

引文格式: 王泽志, 冯琰, 王梓鉴, 等. 一字形喷嘴磁性磨料射流光整加工曲面试验研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(23/24): 88–95.
WANG Zezhi, FENG Yan, WANG Zijian, et al. Experimental study on surface of magnetic abrasive jet finishing of in-line nozzle[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(23/24): 88–95.

一字形喷嘴磁性磨料射流光整加工曲面试验研究*

王泽志, 冯琰, 王梓鉴, 韩月, 马小刚, 韩冰

(1. 辽宁科技大学, 鞍山 114051;

2. 辽宁省重点实验室复杂工件表面特种加工, 鞍山 114051)

[摘要] 采用传统喷嘴光整加工工件时, 射流离开喷嘴后能量集中在中心位置, 且一次性加工区域较小, 使得光整加工后的工件虽然整体的表面粗糙度得到了有效降低, 但易造成工件沿垂直于两个方向测量的表面粗糙度相差较大的问题。为了进一步提高磨料射流光整加工较薄复杂工件的表面质量, 降低表面粗糙度, 提高光整加工的效率, 通过改变喷嘴出口形状, 进而改变射流的结构, 使射流能量分布得更加均匀, 以提高磨料射流的光整效果和可行性。利用仿真软件分别对喷嘴的射流结构、磨料轨迹、冲蚀和剪切效果进行分析, 探究一字形喷嘴光整加工的优势, 通过试验验证一字形喷嘴的光整效果, 并分析各影响因素对光整效果的影响, 最终建立 BP 神经网络预测模型和粒子群参数寻优, 以找到精加工的最佳光整参数。仿真分析和试验表明, 一字形喷嘴能有效提高磨料射流光整加工的表面质量和降低表面粗糙度, 并且提高了磨料射流光整加工的效率, 减小了射流加工后对工件的影响。通过 BP 神经网络构建的预测模型和粒子群参数优化, 当加工时间 15 min、磨料粒径 20 μm 、靶距 12 mm、压强 0.08 MPa 时, 光整加工后铝合金曲面表面粗糙度由 $R_a 0.513 \mu\text{m}$ 降低到了 $R_a 0.219 \mu\text{m}$, 且沿着垂直两个方向测量表面粗糙度基本相同。通过试验验证 BP 神经网络预测模型准确度较高。

关键词: 一字形喷嘴; 光整加工; 磨料射流; BP 神经网络; 磁性磨料

中图分类号: V262; TG73; TG58; TG356.28 文献标志码: A DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.23/24.088

Experimental Study on Surface of Magnetic Abrasive Jet Finishing of In-Line Nozzle

WANG Zezhi, FENG Yan, WANG Zijian, HAN Yue, MA Xiaogang, HAN Bing

(1. Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051, China;

2. Liaoning Key Laboratory of Special Machining for Complex Workpiece Surface, Anshan 114051, China)

[ABSTRACT] When traditional nozzles are used for workpiece finishing, the jet leaves the nozzle, concentrating its energy at the central position, and the one-time processing area is small. As a result, although the overall surface roughness of the workpiece after finishing is effectively reduced, it tends to cause local deformation of the workpiece and the problem of poor uniformity. In order to further improve the surface quality and uniformity of thin-walled and complex workpieces processed by abrasive jet finishing, and to improve the efficiency of the finishing process. By changing the shape of the nozzle outlet, and then change the structure of the jet, so that the jet energy distribution is more uniform, to improve the effect and feasibility of abrasive jet finishing. Fluent software was used to analyse the jet structure of the nozzle, abrasive trajectory, erosion and shear effect, to explore the advantages of the in-line nozzle finishing, to verify the finishing effect of the in-line nozzle through the test, and to analyse the influence of the various influencing factors on the effect of the finishing, and finally to establish the BP neural network prediction model and particle swarm parameter optimisation, to find the optimal parameters of the finishing. The in-line nozzle can effectively improve the surface quality and uniformity of the abrasive jet finishing process, improve the efficiency of the abrasive jet finishing process, and in the case of the

* 基金项目: 国家自然科学基金(51775258); 辽宁省自然科学基金重点项目(20170540458); 精密与特种加工教育部重点实验室基金(B201703)。

same mass flow rate, the in-line nozzle has less influence on the deformation of the workpiece. Finally, simulation analysis and experiments show that the slotted nozzle can effectively improve the surface quality and reduce the surface roughness of abrasive jet finishing, improve the efficiency of abrasive jet finishing, and reduce the influence of jet processing on the workpiece. Through the prediction model constructed by BP neural network and the optimization of particle swarm parameters, when the processing time is 15 min, the abrasive particle size is 20 μm , the target distance is 12 mm, and the pressure is 0.08 MPa, the surface roughness of the aluminum alloy after finishing is reduced from $R_a 0.513 \mu\text{m}$ to $R_a 0.219 \mu\text{m}$, and the surface roughness is basically the same as that measured in the vertical direction. Experiments verify that the BP neural network prediction model has high accuracy.

Keywords: In-line nozzles; Finishing; Abrasive jets; BP neural network; Magnetic abrasives

磨料射流抛光 (Abrasive jet polishing, AJP) 是近年来发展迅速的一种特种加工技术,与传统加工技术相比, AJP 具有加工精度高、自适应强、无工具磨损、无热影响的特点被广泛应用于复杂曲面零件和特殊材料的光整加工^[1-2]。为了进一步提高 AJP 光整加工质量,国内外学者进行了大量的研究,陈正雄等^[3]通过采用响应面法对磨料射流的射流压力、喷嘴角度、磨料流量等进行参数寻优,通过试验获得最佳的工艺参数,提高了表面质量;鄢烈忠等^[4]通过构建 BP 神经网络预测模型的方式,快速、准确地预测各因素对抛光质量的间接影响;王诚文等^[5]采用超声振动和磨料射流工艺结合的方法,提高了磨料射流对工件的去除率;陈雪松等^[6]应用空间圆弧和空间样条曲线两种规则曲线的插补算法,对多自由度磨料水射流抛光异型陶瓷零件进行路径规划,有效提高了磨料射流对异形工件的光整效果;杨欢^[7]为了解决磨料水射流加工过程中射流分散及磨料分布随机的的问题,采用在聚焦管处加入辅助磁场的方法辅助磨料水射流加工,提高了效率和加工表面质量;林琳等^[8]通过数值模拟、射流微观及定点去除试验分析了圆形、三角形、方形、线形 4 种出口形状的喷嘴射流特性及对去除函数轮廓的影响。近年来相关研究都是在传统喷嘴的基础上,而针对喷嘴形状对光整效果影响的研究却很少。在磨料射流光整加工过程中,磨料液通过喷嘴由静压转化为动压,进而形成射流,特别是喷嘴出口的结构,对喷出高压磨料射流的形状、磨料颗粒的加速、磨料颗粒的分布也起到至关重要的作用。但是传统喷嘴为使能量聚集、射流动能更大,采用的是宝石型结构,所喷出的射流形状为圆柱形,加工面积较小,射流能量分布不均匀集中于射流中心,容易形成反流,影响光整效果。在光整加工较薄的复杂工件时,容易造成工件的破坏,在对工件垂直的两个方向进行测量时,表面粗糙度相差较大,并且其光整效果较差,如图 1 所示^[9]。

如图 1 (b) 所示,使用传统的宝石形喷嘴光整加工后,虽然工件整体表面粗糙度有所降低,但有较明显的

加工痕迹。为了有效提高 AJP 对复杂薄壁工件的光整效果,减小加工痕迹,本文提出一种通过改变喷嘴出口形状的方法,以进一步提高磨料射流光整加工复杂工件的表面质量、加工效率。

1 喷嘴内流场变化方程

为更好地研究喷嘴出口结构对磨料射流光整加工效果的影响,并且为接下来的研究提供理论依据,对喷嘴内流场速度变化情况进行理论分析。

射流经喷嘴喷出后可得到 2 个界面的伯努利方程,即

$$\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} \quad (1)$$

式中, p_1 为喷嘴内部静压力; p_2 为喷嘴外部静压力; v_1 为喷嘴内部流体平均速度; v_2 为喷嘴外部流体平均速度; ρ_1 为喷嘴内部流体密度; ρ_2 为喷嘴外部流体密度。

假设射流连续,则喷嘴内外界连续性方程为

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \quad (2)$$

式中, A_1 为喷嘴入口处截面积; A_2 为喷嘴出口处截面积。

本研究中一字形喷嘴入口截面为圆形,出口截面为椭圆形,密度 $\rho = \rho_1 = \rho_2$,联立式(1)和式(2),可得射流速度^[10]。

$$V = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{L \times r_1}{r_2} \right)^4 \right]}} \quad (3)$$

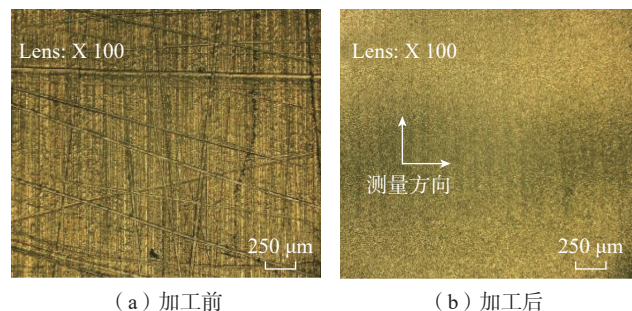


图 1 宝石形喷嘴光整加工前后对比^[9]

Fig.1 Comparison of jewel-shaped nozzle before and after finishing^[9]

式中, L 为喷嘴出口长度; r_1 为出口直径; r_2 为入口直径。

理想状态下, 磨料的速度是射流速度的 95%^[11], 设磨粒半径为 r , 速度为 v , 冲击产生的凹坑假设是半径为 r' 的规则圆形。通过推导得出不同角度下磨粒对工件的冲击磨损去除体积, 为

$$V_1 = \frac{1}{3} \pi U^2 r (v \sin \alpha)^{8/5} [3r' - Ur^{1/2} (v \sin \alpha)^{4/5}] \quad (4)$$

式中, V_1 为磨料对工件的实际去除体积; α 为入射角; U 为固定常数。

磨料在对工件产生冲击磨损的同时, 也会伴随着剪切磨损的发生。当磨粒以入射角度 β 、速度 V_1 作用于工件时, 忽略粒子自转, 参考 Fluent 软件中的单颗磨粒对工件产生的剪切磨损去除体积, 为

$$V_2 \approx \begin{cases} \frac{m v_1^2 (\sin 2\beta - 3 \sin^2 \beta)}{8p} & \beta \leq 18.5^\circ \\ \frac{m v_1^2 \cos^2 \beta}{24p} & \beta > 18.5^\circ \end{cases} \quad (5)$$

式中, V_2 为磨粒对工件的剪切去除体积; m 为单颗磨粒质量; p 为水平流动应力。

综上, 磁性微磨料射流工艺的材料去除总体积 V 为

$$V = \mu N (V_1 + V_2) \quad (6)$$

式中, μ 为磨料分布系数; N 为单位时间作用在工件上的磨料总数量^[12]。

综上, 磨料射流光整加工过程中, 材料去除率和磨料速度及单位时间内作用在工件上的磨粒数量有关, 然而喷嘴出口结构会对磨料的运动轨迹和速度产生直接影响, 因此喷嘴出口形状对提高光整加工效果是十分重要的。

2 喷嘴模型及有限元的建立

AJP 具有复杂的流体特性, 通过试验的方法很难捕捉流体和磨料的运动状态, 因此多采用数值模拟的方式分析喷嘴处的流场^[13-14]。一字形喷嘴实物图和内部流场模型如图 2 所示。该喷嘴尾部开槽, 出口形状呈逐渐向内收敛的椭圆形, 其稳流段直径 D 为 2 mm, 长度 H 为 4 mm, 收缩段角度 α 为 300° , 出口长度 L 为 3 mm, 喷嘴出口直径 r_1 为 1 mm。喷嘴材质采用 304 不锈钢。

2.1 几何网格模型及求解参数选择

磨料射流实际工况通常包含多相, 因此仿真试验过程中采用 VOF 多相流模型, 液相为水, 气相为空气。选择 DPM 离散相模型, 离散相颗粒尺寸为 $15 \mu\text{m}$ 的磁性 Al_2O_3 磨料颗粒, 为了方便计算将形状设置为规则的球形。仿真求解器选择 RNG $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型, 喷嘴的入口压力为 1.0 MPa, 出口压力为一个标准大气压。网格单元尺寸为 0.25 mm, 网格数量为 345680。仿真模型及边界条件, 如图 3 所示。

2.2 一字形喷嘴仿真分析

一字形喷嘴因出口结构改变, 其射流形状、流场结构等均发生了变化, 故通过仿真对射流结构和形状展开分析。当射流入口压力为 1.0 MPa, 喷嘴直径均为 1 mm 时, 喷嘴自由射流的形状如图 4 所示。

如图 4 (a) 所示, 高速射流往往伴随着卷吸效应和阻力的影响, 射流动能逐渐减小并向四周扩散, 一字形喷嘴由于喷嘴出口形状改变使得射流纵截面近似为一个三角形, 横截面形状近似椭圆形。如图 4 (b) 所示, 按照扩散程度可以将自由射流划分为初始段 (0.005 m)、基本段 (0.010 m) 及消散段 (0.030 m) 3 个阶段, 不同阶段的射流情况不同, 加工效果也不相同^[15]。基本段由于射流能量稳定、射流形状完整, 常用于光整加工。

然而, 在磨料射流光整加工过程中, 射流裹挟着磨料喷出后, 受到惯性影响, 磨料液中的磨料主要集中于喷嘴的中心区域。为使磨料随射流喷出后发散得更加

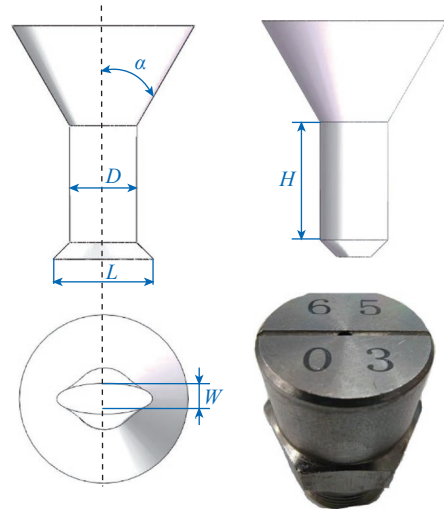


图 2 喷嘴实物图和内部流场模型

Fig.2 Physical drawing of nozzle and the internal flow field model

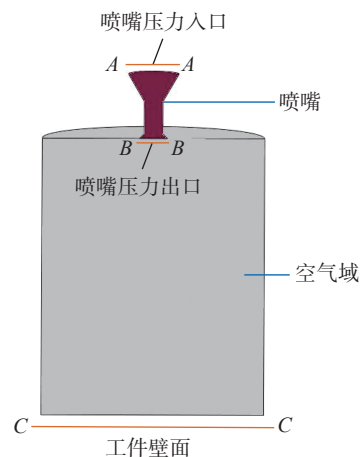


图 3 物理仿真模型

Fig.3 Physical simulation model

均匀,可通过添加磁场改变磨料的运动轨迹^[10],促使磨料在运动的过程中向两侧发散,从而使磨料在射流中分布更加均匀。

喷嘴附近磁场矢量图,如图5所示。使用永磁体 NDNF35 作为磁场发生装置,通过调整磁极的充磁方向,产生向两侧吸引的磁力,使得磨料在运动过程中受到磁场的影响,从而向两侧运动。将喷嘴的轴心设置为0点,沿喷嘴径向磁场强度变化曲线如图6所示。

如图5所示,磁场中最大磁感应强度为1.201 T。

通过耦合接口将磁场和流场导入颗粒仿真软件中,模拟射流喷出后磨料的运动轨迹。添加磁场前后磨料运动轨迹对比情况如图7所示。

添加磁场前,磨料受到流场的影响主要集中于喷嘴中部,如图7(a)所示;添加磁场后,部分磨料明显向两侧发散,在射流离开喷嘴后分布得更加均匀,如图7(b)所示。

2.3 一字形喷嘴对平面侵蚀和剪切效果对比

在磨料射流进行光整加工过程中,磨料借助射流的裹挟作用对工件进行材料去除,其去除方式可分为两种:一种是冲击磨损去除,另一种是磨料通过锋利的锐角和棱边起到切削刀作用,对工件进行划擦和微切削的剪切磨损去除^[16]。当射流压力为1 MPa,靶距均为12 mm时,射流对工件表面冲蚀和剪切效果如图8所示。

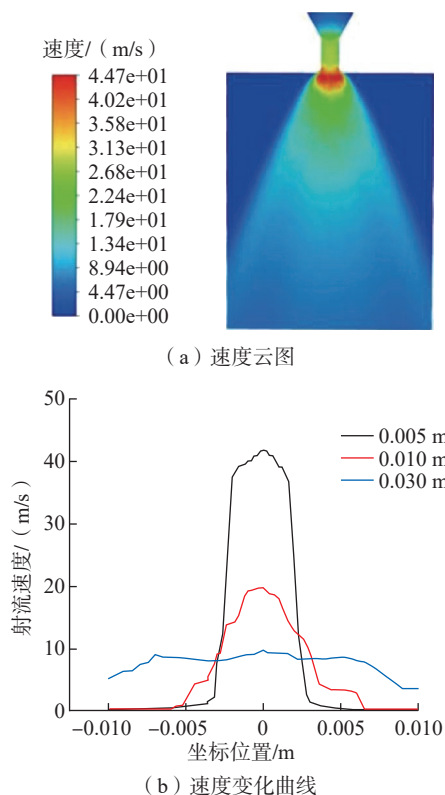


图4 射流形状及不同距离径向速度变化曲线

Fig.4 Shape of the two nozzle jets and the trajectory of the abrasive

当磨料液接触工件壁面时,其流动方向发生 90° 转弯并向四周运动,磨料在运动的过程中对工件产生剪切作用,如图8(a)所示。磨料射流在加工的过程中,靠近喷嘴中心轴线的一部分磨料液与工件接触后会形成反流,该反流会对继续向下的射流产生影响,使得中间区域的光整加工效果较差。由于一字形喷嘴结构的改进,射流发散更快,流能量更均匀,且受到反流的影响更小,磨料对工件表面剪切效果作用更加均匀,有利于提升工件整体的光整加工效果和加工质量。在发生剪切作用的同时,磨料液也会对工件壁面产生冲蚀作用,如

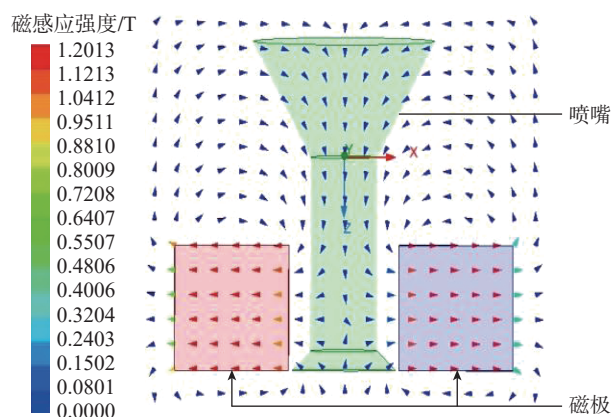


图5 喷嘴磁场矢量图

Fig.5 Nozzle magnetic field vector

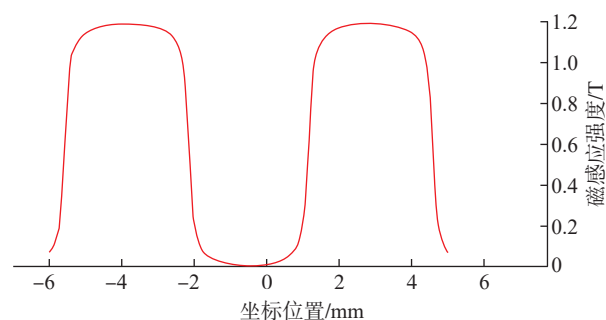


图6 磁场强度变化曲线

Fig.6 Curve of magnetic field strength variation

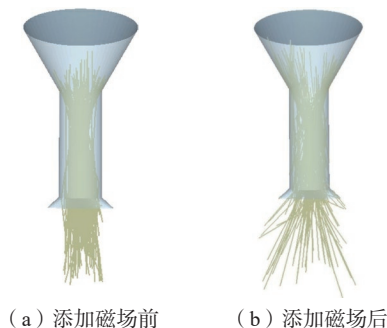


图7 磨料运动轨迹

Fig.7 Abrasive motion trajectory

图 8 (b) 所示,一字形喷嘴喷出的射流对平面的冲蚀形状近似一条线,且冲蚀作用面积更大。

在磨料射流对工件进行加工时,射流冲击会引起工件的变形,由于出口结构的改变,使射流能量在射流中分布更加均匀。通过仿真模拟一字形喷嘴射流对工件形变的影响,如图 9 所示。

由图 9 可知,在质量流率相同的条件下,一字形喷嘴对工件光整过程中最大变形量为 3.84×10^{-6} mm,传统的

宝石形喷嘴对工件的最大变形量为 2.18×10^{-5} mm,一字形喷嘴光整加工后对工件的形变影响更小。

3 试验及检测

为进一步探究光整加工过程中各因素对加工效果的影响,通过磨料射流装置对铝合金曲面结构开展射流光整加工试验,采用超景深显微镜 VHX-500F 观察加工后的工件表面形貌,采用表面粗糙度测量仪 JB-8E 测量加工后表面粗糙度的变化情况。

3.1 单因素试验

根据文献和实际情况,选择磨料质量分数为 5%,喷射角度垂直加工平面^[16]。设置压强取值范围为 0.04~0.12 MPa;设置靶距取值范围为 2~32 mm;设置加工时间取值范围为 2~18 min;设置磨料粒径取值范围为 3~75 μm。对加工后区域的表面粗糙度进行 3 次重复测量,测量结果取平均值。各因素影响表面粗糙度 R_a 的变化曲线如图 10 所示。加工时间表面粗糙度测量和取值如表 1 所示,0.007 μm 为试验中的最大标准偏差,试验准确度较高。

如图 10 (a) 所示,表面粗糙度随着加工时间的增加先迅速降低,在 14 min 时降到最低,随后又开始增加。这是因为磨料水射流冲击工件,使工件表面粗糙度降低,但是随着时间的不断增加,磨料对工件产生了过磨,导致工件表面质量恶化,表面粗糙度增大。如图 10 (b) 所示,随着靶距的增加,工件表面粗糙度先减小,在靶距为 16 mm 时降到最低,随后又开始增加。这是因为靶距过小时,磨料水射流动能大且射流不稳定,虽然对工件表面产生明显的去除效果,但不均匀,甚至导致表面

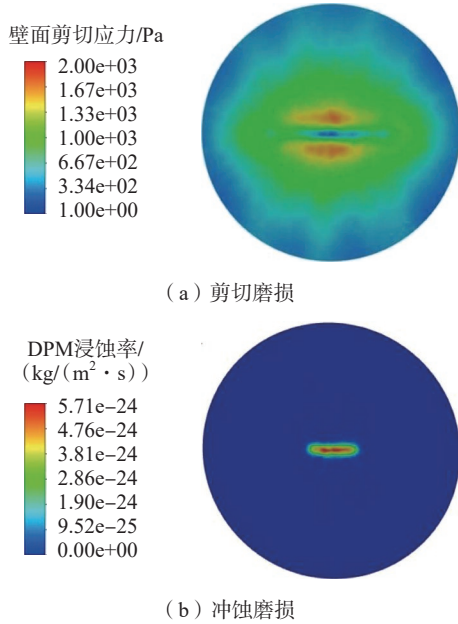


图 8 冲蚀和剪切效果对比

Fig.8 Comparison of erosion and shear effects

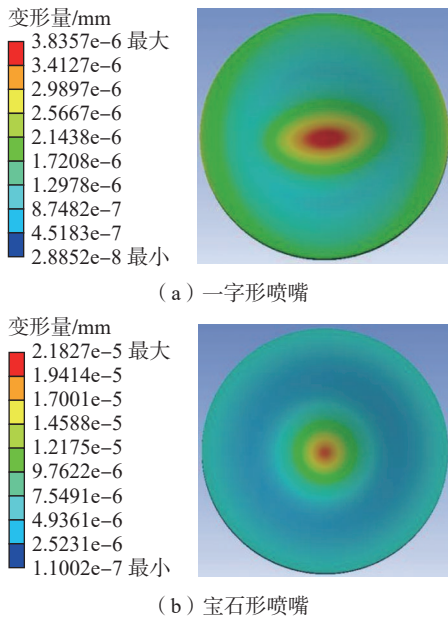


图 9 磨料射流对工件形变影响

Fig.9 Effect of abrasive jets on workpiece deformation

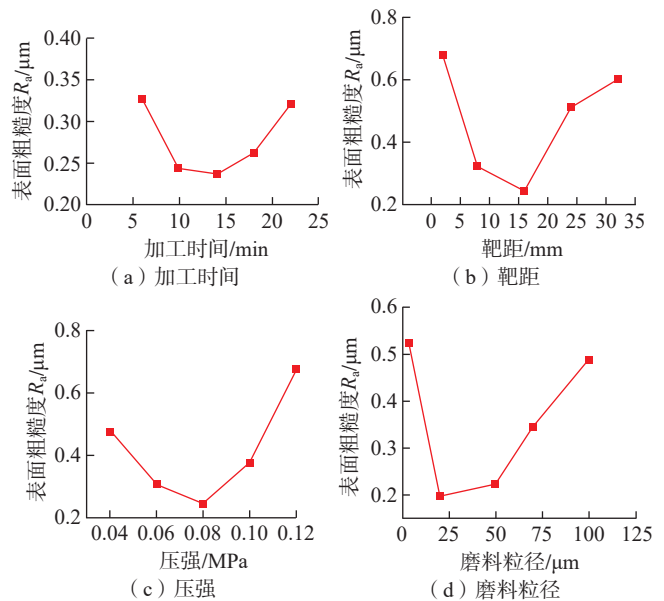


图 10 不同因素影响下表面粗糙度变化曲线

Fig.10 Variation curves of surface roughness under different factors

粗糙度恶化,且恶化后的粗糙度大于加工前的表面粗糙度;靶距过大则射流动能不够,对工件表面的去除效果不足,使工件表面粗糙度几乎没有变化。如图 10 (c) 所示,随着压强的增大,表面粗糙度先减小,在 0.08 MPa 时表面粗糙度降到最低,随后增大。这是因为随着压强的增大,射流对工件的去除效果也会增大,但射流动能过大磨料开始破坏工件表面,使表面产生磨损,导致表面粗糙度增大;压强过小则磨料动能不足,导致对工件去除效果不好。如图 10 (d) 所示,随着磨料粒径的增大,表面粗糙度先减小,在 15 μm 时降到最低,随后随着粒径的增大表面粗糙度开始变大。这是因为过小的磨料粒径会导致磨料质量减小动能不足,使其对工件光整效果降低。

3.2 神经网络数据处理

以工件表面粗糙度为研究对象,采用控制变量法对加工时间、磨料粒径、靶距、压强建立 BP 神经网络模型预测,最后通过粒子寻优寻找一字形喷嘴对平面光整加工的最优参数。

设计变量 $X=[t, r_3, l, p_3]$, 其中 t 为加工时间, r_3 为磨料粒径, l 为靶距, p_3 为压强, 输出值为粗糙度。在单因素试验的基础上, 选择工艺参数范围。

采用 MATLAB 代码来构建 BP 神经网络预测模型, 本文选用 3 层网络结构, 适用性较强^[17]。由于 BP 神经网络需要大量的数据作为支撑才能保证预测结果的可靠性, 因此在工艺参数的取值范围内, 采用控制变量法进行了大量试验。由于输入变量为 4 种, 而输出变量为 1 种, 训练所需样本较少。为了减少神经网络计算所需时间, 共选取 20 组样本进行试验, 每组样本的试验重复 3 次并取加工后表面粗糙度的平均值为最终结果, 具体情况如表 2 所示。

回归值 R 作为神经网络拟合效果的判别依据, 其值大小越接近 1, 则拟合效果越好, 也代表此输入变量与输出变量之间的相关性越高, 影响程度越大。从图 11 可以看出, 该神经网络的预测训练集 $R=1$ 、验证集

表 2 加工后表面粗糙度
Table 2 Roughness after machining

样本	加工时间 t/min	磨料粒径 $r_3/\mu\text{m}$	靶距 l/mm	压强 p_3/MPa	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
1	15	16	12	0.08	0.223
2	15	22	12	0.10	0.478
3	15	10	12	0.10	0.518
4	15	22	12	0.06	0.561
5	15	10	12	0.06	0.365
6	30	16	18	0.08	0.657
7	3	16	18	0.08	0.612
8	30	16	6	0.08	0.531
9	3	16	6	0.08	0.61
10	15	22	18	0.08	0.398
11	15	10	18	0.08	0.489
12	15	22	6	0.08	0.41
13	15	10	6	0.08	0.437
14	30	16	12	0.10	0.677
15	3	16	12	0.10	0.437
16	30	16	12	0.06	0.631
17	3	16	12	0.06	0.616
18	15	16	18	0.10	0.521
19	15	16	6	0.10	0.612
20	15	16	18	0.06	0.471

表 1 表面粗糙度测量

Table 1 Surface roughness measurements

加工时间/min	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$			表面粗糙度平均值/ μm	标准偏差/ μm
	测量点1	测量点2	测量点3		
2	0.332	0.336	0.343	0.337	0.006
8	0.241	0.244	0.247	0.244	0.003
10	0.227	0.235	0.231	0.231	0.004
14	0.271	0.271	0.259	0.267	0.007
18	0.322	0.321	0.320	0.321	0.001

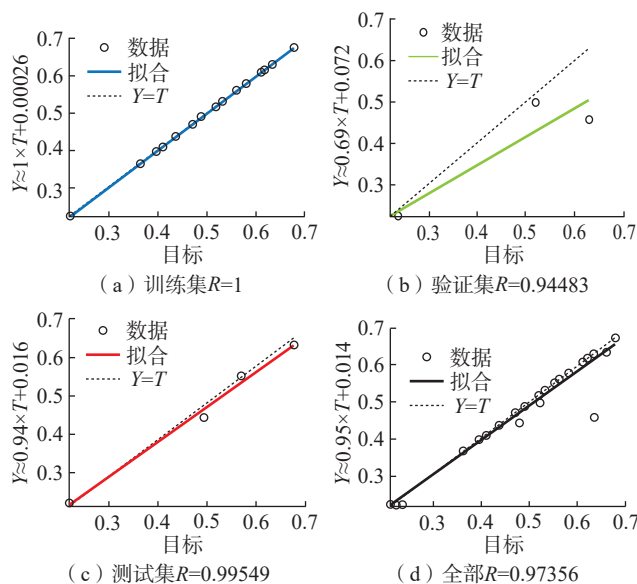


图 11 线性回归曲线

Fig.11 Linear regression curves

$R=0.94483$ 、测试集 $R=0.99549$ 及样本整体 $R=0.97356$ ，其回归线 R 均接近于 1。其中， T 为真实输出目标， Y 为预测输出值。因此，可以将该神经网络作为样本的预测模型。图 12 所示为各组样本实际值与预测值的对比。可以得出，利用该 BP 神经网络的预测平均误差小于 5%，证明该神经网络的预测准确率高。

通过粒子寻优，经过 300 次的迭代，最终得到最优的表面粗糙度值 $R_a 0.2119 \mu\text{m}$ ，最佳工艺参数为 $X=[13.96, 20.83, 12.28, 0.079]$ 。结合实际情况对其最优参数组合进行规整，可以得出最优工艺参数为 $X=[15, 20, 12, 0.08]$ 。利用遗传算法优化得到的 BP 神经网络最优参数组合对试样进行光整加工，实际表面粗糙度为 $R_a 0.219 \mu\text{m}$ ，表面形貌加工前后的对比如图 13 所示。

4 结论

(1) 通过仿真分析一字形喷嘴内部流场情况及冲蚀

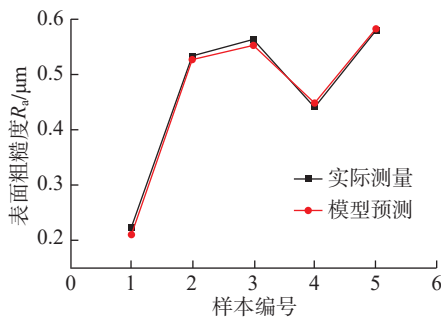


图 12 预测和实际表面粗糙度对比

Fig.12 Comparison of predicted and actual surface roughness

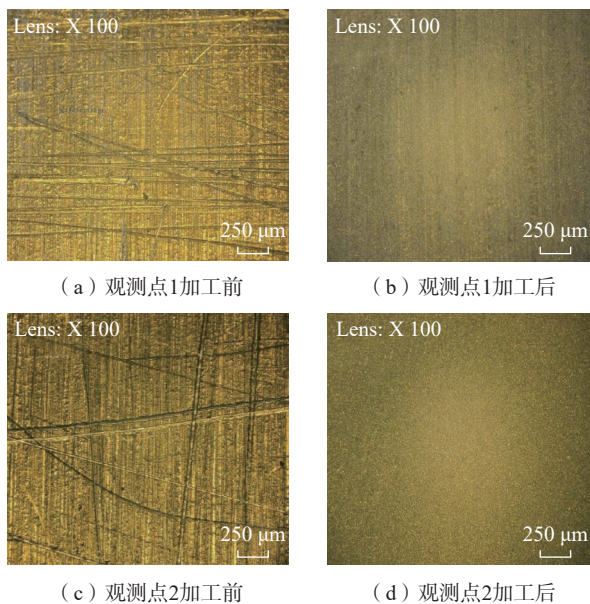


图 13 加工前后对比

Fig.13 Comparison before and after processing

剪切效果发现，一字形喷嘴的基本段更大，一次性加工区域更广，剪切效果和冲蚀效果更加均匀，提高了磨料射流光整加工较大复杂曲面的光整质量和光整效率。

(2) 通过添加磁极的方式，有效解决了磨料受到流场影响集中于喷嘴中部的缺陷，提高了磨料喷出后在射流中分布的均匀性。

(3) 通过建立 BP 神经网络模型，对各因素对表面粗糙度的影响进行预测，预测结果和实际试验误差小于 5%，有较高的准确性，大大降低了重复试验并提高了效率。

参考文献

[1] 胡焰, 陈加东, 戴庆文, 等. 磨料射流加工技术的发展与研究现状[J]. 表面技术, 2022, 51(11): 80–98.

HU Yan, CHEN Jiadong, DAI Qingwen, et al. Recent advances and status of abrasive jet machining technology[J]. Surface Technology, 2022, 51(11): 80–98.

[2] SUBRAMANI K, VASUDEVAN A, KARTHIK K, et al. Insights of abrasive water jet polishing process characteristics and its advancements[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 52: 1113–1120.

[3] 陈正雄, 武美萍, 强争荣. 磨料水射流抛光生物陶瓷工艺参数优化[J]. 机械设计与研究, 2017, 33(2): 129–132, 137.

CHEN Zhengxiong, WU Meiping, QIANG Zhengrong. Optimization of process parameters in the abrasive waterjet polishing biological ceramic[J]. Machine Design & Research, 2017, 33(2): 129–132, 137.

[4] 鄢烈忠, 雷玉勇, 唐炼, 等. 基于BP神经网络的磨料水射流抛光质量研究[J]. 煤矿机械, 2017, 38(12): 133–135.

YAN Liezhong, LEI Yuyong, TANG Lian, et al. Research on polishing quality of abrasive water jet based on BP neural network[J]. Coal Mine Machinery, 2017, 38(12): 133–135.

[5] 王诚文, 高长水, 刘壮. 超声功率对APS涂层超声振动辅助磨料水射流冲蚀效率的影响[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(4): 9–11.

WANG Chengwen, GAO Changshui, LIU Zhuang. Effect of ultrasonic power on ultrasonic vibration-assisted abrasive water jet erosion efficiency of APS coating[J]. Machine Building & Automation, 2023, 52(4): 9–11.

[6] 陈雪松, 侯荣国, 吕哲, 等. 微细磨料水射流抛光异型零件路径规划及算法[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2019, 33(5): 50–53, 57.

CHEN Xuesong, HOU Rongguo, LÜ Zhe, et al. Path planning and algorithm for polishing special-shaped parts with micro abrasive water jet[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 33(5): 50–53, 57.

[7] 杨欢. 磁场辅助微细磨料水射流抛光陶瓷材料关键技术研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2018.

YANG Huan. Key technology of magnetic field assisted micro abrasive water jet polishing ceramic materials[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2018.

[8] 林琳, 赵志磊, 蒋东岑, 等. 尖边喷嘴磨料水射流特性分析及对去除函数轮廓的影响[J]. 液压与气动, 2023, 47(9): 116–129.

LIN Lin, ZHAO Zhilei, JIANG Dongcen, et al. Characteristics analysis of abrasive water jet from pointed nozzle and its influence on profile of removal function[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2023, 47(9): 116–129.

[9] 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 Shikang, 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.

[10] 杨欢, 侯荣国, 吕哲, 等. 多物理场作用下磁场辅助微细磨料水射流流场数值模拟[J]. 机床与液压, 2019, 47(11): 151–154, 107.

YANG Huan, HOU Rongguo, LÜ Zhe, et al. Numerical simulation of micro abrasive water jet flow field assisted by magnetic field under action of multi-physics field[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(11): 151–154, 107.

[11] 花煜昌. 前混合磨料水射流切割45号钢的切深理论与试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.

HUA Yuchang. Theory and experimental study on cutting depth of 45 steel with pre-mixed abrasive water jet[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2021.

[12] 王中昱, 张连新, 孙鹏飞, 等. 磨料水射流抛光技术综述[J]. 电加工与模具, 2019(S1): 70–74.

WANG Zhongyu, ZHANG Lianxin, SUN Pengfei, et al. Review on technology of abrasive jet polishing[J]. Electromachining & Mould, 2019(S1): 70–74.

[13] 陈逢军, 尹业青, 胡天. 仿形喷嘴磨料射流抛光光微结构仿真及试验研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(15): 177–187.

CHEN Fengjun, YIN Yeqing, HU Tian. Simulation and experimental research on polishing microstructure by using abrasive water jet with profiling nozzle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(15): 177–187.

[14] 王志阳, 王凯. 基于FLUENT的磨料水射流抛光喷嘴的流场仿真[J]. 中国设备工程, 2017(9): 101–103.

WANG Zhiyang, WANG Kai. Flow field simulation of abrasive water jet polishing nozzle based on FLUENT[J]. China Plant Engineering, 2017(9): 101–103.

[15] 张艺琳. 磨料水射流去除深孔及交叉孔毛刺的加工技术及机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.

ZHANG Yilin. Machining technology and mechanism of abrasive water jet deburring deep hole and cross hole[D]. Jinan: Shandong University, 2021.

[16] 马文涛, 潘俊锋. 不同喷嘴结构下水射流流场及破岩特征数值模拟[J]. 煤矿机械, 2019, 40(9): 17–20.

MA Wentao, PAN Junfeng. Numerical simulation of flow field of water jet with different nozzle structures and rock breaking characteristics[J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(9): 17–20.

[17] 夏楠, 马小刚, 吴传宗, 等. 磁力研磨工艺提高叶片表面质量的试验研究[J]. 表面技术, 2023, 52(2): 67–77.

XIA Nan, MA Xiaogang, WU Chuazong, et al. Experimental investigation of magnetic finishing for improving blade surface quality[J]. Surface Technology, 2023, 52(2): 67–77.

通信作者: 马小刚, 副教授, 博士, 研究方向为精密与特种加工。

(责编 阳光)

(上接第 87 页)

DU Kai, JIAO Li, YAN Pei, et al. Study of the hard turning processability of hardened ultra-high strength steel 45CrNiMoVA[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(3): 773–782.

[18] XU J, YAN F W, LI Y, et al. Multiobjective optimization of milling parameters for ultrahigh-strength steel AF1410 based on the NSGA-II method[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020(1): 8796738.

[19] 岳源, 王璋. 基于改进粒子群算法的钛合金TC25铣削参数优化[J]. 航空制造技术, 2022, 65(22): 119–124.

YUE Yuan, WANG Zhang. Optimization of titanium alloy TC25 milling parameters based on improved particle swarm optimization[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(22): 119–124.

[20] LI Y E, ZHAO J, ZHANG H H. Prediction of the machined surface quality of ball-end milling of H13 die steel using MLBP method[J]. Machining Science and Technology, 2019, 23(5): 794–823.

[21] ASHENAFI A M, GEREMEW S. A combined simulation-based taguchi robust design approach for improved parameter design[J]. Industrial Engineering & Management Systems, 2020, 19(3): 644–656.

[22] 谭靛, 张定华, 姚倡锋. 高速铣削参数对TC17钛合金表面变质层的影响[J]. 航空材料学报, 2017, 37(6): 75–81.

TAN Liang, ZHANG Dinghua, YAO Changfeng. Effect of high-speed milling parameters on surface metamorphic layer of TC17 titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(6): 75–81.

[23] 张宏基, 葛媛媛, 唐虹, 等. 高速铣削工艺参数对AM50A镁合金铣削力和表面形貌的影响[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(1): 124–131.

ZHANG Hongji, GE Yuanyuan, TANG Hong, et al. Effect of high speed milling process parameters on the milling force and surface topography of AM50A magnesium alloy[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(1): 124–131.

[24] 胡东方, 王卓, 姬源浩. 基于广义灰关联的舱体结构可靠性分析[J]. 中国机械工程, 2015, 26(15): 2021–2029.

HU Dongfang, WANG Zhuo, JI Yuanhao. Structure reliability analysis for airborne pod frame based on generalized grey relational method[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(15): 2021–2029.

[25] 史峰, 王辉, 郁磊, 等. MATLAB智能算法30个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.

SHI Feng, WANG Hui, YU Lei, et al. Analysis of 30 cases of MATLAB intelligent algorithm[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2011.

[26] 雷英杰, 张善文. MATLAB遗传算法工具箱及应用[M]. 2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.

LEI Yingjie, ZHANG Shanwen. MATLAB genetic algorithm toolbox and its application[M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2014.

[27] 孔晓瑶, 袁松梅, 朱光远, 等. 基于灰色关联分析的微量润滑系统工艺参数优化[J]. 航空制造技术, 2021, 64(6): 73–81.

KONG Xiaoyao, YUAN Songmei, ZHU Guangyuan, et al. Optimization of process parameters of minimum quantity lubrication system based on grey relation analysis[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(6): 73–81.

通信作者: 白海清, 教授, 主要研究方向为数字化制造及装备、机电系统监测与控制技术。

(责编 阳光)