

• 试验研究 Experimental Research •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.12.001

铋锡合金熔融沉积凝固过程及组织演变

戎文娟,单忠德,刘 丰,王永威,王佳琳
(北京机科国创轻量化科学研究院有限公司,北京 100044)

摘 要:采用数值模拟与工艺试验相结合的方法,研究了铋锡合金熔融堆积 3D 打印成形过程温度场变化,以及对成形件凝固组织演变的影响。结果表明,成形过程中各单元节点会经历若干次热震荡,整个热循环曲线的震荡幅值不断变小。先被激活的单元节点所经历的热作用时间较长,且所经历热循环震荡的次数更多;在喷头直径 0.2 mm,移动速度 2 mm/s,成形间距 2 mm,搭接率为 50%,加热温度 165 °C,成形底板温度 100 °C 工艺条件下,可得到致密度 97.6%的 3D 打印金属件;通过对成形金属件截面微观组织进行扫描电子显微镜观察,可以观察到底层、中心和上层 3 个区域组织存在明显不同,其中中心区的显微组织为等轴晶组织,该现象与数值模拟分析结果具有一致性。

关键词:熔融沉积;铋锡合金;数值模拟;材料成形

中图分类号: TG291

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2019)12-1231-04

Solidification Process and Microstructure Evolution of BiSn Alloy Fused Deposition

RONG Wenjuan, SHAN Zhongde, LIU Feng, WANG Yongwei, WANG Jialin
(Beijing national innovation institute of lightweight Ltd, Beijing 100044, China)

Abstract: By means of numerical simulation and process test, the change of temperature field and the effect on solidification structure evolution of BiSn alloy in 3D printing process were studied. The results show that each element node experiences several times of thermal shock during the forming process, and the amplitude of the whole thermal cycle curve becomes smaller and smaller. The first activated cell node experienced longer thermal action time and more times of thermal cycle shock. Under the technological conditions of 0.2 mm diameter of sprinkler head, movement speed is 2 mm/s, forming spacing is 2 mm, lap rate is 50%, 165 °C heating temperature and 100 °C forming base plate temperature, 3D printed metal parts with 97.6% densification can be obtained. By scanning electron microscope observation of the microstructure of the section of the formed metal, it can be observed that the microstructure of the bottom layer, the center and the upper layer are obviously different, and the microstructure of the central area is equiaxed crystal structure, which is consistent with the results of numerical simulation.

Key words: fused deposition; bisn alloy; numerical simulation; material forming

随着制造业市场的全球化、消费者需求的个性化发展,能否快速响应市场需求,缩短新产品研发周期,降低制造成本,同时具备小批量、多品种、高

质量以及结构复杂产品的灵活制造能力,成为企业兴衰成败的关键因素。在这种背景下,以增材制造(俗称 3D 打印)为代表的大量快速、高效、清洁的柔性制造技术应运而生。该技术不需要传统的模具、刀具、夹具及多道工序,而是利用三维设计数据在一台设备上可以快速而精确地制造出任意复杂形状的零件,实现许多传统工艺难以制造的复杂结构零部件的精密成形,并大大减少加工工序,缩短加工周期,实现更加优化的短流程、近终成形。

目前,3D 打印技术可成形的材料包括塑料、光敏树脂、蜡、纸、陶瓷、金属以及复合材料等。金属零件因其具有力学性能高、实用意义大等优点,在制造业中得到广泛的应用。因此,金属零件快速制造是 3D 打印技术要实现的最重要目标,也是 3D 打印技术发展的必然方向。传统的金属件制造工艺,以铸造、锻造为主,工序繁杂、生产周期长、能源消耗大,

收稿日期: 2019-08-29

基金项目: “高档数控机床与基础制造装备”国家重大科技专项《先进成形与焊接共性关键技术创新能力平台建设》资助项目(2018ZX01044001);北京机科国创轻量化科学研究院有限公司先进成形技术与装备国家重点实验室开放基金项目(SKL2019002);国家杰出青年科学基金《数字化绿色制造理论、技术及装备》(51525503);北京市科技新星项目(Z171100001117056)

作者简介: 戎文娟(1979-),女,山西太原人,硕士,高级工程师。主要从事先进成形工艺方面的工作。

电话: 010-82415123, E-mail: rwj918@126.com

通讯作者: 单忠德(1970-),山东高密人,院士,博士生导师。主要从事先进成形技术方面的工作。

E-mail: shanzd@canm.com.cn

已无法满足现代制造业市场的发展需求。其中具有特殊内腔结构的复杂金属件更是难于用传统工艺制造,或需要多道工序复合才能完成。增材制造工艺在减少制造工序、缩短加工周期方面具有明显的优势,而且越是复杂结构的产品,其优势越显著。

金属件熔融堆积技术以其效率高、成本低的特点,成为金属 3D 打印技术的一个重要组成部分。在快速经济模具制造中,铋锡合金是最常用的材料。利用铋锡合金材料熔点低、流动性好、成形性能良好、无收缩及材料可以反复使用等优点制成大型覆盖件成形模,为我国汽车工业的发展起到了促进作用^[1-3]。由于金属件快速化、精密化、个性化成形的迫切需求,增材制造方法近几年来成为研究热点^[6-9],本文对铋锡合金熔融沉积增材制造凝固过程组织演变及微观形貌进行了分析。

1 试验材料及方法

采用铋锡合金丝材进行试验,材料熔点 138 ℃,化学成分为 58%铋,42%锡。

铋锡合金熔融堆积 3D 打印成形过程如图 1,丝材在坩埚中熔化,液态铋锡合金在气压作用下通过专用喷嘴沉积在基板上,专用喷嘴固定在运动系统上,可在 X、Y 方向快速运动,Z 方向的运动可以通过成形底板上下移动实现,单道沉积金属按照预先规划好的路径,经过交错编织、叠加所形成铋锡合金件。

本文主要工艺参数为:喷头直径 0.2 mm,移动

速度 2 mm/s,成形间距 2 mm,搭接率为 50%,加热温度 165 ℃,成形底板温度 100 ℃。将熔融沉积件沿截面切断,观察分析其组织特征,同时对试样底层区、中心区和上层区的典型部位进行取样,分析其凝固成形过程中凝固组织生长特征。

2 成形温度场数值模拟

本文基于金属件熔融堆积 3D 打印成形特点,在考虑材料的热物性参数随温度变化和相变非线性行为的情况下,利用 APDL 语言编程建立了有限元模拟模型,并采用 ANSYS 有限元软件中的“生死单元”技术,对熔融堆积 3D 打印成形过程温度场进行数值模拟^[10]。其基本原理是:首先,在前处理阶段建立有限元分析模型,并将模型中没有成形区域单元的刚度或热传导矩阵乘以一个很小的因子(本研究为 $1e-56$),从而使其处于被“杀死”状态,此时被“杀死”单元的质量、比热容等特性以及单元载荷均为 0,不参加求解过程;当成形到先前被“杀死”的单元时,则需要重新“激活”该单元,将其温度、质量、单元载荷等恢复到初始值,单元的激活时间间隔由实际成形速度决定。

图 2(a)所示,为本文所建立的数值模拟物理模型。其中,成形件尺寸为 20 mm×20 mm×6 mm,划分为 6 层。基板尺寸为 200 mm×200 mm×10 mm,划分为 5 层。采用 Solid70 六面体八节点热单元进行网格划分,最终成形件单元的尺寸为 2 mm×2 mm×1 mm。成形件共划分为 600 个单元。模拟过程中,成

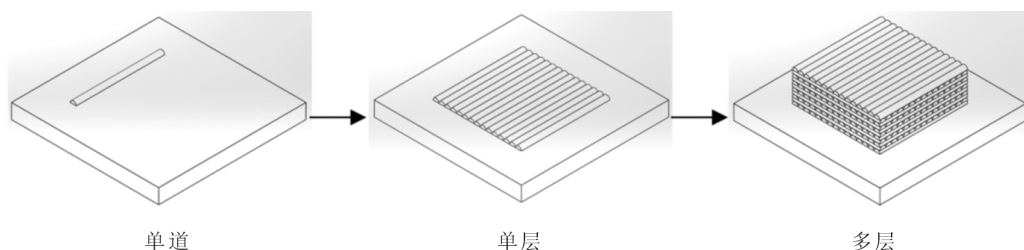
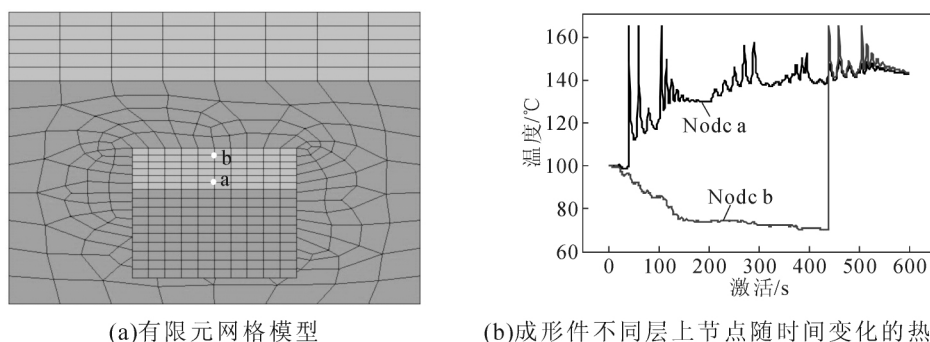


图 1 金属件熔融堆积 3D 打印成形过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of molten metal 3D printing forming process



(a)有限元网格模型

(b)成形件不同层上节点随时间变化的热循环曲线

图 2 3D 打印成形件有限元模型及特征点 a、b 热循环曲线

Fig.2 FEA physical model and temperature cycle curves with changing time on node a and b

形环境温度设定为 20℃,基板与环境接触面对流换热系数为 30 W/m²·k,熔融金属温度为 165℃。

图 2(b)为成形过程中成形件上第 1 层及第 5 层上节点 a、b 随时间变化所经历的热循环曲线对比。由图可见,节点 a 随时间变化的热循环曲线由若干温度波峰值和波谷值组成,当以 a 为节点的单元被激活时,a 点温度迅速上升至 165℃,但随后又在周围较冷环境的作用下温度迅速下降,而当节点 a 周围的单元被激活时,由于热传导作用使得节点 a 再一次经历热循环震荡。以 a 点为代表的熔融单元在整个成形过程中有几个典型特征:①成形过程中各单元经历若干次热震荡;②先激活的单元所经历的热作用时间要长,而且热循环震荡次数更多;③整个热循环曲线的震荡幅值不断变小。一方面,由于逐层堆积温度的积累,使得温度波谷值逐渐上升,另一方面,随着成形高度的增加,激活单元不断远离 a 点,同时成形件的表面换热增强,导致温度波峰值不断降低。

3 试验结果与分析

在上述试验参数下,得到如图 3 的铋锡合金成形件。各道之间通过合理搭接率实现金属致密连接,但各列之间由于金属表面张力及凝固特点,保留着较为明显的凝固痕迹。对成形件的致密度进行测试,其致密度达到 97.6%,将成形件沿截面切断,观察断口形貌与普通铋锡合金铸件的形貌区别,普通铸造组织为条状或块状的枝晶组织,组织较为粗大,且大小不均匀,如图 4,而熔融沉积成形的组织为细小均匀的等轴晶组织,如图 5。

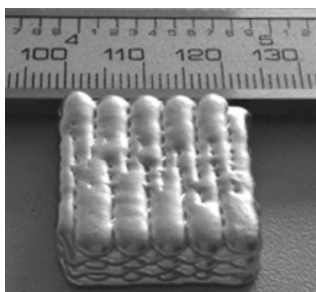


图 3 熔融堆积 3D 打印成形 6 层铋锡合金实体
Fig.3 6-layer Bi-Sn alloy part prepared by molten metal 3D printing method

对熔融堆积试样的底层区、中心区和上层区取样进行组织观察,发现沉积件在试样截面呈现出典型的三区分布。底层区附近形成了细小的快速冷却组织,且由于金属熔滴张力作用和搭接作用,形成了冷疏松,已凝固的熔滴保持了其原有形貌,或变形的熔滴形貌,存在明显的原颗粒边界;在中心区,

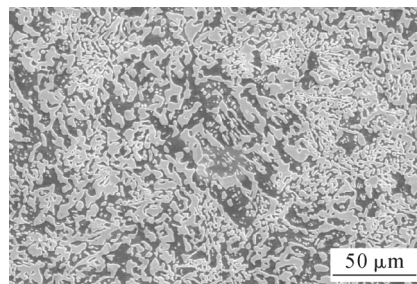


图 4 普通铸造成形铋锡合金微观组织
Fig.4 Microstructure of Bi-Sn alloy formed by casting

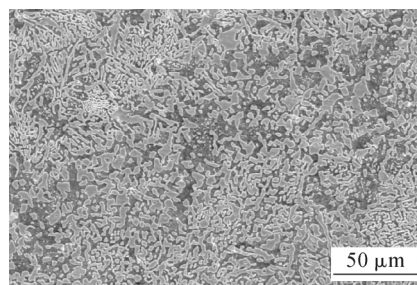


图 5 熔融沉积成形的铋锡合金微观组织
Fig.5 Microstructure of Bi-Sn alloy formed by molten metal 3D printing

形成了均匀分布的等轴晶组织,不存在任何原颗粒边界,这一区域材料的密度较高;上表面层,由于沉积结束后,表面的冷却增加,所以表面的显微组织进一步细化,疏松略有增加。

熔融沉积过程中,液态熔滴沉积成形时表面发生的铺展与凝固瞬态过程,对材料的微观组织与力学性能有重要影响。液态熔滴沉积过程是金属流动、热交换和快速凝固的热力耦合过程。液态熔滴沉积过程的物理过程为开始时熔滴的铺展过程被液体流动控制,主要是撞击动能克服黏滞力做功;当熔滴铺展到一定范围时,热交换成为主要控制因素,随后的铺展过程受凝固过程控制。

沉积过程是一个动态的热平衡过程。运动中的熔滴具有不同的温度和液相分数。液相含量大于 40%的半固态金属具有流变特性,在熔融沉积阶段,此类熔滴中的液相迅速沿表面展开,而固相部分的枝晶骨架被完全破碎,并分散在液相中。完全凝固的熔滴不发生变化或变形,在底层区可以观察到。含液相小于 40%的熔滴,将沿熔滴内的晶界发生破碎,形成单个的晶粒。沉积后,这种非平衡的热状态通过较热的液相区向较冷的固相或者过冷液相的热量流动,迅速达到热平衡。由于熔滴在表面展开的时间仅为微秒数量级,所以热平衡过程不会对枝晶破碎产生影响。在熔融沉积液滴周围液滴下落沉积时,由于热传导作用,先沉积成形金属会经历重新加热,部分枝晶间将发生重熔,并且多数集中在晶界上。晶粒内部的枝晶间液相将形成弥散分布的孤立液体颗粒。

Annarapu^[11]组织的等温粗化研究表明也得出相似结论。

该现象与数值模拟分析的结果是一致的。底层区材料经历若干次热震荡循环,相当于进行了若干次温度逐渐降低的等温处理,其组织形态由长条形凝固组织多次震荡逐渐断裂、破碎、颗粒钝化直至形成椭圆形枝晶(图 6a)。此外,强度幅度逐渐降

低的热震荡,也为底层区材料的热应力转移和消除提供了通道,同时,也为合金元素的固溶提供了条件。在中心区,由于热传导和散热条件区域平衡,凝固组织呈现出均匀分布的等轴晶组织(图 6b),而在上层区,由于热震荡影响减少,而散热条件变好,表面形态保留了长条形凝固形态,但组织更加细小均匀(图 6c)。

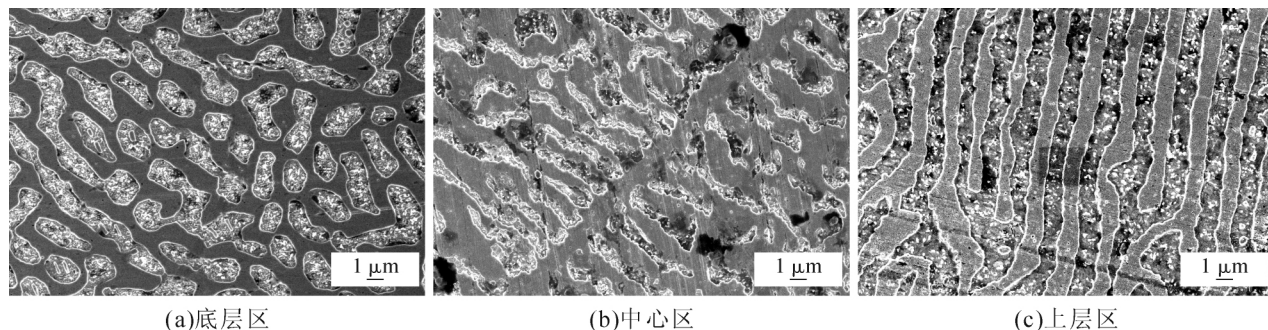


图 6 $T_l=165\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_s=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 成形实体的各区微观组织

Fig.6 Microstructure of each region of the forming entity ($T_l=165\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_s=100\text{ }^{\circ}\text{C}$)

4 结论

(1)通过对铈锡合金熔融沉积成形过程的数值模拟分析,得出成形过程中各单元节点会经历若干次热震荡,且先激活的单元节点所经历的热作用时间要长,热循环震荡次数更多;整个热循环曲线的震荡幅值不断变小。

(2)对于铈锡合金熔融堆积成形,在喷头直径 0.2 mm,移动速度 2 mm/s,成形间距 2 mm,搭接率为 50%,加热温度 165 $^{\circ}\text{C}$,成形底板温度 100 $^{\circ}\text{C}$ 工艺条件下,可得到致密度 97.6%的 3D 打印金属件,进一步验证了工艺可行性。

(3)熔融沉积件的显微组织在截面上呈现较为明显的分布:底层区、中心区和上层区,其中中心区的显微组织为等轴晶组织。显微组织的变化同沉积条件密切相关。

参考文献:

- [1] 单忠德,樊东黎,范宏义,等.机械装备工业节能减排制造技术[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [2] 杨光,巩水利,锁红波,等.电子束快速成形 TC18 合金多次堆积的组织特征研究[J].航空制造技术,2013(8): 71-74.
- [3] 李怀学,巩水利,孙帆,等.金属零件激光增材制造技术的发展

及应用[J].航空制造技术,2012(20): 26-31.

- [4] Liu Hou-cai, Mo Jian-hua, Liu Hai-tao. A review of three dimensional printing technology and its application [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 9, 27(9): 1184-1190.
- [5] Yan Yong-nian, Zhang Ren-ji, Lin Feng. New development of laser rapid prototyping technique [J]. New Technology & New Process, 2006(9): 7-9.
- [6] Sun Hui-lai, Zhao Fang-fang, Lin Shu-zhong, et al. Research progress and development trend on laser cladding [J]. Laser Journal, 2008, 29(1): 4-6.
- [7] Kruth J P, Mercelis P, Vaerenbergh J V, et al. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting [J]. Rapid Prototyping Journal, 2005, 11(1): 26-36.
- [8] Morgan R, Sutcliffe C J, O' Neill W. Density analysis of direct metal laser re-melted 316L stainless steel cubic primitives [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39: 1195-1200.
- [9] Yang Guang, Gong Shui-li, Suo Hong-bo, et al. Microstructure characterization of multi-deposited TC18 alloy by electron beam rapid manufacture [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(8): 71-74.
- [10] 王靖,李自良,祁冬杰,等. ABS 材料基于 ANSYS 生死单元技术的热分析[J].合成材料老化与应用,2017,46(2):41-45.
- [11] Mathur P, Annarapu S, Apelian D, et al. Spray casting: an integral model for process understanding and control[J]. Materials Science & Engineering A, 1991, 142(2):261-276.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2020 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号:52-64

国外发行号:M855

国内定价:25 元/本

海外定价:25 美元/本