用离子溅射效应形成高斯分布的去除函数^[1],再基于计算机辅助光学成型(CCOS)原理^[2]对光学反射镜面型误差进行修除的一种光学加工的主要手段^[3],由于其在加工过程中避免了与镜面直接接触,减少了接触应力,从而使镜面面形精度更高,且大大提高了工作效率。但是,离子束加工原理也决定了其在加工过程中会使镜面局部温度过高,导致镜子和与其相接部件产生热变形,影响镜面面形精度^[4]。因此在加工过程中必须对温度进行预测,并进行有效的控制。

文中通过对离子束热效应的机理研究,结合有限元分析方法,对加工过程中光学元件的温度进行预测,提出温度控制的方法,为更好地使用离子束技术加工光学反射镜面提供了理论和试验依据。

1 离子束加工的热效应产生机理

1.1 离子束加工

真空环境下,氩、氪等惰性气在离子源作用下产

生的离子束经过加速、聚焦并撞击到光学反射镜表面,使光学反射镜在粒子微观机械撞击下形成所需面形的加工方法叫做离子束加工^[5]。图 1 为离子束加工的原理示意图。离子束加工属于非接触式加工,反射镜不会产生接触应力,因此离子束加工时热效应归根结底是由温度升高导致的。高速离子撞击光学反射镜表面后,与镜子表面的原子发生能量转移,入射离子的大部分能量沉积在镜体内部,动能转化成热能,从而使光学反射镜加工部位温度迅速升高。光学反射镜局部温度过高,将会引起如下热效应:

(1) 反射镜与支撑结构通常使用柔性机构胶接,反射镜局部温度过高,会使内部胶层发生非线性变化^[6],影响镜面面形精度;

(2) 反射镜在加工过程中由于热量累积引起的温度升高,导致反射镜发生膨胀,使镜面实际的去除位置和理想去除位置发生偏移,导致面形精度将低。



图 1 离子束加工原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of ion beam processing

1.2 离子束加工热源

离子束加工是在真空环境下运行，反射镜与周围环境间的热传递只有热传导和热辐射两种方式，大量的试验表明，离子室内的工装及离子室结构热容较大，温度在加工过程中几乎不发生变化，因此视为热沉组件。

离子束加工的热量主要来源于三个方面：一是高速的离子与镜表面的原子发生能量转移，动能转化成热能；二是离子源上中和灯丝产生的热辐射。三是工装离子室壁对反射镜组件的辐射^[7]。

在离子束加工过程中，工装组件及离子束室热容较大，温度几乎不随加工过程改变，对反射镜组件的影响可忽略不计。

2 热效应抑制方法

2.1 规划加工路径

在离子束加工过程中，去除函数和驻留时间已通过内部软件进行优化和设置^[8]，较为固定。离子束加工路径决定了离子束与反射镜相互作用位置的排列关系，即反射镜上由于离子束作用产生热效应的区域的时间和空间分布。因此可以通过规划加工路径的方法来控制反射镜的温升速率。

目前，长条反射镜的离子束加工通常选择两种加工路径，一种是线性栅格加工路径如图 2(a)、(b)所示，一种是分区栅格加工路径如图 2(c)、(d)所示。其中

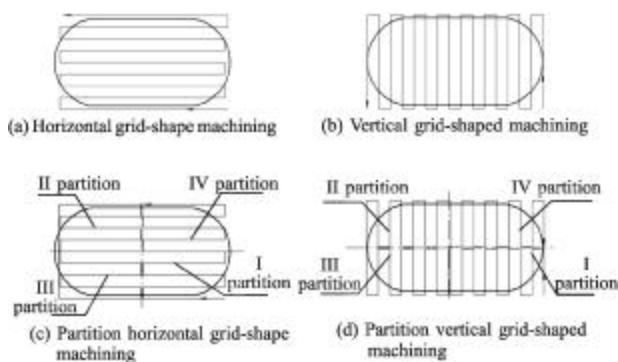


图 2 栅格式加工路径

Fig.2 Grid format processing path

图 2(a)为线性横栅格加工路径，图(b)为线性纵栅格加工路径，图(c)为分区横栅格加工路径，图(d)为分区纵栅格加工路径。不同的加工路径使得在加工过程中热量传递路径和方式都有所不同。文中拟通过计算不同

离子束加工路径下反射镜温度的变化，分析加工路径对反射镜面形的影响，进而找出最优加工路径。

2.2 增强外部导热

另一种抑制反射镜镜面温度的方法是增强镜面外部导热，使镜面热量快速导出。

反射镜与反射镜背板间通常采用柔性方式连接，如柔节等，这使得反射镜与外界间的导热路径变窄。另外，柔性结构通常采用热胀系数较低的钛合金材料或殷钢，导热系数较低，进一步限制了反射镜与背板的传热。因此，可采用铜带、热管等高导热材料将反射镜边缘与热沉相连接，增大接触面积的同时增加等效导热系数，迅速将离子束加工过程中产生的热量导至热沉，有效地降低反射镜热量累积，降低热效应对反射镜组件的影响。

热管是导热性能较好的一种导热材料，但受到弯曲半径、安装的限制，在试验中较少用到。

导热铜带导热系数较高，易于弯曲，不受结构、空间的限制，利用较为方便。

3 实际应用

文中以某型号主反射镜离子束加工为例，采用有限元数值计算，探讨离子束加工过程中温度抑制方法，分析加工路径和增强导热对离子束加工光学反射镜的镜面精度的影响。

某型号主镜组件如图 3 所示，主镜组件由主镜、主镜背板、柔性连接机构组成，主镜采用 Al/SiC 复合材料，主镜背板为高体分铝基复合材料(SiCp/Al)，柔性连接结构材料为钛合金。其材料属性如表 1 所示。离子束源距离主镜镜面 50 mm，功率为 170 W。扫描速率为 12 mm/s。



图 3 某主镜组件离子束加工图

Fig.3 Primary mirror components for ion beam processing

表1 主镜组件相关材料属性

Tab.1 Some related material properties about primary mirror components

Material	Heat sink	Flexible segments	Reflect mirror	Reflect mirror backboard
	Al	TC4	SiC	SiC _p /Al
Young's module E/Gpa	70	114	400	180
Coefficient of thermal expansion $\alpha(10^{-6}/K)$	22.50	9.10	2.4	8.00
Thermal conductivity $\lambda/W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	167.0	7.4	155.5	225.0

3.1 不同加工路径离子束加工有限元分析

利用有限元分析的方法,对不同加工路径的离子束加工过程温度变化进行仿真,图4~7为4种加工路径的同一位置温度-时间变化历程。从图中可以看出:加工路径不同,主镜的温度不同。4种加工路径中,热量集中最严重的为分区纵栅格加工,主镜温度最高为52℃,而且不同位置同一时刻的温度梯度较大;热量累积最小的为横栅格加工方式,主镜温度最高为35.8℃,在同一时刻不同位置的温度梯度较小。分区横栅格和纵栅格加工方式主镜温度36℃,42℃,温度梯度也较大。这说明加工路径对反射镜在离子束加工时的温度分布是有较大影响的。

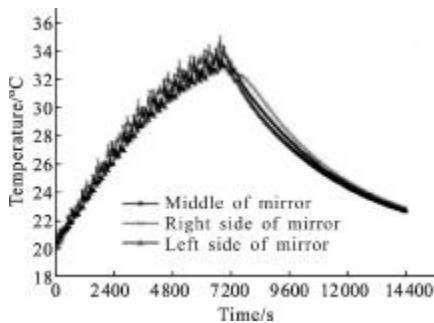


图4 横栅格加工主镜温度变化

Fig.4 Primary mirror temperature changes when use horizontal grid-shape machining is used

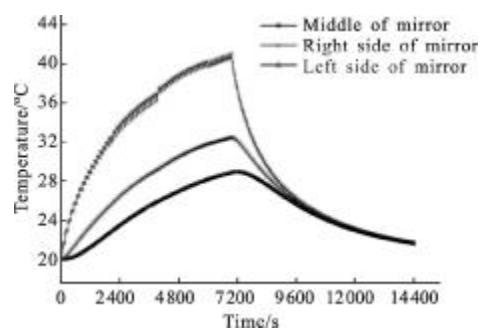


图5 纵栅格加工主镜温度变化

Fig.5 Primary mirror temperature changes when vertical grid-shaped machining path is used

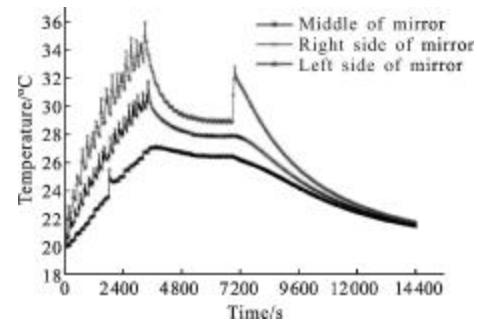


图6 分区横栅格加工主镜温度变化

Fig.6 Primary mirror temperature changes when partition horizontal grid-shape machining is used

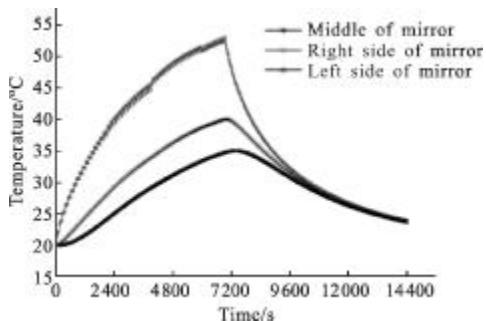


图7 分区纵栅格加工主镜温度变化

Fig.7 Primary mirror temperature changes when partition vertical grid-shaped machining path is used

将获得的最高温度时刻的温度场数据,作为计算主镜应力变化的输入条件,得到主镜组件的应力。结果如表2所示。从表2中可以看出:在没有增强导热措施的情况下,横栅格加工路径的离子束加工主镜镜面形最佳,PV值为 $\lambda/10$,RMS值为 $\lambda/50$,应力变化也较小,其他3种加工方式均比横栅格加工的镜面形及应力大。

表 2 增强导热前不同加工方式主镜面形及应力
Tab.2 Primary mirror surface shape and stresses
of different processing methods before
enhancing heat conduction

Machining path	Maximum temperature /°C	Surface change		Stress changes/MPa
		PV/nm	RMS/nm	
Horizontal grid-shape machining	35.8	$\lambda/10$	$\lambda/52$	0.17
Vertical grid-shaped machining	42.0	$\lambda/7$	$\lambda/37$	0.23
Partition horizontal grid-shape machining	36.0	$\lambda/10$	$\lambda/52$	0.17
Partition vertical grid-shaped machining	52.0	$\lambda/5$	$\lambda/26$	0.33

3.2 增强导热后离子束加工仿真计算

在选择加工路径的基础上,在镜子的周围增加高导热的铜带和热沉相连接,增加散热面积和导热途径。经有限元分析,分析结果如图 8~11 及表 3 所示。

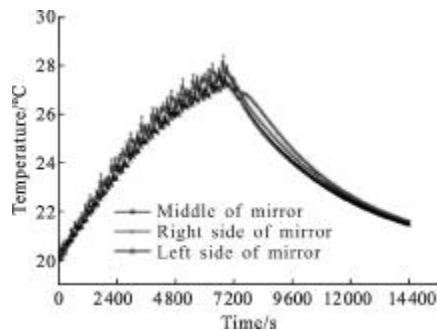


图 8 增强散热横栅格加工主镜温度变化

Fig.8 Primary mirror temperature changes when use enhance thermorytic horizontal grid-shape machining

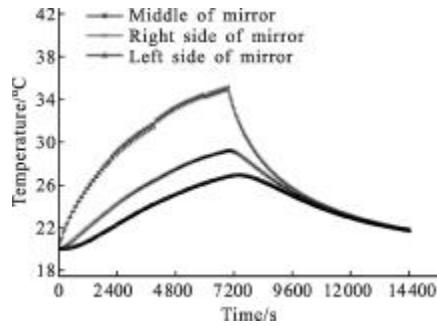


图 9 增强散热纵栅格加工主镜温度变化

Fig.9 Primary mirror temperature changes when use enhance thermorytic vertical grid-shaped machining path

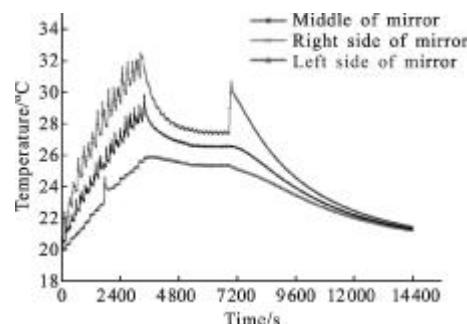


图 10 增强导热分区横栅格加工主镜温度变化

Fig.10 Primary mirror temperature changes when use enhance thermorytic partition horizontal grid-shape machining

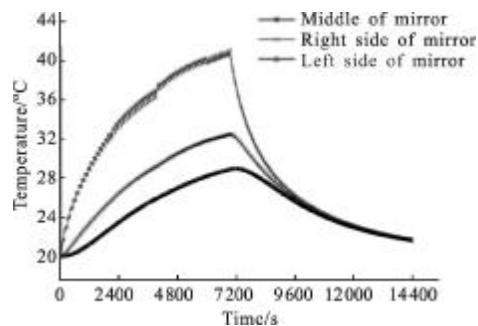


图 11 增强导热分区纵栅格加工主镜温度变化

Fig.11 Primary mirror temperature changes when use enhance thermorytic partition vertical grid-shaped machining path

可以看出:选择横栅格加工路径,增加导热铜带后,4 种加工路径的离子束加工主镜的温度均有所下降,其中增强导热后横栅格加工主镜的温度 28.2 °C,且同一时刻不同位置的温度梯度最小,而其他 3 种方式产生的温度梯度都很大,不利于镜子面形的控制。

表 3 增强导热后不同加工方式主镜面形及应力

Tab.3 Primary mirror surface shape and stresses
of different processing methods after
enhancing heat conduction

Machining path	Maximum temperature/°C	Surface change		Stress changes/MPa
		PV/nm	RMS/nm	
Horizontal grid-shape machining	28.2	$\lambda/20$	$\lambda/100$	0.08
Vertical grid-shaped machining	36	$\lambda/10$	$\lambda/50$	0.17
Partition horizontal grid-shape machining	32	$\lambda/12$	$\lambda/70$	0.14
Partition vertical grid-shaped machining	41	$\lambda/7$	$\lambda/37$	0.23

通过分析结果比较,为抑制主镜组件的热效应,主镜组件的温升应尽量缓慢,温度分布尽量均匀,因此选择横向栅格加工路径的同时,用导热铜带增强导热的方式,能够满足主镜组件加工的温度需求,保证主镜组件的面形精度。

4 试验验证

通过有限元分析结果对比,选择增强导热的横向栅格路径的离子束加工进行试验验证,其加工装置如图12所示,温度传感器粘贴在反射镜的两侧。试验结果与分析结果如图13所示。

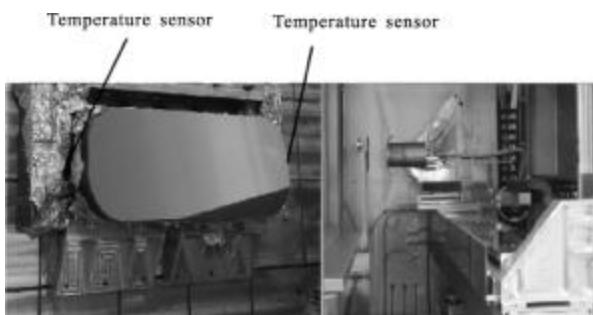


图12 主镜组件离子束加工

Fig.12 Primary mirror components by ion beam processing

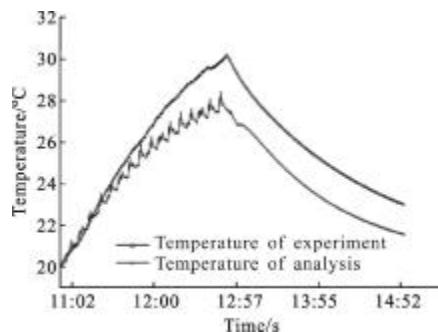


图13 试验与分析温度对比

Fig.13 Temperature contrasts between test and analysis

从试验结果与分析结果对比可以看出:试验过程中主镜的温度变化与分析结果趋势一致。最高温度相差1.9℃。增强导热后并选择横向栅格加工路径降低了主镜组件的温度,有效地抑制了由温度过高引起的热效应。

5 结论

文中通过有限元计算,对比不同加工路径对离

子束加工的影响,提出了对于大尺寸空间反射镜离子束表面加工的热效应抑制方法。计算表明,采用横向栅格加工路径,并选用增强导热的方式后,反射镜从35.8℃降至28.2℃,热应力减小从0.17 MPa变至0.08 MPa。PV值由λ/10降至λ/20,RMS值由原来λ/50降至λ/100,满足高精度光学反射镜面的要求。

依据分析所得方法进行试验验证,试验结果与分析得到的结论一致,温度相差1.9℃,说明仿真结果具有较高的可信度。

分析和试验结果表明:合理规划加工路径,增加导热面积,对降低离子束加工时反射镜的热量累积,降低反射镜因温度升高引起的热应力有较为积极的作用。文中为大尺寸反射镜离子束加工工艺提供了新的方法。

参考文献:

- [1] Mauro Ghigo, Oberto Citterio, Paolo Conconi, et al. Ion beam figuring of nickel mandrels for x-ray replication optics in advanced in x-ray optics[C]//SPIE, 2001: 28-36.
- [2] Jiao Changjun. Study on the material removal mechanisms and fundamental processes for ion beam figuring optical mirrors [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [3] Zhao Gexiao, Li Yang, Zheng Yingna. The principle of ion beam removal machining [J]. Electromachining & Mould, 2001: 26-28. (in Chinese)
- [4] Xu Mingjin, Dai Yifan, Zhou Lin, et al. Numerical simulation of thermal field in ion-beam figuring[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2013, 49 (4):18-21. (in Chinese)
- [5] Dai Yifan, Zhou Lin, Xie Xuhui, et al. Deterministic figuring in optical machining by ion beam [J]. Acta Optica Sinica, 2010 30(1): 192-197. (in Chinese)
- [6] Sha Wei, Zhang Xingxiang, Chen Changzheng, et al. Application of zero clearance support method based on circle mirrors [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(10): 2109-2205. (in Chinese)
- [7] Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer [M]. Beijing: China Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [8] Li Yun, Xing Tingwen, Xu Jiajun, et al. Dwell time algorithm for the 3-axis ion beam figuring system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5): 1300-1305. (in Chinese)