

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.03.013

基于超声振动的硬脆性材料 磨削加工入孔崩边研究*

谭丽娜, 白 冰

(长春职业技术学院 工程分院, 吉林 长春 130000)

摘要:针对陶瓷等硬脆材料磨削加工中出现的崩边问题,对氧化锆陶瓷孔加工过程中出现的入孔崩边情况进行了研究。使用有限元软件 ABAQUS,对超声振动辅助磨削氧化锆陶瓷孔加工进行了仿真,建立了氧化锆陶瓷 JH2 本构模型;研究了入孔崩边的形成机理,结合有限元仿真结果,设计了超声振动辅助磨削氧化锆陶瓷孔加工实验;通过建立入孔崩边的评价指标,分析了主轴转速、进给速度和超声功率对入孔崩边的影响规律,并对仿真结果进行了验证。研究表明:和实验相比,仿真得出的崩边面积平均误差在 10% 以内;随着主轴转速和超声功率的增加,入孔崩边情况得到明显的改善,在 100% 超声功率条件下崩边面积减少了 38% 以上,随着进给速度的增加入孔崩边面积明显增大。

关键词:超声振动;硬脆性材料;磨削加工;有限元仿真

中图分类号:TH16;TG58

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)03-0293-05

Study on the hole edge of hard and brittle materials based on ultrasonic vibration assisted grinding

TAN Li-na, BAI Bing

(Engineering Branch, Changchun Vocational Institute of Technology, Changchun 130000, China)

Abstract: Aiming at the problem of edge chipping in grinding of hard and brittle materials, the situation of hole edge chipping in processing of zirconia ceramics was studied. The ABAQUS was used to simulate the ultrasonic vibration assisted grinding of zirconia ceramic hole machining. And the zirconia ceramic JH2 constitutive model was established to study the formation mechanism of the hole chipping. Combined with finite element simulation results, ultrasonic vibration assisted grinding of zirconia ceramic hole machining experiments was designed. By establishing the evaluation index of the hole chipping, the influence of the spindle speed, feed rate and ultrasonic power on the hole chipping was analyzed and the simulation results were verified. The results show that the average error of chipping area between simulated and experimental is less than 10%. As the spindle speed and ultrasonic power increase, the hole chipping condition is significantly improved. Under the condition of 100% ultrasonic power, the area of chipping is reduced by more than 38%, and the area of hole chipping is obviously increased with the increase of feed rate.

Key words: ultrasonic vibration; hard and brittle materials; grinding; finite element simulation

0 引 言

陶瓷材料因为低密度、高硬度、耐磨耐腐蚀等特性,具有广泛的应用前景^[1-2]。由于陶瓷材料本身的硬

脆性,导致加工过程中极易出现裂纹和崩边等情况,对加工成本、使用性能和有效寿命等方面造成了较大影响,制约了陶瓷材料的广泛应用^[3-4]。

超声振动辅助磨削工艺是将超声振动和砂轮的磨

削运动结合,在砂轮磨粒对工件加工区域划擦去除的同时,引入了超声高频振动对加工表面进行冲击和空化,改变了材料的去除机理,提高了硬脆材料的加工效率,降低了加工中砂轮上金刚石磨粒对工件表面的有效作用力,同时还可以降低加工区域温度并且及时排出切屑,减少了加工后表面二次损伤的发生^[5-6]。

对于超声振动辅助磨削加工的去机理,国内外学者进行了大量的研究^[7]。陶瓷材料钻孔过程中出现的边缘破损主要分为入孔崩边、内部破损和出孔崩边^[8]。秦娜^[9]建立了恒速进给的切削力模型,分析了孔加工过程中切削力和工艺参数之间的联系,进行了不同砂轮形状的钻孔实验,分析了加工参数对出孔崩边的影响;王秀奇^[10]使用有限元仿真软件,研究了陶瓷出孔形成过程中的应力分布情况,提出了施加反向预应力或者添加垫板以降低出孔边缘的破损的方法;EGASHIRA K 等^[11]进行了硬脆材料的超声振动微小孔加工,得出了孔边缘破损主要是因为加工时应力不均匀分布和内部结构不均一。

目前硬脆材料的研究主要集中在氮化硅陶瓷和玻璃材料上,本文将对氧化锆陶瓷进行研究,采用 ABAQUS 软件对入孔崩边产生的机理进行仿真,探究超声振动辅助磨削实验中不同工艺参数对入孔崩边的影响,并对仿真的合理性进行验证。

1 有限元建模与仿真

本文首先建立了砂轮和工件的几何模型,砂轮的直径为 1.2 mm。为了降低网格数量,加快计算速度,笔者对砂轮模型进行了简化,只建立了砂轮前端磨粒的模型。

砂轮表面磨粒尺寸和间距通过扫描电子显微镜进行观测,磨粒随机分布在砂轮表面,模型中使用多种几何形状颗粒嵌入到砂轮模型表面,对磨粒进行了模拟,并将表面金刚石颗粒和砂轮基体设为刚体结构,加快了仿真收敛速度。

砂轮磨粒分布和仿真模型如图 1 所示。

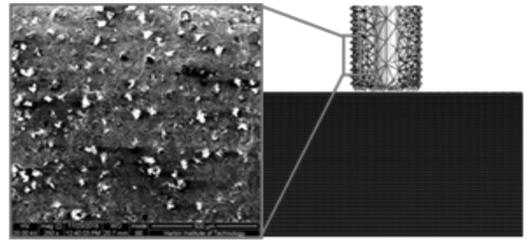


图 1 砂轮磨粒分布和仿真模型

工件为氧化锆陶瓷,为保证仿真结果的准确性,笔者选用动态本构模型 Johnson-Holmquist II 对材料属性进行设置。通过修改 inp 文件中的关键字,添加了氧化锆陶瓷 JH2 本构模型,实现了材料强度同接触压力、应变率和损伤程度相关联。

氧化锆陶瓷主要力学性能参数如表 1 所示。

表 1 氧化锆陶瓷主要力学性能参数

密度/(kg · m ⁻³)	弹性模量 /GPa	泊松比	抗拉强度 /MPa	抗压强度 /MPa	显微硬度 /GPa
5.65	236	0.21	112	846	11

笔者将工件四周施加完全固定约束,在砂轮中心处设置参考点,对砂轮施加载荷。主轴转速设为 12 000 r/min,进给速度设为 3 mm/min,加载了振动频率为 30 kHz 的轴向超声载荷,超声振动最大幅值设为 7 μm,仿真中孔直径设置为 1.2 mm。

ABAQUS 软件入孔形貌仿真结果如图 2 所示。

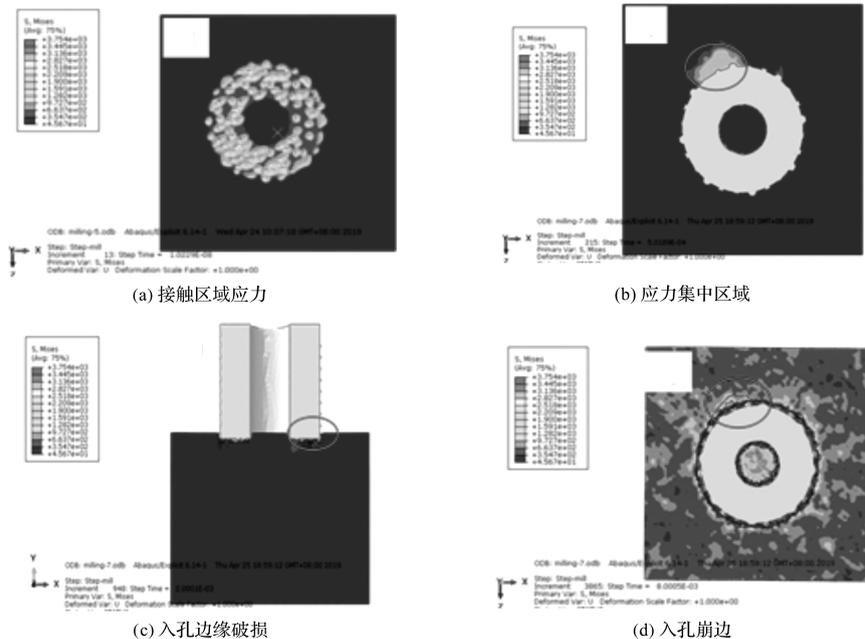


图 2 入孔形貌仿真结果

应力在磨粒接触的位置进行传播,当工件上单元体达到或超过失效准则后网格将被删除,形成单元体内部扩展的裂纹。

砂轮底部磨粒和工件表面刚接触时的应力分布情况如图2(a)所示。此时崩边主要由砂轮底面磨粒的冲击产生,磨粒压入工件模型表面发生脆性崩落,形成较大的边缘磨损,破损的程度受磨粒尺寸的影响较大。

随着砂轮的进给,由于砂轮侧面磨粒对入孔位置的划擦作用,在入孔边缘出现应力集中现象,并引发崩边情况的发生,如图2(b)所示。

从图2(c)可以看出:在侧面磨粒的作用下,裂纹向上扩展形成塌边,造成入孔边缘破损。

在底面磨粒和侧面磨粒的共同作用下,伴随着砂轮进给运动,崩边随机产生,对加工后孔的质量造成很大影响,如图2(d)所示。

2 磨削孔加工实验

2.1 实验条件

磨削实验在一台高速精雕机上进行,主轴转速为0~24 000 r/min;刀具采用超声振动刀柄,型号为HSK32E,通过超声换能器产生轴向超声振动;砂轮采用超声加工专用砂轮,外径1.2 mm,内径0.4 mm,磨粒浓度100%,磨粒平均粒度为63 μm;超声波发生器型号为USPTH-3.3H,功率为0~300 W,振动频率为18 kHz~30 kHz,提供超声加工所需的能量,并控制超声功率的等级。

实验前对工件表面进行抛光处理,降低表面和亚表面损伤对入孔崩边存在的潜在干扰;实验中超声发生器的振动频率自动调节并保持稳定,通过控制超声功率来改变超声幅值,加工中使用的磨削液采用喷射方式对加工区域进行降温 and 排出切屑。

2.2 实验方案

笔者通过对氧化锆陶瓷超声振动磨削仿真进行分析,确定了实验采用单因素变量方法,研究了主轴转速、进给速度和超声功率这3个工艺参数对氧化锆陶瓷超声振动磨削入孔崩边情况的影响。每组参数进行3次重复实验以避免随机误差的影响,加工孔径为1.2 mm。

单因素加工参数如表2所示。

表2 单因素加工参数

主轴转速/ (r · min ⁻¹)	进给速度/ (mm · min ⁻¹)	超声功率/(%)
6 000	1.2	100
9 000	1.2	100

续表

主轴转速/ (r · min ⁻¹)	进给速度/ (mm · min ⁻¹)	超声功率/(%)
12 000	1.2	100
15 000	1.2	100
18 000	1.2	100
21 000	1.2	100
12 000	0.6	100
12 000	0.9	100
12 000	1.2	100
12 000	1.5	100
12 000	1.8	100
12 000	2.1	100
12 000	1.2	0
12 000	1.2	20
12 000	1.2	40
12 000	1.2	60
12 000	1.2	80
12 000	1.2	100

3 实验结果

3.1 图像处理

笔者通过 Matlab 中的数字化处理技术,对入孔表面进行滤波并提取轮廓形貌。为降低图像中其他内容的干扰并增强入孔边缘破损处的细节,采用空域处理方式对图像进行增强,增强图像可以表示为:

$$g(x,y) = E_H(f(x,y)) \quad (1)$$

式中: $g(x,y)$ —增强图像; E_H —转化函数; $f(x,y)$ —未增强的图像。

为了避免线性滤波中出现的清晰度不够的情况,采用中值滤波方式对空域进行加强,过滤掉图像中的脉冲噪声和尖波干扰,其表达式为:

$$y_k = med(x_{k-n}, x_{k-n+1}, \dots, x_k, \dots, x_{k+n}) \quad (2)$$

式中: med —取中值操作。

笔者通过以上方法对采集到的图像进行处理。

入口形貌处理结果如图3所示。

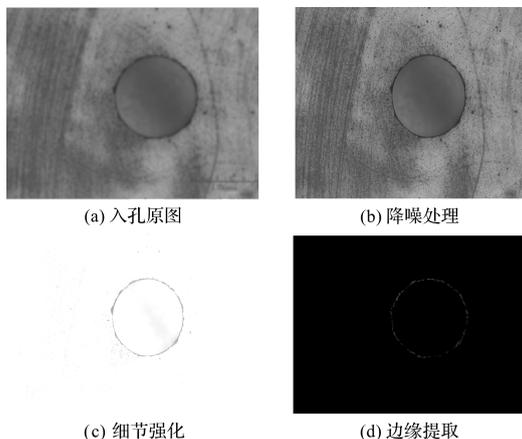


图3 入口形貌处理结果

磨削加工后入孔边缘的原始图像如图 3(a) 所示。

降噪处理并进行二值化增强边缘轮廓后得到的形貌图如图 3(b) 所示。

之后笔者进行边缘提取操作,先对降噪之后的图形进行局部灰度值扩展,将崩边处的灰度值区域进行放大,强化图像中的边缘形貌和轮廓内部的崩边细节,处理后得到的图像如图 3(c) 所示。

最后对图像中的灰度值进行计算,使用“roberts”算法寻找满足灰度的边缘点,判断入孔边缘范围,得到的入孔边界如图 3(d) 所示。

通过以上方式可以减弱噪声对检测结果的影响,有效地提高边缘检测的准确性。

对于砂轮磨削加工形成的入孔崩边,笔者使用崩边面积,对入孔质量进行了评价。对边缘外侧进行拟合后,通过轮廓边缘圆周积分来计算崩边面积 S :

$$\begin{cases} R^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \\ S = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} R^2 d\theta - \pi R_0^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_0, y_0 —入孔圆心位置坐标; x, y —轮廓边缘位置坐标; R —轮廓边缘到圆心的距离; R_0 —入口设计半径。

3.2 结果分析

3.2.1 主轴转速对入孔崩边面积的影响

主轴转速入孔崩边的影响如图 4 所示。

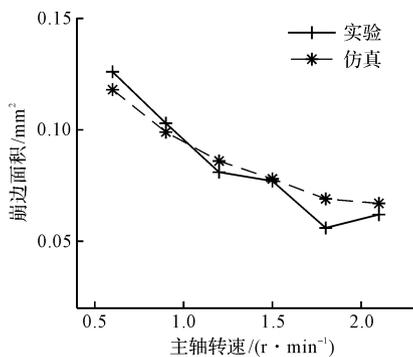


图 4 主轴转速入孔崩边的影响

由图 4 可知:在超声振动辅助磨削实验和仿真中,随着主轴转速增大,入孔崩边面积都会降低;相比于有限元仿真的结果,实验中的入孔崩边面积曲线在较高转速下出现轻微波动,崩边面积下降的趋势变缓,这是由于相同时间内主轴转速增加意味着工件单位体积受到更多的磨粒参与加工,降低了单颗磨粒的去除体积和加工区域的变形程度,从而在较低的磨削力下产生的边缘脆性崩边更小,降低了入孔崩边面积。

3.2.2 进给速度对入孔崩边面积的影响

进给速度对入孔崩边面积的影响如图 5 所示。

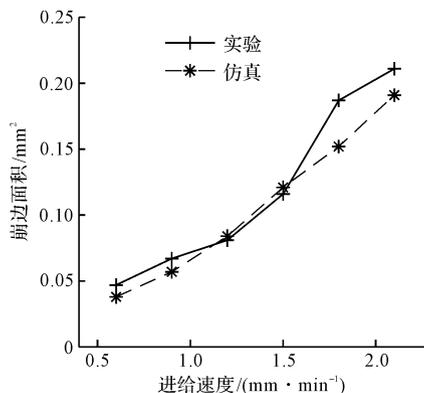


图 5 进给速度对入孔崩边面积的影响

由图 5 可知:在超声振动辅助磨削实验和仿真中,随着进给速度的增加,入孔崩边面积都会增加;在较高进给速度下,崩边面积曲线呈几何方式增加,脆性崩碎分布更加密集并且尺寸更大,这是因为进给速度增大造成了磨粒压入工件的深度增加,在工件内部会产生更大尺寸的裂纹,引起加工表面的大片崩碎发生;相比实验的结果而言,在较高的进给速度下,仿真结果误差更大,其原因可能是在较大的进给速度下,崩边发生的随机性变大,导致规律性变差;随着进给速度的增加,崩边面积曲线变化趋势两者基本一致。

3.2.3 超声振动对入孔崩边面积的影响

超声功率对深小孔入孔表面圆度误差的影响如图 6 所示。

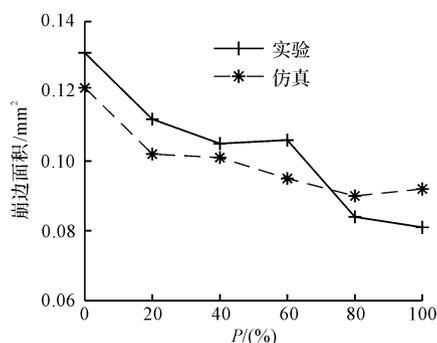


图 6 超声功率对深小孔入孔表面圆度误差的影响

由图 6 可知:在超声振动辅助磨削实验和仿真中,随着超声振动功率的增加,入孔崩边面积呈明显下降趋势,并且实验结果和仿真结果具有很高的相似度,仿真结果的平均误差在 10% 以内;加入超声振动后的入孔崩边得到了有效改善,在 100% 超声功率条件下,崩边面积减少了 38% 以上,很大程度上提高了硬脆材料加工中的入孔质量,这是由于超声振动的引入使磨粒在工件表面进行了高频冲击,对加工区域同一位置进行了反复压入和压出,产生了明显的交变应力,使材料在拉应力情况下实现了分离,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,同时超声振动也增加了单位体积内实际参与加工的磨粒数量,降低了单颗磨粒的实际磨削力,抑制了裂纹在工件内部的扩展趋势;从磨粒运动轨迹方面分析,高频振动使磨粒的连续切削变为了断续加工,在相邻两次冲击间隔条件下,磨粒与工件的实际接触时间极短,同样降低了加工中的实际磨削力。

此外,超声振动辅助磨削过程中工件和砂轮断续接触,提高了切削液的润滑效果,使工件的内部温度得以改善,并促进加工中产生的切屑和脱离的磨粒排出加工区域,减少了二次崩边发生的几率,提高了入孔边缘质量。

4 结束语

本文使用有限元软件对氧化锆陶瓷进行了磨削仿真,结合仿真结果,对超声振动辅助磨削实验进行指导,从仿真和实验的结果分析了氧化锆陶瓷磨削孔加工中入孔崩边的形成机理,研究了工艺参数对入孔崩边面积的影响规律,具体如下:

(1)从仿真结果可以看出:随着砂轮和工件接触,应力在磨粒接触位置逐渐增大,达到材料的断裂强度极限后,对失效单元进行了删除;仿真时,对砂轮附加超声后,在冲击作用下,磨粒和工件的接触位置应力迅速升高,在应力传播之前会达到应力极限,对单元进行删除,降低了崩边产生的尺寸;

(2)从实验结果可以看出:随着主轴转速和超声功率的增加,入孔崩边面积逐渐减少;随着进给速度的增加,崩边面积有几何增长的趋势;超声振动可以有效提高硬脆材料加工中的入孔质量,在100%超声功率条件下崩边面积减少了38%以上;

(3)从仿真和实验在入孔崩边面积方面的对比情况可以看出:仿真得出的崩边面积变化趋势和实验趋势基本一致,从整体上看崩边面积的仿真误差在10%以内,超声振动磨削仿真可以实现对入孔崩边面积的预测;

(4)将超声振动系统和传统砂轮磨削相结合,通

过仿真和实验,可以得出:去除了工件表面受到的磨粒冲击和交变载荷,降低了加工区域的应力集中程度,改善了加工中的冷却和润滑条件,提高了入孔质量。

参考文献(References):

- [1] INASAKI I. Grinding of hard and brittle materials [J]. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, 1987,36(2): 463-471.
- [2] LAUDERS B, KRAUTH J P, LIU W, et al. Investigation of material removal mechanisms in EDM of composite ceramic materials[J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2004,149(1-3):347-352.
- [3] 杜 鹃,李占杰,宫 虎,等.硬脆材料加工诱导崩边断裂的机理分析及控制方法研究[J]. **机械科学与技术**,2013,32(10):1451-1455.
- [4] THOE T B, ASPINWALL D K, WISE M L H. Review on ultrasonic machining [J]. **Int. j. mach. Tools Manuf**, 1998,38(4):239-255.
- [5] 黄 飞.氧化锆陶瓷超声旋转钻削振动系统改进设计及实验研究[D].广州:广东工业大学机电工程学院,2017.
- [6] 房丰洲,倪 皓,宫 虎.硬脆材料的旋转超声辅助加工[J]. **纳米技术与精密工程**,2014,12(3):227-234.
- [7] 冯平法,王健健,张建富.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(19):17-35.
- [8] NG S, LE D, TUCKER S, et al. Control of machining induced edge chipping on glass ceramics [C]. **Proceeding of the 1996ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Manufacturing Engineering Division, Atlanta: ASME**,1996.
- [9] 秦 娜.旋转超声波磨削制孔的切削力建模与试验研究[D].大连:大连理工大学机械工程学院,2011.
- [10] 王秀奇,张凤林,陈 梦,等.工程陶瓷在金刚石工具取孔加工中出口崩边的有限元分析[J]. **超硬材料工程**, 2013,25(3):20-24.
- [11] EGASHIRA K, KUMAGAI R, OKINA R, et al. Drilling of micro holes down to 10 μm in diameter using ultrasonic grinding [J]. **Precision Engineering**, 2014,38(3):605-610.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

谭丽娜,白 冰.基于超声振动的硬脆性材料磨削加工入孔崩边研究[J]. **机电工程**,2020,37(3):293-297.

TAN Li-na, BAI Bing. Study on the hole edge of hard and brittle materials based on ultrasonic vibration assisted grinding[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2020,37(3):293-297.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>