

单颗CBN磨粒超声振动辅助磨削AISI 304 材料去除机理

杨震宇, 邹平, 周亮, 王安琪

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为了解释超声作用下磨粒切削材料的去除机理,对单粒磨削过程进行了分析,建立了未变形切削厚度和磨粒与试件的固定速度比(v_s/v_w)的数学模型.在AISI 304试件上进行了固定速度比的普通磨削(conventional grinding, CG)、切向超声振动辅助磨削(tangential ultrasonic vibration assisted grinding, TUVAG)以及径向超声振动辅助磨削(radial ultrasonic vibration assisted grinding, RUVAG)的单颗粒试验.结果表明,在固定速度比条件下,试件在CG与TUVAG作用下都是以塑性变形的形式去除,但超声辅助显著提高了材料去除率.试件在RUVAG作用下材料的去除方式与未变形切削最大厚度 a_{gmax} 的息息相关. a_{gmax} 小于 $0.8\ \mu\text{m}$ 时,试件表现为脆性断裂的形式去除;之后随着 a_{gmax} 逐渐增大,试件转变为塑性变形的形式去除.

关键词: 单颗CBN(立方氮化硼)磨粒;未变形切削厚度;超声振动辅助磨削;表面形貌;材料去除机理
中图分类号: TH 164 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)07-1011-09

Material Removal Mechanism During Ultrasonic Vibration Assisted Grinding AISI 304 with Single CBN Grain

YANG Zhen-yu, ZOU Ping, ZHOU Liang, WANG An-qi

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZOU Ping, E-mail: pzou@mail.neu.edu.cn)

Abstract: In order to explain the removal mechanism of abrasive cutting materials under ultrasonic action, the single grain grinding process was analyzed, and the mathematical model of undeformed cutting thickness and the fixed velocity ratio (v_s/v_w) of abrasive and workpiece was established. The single grain tests of conventional grinding (CG), tangential ultrasonic vibration assisted grinding (TUVAG) and radial ultrasonic vibration assisted grinding (RUVAG) with a fixed speed ratio were carried out on AISI 304 specimens. The results showed that the specimens are removed by plastic deformation under the action of CG and TUVAG at the fixed speed ratio, but the ultrasound significantly improves the material removal rate. The material removal method of the specimen under RUVAG was closely related to the value of the maximum undeformed cutting thickness a_{gmax} . When a_{gmax} is less than $0.8\ \mu\text{m}$, the specimen was removed in the form of brittle fracture. After that, with the increase of a_{gmax} , the specimen was removed in the form of plastic deformation.

Key words: single CBN (cubic boron nitride) grain; undeformed cutting thickness; ultrasonic vibration assisted grinding; surface topography; material removal mechanism

AISI 304作为典型的难切削材料在国防工业、航空航天等领域应用广泛.为了避免AISI 304加工过程中的砂轮黏附和表面硬化等问题,不得

不采用提高砂轮速度和减小磨削深度的方法来

应对.这大大增加了磨削相关的能量和时间成本,不利于AISI 304的推广与应用.超声振动能有效减小磨削力、减少磨削热量的产生和提高加工表面的质量,是难切削材料的

有效处理方法. 每颗磨粒对试件的切削作用构成了砂轮磨削的整体效应, 因此单颗磨粒的切削可以用来简化极其复杂的磨削过程, 进而深入研究试件在磨削过程中的材料去除机理. Zhang 等^[1]比较了超声振动辅助划痕试验和传统划痕试验中蓝宝石的形变特征, 结果表明, 该工艺可以降低划痕载荷, 有效抑制微裂纹扩展, 提高塑性去除率. 通过普通划痕与超声辅助划痕对比试验^[2-4]分析的碳化硅试件材料去除情况表明, 超声振动辅助划痕产生的划痕材料去除率高于普通划痕形成的划伤. Wang 等^[5]通过单粒划痕试验确定了碳纤维材料在旋转超声作用下的韧性和脆性断裂去除模式. Li 等^[6]设计了垂直和切向振动的金刚石压头用于陶瓷基复合材料的间歇和连续划痕试验, 并与常规刮痕进行了比较. 试验表明, 垂直振动的间歇刮擦增加了韧脆过渡的临界穿透深度, 有助于抑制开裂缺陷. 切向振动的连续划痕速度与振动频率相匹配, 获得了均匀的纤维断口和更好的表面完整性. 更多研究^[7-9]表明, 与常规划痕相比, 超声振动划痕可以促进浅侧向裂纹向表面扩展. Li 等^[10]开展了 SiC_p/Al 材料的普通划痕和旋转超声振动划痕的对比试验. 结果表明, 材料的表面损伤主要包括颗粒开裂、基体撕裂和界面破坏, 而超声振动可以有效地减少材料的亚表面损伤.

综上所述, 单粒磨削试验的确有助于揭示超声加工中材料的去除机理, 但通过单粒磨削试验确定材料去除机理的研究对象主要为脆性材料, 对塑性材料的研究相对较少. 而且超声振动的方式不同, 其对应的材料去除机理必然存在区别. 同时, 影响磨削力和磨削温度、决定表面质量的单粒磨削厚度没有深入研究. 因此, 为了更好地揭示不同超声振动形式下的材料去除机理, 本文通过分析普通磨削与超声振动辅助磨削的对比实验, 研究了固定速度比下的不同未变形切削厚度对 AISI 304 切削过程中材料去除特性的影响.

1 单颗磨粒磨削过程分析

1.1 平均未变形切削最大厚度

在磨削中磨粒的大小形状不一决定了产生的磨屑厚度必然也是不同的. 磨削时产生的最大厚度称为未变形切削最大厚度 a_{gmax} . 它既能影响磨削时产生的磨削力、磨削温度等物理量, 同时也是影响材料去除机理的决定性因素^[11-12]. 图 1 所示为普通磨削中未变形最大切削厚度示意图.

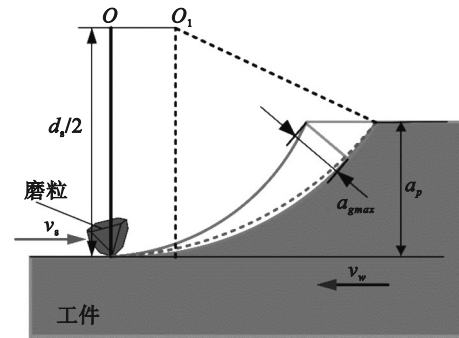


图 1 普通磨削中单颗磨粒切削厚度

Fig. 1 Cutting thickness of single abrasive grain in the conventional grinding

本文拟采用平均未变形切削最大厚度来表示未变形切削最大厚度. 普通磨削中平均未变形切削最大厚度 $\bar{a}_{\text{gmax}}^{\text{C}}$ 计算如下^[13]:

$$\bar{a}_{\text{gmax}}^{\text{C}} = \left[\frac{v_w a_p}{v_s l_c \tan \frac{\theta}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{v_w}{(v_s + v_w) \tan \frac{\theta}{2}} \sqrt{\frac{a_p}{d_s}} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

式中: v_w 为试件进给速度; d_s , v_s 和 a_p 分别为砂轮直径、砂轮磨削速度和磨削深度; θ 为磨粒顶角; l_c 为切削弧长.

常规磨削和超声磨削在加工中的运动轨迹是不同的. 不同的磨削方式产生的磨削厚度必然存在差异. 而未变形切削厚度又是影响材料去除机理的重要因素, 直接通过常规磨削的运动轨迹推导超声作用下的未变形切削厚度, 显然是不合理的. 本文通过建立超声磨削坐标系, 考虑了超声振动方向不同时运动轨迹的差异性, 建立了超声振动辅助磨削中未变形切削厚度模型.

图 2 所示切向和径向超声振动辅助磨削作用下的单颗磨粒都是在点 M 处与试件开始接触, 在 M' 处与试件分离, 在 M'' 处重新接触. 运动轨迹呈现周期性变化. 超声振动辅助磨削作用下产生的切屑比普通磨削的短而细, 因此用超声条件下的切削弧长代替普通磨削的切削弧长进行计算^[14], 就可以得到简化的超声振动辅助磨削的平均未变形切削最大厚度.

以图 2 中的 O 为原点, 与试件平行方向为 X 轴, 垂直方向为 Y 轴建立坐标系. 磨粒 M 作为参考点, 建立的单粒磨削轨迹方程如下:

$$\mathbf{S}_T = \begin{bmatrix} S_{x(t)} \\ S_{y(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_w t - \frac{d_s}{2} \sin(\omega t) + A \sin(2\pi f t + \varphi) \\ \frac{d_s}{2} - \frac{d_s}{2} \cos(\omega t) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

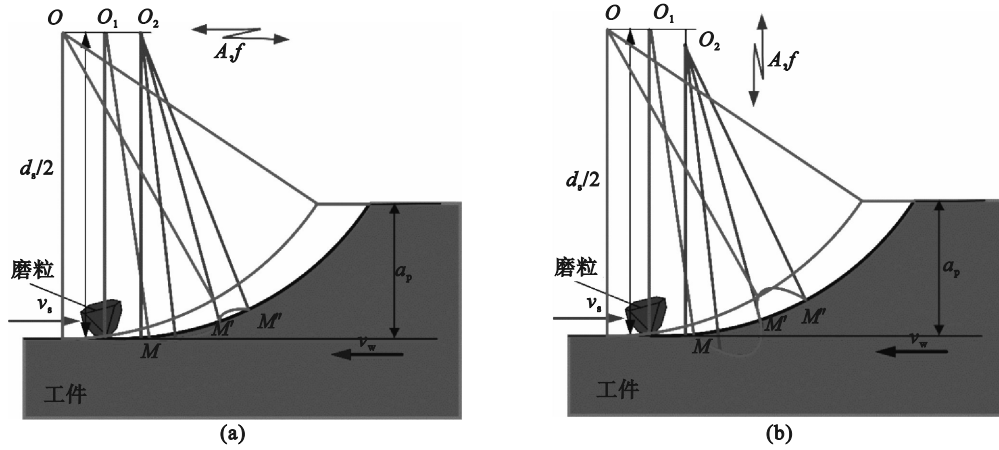


图 2 超声磨削中单颗磨粒切削厚度

Fig. 2 Cutting thickness of single abrasive grain in the ultrasonic grinding
(a)—TUVAG; (b)—RUVAG.

$$\mathbf{S}_R = \begin{bmatrix} S_{x(t)} \\ S_{y(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d_s}{2} - \frac{d_s}{2} \cos(\omega t) + A \sin(2\pi f t + \varphi) \\ v_w t - \frac{d_s}{2} \sin(\omega t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: \mathbf{S}_T 和 \mathbf{S}_R 分别为切向和径向超声的单粒磨削

轨迹; A, f 和 φ 分别为超声振动的幅值、频率和相位角.

根据之前的相关研究^[15], 切向超声振动磨粒的运动轨迹为正弦曲线. 因此, 可以得到单个磨粒在 $T/2$ 周期内的动态接触长度 l_b :

$$l_b = \int_0^{T/2} \sqrt{[v_w - v_s \cos(\omega t) + 2\pi f A \cos(2\pi f t)]^2 + [v_s \sin(\omega t)]^2} dt = \int_0^{T/2} \sqrt{\Psi^2 + (v_s)^2 - 2v_s \Psi \cos(\omega t)} dt \quad (4)$$

式中: T 为超声波振动周期 ($T=1/f$); $\Psi = v_w + 2\pi f A \cos(2\pi f t)$.

式(4)中的被积函数根据牛顿二项式展开得到收敛三角函数, 然后逐项积分, 得到式(5):

$$l_b = \sqrt{(v_w + v_{zd})^2 + (v_s)^2} \frac{T}{2} - \frac{v_s(v_w + v_{zd})}{\omega \sqrt{(v_s)^2 + (v_w + v_{zd})^2}} \sin\left(2\pi f \frac{T}{2}\right) + \frac{(v_s)^2(v_w + v_{zd})^2}{4\omega \sqrt{[(v_s)^2 + (v_w + v_{zd})^2]^3}} \left(\omega \frac{T}{2} + \frac{1}{2} \sin\left(\omega \frac{T}{2}\right) + \dots\right) \quad (5)$$

式中, $v_{zd} = 2\pi f A \cos(2\pi f t)$.

$$l = (v_s + v_w + v_{zd}) \frac{T}{2} = (v_s + v_w) \frac{T}{2} + 2A \quad (6)$$

由于 $\omega T/2$ 的角度很小, 而且砂轮的线速度远大于进给速度和振动速度之和, 所以 $(v_w + v_{zd})$ 二阶以上的部分可以省略. 由此, 可得式(6):

切向超声振动磨削过程中单个磨粒的轨迹长度如式(7)所示:

$$l_T = 2ml_b = \frac{\sqrt{a_p d_s}}{v_s T} [(v_s + v_w)T + 4A] = \frac{\sqrt{a_p d_s}}{v_s} (v_s + v_w + 4Af) \quad (7)$$

式中, m 为切向超声磨削过程中磨粒的振动周期^[15]:

由式(9)可以得到单个磨粒在径向超声振动下的动态接触长度 l_R :

$$m = \frac{\sqrt{a_p d_s}}{v_s T} \quad (8)$$

$$l_R = \int_0^{t_0} \sqrt{[v_s \sin(\omega t) + 2\pi f A \cos(2\pi f t)]^2 + [v_w - v_s \cos(\omega t)]^2} dt \quad (9)$$

式中, t_0 为单次磨粒磨削过程所用时间^[15]:

位移与普通磨削轨迹的夹角为 $(\pi/2 + \alpha)$. 此时单个磨粒的超声振动轨迹长度可表示为

$$t_0 = \frac{\sqrt{a_p d_s}}{v_s} \quad (10)$$

$$l_1 = \sqrt{l_a^2 + \left(\frac{4At_1}{T}\right)^2 - 2l_a \frac{4At_1}{T} \sin \alpha} \quad (11)$$

如图 3a 所示, 当磨粒靠近试件时, 超声振动

式中: t_1 为试件向一侧振动的时间; l_a 为普通磨削过程中磨粒的动态接触长度^[15]:

$$l_a = (v_s + v_w)t_0 = \frac{v_s + v_w}{v_s} \sqrt{a_p d_s}. \quad (12)$$

如图 3b 所示, 当磨粒远离试件时, 超声振动位移与普通磨削轨迹的夹角为 $(\pi/2 - \alpha)$. 此时单个磨粒的超声振动轨迹长度可以表示为

$$l_2 = \sqrt{l_a^2 + \left(\frac{4At_2}{T}\right)^2} + 2l_a \frac{4At_2}{T} \sin \alpha. \quad (13)$$

式中, t_2 为振动到远离试件一侧的时间.

考虑到在实际磨削过程中, 切深很小. 因此角度 α 非常小. 为了方便计算, 将等式简化为

$$l_3 = \sqrt{l_a^2 + \left(\frac{4At_0}{T}\right)^2}. \quad (14)$$

组合式(12)和式(14), 可以得到超声轨迹:

$$\begin{bmatrix} \bar{a}_{gmax}^T \\ \bar{a}_{gmax}^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{v_w a_p}{v_s l_T \tan \frac{\theta}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \left[\frac{v_w a_p}{v_s l_R \tan \frac{\theta}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{v_w}{(v_s + v_w + 4Af) \tan \frac{\theta}{2}} \sqrt{\frac{a_p}{d_s}} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \left[\frac{v_w}{\sqrt{(v_s + v_w)^2 + (4Af)^2} \tan \frac{\theta}{2}} \sqrt{\frac{a_p}{d_s}} \right]^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

1.2 磨粒与试件的固定速度比

在单粒的磨削的试验中, 磨粒会在试件表面生成一系列的凹槽形貌. 磨粒与试件的速度共同决定了凹槽之间的间距. 在实际的磨削过程中形成的加工表面都是连续的, 也就是说磨粒切出的凹槽在切削进给方向上相互之间存在干涉或者重叠. 因此为了使单粒试验的效果更贴近于磨削实际, 就必须保证单颗磨粒在试件表面形成连续的凹槽形貌, 类似于具有多个磨粒的实际磨削过程. 图 4 为普通单粒磨削过程中相邻的两次划痕示意图. 两次连续的划痕之间的位移 s 正好等于砂轮旋转一周所用时间 t 内的试件位移. 因此位移 s 可由式(17)表示:

$$s = v_w t = v_w \frac{2\pi}{\omega} = \frac{\pi d_s v_w}{v_s}. \quad (17)$$

此外, 磨削过程中的单颗磨粒的切削厚度远远小于磨削深度, 一般达到两到三个数量级. 因此单粒磨削要贴合磨削实际, 必须同时满足单颗磨粒在试件表面生成连续凹槽且磨屑厚度小于磨削深度这两个前提条件. 因此结合图 4a, 还可以列出式(18):

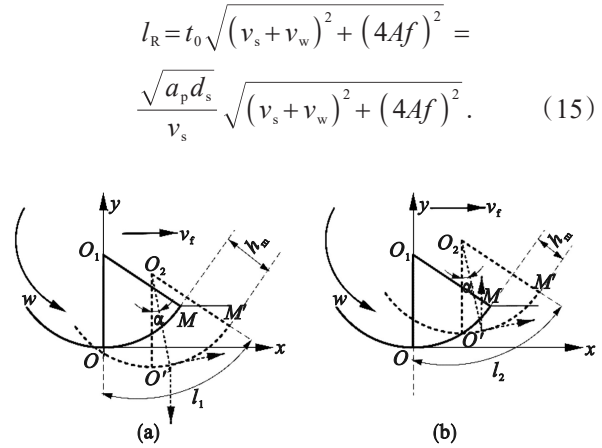


图 3 径向超声磨削示意图
Fig. 3 Schematic diagram of radial ultrasonic grinding
(a)—靠近试件; (b)—远离试件.

因此, 切向和径向超声振动辅助磨削的平均未变形切削最大厚度可以表示如下:

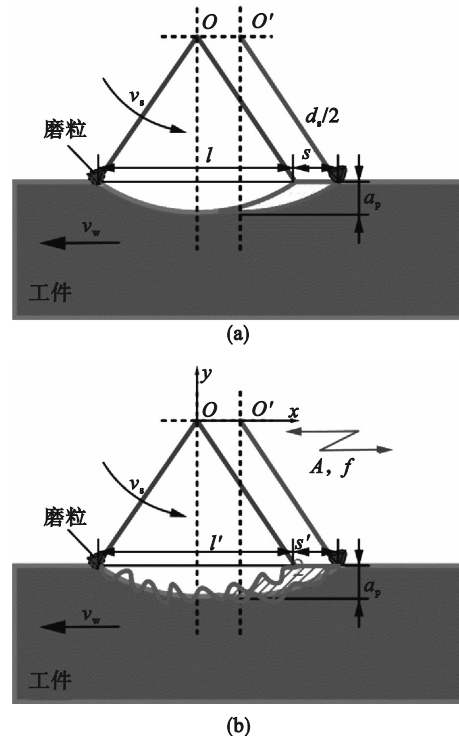


图 4 单颗磨粒磨削过程中的切屑形成条件
Fig. 4 Chip formation condition during the single grain grinding process
(a)—CG; (b)—TUVAG.

$$s < \frac{l}{2}. \quad (18)$$

式中, $l=2\sqrt{d_s a_p - (a_p)^2}$, 为切削弧长对应的弦长.

联立式(17)和式(18), 可以得到连续磨削槽形成时 v_w 与 v_s 的函数关系:

$$v_w < \frac{v_s \sqrt{d_s a_p - (a_p)^2}}{\pi d_s}. \quad (19)$$

因此, 单粒普通磨削中磨粒与试件的固定速度比 Γ 可以表示为

$$\Gamma = \frac{v_s}{v_w} > \frac{\pi d_s}{\sqrt{d_s a_p - (a_p)^2}}. \quad (20)$$

超声振动作用下的单粒磨削主要是径向和切向. 径向超声振动中 v_s 和 v_w 满足的关系式应与普通磨削的基本相同. 因为砂轮一个旋转周期内, 水平方向上的位移是固定不变的. 而切向的超声振动在水平方向上存在超声振动, 图 4b 所示为切向超声振动单粒磨削过程中相邻的两次划痕示意图. 超声振动下磨粒运动轨迹为周期性的曲线. 以砂轮中心为原点 O , 建立 x 轴与试件平行, y 轴与试件垂直的直角坐标系. 式(21)为磨粒的运动轨迹:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_w t + \frac{d_s \cos\left(\frac{2v_s}{d_s} t\right)}{2} + A \sin(2\pi f t) \\ \frac{d_s \sin\left(\frac{2v_s}{d_s} t\right)}{2} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

因此, 两次连续的划痕之间的位移 s' 可以表示为

$$s' = v_w t + A \sin(2\pi f t) = \frac{\pi d_s v_w}{v_s} + A \sin\left(2\pi f \frac{\pi d_s}{v_s}\right). \quad (22)$$

磨粒切入和切出试件表面的地方为点 1 和点 2, 因此 l' 可以用两点间的横坐标之差来表示:

$$l' = x_2 - x_1 = \frac{d_s \cos\left(\frac{2v_s}{d_s} t_2\right)}{2} + A \sin(2\pi f t_2) - \frac{d_s \cos\left(\frac{2v_s}{d_s} t_1\right)}{2} - A \sin(2\pi f t_1). \quad (23)$$

点 1 和点 2 的纵坐标值为 $(a_p - d_s/2)$, 因此可以

计算出 t_1 和 t_2 的值分别为 $\frac{\left(\pi + \sin^{-1}\left(\frac{2a_p - d_s}{d_s}\right)\right) d_s}{2v_s}$, $\frac{\left(2\pi - \sin^{-1}\left(\frac{2a_p - d_s}{d_s}\right)\right) d_s}{2v_s}$. 代入式(23), 可得式(24):

$$l' = 2\sqrt{d_s a_p - (a_p)^2} + A \left[\sin\left(\frac{\pi f d_s \left(2\pi - \sin^{-1}\left(\frac{2a_p - d_s}{d_s}\right)\right)}{v_s}\right) - \sin\left(\frac{\pi f d_s \left(\pi + \sin^{-1}\left(\frac{2a_p - d_s}{d_s}\right)\right)}{v_s}\right) \right]. \quad (24)$$

同理, 为了满足单颗磨粒在试件表面生成连续凹槽且磨屑厚度小于磨削深度这两个前提条件, s' 和 l' 之间的关系为

$$s' < \frac{l'}{2}. \quad (25)$$

联立式(22), 式(23)和式(24), 可以得到超声作用下连续磨削槽形成时 v_s 与 v_w 的函数关系:

$$\Gamma' = \frac{v_s}{v_w} > \frac{\pi d_s}{\sqrt{d_s a_p - (a_p)^2} + \frac{A \pi f d_s \left[2 \sin^{-1}\left(\frac{d_s - a_p}{d_s}\right) - \pi\right]}{v_s}}. \quad (26)$$

已知 $\frac{d_s - a_p}{d_s} < 1$, 那么 $2 \sin^{-1}\left(\frac{d_s - a_p}{d_s}\right) < \pi$, 进一步可以得出, $\frac{A \pi f d_s \left[2 \sin^{-1}\left(\frac{d_s - a_p}{d_s}\right) - \pi\right]}{v_s} < 0$. 比较式(20)和式(26)可以发现, 磨粒与试件的固定速度比能满足切向超声的条件就必然能满足普通磨削的条件. 因此采用切向超声条件下的固定速度比来进行试验参数设计.

2 试验装置和设计

2.1 试验装置

如图 5 所示, 试验在最大主轴速度为 8 000 r/min 的 CNC 立式加工中心 (DMC 635 V eco) 上进行. 超声波振动发生系统振动频率 20 kHz. 所用试件为 65 mm×30 mm×20 mm 的 AISI 304 金属块, 其尾部长度为 35 mm 的螺杆 (螺纹型号: 1/2-20UNF) 直接与超声变幅杆相连.

试验中磨粒磨损需经常更换, 砂轮最好能够实现单颗磨粒的快装快卸功能以提高试验效率. 试验砂轮分为两部分: 砂轮基体、镀上单颗磨粒的截头螺钉. 图 6 所示为单颗粒磨削砂轮的实体与结构示意图. 砂轮基体上对称钻孔并攻螺纹. 截掉螺钉头镀上磨粒, 另一端拧进砂轮基体的螺

纹孔中. 对称的结构保证了转动时的动平衡, 螺

纹保证了装卸的便捷.

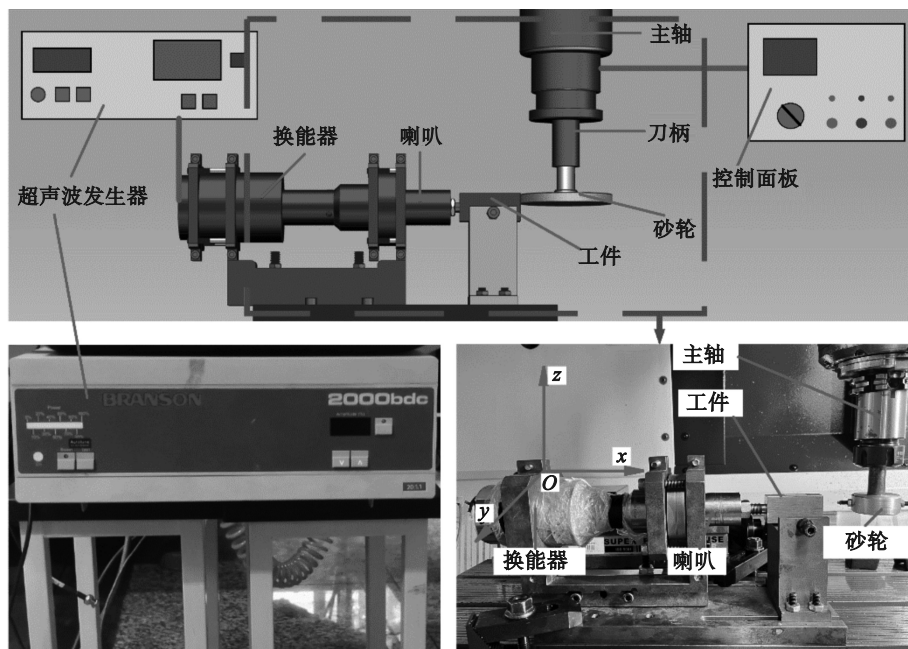


图5 单粒磨削试验装置

Fig. 5 Experimental device for the single grain grinding

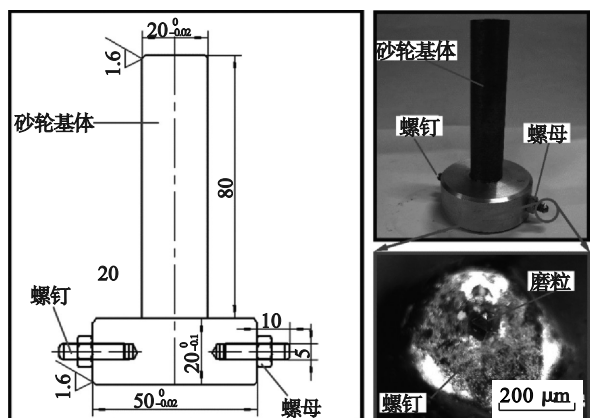


图6 单粒砂轮

Fig. 6 Single grain grinding wheel

2.2 试验设计

未变形的切屑厚度和砂轮速度是显著影响磨削过程中材料去除机制的重要因素, 即尺寸效应和速度效应^[16-17]. 为此设计了如表1所示的试验条件. 在固定速度比条件下进行不同形式的单粒磨削试验. 着重分析了未变形切削最大厚度不同时材料去除机理的变化情况.

3 试验结果

表面形貌是揭示主要材料去除机理的一个重要指标. 图7显示了砂轮速度 11 m/s, 振幅 12 μm 时, 不同磨削方式和不同 a_{gmax} 下单颗磨粒

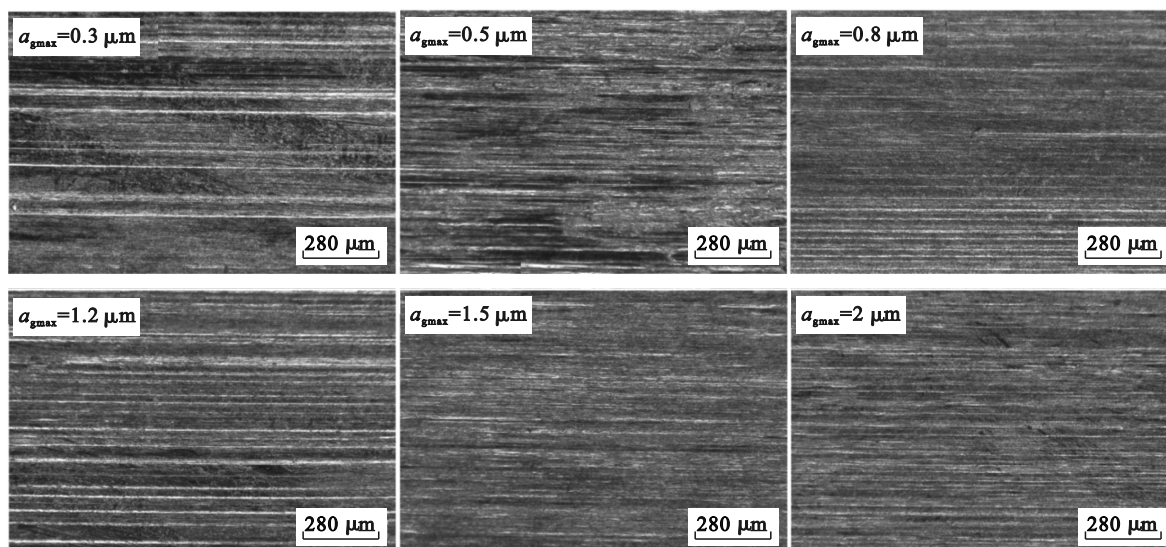
切削的底部凹槽表面形态. 从图中可以看出, 在试验条件下试件表面形成的单粒磨削痕迹都是连续的. 这说明了本文建立的磨粒与试件的固定速度比模型的正确性. 图7中对应的进给速度和未变形切削厚度如表2所示.

表1 磨削条件

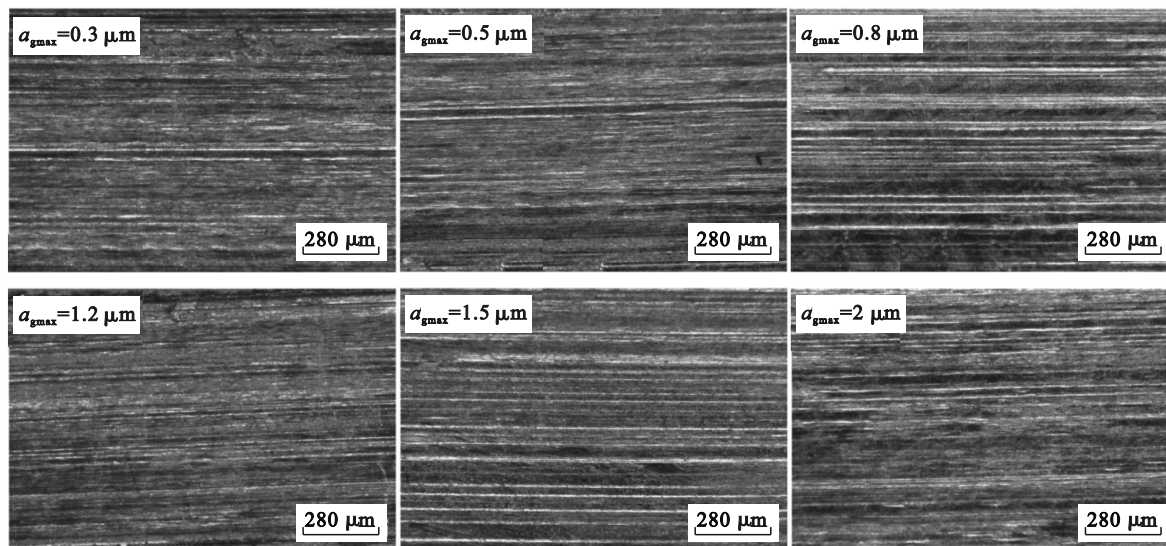
Table 1 Grinding conditions

参数	数值
a_p/mm	0.02
$v_s/(m \cdot s^{-1})$	3.7, 7.3, 11.0, 14.7
$v_w/(mm \cdot min^{-1})$	2~100
$A/\mu m$	0, 6, 8, 10, 12
$a_{gmax}/\mu m$	0.3~2

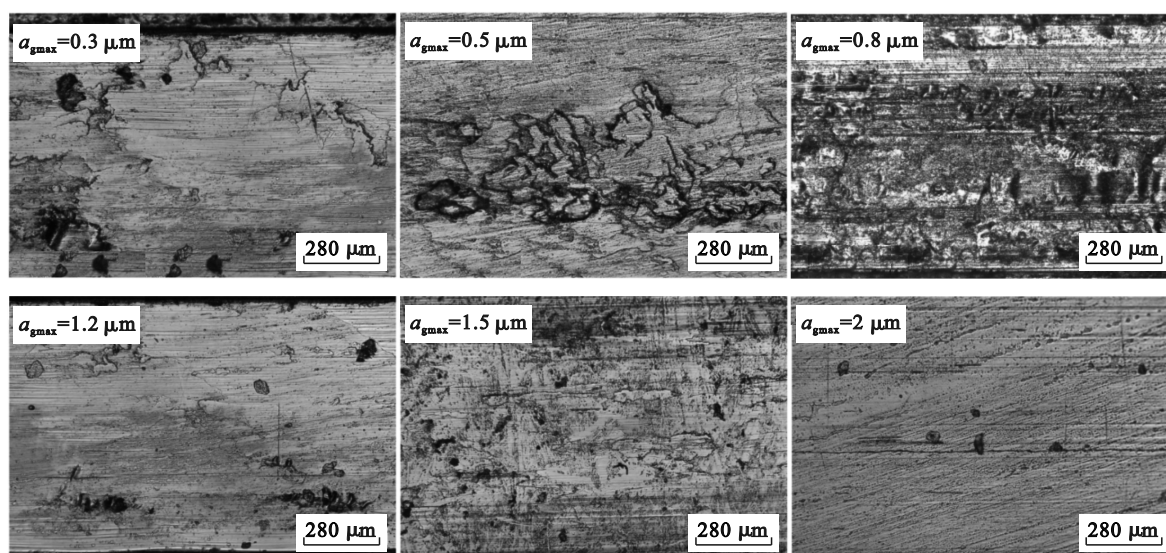
图7a和7b分别为普通磨削和切向超声振动辅助磨削的加工表面. 在切屑形成过程中, 磨粒与试件的逐渐接触导致弹性变形、微耕犁、微切削去除. 从图中可以看出, 磨痕表面上出现的许多微小的细痕, 这是磨粒的多条磨削刃在磨削宽度上的综合作用所形成. 在这两种加工方式下, 无论 a_{gmax} 如何变化, 加工的表面上都出现塑性隆起, 却没有明显的裂纹产生的凹坑. 这是由于磨粒的多条切屑刃在槽底的滑擦、耕犁和切削作用, 使得 AISI 304 由弹性变形转变为塑性变形而形成的. 因此, AISI 304 在 CBN 砂轮的普通磨削和切向超声振动辅助磨削过程中材料去除机制为塑性去除.



(a)



(b)



(c)

图 7 AISI 304 在不同最大 UCT 下的单颗粒磨削沟槽图

Fig. 7 Single grain grinding groove topography at different maximum UCT for AISI 304

(a)—CG; (b)—TUVAG; (c)—RUVAG.

表2 图7中试验参数
Table 2 Test parameters in Fig.7

磨削方式	$v_w/(mm \cdot min^{-1})$	$a_{gmax}/\mu m$
CG/RUVAG	2	0.3
CG/RUVAG	6	0.5
CG/RUVAG	15	0.8
CG/RUVAG	33	1.2
CG/RUVAG	51	1.5
CG/RUVAG	90	2.0
TUVAG	2	0.3
TUVAG	6	0.5
TUVAG	16	0.8
TUVAG	35	1.2
TUVAG	55	1.5
TUVAG	98	2.0

径向超声振动辅助磨削加工表面如图7c所示.由于实验条件的限制, a_{gmax} 的最小取值为 $0.3 \mu m$.此时观察到加工表面上已经出现了少量凹坑和裂纹.随着 a_{gmax} 的增大,磨削槽底面上随机出现了越来越多的裂纹坑.这是由于径向超声振动带来的强力冲击作用,加之磨削厚度较小,使得材料没有经过弹塑性的变形,直接在冲击下达到疲劳极限,以脆性断裂的形式去除.表明此时磨削过程中材料去除机制从韧性变形到脆性断裂的转变,属于韧脆过渡阶段,称为延性脆性磨削.当 a_{gmax} 为 $0.8 \mu m$ 时,底部表面出现了许多大尺寸的裂纹坑.这些大坑是由大块材料的脆性裂纹造成的.该阶段被定义为脆性区域磨削.而随着 a_{gmax} 的增大,加工表面上随机出现的裂纹与凹坑越来越少. a_{gmax} 越大,接触到试件加工表面的距离越长.说明磨削厚度的增加减弱了径向超声振动的冲击作用,材料去除机制由脆性向塑性转变.

可见 a_{gmax} 对RUVAG的影响是巨大的.RUVAG的材料去除机制随着 a_{gmax} 的增大由最初的脆性去除转变为塑性去除.对应的磨削工况参数与 a_{gmax} 的变化关系也可以相应获得. a_{gmax} 与砂轮速度 v_s 成反比,主要是由于单位时间内磨粒的切削次数的增加带来的切除材料的厚度变薄. a_{gmax} 与进给速度 v_w 和磨削深度 a_p 都成正比,这是由于砂轮速度不变,但是单位时间内磨粒切削的材料厚度的增加.超声振幅 A 的出现使得磨粒与试件的接触变为断续接触,单位时间内切削材料变少,导致 a_{gmax} 减小.这也与普通磨削中 a_{gmax} 随磨削参数的变化一致.超声的存在只是一定程度上

改变了材料的去除机理,本质上还是遵循磨削的相关变化规律.

综上所述,不论加工参数如何变化,CG和TUVAG的材料去除方式始终为塑性去除.而在RUVAG中,砂轮速度和超声振幅越大,材料更倾向于脆性去除,反之则表现为塑性去除.而材料去除方式还随着进给速度与磨削深度的增加,由脆性转变为塑性.因此,通过研究固定速度比下的不同未变形切削厚度对材料去除特性的影响,对优化加工参数、促进难加工材料的高效高质切削加工具有参考意义.

4 结 论

1) 固定速度比(v_s/v_w)条件下,无论 a_{gmax} 如何改变,试件在CG与TUVAG作用下都是以塑性变形的形式去除,但超声辅助显著提高了材料去除率.

2) 试件在RUVAG作用下的材料去除方式与未变形切削最大厚度 a_{gmax} 的值息息相关. a_{gmax} 小于 $0.8 \mu m$ 时,试件材料表现为脆性断裂的形式去除;之后随着 a_{gmax} 增大,试件材料开始转变为塑性变形的形式去除.

3) 砂轮磨削的本质是单粒磨削的集合.因此,基于单粒磨削试验研究得到的材料去除机理进一步揭示了塑性材料在不同磨削形式下的材料去除机理.

参考文献:

- [1] Zhang C L, Feng P F, Zhang J F. Ultrasonic vibration-assisted scratch-induced characteristics of C-plane sapphire with a spherical indenter [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 64: 38-48.
- [2] Cao J G, Wu Y B, Lu D, et al. Material removal behavior in ultrasonic-assisted scratching of SiC ceramics with a single diamond tool [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 79: 49-61.
- [3] Feng P F, Liang G Q, Zhang J F. Ultrasonic vibration-assisted scratch characteristics of silicon carbide-reinforced aluminum matrix composites [J]. *Ceramics International*, 2014, 40(7): 10817-10823.
- [4] Zheng F F, Kang R K, Dong Z G, et al. A theoretical and experimental investigation on ultrasonic assisted grinding from the single-grain aspect [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 148: 667-675.
- [5] Wang H, Ning F D, Li Y C, et al. Scratching-induced surface characteristics and material removal mechanisms in rotary ultrasonic surface machining of CFRP [J]. *Ultrasonics*, 2019, 97: 19-28.
- [6] Li Z, Yuan S M, Ma J, et al. Study on the surface formation mechanism in scratching test with different ultrasonic vibration forms [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 294: 117108.

