doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2015.01.017

熔滴在基板上的铺展及凝固过程的三维数值模拟分析 *

朱 胜,李显鹏,殷凤良,王启伟,郭 蕾

(装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室,北京 100072)

摘 要:对于基于熔滴沉积的 3D 打印成形再制造技术,熔滴在基体上的动态铺展过程及伴随此过程中的温度变化情况直接影响到成形形貌及质量。基于有限体积数值模拟方法,建立了熔滴在基板上铺展及凝固过程的三维数值分析模型。采用流体体积比函数(VOF)法追踪熔滴自由界面的动态变化过程,用焓-多孔介质法处理熔滴凝固相变问题,用连续表面张力模型将表面张力处理为体积力源项。利用所建立的模型,计算分析了单个高温熔滴在基板上的碰撞中熔滴自由界面及温度的动态变化过程,以及熔滴凝固后的最终形态。通过比较熔滴界面动态变化过程的模拟计算结果与试验结果,证实所建立的模型是可靠的。

关键词:熔滴;数值模拟;凝固;再制造

中图分类号: TH16 文献标志码: A

文章编号:1007-9289(2015)01-0109-06

Three-dimensional Numerical Simulation of Molten Droplet Spread and Solidification on Substrate

ZHU Sheng, LI Xian-peng, YIN Feng-liang, WANG Qi-wei, GUO Lei

(Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: The spread and solidification process of molten droplet on the substrate will influence forming appearance and quality of the droplet deposition based on 3D printing forming remanufacturing. A three-dimensional numerical simulation model for the droplet spread and solidification process was developed, based on finite volume numerical method. The volume of fluid (VOF)algorithm was used to track the dynamic charge process of the free surface of the molten droplet. A enthalpy-porous method was employed to deal with solidification and phase change of the droplet. The surface tension was considered as the volume force by continue surface tension model. Based on the developed model, the spread and solidification processes of a single molten droplet were obtained, as well as the final forming shape. The validity of this model is confirmed by comparing the calculated and experimental results of the dynamic droplet surface at different times. **Keywords**; molten droplet; numerical simulation; solidification; remanufacturing

0 引 言

3D 打印技术是一系列在零件数字化模型驱动下通过材料的精确堆积方式制造零件原型或功能零件的工艺总称。特别是金属材料的 3D 打印技术,改变了传统的去除材料的加工方法,无需模具即可直接制造形状复杂、满足使用要求的

零件,适合于单件或小批量零件生产,具有生产 周期短、成本低等特点。该技术还可用于具有体 积损失特征零件的再制造中。在众多金属零件 的 3D 打印技术中,基于熔滴沉积的 3D 打印技术 具有对基体的热输入小,沉积成形层完全致密等 优点,如斯坦福大学与卡内基梅隆大学研究的形

收稿日期:2014-09-26; 修回日期:2015-01-04; 基金项目: * 国家自然科学基金(51205408,51375493)

通讯作者: 殷凤良(1980-), 男(汉), 助理研究员, 博士; 研究方向: 再制造工程技术; Tel: (010) 6671 9214; E-mail: yinshr@sohu.com

网络出版日期: 2015-01-05 17:00; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150105.1700.003.html

引文格式:朱胜,李显鹏,殷凤良,等. 熔滴在基板上的铺展及凝固过程的三维数值模拟分析 [J]. 中国表面工程,2015,28(1):109-114. Zhu S, Li X P, Yin F L, et al. Three-dimensional numerical simulation of molten droplet spread and solidification on substrate [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(1): 109-114. 状沉积制造、麻省理工学院的均匀微滴喷射成 形、加州大学的焊料微滴打印技术等^[1]。对于熔 滴沉积成形技术,熔滴碰撞基板时的动态变化及 与基体间的热量传递过程在很大程度上影响到 成形精度及成形质量。

采用数值模拟方法,建立熔滴在基板上的碰 撞过程的数学模型,分析熔滴碰撞过程中的形态 变化及温度变化情况,有助于分析熔滴温度、入 射速度、尺寸等参数对成形精度及质量的影响规 律,进而优化工艺参数,提高成形质量。国内外 一些学者在这方面进行了相当多的研究[2-10]。国 内的相关研究中,赖世强等人采用有限元数值分 析方法研究了等离子喷涂中熔滴在基板上的扁 平化过程,但没有耦合分析熔滴温度变化过 程^[5]。曾祥辉等人在基于有限体积法的 FLU-ENT 环境下,建立了锡合金在不锈钢基体上的变 形过程二维数值分析模型,同时耦合分析了温度 变化过程,用 VOF 法求解追踪了熔滴的自由界 面^[6]。国外 Y. Wang^[7] 与 M. H. Cho^[4] 等人分 别建立了 GMAW 焊接中熔滴与熔池碰撞过程的 数值分析模型,考虑了电弧作用于熔滴及熔池自 由表面上的热流密度及电弧力的影响。

文中运用 VOF 自由界面追踪法,建立普通 碳素钢材质熔滴在同材质基体上碰撞过程的三 维数值分析模型,分析单个熔滴在基板上铺展及 凝固的动态过程,并与 Trapaga 等人^[11]的试验结 果进行了对比验证。

1 数值分析方法

1.1 基本控制方程组

假设熔滴为不可压缩牛顿流,流动状态为层 流,忽略温度变化对密度的影响。分别给出描述 熔滴碰撞过程的基本方程组,即质量连续方程、 动量与能量守恒方程:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{V} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{V} \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\mu(\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^{\mathrm{T}})) + \mathbf{g} + \frac{1}{\rho} \mathbf{F}_{\mathrm{b}}$$
(2)

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho (\mathbf{V} \cdot \nabla) h = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \qquad (3)$$

式中,V为速度矢量,t为时间, ρ 为密度,p为压

力, μ 为粘性系数,g 为重力加速度, F_b 为体积力,h 为焓, λ 是热导率,T 为温度。

1.2 自由表面的追踪

熔滴与基板碰撞过程数值分析的关键是对 动态自由表面的追踪。采用 VOF 法追踪确定熔 滴表面,VOF 法通过求解网格单元的体积分数 F 的值确定出熔滴界面位置。某网格单元的体积 分数 F 被定义为流体在网格单元中所占的体积 百分比,即

$$F = \frac{\hat{\mu} \bar{\pi} n \hat{\pi} h \bar{\pi} h \bar{\pi$$

由上式可知,体积分数 F 为 0~1 之间的数 值。当 F=1 时,网格单元内充满流体;当 F=0 时,网格单元内没有流体;当 0<F<1 时,网格单 元内有部分流体,说明该单元内有熔滴表面。体 积分数 F 满足下列关系式

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla)F = 0 \tag{5}$$

同时求解上式与质量、动量守恒方程,可得体积分数 F 的分布,进而确定出熔滴的自由表面。这些含有部分流体的单元包含了熔滴的自由表面。。

1.3 凝固与相变问题的处理

熔滴在下落及与基体碰撞过程中,与周围环 境及基体间产生能量交换,温度会逐渐降低。当 部分熔滴温度低于其熔点时,凝固现象就会发 生。在熔滴未完全凝固前,存在液相、固相及液 相与固相之间的半固相(也称为糊状区)。采用 焓-多孔介质法处理凝固与相变问题。整个计算 区域采用相同的控制方程,为了模拟凝固与相变 问题,需要对控制方程进行适当修改。在动量守 恒方程的最右侧加入项 – KV,动量守恒方程 变为

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{V} \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\mu(\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^{T})) + \mathbf{g} + \frac{1}{\rho} \mathbf{V}_{b} - K\mathbf{V}$$
(6)

其中,K为阻力系数,其值与单元中物项(熔 滴)的固相分数 F_s 有关,如下式所示:

$$K = C_0 \frac{F_s^2}{(1 - F_s)^3 + \epsilon}$$
(7)

111

式中, C_0 是阻力系数常数(对于钢材,其值为 1), ε 是一个非常小的数。固相分数 F_s 表示单元 内固相体积所占物项总体积的百分比,若 $F_s=0$, 则表示单元内熔滴还未发生凝固;若 $F_s=1$,则表 示单元内熔滴已经全部凝固为固相;若 $0 < F_s <$ 1,则表示单元内熔滴部分凝固为固相。固相分 数 F_s 与温度的关系如式(8)所示,式中 T_s 、 T_l 分 别为固化温度与液化温度。

$$\begin{cases} F_{s} = 0 & (T_{1} \leq T) \\ F_{s} = 1 - \frac{T - T_{s}}{T_{l} - T_{s}} & (T_{s} < T < T_{l}) \\ F_{s} = 1 & (T \leq T_{s}) \end{cases}$$
(8)

为了更好的描述糊状区对凝固过程的影响, 定义凝聚固相分数 F_{co}与临界固相分数 F_{cr},其值 分别为 0.48 和 0.64^[4]。F_{co}与 F_{cr}将糊状区分为 3 个区域,各个区域的阻力系数及计算粘性系数 都不同。

当 $F_s < F_o$ 。时:稀疏的固相结晶组织可以在 液相中自由流动,并没有形成凝聚的固相组织。 这时可以将这种固液混合物看作一种单一的流 体,将固相结晶组织的影响通过粘性系数反映出 来,粘性系数定义为:

$$\mu = \mu_0 \left(1 - \frac{\min(F_s, F_{co})}{F_{cr}} \right)^{-1.55}$$
(9)

式中,µ₀为液相材料的粘性系数。此时的阻 力系数 K 定义为零。

当 *F*_{co} < *F*_s < *F*_{cr}时:阻力系数及粘性系数分 别由式(7)与式(9)计算。

当 $F_s > F_c$ 时:认为流体的刚性已经非常大,流动停止,此时阻力设系数为无限大。

为了模拟固液相变,焓与温度的关系定 义为:

$$h = \begin{cases} \rho CT & (T \leqslant T_{s}) \\ h_{(T_{s})} + h_{sl} \frac{T - T_{s}}{T_{l} - T_{s}} & (T_{s} < T \leqslant T_{1}) \\ h_{(T_{1})} + \rho C_{(T - T_{1})} & (T_{1} < T) \end{cases}$$
(10)

式中,C为比热,hsi为熔化潜热。

1.4 表面张力的处理

表面张力是熔滴动态模拟时必须考虑的因素。采用连续表面张力模型(Continuum surface force, CSF)计算表面张力作用。CSF模型将表

面张力处理为体积力源项,添加到动量守恒方程 中。根据 CSF 模型,表面张力可表示为

$$F_{\rm su} = \sigma k \, \bigtriangledown F \tag{11}$$

式中,*F*_{su}为表面张力,*o*为表面张力系数,*k*为自由表面曲率。

2 模型的建立

2.1 计算区域与网格单元

计算区域尺寸为4 mm×4 mm×5 mm,采用 体立方六面体结构网格单元划分计算区域。网 格单元大小影响到计算结果及计算时间。本模 拟条件下网格单元尺寸大小为 0.05 mm,计算网 格如图 1 所示。



图 1 网格单元示意图 Fig. 1 Schematic diagram of the grid cells

2.2 材料物理参数

需要定义材料的密度、表面张力系数等物理 参数。熔滴与基板为同一材料,其物理性能参数 如表 1 所示,忽略了温度变化对这些参数的 影响。

表 1 材料的物理性能参数^[4]

Table 1 Physical properties parameters of the materials

Parameters	Value
Density, $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 800
Specific heat, $C / (J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	686
Dynamic viscosity, $\mu_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}.\text{s}^{-1})$	6×10^3
Latent heat of fusion, $h_{ m sl}/({ m J}{f \cdot}{ m kg}^{-1})$	2.77 $\times 10^{5}$
Thermal conductivity, $\lambda \;/(W \cdot m^{\text{-1}} \cdot K^{\text{-1}})$	26
Solidus temperature, $T_{\rm s}/{ m K}$	1 768
Liquid temperature, T_1/K	1 798
Surface tension, $\sigma / (N \cdot m^{-1})$	1.8

2.3 边界条件与初始条件

定义基板与熔滴的初始温度与速度条件。 基板厚度为 2 mm,温度为 300 K。熔滴半径 0.8 mm,距离基板 2 mm,温度为 2 000 K,z 方向 初始速度为-1 m/s,其余速度分量为零。基板 与熔滴的初始位置及温度如图 2 所示。

定义边界上的温度与速度条件。各边界上的速度分量均设为零。下表面及熔滴自由表面的温度边界为对流散热边界,即:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = -h_{c}(T-T_{0}) \qquad (12)$$

式中,h。为对流散热系数,T。为环境温度。 侧表面处温度沿表面法线的偏导数为零。



图 2 熔滴的初始条件 Fig. 2 Initial condition of the droplet

3 结果及分析

根据有限体积单元法离散控制方程并求解, 求解方法与步骤如文献「3]中所述。图 3 是计算 得到的熔滴与基板接触后不同时刻的三维形貌, 图 4 是不同时刻熔滴内各处速度矢量分布及温 度变化情况的二维形貌。可以看出,熔滴以一定 的初速度碰撞到基体时,在基体上迅速铺展,随 后熔滴在基板上有一个振荡过程。在 t=3.6 ms 时熔滴与基板接触面的半径已达到1.3 mm,而 此时熔滴与基板接触部位也已开始凝固。表面 张力阻止了熔滴未凝固部分的进一步扩展,促使 熔滴向上运动。在 $t=4.8\sim6$ ms之间时,回荡的 熔滴高度达到最大值,随后在重力的作用下逐步 回落,但此时熔滴与基板接触面的半径基本不 变。熔滴在基板上凝固前的振荡过程与熔滴的 尺寸、碰撞速度及初始温度等特征量有关,并非 熔滴的碰撞速度越大就越易产生振荡。相反的, 当熔滴碰撞速度足够大时,惯性动量能够克服表 面张力作用,使熔滴在未凝固前直接铺展在基体 上。在时间 t=18 ms 后熔滴形态不再发生变化, 只是熔滴仍未完全凝固。当 t=70 ms 时熔滴内 不再有流动发生,已完全凝固为固态。

在熔滴与基板的碰撞过程中,熔滴与基板及 周围空气发生热交换,其中通过热传导方式传递 给基体的热量要远大于通过对流方式传递给周



Fig. 3 Three-dimensional distribution of the morphologies and temperature of droplets





Fig. 4 Two-dimensional distribution of the temperature and velocity of droplets

围空气的热量。随着时间的增加,熔滴温度逐渐降低,基体温度逐渐增加。当熔滴温度小于其凝固温度1768 K时,熔滴开始凝固。凝固现象首先发生在与基板接触的熔滴底部及外围部分,然后逐渐向熔滴上部扩展,在 t=70 ms 左右时熔滴完全凝固。这同时也说明熔滴热量主要是传递给基体。当 t=100 ms 时熔滴最高温度降至1 150 K左右。

Trapaga 等人采用高速摄像技术观察了一个

高温铜合金熔滴碰撞基板时其自由界面的动态变 化过程^[11],铜合金熔滴的初始温度为1531K,直 径为4.67mm,与基板接触时的速度为2.52m/s。 利用所建立的模型计算了相同条件下的铜合金 熔滴碰撞基板时其自由界面的动态变化过程。 图5为模拟结果与Trapaga等人试验结果对比。 可以看出:模拟结果与试验结果比较吻合,说明 所建立的熔滴碰撞模型是可靠的。







4 结 论

(1) 基于 VOF 自由界面追踪法及处理凝固 相变的焓-多孔介质法所建立的熔滴碰撞与凝固 过程的三维数值分析模型,能够计算出熔滴自由 界面的动态变化过程,以及伴随此过程中的温度 变化情况。 (2) 对于一个初始速度1 m/s、温度为2 000 K 的普通碳素钢材质的熔滴在同材质基体上的碰 撞过程,模型计算结果表明,熔滴与基体接触后 迅速铺展,随后有一个振荡过程,直到 *t*=18 ms 后熔滴形态不再发生变化,在 *t*=70 ms 时熔滴完 全凝固。

(3) 从熔滴自由界面的动态变化过程这一特

征量来讲,模拟结果与试验结果比较吻合。

(4)利用所建立的数值分析模型,可进一步 分析熔滴初始温度、速度、尺寸及基板温度等参 数对熔滴沉积形态的影响规律。

参考文献

- [1] 闫占功,林峰,齐海波,等. 直接金属快速成形制造技术 综述 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(11): 1-7.
 Yan Z G, Lin F, Qi H B, et al. Overview of direct metal rapid prototyping and manufacturing technologies [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2005, 41(11): 1-7 (in Chinese).
- [2] Ghafouri Azar R, Shakeri S, Chandra S, et al. Interactions between molten metal droplets impinging on a solid surface [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(8): 1395-407.
- Pasandideh-Fard M, Chandra S, Mostaghimi J. A threedimensional model of droplet impact and solidification [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45 (11): 2229-42.
- [4] Cho M H, Lim Y C, Farson D F. Simulation of weld pool dynamics in the stationary pulsed gas metal arc welding process and final weld shape [J]. Welding Journal, 2006, 85(12): 271-283.
- [5] 赖世强,冯志刚.等离子喷涂过程中液态颗粒平化过程数 值模拟[J].焊接,1998(6):7-9,13.
 Lei S.O. Franz Z.C. Numerical simulation of flattering by

Lai S Q, Feng Z G. Numerical simulation of flattening be-

havior of fully molten particles impacting onto base metal under thermal spray conditions [J]. Welding & Joining, 1998(6): 7-9, 13 (in Chinese).

- [6] 曾祥辉,齐乐华,蒋小珊,等.金属熔滴与基板碰撞变形的 数值模拟[J].哈尔滨工业大学学报,2011,43(3):70-74. Zeng X H, Qi L H, Jiang X S, et al. Numerical simulation of a metal drop in impinging on substrate [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011,43(3):70-74 (in Chinese).
- Wang Y, Tsai H L. Impingement of filler droplets and weld pool dynamics during gas metal arc welding process
 [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(11): 2067-80.
- [8] Kumar A, Ghosh S, Dhindaw B K. Simulation of cooling of liquid Al-33 wt. % Cu droplet impinging on a metallic substrate and its experimental validation [J]. Acta Materialia, 2010, 58(1): 122-133.
- [9] Delplanque J P, Rangel R H. A comparison of models, numerical simulation, and experimental results in droplet deposition processes [J]. Acta Materialia, 1998, 46 (14): 4925-33.
- [10] Amitesh Kumar. Solidification of impinging molten metal droplet on a cold substrate [J]. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2014, 3(2): 486-497.
- [11] Trapaga G, Matthys E F, Valencia J J, et al. Fluid flow, heat transfer, and solidification of molten metal droplets impinging on substrates: comparison of numerical and experimental results [J]. Metallurgical Transactions B, 1992, 23(6): 701-718.

(责任编辑:黄艳斐)

第十一次全国热处理大会征文通知

第十一次全国热处理大会将于 2015 年 7 月在山西太原召开。会议由中国机械工程学会热处理分 会主办,大会主题为"材料•构件•热处理——创新与超越"。现面向国内外征文,征文范围(包括但不 限于下列范围):①相变、组织与性能;②新材料热处理;③化学热处理;④真空热处理;⑤热处理装备技 术;⑥淬火介质、冷却技术与装备;⑦特大构件热处理;⑧虚拟热处理;⑨表层硬化及表层改性(感应、高 能束,等);⑩涂层技术(PVD、CVD、热喷涂,等);⑪残余应力与畸变控制;⑫热处理与关键构件抗疲劳 制造;⑬过程控制与检测技术;⑭热处理标准化与产业化;⑮节能与环保等。

凡未经正式刊物发表的研究成果、学术观点、工程经验、设想及建议等均可以论文形式应征,征文截止日期为2015年5月1日。投稿邮箱:papers@chts.org.cn,网址:www.chts.org.cn

(摘自中国机械工程学会网)