

真空冷喷涂铜颗粒加速特性数值研究

郑建新, 金耀辉, 刘传绍
(河南理工大学, 焦作 454003)

[摘要] 基于 Fluent 气固两相流数值模拟, 研究真空冷喷涂铜颗粒的加速特性, 分析了环境压力、喷涂距离、入口总温和颗粒粒径等参数对真空环境下颗粒撞击速度的影响。结果表明: 环境压力是决定颗粒撞击速度的关键因素, 随环境压力的变化, 小直径颗粒($d_p \leq 1 \mu\text{m}$)撞击速度的变化曲线呈抛物线状态, 但大直径颗粒无显著变化; 采用合适的喷涂距离, 才能获得最大的颗粒撞击速度; 增加入口总温可提高小直径颗粒的撞击速度, 但对大直径颗粒无明显加速效果; 真空冷喷涂颗粒的尺寸可从微米级减小至亚微米级, 但过小的颗粒仍难达到足够高的撞击速度。

[关键词] 真空冷喷涂; 加速特性; 颗粒撞击速度; 气固两相流; 数值模拟

[中图分类号] TG174.442; TQ02

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2013)01-0005-04

Numerical Study on Accelerating Characteristics of Copper Particles in Vacuum Cold Spraying Process

ZHENG Jian-xin, JIN Yao-hui, LIU Chuan-shao

(Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

[Abstract] The accelerating characteristics of copper particles in the process of vacuum cold spraying were investigated based on numerical simulation of gas-particle two phase flow with Fluent, and the influences of ambient pressure, stand-off distance (SoD), inlet temperature and diameter of particles on particle impact velocities were analyzed. The results indicate that the ambient pressure is the key factor affecting the particle impact velocities, and the velocity curve for the small particles with diameters smaller than $1 \mu\text{m}$ is parabolic with the change of the ambient pressure, while no significant change for the big particles; The higher impact velocities may be obtained with suitable SoD; The impact velocities increase with the increment of inlet temperatures for the small particles, but which does not happen for the big particles with the same conditions; The minimum particle size can be reduced from micron size to submicron size in the process of vacuum cold spraying, but too smaller particles cannot obtain enough high impact velocities so as to be deposited.

[Key words] vacuum cold spraying; accelerating characteristics; particle impact velocities; gas-particle two phase flow; numerical simulation

冷喷涂是一种基于气体动力学原理的新型表面涂层技术, 它用经低温预热的高压气体携带粉末颗粒, 通过 Laval 喷管加速, 产生超音速气固两相流, 使颗粒在完全固态下高速撞击基板, 形成涂层^[1]。相对于热喷涂技术, 冷喷涂技术在制备温度敏感材料、氧化敏感材料、相变敏感材料、复合涂层等领域具有独特优势。

冷喷涂时, 因基板前弓形激波的影响, 粒径小于 $5 \mu\text{m}$ 的颗粒难以突破基板前的湍流区而无法实现有效沉积。为实现亚微米甚至纳米级颗粒的冷喷涂, 有研究者引入了真空冷喷涂技术^[2-4], 即在传统冷喷涂技

术的基础上, 将密闭喷涂室抽真空进行喷涂作业。在真空喷涂室内的高速射流不会因空气的阻碍作用而明显减速, 因而有利于涂层的形成。类似技术还有纳米颗粒沉积系统和气浮沉积技术^[5-6]。

在冷喷涂过程中, 颗粒依靠超声速气流带动, 加速至一定的喷涂速度, 因此影响颗粒速度的主要因素有气体性质、喷涂距离和颗粒特性等。限于冷喷涂过程中颗粒高速碰撞的瞬时性和粉末颗粒的微小性等特点, 现有技术和实验条件不易对颗粒的加速和变形过程进行直接观测, 因此利用数值模拟的方法研究颗粒

[收稿日期] 2012-10-18; **[修回日期]** 2012-11-20

[基金项目] 无锡市国际科技合作计划项目 (CZE00902)

[作者简介] 郑建新 (1979—), 男, 湖北人, 博士, 副教授, 主要从事表面工程技术、精密超精密加工技术方面的教学与研究。

加速行为最为普遍。文中以空气为载气,基于 Fluent 气固两相流数值模拟,对真空环境下影响颗粒撞击速度的环境压力、喷涂距离和入口温度等主要参数展开研究,以期了解颗粒的加速特性,为真空冷喷涂作业提供理论指导。

1 几何模型

根据冷喷涂的基本原理,确定真空冷喷涂气固两相流的几何模型,如图 1 所示,图中同时给出了所用 Laval 喷管的结构尺寸。喷管出口与基板之间的喷涂距离(Standoff Distance, SoD)暂定为 25 mm,喷管轴线垂直于基板。

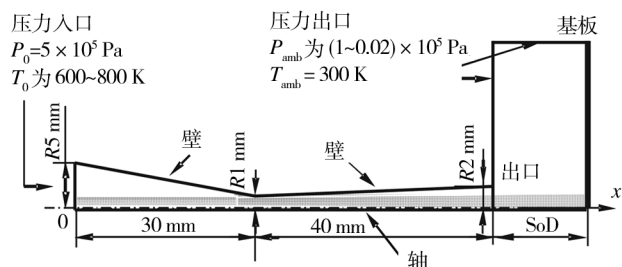


图 1 喷管、基板几何结构模型与边界条件

Fig. 1 Geometry diagram of nozzle and substrate and the boundary conditions

2 数值求解

2.1 计算区域与边界条件

鉴于几何模型的二维轴对称性,为了减少计算机运行时间,计算区域选取整个模型的一半,并对其采用四边形结构网格进行划分。考虑网格无关性,网格总数为 24 723 个。

模型的边界条件如图 1 所示。喷管入口设置为压力入口,总压为 P_0 ,总温为 T_0 ;喷管管壁设置为无滑移壁面;喷管轴线设置为轴对称边界条件;基板也设置为无滑移壁面;喷管出口外的周围环境设置为压力出口,压力为 P_{amb} ,温度为 T_{amb} 。

2.2 气相与固相

加速气体采用空气,气体比热比 $\gamma = 1.4$ 。气相的控制方程包括连续性方程、动量方程和能量方程,采用耦合隐式求解器和二阶迎风离散格式。对于气相的湍流特性,采用标准 $\kappa-\epsilon$ 模型。

固体颗粒按离散相处理,即假设颗粒是稀相,连续相不受离散相影响,则运用耦合方法,分两步迭代求解。先计算连续相流场,然后利用 DPM 模型计算离散相。颗粒材料为铜粉,根据颗粒温度和氧化程度的不

同,其临界沉积速度约为 $500 \sim 640 \text{ m/s}^{[7]}$,颗粒撞击速度超过临界沉积速度则可实现有效沉积。

3 结果与分析

3.1 环境压力对颗粒撞击速度的影响

在 $P_0 = 5 \times 10^5 \text{ Pa}$, $T_0 = 600 \text{ K}$, $T_{amb} = 300 \text{ K}$, $\text{SoD} = 25 \text{ mm}$ 的条件下,对粒径 d_p 分别为 $10, 5, 1, 0.8, 0.5 \mu\text{m}$ 五种规格的铜粉进行冷喷涂。当环境压力 P_{amb} 分别为 $1 \times 10^5, 0.5 \times 10^5, 0.1 \times 10^5, 0.07 \times 10^5, 0.05 \times 10^5, 0.03 \times 10^5, 0.02 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,测得铜颗粒的撞击速度 v_p ,如图 2 所示。

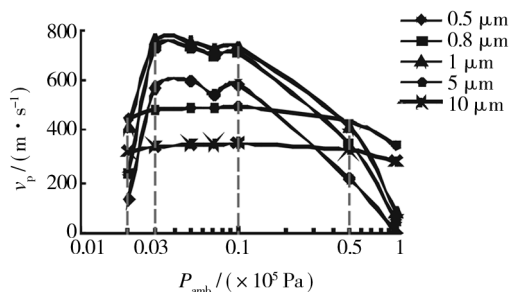


图 2 颗粒撞击速度与环境压力的关系

Fig. 2 Effect of ambient pressure on particle impact velocities

由图 2 可见,对于小直径颗粒($d_p \leq 1 \mu\text{m}$),随着 P_{amb} 变化,颗粒撞击速度呈抛物线变化。 $0.1 \times 10^5 \text{ Pa} \leq P_{amb} \leq 1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,颗粒撞击速度随着 P_{amb} 的降低而显著增加;进一步降低 P_{amb} 至 $0.03 \times 10^5 \text{ Pa}$,颗粒撞击速度作小幅震荡;当 P_{amb} 降低至 $0.02 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,颗粒撞击速度急剧降低,甚至低于 $P_{amb} = 0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时的撞击速度。对于大直径颗粒(d_p 为 $5 \mu\text{m}$ 或 $10 \mu\text{m}$), P_{amb} 的变化对颗粒撞击速度无明显影响。降低 P_{amb} ,相当于提高了入口总压,在传统冷喷涂中,颗粒速度应随之增大^[8],显然真空冷喷涂的颗粒加速特性与之略有不同。

根据气体一维等熵理论,在 $P_0 = 5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,图 1 所示喷管的气体马赫数 Ma 由喷管截面积和气体比热比确定, $Ma = 2.9414$;喷管出口出现完全膨胀波的环境压力由气体压强等熵关系式确定, $P_{amb1} = 0.149 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。因此,当 $P_{amb} > 0.149 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,管内会出现激波,管外会出现斜激波,致使气体速度锐减,这就是 P_{amb} 为 $0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 或 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,颗粒撞击速度较低的原因。当 $P_{amb} < 0.149 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,喷管出口将产生膨胀波,因此当 $P_{amb} \leq 0.1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,一方面气体速度明显增加,另一方面基板前弓形激波区域的气体密度减小,对颗粒的减速效果减弱,这两方面的原因使得颗粒撞击速度增大。

由气体一维等熵流动的能量方程可知, 喷嘴出口气流的能量决定于喷嘴入口和出口处的压力比。压力比越大, 气流能量越高, 其射流范围也越广。降低 P_{amb} 可增加喷嘴出口气流的能量, 增大射流波长节长度。为使气体得到充分的膨胀, 应随 P_{amb} 的降低而增加喷涂距离。有研究表明, 在冷喷涂过程中, 基板的最佳放置位置, 即最佳喷涂距离为自由射流第一周期速度最低点^[9]。如图 3 所示, 在 SoD 相同的条件下, 当 P_{amb} 从 0.1×10^5 Pa 降低至 0.02×10^5 Pa 时, 由于喷涂距离过小, 基板位置处于气体速度较高点, 在基板前形成了非常强烈的弓形激波, 增大了湍流区域厚度, 因此 P_{amb} 过低将会导致颗粒撞击速度反而减小。

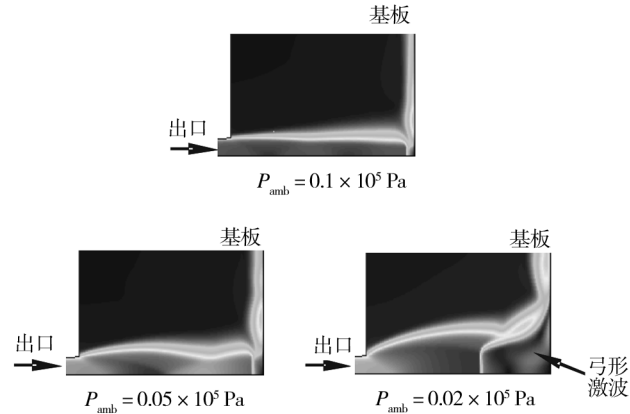


图 3 环境压力对弓形激波的影响

Fig. 3 Effect of ambient pressure on bow shock

改变 P_{amb} 对大直径颗粒的撞击速度影响不大, 这可能与气体的粘性系数相对较小有关。一方面, 气体对大直径颗粒的加速效果不佳; 另一方面, 当大直径颗粒被加速到一定速度后, 因本身惯性较大, 所以气体速度的影响较小。

3.2 喷涂距离对颗粒撞击速度的影响

由图 3 可知, 当 $P_{amb} = 0.02 \times 10^5$ Pa 时, 颗粒撞击速度较低是由于基板位置不当所致, 当 P_{amb} 降低时, 必须增大 SoD 使气体充分膨胀。以 $d_p = 1 \mu\text{m}$ 的铜颗粒为研究对象, 当 $P_{amb} = 0.02 \times 10^5$ Pa 且其它喷涂参数不变时, 调整 SoD, 颗粒撞击速度 v_p 随 SoD 的变化如图 4 所示。显然, 不同 SoD 下的颗粒撞击速度相差很大, 表明喷涂距离对颗粒撞击速度有较大影响。

保持其它参数不变, 不同 SoD 下, 喷嘴出口与基板间的气流云图如图 5 所示。从图 5 可以看出, 当 SoD = 25 mm 时, 基板位于射流第一周期速度较高点, 在板前形成了较为强烈的弓形激波, 相比于 SoD = 35 mm, 其湍流区域厚度明显偏大。当 SoD = 50 mm 时, 基板处于射流第二周期速度较高点, 在基板前也形成了较为强烈的弓形激波, 其湍流区域厚度介于 SoD 为 25 mm

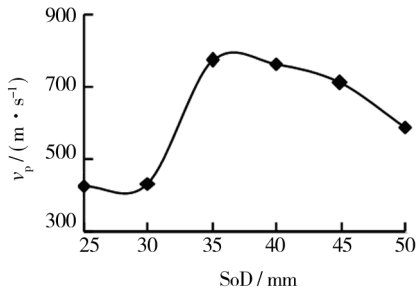


图 4 颗粒撞击速度随喷涂距离的变化

Fig. 4 Effect of SoD on particle impact velocities

和 35 mm 之间。因此, 基板只有处于射流第一周期气体速度最低点, 在板前形成较弱的激波时, 颗粒撞击速度才能达到最大。

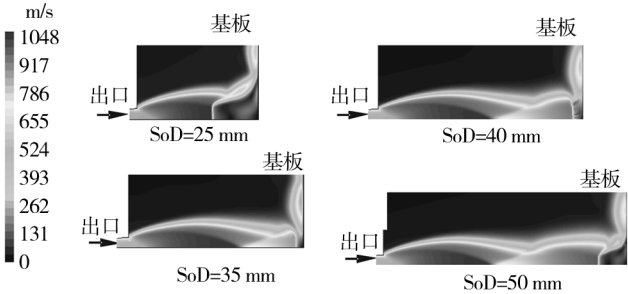


图 5 不同喷涂距离下的气流云图

Fig. 5 Airflow cloud under different SoD

当 SoD = 35 mm 时, 不同直径铜颗粒的撞击速度见表 1。显然, 降低环境压力有利于提高颗粒的撞击速度, 但因其增长幅度不大, 喷涂过程中的环境压力也无需过低。

表 1 不同环境压力下不同直径颗粒的撞击速度

Tab. 1 Impact velocities of particles with different diameters under different ambient pressure

$P_{amb}/$ Pa	颗粒撞击速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			
	$d_p = 0.5 \mu\text{m}$	$d_p = 0.8 \mu\text{m}$	$d_p = 1 \mu\text{m}$	$d_p = 2 \mu\text{m}$
0.1×10^5	590.2	713.8	735.7	688.3
0.02×10^5	600.1	741.0	772.4	715.2

3.3 入口总温对颗粒速度的影响

当 $P_0 = 5 \times 10^5$ Pa, $P_{amb} = 0.1 \times 10^5$ Pa, $T_{amb} = 300$ K, SoD = 25 mm 时, $d_p = 1 \mu\text{m}$ 的铜颗粒在不同的入口总温下加速, 颗粒在喷嘴内和喷嘴出口到基板处的速度 (v) 变化规律如图 6 所示。入口总温对不同直径铜颗粒 (d_p 为 0.5, 0.8, 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 μm) 撞击速度 v_p 的影响如图 7 所示。

由图 6 可知, 同传统冷喷涂一样, 提高入口总温可使颗粒速度增大。其原因是, 提高入口总温增加了气体内能, 经喷嘴加速后, 更多的内能转化为气体动能, 从而带动颗粒速度增加; 另一方面, 提高入口总温会增大气体粘性系数, 进而可提高气体对颗粒的加速效果。

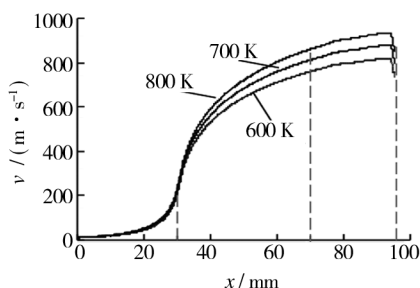


图6 入口总温对颗粒速度的影响

Fig. 6 Effect of inlet temperature on particle velocities

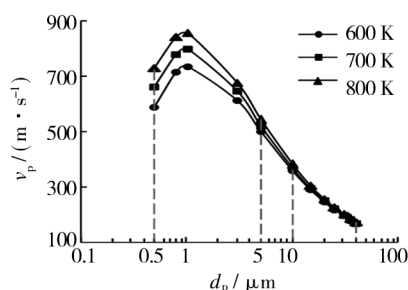


图7 入口总温对颗粒撞击速度的影响

Fig. 7 Effect of inlet temperature on particle impact velocities

由图7知,增加入口总温对提高小直径颗粒($d_p \leq 5 \mu\text{m}$)撞击速度的效果显著,而对大直径颗粒却无明显加速效果。显然,在真空环境下,气体的粘性系数过小,温度升高虽然能增大气体的粘性系数,但对大直径颗粒的带动效果仍然有限。

与传统冷喷涂一样,在真空环境下,颗粒直径与颗粒的撞击速度有着直接的关系,直径过大或过小,都不能得到较高的撞击速度,只有尺寸在合适范围内的颗粒,撞击速度才可以到达较高。在本研究条件下,尺寸范围在 $0.5 \sim 5 \mu\text{m}$ 时,颗粒可实现有效沉积,且当 $d_p = 1 \mu\text{m}$ 时,颗粒可获得最高撞击速度。

4 结论

1) 与传统冷喷涂不同,环境压力 P_{amb} 由 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 降低到 $0.1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,小直径颗粒($d_p \leq 1 \mu\text{m}$)的撞击速度显著提高;当 P_{amb} 从 $0.03 \times 10^5 \text{ Pa}$ 降低至 $0.02 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,颗粒的撞击速度反而急剧降低。

2) 喷涂距离和入口总温对颗粒撞击速度的影响规律与传统冷喷涂相同。其它参数不变时,只有当基板处于射流第一周期气体速度最低点,才能获得最大的颗粒撞击速度。提高入口总温对提高小直径颗粒($d_p \leq 5 \mu\text{m}$)撞击速度的效果显著,而对大直径颗粒无明显加速效果。

3) 相比于传统冷喷涂,真空冷喷涂颗粒的尺寸可从微米级减小至亚微米级,但过小的颗粒仍难达到足

够高的撞击速度以实现有效沉积。

【参考文献】

- [1] 苏贤涌,周香林,崔华,等. 冷喷涂技术的研究进展[J]. 表面技术,2007,36(5):71—74.
- [2] FAN Sheng-qing, LI Chang-jiu, LI Cheng-xin, et al. Preliminary Study of Performance of Dye-sensitized Solar Cell of Nano-TiO₂ Coating Deposited by Vacuum Cold Spraying[J]. Materials Transactions, 2006, 47(7):1703—1709.
- [3] YANG Guan-jun, LI Chang-jiu, LIAO Kai-xing, et al. Influence of Gas Flow During Vacuum Cold Spraying of Nano-porous TiO₂ Film by Using Strengthened Nanostructured Powder on Performance of Dye-sensitized Solar Cell[J]. Thin Solid Films, 2011, 519(15):4709—4713.
- [4] WANG Y Y, LIU Y, LI C J, et al. Electrical and Mechanical Properties of Nano-structured TiN Coatings Deposited by Vacuum Cold Spray[J]. Vacuum, 2012, 86(7):953—959.
- [5] CHUN Doo-man, AHN Sung-hoon. Deposition Mechanism of Dry Sprayed Ceramic Particles at Room Temperature Using a Nano-particle Deposition System[J]. Acta Materialia, 2011, 59(7):2693—2703.
- [6] SAHNER K, KASPAR M, MOOS R. Assessment of the Novel Aerosol Deposition Method for Room Temperature Preparation of Metal Oxide Gas Sensor Films[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2009, 139(2):394—399.
- [7] LI Chang-jiu, LI Wen-ya, LIAO Han-lin. Examination of the Critical Velocity for Deposition of Particles in Cold Spraying[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2006, 15(2):212—222.
- [8] GILMORE D L, DYKHUIZEN R C, NEISER R A, et al. Particle Velocity and Deposition Efficiency in the Cold Spray Process[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1999, 8(4):576—582.
- [9] WANG Xiao-fang, YIN Shuo, XU Bao-peng. Effect of Cold Spray Particle Conditions and Optimal Standoff Distance on Impact Velocity[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(4):498—504.