

[文章编号] 1004-0609(2001)06-1083-06

电弧喷涂锌合金液滴飞行过程数值分析^①

王伊卿, 孙 琨, 周宏志, 朱东波, 赵文轸, 卢秉恒

(西安交通大学 机械学院, 西安 710049)

[摘 要] 运用流体力学、传热学以及相变等理论, 建立数学模型描述金属液滴与气流的相互作用, 计算了金属液滴的飞行速度和温度衰减过程。结果表明: 金属液滴飞行速度、温度以及凝固程度是金属液滴直径、飞行距离的函数; 金属射流中固态金属颗粒比例是金属射流中金属液滴质量分布的函数; 飞行距离 600 mm 以内, 固态、半固态金属颗粒所占比例不超过 2%。

[关键词] 电弧喷涂; 速度; 温度; 数值计算

[中图分类号] TG 706; Y 165837

[文献标识码] A

实践证明, 电弧喷涂锌合金用于模具制造具有速度快、成本低等优势^[1]。研究影响模具性能和精度的因素如: Zn-Al 合金涂层温度、应力应变以及涂层组织等, 必须以金属液滴的飞行速度、温度以及凝固程度为初始条件。作者运用了流体力学、传热学以及相变等理论, 建立数学模型描述金属液滴与气流的相互作用及金属液滴之间的相互作用, 预测了金属液滴的飞行速度、温度随飞行距离及射流中所在位置的变化, 为涂层温度场、应力场的计算提供初始条件, 并以较精确的实验数据为输入参数以验证模型的准确性。

1 金属颗粒温度与速度计算控制方程

1.1 金属液滴运动及温度数学模型

金属喷涂射流由不同直径的金属液滴所组成, 建立数学模型时假设金属液滴为直径均一的球形, 飞行轨迹沿直线。

气体轴向速度 v_g 随轴向距离 z 的变化可表示为

$$v_g = v_{gi} \exp(-\frac{z}{\lambda}) \quad (1)$$

式中 v_{gi} 为气体出口速度, λ 为衰减系数(0.1~0.3), 主要依据实验而定。

忽略重力的作用, 直径为 d 的球形金属液滴在一维连续的雾化气流中所受的总的作用力 F 可由牛顿方程表示^[2]

$$F = ma = m(dv_d/dt) = C_D \rho_g v_r^2 A / 2 \quad (2)$$

式中 a 为金属液滴的加速度, A 为金属液滴的表

面积。

金属液滴的加速度:

$$a = dv_d/dt = 3C_D \rho_g (v_g - v_d) |v_g - v_d| / 4d \rho_d \quad (3)$$

拖曳系数 C_D 与雷诺数有关^[3], 表示为

$$C_D = 0.28 + [6/(Re)^{1/2}] + [21/Re] \quad (4)$$

此方程适合于较宽的雷诺数(0.1 < Re < 4 000), 与标准的拖曳曲线相比偏差不超过 $\pm 7\%$ 。

$$Re = \rho_g (v_g - v_d) d / \mu_g \quad (5)$$

式中 μ_g 为气体的运动粘度。

对于给定的金属液滴, 其初始温度 T_i 决定于电弧喷枪的功率以及送丝速率。金属液滴在飞行过程中通过对流与辐射散失热量直至达到结晶温度 T_n 。这个温度可能低于平衡液态温度, 动态热平衡方程为

$$Q_g = hS(T_d - T_g) + \sigma \varepsilon S(T_d^4 - T_g^4) \quad (6)$$

式中 h 为对流换热系数, σ 为 Stefan-Boltzman 常数, ε 为辐射系数(0.1), Q_g 为金属液滴飞行过程中热量散失, 可表示为

$$Q_g = mC_d \Delta T / \Delta t \quad (7)$$

因为 Biot(hd/K_d) (比奥数) < 0.1, K_d 为金属液滴的导热系数, 可假设金属液滴与周围气流之间的热传递由界面控制。方程(6)中的对流传热系数可表示为^[2]

$$h = K_g (2 + 0.6Re^{0.5} Pr^{0.33}) (c_{g(av)}/c_g)^{0.26} / d \quad (8)$$

式中 K_g , $c_{g(av)}$, c_g 分别为气体的导热系数、平

① [收稿日期] 2001-01-06; [修订日期] 2001-03-26

[作者简介] 王伊卿(1964-), 男, 博士。

均比热容、比热容。比热容之比 $c_{g(\text{avg})}/c_g$ 的引入是考虑到在金属液滴周围的气流存在很大的温度梯度, 平均比热容 $c_{g(\text{avg})}$ 为在平均温度 $(T_d + T_g)/2$ 的值。

通过联解方程(6), (7)可得到每时间间隔 Δt 内温度的变化 ΔT , 计算中所用参数如表1和表2所列, 计算结果见图1和图2。如果能得到金属液滴的瞬时速度, 即可得到金属液滴在每个飞行区间的热量散失。

表1 计算中所用气体热物性参数^[4, 5]

Table 1 Thermal-physic constant of gas in calculation

Thermal conductivity, K_g $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	Stefan Boltzman constant, σ $/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4})$	Kinematic viscosity, μ_g $/(kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$
2.83E-2	6.28E-8	19.6E-6
Density, ρ_g $/(kg \cdot m^{-3})$	Specific heat, c_g $/(kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	Pr
1.95	1.01	0.708

表2 Zn-Al 合金的热物性参数^[6]

Table 2 Thermal-physic constant of Zn-Al alloy in calculation

Density, ρ $/(kg \cdot m^{-3})$	Melt point, T_m/K	Specific heat, c_d $/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$
7100	690	500(800K)
Thermal conductivity, K_d $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	Latent heat of fusion, ΔH_f $/(kJ \cdot kg^{-1})$	Latent heat of evaporation $/(MJ \cdot kg^{-1})$
113	100.9	1.782

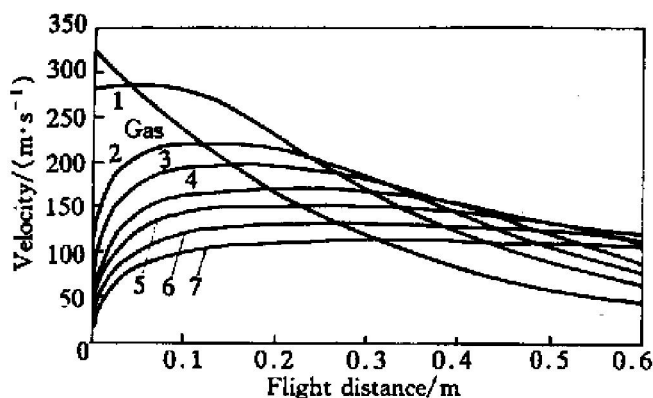


图1 金属液滴飞行速度数值计算结果

Fig. 1 Calculation curves of melt metal droplets velocity with size 10~170 μm

1— $d=10 \mu m$; 2— $d=20 \mu m$; 3— $d=30 \mu m$;
4— $d=50 \mu m$; 5— $d=70 \mu m$; 6— $d=110 \mu m$;
7— $d=170 \mu m$

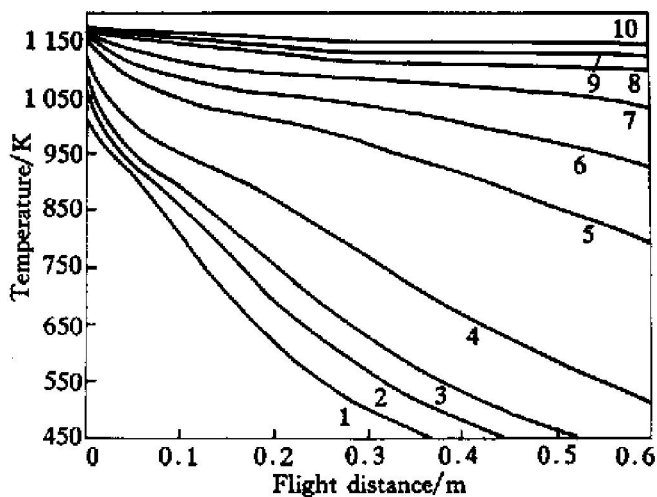


图2 金属液滴飞行过程中温度变化数值计算结果

Fig. 2 Calculation curves of melt metal droplets

temperature with size 5.5~190 μm

1— $d=5.5 \mu m$; 2— $d=6 \mu m$; 3— $d=6.5 \mu m$;
4— $d=10 \mu m$; 5— $d=20 \mu m$; 6— $d=30 \mu m$;
7— $d=50 \mu m$; 8— $d=90 \mu m$; 9— $d=130 \mu m$;
10— $d=190 \mu m$

1.2 模型参数的确定

1.2.1 压缩空气出口速度

研究所用设备在工作期间储气罐内气压为 $p_0 = 0.6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, $T_0 = 320 \text{ K}$, 压缩空气经一喷管流入压强为 $p_1 = 0.12 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 的大气空间, 管内流动为一维等熵流动, 喷枪喉管为单纯收缩管, 测得出口截面积为 70 mm^2 , 下面确定气体出口速度 v_{gi} 及质量流率^[4]:

$$\text{由于 } \frac{p_1}{p_0} = \frac{0.12}{0.6} = 0.2 < 0.528 = \frac{p^*}{p_0}$$

可知在收缩管内的流量已被堵塞, 此时在出口端的流速为音速状态, 且

$$\rho_0 = \frac{p_0}{mRT_0} = \frac{0.6 \times 10^5}{287.1 \times 320} = 0.653 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho^* = \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{1}{K-1}}$$

$$\rho_0 = \left(\frac{2}{1.4+1} \right)^{\frac{1}{1.4-1}} 0.653 = 0.414 \text{ kg/m}^3$$

$$\alpha_0 = \sqrt{K_g RT_0} = \sqrt{1.4 \times 287.1 \times 320} = 358 \text{ m/s}$$

所以, 出口端气体速度为

$$v_{gi} = \sqrt{\frac{2}{K+1}} \alpha_0 = \sqrt{\frac{2}{1.4+1}} \times 358 = 327 \text{ m/s}$$

1.2.2 金属液滴的初始温度

由电弧喷涂原理可知, 两带电金属丝在满足电弧产生所需要的电场强度等条件时, 金属丝尖端通过气体放电, 产生电弧, 将电能转化为热能、机械能和光能, 将金属丝熔化。用于加热和熔化金属丝得总热量主要由两部分组成, 即

$$P_m = I(U_m + IR_s) \quad (9)$$

式中 R_s 为金属丝导电部分长度 L_s 的电阻, 可忽略; U_m 为等效电压; P_m 是单位时间内为电弧热和电阻热提供的能量。

实验中测得送丝电压为 15 V 时, 锌合金丝喷涂速度为 10 kg/h, 熔丝电压为 $U(25 \text{ V})$, 工作电流为 $I(100 \text{ A})$, 金属丝的初始温度为 $T_0(293 \text{ K})$, 熔化至最高温度为 T_i , 假定来自电源的电能 80% 用于熔化金属丝, 实验中测定沉积效率, 发现有 4% ~ 8% 的金属被汽化, 则有

$$3600 UI \cdot 80\% = \int_{T_0}^{T_i} 9.5 C_d T + 9.5 \Delta H_f + 0.5 \Delta H_v$$

$$T_i = 1663 \text{ K}$$

应该注意的是, 金属锌合金是不可能全部加热至超过汽化温度的, 说明假设电流效率低于 80%, 或者被加热汽化的金属锌所占比例高于 8%, 根据实际情况, 最高温度可以取其为汽化温度,

$$T_i = 1179 \text{ K}$$

2 计算结果

图 1 所示为气流初始速度 327 m/s 时, Zr-Al 液滴的飞行速度, 可以看出, 金属液滴的飞行过程满足牛顿运动方程, 存在一加速、减速过程, 金属液滴的加速度以及所能达到的最高速度和金属液滴的尺寸及密度有关。金属液滴的尺寸越小, 加速度越大, 所能达到的最大速度越大, 同时, 达到最大速度所需时间越短, 但同时, 小尺寸金属液滴在达到最高速度后的速度衰减程度也越大。

图 2 为金属液滴飞行过程中温度变化计算结果, 金属液滴的温度衰减和金属液滴的尺寸有关, 尺寸越小, 金属液滴相对表面积增加, 温度衰减幅度增加。

3 计算结果的分析与验证

金属液滴在飞行过程中, 从过热熔体到凝固, 经过液相冷却、形核、再辉、凝固偏析、共晶反应及固相凝固等几个阶段^[7]。

纯金属的实际开始凝固温度 T_n 总是低于理论凝固温度 T_m , 这种现象称为过冷。 T_m 与 T_n 之差 ΔT , 称为过冷温度。金属的过冷温度不是一个恒定值, 而受金属中的杂质和冷却速度的影响。金属愈纯, 过冷温度愈大; 冷却速度愈快, 过冷温度愈

大^[8]。采用薄带急冷实验, Al-Fe-V-Si 1% 合金的过冷度甚至可达到 300 K^[9]。

实验中设计了一种实验方法, 用来测定金属液滴的实际过冷温度 ΔT_{actual} , 采用抛光不锈钢板采集金属液滴, 在日本 JSM-840 型扫描电镜下观察采集板上金属液滴撞击后的形貌, 观察最大已凝固金属液滴尺寸(d^*), d^* 随飞行距离的变化用来确定金属液滴的过冷温度。送丝电压为 15 V, 熔丝电压为 25 V, 喷涂轴向距离分别为 200 mm, 300 mm 和 400 mm。

图 3 所示为金属液滴撞击采集板后的形貌, 从中可看出有 3 种典型的形貌, 小直径的金属液滴撞击采集板后呈光滑球形, 可认为在飞行过程中已凝固; 较大直径的金属液滴呈半凝固状态, 也可以称为糊状, 在采集板上呈部分扁平化; 更大直径的金属液滴呈完全液态, 在采集板上呈完全扁平化, 并可见有飞溅。

确定了 d^* 随飞行距离的变化, 就可以根据金属液滴温度随飞行距离的变化确定不同直径金属液滴温度, 按照金属液滴的温度模型计算过冷温度。

将直径 d^* 的金属液滴凝固时飞行距离代入方程(3), (6) 和(7), 可以断定, 计算出的温度即为该颗粒的即将凝固完毕时的温度 T_n^* , 也可以认为, 金属液滴在采集板处的实际凝固温度最高不超过 T_n^* , 同时, 实验结果也说明, 所有直径小于 d^* 的金属液滴在采集板位置之前均发生凝固。在相图上查出理论凝固温度, 实际过冷温度 $\Delta T_{\text{actual}} = T_m - T_n^*$, 计算结果如表 3, 可以看出, 对于 Zr-Al 合金, 小直径金属液滴($< 6.5 \mu\text{m}$) 在飞行距离 600 mm 内存在过冷现象。从金属液滴温度随飞行距离的关系计算结果(图 2) 看出, 至少在飞行距离小于 600 mm 时, 较大金属液滴($> 20 \mu\text{m}$) 温度高于 800 K, 不存在过冷, 最后以液态撞击基体。

在整个飞行过程(600 mm 以内) 中, 金属液滴既有完全固态的小液滴($< 6.5 \mu\text{m}$), 也有完全液态的大液滴($> 20 \mu\text{m}$), 同时还存在已过冷形核的半固态液滴($< 15 \mu\text{m}$)。

采用盛水玻璃瓶收集金属颗粒, 过滤烘干后, 在扫描电镜下观察金属颗粒直径分布, 并分析金属颗粒在不同位置的直径尺寸分布, 得到金属颗粒直径的质量分数 $f(d_i)$ 。送丝电压分别为 15 V, 熔丝电压为 25 V, 喷涂轴向距离为 400 mm, 采集时间为 5 s。

图 4 所示为金属液滴尺寸和重量分布频率, 可以看出, 金属液滴的半径基本上集中在 35~ 75

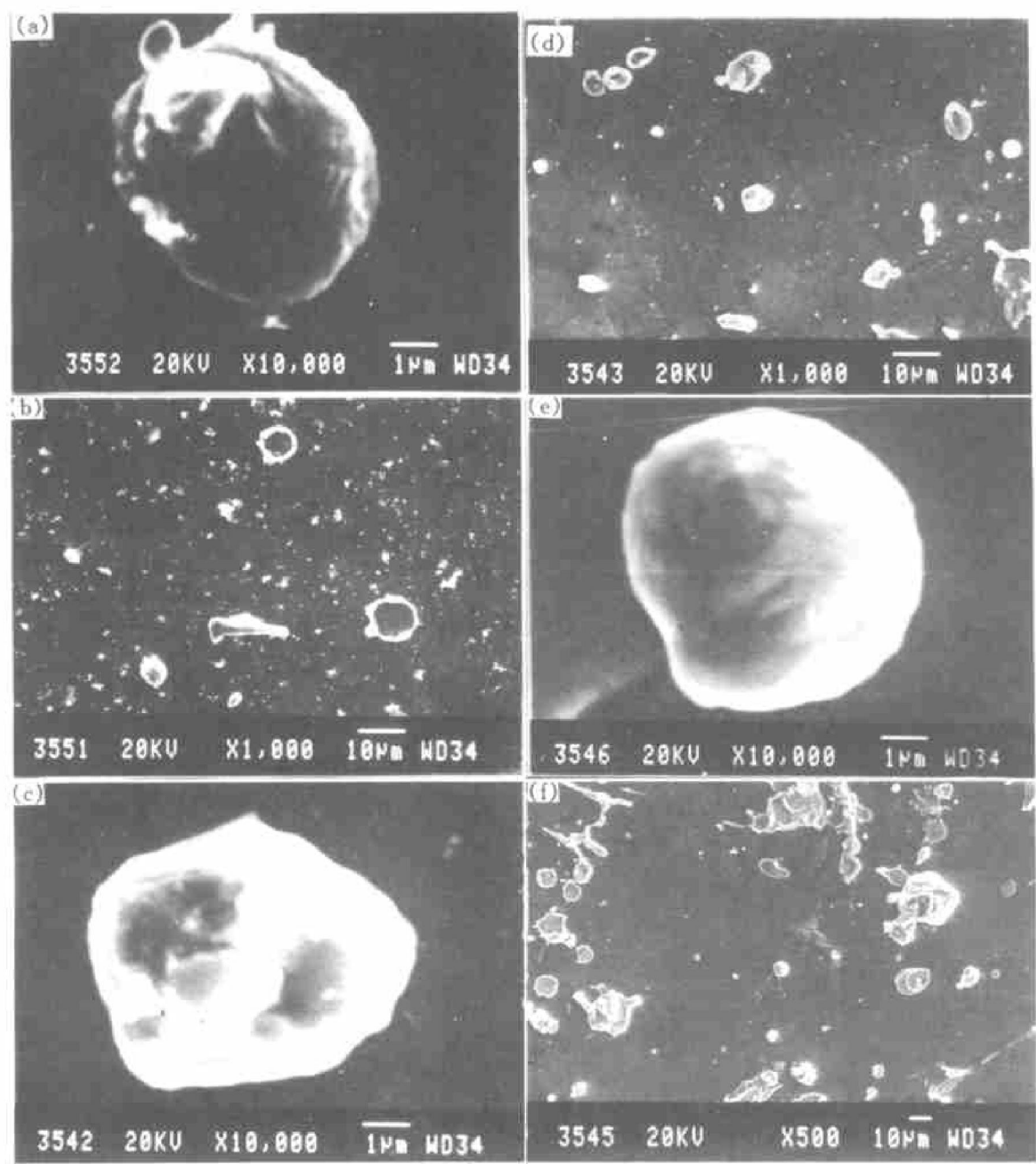


图3 金属液滴分别在 200, 300 及 400 mm 处最大的凝固颗粒

Fig. 3 Largest metal droplets frozen at flight distance 200, 300, 400 mm

(a), (b) —Flight distance 200 mm; (c), (d) —Flight distance 300 mm; (e), (f) —Flight distance 400 mm

表3 Zn-Al 合金液滴的温度、过冷温度

Table 3 Calculation of droplets temperature and undercooling for Zn-Al alloy

$d^*/\mu\text{m}$	Calculated temp. T_n^* /K	Nucleation temp. of pure Zn T_n /K	Calculated undercooling Tem. ΔT_{actual} /K
5. 5(flight 200 mm)	628	555. 4~ 693	65
6(flight 300 mm)	564	554. 4~ 693	29
6. 5(flight 400 mm)	548	554. 4~ 693	145

μm 附近, 且金属液滴直径的质量分布函数符合正态分布, 可表示为

$$f(d_i) = \left| \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \right| \exp \left[-\frac{\ln^2(d)}{2\sigma^2} \right] \tag{10}$$

式中 σ 为对数正态标准偏差。

由统计结果看出, 直径在 $10\ \mu\text{m}$ 以下的锌合金液滴所占重量比不超过 2%, 因此能够以固态或半固态形式撞击基体的金属液滴重量不超过 2%。

从 $20\sim 190\ \mu\text{m}$ 的金属液滴的温度状态计算结果可以断定: 对于最大直径的金属液滴在给定飞行距离足够长时, 可以是完全固态。在给定的飞行距离上, 能够发生凝固的最大金属液滴直径可由图5曲线(b)表示, 此时, 金属液滴直径较小,

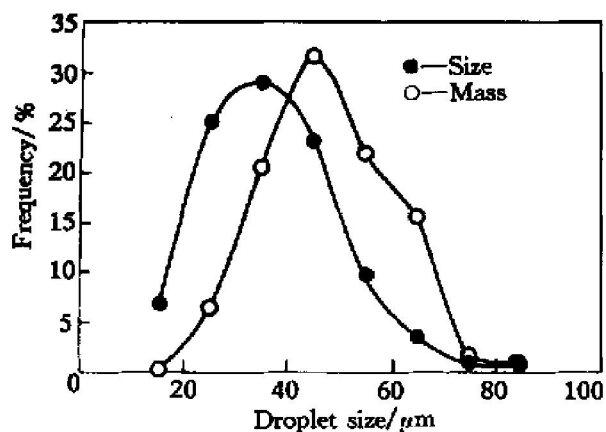


图 4 飞行 400 mm 锌合金液滴尺寸、质量分布

Fig. 4 Droplets size and mass distributions of Zn-Al in spray at axes and flight distance of 400 mm

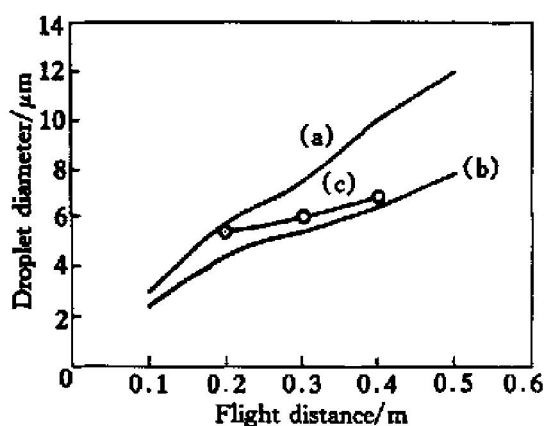


图 5 能够发生非均匀形核 (a), 均匀形核 (b) 的最大金属液滴直径预测和实验结果 (c)

Fig. 5 Predicted variation of d^* with flight distance for Zn-Al droplet in heterogeneous (a), homogeneous nucleation (b) respectively and experimental results (c)

冷却速度足够大, 存在较大的过冷度, 形核过程较均匀; 当金属液滴直径 d 大于 d^* , 冷却速度较小, 在给定的飞行距离上, 过冷度不足或不存在过冷度, d 与飞行距离的关系曲线如图 5 曲线 (a), 此时形核过程不均匀。根据不锈钢板在给定飞行距离上采集的已经凝固的金属液滴直径实验数据 (图 5 曲线 (c)), 实验测得的结果在两曲线之间, 说明实验采集的金属液滴的凝固方式介于均匀形核与非均匀形核方式之间, 符合一般实验条件下的结果。可以证实根据在给定飞行距离采集到能够凝固最大金属液滴来确定金属射流中金属液滴状态的方法是有效的。

4 结论

电弧喷涂 Zn-Al 合金时, Zn-Al 合金液滴的飞行速度、温度以及凝固程度与飞行距离、液滴直径有关, 金属射流中金属液滴直径分布在 $5.5 \sim 190 \mu\text{m}$, 金属射流中固态金属颗粒的比例是金属液滴质量分布的函数。在飞行 600 mm 以内, 小金属液滴 ($< 6.5 \mu\text{m}$) 存在过冷现象, 呈固态; 较大金属液滴 ($> 20 \mu\text{m}$) 不存在过冷现象, 以完全液态形式存在。金属射流中, 金属颗粒以固态、半固态和完全液态形式存在, 其中固态、半固态金属液滴的重量不超过 2%。

金属液滴在飞行过程中, 飞行 600 mm 以内, 直径 $6.5 \mu\text{m}$ 以下的锌合金液滴的过冷形核, 介于均匀形核与非均匀形核方式之间。

[REFERENCES]

- [1] WANG Yi-qing(王伊卿). 电弧喷涂模具制造材料性能的研究 [J]. Chinese Mechanical Engineering(中国机械工程), 2000, 11(10): 41-44.
- [2] Mathur P, Apelian D, Lawley A. Analysis of the spray deposition process [J]. Acta Metal, 1989, 37(2): 429-443.
- [3] Clift R, Grace J R, Weber M E. Bubbles, Drops and Particles [M]. New York: Academic Press, 1979.
- [4] MAO Chun-pu(茅春浦). Fluid Mechanics(流体力学) [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1995. 565.
- [5] ZHANG Xin-zhao(张信昭). Basic Principle of Spray Metallurgy(喷粉冶金基本原理) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988. 10.
- [6] CHENG Shang-mo(程尚模). Heat Transmission(传热学) [M]. Beijing: Higher Education Press, 1988. 152.
- [7] FU Xiao-wei(傅晓伟), ZHANG Ji-shan(张济山), SUN Zu-qing(孙祖庆). 喷射沉积过程的计算模型及优化软件 [J]. Acta Metallurgica Sinica(金属学报), 1999, 35(2): 147-151.
- [8] CAO Ming-sheng(曹明盛). Basic Principle of Physical Metallurgy(物理冶金基础) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985. 31.
- [9] PANG Hua(庞华), DENG Jiang-ning(邓江宁). 快凝 Al-Fe-V-Sr-Nd 合金中第二相选择 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 2000, 10(3): 370-373.

Numerical analysis of arc spray Zn-Al droplets in flight

WANG Yi-qing, SUN Kun, ZHOU Hong-zhi, ZHU Dong-bo, ZHAO Wen-zhen, LU Bing-heng
(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China)

[Abstract] An integral model for arc spray Zn-Al droplets in flight was developed using established theoretical principles of fluid mechanics, heat transmission and phase transformation. Mathematical models describe the interconnected processes of droplet-gas interactions in flight. The calculation result of Zn-Al droplets velocity and temperature shows that droplets velocity and temperature are function of flight distance and droplets diameter. Percentage of solid droplets in metal spray is a function of droplets size distribution. In flight distance (< 600 mm), depending on size and cooling rate, the droplets in metal spray are completely liquid, partially solidified, or completely solidified, the percentage of partially solidified, or completely solidified in metal spray do not exceed 2%.

[Key words] arc spray; velocity; temperature; numerical analysis

(编辑 朱忠国)