

## 反应烧结碳化硅超声线锯切割试验研究

宋洪侠 曾国伟 晁胜豪 郭晓光 董志刚 王毅丹

(大连理工大学 高性能精密制造全国重点实验室, 大连 116024)

**摘要:** 反应烧结碳化硅(Reaction Bonded Silicon Carbide, RB-SiC)因其优异的热稳定性、耐辐射性以及化学惰性,被广泛应用于核能和光学领域核心构件的制造。但是, RB-SiC材料具有硬度高、脆性大等特点,传统加工方法难以保证其加工质量和效率。超声金刚石线锯切割(锯切)技术作为硬脆材料的高效加工方法,已在单晶Si、单晶SiC等硬脆材料的加工中成功应用。然而,该技术在RB-SiC材料的切削试验和工艺的研究还有待开展。为此,首次开展了RB-SiC的超声锯切试验研究,搭建了超声锯切RB-SiC平台,对比分析了平行与垂直超声振动方向的加工表面质量,研究了超声振幅、线速度、进给速度参数对表面粗糙度及表面微观形貌的影响规律。试验结果表明,超声锯切在提高表面质量等方面具有显著优势。随着振幅由3  $\mu\text{m}$  提高到7  $\mu\text{m}$ ,表面粗糙度值降低了17.4%,表面划痕和凹坑数量随之减少;相较于垂直进给方向,平行进给方向的超声锯切更能有效提高RB-SiC材料的表面质量。本研究可为RB-SiC材料超声锯切工艺研究提供指导。

**关键词:** 超声锯切; 反应烧结碳化硅; 金刚石线锯; 超声振动; 表面质量

**中图分类号:** TH162 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.09.015

## 0 引言

反应烧结碳化硅(Reaction Bonded Silicon Carbide, RB-SiC)具有高强度、耐腐蚀、低热膨胀的特征,物理化学性能优异,是核能和光学领域的先进材料<sup>[1][243-253][2-3]</sup>。在核能领域, RB-SiC凭借其出色的高温稳定性、耐辐射性及化学惰性,应用于核工业中的关键部件,以满足极端环境下高温、高压的严苛要求,显著提升冷却堆系统的效率和可靠性。在光学加工领域, RB-SiC因其化学性质稳定、热变形系数小、比刚度大等特性,在大型、复杂轻量化光学系统设计中展现出巨大的应用潜力,满足现代光学领域对高性能材料的迫切需求<sup>[4]</sup>。然而, RB-SiC由SiC相和Si相制备而成,具有高硬度、脆性、各向异性的特点。两相材料在机械性能和化学稳定性上的差异,使得加工过程中的切削力波动大,加剧了刀具磨损,工件表面质量不易控制,加工难度大<sup>[5]</sup>。现有研究表明, RB-SiC材料的加工表面损伤会导致材料断裂强度下降<sup>[6-7]</sup>,进而影响所制成部件的工作和服役性能,因此RB-SiC材料的高质量加工面临挑战<sup>[8][9]15-24[10-11]</sup>。目前,国内外加工RB-SiC材料的主要方式为磨削加工。然而,磨削加工的精度高但加工效率低、加工成本高。金刚石线锯切割

(锯切)技术是利用金刚石线高速锯切割运动实现硬脆材料复杂形状加工的先进技术,具有切削力小、热影响区小以及加工精度高等优势,可实现高硬度脆性材料的高效加工<sup>[12][13]10-14[14]1466-1497[15]7-11[16]</sup>。

现有研究针对不同硬脆材料开展了金刚石线锯切割试验与工艺研究<sup>[17]4238-4240</sup>。金刚石线锯切割工件是通过将金刚石磨粒嵌入切削表面,锯丝带动磨粒沿切削表面滚动形成切割作用,具有切割效率高的优点<sup>[9]17[18]</sup>。然而,影响工件表面质量的锯切工艺的参数很多。HARDIN等<sup>[19]</sup>开展了金刚石锯切单晶SiC的工艺研究试验,研究线锯进给速度对表面损伤的影响,证明了金刚石线锯切割单晶SiC的有效性,当进给速度由0.013 mm/s减小至0.005 1 mm/s时,划痕间距由0.23 mm减小至0.092 mm,划痕变浅,表面波纹度降低。李宏达等<sup>[20]</sup>开展了金刚石线锯多线锯切单晶Si的工艺研究试验,通过对不同线速度下硅片质量的对比,发现随着线速度的提高,表面粗糙度降低30%以上。SEFENE等<sup>[14]1471</sup>对金刚石线锯切割Si和SiC等各类硬脆材料时工艺参数影响的机制研究进行了综述,指出了法向和切向锯切力显著影响工件的表面质量,切削力随着线速度的降低和进给速度的增加而增加,进而降低表面质量。线速度与进给速度作为金刚石

收稿日期: 2025-03-26

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3403401)

作者简介: 宋洪侠,女,1966年生,黑龙江望奎人,硕士,教授; 主要研究方向为虚拟样机数字化设计方法、工程图学教学与应用、精密及特种加工技术; E-mail: hxsong@dlut.edu.cn。

王毅丹(通信作者),男,1989年生,河南洛阳人,博士,助理研究员; 主要研究方向为超声加工技术与装备; E-mail: ydwang@dlut.edu.cn。

引用格式: 宋洪侠, 曾国伟, 晁胜豪, 等. 反应烧结碳化硅超声线锯切割试验研究[J]. 机械强度, 2025, 47(9): 164-173.

SONG Hongxia, ZENG Guowei, CHAO Shenghao, et al. Test study on ultrasonic wire saw cutting of reaction bonded silicon carbide [J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(9): 164-173.

线锯切割的核心工艺参数,直接影响工件去除机制及表面质量。合理的线速度与进给速度的参数选取是提高表面形貌、表面粗糙度等质量指标的关键<sup>[21-24]</sup>。目前金刚石线锯技术已用于单晶 SiC、单晶 Si 等硬脆材料的加工,但存在着工件表面容易出现崩碎、凹坑等问题<sup>[13]10-14</sup>。此外,传统金刚石线锯加工过程中,还存在切削力大、线锯加工锯缝狭窄、切屑和切削热难以及时去除等不足,影响工件表面质量。

超声锯切技术是超声振动与传统金刚石线锯切割相结合的先进加工技术。近年来,超声振动加工技术朝着高频振动<sup>[25-26]</sup>、多向振动发展<sup>[27][28]155-173</sup>。相关学者开展了不同材料和加工技术研究,证明了超声金刚石线锯切割硬脆材料具有加工效率高和表面质量好等优势<sup>[15]10[29]3730-3736[30]</sup>。WANG 等<sup>[31]2445-2460[32]3079-3091[33]</sup>开展超声金刚石线锯切割单晶硅的工艺研究试验,观察工件锯切后的裂纹、凹坑,研究指出,超声振动辅助线锯切割的工件表面凹坑数量少,凹坑尺寸小,表面粗糙度相较传统线锯降低了 23%,在相同的工艺参数下,超声锯切的工件表面形貌优于传统线锯。李伦等<sup>[29]3734</sup>进行了横向超声振动金刚石线锯切割单晶 SiC 试验,发现横向超声振动使金刚石线锯与工件的切削由连续接触变为间断的周期性接触;与传统切割相比,超声振动能够显著降低切片表面的粗糙度,降幅 26%~55%。XU 等<sup>[28]156</sup>研究了不同超声方向、频率和振幅对蓝宝石表面形貌、抛光力的影响,发现水平振动振幅越大,亚表面损伤层越薄;垂直振动振幅越大,损伤越小;水平振动轨迹长,增加了线锯对材料的划切去除作用,可以获得较平整的表面和较浅的加工损伤层。袁日灿等<sup>[34]</sup>开展了超声锯切振动方向对切割运动过程的分析研究,分析了不同振动方向超声锯切的磨粒切削运动轨迹和单颗金刚石磨粒去除过程。综上所述,现有的超声金刚石锯切主要运用于单晶硅、蓝宝石、单晶 SiC 和碳化硅陶瓷等硬脆材料加工,针对 RB-SiC 的超声锯切研究还有待开展。

针对 RB-SiC 材料的高质高效加工需求,本文首次开展了包括振动方向在内的 RB-SiC 的超声锯切试验研究。搭建了超声锯切 RB-SiC 平台,超声锯切方向分别为与超声振动方向平行(简称为平行向)以及与超声振动方向垂直(简称为垂直向),将平行向和垂直向超声振动引入 RB-SiC 加工中,并研究了不同超声振幅、线速度、进给速度等工艺参数下 RB-SiC 的锯切表面微观形貌、表面粗糙度。在此基础上,分析了不同振动方向对表面质量的影响规律。本研究可为 RB-SiC 超声锯切加工工艺制定提供指导。

## 1 试验方案与装置

### 1.1 试验材料及装置

试验装置示意图如图 1 所示。超声金刚石线锯切割加工系统主要由金刚石线切割机、超声振动系统及固持工装组成。工件通过夹头装夹在变幅杆前端部。变幅杆通过固定夹具装夹,并与工作台可靠连接。变幅杆与超声电源相连接,在超声电源驱动下,带动工件进行高频机械振动。金刚石线的线速度方向为主运动方向,线速度为  $v_w$ 。工件通过固定夹具在机床平台的带动下,沿金刚石线方向进给运动。切削液始终喷淋于加工区域,保证切屑和切削热被及时带走。

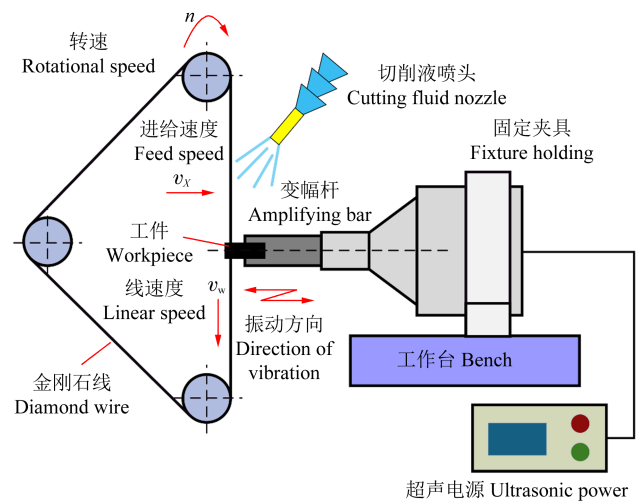


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test device

图 2 为不同超声振动方向超声锯切示意图。图 2(a)为平行向振动锯切示意图。工件在变幅杆的带动下,沿变幅杆的轴线振动。金刚石线与工件垂直并沿变幅杆的轴线方向进给运动。金刚石线的锯切工件的宽度为 3 mm。图 2(b)为垂直向振动锯切示意图,工件在变幅杆的带动下,沿变幅杆的轴线振动。金刚石线垂直于变幅杆轴线方向进给运动。

图 3 为试验现场装置。金刚石线切割机工作台进给方向为 X 方向、Y 方向,最大行程为 250 mm×250 mm。试验所使用的金刚石线为直径  $\phi 0.3$  mm 的电镀金刚石线锯。金刚石线锯的运动方向为 Z 方向,并由主动轮提供线速度。由张紧轮调整张力。所用工件为 RB-SiC,性能参数如表 1<sup>[1]245</sup> 所示。RB-SiC 试件为统一的 30 mm×10 mm×5 mm ( $l_1 \times l_2 \times l_3$ ) 方形试样,并将由固持夹具固定在超声振动单元上。

### 1.2 超声锯切运动学分析

线锯的运动由主运动( $v_w$ )和进给运动( $v_f$ )构成,进给方向为 X 方向,主运动方向为 Z 方向。在时间  $t$  内,线

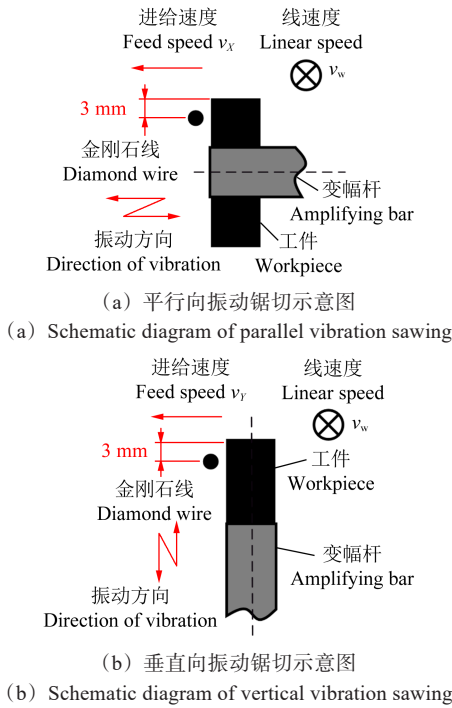


图 2 不同超声振动方向超声锯切示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic sawing in different ultrasonic vibration directions

表 1 RB-SiC 材料性能

Tab. 1 Material properties of RB-SiC

参数 Parameter	值 Value
密度 Density $\rho/(g/cm^3)$	2.89
弹性模量 Elastic modulus $E/GPa$	391
比刚度 Specific stiffness $(E/\rho)/(10^6 m^2/s^2)$	135
比热容 Specific heat capacity $c_{heat}/[J/(kg \cdot K)]$	710
热膨胀系数 Thermal expansion coefficient $c_{TE}/(10^{-8} K^{-1})$	240
导热性系数 Thermal conductivity coefficient $c_{TC}/[W/(m \cdot K)]$	155

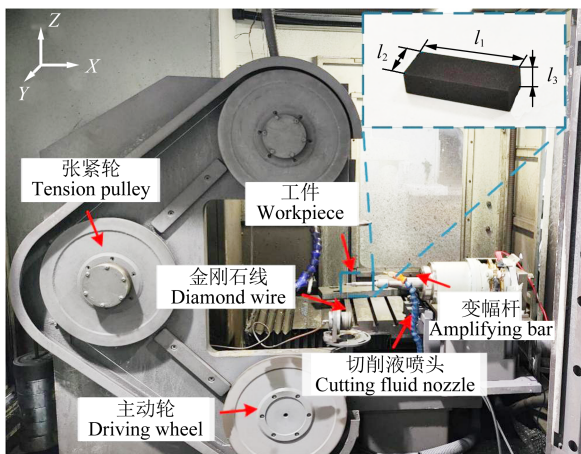


图 3 试验装置实物图

Fig. 3 Physical diagram of the test device

锯在 X 方向上的位移  $x$  和在 Z 方向上的位移  $z$  分别为

$$x = v_t t / 60 \quad (1)$$

$$z = v_w t / 60 \quad (2)$$

在超声作用下,线锯切割作用点处的磨粒振动为

简谐振动,振动方程可设为

$$x(t) = A \sin \omega t \quad (3)$$

式中,  $x(t)$  为磨粒在超声作用下的位移;  $A$  为超声振幅;  $\omega$  为超声振动频率。

对于磨粒而言,  $x$  方向的位移由式(1)、式(3)相加,再联立式(2)可得,其表达式为

$$x_p(t) = \frac{v_t z}{v_w} + A \sin \omega t \quad (4)$$

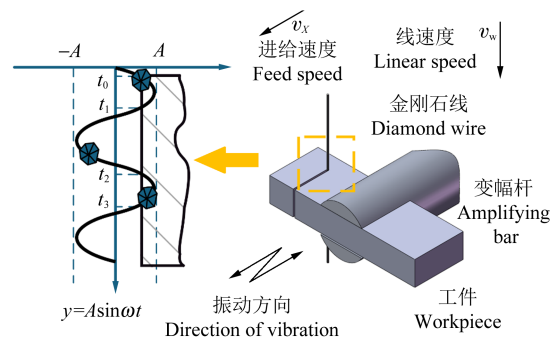
式中,  $x_p(t)$  为磨粒的位移。

在磨粒锯切过程中,工件质量与磨粒的切削厚度相关。磨粒最大切削厚度的计算式<sup>[32][3082]</sup>为

$$h_{max} = \left( \frac{3}{C \tan \theta} \frac{v_w}{v_f} \sqrt{a_c / d} \right)^{1/2} \quad (5)$$

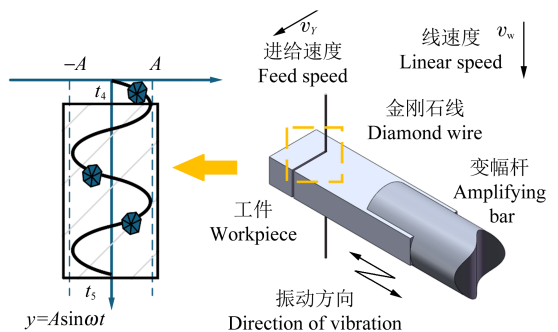
式中,  $h_{max}$  为磨粒的最大切削厚度;  $C$  为单位面积上的有效磨粒数;  $\theta$  为磨粒切削角的一半,  $\theta = 60^\circ$ ;  $a_c$  为金刚石磨粒对工件的切削深度;  $d$  为线锯的直径。

在试验中,平行向与垂直向所选用的超声振幅、线速度、进给速度保持一致。式(5)中其他工艺参数恒定时,  $a_c$  为影响  $h_{max}$  的唯一因素。振动方向不同,则  $a_c$  不同。由图 4 可知,平行向的磨粒相较于垂直向的磨粒会在工件表面上的切削轨迹更短,平行向磨粒的最大切削深度小于垂直向磨粒的最大切削深度。因此,平行向振动加工相较于垂直向振动加工提高工件表面质量更显著。



(a) 平行向振动锯切原理示意图

(a) Schematic diagram of parallel vibration sawing principle



(b) 垂直向振动锯切原理示意图

(b) Schematic diagram of vertical vibration sawing principle

图 4 不同超声振动方向超声锯切原理示意图

图 4 Schematic diagram of ultrasonic sawing principle in different ultrasonic vibration directions

图 4(a)为平行向加工过程中金刚石线锯磨粒的加工轨迹。金刚石线的线速度为  $v_w$ , 方向竖直向下, 工件沿进给速度方向的速度为  $v_x$ 。超声振动方向与进给速度方向平行。金刚石磨粒与工件之间的相对切削运动集中在  $t_0 \sim t_1$  以及  $t_2 \sim t_3$  时间段。在上述时间段内, 磨粒会对工件表面进行切削, 金刚石线上的磨粒会嵌入工件表面, 通过线速度产生的主运动使磨粒在工件表面进行刮擦, 实现工件表面材料的去除。而在其余时间内, 工件与磨粒处于分离状态。在超声振动的作用下, 整体表现为磨粒对工件的高频冲击作用, 会出现周期性的短暂分离。这种间歇性切削运动不仅能够减小切削力、改善加工性能, 还为切削液提供了充分的排屑和冷却空间, 带走加工过程中产生的切屑和热量, 进而提升加工效率和质量<sup>[35-37]</sup>。

图 4(b)为垂直向加工过程中金刚石线锯上磨粒的加工轨迹。垂直向加工的轨迹与平行向加工的轨迹相似, 呈周期性波动特点。但与平行向加工不同的是, 金刚石磨粒从  $t_4$  时刻切入到  $t_5$  时刻切出期间磨粒始终在工件表面耕犁。在超声振动的作用下, 金刚石磨粒以正弦轨迹在加工面上持续切削, 且振幅越大, 切削加工接触面积越大。平行向相比垂直向振动加工时磨粒周期性分离效果更好, 导致其加工性能相对较高, 进而提高了工件表面质量。

### 1.3 试验方案和参数

RB-SiC 试件锯切加工过程如图 5 所示。工件振动方向垂直于工作台进给方向。每次加工线锯对工

件的切削厚度  $a_c$  为 3 mm。金刚石线锯在主动轮的带动下沿  $v_w$  方向高速运动, 同时沿  $v_y$  方向进给, 直至金刚石线锯整体切离工件, 从而实现切割。

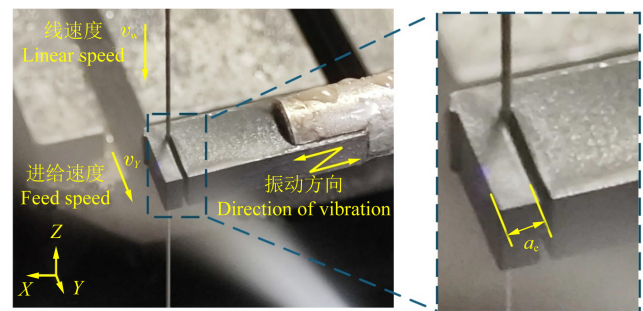


图 5 RB-SiC 超声锯切加工过程

Fig. 5 Ultrasonic sawing processing of RB-SiC

单因素试验法是开展工艺参数研究的常用方法, 具有直接反映单一因素对指标影响的特点。同时因其设计简单、试验次数少, 成为筛选关键参数或确定参数范围的常用方法。单因素试验法被用于单晶硅、单晶碳化硅、碳化硅陶瓷材料的锯切试验<sup>[17]4240[31]2457[32]3083[38-40]</sup>以及 RB-SiC 的超声磨削<sup>[41]</sup>和超声切削<sup>[42]</sup>工艺参数对表面质量影响规律研究。考虑到超声锯切 RB-SiC 研究尚未开展, 参考现有的相关文献, 本文采用单因素超声锯切 RB-SiC 的试验方式开展研究。详细研究了振动方向、振幅、线速度、进给速度对 RB-SiC 工件表面微观形貌和表面粗糙度的影响并揭示其变化规律, 试验参数如表 2 所示。

表 2 试验参数

Tab. 2 Test parameters

编号 Number	线速度 Linear speed $v_w/(m/s)$	进给速度 Feed speed $v_f/(mm/s)$	振幅 Amplitude $A/\mu m$	振动方向 Direction of vibration
1	10, 20, 30	0.025	3	X
2	10	0.1, 0.05, 0.025	3	X
3	10	0.025	3, 5, 7	X
4	10, 20, 30	0.025	3	Y
5	10	0.1, 0.05, 0.025	3	Y
6	10	0.025	3, 5, 7	Y

## 2 试验结果与讨论

在试验结束后, 使用 SU5000 型扫描电子显微镜和 OLS5100 型共聚焦显微镜对锯切加工后的 RB-SiC 试件分别进行表面形貌和表面粗糙度  $S_a$  观测。观察不同加工参数下观测区域内的 RB-SiC 的表面损伤, 并测量表面粗糙度值, 对表面质量进行量化。在此基础上得出不同超声锯切参数对加工表面质量的影响规律。

### 2.1 振幅对表面形貌和粗糙度的影响

图 6 为不同振动方向下不同振幅的 RB-SiC 超声锯切微观形貌。试验在线速度为 10 m/s、进给速度为 0.025 m/s 条件下进行, 对比分析了 3、5、7  $\mu m$  振幅下的

RB-SiC 超声锯切微观形貌。图 6(a)、图 6(c)、图 6(e) 为平行向振动时振幅不断增加的对比图。图 6(b)、图 6(d)、图 6(f) 为垂直向振动时振幅不断增加的对比图。其中, 图 6(a) 所示为平行向加工振幅为 3  $\mu m$  时的加工表面形貌。观测可知, 工件表面存在明显的脆性断裂、凹坑。随着振幅增大到 5  $\mu m$ , 加工表面的凹坑变浅、数量降低, 脆性断裂显著减少, 如图 6(c) 所示。当振幅为 7  $\mu m$  时, 加工表面的划痕明显变浅, 脆性断裂减少, 同时冲击产生的凹坑数量大幅减少, 表面质量得到提升, 如图 6(e) 所示。图 6(b) 为垂直向加工振幅为 3  $\mu m$  时加工表面形貌, 与平行向相比, 脆性断裂更明显, 且存在较深凹坑。当振幅增大到 5  $\mu m$  时,

图6(d)中的脆性断裂数量减少,凹坑范围减小。振幅增大到7 μm时,图6(f)所示的凹坑数量减少,表面微观形貌与平行向类似。

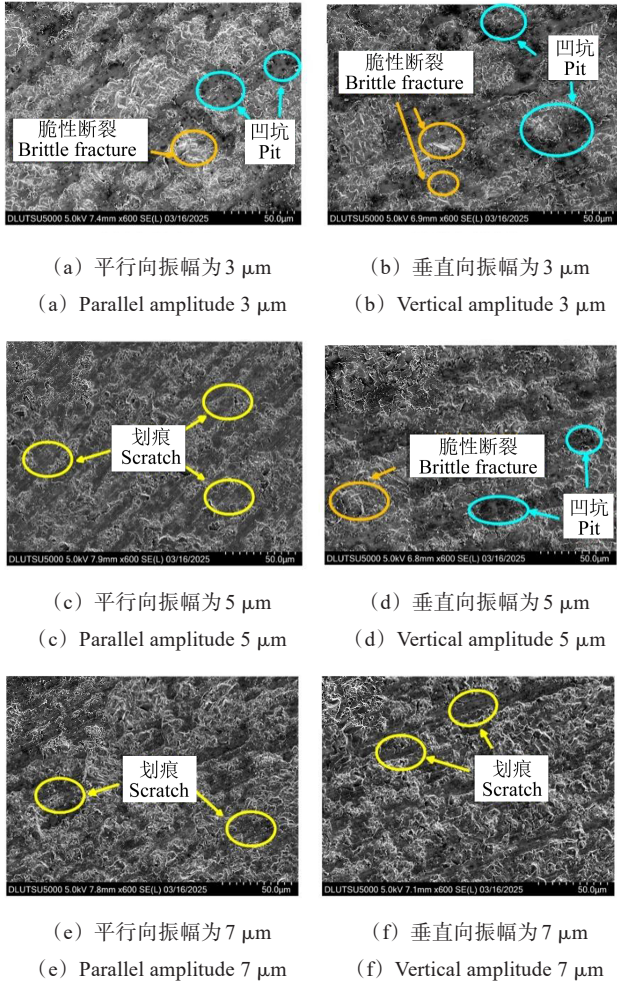


图6 不同振动方向下不同振幅的RB-SiC超声锯切微观形貌  
Fig. 6 Micro-morphology of RB-SiC ultrasonic sawing with different amplitudes in different vibration directions

图7为不同振动方向下不同振幅的RB-SiC超声锯切测量形貌。其中, $S_a$ 为算术平均表面粗糙度,即平面高度差的平均值; $S_z$ 为最大表面粗糙度,即为最大峰高与最大谷深的和。由图7(a)、图7(b)可知,表面中存在碎屑黏附,波峰波谷差值大,当振幅由3 μm增加到5 μm,由图7(c)、图7(d)可知,工件表面变得更加平整,但波纹度较大。振幅为7 μm时,由图7(e)、图7(f)可知表面波纹度降低,整体粗糙度值降低,超声锯切后RB-SiC表面质量提高。

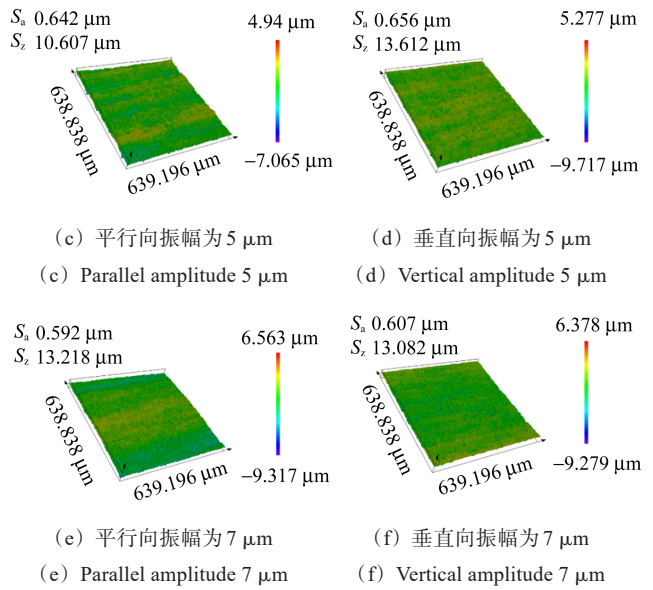
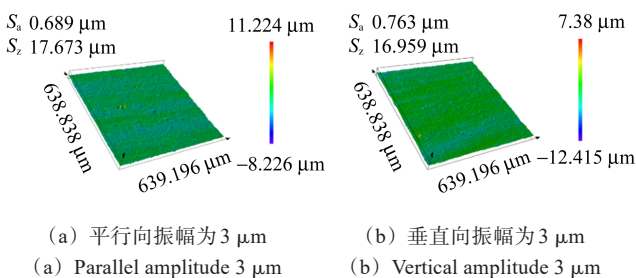


图7 不同振动方向下不同振幅的RB-SiC超声锯切测量形貌  
Fig. 7 Measuring morphology of RB-SiC ultrasonic sawing with different amplitudes in different vibration directions

图8为不同振幅的RB-SiC超声锯切表面粗糙度。当振幅由3 μm增加到7 μm,平行向表面粗糙度由0.689 μm降低到0.592 μm,降幅为14.07%;垂直向表面粗糙度由0.763 μm降低到0.607 μm,降幅为20.45%。超声振动由于其非连续周期性接触特性,显著降低了磨粒与工件之间的切削力和划擦力,减小的划擦力促进了高频划擦作用,在工件表面产生类似研磨的加工效果<sup>[43-44]</sup>,使工件表面的划痕和凹坑大幅减少,凹坑深度降低,脆性断裂占比降低,进而显著降低了锯切的表面粗糙度。因此,在上述试验参数范围内,增大振幅有助于提高加工质量。

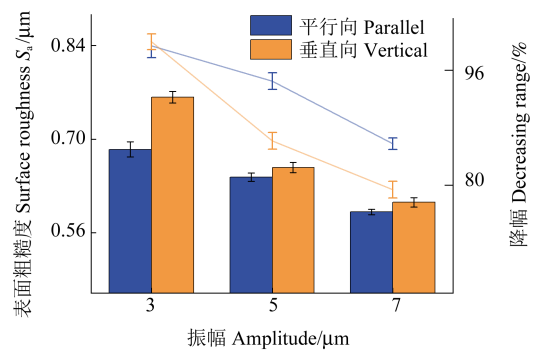


图8 不同超声振幅锯切的RB-SiC表面粗糙度  
Fig. 8 Surface roughness of RB-SiC sawed by different ultrasonic amplitudes

## 2.2 线速度对表面形貌和粗糙度的影响

图9为不同振动方向下不同线速度的RB-SiC超声锯切微观形貌。试验在进给速度为0.025 mm/s、振幅为3 μm条件下进行,对比分析了10、20、30 m/s线速度的RB-SiC超声锯切微观形貌。图9(a)、图9(c)、图9(e)为平行向振动加工时线速度不断增加的对

比图,图 9(b)、图 9(d)、图 9(f)为垂直向振动加工时线速度不断增加的对比图。图 9(a)、图 9(c)中存在范围较大的凹坑和脆性断裂。当线速度提高到 30 m/s 后,图 9(e)中的凹坑数量和脆性断裂数显著减少。同样,这一现象在垂直向振动加工中也存在,图 9(b)、图 9(d)中所示凹坑数量比平行向振动加工中数量更多。线速度提升至 30 m/s 时,图 9(f)中的凹坑数量减少。

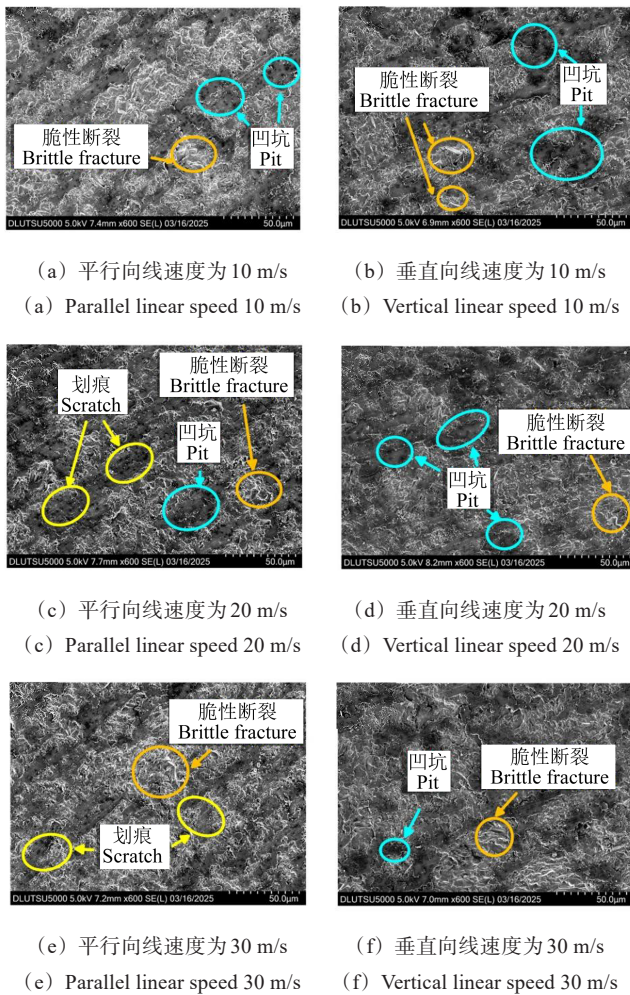


图 9 不同振动方向下不同线速度的 RB-SiC 超声锯切微观形貌

Fig. 9 Micro-morphology of RB-SiC ultrasonic sawing with different linear speeds in different vibration directions

图 10 为不同振动方向下不同线速度的 RB-SiC 超声锯切测量形貌。图 10(a)、图 10(b)为线速度 10 m/s 时测量形貌,工件表面有较大波纹度。线速度为 20 m/s 时,图 10(c)、图 10(d)中表面粗糙度值降低,但存在较明显划擦痕迹。提高线速度到 30 m/s,由图 10(e)、图 10(f)可知,磨粒的耕犁效应得到有效抑制,凹坑数量降低,脆性断裂数量显著减少,波峰波谷高度趋于统一,波纹度降低,工件表面的划痕明显变浅,表面质量得到明显改善。但是工件表面存在部分碎屑黏附,这可能是线速度提高后,加工区域的切削热量增加,

导致未及时排出的切屑黏附在工件表面。提高线速度时,应使加工区域的切屑和切削热及时排出,避免过多切屑留在加工表面,可以进一步提高工件的表面质量。

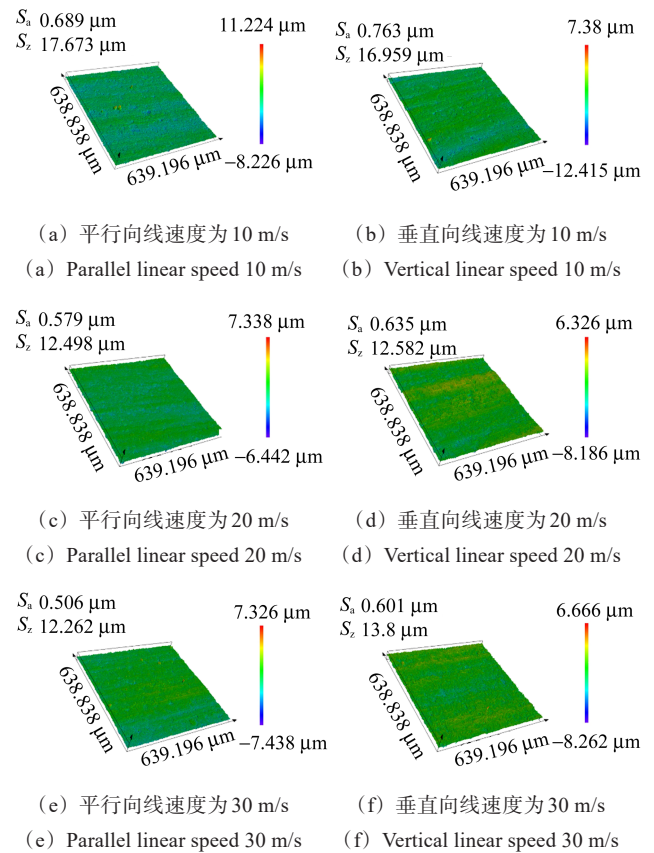


图 10 不同振动方向下不同线速度的 RB-SiC 超声锯切测量形貌  
Fig. 10 Measuring morphology of RB-SiC ultrasonic sawing with different linear speeds in different vibration directions

图 11 为不同线速度的 RB-SiC 超声锯切表面粗糙度。当线速度从 10 m/s 提升至 30 m/s 时,由图 11 可知,平行向振动时表面粗糙度由 0.689  $\mu\text{m}$  降低到了 0.506  $\mu\text{m}$ ,降幅为 26.56%;垂直向振动时的表面粗糙度由 0.763  $\mu\text{m}$  降低到了 0.601  $\mu\text{m}$ ,降幅为 21.23%。锯切后的 RB-SiC 表面质量得到改善。在进给速度恒定的条件下,随着线速度的增加,线锯上单位长度参与切削的磨粒数量增多,工件在单位时间内被切削的次数也随之增加,磨粒压入工件的速度减缓,切削力减小。这使得磨粒在锯切过程中对工件表面的冲击作用更加均匀,脆性破坏减少,表面更加平整,从而大幅降低了表面粗糙度。因此,在试验参数范围内,提高线速度有助于改善加工质量。

### 2.3 进给速度对表面形貌和粗糙度的影响

图 12 所示为不同振动方向下不同进给速度的 RB-SiC 超声锯切微观形貌。试验在线速度为 10 m/s、振幅为 3  $\mu\text{m}$  条件下进行,对比分析了 0.1、0.05、

0.025 mm/s 进给速度的 RB-SiC 超声锯切微观形貌。图 12(a)、图 12(c)、图 12(e) 为平行向振动加工时线速度不断降低的对比图,图 12(b)、图 12(d)、图 12(f) 为垂直向振动加工时线速度不断降低的对比图。如图 12(a) 所示,平行向加工进给速度为 0.1 mm/s 时,存在大量显著脆性断裂,凹坑深度大,划痕明显。进给速度降低到 0.05 mm/s 时,表面形貌改善,脆性断裂减少,凹坑和划痕刻度变浅,如图 12(c) 所示。进给速度降低到 0.025 mm/s 时,脆性断裂大幅减少,凹坑范围降低,如图 12(e) 所示。垂直向加工进给速度为 0.1 mm/s 时,图 12(b) 中有明显划痕并伴随大范围脆性断裂特征,表面质量显著差于平行向加工。随着进给速度降低,脆性断裂大幅减少,冲击产生凹坑减小,表面形貌改善,如图 12(d) 所示。进给速度降到 0.025 mm/s 时的表面形貌如图 12(f) 所示,脆性断裂进一步降低,凹坑变浅,划痕刻度相较于图 12(b) 显著变浅,表面质量提升。

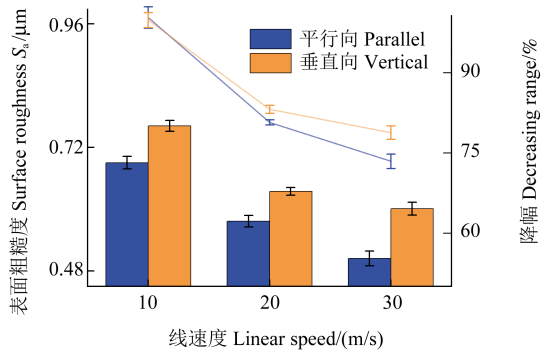
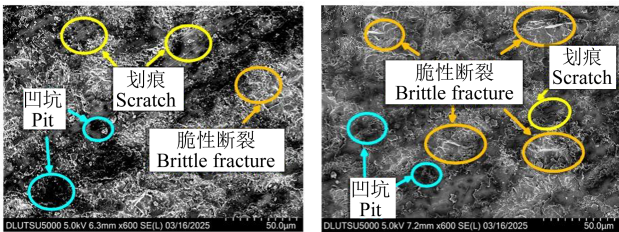
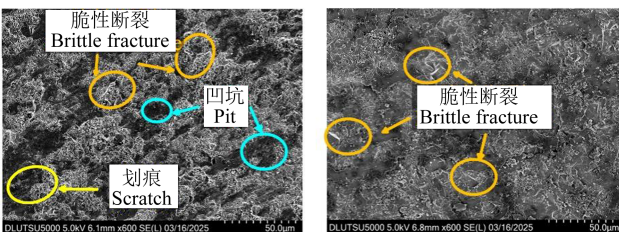


图 11 不同线速度的 RB-SiC 超声锯切表面粗糙度

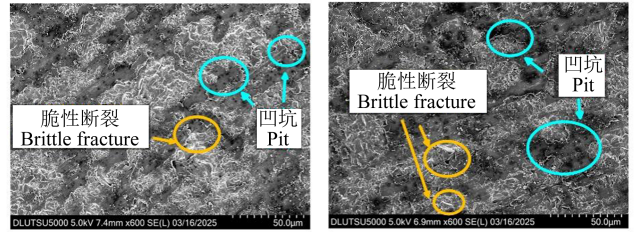
Fig. 11 Surface roughness of RB-SiC ultrasonic sawed by different linear speeds



(a) 平行向进给速度为 0.1 mm/s (b) 垂直向进给速度为 0.1 mm/s  
(a) Parallel feed speed 0.1 mm/s (b) Vertical feed speed 0.1 mm/s



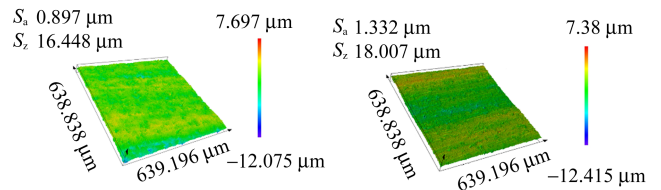
(c) 平行向进给速度为 0.05 mm/s (d) 垂直向进给速度为 0.05 mm/s  
(c) Parallel feed speed 0.05 mm/s (d) Vertical feed speed 0.05 mm/s



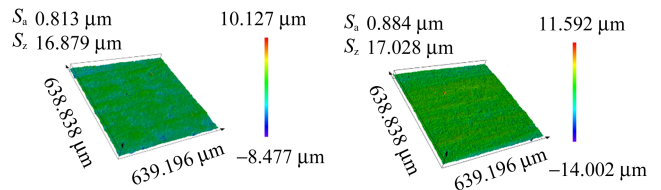
(e) 平行向进给速度为 0.025 mm/s (f) 垂直向进给速度为 0.025 mm/s  
(e) Parallel feed speed 0.025 mm/s (f) Vertical feed speed 0.025 mm/s

图 12 不同振动方向下不同进给速度的 RB-SiC 超声锯切微观形貌  
Fig. 12 Micro-morphology of RB-SiC ultrasonic sawing with different feed speeds in different vibration directions

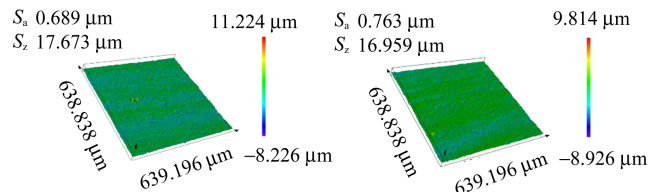
图 13 为不同振动方向下不同进给速度的 RB-SiC 超声锯切测量形貌。图 13(a)、图 13(b) 为进给速度为 0.1 mm/s 时测量形貌,图 13(a) 中表面存在着明显的锯切纹理,表面划痕明显,图 13(b) 的表面有显著划痕,波峰波谷差值大,表面质量差。随着进给速度降低至 0.05 mm/s 时,如图 13(c)、图 13(d) 所示,图 13(c) 呈现周期性波纹特征,波纹度较大,垂直向加工的表面形貌显著改善,但图 13(d) 仍可观察到明显的划痕缺陷。进给速度为 0.025 mm/s 时,图 13(e)、图 13(f) 表面上脆性断裂占比减少,波峰波谷的差值降低,凹坑占比降低,表面粗糙度大幅降低。



(a) 平行向进给速度为 0.1 mm/s (b) 垂直向进给速度为 0.1 mm/s  
(a) Parallel feed speed 0.1 mm/s (b) Vertical feed speed 0.1 mm/s



(c) 平行向进给速度为 0.05 mm/s (d) 垂直向进给速度为 0.05 mm/s  
(c) Parallel feed speed 0.05 mm/s (d) Vertical feed speed 0.05 mm/s



(e) 平行向进给速度为 0.025 mm/s (f) 垂直向进给速度为 0.025 mm/s  
(e) Parallel feed speed 0.025 mm/s (f) Vertical feed speed 0.025 mm/s

图 13 不同振动方向下不同进给速度的 RB-SiC 超声锯切测量形貌  
Fig. 13 Measuring morphology of RB-SiC ultrasonic sawing with different feed speeds in different vibration directions

图 14 为不同进给速度的 RB-SiC 超声锯切表面粗糙度。当进给速度从 0.025 mm/s 增至 0.1 mm/s 时,平行向振动的表面粗糙度由 0.689  $\mu\text{m}$  增加到了 0.897  $\mu\text{m}$ ,增幅为 30.19%;垂直向振动时的表面粗糙度由 0.763  $\mu\text{m}$  增加到了 1.332  $\mu\text{m}$ ,增幅为 74.57%。在高进给速度时,垂直向振动加工更不稳定,表面粗糙度提高幅度显著大于平行向振动加工,锯切后的 RB-SiC 表面质量降低。随着进给速度的增加,线锯上的磨粒嵌入工件的切削深度增大,导致切削力随之上升,表面划痕更加明显,锯切过程中形成的波峰与波谷之间的差值增大,同时凹坑的范围和数量也显著增加,脆性断裂占比增大,使表面粗糙度提高。因此,在试验参数范围内,降低进给速度有助于提高加工质量。

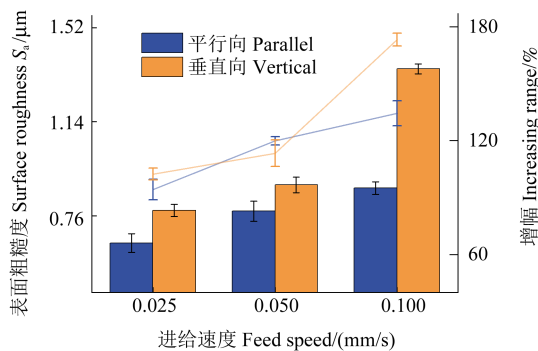


图 14 不同进给速度的 RB-SiC 超声锯切表面粗糙度

Fig. 14 Surface roughness of RB-SiC ultrasonic sawed by different feed speeds

### 3 结论

本文搭建超声金刚石线锯切割 RB-SiC 的试验平台,开展了不同超声振动方向的超声金刚石锯切 RB-SiC 试验,观测了不同超声锯切工艺参数条件下 RB-SiC 的表面损伤和表面粗糙度,采用单因素试验法研究了超声振动方向、超声振幅、线速度、进给速度对工件表面加工质量的影响规律,主要结论如下:

1) 超声锯切 RB-SiC 时,通过增大超声振幅能够有效降低工件表面粗糙度和表面损伤。随着超声振幅由 3  $\mu\text{m}$  提高到 7  $\mu\text{m}$ ,表面粗糙度降低 17.4%,表面划痕变浅,凹坑的数量减少,脆性断裂占比下降,工件表面质量改善。

2) 平行向振动超声锯切相较于垂直向振动超声锯切,在提升工件表面质量方面更为显著。振幅 3、5、7  $\mu\text{m}$  时,平行向比垂直向表面粗糙度分别降低 9.7%、2.47%、2.13%。随着振幅增大,2 种振动方向表面粗糙度差异程度减小。

3) 在平行向和垂直向超声锯切中,通过增大线速度和减小进给速度均能提高工件表面质量。线速度从 10 m/s 提升至 30 m/s 时,平行向表面粗糙度降低了

26.56%,垂直向表面粗糙度降低了 21.23%。进给速度从 0.1 mm/s 降低至 0.025 mm/s 时,平行向表面粗糙度降低了 23.19%,垂直向表面粗糙度降低了 42.72%。

### 参考文献 (References)

- [1] JOHNSON J S, GROBSKY K D, BRAY D. Rapid fabrication of lightweight silicon-carbide mirrors[C]//Optomechanical Design and Engineering 2002. Seattle: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2002: 243-253.
- [2] 李梦飞, 马波. 碳化硅陶瓷在光伏领域的应用与研究[J]. 中国高科技, 2024(11): 103-105.  
LI Mengfei, MA Bo. Application and research of silicon carbide ceramics in the field of photovoltaics [J]. China High and New Technology, 2024(11): 103-105. (In Chinese)
- [3] 张楷瑜, 杨冰, 朱钧国, 等. 碳化硅在核能技术中的应用[C]//中国核学会 2001 学术年会论文集. 北京: 中国核学会, 2001: 762-763.  
ZHANG Kaiyu, YANG Bing, ZHU Junguo, et al. The application of silicon carbide in nuclear energy technology [C]//Proceedings of the 2001 Annual Conference of Chinese Nuclear Society. Beijing: Chinese Nuclear Society, 2001: 762-763. (In Chinese)
- [4] 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.  
ZHANG Ge, ZHAO Rucheng, ZHAO Wenxing. Study on fabrication technology of reaction bonded silicon carbide mirror blank for space [J]. Chinese Journal of Space Science, 2011, 31(3): 401-405. (In Chinese)
- [5] GENG Z C, FANG F Z. Investigation of photocatalysis/vibration-assisted finishing of reaction sintered silicon carbide [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 133: 201-210.
- [6] 王健. RBSiC 超声辅助磨削工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015: 7-12.  
WANG Jian. Study on ultrasonic-assisted grinding technology of RBSiC [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015: 7-12. (In Chinese)
- [7] 梁静静, 张相召, 赵光辉, 等. 磨削加工对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷表面质量与力学性能的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(16): 16020-16024.  
LIANG Jingjing, ZHANG Xiangzhao, ZHAO Guanghui, et al. Effect of grinding process on surface quality and mechanical properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramics [J]. Materials Reports, 2020, 34(16): 16020-16024. (In Chinese)
- [8] 肖龙飞, 徐现刚. 宽禁带碳化硅单晶衬底及器件研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(4): 40003.  
XIAO Longfei, XU Xiangang. Recent development of wide band-gap semiconductor SiC substrates and device [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(4): 40003. (In Chinese)
- [9] 王沛志. 单晶碳化硅的金刚石线锯切片表层裂纹损伤研究[D]. 济南: 山东大学, 2020: 15-24.  
WANG Peizhi. Study on surface crack damage of diamond wire saw slice of single crystal silicon carbide [D]. Jinan: Shandong University, 2020: 15-24. (In Chinese)
- [10] XIONG H F, MAO W W, WANG R, et al. Characterizations on the doping of single-crystal silicon carbide [J]. Materials Today

- Physics, 2022, 29: 100906.
- [11] ZHANG J J, HAN L, ZHANG J G, et al. Brittle-to-ductile transition in elliptical vibration-assisted diamond cutting of reaction-bonded silicon carbide [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 45: 670-681.
- [12] 高玉飞, 葛培琪, 刘全斌, 等. SiC 单晶线锯切片及电镀锯丝制造技术的研究进展[J]. *河北科技大学学报*, 2013, 34(6): 501-506.  
GAO Yufei, GE Peiqi, LIU Quanbin, et al. Research progress of manufacturing technology of SiC single crystal wire saw slicing and electroplated wire saw [J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2013, 34(6): 501-506. (In Chinese)
- [13] 高玉飞. 电镀金刚石线锯切割单晶硅技术及机制研究[D]. 济南: 山东大学, 2009: 10-14.  
GAO Yufei. Study on technology and mechanism of cutting monocrystalline silicon with electroplated diamond wire saw [D]. Jinan: Shandong University, 2009: 10-14. (In Chinese)
- [14] SEFENE E M, CHEN C A, TSAI Y H. A comprehensive review of diamond wire sawing process for single-crystal hard and brittle materials [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 131: 1466-1497.
- [15] 李言, 王肖焯, 李淑娟. 大尺寸 SiC 单晶片的超硬磨料切割技术研究进展[J]. *工具技术*, 2010, 44(7): 7-11.  
LI Yan, WANG Xiaoye, LI Shujuan. Research progress on super-hard abrasive cutting technology of large size SiC wafer [J]. *Tool Engineering*, 2010, 44(7): 7-11. (In Chinese)
- [16] 陈勇彪, 张松辉, 张晓红, 等. 金刚石线锯切割碳化硅陶瓷的机制与工艺研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2021, 41(3): 60-67.  
CHEN Yongbiao, ZHANG Songhui, ZHANG Xiaohong, et al. Study on mechanism and process of cutting silicon carbide ceramics with diamond wire saw [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2021, 41(3): 60-67. (In Chinese)
- [17] YANG H Y, FU M, ZHANG X, et al. Material removal mechanisms of polycrystalline silicon carbide ceramic cut by a diamond wire saw [J]. *Materials*, 2024, 17(17): 4238-4240.
- [18] 张俊然, 朱如忠, 张玺, 等. 线锯切片技术及其在碳化硅晶圆加工中的应用[J]. *人工晶体学报*, 2023, 52(3): 365-379.  
ZHANG Junran, ZHU Ruzhong, ZHANG Xi, et al. Wire saw slicing and its application in silicon carbide wafers processing [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2023, 52(3): 365-379. (In Chinese)
- [19] HARDIN C W, QU J, SHIH A J. Fixed abrasive diamond wire saw slicing of single-crystal silicon carbide wafers [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2004, 19(2): 355-367.
- [20] 李宏达, 秦军存, 邢旭, 等. 线速度对金刚石线锯及硅片表面质量的影响[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2017, 37(5): 41-44.  
LI Hongda, QIN Juncun, XING Xu, et al. Influence of wire speed on diamond wire saw and surface quality of silicon wafer [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2017, 37(5): 41-44. (In Chinese)
- [21] 郭俊文, 苏宇飞. 线速度对金刚石线锯及硅片表面质量的影响[J]. *工具技术*, 2019, 53(11): 63-66.  
GUO Junwen, SU Yufei. Influence of wire speed on diamond wire saw and surface quality of silicon wafer [J]. *Tool Engineering*, 2019, 53(11): 63-66. (In Chinese)
- [22] HUANG H, ZHANG Y X, XU X P. Experimental investigation on the machining characteristics of single-crystal SiC sawing with the fixed diamond wire [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(5): 955-965.
- [23] WANG P Z, GE P Q, BI W B, et al. Effect of wire speed on sub-surface cracks in wire sawing process of single crystal silicon carbide [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 184: 273-285.
- [24] COSTA E C, XAVIER F A, KNOBLAUCH R, et al. Effect of cutting parameters on surface integrity of monocrystalline silicon sawn with an endless diamond wire saw [J]. *Solar Energy*, 2020, 207: 640-650.
- [25] 吴大伟. 高频超声换能器技术研究进展与展望[J]. *振动. 测试与诊断*, 2017, 37(1): 1-12.  
WU Dawei. Progress and prospects of high-frequency ultrasonic transducer techniques [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(1): 1-12. (In Chinese)
- [26] 吕东喜. 硬脆材料旋转超声加工高频振动效应的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 20-26.  
LÜ Dongxi. Study on high frequency vibration effect of rotary ultrasonic machining of hard and brittle materials [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 20-26. (In Chinese)
- [27] 赵波, 李鹏涛, 张存鹰, 等. 超声振动方向对 TC4 钛合金铣削特性的影响[J]. *航空学报*, 2020, 41(2): 623301.  
ZHAO Bo, LI Pengtao, ZHANG Cunying, et al. Effect of ultrasonic vibration direction on milling characteristics of TC4 titanium alloy [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(2): 623301. (In Chinese)
- [28] XU W H, HUANG C, LIU X H, et al. Influences of ultrasonic vibration directions, amplitudes, and frequencies on sapphire polishing studied by molecular dynamics [J]. *Precision Engineering*, 2024, 91: 155-173.
- [29] 李伦, 李艳军, 李济顺. 横向超声辅助线锯振动切割单晶 SiC 法向锯切力研究[J]. *人工晶体学报*, 2015, 44(12): 3730-3736.  
LI Lun, LI Yanjun, LI Jishun. Research on normal cutting force of transverse ultrasonic-assisted wire saw vibration cutting SiC monocrystal wafer [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2015, 44(12): 3730-3736. (In Chinese)
- [30] LI S J, WAN B, LANDERS R G. Surface roughness optimization in processing SiC monocrystal wafers by wire saw machining with ultrasonic vibration [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2014, 228(5): 725-739.
- [31] WANG Y, BAI T Q, SHU L, et al. Analytical prediction of sub-surface damage depth of monocrystalline silicon in ultrasonic vibration assisted wire sawing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 133(5): 2445-2460.
- [32] WANG Y, ZHAO B C, LI J X, et al. The surface residual stress of monocrystalline silicon in ultrasonic vibration-assisted diamond wire sawing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 121(5): 3079-3091.
- [33] WANG Y, ZHANG S, DONG G J, et al. Theoretical study on sawing force of ultrasonic vibration assisted diamond wire sawing (UAWS) based on abrasives wear [J]. *Wear*, 2022, 496: 204291.

- [34] 袁日灿,单翔,金亦富. 超声辅助金刚石线锯切割硬脆材料的研究[J]. 机械工程与自动化,2018(1):136-137.  
YUAN Rican, SHAN Xiang, JIN Yifu. Research on ultrasonic-assisted diamond wire saw cutting hard and brittle materials[J]. Mechanical Engineering & Automation,2018(1):136-137. (In Chinese)
- [35] DONG Z G, YUAN G Q, RAN Y C, et al. Material removal mechanism of SiC<sub>f</sub>/SiC composites during ultrasonic-assisted scratching with vertical vibration[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2025: 103416.
- [36] GENG D X, SUN Z F, LIU Y H, et al. Unravelling the influence of vibration on material removal and microstructure evolution in ultrasonic transversal vibration-assisted helical milling of Ti-6Al-4V holes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 326: 118320.
- [37] SUN Z F, GENG D X, GUO H L, et al. Introducing transversal vibration in twist drilling: material removal mechanisms and surface integrity[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 325: 118296.
- [38] 陈剑彬,沈剑云,王江全,等. 超声振动对单晶硅锯切比能的影响[J]. 材料科学与工艺,2017,25(1):62-68.  
CHEN Jianbin, SHEN Jianyun, WANG Jiangquan, et al. Influence of ultrasonic vibration on specific sawing energy of monocrystalline silicon[J]. Materials Science and Technology, 2017, 25(1): 62-68. (In Chinese)
- [39] 杨少东. 超声激励线锯切割SiC单晶机制与工艺研究[D]. 洛阳: 河南科技大学,2019:50.  
YANG Shaodong. Study on mechanism and technology of ultrasonic-excited wire saw cutting SiC single crystal[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology,2019:50. (In Chinese)
- [40] SHEN J Y, ZHU X, CHEN J B, et al. Investigation on the edge chipping in ultrasonic assisted sawing of monocrystalline silicon[J]. Micromachines, 2019, 10(9): 616.
- [41] 郑非非,董志刚,张嘉桐,等. 超声振动对单颗金刚石工具划擦RB-SiC材料去除行为的影响[J]. 机械工程学报,2019,55(1): 225-232.  
ZHENG Feifei, DONG Zhigang, ZHANG Jiatong, et al. Influence of ultrasonic vibration on material removal of scratching on RB-SiC with single diamond tool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(1): 225-232.
- [42] 韩腊. 反应烧结碳化硅振动辅助切削加工工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2019:56.  
HAN La. Study on vibration-assisted cutting technology of reactive sintering silicon carbide[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019:56. (In Chinese)
- [43] 张辽远,赵炎,马康乐,等. 超声金刚石线锯复合加工工件的对比实验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2016,36(2):32-36.  
ZHANG Liaoyuan, ZHAO Yan, MA Kangle, et al. Contrastive study on diamond wire saw cutting with/without ultrasonic vibration [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2016, 36(2): 32-36. (In Chinese)
- [44] CAO S Y, ZHANG X Y, WU C Q, et al. Towards understanding the material removal mechanism on the effect of ultrasonic vibration and anisotropy for unidirectional CFRP by scratching [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 324: 118250.

## Test study on ultrasonic wire saw cutting of reaction bonded silicon carbide

SONG Hongxia ZENG Guowei CHAO Shenghao GUO Xiaoguang DONG Zhigang WANG Yidan

(State Key Laboratory of High-performance Precision Manufacturing, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Reaction bonded silicon carbide (RB-SiC) is widely used for manufacturing core components in nuclear energy and optics due to its excellent thermal stability, radiation resistance and chemical inertness. However, RB-SiC is highly hard and brittle, making it difficult to ensure processing quality and efficiency with traditional methods. Ultrasonic diamond wire saw cutting technology, as an efficient machining method for hard brittle materials, has been successfully applied in the processing of single crystal Si, single crystal SiC, and other hard brittle materials. However, the cutting test and process research of this technology in RB-SiC materials need to be carried out. To this end, the ultrasonic sawing test of RB-SiC was carried out for the first time. The ultrasonic wire saw cutting RB-SiC platform was built. The surface quality of parallel and vertical ultrasonic vibration directions was compared and analyzed. The effects of ultrasonic amplitude, line speed and feed speed parameters on surface roughness and surface micro-morphology were studied. Results demonstrate ultrasonic sawing has significant advantages in improving surface quality. Increasing the amplitude from 3  $\mu\text{m}$  to 7  $\mu\text{m}$  reduces surface roughness value by 17.4% and decreases the number of surface scratches and pits. Compared to the vertical feed direction, ultrasonic vibration sawing in the parallel feed direction is more effective in improving the surface quality of RB-SiC materials. This study can provide guidance for the research of ultrasonic sawing process of RB-SiC materials.

**Key words:** Ultrasonic sawing; Reaction bonded silicon carbide; Diamond wire saw; Ultrasonic vibration; Surface quality

Corresponding author: WANG Yidan, E-mail: ydwang@dlut.edu.cn

Fund: National Key Research and Development Program of China (2022YFB3403401)

Received: 2025-03-26