

文章编号 1004-924X(2016)04-0855-10

## 气-液-固三相磨粒流光整加工及其工艺参数优化

计时鸣, 黄希欢, 谭大鹏\*, 谭云峰

(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 310032)

**摘要:** 考虑用流体抛光法加工大尺度工件存在效率低下问题, 本文提出了一种气-液-固三相磨粒流抛光方法。该方法在约束流场中引入微纳米气泡, 利用气泡在溃灭时释放的能量加速驱动磨粒运动, 从而有效提升抛光效率。实验显示: 在加工过程中, 离心泵的发热会导致流体黏度下降, 进而影响工件近壁面的湍动能和动压力的大小及分布, 而加工工件近壁面的湍动能和动压力会对表面纹理的均匀性和材料的去除效率有重要影响。针对上述实验结果, 文中基于对磨粒流抛光机理的研究, 提出一种通过改变入口流速来补偿温升带来的湍动能和动压力变化的方法, 实验求得了抛光流体温度从 20 °C 到 60 °C 之间的 9 个均等点对应的最优入口流速值。实验表明, 相对未加入气泡时, 该抛光方法的加工效率得到提高, 而调速补偿明显提升了工件表面加工质量。

**关键词:** 流体抛光; 气-液-固三相磨粒流抛光; 微纳米气泡; 湍动能; 动压力; 参数优化

**中图分类号:** TG580.692.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162404.0855

## Gas-liquid-solid abrasive flow polishing and its process parameter optimization

Ji Shi-Ming, HUANG Xi-Huan, TAN Da-Peng\*, TAN Yun-Feng

(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: jishiming@zjut.edu.cn

**Abstract:** A gas-liquid-solid three-phase abrasive flow finishing method was proposed to improve the efficiency of fluid-based finishing for large-scale workpieces. By introducing micro-nano bubbles into a restrain flow field, the method utilized the energy released by the bubble collapsing to accelerate the motions of abrasive particles and to improve the finishing efficiency. During the finishing process, the fluid viscosity might decline owing to the centrifugal pump heat, and it could influence the amplitudes and profiles of turbulent kinetic energy and dynamic pressure in the near-wall region. Furthermore, the turbulent kinetic energy and dynamic pressure of near-wall region have a major impact on the uniformity of the surface texture and the removal efficiency. On the basis of the results mentioned above, a method to change the inlet velocity to compensate the temperature rising brought by the turbulent kinetic energy and dynamic pressure changes was proposed, and the optimal inlet velocity of finishing fluid temperature from 20 °C to 60 °C between the corresponding nine equal points was obtained. Ex-

收稿日期: 2015-09-19; 修订日期: 2015-12-23.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 51575494); 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)项目(No. 2015R403066)

perimental results show that the gas-liquid-solid three-phase abrasive flow finishing method improves the efficiency respect to traditional methods without the bubble processing, and the inlet velocity compensation improves the quality of workpiece surfaces significantly.

**Key words:** fluid-assisted polishing; gas-liquid-solid three-phase abrasive flow finishing; micro-nano bubble ; turbulent kinetic energy; dynamic pressure; parameter optimization

## 1 引言

大尺度工件一般定义为直径或对角直径达 1m 以上的工件,其广泛应用于光伏、航空等领域。为满足特定场合的性能需求,常常需要在大尺度精密光学零件和功能晶体材料等表面进行超精密光整加工,例如高能激光反射镜、超精密玻璃材料、功能光电器件等。

目前主要的微纳米级抛光方法有磁流变抛光、化学机械抛光、离子束抛光、等离子体辅助抛光、磨粒射流抛光等<sup>[1-4]</sup>,这些抛光方法在特定的领域将精密抛光精度不断地推向极限,但同时也具有一定局限性。磁流变抛光和化学机械抛光方法是通过工件长时间往复微量切削,以实现超光滑表面的加工,但是效率不高。磨粒射流是通过高压使流体达到较高的流速,但是由于磨粒的冲击方向基本一致,有效抛光范围比较小而且由于射流方向和工件之间的夹角不合理易造成工作表面损伤<sup>[5]</sup>。因此,对于减少损伤并且能够提高抛光效率的加工方法的研究具有重要意义。

计时鸣等人<sup>[5]</sup>在结构化表面软性磨粒流精密光整加工中,通过在被加工的结构化表面附近配置约束模块,使结构化表面成为一条截面几何形状可自由设计的约束流道的内壁面,利用磨粒流在约束流道内的湍流壁面效应实现对约束流道内壁面的微力微量切削,从而使软性磨粒流在湍流壁面效应下获得良好的加工效果,并且不会对加工工件造成亚损伤。

具有约束模块的液-固二相软性磨粒流在精密光整加工中有着良好表现,但在有限的流体动压力下,其抛光效率受限。有研究表明<sup>[6]</sup>,流体中如果存在气泡,其在固体壁面溃灭时,将对壁面产生一定的轰击作用,如果不加以控制,轰击所释放的能量将会造成破坏作用,这就是通常所说的汽蚀现象。如果根据汽蚀的作用机理,制造类似的汽蚀现象并作用于磨粒流中的磨粒上,则可加速驱动磨粒

对壁面的切削作用,提高抛光效率。

气-液-固三相流的流动问题比较复杂,主要困难在于相与相之间的质量、动能、能量间的相互作用十分复杂,难以精确描述,因此对气液固多相的研究较少,且主要是以外特性试验研究为主。庞佑霞等人<sup>[6]</sup>利用空蚀模型和混合流体两相流模型进行数值分析,探索了流体机械过流部件在气液固三相冲蚀和空蚀下的交互磨损机理。付强等人<sup>[7]</sup>利用 Ansys CFX 软件对离心泵中输送的水、固体颗粒、气体的多相混合物进行数值分析,多相流模型采用 Mixture 模型,对气液固多相流的深入研究和应用提供了有价值的参考。

综上所述,本文利用流体对大尺度平面工件进行抛光,并通过引入约束模块和微尺度气泡,来约束模块增大流体动能,利用气泡溃灭释放的能量冲击磨粒辅助抛光;设计能使磨粒流形成具有良好加工特性的湍流形态的抛光工具,增大随机方向的微量切削的可能性以提高加工质量,在保证加工质量的同时最大限度地提高加工效率。

## 2 抛光方法及工艺分析

### 2.1 气-液-固三相磨粒流抛光工具

气液固三相磨粒流抛光工具(Gas-Liquid-Solid Polishing, GLSP)的结构原理如图 1 所示。抛光盘整体通过机械方式固定,使其底部与被加工工件间存在一定的微间距(间距小于 1mm),在 GLSP 内腔,磨粒和气泡混合液形成旋流,使抛光盘底部与被加工工件的磨粒流受表面约束,形成面约束流场。

本加工方法采用微纳米气泡泵不间断地产生微纳米气泡与水的混合液。该气泵可以根据实验需要调整气泡的大小(10 nm~10 μm)。气泡泵产生的气泡液通入抛光盘上 3 个呈 120°布置的微纳米气泡液入口,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溃灭,大量气泡溃灭释放的能量会激起无数小射流

驱动磨粒运动,增大磨粒撞击被加工表面的动能。

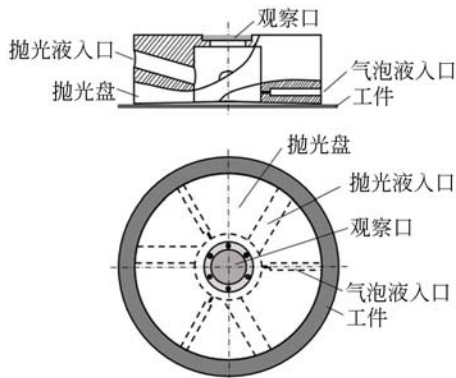


图1 GLSP抛光工具结构原理图

Fig.1 Structure diagram of GLSP polishing tool

## 2.2 气-液-固三相磨粒流加工工艺分析

在GLSP加工的过程中,材料的去除主要来自于近壁区磨粒对工件表面的切向犁削作用。磨粒对工件作用力的大小取决于磨粒的动能,而磨粒的动能来自于其携带介质抛光液的动压力。故磨粒流在抛光区域近壁面的动压力越大,磨粒在工件上对微观凸起碰撞的能量就越大,材料去除效率就越高。若要获得越大的流体动压力,则需要输入更多的电力,因而产生的发热量也就越大,这会对实验带来不确定性的影响。由此可见,在满足加工效果的前提下,动压力要保持在一个较好的数值域。

湍动能是描述湍流强烈程度的物理量,在抛光的近壁区域其也可等价成磨粒的无序运动程度,即湍动能越大,磨粒运动的无序性越强烈,则越不会在工件表面形成方向性的条纹,加工效果便越好。由此可见湍动能越大,被加工工件的表面质量越好。

在GLSP加工时,最理想的状态是动压力和湍动能完全均匀分布,但实际上由于湍流的复杂性以及加工盘抛光流域的不规则性,在抛光近壁区不可能获得完全均等的动压力和湍动能,实际上以中心为基点,呈向外辐射状,但在一定的半径范围内存在动压力和湍动能相对均衡的区域。通过仿真软件模拟实际工况,优化试验参数,可以得到整体均衡性的最优化。

对于确定的牛顿流体,流体黏度主要与温度有关,温度越高,分子的运动越剧烈,黏度越低<sup>[8]</sup>。流体黏度的改变会使抛光参数产生一系列的变化。气-液-固三相磨粒流抛光实验平台中,磨粒

流进入3个速度入口的动力来自于离心泵,然而离心泵的长时间工作会对水温产生较大的影响。经实验测试知,25℃水温条件下,若离心泵工作2h,则磨粒流的温度将会上升至55℃左右。出于对泵寿命考虑,工作一定时间后,必须停止实验,另外水温的急剧升高也会给流体黏度产生较大的改变,图2是水温-黏度曲线。

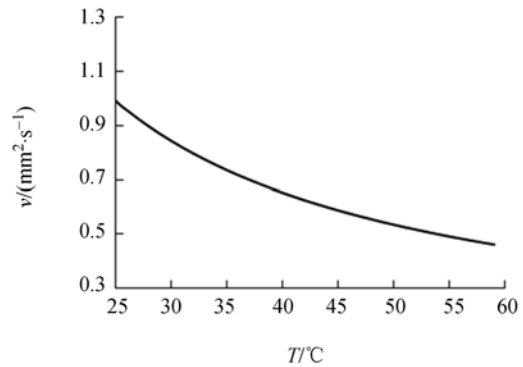


图2 纯水的运动黏度和温度的关系

Fig.2 Relationship of kinematic viscosity for pure water and temperature

受限于实验成本以及操作的便利性,应对发热问题最便捷的方法为改变其他输入参数,考虑到在GLSP加工过程中速度输入参数对湍动能和动压力的大小和分布比较敏感,因此量化出具体影响数值,并将温度升高对参数产生的影响进行补偿,有一定的研究意义。

综上所述,抛光液温度升高会导致流体粘度下降,进而影响湍动能和动压力参数。而改变抛光盘的入口速度则可以改变湍动能和动压力的大小及分布,本文通过流体仿真软件Fluent进行数值分析,得出速度参数和湍动能及动压力的定量变化关系。探寻一种通过改变入口流速来补偿温度升高带来的抛光参数变化的方法,寻找抛光流体在不同温度下所匹配的入口速度最优值,从而最大可能地提高抛光效果。

## 3 气-液-固三相磨粒流数值模拟

### 3.1 湍流模型的选择

对于气-液-固三相磨粒流抛光,流体的湍流形态对加工效果有着重要影响,因此需要选择合适的湍流模型以提高数值分析的精确度。Standard  $k-\epsilon$  双方程湍流模型是一种常用的经典湍流

模型,其中,  $k$  代表湍动能,  $\epsilon$  为湍动能的耗散率, Standard  $k-\epsilon$  模型在全湍流的流动过程模拟中能够得到较为精确的结果。但在 Standard  $k-\epsilon$  中,黏度系数为常数,而在强旋流、弯曲壁面流动或者弯曲流线流动时,黏度系数会产生一定的失真。针对这一问题 Shih 等人<sup>[9]</sup>提出了 Realizable  $k-\epsilon$  模型,他在湍流黏度计算公式中引入了旋度和曲率相关的参数,比较适合 GLSP 中强旋流的数值分析。在 Realizable  $k-\epsilon$  模型中,湍动能和湍动能耗散率  $\epsilon$  的输运方程分别为:

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

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}}, \quad (2)$$

其中:  $\rho$  为流体密度;  $t$  为时间;  $x_i, x_j$  为对应坐标方向的张量;  $u_i$  为速度矢量  $u$  在 3 个坐标轴方向的分量;  $\mu_t$  为湍流动力黏性系数,  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ ,  $C_\mu$  为与应变率有一定联系的表达式<sup>[9]</sup>, 其中,  $C_\mu = \frac{1}{4 + \sqrt{6} \cos \phi U \cdot k / \epsilon}$ ,  $\phi = \frac{1}{3} \arccos(\sqrt{6} W)$ ,  $W = \frac{E_{ij} E_{jk} E_{kj}}{(E_{ij} E_{ij})^{1/2}}$ ,  $U^* = \sqrt{E_{ij} E_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}}$ ,  $\tilde{\Omega}_{ij}$  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。

式(1)中,  $\sigma_k$  为湍动能  $k$  的湍流普朗特常数,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $G_k$  是由平均速度梯度引起的湍动能。式(2)中  $\sigma_\epsilon$  为湍动能耗散率  $\epsilon$  的湍流普朗特常数,  $\sigma_\epsilon = 1.2$ ;  $C_2 = 1.9$  为默认常数,  $C_1 = \max \left\{ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right\}$ , 其中  $\eta = (2 E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\epsilon}$ ,  $E_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right]$ 。其中  $\mu_i, \mu_j$  表示对应坐标方向的相对伸长率。

Realizable  $k-\epsilon$  模型能给出较好的射流扩张角,其对于具有复杂旋流腔道的 GLSP 中的流动过程的模拟结果比 Standard  $k-\epsilon$  模型的要好。本文采用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型可以比较准确地预测工件表面气-液-固三相磨粒流形成的高速湍流涡旋旋流的位置和形状,也可以更精确地预测涡旋的切线速度和发散比率,避免数值分析过

程中产生的失真不断累积导致较大的误差。

### 3.2 计算对象及网格划分

在 GLSP 中磨粒和微纳米气泡混合液的主要作用区域在模型的底部内腔,微纳米气泡液入口较小对流体整体流型影响不大,因此兼顾计算的精确性和效率,在 Ansys Workbench 中 Geometry 中只对主要流体域进行建模。在 Mesh 步骤对主要计算域即下底倒锥面湍流集中抛光域进行更为细致的六面体网格划分,以增加计算精度。对于 3 个速度入口及磨粒流中间聚集区等非主要计算域采用相对较大的自动生成的四面体网格,以节省计算时间。Mesh 模型的正视图及轴测图如图 3 所示。

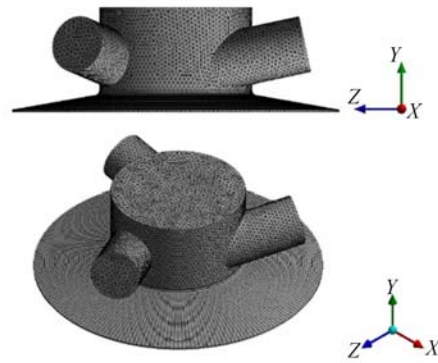


图 3 GLSP 抛光工具流道网格划分

Fig. 3 Mesh generation of channel in GLSP polishing tool

### 3.3 数值计算初始条件的设置

本文主要是对气-液-固三相磨粒流加工工件表面时近壁区进行数值模拟,在 Fluent 中采用的是 3D 单精度稳态隐式压力求解器,其利用压力耦合方程的 SIMPLEC 算法进行求解;湍流模型采用 Realizable  $k-\epsilon$  模型;三相流模型采用 Mixture 模型, Mixture 模型假定在短空间尺度上局部平衡下,相之间的耦合比较强,可以模拟具有不同速度的多相流动<sup>[10]</sup>。在 GLSP 内腔中,由于高速旋流使得气-液-固三相速度具有强耦合,因此 Mixture 模型可应用于抛光盘内含磨粒气泡水流的气-液-固三相流动数值计算。边界条件中,3 个气-液-固三相磨粒流入口设为速度入口,水力直径为 0.026 m。其中固相介质设为体积分数为 0.1 的 SiC 磨粒,气相介质是体积分数为 0.001 的空气,出口为模型的下锥形侧边圆环面,满足连续性条件,将出口设为 outflow,其余边界设为 wall。

液相介质采用相对清洁的水,相对于液压油



等油性的高黏度液相介质,水的黏度更小。根据雷诺数公式  $R_e = \rho D_h v / \mu$  可知,在相同的速率下黏度和雷诺数成反比,雷诺数越大,流体的流动越容易从稳态转成湍流,经计算在此环境下,各介质的雷诺数均远大于圆管中流体从层流向湍流转捩的流体雷诺数的临界值 2300,完全满足湍流需求。研究表明<sup>[11]</sup>,在磨粒流处于湍流的状态下,不同的黏度对于颗粒运动规律的影响是很微弱的,因此水作为磨粒和微纳米气泡的载体是合理的。

### 3.4 数值分析与结果讨论

在气-液-固三相流的抛光实验中,以圆形铝板作为被抛光工件,速度入口的速度为 60 m/s,磨粒流温度在 30 °C 时,抛光效果比较理想。为了进一步精确量化实验参数,通过流体力学计算软件 Fluent 分别对等温不同流速和等速不同温度情况下的近壁抛光区域流体的湍动能和动压力进行数值分析。

表 1 等速仿真参数

Tab.1 Constant velocity simulation parameters

入口流速 $v$ /m · s <sup>-1</sup>	温度 T/(°C)	动力粘度 $\mu$ /Pa · s	水力直 径 $D_h$ /m	雷诺数 $R_e$	湍流强 度 $I$ /%
60	25	$0.989 \times 10^{-3}$	0.026	$1.58 \times 10^6$	2.69
60	35	$0.735 \times 10^{-3}$	0.026	$2.12 \times 10^6$	2.59
60	45	$0.589 \times 10^{-3}$	0.026	$2.65 \times 10^6$	2.52
60	55	$0.494 \times 10^{-3}$	0.026	$3.16 \times 10^6$	2.46

首先将入口流速设为 60 m/s,针对温度的改变进行数值模拟。温度分别设定为 25、35、45、55 °C 4 个梯度。其中温度和黏度系数的关系如图 2 所示,水力直径即速度入口直径,为 0.026 m,湍流强度采用经验公式  $I = 0.16 R_e^{-0.125}$  计算,取离工件表面 0.000 5 m 处的平面作为观察平面。详细仿真参数如表 1 所示。

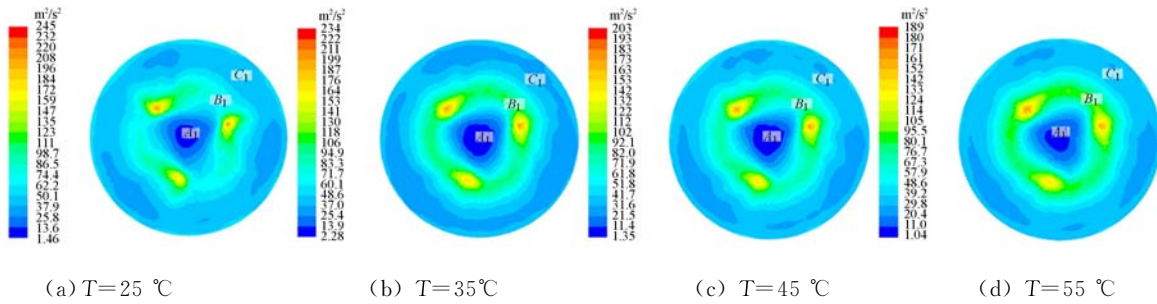


图 4 T 为 25、35、45、55 °C 时的湍动能分布

Fig. 4 Distribution of turbulent kinetic energy at different temperatures

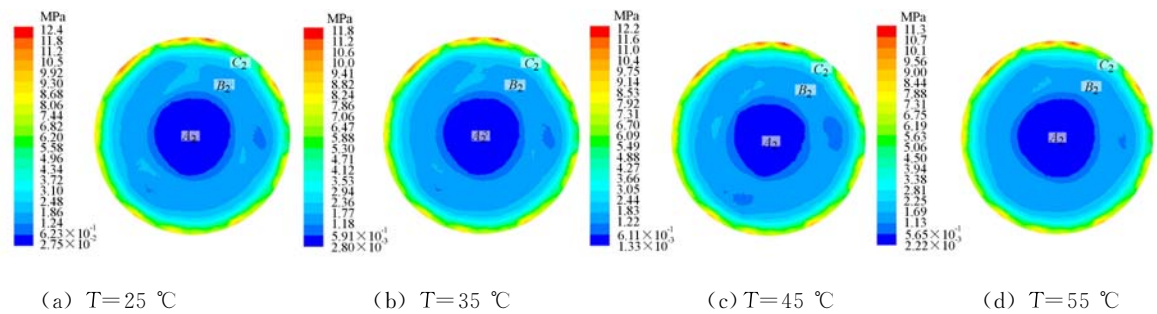


图 5 T 为 25、35、45、55 °C 时观察面动压力的分布情况

Fig. 5 Distribution of dynamic pressure at different temperatures

图 4 为不同温度下湍动能在观察平面上的数值分布情况。为了方便统计,把图中相对数据集成的区域分为区域 A<sub>1</sub>、区域 B<sub>1</sub>、区域 C<sub>1</sub>。区域 A<sub>1</sub> 为速度空心漩涡,该区域湍动能很小,不能起到抛光作用,区域 B<sub>1</sub> 为主要抛光作用区域,也是湍动能数值较大的集中区域,此处磨粒流具有强烈的离心向外的脉动速度,而且气泡撞壁溃灭释

放的能量也传递给磨粒,从而实现良好的抛光效果。区域 C<sub>1</sub> 的湍动能数值比区域 B<sub>1</sub> 小,这是因为 C<sub>1</sub> 距离中心远,离心力弱。由图 4 可知,随着温度的增加,观察面的整体湍动能值变小。理论分析可知,温度造成的黏度降低会导致雷诺数变大,而湍流强度又是一个关于雷诺数的减函数,因此,温度降低时,湍动能相对变小。这和实验结果

吻合。从微观上讲黏度降低会减少流体间的阻力,使得流体中各点的速度更加稳定均匀。而湍动能来源于速度梯度,速度梯度减小,湍动能也就相应减小。

由图 4 还可明显看到,随着温度升高,各区域内的数值分布更加均匀。比较图 4(a)和(b)可知,温度升高使得区域  $B_1$  的湍动能分布更加均匀圆滑。通过比较 4(b)、(c)、(d),区域  $C_1$  的湍动能分布也可得到一样的结论。

图 5 为观察面的动压力分布图,动压力决定着实验中材料的去除效率。按数据分布相对集中原则,把观察面分为 3 个区域,区域  $A_2$ 、区域  $B_2$ 、区域  $C_2$ ,区域  $A_2$  的动压力几乎为零,这是因为中间形成了速度旋涡区域,而旋涡中心为大范围的无液空区域,其减小了整体的平均密度,根据动压表达式  $1/2\rho v^2$  可知,图 5 的仿真结果符合理论分析, $B_2$  为大区域中等动压集中区,区域  $C_2$  为速度狭缝出口区域,此处动压数值较大。

综合分析 25-60 °C 的仿真数据,各区域的数据取平均值,如图 6~7 所示。由图可见,温度对湍动能的影响相对比较明显,尤其对于区域  $B_1$ ,当流体温度达到 55 °C 时,平均湍动能只有  $86 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ,本研究组先前的研究成果表明<sup>[12-13]</sup>,当湍动能大于  $95 \text{ m}^2/\text{s}^2$  时,工件表面能获得较好的抛光形态。由图 6 可知在 35 °C 时,湍动能既能保证达  $95 \text{ m}^2/\text{s}^2$  以上,而且有着相对均匀的分布,故可以认为 35 °C 时的入口速度 60 m/s 是比较合理的。对于区域  $A_1$  和区域  $C_1$ ,它们不是主要的抛光区域,而且温度变化时,它们的湍动能不会产生较大的数值突变,所以可以认为温度对这两个区域无影响。对于区域  $A_2$ 、 $B_2$ 、 $C_2$ ,随着温度升高,动压力的数值仅轻微变小,这说明温度变化对于气液固三相磨粒流的抛光实验无明显影响。结合图 5 中(a)、(b)、(c)可知,动压力的分布情况和湍动能一样,温度越高,分布越均匀,特别是在区域  $B_2$  上体现的更为明显,这说明温度升高对抛光的稳定性有一定的帮助。

综合考虑湍动能和动压力的分布情况可知,区域  $B_1$  和区域  $B_2$  的重叠区域可以在具有足够大的湍动能的情况下,依然能保证动压力大小合理、分布稳定。

下面环境温度不变的情况下,对不同入口流速进行数值模拟。取环境温度为 35 °C,速度依次

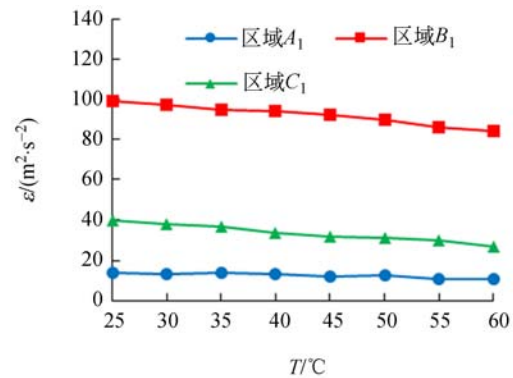


图 6  $v=60 \text{ m/s}$  时各区域湍动能大小分布图

Fig. 6 Distribution of turbulent kinetic energy in 60 m/s

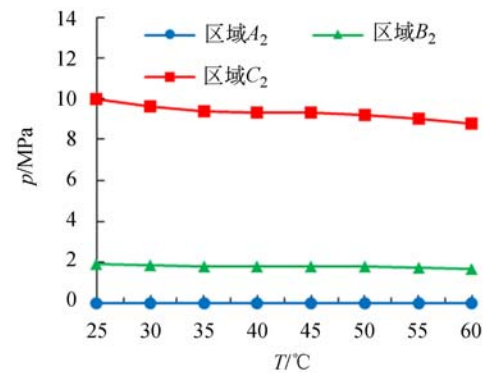


图 7  $v=60 \text{ m/s}$  时各区域动压力大小分布图

Fig. 7 Distribution of dynamic pressure in 60 m/s

取为 50、60、70、80 m/s,具体参数如表 2 所示。取离工件表面 0.000 5 m 处的平面作为观察平面,图 8 为观察平面的湍动能云图。

表 2 等温仿真参数

Tab. 2 Constant temperature simulation parameters

温度 $T/^\circ\text{C}$	入口流速 $v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	动力粘度 $\mu/\text{Pa}\cdot\text{s}$	水力直 径 $D_h/\text{m}$	雷诺数 $R_e$	湍流强 度 $I/(\%)$
35	50	$0.735\times 10^{-3}$	0.026	$1.77\times 10^6$	2.65
35	60	$0.735\times 10^{-3}$	0.026	$2.12\times 10^6$	2.59
35	70	$0.735\times 10^{-3}$	0.026	$2.48\times 10^6$	2.54
35	80	$0.735\times 10^{-3}$	0.026	$2.83\times 10^6$	2.50

由图 8 可知,随着速度的增大,湍动能在数值上具有较大的提升。这是因为速度越大,抛光区域内的流体紊乱程度越高,速度的脉动程度越高,湍动能也就越大。通过观察云图分布可知,速度

增大并没有改变湍动能大小集中区域的格局,它们只是在各自区域上数值变大,这也是符合抛光

工具的实际情况。同等速对比实验一样,将湍动能大小集中区域分为区域  $A_3$ 、区域  $B_3$ 、区域  $C_3$ 。

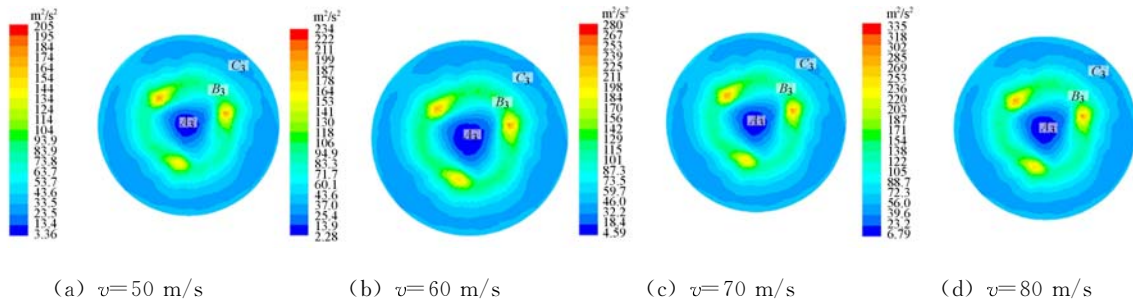


图 8  $v=50, 60, 70, 80$  m/s 时的湍动能分布

Fig. 8 Distribution of turbulent kinetic energy at different inlet velocities

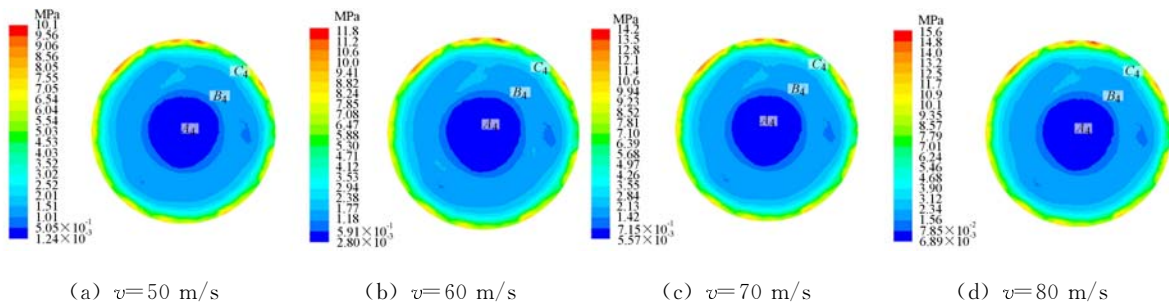


图 9  $v=50, 60, 70, 80$  m/s 时动压力分布图

Fig. 9 Distribution of dynamic pressure at different inlet velocities

图 9 为观察平面的动压力云图,由图 9 可知,和湍动能一样,随着入口速度的增大,动压力明显增大。同样将动压力分为 3 个区域  $A_4$ 、 $B_4$ 、 $C_4$ ,中间区域  $A_4$  动压力几乎为零,区域  $B_4$  的动压力骤然增大,这是刚离心出来的流体能量释放的结果。区域  $C_4$  为出口附近区域,该区域的动压力又有所增加,如此的动压分布也符合抛光盘结构的。

进一步分析温度不变的情况下,观察面的湍

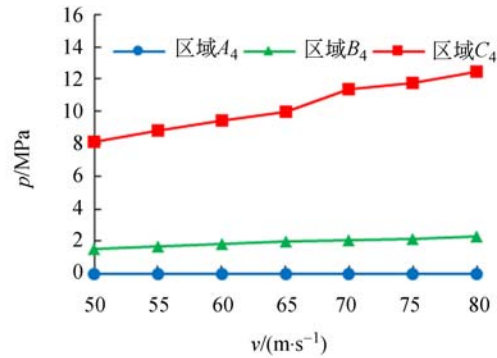


图 11  $T=35$  °C 各区域动压力大小分布

Fig. 11 Distribution of dynamic pressure in each region with T of 35 °C

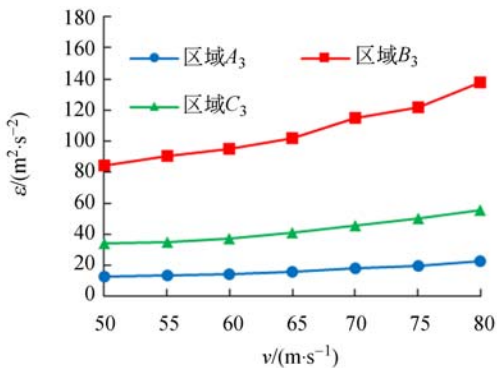


图 10  $T=35$  °C 各区域湍动能分布图

Fig. 10 Distribution of turbulent kinetic energy in each region with T of 35 °C

动能和动压力的分布情况。入口流速为 50~80 m/s 时,7 个均等点的各区域的湍动能和动压力的均值如图 10~11 所示。由图可知,温度升高时,整体湍动能和动压力均升高。区域  $B_3$  的速度-湍动能曲线倾斜度最大,说明此处对速度的升高更为敏感,区域  $A_3$  和区域  $C_3$  则稳步上升没有突变。同样作为主要抛光区域的  $B_4$ ,当温度上升时,动压力稳步上升,材料的去除效率更高,如能



选择最佳的湍动能值,就能达到最好的抛光效果。由上图可知在温度为 35 °C,速度为 60 m/s 时,区域  $B_3$  内的湍动能达到  $95 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ,而且湍动能和动压力分布相对较均匀,可以认为能获得较好的抛光效果。

### 3.5 分析与拓展

通过对观察平面内的湍动能和动压力进行数值模拟,得出温度为 35 °C,速度为 60 m/s 时,可以在区域  $B_1$ (或  $B_3$ )内获得较好的抛光效果。因此,对于区域  $B_1$ (或  $B_3$ ),理论上每个温度值都对应一个合适的入口速度。

抛光作业的实际温度一般为 20~60 °C,为了寻找最佳速度-温度对应规律,取其中具有代表性的 9 个点,用上述方法进行大量仿真分析,得到 9 个离散温度点对应的最优入口速度图,如图 12 所示。

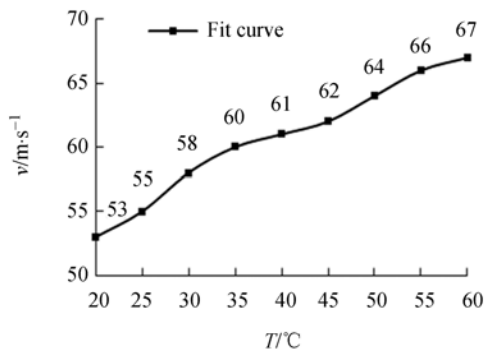


图 12 最优速度曲线

Fig. 12 Optimal velocity curve

由图 12 可以看到最优速度和温度整体呈现正相关的关系,当温度在 35 °C 左右时,最优速度的增速放缓,当温度达到 45 °C 时,曲线斜率再次增加。初步判断此曲线为存在拐点的高次非线性曲线,利用 Origin 数据处理软件对以上离散数据进行拟合,通过自定义三次多项式方程得到以下最优速度和温度之间的函数关系:

$$v_{\text{optimal}} = 0.000155T^3 - 0.0213T^2 + 1.26T + 34.9, \quad (5)$$

基于以上公式,在实际气液固三相磨粒流仿真实验时,通过温度传感器实时监测温度变化,利用自动控制系统实时控制离心泵的频率,以改变入口速度,从而实现在任意温度下,总能达到最优的抛光效果。

## 4 三相磨粒流加工实验

本实验采用粒度为 7 的氧化铝磨料,以 10% 的质量分数与水均匀调制,在浑浊液中加入少量改性高分子聚合物分作为散剂,以减少磨粒沉积对实验的影响,通过离心泵将抛光液冲入抛光盘的速度入口。加工材料选用在航空航天领域常用于制作飞机蒙皮、机身框架等的 6063 硬质铝。GLSP 在加工时抛光液会产生强烈的中空旋流,与动压力及湍动能参数的仿真结果相符合,如图 13 所示。



图 13 GLSP 加工时旋流效果图

Fig. 13 Swirling flow generated by GLSP

为了验证上述调速方法对水温上升所产生的影响的修正效果,设置两组对比实验分别对两块相同的工件进行加工,其中工件一在 2 h 加工过程中不采取调速措施,工件二在 2 h 的加工过程中,在图 12 所示的 9 个离散的温度点上依次对变频泵进行输入电压频率控制,从而实现对应速度的调控。工件一、二初始精铣后的表面粗糙度  $R_a$  均为  $0.8 \mu\text{m}$  左右。

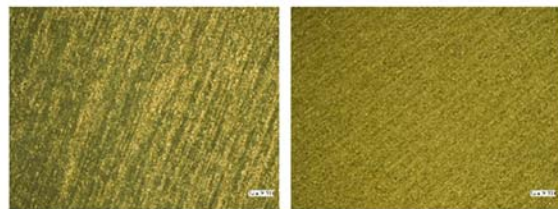


图 14 工件一、工件二表面微观形貌图对比

Fig. 14 Comparison of surface morphology diagram for two workpieces

图 14 为加工后工件一、工件二的相同加工区域在 Keyence 数码显微镜 300 倍率下的微观形貌图。由图 14 可知,未进行调速加工的工件一沿流速方向有着更为明显的加工痕迹。对于工件二,由于进行了调速补偿使其湍动能发展的更为充



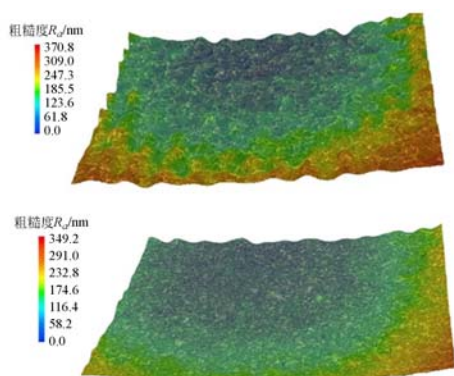


图15 工件一、工件二表面加工形貌三维模拟图

Fig. 15 3D simulation diagrams of surface topography for two workpieces

分,表面的加工痕迹改善明显,入口流速调节作用明显。

图15为图14景深深度合成的三维形貌模拟图。可以看出,工件一、二整体表面粗糙度差别不大,都达到了良好的抛光效果,轮廓算数平均偏差 $R_a$ 从 $0.8\ \mu\text{m}$ 降到了 $0.2\ \mu\text{m}$ 以下,这也证明了气-液-固三相磨粒流抛光的高效性,经过对比实验可知,同等条件下未加入微气泡情况下,若要达到同等粗糙度则需要8 h左右。

观察两个三维形貌模拟图,上图为工件一,下图为工件二,可见未调速工件的表面粗糙度略高于调速工件。工件一表面的波峰波谷比较密集,而工件二表面的波峰波谷更趋于分散,这表明调

#### 参考文献:

- [1] 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):308-315. 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):308-315. (in Chinese)
- [2] 张峰. 非球面碳化硅表面硅改性层的数控化学机械抛光[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12):3015-3020. ZHANG F. Computer-controlled chemical mechanical polishing of silicon modification layer on aspheric silicon carbide surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12):3015-3020. (in Chinese)
- [3] 唐瓦,邓伟杰,李锐钢,等. 离子束抛光高陡度离轴非球面的去除函数修正[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6):1572-1579. TANG W, DENG W J, LI R G, *et al.*. Correction

of removal function of ion beam figuring highly steep off-axis asphere [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6):1572-1579. (in Chinese)

## 5 结论

气-液-固三相流作为一种全新的流体抛光方法,在约束流场中引入气相微纳米气泡溃灭释放能量,该方法对6063硬质铝的加工中,轮廓算数平均偏差 $R_a$ 从 $0.8\ \mu\text{m}$ 降到了 $0.2\ \mu\text{m}$ 左右,比未引入微纳米气泡加工的效率,技术成熟后对于大尺度工件的抛光应用具有一定的参考价值。

在气-液-固三相磨粒流抛光中,入口速度为首要考虑参数。变频泵的电压频率越大,流体流速就越大,抛光近壁面的湍动能以及动压力也越大,但是液体温升就越快。湍动能用于决定表面抛光质量,动压力用于决定材料去除效率,微纳米气泡相当于催化剂。因此在保证表面抛光质量的同时,应寻找尽可能小的入口速度。

温度作为被动变量对实验有着重要影响。工件表面的湍动能随着温度升高而减小,温度对动压力的影响则不大,因此通过提升入口速度来补偿温升带来的湍动能损失具有明显效果。

理论上每一个温度都对应着一个最优的入口速度,等分抽取温度点后,通过大量的数值模拟求得最优速度,实验表明,最优速度下的抛光效果较好。

- [4] 潘鑫,马志斌,高攀,等. ECR等离子体刻蚀增强机械抛光CVD金刚石[J]. 真空科学与技术学报, 2015(2):174-178. PAN X, MA ZH B, GAO P, *et al.*. Polishing diamond coatings by combination of electron cyclotron resonance plasma etching and mechanical polishing [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2015(2):174-178. (in Chinese)
- [5] 计时鸣,池永为,谭大鹏. 软性磨粒流磨粒入射壁面过程及其加工特性研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13):174-183. JI SH M, CHI Y W, TAN D P. Research of abrasive injection process to the wall and machining characteristic of soft abrasive flow machining [J].

- Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48 (13):174-183. (in Chinese)
- [6] 庞佑霞, 唐勇, 梁亮, 等. 冲蚀与空蚀交互磨损三相流场仿真与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2012, 48 (3):115-120.
- PANG Y X, TANG Y, LIANG L, *et al.*. Flow field simulation and experimental research on interactive erosion and cavitation wears in three phases [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48 (3):115-120. (in Chinese)
- [7] 付强, 袁寿其, 朱荣生, 等. 离心泵气液固多相流动数值模拟与试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(14): 52-57.
- FU Q, YUAN SH Q, ZHU R SH, *et al.*. Numerical simulation and experiment on gas-liquid-solid multiphase flow in centrifugal pump[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28 (14):52-57. (in Chinese)
- [8] 章梓雄 董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2011.
- ZHANG Z X, DONG Z N. *Viscous Fluid Mechanics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011. (in Chinese)
- [9] SHIH T, LIOU W W, SHABBIR A, *et al.*. A new eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows[J]. *Computers & Fluids*, 1995, 24(3):227-238.
- [10] 赵斌娟, 袁寿其, 刘厚林, 等. 基于 Mixture 多相流模型计算双流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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(1):7-12. (in Chinese)
- [11] 计时鸣, 马宝丽, 谭大鹏. 结构化表面环境下软磨粒流的流场数值分析[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(9):2092-2099.
- JI SH M, MA B L, TAN D P. Numerical analysis of soft abrasive flow in structured restraint flow passage[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2092-2099. (in Chinese)
- [12] 计时鸣, 付有志, 谭大鹏. 软性磨粒流双入口约束流场数值分析及加工试验研究[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(19):177-185.
- JI SH M, FU Y ZH, TAN D P. Numerical analysis and processing experiment of double-inlet restraint flow field in the soft abrasive flow machining [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(19):177-185. (in Chinese)
- [13] 李琛, 计时鸣, 谭大鹏, 等. 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
- LI CH, JI SH M, TAN D P, *et al.*. Study of near wall area micro-cutting mechanism and finishing characteristics for softness abrasive flow finishing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(9):161-168. (in Chinese)

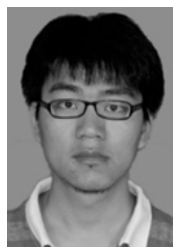
#### 作者简介:



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,副教授、博士,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



黄希欢(1990—),男,江西九江人,硕士研究生,主要从事超精密加工、流体力学等方面的研究。

(本栏目编辑:马 健)