

喷射成型过程中雾化粒滴的 数值模拟^①

张永安 熊柏青 刘江 张少明 石力开

(北京有色金属研究总院, 北京 100088)

刘勇 王峰

(北京科技大学, 北京 100083)

摘要 在对金属熔体气雾化过程分析的基础上, 建立了喷射成型过程中雾化粒滴在飞行阶段的数学模型。选取纯铝为模拟雾化金属, 计算了雾化气体速度、粒滴速度、粒滴温度、雾化锥固相含量等过程参量的变化过程。

关键词 喷射成型 数值模拟 雾化粒滴

中图法分类号 TG146.2

在喷射成型过程中, 高温合金熔体经高温导流系统注入雾化区后, 被高压气体雾化, 形成包含大量不同尺寸液滴的雾化锥。这些小液滴被高速雾化气体加速, 在飞行一段距离以后沉积到接收基体上形成沉积坯件^[1, 2], 雾化液滴在飞行阶段与雾化气体相互作用将决定沉积坯件的成型性及显微组织, 本文将就雾化粒滴在飞行过程中的状态进行探讨。

1 数学模型

为了建立雾化粒滴在飞行过程中的数学模型, 首先进行了以下几点假设:

(1) 合金熔体流经高压气体雾化后, 雾化锥中包含的粒滴尺寸分布基本确定, 且以后不再发生改变, 熔体流雾化成小粒滴的时间可以忽略不计;

(2) 雾化粒滴一经形成就得到球状外形;

(3) 喷雾形成的粒滴在自身重力和气流的共同作用下沿直线运动。这样就忽略了粒子之

间的粘着力, 也忽略了球形液滴周围的流体扰动对液滴运动的影响;

(4) 液滴在飞行中的冷却速度由传热系数决定。传热系数 h 值是从 Ranz-Marshall 关系中得到的, 与喷射成型过程的实际情况有差别, 但仍可以得到近似的数值^[3]。

(5) 模型忽略了液滴内部沿直径方向的温度梯度。

1.1 气体速度

在气雾化过程中, 雾化气体经由雾化喷嘴流出, 在距离喷嘴出气孔很小的一段距离内, 气体速度达到最大值, 但是由于周围环境中的气流场速度相对小得多, 就造成雾化气体的速度的衰减。Bewlay B P 等人总结了气体速度的变化规律^[4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_g = V_{g0} - X(V_{g0} - V_{g54})/54 \\ 0 \leq X < 54 \text{ mm} \\ V_g = 4727.066/X - 2.6 \\ X \geq 54 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中 V_g 为雾化气体的速度, m/s; V_{g0} 为气

① 国家“八六三”计划资助项目 收稿日期: 1999-01-15
张永安, 男, 27岁, 硕士, 助理工程师

体在雾化焦点处的速度, m/s; V_{g54} 为气体在距离雾化焦点 54 mm 处的速度, m/s; X 为液滴距离雾化焦点的距离, m。

1.2 液滴速度

合金熔体流经过雾化区以后, 被雾化气体雾化成为大量的小液滴, 由于合金液滴与雾化气体之间存在着相对较大的速度差, 液滴会受到牵引而加速, 当达到某一时刻时, 液滴的速度等于周围气体的速度, 然后速度又衰减。

液滴的速度分布可以用动量方程来决定, 这与液滴的加速度和气体的相对速度有关。在一维连续流动的气体中, 直径为 d 的球形粒滴所受的力可以根据牛顿第二定律给出:

$$F = m \frac{dV_d}{dt} = mg + m \frac{3C_D \rho_g (V_g - V_d) |V_g - V_d|}{4d\rho_d} \quad (2)$$

式中 m 为液滴的质量, kg; C_D 为阻力系数, ρ_g 为雾化气体的密度, kg/m^3 ; d 为液滴直径, m; ρ_d 为液滴的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 。式(2)中的阻力系数 C_D 是表征气体对粒滴作用强弱的无量纲的数, 与雷诺数的关系如下式表达:

$$C_D = 0.28 + \frac{6}{\sqrt{\text{Re}}} + \frac{21}{\text{Re}}$$

$$\text{Re} = \frac{|V_g - V_d|d}{\eta} \quad (3)$$

在上式中, Re 为雷诺数, η 为气体的粘度系数, m^2/s 。

1.3 液滴在飞行过程中的温度和凝固过程

喷射成型技术制备坯件的成型性以及沉积坯件的显微组织很大程度上取决于沉积时液滴的状态, 为了表征沉积时粒滴的状态必须给出液滴飞行时的温度变化过程。

在合金小液滴的飞行过程中, 液滴的表面温度要远远高于周围环境的温度, 液滴的热能就会以对流传热和辐射传热的方式传递到周围环境中, 其传热过程可以用下式表达:

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

式中 Q_g 为热传输量, h 为对流传热系数, σ

为黑体热辐射系数, ϵ 为黑度, S 为粒滴表面积。

液滴和周围气体的热传导被设为界面可控的, 因为 Biot 数 $(hd/K_d) < 0.1$, 其中 K_d 是液滴的热传导率。方程(4)中的对流传导系数 h 由下式给出:

$$h = \frac{K_g(2 + 0.6\sqrt{\text{Re}}\sqrt[3]{p_r})}{d} \quad (5)$$

但是相对液滴表面对流传热而言, 表面辐射传热量很小, 足以忽略不计, 那么热平衡方程式可以表达为

$$mC_d \frac{\Delta T}{dt} = hS(T_d - T_g) \quad (6)$$

联立方程(5)和(6)可以计算出每经过时间 dt 液滴的温度变化值 ΔT 。

当粒滴温度达到形核温度时, 其内部会发生异质形核, 开始发生凝固。在过冷液滴中, 固液界面以一定速度向前推进, 凝固潜热以极快的速度释放, 而外表面的对流散热强度相对较弱, 不能及时将这些热能迅速传走, 从而导致形成再辉现象, 这一过程可用下式表达:

$$\begin{cases} \Delta T_r = \frac{H_f F_{s0}}{C_d} \\ T_r = T_n + \Delta T_r \end{cases} \quad (7)$$

式中 H_f 为液滴熔化潜热, J/kg ; ΔT_r 为再辉时升高的温度; T_r 为再辉温度; F_{s0} 为再辉发生时的凝固分数。

$$C_d = \begin{cases} C_{dl} & T \geq T_n \\ C_{da} & T_n < T \leq T_r \\ C_{ds} & T \leq T_s \end{cases} \quad (8)$$

式中 C_{dl} 为粒滴液态时的比热, T_n 为形核温度, C_{da} 为平均比热, T_s 为固相线温度, T_r 为再辉温度, C_{ds} 为固态金属的比热。

平均比热 C_{da} 是粒滴部分凝固时的比热:

$$C_{da} = C_{ds}F_s + C_{dl}(1 - F_s) \quad (9)$$

当液滴在飞行中的温度变化过程确定以后, 就可以求出液滴中固相分数的变化:

$$F_s = \begin{cases} 0 & T > T_n \\ F_{s0} & T_n < T \leq T_r \\ F_{s0} + Q/H_f & T = T_s \\ 1 & T < T_s \end{cases} \quad (10)$$

喷雾中液滴的尺寸分布确定后,由单个液滴的固相分数加权求和就可以计算出不同飞行距离上雾化锥中总体固相分数的值:

$$F_{sg}(X) = \sum F_s(d_i, X) F_w(d_i) \quad (11)$$

式中 F_w 为粒滴占总量的质量百分比, X 为飞行距离, d_i 为粒滴直径。

2 模型中参数确定及计算程序的编制

选择纯铝为雾化金属,氮气为雾化气体,进行数值计算,纯铝和氮气的热物理性能数据及喷射成型典型工艺参数如下^[5-9]:

- Gas density(ρ_g): 1.25 J/kg·°C
 - Gas viscosity(η): 1.7×10^{-5} m²/s
 - Gas thermal conductivity(k_g): 0.0164 W/m·°C
 - Gas initial velocity(V_{g0}): 300 m/s
 - Gas initial temperature(T_{gi}): 25 °C
 - Droplet density(ρ_d): 2700 kg/m³
 - Latent heat(H_{f0}): 4.04×10^5 J/kg
 - Liquidus specific heat(c_{pl}): 1090 J/kg·°C
 - Solidus specific heat(c_{ps}): 1190 J/kg·°C
 - Solidus temperature(T_{ds}): 660 °C
 - Nucleation temperature(T_{pn}): 630 °C
 - Heat transfer coefficient(K_d): 228 W/(m·°C)
 - Prandtl number(p_r): 0.72
 - Gravity constant(g): $9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
- 根据上述数学模型编制计算程序。

3 计算结果与讨论

将前面所得到的物理参数输入计算程序,便可得到以下结果。

3.1 气体速度随飞行距离的变化规律

雾化气体从雾化喷嘴中喷出,经过雾化焦点后的变化规律见图1。可以看出随着距雾化焦点的垂直距离的增加,气体速度呈指数急剧

衰减,当达到54 mm处,其速度已衰减至84 m/s。然后,衰减的趋势变缓,最后趋于零。

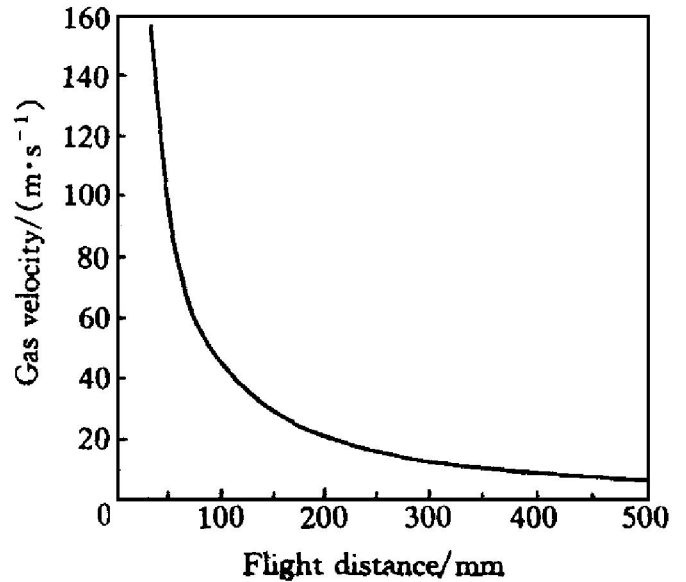


图1 气体速度随飞行距离的变化规律

Fig.1 Exponential decay of gas velocities during spray forming

3.2 液滴速度变化规律

雾化锥中雾化粒滴在自身重力和气体的推动作用下运动,图2是在雾化沉积室内,不同直径的粒滴速度随飞行距离的变化以及气体速度与粒滴速度的对比规律。由图2中可看出,在气体速度减小、粒滴速度增加的过程中出现了一个交叉点。在该点二者速度相等,二者之间无任何作用力,粒滴做自由下落运动,在此点之前,气体速度大于粒滴速度,因此粒滴被加速;超过此点,粒滴速度将大于气体速度,

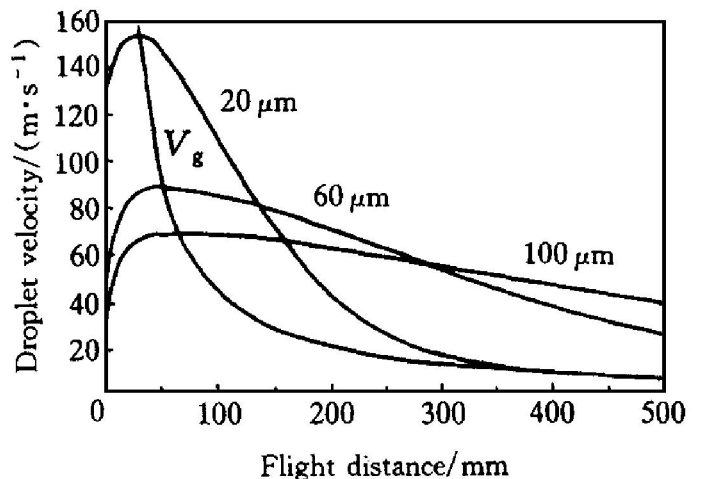


图2 气体速度与不同直径粒滴速度的比较

Fig.2 Gas velocity and droplets velocities

气体起阻碍作用, 因此粒滴被减速。从图2可以清晰地看出上述规律, 气体速度与各不同尺寸的粒滴的交叉点都在粒滴速度的最大值处。

3.3 传热系数随飞行距离的变化

图3是直径为20 μm和100 μm的粒滴其传热系数随飞行距离的变化规律。

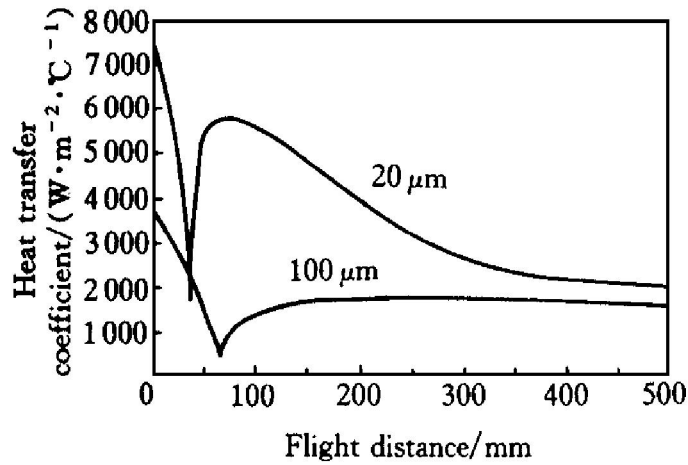


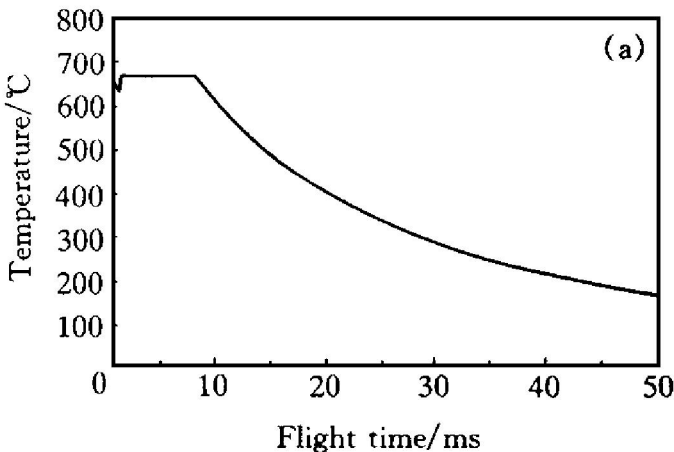
图3 雾化粒滴的传热系数变化规律

Fig. 3 Heat transfer coefficient of droplets

由图可见, 直径小的粒滴的平均传热系数比直径大的粒滴大, 直径小的粒滴传热系数先达到其极小值, 而且该值比直径大的粒滴的极小值大; 直径小的粒滴的传热系数的极大值也比直径大的粒滴大。经分析可发现, 传热系数与粒滴相对速度的变化规律是一致的。

3.4 粒滴的冷却过程

图4中是直径为60 μm和100 μm粒滴的温度随飞行时间的变化。由图可见, 变化过程



中有明显的4个区域: 起始时粒滴温度下降, 在达到形核温度后, 温度突然升高(发生再辉), 然后再凝固冷却。

从图中比较可见, 形核前, 直径大的粒滴飞行时间较长, 因此冷却速度相对较慢; 凝固阶段(图中水平线)也是直径大的粒滴冷却速度较慢。由以上分析, 雾化粒滴在液态的平均冷却速度为 $4 \times 10^4 \text{ °C/s}$, 这与文献中提出的 10^4 °C/s 的冷却速度处在一个数量级。

3.5 固相分数随飞行距离的变化

图5是不同直径的粒滴的固相分数随飞行距离的变化曲线。曲线上明显有4个区域: 当飞行距离小于某一距离时, 固相分数为零, 然后固相分数有一突变, 继而随飞行距离的增加, 固相分数单调增加, 直到凝固完毕, 固相分数变为1, 以后固相分数不再变化。

比较图中各不同直径粒滴, 可以发现, 随粒滴直径的增加, 开始凝固所需的飞行距离增大; 直径越大, 完成凝固所需的飞行距离越长; 直径大的粒滴凝固分数的增加率小于直径小的粒滴。

3.6 最佳沉积条件

由公式(11)可求出各种尺寸粒滴的固相分数随飞行距离的变化, 喷雾中粒滴的尺寸分布确定以后, 就可以利用公式(12)计算总体固相分数随飞行距离的变化。

计算喷雾中总体固相分数随飞行距离的变

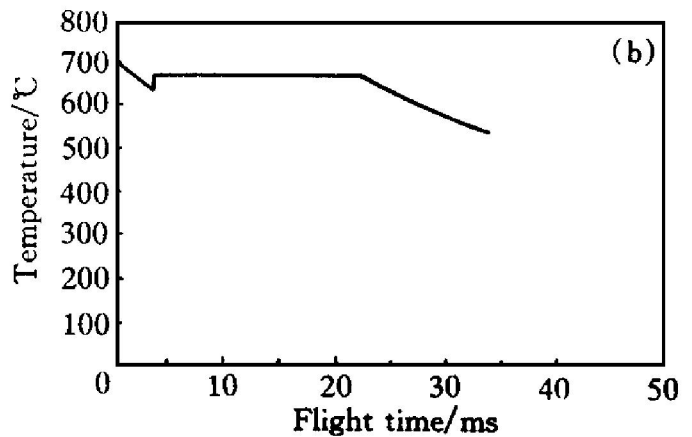


图4 雾化粒滴温度随飞行时间的变化

Fig. 4 Droplets temperature with flight time

(a) $-d=60 \mu\text{m}$; (b) $-d=100 \mu\text{m}$

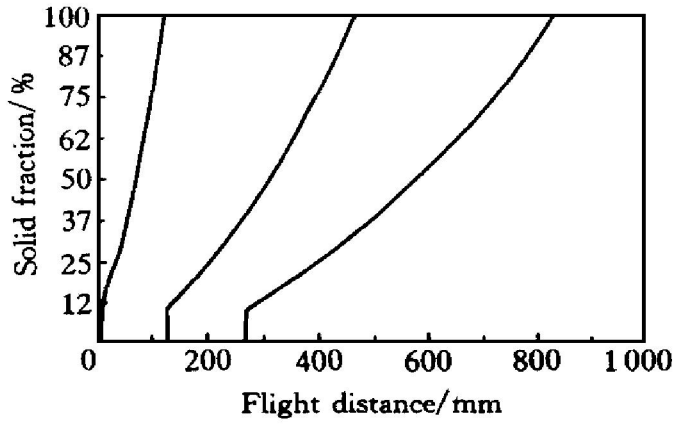


图5 不同直径的粒滴的固相分数的变化规律

Fig. 5 Solid fractions of droplets with different diameter

化见图6, 由图可见, 总体固相分数的变化是单调上升的。在离雾化焦点 500 mm 处, 总体固相分数达到 75%。总体固相分数确定以后, 就可以用来分析在不同的接收基板与雾化喷嘴距离下, 沉积物的组织和性能, 从而确定最佳沉积条件。

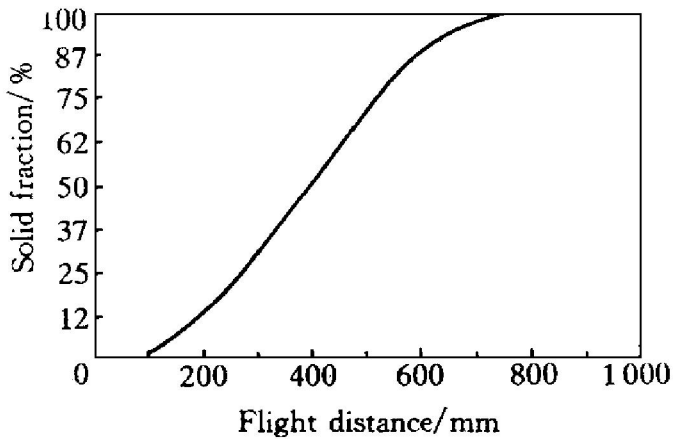


图6 总体固相分数随飞行距离的变化

Fig. 6 Solid fraction of spray with flight distance

4 结论

(1) 雾化气体速度是喷射成型工艺的重要参数。随着离雾化焦点的垂直距离的增加, 气体速度单调衰减, 而且衰减速度逐渐减小。

(2) 雾化粒滴在初始阶段被加速, 飞行一段距离后达到最大值, 然后再减速。并且, 其速度变化规律与粒滴直径相关。

(3) 雾化锥中粒滴的冷却速度很大, 平均直径为 80 μm 的粒滴冷却速度约为 4×10^4 °C/s, 实现了快速凝固。

(4) 在飞行过程中, 粒滴中的固相含量单调增加。

(5) 利用铝合金雾化粒滴的粒度分布, 可以预测喷射成型过程中的最佳沉积距离。

REFERENCES

- 1 Singer A R E. Metal Mater, 1970, 4(4): 246.
- 2 Brooks R G, Moore C, Leatham A G *et al.* Powder Metall, 1985, 22: 28.
- 3 Ranz W and Marshall W. Chem Eng Prog, 1952, 48: 141.
- 4 Bewlay B P and Cantor B. Metall Tran, 1990, 21B (5): 899.
- 5 Mathur P, Apelian D and Lawley A. Acta Metall, 1989, 37(2): 429.
- 6 Gutierrez Miravete, Lavernia E E J *et al.* Metall Tran, (in Japanese), 1989, 20A: 71.
- 7 Bewlay B P and Cantor B. Metall Tran, 1990, 21B (5): 899.
- 8 Lavernia C J and Mehrabian R. Metall Trans, 1982, 13A: 221- 234.

COMPUTER SIMULATION OF DROPLETS IN FLIGHT STAGE DURING SPRAY FORMING PROCESS

Zhang Yongan, Xiong Baiqing, Zhang Shaoming and Shi Likai

Beijing General Research Institute for

Nonferrous Metals, Beijing 100088, P. R. China

ABSTRACT Based on the studies on spray forming process, a computer model has been developed to describe the dynamic and thermal behavior of droplets in the stage of flight during the spray forming process. In this computer model, the velocity of atomization of droplets, the thermal profile of the droplets in flight, solid fraction of the droplets and the spray were studied. According to the model, the dynamic behavior and thermal behavior of aluminum are calculated and discussed.

Key words spray forming process computer simulation droplet

(编辑 朱忠国)