

# 真空度对真空冷喷涂气固两相流的影响

郑建新, 郝婉君

(河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454003)

**摘要:**目的 真空度直接影响着真空冷喷涂时气体流动特性和颗粒撞击速度,研究真空度对气体和颗粒流动特性的影响。方法 确定真空冷喷涂系统结构,采用 FLUENT 软件进行真空冷喷涂气固两相流研究,通过数值模拟研究真空度对流场和颗粒撞击速度的影响,并研究相同压力比下的气固两相流特性。结果 当入口压力一定时,喷管内的气体轴线速度、密度和温度与环境压力大小无关;而在射流区,环境压力越小,则气体轴线速度波动越小、密度越低,但到达基板后的气体温度均接近喷管入口温度。环境压力对大粒径颗粒的撞击速度影响较大,颗粒撞击速度随环境压力增大而先增后减,最佳环境压力可根据气相云图和气体密度来确定。当进出口压力比相同时,喷管内和射流区域内的气相速度云图基本相同,气体轴线速度曲线基本重合,而基板前的颗粒速度不同,此时环境压力越低,颗粒速度越高,越有利于形成涂层。结论 采用计算流体动力学分析方法厘清了真空度对真空冷喷涂气固两相流的影响,为涂层制备奠定了理论基础。

**关键词:**真空冷喷涂;气固两相流;真空度;流场;颗粒速度;数值研究

**中图分类号:** TG174.442; TQ02

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3660(2015)12-0075-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.12.012

## Influence of Vacuum Degree on Gas-Solid Flow in Vacuum Cold Spray

ZHENG Jian-xin, HAO Wan-jun

(School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

**ABSTRACT:** **Objective** The flow behavior of gas and the particle impact velocity are directly affected by the vacuum degree in the process of vacuum cold spray. The influences of vacuum degree on gas and particle flow properties were studied. **Methods** The structure of the vacuum cold spray system was determined, and the gas-solid flow in vacuum spray was studied based on FLUENT. The influences of vacuum degree on the flow field and particle impact velocity were explored through numerical simulation, and the gas-solid flow properties under the same pressure ratio were studied. **Results** The numerical research indicated that when the inlet pressure was constant, the axis velocity, the density and the temperature of gas in the nozzle were independent of the ambient pressure, whereas in the jet flow region, lower ambient pressure led to lower fluctuation of the gas velocities and lower gas density. However, when the gas reached the substrate, its temperature was close to the inlet temperature in all cases. The ambient pressure had obvious effect on the impact velocity of the particle with large diameter, and the impact velocity first increased and then decreased with increasing ambient pressure, and the optimal ambient pressure could be determined by the gas contour and its density.

收稿日期: 2015-08-03; 修订日期: 2015-09-21

Received: 2015-08-03; Revised: 2015-09-21

基金项目: 河南省高等学校精密制造技术与工程重点学科开放实验室开放基金(PMTE201314A)

Fund: Supported by the Opening Project of Key Laboratory of Precision Manufacturing Technology and Engineering (PMTE201314A)

作者简介: 郑建新(1979—),男,湖北人,博士,副教授,研究方向为表面工程技术、精密与特种加工技术。

Biography: ZHENG Jian-xin (1979—), Male, from Hubei, Ph. D., Associate professor, Research focus: surface engineering, precision and non-conventional manufacturing technology.

When the pressure ratios of the inlet and outlet of the nozzle were the same, the gas contours in the nozzle and the jet flow region were almost the same, and the curves of the gas axis velocities almost coincided. While the particle velocities before the substrate were different, the lower the ambient pressure, the higher the particle velocity, which was more beneficial to coating formation.

**Conclusion** The influence of vacuum degree on the gas-solid flow in vacuum spray was clarified based on the CFD, which laid the ground work for the preparation of coating.

**KEY WORDS:** vacuum cold spray; gas-solid flow; vacuum degree; flow field; particle velocity; numerical research

冷喷涂技术是喷涂颗粒在低温预热的高压气体作用下,通过 Laval 喷管加速后,在固态下高速撞击基板表面,发生强烈的塑性变形而沉积形成涂层<sup>[1]</sup>。气体高速撞击基板时,会在基板表面产生弓形激波,形成一个弧状湍流区,使得粉末颗粒撞击速度急剧下降,不利于或难以形成涂层<sup>[2]</sup>。传统的冷喷涂技术只能沉积微米尺度(5~50 μm)的颗粒<sup>[3-4]</sup>。

为实现微米级以下颗粒的有效沉积,研究者们提出了真空冷喷涂技术(Vacuum Cold Spray, VCS)。该技术是通过密封喷涂室抽真空,降低环境压力,进而减小射流区气体对颗粒运动的阻碍作用,实现颗粒的有效沉积<sup>[4-7]</sup>。有研究表明,以空气或氮气作为载气时,真空冷喷涂可实现亚微米级颗粒的有效沉积<sup>[6-10]</sup>。Chun 等人<sup>[4]</sup>研究了真空常温环境下,喷涂距离对陶瓷颗粒撞击速度和沉积特性的影响;杨冠军、李长久等人<sup>[5-8]</sup>采用真空冷喷涂方法制备了纳米多孔 TiO<sub>2</sub> 薄膜,研究了气流速度对光电流密度的影响和颗粒速度对材料性能的影响;郑建新等人<sup>[9]</sup>研究了环境压力、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。

在真空冷喷涂过程中,真空度不同,则气相流场会发生变化,进而造成颗粒沉积特性也不同,因此有必要研究不同真空度下的流场特性。限于冷喷涂过程中的流场复杂性、颗粒高速碰撞瞬时性、粉末颗粒微小性和环境低温性等特点,现有技术和试验条件难以对气固流场进行直接观测,因此冷喷涂流场特性研究大多采用计算流体动力学(CFD)进行数值分析的方法<sup>[11-14]</sup>。文中基于 FLUENT 探索真空度对气固两相流的影响,主要研究真空环境下载气在喷管内和射流区的流动特性以及颗粒的运动规律,拟为实现亚微米颗粒的有效喷涂奠定理论基础。

## 1 真空冷喷涂系统与计算模型

### 1.1 系统结构与边界条件

真空冷喷涂系统如图 1 所示。Laval 喷管结构尺

寸为:喷管入口直径 10 mm,喉部直径 2 mm,出口直径 4 mm。收缩段长度为 30 mm,扩张段长度为 40 mm。喷管出口到基板距离 SOD=25 mm。

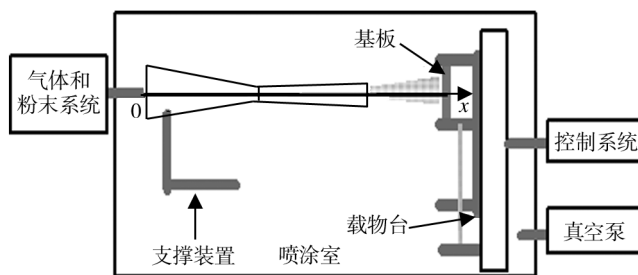


图 1 真空冷喷涂系统示意

Fig. 1 Schematic of vacuum cold spray system

气固两相流模拟采用计算流体力学软件 FLUENT 运算。边界条件设置如下:喷管入口设为压力入口,进气压力  $p_0=0.5$  MPa,进气温度  $T_0=600$  K;喷管出口为压力出口;喷管管壁设为绝热无滑移壁面,基板设为逃逸壁面;喷管轴线设为轴对称。喷涂材料为球形 Cu 颗粒,密度为  $8978$  kg/m<sup>3</sup>,载气为空气。

### 1.2 数学模型

对于气体的流动,采用有限体积法来离散控制方程,其控制方程与传统冷喷涂相同,包括质量方程、动量方程和能量方程,在此不再赘述。入口湍流特性采用湍流强度和水力直径来初始化,湍流模型选择标准  $k-\epsilon$  模型,近壁区采用标准壁面函数法,控制微分方程采用二阶迎风离散格式。

颗粒可以看成连续气流中的离散相,连续相不受离散相影响。先计算连续相流场,再加入离散相,利用 DPM 模型计算颗粒速度。

## 2 真空度对流场的影响

当  $p_0=0.5$  MPa,  $T_0=600$  K,出口温度  $T_a=300$  K 时,分析不同环境压力  $p_a$ (即不同真空度)下的气体轴线速度  $v$  和气体轴线速度云图,结果见图 2。

图 2a 表明,在喷管内,气体轴线速度与环境压力

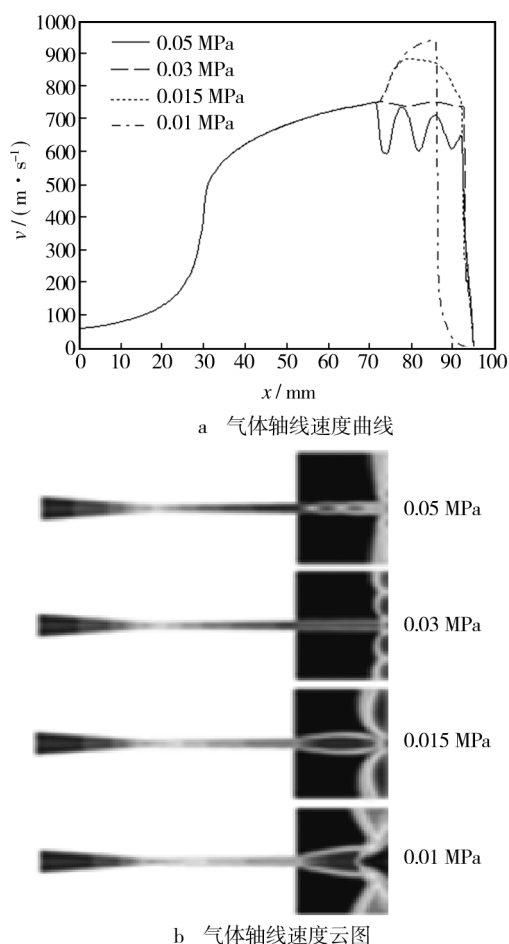


图2 不同环境压力下气体轴线速度曲线和速度云图

Fig. 2 Curves and contours of gas axis velocities under different ambient pressures

大小无关。当环境压力  $p_a = 0.05$  MPa 时,气体轴线速度在射流区出现震荡,之后在基板附近急剧减小至 0;  $p_a \leq 0.03$  MPa 时,气体轴线速度在射流区无震荡出现,在基板附近也急剧减小至 0。环境压力越小,最大气体轴线速度出现的位置越靠近基板。

图 2b 表明,当  $p_a = 0.05$  MPa 时,射流区出现了二次完全膨胀波;当  $p_a = 0.03$  MPa 时,气体在射流区尚未膨胀;当  $p_a = 0.015$  MPa 时,射流区出现一次完全膨胀波;当  $p_a = 0.01$  MPa 时,气体在射流区尚未充分膨胀。在真空环境下,当  $p_a = 0.01$  MPa 时,基板上形成了明显的湍流弧撞击区,而当  $p_a = 0.015$  MPa 时,湍流区厚度最薄。

颗粒的速度与气体的速度、密度和拖曳系数有关。当气体速度低于颗粒速度时,气体对颗粒加速起阻碍作用,此时气体密度越小,阻碍作用就越小。进一步分析气体轴线密度  $\rho$  的变化,结果见图 3。图 3 表明,喷管内,随环境压力的减小,气体轴线密度无显

著变化。在射流区,当  $p_a = 0.05$  MPa 时,气体轴线密度经震荡后,在基板附近急剧上升;当  $p_a < 0.05$  MPa 时,射流区气体轴线密度无震荡。当  $p_a > 0.01$  MPa 时,气流轴线密度随着环境压力的减小而减小,至  $x = 92.25$  mm 处(图 3 中 B 点)急剧增大,基板处约为  $2 \text{ kg/m}^3$ ;  $p_a = 0.01$  MPa 时,气流轴线密度一直呈下降趋势,至  $x = 85.75$  mm(图 3 中 A 点)处后急剧增大,基板处约为  $0.5 \text{ kg/m}^3$ 。

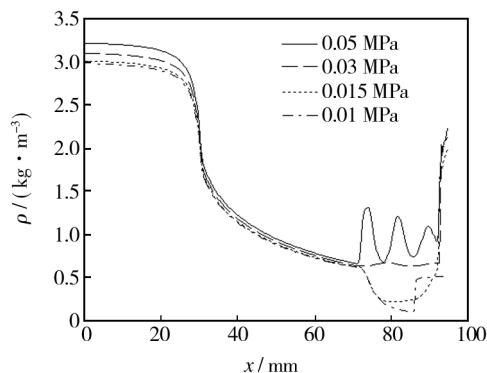


图3 气体轴线密度

Fig. 3 Gas axis density

气体温度的变化会影响气体的内能,进而影响气体动能和颗粒速度。分析不同环境压力下的气体轴线温度变化(图 4),发现在不同环境压力下,喷管内的气体轴线温度保持不变,而射流区的气体轴线温度变化较大,但到达基板后温度均接近入口温度,因此提高入口温度可以提高基板附近的气体温度,进而提高颗粒撞击速度。

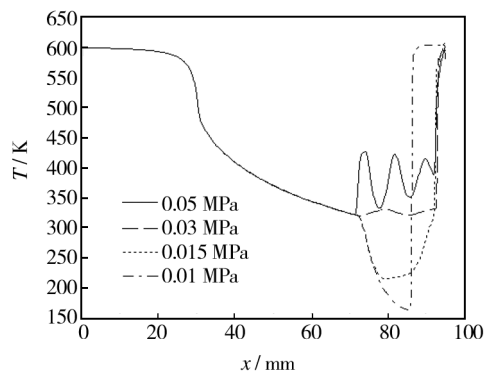


图4 气体轴线温度

Fig. 4 Gas axis temperature

### 3 真空度对颗粒撞击速度的影响

当  $p_0 = 0.5$  MPa,  $T_0 = 600$  K,  $T_a = 300$  K 时,研究不同环境压力下不同粒径颗粒的撞击速度  $v_{p0}$ ,结果见

图5。图5表明,环境压力对大粒径颗粒( $d_p \geq 0.5 \mu\text{m}$ )的撞击速度影响较大,对小粒径颗粒( $d_p < 0.5 \mu\text{m}$ )影响较小。当环境压力 $p_a > 0.015 \text{ MPa}$ 时,颗粒撞击速度随环境压力增大而减小;当环境压力 $p_a < 0.015 \text{ MPa}$ 时,颗粒撞击速度随环境压力增大而增大。显然,不同粒径的颗粒均在环境压力 $p_a = 0.015 \text{ MPa}$ 时获得最大撞击速度,因此当进气压力 $p_0 = 0.5 \text{ MPa}$ 时,最佳环境压力 $p_a = 0.015 \text{ MPa}$ 。

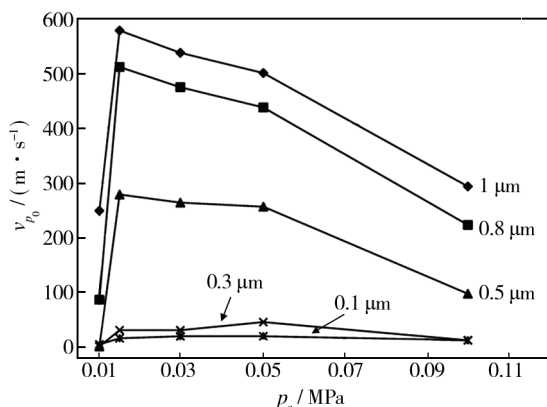


图5 不同环境压力下的颗粒撞击速度

Fig. 5 Particle impact velocities under different ambient pressure

分析 $p_a = 0.015 \text{ MPa}$ 时的气相云图和气体密度,可以发现此时湍流区相对最薄,在射流区出现了一次完全膨胀波,且射流区气体密度相对较小。Grujicica等人的研究表明<sup>[15]</sup>,颗粒的撞击速度与湍流区的平均气体密度和厚度成反比。因此,最佳环境压力可根据气相云图和气体密度来确定。

#### 4 相同压力比下的气固两相流

当进气温度 $T_0 = 300 \text{ K}$ ,出口温度 $T_{\text{amb}} = 300 \text{ K}$ ,进出口压力比 $p_{i0}$ 为1/0.03,0.5/0.015,0.1/0.003时,分析整个喷管内和射流区域内的流场情况,结果见图6和图7。两图表明,当进出口压力比相同时,喷管内和射流区域内的气相速度云图基本相同,气体轴线速度曲线基本重合。

在流场中添加粒径 $d_p = 1 \mu\text{m}$ 的Cu颗粒,分析颗粒轴线速度。当 $x < 92 \text{ mm}$ 时,相同压力比下的颗粒轴线速度曲线基本重合(如图8所示);但当 $x > 92 \text{ mm}$ 时,颗粒轴线速度曲线有明显变化(如图9所示),越靠近基板,相同压力比下环境压力越低,则颗粒轴线速度越高。

究其原因,可分析此时基板附近的气体密度,结

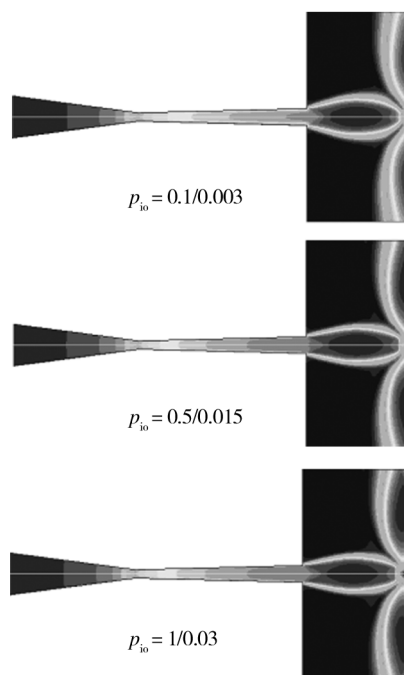


图6 相同压力比下的气体轴线速度云图

Fig. 6 Gas axis velocity contours under the same pressure ratio

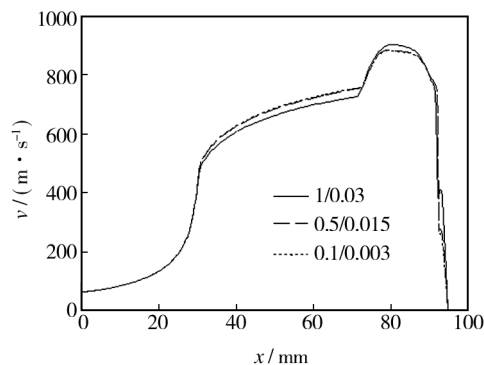


图7 相同压力比下的气体轴线速度

Fig. 7 Gas axis velocities under the same pressure ratio

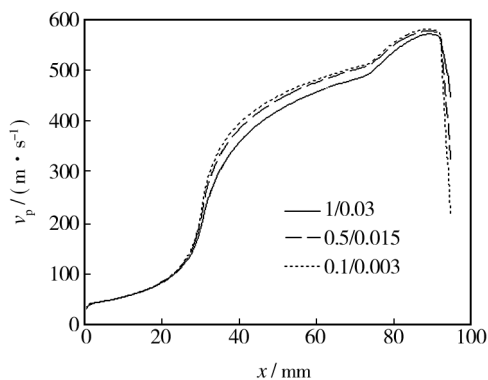


图8 相同压力比下的颗粒轴线速度

Fig. 8 Particle axis velocities under the same pressure ratio



果见图10。图10表明,当 $p_{i0}=0.1/0.003$ 时,靠近基板处的气体密度最小,且沿轴线方向无显著变化;当 $p_{i0}=0.5/0.015$ 或 $p_{i0}=1/0.03$ 时,靠近基板处的气体密度随环境压力的增大而增大,且在 $x$ 为92.25~92.75 mm段,气体密度急剧增加,在其他区间段,气体密度增加不显著。由于相同压力比下基板前湍流区厚度基本不变,因此颗粒速度的变化主要是由湍流区气体密度不同引起的。湍流区气体密度越低,气体对颗粒的阻碍作用越小,则颗粒速度越高。

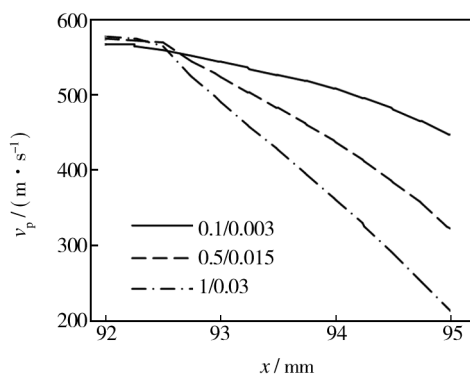


图9 靠近基板处颗粒轴线速度

Fig.9 Particle axis velocities near the substrate

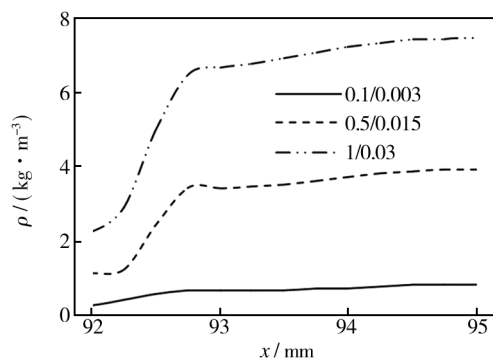


图10 靠近基板处气体轴线密度

Fig.10 Gas axis densities near the substrate

## 5 结论

1) 真空冷喷涂过程中,在喷管内,气体轴线速度、密度和温度与环境压力大小无关;在射流区,环境压力越小,则气体轴线速度波动越小,密度越低,但到达基板后的气体温度均接近喷管入口温度。

2) 环境压力对大粒径颗粒的撞击速度影响较大,颗粒撞击速度随环境压力增大而先增后减。入口压力一定时,存在最佳环境压力,最佳环境压力可根据气相云图和气体密度来确定。

3) 当进出口压力比相同时,喷管内和射流区域内的气相速度云图基本相同,气体轴线速度曲线基本重合,而基板前的颗粒速度不同。环境压力越低,则湍流区气体密度越低,颗粒速度越高,越有利于形成涂层。

## 参考文献

- [1] PAPYRIN A, KOSAREV V, KLINKOV S, et al. Cold Spray Technology[M]. Netherlands: Elsevier Science Ltd, 2005.
- [2] PATTISON J, CELOTTO S, KHAN A. Standoff Distance and Bow Shock Phenomena in the Cold Spray Process[J]. Surface and Coating Technology, 2008, 202(8): 1443—1454.
- [3] 钟厉, 王昭银, 张华东. 冷喷涂沉积机理及其装备的研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 15—22.  
ZHONG Li, WANG Zhao-yin, ZHANG Hua-dong. Research Progress of Precipitation Mechanism and Apparatus of Cold Spray[J]. Surface Technology, 2015, 44(4): 15—22.
- [4] CHUN Doo-man, CHOI Jung-oh, LEE C, et al. Effect of Stand-off Distance for Cold Gas Spraying of Fine Ceramic Particles (<5 μm) under Low Vacuum and Room Temperature Using Nano-particle Deposition System (NPDS) [J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(8/9): 2125—2132.
- [5] YANG Guan-jun, LI Chang-jiu, LIAO Kai-xing, et al. Influence of Gas Flow during Vacuum Cold Spraying of Nanoporous TiO<sub>2</sub> Film by Using Strengthened Nanostructured Powder on Performance of Dye-sensitized Solar Cell [J]. Thin Solid Films, 2011, 519(15): 4709—4713.
- [6] 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.
- [7] HE X L, YANG G J, LI C X, et al. Preparation and Characterization of TiO<sub>2</sub> Scattering Layer for Plastic Dye-sensitized Solar Cells by Vacuum Cold Spray [C]//Thermal Spray 2013; Proceedings of the International Thermal Spray Conference. [s. l.]: ASM International, 2013: 184—189.
- [8] FAN Sheng-qing, LI Chang-jiu, LI Cheng-xin, et al. Preliminary Study of Performance of Dye-sensitized Solar Cell of Nano-TiO<sub>2</sub> Coating Deposited by Vacuum Cold Spraying [J]. Materials Transactions, 2006, 47(7): 1703—1709.
- [9] 郑建新, 金耀辉, 刘传绍. 真空冷喷涂铜颗粒加速特性数值研究[J]. 表面技术, 2013, 42(1): 5—8.  
ZHENG Jian-xin, JIN Yao-hui, LIU Chuan-shao. Numerical Study on Accelerating Characteristics of Copper Particles in Vacuum Cold Spraying Process [J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 5—8.

(下转第121页)

- SUO Xiang-bo, QIU Ji, ZHU Hai-yan. Analysis of Elements and Phases of Nano-SiO<sub>2</sub> Composite Layer Formed on Aluminum Alloy by Micro-arc Oxidation[J]. Materials Science and Technology, 2011, 32(1): 68—71.
- [6] 王虹斌, 方志刚, 蒋百灵. 微弧氧化技术及其在海洋环境中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- WANG Hong-bin, FANG Zhi-gang, JIANG Bai-ling. Micro-arc Oxidation Technology and the Application to the Marine Environment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [7] 石小超, 陈朝章, 徐晋勇, 等. 铝合金微弧氧化技术研究概况[J]. 兵器材料科学与工程, 2012, 35(6): 92—95.
- SHI Xiao-chao, CHEN Chao-zhang, XU Jin-yong, et al. Research Situation of Micro-arc Oxidation of Aluminum Alloys[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2012, 35(6): 92—95.
- [8] 蒋百灵, 白力静, 蒋永锋, 等. 铝合金微弧氧化技术[J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(2): 138—142.
- JIANG Bai-ling, BAI Li-jing, JIANG Yong-feng, et al. The Technique of Micro-arc Oxidation on Aluminum Alloy[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2000, 16(2): 138—142.
- [9] 李克杰, 李全安. 合金微弧氧化技术研究及应用进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(3): 199—203.
- LI Ke-jie, LI Quan-an. Research and Application Progress of Micro-arc Oxidation on the Alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(3): 199—203.
- [10] 刘兵. LY12 合金喷射式微弧氧化膜层制备及腐蚀性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- LIU Bing. Preparation and Corrosion Properties of Coating Formed on LY12 Alloy by Spraying Micro-arc Oxidation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [11] 任鑫. 扫描式微弧氧化装置与工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- REN Xin. Research on Device and Processes in Scanning Micro-arc Oxidation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [12] 莫锦添. 镁合金非浸入式滚刷微弧氧化技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- MO Jin-tian. Research of Non-immersive Roller Brush Micro Arc Oxidation on Magnesium Alloy[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [13] 喻杰, 韦东波, 王岩, 等. 激光重熔改性铝合金微弧氧化膜层的组织与性能[J]. 无机材料学报, 2013, 28(8): 859—863.
- YU Jie, WEI Dong-bo, WANG Yan, et al. Structure and Property of Micro-arc Oxidation Coating Modified by Laser Melting and Solidifying on Aluminum Alloy[J]. Journal of Inorganic Materials, 2013, 28(8): 859—863.
- [14] 慕伟意, 李争显, 杜继红, 等. 铝合金微弧氧化陶瓷涂层研究进展[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 94—99.
- MU Wei-yi, LI Zheng-xian, DU Ji-hong, et al. Research Progress of Ceramic Coatings Formed on Aluminum Alloys by Micro-arc Oxidation[J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 94—99.
- [15] 王艳秋, 王岩, 陈派明, 等. 7075 铝合金微弧氧化涂层的组织结构与耐蚀耐磨性能[J]. 金属学报, 2011, 47(4): 455—461.
- WANG Yan-qiu, WANG Yan, CHEN Pai-ming, et al. Micro-structure, Corrosion and Wear Resistances of Microarc Oxidation Coating on Al Alloy 7075[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(4): 455—461.

(上接第79页)

- [10] 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.
- [11] 李文亚, 张冬冬, 黄春杰, 等. 冷喷涂粒子碰撞行为和临界速度预测的数值模拟研究现状[J]. 中国表面工程, 2014, 27(1): 1—11.
- LI Wen-ya, ZHANG Dong-dong, HUANG Chun-jie, et al. State-of-the-art of Particles Impacting Behavior and Prediction of Critical Velocity for Cold Spraying by Numerical Simulation[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(1): 1—11.
- [12] YIN Shuo, WANG Xiao-fang, LI Wen-ya. Computational Analysis of the Effect of Nozzle Cross-section Shape on Gas Flow and Particle Acceleration in Cold Spraying[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205(8/9): 2970—2977.
- [13] JEN Tien-chien, LI Long-jian, CUI Wen-zhi, et al. Numerical Investigations on Cold Gas Dynamic Spray Process with Nano- and Microsize Particles[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(21/22): 4384—4396.
- [14] WINNICKI M, MAŁACHOWSKA A, DUDZIK G, et al. Numerical and Experimental Analysis of Copper Particles Velocity in Low-pressure Cold Spraying Process[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 268(25): 230—240.
- [15] GRUJICIC M, ZHAO C L, TONG C, et al. Analysis of the Impact Velocity of Powder Particles in the Cold-gas Dynamic-spray Process[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 368(1/2): 222—230.