

行星滚磨抛光磨料流态特征的数值模拟

王浩程 张宏太

天津工业大学机械电子学院 天津, 300160

张德良 方新

中国科学院力学研究所,北京,100080

摘要:本文用流固两相流模型对行星抛光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数值结果。分析了不同行星传动比和不同滚筒形状时磨料的流态特征。理论分析与实验结果是一致的。指出计算机数值模拟结果对抛光机的设计、抛光工艺参数的选择和抛光技术参数的优化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,有利于提高生产效率。

关键词: 行星滚磨抛光, 两相流, 流态特征, 数值模拟

0 引言

行星滚磨抛光是一种高效率的金属表面光整加工方法,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。在抛光过程中,磨料的物理特性和相对运动状态对零件的抛光效果有着直接的影响和控制。通过高速摄影实验我们观察到磨料在滚筒内受重力和双重离心力的作用,其运动是极为复杂的,至今磨料运动特征对抛光过程影响机制尚不了解。深入研究磨料运动特征以及它对抛光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,对行星滚筒抛光技术设备中的磨料运动特征以及它对抛光效果影响进行数值模拟已成为可能,本文尝试利用计算机数值分析方法对行星滚筒抛光过程中磨料运动规律和特征进行数值模拟,结果表明数值模拟是成功的,这为行星滚筒抛光技术设备优化设计和运行参数选择将会提供有力的依据。

1 磨料运动的两相流理论

1.1 两相流体运动假设条件

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对两者的运动特征都会产生不可忽略的影响,此时宜将流体和颗粒都作为连续介质,应用欧拉方法描述颗粒的运动过程。根据连续介质理论的质量守恒和动量守恒定律建立颗粒和流体的动力学控制方程,结合边界条件和工况参数条件,利用数值方法求得磨料颗粒运动的浓度、速度和压力场分布。

在建立和简化控制方程的过程中,我们假设颗粒相和流体相之间不发生溶解或结晶等物理化学过程,即不考虑两相之间的质量和热量交换。颗粒状固体磨料与流体所构成的两相流动过程满足如下条件:

- (1) 颗粒状固体磨料和流体具有相同的压力作用;
- (2) 颗粒状固体磨料和流体分别满足动量守恒和质量守恒;
- (3) 颗粒状固体磨料和流体之间的相互作用通过阻力系数函数来实现;
- (4) $\kappa-\epsilon$ 湍流模式适用于颗粒状固体磨料和流体介质以及它们的混合相介质。

1.2 磨料流态特征的计算方法

在以上基本假设的前提下,根据两相流动理论,可以建立基于质量守恒方程、动量守恒方程和 $\kappa-\epsilon$ 湍流的磨料流运动数学模型。

根据实验观察和理论分析可知，滚筒内由流体和磨料颗粒所组成的混合介质在重力和离心力作用下的流动过程是一个三维非定常粘性不可压两相流动问题。但是由于滚筒的轴向尺度远大于其径向尺度，为了便于分析，我们只取滚筒的一个垂直截面上的流动过程来研究，这样问题就简化成一个二维非定常粘性不可压两相流动问题。

在计算中采用粘性两相流体的二维非定常守恒型 Navier-Stokes 方程组，结合湍流的 $\kappa-\epsilon$ 模型来计算和模拟颗粒状固体磨料的主要运动特征，以及相应的湍流输运过程。求解的基本过程是以速度、压力和体积分数等原始函数为求解变量，基于有限体积法对上述二维非定常守恒型 Navier-Stokes 方程组进行空间离散，求解变量设置在各单元中心点。在空间离散时方程组各项均采用一阶迎风格式。采用多相耦合 SIMPLE 算法(PC-SIMPLE)同时迭代求解两相流动控制方程，从而获得流体相和颗粒相在每一时刻的浓度、压力和速度分布。

PC-SIMPLE 是广泛使用的 SIMPLE 算法在多相流动领域的推广。工程应用和数值实验表明，上述简化模型在一定条件下是能够模拟大多数两相流动的主要特征。

2 计算结果及力学分析

2.1 磨料颗粒的体积分数分布

图 1 给出了基于行星传动比为 2/15 的磨料颗粒的体积分数分布云图。该分布云图反映了颗粒流的浓度分布特征。首先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。界面左侧的颗粒浓度较高，意味着有较多的磨料颗粒，体积分数接近 0.63 的部分区域表明颗粒处于堆积状态；另一侧的颗粒体积分数小于 0.1，表明颗粒浓度极低。

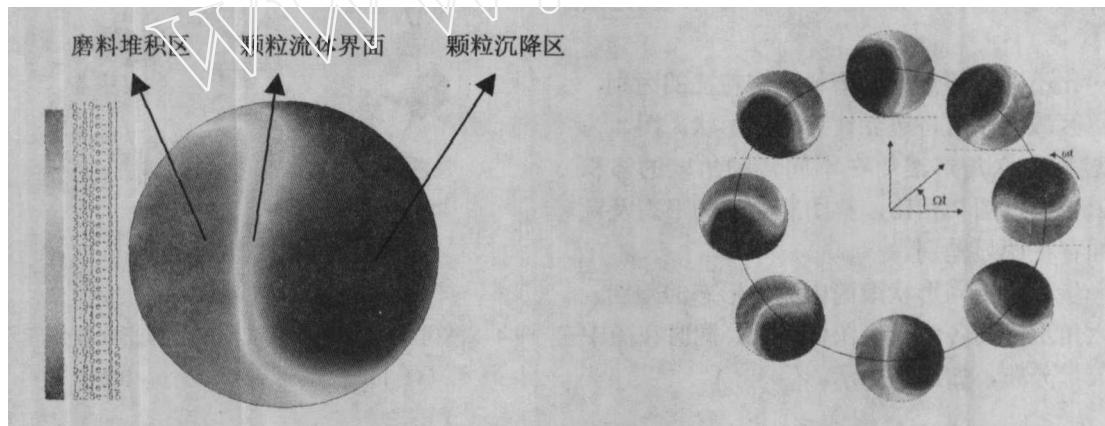


图 1 S 型流动形态的颗粒体积分数分布图

图 2 抛光过程在不同转动角度的体积分数数值云图

$$(\Omega=158 \text{ rpm}, \omega=-21 \text{ rpm}, \alpha_0=0.25)$$

图 2 给出了行星滚筒抛光过程在不同转动角度的体积分数数值云图及流体和颗粒的界面在不同转动角度的形态对比，它是将四个特殊角度的分布图回旋相应角度后重新排列得到的，从图中可见颗粒和液体之间的界面在不同位置是略有改变。

将图 1 和图 2 与高速摄影实验结果^[1]对比，可以看出二者反映出的磨料颗粒的流态特征非常相似，由此证明两相流计算方法是合理的。

2.2 不同行星传动比的体积分数和速度矢量分布

为比较不同行星传动比时磨料颗粒的流态特征，选择两组计算参数：① 公转转速 158 rpm，自转转速-21 rpm（行星传动比 I=-2/15）。② 公转转速 158 rpm，自转转速-158 rpm（行星传动比 I=-1）。

在动态图形中，可以直观地观察在一个循环周期内磨料颗粒的运动情况。这里截取两种行星传动比磨料流体动态运动过程中能够表达磨料典型运动特征的两幅图形，根据流体存在的形态，分别称为 S 型流态和 R 型流态，体积分数和速度矢量分布叠加后如图 3 所示。

对比两种行星传动比下的磨料流态特征可以看出，传动比 $I=1$ 的情况磨料的离散度更大。而且速度矢量的大小和方向变化充分表明，当 $I=1$ 时磨料高密度堆积区的速度明显高于 $I=2/15$ 的情况，且从整体上速度方向变化更加剧烈。这些均说明当行星传动比增大时，磨料对工件的撞击力度和机率会明显增加，因而加工效率也会明显提高。

以上结论与滚磨实验磨削率的测试结果也是相一致的。

2.3 不同行星滚筒形状的体积分数和速度矢量分布

一般认为，多边形滚筒由于棱角处强制改变两相流体的运动方向，物料间运动更加剧烈，相互碰撞进一步加强，因此较之圆形滚筒加工效率更高。生产实践已经验证了这一点。在实际生产中多采用六角形滚筒。

为了对比不同滚筒形状时磨料流态特征的区别，在设置计算区域时，可将边界设为不同形状。图 4 为正常转动过程中六角形滚筒在不同转动角度的体积分数数值云图。与图 2 相比，整团磨料流动形态及颗粒流体界面存在明显差别。

为进一步说明不同形状滚筒内流体形态的差别，对圆形和六角形滚筒各取一幅图做对比，同时在图中叠加速度矢量分布，如图 5 所示。

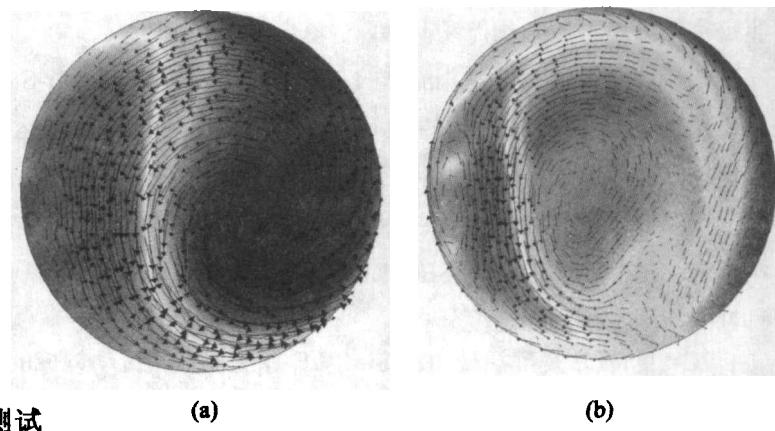


图 3 颗粒体积分数和速度矢量分布

(a) $I=2/15$, S 型流态 (b) $I=1$, R 型流态

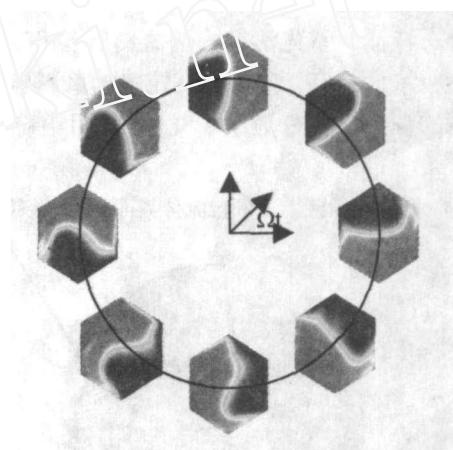


图 4 六角形滚筒在不同转动角度的体积分数数值云图

$(\Omega=158\text{rpm}, \omega=-21\text{rpm}, \alpha_0=0.25)$

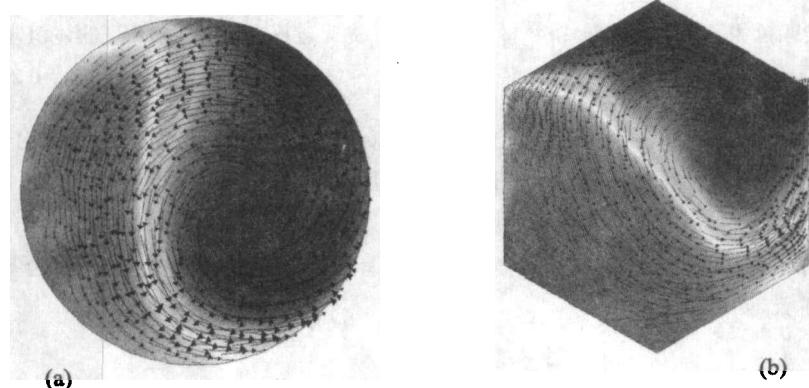


图 5 滚筒内磨料颗粒流动的体积分数和速度矢量分布图。

(a) 圆形滚筒 (b) 六边形滚筒

$(\Omega=158\text{rpm}, \omega=-21\text{rpm}, \alpha_0=0.35)$

可以看出，与圆形滚筒相比，六角形滚筒内整团磨料前沿界面的前端曲率半径更大，速度矢量方向更趋于一致。在磨料流前端的两个棱角处速度矢量分布非常集中。这些现象说明，在抛光过程中，更明显的前沿界面变化和速度矢量的叠加效应使得六角形滚筒内磨料的运动比圆形滚筒更加剧烈，从而加工效率更高。

图6显示的滚筒内磨料颗粒流动的静压分布也表明六角形滚筒内压力分布波动更大，且在一棱角处为高浓度颗粒堆积区，那里的压力最高。

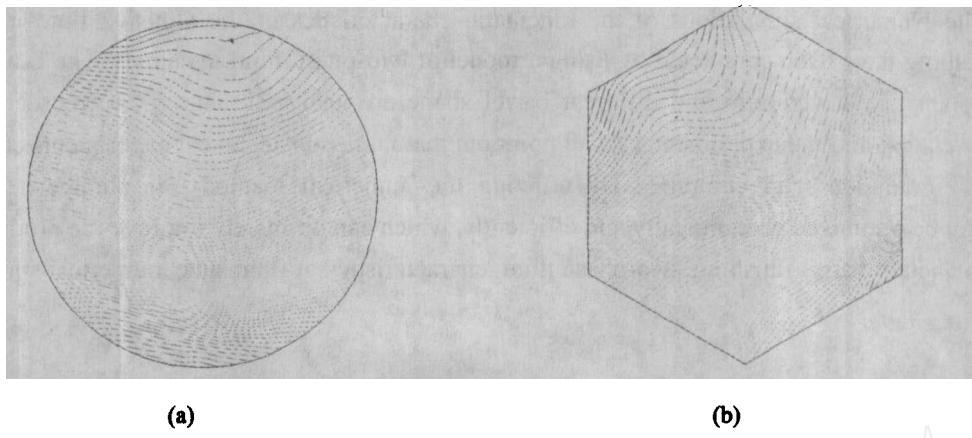


图6 滚筒内磨料颗粒流动的静压分布图。

(a) 圆形滚筒 (b) 六边形滚筒

($\Omega=158\text{rpm}$, $\sigma=21\mu\text{m}$, $\alpha_s=0.35$)

3 结论

(1) 基于两相流动理论建立了磨料颗粒的两相流动模型，对滚筒内磨料颗粒的运动过程进行了数值模拟。计算模拟的结果与实验观察得到的主要流动特征基本相符。表明将连续颗粒模型应用于磨料颗粒的流动过程分析是合理的，计算模拟的结果是可信的。

(2) 利用数值模拟结果分析了不同行星传动比时磨料流的流态特征，指出行星传动比是机器设计时影响加工效率的重要参数。进一步细致的分析将为优化行星传动比提供理论依据。

(3) 比较了不同滚筒形状时磨料流的流态特征的差别。从体积分数分布、速度矢量分布和压力分布说明了六角形滚筒与圆形滚筒相比加工效率更高，为进一步优化滚筒形状奠定了基础。

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) : 17-20.
- [2] 董金铎等, 行星滚抛机的原理及运动分析, 天津纺织工学院学报, 1994, 13 (4) : 104-108
- [3] 杨世春, 表面质量与光整技术, 北京, 机械工业出版社, 2000
- [4] 郭烈锦编著, 两相与多相流动力学, 西安交通大学出版社, 2002
- [5] 柏实义, 二相流动, 北京, 国防工业出版社, 1985
- [6] Dhir, V. K., Basic aspects of two phase flow and heat transfer, American Society of Mech. Eng. 1984
- [7] Brian, S. D., Numerical Simulation of Transient Two-phase flow, 1987

Kinetic Numerical Simulation of Abrasive Fluid Characteristics in Planetary Barrel Finishing

Wang Haocheng Zhang Hongtai

Tianjin Polytechnic University

Zhang Deliang Fang Xin

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences

Abstract: The Numerical simulations of the kinematic characteristics of the abrasive fluid in the process of planetary finishing have been completed by using a model of two-phase fluid dynamics. The fluid characteristics of different planetary driver ratio and different barrel shape are analyzed. The good accordance between the numerical simulation and the experimental result point out that numerous technical experiments can be substituted by numerical simulation with computer. By utilizing the numerical method, the parameters of design and technology can be optimized economically and efficiently, which can ultimately improve the productivity.

Keywords: planetary barrel finishing, two-phase fluid, characteristics of fluid state, numerical simulations