[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2012.04.008

稀疏软性磨粒流的磨粒群分布 及其动力学特性研究

计时鸣,钟佳奇

(特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学),浙江杭州 310014)

摘 要:利用 CFD 技术和 PIV 测量研究了结构化表面约束流道内的流场和磨粒群分布。基于液-固两相流体耦合理论, 利用欧拉-拉格朗日模型中的 DPM 模型和标准 κ-ε 湍流模型对 V 型纹理矩形截面流道内颗粒运动进行了数值模拟,计 算了流场中的湍流性能等参数。结果表明:V 型纹理矩形截面约束流道内磨粒群的分布总体均匀,各速度矢量紊乱无 序,靠近底部壁面区域颗粒相对比较密集,这些都有利于磨粒对壁面的微力微量切削。图 11 参 10 关键 词:软性磨粒流;粒子成像测速(PIV);结构化表面;数值模拟;精密加工 中图分类号:TG580.1 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2012)04-0029-05

Research on Distribution and Dynamic Characteristic of Particle Group in Low Concentration Soft Abrasive Flow

JI Shi-ming, ZHONG Jia-qi

(Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The CFD technique and PIV were adopted to investigate the flow field and distribution of particle group. Based on the coupled theory of liquid-solid two phases flow, DPM model which belongs to Euler-Lagrange model and standard κ - ε turbulence model were used to analyze particle motion, and some parameters were calculated in the flow passage with V-shaped texture and rectangular section. Results show that distribution of particle group in the flow passage with V-shaped texture and rectangular section is well-distributed overall, but each velocity vector is in disorder and the particle density near wall at the bottom is bigger, these are conducive to the wall of wear. [Ch,11 fig. 10 ref.]

Key words: soft abrasive flow; particle image velocimetry (PIV); structural surface; numerical simulation; precision machining

0 引言

近年来,中国模具工业快速发展,模具产品向着更加精密、更加复杂及更加经济快速的方向发展,技术含量不断提高。但是,模具中大量存在沟、槽、孔、棱柱、棱锥、窄缝等异型表面,受尺寸、形状限制而无法使用工具进行接触式加工,这一点成为模具制造领域急需解决的技术难题。针对尺寸小或几何形态特殊的结构化表面难以使用工具进行接触式光整加工^[12](如抛光或研磨),计时鸣等人提出了一种基于软性磨粒流

的结构化表面无工具精密加工新方法^[34]。所谓的 "软性"磨粒流是一种液-固两相磨粒流,具有弱黏性, 因此具有更好的流动特性并可实现湍流流动。该方法 主要利用封闭流道内湍流的壁面效应实现对模具结构 化表面的微力微量切削,以达到精密加工的效果。

颗粒动力学模型和两相流数值模拟方法称为液固 两相流模化理论研究的2个主要问题,前者分析相间 耦合和颗粒间相互作用机理,建立描述颗粒运动的通 用动力学模型;后者在前者的基础上,分别以2种方

收稿日期:2011-10-11;修回日期:2012-01-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50875242,50905163);浙江省自然科学基金资助项目(Z107517,Y1090836) 作者简介:计时鸣(1957),男,浙江温州人,教授,博士生导师,从事先进加工技术方面的研究。E-mail: jishiming@zjut.edu.cn; 通信作者:钟佳奇(1986),男,浙江慈溪人,硕士,研究方向:精密加工.E-mail: ned2009@yeah.net 式,即以代表性颗粒表征离散相的欧拉-拉格朗日模型 和以拟流体表征离散相的欧拉-欧拉模型(也称为双流 体模型),建立其描述液固两相流的完整数学模型。 欧拉-拉格朗日模型^[5]对连续相流体在欧拉框架下求 解*N-S*方程,对粒子相在拉格朗日框架下求解颗粒轨 道方程,以单个粒子为对象。该模型中,粒子被当作离 散存在的一个个颗粒,首先计算连续相流场,再结合流 场变量求解每一个颗粒的受力情况获得颗粒的速度,从 而追踪每一个颗粒的轨道,这种方法假定第二相(离散 相)非常稀疏,因此可以忽略颗粒-颗粒之间的相互作 用、颗粒体积分数对连续相的影响。这种假定意味着离 散相的体积分数必然很低,一般说要求颗粒相的体积分 数小于10%~12%。考虑到本文颗粒相浓度为10%, 故选用欧拉-拉格朗日模型,即 DPM 离散相模型。

文中基于标准 κ-ε 湍流模型和 DPM^[5] 离散相模型,研究 V 型纹理矩形截面流道内的磨粒群分布和动力学特性,对分析软性磨粒流的加工特性具有一定的指导意义。

1 计算所用的数学模型

1.1 流体相控制方程 流体相的进步地^[6]

$$\frac{\partial(\rho_f \alpha_f)}{\partial t} + \nabla \left(\rho_f \alpha_f u_f\right) = 0 \tag{1}$$

连续相的动量守恒方程

 $\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{f}\alpha_{f}u_{f}) + u \cdot \nabla (\rho_{f}\alpha_{f}u_{f}u_{f}) =$

 $-\alpha \nabla p + \rho_f \alpha_f g + \nabla (\mu_{eff} \nabla u_f) + F_f + S_f$ (2) 式中, ∇ 为拉普拉斯算子, F_f 为相间作用力, g 为重力 加速度, S_f 为将方程写成通用形式而产生的源项, α_f 为 流体体积分数。

1.2 颗粒运动方程

在拉格朗日坐标下通过对粒子力平衡方程求积分,可得到离散相颗粒的运动轨迹。本文研究稀释粒子流,故可简化颗粒运动方程,忽略巴塞特力、虚拟质量力、马格努斯力、Saffman力和浮力^[7]。其运动方程如下

$$\frac{\mathrm{d}u_p}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{\tau_p} (u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \tag{3}$$

其中,u 为流体相速率, u_p 为粒子速率, g_x 为附加加速度(每单位质量粒子上的作用力), τ_p 为颗粒弛豫时间。

1.3 标准 *κ*-ε 湍流模型

标准 κ - ε 模型(standard κ - ε model)由 Launder 和 Spalding于 1972年提出。文中研究的软性磨粒流为不 可压缩流体流动,故其湍动能 κ 和耗散率 ε 的控制方 程为^[8]

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \Big[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial\kappa}{\partial x_j} \Big] + G_\kappa - \rho\varepsilon$$
(4)

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \Big[\left(\mu + \frac{\mu_l}{\sigma_s} \right) \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} \Big] + \frac{C_{1s}\varepsilon}{\kappa} G_{\kappa} - C_{2s} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa}$$
(5)

$$G_{\kappa} = \mu_{l} \left(\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{i}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} \right) \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{i}}$$
(6)

$$\mu_l = \rho C_{\mu} \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \tag{7}$$

式中: G_{κ} 是由于平均速度梯度引起的湍动能产生; ρ 为流体密度, μ 为黏度, C_{1s} , C_{2s} 和 C_{μ} 为经验常数,其值分别为1.44,1.92和0.09, σ_{s} 和 σ_{κ} 分别为湍动能和湍动耗散率对应的普朗特数,其值分别为1.0和1.3。

2 模型的建立

2.1 物理模型

软性磨粒流加工系统由待加工面和约束模块组成 V型纹理矩形截面的直流道。本数值计算网格由计算 流体力学软件实现,并对模型进行网格划分和边界条 件的设置。物理模型有约束模块、底座、和工件3部分 组成,文中所建物理模型示意图如图1所示。其中,流 道长度为100 mm,间隙为1~2 mm。



1-约束模块;2-底座;3-V型纹理半圆形截面流道;4-工件
 图 1 物理模型示意图
 Figure 1 Structural diagram of physical model

对模型采用非结构化的六面体网格进行网格划分,如图2所示,网格总数约为790920。选用速度入口,自由出口。在流道入口处布置垂直于入口截面入射的粒子流。采用 DPM 随机轨道模型,考虑流体和颗粒间的相间耦合作用,用压力-速度耦合的 Phase Coupled SIMPLE 算法求解,一阶迎风格式离散。迭代步长为0.0001s。



图2 网格划分示意图

Figure 2 Mesh generation of the passage

2.2 初始条件

流体(46#机油)相:给定流体相初始速度为60 m/s,假定流动已充分发展为湍流,采用速度进口,自由出流,则可给定湍流强度*I*=0.16(Re_{DH})^{-1/8}=5.2%。

颗粒(sic)相:采用密度为 3 170 kg/m³,动力黏度 为 2.064 × 10⁻⁶ m²/s,磨粒平均直径为 55 μ m,体积分 数为 10%,给定初始速度为 60 m/s,质量流量为 1.03 kg/s。

在壁面处,对流体相采用壁面函数法和无滑移边 界条件,颗粒相在壁面处不满足无滑移条件,在与壁面 碰撞时为弹性碰撞反射,近壁区域采用非平衡壁面函 数近似处理。

3 数值计算结果与分析

约束流道内结构化表面的加工效果与磨粒速度、 压力等性能参数密切相关。这里主要对 V 型纹理矩 形截面流道下软性磨粒流的湍流性能及磨粒群分布进 行分析。

选取 V 型纹理的矩形截面流道、流速 60 m/s,颗 粒浓度 0.1 的工况进行流场分析。如图 3 所示为流道 底部(即工件加工表面)沿流道方向的速度变化曲线。 由图可知,流速在 15~95 mm 的位置大致呈正弦曲线 变化,最小值为 60 m/s,最大值为 11 m/s,表明该流道 内靠近壁面处的速度大小在不断变化,有利于工件表 面的微力微量切削,提高加工精度。





图 4 为计算时间为 5 × 10⁻² s 时流场横向速度云 图。从图中可以看出,除入口处外,速度较大的区域集 中于流道的底部,即靠近被加工零件的表面,表明此刻 流道内(不包括入口处)靠近壁面处流速较大。





Figure 4 Contours of transverse velocity

湍动能反映流道内湍流脉动的长度和时间尺度, 湍动能越大说明脉动越强烈。图5所示为计算时间为 5×10⁻²s时流道内的湍动能云图。从图中可以看出, 流道底部的湍动能比较均匀且很大。湍动能比较大说 明脉动强度和速度比较大,磨粒对工件表面的切削强 度比较大且较频繁无序,从而可以提高加工效率。





图 6 为计算时间为 5 × 10⁻² s 时 V 型纹理约束流 道内磨粒群的空间及其速度分布。从图中可以看出, 磨粒群在流道内分布总体均匀,在靠近底部壁面区域 颗粒相对比较密集且速度较大,各个沟槽间存在颗粒 涡流,软性磨粒流已达到湍流无序状态。



图 6 磨粒群速度矢量分布图 Figure 6 Particle group velocity vector

图 7 所示为磨粒群三维矢量图,可见磨粒对壁面 有明显的碰撞趋势,磨粒群分布均匀且紊乱,对壁面磨 削碰撞频繁。





Figure 7 Particle group of 3-D vector distribution

图 8 所示为 DPM 模型下仿真的工件表面的磨损 率分布情况。从图中可以看出,流道入口处工件表面 磨损较少,之后磨损逐渐增加,最终达到均匀磨损的效 果,即工件表面加工均匀。



图8 工件加工面的磨损率分布

Figure 8 Distribution of erosion rate

4 PIV 测试实验

试验样机采用有机玻璃制成,各尺寸与原加工系 统保持一致,且保持加工工况一致。PIV^[9-10]测试装置 如图9所示。

文中使用 TSI 公司的 DPIV 系统,它包括成像子系 统和分析显示系统。图像处理方法是:将两帧单次曝 光的粒子图像划分为成小的查问区,对各查问区内的 粒子图像进行互相关分析,获得各查问区速度矢量,进 而得到全场速度矢量。如图 10 所示为 V 型纹理矩形 截面约束流道内的磨粒群分布。

从图中可以看出,磨粒群分布大致比较均匀。对 图中红色矩形区域内的磨粒群进行局部放大,且对粒 子图像进行互相关分析,进而得到磨粒群的局部速度 矢量图如图 11 所示(其中图片底部为加工壁面)。

从图中可以看出,磨粒群颗粒速度矢量比较紊乱,



图 9 PIV 测试装置 Figure 9 PIV test device







图 11 磨粒群的局部速度矢量图

Figure 11 Local velocity vector of particle group

且具有一定的涡旋结构,涡流运动使颗粒不断加速和 减速,扰乱了壁面附近边界层的状态,从而进一步证明 了约束流道内软性磨粒流流场已达到了湍流状态,这 有利于磨粒对壁面进行无序的微力微量切削。

5 结论

采用标准 κ-ε 湍流模型和 DPM 离散相模型,对 V 型纹理矩形截面流道内浓度为0.1 的软性磨粒流流场 进行数值模拟,得到了稀疏相软性磨粒流的速度场、磨 粒群分布规律等参数。由研究结果得到以下主要 结论:

 在整个流道内,入口处磨粒群分布较少,中间 (下转第36页)