

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.03.003

基于软性磨粒流抛光超声波激振湍流强化的初步研究*

计时鸣, 李宜燃, 谭大鹏

(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: 在固-液两相软性磨粒流加工方法中固定的约束模块中存在湍动能和动压力的分布不均匀、加工时间偏长、加工效率偏低等问题,为解决以上问题,将超声波激振技术应用于固-液两相软性磨粒流加工中。针对超声波激振在液体中产生的压力场改变,在高幅和高频的交变压力场的激励下,分析了流场产生的周期性空化现象,建立了超声波激振与固-液两相软性磨粒流之间的关系;在软性磨粒流加工方法的基础上,提出了在约束流道中耦合超声波激振的方法,从而达到了扰动流场增强湍流强度的目的;在减少加工时间,提高加工效率和减少能耗上对新提出的方法进行了评价;通过大量的仿真,得到不同时刻约束流道内的压力、速度和湍动能分布图,并与定常流道内的压力、速度和湍动能分布图进行了对比。研究表明,超声波激振带来的压力场变化能够实现提高加工效率和加工质量的目的。

关键词: 软性磨粒流; 超声波激振; 湍动能; 扰流

中图分类号: TG121; TH122 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)03-0261-06

Preliminary study based on turbulence strengthen of softness abrasive flow precision machining by ultrasonic

Ji Shi-ming, Li Yi-ran, Tan Da-peng

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to solve the problems of the uneven distribution of turbulent kinetic energy and dynamic pressure in the fixed constraint module, as well as the processing time is rather long and low processing efficiency in the solid-liquid two-phase softness abrasive flow precision machining, the ultrasonic technology was investigated in the solid-liquid two-phase soft abrasive flow machining. Aiming at the ultrasonic change of the pressure field in the liquid, as well as in the excitation of high amplitude and high frequency alternating pressure field, the periodic cavitation of the flow field was analyzed. The relationship between the ultrasonic excitation and solid-liquid two-phase soft abrasive flow was established. Based on the soft abrasive flow machining method, a method was presented to coupling the ultrasonic in a constrained flow field, so as to achieve the purpose of the disturbed flow field. The new method was evaluated on the reducing processing time, improving processing efficiency and reducing energy consumption. The figures of pressure, speed and turbulent kinetic energy distribution at different times within the constraint flow channel were gotten through a large number of simulations. The results show that the pressure change in the field generated by the ultrasonic field can indeed improve processing efficiency and quality, compared with the steady flow.

Key words: softness abrasive flow; ultrasonic vibration; turbulent kinetic energy; spoiler

收稿日期: 2012-05-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875242); 浙江省自然科学基金资助项目(Z107517)

作者简介: 计时鸣(1957-), 男, 浙江温州人, 教授, 博士生导师, 主要从事机电控制及自动化、精密与超精密加工和机器视觉等方面的研究。

E-mail: benli0525@gmail.com

0 引言

近年来,我国制造业发展十分迅猛。而模具行业作为制造业的基础,其高精度和高复杂性表现得越来越明显。模具表面的型腔面越来越复杂,自由曲面数量日益增多,这给模具的光整加工带来了诸多不便^[1-2]。对于普通结构特征,研究者可以利用精密机床、精密磨床等进行加工。但是对于模具中一些细小结构,如沟、槽、孔、窄缝等复杂异形表面(这里统一称为结构化表面)^[3-4],上述传统的加工方法就显然难以胜任了。针对这一技术难题,浙江工业大学计时鸣等人^[5]依据磨粒流加工方法的高仿形特点,提出了基于软性磨粒流的无工具精密加工方法。

软性磨粒流是一种由松散磨粒与液体混合而成的固-液两相磨粒流,具有较好的流动特性并可实现湍流流动。该方法通过在结构化表面配置约束模块,构成磨粒流约束流道,以流道内湍流状态下的软性磨粒流代替加工工具对加工表面进行微切削,湍流产生的蜗旋带动磨粒运动,就像一个个的小砂轮引起对壁面的刮削,湍流的脉动有助于提高表面加工质量的均匀性并实现镜面级加工^[6-8]。

本课题组已对多种流道在 fluent 中进行了模拟,得到了相应的数据,并根据模拟的情况,搭建实验平台做相应的实验,得到了很好的加工效果,从而印证了软性磨粒流超精密加工的可行性。但实验的时间还是偏长,加工效率低、能耗过大等缺点还是比较明显。

因此本研究提出在约束流道中加入超声波激振,以超声波激振在液体中能改变压力场,高幅和高频的压力场改变在液体中产生相应的压力波,当压力变化的幅度大到足以使压力降低到低于液体的气化压力时,就会产生空化现象。故约束流道的超声波激振可使空化现象周期性产生,从而实现扰流,增强湍流强度,以实现减少加工时间、提高加工效率和减少能耗的目的。

1 简化模型的建立

1.1 加工原理及模型描述

软性磨粒流的加工原理是利用处于湍流形态的固-液两相流对工件表面进行加工。本研究在约束流道上加载超声波激振,以压力波及其诱发空化效应从而实现扰流。根据对流体振动抛光机理的研究可知,一般情况下,磨粒的尺寸远小于气泡直径,磨粒的局部运动状态可以认为与局部流场一致^[9]。因此本研究把磨粒流简化应用粘性流 N-S 方程求解空泡流问题。在处理空泡流的空化模型的问题上,目前主要有两大类不同方法:一类是将空泡流作为多相流(水和

气)分别处理的模型;另一类是将空泡流中气体与液体一起,当成混合均匀的平衡流处理的模型。考虑到空泡流中多相流的物理模型尚缺乏充分的认识和研究,因此可先用两相混合的单流体方法来研究^[10]。为此,本研究引入可耦合到控制方程中的混合流密度:

$$\rho_m = \rho_l \alpha_1 + \rho_g (1 - \alpha_1) \quad (1)$$

式中: ρ_m —混合流密度; α_1 —液体体积分数,表示空泡流中液体的空化程度; ρ_l —液相密度; ρ_g —气相密度。

其抛光的关键为产生湍流,所以本研究用可以描述湍流状态的数学模型来对软性磨粒流进行描述。同时在软性磨粒流中加入超声波激振以增强其湍流强度,因此本研究采用 RNG k- ε 双方程湍流模型^[11-12]。该模型是由 LAUNDER B E 等人在 1972 年提出的,根据湍流产生和耗散是平衡或非平衡条件, Senocak I & Shyy W 等提出了液体体积分数 α_1 的相变方程式, Owis F W & Nayfen A H^[13] 将空泡流中相变模型经验公式进行了简化。湍动能作为其重要的流体特征参数可以基本反映其湍流的强度。在笛卡尔坐标系下的流体控制方程如下:

连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (2)$$

动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) + \rho g_i \quad (3)$$

k- ε 模型中, k 和 ε 的输运方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} + \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \rho E \varepsilon - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (5)$$

式中: ρ —流体密度,用公式(1)中代替 ρ_m ; x_i, x_j —各坐标分量; μ —分子粘性系数; μ_t —湍流粘性系数, $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ 。

且:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s U^* k / \varepsilon}$$

其中: $A_0 = 4.0$; $A_s = \sqrt{6} \cos \phi$; $\phi = \cos^{-1}(\sqrt{6} W) / 3$; $W = E_{ij} E_{jk} E_{ki} / (E_{ij} E_{ij})^{1/2}$; $E_{ij} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2$; $\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k$; $\Omega_{ij} = \tilde{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k$ 。

部分参数经验值为:

$$C_2 = 1.9; C_1 = \max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right]$$

其中: $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} k/\varepsilon$; $E_{ij} = (\partial u_i/\partial x_j + \partial u_j/\partial x_i)/2$ 。

目前,市面上现有许多CFD软件,由于Fluent为其中运用最为广泛、功能最全面的CFD软件,本研究用它来仿真流场内的压力分布、湍动能强度分布、磨粒体积分数分布、速度分布、磨粒体积分数分布等流场参数;同时它还能在单独模拟超声波声场下对流场进行仿真,但CFD软件也有其局限性,并不是完全适合超声波声场下的软性磨粒流加工流场内的仿真计算。如,在流道的壁面,流体的速度为零、在超声波声场下许多的模型不能应用、不能只把流道的局部设置在声场下等,这些显然不符合软性磨粒流加工的实际情况。

因此,本研究把加入超声波激振的模型进行了合理的简化:控制方程选用RNG $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型,在整个迭代计算过程选用非定常模型。其加工装置简化模型如图1所示。

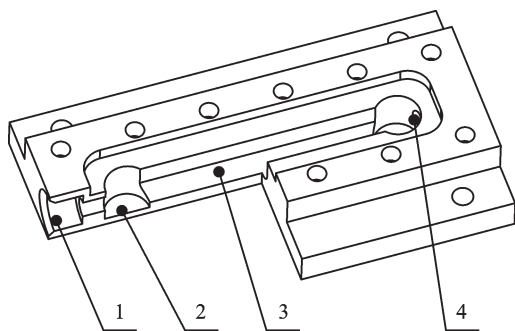


图1 加工装置简化模型

1—圆形进口;2—湍流发生器;3—矩形约束流道;4—出口

笔者把4矩形约束流道上表面整个表面设为压力入口,用UDF自定义函数设置正弦压力变化来模拟超声波在约束流道中产生的压力变化。根据已有的实验设备,结合本次研究的目的(为证明加载超声波激振后能实现扰流,增强湍流强度),在超声波的频率段中,本研究先选取超声波的最低频率20 kHz,正弦波的幅值为50,可得到UDF自定义函数如下:

```
#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(unsteady_velocity,thread,position)
{
    face_t f;
    begin_f_loop(f,thread)
    {
        real t=RP_Get_Real("flow-time");
        F_PROFILE(f,thread,position)=((50)*sin(125600.0*t));
    }
    end_f_loop(f,thread)
}
```

本研究通过改变函数的数值特征可以改变压力变化的幅值、频率、相位等特征。另外,把这个简化了的超声波激振模型与定常的约束流道模型的仿真结果进行定性的对比。

在磨粒流中,固相磨粒在随流体进入边界层后会由于惯性力保持原有运动状态撞击壁面而产生划痕,在实验加工中,显微镜相机拍摄的加工表面也显示了清晰的加工痕迹。而颗粒无序撞击壁面的动能来自于液相靠近壁面处形成湍流,因此,湍动能作为一项重要参数将在仿真中作对比研究。同时,本研究借助Preston方程分析流道材料去除率,即:

$$r = kpu \quad (6)$$

式中: r —材料去除率; k —Preston系数,常数; p —抛光区域内工作表面所受的压力; u —抛光区内软性磨粒流与工件表面的相对速度。

因此,本研究在相关面内对动压力和磨粒流速度这两个参数进行对比研究。

1.2 模型的参数及网格划分

网格是对集合模型进行离散,网格的好坏影响计算结果的精确度,划分一个好的网格可以大大提高收敛性,减少对计算资源的需要。本研究利用Gambit软件对上述简化模型进行几何建模及网格划分。圆柱形入口处的直径是10 mm。矩形约束流道的长、宽、高分别为100 mm、10 mm、5 mm。

在进行网格划分时,为获得较好的网格质量,笔者对模型进行分块网格划分。先对圆柱形入口进口网格划分,然后是约束流道,最终再对圆柱形的湍流发生器进行网格划分,将网格大小设为0.1。划分好的网格如图2所示。

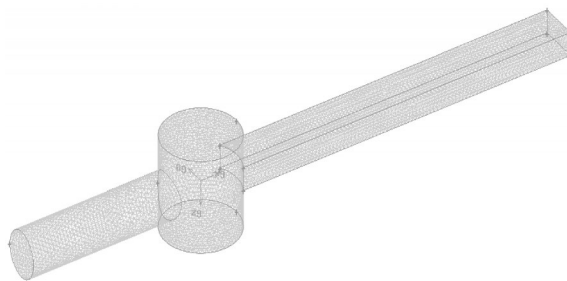


图2 加工装置简化模型网格划分

对上述流道,笔者在进行边界条件设置时选用速度入口(velocity-inlet),入口流速设为40 m/s,出口直接与大气相通,设置为自由出口(outflow),约束流道上表面设置为压力入口(press-inlet),设为幅值10 kPa、周期20 k的正弦函数。其余边界条件设置为默认的固体边界wall。

同时,为了便于观测软性磨粒流在流道中随压力变化、各个参数的动态变化,本研究选用非定常(unsteady)

求解方式进行计算。考虑到超声波的频率为20 k,周期为0.000 05 s。为了能得到各个压力周期上的不同参数值,本研究把计算时间步长设为0.000 005 s,时间步设为1 000步。流体运动的物理时间为0.005 s,足够达到稳定状态。

为了与简化的超声波模型做对比,体现出其能改变约束流道内的加工参数,从而进行分析,还需建立一个尺寸相同的流道,其入口速度同为40 m/s,本研究选用定常(steady)求解方式进行仿真。

2 仿真结果与讨论

对数值仿真的结果进行分析时,笔者先对未加超声波定常流模型的模拟结果进行分析。在软性磨粒流的精密光整加工中,本研究选用的SiC磨粒的平均粒径约为50 μm。根据本课题组已有研究,在上述流道中,在距离约束流道底层100 μm处磨粒流的流态与磨粒穿越边界层及所获得的壁面抛光效果有很大的正相关性,因此本研究设置一检测面^[14],该检测面上的压力、速度及湍动能强度分布图如图3~5所示。

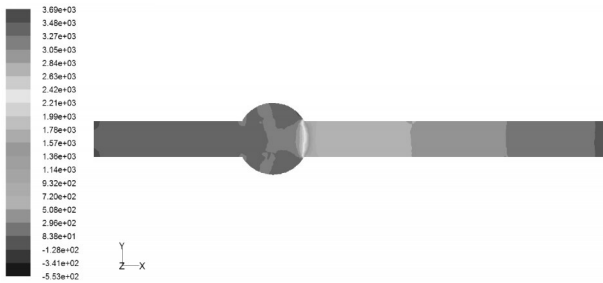


图3 定常流流道压力分布图

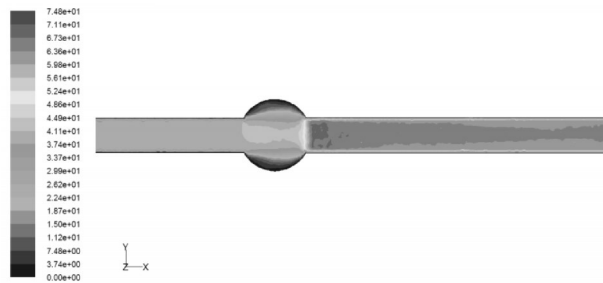


图4 定常流流道速度分布图

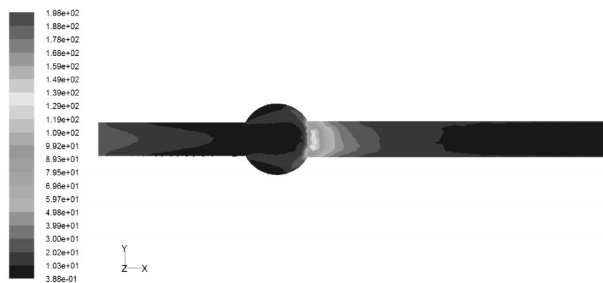


图5 定常流流道湍动能强度分布图

磨粒流从圆形入口进入湍流发生器后,部分流体撞击到壁面,另外一些磨粒流进入到约束流道时,由

于界面的变化和突然减小,磨粒流在约束流道入口出现压缩,导致流体参数出现突然改变。静压力从流道入口向出口逐步递减,只在约束流道入口前的一小部分内突然增大,如图3所示。速度在约束流道中总体变化趋势不大,只在入口处的中间区块相对较大,如图4所示。湍动能强度为带动磨粒在软性磨粒流中进行无序化抛光的主要动力来源,也主要集中在约束流道的入口处,如图5所示。

由上述仿真结果可知,在定常流的流道中,磨粒流只在约束流道入口处突然发生变化时,磨粒流由于有流道结果的突然改变,部分流体撞击上壁面返回,部分被压缩,在此处产生较强的湍流流态。此时存在平行于约束流道的湍流,也存在于垂直于流道壁面的湍流。磨粒流经过约束流道壁面存在的摩擦等作用,造成磨粒流的能量损失,流体运动能量降低,逐步趋于稳定,约束流道内有固定的低值区,前、后端也有很大的差别。这样多于整个工件的加工,整体加工的质量不一致,低值区的加工时间要加长,降低了加工效率,对软性磨粒流超精密加工方法的实际应用相当不利。

基于上述各种对加工不利的原因,本研究在约束流道中加入超声波激振,利用其特性来扰乱约束流道内速度、压力及湍动能强度分布等,以强化磨粒流在约束流道内的无序性运动。流道在Fluent中用简化的超声波模型仿真,并与上述定常流进行对比,同样在距离约束流道底面100 μm处设置检测面,得到的不同时刻的速度分布图分别如图6、图7所示。

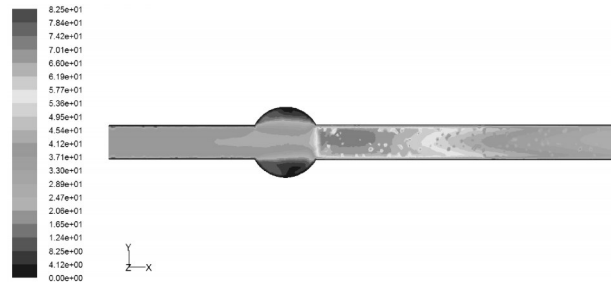


图6 $t=4.0e-03$ 时刻速度分布图

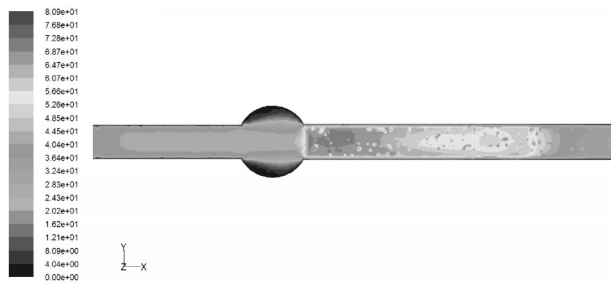


图7 $t=4.5e-03$ 时刻速度分布图

根据UDF中自定义函数的频率和初始相位计算可知: $t=4.0e-02$ 时刻处在函数的接近峰值处,而 $t=4.5e-02$ 时刻处在函数的接近中间值处。本研究在流道中间

面取3个不同位置点,并设置3个监控器,在仿真中对其速度进行实时监控,流道中3点速度变化图如图8所示。与上述定常流道的相比,首先可知速度是随着声场压力波的变化在约束流道内不断变化的,变化的流场更有利于无序化湍流的形成。根据经典空化数 σ 的定义:

$$\sigma = \frac{p_x - p_v}{\frac{1}{2}\rho U_x^2} \quad (7)$$

式中: p_x , U_x —流体的压力和流体速度; ρ —液体密度; p_v —液体的汽化压力。

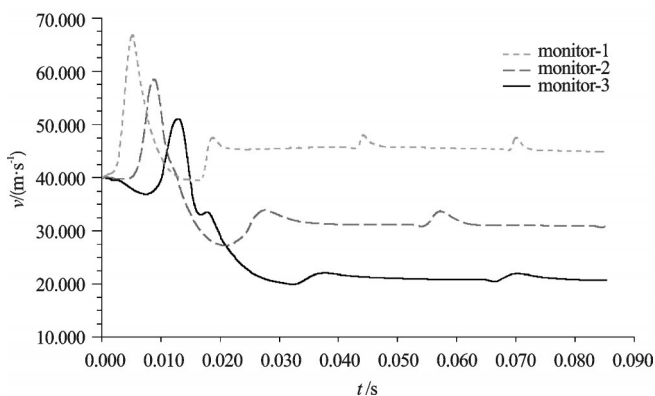


图8 流道中3点速度变化图

由此可知:空化数和流体的运动速度及压力有关,流体的动压力可以从流体的重力、压力转换而来,也可以由外力做功得到,速度与流通动压力有如下关系:

$$P = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (8)$$

式中: ρ —流体密度, v —流体速度。

从图6、图7中可知:流场在声场压强变化的作用下还出现了局部斑点状的速度减小的区域,且随机分布在加了压强变化的区域内。根据上述公式(7, 8)可知,在流场内既有压力整个压力环境的周期性变化,又有速度的随机的变化,同时这两个数值还存在相互影响,增强了空化数 σ 的变化,从而使空化在整个流场中更普遍的发生,提高了湍流强度。整个待加工面获得了更均匀的加工,从而提高了软性磨粒流的加工精度和加工效率。

同时,由于总体的速度在入口处的设定是一样的,“在检测面上约束流道后端的速度比前端的速度小”,该情况说明:在约束流道内在垂直于底面的截面内也是不均匀分布,易于形成垂直于流场的的湍流,提高磨粒流的加工效率。

湍动能也是评价流道湍流性能的重要参数。湍动能反映湍流脉动能量的大小,湍动能越大说明脉动越强烈,湍动能的增加,使磨粒与待加工表面作用频繁,结合

磨粒运动的无序性可提高加工效率和加工精度。

数值仿真后不同时刻的湍动能强度分布图如图9~11所示。

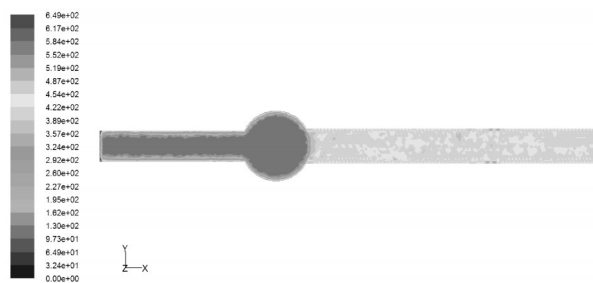


图9 $t=4.0e-03$ 时刻湍动能分布图

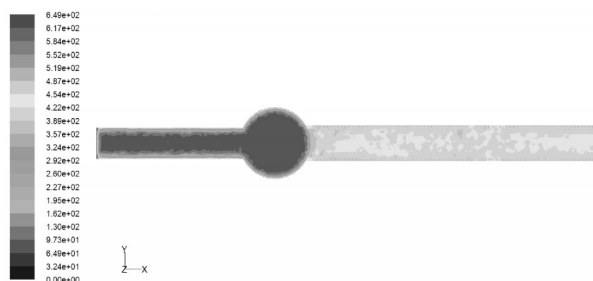


图10 $t=4.25e-03$ 时刻湍动能分布图

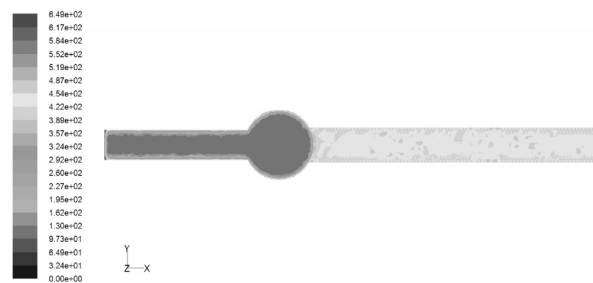


图11 $t=4.5e-02$ 时刻湍动能分布图

首先本研究对比在定常流动下湍动能的分布图,湍动能只集中在约束流道入口处,流道结构发生迅速增大,然后迅速地衰减,如图5所示。而在声场压强变化的流道里,湍动能在整个有声场的约束流道中都分布的比较均匀,排除了加工的死角。同时还说明超声波激振能增强约束流道的湍动能,提高软性磨粒流的加工效率。

据UDF自定义函数的频率和初始相位,经过计算,3个湍动能图像所示的时刻分别在声场压强幅值变化的不同位置,并且上述湍动能在整个约束流道出现不规则分布,并且不同时刻具有不同的分布规律,避免了湍动能在约束流道中的定常分布,从而避免了加工死角的出现。

3 结束语

本研究基于软性磨粒流的加工方法,对于所设计的特殊流道,采用标准 $k-\epsilon$ 模型。同时应用Fluent软件,对定常流和加入正弦超声波声场压强的非定常流

进行了数值模拟。数值模拟结果为磨粒流加工过程中的工艺参数选择提供了参考依据,为进一步深入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了一种理论工具。

(1) 通过对上述两个模型数值仿真的对比,可知在声压变化模型中的速度、湍动能等主要参数在整个约束流道内不同时刻,其分布有明显的不同,能实现扰动流场增强湍流以提高加工效率的目的。而湍动能较强区块的分布由入口扩散到整个约束流道内,提高了整个约束流道内软性磨粒流的加工效率。

(2) 在仿真中因超声波振动空化对经验公式和其参数进行了调整。根据仿真得到的速度、压力及湍动能等参数,结合它们之间的相互影响,及与空化数 σ 之间的相互联系,与定常流相对比,可证明软性磨粒流结合超声波激振能使软性磨粒流中空化效应大大增强,从而提高了软性磨粒流的加工精度和加工效率。

(3) 对比于定常流,在增加了声场压强变化的模型中,湍动能的分布在约束流道中更加均匀,且减小了定常流中出现加工死角的问题。同时湍动能增强的区域只在耦合了声场压强的约束流道区域内,而在相邻的湍流发生器中并无明显变化。因此可结合软性磨粒流约束流道的设计,在所需强化加工部位引入超声波激振,增强湍流,从而使软性磨粒流加工的方法能适应各种不同的流道,为研究和推广软性磨粒流超精密加工提供了新的方法。

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(7-8): 721-732.
- [2] GIANPAOLO S, ROBERTO M, GIANMARIA C. A surface

roughness predictive model in deterministic polishing of ground glass moulds [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(1): 1-7.

- [3] 计时鸣,金明生,张 宪,等. 应用于磨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.
- [4] 汤 勇,周德明,杨 钢,等. 磨料流光整加工性研究[J]. *华南理工大学学报:自然科学版*, 2001, 29(9): 17-19.
- [5] 计时鸣,唐 波,谭大鹏. 基于VOF的磨具结构化表面软性磨粒流数值模拟[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(3): 334-339.
- [6] 孙树峰,计时鸣,谭大鹏. 低黏度液-固两相磨粒流湍流调控与结构化表面光整加工技术研究[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(19): 2349-2353.
- [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, 46(15): 178-184.
- [8] 计时鸣,李 琛,谭大鹏,等. 基于Preston方程的软性磨粒流加工特性研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 48(19): 126-130.
- [9] 王献孚. 空化泡和超空化泡流体理论及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2009.
- [10] 王献孚,熊鳌魁. 高等流体力学[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2002.
- [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): 1071-1107.
- [12] 章梓雄,董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1998.
- [13] OWIS F W, NAYFEN A H. Computstions of the compressible multiphase flow over the cavitating high-speed torpedo [J]. *Journal of Fluid Engineering*, 2003, 125(2): 459-468.
- [14] 计时鸣,付有志,谭大鹏. 基于SST湍流模型的两相磨粒流动力学特性研究[J]. *兵工学报*, 2012, 23(11): 126-130.

[编辑:张 翔]

(上接第256页)

参考文献(References):

- [1] 任吉林,林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京:科学出版社, 2008: 7-15, 64-66.
- [2] 尹武良. 低频电磁传感检测技术[M]. 北京:科学出版社, 2010: 17-154.
- [3] 陈立晶,王化祥,尹武良. 基于FPGA的金属膜厚检测系统[J]. *测试技术学报*, 2011, 25(4): 323-324.
- [4] YIN W, PEYTON A J. Thickness measurement of non-magnetic plates using multi-frequency eddy current sensors [J]. *NTD & E International*, 2007, 40(1): 43-48.
- [5] YIN W, PEYTON A J. A planar EMT system for the detection of faults on thin metallic plates[J]. *Measurement Sci-*

ence and Technology, 2006, 17(8): 2130-2135.

- [6] 尹武良,王 奔,王化祥. 电磁层析成像中基于半周期采样的数字解调方法[J]. *天津大学学报:自然科学版*, 2011, 44(12): 1119-1123.
- [7] 姜 剑. 宽频EMT的电路和信号处理研究[D]. 天津:天津大学电气与自动化工程学院, 2010: 9-17.
- [8] 杨丽娟,张白桦,叶旭桢. 快速傅里叶变换FFT及其应用[J]. *光电工程*, 2004, 31(Z): 1-7.
- [9] 薛年喜. Matlab在数字信号处理中的应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2008: 111-129.
- [10] 靳 希,杨尔滨,赵 玲. 信号处理原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2008: 35-67.

[编辑:罗向阳]