

# 双弯振旋转超声加工氧化铝的工艺试验研究

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2026.2005

洪俊<sup>1</sup> 吴吉平<sup>1</sup>

鞠建忠<sup>2</sup> 隆志力<sup>2</sup>

1. 湖南工业大学

机械工程学院

湖南 株洲 412007

2. 哈尔滨工业大学(深圳)

智能科学与工程学院

广东 深圳 518055

**摘要:**  $\text{Al}_2\text{O}_3$  因其优异的物理、化学和力学性能而被广泛应用于多个工业领域, 然而其高硬度、高脆性、强耐磨性及低热导率等特性导致加工难度较大。旋转超声加工技术因其能够显著降低切削力、改善表面粗糙度并延长刀具寿命, 已成为加工硬脆材料的有效方法。基于自主研发的双弯振旋转超声椭圆加工系统, 分别对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  进行了普通磨削、一维和二维超声振动辅助磨削工艺试验, 系统研究了不同加工模式下工艺参数对加工性能的影响, 并定量分析了最大切削力和表面粗糙度的变化规律。与传统的普通磨削相比, 旋转超声加工能显著降低切削力和工件表面粗糙度; 相较于一维旋转超声加工, 二维旋转超声椭圆加工展现出更优异的加工性能。这不仅证实了双弯振旋转超声加工技术在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  材料加工中的显著优势, 还为拓展该技术在精密加工领域的应用提供了重要的试验依据和理论指导。

**关键词:** 旋转超声加工; 氧化铝; 切削力; 表面粗糙度

**中图分类号:** TB559

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2026)02-0033-08

**引文格式:** 洪俊, 吴吉平, 鞠建忠, 等. 双弯振旋转超声加工氧化铝的工艺试验研究 [J]. 包装学报, 2026, 18(2): 33-40.

氧化铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 陶瓷<sup>[1-3]</sup> 因其优异的物理性能<sup>[4]</sup>(如高硬度、高耐磨性、良好的化学稳定性和高温稳定性)以及出色的力学性能, 被广泛应用于航空航天、精密仪器、电子封装、生物医疗等领域<sup>[5]</sup>。然而, 这些特性在赋予材料卓越服役性能的同时, 也为加工领域带来了显著挑战。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷固有的高硬脆性、低断裂韧性、极高的耐磨性以及较低的热导率, 导致其在传统机械加工<sup>[6]</sup>过程中极易产生切削力过大<sup>[7]</sup>、刀具磨损剧烈<sup>[8]</sup>、加工效率低下<sup>[9]</sup>、加工表面质量差<sup>[10]</sup>等问题。因此, 开发高效、精密、低损伤的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶

瓷加工技术, 对于提升其应用性能和拓展应用范围具有重要的工程意义。

旋转超声加工<sup>[11]</sup> (RUM) 作为一种先进的复合加工技术, 通过将刀具的旋转运动与高频超声振动相结合, 以改善硬脆材料的加工性能<sup>[12]</sup>。相较于传统磨削 (CG), RUM 技术能够显著降低切削力<sup>[13]</sup>、减小刀具磨损<sup>[14]</sup>、改善加工表面粗糙度<sup>[15]</sup>并提升材料去除率, 因而在工程陶瓷、光学玻璃、单晶硅等难加工材料的精密加工中展现出独特优势<sup>[16]</sup>。其中, 二维旋转超声椭圆加工 (2DOF) 技术<sup>[17]</sup> 通过在相互

收稿日期: 2025-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52175392); 湖南省自然科学基金资助项目 (2023JJ50186); 湖南省教育厅科学研究重点项目 (24A0397)

作者简介: 洪俊, 男, 硕士生, 主要研究方向为旋转超声设备设计与制造, E-mail: junhong0606@163.com

通信作者: 吴吉平, 男, 副教授, 主要从事高性能制造与智能化技术等领域研究, E-mail: wujiping@hut.edu.cn

垂直的两个方向上以一定相位差激发弯曲振动模态，使加工刀具末端产生二维椭圆振动轨迹。这种复杂的振动轨迹在理论上能够更有效地促进磨粒与工件的动态交互作用，增强微切削和材料去除效率，且更有利抑制裂纹扩展。

综上，本课题组研发了一套双弯振旋转超声椭圆加工系统，并将普通磨削、一维旋转超声加工和二维旋转超声椭圆加工3种加工方式进行对比分析，得到不同加工模式及其关键工艺参数对加工的影响，旨在定量评估双弯振旋转超声椭圆加工技术的优势，并为该技术的推广和应用提供依据。

## 1 系统原理

### 1.1 加工原理

旋转超声加工技术的工作原理是通过超声振动使磨粒周期性撞击工件表面，使硬脆材料产生微裂纹并局部破碎<sup>[18]</sup>。在加工过程中，高频的微振动会使刀具和工件之间产生间歇性的接触效应，有效减少了接触时间以及加工过程中的切削力和切削热；刀具的振动还会使切削液更易流入刀具与工件接触的表面，能够更好地发挥切削液的降温作用；此外，刀具与工件的振动分离效应，极大地提高了加工过程中的排屑效率，降低了刀具磨损程度。

二维旋转超声椭圆加工是在一维加工的基础上，同时对平面内的不同方向进行激励，使得刀具形成一个椭圆振动轨迹。与一维旋转超声加工相比，这种椭圆振动轨迹能够更高效地利用超声能量，使磨粒与工件表面的碰撞更为频繁，极大提高了加工效率与表面质量。图1为本双弯振旋转超声加工示意图。

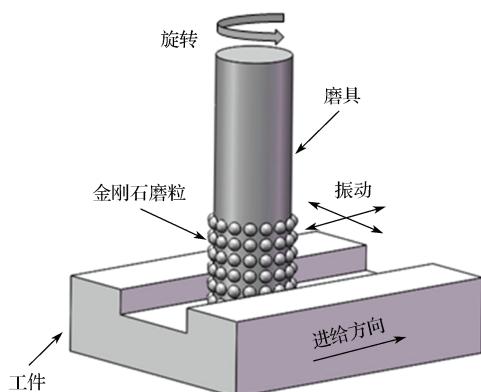


图1 双弯振旋转超声加工示意图

Fig. 1 Double bending vibration rotary ultrasonic machining

### 1.2 椭圆轨迹形成原理

双弯振旋转超声加工系统可以通过激发两组相互正交的弯曲振动形成二维旋转超声椭圆振动轨迹。当两组压电陶瓷片受到激励时，会在刀尖产生沿x、y方向的正弦振动，

$$B_x = A_1 \sin(2\pi f_x t + \varphi_x), \quad (1)$$

$$B_y = A_2 \sin(2\pi f_y t + \varphi_y), \quad (2)$$

式中： $B_x$ 、 $B_y$ 为刀尖位移； $A_1$ 、 $A_2$ 为最大振幅； $f_x$ 、 $f_y$ 为工作频率； $\varphi_x$ 、 $\varphi_y$ 为初始相位； $t$ 为时间。

由上可得刀尖轨迹，见式(3)。当 $f_x=f_y$ 且两个方向具有不同相位差时，刀尖将会产生不同的振动轨迹。当相位差 $\varphi_x-\varphi_y=\pi/2$ 时，振动轨迹为椭圆，见式(4)。

$$\left(\frac{B_x}{A_1}\right)^2 + \left(\frac{B_y}{A_2}\right)^2 - \frac{2B_x B_y \cos(\varphi_x - \varphi_y)}{2A_1 A_2} = \sin^2(\varphi_x - \varphi_y), \quad (3)$$

$$\left(\frac{B_x}{A_1}\right)^2 + \left(\frac{B_y}{A_2}\right)^2 = 1. \quad (4)$$

## 2 试验设备与方案

双弯振旋转超声椭圆加工系统可在不同方向进行振动激励，从而形成一维与二维的两种振动轨迹。加工试验平台如图2所示。加工机床为北京京雕JDVT600T-A13S。加工材料 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (25 mm × 25 mm × 10 mm)通过夹紧装置安装在力传感器上。在加工过程中，力传感器将切削力的信号传递给处理器，并在PC上显示。金刚石刀具直径为6 mm，晶粒尺寸为200#。使用白光干涉仪(Newview 9000, 美国)对磨削后的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 表面进行粗糙度测量，从而表征加工后工件的表面粗糙度，以此来判定不同加工方式在各种工艺参数下的工件表面质量。

3种加工工艺参数范围分别为：主轴转速为2000~6000 r/min，进给速度为120~180 mm/min，吃刀量为0.01~0.03 mm，一维和二维旋转超声振动振幅为3~7 μm。普通磨削的工艺参数具体设置如表1所示。表2和表3分别为一维旋转超声加工和二维旋转超声椭圆加工的工艺参数。试验探讨了在超声振动振幅为5 μm，而其他参数不同下，以及在主轴转速4000 r/min、进给速度120 mm/min、吃刀量0.01 mm，而超声振动振幅不同(3, 5, 7 μm)下，3种加工方式对切削力与工件表面粗糙度的影响。

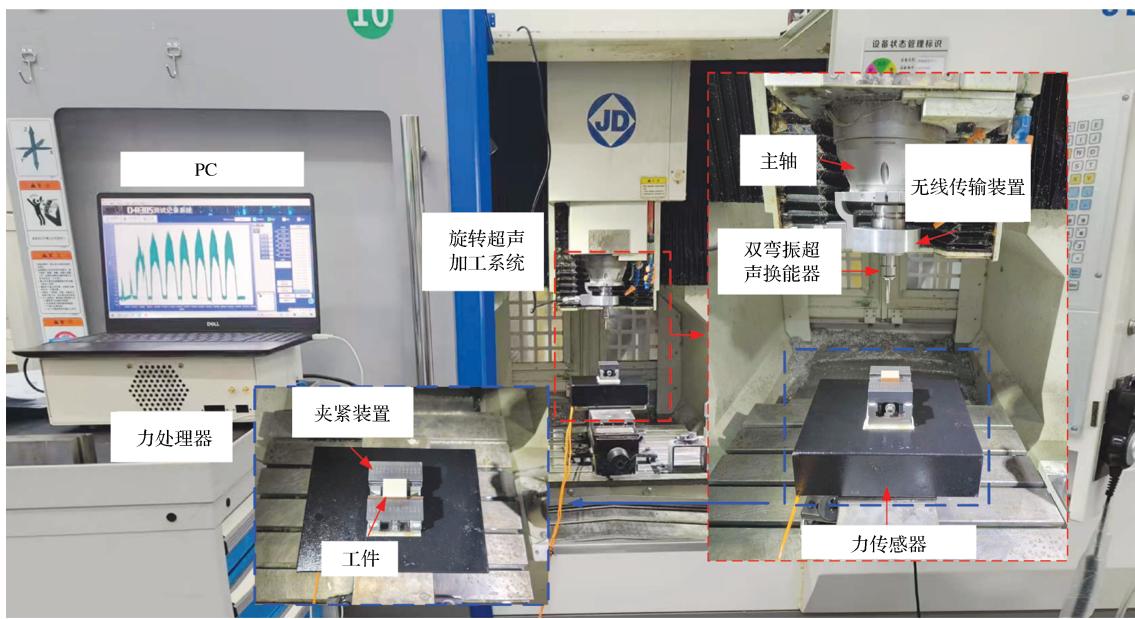


图 2 加工试验平台

Fig. 2 Machining experiment platform

表 1 普通磨削下的工艺参数

Table 1 Machining parameters under ordinary grinding

序号	转速 / (r·min⁻¹)	进给速度 / (mm·min⁻¹)	吃刀量 / mm
1	2000	120	0.02
2	4000	120	0.02
3	6000	120	0.02
4	4000	160	0.02
5	4000	180	0.02
6	4000	120	0.01
7	4000	120	0.03

表 2 一维旋转超声加工下的工艺参数

Table 2 Machining parameters under one-dimensional rotary ultrasonic machining

序号	转速 / (r·min⁻¹)	进给速度 / (mm·min⁻¹)	吃刀量 / mm	振幅 / μm
8	2000	120	0.02	5
9	4000	120	0.02	5
10	6000	120	0.02	5
11	4000	160	0.02	5
12	4000	180	0.02	5
13	4000	120	0.01	5
14	4000	120	0.03	5
15	4000	120	0.01	3
16	4000	120	0.01	7

表 3 二维旋转超声椭圆加工下的工艺参数

Table 3 Machining parameters under two-dimensional rotary ultrasonic elliptical machining

序号	转速 / (r·min⁻¹)	进给速度 / (mm·min⁻¹)	吃刀量 / mm	振幅 / μm
17	2000	120	0.02	5
18	4000	120	0.02	5
19	6000	120	0.02	5
20	4000	160	0.02	5
21	4000	180	0.02	5
22	4000	120	0.01	5
23	4000	120	0.03	5
24	4000	120	0.01	3
25	4000	120	0.01	7

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 不同磨削方式对切削力的影响

在磨削过程中, 切削力会显著影响工件的表面质量与刀具寿命<sup>[19]</sup>。通过自主研制的力传感测量系统对加工过程中的切削力进行监控, 对比分析不同加工方式在不同工艺参数下的切削力, 从而探究旋转超声加工对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的磨削效果。

图 3 为不同转速下的切削力。随着主轴转速的增加, 磨粒与加工面的接触更加频繁, 故普通磨削、一维旋转超声加工与二维旋转超声椭圆加工的切削力

均降低。同一转速下，一维旋转超声加工的切削力相较于普通磨削的最大降低为 15.8%。在同一组加工工艺参数下，二维旋转超声椭圆加工在降低切削力方面明显优于一维旋转超声加工与普通磨削，其切削力最大降低发生在 4000 r/min 转速下，相较于普通磨削与一维旋转超声加工分别降低了 32% 和 13.3%。

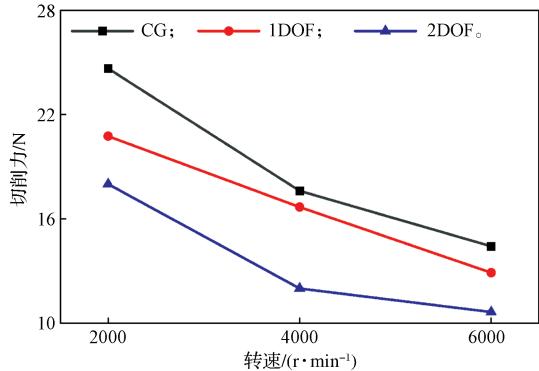


图 3 不同转速下的切削力

Fig. 3 Cutting forces at different rotational speeds

图 4 为不同吃刀量下的切削力。随着吃刀量的增大，3 种加工方式皆表现出切削力增大的现象。这是由于吃刀量越大，切削层的截面积越大，导致剪切阻力显著上升。此外，在各种吃刀量下，旋转超声加工都能够明显地降低切削力。在吃刀量为 0.03 mm 下，一维旋转超声加工的切削力相较于普通磨削的最大降低为 19.9%；在吃刀量为 0.02 mm 下，二维旋转超声椭圆加工的切削力相较于普通磨削与一维旋转超声加工，最大降低分别为 32% 与 17.5%。

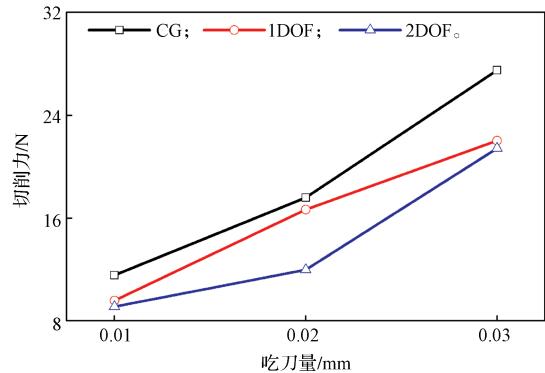


图 4 不同吃刀量下的切削力

Fig. 4 Cutting forces at different depths of cut

图 5 为不同进给速度下的切削力。切削力随着进给速度的增大而增大，该趋势与吃刀量对切削力的影响一致。这是由于进给速度的增大使单位时间内材料的去除率增加，刀具需要克服更大的阻力。旋转超声

能够很好地降低切削力：一维旋转超声加工的最大切削力相较于普通磨削的降低了 19.5%；二维旋转超声椭圆加工的切削力显著降低，在进给速度为 60 mm/min 时，其切削力降低最大，与普通磨削和一维旋转超声加工相比，分别降低了 41.5% 与 34.6%。

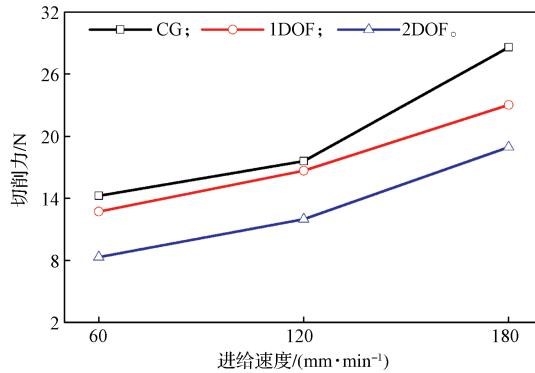


图 5 不同进给速度下的切削力

Fig. 5 Cutting forces at different feed rates

从改变主轴转速、吃刀量与进给速度 3 个工艺参数可以看出，旋转超声加工能够显著降低切削力。但上述旋转超声加工由于仅在单一振幅 (5 μm) 条件下进行试验，并未探究不同振幅条件对切削力的影响。因此，进一步对不同振幅条件 (3, 5, 7 μm) 下的切削力展开讨论，结果如图 6 所示。由图 6 可知，切削力随着振幅的增大而逐渐减小，这是由于超声加工过程中振动分离效应进一步降低了切削力。当振幅为 7 μm 时，切削力显著降低，此时一维旋转超声加工的切削力相较于普通磨削的降低了 29.3%，二维旋转超声椭圆加工的切削力与普通磨削的和一维旋转超声加工的相比，分别降低了 39.7% 与 14.6%。

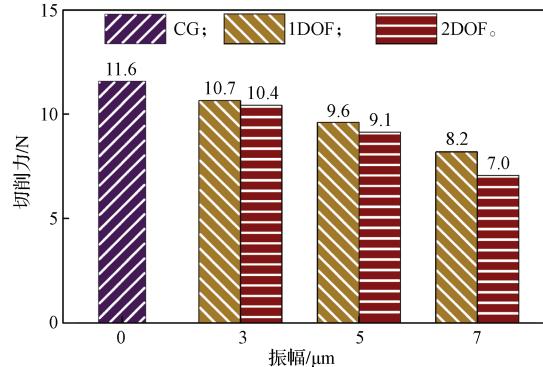


图 6 不同振幅下的切削力

Fig. 6 Cutting forces at different amplitudes

### 3.2 不同磨削方式对粗糙度的影响

表面粗糙度是衡量物体表面微观不平整程度的

重要指标，而硬脆材料加工对表面粗糙度的要求尤为严苛<sup>[20]</sup>。采用白光干涉仪测量磨削工件的表面粗糙度，通过对比各工艺参数下工件表面的粗糙度，进一步探究了旋转超声加工对Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷磨削质量的影响。图7为不同转速下的表面粗糙度。由图7可知，转速的增大进一步减小了各种加工方式下工件的表面粗糙度，其变化趋势与转速对切削力的影响一致。当转速为2000 r/min时，经二维旋转超声椭圆加工的工件表面粗糙度相较于普通磨削的与一维旋转超声加工的，分别降低了4.6%和20%。可见，二维旋转超声椭圆加工在不同转速下仍具有显著优势。

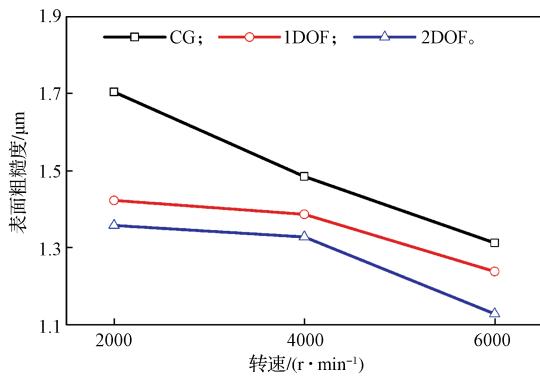


图7 不同转速下工件表面粗糙度

Fig. 7 Surface roughness at different rotational speeds

图8为不同吃刀量下工件的表面粗糙度。工件表面粗糙度随着吃刀量的增大而增大。在不同吃刀量下，旋转超声加工能显著提高工件的表面质量。其中，一维旋转超声加工对工件表面粗糙度的优化效果明显优于普通磨削，最大降幅为18.4%；其次，在0.03 mm吃刀量下，二维旋转超声椭圆加工有效降低了工件的表面粗糙度，对比一维旋转超声加工的下降了14.1%，对比普通磨削的则下降了30%。

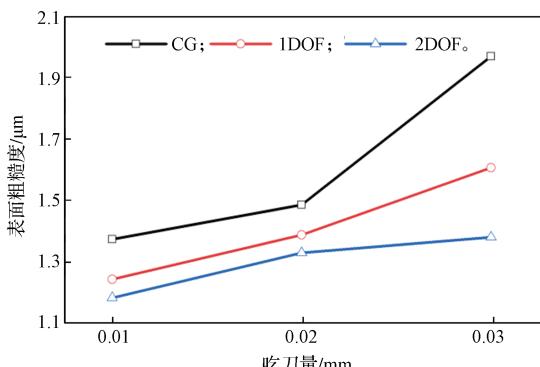


图8 不同吃刀量下工件表面粗糙度

Fig. 8 Surface roughness at different cutting depths

图9为不同进给速度下工件的表面粗糙度。表面粗糙度随着进给速度的增大而增大。当进给速度为60 mm/min时，普通磨削下工件表面粗糙度为1.378 μm，而二维旋转超声椭圆加工下工件表面粗糙度最小，其值为1.136 μm。

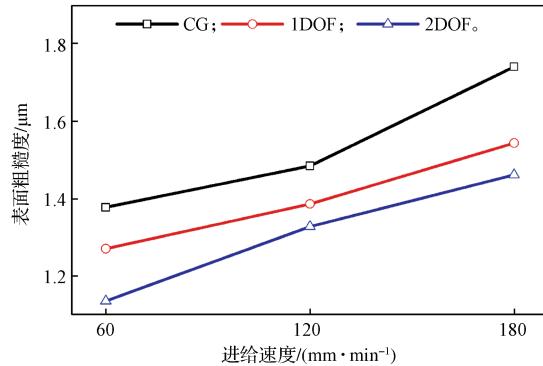


图9 不同进给速度下的表面粗糙度

Fig. 9 Surface roughness at different feed rates

为探究不同振幅下一维旋转超声加工与二维旋转超声椭圆加工对工件表面粗糙度的影响，在转速4000 r/min、吃刀量0.01 mm、进给速度120 mm/min，且不同振幅(3, 5, 7 μm)条件下，测量了普通磨削和旋转超声加工下的工件表面粗糙度，结果如图10所示。随着振幅的增大，表面粗糙度会随之降低。在振幅为7 μm下，不同加工方式对表面粗糙度的优化效果均达到峰值，具体表现为：一维旋转超声加工下，相比普通磨削的工件表面粗糙度降低了12.4%；二维旋转超声椭圆加工下，相较于普通磨削的降低了14.6%，相较于一维旋转超声加工的降低了2.5%。

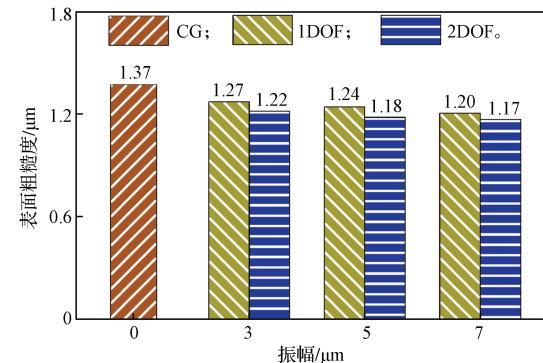


图10 不同振幅下工件表面粗糙度

Fig. 10 Surface roughness at different amplitudes

图11为在主轴转速4000 r/min、吃刀量0.01 mm、进给速度120 mm/min、振幅5 μm条件下，普通磨削、一维旋转超声加工与二维旋转超声椭圆加工的实际切削力。旋转超声加工可减小加工过程中的

实际切削力，其中二维旋转超声椭圆加工的实际切削力最小，与普通磨削的相比降低了32%。普通磨削（见图11a）和一维旋转超声加工（见图11b）的实际切削力比较稳定，而二维旋转超声椭圆加工（见图11c）的实际切削力呈现出许多尖峰与凹陷，这是因其椭圆振动轨迹不能完美耦合，使加工过程中两个方向的振动互相抑制，导致实际切削力的波动。

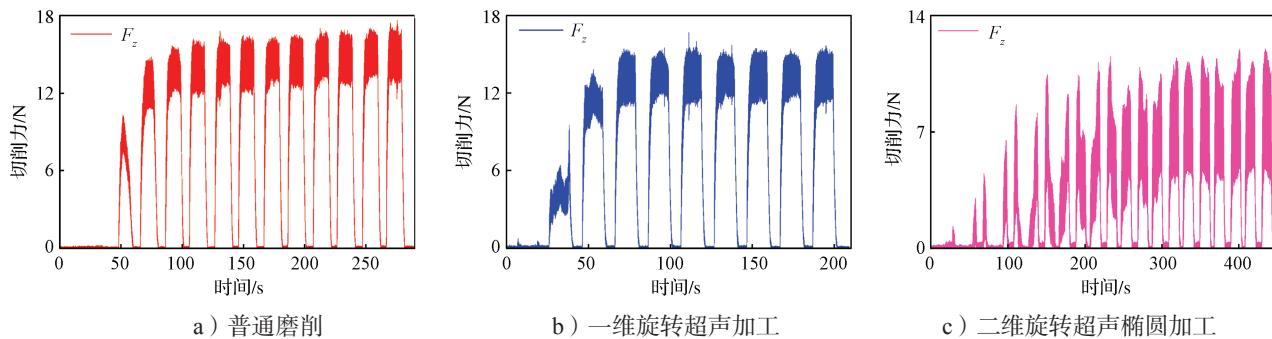


图 11 普通磨削与超声加工实际切削力

Fig. 11 Actual cutting forces in ordinary grinding and ultrasonic machining

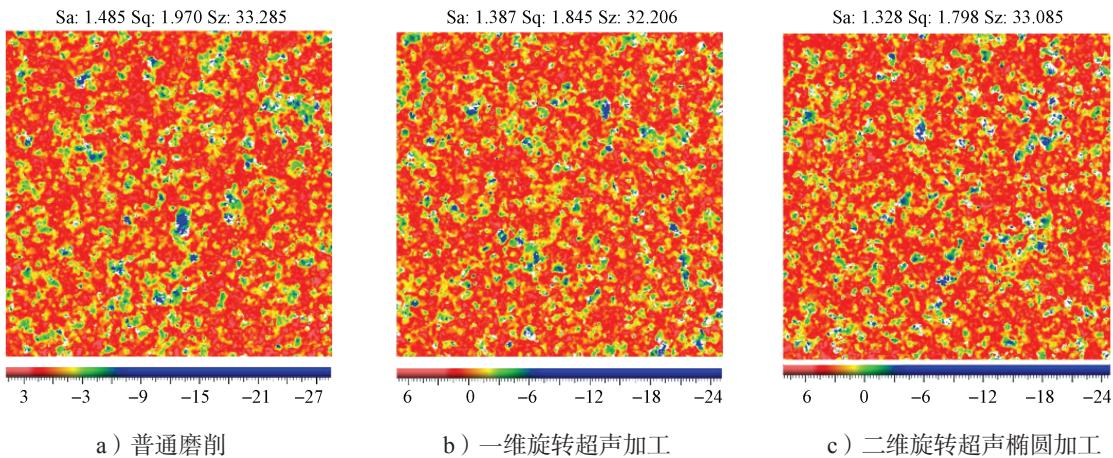


图 12 普通磨削与超声加工的工件表面粗糙度

Fig. 12 Surface roughness of ordinary grinding and ultrasonic machining

## 4 结论与展望

$\text{Al}_2\text{O}_3$ 广泛用于食品包装机械的耐磨部件、电子产品的防静电包装与化工产品的耐腐蚀包装等领域。旋转超声加工则在硬脆材料的加工上具有显著优势。故本课题组研发了双弯振旋转超声加工系统，并通过普通磨削、一维旋转超声加工与二维旋转超声椭圆加工分别对 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷进行磨削试验，分析本系统的优越性。所得主要结论如下：

1) 主轴转速的增加能显著减小磨削的切削力并降低工件的表面粗糙度，而吃刀量与进给速度的增加

在主轴转速4000 r/min、吃刀量0.01 mm、进给速度120 mm/min、振幅5  $\mu\text{m}$ 的工况下，采用白光干涉仪测试 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的表面粗糙度，结果如图12所示。由图12可知，分别经普通磨削、一维旋转超声加工和二维旋转超声椭圆加工处理的工件表面粗糙度分别为1.485, 1.387, 1.328  $\mu\text{m}$ 。

则会增大磨削的切削力与工件表面粗糙度。

2) 二维旋转超声椭圆加工具有复杂的振动轨迹，能有效增大磨粒与工件的接触，提高超声振动的能量转换效率，在各种工艺参数下均具有显著优势。

3) 二维旋转超声椭圆加工能够显著降低切削力与工件表面粗糙度，与普通磨削的相比，最大降低分别为41.5%和30%。

然而，自主研发的双弯振旋转超声加工系统仍存在一些问题有待改进，其主要体现在：双弯振椭圆振动轨迹耦合得并不完美，导致切削力不能得到最大程度的降低，因此需从超声波发生器入手，研究一套

适用于两自由度的超声波发生器；双弯振旋转超声加工系统中的加工平台难以实现大尺寸工件的加工，需进一步改善加工平台及力测量系统，使双弯振旋转超声加工系统能够实现大尺寸工件的加工；双弯振旋转超声加工系统仅能实现平面内两自由度的振动，无法实现空间内三自由度的振动加工，需从超声换能器入手，设计一款用于三自由度的超声换能器。

### 参考文献：

- [1] 侯清麟, 王靖文, 段海婷, 等. 正交试验优化金红石型钛白粉表面包覆  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的工艺研究 [J]. 包装学报, 2015, 7(1): 18–22.
- [2] 王磊, 董金善, 杨林娟. 氧化铝陶瓷旋转超声铣磨加工表面粗糙度研究 [J]. 矿冶工程, 2022, 42(4): 130–133, 138.
- [3] 马征. 氧化铝陶瓷精密部件制备技术的研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.
- [4] 廖东阳, 廖勇克, 陆健, 等. 加工参数对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷小孔钻削质量影响研究 [J]. 机械工程师, 2025(4): 150–156.
- [5] GENG D X, ZHANG D Y, XU Y G, et al. Rotary Ultrasonic Elliptical Machining for Side Milling of CFRP: Tool Performance and Surface Integrity[J]. Ultrasonics, 2015, 59: 128–137.
- [6] CHEN J R, PAN Y Z, MENG Y, et al. Ultrasonic Elliptic Vibration Cutting of Difficult-to-Machine Materials: A Review[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2025, 26(4): 1023–1048.
- [7] WANG H, PEI Z J, CONG W L. A Mechanistic Cutting Force Model Based on Ductile and Brittle Fracture Material Removal Modes for Edge Surface Grinding of CFRP Composites Using Rotary Ultrasonic Machining[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 176: 105551.
- [8] XU M R, CHEN S, KURNIAWAN R, et al. Cryogenic and Ultrasonic-Assisted Micro-Drilling of Printed Circuit Boards Using High-Frequency-Amplitude Spindle[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 119: 911–928.
- [9] YAO L X, LIU Z Q, SONG Q H, et al. Machining Quality Improvement Through Ice Densification Pretreatment During Rotary Ultrasonic Face Grinding  $\text{SiO}_2/\text{f}/\text{SiO}_2$  Composite[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2025, 193: 108878.
- [10] LI Y Z, ZHANG D Z, WANG H, et al. Theoretical and Experimental Investigations on Rotary Ultrasonic Surface Micro-Machining of Brittle Materials[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 89: 106162.
- [11] LI H, ZHANG C, ZHANG X X, et al. Processing Parameter Effect, Formation Mechanism and Inhibition Method of Micro-Hole Exit Defects in Rotary Ultrasonic Pecking Drilling of  $\text{SiCf/SiC}$  Composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2024, 185: 108285.
- [12] XIANG D H, SU B, WANG D Z, et al. Ultrasonic Longitudinal-Torsional Vibration Helical Milling Internal Thread of  $\text{SiCp/Al}$  Composites: Finite Element Simulation and Machining Quality Research[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 131: 1833–1845.
- [13] ZHU F X, ZHANG H W, HU K J, et al. A Comparative Investigation on Surface Quality of CFRP Laminates Between Rotary Drilling and Rotary Ultrasonic-Assisted Drilling[J]. Composite Structures, 2025, 358: 118964.
- [14] CHEN Y, HU Z W, YU Y Q, et al. Processing and Machining Mechanism of Ultrasonic Vibration-Assisted Grinding on Sapphire[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2022, 142: 106470.
- [15] 兰天, 冯平法, 张建富, 等. 超声辅助铣削钛合金工艺研究 [J]. 电加工与模具, 2024(1): 59–64.
- [16] AREFIN S, ZHANG X Q, KUMAR A S, et al. Study of Chip Formation Mechanism in One-Dimensional Vibration-Assisted Machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 291: 117022.
- [17] YAN Y Y, ZHAO B, LIU J L. Ultraprecision Surface Finishing of Nano- $\text{ZrO}_2$  Ceramics Using Two-Dimensional Ultrasonic Assisted Grinding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 43(5): 462–467.
- [18] 王明.  $\text{SiCp/Al}$  旋转超声加工机制及薄壁件加工稳定性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [19] 陈晓晓, 王恒, 张文武. 微组织阵列离散陶瓷材料旋转超声加工机理与工艺研究 [J]. 电加工与模具, 2020(3): 64–68.
- [20] 张若愚. 用于旋转超声加工的半波谐振超声振子设计及实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.

(责任编辑: 李涛)

# Experimental Study on the Process of Double Bending Vibration Rotary Ultrasonic Machining of $\text{Al}_2\text{O}_3$

HONG Jun<sup>1</sup>, WU Jiping<sup>1</sup>, JU Jianzhong<sup>2</sup>, LONG Zhili<sup>2</sup>

( 1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. School of Intelligence Science and Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen),  
Shenzhen Guangdong 518055, China )

**Abstract:**  $\text{Al}_2\text{O}_3$  is widely applied in various industrial fields owing to its excellent physical, chemical and mechanical properties. However, its high hardness, pronounced brittleness, strong wear resistance and low thermal conductivity make it extremely difficult to machine. Rotary ultrasonic machining (RUM) has emerged as an effective technique for machining hard and brittle materials because of its ability to significantly reduce cutting force, improve surface finish and extend tool life. Based on an independently developed double-bending vibration rotary ultrasonic elliptical machining system, experiments were conducted on conventional grinding as well as one-dimensional and two-dimensional ultrasonic vibration-assisted grinding of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . The effects of process parameters on machining performance under different machining modes were systematically investigated, and the variation trends of maximum cutting force and surface roughness were quantitatively analyzed. Compared with conventional machining, rotary ultrasonic machining significantly reduces both cutting force and surface roughness, while two-dimensional rotary ultrasonic elliptical machining exhibits superior machining performance over its one-dimensional counterpart. These results not only confirm the significant advantages of double-bending vibration rotary ultrasonic machining in processing  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , but also provide an important experimental foundation and theoretical guidance for extending the application of this technology in precision machining.

**Keywords:** rotary ultrasonic machining;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; cutting force; surface roughness