

送粉气流对冷喷涂流场及粒子速度影响的数值模拟

唐文勇^{1,2}, 陈清华^{1,2}, 陈子云^{1,2}, 张学清^{1,2}, 柴伟伟^{1,2}, 贺志强^{1,2}

(1. 重庆大学低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 400030, 重庆;

2. 重庆大学动力工程学院, 400030, 重庆)

摘要: 通过建立二维数值模型, 利用计算流体力学软件进行数值模拟, 研究了送粉气流压力和温度对冷喷涂过程中流场及粒子速度的影响. 结果表明: 喷涂中不可忽略送粉气流对流场及粒子速度的影响; 为将粉末注入喷管, 送粉气流的出口压力不能小于出口处的主气流压力, 但增大送粉气流压力会使得进入喷管渐缩段的送粉冷气体流量增大, 从而排挤高温主气流, 同时也降低喷管气体流动的滞止焓, 导致喷管喉部声速减小, 不利于粒子加速; 增加主气流温度对粒子加速效果不明显, 而增加送粉气流温度可有效提高粒子撞击基板的速度, 进而提高粉末粒子的沉积效率.

关键词: 冷喷涂; 送粉气流; 计算流体力学; 数值模拟

中图分类号: TG174.442 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)07-0082-05

Numerical Simulation for Effect of Powder Carrier Gas on Flow Field and Particle Impact Velocity in Cold Spraying

TANG Wenyong^{1,2}, CHEN Qinghua^{1,2}, CHEN Ziyun^{1,2}, ZHANG Xueqing^{1,2},

CHAI Weiwei^{1,2}, HE Zhiqiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Low-Grade Energy Utilization Technologies and Systems of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: A two-dimensional numerical model is established and numerical simulation with computational fluid dynamics(CFD) software FLUENT is conducted to investigate the effect of the powder deliver gas on flow field and particle velocity inside and outside supersonic nozzle in cold spraying process. It is found that the powder deliver gas with higher pressure and lower temperature than main stream gas exerts significant effects on the flow field and the particle velocity. The inlet pressure of the powder deliver gas must be higher than that of the main stream gas to inject the particles into the nozzle. However, increasing the pressure of the powder deliver gas will result in the increase in the flow rate of the cold powder deliver gas to squeeze out the high temperature main gas. Then the stagnation enthalpy of the gas in the nozzle also decreases, which leads to the reduction in the speed of sound at the nozzle throat and impedes the acceleration of particles. At this time, the increase in the main gas temperature does not significantly affect the acceleration of particles, while the increase in the temperature of powder deliver gas effectively improves the particles' impact velocity and deposition efficiency.

Keywords: cold spraying; powder deliver gas; computational fluid dynamics; numerical simulation

冷喷涂是近年来新发展起来的一种高效的材料表面低温沉积技术. 在冷喷涂过程中,粉末粒子(粒径通常为 $1\sim 50\ \mu\text{m}$)由流经缩放喷管的超声速气流加速,以高速($300\sim 1\ 200\ \text{m/s}$)撞击基板产生剧烈塑性变形,沉积在材料表面形成涂层^[1-2]. 粒子在基板上沉积时的温度远低于喷涂材料的熔点,从而大大减小或消除了传统热喷涂过程中存在的诸如材料高温氧化、蒸发、熔化、结晶、残余热应力、脱落及气体释放等缺点. 此外,该技术还具有喷涂效率高、涂层气孔率低、喷涂粉末可回收利用等优点,具有广阔的应用前景和实用价值.

粒子撞击基板时,只有超过其临界沉积速度才会沉积,从而形成涂层,因此,粒子撞击速度是冷喷涂的关键因素,直接影响涂层的沉积效率及质量^[3]. 为了有效地提高粒子撞击基板的速度,需要了解影响粒子撞击基板速度的各种因素. 目前,人们主要运用数值模拟来分析喷涂参数(主要是载气体温度、压力及喷涂距离)对流场和粒子速度的影响,并对喷管进行优化. 例如:Champagne 等^[4]利用一维等熵气体动力学计算,分析了冷喷涂过程中气体和粒子速度随喷涂参数的变化关系;Li 等^[5-6]应用计算流体力学,通过对喷管尺寸的优化,获得了更大的粒子速度;Ning 等^[7]讨论了低压冷喷涂系统中粒子的加速特性. 此外,送粉位置的不同也会对粒子速度及温度产生影响. Klinkov 等^[8]通过对不同的材料粉末选用不同的送粉位置来实现多组分涂层的制备,经数值计算发现,不同送粉位置对于流动粒子温度的影响十分明显.

以上研究只考虑了从送粉器出来的粉末粒子,但却忽略了将粒子带出送粉器的气流(本文称为送粉气流). 在冷喷涂过程中,送粉气流将粉末粒子从送粉器中带出,并与经过预热的主气流一同进入缩放喷管加速(如图 1 所示). 为使粉末粒子能够进入喷管,送粉气流的压力不能低于主气流压力,而没有经过加热的送粉气流的温度远低于经过预热的主气流的温度,因此,高压低温的送粉气流进入喷管后对喷管内整个流场的影响不能忽略. 本文将分析送粉气流对冷喷涂中流场及粒子速度的影响,利用计算流体力学(CFD)软件 FLUENT 进行数值模拟,并对相关结果进行讨论.

1 数值分析模型

喷管的几何结构、计算区域及边界条件如图 2 所示. 由于整个喷管模型是轴对称结构,因而只需要

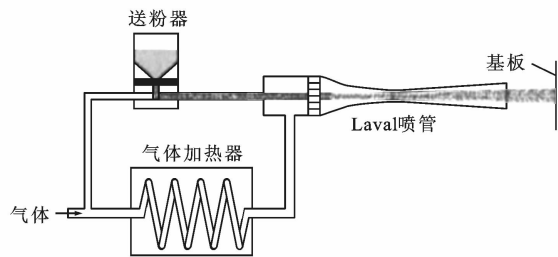


图 1 典型冷喷涂过程示意图

对轴对称二维模型的一半区域进行数值模拟即可. 喷管进口、喉部和出口的直径分别为 14 mm 、 2 mm 和 6 mm , 渐缩段和渐扩段的长度分别为 20 mm 和 150 mm , 喷涂距离(喷管出口到基板间的距离)设定为 30 mm . 送粉口位于喷管进口处, 取送粉管直径为 1.8 mm , 长度为 5 mm , 主气流和送粉气流均为空气, 粉末材料为铜.

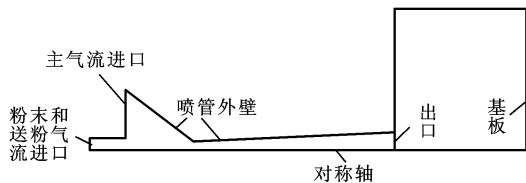


图 2 喷管 1/2 二维模型的几何结构、计算区域及边界条件

模拟中,流体被认为是理想的且可压缩的,粒子为连续气相中的离散相. 采用 Yakhot 等^[9]提出的重整化群(RNG) $k\epsilon$ 模型描述气体的湍流流动,相应的控制微分方程的张量形式如下:

质量方程

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

能量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i c_p T) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_T \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \right] + \\ &\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

湍动能方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\alpha_T \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \right] + \\ &\mu_t S^2 - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (4)$$

湍动能耗散方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) \right] +$$

$$C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \mu_t S^2 - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R$$

(5)

可压缩理想气体的状态方程

$$p/\rho = RT$$

(6)

模拟中,粒子可以看成连续气相中的离散相,在FLUENT中通过积分拉氏坐标系下的颗粒作用力微分方程,来求解离散相颗粒的轨道.忽略重力对粒子的影响,颗粒的作用力平衡方程在笛卡尔坐标系下的形式(x 方向)为

$$\frac{du_p}{dt} = F_d(u - u_p)$$

(7)

式中: u 和 u_p 分别为流体速度和粒子速度; $F_d(u - u_p)$ 为单位质量粒子所受的曳力,且

$$F_d = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D Re}{24}$$

(8)

其中 μ 为流体运动黏度, ρ 和 ρ_p 分别为流体和粒子的密度, D_p 是粒子直径, Re 是相对雷诺数,其定义为

$$Re = \frac{\rho D_p |u - u_p|}{\mu}$$

(9)

C_D 为阻力系数,计算公式为

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}$$

(10)

对于球形颗粒,在一定的雷诺数范围内 a_1 、 a_2 和 a_3 为常数^[10].

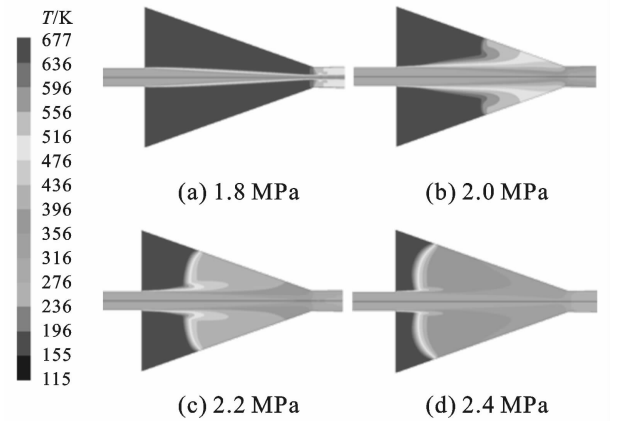
计算中对控制微分方程中的对流项采用二阶迎风方案进行离散,对近壁面的流动采用非平衡壁面函数来处理,计算区域的网格采用四边形结构化网格.用不同的网格数检验了网格无关性,测试表明,对于所涉及的模型,30万个网格单元已足以消除网格密度的影响.

2 结果和讨论

2.1 送粉气流对气体流场的影响

在冷喷涂过程中,送粉气流的进口压力不应小于主气流的进口压力,否则主气流会倒流进入送粉管,出现送粉管堵粉现象.在模拟中,主气流进口温度和压力分别设定为 673 K 和 1.8 MPa. 首先分析当送粉气流进口温度为常温时,进口压力对冷喷涂过程中喷管内气体速度场、温度场的影响. 图 3 给出了送粉气流进口压力对喷管渐缩段气体温度的影响:当送粉气流和主气流的进口压力相同时,送粉冷气流在出口处的速度与高温主气流的速度相同,两股气流都可以穿过喉部进入渐扩段(见图 3a);随送粉气流压力增加,使得进入渐缩段的送粉冷气体流

量增加,送粉冷气流在出口处的速度将大于高温主气流的速度,从而出现类似于射流的现象,即渐缩段对称轴周围的低温气流区域扩大(见图 3b). 与大空间自由射流不同,超声速缩放喷管中的气体流量取决于喷管喉部的声速,送粉冷气体流量增加必将排挤高温主气流,使高温主气流流量(M_2)减小,并且喷管气体流动的滞止焓也将随着下降,从而降低喷管喉部的声速及喷管中的气体总流量,这将进一步排挤高温主气流. 当进一步增加送粉气流压力时,这一现象更为明显(见图 3c). 图 3d 是送粉气流压力增加到 2.4 MPa 时,高温气体被排挤的状况. 从表 1 也可以看出,随着送粉气流进口压力(p_1)的增加,进入喷管的送粉气流质量流量(M_1)急剧增加:当送粉气流进口压力与主气流进口压力(p)相等为 1.8 MPa 时,送粉气流质量流量与喷管内总气流质量流量(M)的比值仅为 2.1%;当送粉气流进口压力增加到 2.0 MPa 时,该比值上升为 57.1%;进一步增加送粉气流压力到 2.4 MPa 时,该比值高达 84.2%.



主气流进口温度为 673 K, 压力为 1.8 MPa,
送粉气流进口温度为 300 K

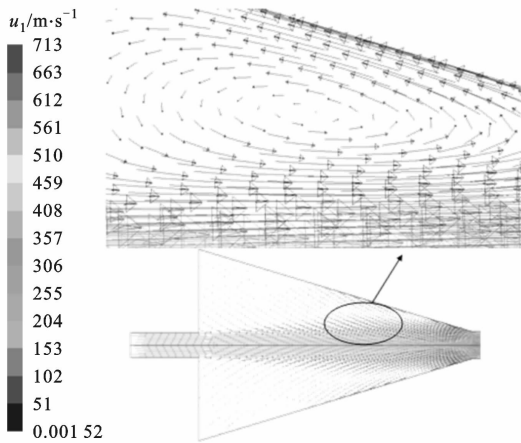
图3 不同送粉气流进口压力下喷管渐缩段的气体温度分布

表 1 不同送粉气流压力下喷管内的气流质量流量

p_1 /MPa	M /g · s ⁻¹	M_1 /g · s ⁻¹	M_2 /g · s ⁻¹	$M_1 \cdot M^{-1}/\%$
1.8	15.84	0.34	15.50	2.1
2.0	15.39	7.33	8.06	57.1
2.4	14.97	12.61	2.36	84.2

图 4 给出了送粉气流进口压力为 2.2 MPa 时喷管渐缩段内的气体速度矢量图. 图中显示,在喷管渐缩段中心线两侧存在旋涡. 这是因为缩放喷管渐缩段有限空间的特殊性所致,即在渐缩段入口处,送

粉气流管截面远小于渐缩段入口截面,当送粉冷气压力大于高温主气流压力时,送粉气流出口形成的射流类似于大空间自由射流,送粉射流卷吸高温主气流,但是由于渐缩段空间变小,同时受到喷管喉部流量的限制,从而导致射流外部气体回流形成旋涡,造成高温主气流被送粉冷气流排挤,以及高温主气流在喷管总气体流量中的比例大幅度减小。



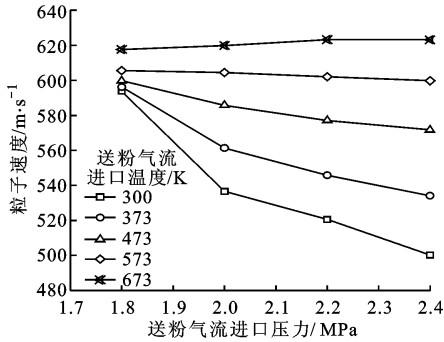
主气流进口温度为 673 K,压力为 1.8 MPa;
送粉气流进口温度为 300 K,压力为 2.2 MPa

图 4 喷管渐缩段气体速度矢量图

2.2 送粉气流对粒子撞击速度的影响

为形成有效沉积,冷喷涂中的一个重要条件是粒子撞击基板时的速度必须达到粒子的临界沉积速度.图 5 给出了主气流进口温度为 673 K、压力为 1.8 MPa 时,直径 10 μm 的粒子撞击基板的速度随送粉气流进口压力和温度变化的情况.从图中可看出,当主气流参数一定时,改变送粉气流参数对粒子撞击基板的速度影响显著.当送粉气流为常温 300 K 时,随着送粉气流压力的增加,粒子撞击基板的速度减小;当送粉气流压力与主气流压力相等为 1.8 MPa 时,粒子速度最大为 594 m/s,大于文献[3]给出的铜粉末临界沉积速度值 570 m/s;当增加送粉气流压力到 2.0 MPa 时,喷管内送粉冷气体所占的份额增加,此时粒子撞击基板的速度为 535 m/s;当送粉气流压力为 2.4 MPa 时,粒子撞击基板的速度仅为 498 m/s,此时粒子均不能沉积在基板上.这是因为增大送粉气流压力使得进入渐缩段的送粉冷气体流量增大,从而排挤了高温主气流,同时也降低了喷管气体流动的滞止焓,导致喷管喉部声速减小,喷管气流流速下降不利于粒子加速.另一方面,增加送粉气流温度可使滞止焓以及喷管喉部声速下降的幅度减小,有利于提高粒子撞击基板的速度,而当送粉

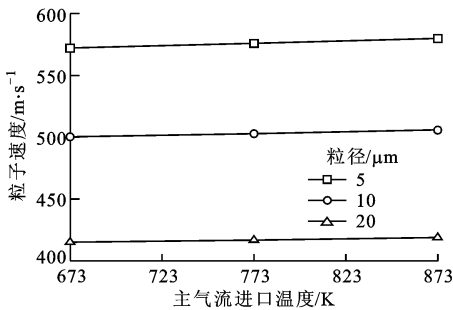
气流温度达到 673 K,即与主气流温度相同时,则对滞止焓以及喷管喉部声速没有影响。



主气流进口温度为 673 K,压力为 1.8 MPa

图 5 直径 10 μm 粒子撞击基板的速度随送粉气流进口压力和温度的变化

图 6 显示了送粉气流温度为 300 K、压力为 2.4 MPa,主气流压力为 1.8 MPa 时,不同粒径粉末撞击基板的速度随主气流温度的变化情况.从图中可以看出,粒子撞击基板的速度随主气流温度增加基本保持不变,这时送粉气流流量与主气流流量之比为 5.33 : 1,由于主气流流量占喷管总流量的比例很小,提高主气流的温度对提高喷管气体流动的滞止焓不明显,所以加热主气流并不能有效提升粒子速度。



送粉气流温度为 300 K、压力为 2.4 MPa,主气流压力为 1.8 MPa

图 6 不同粒径粉末撞击基板的速度随主气流温度的变化

3 结 论

本文利用数值方法,主要讨论了送粉管出口位于缩放喷管进口处的冷喷涂系统中,送粉气流参数对喷管内气体流场及粒子撞击基板速度的影响,得出以下结论。

(1)冷喷涂过程中应控制送粉气流的压力,使其稍大于(理想状况是等于)主气流进口压力.送粉气流进口压力超过主气流进口压力过多时,会使得进

入渐缩段的送粉冷气体流量增大,从而排挤高温主气流,同时也降低了喷管气体流动的滞止焓,导致喷管喉部声速减小,因而不利于粒子加速,并且此时提高主气流温度对提高粒子速度不明显。

(2)在不改变喷涂粉末物性的前提下,对送粉气体进行预热将有效提高粒子撞击基板时的速度,从而提高沉积效率。

参考文献:

- [1] ALKIMOV A P, PAPYRIN A N, KOSAREV V F, et al. Gas dynamic spraying method for applying a coating: US, 5302414 [P]. 1994-04-12.
- [2] KOSAREV V F, KLINKOV S V, ALKHIMOV A P, et al. On some aspect of gas dynamics of the cold spray process [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2003, 12(2): 265-281.
- [3] ASSADI H, GARTNER F, STOLTENHOFF T, et al. Bonding mechanism in cold gas spraying [J]. Acta Materialia, 2003, 51 (15): 4379-4394.
- [4] CHAMPAGNE V K, HELFRITCH D J, LEYMAN P F, et al. The effects of gas and metal characteristics on sprayed metal coatings [J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2005, 13

(7): 1119-1128.

- [5] LI Wenya, LI Changjiu. Optimal design of a novel cold spray gun nozzle at a limited space [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2005, 14(3): 391-396.
- [6] LI Wenya, LIAO Hanlin, WANG Hongtao, et al. Optimal design of a convergent-barrel cold spray nozzle by numerical method [J]. Applied Surface Science, 2006, 253(2): 708-713.
- [7] NING Xianjin, WANG Quansheng, MA Zhuang, et al. Numerical study of in-flight particle parameters in low-pressure cold spray process [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(6): 1211-1217.
- [8] KLINKOV S V, KOSAREV V F, SOVA A A, et al. Deposition of multi component coatings by cold spray [J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202 (24): 5858-5862.
- [9] YAKHOT Y V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence: basic theory [J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 3-51.
- [10] MORSE S A, ALEXANDER A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 55(2): 193-208.

(编辑 葛赵青)