

DOI: 10.13957/j.cnki.tcx.2023.05.017

引文格式:

徐晗, 谭聪, 沈国浪, 等. 陶瓷坯体的旋转超声辅助加工实验研究[J]. 陶瓷学报, 2023, 44(5): 988–994.

XU Han, TAN Cong, SHEN Guolang, et al. Rotary ultrasonic assisted machining of ceramic billet [J]. Journal of Ceramics, 2023, 44(5): 988–994.

陶瓷坯体的旋转超声辅助加工实验研究

徐 晗¹, 谭 聪¹, 沈国浪¹, 李晓高¹, 王兴国¹, 张银龙²

(1. 景德镇陶瓷大学 机械电子工程学院, 江西 景德镇 333403; 2. 航空工业昌河飞机工业(集团)有限责任公司, 江西 景德镇 333000)

摘 要: 利用金刚石工具头高速旋转和超声频辅助轴向振动的加工方法铣削陶瓷坯, 以加工工艺中的四个重要工艺参数(有无超声加工、主轴转速、进给速度和不同素烧温度的陶瓷坯)为实验因素, 以轴向切削力为评判指标, 采用等水平正交试验方案, 研究各个加工参数对陶瓷坯加工质量的影响规律, 从而得出陶瓷坯旋转超声加工参数的最优组合。试验结果表明: 进给速度和超声加工的有无对轴向切削力的影响最大, 陶瓷坯素烧温度的不同和主轴转速对轴向切削力影响较小。在主轴转速为 $1600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $40 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和素烧温度为 $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的旋转超声加工条件下, 轴向切削力最小, 加工表面最好, 加工效果最佳。

关键词: 陶瓷坯; 旋转超声辅助加工; 工艺参数; 正交试验

中图分类号: TQ174.6⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1000-2278(2023)05-0988-07

Rotary Ultrasonic Assisted Machining of Ceramic Billet

XU Han¹, TAN Cong¹, SHEN Guolang¹, LI Xiaogao¹, WANG Xingguo¹, ZHANG Yinlong²

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Jingdezhen Ceramic University, Jingdezhen 333403, Jiangxi, China;
2. AVIC Changhe Aircraft Industry (Group) Corporation LTD., Jingdezhen 333000, Jiangxi, China)

Abstract: Ceramic billet was milling by means of high speed rotation of diamond tool head and ultrasonic assisted axial vibration. Four important technological parameters in the processing process (whether there is ultrasonic machining, spindle speed, feed speed and ceramic billet with different primary firing temperature) were taken as experimental factors, while the axial cutting force was taken as evaluation index. The equal level orthogonal test scheme was adopted. The influence law of each machining parameter on the machining quality of ceramic billet was studied, in order to obtain the optimal combination of rotating ultrasonic machining parameters of ceramic billet. It is found that the feed speed and ultrasonic machining have the greatest influence on the axial cutting force, while the firing temperature of ceramic blank and spindle speed have only very weak influence on the axial cutting force. Under the rotating ultrasonic machining conditions of spindle speed of $1600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, feed speed of $40 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ and primary burning temperature of $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$, the axial cutting force is minimum, the surface is finest and the machining effect is highest.

Key words: ceramic billet; rotary ultrasonic assisted machining; process parameters; orthogonal test

收稿日期: 2023-04-22。

修订日期: 2023-09-06。

基金项目: 国家自然科学基金(51565020); 江西省教育厅项目(720/05420)。

通信联系人: 徐 晗(1982-), 男, 硕士, 讲师。

Received date: 2023-04-22.

Revised date: 2023-09-06.

Correspondent author: XU Han (1982-), Male, Master, Lecturer.

E-mail: xuhan1982@163.com

0 引 言

陶瓷素坯是由陶土等原材料经过成型、干燥、烧成等工艺制成的未经装饰的陶瓷制品。该制品^[1]因其优异的热稳定性^[2]和耐磨性^[3]等优点被广泛应用于各行各业。但由于陶瓷脆硬性材料在加工过程中易出现切削力大、切削温度过高^[4]和工具头易磨损^[5]等问题,从而导致易产生微裂纹、加工表面粗糙^[6]、加工效率低和加工成本昂贵等后果,严重阻碍了陶瓷硬脆性材料在工业应用上的发展。

针对以上问题,特种加工技术随即产生,如电火花加工^[7-8]、激光加工^[9-10]、旋转超声辅助加工^[11]等。电火花加工技术虽然可以提高陶瓷脆硬性材料加工表面的质量,但是需要提供额外的辅助电极,容易导致放电不稳定,且增加设备成本。激光加工需要配备激光加工设备,加工成本昂贵。在加工过程中,激光设备产生的高能激光束会对人体造成一定的危害,并且该设备对工作环境要求极高,需要在低尘、无振动、无电磁干扰的环境下进行。旋转超声辅助加工^[12-13]无须配备昂贵的加工设备,加工成本低;加工范围广泛,不受加工材料硬度、脆硬性^[14]、熔点和导电性等属性的限制;污染较小,加工方式环保节能;简单的常规操作便可加工复杂的形状,如窄缝、小孔和不规则形状等。此外,它还结合了金刚石工具头优良的切削性能,旋转超声辅助加工方法可以降低加工表面的粗糙度^[15-16],减缓工具头的磨损,提高加工质量^[17-18]和加工效率^[19-20]。

目前,许多国内外学者对陶瓷脆硬性材料进行了旋转超声辅助加工实验,验证了该加工方法的优越性。郑侃等^[21]通过对完全烧结氧化锆陶瓷进行了旋转超声磨削加工试验,研究了主轴转速对磨削力、最大边缘碎裂尺寸和亚表面损伤特性的影响规律。汪勇等^[22]采用旋转超声加工的方式钻削氧化铝工程陶瓷材料,研究了施加压力、刀具转速和超声振幅对材料去除率的影响关系。宫虎等^[23]研究了陶瓷球转速、砂轮转速和起始相位角等参数对表面纹理的影响。许俊等^[24]研究了工件固定装置中夹紧力、支撑长度和材料类型等加工参数对崩边区域最大主应力的影响。

陶瓷脆硬性材料加工状况的改善^[25]一般有三种:(1)提高工具头性能;(2)应用新加工方法;(3)选用可加工陶瓷材料。上述研究主要集中在提高工具头性能和应用新型加工方法,没有综合考虑到材料自身因素对加工作用的效果。针对以上问题,本文根据自身设计和搭建的旋转超声辅助加工设备^[26],以加工工艺中的四个重要工艺参数

(有无超声加工、主轴转速、进给速度和不同素烧温度的陶瓷坯)为实验因素,以轴向切削力为评判指标,采用等水平正交试验方案^[27],在材料去除量相同的情况下,研究各个加工参数对陶瓷坯加工质量的影响规律,从而得出陶瓷坯材料旋转超声加工参数的最优组合,改善因切削力大而易出现材料加工质量不佳的问题,为陶瓷材料高效率高质量加工提供了工艺基础。

1 试 验

1.1 旋转超声辅助加工机床

本文采用自制的旋转超声辅助加工机床作为实验设备,如图 1 所示。该机床由超声波发生器、mach3 机床、旋转超声辅助加工系统(换能器、变幅杆和工具头)和辅助连接件组成。在超声波发生器给换能器通电的作用下,旋转超声辅助加工系统具备高频纵向振动和高速旋转运动。以陶瓷坯作为加工对象,该陶瓷坯的材料组成成分如表 1 所示,其规格为 60 mm×60 mm×10 mm,在 mach3 机床上进行数控编程以完成旋转超声辅助加工实验。

表 1 陶瓷坯组成成分(wt.%)
Tab. 1 Composition of the ceramic body (wt.%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	IL
65.87	22.13	0.47	0.81	0.49	2.83	1.80	—

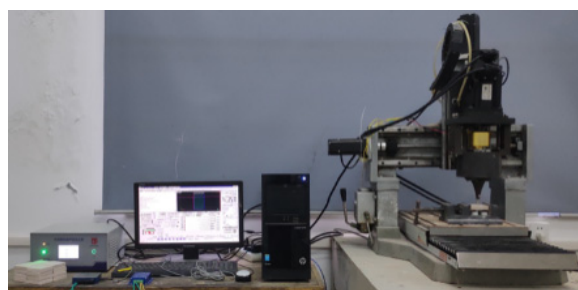


图 1 旋转超声加工机床实物图

Fig. 1 Physical drawing of the rotary ultrasonic machine tool

1.2 实验方法

本文通过压力传感器、放大器、数据采集卡和 Labview 软件完成对轴向切削力的采集。压力传感器采用具有体积小、精度高和稳定性强的微型压力传感器。放大器则采用高精度、高稳定、多种功能输出和带有显示屏幕的 PLC 变送器。数据采集卡选用美国 NI 公司的 USB-6000。微型压力传感器将主轴上的轴向切削力转换成电信号,该电信号通过 PLC 变送器转换成可以输出的标准化电压,最后通过数据采集卡和 Labview 软件将该电压信号转换成数字信号,完成轴向切削力的采集。

正交试验主要研究加工过程中四个重要影响因素(有无超声加工、主轴转速、进给速度和不同素烧温度的陶瓷坯)对陶瓷脆硬性材料加工质量的影响,以轴向切削力为评判指标,本实验采用四因素五水平的等水平正交试验方案。主轴转速过高会导致机床振动太大,工件表面粗糙度值增加,甚至形成划痕、毛刺等缺陷,影响加工质量,且加工过程中会产生更多的切削热,对刀具的损伤很大,故主轴转速不宜过高。进给速度过低会使刀具停留在工件表面太久,产生过多摩擦和热量,影响刀具寿命,从而导致工件表面粗糙度值增加,甚至形成划痕、毛刺等缺陷,影响加工质量。进给速度过高会影响伺服电机和工具头的寿

命。陶瓷坯素烧温度过低会导致坯体的强度不够,脆性增加,易出现变形、开裂、缺陷等问题,降低坯体质量。因此,钻孔加工参数的水平数值如正交表 2 所示。

由于各因素的水平数不同,故采用拟水平法,对超声加工中剩余的 3 个水平数用有超声加工和无超声加工随机填充,对陶瓷坯材料这个因素也采取这种方法。根据表 1 所示的水平值进行正交试验,试验结果如表 3 所示,分析有无超声加工、主轴转速、进给速度和不同素烧温度的陶瓷坯材料等因素对轴向切削力的影响规律,得出各个因素对轴向切削力的影响程度,获得陶瓷脆硬性材料旋转超声加工参数的最优组合。

表 2 钻孔正交试验各因素水平

Tab. 2 Drilling orthogonal test of each factor level

Level	Factor A (Ultrasonic machining)	Factor B (Firing temperature of ceramic blank)/°C	Factor C (Spindle speed)/(r·min ⁻¹)	Factor D (Feed rate)/(mm·min ⁻¹)
1	Yes	600	800	40
2	No	700	1000	50
3	Yes	800	1200	60
4	No	900	1400	70
5	Yes	600	1600	80

表 3 钻孔正交试验各因素水平

Tab. 3 Drilling orthogonal test of each factor level

Test number	A	B	C	D	Axial cutting force/N
1	1	1	1	1	17.27
2	1	2	2	2	31.37
3	1	3	3	3	39.33
4	1	4	4	4	47.72
5	1	1	5	5	39.59
6	2	1	2	3	50.67
7	2	2	3	4	67.49
8	2	3	4	5	69.52
9	2	4	5	1	36.38
10	2	1	1	2	37.79
11	1	1	3	5	47.32
12	1	2	4	1	16.85
13	1	3	5	2	26.37
14	1	4	1	3	44.79
15	1	1	2	4	39.82
16	2	1	4	2	35.61
17	2	2	5	3	42.63
18	2	3	1	4	57.26
19	2	4	2	5	84.83
20	2	1	3	1	34.27
21	1	1	5	4	36.19
22	1	2	1	5	39.14
23	1	3	2	1	28.38
24	1	4	3	2	41.38
25	1	1	4	3	26.79

2 结果与讨论

2.1 实验结果

将每个因素中各个水平的指标数值分别相加,计算出不同因素下对应各个水平指标的平均值和极差值,绘制有无超声加工、主轴转速、进给速度和不同素烧温度的陶瓷坯等因素对轴向切削力的影响变化图,以此确定各个因素对轴向切削力影响的主要次序和各因素与轴向切削力的变化关系。极差是指各个因素中各个水平指标平均值的极差,它可以反映出每个因素在不同水平下与考察指标数据的离散程度,进而评价出各个因素对轴向切削力的影响主要顺序。极差越大说明该因素对轴向切削力的影响最大,极差越小说明该因素对轴向切削力的影响最小。轴向切削力的极差分析表如表 4 所示。

对表 3 中的极差结果进行分析,如图 2 所示。由图可知,进给速度对轴向切削力的影响最大,超声加工的有无对轴向切削力影响第二,陶瓷坯素烧温度的不同对轴向切削力的影响排居第三,主轴转速对轴向切削力影响最小。对加工参数的优化需根据各因素对轴向切削力影响程度而定。

表 4 轴向切削力的极差分析表
Tab. 4 Range analysis table of axial cutting force

	Ultrasonic processing	Firing temperature of ceramic blank/°C	Spindle speed/(r·min ⁻¹)	Feed rate/(mm·min ⁻¹)
Sum 1	522.31	365.32	196.25	133.15
Sum 2	516.45	197.48	235.07	172.52
Sum 3	—	220.86	229.79	204.21
Sum 4	—	255.10	196.49	248.48
Sum 5	—	—	181.16	280.40
Average 1	34.82	36.53	39.25	26.63
Average 2	51.65	39.50	47.01	34.50
Average 3	—	44.17	45.96	40.84
Average 4	—	51.02	39.30	49.70
Average 5	—	—	36.23	56.08
Range	16.82	14.49	10.78	29.45

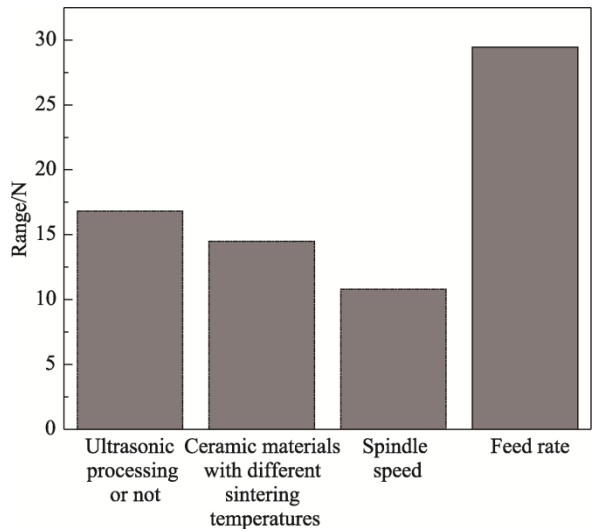


图 2 各因素对轴向切削力的影响程度比较图
Fig. 2 Influence degree of each factor on axial cutting force

陶瓷坯素烧温度的不同对轴向切削力的影响规律如图 3 所示。在进给速度为 $40 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、主轴转速为 $1600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的加工情况下，对不同素烧温度的陶瓷坯上进行两种加工方式。由图可知，无论是普通加工还是旋转超声辅助加工，轴向切削力均会随着陶瓷坯素烧温度的升高呈现出不断增加的趋势。众所周知，陶瓷坯的硬度随着素烧温度的升高而越硬，故在加工过程当中，轴向切削力越大。

主轴转速与轴向切削力的规律如图 4 所示，控制进给速度为 $40 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，在 $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 素烧温度的陶瓷坯上采用两种加工方式，轴向切削力随

着主轴转速的递增均呈现出先增后减的趋势。如在旋转超声辅助加工的情况下，随着主轴转速递增，轴向切削力由一开始的 17.3 N 逐渐增加到 22.2 N ，后面减小到 13.5 N 。主轴转速的增加会使得工具头上的金刚石磨粒参与加工的颗粒增加，同时会减小每颗金刚石磨粒的加工深度，由于越来越多的金刚石磨粒参与加工，轴向切削力会在一开始有一个增加的趋势，当主轴转速增加到一定时，工具头上的金刚石磨粒已全部参与加工过程，金刚石磨粒颗数不再增加，而每颗金刚石磨粒的加工深度在不断减小，故轴向切削力呈现出逐渐减小的趋势。

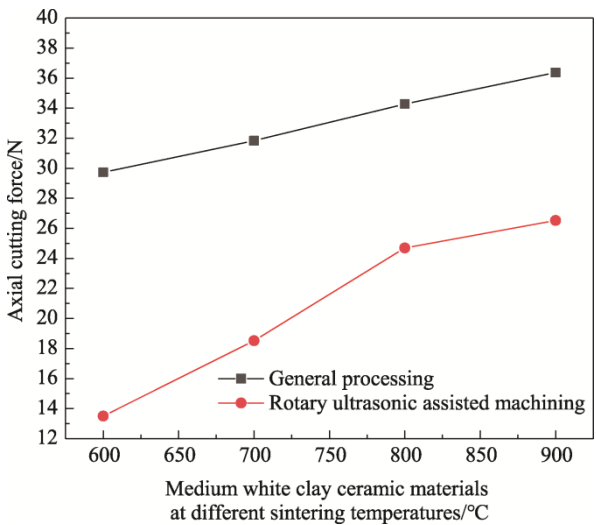


图 3 不同素烧温度陶瓷坯与轴向切削力的关系图
Fig. 3 Relationships between ceramic blank and axial cutting force at different firing temperatures

由图 5 可知,当主轴转速为 $1600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,并对 $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 素烧温度的陶瓷坯上进行普通加工和旋转超声加工时,轴向切削力随着进给速度的递增呈现出递增的趋势。进给速度的提高会增加金刚石工具头磨粒的加工深度,磨粒承受的切削力就越大。此外,进给速度的增加会减小钻孔过程中超声振动工作的时间,从而削弱了超声过程当中锤击和磨抛作用,故轴向切削力呈现出逐渐增加的趋势。

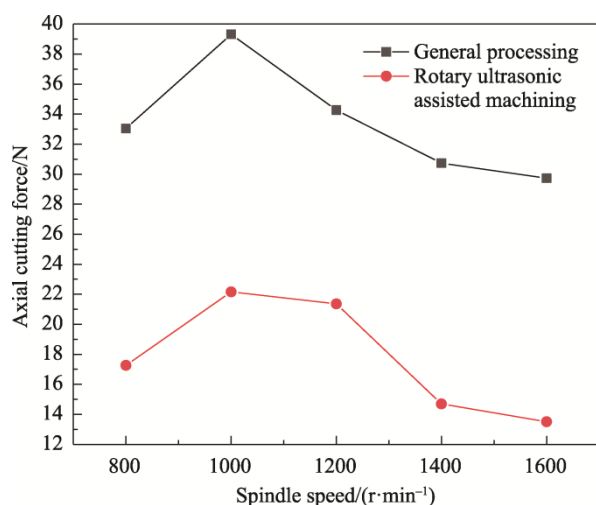


图 4 主轴转速与轴向切削力的关系图

Fig. 4 Relationship between spindle speed and axial cutting force

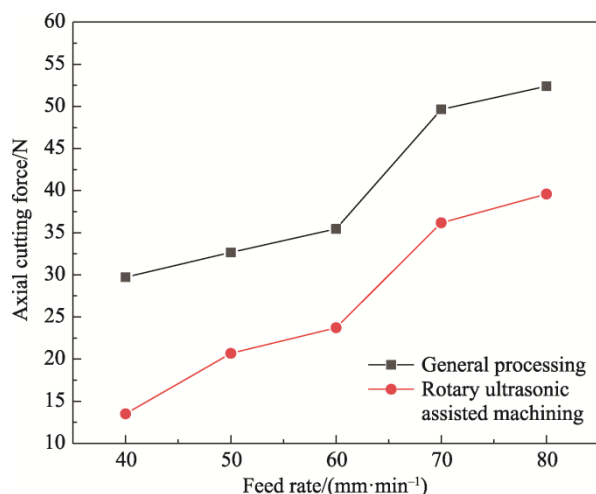


图 5 进给速度与轴向切削力的关系图

Fig. 5 Relationship between feed speed and axial cutting force

此外,由图 3、图 4 和图 5 三个图易知,旋转超声辅助加工在加工过程当中相较于普通加工,确实可以减少工具头的轴向力,旋转超声辅助加工的超声波会引起工具头表面质点交替的压缩与

伸张^[28],使得表面介质间产生了压力变化,从而使得表面介质产生了机械运动的效应。虽然该运动的位移和速度不大,但由于超声频率很高,质点加速度很大,该力通过固结在工具头中的金刚石颗粒的刃部作用到工件上,导致材料表面的微细裂纹的产生、发展,以致材料的局部破碎去除,再加上金刚石工具头的高速旋转,对工件表面进行划擦、磨抛、撕扯,从而加速微观裂纹的发展,造成材料的宏观破碎去除。由于工件材料主要依靠磨粒瞬时局部的冲击作用,故工件表面的宏观切削力很小,切削热少,实现加工效率高、切削力小、切削温度低、工具头损耗小和加工精度高等加工特性。

综上可知,在主轴转速为 $1600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $40 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和陶瓷坯素烧温度为 $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的加工条件下,对陶瓷坯进行旋转超声辅助加工,工具头轴向切削力最小。

2.2 加工结果实物图

在主轴转速为 $1600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $40 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和陶瓷坯素烧温度为 $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的加工条件下,对陶瓷坯进行有无旋转超声辅助加工实验对比,加工后的结果如图 6 所示。

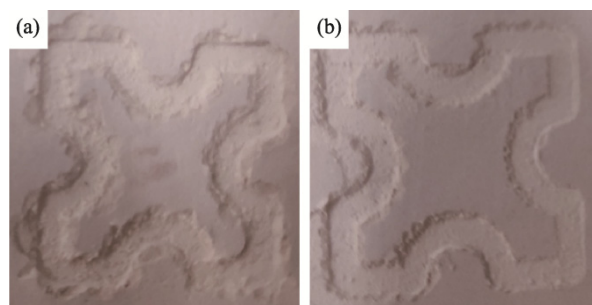


图 6 陶瓷坯加工实物图: (a) 普通加工实验图;

(b) 旋转超声加工实验图

Fig. 6 physical drawings of the ceramic blank processing: (a) general machining drawing and (b) experimental diagram of rotary ultrasonic machining

由图 6 可知,普通加工表面崩边严重,且刮划摩擦痕迹明显。普通加工主要依靠工具头的机械能对材料进行切除,正是由于该特点,材料在被切除的同时,加工表面会因切削力大和切削温度过高导致加工表面质量粗糙,而旋转超声辅助加工则是同时利用声能和机械能对材料进行切除,减小了工具头对材料的切削力,减少了加工时产生的热量。因此,旋转超声辅

助加工相比于普通加工而言, 加工表面的划痕痕迹更少, 崩边情况也得到了改善, 故而加工质量得到了提高。

3 结 论

利用搭建好的旋转超声辅助加工装置, 设计等水平无交互作用的正交试验方案, 在材料去除量相同的情况下, 以轴向切削力为评判指标, 对不同素烧温度的陶瓷坯进行不同加工参数(有无超声加工、主轴转速、进给速度)的旋转超声辅助加工实验。研究了有无超声加工、主轴转速、进给速度和不同素烧温度的陶瓷坯等加工参数对工具头轴向切削力的影响规律, 得出各个加工参数对陶瓷脆硬性材料加工质量的影响规律, 从而优化了陶瓷脆硬性材料加工工艺参数。

(1) 进给速度对加工质量的影响程度最大, 有无超声加工的影响程度第二, 不同素烧温度的陶瓷坯影响程度第三, 主轴转速影响程度最小。

(2) 在控制变量的情况下, 旋转超声辅助加工与普通加工相比, 工具头的轴向切削力更小, 加工表面的崩边情况及刮划摩擦痕迹更少, 加工质量更好; 轴向切削力随着陶瓷坯素烧温度、进给速度和主轴转速等加工参数的提高呈现出不同的变化趋势。在主轴转速为 $1600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $40 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和陶瓷坯素烧温度为 $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的加工条件下, 对陶瓷坯进行旋转超声辅助加工, 工具头的轴向切削力最小, 陶瓷坯加工表面的刮划痕迹更少, 加工效果更好。

参考文献:

- [1] 张黎明. 微晶云母陶瓷超声振动铣磨小孔出口崩边研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2019.
- [2] 闫洪, 窦明民, 李和平. 二氧化锆陶瓷的相变增韧机理和应用[J]. 陶瓷学报, 2000, 21(1): 46–50.
YAN H, DOU M M, LI H P. Journal of Ceramics, 2000, 21(1): 46–50.
- [3] 成茵, 肖汉宁, 李玉平. 层状复合陶瓷增韧机理和制备工艺的研究[J]. 陶瓷学报, 2003, 24(2): 111–115.
CHENG Y, XIAO H N, LI Y P. Journal of Ceramics, 2003, 24(2): 111–115.
- [4] 李哲, 张德远, 姜兴刚. 钛合金旋转超声辅助钻削的出口毛刺[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(7): 1380–1386.
LI Z, ZHANG D Y, JIANG X G. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(7): 1380–1386.
- [5] 雷敬文. 钛合金旋转超声加工中固结磨粒工具的扭矩与磨损研究[D]. 西南交通大学, 2015.
- [6] 韩文, 王玉涛, 徐晗. 三维扫描技术在异形超薄陶瓷雕刻中的应用研究[J]. 陶瓷学报, 2014, 35(3): 314–317.
HAN W, WANG Y T, XU H. Journal of Ceramics, 2014, 35(3): 314–317.
- [7] 徐小兵. 绝缘陶瓷材料电火花加工技术及仿真研究[D]. 武汉理工大学, 2009.
- [8] 毕进子, 张勤河, 张建华, 等. 陶瓷气中放电加工性能预测及加工参数优化仿真系统[J]. 陶瓷学报, 2002, 23(2): 119–122.
BI J Z, ZHANG Q H, ZHANG J H, et al. Journal of Ceramics, 2002, 23(2): 119–122.
- [9] 周敏. 短脉冲紫外激光抛光工程陶瓷的机理及其工艺规律研究[D]. 广东工业大学, 2014.
- [10] 李青, 王丽红, 周波. 浅析激光加工技术在光电显示玻璃生产中的发展现状[J]. 应用激光, 2016, 36(3): 357–362.
LI Q, WANG L H, ZHOU B. Applied Laser, 2016, 36(3): 357–362.
- [11] 秦哲. 旋转超声加工系统的振幅控制研究[D]. 广东工业大学, 2018.
- [12] 康凯, 张云电, 赵猛, 等. 具有复合型工具的超声加工声学系统设计[J]. 机电工程, 2018, 35(8): 843–847.
KANG K, ZHANG Y D, ZHAO M, et al. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(8): 843–847.
- [13] CHEN F, BIE W B, WANG X B, et al. Longitudinal-torsional coupled rotary ultrasonic machining of ZrO_2 ceramics: An experimental study [J]. Ceramics International, 2022, 48(19): 28154–28162.
- [14] 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 Y H, CHEN H B, MA W J, et al. Surface Technology, 2020, 49(4): 90–97.
- [15] 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): 3–21.
FENG P F, WANG J J, ZHANG J F, et al. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 3–21.
- [16] SHU J, LIAO W H, ZHENG K, et al. Effect of rotary ultrasonic machining on surface structure and ablation resistance of C/C composite [J]. Ceramics International, 2022, 48(13): 18246–18256.
- [17] 曾加恒, 陈燕, 张科丙, 等. 旋转超声辅助磁力研磨镍基合金参数优化设计及分析[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 274–280.

- ZENG J H, CHEN Y, ZHANG K B, et al. Surface Technology, 2018, 47(11): 274–280.
- [18] 查慧婷, 冯平法, 张建富. 高体积分数 SiCp/Al 复合材料旋转超声铣磨加工的试验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 107–113.
- ZHA H T, FENG P F, ZHANG J F. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 107–113.
- [19] 杨萍. 机械用新型碳纤维复合材料的旋转超声加工工艺研究[J]. 粘接, 2022, 49(9): 62–67.
- YANG P. Adhesion, 2022, 49(9): 62–67.
- [20] 张卫锋, 刘致君, 张灿祥, 等. 旋转超声加工的研究现状及发展趋势[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(3): 1–4, 19.
- ZHANG W F, LIU Z J, ZHANG C X, et al. Machine Building & Automation, 2021, 50(3): 1–4, 19.
- [21] 郑侃, 肖行志, 廖文和, 等. 完全烧结氧化锆牙科陶瓷材料的旋转超声加工实验研究[J]. 人工晶体学报, 2013, 42(9): 1864–1869.
- ZHENG K, XIAO X Z, LIAO W H, et al. Journal of Synthetic Crystals, 2013, 42(9): 1864–1869.
- [22] 汪勇, 张国青. 基于钎焊金刚石钻头的旋转超声钻削工程陶瓷的实验研究[J]. 池州学院学报, 2015, 29(3): 159–160.
- WANG Y, ZHANG G Q. Journal of Chizhou University, 2015, 29(3): 159–160.
- [23] 宫虎, 陈芳琪, 王涛, 等. 陶瓷人工髋关节球超精密磨削加工微观纹理形成规律[J]. 光学精密工程, 2019, 27(9): 1926–1934.
- GONG H, CHEN F Q, WANG T, et al. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(9): 1926–1934.
- [24] 许俊, 胡红斐, 唐勇军, 等. 旋转超声加工陶瓷过程中崩边的有限元分析及实验验证[J]. 电加工与模具, 2014, 11(4): 33–37.
- XU J, HU H F, TANG Y J, et al. Electromachining & Mould, 2014, 11(4): 33–37.
- [25] 钟利军, 于爱兵, 刘家臣, 等. 可加工陶瓷材料的机械加工技术[J]. 现代技术陶瓷, 2003(2): 41–45.
- ZHONG L J, YU A B, LIU J C, et al. Advanced Ceramics, 2003(2): 41–45.
- [26] 谭聪, 沈国浪, 李晓高, 等. 陶瓷材料旋转超声辅助加工设备的结构优化[J]. 陶瓷学报, 2022, 43(4): 706–712.
- TAN C, SHEN G L, LI X G, et al. Journal of Ceramics, 2022, 43(4): 706–712.
- [27] 庞超明, 黄弘. 试验方案优化设计与数据分析[M]. 南京: 东南大学出版社, 2016.
- [28] 郑书友. 旋转超声加工机床的研制及实验研究[D]. 华侨大学, 2008.

(编辑 梁华银)