

基于 Fluent 的喷油嘴倒锥孔磨粒流加工数值模拟

刘江^{a,b},黄晓斌^{a,b},何吕^{a,b},唐志雄^{a,b}

(中北大学 a. 机械工程学院; b. 山西省深孔加工工程技术研究中心,山西 太原 030051)

摘要:针对发动机喷油嘴零件内腔表面质量差和加工效率低下的问题,对发动机喷油嘴倒锥孔的磨粒流加工工艺参数进行研究。利用流体力学软件 Fluent 模拟不同磨粒流压力、浓度等工艺参数下,喷油嘴倒锥孔内流道的稳态压强、湍动能分布及速度分布情况。结果表明,要想获得较理想的内表面质量,应适当增加入口压力并选取黏度较低的磨粒流液相介质。模拟结果为磨粒流加工参数的优化提供了理论依据。

关键词:喷油嘴;倒锥孔;磨粒流;数值模拟

中图分类号:TH164

文献标志码:A

文章编号:1671-5276(2021)02-0040-03

Numerical Simulation of Nozzle Inverted-hole Abrasive Flow Machining Based on Fluent

LIU Jiang^{a,b}, HUANG Xiaobin^{a,b}, HE Lyu^{a,b}, TANG Zhixiong^{a,b}

(a. School of Mechanical Engineering; b. Shanxi Deep Hole Processing Engineering Technology Research Center, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To improve the poor surface quality and low processing efficiency of the internal cavity of the engine fuel injection nozzle parts, the process parameters of the abrasive particle flow processing of the inverted-hole of the engine fuel injection nozzle were studied. The fluid dynamics software Fluent was used to simulate the steady-state pressure, turbulent kinetic energy distribution and velocity distribution of the flow channel in the inverted-hole of the nozzle under different process parameters such as pressure and concentration of abrasive flow. The results show that appropriate increasing inlet pressure and selecting the liquid medium of abrasive flow with lower viscosity can obtain more ideal inner surface quality. The simulation results provides sound theoretical basis for the optimization of abrasive flow processing parameters.

Keywords: nozzle; inverted-hole; abrasive flow; numerical simulation

0 引言

在发动机供油系统中,喷油嘴微小孔的加工质量直接影响发动机的燃油性能^[1]。随着全球气候日益严峻,喷油嘴的生产加工也越来越严格^[2]。新型改进的喷油嘴喷孔呈由内至外不断变小的倒锥形结构,这种设计结构对于喷油嘴的流量系数和雾化效果有非常显著的提升。目前,磨粒流加工因其较好的仿形效果,现已成为工业生产中关键零部件的主要加工方法^[3]。因此,本文采用 Fluent 软件模拟喷油嘴内部磨粒流加工过程,为倒锥孔磨粒流加工及参数优化打下基础。

1 磨粒流加工机理

磨粒流加工(AFM)技术是一种以固-液两相介质混合而成的油性磨料,在密闭磨料缸中,油性液相介质裹挟着磨粒从喷油嘴内壁滑过,实现工件表面光整加工^[4]。在抛光过程中,磨粒抛光角度与喷油嘴内表面的接触方式为随机分布,以微量切削方式实现表面抛光^[5]。与传统

减材制造相比,其表面材料去除率大幅降低,零件内部保持相对平衡的内应力,不会留下残余应力。

2 磨粒流湍流数学模型

假设流体和固体颗粒空间分布无空隙,流动过程满足时间和空间上的连续性。标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型由 LAUNDER B E 和 SPALDING D B^[6] 提出,在标准 $k-\varepsilon$ 模型中,湍动能 k 和耗散率 ε 对应的运输方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中: t 为时间; ρ 为流体平均密度; G_k 和 G_b 均为湍动能 k 的产生项,分别由平均速度梯度和浮力引起; Y_M 代表可压湍流中脉动扩张的贡献; $G_{1\varepsilon}$ 、 $G_{2\varepsilon}$ 和 $G_{3\varepsilon}$ 为模型系数; σ_k

基金项目:中北大学自然科学研究基金资助项目(XJJ2016002)

第一作者简介:刘江(1996—),男,山西长治人,硕士研究生,研究方向为深孔加工、特种加工。

和 σ_ε 为 Prandtl 数; S_k 和 S_ε 是工况定义的源项。

G_k 由下式计算:

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

本文假设流体不可压缩,则 $G_b = 0$, $Y_M = 0$ 。在标准 $k - \varepsilon$ 模型中,模型系数 $G_{1\varepsilon}$ 、 $G_{2\varepsilon}$ 、 $G_{3\varepsilon}$ 、 σ_k 、 σ_ε 分别为:

$$G_{1\varepsilon} = 1.44, G_{2\varepsilon} = 1.92, G_{3\varepsilon} = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (4)$$

由以上分析,标准 $k - \varepsilon$ 方程简化为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

式(5)、式(6)中的 G_k 按式(3)计算,其展开式为:

$$G_k = \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

3 喷油嘴倒锥孔仿真模拟

选用的磨粒流是由二甲基硅油和碳化硅颗粒按照 7:3 的比例制成。其中,二甲基硅油充当黏弹性体的软磨介质,运动黏度范围为 1.5~8.0 mm²/s,密度为 0.79 g/cm³;碳化硅为磨料,密度为 3.25 g/cm³。根据企业提供的数据,采用三维软件 Pro/E 构建零件内流道模型,如图 1 所示。将三维模型的 igs 文件导入 ANSYS Workbench 中进行四面体划分网格,如图 2 所示。

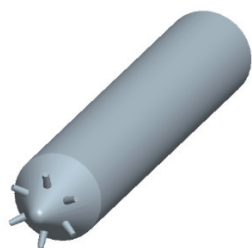


图 1 喷油嘴内流道三维模型

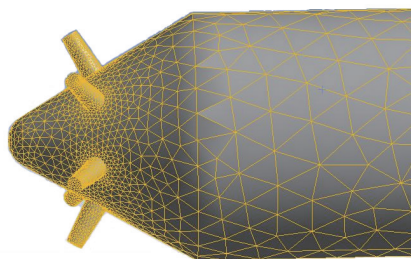


图 2 喷油嘴内流道网格模型

本计算考虑重力的影响,Gravity 中修改 y 方向重力加

速度为 -9.81 m/s²;设置入口 (pressure-inlet) 和出口 (pressure-outlet) 边界条件,其余边界定义为 wall。

3.1 稳态压强分析

利用 Fluent 模拟不同进口压力下喷油孔磨粒流动情况,得到如图 3 所示的在 $Z=0$ 截面上的稳态压强图。通过观察可以看出,主流道内压强整体保持不变,而在喷孔处由内至外压强呈递减趋势,故流道表面去除率沿出口方向递减,更易加工倒锥孔与过渡圆角,有利于提高喷油嘴的雾化特性。随着进口压力的增大,流道内压力差增大,材料表面去除率不断增强。

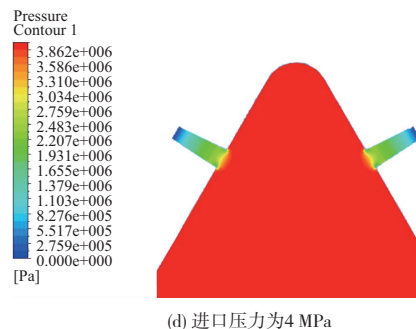
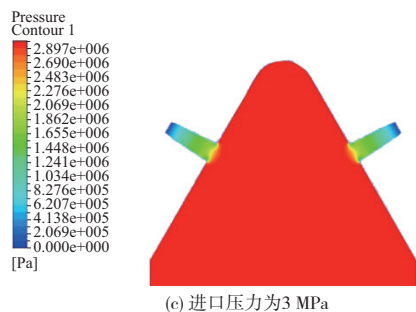
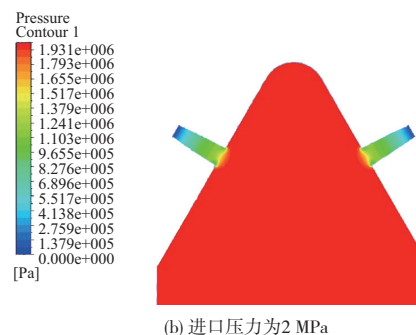
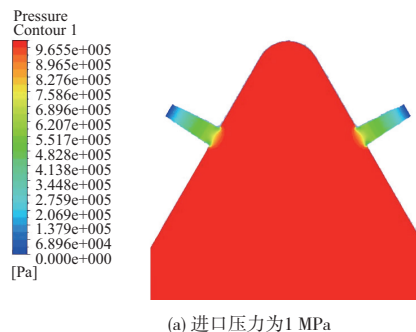
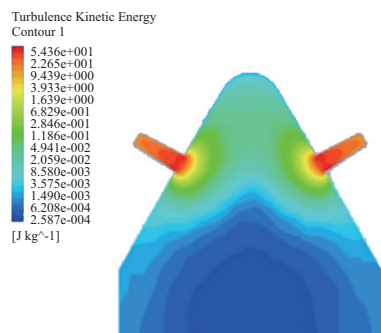


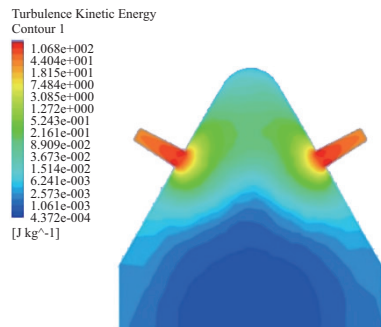
图 3 不同进口压力下的稳态压强图

3.2 湍动能分析

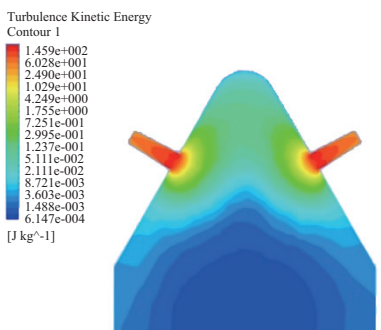
湍动能是湍流强度的度量,是流动稳定性的衡量标准。图 4 所示的是在 $Z=0$ 截面上的湍动能分布图。磨粒流介质中湍动能越大,碳化硅颗粒运动越剧烈,其加工效果越好。从图 4 可以看出,湍动能较大的区域主要集中在喷孔处,因此此处磨削性能更强,加工效率也更高,在喷孔处可获得更符合加工指标的表面质量。



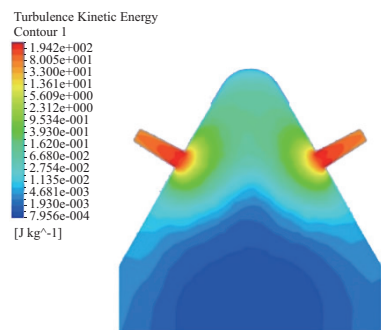
(a) 进口压力为 1 MPa



(b) 进口压力为 2 MPa



(c) 进口压力为 3 MPa



(d) 进口压力为 4 MPa

图 4 不同进口压力下湍动能分布图

3.3 压力与速度关系分析

经过多组不同数据模拟,获得了如图 5 所示的不同进口压力下速度分布曲线图。由图可知,在介质运动黏度保持为 $1.72 \text{ mm}^2/\text{s}$ 的条件下,随着压力的增大,喷油孔处的速度增大,边界磨粒流与加工表面之间的速度差增大,流道表面材料去除量增大,加工效率增强。因此,若要提高磨粒流加工速度,可以采取提高进口压力的措施。

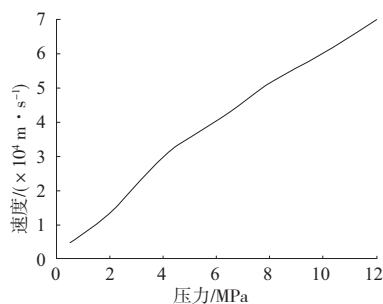


图 5 压力与速度曲线图

3.4 黏度与速度关系分析

物体在流体中运动时会受其黏度的作用,影响其运动速度。为探究磨粒流的黏度对碳化硅颗粒运动的影响规律,在保持压力相同的情况下,选用不同黏度的二甲基硅油进行模拟。图 6 为多次模拟得到的速度与黏度的关系曲线。

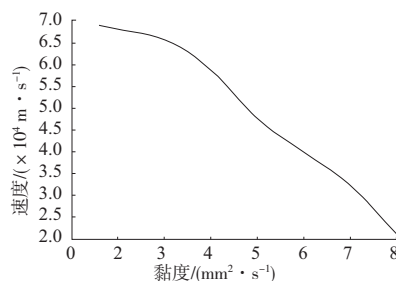


图 6 液相运动黏度与速度曲线图

从图 6 可以看出,液相黏度对颗粒运动速度有很大影响。磨粒流液相运动黏度增大,颗粒运动速度将减小,加工性能和效率显著减弱。因此,在进行喷油嘴抛光时,特别是针对微小孔的加工,应选择较低黏度的液相介质,从而获得较快的加工速度。

4 结语

1) 根据喷油嘴零件构建仿真模型,以磨粒流加工原理为基础,采用 Fluent 软件对加工过程进行仿真。从仿真结果可看出,进口压力不同,流道内压力差不同,磨粒流速度也不同,且压力和速度呈正相关。随着进口压力的不断增大,材料去除率和磨削性能增强,易于加工倒锥孔和过渡圆角;

(下转第 50 页)

表4 转子轴承刚度对临界转速的影响

轴承刚度/ (N/mm)	一阶临 界转速/ (r/min)	避开 裕度/%	二阶临 界转速/ (r/min)	避开 裕度/%	三阶临 界转速/ (r/min)	避开 裕度/%
3 000	17 352	42.16	20 847	30.51	116 150	36.65
6 000	24 432	18.56	29 379	2.07	116 400	36.94
9 000	29 790	0.70	35 855	转速 范围内	116 680	37.27
12 000	34 242	转速 范围内	41 250	转速 范围内	116 960	37.60

由表4可以看出,随着轴承支承刚度的增大,各阶转子临界转速均有所提高,三阶临界转速数值变化相对较小。一阶临界转速的避开裕度随着轴承刚度的增加而降低,当轴承刚度为12 000 N/mm时,一阶临界转速落入转子的转速范围内,但其对转子额定转速60 000 r/min的避开裕度为42.93%。在转子提速过程中应注意规避临界转速,快速到达额定转速即可平稳运行。二阶临界转速在轴承刚度为9 000 N/mm时即落入转子的转速范围内,轴承刚度为9 000 N/mm和12 000 N/mm时,二阶临界转速对转子额定转速的避开裕度分别为40.24%和31.25%,均>20%。三阶临界转速的避开裕度随着轴承刚度的增加而增大。

4 结语

1) 轴承刚性支承时的前两阶临界转速要远高于轴承弹性支承时相对对应阶数的临界转速值。

2) 通过对转子系统进行模态分析可以得到转子的各阶振型、固有频率和临界转速,计算可得出不同工况下临界转速对转子转速的避开裕度,选择轴承时要确保避开裕度>20%。

3) 转子系统的临界转速会随着轴承刚度系数的增大而增大。

4) 高速转子通常需进行动平衡试验,但实现高速运转成本高,所以在试验中一般不会达到转子的实际最高运转速度。通过试验台上较低转速的试验来验证有限元模型仿真结果的准确性,再依据有限元仿真结果来估计高阶的临界转速,避免转子在实际运转过程中产生共振。因此有限元模型的仿真结果对实际工作具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 黄梓娜, 韩邦成, 周银锋. 非线性接触下磁悬浮电机柔性转子系统模态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2438-2444.
- [2] 彭卓凯, 熊飞, 李罡, 等. 混合动力汽车电机转子动力学分析[J]. 微特电机, 2019, 47(3): 18-21.
- [3] CHEN S Y, KUNG C, LIAO T T, et al. Dynamic effects of the interference fit of motor rotor on the stiffness of a high speed rotating shaft[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2010, 34(2): 243-261.
- [4] GERADA D, MEBARKI A, BROWN N L, et al. High-speed electrical machines: technologies, trends, and developments[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6): 2946-2959.
- [5] 李争, 陈秋萌, 王群京. 多自由度永磁同步电机转子动力学特性分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2269-2276.
- [6] 张凤阁, 杜光辉, 王天煜, 等. 高速电机发展与设计综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 1-18.
- [7] FRISWELL M I, PENNY J E T, GARVEY S D, et al. Dynamics of rotating machines[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [8] 路振勇, 陈予恕, 李洪亮, 等. 航空发动机转子系统动力学模型的可逆简化方法[J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 57-64.
- [9] KOLONDOZSKI Z, SALLINEN P, BELAHCEM A, et al. Rotordynamic analysis of different rotor structures for high-speed permanent-magnet electrical machines[J]. IET Electric Power Applications, 2010, 4(7): 516-524.

收稿日期: 2020-07-09

(上接第42页)

2) 从仿真结果可以看出,通过改变介质的运动黏度也可以获得不同的磨料介质的运动速度。在入口压力相同的情况下,选取较小黏度的磨粒流介质,可显著增强加工效率;

3) 通过分析不同参数条件下的稳态压强、磨粒流动能和速度分布可知,要想获得较理想的表面质量,可适当增加入口压力并选取黏度较低的磨粒流液相介质;

4) 通过喷油嘴倒锥孔磨粒流仿真模拟,为喷油嘴倒锥孔加工的参数优化打下基础。

参考文献:

- [1] 李俊焯, 刘薇娜, 杨立峰, 等. 喷油嘴微小孔磨粒流加工特性的数值模拟[J]. 煤矿机械, 2010, 31(10): 56-58.

[2] 刘华, 乔娜, 郑伟. 喷油嘴倒锥孔超快激光加工工艺研究[J]. 金属加工(热加工), 2018(3): 5-9.

[3] 郝立华, 吴鸣宇. 难加工航空发动机叶轮叶片抛光技术及其发展现状[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(6): 54-56.

[4] 唐永亮, 张红芹, 李伟家, 等. 深孔钻表面磨粒流抛光精化工艺与应用[J]. 工具技术, 2019, 53(8): 93-97.

[5] 张利, 黄一, 陈国达, 等. 钛合金曲面磨粒流加工扰流道仿真与试验研究[J]. 中国机械工程, 2019, 30(5): 519-527.

[6] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2): 269-289.

收稿日期: 2020-06-09