

碳化硅表面硅改性层的磁介质辅助抛光

张 峰 邓伟杰

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 为了实现碳化硅表面硅改性层的精密抛光, 获得高质量光学表面, 对磁介质辅助抛光技术进行研究。设计了适合碳化硅表面硅改性层抛光的磁介质辅助抛光工具, 并对抛光工具的材料去除函数进行研究。针对材料去除函数的特性, 对数控磁介质辅助抛光的驻留时间算法进行了研究。采用磁介质辅助抛光技术对碳化硅表面硅改性层平面样片进行了抛光实验。经过一次抛光迭代, 碳化硅样片表面硅改性层的面形精度(均方根)由 0.049λ 收敛到 0.015λ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$), 表面粗糙度从 $2\ \text{nm}$ 改善至 $0.64\ \text{nm}$ 。实验结果表明基于矩阵代数的驻留时间算法有效, 磁介质辅助抛光适合碳化硅表面硅改性层加工。

关键词 光学制造; 磁介质辅助抛光; 去除函数; 硅改性层

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.1116001

Magnetic-Medium Assistant Polishing of Silicon Modification Layer on Silicon Carbide Surface

Zhang Feng Deng Weijie

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract To actualize precise polishing of silicon modification layer on silicon carbide surface, and achieve high-quality optical surface, a technology of magnetic-medium assistant polishing is studied. The special magnetic polishing tool for polishing silicon modification layer on silicon carbide surface is designed, and the material removal function of magnetic polishing tool is studied. On the basis of the material removal function, the dwell time algorithm of computer-controlled magnetic-medium assistant polishing is researched. A Si-modified on silicon carbide surface experimental sample is polished by magnetic-medium assistant polishing technology. Initial figure error and roughness of the sample are 0.049λ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$) (root-mean-square) and $2\ \text{nm}$. After one polishing iteration, the figure error and roughness of the sample are 0.015λ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$) and $0.64\ \text{nm}$, respectively. Experimental results indicate the dwell time algorithm based on matrix algebra is effective, and magnetic-medium assistant polishing is appropriate for polishing silicon modification layer on silicon carbide surface.

Key words optical fabrication; magnetic-medium assistant polishing; removal function; silicon modification layer

OCIS codes 240.5450, 240.5770, 160.6030, 220.4610

1 引 言

碳化硅材料以其优良的物理性质和高度的化学稳定性获得越来越广泛的应用。尤其是在空间光学领域, 碳化硅已代替微晶玻璃等光学材料成为高精度空间相机反射镜镜体的首选材料^[1~3]。然而, 碳化硅属于陶瓷材料, 一方面由于存在残留的气孔等缺陷, 使碳化硅表面致密程度远不如玻璃材料, 抛光

后很难获得高质量光学表面^[4]; 另一方面由于碳化硅极高的硬度和化学稳定性, 直接对其抛光难度大、效率低。因此, 为了获得高质量光学表面, 一般先将碳化硅反射镜基底的面形精度(均方根, 下同)加工至 0.1λ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$) 左右。然后, 采用物理气相沉积的改性方法在碳化硅表面镀一层约 $10\ \mu\text{m}$ 厚的硅改性层^[5]。最后, 通过对碳化硅表面改性层的

收稿日期: 2012-05-21; 收到修改稿日期: 2012-06-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61036015)和科技部国际科技合作项目(2008DRF70140)资助课题。

作者简介: 张 峰(1969—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学加工与检测等方面的研究。E-mail: zhangfj@yahoo.com

加工得到高精度光学表面^[6,7]。硅改性层的硬度较小,加工起来相对容易些。但正是因为改性层较软,采用传统的硬度较大的沥青抛光盘抛光时,容易产生划痕。而且一旦出现划痕,划痕的深度一般都和改性层的厚度相当,很难再被抛光掉。因此,提出采用柔性的磁介质辅助抛光技术来对碳化硅表面硅改性层进行抛光。

磁介质辅助抛光的工作原理是在强梯度磁场的作用下,磁性微粉沿着磁力线的方向排列起来,吸附在磁性抛光工具上形成柔性的“磁性抛光刷”,该柔性“磁性抛光刷”的作用类似于传统抛光中沥青抛光盘。柔性“磁性抛光刷”与工件相接触,并对工件表面产生一定的压力,通过两者之间的相对运动去除工件表面材料。“磁性抛光刷”对工件表面产生压力的大小可以通过调节磁性抛光工具与工件之间的间隙来改变。

从 20 世纪 50 年代开始,前苏联、保加利亚、德国和日本等国家的学者开展对磁介质辅助加工的研究工作,并发表了大量有关这方面的论文,申请了多项专利,20 世纪 80 年代,William I Kordonski 及其领导的研究团队发明了磁流变抛光技术。到 20 世纪 90 年代,Golini 等^[8]进一步对磁流变抛光技术进行研究,并将该技术商业化,掀起了磁介质辅助加工技术研究的高潮。我国对磁介质辅助加工技术的研究始于 20 世纪 80 年代末。哈尔滨工业大学^[9]、山东理工大学^[10]、大连理工大学^[11]、长春光机所^[12]和国防科技大学^[13]等多家高校和研究所开展了对磁介质辅助加工机理、数学建模以及加工工艺等方面的研究,并将该技术应用于钢、铝、玻璃和碳化硅等材料的实际加工,取得了一定的成绩。

本文通过对磁介质辅助加工技术的研究,设计了特殊的磁性抛光轮,并对其去除函数、数控磁介质辅助抛光的驻留时间算法进行研究,同时将该项技术应用到碳化硅表面硅改性层的抛光,获得较好的效果。

2 磁性抛光工具

“磁性抛光刷”是磁介质辅助抛光的核心组件,在抛光过程中起关键作用。因此,设计了具有特殊磁场结构的磁性抛光轮。该磁性抛光轮既具有柔性的抛光特性,又可以通过增大抛光轮的转速提高抛光效率,适合碳化硅表面硅改性层的抛光。

磁性抛光轮的结构如图 1 所示,由磁铁、磁轭、隔磁板、转轴及不锈钢外壳等 5 部分组成。将磁铁(N 极和 S 极)、隔磁板和磁轭都设计成圆环形。套

于转轴上的两磁极 N 极和 S 极之间被隔磁板隔开,两个圆环形磁轭分别套在 N 极和 S 极外圆表面上。于是,磁性抛光轮外圆周上一侧是 N 极,另一侧是 S 极。转轴、磁铁和磁轭形成了一个闭合回路,而仅在磁性抛光轮外圆周中间,两个磁轭之间被隔磁板隔开的区域形成沿圆周方向的气隙。漏磁形成一个梯度磁场,该磁场均匀的分布在磁性抛光轮整个外圆周中部。磁性抛光轮的最外层是不锈钢外壳,起到保护作用。

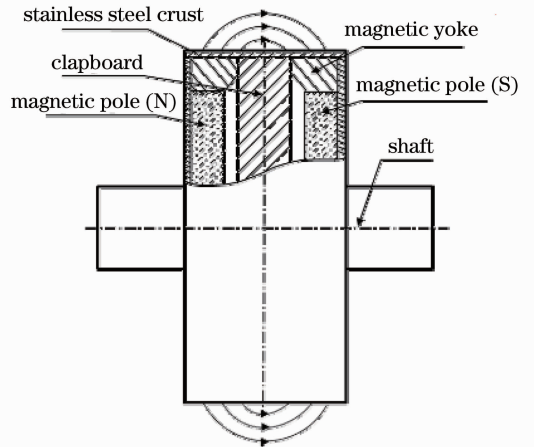


图 1 磁性抛光轮的结构示意图

Fig. 1 Structure of magnetic polishing tool

磁性抛光轮进行磁介质辅助抛光的实物照片如图 2 所示。在磁场作用下,磁性微粉均匀的吸附在磁性抛光轮外圆中部两磁极处,形成一个轮式“磁性抛光刷”,该“磁性抛光刷”与工件相接触并对工件表面产生一定的压力,通过转轴带动磁性抛光轮旋转实现工件表面材料的去除。在抛光过程中,循环更新的抛光液通过喷嘴注入到磁性抛光轮与工件表面接触的区域,磁性抛光轮保持恒定的间隙沿工件表面移动,同时使用修形器不断地对“磁性抛光刷”进行修形,保证其与工件表面接触形状始终保持一致,从而实现去除函数的稳定。

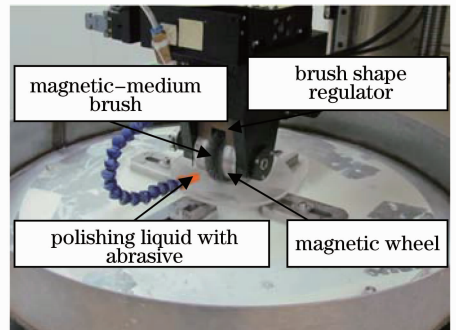


图 2 磁介质辅助抛光装置

Fig. 2 Device of magnetic-medium assistant polishing

抛光液是由抛光粉颗粒溶于蒸馏水配制而成的,并在其中加入一些稳定剂和分散剂,防止抛光粉颗粒凝聚、沉淀。同时,保持抛光液的 pH 值在 9~10 之间,以防构成“磁性抛光刷”的铁基磁性微粒在抛光过程中被氧化。“磁性抛光刷”中磁性微粒一般采用软磁类材料,同时兼顾其化学稳定性。使用粒度为平均粒径 5 μm 的 FeSiCr 粉末,经过球磨罐研磨后去除表面锐角。因此,磁性微粒的微观形状接近球形,图 3 为采用 100 倍光学显微镜对其表面形貌进行观测结果,可以看出颗粒表面锐角较少。磁性颗粒对材料去除作用较小,可以认为它们不对光学表面造成材料去除,而真正使工件表面材料被去除的是由喷嘴不断喷入的浮于柔性“磁性抛光刷”表面的抛光液中的抛光粉颗粒。抛光粉颗粒种类需根据去除材料的特点针对选取。

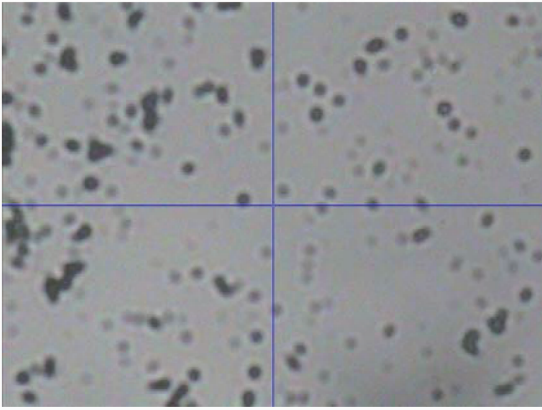


图 3 磁性颗粒的光学显微镜观测结果
Fig. 3 Observation of magnetic particles in optical microscope

磁介质辅助抛光的优点在于,以柔性“磁性抛光刷”代替传统的沥青抛光盘,被加工工件不会产生下表面破坏层,剪切去除特性使抛光后的表面质量很好;在抛光过程中修形器不断地对柔性“磁性抛光刷”进行修整,使其形状特性稳定,不会出现传统抛光过程中的抛光盘磨损问题,实现了去除特性稳定的确定性加工。

3 材料去除函数

光学抛光极为复杂,不仅存在机械切削作用,还有化学作用,以及被抛光材料表面分子的流动现象。Preston 假设对光学加工过程的描述是目前被人们所普遍接受的,这个假设认为,在很大的数值范围内可以将速度和压力以外的其他所有因素的作用全部归为一个比例常数 k ,从而建立起了一个材料去除

量、抛光盘与工件之间的压力以及相对速度之间的线性关系,线性方程如下:

$$\Delta Z(x, y) = kP(x, y)V(x, y), \quad (1)$$

式中 $\Delta Z(x, y)$ 为抛光工具驻留某点 $D(x, y)$ 单位时间内的材料去除量; $P(x, y)$ 为抛光工具与工件间的相对压强; $V(x, y)$ 为抛光工具与工件间的相对运动速度; k 为与加工过程有关的比例常数(其他影响因素)。

一些学者依据 Preston 假设,通过对磁性微粒在磁场中的受力分析,建立了磁介质辅助抛光材料去除模型,在一定程度上获得了较为准确的结果^[14,15]。在这里,不去进行复杂的数学建模,而是在遵循 Preston 假设的基础上通过对抛光实验结果进行分析,得出准确的、稳定的去除函数。

采用设计的磁性抛光轮和自行配制的辅助抛光液进行磁介质辅助抛光材料去除函数实验。对影响抛光去除结果的一些参数进行了实验分析,选取了较为合理的工艺参数。磁轮与工件表面的间隙直接决定了磁性抛光刷对工件表面的压力,但同时也改变去除函数的分布形状。间隙偏大时,去除函数区域面积以及去除峰值都偏小,会显著降低抛光效率;而过小的间隙虽然会增大去除面积以及去除峰值,但会显著改变去除函数单峰特性而变为双峰分布,增加中高频因素,不利于面形误差的校正。综合分析后,选取的间隙参数为 4 mm,以达到平衡去除效率及单峰特性的目的。较大的抛光轮转速在理论上可以获得更大的去除峰值,但是在实际操作中,过大的转速会导致数控系统的精度降低以及抛光液的不充分嵌入,造成去除效率的降低,因此选取的抛光轮转速为 500 r/min。

CeO₂ 抛光粉是常用的 Si 材料抛光磨料,去除特性稳定且抛光后表面质量好。为获得好的表面质量以及配置稳定的抛光液,选取的 CeO₂ 磨料粒度为平均粒径 0.82 μm ,纯度 99.9%;抛光液中的 CeO₂ 抛光粉浓度为 15 g/L。采用非离子表面活性剂异丙醇胺作为分散剂,羧甲基纤维素钠作为稳定剂。配置的抛光液 CeO₂ 颗粒在 2 h 内静置的沉降百分比小于 3%,且经搅拌后能够迅速分散。

去除函数样片表面材料为 Si 改性层,经过传统小磨头抛光后面形误差优于 $1/20\lambda$,表面粗糙度约为 2 nm。去除函数实验时,磁性抛光工具每隔 30 min 进行一次去除函数的抛光实验,单次驻留时间为 1 min。去除函数实验结果如图 4 所示。

去除函数实验结果为后续的表面 Si 改性层的

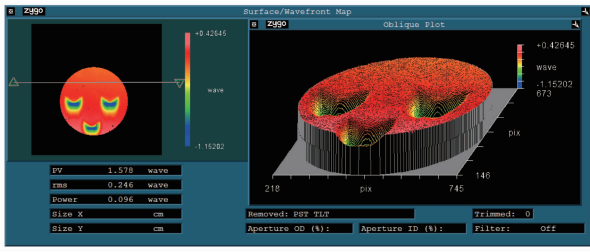


图 4 材料去除函数实验结果

Fig. 4 Experimental result of material removal function
 数控抛光提供了去除函数的理论分布。采用 ZYGO 干涉仪自带的 MetroPro 软件对实验结果进行了数据处理,3 个去除函数的峰值分别为 $1.57\lambda, 1.49\lambda, 1.52\lambda$, 差异很小。因此将去除函数导入 Matlab 软件矩阵化,数值平均运算后作为后续计算的输入分布,图 5 即为平均后的去除函数分布图。

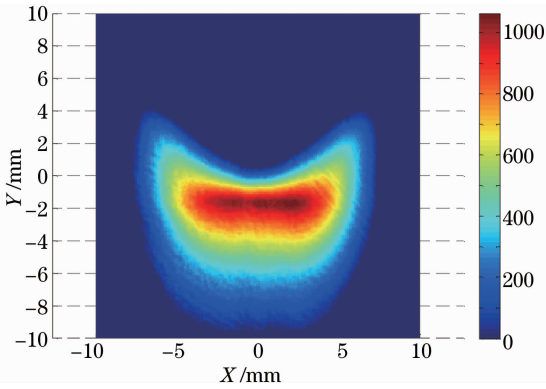


图 5 平均材料去除函数分布

Fig. 5 Distribution of average material removal function

4 数控磁介质辅助抛光驻留时间算法

磁介质辅助抛光的去除函数明显区别于传统的数控小磨头加工的圆对称去除函数分布,采用基于矩阵代数的驻留时间算法来对驻留时间问题进行求解。该方法将驻留时间求解的反卷积问题转化为矩阵代数方程求解问题,适用于所述的对不规则且无解析表达式的去除函数求解驻留时间函数^[16]:

$$\mathbf{R} \cdot \mathbf{d} = \mathbf{e}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{R} 为去除函数矩阵,它的每个元素都代表着单个驻留点对单个去除点的单位时间去除量,它代表着驻留点位置、去除点位置及去除函数的综合信息。 \mathbf{d} 为待求的驻留时间函数向量, \mathbf{e} 为要求去除的面形误差分布向量。

当抛光工具在驻留点 $A(x_i, y_i)$ 抛光时,对在去除范围内的点 $B(x_j, y_j)$ 处的单位时间去除量,可以通过对去除函数分布矩阵 \mathbf{M}_{ref} 进行数值插值得到:

$$\mathbf{R}_{ij} = \text{interp}(X_{BA}, Y_{BA}, \mathbf{M}_{\text{ref}}), \quad (3)$$

式中 i, j 分别为 A, B 点在其点向量中索引号;interp 为插值算法函数, X_{BA}, Y_{BA} 为点 $B(x_j, y_j)$ 在驻留点 $A(x_i, y_i)$ 坐标系中的位置,当加工路径为直角坐标时, $X_{BA} = x_j - x_i; Y_{BA} = y_j - y_i$;当加工路径为极坐标方式时,令其对应驻留点坐标为 $A(\rho_i, \theta_i)$

$$\begin{cases} X_{BA} = x_j \cos \theta_i - y_j \sin \theta_i, \\ Y_{BA} = x_j \sin \theta_i - y_j \cos \theta_i - \rho_i. \end{cases} \quad (4)$$

计算得到去除矩阵 \mathbf{R} 后,根据面形误差分布求解矩阵方程(2)式即可得到驻留时间分布。

5 抛光实验

将设计的磁介质辅助抛光装置集成到本实验室已有的 FSGJ-1 型非球面数控加工机床上,形成新型磁介质辅助抛光数控抛光机。根据单点的去除函数分布实际加工结果以及控制算法软件,对一个直径 90 mm 的碳化硅表面硅改性层实验样件进行了实际面形抛光,以验证磁介质辅助抛光去除函数的稳定性、数控算法的有效性,同时证明磁介质辅助抛光适合 Si 改性层的抛光。

图 6 为采用磁介质辅助抛光技术抛光前后实验样片面形误差分布对比。为保证抛光效果符合理论计算,抛光过程中的参数与去除函数实验的参数严格保持一致。经过一个周期(25 min)的抛光,工件的面形误差从 0.049λ 收敛到 0.015λ ,面形误差修正效果显著。

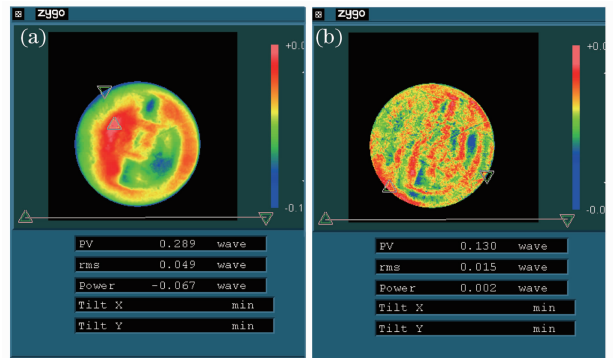


图 6 实验样件的面形误差。(a)抛光前;
(b)抛光后

Fig. 6 Figure errors of experimental sample. (a) Before polishing; (b) after polishing

抛光实验前,对试验件表面粗糙度进行了检测,选取位置为工件中心区域,检测结果如图 7 所示。检测仪器为 Zygo 公司的白光干涉三维形貌轮廓仪 NewView 7200 型。其垂直分辨率优于 0.1 nm ,在干涉物镜为 $10\times$ 时,测量区域面积为 $0.7 \text{ mm} \times 0.53 \text{ mm}$ 。

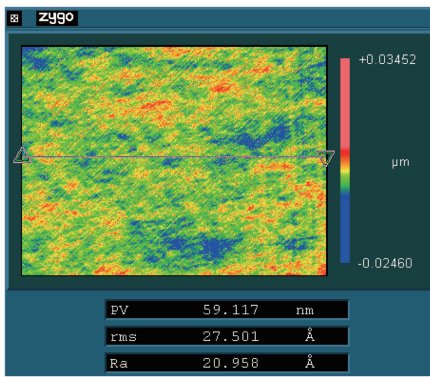


图7 实验样品抛光前中心区域的表面粗糙度

Fig. 7 Surface roughness of experimental sample's central zone before polishing

抛光后,试验件表面粗糙度值达到 0.64 nm,检测结果如图 8 所示。检测结果中工件表面的有规则的微划痕方向,说明磁介质辅助抛光方法对工件表面材料是剪切去除方式。磁介质辅助光学抛光除了能有效修正面形误差,还能够改善 Si 改性层的粗糙度,可以作为 Si 改性层抛光的最后工序。

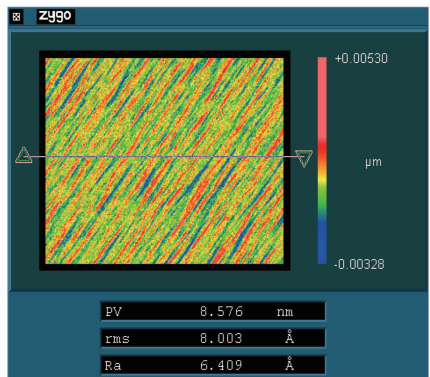


图8 实验样品抛光后中心区域的表面粗糙度

Fig. 8 Surface roughness of experimental sample's central zone after polishing

6 结 论

提出了一种新型的磁介质辅助抛光技术,用于碳化硅表面硅改性层的数控抛光。设计了适合碳化硅表面硅改性层抛光的磁介质辅助抛光装置,通过实验获得了磁介质辅助抛光稳定的去除函数分布,并针对该装置材料去除函数的特殊分布特性,研究了数控磁介质辅助抛光的基于矩阵代数的驻留时间算法。在此基础上,对表面改性碳化硅平面样片进行了抛光实验。经过一次抛光迭代,碳化硅样片表面硅改性层的面形精度由 0.049λ 收敛到 0.015λ ($\lambda=0.6328 \mu\text{m}$),表面粗糙度从 2.1 nm 改善至 0.64 nm。这表明磁介质辅助抛光装置的去除函数

稳定、基于矩阵代数的数控驻留时间算法有效,同时证明磁介质辅助抛光适合碳化硅表面硅改性层的抛光。

参 考 文 献

- 1 M. A. Ealey, G. Q. Weaver. Development history and trends for reaction bonded silicon carbide mirrors [C]. *SPIE*, 1996, **2856**: 66~72
- 2 Zhang Jianhan, Zhang Yumin, Han Jiecai *et al.*. Design, fabrication and testing of space-borne SiC mirror [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2006, **14**(2): 179~184
张剑寒, 张宇民, 韩杰才等. 空间用碳化硅反射镜的设计制造与测试[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(2): 179~184
- 3 Zhang Ge, Zhao Rucheng, Zhao Wenxing. Study on fabrication technology of reaction bonded silicon carbide mirror blank for space [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(3): 401~405
张 舸, 赵汝成, 赵文兴. 空间用反应烧结碳化硅反射镜坯体制备技术研究 [J]. *空间科学学报*, 2011, **31**(3): 401~405
- 4 Fan Di, Zhang Zongyu, Niu Haiyan *et al.*. Surfacing fabrication of silicon carbide optical mirror [J]. *J. Chinese Ceramic Society*, 2003, **31**(11): 1096~1100
范 镒, 张忠玉, 牛海燕等. 碳化硅光学镜面加工[J]. *硅酸盐学报*, 2003, **31**(11): 1096~1100
- 5 Gao Jinsong, Shen Zhenfeng, Wang Xiaoyi *et al.*. Research on surface modification of space used SiC mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2624~2629
高劲松, 申振峰, 王笑夷等. 空间反射镜基底材料碳化硅表面改性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2624~2629
- 6 Zhang Feng, Xu Lingdi, Fan Di *et al.*. Fabrication of surface modification aspheric SiC mirror [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2008, **16**(12): 2479~2484
张 峰, 徐领娣, 范 镒等. 表面改性非球面碳化硅反射镜的加工[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(12): 2479~2484
- 7 Ma Zhanlong, Liu Jian, Wang Junlin. Development and application of ultra-smooth optical surface polishing technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(8): 082202
马占龙, 刘 健, 王君林. 超光滑光学表面加工技术发展及应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(8): 082202
- 8 Donald Golini, William I. Kordonski, Paul Dumas *et al.*. Magnetorheological finishing (MRF) in commercial precision optics manufacturing [C]. *SPIE*, 1999, **3782**: 80~91
- 9 Kang Guiwen, Zhang Feihu. Surface shape control in optics manufacturing using magnetorheological finishing [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2010, **30**(5): 77~82
康桂文, 张飞虎. 磁流变抛光光学表面加工面形控制技术的研究 [J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2010, **30**(5): 77~82
- 10 Liu Haishan. Study and Application of Magnetic Abrasive Finishing [D]. Shandong: Shandong University of Technology, 2008
刘海山. 磁力研磨技术的研究与应用[D]. 山东: 山东理工大学, 2008
- 11 Wang Xuyue, Wu Yongbo, Jiang Jian *et al.*. MPT development and polishing characteristics test [J]. *J. Dalian University of Technology*, 2006, **46**(6): 832~836
王续跃, 吴勇波, 姜 健等. 磁性复合抛光液配制及其抛光性能试验研究[J]. *大连理工大学学报*, 2006, **46**(6): 832~836
- 12 Zhang Feng, Zhang Binzhi. Surface roughness of optical elements fabricated by magnetic fluid-assisted polishing [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2005, **13**(1): 34~39
张 峰, 张斌智. 磁流体辅助抛光工件表面粗糙度研究[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(1): 34~39
- 13 Dai Yifan, Shi Feng, Peng Xiaoqiang *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by magnetorheological finishing [J].

- Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 198~205
戴一帆, 石 峰, 彭小强 等. 光学镜面磁流变确定性修形的实现 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 198~205
- 14 Zhang Feng, Zhang Xuejun. Foundation of mathematics model of magnetorheological finishing [J]. *Optical Technique*, 2000, **26**(2): 190~192
张 峰, 张学军. 磁流变抛光数学模型的建立[J]. *光学技术*, 2000, **26**(2): 190~192
- 15 Jessica E. DeGroot, Anne E. Marino, John P. Wilson *et al.*. Removal rate model for magnetorheological finishing of glass [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(32): 7927~7941
- 16 Deng Weijie, Zheng Ligong *et al.*. Dwell time algorithm based on matrix algebra and regularization method [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2007, **7**(7): 1009~1015
邓伟杰, 郑立功 等. 基于线性代数和正则化方法的驻留时间算法[J]. *光学精密工程*, 2007, **7**(7): 1009~1015

栏目编辑: 韩 峰