文章编号:1674-2974(2024)04-0027-08 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024167

三维超声振动辅助铣磨氧化锆陶瓷的试验研究

沈剑云†,林少龙,程家威,吴贤,朱来发
(华侨大学 机电及自动化学院,福建 厦门 361021)

摘 要:分析了三维超声振动辅助铣磨(Ultrasonic Vibration Assisted Grinding, UAG)中单颗磨粒的运动学,采用自主搭建的三维超声振动辅助铣磨加工系统,对氧化锆陶瓷进行超声振动辅助铣磨加工试验.在不同超声辅助条件下,对比铣磨氧化锆陶瓷的法向铣磨力、表面粗糙度和工件表面形貌,研究不同加工参数对三维UAG加工过程的影响规律以及三维超声对铣磨过程的影响.研究结果表明,铣磨氧化锆陶瓷时,法向铣磨力随超声辅助加工维度的增加而减小,三维UAG加工可有效降低其铣磨负荷,且加工参数对法向铣磨力降低幅度的影响最小;法向铣磨力降低幅度随进给速度与切削深度的增大而减小,随主轴转速的增大而增大.氧化锆陶瓷工件的表面粗糙度随超声辅助加工维度的增加而降低,表面形貌逐渐呈现更多的塑性划痕,加工参数对三维UAG加工表面粗糙度的影响最小.由此可见,三维UAG加工中,单颗磨粒切削轨迹长度的增大有利于其切削厚度减小,从而降低铣磨力并改善加工表面质量.

关键词:超声振动辅助铣磨;氧化锆陶瓷;铣磨力;表面粗糙度
中图分类号:TH161 **文献标志码**:A

Experimental Study on Three-dimensional Ultrasonic Vibration Assisted Grinding of Zirconia Ceramics

SHEN Jianyun†, LIN Shaolong, CHENG Jiawei, WU Xian, ZHU Laifa
(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The kinematics of a single abrasive particle in three-dimensional Ultrasonic Vibration Assisted Grinding (UAG) was analyzed. The ultrasonic vibration assisted grinding experiment of zirconia ceramics was carried out with the self-built three-dimensional UAG system. By comparing the normal grinding force, surface roughness, and surface morphology of zirconia ceramics under different ultrasonic-assisted conditions, the influence of different processing parameters on the three-dimensional UAG process and the influence of three-dimensional ultrasound on the grinding process were studied. The experimental results show that the normal grinding force of zirconia ceramics decreases with the increase of ultrasonic assisted machining dimension. Three-dimensional UAG machining can effectively reduce the grinding load, and the influence of machining parameters on the reduction of normal grinding force is the smallest. The reduction of normal grinding force decreases with the increase of feed speed and cutting depth and increases with the increase of spindle speed. The surface roughness of zirconia ceramic

* **收稿日期**:2023-10-14
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51905182),National Natural Science Foundation of China(51905182)
作者简介:沈剑云(1972—),男,福建莆田人,华侨大学研究员
† 通信联系人,E-mail:jianyun@hqu.edu.cn

workpieces decreases with the increase of ultrasonic assisted processing dimension, and the surface morphology gradually shows more plastic scratches. The influence of processing parameters on the surface roughness of three-dimensional UAG grinding is also the smallest. It can be seen that the increase of the cutting trajectory length of the single abrasive particle in the three-dimensional UAG machining is beneficial to the decrease of the cutting thickness, thus reducing the grinding force and improving the surface quality.

Key words: ultrasonic vibration assisted grinding; zirconia ceramics; grinding force; surface roughness

氧化锆陶瓷材料具有硬度高、强度大、耐磨损、耐腐蚀、化学性质稳定等众多优异的物理和化学性能,被广泛应用于航空航天、光电数码、光学玻璃、医疗器械等重要技术领域[1].氧化锆陶瓷是一种硬脆性难加工材料,具有高硬度和低断裂韧性[2],在传统磨削加工时往往容易产生表面裂纹、亚表面损伤以及热损伤[3-4],需对其进行二次加工来满足实际使用要求,增加了加工成本,降低了加工效率,从而在一定程度上限制了氧化锆陶瓷材料的推广及应用.

相对于传统磨削(Conventional Grinding,CG),超声振动辅助铣磨(Ultrasonic Vibration Assisted Grinding,UAG)加工复合了超声加工和磨削加工的材料去除方式[5],具有提高加工效率、降低切削力、提高表面质量、降低刀具磨损等优点,尤其适用于加工氧化锆陶瓷等硬脆性材料[6-7].周雪钢[8]研究了超声作用下磨粒运动轨迹对材料去除的影响,结果表明,超声辅助磨削能够提高加工效率,降低表面损伤,提高表面质量.Qin 等[9]建立了超声辅助磨削力模型,用于预测加工参数对磨削力的影响. Zhang 等[10]建立了旋转超声端面铣削力数学模型,试验结果表明所建立的模型可以用来评价脆性材料旋转超声铣削力.张洪丽[11]以单颗磨粒为研究对象,发现超声辅助下磨削力降低的原因是超声振动的引入使得磨粒与工件之间存在断续切削的现象. Xiao 等[12]建立了不同加工参数下的磨削形貌仿真模型并计算了理论表面粗糙度,发现椭圆超声振动磨削形成的特殊表面形貌可以对加工表面纹理进行细化以降低表面粗糙度,最大降幅达 27.7%. Li 等[13]研究了垂直椭圆振动辅助磨削下单颗磨粒的运动特性,发现超声振动辅助加工时单颗磨粒磨削硬脆材料的瞬时前角远大于传统磨削,更有利于硬脆材料的塑性去除.

针对氧化锆陶瓷材料的三维 UAG 加工研究相对较少的问题,本文提出一种三维超声振动辅助铣磨加工装置,从运动学的角度,以单颗磨粒为研究对象,通过轨迹仿真研究三维 UAG 的加工特点.通过三维 UAG 加工试验分析加工过程中进给速度、切削深度和主轴转速对法向铣磨力及表面加工质量的影响规律,为后续氧化锆陶瓷的三维 UAG 加工提供工艺研究基础.

1 三维UAG加工系统

试验在自行搭建的三维 UAG 加工系统中进行.三维 UAG 加工系统设计方案如图 1 所示.该系统包括切削力测量系统、数控机床、一维 UAG 系统、二维 UAG 系统.其中,数控机床为 DY-ULV500 超声数控机床.一维 UAG 系统主要由机床内置的 DY-J2000 型超声波发生器 a、换能器 a 以及一级变幅杆 a 组成.二维 UAG 系统主要由 28 kHz 超声波发生器 b、换能器 b、一级变幅杆 b 以及二级变幅杆组成.切削力测量系统包括 Kistler 9272 型测力仪、电荷放大器、数据采集系统以及 PC 端.

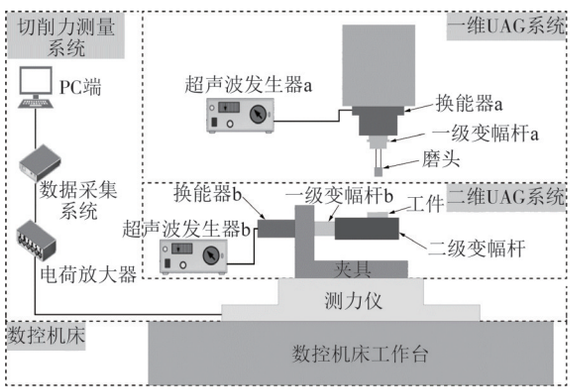

图 1 三维 UAG 加工系统设计方案

Fig.1 Design scheme of three-dimensional UAG system

三维UAG加工时,超声波发生器a和超声波发生器b产生高频电振动信号,分别经换能器a和换能器b转换成机械振动,然后分别将机械振动传递给一级变幅杆a和一级变幅杆b.一级变幅杆a放大振幅并作用在磨头上,一级变幅杆b将一维超声振动传递给二级变幅杆,二级变幅杆将一维超声振动转为二维超声振动并作用在工件上.2种超声振动叠加,进而得到需要的三维超声振动辅助加工轨迹.

2　三维UAG运动学分析

2.1　单颗磨粒运动轨迹

三维UAG加工示意图如图2所示.加工过程中,磨头以一定速度旋转,在沿X向做进给运动的同时沿Z向以一定频率振动,同时工件在X、Y方向上以一定频率振动.

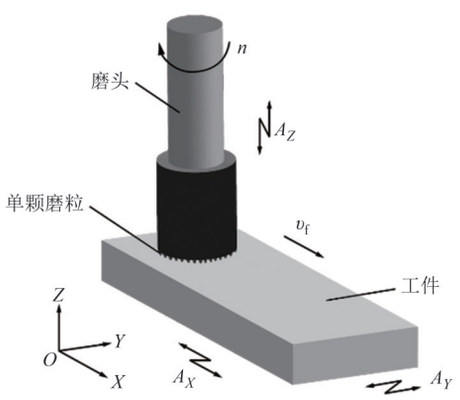

图2　三维UAG加工示意图

Fig.2　Three-dimensional UAG schematic diagram

磨头端面最外层单颗磨粒的运动轨迹方程为:

$$\begin{cases} X_{3D} = R\sin\left(\dfrac{\pi St}{30}\right) + v_f t + A_X \sin(2\pi ft) \\ Y_{3D} = R\cos\left(\dfrac{\pi St}{30}\right) + A_Y \sin(2\pi ft + \delta_1) \\ Z_{3D} = A_Z \sin\left(2\pi f_z t + \delta_2\right) + Z_0 \end{cases} \tag{1}$$

式中:A_X、A_Y、A_Z分别为沿X、Y、Z方向上的超声振幅;v_f为工具沿加工方向的进给速度;f和f_z分别为工件超声振动频率和刀具超声振动频率;S为主轴转速;Z_0为磨粒在Z轴上的初始位置;R为磨头的直径;δ_1为工件纵向超声振动与弯曲超声振动的相位差;δ_2为刀具纵向超声振动与工件纵向超声振动的相位差.

采用MATLAB软件进行仿真,获得不同加工方式下单颗磨粒的运动轨迹如图3所示.由图3可知,在CG、一维UAG、二维UAG、三维UAG不同加工方式中,三维UAG加工的切削轨迹长度最长,空间上轨迹形状最复杂,因此加工时多颗磨粒的轨迹交叠程度最高.此外,磨粒与工件间存在一个周期性分离的现象,有利于切削力的降低,并且加工过程中磨粒会周期性地锤击工件表面,更有利于材料的破碎去除,从而提高表面加工质量.

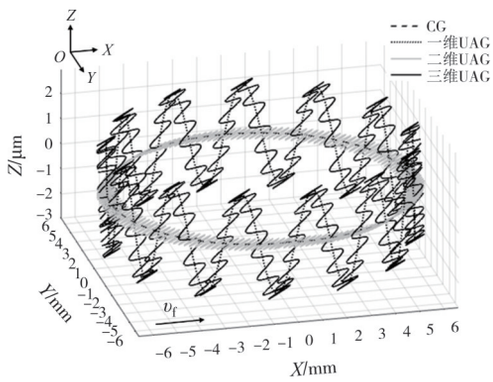

图3　不同加工方式下单颗磨粒的运动轨迹

Fig.3　Motion trajectory of single abrasive particle under different processing methods

2.2　单颗磨粒切削力方程

对式(1)求一阶导数,可以得到三维UAG加工时磨粒的速度方程.

$$\begin{cases} v_{X-3D} = v_f + \dfrac{S\pi R}{30}\cos\left(\dfrac{S\pi}{30}\cdot t\right) + 2\pi f A_X \cos(2\pi ft) \\ v_{Y-3D} = 2\pi f A_Y \sin(2\pi ft) - \dfrac{S\pi R}{30}\sin\left(\dfrac{S\pi}{30}t\right) \\ v_{Z-3D} = 2\pi f_z A_Z \cos(2\pi f_z t) \end{cases} \tag{2}$$

在材料去除的过程中,磨粒的空间轨迹长短直接影响材料的最大去除层厚度[14],而磨粒最大去除层厚度又直接影响切削力的大小[15].磨粒的空间运动轨迹长度[16]为:

$$L = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{v_X^2 + v_Y^2 + v_Z^2}\,\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中:v_X、v_Y、v_Z分别为X、Y、Z方向的速度分量.

UAG加工方式下的最大去除层厚度[17]为:

$$T_{max} = \frac{a_p v_f}{v_s}\left(\frac{N_\alpha bL}{2}\right)^{-1} \tag{4}$$

式中:v_s为磨粒切削速度;a_p为切削深度;N_α为铣磨加工过程中的有效磨粒数;b为铣磨宽度;L为磨粒空间运动轨迹长度.磨粒受到的切削力大小[18-19]为:

$$F_{nb}=\frac{1}{2}\xi T_{max}^{2}\tan^{2}\frac{\alpha}{2}\cdot H_{v} \tag{5}$$

式中:F_{nb}为切削力;ξ为压头的几何因子;α为磨粒的顶锥角;H_v为工件的硬度.

由式(4)、式(5)分析得出,磨粒受到的切削力与最大去除层厚度成正比,与磨粒轨迹长度成反比.即磨粒轨迹长度越长,最大去除层厚度越小,磨粒受到的切削力越小.

3 三维UAG加工试验

3.1 试验设备

本次试验在自主搭建的三维UAG加工系统中进行.使用超声波发生器设定超声频率和振幅.试验过程中采用Kistler 9272型测力仪对法向铣磨力进行测量.试验后采用TIME32便携式粗糙度仪对表面粗糙度进行测量,采用SU5000场发射扫描电镜对表面微观形貌进行观测.

3.2 试验磨头

试验所采用的磨头为开槽电镀金刚石磨头,直径为6 mm,磨粒粒度为100#.

3.3 试验工件

工件材料为氧化锆陶瓷,尺寸为17.0 mm×2.5 mm×1.0 mm,氧化锆陶瓷材料性能参数如表1所示.

表1 氧化锆陶瓷材料性能参数

Tab.1 Performance parameters of zirconia ceramic

密度/(g·cm^{-3})	弹性模量/GPa	断裂韧性/(MPa·m$^{1/2}$)	泊松比	维氏硬度/HV
6.05	200	8.0	0.23	1 175

3.4 试验方案

超声振动辅助铣磨试验包括单因素试验和表面形貌对比试验.首先进行单因素试验,对比分析CG、一维UAG、二维UAG、三维UAG不同加工方式下,各加工参数对法向铣磨力和表面粗糙度的影响,表2为单因素试验采用的加工参数.其次进行表面形貌对比试验,对比分析4种不同加工方式对氧化锆陶瓷加工后表面形貌的影响.

表2 单因素试验采用的加工参数

Tab.2 Processing parameters used in single factor experiment

因素	参数设置
主轴转速/(r·min^{-1})	8 500、9 000、9 500、10 000
进给速度/(mm·min^{-1})	50、70、90、110
切削深度/μm	10、15、20、25
谐振频率/kHz	28.22(一维),28.20(二维)
超声振幅/μm	2.00(Z向),5.75(X向),4.80(Y向)

4 试验结果与分析

4.1 法向铣磨力对比分析

图4、图5和图6分别为CG、一维UAG、二维UAG、三维UAG加工时法向铣磨力随进给速度、切削深度和主轴转速的变化规律.由图4、图5和图6可知,无论是UAG加工还是CG加工,工艺参数对法向铣磨力的影响规律是一致的,即法向铣磨力随进给速度的增大而增大,随切削深度的增大而增大,随主轴转速的增大而减小.

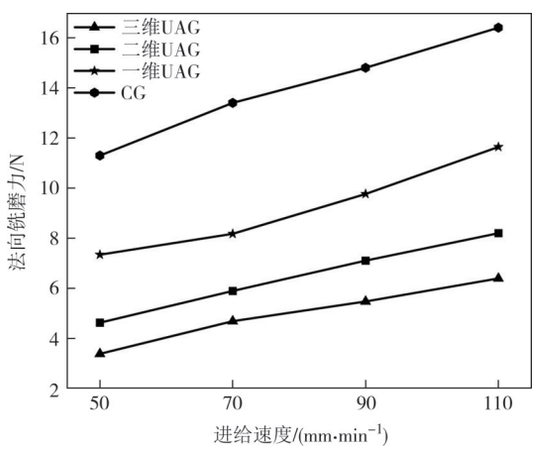

图4 进给速度对法向铣磨力的影响

Fig.4 Effect of feed rate on normal grinding force

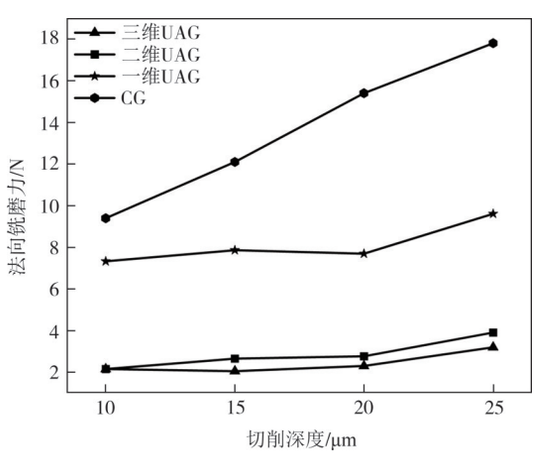

图5 切削深度对法向铣磨力的影响

Fig.5 Effect of cutting depth on normal grinding force

为便于描述,用D_F表示UAG加工时法向铣磨力相比于CG加工时法向铣磨力的降低幅度.D_F值越

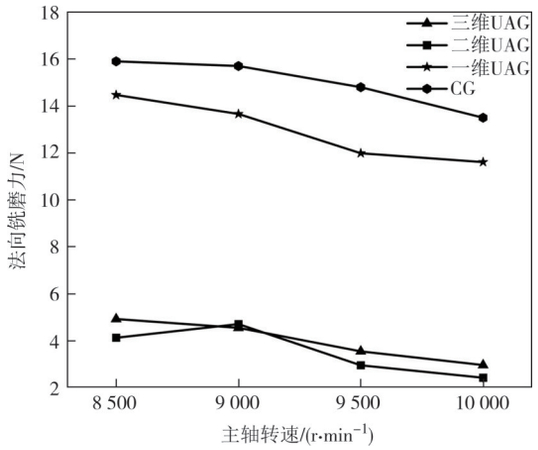

图6　主轴转速对法向铣磨力的影响

Fig.6　Effect of spindle speed on normal grinding force

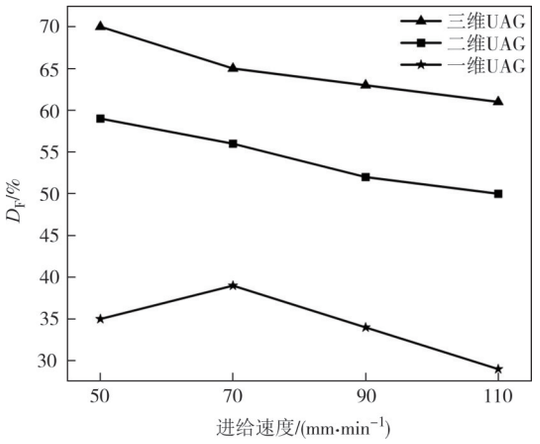

图7　进给速度对D_F的影响

Fig.7　Effect of feed rate on D_F

大,表明超声振动辅助加工对法向铣磨力的影响效果越显著.3种UAG加工方式下,进给速度、切削深度、主轴转速对D_F值的影响分别如图7~图9所示.

由图7可知,在S=10 000 r/min,a_p=5 μm条件下,随着进给速度从50 mm/min增加至110 mm/min,3种UAG加工的D_F值均有不同程度的降低.其中,三维UAG加工在3种UAG加工中对法向铣磨力的降低效果最明显,D_F值从70%、65%、63%降低至61%,降幅波动幅度为9%.

由图8可知,在S=10 000 r/min,v_f=50 mm/min条件下,随着切削深度从10 μm增加至25 μm,3种UAG加工的D_F值呈先升高后降低趋势.其中,三维UAG加工在3种UAG加工中对法向铣磨力的降低效果最明显,D_F值从82%、85%、83%降低至77%,降幅波动幅度为5%.

由图9可知,在v_f=50 mm/min,a_p=5 μm条件下,随着主轴转速从8 500 r/min增加至10 000 r/min,3种UAG加工的D_F值呈增大趋势.其中,三维UAG加工在3种UAG加工中对法向铣磨力的降低效果较明显,且与二维UAG加工相差不大,D_F值从69%、71%、76%增大至78%,降幅波动幅度为9%.

综上所述,铣磨氧化锆陶瓷时的法向铣磨力随着超声辅助加工维度的增加而减小,三维UAG加工可有效降低其铣磨负荷,且加工参数对法向铣磨力降低幅度的影响是最小的.法向铣磨力的降低幅度随进给速度与切削深度的增大而减小,随主轴转速的增大而增大.

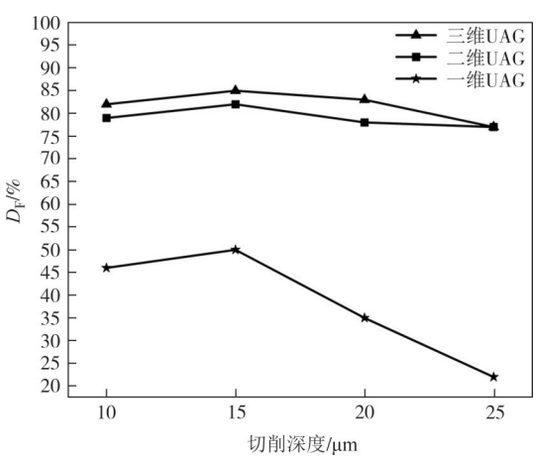

图8　切削深度对D_F的影响

Fig.8　Effect of cutting depth on D_F

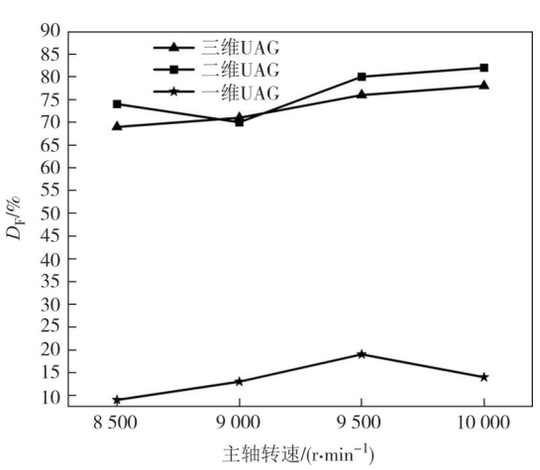

图9　主轴转速对D_F的影响

Fig.9　Effect of spindle speed on D_F

4.2　表面粗糙度对比分析

当S=10 000 r/min,a_p=5 μm时,进给速度对表面粗糙度的影响如图10所示.为便于描述,用D_R表示UAG加工时表面粗糙度相比于CG加工时表面粗糙度的降低幅度,进给速度对D_R的影响如图11所示.可以看出,随着进给速度的增大,表面粗糙度呈增大

趋势,D_R值呈降低趋势.三维UAG加工对表面粗糙度的降低效果最明显,且波动幅度最小.

这是由于随着进给速度增大,磨粒轨迹交叠程度降低,磨粒对工件的熨压次数减少,使得表面残留材料未被充分去除,单颗磨粒的最大未变形切削厚度增大,使工件以脆性断裂方式去除比例增加,表面粗糙度增加,从而使得超声作用对表面粗糙度的改善效果降低.而由于三维超声磨粒切削轨迹最长,被弱化程度最低,表面粗糙度最好.

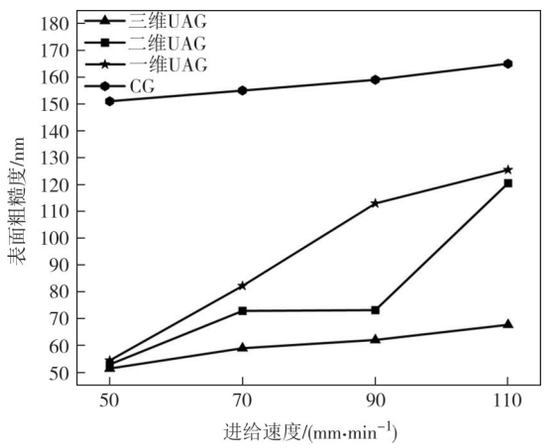

图10 进给速度对表面粗糙度的影响

Fig.10 Effect of feed rate on surface roughness

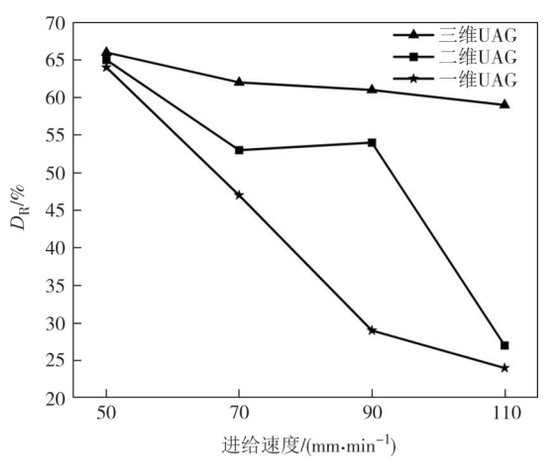

图11 进给速度对D_R的影响

Fig.11 Effect of feed rate on D_R

在S=10 000 r/min,v_f=50 mm/min条件下,切削深度对表面粗糙度的影响如图12所示.可以看出,随着切削深度的增大,表面粗糙度呈增大趋势.这是由于随着切削深度增大,单颗磨粒的切削深度增大,工件表面残留高度增加,表面粗糙度增大.

尽管表面粗糙度值随切削深度的变化趋势是一致的,但D_R波动幅度却相差较大.由图13可知,三维UAG加工对表面粗糙度的降低效果最明显,D_R值波动幅度为23%,相比于一维UAG和二维UAG的D_R值波动幅度46%和35%较小.这是由于三维UAG加工的单颗磨粒切削轨迹长度最长,有利于减小最大去除层厚度,抑制了材料由塑性去除转为脆性去除的过程.

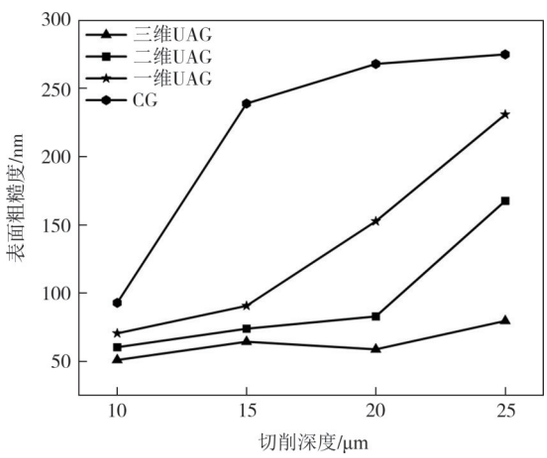

图12 切削深度对表面粗糙度的影响

Fig.12 Effect of cutting depth on surface roughness

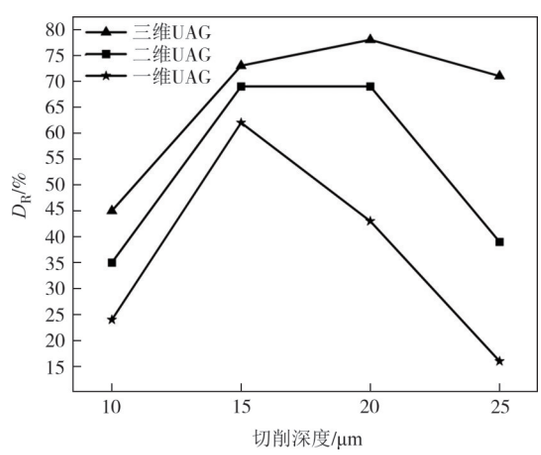

图13 切削深度对D_R的影响

Fig.13 Effect of cutting depth on D_R

在a_p=5 μm,v_f=50 mm/min条件下,主轴转速对表面粗糙度的影响如图14所示.可以看出,随着主轴转速的增大,表面粗糙度呈降低趋势.这是由于磨头转速增加,单位时间内与工件接触的磨粒数增多,磨粒对表面的切削次数增加,导致最大切削层厚度降低,材料被磨粒切得更加细碎,从而使表面粗糙度降低.

由图15可知,在转速小于9 500 r/min时,三维UAG加工对表面粗糙度的降低效果最明显,当转速超过9 500 r/min时,三维UAG加工对表面粗糙度的

降低效果较二维UAG稍差.虽然三维超声振动的引入大幅提升了磨粒间的轨迹交叠程度,区域内进行铣磨的磨粒更多,从而降低了表面粗糙度,但是随着转速增加,超声作用下磨粒轨迹交叠程度被削弱,对表面粗糙度的改善效果逐渐减弱.

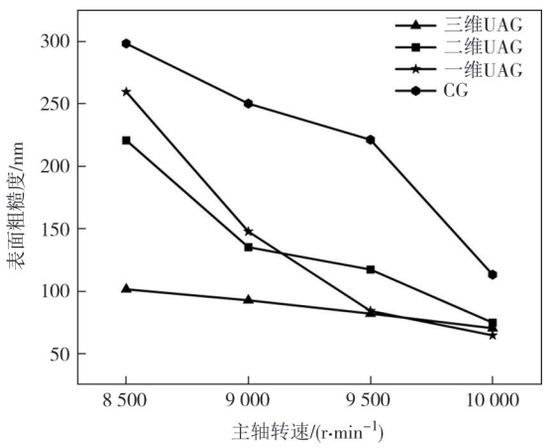

图 14　主轴转速对表面粗糙度的影响

Fig.14　Effect of spindle speed on surface roughness

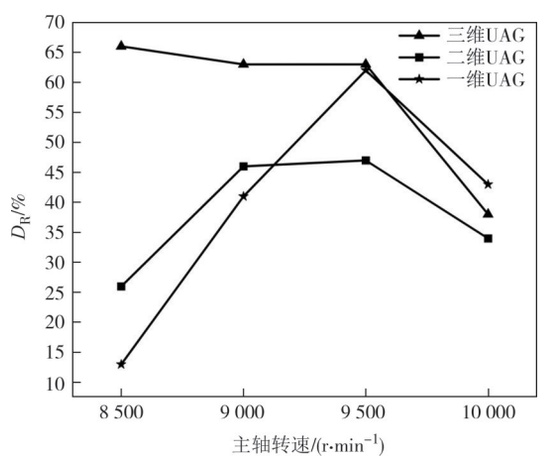

图 15　主轴转速对D_R的影响

Fig.15　Effect of spindle speed on D_R

4.3　工件表面形貌对比分析

在S=10 000 r/min,v_f=110 mm/min,a_p=10 μm条件下,不同加工方式下氧化锆陶瓷表面的SEM图像如图16所示.由图16可以看出,与其他3种加工方式相比,三维UAG加工区域呈现大面积的塑性加工痕迹,未出现明显的微破碎及凹坑现象,显著减少了由于脆性破碎造成的表面质量破坏.这是由于三维超声条件下磨粒间的轨迹交叠程度最高,使得磨粒对工件表面反复熨压,降低了工件的表面粗糙度.同时,密集交错的加工轨迹导致切痕被提前截断,在工件表面留下更多的塑性加工痕迹,从而改善了加工表面质量.

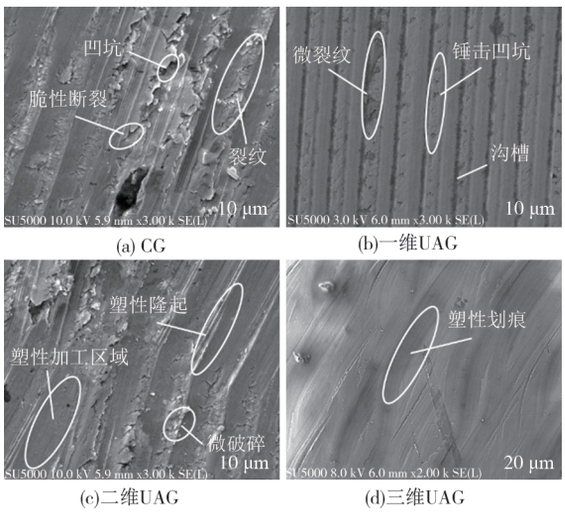

图 16　不同加工方式下氧化锆陶瓷表面的SEM图像

Fig.16　SEM images of zirconia ceramic surface under different processing methods

5　结 论

1)三维UAG加工的切削轨迹长度在4种加工方式中最长,空间上轨迹形状最复杂.加工时磨粒与工件间存在周期性分离,有利于切削力的降低,并且加工过程中磨粒会周期性地锤击工件表面,更有利于材料的破碎去除.另外,三维UAG加工的单颗磨粒切削轨迹长度最长,有利于减小最大去除层厚度,从而降低铣磨力.

2)相同加工工艺参数下,4种加工方式中三维UAG加工氧化锆陶瓷的法向铣磨力最低,有效降低了铣磨负荷,且加工参数对法向铣磨力降低幅度的影响最小.法向铣磨力降低幅度随进给速度与切削深度的增大而减小,随主轴转速的增大而增大.

3)与其他3种加工方式相比,三维UAG加工时磨粒间轨迹交叠程度最高,使得磨粒对工件表面反复熨压,降低了工件的表面粗糙度.同时,密集交错的加工轨迹导致切痕被提前截断,表面形貌呈现出更多的塑性划痕,从而改善了表面加工质量.

参考文献

[1]　YANG Z C, ZHU L D, LIN B, et al. The grinding force modeling and experimental study of ZrO_2 ceramic materials in ultrasonic vibration assisted grinding [J]. Ceramics International, 2019, 45(7): 8873-8889.

[2]　WEI M B, FENG P F, ZHA H T, et al. Kinematics and simulation analysis of longitudinal-torsional ultrasonic assisted grinding of

zirconia ceramics[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2173(1): 012002.

[3] MA Z L, WANG Z, WANG X Z, et al. Effects of laser-assisted grinding on surface integrity of zirconia ceramic[J]. Ceramics International, 2020, 46(1): 921-929.

[4] WAN L L, LI L, DENG Z H, et al. Thermal-mechanical coupling simulation and experimental research on the grinding of zirconia ceramics[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 47: 41-51.

[5] QIN S Q, ZHU L D, HAO Y P, et al. Theoretical and experimental investigations of surface generation induced by ultrasonic assisted grinding[J]. Tribology International, 2023, 179: 108120.

[6] LI H B, CHEN T, DUAN Z Y, et al. A grinding force model in two-dimensional ultrasonic-assisted grinding of silicon carbide[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 304: 117568.

[7] HE Y H, ZHANG J J, ZHOU W H, et al. Study on force reduction mechanism in ultrasonic-assisted grinding based on single-grain scratching[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2022, 22(80): 1-14.

[8] 周雪钢. 氮化硅陶瓷超声振动磨削机理及表面质量研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
ZHOU X G. Study on machining mechanism and surface quality in ultrasonic vibration grinding of silicon nitride ceramics[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)

[9] QIN N, PEI Z J, TREADWELL C, et al. Physics-based predictive cutting force model in ultrasonic-vibration-assisted grinding for titanium drilling[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009, 131: 1-9.

[10] ZHANG C L, ZHANG J F, FENG P F. Mathematical model for cutting force in rotary ultrasonic face milling of brittle materials[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(1): 161-170.

[11] 张洪丽. 超声振动辅助磨削技术及机理研究[D]. 济南:山东大学,2007.
ZHANG H L. Study on the technology and mechanism of ultrasonic vibration assisted grinding[D]. Jinan: Shandong University, 2007. (in Chinese)

[12] XIAO G J, ZHUO X Q, LI S C, et al. Study on surface creation law of planar two-dimensional ultrasonic-assisted abrasive belt grinding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 312: 117847.

[13] LI C L, PENG Y, CHEN D L, et al. Theoretical investigation of vertical elliptic vibration-assisted grinding (EVAG) technology[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(5): 2315-2324.

[14] 朱传宇. 旋转超声刀柄设计及其试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
ZHU C Y. Design and experimental research of rotary ultrasonic tool holder[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)

[15] 陈涛,刘德福,严日明,等. 纵弯复合型超声椭圆振动辅助抛光光纤阵列系统设计[J]. 振动与冲击,2017,36(24): 242-249.
CHEN T, LIU D F, YAN R M, et al. Design of longitudinal bending compound mode ultrasonic elliptical vibration-assisted fiber array polishing system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(24): 242-249. (in Chinese)

[16] 唐军,赵波. 一种新型纵扭复合超声振动系统的研究[J]. 机械科学与技术,2015,34(5): 742-747.
TANG J, ZHAO B. Study on a new type of longitudinal-torsional composite ultrasonic vibration system[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(5): 742-747. (in Chinese)

[17] 林仲茂. 超声变幅杆的原理和设计[M]. 北京:科学出版社,1987: 226-242.
LIN Z M. Principle and design of ultrasonic horn[M]. Beijing: Science Press, 1987: 226-242. (in Chinese)

[18] LEI X F, XIANG D H, PENG P C, et al. Establishment of dynamic grinding force model for ultrasonic-assisted single abrasive high-speed grinding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 300: 117420.

[19] 李贺. 新型超声波钻探器驱动特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
LI H. Research on driving characteristics of a novel ultrasonic/sonic driller[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)