

超声辅助微细磨料水射流加工陶瓷试验研究

陈雪松,侯荣国,王屹楨,张宇,曹茗茗

山东理工大学机械工程学院

摘要: 针对陶瓷材料难加工的特性,提出了超声辅助微细磨料水射流加工技术。基于响应曲面法对工程陶瓷进行切槽试验,测量加工沟槽底部表面粗糙度,通过建立表面粗糙度预测模型,分析了系统压力、超声振幅及靶距对加工质量的影响规律。当系统压力为 32.8MPa、振幅为 16 μm 、靶距为 10mm 时,获得最低表面粗糙度为 0.746 μm 。通过试验验证了该预测模型的准确性和有效性。

关键词: 超声辅助;磨料水射流;响应曲面法;表面粗糙度

中图分类号: TG663;TH161;TP69

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2020.03.002

Experimental Study on Ultrasonic Assisted Micro Abrasive Waterjet Machining of Ceramic

Chen Xuesong, Hou Rongguo, Wang Yizhen, Zhang Yu, Cao Mingming

Abstract: According to the difficult-to-machine characteristic of ceramic materials, the ultrasonic assisted micro abrasive waterjet machining technology is proposed. Based on the response surface method, the grooving experiments of engineering ceramics are carried out to measure the surface roughness of the bottom surface of the groove. The prediction model of surface roughness is established. The effect of system pressure, the ultrasonic amplitude and the standoff distance on the machining quality are analyzed. When the system pressure is 32.8MPa, the ultrasonic amplitude is 16 μm and the standoff distance is 10mm, the minimum surface roughness is 0.746 μm . Finally, the accuracy and the effectiveness of the prediction model are verified by verification experiments.

Keywords: ultrasonic assisted; abrasive waterjet; response surface method; surface roughness

1 引言

工程陶瓷、光学玻璃等硬脆材料具有无毒、高硬度、高强度、耐腐蚀、耐磨损等优点,广泛应用于机械、航空航天、化工等领域,但因其脆性大、硬度高,传统加工方式会导致热损伤区及表面裂纹,降低工件强度^[1,2]。针对此问题,有学者提出采用磨料水射流技术加工硬脆材料,并开展了大量研究。赵永赞等^[3]利用磨料水射流切割工程陶瓷,研究其加工机理。万庆丰等^[4]利用磨料水射流技术对陶瓷材料进行钻削试验,建立了钻削深度的理论模型。张成光等^[5]研究认为在磨料水射流加工硬脆材料过程中,主要以剪切磨损的方式去除材料,表面轮廓呈“W”形。Hou R. G. 等^[6]研究了超声振动辅助磨料水射流冲蚀石英玻璃,试验结果表明,施加超声振动可有效提高其加工性能。Lv Z. 等^[7]分析了超声辅助磨料水射流加工过程中的空化特性,采用空化模型模拟了气液两相传质过程。本文研制了新型超声辅助磨料水射流加工装置,并基于响应曲面法分析

了工艺参数对加工后陶瓷表面粗糙度的影响规律,建立了表面粗糙度预测模型。

2 加工陶瓷试验研究

2.1 超声辅助微细磨料水射流试验装置

超声辅助微细磨料水射流加工系统主要由气液增压系统、磨料浆体供给装置、四轴运动及控制系统和超声喷嘴等装置组成,其中磨料供给采用前混合方式。超声喷嘴装置是加工系统的关键,如图1所示,该装置主要由超声发生器、压电陶瓷换能器、变幅杆和喷嘴组成。其内部结构见图2,变幅杆安装在喷嘴内部,具有放大振幅和聚能的作用,通过超声波能量与射流能的耦合作用,增强磨料水射流的冲蚀性能。

2.2 试验设计

采用超声辅助微细磨料水射流对陶瓷材料进行切槽试验,加工后沟槽见图3,研究沟槽底部的表面粗糙度,分析工艺参数对加工质量的影响规律。试验条件见表1。

在合理的试验设计基础上,响应曲面法通过试验得到响应的数据,研究响应与输出之间的关

系^[8]。基于 Design-Expert 统计软件,利用响应曲面法中的 Box-Behnken 法设计三因素三水平试验,以系统压力、振幅及靶距为参数变量,具体设置见表 2。

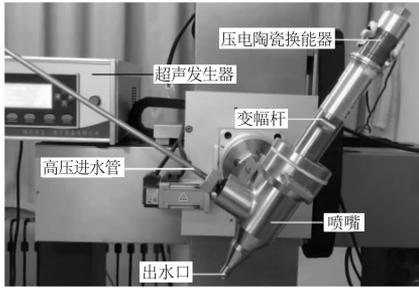


图 1 超声喷嘴装置

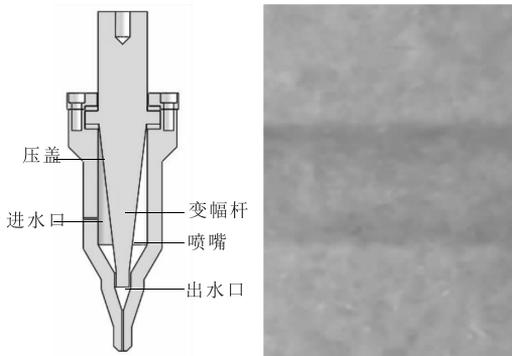


图 2 超声喷嘴内部结构 图 3 磨料水射流冲蚀陶瓷沟槽

表 1 试验条件

| | | | | |
|-------|----------|--------------|-----------|------------|
| 参数 | 工件材料 | 磨料 | 喷嘴直径(mm) | 磨料流量(mg/s) |
| 数值或条件 | 96%氧化铝陶瓷 | 500#棕刚玉 | 1 | 2.5 |
| 参数 | 冲击角度(°) | 横移速度(mm/min) | 超声频率(kHz) | |
| 数值或条件 | 45 | 15 | 20 | |

表 2 Box-Behnken 试验因素与水平

| 因素 | 符号 | 水平 | | |
|---------|----|----|----|----|
| | | -1 | 0 | 1 |
| 压力(MPa) | A | 20 | 30 | 40 |
| 振幅(μm) | B | 0 | 10 | 20 |
| 靶距(mm) | C | 4 | 7 | 10 |

2.3 表面粗糙度数学模型

为了评估各因素的影响程度,对试验结果进行数据回归分析。分析结果显示二次项显著,采用二次项对表面粗糙度进行拟合,建立多元二阶回归预测模型^[9]。表面粗糙度与各参数变量之间的数学模型为

$$R_a = 1.10 - 0.20A - 0.37B - 0.094C + 0.10AB - 0.15AC + 0.062BC + 0.52A^2 + 0.23B^2 - 0.12C^2$$

为了验证该模型的有效性,对试验结果进行方差分析和显著性分析,结果见表 3。模型的 P 值为 0.0073,表示模型噪声过大的概率仅为 0.73%,说

明该模型显著。模型的失拟项 P 值为 0.0682,该值大于 0.05 表示失拟不显著,证明建立的回归方程拟合度良好。信噪比为 15.26,该比值大于 4 说明信号显著。通过方差分析证明该数学模型拟合度好、可信度高。分析表 3 的 F 值可得,振幅对表面粗糙度的影响程度最大,其次为压力,靶距影响最小。

表 3 表面粗糙度 R_a 的方差分析

| 来源 | 平方和 | 自由度 | 均方差 | F 值 | P 值 |
|-------|-------|-----|-------|-------|--------|
| 模型 | 3.06 | 9 | 0.34 | 7.49 | 0.0073 |
| A | 0.32 | 1 | 0.32 | 7.04 | 0.0328 |
| B | 1.09 | 1 | 1.09 | 23.94 | 0.0018 |
| C | 0.07 | 1 | 0.07 | 1.55 | 0.2536 |
| AB | 0.04 | 1 | 0.04 | 0.88 | 0.3794 |
| AC | 0.09 | 1 | 0.09 | 1.98 | 0.2022 |
| BC | 0.016 | 1 | 0.016 | 0.34 | 0.5760 |
| A^2 | 1.13 | 1 | 1.13 | 24.93 | 0.0016 |
| B^2 | 0.23 | 1 | 0.23 | 4.95 | 0.0613 |
| C^2 | 0.059 | 1 | 0.059 | 1.31 | 0.2906 |
| 残差 | 0.32 | 7 | 0.045 | | |
| 失拟 | 0.25 | 3 | 0.09 | 4.65 | 0.0682 |
| 纯误差 | 0.07 | 4 | 0.078 | | |
| 合计 | 3.38 | 16 | | | |

3 工艺参数优化

3.1 响应面分析

各加工参数之间的交互作用对表面粗糙度的影响如图 4 所示,其他参数为 0 水平。从图 4a 和图 4b 可以看出,当射流压力从 20MPa 增大到 30MPa 时,表面粗糙度逐渐降低;当压力继续增大,表面粗糙度升高。分析原因是当射流压力过低时,磨粒的冲蚀载荷较小,不足以去除工件表面的微观凸起,加工质量较差。当压力过高时,磨粒以较高的冲击动能冲蚀工件,陶瓷材料发生脆性断裂,在工件表面生成微观裂纹,并形成大量的冲蚀坑,表面粗糙度高。当采用较低的射流压力时,磨粒对工件表面产生接触滑擦、刻划、剪切等延性侵蚀^[10],此时材料去除方式为塑性流动,表面光滑,加工质量高。

从图 4a 和图 4c 可知,表面粗糙度与振幅成反比。通过超声喷嘴装置将超声波能量与射流能量在喷嘴内充分耦合,增强磨料水射流的脉动行为,将低脉动、连续射流转变为高脉动、非定常射流,利用脉冲射流的动压力作用减弱水垫效应的影响,提高磨料水射流的加工性能。随着振幅的增加,射流的脉动幅度增大,脉动效果显著,加工精度提高。并且,分析图 4a 可知,随着压力的增大,超声振动引起的脉动作用效果减弱,表面质量轻微降低。图 4c 为振幅和靶距对表面粗糙度的响应曲面图,可以看出,靶

距对加工质量影响不大,说明施加超声振动可以延长射流束核心区的长度,增加磨料水射流加工的有效靶距,提高加工的灵活性。

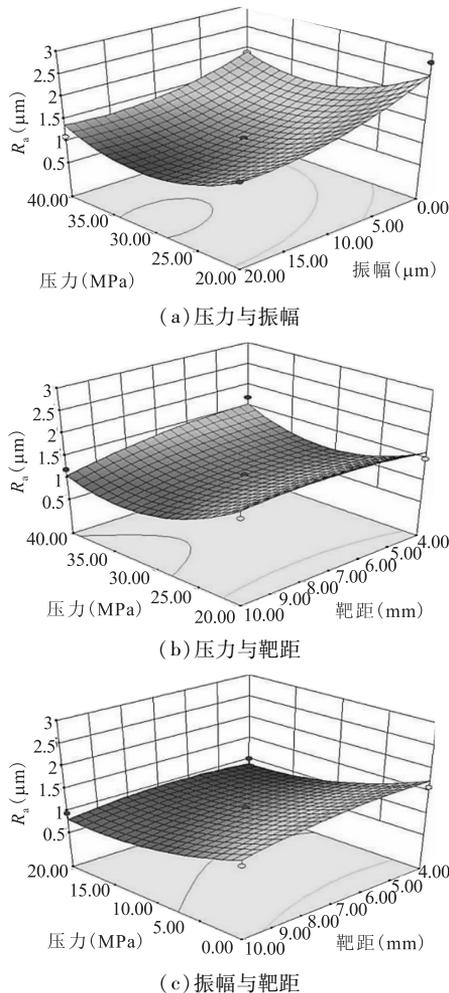


图4 表面粗糙度的响应曲面及等高线

3.2 参数优化

利用 Design-Expert 软件进一步对试验参数进行目标优化,寻求最佳表面质量参数。优化结果见图5,当压力为 32.8MPa、振幅为 16 μm 、靶距为 10mm 时,表面粗糙度达到最小值 0.746 μm 。

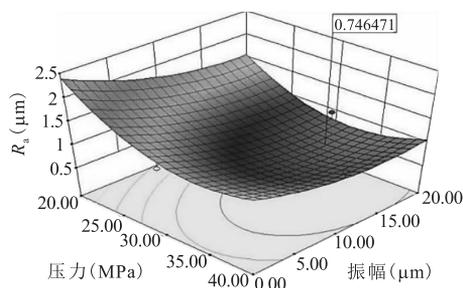


图5 参数优化结果

基于该加工参数组合,重复进行 3 次试验验证,得到的表面粗糙度均值为 0.81 μm ,预测模型的误差率为 7.9%。加工后的沟槽底部纹理如图 6 所

示,磨粒对工件产生划擦、剪切,生成的划痕均匀、细腻,无明显冲蚀坑,表面平整光滑,粗糙度低,证明该数学预测模型优化得出的工艺参数准确性高。



图6 陶瓷表面纹理

4 结语

利用超声辅助微细磨料水射流技术对陶瓷材料进行切槽试验,基于响应曲面法建立了沟槽底部表面粗糙度与工艺参数之间的预测模型,并分析了工艺参数对加工质量的影响规律,研究表明振幅对表面粗糙度的影响最为显著,其次是系统压力,靶距的影响程度最小。通过响应曲面优化获得最佳工艺参数组合,通过试验验证了其误差率为 7.9%,证明该模型具有较好的预测性和可信性,为超声辅助磨料水射流加工陶瓷材料提供了一定的理论依据。

参考文献

- [1] 武美萍, 缪小进, 苗新刚, 等. 基于磨料水射流的陶瓷材料车削加工[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(6): 87 - 89, 93.
- [2] 张能, 魏昕, 汪永超, 等. 超声振动磨削工程陶瓷的磨削力试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(1): 23 - 25.
- [3] 赵永赞, 王军, 赵民. 磨料水射流切割工程陶瓷的机理及试验分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(S1): 741 - 744.
- [4] 万庆丰, 雷玉勇, 陈林, 等. 磨料水射流钻削工程陶瓷试验研究[J]. 液压气动与密封, 2013, 33(8): 10 - 13.
- [5] 张成光, 张勇, 张飞虎, 等. 磨料水射流加工去除模型研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(7): 188 - 196.
- [6] Hou R G, Wang T, Lv Z, et al. Experimental study of the ultrasonic vibration-assisted abrasive waterjet micromachining the quartz glass[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018(2): 1 - 9.
- [7] Lv Z, Hou R G, Wang T, et al. Research on cavitation involved in ultrasonic-assisted abrasive waterjet machining [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 101: 1879 - 1886.
- [8] 李韩博, 杨明顺, 李言, 等. 响应曲面法在 SPIF 表面粗糙度预测及多目标优化中的应用[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(12): 1896 - 1905.

刀片钝化半径对高温合金切削质量影响的研究

张高峰¹, 康银乐¹, 王社权², 章伟², 黄威武², 鲁炎鑫²

¹湘潭大学机械工程学院; ²株洲钻石切削刀具股份有限公司

摘要: 通过不同钝化半径的刀具对 GH4169 高温合金进行车削正交试验, 结果表明: 随着钝化半径的增加, 表面残余应力先降低后增加; 工件环向残余应力随着钝化半径的增加, 工件内部残余压应力最大值增大, 影响深度随之增加。由表面粗糙度和表面残余应力的敏感程度可知, 进给量是影响表面完整性的最主要因素, 其次是切削速度和切削深度。分析了不同钝化半径和切削参数对表面完整性特征的影响规律, 建立了表面粗糙度表面残余应力的经验公式, 得到了用于精加工 GH4169 高温合金较好的钝化半径范围 0.02 ~ 0.03mm, 以及较优的切削参数 $v_c = 60 \sim 70\text{m/min}$, $f_n = 0.05 \sim 0.075\text{mm/r}$, $a_p = 0.2 \sim 0.5\text{mm}$ 。

关键词: GH4169; 钝化半径; 表面粗糙度; 残余应力

中图分类号: TG707; TH161

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2020.03.003

Study on Effect of Blade Roundness Radius on Cutting Quality of Superalloy

Zhang Gaofeng, Kang Yinle, Wang Shequan, Zhang Wei, Huang Weiwu, Lu Yanxin

Abstract: The turning orthogonal experiment of superalloy GH4169 is carried out with tools with different roundness radius. The results show that the surface residual stress decreased at first and then increased with the increase of roundness radius. With the increase of the circumferential residual stress of the workpiece, the maximum residual compressive stress in the workpiece increases, and the influence depth increases with the increasing of the circumferential residual stress of the workpiece. The sensitivity to surface roughness and surface residual stress shows that feed rate is the most important factor affecting surface integrity, followed by cutting speed and cutting depth. The effects of different roundness radius and cutting parameters on the surface integrity characteristics are analyzed, the empirical formula of surface residual stress of surface roughness is established, and the better roundness radius range of 0.02mm to 0.03mm for finishing GH4169 is obtained, the better cutting parameter $v_c = 60 \sim 70\text{m/min}$, $f_n = 0.05 \sim 0.075\text{mm/r}$, $a_p = 0.2 \sim 0.5\text{mm}$.

Keywords: GH4169; roundness radius; surface roughness; residual stress

1 引言

作为镍基高温合金的主要代表, GH4169 材料(国外牌号 Inconel718)具有镍基合金的典型特点, 在 650℃ ~ 1000℃ 范围内具有优异的高温强度、抗腐蚀、抗氧化的能力、良好的抗疲劳特性和稳定的力学性能^[1]。因此, GH4169 广泛应用

于航空喷气发动机、各种工业燃气轮机等热端部件的制造。

表面完整性是描述、鉴定和控制加工过程在零件表面内可能产生的各种变化及其对零件使用性能影响的技术^[2], 包括表面粗糙度、表面形貌、残余应力等。由现有研究对航空发动机的使用过程和故障分析得知, 各种形式的疲劳破坏几乎都集中在零件表面或接近表面的地方, 80% 以上的裂纹从加工刀痕、夹杂物或划伤等缺陷处起始^[2]。表面完整性的优劣对于零部件的使用寿命有着重要影响, 在航空

基金项目: 国家自然科学基金(51775469); 国家自然科学基金航空发动机专项(91860133); 国家重大专项(2018ZX04012001)

收稿日期: 2019年9月

[9] 巩亚东, 马晓腾, 孙瑶. 基于响应曲面法电火花线切割回转变零件试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(7): 1005-1010.

[10] Zhu H T, Huang C Z, Wang J, et al. Experimental study on abrasive waterjet polishing for hard-brittle materials[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(7-8): 569-578.

第一作者: 陈雪松, 硕士研究生, 山东理工大学机械工程学院, 255049 山东省淄博市

First Author: Chen Xuesong, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China

通信作者: 侯荣国, 副教授, 山东理工大学机械工程学院, 255049 山东省淄博市

Corresponding Author: Hou Rongguo, Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China