

旋转超声磨削氧化锆陶瓷孔的质量控制研究

李颂华^{1,2}, 马超¹, 孙健¹

(1.沈阳建筑大学 机械工程学院, 沈阳 110168;

2.高档石材数控加工装备与技术国家地方联合工程实验室, 沈阳 110168)

摘要: **目的** 确定在旋转超声磨削加工下使氧化锆陶瓷出孔端面崩边面积最小时的最优磨削参数, 并证明在工件底部加辅助支撑抑制崩边策略的合理性, 为实际生产提供理论指导。**方法** 以出孔端面崩边面积与加工后理想孔面积之比 H_d 值作为出孔质量评价指标。首先对氧化锆陶瓷进行孔磨削正交实验, 实验设置为三因素四水平, 因素分别为主轴转速、进给速度及超声波振幅, 得到各因素对 H_d 值的影响趋势及初步预测最优磨削参数组合; 其次利用单因素实验, 进一步分析各因素对 H_d 值的影响及确定最优的磨削参数范围; 最后通过在工件底部加辅助支撑来进一步降低 H_d 值。**结果** 通过实验得到最优的加工参数范围, 主轴转速为 15 000~17 000 r/min, 进给速度为 0.5~0.6 mm/min, 超声波振幅为 6~8 μm 时, 可将 H_d 值控制在 3.308×10^{-3} 以内。采用辅助支撑后, H_d 值最多可再降低 11.83%。**结论** 旋转超声磨削加工下, 氧化锆陶瓷出孔 H_d 值随主轴转速、进给速度和超声波振幅的增加呈先减小、后增大的趋势, 在保证进给速度最优时, 适当提高主轴转速及超声波振幅有助于提高出孔表面质量, 并可提高加工效率。采用在工件下方加辅助支撑的策略, 能有效降低出孔端面崩边面积, 并从理论和实验上证明其可行性。

关键词: 氧化锆陶瓷; 超声磨削; 孔崩边; 崩边抑制; 质量控制

中图分类号: TG580.6; TH145.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)11-0354-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.11.038

Research on Quality Control of Rotary Ultrasonic Grinding of Zirconia Ceramic Hole

LI Song-hua^{1,2}, MA Chao¹, SUN Jian¹

(1.School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2.National-Local Joint Engineering Laboratory of NC Machining Equipment and Technology of High-Grade Stone, Shenyang 110168, China)

ABSTRACT: This paper aims to determine the optimal grinding parameters when minimizing the edge chipping area of the zirconia ceramic exited hole under rotary ultrasonic grinding, and prove the rationality of the strategy of suppressing chipping with auxiliary supported at the bottom of the workpiece, provide theoretical guidance for actual production. The hole quality evaluation index was the ratio H_d value of the hole edge collapse area to the ideal hole area after processing. Firstly, the

收稿日期: 2021-01-29; 修订日期: 2021-03-08

Received: 2021-01-29; Revised: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金 (51975388); 辽宁省自然科学基金 (2019-MS-266, 2019-ZD-0666, 2020-BS-159); 辽宁省百千万人才工程资助计划 (2018921009)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51975388); Natural Science Foundation of Liaoning Province of China (2019-MS-266, 2019-ZD-0666, 2020-BS-159); Liaoning BaiQianWan Talents Program (2018921009)

作者简介: 李颂华 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密与超精密加工技术。

Biography: LI Song-hua (1977—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision and ultraprecision machining technology.

引文格式: 李颂华, 马超, 孙健. 旋转超声磨削氧化锆陶瓷孔的质量控制研究[J]. 表面技术, 2021, 50(11): 354-361.

LI Song-hua, MA Chao, SUN Jian. Research on quality control of rotary ultrasonic grinding of zirconia ceramic hole[J]. Surface technology, 2021, 50(11): 354-361.

orthogonal experiment of hole grinding for zirconia ceramics were carried out. The experiment was set to three factors and four levels. The factors were spindle speed, feed speed and ultrasonic amplitude. The influence trend of each factor on H_d value was obtained and the optimal grinding was predicted parameter combination; Secondly, single-factor experiments were used to further analyzed the influence of each factor on the H_d value and determine the optimal grinding parameter range. Finally, auxiliary supports were added to the bottom of the workpiece to further reduce the H_d value. The optimal processing parameter range obtained through experiments, the spindle speed was 15 000~17 000 r/min, the feed speed was 0.5~0.6 mm/min, and the ultrasonic amplitude was 6~8 μm , the H_d value can be controlled at 3.308×10^{-3} within. After using auxiliary support, the H_d value can be reduced by up to 11.83%. The hole H_d value of zirconia ceramics under rotary ultrasonic grinding decreases firstly and then increases with the increase of spindle speed, feed rate and ultrasonic amplitude. When ensuring the optimal feed speed, increase the spindle speed and ultrasonic amplitude appropriately It is helpful to improve the surface quality of the hole and increase the processing efficiency. The strategy of adding auxiliary support under the workpiece can effectively reduce the area of the edge of the hole, and prove its feasibility from the theory and experiment.

KEY WORDS: zirconia ceramics; ultrasonic grinding; hole collapse; edge collapse suppression; quality control

随着光学、电子学、医学、生物技术、航空航天等领域前沿技术的发展,工程陶瓷因其具有高硬度、高强度、低密度、耐磨损、耐腐蚀、绝缘性好和热膨胀系数小等诸多优点^[1-2],已广泛应用于制造轴承、密封环、涡轮叶片、航天器喷嘴等场合。然而作为典型的硬脆材料,因其高脆性及低断裂韧性特点,也极大地限制了材料的可加工性。在陶瓷小孔加工中,出孔端面崩边面积大小是评估孔质量的重要标准之一,它会极大地影响组件的性能和组件中的定位精度。出孔端面崩边面积严重,成为了陶瓷材料孔加工领域的瓶颈^[3-5]。目前常见的小孔加工方法包括激光加工、电火花加工^[6]、化学蚀刻^[7]和普通钻削加工,但存在加工后孔尺寸精度低、表面粗糙度高、钻头偏斜、对中不良、排屑不良和散热困难等问题^[8]。旋转超声磨削加工已被证明是一种优良的微小孔加工方法,具有降低切削力、改善孔表面质量、提高加工效率和刀具耐用度等优点^[9-11]。目前,旋转超声加工小孔时虽能使孔出口崩边得到改善,但并不能彻底消除,所以探究合适的加工方法及抑制策略,以此来进一步控制工程陶瓷孔出口的崩边,对于工程陶瓷材料的运用和进一步发展具有重要的意义。

目前,国内外学者针对工程陶瓷孔加工做了许多研究。李琛等^[12]利用有限元模拟分析了微晶云母陶瓷旋转超声磨削孔加工时出孔的切屑状态,建立了出孔切屑模型,并验证了理论模型的可靠性,该模型为研究旋转超声磨削孔加工提供了理论依据。冯平等^[13]对 C/SiC 复合材料旋转超声加工孔时引起的出口崩边进行了定量研究,通过对推力的详细观察,研究了撕裂缺陷形成的机理。Wang 等^[14]提出了异型刀具抑制孔出口崩边的刀具设计准则,并通过理论说明了该设计的科学性。工艺实验结果表明,使用经过合理设计的异型刀具可以将 C/SiC 复合材料孔出口崩边体积进一步减小 50%以上。张德远等^[15]对超声磨削中的切削刃轨迹进行了建模,通过实验分析了超声辅助磨

削中的切削力降低、孔精度提高的改善机理。刘瑞军等^[16]采用飞秒级差短脉冲激光复材制孔,加工孔径为 0.4~1.6 mm,深径比达 10:1,出孔质量好,内腔表面粗糙度 R_a 可达 0.27 μm 。Ankit Sharma 等^[17]提出化学辅助旋转超声加工方法,对浮法玻璃进行了钻孔实验,解释了该加工方法下孔表面完整性和工具磨损的机理。实验结果表明,该方法可大大降低孔表面的崩边尺寸。

迄今为止,国内外学者在工程陶瓷旋转超声磨削孔加工质量方面进行了大量的研究,包括孔内壁粗糙度^[18]、孔口处微裂纹扩展及边缘崩边等,但对于不同孔径的出孔端面质量评价指标与该质量控制方法上研究较少。针对该问题,本文采用孔出口端面崩边面积与加工后理想孔截面面积的比值作为孔出口质量评价指标,定义为孔出口损伤因子 H_d 。 H_d 值越小,表明该孔出口质量越好。为得到较小 H_d 值,本文进行了正交实验,深入探究了磨削工艺参数对 H_d 的影响规律,初步预测出最优磨削参数组合范围。通过单因素实验进一步对最优磨削参数进行确定,并提出一种孔出口崩边控制策略的原理。最后通过实验证明其合理性,进一步降低 H_d 值,对旋转超声加工孔出口质量的合理控制具有重要的指导意义。

1 实验

1.1 加工原理

旋转超声磨削孔加工是将普通旋转磨削和超声振动复合,加工原理如图 1 所示。金刚石磨头随主轴进行旋转运动,底部磨粒对工件进行旋转磨削去除。同时,在压电陶瓷的驱动下,磨头沿机床 Z 轴方向产生高频往复振动,以几微米的振幅对工件进行冲击以去除材料。该加工方式在保证加工质量的同时,又提高了加工效率。同样的工艺参数下,旋转超声加工效率是普通加工的 8 倍左右,是目前解决硬脆材料孔

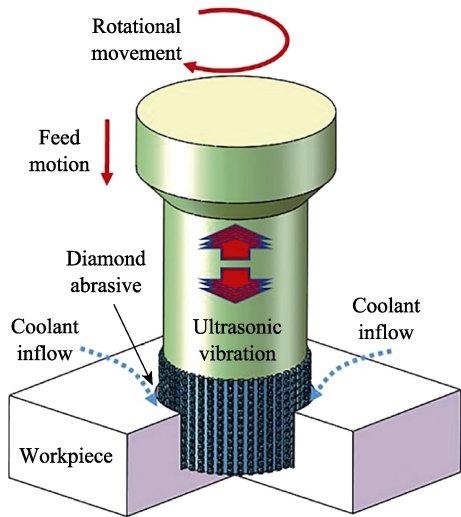


图 1 超声辅助磨削
Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic assisted grinding

加工难的良好手段。

1.2 实验设备

本实验在北京精雕生产的 JDVT600T 加工中心上进行,如图 2 所示。结合 BT30 超声振动刀柄,通过换能器产生纵向往复式振动。刀具采用电镀金刚石磨头,机床及刀具主要技术参数见表 1 及表 2。工件采用氧化锆陶瓷,尺寸为 20 mm×20 mm×8 mm,其相关材料属性见表 3^[19]。

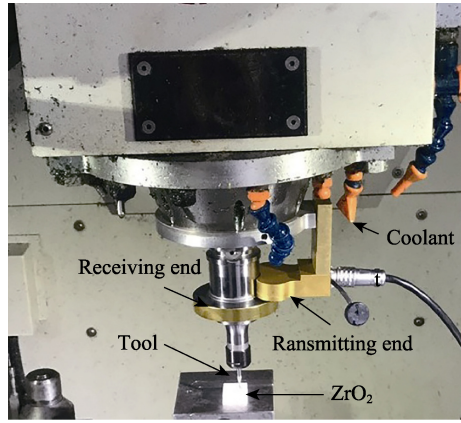


图 2 氧化锆磨削实验
Fig.2 Experimental diagram of zirconia ceramic grinding

表 1 机床技术参数
Tab.1 Technical parameters of machine tool

| Speed range/(r·min ⁻¹) | Handle model | Amplitude range/μm | Frequency range/kHz |
|------------------------------------|--------------|--------------------|---------------------|
| 6000~22 000 | BT30 | 0~10 | 18~30 |

表 2 金刚石磨头规格
Tab.2 Specification of diamond grinding head

| Tool diameter/mm | Tool effective length/mm | Mesh number | Abrasive size/μm |
|------------------|--------------------------|-------------|------------------|
| 1 | 8 | 400 | D64 |

表 3 ZrO₂主要性质
Tab.3 The main properties of ZrO₂

| Density/(g·cm ⁻³) | Thermal expansivity/(×10 ⁻⁶ K ⁻¹) | Poisson-ratio | Fracture toughness/(MPa·m ^{1/2}) | Hardness (HRC) | Bending strength/MPa |
|-------------------------------|--|---------------|--|----------------|----------------------|
| 5.88 | 8.75 | 0.30 | 10.50 | 78 | 750 |

1.3 实验方案

实验前对工件表面进行精磨处理,降低表面不平等因素对出孔质量存在的潜在干扰。实验中,超声发生器的振动频率自动调节,并保持稳定,通过调节发生器功率来改变超声幅值。在底座夹具上表面加工出 20.1 mm×20.1 mm×1 mm 凹槽,将工件置于凹槽内,并用石蜡加热固定。机床设置加工后理想孔径为 1.2 mm,加工深度为 8 mm,孔深径比为 6.6,刀具运动轨迹如图 3 所示,刀具底部圆心按图中螺旋线进给加工。加工中使用水基磨削液,质量分数为 3.8%,流量为 50 L/min,采用喷射方式对加工区域进行降温 and 排出切屑。

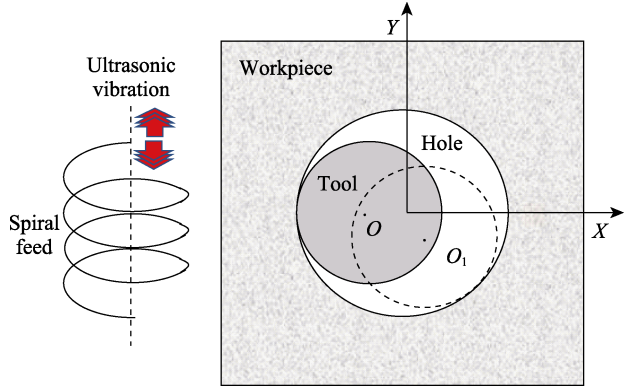


图 3 刀具运动轨迹
Fig.3 Tool path

在影响旋转超声磨削加工孔出口质量的诸多因素中,主轴转速、进给速度及超声波振幅是主要因素,合理选择加工工艺参数能有效降低 H_d 值。本文采用正交实验三因素四水平 $L_{16}(4^3)$ 正交表进行实验^[20],初步预测最优参数组合,正交实验的因素和水平见表 4。为了进一步优化氧化锆陶瓷孔加工磨削工艺参数,在正交实验结果基础上采用单因素实验法,分别研究主轴转速 n 、进给速度 v_w 、超声波振幅 A 对 H_d 值的影

表 4 正交实验因素水平
Tab.4 Factors and levels of orthogonal experimental

| Levels | Spindle speed/(r·min ⁻¹) | Feed rate/(mm·min ⁻¹) | Amplitude/μm |
|--------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| 1 | 9 000 | 0.3 | 2 |
| 2 | 12 000 | 0.5 | 4 |
| 3 | 15 000 | 0.7 | 6 |
| 4 | 18 000 | 0.9 | 8 |

响。最后通过在工件底部加设辅助支撑来进一步改善出孔质量。本文采用天准影像测量仪（型号为VMA2515）对试件孔出口崩边进行观测，放大倍数为 200 倍，如图 4 所示。



图 4 孔出口影像观测
Fig.4 Image observation of hole outlet

2 结果与讨论

2.1 图像处理

本文通过 Matlab 软件对出孔轮廓边缘进行提取^[21]，出口形貌处理过程如图 5 所示。影像测量仪下得到的原图像为彩色图像，为了减小处理过程的运算量，首先对原图进行灰度化，如式(1)所示。

$$\text{Gray} = R \times 0.299 + G \times 0.587 + B \times 0.114 \tag{1}$$

式中：Gray 为获得的灰度图；R、G、B 分别为原图像红、绿、蓝三通道分量。

灰度化结果如图 5a 所示，目标圆盘在整张灰度图中表现为连续的高灰度区域，目标灰度值远高于背景区域，因此采用全局阈值化的方式提取目标圆盘区。本文采用大津法求取全局阈值，阈值求取函数如式(2)所示，采用式(3)进行二值化处理^[22]，式中 BW 为二值化的结果，如图 5b 所示。

$$\text{th} = \text{graythresh}(\text{Gray}) \tag{2}$$

$$\text{BW} = \text{im2bw}(\text{Gray}, \text{th}) \tag{3}$$

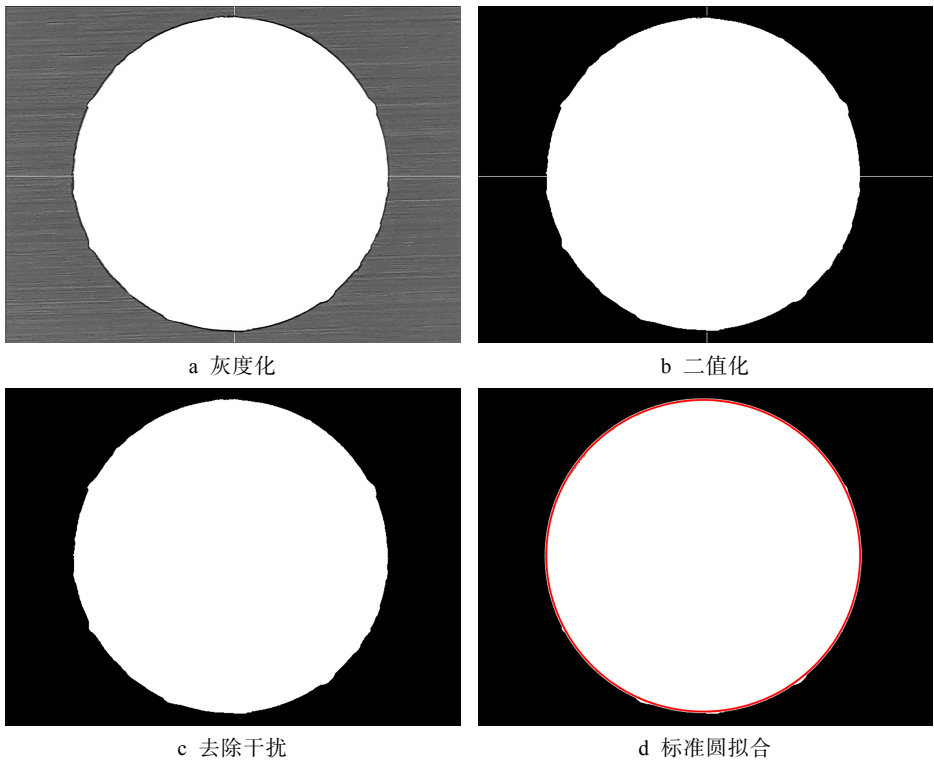


图 5 出口形貌处理结果

Fig.5 Treatment results of outlet morphology: a) grayscale; b) binarization; c) remove interference; d) standard circle fitting

观察图 5b 发现，除了中央的有效区域外，图像中还存在水平以及竖直方向的两条干扰线，因此需要进行剔除。这里采用的是基于形态学操作的方法，以定义一个圆盘结构体为基础，利用结构体对二值化图像进行先腐蚀、后膨胀的操作，即可实现消除细小物体，在纤细处分离物体和平滑较大物体边界的作用，处理结果如图 5c 所示。

为求加工后形成的孔出口边缘端面损伤面积 S ，以霍夫变换圆形检测理论为基础，利用 Matlab 中的 `imfindcircles` 函数返回到二值化图像，求出标准圆的圆心 O_1 和半径 R_1 ，进而拟合出加工后的标准圆（如图 5d 所示），并求出标准圆面积 S_1 。在 Matlab 中利用 `Area_Ini=sum(Open(:))` 语句求出二值化图像中灰度值为 1 的像素点和，自动求出带有崩边的圆盘面积

S_2 , 其中 Open 代表导入的二值化图像。两者做差来计算孔出口边缘端面损伤面积 S , 如式(4)所示。式中 S_i 为加工后的理想圆横截面积。

$$\begin{cases} S = S_2 - S_1 \\ H_d = \frac{S}{S_i} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 正交实验结果分析

依据正交实验结果, 得到 H_d 值的回应见表 5。根据回应表中数值, 可得到正交结果, 如图 6 所示。

表 5 H_d 回应
Tab.5 Response table of H_d

| Levels | Spindle speed/ ($\times 10^{-3}$) | Feed rate/ ($\times 10^{-3}$) | Amplitude/ ($\times 10^{-3}$) |
|--------|--|------------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 5.754 | 3.214 | 7.459 |
| 2 | 4.692 | 3.119 | 6.152 |
| 3 | 3.389 | 4.615 | 4.188 |
| 4 | 3.721 | 5.418 | 4.918 |
| Range | 2.365 | 2.299 | 3.271 |

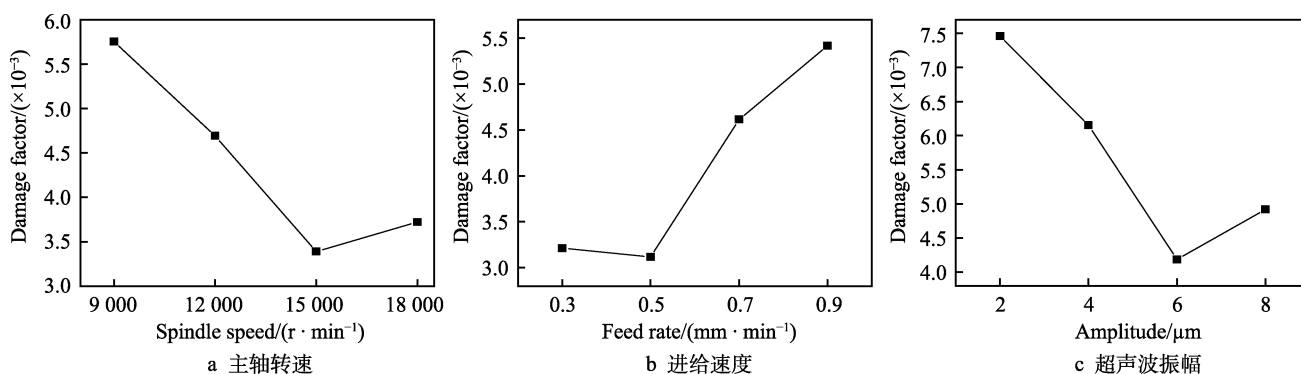


图 6 磨削参数对 H_d 的影响

Fig.6 Influence of grinding parameters on H_d : a) spindle speed; b) feed rate; c) ultrasonic amplitude

极差数值的大小能有效反映出各工艺参数对 H_d 值的影响程度, 极差值 R 最大那一列所对应的因素, 对 H_d 值的影响最大, 在实验中需要优先考虑该因素变化对实验结果产生的影响。分析结果表明, 氧化锆陶瓷旋转超声磨削孔加工实验中, 影响 H_d 值的因素为超声波振幅 > 主轴转速 > 进给速度。

由图 6 可知, 随着主轴转速 n 的增加, H_d 值逐渐减小, 当旋转速度 n 超过 15 000 r/min 时, 呈逐渐上升趋势; 随着进给速度 v_w 逐渐增加, H_d 值总体上

呈先减小、再增大的趋势, 进给速度为 0.5 mm/min 时最小; 随着超声波振幅 A 逐渐增加, H_d 值先减小、后增大, 总体变化幅度较大, 在超声波振幅 A 为 6 μm 时达到最小值。

2.3 单因素实验结果分析

为进一步确定最优参数组合, 进行单因素实验, 实验设计见表 6。

表 6 单因素实验
Tab.6 Single factor experiment table

| Number of experiment | Spindle speed/($\times 10^{-3} r \cdot min^{-1}$) | Feed rate/($mm \cdot min^{-1}$) | Amplitude/ μm |
|----------------------|---|---|-----------------------------------|
| 1 | 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 | 0.5 | 6 |
| 2 | 15 | 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7 | 6 |
| 3 | 15 | 0.5 | 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5, 8 |

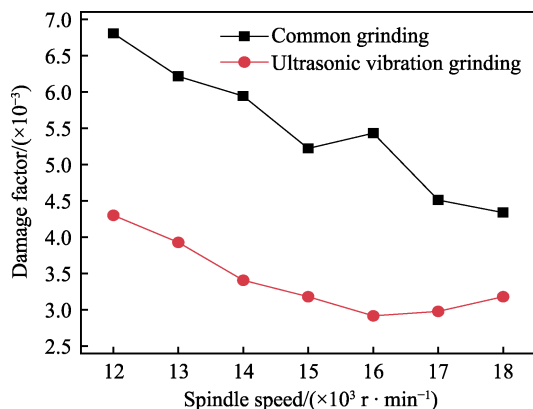
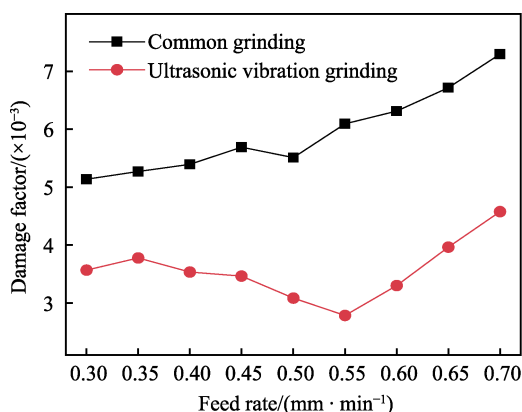
2.3.1 主轴转速对 H_d 的影响

由图 7 可知, 不同主轴转速时, 旋转超声磨削加工下的 H_d 值要比普通磨削加工低。在转速为 14 000 r/min 时, H_d 值降低最多, 可降低 45.13%。随着主轴转速的增大, 旋转超声加工的 H_d 值呈先减小、后增大的趋势。这是因为材料未变形的最大切削厚度随主轴转速的增加而减小, 从而减小了裂纹尺寸。同时, 由于相同时间内主轴转速的增加意味着工件单位体积将受到更多磨粒的参与去除, 降低了单颗磨粒的磨削

力^[23], 故降低了崩边^[12]。当主轴转速达到 16 000 r/min 时, 崩边面积反而呈上升趋势。这是由于当转速达到一定程度后, 会产生大量的磨削热而无法及时散去, 使出口处的热裂纹增加, 逐渐扩展后发生脆性断裂, 导致大面积材料的去除, 使 H_d 值变大^[24]。

2.3.2 进给速度对 H_d 的影响

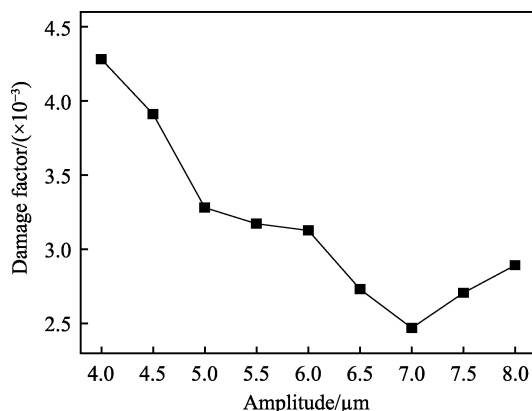
由图 8 可知, 不同进给速度时, 旋转超声磨削加工下的 H_d 值要比普通磨削加工低。在进给速度为 0.55 mm/min 时, H_d 值降低最多, 可降低 53.13%。随

图 7 主轴转速对 H_d 的影响Fig. 7 Influence of spindle speed on H_d 图 8 进给速度对 H_d 的影响Fig. 8 Effect of feed speed on H_d

着进给速度的增大, 旋转超声加工下的 H_d 值呈先减小、后增大的趋势。这是由于随进给速度的增加, 磨粒在相同加工区域内的切削次数降低, 使相邻磨粒构成的轨迹拉长, 相互干涉变少, 磨削厚度会随之提升, 增大了加工中单颗磨粒的磨削力, 导致裂纹尺寸变大^[25]。又因磨粒压入工件的深度变大, 当超过最大临界切削深度后, 发生脆性断裂, 增大裂纹的扩展, 从而引起大面积崩碎。

2.3.3 超声波振幅对 H_d 的影响

由图 9 可知, 旋转超声磨削加工下的 H_d 值随着振幅的增大呈先减小、后增大的趋势。从磨粒的运动轨迹方面分析, 这是由于超声振动的引入, 使磨粒在工件表面进行了高频往复冲击, 从连续切削变为了断续切削, 改变了脆性材料的去除机理, 增加了脆塑转变的临界磨削深度, 塑性去除比例增加, 裂纹数量更少, 且扩展更短。同时, 超声振动增加了砂轮圆周上磨粒的轴向刮擦效果, 减小了磨削过程中砂轮圆周上的作用力, 降低了单颗磨粒的实际磨削力, 减少了工件孔壁裂纹的扩展, 使出口损伤得到了较好的抑制。由图 9 可得, 当振幅超过 $7 \mu\text{m}$ 时, H_d 值会发生增大的现象。这是由于振幅过大, 导致往复锤击的作用力

图 9 振幅对 H_d 的影响Fig. 9 The effect of amplitude on H_d

变大, 造成孔出口处产生更大面积的破碎效果。

2.4 最优磨削参数选择

在实验中, 选择 H_d 值为实验指标, H_d 值越小, 代表孔出口端面质量控制越好, 因此要尽可能选择 H_d 值小的参数。在上述正交实验的基础上, 由单因素实验可知, 主轴转速为 $16\,000 \text{ r/min}$, 进给速度为 0.55 mm/min , 超声波振幅为 $7 \mu\text{m}$ 时, 金刚石磨头加工 ZrO_2 工件的 H_d 值最小。按此磨削参数组合进行加工孔实验, H_d 值取 3 次平均值, 为 2.223×10^{-3} 。因此, 在当前实验条件下, 旋转超声磨削加工氧化锆陶瓷推荐最优磨削参数为: 主轴转速 $15\,000 \sim 17\,000 \text{ r/min}$, 进给速度 $0.5 \sim 0.6 \text{ mm/min}$, 超声波振幅 $6 \sim 8 \mu\text{m}$ 。

2.5 孔出口崩边抑制策略

2.5.1 抑制策略原理

在氧化锆材料的超声辅助孔加工中, 由于磨粒与工件之间的划擦与冲击作用, 不可避免地会产生大量的亚表面裂纹。这些裂纹的尺度远大于材料本身所存在的微裂纹, 这些尺寸更大的亚表面裂纹更容易在驱动力的作用下失稳扩展。随着加工孔深度不断增加, 支撑轴向切削力 F_a 的剩余材料厚度 d_u 不断减小, 如图 10 所示。当 d_u 小于某一临界值时, 在轴向切削力 F_a 的作用下, 孔底边缘处产生应力集中。此时材料之间的拉应力大于强度极限, 产生微裂纹, 并快速扩展^[26]。

当裂纹扩展至孔底时, 造成孔出口边缘损伤, 如图 11 所示。为抑制该损伤, 本文采取在孔底加垫一定厚度的氧化锆材料垫块, 尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 增加材料剩余厚度值, 以此来抑制裂纹扩展。基于压痕断裂力学, 建立磨粒压入工件时产生横向与纵向裂纹的模型, 如式(5)所示^[11]。在工件的上表面用夹具夹紧, 使垫块对孔底产生一定反作用力 F , 增加工件的动态断裂韧性 K_{ID} , 有效降低横向与纵向裂纹大小, 以此来降低孔底崩边。

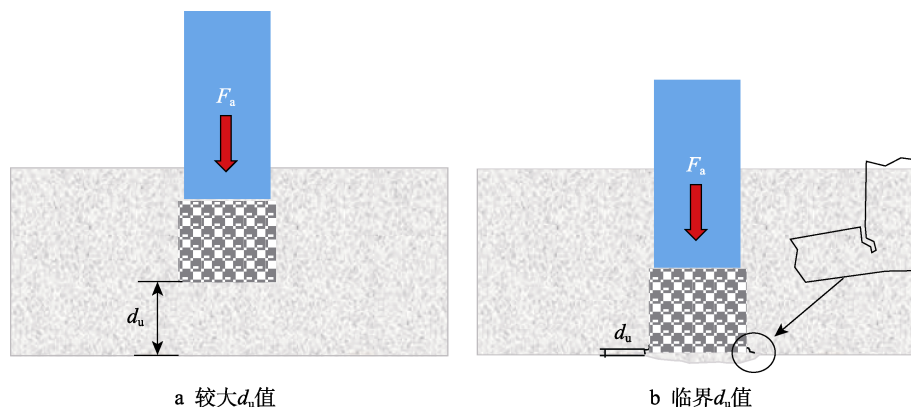


图 10 孔磨削过程

Fig.10 Hole grinding process: a) larger d_u value; b) critical d_u value

$$\begin{cases} C_l = k_1 \left(\frac{F_n}{K_{ID}} \right)^{\frac{3}{4}} \\ C_h = k_2 \left(\frac{F_n}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: C_l 为裂纹长度; C_h 为裂纹深度; F_n 为法向磨削力; K_{ID} 为动态断裂韧性。

2.5.2 抑制策略实验验证

通过单因素实验验证抑制策略的合理性,各加工参数及实验结果见表 7。经比较可知,在旋转超声磨削加工孔时,工件下方有垫块时的 H_d 值均比无垫块时的小,最多减小 11.83%。在工件下方增加垫块并在工件上方施加一定压力,对于氧化铝陶瓷旋转超声

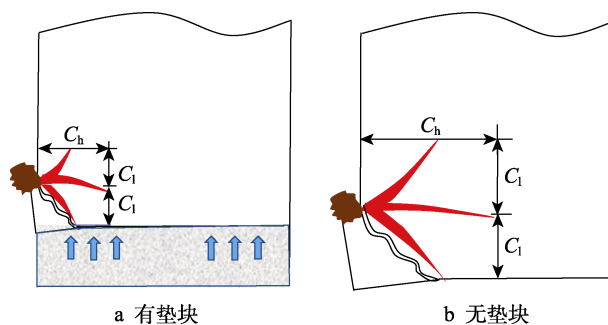


图 11 孔出口裂纹扩展情况

Fig.11 Crack propagation at hole exit: a) with cushion; b) no cushion

磨削孔加工的出口质量有较好的改善作用,为实际生产加工提供一定的理论指导。

表 7 有无垫块 H_d 值比较Tab.7 Comparison of H_d value with and without cushion block

| Number of experiment | Spindle speed/ ($\times 10^{-3} \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) | Feed rate/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) | Amplitude/ μm | No cushion value/($\times 10^{-3}$) | Cushion value/($\times 10^{-3}$) | Relative error/% |
|----------------------|--|---|--------------------------|--|---------------------------------------|------------------|
| 1 | 13 | 0.5 | 6 | 3.923 | 3.566 | 9.10 |
| 2 | 14 | 0.5 | 6 | 3.358 | 3.133 | 6.70 |
| 3 | 15 | 0.5 | 6 | 3.132 | 3.088 | 1.40 |
| 4 | 16 | 0.5 | 6 | 2.982 | 2.825 | 5.26 |
| 5 | 15 | 0.4 | 6 | 3.551 | 3.131 | 11.83 |
| 6 | 15 | 0.6 | 6 | 3.308 | 3.102 | 6.23 |
| 7 | 15 | 0.7 | 6 | 4.577 | 4.493 | 1.84 |
| 8 | 15 | 0.5 | 4 | 4.107 | 4.011 | 2.34 |
| 9 | 15 | 0.5 | 5 | 3.296 | 3.126 | 5.16 |
| 10 | 15 | 0.5 | 7 | 2.486 | 2.398 | 3.54 |

3 结论

1) 在氧化铝陶瓷小孔磨削加工过程中,超声辅助磨削加工下的 H_d 值普遍比普通磨削加工小,最多可降低 53.13%。在超声辅助磨削孔加工中,超声波振幅对 H_d 值的影响最大,其次是进给速度,最后是主轴转速。

2) 当前实验条件下,使超声辅助磨削孔加工 H_d 值最小的最优参数组合: 主轴转速为 15 000~17 000 r/min, 进给速度为 0.5~0.6 mm/min, 超声波振幅为 6~8 μm , 可将 H_d 值控制在 3.308×10^{-3} 以内, 满足加工要求。

3) 在选择最优工艺参数组合的情况下,在工件下放置垫块,并在工件上方施加一定压力,在同等工

艺参数下, H_d 值最多可再减小 11.83%。从理论上对该策略进行了合理解释, 通过实验证明该策略的可行性, 对实际生产加工中具有重要指导意义。

参考文献:

- [1] 郑非非, 董志刚, 张嘉桐, 等. 超声振动对单颗金刚石工具划擦 RB-SiC 材料去除行为的影响[J]. 机械工程学报, 2019, 55(1): 225-232.
ZHENG Fei-fei, DONG Zhi-gang, ZHANG Jia-tong, et al. Influence of ultrasonic vibration on material removal of scratching on RB-SiC with single diamond tool[J]. Journal of mechanical engineering, 2019, 55(1): 225-232.
- [2] 吴玉厚, 王维东, 李颂华, 等. 干湿磨条件下氧化锆陶瓷表面粗糙度实验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(6): 1080-1087.
WU Yu-hou, WANG Wei-dong, LI Song-hua, et al. Experiments of surface roughness of zirconia ceramics under wet and dry grinding[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (natural science), 2017, 33(6): 1080-1087.
- [3] MA Lian-jie, GONG Ya-dong, CHEN Xiao-hui. 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.
- [4] MA Lian-jie, LI Chen, CHEN Jie, et al. Prediction model and simulation of cutting force in turning hard-brittle materials[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2017, 91(1-4): 165-174.
- [5] CAO Jian-guo, WU Yong-bo, LI Jian-yong, et al. A grinding force model for ultrasonic assisted internal grinding (UAIG) of SiC ceramics[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2015, 81(5-8): 875-885.
- [6] GOIOGANA M, SARASUA J A, RAMOS J M. Ultrasonic assisted electrical discharge machining for high aspect ratio blind holes[J]. Procedia CIRP, 2018, 68: 81-85.
- [7] ZHU Xiang-ming, LIU Yong, ZHANG Jian-hua, et al. Ultrasonic-assisted electrochemical drill-grinding of small holes with high-quality[J]. Journal of advanced research, 2020, 23: 151-161.
- [8] 张园, 康仁科, 刘津廷, 等. 超声振动辅助钻削技术综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 33-44.
ZHANG Yuan, KANG Ren-ke, LIU Jin-ting, et al. Review of ultrasonic vibration assisted drilling[J]. Journal of mechanical engineering, 2017, 53(19): 33-44.
- [9] WANG Jian-jian, FENG Ping-fa, ZHENG Jing-zhen, et al. Improving hole exit quality in rotary ultrasonic machining of ceramic matrix composites using a compound step-taper drill[J]. Ceramics international, 2016, 42(12): 13387-13394.
- [10] CAO Jian-guo, NIE Meng, LIU Yue-ming, 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.
- [11] WANG Jian-jian, ZHANG Cheng-long, FENG Ping-fa, et al. A model for prediction of subsurface damage in rotary ultrasonic face milling of optical K9 glass[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2016, 83(1-4): 347-355.
- [12] DONG Guo-jun, LANG Chen-yang, LI Chen, et al. Formation mechanism and modelling of exit edge-chipping during ultrasonic vibration grinding of deep-small holes of micro-crystalline-mica ceramics[J]. Ceramics international, 2020, 46(8): 12458-12469.
- [13] FENG Ping-fa, WANG Jian-jian, ZHANG Jian-fu, et al. Drilling induced tearing defects in rotary ultrasonic machining of C/SiC composites[J]. Ceramics international, 2017, 43(1): 791-799.
- [14] WANG Jian-jian, FENG Ping-fa, ZHANG Jian-fu. Reduction of edge chipping in rotary ultrasonic machining by using step drill: A feasibility study[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2016, 87(9-12): 2809-2819.
- [15] 刘逸航, 滕云达, 耿大喜, 等. 复合材料小孔超声铣磨质量研究[J]. 电加工与模具, 2020(4): 61-65.
LIU Yi-hang, TENG Yun-da, GENG Da-xi, et al. Research on quality of CFRP holes by rotary ultrasonic helical machining[J]. Electromachining & mould, 2020(4): 61-65.
- [16] 刘瑞军, 桓恒, 赵晨曦, 等. 超短脉冲激光加工陶瓷基复合材料制孔研究[J]. 电加工与模具, 2019(2): 55-58.
LIU Rui-jun, HUAN Heng, ZHAO Chen-xi, et al. Study on micropore preparation of ceramic matrix composites by ultra-short pulse laser processing[J]. Electromachining & mould, 2019(2): 55-58.
- [17] SHARMA A, JAIN V, GUPTA D. A novel investigation study on float glass hole surface integrity & tool wear using chemical assisted rotary ultrasonic machining[J]. Materials today: Proceedings, 2020, 26: 632-637.
- [18] GENG Da-xi, TENG Yun-da, LIU Yi-hang, et al. Experimental study on drilling load and hole quality during rotary ultrasonic helical machining of small-diameter CFRP holes [J]. Journal of materials processing technology, 2019, 270: 195-205.
- [19] 李颂华, 王科冲, 孙健, 等. 氧化锆陶瓷磨削工艺优化和粗糙度控制研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(1): 271-277.
LI Song-hua, WANG Ke-chong, SUN Jian, et al. Research on grinding process optimization and roughness control of zirconia ceramics[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(1): 271-277.

(下转第 371 页)