

文章编号 1004-924X(2018)02-0388-11

三相磨粒流抛光及其气泡溃灭分布特性

计时鸣,葛江勤,谭大鹏*,曾 晰

(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 310014)

摘要:针对软性磨粒流在加工硬脆性材料时效率低下的问题,本文提出一种气-液-固三相磨粒流加工方法。该方法通过在加工流场内注入微尺度气泡群,利用气泡溃灭释放的能量提升磨粒流加工能力。基于计算流体力学和群体平衡模型耦合计算方法,建立气-液-固三相磨粒流流体力学模型,数值模拟结果揭示了工件表面三相磨粒流形成高速湍流涡旋流场加工特性,得到了工件表面气泡溃灭的分布规律,并探明流体黏度与气泡溃灭之间的关系。图像粒子测速实验表明,通入微尺度气泡群后,平均速度从 12.50~13.50 m/s 提升至 15.00~17.00 m/s,最高平均速度可达 20.00 m/s 以上。对比加工实验显示,经 8 h 加工后,粗糙度从 0.50 μm 降低到 0.05 μm 。理论和实验研究结果说明借助微尺度气泡群的溃灭效应可有效提升软性磨粒流的加工效率和加工精度。

关键词:硬脆性材料加工;软性磨粒流;气-液-固三相磨粒流;气泡溃灭

中图分类号: TG580.692.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182602.0388

Three-phase abrasive flow polishing and distribution characteristics of bubble collapse

Ji Shi-ming, Ge Jiang-qin, Tan Da-peng*, Zeng Xi

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology of the Ministry of Education of China, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310032, China)

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

Abstract: To resolve the low processing efficiency of softness abrasive flow method (SAF) for hard brittle materials, a gas-liquid-solid three-phase abrasive flow processing method (GLSP) was proposed. Through injecting the micro bubbles into processing flow field and by means of the bubble collapse energy, the processing capability of abrasive flow could be strengthened. The fluid mechanics model of GLSP was established based on computational fluid dynamics-population balance model (CFD-PBM) coupled method. The simulation results revealed the dynamic characteristics of the high-speed turbulent vortex flow field formed by the gas-liquid-solid three-phase abrasive flow, and the bubble collapse distribution could be obtained, furthermore, the effect of fluid viscosity on bubble collapse was analyzed. The results of particle image velocimetry show that through injecting micro bubbles, the average velocity could be increased from 12.50–13.50 m/s to 15.00–17.00 m/s, and the maximum value could reach above 20.00 m/s. The comparison processing experiments showed that

收稿日期:2017-05-26;修订日期:2017-07-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51575494, No. 51775501);浙江省自然科学基金资助项目(No. LZ14E050001, No. LR16E050001, No. LY18E050023)

the roughness increased from $0.09\ \mu\text{m}$ to $0.05\ \mu\text{m}$ after 8 h processing. The above results indicate that the effect of bubble collapse can effectively improve the processing efficiency and precision of SAF method.

Key words: hard brittle materials processing; softness abrasive flow; gas-liquid-solid three-phase abrasive flow; bubble collapse

1 引言

单晶硅、光学玻璃及功能性陶瓷是典型的硬脆性材料,被广泛应用于现代光学、电子信息及薄膜科学领域的精密器件制造^[1-3]。精密器件在使用之前,往往需要对其表面实现精密光整加工。现有的工件表面抛光方法主要有工具接触式抛光及流体式抛光。在工具接触式抛光过程中,由于难以避免在磨粒中混入大颗粒及杂质材料,极易引起工件表面划痕及亚表面损伤^[4-5]。流体式抛光采用柔性好得多的流体驱动磨粒加工工件,可有效缓冲大颗粒物质对工件的过冲击效应。

传统流体抛光技术主要包括磁流变抛光^[6]、弹性发射加工^[7]、磨料流加工^[8]以及所有射流抛光技术,例如磨粒水射流^[9]、磁射流^[10]等。上述抛光方法在针对特定的加工对象时可获得较高的表面质量,但也存在一定局限性。针对较小的工件表面,磁流变抛光及弹性发射加工可获得极高的表面精度,但加工成本高昂,在加工大面积工件时效率又较低;磨料流加工需要在工件表面构造封闭空间,导致加工时碎屑不易排出,易造成二次损伤;射流抛光方法的有效加工面积较小,且较难调控射流角度以实现工件表面大范围的精密加工。

计时鸣等人针对结构化表面精密光整加工技术难题提出了一种软性磨粒流加工方法^[11],通过在工件表面配置约束流道,利用弱黏性流体形成强湍流流态,进而驱动磨粒实现工件表面大范围地无序化精密加工。鉴于软性磨粒流的加工优势,诸多学者展开了深入研究,验证了软性磨粒流加工方法的有效性^[12-14]。

借助具有强湍流形态的磨粒流,软性磨粒流加工方法可实现大平面或非结构曲面工件的光整加工,但受到输运流体动能的限制,在加工硬脆性材料时加工效率较低。现有研究表明,流体中微气泡在强湍流、速度梯度及流体冲击碰撞的作用

下会发生溃灭,溃灭产生的能量可有效增强局部流体动能^[15-16]。基于气泡溃灭效应,本文在软性磨粒流加工方法的基础上,提出一种气-液-固三相磨粒流加工方法。该加工方法在软性磨粒流中连续注入微尺度气泡,并通过设计能使微气泡群集中溃灭的流道结构,实现具有更高加工能力的磨粒流湍流流态,进而提高传统软性磨粒流加工效率。

气-液-固三相磨粒流流动问题较为复杂,主要困难在于大量微气泡溃灭后,对相与相之间质量、动量以及能量的描述。群体平衡模型通过建立气泡溃灭条件判据,可计算得到溃灭后的气泡尺度分布,进而可得到流体物理特性(湍动能、动压力)更为准确地描述。因此,本文将群体平衡模型引入到磨粒流建模领域,采用计算流体力学和群体平衡模型耦合计算方法(Computational Fluid Dynamics-Population Balance Model, CFD-PBM)^[17]建立气-液-固三相磨粒流流体力学模型,分析工件表面加工特性。

综上所述,本文首先建立可实现微气泡群集中溃灭的三入口加工流道,并采用 CFD-PBM 耦合方法建立数值模型,进而对加工特性进行模拟分析;基于模拟分析结果,采用图像粒子测速法验证气-液-固三相磨粒流加工方法的有效性;最后,搭建实验平台,进行本文所述方法与软性磨粒流加工方法的对比实验。

2 气-液-固三相磨粒流场数值模拟

2.1 气-液-固三相磨粒流数学模型

本文所述的气-液-固三相磨粒流由微尺度气泡、抛光液及磨粒按一定比例混合组成,对其中工件表面磨粒体积分数分布以及气泡溃灭特性研究至关重要。流场内相与相之间质量、动量及能量的传递是决定每一相运动情况的主要因素。考虑到气泡溃灭导致的局部气相体积分数及尺度的变化,本文采用 CFD-PBM 耦合方法对气-液-固三

相磨粒流建模。CFD 模型部分即流体质量守恒方程及动量守恒方程,以第 p 相为例, p 相的质量守恒方程可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_p) = \sum_{p=1}^n \dot{m}_{pq}. \quad (1)$$

p 相的动量守恒方程可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_p \mathbf{v}_p) = -\alpha_p \nabla p_p + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}_p + \sum_{q=1}^n (\mathbf{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \mathbf{v}_{pq}) + \alpha_{pq} \rho_{pq} \mathbf{F}, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{F} = \mathbf{F}_b + \mathbf{F}_{if} + \mathbf{F}_{vm}$, α_p 和 ρ_p 分别为 p 相的体积分数及密度, \mathbf{v}_p 为 p 相速度, \dot{m}_{pq} 为 p 相到 q 相的质量传递, \mathbf{R}_{pq} 为相与相之间的相互作用力, p_p 为 p 相所受到的压力, \mathbf{v}_{pq} 为 p 相与 q 相之间的相对速度, \mathbf{F}_b 为外部体积力; \mathbf{F}_{if} 为 p 相施加于 q 相的升力, \mathbf{F}_{vm} 为 p 相施加于 q 相的虚拟质量力, $\bar{\boldsymbol{\tau}}_p$ 为应力应变张量。

从三入口注入的磨粒流在流场中部及微距缝隙内会产生较大的湍流扰动。同时,大量微气泡溃灭进一步加强湍流流动,使得磨粒以无序、随机的方式加工工件。因此,磨粒流流体动力学模型中还需加入湍流方程组。在本文中采用标准湍流模型,基本可以反映三相流场中主要的湍流特征,由于该模型运用极为广泛,故在此不作详细说明,计算方程如下:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M, \quad (3)$$

$$\rho \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}. \quad (4)$$

在气-液-固三相磨粒流加工过程中,连续注入的气泡在流体强湍流、速度梯度及流场高静压的共同作用下发生溃灭,从而产生大量微射流增强磨粒运动的无序性。溃灭后的气泡会产生小尺度气泡。若小尺度气泡进入到更强的湍流、速度梯度及流场静压区内,则会发生二次溃灭;反之,大量小尺度气泡的冲击碰撞可能重新聚并成大气泡。从上述分析中可以看出,工件表面气泡溃灭分布反映了磨粒受到溃灭效应加速的区域。计算并分析工件表面气泡溃灭分布,对优化气-液-固三相磨粒流加工工艺参数,有一定指导意义。

群体平衡模型通过建立气泡溃灭条件判据,可计算得到溃灭后的气泡尺度分布,从而间接反映气泡溃灭分布。在计算之前首先建立如下假

设:(1)气泡始终保持球形;(2)溃灭后可产生 12 组不同尺度的气泡,第 1 组气泡(Group-0)尺度最大,第 12 组(Group-11)最小,相邻组的气泡体积比为 $V_{i+1}/V_i=2$,由此可以建立第 i 组气泡控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \alpha_i) + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{u}_i \alpha_i) = S_i, \quad (5)$$

其中: ρ_g 为气体密度, \mathbf{u}_i 及 α_i 为第 i 组气泡的局部流速及体积分数, S_i 为第 i 组气泡由于聚并和破碎产生的源项,本文中采用 Luo 模型计算^[18]。

在 CFD 计算过程中,磨粒作为拟流体处理,并通过求解相间作用力 \mathbf{R}_{pq} 及各相体积分数 α_p 实现不同相间的耦合。在此基础上,通过耦合计算 PBM 模型,实现对气泡尺度分布的精确描述。图 1 所示为 CFD-PBM 耦合计算过程。首先,求解质量守恒方程(1)、动量守恒方程(2)及湍动能方程(3)、(4),得到局部气含率及湍能耗散率等流场信息,再把这些信息提供给气泡破碎聚并模型求解气泡破碎聚并源项;在此基础上,通过求解气泡控制方程(5),得到流场内不同尺度气泡的体积分数分布;由气泡大小分布对 CFD 模型中的液相湍能及气液相间作用力进行修正,由此形成闭环的计算流程。通过 CFD-PBM 耦合求解,可得到工件表面湍动能、磨粒体积分数、磨粒速度及气泡溃灭分布,进而对气-液-固三相磨粒流加工特性进行研究。

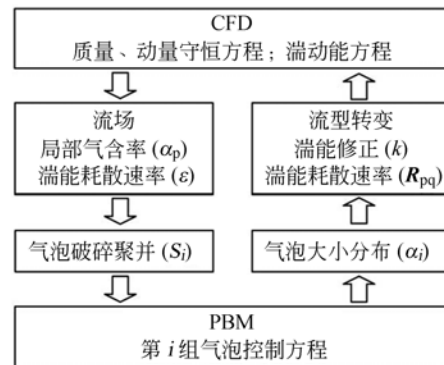


图 1 CFD-PBM 耦合计算过程

Fig. 1 Coupled solution process of CFD-PBM

2.2 网格划分及边界条件

基于气-液-固三相磨粒流加工工具的几何特征,抽取抛光工具内腔建立三入口流道物理模型,并通过网格生成软件 ICEM-CFD 进行网格单元离散。离散后的模型如图 2 所示,模型底面即为

工件表面。由于磨粒从非约束空间进入到约束空间时存在较大的速度梯度及湍流扰动,故在空间交界面处必须进行网格加密处理,以增加计算精度。考虑到流体域中存在多处空间相贯结构,采用自适应更好的非结构网格进行划分,划分后总网格数为 498 637。基于流道结构特点,将流道分为两个区域,即流道中部的非约束空间以及周向的约束空间。

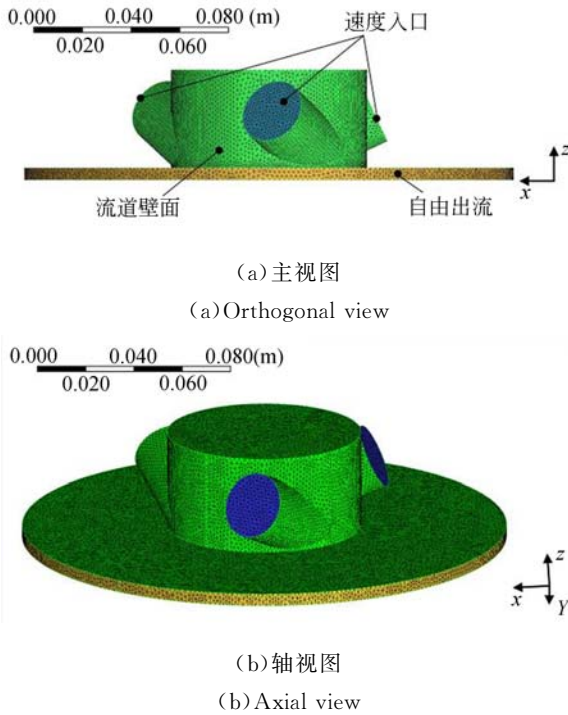


图 2 流道网格划分

Fig. 2 Mesh generation of flow channel

在三相磨粒流加工过程中,微气泡流及磨粒流通过气泵及水泵连续注入到加工工具内。为获得稳定的加工效果,需保持稳定的流量供给。若忽略管道压力损失,则流道入口速度可以通过水力直径来计算。基于上述假设,可以建立数值模拟所用边界条件如下:入口为水力直径为 27 mm 的速度边界条件,磨粒注入速度为 10 m/s,气泡注入速度为 5 m/s;出口为自由出流;磨粒采用直径为 10 μm 的 SiO_2 ,浓度 10%;初始通入为直径 3 mm 的单一尺度气泡(即 Group-0 气泡)。在上述边界条件的基础上,借助 ANSYS-Fluent 求解器求解气-液-固三相磨粒流数学模型。由于多相流模拟过程涉及比较复杂的相间变化,为提高求解鲁棒性,压力速度耦合处理采用压力关联方程的相耦合型半隐式算法(Phase Coupled Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations, PC-SIMPLE),用以提高收敛率;同时,采用基于一阶迎风格式的有限体积法进行动量、湍动能以及湍流耗散率的离散。

2.3 数值分析与结果讨论

气-液-固三相磨粒流具有与软性磨粒流相同的物理特性,均为低黏度稀疏磨粒流。根据 Preston 切削方程可知,磨粒速度及磨粒体积分数是影响工件表面加工效率的关键因素。同时,根据磨粒流的加工特性,磨粒湍动能决定了磨粒在近壁面处的无序运动状态。湍动能越大,磨粒无序运动越剧烈,工件表面的方向性条纹则越不明显。因此,首先针对上述 3 个关键因素进行模拟研究,结果如图 3 所示。

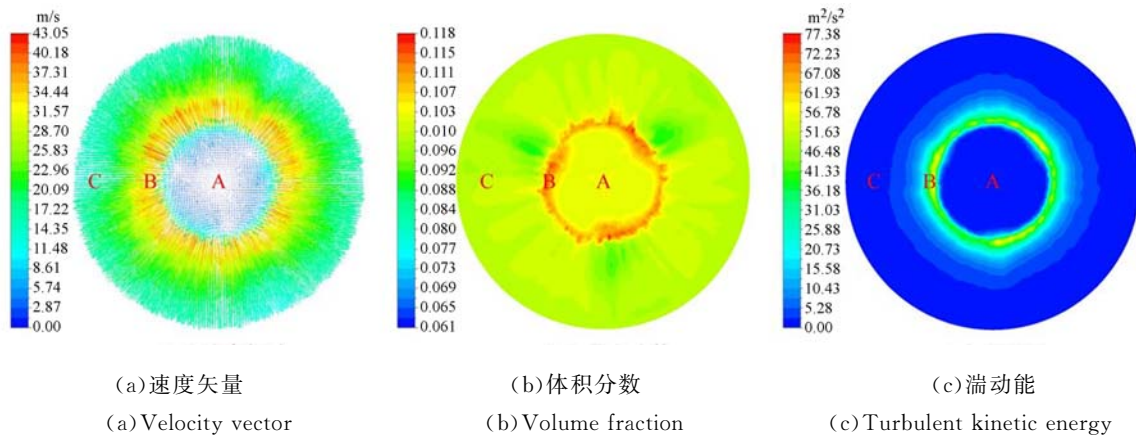


图 3 三相磨粒流分布特性

Fig. 3 Distribution characteristics of three-phase abrasive flow

由图 3 可知,在抛光工具覆盖下的区域内,磨粒流形成了具有明显 A、B、C3 区域的高速湍流涡旋:A 区域位于抛光工具中部区域,即非约束空间内;B 区域位于初始约束空间内;C 区域位于之后的约束空间内。首先,从入口进入的三相磨粒流在 A 区域内形成湍流涡旋,因此,处于湍流涡核内的磨粒速度达到最低点,处于 0~2.87 m/s 之间。随后,磨粒流进入到 B 区域。由于流道空间急剧减小,使得进入 B 区域的磨粒极大加速。同时,在磨粒集聚效应的作用下,B 区域的磨粒体积分数达到最大值,磨粒湍动能也达到最大值。最后,磨粒进入 C 区域。在流体黏性阻力的作用下,磨粒速度及湍动能衰减较快。

从上述现象中可以得到如下结论:(1)抛光工具的有效抛光区位于 B 区域,通过改变非约束空间尺度大小可实现对 B 区域位置的可调;(2)从

图 3(b)中可以看到,受流道物理结构限制,B 区域内存在相隔 120°的低磨粒浓度区,原位抛光法无法获得均匀化的工件表面。在实际加工过程中,上述结论提供了如下指导:(1)为实现有效抛光区内的均匀化加工,应使得抛光工具做周期性自转运动,以补偿流道物理结构带来的加工不均匀性;(2)针对大面积全局范围的光整加工,抛光工具在周期性自转运动的基础上,还应做横纵向平移运动,实现有效抛光区域(B 区域)对工件表面的全局覆盖。

大量通入的微尺度气泡在特定条件下发生溃灭,溃灭产生的能量可有效加强磨粒运动。因此,分析工件表面气泡溃灭分布具有实际意义。图 4 所示为气泡溃灭后,工件表面不同尺度的气泡体积分数分布,其中仅挑选了能够反映溃灭规律的 6 组气泡尺度分布。

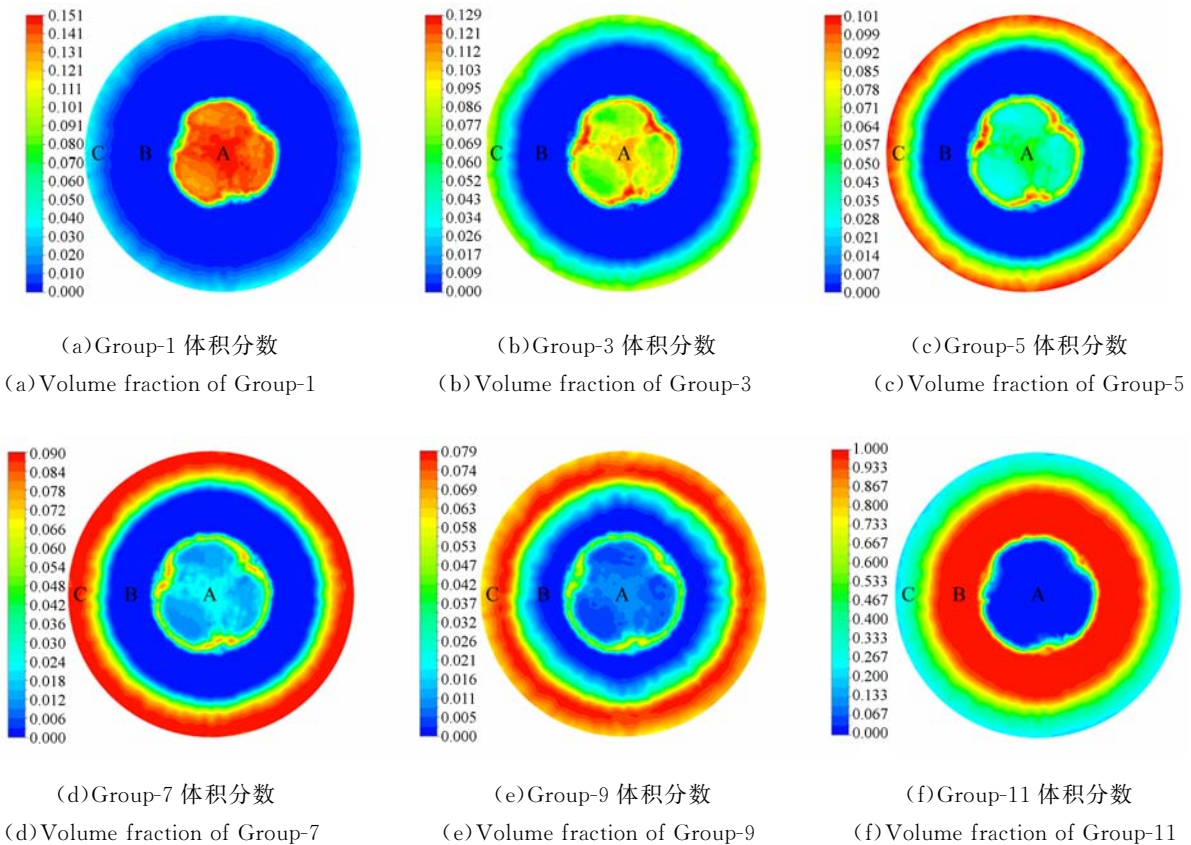


图 4 气泡体积分数分布

Fig. 4 Bubble volume fraction distributions

由图 4 可知,通入的单一直径气泡在工件表面溃灭生成多种尺度的气泡。根据分布特点,也存在明显的 A、B、C 3 个区域。A 区域存在多种尺度气泡,且以大尺度气泡为主,其中 Group-1 体

积分数最高,Group-11 体积分数最低;在 B 区域,尺度最小的 Group-11 气泡体积分数反而最高,其余几组气泡体积分数几乎为 0;在 C 区域内,除了 Group-11 气泡外,其余几组气泡体积分数有所

升高。

从上述现象中可得到如下结论:(1)在流体碰撞的作用下,初始通入的 Group-0 气泡在非约束空间内发生初次溃灭,并生成多种尺度气泡(不包括 Group-11);(2)在进入 B 区域时,由于强湍流作用,大量多种尺度气泡均溃灭生成最小尺度气泡(Group-11),该区域气泡溃灭最为剧烈。通过上述结论可以推测,在 A、B 区域均存在微射流加速效应,且在 B 区域效应最为明显。结合图 3 所示模拟结果可知,在 B 区域覆盖下的工件表面具有良好的加工效果。

根据尼古拉兹圆管近壁面湍流分层实验可知,与粗糙壁面相比,若要在光滑壁面处形成稳定湍流,则需要更高的雷诺数。由于工件表面初始粗糙度较低($R_a=0.5\ \mu\text{m}$),需要采用高雷诺数流体驱动磨粒加工工件。若保持入口流量恒定不变,则需要降低流体黏性来提高流体雷诺数。因此,高雷诺数流体是否会对气泡溃灭产生影响,有必要进行研究。因此,根据软性磨粒流常用流体黏度范围,设定流体动力黏度分别为 $0.015\ \text{kg/m}\cdot\text{s}$ 、 $0.012\ \text{kg/m}\cdot\text{s}$ 、 $0.009\ \text{kg/m}\cdot\text{s}$ 、 $0.006\ \text{kg/m}\cdot\text{s}$ 、 $0.003\ \text{kg/m}\cdot\text{s}$ 、 $0.001\ \text{kg/m}\cdot\text{s}$,进行对比模拟研究,结果如图 5 所示。

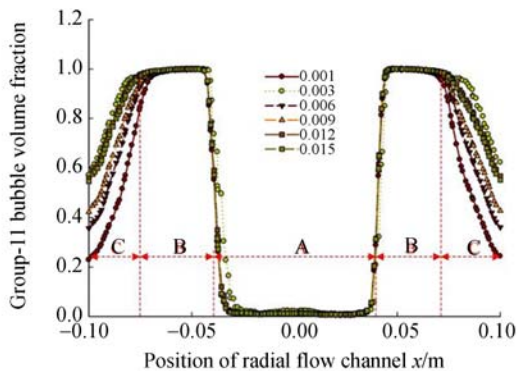


图 5 不同黏度下 Group-11 气泡体积分数变化

Fig. 5 Variation curves of Group-11 bubble volume fraction of different viscosities

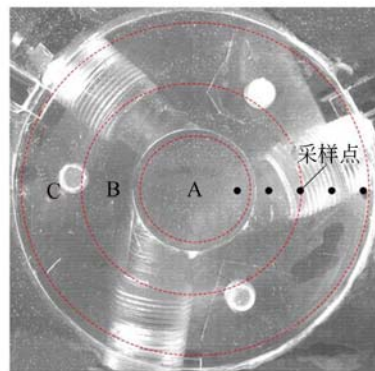
图 5 为不同流体黏度下,沿径向流道位置计算的 Group-11 气泡体积分数。由图 3、图 4 结果可知,B 区域是有效光整加工区。在此区域气泡溃灭主要产生 Group-11 气泡,因此,通过计算此区域 Group-11 气泡体积分数即可判断溃灭剧烈程度。由图 5 可知,在不同流体黏度下,B 区域的 Group-11 气泡体积分数基本相同,说明在此流道

内,流体黏度变化对气泡溃灭影响不大。而在 C 区域,随着流体黏度的降低 Group-11 气泡体积分数有明显下降(形成其余组气泡)。这说明低黏度环境下,气泡与气泡之间碰撞更为剧烈,气泡聚合效应更为明显。

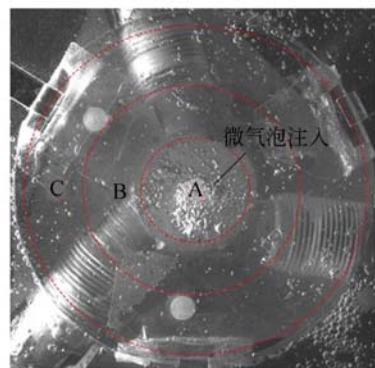
3 三相磨粒流场观测实验及结果分析

为获得气-液-固三相磨粒流真实流场分布规律,同时验证该加工方法的有效性,本文采用粒子图像测速法(PIV)进行流场测量。PIV 方法在实验流体力学中是一种可有效计算流场速度矢量的技术手段。通过追踪示踪粒子位移,可以计算流场的瞬时速度分布。

根据抛光工具结构特点,采用有机玻璃按 1:1 制作了 PIV 观测流道,如图 6 所示。PIV 观测所用边界条件与仿真、实验所用参数保持一致。



(a)未通入气泡
(a)No bubble injection



(b)通入气泡
(b)Bubble injection

图 6 PIV 观测流道

Fig. 6 PIV observation flow channel

PIV 拍摄参数如下:相机触发频率为 6 HZ;激光脉冲间隔 $400 \mu\text{s}$,即粒子速度计算时间为 $400 \mu\text{s}$;一次采集包含 200 张图片。观测实验分为两组,第一组不通入气泡,如图 6(a)所示,第二组通入

气泡,如图 6(b)所示。取每组实验所拍摄连续 150 张图片进行速度矢量分析,可得到连续 150 个时刻的速度矢量图。从中各抽取连续 3 幅速度矢量图进行分析,如图 7 所示。

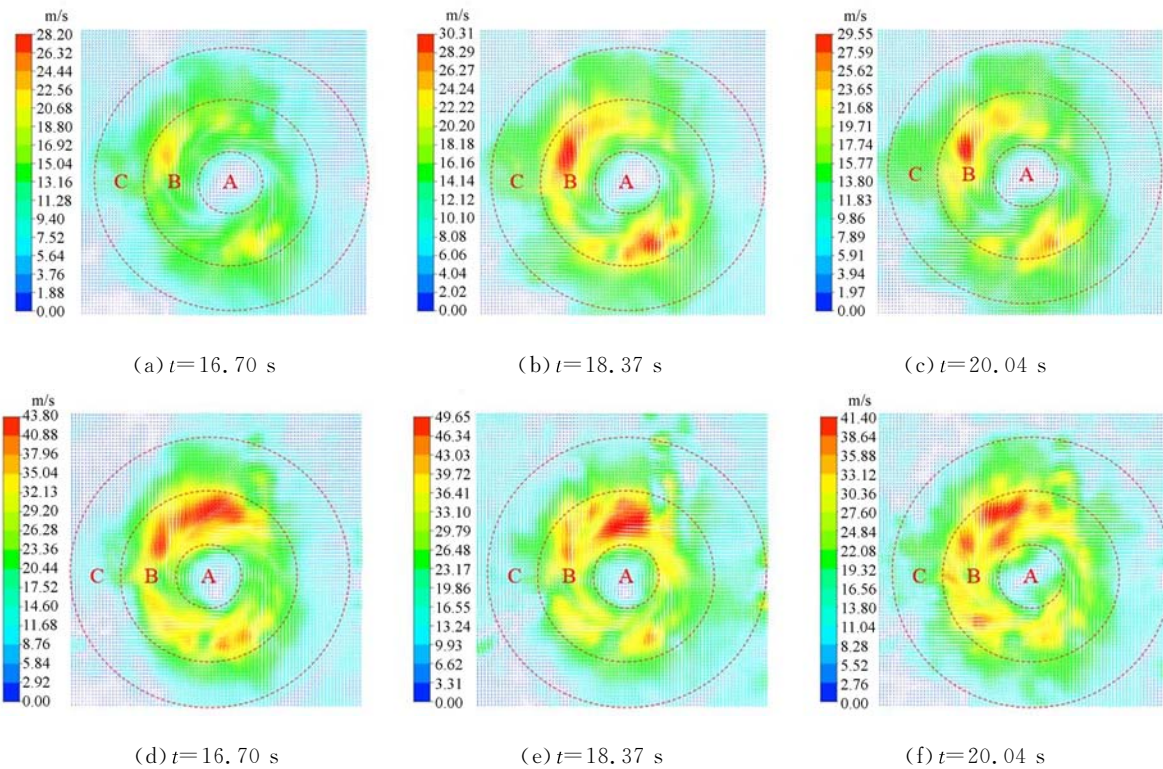


图 7 有无气泡时的速度矢量分布

Fig. 7 Velocity vector profiles of bubble injection and no bubble injection

图 7(a)、(b)、(c)为未通入气泡时的速度矢量分布,图 7(d)、(e)、(f)为通入微气泡时的速度矢量分布。由图 7 可知,在可视化流道覆盖区域内,速度矢量可分为 A、B、C 3 个区域。A 区域速度几乎为 0;B 区域速度达到最大值;C 区域速度有极大地衰减。上述现象与图 3 所示的模拟结果是相符合的。对比未通入气泡时的速度矢量分布,通入微气泡后,整个流场内的示踪粒子速度有了较大提升,且 B 区域的粒子速度方向更为紊乱,存在多处局部粒子加速。同时,由图 7(d)、(e)、(f)还可发现,B 区域的加速区环周向并不均匀。这主要原因是受流道结构限制,流体未能均匀在约束流道内散开,并且,三入口通入的气泡在非约束空间内发生初次溃灭后,无法均匀地进入到约束空间内发生二次溃灭,即总是存在气泡密集区及稀疏区。这说明在加工过程中应使抛光工具做周期性自转,以保证工件表面磨粒速度的均匀性。

为获得微气泡通入对流场速度提升的量化评

价指标,对通入气泡前后的流场速度进行统计分析。首先,沿约束流道径向方向设置 5 处速度采样点,如图 6(a)所示;之后,采集每一处采样点的速度,进而得到 5 处采样点的平均速度;最后,记录连续 180 个时刻点的平均速度,得图 8 所示结果。

很明显,注入气泡后有效提升了流场内示踪粒子速度,总采样点的平均速度从 12.90 m/s 提

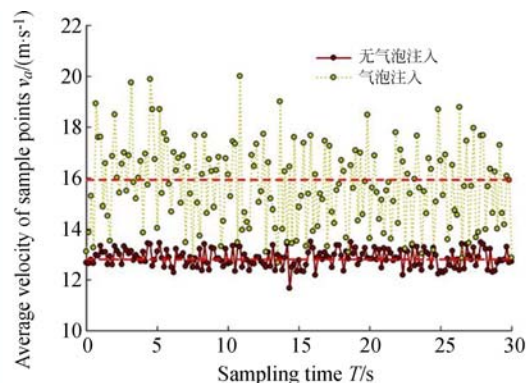


图 8 平均速度变化

Fig. 8 Average velocity variation

升至 15.97 m/s。在无气泡注入情况下,多数时刻点的速度位于 12.50~13.50 m/s 之间,通入气泡后,这一范围提升至 15.00~17.00 m/s,最高速度可以达到 20.00 m/s 以上。此外,由于气泡溃灭的混沌特性,使得通入气泡后流场速度大小、方向均波动得更为剧烈,这使得磨粒从多角度多方向冲击工件,有利于工件表面加工均匀性。

4 对比加工实验研究

为验证气-液-固三相磨粒流加工方法的有效性,搭建如图 9 所示的加工实验平台,进行加工实

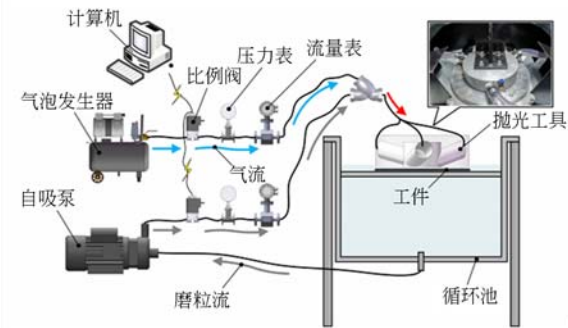


图 9 三相磨粒流加工实验平台

Fig. 9 Three phase abrasive flow processing platform

表 1 加工实验参数

Tab.1 Processing parameters

实验项目	实验条件
工件材料	单晶硅片
自吸泵(功率/KW;流量/(m ³ ·h ⁻¹))	3;25
气泵(功率/KW;流量/(m ³ ·h ⁻¹))	1.6;7.2
磨粒	1500# SiO ₂
流体介质	去离子水
加工时长/h	8

验验证。加工对象为单晶硅片,加工参数如表 1 所示。

首先,将含有 10%磨粒的软性磨粒流在循环池内混合均匀;然后,在自吸泵及气泡发生器作用下,软性磨粒流和微气泡流分别注入到三通阀内;混合均匀后,将产生的气-液-固三相磨粒流注入到抛光工具内,冲击工件表面以实现加工。其中,气流及磨粒流通过比例阀精确控制流量。在加工过程中,每隔 2 h 将工件旋转 90°,以保证加工均匀性。实验分为两组,第一组不通入气泡,即软性磨粒流加工方法;第二组为气-液-固三相磨粒流加工方法。根据模拟分析结果,在工件表面设置如图 10 所示的采样点,进行加工质量分析。

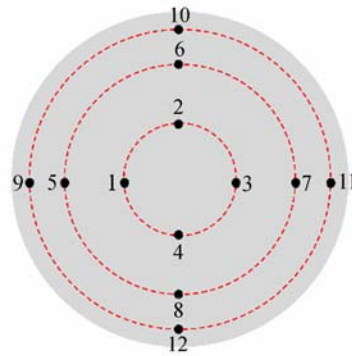
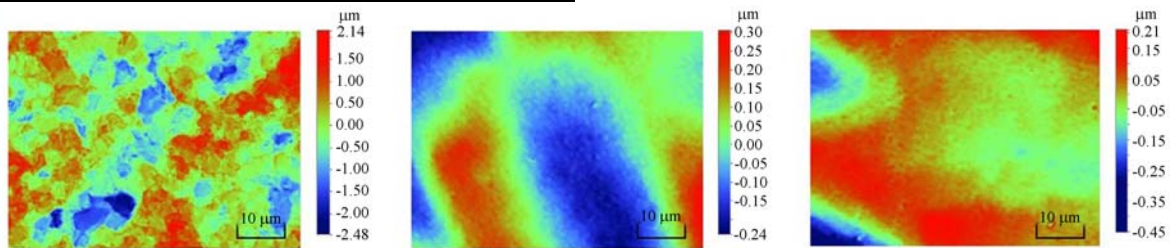


图 10 采样点分布

Fig. 10 Sample points distribution

结合图 3 及图 4 模拟结果可知,点 1、2、3、4 位于 A 区域内,点 5、6、7、8 位于 B 区域内,点 9、10、11、12 位于 C 区域内。分别经过 8 h 加工后,采用 Wyko NT9800 Veeco 白光干涉仪观测 B 区域内工件表面形貌,如图 11 和图 12 所示。



(a)初始表面 (a)Initial surface (b)软性磨粒流加工后的表面 (b)Surface processed by SAF (c)三相磨粒流加工后的表面 (c)Surface processed by three-phase abrasive flow

图 11 加工前后工件表面二维形貌

Fig. 11 Two-dimension surface topography before and after 8 h processing

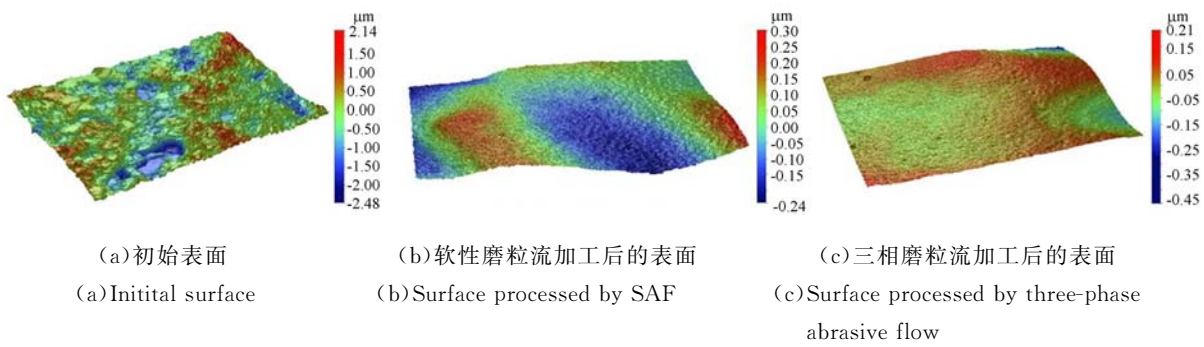


图 12 加工前后工件表面三维形貌

Fig. 12 Three-dimension surface topography before and after 8 h processing

图 11 为工件表面二维形貌,图 12 为相同测量点处的三维形貌。由图 11、图 12 可知,工件表面初始形貌存在多处波峰波谷,工件表面极不平整,波峰波谷之间高度差达到 $4.62 \mu\text{m}$,粗糙度 R_a 为 $0.50 \mu\text{m}$ 。经过软性磨粒流加工后,工件表面平整性有了较大地提高,波峰波谷之间高度差降低到 $0.54 \mu\text{m}$, R_a 达到 $0.09 \mu\text{m}$ 。经过气-液-固三相磨粒流加工后的表面形貌平整性最佳,虽然采样点处波峰波谷之间高度差为 $0.69 \mu\text{m}$,高于软性磨粒流加工结果,但采样点处总体平整性更优, R_a 达到 $0.05 \mu\text{m}$ 。

在两组实验的加工过程中,每隔 2 h 测量图 10 所示采样点粗糙度,得到 A、B、C 3 区域的平均粗糙度,如表 2、3 所示。

表 2 软性磨粒流加工粗糙度变化

Tab. 2 Roughness variation processed by SAF

平均粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	加工时间 t/h				
	0	2	4	6	8
A 区域	0.50	0.49	0.49	0.50	0.51
B 区域	0.50	0.29	0.18	0.14	0.09
C 区域	0.50	0.33	0.25	0.21	0.14

表 3 三相磨粒流加工粗糙度变化

Tab. 3 Roughness variation processed by GLSP

平均粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	加工时间 t/h				
	0	2	4	6	8
A 区域	0.50	0.49	0.50	0.50	0.50
B 区域	0.50	0.22	0.09	0.06	0.05
C 区域	0.49	0.28	0.22	0.17	0.13

由表 2、3 可得到如下加工规律:(1)A 区域粗糙度并未下降,说明 A 区域是加工盲区,这与图 3

模拟结果及图 7 流场测量结果相符;(2)两种加工方法中,B 区域粗糙度较 C 区域粗糙度下降的更快,光整效果更为明显;(3)通入微气泡后,B 区域光整效果有明显提升,经 8 h 加工后,粗糙度达到 $0.05 \mu\text{m}$,C 区域光整效果虽有提升但不明显。上述实验结果说明 B 区域覆盖下的工件表面具有更高的加工精度,同时证明了微气泡的通入可以有效增强磨粒流加工能力,提升工件表面加工质量。

5 结 论

为提高软性磨粒流在抛光硬脆性材料时的加工效率,本文提出一种改进的流体抛光方法,即气-液-固三相磨粒流抛光。该抛光方法通过在软性磨粒流中通入大量微尺度气泡,借助气泡溃灭释放的能量辅助抛光。

针对气-液-固三相磨粒流态特点,采用 CFD-PBM 耦合方法建立三相磨粒流流体学模型。基于该模型进行了加工特性模拟分析。模拟结果表明:抛光工具覆盖下的 B 区域具有较高的磨粒体积分数、湍动能及磨粒动能,是有效抛光区;工件表面微气泡呈逐级溃灭的方式,其中,在 B 区域大量多种尺度的气泡均溃灭成最小尺度气泡,溃灭最为剧烈;黏度对磨粒流加工的影响主要体现在近壁面磨粒流湍流特性,在常用流体黏度范围内,黏度的变化不会对 B 区域气泡溃灭的剧烈程度产生影响。

通过图像粒子测速法测量通入微气泡前后气-液-固三相磨粒流场速度矢量,结果显示微气泡通入可有效加强流场粒子速度,平均速度从 $12.50 \sim 13.50 \text{ m/s}$ 提升至 $15.00 \sim 17.00 \text{ m/s}$,最高平均速度

可达 20.00 m/s 以上。由于微气泡群在工件表面分布的随机性,使得 B 区域微气泡溃灭并不均匀,在加工中应使抛光工具做周期性自转以补偿加工。

搭建气-液-固三相磨粒流加工实验平台,与

软性磨粒流的对比加工实验表明,本文所述方法具有更高的加工效率和加工精度,相同加工时间内硅片表面平均粗糙度从 0.50 μm 降低到 0.05 μm ,而采用软性磨粒流方法降低到 0.09 μm 。

参考文献:

- [1] BEAUCAMP A, NAMBA Y. Super-smooth finishing of diamond turned hard X-ray molding dies by combined fluid jet and bonnet polishing[J]. *CIRP Annals*, 2013, 62(1): 315-318.
- [2] 荆君涛,冯平法,魏士亮,等. Si_3N_4 陶瓷旋转超声磨削加工的表面摩擦特性[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(11): 3200-3210.
JING J T, FENG P F, WEI SH L, *et al.*. Surface friction characteristics of Si_3N_4 ceramics machined by rotary ultrasonic grinding[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(11): 3200-3210. (in Chinese)
- [3] 白杨,张峰,李龙响,等. 碳化硅基底改性硅表面的磁流变抛光[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0322007.
BAI Y, ZHANG F, LI L X, *et al.*. Manufacture of silicon modification layer on silicon carbide surface by magnetorheological finishing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0322007. (in Chinese)
- [4] 朱永伟,李信路,王占奎,等. 光学硬脆材料固结磨料研磨中的亚表面损伤预测[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(2): 367-374.
ZHU Y W, LI X L, WANG ZH K, *et al.*. Subsurface damage prediction for optical hard-brittle material in fixed abrasive lapping[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(2): 367-374. (in Chinese)
- [5] 许亮,李剑,樊学武. 光学窗口形变对平行光管光学性能影响分析[J]. *应用光学*, 2010, 31(6): 914-917.
XU L, LI CH, FAN X W. Deformation of optical window and its influence on collimator's optical performance[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(6): 914-917. (in Chinese)
- [6] 石峰,万稳,戴一帆,等. 磁流变抛光对熔石英激光损伤特性的影响[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(12): 2931-2937.
SHI F, WAN W, DAI Y F, *et al.*. Effect of magnetorheological finishing on laser damage properties of fused silica[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(12): 2931-2937. (in Chinese)
- [7] KANAOKA M, TAKINO H, NOMURA K, *et al.*. Removal properties of low-thermal-expansion materials with rotating-sphere elastic emission machining[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2007, 8(3): 170-172.
- [8] JAIN V K, ADSUL S G. Experimental investigations into abrasive flow machining (AFM)[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, 40(7): 1003-1021.
- [9] STRNADEL B, HLAVÁČ L M, GEMBALOVÁ L. Effect of steel structure on the declination angle in AWJ cutting[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 64: 12-19.
- [10] WANG T, CHENG H B, CHEN Y, *et al.*. Multiplex path for magnetorheological jet polishing with vertical impinging [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(10): 2012-2019.
- [11] 计时鸣,李琛,谭大鹏,等. 基于 Preston 方程的软性磨粒流加工特性[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(17): 156-163.
JI SH M, LI CH, TAN D P, *et al.*. Study on machinability of softness abrasive flow based on Preston equation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(17): 156-163. (in Chinese)
- [12] ZHANG L, DENG B, XIE Y, *et al.*. Curved surface turbulence precision machining method for artificial joint complex of titanium alloy[J]. *Materials Research Innovations*, 2015, 19(S8): S8-55-S8-59.
- [13] TAN D P, JI SH M, FU Y ZH. An improved soft abrasive flow finishing method based on fluid collision theory[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 85(5-8): 1261-1274.
- [14] LI CH, JI SH M, TAN D P. Softness abrasive flow method oriented to tiny scale mold structural surface[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 61(9-12): 975-987.
- [15] 王含. 气泡行为的数值研究[D]. 上海:复旦大学, 2010.
WANG H. *Numerical Investigation of Bubble Behavior*[D]. Shanghai: Fudan University, 2010.

(in Chinese)

- [16] NI B Y, ZHANG A M, WANG Q X, *et al.*. Experimental and numerical study on the growth and collapse of a bubble in a narrow tube[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2012, 28(5): 1248-1260.
- [17] 徐琰, 董海峰, 田肖, 等. 鼓泡塔中离子液体-空气两相流的 CFD-PBM 耦合模拟[J]. *化工学报*, 2011, 62(10): 2699-2706.

XU Y, DONG H F, TIAN X, *et al.*. CFD-PBM coupled simulation of ionic liquid-air two-phase flow in bubble column[J]. *CIESC Journal*, 2011, 62(10): 2699-2706. (in Chinese)

- [18] LUO H A, SVENDSEN H F. Theoretical model for drop and bubble breakup in turbulent dispersions[J]. *AIChE Journal*, 1996, 42(5): 1225-1233.

作者简介:



计时鸣(1957—),男,浙江温州人,博士,教授,博士生导师,1982年于浙江工学院获得学士学位,1994年于浙江工业大学获得硕士学位,2000年于浙江大学获得博士学位,主要从事精密与超精密加工技术、计算机视觉与图像处理、汽车电子工程等方面研究。E-mail: jishiming@zjut.edu.cn



谭大鹏(1980—),男,山东淄博人,博士,教授,博士生导师,2002年于山东农业大学获得学士学位,2008年于浙江大学获得博士学位,主要从事工业检测技术、超精密加工等方面研究。E-mail: tandapeng@zjut.edu.cn