

金属喷墨打印成形技术的研究现状及应用

左寒松, 石阿娜², 柳翊¹, 安俊超¹, 金文中¹, 闵志宇¹, 张伟¹

(1. 洛阳理工学院 材料科学与工程学院, 洛阳 471023; 2. 洛阳理工学院 会计学院, 洛阳 471023)

摘要: 金属喷墨打印技术是基于金属微滴喷射技术的一种新型增材制造技术, 其源于传统喷墨打印技术, 具有高精度、高灵活性和适用材料范围广等优点, 广泛应用于工业制造、教育科研、医疗卫生、建筑、军事、航空航天和艺术设计等领域。本文关注新型喷墨打印技术在金属零部件快速成型领域中的研究及应用现状, 结合笔者研究实践与国内外研究文献, 详细阐述了金属熔滴喷射产生技术、熔滴/沉积表面交互作用、连续熔滴沉积过程规律、成型件微观组织演变机理等关键技术与研究难点, 并对金属喷墨打印成形的未来研究及应用方向作以展望, 旨在为相关领域研究者们提供些许参考。

关键词: 增材制造; 金属熔滴; 喷墨打印

1 引言

近年来, 随着传统喷墨打印技术与增材制造技术 (Additive Manufacturing, AM) 的不断融合与相互催化, 新型喷墨打印技术 (Ink Printing Technology) 越来越得到关注。该技术基于离散-堆积成形原理, 直接将金属材料离散为均匀稳定的零维点单元 (即微熔滴), 配合先进数控技术实现三维实体结构等的“降维制造”。因其具有短周期、高柔性、非接触、数字驱动, 以及环境亲和等诸多优点, 且“墨水”适用原材料几乎无限制, 在机械制造、电子信息、航空航天、生物医药乃至土木工程等领域中的应用前景广泛^[1-3]。

本文重点关注新型喷墨打印技术在金属材料三维实体结构快速成型领域中的研究及应用现状。结合笔者研究实践与国内外研究文献, 详细阐述了金属熔滴喷射产生技术、熔滴/沉积表面交互作用、连续熔滴沉积过程规律、成型件微

观组织演变机理等关键技术与研究难点, 并对金属喷墨打印成形的研究现状及应用探索作以小结与展望, 以期为此类新技术的后续研究和实际应用提供一些可能方向。

2 金属微熔滴喷射产生技术

开发出一种材料离散技术以实现均匀金属微滴单元持续而稳定的产生, 始终是金属喷墨打印技术的研究热点和发展阻碍。目前在喷墨打印技术中应用最多、较为成熟的金属微滴喷射产生技术主要有连续式 (CIJ) 和按需式 (DOD) 两大类, 根据使用驱动形式的不同又发展出多种技术分支, 如压电连续式、压电按需式、气动按需式和脉冲按需式等, 已成功实现锡铅钎料、汞、锌、铝、铜、金和镁等多种金属材料及其合金的连续稳定喷射, 所得球状熔滴体积可控制在皮升数量级水平以内^[4]。不过受限于金属材料的固有物化性能, 如较高的熔点、黏度和表面张力等, 利用现有喷射技术

想进一步减小金属熔滴尺寸以提高成型分辨率的难度较大,且微喷嘴容易堵塞,迫切需要新一类金属熔滴喷射产生技术的开发。近期研究发现,利用能量更为集中的驱动方式,能够摆脱喷嘴结构和现有微孔径加工技术限制,实现大孔径喷嘴条件下的小微滴喷射^[4-6]。

3 金属微熔滴与沉积表面间的交互作用

高温金属微熔滴在低温固体表面上的非等温瞬时沉积过程,至少涉及两个动力学参数及五个热力学参数,可能出现或并存铺展、飞溅/喷射和破裂、弹跳、质量传输、冲击震荡、传热、凝固及界面重熔等多种现象,直接关系喷墨打印成型精度、微观组织乃至整体性能^[7]。前期研究中确定,熔滴若想稳定产生,同时避免溅射不可控沉积现象,以获得稳定而可重复的沉积形态,其无量纲韦伯数应在1~10数量级之间^[7,8]。喷墨打印过程熔滴飞行下落速度较慢,溅射现象不易发生。但在熔滴碰撞铺展结束后仍可能发生回缩弹跳,脱离初始沉积位置而影响成型精度的获得。大量研究结果表明,熔滴弹跳行为发生与否,主要取决于沉积表面状态(材料、粗糙度和温度等)、熔滴状态(材料、尺寸、温度和速度等)、表面-熔滴接触条件(润湿性、界面热阻、界面重熔和界面反应等)^[9]。

再者,金属熔滴与沉积表面间的界面重熔是决定沉积精度和结合强度的关键。前期研究发现当熔滴接触界面温度超过临界阈值(熔点或固相线)时,重熔即发生。影响重熔的因素包括熔滴温度、沉积表面温度、沉积表面材料、基板厚度、已沉积层厚度等^[10]。另外,喷墨打印过程中微小高温金属熔滴在大面积低温固态表面上碰撞沉积,其冷却速度可达到亚快速凝固(10~103 K/s)甚至快速凝固范畴(103~106 K/s)。沉积熔滴典型外观形态为球冠状结构,内部则形成细小快速凝固组织。沉积熔滴外观形貌以及内部微观组织的形成与分布是熔滴沉积过程中的热力学、动力学行为耦合作用的结果^[11]。

4 金属熔滴连续沉积过程及其影响

根据离散-堆积原理,喷墨打印过程实际上就是熔滴单元由点-线-面-体的三维累加过程,涉及质量单元的有序添加和移动点热源的周期性作用,这与传统块状材料整体凝固过程差异较大。根据微滴沉积方向与沉积表面移动方向间的关系,熔滴连续沉积行为主要分为层间沉积(Columnar

Deposition)和层内沉积(Sweep Deposition)两种基本模式,动量传输和热交换变化规律各不相同^[8]。根据喷射间隔时间与熔滴凝固时间两者的对比关系,层间沉积模式可分为高频喷射沉积和低频喷射沉积两种。在高频喷射沉积模式下,沉积熔滴凝固时间大于喷射间隔,热输入大于热输出,即出现层间热累积效应,甚至造成沉积体垮塌,外形尺寸无法保证,微观组织也会恶化为铸态组织。在低频喷射沉积模式下,沉积熔滴凝固时间要小于喷射间隔,热输入小于热输出,即出现层间热耗散效应,造成沉积体温度会逐渐下降,甚至导致界面重熔难以发生,熔滴间的冶金结合无法形成,最终成型件力学性能受到影响。只有当沉积熔滴凝固时间与喷射间隔时间相等时,系统内热输入和热输出维持平衡,此时喷射频率为最优,其值会随沉积过程而实时改变。相对于层间沉积,层内沉积过程中的传热规律相对简单,针对此模式的研究主要集中于成型结构规律、扫描路径规划和相关工艺参数优化等等。总的来说,在连续沉积过程中,实现熔滴喷射产生频率、热力学状态,以及动力学状态间的匹配,是精确控制产品外观形貌、微观组织和整体性能等主要难点和突破点所在^[12]。但是,目前针对均匀金属微滴连续沉积过程中涉及的传热、凝固和相变等微观科学问题的相关研究仍不深入、系统,沉积态金属零件微观组织的形成与演化机理尚不明确。

5 金属喷墨打印成型零件

将金属微滴应用于金属材料近净成形领域的思路是由麻省理工学院和UCI于20世纪90年代提出的,而后国内外诸多研究机构先后投入到金属喷墨打印技术的研究中,目前主要集中于微小薄壁异形件直接成型领域的应用可行性,已经实现了块体、管件、圆筒件、框体、多孔结构等典型结构的打印成型,材料涉及锡、铅、锌、铝、铜和镁等金属及其合金,制品性能与铸态原坯相比有较大提高。但成型结构种类较为单一,复杂程度不高,致密度和成型精度也有待提高^[13,14]。再者,支撑辅助结构常被引入加工以成型复杂结构(如镂空、悬伸结构),提高成型质量,但是,迄今为止金属喷墨打印技术中支撑结构的设计与添加相关研究仍较少见诸报端,严重制约了成型零件结构复杂度的提升。此外,前期也进行了喷墨打印技术在非均质金属零件成型领域的初步应用探索,此类研究在制备梯度功能材料方面具有一定的应用潜力和研究价值^[15,16]。

6 展望

金属喷墨打印技术具有喷射材料范围广、无约束自由成形和无须昂贵专用设备等优点,是一种极具发展潜力的增材制造技术。目前,该技术已应用于金属件直接成形、微电子封装和焊球制备等领域,在非均质材料及其制件制备、结构功能一体化制造以及航空、航天等高新技术领域也具有重要的应用前景。然而,要进一步推进金属喷墨打印技术的应用和发展,尚需在金属熔滴喷射产生技术、沉积过程热、动力状态检测、支撑或型芯设计与添加、成型件尺寸精度、微观组织及其性能优化等几个方面开展继续深入研究。

参考文献

- [1] 王运赣, 张祥林. 微滴喷射自由成形 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009.
- [2] ZHANG D, QI L, LUO J, et al. Parametric mapping of linear deposition morphology in uniform metal droplet deposition technique[J]. Journal of Materials Processing Tech., Elsevier, 2019, 264 (June 2018) : 234-239.
- [3] 王至尧. 中国材料工程大典 第25卷 材料特种加工成形工程 (下) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [4] AMIRZADEH A, RAESSI M, CHANDRA S. Producing molten metal droplets smaller than the nozzle diameter using a pneumatic drop-on-demand generator[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 47: 26-33.
- [5] 陶院, 杨方, 罗俊等. 基于应力波驱动的金属微滴按需喷射装置开发及试验研究 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (7) : 162-167.
- [6] ZHAO X, JIA Z, LI W, et al. Numerical simulation of micro droplet formation combined with pneumatic and piezoelectric drive[J]. Microsystem Technologies, Springer Berlin Heidelberg, 2019, 25 (7) : 2727-2734.
- [7] SCHIAFFINO S, SONIN A A. Molten droplet deposition and solidification at low Weber numbers[J]. Physics of Fluids, 1997, 9 (11) : 3172-3187.
- [8] GAO F, SONIN A A. Precise Deposition of Molten Microdrops: The Physics of Digital Microfabrication[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1994, 444 (1922) : 533-554.
- [9] YI H, QI L, LUO J, et al. Elimination of droplet rebound off soluble substrate in metal droplet deposition[J]. Materials Letters, 2018, 216: 232-235.
- [10] HIMMEL B, RUMSCHÖTTEL D, VOLK W. Thermal process simulation of droplet based metal printing with aluminium[J]. Production Engineering, Springer Berlin Heidelberg, 2018, 12 (3) : 457-464.
- [11] ZUO H, LI H, QI L, et al. Influence of Interfacial Bonding between Metal Droplets on Tensile Properties of 7075 Aluminum Billets by Additive Manufacturing Technique[J]. Journal of Materials Science and Technology, Elsevier Ltd, 2016, 32 (5) : 485-488.
- [12] FANG M, CHANDRA S, PARK C B. Heat Transfer During Deposition of Molten Aluminum Alloy Droplets to Build Vertical Columns[J]. Journal of Heat Transfer, 2009, 131 (11) : 112101.1-112101.7.
- [13] YI H, QI L, LUO J, et al. Direct fabrication of metal tubes with high-quality inner surfaces via droplet deposition over soluble cores[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 264 (August 2018) : 145-154.
- [14] LI S L, WEI Z Y, JUN D, et al. Research on the manufacturing of electrical power fittings based on metal droplet deposition[J]. Applied Physics A, Springer Berlin Heidelberg, 2017, 123 (6) : 405.
- [15] OH J H, KIRIHARA S, MIYAMOTO Y, et al. Process control of reactive rapid prototyping for nickel-aluminides-II[J]. Materials Science and engineering A, 2003, 349 (1-2) : 294-299.
- [16] WANG P Y, LI H J, QI L H, et al. Synthesis of Al-TiAl₃ compound by reactive deposition of molten Al droplets and Ti powders[J]. Progress in Natural Science: Materials International, Chinese Materials Research Society, 2011, 21 (2) : 153-158.