基于均匀金属微滴喷射的 3D 打印技术

齐乐华^{①②*}, 钟宋义^①, 罗俊^{①②}

① 西北工业大学机电学院, 西安 710072

② 西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072

* 通信作者. E-mail: qilehua@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2014-08-06; 接受日期: 2014-10-23; 网络出版日期: 2015-01-21

国家自然科学基金 (批准号: 51105314)、国防基础科研项目 (批准号: A1120133026) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20126102110022) 资助项目

摘要 均匀金属微滴喷射技术是基于喷墨打印的原理, 于 20 世纪 90 年代初提出并发展起来的一种 3D 打印技术. 它是以均匀金属微滴为基本成型单元, 依据零件形状特征逐点、逐层“堆积”而实现三维结构的快速打印技术, 具有喷射材料范围广、无约束自由成形和无需昂贵专用设备等优点, 在微小复杂金属件制备、电路打印与电子封装以及结构功能一体化制造等领域具有广泛应用前景. 由于金属材料具有熔点高、易氧化、粘性和表面张力大等特点, 与非金属材料喷射沉积有很大差异. 本文分析了金属微滴喷射方式及其机理, 概述了此领域国内外研究现状, 并结合笔者研究实践, 阐述了金属微滴喷射沉积需要解决的关键技术及实例, 如微滴喷射装置开发、喷射成型参数优化等, 并对该技术的重点研究方向进行了展望.

关键词 金属液滴喷射 均匀微滴 连续式喷射 按需式喷射 3D 打印

1 引言

基于均匀金属微滴喷射的 3D 打印技术是由美国 Orme 在 1993 年提出并发展起来的一种增材制造技术^[1]. 它是基于“离散—叠加”的成型原理, 通过液滴喷射器产生均匀金属微滴, 同时控制三维基板运动, 使金属微滴精确沉积在特定位置并相互融合、凝固, 逐点逐层“堆积”, 而实现复杂三维结构的快速打印. 该技术具有喷射材料范围广、无约束自由成形和无需昂贵专用设备等优点, 在微小复杂金属件制备、电路打印与电子封装以及结构功能一体化零件制造等领域具有广泛应用前景^[2,3].

目前, 非金属材料 (如墨水、聚合物溶液) 微滴喷射技术已有成熟应用^[4], 但在金属材料喷射和三维实体结构打印方面, 还有较多的技术难题需要解决. 金属材料熔点高, 粘性和表面张力大, 部分金属还具有较强的腐蚀性, 以往成熟的非金属材料喷射装置及控制方法很难直接用于金属材料的喷射和打印成型, 需开发新型耐高温、耐腐蚀的喷射装置; 另一方面, 在金属微滴喷射沉积过程中, 金属微滴铺展、凝固等受到微滴飞行速度、微滴温度、基板温度等多因素的耦合作用, 需从实验和理论两方面研究各参数对微滴熔合状态、内部微观组织演变规律等的影响, 以保证成型件的外部形貌、内部质量及力学性能. 此外, 杂质过滤、成型过程监控等也是需要解决的关键技术.

本文在介绍金属微滴喷射技术原理与分类的基础上, 结合笔者研究实践和国内外研究现状, 重点阐述了金属液滴喷射中所涉及的关键技术及难点, 并对未来发展趋势和研究方向进行了展望.

引用格式: 齐乐华, 钟宋义, 罗俊. 基于均匀金属微滴喷射的 3D 打印技术. 中国科学: 信息科学, 2015, 45: 212–223, doi: 10.1360/N112014-00219

图 1 均匀金属微滴产生与喷射原理图

Figure 1 Schematic of droplet generator. (a) CIJ; (b) DOD-pneumatic driven; (c) schematic of droplet formation in DOD

表 1 金属微滴喷射技术分类及特点

Table 1 Classification and characteristics of uniform metal droplet ejecting technology

Classification	Driven mode	Ejection frequency	Velocity of droplet	Efficiency
Continuous-ink-jet	Piezoelectric driven	5~44 kHz	10~20 ^[5]	High
	Piezoelectric driven,	< 2 kHz	5~10	Low
Drop-on-demand	Pneumatic driven, Mechanical vibration			

2 金属微滴喷射技术原理及分类

根据均匀金属液滴产生原理和控制方式的不同, 金属液滴喷射技术可以分为连续式喷射 (continuous-ink-jet, CIJ)(图 1(a)) 和按需式喷射 (drop-on-demand, DOD)(图 1(b)) 两大类, 其技术特点如表 1 所示.

连续式均匀金属微滴喷射是在持续压力的作用下, 使喷射腔内流体经过喷孔形成毛细射流, 并在激振器的作用下断裂成为均匀液滴流. 该技术最早是由美国麻省理工学院^[6] 和美国加州大学欧文分校^[1] 在 20 世纪 90 年代基于 Rayleigh 射流线性不稳定性理论^[7] 提出的. 图 1(a) 所示为典型的连续式微滴产生装置, 坩埚内熔体先在气压作用下流出喷嘴形成射流, 并同时由压电陶瓷产生周期性扰动. 当施加扰动的波长 (λ) 大于射流径向周长 πd_j (d_j 为射流初始直径) 时, 射流内部产生压力波动, 结合表面张力的作用, 射流半径发生变化. 射流表面扰动 η 随时间成指数变化 $\eta(t) = d_j \varepsilon e^{\beta t} / 2$ (其中 t 为时间, ε 为施加的扰动的初始振幅, β 为表面波增长率)^[8,9], 当扰动幅度等于射流初始半径 ($\eta(t) = td_j$) 时, 射流断裂形成微滴^[10]. 研究表明, 当对射流施加波数 k ($k = \pi d_j / \lambda$) 约为 0.697 的正弦波扰动时, 可实现均匀金属液滴的产生^[11]. 由于微滴产生速率较高, 需在射流断裂后, 经过充电、偏转电场来控

制其飞行轨迹与沉积位置.

按需式金属微滴喷射是利用激振器在需要时产生压力脉冲, 改变腔内熔体体积, 迫使流体内部产生瞬间的速度和压力变化驱使单颗熔滴形成^[2]. 相比于连续式微滴喷射技术喷射频率高, 单颗熔滴飞行沉积行为不易控制的特点, 按需式喷射时, 一个脉冲仅对应一颗熔滴, 因而具有喷射精确可控的优点, 但喷射速度远低于连续式喷射. 图 1(c) 所示为按需式喷射金属微滴形成的过程, 驱动器按需产生脉冲压力挤压腔内熔液, 熔液受迫向下流动形成液柱, 在腔内压力、表面张力作用下, 更多的熔液流出, 液柱伸长, 逐渐形成近似球形. 当腔内压力减小后, 喷嘴出口处流体的速度将小于先期流出流体的速度, 导致液柱发生颈缩, 并断裂成单颗熔滴.

金属微滴喷射技术受到国内外学者的高度关注, 目前研究主要集中在均匀金属微滴产生机理、轨迹控制装置及其装备开发、锡铅和铝液滴喷射沉积成形机理、微滴精准控制与应用和成型质量控制等方面, 表 2 列出了国内外主要研究机构及其研究领域.

表 2 均匀金属微滴喷射成形技术国内外研究概况
Table 2 Research status of uniform metal droplet ejecting technology

Country	Name of organization	Classification	Driven mode	Material	Research area
China	Northwestern Polytechnical University	CIJ	Piezoelectric driven	Solder, Aluminium alloy	Fabrication of metal components, Droplet formation mechanism
			Pneumatic driven	Solder, Aluminium alloy,	Fabrication of metal components,
			Piezoelectric driven	Copper alloy	Electronic package,
			Electromagnetism driven		Circuit printing
	Huazhong University of Science and Technology	DOD	Pneumatic driven	Solder	Electronic package
	Harbin Institute of Technology	CIJ	Piezoelectric driven	Tin alloy	Production of micro particle, Ejection mechanism
	Tianjin University	CIJ	Piezoelectric driven	Tin alloy	Production of micro particle
	General Research Institute for Nonferrous Metals	CIJ	Piezoelectric driven	Tin alloy	Electronic package
	National Cheng Kung University	CIJ	Piezoelectric driven	Tin alloy, Copper alloy	Production of micro particle
	University of California, Irvine	CIJ	Piezoelectric driven	Tin alloy, Aluminium alloy	Droplet formation mechanism
					Deflection and deposition mechanism, Fabrication of metal components,

续表 2

	Massachusetts Institute of Technology	CIJ DOD	Piezoelectric driven	Tin alloy, Zinc alloy, Copper alloy, Aluminium alloy	Deflection and deposition mechanism Circuit printing, Electronic package
	Northeastern University	CIJ	Piezoelectric driven	Tin alloy	Mechanism of droplet solidification
	Microfab.INC	DOD	Piezoelectric driven	Solder	Circuit printing, Electronic package
Canada	University of Toronto	DOD	Pneumatic driven	Tin alloy, Aluminium alloy	Fabrication of metal components, Droplet formation mechanism
German	Institute for Micromachining and Information Technology	DOD	Piezoelectric driven	Solder	Electronic package
Japan	Osaka University	DOD	Piezoelectric driven	Aluminium alloy	Fabrication of heterogeneous components
	Nagoya University	DOD	Piezoelectric driven	Tin alloy	Fabrication of metal components
Korea	Korea Institute of Machinery	DOD	Piezoelectric driven	Tin alloy	Fabrication of metal components and Materials

3 均匀金属微滴喷射沉积关键技术

在金属微滴喷射 3D 打印过程中, 保持均匀金属微滴的稳定喷射是该技术得以应用的基础. 针对不同形式的微滴产生机理和应用领域, 需开发相应的微滴喷射装置与控制系统. 此外, 喷射参数、液滴温度、基板温度等的协调匹配对于成型件外部形貌、内部组织等均有很大影响.

3.1 均匀金属微滴喷射装置研究

3.1.1 连续式金属微滴喷射装置

连续式金属微滴喷射装置需能产生持续压力形成射流, 并施加扰动使射流受激断裂成均匀液滴流. 典型的喷射系统主要包括压力控制子系统、扰动产生子系统、充电偏转子系统、金属熔炼子系统和沉积、回收子系统等^[12]. 其中扰动产生装置和充电偏转装置是其关键部件, 前者用于驱动均匀液滴的产生, 后者用于控制微滴的飞行轨迹与沉积位置. 连续喷射技术通常采用压电陶瓷作为扰动产生装置的驱动源, 由于驱动源产生的机械振动较微弱, 可采用阶梯轴结构的激振杆来放大振幅, 以产生足够的扰动使射流断裂^[13]. 此外, 压电陶瓷的工作温度一般应保持在居里点一半以下^[6], 当喷射锡铅、铝、铜等金属材料时, 需要解决隔热和防腐等问题. 西北工业大学通过在压电陶瓷外围安装冷却水路可有效保证其工作温度^[14]. 台湾国立成功大学通过在石墨坩埚上下两端加装隔热模块, 开发了用于铜熔滴喷射的装置^[15]. 加州大学在开发铝合金喷射装置时, 使用镀有氮化硼涂层的钛合金杆作为振动杆, 可有效防止铝熔液腐蚀. 由于钛合金热导率较低, 可减少热量向压电陶瓷传递^[16].

3.1.2 按需式金属微滴喷射装置

按需式喷射技术是通过驱动器产生脉冲压力挤压熔体流出喷嘴形成微滴。根据脉冲压力产生的方式不同, 按需式喷射主要有气压驱动式、压电驱动式、机械振动式、应力波式等。美国麻省理工学院在 20 世纪 90 年代中期开发的压电驱动式按需喷射装置。在喷射过程中, 压电陶瓷产生位移, 挤压膜片改变腔体内熔液体积, 迫使其流出喷嘴形成微滴^[17]。但该结构存在供给流道小, 容易发生堵塞和喷射腔内热量高易导致压电陶瓷失效等问题。对喷头进行改进设计后的压电驱动活塞式喷射装置, 采用环状流道, 在活塞头和喷射腔体之间留有空隙, 在熔液上部施加气压, 可确保熔液能及时地补充到喷嘴口。此外, 在压电陶瓷上安装较长的振动杆可有效减少热量的传递, 保护压电陶瓷, 使其能应用于更高熔点的金属喷射^[18]。机械振动式的原理和压电驱动活塞式类似, 其驱动源采用电磁阀, 使振动杆能够获得更大位移, 且驱动控制装置更简单, 但喷射频率较低^[19]。

气压驱动式喷射装置是目前使用较多的一种喷射装置, 其结构简单、稳定性高、无热敏感元件, 更适用于熔点较高的金属材料的喷射。如图 2 所示为气压驱动喷射系统原理图, 通过控制电磁阀的开关, 使腔内产生脉冲气压, 挤压熔体流出喷嘴而形成微滴。加拿大多伦多大学开发了气压驱动式按需喷射装置, 实现了液滴直径为 100~300 μm 的锡铅合金喷射^[20]。西北工业大学开发了高熔点金属气动喷射装置, 采用石墨坩埚和感应加热炉, 实现了铝、铜等金属的按需喷射, 熔滴直径在 0.5~2 mm 之间^[21,22]。

由于流出喷嘴的射流不能及时断裂, 液柱直径在表面张力、润湿性等因素的影响下增大, 导致断裂后形成的液滴直径一般都大于喷嘴直径, 这限制了沉积件表面精度的提高。西北工业大学开发的基于应力波驱动的新型喷射装置, 可以产生小于喷嘴直径的微液滴喷射, 目前已实现直径为喷嘴直径 60% 的金属熔滴的喷射, 其原理如图 3 所示^[23]。喷射过程中, 冲击杆 B 加速前进, 与传振杆 A 上端发生碰撞并在传振杆内产生应力波, 应力波传递到喷嘴下方自由液面处迫使其“凸起”, 随着应力波能量的继续增加, 自由液面上的“凸起”继续伸长, 射流前端在表面张力作用下发生“颈缩”, 当应力波消失后, 射流前端液面在表面张力和惯性力综合作用下断裂为单颗液滴。

3.2 金属微滴喷射影响因素研究

金属微滴的稳定喷射除受环境因素影响外, 还与喷射参数、喷嘴结构参数等选取息息相关, 需通过理论与实验研究, 掌握其协调匹配规律, 才能实现均匀金属微滴稳定喷射和精确沉积。

3.2.1 连续式喷射影响参数及其控制

连续式喷射过程中, 微滴的均匀性主要受扰动频率和扰动幅度等参数影响。在每一喷射压强下, 均对应最优扰动频率和扰动振幅, 且最优扰动频率随喷射压强增大而增大^[24]。但是, 由于断裂后的各熔滴具有相对速度, 飞行一定距离后相互间会发生融合^[25], 使微滴尺寸发生变化, 导致均匀性变差。通过对液滴施加不同振幅调制扰动^[26], 可以控制液滴按需融合, 提高其尺寸均匀性, 但同时会增大熔滴直径, 不利于后期应用。如果在均匀微滴发生融合之前, 对微滴进行充电, 使微滴间具有排斥力而阻止微滴的融合, 则可以提高熔滴尺寸的均匀性^[12]。

连续式金属微滴喷射会持续产生高速液滴流, 必须利用电场偏转技术使不需要的液滴偏转回收, 从而实现所需液滴精确沉积。液滴的充电电量对偏转距离有很大影响, 基于圆柱射流充电电容模型^[12,27], 采用平均充电电量递推算法可有效预测液滴的充电电量, 在此基础上, 通过调节偏转电压、沉积距离等, 实现对微滴飞行过程和沉积位置精确控制^[28]。

图 2 气压驱动按需喷射系统原理图

Figure 2 Schematic of pneumatic drop-on-demand system

图 3 应力波驱动微滴喷射原理图

Figure 3 Schematic of droplet formation driven by stress wave. (a) Vibration rod; (b) droplet formation process

3.2.2 按需式喷射影响参数及其控制

按需式喷射由于驱动方式不同, 工艺参数控制方法也不同. 本节主要对气压式按需喷射过程的影响因素进行探讨.

气压式按需喷射技术中, 熔滴的产生受到喷射压力、喷嘴直径、金属熔液自身物性等因素影响, 通过熔滴产生过程静力学分析, 可获得产生熔滴的最小压力 $P_1 = 4\sigma/dt\rho gh$ (其中 ρ , σ , d , h 分别为熔液密度、表面张力、喷孔直径及腔内熔液高度), 可以用于不同材料、不同喷嘴直径下喷射压力的初步选取. 为进一步研究工艺参数对微滴尺寸、飞行速度等的影响, 研究者基于流体体积 (volume of fluid, VOF) 两相流模型, 建立了微滴按需喷射过程流场的计算模型并验证了其有效性^[29,30]. 研究表明, 熔滴直径随着喷射压力和脉冲宽度增大而增大, 但当喷射压力和脉冲宽度过大时会使喷射过程变得不稳定, 并产生多颗卫星熔滴. 熔滴尺寸通常在喷嘴直径的 1.2~2.5 倍范围内变化, 改变喷嘴直径可有控制熔滴尺寸. 然而随着喷嘴直径地减小, 表面张力影响更为显著, 当韦伯数小于 0.05 时, 熔滴尺寸会迅速增加 (图 4)^[29]. 其主要原因是, 当喷嘴较小时, 表面张力作用增大, 出口处射流断裂时间延长, 在润湿等因素作用下液柱直径增大, 进而增大了熔滴直径^[29,31]. 基于此, 加拿大多伦多大学的 Amirzadeh 等^[32] 通过对腔内气压波形的控制, 实现了尺寸为喷嘴直径 65% 的微滴喷射. 其喷射过程为在腔内首先施加负压, 使液面往内收缩, 随后施加正压, 液柱中心区域由于受到较小的粘性力作用, 中心处液面具有较高的速度, 向前运动并凸起, 随即腔内又形成负压, 已凸起的液柱由于惯性继续运动并脱离液面形成小于喷嘴直径的微滴.

金属微滴精确沉积是按需喷射打印中另一个需要解决的问题. 与连续式喷射过程中的充电偏转过程不同, 按需喷射过程中微滴在飞行时只受自身重力作用, 因此其离开喷嘴时的初始速度、沉积高度等对最终沉积精度均有较大影响. 微滴离开喷嘴时因受到喷孔内杂质、缺陷、喷嘴口不对称润湿等因素的影响会产生水平分速度, 从而导致沉积位置的偏差. 由于金属微滴喷射使用的喷嘴直径较小, 上述不确定因素不能完全消除, 因此研究者多采用调节沉积距离的方式来控制确保沉积精度. 如图 5 所

图 4 韦伯数 (We) 对熔滴直径、断裂长度与喷嘴直径比值的影响
Figure 4 Dimensionless breakup length and diameter versus Weber number

图 5 沉积距离对沉积偏差半径的影响
Figure 5 The deviation radius and the pulse numbers under different deposition distance

示, 当沉积高度小于 20 mm 时, 沉积偏差半径小于熔滴直径, 研究者认为该条件下可有效成型制件 [33]. 在沉积距离为 10 mm 时沉积点阵, 经测量, 所有点中最大位置误差为 0.05 mm.

3.3 均匀金属微滴沉积成型影响因素研究

均匀金属微滴喷射沉积成型质量主要包括制件尺寸精度、表面质量、内部质量等, 分层厚度、扫描步距、熔滴温度、基板温度等工艺参数对成型件质量有较大影响.

零件沉积方向上的尺寸精度主要受分层厚度的影响, 分层切片厚度越小, 零件模型分层切片后获得的层面数目越大, 零件沉积方向上的尺寸增大; 相反如果分层厚度越大, 就会使得零件分层切片后获

图 6 扫描步距对沉积形貌影响示意图

Figure 6 Overlapping states under different scanning steps

得的层面数越小, 进而导致零件沉积方向上的尺寸缩小. 通过实验和理论推导, 在确定单颗熔滴铺展高度后, 可对最优分层厚度进行预测.

扫描步距是影响制件外观形貌和内部质量的重要因素之一. 如图 6 和图 7 所示为不同扫描步距下微滴间可能产生的搭接现象. 当扫描步距过大时, 熔滴间无法有效搭接成型实体; 当扫描步距过小时, 熔滴间发生过度搭接而隆起. 对不同扫描步距下成型的制件内部进行观察, 当搭接率过大或者过小时, 内部均会产生孔洞. 可以采用基于体积恒定法的最优化步距算法^[34]来确定合适的扫描步距.

微观孔洞和冷隔属微滴喷射沉积件内部常见的微观缺陷, 主要受熔滴温度、基板温度等的影响^[35]. 熔滴温度较低时, 液相分数较小, 熔滴间搭接间隙难以填充完全, 形成间隙孔洞. 当基板温度过低时, 熔滴在较短时间内就会完全凝固, 可供熔滴铺展以及填充搭接间隙的时间较短, 亦会引起间隙孔洞. 除间隙孔洞外, 在熔滴最后凝固的区域还会存在凝固收缩孔洞, 此类孔洞通常难以完全消除, 因其尺寸小, 数量少, 对整体性能影响不大. 此外, 熔滴温度与基板温度的合适匹配也是保证熔滴间良好重熔及冶金结合的必要条件. 西北工业大学采用有限单元法和单元生死技术对沉积过程进行动态模拟, 获得了铝合金沉积过程中熔滴温度和基板温度的最佳匹配值^[36].

4 应用现状

基于均匀金属微滴喷射的 3D 打印技术目前已有应用, 主要集中在以下两个方面.

图 7 不同扫描步距时沉积平面外观形貌及内部微观组织

Figure 7 The deposited layers under different scanning steps. (a) 1000 μm ; (b) 850 μm ; (c) 750 μm ; (d) 700 μm ; (e) 620 μm ; (f) 600 μm

(1) 金属件直接成型.

微滴喷射技术产生的金属熔滴尺寸均匀、飞行速度相近^[37], 通过对工艺参数有效控制, 可以实现沉积制件形状和内部组织控制, 因此在复杂金属件直接成型方面具有独特优势. 加州大学 Orme 等^[9,16] 率先将金属微滴连续喷射技术应用于铝合金管件地直接成型, 其内部晶粒尺寸均匀细小 (10 μm 量级), 抗拉强度和屈服强度与铸态相比, 提高约 30%.

(2) 电子封装/电路打印.

连续式微滴喷射技术可高效率制备均匀细小金属颗粒, 在充电偏转装置控制下, 沉积精度可达 $\pm 12.5 \mu\text{m}$ ^[37], 但是由于其不能按需产生液滴, 所以多用于焊球制备和简单形状电路打印. 而按需式喷射技术可实现微滴定点沉积, 因此在焊球打印、电子封装、复杂结构电路打印方面更具优势. 美国 Microfab 公司已实现焊点打印商业化应用.

5 结论与展望

基于均匀金属微滴喷射的 3D 打印技术具有喷射材料范围广、无约束自由成形和无需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型、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、航天等高科技领域也具有重要的应用前景.

然而, 要进一步推进金属微滴喷射 3D 打印技术的应用和发展, 尚需在以下几个方面开展深入研究.

(1) 面向不同应用领域的喷射沉积装备研究, 特别是用于喷射不同高温金属材料喷射装置的开发.

均匀金属微滴稳定喷射沉积是该技术能否得到广泛应用的关键. 由于不同金属材料的物性相差很大, 为实现其稳定喷射, 需在研究工艺参数对不同材料喷射过程影响规律的基础上, 设计合适的喷射装置, 开发出适用于不同金属材料喷射的柔性化 3D 打印装备.

(2) 非均质材料、梯度功能材料及其制件打印与控制系统研究.

由于微滴喷射技术具有微量定点精确沉积的特点, 在非均质材料、功能材料及其制件成型方面具有独特优势. 传统均质材料喷射成型系统及其控制软件很难直接应用, 因此, 需要研究多材料喷射沉积机理及其控制方案, 开发多喷头联动沉积系统、多材质材料/零件模型处理软件和轨迹规划算法, 以实现依据用户需求而设计的非均质材料及制件的打印成型.

(3) 结构功能一体化集成件喷射沉积打印机理、工艺与成型设备研究.

实现结构性能和热、电、磁等特殊功能集成的结构功能一体化件的成型, 需在研究不同材质打印、结合机理、集成方式的基础上, 设计具有熔滴喷射沉积功能与异质组元添加功能的智能化柔性打印设备及其相应软件与控制系统. 可以预见, 该技术将随着高新技术的迅猛发展而发挥愈来愈重要的作用.

参考文献

- Orme M. A novel technique of rapid solidification net-form materials synthesis. *J Mater Eng Perform*, 1993, 2: 399–405
- Liu Q B, Orme M. High precision solder droplet printing technology and the state-of-the-art. *J Mater Process Tech*, 2001, 115: 271–283
- Orme M, Liu Q B, Smith R, et al. Net-form manufacturing of aluminum components: the dependence of processing parameters on component quality. In: *Proceedings of the 10th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, 1999. 9–11
- Singh M, Haverinen H M, Dhagat P, et al. Inkjet printing-process and its applications. *Adv Mater*, 2010, 22: 673–685
- Hutchings I M. Ink-jet printing in micro-manufacturing: opportunities and limitations. In: *Proceedings of International Conferences on Multi-Material Micro Manufacture(4M)*, Karlsruhe, 2009. 47–57
- Passow C H. A study of Spray Forming Using Uniform Droplet Sprays. Dissertation for Master Degree. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1992
- Rayleigh L. On the stability, or instability, of certain fluid motions. *Proc London Math Soc*, 1879, 1: 57–72
- Rayleigh L, Strutt J W. On the instability of jets. *Proc London Math Soc*, 1878, 10: 4–13
- Liu Q, Orme M. On precision droplet-based net-form manufacturing technology. *P I Mech Eng B-J Eng Manu*, 2001, 215: 1333–1355
- Luo J. Research on the Control and Mechanism of the Uniform Metal Droplets Charging and Deflecting for Micro Parts Spray Forming. Dissertation for Master Degree. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2010
- Savart F. Memory on the formation of liquid jets launched by circular holes in thin wall (in French). *Ann Chim Phys*, 1833, 53(337): 1833
- Luo J, Qi L H, Zhou J M, et al. Study on stable delivery of charged uniform droplets for freeform fabrication of metal parts. *Sci China Technol Sci*, 2011, 54: 1833–1840
- Fan G L, Ying C F, Lin Z M, et al. A novel tool system for ultrasonic machining small-long hole. *Appl Acoust*, 1982, 1: 1–7 [范国良, 应崇福, 林仲茂, 等. 一种新型超声深小孔加工的方法. *应用声学*, 1982, 1: 1–7]
- Jiang X S. Research on the Uniform Metal Droplet Stream for Generation & Stable Spraying Process. Dissertation for Master Degree. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2010 [蒋小珊. 均匀金属液滴流的产生及其稳定喷射研究. 硕士学位论文. 西安: 西北工业大学, 2010]
- Li Z Y. Study on Manufacturing Tiny Copper Balls by Using Uniform Droplet Spray Method. Dissertation for Master Degree. Taipei: National Cheng Kung University, 2009 [李志扬. 利用均匀液滴喷射法制造细小铜球之研究. 硕士学位论文. 台北: 国立成功大学, 2009]
- Orme M, Smith R F. Enhanced aluminum properties by means of precise droplet deposition. *J Manuf Sci Eng*, 2000, 122: 484–493
- Duthaler G M. Design of a Drop-on-demand Delivery System for Molten Solder Microdrops. Dissertation for Master

- Degree. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1995
- 18 Lee T M, Kang T G, Yang J S, et al. Drop-on-demand solder droplet jetting system for fabricating microstructure. *IEEE Trans Electron Pack*, 2008, 31: 202–210
 - 19 Sohn H, Yang D Y. Drop-on-demand deposition of superheated metal droplets for selective infiltration manufacturing. *Mater Sci Eng A*, 2005, 392: 415–421
 - 20 Amirzadeh G A. Producing Small Droplets of Aqueous Solutions and Molten Metals Using a Pneumatic Droplet Generator. Dissertation for Ph.D. Degree. Toronto: University of Toronto, 2010
 - 21 Zeng X H, Qi L H, Huang H, et al. Experimental research of pneumatic drop-on-demand high temperature droplet deposition for rapid prototyping. *Key Eng Mater*, 2010, 419: 405–408
 - 22 Zhong S Y, Qi L H, Luo J, et al. Parameters study on generation of uniform copper droplet by pneumatic drop-on-demand technology. *Adv Mater Res*, 2012, 430: 781–784
 - 23 Tao Y, Yang F, Luo J, et al. Experimental research and development of metal drop-on-demand spray apparatus driven by the stress wave. *Chin J Mech Eng*, 2013, 49: 162–167 [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. *机械工程学报*, 2013, 49: 162–167]
 - 24 Qi L H, Luo J, Li L, et al. Simulation and experiment research of the uniform droplet spray process. *Chin Mech Eng*, 2008, 44: 86–92 [齐乐华, 罗俊, 李莉, 等. 均匀液滴喷射过程仿真与试验研究. *机械工程学报*, 2008, 44: 86–92]
 - 25 Orme M, Muntz E P. New technique for producing highly uniform droplet streams over an extended range of disturbance wavenumbers. *Rev Sci Instrum*, 1987, 58: 279
 - 26 Luo J, Qi L H, Li L, et al. Numerical simulation of jet breakup due to amplitude-modulated (A-M) disturbance. *Trans Nonferr Metal Soc China*, 2008, 18: 686–690
 - 27 Qi L H, Luo J, Zhou J, et al. Predication and measurement of deflected trajectory and temperature history of uniform metal droplets in microstructures fabrication. *Int J Adv Manuf Technol*, 2011, 55: 997–1006
 - 28 Luo J, Qi L H, Zhong S, et al. Printing solder droplets for micro devices packages using pneumatic drop-on-demand (DOD) technique. *J Mater Process Technol*, 2012, 212: 2066–2073
 - 29 Luo J, Qi L H, Zhou J, et al. Modeling and characterization of metal droplets generation by using a pneumatic drop-on-demand generator. *J Mater Process Technol*, 2012, 212: 718–726
 - 30 Zhong S, Qi L H, Luo J, et al. Effect of process parameters on copper droplet ejecting by pneumatic drop-on-demand technology. *J Mater Process Technol*, 2014, 214: 3089–3097
 - 31 Zuo H S, Li H, Qi L H, et al. Effect of wetting behavior on generation of uniform aluminum droplets obtained by pneumatic drop-on-demand technique. *J Mater Process Technol*, 2014, 214: 2566–2575
 - 32 Amirzadeh A, Raessi M, Chandra S. Producing molten metal droplets smaller than the nozzle diameter using a pneumatic drop-on-demand generator. *Exp Therm Fluid Sci*, 2013, 47: 26–33
 - 33 Chao Y P. Fundamental Research on Manufacturing Micro-metal Parts Based on Deposition Metal Droplet. Dissertation for Master Degree. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2012 [晁艳普. 微小金属件熔滴喷射沉积成形技术基础研究. 硕士学位论文. 西安: 西北工业大学, 2012]
 - 34 Qi L H, Chao Y P, Luo J, et al. A novel selection method of scanning step for fabricating metal components based on micro-droplet deposition manufacture. *Int J Mach Tools Manuf*, 2011, 56: 50–58
 - 35 Zuo H S, Li H J, Qi L H, et al. Formation mechanism of defects in aluminum alloy during micro-droplet deposition. *Rare Metal Mater Eng*, 2013, 42: 1596–1600 [左寒松, 李贺军, 齐乐华, 等. 铝合金微熔滴沉积成形过程中缺陷形成机理研究. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42: 1596–1600]
 - 36 Chao Y P, Qi L H, Zuo H S, et al. Remelting and bonding of deposited aluminum alloy droplets under different droplet and substrate temperatures in metal droplet deposition manufacture. *Int J Mach Tools Manuf*, 2013, 69: 38–47
 - 37 Orme M, Courter J, Liu Q, et al. Charged molten metal droplet deposition as a direct write technology. In: *Proceedings of MRS*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000

Three-dimensional printing technology based on uniform metal droplet ejecting

QI LeHua^{1,2*}, ZHONG SongYi¹ & LUO Jun^{1,2}

1 School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2 The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Xi'an 710072, China

*E-mail: qilehua@nwpu.edu.cn

Abstract As a novel type of three-dimensional (3D) printing technology, the metal micro-droplet deposition manufacturing technique was developed in the 1990s based on the principle of ink printing technology. In the process, uniform metal droplets are generated as the basic building blocks, and 3D structures are fabricated by sequentially depositing droplets on the substrate layers. Because of its advantages, including a wide range of material selection, free-form fabrication, and no need for expensive equipment, the technology has great potential applications in directly fabricating complex metal parts, electrical circuits, and the structure/function of integrating components. Because of the high melting temperature point, high viscosity, great surface tension, and good oxidability, metal droplet ejection is complex and completely different from the ejection of non-metallic material. In the present work, different modes and principles of droplet ejection are analyzed. Then, the key issues of the technology, such as development of a droplet generator and optimization of process parameters, are discussed based on state-of-the-art and research results of the author's team. Lastly, technology development trends are proposed.

Keywords metal droplet ejecting, uniform droplet, continuous-ink-jet, drop-on-demand, 3D printing

QI LeHua was born in 1957. She received the Ph.D. degree in China from the Northwestern Polytechnical University, Xi'an in 2004. Currently, she is a professor at NPU. Her research interests include micro-manufacturing based on metal droplet e technology and forming mechanism of metal matrix composites.

ZHONG SongYi was born in 1986. He is a Ph.D. student at Northwestern Polytechnical University. His research interests include metal droplet ejection, metal droplet deposition and 3D printing technology based on uniform droplet ejection.