

基于改进神经网络和 Fluent 的气液固技术的 内表面处理

李光保^{1,2}, 高 栋², 路 勇², 平 昊¹, 周愿愿¹

(1. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600; 2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对目前航空、航天工件内孔表面有凸起毛刺且不容易去除的问题, 提出一种气液固多相流技术方法。基于 Fluent 数值分析对多相流下的不同气体压力、水流速度和磨粒浓度参数进行流体仿真, 得到影响加工的近壁区内表面处的磨粒速度、相对压力及磨粒体积分数参数, 采用 MATLAB 软件利用 BP 神经网络对各参数进行拟合, 通过 BP 预测模型再运用 PSO (粒子群算法) 在支配解集中求解满足约束数学模型的气液固三相流最优输入值, 基于最优输入值搭建试验平台并设计 $L_9(3^3)$ 正交试验对工件内表面进行加工, 最后通过白光干涉仪测量加工前后的内孔表面精度, 验证了仿真最优参数与试验加工最优参数的一致性, 运用最优参数值下的气液固流体对工件内表面加工, 经测量显示, 内表面精度提高了 75%, 满足航空航天工件的应用要求。

关键词: 机械制造工艺与设备; 气液固技术; 流体仿真; 神经网络; 粒子群算法; 正交试验

中图分类号: TG664 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2024)06-1537-11

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230025

Internal surface treatment of gas-liquid-solid technology based on improved neural network and Fluent

LI Guang-bao^{1,2}, GAO Dong², LU Yong², PING Hao¹, ZHOU Yuan-yuan¹

(1. Shanghai Aerospace Precision Machinery Research Institute, Shanghai 201600, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: At present, the manufacturing methods of complex multi-bore workpieces in aviation and aerospace often have raised burrs on the inner bore surface of the workpieces, which are not easy to remove. In view of this situation, a gas-liquid-solid multiphase flow technology is proposed to treat the inner surface of complex workpieces. Based on fluent numerical analysis, different gas pressure, water velocity and abrasive particle concentration parameters under multiphase flow are simulated. The parameters of abrasive particle velocity, relative pressure and abrasive particle volume fraction at the inner surface of the near-wall area which affect the machining are obtained. The parameters are fitted by using BP neural network with MATLAB software, and the optimal input value of gas-liquid-solid three-phase

收稿日期: 2023-01-08.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1306803).

作者简介: 李光保(1995-), 男, 工程师, 博士. 研究方向: 机电一体化控制, 智能检测, 航天制造加工技术.

E-mail: 18363998150@163.com

flow satisfying the constraint mathematical model is solved by using the BP prediction model and PSO (Particle Swarm Optimization) in the dominant solution set. Based on the optimal input value, an experimental platform is built and $L_9(3^3)$ orthogonal experiment is designed to machine the inner surface of the workpiece. Finally, the surface accuracy of the inner hole before and after machining is measured by a white light interferometer, which verifies the consistency between the simulation optimal parameters and the experimental optimal parameters. The inner surface of the workpiece is machined by using the gas-liquid-solid three-phase flow with the optimal parameters. The measurement shows that the inner surface accuracy is increased by 75%, which meets the application requirements of aerospace workpieces.

Key words: machinery manufacturing technology and equipment; gas-solid technology; fluid simulation; neural network; particle swarm optimization; orthogonal experiment

0 引言

随着我国工业化建设进程的不断加快,机械加工也在快速发展,尤其在航空、航天液压气动元件领域,随着航空航天、精密器械、信息电子、军事等领域对产品工件的表面形貌、表面精度的要求进一步提高,高精度、高质量、高效率的精密加工方向已成为重要的研究方向。由于航空航天领域制造加工方式的不同其工件内表面毛刺产生的原因也各不相同。例如:在切削加工过程中,产生毛刺的原因大部分是由于加工刀具的振动和发热^[1,2]引起的,在铸造成型过程中,工件产生毛刺的原因基本是由于模具结合面不符合规范^[3,4]引起的,而在焊接过程中,其原因主要是焊接填料过多^[5,6]、技术未达标等。

目前针对工件内表面提高精度的方法有机械抛光、磨粒射流抛光^[7,8]等,机械抛光主要通过磨削工具对待加工表面进行反复的微量切削,存在效率低且成本较高的缺陷。磨粒射流抛光主要通过微小磨粒在水流带动下,以较高的速度撞击工件表面,达到抛光的目的,但是存在加工方向一致,容易损伤工件等问题。因此,本文提出了一种基于气液固技术的加工方法,通过高压气体的爆破提高流体的湍流动能,利用气体气泡溃灭释放的能量冲击磨粒混合溶液进行辅助加工,从而改善磨粒流加工方向一致、容易损伤工件的问题。

1 技术方案

1.1 方案设计

航空航天气动工件内表面精度需要达到的技术指标为表面粗糙度9级^[9]内表面粗糙度平均为 $0.4\ \mu\text{m}$ 。本文以航天领域常用的充氮设备气动

多内孔工件为研究对象,多内孔工件如图1所示。首先测出原工件的内表面粗糙度平均为 $1.6\ \mu\text{m}$,然后将表面粗糙度等级划分为7级。针对此等级的多内孔工件不能满足航空航天领域使用要求的问题,本文首先分析气液固技术加工机理和流体数学模型,再基于 ANSYS Fluent 软件对工件内孔流体进行前处理、求解器设置以及后处理得出在工件内孔的各流体状态及仿真参数值,然后采用 PSO-BP 多目标搜索算法^[10]依据仿真参数数据集进行参数寻优,迭代求解最优的气体压力、水流速度和磨粒浓度参数值,最后基于最优参数搭建试验平台,设计正交试验,并通过试验平台对工件内孔进行加工处理后,采用白光干涉仪对工件内表面进行测量,从而证明该技术方法对于工件内孔表面提高精度的可行性。技术流程如图2所示。

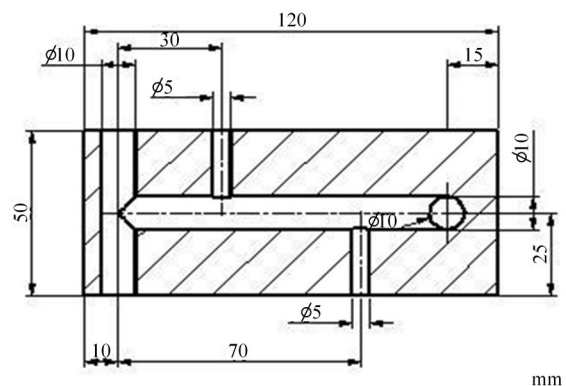


图1 充氮设备多内孔工件

Fig. 1 Multi-bore workpiece of nitrogen charging equipment

1.2 加工机理

1.2.1 加工参数

Preston 方程^[11]是广泛应用于磨粒磨削加工中的经验方程,在 Preston 方程中,除了影响加工

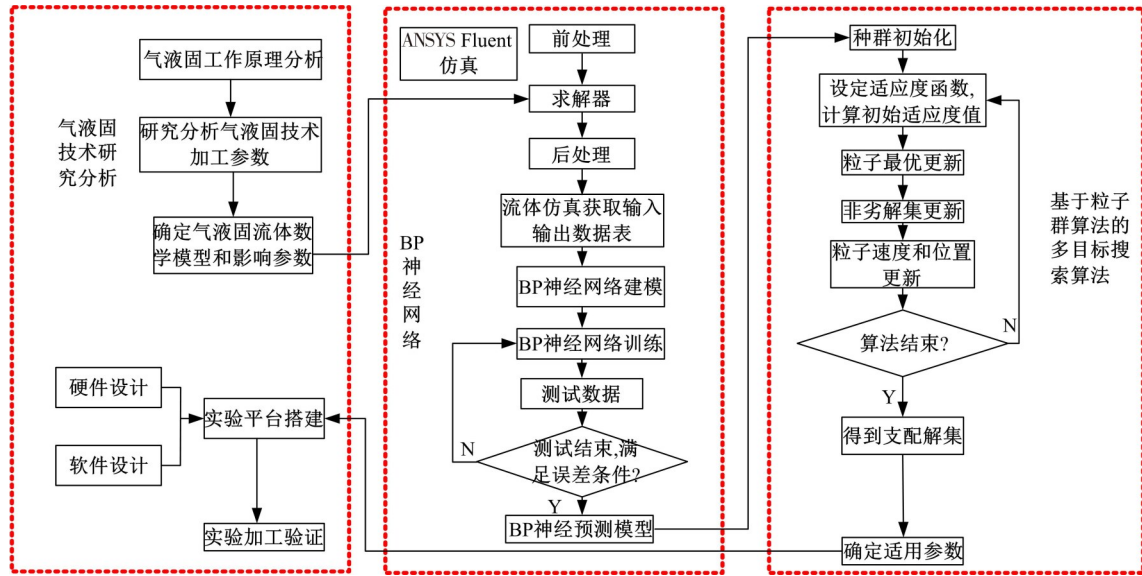


图 2 技术流程图

Fig. 2 Technical flow chart

效果的磨粒运动速度、对工件表面的压力及磨粒单位体积内的体积分数 n , 将其他方面的影响因素归结为一个常数 k , 即 Preston 常数, 则 Preston 方程表达式如下所示:

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

式中: Δz 为磨削去除量; t 为加工时间; v 为磨粒在近壁区的运动速度; n 为单位体积内磨粒体积分数; 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 、磨粒运动速度 v 、相对压力 p 、磨粒体积分数 n 。

1.2.2 气液固三相流的数学模型

气液固三相流研究表明, 固相磨粒以磨损去除为主要工艺时, 流体相对光滑, 去除方向相对一致, 不能满足提高工件内表面精度的要求。湍流强度较大时, 固相磨粒以冲蚀去除为主, 固相磨粒的去除方向不规则^[12]。此时车工效果比较理想, 根据上述分析, 采用标准的 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型。输运方程如式(2)(3)所示:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_1 + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_1 + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v \epsilon}} \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度; x_i, x_j 为各坐标分量; $\partial k, \partial \epsilon$ 分别为湍流动能和耗散率的湍流普朗特数; G_k 为由

于平均速度梯度引起的湍流动能; μ_1 为分子黏性系数; μ_t 为湍流流黏性系数。其中:

$$\partial k = 1.0, \partial \epsilon = 1.2, C_2 = 1.9;$$

$$C_1 = \max \left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right); \eta = (2E_{ij} E_{ij})^{\frac{1}{2}} \frac{k}{\epsilon};$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

由于工件内孔的复杂性, 在以气液固为介质进行加工处理时, 内孔表面由于其复杂的流动也是主要研究对象, 标准 $k-\epsilon$ 模型比较适合该流动场景, 本文采用该模型进行内孔流体仿真和分析。

2 多内孔零件流体仿真及分析

2.1 物理模型建立

由于 ANSYS Fluent 软件计算的是工件内孔流体的网格物理量, 运用 croe 软件建立的流体模型为流体流经内孔的物理模型^[13], 流体物理模型如图 3 所示。

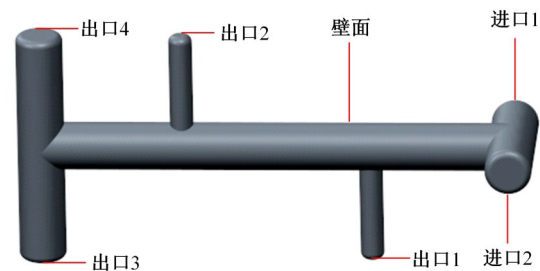


图 3 内孔流体三维模型

Fig. 3 Three-dimensional model of bore fluid

2.2 网格划分

网格划分采用 ANSYS Mesh 软件进行生成, 首先导入建立的流体物理模型, 设置流体物理模型的进口、出口和壁面, 针对工件内孔表面的流体状态, 设置近壁面边界层网络, 设置参数为: 层数 5, 比例因子 1.2, 厚度 1 mm, 基于复杂的多内孔流体模型, 采用三角形和四边形混合网络划分方式, 划分结果如图 4 所示, 生成的网格数量为 15 510, 质量系数最大为 0.4, 满足流体仿真的网格划分要求。

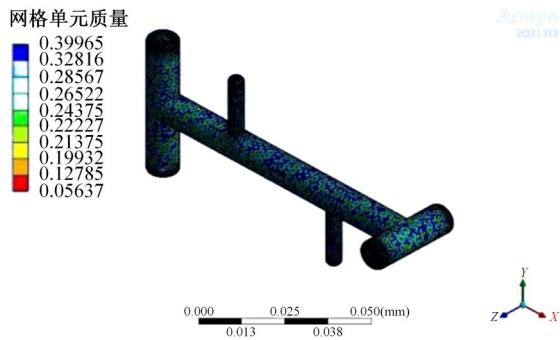


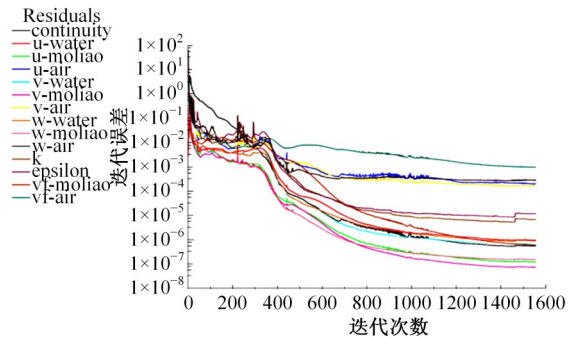
图 4 网格划分
Fig. 4 Grid division

2.3 计算仿真

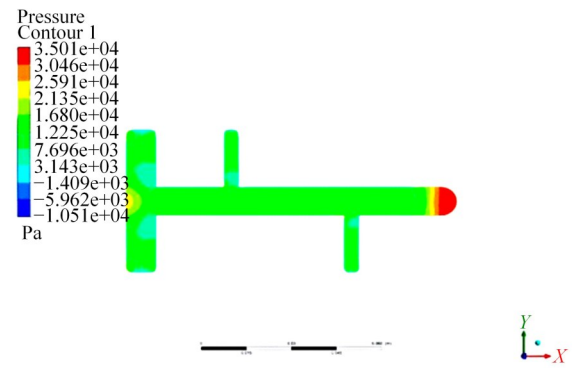
计算仿真之前需要对求解器进行设置, 根据上述分析, 在进行气液固三相流仿真时, 采用标准的 $k-\epsilon$ 模型, 这种模型还具有运算速度快、易收敛的优点。方法选用非耦合求解法。状态选用 VOF 模型。针对固相磨粒选用 Al_2O_3 , 参数具体如下: 密度为 $2\ 880\ kg\cdot m^{-3}$, 黏度为 0.001, 直径为 0.01 mm。边界条件如下: 气体压力为 0.1 MPa, 水流速度为 5 m/s, 磨粒浓度为 1%。设置固相为主相, 液相水流和气相空气分别为第二相和第三相, 作为次相^[14]。设置完成后进行仿真计算, 迭代次数为 1 600 次, 得到各参数曲线变化如图 5(a) 所示, 采用后处理软件进行处理, 得到仿真云图如 5(b) (c)(d) 所示。

2.4 结果分析

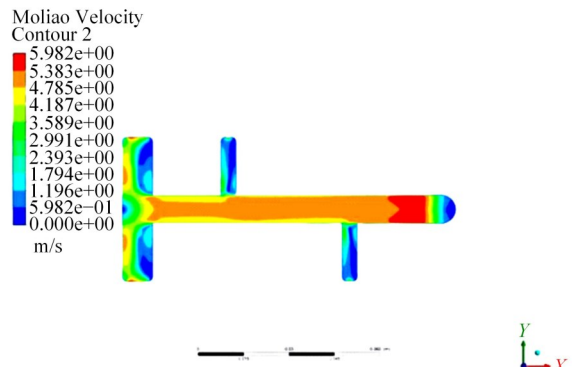
运用 Ansys Fluent 软件重复上述仿真流程, 将气体压力分别设定为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 MPa, 水流速度分别设定为 5、10、15、20、25 m/s, 磨粒浓度分别设定为 1%、5%、10%、15%、20%, 并创建工件内孔壁面的监视面, 监视面如图 6 所示, 记录气体压力从 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 MPa, 水流速度从 5、10、15、20、25 m/s, 磨粒浓度为 1%、5%、10%、15%、20% 时内孔监



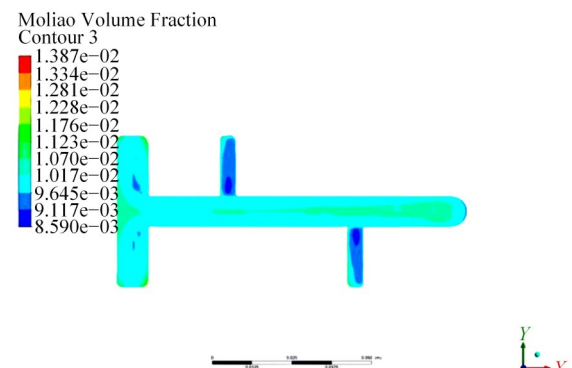
(a) 仿真收敛图



(b) 压力云图



(c) 磨粒速度



(d) 磨粒体积分

图 5 仿真参数云图

Fig. 5 Nephogram of simulation parameters

视面上的壁面压力、磨粒速度、磨粒体积分及仿真均匀度参数, 如表 1 所示。为体现各内孔监视

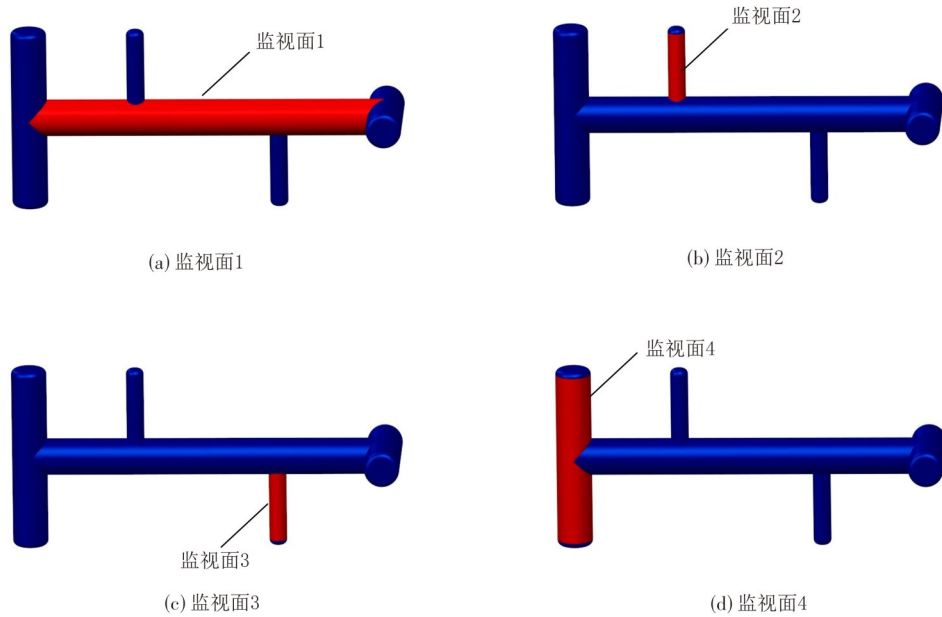


图 6 监视面

Fig. 6 Monitoring surface

表 1 仿真参数数据集

Table 1 Simulation parameter data set

序号	气相压力/MPa	液相速度/(m·s ⁻¹)	磨粒浓度/%	壁面压力/MPa	磨粒速度/(m·s ⁻¹)	体积分数/%	仿真均匀度/%
1	0.1	5	1	0.122	3.589	1	62
2	0.2	10	5	2.126	5.012	6	68
3	0.3	15	10	5.336	8.742	13	53
4	0.4	20	15	12.461	11.641	16	32
5	0.5	25	20	20.174	12.347	18	69

表面粗糙度值的一致性,设置仿真均匀度参数。

为防止运用气液固技术对工件进行加工时出现损伤,依据工件材料和尺寸计算内孔的许用压力值。计算公式如式(4)所示:

$$\delta = S \times \frac{PD}{2\sigma} \quad (4)$$

式中: σ 为材料强度; P 为许用压力; D 为工件外径; δ 为内孔壁厚; S 为安全系数^[15]。工件的材质为 ZAlCu5Mn(ZL201),强度为 295 MPa,内孔壁厚 2 mm,内孔外径为 10 mm,安全系数为 $S=6$,通过计算可得许用压力为 19.7 MPa。为保证工件不受到损伤,壁面最大压力值应小于 19.7 MPa。

3 PSO-BP 多目标搜索算法的气液固参数寻优

3.1 BP 神经网络预测模型

3.1.1 数据选择和归一化

通过 ANSYS Fluent 流体仿真采集的数据中

3个输入参数(气体压力、水流速度、固相浓度)和 4个输出参数(近壁面压力、磨粒速度、磨粒体积分数、仿真均匀度)数量级之间差别较大。为提高测试和训练神经网络的准确性和精确性,需要对各参数数据进行归一化处理^[16]。数据归一化处理就是把所有的数据参数都规划为[0,1]之间的数。在 MATLAB 软件中调用 MAPMINMAX 函数完成归一化。

3.1.2 BP 神经网络训练

用 ANSYS Fluent 流体仿真采集的数据集训练神经网络,使神经网络对非线性函数具有预测能力。MATLAB 神经网络工具箱自带 BP 神经网络函数,调用相关的子程序函数 NEWFF、SIM 完成操作^[17]。根据需要拟合的函数有 3个输入参数、4个输出参数,根据经验公式确定 BP 神经网络结构为 3-13-4,在流体仿真采集的 125 组数据集中选取 115 组用于训练 BP 神经网络^[14],剩余 10 组数据用于测试 BP 神经网络的预测性能。BP

网络结构模型如图 7 所示,训练结果如图 8 所示,从 BP 神经网络训练结果可以看出, R^2 值达到了 0.996, 满足训练精度要求。

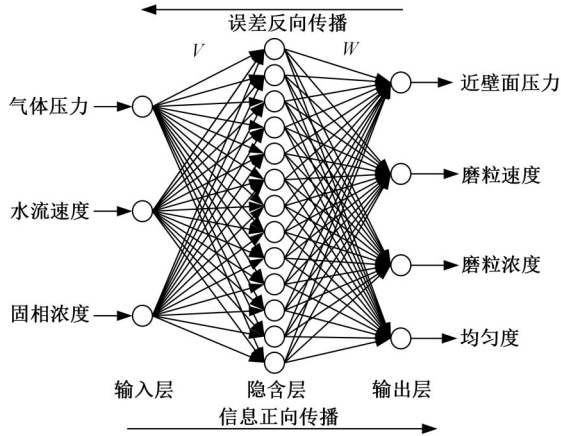


图 7 BP 神经网络模型

Fig. 7 BP neural network model

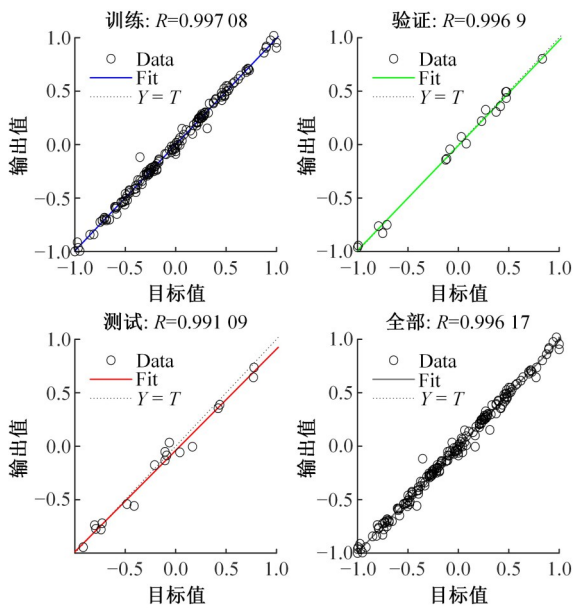


图 8 训练结果

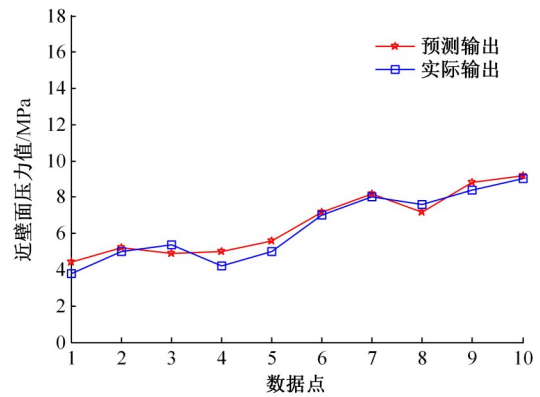
Fig. 8 Training results

3.1.3 BP 神经网络预测

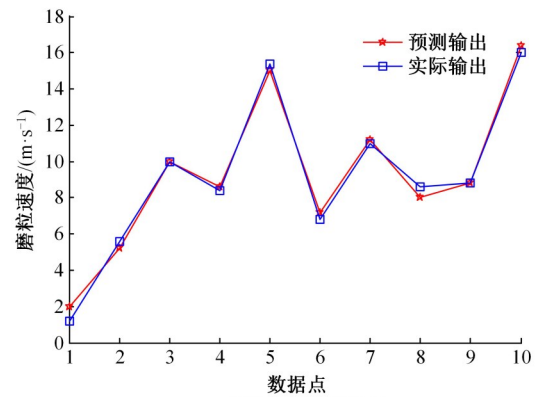
用训练好的 BP 神经网络预测非线性函数输出与剩余的 10 组测试数据集进行测试,因为 BP 神经网络的预测值为非线性函数输出值,所以 BP 神经网络预测精度对最优值的寻找具有重要的意义。训练完成后 BP 神经网络预测输出和实际输出对比如图 9 所示。结果显示,拟合精度较高,可以把 BP 神经网络的预测输出近似看成非线性函数的实际输出。

3.2 粒子群算法的参数寻优

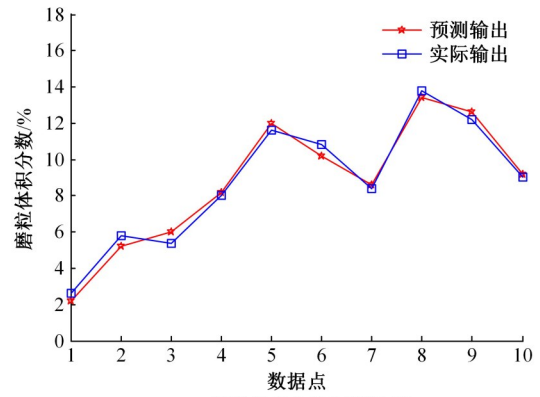
PSO(粒子群算法)是一种新兴的群智能优化



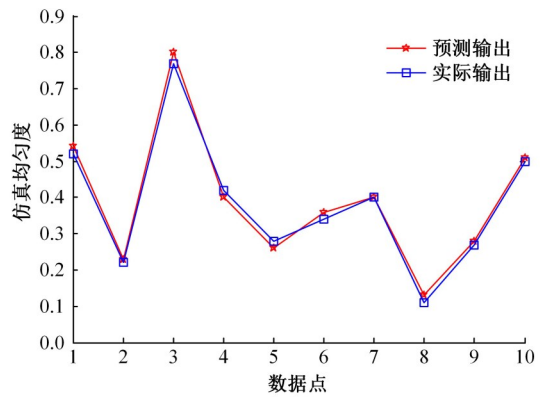
(a)近壁面压力值预测效果



(b)磨粒速度预测效果



(c)磨粒体积分数的预测效果



(d)仿真均匀度预测效果

图 9 预测参数与实际参数对比图

Fig. 9 Comparison between predicted parameters and actual parameters

算法,具有较强的全局探索和局部开发能力^[18],将种群中的所有因素考虑在内,能够使种群中的粒子向全局最优值移动,迅速在最优值附近收敛。粒子速度和位置更新模块根据个体最优粒子位置和全局粒子位置更新粒子速度和位置。粒子更新公式如式(5)(6)所示:

$$V^{k+1} = \omega V^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X^k) \quad (5)$$

$$X^{k+1} = X^k + V^{k+1} \quad (6)$$

式中: ω 为惯性权重; r_1 和 r_2 为分布于 $[0,1]$ 区间的随机数; k 为当前迭代次数, P_{id}^k 为个体最优粒子位置; P_{gd}^k 为全局最优粒子位置; c_1 和 c_2 为常数; V 为粒子速度; X 为粒子位置。

3.2.1 数学模型

每一个粒子初始适应度值是将初始位置当作个体极值来计算,然后计算出种群的最优位置解,通过调整 3 个输入参数值使数学模型性能达到最优,从优化的角度来看,就是在 3 个变量的参数空间中寻找最优值,使气液固的加工性能达到最优的效果,同时,通过式(1)的 Preston 方程可知单位时间内的磨削去除量与近壁面的压力值、磨粒速度、磨粒体积分数正相关,即忽略量纲情况下,近壁面的压力值、磨粒速度、磨粒体积分数之和最大时,乘积最大,单位时间内的磨削去除量达到最大。为防止加工过程对工件产生损伤,结合式(4)可知,近壁面的压力值应小于 19.7 MPa。最后,为保证工件的加工质量,增加了仿真均匀度参数,该参数表示整个内表面粗糙度的不均匀程度,当该参数到达最小值时,整个内表面粗糙度质量最好。

根据上述分析可得,假设输入参数气体压力、水流速度、固相浓度为 X_1, X_2, X_3 , 输出参数近壁面压力、磨粒速度、磨粒体积分数、仿真均匀度为 Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 , 可得到如下所示的数学模型:

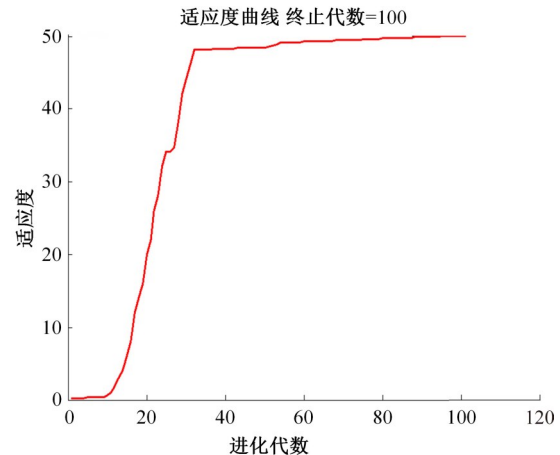
$$\begin{cases} \text{Max } P_x = Y_1 + Y_2 + Y_3 \\ \text{Min } P_y = Y_4 \\ Y_1 \leq 19.7 \end{cases} \quad (7)$$

求解一组输入参数值满足近壁面压力值、磨粒速度和磨粒体积分数之和 P_x 最大且仿真均匀度 P_y 最小且近壁面压力值小于 19.7 MPa。

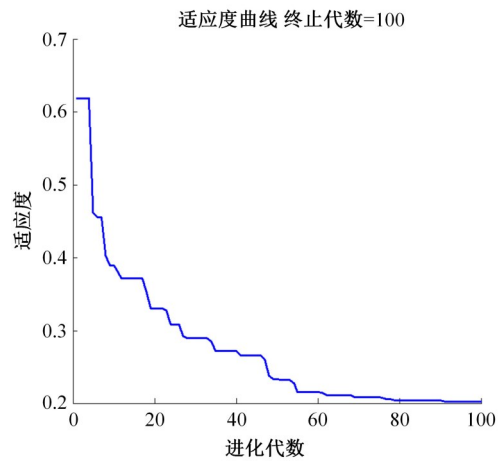
3.2.2 优化迭代

PSO 参数设置为:惯性权重 ω , 学习因子 c_1, c_2 , 粒子最大速度和最大迭代次数;本文选用自适应调整的线性递减惯性权重,惯性权重的典型权

值为 $\omega_{\max}=0.9, \omega_{\min}=0.4$, 取初始权重 ω 为 0.9。学习因子满足 $c_1+c_2=4$, 且 $c_1=2$ 时迭代次数较少,在两端点 0 和 4 时迭代次数较多,出现对称性;在两端点出现搜索失败率较大。因此,取 $c_1=c_2=2$, 然后根据需要的当前位置与最好位置之间的分辨率(精度)设置粒子最大速度为 0.5, 为防止连续迭代达不到收敛状态和观测的本文粒子群算法迭代收敛次数,确定算法最大迭代次数为 100。参数设置完成后进行优化迭代求解。适应度迭代曲线如图 10 所示。



(a) P_x 适应度迭代曲线



(b) P_y 适应度迭代曲线

图 10 适应度迭代曲线

Fig. 10 Fitness iteration curve

3.2.3 最优参数

求解过程中种群粒子变化曲线如图 11 所示。适应度 P_x 最大为 47, 适应度 P_y 最小为 0.21, 由 BP 神经网络预测模型可得, 对应的输出参数为近壁压力 12.5 MPa, 磨粒速度 22 m/s, 磨粒浓度 12.2%, 仿真均匀度 21%, 输入参数气体压力 0.48 MPa, 水流速度 20.3 m/s, 固相磨粒浓度 10.2%。

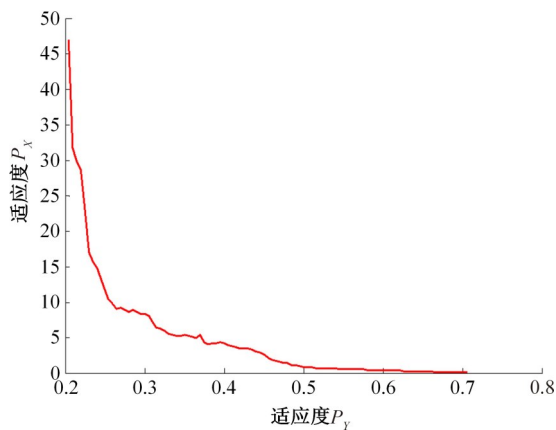


图 11 种群粒子对应适应度

Fig. 11 Corresponding fitness of population particles

4 加工试验

4.1 搭建试验平台

为验证气液固技术加工方法的有效性,根据上述得到的最优参数,搭建如图 12(a)所示的试验加工平台。通过磨粒的循环及增压装置,实现不间断加工,管道泵将在混合箱中混合均匀的磨粒液增压后输送至加工工件的进口 1,气压泵将通过减压器输送定量的增压气体至工件的进口 2 中,实现对工件内表面的气液固加工。因加工前



(a)实验加工处理平台



(b)白光干涉仪

图 12 实验设备

Fig. 12 Experimental equipment

后的工件内表面粗糙度不容易测得,首先采用线切割进行切割加工,然后再通过如图 12(b)所示的白光干涉仪进行内孔表面测量。

4.2 正交试验

为探究气液固技术加工方法的有效性和 PSO-BP 算法优化结果的准确性,设计正交试验,采用 3 因子 3 水平 $L_9(3^3)$ 正交试验表,以最优参数结果对应中间水平,选用的 9 组试验参数如表 2 所示,选择同一批工件作为试验工件,加工时间为 30 min,通过正交试验分别测试 3 个输入参数对内孔表面加工的影响程度。

表 2 气液固技术内表面加工的正交试验参数

Table 2 Orthogonal experimental parameters of internal surface processing of gas-liquid-solid technology

编号	气体压力/ MPa	水流速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	固相浓度 /%	加工时间/ min
1	0.4	19	9	30
2	0.5	20	9	30
3	0.6	21	9	30
4	0.6	20	10	30
5	0.5	19	10	30
6	0.4	21	10	30
7	0.4	20	11	30
8	0.5	21	11	30
9	0.6	19	11	30

4.3 结果分析

4.3.1 正交试验结果

利用气液固技术对工件内孔表面进行加工,9 组试验参数下的结果如表 3 所示。

为判断气液固技术各输入参数和水平对工件内孔表面加工粗糙度的影响程度,依据正交试验对称性原理,建立各个因素粗糙度和均匀度回值 k 。同一因素下第 i 个水平试验结果的均值用 K_i 表示 ($i=1, 2, 3$),如表 4 和表 5 所示。

根据试验结果可知,最佳加工组合方案为:气体压力 0.5 MPa,水流速度 20 m/s,固相磨粒浓度 10%。证明了对应的仿真优化结果的一致性。

4.3.2 最优参数加工试验结果

设置气体压力为 0.5 MPa,水流速度为 20 m/s,磨粒浓度为 10%,加工时间为 30 min,对加工完成的工件利用线切割技术进行切割,切割完成的工件通过白光干涉仪进行测量,如图 13 所示;每个监视面取 3 个点进行测量,测量点如图 14 所示;加

表 3 气液固技术内表面处理的正交试验结果

Table 3 Orthogonal experimental results of internal surface treatment of gas-liquid-solid technology

编号	气体压力/MPa	水流速度/(m·s ⁻¹)	固相浓度/%	加工时间/min	粗糙度/μm	加工均匀度/%
1	0.4	19	9	30	0.422	31.2
2	0.5	20	9	30	0.314	25.6
3	0.6	21	9	30	0.452	30.3
4	0.6	20	10	30	0.322	24.5
5	0.5	19	10	30	0.317	24.3
6	0.4	21	10	30	0.351	28.8
7	0.4	20	11	30	0.348	29.1
8	0.5	21	11	30	0.352	28.9
9	0.6	19	11	30	0.455	32.1

表 4 粗糙度响应值

Table 4 Response value of roughness

水平	因 素		
	气体压力/MPa	水流速度/(m·s ⁻¹)	磨粒浓度/%
1	0.374	0.398	0.396
2	0.327	0.328	0.33
3	0.409	0.385	0.385

表 5 加工均匀度响应值

Table 5 Uniformity response value

水平	因 素		
	气体压力/MPa	水流速度/(m·s ⁻¹)	磨粒浓度/%
1	29.7	29.2	29.1
2	26.2	26.4	25.8
3	28.9	29.3	30.1

工前后的内孔表面如图 15 所示;测量的 4 个监视面的粗糙度参数如表 6 所示,通过与上述正交试验得到的试验结果对比,该参数对应的加工性能最优。粗糙度为 0.267 μm,加工均匀度为 24%,对应粗糙度等级为 9 级,满足了航空航天气动压领域工件的应用要求。

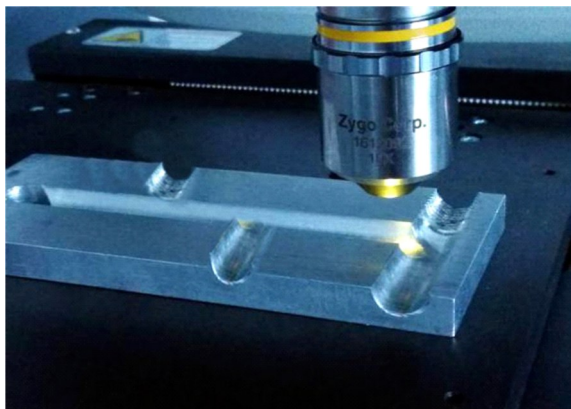


图 13 测量示意图

Fig. 13 Survey schematic diagram

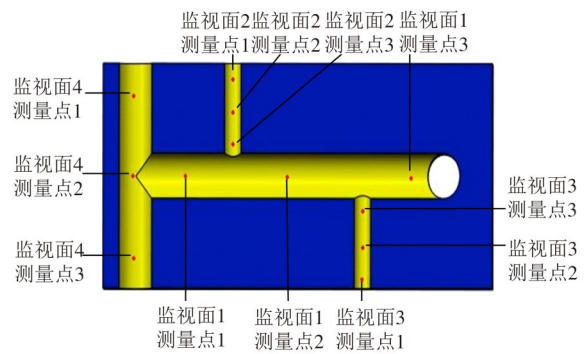
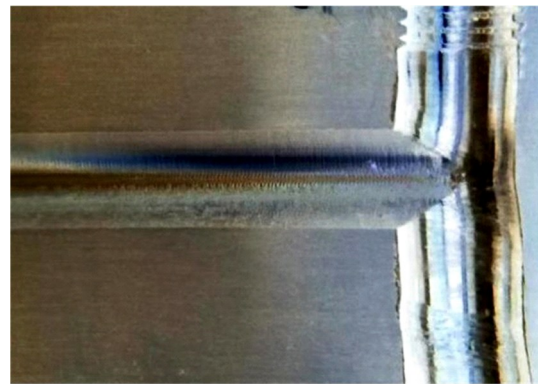
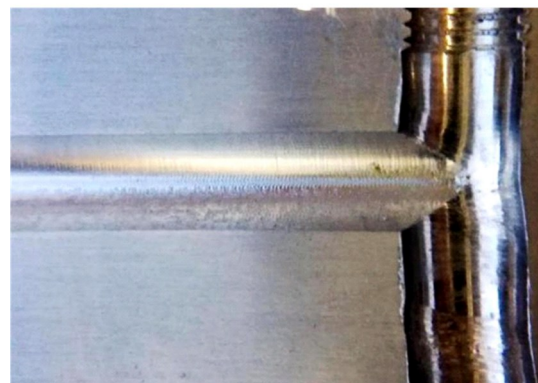


图 14 测量点示意图

Fig. 14 Schematic diagram of measuring point



(a)内孔表面未加工前



(b)内孔表面加工后

图 15 内孔表面示意图

Fig. 15 Schematic diagram of inner hole surface

表6 监视面测量粗糙度参数

Table 6 Measuring roughness parameters of monitoring surface

测量位置	粗糙度算术平均高度 $s_a/\mu\text{m}$	粗糙度均方根高度 $s_q/\mu\text{m}$	粗糙度最大高度 $s_z/\mu\text{m}$	
监视面1	测量点1	0.231	0.328	13.423
	测量点2	0.266	0.360	9.907
	测量点3	0.219	0.323	13.542
监视面2	测量点1	0.334	0.433	8.004
	测量点2	0.373	0.566	17.047
	测量点3	0.262	0.377	19.611
监视面3	测量点1	0.303	0.417	12.864
	测量点2	0.271	0.368	15.857
	测量点3	0.221	0.282	6.169
监视面4	测量点1	0.174	0.254	7.422
	测量点2	0.231	0.413	18.624
	测量点3	0.322	0.537	8.340

5 结 论

(1) 本文采用气液固三相流技术实现了对工件内孔表面的加工,通过分析气液固技术加工机理和流体的数学模型,依据 ANSYS Fluent 进行前处理、求解器设置、后处理,以固相磨粒为主要加工相,液相和气相为次相辅助磨粒进行加工,得到在工件内孔近壁面区域的相对压力、磨粒速度和磨粒浓度,考虑加工均匀性,引进仿真均匀度参数,通过流体仿真分析,得到在不同气体压力、水流速度、磨粒浓度下的工件内孔近壁面区域的相对压力、磨粒速度、磨粒浓度和仿真均匀度。

(2) 通过 BP 神经网络模型,依据流体仿真数据表进行训练预测,得到满足要求的 BP 神经网络预测模型,在 PSO 粒子群算法中进行多目标搜索,得到适合的气液固输入参数。根据 BP 神经网络求解的最优参数,搭建试验平台。

(3) 通过搭建的试验平台,运用 $L_9(3^3)$ 正交试验方式证明了仿真最优参数和试验加工最优参数的一致性。设置最优参数对多内孔工件进行加工,将处理前后的工件通过白光干涉仪进行测量,测量内孔粗糙度为 $0.267 \mu\text{m}$,加工均匀度为 24%,证明了气液固三相磨粒加工技术的可行性。本文研究为航空航天工件内表面精度的提升提供了一种切实可行的方法。

参考文献:

[1] 王杰,李爱蓉. 小波包分析识别气液固三相流流型[J]. 石油化工, 2020(1):62-69.
Wang Jie, Li Ai-rong. Identification of gas-liquid-solid three-phase flow pattern by wavelet packet analysis

[J]. Petrochemical Industry, 2020(1):62-69.

[2] 辛亚男,张建文,姜爱国. 一种新型螺旋内槽管的气液固三相流数值模拟研究[J]. 计算力学学报, 2018(2):238-248.

Xin Ya-nan, Zhang Jian-wen, Jiang Ai-guo. Numerical simulation of gas-liquid-solid three-phase flow of a new type of spiral inner groove tube[J]. Journal of Computational Mechanics, 2018(2):238-248.

[3] 黄豆豆,计时鸣,陈国达,等. 气液固三相湍流环境中气泡破裂对 SiC 颗粒的影响研究[J]. 机电工程, 2017, 34(9):965-970.

Huang Dou-dou, Timing, Chen Guo-da, et al. Study on the influence of bubble burst on SiC particles in gas-liquid-solid three-phase turbulent environment[J]. Electromechanical Engineering, 2017, 34(9):965-970.

[4] 杨建. 水力空化气液固三相磨粒流抛光工具及系统研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院, 2019.

Yang Jian. Study on polishing tools and systems of hydraulic cavitation gas-liquid-solid three-phase abrasive flow[D]. Hangzhou: College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, 2019.

[5] 胡焰. 基于气液固混合的磨料射流加工系统及实验研究[D]. 南京:南京航空航天大学机电学院, 2019.

Hu Yan. Abrasive jet machining system and experimental study based on gas-liquid-solid mixing[D]. Nanjing: School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[6] 李瑞光,丁宇亭,杨增辉,等. 航天伺服阀阀套相交孔磨粒流工艺技术研究[J]. 液压气动与密封, 2022, 42(7):109-112.

Li Rui-guang, Ding Yu-ting, Yang Zeng-hui, et al. Study on abrasive flow technology of intersecting hole of aerospace servo valve sleeve[J]. Hydraulic Pneu-

- matic and Sealing, 2022, 42(7):109-112.
- [7] 计时鸣,曹慧强,赵军,等. 三相磨粒流文丘里管结构空化辅助抛光机理与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16):71-79.
- Timing, Cao Hui-qiang, Zhao Jun, et al. Cavitation-assisted polishing mechanism and experiment of three-phase abrasive flow venturi tube structure[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 34(16):71-79.
- [8] 王景坡,宋超,凌洋,等. 多通管接头磨粒流光整均匀性研究[J]. 表面技术, 2022, (4):299-307.
- Wang Jing-po, Song Chao, Ling Yang, et al. Study on abrasive particle polishing uniformity of multi-port pipe joints[J]. Surface Technology, 2022(4):299-307.
- [9] 李晓波,魏武,才冬涛,等. 基于磨粒流技术的阀块内孔道光整加工[J]. 金属加工(冷加工), 2022(3):20-24.
- Li Xiao-bo, Wei Wu, Cai Dong-tao, et al. Finishing of inner bore of valve block based on abrasive flow technology[J]. Metalworking (Cold Working), 2022(3):20-24.
- [10] 王卫东. 自激振荡脉冲空化射流喷嘴多目标优化研究[D]. 秦皇岛:燕山大学机械工程学院, 2021.
- Wang Wei-dong. Study on multi-objective optimization of self-excited oscillation pulsed cavitation jet nozzle[D]. Qinghuangd: School of Mechanical Engineering, Yanshan University, 2021.
- [11] 褚聪,戴勇,沈明,等. 基于Fluent仿真的强约束磨粒射流抛光特性[J]. 表面技术, 2016(6):198-204.
- Chu Cong, Dai Yong, Shen Ming, et al. The polishing characteristics of strongly constrained abrasive jet based on Fluent simulation[J]. Surface Technology, 2016(6):198-204.
- [12] 刘江,黄晓斌,何吕,等. 基于Fluent的喷油嘴倒锥孔磨粒流加工数值模拟[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(2):40-42, 50.
- Liu Jiang, Huang Xiao-bin, He Lyu, et al. Numerical simulation of abrasive flow machining in the inverted cone hole of fuel injector based on Fluent[J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2021, 50(2):40-42, 50.
- [13] 李研彪,陈强,张利. 钛合金薄壁曲面液态金属-磨粒流加工仿真与试验研究[J]. 机械工程学报, 2021(23): 220-231.
- Li Yan-biao, Chen Qiang, Zhang Li. Simulation and experimental study on liquid metal-abrasive flow machining of titanium alloy thin-walled curved surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021(23):220-231.
- [14] 刘洋,李俊焯,苏宁宁,等. 磨粒流抛光弯管的数值模拟与试验优化[J]. 机械设计与制造, 2021(7): 137-140.
- Liu Yang, Li Jun-ye, Su Ning-ning, et al. Numerical simulation and experimental optimization of abrasive flow polishing bend[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2021(7):137-140.
- [15] 计时鸣,葛江勤,谭大鹏,等. 三相磨粒流抛光及其气泡溃灭分布特性[J]. 光学精密工程, 2018(2): 388-398.
- Timing, Ge Jiang-qin, Tan Da-peng, et al. Three-phase abrasive flow polishing and bubble collapse distribution characteristics[J]. Optical Precision Engineering, 2018(2):388-398.
- [16] 姚燕生,周瑞根,张成林,等. 增材制造复杂金属构件表面抛光技术[J]. 航空学报, 2022(4):244-256.
- Yao Yan-sheng, Zhou Rui-gen, Zhang Cheng-lin, et al. Surface polishing technology of complex metal components manufactured by additives[J]. Acta Aeronautical, 2022(4):244-256.
- [17] 李光保. 基于三相流技术的零件内表面毛刺处理的系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院, 2019.
- Li Guang-bao. Systematic research on burr treatment of parts inner surface based on three-phase flow technology[D]. Harbin: School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, 2019.
- [18] 张方东. 磨料流加工工件表面粗糙度研究[J]. 现代制造技术与装备, 2020, 56(10):162-163.
- Zhang Fang-dong. Study on the surface roughness of abrasive flow machining workpiece[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2020, 56(10): 162-163.