

熔滴喷射沉积制造中重熔过程的研究

杨毅, 齐乐华, 曾祥辉, 罗俊, 杨方

(西北工业大学机电学院, 710072, 西安)

摘要: 为使熔滴喷射增材制造过程中熔滴颗粒间能够获得较好的融合, 分析了熔滴温度和基体温度对颗粒间重熔过程的影响, 建立了基于 Stefan 条件的熔滴融合时界面重熔过程的一维热传导模型; 利用有限元方法对模型进行求解, 得到了熔滴喷射沉积过程中液固界面的移动规律和最大重熔深度, 并以此预测了沉积熔滴间的结合效果. 在自行研制的熔滴沉积实验系统中进行了柱状制件沉积实验, 结果表明: 提高基板温度或熔滴温度可有效增加重熔深度, 进而改善熔滴间的结合状态; 所建模型可以正确预测颗粒间的结合效果.

关键词: 熔滴; 重熔; 界面移动; 热传导

中图分类号: TG455; O242 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)08-0117-05

Study of Remelting During Droplet Spray Depositing Process

YANG Yi, QI Lehua, ZENG Xianghui, LUO Jun, YANG Fang

(School of Mechatronic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To determine the conditions for fine metallurgical bonding, a one-dimensional heat transfer model based on Stefan boundary condition was established to investigate the effects of droplets and substrate temperature on remelting. The liquid-solid interface movement and remelting depth were calculated, and the bonding of droplets in pillar component was predicted via numerical simulation. Following the simulation results, a droplet spray experiment device was designed, and some pillar components were deposited. Both experimental and simulation results demonstrate that increasing either droplet temperature or substrate temperature facilitates the bonding between deposited droplets.

Keywords: molten droplet; remelting; interface movement; heat transfer

熔滴喷射制造技术是近年兴起的一种快速成形技术, 可将按需喷射的金属熔滴逐点逐层沉积成三维金属制件^[1], 且后处理简单, 加工成本低, 能大幅缩短产品的研发时间, 在航天航空、粉末冶金、模具制造及微小机械系统制造等领域具有广阔的应用前景^[2-3]. 然而, 此项技术还不够成熟, 例如熔滴结合时的重熔行为对熔滴间结合程度的影响目前尚不明确. 近年来, 国内外针对熔滴重熔行为进行了一些研究: 卡耐基-梅隆大学的 Amon 等人研究了系统温度对不同金属的冷却率和重熔深度的影响, 发现预热铜基体可使沉积在铜基体上的不锈钢熔滴形成相同

的组织^[4]; 罗马尼亚大学的 Neagu 等人利用毕奥数分析凝固过程, 计算了毕奥数对熔化时间和凝固时间的影响及与重熔过程的关系^[5]; 多伦多大学的 Chandra 等人研究了熔滴沉积频率对柱状制件高度的影响, 建立模型计算了纯锡的界面熔化情况, 分析了液固界面的移动, 并进行了三维制件的沉积实验^[6]. 上述研究在讨论重熔行为时, 建立的模型仅考虑了稳态热传导或半无限维上的液固界面移动, 并未对颗粒间的融合情况进行深入讨论, 而熔滴间的融合状态直接影响制件的成形性能与内部质量.

针对以上不足, 本文利用液固相结合面处的两

相一维 Stefan 条件建立了沉积熔滴的一维热传导模型,计算了在沉积熔滴大小一定的条件下液固界面的移动规律,以及基体温度和熔滴温度对重熔深度的影响,理论结果与实验结果吻合良好。

1 沉积过程中熔滴界面重熔的传热模型

为研究沉积过程中熔滴界面的重熔,须建立其传热模型。为便于分析和实验验证,本文以柱状制件的沉积过程为例,分析沉积中熔滴间液固界面的移动规律和重熔。依据层制造理论,所得结果可以推广至其他形状制件。

根据制造条件,基板不移动,微小熔滴沉积在基板上形成扁平颗粒后凝固,随后的熔滴以一定频率在相同位置上逐层沉积成柱状制件。如果熔滴的温度足够高,则熔滴会使已凝固部分产生重熔,液固界面会先向已沉积部分(固相区域)移动,到达最低点后又向液相区域移动,直至熔滴完全凝固,整个过程如图1所示。

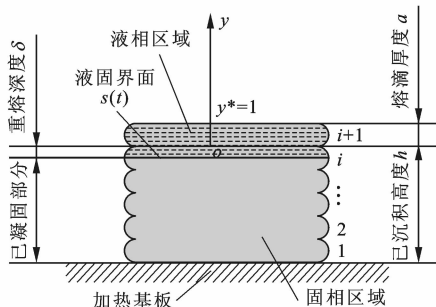


图1 柱状制件沉积过程示意图

为了研究第 $i+1$ 颗熔滴对已沉积熔滴的重熔行为,需建立描述重熔液固界面移动过程的数学模型。本文将熔滴之间的热传导模型建立为两相一维 Stefan 模型。

根据制造过程对模型作如下假设:①材料的热物理性质恒定;②忽略熔滴下落时的热量损失,熔滴具有均匀温度 T_l ;③熔滴形成固定的形状后开始传热,熔滴颗粒的厚度一定,基体具有均匀温度 T_s 。

在液相区域,热传导方程为

$$\frac{\partial T_l}{\partial t} = \alpha_l \frac{\partial^2 T_l}{\partial y^2}, \quad s(t) < y < a, \quad t > 0 \quad (1)$$

在固相区域,热传导方程为

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2}, \quad y < s(t), \quad t > 0 \quad (2)$$

式中: T_l 为液相区的温度; T_s 为固相区的温度; t 为

时间; y 为竖直方向的坐标,其原点在初始液固界面; $s(t)$ 为液固界面相对 $y(0)$ 的位置; α_s 、 α_l 分别是固相和液相区域的热扩散系数。

取液固界面处的温度为合金熔点,则有

$$T(s(t), t) = T_m, \quad t > 0 \quad (3)$$

边界条件为

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial y} = L\rho \frac{dy}{dt}, \quad y = s(t), \quad t > 0 \quad (4)$$

$$T = T_s, \quad y = -h \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_l}{\partial t} = 0, \quad y = a \quad (6)$$

式(4)为液固界面处的 Stefan 条件,其中 k_l 、 k_s 为液相区域和固相区域的热传导系数, L 为铅锡合金的凝固潜热, ρ 为铅锡合金的密度。式(5)为沉积基体与基板接触处的等温条件,其中 h 为已沉积基体的高度。式(6)为熔滴顶部的绝热条件,其中 a 为扁平熔滴的厚度。

初始条件为

$$T(y, 0) = T_l, \quad 0 < y < a \quad (7)$$

$$T(y, 0) = T_s, \quad y < 0 \quad (8)$$

式(1)~(4)描述了金属熔滴与已沉积表面发生重熔时液相区、固相区和液固界面处的热传导行为。

2 有限元模型

下面基于上述热传导分析方法,对熔滴重熔过程进行有限元建模和数值仿真。根据实验中的参数,利用有限元软件 CFDRC 建立模型并求解。将柱状零件的网格分布划分为液相区域、靠近液相区域的初始固相区域和远离液相区域的初始固相区域,网格划分如图2所示。考虑到液相区域和靠近液相区域的初始固相区域为变化梯度较大的部位,故网格划分较密,将高度为 0.2 mm 的液相区域均匀划分为 50 个网格,每个网格的高度是 0.004 mm;靠近液相区域的固相区域高度为液相区域的一半(0.1 mm),将其划分为 25 个网格,每个网格的高度也为 0.004 mm;余下的固相区域的温度变化相对较小,网格划分也较为疏松,每个网格的高度为 0.008 mm。边界条件:液相与固相接触处设为自由界面,柱状模型的最下方边界设为恒温条件,其余边界条件为绝热。初始条件:液相区域为均匀的液相初始温度,固相区域具有均匀的固相初始温度。计算条件中时间步长 $\Delta t = 1 \times 10^{-5}$ s,最大迭代次数为 10,最小迭代误差为 1×10^{-18} 。

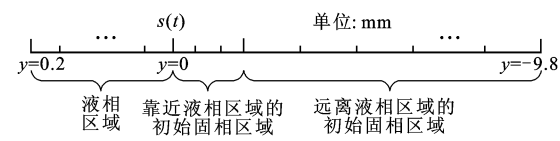


图 2 有限元网格划分示意图

3 液固界面移动与最大重熔深度

以铅锡合金(Sn60Pb40)熔滴为研究对象,根据所建立的沉积过程传热模型,计算熔滴间的重熔情况.材料属性取自参考文献[7],模拟过程的一些参数见表 1,其中的熔滴厚度和柱状件高度取自多次实验的平均结果.

表 1 重熔过程模拟的相关参数

$T_l/^\circ\text{C}$	$T_s/^\circ\text{C}$	a/mm	h/mm
200~275	50~175	0.2	10

为方便表示,将高度归一化为与熔滴厚度的相对值,建立坐标系 y^* ,即 $y^*=y/a, s^*(t)=s(t)/a, \delta^*=\delta/a$.当已沉积部分即基体的温度为 125°C 、熔滴初始温度为 230°C 、沉积熔滴高度为 0.2 mm 时,计算得到的液固界面的移动过程如图 3 所示.在本文的实验条件下,熔滴接触基体约 1 ms 后液固界面到达最低点,之后向液相区移动,在约 4 ms 时熔滴完全凝固,最大重熔深度为沉积熔滴厚度的 11% .

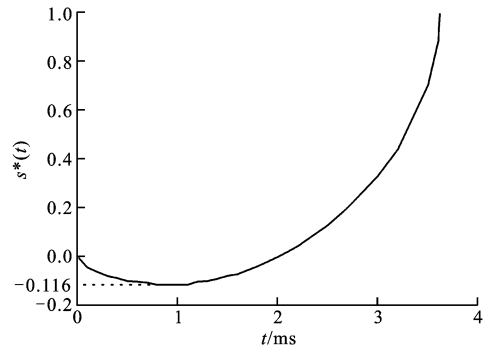


图 3 计算得到的液固界面移动曲线

由图 4 可看出,提高基板温度或熔滴温度都可增加重熔深度.当基板温度较高时,更易得到大的重熔深度.依据图 4 可对熔滴喷射沉积制造过程中熔滴与沉积颗粒间的结合程度进行预测:若实验中的温度条件在重熔深度为 0 的曲线(简称“0 曲线”)之上,则发生重熔,熔滴与沉积颗粒之间结合良好,在一定范围内温度越高重熔深度就越大;当温度条件在 0 曲线以下时,将不会发生重熔,熔滴与沉积颗粒

之间结合不好,影响制件的结合强度.

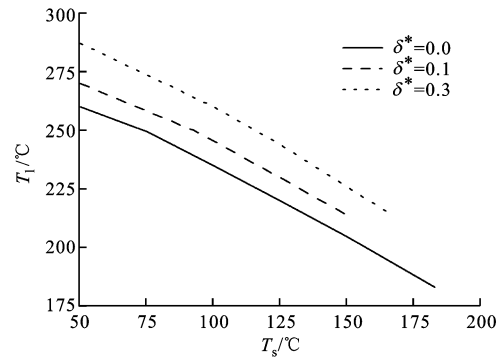


图 4 计算得到的最大重熔深度曲线图

4 实验验证

4.1 实验方法

为验证本文所建模型的可行性,在自行研制的均匀熔滴喷射系统^[8]上进行柱状制件沉积实验,以观察熔滴颗粒间的融合情况.

本文以铅锡合金(Sn60Pb40)为沉积材料,依据表 2 所示参数,在不同的基板温度和熔滴温度条件(见表 3)下进行柱状制件的沉积实验.熔滴以一定的频率(f)产生,沉积在被加热的基板上形成柱状制件.在沉积过程中,金属的毕奥数较小,可认为熔滴内部无温度梯度.喷嘴距离沉积表面小于 10 mm ,且熔滴速度较低(约 1 m/s),故可认为熔滴的温度即为坩埚内测量得到的温度.喷嘴直径为 $100\text{ }\mu\text{m}$,产生的熔滴直径(d)稳定在 $200\text{ }\mu\text{m}$.实验采用较低的熔滴产生频率(1 Hz),以使每颗熔滴沉积在基体上时其温度即恢复至基板温度^[9].以上条件均对应于前述模型的假设.

表 2 熔滴沉积实验参数

f/Hz	h/mm	d/mm	a/mm
1	10	0.2	0.2

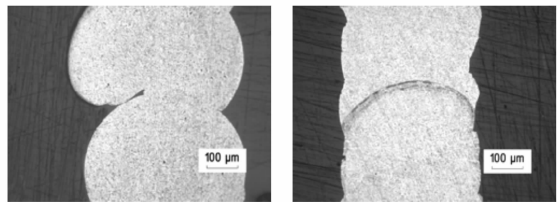
表 3 熔滴沉积实验的温度条件

$T_s/^\circ\text{C}$	70	140	50	50	100	100	150	150
$T_l/^\circ\text{C}$	200	200	230	276	200	280	230	250

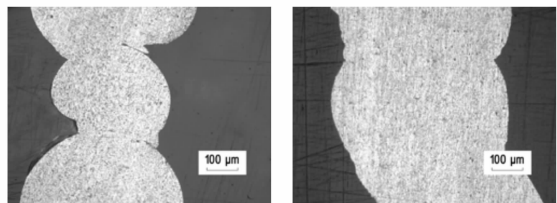
实验中于不同的基板温度和熔滴温度下得到若干柱状制件,实验完成后沿高度方向对制件进行研磨、抛光,观察熔滴之间的结合情况,并且根据各种温度条件下计算得到的重熔深度曲线及沉积实验数据,确定温度与熔滴间结合程度的关系.

4.2 实验结果与分析

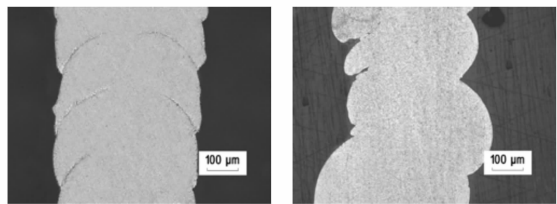
图 5 为各种实验温度条件下沉积的柱状制件在熔滴结合部位的形貌,可以看出在图 5a~5c 和图 5e 中,熔滴结合部有明显的缝隙,说明熔滴间没有发生重熔,结合较差,而图 5d、图 5f~5h 所示的熔滴结合处无缝隙,说明熔滴间发生了重熔,结合较好.



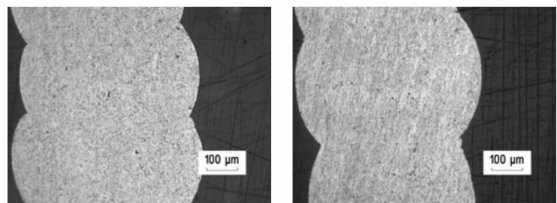
(a) $T_s=70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_l=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b) $T_s=140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_l=200\text{ }^{\circ}\text{C}$



(c) $T_s=50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_l=230\text{ }^{\circ}\text{C}$ (d) $T_s=50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_l=276\text{ }^{\circ}\text{C}$



(e) $T_s=100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_l=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (f) $T_s=100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_l=280\text{ }^{\circ}\text{C}$



(g) $T_s=150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_l=230\text{ }^{\circ}\text{C}$ (h) $T_s=150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_l=250\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 5 不同温度条件下柱状制件颗粒结合部位的形貌

从图 5 还可以看出,在基板温度和熔滴温度都较低时,熔滴之间融合较差(见图 5a~5c 和图 5e).在这种情况下,当基板温度不变时,提高熔滴温度可以改善熔滴间的结合程度(见图 5d、图 5f);当熔滴温度不变时,提高基板温度也可以有效地改善熔滴间的结合程度(见图 5g).

上述分析表明:在较低的系统温度下,熔滴颗粒

不能完全融合,颗粒之间存在明显的缝隙,而增加基板温度或熔滴温度都可以有效地提高颗粒间的融合程度.将图 5 所示各样本的温度条件均在重熔深度图中标出,如图 6 所示.图 6 中的 $a\sim h$ 各点分别对应图 5a~5h 的各个温度条件.点 a 、 b 、 c 、 e 在 0 曲线下方,对应的熔滴间没有获得良好结合;点 d 、 f 、 h 、 g 在 0 曲线上方,对应条件下熔滴之间发生了重熔,融合较好,表明根据 0 曲线可以判断熔滴间是否能够达到良好结合.实验结果与理论结果吻合较好,说明模拟结果可以预测实验中各温度条件下熔滴之间的结合程度.

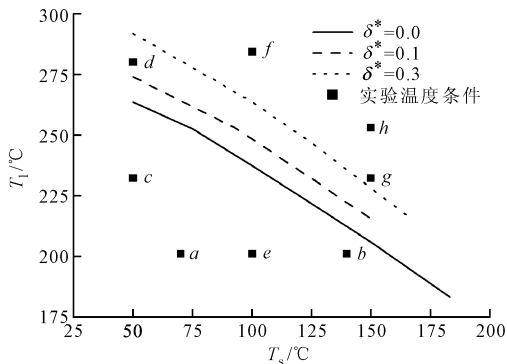


图 6 图 5 中的各温度条件在最大重熔深度图中的位置

5 结 论

(1)本文建立了基于 Stefan 条件的熔滴融合时界面重熔过程的一维热传导模型,得到了液固界面移动规律和重熔深度曲线,可以预测熔滴间结合的优劣.

(2)在自行研制的熔滴喷射装置上进行了柱状制件的沉积实验,研究了各种温度条件下熔滴与基体结合处的重熔行为,结果表明,增加基板温度或熔滴温度都可以有效地改善熔滴间的结合效果.

(3)熔滴结合面处的形貌分析表明,本文所建模型可以正确地预测熔滴间的结合状态.实验结果与理论结果基本相符,验证了模型的可行性和正确性.

参考文献:

[1] SUDARSHAM S T, SUDARSHAN S T. Rapid solidification technology: an engineering guide [M]. Lancaster, Pennsylvania, USA: Technomic Publishing Company, Inc., 1993:3-10.

[2] 胥光申,赵万华,卢秉恒. 高分辨率快速成型系统的光固化实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39 (1):66-69.

XU Guangshen, ZHAO Wanhua, LU Bingheng. Ex-

- perimental investigation on high-resolution stereolithography system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005,39(1):66-69.
- [3] LUO Jun, QI Lehua, JIANG Xiaoshan, et al. Research on lateral instability of the uniform-charged droplet stream during droplet-based freeform fabrication [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008,48(3/4):289-294.
- [4] AMON C H, SCHMALTZ K S, MERZ R, et al. Numerical and experimental investigation of interface bonding via substrate remelting of an impinging molten metal droplet [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1996, 118(1):164-172.
- [5] NEAGU M. Study of remelting process during the droplet-based solid freeform fabrication [J]. The Annals Dunarea de Jos University of Galati, Fascicle V: Technologies in Mechanical Engineering, 2004, 5: 35-39.
- [6] FANG M, CHANDRA S, PARK C B. Building three-dimensional objects by deposition of molten metal droplets [J]. Rapid Prototyping Journal, 2008,14(1):44-52.
- [7] SIQUEIRA C A, CHEUNG N, GARCIA A. The columnar to equiaxed transition during solidification of Sn-Pb alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2003, 351(1/2):126-134.
- [8] ZENG Xianghui, QI Lehua, HUANG Hua. Experimental research of pneumatic drop-on-demand high temperature droplet deposition for rapid prototyping [C]// SU Daizhong. Advanced Design and Manufacture: II. Zurich, Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. , 2009:405-408.
- [9] MAHESH N S, MENDANCA J, MURALIDHARA M K, et al. Modeling of droplet dynamic and thermal behaviour during spray deposition [J]. Bulletin of Materials Science, 2003,26(3):355-364.

(编辑 葛赵青)