

文章编号: 1006-4710(2012)01-0085-05

# 金刚石线锯超声振动切割 SiC 锯切力的实验研究

张洁<sup>1</sup>, 杨润<sup>2</sup>, 李淑娟<sup>1</sup>, 李言<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工晶体科技有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 在建立金刚石线锯普通切割 SiC 各锯切参数与锯切力关系的基础上, 研究了振动切割中各参数对锯切力的影响机理和锯丝磨损对 SiC 切割表面质量的影响, 并采用单因素进行锯切参数对锯切力和 SiC 切割表面形貌的试验研究。结果表明: 同等条件下, 超声振动切割比普通锯切的平均主锯切力明显减小; 相对于锯切速度和工件转速, 工件进给速度对锯切力的影响更为明显; 增大振幅直接扩大了介于工具-工件间的动态容屑空间, 有利于排屑。正确选择锯切工艺参数尤其是进给速度和振幅, 对锯切力和动态容屑空间的平衡至关重要。

**关键词:** 金刚石线锯; 振动切割; 锯切力

中图分类号: TG732, TG717 文献标志码: A

## Experimental Study of Diamond Scroll Saw Ultrasonic Cutting SiC

ZHANG Jie<sup>1</sup>, YANG Run<sup>2</sup>, LI Shujuan<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>

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

2. XAUT Crystal Growing Technology Co Ltd, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Based on the relationship between processing parameters and cutting force under wire saw fixed diamond abrasive cutting SiC single crystal wafers, this paper studies mechanism for each parameters influencing on the cutting force and the wire saw wear has effect to surface quality of SiC single crystal wafers, the single factor experiment for processing parameters influencing on cutting force and surface topography is conducted. The results show that: the wire saw with ultrasonic vibration cutting reduce significantly the average main cutting force than that in ordinary wire saw cutting. Compare with the wire saw velocity and part rotation, the part feedrate influence on cutting force more obvious and increasing the amplitude lead to expand directly the dynamic chip space between wire saw-part which is benefit to chip outflowing. It is critical that reasonable choice processing parameters, especially the part feedrate and vibration amplitude, to the balance of the cutting force and dynamic chip space.

**Key words:** wire saw fixed diamond abrasive; vibration cutting; cutting force

随着 SiC 单晶应用领域的不断扩大, 也因其所具有的耐高温、导热性能好、抗冲击等特性, SiC 成为制作高温、高频、大功率、抗辐射器件及光电集成器件的理想材料, 在电子和微电子领域起到了重要作用。SiC 晶体作为一种超硬脆材料, 切片加工是制造过程的重要工序。根据被切割材料的性质不同, 切割方法可分为导电材料的切割和非导电材料的切割。

导电材料的切割方法种类繁多, 有气割、锯割、等离子切割、激光切割、高压水流切割、电火花线切割等。其中电火花线切割是导电材料常用的精密切割技术。非导电材料的精密切割方法由于受材料性质的限制, 种类相对较少, 主要是使用各种游离磨料或固结磨料的锯割。电镀金刚石线锯-超声振动复合锯切技术是近年来新兴的一类加工方法。该方法特别适合加工硬脆材料, 具有锯切力小、加工精度

收稿日期: 2011-10-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175420); 陕西省教育厅项目(11JK0849, 11JS074); 陕西省科学技术研究发展计划项目(2010K09-01)。

作者简介: 张洁(1985-), 女, 陕西渭南人, 硕士生, 研究方向为硬脆材料超声切割技术。E-mail: bingjie1985118@126.com。  
李淑娟(1968-), 女, 陕西蒲城人, 教授, 博导, 研究方向为加工过程控制。E-mail: shujuanli@xaut.edu.cn。

高、加工表面质量好等优点<sup>[1]</sup>。近年来,国内外的学者在超声加工方面进行了相关实验研究<sup>[2-8]</sup>,但实验研究方面都比较笼统,没有从单一的因素层面考虑对实验结果的影响,而作为振动切割中重要参数之一的振幅,其变化对锯切力的影响方面的研究很少,尤其是理论方面的研究未见报道。

本文通过对振动切割中锯切力的实验研究,利用曲线拟合的方法,从理论上给出了振幅、锯切速度、工件进给速度、工件转速对锯切力的影响变化规律,同时研究了锯丝磨损对 SiC 表面形貌的影响,为获得较小的切向锯切力和更好的表面质量确定合适的参数匹配。

## 1 实验原理与条件

### 1.1 实验原理

和普通切割相比,振动切割加工就是给刀具(或工件)加以适当方向、一定频率及振幅的振动,以达到将连续切割的方式转变为脉冲切割方式。由于这种方法在一定范围内能够有效地解决难加工材料的加工及其精密加工方面的问题,有效地利用了超声振动的一系列特点,使其越来越多地应用在机械加工的各个领域。本文所用的实验机床由 WXD170 型往复式金刚石线旋转点切割机改装而成(参见图 1),X 方向移动平台行程:180~300 mm,进给速度可调整在 0.005~18 mm/min 之间,Y 方向移动平台行程:180~300 mm,旋转速度在 0~36 r/min 之间,可实现金刚石线锯与工件材料的点接触切割。



图 1 实验仪器设备

Fig. 1 Experimental equipment

振动切割实际上是利用锯丝高频振动,使一段连续的切割过程转化为分段的间断的高速切割过程,其原理如图 2 所示。

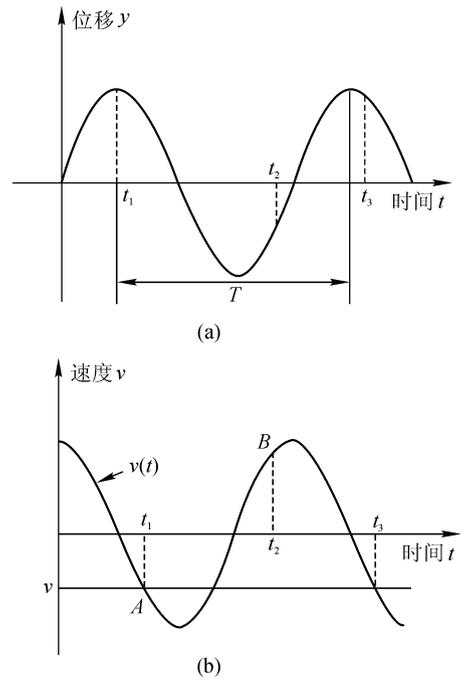


图 2 振动切割基本运动分析图

Fig. 2 The basic movement analysis chart of vibration cutting

设振动切割时线锯的强迫振动为不衰减的简谐振动,即:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

式中, $x$  为位移, $A$  为刀尖的振幅, $\omega = 2\pi f$  为角频率, $f$  为频率, $t$  为时间, $\varphi_0$  为初始相位。

振动速度为:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = A\omega \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (2)$$

在  $t_1$  时刻,线锯振动速度  $v(t)$  与锯切速度  $v$  数值相等且方向相同,这时锯丝和工件脱离,工件继续以切割速度  $v$  推进;到  $t_2$  时刻,工件位置坐标与金刚石线锯加工刀位置坐标相同,线锯和工件开始接触而进入切割过程;到  $t_3$  时刻,线锯振动速度又与工件速度相同,锯丝又与工件脱离。如此反复循环进行,这就是超声波振动切割过程。

其最大速度  $v(t)_{\max} = A\omega = 2A\pi f$ , 平均速度  $v(t)_{\text{mean}} = 4Af$ 。

在不考虑走线的影响时,振动切割线锯运动的合成速度  $\bar{V}$  是工件圆周线速度  $\bar{v}$  与线锯运动速度  $\bar{v}(t)$  的合成,即:

$$\bar{V} = \bar{v} + \bar{v}(t) = \bar{v} + A\omega \cos(\omega t + \varphi_0)$$

可见,振动切割时,在一个振动周期内,磨粒随时改变着切削方向,形成一种“多刃切削”过程,磨粒也容易破碎,不断形成新的磨刃,使得锯丝上的有效磨粒数和磨粒的有效磨刃数都显著增加,提高锯丝的切割能力,也提高了切割质量和效率<sup>[9]</sup>。

## 1.2 实验条件

切割实验选用 ACQ-600 超声波振动加工机, 工作频率为  $(20 \pm 1)$  kHz。该装置采用日本上世纪 90 年代先进技术, 使用了 PLL 频率自动跟踪系统, 使发生器的震荡频率和换能器谐振频率达到一致, 将发生器输出的功率充分反馈给换能器, 有效地提高了系统的电声转换效率。工件材料为 SiC, 式样为  $\phi 76 \text{ mm} \times 18.5 \text{ mm}$  的晶棒。实验参数设定为: 锯切速度  $V_s$  分别为 1.3、1.6、1.9、2.2 m/s, 工件进给速度  $a_p$  分别为 0.025、0.05、0.08、0.1 mm/min; 工件转速  $n_w$  分别为 8、12、16、20 r/min。普通水冷却。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 振幅对锯切力的影响

在普通锯切的基础上, 给线锯加上 0.001 2 ~ 0.004 4 mm 的振幅。其他锯切条件为: 锯切速度  $V_s = 1.9 \text{ m/s}$ , 进给速度  $a_p = 0.05 \text{ mm/min}$ , 工件自转转速  $n_w = 12 \text{ r/min}$ 。测试结果如表 1 所示。表中  $F_t$  表示振动切向锯切力,  $F_n$  表示振动法向锯切力,  $F'_t$  表示普通切向锯切力,  $F'_n$  表示普通法向锯切力, 下同。由表 1 可知, 随着振幅的增大, 切向锯切力随之减小, 此时与理论结果刚好相符。

表 1 不同振幅下的锯切力

振幅/mm	0.001 2	0.001 5	0.001 8	0.002 1
$F_t/\text{N}$	0.437 0	0.346 25	0.402 87	0.329 19
$F_n/\text{N}$	0.506 5	0.408 90	0.502 10	0.474 07

在普通切削(不加超声振动)的同等条件下,  $F'_t = 0.738 8 \text{ N}$ ,  $F'_n = 0.999 8 \text{ N}$ 。

可以得出振幅在 0.001 2 ~ 0.002 1 mm 变化时, 随着振幅的增大, 平均锯切力随之减小, 此时与理论结果刚好相符。而增大振幅直接扩大了介于工具与工件之间的动态容屑空间, 使得工具与工件之间能间断地结合和分离, 直接有利于排屑。因此正确选择锯切工艺参数尤其是振幅, 对锯切力和动态容屑空间的平衡至关重要。

### 2.2 锯切速度对锯切力的影响

根据往复式电镀金刚石线锯切割实验机床的锯切速度范围(0 ~ 3 m/s), 选取锯切速度, 为了保证良好的实验结果, 选定进给速度  $a_p = 0.05 \text{ mm/min}$ , 工件自转转速  $n_w = 12 \text{ r/min}$ , 超声波振幅  $A = 0.001 2 \text{ mm}$ 。只变化锯切速度, 取锯切速度为 1.3、1.6、1.9、2.2 m/s, 分别测量振动切削和普通切削

的锯切力, 测量结果如表 2 所示。

表 2 不同锯切速度下的锯切力

$V_s/(\text{m/s})$	1.3	1.6	1.9	2.2
$F_t/\text{N}$	1.449 2	0.780 2	0.548 5	0.407 3
$F'_t/\text{N}$	2.191 0	1.133 0	0.738 8	0.440 1
$F_n/\text{N}$	1.556 9	0.825 0	0.653 0	0.429 2
$F'_n/\text{N}$	2.634 0	1.646 9	0.999 8	0.749 0

从表 2 可看出, 随着锯切速度的增大, 普通切削的锯切力和振动锯切力都在减小; 在锯切速度较低时, 超声振动切割的锯切力约为普通切割的锯切力的近一半, 但随着锯切速度的提高, 振动切割的锯切力也慢慢接近普通切割的锯切力。

### 2.3 工件进给速度对锯切力的影响

在研究进给速度和锯切力的关系时, 固定锯切速度  $V_s = 1.9 \text{ m/s}$ , 工件自转转速  $n_w = 12 \text{ r/min}$ , 超声波振幅  $A = 0.001 2 \text{ mm}$ , 只变化进给速度, 如表 3 所示。分别取进给速度  $a_p$  为 0.025、0.05、0.08、0.10 mm/min, 作振动锯切力和普通锯切力的比较。由表 3 可见, 在其他参数不变的情况下, 随着工件进给速度的增大, 进给方向的抗力也增大, 切割分离的作用减弱, 所以锯切力增大。

表 3 不同工件进给速度下的锯切力

$a_p/(\text{mm/min})$	0.025	0.05	0.08	0.10
$F_t/\text{N}$	0.463 3	0.548 5	0.773 5	0.936 2
$F'_t/\text{N}$	0.625 6	0.733 0	0.927 8	1.619 3
$F_n/\text{N}$	0.518 4	0.629 1	0.829 1	1.137 5
$F'_n/\text{N}$	0.833 0	0.999 8	1.432 1	1.852 6

根据分析得知, 工件进给速度增大, 切向锯切力和法向锯切力都有不同程度的增大; 当进给速度比较大时, 法向锯切力随进给速度增加的速率也增大。

### 2.4 工件转速对锯切力的影响

在本实验装置中, 工件也随着滚筒进行自转, 为了研究工件转速变化对振动切削锯切力的影响, 固定锯切速度  $V_s = 1.9 \text{ m/s}$ , 工件进给速度  $a_p = 0.05 \text{ mm/min}$ , 超声波振幅  $A = 0.001 2 \text{ mm}$ , 只变化工件转速, 如表 4 所示。分别取工件转速  $n_w$  为 8、12、16、20 r/min, 作振动切削和普通切削锯切力的比较。

由表 4 可见, 在其他参数不变的情况下, 随着工件转速的增大, 振动切割和普通切割的锯切力都有不同程度的下降, 但当工件转速超过 16 r/min 时, 锯切力又有所增大。分析其原因, 主要从运动学出

发,磨粒运动的实际速度是工件圆周线速度与锯丝运动速度的合成,在 16 r/min 之前,转速增大,合成速度增大,在进给速度和侧向压力一定的情况下,单位时间内磨粒的压入深度减小,在其之后,速度不断增大,会引起低频振动,加快磨粒磨损,锯切力反而增大。

表4 不同工件转速下的锯切力

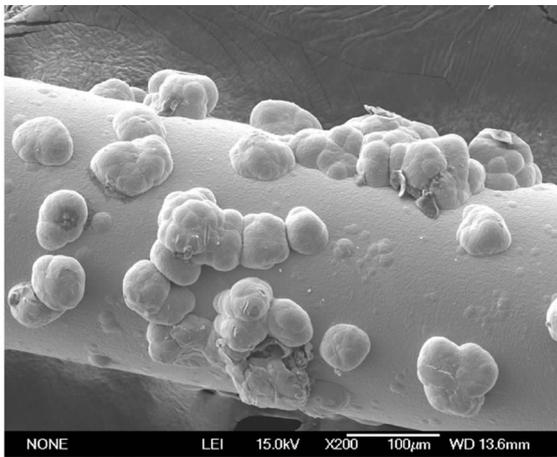
Tab.4 The cutting force under different rotational speed of workpiece

$n_w/(r/min)$	8	12	16	20
$F_t/N$	0.520 1	0.464 9	0.373 6	0.426 0
$F'_t/N$	0.743 7	0.738 8	0.608 1	0.701 7
$F_n/N$	0.668 0	0.588 3	0.480 7	0.579 0
$F'_n/N$	0.884 5	0.920 1	0.856 8	0.999 8

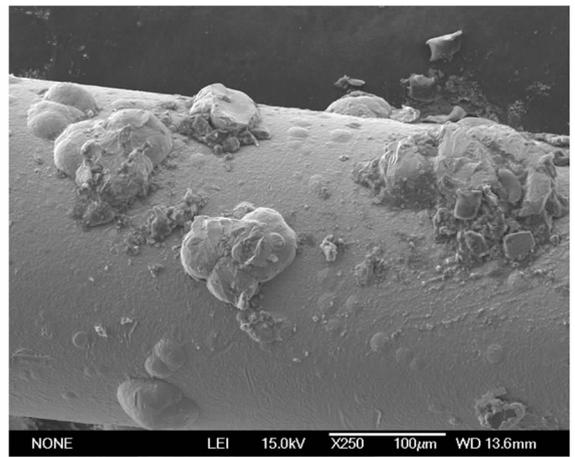
## 2.5 线锯磨损对 SiC 单晶片切割表面形貌的影响

金刚石线锯的磨损在微观上表现为金刚石颗粒的破损、脱落和粘合剂的磨损,在宏观上表现为线锯直径的减小。从图3可看出,使用前的金刚石颗粒随机分布在锯丝的表面,形成不规则的切削刃。随着锯切过程的进行,锯丝上的金刚石磨粒出现破损和脱落现象,被磨平、破损及脱落的金刚石磨粒不断增多,使得金刚石线锯的锯切能力逐渐减弱。而随着线锯的逐渐失效,工件上所承受的锯切力也就跟着增大。

在锯切过程中,笔者采用不同的锯切方式(加超声波和不加超声波)研究 SiC 的切割表面形貌,采用同一倍数的 JSM-6700F 场发射扫描电子显微镜观测的加超声切割和不加超声切割下的 SiC 单晶表面 SEM 微观形貌图(见图4)。



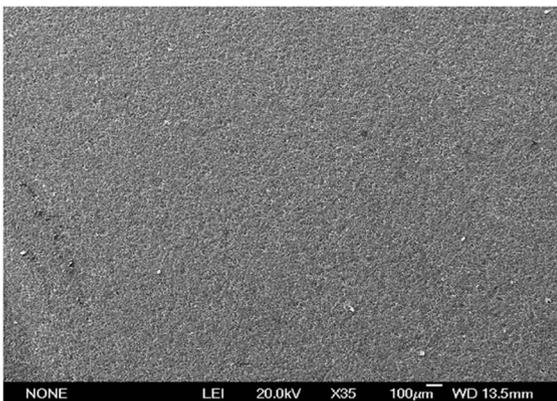
(a) 磨损前



(b) 磨损后

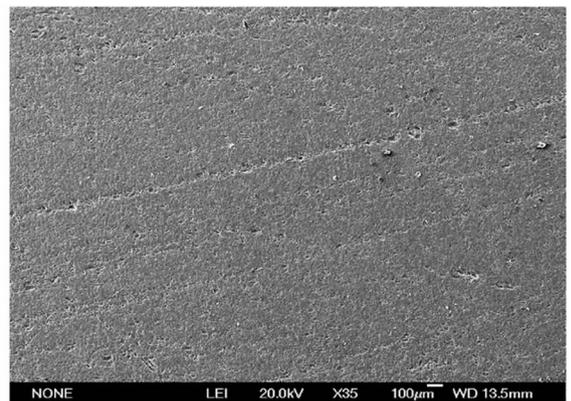
图3 锯丝磨损前后 SEM 微观形貌图

Fig.3 The SEM topography before and after sawing wire worn



( $V_s=1.9$  m/s,  $a_p=0.08$  mm/min,  $n_w=12$  r/min,  $A=0.0012$  mm)

(a) 加超声切割



( $V_s=1.9$  m/s,  $a_p=0.08$  mm/min,  $n_w=12$  r/min)

(b) 不加超声切割

图4 线锯切割下 SiC 单晶表面 SEM 微观形貌图

Fig.4 The SEM microscopic topography of cutting surface of SiC single crystal

从图4可看出,比起加超声波的 SiC 切割表面,

在不加超声波的 SiC 切割表面存在有凹凸不平的划

痕。分析原因,一方面是实验所用的锯丝滚筒是正反转的,当锯丝换向运转时,线速为零,但工件进给速度没变,使得锯丝瞬间的弹性变形增大,此时的锯切力也在跟着增大;其次,在加超声波振动切割中,锯丝上的金刚石颗粒周期性地离开和接触工件,工件只作圆周运动,金刚石颗粒按有规律的脉冲力进行切割,除了正常的切割运动和所加的规则振动之外,在切割过程的极短时间内,刀具与工件之间没有其他附加的相对运动,因此加超声振动的 SiC 切割表面要相对光滑。

### 3 结 论

1) 与普通锯切比较,超声锯切的平均主锯切力明显减小。在较小的锯切用量下,锯切力的减少尤为显著。这也就是在锯切速度达到临界值的时候,超声锯切和普通锯切的锯切力基本一致的主要原因。

2) 在超声锯切条件下,随着锯切进给量的增加,锯切力稳定增加。

3) 在往复式金刚石线锯超声切割中,工件本身也进行自转,这样使得在滚筒和工件所转方向一致的时候,合速度会变大,单颗磨粒的锯切厚度减小,单位长度上的切向锯切力也随之减小,但随着工件转速的增加,引起线锯的低频振动,线锯与工件之间的冲击增大,加速磨粒的破碎,最终也会使锯切力明显增加,严重时会导致线锯失效,因此,选择合适的工件转速也尤为重要。

4) 在试验过程中,发现随着超声波振幅的增大,法向锯切力和切向锯切力都随着减小,而法向锯切力减小的幅度相对小于切向锯切力的减小幅度,在本实验中,根据实验结果可以看出,切向锯切力平均减小了 20% ~ 30%。

### 参考文献:

- [1] 袁艺,吕彦明,王纯. 超声波振动切削应用范围理论探讨[J]. 华北工学院学报,1994,15(3):189-194.  
Yuan Yi, Lü Yanming, Wang Chun. Application of ultrasonic vibration cutting theory[J]. Journal of North China Institute of Technology,1994,15(3):189-194.
- [2] 高伟. 环形电镀金刚石线锯的制造及其切割技术与机理的研究[D]. 济南:山东大学,2002:54-60.  
Gao Wei. Diamond wire manufacturing and cutting technology and mechanism research[D]. Jinan: Shandong University,2002:54-60.
- [3] Goetze D. Effect of vibration amplitude, frequency and composition of abrasive slurry on the rate of ultrasonic machining in ketos tool steel[J]. Journal of Acoustic Society of America,1956,(28):133.
- [4] Rosenberg R S. Silllulation of genetic populations with biochemical properties [D]. Michigan: University of Michigan,1967.
- [5] Schaffer J D. Multiple objective optimizations with vector evaluated genetic algorithms [C] // Genetic algorithms and their applications: proceeding of the First Intemational Conference on Genetic Algorithms. N J, USA: Lawrence Erlbaum Associates Inc,1985:93-100.
- [6] Shaw M C. Ultrasonic grinding [J]. Microtecnic, 1956, 10:257.
- [7] Neppiras E A, Foskett R D. Ultrasonic machining [J]. Phillips Technical Reviewvol,1956,67(18):325 ~ 368.
- [8] Markov A I. Ultrasonic machining of intractable materials [M]. London : Life Books Limited,1966.
- [9] 李祥林,薛万夫,张日昇. 振动切削及其在机械加工中的应用[M]. 北京:科学技术出版社,1985.

(责任编辑 王卫勋)