

文章编号 1004-924X(2017)10-2714-11

## RB-SiC 亚表面损伤检测及其旋转 超声磨削亚表面损伤特征

秦娜, 郑亮\*, 刘亚龙, 孔春雷

(西南交通大学机械工程学院, 四川成都 610031)

**摘要:** 分别采用截面抛光法(包括以硅片作陪衬与以聚酯作陪衬两种形式)和界面黏接法检测了反应烧结碳化硅(Reaction Bonded SiC, RB-SiC)旋转超声磨削加工的亚表面损伤。为确定其中的最佳检测形式,采用表面破碎层深度、最大破碎层深度、平均裂纹深度、最大裂纹深度4个亚表面损伤评价指标对两种方法分别检测到的RB-SiC旋转超声磨削亚表面损伤进行对比分析。结果显示:截面抛光法(硅片作陪衬)检测到的4个指标值依次为3.30  $\mu\text{m}$ 、6.59  $\mu\text{m}$ 、8.64  $\mu\text{m}$ 、17.44  $\mu\text{m}$ ;截面抛光法(聚酯作陪衬)检测到的4个指标值依次为5.71  $\mu\text{m}$ 、14.33  $\mu\text{m}$ 、15.36  $\mu\text{m}$ 、54.82  $\mu\text{m}$ ;而界面黏接法检测到的4个指标值依次为9.19  $\mu\text{m}$ 、19.45  $\mu\text{m}$ 、13.04  $\mu\text{m}$ 、32.20  $\mu\text{m}$ 。试验结果表明,截面抛光法(硅片作陪衬)检测的精度更高,检测的亚表面损伤更符合实际情况。最后,基于此方法,对旋转超声磨削RB-SiC材料的亚表面损伤特征进行了总结。

**关键词:** 旋转超声磨削;反应烧结碳化硅(RB-SiC)材料;亚表面损伤;截面抛光法;界面黏接法

**中图分类号:** TG54; TQ163.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172510.2714

## Subsurface damage detection of RB-SiC and its subsurface damage characteristics in rotating ultrasonic grinding

QIN Na, ZHENG Liang\*, LIU Ya-long, KONG Chun-lei

(Department of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

\* Corresponding author, E-mail: 598167647@qq.com

**Abstract:** A cross-sectional polishing method (taking a silicon as foil or taking a polyester as foil) and a bonded interface sectioning method were used to test the subsurface damage of RB-SiC (reaction bonded SiC) in rotary ultrasonic grinding (RUG) respectively. To determine the optimal test form, four kinds of subsurface damage evaluation indexes, namely average chipping layer depth, maximum chipping layer depth, average crack depth and maximum crack depth were used to analyze and compare the subsurface damages of RB-SiC in the RUG tested by the two methods mentioned above. The results show that the evaluation indexes from cross-sectional polishing method (the silicon as foil) are 3.30  $\mu\text{m}$ , 6.59  $\mu\text{m}$ , 8.64  $\mu\text{m}$ , and 17.44  $\mu\text{m}$ , those from the cross-sectional polishing method (the polyester as foil) are 5.71  $\mu\text{m}$ , 14.33  $\mu\text{m}$ , 15.36  $\mu\text{m}$ , and 54.82  $\mu\text{m}$ , and those from the bonded interface

**收稿日期:** 2017-04-28; **修订日期:** 2017-05-22.

**基金项目:** 教育部重点实验室开放式基金资助项目(No. JMTZ201605);国家自然科学基金资助项目(No. 51305369);中国博士后科学基金资助项目(No. 2012M521708);高等学校博士学科点专项科研基金新教师类课题资助项目(No. 20130184120007);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. SWJTU11CX023)

sectioning method are  $9.19\ \mu\text{m}$ ,  $19.45\ \mu\text{m}$ ,  $13.04\ \mu\text{m}$ , and  $32.20\ \mu\text{m}$ . It demonstrates that the cross-sectional polishing method (the silicon as foil) has the higher test accuracy, and the detection result is more in line with the actual situation. Finally, the paper summarizes subsurface damage characteristics of RB-SiC in the RUG.

**Key words:** rotary ultrasonic grinding; reaction Bonded SiC (RB-SiC); subsurface damage; cross-sectional polishing; bonded interface sectioning

## 1 试验研究方案

反应烧结碳化硅 (Reaction Bonded SiC, RB-SiC) 是一种复合材料, 具有比刚度大、密度低、热膨胀系数小、导热性好、强度和硬度高等优良特性; 同时该材料的制备工艺简单、成本低, 镜体成形后收缩率小, 可以制作复杂结构的镜体, 因此在空间光学领域有很好的运用前景。目前, RB-SiC 是制作空间反射镜, 尤其是大口径空间反射镜的首选材料之一<sup>[1]</sup>。然而 RB-SiC 是高硬度高脆性材料, 在磨削过程中, 容易引入亚表面损伤, 这些损伤会造成材料强度的下降, 严重影响加工工件的使用寿命。

为减小并最终去除磨削加工所产生的损伤, 科研人员对有效检测磨削加工中产生的亚表面损伤的方法和损伤的深度、分布规律和产生机理进行了深入的研究。目前, 已提出了许多对机械加工产生的亚表面损伤的检测方法。根据检测试件是否被破坏这些检测方法可分为破坏性检测和非破坏性检测两种。常用的破坏性检测方法如化学蚀刻法、截面显微法 (包括截面抛光法与界面黏接法)、角度抛光法和磁流变抛光法等; 非破坏性检测方法主要有激光调制散射 (Laser Modulated Scattering, LMS) 技术、内反射检测 (Total Internal Reflection Microscopy, TIRM) 技术、光学相干层析 (OCT) 技术、高频扫描声学显微 (High-frequency Scanning Acoustic Microscopy, HF-SAM) 技术和共焦激光扫描显微 (Confocal Laser Scanning Microscopy, CLSM) 技术等。破坏性检测方法的主要优点是直观获取损伤信息, 且原理简单易实现, 但存在检测样品易被破坏、检测效率低、检测样品容易二次损伤和只能检测局部区域等缺点; 非破坏性检测方法尽管不破坏检测样品且检测周期短, 但相对于破坏性检测方法, 此类方法测量精度低、探测深度浅、测试系统成本高,

时间长且测量结果不直观。鉴于破坏性检测方法的种种优点, 其仍然是一种不可替代的技术手段<sup>[2-3]</sup>。

目前, 对碳化硅磨削亚表面损伤的检测仍主要采用破坏性检测方法。王健等人<sup>[4]</sup>研究了截面显微法 (截面抛光) 和角度抛光法, 结果表明: 截面显微法更能直观地反映出损伤的形态和分布特征, 适用于亚表面损伤机理的研究, 而角度抛光法测量损伤深度则更为精确。此外, Zhang 等人<sup>[5]</sup>应用角度抛光法, 刘民慧<sup>[6]</sup>、梁晓辉<sup>[7]</sup>采用了离子束截面抛光方法, 曾艳芬<sup>[8]</sup>采用了截面显微法 (截面抛光), 姚旺<sup>[9]</sup>、Agarwal 等人<sup>[10]</sup>采用是截面显微法 (界面黏接) 分别对碳化硅亚表面损伤进行了检测。综上所述, 现阶段仍多使用截面显微法对碳化硅亚表面损伤进行检测, 且截面显微法所包含的截面抛光法与界面黏接法均有使用, 但对于哪一种方法更适合碳化硅材料的亚表面损伤检测的研究成果仍就少见。

旋转超声磨削加工将超声加工与传统的金刚石磨削加工结合起来, 具有加工效率高、加工表面完整性好、刀具磨损程度小等优点, 因此被公认为是实现脆性材料加工的有效方法<sup>[11-12]</sup>。本文分别采用截面抛光法和界面黏接法对 RB-SiC 旋转超声磨削加工亚表面损伤进行检测 (其中截面抛光法包括以聚酯作陪衬与以硅片作陪衬两种形式), 通过对比分析检测结果确定最优检测方法, 并对最优方法获得的亚表面损伤进行了特征分析。

## 2 试验方案

### 2.1 样品准备

试验材料为颗粒增强复合材料 RB-SiC, 由不同粒径的 SiC 颗粒与单质游离硅组成。

图 1 所示为抛光后的 RB-SiC 材料表面显微图, a 为 SiC 颗粒, b 为单质游离硅。原始材料为一块  $500\ \text{mm} \times 240\ \text{mm} \times 240\ \text{mm}$  的 RB-SiC, 采

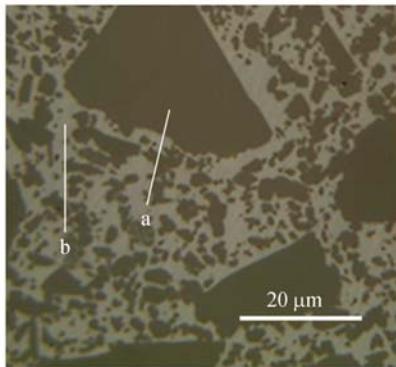
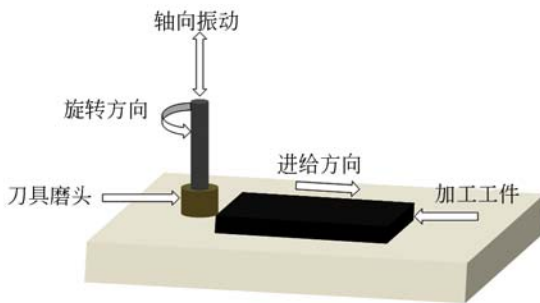


图 1 抛光后的 RB-SiC 表面显微图

Fig. 1 Microstructure of RB-SiC after polishing



(a) 磨削模型

(a) Grinding model



(b) 金刚石砂轮

(b) Grinding tool

图 2 磨削加工示意图与磨削工具

Fig. 2 Schematic of grinding and grinding tool

用电火花线切割机从原始材料块上切割得到  $10\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 4\text{ mm}$  的加工样块。

磨削试验使用的是郑州三磨所生产的粒度为 #100、磨料浓度为 100% 的金属基金刚石砂轮，砂轮外径为 10 mm，内径为 6 mm。采用端面磨削方式来加工工件材料，加工示意图及金刚石砂

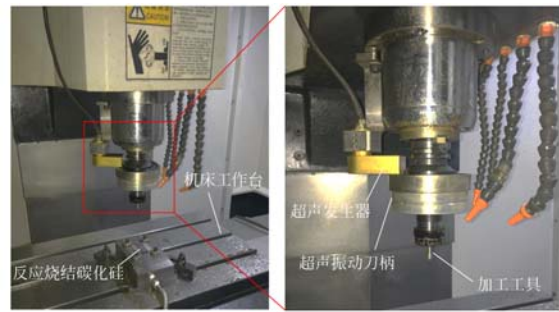


图 3 加工机床结构

Fig. 3 Structure of machine tool

轮如图 2 所示。试验在自主装配的超声振动数控机床上进行，机床是型号为 XK714D 的三坐标立式数控钻铣床，超声振动磨削试验装置如图 3 所示。由于振幅测定困难，研究者多采用超声功率来表征超声振动的强弱<sup>[13-15]</sup>，故本文也采用超声功率作为加工参数。磨削时采用 WF-8-II 型水基半透明多功能切削液通过外喷进行冷却。为充分去除前一道线切割工序所带来的损伤，按表 1 所示的第一组参数进行 10 次磨削进给；为去除上一磨削工序所带来的损伤，按表 1 中的第二组参数进行 5 次磨削进给，所有试验样品都采用同样的试验程序，最大程度地保证样品的初始状态一致。

表 1 加工参数

Tab. 1 Processing parameters

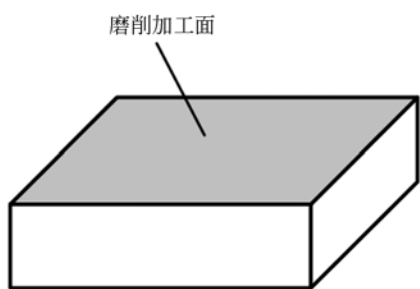
水平	主轴转速 $/(r \cdot \text{min}^{-1})$	进给速度 $/(mm \cdot \text{min}^{-1})$	磨削深 度/mm	超声波 功率/W	超声振动 频率/kHz
1	3 000	100	0.05	275	22
2	3 000	100	0.02	275	22

## 2.2 亚表面损伤检测方法

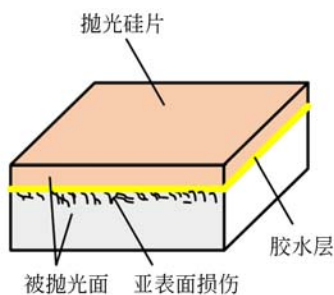
### 2.2.1 截面抛光法(硅片作陪衬)

图 4 所示为截面抛光法(硅片作陪衬)的原理示意图。具体工艺过程为:(1)电火花切割机将加工好的  $10\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 4\text{ mm}$  样块切割成两块  $5\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 4\text{ mm}$  的样块,  $10\text{ mm} \times 12\text{ mm}$  面为磨削加工面;(2)在  $5\text{ mm} \times 12\text{ mm}$  的加工表面上用 AB 胶黏接抛光硅片作为陪片,在粘贴的过程中给陪片和 RB-SiC 样块施加一定压力,以保证陪片和 RB-SiC 样块之间的胶层均匀、细密,将抛光硅片作为陪片的作用是保护加工表面和作为损伤测量的基准;(3)研磨抛光样品截面,研磨抛光在 UNIPOL-802 型研磨抛光机上进行,为充

分去除电火花线切割所引入的表面/亚表面损伤,首先采用粒度为 # 600 的金刚石研磨盘进行研磨,研磨去除厚度为 0.5 mm,再依次使用粒度为 # 1200、# 4000、# 8000 的金刚石研磨盘对截面进行研磨,最后采用粒径为 0.02 μm 态的金刚石研磨盘对截面进行抛光,每一道工序的时间需要足够长,以保证完全去除上一道工序引入的损伤且研磨抛光完成后,使用光学显微镜在远离加工表面的材料内部不能观察到损伤痕迹;(4)用酒精对抛光面进行清洗并风干,利用光学显微镜对抛光面进行观测,获得损伤图像。



(a) 磨削加工  
(a) Grinding



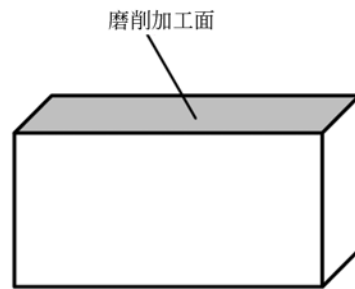
(b) 磨削加工面上黏接硅片并抛光截面  
(b) Bonding wafer and polishing cross section

图 4 截面抛光法(硅片作陪衬)原理示意图

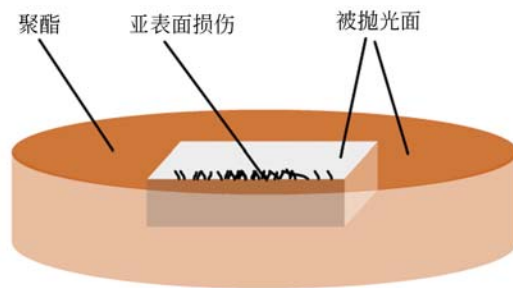
Fig. 4 Schematic diagram of cross-sectional polishing method by taking silicon wafer as foil

### 2.2.2 截面抛光法(聚酯作陪衬)

图 5 所示为截面抛光法(聚酯作陪衬)原理示意图。具体工艺过程为:(1)将已加工的 10 mm × 12 mm × 4 mm 样块切割成两块 5 mm × 12 mm × 4 mm 的样块,10 mm × 12 mm 面为加工面;(2)将 5 mm × 12 mm × 4 mm 样块镶嵌在聚酯中,截面朝上露出;(3)对截面进行研磨抛光,其研磨抛光工序与截面抛光法(硅片作陪衬)的研磨抛



(a) 磨削加工  
(a) Grinding



(b) 镶嵌已加工样块并抛光截面  
(b) Embedding RB-SiC specimens in polyester and polishing cross section

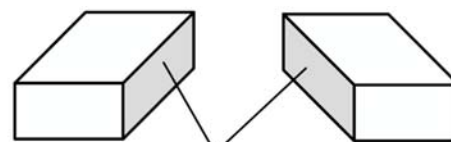
图 5 以聚酯作陪衬的截面抛光原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of cross-sectional polishing method with polyester as foil

光工序相同;(4)清洗风干样品,利用光学显微镜对抛光面进行观测,获得损伤图像。

### 2.2.3 界面黏接法

如图 6 所示为界面黏接法原理示意图。具体工艺过程为:(1)采用电火花线切割机切割出两块 5 mm × 12 mm × 4 mm 的 RB-SiC 块,将两个样块的 12 mm × 4 mm 面均进行研磨抛光,研磨抛光工序与截面抛光法(硅片作陪衬)的研磨抛光工序相同;(2)用 AB 胶将两抛光面黏接在一起,黏接时施加一定压力;(3)磨削加工黏接后形成 10 mm × 12 mm 面;(4)加工后的样品放入装有丙酮



(a) 抛光截面  
(a) Polishing cross section

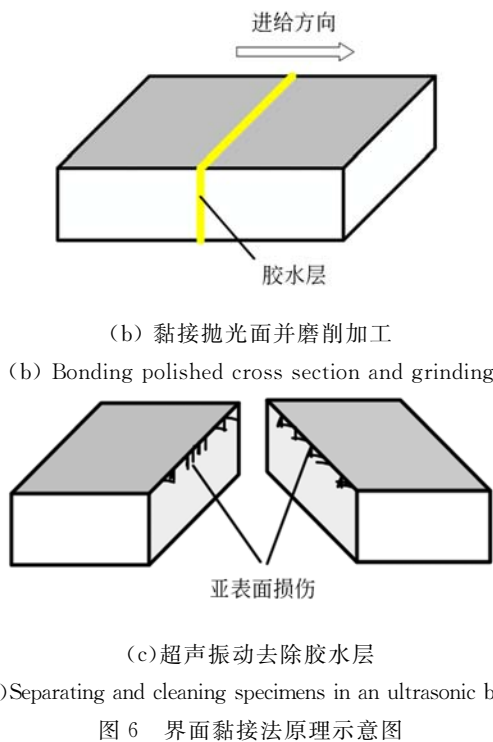


图 6 界面黏接法原理示意图

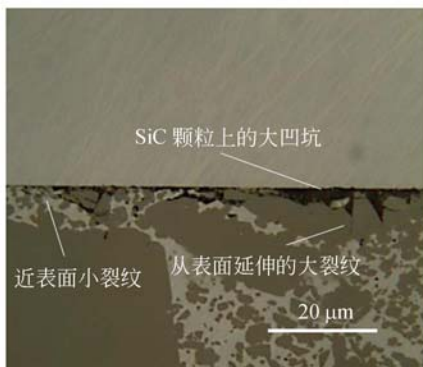
Fig. 6 Schematic diagram of bonded interface sectioning method

的超声振动清洗器中清洗(10 min),胶水溶解后取出样品,用酒精清洗并风干,利用光学显微镜对抛光面进行观测,获得损伤图像。

### 3 试验结果

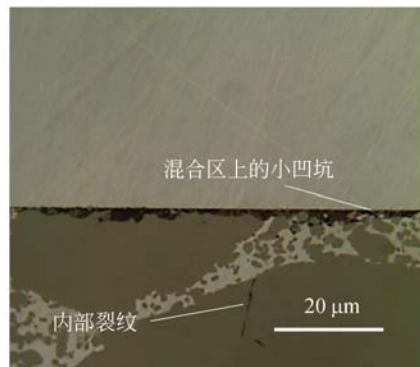
#### 3.1 3种损伤检测方法效果对比与分析

3种检测方法获得的亚表面损伤如图7所示。从图中发现亚表面损伤主要分为两个部分,一部分是因材料剥落在加工表面形成的凹坑,另一部分是亚表面裂纹。表面凹坑包括在SiC颗粒上留下的较大凹坑(如图7(a)、(d)、(e)所示)和在小粒径SiC颗粒与单质游离硅组成的混合区上的小凹坑(如图7(b)、(c)、(f)所示)。裂纹包括如图7(a)、(c)、(e)所示的近表面细小裂纹和如图7(a)、(d)、(f)所示的从表面延伸到材料深处的大裂纹,另外还有少量离加工表面不远且起源材料内部的一些裂纹,如图7(b)、(c)、(e)所示。



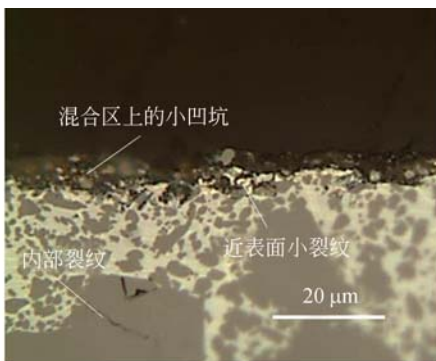
(a) 截面抛光法(硅片作陪衬)

(a) Cross-sectional polishing method by taking silicon wafer as foil



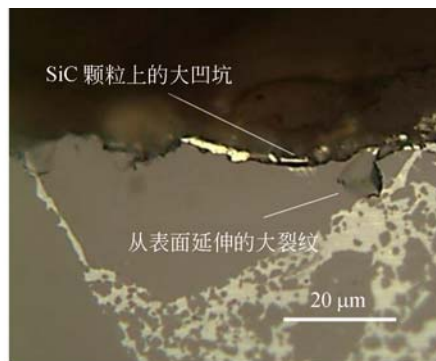
(b) 截面抛光法(硅片作陪衬)

(b) Cross-sectional polishing method by taking silicon wafer as foil



(c) 截面抛光法(聚酯作陪衬)

(c) Cross-sectional polishing method by taking polyester as foil



(d) 截面抛光法(聚酯作陪衬)

(d) Cross-sectional polishing method by taking polyester as foil

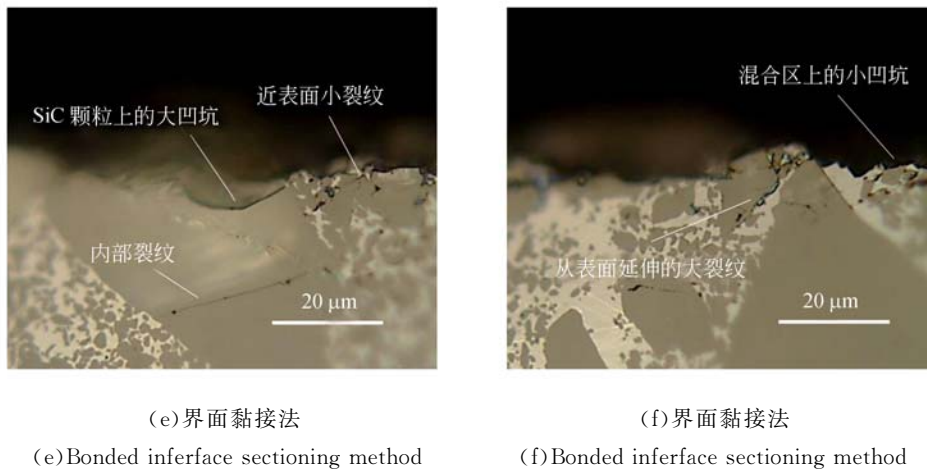


图 7 3 种检测方法获取的亚表面损伤

Fig. 7 Subsurface damage acquired by three methods

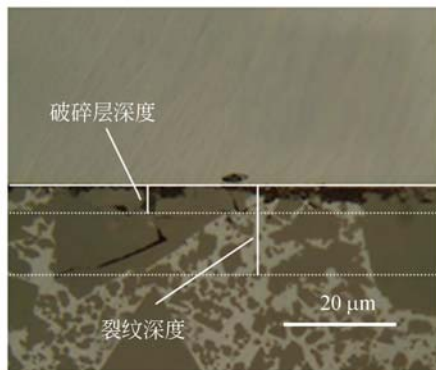


图 8 亚表面损伤测量示意图

Fig. 8 Schematic diagram of subsurface damage measurement

以截面抛光法(硅片作陪衬)获得的亚表面损伤图片为基础,亚表面损伤测量示意图如图 8 所示,破碎层深度为加工表面到凹坑底部的距离,裂纹深度为加工表面到裂纹最深处的距离。本文采用表面破碎层深度、最大破碎层深度、平均裂纹深度、最大裂纹深度 4 个损伤评价指标对 3 种方法所检测出的亚表面损伤进行统计<sup>[16-17]</sup>。由于材料以脆性断裂的方式去除,在加工表面留下了很多断裂凹坑,表面破碎层深度是评价表面完整性的重要指标,表面破碎层深度值是指不同位置测量的破碎层深度的平均值;最大破碎层深度值是指不同位置测量的破碎层深度中的最大值。平均裂纹深度是指不同位置所测裂纹深度的平均值,反应出亚表面裂纹深度的整体情况;最大裂纹深度是评价亚表面损伤最常用的指标,对于表面完整性有较高要求的工件,应使用最大裂纹深度对亚

表面裂纹进行表征,指导后续研磨抛光过程完全去除亚表面损伤,最大裂纹深度指样品不同截面位置测量的裂纹深度中的最大值。

每种检测方法的检测试验都重复 3 次。每次试验都分别对各方法获得的样品将截面上 8 mm (样品截面总长 12 mm,取中间 8 mm)的长度范围作为取样区间,沿着取样区间从头到尾获取 35 张损伤图片样本,根据上述 4 个亚表面损伤表征参数的取值定义,对 35 张图片进行测量计算,获得每种方法单次试验的数据。对 3 次试验各检测方法得到的 4 个亚表面损伤表征参数值分别取平均值,统计结果如表 2 所示。在试验过程中,一方面通过严格执行加工工序及研磨抛光工序来保证样品没有引入二次损伤;另一方面保证亚表面损伤采样区间长度足够长,在区间上获取的亚表面损伤样本足够多,以保证损伤信息的采集是全面的。因此,试验最大程度地消除了数据受测量点处损伤深度偶然性所致的影响,所获得的试验数据是可信的。

从统计的结果来看,截面抛光法(硅片作陪衬)检测得到的表面破碎层深度、最大破碎层深度、平均裂纹深度、最大裂纹深度 4 个亚表面损伤评价价值都是最小,测量同样加工条件下产生的亚表面损伤,测量值越小,则测量过程中引入的二次损伤越小,所测量的值越接近真实的损伤信息,因此,截面抛光法(硅片作陪衬)的检测结果是最接近真实的损伤情况。

用 3 种不同的损伤检测方法检测同样加工条件下产生的亚表面损伤,检测结果差距很大。界

表 2 3 种检测方法的亚表面损伤统计

Tab. 2 Statistics of subsurface damage data obtained by three methods

( $\mu\text{m}$ )

检测方法	表面破碎层深度		最大破碎层深度		平均裂纹深度		最大裂纹深度	
	单次试验值	平均值	单次试验值	平均值	单次试验值	平均值	单次试验值	平均值
截面抛光法 (硅片为陪衬)	3.34		5.1		8.64		18.78	
	3.84	3.30	7.29	6.59	10.62	8.64	17.83	17.44
	2.72		7.35		6.66		15.71	
截面抛光法 (聚酯为陪衬)	5.3		17.73		14.31		50.35	
	5.87	5.71	14.65	14.33	13.58	15.36	53.17	54.82
	5.96		10.61		18.19		60.94	
界面黏接法	8.60		17.43		10.91		27.44	
	9.3	9.19	21.40	19.45	14.11	13.04	36.91	32.20
	9.67		19.51		14.1		32.24	

面黏接法和截面抛光法(硅片作陪衬)为已在文献中采用的截面显微法,截面抛光法(聚酯作陪衬)是本文提出的一种方法。对于 3 种方法试验数据产生差异的原因分析如下:(1)聚酯的硬度和强度小于 RB-SiC,在研磨抛光过程中更容易被金刚石磨粒去除,这使得截面与加工面相交处的棱边得不到很好的保护,最终引入了二次损伤,因此截面抛光法(聚酯作陪衬)的检测结果大于截面抛光法(硅片作陪衬)的检测结果;(2)黏接形成的界面已经极大地改变了界面周围的应力分布,界面的存在改变了 RB-SiC 加工性质<sup>[18]</sup>,因此界面黏接法的检测结果大于截面抛光法(硅片作陪衬)的检测结果。

观察图 7 的损伤图像可以发现,界面黏接法的检测样品上靠近加工表面的细小裂纹密度明显小于截面抛光法样品的,且注意到界面黏接法的平均裂纹深度与表面破碎层深度之差要明显小于截面抛光法的。分析产生此现象的原因:界面黏接法超声清洗的过程中样品引入了二次损伤,超声清洗的振动能量较小,只能促使靠近加工表面的细小裂纹扩展,许多细小的材料颗粒从表面脱落,从而使得表面破碎层深度变大;另一方面,由于能量较小,能量主要影响近表面区域,而材料深处的裂纹损伤几乎不受影响,深处裂纹几乎不会继续扩展,这样使得平均裂纹深度值就几乎不变,最终产生平均裂纹深度与表面破碎层深度之差明显减小的现象。试验过程中还注意到,界面黏接法检测损伤时只能检测一个截面的损伤信息,但是截面抛光法可以通过继续研磨抛光来观察多个截面的损伤信息,因此截面抛光法在信息采集方

面可以更为全面。综上所述,与界面黏接法相比,截面抛光法(硅片作陪衬)是更加适合检测 RB-SiC 亚表面损伤的方法。

### 3.2 旋转超声磨削 RB-SiC 的亚表面损伤特征分析

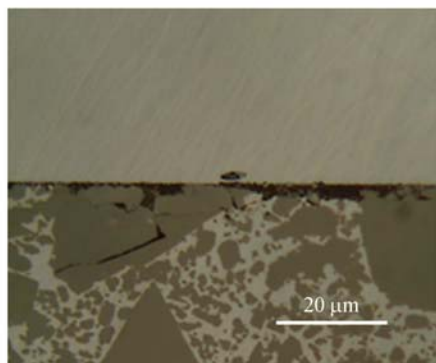
根据以上检测分析结果,论文下部分以截面抛光法(硅片为陪衬)检测得到的亚表面损伤为基础,分析总结 RB-SiC 旋转超声加工亚表面损伤特征。

如图 9 所示,材料主要以脆性断裂方式去除。材料去除包括两部分,一部分表现为大粒度 SiC 颗粒上较大的凹坑,如图 9(d)所示,另一部分表现为小粒度 SiC 颗粒与单质游离硅组成的混合区上的小凹坑,如图 9(e)所示。由图 9(a)和(b)可注意到,大粒度 SiC 颗粒上的材料去除是横向裂纹向自由表面延伸或裂纹之间交叉所致。由图 9(b)和图(d)可知,具有一定角度的中位裂纹交叉后形成了 SiC 颗粒上大且深的凹坑,这些 SiC 颗粒上的大凹坑与加工表面粗糙度有着直接联系,对表面完整性影响巨大。由图 9(e),在混合区上,许多微小的横向裂纹或相互交叉或延伸到自由表面,造成混合区上的材料去除并留下许多小凹坑。

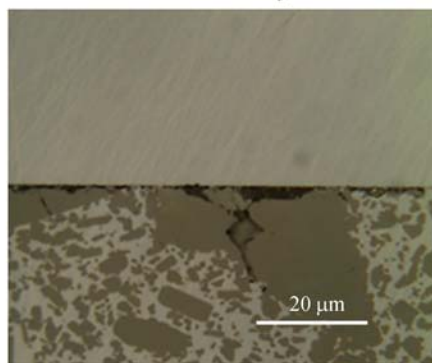
图 9(c)和(f)上存在裂纹沿着颗粒边界扩展的现象。裂纹生长及平衡条件是:当裂纹尖端应力场强度等于或大于材料裂纹临界应力场强度时,裂纹开始生长(及扩展);当裂纹尖端应力场强度小于材料裂纹临界应力场强度时,裂纹停止生长,达到平衡状态<sup>[19]</sup>。因此这种现象产生的可能原因是颗粒边界处两相结合力不强,导致裂纹更易

沿颗粒边界处扩展。图 9(a)、(b)、(c)显示,裂纹在扩展到颗粒边界处后停止扩展,可能的原因是,裂

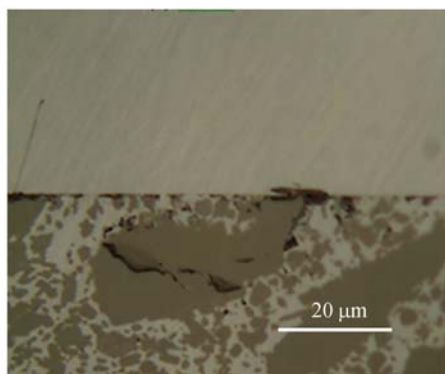
纹扩展的能量被颗粒边界稀释吸收了,同时裂纹与颗粒边界相会处会存在一定大小的残余应力。



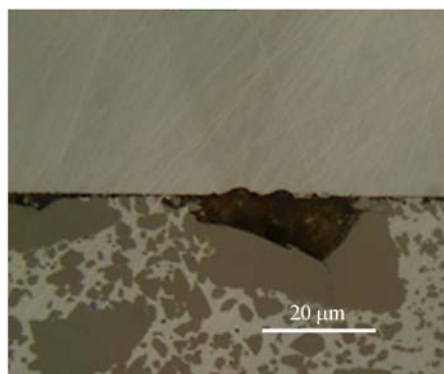
(a) 横向裂纹  
(a) Lateral cracks



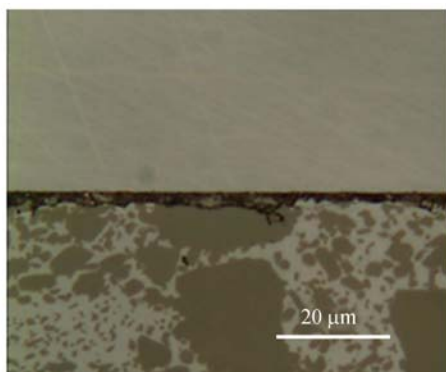
(b) 裂纹交叉  
(b) Crack cross



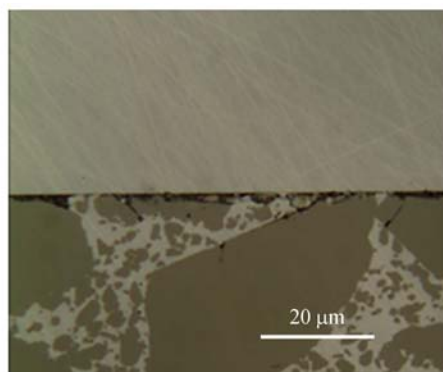
(c) 内部裂纹  
(c) Internal cracks



(d) SiC 颗粒上大且深的凹坑  
(d) Large and deep pit on SiC grain



(e) 混合区细小横向裂纹  
(e) Small lateral cracks in the mixing zone



(f) 沿颗粒边界的裂纹  
(f) Cracks along grain boundary

图 9 旋转超声磨削 RB-SiC 的亚表面损伤

Fig. 9 Subsurface damage images of rotary ultrasonic grinding RB-SiC

图 9(c)显示,在靠近加工表面的 SiC 颗粒内观测到一定数量的裂纹,此类型的裂纹数量不多,

且一般不会穿过颗粒边界。该类裂纹产生的可能原因是存在于 SiC 颗粒内部的缺陷在磨削力的作

用下成核并发展。这类型裂纹的数量较少且绝大部分存在于 SiC 颗粒内部,可能原因是缺陷距离加工表面较远,无法获得足够的能量,因此,一方面激发材料内部缺陷处微裂纹的成核与扩展比较困难,另一方面已成核发展的裂纹扩展到颗粒边界处后没有足够的能量继续扩展。这类型裂纹的存在也反应出大颗粒 SiC 上比混合区上更容易有缺陷。

图 9(a)、(b)所示,那些严重影响 RB-SiC 性能的中位裂纹大都存在于大粒度 SiC 颗粒上,图 9(d)显示,大且深的凹坑也出现在大粒度 SiC 颗粒上,而在由小粒度 SiC 颗粒与单质游离硅组成的混合区上多出现小的凹坑和细小的横向裂纹。与大粒度 SiC 颗粒上的凹坑与裂纹比较,混合区上的凹坑与裂纹呈现出小且数量多的特点,在混合区上的亚表面损伤深度远小于大粒度 SiC 颗粒上的亚表面损伤深度。可能的原因有:(1)由于单质 Si 的脆性大于 SiC 颗粒的脆性,硬度和强度又低于 SiC 颗粒,故混合区整体的脆性要大于大粒度 SiC 颗粒的脆性,强度和硬度小于大粒度 SiC 颗粒的强度和硬度;在磨削加工时,材料越脆,越容易产生裂纹,材料强度和硬度越低,材料越容易去除,因此混合区域上更容易通过材料的去除和裂纹的产生来消耗磨粒施加于材料表面的能量,在混合区上,能量是分散在大面积区域内被消耗的,而在大粒度 SiC 颗粒上,能量是集中在局部区域被消耗的,所以,加工条件相同时,混合区的亚表面损伤深度小于 SiC 颗粒的亚表面损伤深度。(2)相对来说,混合区上存在更大的颗粒边界面积,相同磨削加工条件下,混合区的颗粒边界会吸收更多磨削力带来的能量,这样能量在近表面区域就已被大量吸收,亚表面损伤深度就自然减小。综上所述,为减小 RB-SiC 磨削加工产生的亚表面损伤,一方面要使用合理的加工方法和加工参数,另一方面在制备 RB-SiC 材料时需细化 RB-

SiC 材料中的 SiC 颗粒。

## 4 结 论

本文确定截面抛光法(硅片作陪衬)更适合检测亚表面损伤。采用截面抛光法和界面黏接法检测同样工艺参数下 RB-SiC 旋转超声加工产生的亚表面损伤,其中截面抛光法又包括以聚酯作陪衬与以硅片作陪衬两种形式。采用表面破碎层深度、最大破碎层深度、平均裂纹深度、最大裂纹深度 4 个亚表面损伤评价指标对不同检测方法获得的亚表面损伤进行统计。试验结果如下:(1)截面抛光法(硅片作陪衬)检验到的 4 个指标值依次为  $3.30 \mu\text{m}$ 、 $6.59 \mu\text{m}$ 、 $8.64 \mu\text{m}$ 、 $17.44 \mu\text{m}$ ;(2)截面抛光法(聚酯作陪衬)检测到的 4 个指标值依次为  $5.71 \mu\text{m}$ 、 $14.33 \mu\text{m}$ 、 $15.36 \mu\text{m}$ 、 $54.82 \mu\text{m}$ ;(3)界面粘接法检测到的四个指标值依次为  $9.19 \mu\text{m}$ 、 $19.45 \mu\text{m}$ 、 $13.04 \mu\text{m}$ 、 $32.20 \mu\text{m}$ 。截面抛光法(硅片作陪衬)测得的四个指标值均最小,测得的损伤信息最接近真实的损伤情况,因此,截面抛光法(硅片作陪衬)为最优的亚表面损伤检测方法。基于截面抛光法(硅片作陪衬)获得的旋转超声磨削 RB-SiC 亚表面损伤信息,对其损伤特征进行总结如下:(1)材料以脆性断裂去除为主;(2)裂纹倾向于沿着颗粒边界扩展,同时颗粒边界具有屏蔽裂纹延伸的作用;(3)在大粒度 SiC 颗粒上的材料去除是横向裂纹向自由表面的延伸或者裂纹之间的交叉所致,而小粒度 SiC 颗粒与单质游离硅组成的混合区上材料的去除是许多微小横向裂纹的交叉或延伸到自由表面造成的;(4)对材料有重要影响的亚表面损伤,如大型凹坑及较深的中位裂纹主要存在于大粒度 SiC 颗粒上。为减小 RB-SiC 材料磨削加工带来的损伤,不仅要选择合理的加工方法和加工参数,还应在材料制备时尽量细化 SiC 颗粒。

## 参考文献:

- [1] 饶小双, 张飞虎, 刘立飞, 等. 电火花机械复合磨削反应烧结 SiC 陶瓷的表面特征[J]. 光学精密工程, 2016, 24(9): 2192-2199.
- RAO X SH, ZHANG F H, LIU L F, et al.. Surface characteristics for RB-SiC ceramics by electrical

- discharge diamond grinding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2192-2199. (in Chinese)
- [2] 王卓. 光学材料加工亚表面损伤检测及控制关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- WANG ZH. *Study on the detection and control techniques of subsurface damage in optical fabri-*

- cation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [3] 刘健, 马占龙, 王君林. 光学元件亚表面损伤检测技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 081204.
- LIU J, MA ZH L, WANG J L. Research status of subsurface damage detection technology of optical elements[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(8): 081204. (in Chinese)
- [4] 王健, 郑非非, 董志刚, 等. 碳化硅磨削亚表面损伤检测方法[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2015, 35(4): 60-65.
- WANG J, ZHENG F F, DONG ZH G, *et al.*. Detection method of subsurface damage of silicon carbide after grinding[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2015, 35(4): 60-65. (in Chinese)
- [5] ZHANG B, ZHENG X L, TOKURA H, *et al.*. Grinding induced damage in ceramics[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 132(1-3): 353-364.
- [6] 刘民慧. 碳化硅陶瓷精密磨削亚表面损伤及预测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- LIU M H. *Research on precision grinding subsurface damage and prediction of silicon carbide ceramic*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [7] 梁晓辉. 碳化硅磨削去除机理及亚表面裂纹研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- LIANG X H. *Research on grinding removal mechanism and subsurface crack of silicon carbide*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [8] 曾艳芬. RB-SiC 材料的磨削加工表面层质量研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- ZENG Y F. *Study on the surface layer quality of RB-SiC after grinding*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [9] 姚旺. 反应烧结碳化硅材料磨削去除机理和加工参数优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- YAO W. *Investigation on material removal mechanisms and grinding parameters optimization of reaction bonded silicon carbide*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [10] AGARWAL S, RAO P V. Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 2008, 48(6): 698-710.
- [11] 杨鑫宏, 韩杰才. 脆性光学材料的超声磨削实验研究[J]. 光学技术, 2007, 33(1): 65-67.
- YANG X H, HAN J C. Experimental study on ultrasonic vibration grinding of brittle optical materials[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(1): 65-67. (in Chinese)
- [12] ZHANG C L, FENG P F, ZHANG J F, *et al.*. Theoretical and experimental research on the features of cutting force in rotary ultrasonic face milling of K9 glass[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 157-158: 1674-1679.
- [13] CHURI N J, PEI Z J, SHORTER D C. Rotary ultrasonic machining of dental ceramics[J]. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2009, 6(3-4): 270-284.
- [14] ZHANG C L, FENG P F, PEI Z J, *et al.*. Rotary ultrasonic machining of sapphire: feasibility study and designed experiments[J]. *Key Engineering Materials*, 2014, 589-590: 523-528.
- [15] CONG W L, PEI Z J, DEINES T W, *et al.*. Rotary ultrasonic machining of CFRP composites: a study on power consumption [J]. *Ultrasonics*, 2012, 52(8): 1030-1037.
- [16] 乔国朝. 氮化硅陶瓷超声振动铣磨加工表面完整性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- QIAO G C. *Research on machined surface integrity in ultrasonic vibration mill-grinding of silicon nitride ceramics*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [17] 王健. RBSiC 超声辅助磨削工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- WANG J. *Study on the ultrasonic assisted grind-*

- ing process of RBSiC*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [18] HELBAWI H, ZHANG L C, ZARUDI I, *et al.*. Difference in subsurface damage in indented specimens with and without bonding layer[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, 43 (4): 1107-1121.
- [19] 魏士亮.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷超声旋转磨削加工过程技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- WEI S L. *Research on the process of rotary ultrasonic grinding machining for  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics* [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)

#### 作者简介:



秦娜(1981—),女,四川眉山人,博士,讲师,硕士生导师,2003年于吉林大学获得学士学位,2005年于大连理工大学获得硕士学位,2011年于美国堪萨斯州立大学获得博士学位,主要从事难加工材料的非传统加工及多轴数控机床及其加工技术的研究。E-mail: tinaspirit@home.swjtu.edu.cn



郑亮(1993—),男,湖北武汉人,硕士研究生,2015年于长江大学获得学士学位,主要从事旋转超声加工方面的研究。E-mail:598167647@qq.com

(本栏目编辑:秦思)