

表面质量控制及检测

# 单晶碳化硅的电磁场励磁大抛光模磁流变抛光

尹韶辉<sup>1</sup>, 邓子默<sup>1</sup>, 郭源帆<sup>1</sup>, 刘坚<sup>1</sup>, 黄帅<sup>1</sup>,  
尹建刚<sup>2</sup>, 卢建刚<sup>2</sup>, 彭博<sup>3</sup>

(1.湖南大学 国家高效磨削工程技术研究中心, 长沙 410082; 2.大族激光科技产业集团股份有限公司, 广东 深圳 518000; 3.中国电子科技集团公司第十三研究所, 广东 深圳 050051)

**摘要:** **目的** 研发一种高精高效单晶碳化硅表面抛光技术。**方法** 采用电磁场励磁的大抛光模磁流变抛光方法加工单晶碳化硅, 利用自制的电磁铁励磁装置与磁流变抛光装置, 进行单因素实验, 研究电流强度、工作间隙和抛光时间等工艺参数对单晶碳化硅磁流变抛光加工性能的影响, 并检测加工面粗糙度及其变化率来分析抛光效果。**结果** 在工作间隙 1.4 mm、电流强度 12 A 的工艺参数下, 加工面粗糙度值随着加工时间的增加而降低, 抛光 60 min 后, 加工面粗糙度值  $R_a$  达到 0.9 nm, 变化率达到 98.3%。加工面粗糙度值随通电电流的增大而减小, 随着工作间隙的增大而增大。在工作间隙为 1.0 mm、通电电流为 16 A、加工时间为 40 min 的优化参数下抛光单晶碳化硅, 可获得表面粗糙度  $R_a$  为 0.6 nm 的超光滑表面。**结论** 应用电磁场励磁的大抛光模盘式磁流变抛光方法加工单晶碳化硅材料, 能够获得亚纳米级表面粗糙度。

**关键词:** 碳化硅晶片; 磁流变抛光; 大抛光模; 表面粗糙度; 电磁场

**中图分类号:** TG707; TG580.692 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)10-0309-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.10.036

## Magnetorheological Polishing Using Large Polishing Tool Excited by Electromagnetic Field for Silicon Carbide Wafer

YIN Shao-hui<sup>1</sup>, DENG Zi-mo<sup>1</sup>, GUO Yuan-fan<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>1</sup>, HUANG Shuai<sup>1</sup>,  
YIN Jian-gang<sup>2</sup>, LU Jian-gang<sup>2</sup>, PENG Bo<sup>3</sup>

(1.National Engineering Research Center for High Efficiency Grinding, Hunan University, Changsha 410082, China;  
2.Han's Laser Technology Industry Group Co., Ltd, Shenzhen 518000, China; 3.The 13th Research Institute,  
China Electronics Technology Group Corporation, Shenzhen 050051, China)

**ABSTRACT:** The work aims to develop a high precision and efficiency polishing technique for single-crystal silicon carbide surface. Single crystal silicon carbide was polished by a magnetorheological polishing method using a large polishing tool excited by an electromagnetic field. The self-developed electromagnet excitation device and magnetorheological polishing device were used for single-factor experiments. Effects of process parameters such as current intensity, working gap and polishing time on polishing performance were studied. The roughness of polished surface and its rate of change were analyzed

收稿日期: 2020-01-07; 修订日期: 2020-03-02

Received: 2020-01-07; Revised: 2020-03-02

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFE0116900); 国家自然科学基金 (51675171)

Fund: National Key R&D Program (2017YFE0116900) and National Natural Science Foundation of China (51675171)

作者简介: 尹韶辉 (1967—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为纳米制造、超精密加工。邮箱: shyin2000@126.com

Biography: YIN Shao-hui(1967—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: nano manufacturing, ultra-precision machining. E-mail: shyin2000@126.com

引文格式: 尹韶辉, 邓子默, 郭源帆, 等. 单晶碳化硅的电磁场励磁大抛光模磁流变抛光[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 309-315.

YIN Shao-hui, DENG Zi-mo, GUO Yuan-fan, et al. Magnetorheological polishing using large polishing tool excited by electromagnetic field for silicon carbide wafer[J]. Surface technology, 2020, 49(10): 309-315.

to investigate the polishing effect. Under the process parameters of working gap of 1.4 mm and current strength of 12 A, the roughness value of the polished surface decreased with the increase of polishing time. After 60 min, the roughness value of the polished surface reached  $Ra$  0.9 nm, and the rate of change reached 98.3%. The roughness of the polished surface decreased with the increase of the current, and increased with the increase of the working gap. Under optimized parameters of the working gap of 1.0 mm, the energized current of 16 A and the processing time of 40 min, an ultra-smooth surface of single crystal silicon carbide was obtained with surface roughness of  $Ra$  0.6 nm. The sub-nanometer surface roughness of single crystal silicon carbide materials can be obtained by the method of magnetorheological polishing using large polishing tool excited by electromagnetic field.

**KEY WORDS:** silicon carbide wafer; magnetorheological polishing; large polishing tool; surface roughness; electromagnetic field

单晶碳化硅材料 (SiC) 作为第三代半导体材料, 具有禁带宽度大、热导率高、电子饱和漂移速率大、临界击穿电场高、相对介电常数低和化学稳定性好等特点, 适合制作高温、高频、大功率和高集成度的电子器件, 是最理想的后续发展材料之一<sup>[1-2]</sup>。同时在光电子领域, 碳化硅也比目前广泛使用的蓝宝石更适合用于大功率白光器件<sup>[3]</sup>。但是碳化硅材料高硬度、高脆性的特点, 给其研抛加工带来困难<sup>[4-5]</sup>。

如何实现高效率、高精度、低成本加工, 成为目前发展碳化硅材料亟待解决的重要难题。针对单晶碳化硅的精密抛光, Aida 等<sup>[6]</sup>采用化学机械抛光 (CMP) 的方式对单晶碳化硅进行了抛光, 使用碱性二氧化硅浆料将材料表面粗糙度抛光至  $Ra$  0.1 nm, 但是其抛光效率偏低。Pan 等<sup>[7]</sup>通过在抛光液中添加过氧化氢, 提高了碳化硅的 CMP 抛光效率。Lee 等<sup>[8-9]</sup>通过单一磨料与混合磨料的单晶碳化硅 CMP 抛光对比实验, 发现添加金刚石磨料能够提高机械去除作用, 并得到了表面粗糙度  $Ra$  为 0.27 nm 的材料表面, 但 CMP 加工时所施加的法向载荷容易使金刚石磨粒对材料造成划伤。Yamamura 等<sup>[10]</sup>通过等离子体氧化对单晶碳化硅材料表面进行抛光, 获得了具有原子台阶的超光滑表面, 但抛光效率偏低。Deng 等<sup>[11-12]</sup>通过将热氧化预处理和软磨料抛光相结合的方法来抛光 4H-SiC, 成功获得亚纳米级的无划痕表面, 但是抛光前需对材料进行高温热氧化预处理。已有的一些单晶碳化硅的抛光方法存在抛光效率低、易产生表面损伤和工艺流程复杂等问题。

磁流变抛光利用磁流变液 (MR fluid) 在磁场区域中发生流变效应而生成硬化区, 硬化区包裹并固定磨粒, 在旋转过程中与工件表面发生相对运动, 产生极大的剪切应力, 从而对工件表面进行材料去除<sup>[13]</sup>。而且磁流变抛光过程中, 磁流变体对工件的法向压力极低, 表面和亚表面损伤极小<sup>[14-15]</sup>。同时磁场约束能将磨粒稳固于抛光模上, 不会产生游离磨料抛光中出现的磨粒无法稳定分布等问题, 从而保证抛光效率和精度, 可用于抛光碳化硅材料<sup>[16]</sup>。传统的轮式磁流变抛光方法仅能在局部进行点加工, 抛光效率低, 无法

满足单晶碳化硅高效的加工要求<sup>[17-18]</sup>。潘继生等<sup>[19]</sup>利用集群磁流变抛光方式抛光 6H-SiC 芯片, 获得了表面粗糙度  $Ra$  为 1.9 nm 的表面。但该方式存在流体难以更新、磁场难以调整以及磁流变抛光垫活性不足等问题<sup>[20]</sup>。本课题组前期研发了大抛光模盘式磁流变抛光技术, 能够在特定区域产生大面积磁场, 通过旋转抛光盘不断更新抛光区域内磨粒, 可有效加工氧化锆、蓝宝石等硬脆材料<sup>[21-22]</sup>。

为实现单晶碳化硅的高效、高精加工, 同时获得纳米级表面, 本文采用电磁场励磁的大抛光模盘式磁流变抛光方法对单晶碳化硅进行抛光。首先介绍了电磁场励磁的大抛光模盘式磁流变抛光原理及装置, 配制了相关抛光液, 试验研究了电流强度、工作间隙、抛光时间等因素对单晶碳化硅抛光效果的影响。

## 1 抛光机理及装置

图 1 为电磁场励磁的大抛光模盘式磁流变抛光机理。工件装夹在工件轴的夹具上, 可随工件轴旋转和上下移动。抛光盘底部安装有聚氨酯抛光垫, 用于增大磁流变液对抛光槽的粘附力, 从而提高磁流变液在抛光槽中的旋转速度。为保证工件底部与磁流变抛光体的接触, 工件需要与抛光垫保持一定的间隙 (即工作间隙), 工作间隙的大小会影响加工效果。电磁励磁装置作为磁场发生器, 当线圈中通入恒定电流时, 磁极将因为间隙漏磁原理产生稳定磁场。抛光过程中, 当磁流变液流到励磁装置上方时, 在磁场作用下, 其内的磁性颗粒 (CIP particle) 迅速形成线形磁簇, 形成具有高剪切屈服应力的大抛光模, 磨粒被镶嵌在内, 在转台和工件的旋转下, 磨粒与工件之间产生摩擦去除作用, 从而对工件表面进行加工。

图 2 为磁流变抛光设备, 工件和夹具安装在工件主轴上, 电机通过带传动驱动主轴旋转。抛光槽通过底部的抛光槽主轴带动旋转, 磁流变抛光液于抛光槽内, 随抛光槽旋转而运动。电磁励磁装置安装于抛光槽下, 电磁铁部分由励磁磁轭与励磁线圈构成, 励磁磁轭根据间隙漏磁原理制作, 两个磁极头之间有一定

间隙，磁轭通电后，能在上方产生梯度磁场。励磁线圈安装在磁轭上，通电后能在磁轭内部产生稳定磁场。DC 电源用于给励磁线圈供电，保证通电电流的稳定。

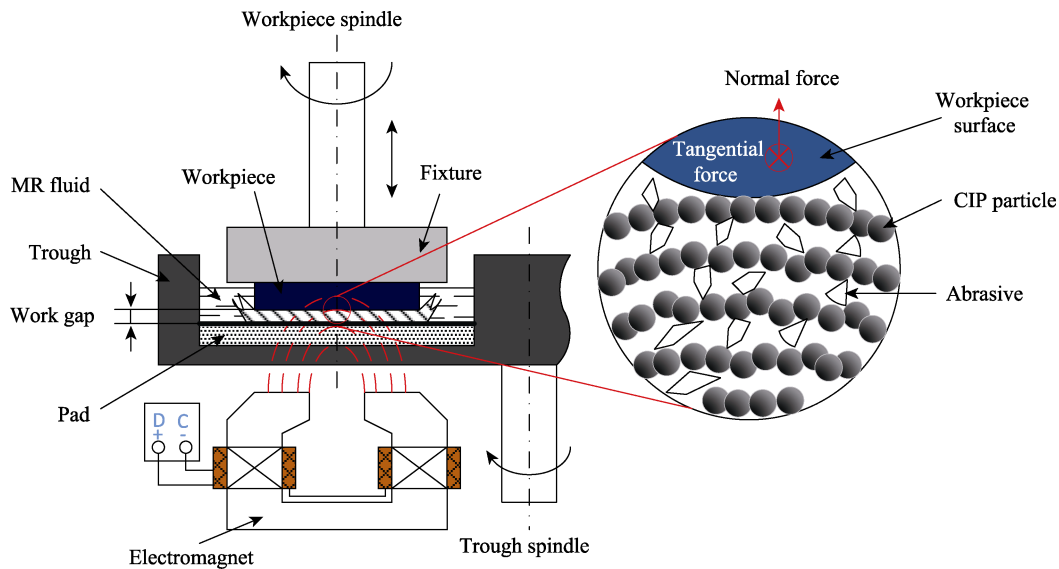


图 1 电磁场的励磁大抛光模磁流变抛光机理  
Fig.1 Schematic illustration of magnetorheological polishing using large polishing tool excited by electromagnetic field

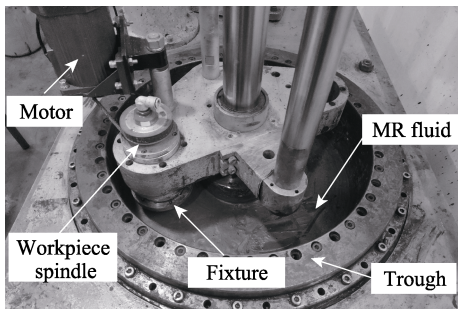


图 2 磁流变抛光设备及其励磁装置  
Fig.2 Magnetorheological polishing equipment and its excitation device

2 抛光试验条件和方法

使用自制的电磁场励磁的抛光装置，进行单因素试验，研究电流强度、工作间隙、抛光时间对单晶碳化硅抛光表面质量的影响。

2.1 抛光液的制备

配制的磁流变抛光液由基液（去离子水）、抗氧化添加剂（NaOH）、铁粒子（羰基铁粉）、金刚石磨粒（粒径 3.5 μm）和表面活性剂（PVP-K30）组成。

其中使用去离子水是为了避免其他离子混入，对实验产生影响，抗氧化剂用于避免碳基铁粉被氧化，羰基铁粉用于构成强磁性悬浮液体，活性剂的作用则是使抛光液中各粒子能稳定分散在抛光液中。抛光液的详细成分见表 1。

表 1 磁流变抛光液成分	
Tab.1 Magnetorheological polishing liquid composition	
Parameters	Value
Volume of MR Fluid	1000 mL
pH	13
Carbonyl iron powders	40%
Deionized water	45%
Active agent	1%
Antioxidants	4%
Diamond abrasives	10%

2.2 试验条件

为了探究工艺参数对工件抛光效果的影响，选取电流强度、工作间隙、抛光时间三组主要因素进行抛光试验，各组工艺参数见表 2。第 1 组试验是研究电

表 2 工艺参数			
Tab.2 Process parameters			
Test number	Current intensity/A	Work gap/mm	Polishing time/min
1	8, 10, 12, 14, 16	1.4	60
2	12	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8	60
3	12	1.4	20, 40, 60, 80, 100, 120

流强度对抛光效果的影响,在工作间隙为 1.4 mm、抛光时间为 60 min 的条件下,对单晶碳化硅采用不同的电流强度进行加工。第 2 组试验是研究工作间隙对抛光效果的影响,在电流强度为 12 A、抛光时间为 60 min 的条件下,对单晶碳化硅采用不同的工作间隙进行加工。第 3 组试验是探究抛光时间对抛光效果的影响,在电流强度为 12 A、工作间隙为 1.4 mm 的条件下,对单晶碳化硅采用不同的抛光时间进行加工。

## 2.3 抛光样品

试样材料为单晶碳化硅(4H-SiC),其性能参数见表 3。正晶向的单晶碳化硅,一面是硅面,另一面是碳面,实验前测得硅面粗糙度  $Ra$  为 60 nm~100 nm,且表面缺陷较多。对硅面进行抛光试验,结束后,使用无水乙醇去除材料表面残留的抛光液,再用去离子水作清洗剂进行清洗,最后烘干试样,使用白光干涉仪(Zygo New View7100)对其进行表面粗糙度的测量,并计算试验前后粗糙度  $Ra1$  与  $Ra2$  的变化率  $\Delta Ra$ ,用于评估实验效果,计算方法如式(1)所示:

$$\Delta Ra = \frac{Ra1 - Ra2}{Ra1} \quad (1)$$

表 3 单晶 4H 碳化硅性能参数

Tab.3 Performance parameters of single crystal 4H silicon carbide

Properties	Value
Density/(g·cm <sup>-3</sup> )	3.2
Moh's hardness	9.5
Microhardness/(kg·mm <sup>-2</sup> )	3300
Modulus of elasticity/GPa	420
Thermal conductivity/(W·K <sup>-1</sup> ·cm <sup>-1</sup> )	3.7
Doping type	N

## 3 结果与分析

### 3.1 抛光时间对加工面粗糙度及微观形貌的影响

图 3 为加工面粗糙度及其变化率随抛光时间的变化情况。在加工的初始阶段,加工面粗糙度迅速降低,随着加工时间的延长,粗糙度值下降速度减缓。抛光前,粗糙度值  $Ra$  为 65.0 nm(图 4),表面比较粗糙,材料容易被去除,所以在抛光前 20 min 内,加工面粗糙度  $Ra$  迅速下降至 12.7 nm。抛光至 40 min 时,  $Ra$  值降至 3.1 nm。抛光 60 min 后,表面粗糙度  $Ra$  降为 0.9 nm。加工后期,表面越来越光滑,加工面粗糙度值下降速度变慢。图 5 为白光干

涉仪观察到的表面微观形貌,可以发现,抛光前,材料表面有大量缺陷,例如划痕、凹坑等。抛光 20 min 后,这些缺陷被大量去除,表面质量得到极大改善,抛光 40 min 后,表面仍有细微凹坑、划痕。当抛光时间长于 60 min 后,表面的缺陷基本被消除,趋于平滑。抛光 120 min 后,表面粗糙度  $Ra$  降为 0.4 nm。

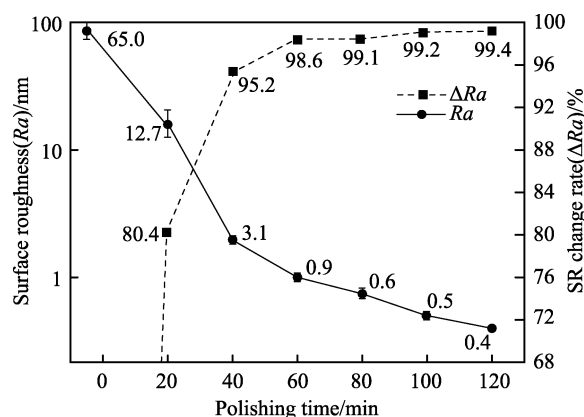


图 3 表面粗糙度随抛光时间的变化  
Fig.3 Variation of surface roughness with polishing time

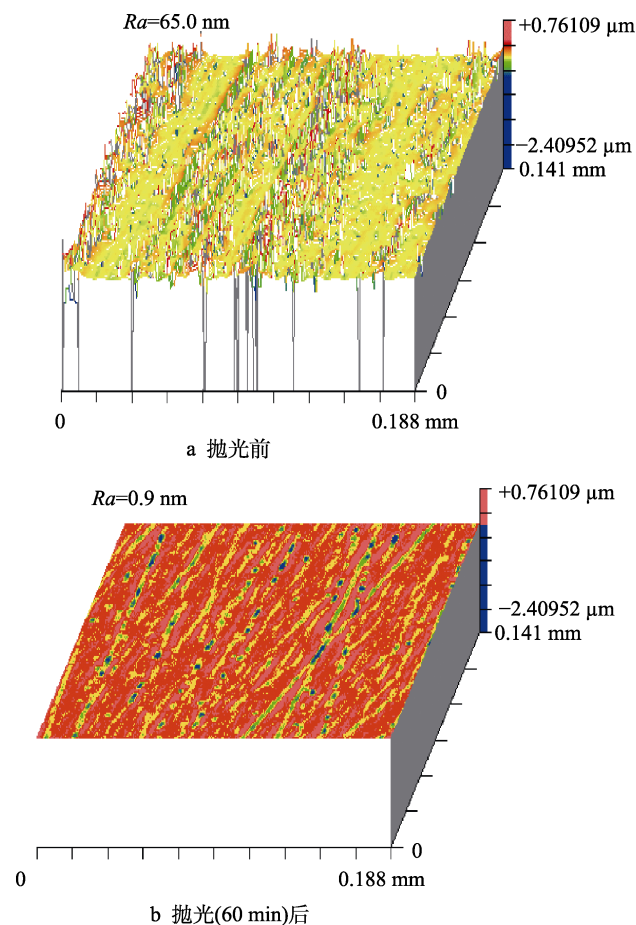


图 4 不同抛光时间下的材料表面微观形貌  
Fig.4 Microstructure of material surface under different polishing time: a) before polishing; b) after polishing (60 min)



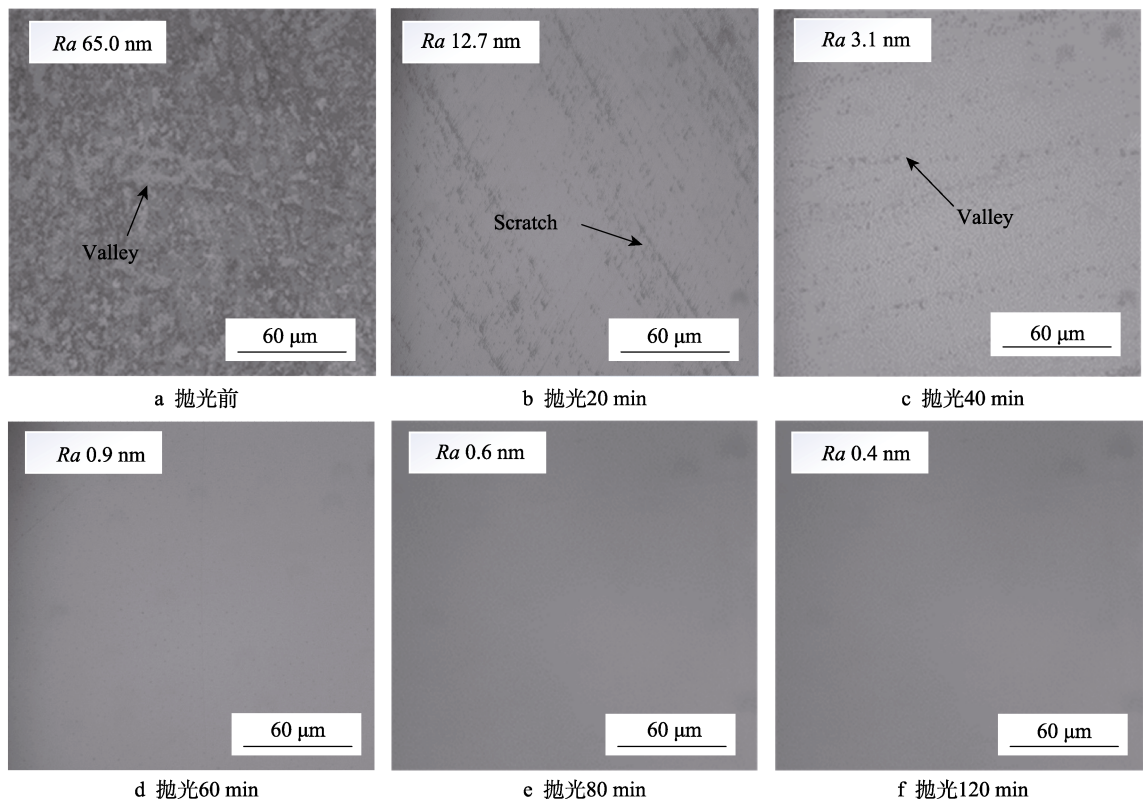


图 5 不同抛光时间的材料表面微观图

Fig.5 Micrographs of the surface for different polishing time: a) before polishing; b) polishing for 20 min; c) polishing for 40 min; d) polishing for 60 min; e) polishing for 80 min; f) polishing for 120 min

3.2 工作间隙对表面粗糙度的影响

图 6 反映了工作间隙对单晶碳化硅表面粗糙度的影响。可以发现，表面粗糙度值随着工作间隙的增大而减小。因为励磁装置所产生的磁场强度将随着空间距离的增长呈指数型衰减，所以工作间隙越大，加工面的磁场强度减小得越快，则在此磁场强度下所形成的磁流变体屈服强度也很小，不能有效地去除材料，导致抛光后材料表面粗糙度值变化率较低。工作间隙为 1.0 mm 时，加工后，材料表面粗糙度值  $Ra$  为 0.7 nm，此时粗糙度值变化率最高，达到 98.9%。加工面粗糙度值在加工间隙小于 1.4 mm 时相差不

大，而当工作间隙超过 1.4 mm 时，加工面粗糙度迅速增大，这说明当工作间隙大于一定值时，在该加工间隙处的磁场强度已经不足以使磁流变液具有高强度的剪切应力，无法对材料进行有效去除，导致表面粗糙度值较高。

3.3 通电电流对表面粗糙度的影响

如图 7 所示，表面粗糙度值的变化率随通电电流的增加而增大。这是因为随着通电电流的增大，励磁装置产生的磁场强度增强，在磁场中同一间隙下形成的磁流变体屈服强度增大，抛光体对工件的剪切去除作用增强，材料去除量有所增加，其表面粗糙度值变化率也得到了相应的增加。当通电电流为 8 A 时，加工后的表面粗糙度值  $Ra$  为 8.2 nm，而当通电电流为 16 A 时，加工后的表面粗糙度值  $Ra$  为 0.6 nm。从抛光后工件表面粗糙度值的变化曲线来看，其随着电流强度的增加，呈现先减小后稳定的趋势。这是因为随着电流强度的增加，其磁流变体的剪切屈服强度增大，提高了其抛光能力，使得加工后的工件表面更加光滑。但是随着电流强度的进一步增大，其表面粗糙度值基本不再变化。这是因为当电流强度增大到一定值时，磁流变液中的磁感应强度将逐渐达到饱和，继续增加通电电流，磁感应强度增加不明显，抛光液所具有的剪切屈服强度不再增大，对材料的去除效率不再有明显增加，使得加工面的表面粗糙度值相差不大。

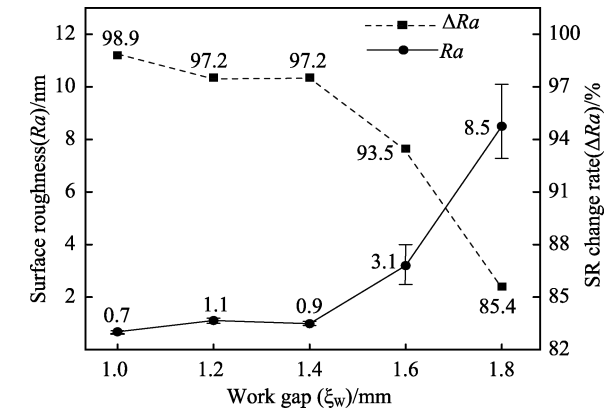


图 6 工作间隙对抛光效果的影响

Fig.6 Influence of working gap on polishing effect

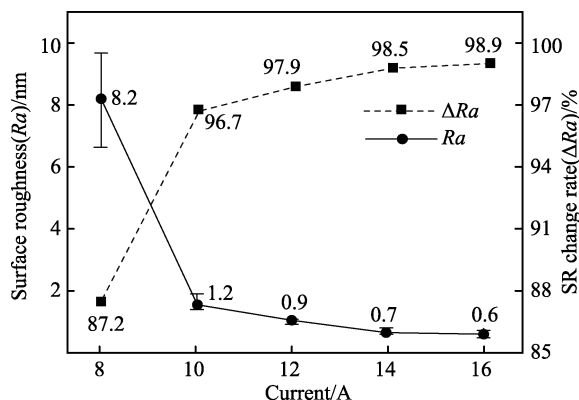


图7 通电电流对抛光效果的影响

Fig.7 Effect of current applied on polishing effect

## 4 参数优化及试验验证

为了提高抛光工艺对碳化硅材料的加工效率,通过上述抛光试验,选取在单因素实验中抛光结果最好的参数,即16 A的通电电流、1.0 mm的工作间隙、40 min的抛光时间,进行抛光试验验证。图8为工艺优化前后的材料抛光表面形貌对比,图8a为在通电电流12 A、工作间隙1.4 mm、加工时间40 min的未优化参数下的加工面微观形貌,图8b为在通电电流16 A、工作间隙1.0 mm、加工时间40 min的优化参数下的加工面微观形貌。由图8可以看出,抛光工艺优化后,表面粗糙度 $Ra$ 达到0.6 nm,相比优化前的加工面,表面粗糙度值减小了80.6%。

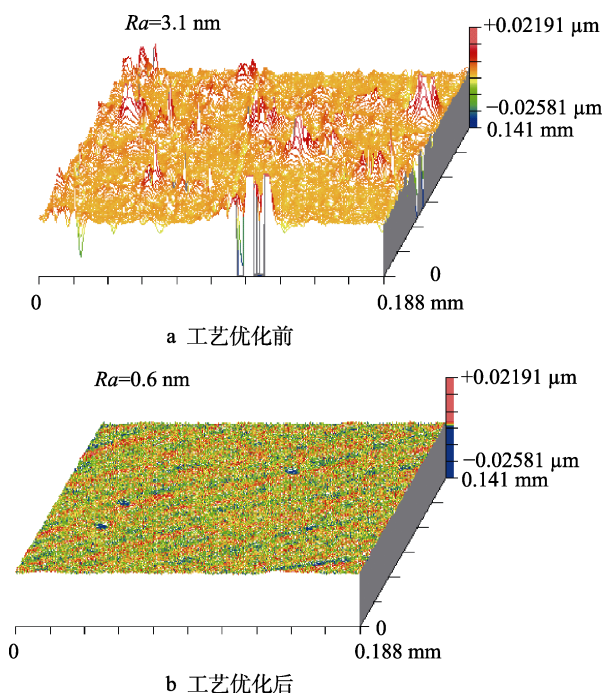


图8 工艺优化前后加工面微观形貌

Fig.8 Comparison of Surface morphologies before (a) and after (b) process optimization

## 5 结论

1) 应用电磁场励磁的大抛光模盘式磁流变抛光方法加工单晶碳化硅材料,可获得亚纳米级表面粗糙度。

2) 材料表面粗糙度值随着通电电流的增大而减小,随工作间隙的增大而增大。

3) 对单晶碳化硅电磁场励磁的磁流变抛光工艺参数进行优化,在工作间隙为1.0 mm、通电电流为16 A的工艺条件下,单晶碳化硅抛光40 min后,表面粗糙度值 $Ra$ 达到0.6 nm。相比于参数未优化的试验结果,抛光后材料的表面粗糙度值减小了80.6%。

## 参考文献:

- [1] CASADY J B, JOHNSON R W. Status of silicon carbide (SiC) as a wide-bandgap semiconductor for high-temperature applications: a review[J]. Solid-state electronics, 1996, 39(10): 1409-1422.
- [2] SIERGIEJ R R, CLARKE R C, SRIRAM S, et al. Advances in SiC materials and devices: an industrial point of view[J]. Materials science and engineering B, 1999, 61-62: 9-17.
- [3] 李娟, 陈秀芳, 马德营, 等. SiC单晶片的超精密加工[J]. 功能材料, 2006(1): 70-72.  
LI Juan, CHEN Xiu-fang, MA De-ying, et al. High-precision processing of silicon carbide[J]. Journal of functional materials, 2006(1): 70-72.
- [4] KATO T, WADA K, HOZOMI E, et al. High throughput SiC wafer polishing with good surface morphology[J]. Materials science forum, 2007, 556-557: 753-756.
- [5] LUO Q, LU J, XU X. Study on the processing characteristics of SiC and sapphire substrates polished by semifixed and fixed abrasive tools[J]. Tribology international, 2016, 104: 191-203.
- [6] AIDA H, DOI T, TAKEDA H, et al. Ultraprecision CMP for sapphire, GaN, and SiC for advanced optoelectronics materials[J]. Current applied physics, 2012, 12(S2): S41-S46.
- [7] PAN G, ZHOU Y, LUO G, et al. Chemical mechanical polishing (CMP) of on-axis Si-face 6H-SiC wafer for obtaining atomically flat defect-free surface[J]. Journal of materials science: materials in electronics, 2013, 24(12): 5040-5047.
- [8] LEE H S, JEONG H D. Chemical and mechanical balance in polishing of electronic materials for defect-free surfaces[J]. CIRP annals, 2009, 58(1): 485-490.
- [9] LEE H S, KIM D I, AN J H, et al. Hybrid polishing mechanism of single crystal SiC using mixed abrasive slurry (MAS)[J]. CIRP annals, 2010, 59(1): 333-336.
- [10] YAMAMURA K, TAKIGUCHI T, UEDA M, et al. Plasma assisted polishing of single crystal SiC for obtaining atomically flat strain-free surface[J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2011, 60: 571-574.

- [11] DENG H, NIAN L, ENDO K, et al. Atomic-scale finishing of carbon face of single crystal SiC by combination of thermal oxidation pretreatment and slurry polishing[J]. *Applied surface science*, 2017, 434:40-48.
- [12] DENG H, ENDO K, YAMAMURA K. Damage-free and atomically-flat finishing of single crystal SiC by combination of oxidation and soft abrasive polishing[J]. *Procedia CIRP*, 2014, 13: 203-207.
- [13] KORDONSKI W I, JACOBS S D. Magnetorheological finishing[J]. *International journal of modern physics B*, 1996, 10(23-24): 2837-2848.
- [14] KORDONSKI V, GOLINI D, DUMAS P, et al. Magnetorheological-suspension-based finishing technology[J]. *Proceedings of SPIE—the International Society for Optical Engineering*, 1998, 3326: 650-654.
- [15] LUO H, YIN S, ZHANG G, et al. Optimized pre-thinning procedures of ion-beam thinning for TEM sample preparation by magnetorheological polishing[J]. *Ultramicroscopy*, 2017, 181: 165-172.
- [16] WANG Y Q, YIN S H, HUANG H, et al. Magnetorheological polishing using a permanent magnetic yoke with straight air gap for ultra-smooth surface planarization[J]. *Precision engineering*, 2015, 40: 309-317.
- [17] JIAO L, WU Y, WANG X, et al. Fundamental performance of magnetic compound fluid (MCF) wheel in ultra-fine surface finishing of optical glass[J]. *International journal of machine tools and manufacture*, 2013, 75: 109-118.
- [18] KORDONSKI W I, GOLINI D. Fundamentals of magnetorheological fluid utilization in high precision finishing[J]. *Journal of intelligent material systems and structures*, 1999, 10(9): 683-689.
- [19] 潘继生, 阎秋生, 徐西鹏, 等. 单晶 SiC 基片的集群磁流变平面抛光加工[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(18): 2495-2499.
- PAN Ji-sheng, YAN Qiu-sheng, XU Xi-peng, et al. Cluster magnetorheological effect plane polishing on SiC single crystal slice[J]. *China mechanical engineering*, 2013, 24(18): 2495-2499.
- [20] JAIN V K, RANJAN P, SURI V K, et al. Chemo-mechanical magneto-rheological finishing (CMMRF) of silicon for microelectronics applications[J]. *CIRP annals-manufacturing technology*, 2010, 59(1): 323-328.
- [21] 尹韶辉, 王永强, 李叶鹏, 等. 蓝宝石基片的磁流变化学抛光试验研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(5): 80-87.
- YIN Shao-hui, WANG Yong-qiang, LI Ye-peng, et al. Experimental study on magnetorheological chemical polishing for sapphire substrate[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2016, 52(5): 80-87.
- [22] 郭美键, 罗虎, 王长兵, 等. 氧化锆陶瓷大抛光模磁流变抛光试验研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(7): 28-34.
- GUO Mei-jian, LUO Hu, WANG Chang-bing, et al. Experimental study on magnetorheological finishing using large polishing tool for zirconia ceramic plane[J]. *Surface technology*, 2018, 47(7): 28-34.

(上接第 293 页)

- [22] FOROOZMEHR E, LIN D, KOVACEVIC R. Application of vibration in the laser powder deposition process[J]. *Journal of manufacturing processes*, 2009, 11(1): 38-44.
- [23] CHEN Shang-liang, HSU Lon-lei. In-process vibration-assisted high power Nd:YAG pulsed laser ceramic-metal composite cladding on Al-alloys[J]. *Optics & laser technology*, 1998, 50(5): 263-273.
- [24] 胡勇, 陈智君, 王梁, 等. 静态磁场对激光熔池传热及流动行为的调控作用数值模拟[J]. *应用激光*, 2014(6): 508-512.
- HU Yong, CHEN Zhi-jun, WANG Liang, et al. Numerical simulation of the static magnetic field regulation of the laser molten pool heat transfer and flow behavior[J]. *Applied laser*, 2014(6): 508-512.
- [25] GAN Zheng-tao, YU Gang, HE Xiu-li, et al. Numerical simulation of thermal behavior and multicomponent mass transfer in direct laser deposition of Co-base alloy on steel[J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2017, 104: 28-38.
- [26] GAN Zheng-tao, LIU Hao, LI Shao-xia, et al. Modeling of thermal behavior and mass transport in multi-layer laser additive manufacturing of Ni-based alloy on cast iron[J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2017, 111: 709-722.
- [27] 袁易全. 近代超声原理及应用[M]. 南京: 南京大学出版社, 1996.
- YUAN Yi-quan. Principles and applications of modern ultrasound[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1996.
- [28] MILLS K C. Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2002.
- [29] BOGAARD R H, DESAI P D, LI H H, et al. Thermophysical properties of stainless steels[J]. *Thermochimica acta*, 1975, 218: 373-393.
- [30] 刘振侠. 激光熔凝和激光熔覆的数学模型及数值分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2003: 81-100.
- LIU Zhen-xia. Modeling and numerical simulation on laser remelting and cladding[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003: 81-100.
- [31] 陈宗洪, 王光信, 徐桂英. 胶体与界面化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- CHEN Zong-qi, WANG Guang-xin, XU Gui-ying. Colloid and interface chemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.