

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.12.005

耦合 DEM-CFD 法双入口磨粒流动力学 模拟及加工试验*

周迪锋, 刘冬玉

(浙江工业大学 特种装备制造与先进技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要: 针对单入口磨粒流加工装置光整不均匀问题, 提出了双入口磨粒流加工装置, 为了解决传统 CFD 软件不能跟踪颗粒撞击壁面问题, 结合 DEM 和 CFD 方法, 通过耦合 PFC 和 CCFD 软件, 利用 DMP 颗粒运动模型和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型来模拟磨粒在流场中的运动。仿真中, 通过 PFC 记录磨粒撞击壁面的速度和次数, 通过 CCFD 记录流场运动状态, 并应用 Abaqus 中 Johnson-Cook 模型分析了撞击速度和撞击次数对靶材质量损失的影响。数值模拟结果表明, 双入口装置内两股流体撞击使得磨粒运动更为无序, 磨粒撞击壁面次数大大增加, 同时撞击壁面速度大于 40 m/s 的次数达到 1 382 次, 远大于单入口的 563 次, 使得加工面的材料去除速度更快。加工试验结果表明, 加工 30 h 后, 双入口装置加工的工作表面粗糙度 $R_a = 0.35 \mu\text{m}$, 单入口装置工作表面粗糙度 $R_a = 0.65 \mu\text{m}$, 加工效率明显提高。

关键词: 计算流体力学; 离散元法; 磨粒流; 双入口装置; 撞击; 数值模拟

中图分类号: TH16; TG580.1 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)12-1467-05

Coupling DEM-CFD double inlet abrasive flow dynamics of numerical simulation and test device

ZHOU Di-feng, LIU Dong-yu

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

Abstract: Aiming at the uneven finish machining effected by the single inlet abrasive flow processing, a double inlet processing was brought forward. In order to solve the processing of particles impact the wall can't be tracked by tradition CFD software, a new method which combined DEM with CFD and through coupling the PFC and CCFD software with DMP particle motion model and standard $k-\varepsilon$ turbulence model was used. The speed of abrasive was recorded by PFC and the movement of flow was recorded by CCFD. Johnson-Cook model in Abaqus was used to analyze the effect of impact velocity on the target mass loss. The numerical results indicate that two flow impacts make the abrasive's movement more disorder in double inlet processing and the impact between wall and abrasive increase greatly. The speed of impact between abrasive and wall above 40 m/s is 1 382 times in double inlet processing while in single inlet processing is 563 times. Processing test results indicate that the surface roughness of work piece is $R_a = 0.35 \mu\text{m}$ in double inlet processing after 30 hours of processing, while in single inlet the value is $R_a = 0.65 \mu\text{m}$ which improved the processing efficiency greatly.

Key words: computational fluid dynamics (CFD); discrete element method (DEM); abrasive flow; double inlet processing; impact; numerical simulation

0 引 言

模具表面粗糙度的高低决定了模具产品的质量,

在模具制造中, 光整加工是提高模具质量重要的工艺环节^[1]。在模具产业中, 60%以上的模具型腔为自由曲面, 传统的机械抛光效果不理想, 气囊抛光、电解抛

收稿日期: 2013-09-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20876146)

作者简介: 周迪锋(1988-), 男, 浙江慈溪人, 主要从事流固耦合与超精密加工方面的研究。E-mail: zjut_zdf@163.com

光等新型抛光方法逐渐应用到模具抛光中,但在结构微小的沟、孔、槽等抛光工具无法进入的结构中抛光效果达不到要求。需抛光工具的抛光方法不能满足精密模具制造的需求。为了突破这一技术瓶颈,国内外研究人员提出了磨粒流加工方法。流体有很高的仿形性,磨粒随着流体对加工表面进行抛光,因此在曲面加工和异面加工中具有不可替代的优势。

PROKHOROV^[2]在1992年首先提出了磁流抛光概念,利用磁性颗粒和流体介质组成的悬浮液在磁场中的运动特性对工件进行抛光。曹志强^[3],赵继^[4]研究了悬浮液加工中材料去除的机理,通过建立球形磨粒的力学模型,分析了抛光加工的可行性。Zitoun^[5]采用粒子跟踪测速方法检测了固液两相流中颗粒的运动状态。汤勇^[6]利用高粘度分子材料作为流体介质,加入磨粒形成悬浮液,在压力作用下加工未淬火的T8工具钢,使表面粗糙度从加工前的 $R_a = 1.2 \mu\text{m}$ 变为加工后的 $R_a = 0.2 \mu\text{m}$ 。计时鸣^[7]采用弱粘性的磨粒流获得了更好的流动特性,有效实现了细微结构表面的光整加工,表面粗糙度可以达到 $R_a = 0.5 \mu\text{m}$ 。但是在单入口加工装置中,加工面出现了不均匀性,同时加工效率较低,为了提高加工效率,改善工件加工质量,笔者在此基础上采用双入口加工装置。

对于流场的研究一般采用数值模拟的方法,而传统的CFD软件有一定的局限性,流体在壁面处的速度默认为零,固相颗粒在流固两相流中多以拟流体计算,因此磨粒撞击壁面的速度也为零,而在实际加工中,磨粒进入流体边界层后在惯性作用下维持原有运动状态^[8],进而撞击壁面,产生切削作用。本研究将离散元法(DEM)和CFD结合起来,把磨粒作为离散相,把流体作为连续相,通过PFC-CCFD软件耦合,跟踪磨粒撞击壁面过程,比较单入口和双入口加工装置中撞击的次数、撞击的速度,并用Abaqus软件中的Johnson-Cook模型研究撞击速度、撞击次数对工件材料去除的影响,来分析光整的均匀性和效率。

1 控制方程

基于磨粒流加工流固两相流基本特征,固相采用拉格朗日离散相(DPM)模型,使用PFC软件在拉格朗日坐标系下描述磨粒运动特征;液相采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,使用CCFD软件在欧拉坐标系下计算流体流动特征。颗粒间的撞击采用PFC中的软球模型进行计算。

1.1 液相控制方程

流体的控制方程包括连续方程、动量方程和湍流模型方程。在磨粒流加工中流场表现为湍流形式,采

用应用广泛的标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型(k 表示湍动能, ε 表示湍动耗散率)。方程表达式如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial F_p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) + S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_3) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

式中: u_i, u_j — x, y, z 方向上的速度分量; x_i, x_j — x, y, z 轴的坐标; $\overline{u_i u_j}$ —雷诺应力项; S_i, S_k, S_ε —流体初始条件; G_k —湍动能中的速度梯度分项; G_b —湍动能中的浮力影响分项; C_1, C_2, C_3 —常数参量, $C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_3 = 0.09$; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ — k 和 ε 湍流普朗特数, $\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

1.2 固相运动方程

磨粒在流体中受到的主要作用力是曳力和重力,磨粒的运动方程为:

$$\frac{du_p}{dt} = F_d(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (6)$$

式中: $F_d(u - u_p)$ —磨粒单位质量上受到的曳力, u —液相速度, u_p —固相速度, ρ_p —固相密度, ρ —液相密度, F_x —质量附加力在 x 轴上的投影。

F_d 计算方法为:

$$F_d = \frac{9\mu}{\rho_p d_p} \cdot \frac{C_d \text{Re}}{12} \quad (7)$$

式中: d_p —磨粒直径,Re—颗粒相对雷诺数, C_d —曳力系数。

Re计算方法为:

$$\text{Re} = \frac{\rho d_p |u - u_p|}{\mu} \quad (8)$$

C_d 计算方法是Haider和Levenspile^[9]提出的,公式为:

$$C_d = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + b_1 \text{Re}^{b_2} \right) + \frac{b_3 \text{Re}}{b_4 + \text{Re}} \quad (9)$$

其中,当磨粒非球形时,需要引入球形系数:

$$\phi = \frac{s}{S} \quad (10)$$

式中: s —与磨粒体积相同的球的表面积, S —磨粒的表面积,当磨粒为球形时 $\phi = 1$ 。

则 b_1, b_2, b_3, b_4 分别为:

$$b_1 = \exp(2.33 - 6.46\phi + 2.45\phi^2) \quad (11)$$

$$b_2 = 0.09 + 0.56\phi \quad (12)$$

$$b_3 = \exp(4.91 - 13.89\phi + 18.42\phi^2 - 10.26\phi^3) \quad (13)$$

$$b_4 = \exp(1.47 + 12.26\phi - 20.73\phi^2 + 15.89\phi^3) \quad (14)$$

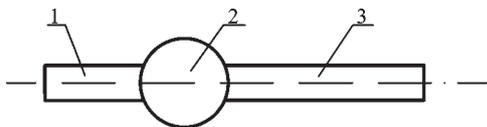
2 磨粒流加工数值模拟

本研究以单入口加工装置和双入口加工装置为研究对象,分别比较磨粒在加工区域内撞击壁面的次数、撞击速度,并用有限元分析不同撞击速度对加工面材料去除的影响。

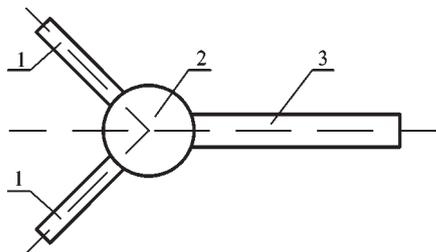
2.1 加工装置及网格划分

双入口装置采用两个对称的入口流道,流体进入缓冲区后,两股流体发生撞击,撞击使得流体的运动变得更加复杂,同时磨粒也在两股流体之间来回穿插,磨粒与磨粒之间的撞击次数也急剧增大,使得磨粒运动的无序性提高。

为了使两个装置中的流量相同,本研究控制双入口装置入口处的横截面积为单入口的一半。加工装置二维图如图1所示。加工装置参数如表1所示。



(a) 单入口装置



(b) 双入口装置

图1 加工装置二维模型

1—入口;2—缓冲区;3—加工曲面

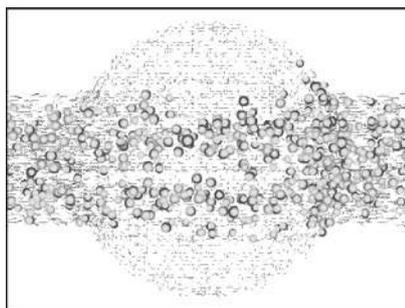
表1 加工装置参数

	直径 d/mm	速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	雷诺数 Re
单入口	10	40	8 695
双入口	7.07	40	6 150

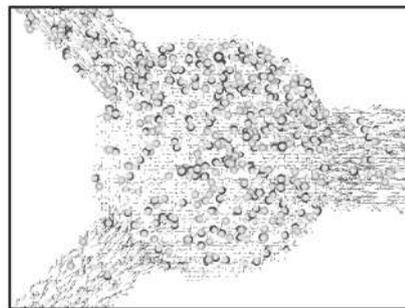
2.2 流固两相数值模拟

在磨粒流加工中,磨粒的体积分数一般在20%~30%。在PFC-CCFD耦合仿真中,在每个加工装置中加入1 000个磨粒,其中双入口装置每个入口分别为500个,这样在入口装置中,磨粒的体积分数为22.5%,符合加工要求。本研究利用PFC中的 `contact_head` 函数采集每个磨粒撞击加工面时速度等数据。

PFC-CCFD耦合仿真如图2所示。在图2中,小箭头表示流场的运动方向,颗粒表示磨粒,图2(b)中的磨粒由于受到撞击流的影响,运动显然更加无序,磨粒与磨粒之间撞击的增多也使得磨粒撞击壁面的次数增多。



(a) 单入口装置仿真



(b) 双入口装置仿真

图2 PFC-CCFD耦合仿真

经过统计,磨粒撞击加工面的数据如表2所示。

表2 磨粒撞击加工面次数

	< 20 m/s	20 m/s ~ 30 m/s	30 m/s~ 40 m/s	> 40 m/s	总计
单入口	487	734	1 028	563	2 812
双入口	937	1 509	2 225	1 382	6 053

2.3 有限元仿真

为了研究磨粒流加工时壁面材料的去除原理,需要对磨粒撞击过程进行有限元分析。本研究选择典型的Ti-6Al-4V作为靶材,应用Johnson-Cook失效模型,利用ABAQUS进行建模与求解,分析磨粒撞击次数、撞击速度对加工的影响。Ti-6Al-4V和磨粒的材料参数详见文献[10]。

有限元仿真示意图如图3所示。图3中磨粒的直

径为 100 μm , 撞击速度为 40 m/s, 经过 5 次撞击, 其中第 3 次撞击靶材的质量损失较少, 这是由于前两次撞击使得表面发生硬化, 在经过第 4 次和第 5 次撞击后, 靶材逐渐被冲蚀。撞击速度为 40 m/s 时, 靶材质量损失与磨粒撞击次数的关系如图 4 所示。

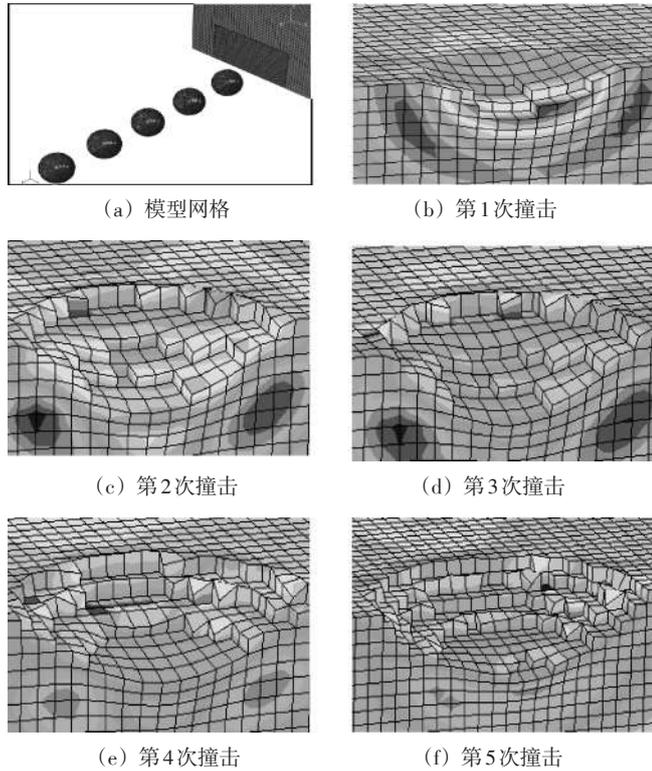


图3 有限元仿真

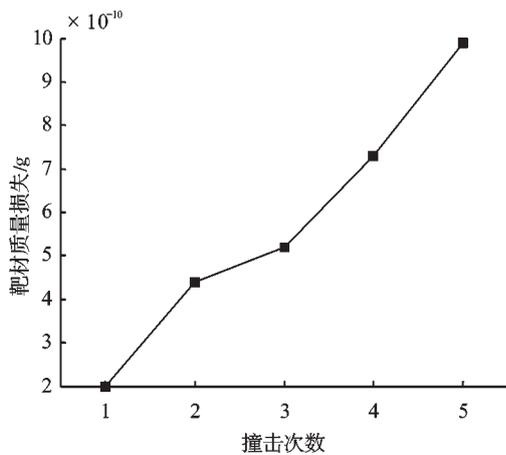


图4 靶材质量损失随撞击次数的变化

为了研究撞击速度对靶材质量损失的影响, 本研究分别对入射速度为 20 m/s, 30 m/s, 40 m/s, 50 m/s 进行仿真。靶材质量损失与撞击速度的关系如图 5 所示, 当入射速度为 20 m/s 时, 靶材质量损失基本为零, 入射速度为 30 m/s~40 m/s 时, 质量损失开始增大, 入射速度达到 50 m/s 时, 材料质量损失较大。

结合表 2 中磨粒撞击加工面的数据, 双入口加工装置光整效率更高。

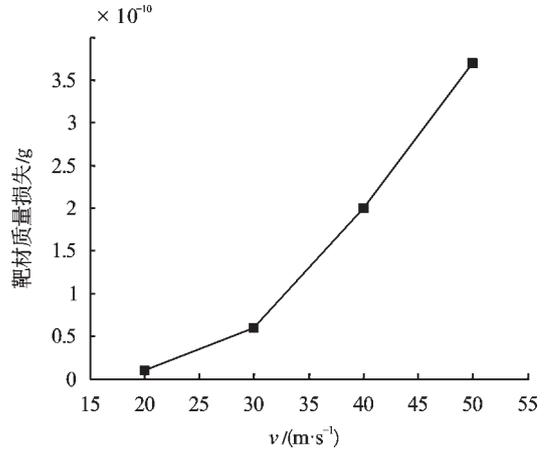


图5 靶材质量损失与撞击速度的关系

3 实验测量

磨粒流实验装置如图 6 所示。本研究用单入口装置和双入口装置进行磨粒流加工实验, 选择碳化硅磨粒, 模具钢作为加工试件, 在磨粒流实验台上进行测试。每隔 5 h 测量加工面的表面粗糙度, 加工 30 h 后, 双入口装置加工的试件的表面粗糙度 $R_a = 0.35 \mu\text{m}$, 单入口装置中试件的表面粗糙度 $R_a = 0.65 \mu\text{m}$ 。



图6 磨粒流实验装置

表面粗糙度随时间变化曲线如图 7 所示。

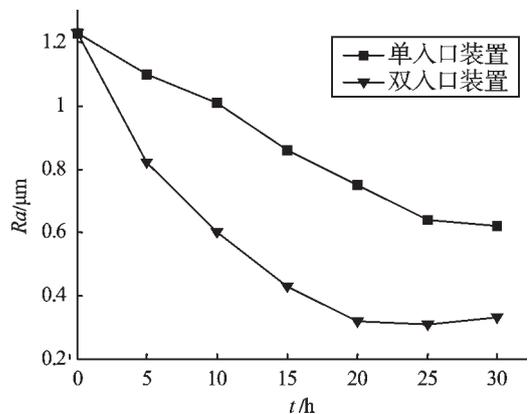
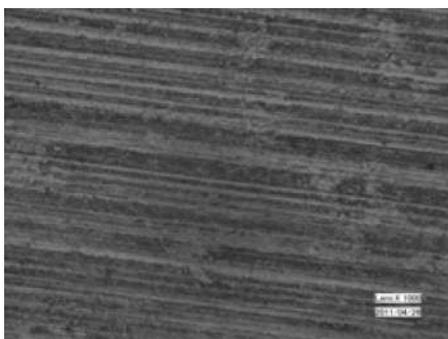


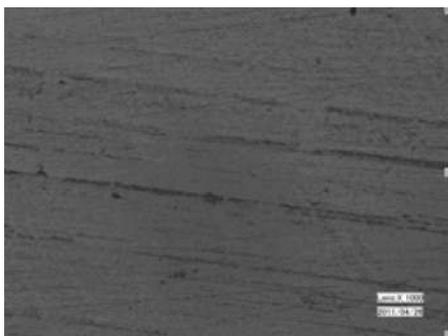
图7 表面粗糙度随时间变化

笔者把加工 30 h 后的试件放在 VHX-600E 显微镜上, 放大 1 000 倍观察工件的表面形貌。加工后表

面纹理如图8所示。双入口装置加工的工件表面纹理较少,表面粗糙度较低。



(a) 单入口加工试件



(b) 双入口加工试件

图8 加工后表面纹理

4 结束语

本研究采用DEM和CFD耦合的方法,结合DPM模型和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,以单入口和双入口磨粒流加工装置为研究对象,对磨粒撞击壁面过程进行了数值模拟,并得到以下结论:

(1) 双入口加工装置中,两股流体在缓冲区中发生撞击,使得磨粒运动的无序性提高,磨粒与壁面撞击的次数也随之增大。

(2) 双入口加工装置的加工效率明显高于单入口装置,加工后的表面纹理少,表面粗糙度低。

(3) 在双入口加工装置加工30 h后,试件的表面粗糙度 $R_a=0.35\ \mu\text{m}$,单入口装置中试件的表面粗糙度 $R_a=0.65\ \mu\text{m}$ 。

参考文献(References):

- [1] SHIOU F J, CIOU H S. Ultra-precision surface finish of the hardened stainless mold steel using vibration-assisted ball polishing process [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(7): 721-732.
- [2] BORISOV A B, BOROVSKIY A V, KOROBKIN V V, et al. Observation of relativistic and charge-displacement self-channeling of intense subpicosecond ultraviolet (248 nm) radiation in plasmas [J]. *Physical Review Letters*, 1992, 68(15): 2309.
- [3] 曹志强,赵继,詹建明,等.液流悬浮超光滑纳米加工试验[J].农业机械学报,2007,38(3):153-155.
- [4] 赵继,陈德祥,张富,等.SiC悬浊液超光滑表面加工技术[J].吉林大学学报:工学版,2006,36(4):518-522.
- [5] ZITOUN K B, SASTRY S K, GUEZENNEC Y. Investigation of three dimensional interstitial velocity, solids motion, and orientation in solid-liquid flow using particle tracking velocimetry [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, 27(8): 1397-1414.
- [6] 汤勇,周德明,夏伟,等.磨料流加工壁面滑动特性的研究[J].华南理工大学学报:自然科学版,2001,29(1):34-37.
- [7] 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(15):178-184.
- [8] KAFTORI D, HETSRONI G, BANERJEE S. Particle behavior in the turbulent boundary layer. I. Motion, deposition, and entrainment [J]. *Physics of Fluids*, 1995, 7(5): 1095-1221.
- [9] HAIDER A, LEVENSPIEL O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles [J]. *Powder Technology*, 1989, 58(1): 63-70.
- [10] WANG Y F, YANG Z G. Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials [J]. *Wear*, 2008, 265(5): 871-878.

[编辑:张翔]

本文引用格式:

周迪锋,刘冬玉.耦合DEM-CFD法双入口磨粒流动力学模拟及加工试验[J].机电工程,2013,30(12):1467-1471.

ZHOU Di-feng, LIU Dong-yu. Coupling DEM-CFD double inlet abrasive flow dynamics of numerical simulation and test device [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2013, 30(12): 1467-1471.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>