

DOI: 10.3901/JME.2010.15.178

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*

计时鸣^{1,2} 唐波^{1,2} 谭大鹏^{1,2} 官斌¹ 袁巧玲¹ 潘艳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 杭州 310014;

2. 浙江工业大学浙江省特种装备制造与先进加工技术重点实验室 杭州 310014)

摘要: 提出一种基于软性磨粒流的模具结构化表面无工具精密光整加工新方法, 通过在被加工的结构化表面附近配置约束模块, 使结构化表面成为一条截面几何形状可设计的约束流道的内壁面, 利用液固两相软性磨粒流在约束流道内的湍流壁面效应实现对约束流道内壁面的微力微量切削, 从而克服光整加工工具难以接触结构化表面的困难, 完成对结构化表面的无工具精密光整加工。基于液固两相流体耦合理论, 建立面向结构化表面精密加工的约束流道内液固两相磨粒流动力学模型, 利用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和离散相模型相结合的求解方法, 以环形截面约束流道为研究对象, 选择不同的约束模块配合参数, 对流道内压力/速度分布及湍流动能进行数值分析研究, 通过该数值分析方法, 可以观察约束流道进口压力、入口与出口截面尺寸的相对变化等工艺参数对湍流形态的影响, 为研究软性磨粒流湍流形态调控的基本规律和磨粒流特性提供一种理论工具。

关键词: 结构化表面 精密光整加工 软性磨粒流 数值模拟

中图分类号: TG580.1

Structured Surface Softness Abrasive Flow Precision Finish Machining and Its Abrasive Flow Dynamic Numerical Analysis

Ji Shiming^{1,2} TANG Bo^{1,2} TAN Dapeng^{1,2} GONG Bin¹ YUAN Qiaoling¹ PAN Yan¹

(1. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

Abstract: A new mould structural surface no-tool precision finish machining method based on soft abrasive flow is brought forward. By installing constraint module at nearby the structured surface to be machined, the surface becomes a configurable restrained flow channel (RFC). Micro force and micro amount cutting for RFC is realized by using the turbulence wall effect of liquid-solid two-phase soft abrasive flow in RFC. It will overcome the difficulty of the polishing tool to contact the structured surface and accomplish the no-tool precision machining of the structured surface. Dynamical model of soft abrasive flow in RFC oriented to structured surface precision machining is established on the basis of liquid-solid two-phase flow coupling theory. Choosing corresponding conjunction parameters of different constraint modules, annular constraint flow channel is taken as the research object, and its pressure/velocity distribution and turbulent kinetic energy are analyzed by using standard $k-\varepsilon$ turbulent model and discrete phase model. The influence of relative variation of inlet/outlet conditions on the turbulent flow pattern can be inspected through the numerical analysis, thus providing a theoretical tool for the research of the basic law of soft abrasive flow form control and the abrasive flow characteristics.

Key words: Structural surface Precision finish machining Soft abrasive flow Numerical simulation

0 前言

在模具制造过程中, 为了消除模具表面所残留

的机械加工痕迹, 光整加工技术成为必要的工艺环节, 占整个模具制造时间的 50%以上。现有方法一般借助工具接触或靠近待加工表面进行加工^[1]。当前应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术能使被抛光曲面平均表面粗糙度达到 $0.007 \mu\text{m}$ ^[2], 但面向模具制造中所涉及的沟、槽、孔、棱柱、棱锥、

* 国家自然科学基金(50875242)和浙江省自然科学基金重点(Z107517)资助项目。20091120 收到初稿, 20100303 收到修改稿

窄缝等异型表面(本文将其定义为结构化表面)的表面精密光整加工技术研究却比较薄弱。由于基于工具接触加工机理的光整加工方法难以应用于结构化表面的精密加工,因此,模具结构化表面的精密加工成为亟待解决的技术难题。

松散磨粒与液体混合,可构成液固两相磨粒流,磨粒流的流体性质决定其可变化无形且无孔不入。因此,基于磨粒流形成了一些表面加工方法,由于磨粒流可形成良好仿形接触,因此在曲面和异型面加工中体现出优势。

但是,现有的磨粒流加工方法一般不能直接应用于模具结构化表面的光整加工或尚不能获得满意的表面粗糙度。其中磁流变光整^[3]、磁射流光整^[4]和电流变液光整^[5]等方法仍须借助工具,受工具尺寸限制,对于微小尺寸的沟、槽、狭缝的加工无能为力;磨粒水射流光整^[6]利用高压高速磨粒流喷射工件表面,借助磨粒高速碰撞的剪切作用实现光整加工,但射流的直线特性使得它难以均匀地冲刷到结构化表面的各个部位,因此无法与结构化表面形成的良好仿形接触和均匀的加工效果。

挤压珩磨使用强粘性磨粒流强力挤压进行加工,汤勇等^[7]开展了挤压珩磨加工工艺研究,聂先桥等^[8]研究了挤压珩磨磨料流动边界条件的确定问题。挤压珩磨的加工对象一般仍为常见的非结构化表面,由于强粘度磨粒流流经过于狭小和形态复杂的狭缝、沟槽时的强阻力会破坏结构化表面或薄壁形态,另外其磨粒的往复运动加工形式使表面纹理呈规律性和切削残留物无法及时排出,限制了其用于镜面级表面粗糙度的超精密加工^[9]。

针对模具制造中细小结构化表面光整加工的技术难题,SHEN等^[10]提出了一种基于软性磨粒流的模具结构化表面无工具精密光整加工新方法,通过在被加工的结构化表面附近配置约束模块,使结构化表面成为一条截面几何形状可设计的约束流道的内壁面,利用软性磨粒流(即弱粘性或无粘性液固两相磨粒流)在约束流道内的湍流壁面效应实现对约束流道内壁面的微力微量切削,完成对结构化表面的无工具化精密光整加工。该方法的主要优点在于,约束流道可以使软性磨粒流与复杂形状的结构化表面形成良好接触,克服了细小尺度的结构化表面无法使用工具进行光整加工的困难;利用磨粒流的湍流壁面效应实现表面的微力微量切削,不会导致结构化表面的机械变形;磨粒流在流道内的单向循环流动提高了磨粒利用率和加工效率,并可有效过滤加工残留物并减少排放污染;加工过程可自动化进行。

约束流道内磨粒流的层流流动将使磨粒相对壁面产生方向具有规律性的运动,其加工效果将在被加工面形成有规律的加工条纹,从而影响表面粗糙度的提高。因此,基于软性磨粒流实现精密加工的技术关键是合理配置约束流道截面的几何形状,调控磨粒流的压力和流速,使磨粒流形成具有良好加工特性的湍流形态,产生切削方向具有随机性的磨粒微切削,从而消除表面纹理的方向性,获得镜面级的表面粗糙度。

本文基于标准湍动能耗散($k-\varepsilon$)湍流模型和离散相模型(Discrete phase model, DPM),采用考虑颗粒碰撞的欧拉-拉格朗日数值模拟方法,以环形截面约束流道为例,研究液固两相流磨粒流在约束流道中固体颗粒的碰撞过程及湍流调控机理,为应用软性磨粒流实现模具结构化表面精密加工提供理论依据。

1 软性磨粒流结构化表面加工新方法

1.1 在模具结构化表面构造约束流道

为了利用软性磨粒流实现对尺寸小且结构特殊的结构化表面(沟、槽、窄缝等)的光整加工,需要磨粒流以一定压力和流速在结构化表面形成湍流流态,因此须引入约束模块与结构化表面组合(图1),以构成一个封闭的约束流道。高速流动的磨粒流在特定的流道截面形状约束下,形成湍流流动,对作为约束流道内壁面一部分的结构化表面进行冲蚀微切削,实现精密光整加工。对不同形态的模具结构化表面,可以设计不同形状的约束模块,形成不同截面形状的约束流道。

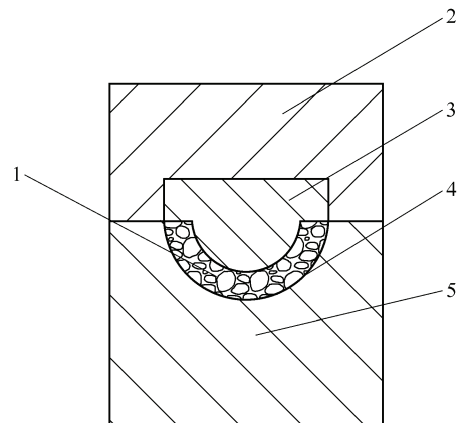


图1 模具结构化表面与约束模块配合

1. 约束流道 2. 夹具 3. 约束模块 4. 结构化表面 5. 模具

应用约束模块在模具结构化表面构造约束流道的原理方案如图1所示,夹具2通过压力固定装置将固接其上的约束模块3固定在被加工的模具5上,

约束模块 3 与模具 5 的结构化表面组合在模具结构化表面 4 上形成约束流道 1, 模具 5 的表面与夹具 2 之间视需要布置密封垫, 以防止加工过程中的高压磨粒流的泄漏。

1.2 基于软性磨粒流的无工具精密光整加工原理

所谓软性磨粒流, 指的是具有弱粘性或无粘性的液固两相磨粒流, 与具有强粘性的硬性磨粒流相比, 具有更好的流动特性并可方便地实现湍流流动, 基于软性磨粒流实现结构化表面无工具精密光整加工的原理是: ① 通过配置约束模块, 在结构化表面构成磨粒流约束流道; ② 以约束流道内流动的软性磨粒流替代加工工具实现对被加工表面的光整加工; ③ 软性磨粒流的有效加工是在湍流状态下进行, 它不是通过射流的形式强力冲击被加工表面, 而是利用磨粒的微力微量切削的频繁作用实现表面的逐步光整, 湍流流场中的磨粒运动的随机性实现了表面纹理无序化, 直至实现结构化表面无工具镜面级加工。

软性磨粒流采用隔膜泵驱动, 以保证具有强磨损性的磨粒流实现低压、高速、湍流流动, 隔膜泵驱动液固两相磨粒流可长期使用而不易磨损, 通过隔膜泵流量的控制可以实现磨粒流湍流流动形态的调控。磨粒流主要依靠剪切作用进行材料去除。磨粒速度的水平分量对切削起作用而垂直分量使粒子透入壁面。磨粒垂直速度小于临界值时, 材料只发生弹性变形, 磨粒粒子掠过表面, 而不产生材料去除, 水平分量小于临界值则不产生切削作用。磨粒的有效运动模式是磨粒先压入表面然后犁削进行微力微量切削。

2 软性磨粒流动力学模型

基于软性磨粒流的二相流基本特征, 液相采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 固相采用 DPM 模型建立面向结构化表面精密加工的软性磨粒流动力学模型。其中 DPM 采用考虑颗粒碰撞的欧拉-拉格朗日方法模拟液固两相流中颗粒的碰撞过程。在欧拉坐标系下描述流体相流动, 在拉格朗日坐标系下计算颗粒的运动轨迹、速度等参数。颗粒间的相互碰撞采用硬球模型进行模拟计算与求解^[10]。

2.1 流体相控制方程

采用连续方程、动量方程、标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型的湍流动能 k 方程和耗散率 ε 方程等控制方程对通道内液固两相磨粒流问题进行求解, 采用湍流涡粘性系数概念得到雷诺应力与涡粘性系数和时均速度

之间的关系。上述方程的具体表达式如下

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial F_p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right) + S_i \quad (2)$$

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

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} C_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

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

式中, ρ 为流体密度; t 是时间; x_i, x_j 是 x, y, z 三个方向的坐标; u_i, u_j 是 x, y, z 三个方向的速度分量; F_p 为流体微元体上的压力; $\overline{u_i' u_j'}$ 为雷诺应力项; S_i, S_k 和 S_ε 是用户定义的源项; G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; G_b 是由于浮力影响产生引起的湍动能 k 的产生项; Y_M 代表可压湍流脉动中胀动扩张的贡献; μ 为流体的粘度; C_μ 为经验常数; k 为湍动能; ε 为耗散率。 $k-\varepsilon$ 方程中的其他参数分别为 $C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92, C_{3\varepsilon}=0.09$, 湍动能 k 和耗散率 ε 的湍流普朗特数分别为 $\sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3$ ^[11]。

2.2 磨粒运动方程

由于软性磨粒流是一种弱粘性或者无粘性流体, 因此可忽略颗粒体积分数对连续相的影响。根据流道流动的实际情况, 本文在计算中主要考虑了重力和拽引阻力的作用, 忽略了较为次要的作用力, 因此磨粒运动方程在笛卡尔坐标系下可表示(x 方向)为

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

式中, $F_D(u - u_p)$ 为单位质量磨粒所受的曳力, u 为流体相速度, u_p 为磨粒速度, ρ_p 为磨粒密度, F_x 为所包括的附加质量力、热涌力、布朗作用力、萨夫曼力等其他各种力在 x 轴上面的投影。 F_D 的计

算方法为

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \times \frac{C_D Re}{24} \quad (7)$$

式中， μ 为流体动力粘度； d_p 为磨粒直径； Re 为相对雷诺数，其定义为

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

C_D 的计算方法是 HAIDER 等^[12]在 1989 年提出的，其具体表达式如下

$$C_D = \frac{24}{Re_{sph}} \left(1 + b_1 Re_{sph}^{b_2} \right) + \frac{b_3 Re_{sph}}{b_4 + Re_{sph}} \quad (9)$$

$$\begin{cases} b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581\phi + 2.4486\phi^2) \\ b_2 = 0.0946 + 0.5565\phi \\ b_3 = \exp(4.905 - 13.8944\phi + 18.4222\phi^2 - 10.2599\phi^3) \\ b_4 = \exp(1.4681 + 12.2584\phi - 20.7322\phi^2 + 15.8855\phi^3) \end{cases} \quad (10)$$

式中， $\phi = s/S$ 为磨粒的形状系数， s 为与磨粒具有相同体积的球的表面积， S 为磨粒的真实表面积。

2.3 磨粒运动与壁面碰撞

磨粒迹方程以及描述磨粒质量和热量传递的附加方程都是在离散的时间步长上可逐步进行积分运算求解的，对式(6)积分就得到了磨粒轨道上每一个位置上的磨粒速度。在固体边界上，对于直径较大的磨粒，其运动主要受惯性和磨粒与壁面碰撞的影响，直径较小的磨粒在边界处主要受流动和紊流的影响。磨粒与壁面发生碰撞过程中以磨粒发生弹性和非弹性碰撞反射处理。磨粒与壁面的碰撞过程如图 2 所示。

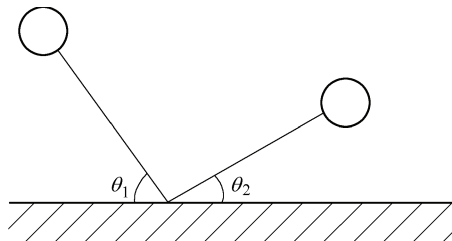


图 2 磨粒碰撞边界条件

图 2 中 θ_1 为碰撞前磨粒与壁面的入射角， θ_2 为磨粒与壁面反弹后所成的反射角，磨粒在壁面发生弹性反射，动量发生变化，变化量由弹性系数确定。弹性系数又可分解为法向恢复系数和切向恢复系数。法向恢复系数确定了，磨粒在壁面发生反弹后，

垂直于壁面方向的动量变化。切向恢复系数确定了磨粒在壁面发生反弹后，切向的动量变化。恢复系数的计算表达式为

$$e_n = \frac{v_{n2}}{v_{n1}} \quad e_t = \frac{v_{t2}}{v_{t1}} \quad (11)$$

式中， e_n 、 e_t 分别为法向和切向恢复系数， v_{n1} 、 v_{n2} 分别为碰撞前后法向速度， v_{t1} 、 v_{t2} 分别为碰撞前后切向恢复系数。法向(切向)恢复系数等于 1 表示磨粒在碰撞前后没有动量损失(完全弹性碰撞)。法向(切向)恢复系数等于 0 表示磨粒在碰撞后损失了所有的动量。

3 磨粒流的数值分析

3.1 计算对象及网格划分

计算域为磨粒流在约束模块和被加工工件的结构化表面组合构成约束流道，本文以半环形截面流道为例进行数值分析。采用三维实体结构模拟该区域，计算区域和网格划分由 GAMBIT-2.2.30 前处理器生成，网格划分示意图如 3 所示。

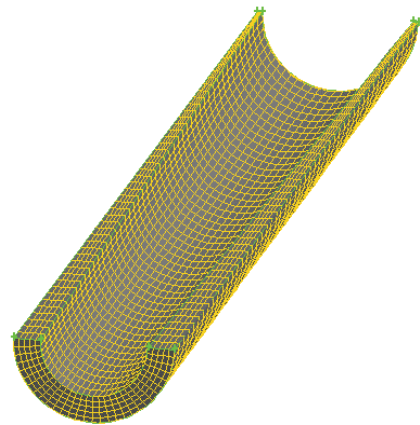


图 3 环形流道的网格划分示意图

3.2 模型描述及边界条件

为了实现对加工通道内磨粒流湍流流动形态的数值模拟，本文以 FLUENT-6.3 软件为计算平台，考虑到液固两相流的特点，针对不同的出口条件，分别采用了 3D 单精度稳态隐式压力基解器进行求解。计算过程中对控制方程和边界条件使用有限容积法(Finite volume method, FVM)进行离散，并用压力耦合方程的半隐方法算法(Semi-implicit method for pressure linked equations, SIMPLE)求解流体相，采用颗粒轨道法求解磨粒运动方程。

通过改变约束模块的形状和尺寸，来改变约束流道截面的形状和尺寸。模拟中使用的简化物理模

型如图 4 所示,物性参数如表 1 所示,其中 R_0 、 r_0 分别为结构化表面与约束模块的入口直径, R_1 和 R_2 、 r_1 和 r_2 分别为结构化表面与约束模块的出口直径, r' 为结构化表面直径与约束模块直径之差,即约束流道的直径。本文采用 5 种不同的约束模块,约束流道入口尺寸不变,提供了 5 种不同的约束流道出口尺寸: 0.2 mm、0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm、1 mm(表 1)。仿真参数如表 2 所示。由此初始条件,可以计算出此时雷诺数 $Re = 3197$, 已达到湍流流动的条件。

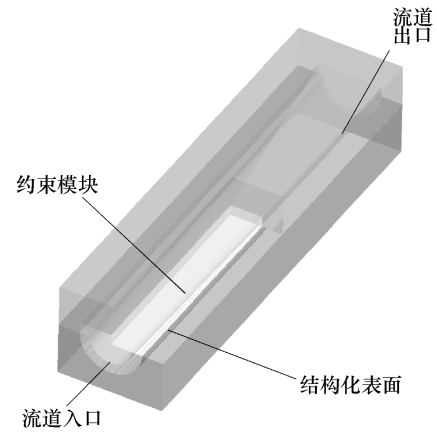


图 4 环形约束流道截面示意图

表 1 物性参数

流道	入口速度 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	流道深度 h / mm	入口尺寸			出口尺寸		
			R_0 / mm	r_0 / mm	r'_0 / mm	R / mm	r / mm	r' / mm
A	60	50	3.0	2.0	1.0	3.0	2.8	0.2
B	60	50	3.0	2.0	1.0	3.0	2.6	0.4
C	60	50	3.0	2.0	1.0	3.0	2.4	0.6
D	60	50	3.0	2.0	1.0	3.0	2.2	0.8
E	60	50	3.0	2.0	1.0	3.0	2.0	1.0

表 2 仿真参数

模具材料	洛氏硬度 HRB	磨粒材料	磨粒平均直径 $D / \mu\text{m}$	磨粒体积分数 $V / \%$	磨料动力粘度 $v_m / (\text{Pa} \cdot \text{s})$
45 钢	25	SiC	55	10	2.064

数值分析中使用的边界条件是: 流体相(全损耗系统用油), 假定流动已充分发展为湍流, 采用速度进口, 自由出流出口; 颗粒相(SiC), 给定与流体相同的初始速度, 采用速度进口, 自由出流出口, 忽略流体与颗粒之间的相互作用引起的两相间的双向耦合作用, 考虑磨粒与壁面的碰撞; 壁面边界条件: 壁面处采用无滑移边界条件, 近壁区域采用非平衡壁面函数近似处理。

3.3 数值分析结果及讨论

残差计算的收敛是判断磨粒流流动是否已达到湍流稳定状态(软性磨粒流加工状态)的重要标志, 因此观测残差计算的迭代收敛过程是很有必要的。针对本文所提供的不同约束流道出口, 其残差计算过程如图 5 所示, 其中横坐标为迭代计算次数 N , 纵坐标为量纲一残差幅值 A 。从图 5 中可以看出, 随着出口尺寸的增加, 迭代计算次数逐步增加, 这说明在约束流道出口较大时, 需要较长的湍流发展时间才能够达到所期望的稳定加工状态。

评价流道湍流的性能, 首先要从流道的湍流程度来分析, 湍流强度越大, 模具结构化表面的加工效果越好, 越能使加工精度得到提高。因此, 湍流

性能与流道截面的形状和尺寸有直接的关系。图 6~8 分别给出了不同出口截面尺寸的约束流道的径向速度、湍动能和湍流耗散率比较。

不同约束流道截面尺寸的径向速度对比关系如图 6 所示, 其中横坐标为流道深度位置 L , 纵坐标为径向速度 v 。从图 6 中可以看出, 随着出口的变小, 流道中的磨粒流的流速在增加, 开始时增加速度慢, 后来增加速度快, 速度的递增跟出口截面尺寸大小的改变存在一定关系, 由于流量一定, 出口越小, 速度就越快。

湍动能对比关系如图 7 所示, 其中横坐标为流道深度位置 L , 纵坐标为湍动能 k 。从图 7 中可以看出, 随着流道截面的减小, 磨粒流受到的挤压, 磨粒流的湍动能随之增加, 其原因是由于能量的损失速度比有效截面面积的减小速度要慢, 同时磨粒受到相互挤压, 所以湍动能随着流道的减小而变大。

湍流耗散率对比关系如图 8 所示, 其中横坐标为流道深度位置 L , 纵坐标为湍流耗散率 ε 。从图 8 中可以看出, 随着有效面积的变小, 耗散率也在不断的增加, 初期随着 L 增大, E 变化不大, 各流道

曲线重合；当出口尺寸由0.4 mm到0.2 mm时，耗散率变化较大。由于出口有效面积的减小，流动受到的阻碍就越大。

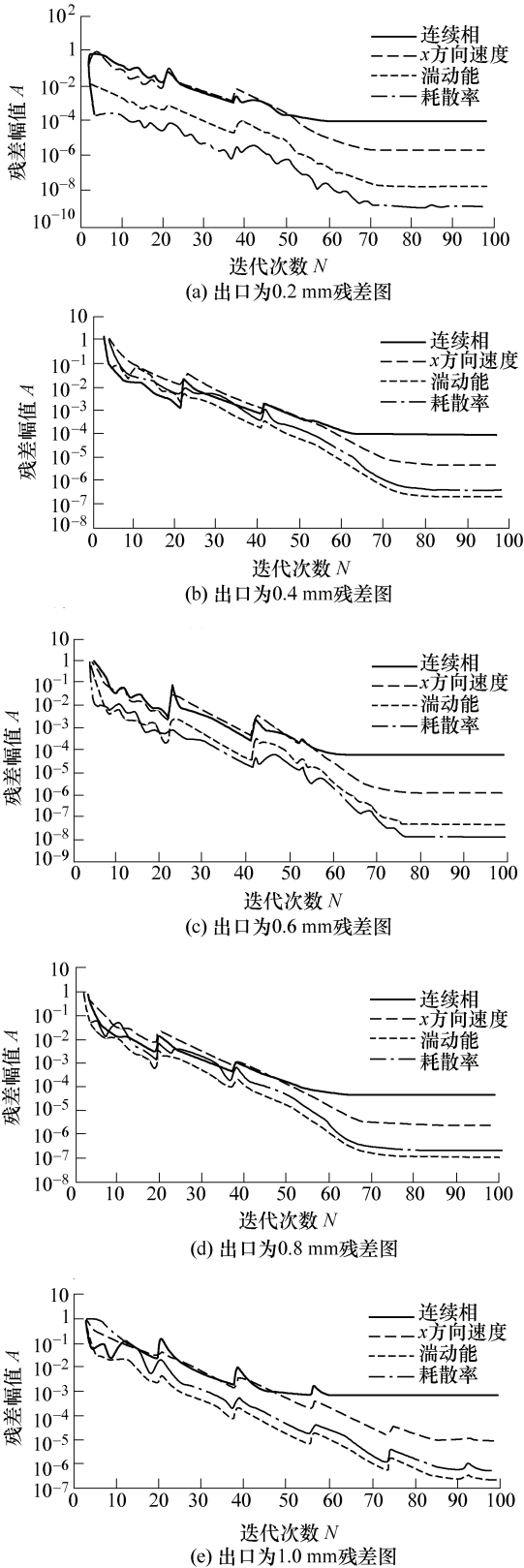


图5 不同出口尺寸流道的残差比较

通过对以上约束流道湍流衡量指标对比分析发现：① 随着约束流道深度的增大，磨粒流的径向速

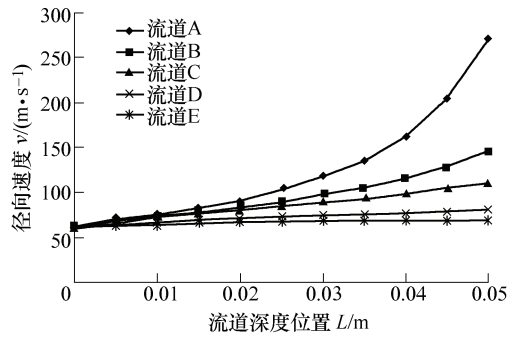


图6 不同约束流道截面尺寸的径向速度对比

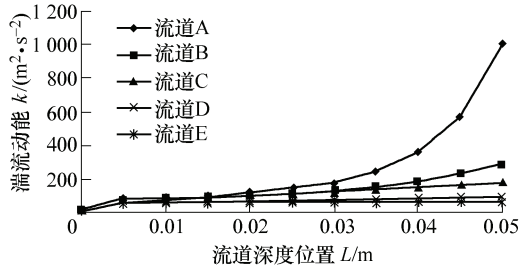


图7 不同约束流道截面尺寸的径向湍动能对比

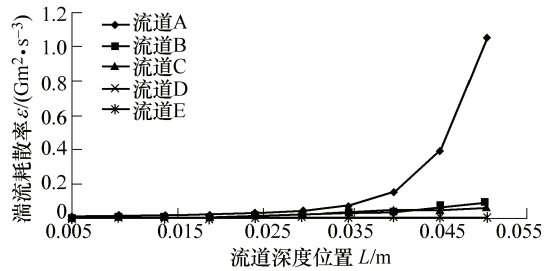


图8 不同约束流道截面尺寸的湍流耗散率对比

度、湍动能及耗散率也随之增大，且在接近流道出口处的增加幅度陡然提高，出现明显的非线性区域，而这是软性磨粒流加工过程中不希望出现的，因此需要增加约束流道的长度，使被加工工件位置在湍流线性区域内，从而使加工质量得到保证；② 当出口尺寸为0.6 mm时，约束流道中的磨粒流流动趋于均匀，对应的模具结构化表面加工效果应较为理想。上述分析表明，对于不同形状和尺寸的结构化表面，必须通过设计约束模块构造合理的约束流道截面形状和尺寸，并配合压力和流速的调节，实现对磨粒流湍流形态的调控，最终获得具有理想湍流指标的加工磨粒流和理想的加工效果。

4 结论

(1) 基于软性磨粒流的模具结构化表面光整加工新方法利用软性磨粒流在约束流道内的湍流壁面效应可以实现对结构化表面的光整加工，为克服细

小尺度结构化表面无法使用工具进行光整加工的困难提供了一种可行的解决方法。

(2) 为使软性磨粒流具有理想的湍流壁面效应以实现良好的加工效果, 必须对约束流道内磨粒流的湍流形态进行调控, 为此, 掌握湍流形态调控的基本规律是十分重要的。本文提出了一种利用 $k-\varepsilon$ 模型与 DPM 模型求解结构化流道压力/速度分布及湍流动能的数值分析方法, 为研究湍流形态调控的基本规律和软性磨粒流特性提供了一种理论工具。

(3) 借助本文给出的数值分析方法, 可以观察分析约束流道进口压力、入口与出口截面尺寸的相对变化等工艺参数变化对湍流形态的影响, 从而实现工艺参数的优化设计。合理的工艺参数可以得到具有良好加工特性磨粒流平均速度, 沿程压力分布状态以及较高的加工效率和表面纹理形态。

参 考 文 献

- [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(7-8): 721-732.
- [2] 计时鸣, 金明生, 张宪, 等. 应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 2-6.
JI Shiming, JIN Mingsheng, ZHANG Xian, et al. Novel gasbag polishing technique for free-form mold[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 2-6.
- [3] 孙希威, 张飞虎, 董申, 等. 磁流变抛光光学曲面的两级插补算法[J]. 光电工程, 2006, 33(2): 61-64.
SUN Xiwei, ZHANG Feihu, DONG Shen. Two-stage interpolated algorithm for magnetorheological finishing optical curved face[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(2): 61-64.
- [4] 张学成, 戴一帆, 李圣怡. 磁射流抛光中磁场的分析与设计[J]. 航空精密制造技术, 2006, 42(1): 12-15.
ZHANG Xuecheng, DAI Yifan, LI Shengyi. Analysis and design of magnetic field for MJP[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2006, 42(1): 12-15.
- [5] KURIYAGAWA T, SAEKI M, SYOJI K. Electrorheological fluid-assisted polishing for small three-dimensional parts[J]. Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 2002, 26(4): 370-380.
- [6] 方慧, 郭培基, 余景池. 液体喷射抛光材料去除机理的研究[J]. 光学技术, 2004, 30(2): 248-250.
FANG Hui, GUO Peiji, YU Jingchi. Research on material removal mechanism of fluid jet polishing[J]. Optical Technique, 2004, 30(2): 248-250.
- [7] 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, 2001, 29(1): 34-36.
TANG Yong, ZHOU Deming, XIA Wei, et al. Some investigation on the characteristic of wall sliding in abrasive flow machining[J]. Journal of South China University of Technology, 2001, 29(1): 34-36.
- [8] 聂先桥, 杨建明. 磨料流加工磨料流动边界条件的确定[J]. 机械制造, 2001, 39(10): 9-11.
NIE Xianqiao, YANG Jianming. Determination of boundary condition of abrasive flow in abrasive flow machining[J]. Machinery, 2001, 39(10): 9-11.
- [9] JAIN V K, ADSUL S G. Experimental investigations into abrasive flow machining(AFM)[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(7): 1 003-1 021.
- [10] SHEN Jianqi, XU Yamin, YU Bin, et al. Transmission fluctuation method for particle analysis in multiphase flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2008, 34(10): 931-937.
- [11] ANNALAND M V S, DEEN N G, KUIPERS J A M. Multi-level computational fluid dynamics models for the description of particle mixing and granulation in fluidized beds[J]. Handbook of Powder Technology, 2007, 11: 1 071-1 107.
- [12] HAIDER A, LEVENSPIEL O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles[J]. Powder Technology, 1989, 58(1): 63-70.

作者简介: 计时鸣, 男, 1957 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为精密/超精密加工。

E-mail: jishiming@zjut.edu.cn

唐波, 男, 1986 年出生。主要研究方向为磨粒流模拟计算。

E-mail: tang-bo001@163.com

谭大鹏(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为工程流体计算与精密/超精密加工。

E-mail: tandapeng@zjut.edu.cn