

冷喷涂中氮和氦混合气体对颗粒加速作用的模拟研究

Numerical Investigation on Acceleration of Gaseous Mixture of Nitrogen and Helium on Particles During Cold Spraying

巫湘坤, 周香林, 王建国, 张济山

(北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

WU Xiang-kun, ZHOU Xiang-lin, WANG Jian-guo, ZHANG Ji-shan

(State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

摘要: 采用 FLUENT 软件数值模拟氮和氦混合气体在拉伐尔喷管内对颗粒的加速过程, 并与一维等熵定常流动理论值进行比较, 同时研究混合气体中氦气含量对喷管出口处气体以及颗粒的速度和温度的影响。结果表明: 喷管中气体参数的模拟值和一维理论值比较吻合, 可以预计颗粒的出口参数, 指导冷喷涂工艺。随着混合气体中氦气含量的升高, 气体和颗粒的出口速度不断提高, 温度不断降低, 但速度和温度的变化率不断减小, 在氮气中加入少量氦气可以提高气体和颗粒的出口速度, 同时避免了全部使用氦气加速时的高成本。

关键词: 冷喷涂; 混合气体; 拉伐尔喷管; 数值模拟

中图分类号: TG17; O354 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)08-0012-04

Abstract: The acceleration of the gaseous mixture of nitrogen and helium on particles in the de-Laval nozzle was analyzed using FLUENT software, and numerical results of gas flow were compared with one-dimensional steady isentropic theoretical ones. Moreover, the effects of the helium content of gaseous mixture on the gas and particles velocity and temperature in the nozzle exit were studied. The results show that the numerical values are similar to the theoretical ones, therefore numerical simulation can be expected to determine the process parameters to guide the cold spraying process. In addition, with the helium content in the gaseous mixture increasing, the gas and particles velocity increase, but temperature is lower, however, the rate of change of velocity and temperature decrease. When nitrogen with a small amount of helium gas is used as acceleration gas, particles velocity in the nozzle exit increases while the consumption of helium is reduced.

Key words: cold spraying; gaseous mixture; de-Laval nozzle; numerical simulation

冷气动力学喷涂(简称冷喷涂)工艺制备涂层时, 颗粒碰撞速度是颗粒能否有效结合形成涂层以及沉积层质量优劣的关键因素, 只有当碰撞速度超过某一临界值时, 颗粒才能在基板表面形成沉积层^[1-3]。而粉体颗粒是利用高压预热气体经拉伐尔喷管加速到超音速的, 大量研究表明^[4-7], 颗粒速度受到喷枪结构、工作气体的压力、预热温度、种类等众多因素影响。工作气体入口压力越大, 预热温度越高, 气体对颗粒的加速作用越显著, 喷管出口处颗粒速度越大, 利于制备性能优异的涂层。但一般的送粉器能够承受的最大压力小于 3.5 MPa(气体压力不能太高)。而气体预热温度太高时, 虽然利于颗粒加速, 却会引起氧化、相变等现象, 从而失去冷喷涂所具有的“冷”特性, 一般情况下, 气体

预热温度不超过 600℃。氦气分子量小且为单原子气体, 对颗粒的加速效果优于氮气, 在较低的气体入口压力条件下, 气体和喷涂颗粒就能获得很高的出口速度, 因此, 在制备一些硬涂层时, 如非晶^[8]、CoNiCrAlY^[9]等, 需要较高的临界沉积速度, 一般需要采用氦气作为工作气体。而氦气价格贵, 工业生产或者实验室制备涂层时, 成本提高。因此, 可以采用氮和氦的混合气体作为加速气体。

本工作采用流体力学 CFD 软件 FLUENT, 数值分析了氮和氦混合气体在拉伐尔喷管内对颗粒的加速过程, 并与一维等熵定常流动理论值进行了比较, 同时探讨了混合气体中氦气含量对喷管出口处气体以及颗粒的速度和温度的影响, 并且分析了使用氮气、氦气混

合气体进行加速时气体质量流量,在保证涂层性能的条件下减少气体用量,降低成本。

1 实验方法

1.1 混合气体特性参数

在确定混合气体流动特性时,首先应根据混合气体的组成成分,确定混合气体的各特性参数。根据黏性流体力学理论,混合气体的摩尔质量 M ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$),折合气体常数 R ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),定压热容 C_p ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),比热比 γ 可由式(1)计算:

$$M = \sum x_i M_i; R = \frac{8314.3}{M};$$

$$C_p = \sum \omega_i C_{p,i}; \gamma = \frac{C_p}{C_p - R} \quad (1)$$

而混合气体的黏度 μ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 和导热系数 λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 可分别由式(2)进行估算:

$$\mu = \frac{\sum x_i \mu_i M_i^{1/2}}{\sum x_i M_i^{1/2}}; \lambda = \frac{\sum \lambda x_i M_i^{1/3}}{\sum x_i M_i^{1/3}} \quad (2)$$

式中: x_i , ω_i 分别为混合气体中组元 i 的摩尔分数和质量分数; M_i , $C_{p,i}$, μ_i , λ_i 分别为混合气体中组元 i 的摩尔质量、定压热容、导热系数和黏度。

1.2 一维等熵定常流动

对拉伐尔喷管内的流体进行分析时,把管内气流看成一维等熵定常流动,即假设流体内和外界没有热量和功的交换;不计管壁与气体之间的摩擦作用;管内质量流量不发生变化,流动是一维定常的;所讨论的气体为定比热的完全气体。则根据喷管各处截面比值由式(3)可计算各截面处的马赫数 Ma ,然后根据马赫数 Ma 由式(4)计算喷管内各处流体的特性参数,如压力 P , 温度 T 和速度 v ^[6, 10] 等。

$$\frac{A}{A_1} = \left(\frac{1}{Ma} \right) \left[\left(\frac{2}{\gamma+1} \right) \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} Ma^2 \right) \right]^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)} \quad (3)$$

$$P = \left(\frac{P_0}{1 + \frac{\gamma-1}{2} Ma^2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}; T = \frac{T_0}{1 + \frac{\gamma-1}{2} Ma^2};$$

$$v = Ma \sqrt{\gamma RT} \quad (4)$$

式中: A 为喷管某处截面面积; A_1 为喉部截面积; P_0 和 T_0 分别为喷管入口气体总压和总温。

1.3 计算模型

采用 FLUENT 数值分析了氮和氦混合气体在拉伐尔喷管内对颗粒的加速过程。拉伐尔喷管为圆形截面,图 1 为拉伐尔喷管结构示意图,入口直径 $D_i = 9.4 \text{ mm}$,喉部直径 $D_t = 3.0 \text{ mm}$,出口直径 $D_e =$

6.4 mm,收缩段长度 $L_i = 5.6 \text{ mm}$,收敛角 $\alpha = 10^\circ$,扩张段长度 $L_e = 19.4 \text{ mm}$,发散角 $\beta = 6^\circ$ 。计算区域为拉伐尔喷管内射流段轴对称二维模型,喷管入口为压力入口,设定入口总压 P_0 ,入口总温 T_0 ;喷管出口为压力出口,出口背压为一个大气压。将气体在喷管内的流动过程看作可压缩流体的定常流动,忽略重力产生的影响,考虑气体的黏性,针对喷管内高度紊流的情况,应用重整化群(RNG) $k-\varepsilon$ 模型^[11]。忽略颗粒对气体的影响,以单相流考虑。颗粒看作是连续气流中的离散相,在拉格朗日坐标系中研究颗粒的运动情况,模拟过程中只考虑颗粒所受的气流拽力,而忽略颗粒重力等其他力的影响。惰性换热定律用于计算颗粒和气相之间的换热^[11]。根据前面所计算的混合气体特性参数在流体力学 CFD 软件 FLUENT 中自定义不同成分的氮和氦混合气体,分析混合气体中氦气含量对气体和颗粒的速度和温度的影响。颗粒为球形,直径 d_p 分别为 $1 \mu\text{m}$ 和 $5 \mu\text{m}$ 的两种铜颗粒。

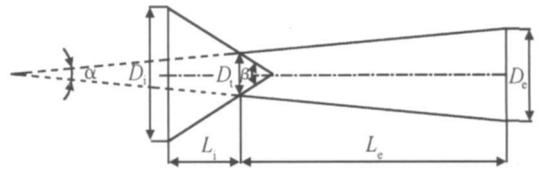


图 1 拉伐尔喷管结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the de-Laval nozzle

2 结果与讨论

2.1 氮和氦混合气体加速过程

利用 FLUENT 软件数值模拟了气体入口总压 $P_0 = 2.8 \text{ MPa}$,入口总温 $T_0 = 873 \text{ K}$ 时,90% 氮气(质量分数,下同)和 10% 氦气混合气体对铜颗粒的加速过程。以喷管喉部为 x 轴坐标原点,图 2 为模拟得到的喷管轴线上气体和颗粒的流动参数分布,根据一维等熵定常流动计算的理论值一并给出。其中,图 2(a) 为气体压力 and 马赫数分布,由一维理论分析可知,气体进入喷管之后,压力下降,马赫数上升,在喉部达到临界状态,马赫数等于 1;扩张段内,压力继续下降,马赫数继续上升,在喷管出口马赫数大于 1,气体达到超音速。而模拟过程中,在喉部下游附近马赫数才达到 1,扩张段内马赫数小于理论值,这是由于流体黏性流动以及边界层作用,气体能量沿程损失,这更接近实际情况。图 2(b) 为气体以及铜颗粒的温度在喷管内的分布情况,气体在扩张段内膨胀,温度迅速下降,模拟值与一维理论值比较吻合, $1 \mu\text{m}$ 小颗粒比表面积大,颗粒与

气体热交换快, 颗粒温度跟随气体温度变化。相比而言, $5\mu\text{m}$ 颗粒在收缩段加热, 扩张段冷却, 温度在喷管喉部附近达到最大值。图 2(c) 为气体以及直径 d_p 分别为 $1\mu\text{m}$ 和 $5\mu\text{m}$ 的铜颗粒的速度在喷管内的分布情况, 气体速度模拟值略小于一维理论值, 在喷管中随着气体速度不断增加, 铜颗粒一直处于加速过程, 但是速

度增长率不断降低, 在喷管出口处趋于平缓, 小颗粒的加速效果显著。

通过确定混合气体特性参数, 然后根据一维等熵定常理论和流体力学数值模拟可以分析混合气体在拉伐尔喷管内对固体颗粒的加速和热传导过程, 从而预计颗粒在喷管出口的速度和温度, 指导冷喷涂工艺。

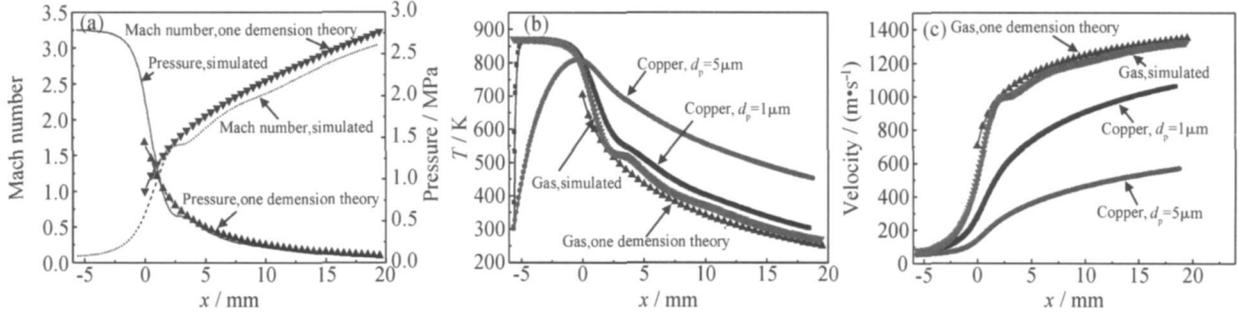


图 2 喷管轴线上气体压力和马赫数 (a), 气体和颗粒的温度 (b) 以及速度 (c) 的分布

Fig. 2 Changes of gas pressure and Mach number (a), gas and particles temperatures (b) and gas and particles velocities (c) along the nozzle axis

2.2 He 含量对气体及颗粒速度的影响

图 3 为 He 含量对气体及颗粒出口速度的影响, 模拟值与一维等熵定常流动理论值接近, 比理论值略低。由图 3 可知, 随着 He 含量的增加, 气体速度不断增加, 但气体速度增加速率不断减小, 氮气中混入少量氦气时气体速度就显著增加, 通过控制氦气含量可以在很大范围内调节气体的出口速度。增加氦气含量, 气体出口速度增加, 因此, 颗粒的速度也随之增加。同样, 氦气含量不断升高时, 颗粒的出口速度的增加速率也不断减小, 而且对于粗大的颗粒这种现象越明显。从颗粒碰撞速度考虑, 小颗粒更容易加速, 但颗粒太小时, 在喷管外也容易被气流减速。

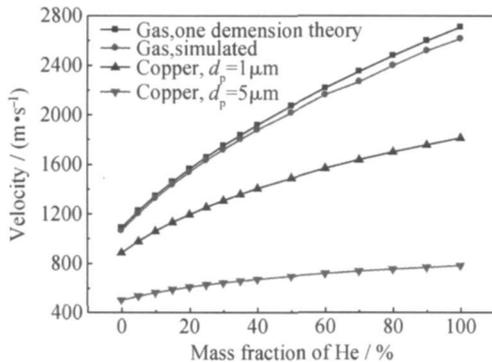


图 3 He 含量对气体及颗粒出口速度的影响

Fig. 3 Effect of the helium content in the gaseous mixture on gas and particles velocities in the nozzle exit

2.3 He 含量对气体及颗粒温度的影响

另外, 颗粒温度也是影响沉积过程、决定涂层质量

的一个关键因素。颗粒温度越高, 材料软化更容易发生塑性变形, 所需要的临界沉积速度越低, 利于冷喷涂层的制备。图 4 为气体入口总压 $P_0 = 2.8\text{MPa}$, 入口总温不变情况下 He 含量对气体及铜颗粒在喷管出口处的温度的影响。随着氦气含量的增加, 气体温度先迅速减小, 当氦气含量大于 50% 时, 温度减小速率缓慢。气体温度的模拟值略高于一维理论值, 小颗粒由于比表面大, 热传导快, 温度与气体温度相差较小, 而大颗粒出口温度较高。

2.4 气体流量分析

根据一维等熵定常流动理论, 拉伐尔喷管超音速射流临界质量流量 \dot{m} 可由式 (5) 计算:

$$\dot{m} = \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} \cdot A_t \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{R}} \cdot \left(1 + \frac{\gamma-1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{2(\gamma-1)}} \quad (5)$$

由式 (5) 可知, 气体质量流量与气体种类、气体入口总压和入口总温有关。图 5 为气体入口总压, 入口总温不变时混合气体中 He 含量不同所对应的混合气体、氮气和氦气的质量流量。由图 5 可知, 随着混合气体中 He 含量的不断升高, 总的气体质量流量不断下降, 但其中, 氮气的质量流量却不断上升。因此, 当冷喷涂制备涂层时, 要获得高的颗粒出口速度, 就必须增加混合气体中的 He 含量, 从而增加了涂层制备成本。当全部使用氦气时, 相对混合气体而言, 虽然气体流量最小, 但氦气流量是最大的。因此, 可以根据所要制备的涂层材料特性, 选择合适的氦气含量。

通过控制混合气体中的氦气含量, 可以调节气体

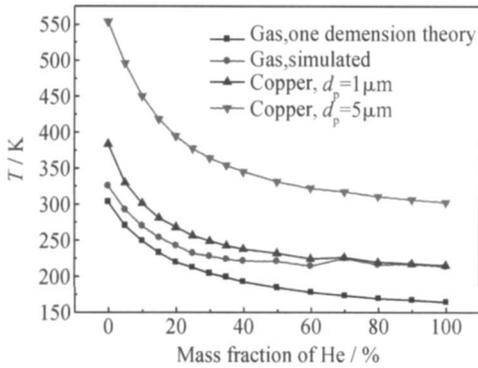


图4 He含量对气体及颗粒出口温度的影响

Fig. 4 Effect of the helium content in the gaseous mixture on gas and particles temperatures in the nozzle exit

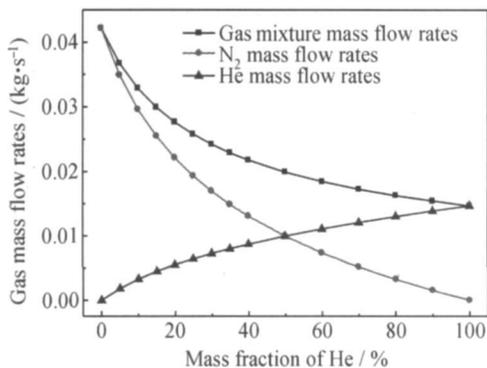


图5 He含量对喷管中的气体质量流量的影响

Fig. 5 Effect of the helium content in the gaseous mixture on gas mass flow rates

的出口速度,从而影响颗粒的加速过程。在氮气中加入少量氦气就能比较显著地提高颗粒的出口速度,利于制备致密、结合强度高的涂层,同时避免完全使用氦气加速而增加的昂贵成本。章华兵等^[12]利用92% N₂ + 8% He(体积分数)在Cu基板上制备了Ni涂层, Balani等^[13]分别以100% He和He+20% N₂(体积分数)混合气体作为工作气体制备了1100Al涂层,并研究了不同的工作气体对涂层组织与性能的影响。

3 结论

(1) 根据混合气体的组成成分,确定混合气体的各特性参数,采用一维等熵定常流动理论和FLUENT数值模拟方法,可以计算气体在喷管出口的速度和温度,模拟值和一理论值比较吻合,从而可以预计颗粒的出口速度和温度,指导冷喷涂工艺。

(2) 随着混合气体中氦气含量的升高,气体和颗粒的出口速度不断提高,而温度不断降低,但两者变化速度不断减小。在氮气中加入少量氦气可以显著提高气体和颗粒的出口速度,同时降低了全部使用氦气时的

高成本。

(3) 随着混合气体中He含量的不断升高,总的气体质量流量不断下降,但氦气的质量流量却不断上升,涂层制备成本增加。

参考文献

- [1] ASSADI H, GARTNER F, STOLTENHOFF T, et al. Bonding mechanism in cold gas spraying[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(15): 4379–4394.
- [2] 李文亚, 李长久, 王豫跃, 等. 冷喷涂Cu粒子参量对其碰撞变形行为的影响[J]. *金属学报*, 2005, 41(3): 282–286.
- [3] 李文亚, 李长久. 冷喷涂特性[J]. *中国表面工程*, 2002, 54(01): 12–16.
- [4] LI W Y, LIAO H, DOUCHY G, et al. Optimal design of a cold spray nozzle by numerical analysis of particle velocity and experimental validation with 316L stainless steel powder[J]. *Materials & Design*, 2007, 28(7): 2129–2137.
- [5] JODOIN B, RALETZ F, VARDELLE M. Cold spray modeling and validation using an optical diagnostic method[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 200(14–15): 4424–4432.
- [6] DYKHUIZEN R C, SMITH M F. Gas dynamic principles of cold spray[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1998, 7(2): 205–212.
- [7] 王晓放, 李芳, 赵爱娃, 等. 喷嘴出口截面形状对冷喷涂涂层性能影响的数值分析[J]. *机械工程材料*, 2006, (12): 84–86.
- [8] YOON S, KIM H J, LEE C. Deposition behavior of bulk amorphous NiTiZrSiSn according to the kinetic and thermal energy levels in the kinetic spraying process[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 200(20–21): 6022–6029.
- [9] RICHER P, ZIGA A, YANDOUZI M, et al. CoNiCrAlY microstructural changes induced during cold gas dynamic spraying[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2008, 203(3–4): 364–371.
- [10] GRUJICIC M, TONG C, DEROSSET W S, et al. Flow analysis and nozzle-shape optimization for the cold-gas dynamic spray process[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2003, 217(11): 1603–1613.
- [11] FLUENT INC. *Fluent 6.3 user's guide* [M]. Lebanon NH, USA: Centerra Resource Park, 2006.
- [12] 章华兵, 张俊宝, 单爱党, 等. 气体温度对冷喷涂Ni颗粒结合与变形行为的影响[J]. *金属学报*, 2007, 43(08): 823–828.
- [13] BALANI K, LAHA T, AGARWAL A, et al. Effect of carrier gases on microstructural and electrochemical behavior of cold-sprayed 1100 aluminum coating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 195(2–3): 272–279.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50871019)

收稿日期: 2009-02-06; 修订日期: 2010-02-26

作者简介: 巫湘坤(1982—), 男, 博士研究生。

通讯作者: 周香林, 联系地址: 北京市海淀区学院路30号北京科技大学新金属材料国家重点实验室(100083), E-mail: bkdzxl@sina.com