

纳米 ZrO_2 陶瓷的超声振动延性域磨削特性研究

向道辉,刘建慧,支新涛,赵波

河南理工大学

摘要:本文分析了纳米 ZrO_2 陶瓷在普通和超声磨削状态下的裂纹扩展过程及延性去除机理;通过对不同磨削状态的磨削力及 AFM 和 SEM 对表面质量的观察,做了在普通和超声磨削状态下的对比试验,研究了临界延性磨削深度对磨削力及表面质量的影响关系;基于超声振动磨削过程及磨削力的分析,讨论了超声振动增加延性磨削深度的原因,最后通过 AFM 对延性域加工表面形貌的形成机理进行了观察。研究表明:超声加工能明显提高纳米 ZrO_2 陶瓷的临界延性磨削深度,振动方向垂直于砂轮线速度方向时,其磨削效果要优于振动方向平行于砂轮速度方向的磨削效果。通过在延性域范围内磨削,超声加工能高效地获得纳米加工表面,超精密磨削表面是由不同幅值多种波形叠加的结果。

关键词:超声振动磨削;纳米 ZrO_2 陶瓷;临界延性磨削深度

中图分类号: TG58

文献标志码: A

Study on Ductile Grinding Character of Nano ZrO_2 Ceramics using Ultrasonic Vibration Grinding

Xiang Daohui, Liu Jianhui, Zhi Xintao, Zhao Bo

Abstract: In this paper the crack extension course and ductile removal mechanics of nano ZrO_2 ceramics were analyzed. On the basis of contrast test with or without ultrasonic vibration, the influence of critical ductile grinding depth on grinding forces and surface quality were studied by analyzing the grinding forces in different grinding state and surface quality observed by SEM and AFM. The reason for the increase of the critical grinding depth was discussed based on the analysis of grinding force and ultrasonic vibration course. At last, the formation mechanics of surface topography observed by AFM in ductile domain was analyzed. The research indicated that ultrasonic machining could increase the critical ductile grinding depth of nano ZrO_2 ceramics obviously. The grinding effect when vibration direction perpendicular to wheel linear velocity superior to vibration direction parallel to wheel linear velocity. Through grinding in ductile domain, ultrasonic machining could obtain nano finished surface with high efficient. Ultraprecise grinding surface was the result superimposed by different amplitudes and multiple waveforms.

Key words: ultrasonic vibration grinding; nano ZrO_2 ceramics; critical ductile grinding depth

1 引言

在微电子、光电子、传感器技术等尖端技术中,高精度超光滑表面的零件获得了广泛应用。而在超光滑表面零件材料中,硬脆材料占有相当大的比例,已成为尖端科学技术中应用最为活跃的材料。要获得无裂纹无缺陷的超精密表面,就必须对材料在延性域内进行磨削。目前许多学者对普通陶瓷的延性磨削进行了研究,但采用常规方法,其延性磨削深度都较低;其在延性域加工的高成本、低效率一直是阻碍先进陶瓷材料进一步应用的障碍。

在磨削深度足够小的情况下,所有脆性材料将以塑性流动去除而不是以脆性断裂去除^[1]。研究表明,对于各种脆性材料在对应的脆性转变时的磨削进给量与材料性能(如断裂韧性、硬度、弹性模量)之

间存在一定的关系,这种关系可通过一个简单的能量原理方程来描述^[2]:

$$d_c = \left(\frac{E}{H} \right) \left(\frac{K_c}{H} \right)^2 \quad (1)$$

Bifano 定义脆性材料被磨表面的破碎表面相对面积率为 10% 以下时为延性磨削。当磨削深度 $a_p \leq d_c$ 时,可以对硬脆材料进行延性磨削。式(1)表示临界磨削深度只与材料特性有关(E 为不同材料的系数),这有一定的局限性,有研究认为临界磨削深度与加工方法和加工参数有关。在超声波磨削状态下,由单一磨粒高频动态冲击引起的表面破碎微结构分析表明:材料去除出现两种现象,冲击点的变形及冲击区的破碎^[3]。通过动态冲击试验证明^[4],超声加工材料去除是由于冲击速度的作用,冲击速度由振动工具的频率和振幅决定。材料在冲击区受到很高的脉冲压力,其去除方式是通过破碎、微裂纹及塑性变形完成的。在低的冲击速度下,脆性材料去除主要是结构分解及微粒移动;在高的冲击速度

下,材料的去除主要是由于材料晶格的微裂纹及侧面和中间裂纹的扩展。这些裂纹出现在表面就形成了磨屑,进而形成磨削表面。在超声振动情况下,工件由于受到高能量的高频冲击,产生了很多微观裂纹,由于磨粒具有随机性,在裂纹还没有向深层扩展时,高频冲击使得裂纹改变了扩展方向,使其来不及脆性破坏,继续以延性方式去除,这样就加大了材料的临界延性磨削深度并减少了磨削力,超声加工因扩大延性域加工范围而使得陶瓷等硬脆材料高效精密加工简单可行。

2 实验条件及试验方法

超声波振动磨削试验现场见图1,试验原理见图2。磨削机床为万能工具精密磨床;工件材料为纳米 ZrO_2 陶瓷,其维氏硬度为 12GPa,弹性模量为 380GPa,抗弯强度为 600 - 700MPa,断裂韧性为 9.0 - 9.3MPa·m^{1/2},材料粒度为 50 - 60nm,密度为 3.96 - 3.99g/cm³。表面粗糙度测量采用 JJ1 - B 触针式表面粗糙度测量仪沿垂直磨削纹路方向测量六点的平均值;工件磨削表面微观结构采用 SEM 和 AFM 测量(型号 CSPM2000, X - Y 向分辨率 0.13nm, Z 向分辨率 0.01nm);磨削力采用安装在支撑板下的应变式测力仪(SDC - CJ4A)进行测量。本实验采用频率自动跟踪的超声波发生器功率,其频率固定在 20KHz 左右,振幅 $A = 12\mu\text{m}$ 。砂轮修整条件为: # 200 磨石块(SiC 修形), # 400 磨石块(Al_2O_3 修锐),修整时砂轮转速 $V_s = 35.3\text{m/s}$,磨削深度 $10\mu\text{m/pass}$ 。为了了解超声振动对纳米 ZrO_2 陶瓷磨削性能的影响,试验采用对比的方式进行,当打开超声发生器时

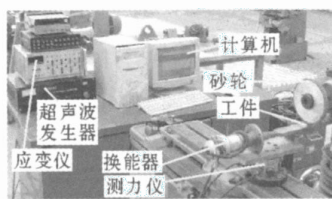


图1 试验现场图

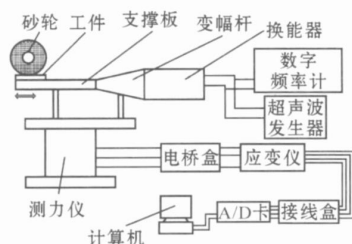


图2 试验原理图

为超声磨削,当关闭超声发生器时为普通磨削。转动超声振动装置的托板,可以试验不同振动方向对磨削深度的磨削特性的影响。

3 试验结果及试验分析

3.1 磨削力对临界磨削深度的影响

磨削力是评价磨削过程的一个极为重要的参数,在磨削过程中,磨削力的大小不但可以反映出整个磨削过程中砂轮与工件之间的相互干涉过程,评价磨削效果的好坏,还可以在在一定程度上预测加工表面质量及加工变质层深度。在陶瓷材料的精密加工中,通过对磨削力的测量,可以预测加工过程是属于塑性加工还是脆性加工。

图3为磨削深度对磨削力影响的关系图,其中 F_{n1} 、 F_{t1} 为超声波振动平行于砂轮速度方向的磨削力, F_{n2} 、 F_{t2} 为超声波振动垂直于砂轮速度方向的磨削力。从图中可以看出,磨削力随着磨削深度的增加而直线上升。在普通磨削中,当磨削深度 a_p 达到 $15\mu\text{m}$ 时,磨削力达到最大值后有下降趋势,增大磨削深度至 $20\mu\text{m}$ 时磨削力出现波动现象,这时工件表面呈脆性磨削状态,磨削力起伏跳动,工件表面磨削温度明显上升,用手触摸有很热的感觉。可以判断此时的临界磨削深度为 $15\mu\text{m}$ 。同样在超声波振动磨削状态下,也有类似的规律,可以判断在振动方向垂直于砂轮速度方向时其临界磨削深度为 $25\mu\text{m}$ 左右,在振动方向平行于砂轮速度方向时为 $20\mu\text{m}$ 左右。不论是普通磨削还是超声波振动磨削,当磨削模式由塑性磨削转变为脆性磨削时,磨削力都会呈明显下降趋势。在两种不同振动方向的磨削方式下,当振动方向平行砂轮速度方向时其磨削力要明显大于振动方向垂直砂轮速度方向时的磨削力。

从图3中可以看到,在普通磨削条件下,当磨粒深度 $a_p = 15\mu\text{m/pass}$ 时,法向磨削力 $F_{n1} = 53.4\text{N}$,这一压力没能使材料发生脆性破坏。同时,在超声振动磨削中,当磨削深度 $a_p = 25\mu\text{m/pass}$ 时,法向磨削力 $F_{n2} = 49.8\text{N}$,在数值上 $F_{n2} < F_{n1}$,因此单纯从磨削力上分析,虽然在超声波振动磨削中磨削深度 a_p 值很大,但磨削力并不大,不会使材料发生脆性破坏。

在陶瓷材料的塑性精密磨削中,由于切向磨削力 F_t 在数值上较小,只有法向磨削力的 $1/3 - 1/4$,因此材料表面发生的应力破坏可以认为主要是由于法向磨削力 F_n 作用的结果。因此可以将应力破坏

简化成单粒磨粒压入工件表面产生的破坏,由压痕断裂力学分析,对于横向裂纹, $P \propto C_L^{5/8}$,对于中央/径向裂纹公式, $P \propto C_L^{3/2}$,其中 C_L 为裂纹长度。从而可知裂纹的长度、大小与正压力 P 值有着直接的关系。当压力足够小时,会出现裂纹的长度 C_L 等于磨粒直径的现象,这时没有脆性破坏现象出现,而是以塑性变形为主。磨削力的显著减少是超声加工增大延性磨削深度的主要原因^[5]。

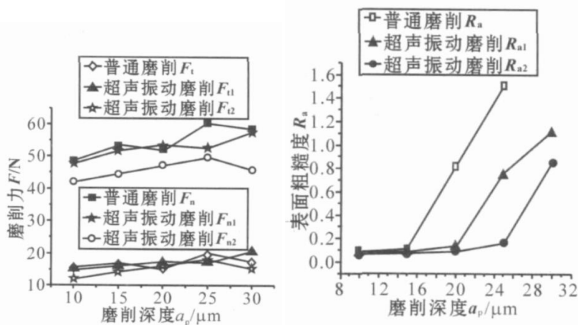


图3 磨削深度对磨削力的影响

图4 磨削深度对表面粗糙度 R_a 的影响

3.2 表面质量和临界磨削深度的关系

材料的加工精度,特别是表面质量在很大程度上直接影响到工件的使用性能。大的磨削深度又会带来一系列问题,比如出现表面质量下降,砂轮烧伤及工件表面烧伤等现象。就陶瓷材料而言,当加工表面的粗糙度过大,材料表面残留有加工裂纹时,在使用过程中极易造成应力集中现象,使原有裂纹在长度与深度方向继续发展,继而产生破坏。因此研究与加工效率直接相关的磨削深度对表面粗糙度的影响很有必要。

图4为磨削深度对表面粗糙度 R_a 的影响关系图,其中 R_{a1} 为超声波振动平行与砂轮速度方向的粗糙度值, R_{a2} 为超声波振动垂直于砂轮速度方向的粗糙度值。从图4中可以看出,随着磨削深度的增加,两种磨削方式表面粗糙度均有增大趋势,但在延性临界磨削深度内,其表面粗糙度上升得不是很快,超过临界磨削深度后表面粗糙度有显著增大,因此要想获得理想的表面质量,应该在延性磨削深度范围内对硬脆材料进行加工。在普通磨削深度为 $10\mu\text{m}/\text{pass}$ 时,此时为塑性磨削,其表面几乎没有破碎现象(见图5)。而在振动方向垂直砂轮速度方向的超声磨削中,当磨削深度为 $15\mu\text{m}/\text{pass}$ 时,其表面质量仍好于普通磨削。如图6所示,其表面为完全延性磨削状态,并且其沟痕比普通磨削宽,且深度比

普通磨削时浅。说明超声振动磨削有比普通磨削大得多的临界延性磨削深度,利用超声振动磨削能高效地获得精密加工表面。

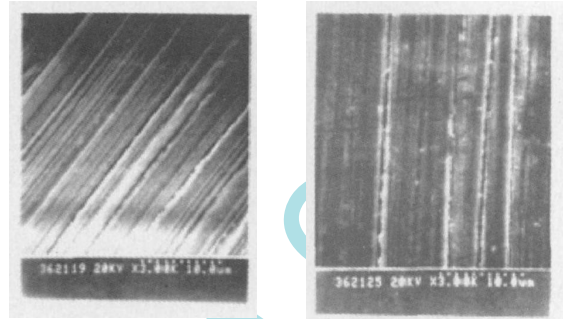


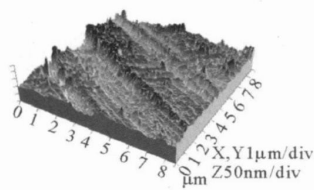
图5 普通磨削深度 $10\mu\text{m}/\text{pass}$ 时的表面 图6 振动方向垂直砂轮速度方向、 $15\mu\text{m}/\text{pass}$ 时的表面

图7为工件在同样加工参数下的普通和超声两种磨削状态三维AFM图。从图中可以看出,在超声加工状态下,工件表面的尖峰明显减少,表面沟槽均匀,工件完全处于延性磨削状态。而在普通加工状态下,工件表面尖峰明显,表面沟槽不均匀,工件表面局部还有破碎现象。图8为与图7相应的表面截面轮廓图,从图中更能清楚地看出工件表面的微观截面形貌。图8a波峰和波谷的最大距离为 75nm 左右,波峰之间的平均间距为 $2\mu\text{m}$ 左右,其表面粗糙度 R_a 为 65nm 左右;而在图8b中波峰和波谷的最大距离为 85nm 左右,波峰之间的平均间距为 300nm 左右,其表面粗糙度为 $0.1\mu\text{m}$ 左右,从而可以看出超声加工能显著改善表面质量,并能提高硬脆材料的临界延性磨削深度。

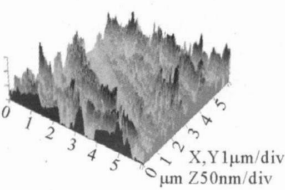
图9为不同振动方向超声波延性磨削试件精密表面的AFM图像,图中未发现诸如微裂纹和破碎等断裂的痕迹,可以明显看出磨削痕迹、切削刃微小切痕、晶粒边界台阶和微突起的全貌。图9a与图9b相比表面粗糙度略大,在试件表面上 Zr 粒子(经能谱仪分析证实)略为突出,颗粒边界较为明显,两种试件已加工表面均由延性磨削的塑性剪切机理形成。这些硬质颗粒边界的台阶是控制陶瓷晶体表面粗糙度的主要因素,在振动方向垂直于砂轮速度方向时,突出的硬颗粒较少,表面呈现微凹凸的变化。在图10中,可以看到这些硬颗粒的边界和台阶高度,在振动方向垂直于砂轮速度时,这些微突起被磨削刃划痕所覆盖,因而存在大量的微切痕。通过对表面形貌的三维AFM分析,可以认为超精密磨削表面粗糙度是由不同幅值的多种波形叠加的结果,这

些波形在磨粒划痕、切削刃微划痕上具有规律性,但在微观的晶粒边界台阶和微突起等方面又有细微差别,这些波形是控制已加工表面粗糙度的主要因素。

在超声振动作用下,比普通磨削小得多的切削力不仅使陶瓷的被加工表面局部产生破碎,且破碎仅出现在材料延性流动所隆起的部分,并不像普通磨削,破碎不仅产生在材料所隆起的部分,且大部分产生在犁沟的底部。此外超声磨削呈片状的切屑非常薄,破碎的凹坑非常浅,故同样条件下采用超声磨削会得到比普通磨削小得多的粗糙度值和延性域内随切深增大粗糙度没有明显改变的现象。这也是超声振动加工增加临界延性磨削深度的一个原因。

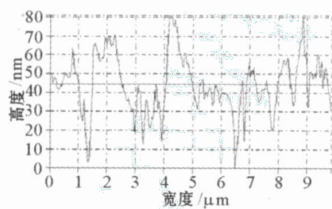


(a) 超声加工的表面形貌

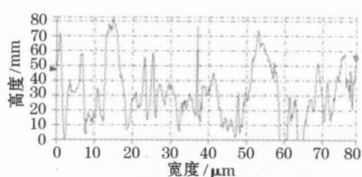


(b) 普通加工的表面形貌

图7 超声延性磨削及普通延性磨削纳米陶瓷表面的 AFM 三维照片

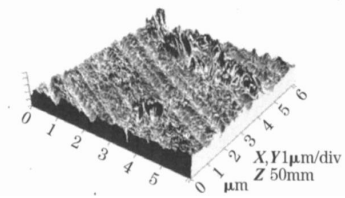


(a) 超声延性磨削的表面截面图

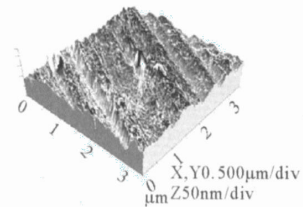


(b) 普通延性磨削的表面截面图

图8 超声延性磨削及普通延性磨削纳米陶瓷表面的截面轮廓图

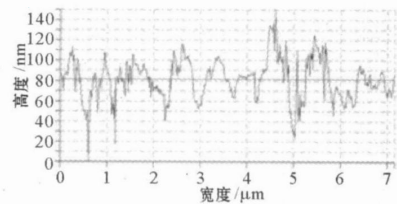


(a) 超声延性磨削的三维图像
振动平行砂轮速度方向

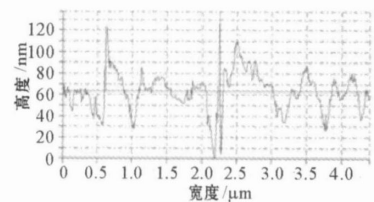


(b) 超声延性磨削的三维图像
振动垂直砂轮速度方向

图9 不同振动方向超声延性磨削纳米陶瓷表面的三维形貌图



(a) 图9a的截面轮廓图



(b) 图9b的截面轮廓图

图10 不同振动方向超声延性磨削纳米陶瓷表面的截面轮廓图

4 结语

(1) 超声振动加工能显著提高硬脆材料的临界延性磨削深度,其临界延性磨削深度和超声振动冲击速度有关,即由振动工具的频率和振幅决定。超声加工的高频振动能改变硬脆材料的裂纹扩展方向,使其来不及脆性破坏,继续以延性方式去除,这样就加大了材料的临界延性磨削深度并减少了磨削力,使得高效获得超精密表面成为可能。

(2) 通过试验分析得出纳米 ZrO_2 陶瓷在普通磨

基于刀具进让式进给数控加工技术的研究

孙业荣¹, 姚斌²

¹ 安徽科技学院; ² 厦门大学

摘要:通过分析常规数控加工中存在的问题,提出了一种刀具在进给方向上可进让式进给切削工件曲面轮廓的新工艺方法,建立了进让式进给切削数学模型,并从被加工工件的几何形状、切削过程中刀具受力情况及切削区的切削热释放情况等方面,具体分析了采用该方法对加工精度的改善情况,并给出了算法步骤。试验结果表明,新方法有利于减小工艺系统的变形,显著提高了工件的加工精度。

关键词:数控加工;进给运动;加工精度

中图分类号: TG707

文献标志码: A

Research on NC Machining Technology Based on Cutting Tool with Forward and Backward Motion

Sun Yerong, Yao Bin

Abstract: Based on analyzing problems that general NC machining process existed, this paper proposed a machining method of cutting tool forward and backward machining work piece in feed direction. The calculation model of cutting location was established, and the advantages of this process included a superior surface finish, low tool pressure and cutting heat released easily in the cutting section. Finally, experiments and data were shown. The advantages were illustrated by reducing deformation of machining complex and achieving higher machining precision.

Key words: numerical control machining; feeding motion; machining precision

1 引言

在常规的数控加工中,走刀步长短,意味着加工精度高,但会造成刀具轨迹线上刀位数据的密度大,

程序指令冗长,更重要的是在一般加工方式下,对一般运动精度的机床而言,小步长程序指令的执行会产生进给速度波动和平均速度下降,从而影响加工效率和表面质量。反之,大的走刀步长,意味着刀具轨迹线上刀位数据的密度小,加工效率高,但轮廓逼近精度降低,一阶不连续性使工件表面完整性恶化,后续处理工作量加大,整体效率降低^[1]。在常规的

基金项目:校引进人才科研启动资金项目(ZRC2008221)
收稿日期:2008年12月

削下的临界延性磨削深度为 $15\mu\text{m}$,在超声振动磨削下其临界延性磨削深度与施振方向有关:当振动方向垂直砂轮速度方向时其临界延性磨削深度约为 $25\mu\text{m}$,当振动方向平行砂轮速度方向时其临界延性磨削深度约为 $20\mu\text{m}$ 。

(3) 超过工件的临界磨削深度后,磨削力有下降趋势,而后出现剧烈跳动现象,因此在超过延性临界磨削深度后,其表面粗糙度将显著上升。由于超声振动有较大的延性临界磨削深度,故在要求同样的表面质量时,采用超声波振动加工将显著提高生产率。

参考文献

- [1] 刘传绍,赵波,高国富,焦锋.粗磨粒金刚石珩磨工程陶瓷的表面特征研究[J].工具技术,2000,34(5):11-14.
[2] Bifano T G, Dow T A, Scatter good R O. Ductile regime grind-

ing: A new technology for machining brittle materials[J]. ASME Journal of Engineering for Industry, 1991, 113: 184-189.

- [3] Ming Zhou, XJ Wang, B KA Ngoi, J G K Gan. Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration[J]. Materials Processing Technology, 2002: 243-251.
[4] K P Rajurkar, Z Y Wang, A Kuppattan. Micro removal of ceramic material (Al_2O_3) in the precision ultrasonic machining[J]. Precision Engineering, 1999(23): 73-78.
[5] 赵波,郑玉歌.超声珩磨难加工材料精密表面的高效特性研究[J].中国机械工程,1998,9(8):61-64.

第一作者:向道辉,博士,副教授,河南理工大学机械与动力工程学院,454000 河南省焦作市

First Author: Xiang Daohui, Doctor, Associate Professor, School of Mechanical and Power Engineering, Henan University of Technology, Jiaozuo, Henan 454000, China