

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.09.003

气液固三相湍流环境中气泡破裂 对 SiC 颗粒的影响研究*

黄豆豆, 计时鸣, 陈国达*, 葛江勤, 张 利

(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:为解决气液固三相磨粒流抛光加工中气泡破裂对 SiC 颗粒运动的可控性研究等问题,研究了气液固三相流中近壁面微纳米气泡破裂对周围流场和颗粒的影响,采用 Fluent 软件中多相流体体积模型与可实现 $k-\varepsilon$ 湍流模型,建立了气液固三相颗粒流气泡破裂动力学模型,得到了气泡破裂对壁面和颗粒的作用规律。利用流场中气泡破裂产生的高速射流对周围颗粒的扰动作用,提高了颗粒切削工件表面动能。研究表明:气泡初始直径越小或气泡与颗粒之间的距离越小,都使气泡破裂所产生的局部射流对周围颗粒的影响越大;可为流体精密加工、空蚀、气泡可控性研究提供参考。

关键词:气液固三相流;微纳米气泡;射流;颗粒运动

中图分类号:TH16;TG580.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)09-0965-06

Effect of bubble burst on SiC particles in gas-liquid-solid three-phase turbulent environment

HUANG Dou-dou, JI Shi-ming, CHEN Guo-da, GE Jiang-qin, ZHANG Li

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to solve the problem of controllability of bubble rupture to SiC particles in gas-liquid-solid three-phase abrasive flow polishing process, the influence of micro-nano bubble burst in near wall on the flow field and particles in the gas-liquid-solid three-phase flow was studied. The bubble and particles dynamics model of gas-liquid-solid three-phase abrasive flow was established by multiphase fluid volume (VOF) model and $k-\varepsilon$ turbulence model in the Fluent software, and the effect law of bubble on the wall and particles was obtained. The surface kinetic energy of the workpiece was improved by the disturbance of the high velocity jet caused by the bubble burst in the flow field. The results show that the smaller the initial diameter of the bubble or the smaller the distance between the bubble and the particle, the greater the effect of the local jet caused by the bubble burst on the surrounding particles. The study can provide reference for the research of fluid precision machining, cavitation erosion and bubble controllability.

Key words: gas-liquid-solid three-phase flow; micro-nano-bubble; jet; particle movement

0 引 言

作为三相流流动现象中的一种,气液固三相颗粒流在化学反应、能源输送、钢铁冶炼、精密加工及食品分离等工程领域广泛存在^[1-2]。在三相颗粒流流动过

程中,其所涉及的气泡破裂过程是一个复杂的气液固三相耦合问题。因此,研究气液固三相颗粒流中的气泡的动力学特性与演化机理,进而揭示其对颗粒运动与壁面冲击作用规律,具有重要的意义。

气泡破裂产生的射流是一种比较典型的高效射

收稿日期:2017-01-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50575494,51575493);浙江省自然科学基金重点资助项目(LZ14E050001,LQ16E050012)

作者简介:黄豆豆(1992—),女,江西吉安人,硕士研究生,主要从事超精密抛光方面的研究。E-mail: 13588258075@163.com

通信联系人:陈国达,男,博士,讲师。E-mail: gchen@zjut.edu.cn

流。BRUJAN 等^[3]通过捕捉固壁面附近半径为 68 μm 的气泡发现,其产生的微射流冲击强度可达 $(1.3 \pm 0.3) \text{ GPa}$; VIGNOLI 等^[4]通过研究发现只有当气泡溃灭速度高于甚至远远高于声波在液体中的传播速度时,高速的微射流才会出现; KAZUHITO 等^[5]通过空化辅助磨料加工设备,将玻璃表面从 9 nm 抛光到 5.3 nm。固壁面附近气泡的破裂辅助磨料抛光加工对于探讨机械加工在工业的应用有重要意义。

李疆等^[6]采用流体体积模型和非稳态方法求解纳维-斯托克斯方程,模拟了气液两相中近壁面的空泡溃灭过程,同时计算了空泡溃灭处与壁面的距离对射流强度的影响;张鸿雁等^[7]分析静水中的上升气泡诱导产生流场影响水中颗粒物的运动过程,考虑颗粒在受到重力、浮力、流体 Stokes 力作用下的运动行为^[8],建立静水中上升气泡作用下颗粒运动的力学模型,研究了颗粒的粒径、分布的展向位置、垂向位置等参数对颗粒运动的影响,虽然对气液固多相流的深入研究和应用提供了有价值的参考,但是主要是静止流场中气泡对磨粒和壁面的影响,对高速湍流环境中气泡动力学特性的研究以及气泡破裂对颗粒和壁面的作用研究较少。

本研究以气液固三相磨粒流抛光加工为物理对象,研究气液固三相颗粒流中微观气泡运动对周围流场和颗粒的影响。

1 气液固三相动力学模型

气液固三相颗粒流运动中的气泡破裂与颗粒运动是一个复杂的气液固三相耦合现象。这类运动具有高度的非线性特征,主要涉及如下方程。

1.1 气泡运动方程

本研究采用 Fluent 软件进行计算,对气液固三相流采用相场方法进行模拟,支配方程组包括考虑表面张力的 $N-S$ 方程及不可压缩流体的连续性方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \gamma \nabla^2 \mathbf{u} \\ \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u}$ —流体的速度张量, γ —流体的运动粘度, $\mathbf{v}$ —速度矢量。

气泡的界面采用 VOF 方法求解,该方法是一种适用于欧拉网格的界面跟踪技术,体积分率函数 α_q 表示流体在网格中所占空间的比例,并满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \beta_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \beta_q \mathbf{v}) = 0 \\ \sum_{q=1}^3 \alpha_q = 1 \end{cases} \quad (2)$$

1.2 颗粒运动方程

在气液固三相流场中,颗粒一般假设为圆球形,对处于气泡诱导的流场中对颗粒进行的受力分析:

$$\begin{cases} F_{\text{合}} = m \frac{dv}{dt} = G + F_{\text{浮}} + F_{\text{Stokes}} \\ G = \frac{1}{6} \pi d_m^3 \rho_m g \\ F_{\text{合}} = \frac{1}{6} \pi d_m^3 \rho_w g \\ F_{\text{Stokes}} = -6 \pi \mu U \end{cases} \quad (3)$$

式中: U —气泡与颗粒间的相对运动速度^[9-10]; G —颗粒受到重力; F_{Stokes} —流场的斯托克斯力。

1.3 湍流模型

鉴于可实现 $k-\varepsilon$ 湍流模型在处理有旋、剪切、射流流动方面的优势,本研究采用可实现 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟气液固三相颗粒流中气泡破裂产生的射流对壁面和颗粒产生的冲击作用^[11-12]。此外,可实现 $k-\varepsilon$ 湍流模型对流体涡流的位置和形状预测比较准确,对涡量的切线速度的预测也与试验值更为接近,主要涉及如下方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \int - \rho C_2 \frac{\int^2}{k + \sqrt{v}} \\ G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ C_1 = \max \left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right) \\ \eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{\frac{1}{2}} \frac{k}{\varepsilon} \\ E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中: ρ —流体密度; t —时间; k —湍动能; ε —湍动能耗散率; u_i —速度; x_i, x_j —两个左边方向的张量变化; μ —流体动力粘度; G_u —平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; E —时均应变张量模量; C_1 —系数; η —中间变量; E_{ij} —时均应变张量。

2 物理对象模型和网格划分

气液固三相磨粒流精密加工以处于高速湍流状态

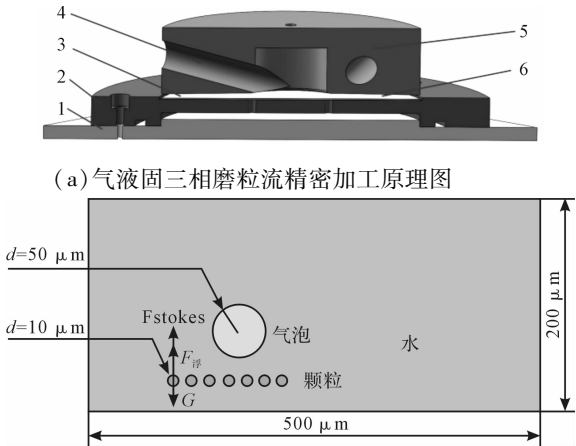
下的三相流为介质,通过气泡破裂、颗粒碰撞等复杂耦合作用,实现对目标工件表面的材料去除,其工作原理如图 1(a)所示。加工盘整体通过机械方式固定,使其底部与加工工件间存在一定的微距缝隙,在加工工具的内腔,磨粒和气泡混合液形成旋流,使加工盘底部与被加工工件的磨粒流受表面约束,形成面约束流道。

上述实例中,采用微纳米气泡泵无间断地产生微纳米气泡,该气泵可以根据实验需要调整气泡的大小和浓度。气泡泵产生的气泡通入加工盘上 3 个呈 120°布置的微纳米气泡入口,与磨粒和水形成的加工介质混合,并迅速进入磨粒流的漩涡中,在封闭区域中,强烈的离心震荡促使微纳米气泡破裂,大量气泡破裂释放的能量会激起无数小射流加速磨粒运动,增大磨粒撞击抛光表面的动能,并且气泡破裂产生的冲击波打乱磨粒运动的有序性,使磨粒向各方向运动,增加抛光工件的效率,同时可获得各向同性的抛光表面,提高表面纹理均匀化程度。

本研究建立的二维仿真模型如图 1(b)所示。整个计算域分为 3 部分:水、气泡、颗粒。这一过程中左右两侧边界分别为入口和出口,入口设置为速度入口,速度为 30 m/s,入口处只有水流入,当流体温度为 40 ℃时计算得到流体雷诺数为 13 000,能够使流体达到湍流流态;出口设置为自由出口。上下两侧为固体边界,上侧边界为刚性表面,下侧边界为工件抛光面,抛光工件为单晶硅片或光学玻璃。模拟仅针对单个气泡,气泡初始时刻设置为直径 50 μm 的圆形。气液固三相磨粒流抛光实验中固相为碳化硅微小颗粒或者氧化铝微小颗粒,本研究仿真中将固相设置为 SiC 颗粒,属于疏水性物质,与气泡存在差别。仿真计算过程中选择颗粒的直径很小,为 10 μm,较气泡初始直径相比小很多,因此将网格总体尺寸设置为比颗粒直径小一个数量级,为 1 μm。该研究属于三相流问题的研究,且目前对三相流体模拟也很重要,但在其算法上仍存在一定困难,较难以实现^[13-14]。目前可用于仿真气液固三相气泡运动对颗粒作用的软件尚在开发改进阶段,仿真这类问题还没有权威有效的方法,本研究仿真研究利用 Fluent 软件采用 VOF 模型,第三相颗粒当做拟流体对待,因此仿真过程中颗粒会有形变,属于正常现象。

本研究仿真所用二维模型整体尺寸长 500 μm,宽 200 μm 的长方形,主要由于抛光加工中抛光盘与工件之间为微距缝隙,同时考虑到模型中网格尺寸小为 1 μm,如果建立的模型过大,会对计算机的计算要求过高,因此取微距缝隙中部分进行仿真分析。另外抛光实验中气泡、颗粒与水以一定比例混合。本研究从

单个气泡入手,研究单个气泡对颗粒影响的一般规律。同时抛光液中磨粒与气泡的体积分数比值约为 7:1,因此将 SiC 颗粒设置为均匀分布的 7 个。



(a) 气液固三相磨粒流精密加工原理图

(b) 数值模拟使用的二维几何模型及颗粒受力分析

图 1 数值模拟前处理
1—下夹具;2—上夹具;3—微距缝隙;4—磨粒流入口;5—加工盘;6—工件

3 仿真结果分析

基于 Fluent 环境,本研究计算得到近壁面单个气泡在流场中的运动形变情况,以及单个气泡运动破裂产生的射流对周围颗粒的影响,同时改变参数得到气泡与颗粒的最优配比。

3.1 气泡破裂对颗粒运动的影响

单个气泡在流场中运动对颗粒的影响如图 2 所示。图中:黑色大面积区域为液态水;单个浅灰色区域为气泡,所选气泡初始直径为 50 μm,气泡初始位置设置为球形,球形内部设置为均匀气体;深灰色区域为 SiC 颗粒,颗粒直径为 10 μm,流场中设置颗粒为均匀分布的 7 个,各颗粒之间的间距为 15 μm。

气泡颗粒初始状态在流场中的位置如图 2(a)所示。气泡运动一段时间后气泡表面开始变形如图 2(b)所示。气泡呈内凹状态,气泡内凹的部分由流场中液体填充,引起流场中液体的运动带动微小颗粒的运动,均匀分布的颗粒运动一段时间后由一字型变成弧形。气泡的变形加剧如图 2(c)所示。同样磨粒的不均匀性也增加,颗粒表现出来的形状变化为 Fluent 软件设置为 VOF 模型出现的效果,可以忽略。气泡运动产生漩涡如图 2(d)所示。靠近气泡的颗粒被漩涡带动,与漩涡一起顺时针运动,气泡和颗粒随漩涡瞬时针转动一段时间后的气液固体积云图如图 2(e~f)所示。气泡运动对颗粒的影响大致分为 3 个阶段:首先,气泡由于水平方向入口流体的冲击,气泡表面开始

变形;气泡变形加剧形成内凹部分被液态水填充,同时气泡逐渐靠近颗粒,扰乱颗粒周围液态水的有序运动,

均匀分布的颗粒由一字型运动为弧形;气泡完全破裂产生漩涡,靠近气泡周围的颗粒被漩涡带动一起运动。

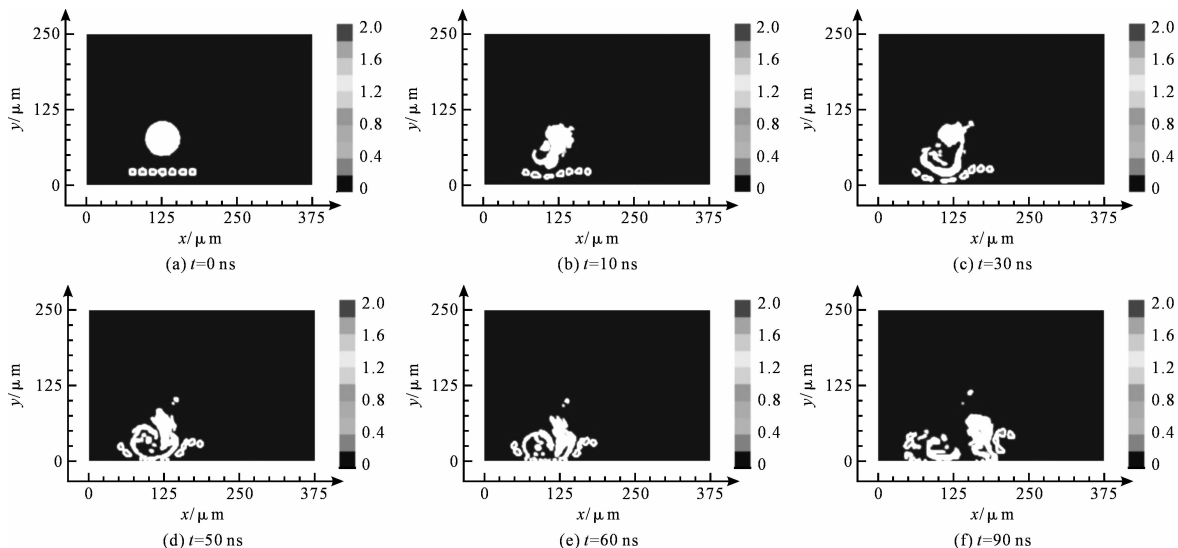


图2 不同时刻气泡颗粒运动情况体积云图

气泡破裂为两个气泡瞬间速度矢量图如图3所示。

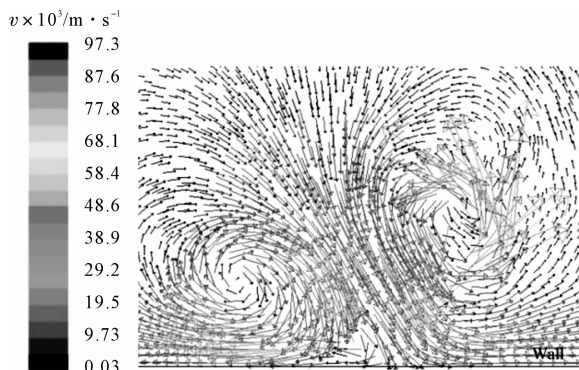


图3 气泡破裂瞬间速度矢量图

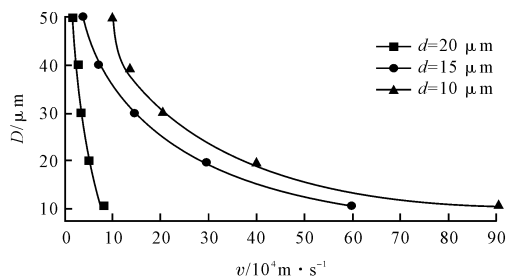
图3中箭头方向表示射流速度方向,箭头长度和颜色的深浅表示速度大小。由于入口速度设置为30 m/s,在气泡破裂瞬间最大射流速度可达 9.73×10^4 m/s,说明在气泡破裂瞬间产生局部射流和冲击力。从图3可看出,单个气泡破裂为两个气泡的过程中,同时产生两个流体流向相反的涡流,两个涡流的中间部分形成局部射流,射流指向壁面,并与壁面形成45°左右的角,由于壁面设置为固体壁面,从射流冲击壁面位置到沿流体流动方向的一段距离内壁面所受射流的冲击最大。

3.2 环境参数对气泡破裂速度的影响

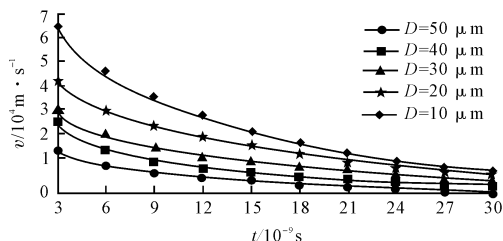
为进一步研究刚性界面附近气泡破裂对颗粒的剧烈程度,本研究对影响气泡破裂的主要参数进行分析。考虑到声空化理论及试验过程中气泡破裂更多关心的是气泡破裂速度的大小,笔者选择在气泡破裂为两个气泡瞬间作用在颗粒上的速度矢量的最大值来记录气

泡的破裂速度。

颗粒直径为10 μm,与壁面之间的距离为20 μm,在这个距离范围内流体对颗粒运动影响较小。气泡初始直径取为10 μm~50 μm之间,该范围内的气泡为微纳米气泡,且该范围为研究固壁面气泡破裂的常用数值。由于气泡初始直径与颗粒直径相差不大,气泡初始直径变化对气泡颗粒间距的影响较大,因此笔者设置气泡与颗粒间距分别为20 μm、15 μm、10 μm 3个范围。计算结果如图4(a)所示。



(a) 气泡破裂速度随气泡初始直径与气泡颗粒间距的变化



(b) 气泡的破裂速度随时间变化曲线

图4 环境参数对气泡破裂速度的影响曲线图

如图4(a)中曲线可看出,气泡初始直径较小时,气泡的破裂速度较大,气泡破裂产生的局部射流对颗粒的影响较大,随着气泡初始直径的增加,气泡破裂产

生的最大速度急剧降低,说明气泡破裂产生的局部射流对颗粒的影响随气泡初始直径的增加而降低。这主要因为气泡初始直径在 $10\text{ }\mu\text{m}\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ 范围内,气泡初始直径越大破裂产生的射流越短^[14],因此气泡破裂产生的局部射流对颗粒的作用越小。从图 4(a) 还可以看出,对于相同的气泡初始直径,气泡与颗粒的间距越大,气泡破裂产生的局部射流对颗粒的作用越大,而当气泡与颗粒之间的距离为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 时,气泡破裂产生的局部射流对颗粒的作用较小。因此如果需要通过气泡破裂改变颗粒的有序运动,应尽量选用较小气泡,并且气泡与颗粒之间的距离应小于等于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。

气泡的破裂速度随时间变化曲线如图 4(b) 所示。气泡初始直径为 $10\text{ }\mu\text{m}\sim 50\text{ }\mu\text{m}$,气泡与颗粒之间的间距为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。从图 4(b) 中可看出,当气泡初始直径较小时,气泡的破裂速度较大,同时气泡破裂产生的局部射流对颗粒的影响较大,随着时间的增加,气泡的破裂

速度几乎将为零,气泡破裂产生的局部射流对颗粒的影响急剧降低,在很短时间内,气泡破裂速度降为零。这主要是因为气泡破裂产生的瞬时速度为局部射流和冲击波,之后在很短时间内随流体的运动向四周扩散。

气泡在流场中运动时,大部分气泡会由于表面变形发生破裂,也有一部分气泡表面发生轻微变形,但整体不破裂的情况。针对部分气泡不破裂的情况,笔者探究气泡在不破裂情况下对周围磨粒运动的影响。

3.3 气泡未破裂对周围颗粒的影响

单个气泡在流场中运动但未破裂的情况如图 5 所示。同样图 5 中黑色大面积区域为液态水,单个浅灰色区域为气泡,所选气泡初始直径为 $30\text{ }\mu\text{m}$,气泡初始位置设置为球形,球形内部设置为均匀气体,深灰色区域为 SiC 颗粒,颗粒直径为 $10\text{ }\mu\text{m}$,流场中设置颗粒为均匀分布的 7 个,各颗粒之间的间距为 $15\text{ }\mu\text{m}$ 。图 5 显示入口速度为 30 m/s 时气泡颗粒在流场中的运动情况。

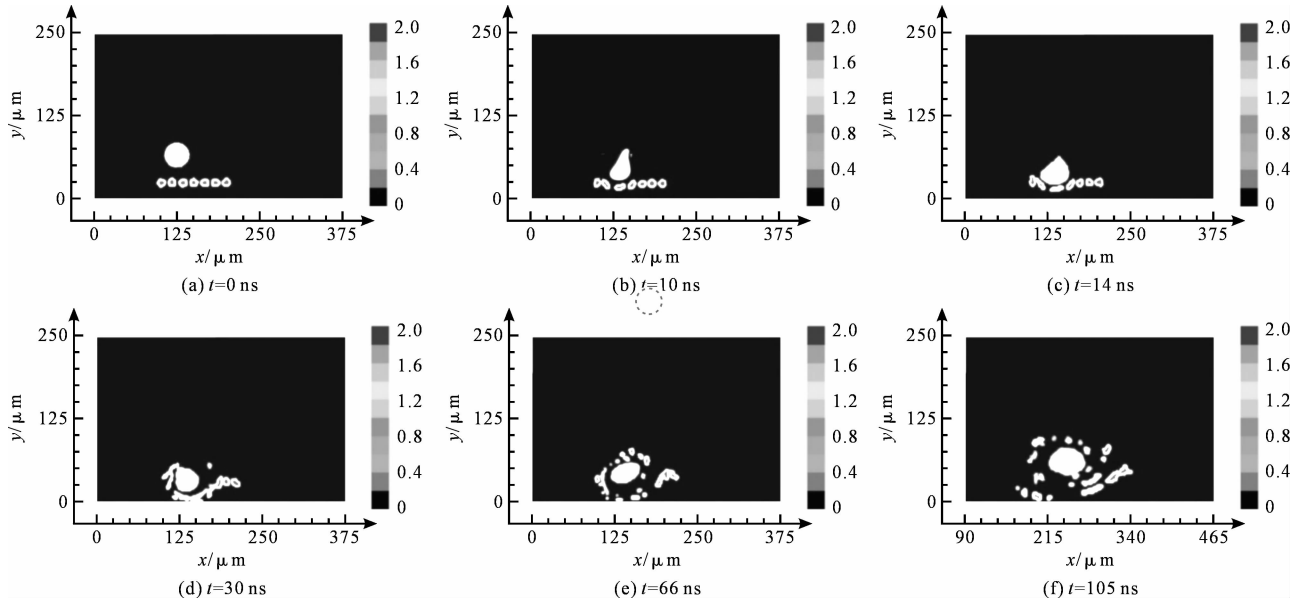


图5 气泡不破裂情况下不同时刻气泡颗粒的运动过程体积云图

气泡不破裂情况下不同时刻气泡颗粒的运动过程情况结果如图 5 所示。当悬浮在流场中的小半径颗粒受到上方的另一流场的气泡的扰动作用时,靠近气泡边界处的颗粒由于气泡向出口处的运动开始内凹,均匀分布的气泡开始变得不均匀。之后随着气泡向出口处的运动为滚动,带动周围颗粒形成局部小漩涡,将周围颗粒代入小漩涡与气泡一同向出口运动。在这种反复的滚动过程中,气泡形成的小漩涡由于能量的不断耗散,以及带动的颗粒数目增加,漩涡的面积增大,同时气泡带动卷入漩涡的颗粒与气泡之间的距离也增大,如此反复滚动,直至这部分颗粒脱离漩涡。

图 5(e) 的瞬时速度矢量图如图 6 所示。

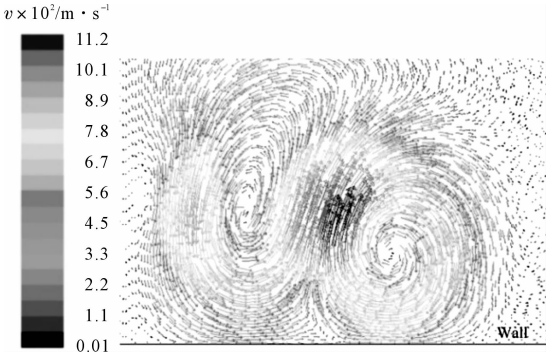


图6 气泡运动瞬时速度矢量图

从图 6 可看出,气泡运动过程中形成两个流向相反的漩涡,与图 3 气泡破裂形成的漩涡不同的是,图 3

两漩涡中间的瞬时速度方向指向壁面,而图 6 气泡未破裂形成的两漩涡中间瞬时速度的方向远离壁面,即图 3 中气泡破裂产生的局部射流对壁面有冲击作用,而图 6 中气泡破裂的两个漩涡中间部分的瞬时速度对壁面没有冲击作用。

同时从图 6 中可看出,气泡未破裂产生的瞬时速度的数值与图 3 中速度的大小相比,明显较小。综上,气泡未破裂在流场的运动过程中同样产生两个流向相反的漩涡,同时产生较大的瞬时速度,但是气泡破裂产生的瞬时速度指向壁面与壁面呈 45° 角,而气泡未破裂运动过程中产生的瞬时速度,方向远离壁面,大小与气泡破裂产生的瞬时速度相比小 2 个数量级。

综合以上仿真结果,由于仿真过程中发现气泡初始直径小于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 在高速湍流流场中不易破裂,因此选用气泡初始直径为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的微纳米气泡对于达到流场中 SiC 颗粒运动的紊乱性效果更好,并且气泡初始直径为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的气泡破裂产生的破裂速度大,速度持续的时间长,同时气泡破裂速度不至于太大而损伤工件表面。微纳米气泡的直径范围为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 到数十纳米之间,本研究通过模拟气泡破裂对颗粒实现可控性研究,得到采用 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的气泡在抛光过程中对 SiC 颗粒的扰动作用最明显,颗粒运动的无序性增加抛光效率,还可获得各向同性的抛光表面,提高表面纹理均匀化程度。

4 结束语

本研究对湍流环境下微距缝隙中单个微纳米气泡运动过程中对周围颗粒运动的影响,建立气液固三相气泡颗粒动力学模型进行仿真。仿真结果表明:单个气泡在流场中运动破裂与不破裂都会对周围颗粒运动产生扰动作用,只是气泡在不破裂情况下,其瞬时速度对周围颗粒的影响比破裂情况下小 2 个数量级;同时气泡运动过程中破裂的情况下,气泡初始直径越小或气泡与颗粒之间的距离越小,都使气泡破裂所产生的局部射流对周围颗粒的影响越大。

今后研究将通过微观观测实验和加工实验来进一步验证仿真结果。由于仿真过程只研究单个气泡的运动过程,与实际流体环境相差较大,因此在今后的研究中,可能需要进一步研究多个气泡与多个颗粒之间运动过程,以实现颗粒运动可控性的研究。

参考文献 (References):

- [1] QIAN W W, LI W F, SHI Z H. Characteristics of surface waves on the granular sheet of dense granular jet impingement[J]. **Chinese Journal of Physics**, 2016, 65 (21): 214501.
- [2] TAN D P, YANG T, ZHAO J. Free sink vortex ekman suction-extraction evolution mechanism[J]. **Chinese Journal of Physics**, 2016, 65 (5): 054701.
- [3] BRUJAN E A, MATSUMOTO Y. Collapse of micrometer-sized cavitation bubbles near a rigid boundary[J]. **Microfluid Nanofluid**, 2012, 13 (6): 957-966.
- [4] VIGNOLI L L, BARROS A L, THOME R C. Modeling the dynamics of single-bubble sonoluminescence[J]. **European Journal of Physics**, 2013, 34 (3): 679-688.
- [5] KAZUHITO O, SHINYA T, TOSHIKATSU N. Study on cavitation aided abrasive machining on glass[J]. **Key Engineering Materials**, 2009 (407-408): 654-657.
- [6] 李 疆,陈皓生. Fluent 环境中近壁面微空泡溃灭的仿真计算[J]. **摩擦学学报**, 2008, 28 (4): 311-315.
- [7] 张鸿雁,徐 琳,崔海航. 静水中上升气泡对颗粒运动影响的数值模拟研究[J]. **西安建筑科技大学学报**, 2013, 45 (4): 582-596.
- [8] 郑建祥,许 帅,王京阳. 基于 CFO-PBM 积分矩量法旋风分离器中颗粒聚团的数值模拟[J]. **流体机械**, 2016, 44 (11): 30-35, 14.
- [9] 李 琛,计时鸣,谭大鹏. 软性磨粒流加工特性及近壁区域微切削机理[J]. **机械工程学报**, 2014, 50 (9): 161-168.
- [10] 张阿漫,倪宝玉,宋炳月,等. 狭窄流域内气泡破裂现象数值模拟[J]. **应用数学与力学**, 2010, 31 (4): 420-432.
- [11] 张马骏,陈 鑫. 单个蒸汽气泡溃灭过程的边壁效应数值研究[J]. **上海交通大学学报**, 2014, 48 (12): 1766-1776.
- [12] 罗 经,李 健,董光能. 壁面处气泡在静止流场和高速水流中溃灭过程的计算仿真[J]. **摩擦学学报**, 2016, 27 (6): 562-566.
- [13] 丁跃文,张亚新,徐小姿. 液体中气泡生成影响因素的试验研究[J]. **液体机械**, 2016, 44 (7): 9-13.
- [14] 郭 晟,李浙昆. 气泡发生器内三相流动数值模拟[J]. **机电工程技术**, 2007, 36 (3): 49-51.
- [15] GUO C, ZHU X J, WANG J Q. Velocity analysis for collapsing cavitation bubble near a rigid wall under an ultrasound field[J]. **Chinese Journal of Physics**, 2016, 65 (4): 044304.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

黄豆豆,计时鸣,陈国达,等. 气液固三相湍流环境中气泡破裂对 SiC 颗粒的影响研究[J]. **机电工程**, 2017, 34 (9): 965-970.

HUANG Dou-dou, JI Shi-ming, CHEN Guo-da, et al. Effect of bubble burst on SiC particles in gas-liquid-solid three-phase turbulent environment[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017, 34 (9): 965-970.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>