

文章编号 1004-924X(2012)09-2021-08

旋转超声磨削加工中刀具结合剂类型与加工性能的关系

刘运凤^{1,3*}, 荆君涛^{1,3}, 李占杰²

(1. 哈尔滨工程大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 154001;

2. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津市微纳制造技术工程中心, 天津 300072;

3. 航天科工哈尔滨风华有限公司, 黑龙江 哈尔滨 154001)

摘要: 实验分析了硬脆材料旋转超声磨削过程中刀具结合剂类型对加工性能的影响以便提高加工精度和加工表面的完整性。首先, 采用能谱分析研究了铁基、陶瓷基和青铜基 3 种超声振动刀具中结合剂与金刚石颗粒的把持形式, 并根据相同加工工艺条件下刀具磨损形式确定了把持力大小。然后, 结合超声振动刀具特性, 通过旋转超声磨削加工实验研究刀具结合剂类型与切削力、刀具磨损量、加工表面完整性的关系, 并对实验结果进行了分析。实验结果表明: 相对于陶瓷基和青铜基结合剂超声振动刀具, 铁基结合剂超声振动刀具把持力最大, Z 轴切削力平均值最小(为 46.8 N); 加工 18 000 mm³ 材料后, 刀具轴向磨损量最小(为 0.1 mm); 而陶瓷基结合剂超声振动刀具加工表面质量最好, 表面粗糙度最大值为 21.79 μm。结果证实铁基超声振动刀具适用于粗加工, 陶瓷基超声振动刀具则适用于精加工。

关键词: 旋转超声磨削; 超声振动刀具; 结合剂; 把持力; 加工性能

中图分类号: TG74; TB559 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122009.2021

Relationship between bond patterns of tools and working performance in rotary ultrasonic grinding

LIU Yun-feng^{1,3*}, JING Jun-tao^{1,3}, LI Zhan-jie²

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering,
Harbin Engineering University, Harbin 154001, China;

2. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Centre of
MicroNano Manufacturing Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Harbin Fenghua Co., Ltd., China Aerospace Science & Industry Corporation, Harbin 154001, China)

* Corresponding author, E-mail: weishil264326@126.com

Abstract: For improving the machining precision and surface integrity of hard and brittle materials in rotary ultrasonic grinding, the influence of bond patterns of tools on working performance was analyzed. First, the bonding patterns between diamond particles and bonds in ceramics-bonded, iron-bonded and bronze-bonded tools were investigated by energy spectral analysis, and bonding strength

收稿日期: 2012-04-17; 修订日期: 2012-05-30.

基金项目: 国家科技重大专项资助项目 (No. 2010ZX04014-051); “十二五”航天支撑技术预研项目 (No. 61801060103)

was confirmed according to the tool wear of the same process parameters. Based on results above and the characteristics of ultrasonic vibration tool, the relationship between bond patterns and cutting force, tool wear, surfaces integrity was studied by rotary ultrasonic grinding machining experiments. Experimental results indicate that average cutting force in Z axis is 46.8 N and the tool wear of after removing 18 000 mm³ is 0.1 mm by iron-bonded ultrasonic vibration tool, they are smaller than those of ceramics-bonded and bronze-bonded tools. However, the ceramics-bonded ultrasonic vibration tool is the best one, and its surface roughness is 21.79 μm . These results prove that the iron-bonded ultrasonic vibration tool is suitable for rough machining and the ceramics-bonded ultrasonic vibration tool is favourable to finish machining.

Key words: rotary ultrasonic grinding; ultrasonic vibration tool; bond; bonding strength; working performance

1 引言

随着科学技术的发展,工程陶瓷等硬脆材料在现代工业中的应用越来越广,尤其在航空航天、兵器装备、汽车、发动机等制造领域地位日益重要。硬脆材料具有良好的物理和化学特性,如高硬度、耐高温、耐磨、低传热系数、化学惰性、非导电性、抗氧化等。但是,由于其具有硬度高、脆性大、耐磨等特点,硬脆材料的加工一直非常困难,是限制其应用的一个重要因素。1960年,旋转超声磨削加工技术的产生改变了这种状态。旋转超声磨削加工具有加工效率高、切削力小、加工表面质量好等优点,主要应用于工程陶瓷等硬脆材料的加工^[1,2]。

值得注意的是旋转超声磨削加工存在超声振动刀具磨损严重、刀具寿命短等问题,这些问题严重影响了零部件加工精度和加工表面质量^[3]。旋转超声磨削加工过程中,刀具不仅做高速旋转运动,而且做高频纵向振动。在刀具高频振动过程中,当金刚石微粒延伸到最高点时,不仅需要与刀具结合剂间把持力足够大,以防止金刚石颗粒脱落^[4]。同时,还要保证当磨粒受到撞击时不从刀具上脱落,从而实现在大范围内进行切削。金刚石颗粒形状、金刚石粒度、结合剂类型、刀具结构、刀具密度等都会对加工性能造成影响^[5,6]。在这些影响因素中,结合剂对刀具性能和加工表面质量起着显著的作用^[7]。超声振动刀具中,结合剂将所有磨粒黏结在一起^[8]。对于结合剂界面特性研究非常重要,研究重点主要包括保持力、断裂形式

和热传递特性^[5]。但是,只有很少文献介绍了结合剂与磨粒之间的界面特性^[9,10],并且主要侧重于结合剂与金刚石之间的理化反应,加工过程中并未涉及结合剂对加工性能影响。结合剂直接决定了超声振动刀具性能,刀具性能进而影响了其加工性能。在高效精密加工要求条件下,对超声振动刀具结合剂类型及其对加工性能影响研究非常必要。本文从金刚石颗粒与结合剂之间的结合关系,通过能谱实验分析铁基、陶瓷基和青铜基结合剂 3 种超声振动刀具把持力形式,并在此基础上研究 3 种结合剂类型刀具在旋转超声磨削加工过程中对切削力、刀具磨损量、加工表面质量和崩边的影响,为超声振动刀具制造技术和旋转超声磨削加工技术的进一步研究提供了依据。

2 超声振动刀具把持力形式及对加工性能影响分析

把持力反映了金刚石颗粒与结合剂之间黏结的牢固程度。结合剂与金刚石颗粒之间存在的把持力类型包括:机械镶嵌力、物理吸附力和化学结合力^[11-13]。机械镶嵌力是指金刚石颗粒全部或部分被结合剂包围,由于结合剂体积收缩造成的对金刚石颗粒表面的压应力。物理吸附力指金刚石颗粒与结合剂之间的范德华力和氢键力。化学结合力指在刀具烧结过程中,结合剂中某些化学物质在金刚石颗粒表面与金刚石发生化学反应,从而使结合剂与金刚石颗粒存在化学键(主要是共价键)作用。化学结合力在 3 种把持力中值最大,但由于金刚石颗粒界面能很大,一般化学物质难

于与之发生化学反应^[14]。

当单个金刚石颗粒所受把持力小于切削力时,金刚石颗粒将与结合剂分离,刀具端面金刚石颗粒数目发生变化;而当单个金刚石颗粒所受把持力大于切削力时,随着加工持续进行,金刚石颗粒将磨损,颗粒尖角值变大。超声振动刀具端面金刚石颗粒数目和金刚石颗粒尖角值的变化必然引起加工过程中切削力的变化,切削力的变化也将导致硬脆材料工件端面受力变化,进而影响被加工工件崩边范围。

把持力的不同造成刀具磨损形式不同。刀具把持力小,刀具磨损形式主要为金刚石颗粒脱落,刀具磨蚀量大,刀具寿命短;刀具把持力大,刀具磨损形式主要为金刚石颗粒磨损,由于金刚石耐磨损性高,刀具磨蚀量小,寿命较长。

旋转超声磨削加工硬脆材料时,金刚石颗粒不断与工件冲击接触,材料表面产生裂纹,相邻的裂纹相遇从而去除材料。把持力大小影响金刚石颗粒尖角值的变化程度,尖角值越大,在刀具相同振幅作用下,裂纹产生及扩展越明显。裂纹的存在必然对加工表面粗糙度产生影响,因此不同把持力超声振动刀具加工表面粗糙度值不同。

3 结合剂类型对把持力影响实验研究

常用超声振动刀具结合剂种类主要有:铁基、陶瓷基和青铜基。本文以 SAUER 公司生产的 3 种超声振动刀具作为研究对象,刀具参数如表 1 所示。

表 1 实验刀具参数

Tab. 1 Parameters of experimental tools

刀具号	结合剂	金刚石粒度	金刚石浓度/%	刀体材料	外径/mm	内径/mm
1	铁基	D126	100	45 钢	10	6
2	陶瓷基	D126	100	45 钢	10	6
3	青铜基	D126	100	45 钢	10	6

表中刀具结合剂成分铁基为:45%Fe、20%Co、20%Cu、5%Sn、10%Ni、2%Al;陶瓷基^[15]为:7.5%Na₂O、16%B₂O₃、60%SiO₂、8.5%Al₂O₃;青铜基为:86%Cu、17%Sn。

采用扫描电镜对铁基超声振动刀具表面单个金刚石颗粒周围观察,如图 1 所示。可以看出铁

基超声振动刀具金刚石颗粒与结合剂黏结紧密,没有沟隙。画一条穿过颗粒与结合剂的直线,进行能谱分析,如图 2 所示。

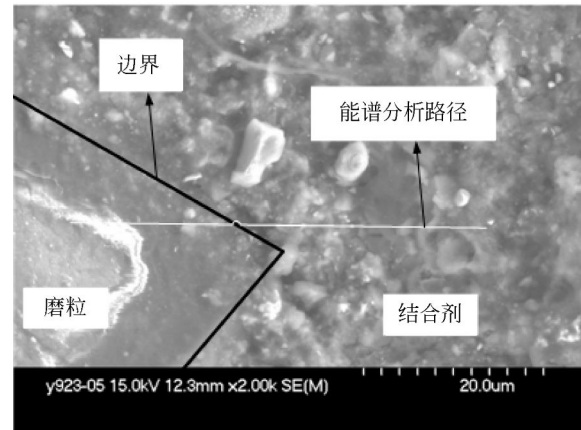


图 1 铁基刀具单个金刚石颗粒周围观察图

Fig. 1 Vicinity of single diamond particle of iron-bonded tool

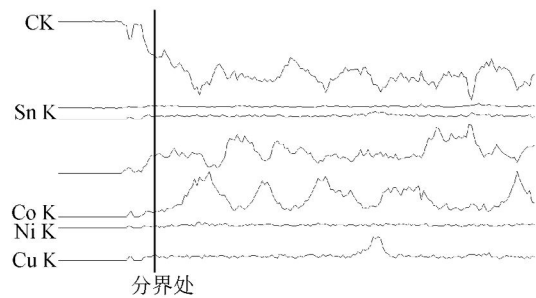


图 2 铁基刀具单个金刚石颗粒周围能谱图

Fig. 2 Energy spectrum around single diamond particle of iron-bonded tool

在金刚石颗粒与结合剂黏结界面处,金刚石颗粒中 C 元素含量从 96%缓慢下降到 45%左右,并保持在一定距离范围内,同时,结合剂内部 Al、Sn、Fe、Co、Ni 等元素在结合面处逐渐上升,但是 Cu 一直保持在较低的水平。通过能谱分析图可以看出 C 元素从金刚石颗粒向黏结剂内部发生了流动,同时,结合剂内部 Al、Sn、Fe、Co、Ni 等元素也向金刚石颗粒处流动。由于金刚石颗粒界面能较高,在烧结过程中,Al、Sn、Cu、Ni 等元素很难甚至不与之发生反应。但是由于 Al、Sn 润湿性好,这也解释了为何在结合界面处 Al、Sn 元素含量较高。由于 Cu 元素润湿性差,且难以在界面处与 C 元素发生反应,因此结合面处 Cu 元素

含量较少,但是在离界面较远处,Cu 元素富集,含量上升。在铁基结合剂中,Co 和 Fe 元素最为活泼,因此只有这两种元素可能在界面处与 C 元素发生反应。通过 C 元素的能谱分析图发现,在结合剂处 C 含量仍然较高,可以断定在界面周围 Co 和 Fe 元素与 C 元素发生了化学反应。

刀具烧结制造过程中,Co 与 Ni 以及 Fe 与 Ni 元素还容易生成马氏体和残余奥氏体,在界面处由于 Co 和 Fe 元素含量的上升,Ni 元素含量也上升。Ni 元素含量增大,马氏体含量也增大,强度提高,结合剂与金刚石颗粒之间把持力增大。

对陶瓷基超声振动刀具表面单个金刚石颗粒周围观察,结果如图 3 所示。在放大 800 倍时,就可以观察到金刚石颗粒与结合剂存在明显沟隙,因此结合剂不可能在界面处与金刚石颗粒中 C 元素发生化学反应,金刚石颗粒与陶瓷结合剂之间的把持力形式为机械镶嵌力。

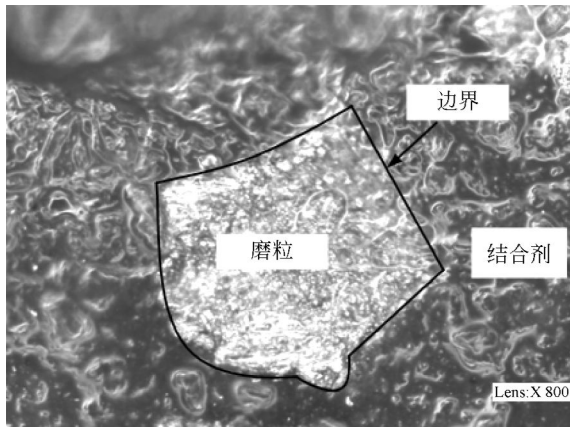


图 3 陶瓷基刀具单个金刚石颗粒周围观察图
Fig. 3 Vicinity of single diamond particle of ceramic-bonded tool

采用扫描电镜对青铜基超声振动刀具表面单个金刚石颗粒周围观察,如图 4 所示。金刚石颗粒与青铜结合剂结合仍很致密,观察不到明显沟隙。采用相同方法,画一条穿过颗粒与结合剂的直线,进行能谱分析,结果如图 5 所示。

通过能谱分析发现,金刚石颗粒中 C 元素迅速从 98%降低到低于 1%,同时青铜结合剂中 Cu 元素上升到 83%,Sn 元素上升到 15%,在金刚石颗粒结合面处没有发现 Cu、Sn 元素的存在。因此可以得出金刚石颗粒与青铜结合剂之间无化学反应,把持力形式为机械镶嵌力。由于青铜结合

剂烧结过程中收缩能力远远大于陶瓷基结合剂,因此青铜基结合剂与金刚石颗粒结合紧密程度大于陶瓷基结合剂与金刚石颗粒结合,较难观察到沟隙。

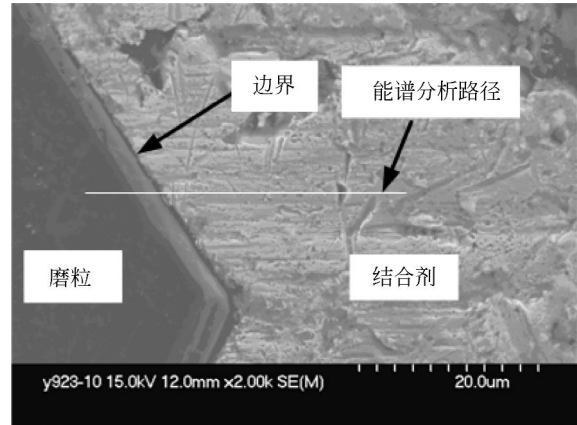


图 4 青铜基刀具单个金刚石颗粒周围观察图
Fig. 4 Vicinity of single diamond particle of bronze-bonded tool

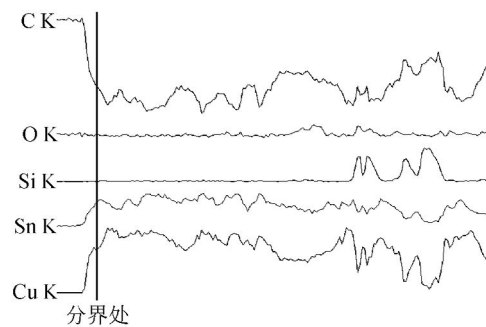


图 5 青铜基刀具单个金刚石颗粒周围能谱图
Fig. 5 Energy spectrum around single diamond particle of bronze-bonded tool

通过以上分析,可以看出不同结合剂类型超声振动刀具金刚石颗粒与结合剂把持形式不同,因此把持力大小也不同,铁基超声振动刀具金刚石颗粒与结合剂把持力为机械镶嵌力和化学结合力,陶瓷基和青铜基超声振动刀具金刚石颗粒与结合剂把持力为机械镶嵌力。由于化学镶嵌力远远大于物理镶嵌力,因此铁基超声振动刀具金刚石颗粒与结合剂把持力最大,同时由于青铜基结合剂与金刚石颗粒结合紧密程度大于陶瓷基结合剂与金刚石颗粒结合,故青铜基超声振动刀具金刚石颗粒与结合剂把持力大于陶瓷基超声振动刀具金刚石颗粒与结合剂把持力。采用相同的工艺

参数进行加工,3种刀具磨损后表面观察如图6所示,可以看出铁基和青铜基刀具主要磨损形式为结合剂与工件摩擦和金刚石颗粒磨损,陶瓷基刀具主要磨损形式为金刚石颗粒脱落和金刚石颗粒磨损^[16,17],进一步验证了铁基和青铜基超声振动刀具把持力大于陶瓷基超声振动刀具把持力。

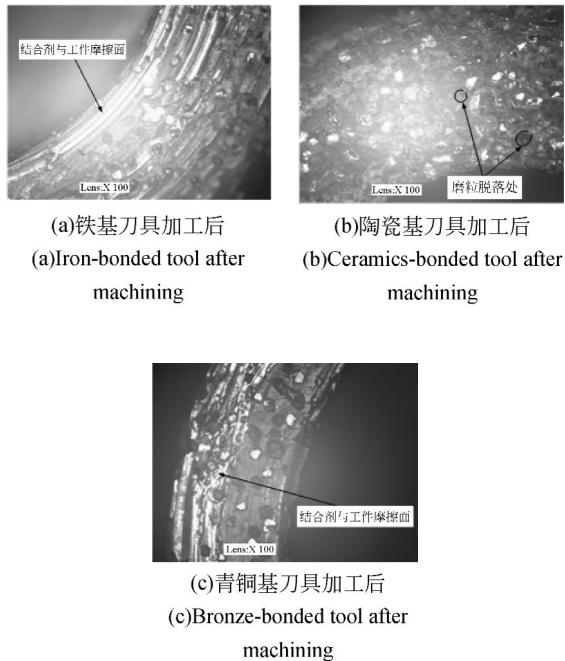


图6 不同结合剂刀具加工后的工件端面观察图

Fig. 6 Figures of tools after machining

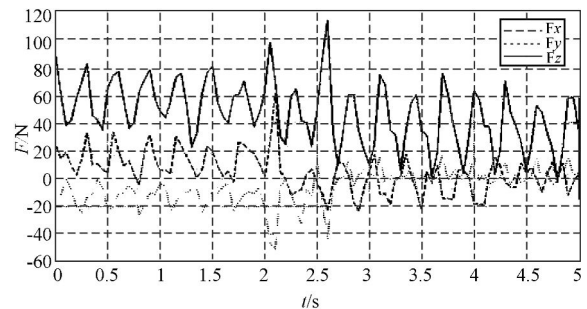
4 把持力对超声振动刀具加工性能影响实验

为研究把持力对超声振动刀具加工性能的影响,采用铁基、陶瓷基和青铜基3种结合剂刀具进行超声旋转磨削加工试验。实验设备选用DMG Ultrasonic 20 超声5轴加工中心,实验材料为致密度70%Si₃N₄陶瓷材料,刀具参数如表1所示。采用3种刀具分别加工出60 mm×15 mm×20 mm的槽,选取工艺参数:转速为5 000 r/min,进给速度为600 mm/min,分层厚度为0.15 mm。

4.1 把持力对切削力影响

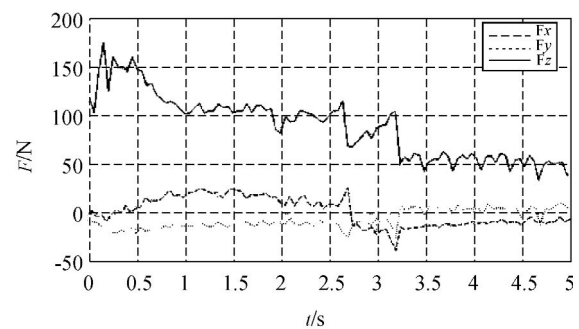
选用KISTLER 9257A测力仪、KISTLER 5070电荷放大器采集切削力,采样频率为5 000 Hz,采集时间为5 s,如图7所示。

加工过程中选取分层厚度为0.15 mm,刀具侧面与工件接触面积较小,产生的力非常小;而在



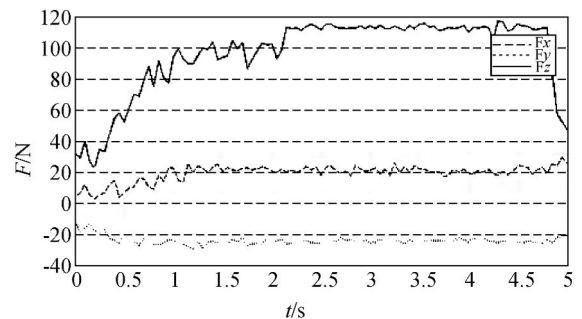
(a)铁基刀具 X、Y、Z轴方向切削力

(a)Cutting forces of X,Y,Z directions of iron-bonded tool



(b)陶瓷基刀具 X、Y、Z轴方向切削力

(b)Cutting forces of X,Y,Z directions of ceramics-bonded tool



(c)青铜基刀具X、Y、Z轴方向切削力

(c)Cutting forces of X,Y,Z directions of bronze-bonded tool

图7 不同刀具的切削力

Fig. 7 Cutting forces of different tools

刀具端面上,X、Y方向上切削力大小可认为与Z轴方向切削力存在一个比例系数,故只对Z轴方向上切削力。通过图7可以看出,在Z轴方向上,陶瓷基刀具和青铜基刀具切削力变化较大,切削力不稳定,幅值不断变化,但铁基刀具切削力变化较小。陶瓷基刀具Z轴切削力最大值、平均值分别达到176.18和61.24 N,大于铁基和青铜基刀具对应值。青铜基刀具最大切削力比铁基刀具大12.46 N,但平均切削力远大于铁基刀具,与陶瓷基刀具平均切削力相差较小。

旋转超声磨削加工过程中,刀具端面上金刚石颗粒形状和排布不规整,只有小部分金刚石颗粒参与加工。陶瓷基对金刚石颗粒的把持力最小,加工过程中金刚石颗粒不断脱落,刀具的自锐性好,因此陶瓷基刀具参与加工的金刚石颗粒数目多于铁基和青铜基刀具,由于加工过程中金刚石颗粒脱落,其数目不断变化,根据文献[18],切削力大小与参与加工的金刚石颗粒数目以及金刚石颗粒切削刃锋利程度有关,故陶瓷基刀具 Z 方向切削力较大且变化程度也大。

铁基对金刚石颗粒的把持力最大,金刚石颗粒不易脱落,同时参与加工的金刚石颗粒数目小于陶瓷基刀具,Z 方向平均切削力小。刀具磨损小,参与加工的金刚石颗粒数目稳定,故切削力值比较稳定,但金刚石颗粒切削刃锋利程度值大。

青铜基对金刚石颗粒的把持力也较大,略低于铁基刀具,在加工过程中除金刚石颗粒与工件接触外,青铜基结合剂与工件也存在摩擦,由于青铜硬度大于铁,青铜基与工件之间挤压力和摩擦力大于铁基刀具,故所测 Z 轴切削力值也大于铁基刀具切削力。

4.2 把持力对超声振动刀具磨损量影响

铁基、陶瓷基和青铜基超声振动刀具去除相同体积材料 $60\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 后刀具磨损长度分别为 0.1 、 0.78 和 0.159 mm 。可见,陶瓷基超声振动刀具磨损长度远远大于铁基和青铜基刀具,是后者的 $6 \sim 7$ 倍,并且铁基刀具磨损长度小于青铜基刀具磨损长度。由于陶瓷基刀具金刚石与结合剂之间把持力最小,刀具磨损形式主要为金刚石颗粒脱落。当切削力大于金刚石颗粒与结合剂间把持力时,金刚石颗粒脱落,在未有新的金刚石颗粒显露前,陶瓷结合剂与工件表面接触,由于摩擦作用,陶瓷结合剂也将以粉末形式脱落,新的金刚石颗粒切削刃显露出来。金刚石颗粒的易脱落和陶瓷结合剂的易磨损,造成了加工过程中刀具磨损严重,磨损量最大。铁基和青铜基刀具金刚石颗粒与结合剂之间把持力较大,磨损形式主要为结合剂与工件摩擦和金刚石颗粒磨损。由于金刚石耐磨性好,抗磨损能力强,从而使使得刀具磨损长度小,同时铁基结合剂和青铜基合金烧结过程中结合致密,加工过程中结合剂也与工件表面之间发生摩擦,但结合剂有一定的耐磨能力,也减缓了刀具磨损量。

4.3 把持力对加工表面质量影响

为研究把持力对材料加工表面质量影响,采用粗糙度轮廓仪分别对 3 种刀具加工后的槽表面进行测量(测量区域为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$),得到铁基、陶瓷基、青铜基刀具加工形成的表面粗糙度(R_a)最大值分别为 30.35 、 21.79 和 $36.31\text{ }\mu\text{m}$ 。不同把持力刀具加工形成的不同表面质量是因把持力大小不同造成的刀具磨损形式和超声振动加工材料去除方式所引起。在旋转超声磨削加工过程中,材料去除方式为磨削去除和超声波振动去除。超声波振动去除是由于刀具作纵向超声振动,不断与工件接触,使材料表面产生裂纹,相邻的裂纹相遇从而去除材料^[19,20]。超声波振动去除与金刚石颗粒锋利程度有很大关系,金刚石颗粒越锋利,其尖角角度越小,裂纹产生及扩展越小,加工表面质量越优。陶瓷基刀具由于把持力小,刀具自锐性好,参与加工过程金刚石颗粒锋利。而对于铁基和青铜基刀具,刀具把持力大,金刚石颗粒不易脱落,且不断磨损,颗粒变钝,尖角角度增大,加工质量变差,这也解释了铁基和青铜基刀具加工表面质量差于陶瓷基刀具。铁基和青铜基刀具磨损形式除金刚石颗粒磨损外,还存在结合剂摩擦,由于青铜硬度大,摩擦力也大,造成加工表面粗糙度大于铁基刀具加工表面粗糙度。

4.4 把持力对崩边影响

超声旋转磨削加工主要应用于硬脆材料加工,在加工过程中最容易出现的问题是崩边,即边缘破损。崩边与切削力大小有关,刀具把持力大小可影响加工过程切削力,进而对崩边造成影响。图 8 所示为 3 种不同刀具加工造成的崩边现象。

由图 8 可以看出,陶瓷基刀具加工材料表面崩边现象最不明显,几乎观察不到边缘破损,而铁基和青铜基刀具加工的材料表面崩边现象非常明显,边缘破损严重。崩边大小与加工过程中产生的 X、Y 方向切削力大小直接相关,X、Y 方向切削力越大,刀具外圆端面对材料作用力越大,达到一定程度后产生边缘破损。如前所述,X、Y 方向上切削力大小与 Z 轴方向切削力存在一个比例系数,由于加工过程中铁基和青铜基刀具存在结合剂与工件表面摩擦,因此比例系数较大;同时,通过图 7 可以看出,青铜基刀具 X、Y 方向上切削力最大,其次为铁基。陶瓷基刀具由于刀具表面与工件表面比例系数最小,虽然 Z 轴方向切削力

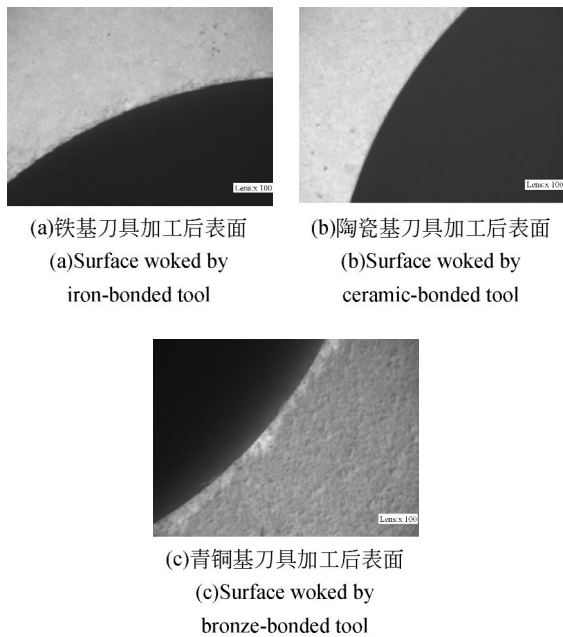


图8 不同结合剂刀具加工后工件表面崩边现象
Fig.8 Edge breakout phenomenon of different tools

最大,但是 X、Y 方向上切削力最小,因此崩边现象得到较好抑制。

参考文献:

- [1] LI Z C, JIAO Y, DEINES T W, *et al.*. Rotary ultrasonic machining of ceramic matrix composites: feasibility study and experiments[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, 45:1402-1411.
- [2] YA G, QIN H W, YANG S C, *et al.*. Analysis of the rotary ultrasonic machining mechanism [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 129:182-185.
- [3] 葛英飞,徐九华,杨辉. SiCp/Al 复合材料的超精密车削试验[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7):1621-1629.
GE Y F, XU J H, YANG H. Experiments of ultra-precision turning of SiCp/Al composites[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1621-1629. (in Chinese)
- [4] 侯永改,邹文俊,肖福仁,等. 烧结方式对陶瓷结合剂金刚石磨具性能影响的研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2008, 3:39-42.
HOU Y G, ZOU W J, XIAO F R, *et al.*. Effect of sintering manner on performance of vitrified bond diamond tools[J]. *Diamond&Abrasives Engineer-*
- ing*, 2008, 3:39-42.
- [5] 王立江,韩荣久,马文生. 人造多晶金刚石刀具加工表面微观纹理的实验研究[J]. *光学精密工程*, 1995, 3(3):67-72.
WANG L J, HAN R J, MA W SH. Experimental research for surface micro texture manufactured with PCD tool[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995, 3(3): 67-72. (in Chinese)
- [6] LIU J H, PEI Z J, FISHER G R. Grinding wheels for manufacturing of silicon wafers; a literature review[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(1):1-13.
- [7] JACKSON M J. Fracture dominated wear of perfectly sharp abrasive grinding wheels[J]. *Journal of Engineering Tribology*, 2002, 218(3):225-235.
- [8] DROZDA T J, WICK C. *Tool and manufacturing engineers handbook*[D]. Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1983.
- [9] MIYAZAKI M, ONOSE H, IIDA N, *et al.*. Determination of residual double bonds in resin dentin interface by Raman spectroscopy[J]. *Dent. Mater.*, 2003, 19(3):245-251.
- [10] FAN F, TANG W, LIU S, *et al.*. An effort to

5 结 论

研究了3种不同结合剂超声振动刀具把持力及对切削力、刀具磨损量、加工表面完整性的影响。实验结果表明,铁基刀具把持力形式为物理镶嵌力和化学结合力,陶瓷基刀具和青铜基刀具把持力形式为物理镶嵌力,其中铁基刀具把持力最大,其次为青铜基刀具,而陶瓷基刀具把持力最小;铁基和青铜基刀具主要磨损形式为结合剂与工件摩擦和金刚石颗粒磨损,陶瓷基刀具主要磨损形式为金刚石颗粒脱落和金刚石颗粒磨损。

相对于陶瓷基和青铜基结合剂超声振动刀具,铁基结合剂超声振动刀具 Z 轴切削力和刀具磨损量最小,其 Z 轴切削力平均值只有 46.8 N;加工 18 000 mm³ 材料后,刀具磨损量只有 0.1 mm;但是加工表面质量较差,适用于粗加工。而陶瓷基超声振动刀具加工表面质量优,表面粗糙度最大值只有 21.79 μm,适用于精加工。青铜基结合剂超声振动刀具加工性能介于两者之间。

- enhance adhesion of diamond coatings to cemented carbide substrates by introducing Si onto the interface[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 200(24):6727-6732.
- [11] 宁春旭,肖乐银,王进保,等. 金刚石涂附磨具用树脂结合剂的性能评价探讨[J]. *超硬材料工程*, 2011, 23(1):13-17.
NING CH X, XIAO L Y, WANG J B, *et al.*. Performance evaluation for resin bond of coated diamond tools[J]. *Superhard Material Engineering*, 2011, 23(1):13-17. (in Chinese)
- [12] BRIDWELL H C, APPL F C. A study of "Free Cutting" with diamond saws[J]. *Industrial Diamond Review*, 1974, 2:51-53.
- [13] 栗正新,杨雪峰,邓相荣,等. 陶瓷结合剂对金刚石颗粒把持力检测的研究[J]. *超硬材料工程*, 2010, 22(5):5-7.
LI ZH X, YANG X F, DENG X R, *et al.*. Research on diamond holding strength of ceramic matrix[J]. *Superhard Material Engineering*, 2010, 22(5):5-7. (in Chinese)
- [14] 汤东华,洪跃生. 钴基结合剂对金刚石把持力的研究[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 1994, 15(3):353-357.
TANG D H, HONG Y SH. A study on the retention of cobalt base bonding agent to diamond[J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 1994, 15(3):353-357. (in Chinese)
- [15] 张宇航. 超硬材料磨削工具有用金属陶瓷复合结合剂研究[D]. 天津:天津大学, 2005.
ZHANG Y H. *The research of cermets bonds of super-hard abrasive grinding tools*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)
- [16] ZENG W M, LI Z C, PEI Z J. Experimental observation of tool wear in rotary ultrasonic machining of advanced ceramics [J]. *Machining Tools&Manufacture*, 2005, 45:1468-1473.
- [17] 葛英飞,徐九华,傅玉灿. 高速铣削 SiCp/Al 复合材料时聚晶金刚石刀具的磨损机理[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12):2908-2918.
GE Y F, XU J H, FU Y C. Wear mechanisms of PCD tool in high-speed milling of SiCp/Al composites[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12):2908-2918. (in Chinese)
- [18] 任敬心,康仁克,史兴宽. 难加工材料的磨削[M]. 北京:国防工业出版社, 1999.
REN J X, KANG R K, SHI X K. *Grinding of Difficult-to-cut Materials* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999. (in Chinese)
- [19] LIU Y F, ZHAO H, JING J T. Research on material removal rate in rotary ultrasonic grinding machining [J]. *I. J. Nano-manufacturing*, 2011, 7(2):158-168.
- [20] ZHANG W, SUBBASH G. An elastic-plastic-cracking model for finite element analysis of indentation cracking in brittle materials[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, 38:5893-5913.

作者简介:



刘运凤(1973—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,高级工程师,2005年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事硬脆材料高效精密加工及超声振动刀具技术方面的研究。E-mail: weishi1264326@126.com



荆君涛(1979—),男,内蒙古赤峰人,博士研究生,高级工程师,2009年于哈尔滨工程大学获得硕士学位,主要从事硬脆材料精密加工及加工表面完整性评价方面的研究。E-mail: jjt76732@hotmail.com



李占杰(1977—),男,河北隆尧人,博士研究生,2007年于天津大学机械学院获得硕士学位,主要从事光学零部件超精密加工、超声振动辅助金刚石切削钢铁材料方面的研究。E-mail: mtydhghd@126.com