

介观尺度下磨料浓度对磨粒流加工质量的影响

李俊烨^{1,2}, 乔泽民¹, 杨兆军², 张心明¹

(1. 长春理工大学 机电工程学院,长春 130022;2. 吉林大学 机械科学与工程学院,长春 130022)

摘要:选择介观尺度下的粒子作为研究对象,通过设定介观尺度下的磨粒和工件磨削参数,进行了不同磨料浓度对磨粒流加工质量影响的仿真分析和试验研究。从数值模拟和试验研究结果可知:随着磨料浓度的增大,动压力和湍流动能升高,磨削效果增强;试验后的工件经过变焦非接触三维形貌测量和扫描电镜测试也得到了相同的结论,即随着磨料浓度的增大,经过固液两相磨粒流加工后的工件表面粗糙度逐渐降低,小孔质量和工件的使用性能得到提升,工件表面质量提高。

关键词:机械制造工艺与装备;介观尺度;磨料浓度;仿真分析

中图分类号:TH161.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2017)03-0837-07

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb201703020

Influence of abrasive concentration on processing quality of abrasive flow in mesoscopic scale

LI Jun-ye^{1,2}, QIAO Ze-min¹, YANG Zhao-jun², ZHANG Xin-ming¹

(1. College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Simulation analysis and experiments are performed to investigate the influence of the concentration of abrasive particles on the processing quality of abrasive flow in mesoscopic scale. Both analysis and experimental results show that with the increase in abrasive concentration, the dynamic pressure and turbulent kinetic energy increase, and the grinding effect is enhanced. The shapes of grinded workpieces are measured by zoom non-contact 3D measurement and scanned by SEM, and the results are similar to that of simulation. In other words, with the increase in abrasive concentration, the workpiece roughness decreases, the hole quality and workpiece performance are improved, the workpiece surface quality is enhanced.

Key words: machinery manufacturing technology and equipment; mesoscopic scale; abrasive concentration; simulation analysis

收稿日期:2016-04-21.

基金项目:国家自然科学基金项目(51206011);吉林省科技发展计划项目(20160101270JC, 20170204064GX);吉林省教育厅项目(吉教科合字[2016]第 386 号).

作者简介:李俊烨(1981-),男,副教授,博士. 研究方向:精密与超精密加工,微摩擦与多相流技术.

E-mail:ljjy@cust.edu.cn

通信作者:张心明(1967-),男,研究员,博士生导师. 研究方向:精密超精密加工,检测及装备.

E-mail:zxm@cust.edu.cn

0 引言

随着科技的进步和发展,机械加工由原始的粗加工逐步迈向精密、超精密加工领域^[1]。在精密加工方法中,磨粒流加工(Abrasive flow machining, AFM)是一种典型的抛光方法,它以去除工件内表面毛刺、进行工件内部小孔倒圆角及去除飞边为目的,借助磨料介质(由磨粒与液压油等结合而成的可流动物)降低工件表面波纹度、粗糙度,从而提高工件精度^[2-4]。在磨粒流加工过程中,磨料的组成成分及形态决定了工件的加工精度,其中磨料浓度是影响磨粒流加工精度的关键因素^[5,6],研究磨料的流动状态和性质变化对磨粒流加工质量的影响具有深远的意义。

从宏观方面来讲,磨料介质是一种固液两相流体,当前学者对宏观尺度流体学方面的探究已经卓有成果。流体作为非常受关注的物质,研究它的性质对改善磨粒流加工质量具有实际意义^[7],而按照空间尺度和运动的时间尺度来分,它可以在宏观、微观、介观等尺度内表现出不同的性质和流体形态^[8]。

通常来讲,可用斯托克斯公式描述简单的流体形态。在宏观尺度内,基于此公式形成的各类技术(一般特指计算机方面的应用)是通过微观细节探究流体的内部流动形态(流体的微观结构决定宏观尺度内的物理性质),该方法并不适用于对复杂流体的研究^[9]。而在微观尺度内,一般通过分子动力学方法研究流体分子的流动形态及性质,进而实现基于分子动力学方法的流体数值分析,但受限于计算机性能,分子动力学计算的时间和空维度仅限于纳秒、纳米级,而对于复杂的流体系统,其物理特性通常处于毫秒、微米级,即介观(Mesoscopic)尺度^[10,11],因此在介观尺度内研究流体的特性十分必要。

本文在介观尺度下通过数值模拟和试验研究了磨料浓度对磨粒流加工质量的影响,分析了磨料浓度对磨粒流加工质量的影响规律。

1 磨料浓度对磨粒流加工质量影响的仿真分析

磨粒流可用于加工具有内通道结构的零件,此类零件广泛应用于航空航天、武器装备、汽车制造、精密模具制造、高清洁度零件、纺织机械、柴油机制造、液压件制造等领域。本文以柴油机燃油

系统中的重要组成部件——喷油嘴为研究对象,喷油嘴的作用是使柴油或汽油经喷油嘴内孔进入气缸,通过高压喷油使油雾化,经火花塞点火燃烧,进而启动发动机。因此,实际生产中对喷油嘴小孔加工精度要求非常高,其加工精度直接影响到发动机的喷射和雾化性能。

在进行磨料浓度对磨粒流加工质量影响的数值仿真分析时,首先需建立喷油嘴工件的物理模型及数值模型,并设置入口、出口和壁面的边界条件;然后对工件划分网格并设置相关参数;最后才能进行介观尺度下颗粒磨削的数值分析。在设定总体模型过程中,连续相采用 k -epsilon 湍流模型,通过喷油嘴数值模型进行离散相跟踪。经过 275 次迭代,达到收敛,收敛残差曲线如图 1 所示。

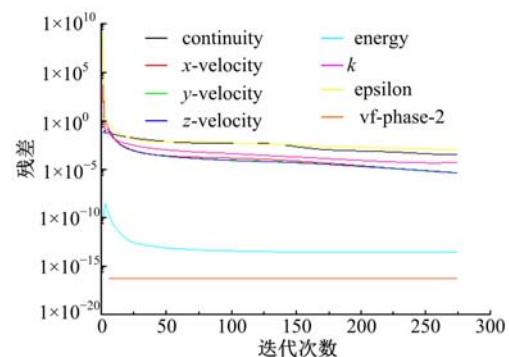


图 1 喷油嘴通道计算残差曲线图

Fig. 1 Calculation of residual curve of nozzle channel

1.1 磨料浓度对动压力的影响

为探究不同磨料浓度对磨粒流加工质量的影响,选取介观尺度下的碳化硅磨粒作为仿真用研磨液颗粒。由于数值模型所能计算的最大磨料浓度为 10%~12%,故选择 4 种磨料浓度,分别为 2%、4%、6% 和 8%,观察磨料浓度对动压力的影响。

图 2 为不同浓度下的动压力云图。从图 2 中可以看出,从入口到主干路内腔处,动压力最小,从进入交叉口处开始,动压力逐渐增大,即磨粒对小孔的磨削作用逐渐加大,磨粒流加工效果逐渐加强。

选取主干路型腔作为数据 1 区;交叉口处作为数据 2 区;将小孔内部分为 3 个数据区,记为:数据 3 区、数据 4 区和数据 5 区,通过数值模拟获得 5 个数据区域的湍流动压分布如表 1 所示。

分析表 1 中数据可知:①当磨粒粒径相同时,动压力按照由大到小排序为:数据 5 区、数据 4

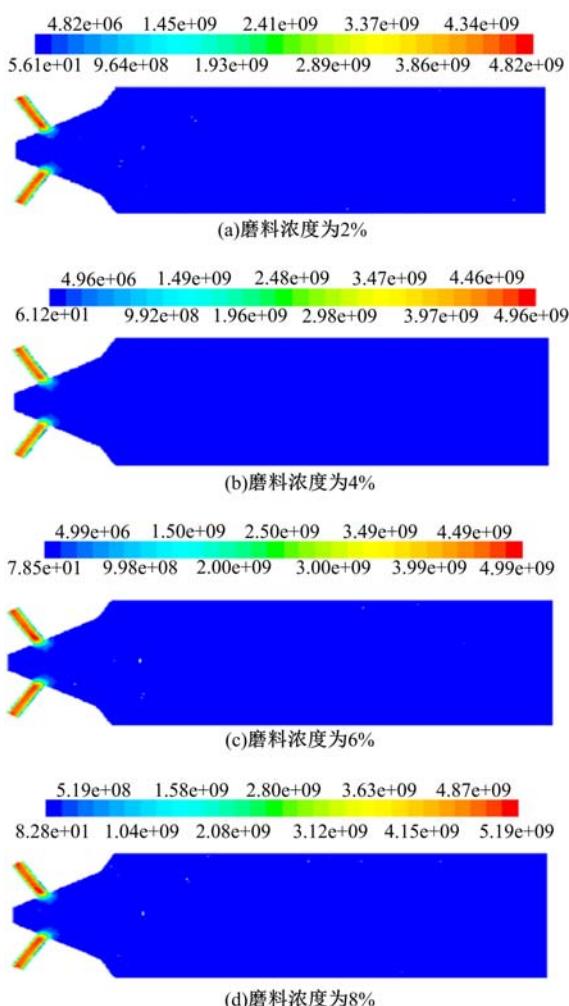


图2 不同磨料浓度下的动压力云图

Fig. 2 Dynamic pressure cloud images of different abrasive concentration

表1 不同磨料浓度下喷油嘴动压力分布

Table 1 Distribution of dynamic pressure of nozzle under different abrasive concentration

| 磨料浓度 /% | 动压力/(10 ³ MPa) | | | | |
|---------|---------------------------|------|------|------|------|
| | 数据1区 | 数据2区 | 数据3区 | 数据4区 | 数据5区 |
| 2 | 0.48 | 1.45 | 1.93 | 2.89 | 4.43 |
| 4 | 0.49 | 1.49 | 1.98 | 2.98 | 4.46 |
| 6 | 0.49 | 1.50 | 2.00 | 3.00 | 4.49 |
| 8 | 0.51 | 1.50 | 2.08 | 3.12 | 4.67 |

区、数据3区、数据2区、数据1区,即随着磨粒流对喷油嘴工件加工的进行,在主干路型腔处的动压力最小,从交叉口处开始动压力逐渐增大,此时磨粒对交叉口有磨削趋势,即对交叉孔有倒圆角作用;在喷油嘴入口处、中段、出口小孔处动压力继续增大,在喷油嘴出口小孔处的磨粒运动较为激烈,对喷油嘴小孔内壁的研抛作用更激烈。

②随着磨粒粒径的逐渐增大,5个数据区的动压力都呈现递增趋势,这是由于磨料浓度增大,磨料与喷油嘴工件内表面接触表面积增大,与内壁壁面的磨削也增强,从而提高了磨粒流对喷油嘴小孔的加工质量。

1.2 磨料浓度对湍流动能的影响

由于能量的变化能够说明加工效果的显著性,因此将湍流动能的变化进行重点分析,不同磨料浓度下的湍流动能云图如图3所示。

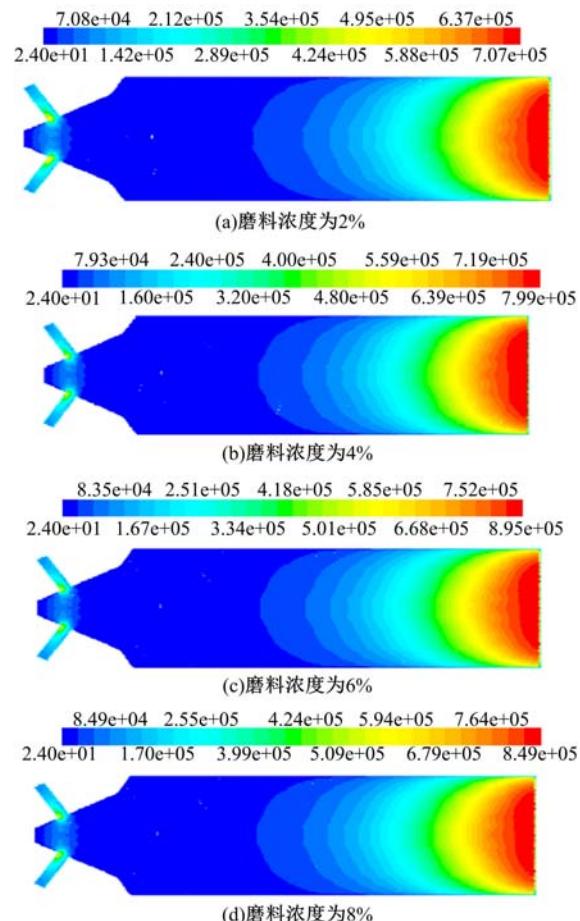


图3 不同磨料浓度下湍流动能云图

Fig. 3 Cloud image of turbulent flow under different abrasive concentration

从图3可以看出,喷油嘴入口处的湍流动能最大,随后开始减弱,在进入主干路前端后,湍流动能达到最小。这是由于在整个磨粒流动加工过程中,随着磨粒对壁面磨削作用的进行,磨粒能量降低,磨粒能量由初始动能转化为磨削力的功和内能,湍流动能在喷油嘴内壁四周最先开始减小,中心处随后减小,呈现抛物线状形式。从磨粒流进入小孔处开始,由于横截面瞬时减小,湍流动能增大,进入小孔的磨粒对磨削壁面做功,湍流动能

减小。

设主干路入口处为数据 1 区,入口前端为数据 2 区,中间型腔为数据 3 区;小孔交叉口为数据 1 区、中段为数据 2 区、出口为数据 3 区,不同浓度下的喷油嘴湍流动能分布如表 2 所示。

表 2 不同磨料浓度下喷油嘴湍流动能分布

Table 2 Distribution of turbulent kinetic energy of nozzle under different abrasive concentration

| 磨料 浓度 /% | 湍流动能/ $[10^5(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2})]$ | | | | | |
|----------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 主干路径区 | | | 小孔径区 | | |
| | 数据 1 区 | 数据 2 区 | 数据 3 区 | 数据 1 区 | 数据 2 区 | 数据 3 区 |
| 2 | 7.07 | 4.95 | 1.42 | 4.24 | 2.12 | 0.71 |
| 4 | 7.99 | 5.59 | 1.60 | 4.80 | 2.40 | 0.79 |
| 6 | 8.35 | 5.85 | 1.67 | 5.01 | 2.51 | 0.83 |
| 8 | 8.49 | 5.94 | 1.70 | 5.09 | 2.55 | 0.84 |

分析表 2 中数据可知:①磨料浓度相同时,主干路径区域的湍流动能按照从大到小排序为:数据 1 区、数据 2 区、数据 3 区,而能量在每一区域都有损耗;在小孔径区域,以磨料浓度为 6% 为例,湍流动能最初为 $4.24 \text{ m}^2/\text{s}^2$,到小孔中段时,下降到 $2.12 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、在出口处下降到 $0.71 \text{ m}^2/\text{s}^2$,整个下降过程有能量损耗,能量转化为磨粒磨削工件的功;②随着磨料浓度的不断增大,各数据区的湍流动能呈增大趋势,说明磨料浓度的变化会影响湍流动能的变化,选择适当增大磨料浓度,可以提高湍流动能,从而增强颗粒的磨削效果。

1.3 磨料浓度对密度场的影响

由于不同磨料浓度会导致密度场的变化较明显,因此分析密度场同样很重要。不同磨料浓度下的密度场云图如图 4 所示。

分析图 4 可知:喷油嘴入口处的密度比较大,随着磨粒流加工的进行,在主干路进入小孔的交叉孔处密度变小,这说明在磨粒流加工过程中,磨粒对壁面的磨削作用减弱,密度随之减小。

为了分析磨料浓度对主干路磨削质量的影响,这里选取主干路前段、尖端部分区域及小孔部分区域作为分析区域。设定喷油嘴主干路部分有 3 个数据分析区域,从主干路中心处向四周分别记为数据 1 区、数据 2 区和数据 3 区;喷油嘴小孔部分也为 3 个数据区域,交叉口处记为数据 1 区、小孔中段记为数据 2 区、小孔出口处记为数据 3 区,不同浓度下的喷油嘴密度场分布如表 3 所示。

分析表 3 数据可知:①当磨料浓度相同时,主

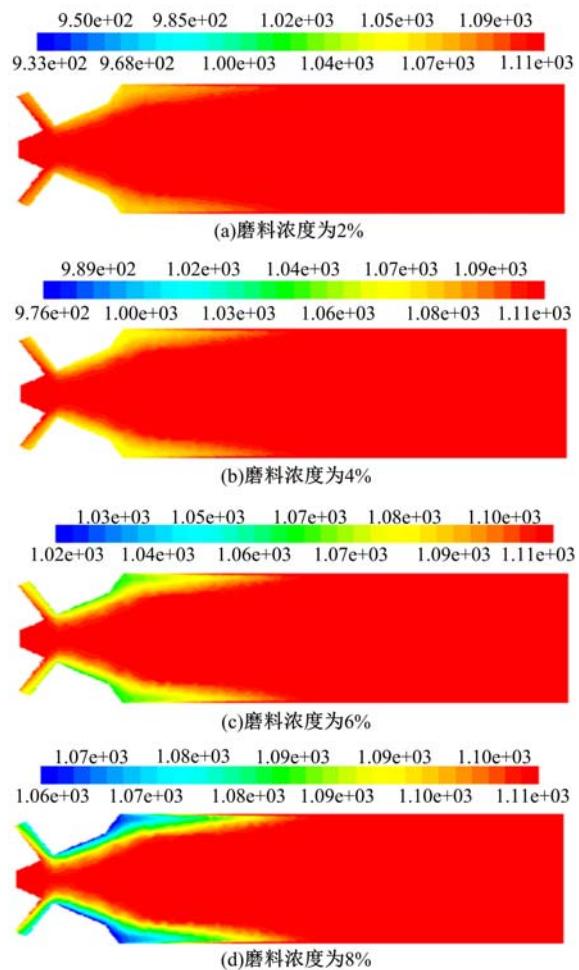


图 4 不同磨料浓度下密度场云图

Fig. 4 Density field of different abrasive density

表 3 不同磨料浓度下喷油嘴密度场分布

Table 3 Distribution of density field of nozzle under different abrasive density

| 磨料 浓度 /% | 密度场/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | | | | | |
|----------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 主干路径区 | | | 小孔径区 | | |
| | 数据 1 区 | 数据 2 区 | 数据 3 区 | 数据 1 区 | 数据 2 区 | 数据 3 区 |
| 2 | 1.07 | 1.04 | 0.95 | 1.09 | 1.05 | 1.02 |
| 4 | 1.08 | 1.05 | 0.98 | 1.09 | 1.07 | 1.04 |
| 6 | 1.09 | 1.07 | 1.03 | 1.10 | 1.08 | 1.06 |
| 8 | 1.10 | 1.09 | 1.07 | 1.10 | 1.09 | 1.08 |

干路区域的密度场按照从大到小排序为:数据 1 区、数据 2 区、数据 3 区,说明磨料集中于主干路中心部位区域,向周围区域分散的磨料较少,对主干路内壁的磨削力减弱;在小孔区域的密度场按照从大到小排序为:数据 1 区、数据 2 区、数据 3 区,说明在小孔交叉口处磨料密度大,对交叉口处起到较好的磨削作用,在磨料进入小孔内后,磨粒

密度有所降低,磨粒磨削效果减弱。由此可知,若要达到喷油嘴磨粒流加工的预期指标,需要增大入口压力,使磨料密度均匀分散,使之达到理想的加工效果。②由于磨料浓度的不同,磨料分散密度也随之发生变化,随着磨料浓度的增大,各数据区域密度增大,在腔体和小孔内壁处接触的磨粒密度增大,增大浓度可以提高磨料分散程度,进而增强磨削效果。

2 磨料浓度对磨粒流加工质量影响的试验分析

根据仿真分析的结果进行磨料制备,选取相同的流体介质制备磨料浓度分别为2%、4%、6%和8%的固液两相磨粒流抛光液,并选取4组试验样件进行磨粒流加工试验,试验样件分别记作样件01#、样件02#、样件03#、样件04#。利用测量精度高、适合测量具有大倾角斜面的变焦非接触三维形貌测量设备对喷油嘴小孔部分进行三维图像扫描测试,结果如图5所示。

经过上述检测,得到样件01#、样件02#、样

件03#、样件04#的表面粗糙度值,如表4所示。

表4 表面粗糙度的检测结果

Table 4 Detection results of surface roughness μm

| 原件 | 样件01# | 样件02# | 样件03# | 样件04# |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1.986 | 0.882 | 0.813 | 0.724 | 0.646 |

由表4可知,原件的表面粗糙度为1.986 μm ,经过磨粒流加工后,样件01#、样件02#、样件03#、样件04#的表面粗糙度值逐渐降低;其中,样件04#的表面粗糙度值达到0.646 μm ,这表明随着磨料浓度的增大,工件表面粗糙度逐渐减小,与磨粒流加工数值仿真分析结果一致。在对比仿真与试验数据的基础上,再利用扫描电镜对喷油嘴小孔通道及交叉孔的表面形貌进行检测,结果如图6所示。

从图6可以看出,样件01#的交叉孔边缘四周较粗糙,毛刺较多;样件02#的交叉孔处加工效果较好,但仍留有少许毛刺,样件03#的四周逐渐趋于光滑,而样件04#的交叉孔处毛刺已全部去除,加工效果最好,喷油嘴小孔内表面形貌如图7所示。

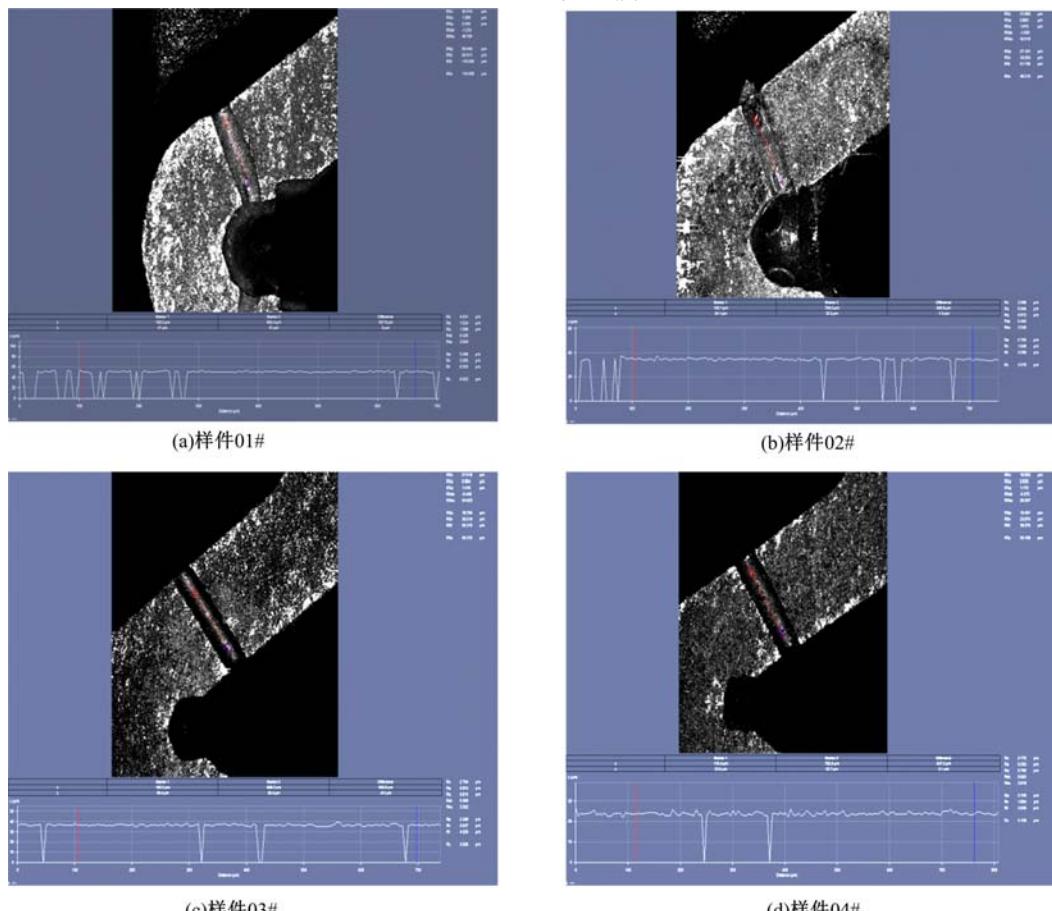
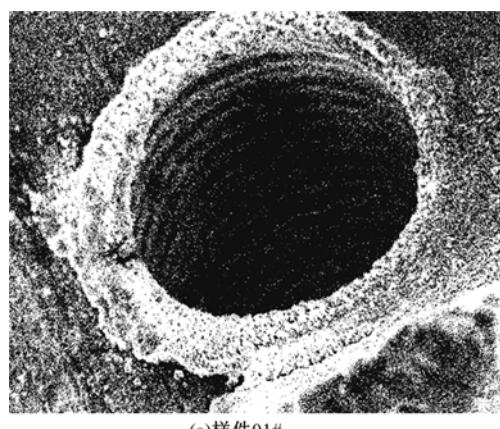
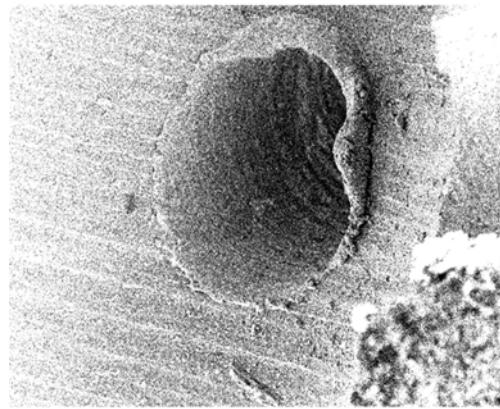


图5 四组样件的三维形貌检测结果

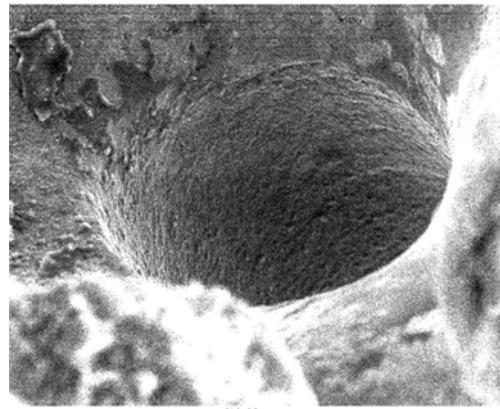
Fig. 5 3D detection results of four groups



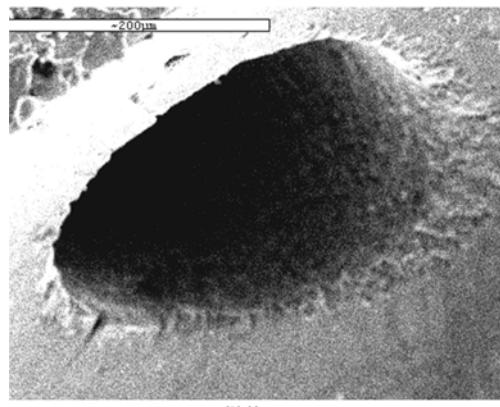
(a) 样件 01#



(b) 样件 02#



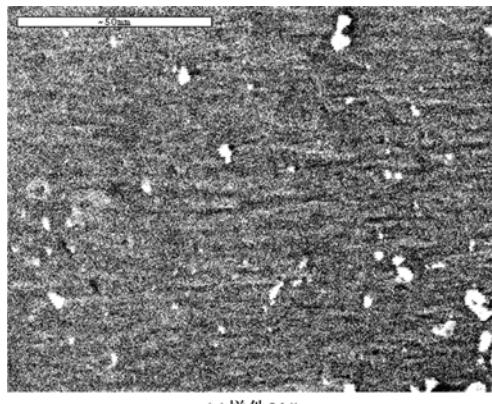
(c) 样件 03#



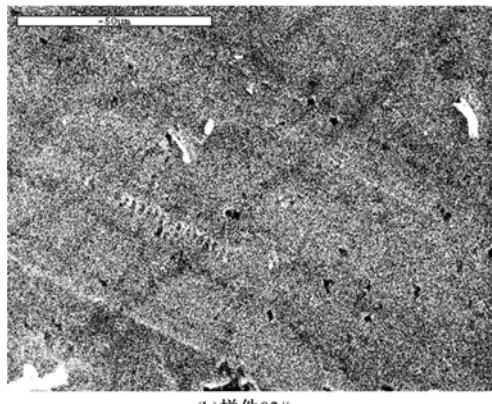
(d) 样件 04#

图 6 样件交叉孔处的扫描电镜图

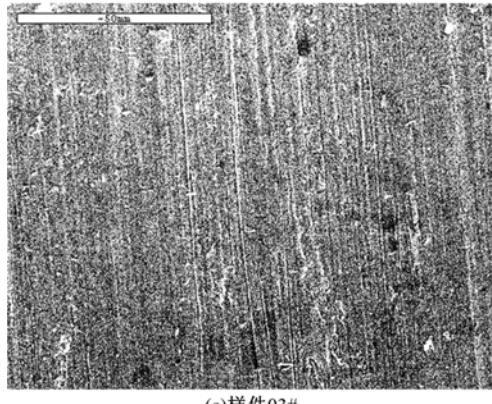
Fig. 6 SEM sample cross hole



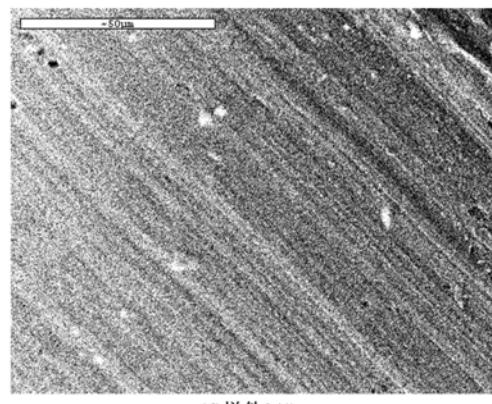
(a) 样件 01#



(b) 样件 02#



(c) 样件 03#



(d) 样件 04#

图 7 喷油嘴小孔内表面磨粒流加工内壁表面形貌

Fig. 7 Surface morphology of inner surface of abrasive flow inside nozzle orifice

通过观察磨粒流加工后的喷油嘴小孔表面形貌可知,随着磨料浓度的增大,工件表面粗糙度逐渐减小,小孔质量、工件使用性能和表面质量得到提升。

3 结 论

(1)通过对固液两相磨粒流加工喷油嘴内通道的过程进行仿真分析可知,介观尺度与宏观尺度及微观尺度磨粒流加工效果一致,即随着磨料浓度的增大,磨削效果增强。

(2)随着磨料浓度的增大,在磨粒流从喷油嘴入口至主干路腔体尾部处的动压力最小,当磨粒流流至交叉孔处,动压力由小变大;喷油嘴入口处的湍流动能最大,随后开始减小,在进入主干路前端时,湍流动能达到最小,小孔交叉口处湍流动能增大,磨料进入小孔后磨粒对小孔壁面磨削做功,湍流动能再次减小;喷油嘴入口处的密度比较大,随着磨粒流加工的进行,在主干路进入小孔的交叉处,周边磨料密度变小。

(3)通过对固液两相磨粒流进行加工试验可见,随着磨料浓度的增大,喷油嘴工件表面粗糙度减小,由 $1.986\text{ }\mu\text{m}$ 降低到 $0.646\text{ }\mu\text{m}$,喷油嘴内通道的表面质量有较大幅度的提升,交叉口处圆角逐渐圆润,小孔内表面逐渐光整,喷油嘴的喷射性能和雾化性能得到良好的改善。

参考文献:

- [1] 李俊烨,许颖,杨立峰,等. 非直线管零件的磨粒流加工实验研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(13): 1729-1734.
Li Jun-ye, Xu Ying, Yang Li-feng, et al. Research on abrasive flow machining experiments of non-linear tubes[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(13): 1729-1734.
- [2] Li Jun-ye, Liu Wei-na, Yang Li-feng, et al. Study of abrasive flow machining parameter optimization based on taguchi method[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2013, 10(12): 2949-2954.
- [3] 沈志煌,姚斌,陆如升,等. 精密螺杆转子齿廓成形磨削的误差分析[J]. 吉林大学学报:工学版, 2016, 46(3):831-838.
Shen Zhi-huang, Yao Bin, Lu Ru-sheng, et al. From grinding error analysis of precision screw rotor profile[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(3):831-838.
- [4] 丁金福,刘润之,张克华,等. 磨粒流精密光整加工的微切削机理[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3324-3331.
Ding Jin-fu, Liu Run-zhi, Zhang Ke-hua, et al. Micro cutting mechanism of abrasive flow precision machining[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12):3324-3331.
- [5] Venkatesh G, Sharma A K, Singh N. Simulation of media behaviour in vibration assisted abrasive flow machining[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2015, 51:1-13.
- [6] Wan S, Ang Y J, Sato T, et al. Process modeling and CFD simulation of two-way abrasive flow machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(5):1077-1086.
- [7] Abu-Nada E. Assessment of dissipative particle dynamics to simulate combined convection heat transfer: effect of compressibility[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2015, 61: 49-60.
- [8] 朱明哲. 纳米尺度接触和摩擦的分子动力学及多尺度模拟研究[D]. 北京:清华大学机械工程学院, 2010.
Zhu Ming-zhe. Molecular dynamics and multiscale simulation of contact and friction on the nanoscale [D]. Beijing: School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, 2010.
- [9] 陈硕,赵钧,范西俊,等. 复杂流体流动的耗散粒子动力学研究进展[J]. 科技通报, 2006, 22(5):596-602.
Chen Shuo, Zhao Jun, Fan Xi-jun, et al. Research advances in the study of complex fluid flows by dissipative particle dynamics[J]. Bulletin of Science and Technology, 2006, 22(5):596-602.
- [10] Larentzos J P, Brennan J K, Moore J D, et al. Parallel implementation of isothermal and isoenergetic dissipative particle dynamics using shardlow-like splitting algorithms[J]. Computer Physics Communications, 2014, 185(7):1987-1998.
- [11] Goicochea A G, Altamirano M A B, Hernández J D, et al. The role of the dissipative and random forces in the calculation of the pressure of simple fluids with dissipative particle dynamics[DB/OL]. [2016-03-19]. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1411/1411.1798.pdf>.