

# 软性磨粒流精密加工的仿真及实验\*

计时鸣, 章 定

(浙江工业大学 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 杭州 310014)

**摘要:** 为改进现有磨粒流加工技术存在的缺陷,提出了软性磨粒流加工技术,并将其应用于各种微小型腔及通道的加工中。首先针对加工表面配置了相应的约束模块从而构成密封的加工流道,建立了欧拉双流体数值分析的数学模型,利用 Fluent 开展了流道中软性磨粒流固-液两相流动特性的分析,然后通过对工件表面进行喷漆的方法,观察了软性磨粒流的实际加工效果,并进行了相应的软性磨粒流加工试验。试验结果表明,加工表面喷漆磨损的分布比较均匀,表面细腻,体现了软性磨粒流加工的先进性与有效性。研究表明,实际工件表面喷漆磨损的分布与仿真中颗粒相压力的分布比较接近,这为软性磨粒流的加工提供了一种预测方法。

**关键词:** 软性磨粒流;约束流道;双流体模型;数值模拟

中图分类号: TG580.1; TH161<sup>+</sup>.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)03-0245-04

## Simulation and experiment for softness abrasive flow processing

Ji Shi-ming, ZHANG Ding

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

**Abstract:** In order to improve the defects of abrasive flow processing, softness abrasive flow processing was put forward, and it was applied to the processing of small cavity and channel. Collocating restraint component to the surface in order to form sealed processing flow passage, Euler double fluid model was established. Using Fluent, the characteristics of solid-liquid two-phase flow in the passage of softness abrasive flow was simulated. Spraying paint on the surface of workpiece, the softness abrasive flow processing's effect was observed, and the experiment was processed. Experiment results show that wear of paint is well-distributed and wear of surface is exquisite, which reflect the advancement and effectiveness of softness abrasive processing. The result indicates that distribution of spray paint's wear on surface is close with abrasive dynamic pressure's distribution in simulation, so it can predicate softness abrasive flow processing's effect.

**Key words:** softness abrasive flow; constraint passageway; double fluid model; numerical simulation

## 0 引 言

零件表面质量<sup>[1]</sup>对零件使用性能、寿命、可靠性等有很大的影响。抛光作为一种表面处理方法,是利用抛光工具或其他抛光介质对工件表面进行修饰加工。抛光加工一般采用固结磨料或游离磨料,主要的抛光方法包括:传统的机械抛光方法、现代抛光方法、复合非传统抛光方法等。现代的许多工业领域对精密机械零件工艺性能的要求不断提高,并且零件规格不断小型化,表面质量要求不断的提高,特别是各种微小的

型腔及通道等。磨粒流对这些部位的加工可谓独树一帜<sup>[2]</sup>,磨粒流加工还可以成功地对各种材料进行微量研磨加工,包括较软的有色金属及坚韧的合金等,非常适应于现代制造材料和制造技术的发展。

磨粒流<sup>[3]</sup>以流体作为载体,将具有切削性能的磨粒悬浮于其中,形成流体磨料,依靠磨料相对于被加工表面的流动来进行加工。相对于传统的机械加工技术,它不受工件几何形状的限制,加工效率高,可以达到极高的表面粗糙度及公差要求,可以保证质量稳定<sup>[4]</sup>。

根据流体的粘度和施加压力的不同,可将磨粒流

收稿日期: 2011-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875242, 50905163)

作者简介: 计时鸣(1957-),男,浙江温州人,博士,教授,博士生导师,主要从事精密/超精密加工方面的研究. E-mail: jishiming@zjut.edu.cn

加工分为：磨粒水射流加工<sup>[5]</sup>和挤压研磨加工<sup>[6]</sup>。前者是采用粘度极低的压缩空气或水作为载体，用很大的压力差使磨粒流喷射到工件表面而达到加工目的<sup>[7]</sup>，但是需要对磨粒流施加强大的喷射动力，使得工件表面会受到强力的冲击碰撞；后者采用粘度较大的有机高分子作为载体，在压力作用下使载体中悬浮的磨粒在被加工表面缓慢流动，需要施加强大的挤压力<sup>[8]</sup>，会使工件表面受到强力的刮削。

本研究提出软性磨粒流的加工方法<sup>[9]</sup>，它的特点在于使流体具有弱粘性，具有更好的流动特性，从而能实现湍流的运动状态。磨粒随流体无规律地撞击工件的表面，利用这种微力微量的切削逐步地达到光整加工的效果<sup>[10]</sup>。

### 1 约束装置及流道建模

软性磨粒流加工的特点之一是利用约束装置针对特有的加工表面配置相应的约束模块，从而形成特定的约束流道，使用于加工的固-液两相流体能够在约束流道中形成湍流的运动状态<sup>[11]</sup>。

约束装置的结构图如图 1(a)所示。

它主要包括上盖板、下盖板、密封垫、约束模块、加工工件及底座，这些部件通过螺栓连接从而构成密封的加工流道。

约束装置的加工流道如图 1(b)所示。

它包括了入口、缓冲区和加工区，加工区的底面即为待加工的表面，约束流道的长度为 100 mm，利用 GAMBIT 建模，采用非结构化的六面体网格进行网格划分，网格总数为 78 050。采用速度入口，自由出口，无滑移边界条件，标准壁面函数。第一相为水，它

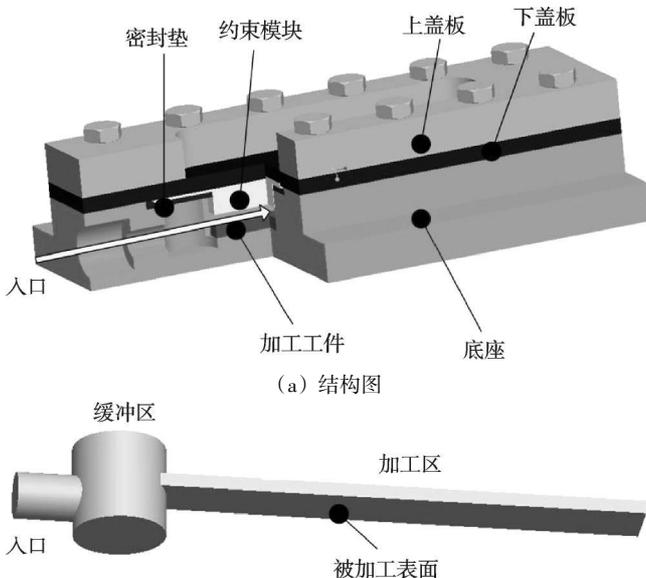


图 1 约束装置结构

的粘度比较小，较容易达到湍流。第二相为碳化硅颗粒，它的体积分数为 30%，颗粒直径为 50 μm。入口速度设为 25 m/s。

为研究软性磨粒流在加工过程中固-液两相流体在约束流道中的流动特性，本研究采用 Fluent 进行仿真。选择欧拉两相流模型为计算模型，该模型的特点是将颗粒相与流体相一样都视为连续相。本研究按牛顿定律描述颗粒的运动，两相在同一空间点上共存，各自遵从自身的动量、质量和能量传递方程，两相间通过相间作用力和共用的压力场互相耦合。

液相的连续性方程与动量守恒方程表达式<sup>[12]</sup>为：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{v}_l) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l \vec{v}_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{v}_l \vec{v}_l) = \alpha_l \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_l + \alpha_l \rho_l g + K_b(\vec{v}_s - \vec{v}_l) \end{cases} \quad (1)$$

颗粒相的连续性方程与动量守恒方程表达式为：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = \alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s g + K(\vec{v}_l - \vec{v}_s) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $l$ —液相， $s$ —固相， $\nabla$ —拉普拉斯算子， $\alpha$ —体积分分数， $\rho$ —密度， $v$ —局部速度， $\nabla p$ —压力梯度， $g$ —重力加速度， $K_b$ —液相与颗粒相的曳力系数， $\mu$ —液相粘度， $\bar{\tau}$ —剪切应力张量。

对于颗粒相本研究考虑了颗粒动力学理论，引入颗粒碰撞恢复系数和稠密气体的 Boltzman 输运方程，修正了经典分子论对量颗粒碰撞的动力学处理，推导出颗粒相的应力，及描述颗粒流动的封闭方程组<sup>[13]</sup>：

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial t}(\rho_s \alpha_s \Theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \vec{v}_s \Theta_s) \right] = (-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_\Theta \nabla \Theta_s) - \gamma_\Theta \Theta_s + \Phi_{ls} \quad (3)$$

式中： $\Theta_s$ —颗粒温度， $\gamma_\Theta$ —颗粒相碰撞的能量耗散， $\Phi_{ls}$ —液相或颗粒相和颗粒相的能量交换， $p_s$ —颗粒压力， $\bar{I}$ —单位矩阵， $K_\Theta$ —颗粒相温度运输系数。

其中， $p_s$ 、 $\gamma_\Theta$ 、 $\Phi_{ls}$ 分别为：

$$\begin{cases} p_s = \alpha_s \rho_s \Theta_s + 2\rho_s(1+e_{ss})\alpha_s^2 g_0 \Theta_s \\ \gamma_\Theta = \frac{12(1-e_{ss}^2)g_0}{d_s \sqrt{\pi}} \rho_s \alpha_s^2 \Theta_s^{3/2} \\ \Phi_{ls} = -3K_b \Theta_s \end{cases} \quad (4)$$

式中： $e_{ss}$ —碰撞的归还系数； $g_0$ —径向分布函数，是一

个当颗粒相变密时,用于修改颗粒之间碰撞概率的修正因子。

径向分布函数为:

$$g_0 = \left[ 1 - \left( \frac{\alpha_s}{\alpha_{s,\max}} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (5)$$

式中: $\alpha_{s,\max}$ —颗粒相堆积最大体积分数。

## 2 仿真结果

湍流强度的定义为脉动速度的均方根与平均速度  $\bar{U}$  的比值,即:

$$I = \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{U}} \quad (6)$$

一般小于或等于 1% 的湍流强度通常被认为是低强度湍流,大于 10% 被认为是高强度湍流。

流道中湍流强度的分布如图 2 所示。

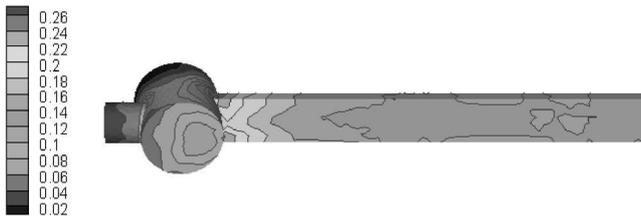


图 2 湍流强度分布

图 2 中,在入口处的湍流强度较小为 2% 左右,流体流到加工区域后,由于水流直径的减小,导致湍流强度的增加,可看出其值已大于 10%,故可认为其为强湍流。强湍流有利于颗粒的运动的无序性,从而能够达到较好的加工效果。

欧拉模型中把颗粒温度描述为颗粒速度脉动的一种度量,颗粒相的应力来自于颗粒碰撞产生的随机粒子运动,并考虑了颗粒相的无伸缩性,故颗粒温度的概念可间接反映颗粒撞击的程度。

颗粒温度的分布如图 3 所示。



图 3 颗粒温度分布

加工区域由于截面的减小造成颗粒与壁面的碰撞更加激烈,从而使颗粒温度的值增加。颗粒温度的分布没有明显的规律,从而证实了颗粒在流道中运动的无序性及颗粒对于壁面撞击的无序性。

整个流道中的速度迹线图如图 4 所示。

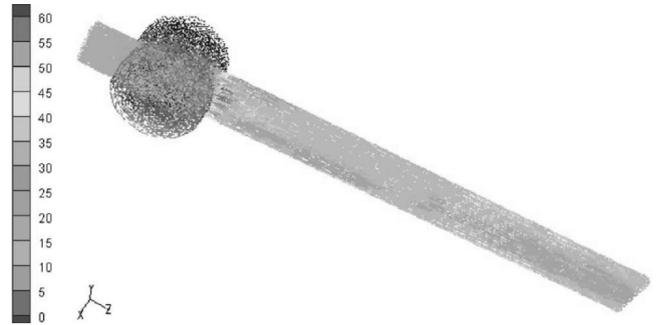


图 4 速度迹线图

图 4 中,入口处设定的入口速度为 25 m/s,进入缓冲区后,由于空间突然变大,速度相应变小。加工区的横截面窄,导致加工区流体的流速很大,为 50 m/s~60 m/s。速度的增加亦可增加软性磨粒流的加工效果。

## 3 实验设计

### 3.1 实验平台

实验平台主要由磨料箱、泵、搅拌机、节流阀、压力表、约束模块、工作台及连接管道组成。磨料箱中装的是水与碳化硅颗粒的混合物,碳化硅颗粒的平均直径为 50  $\mu\text{m}$ ,搅拌机为防止在实验过程中碳化硅颗粒的沉淀,压力表显示约束模块入口处的压力。泵的最高流量为 10  $\text{m}^3/\text{h}$ ,约束流道入口半径为 5 mm,面积约为 78.5  $\text{mm}^2$ ,故可以计算得到入口处的最大流速为 35 m/s。

各部分由管道连接而组成工作回路,软性磨粒流在此回路中循环往复加工,不会造成磨料的浪费,提高了磨料的利用率,且在加工过程中不需要人为操作。

本研究在工件表面均匀地涂上 3 层喷漆,底层为红色喷漆,中间层为蓝色喷漆,最外面层为黄色喷漆。把加工工件放入到约束装置中加工,软性磨粒流对表面的加工效果,可以从喷漆被冲刷的程度上直观地观察到。

### 3.2 实验结果

仿真后流道底部的颗粒动压分布图如图 5(a)所示;加工工件被加工的表面痕迹如图 5(b)所示。

对比图 5(a)与图 5(b),可以发现,动压值分布与喷漆被冲击程度是相对应的,动压大的区域喷漆被冲击的程度也越大。故在仿真中,动压的分布图将为工件的加工效果提供很好的预测。

从喷漆的被冲击程度可预测相应的工件被加工的效果:

(1) 流体从缓冲区进入加工的,由于截面的突然收缩,会对加工区的入口处有一个非常猛烈的冲击,故在加工区地入口处有一处明显的被冲击区域;

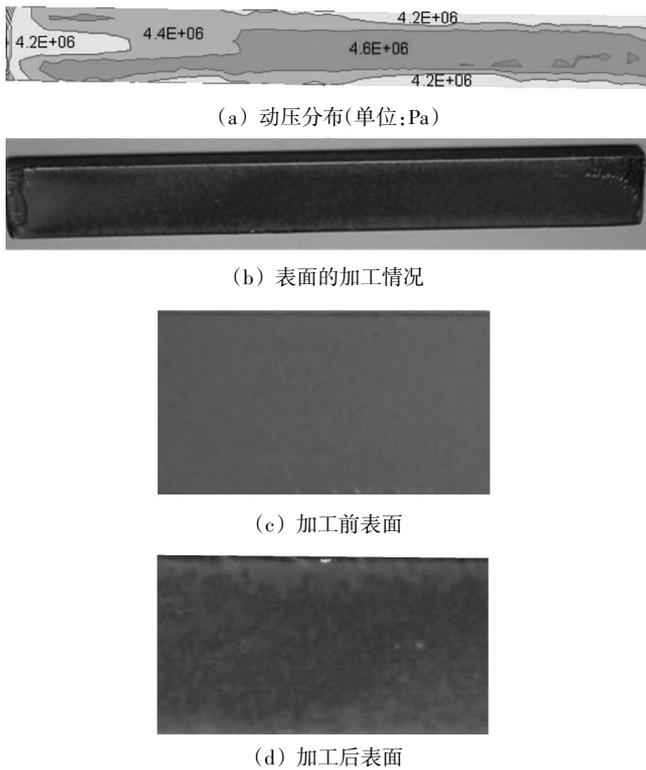


图 5 仿真与实验的对比

(2) 加工区出口处喷漆的损失也比较厉害, 已可观察到底层的红色喷漆层, 由于出口处截面突然增大造成回流区的存在, 会对工件的出口处进行反复的冲击, 造成出口处喷漆的磨损特别严重;

(3) 整个加工区加工效果, 后半部分要比前半部分要好;

(4) 中间位置的加工效果比两侧要好, 两侧由于近壁区的存在, 软性磨粒流的流动受到一部分限制。

工件加工前后表面的分别如图 5(c)、图 5(d)所示。

对比图 5(c)和图 5(d), 可以发现: 喷漆被冲击后的表面没有明显的被强力冲刷的痕迹, 还是非常光滑, 而且喷漆并没有被一片一片地冲掉, 分布非常均匀。颗粒随流体在湍流的状态下运动, 颗粒有可能从各个方向撞向表面, 且颗粒撞向金属表面的力是微力微量的, 逐步地实现光整加工的效果, 验证了软性磨粒流加工的有效性及其先进性。

## 4 结束语

本研究在普通磨粒流加工的基础上提出了软性磨粒流加工方法, 这种方法可对微小型腔或通道等普

通抛光方法无法加工的地方进行加工。它的特点在于通过磨粒的湍流运动实现对壁面的无序碰撞, 利用微力微量的切削提高工件的表面质量。

通过实验发现工件表面喷漆磨损的分布与仿真中颗粒相动压的分布比较接近, 本研究认为通过仿真分析颗粒动压的分布, 可预测软性磨粒流加工的加工效果。加工后的表面没有被强力冲击的磨损, 喷漆表面还是比较细腻, 喷漆磨损的分布比较均匀, 体现了软性磨粒流加工的先进性与有效性。

## 参考文献(References):

- [1] 黄春峰, 赖传兴. 现代特种加工技术的发展[J]. 航空精密制造技术, 2001(6):14-20.
- [2] ALTAN T, LILLY B, YEN Y C. Manufacturing of dies and molds [J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2007, 50(2):404-422.
- [3] 任红军. 磨粒流流工艺技术及其应用[J]. 机器人, 2004(9):21-23.
- [4] BRINKSMEIER E. Finishing of structured surface by abrasive polishing[J]. *Precision Engineering*, 2006, 30(3):325-336.
- [5] 唐维平, 宋伟, 喻鸣显, 等. 喷油嘴喷孔液体挤压研磨工艺研究[J]. 现代车用动力, 2003(2):30-34.
- [6] 孙玉良. 磨具的挤压研磨精加工工艺[J]. 轻合金加工技术, 1996, 24(12):8-11.
- [7] 袁卓林. 磨料水射流表面抛光技术的理论及实验研究[D]. 成都: 西华大学机械工程与自动化学院, 2010.
- [8] 黄光明, 章成军. 液体挤压研磨技术在喷油嘴喷孔加工中的应用[J]. 现代车用动力, 2003(1):22-27.
- [9] 计时鸣, 唐波, 谭大鹏, 等. 结构化表面软性磨粒流精密光整加工方法及其磨粒流动力学数值分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15):178-184.
- [10] 潘艳. 基于“软性”液-固两相磨粒流的模具结构化表面光整加工的工艺研究[D]. 杭州: 浙江工业大学机械工程学院, 2009.
- [11] JI Shi-ming, Xiao Feng-qing, TAN Da-peng. Analytical method for softness abrasive flow field based on discrete phase model [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2010, 53(10):2867-2877.
- [12] 刘永兵, 陈纪忠, 阳永荣. 管道内液固浆液输送的数值模拟[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 40(5):128-133.
- [13] JIE L I. Euler-Euler Simulation of Flow Structure Formation and Evolution in Dense Gas-solid Flows [D]. The Netherlands: Twente University, 2002.

[编辑: 张翔]