

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.05.006

基于大涡数值模拟的磨粒流流场仿真分析^{*}

尹延路¹, 滕 琦², 李俊烨^{1*}, 张心明¹, 董 坤¹, 周立宾¹

(1. 长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 东北林业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:针对磨粒流在非直线管类零件中磨削效果受速度影响及磨削不均匀的问题,应用流体力学软件 Fluent,采用 Eulerian-Eulerian (欧拉—欧拉)固—液两相流大涡模拟湍流模型与 SIMPLE 算法,对不同入口速度条件下 U 型管内磨粒流的流动状态进行了数值模拟研究。对比分析了 6 种不同速度入口条件下的静态压强、壁面剪切力以及湍流粘度的分布,并分析了入口条件不变情况下的速度分布矢量图和 U 型管不同位置的速度分布截面图。研究结果表明,增大磨粒流的入口速度有利于提高其对 U 型管内表面的磨削效果,且在 U 型管的入口段部分磨削效果较均匀,在弯管部分的 0°~30°截面间对内侧壁面的磨削效果要好于外侧壁面,在弯管部分的 60°~180°截面间以及在出口段部分,对外侧壁面的磨削效果要好于内侧壁面。

关键词:磨粒流; U 型管; Eulerian—Eulerian; 大涡数值模拟

中图分类号:TH16;TG580.63

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)05-0537-05

Simulated analysis based on large eddy numerical simulation for abrasive flow field

YIN Yan-lu¹, TENG Qi², LI Jun-ye¹, ZHANG Xin-ming¹, DONG Kun¹, ZHOU Li-bin¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Aiming at investigating the effect of velocity on grinding results and the problem of non-uniform grind in nonlinear-tube component, the fluid dynamics software Fluent was applied with building the Eulerian-Eulerian mathematic model solid-liquid the phase flow of large eddy simulation and choosing simple arithmetic to research on the numerically simulate under flow condition of abrasive flow with different entrance velocity in U tube. The distribution maps of static pression, boundary stress and turbulence viscosity in six different entrance velocity were compared and the velocity distribution vector diagram was analyzed with same entrance conditions and velocity distribution sectional view in different location of U tube. The results indicate that increasing entrance velocity is beneficial to improve abrasive flow machining efficiency on the internal surface of U tube. Especially, the grinding results of entrance are more uniform; the cross section from 0° to 30° in bend region of internal surface is better than external surface and from 60° to 180° is opposite; exit section of external surface is better than internal surface.

Key words: abrasive flow; U tube; Eulerian-Eulerian; large eddy simulation

0 引言

U 型管等非直线管广泛应用于各个领域,是制造

业产品中必不可少的一部分,其内表面质量的优劣对零件的使用性能、寿命、可靠性等有很大的影响^[1-2]。而由于非直线管内部通道结构较复杂,研究

收稿日期:2015-12-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51206011);吉林省科技发展计划资助项目(20130522186JH,20160101270JC)

作者简介:尹延路(1990-),男,山东聊城人,硕士研究生,主要从事精密、超精密方面的研究. E-mail: 760629141@qq.com

通信联系人:李俊烨,男,博士,副教授. E-mail: ljy@cust.edu.cn; fstving@126.com

人员难以使用传统的抛光研磨工具对其进行磨削加工^[2-3]。磨粒流加工技术的出现,成功地解决了这一难题^[4]。

磨粒流加工技术主要是应用磨料中的磨粒来作为切削刀具,通过其尖锐的棱角反复切削工件表面,从而达到对工件表面的抛光和去毛刺的效果^[5]。松散磨粒与具有一定粘度的液体混合,可构成固液两相磨粒流,磨粒流的流体特性使其具有无孔不入的加工特点,是进行结构化表面光整加工的有效工具^[6]。

在磨粒流加工过程中,磨粒所产生的切削效果主要受压力、磨粒流液体相的黏度及其流速、被加工通道的几何参数以及磨粒形状尺寸等诸多因素的影响^[7]。由于影响磨粒流加工效果的因素比较多,对其加工机理的研究也就比较困难。近年来由于相关流体力学软件的发展,使得研究者通过计算机便可以实现对各种流体流动的计算分析,而且由于计算机软件界面的可视化,使得计算结果的显示变得更加直观形象,分析也更加方便。

磨粒流抛光的介质为固液两相流,固液两相流是一种复杂的湍流运动形式,现有的湍流数值计算方法大致分为:雷诺时均方程法(RANS)、直接模拟法(DNS)和大涡模拟法(LES)3类^[8-9]。大涡模拟能够较准确地描述弯管内的流动情况,且能够较好的模拟出弯管各个断面上的二次流动情况^[10]。因此可以应用大涡模拟的方法来模拟分析磨粒流的研磨抛光过程。

湍流运动可看做是各种不同尺度的涡流重叠在一起的流动。其中的大尺度涡成分主要支配湍流的动力学特性,而小尺度涡主要起耗散作用^[11]。湍流的能量主要聚集在大尺度的涡中,同时大尺度涡依赖于流场的形状、边界条件,具有明显的各向异性。而小尺度涡通过大尺度涡间的非线性相互作用而间接产生,对平均流的作用很少,更接近各向同性^[12]。大涡模拟法的基本思路就是:通过滤波函数把湍流运动分成大尺度和小尺度两部分运动,用瞬时的 N-S 方程来直接模拟湍流中的大尺度涡,而小尺度涡对大大尺度涡以及整个流场的影响则通过建立亚格子模型来求解^[13-15]。

本研究对 U 型管内磨粒流的流动状态进行数据模拟研究。

1 大涡模拟控制方程

不可压缩均匀湍流的基本方程为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

对式(1)求散度,并利用式(2),可得脉动压强满足的泊松方程为:

$$\Delta p = -\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = -\rho \frac{\partial^2 u_i u_j}{\partial x_i \partial x_j} \quad (3)$$

滤波后,不可压缩湍流状态下的纳维-斯托克斯(N-S)方程为:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\text{令: } \overline{u_i u_j} = \bar{u}_i \bar{u}_j + (\bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j)$$

则式(4)可写作:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} \quad (6)$$

亚格子应力方程:

式(4)的右端含有不封闭项,即:

$$\bar{\tau}_{ij} = (\bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad (7)$$

式中: $\bar{\tau}_{ij}$ —亚格子应力。

2 几何模型与网格划分

本研究中所选用的 U 型管其出、入口直径均为 4 mm。网格划分采用六面体网格。为了能够较准确地描述分析在 U 型管不同位置处的流动特性,笔者将 U 型管模型划分为入口段部分、出口段部分以及弯管部分。并将弯管部分划分为 0° 30° 60° 90° 120° 150° 180°, 5 个截面部分。

U 型管划分示意图如图 1 所示。

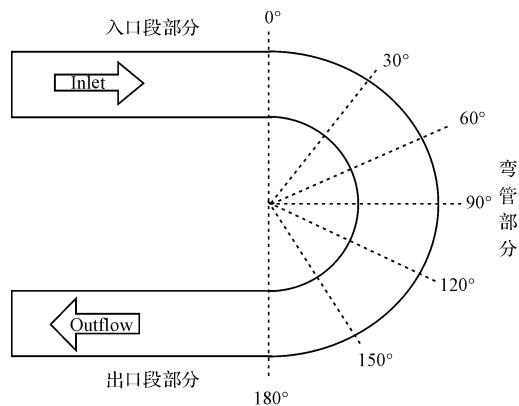


图 1 U 型管模型划分示意图

3 计算参数及边界条件

本研究选用 Eulerian-Eulerian 两相流数学模型,材料设置中液体相选用 32 号液压油其 40 ℃时的运动粘度为 32 mm²/s,颗粒相选用碳化硅颗粒,并将颗粒相视为拟流体,颗粒相与液体相假定为相互贯穿的连续介质。

为获得较好的计算结果,笔者使用三维双精度求解器;并选用压力耦合方程的 SIMPLE 算法对控制方程进行求解计算。SIMPLE 数值计算的稳定性比较高,是不可压缩流场求解中应用较多的算法。空间离散化采用 1 次精度迎风格式。

亚格子应力封闭模型的构建是大涡数值模拟成功的关键,本研究采用标准 Smagorinsky 模型作为大涡模拟的亚格子尺度应力封闭模型。边界条件分别选用 Velocity Inlet (速度进口条件)和 Outflow(自由出口条件)。选用不同的入口速度对磨粒流流过 U 型管三维通道进行数值模拟,入口速度分别取 35 m/s、40 m/s、45 m/s、50 m/s、55 m/s、60 m/s。

根据雷诺数方程:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

(8)

当 $Re > 4\ 000$ 时,流体的流动状态为湍流状态。入口速度为 35 m/s 时的雷诺数为 4 375,满足湍流条件。

4 计算结果及分析

在数值模拟过程中,假定磨粒与液体相分别满足动量守恒和能量守恒方程,且磨粒与液体相具有相同的初始速度。为了能够较准确地分析研究磨粒流加工流场特性,现笔者选取 XOY 平面上的仿真结果进行显示分析。计算结束后不同初始速度条件下的静态压强如图 2 所示。

从图 2 的静态压强分布图可以看出,磨粒流在刚进入 U 型管时压强较大,随着向 U 型管内部的流动逐渐出现衰减。这是因为磨粒流在流动过程中与 U 型管的内表面产生摩擦而使得磨粒流的流动速度逐渐降低。在弯管部分压强变化较明显,且在 0°~60°截面间的外侧壁面处压强明显变大,这是磨粒流进入弯曲段时与外壁面产生垂直碰撞所引起的结果。在 90°~180°截面间外侧壁面处的压强同样要大于内侧壁面,这主要是由于磨粒流在该阶段内受离心力作用的影响而偏向弯管的外侧面流动,从而使磨粒流与弯管外侧

壁面的碰撞要强于与弯管内壁面的碰撞。

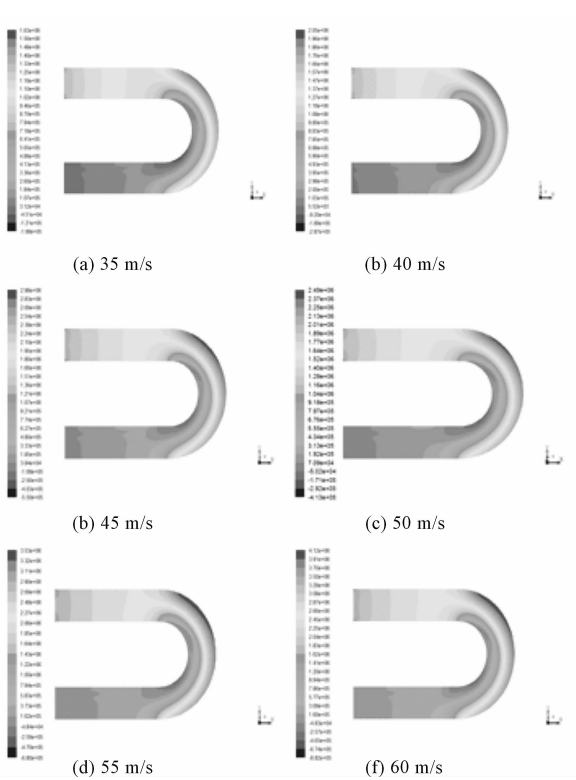


图2 不同初始速度条件下的静态压强

随着初始速度的增加,U 型管内的静态压强也明显变大,这说明增大初始速度有利于对 U 型管内部的磨削。

不同初始建设条件下的壁面剪切应力如图 3 所示。

从图 3 的壁面剪切应力分布图可以看出,磨粒流在入口处时对 U 型管的壁面剪切应力最大,且在入口段部分壁面剪切应力呈梯度递减,这是由于磨粒流在流动过程中速度逐渐下降而使得磨粒流与壁面间的切应力减小。在弯管部分壁面剪切应力增大,且外侧壁面的壁面剪切应力要大于内侧壁面,这是由于磨粒流进入弯曲段产生了离心与涡流,使得其在外侧壁面附近的湍流强度要高于内侧壁面附近的湍流强度。在出口段部分的同一截面上 U 型管外侧壁面的壁面剪切应力同样也大于内侧壁面,这是由于出口段磨粒流的流动状态受到弯管段内磨粒流流动状态的影响使得外侧壁面附近的湍流强度仍高于内侧壁面附近的湍流强度。

比较不同初始速度条下的壁面剪切应力分布,可以看出,随着磨粒流初始速度的增加壁面剪切应力也随之增大。

不同初始建设条件下的湍流速度如图 4 所示。

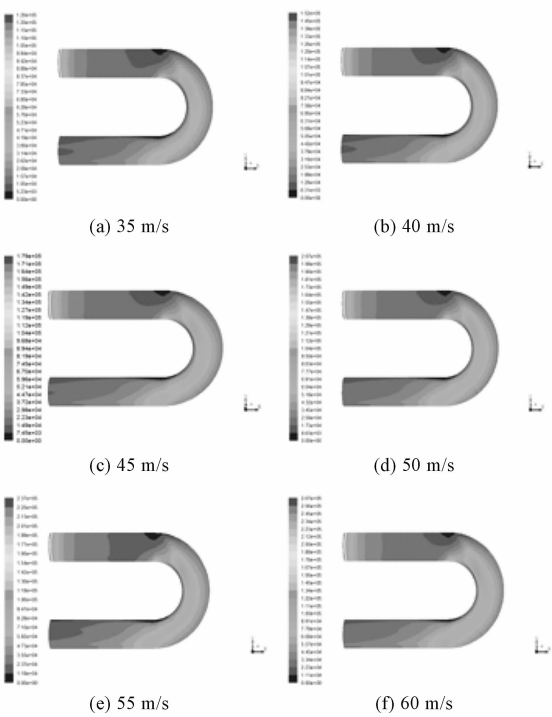


图 3 不同初始速度条件下的壁面剪切应力

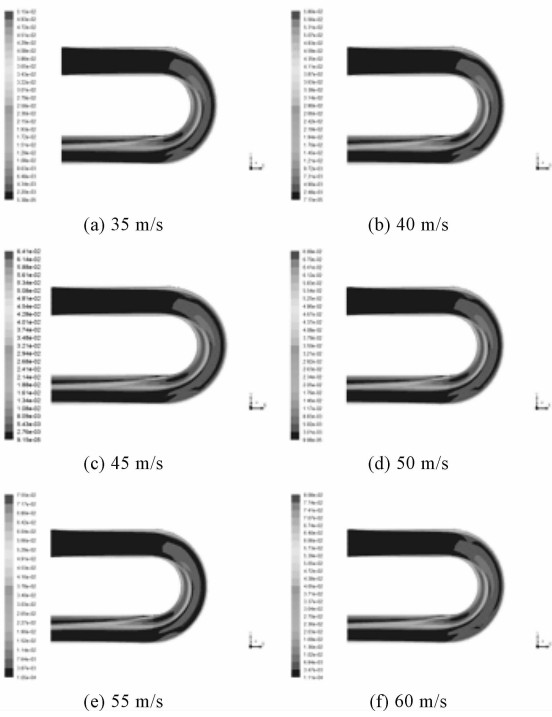


图 4 不同初始速度条件下的湍流粘度

从图 4 的湍流粘度分布图可以看出,近壁面的湍流粘度要大于管道中心处的湍流粘度,这是由于磨粒流与壁面发生摩擦切削而使得湍流粘度增大。在弯管部分以及出口段部分湍流粘度变化较复杂,这是由于在此部分有涡流的产生。且在弯管部分以及出口段部分外侧壁面的湍流粘度同样要大于内侧

壁面;随着初始速度的增加湍流粘度同样也随之增加。

为了能够更加准确地分析说明磨粒流在 U 型管内不同位置的加工效果,须对入口速度为 35 m/s 时的速度分布矢量图和速度横截面图进行分析。

速度分布矢量图如图 5 所示。

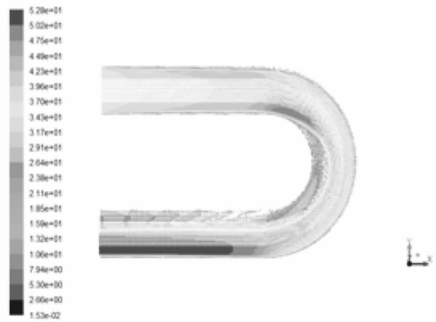


图 5 速度分布矢量图

从图 5 可以看出在入口段部分,速度呈梯度递减且磨粒流流动状态较稳定。在弯管部分速度出现不规则变化且有涡流产生,在 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 截面间内侧壁面处的速度要大于外侧壁面处的速度,这是由于在外侧壁面处磨粒流与壁面发生碰撞,使得其沿 x 方向速度减弱。在出口段部分外侧壁面的磨粒流流速明显增加。

速度分布截面图如图 6 所示。

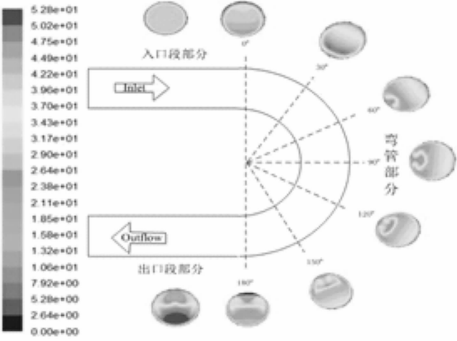


图 6 速度分布截面图

从图 6 中可以看出,在入口段部分速度分布较均匀,这说明磨粒流在入口段的磨削效果比较均匀。在弯管部分的 0° 截面 $\sim 30^{\circ}$ 截面间内侧壁面的速度明显要大于外侧壁面的速度,说明在这一阶段磨粒流对 U 型管的内侧壁面的磨削效果要好于对外侧壁面的磨削效果。

由于受离心力和涡流的影响,在 60° 截面 $\sim 180^{\circ}$ 截面间内侧壁面的速度要小于外侧壁面的速度;由于受到弯管部分流动状态的影响,出口段部分内侧壁面的速度同样要小于外侧壁面的速度。说明在弯

管部分的 $60^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 截面之间以及出口段部分磨粒流对外侧壁表面的磨削效果要好于对内侧壁表面的磨削效果。

5 结束语

本研究通过建立 Eulerian-Eulerian 固-液两相流大涡模拟数学模型,对比分析不同速度入口条件下 U 型管近壁面处的静态压强、壁面剪切应力以及湍流粘度的分布,可知在一定程度上增大磨粒流的入口速度有利于提高其磨削效果。

本研究通过对比分析同一速度入口条件下 U 型管内表面不同位置的静态压强、壁面剪切应力、湍流粘度和速度分布矢量图以及不同位置处的速度分布截面图,可知磨粒流由于受离心力以及涡流的影响在 U 型管内的不同位置具有不同的磨削效果,其中在入口段部分磨削效果较均匀,在弯管部分的 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 截面间对内侧壁面的磨削效果要好于外侧壁面,在弯管部分的 $60^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 截面间以及在出口段部分对外侧壁面的磨削效果要好于内侧壁面。

参考文献(References):

- [1] 计时鸣,章 定. 软性磨粒流精密加工的仿真及实验[J]. 机电工程,2012,29(3):245-248.
- [2] 李定鹏,钱建平,黄维平,等. 旋转驱动装置流场数值模拟[J]. 兵工自动化,2015,34(5):14-17.
- [3] 郭 豪. 多物理耦合场非直线管磨粒流加工热力学关键技术的数值模拟研究[D]. 长春:长春理工大学机电工程学院,2014.
- [4] 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):1729-1733.

- [5] 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 & Theoretical Nanoscience*, 2013, 10(12):2949-2954.
- [6] 计时鸣,张 微,谭大鹏. 基于相位场模型的稀疏液固两相流场特性分析方法[J]. 机电工程,2012,29(12):1376-1381.
- [7] 张凌云,吴凤林. 磨料流加工技术现状及展望[J]. 机械工程与自动化,2006,17(5):166-168.
- [8] 马宝丽. 化学辅助软磨粒流抛光技术研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2013.
- [9] 牛 权,基于湍流猝发结构的离心泵内沙粒运动规律研究[J]. 流体机械,2014,42(11):29-33.
- [10] 董亮,刘厚林,代翠,等. 不同湍流模型在 90° 弯管数值模拟中的应用[J]. 华中科技大学学报,2012,40(12):18-22.
- [11] 张兆顺,崔桂香,许春晓. 湍流大涡数值模拟的理论和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [12] ZHU Hai, WANG Ling-ling, TANG Hong-wu. Large-eddy simulation of suspended sediment transport in turbulent channel flow[J]. *Journal of hydrodynamics*, 2013, 25(1):48-55.
- [13] 周磊,解茂昭,罗开红,等. 大涡模拟在内燃机中应用的研究进展[J]. 力学学报,2013,45(4):467-481.
- [14] YANG Zhi-yin. Large-eddy simulation: Past, present and the future[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(1):11-24.
- [15] 张德胜,石 磊,陈 健,等. 基于大涡模拟的轴流泵叶顶泄漏涡瞬态特性分析[J]. 农业工程学报,2015,31(11):74-80.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

尹延路,滕 琦,李俊烨,等. 基于大涡数值模拟的磨粒流流场仿真分析[J]. 机电工程,2016,33(5):537-541.

YIN Yan-lu, TENG Qi, LI Jun-ye, et al. Simulated analysis based on large eddy numerical simulation for abrasive flow field[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(5):537-541.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>