

文章编号 1004-924X(2017)06-1534-13

## 固液两相磨粒流研抛工艺优化及质量影响

李俊焯, 胡敬磊, 董 坤, 王 震, 周立宾, 张心明\*  
(长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:**为研究磨粒流对异形腔孔内壁表面以及微小孔的研抛去毛刺等的作用效果,探讨了研抛过程中磨粒流各工艺参数与加工质量间的作用关系。以共轨管这种非直线管为研究对象,对磨粒流抛光共轨管过程进行数值模拟研究,探索各工艺参数对磨粒流研抛的影响。数值模拟结果表明:控制碳化硅体积分数可以改变磨粒流研抛过程中的粘温特性,从而可以控制磨粒流的研抛质量。然后采用正交方法设计实验方案,实验过程中,采集抛光过程中温度和粘度的变化数据,分析磨粒流研抛中粘温特性对磨粒流研抛质量的影响。试验与数值模拟结果表明,在磨粒流研抛共轨管过程中 SiC 的体积分数比出口压力的极差秩大,磨粒流研抛确实可有效改善工件表面质量。而且本文还进一步得出在本试验条件下,磨粒流研抛共轨管的最佳工艺参数:出口压力为 5 MPa, SiC 体积分数为 0.25%, SiC 目数为 80,同时获得了表面粗糙度与体积分数的回归方程,可用于指导磨粒流实际研抛生产工作。

**关键词:**共轨管; SiC 体积分数; 粘温特性; 湍流粘度; 数学模型

**中图分类号:** TG580.692.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172506.1534

## Technological parameter optimization and quality effects on solid-liquid phase abrasive flow polishing

LI Jun-ye, HU Jing-lei, DONG Kun, WANG Zhen, ZHOU Li-bin, ZHANG Xin-ming\*

(College of Mechanical and Electric Engineering, Chang Chun University of  
Science and Technology, Changchun 130022, China)

\* Corresponding author, E-mail: zxm@cust.edu.cn

**Abstract:** To study the effect of abrasive flow polishing on internal surface of heteromorphic coelomopore and polishing deburring of micro-holes, the function relationship between each technological parameter of abrasive flow and processing quality in the process of polishing was discussed. Common rail pipe that is a type of non-straight pipe was taken as research object, and numerical simulation study was implemented for abrasive flow polishing process, the influence of each technological parameter on abrasive flow polishing was explored. Numerical simulation results show that: the viscosity-temperature characteristics in the process of abrasive flow polishing can be changed by controlling volume fraction of SiC, thus the control of quality for abrasive flow polishing can be realized. Then orthogonal method was adopted to design experiment scheme. Changed data of temperature and viscosity in polishing process was collected and influence of viscosity-temperature characteristics on quality of

**收稿日期:** 2016-09-28; **修订日期:** 2016-11-14.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No. 51206011); 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20160101270JC, 20170204064GX); 吉林省教育厅项目 (吉教科合字[2016]第 386 号)。

abrasive flow polishing was analyzed. The experimental and numerical simulation results show that the range rank of SiC volume fraction is higher than that of exit pressure in the process of abrasive flow polishing. What's more significant is the quality of work-piece surface can be effectively improved by abrasive flow polishing. Under the condition of the experiment, the exit pressure of the optimum technology parameter for common rail tube of abrasive flow polishing is 5 MPa; the volume fraction of SiC is 0.25%; the mesh number of SiC is 80; the regression equation of surface roughness and volume fraction can be obtained at the same time, which can be applied to guide production of practical polishing for abrasive flow.

**Key words:** Common rail tube; SiC volume fraction; viscosity-temperature characteristics; turbulent viscosity; mathematical model

## 1 引言

磨粒流抛光技术是近年来新兴的一种抛光方法,磨粒流一般是由具有粘弹性的液体载体与具有一定刚度和强度的固体颗粒混合形成的。在外界压力作用下,悬浮在液体介质中的固体颗粒对复杂结构零件的内表面进行反复的冲击碰撞,以实现工件内表面的平整、抛光及材料的微量去除等加工,从而获得更高的精度<sup>[1,2]</sup>。

近几年来,国内外学者从不同的切入点研究了磨粒流抛光技术,以及影响磨粒流抛光的各种因素,并对最终的加工技术参数进行优化,使磨粒流抛光技术日趋成熟和完善。Rajendra等学者尝试从神经网络和有限元模拟的角度阐述在磨粒流加工过程中加工参数对于材料的磨损,去除等的影响,但遗憾的是没有与黏度建立相关的联系<sup>[3,4]</sup>。Dhirendra等学者从磁性磨料的角度进行研究,发现固相磁性颗粒在磁场中可以减小黏度的作用,但没有对固液两相混合物的黏度与加工磨损效率的关系展开深入的研究,也没有具体的理论模型来支撑<sup>[5,6]</sup>。Sushil M等学者用田口设计方法,研究了磨粒流加工过程中输入参数对材料去除表面形貌的影响,通过实验得到挤压力是影响加工效果的最重要因素<sup>[7,8]</sup>。G. Venkatesh等学者选用超声辅助磨粒流抛光技术对圆锥齿轮上的复杂曲面进行光整加工,从模拟分析和实验验证两方面揭示了这种技术是齿轮叶片光整加工最好的选择之一。在这种技术中,磨粒以比传统磨粒流更高的速度来碰撞工件表面,故可以提高加工效率<sup>[9,10]</sup>。Tina Bremerstein等学者对磨粒流介质的磨损以及介质对磨粒流加工结果

的影响展开研究,应用流体力学和颗粒特性描述法理论,说明了流变行为和磨粒介质的成分与磨粒大小和形状一样都能导致研磨效率降低。他们的研究结果还显示:加工过程中磨粒介质浓度的增加和大颗粒磨粒的磨圆是材料去除率低和表面质量降低的主要影响因素<sup>[11]</sup>。Fritz Klocke等学者对目前磨粒流应用于先进的航空航天合金和复合材料的技术能力以及未来的发展进行了较为全面的概括总结<sup>[12]</sup>。B S Brar等学者提出了电化学辅助的磨粒流抛光加工方法,通过设计田口实验发现,由于电化学腐蚀和磨粒流的协调效应使材料发生较大的磨损以及通过得到的实验数据对各种工艺参数下已去除材料的响应特性进行了优化<sup>[13]</sup>。计时鸣等人针对利用流体抛光大尺度工件时存在效率低的问题,提出了一种气-液-固三相磨粒流抛光方法。该方法将微纳米气泡引入约束流场,利用气泡溃灭时释放的能量加速驱动磨粒运动<sup>[14]</sup>。同时以U形流道为例,研究了模具结构化表面环境下软性磨粒流的流场加工特性,应用单颗动力学模型(SPD)通过数值模拟方法求解了颗粒在不同形态的湍流场中的运动特性<sup>[15]</sup>。丁金福等人利用磨粒流的流变特性,通过分析应力张量,研究了磨粒流加工中的微切削力,实验加工表明随着加工次数的增加去除作用迅速削弱,而表面粗糙度在挤压力的作用下仍有所降低<sup>[16,17]</sup>。

本文以共轨管为研究对象,对其通道内固液两相磨粒流研抛的传热特性和表面加工特性进行数值模拟。在保持进口压力一定的情况下,研究不同出口压力下,碳化硅颗粒的体积分数对共轨管通道壁面的湍流黏度、温度、湍流耗散率等参数的影响。同时对共轨管进行磨粒流研抛实验,通

过采集加工过程中的温度变化,绘制不同温度条件下的粘温特性变化曲线,再对共轨管内表面粗糙度进行检测,通过数值模拟和实验分析,得到磨粒流研抛过程中的粘温特性与加工质量间的关系。本文的研究将为磨粒流实际加工提供技术依据。

## 2 磨粒流抛光中颗粒的受力分析

### 2.1 惯性力

磨粒随液体在共轨管的流道内运动时,受固液两相耦合作用,以及外界压力场和速度场的综合作用,磨粒在流道内呈现出非线性的复杂流动。以单个磨粒为对象,研究磨粒在固液两相流场中的运动规律,进而分析磨粒对工件的微切削作用。

磨粒在运动时所受到的惯性力如式(1)所示:

$$F_i = -\frac{1}{6}\pi d_p^3 \rho_p \frac{du_p}{dt}, \quad (1)$$

式中: $d_p$  为球形磨粒半径; $\rho_p$  为磨粒密度; $u_p$  为磨粒的速度。

### 2.2 阻力系数和阻力

在实际的两相流中,磨粒的阻力大小受很多因素的影响,不仅与磨粒的雷诺数  $R_p$  有关,而且还和流体的湍流运动、流体的可压缩性、流体温度与颗粒温度、颗粒形状、壁面的存在以及颗粒群的浓度等因素有关。为研究的方便,引入阻力系数的概念,将其定义为:

$$C_D = \frac{F_r}{\pi r_p^2 \left[ \frac{1}{2} \rho (u - u_p)^2 \right]}, \quad (2)$$

于是,磨粒的阻力可表示为

$$F_r = \frac{1}{2} \pi r_p^2 C_D \rho (u - u_p)^2, \quad (3)$$

式中: $\rho$  为流体密度; $r_p$  为球形磨粒半径; $u$  为流体的速度。

### 2.3 重力和浮力

对于悬浮在流体中的磨粒,同样存在重力和浮力。

磨粒的重力为:

$$F_g = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p g, \quad (4)$$

流体施加在磨粒上的浮力为:

$$F_b = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho g, \quad (5)$$

### 2.4 压力梯度力

磨粒在有压力梯度的流场中运动时,还会受到压力梯度引起的作用力,其表达式为:

$$F_p = -V_p \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (6)$$

式中: $V_p$  表示颗粒的体积,负号表示压力梯度力的方向和流场中压力梯度的方向相反。一般来说,压力梯度力同惯性力相比数量级很小,因而可以忽略不计。

### 2.5 虚假质量力

当磨粒相对于流体作加速运动时,不但磨粒的速度越来越大,而且颗粒周围流体的速度也会不断增大,推动磨粒运动的力不但增加了颗粒本身的动能,也增加了流体的动能,故这个力将大于加速颗粒本身所需要的动能( $m_p a_p$ ),这好比是增加了磨粒质量一样,故将这部分增加质量的力叫做虚假质量力,或称表现质量效应,当流体以瞬时速度  $u$  运动,且颗粒的瞬时速度为  $u_p$  时,虚假质量力为:

$$F_{am} = \frac{1}{2} \rho V_p \left( \frac{du}{dt} - \frac{du_p}{dt} \right). \quad (7)$$

由式(7)可见,虚假质量力数值上等于与颗粒同体积的流体质量附着在颗粒上作加速运动时的惯性力的一半。当  $\rho \ll \rho_p$  时,虚假质量力和颗粒惯性力之比是很小的,特别是当相对运动加速度不大时,虚假质量力就可以不予考虑。

正常情况下颗粒的受力图如图 1 所示。

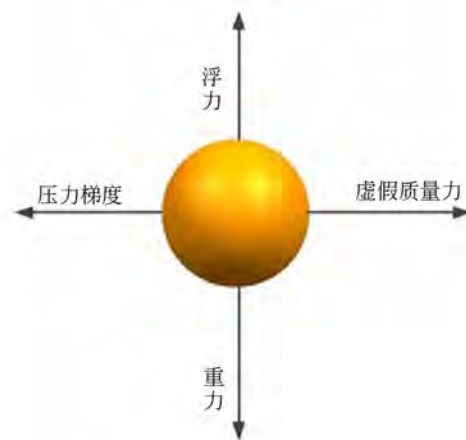


图 1 颗粒受力图

Fig. 1 Force diagram of particle

## 2.6 Basset 力

当颗粒在静止的粘性流体中以任意速度做直线运动时,颗粒不但受粘性阻力和虚假质量力的作用,还受到一个瞬时流动阻力的作用,这个力与流型连续不断调整有关,取决于运动的历程,其表达式为:

$$F_B = \frac{3}{2} d_p^2 \sqrt{\pi \rho \mu} \int_{-\infty}^t \frac{du - du_p}{\sqrt{t - \tau}} d\tau, \quad (8)$$

式中,  $\mu$  为流体粘度, Basset 力只发生在粘性流体中, 并且与流动的不稳定性有关, 当固相密度远大于液相密度时, Basset 力和颗粒惯性力之比很小, 可以忽略不计。

## 2.7 曳力

流体与固体颗粒之间有相对运动时, 将发生动量传递。颗粒表面对流体有阻力, 流体则对颗粒表面有曳力。阻力与曳力是一对作用力与反作用力。由于颗粒表面几何形状和流体绕颗粒流动的流场均较复杂, 因此流体与颗粒表面之间的动量传递规律远比在固体壁面上要复杂得多。本文通过引入曳力系数来对曳力进行分析, 通过 Stokes 定律、Oseen 公式以及 Newton 公式来表达。

固相相对雷诺数  $Re_p$  定义如式(9)所示:

$$Re_p = \frac{\rho_l |u_l - u_p| d_p}{\mu_l}, \quad (9)$$

在 Stokes 定律中, 曳力系数如式(10)所示:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} Re_p < 1, \quad (10)$$

在 Oseen 公式中, 曳力系数如式(11)所示:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left(1 + \frac{3}{16} Re_p\right), \quad (11)$$

在 Newton 公式中, 曳力系数如式(12)所示:

$$C_D = 0.445 \quad 00 < Re_p < 2 \times 10^5, \quad (12)$$

则曳力  $F_d$  可用式(13)表示:

$$F_d = \frac{1}{8} C_D \pi d_p^2 \rho_l |u_l - u_p| (u_l - u_p). \quad (13)$$

## 3 磨粒流抛光的数学模型

通过分析磨粒流加工的实际情况发现, 主要研究的是固液两相流的加工试验问题, 其中, 传热

生热问题不可避免, 因此在数值分析过程中选取多相流模型: 湍流模型和传热模型进行分析。理论上颗粒浓度越高, 磨粒流中的磨粒与通道壁面接触碰撞的机会也越大, 对通道壁面磨削加工的作用也越明显。但是, 固相体积分数也不能过大, 因此合理选择固相体积分数, 能有效提高磨粒流的加工效率。在对共轨管通道模型仿真时所使用的颗粒体积分数超过了 0.1, 并且颗粒的分散均匀, 计算量小, 而且在磨粒流抛光共轨管的过程中, 磨粒流的流动属于湍流流动, 所以选取了混合模型来进行仿真。另外, 由于通道为非直线形式, 不可避免地会出现复杂的流动情况, 比如回流、对流, 同时,  $k-\epsilon$  模型还可在激活能量方程时, 计算传热。为研究磨粒流对共轨管内壁加工质量的影响, 本文选用标准的  $k-\epsilon$  模型。关于  $k$  和  $\epsilon$  的运输方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \dots G_k - \rho \epsilon \quad (14)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \dots \rho C_1 E \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}}, \quad (15)$$

式中:  $\rho$  为流体密度;  $x_i, x_j$  为各坐标分量;  $\sigma_k, \sigma_\epsilon$  为湍流动能  $k$  和耗散率  $\epsilon$  的湍流普朗特数;  $G_k$  为由平均速度梯度引起的湍流动能产生的;  $\mu_t$  为分子粘性系数;  $\mu_t$  为湍流粘性系数。

流体的粘性和流体温度有着密切的关系, 其函数关系可以表示成如下指数形式:

$$\mu = \mu_0 e^{-\lambda(t-t_0)}. \quad (16)$$

## 4 磨粒流抛光共轨管的数值模拟

### 4.1 数值模拟的物理模型及初始边界条件

共轨管这种非直线管在众多领域应用广泛, 其通道内表面的质量也决定了零件性能所能达到的高度。如图 2 所示为共轨管三维实体模型, 其中小孔直径为 4 mm, 大孔直径为 10 mm。

对共轨管模型进行非结构化六面体网格划分后, 采用进出口压力边界条件进行数值模拟, 根据实际研抛情况, 设置入口压力为 12 MPa, 出口压



图 2 共轨管三维实体模型

Fig.2 3D model of common rail pipe

力分别设置为 5、7 和 9 MPa,碳化硅磨粒的体积分数分别设置为 0.25、0.3 和 0.35。

为最大程度地保证加工结果的一致性,选择单独加工一个支路(左边第二支路)来进行仿真模拟。结合实际加工情况设定初始参数,如表 1 所示。

表 1 初始参数的选择

Tab.1 Selection of initial parameters

物理量	数值	说明
环境压力/Pa	$1.01 \times 10^5$	操作压力
液相密度 $\rho_l / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	886	常温(293.15K)
液相动力粘度 $\mu / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\mu = 0.131e^{-0.22cT}$	随加工温度变化
液相比热容 $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	2 000	
液相传热系数 $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.15	
重力加速度 $g / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	9.81	竖直方向
SiC 颗粒密度 $\rho_p / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	3 100	常温(293.15K)
SiC 颗粒传热系数 $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	120	
SiC 颗粒粘度 $\text{Pa} \cdot \text{s}$	$5 \times 10^{-6}$	较小可忽略

### 4.2 磨粒流抛光共轨管的数值模拟结果

根据共轨管的结构特性,在 YOZ 面分析磨粒流研抛效果,得到抛光过程中的温度、湍流粘度和湍流耗散率的分布云图。为清晰地显示云图,对部分云图进行了局部放大,所得到的数值分析云图如图 3~图 11(彩图见期刊电子版)所示。

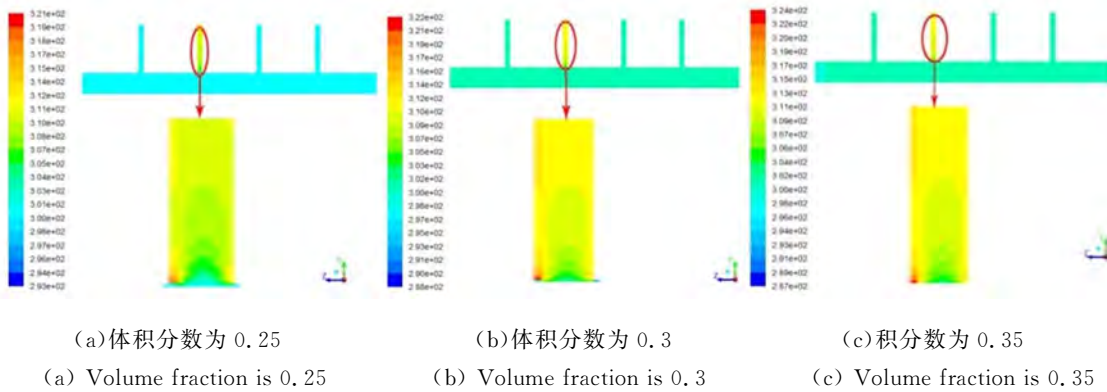


图 3 出口压力为 5 MPa,不同碳化硅体积分数对应的温度仿真云图

Fig.3 Distribution of temperature at different SiC volume fractions with outlet pressure of 5 MPa

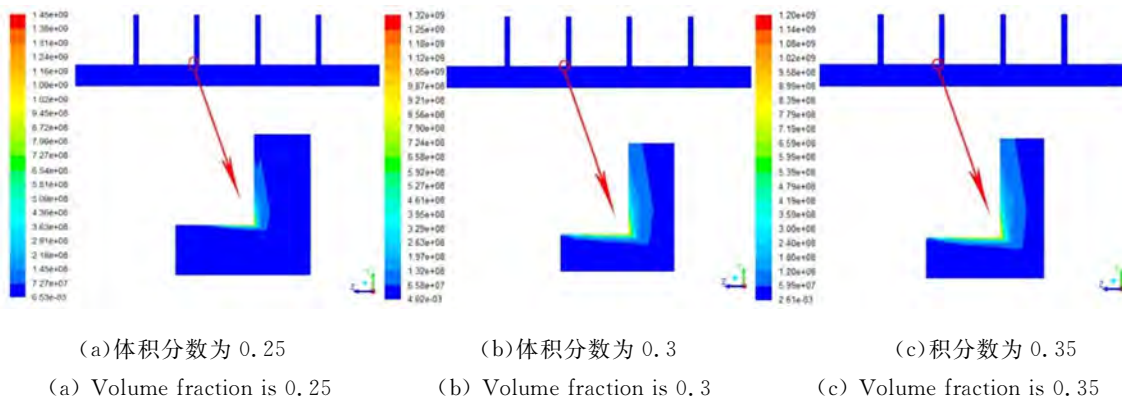
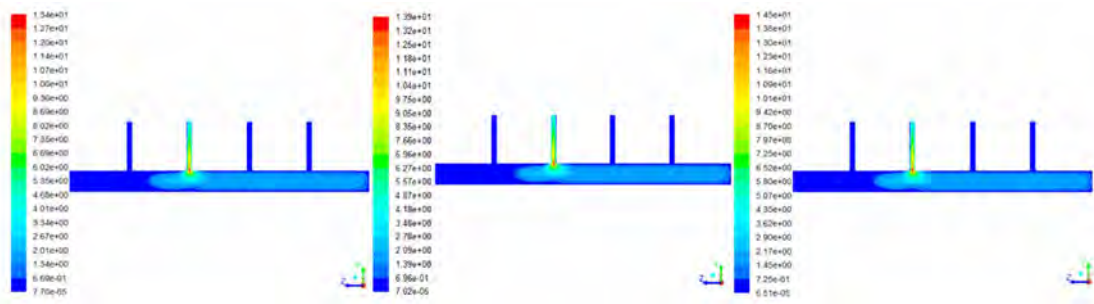


图 4 出口压力为 5 MPa,不同碳化硅体积分数时的湍流耗散率仿真云图

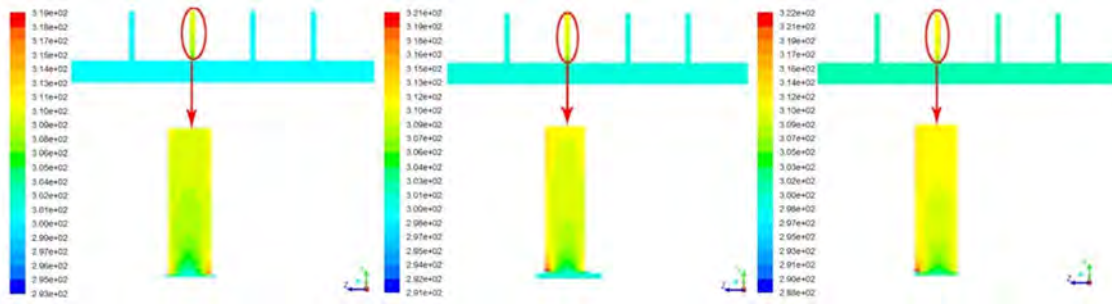
Fig.4 Distribution of turbulent dissipation at different SiC volume fractions with outlet pressure of 5 MPa



(a) 体积分数为 0.25 (b) 体积分数为 0.3 (c) 积分数为 0.35  
 (a) Volume fraction is 0.25 (b) Volume fraction is 0.3 (c) Volume fraction is 0.35

图 5 出口压力为 5 MPa,不同碳化硅体积分数的湍流粘度仿真云图

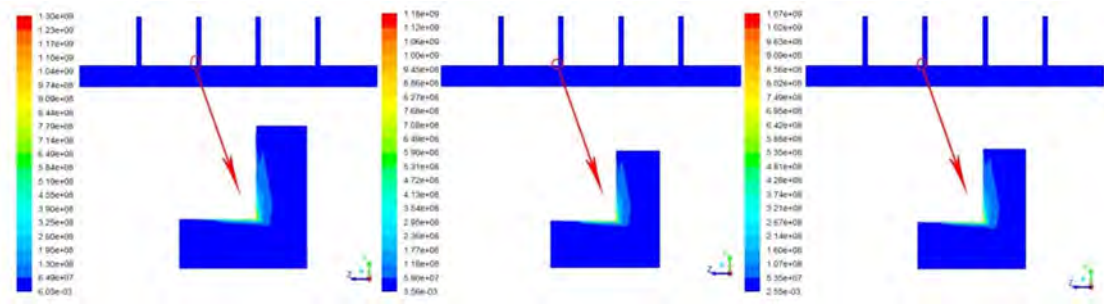
Fig. 5 Distribution of turbulence viscosity at different SiC volume fractions with outlet pressure of 5 MPa



(a) 体积分数为 0.25 (b) 体积分数为 0.3 (c) 积分数为 0.35  
 (a) Volume fraction is 0.25 (b) Volume fraction is 0.3 (c) Volume fraction is 0.35

图 6 出口压力为 7 MPa,不同碳化硅体积分数的温度仿真云图

Fig. 6 Distribution of temperature at different SiC volume fractions with outlet pressure of 7 MPa



(a) 体积分数为 0.25 (b) 体积分数为 0.3 (c) 积分数为 0.35  
 (a) Volume fraction is 0.25 (b) Volume fraction is 0.3 (c) Volume fraction is 0.35

图 7 出口压力为 7 MPa,不同碳化硅体积分数的湍流耗散率仿真云图

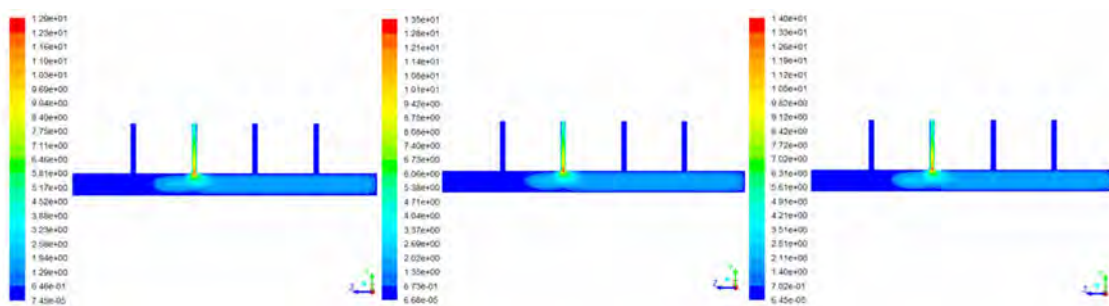
Fig. 7 Distribution of turbulent dissipation at different SiC volume fractions with outlet pressure of 7 MPa

4.2.1 共轨管温度场的仿真云图的数值分析

从图 3、图 6 和图 9 的共轨管温度仿真云图可以看出,由于磨粒流在流动磨削的过程中必然会产生热量,且温度的变化幅度主要集中在主干路到支路这一段,故温度处于增大的趋势,通道直径的瞬间变化将导致在主干路与支路交叉位置处

的温度变化最为剧烈。而温度改变直接影响的是粘度,进而影响磨粒的运动。在干路与支路的交叉位置处温度升高导致粘度降低,此处颗粒运动最剧烈,因此位于交叉孔位置的研抛、去毛刺等复杂的内部通道内壁表面的加工质量有显著提高。

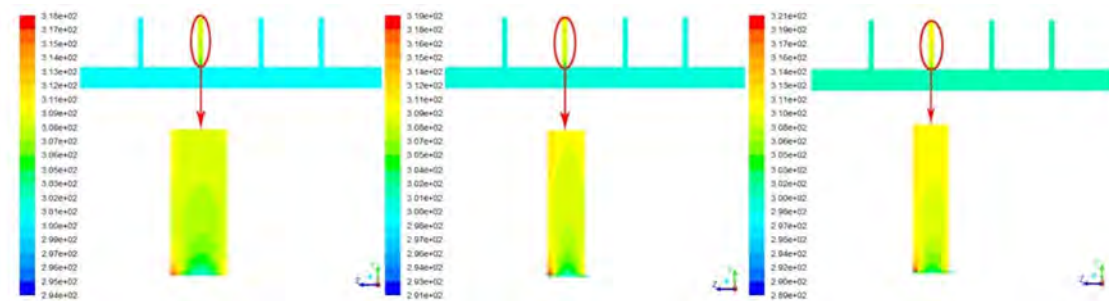
接下来,分析不同的碳化硅体积分数的仿真



(a) 体积分数为 0.25 (b) 体积分数为 0.3 (c) 积分数为 0.35  
 (a) Volume fraction is 0.25 (b) Volume fraction is 0.3 (c) Volume fraction is 0.35

图 8 出口压力为 7 MPa,不同碳化硅体积分数时的湍流粘度仿真云图

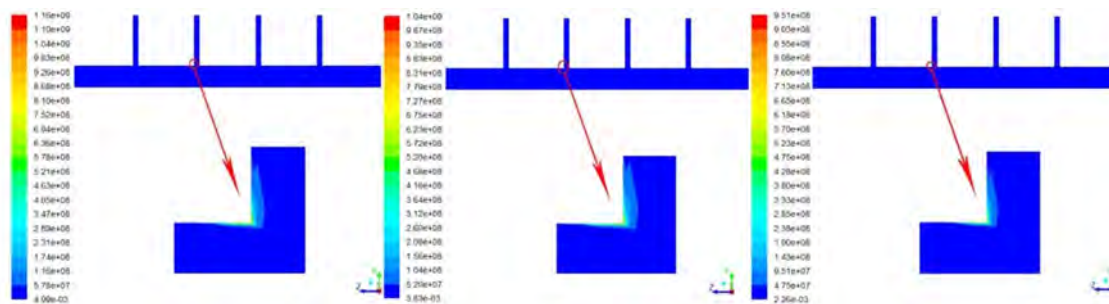
Fig. 8 Distribution of turbulence viscosity at different SiC volume fractions with outlet pressure of 7 MPa



(a) 体积分数为 0.25 (b) 体积分数为 0.3 (c) 积分数为 0.35  
 (a) Volume fraction is 0.25 (b) Volume fraction is 0.3 (c) Volume fraction is 0.35

图 9 出口压力为 9 MPa,不同碳化硅体积分数时的温度仿真云图

Fig. 9 Distribution of temperature at different SiC volume fractions with outlet pressure of 9 MPa



(a) 体积分数为 0.25 (b) 体积分数为 0.3 (c) 积分数为 0.35  
 (a) Volume fraction is 0.25 (b) Volume fraction is 0.3 (c) Volume fraction is 0.35

图 10 出口压力为 9 MPa,不同碳化硅体积分数时的湍流耗散率仿真云图

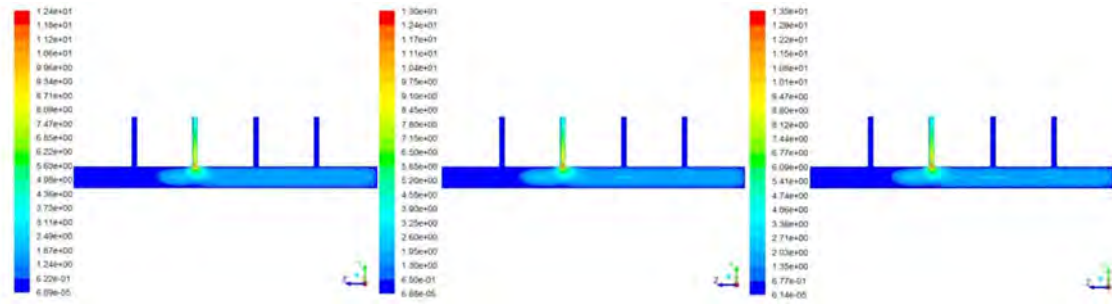
Fig. 10 Distribution of turbulent dissipation at different SiC volume fractions with outlet pressure of 9 MPa

结果,可知在相同的碳化硅体积分数下,随着出口压力的增大,干路与所加工支路的最高温度有所降低,这间接说明局部范围内特别是交叉孔处流体的运动激烈程度有减缓的趋势,但由于干路与支路的直径相差较大,所以温度的这种减缓趋势

不是特别明显。

#### 4.2.2 共轨管湍流耗散率仿真云图的数值分析

通过对图 4、图 7 和图 10 进行对比可知,在研抛过程中碳化硅磨粒在共轨管内部通道中的湍流耗散率在交叉孔处变化比较明显。在碳化硅的



(a) 体积分数为 0.25 (b) 体积分数为 0.3 (c) 积分数为 0.35  
 (a) Volume fraction is 0.25 (b) Volume fraction is 0.3 (c) Volume fraction is 0.35

图 11 出口压力为 9 MPa, 不同碳化硅体积分数时的湍流粘度仿真云图

Fig. 11 Distribution of turbulence viscosity at different SiC volume fractions with outlet pressure of 9 MPa

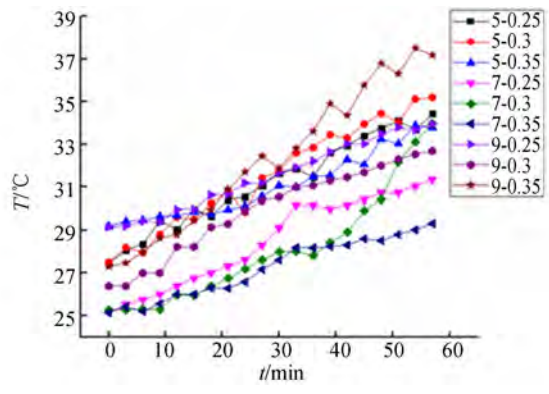


图 12 不同出口压力和 SiC 体积分数的温度变化曲线图  
 Fig. 12 Temperature variation curves of different outlet pressures and different SiC volume fractions

体积分数相同时, 随着出口压力的增加, 湍流耗散率减小, 转化率降低, 碳化硅颗粒对于内部壁面的冲击减小, 即, 颗粒的运动激烈程度变缓, 湍流动能向其他形式能量的转化速率减小, 由此可初步判断湍流耗散率越小加工效果越差。

4.2.3 共轨管湍流粘度仿真云图的数值分析

图 5、图 8 和图 11 为共轨管的湍流粘度仿真云图, 对每个图内的 (a) (b) (c) 分别进行对比可知, 交叉孔附近是湍流粘度变化程度最大的区域, 并可以看出在相同的压力边界条件下, 湍流粘度的最大值呈现减小的趋势, 即在出口压力为 5、7 和 9 MPa 的情况下, 随着碳化硅体积分数的增加, 磨料的湍流粘度逐渐增大, 从而导致碳化硅磨粒对共轨管内部壁面的磨削作用变大, 冲击力变大。

在相同的碳化硅体积分数下, 随着出口压力的增加, 共轨管内部液体相的湍流粘度逐渐减小。

由于入口压力一定, 所以在入口与出口的压力差逐渐减小的情况下, 共轨管内部液相的湍流粘度也逐渐减小。初步判断磨粒流对共轨管内部壁面的加工效果随着入口与出口压力差的增大而变好。

如图 12 所示, 对共轨管交叉口处的温度进行分析, 可以发现随着模拟的进行, 出口温度有增加的趋势, 并且压力对温度的影响并不是呈线性的, 但相同压力下, 温度随碳化硅体积分数的增加变大。最后, 综合比较出口压力和碳化硅体积分数对温度、湍流粘度和湍流耗散率的影响知, 碳化硅体积分数的改变比出口压力的改变对温度、湍流粘度和湍流耗散率的影响程度要大。初步确定在磨粒流研抛共轨管过程中, 碳化硅的体积分数要比出口压力的影响大。由此本文通过改变碳化硅体积分数来改善磨粒流研抛过程中的粘温特性, 从而实现对磨粒流研抛质量的控制。

5 磨粒流研抛共轨管试验

5.1 研抛实验设计及方案

为验证数值模拟的结果, 对磨粒流研抛共轨管的粘温特性进行实验设计, 在研抛试验中, 考虑实际加工环境以及磨料的流动性等因素, 选取碳化硅颗粒作为固相, 航空机油作为液相, 按一定比例配置所需要的磨料, 选取和仿真模型相同尺寸的共轨管, 通过正交试验设计法设计试验方案, 并利用 6σ 理论对获得的试验数据进行分析。

试验参数为共轨管的出口压力、碳化硅颗粒的目数和体积分数 3 个关键参数, 出口压力的水平因素有 5、7 和 9 MPa; 固相碳化硅颗粒的目数

为 80、100 和 120 目(目数越大颗粒的粒径越小), 体积分数为 0.25、0.3 和 0.35, 为三因素三水平的正交试验, 具体试验加工方案设计如表 2 所示。

表 2 磨粒流研抛试验方案

Tab. 2 Experiment approaches of abrasive flow polishing

	出口压力 /MPa	碳化硅的体 积分数/%	碳化硅的 目数	试验 结果
试验一	5	0.25	80	
试验二	5	0.30	100	
试验三	5	0.35	120	
试验四	7	0.25	100	
试验五	7	0.30	120	
试验六	7	0.35	80	
试验七	9	0.25	120	
试验八	9	0.30	80	
试验九	9	0.35	100	

注: 试验结果是指试验完成后对共轨管的内表面进行粗糙度的测量。

设定的磨粒流加工时间为 1 h, 采集实验数据的时间间隔为 3 min, 即一次研抛过程中共采集 20 个数据, 共进行 9 组磨粒流研抛共轨管试验。

## 5.2 试验结果

根据实验方案完成共轨管研抛实验后, 利用 MAHR 粗糙度检测仪检测共轨管内表面的表面粗糙度值, 检测结果见表 3。

表 3 共轨管粗糙度检测结果

Tab. 3 Roughness measurement values of common rail pipe

共轨管	试验结果/ $\mu\text{m}$
原件	3.653
样品 01 #	1.201
样品 02 #	1.117
样品 03 #	1.562
样品 04 #	1.273
样品 05 #	1.138
样品 06 #	1.981
样品 07 #	1.499
样品 08 #	1.172
样品 09 #	1.581

通过表 3 可以看出磨粒流研抛前的共轨管内壁表面粗糙度为 3.653  $\mu\text{m}$ , 经过磨粒流研抛后, 共轨管的内壁表面粗糙度明显降低了很多。

## 5.3 共轨管磨粒流研抛试验结果分析

综合考虑磨粒流研抛试验过程中所得到的粘温特性数据和粗糙度, 分析在磨粒流研抛共轨管的过程中, 各因素对通道内表面质量的影响, 并确定出本试验条件下的最佳加工工艺。

### 5.3.1 温度数据分析

从图 13(彩图见期刊电子版)可以看出, 样品 01 # 至样品 09 # 的温度变化曲线虽略有差异, 但整体上差异不大, 并且和图 12 中的温度变化趋势一致。分析原因可能是由于交叉孔位置处孔径突然变小, 弱化了压力变化的影响。总的来说, 通过改变出口压力, 固液两相磨粒流中碳化硅的目数和体积分数发现, 3 个参数对于最终效果的影响比较均衡。由于磨料的粘弹性会引起生热散热现象, 在加工一定时间后, 共轨管中固液两相磨料的温度趋于平缓, 生热散热达到了一种动态平衡。随着温度的升高, 固液两相磨粒流的粘度开始下降, 当温度达到一定的临界值时, 固液两相磨粒流的粘度下降到临界值, 对整个加工过程来说, 碳化硅磨粒对共轨管内壁表面的冲击和碰撞减弱, 加工效果变差。此时传热和生热基本很小, 达到动态平衡状态, 温度达到了临界值, 基本开始保持不变。

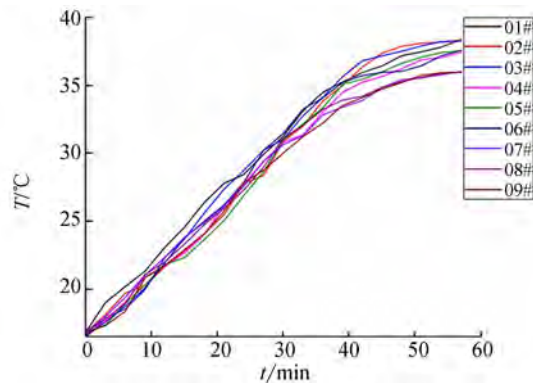


图 13 共轨管温度变化曲线

Fig. 13 Temperature variation curves of common rail pipe

### 5.3.2 粘温特性数据分析

通过粘度测量仪测得对应温度下磨料的粘度, 如图 13(彩图见期刊电子版)所示。

对图 14 共轨管的粘温特性曲线进行分析可知, 随温度的升高, 液体磨料的粘度逐渐降低, 这跟粘温特性理论<sup>[18]</sup>一致, 也证实了试验数据的合理性和科学性。深入分析可以发现粘温特性曲线变化图与温度变化图的曲线拟合程度是一致的。

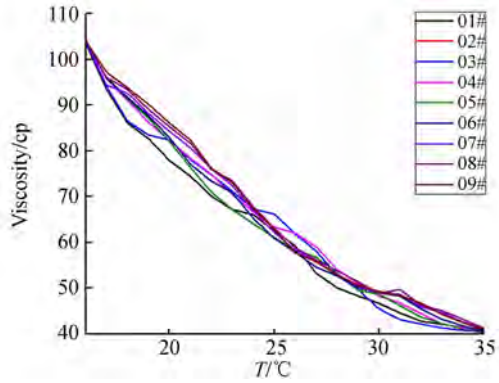


图 14 共轨管粘温特曲线变化图

Fig. 14 Viscosity-temperature variation curves of common rail pipe

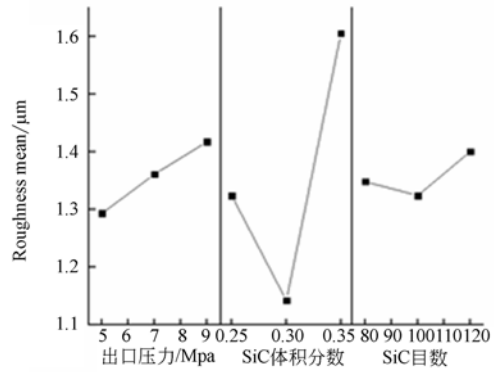


图 15 共轨管粗糙度主效应曲线图

Fig. 15 Roughness main effect curve of common rail pipe

因此只能定性地分析这 3 个参数(出口压力、碳化硅磨粒的目数和体积分数)对于加工的影响,具体的影响关系需要通过测定试验完成后共轨管的表面粗糙度确定。

5.3.3 粗糙度数据分析

通过由 MAHR 粗糙度检测仪测得的研抛后的共轨管表面粗糙度的数据,分析各参数对磨粒流加工质量的影响。通过 6σ 理论,可以得到关于表面粗糙度的 3 个因子的小型均值响应表,如表 4 所示。

通过对均值响应表的分析,可以看到各因子各水平平均值的平均值和极差(Delta)。从极差大小排序中可知:在磨粒流研抛共轨管过程中,对最终的加工质量影响最大的是碳化硅的体积分数,其次是出口压力,最后是碳化硅的目数。经过计算,得到了共轨管粗糙度的主效应图,如图 15 所示。

增大,当碳化硅的体积分数为 0.3 时,共轨管的内壁表面粗糙度最小,而碳化硅的目数对于共轨管最终的加工质量的影响与另外两个因素相比不是很突出。由以上分析可知,在研抛过程中,碳化硅的体积分数对最终的加工效果影响最大,出口压力次之,碳化硅的目数的影响略小。

通过对共轨管内壁表面的粗糙度与出口压力,碳化硅的体积分数和碳化硅的目数的曲面图和等值线图进行分析,可得出磨粒流研抛的最佳加工工艺参数。

表 4 均值响应表

Tab. 4 The mean response table

水平	出口压力/MPa	碳化硅的体积分数	碳化硅的目数
1	1.293	1.324	1.348
2	1.361	1.142	1.324
3	1.417	1.605	1.400
Delta	0.124	0.463	0.076
排序	2	1	3

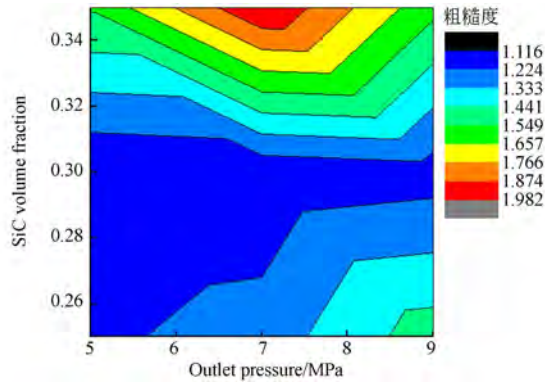


图 16 粗糙度与出口压力、碳化硅的体积分数间的等值线图

Fig. 16 Contour map between roughness, outlet pressure and SiC volume fraction

图 16~18 给出了 3 个参数对共轨管表面粗糙度的影响情况。通过主效应图可以看出,随着出口压力的增加,共轨管内壁表面的粗糙度逐渐

图 16(彩图见期刊电子版)显示当出口压力一定时,工件的粗糙度随着体积分数的增加显著变小;当碳化硅体积分数一定时,出口压力增加,粗糙度的变化并不是线性的。综合分析可知,出口压力越小,碳化硅的体积分数越小,所得到的工件粗糙度越小,工件最终研抛质量也就越高。因

此,当出口压力为 5~6 MPa,碳化硅的体积分数为 0.25 左右时,研抛效果最好。

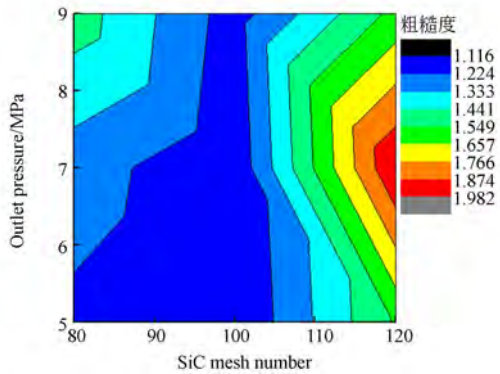


图 17 粗糙度与出口压力、碳化硅的目数间的等值线图

Fig. 17 Contour map between roughness, outlet pressure and SiC mesh number

图 17(彩图见期刊电子版)显示,当出口压力一定时,工件的粗糙度基本是随着碳化硅目数的变大,而显著变小的,但当压力在 7MPa 以上时,碳化硅目数的增大并未导致粗糙度的减小;当碳化硅目数一定时,出口压力增加,粗糙度的变化并不是线性的,甚至不变。综合分析可知,出口压力越小,碳化硅的目数越小,最终的表面粗糙度越小,加工质量越好。从图中可以看出,当出口压力为 5 MPa,碳化硅的目数为 80 左右时,最终的加工效果最好。

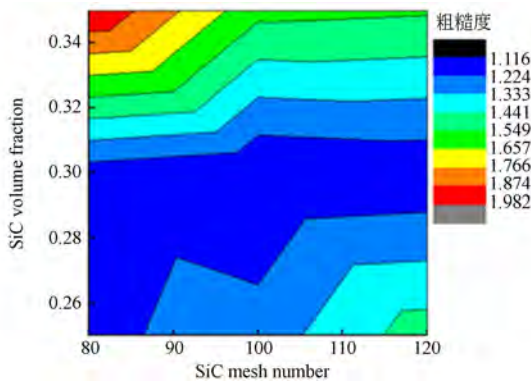


图 18 粗糙度与碳化硅的目数、碳化硅的体积分数的等值线图

Fig. 18 Contour map between roughness, SiC mesh number and volume fraction

从图 18(彩图见期刊电子版)可以看出,当碳化硅目数在一定范围内时,工件的粗糙度随着体积分数的增加而显著变小;当碳化硅体积分数一

定,碳化硅目数增加时,粗糙度的变化并不是线性的。综合来看,碳化硅的体积分数越小,碳化硅的目数越小,最终的粗糙度越小,也就是加工质量越好。从图中还可以看出,当碳化硅的体积分数为 0.25,碳化硅的目数为 80 时,最终的加工效果最好。

通过对以上等值线图进行综合分析得到,在磨粒流研抛共轨管过程中,碳化硅的体积分数对最终的研抛效果影响最大,出口压力次之,碳化硅的目数的影响略小,因此磨粒流研抛共轨管过程中的最佳工艺是出口压力为 5 MPa,碳化硅的体积分数为 0.25,碳化硅的目数为 80。

### 5.4 表面粗糙度预测模型的建立

根据 6σ 理论对实验数据进行拟合发现,在对单因子进行均值分析时,粗糙度与碳化硅体积分数的二次回归分析模型是合理的,如表 5 所示。

表 5 二次回归分析:粗糙度与碳化硅的体积分数方差分析  
Tab. 5 Quadratic regression analysis; variance analysis of roughness and SiC volume fraction

来源	自由度	SS	MS	F 值	P 值
回归	2	0.325 958	0.162 979	17.21	0.003
误差	6	0.056 809	0.009 468		
合计	8	0.382 768			

由表 5 可得到模型的相关系数和 S 值:  $S=0.097\ 304\ 8$ ,  $R-Sq=85.2\%$ 。通过对表 5 粗糙度与碳化硅体积分数进行二次回归拟合模型分析看,二次回归模型的 P 值远远小于 0.05,而且 R-Sq 的值较合理,误差小。共轨管的残差图如图 19 所示。

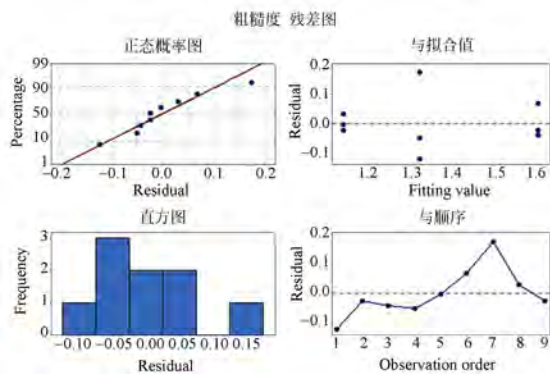


图 19 共轨管粗糙度残差图

Fig. 19 Residual plot of roughness for common rail piper

从图 19 可以看出残差图均正常,经过残差诊断,所建立的模型比较合理。

通过对共轨管内壁表面粗糙度与出口压力、碳化硅体积分数和碳化硅目数进行的线性和二次多项式的回归拟合模型的方差分析,获得表面粗糙度与体积分数的二次回归拟合模型:

$$R_a = 11.90 - 74.55V + 128.9V^2. \quad (16)$$

式中:  $R_a$  为共轨管加工件的表面粗糙度;  $V$  为碳化硅的体积分数。

## 6 结 论

通过对磨粒流研抛过程中的温度、湍流粘度

和湍流耗散率云图分析可以发现,磨粒流研抛对于复杂的交叉孔处的圆角研抛及去毛刺效果显著,体积分数对研抛质量的贡献度要大于出口压力和颗粒粒径。

从粘温特性的角度分析了出口压力、碳化硅的体积分数和目数对研抛质量的影响,建立了磨粒流研抛的表面粗糙度与体积分数的二次回归方程,可为磨粒流研抛质量控制提供理论支持。

通过磨粒流研抛试验验证知,在本试验条件下,磨粒流研抛共轨管的最优参数组合为出口压力 5MPa,碳化硅体积分数 0.25,碳化硅目数为 80#,本试验的研究结果可为磨粒流研抛的实际应用提供技术支撑。

### 参考文献:

- [1] 李俊焯,许颖,杨立峰,等. 非直线管零件的磨粒流加工实验研究[J]. 中国机械工程,2014,25(13): 1729-1734.
- LI J Y, XU Y, YANG L F, et al.. Analysis of non-linear tube abrasive flow machining experiments [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25 (13):1729-1734. (in Chinese)
- [2] LI J Y, LIU W N, YANG L F, et al.. Study of abrasive flow machining parameter optimization based on taguchi method[J]. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2013, 10(12): 2949-2954.
- [3] JAIN R K, JAIN V K. Optimum selection of machining conditions in abrasive flow machining using neural network[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 108(1): 62-67.
- [4] RAJENDRA K J, VIJAY K J. Stochastic simulation of active grain density in abrasive flow machining[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 152: 17-22.
- [5] SUNIL J, VIJAY K. J. Design and development of the magnet or heological abrasive flow finishing (MRAFF) process [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44: 1019-1029.
- [6] SUNIL J, VIJAY K. J. Modeling and simulation of surface roughness in magnet or heological abrasive flow finishing ( MRAFF ) process [J]. *Wear*, 2006, 261: 856-866.
- [7] SUSHIL M, VINOD K, HARMESH K. Experimental investigation and optimization of process parameters of Al/SiC MMCs finished by abrasive flow machining [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, 30(7): 902-911.
- [8] VENKATESH G, SHARMA A K, SINGH N, et al.. Finishing of bevel gears using abrasive flow machining [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 97: 320-328.
- [9] VENKATESH G, SHARMA A K, KUMAR P. On ultrasonic assisted abrasive flow finishing of bevel gears [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 89: 29-38.
- [10] SHARMA A K, VENKATESH G, RAJESHA S, et al.. Experimental investigations into ultrasonic-assisted abrasive flow machining ( UAAFM ) process [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 80(1-4): 477-493.
- [11] BREMERSTEI T, POTTHOFF A, MICHAELIS A, et al.. Wear of abrasive media and its effect on abrasive flow machining results [J]. *Wear*, 2015, 342:44-51.
- [12] KLOCKE F, SOO S L, KARPUSCHEWSKI B, et al.. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2015, 64(2): 581-604.
- [13] BRAR B S, WALIA R S, SINGH V P. Electrochemical-aided abrasive flow machining (ECA2FM) process: a hybrid machining process [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79(1-4): 329-342.
- [14] 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.
- JI SH 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)
- [15] 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)
- [16] 丁金福, 刘润之, 张克华, 等. 磨粒流精密光整加工的微切削机理[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(12): 3324-3331.
- DING J F, LIU R ZH, ZHANG K H, *et al.*. Micro cutting mechanism of abrasive flow precision machining[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3324-3331. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] SUH N P, SAKA N. *Fundamentals of Tribology* [M]. The MIT Press, 1978.

#### 作者简介:



李俊辉(1981—),男,吉林农安人,副教授,博士,主要研究方向为精密加工、微摩擦及多相流技术。E-mail: ljy@cust.edu.cn



胡敬磊(1990—),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向为微摩擦及多相流技术。E-mail: 1340113539@qq.com



董 坤(1989—),男,山东青岛人,硕士研究生,主要研究方向为微摩擦及多相流技术。E-mail: dongkun0908@163.com