

# 旋转条件下切割 SiC 单晶片实验研究

王肖烨<sup>1,2</sup> 李言<sup>1</sup> 李淑娟<sup>1</sup> 肖强<sup>1</sup>

(1 西安理工大学机械与精密仪器工程学院,西安 710048)

(2 宝鸡文理学院机电工程系,宝鸡 721007)

**文 摘** 通过旋转条件下切割 SiC 单晶片,分析了切片表面微观形貌特点,研究了线锯速度、工件进给速度和工件转速对切片表面粗糙度与切向锯切力的影响规律。结果表明:增加工件旋转,切片表面平整光滑,沿线锯运动方向没有明显沟槽及凸起,质量明显得到改善;当转速由 0 增加到 12 r/min 时,切片表面粗糙度由 1.532  $\mu\text{m}$  降到 0.513  $\mu\text{m}$ ;线锯速度和工件旋转速度增大、工件进给速度减小,切向锯切力减小,表面粗糙度减小。当线锯速度和工件旋转速度过大,切向锯切力和表面粗糙度反而会有所增加。

**关键词** 工件旋转, SiC 单晶片, 切向锯切力, 表面粗糙度

## Experiment Research on Cutting SiC Wafer Under Workpiece Rotating

Wang Xiaoye<sup>1,2</sup> Li yan<sup>1</sup> Li Shujuan<sup>1</sup> Xiao Qiang<sup>1</sup>

(1 Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

(2 Arts and Science Electronic and Mechanical Engineering Department of Baoji University, Baoji 721007)

**Abstract** Through the experiments on cutting SiC wafer under the workpiece rotating, the surface micro-topography of slices was analyzed. The affecting laws including saw wire speed, workpiece feed speed and workpiece rotational speed on surface roughness and tangential force of slice were studied. The results show that the wafer surface is flat and smooth and there are no obvious bumps or grooves along the sawing direction due to additional rotation of the workpiece in this experiment condition. The surface roughness of slice reduces from Ra 1.532  $\mu\text{m}$  to Ra 0.513  $\mu\text{m}$  when the speed increases from 0 r/min to 12 r/min. Thus the quality of slice surface is improved. The value of surface roughness and tangential force reduce when wire saw speed and workpiece rotation speed increase and workpiece feed speed decreases. However, the value of surface roughness and tangential force will increase when wire saw speed and workpiece rotation speed excessively increase.

**Key words** Workpiece rotation, SiC wafer, Tangential force, Surface roughness

## 0 引言

SiC 单晶片作为一种重要的半导体材料,不但可以用作 GaN 蓝色发光二极管的衬底材料,同时又是制作高温、高频、大功率电子器件的最佳材料之一。然而,它却由于硬度高、脆性大,给加工带来了一定的困难。SiC 单晶片从生成到制成成品要经历:切片→粗研磨→精研磨→粗抛光(机械抛光)→精抛光(化学机械抛光)→检测→应用等多道加工工序。切片是把晶棒变成晶片的一

道重要工序,其切片质量的好坏直接影响后续加工工序及最终加工质量。固结磨料线锯切片技术具有切缝窄、材料去除率高、切片质量好和切割环境清洁等<sup>[1]</sup>优点而受到越来越广泛的关注。高玉飞、侯志坚等人利用往复电镀金刚石线锯进行了硅晶体的切割<sup>[2-3]</sup>, W. I. Clark、陈秀芳等人利用往复摇摆式金刚石线锯进行了 SiC 单晶的切割<sup>[4-5]</sup>,高伟、孟剑锋等人利用环形金刚石线锯分别进行了花岗岩和单晶硅、LT55 陶瓷的切割<sup>[6-7]</sup>,但切割过程中附加工件的旋转运动至今尚未有人提出。

收稿日期:2010-08-31

基金项目:陕西省机械制造及装备重点实验室项目(No.08JZ46);陕西省教育厅重点实验室建设基金项目(No.09JS099);陕西省科技攻关项目(No.2010k09-01)

作者简介:王肖烨,1975 出生,博士研究生,主要从事现代制造及现代加工技术的研究。E-mail:xiaoyewang221@163.com

本文进行了工件旋转条件下 SiC 单晶片的切割实验,分析了切片表面微观形貌特点及形成原因,与未加工件旋转运动的切片进行了对比,研究了工艺参数对切片表面粗糙度及切向锯切力的影响规律,并对实验结果进行了分析。

## 1 实验

实验选用自行改进的 WXD170 型往复式金刚石线旋转点切割机,切割装置示意图如图 1 所示, SiC 单晶棒垂直于线锯进给,线锯由可正反向旋转的卷丝滚筒带动,当滚筒作顺时针(逆时针)转动使走丝达到最大长度时,滚筒在控制系统的作用下实现逆向运转,从而使线锯往复运转实现切割加工。线锯由一对张紧导轮与一对工作导轮支撑,用气动装置来调节线锯的张紧力。微型潜水循环泵通过喷嘴向线锯切割区供给冷却液,冷却液为水。

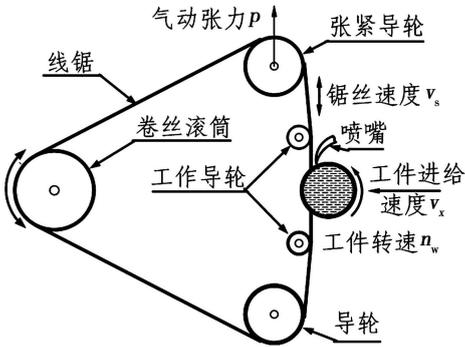


图 1 SiC 切割示意图

Fig. 1 Principle sketch of SiC cutting

所用 SiC 单晶棒由西安理工大学新型半导体功能材料与设备研究中心提供,采用 PVT 法生成,直径为 70 mm,锯切方向沿晶面,切片厚度为 0.8 mm。线锯直径 0.3 mm,总长 50 m,磨粒大小 30–40  $\mu\text{m}$ ,气动张力  $p$  为 0.24 MPa。锯切条件与参数如表 1 所示。

表 1 锯切参数

Tab. 1 Sawing conditions and parameters

| 线锯速度<br>$v_s/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 工件进给速度<br>$v_x/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ | 工件旋转速度<br>$n_w/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ |
|--|---|--|
| 1.0, 1.3, 1.6,                           | 0.025, 0.038,                                 | 0, 4, 8, 12,                                 |
| 1.9, 2.2, 2.5                            | 0.05, 0.08, 0.1                               | 16, 20, 24                                   |

使用日本电子 JSM-6700F 型场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察 SiC 单晶片表面形貌,采用 Time (TR300) 接触式表面粗糙度测量仪沿工件进给方向测量切片的表面粗糙度,每个切片取 6 处测量,每处测量 3 次,取其平均值。测力系统由 Kistler9257B 型三向压电晶体测力

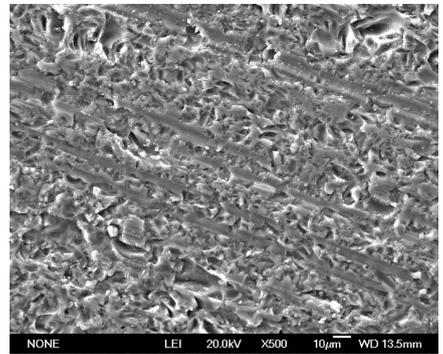
<http://www.yhclgy.com> 宇航材料工艺 2010 年 第 6 期

仪、Kistler5070A 型电荷放大器、自制的数据采集仪和装有数据采集分析软件的计算机组成。测量时,测力范围档位选 0–50 N,每个切片取 6 个时间点测量,每点测量 3 次,所得数据去噪后得到的平均值减去初始阶段力大小的平均值,即为实验真实值。

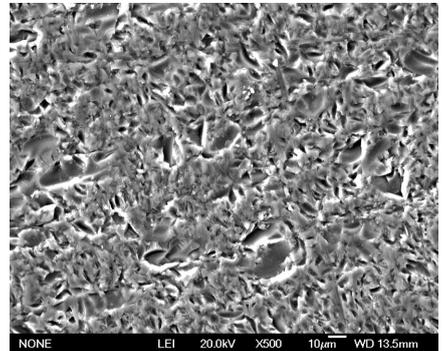
## 2 结果与讨论

### 2.1 切片表面形貌分析

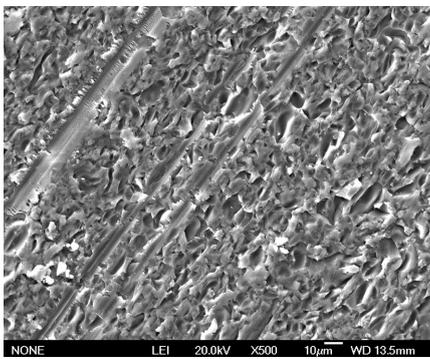
图 2 为不同锯切参数切割的 SiC 单晶片表面 SEM 图。从图 2(a)与 2(b)对比可以看出,在其他锯切参数及线锯性能相同的条件下,增加工件的旋转速度,切片表面质量明显不同。工件转速为 0 时,如图 2(a)所示,切片表面较粗糙,切割纹理具有明显方向性,有线条隆起或沟槽,局部沟槽较深,表面粗糙度为 1.532  $\mu\text{m}$ 。工件转速为 12 r/min 时,如图 2(d)所示,锯切表面平整光滑,无崩碎现象。沿线锯运动方向没有明显沟槽及凸起,几乎看不出切割纹理方向,整个表面呈云状,表面粗糙度为 0.513  $\mu\text{m}$ 。这是因为工件旋转进给时,相当于切片单位面积内参与磨削的磨粒数增多,结果把未加工件旋转时的切片表面隆起部分的金属全部磨去而形成了光滑表面,改善了表面质量。图 2(a)与图 2(c)对比可以看出,虽然图 2(c)比图 2(a)的工件进给速度大,但由于增加了工件旋转,表面质量明显改善。从图 2(c)与图 2(d)对比可以看出,工件进给增大,表面粗糙度变大,从图 2(d)与图 2(b)对比可以看出,随着工件转速增大,表面质量明显提高。磨粒尺寸越小,切削深度越小,加工表面质量越高。



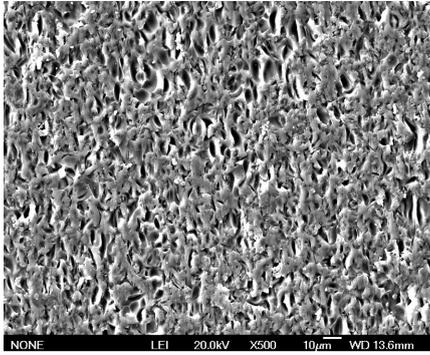
(a)  $v_s = 1.9 \text{ m/s}, v_x = 0.08 \text{ mm/min}, n_w = 0$



(b)  $v_s = 1.9 \text{ m/s}, v_x = 0.08 \text{ mm/min}, n_w = 8 \text{ r/min}$



(c)  $v_s = 1.9 \text{ m/s}$ ,  $v_x = 0.1 \text{ mm/min}$ ,  $n_w = 12 \text{ r/min}$



(d)  $v_s = 1.9 \text{ m/s}$ ,  $v_x = 0.08 \text{ mm/min}$ ,  $n_w = 12 \text{ r/min}$

图2 SiC单晶片表面形貌SEM图

Fig. 2 SEM micrographs of wire saw cut silicon wafers surface

## 2.2 锯切工艺参数对切向锯切力的影响

图3为锯切工艺参数对切向锯切力的影响。

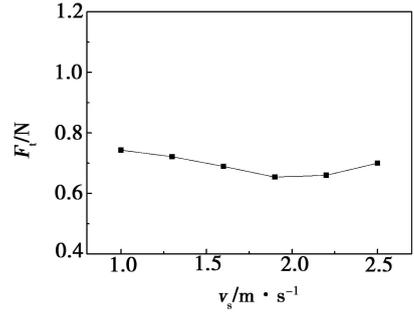
(1)由图3(a)可以看出,如果只考虑力的大小变化,不论线锯与工件是否同向,随着线锯速度增大,切向锯切力减小。这是因为 $V_s$ 增大,单位时间参加切削的总磨粒数增多,使得单颗磨粒切削厚度减小,导致切向切削力减小。当线锯速度为 $2.2 \text{ m/s}$ 时,开始崩片,且 $F_t$ 增大,这是因为线锯速度过大自身产生振动,使 $F_t$ 增大,当然此处 $F_t$ 中包含了由振动产生的力。

(2)按照格里菲思理论,SiC单晶片切割过程中,材料是通过挤压、裂纹、破碎和剥落这一系列过程达到去除的。也就是说,在脆性材料加工中,如果增大磨粒的切削厚度,更有利于脆性材料发生脆性断裂而被去除。因此,切削力应该降低,但是由图3(b)可以看出,当 $v_x$ 增大时,切削厚度增大,线锯与工件的动态接触弧长增加,从而增加了磨粒摩擦路径的长度,同时也增加了排屑的难度。在这两种相反的作用中,增加动态接触弧长而引起的摩擦力的增大起了更重要的作用,从而表现为锯切力的增加。

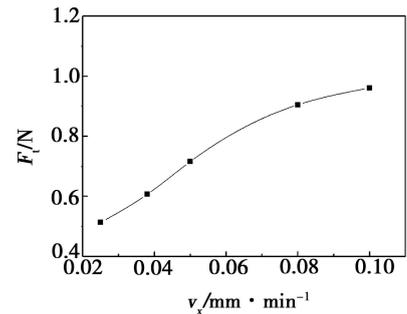
(3)由图3(c)可以看出,切向锯切力随转速的增加出现先减小后增大的趋势。这是因为随着工件转速的增加,单位面积内参与切削的磨粒数增加,单颗磨粒切削厚度较小,导致切向切削力减小。但工件转速过快,

会引起工艺系统的振动增加,导致线锯的振动增大,出现崩片现象,切向锯切力有所增大。

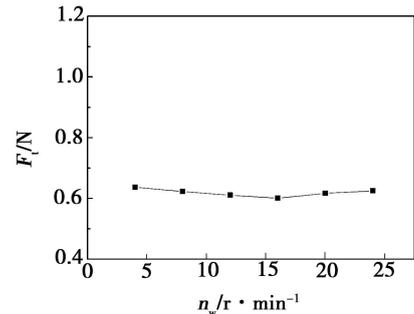
从图中曲线也可以看出,工件进给速度比工件旋转速度和线锯速度对切向锯切力影响更大。



(a)  $v_s$



(b)  $v_x$



(c)  $n_w$

图3 锯切参数对切向锯切力的影响  
Fig. 3 Sawing parameters influences on tangential cutting force

## 2.3 锯切工艺参数对切片表面粗糙度的影响

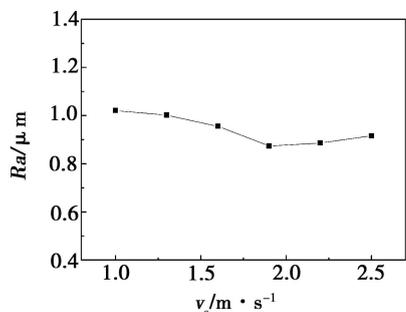
图4为锯切工艺参数对切片表面粗糙度的影响。

(1)由图4(a)可以看出,线锯速度增大,表面粗糙度减小。线锯速度增大,单位面积内参与切削的磨粒数目增多,所以表面粗糙度就低;同时,线锯速度增加时,切屑厚度减小,每颗磨粒的负荷也相应减小,磨削力减小,表面质量就好。线锯速度过高,会使线锯振动的趋势增大,在工件表面形成振痕,造成加工表面损伤,粗糙度增大。

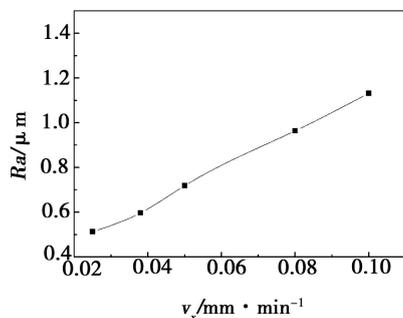
(2)由图4(b)可以看出,工件进给速度增大,表面粗糙度增大。这是因为:第一,进给速度的增大使得磨粒的压入深度增大,磨粒与加工表面的摩擦、挤压作用变大,因此粗糙度值变大;第二,进给速度的增大使得线

锯变形增大、线锯与工件间的接触长度增大,从而增加了磨粒划擦路径的长度和排屑的难度,因此粗糙度变大。

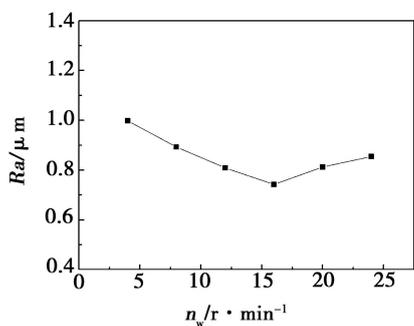
(3)由图4(c)可以看出,当工件旋转速度增大时,表面粗糙度减小。因为当工件转速增加时在单位面积内参与切削的磨粒数目增加,凹痕间的残留面积较少,粗糙度减小。但是,转速过大,机床容易产生振动,导致粗糙度上升,因此,应该在不引起机床震动的前提下适当增加工件的转速。



(a)  $v_s$



(b)  $v_x$



(c)  $n_w$

图4 锯切参数对表面粗糙度的影响

Fig.4 Saws parameters influences on surface roughness

从图3也可以看出,工件进给速度和工件旋转速度比线锯速度对表面粗糙度的影响更大。

### 3 结论

(1)在本实验条件下,由于增加了工件的旋转,切片表面平整光滑,沿线锯运动方向没有明显沟槽及凸起;当转速由0增加到12 r/min时,切片表面粗糙度由1.532  $\mu m$  降到0.513  $\mu m$ ,质量明显得到改善。

(2)线锯速度和工件旋转速度增大、工件进给速度减小,切向锯切力减小,表面粗糙度减小;但是,线锯速度和工件旋转速度过大,切向锯切力和表面粗糙度反而会有所增加。

(3)工件进给比工件旋转速度和线锯速度对切向锯切力影响更大;工件进给和工件旋转速度比线锯速度对表面粗糙度的影响更大。

### 参考文献

- [1] Hardin C W, Shih A J, Lemaster R L. Diamond wire machining of wood [J]. Forest Products Journal, 2004, 54(11): 50-55
- [2] 高玉飞, 葛培琪, 李绍杰. 往复式电镀金刚石线锯切割单晶硅片特性研究[J]. 人工晶体学报, 2009, 38(2): 372-377
- [3] 侯志坚, 葛培琪, 张进生, 等. 利用金刚石线锯切割硅晶体的实验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2007(5): 14-16
- [4] Clark W L, et al. Fixed abrasive diamond wire machining-part I: process monitoring and wire tension force [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43: 523-532
- [5] 陈秀芳, 等. 金刚石线锯切割大直径 SiC 单晶[J]. 功能材料, 2005, 36(10): 1575-1577
- [6] 高伟, 刘迎, 刘镇昌. 环形电镀金刚石线锯锯切工艺参数的正交实验研究[J]. 机械设计与制造, 2006(4): 91-92
- [7] 孟剑峰, 韩云鹏, 葛培琪. 硬脆材料的环形电镀金刚石线锯加工实验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2007(3): 56-59

(编辑 任涛)