

# 超声辅助微细磨料水射流冲蚀 K9 玻璃的实验研究

张旭<sup>1</sup>, 秦世康<sup>1</sup>, 齐欢<sup>1</sup>, Viboon Tangwarodomnukun<sup>2</sup>

(1. 浙江工业大学 a. 机械工程学院 b. 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310023; 2. Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand)

**摘要:** **目的** 提高微细磨料水射流对硬脆材料的加工能力, 改善加工表面的形貌和质量。**方法** 引入超声振动作为辅助手段, 使工件在垂直于加工表面方向作小振幅超声频振动。以 K9 玻璃为加工对象, 利用自主设计搭建的超声辅助微细磨料水射流加工装置进行微孔冲蚀加工实验, 并以无超声振动时的微孔加工实验作为对照。借助超景深三维显微镜对各实验条件下所加工的微孔进行观测, 获取其尺寸和截面轮廓数据, 研究超声振动对微孔尺寸、形貌的影响。**结果** 微孔的深度和顶部直径与射流压力的大小和加工时间的长短呈正相关。超声振动的引入, 显著增加了微孔的深度, 实验中深度的最大增幅达 54.6%, 但微孔顶部直径略有减小, 最大降幅为 8.2%, 总体的材料去除量有所提升。塑性冲蚀作用主导了材料的去除过程, 微孔的截面呈典型的“W”形。在引入超声振动后, “W”形截面形貌得到了改善, 微孔中心凸起部分的材料得到更多的去除, 底面平坦程度得到提升。**结论** 超声振动的引入增强了微细磨料水射流对 K9 玻璃的冲蚀性能, 超声辅助微细磨料水射流加工技术可以实现对 K9 玻璃等硬脆材料的高质量、高效率加工。

**关键词:** 微细磨料水射流; 超声振动; 冲蚀; K9 玻璃; 微孔形貌; 底面平坦程度

**中图分类号:** TH162 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)11-0346-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.11.037

## Experimental Study on Erosion Processing of K9 Glass Using Ultrasonic-assisted Micro-abrasive Water Jet

ZHANG Xu<sup>1</sup>, QIN Shi-kang<sup>1</sup>, QI Huan<sup>1</sup>, Viboon Tangwarodomnukun<sup>2</sup>

(1. a. College of Mechanical Engineering, b. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; 2. Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the processing ability of the micro-abrasive water jet on hard and brittle materials, and improve the morphology and quality of the machined surface. Ultrasonic vibration was introduced to vibrate the workpiece vibrate at a small amplitude and given ultrasonic frequency perpendicularly to the target surface. The in-house developed ultrasonic-assisted micro-abrasive water jet processing device was used to carry out the micro-hole erosion processing experiment on the K9 glass, and the related experiments without ultrasonic vibration were also used to be as the comparisons. The 3D microscope was used to observe the micro-holes machined under various experimental conditions, in which the cross-

收稿日期: 2021-05-21; 修订日期: 2021-08-02

Received: 2021-05-21; Revised: 2021-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52075493, 51605439); 浙江省重点研发计划项目 (2021C04011)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52075493, 51605439); Key Research and Development Project of Zhejiang Province (2021C04011)

通讯作者: 齐欢 (1986—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为磨粒精密加工技术。

Corresponding author: QI Huan (1986—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: abrasive precision machining technology.

引文格式: 张旭, 秦世康, 齐欢, 等. 超声辅助微细磨料水射流冲蚀 K9 玻璃的实验研究[J]. 表面技术, 2021, 50(11): 346-353.

ZHANG Xu, QIN Shi-kang, QI Huan, et al. Experimental study on erosion processing of K9 glass using ultrasonic-assisted micro-abrasive water jet[J]. Surface technology, 2021, 50(11): 346-353.

sectional profiles of micro-holes were measured, and then the effect of ultrasonic vibration on the profiles and morphology of micro-holes were studied. It is found that the depth and top diameter of the micro-holes were positively correlated with the jet pressure and processing time. The introduction of ultrasonic vibration significantly increased the depth of the micro-holes, with the maximum increase in depth to about 54.6%, but the top diameter of micro-holes was slightly reduced, with the maximum decrease of 8.2%, and the overall material removal rate was increased. It is because that the ductile erosion dominated the material removal process, as a result, the cross section of the micro-holes was a typical “W” shape. However, with the ultrasonic vibration the “W”-shaped cross-sectional profile had been improved, where the material of the protruding part of the center of the micro-hole had been more removed, and the flatness of the bottom surface has been improved as well. Thus, the ultrasonic vibration, indeed, enhances the erosion performance of micro-abrasive water jet on K9 glass, the ultrasonic-assisted micro-abrasive water jet processing technology can realize high-quality and high-efficiency processing of hard and brittle materials such as K9 glass.

**KEY WORDS:** micro-abrasive water jet; ultrasonic vibration; erosion; K9 glass; micro-hole morphology; flatness of bottom surface

K9 光学玻璃材料具有强度高、耐磨性强、光学透明度高、化学物理性能稳定等优点,在航空航天、微电子、信息技术等领域得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。然而, K9 玻璃是一种典型的硬脆材料,具有较低的断裂韧性,在加工过程中容易产生裂纹和亚表面损伤<sup>[5]</sup>。因此,采用传统的机械加工方法难以实现 K9 玻璃表面微结构的高效率、高质量加工,而微孔、微通道等微结构又是实现一些特定功能的基础。

微细磨料水射流加工技术是一种新型非接触式加工技术。与其他微细加工技术相比,具有无热损伤、切削效率高、柔韧性高等优势,几乎可以切割任何材料,特别是在硬脆材料等难加工材料领域,具有独特的优势<sup>[6-8]</sup>,可用于在各种材料上加工微结构<sup>[9-12]</sup>。

然而,相较于传统磨料水射流,微细磨料水射流技术采用了更小的喷嘴,使用的磨料粒径很小,且含量低,同时使用的射流压力也更小<sup>[13]</sup>,加工能力有所下降,导致了加工形貌较差。Wang 等<sup>[14]</sup>用微细磨料水射流技术进行了玻璃表面的微孔加工实验研究,由于使用了小粒径磨料和较低的射流压力,工件表面的黏性流动引起的塑性冲蚀成为了材料去除的主导方式,因此微孔截面呈现出“W”形,微孔中心处的材料较难去除。Pang 等<sup>[10,15]</sup>也进行了类似的实验研究,他们在玻璃表面进行微通道加工,得到的微通道底部表面呈现波纹状形貌。

为提升微细磨料水射流技术的加工性能,Lv 等<sup>[16]</sup>在工件处引入了超声振动,进行了氮化铝陶瓷抛光实验,结果表明,超声振动可以显著提升微细磨料水射流的加工效率。Qi 等<sup>[17]</sup>采用数值模拟手段对超声辅助微细磨料水射流冲蚀玻璃的过程进行了仿真,结果也表明,超声振动可以增加材料去除率。Hou 等<sup>[18]</sup>和陈雪松等<sup>[19]</sup>的实验研究也表明,以超声振动作为辅助手段,可以有效提升微细磨料水射流的冲蚀能力。但超声振动对冲蚀形貌的改善效果还有待研究。

本文设计了相关实验,在自主搭建的超声辅助微细磨料水射流加工装置上进行了 K9 玻璃表面微孔加工实验,进一步研究了超声振动在微细磨料水射流冲

蚀加工 K9 玻璃等硬脆材料过程中的作用,重点探讨了超声振动对微孔形貌、深度、顶部孔径和底面平坦程度的影响,为提高微细磨料水射流的加工能力和质量提供技术支持。

## 1 加工系统工作原理

目前,微细磨料水射流加工系统常采用前混合式系统,其工作原理为:预先将水和磨料加入磨料桶中混合,并时刻保持搅拌器搅动,使磨料在水中均匀分布,为提升磨料的分散悬浮能力,可以加入一些添加剂。随后,磨料与水的混合物经过增压泵的增压,获得较高的压力,最后流经内径极小的喷嘴,形成高速微细磨料水射流束,冲向待加工工件表面。喷嘴或工件可以夹持在运动平台上,实现各个方向的运动,从而加工出各种形状的微细结构。

超声辅助加工是将超声加工与机械加工结合形成的新型复合加工技术,通过在加工工具或工件上施加超声振动,使加工工具或工件作小振幅超声频振动,从而可以获得更好的加工性能<sup>[20-22]</sup>。在微细磨料水射流加工领域,超声振动可以施加在喷嘴<sup>[23]</sup>,也可以施加在工件上<sup>[24]</sup>,振动方向通常与工件加工表面垂直或平行,采用不同的方式可以达到不同的效果。

超声振动平台(如图 1 所示)带动工件在垂直于工件加工表面方向以频率  $f$ 、振幅  $A_f$  振动,工件振动的位移函数可以表达为:

$$y = A_f \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

由此可以得到工件的运动速度为:

$$v_w = \frac{dy}{dt} = 2\pi f A_f \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

式中:  $v_w$  为工件的运动速度, m/s;  $y$  为工件的位移, m;  $t$  为工件运动时间, s;  $f$  为超声振动频率, Hz;  $A_f$  为超声振动振幅, m。

对工件施加超声振动后,一方面会增大射流与工件之间的相对运动速度;另一方面,超声振动也使工件表面的流场发生周期性振荡,改变工件表面尤其是

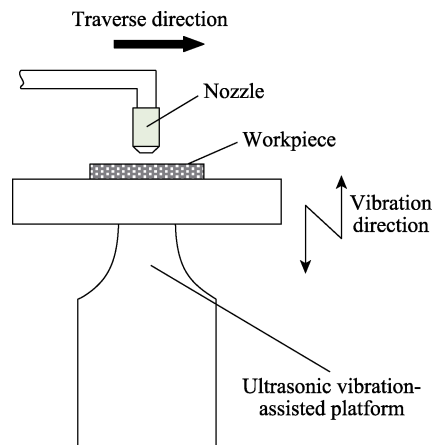


图 1 超声辅助微细磨料水射流加工示意

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic-assisted micro-abrasive water jet system

射流滞止区内静压的分布,从而影响磨粒的运动速度和轨迹,最终影响微细磨料水射流的加工性能。

## 2 K9 玻璃冲蚀钻孔实验

### 2.1 实验材料

工件材料选用了 K9 玻璃,尺寸为  $45\text{ mm} \times 22\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ ,如图 2 所示。其硬度高,断裂韧性低,

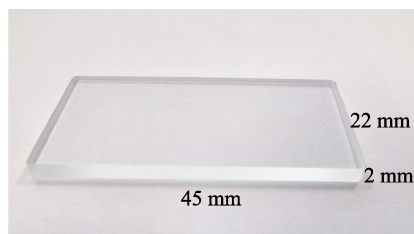


图 2 实验用 K9 玻璃

Fig.2 K9 glass in the experiment

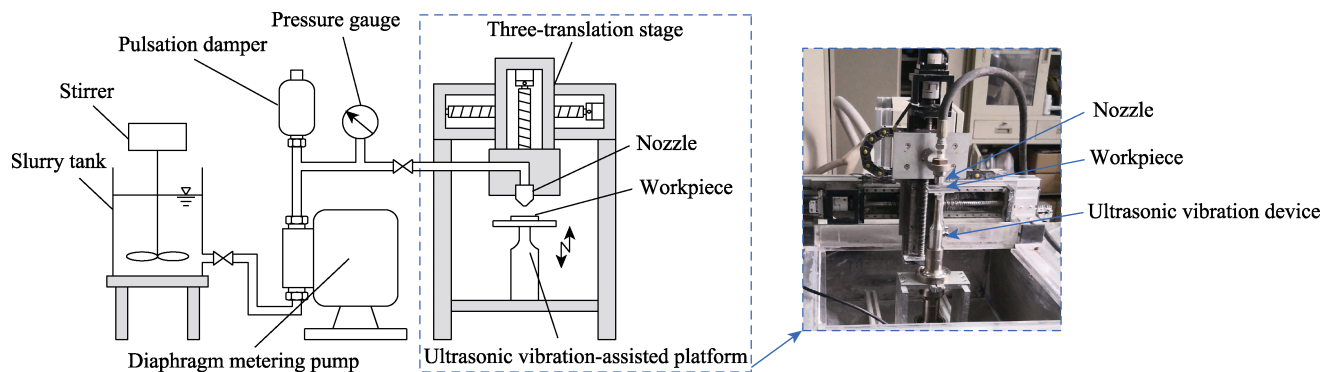
图 3 超声辅助微细磨料水射流加工装置<sup>[24]</sup>

Fig.3 Ultrasonic-assisted micro-abrasive water jet processing equipment

### 2.3 实验方案

微细磨料水射流冲蚀能力强弱的影响因素有很

多,选取影响较大的射流压力  $P$  和加工时间  $t$  作为工艺参数变量,进行单因素实验。射流压力和加工时间均选取了 3 个水平,进行全因子实验,可得到 9 种组

表 1 实验中 K9 玻璃的材料参数

Tab.1 Material parameters of K9 glass in the experiment

Density /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Young's modulus /GPa	Hardness /GPa	Fracture toughness /( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )
2520	82	7.7	0.82

### 2.2 实验装置

图 3 是自主设计搭建的超声辅助微细磨料水射流加工装置,包含微细磨料水射流加工系统和超声辅助系统两个基本的系统。装置中最重要的部件是增压泵,其性能的优劣关乎微细磨料水射流的稳定性。实验中采用了最大输出压力可达 20 MPa 的隔膜式计量泵,此泵允许磨料和水的混合物直接流经其管路。增压泵出口处连接了囊式蓄能器,可以起到储存能量、稳定压力、减少功率消耗、补偿渗漏、吸收压力脉动和缓和冲击力等多种作用。蓄能器使用前需要充装氮气,充气压力约为系统工作压力的 60% (用于稳定隔膜式计量泵的输出压力)。喷嘴的材料为氧化锆陶瓷,内径为 0.125 mm,长度为 10.5 mm,具有较好的耐磨性,形成的水射流有较好的集束性。喷嘴固定于三维运动平台上,可以在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向上以精度 0.001 mm 运动。超声振动辅助系统主要包含超声发生器、换能器、变幅杆和夹具等,为整个加工过程提供第二动力源,其峰值功率为 1000 W,振动频率为 20 kHz,输出端最大振幅为 20  $\mu\text{m}$  (可在 0~20  $\mu\text{m}$  间调节)。

合，每种组合在工件超声振动和无超声振动的条件下进行对比实验，一共得到 18 组实验。具体的加工工艺参数选取见表 2。

表 2 实验工艺参数及取值  
Tab.2 Experimental variables and processing parameters

Variables	Levels
Particle concentration (mass)	2%
Standoff distance	2 mm
Nozzle diameter	0.125 mm
Jet impingement angle	90°
Ultrasonic vibration frequency	20 kHz
Ultrasonic vibration amplitude	10 μm
Average Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle diameter	5 μm
Jet pressure	4, 6, 8 MPa
Processing time	20, 40, 60 s

所有实验均在自主搭建的超声辅助微细磨料水射流加工装置上进行。喷嘴被夹具夹持在三维运动平台上，始终与工件保持垂直，靶距为 2 mm。工件固定在超声振动平台上，在与喷嘴垂直方向上以 20 kHz 的超声振动频率和 10 μm 的振幅作周期性振动。实验

中对 K9 玻璃进行定点冲蚀，从水射流从喷嘴出口出射开始计时，达到设定时间后结束冲蚀。每组实验均重复进行 3 次，以排除偶然误差。

3 结果与讨论

3.1 微孔形貌

实验结束后，使用基恩士超景深三维显微镜对各条件下加工所得的微孔进行了观测，其中加工时间为 60 s 时引入超声振动前后 K9 玻璃表面的微孔形貌如图 4 所示，各微孔相应的截面轮廓如图 5 所示<sup>[24]</sup>。从图 4 中可以发现，无论有无超声振动，采用粒径为 5 μm 的氧化铝磨料在 K9 玻璃表面加工出的微孔底面中心处均有明显的凸起，截面形貌呈现“W”形。一般认为，“W”形截面微孔的形成是由于工件材料的去除方式以塑性冲蚀为主，这说明超声振动的引入并未改变小颗粒磨粒对工件材料的去除机理。引入超声振动后，微孔的尺寸发生了明显的变化。从截面轮廓图中可以看出，微孔孔径略微有所减小，但深度明显增加，总体材料去除率得到提升。同时，底面凸起的范围在引入超声振动后有所减小。

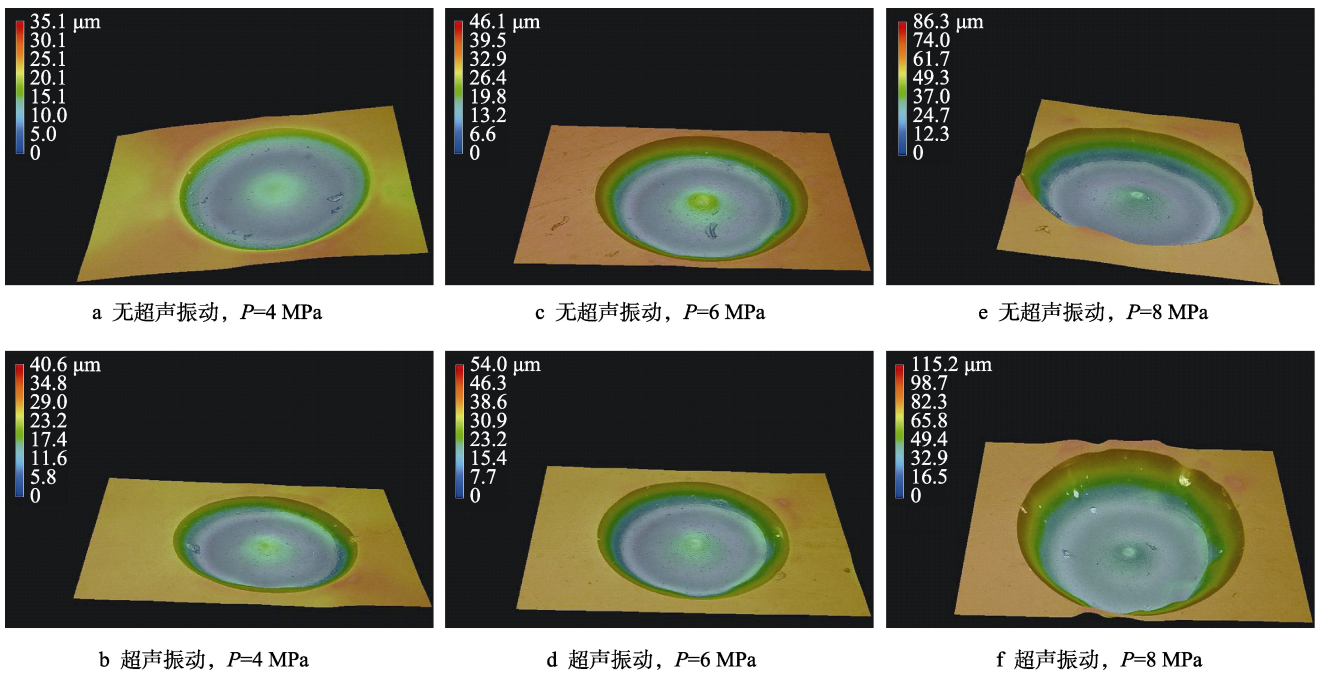


图 4 微孔形貌

Fig.4 Micro-hole morphology: a) without ultrasonic vibration,  $P=4$  MPa; b) with ultrasonic vibration,  $P=4$  MPa; c) without ultrasonic vibration,  $P=6$  MPa; d) with ultrasonic vibration,  $P=6$  MPa; e) without ultrasonic vibration,  $P=8$  MPa; f) with ultrasonic vibration,  $P=8$  MPa

为进一步分析超声振动对微细磨料水射流在 K9 玻璃表面加工微孔效果的影响，对微孔的主要尺寸进行了测量，如图 6 所示。具体包含微孔顶部直径、微孔深度和驼峰值（Hump depth，定义为微孔底面最低

处到中间凸起顶部的高度差）。每个微孔均取不同方向的 4 条截面轮廓线进行尺寸测量，由于每组实验均重复了 3 次，最终的结果是 12 条截面轮廓线上测量结果的平均值。

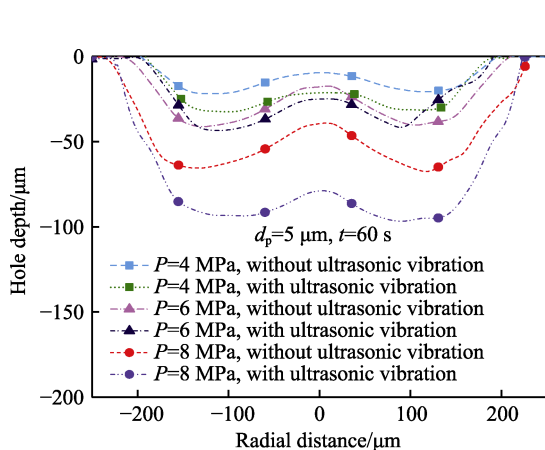


图5 微孔截面轮廓  
Fig.5 Micro-hole section profile

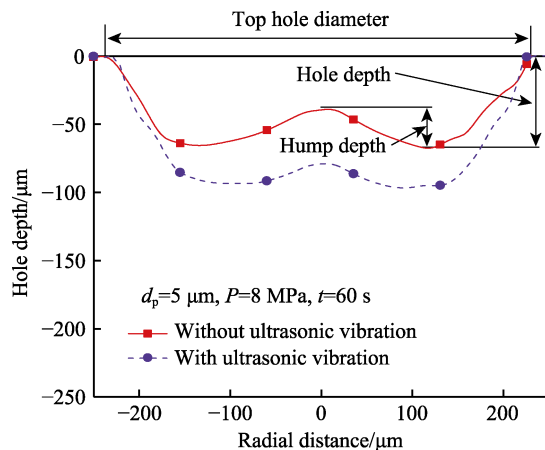


图6 微孔主要测量尺寸  
Fig.6 Main measurement dimensions of the micro-hole

### 3.2 微孔深度

各实验条件下的微孔深度如图7所示。在相同射流压力条件下, 无论是否引入了超声振动, 微孔深度均随着加工时间的增加而增大。这是由于随着加工时间的增加, 更多的磨粒冲击工件表面, 从而造成材料的进一步去除, 使得微孔深度增加。随着加工时间的进一步增加, 微孔深度存在一个临界值, 即随着加工时间增加, 微孔深度保持不变。这是因为随着微孔深度的增加, 在保持射流喷嘴与工件表面喷射距离一定的情况下, 射流冲击能量逐渐减少, 从而导致其中磨粒冲击工件材料的动能减少。如果磨粒冲击工件材料的动能已经不足以造成工件材料的失效进而从工件表面去除, 那么微孔的深度将不会再增加。因此, 在

这个值以下, 微孔的深度与加工时间呈正相关。

对比图7a—c可发现, 微孔的深度与射流压力也呈正相关。由流体力学中管道流动的伯努利方程 ( $1/2\rho v^2 = P$ ) 可知, 在流体密度  $\rho$  一定的情况下, 射流压力  $P$  越大, 射流流速  $v$  也就越大, 从而流场中的磨粒可以获得更大的冲击动能, 冲蚀能力更强, 造成更多的材料去除。

对比在同等条件下有无超声振动加工的微孔深度, 可以发现, 超声振动增大了微孔的深度。在射流压力较小时, 增幅不大, 而在射流压力较大时, 深度显著增加。对比各组实验的结果发现, 射流压力为8 MPa, 加工时间为60 s时, 微孔深度的增幅最大, 由67.14  $\mu\text{m}$  增至103.81  $\mu\text{m}$ , 增幅达到了54.6%。

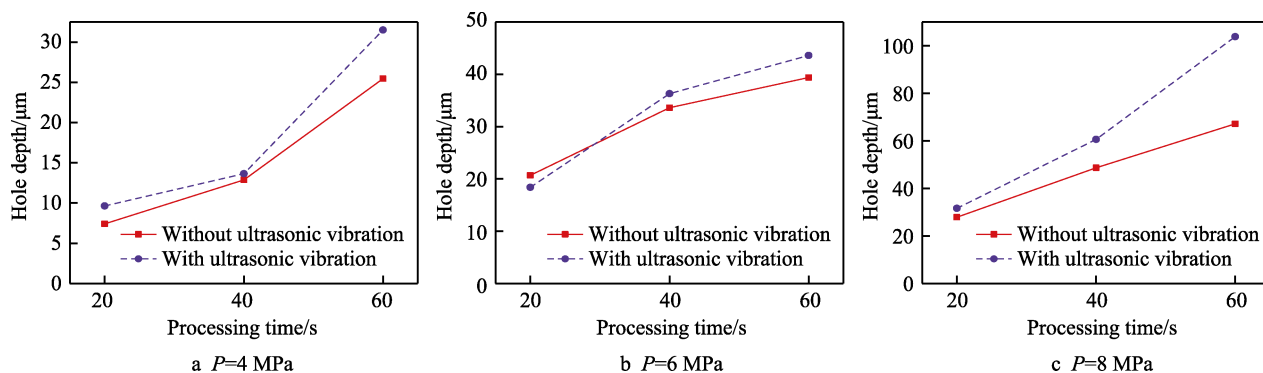


图7 微孔深度对比  
Fig.7 Comparison of the hole depth

### 3.3 微孔顶部直径

图8反映了各实验条件下微孔顶部直径的大小, 微孔的顶部直径在很大程度上反映了微孔孔径的大小。从图8中可以发现, 微孔顶部直径的大小与射流压力呈正相关。这是由于射流沿工件表面的黏性流动强弱对微孔孔径的大小有很大的影响, 射流压力越大, 黏性流动的速度越快, 因此导致磨粒在工件表面微切削、微犁耕时的能量也越大, 从而拓宽了孔径。

微孔顶部直径的大小与加工时间也呈正相关。这是因为随着时间的推进, 黏性流动流体携带的磨料颗粒以较小的角度冲击工件所产生的塑性冲蚀作用不断累积, 使得微孔的孔径得以增加。

对比图8中同等实验条件下有无超声振动时微孔顶部直径的大小, 可以发现, 超声振动的引入导致了微孔顶部直径有所减小。在各组实验中, 当射流压力为6 MPa, 加工时间为60 s时, 顶部直径减小幅度最大, 由415.69  $\mu\text{m}$  减小至381.48  $\mu\text{m}$ , 降幅为8.2%。

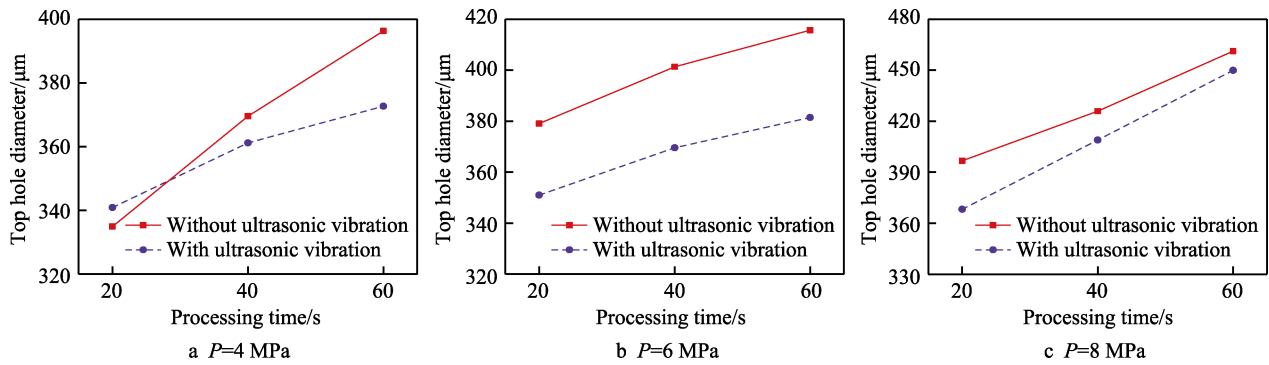


图 8 微孔顶部直径对比  
Fig.8 Comparison of the top hole diameters

这也说明超声振动使得微细磨料水射流对工件材料的冲蚀作用更加集中, 工件表面流场的振荡诱发了磨粒的二次或多次碰撞, 导致对材料的去除更多地发生于水射流的直接冲击方向, 而沿微孔内壁面运动拓宽孔径的行为有所减少。

### 3.4 微孔底面的平坦程度

在微细磨料水射流冲蚀过程中, 由于受射流滞止区的影响, 小颗粒的磨粒在接近工件表面时会发生较大角度的偏转, 从而导致微孔中心处的材料较难得到去除。同时, 在本实验中, 材料去除的方式均以塑性冲蚀为主, 故而微孔底面中心存在明显的凸起, 截面形貌呈现典型的“W”形。“W”形中间凸起的占比越小, 整个微孔看上去也就越平坦。因此, 微孔底面的平坦程度在一定程度上可以用驼峰值与微孔深度的比值来衡量, 比值越小, 意味着底面越平坦。

图 9 是各实验条件下加工所得的各个微孔截面

驼峰值与深度的比值。这一比值随着射流压力的增大而有所减小, 这可以用笔者课题组前期的仿真结果进行解释<sup>[25]</sup>。射流压力越大, 磨粒的碰撞速度和角度也越大, 从而磨粒对工件的冲蚀更靠近中心点, 造成中心处更多的材料去除。对比图 9 中同等条件下有无超声振动时的驼峰值与微孔深度的比值, 可以发现, 超声振动的引入显著降低了这一比值。当射流压力为 8 MPa, 加工时间为 60 s 时, 比值从 0.422 降至 0.188, 降幅达 55.5%, 这意味着超声振动的引入使得微孔的底面更加平坦。

超声振动对微孔底面平坦程度的改善效果, 主要在于工件的超声振动使得其表面的静压呈现周期性变化<sup>[25]</sup>, 总体上相较无超声振动时略有减小, 引起了小颗粒磨粒对工件表面的动态冲击过程, 在增大射流中心处磨粒最大碰撞速度和角度的同时, 增加了磨粒的二次或多次碰撞, 从而使微孔中心处的材料得到了更多的去除。

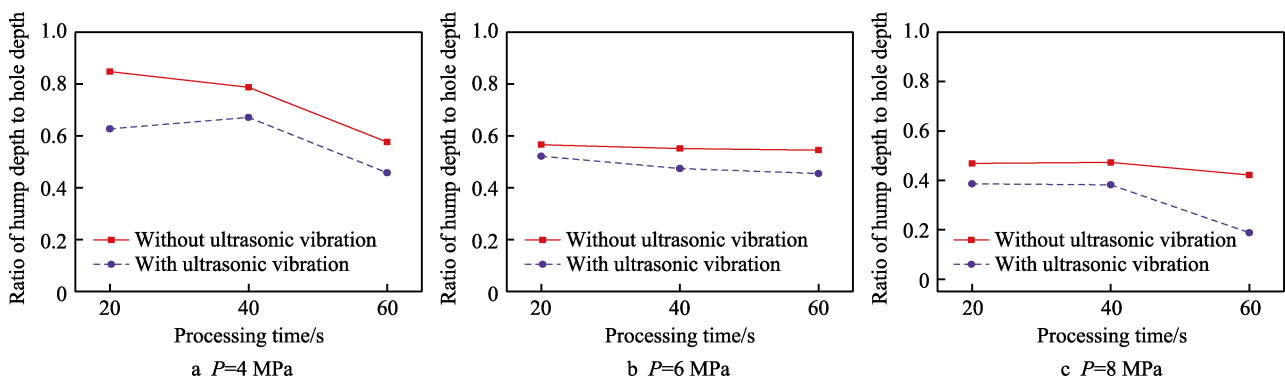


图 9 微孔底面平坦程度对比  
Fig.9 Comparison of the flatness of the micro-hole bottom surface

## 4 结论

本文采用超声辅助微细磨料水射流对 K9 玻璃进行了冲蚀钻孔实验研究, 着重分析了超声振动对微孔形貌、尺寸的影响, 主要结论如下:

1) 通过有无超声振动时微细磨料水射流在 K9

玻璃表面加工微孔的深度尺寸对比, 可以得出, 工件的超声振动增大了微孔的深度, 这一效果在射流压力较大时尤为明显。

2) 通过有无超声振动时微孔顶部直径尺寸的对比, 可以得出, 超声振动使得微细磨料水射流的冲蚀更加集中, 从而导致微孔顶部直径减小。

3) 通过分析微孔的截面形貌可以发现, 超声振

动对微孔深度方向的影响要大于对孔径方向的影响,虽然孔径有所减小,但整个微孔的体积是增大的,且小颗粒磨粒对材料的去除机理未发生变化。因此,超声振动能在不改变材料去除机理的前提下,提升微细磨料水射流的冲蚀能力。

4) 超声振动的引入提升了微孔底面的平坦程度,“W”形截面形貌得到改善,微孔中心的凸起部分材料因工件的振动得到了更好的去除。

综上所述,超声振动可以改善微细磨料水射流的冲蚀过程,在提升加工能力的同时改善加工面的形貌,可以实现 K9 玻璃等材料的高质量高效率加工。这对推动微细磨料水射流在硬脆材料的微细加工领域的应用具有积极意义。

#### 参考文献:

- [1] ZHAO Jun, HUANG Jin-feng, WANG Rui, et al. Investigation of the optimal parameters for the surface finish of K9 optical glass using a soft abrasive rotary flow polishing process[J]. *Journal of manufacturing processes*, 2020, 49: 26-34.
- [2] GUO Xiao-guang, SHI Yu-tong, LUO Xi-chun, et al. Mechanism of crack propagation for K9 glass[J]. *International journal of precision engineering and manufacturing*, 2019, 20(5): 815-825.
- [3] 聂文忠, 马亚健, 陆建民, 等. 纵扭复合超声振动铣削 K9 玻璃表面质量的研究[J]. *机床与液压*, 2020, 48(20): 45-48.
- [4] NIE Wen-zhong, MA Ya-jian, LU Jian-min, et al. Study on surface quality of K9 glass by longitudinal torsional composite ultrasonic vibration milling[J]. *Machine tool & hydraulics*, 2020, 48(20): 45-48.
- [5] 李钱陶, 熊长新, 杨长城. K9 光学玻璃化学钢化技术研究[J]. *应用光学*, 2021(1): 188-193.
- [6] LI Qian-tao, XIONG Chang-xin, YANG Chang-cheng. Research on chemical strengthening technology for K9 optical glass[J]. *Journal of applied optics*, 2021(1): 188-193.
- [7] LIU Ming, WU Jia-nan, GAO Cheng-hui. Sliding of a diamond sphere on K9 glass under progressive load[J]. *Journal of non-crystalline solids*, 2019, 526: 119711.
- [8] WANG Cheng-yong, YANG P X, FAN Jing-ming, et al. Effect of slurry and nozzle on hole machining of glass by micro abrasive suspension jets[J]. *Key engineering materials*, 2009, 404: 177-183.
- [9] 张庆举, 吕洪君. 微细磨料水射流切割技术的研究进展[J]. *液压与气动*, 2012(12): 134-138.
- [10] ZHANG Qing-ju, LV Hong-jun. Research progress of micro abrasive water-jet cutting technology[J]. *Chinese hydraulics & pneumatics*, 2012(12): 134-138.
- [11] 李增强, 赵佩杰, 宋雨轩, 等. 微磨料水射流加工技术研究现状[J]. *纳米技术与精密工程*, 2016(2): 134-144.
- [12] LI Zeng-qiang, ZHAO Pei-jie, SONG Yu-xuan, et al. Research status of micro abrasive water jet machining technology[J]. *Nanotechnology and precision engineering*, 2016(2): 134-144.
- [13] KOWSARI K, NOURAEI H, JAMES D F, et al. Abrasive slurry jet micro-machining of holes in brittle and ductile materials[J]. *Journal of materials processing technology*, 2014, 214(9): 1909-1920.
- [14] PANG K L, NGUYEN T, FAN J M, et al. Modelling of the micro-channelling process on glasses using an abrasive slurry jet[J]. *International journal of machine tools and manufacture*, 2012, 53(1): 118-126.
- [15] QI Huan, FAN Jing-ming, WANG Jun. A study of the micro-machining process on quartz crystals using an abrasive slurry jet[J]. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part B: Journal of engineering manufacture*, 2015, 229(3): 421-434.
- [16] 雷玉勇, 蔡黎明, 邴龙健, 等. 微磨料水射流技术及其应用[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2009, 28(4): 1-6.
- [17] LEI Yu-yong, CAI Li-ming, BING Long-jian, et al. Micro abrasive water jet technology and its application[J]. *Journal of Xihua University (natural science edition)*, 2009, 28(4): 1-6.
- [18] 樊晶明, 樊昶明, 王军. 微磨料水射流加工脆性玻璃的冲蚀机理研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2010, 30(3): 1-5.
- [19] FAN Jing-ming, FAN Chang-ming, WANG Jun. Erosion mechanism of brittle glass by micro-abrasive water jet[J]. *Diamond & abrasives engineering*, 2010, 30(3): 1-5.
- [20] WANG J, NGUYEN T, PANG K L. Mechanisms of micro-hole formation on glasses by an abrasive slurry jet[J]. *Journal of applied physics*, 2009, 105(4): 044906.
- [21] PANG K L, NGUYEN T, FAN Jing-ming, et al. A study of micro-channeling on glasses using an abrasive slurry jet[J]. *Machining science and technology*, 2012, 16(4): 547-563.
- [22] LV Zhe, HUANG Chuan-zhen, ZHU Hong-tao, et al. A research on ultrasonic-assisted abrasive waterjet polishing of hard-brittle materials[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2015, 78(5-8): 1361-1369.
- [23] QI Huan, WEN Dong-hui, YUAN Qiao-ling, et al. Numerical investigation on particle impact erosion in ultrasonic-assisted abrasive slurry jet micro-machining of glasses[J]. *Powder technology*, 2017, 314: 627-634.
- [24] HOU Rong-guo, WANG Tao, LV Zhe, et al. Experimental study of the ultrasonic vibration-assisted abrasive waterjet micromachining the quartz glass[J]. *Advances in materials science and engineering*, 2018, 2018: 1-9.
- [25] 陈雪松, 侯荣国, 吕哲, 等. 超声辅助磨料水射流加工机制及去除模型研究[J]. *机床与液压*, 2020, 48(17): 79-82, 87.
- [26] CHEN Xue-song, HOU Rong-guo, LV Zhe, et al. Study on processing mechanism and removal model of ultrasound assisted abrasive waterjet machining[J]. *Machine*

- tool & hydraulics, 2020, 48(17): 79-82.
- [20] 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.  
FANG Feng-zhou, NI Hao, GONG Hu. Rotary ultrasonic machining of hard and brittle materials[J]. Nanotechnology and precision engineering, 2014, 12(3): 227-234.
- [21] 张雄, 焦锋. 超声加工技术的应用及其发展趋势[J]. 工具技术, 2012, 46(1): 3-8.  
ZHANG Xiong, JIAO Feng. Applications and development trends of ultrasonic machining technology[J]. Tool engineering, 2012, 46(1): 3-8.
- [22] 康仁科, 马付建, 董志刚, 等. 难加工材料超声辅助切削加工技术[J]. 航空制造技术, 2012, 55(16): 44-49.  
KANG Ren-ke, MA Fu-jian, DONG Zhi-gang, et al. Ultrasonic assisted machining of difficult-to-cut material[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2012, 55(16): 44-49.
- [23] 陈雪松, 侯荣国, 吕哲, 等. 超声辅助微细磨料水射流加工装置的研制及实验研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(6): 17-22.  
CHEN Xue-song, HOU Rong-guo, LV Zhe, et al. Development and experimental investigation of ultrasonic assisted micro abrasive waterjet machining device[J]. Machine tool & hydraulics, 2020, 48(6): 17-22.
- [24] QI Huan, QIN Shi-kang, CHENG Zhi-chao, et al. Towards understanding performance enhancing mechanism of micro-holes on K9 glasses using ultrasonic vibration-assisted abrasive slurry jet[J]. Journal of manufacturing processes, 2021, 64: 585-593.
- [25] QI Huan, WEN Dong-hui, LU Cong-da, et al. Numerical and experimental study on ultrasonic vibration-assisted micro-channelling of glasses using an abrasive slurry jet[J]. International journal of mechanical sciences, 2016, 110: 94-107.
- 
- (上接第 345 页)
- [18] CHO Y S, KIM J, PARK Y J, et al. The effects of strained sapphire (0001) substrate on the structural quality of GaN epilayer[J]. Physica status solidi, 2004, 241(12): 2722-2725.
- [19] CAO Lin-lin, ZHANG Xiang, YUAN Ju-long, et al. Study on the influence of sapphire crystal orientation on its chemical mechanical polishing[J]. Applied sciences, 2020, 10(22): 8065.
- [20] 胡中伟, 邵铭剑, 郭建民, 等. 蓝宝石不同晶面磨削特性比较[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1250-1258.  
HU Zhong-wei, SHAO Ming-jian, GUO Jian-min, et al. Comparison of grinding characteristics of different crystal surfaces for sapphire[J]. Optics and precision engineering, 2017, 25(5): 1250-1258.
- [21] WAN Lin-lin, DAI Peng, LI Le, et al. Investigation on ultra-precision lapping of A-plane and C-plane sapphires[J]. Ceramics international, 2019, 45(9): 12106-12112.
- [22] LUO Qiu-fa, LU Jing, XU Xi-peng, et al. Removal mechanism of sapphire substrates (0001, 1120 and 1010) in mechanical planarization machining[J]. Ceramics international, 2017, 43(18): 16178-16184.
- [23] MAAS P, MIZUMOTO Y, KAKINUMA Y, et al. Anisotropic brittle-ductile transition of monocrystalline sapphire during orthogonal cutting and nanoindentation experiments[J]. Nanotechnology and precision engineering, 2018, 1(3): 157-171.
- [24] MIZUMOTO Y, MAAS P, KAKINUMA Y, et al. Investigation of the cutting mechanisms and the anisotropic ductility of monocrystalline sapphire[J]. CIRP annals, 2017, 66(1): 89-92.
- [25] MA Yi, CAO Lin-lin, HANG Wei, et al. Crystallographic orientation effect on the incipient plasticity and its stochastic behavior of a sapphire single crystal by spherical nanoindentation[J]. Ceramics international, 2020, 46(10): 15554-15564.
- [26] WANG Jin-hu, GUO Bing, ZHAO Qing-liang, et al. Dependence of material removal on crystal orientation of sapphire under cross scratching[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2017, 37(6): 2465-2472.