

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.08.005

耦合超声场的气液固三相磨粒流多 物理场数值模拟研究*

韩帅非, 计时鸣, 陈国达*, 潘 焯

(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:针对气液固三相磨粒流抛光研究中流场分布不均问题,对气液固三相磨粒流中的湍流分布、湍流峰值分布、能量分布、温度分布和加工质量等方面进行了研究,对气液固三相磨粒流的抛光方法和抛光问题进行了归纳,提出了一种耦合超声场的气液固三相磨粒多物理场数值模拟方法,利用超声场的交变声压增加了气液固三相磨粒流流场的扰动,改变了流场分布。研究表明:不同的超声频率和声压幅值会带来不同的流场分布,其中频率为20 kHz、声压幅值为30 kPa的超声场所得的流场分布最优。该研究成果对气液固三相磨粒流抛光方法的推广与实际运用具有重要意义。

关键词:多场耦合;超声场;湍流分布;数值模拟

中图分类号:TH161+.14;TG580.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)08-0841-06

Multiphysical field numerical simulation of gas-liquid-solid three phase abrasive particles under coupled ultrasonic field

HAN Shuai-fei, JI Shi-ming, CHEN Guo-da, PAN Ye

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

Abstract: Aiming at the problem of uneven distribution of flow field of gas-liquid-solid three phase abrasive flow polishing, the distribution of turbulent flow, turbulent peak, energy, temperature and processing quality in gas liquid solid three-phase abrasive particle flow were researched, the polishing method and polishing problem of gas liquid solid three-phase abrasive flow were summarized, and a multiphysical field numerical simulation method was proposed for gas-liquid-solid three phase abrasive particles under coupled ultrasonic field. By using the alternating pressure of ultrasonic field, the flow field of gas-liquid-solid three phase abrasive particles was increased to chance the flow field distribution. The results indicate that different ultrasonic frequency and sound pressure intensity have different results. Among the different ultrasonic frequency and sound pressure intensity, the ultrasonic frequency of 20kHz and the sound pressure amplitude of 30kPa can obtain the optimal flow distribution. This study is of great significance to the promotion and practical application of gas-liquid-solid three phase abrasive particles flow polishing method.

Key words: multi field coupling; ultrasonic field; turbulent distribution; numerical simulation

0 引 言

随着科学技术的发展,在现代光学、电子信息及薄膜科学等高新科技领域,对精密光学零件和功能晶体等

电子信息材料零件的需求越来越多和质量要求越来越高,这些零件需要对其表面进行超光滑表面加工^[1]。

为了实现这些零件的超光滑表面抛光加工,国内外学者已经研制开发出多种流体抛光加工方法^[2-3]。

收稿日期:2017-01-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575494);浙江省自然科学基金重点资助项目(LZ14E050001, LQ16E050012)

作者简介:韩帅非(1989-),男,河南平顶山人,硕士研究生,主要从事超精密加工方面的研究。E-mail:15968843625@163.com

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

传统的流体抛光如磁流变抛光、磨料水射流加工等,但这些方法有一定的缺点:加工效率不高,加工过程中磨屑不易排出,易造成加工零件表面出现加工变质层和亚表面损伤^[4]。为了克服传统流体抛光方法的缺点,计时鸣等人提出了气液固三相磨粒流抛光方法。气液固三相磨粒流是基于空化冲击磨粒的面约束流场高效无损伤抛光新方法,是一种利用处于湍流状态的气液固三相磨粒流对平面工件表面进行精密抛光加工的新方法,所提出的新方法在提高抛光加工效率的同时也保证加工质量,是在脆硬材料表面进行超精密加工的一种全新探索研究^[5-6]。

气液固三相磨粒流是将松散磨粒、微气泡和液体介质以一定的体积比均匀混合形成气液固三相磨粒流,并利用多方向注入方法向抛光加工工具内注入处于湍流状态的气-液-固三相磨粒流。湍流分布情况直接影响抛光质量、流场的速度、流场压强和流场动压力等参数,这些参数对抛光过程具有重要作用。

不规则性是湍流最基本的特点,即在流场的定点处,质点进行高频脉动(流速和压力)。湍流现象的发生不仅与流动的内在因素有关,同时也与外界因素有关。如果在湍流中耦合超声压力场,超声场的高幅和高频的压力场会改变湍流中的压力场,从而对湍流实现了外力扰动,会改变湍流的分布。同时耦合超声压力场,由于压力变化,产生更多的空化现象,湍流内部会产生高温高压的射流,从而改变湍流内部介质的运动形态。ITO Yasumasa 等^[7]通过实验研究了超声对湍流产生的非反应性液体混合层下游湍流混合和化学反应的影响,通过实验对比分析,结果表明,高频超声促进了湍流混合和化学反应,超声可以作为一个更好的工具,促进湍流混合。Kim H Y 等^[8]通过实验进行了超声空化对强化换热效果影响的研究,研究发现在饱和沸腾传热体系中,超声声压被证明是一个主要的传热强化机制。从上面的研究中可以看到耦合超声场的重要性,超声场交变的压力场对湍流的运动形态具有重要影响,增加了空化的可能性,同时也改变了局部的温度,可以增强湍流的扰动和扩大湍流高强度的范围,使湍流的分布更均匀。故耦合超声场,对改善气液固三相磨粒流的流场分布和加工质量具有重要的意义。

通过引入超声场来改变湍流强度分布是目前科学研究领域比较常用的方法^[9]。利用超声场声压的压力变化改变流体内部的压力场,带来了扰动流场,同时使湍流内部空化现象增多,从而改变湍流强度分布。超声场压力场的引入,虽然会带来湍流强度分布的改变,但在超声空化控制的方法不合理的情况下,反而会

给气液固三相磨粒流抛光加工带来负面的效果^[10]。因此需要对不同幅值和频率的超声场进行研究,通过对比分析得出最优的参数。

本研究对气液固三相磨粒流的抛光方法和抛光问题进行归纳,提出一种耦合超声场的气液固三相磨粒多物理场数值模拟方法。

1 耦合超声场作用机理

超声场是一种频率高于 2 kHz 的声场,它具有穿透能力强,方向性好,易于获得较集中的声能,在液体中传播距离远,不易损失等特点。当超声场能量比较高时,就会产生“超声空化”现象^[11]。超声空化是指液体介质中一些微小气泡核(空化核)的产生、生长及溃灭的一系列动力学过程。当超声场经过液体介质时,超声场的极高频率将会压迫液体质点振动,在抛光介质中形成有规律的压缩和稀疏区域,由于抛光介质为不可压缩流体,由正、负压力交替地变化而产生空化现象。空化气泡的寿命约 0.1 μs,它在急剧崩溃时可释放出巨大的能量,并产生速度约为 110 m/s、有强大冲击力的微射流,使碰撞密度高达 1.5 kg/cm²。空化气泡在急剧崩溃的瞬间产生局部高温高压(5 000 K, 1 800 atm),冷却速度可达 109 K/s。超声场这种空化作用大大提高非均相反应速率,实现非均相反应物间的均匀混合,加速反应物和产物的扩散,促进固体新相的形成,控制颗粒的尺寸和分布。

超声场在气液固三相磨粒流中的微观作用示意图如图 1 所示。

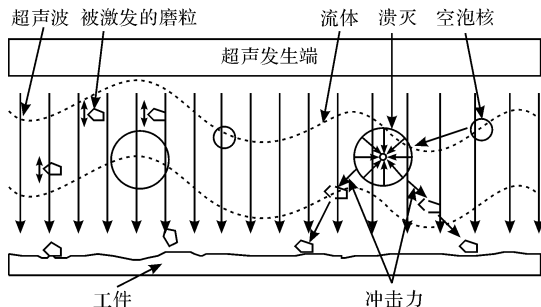


图 1 超声场在气液固三相磨粒流中的微观作用示意图

由图 1 可知,超声场的引入,对气液固三相磨粒流中的磨粒和气泡具有较大的影响。超声场对磨粒有激发作用,对磨粒有一定的作用力,被激发的磨粒对工件表面有一定的研磨作用。由超声振动引起的压力变化,在气液固三相磨粒流中激发空泡核的空化发生,空化气泡溃灭的瞬间对周围有一定的冲击力,冲击力作用在磨粒上面,会加速和改变磨粒的运动状态,增强磨粒对工件的撞击和研磨能力。但是同时空化也会带来一定的空

蚀现象,所以需要超声空化进行控制,找到较优的超声场参数,尽量减少空蚀对气液固三相抛光的影响。

2 耦合超声场的控制方程

超声强化主要是利用超声场的扰动作用于流场,液体各处的声压会发生周期性的变化,相应地,流场中的气泡、空泡核和磨粒也会受到超声场声压的扰动,运动形态都会发生相应的变化。超声场的引入对流场的主要影响是增加了激发超声空化的几率。超声空化会带来局部的高温高压现象,会对周围局部的流场产生较强的影响,同时使流场的分布产生局部改变。三相流的主要研究对象是磨粒流的流动、气泡溃灭、传热等,其中十分重要的是各个物理场之间的动量和能量的相互作用规律。耦合超声场会对气液固三相磨粒流各个相的能量产生影响和改变,从而改变气液固三相磨粒流流场的形态,同时超声场带来的高温、高压会对流体的动力粘度、压力场产生较大的影响,从而改变湍流的状态。

2.1 气液固三相磨粒流多场耦合基本模型

在多物理场耦合软件中,先采用标准可实现性的限制 $k-\varepsilon$ 方程模型作为气液固三相磨粒流的湍流模型,然后与多场耦合软件里面的湍流气泡流和流体粒子追踪模型进行耦合,模拟气液固三相磨粒的流场,同时耦合流体传热模块来计算在抛光过程中产生的热量与周围环境热交换,从而建立了气液固三相磨粒流多场耦合基本模型。气液固三相磨粒流多场耦合所涉及基本方程如下:

(1) 液相连续性方程和动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Phi_l \rho_l) - \Delta(\Phi_l \rho_l v_l) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Phi_l \rho_l \frac{\partial v_l}{\partial t} + \Phi_l \rho_l v_l \cdot \nabla v_l = & -\nabla P + \\ \nabla \cdot \left[\Phi_l (\nabla \mu_l + \nabla \mu_l^T - \frac{2}{3}(\nabla \cdot v_l)I) (\nabla v_l + (\nabla v_l)^T) \right] + & \\ \Phi_l \rho_l g + K_{lp}(v_p - v_l) + K_{gl}(v_g - v_l) & \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 固相连续和动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Phi_p \rho_p) + \Delta(\Phi_p \rho_p v_p) = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\Phi_p \rho_p v_p) - \Delta(\Phi_p \rho_p) = & \Phi_p \nabla P - \nabla P_p + \Delta \tau_p + \\ \Phi_p \rho_p g + K_{lp}(v_l - v_p) + K_{gp}(v_g - v_p) & \end{aligned} \quad (4)$$

(3) 气相传输运动方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_g \Phi_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \Phi_g v_g) = -m_{gl} \\ v_g = v_l + v_{slip} + v_{drift} \\ v_{drift} = -\frac{\mu_T}{\rho_l} \frac{\nabla \Phi_g}{\Phi_g v} \end{cases} \quad (5)$$

式(1~5)中: v —液相, g —气相, ρ —固相; Φ —三相流中各个相的体积分; μ_l —流体的动态粘度, μ_T —湍流粘度; ρ —各个相的密度; Δ —拉普拉斯算子; t —时间; v —局部速度矢量; p —流体动压; ∇p —压力梯度; g —重力加速度; K —各个相之间的曳力系数; τ —剪切应力张量; v_{slip} —各个相之间的相对速度矢量; v_{drift} —湍流粘性漂移速度矢量; m_{gl} —从气相到液相的传质速率; 粒子速度响应时间; T —流体的温度; I —单位矩阵。

以上是气液固三相磨粒流的基本模型,包含了位移场、温度场、流场和压力场,各个物理场通过共用相应的参数进行实时耦合,各个物理场互相耦合共同构成了气液固三相磨粒流的复杂的多物理场模型。这是气液固三相磨粒流在不借助外界条件下的多物理场模型,实际情况下,流场本身分布并不是很合理,需要借助外界条件来改变内部流场的分布。

2.2 超声场的动力学模型

气液固三相磨粒流耦合超声场,对流场的作用主要是通过激发空化效应,从而影响流场的形态。通过多物理场耦合软件中现有的压力声学模块作为超声场与上述的基本模型进行耦合。一般情况下,在超声场的作用下的空化核不一定会发生溃灭,只有当谐振频率超过超声场频率时,才可能使空化气泡产生溃灭。如果在超声场强度一定的情况下,空化气泡中的气体及其水蒸气均满足理想气体的运动规律;如果液体属于不可压缩流体并且在主体温度恒定不变的情况下,那么空化泡中的蒸汽压就等于该主体温度下相对应下的蒸汽压力,此时空化泡气壁的运动近似可看作是球形对称运动。

在充分考虑液体表面张力及其液体动力粘度对空化泡运动的影响情况下,可推导出空化气泡的运动方程,具体方程如下:

$$\begin{cases} R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = 0 \\ \frac{1}{\rho_l} \left\{ \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} - P_v \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3k} + P_v - \right. \\ \left. P_0 + A \sin(2\pi ft) - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} \right\} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: ρ_l —流体的密度, t —空化气泡运动的时间, f —超声场的频率, k —气体的绝热系数, σ —流体表面的张力, μ —流体的动力粘度系数, R_0 —空泡核的直径, R —空化气泡的瞬时半径, A —超声场声压幅值, P_0 —空化气泡壁内的初始压力, P_v —空化气泡内部的瞬时压力。

当 P_v 大于 P_0 时,空泡核不再稳定,而是开始逐步

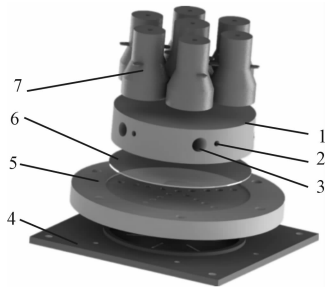
增大,直至破裂,形成了空化。

综上所述,利用多物理耦合软件中现有的湍流气泡流模块、流体粒子追踪模块、流体传热模块和压力声学模块共同相互耦合建立耦合超声场的气液固三相磨粒多物理场,从而对气液固三相磨粒流中动力学模型进行数值模拟分析,寻找相应的规律。

3 数值模拟前处理

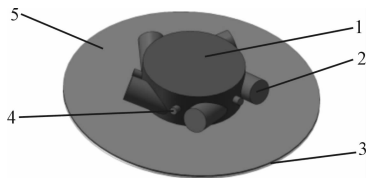
3.1 数值模型

气液固三相磨粒流超声强化的抛光工具装置的结构方案如图 2(a)所示,由 5 入口抛光工具、单晶硅片、上下夹具和 6 个超声激励器组成。



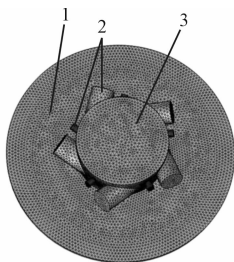
(a) 气液固三相磨粒流抛光工具装置

1—抛光工具;2—气泡入口;3—流体入口;4—下夹具;5—单晶硅片;6—上夹具;7—超声场激励器



(b) 抛光工具装置数值模拟简化模型

1—高速旋流;2—流体入口;3—单晶硅片;4—微气泡入口;5—微距湍流旋流



(c) 气液固流体模型和抛光工件的网格划分

1—微距细化区域;2—入口细化区域;3—旋流区域细化区域

图 2 数值模拟前处理

气液固三相磨粒流通过与平面成 72° 夹角均布的 5 个流体入口和气泡入口,进入抛光工具,基于圆管内旋流分离器原理,气液固三相进行混合,形成高速气液固湍流旋流。高速湍流旋流进入被加工工件与抛光流道

盘之间的微缝隙(间距小于 1 mm),受约束表面的约束,形成面约束流场,对单晶硅片进行抛光。6 个超声激励器同时工作,通过抛光工具引入超声振动,对形成面约束流场和其他部分的流体进行超声强化,改变流场的形态,从而改变湍流强度的分布,提高加工效率和质量。

在气液固三相磨粒流多场耦合超声压力场强化数值模拟中,首先需要对抛光装置进行模型简化,省去不重要的部分,以适应计算机的性能和提高数值模拟效率。提取抛光工具内的流体、微距缝隙中的流体和单晶硅片作为仿真对象进行数值模拟。气液固三相磨粒流抛光工具装置数值模拟简化模型如图 2(b)所示。图 2(b)中 1 和 5 处的表面作为超声场的作用表面,实际加工过程中,也是这两个表面最先接收到超声场。

3.2 网格划分

网格划分作为对几何模型在空间上的离散,其质量直接影响到数值模拟的精度和计算规模。由于磨粒流入口及磨粒流聚集区为气液固三相磨粒流汇聚形成高速湍流涡旋流场的关键区域,该区域流体运动过程中应力最为集中,在计算机模拟中应当进行精细网格划分,以保证数值模拟的精度。微距细化区域是超声场作用区域较强的区域,要得到准确的耦合结果,需要对该区域进行细化。气液固流体模型和抛光工件的网格划分如图 2(c)所示。从图中可以看到,磨粒和微气泡入口处的网格划分比较精细、均匀,没有畸变处。通过网格划分密度的变化,对比计算结果,仿真结果几乎无变化,从而验证了仿真结果的网格无关性。

3.3 初始条件

气液固三相磨粒流数值模拟的初始条件为:液相选用纯水,密度为 $1\ 000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,体积分数为 85%;固相选用碳化硅微小颗粒,颗粒平均直径为 $10\ \mu\text{m}$,密度为 $3\ 170\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,体积分数为 10%;气相选用空气,气泡平均直径为 $20\ \mu\text{m}$,体积分数为 5%;磨粒流入口的速度入口,出口为自由出口;入口的个数为 5 个,呈 72° 分布,入口的入射角度为 14° ;出口 1 个;仿真外部环境温度为 293.15 K ,磨粒流的初始温度为 318.15 K 。超声场的初始参数为频率 20 kHz ,幅值 30 kPa 的正弦场。

4 数值模拟结果

超声场的引入会激发磨粒和气泡,在一定程度上改变他们的运动形态,同时也带来流体压力分布的改变。但对于气液固三相磨粒流的流场形态,耦合超声场能否对其进行改变,需要经过数值模拟的对比分析。

对于超声场而言,影响其大小和质量的参数是频率和幅值。对于气液固三相磨粒流,哪一个频率和幅值能较好地改变气液固三相磨粒流的流场形态,需要经过对比,才能决定频率和幅值的参数。

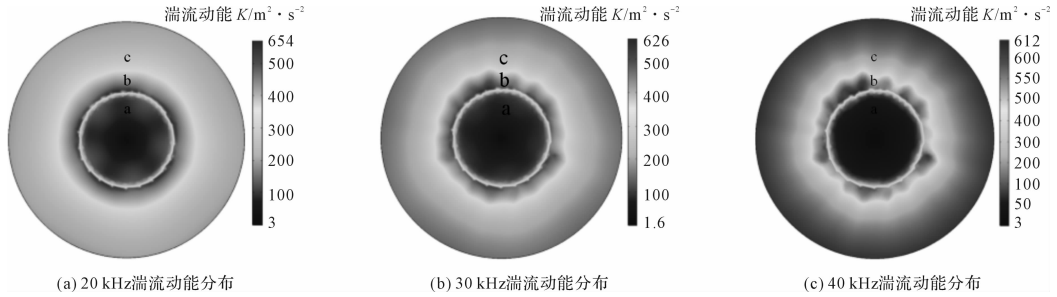


图3 超声场频率对气液固三相磨粒流湍流强度分布的影响

从对比图可以看出,随着超声场频率的增加,气液固三相磨粒流的湍流强度整体分布情况越来越差:a区域的湍流强度值越来越低;b区域的凹凸峰越来越多,峰值区域也较多;c区域高值区域越来越窄,凹凸峰的区域也越来越多。随着超声场频率的增加,对湍流强度分布改善的作用越来越小,对气液固三相磨粒流的影响越来越差。

超声频率越大对气液固三相磨粒流湍流强度分布的影响越差,造成这种现象的原因是随着超声场频率的增加,超声场完成一个完整场形的时间就越短,单位时间内发生完整场的个数就越多,这就会造成超声场在低压相区所经历的时间偏少,导致空泡核的拉伸时间不足,从而造成产生有效的空化气泡数量减少;在高压相区,同样停留的时间也会变短,结果会造成空化气泡内压力大小不能够达到空化气泡溃灭的压力极限,最终导致了气泡空化的现象减少。根据有关文献可知,超声场的频率较大时,在幅值相同的情况下,空化气泡的振动幅值会越小,空化气泡的运动不够强烈。要使空化气泡达到共振的效果,空化气泡的自振频率必须与超声场的接近或等值。达到或接近共振时,空泡核

4.1 超声场频率对气液固三相磨粒流湍流强度分布的影响

幅值为 30 kPa 时,不同频率的超声场对气液固三相磨粒流湍流强度分布的影响如图 3 所示。

才能在超声场作用下比较容易发生空化现象。根据现有的数值模拟和实验结果可知,当超声场的振动频率达到 20 kHz 时,这个频率是比较接近空泡核共振频率,能使空泡核在这个频率的超声场作用下发生空化效应。根据超声场在液体中传播的相关特点可知,超声场的能量衰减速率与其自身的振动频率成负相关性,所以随着超声场频率增加,在介质中传播,其自身的能量衰减越快,传递到空化气泡的能量就越来越少,就会导致空化效应减弱。随着频率达到一定值之后,空化效应不再发生,这就是造成不同频率数值模拟结果不一样的原因。

当超声场频率是 20 kHz 时,气液固三相磨粒流空化效应比较强烈,空泡核不断被激发和溃灭,空化气泡在溃灭的瞬间给周围的流体带来了高温、高压的物理效应,使周围的流场受到了冲击场和微射流的作用,使得流场局部发生了改变。原来的流场分布形态发生了改变,从而改变了湍流强度的分布。

4.2 超声场声压幅值对气液固三相磨粒流湍流强度分布的影响

在超声场频率为 20 kHz 时,不同声压幅值条件下的气液固三相磨粒流湍流分布的数值模拟结果如图 4 所示。

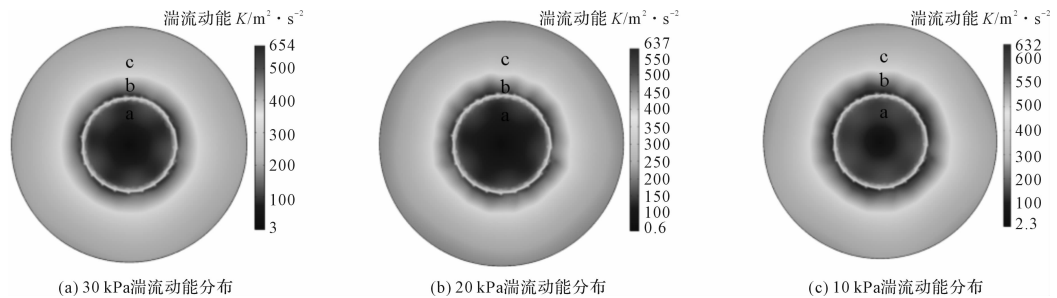


图4 超声场声压幅值对气液固三相磨粒流湍流强度分布的影响

从图 4 可以看出,随着超声场声压幅值的递减,气液固三相磨粒流的湍流强度分布越来越不均匀,出现峰值区域越来越多,湍流值凹凸分布越来越多。从数值模拟

结果来看,a区域也随着幅值变小,也逐渐减小;b区域随着幅值的变小,圆环区域的湍流强度较高凹凸峰区域增多,极值高亮区也增加,湍流强度分布逐渐不均匀;c区域

湍流高值区域也逐渐变窄,湍流强度值有所降低。

随着超声场声压幅值的减小,气液固三相磨粒流的湍流强度分布情况逐渐变差,造成这种现象的原因是,在超声场频率一定的情况下,当超声场声压幅值不断增大,在相同的超声场振动周期内,幅值越大,空泡核在低压相区,超声场对空泡核的拉伸作用越强;空化气泡在高压区也是同样的情况,因为经历的时间较长,超声场对空化气泡的作用也较强;从而造成了空化气泡在低压区和高压区的气泡半径幅度变化较大,空化气泡的运动形态变化较快,有利于空化效应的发生。空化的同时气泡释放大量的能量,使局部流场运动形态发生改变,扰动增强,从而改变气液固三相磨粒流的湍流强度分布。

4.3 超声场对气液固三相磨粒流温度场的影响

超声空化的瞬间会带来高温高压的物理现象,对周围的流体会产生一定的影响,不仅会对流场的湍流强度产生影响,也会对温度场产生影响。超声场的频率是 20 kHz,声压幅值是 30 kPa 的情况下的数值模拟结果对比如图 5 所示。

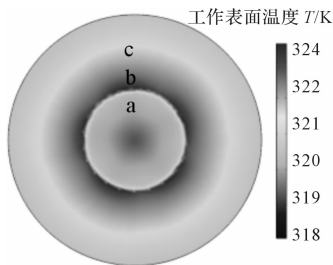


图 5 超声场对气液固三相磨粒流温度场的影响

从数值模拟结果可以看出,耦合超声场的温度分布数值模拟结果更加均匀,没有明显的温度过高的区域,温度极值也比未耦合之前的高。耦合超声场之后,温度分布变得更加均匀的原因是超声场的引入带来较多的超声空化,对流场的扰动作用增强,改变了原有的分布形态。

综上所述,超声场的引入,使气液固三相磨粒流的温度分布更加均匀,对提高气液固磨粒的加工质量具有重要的作用,温度分布不均,会造成加工工件应力不均,最终导致表面形状分布不均,加工质量不好。

5 结束语

本研究利用多物理场耦合软件,对气液固三相磨粒流抛光过程进行了耦合超声场的数值模拟,分析不

同频率和声压幅值的超声场对气液固三相磨粒流场分布的影响数值模拟结果。通过数值模拟的对比分析,得出适合气液固三相磨粒流抛光方法的超声场物理参数。

(1) 研究发现,气液固三相磨粒流通过借助于外界条件(超声场),流场分布发生较大改变。超声场对气液固三相磨粒流的流场分布具有重要影响;

(2) 通过对比超声场不同频率和声压幅值所得数值模拟结果,研究发现不同的频率和声压幅值会带来不同的结果。同时对比结果指出超声场参数为频率 20 kHz,声压幅值 30 kPa 的条件下的所得的数值模拟结果最优,气液固三相磨粒流的流场分布最好;

(3) 通过超声场对气液固三相磨粒流温度场的影响,进一步验证了气液固三相磨粒流耦合超声场的重要性。

参考文献 (References):

- [1] BEUCAMP 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] 彭小强,戴一帆,李圣怡. 磁流变抛光的材料去除数学模型[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(4): 67-70.
- [3] 杨刚. 磨料水射流除锈技术仿真研究[J]. *机电工程*, 2013, 30(8): 929-932.
- [4] 刘家豪,傅建中,陈子辰. 超精密加工的关键技术及发展趋势[J]. *机电工程*, 2001, 18(5): 19-21.
- [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.
- [6] 雷敬文,秦娜,胡智特,等. 基于刀具—工件接触率的固结磨粒旋超声加工的工具受力分析[J]. *机械*, 2015, 44(5): 1-5, 15.
- [7] ITO Y, NAGATA K, KOMORI S. The effects of ultrasound on turbulent mixing and chemical reaction[J]. *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu B Hen/transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Part B*, 2002, 68(665): 79-85.
- [8] KIM H Y, YI G K, KANG B H. Enhancement of natural convection and pool boiling heat transfer via ultrasonic vibration[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2004, 47(12-13): 2831-2840.
- [9] 吕婷. 基于 CFD 的超声空化对抛光介质运动影响的研究[D]. 苏州: 苏州大学机电工程学院, 2015.
- [10] 夏荣涛. 超声空化对强化换热效果影响的研究[D]. 吉林: 东北电力大学能源与动力工程学院, 2016.
- [11] 陈辉,强颖怀,葛长路. 超声场空化及其应用[J]. *新技术新工艺*, 2005(7): 63-65.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

韩帅非,计时鸣,陈国达,等. 耦合超声场的气液固三相磨粒流多物理场数值模拟研究[J]. *机电工程*, 2017, 34(8): 841-846.

HAN Shuai-fei, JI Shi-ming, CHEN Guo-da, et al. Multiphysical field numerical simulation of gas-liquid-solid three phase abrasive particles under coupled ultrasonic field[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(8): 841-846.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>