

# FeNiCrSiMoMnC 合金气雾化熔滴的 运动与传热行为模拟分析

胡云飞<sup>1</sup>, 李景昊<sup>2</sup>, 周香林<sup>1\*</sup>, 杜开平<sup>3</sup>, 马尧<sup>3</sup>, 于月光<sup>3</sup>

- (1. 北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083;  
2. 加拿大麦吉尔大学 机械工程系, 蒙特利尔 QCH2A0C3;  
3. 北京矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

**摘要:** 气雾化过程中合金液流被高压气流破碎后, 要飞行一段距离才开始冷却凝固, 这称为熔滴的飞行过程。本文以重载耐磨耐腐蚀激光熔覆涂层用 FeNiCrSiMoMnC 合金为对象, 通过建立熔滴飞行过程的模型, 并对该过程进行数值模拟, 计算讨论了雾化气体初始速率、熔滴直径对熔滴的速度、传热系数等参数的影响。结果表明, 熔滴速度呈现先增大至最大值后逐渐减小的趋势, 且随熔滴直径的增大, 熔滴速度最大值点逐渐降低; 传热系数与速度曲线相反, 呈先下降后上升的趋势, 极小值为  $2k_g/d$ , 熔滴直径越大, 与气体速度差越小, 传热系数越小; 随气体初始速率的增大, 熔滴最大速度点上移, 同时传热系数也逐渐增大。

**关键词:** 气雾化, 铁基合金, 热交换, 数学模型, 数值模拟

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-7127 (2019) 06-0004-05

DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2019.02.004

## Simulation and Analysis of Motion and Heat Transfer Behavior of FeNiCrSiMoMnC Alloy Droplets in Gas Atomization

Yunfei Hu<sup>1</sup>, Jinghao Li<sup>2</sup>, Xianglin Zhou<sup>1\*</sup>, Kaiping Du<sup>3</sup>, Yao Ma<sup>3</sup>, Yueguang Yu<sup>3</sup>

- (1. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;  
2. Department of Mechanical Engineering, McGill University, Montreal, QCH2A0C3, Canada;  
3. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160)

**Abstract:** In gas atomization, the broken droplets usually experience a short flight before their solidification. The flying process of a wear and corrosion resistant FeNiCrSiMoMnC alloy designed for the laser cladding coatings under heavy-duty condition is studied in this work. By a model established based on this process and numerical simulation, the influence of the initial gas velocity and droplet diameter on droplet velocity and heat transfer coefficient was investigated. The result shows that the fused droplet velocity increases with the flight distance at the first stage and then decreases gradually, and the maximum droplet velocity points decrease with the incremental of droplet diameter. On the contrary, the heat transfer coefficient declines sharply before it rises, the minimum value is  $2k_g/d$ . An increasing droplet diameter leads to a smaller velocity difference between the droplet and gas, thus a smaller heat transfer coefficient. The maximum droplet velocity moves up along with the initial gas velocity, at the same time, the heat transfer coefficient also increases.

**Keywords:** Gas atomization, Iron-based alloy, Heat transfer, Mathematical model, Numerical simulation

第一作者: 胡云飞 (1994-), 男, 硕士研究生。通讯作者: 周香林: bkdzxl@ustb.edu.cn。

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0306100) 和国家自然科学基金 (51271034) 项目。

## 0 引言

近些年来,随着金属增材制造(MAM)、金属注射成型(MIM)及粉末冶金(PM)、冷热喷涂等行业的迅猛发展,对合金粉末的质量,特别是粒度分布、球形度、成分精度及杂质元素控制等方面的要求越来越高。雾化法制备的合金粉末具有球形度好、粒度分布窄且易于控制、氧含量低等优点,自20世纪20年代起源以来,经过100多年的发展,现已成为制备高性能合金粉末的主要方法<sup>[1-4]</sup>。雾化制粉过程是以高速气流冲击合金熔体,将其粉碎成小液滴并随后冷却凝固的过程;其间高速气流的动能转化为小液滴的表面能,同时拖曳熔滴一起飞行,因此是一个多相流相互耦合作用的复杂过程。熔滴在凝固之前要在雾化腔内飞行一段距离,即为熔滴的飞行过程,此过程中熔滴与气流存在热量交换。雾化熔滴的运动与热交换环节是熔体雾化破碎到最后凝固成粉的中间过渡阶段,起到承上启下的作用,对粉体凝固组织及最终性能将产生重要影响。但雾化过程速度很快,不易通过直接观测以准确确定过程参数,故研究工作者多采用数值模拟计算与实验相结合的方法,研究雾化过程中各参数对粉末性能的影响<sup>[5-7]</sup>,但这些研究并未对熔滴破碎之后冷却凝固之前的速度及传热行为做分析,亦没有考虑雾化气体的初始速率的影响,而决定气体初始速率的雾化压力是雾化生产中的重要影响因素,故此方面研究还需继续加深。本文以重载耐磨耐腐蚀激光熔覆涂层用FeNiCrSiMoMnC合金为对象,着重分析雾化制粉过程中熔滴的飞行运动过程及传热行为,并在此基础上考虑了气体初始速率的影响,建立描述相关过程的数学模型并给出相应的模拟计算结果,为进一步研究雾化熔滴的凝固组织及制备高质量合金粉体奠定基础。

## 1 数学模型的建立

### 1.1 气体与熔滴的运动模型

雾化过程中,合金液流通过喷嘴,在雾化气体的高速冲击作用下破碎成细小熔滴,熔滴在

雾化腔内一边飞行一边冷却,此过程中熔滴与周围气体环境发生明显的热量交换。已有研究者提出一些数学模型对熔滴的传热及冷却凝固行为进行预测<sup>[8-10]</sup>,但考虑到气雾化工艺本身是多相流耦合作用的复杂过程,因此需要对模型做必要的简化<sup>[11]</sup>:(1)熔滴在喷嘴出口处形成且视为刚性球体;(2)所有熔滴只沿轴向运动;(3)熔滴间无碰撞影响;(4)考虑到合金液流被高速气流破碎,熔滴初速度视为 $80\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

在雾化腔内,熔滴与气体的速度差引起作用在熔滴上的拖曳力,在该力的作用下,熔滴逐渐被加速,根据牛顿第二定律,可得如下熔滴速度与拖曳力的关系式<sup>[12-13]</sup>:

$$\rho_d \frac{dv_d}{dt} = (\rho_d - \rho_g)g - \frac{3}{4} \frac{\rho_g C_D}{d} |v_d - v_g| (v_d - v_g) \quad (1)$$

其中, $v_d, \rho_d$ 分别表示熔滴速度、密度, $v_g, \rho_g$ 分别表示气体速度、密度, $g$ 表示重力加速度,取 $9.8\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ , $C_D$ 表示拖曳系数。拖曳系数可由以下经验公式求得<sup>[14]</sup>:

$$C_D = 0.28 + \frac{6}{\sqrt{Re}} + \frac{21}{Re} \quad (2)$$

式中

$$Re = \rho_g d |v_d - v_g| / \mu_g \quad (3)$$

其中 $Re$ 表示雷诺数, $d$ 表示熔滴直径, $\mu_g$ 表示气体动力粘度。为求解方程(1),需建立气体速度与轴向距离的关系,假设熔滴的运动不影响气体速度的变化,一个较成熟的气体速度衰减方程为<sup>[15]</sup>:

$$v_g = v_0 \left[ 1 + \left( \frac{z}{\lambda} \right)^{20} \right]^{-0.05} \quad (4)$$

其中, $v_0$ 表示气体初始速率, $z$ 表示气体轴向飞行距离, $\lambda = \alpha \sqrt{A_e}$ 表示气体衰减系数, $\alpha$ 是与气体特性相关的经验常数,取 $7.414$ <sup>[16]</sup>, $A_e$ 表示喷嘴喉部面积,取 $2.25 \times 10^{-5}\text{m}^2$ 。

### 1.2 熔滴的传热模型

熔滴在飞行过程中与周围气体环境发生热交换,其热焓变化率与熔滴温度和固相分数有关,

由下式表示<sup>[17]</sup>：

$$\frac{dH_d}{dt} = C_{pd} \frac{dT_d}{dt} - \Delta H_d \frac{df_s}{dt} \quad (5)$$

式中， $C_{pd} = C_L - (C_L - C_S) f_s$ ， $\Delta H_d = \Delta H_f (C_L - C_S) (T_L - T_d)$ ，其中， $H_d$  表示单位质量合金热焓， $T_d$  表示熔滴温度， $f_s$  表示熔滴固相分数， $C_L$ ， $C_S$ ， $C_{pd}$  分别表示合金液态比热容、固态比热容和混合比热容， $\Delta H_f$  表示单位质量合金熔化潜热， $T_L$  表示液相线温度。

在快速凝固的条件下，可忽略热辐射对熔滴温度的影响，因此熔滴与外界发生热量交换的主要形式为热对流<sup>[18]</sup>。又考虑到合金液的热传导性高，熔滴的 Biot 数较低 ( $Bi = hd/\lambda$ )，可以忽略熔滴内部的温度梯度<sup>[19-20]</sup>，即熔滴整体视为等温系统，对流传热只发生在熔滴与外界环境之间，则熔滴的传热过程符合牛顿传热模型，由牛顿冷却定律得<sup>[16]</sup>：

$$\rho_d V_d \frac{dH_d}{dt} = -S_d h (T_d - T_g) \quad (6)$$

其中， $S_d$ ， $V_d$  分别表示熔滴的表面积、体积， $h$  表示传热系数， $T_g$  表示气体温度。联立式 (5)(6)，消去热焓微分项，得到直径为  $d$  的熔滴的温度变化表达式：

$$C_{pd} \frac{dT_d}{dt} = \Delta H_d \frac{df_s}{dt} - \frac{6h}{\rho_d d} (T_d - T_g) \quad (7)$$

传热系数  $h$  由 Ranz-Marshall 公式求得<sup>[21]</sup>：

$$h = \frac{k_g}{d} (2.0 + 0.6\sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr}) \quad (8)$$

其中， $Pr$  表示普朗特数，由式  $Pr = C_{pg} \mu_g / k_g$  确定， $C_{pg}$  表示气体比热容， $k_g$  表示气体导热系数。

## 2 模型求解与讨论

模型中所用的合金材料为 FeNiCrSiMoMnC，雾化气体为氮气，涉及到的参数如表 1 所示。因粉末粒度分布不均匀，分别选取直径为 60 $\mu\text{m}$ 、80 $\mu\text{m}$ 、100 $\mu\text{m}$ 、120 $\mu\text{m}$ 、150 $\mu\text{m}$  的熔滴为研究对象，根据以上构建的模型，通过编程求解，可得到熔滴直径对熔滴速度、雷诺数、传热系数的影响。

表 1 合金材料及气体相关参数<sup>[15-16]</sup>

Table 1 Parameters Related to Alloy Materials and Gas

参数名称	符号	参数值	单位
气体密度	$\rho_g$	1.16	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
气体初始速度	$v_0$	300	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
气体比热容	$C_{pg}$	1039	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
气体动力粘度	$\mu_g$	$1.78 \times 10^{-5}$	$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$
气体导热系数	$k_g$	$2.6 \times 10^{-2}$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
合金密度	$\rho_d$	7669	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

熔滴速度与飞行距离的关系如图 1 所示，熔滴速度都是先逐渐增大，这是由于气体的拖曳作用使其加速，当熔滴与气体速度相同时，熔滴速度达到最大值，此时由于惯性与重力的作用，熔滴会继续飞行，而气体速度持续衰减，对熔滴的拖曳作用表现为减速，因此熔滴速度又逐渐减小。由于气体速度衰减很快，可以看出，不同直径的熔滴达到最大速度时的飞行距离差距很小。同时

可以发现，气体对小熔滴的加速和减速作用都较明显，这是因为，由式 (2)(3) 可知，熔滴直径为影响雷诺数的一个主要因素，直径越小，雷诺数越小，则拖曳系数越大，即气体对熔滴的拖曳作用越明显，所以小熔滴加速较快，最大速度较大，减速也较快，甚至于后期小熔滴速度已经小于大熔滴速度。若考虑到此过程中熔滴的碰撞，则小熔滴可能会嵌入大熔滴内部成为异质形核的核心，

或嵌在大熔滴表面并在冷却凝固后形成卫星粉。

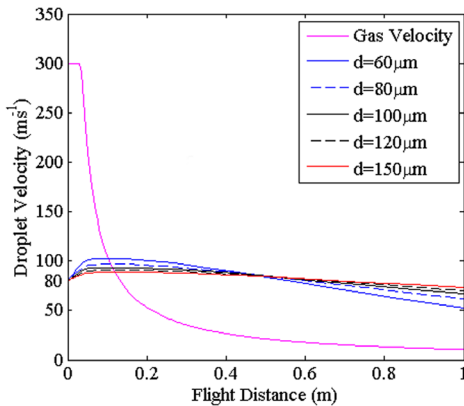


图 1 熔滴速度与飞行距离的关系

Fig.1 The relation between Droplet Velocity and Flight Distance

当综合考虑熔滴速度与直径因素时，雷诺数与飞行距离的关系如图 2 所示。开始由于气体速度基本不变，雷诺数下降较慢，当气体速度急速衰减时，雷诺数呈现出相同的趋势，即迅速减小，且在熔滴最大速度点处达到最小值，由式(3)可知，该最小值为 0，而后再随熔滴与气体相对速度的增大而增大。

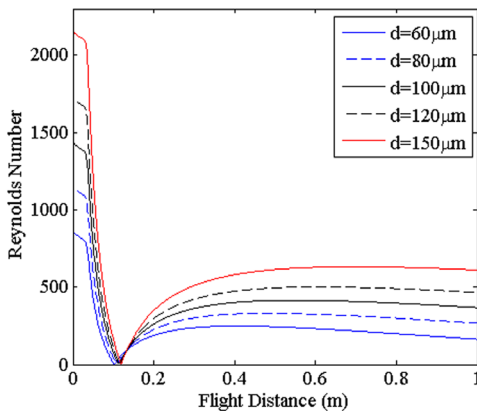


图 2 雷诺数与飞行距离的关系

Fig.2 The relation between Reynolds Number and Flight Distance

传热系数是衡量熔滴与雾化气体传热快慢的重要物理量，其值是和熔滴与气体相对速度正相关的函数，与飞行距离的关系如图 3 所示。初始阶段，由于熔滴与气体相对速度最大，所以传热

系数也为最大值，随相对速度的减小，其值逐渐减小，当熔滴与气体速度相等时，雷诺数为零，由式(8)可知，传热系数达到最小值  $2k_g/d$ ，后又随相对速度的增大而增大。

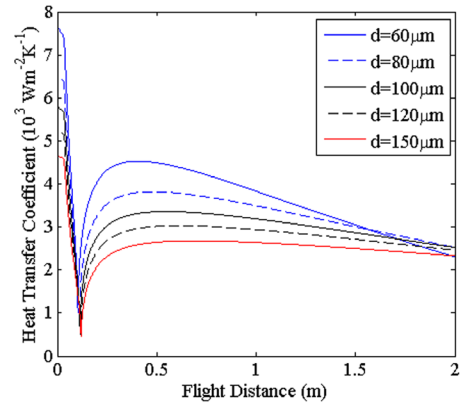


图 3 传热系数与飞行距离的关系

Fig.3 The relation between Heat Transfer Coefficient and Flight Distance

雾化压力是气雾化生产中重要的工艺参数，主要表现为影响气体的初始速率，本文模拟中通过改变气体初始速率来分析雾化压力对熔滴的影响，熔滴直径固定为 100µm，如图 4 所示。图中虚线为气体速度衰减曲线，相同颜色的实线为该气体初始速率下的熔滴速度变化曲线，气体初始速率越大，熔滴所能达到的最大速度越大，达到最大速度时熔滴的飞行距离更大，但该差距很小。传热系数和熔滴与气体的相对速度有关，如图 5 所示，基本走势还是从一开始的最大值逐渐减小至极小值  $2k_g/d$ ，然后再逐渐增大，但气体初始速

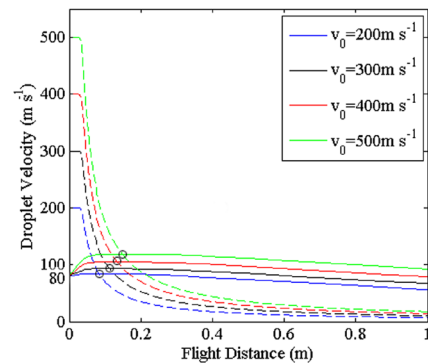


图 4 气体初始速率对熔滴速度的影响

Fig.4 The influence of Initial Gas Velocity on Droplet Velocity



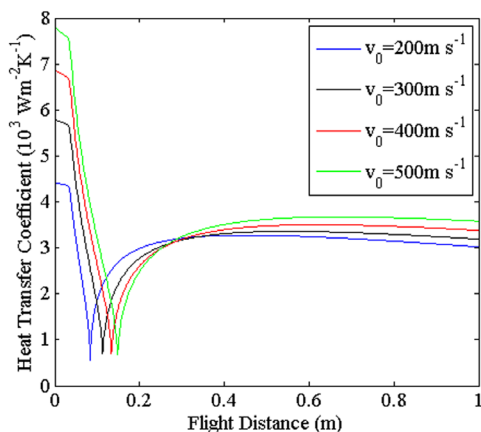


图 5 传热系数与飞行距离的关系

Fig.5 The relation between Heat Transfer Coefficient and Flight Distance

率越大，熔滴与气体的相对速度越大，故开始阶段传热系数较大，且由于相对速度为 0 时熔滴飞行距离更大，故传热系数达到极小值的飞行距离也相应变大。

### 3 结论

本文将雾化过程中雾化熔滴的运动模型与传热模型耦合，通过数值模拟，计算出熔滴在飞行过程中速度、雷诺数、传热系数与飞行距离的关系以及熔滴直径、气体初始速率对各参数的影响，主要结论如下：

(1) 熔滴速度随飞行距离的增大都经历先加速后减速的过程，熔滴速度存在一个最大值，且熔滴直径越大，最大速度越小。

(2) 雷诺数与传热系数均为熔滴与气体速度差的反比函数，因此都是先减小后增大，当速度差为 0 时，雷诺数达到最小值，为 0，传热系数也达到最小值，为  $2k_g/d$ ，且熔滴直径越大，速度差越小，传热系数越小。

(3) 雾化压力主要影响气体初始速率，气体初始速率越大，熔滴所能达到的最大速度越大，熔滴达最大速度时的飞行距离稍有增大。传热系数和熔滴与气体的相对速度有关，故气体初始速率越大，开始阶段传热系数越大，且传热系数达最小值时的飞行距离略有增加。

### 参考文献

- [1] 周恒, 马尧. Inconel625 合金粉末的雾化制备方法对比[J]. 热喷涂技术, 2018, 10(3): 14-18.
- [2] 马尧, 王旭, 胡宇, 等. 惰气雾化过程中粉末破碎机理研究[J]. 热喷涂技术, 2017, 9(1): 34-36.
- [3] 欧阳鸿武, 陈欣, 余文焘, 等. 气雾化制粉技术发展历程及展望[J]. 粉末冶金技术, 2007, 25(1): 53-58.
- [4] 王建军. 中国雾化制粉技术现状简介[J]. 粉末冶金工业, 2016, 26(5): 1-4.
- [5] Guo S, Liu Y. Estimation of critical cooling rates for formation of amorphous alloys from critical sizes[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2012, 358(20): 2753-2758.
- [6] Behúlová M, Mesárošová J, Grgáč P. Analysis of the influence of the gas velocity, particle size and nucleation temperature on the thermal history and microstructure development in the tool steel during atomization[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2014, 615(6): S217-S223.
- [7] Xia Z C, Wang W L, Luo S B, et al. Liquid phase separation and rapid dendritic growth of highly undercooled ternary Fe62.5Cu27.5Sn10 alloy[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(5): 044911.
- [8] Li B, Liang X, Earthman J C, et al. Two dimensional modeling of momentum and thermal behavior during spray atomization of  $\gamma$ -TiAl [J]. Acta Materialia, 1996, 44(6): 2409-2420.
- [9] Bergmann D, Fritsching U, Bauckhage K. A mathematical model for cooling and rapid solidification of molten metal droplets [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2000, 39(1): 53-62.
- [10] Vedovato G, Zambon A, Ramous E. A simplified model for gas atomization [J]. Materials Science & Engineering A, 2001, 304: 235-239.
- [11] Heringer R, Gandin C A, Lesoult G, et al. Atomized droplet solidification as an equiaxed growth model[J]. Acta Materialia, 2006, 54(17): 4427-4440.
- [12] 李克峰. Fe-6.5Si 单相合金雾化液滴凝固行为与组织形成机制 [D]. 上海: 上海大学, 2014.
- [13] Li S, Wu P, Fukuda H, et al. Simulation of the solidification of gas-atomized Sn-5mass%Pb droplets[J]. Materials Science & Engineering A, 2009, 499(1): 396-403.
- [14] Gutierrez-Miravete E, Lavernia E J, Trapaga G M, et al. A mathematical model of the spray deposition process[J]. Metallurgical Transactions A, 1989, 20(1): 71-85.
- [15] 方鹏均. 气雾化 Ni-Al 合金粉末快速凝固特征及相场

(下转 72 页)

参考文献

[1] 伍超群, 周克崧, 邓畅光, 等. 浅谈热喷涂涂层残余应力的测试技术 [J]. 表面技术, 2005, 34(5): 82-83.

[2] 丁坤英, 郭亚飞, 鄢慧. 残余应力对涂覆 WC-17Co 涂层的 Ni718 合金弯曲疲劳寿命的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2017(2): 307-311.

[3] 姜祎, 徐滨士, 王海斗. 热喷涂层残余应力的来源及其失效形式 [J]. 金属热处理, 2007, 32(1): 25-27.

[4] 王志平, 林小娉, 贾鹏, 等. 等离子喷涂热障涂层热震失效过程及残余应力分析 [J]. 材料热处理学报, 2012, 33(4): 116-120.

[5] Zhu H B, Shen J, Gao F, et al. Microstructure and sliding Wear Performance of Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>-(Ni,Cr)<sub>3</sub>(Al,Cr) Coating Deposited from Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> In Situ Formed Atomized Powder[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2017, 26: 254-264.

[6] 邝子奇, 邓畅光, 牛少鹏, 等. 超音速火焰喷涂 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-BaF<sub>2</sub>-CaF<sub>2</sub>/NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层的制备及抗热震性能 [J]. 材料科学与工程学报, 2015, 33(3): 319-323.

[7] Guilemany J M, Nutting J, Lorcalsem N. Microstructural examination of HVOF chromium carbide coatings for high-temperature applications[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1996, 5: 483-489.

[8] 胡一贯, 乐德芬. 用激光干涉法分析薄膜应力 [J]. 中国科学技术大学学报, 1992, 2:204-208.

[9] 孙光爱, 陈波. 中子衍射残余应力分析技术及其应用 [J]. 核技术, 2007, 30(4): 286-289.

[10] 弓满锋, 乔生儒, 卢国锋, 等. X 射线测量高速钢上不同厚度氮化钛涂层残余应力 [J]. 材料科学与工艺, 2010, 18(3): 415-419.

[11] Oliver W C, Pharr G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. Journal of Materials Research 1992, 7: 1564-1583.

[12] Stoney G G. The tension of metallic films deposited by electrolysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A 1909, 82: 172-175.

[13] 王敏毅, 黄颖. 石墨形态对铸铁高温组织和性能的影响 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2014, 42(4): 622-627.

[14] Manse J C, Maury F, Morancho R, et al. Residual stresses analyses of metallo-organic chemically vapour-deposited Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> coatings on SAE 4135 steel substrates[J]. Surface & Coatings Technology, 1991, 45(1-3): 185-192.

[15] 王枫, 朱晖朝, 陈志坤, 等. 采用 HVOF 与 HVOF 工艺制备的 NiCr-25%Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层的结构和性能表征 [J]. 材料研究与应用, 2010, 04(3): 202-206.

[16] 陈永雄, 梁秀兵, 商俊超, 等. 轴类件热喷涂涂层残余应力的有限元分析 [J]. 焊接学报, 2013, 34(6): 13-16.

[17] 刘前, 王优强, 苏新勇, 等. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40%TiO<sub>2</sub> 陶瓷涂层残余应力的有限元分析 [J]. 热喷涂技术, 2015, 7(2): 51-55.

[18] 伍建华, 刘超, 倪立勇, 等. 等离子喷涂纳米氧化锆涂层组织结构及热物性能研究 [J]. 热喷涂技术, 2017, 9(4): 30-33.



(上接 23 页)

模拟 [D]. 四川: 西南交通大学, 2017.

[16] Lee E S, Ahn S. Solidification progress and heat transfer analysis of gas-atomized alloy droplets during spray forming[J]. Acta Metallurgica Materialia, 1994, 42(9): 3231-3243.

[17] Levi C G, Mehrabian R. Heat flow during rapid solidification of undercooled metal droplets[J]. Metallurgical Transactions A, 1982, 13(2): 221-234.

[18] Mathur P, Apelian D, Lawley A. Analysis of the spray deposition process [J]. Acta Metallurgica, 1989, 37(2): 429-443.

[19] 欧阳鸿武, 陈欣, 余文焘, 等. 一种表征紧耦合气雾化中熔滴冷却速率的新方法 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2007, 38(3): 375-380.

[20] Perepezko J H, Sebright J L, Höckel P G, et al. Undercooling and solidification of atomized liquid droplets[J]. Materials Science & Engineering A, 2002, 326(1): 144-153.

[21] Aissa A, Abdelouahab M, Noureddine A, et al. Ranz and Marshall Correlations limits on heat flow between a sphere and its surrounding gas at high temperature[J]. Thermal Science, 2015, 19(5): 1521-1528.