

表面质量控制及检测

主轴式滚磨光整加工中介质流场的 数值模拟及作用机理分析

王程伟^{1,2}, 李秀红^{1,2}, 李文辉^{1,2}, 王娜^{1,2}, 杨胜强^{1,2}

(1.太原理工大学 机械工程学院, 太原 030024; 2.精密加工山西省重点实验室, 太原 030024)

摘 要: **目的** 研究主轴式滚磨光整加工中介质流场的作用机理和工艺参数对加工能力的影响规律。**方法** 基于多相流 Mixture 模型、标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和压力速度耦合 SIMPLEC 算法, 对主轴式滚磨光整加工中介质流场构成的固液两相湍流进行数值模拟。通过改变滚筒转速和工件轴心距筒壁距离等工艺参数, 分析在不同参数下滚抛磨块的速度矢量和工件表面压力的分布规律, 并通过测试实验验证模拟的有效性。**结果** 0° 处静压值在 32 MPa, 为静压最大点; 90° 和 270° 处动压在 35 MPa 左右, 为动压最大点。尾流区域总压力大幅削减为 0° 处的 33%。工件表面的总压和滚筒转速成指数函数关系, 且滚筒转速大于 50 r/min 时, 0° 和 270° 处总压值达到 32 MPa, 并迅速增大。工件轴心和筒壁的距离为 65 mm 的区域, 工件表面的总压均值最大为 19 MPa, 且距离为 30 mm 时, 270° 处滚抛磨块受筒壁影响, 总压变为负值。数值模拟和实验结果的压力平均误差为 5.25%。**结论** 工件上正对滚抛磨块处为碰撞和挤压作用, 两侧主要为滑擦作用。滚筒转速大于 50 r/min 且工件轴心和筒壁的距离为 65 mm 时, 滚抛磨块对工件的加工能力较强。

关键词: 滚磨光整加工; 滚抛磨块; 数值模拟; 液固耦合; 动态力测试

中图分类号: TG580.692 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)11-0251-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.11.036

Analysis on Numerical Simulation and Mechanism of Medium Flow Field in Spindle Barrel Finishing Process

WANG Cheng-wei^{1,2}, LI Xiu-hong^{1,2}, LI Wen-hui^{1,2}, WANG Na^{1,2}, YANG Sheng-qiang^{1,2}

(1.School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2.Shanxi Key Laboratory of Precision Machining, Taiyuan 030024, China)

ABSTRACT: This work aims to analyze the effects of mechanism and process parameters of medium flow filed on the processing capacity during the spindle-type barrel finishing. Based on mixture model, standard $k-\varepsilon$ turbulence model and pressure-velocity coupled SIMPLEC algorithm, numerical simulation was performed for the solid-liquid two-phase turbulent flow composed by the medium flow field in spindle barrel finishing process. The distribution of abrasive velocity vector and work-piece surface pressure under different parameters was analyzed by changing the process parameters like barrel speed, distance

收稿日期: 2018-05-17; 修订日期: 2018-06-21

Received: 2018-05-17; **Revised:** 2018-06-21

基金项目: 国家自然科学基金 (U1510118); 山西省自然科学基金 (201701D121073)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation (U1510118), Shanxi Natural Science Foundation (201701D121073)

作者简介: 王程伟 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为零件表面精密加工。

Biography: WANG Cheng-wei (1992—), Male, Master, Research focus: finishing technology of the precision surface.

通讯作者: 李秀红 (1972—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为零件表面精密加工。邮箱: xhli7489@sina.com

Corresponding author: LI Xiu-hong (1972—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: finishing technology of the precision surface. E-mail: xhli7489@sina.com

from workpiece axis to the barrel wall. The effectiveness of the simulation was verified by test experiments. The maximum point of static pressure was 32 MPa at 0° , the maximum point of dynamic pressure was about 35 MPa at 90° and 270° , and the total pressure in the wake area was greatly reduced to 33% at 0° . The total pressure on the workpiece surface was exponentially related to the rotation speed of the drum. When the rotating speed was more than 50 r/min, the total pressure value reached 32 MPa at 0° and 270° and increased rapidly. In the area where the distance between the axis of the workpiece and the wall of the drum was 65 mm, the maximum total pressure of the workpiece surface was 19 MPa. When the distance was 30 mm, the total pressure was negative at 270° due to the effect on abrasive by drum wall. The average pressure error between numerical simulation and experimental results was 5.25%. The part on the workpiece facing abrasive is subject to impact and compression, while two sides are subject to scratching effect. When the rotating speed is greater than 50 r/min and the distance between the axis of the workpiece and the wall is 65 mm, the machining ability of the abrasive is relatively strong.

KEY WORDS: barrel finishing; abrasive; numerical simulation; liquid-solid coupling; dynamic force test

滚磨光整加工中滚抛磨块和液体介质以一定的作用力和相对速度对工件表面进行碰撞、滚压、滑擦和刻划的微量磨削,以改变工件表面的几何特征,从而改善表面层的物理力学性能,并且综合改善工件的表面完整性^[1-2]。作为一种典型的自由磨具光整加工方法,滚磨光整加工已经被各行业所广泛使用。

针对滚磨光整加工,国内外学者已对工件和滚抛磨块之间的作用力进行了数值模拟和测试研究。Mohammad 等^[3]同时测量了振动光饰机中滚抛磨块的法向力和切向力,并利用冲击坑的 SEM 显微照片来研究滚抛磨块的接触力学和铝合金工件的磨损机理。A. Yabuki 等^[4]将干燥和水湿两种条件下测试的滚抛磨块的摩擦系数进行了比较。LI 等^[5]采用 CCD 激光位移传感器,测试了主轴式滚磨光整加工中加工介质的整体速度,并找出其分布规律。随着计算机的发展,越来越多的研究者使用数值模拟的方法研究加工机理。Kamyar H 等^[6]使用离散元模型预测了卧式振动抛光机内滚抛磨块整体和局部的冲击速度,并与测试值进行了比较。LI 等^[7]通过离散元模拟的手段,确定了离心式滚磨光整加工中的最佳传动比。WANG 等^[8]利用 FLUENT2ddp 隐式求解器模拟了深井煤矿固液两相流充填系统,并分析了系统中两相流动的稳定性。TANG 等^[9]将 FLUENT 的二阶动力学 SGS 模型应用于离心叶轮中两相流动的模拟,预测压力和速度分布并与实验结果对比。张强等^[10]运用 FLUENT 软件,模拟了一种固液两相流对孔表面光整加工的新工艺。之前学者对滚磨光整加工的数值模拟大部分采用离散元方法,其能够预测加工介质对工件作用的力和频率。但离散元软件计算耗时,且对于介质流场仅是在干式的情况下研究,并没有考虑实际加工中液体介质的影响。采用 FLUENT 的固液两相流模块,能够准确模拟实际应用中的介质流场形态。

本文以主轴式滚磨光整加工的介质流场为研究对象,基于 FLUENT 软件建立了介质流场的两相流 CFD 模型,以滚筒转速和工件距滚筒内壁距离为加工变量,研究加工参数对介质流场和工件表面压力的影

响,并分析加工介质的作用机理,通过测试实验,验证模拟结果的有效性。

1 数学模型建立

1.1 几何模型

主轴式滚磨光整加工原理如图 1 所示,滚筒回转,加工介质在离心力作用下形成旋转流场,从而对工件产生作用力,达到工件表面光整加工的目的。工件上正对滚抛磨块处为 0° ,平行于滚抛磨块靠筒轴心一侧为 90° ,平行于滚抛磨块靠筒壁一侧为 270° ,背对滚抛磨块处为 180° 。

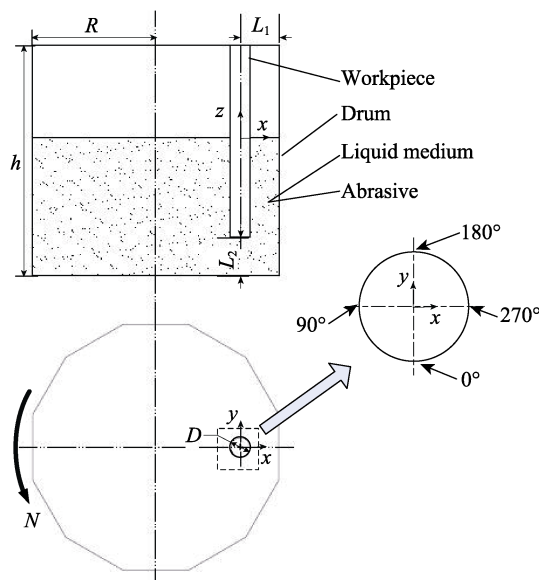


图 1 主轴式滚磨光整加工原理简图

Fig.1 Schematic diagram of spindle barrel finishing process

图 2 为主轴式滚磨光整加工的几何模型,圆柱形工件材料为铝合金,滚抛磨块为直径 3 mm 的氧化铝球形颗粒,液体介质为水。其结构参数及工艺参数如表 1 所示。



图 2 主轴式滚磨光整加工的几何模型
Fig.2 Geometric model of spindle barrel finishing process

表 1 主轴式滚磨光整加工结构参数及工艺参数
Tab.1 Structural parameters and process parameters of spindle barrel finishing process

Structural parameters	Inscribed circle radius of the drum R/mm	320
	Effective depth of the drum h/mm	600
	Workpiece diameter D/mm	50
	The distance between workpiece axis and drum wall L_1/mm	100
	The distance between workpiece bottom and Drum bottom L_2/mm	100
Process Parameters	Processing media loading $v_1/\%$	60
	The proportion of abrasive in processing medium $v_2/(\%)$	70
	Rotating velocity $N/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	0~105

1.2 控制方程

滚磨光整加工中，介质流场由滚抛磨块和液体介质构成，且颗粒项体积分数大于 10%，所以采用多相流 Mixture（混合）模型。其相之间的耦合能力强，适用于固液两项湍流场的数值模拟，其连续性方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k\right) + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k v_k\right) = 0 \tag{1}$$

式中： α_k 表示第 k 相的体积分数； ρ_k 表示第 k 相的密度（ kg/m^3 ）； v_k 表示第 k 相的平均速度（ m/s ）。

混合模型的动量方程由介质流场固液两项的动量方程求和得到：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k v_k\right) + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k v_k v_k\right) = -\alpha_k \nabla p + \nabla \cdot [\alpha_k (\tau_k + \tau_k^t)] + \alpha_k \rho_k g + M_k + (F_{\text{int}})_k + S_D \tag{2}$$

式中： p 表示压力（ Pa ）； τ_k 表示分子动力（ N/m^2 ）； τ_k^t 表示紊动应力（ N/m^2 ）； M_k 表示单位体积相间动量传递（ N/m^3 ）； $(F_{\text{int}})_k$ 表示内在（ N/m^3 ）； g 为重力加速度（ m/s^2 ）； S_D 为动量源项（ N/m^3 ）。

由动量方程，可得混合模型的能量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k h_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n [\alpha_k v_k (\rho_k h_k + p)] = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_E \tag{3}$$

式中： h_k 表示第 k 相的显焓； k_{eff} 表示有效热传导率； S_E 为能量源项（ N/m^3 ）。

1.3 网格模型及边界设置

通过 Mesh 模块将图 2 几何模型的加工介质区域划分为四面体网格，考虑到加工介质和工件的接触区域流场更为复杂，设定 5 层膨胀层，将工件周围的网格加密，计算区域网格模型如图 3 所示。制作网格独立性检验表，如表 2。由表可知，在网格数量增加到一定值时，计算精度基本不变，计算时间明显增加，所以选择第 4 种网格划分方法，网格总数达到 67177，网格质量达到 0.9。

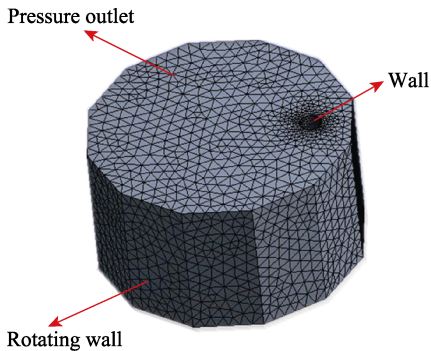


图 3 计算区域网格模型
Fig.3 Meshing model of compute area

表 2 网格独立性检验
Tab.2 Test of grid independence

No.	Number of model grids	Average surface pressure of the workpiece/MPa	Calculating time/s
1	49 460	15.9817	341
2	49 554	16.0678	354
3	66 836	16.7792	491
4	67 177	16.8543	503
5	126 446	16.8577	135

数值求解时所设置的边界条件为：出口边界条件为压力出口，相对压力为 0 MPa；滚筒和工件分别为旋转壁面和固定壁面，并采用无滑移边界。

1.4 计算求解设置

将网格模型导入 FLUENT 软件中，首先采用压力稳态求解器，基于 Standard $k-\varepsilon$ 湍流模型，利用 Mixture 多相流模型模拟加工介质，其中固相为直径 3 mm 的球形颗粒，体积分数 70%，液体相为液态水，体积分数 30%。压力-速度耦合方式用 SIMPLE 算法来处理，控制方程离散格式设为一阶迎风格式，收敛精度为 10^{-5} ，并采用质量守恒及残差曲线为判断收敛依据。

2 计算结果与分析

2.1 工件表面压力分析

根据文献[1]中主轴式滚磨光整加工的工艺参数,取滚筒转速为 60 r/min,并结合边界条件设置进行数值模拟,分析模拟结果中加工介质的速度矢量和工件表面压力。由于三维立体模型无法反应流场内部情况,应取内部层面做具体分析。由于工件的加工部分顶层压力过小,底层受工件底面影响过大,所以应分析中间层面。图 4 为距离工件底面 100 mm 上方水平面的总压云图。

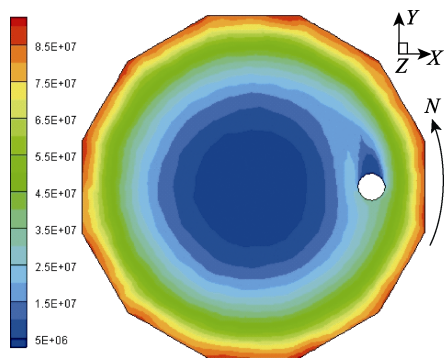


图 4 距离工件底面 100 mm 上方水平面的总压力云图
Fig.4 Cloud chart for horizontal total pressure 100 mm above the bottom surface of the workpiece

从图 4 可以看出,随距滚筒中心的距离增大,总压力由 15 MPa 增高到 85 MPa,在滚抛磨块和筒壁接触的位置,总压达到最大。此外,工件在 180°处形成尾流,且在尾流区域内,总压由 45 MPa 降低到 15 MPa,滚抛磨块对工件的加工作用大幅削弱。

图 5 为工件周围加工介质的速度矢量云图,图 6 为圆柱形工件表面各点压力分布图。由图 5 和图 6 可知,0°处静压为 32 MPa,是静压最大值点,动压趋近于 0,速度方向正对工件,速度大小明显低于其他位置。根据能量损失公式(式 4),此位置滚抛磨块正对碰撞工件,碰撞后能量损失,速度降低至接近 0 m/s,是滚抛磨块对工件碰撞作用最强的区域。90°和 270°处动压为 35 MPa,均接近各自极值点,而静压为 -20 MPa,是因为介质流场的紊流形成两处的漩涡脱落,对工件产生吸力,没有碰撞作用。两位置处滚抛磨块的速度方向相同,大小接近极值,是对工件切削作用最强的区域。180°处尾流区域内,静压降低至 8 MPa,动压接近于 0,滚抛磨块对工件的加工作用很弱,并产生部分回流。从总压来看,总压力沿圆柱形工件的周向呈对称分布,0°处总压 32 MPa,为最大值点,加工作用最强。从 0°处到工件两侧,总压逐渐减小到 15 MPa 左右。从工件两侧再到 180°处,总压沿原趋势减小到最低点后,有小幅回升。工件表面静压大于动压的范围为 166°(0°~30°、130°~229°、

323°~360°),碰撞起主要加工作用;动压大于静压的范围为 194°,滑擦起主要加工作用。

$$|\Delta E| = \frac{1}{2}(1-e^2) \frac{mM}{m+M} v_0^2 \quad (4)$$

其中, m 为滚抛磨块质量, M 为工件质量, v_0 为滚抛磨块碰撞前速度, e 为恢复系数,范围 $0 \leq e \leq 1$ 。

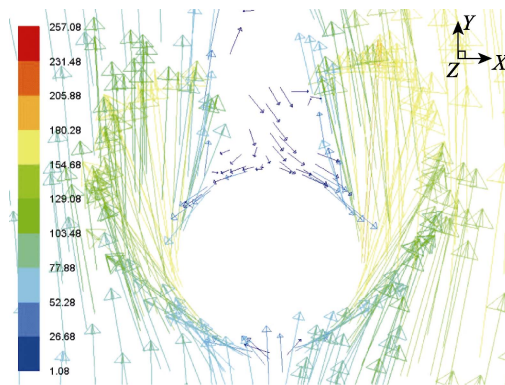


图 5 工件周围加工介质的速度矢量云图
Fig.5 Cloud chart for the velocity vector of the processing medium around the workpiece

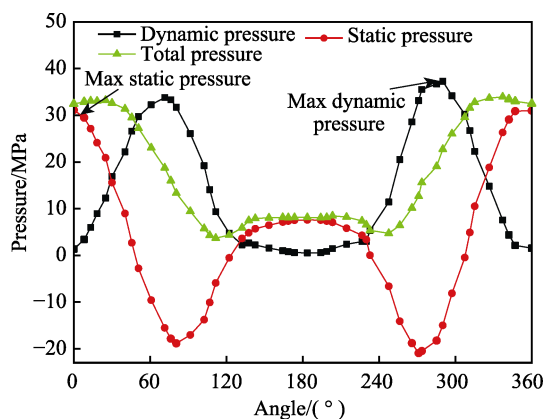


图 6 工件表面各点压力分布
Fig.6 Pressure distribution of each point on the workpiece surface

2.2 加工参数对工件表面压力的影响

2.2.1 滚筒转速

其他参数不变,针对不同滚筒转速进行加工过程数值模拟。取上文中工件表面四个方位点的总压力值绘制散点图,并用 MATLAB 得出各点总压力变化的拟合曲线和方程。图 7 为滚筒不同转速对各方位点总压力的影响,图中实线为离散点的拟合曲线。表 3 为工件不同方位点总压力值的拟合方程。表中 R^2 为判定系数,计算如下:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

其中, SSR 为回归平方和, SST 为总误差平方和, y 为样本数据, R^2 为回归平方和占总误差平方和的比

例，反映曲线的拟合程度，其值越趋近于 1，说明方程拟合程度越佳。曲线的最佳拟合函数可选择为线性函数、二次函数、指数函数、对数函数、幂函数。

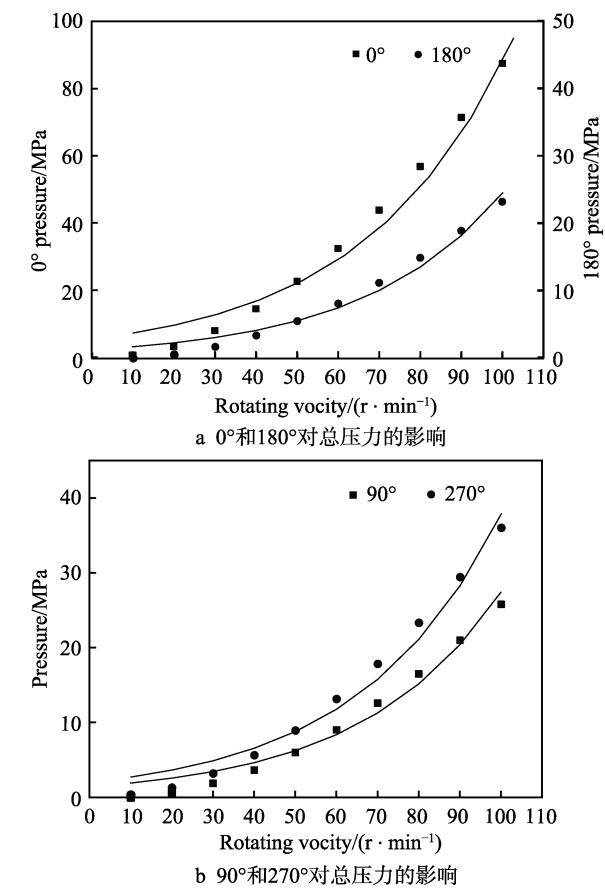


图 7 滚筒不同转速对各方位点总压力的影响
Fig.7 Effect of different rotating velocity of barrel on the total pressure of each orientation point: a) 0 degree and 180 degree; b) 90 degree and 270 degree

表 3 工件不同方位点总压力值的拟合方程
Tab.3 Fitting equation for the total pressure value of each orientation point on the workpiece

Point	Fitting equation	R^2
0°	$y = 5\,346\,000 \exp(0.02849x)$	0.9743
90°	$y = 1\,409\,000 \exp(0.02968x)$	0.973
180°	$y = 1\,254\,000 \exp(0.02975x)$	0.9736
270°	$y = 2\,067\,000 \exp(0.0291x)$	0.9742

由图 7 可看出，随着滚筒转速增加，各方位点总压力迅速增大，滚抛磨块对工件的加工作用显著增强。0°处总压力增长最快，是因为 0°处滚抛磨块正对加工工件，没有工件自身对滚抛磨块的阻碍作用，速度对总压力的影响最显著。各方位点总压初始值接近，随滚筒转速增加，特别是转速大于 50 r/min 时，0°和 270°处总压值达到 32 MPa，且随着滚筒转速的继续增加，总压值迅速增大，明显高于其他两处。说明转速大于 50 r/min 时，滚抛磨块对工件产生显著的滑擦作用，整体的加工能力增强。

由表 3 可知，各方位点滚抛磨块对工件的总压力均以指数函数递增，判定系数 R^2 值均达到 0.95，说明拟合方程和离散数据比较接近。0°处的 R^2 值相对最大，表明其总压力值和滚筒转速的相关性最强。

2.2.2 工件轴心距筒壁的距离

取 2.1 中转速为 60 r/min、圆柱形工件轴心距离筒壁 100 mm 的数值模型，改变工件轴心和筒壁的距离，过程中保持 0°处加工工件的滚抛磨块速度不变，不同位置及对应的角速度如表 4，对表 4 中数据进行数值模拟，5 种情况下工件表面的总压如图 8 所示。

表 4 工件距离筒壁的距离和对应的角速度值
Tab.4 Distance between the workpiece and the wall and the corresponding angular velocity

Distance from the wall/mm	30	65	100	135	170
Angular velocity/(rad·s ⁻¹)	4.764	5.418	6.280	7.468	9.211

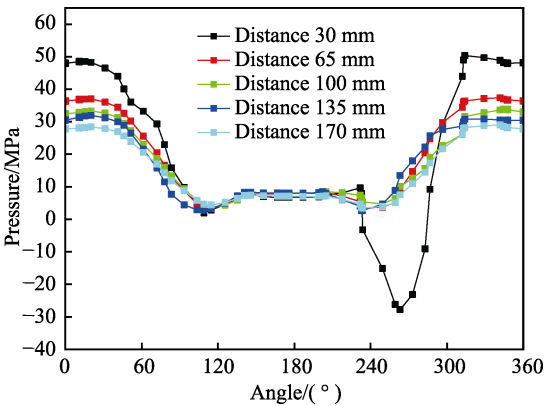


图 8 工件轴心和筒壁不同距离处工件表面总压对比
Fig.8 Comparison of total pressure on the workpiece at different distances between workpiece axis and wall

由图 8 可知，距筒壁 65 mm 到 170 mm 处，工件的总压分布趋势基本一致，但随着距离增大，工件表面总压均值由 19 MPa 下降至 15 MPa。这是由于滚筒回转时，距离筒壁越远处的滚抛磨块受离心力越小，磨块对工件的作用力也相应减小，造成了工件表面总压值的降低，导致滚抛磨块对工件的加工能力变弱。而工件轴心距离筒壁 30 mm 处表面总压分布明显不同于其他 4 种情况，是因为此处受筒壁影响，滚抛磨块对工件的作用机理发生显著变化，为进一步研究其变化过程，取工件轴心距离筒壁 30 mm 和 100 mm 的数据进行对比分析。两不同距离处，工件周围压力云图和速度矢量云图见图 9，工件表面的静压和动压对比见图 10。

对比图 9a 和 b 可知，工件轴心距离筒壁 30 mm 处时，滚抛磨块碰撞工件引起的静压升高区扩大，且向筒壁处偏移，并和滚抛磨块碰撞筒壁引起的静压升高区相连。对比图 9c 和 d，30 mm 位置处工件靠近

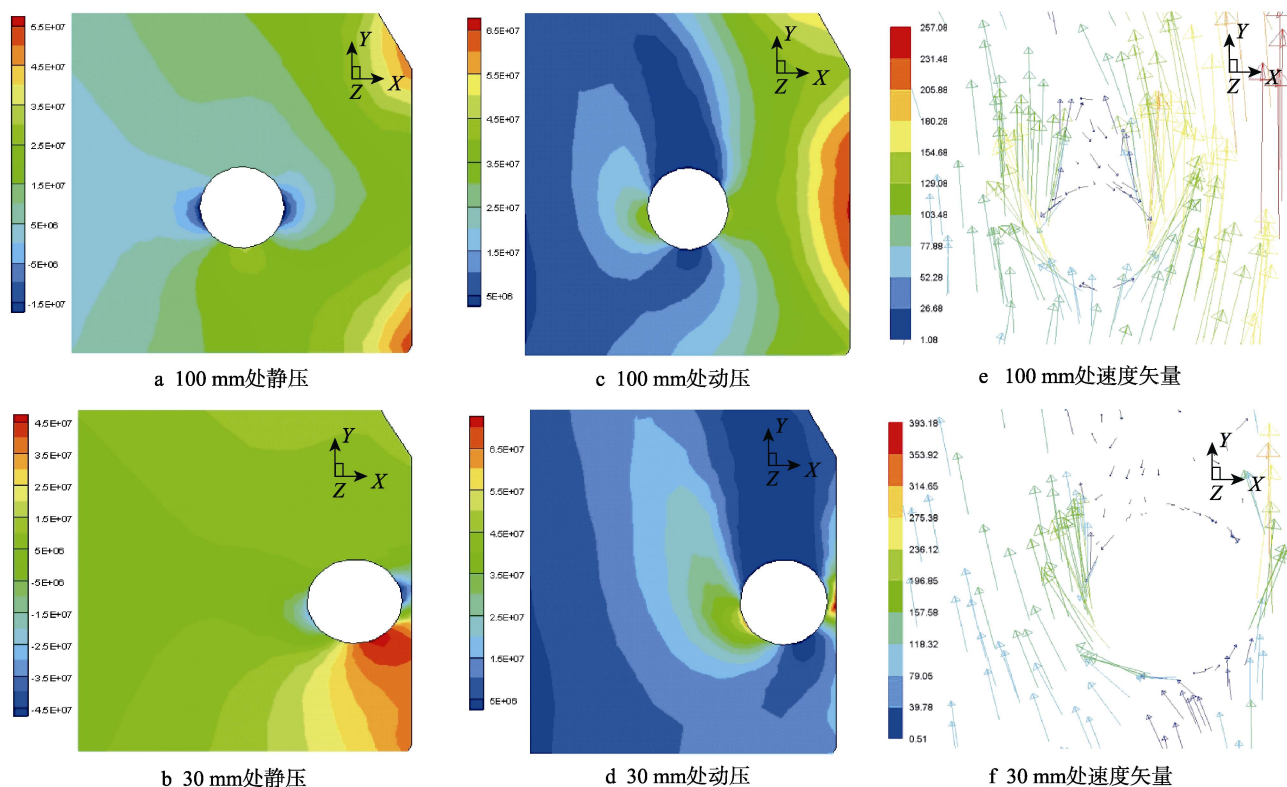


图9 距筒壁 100 mm 和 30 mm 处工件周围压力云图和速度矢量云图

Fig.9 Pressure cloud and velocity vector cloud around the workpiece at 100 mm and 30 mm from the wall:

a) 100 mm static pressure; b) 30 mm static pressure; c) 100 mm dynamic pressure; d) 30 mm dynamic pressure; e) 100 mm velocity vector; f) 30 mm velocity vector

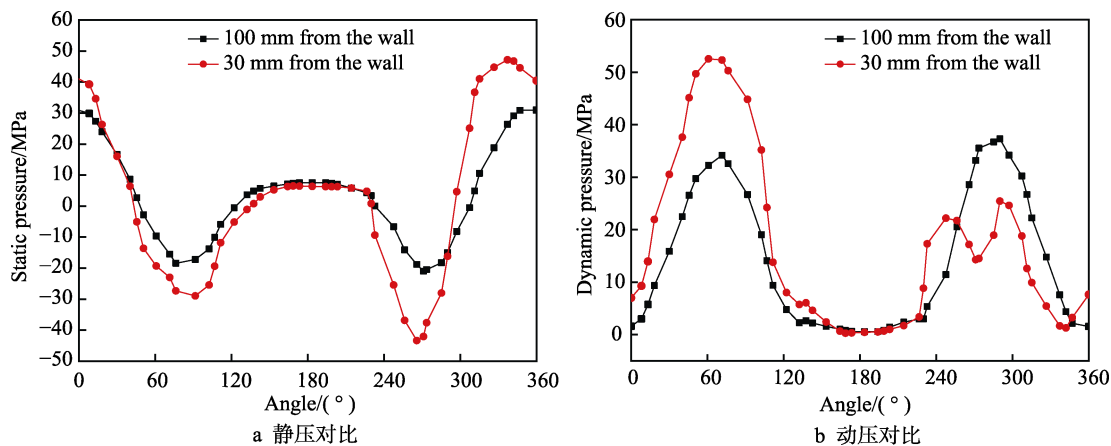


图10 距筒壁 100 mm 和 30 mm 处工件表面的静压和动压

Fig.10 Static pressure and dynamic pressure of the workpiece surface at 100 mm and 30 mm from the wall:

a) static pressure comparison; b) dynamic pressure comparison

筒壁一侧的动压升高区大幅度缩小。对比图 9e 和 f, 30 mm 位置处滚抛磨块的速度方向, 整体以工件轴心为中心逆时针旋转了一定角度, 且靠近筒壁一侧, 滚抛磨块的速度降低, 紊乱程度增加。

分析图 10a 和 b 可知, 30 mm 处工件表面的压力不再近似呈周向对称分布, 180°之后曲线段的静压正极值增大约 15 MPa, 270°左右的动压极值减小 20 MPa, 且形成两个小波峰。说明在工件距筒壁过近时, 其靠近筒壁一侧, 滚抛磨块对工件的碰撞作用增强, 切削作用锐减, 流场的紊乱程度加剧。这将会增加筒

壁的磨损, 降低滚抛磨块的加工能力。

3 有效性验证

为证明数值模拟的有效性, 基于主轴式滚磨光整加工对工件表面的压力进行测试。图 11 为动态力信号测试平台, 该测试平台由主轴式滚磨光整加工试验设备、动态力传感器 (型号为 501F01) 及其固定工装、数据采集系统 (DH5902 坚固型) 和计算机组成。按照表 1 的工艺参数进行测试, 其值和数值模拟相

同, 滚筒转速设定为 60 r/min, 6061-T6 铝合金管的抛光长度为 260 mm。传感器固定在工件外壁, 放置位置垂直距离筒底 200 mm, 图 12 为传感器固定工装。将工件一周划分为 12 个均布的采样点, 每个采样点分别有效地测试 3 次, 并取平均值。因力传感器测得的作用力单位为牛顿 (N), 需将单位转换为数值模拟结果中压力的单位 (Pa), 所需材料的力学参数: 氧化铝磨块的弹性模量 (E) 350 GPa、泊松比 (ν) 0.22, 45 钢的弹性模量 (E) 210 GPa、泊松比 (ν) 0.31。根据颗粒物质力学导论^[11], 计算公式如下:

$$F = \frac{4E^*}{3R^*} a^3 \quad (5)$$

$$P = \sqrt[3]{\frac{16E^* F}{9R^* \pi^3}} \quad (6)$$

其中 F 为力传感器测量的作用力, E^* 为有效弹性模量, R^* 为有效颗粒半径, a 为颗粒和工件接触面半径, P 为工件表面所受压力。

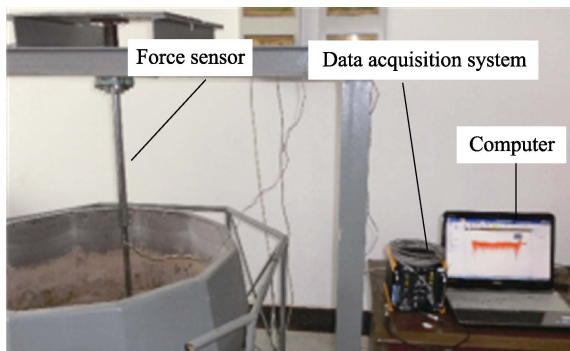


图 11 动态力信号测试平台
Fig.11 Dynamic force signal test platform

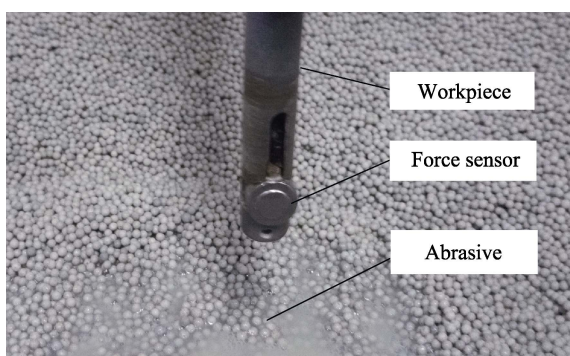


图 12 传感器固定工装
Fig.12 Sensor fixing fixture

图 13 为工件表面压力分布的实验结果和模拟结果对比。由图 13 可知, 在数值模拟和实验的结果中, 两曲线变化趋势基本一致, 平均误差为 5.25%, 证明了数值模拟的有效性。图中实验测试的压力值较高, 而 180°处实验的压力值明显降低, 是数值模拟和实验结果的最大差值点, 其差值为 8.35%。这是由于实验所用的加工介质为滚抛磨块湿颗粒, 和加入液体介质

相比, 滚抛磨块对传感器的作用力更强, 但缺少液体介质的粘连作用, 尾流部分加工工件的滚抛磨块数量减少, 导致传感器测试的压力值较低。

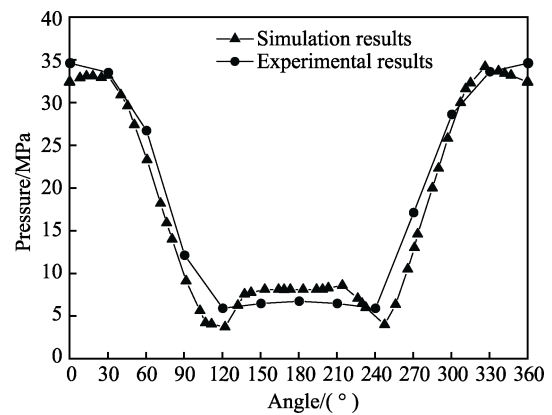


图 13 工件表面压力分布的实验结果和模拟结果对比
Fig.13 Comparison of experimental results and simulation results of pressure distribution on the workpiece surface

4 结论

采用多相流 Mixture 模型、标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和压力速度耦合 SIMPLEC 算法, 对滚磨光整加工中工件表面压力分布进行数值模拟, 并通过测试实验进行了模拟的有效性验证, 揭示了滚磨光整加工介质作用机理及工件表面压力的分布规律, 得出结论如下:

1) 工件表面总压在正对滚抛磨块处最大, 平行滚抛磨块两侧的总压接近, 约为最大值的 1/2, 背对滚抛磨块处总压为最大值的 1/3。正对滚抛磨块处, 静压最大, 主要为碰撞和挤压作用; 平行滚抛磨块两侧, 动压最大, 主要为滑擦作用; 尾流区域内, 滚抛磨块对工件的作用力大幅减小。

2) 随滚筒转速增加, 滚抛磨块对工件表面的压力以指数函数递增, 且工件上正对滚抛磨块处压力增幅最明显, 曲线拟合程度最高。当转速大于 50 r/min 时, 滚抛磨块对工件的加工能力显著增强。

3) 工件轴心和筒壁的距离越小, 滚抛磨块对工件的作用力越大, 但距离缩小到 30 mm 时, 270°处滚抛磨块对工件的碰撞作用增强, 滑擦作用锐减, 造成介质流场的加工能力减弱。

参考文献:

- [1] 杨胜强, 李文辉, 陈红玲. 表面光整加工理论与新技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
YANG S Q, LI W H, CHEN H L. Surface finishing theory and new technology [M]. Beijing: National defense industry press, 2011.
- [2] LI W H, YANG S Q, YANG S C. Theoretic analysis and simulation on horization spindle barrel finishing [J]. Key engineering materials, 2009, 46: 332-336.

- [3] BAGHBANAN M R, YABUKI A, ROLAND S T. Tribological behavior of aluminum alloys in a vibratory finishing process[J]. *Wear*, 2003, 255: 1369-1379.
- [4] YABUKI A, BAGNBANAN M R, SPELT J K. Contact forces and mechanisms in a vibratory finisher[J]. *Wear*, 2002, 252(7): 635-643.
- [5] LI X H, WU F F, LI W H, et al. Kinematic characteristics of mass finishing process with the parallel spindle: Velocity measurement and analysis of the media[J]. *Advances in mechanical engineering*, 2017, 9(10): 1-12.
- [6] KAMYER H, JAN K S. Particle impact velocities in a vibrationally fluidized granular flow: Measurements and discrete element predictions[J]. *Chemical engineering science*, 2014, 109: 123-135.
- [7] LI W H, ZHANG L, LI X H, et al. Theoretical and simulation analysis of abrasive particles in centrifugal barrel finishing: Kinematics mechanism and distribution characteristics[J]. *Powder technology*, 2017, 318: 518-527.
- [8] WANG X M, ZHAO J W, XUE J H, et al. Features of pipe transportation of paste-like backfilling in deep mine[J]. *Journal of central south university of technology*, 2011, 18(5): 1413-1417.
- [9] TANG X L, WANG F J, WU Y L. An improved large eddy simulation of two-phase flows in a pump impeller[J]. *Acta mechanica sinica*, 2007, 23: 635-643.
- [10] 张强, 李文辉, 候志燕, 等. 一种液粒两相流光整工艺与试验研究[J]. *工艺与检测*, 2015(1): 115-118.
- ZHANG Q, LI W H, HOU Z Y, et al. A liquid-particle two-phase flow finishing process and experimental study[J]. *Process and inspection*, 2015(1): 115-118.
- [11] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- SUN Q C, WANG G Q. Introduction to particle matter mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [12] 陈玉楠, 李文辉, 李秀红, 等. 主轴式滚磨光整加工过程中滚抛磨块作用力测试与分析[J]. *中国表面工程*, 2007, 30(1): 33-40.
- CHEN Y N, LI W H, LI X H, et al. Force test and analysis of abrasive in spindle barrel finishing process[J]. *China surface engineering*, 2017, 30(1): 33-40.
- [13] 田雨, 李文辉. 基于离散元法的曲轴滚磨光整加工机理分析[J]. *现代制造工程*, 2015(3): 79-83.
- TIAN Y, LI W H. Analysis of crankshaft barrel finishing mechanism based on discrete element method[J]. *Modern manufacturing engineering*, 2015(3): 79-83.
- [14] 樊荣, 李秀红, 李文辉, 等. 基于 ABAQUS/FE-SAFE 的 TC4 钛合金板材疲劳寿命仿真与实验[J]. *表面技术*, 2017, 46(1): 158-163.
- FAN R, LI X H, LI W H, et al. Fatigue life simulation and experiment of TC4 titanium alloy board based on ABAQUS/FE-SAFE[J]. *Surface technology*, 2017, 46(1): 158-163.
- [15] 赵斌娟, 袁寿其, 刘厚林, 等. 基于 Mixture 多相流模型计算双流道泵全流道内固液两相湍流[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(1): 7-12.
- ZHAO B J, YUAN S Q, LIU H L, et al. Calculate the two-phase turbulent flow in the full flow channel of a dual-channel pump based on mixture multiphase flow model[J]. *Journal of agricultural engineering*, 2008, 24(1): 7-12.