

金属微喷熔滴沉积成形工艺数值模拟与验证

陈 祯, 杜 军, 魏正英, 方学伟, 李俊峰

(西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要: 采用半隐式压力关联算法, 通过引进 VOF 函数和分段线性界面结构 (PLIC) 构建自由曲面, 建立了微喷金属熔滴流动和传热数值模型, 模拟了 7075 铝合金熔滴成形过程中撞击速度、熔滴间距、基板温度和熔滴尺寸等工艺参数对成形形貌的影响规律, 并对模拟结果进行了实验验证。结果表明: 确定合理的撞击速度和熔滴间距是获得好成形精度和质量的关键, 熔滴直径为 100 μm , 间距为 200 μm 的 7075 铝合金熔滴在初始温度为 350 K 的不锈钢基板上以 1.5 m/s 的初速度沉积成形时, 可获得较好的成形效果。模拟结果与试验结果基本吻合, 较好反映了实际成形过程中熔滴撞击、铺展和固化行为, 为该工艺的实际应用提供了参考依据。

关键词: 微喷熔滴沉积成形; 铝合金; 最终成形形貌; 数值模拟

中图分类号: TGI46.2⁺1; TH164

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)05-1334-07

金属微喷熔滴沉积成形技术是金属增材制造技术的一种^[1]。其原理如图 1 所示, 它基于离散-堆积的成形思想, 通过坩埚将块状金属熔化, 利用计算机精确控制金属微熔滴按需喷射和三维沉积平台的运动, 使熔滴在基板上逐点、逐层沉积, 从而实现三维金属零件的无模直接成形^[2]。该技术具有成形工艺简单, 材料可循环利用, 成形过程快速化、自动化和高度柔性化、制造成本低等优点, 适合于微小复杂金属零件的直接快速成形, 已成为无约束成形技术的一个新发展方向^[3]。

近年来, 国内外研究者针对微熔滴喷射理论^[4,5]、

熔滴及沉积实体热状态变化规律^[6,7]和微熔滴碰撞铺展^[8]等基础问题, 以及配套实验装置的设计与改进^[9]等方面均进行了较为深入的研究, 但仍存在诸多影响成形精度和质量的问题亟待解决, 如熔滴流淌难控制、成形层间冶金结合不足、容易形成微孔隙和冷叠等, 尤其是熔体流淌和凝固过程的精确控制已成为制约该技术走向工业应用的瓶颈^[10]。为了实现复杂金属零件的制造, 保证成形精度和质量, 需要全面掌握成形过程中的复杂物理现象, 精确控制大量单颗粒熔滴在准确的位置逐层沉积成形以保证熔滴间良好的冶金结合, 针对此问题, 大都采用数值模拟的方法研究。C. Escure 等^[11]通过数学模型和实验方法对铝合金熔滴碰撞冷热基板的过程进行了研究; M. Fang 等^[12]通过合理控制金属熔滴温度和基板温度实现了熔滴的良好冶金结合; M. Neagu 等^[13]利用毕奥数分析凝固过程, 计算了毕奥数对熔化和凝固时间的影响; 晁艳普等^[14]基于有限元和单元生死技术, 建立了熔滴沉积成形温度场计算模型。然而, 很少有文献对影响成形精度和质量的关键工艺参数进行量化研究。

本实验重点研究 7075 铝合金熔滴在基板或前颗熔滴上的沉积成形过程, 通过建立流动和传热数学模型来分析合适的成形条件, 以保证熔滴成形过程获得较好的最终成形形貌和良好的冶金结合, 并通过实验验证数字模型的准确性。研究结果将为深入了解熔滴

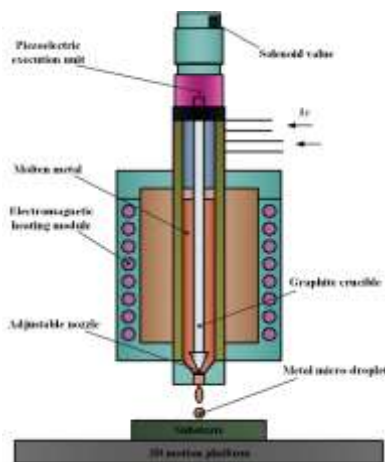


图 1 金属微喷熔滴沉积成形原理图

Fig.1 Schematic of metal microdroplet deposition forming

收稿日期: 2016-05-06

基金项目: 国家自然科学基金 (31370944); 陕西省自然科学基金 (2014JQ7238)

作者简介: 陈 祯, 男, 1985 年生, 博士生, 西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049, 电话: 029-8225064, E-mail: chen zhen051g810@163.com

沉积成形中复杂物理过程和成形工艺参数的优化提供理论指导。

1 熔滴沉积成形数值建模

1.1 控制方程

熔滴铺展由水平铺展和撞击铺展组成，本实验主要针对撞击铺展进行研究，两颗连续熔滴直径大致为 100 μm 时，成形过程相对稳定，熔滴从接触、铺展到固化的时间大致为 100 μs，因此模拟计算时采用的长度尺度和时间尺度大致为 $O(100 \mu\text{m})$ 和 $O(100 \mu\text{s})$ 。由于熔池存在时间极短，因此温度对瞬态过程的材料热物性参数的影响可以忽略，不会引起计算结果产生较大误差。

为了便于描述熔滴沉积成形复杂的物理过程，在建模时采用如下假设：(1) 假设液态金属呈粘性，且不可压缩，流动方式为层流，其流动和传热是轴对称的；(2) 材料的物理性能参数除了热导率、比热容、粘度等与温度有关的之外，均不随着温度的变化而变化；(3) 忽略了熔滴与基板或已凝固熔滴表面接触角的影响，假设其为 90°（接触速度大于 1 m/s 时，接触角对熔滴铺展的影响可以忽略）；(4) 自由曲面假设为绝热条件。

利用半隐式压力关联算法来建立数值模型分析金属微熔滴喷射、铺展、固化的成形过程。基于 Navier-Stokes 方程和能量守恒方程，通过引进 VOF 函数和分段线性界面结构 (PLIC) 来构建自由曲面，利用流体的连续性方程、动量和能量守恒方程来获得熔滴内部的流场。

1.1.1 VOF 函数

利用 VOF 法跟踪自由表面^[15]。VOF 函数 F 定义为目标流体的体积与网格体积的比值，用来确定自由界面，追踪流体的变化。当控制容积充满液体时， $F=1$ ；当控制容积为空时， $F=0$ ；当控制容积含有部分液体时 $0 < F < 1$ 。VOF 函数中的 F 满足以下方程：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x}(FA_x u) + \frac{\partial}{\partial y}(FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z}(FA_z w) \right] = 0 \quad (1)$$

式中， u 、 v 和 w 分别表示 x 、 y 和 z 方向的速度矢量； A_x 、 A_y 、 A_z 分别表示 x 、 y 、 z 方向上各自向流体开放的面积。

1.1.2 质量连续性方程

对于不可压缩流体，体积不变，密度为常数，还应满足质量连续性方程：

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = 0 \quad (2)$$

式中， V_F 是指向流体开放区域的体积， ρ 是熔滴的密度。

1.1.3 动量守恒方程

熔滴速度矢量 (u, v, w) 的格林函数方程为：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x \quad (3a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f_y \quad (3b)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\rho \partial z} + f_z \quad (3c)$$

式中， (f_x, f_y, f_z) 是粘性加速度，满足下列方程：

$$\rho V_F f_x = w s_x - \left[\frac{\partial}{\partial x}(A_x \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z \tau_{xz}) \right] \quad (4a)$$

$$\rho V_F f_y = w s_y - \left[\frac{\partial}{\partial x}(A_x \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z \tau_{yz}) \right] \quad (4b)$$

$$\rho V_F f_z = w s_z - \left[\frac{\partial}{\partial x}(A_x \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y}(A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z \tau_{zz}) \right] \quad (4c)$$

τ 是粘性应力， $(w s_x, w s_y, w s_z)$ 项表示壁面纯剪切应力。

1.1.4 能量守恒方程

流场内部能量守恒方程为：

$$V_F \frac{\partial}{\partial t}(\rho I) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho H u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho H v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho H w A_z) = -p \left(\frac{\partial u A_x}{\partial x} + \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} \right) + T_{DIF} \quad (5)$$

式中， I 是指宏观内能。 I 是温度的线性函数，由下式得：

$$I = C_1 T + (1 - f_s) \cdot C_{LHT} \quad (6)$$

C_1 是指流体的比热， f_s 是指凝固的体积分数， C_{LHT} 是指熔化潜热。 T_{DIF} 是指热传导扩散系数，由下式给出：

$$T_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x}(k A_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k A_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k A_z \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (7)$$

式中， k 是指流体热导系数。熔体与基板间的传热方程：

$$(1 - V_F) \rho_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left[k_w (1 - A_x) \frac{\partial T_w}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[k_w (1 - A_y) \frac{\partial T_w}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[k_w (1 - A_z) \frac{\partial T_w}{\partial z} \right] = T_{SOR} \quad (8)$$

式中， T_w 基板温度， ρ_w 、 C_w 和 k_w 分别是基板密度，比热容和热导率。 T_{SOR} 表示熔体-基板间的传导热为：

$$T_{SOR} = h W_A (T_w - T) \quad (9)$$

式中， h 是流动熔滴与基板间的热传导系数， W_A 是网格单元内部的界面区域， T 和 T_w 分别指流体和壁面的

温度。

1.2 模型设置与边界条件

熔滴与基板撞击时，撞击的能量转换为铺展能量，熔滴垂直滴落到基板上的形貌变化过程如图 2 所示。

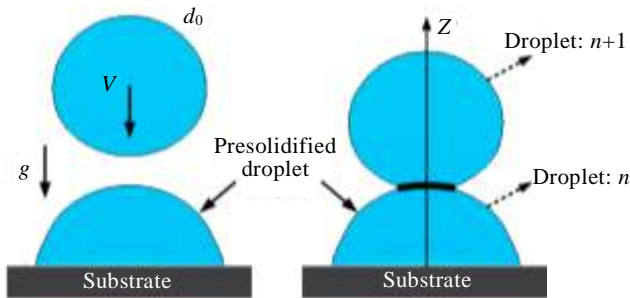


图 2 熔滴撞击铺展原理图

Fig.2 Schematic of metal microdroplet impact spreading

模拟过程中，需要确定自由边界条件和计算区域边界条件。自由边界条件由式 (1) 得到，并不断修改与自由边界单元相邻的空单元的速度。计算区域边界条件如图 3 所示，定义基板为刚性无滑移条件，压力出口的边界为右上方，所有自由曲面假设为绝热。表 1 为计算过程中初始化条件。

熔滴撞击铺展过程中的动能和表面能量大小用韦伯数 (Weber) 来表示：

$$We = \frac{\rho u^2 d_0}{\sigma} \quad (10)$$

式中， ρ 是熔滴密度， u 是撞击速度， d_0 是熔滴撞击前的直径， σ 是表面张力。 We 较大时，熔滴的动能能够克服熔滴表面张力而发生铺展；反之， We 较小时，撞击速度小，熔滴不会铺展。熔滴动能与粘滞阻力对铺

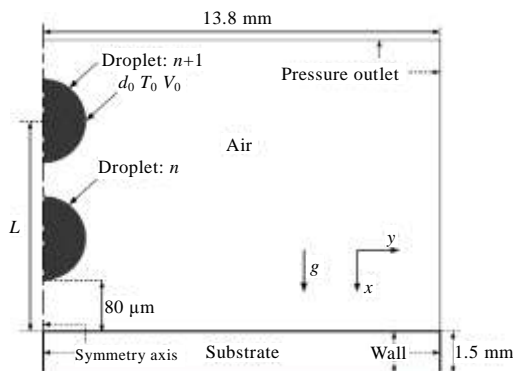


图 3 边界条件和计算域

Fig.3 Boundary conditions and computational domain

表 1 初始条件

Table 1 Initial conditions

Parameters	Value
------------	-------

Diameter of droplets/ μm	100
Initial impacting velocity of droplets/ m s^{-1}	1, 1.5, 2, 2.5, 3
Initial temperature of droplets/K	960
Deposition distance/ μm	0.868
Substrate temperature/K	350

展的相对平衡程度由雷诺数确定：

$$Re = \frac{\rho u d_0}{\mu} \quad (11)$$

式中， μ 是熔滴的动力粘度，雷诺数较大时，熔滴的动能足够克服粘滞阻力而铺展开来。

本实验所用材料为 7075 铝合金，其物性参数如表 2 所示，估计得到无量纲数 $We \approx 0.31 \sim 2.8$ ， $Re \approx 216 \sim 648$ 。由于 We 的值接近 1，而 Re 远大于 1，表明熔滴的动能能够克服熔滴的表面张力和粘滞阻力。

2 数值模型的实验验证

实验是在本课题组自主研发的金属微喷沉积成形系统上进行的 (如图 4)。成形过程中，将熔滴成形设备置于充满氩气的手套箱中，手套箱水氧含量控制在 $5 \mu\text{L/L}$ 以内，将质量为 25 g 的铝锭放到石墨坩埚中利用电阻炉进行加热熔化，坩埚底部喷嘴直径为 $73 \mu\text{m}$ ，氩气脉冲 (脉冲频率为 5 Hz) 通过电磁阀控制作用在熔融金属上，使熔融金属均匀一致的从坩埚底部的喷嘴喷射滴落，在 H13 不锈钢材料的基板上沉积成形。试验中，脉冲持续作用时间为 $1 \sim 1.5 \text{ ms}$ ，压力为 $40 \sim 90 \text{ kPa}$ ，

表 2 铝合金物性参数

Table 2 Property parameters of aluminum alloy

Properties	Value
Density, $\rho/\text{kg m}^{-3}$	2700
Viscosity, $\mu/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$	$1.25\text{e-}03$
Surface tension coefficient, $\sigma/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	0.868
Thermal conductivity of alloy, $k_s/\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	185
$k_l/\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	96.4
Specific heat capacity, $C_{ps}/\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1084
$C_{pl}/\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	997
Solidus temperature, T_s/K	933
Liquidus temperature, T_l/K	946.3
Latent heat of fusion, $L/\text{J kg}^{-1}$	$3.95\text{e}+05$
Static contact angle, $\theta/(\text{^\circ})$	90



图 4 熔滴微喷沉积实验平台照片

Fig.4 Photo of metal microdroplet experimental platform

当基板与喷嘴之间的距离保持在 18 mm 时，熔滴的形状和动态特性趋于稳定。

通过实验观察熔滴成形形貌，与 Flow-3D 数值模拟软件计算结果进行比较，验证数值计算结果的准确性。成形后的试件经金相砂纸（200~1500 目）打磨，抛光机抛光（粒度为 1 μm 金刚石抛光液）后，用 keller 试剂（90 mL 蒸馏水，浓度为 68% 的 2.5 mL HNO₃，浓度为 38% 的 HCl，浓度为 40% 的 HF 1 mL 自配）进行表面腐蚀，利用扫描电子显微镜（SEM, HITACHI S-3000N, JPN, Hitachi）观察固化后的截面形貌和结合面附近显微组织，利用尼康自动对焦相机（型号为 Nikon AF 213Micro 200 mm f/4D IF-ED）和数字便携式频闪仪（型号为 Monarch Nova-Strobe BBX 115/230）测量熔滴初始直径。图 5 表示，熔滴直径为 100 μm，间距为 200 μm，速度为 1.5 m/s 的熔滴在温度为 350 K 的 H13 不锈钢基板上沉积成形后的熔滴形貌和模拟结果对比。图 6 表示，放大 3000 倍后两颗熔滴界面附近的显微组织。

图 5 表明实验结果与数值模拟结果在熔滴形貌上能够很好的吻合。图 6 表明两颗连续熔滴结合面附近显微组织无明显差异，实现了良好的冶金结合。

3 结果与讨论

金属微喷熔滴沉积成形过程非常复杂，熔滴凝固

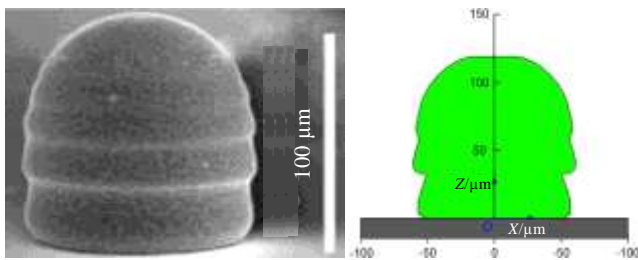


图 5 扫描电镜照片和模拟结果图对比

Fig.5 Comparison of SEM image and simulation result

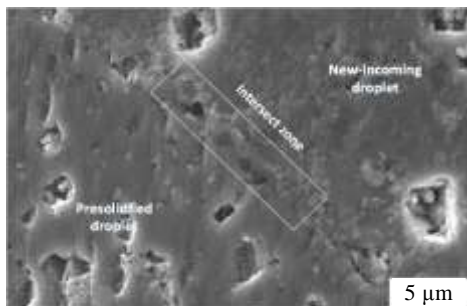


图 6 两颗熔滴界面附近的显微组织

Fig.6 Microstructure of interface between two successive droplets

前后的形貌会发生显著变化，成形过程中，熔滴间界面温度会发生变化，撞击成形的冷却速度也存在差异。如果前颗熔滴与新来熔滴界面温度过低，就会引起熔滴融合不充分，产生微孔隙、冷叠等。反之，如果两颗熔滴结合界面温度过高，熔滴来不及凝固就随前颗熔滴向周围流淌发生崩塌，致使无法顺利成形。实际上，成形过程中可调整的工艺参数窗口范围很窄，成形精度和质量可通过成形形貌和冶金缺陷反映出来。

为了获取更好的量化结果，本实验主要研究撞击速度、熔滴间距、基板特性和熔滴尺寸等对成形形貌的影响。 d 是两颗熔滴间距， L 和 l 分别表示两颗熔滴的铺展直径， H 和 h 分别指熔滴高度和撞击点到基板间的高度。

图 7 表示直径为 100 μm，熔滴间距为 200 μm 的铝合金熔滴在 $t=78 \mu s$ 时以 1.5 m/s 的速度撞击在初始温度为 930 K 的基板上时变形、固化以及基板内部温度场。

3.1 撞击速度对成形形貌的影响

图 8 表示，两颗连续熔滴间距离为 200 μm，熔滴以 1~3 m/s 的速度撞击在初始温度为 350 K 的 H13 不锈钢基板上时，熔滴铺展直径、熔滴高度及凝固高度的变化情况。图 8a、8b 和 8c 中熔滴撞击基板的初速度分别为 1, 2 和 3 m/s，图中每一行代表同一无量纲时间 $t^* = tV_0/D_0$ 和实际时间 (t) 下熔滴撞击基板瞬时形貌。

图 9 表示，熔滴间距为 200 μm，以 1~3 m/s 的速度撞击在初始温度为 350 K 的 H13 不锈钢基板上时熔滴凝固过程中，熔滴无量纲铺展直径变化及连续熔滴沉积成形直至完全固化过程中的无量纲成形高度变化情况。

可见，在同一时间尺度下，随着撞击速度的提高，凝固前沿的有效接触区域会显著增大。随着凝固前沿上移，熔滴发生振荡直至完全固化，且振荡次数随撞击速度的减小而增加，振荡幅度随熔滴体积的减少而减少。

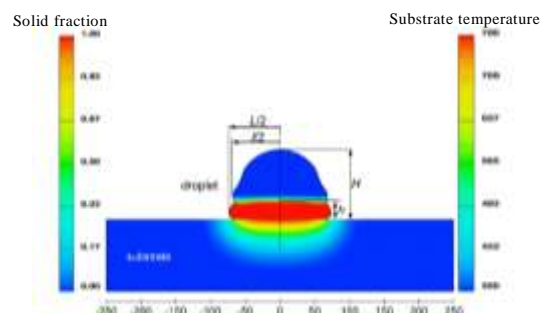


图 7 两颗连续熔滴撞击基板时的温度场

Fig.7 Temperature field of droplet and substrate

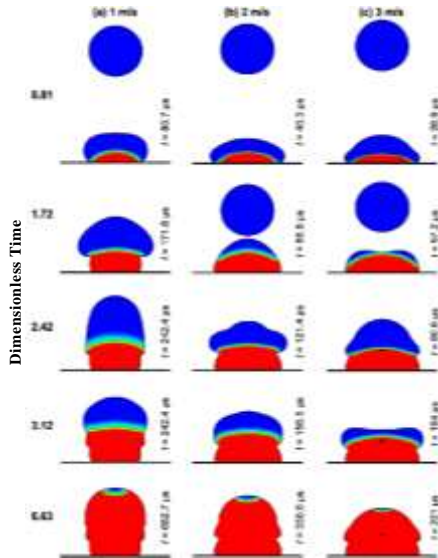


图 8 熔滴以 1~3 m/s 速度撞击在温度为 350 K 基板上的时的形貌变化

Fig.8 Impact of molten droplet on a stainless steel surface at 350 K with velocity of 1 m/s (a), 2 m/s (b), 3 m/s (c)

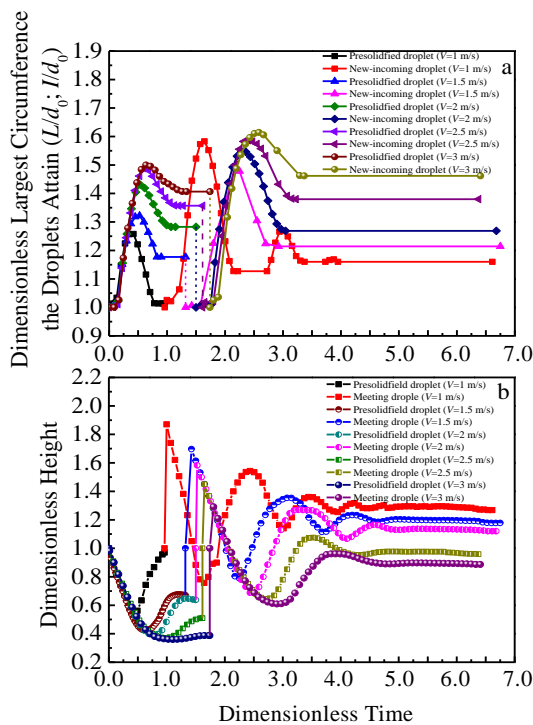


图 9 熔滴初速度为 1~3 m/s 时熔滴无量纲铺展直径和高度变化

Fig.9 Variation of dimensionless spreading diameter (a) and dimensionless height (b) with velocity of 1~3 m/s

3.2 两颗连续熔滴间距对成形形貌的影响

图 10 表示, 两颗连续熔滴间距 d 在 140~320 μm 变化时, 直径为 100 μm 的熔滴以 1.5 m/s 的速度撞击在初始温度为 350 K 的基板上, 无量纲熔滴高度和铺

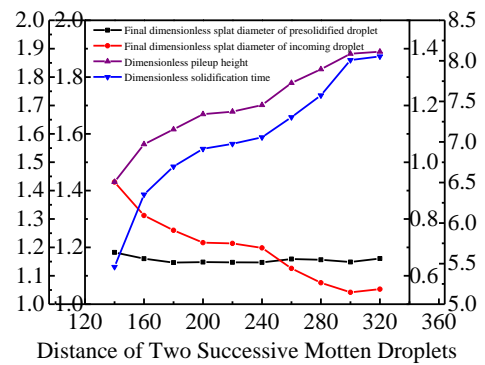


图 10 两颗连续熔滴无量纲高度和铺展直径变化

Fig.10 Variation of dimensionless height and spreading diameter with the distance between two successive droplets

展直径的变化。

由图 10 可知, 增大熔滴间距不会影响第一颗熔滴的最终无量纲铺展直径, 但会使第二颗熔滴的无量纲铺张直径减小, 同时也会使熔滴成形无量纲高度和固化时间增加。两颗熔滴的最终无量纲铺展直径之间的差异会影响熔滴成形的光滑过度。

3.3 基板温度对成形形貌的影响

图 11 表明, 基板温度对熔滴最终成形形貌的影响, 在热影响区域, 熔滴最大无量纲铺展直径会增大, 而无量纲成形高度会略微降低, 且最大无量纲铺展直径受到凝固过程中迟滞作用及基板温度的影响。随着基板温度的升高, 熔滴和基板的浸润作用发生变化, 毛线现象变得格外重要。此外, 随着基板温度的升高熔滴沉积成形固化时间会略微增加。

3.4 熔滴尺寸对成形形貌的影响

图 12 表示, 熔滴间距为 200 μm , 初速度 1.5 m/s 时熔滴直径对最大无量纲铺展直径、成形高度及固化时间的影响。

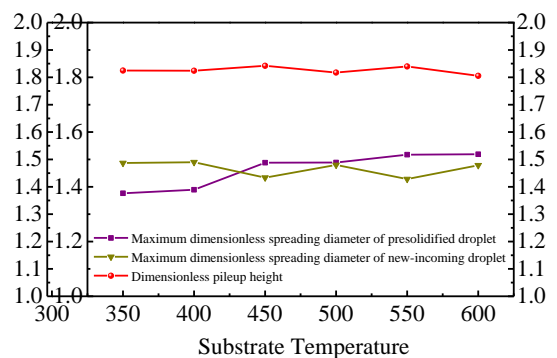


图 11 基板初始温度对最大无量纲铺展直径和无量纲高度的影响

Fig.11 Effect of substrate initial temperature on maximum dimensionless spreading diameter and dimensionless height

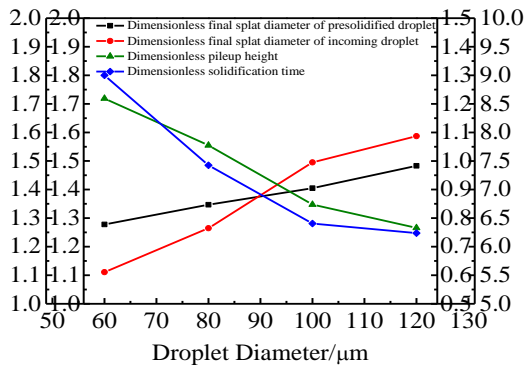


图 12 熔滴直径对最大无量纲铺展直径和无量纲高度的影响

Fig.12 Effect of droplet diameter on maximum dimensionless spreading diameter and dimensionless height

结果表明，前颗熔滴的最大无量纲铺展直径随着熔滴直径的增大线性增加，而新来熔滴的最大无量纲铺展直径随熔滴直径呈非线性特性，且无量纲成形高度会显著降低。其原因是当两个连续熔滴之间的间距保持为常量时，随着熔滴直径的增大，后续熔滴会提早与前颗熔滴接触。

4 结 论

1) 建立了金属熔滴流动和传热数值模型，揭示了 7075 铝合金熔滴成形过程中，撞击速度、熔滴间距、基板特性和熔滴尺寸等对成形形貌的影响规律。

2) 随熔滴撞击速度和基板温度的增大，熔滴的铺展直径会相应增大，而熔滴固化高度会降低，但撞击速度的影响更显著；熔滴间距对前颗熔滴的无量纲铺展直径影响不显著，但会使新来熔滴最终无量纲铺展直径减小；前颗熔滴的最大无量纲铺展直径随着熔滴直径的增大线性增加，而新来熔滴的最大无量纲铺展直径随熔滴直径呈非线性特性。

3) 确定合理的撞击速度和熔滴间距是熔融沉积成形获得好的冶金结合和成形形状精度的关键，熔滴直径为 100 μm ，间距为 200 μm 的 7075 铝合金熔滴在初始温度为 350 K 的不锈钢板上以 1.5 m/s 的初速度沉积成形时，可获得较好的成形效果。

4) 模拟结果与试验结果基本吻合，较好反映了实

际成形过程中熔滴撞击、铺展和固化行为，为该工艺的实际应用提供了参考依据。

参考文献 References

[1] Orme M, Smith R F. *Transactions-American Society of Mechanical Engineers Journal of Manufacturing Science and Engineering*[J], 2000, 122(3): 484

[2] Jiang Xiaoshan, Qi Lehua, Luo Jun *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2010, 49(5-8): 535

[3] Zuo Hansong(左寒松), Li Hejun(李贺军), Qi Lehua(齐乐华) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程) [J], 2013,42(8): 1596

[4] Xia Hong, Gao Xuefeng, Jiang Lei. *Journal of the American Chemical Society*[J], 2007, 129(6): 1478

[5] Qi Lehua(齐乐华), Jiang Xiaoshan(蒋小珊), Luo Jun(罗俊) *et al. Chinese Journal of Aeronautics*(中国航空学报)[J], 2010, 23: 495

[6] Fang M, Chandra S, Park C B. *Rapid Prototyping Journal*[J], 2008, 14(1): 44

[7] Xu Q, Gupta V V, Lavernia E J. *Acta Materialia*[J], 2000, 48(4): 835

[8] Aziz S D, Chandra S. Impact. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2000, 43(16): 2841

[9] Jojmaa H K. *Thesis for Master*[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2005

[10] Wehl W, Wild J, Lemmermeyer B. *14th European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition*[C]. Friedrichshafen: International Microelectronics Assembly and Packaging society (IMAPS), 2003: 23

[11] Escure C, Vardelle M, Fauchais P. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*[J], 2003, 23: 185

[12] Fang M, Chandra S, Park C B. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*[J], 2009, 131: 112 101

[13] Neagu M. *Technologies in Mechanical Engineering*[J], 2001, 5: 35

[14] Chao Yanpu(晁艳普), Qi Lehua(齐乐华), Zhong Songyi(钟宋义) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(2): 282

[15] Hirt C W, Nichols B D. *Journal of Computational Physics*[J], 1981, 39(1): 201

Numerical Simulation and Validation of Metal Micro-droplet Deposition Forming

Chen Zhen, Du Jun, Wei Zhengying, Fang Xuewei, Li Junfeng

(State Key Laboratory of Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A numerical model of flow and heat transfer for micro-droplet deposition forming was established on 7075 aluminum alloy by semi-implicit pressure-linked equation algorithm (SIMPLE), and the volume of fluid (VOF) method with Piecewise Linear Interface Construction (PLIC) was employed to reconstruct the free surface. The influence of processing parameters including impacting velocity, relative distances between two successive molten droplets, the temperature of the substrate and droplet size on end-shapes morphology was simulated during fabricating 7075 aluminum alloy by micro-droplets, and the numerical models were validated with experimental results. The results show that the determination of reasonable impact velocity and droplet relative distances is the key to obtain a good precision and quality. Better forming effect can be obtained when molten 7075 aluminum alloy droplet with 100 μm in diameter and the distance between two successive droplets 200 μm is deposited on a stainless steel surface at 350 K with velocity 1.5 m/s. The simulation results agree well with the experimental results, which reflect better the actual process of droplet impacting, spreading and solidification behavior, and provide a reference for the practical application of the process.

Key words: micro-droplet deposition forming; aluminum alloy; end-shapes morphology; numerical simulation

Corresponding author: Chen Zhen, Candidate for Ph. D., State Key Laboratory of Manufacturing Systems Engineering, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China, Tel: 0086-29-8225064, E-mail: chenchen051g810@163.com