

文章编号 1004-924X(2017)04-0943-11

## 三相旋流抛光磨粒运动的测量与微气泡补偿

计时鸣,余昌利,赵 军\*

(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:**研究了气液固三相旋流抛光机理和规律。设计了三入口的抛光加工流道,对气液固三相旋流抛光流场进行了数值模拟。基于模拟结果设计了气液固三相磨粒流旋流流场测量平台,并通过粒子图像测速法(PIV)测量了微气泡补偿条件下气液固三相旋流抛光的流场参数,获得了微气泡补偿区域流场的运动图像、速度矢量图和涡量图。PIV 测量试验数据显示:在微气泡补偿区域,磨粒速度主要集中在 30 m/s 到 80 m/s,同一测量点高速磨粒出现频率明显增加,少数磨粒速度达到 100 m/s 以上;磨粒平均速度从 33.8 m/s 增大到 44.2 m/s,经 4 h 抛光后硅片表面最大粗糙度从 10.4  $\mu\text{m}$  下降到 1.3  $\mu\text{m}$ 。理论和试验研究表明,气液固三相旋流抛光流场中微气泡溃灭引发的空化冲击效应可增大磨粒动能,提高抛光效率,实现 B 区域的均匀化抛光。

**关键词:**三相旋流抛光;空化冲击;微气泡补偿;磨粒运动;粒子成像测速法(PIV)

**中图分类号:**TG580.692.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172504.0943

## Measurement of abrasive particles by three-phase swirling polishing and its microbubble compensation

Ji Shi-Ming, Yu Chang-Li, Zhao Jun\*

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

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

**Abstract:** The polishing mechanisms and rules of a gas-liquid-solid three-phase swirling flow field were explored. A polishing flow channel with three entrances was designed and the numerical simulation for the gas-liquid-solid three-phase swirling flow field was carried out. Then, a measuring table for the gas-liquid-solid three-phase swirling flow field was designed. The parameters of gas-liquid-solid three-phase swirling flow field were measured by the Particle Image Velocimetry (PIV) under the condition of microbubble compensation and the motion images, velocity vector images, and the vorticity graphs of the flow field in the microbubble compensation region were obtained. The test data by the PIV show that the speeds of abrasive particles mainly concentrate between 30 m/s and 80m/s in microbubble compensation region, high speed abrasive particles in the same measurement point are significantly increased, and the speeds of a parts of abrasive particles can be more than 100 m/s. Furthermore, the

收稿日期:2016-10-21;修订日期:2017-01-16.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 51575494);国家自然科学基金青年基金资助项目,(No. 51605438);浙江省自然科学基金重点项目(No. LZ14E050001);浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)资助项目(No. 2016R403061)

average speed of abrasive particles is increased from 33.8 m/s to 44.2 m/s and the maximum surface roughness of a silicon wafer decreases from 10.4  $\mu\text{m}$  to 1.3  $\mu\text{m}$  after the 4 h polishing. The research on theory and testing indicates that the cavitation impact effect caused by microbubble collapse in the gas-fluid-solid three-phase swirling polishing flow field increases the kinetic energy of abrasive particles and improves the polishing efficiency, so as to achieve the homogenization polishing of the region B.

**Key words:** three-phase swirling polishing; cavitation impact; microbubble compensation; abrasive particle movement; Particle Image Velocimetry(PIV)

## 1 引言

随着现代光学、电子信息等领域的高速发展,常常需要对大面积精密光学零件表面进行抛光,例如高精度硅片、光学透镜等<sup>[1]</sup>。现有应用于电子信息材料精密加工的方法有工具接触式加工和流体加工两类。前者如化学机械抛光(CMP)加工,由于磨粒粒径不一,极易造成工件划痕和亚表面损伤<sup>[2-3]</sup>。相对而言,流体抛光由于流体介质的缓冲作用,不易产生加工变质层,更适合大面积或自由曲面光学元件的光整加工,如磁流变抛光、浮法抛光等<sup>[4]</sup>,但这些方法加工效率往往较低。为了提高流体抛光方法的加工效率,本文提出了三相旋流微气泡补偿抛光方法,该方法在固液二相湍流流场中通入微气泡,利用微气泡溃灭形成的空化冲击效应增大磨粒的动能,提升光整加工效率,并在流场低速度区域引入额外微气泡补偿,实现部分区域的均匀化抛光。为了验证该方法的有效性,探索磨粒在流场中的运动规律,需要对气液固三相旋流抛光流场进行数值模拟和粒子图像测速,并对工件进行加工试验。

目前,关于气液固三相旋流流场的研究主要集中在对流场边界条件的控制上。计时鸣<sup>[5]</sup>等对不同温度下气液固三相磨粒流场湍动能和动压力的大小进行了研究,通过控制流场入口流速形成不同温度下最佳的抛光加工工艺。张勤<sup>[6]</sup>等人分析了两支微管对向喷射流场内颗粒的受力情况,得到了不同参数条件下旋流流场中磨粒的运动规律。Rayleigh<sup>[7]</sup>等人通过分析单个球形气泡在无界流域中的溃灭过程,得到了 Rayleigh—Plesset 方程,并发现在溃灭末期,气泡附近会形成相对高压,对附近流场形成冲击。

目前国内外学者对于复杂流场测量的研究方

法主要涉及激光多普勒测速法、时间解析图像测速法和粒子图像测速法(PIV)。PIV 能够在不干扰流场运动状态的情况下对高速流场进行测量,得出流场的涡量、速度矢量等关键信息<sup>[8]</sup>,较适合作为本文的测量方法。王波兰<sup>[9]</sup>等应用 PIV 技术对复杂气动流场中微粒分布状态进行了观测,结合图像后处理技术,得到了旋涡结构流场内瞬态粒子的分布特性规律。CHENG Wen<sup>[10]</sup>等采用 PIV 技术测出气液两相流中气泡速度场,根据气泡运动的测量数据,提出了估算液相流场的算法。高晖<sup>[11]</sup>等利用 PIV 技术对组合弯管内气、水和砂三相流底部水平段和上升段液膜区的流场进行了测量,揭示了弯管内气液固三相流流场的运动特性。

在上述研究的基础上,本文针对面约束下气液固三相磨粒流旋流流场特性,设计了三入口的抛光加工流道,结合 Mixture 湍流模型和 Realizable 模型对该旋流抛光流场进行数值模拟,基于模拟结果设计出气液固三相磨粒流旋流流场测量平台,利用 PIV 技术对该旋流流场中磨粒与气泡的运动规律、流场速度、涡量进行测量,并进行了抛光对比试验。

## 2 气液固三相旋流抛光流场数值模拟

### 2.1 气液固三相旋流抛光平台

基于气液固三相旋流抛光流场特性和加工工件(大尺寸硅片)结构形貌搭建了抛光平台,如图 1 所示:

工件固定安装在装夹台上,抛光圆盘置于硅片正上方,于硅片上表面形成面约束(间距小于 2 mm),气液固三相磨粒流经三均布入口高速注入抛光圆盘,在硅片上约束面中形成高速湍流涡旋流。约束面内的高速离心震荡使通入的微气泡

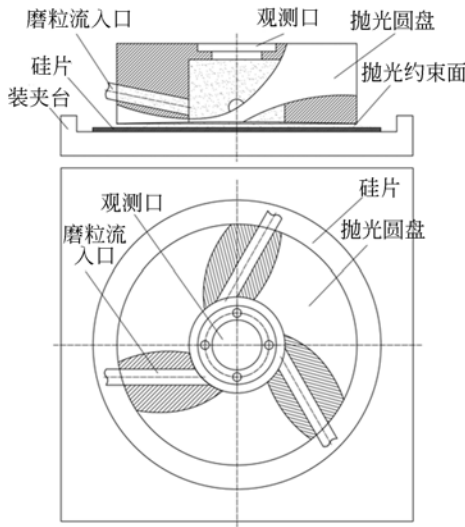


图 1 抛光工具原理图

Fig. 1 Schematic diagram of polishing tools

溃灭形成空化冲击效应,从而增强磨粒运动的无序性、增大磨粒动能,提升抛光加工效率,实现大面积精密抛光加工。其中微气泡由微纳米气泡发生器产生,可根据实验要求调整气泡大小与数量。

### 2.2 气液固三相旋流流场的数学描述

Mixture 模型是一种简化的两(多)相流模型,它使用单流体方用于模拟各相有不同速度的两(多)相流,其假定在短空间尺度上局部平衡,离散相有着宽广的分布,相之间的耦合比较强,可以用来模拟具有不同速度的多相流动,典型的应用包括低负载的粒子负载流、沉降、旋风分离器等<sup>[12]</sup>。气液固三相旋流抛光流场中磨粒分布广泛,且在空化冲击作用下磨粒与液相具有相对滑移,相与相之间具有不同速度,比较符合 Mixture 模型的特性要求。

湍流状态下流场中的磨粒呈不规则运动,满足硅片大面积均匀化抛光加工要求。Realizable 双方程湍流模型在 Standard 湍流模型的基础上改进了湍流黏度计算公式,在其公式中引入了旋度和曲率相关的参数,提高了计算精度<sup>[13]</sup>,比较适合本文中面约束下的气液固三相旋流抛光流场的数值模拟。

在 Realizable  $k-\epsilon$  模型中,湍动能及其耗散率输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}}, \quad (2)$$

式中,  $\rho$  为流体密度;  $t$  为时间;  $k$  为湍动能;  $\mu_t$  为速度;  $x_i, x_j$  为两个坐标方向的张量表示;  $\mu$  为流体动力黏度;  $\sigma_k = 1.0$  为湍动能  $k$  所对应的湍流普朗特数;  $G_k = \mu_t \left( \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j}$  为平均速度梯度引起的湍动能  $k$  的产生项;  $\epsilon$  为湍流耗散率;  $\sigma_\epsilon = 1.2$  为耗散率  $\epsilon$  对应的湍流普朗特数;  $E$  为时均应变率张量模量;  $C_2 = 1.9$  为经验常数值;  $C_1 = \max \left( 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right)$  为系数,  $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\epsilon}$  为中间变量,  $E_{ij} \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right)$  为时均应变率张量; 式(2)中,  $\mu_t$  按下式计算:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (3)$$

式中,  $\mu_t$  为湍动黏度系数;  $C_\mu = \frac{1}{4 + \sqrt{6} \cos \phi U^* k / \epsilon}$  为模型系数;  $\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W)$  为中间变量;  $W = \frac{E_{ij} E_{jk} E_{kj}}{(E_{ij} E_{ij})^{1/2}}$  为中间变量;  $U^* = \sqrt{E_{ij} E_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}}$  为中间变量;  $\tilde{\Omega}_{ij}$  为时均转动速率张量;  $\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\epsilon_{ijk} \omega_k$ ,  $\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \epsilon_{ijk} \omega_k$ ;  $\omega_k$  为角速度。

### 2.3 网格划分及边界条件设置

基于抛光圆盘的特点抽取内腔流道作为数值模拟的物理模型,利用 Ansys Workbench 进行网格划分,对工件上约束面的主计算域进行六面体网格划分并细化,中间腔体和 3 入口流道域设置自动四面体网格划分,并在 3 入口处设置膨胀层,模型网格总数达到 42 万个,能达到模型流场特性分析的要求,划分结果如图 2 所示。

采用 Fluent 软件对气液固三相旋流抛光流场在流道内的运动特性进行数值模拟。参数设置如下:三相流模型采用 Mixture  $k-\epsilon$  模型,湍流模型采用 Realizable 模型,并采用 3D 单精度稳态隐式压力求解器求解。

三相旋流抛光所用泵为功率 1.5 kW,流量为 19 m<sup>3</sup>/h 的 304 自吸泵,换算后出口速度约为 30 m/s,底部圆环直径为 200 mm。在边界条件中,三入口设为 velocity inlet,初始速度值为 30 m/s,

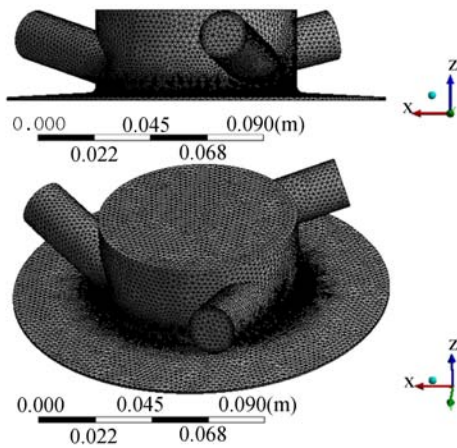


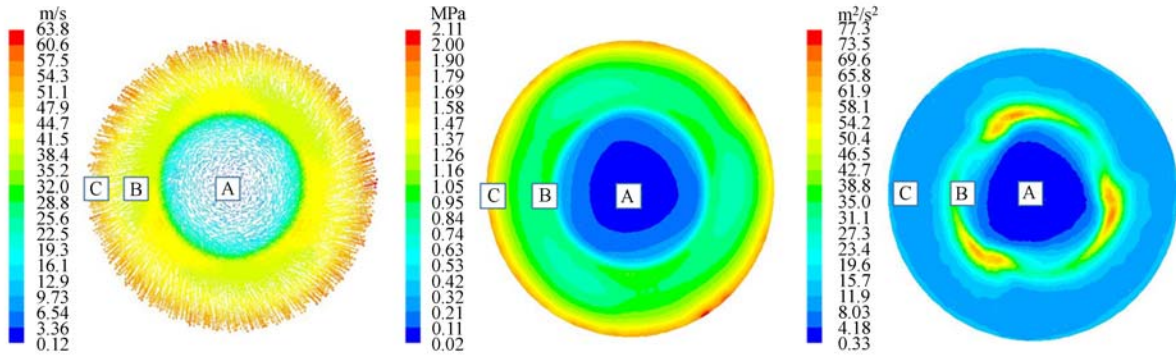
图 2 抛光流道网格划分图

Fig. 2 Meshing figure of polishing tools

主相为液相,材料为水,次相中固相为体积分数为 0.1 的 SiC 颗粒(50  $\mu\text{m}$ ),气相介质为体积分数为 0.05 的空气,出口为模型下圆盘侧边圆环面,设为 outflow,其余边界设为 wall。根据雷诺数计算公式  $Re = \rho v d / \mu$  可得雷诺数为  $1.193 \times 10^6$ ,已达到湍流状态。

### 2.4 数值模拟结果与分析讨论

当流场内形成稳定的湍流状态后,硅片上约束表面流场的磨粒运动速度、湍动能强度、动压力都会直接影响硅片的抛光加工效率,所以本文对上述变量进行数值模拟分析。图 3 为硅片上表面 0.001 m 处平面的气液固三相旋流抛光流场数值模拟结果,图 4 为其 X 方向以圆心为起点沿径向坐标数据分布图。



(a)速度矢量

(a) Velocity vector

(b)动压力

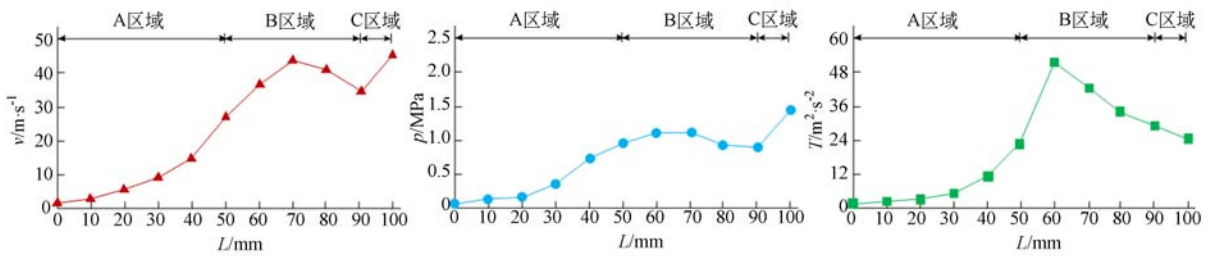
(b) Dynamic pressure

(c)湍动能

(b) Turbulent kinetic energy

图 3 气液固三相磨粒流旋流流场数值模拟结果

Fig. 3 Numerical simulation results of gas-liquid-solid abrasive flow



(a)速度分布

(a) Velocity distribution

(b)动压力分布

(b) Dynamic pressure distribution

(c)湍动能分布

(c) Turbulent kinetic energy distribution

图 4 各区域流场参数分布

Fig. 4 Parameter distributions of flow fields

因为入射流速较高,流场经过 0.1 s 后达到稳定状态,为便于分析,将数值模拟结果分解为

A、B、C 等 3 个环形区域。

由图 3(a)及图 4 可知,A 区域磨粒流速度较

低,这是因为三入口抛光液高速注入抛光圆盘,在强离心作用下于A区域形成速度空心漩涡,如台风的风眼,相对速度较小。B区域面积最大,磨粒流速度较A区域明显增大且分布较为均匀,在3个三相磨粒流入口下方处达到该区域的最大值,约为44.7 m/s, B区域其它处磨粒流速度约为35.2 m/s,这是因为三相磨粒流由内腔进入约束面,在流量不变的情况下壁面直径变小,流速增大,三入口下方为三相磨粒流直接冲刷点,导致该区域的磨粒流相对速度偏高。C区域为约束面狭缝出口,磨粒流速度将有所增大。

由图3(a)、图3(b)与图4可知,该区域的动压力变化趋势和速度矢量分布云图相似,结合动压力公式  $1/2\rho v^2$  可知,在密度不变的情况下,动压力随速度的增加而增大。A区域流场磨粒运动速度较小,动压力也较小,基本不起抛光作用。B区域由于三相磨粒流速增加使动压力明显增大,且动压力分布相对均匀,占有面积最大,为主抛光区域。C区域动压力最大,但面积较小,对工件的均匀化抛光影响较小。

由图3(c)和图3(a)、3(b)及图4可知,该区域的湍动能变化趋势和速度矢量分布相似,结合湍动能经验公式  $3/2 \mu L^2$  可知,在湍流强度L一定的情况下,湍动能随速度 $\mu$ 的增大而增大。在主加工区域B,磨粒流动压力和速度较大,微气泡受强湍流作用下溃灭,空化效应较为集中,释放的能量增大了磨粒的动能,从而提高了抛光加工效率。不过跟随速度矢量图的分布,三入口处的湍动能明显强于B区域的其他位置,对工件的均匀化加工存在一定的影响。C区域湍动能强度有所减少,虽然C区域的磨粒流速有所增加,但三相磨粒流在B至C过程中存在着一定的湍动能耗散,且C区域距中心较远,离心力较弱,空化效应相对减弱,综合导致C区域湍动能下降。

综合分析可知,气液固三相磨粒流在工件上约束面形成稳定湍流状态后,在B区域形成较为均匀稳定的主抛光加工区域,该区域在强湍流、动压力作用下,大量微气泡激发空化冲击效应,增强磨粒运动无序性、增大其动能,提升了抛光加工效率。同时也可以知道,在B区域的磨粒流三入口处存在速度峰值,可以在环形非峰值区域额外施加微气泡补偿,通过增强该区域的空化冲击效应使B区域流场的平均速度达到相对均匀的效果。

### 3 气液固三相旋流流场测量试验

#### 3.1 气液固三相旋流流场测量循环平台

取气液固三相磨粒流实际抛光平面,即工件表面上方0.001 m水平面作为测量面,基于相似理论,以1:1的比例设计出可视化流道,如图5所示。其中可视化流道模型外圈直径为200 mm,微气泡补偿点孔直径为8 mm,测量时以微气泡补偿点作为测量点,测量该区域在补偿空化冲击作用下的速度矢量、涡量以及磨粒的运动规律。

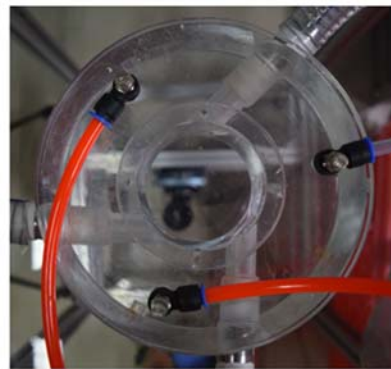


图5 可视化流道模型

Fig. 5 Visible flow passage model

#### 3.2 PIV 测量试验平台的搭建

结合PIV设备与可视化流道搭建了PIV测量试验平台,如图6所示。该平台主要包括4大部分,分别为:磨粒循环系统,激光发生器,拍摄系统,后处理系统。磨粒循环系统可实现气液固三相磨粒流的内循环,激光发生器用于发出高强度的双帧激光片光,拍摄系统采用高速相机对流场进行拍摄,获得示踪粒子在流道内的运动图像,后处理系统对所拍摄到的图像进行处理分析,得到流场的速度矢量图、涡量图。

PIV试验数据与数值模拟参数保持相同,流道中气液固三相磨粒流成分分别为:1200目的SiC颗粒(密度为3.2 g/cm<sup>3</sup>,体积分数为10%),液相为水,气相由微纳米气泡发生器产生。其中流场入口速度为30 m/s,流场温度为25℃,动力黏度为0.735×10<sup>-3</sup> Pa·s,水力直径为0.015 m,三相磨粒流密度为1.17×10<sup>-3</sup> kg/m,根据雷诺数计算公式:

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu} = \frac{0.015 \times 30 \times 1170}{0.735 \times 10^{-3}} = 7.16 \times 10^5, \quad (4)$$

由  $Re=7.16 \times 10^5 \geq 2320$  可知<sup>[14]</sup>,气液固三相磨粒流旋流流场已处于湍流状态。

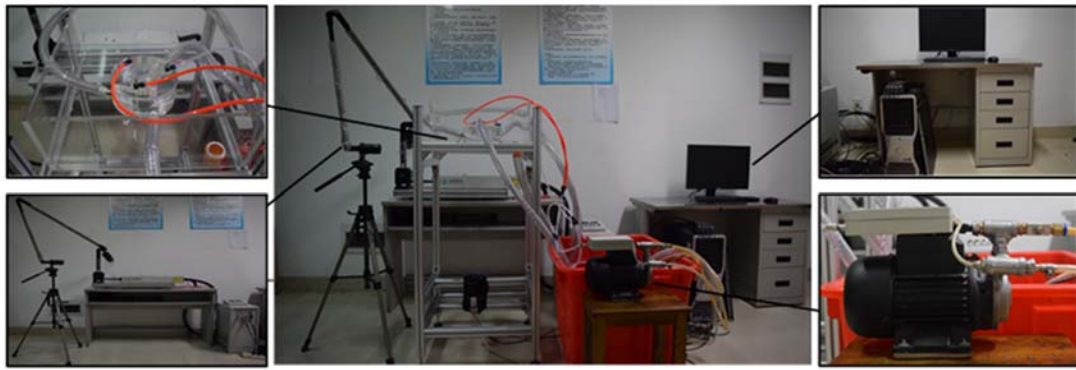


图 6 PIV 测量试验平台

Fig. 6 Measurement experiment platform of PIV

### 3.3 气液固三相旋流流场微气泡补偿点测量结果与分析

PIV 测量试验获得了 0~16 s 内微气泡补偿点连续 100 幅流场运动图像,从中抽取 3 幅最能

表达微气泡从形核到溃灭这一过程的运动轨迹图像,经图像后处理技术得到速度矢量和涡量图,如图 7 至 9 所示。

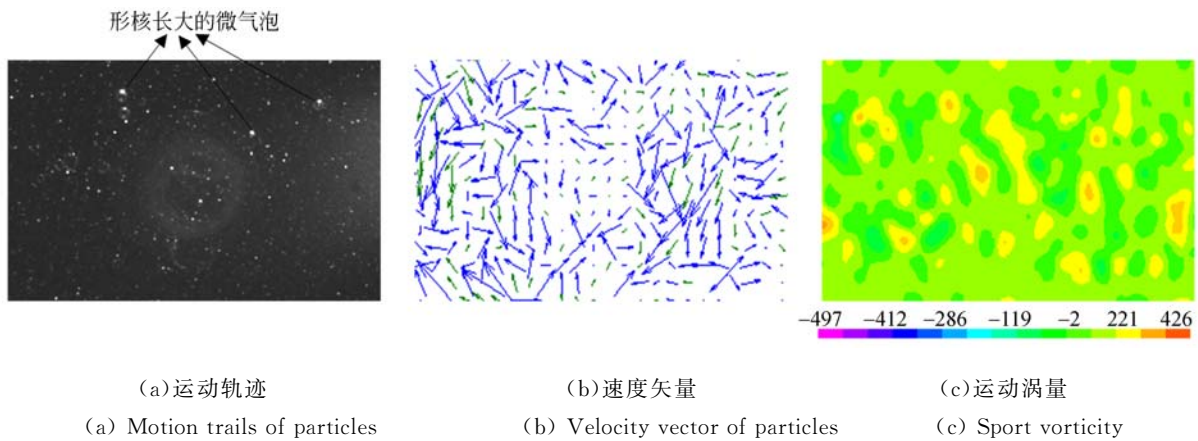


图 7  $t=0.137$  s 测量结果

Fig. 7 Measurement result in  $t=0.137$  s

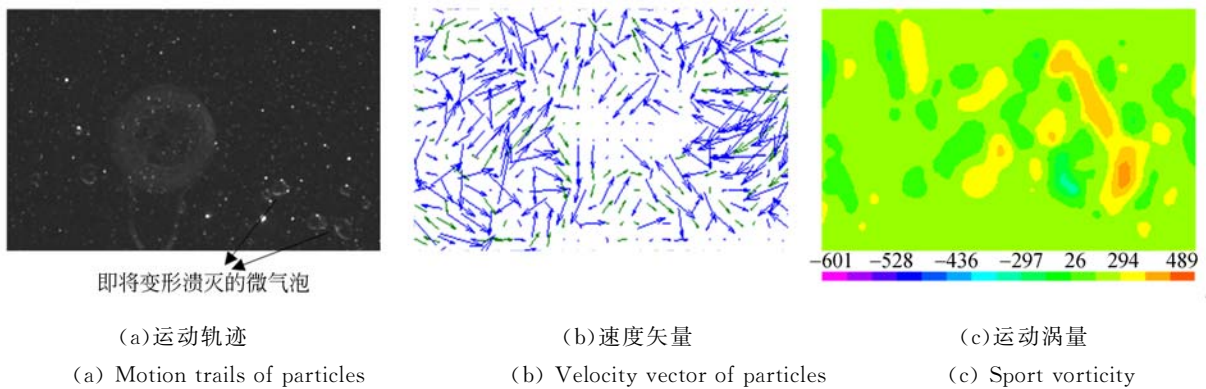


图 8  $t=1.233$  s 测量结果

Fig. 8 Measurement results in  $t=1.233$  s

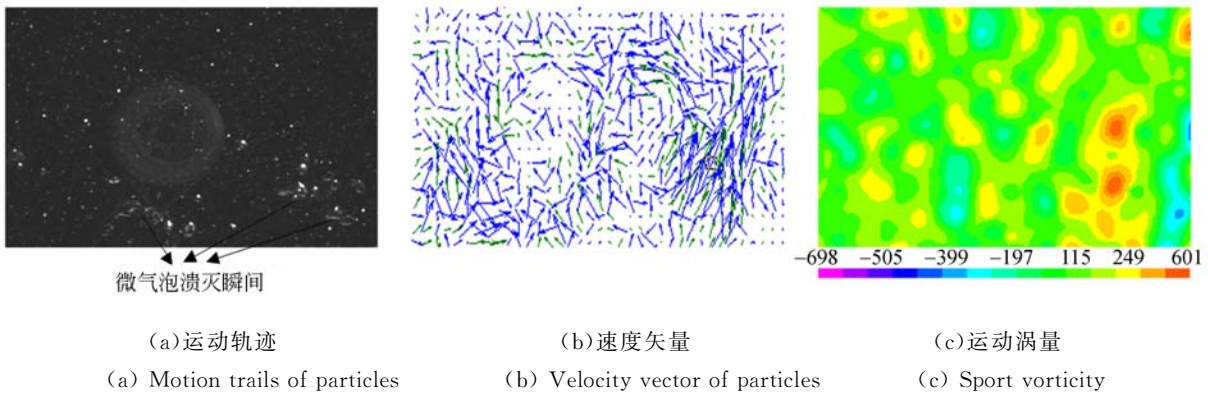


图 9  $t=2.877$  s 测量结果

Fig. 9 Measurement result in  $t=2.877$  s

由图 7(a)可知,在  $t=0.137$  s 时,补偿测量点区域有少量正在形核长大的微气泡,微气泡外形较圆,还不具溃灭特征,空化冲击效应较少。结合图 7(b)和 7(c)可知,磨粒的运动轨迹呈小范围的无规则涡旋状态,高涡量点较为分散且均匀,符合湍流的基本特征。此时,该区域处于正常的稳定湍流状态,磨粒在液相的驱动下冲击流道壁面,对工件凸起峰进行切削去除。

由图 8(a)可知,在  $t=1.233$  s 时,补偿测量点区域有部分即将变形溃灭的微气泡,微气泡外形扭曲改变,处于溃灭的边缘,空化冲击效应有所增加。对比图 7(b)和 8(b)、图 7(c)和 8(c)可知,微气泡即将溃灭位置处磨粒的速度矢量变得更加密集,速度矢量方向变得杂乱,同时在该区域的涡量值较其他区域亦有增大。说明了在湍流流场中,少量的空化效应增大了液相中局部磨粒的动能,增强了磨粒运动无序性。

由图 9(a)可知,在  $t=2.877$  s 时,补偿测量点区域有大量溃灭的微气泡,此时微气泡形核到极限,在强湍流作用下变形严重并逐渐溃灭,大量微气泡产生空化冲击效应。对比图 9(b)和 8(b)、图 9(c)和 8(c)可知,在强空化冲击作用下,磨粒的速度矢量整体变得更加密集,速度矢量方向更加紊乱,涡量值进一步增大,在微气泡溃灭中心达到峰值。说明了在湍流流场中,大量的空化冲击作用能增大液相中磨粒的动能,增强磨粒运动的无序性,从而提升磨粒对工件的抛光效率。

分析连续 16 s 内无微气泡补偿、微气泡补偿两组试验各 100 张速度矢量图,获得测量点区域磨粒在 U、V 方向及合成后的速度,如图 10、11 所示:

将图 10(a)、10(b)与图 11(a)、11(b)对比可知,在连续的 100 幅速度矢量图中,气液固三相磨粒流及微气泡补偿下的三相磨粒流在 U、V 方向的正负速度都相对平衡,说明流场中的磨粒在这

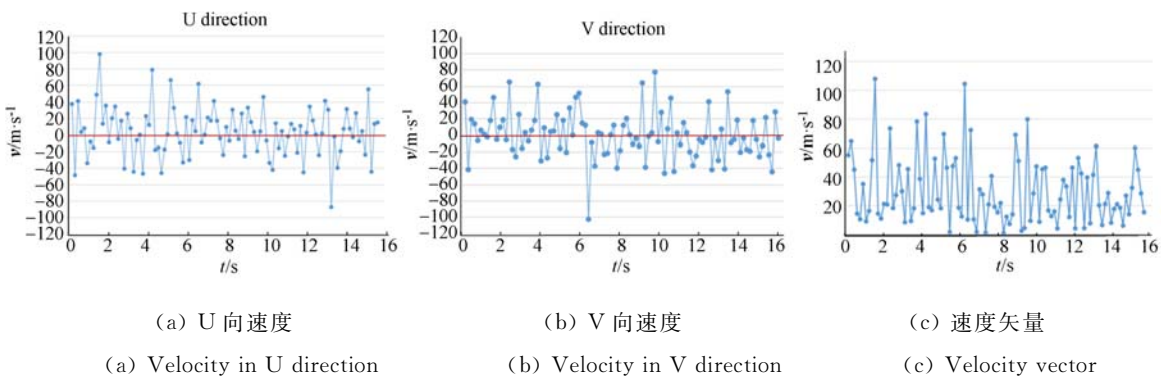


图 10 无微气泡补偿速度图

Fig. 10 Velocity diagram without microbubble compensation

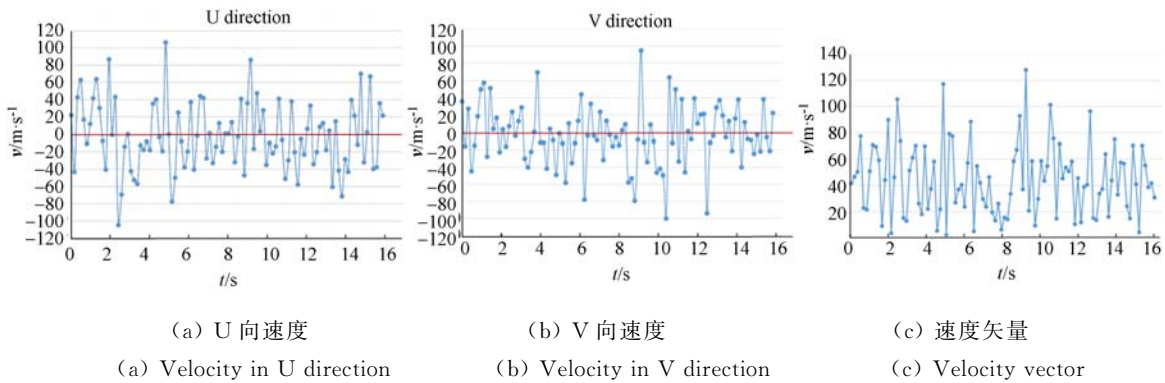


图 11 微气泡补偿速度图

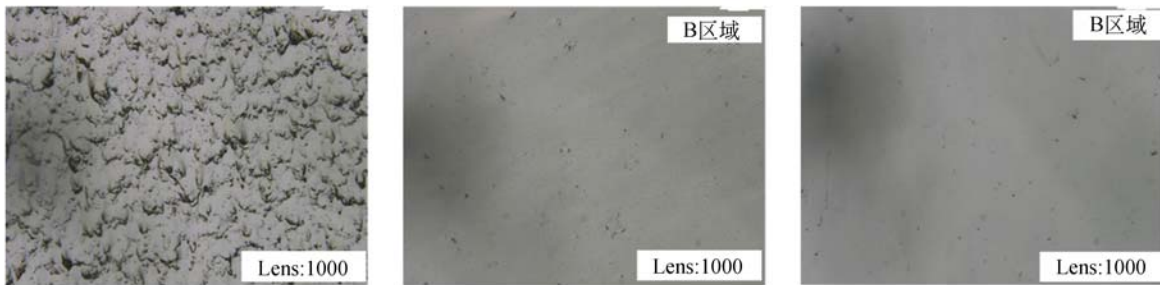
Fig. 11 Velocity diagram with microbubble compensation

两种状态下都呈无规则运动状态,符合湍流的基本特征,有利于工件的均匀化抛光。图 10(c)、11(c)为两种状态下 U、V 向的速度合成图,观察可知,在无微气泡补偿下的常规气液固三相旋流流场内,磨粒受微气泡空化冲击作用后,测量点磨粒的速度分布在 0 m/s~110 m/s,主要集中在 20 m/s~60 m/s,少部分磨粒速度达到 80 m/s,2 个时刻到达 100 m/s 以上,求得平均速度为 33.8 m/s。在微气泡补偿状态下,测量点磨粒的速度分布则在 0 m/s~130 m/s,主要集中在 30 m/s~80 m/s,80 m/s 以上的时刻点到达 11 个,平均速度提升至 44.2 m/s。对比分析图 10(c)、11(c)可知,观测点在额外补偿的空化冲击效应的正向作用下,高速度时刻点显著增加,在部分时刻,测量点处于湍流涡旋中心,或在空化冲击效应的负向作用下速度呈较低值,总体平均速度从未补偿的 33.8 m/s 增大到 44.2 m/s,与数值模拟的 B 环

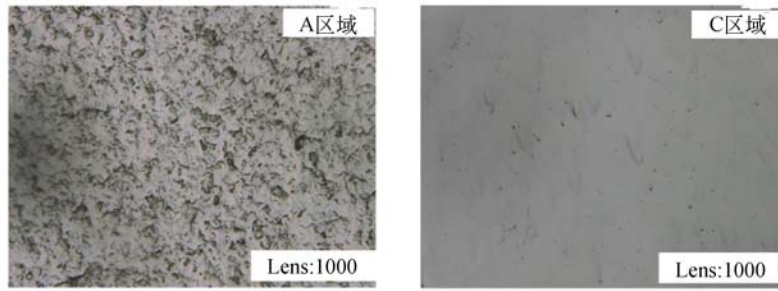
极值点基本相符,满足均匀化抛光加工要求。

将硅片置于加工平台抛光 4 h 后,分别对 A、B、C 区域加工效果进行检测,并放大 1000 倍,如图 12、图 13 所示。

由图 12、图 13 可知,硅片在未加工时,表面突起峰众多,测量点表面最大粗糙度达到 10.4  $\mu\text{m}$ ,大部分区域粗糙度集中在 4.4  $\mu\text{m}$ ~6.2  $\mu\text{m}$  之间。经无微气泡补偿的气液固三相旋流抛光加工后,B 区域测量点最大粗糙度下降至 3.6  $\mu\text{m}$ ,且只占极小部分区域,大部分区域粗糙度集中在 0.8~1.6  $\mu\text{m}$ ,抛光后的区域较为平整光滑。经微气泡补偿的 B 区域测量点抛光效果最佳,最大粗糙度下降至 1.3  $\mu\text{m}$ ,大部分测量区域的表面粗糙度集中在 0.4~0.9  $\mu\text{m}$  之间,且显微效果最为光整,黑色突起峰最少;A 区域由于流场速度及动压力较小,其抛光效果几乎可以忽略;C 区域由于湍动能较弱,虽一定的抛光效果,但凸起峰较多,



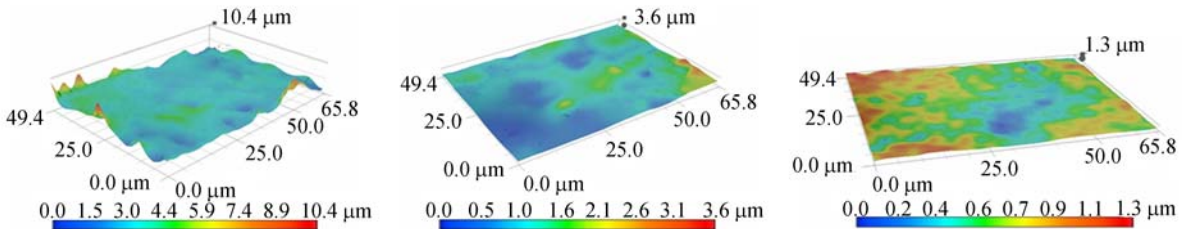
(a) 工件原始图 (a) Origin image of workpiece (b) 无微气泡补偿加工图 (b) Polishing image without microbubble (c) 微气泡补偿加工图 (c) Polishing image with microbubble



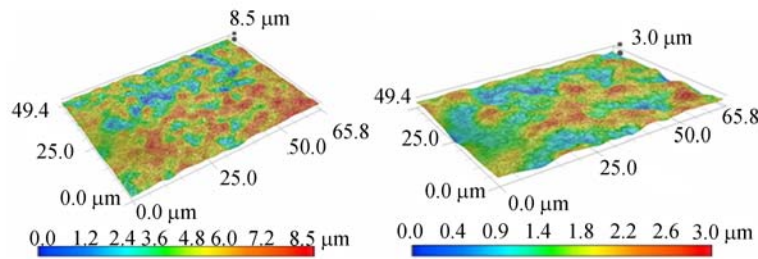
(d) A 区域加工图 (e) C 区域加工图  
 (d) Processing chart for A region (e) Processing chart for C regional

图 12 抛光结果对比

Fig. 12 Comparison of polishing results



(a)原始扫描图 (b)无微气泡补偿扫描图 (c)微气泡补偿扫描图  
 (a) Original scan image (b) Scan image without microbubble compensation (c) Scan image with microbubble compensation



(d) A 区域扫描图 (e) C 区域扫描图  
 (d) Scan image for A region (e) Scan image for C region

图 13 抛光结果三维扫描图

Fig. 13 3-D scanning of polishing results

加工痕迹较明显。对硅片 A、B、C 区域沿径向各取 8 点进行粗糙度测量,测量点及测量结果如图 14、图 15 所示:

由图 15 可知,A 区域抛光效果较差,基本不起光整加工作用;B 区域抛光效果最好,且粗糙度值波动最小,其平均值在  $0.7 \mu\text{m}$  左右,光整加工性能最优;C 区域有一定的光整加工效果,但其粗糙度波动较大,不太适合均匀化加工。

通过 PIV 测量试验对气液固三相旋流流场中补偿点位置的磨粒运动进行测量,得到了气液

固三相磨粒流在该区域的磨粒运动轨迹图、速度矢量图、涡量图以及粒子速度分布图。对比分析流场测量结果和数值模拟结果可知,在空化冲击作用下,补偿点区域磨粒的平均速度从  $33.8 \text{ m/s}$  提高到了  $44.2 \text{ m/s}$ ,磨粒运动无序性进一步增强,在 B 区域形成了较为均匀的湍流流场。经 4 h 抛光实验后,B 区域测量点硅片表面最大粗糙度从  $10.4 \mu\text{m}$  下降到  $1.3 \mu\text{m}$ ,平均达到  $0.7 \mu\text{m}$ 。加工试验与 PIV 测量试验及数值模拟结果基本相符,证明了气液固三相旋流微气泡补偿抛光方

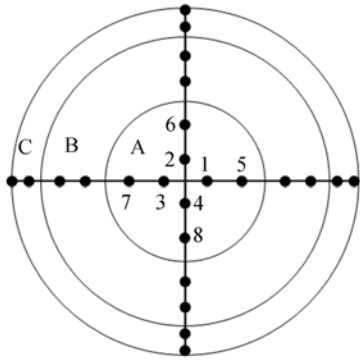


图 14 测量位置示意图

Fig. 14 Diagram of measuring position

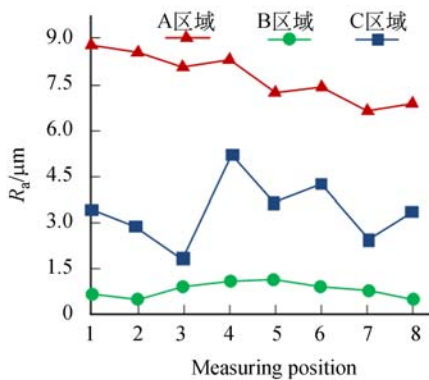


图 15 工件粗糙度测量图

Fig. 15 Diagram of silicon roughness measurement

法能够提高流体抛光效率,实现 B 区域的均匀化抛光。

#### 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 - Manufacturing Technology*, 2013, 62(1): 315-318.
- [2] 许雪峰,马冰迅,黄亦申,等. 利用复合磨粒抛光液的硅片化学机械抛光[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7):1587-1593.
- XU X F, MA B X, HUANG Y S H, *et al.*. Chemical mechanical polishing for silicon wafer by composite abrasive slurry[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7):1587-1593. (in Chinese)

## 4 结 论

为了探究气液固三相旋流抛光流场中磨粒的运动规律,利用 Realizable 湍流模型和 Mixture 模型对流场进行数值模拟,得到了空化冲击作用下工件上表面 0.001 m 处平面流场的速度矢量、动压力、湍动能云图。数值模拟结果表明,B 环处的三相旋流流场特性较好,但在抛光液三入口下方处存在速度极值。

根据数值模拟结果,设计气液固三相旋流可视化流道,结合 PIV 测量设备搭建了气液固三相旋流抛光流场测量试验平台。PIV 测量试验获得了微气泡补偿区域流场的运动图像、速度矢量图、涡量图,结果表明,在大量空化冲击作用下,微气泡补偿位置流场内磨粒的速度、动能有所增大,磨粒运动呈无规则状态。

分析微气泡补偿区域流场连续 100 幅速度矢量图,得到磨粒在 0~16 s 内的速度矢量图。结果表明,在空化冲击作用下,微气泡补偿区域磨粒的最大速度可达到 100 m/s 以上,平均速度相对无微气泡补偿点的 33.8 m/s 增大到 44.2 m/s,与数值模拟中流场 B 环的峰值速度基本相符。经 4 h 抛光试验后,B 区域测量点硅片表面最大粗糙度从 10.4 μm 下降到 1.3 μm,平均达到 0.7 μm,证明了微气泡补偿作用下的气液固三相旋流可有效提高流体抛光效率,实现 B 区域的均匀化抛光,为后续大面积光整加工奠定了基础。

- [3] PARK Y, LEE H, LEE Y, *et al.*. Effect of contact angle between retaining ring and polishing pad on material removal uniformity in CMP process[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(9): 1513-1518.
- [4] LIU Y M, TAN J B, MA J. Fabrication and shielding effectiveness evaluation of curved mesh optical windows using ray-optic tracing and equivalent film methods[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(20): 4015-4018.
- [5] 计时鸣,黄希欢,谭大鹏,等. 气-液-固三相磨粒流光整加工及其工艺参数优化[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4):855-864.
- J I S H M, HUANG X H, TAN D P, *et al.*. Gas-

- liquid-solid abrasive flow polishing and its process parameter optimization[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 855-864. (in Chinese)
- [6] 张勤,王建华,黄维军,等.旋流驱动微粒转动的性能与实验[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 2013-2022.  
ZHANG Q, WANG J H, HUANG W J, *et al.*. Performance and experiments of particle rotation driven by swirl[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 2013-2022. (in Chinese)
- [7] RAYLEIGH L. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity[J]. *Philosophical Magazine, Series 6*, 1917, 34(200): 94-98.
- [8] 权辉,李仁年,苏清苗,等.基于PIV测试的螺旋离心泵内部流动特性研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 28-32, 58.  
QUAN H, LI R N, SU Q M, *et al.*. Internal Flow Characteristic of Screw Centrifugal Pump Based on PIV[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 28-32, 58. (in Chinese)
- [9] 王波兰,宗昕,顾蕴松. PIV技术在复杂二相流场中的应用[J]. *实验流体力学*, 2014, 28(1): 60-64.  
WANG B L, ZONG X, GU Y S. The application of PIV technology in complex two-phase flow field[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2014, 28(1): 60-64. (in Chinese)
- [10] CHENG W, MURAI Y, ISHIKAWA M A, *et al.*. An algorithm for estimating liquid flow field from PTV measurement data of bubble motion [J]. *Transactions of the Visualization Society of Japan*, 2003, 23(11): 107-114.
- [11] 高晖,郭烈锦,赵丙强,等.弯管内气液固三相流中液膜区流场的PIV测量[J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(2): 255-258.  
GAO H, GUO L J, ZHAO B Q, *et al.*. PIV measurement of liquid film flow field in gas-liquid-solid three phase flow through a curved pipe[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25(2): 255-258. (in Chinese)
- [12] 赵斌娟,袁寿其,刘厚林,等.基于Mixture多相流模型计算双通道泵全流道内固液两相湍流[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(1): 7-12.  
ZHAO B J, YUAN SH Q, LIU H L, *et al.*. Simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in double-channel pump based on Mixture model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(1): 7-12. (in Chinese)
- [13] 崔凯,张海,王卫良,等.旋流燃烧器数值模拟中Realizable  $\kappa$ - $\epsilon$ 和RSM模型比较[J]. *工程热物理学报*, 2012, 33(11): 2006-2009.  
CUI K, ZHANG H, WANG W L, *et al.*. Comparison between realizable  $\kappa$ - $\epsilon$  and RSM model in the simulation for a swirl burner[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2012, 33(11): 2006-2009. (in Chinese)
- [14] 李琛,善盈盈,厉志安,等.图像粒子测速技术测量软性磨粒流流场[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 71-77.  
LI CH, SHAN Y Y, LI ZH A, *et al.*. Measurement of softness abrasive flow field based on particles image velocimetry [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(5): 71-77. (in Chinese)

## 作者简介:



赵军(1983—),男,辽宁锦州人,博士、讲师,2005年、2009年、2014年于吉林大学分别获得工学学士、工学硕士和工学博士学位,主要从事精密与超精密加工、工业机器人技术、机器视觉等方面的研究。E-mail: jzhao@zjut.edu.cn

## 导师简介:



计时鸣(1957—),男,浙江温州人,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、电子工程等方面的研究。E-mail: jishiming@zjut.edu.cn