

表面质量控制及检测

基于 Fluent 仿真的强约束磨粒射流抛光特性

褚聪, 戴勇, 沈明, 葛满, 叶见领, 袁巧玲

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310014)

摘要:目的 解决传统水射流加工中的法向力冲击损伤、磨粒束发散、加工效率及能量利用效率问题。方法 提出一种新型加工方式, 即强约束磨粒射流抛光。在水射流加工的喷嘴末端施加一个约束力, 使抛光液以较高的速度并以与工件表面相切的方向喷射而出。采用仿真分析与实验探究相结合的方式, 以实际加工条件为仿真参数, 应用 Fluent 仿真软件分析了磨粒直径及磨粒浓度对加工的影响, 并得到相应的压力曲线。在仿真分析的基础上, 实验验证仿真结果的可靠性及实际加工的可行性。结果 由仿真结果可知, 1500 目直径的磨粒相对其他四种直径的磨粒, 颗粒对工件表面的压力最大, 达到 0.185 MPa。当磨粒质量分数为 15% 时, 相对其他三种磨粒浓度, 颗粒对工件表面的压力最大, 达到 0.19 MPa。因而, 1500 目磨粒、15% 的磨粒浓度为加工的最佳理论参数。以仿真结果为参考实验条件, 结果表明, 在 8 h 内, 工件表面粗糙度下降了 239 nm, 材料去除率达到 6.9 mg/h。结论 强约束磨粒射流加工方式可在工件表面形成较高速度的磨粒射流, 提高加工效率。在短时间内工件表面粗糙度的改善及工件质量的下降, 证明了此加工方式的有效性。

关键词: 强约束; 水射流; 抛光; 仿真; Fluent; 光学玻璃

中图分类号: TG580.692 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)06-0198-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.06.030

Machinability of Strongly Constrained Abrasive Jet Polishing Based on Fluent Simulation

CHU Cong, DAI Yong, SHEN Ming, GE Man, YE Jian-ling, YUAN Qiao-ling

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

ABSTRACT: **Objective** To solve the problems in traditional waterjet processing such as the impact damage by wears force, the divergency of abrasive jet, the machining efficiency and utilization efficiency of energy. **Methods** A new method, constrained abrasive jet polishing, was brought forward. A constrain was applied at the end of the nozzle, enabling injection of po-

收稿日期: 2016-01-21; 修订日期: 2016-05-25

Received: 2016-01-21; Revised: 2016-05-25

基金项目: 国家自然科学基金 (51305399)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51305399)

作者简介: 褚聪 (1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密、超精密加工技术及装备。

Biography: CHU Cong(1989—), Male, Master graduate student, Research focus: precision and ultra-precision processing technology and equipment.

通讯作者: 袁巧玲 (1979—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为精密、超精密加工技术及装备。

Corresponding author: YUAN Qiao-ling(1979—), Male, Ph. D., Lecturer, Research focus: precision and ultra-precision processing technology and equipment.

lishing solution at relatively high speed in the direction tangential to the surface of the workpiece. Along with the experiment, the actual processing conditions were selected as the simulation parameters, and a Fluent software was applied to analyze the effects of diameter and concentration of abrasive on the processing. After simulation, the corresponding pressure curve was gained. And in the basic of simulation, the experiment proved the reliability of simulation and the feasibility of processing.

Results The results showed that the abrasive of 10 μm in diameter had the largest pressure on the workpiece among the five diameters, reaching up to 0.185 MPa, and the abrasive with 15% mass fraction had the largest pressure on the workpiece among the four concentrations, reaching up to 0.19 MPa. Therefore, the best processing parameters for abrasive were 10 μm in diameter and 15% concentration. Within 8 hours, the roughness of workpiece presented a decline of up to 239 nm, and the material removal rate was 6.9 mg/h. **Conclusion** The method of constrained abrasive jet polishing, which could lead to high speed of abrasive jet on the surface of workpiece, improved the efficiency of processing. On the other hand, the decline of the roughness on the workpiece surface and the weight loss of the workpiece proved that this method had a good effect.

KEY WORDS: constrained; waterjet; polishing; simulation; Fluent; optical glass

随着现代科技的进步, 光学玻璃元器件在现代工业中的应用越来越广泛, 凸透镜、光学仪器镜片、激光反射镜等, 都只是光学玻璃应用的冰山一角^[1-3]。随着光学玻璃应用的愈加广泛, 对其加工后的表面质量及形状要求也越来越高。一般要求工件的面型精度为 0.1~0.001 μm , 角度精度大约在秒级, 且光学玻璃对表面质量要求为纳米级, 一般表面粗糙度需要达到 20 nm 以下^[4-7]。

水射流加工技术, 是近年来发展起来的一种全新加工方式^[8-12]。在加工过程中, 抛光液中的微小磨粒在水流带动下, 以较高的速度撞击工件表面, 达到去除材料的目的。当水射流中的所有磨粒在水流的带动下, 以不同角度和方向对工件表面进行加工, 即可达到光整工件表面的作用。在此过程中, 抛光基液的作用不仅是磨料颗粒的承载基液, 而且可以添加合适的化学试剂, 提高加工效率。抛光基液^[13]也起到冷却的作用, 避免了传统热加工方式中对工件的热损伤。此外, 磨粒作为一个个微小切削刀具, 可以对十分微小的缝隙进行加工。但是这种加工方式有其自身的弊端, 最显著的就是法向力冲击损伤问题以及磨粒束的发散问题^[14]。为解决水射流加工中存在的问题, 本文采用了约束磨粒射流的方式, 以达到加工的目的。

约束磨粒流是在水射流加工的喷嘴末端施加一个约束力, 使喷嘴紧贴在待加工工件表面。当约束在喷嘴内的抛光液压力足以克服这个约束力时, 喷嘴将离开工件表面, 抛光液以较高的速度向与工件表面相切的方向喷射而出。

配置此约束力的目的是: ①以合适的约束力,

强约束磨粒流的流动方向及流动速度, 使磨粒流成为可控的抛光工具; ②节约能源, 提高使用效率, 以很小的入口压力, 就可以得到较高的出口流速; ③有效改善传统水射流加工中存在的磨粒束发散问题。

1 仿真设置

在 Preston 方程中^[15], 除了影响加工效果的磨粒运动速度及其对工件表面的压力, 将其他方面的影响因素归结为一个常数 k , 即 Preston 常数, 则 Preston 方程表达式为:

$$\Delta z = \int_0^t k v p dt \quad (1)$$

式中: Δz 为磨削去除量; v 为磨粒在近壁区的相对运动速度; p 为磨粒在近壁区的相对压力。

由式 (1) 可以看出, 影响加工的主要因素为常数 k 、相对运动速度 v , 相对压力 p 。为探究此加工方式的加工机理, 了解此加工方式的可行性及加工方式的优缺点, 建立现有条件下的仿真模型, 获得颗粒在不同直径及浓度状态下对工件表面的压力曲线。

1.1 网格划分

在三维建模软件 Proe 中建立流道三维模型, 导入 Ansys 自带的网格划分软件 Icem 中划分网格。除喷嘴与工件接触位置间隙较小外, 流道其他部位都较简单, 因而采取自动网格划分。在喷嘴与工件接触处采用控制节点密度的方式, 控制此部分的网

格质量,其他部分通过整体网格密度控制其网格质量。

1.2 加工条件

为验证此加工方式是否有良好的加工效果及较高的加工效率,物理泵的入口压力设定为 1.7×10^5 Pa。对现有的物理泵而言,此工作压力可轻易达到,有效降低了装置的安装成本。在本实验的仿真中,仿真模型均以此工作压力为仿真条件。

实际探究性加工实验中,测得入口流量为 $1.08 \text{ m}^3/\text{h}$ 。由此计算得出,入口雷诺数 Re 为 2.613×10^5 ,出口雷诺数 Re 为 9.46×10^5 ,可认定内部流动状态为湍流。

1.3 湍流模型的选择

内部流动状态为湍流,且喷嘴装置的内部流动十分简单,因而使用标准的 k - ε 模型^[16]作为湍流模型的控制方程。选用标准 k - ε 模型作为计算模型,不仅能够满足流道的湍流状态,而且能兼顾计算精度及计算时间。其输送方程是:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; x_i , x_j 为各坐标分量; ∂_k , ∂_ε 为湍动能 k 和耗散率 ε 的湍流普朗特数, $\partial_k = 1.0$, $\partial_\varepsilon = 1.3$; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能; G_b 为浮力影响引起的湍动能; Y_M 为可压湍流中脉动扩张; S_k 为自定义源项; μ 为分子黏性系数; μ_t 为湍流黏性系数; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数, $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $C_{3\varepsilon}=0.09$ 。

1.4 仿真参数设置

为探究加工条件在此加工方式下的作用,设置相应的初始条件。其中,入口边界条件设置为压力入口,出口边界条件设置为 outflow。湍流模型采

用标准 k - ε 后,相应的壁面函数采用 Enhanced Wall Treatment。由入口雷诺数 Re , 计算相应的湍动能 k 及湍流损耗率 ε 。湍动能计算公式为:

$$k = \frac{3}{2} (v \cdot I)^2 \quad (3)$$

式中: v 为平均速度; 湍流强度 $I = 0.16 \cdot \text{Re}^{-\frac{1}{8}}$,

$\text{Re} = \frac{\rho v L}{\mu}$, L 为特征长度。

湍流损耗率 ε 计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} \cdot k^{1.5}}{L} \quad (4)$$

2 仿真及分析

在进行仿真分析时,选择合适的计算器。在综合考虑计算精度及计算时间的基础上,在基于压力的求解器中,选择 Coupled 算法,以满足计算精度的要求。因 Coupled 算法每个迭代步都需要较多的计算量,为缩短整个分析时间,采用以下求解方式: Volume Fraction、Turbulent Kinetic Energy 及 Turbulent Dissipation Rate 设置为一阶迎风格式,获得一个精度较低的解,收敛后再以二阶迎风格式计算,以获得精度较高的解。

2.1 分析颗粒直径对加工的影响

颗粒直径大小不仅对加工效率、加工精度有较大影响,而且在同一压力入口条件下、同一位置,颗粒对工件表面的压力也随颗粒直径的变化而改变^[17]。为探究不同颗粒直径时颗粒对工件表面的压力,在工件表面沿其中一径向方向等间距选取 6 个点作为压力数据采集点,见图 1。

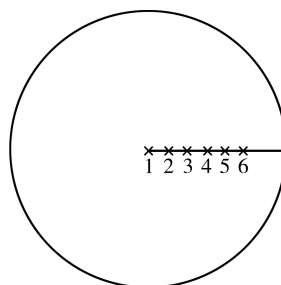


图 1 工件表面取点位置

Fig.1 Selection of pions on the surface of workpiece

图 2 为不同直径的颗粒冲击工件表面时对工

件表面的压力曲线图,颗粒含量为 15%(质量分数,下同)。使用标准 $k-\varepsilon$ 模型作为流体控制方程。由仿真结果可以看出,1500 目的磨料颗粒对工件表面的压力最大。当颗粒由 800 目到 1500 目过渡时,颗粒对工件表面的压力逐渐增大;当超过 1500 目时,颗粒对工件表面的压力逐渐减小。对于粗糙的工件表面 ($Ra > 200 \text{ nm}$), 1500 目磨料的材料去除率较低,不适于半精抛过程。因而,在半精抛过程中,可适当采用目数更低的磨料,精抛时再采用 1500 目磨料颗粒,以获取较高的表面质量。

在颗粒直径大于 1500 目时,颗粒对工件表面的压力减小,这是因为此时颗粒在液相中所受的 Basset 力增大, Basset 与颗粒的速度加速度方向相反,因而,当颗粒直径减小时,颗粒对工件表面的压力减小。

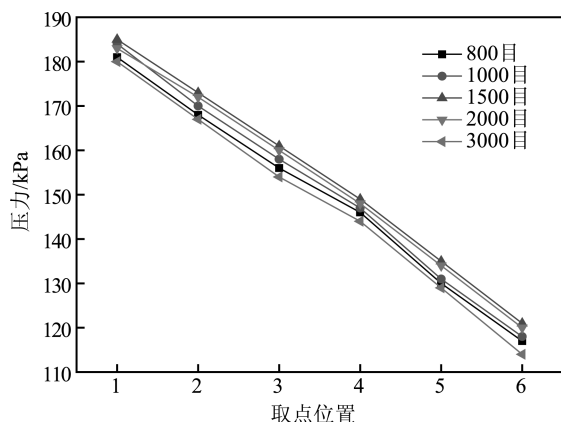


图 2 不同颗粒直径对工件表面的压力

Fig.2 The pressure on the surface of workpiece exerted by particles with different diameters

2.2 颗粒含量对加工的影响

抛光液中颗粒的浓度对加工有重要影响,然而并非颗粒含量越高,加工效果越好。在本实验条件下,采用 Fluent 分析不同颗粒含量下,颗粒对工件表面压力的变化。图 3 所示颗粒含量分别为 5%、10%、15%、20%,固相采用 1500 目磨粒时,颗粒对工件表面的压力。依然采用标准 $k-\varepsilon$ 模型作为流体控制模型。

由仿真结果可以看出,在本实验装置及加工条件下,当抛光液中磨料颗粒含量达到 15%时,颗粒对工件表面的压力最大。在磨料水射流抛光过程中,当材料去除机制处于塑性去除范围内时,磨粒对工件表面的压力越大,其对工件的切削深度也越大,加工效果越好。因此,理论上当颗粒含量达到 15%

时,抛光液对工件的加工效果最好。

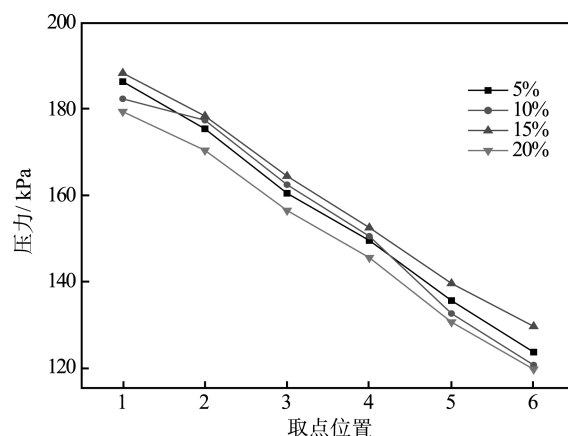


图 3 不同含量颗粒对工件表面的压力

Fig.3 The pressure on the surface of workpiece exerted by particles with different concentrations

3 加工试验

基于以上颗粒对工件表面压力的仿真分析,当颗粒目数达到 1500 目、颗粒含量为 15%时,对工件表面的压力最大。为验证理论仿真结果对加工的影响,设置合理的实验方案,进行实验验证。

3.1 搭建强约束磨粒射流加工实验平台

根据仿真分析结果,搭建合适的实验加工平台。如图 4 所示,通过磨料的循环及增压装置,实现不间断加工。物理泵将磨料收集混合箱中混合均匀的抛光液增压后输送至加工喷嘴中,实现对工件表面的水射流加工。调速器可手动调整工件的旋转速度。

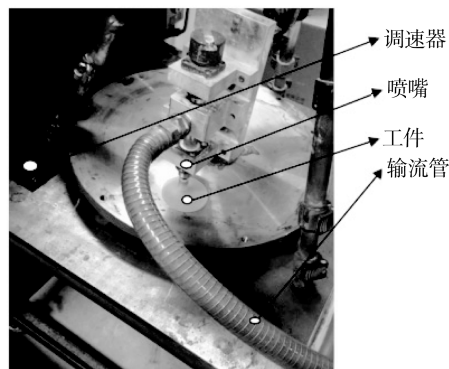


图 4 实验加工平台

Fig.4 The equipment for experiment

3.2 强约束磨粒射流加工试验及结果分析

强约束磨粒射流加工实验中,加工工件采用

K9 光学玻璃。为探究仿真结果与实际加工中的关系,抛光液配比采用五种方案:1500 目磨粒,15%磨粒;1500 目磨粒,10%磨粒;1500 目磨粒,5%磨粒;1000 目磨粒,15%磨粒;2000 目磨粒,15%磨粒。抛光液液相采用去离子水。

加工中心固定在 K9 玻璃圆片圆心位置,入口

压力保持 1.72 MPa,对工件进行加工。测量时间间隔为 2 h,对上述仿真中的 6 个点分别就工件表面粗糙度测量五次,取平均值,并称取测量工件质量。工件表面粗糙度随加工时间的变化如图 5 所示,工件质量随加工时间的变化如图 6 所示。

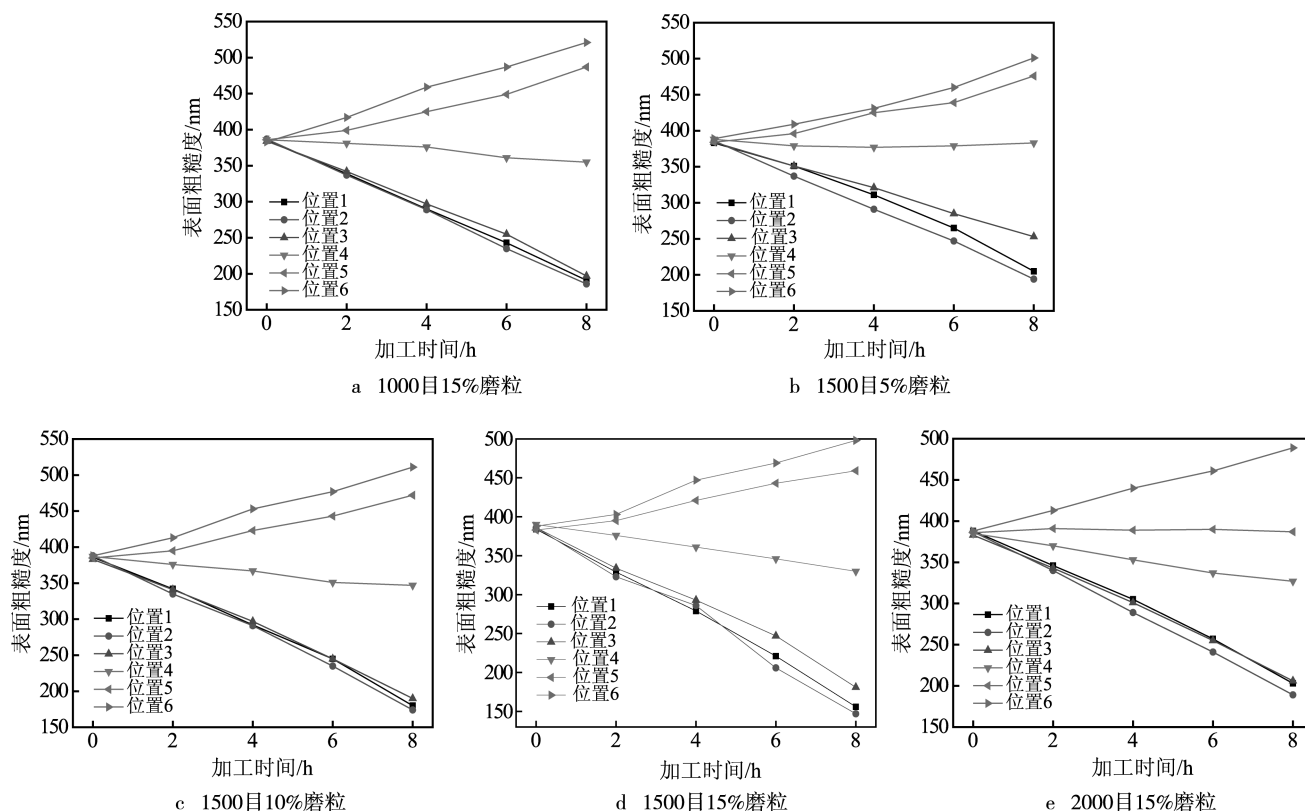


图5 工件表面粗糙度随加工时间的变化

Fig.5 The change of surface roughness on the workpiece over processing time: a) 1000[#] 15% concentration, b) 1500[#] 5% concentration, c) 1500[#] 10% concentration, d) 1500[#] 15% concentration, e) 2000[#] 15% concentration

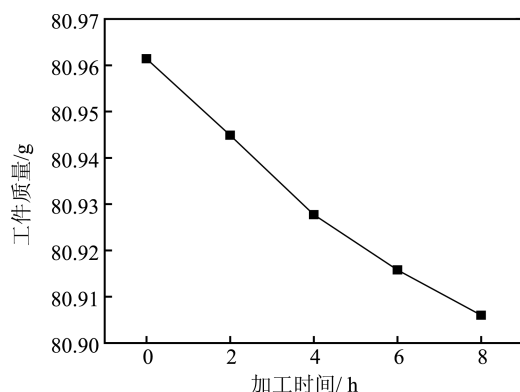


图6 工件质量随加工时间的变化

Fig.6 The change of weight of the workpiece over processing time

从图5可以看出位置1、位置2、位置3处的加工效果,就加工前后的工件表面粗糙度变化而言,

相对其他三处要好许多。随着加工时间的增加,在靠近加工中心的三处测量点,工件表面粗糙度均有明显下降。而位置4、位置5、位置6三处,因工件没有自转,颗粒均沿径向方向运动,因而在工件表面形成了较明显的加工痕迹,增大了工件表面的粗糙度。此处,仅对靠近加工中心的三点进行分析。加工8 h后,1500 目磨粒、15%磨粒加工条件下的玻璃表面粗糙度改善最好,达到 147 nm,下降了 200 nm。一方面,是由于工件本身的粗糙度高,因而表面粗糙度的改善效果好;另一方面,从工件的质量变化可以看出,工件的材料去除率达到 6.9 mg/h,说明此种加工方式对 K9 光学玻璃有较好的材料去除。图7为加工前后,在 BMM-550V 型晶相显微镜下工件表面形貌,可以看出 8 h后,在此

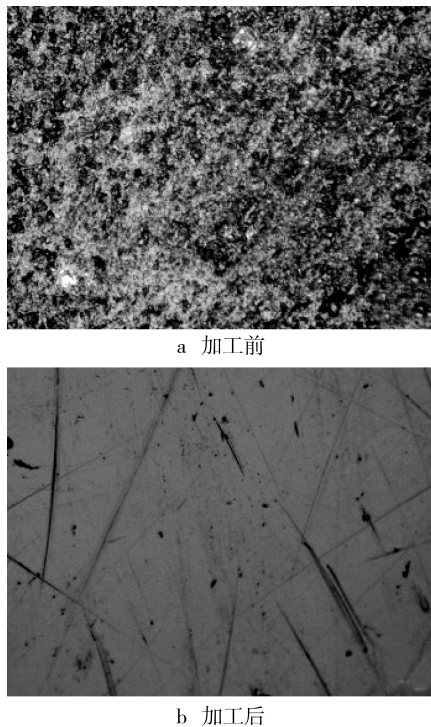


图 7 加工前后工件表面形貌

Fig.7 Surface topography of the workpiece before and after processing: a) before processing, b) after processing

加工工艺条件下工件表面的形貌得到了明显改善。实验加工的结果与仿真结果对比, 当颗粒大小为 1500 目, 颗粒含量为 15% 时, 加工效果最好, 这与仿真结果相符, 验证了仿真结果的可参考性。

4 结论

1) 针对磨粒射流加工工艺中出现的抛光液发散问题, 提出了强约束磨粒射流加工工艺, 有效解决了磨粒流的发散问题, 提高了加工效率, 并得到了较好的加工效果。

2) 通过理论仿真分析了强约束磨粒射流加工工艺中的磨粒直径及磨粒浓度对加工效果的影响, 得到了两加工因素不同参数下颗粒对工件表面的压力曲线。根据压力曲线可知, 当磨粒大小为 1500 目时, 磨粒对工件表面的压力达到最大值; 当颗粒含量为 15% 时, 颗粒对工件表面的压力达到最大值。

3) 通过五组实验方案, 分析了抛光液中磨粒直径及磨粒浓度对加工的影响。实验证明, 当颗粒大小为 1500 目, 颗粒含量为 15% 时, 加工效果最好, 8 h 后, 工件表面粗糙度下降了 229 nm, 达到 147 nm。结果与仿真结果相符, 证明了仿真结果的正确性及可参考性。

4) 工件在加工过程中, 平均材料去除率为 6.9 mg/h, 表明此种加工方式可以实现材料去除, 有一定的加工效果。加工前后工件表面形貌的对比表明, 此种加工方式在改善工件表面形貌上具有明显的效果。

参考文献

- [1] ZHAO Qing-liang, LIANG Ying-chun, DAVID S, et al. Surface and Subsurface Integrity in Diamond Grinding of Optical Galss on Tetraform's [J]. International Journal of Machine Tools& Manufacture, 2007(47):2091—2097.
- [2] 王军, 李军, 朱永伟, 等. 游离和固结金刚石磨料抛光手机面板玻璃的试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具, 2009(2):13—17.
WANG Jun, LI Jun, ZHU Yong-wei, et al. Experimental Study on Polishing of Mobile Phone Panel Glass with Un-fixed-abrasive and Fixed-abrasive Pad[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2009(2): 13—17.
- [3] 洪静, 高国富, 赵波. 光学玻璃的精密加工技术[J]. 新技术新工艺, 2011(4):21—24.
HONG Jing, GAO Guo-fu, ZHAO Bo. Precision Machining Technology of Optical Glass[J]. New Technology & New Process, 2011(4):21—24.
- [4] 邬烈恭. 光学玻璃加工破坏层研究及粗磨、精磨、抛光工序加工余量的合理匹配[J]. 光学技术, 1996 (2) :30—35.
WU Lie-gong. Research of Destruction Layer of Ground Optical Glass and Founding Process Redundancy of Fine-grinding and Polishing[J]. Optical Technology, 1996 (2) :30—35.
- [5] MATSUMURA T, MURAMATSU T, FUEKI S. Abrasive Water Jet Machining of Glass with Stagnation Effect[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 355—358.
- [6] 张学成, 戴一帆, 李圣怡, 等. 磁射流抛光的射流稳定性分析[J]. 中国机械工程, 2008, 19(8):964—968.
ZHANG Xue-cheng, DAI Yi-fan, LI Sheng-yi, et al. Analysis on Jet Stability of Magnetorheological Jet Polishing[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(8):964—968.
- [7] 李婷, 黄河山, 徐学峰, 等. 射流抛光试验平台柔性加减速控制算法应用研究[J]. 包装工程, 2015, 36(11):108—113.
LI Ting, HUANG He-shan, XU Xue-feng, et al. Application of Flexible Acceleration and Deceleration Algorithm for Jet Polishing Test Platform[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(11):108—113.
- [8] JAIN VK. Magnetic Field Assisted Abrasive Based Micro-/ Nano-finishing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(20):6022—6038.

- [9] 李兆泽. 磨料水射流抛光技术研究[D].长沙:国防科学技术大学, 2011.
LI Zhao-ze. Study on Abrasive Jet Polishing Technology[D].Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [10] 朱洪涛. 精密磨料水射流加工硬脆材料冲蚀机理及抛光技术研究[D].济南:山东大学,2007:1—13.
ZHU Hong-tao. Study on Erosion Mechanisms and Polishing Technology of Hard-Brittle Materials Machined with Pression Abrasive Waterjet [D].Jinan: Shandong University, 2007: 1—13.
- [11] 刘增文. 硬脆材料冲蚀机理及前混合微细磨料水射流抛光技术研究[D]. 济南:山东大学,2011:1—14.
LIU Zeng-wen. Study on Removal Mechanisms of Hard-brittle Materials and Pre-mixed Micro Abrasive Water Jet Polishing Technology[D]. Jinan: Shandong University, 2011: 1—14.
- [12] 陈逢军,唐宇,苗想亮,等.磨料射流表面抛光研究综述[J].表面技术,2015,44(11):119—127.
CHEN Feng-jun, TANG Yu, MIAO Xiang-liang, et al. Review on the Abrasive Jet Surface Polishing (AJP) Technology[J]. Surface Technology, 2015, 44(11): 119—127.
- [13] 申立军.抛光液分散性对 K9 光学玻璃表面粗糙度影响研究[D]. 成都:中国科学院大学, 2015.
SHEN Li-jun. Study on the Influence of Polishing Particle Quality on K9 Glass Surface Roughness [D]. Chengdu: University of China Academic of Science, 2015.
- [14] 文东辉,周海锋,徐钉,等. 超光滑表面加工技术研究进展[J].机电工程,2015(15):579—584.
WEN Dong-hui, ZHOU Hai-feng, XU Ding, et al. Research Progress in Ultra-smooth Surfaces Polishing Technology[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015(15): 579—584.
- [15] PRESTON F W. Glass Technology[J].Journal of the Society of Glass Technology,1927,11:277—281.
- [16] LAUNDER BE, SPALDING DB. The Numerical Computation of Turbulent Flows[J]. Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion, 1983(8): 96—116.
- [17] GUO Z, RAMULUM, JENKINS G. Analysis of the Waterjet Contact/Impact on Target Material[J].Optics and Lasers in Engineering,2000,33:121—139.