

# 超声振动辅助划擦高体分铝基碳化硅的 刀具磨损特性

查慧婷<sup>1</sup>,冯平法<sup>1,2</sup>,张建富<sup>1</sup>,郁鼎文<sup>1</sup>,吴志军<sup>1</sup>

(1.清华大学精密超精密制造装备及控制北京市重点实验室,北京 100084;2.清华大学深圳研究生院先进制造学部,广东深圳 518055)

**摘要:**为研究高体分 SiCp/Al 复合材料旋转超声加工中金刚石刀具的磨损规律,制备了圆锥形单颗金刚石工具,分别进行了单颗金刚石普通磨损试验和超声振动辅助磨损试验,通过对比分析两种试验结果,得出超声振动对金刚石刀具磨削高体分 SiCp/Al 复合材料时磨粒磨损规律的影响。试验结果表明:普通磨损试验中金刚石磨粒的磨损形式主要为宏观崩裂和磨耗磨损,而超声振动辅助磨损试验中金刚石磨粒的磨损形式主要为微小破碎和磨耗磨损。超声振动作用能显著降低试验过程中的切削力,减小摩擦因数,缓解金刚石磨粒与材料的黏附作用。金刚石磨粒在轴向上叠加了超声频的振动速度,其切入材料的合成速度增大,使金刚石磨粒内部尺寸较小的裂纹更易扩展,磨粒所受切削力方向不断发生改变,因此不易形成较大的宏观崩裂,金刚石磨粒的使用寿命得到延长。

**关键词:**机械学;超声振动;铝基碳化硅复合材料;磨损规律;金刚石刀具

中图分类号:TH117.1

文献标志码:A

文章编号:1671-5497(2019)02-0458-08

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb20171283

## Wear characteristics of cutting tools in ultrasonic vibration assisted scratching high volume fraction SiC particle reinforced aluminum matrix composites

ZHA Hui-ting<sup>1</sup>, FENG Ping-fa<sup>1,2</sup>, ZHANG Jian-fu<sup>1</sup>, YU Ding-wen<sup>1</sup>, WU Zhi-jun<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Lab of Precision/Ultra-precision Manufacturing Equipments and Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Division of Advanced Manufacturing, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** To study the wear mechanism of diamond cutting tools in rotary ultrasonic machining high volume fraction SiC particle reinforced aluminum matrix composites, a conical single diamond tool was prepared to conduct ordinary wear test and ultrasonic vibration assisted wear test respectively. By comparing and analyzing the results, the influence of ultrasonic vibration on the grain wear of diamond cutting tools was obtained in grinding high volume fraction SiC particle reinforced aluminum matrix composites. The results show that the diamond grain mainly undergoes macro-cracking and abrasion in ordinary wear test, while the form of diamond grain wear is mainly micro-breaking and abrasion in ultrasonic vibration assisted wear test. The ultrasonic vibration can reduce the cutting force and the

收稿日期:2017-12-27.

基金项目:国家自然科学基金项目(51761145103, 51875311);北京市自然科学基金项目(3141001).

作者简介:查慧婷(1991-),女,博士研究生.研究方向:旋转超声加工技术. E-mail: cht13@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者:张建富(1975-),男,副教授,博士.研究方向:精密加工工艺与装备. E-mail: zhjf@tsinghua.edu.cn

friction coefficient. The adhesion between the diamond grain and the material is alleviated. The velocity of the diamond grain is superimposed with vibration velocity along the axial direction. So its speed increases when the diamond grain cuts into the material and small cracks in the diamond grain expand. Moreover, the direction of the cutting force is constantly changing to make it difficult to form large macro-crack, so that the service life of diamond grain is prolonged.

**Key words:** mechanics; ultrasonic vibration; SiC particle reinforced aluminum matrix composites; wear rule; diamond cutting tool

## 0 引言

铝基碳化硅复合材料(SiCp/Al)是以铝合金作为基体, SiC 颗粒作为增强体的一种新型复合材料。它具有密度低、比强度高、比刚度高、热膨胀系数低、热导率好、耐磨性好等优异的物理力学性能<sup>[1-3]</sup>, 被广泛运用在航空航天、轨道交通和电子封装等领域<sup>[4-6]</sup>。但随着 SiC 颗粒体积分数的增加, 材料的硬度、脆性和耐磨性等性能也会随之增加<sup>[7,8]</sup>, 使高体分 SiCp/Al 复合材料的机械加工性能显著降低, 其主要的难加工性体现在加工过程中刀具磨损十分严重, 普通的高速钢和硬质合金刀具在加工时刀具磨损剧烈, 难以胜任该材料机械加工的需求<sup>[9,10]</sup>。

近年来, 旋转超声加工技术(Rotary ultrasonic machining, RUM)得到迅速发展。旋转超声加工技术是在传统磨料液超声加工技术的基础上发展而来, 它是将磨粒固结在刀具表面, 通过刀具表面磨粒的磨削作用和超声振动作用来完成材料的去除<sup>[11]</sup>。众多研究结果表明<sup>[12-14]</sup>, 旋转超声加工技术在加工硬脆材料时具有降低切削力、提高加工效率、改善加工质量等优势。目前, 旋转超声加工技术被逐渐引入到高体分 SiCp/Al 复合材料的机械加工中。单颗金刚石磨损试验能有效观察金刚石磨粒在加工过程中的变化规律, 反映出金刚石颗粒磨损的机制。王健全等<sup>[15]</sup>采用圆锥形单颗金刚石磨具划擦工程陶瓷, 用圆弧半径的磨损规律等效描述切削刃磨损特性, 研究结果表明, 金刚石颗粒尖端形状对磨粒磨损的影响最大。吴海勇等<sup>[16]</sup>进行了单颗金刚石划擦 Ta12W 的试验研究, 跟踪观察了金刚石的磨损形貌, 测量了划擦过程的力信号及声发射信号。黄武等<sup>[17]</sup>对比分析了金刚石和 CBN 磨粒修整过程中的磨损特征, 试验发现砂轮和修整碟轮的相对速度对磨粒的磨损有重要影响。目前, 关于刀具磨损的研究较少涉及超声振动作用的影响, 针对高体分 SiCp/Al 复合材料, 目前的研究也主要集中在旋转超声加

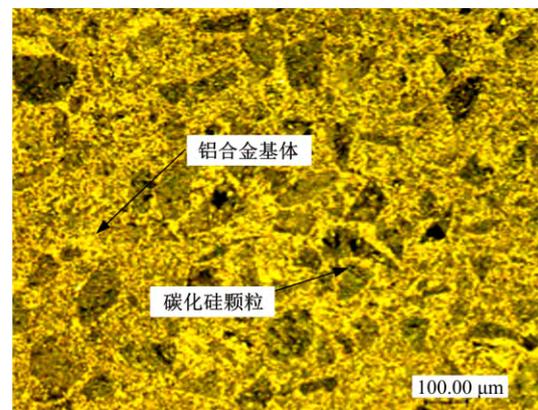
工中的工艺参数对材料加工质量的影响, 对于该材料旋转超声加工中刀具磨损的研究相对较少。

本文通过对比单颗金刚石普通磨损试验和超声振动辅助磨损试验, 观察了金刚石磨粒在试验过程中的变化规律, 分析了金刚石磨粒的磨损形式, 指出超声振动对金刚石刀具磨削高体分 SiCp/Al 复合材料磨损规律的影响。

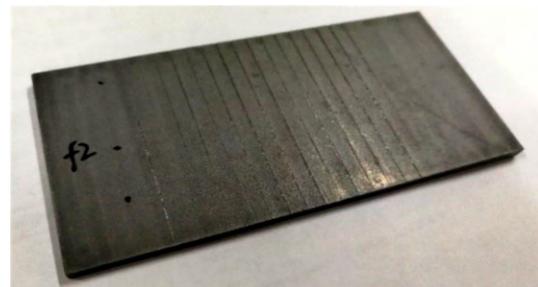
## 1 试验设计

### 1.1 试验材料与设备

试验在德国 DMG 公司生产的 Ultrasonic 50 旋转超声加工机床上进行, 该机床最大超声功率为 300 W, 进给分辨率为 1  $\mu\text{m}$ 。试验中使用的材料是体积分数为 65% 的 SiCp/Al 复合材料, 工件尺寸为 80 mm $\times$ 40 mm $\times$ 3.2 mm, 如图 1 所示。



(a) 微观组织



(b) 工件

图 1 高体分 SiCp/Al 复合材料

Fig.1 High volume fraction SiCp/Al composites

由于圆锥形金刚石颗粒具有轴对称性, 在试

验过程中不受切入方向的影响,其尖端部位能模拟磨粒在加工过程中的各种状态,从而简化对各类形态金刚石磨粒的磨损规律分析。试验采用自制的圆锥形单颗金刚石工具,金刚石颗粒的锥角为  $80^\circ$ ,如图 2 所示。

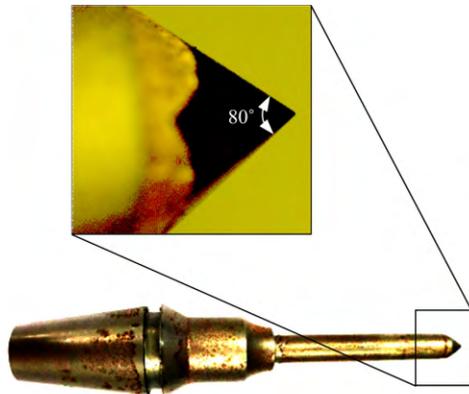


图 2 单颗金刚石工具

Fig.2 Single diamond grain tool

将单颗金刚石工具通过超声刀柄安装在旋转超声加工机床的主轴上,开启超声振动的功能后,工具末端的金刚石磨粒则会获得一定振幅的超声频振动。通过激光位移传感器的测量,金刚石磨粒的振幅为  $5\sim 6\ \mu\text{m}$ 。试验中切削力的测量由 Kistler 9256C2 动态测力系统完成。

### 1.2 试验方案

试验首先将工件用热熔胶固定在夹具上,用金刚石铣磨刀具将工件表面加工平整,倾斜工件,使工件一端抬高  $30\ \mu\text{m}$ ,使用千分表保证高度差,试验系统实物图如图 3 所示。调整单颗金刚石工具,使金刚石末端贴近工件最低侧。试验中金刚石磨粒的最大划擦深度为  $30\ \mu\text{m}$ ,划擦速度为  $24000\ \text{mm}/\text{min}$ ,在工件上的划擦长度为  $40\ \text{mm}$ 。

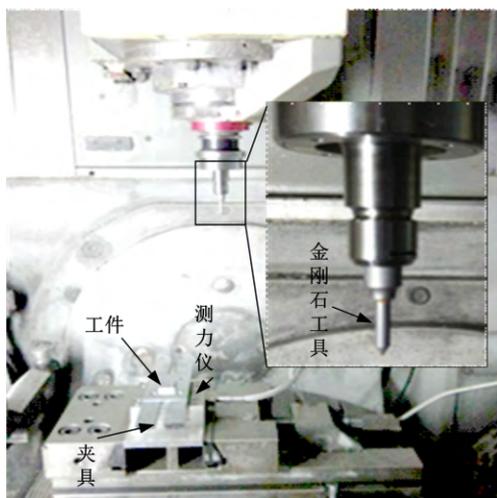


图 3 试验系统实物图

Fig.3 Test system

每划擦一次,使用千分尺测量单颗金刚石工具的总长度,并用 KEYENCE VHX-600 超景深数码显微镜观察金刚石磨粒的形貌,使用 Kistler 9256C2 测力仪测量加工过程中的切削力。

## 2 金刚石磨粒的磨损规律分析

在试验过程中,金刚石磨粒挤压切除铝合金基体,并与材料中的 SiC 颗粒相互碰撞摩擦。在实现材料去除的同时,金刚石磨粒本身也发生了磨损,如磨耗、破碎和崩裂等。

### 2.1 金刚石磨粒的磨损形貌及磨损量

为高效、低成本地研究超声振动对于金刚石磨粒划擦高体分 SiCp/Al 复合材料时刀具磨损的影响,通过开展前期试验探索了方案的可行性,包括划擦速度、划擦深度、超声振幅大小的影响,以及金刚石磨损特征等。金刚石磨粒在叠加超声振动作用后,磨损速度得到减缓。超声振动辅助磨损试验及普通磨损试验中金刚石磨粒磨损过程分别如图 4、图 5 所示。在超声振动辅助磨损试验

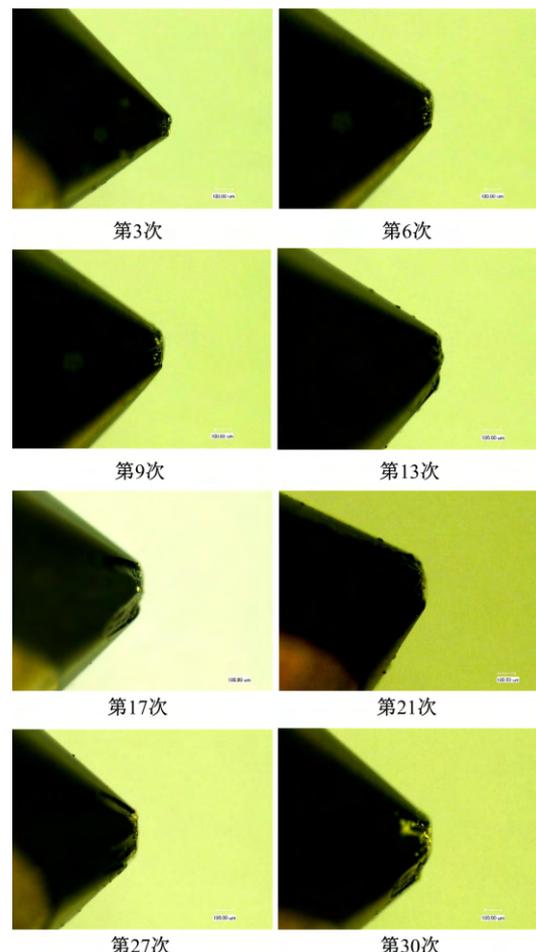


图 4 超声振动辅助磨损试验中金刚石磨粒的磨损过程

Fig.4 Wear process of diamond grain in ultrasonic vibrating assisted wear test

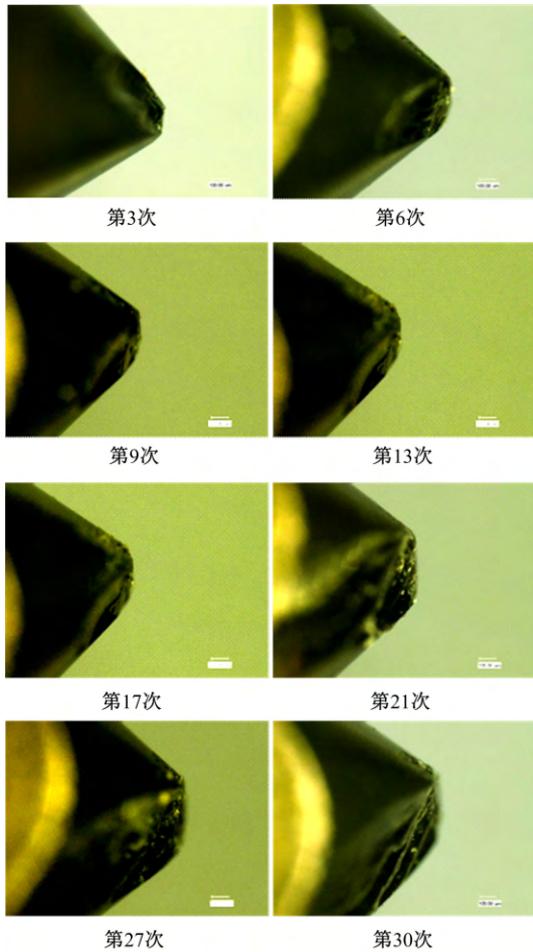


图 5 普通磨损试验中金刚石磨粒的磨损过程

Fig.5 Wear process of diamond grain in ordinary wear test

中,金刚石磨粒的磨损相对平稳,磨粒发生微小破碎;而在普通磨损试验中,金刚石磨粒出现了几次大的崩裂,磨粒的磨损情况变化剧烈,后期刀具长度持续快速缩短。从金刚石磨粒的形貌上可见普通磨损试验中金刚石磨粒的磨损形式主要为宏观崩裂和磨耗磨损,而超声振动辅助磨损试验中金刚石磨粒的磨损形式主要为微小破碎和磨耗磨损。

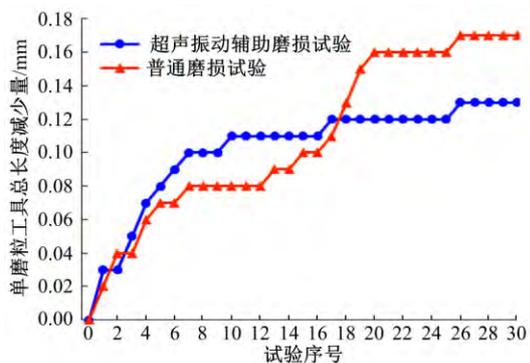


图 6 单颗金刚石工具总长度的减少量

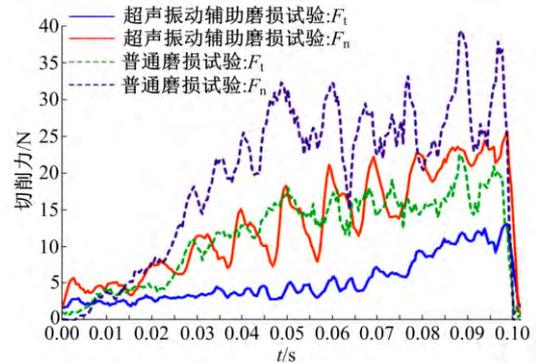
Fig.6 Length reduction of single diamond tool

从图 6 可以看出,在试验初期,由于单颗金刚石工具顶部相对脆弱,金刚石工具容易发生破碎而变短,使单颗金刚石工具总长度的减少量较大。超声振动辅助磨损试验中,金刚石磨粒在初期磨损后,迅速进入稳定阶段;而在普通磨损试验中,金刚石磨粒在初期经历多次崩刃,单颗金刚石工具总长度虽然减少得较慢,但其强度被削弱,因此金刚石磨粒经历了初期磨损、稳定,再次磨损、稳定这一过程,刀具磨损更加剧烈,磨损得更快。由此可见,超声振动作用有利于改善金刚石刀具的磨损特性,使金刚石磨粒的使用寿命得到延长。

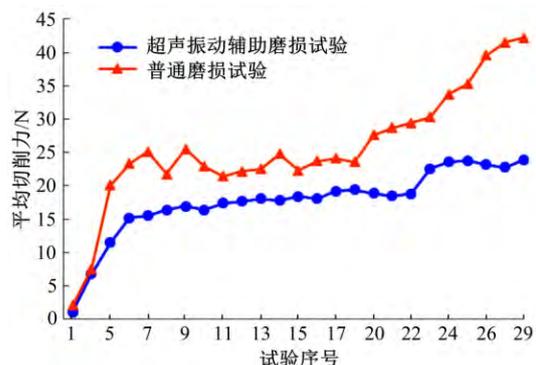
### 2.2 试验过程中的切削力

#### 2.2.1 平均切削力

在试验过程中,随切削深度不断增大,轴向切削力与切向切削力逐渐增大,图 7(a)为所测得第 7 次试验的轴向切削力  $F_n$  与切向切削力  $F_t$ 。由图 7(a)可知,超声辅助磨损试验中的轴向切削力和切向切削力均小于普通磨损试验中的切削力,并且超声振动辅助磨损试验中的轴向切削力明显小于切向切削力。为方便比较,选择每组试验过程的总体平均轴向切削力进行对比分析。由图 7(b)可知,在整个试验过程中,超声振动辅助磨损



(a) 第 7 次试验的切削力



(b) 平均切削力对比

图 7 试验过程中的切削力

Fig.7 Cutting force intest process

试验中的平均切削力始终小于普通磨损试验中的平均切削力,并且到试验后期,普通磨损试验中的平均切削力持续升高,两种试验中平均切削力的差值也在增大,可知试验后期普通磨损试验中金刚石磨粒的磨耗磨损较大。

### 2.2.2 摩擦因数

磨粒与材料之间划擦的摩擦因数  $\mu$  可定义为切向切削力与轴向切削力的比值,即  $F_t/F_n$ 。通常认为摩擦因数  $\mu$  可以揭示材料的去除特性<sup>[18]</sup>。由图 8 可知,超声振动辅助磨损试验中的摩擦因数明显小于普通磨损试验中的摩擦因数。这表明,在超声振动辅助磨损试验中,金刚石磨粒与材料的摩擦作用被减弱,磨粒与材料不易发生黏附。从材料上的划痕形貌也能看出这一效果,如图 9 所示,超声振动辅助磨损试验中材料上的划痕比较平整,SiC 颗粒发生破碎而脱落;普通磨损试验中材料的铝基体表面粗糙。

### 2.2.3 切削力与磨损量的关系

图 10 为试验过程中平均切削力与工具总长

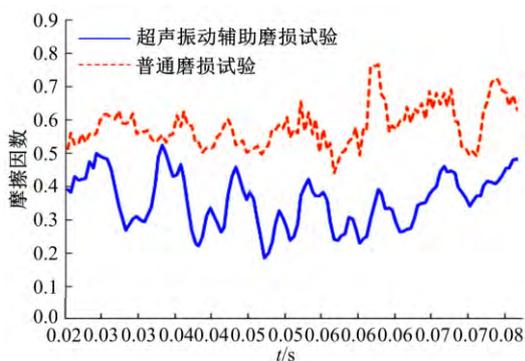
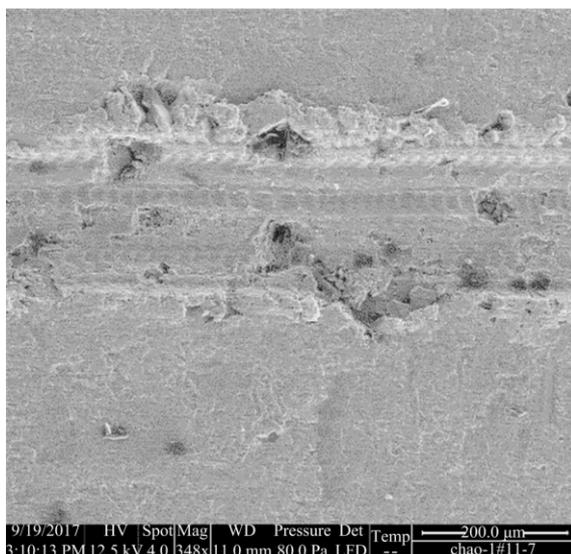
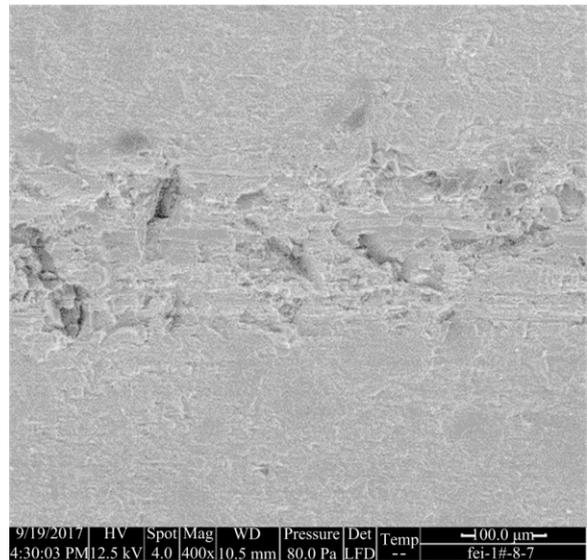


图 8 试验过程中的摩擦因数  
Fig.8 Friction coefficient in test process



(a) 超声振动辅助磨损试验

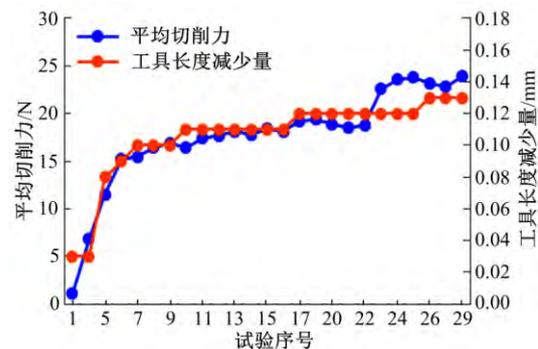


(b) 普通磨损试验

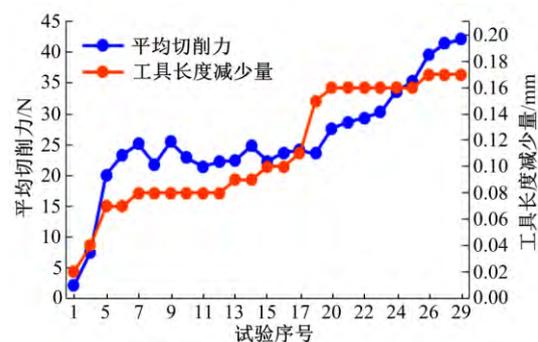
图 9 划痕形貌图

Fig.9 Morphology of scratching surfaces

度减少量的关系。由图 10 可知,试验过程中单颗金刚石工具总长度减少量与平均切削力的大小呈正相关性,即切削力的大小影响着金刚石磨粒的磨损量。由于超声振动的作用,超声振动辅助磨损试验过程中的切削力得到显著降低,切削力的降低进一步减缓了金刚石磨粒的磨损。



(a) 超声辅助磨损试验



(b) 普通磨损试验

图 10 试验过程中的切削力与工具总长度减少量的关系

Fig.10 Relationship between cutting force and length reduction of tool during test

2.3 超声振动作用对金刚石磨粒磨损规律的影响

由于超声振动的作用,金刚石磨粒的运动学特征发生了改变。如图 11 所示,超声振动辅助磨损试验中金刚石磨粒的轨迹可用式(1)表示,轨迹为一正弦曲线,而普通磨损试验中金刚石磨粒的轨迹为一条直线,即  $\gamma_c(t) = v_t t + y_0$ 。

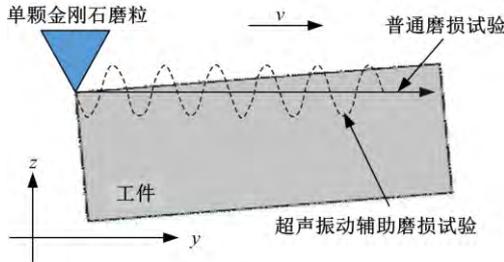


图 11 试验过程中金刚石磨粒的运动轨迹

Fig.11 Trajectory of single diamond grain during test

$$\gamma_{VA}(t) = \begin{bmatrix} y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_t t + y_0 \\ A \cdot \sin(2\pi f t) + z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\gamma_{VA}$  和  $\gamma_c$  分别为超声振动辅助磨损试验和普通磨损试验中金刚石磨粒的位移;  $y_0$ 、 $z_0$  分别为金刚石磨粒在  $y$  向和  $z$  向上的初始位置;  $v_t$  为金刚石磨粒的划擦速度;  $A$  为超声振动的振幅;  $f$  为超声振动的频率。

对位移公式进行求导,即可得金刚石磨粒的速度公式。超声振动辅助磨损试验中金刚石磨粒的速度可表示为:

$$\gamma'_{VA}(t) = \begin{bmatrix} V_y(t) \\ V_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_t \\ 2\pi f A \cdot \cos(2\pi f t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

而普通磨损实验中金刚石磨粒的速度恒定,即  $\gamma'_c(t) = v_t$ 。

在超声振动辅助磨损试验中,由于超声振动的作用,金刚石磨粒在轴向上叠加了一个超声频的振动速度,金刚石磨粒切入材料中的速度为划擦速度与超声振动速度的合成,由此可知超声振动辅助磨损试验中金刚石磨粒的速度高于普通磨损试验中金刚石磨粒的速度。

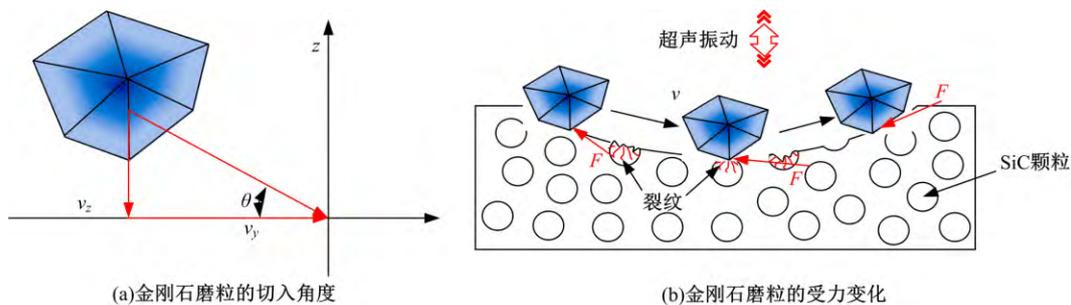


图 12 超声振动辅助磨损试验中金刚石磨粒的切入角和受力情况

Fig.12 Cutting angle and force of diamond grain in ultrasonic vibrating assisted wear test

根据脆性材料断裂力学理论,脆性材料中 I 型裂纹失稳扩展的判据:材料中的应力场强度  $K_I$  大于等于材料的断裂韧性  $K_{IC}$ ,即  $K_I \geq K_{IC}$ 。应力场强度  $K_I$  的普通表达式为  $K_I = Y\sigma\sqrt{c}$ ,其中, $Y$  为与颗粒形状及内部裂纹尺寸有关的比例因子; $\sigma$  为材料所受的应力; $c$  为材料内部初始裂纹尺寸。将该式代入判据得:

$$\sigma^2 c \geq \frac{K_{IC}^2}{Y^2} \quad (3)$$

对于脆性材料,冲击碰撞时导致颗粒破碎的速度为<sup>[19]</sup>:

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{m \sigma^2}{2 \rho E} \quad (4)$$

式中: $v$  为颗粒的速度; $\rho$  为颗粒的密度; $E$  为杨氏模量,则有:

$$v = \frac{\sigma}{\sqrt{\rho E}} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)中,即得到颗粒破碎的速度与材料内部裂纹尺寸的关系:

$$v^2 c \geq \frac{K_{IC}^2}{\rho E Y^2} \quad (6)$$

由式(6)可知,当颗粒的材料一定时,颗粒速度增大,材料内部尺寸小的裂纹得以扩展,进而使颗粒形成微小的破碎;当颗粒速度较小时,材料内部尺寸较大的裂纹才能扩展,从而更易形成较大的宏观崩裂。

另外,由于金刚石磨粒在  $z$  方向上叠加了超声振动,在超声振动辅助磨损试验中,金刚石磨粒切入材料的方向在不断发生改变,从而金刚石磨粒受到力的方向也在不断改变,而普通磨损试验中,金刚石磨粒的切入角度和受力方向始终不变,如图 12 和图 13 所示(图中将 SiC 颗粒简化成理想的球体,均匀分布于铝合金基体中)。因此,超声振动辅助磨损试验中金刚石磨粒不易发生宏观崩裂。

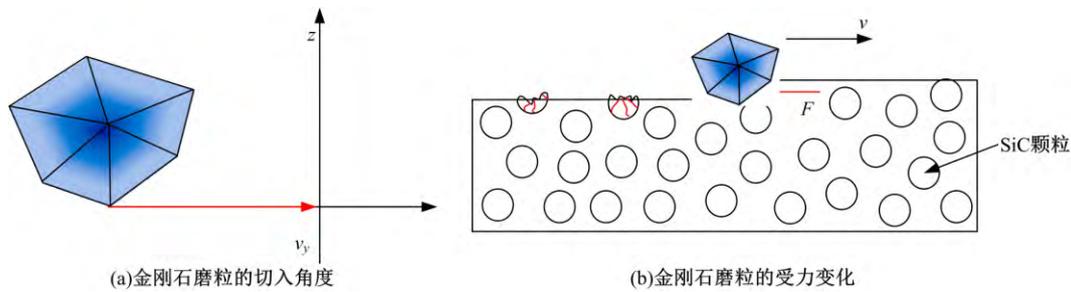


图 13 普通磨损试验中金刚石磨粒的切入角和受力情况

Fig.13 Cutting angle and force of diamond grain in ordinary wear test

综上,试验中金刚石磨粒的磨损机制可用图 14 和图 15 表示。在超声振动辅助磨损试验中,由于超声辅助作用,金刚石磨粒在与高体分 SiCp/Al 复合材料中的 SiC 颗粒发生碰撞时,产生微小的裂纹并发生扩展,进而形成微小破碎,表现为初期磨损,磨粒磨钝后,发生磨耗磨损,逐渐进入稳定磨损阶段;而在普通磨损试验中,金刚石磨粒在碰到 SiC 颗粒后会出现较大的崩裂,磨粒磨损情况迅速恶化。

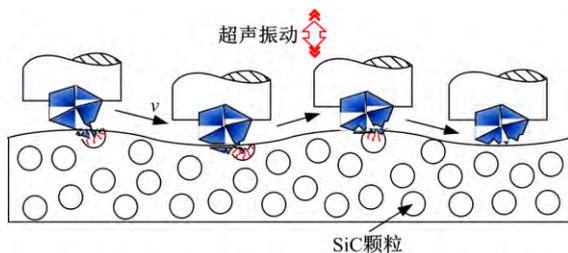


图 14 超声振动辅助磨损试验中金刚石磨粒的磨损机制

Fig.14 Wear mechanism of diamond grain in ultrasonic vibrating assisted wear test

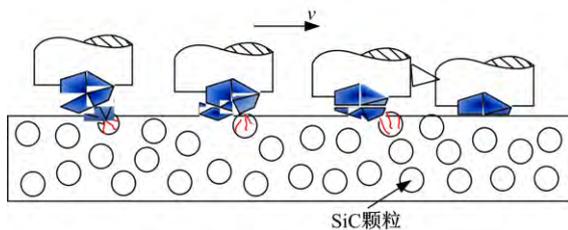


图 15 普通磨损试验中金刚石磨粒的磨损机制

Fig.15 Wear mechanism of diamond grain in ordinary wear test

### 3 结 论

(1)对于高体分 SiCp/Al 复合材料,金刚石磨粒会与材料中 SiC 颗粒发生碰撞摩擦,在去除材料的同时,自身也会发生磨损。在普通磨损试验中金刚石磨粒的磨损形式主要为宏观崩裂和磨耗磨损,而超声振动辅助磨损试验中金刚石磨粒的磨损形式主要为微小破碎和磨耗磨损。

(2)超声振动作用能显著降低加工过程中的切削力,减小摩擦因数,缓解金刚石磨粒与材料之间的黏附作用,从而降低金刚石磨粒的磨耗磨损。切削力的大小与金刚石磨粒的磨损量呈正相关性,切削力降低能进一步减缓金刚石磨粒的磨损。

(3)超声振动作用下,金刚石磨粒在轴向上叠加了一个超声频的振动速度,其切入材料的合成速度增大。根据脆性材料断裂力学理论,金刚石磨粒内部尺寸较小的裂纹更易扩展,进而使颗粒形成微小的破碎。另外,超声振动作用使金刚石磨粒的受力方向不断发生改变,因此不易形成较大的宏观崩裂,金刚石磨粒的磨损情况随超声振动作用的引入得到改善。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Xiu Zi-yang, Yang Wen-shu, Dong Rong-hua, et al. Microstructure and mechanical properties of 45 vol.% SiCp/7075Al composite[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2015, 31(9): 930-934.
- [ 2 ] Sahin Y, Acilar M. Production and properties of SiCp-reinforced aluminium alloy composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2003, 34(8): 709-718.
- [ 3 ] 刘卫红, 孙大谦, 贾树盛, 等. 颗粒增强铝基复合材料扩散连接研究进展[J]. 吉林大学学报:工学版, 2002, 32(3):96-100.  
Liu Wei-hong, Sun Da-qian, Jia Shu-sheng, et al. Advances of research for diffusion bonding particle reinforced aluminium matrix composites[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2002, 32(3):96-100.
- [ 4 ] Kevorkijan V M. Aluminum composites for automotive applications: a global perspective [J]. JOM, 1999, 51(11): 54-58.
- [ 5 ] Lee H S, Jeon K Y, Kim H Y, et al. Fabrication process and thermal properties of SiCp/Al metal matrix composites for electronic packaging applica-

- tions[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(24):6231-6236.
- [6] Cui Yan, Wang Li-feng, Ren Jian-yue. Multi-functional SiC/Al composites for aerospace applications[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008(6): 578-584.
- [7] Gul F, Acilar M. Effect of the reinforcement volume fraction on the dry sliding wear behaviour of Al-10Si/SiCp composites produced by vacuum infiltration technique[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(13/14): 1959-1970.
- [8] El-kady O, Fathy A. Effect of SiC particle size on the physical and mechanical properties of extruded Al matrix nanocomposites[J]. Materials & Design, 2014, 54:348-353.
- [9] El-gallab M, Sklad M. Machining of Al/SiC particulate metal-matrix composites: part I: tool performance[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 83(1-3): 151-158.
- [10] Ciftci I, Turker M, Seker U. Evaluation of tool wear when machining SiCp-reinforced Al-2014 alloy matrix composites [J]. Materials & Design, 2004, 25(3): 251-255.
- [11] Singh R P, Singhal S. Rotary ultrasonic machining: a review[J]. Advanced Manufacturing Processes, 2016, 31(14):1795-1824.
- [12] 冯平法,王健健,张建富,等. 硬脆材料旋转超声加工技术的研究现状及展望[J]. 机械工程学报, 2017(19): 3-21.  
Feng Ping-fa, Wang Jian-jian, Zhang Jian-fu, et al. Research status and future prospects of rotary ultrasonic machining of hard and brittle materials [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017(19): 3-21.
- [13] Wang J, Zhang J, Feng P, et al. Damage formation and suppression in rotary ultrasonic machining of hard and brittle materials: a critical review[J]. Ceramics International, 2017, 44(2):1227-1239.
- [14] Zhang J, Wang D, Feng P, et al. Effect of processing parameters of rotary ultrasonic machining on surface integrity of potassium dihydrogen phosphate crystals[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(9):1-10.
- [15] 王健全,田欣利,唐修检,等. 面向工程陶瓷的单颗金刚石磨粒划擦磨损规律[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2012, 32(3): 1-6.  
Wang Jian-quan, Tian Xin-li, Tang Xiu-jian, et al. Wear rule of single diamond grit when scratching on engineering ceramics[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2012, 32(3): 1-6.
- [16] 吴海勇,黄辉,徐西鹏. 单颗金刚石划擦 Ta12W 的试验研究[J]. 摩擦学报, 2015, 35(5): 635-645.  
Wu Hai-yong, Huang Hui, Xu Xi-peng. Experimental study for single diamond grit scratching on Ta12W[J]. Tribology, 2015, 35(5): 635-645.
- [17] 黄武,苏宏华,张昆,等. 单颗钎焊金刚石磨粒磨损试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2016, 36(2): 15-18.  
Huang Wu, Su Hong-hua, Zhang Kun, et al. Wear experiment of single brazed diamond abrasive [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2016, 36(2): 15-18.
- [18] 鲁春朋,高航,王奔,等. 磷酸二氢钾晶体单点划痕试验研[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 179-185.  
Lu Chun-peng, Gao Hang, Wang Ben, et al. Experimental study of single-tip scratching on potassium dihydrogen phosphate single crystal[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(13): 179-185.
- [19] 张柱,杨云川,晋艳娟. 单颗粒破碎机理分析[J]. 太原科技大学学报, 2005, 26(4): 306-308.  
Zhang Zhu, Yang Yun-chuan, Jin Yan-juan. Analysis of cracking mechanism of single granule [J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2005, 26(4): 306-308.