

# 氧化锆陶瓷旋转超声加工脆塑转变特性研究

杨宇辉<sup>1</sup>, 陈海彬<sup>1</sup>, 马文举<sup>3</sup>, 赵恒<sup>2</sup>, 隆志力<sup>2</sup>

(1. 东莞理工学院 机械工程学院, 广东 东莞 523808; 2. 哈尔滨工业大学(深圳) 机电学院, 广东 深圳 518055; 3. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** **目的** 揭示旋转超声振动对硬脆材料脆塑转变特性及工艺参数对材料脆塑转变临界切削深度的影响规律。**方法** 以氧化锆陶瓷为研究对象, 在硬脆材料压痕断裂试验基础上, 从理论上分析了超声振动加工硬脆材料脆塑转变的临界条件, 并进行了纵向振动及纵扭共振形式的旋转超声振动划痕与普通划痕对比试验。**结果** 在相同试验条件下, 超声振动划痕较普通划痕有较高的材料脆塑转变临界切削深度。适当地增大超声能量, 纵扭共振比纵向振动具有更大的脆塑转变临界切削深度值; 而随着进给速度的增大, 纵向振动比纵扭共振具有更大的材料脆塑转变临界切削深度。**结论** 通过不同划痕条件的对比, 超声振动能有效提高氧化锆陶瓷的脆塑转变临界切削深度, 增大塑性域加工范围, 提高材料表面加工质量, 验证了理论分析的正确性。**关键词:** 氧化锆陶瓷; 旋转超声加工; 脆塑转变; 临界切削深度; 塑性域

中图分类号: TG506.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2020)04-0090-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.04.011

## Study of the Characteristics of Brittle-ductile Transition in Rotary Ultrasonic Machining of Zirconia Ceramics

YANG Yu-hui<sup>1</sup>, CHEN Hai-bin<sup>1</sup>, MA Wen-ju<sup>3</sup>, ZHAO Heng<sup>2</sup>, LONG Zhi-li<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

**ABSTRACT:** The work aims to reveal the brittle-ductile transition characteristics of rotating ultrasonic vibration on hard-brittle materials and the influence of processing parameter on the critical cutting depth of zirconia ceramics. Based on the fracture experiment, the critical condition of brittle-ductile transition of hard-brittle materials processing by rotary ultrasonic vibration

收稿日期: 2019-09-06; 修订日期: 2019-10-13

Received: 2019-09-06; Revised: 2019-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1713206); 深圳市学科布局基础研究项目(JCYJ20170413112645981, JCYJ20150928162432701); 东莞理工学院高层次人才科学研究基金(创新团队)(KCYCXPT2016004)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (U1713206); the Basic Research Project of Shenzhen Municipal Subject Layout (JCYJ20170413112645981 and JCYJ20150928162432701); Scientific Research Foundation of Advanced Talents (Innovation Team), DGUT (KCYCXPT2016004)

作者简介: 杨宇辉(1988—), 男, 硕士, 主要研究方向为超声特种加工技术、精密与微细加工技术。

Biography: YANG Yu-hui (1988—), Male, Master, Research focus: ultrasonic non-traditional machining technology, precision and microfabrication technology.

通讯作者: 隆志力(1976—), 男, 博士, 研究员, 博士研究生导师, 主要研究方向为超声波系统设计与控制、自动化装备振动控制。

邮箱: longworking@163.com

Corresponding author: LONG Zhi-li (1976—), Male, Doctor, Researcher, Doctoral supervisor, Research focus: design and control of ultrasonic system, vibration control of automation equipment. E-mail: longworking@163.com

引文格式: 杨宇辉, 陈海彬, 马文举, 等. 氧化锆陶瓷旋转超声加工脆塑转变特性研究[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 90-97.

YANG Yu-hui, CHEN Hai-bin, MA Wen-ju, et al. Study of the characteristics of brittle-ductile transition in rotary ultrasonic machining of zirconia ceramics[J]. Surface technology, 2020, 49(4): 90-97.

was analyzed theoretically, and the comparison testing between rotary ultrasonic vibration scratch and normal scratch was carried out. Under the same test conditions, compared with the critical cutting depth of brittle-ductile transition on normal scratch, ultrasonic vibration scratch has a higher value. The critical cutting depth of brittle-ductile transition can be effectively increased by increasing the ultrasonic energy, and the critical cutting depth of brittle-ductile transition in longitudinal-torsional resonance is higher than that in longitudinal vibration. However, the critical cutting depth of brittle-ductile transition in longitudinal vibration is greater than that in Longitudinal-torsional resonance, when the feed speed is increasing. By comparing different scratch conditions, the ultrasonic vibration can effectively improve the critical cutting depth of brittle-ductile transition, increase the machining range of ductile domain, and improve the surface quality of Zirconia Ceramics.

**KEY WORDS:** zirconia ceramics; rotary ultrasonic machining (RUM); brittle-ductile transition; critical depth of cut; ductile domain

工程陶瓷材料因具有高硬度、高强度、高耐磨性、高耐腐蚀性及良好的化学稳定性等优良特性,而被广泛地应用于生物医疗、能源装备、电子通讯、航空航天等领域<sup>[1]</sup>。但由于陶瓷材料具有硬度高、韧性差、断裂韧度低及弹性极限与强度非常接近等特点,使其加工性能差,传统加工技术手段难以加工或无法加工,在一定程度上限制了其应用。对比传统加工方式,旋转超声加工复合了磨削加工和传统超声加工,具有加工效率高、切削力小、加工质量高及刀具磨损小等优势,目前已被应用到工程陶瓷材料的高效加工中,其相关材料去除机理也成为各国学者研究的热点<sup>[2]</sup>。

为了获得较高的工程陶瓷加工表面质量及较低的亚表面损伤,国内外学者开展了工程陶瓷材料塑性域加工技术的研究,并通过引入超声振动辅助来改善其加工性能,增大其塑性域加工范围。Gan 等人<sup>[3]</sup>将超声振动施加于单晶金刚石刀尖上,实现了熔融石英的塑性加工,试验结果表明超声振动提高了材料脆塑转变临界切削深度。Suzuki 等人<sup>[4]</sup>在对玻璃、氧化锆陶瓷及硬质合金进行二维超声振动时,发现已加工表面没有产生裂纹,材料皆以塑性去除方式去除。吴雁等人<sup>[5]</sup>基于压痕断裂力学,给出了微纳复合陶瓷超声振动磨削的脆塑转变临界条件,并进行了超声振动磨削与普通磨削对比试验,着重研究了磨削参数对材料脆塑转变特性的影响。郑建新等人<sup>[6]</sup>从以压痕断裂力学理论为基础建立的陶瓷材料延性域磨削加工数学模型入手,探讨了陶瓷材料延性域超声磨削机理,给出了延性域超声磨削的临界条件,并进行了氧化锆陶瓷加工试验。Cao 等人<sup>[7]</sup>利用超声振动辅助磨削碳化硅陶瓷来对材料脆塑转变行为进行试验研究,发现超声振动有利于材料的去除,但在脆塑转变过程中磨削能量出现降低。马廉洁等人<sup>[8]</sup>通过引入两个延性域系数,建立了延脆性域两个临界磨削深度模型,并开展了微晶玻璃陶瓷磨削试验,得到了工程陶瓷加工表面临界条件的规律。

工程陶瓷材料的超声加工相对于普通切削加工具有很多不可比拟的优势。目前,国内外对工程陶瓷材料超声振动加工技术的研究主要集中在材料脆塑

去除机理、工艺参数对已加工表面质量的影响等方面,而在不同的旋转超声加工模式下,工艺参数对材料的脆塑转变临界切削深度的影响规律及相关的材料脆塑转变特性等方面的报道较少。本文根据能量假说的观点,结合旋转超声振动加工特性,分析切削深度对陶瓷等硬脆材料脆塑转变特性的影响,并基于显微压痕试验法,给出超声振动条件下的硬脆材料脆塑转变临界条件。以氧化锆陶瓷为研究对象,通过开展普通切削划痕、纵向旋转超声振动划痕及纵扭共振旋转超声振动划痕的对比试验研究,分析不同加工模式下工艺参数对材料脆塑转变临界切削深度的影响。

## 1 脆塑转变机理及临界条件

### 1.1 切削深度对材料脆塑转变特性的影响

通过切削加工试验发现,在不同的切削深度下,硬脆材料加工时表面会呈现塑性去除、脆塑混合及脆性去除等三种不同的状态,如图 1 所示。当切削深度小于一定值时,此时材料以塑性变形的形式被去除,加工表面没有产生脆性裂纹,随着切削深度的增加,已加工表面开始出现裂纹,当切削深度大到一定程度后,材料将彻底以脆性断裂形式去除<sup>[9]</sup>。

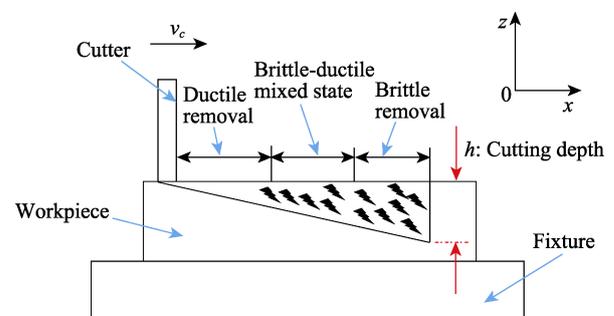


图 1 切削深度对材料去除方式的影响

Fig.1 The effect of cutting depth on material removal mode

根据能量假说<sup>[10]</sup>的观点,硬脆材料在加工过程中发生脆性去除或塑性去除,主要取决于材料发生塑性去除所需的变形能与脆性去除所需的断裂能中哪一

个被首先满足,且材料所需要的变形能  $E_p$  及断裂能  $E_b$  与切削深度  $h$  具有如下关系:

$$E_p = \sigma_s h^3 \quad (1)$$

$$E_b = G_b h^2 \quad (2)$$

式中:  $\sigma_s$  为材料屈服强度,表示材料的抗塑性变形能力;  $G_b$  为材料裂纹扩展系数,表示材料的抗断裂能力。

由公式(1)、公式(2)可得:

$$\frac{E_p}{E_b} \propto h \quad (3)$$

由公式(3)可知,硬脆材料切削加工时产生塑性变形所需的能量和产生脆性变形所需的能量的比值与切削深度成正比。从能量耗散角度来看,切削深度较小时,塑性去除材料这种方式耗能更少,塑性变形优于脆性断裂,这说明刀具切入工件的深度是影响硬脆材料脆塑转变特性的关键因素。

## 1.2 脆塑转变临界切削深度模型

为了分析载荷作用下硬脆材料的断裂机理,应用显微压痕试验法,基于压痕断裂力学理论建立了硬脆材料不产生裂纹时的临界切削深度数学模型<sup>[10-11]</sup>为:

$$h_c = \frac{ER}{H^2} \quad (4)$$

式中:  $E$  为材料的弹性模量,MPa;  $R$  为材料的断裂能量, J;  $H$  为材料的硬度,MPa。

在静态下缓慢加载,当材料发生断裂时,有:

$$R \propto K_c^2 / H \quad (5)$$

式中:  $K_c$  为材料的静态断裂韧性。

由式(4)、(5)可得:

$$h_c \propto \left(\frac{E}{H}\right) \cdot \left(\frac{K_c}{H}\right)^2 \quad (6)$$

硬脆材料表面的裂纹数少于10%,综合考虑到金刚石压头几何形状对材料脆塑转变临界切削深度的影响,则材料的脆塑转变临界切削深度<sup>[12]</sup>须满足:

$$h_c = \psi \cot(\alpha/2) \sqrt{\frac{2\lambda}{\beta}} \left(\frac{K_c}{H}\right)^2 \quad (7)$$

式中:  $\psi$  为无量纲参数,其确定取决于加工参数、机床性能等试验条件;  $\alpha$  为理想金刚石压头的顶角;  $\lambda$  为综合系数;  $\beta$  为与压头几何形状相关的因子。

根据 George 等人<sup>[13-14]</sup>对硬脆材料在平衡载荷作用下的断裂机理的压痕试验研究结果,有:

$$P_c = \lambda \cdot K_c \cdot \left(\frac{K_c}{H}\right)^3 \quad (8)$$

式中:  $P_c$  为临界压载荷, N。

由式(7)、(8)可得材料的脆塑临界切削深度  $h_c$  与临界压载荷  $P_c$  的关系式:

$$h_c = \psi \cot(\alpha/2) \lambda^{-\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{2}{\beta}} H^4 P_c^2 \quad (9)$$

## 1.3 超声振动对临界切削深度的影响

实际切削加工运动是旋转运动、进给运动等多种运动模式复合的动态结果,而第1.2节中的静态断裂韧性  $K_c$  是基于静态条件下获得的,故所计算得到的材料脆塑转变临界切削深度  $h_c$  也仅适用于静态条件下的切削加工运动。根据 Kalthoff 等<sup>[15-16]</sup>对冲击载荷下动态断裂韧性的深入研究表明,对于陶瓷等硬脆材料,其动态断裂韧性会随着载荷加载速率的增加而降低,显然用静态断裂韧性来研究动态裂纹起始规律是不能正确反映材料在冲击载荷作用下的动态断裂特性。由于切削加工恰好会在刀具与工件接触瞬间产生较大的冲击作用,因此要正确反映硬脆材料的切削加工过程,必须考虑动态冲击载荷的影响。

由于切削加工过程是多种运动模式综合影响的结果,受刀具几何形状、机床性能、冷却条件等的影响较大,其切削过程十分复杂,并且刀具作用于工件表面的动态冲击载荷方向不垂直于工件表面,其动态冲击载荷时刻变化,故无法正确获得。因此,只能用  $h_c$  来定性分析硬脆材料的脆塑转变特性。

相对于普通切削,超声振动会降低材料的断裂韧性,更容易萌生切削裂纹和成屑,有利于降低切削力并取得较好的材料表面质量<sup>[17]</sup>。由式(9)可知,在相同的切削力条件下,超声振动加工较普通切削加工具有更大的材料脆塑转变临界切削深度,进一步表明了在一定程度上超声振动的施加可抑制切削过程中材料由塑性去除向脆性断裂转变的趋势,提高材料临界切削深度,增大了塑性域加工范围,同时也提高了材料去除率及加工表面质量。

## 2 试验条件与方案

### 2.1 试验条件

采用单因素试验法,利用金刚石压头划痕方式来分析普通切削、纵向超声振动以及纵扭复合超声振动等三种划痕模式条件下,进给速度及超声能量单一变量对氧化锆陶瓷脆塑转变临界切削深度的影响规律。对于主轴转速试验取值选取,根据文献<sup>[18-19]</sup>可知,在切削加工过程中,切削力及表面粗糙度均随着主轴转速的增大而减小,变化趋势缓慢渐趋于平稳状态,这说明合适的主轴转速取值有利于降低加工切削力及材料表面粗糙度。由于过大的主轴转速会增大机床工作的负荷,增加加工成本,不利于实际的生产加工应用,因而本试验综合生产实际和部分参考文献,主轴转速选取为 18 000 r/min。

划痕单因素试验分 10 组,每组试验 2 次,最终结果取平均值。本试验条件如表 1 所示,工艺试验参数取值如表 2 所示。

表 1 试验条件  
Tab.1 Experimental conditions

Category	Content
Experiment material	Specimen dimensions of ZrO <sub>2</sub> : 100 mm×100 mm×5 mm
Experiment machine	B-600A-BCNC engraving and milling machine of Taikan: Spindle speed 0~40 000 r/min, feed speed 0~10 000 mm/min, positional accuracy ±0.008 mm
Ultrasonic generator	Universal series of YC-UTG, YC in Dongguan: Maximum power 100 W, frequency range 15~33 kHz, automatic frequency sweep and frequency tracking
Ultrasonic tool	Series of YC-HSK32E (working frequency 22~30 kHz): YC-HSK32E-L (Longitudinal), ultrasonic amplitude 1~10 μm, YC-HSK32E-LT (longitudinal-torsional, with chute structure of ultrasonic transducer), ultrasonic amplitude 1~10 μm, ratio of longitudinal-torsional conversion about 1/3
Cutting tool	HV-5 vikers diamond indenter, with apex angle 136°
Detection system	(1) OLS4000LSCM (OLYMPUS, Japan): Double confocal optical system, 1~8x optical zoom and digital zoom, mobile resolution reached 10 nm, (2) Kistler 9257B three-way dynamometer
Scratch way	Plane linear cutting, cooling with emulsion

表 2 工艺试验参数表  
Tab.2 Table of process experimental parameters

No.	Ultrasonic energy P/%	Feed speed V <sub>c</sub> /(mm·min <sup>-1</sup> )	Spindle speed n/(r·min <sup>-1</sup> )
1	30, 40, 50, 60, 70	30	18 000
2	50	10, 20, 30, 40, 50	

## 2.2 试验方案

试验过程中，通过更换超声波刀柄完成纵向振动划痕及纵扭振动划痕试验。普通切削与超声振动切削在同一加工系统中完成，两者工作模式的切换通过开关超声波电源来实现。

将打磨抛光过的氧化锆陶瓷试件，通过夹具固定在台群雕铣机 T 型工作台上，采用精度为 1 μm 的千

分表调平，试件待加工面平面度误差为 2 μm。通过数控编程，在 z 轴方向上模拟 0~30 μm 切削深度线性变化，沿 x 轴方向划痕长度为 20 mm，每条划痕间隙为 5 mm。在划痕试验中，由于 y 轴方向保持不变，测力仪 y 轴方向受力小且变化小，在分析时不作考虑。氧化锆陶瓷变切深加工试验方案示意图 2 所示。

为了便于试验后对氧化锆陶瓷的脆塑转变现象及临界切削深度进行观察测量，须在划痕试验后对试件表面进行超声波清洗并加热烘干。采用 OLS4000 激光共聚焦显微镜沿着划痕进给方向，观察氧化锆陶瓷加工表面的微观形貌，当发现试件表面出现脆性去除现象时，以出现脆性断裂现象的位置为观测点，测量所在位置与试件未加工表面的高度值，以此作为该组加工参数条件下的脆塑转变临界切削深度值。

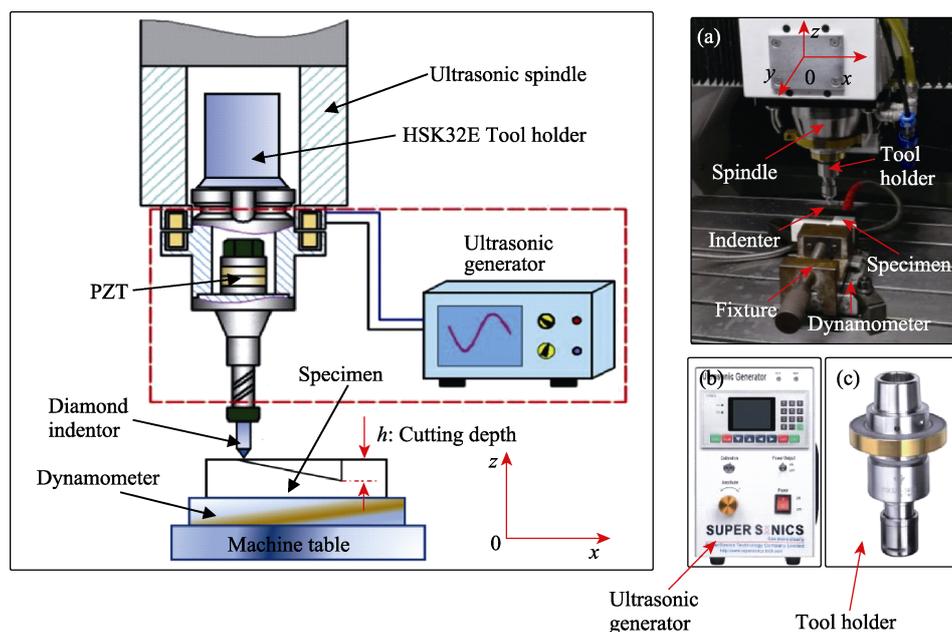


图 2 划痕试验装置  
Fig.2 Scratch test device

### 3 结果与分析

#### 3.1 工艺参数对脆塑脆塑转变临界切削深度的影响

图3为氧化锆陶瓷材料脆塑转变临界切削深度、切削力与超声能量大小的关系。由图3a可知,试验参数取值范围内,提高超声能量的输出,对材料脆塑转变临界切削深度,普通划痕不受超声能量影响为恒值,即材料脆塑转变临界切削深度为恒值,纵扭共振划痕与纵向振动划痕均呈现先增大后逐步减小的趋势,且超声振动划痕的脆塑转变临界切削深度整体上大于普通划痕。同时由公式(9)可知,此时普通划痕时刀具所受到的切削力大于超声振动划痕时的切削力,这与图3b试验结果相符。相比普通划痕,超声振动划痕的动态切削力较小,这说明在相同动态冲击载荷下,超声振动能获得比普通切削更大的脆塑转变临界切削深度,这与图3a的结果是对应的,验证了上述理论分析的正确性。

从图3a还可知,超声能量输出为40%~50%时,纵向振动及纵扭共振划痕的脆塑转变临界切削深度出现最大值,之后均开始降低,这说明超声能量适当增大能提高材料脆塑转变临界切削深度值,有利于材料的高效率塑性加工,但超声能量超过一定值后继续

增大,反而降低了材料脆塑转变临界切削深度值。这是因为过大的超声能量输出,导致超声高频冲击材料的效果明显,在较小切削深度下材料出现裂纹生长并加速扩展破碎,由塑性加工为主转变为脆性去除加工为主,此时反而降低了材料脆塑转变临界切削深度。

从图3b还可得知,随着超声能量的提高,纵扭共振划痕时刀具所受到的切削力均低于纵向振动划痕,这说明在纵扭共振划痕模式下,切削力受超声能量变化的影响较纵向振动划痕敏感。根据公式(9)理论分析可知,此时纵扭共振划痕在超声能量影响下,其材料脆塑转变临界切削深度要大于纵向振动划痕,这与图3a揭示的结果一致。主要原因是在相同的超声能量及振幅条件下,纵扭共振超声变幅杆采用斜槽式结构将部分纵向振动转换为扭转振动,纵向振动效应较单一模式的纵向振动要弱,刀具垂直锤击工件表面所导致的径向裂纹相对较少,所得到的工件表面质量较好。扭转振动高频间断的冲击使得进给方向上的材料更容易去除,刀具所受到的切削抗力也更小,因而纵扭共振所受到的动态载荷小于纵向振动。相对纵向超声振动加工,纵扭共振超声加工更能有效提高材料脆塑转变临界切削深度,具有显著的加工优势,单次塑性去除材料的体积大,能有效提高工件材料的加工效率及表面质量。

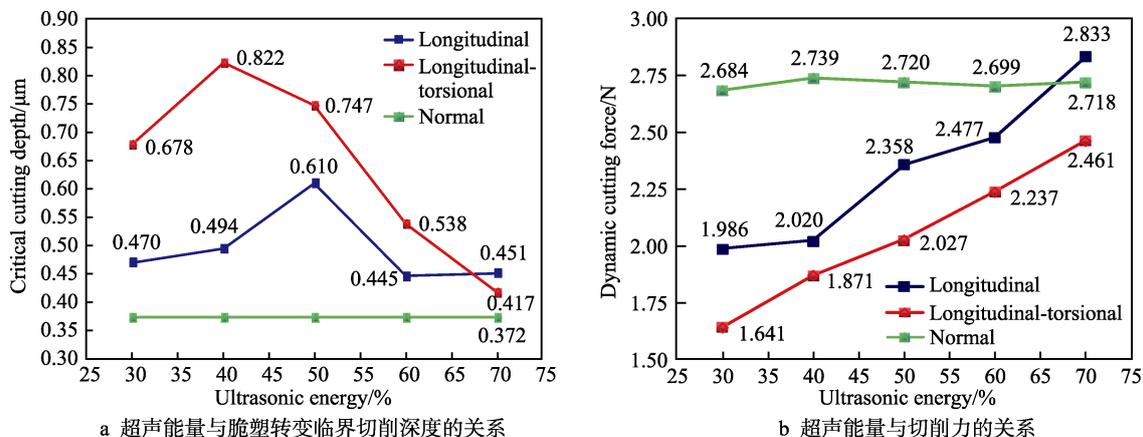


图3 超声能量对脆塑转变临界切削深度的影响 ( $n=18\ 000\ \text{r/min}$ ,  $V_c=30\ \text{mm/min}$ )

Fig.3 Effect of ultrasonic energy on critical cutting depth of brittle-ductile transition

图4为不同加工模式下氧化锆陶瓷材料脆塑转变临界切削深度随进给速度变化的对比。由图4a可知,在试验参数取值范围内,进给速度的提高,普通划痕、纵向振动划痕及纵扭共振划痕下,材料脆塑转变临界切削深度均呈现整体增大的趋势,但普通划痕的增大缓慢且渐趋于平稳,超声振动划痕的临界切削深度大于普通划痕的临界切削深度。从图4b可看出,超声振动划痕时,刀具随进给速度的增大,所受到的切削抗力整体上较普通划痕的小,这说明超声振动能有效减小切削力。由公式(9)理论分析可知,超声振动时切削力的减小,在一定程度上提高了材料的脆塑转变临界切削深度,增大塑性域加工范围,所得到

的结论与图4a试验结果相符。

此外,对于材料脆塑转变临界切削深度和切削力,纵向振动划痕均大于纵扭共振。这是由于进给速度的增大,使得单位时间内材料去除率提高,此时刀具与工件间的高频切入切出在一定程度上会被抑制,超声振动效果会减弱,在相同试验条件下,斜槽式结构的纵扭共振超声刀柄会将部分超声振动能量转化为扭转机械振动,而这部分的机械振动由于较大的进给速度,会在一定程度上被抑制减弱,纵扭共振超声振动中的纵向振动分量相较于纵向振动划痕的要弱,在纵向方向上提升脆塑转变临界切削深度值的效果不如单纯是纵向振动划痕的,故纵向振动划痕的脆塑

转变临界切削深度值大于纵扭共振划痕。塑性域加工范围增大，意味着刀具受到的塑性变形抗力较大，故刀具所受到的切削力大于纵扭共振划痕。

### 3.2 旋转超声划痕与普通划痕的加工效果对比

图 5、图 6 及图 7 分别为超声能量输出为 40%、50%、60% 时，不同加工模式下材料脆塑转变切削深度临界区域及材料表面形貌对比。

由图 5 可知，在相同工艺参数下，较普通划痕方式，旋转超声划痕出现脆性去除时的切削深度临界区域位置比较靠后，说明旋转超声加工可以显著提高材料脆塑转变临界切削深度。通过比较图 5b 和图 5c 可知，材料脆塑转变临界切削深度在纵扭共振划痕方式

下对超声能量的变化较纵向振动划痕的敏感，更加有利于提高材料脆塑转变临界切削深度。

由图 5 与图 6、图 7 对比可知，当超声能量增大超过一定程度时，超声划痕与普通划痕方式均较早出现了表面脆性去除现象，零散破碎的区域逐渐增多且愈发集中，材料表面质量出现恶化趋势，超声振动提高材料的脆塑转变临界切削深度的效果正在减弱。对比图 6 与图 7 可知，超声能量增大时，纵扭共振划痕的材料表面形貌较纵向振动划痕的均匀平整，划痕前部分塑性变形区域及脆性去除现象集中，纵向振动划痕的材料表面脆性去除区域出现较早，相对分散，材料表面也溃烂严重。

图 8 为不同进给速度对材料表面形貌的影响对比。由图 8 可知，进给速度较小时，不同划痕方式下，

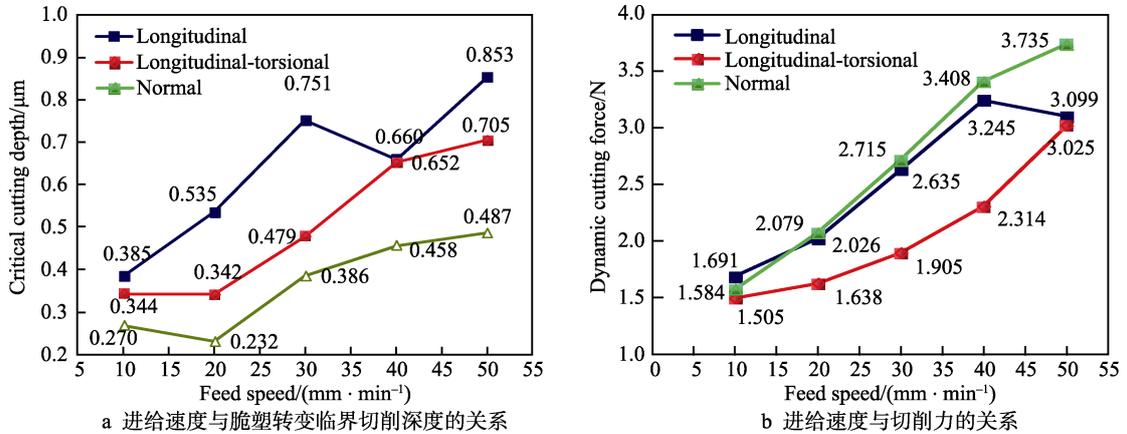


图 4 进给速度对脆塑转变临界切削深度的影响 ( $P=50\%$ ,  $n=18\ 000\ \text{r/min}$ )  
Fig.4 Effect of feed speed on critical cutting depth of brittle-ductile transition

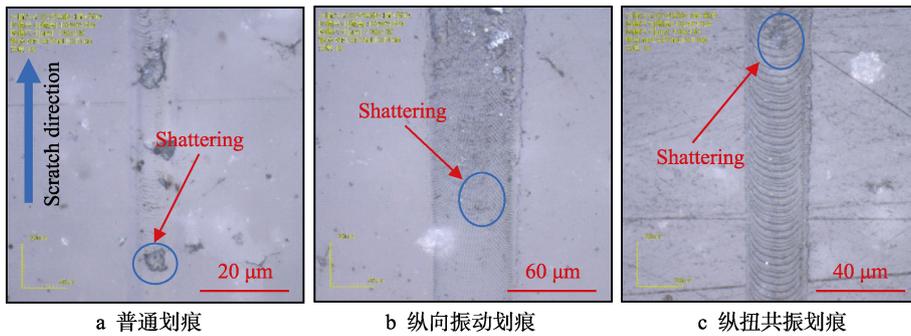


图 5 材料脆塑转变切削深度临界区域及表面形貌对比 ( $n=18\ 000\ \text{r/min}$ ,  $V_c=30\ \text{mm/min}$ ,  $P=40\%$ )  
Fig.5 Contrast of critical zones of cutting depth for brittle-ductile transition and surface morphology of  $\text{ZrO}_2$

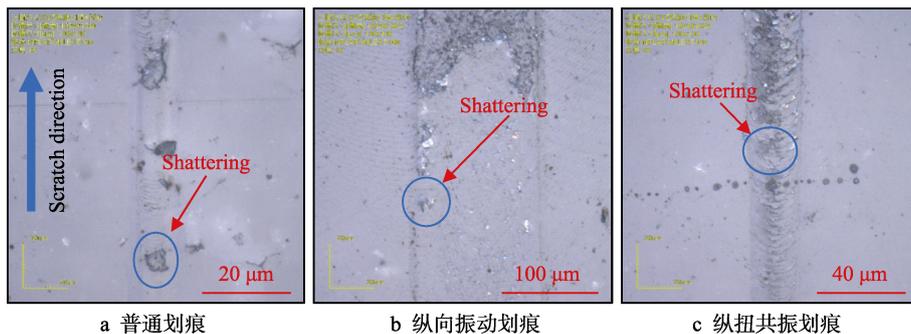


图 6 材料脆塑转变切削深度临界区域及表面形貌对比 ( $n=18\ 000\ \text{r/min}$ ,  $V_c=30\ \text{mm/min}$ ,  $P=50\%$ )  
Fig.6 Contrast of critical zones of cutting depth for brittle-ductile transition and surface morphology of  $\text{ZrO}_2$

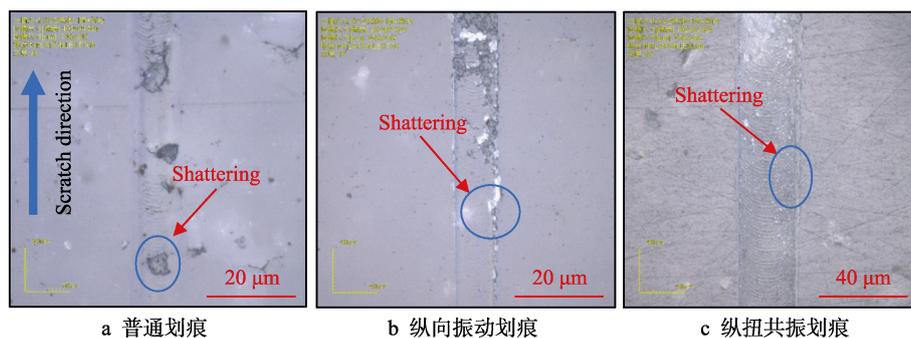


图7 材料脆塑转变切削深度临界区域及表面形貌对比 ( $n=18\ 000\ \text{r/min}$ ,  $V_c=30\ \text{mm/min}$ ,  $P=60\%$ )  
Fig.7 Contrast of critical zones of cutting depth for brittle-ductile transition and surface morphology of  $\text{ZrO}_2$

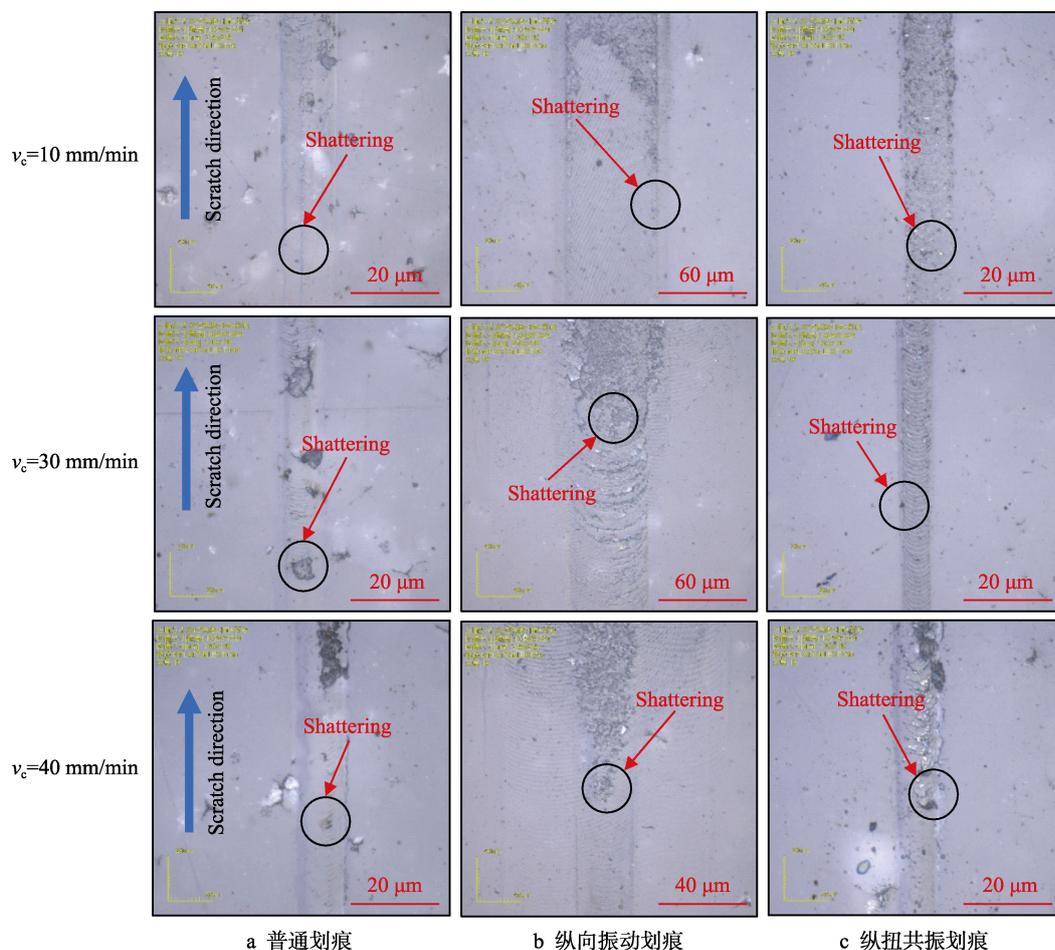


图8 不同进给速度对材料表面形貌的影响 ( $P=50\%$ ,  $n=18\ 000\ \text{r/min}$ )  
Fig.8 Effect of feed speed on surface morphology

材料脆塑转变切削深度临界区域所处划痕位置基本一致,随着进给速度的增大,其切削深度临界区域位置均出现了后延,即受进给速度增大的影响,旋转超声划痕与普通划痕下材料脆塑转变临界切削深度均增大。较普通划痕方式,旋转超声划痕方式出现脆性去除时的切削深度临界区域位置相对靠后,说明较普通切削加工,旋转超声加工可有效提高陶瓷材料脆塑转变临界切削深度。

对比图8所示材料表面形貌,普通划痕的材料

表面较早出现了分散的脆性去除斑点,材料表面塑性变形区域小。但对于旋转超声划痕,材料表面划痕较深时才开始出现大块材料脆性破碎去除,且溃烂区域集中,划痕前部分痕迹较为平整均匀,材料因受挤压,热塑性变形区域大。这说明在合理的进给速度取值范围内,陶瓷材料脆塑转变临界切削深度值会随进给速度的增大有一定程度上的提高,超声振动有利于提高材料脆塑转变临界切削深度,扩大了塑性域范围。

## 4 结论

1) 刀具切入工件的深度是影响氧化锆陶瓷等硬脆材料脆塑转变特性的关键因素。

2) 超声振动加工较普通切削加工具有更大的脆塑转变临界切削深度, 能增大材料的塑性域加工范围, 提高材料去除率及加工表面质量, 验证了理论分析的正确性。

3) 随着超声能量的提高, 纵扭共振加工比纵向振动加工更能提高材料脆塑转变临界切削深度。此外, 过大的超声能量输出, 不利于提高材料的脆塑转变临界切削深度。受进给速度提高的影响, 纵向振动加工比纵扭共振加工更具塑性域加工优势。

4) 相同试验条件下, 较普通划痕方式, 旋转超声划痕材料初始出现脆性去除现象的位置相对靠后, 材料表面脆性去除区域集中, 划痕前部分塑性变形明显。

### 参考文献:

- [1] 房善想, 赵慧玲, 张勤俭. 超声加工技术的应用现状及其发展趋势[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 22-32.  
FANG Shan-xiang, ZHAO Hui-ling, ZHANG Qin-jian. The application status and development trends of ultrasonic machining technology[J]. Journal of mechanical engineering, 2017, 53(19): 22-32.
- [2] 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, 53(19): 17-35.  
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, 53(19): 3-21.
- [3] GAN J, WANG X, ZHOU M, et al. Ultraprecision diamond turning of glass with ultrasonic vibration[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2003, 21(12): 952-955.
- [4] SUZUKI N, NAKAMURA A, SHAMOTO E, et al. Ultra-precision micromachining of hardened steel by applying ultrasonic elliptical vibration cutting[C]//Proceedings of 2003 international symposium on IEEE. Human: IEEE, 2003: 221-226.
- [5] 吴雁, 孙爱国, 朱训生, 等. 微-纳米复合陶瓷超声振动磨削的塑性-脆性转变特征研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2007, 39(1): 113-117.  
WU Yan, SUN Ai-guo, ZHU Xun-sheng, et al. Brittle-ductile transition of micro-nano composite ceramics using ultrasonic vibration grinding[J]. Journal of Sichuan University (engineering science edition), 2007, 39(1): 113-117.
- [6] 郑建新, 徐家文, 吕正兵. 陶瓷材料延性域磨削机理[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(1): 102-106.  
ZHENG Jian-xin, XU Jia-wen, LYU Zheng-bing. Grinding mechanism of ceramics in the ductile regime[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006, 34(1): 102-106.
- [7] CAO J, NIE M, LIU Y, et al. Ductile-brittle transition behavior in the ultrasonic vibration-assisted internal grinding of silicon carbide ceramics[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2018, 96(9-12): 3251-3262.
- [8] 马廉洁, 巩亚东, 顾立晨, 等. 可加工微晶玻璃陶瓷磨削表面成形机制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(15): 201-207.  
MA Lian-jie, GONG Ya-dong, GU Li-chen, et al. Mechanism of surface forming in grinding machinable glass ceramics[J]. Journal of mechanical engineering, 2017, 53(15): 201-207.
- [9] PEI Z J, FERREIRA P M, HASELKORN M. Plastic flow in rotary ultrasonic machining of ceramics[J]. Journal of materials processing technology, 1995, 48(1): 771-777.
- [10] BIFANO T G, DOW T A, SCATTERGOOD R O. Ductile-regime grinding: A new technology for machining brittle materials[J]. Journal of engineering for industry, 1991, 113(2): 184-189.
- [11] ARIF M, XINQUAN Z, RAHMAN M, et al. A predictive model of the critical undeformed chip thickness for ductile-brittle transition in nano-machining of brittle materials[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2013, 64: 114-122.
- [12] CHEN M, ZHAO Q, DONG S, et al. The critical conditions of brittle-ductile transition and the factors influencing the surface quality of brittle materials in ultra-precision grinding[J]. Journal of materials processing technology, 2005, 168(1): 75-82.
- [13] GEORGE J, PETER G. Microindentation analysis of diammonium hydrogen citrate single crystals[J]. Journal of materials science, 1985, 20(9): 3150-3156.
- [14] LAWN B R, EVANS A G, MARSHALL D B. Elastic/plastic indentation damage in ceramics: The median/radial crack system[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1980, 63(9-10): 574-581.
- [15] KALTHOFF J F, BÜRCEL A. Influence of loading rate on shear fracture toughness for failure mode transition[J]. International journal of impact engineering, 2004, 30(8-9): 957-971.
- [16] PLUVINAGE G, LEBIENVENU M. Dynamic fracture toughness: Specificity and particular aspects[J]. Journal of Ningbo University (natural science & engineering edition), 2003, 16(4): 325-335.
- [17] 佟富强, 张勇, 张飞虎, 等. 振动切削中应力波对裂纹及成屑机理影响研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(6): 136-139.  
TONG Fu-qiang, ZHANG Yong, ZHANG Fei-hu, et al. Influence of stress fluctuation in vibrating cutting on crack creation and chip formation[J]. Journal of vibration and shock, 2008, 27(6): 136-139.
- [18] 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, 539(1): 23-25.  
ZHANG Neng, WEI Xin, WANG Yong-chao, et al. Experimental study on grinding force of engineering ceramics by ultrasonic vibration grinding[J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2019, 539(1): 23-35.
- [19] 闫艳燕, 栗成杰, 赵波, 等. 二维超声磨削纳米氧化锆陶瓷的磨削力特性研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(11): 1270-1274.  
YAN Yan-yan, LI Cheng-jie, ZHAO Bo, et al. Research on grinding force of two dimensional ultrasonic grinding for nano-ZrO<sub>2</sub> ceramics[J]. China mechanical engineering, 2008, 19(11): 1270-1274.