

磨料流在离心研磨过程中运动特征的数值模拟

王浩程^{1,2} 张宏太¹ 张德良³ 方新³

1. 天津工业大学, 天津, 300160 2. 天津大学, 天津, 300072

3. 中国科学院力学研究所, 北京, 100080

摘要: 用液固两相流体动力学的方法对离心研磨过程中磨料流的运动特征进行数值模拟, 得出磨料流运动的动态结果, 并与高速摄影实验结果进行对比, 指出计算机数值模拟结果对研磨机的设计和研磨工艺参数的选择具有实际的指导意义。该方法经济简捷, 可以代替大量的工艺实验实现对离心研磨技术参数的优化, 从而提高生产效率。

关键词: 数值模拟; 离心研磨; 液固两相流体; 连续颗粒模型

中图分类号: TH113.2; O359

文章编号: 1004—132 (2005) 22—1995—04

Kinetic Numerical Simulation of Abrasive Fluid in Planetary Lapping

Wang Haocheng^{1,2} Zhang Hongtai¹ Zhang Deliang³ Fang Xin³

1. Tianjin Polytechnic University, Tianjin, 300160

2. Tianjin University, Tianjin, 300072

3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080

Abstract: A method of two-phase fluid dynamics was advanced, which simulated numerically the kinematic behavior of the abrasive fluid in planetary lapping process. Dynamic results from the method are contrasted with the profiles of the moving abrasives during planetary lapping obtained by high-speed photographic experiments. The facts of two similar results show a lot of technical experiments can be substituted by numerical simulation with computer. The parameters of design and technology can be optimized economically and efficiently with the method so as to improve productivity.

Key words: numerical simulation; planetary lapping; two-phase fluid; continuous grain model

0 引言

作为一种高效率的金属表面加工手段, 离心研磨工艺及设备在小型异形零件的去毛刺和光整加工生产领域得到广泛应用。目前, 该项技术存在以下问题: 离心式研磨机的设计参数凭经验确定, 应进一步优化; 研磨工艺参数的确定无理论依据, 完全凭经验确定。

研磨过程中磨料的物理特性和相对运动状态对零件的研磨效果有着直接的影响。实验观察发现, 磨料在滚筒内的运动是极为复杂的, 至今磨料运动特征对研磨过程影响机制尚不十分了解。深入研究磨料运动特征及它对研磨过程的影响对于优化机器的设计参数和加工工艺参数, 进一步提高加工效率具有重要意义。

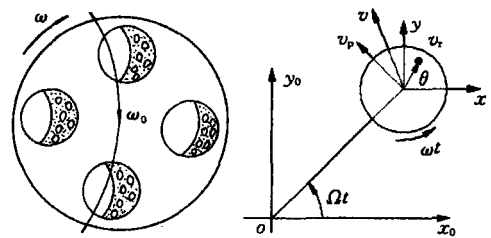
近年来计算机科学、计算流体力学的飞速发展, 使得对离心滚筒研磨设备中的磨料运动特征及它对研磨效果的影响进行数值模拟成为可能, 本文尝试利用计算机数值分析方法对离心滚筒研磨过程中磨料运动规律和特征进行数值模拟, 通过与高速摄影实验结果对比, 表明模拟是成功的, 为离心

滚筒研磨设备优化设计和运行参数选择提供了一定的依据。

1 离心研磨原理及磨料流的运动模型

1.1 离心研磨原理^[1]

离心滚筒研磨原理如图 1 所示。在静止坐标系中, 滚筒的运动由两部分组成, 即绕支点的公转和绕其中心轴线的自转。当以联结于滚筒轴心的



(a) 物料运动情况

(b) 单颗粒磨料的受力分析

图 1 离心滚筒研磨原理

运动坐标系为参考系时, 滚筒仅围绕其中心轴线旋转, 公转的作用相当于在滚筒上施加一个等效的、方向不断变化的惯性离心力。相对于运动坐标系, 两种运动方式通过不同的途径对磨料颗粒运动施加影响。首先, 通过滚筒侧壁与磨料颗粒的碰撞和摩擦, 以及侧壁附近流动边界层中的动量传输, 间接地影响颗粒的运动状态和特征分布; 其次, 滚筒

收稿日期: 2005—01—31

基金项目: 天津市“十五”投资科技创新基金项目

内部的磨料颗粒又受到重力和离心滚筒公转产生的离心力的作用。在上述外力作用下,滚筒内部的磨料颗粒作复杂的运动,并通过磨料和待加工的零件之间的碰撞和摩擦,使待加工的零件表面越来越光洁。

1.2 物料运动情况假设

(1) 滚筒内充满了流体和磨料颗粒的混合物。假设磨料颗粒是同一直径的球状颗粒。对于非球状颗粒,可以看作是同体积的等效直径球状颗粒。颗粒和颗粒之间及颗粒和液体之间存在相互碰撞、摩擦等相互作用。

(2) 流体介质可以是气体或液体。当流体介质的密度远小于磨料颗粒的密度时,可忽略作用在颗粒上的浮力作用和附加质量效应。当流体介质的密度接近磨料颗粒的密度时,通常应考虑浮力作用和附加质量效应,在本文计算中忽略浮力和附加质量的影响。

(3) 在两相流体介质中磨料和流体之间存在着质量和热量的交换,以及凝结、溶化或结晶等物理化学过程。在本文的计算中假定颗粒状固体磨料和流体具有相同的压力,不考虑颗粒和流体之间的上述相互作用,即认为颗粒和流体是互不相溶的两种介质。

1.3 磨料流运动特征数学模型

在上述假设下,离心滚筒研磨过程存在两种颗粒的运动模型。

(1) 离散颗粒模型 在滚筒内的磨料颗粒的数量极少,颗粒之间的相互作用可忽略不计,颗粒对流体的作用很弱,在这种情况下采用离散颗粒模型。

(2) 连续颗粒模型 在滚筒内的磨料颗粒的体积占流动介质总容积10%以上时,颗粒之间以及颗粒和流体之间的相互作用必须考虑,这种情况下需要采用连续颗粒模型。

本文集中讨论了连续颗粒模型下的离心滚筒研磨过程的数值模拟,并对离心滚筒内的颗粒和流体运动规律进行了初步的力学分析。

2 磨料流运动的液固两相流体模型^[2,3]

2.1 磨料颗粒的体积分布

当磨料颗粒的体积占流动介质总容积的10%以上,颗粒之间的相互作用以及颗粒和流体之间的相互作用不可忽略时,我们需要在统计平均的意义上描述颗粒的运动特征。因此,可将流体和颗粒都作为连续介质来处理,然后,根据连续介质模型的质量守恒和动量守恒定律建立相应的守恒方程。

假设滚筒中流固两相流体介质是由两种互不渗透的磨料颗粒和不可压缩流体所组成。在上述假设的基础上,引入体积分数 α_l 和 α_s 分别表示流体和磨料颗粒所占据的体积比率,则第 q 相流体介质所占体积为

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (1)$$

其中, α_q 为1时表示液体介质; α_q 为 α_s 时表示磨料颗粒,且 $\alpha_l + \alpha_s = 1$ 。

从而 q 相流体介质的等效密度分布函数为

$$\rho_q = \rho_l \alpha_l + \rho_s \alpha_s \quad (2)$$

2.2 质量守恒方程

在流固两相流体介质的各相之间无质量和热量交换,并忽略蒸发、凝结、溶解和结晶等过程,两相流体介质的质量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{V}_q) = 0 \quad (3)$$

式中, \mathbf{V}_q 为第 q 相的速度分布。

在满足 $\alpha_l + \alpha_s = 1$ 的条件下联立求解式(1)和式(3),可得流固两相流体介质中各相介质体积分数的分布。

2.3 动量守恒方程

液体和颗粒状固体磨料的运动分别满足如下动量守恒方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l \mathbf{V}_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{V}_l \mathbf{V}_l) = & - \alpha_l \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_l + \mathbf{R}_{sl} + \mathbf{F}_{gl} \\ \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \mathbf{V}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \mathbf{V}_s \mathbf{V}_s) = & - \alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_s + \mathbf{R}_{ls} + \mathbf{F}_{gs} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, $\boldsymbol{\tau}_q$ 为颗粒相和流体相的剪切应力张量; p 为流体压力; p_s 为颗粒状固体磨料的固相压力; \mathbf{F}_{gs} 、 \mathbf{F}_{gl} 分别为作用在颗粒状固体磨料和流体上的各外力的合力; \mathbf{R}_{ls} 、 \mathbf{R}_{sl} 分别为流固、固流两相流体介质之间的相互作用力。

在本文计算中外力主要是离心力和重力。液固两相介质之间的作用力应该大小相等,方向相反。

假设液固两相介质之间的相互作用为

$$\mathbf{F}_{sl} = K_{sl}(\mathbf{V}_l - \mathbf{V}_s) \quad K_{sl} = K_{ls} \quad (5)$$

式中, K_{sl} 、 K_{ls} 分别为液固、固液两相流体介质之间的动量交换函数。

K_{sl} 和颗粒相的颗粒直径 d_s 、交换系数 f 、颗粒的流动阻力系数 C_D 和相对雷诺数 Re 有关。本文计算采用Syamlal-OBrien模型中的相关系数和定义。

2.4 $k-\epsilon$ 湍流模型

在计算中采用标准的 $k-\epsilon$ 湍流模型和相应的湍流输运方程,将 $k-\epsilon$ 模型应用于流固两相流体介质的流动特征分析,基本上可以反映出流固两相流

体介质流动的主要湍流特征。数值实验证明,本模型所得数值结果和实验值吻合较好。

3 数值模拟结果和力学分析

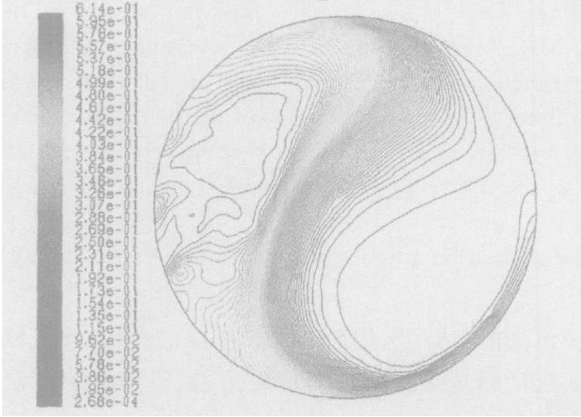
3.1 计算参数选择

固体磨料颗粒的主要成分是氧化铝,球状颗粒的直径为 1.5mm,计算区域中的等效面积为 2.25mm²,密度为 2.5g/cm³。滚筒内充满了水溶剂和磨料颗粒的混合物。水溶剂的密度为 1.0g/cm³,雷诺数为 1.78 × 10⁴。

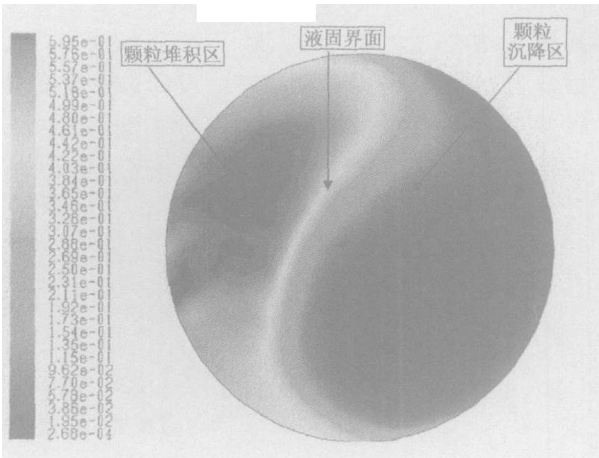
滚筒的逆时针公转角速度为 158r/min,公转半径为 254mm;顺时针自转角速度为 21r/min,滚筒半径为 90mm。离心轮与中心轮的传动比为 2/15。从而得到相对惯性力比值为 7.088。

3.2 离心滚筒不同转动角度的体积分数

图 2 给出了磨料颗粒的体积分数分布图。体积



(a) 等值线图



(b) 等值云图

图 2 磨料颗粒体积分数的等值线分布图

($\omega = 158\text{r/min}$, $\omega_s = 21\text{r/min}$, $\phi = 0.25$)

分数分布基本上反映了颗粒的浓度分布。从图中清楚看出,磨料颗粒分布在滚筒的一侧,且在滚筒外缘的颗粒浓度较高,某些区域体积分数可接近 0.63,在这些区域附近颗粒处于堆积状态;流体分

布在另一侧,这部分的颗粒体积分数小于 0.1,表明颗粒极少。计算结果指出,在滚筒内的磨料颗粒和流体之间形成较为明显稳定的界面,界面呈 S 形状。在不同的时间,体积分数的分布以及界面位置和形状基本相似,并且随着转动角度的变化而呈近似周期性的变化。

3.3 数值模拟结果和高速摄影实验结果的对比

图 3 给出了当离心传动比为 0.13 时,离心滚筒研磨过程中料桶沿圆周分布在不同位置时磨料流形态特征的数值模拟结果,图 4 为对应的高速摄影实验结果。

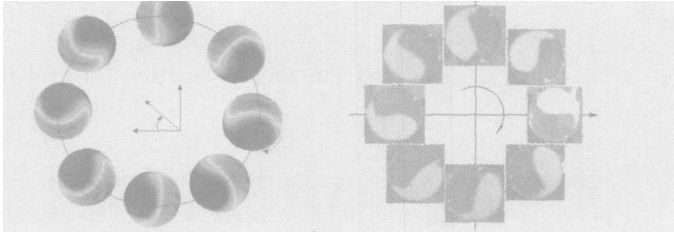


图 3 磨料流在不同转动角度的体积分数数值云图

($\omega = 158\text{r/min}$, $\omega_s = 21\text{r/min}$, $\phi = 0.25$)

图 4 磨料流周期运动情况的高速摄影结果

($\omega = 158\text{r/min}$, $\omega_s = 21\text{r/min}$, $\phi = 0.25$)

离心传动比变化时,磨料流的运动特征有明显变化。图 5 是当 ω/ω_s 为 1.68 时数值模拟的颗粒体积分数云图。图 6 是在相应位置时的高速摄影照片。

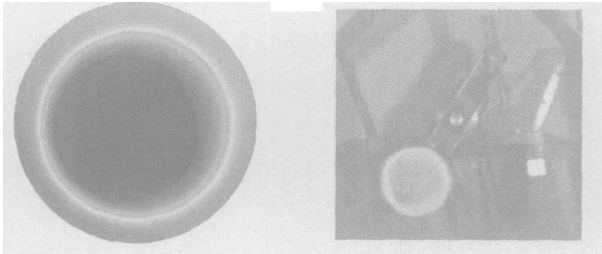


图 5 ω/ω_s 为 1.68 时颗粒体积分数云图

($\omega = 158\text{r/min}$, $\omega_s = 266\text{r/min}$, $\phi = 0.25$)

图 6 ω/ω_s 为 1.68 时颗粒运动特征的高速摄影结果

($\omega = 158\text{r/min}$, $\omega_s = 266\text{r/min}$, $\phi = 0.25$)

可以看出,当 ω/ω_s 值较小时,公转离心力起主导作用,磨料流前沿逐渐呈 S 形,磨料流分布密度由疏松不均匀变得密集均匀。当 ω/ω_s 值较大时,自转作用占主导,磨料在自转离心力作用下呈环形分布在料桶边缘,且由于公转离心力及重力的辅助作用使得在圆周不同位置磨料圆环厚度不等。

从以上图形对比可以看出,数值模拟和高速摄影实验结果非常一致,表明采用的计算模型和数值方法是合理的,数值模拟是成功的。

4 结论

本文使用液固两相流体力学方法建立了离

气动位置控制磁流变流体制动器的研究

李松晶 蒋 丹

哈尔滨工业大学, 哈尔滨, 150001

摘要: 利用磁流变流体在外加磁场作用下的流变特性, 设计了用于气动位置控制的磁流变流体制动器, 给出了制动器结构及工作原理, 采用磁场有限元分析方法, 对制动器工作间隙中磁场分布及磁场强度进行了分析和计算, 对制动器制动力特性进行了分析, 对工作间隙中磁场强度及制动力进行了实验测试, 对制动器动态制动特性进行了试验研究, 并给出了提高制动精度的方法。

关键词: 磁流变流体; 流变特性; 气动位置控制; 制动器

中图分类号: TH138.7

文章编号: 1004—132 (2005) 22—1998—04

Study on Pneumatic Position Control Brake Using Magneto - rheological Fluid

Li Songjing Jiang Dan

Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001

Abstract: By using the rheological property of magneto - rheological fluid (MRF) when it is exposed to a magnetic field, a MRF brake was developed to realize the pneumatic position control. The construction and working principles of the brake using MRF were introduced. The magnetic field distribution, magnetic flux density inside the working clearance, and the braking force of the brake were analyzed and calculated using finite element analysis method. The characteristics of magnetic flux density and the braking forces were tested. The dynamic experiments of braking response were carried out. The simulation and experimental results, as well as the method to improve the precision of pneumatic position control using MRF brake are given.

Key words: magneto - rheological fluid; rheological property; pneumatic position control; brake

0 引言

目前, 在气动控制系统中, 普遍采用气动伺服阀和机械式气动制动闸两种方式来实现气动位置控制。但由于采用伺服阀的气动位置伺服控制系统难以调节, 而且伺服阀对空气的质量非常敏感,

抗污染能力较低, 因而尚未广泛地商业化, 而机械式气动制动闸因无法实现复杂的、程序化的控制而使其应用受到限制^[1]。本文利用磁流变流体 (magneto - rheological fluid, MRF) 在外加磁场作用下, 能够产生较大的屈服应力, 磁场消失后又恢复为原流动状态的流变特性, 设计了磁流变流体制动器。该制动器通过在开关阀控制的气缸上施加一个较大且可变的阻尼力, 来实现刚度大、精

收稿日期: 2005—01—25

基金项目: 黑龙江省博士后基金资助项目

心研磨物料运动的数学模型, 对离心研磨过程磨料流的运动特征进行了数值模拟。通过与高速摄影实验结果对比可以看出, 计算机数值模拟结果与磨料流的真实运动情况十分接近。因此, 可认为用计算机数值模拟方法对离心研磨过程中物料的运动情况进行运动和动力分析是可行的。事实上, 利用动态模拟结果, 我们得出了磨料流在公转和自转离心力场及重力场中的压力分布、速度矢量分布等许多重要结论。可以预料, 这些结论将对离心研磨技术的改进起到重要的指导作用。

参考文献:

[1] 张宏太, 杨建成, 王浩程. 磨料流在离心场中运动的

实验研究 (一). 天津纺织工程学院学报, 2000, 19 (4): 19 (6): 17~20

[2] 郭烈锦. 两相与多相流动力学. 西安: 西安交通大学出版社, 2002

[3] 柏实义. 二相流动. 北京: 国防工业出版社, 1985

(编辑 何成根)

作者简介: 王浩程, 男, 1964年生。天津工业大学机械电子学院副教授, 天津大学机械工程学院博士研究生。主要研究方向为机械设计理论和金属表面光整加工技术。获省部级科技进步三等奖1项。发表论文10篇。张宏太, 男, 1954年生。天津工业大学机械电子学院高级实验师。张德良, 男, 1939年生。中国科学院力学研究所研究员、博士研究生导师。方 新, 男, 1961年生。中国科学院力学研究所副研究员、博士。