DOI: 10.3901/JME.2014.01.205

集群磁流变平面抛光加工技术*

潘继生¹ 阎秋生¹ 路家斌¹ 徐西鹏² 陈森凯¹

(1. 广东工业大学机电工程学院 广州 510006;

2. 华侨大学脆性材料加工技术教育部工程研究中心 厦门 361021)

摘要: 基于磁流变效应和集群原理提出集群磁流变效应平面抛光技术, 对磁极排布方式、端面形状及其尺寸的磁场特性进行静磁场有限元分析优化, 结果表明, 选取圆柱平底磁极进行同向规律排布时容易形成由多个独立“微磨头”组成的柔性抛光膜, 能实现加工表面与“微磨头”的实际接触面积最大化。通过设置“微磨头”尺寸及数量与工件的接触状态, 对 K9 玻璃、单晶硅和单晶 6H-SiC 三种硬脆材料基片加工出弧形抛光带, 试验验证集群磁流变效应抛光膜的集群特性。对加工表面与抛光盘表面之间的间隙、加工时间、磁感应强度和转速等集群磁流变平面抛光工艺参数进行试验优化, 并采取优化工艺对三种硬脆材料进行 30 min 抛光, K9 玻璃表面粗糙度从 $R_a 0.34 \mu\text{m}$ 下降到 $R_a 1.4 \text{ nm}$, 单晶硅从 $R_a 57.2 \text{ nm}$ 下降到 $R_a 4 \text{ nm}$, 单晶 SiC 从 $R_a 72.89 \text{ nm}$ 下降到 $R_a 1.92 \text{ nm}$, 均能获得纳米级粗糙度表面。

关键词: 集群磁流变效应; 平面抛光; 磨粒半固着; 表面粗糙度; 硬脆材料

中图分类号: TG356

Cluster Magnetorheological Effect Plane Polishing Technology

PAN Jisheng¹ YAN Qiusheng¹ LU Jiabin¹ XU Xipeng² CHEN Senkai¹

(1. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006;

2. Engineering Research Center for Brittle Materials Machining, Huaqiao University, Xiamen 361021)

Abstract: Base on magnetorheological effect and cluster principle, the cluster magnetorheological effect plane polishing technology is proposed. The magnetic field characteristics of pole arrangement, the pole tip shape and different magnetic pole size are analysed by static magnetic field finite element software. It is found that soft polishing pad is more easily composed of multiple independent micro grinding head by select cylindrical flat bottom magnetic pole and arrange in the same direction, then the contact area of workpiece and micro grinding head maximization can be realized. By setting the contact state between the workpiece and the micro grinding head size and number, arc polish belt of K9 glass, single crystal silicon wafers and single crystal 6H-SiC wafers are polished for testing and verifying the cluster characteristics of micro grinding head. Optimization experiments are conducted to optimize the machining gap between the workpiece and the polishing disc surface, polishing time, the magnetic field strength of disk end and speed. By polishing K9 glass, single crystal silicon wafers and single crystal 6H-SiC wafers with the optimized parameters, nanoscale roughness surface are obtained in 30 min. The surface roughness of K9 glass, single crystal silicon wafers and single crystal SiC can be reduced from $R_a 0.34 \mu\text{m}$ to $R_a 1.4 \text{ nm}$, $R_a 57.2 \text{ nm}$ to $R_a 4 \text{ nm}$ and $R_a 72.89 \text{ nm}$ to $R_a 1.92 \text{ nm}$, respectively.

Key words: cluster magnetorheological effect; plane polishing; semi-fixed abrasive; surface roughness; hard and fragile materials

0 前言

磁流变抛光技术(Magnetorheological finishing, MRF)是 20 世纪 90 年代由 KORDONSKI 及其合作者将电磁学、流体动力学、分析化学、加工工艺学等相结合而提出的一种新型的光学表面加工方法, 具有抛光效果好、不产生次表面损伤、适合复杂表

面加工等传统抛光所不具备的优点, 已发展成为一种革命性光学表面加工方法, 特别适合轴对称非球面的超精密加工^[1-4]。但目前采用磁流变抛光方法对平面工件进行加工时, 主要是把工件置于一圆弧形抛光盘上方, 工件表面与抛光盘之间形成的凹形间隙, 抛光盘下方布置一个磁感应强度可调的电磁铁磁极或者永磁体磁极使凹形间隙处形成高强度梯度磁场, 当磁流变液随抛光盘运动到工件与抛光盘形成的空隙附近时形成的柔性凸起“抛光缎带”, 但“抛光缎带”与工件表面属于“斑点”局部接触, 在

* 国家自然科学基金资助项目(U1034006, 51305082, 51375097)。20121227 收到初稿, 20131101 收到修改稿

加工过程中只能靠控制“斑点”沿工件表面按一定规律轨迹扫描才能实现整个表面的加工, 轨迹扫描过程需要大量的时间, 造成效率低、加工形状精度不易保证^[5-6]。

本研究基于磁流变抛光原理和集群作用机理, 提出一种集群磁流变平面抛光加工技术^[7], 在深入分析集群磁流变效应磁场特性基础上, 研究集群磁流变效应抛光膜特性, 优化集群磁流变效应平面抛光工艺, 实现单晶 6H-SiC 等硬脆材料平面高效超光滑抛光加工。

1 集群磁流变平面抛光技术

1.1 集群磁流变抛光原理

集群磁流变平面抛光是基于磁流变效应、将磨料微粒混入磁流变液作为抛光工作液, 以小尺寸磁性体为基体形成磁流变效应“微磨头”半固着约束聚集游离磨料, 运用集群作用原理由多点磁流变效应“微磨头”的阵列组合构成抛光膜, 形成磨料均匀弥散分布的黏弹性介质层对磨粒姿态、运动轨迹、滞留时间和磨料浓度的控制, 实现工件表面与抛光膜的柔性全面接触, 达到高效率超光滑抛光加工的目的^[7-8]。

集群磁流变平面抛光加工原理如图 1 所示, 磁性体镶嵌在抗磁材料制作的抛光盘基体上, 工件和抛光盘绕各自的轴线旋转, 磁流变抛光工作液注入工件与抛光盘之间, 工件与抛光盘在一定幅度内摆动实现抛光运动。

图 1 集群磁流变平面抛光工艺原理

1. 工作液循环装置 2. 抗磁材料抛光盘基体 3. 集群磁性体
4. 工件主轴 5. 磁流变抛光工作液 6. 工件 7. 磁流变“微磨头”

1.2 集群磁场特性仿真分析

集群磁流变平面抛光是由在抛光盘表面形成的黏弹性“微磨头”构成柔性抛光膜实现对工件材料的微量去除, “微磨头”的硬度与尺寸决定抛光膜剪切力的大小, “微磨头”的排布规律与密度决定了抛光膜与工件的接触状态, 而集群磁流变效应“微磨头”是多个磁极相互干涉共同作用的结果, 磁极的排布方向、磁极形状、磁极尺寸等对最终形成

的抛光膜形态有直接影响。因此, 选择电磁场有限元分析软件 Ansoft 的 Maxwell 3D 静磁场求解器^[9], 对集群磁场特性进行仿真分析, 优化磁流变效应抛光膜。

1.2.1 磁极排布方向对磁流变效应抛光膜特性影响

磁极在点阵集群排布时, 相邻磁极具有反向排布和同向排布两种方案, 为研究磁极反向和同向排布时对工件表面加工区域内磁场分布的影响, 如图 2 所示对 $\phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的 N35 磁极按磁极中心距 15 mm 反向和同向单环排布进行仿真, 做出距离磁极端面轴向 2 mm 位置的磁感应强度曲线如图 3 所示。

图 2 磁极环形布置示意图

图 3 磁极反向和同向排布时的磁感应强度沿各磁极圆心所在圆周分布

由仿真结果可以看出, 磁极反向排布时的磁感应强度均大于磁极同向排布时的磁感应强度。根据抛光盘表面抛光膜厚度与磁感应强度成正比的关系可知, 磁极反向排布时, 可以形成稳定、致密的抛光膜, 而磁极同向排布时, 更容易形成相对独立“微磨头”组成的抛光膜。磁极反向和同向排布时的磁力线分布情况如图 4a 和 4b 所示。磁极反向排布时相邻的磁极形成回路, 因而磁场相对均匀, 但由于磁性粒子是沿着磁力线方向分布, 故磁性粒子所受到的磁场作用力也近似平行于工件表面, 致使被磁性粒子形成链状束缚的磨粒对工件表面研抛正压力减小, 影响到磨粒去除率。磁极同向排布时磁力线不会闭合, 在磁极端部向四周方向发散分布, 由于磁力线在相互排斥的作用下与工件表面垂直, 此时磁性粒子沿磁力线形成磁串近似垂直于工件表面, 故磨料微粒被束缚在近似垂直于工件表面的“微磨

头”中,使工件表面的研抛正压力增大,磨粒去除率得到有效提高。

图4 磁极反向和同向排布时的磁力线分布

1.2.2 磁极形状对磁流变效应抛光膜特性的影响

构成集群磁流变平面抛光的磁极端部形状对最终形成的“微磨头”形状有直接影响,分别选取直径和高度均为 30 mm 的圆柱平底、圆柱锥台和圆柱球头三种端部形状(图 5)的 N35 磁极,按图 2 所示设置磁极同向排布且磁极中心为 35 mm 进行磁感应强度仿真分析,获得单个磁极距离磁极端面轴向 2 mm 位置的磁感应强度曲线如图 6 所示。

图5 不同磁极形状

图6 不同端部磁极形状的磁场沿磁极圆心所在圆周分布

由磁感应强度曲线可以看出,圆柱平底、圆柱锥台和圆柱球头磁极在加工区域的磁场分布均有明显的峰值规律,对应能分别形成近似圆柱形、圆台形和圆锥形的“微磨头”,因而圆柱平底磁极形成的“微磨头”截面尺寸最大,更有利于抛光加工。

1.2.3 磁极尺寸对集群磁流变效应抛光膜特性的影响

集群磁流变抛光的磁极尺寸对最终形成的“微磨头”分布也有直接影响,为了使加工过程中“微磨头”与工件的有效接触面积最大化,对高度为 15 mm 而直径不同的 N35 磁极,按图 2 所示单环布置进行仿真,单个磁极距离磁极端面轴向 2 mm 处的

磁感应强度分布如图 7 所示。由仿真结果可以看出,随着磁极直径的增大,与磁场分布对应形成的“微磨头”直径逐渐增大,当直径增大到一定程度后,磁感应强度的边缘效应越来越显著,“微磨头”容易变成中空结构,不利于加工效率的提高。通过对环形磁铁径向截面磁场进行仿真,得到与图 7 所示类似的磁场分布规律,因而进行集群磁流变平面抛光时,适宜选择合理尺寸的圆柱平底磁极进行规律布置,仿真条件下应选择直径 30 mm 的磁极。

图7 不同磁极直径同向排布时的磁感应强度沿各磁极圆心所在圆周分布

同时,通过高度为 15 mm 而直径不同的圆柱平底 N35 磁极以及直径为 15 mm 而高度不同的圆柱平底 N35 磁极,按图 2 所示以磁极中心为 15 mm 单环布置进行仿真,距离磁极端面轴向 2 mm 处单个磁极的磁感应强度极值变化曲线图如图 8 所示。由仿真结果可以看出,对于材料相同而尺寸不同的磁极材料,当磁极高度与直径尺寸一致时,在盘面相同间隙下产生的磁感应强度最大。

图8 不同磁极尺寸的磁感应强度分布

通过上述仿真可知,选取一定尺寸且直径和高度相同的圆柱平底磁极进行同向规律排布,可以获得由多个独立“微磨头”组成的致密性集群磁流变效应抛光膜,实现工件与“微磨头”的实际接触面积最大化。同时,抛光膜在磁感应强度相对较弱处容易形成流动性好的磨料富集区(图 9),有利于“微磨头”磨料更新,进一步提高抛光效率。

图 9 圆柱状磁极形成的集群磁流变效应抛光膜形貌

2 试验研究

2.1 试验装置

集群磁流变平面抛光试验装置基于磁流变抛光原理和工艺特点进行设计, 利用数控铣床的伺服运动, 编程控制实现抛光加工需要的运动控制, 如图 10 所示, 4 个运动(X , Y , $C1$, $C2$)的相互配合实现抛光盘与工件之间的抛光加工运动轨迹覆盖整个工件表面, 达到对工件表面均匀抛光加工的目的。

图 10 集群磁流变平面抛光加工试验装置

1. 机床本体 2. 磁流变液循环及存储装置 3. 工件装夹装置
4. 旋转抛光盘 5. 调节磁场装置

2.2 磁流变抛光工作液

试验中采用水基磁流变液混入一定比例的磨料作为磁流变抛光工作液, 抛光时采用的磁流变液主要质量组分如下: 4%的羰基铁粉、88%的水、4%的 Al_2O_3 磨料(SiC 采用金刚石微粉)、4%的稳定剂。

2.3 集群磁流变抛光膜集群特性试验

为了试验分析工件加工表面与集群磁流变抛光膜的接触状态, 设置工件不旋转而抛光盘旋转, 圆柱平底永磁铁在圆周上按照图 11a~11d 所示布置时, 可以得到工件某区域每时刻与一个“微磨头”、两个“微磨头”、三个“微磨头”接触的状态, 而采用按图 11e 所示的环形永磁铁时, 可以实现工件某区域每时刻与“微磨头”全接触, 对工件加工出弧形抛光带, 以验证集群磁流变抛光膜特性。

2.3.1 “微磨头”尺寸对加工效果的影响

为了比较“微磨头”大小对集群磁流变抛光效果的影响, 分别采用 $\phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 、 $\phi 20 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 、 $\phi 30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的 N35 圆柱平底永磁铁在 $\phi 135$

mm 圆周上按图 11a 所示规律同向单环布置于厚度为 5 mm 的抛光盘内, 在工件下表面与抛光盘上表面距离 (称为加工间隙) 为 0.8 mm 、加工时间为 35 min 、抛光盘转速为 180 r/min 的条件下, 对直径为 5.08 cm 的 K9 玻璃、单晶硅和单晶 6H-SiC (以下称单晶 SiC) 基片进行抛光, 获得弧形抛光带, 测量抛光带的表面粗糙度均值, 并与图 11e 所示的 $\phi 120 \text{ mm} \times \phi 150 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的环形永磁体抛光效果进行对比, 试验结果如图 12 所示。

图 11 抛光盘磁极布置示意图

图 12 磁流变“微磨头”尺寸对抛光效果的影响

由图 12 可见, 对于三种不同的材料, 均具有相同的变化趋势: 随着磁铁直径的变大, 抛光效果变好, 而 $\phi 30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的圆柱平底永磁铁与全接触的环形磁铁的加工效果基本相当, 也就是说随着磁铁直径的持续增大, “微磨头”与工件的接触区域随之增大, 但接触面积达到一定值时, 抛光效果趋于稳定。

2.3.2 “微磨头”数量对加工效果的影响

为了验证集群“微磨头”组成的抛光膜加工特性, 采用 $\phi 15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的 N35 圆柱平底永磁铁在 $\phi 135 \text{ mm}$ 圆周上按图 11a~11d 所示规律多环布置于厚度为 5 mm 的抛光盘内, 在加工间隙为 0.8 mm 、加工时间为 35 min 、抛光盘转速为 180 r/min 的条件下, 对 3 种材料基片进行抛光加工并与图 11e 所示

的 $\phi 120\text{ mm} \times \phi 150\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 的环形永磁铁抛光效果进行对比, 试验结果如图 13 所示。

图 13 不同“微磨头”排布对抛光效果的影响

由图 13 可见, 对于 3 种不同的材料, 均具有相同的变化趋势: 在工件加工区域内, 磁极同向排布形成的“微磨头”数量越多, 抛光效果越好, 环形全区域接触抛光效果最好; 同时, 从同向三点和反向三点的试验结果可以看出, 对于相同的磁极数量, 磁极同向排布所获得的表面粗糙度小于磁极反向排布。

由此可见, 传统的磁流变抛光只有一个“微磨头”与工件接触, “微磨头”扫描加工整个工件表面需要时间, 而集群磁流变平面抛光可以保证工件表面与多个“微磨头”同时接触工作, 因而可以实现高效率抛光。

2.4 集群磁流变平面抛光加工试验

为进一步探索集群磁流变平面抛光加工特性, 优化试验参数, 采用 $\phi 15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 的圆柱平底磁极, 按图 11a 所示规律以磁极中心距约 20 mm 同向多环布置于厚度为 5 mm 的抛光盘内, 用特斯拉计测出盘面磁感应强度, 采取不同工件与抛光盘表面之间的间隙、加工时间、磁感应强度、工件与抛光盘之间的相对转速等工艺参数对 K9 玻璃、单晶硅和单晶 SiC 基片进行抛光对比试验。

2.4.1 加工间隙对加工效果的影响

在相同的磁极及布置情况下, 加工间隙越大, 工件表面的磁感应强度越弱, 因而加工间隙是影响抛光效果的一个重要因素。在盘面磁感应强度约 0.19 T、加工时间为 20 min、工件转速为 200 r/min、抛光盘转速为 30 r/min、工件左右摆速为 20 mm/s 条件下, 对 3 种材料基片以不同加工间隙进行加工试验, 结果如图 14 所示。

从图 14 可以看出, 三组工件有大致相同的变化趋势, 即工件表面粗糙度 R_a 随着抛光盘与工件间间隙的增大而升高, 说明随着加工间隙的增大, 由于磁感应强度的衰减, 对工件的加工作用逐渐减弱;

由图 14 同时可以看出相同加工条件下, 三组工件在加工间隙为 1 mm 左右时工件表面粗糙度达到最小值。加工间隙对抛光效果存在两方面的影响, 一方面, 随加工间隙减小抛光膜硬度增大, 相同加工时间内抛光效果改善; 另一方面, 随着加工间隙减小到一定程度, 集群磁流变抛光膜趋向于固着磨料, 有可能损伤加工表面造成表面粗糙度增大, 也就是说存在合理的加工间隙, 本试验条件下加工间隙 0.6~2.0 mm 较为合理。

图 14 加工间隙对加工效果的影响

2.4.2 加工时间对加工效果的影响

在盘面磁感应强度约 0.19 T、加工间隙为 1 mm、工件转速为 200 r/min、抛光盘转速为 30 r/min、工件左右摆速为 20 mm/s 条件下, 采用不同加工时间对 3 种材料进行加工试验, 结果如图 15 所示。由图 15 可见, 随着加工时间的延长, 三组工件表面粗糙度表现出大致相同的趋势, 在开始加工的 10 min 内加工表面粗糙度快速下降, 单晶 SiC 由 $R_a 42\text{ nm}$ 下降到 $R_a 8.9\text{ nm}$ 、单晶硅由 $R_a 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 下降到 $R_a 0.034\text{ }\mu\text{m}$ 、K9 玻璃由 $R_a 0.42\text{ }\mu\text{m}$ 下降到 $R_a 0.032\text{ }\mu\text{m}$, 下降均超过了 1 个数量级, 之后随着加工时间的延长, 加工表面粗糙度均匀降低, 加工 30 min 时表面粗糙度分别下降到单晶 SiC: $R_a 5.8\text{ nm}$ 、单晶硅: $R_a 14\text{ nm}$ 、K9 玻璃: $R_a 8\text{ nm}$, 此后继续延长加工时间加工表面粗糙度逐渐趋向稳定。说明在加工初期 10 min 内, 由于工件表面凸起的尖峰处抛光压力较大, 抛光膜的去除作用较强, 因此工件表面粗糙度内急速下降; 随着工件表面凸起的尖峰高度下降, 磨粒的切削作用较之前减弱, 因此在 30~50 min 内, 工件表面粗糙度下降开始平缓, 但表面质量仍有所改善。由此可见, 集群磁流变平面抛光对于去除加工表面的高频凸点分量具有显著的效果, 这正是该抛光方法的独特之处。

一般来讲, 加工条件不变表面粗糙度降低到一定程度后, 即使继续延长加工时间, 表面粗糙度也会趋近于稳定值, 对集群磁流变抛光平面抛光而言加工时间控制在 30~40 min 之间有较好的效果。

图 15 加工时间对加工效果的影响

2.4.3 磁感应强度对加工效果的影响

磁感应强度决定了抛光膜中“微磨头”的形状和剪切屈服强度,因而对材料去除效率有直接影响。在加工间隙为 0.8 mm、工件转速为 0 r/min、抛光盘转速为 180 r/min、工件左右摆速为 0 mm/s、加工时间为 35 min 条件下,采用不同盘面磁感应强度对 3 种材料基片进行加工试验,结果如图 16 所示。

图 16 盘面磁感应强度对加工效果的影响

从图 16 可以看到,随着盘面磁感应强度的增大,三组工件表现出相同的趋势:盘面磁感应强度在 0.2 T 之前,随着盘面磁感应强度的增大,抛光后工件的表面粗糙度成一个近似线性的减小,其原因被认为是随着盘面磁感应强度的增大,“微磨头”变硬,抛光区的磁流变液剪切屈服强度随之增加,磁流变效应对磨料颗粒的把持作用增大,磨料颗粒对加工表面的去除作用增强;当盘面磁感应强度达到 0.2 T 后,表面粗糙度变化减小,随着磁感应强度增加表面粗糙度有增大的趋势,这说明随着盘面磁感应强度的增大,“微磨头”的硬度相对越高,抛光膜的刚性增大,趋向于固着磨料的抛光,有可能局部损伤了加工表面。因而本试验条件下,盘面磁感应强度最优值约为 0.19 T。

2.4.4 转速对加工效果的影响

集群磁流变平面抛光加工中,磨料在加工表面的相对速度是影响抛光效果的重要因素之一,而相

对速度由抛光盘的转动速度、工件的转动速度和工件与抛光盘相对平摆速度三个因素所决定。为了优化三个速度因素对工件加工效果的作用,在盘面磁感应强度约 0.19 T、加工间隙为 1 mm、加工时间为 30 min 条件下,设计如表 1 所示的正交试验表,不考虑各速度因素的相互作用,对每个因素在前期试验经验获得的最佳速度中选取三个水平对原始粗糙度 $R_a 0.488 \mu\text{m}$ 的单晶硅进行 $L_9(3^4)$ 正交优化试验,以加工表面粗糙度为目标函数,试验结果及各列与各水平对应的均值和各列的极差结果如表 2 所示。

表 1 正交试验因子及其水平

影响因子	水平		
	1	2	3
抛光盘转速/(r/min)	30	60	90
工件转速/(r/min)	200	400	600
工件摆速/(mm/s)	5	10	15

表 2 正交试验数据表

试验号	影响因素			表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
	抛光盘转速/(r/min)	工件转速/(r/min)	工件摆速/(mm/s)	
1	30	200	5	0.017 3
2	30	400	10	0.015 5
3	30	600	15	0.011 3
4	60	200	10	0.090 0
5	60	400	15	0.012 8
6	60	600	5	0.013 3
7	90	200	15	0.117 3
8	90	400	5	0.023 4
9	90	600	10	0.025 8
均值 1	0.014 7	0.074 9	0.018 0	0.01967
均值 2	0.038 7	0.017 23	0.043 8	0.0487
均值 3	0.055 5	0.016 8	0.047 1	0.04157
极差	0.040 8	0.058 07	0.029 1	0.02903

从极差的大小可以看出各个因子对于表面粗糙度的影响顺序:工件转速>抛光盘转速>工件平摆速度,从试验结果可以看出,抛光盘转速为 30 r/min、工件转速为 600 r/min、工件摆速为 5 mm/s 时是最优组合,可以获得的较好的加工效果。

2.5 集群磁流变平面抛光加工表面形貌

在加工间隙为 1 mm、盘面磁感应强度约为 0.19 T、抛光盘转速为 30 r/min、工件转速为 600 r/min、工件摆速为 5 mm/s 的优化工艺参数下,对 3 种材料基片进行了 30 min 集群磁流变平面抛光,K9 玻璃表面粗糙度从 $R_a 0.34 \mu\text{m}$ 下降到了 $R_a 1.4 \text{ nm}$,单晶硅从 $R_a 57.2 \text{ nm}$ 下降到了 $R_a 4 \text{ nm}$,单晶 SiC 从 R_a

72.89 nm 下降到了 R_a 1.92 nm, 均获得了纳米级粗糙度表面, 图 17 是抛光前后单晶 SiC 基片的 Zygo NewView 5022 表面轮廓仪三维形貌。由图 17 可见, 工件材料是在塑性状态下被磨粒微量去除的, 得到了光滑平整的加工表面。也就是说, 集群磁流变平面抛光既具有较高的材料去除能力, 又能保证低的表面粗糙度, 在硬脆材料的光学平面及半导体衬底等超光滑抛光加工中具有有良好的应用前景。

图 17 单晶 SiC 基片抛光前后的三维形貌

3 结论

(1) 提出了一种以小尺寸磁性体为基体形成磁流变效应“微磨头”半固着约束聚集游离磨料, 运用集群作用原理由多点磁流变效应“微磨头”的阵列组合构成柔性抛光膜, 实现磨料柔性半固着的集群磁流变平面抛光技术。

(2) 对磁极排布方式、磁极端面形状及不同磁极尺寸的磁场特性进行了静磁场有限元分析, 选取一定直径的圆柱平底磁极进行同向规律排布时容易形成由多个独立“微磨头”组成的抛光膜, 能实现工件与“微磨头”的实际接触面积达最大化, 且磁极之间容易形成流动性好的磨料富集区, 有利于“微磨头”磨料的更新, 提高研磨抛光效率。

(3) 利用同向排布的圆柱平底永磁体和环形永磁体构成抛光盘, 对 K9 玻璃、单晶硅和单晶 SiC 基片进行抛光, 验证了随着磁极直径的增大抛光效果显著、在工件面区域内参与作用的“微磨头”越多抛光效率越显著等集群磁流变特性, 证明集群磁流变平面抛光加工具有高效率去除加工表面高频凸

点的特性。

(4) 采取不同工件与抛光盘表面之间的间隙、加工时间和磁感应强度等工艺参数进行了抛光对比试验, 加工间隙在 0.6~2.0 mm 之间, 抛光时间在 30~40 min 之间, 盘面磁感应强度约为 0.19 T, 抛光盘转速为 30 r/min, 工件转速为 600 r/min, 工件摆速为 5 mm/s 时, 可以获得较好的抛光效果。

(5) 采取优化工艺参数进行 30 min 加工, K9 玻璃表面粗糙度从 R_a 0.34 μm 下降到了 R_a 1.4 nm, 单晶硅从 R_a 57.2 nm 下降到了 R_a 4 nm, 单晶 SiC 从 R_a 72.89 nm 下降到了 R_a 1.92 nm, 均获得了纳米级粗糙度表面。

参 考 文 献

- [1] KORDONSKI W, GORODKIN S. Material removal in magnetorheological finishing of optics[J]. Applied Optics, 2011, 50(14): 1984-1994.
- [2] MIAO C, LAMBROPOULOS J C, JACOBS S D. Process parameter effects on material removal in magnetorheological finishing of borosilicate glass[J]. Appl. Opt., 2010, 49(10): 1951-1963.
- [3] 宋辞, 彭小强, 戴一帆, 等. 基于去除函数预测模型的磁流变抛光工艺优化研究[J]. 国防科技大学学报, 2009(4): 20-24.
- SONG Ci, PENG Xiaoqing, DAI Yifan, et al. Research on process of optimization of magnetorheological finishing basing on predictive model of removal function[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009(4): 20-24.
- [4] POLLICOVE F, GOLINI D. Deterministic manufacturing processes for precision optical surfaces [J]. Key Engineering Materials, 2003, 238-239: 53-58
- [5] SCHINHAERL M, VOGT C, GEISS A, et al. Forces acting between polishing tool and workpiece surface in magnetorheological finishing[C/CD]//Proceedings of the Current Developments in Lens Design and Optical Engineering IX, SPIE, August 11-12, 2008, San Diego, CA, United States, 2008.
- [6] CHENG H B, FENG Z J, WANG Y W, et al. Magnetorheological finishing of SiC aspheric mirrors [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2005, 20(6): 917-931.
- [7] 阎秋生, 高伟强, 路家斌. 基于磁流变效应的研磨抛光方法及其抛光装置: 中国, 200610132495.9[P]. 2009-05-13.
- YAN Qiusheng, GAO Weiqiang, LU Jiabin. Grinding

polishing method based on magnetic rheology effect and its polishing device : China , 200610132495.9[P]. 2009-05-13.

- [8] YAN Jiewen , YAN Qiusheng , LU Jiabin , et al. Experimental research on smooth surface polishing based on the cluster magnetorheological effect[J]. Key Engineering Materials, 2012, 516: 79-83.

- [9] 赵博. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京: 水利水电出版社, 2011.

ZHAO Bo. Application of Ansoft 12 in engineering electromagnetic field[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2011.

作者简介: 潘继生(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士研究生, 讲师。主要研究方向为光学材料超精密加工、机械传动装置与高性能传动系统设计。

E-mail: panjisheng@gdut.edu.cn

阎秋生, 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为微纳加工、光电子/微电子材料磨粒加工、金属材料低碳节材加工。

E-mail: qsyang@gdut.edu.cn

(上接第 204 页)

- [5] PATIR N, CHENG H S. An application of average flow model to lubrication between rough sliding surfaces[J]. Journal of Lubrication Technology, 1979, 101(2): 220-229.

- [6] 吴承伟, 郑林庆. 接触因子及其在研究部分流体润滑中的应用[J]. 润滑与密封, 1989 (3): 1-6.

WU Chengwei, ZHENG Linqing. A contact factor and its application in studying partial hydrodynamic lubrication[J]. Lubrication Engineering, 1989(3): 1-6.

- [7] JIN X Q, KEER L M, WANG Q. A 3D EHL simulation of CMP[J]. Journal of Electrochemical Society, 2005,

152(1): G7-G15.

- [8] MOON Y, DORNFELD D A. Investigation of the relationship between Preston's coefficient and friction coefficient in chemical mechanical polishing (CMP) of silicon[C]// ASPE 1998 Spring Topical Meeting on Silicon Machining, 1998, Monterey, CA. Raleigh: American Society for Precision Engineering, 1998: 47-48.

作者简介: 周平(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为超精密加工技术和表面功能结构设计与制造。

E-mail: pzhou@dlut.edu.cn