

引文格式: 乔家平, 汪强, 武韩强, 等. 切向超声辅助氧化锆陶瓷镜面磨削试验研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(8): 69-75.

QIAO Jiaping, WANG Qiang, WU Hanqiang, et al. Experimental study on tangential ultrasonic-assisted mirror grinding of zirconia ceramics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(8): 69-75.

切向超声辅助氧化锆陶瓷镜面磨削试验研究*

乔家平^{1,2}, 汪强², 武韩强², 曾江², 吴勇波²

(1. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150000;

2. 南方科技大学, 深圳 518055)

[摘要] 氧化锆陶瓷具有高脆性、低断裂韧性等特点, 精密加工难度大, 一直限制着其应用。针对这一难题, 提出了切向超声辅助镜面磨削的精密加工方法, 研究了超声振幅对工件表面粗糙度、磨削力和磨削温度的影响, 以及有/无超声作用下砂轮的磨损状况等基础加工特性。结果表明, 切向超声辅助磨削可以实现氧化锆陶瓷镜面加工, 在振幅 $A_{p-p}=4.66\mu\text{m}$ 时, 与传统磨削($A_{p-p}=0$)相比, 工件表面粗糙度下降43.8%, 达到了 $R_a 19.9\text{nm}$; 法向磨削力随着超声振幅增大而下降, 最大下降34%, 但下降速率逐渐变小; 磨削温度也随着超声振幅增大而下降, 当 $A_{p-p}=4.66\mu\text{m}$ 时, 磨削温度比无超声时下降34.5%。此外, 切向超声辅助磨削加工可以改善砂轮的磨损状况, 减少砂轮上磨粒的脱落, 延长砂轮使用寿命。

关键词: 氧化锆陶瓷; 切向超声辅助磨削; 表面粗糙度; 磨削力; 磨削温度

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.08.069



乔家平

博士研究生, 研究方向为切向超声辅助镜面磨削氧化锆陶瓷。

随着航空航天产业的不断发展, 作为先进材料的精细陶瓷, 近十几年来得到了广泛的关注^[1]。其中, 氧化

锆陶瓷具有耐高温、抗腐蚀性和耐磨性优良等特性, 成为推动航空航天产业发展的关键材料之一。但氧化锆陶瓷由于同时具有高脆性、低断裂韧性等特点, 加工难度大, 容易引起工件表面组织损伤, 很难实现高精度、高效率、高表面质量的加工, 从而限制了其应用范围的进一步扩展。为了满足近年来精细陶瓷等脆性材料制品日益增长的需求, 在现有陶瓷加工方法的基础上, 进一步研究开发高精度、高效率 and 具有高表面完整性的精密加工方法显得尤为重要^[2-4]。

目前在氧化锆陶瓷构件的精密加工方面已有多种方法可供选择, 如金刚石砂轮磨削、磨料水射流加工、电火花加工、激光加工、超声辅助加工等^[5]。郑建新等^[6]从陶瓷磨削加工过程, 有效材料去除率, 临界磨削

深度与材料性质以及材料的破坏形式等角度分析了陶瓷材料延性域磨削加工的可行性。冯衍霞^[7]和李增强^[8]等研究了陶瓷材料的磨料水射流切割和微铣削加工。陈明君等^[9]采用 ELID 磨削技术对陶瓷材料进行磨削加工, 实现了镜面磨削, 工件的表面粗糙度达到了纳米级, 但要实现陶瓷材料的延性域磨削, 高刚度高分辨率的磨床仍然不可或缺。李洪峰等^[10]对工程陶瓷的电火花加工技术原理和特点进行了分析和阐述, 并且对相应的复合加工技术进行了研究。东京大学 Kizaki 等^[11]研究了激光辅助加工氧化锆陶瓷, 结果表明, 激光辅助能减小磨削力和刀具损伤, 但工件表面会出现微裂纹。徐瑞玲等^[12]建立了单颗磨粒的切削模型, 通过仿真求解出砂轮线速度在一定

* 基金项目: 科技部重点专项(2021YFF0700900); 国家自然科学基金(51975269); 深圳市科技计划(KQTD20170810110250357)。

范围内时,超声振动对磨削加工作用影响显著。张能等^[13]研究了纵扭复合超声辅助磨削加工氧化锆陶瓷产生的磨削力变化规律,发现外加超声振动在一定程度上强化了磨削能力,降低了磨削力。在这些研究中,超声振动模式和作用方向均有不同,且针对的主要是磨削力、砂轮寿命等基本加工特性,而在氧化锆陶瓷材料的镜面磨削加工方面研究内容较少。综合而言,上述加工方法分别在某方面或一定程度上满足了加工的需求,但随着对加工精度、效率和成本等综合要求越来越高,这些方法存在各自的局限性,使得加工成本占到生产成本的一半以上。

为了开发出一种针对氧化锆陶瓷的具有较高加工效率并能获得镜面的加工新技术,本文提出了切向超声辅助磨削加工方法,即加工中砂轮工作面上磨粒超声振动方向始终与其切削速度方向垂直,并与磨削点处工件表面(包括平面和曲面)相切,提高了相邻磨粒运动轨迹的交叉重合度,在加工效率得到保证的情况下使得镜面磨削更易实现。传统金刚石砂轮磨削过程中,存在磨削温度高、磨削力大、表面质量差和砂轮磨损快等问题。本文针对这些问题,研究了切向超声辅助条件下,磨削温度、磨削力以及表面质量随超声振幅的变化规律,同时对砂轮的磨损也进行了讨论,旨在研究切向超声对加工氧化锆陶瓷的影响规律,从而改善工艺,最终实现镜面磨削。

1 切向超声辅助磨削加工原理

切向超声辅助磨削加工原理如图1(a)所示。将XYZ坐标系固定在工件上,其中X轴、Y轴分别位于工件厚度和长度方向,而Z轴位于工件宽度方向并与砂轮轴线平行。直径为d的金刚石砂轮沿自身轴向(Z方向)做超声振动(频率为f,振幅为 A_{p-p}),同时,以速度 n_g 做顺时针旋转,

并以速率 V_f 沿工件表面从左往右进给。砂轮圆周面,即工作面上的金刚石磨粒振动方向与加工面平行,从而实现切向超声辅助磨削加工。在磨削过程中,金刚石磨粒在工件表面产生的切削痕迹变得相对复杂,由超声振动、砂轮转动和进给运动合成。假设 $t=0$ 时刻,磨粒在XYZ坐标系中位置为 $x=0, y=0, z=C$,则根据图1(a)的几何运动关系,磨粒在工件表面产生的切削痕迹可近似表达为

$$\begin{cases} y(t) = \frac{d}{2} \sin\left(\frac{\pi n_g}{30} t\right) + V_f t \\ z(t) = C + \frac{A_{p-p}}{2} \sin(2\pi f t) \end{cases} \quad (1)$$

基于式(1),将能得到如图1(b)所示工件表面上形成的磨粒切削轨迹,即砂轮上相邻两颗磨粒1和2的切削轨迹,在振幅较大时将会出现交叉现象,从而减小表面粗糙度^[14]。

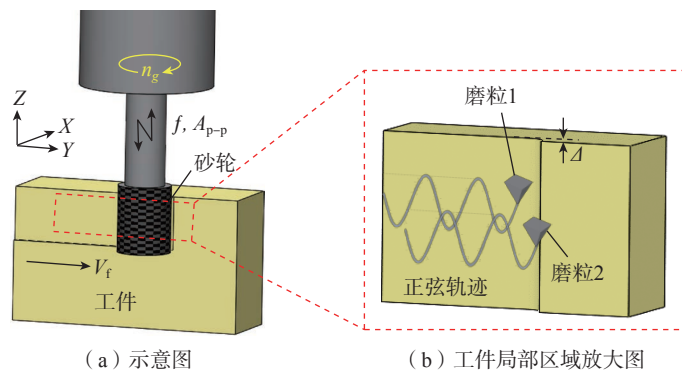


图1 切向超声辅助磨削加工原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of tangential ultrasonic-assisted grinding

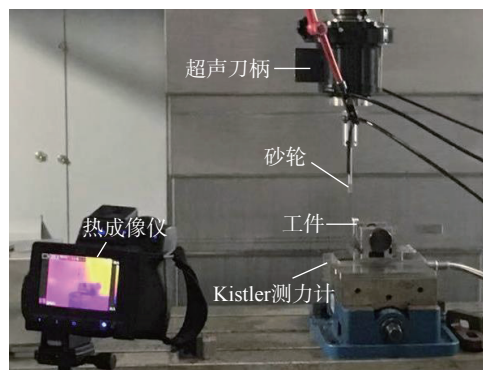


图2 试验装置

Fig.2 Experimental setup

2 试验装置与加工参数

将超声刀柄(日本岳将公司UB40-C5-BT40,最大推荐使用转速为4500r/min)安装到三轴数控机床(美国哈挺公司GX1000Plus)主轴上,搭建了切向超声辅助磨削试验平台,如图2所示。超声刀柄前端安装直径8mm的金属/树脂结合剂金刚石砂轮,砂轮轴向超声振动频率 $f=40\text{kHz}$,振幅 A_{p-p} 在 $0\sim 5\mu\text{m}$ 范围内可调。此外,在工件夹具和工作台之间安装了六分量测力计(瑞士Kistler仪器公司9119A),与电荷放大器和内藏数据采集卡及相应软件的电脑组成磨削力测量系统,用于磨削力的实时测量。尺寸为 $15\text{mm} \times 10\text{mm} \times 8\text{mm}$ 的氧化锆陶瓷工件通过夹具固定在测力计上表面,再和测力计一起固定在数控机床的

工作台上。在工作台附近还设置了非接触式热成像仪(美国菲力尔公司 T660),用于测量磨削过程中的温度。冷却液由喷嘴、附加软管、泵和水箱组成的供给系统以给定的流量供应到磨削区域。磨削参数如表 1 所示。

为了确保试验过程中设置砂轮切深的可靠性,对数控机床主轴在砂轮切深方向(图 1 所示的 X 方向)的定位精度进行了测量。测量装置和结果分别如图 3 所示。首先在机床数控装置上输入 X 方向的设置位移量并运行程序,同时使用激光位移传感器测量机床主轴的实际位移量。测量结果(图 3 (b))显示,每设置 $1\mu\text{m}$ 的位移量,主轴的实际位移在测量范围内平均为 $1.04\mu\text{m}$,与设置值只有 4% 的误差,而且两者间呈现出良好的线性关系,表明所用机床精度可以有效保证在切深方向的参数设定要求。

加工后,工件表面形貌和粗糙度等特征用扫描电子显微镜(德国蔡司 Merlin SEM)和白光干涉仪(英国泰勒·霍普森 CCI HD)进行表征测量,并用激光共聚焦显微镜(日本基恩士公司 VK-X1000)观察加工后砂轮工作面的 3D 形貌,对不同条件下使用后的砂轮磨损情况进行表征。

3 结果与讨论

3.1 表面质量

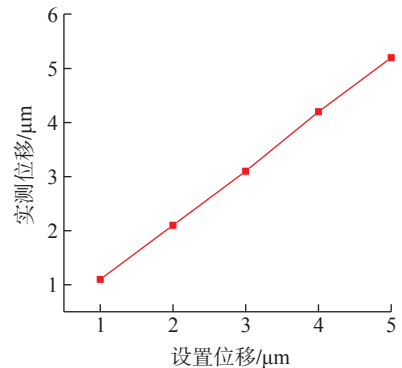
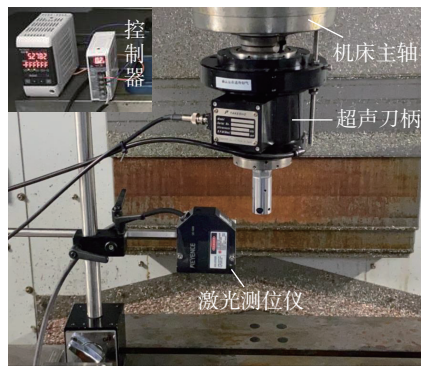
首先,对切向超声辅助磨削加工与无超声的传统磨削加工工件表面形貌和粗糙度进行了比较。图 4 为有/无超声磨削加工后的氧化锆陶瓷工件外观照片。超声辅助磨削加工后的表面接近镜面,可以比较清晰地倒映出字母。

图 5 (a) 和 (b) 分别为图 4 所示无超声磨削区和有超声磨削区的 SEM 照片,并测量表面粗糙度,取平均值进行对比。很显然,无超声时产生了明显的沿砂轮进给方向(磨粒

表 1 磨削加工试验参数

Table 1 Grinding experiment parameters

参数	值
超声振动频率 f/kHz	40
超声振动振幅 $A_{p-p}/\mu\text{m}$	0~5.0
砂轮型号	SD4000125MSH
砂轮直径 d/mm	8
砂轮转速 $n_g/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	4200
砂轮切深 $A/\mu\text{m}$	1
砂轮进给速度 $V_f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	40
冷却液类型	1.6% 稀释



(a) 测量装置

(b) 测量结果

图 3 数控机床精度测量装置及测量结果

Fig.3 Measurement device and results of CNC machine accuracy

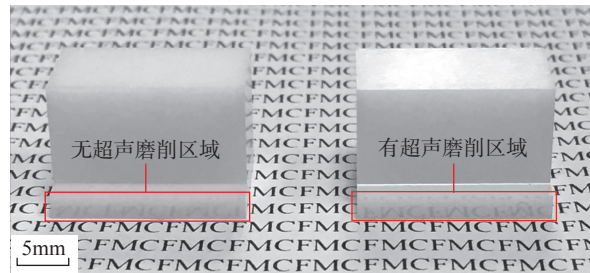
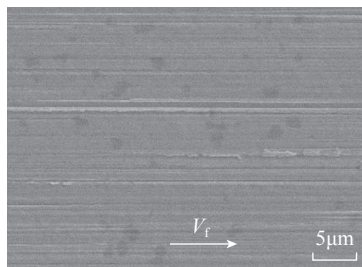
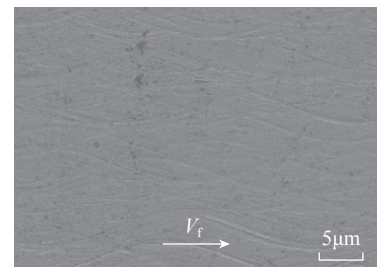


图 4 无超声 ($A_{p-p}=0$) 和有超声 ($A_{p-p}=2.57\mu\text{m}$) 磨削后工件的外观照片

Fig.4 Optical images of workpieces after grinding without ultrasonic ($A_{p-p}=0$) and with ultrasonic ($A_{p-p}=2.57\mu\text{m}$)



(a) 无超声的传统磨削表面



(b) 超声辅助磨削表面

图 5 有/无超声磨削后工件表面 SEM 照片对比

Fig.5 SEM images comparison of work surfaces after grinding with and without ultrasonic

切削速度方向)平行分布的加工痕迹,表面粗糙度为 $R_a35.4\text{nm}$;而有超声时工件表面变得非常平整,几乎看不到平行分布的加工痕迹,仅有轻微的正弦波纹路,表面粗糙度显著降低,达到 $R_a19.9\text{nm}$,降幅达43.8%。通过对比可以发现,无超声时金刚石磨粒划过的沟槽明显,深浅不一,而一旦施加切向超声后,磨粒划痕无较大起伏,整个平面更加平坦,这是由于超声作用下引起的砂轮磨粒轨迹交叉重叠(图1(b)),对沟槽凸起部分的材料进行了去除,从而改善了表面质量。

图6为砂轮转速 $n_g=4200\text{r/min}$ 下,超声振幅 A_{p-p} 对工件表面粗糙度的影响规律。显然,随着 A_{p-p} 值增加, R_a 值单调下降。然而,值得注意的是,在 $A_{p-p}=0\sim 1.1\mu\text{m}$ 范围内, R_a 从 35.4nm 快速降低到 22.1nm ,降低幅度约为37.6%;随着 A_{p-p} 继续增大,在 $A_{p-p}=1.1\sim 4.66\mu\text{m}$ 范围内, R_a 下降速率开始变小,最终下降到 19.9nm 。这些现象表明,在设置的砂轮转速条件下,在砂轮上施加超声能显著降低表面粗糙度。然而,应注意的是,超声振幅对表面粗糙度的作用效果会受砂轮转速的影响^[15]。

切向超声辅助磨削可以达到镜面效果,是由于超声振动影响了工件的表面形貌,如图7所示。图7(a)为工件表面形貌的初始形态,无超声的传统磨削加工后,工件表面上产生了直条纹切削痕迹(图5(a)),其表面形貌如图7(b)右上所示,此时的表面形貌由砂轮磨粒大小及进给速度等加工参数决定;然而,当砂轮被施以轴向超声振动时,工件表面就会产生正弦切削痕迹。当超声振幅足够大时,不仅与原始直线切削痕迹相交,相邻磨粒的正弦状切削痕迹之间也会相互交叉(图1(b)和图5(b)),从而使 R_a 值降低。交叉点越多,由于磨粒痕迹重叠熨烫、痕迹干涉和摩擦,磨削表面将更平滑,如图7(b)

右下的超声辅助磨削后工件表面形貌。因此,随着振幅的增大,工件表面的粗糙度值会逐渐下降,这也符合了图5的试验结果。

3.2 磨削力

图8所示为切向超声辅助磨削时,磨削力随着超声振幅的变化趋势,其中 $A_{p-p}=0$ 为无超声时的传统磨削加工。可知,随着 A_{p-p} 的增加,磨削力均呈现下降趋势。法向磨削力 F_x 减小比较明显,从 $A_{p-p}=0$ 时的 0.65N 下降到 $A_{p-p}=4.66\mu\text{m}$ 时的 0.43N ,

降幅约34%。其中,在 $A_{p-p}=0\sim 1.1\mu\text{m}$ 范围内时, F_x 减小约23.1%;在 $A_{p-p}=1.1\sim 4.66\mu\text{m}$ 范围内时, F_x 减小约10.9%,下降速度变慢。这个现象说明,加上超声之后,磨削力会有明显的下降,但随着超声振幅的增大,磨削力下降速率变小。另一方面,超声的有无以及超声振幅对切向磨削力 F_y 的影响不明显。事实上,在切向超声辅助磨削过程中, F_x 对于材料去除机理起主要影响作用, F_x 变小有助于材料去除模式的脆塑转换,更

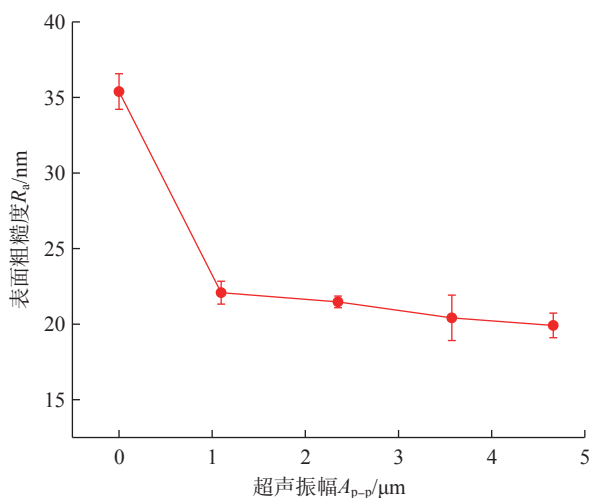


图6 加工表面粗糙度随振幅的变化

Fig.6 Variation of surface roughness with ultrasonic amplitude

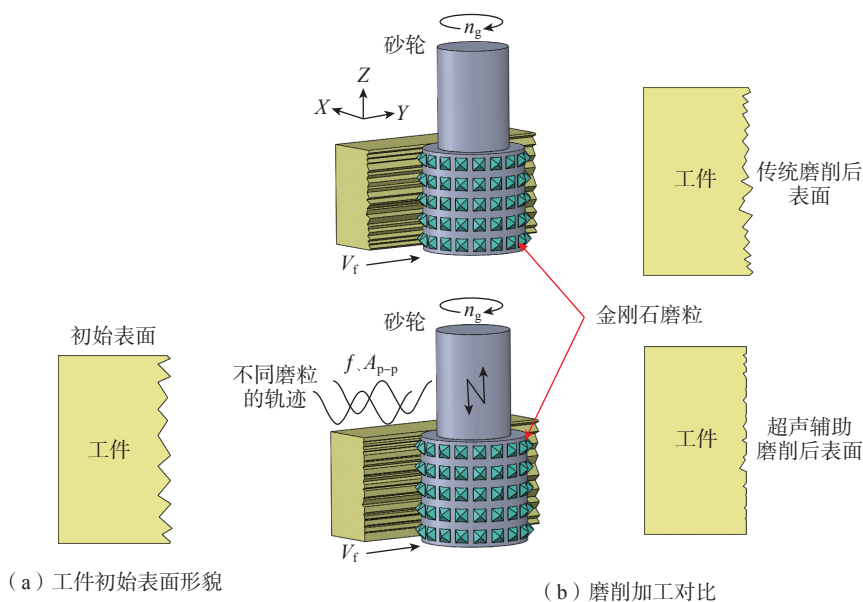


图7 有/无超声作用下磨粒切削痕迹示意图

Fig.7 Schematic diagram of abrasive grain cutting traces with/without ultrasonic

容易磨削出镜面效果,并减少砂轮磨损^[16]。

3.3 磨削温度

图9(a)为 $V_f=40\text{mm/min}$ 、 $A_{p-p}=4.66\mu\text{m}$ 时,热成像仪输出记录;图9(b)为 $V_f=40\text{mm/min}$ 时磨削温度随超声振幅的变化趋势。试验过程中停止供给磨削液,每个振幅下重复磨削加工5次,将5次结果的平均值作为该振幅下的磨削温度。可以看出,随着振幅的增加,磨削温度逐渐减小。无超声($A_{p-p}=0$)时,磨削区域平均温度为 61.8°C ,当 $A_{p-p}=1.1\mu\text{m}$ 时,平均温度为 56.5°C ,下降了 8.6% ;当 A_{p-p} 继续增大到 $4.66\mu\text{m}$ 时,平均温度下降到 40.5°C ,降幅为 34.5% ,即振幅越大,磨削温度下降越明显。磨削温度直接影响砂轮寿命和工件加工质量,是研究加工过程的重点。在氧化铝陶瓷磨削过程中,磨削温度过高,可能会引起金刚石磨粒石墨化以及工件表面残余应力等形式的热损伤,从而影响金刚石砂轮的使用寿命和氧化铝陶瓷零件的机械性能。

3.4 砂轮磨损

试验中,使用激光共聚焦显微镜观察砂轮在磨削加工后的形貌,对比其磨损状况。图10为有/无超声辅助条件下,磨削加工后的金属/树脂结合剂金刚石砂轮(SD4000125MSH)的3D形貌。从图10(a)可以明显看出无超声辅助磨削加工后金刚石磨粒的脱落情况,而从图10(b)可以看出超声辅助条件下金刚石磨粒的切削刃虽被磨平,但磨粒并未脱落。这和前文所述的超声作用下磨削力下降的现象有关。进而对有/无超声条件下使用后的砂轮表面进行了SEM观察,其结果如图11所示。从图11(a)中也可以看出,无超声磨削后的砂轮表面有较明显的磨粒脱落,而有超声时磨粒脱落现象不明显(图11(b))。这些均表明超声的施加能有效减轻砂轮的磨损。

4 结论

本文主要研究氧化铝陶瓷镜面磨削的加工方法,提出了切向辅助磨削加工工艺,并对其基本加工特性进行了试验研究,得出了以下结论:

(1)切向超声辅助磨削加工后,工件表面粗糙度 R_a 比传统磨削有较大的降低,本试验参数范围内降幅达 43.8% 。同时,随着超声振幅的增大,工件表面粗糙度减小。

(2)随着超声振幅的增大,法向

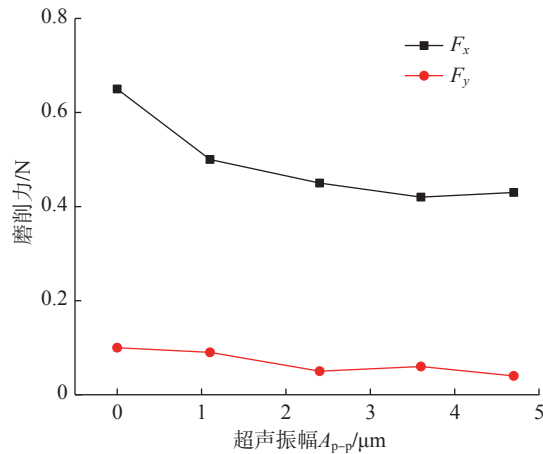


图8 磨削力随超声振幅的变化

Fig.8 Grinding forces versus ultrasonic amplitude

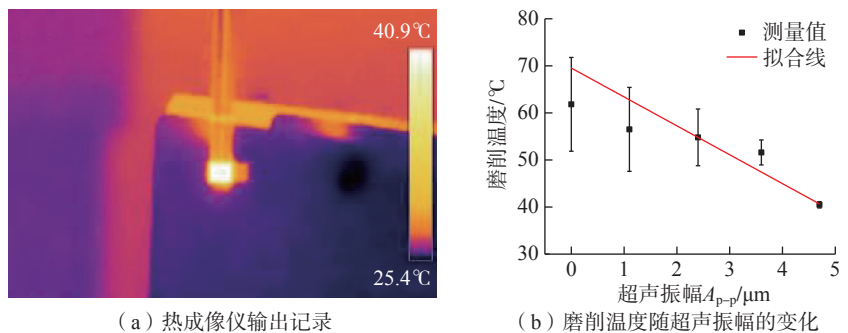
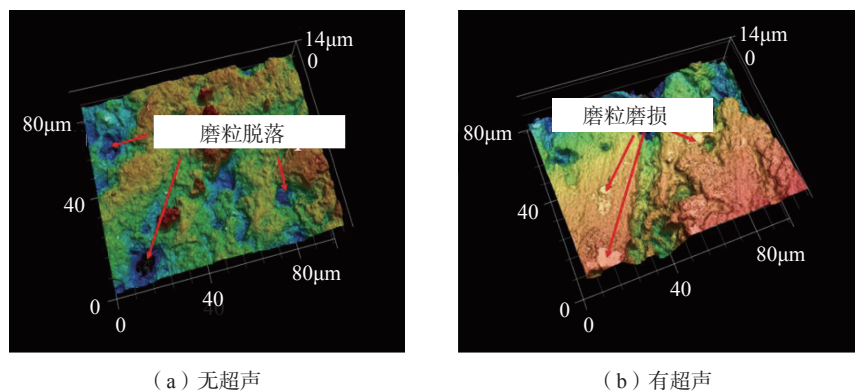


图9 磨削温度随超声振幅的变化

Fig.9 Grinding temperature versus ultrasonic amplitude

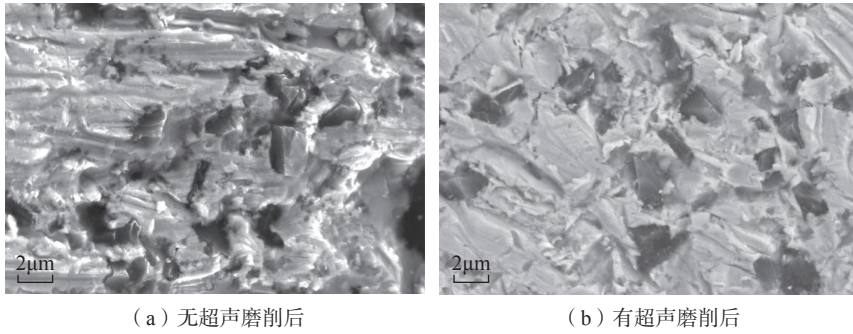


(a) 无超声

(b) 有超声

图10 砂轮磨损

Fig.10 Grinding wheel wear



(a) 无超声磨削后 (b) 有超声磨削后

图 11 砂轮磨削加工后的表面形貌 SEM 图

Fig.11 SEM images of surface morphology of the grinding wheel after grinding

磨削力逐渐减小,但其减小速率逐渐变缓,相比无超声作用的传统磨削,减小幅度最大达到了 34%。

(3) 磨削温度随振幅增大而下降,本试验参数范围内,相较于无超声的传统磨削,最大下降幅度达到了 34.5%。

(4) 切向超声辅助磨削加工工艺可以改善砂轮的磨损状况,减少砂轮上磨粒的脱落,延长砂轮的使用寿命。

参考文献

[1] 李强,姜勇刚,冯军宗,等. 水热-热静压工艺制备陶瓷材料的研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(S2): 1123-1127.

LI Qiang, JIANG Yonggang, FENG Junzong, et al. Research progress on the preparation of ceramic materials by hydrothermal hot-pressing[J]. Materials Reports, 2020, 34(S2): 1123-1127.

[2] PICONI C, MACCAURO G. Zirconia as a ceramic biomaterial[J]. Biomaterials, 1999, 20(1): 1-25.

[3] TAWAKOLI T, AKBARI J, ZAHEDI A. Ultrasonic-assisted cylindrical grinding of alumina-zirconia ceramics[C]//Volume 2A: Advanced Manufacturing. ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition. San Diego: American Society of Mechanical Engineers, 2013.

[4] MA L J, GONG Y D, CHEN X H. Study on surface roughness model and surface forming mechanism of ceramics in quick point grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 77: 82-92.

[5] 侯永改,田久根,路继红,等. 氧化锆陶瓷磨削加工的研究现状[J]. 中国陶瓷,

2014, 50(9): 6-9.

HOU Yonggai, TIAN Jiugen, LU Jihong, et al. The Current research status of zirconia ceramics grinding[J]. China Ceramics, 2014, 50(9): 6-9.

[6] 郑建新,徐家文,吕正兵. 陶瓷材料塑性域磨削机理[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(1): 102-106.

ZHENG Jianxin, XU Jiawen, LÜ Zhengbing. Grinding mechanism of ceramics in the ductile regime[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006, 34(1): 102-106.

[7] 冯衍霞,黄传真, WANG Jun, 等. 磨料水射流切割陶瓷材料的加工表面质量研究[J]. 工具技术, 2007, 41(1): 43-45.

FENG Yanxia, HUANG Chuanzhen, WANG Jun, et al. Study on surface quality of ceramics cut by abrasive waterjet[J]. Tool Engineering, 2007, 41(1): 43-45.

[8] 李增强,赵佩杰,宋雨轩,等. 微磨料水射流加工技术研究现状[J]. 纳米技术与精密工程, 2016, 14(2): 134-144.

LI Zengqiang, ZHAO Peijie, SONG Yuxuan, et al. Research status of micro abrasive water jet machining technology[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2016, 14(2): 134-144.

[9] 陈明君,董申,李旦,等. 单晶硅脆性材料塑性域超精密磨削加工的研究[J]. 航空精密制造技术, 2000, 36(2): 8-11.

CHEN Mingjun, DONG Shen, LI Dan, et al. Study on ultra-precision grinding of single silicon brittle material in the ductile mode[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2000, 36(2): 8-11.

[10] 李洪峰,李嘉,温雨,等. 陶瓷材料电火花加工技术及研究进展[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2008, 22(2): 178-182.

LI Hongfeng, LI Jia, WEN Yu, et al. EDM

for ceramics and its research status[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2008, 22(2): 178-182.

[11] KIZAKI T, ITO Y, TANABE S, et al. Laser-assisted machining of zirconia ceramics using a diamond bur[J]. Procedia CIRP, 2016, 42: 497-502.

[12] 徐瑞玲,赵波. 基于切向超声的平面磨削参数有效性研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2015, 35(6): 32-36.

XU Ruiling, ZHAO Bo. Study on effectiveness of plane grinding parameters based on tangential ultrasonic vibration[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2015, 35(6): 32-36.

[13] 张能,魏昕,汪永超,等. 超声振动磨削工程陶瓷的磨削力试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(1): 23-25.

ZHANG Neng, WEI Xin, WANG Yongchao, et al. Experimental study on grinding force of engineering ceramics by ultrasonic vibration grinding[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(1): 23-25.

[14] QIAO J P, FENG M, LI Y, et al. A study on tangential ultrasonic-assisted mirror grinding of zirconia ceramic curved surfaces[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(9-10): 2837-2851.

[15] 许陆昕,李华,蔡晓童,等. 小直径砂轮超声振动磨削 SiC 陶瓷的表面质量研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(2): 67-77.

XU Luxin, LI Hua, CAI Xiaotong, et al. Study on surface quality in ultrasonic vibration grinding of SiC ceramics with small diameter grinding wheel[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(2): 67-77.

[16] 谢建华. 基于超声振动辅助平面磨削的磨削力与磨削温度的试验研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2015.

XIE Jianhua. The experimental study on grinding forces and grinding temperature based on ultrasonic vibration assisted surface grinding[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science & Technology, 2015.

通讯作者: 吴勇波, 讲席教授, 博士, 研究方向为多场辅助精密加工。

Experimental Study on Tangential Ultrasonic-Assisted Mirror Grinding of Zirconia Ceramics

QIAO Jiaping^{1,2}, WANG Qiang², WU Hanqiang², ZENG Jiang², WU Yongbo²

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China;

2. Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

[ABSTRACT] Zirconia ceramics are difficult-to-machine materials and their application are restricted as a result of the difficulty in precision machining due to their high brittleness and low fracture toughness. Against this problem, a tangential ultrasonic-assisted mirror grinding method was proposed. The effect of ultrasonic amplitude on the work-surface roughness, the grinding force and temperature, and the wear condition of grinding wheel with/without ultrasonic were studied. The results demonstrated that the mirror surface was successfully obtained on the zirconia ceramics workpiece by tangential ultrasonic-assisted grinding, and the work-surface roughness decreased by 43.8% to R_a 19.9nm at ultrasonic amplitude $A_{p-p}=4.66\mu\text{m}$, compared with conventional grinding ($A_{p-p}=0$). The normal grinding force decreased with the increase of ultrasonic amplitude, with the maximum decrease of 34%, but the rate gradually slowed down. The change trend of grinding temperature was similar with that of grinding force, showing the temperature at $A_{p-p}=4.66\mu\text{m}$ was lower than that without ultrasonic by 34.5%. In addition, the wear condition of grinding wheel was improved, reducing the falling off abrasive grains and extending the life of grinding wheel with ultrasonic.

Keywords: Zirconia ceramics; Tangential ultrasonic-assisted grinding; Surface roughness; Grinding force; Grinding temperature

(责编 雪松)

(上接第 68 页)

Elliptic Ultrasonic Assisted Fixed-Abrasive Polishing of AlN Ceramics

LI Gengzhuo, WU Yongbo, WANG Qiang

(Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

[ABSTRACT] AlN ceramics are considered as the most ideal substrate material for high integration and high-power devices packaging due to its high thermal conductivity, low thermal expansion coefficient and good mechanical strength, and have great prospects for application in automotive chips, aerospace and defense military. However, as the primary methods of the substrate planarization, lapping and polishing of AlN ceramics are encountering the bottleneck of low processing efficiency caused by the employment of loose abrasive slurries. In addition, the chemicals in abrasive slurries can cause increased environmental expenses. In this research, for the purpose of solving environmental problems and improving the polishing efficiency of AlN ceramics, a vitrified-bonded abrasive pellet containing fine abrasives is employed to realize the fixed-abrasive dry polishing. With this method, higher material removal rate can be obtained, but the chip cannot be discharged in time during the dry machining, which will lead to the deterioration of surface integrity. Consequently, an elliptic ultrasonic vibration is applied to the abrasive pellet during the dry polishing. It is found from experiments that the elliptic ultrasonic vibration has a catalytic effect on the chip emission, which is more favourable for better surface quality and higher material removal rate.

Keywords: AlN ceramics; Lapping and polishing; Fixed-abrasive polishing; Ultrasonic assisted machining;

Elliptic ultrasonic vibration

(责编 阳光)