DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.08.026

# 金属微滴喷射增材制造技术

左寒松[1],金文中[1],石阿娜[2],柳　翊[1],安俊超[1],刘　明[1],张　伟[1]

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

**摘　要**:金属微滴喷射打印是一种源于传统喷墨打印技术的新型增材制造技术,其具有高精度、高灵活性、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、艺术等诸多领域。该增材制造技术关键核心与技术难题是金属微滴喷射技术的开发与实现。本文结合笔者研究实践与国内外研究文献,系统地介绍了各类金属微滴喷射产生技术的原理、发展和应用现状,并对该技术研究方向和应用前景进行了展望。

**关键词**:增材制造;金属微滴;微滴喷射

**中图分类号**:TP391.7; TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)08-0804-03

## Metal Droplet Injection Additive Manufacturing Technology

ZUO Hansong[1], JIN Wenzhong[1], SHI A'na[2], LIU Yi[1], AN Junchao[1], LIU Ming[1], ZHANG Wei[1]

(1. School of Materials Science and Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China; 2. School of Accountancy, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

**Abstract**: Metal droplet jet printing was a new additive manufacturing technology originated from traditional ink-jet printing technology. It had the advantages of high precision, high flexibility and wide range of applicable materials, and was widely used in industrial manufacturing, education, scientific research, medical care, construction, military, aerospace, art and other fields. The key and difficult problem of the additive manufacturing technology was the development and implementation of metal droplet injection technology. The principle, development and application status of various metal microdroplet injection technology are systematically introduced, and the research direction and application prospect of the technology are forecasted.

**Key words**: additive manufacturing; metal droplet; droplet ejection

增材制造技术(Additive Manufacturing,AM)或称 3D 打印技术(Three Dimensional Printing,3DP),是一种综合机械、电子、软件、材料、光学等多学科的新型加工技术。其中微滴喷射打印(Ink-jet Printing Technology)是源于传统喷墨打印的一种新型增材制造技术,其具有短周期、高柔性、低成本、无需专用工具或约束等优点,且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[1,2]。然而,将该种技术用于金属零部件的直接快速制造领域,其技术核心和瓶颈是金属材料离散技术,即金属微滴喷射技术。目前,非金属材料微滴喷射技术业已成熟并实现商业化应用。但金属材料因其熔点高,粘性和表面张力大,部分活泼金属(如铝、镁等)还具有较强的氧化性和腐蚀性,迫使研究者必须开发或改进出更适用于金属材料的新型微滴喷射装置。

本文重点关注面向增材制造技术的金属微滴喷射产生技术。结合笔者研究实践与国内外研究文献,简介金属微滴喷射产生技术的原理、分类等,并对其在金属微滴喷射打印成形领域中的应用现状作以小结,进而探索其研究和应用前景,旨在为推进此类新技术的后续研究和实际应用提供些许参考。需要说明的是,传统雾化喷射技术所得熔滴与微滴喷射打印技术所定义成型单元特征差异较大,故不在本文涉及范围之内。

## 1　金属微滴喷射技术原理及分类

根据喷射液滴形态的不同,金属微滴喷射技术主要分为液滴滴落(Dripping)、连续喷射(Continuous Ink Jetting,CIJ)和按需喷射(Drop-on-demand,DOD)3 种[3]。液滴滴落是低流量射流仅在重力作用

收稿日期:2020-05-12

基金项目:河南省科技攻关计划(172102210399);河南省科技攻关计划项目(162102210280);河南省高等学校重点科技攻关项目(18A430019);河南省高等学校重点科研计划项目(15A430035);洛阳理工学院青年基金(2017QZ07)

作者简介:左寒松(1980-),河南长葛人,讲师,博士.研究方向:增材制造技术的研究.电话:18211973136,
E-mail: zhs19801212@163.com

下的破裂形式。液滴产生速度较低，主要用于表面张力或接触角等的测定实验。连续喷射技术基于Rayleigh线性不稳定理论。当高流量射流表面被施加高频扰动时，会在表面张力作用下分解成一连串的微小液滴，如图1(a)[4]。按需喷射技术是1960年首次提出的一种人造的材料离散技术，是通过某种使能方式，由数字脉冲信号控制产生压力信号，挤压工作腔体而按需产生单颗微滴，如图1(b)[5]。后两种喷射方式在增材制造技术中较为常见。

## 2　连续式金属喷射技术

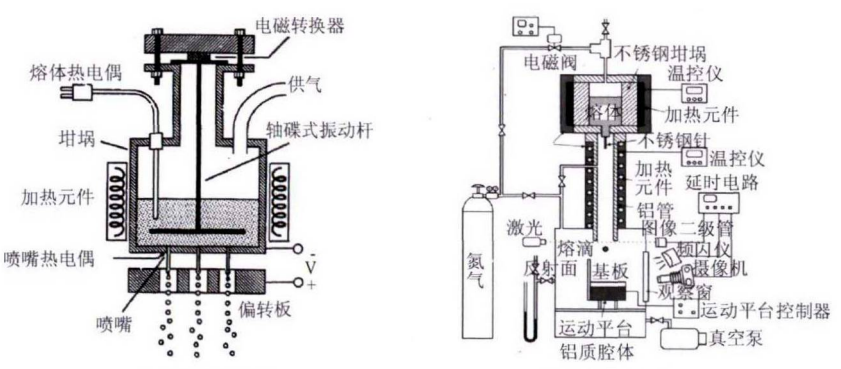
如何克服金属熔体高表面张力，迫使其通过毫米甚至微米级的微孔形成稳定射流乃至均匀熔滴，是金属微滴喷射关键技术难点之一。由美国麻省理工学院(MIT)[6]提出的典型连续喷射装置结构如图1(a)所示。其工作原理是利用背压形成持续金属射流，再利用压电陶瓷驱动压杆结构在金属射流表面形成特定频率的扰动，从而使其克服表面张力而形成液滴串。所得熔滴形态和尺寸受气体背压、扰动频率以及喷嘴结构尺寸等因素共同控制。但是，由于驱动源材料—压电材料实际工作温度需低于其居里温度(通常不高于200 ℃)，该技术应用于高熔点金属材料时必须设计特殊隔热结构。MIT和日本东京大学基于压电驱动式结构进行改进，实现了铜合金的喷射产生[7,8]。技术难点之二是超低氧气氛环境构建，这在喷射铝合金、镁合金等活泼金属过程中至关重要。喷射环境内的氧含量应小于$5\times10^{-4}\%$，否则过多的含氧量将使得金属射流表面形成相连的岛状氧化物造成不能分离形成球形熔滴[9,10]。技术难点之三是坩埚和喷嘴材料的选择。金属材料喷射装置中的加热坩埚需采用具有高工作温度、高温强度、化学惰性、耐熔融金属、低孔隙率、可加工性、抗热冲击的材料。喷嘴材料选择要求更高，研究中发现喷嘴材料物化性能、高温力学性能、表面润湿性、机加工性能以及结构稳定性等显著影响产生熔滴形态、尺寸、喷射稳定性等，甚至直接决定喷射过程成功与否。前期实验中系统研究过不锈钢、耐火材料、钛合金、石墨、氮化硼、石英、红宝石、蓝宝石、氧化铝、碳化硅等金属、非金属材料在金属材料连续喷射实验中的应用可能性，目前较多应用的喷嘴材料是优质石墨[6,7]。

除设备构建与开发外，针对连续式金属微滴喷射过程的理论研究、数值模拟和实验验证也一直是重要手段和研究热点。研究内容主要涉及金属微滴连续喷射过程、关键参数预测（射流断裂长度、喷射液滴直径等）、及液滴后续飞行过程中的热、动力学行为变化等，为基于金属微滴喷射技术的增材制造技术的研究与应用提供了一定的理论和实验基础[4]。

总的来说，美国MIT、UCI、东北大学和国内西北工业大学、哈尔滨工业大学、天津大学、台湾国立成功大学等机构研究者已针对不同应用背景开发出适用于锡铅钎料、汞、锌、铝、铜、金、镁等材料的连续稳定喷射。连续喷射技术所得金属微滴直径通常为喷孔直径2倍左右，尺寸均匀性好，但其喷射频率极高(5~44 kHz)，初始速度通常在10~20 m/s，较难实现单个微滴的精确受控沉积[11]，且在成型零件过程中容易形成热累积效应，导致零件成型精度和组织性能的恶化。再加之连续喷射设备包含驱动源隔热保护装置、辅助高压充电偏转和废微滴回收等子装置，结构复杂而昂贵，制约了该类喷射技术在精确成形领域内的应用，而更多地被用以快速大批量地制备尺寸均匀的微细焊球和合金颗粒材料等。

## 3　按需式金属喷射技术

按需式喷射技术可通过控制激励信号的输入形式获得所需尺寸的液滴，按需喷射技术中微滴产生




(a)连续喷射　　(b)按需喷射

图1　微滴喷射原理图

Fig.1　Schematic of microdroplet injection

与脉冲控制信号同步，按需喷射技术喷射频率较低（<2 kHz），微滴尺寸均匀，微滴初始速度通常在5~10 m/s范围，无需额外的充电偏转装置即可精确控制每个微滴的飞行轨迹和沉积位置，具备数字化控制特性，易于与计算机控制紧密结合，容易实现喷射设备的小型化和集成化，再加之材料适用范围广等其他优点，因此近年来研究较多，发展迅速。金属连续喷射技术中关于超低氧气氛环境构建、坩埚喷嘴材料选择等研究结构在金属按需喷射技术中同样适用，在此不再赘述，主要关注喷射结构改进等其它研究方面。

根据使能方式的不同，液滴按需喷射技术可进一步分为阀控式、压电式、热泡式、静电式和微注射器式等类型，其中前两种形式更适合于金属材料。金属微滴按需喷射设备发展早期仍是基于逆压电效应的压电驱动式技术，其具有单位体积输出能量大、结构紧凑、可控性好且性能稳定等优点，但其应用同样受限于压电陶瓷的工作温度范围[12,13]。相比之下，阀控气压驱动式（简称气动式）按需喷射技术以数字信号控制的脉冲气体为激励源，无需其他附加驱动元件和复杂的隔热结构，设备结构简单、工作温区大且可靠性好，实验材料涉及锡、铅、锌、铟、铝、铜等各类金属及其合金，可以实现毫米级乃至亚微米微滴的稳定喷射。更值得注意的是，通过喷射结构的改进，按需式喷射能够摆脱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[14]。

针对金属按需喷射过程中射流长度、液滴直径等关键参数的理论计算仍沿用连续喷射相关研究结论。但从模型实验和数值模拟研究结果中发现，典型金属微滴按需喷射过程与传统的基于Rayleigh线性不稳定理论的射流断裂过程不完全相符，说明按需喷射过程模型需要修正甚至重新建立[15]。另外，由于未设外加偏转电场，喷嘴表面轮廓不完整、附着杂质、表面粗糙度不对称等缺陷，都会直接影响影响成型单元的精确受控沉积，这也是金属按需喷射微滴技术研究重点和急需攻克的难题之一。

## 4　结语

金属微滴喷射打印技术因其具有高精度、高灵活性、适用材料范围广等优点而具有极大的应用前景，其核心关键即为金属微滴喷射技术。综述笔者研究实践与相关研究文献可知，目前连续式和按需式金属微滴喷射技术在增材制造技术中均已实现了不同程度的应用。但如何进一步确保金属微滴的稳定，包括喷射稳定性、尺寸均一性及沉积受控性等要求，仍然是未来金属微滴喷射打印技术设备开发和工艺改进的核心难点。

**参考文献：**


[1] 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.

[2] Huang JieGuang, QI LeHua, LUO Jun, et al. Suppression of gravity effects on metal droplet deposition manufacturing by an anti-gravity electric field [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 148: 103474.

[3] Dong H, Carr W W, Morris J F. An ex perimental study of drop-on-demand drop formation[J]. Physics of Fluids, 2006, 18(7): 1-16.

[4] Blazdell P F, Evans J R G G. Application of a continuous ink jet printer to solid freeforming of ceramics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 99(1): 94-102.

[5] 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): 1395-1407.

[6] Passow C. A Study of Spray Forming Using Uniform Droplet Sprays [D]. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1990: 13-19.

[7] Abel G K. Design and construction of high temperature uniform metal spray apparatus [D]. massachusetts institute of technology, 1993: 5-9.

[8] Takagi K, Masuda S, Suzuki H, et al. Preparation of Monosized Copper Micro Particles by Pulsated Orifice Ejection Method [J]. Materials Transactions, 2006, 47(5): 1380-1385.

[9] Haj-Hariri H, D. Poulikakos. Capillary instability of a cylindrical jet with an elastic shroud: a model for the breakup of an oxidized metal jet[J]. Transactions of the ASME, 2000, 67(3): 626-628.

[10] Yim P. The role of surface oxidation in the break-up of laminar liquid metal jets[D]. 1996: 13-136.

[11] Derby B. Additive Manufacture of Ceramics Components by Inkjet Printing[J]. Engineering, THE AUTHORS, 2015, 1(1): 113-123.

[12] Gregg Michael Duthaler. Design of a drop-on-demand delivery system for molten solder microdrops [D]. Massachusetts Institute of Technology, 1995: 15-19.

[13] Lee T, Kang T G, Yang J S, et al. Gap Adjustable Molten Metal DoD Inkjet System With Cone-Shaped Piston Head [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2008, 130 (3): 031113-1-6.

[14] 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.

[15] 李素丽，杨来侠，卢秉恒. 金属熔体喷射沉积特性分析[J]. 稀有金属材料与工程，2019, 48(7): 2232-2238.