

文章编号 1004-924X(2011)09-2092-08

结构化表面环境下软磨粒流的流场数值分析

计时鸣¹, 马宝丽^{1,2}, 谭大鹏^{1*}

(1. 浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310032;
2. 杭州师范大学 钱江学院, 浙江 杭州 310012)

摘要:为了研究模具结构化表面环境下软性磨粒流的流场加工特性,应用单颗动力学模型(SPD)通过数值模拟求解了颗粒在不同形态的湍流场中的运动特性。以 U 形流道为例,利用 N-S 方程、湍流的 Realizable($k-\epsilon$)模型以及压力耦合方程的半隐相容(SIMPLEC)算法,求解了软性磨粒两相流场中流体的速度、压力等特性参数;接着利用 SPD 求解多种环境下软性磨粒两相流场中颗粒的速度、轨迹、密度分布等参数。实验结果表明:在流体初始速度为 5, 10, 20 m/s 3 种情况下,流体初始速度为 5 m/s 时颗粒沉降最为明显;在颗粒直径为 0.01, 0.05, 0.1 mm 3 种情况下,直径为 0.01 mm 时颗粒沉降较为明显;在水、柴油、机油 3 种不同黏度的湍流场中,两相软性磨粒流场特性非常接近。结论显示,流体的初始速度和颗粒的粒径使得湍流对颗粒运动特性影响较大,流体的黏性对其影响较小。

关键词: 模具抛光; 结构化表面; 软磨粒流加工; 单颗动力学模型; 数值模拟

中图分类号: TG580.692 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111909.2092

Numerical analysis of soft abrasive flow in structured restraint flow passage

Ji Shi-ming¹, Ma Bao-li^{1,2}, Tan Da-peng^{1*}

(1. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology of the Ministry of Education of China, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China;
2. Qianjiang College, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310012, China)

* Corresponding author, E-mail: tandapeng@zjut.edu.cn

Abstract: In order to explore machining characteristics of the soft abrasive flow field in a structured mold surface, the Single Dynamics Model (SPD) was applied to the solution to the motion characteristics of particles in different types of turbulence fields numerically. By taking a U-shaped flow passage for an example, the velocity and pressure of fluid in a two-phase soft abrasive flow field were solved by using the N-S equations, a Realizable $k-\epsilon$ model of turbulence and the SIMPLEC method. Then the velocity, locus and the density of particles in the two-phase field were also obtained by the SPD model. The results are that when the initial fluid velocities are 5, 10 and 20 m/s, the particle deposition is the largest for the first case. When the particle diameters are 0.01, 0.05 and 0.1 mm, the first value causes the particle deposition to be most obvious. In turbulence fields with different viscosities, the

收稿日期: 2011-01-07; 修订日期: 2011-01-29.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 50875242, No. 50905163); 浙江省自然科学基金重点项目 (No. Z107517)

water, gas-oil and engine-oil show similar two-phase soft abrasive flow characteristics. It concludes that the initial velocity of the fluid field and the diameters of particles have more severe effect on the moving characteristics of particles, and the viscosity of the fluid influences them the least.

Key words: die polishing; structured surface; soft abrasive flow machining; single particle dynamic model; numerical simulation

1 引言

软磨粒流加工(Soft Abrasive Flow Machining, SAFM)是应用于模具的结构化表面加工的一种新型抛光技术。结构化表面(structured surface)一词是从光学元件领域借鉴而来^[1-2],在这里是模具中沟、槽、孔、棱柱、棱锥、窄缝等复杂异型面的统称。软磨粒流加工是以具有无黏性或弱黏性的流体为载体,将具有刮削作用的磨粒悬浮在其中,依靠封闭流道内含有磨粒的高雷诺数(Reynolds number)流体在湍流状态下的循环流动实现对模具结构化表面微力微量的频繁切削。软磨粒流加工主要特点是不需借助加工工具,因此不受加工空间的局限。针对模具中那些微小尺寸的沟、槽、狭缝等工件表面的精密加工难制造的问题,软磨流加工的应用具有非常重要的意义。

相对磨粒流加工(Abrasive Flow Machining, AFM)技术,软磨粒流加工的软性主要表现为以下两个特征:一是软磨粒流加工采用的是在流体湍流状态下进行微力微量刮擦去除材料的方法,所以流体具有流速高、黏性低,磨粒含量少的特点。二是该方法可人为设计约束模块表面的形状,使之与被加工表面组成可调控的流道,优化流场参数,从而更好地实现两相流对结构化表面的镜面级加工。而磨粒流加工是以一定的压力强迫半流动状态的粘弹性磨料通过被加工表面,利用其中磨粒的刮削作用去除工件表面微观不平材料而达到对工件表面光整加工的目的^[3-5]。因此,磨粒流加工具有流体黏性大,磨粒含量高,流动性差,流道受加工表面形状的限制以及表面呈现明显加工纹理等特点。

软磨粒流加工是一种新型的抛光方法与加工工艺,加工机理和工艺过程试验都是未来一段时间需要研究的重点内容。软磨流加工的实质是依靠贴近壁面的磨粒运动实现对壁面也就是工件表面的加工,因此研究流体中磨粒特别是近壁区磨

粒的运动特性对加工机理的研究和工艺参数选择具有非常重要的意义。本文利用低浓度固液两相流理论,采用计算机数值模拟方法^[6],分析了在不同初始条件下磨粒的运动特性,并对两种不同初始条件下的软磨粒流对模具钢试件加工效果进行了对比。

2 数学模型

由固液两相流理论可知,当软磨粒流的磨粒浓度较低时,流体与颗粒之间的耦合可假设为是单向的,即颗粒的运动会受到流体的影响,而颗粒对流体的影响忽略不计,这就是单颗粒动力学模型(Single Particle Dynamics, SPD)^[7-8]。

2.1 流体的湍流模型

如前所述,软磨粒流加工工作状态的流场形态为湍流,因此流场的动量方程相比层流运动方程增加了雷诺应力梯度项,为了使其方程组能够封闭求解,在此选择应用最广泛的可实现(Realizable) $k-\epsilon$ 模型。在Realizable $k-\epsilon$ 模型中引入了两个未知量,湍动能 k 和湍动耗散率 ϵ ,与之相对应的输运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} + \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} - \rho \epsilon, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \rho E \epsilon - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v \epsilon}}, \quad (2)$$

式(1)、式(2)中普朗特数(Prandtl number) $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.2$,经验常数 $C_2 = 1.9$,

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad (3)$$

式(3)中,

$$\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\epsilon}, \quad (4)$$

式(4)中,

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (5)$$

式(1)、式(2)中,湍动黏度

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (6)$$

式(6)中,

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S U^* k / \epsilon}. \quad (7)$$

系数 C_μ 不是常数,而是与应变率联系起来,这就是 Realizable $k-\epsilon$ 比标准(standard) $k-\epsilon$ 模型和重正化群(RNG) $k-\epsilon$ 模型的改进之处。式(7)中的参数见文献[9]。

2.2 单颗粒动力学模型

单颗粒动力学模型属于欧拉-拉格朗日模型的范畴,它不考虑颗粒相的存在对连续相流体流动的影响,也不考虑颗粒之间的相互作用以及颗粒的脉动,并认为连续相的流场已知,只考虑单个颗粒在连续流体相中的受力和运动。

固体颗粒在两相流中受到绕流阻力 F_d 、重力 F_g 、附加质量力 F_{vm} 、压力梯度力 F_p 、Basset 力 F_B 、萨夫曼(Saffman)力 F_S 、马格努斯(Magnus)力 F_M 等作用力,由牛顿第二定律推导出颗粒的动量方程:

$$m_p \frac{du_{pi}}{dt} = F_{di} + F_{gi} + F_{vmi} + F_{pi} + F_{Bi} + F_{Mi} + F_{Si} + F_{Xi}. \quad (8)$$

公式(8)中的 F_X 为其他未考虑的外力总和,对该式各项进行展开后得到:

$$\begin{aligned} & \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_p \frac{du_{pi}}{dt} = \pi r_p^2 C_d \frac{1}{2} \rho (u_i - u_{pi}) |u_i - u_{pi}| + \\ & \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_p g_i + \frac{2}{3} \pi r_p^3 \rho \frac{d}{dt} (u_i - u_{pi}) - \frac{4}{3} \pi r_p^3 \frac{dp}{dx} + \\ & 6 r_p^2 \sqrt{\pi \rho \mu} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \frac{d}{dt} (u_i - u_{pi}) d\tau + \pi r_p^3 \omega (u_i - u_{pi}) \tau \\ & + 6.46 \sqrt{\rho \mu} r_p^2 \sqrt{\frac{du_i}{dy}} |u_i - u_{pi}|. \end{aligned} \quad (9)$$

公式(9)中, u 为流体相速度, u_p 为颗粒速度, μ 为流体动力黏度, ρ 为流体密度, ρ_p 为颗粒密度, r_p 为球形颗粒半径, ω 为颗粒转动的角速度, C_d 为阻力系数。

当颗粒是非球形时,阻力系数 C_d 中需引入球形系数 ϕ , 取由 Haider and Levenspiel^[10] 得出的公式:

$$C_d = \frac{24}{Re} (1 + b_1 Re^{b_2}) + \frac{b_3 Re}{b_4 + Re}, \quad (10)$$

颗粒雷诺数

$$Re = \frac{\rho d_p |u - u_p|}{\mu}, \quad (11)$$

式(10)中:

$$b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581\phi + 2.4486\phi^2), \quad (12)$$

$$b_2 = 0.0964 + 0.5565\phi, \quad (13)$$

$$b_3 = \exp(4.905 - 13.8944\phi + 18.4222\phi^2 - 10.2599\phi^3), \quad (14)$$

$$b_4 = \exp(1.4681 + 12.2584\phi - 20.7322\phi^2 + 15.8855\phi^3), \quad (15)$$

本文中固液流场的温度为常温,不考虑颗粒的热泳力、布朗力及热辐射。

3 数值计算

3.1 假设

以 U 形待加工的结构化表面为例,如图 1 所示,其截面形状为矩形,长宽尺寸分别是 2 mm, 1 mm。计算在不同初始速度、颗粒的粒径以及流体粘度下的颗粒浓度分布与颗粒轨迹。

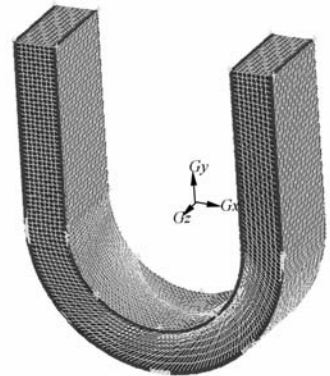


图 1 U 形流动及其网格划分

Fig. 1 U-shape passage and its mesh

计算实例参数的选择要做如下的考虑:

(1) 流场内的流体是不可压缩流体,流型处于湍流状态,流体无黏性或弱黏性。

(2) 根据管道黏性底层厚度的半经验公式计算其厚度,选择 3 种不同粒径大小的颗粒,分别是颗粒粒径小于黏性底层厚度,近似等于黏性底层厚度,大于黏性底层厚度 3 种情况。

(3) 能量方程不予考虑。

3.2 网格的划分

一个成功的数值计算离不开好的网格,求解

湍流问题比求解层流问题更依赖网格的划分,这主要是由于湍流流体质点的不规则运动造成质点在主运动之外还有附加的脉动。

普朗特(Prandtl)等人的研究表明,在湍流流动中,并不是整个流场都是湍流,由于液体质点受固体边界的限制,横向位移很小,几乎没有混掺现象,因而,在固体边界附近有一层极薄的液层几乎处于层流状态,这一液层称为黏性底层。黏性底层以外才是湍流核心区,过渡层较薄可不考虑^[11]。为考虑黏性底层对流场的影响,第一网格距离要小于黏性底层的厚度。网格划分如下:U形流道内采用结构化网格类型和六面体网格单元,对边界层部分的网格进行了细化,第一网格距离为 0.01 mm,网格划分如图 1 所示。

3.3 边界条件和初始条件

边界条件是数值计算具有定解的必要条件,选择合适的边界条件和初始条件,才能通过数值计算得出符合实际的计算结果。

在进口边界上,设置速度进口方式,给定其流动的速度方向为沿进口边界面的法线方向;在出口边界上,采用自由出流的方式。

颗粒相(SiC)的射流采用面射流源,从进口边界面上抛撒惯性颗粒,颗粒的初始速度与流体进口速度相同,颗粒与流体是单耦合。当颗粒与壁面发生碰撞时,采用颗粒-壁面碰撞模型,反弹速度的切向和法向分量可根据 Tabakoff 和 Hamed^[12]碰撞的反弹关系式:

$$v_{pr1}/v_{pr2} = 1.0 - 2.12\beta_1 + 3.0775\beta_1^2 - 1.1\beta_1^3, \quad (16)$$

$$v_{pn1}/v_{pn2} = 1.0 - 0.4159\beta_1 - 0.4994\beta_1^2 + 0.292\beta_1^3. \quad (17)$$

式(16)、(17)中, v_{pr} 和 v_{pn} 分别为颗粒撞击点的切向和法向速度,脚标 1 和 2 分别表示碰撞前后。

β_1 为颗粒撞击壁面的入射角,可由下式计算:

$$\beta_1 = \arctan(v_{pn1}/v_{pr2}). \quad (18)$$

颗粒撞击固壁后的速度 v_{p2} 和反弹角 β_2 由下式来确定:

$$v_{p2} = \sqrt{v_{pr2}^2 + v_{pn2}^2}, \quad (19)$$

$$\beta_2 = \arctan(v_{pn2}/v_{pr2}). \quad (20)$$

设置以上边界条件和初始条件,以及 Realizable- $k-\epsilon$ 模型的有关参数后,采用耦合隐式解法,通过协调一致的压力耦合方程组的半隐式方法 SIMPLEC 算法求解。

3.4 计算结果讨论

通过对流体初始速度、颗粒的粒径、流体黏性 3 个调控参数下 9 种湍流场的计算分析了以上参数对颗粒场的影响程度。9 种数值计算参数设置如表 1。

表 1 数值计算参数设置
Tab. 1 Parameters of numerical caculation

初始条件	流体速度 ($m \cdot s^{-1}$) ($d=0.1 \text{ mm}$, 水)($u=10 \text{ m/s}$, 水)	颗粒粒径 /mm	流体载体黏度 ($kg/m \cdot s$) ($d=0.1 \text{ mm}$, $u=20 \text{ m/s}$)
1	5	0.01	水 ($\mu=1.03 \times 10^{-3}$)
2	10	0.05	柴油 ($\mu=3.32 \times 10^{-3}$)
3	20	0.1	机油 ($\mu=7 \times 10^{-3}$)

3.4.1 初始速度的影响

在不同初始流速的水中加入相同粒径的碳化硅颗粒($d=0.1 \text{ mm}$),体积含量均为 10%,计算结果如图 2~4。3 幅图均反映了颗粒在运动过程中的速度有明显的下降,这主要由沿程所受阻力所致。在颗粒与壁面发生碰撞时,可以清晰地从图中观察到颗粒的反射路径,不同之处在于图 2 中的颗粒有明显的沉降、回流现象,图 3 的回流、沉降不是很明显;图 4 已经消除了颗粒的回流与沉降现象。因此从图中可以得出结论,在颗粒初始速度定义为流体的初始速度的前提下,颗粒的初始速度对颗粒在管道中的密度分布以及运动轨迹的影响还是非常明显的。

从计算结果来看,尽管在 3 种状况下流场均为湍流,但由于颗粒在运动过程中会受到各种阻力,而且颗粒与壁面的碰撞也会造成能量损失,这些影响都导致颗粒流速明显下降,当颗粒到达管的右侧时由于受重力作用降速更加严重,颗粒会出现如图所示的回流、沉降现象(左侧区域)。因此,在软磨粒加工过程中,设定流场运动参数时,一定要避免此种现象。沉降、回流将导致颗粒的密度分布不均匀,以及颗粒与壁面的的相对运动速度较低,对软磨粒的精密抛光非常不利。

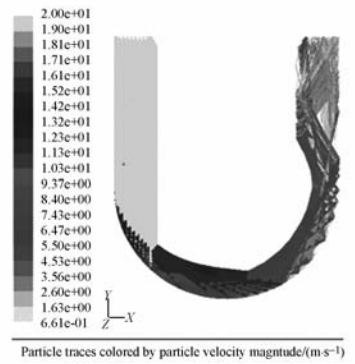
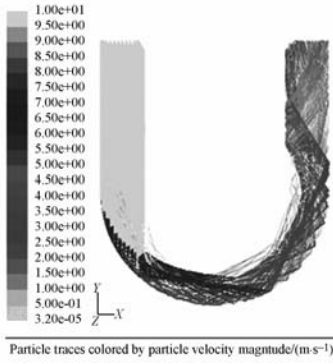
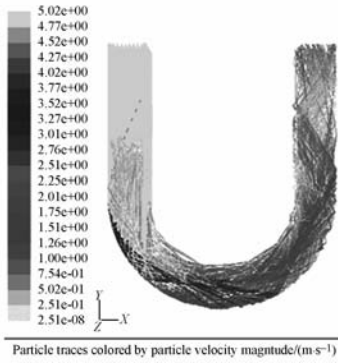


图 2 颗粒的速度幅值图 ($u=5\text{ m/s}$) 图 3 颗粒的速度幅值图 ($u=10\text{ m/s}$) 图 4 颗粒的速度幅值图 ($u=20\text{ m/s}$)
 Fig.2 Velocity magnitudes of particles Fig.3 Velocity magnitudes of particles Fig.4 Velocity magnitudes of particles

3. 4. 2 颗粒粒径的影响

为了分析颗粒的粒径对颗粒密度以及颗粒轨迹的影响,本文对相同初始流速($u=10\text{ m/s}$)的水中分别加入 $0.01, 0.05, 0.1\text{ mm}$ 3 种粒径的 SiC 颗粒,体积含量均为 10% ,计算结果如图 5~7。

从 3 幅图可以发现,在近壁区颗粒的分布不同,其中直径(0.1 mm)大于边界层厚度的颗粒的分布,要比直径(0.01 mm)小于边界成厚度的颗粒浓度分布要均匀。这主要是由于惯性作用,在弯头处湍流核心区的颗粒都要发生与管壁的碰

撞。当颗粒的直径小于边界层厚度时,湍流核心区的颗粒要经历从湍流到近似层流的穿越,两种不同的流动形态对颗粒运动有较大的影响。当颗粒的直径大于边界层的厚度时,湍流核心区的颗粒仍要经历从湍流到近似层流的穿越,但会出现颗粒有部分在近似层流区,部分在湍流区,因此造成颗粒不同区域的速度不同,从而导致颗粒有旋转的趋势。另外大颗粒的惯性力大,这也是大颗粒分布较均匀的原因之一。

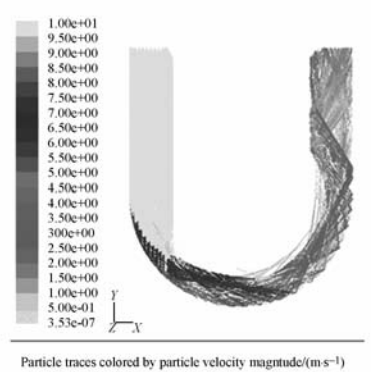
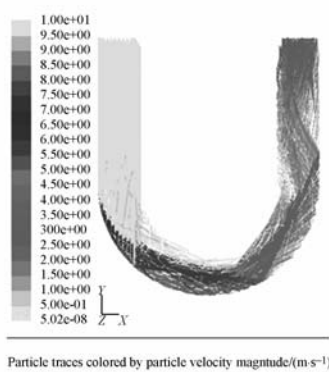
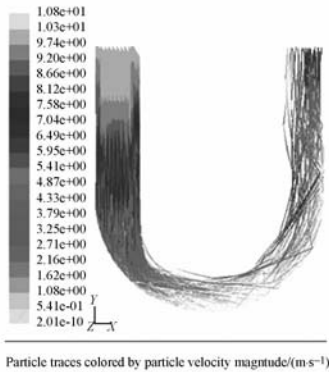


图 5 颗粒的速度幅值图 ($d=0.01\text{ mm}$) 图 6 颗粒的速度幅值图 ($d=0.05\text{ mm}$) 图 7 颗粒的速度幅值图 ($d=0.1\text{ mm}$)
 Fig.5 Velocity magnitudes of particles Fig.6 Velocity magnitudes of particles Fig.7 Velocity magnitudes of particles

3. 4. 3 流体黏度的影响

在 3 种不同黏性的流体(水,柴油,机油)中加入相同粒径的 SiC 颗粒($d=0.1\text{ mm}$),体积含量均为 10% ,初始速度为 20 m/s ,计算结果如图 8~10。3 幅图揭示了湍流状态下,在不同黏度的载体(柴油的黏度是水黏度的 3 倍,选择稀释机油

黏度是水黏度的 7 倍)下颗粒轨迹上速度幅值图。从图中可以观察到,无论是颗粒的运动轨迹,颗粒的密度分布,还是轨迹上速度幅值 3 幅图都非常接近。因此得出结论,在保证湍流的状态下,黏度的差别对颗粒运动规律的影响较为微弱。

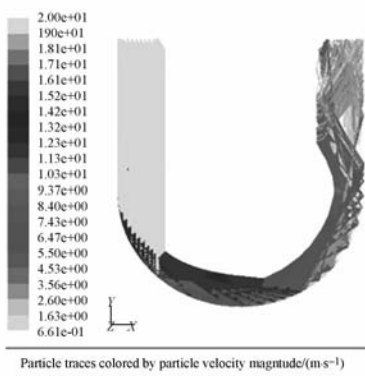


图 8 颗粒的速度幅值图(水)

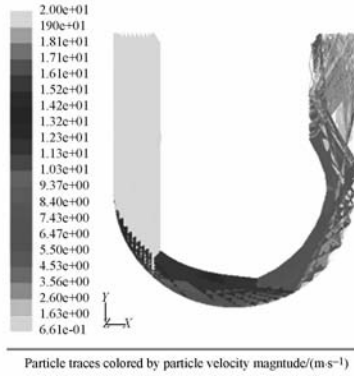


图 9 颗粒的速度幅值图(柴油)

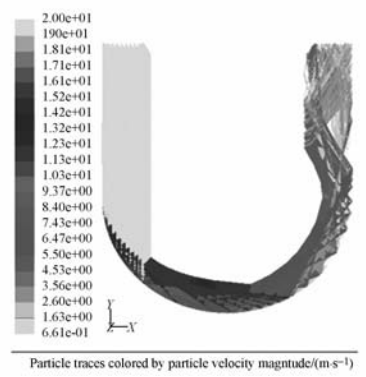


图 10 颗粒的速度幅值图(机油)

Fig. 8 Velocity magnitudes of particles

Fig. 9 Velocity magnitudes of particles

Fig. 10 Velocity magnitudes of particles

3. 4. 4 结果讨论

通过对不同初始速度(5, 10, 20 m/s),不同粒径的颗粒(0.01, 0.05, 0.1 mm),不同黏度的流体(水, 柴油, 机油)的固液两相流的数值模拟,发现在 U 形流道或者类似具有弯头的流道中,初始速度对颗粒密度分布与颗粒运动轨迹的影响最大;其次是颗粒的粒径;在保证湍流的状态下,流体的黏度对颗粒密度分布与颗粒运动影响不大。

4 实验验证

根据以上的数值模拟结果,选取其中颗粒运动特性差别较大的两种方案对模具钢试件(见图 11)进行软磨粒流加工实验,实验参数设置见表 2。

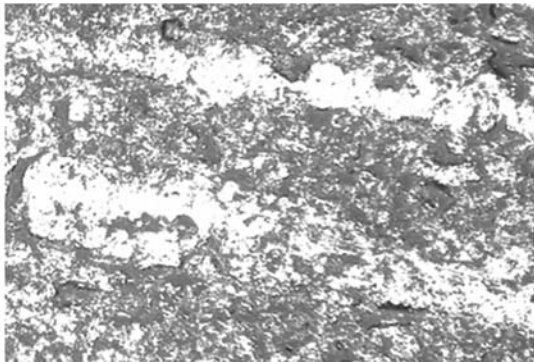


图 11 加工前表面形貌图

Fig. 11 Surface topography before machining

表 2 实验方案参数设置

Tab. 2 Parameters of experiment scheme

初始条件	流体速度/(m·s ⁻¹)	颗粒粒径/mm	流体载体
方案 1	10	0.01	水
方案 2	20	0.1	机油

在不同的初始条件下,在软磨粒流实验台上经过 50 h 的加工,采用放大 500 倍的显微镜观测,加工后的试件形貌见图 12, 13。

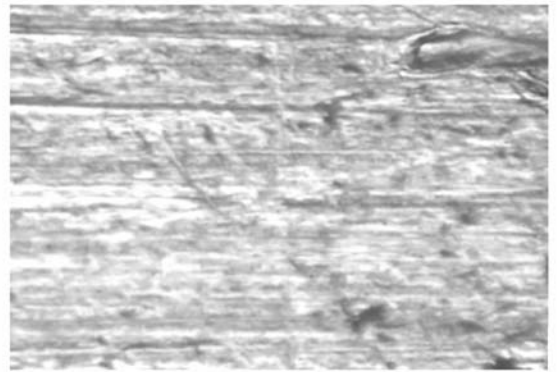


图 12 加工后表面形貌图(方案一)

Fig. 12 Surface topography after machining(scheme 1)

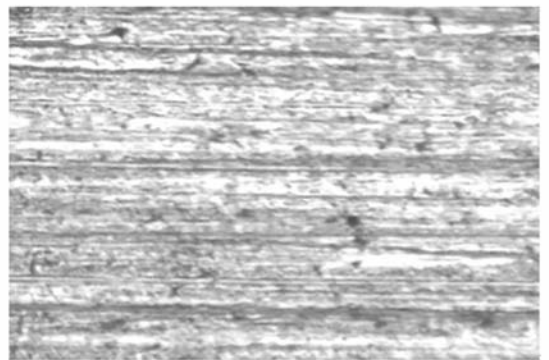


图 13 加工后表面形貌图(方案二)

Fig. 13 Surface topography after machining(scheme 2)

从以上两个相同试件加工后的微观形貌图可以看出,选择第二种工艺参数加工效果较好,这和数值模拟结果非常吻合。第二种方案中的数值模

拟结果(图 10),相比第一种方案的数值模拟结果(图 5),颗粒密度分布更均匀,颗粒受流体运动控制更明显,颗粒运动轨迹更趋于流线,更适合软磨粒流的光整加工。

5 结 论

本文采用单颗动力学模型和 Realizable $k-\epsilon$ 模型相结合的方法,以 U 形待加工表面为例,对

软磨粒流的流场特性进行了数值模拟。模拟结果表明流体的初始速度和颗粒的粒径两个参数对颗粒运动特性影响较大,而流体的黏性对颗粒运动特性影响最小。根据数值模拟结果选取两种不同工艺参数的方案进行了试验验证,两者结果非常一致,表明数值模拟结果能够对今后的软性磨粒流在类似 U 形管的模具加工中工艺参数的选择方面起到较好的指导和借鉴作用。

参考文献:

- (2):218-223. (in Chinese)
- [7] HOWARD H H, PATANKAR N A, ZHU M Y. Direct numerical simulations of fluid-solid systems using the arbitrary lagrangian-eulerian technique [J]. *Journal of Computational Physics*, 2001, 169(2):427-462.
- [8] 邓永波, 张平, 杜新, 等. 亲/疏水性不同壁面组成微通道的深宽比与通道内液体的自发毛细流动[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7):1562-1567.
- DENG Y B, ZHANG P, DU X, *et al.*. Analysis of material removal mechanism in fluid jet polishing by finite element method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1562-1567. (in Chinese)
- [9] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, *et al.*. A new eddy viscosity two-equation model for high Reynolds number turbulent flows [J]. *Computer Fluids*, 1995, 24(3):227-238.
- [10] HAIDER A, LEVENSPIEL O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles [J]. *Powder Technology*, 1989, 58(1):63-70.
- [11] KLINE S J, REYNOLDS W C, SCHRAUB F H. The structure of turbulent boundary layer [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1967, 30(4):741-773.
- [12] TABAKOFF W, HAMED A. Aerodynamic effects on erosion in turbomachinery [J]. *Jsme and Asme*, 1977, 70:392-401.
- [1] EKKARD B, OLTSMANN R, ALEXANDER G. Finishing of structured surfaces by abrasive polishing [J]. *Precision Engineering*, 2006, 30(3):325-336.
- [2] JI S M, XIAO F Q, TAN D P. Analytical method for softness abrasive flow field based on discrete phase model [J]. *Science China - Technological Sciences*, 2010, 53(10):2867-2877.
- [3] RAJENDRA K J, JAIN V K, DIXIT P M. Modeling of material removal and surface roughness in abrasive flow machining process [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1999, 39(12):1903-1923.
- [4] JAIN V K, ADSUL S G. Experimental investigations into abrasive flow machining (AFM) [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2000, 40(7):1003-1021.
- [5] GORANA V K, JAIN V K, LAL G K. Prediction of surface roughness during abrasive flow machining [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 31(3-4):258-267.
- [6] 方慧, 郭培基, 余景池. 液体喷射抛光技术材料去除机理的有限元分析 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2):218-223.
- FANG H, GUO P J, YU J C. Analysis of material removal mechanism in fluid jet polishing by finite element method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14

作者简介:



计时鸣 (1957—),男,浙江温州人,教授,博士生导师,主要从事精密加工、并联机器人等方面的研究。E-mail:jish-
iming@zjut.edu.cn



谭大鹏 (1980—),男,山东淄博人,副教授、博士,主要从事工业检测技术、超精密加工等方面的研究。E-mail:
tandapeng@zjut.edu.cn



马宝丽 (1977—),女,山东聊城人,讲师,博士研究生,主要从事超精密加工、噪声与振动控制等方面的研究。E-mail:Mabaoli_77@163.com

● 下期预告

激光外差技术对目标速度高精度测量

刘立生^{1,2},张合勇^{1,2},赵 帅^{1,2},郭 劲¹,王卫兵¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

为了研究激光外差探测在速度测量中的应用及其测量精度,将该技术应用于漫反射目标匀速转动速度测量,实现了对类简谐运动变速测量。搭建了外差探测实验系统。分别测量了漫反射目标正负两个方向转动,共得了133组不同匀速速度;通过调整实验系统,实现了对类简谐运动目标变速测量,应用Matlab数学工具对拍摄频谱视频做后续处理,得到运动目标实时速度。测量匀转速为0.05~16 m/s,分析实验测量结果,正向转动平均相对误差为0.51%,负向平均相对误差为0.42%;变速测量得正负方向最大速度分别为0.555 6 m/s和-0.659 m/s,所测数值可信,证明了激光外差对速度测量的高精度性,实验中频谱峰值清晰可见,激光外差探测具有较高信噪比。