DOI: 10.3901/JME.2020.23.203

气动式微滴喷射中液滴稳定生成的动力学特性研究*

刘赵森^{1,2} 钟希祥^{1,2} 杨刚^{1,2} 逢燕^{1,2} 任彦霖^{1,2}
徐元迪^{1,2} 高山山^{1,2}

(1. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100124;
2. 北京工业大学先进制造技术北京市重点实验室 北京 100124)

摘要: 微滴喷射增材制造技术作为制造领域的新兴前沿技术有着广泛的应用前景,微滴生成特性对增材制造中微滴在基板铺展、搭接、凝固等过程影响较大,研究微滴生成特性对于提高液滴生成尺寸、频率和稳定性有重要意义。通过试验研究气动按需喷射作用下的微滴喷射行为,探究喷嘴尺寸、黏度和供给压力等因素对射流断裂过程及液滴生成稳定性的影响关系,并进一步研究形成角的变化对液桥断裂顺序及卫星液滴产生的影响关系。研究结果表明,随着喷嘴直径减少,韦伯数(We)显著减少,当喷嘴直径减少到 100 μm 时, We 变为 0.33,液滴尺寸与喷嘴直径的比值急剧增大;随着黏度的增加,射流颈缩段的液桥显著增长,液滴尺寸明显增大。在保证生成单个液滴的压力条件下,当供给压力较小时,液桥两端先后断裂形成卫星滴,并最终与半月面融合;随着压力的增大,液桥只发生一次断裂,剩余射流回缩到喷嘴内。在气动式喷射方式中由于上形成角始终大于下形成角,所以液桥总是在靠近液滴端首先断裂,该研究结果有助于提高气动式微滴喷射装置的液滴生成质量。

关键词: 气压驱动; 按需喷射; 液桥; 微滴直径; 卫星液滴

中图分类号: TG156

Study on the Kinetic Characteristics of Droplet Formation in Pneumatic Microdroplet Injection

LIU Zhaomiao^{1,2} ZHONG Xixiang^{1,2} YANG Gang^{1,2} PANG Yan^{1,2}
REN Yanlin^{1,2} XU Yuandi^{1,2} GAO Shanshan^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124;

2. Beijing Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: As a new and cutting-edge technology in the field of additive manufacturing, droplet injection additive manufacturing technology has a broad application prospect. Droplet generation characteristics have a great influence on substrate spreading, bonding, solidification and other processes of droplet in additive manufacturing. The study on droplet generation characteristics is of great significance for improving the size, frequency and stability of droplet generation. The micro-droplet injection behavior under the action of aerodynamic on-demand injection was studied through experiments, to explore the influence of nozzle size, viscosity, supply pressure and other factors on the jet fracture process and droplet formation stability, and to further study the influence of the change of formation angle on the fracture sequence of the liquid bridge and the generation of satellite droplets. The results show that with the decrease of nozzle diameter, weber number (We) decreases significantly. When the nozzle diameter decreases to 100 μm , We becomes 0.33, and the ratio of droplet size to nozzle diameter increases sharply. With the increase of viscosity, the liquid bridge and droplet size in the necking section of the jet increased significantly. Under the condition of ensuring the generation of a single droplet, when the supply pressure is low, the two ends of the liquid bridge break successively to form satellite droplet, and finally merge with the lunate surface; With the increase of pressure, the bridge only breaks once, and the

* 装备预研领域基金资助项目(61409230309)。20190822 收到初稿, 20191224 收到修改稿

remaining jet retract to the nozzle. Since upstream formation Angle is always greater than downstream formation angle, the liquid bridge always breaks first near the droplet end in the pneumatic injection mode. The results of this study are helpful to improve the droplet generation quality of the pneumatic microdroplet injection device.

Key words: pneumatic drive; drop-on-demand; liquid bridge; droplet diameter; satellite droplet

0 前言

微滴喷射增材制造技术是一种新型增材制造技术^[1-2],将液态材料充入到特定的容腔内,通过在腔体内部施加特定压力促进微滴在喷嘴处稳定生成,三维基板的运动能够实现微滴的准确沉积,最终得到复杂的三维实体结构^[3-10],在生物化学反应^[11-13]、微电路打印^[14-16]、复杂零件快速成型^[17-19]等领域具有广阔应用前景。

微滴喷射装置根据驱动方式的不同主要分为压电驱动式、机械振动式、气压驱动式等。常用的压电驱动式生成方式主要应用于低黏度和低熔点的微滴生成,对喷射材料和工作温度有一定的要求。相比于压电式驱动系统,电磁阀驱动控制装置更简单,温度适用范围更广,但喷射频率低,活塞杆振动响应较差,微滴产生过程不易控制。综合而言,气动式喷射装置具有结构简单,易于控制以及材料成型范围广等特点,且工作时不受黏度,表面张力和温度等条件限制,能够广泛适用于多数材质的微滴生成。喷射装置可以根据材料性质选择特定的高压气体作为驱动源,装置容腔内不需要精密的位移驱动装置,保证了装置的稳定性和结构的简单性。

气动式按需喷射装置中的几何结构和喷嘴材料等参数对于提高液滴成形精度、整体质量、运动稳定性具有关键作用^[20]。CHENG 等^[21-22]研究了腔体内结构改变引起的压力变化对液滴生成的影响,发现负压的存在对于液滴稳定生成、减少卫星滴具有重要作用。ZUO 等^[23]发现液态金属与喷嘴表面的润湿条件对微铝液滴的产生和飞行有显著影响。WANG 等^[24]通过气压驱动与压电式相结合方式,研究了不同喷嘴直径下液滴的破碎模式,发现喷嘴直径对卫星滴的产生模式影响较大。GERDES 等^[25]设计了一种带有星形孔口几何形状的喷嘴芯片,通过添加的二次辅助气流来实现克服表面张力的影响,使喷嘴内的液滴具有高精度的形成。

在装置结构改进的基础上,探究物性参数和控制条件的影响规律同样是改善喷射质量的有效方式。AMIRZADEH 等^[26-27]研究了甘油/水溶液和锡金属在气动式装置中的生成过程,调控腔内压力振荡的振幅和频率能够产生小于喷嘴直径的液滴。

BANITABAEI 等^[28]设计的具有可互换喷嘴的气动液滴发生器能够产生不同液体和大小的单液滴,局限性在于不能够适用于高黏度的液滴生成。ZHAO 等^[29]发现气动式液滴生成过程中半月面的形成对于较小尺寸液滴的生成具有很大影响,黏度的增加导致难以形成半月面。

现有的研究多集中在喷嘴几何结构改变和物性参数等对液滴最终生成质量的影响,较少关注射流及液桥的断裂过程对液滴稳定性的影响,缺乏对微液滴生成机理的深入研究。本文主要研究不同喷嘴直径下,表面张力对射流断裂过程和液滴尺寸的影响关系,并进一步分析不同黏度和压力下,液桥的断裂长度及断裂顺序对卫星滴的影响机制,对揭示气动式按需喷射方式下液滴稳定生成的关键流体力学行为具有重要意义,研究结果有助于提高气动式按需喷射装置的微滴生成质量,对促进微滴喷射增材制造技术的发展提供技术参考。

1 试验装置及方法

为了研究液滴生成过程中表面张力和黏度等参数变化对其造成的影响,本文参考并借鉴 ZHANG 等^[30]研究的试验装置,设计了一种气动式按需喷射装置,试验系统如图 1 所示。该系统具有结构简单、操作方便和工作条件稳定等优势,能够实现微滴的按需稳定生成。

图 1 微滴按需喷射系统

试验中供给压力由高压氮气提供,由减压器控制管道压力在 200 kPa 内,并由精密调压阀(0~200 kPa)实现压力精确调节,利用缓冲罐抑制压力波动,保证供给压力的稳定。通过函数信号发生器

来快速控制电磁阀(型号 MHJ10-S-2, 5-QS-6-HF 德国 FESTO 阀门公司)的启闭以产生压力脉冲。该阀门通过 24 V 直流脉冲激活约 6 ms。阀门开启完全的响应时间为 1.2 ms, 试验中电磁阀以 15 Hz 的频率工作。采用 11Elite 注射泵(美国 Harvard 公司)将液体通过注射器注入喷腔内。整个试验中主要使用去离子水和不同配比的甘油(国药集团化学试剂有限公司)水溶液进行试验。

利用 VEO410L 高速相机(美国 Phantom 公司)记录微滴生成过程, 相机帧率为 20 000 fps, 曝光时间为 9 μ s, 图像分辨率为 862 像素 $\times$ 600 像素, 拍摄光源为置于相机正对面的 LED 冷光源。采用图像分析软件(Matlab)对液滴大小和速度等参数进行分析。

本文在 LUO 等^[31]研究的基础上对气动式喷头进行了改进, 增加了 T 型调节螺杆和可更换喷嘴, 便于装置的气压调节和不同尺寸的液滴生成, 如图 2 所示。改进后的气动式喷头主要由喷嘴、喷头和供气端盖三部分组成。喷嘴出口直径分别为

100 μ m、150 μ m、200 μ m、250 μ m、300 μ m, 并通过螺纹连接与喷头连接。喷头由内径 10 mm、高度 20 mm 的圆柱储液腔构成, 与喷嘴连接处采用 135° 锥角, 并设计内径 6 mm 的内螺孔以便于与喷嘴连接。喷头上端设有带凸台的结构, 并通过螺纹连接与供气端盖相连, 连接处的圆形凹槽可以填充密封材料以保证气密性。喷头侧面开有进料口来保证腔体内液面的稳定, 从而保证气体作用于腔体的工作固有频率稳定。喷嘴上部采用 T 型调节螺杆控制泄气口大小, 能够实现供给气压幅值的准确调节, 从而实现整个喷射过程的稳定。

2 理论背景

本节主要通过拉普拉斯方程和能量方程对液滴的分离过程进行分析。拉普拉斯方程表述平衡状态下通过施加气压驱动力来打破稳定状态, 能量方程解释了射流的形成及断裂过程。

微尺度条件下, 喷嘴可以理解为毛细管, 并受到强烈毛细现象的影响, 因此液体并不会自发地从喷嘴流出。在微滴喷射试验中, 液滴的生成过程存在着明显的曲率变化, 并受限于喷嘴直径所带来的阻力和材料自身物性参数的影响, 喷嘴口液面的变化反映了液体内外压强差与界面曲率和界面张力的关系, 因此可以用拉普拉斯方程来解释

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

式中, ΔP 为内外压差, γ 为表面张力, R_1 、 R_2 为曲率半径。针对喷嘴中液滴的形成过程, 可以理解为毛细下降现象, 此时的液面近似为球面, 所以两个曲率半径 $R_1 = R_2$, 考虑到液体与毛细管之间的接触角为 θ , 则曲率半径 R 与毛细管半径 r 之间的关系为 $R = r / \cos \theta$, 可以将内外压差公式化解为

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad (2)$$

式中, P_{in} 为液滴内部压力; P_{out} 为液滴外部压力; r 为喷嘴的半径。

因为微尺度下毛细现象的存在使得喷嘴口液面处于平衡状态, 即毛细管压力等于静水压力, 解释为公式

$$2\gamma \cos \theta / r = \Delta \rho g h + f \quad (3)$$

式中, $\Delta \rho g h$ 为喷腔内液体在没有受到外力作用时的静水压力, ρ 为喷腔内液体材料的密度, g 为重力, h 为喷腔内液面高度, f 为外力, 此时 $f = 0$ 。为了稳定的驱动液滴生成, 通过施加一定的外力 f

图 2 气动装置示意图

来实现。当喷嘴处射流发生颈缩时,断裂点附近液桥变薄,曲率增加,由式(2)可知, ΔP 增加,液体内部压强增加,最终导致颈缩点夹断,产生液滴。

射流的形成主要受到黏性力和表面张力等因素的影响,为了更好地评估液滴不同状态下的生成过程,在参考 TURKOZ 等^[32]理论模型的基础上,引入相关射流变化的能量方程来解释这一过程。

$$\frac{1}{2} \rho v_p^2 \Delta V_p - \mu \frac{v_p}{h} \Delta V_p - \mu \frac{v_s}{H} \Delta V - E_r = \sigma \Delta A + \frac{1}{2} \rho v_j^2 \Delta V_j \quad (4)$$

式中, ρ 为喷腔内液体的密度; v_p 为脉冲气压作用于液面的平均速度; ΔV_p 为由脉冲气压驱动气体所占据的液体体积; μ 为液体的黏度; h 为如图 3 所示气体处的高度; v_s 为剪切速度; H 为喷腔内液面的高度; ΔV 为气压驱动刚开始运动的液体体积; E_r 为喷腔内部局部变化所需要的能量; σ 为表面张力; ΔA 为新形成的射流的表面积; v_j 为射流速度; ΔV_j 为射流体积。

图 3 气动式射流形成示意图

在能量平衡方程式(4)中,左边第一项表达式表示脉冲气压提供给流体的动能,左边的第二项表示随着液面凹陷,气体克服黏性耗散所损失的能量,左边的第三项表示喷腔内剪切流动所耗散的能量,左边第四项表示喷嘴部分结构改变所耗散的能量。流出喷嘴的射流运动主要由右边两项组成,第一项为新形成的射流所具有的表面能,第二项为射流动能。

在气动式液滴喷射装置中,随着脉冲压力的作用,液滴会从喷嘴口形成射流,在断裂过程中液滴与半月面之间会形成液桥。为了更好地量化和分析液滴及液桥的变化过程,采用 Matlab 软件对液滴生成过程中液滴断裂瞬间的图像进行后处理,通过识别液桥中部水平标线与上半月面切线形成的角度,并定义为上形成角,同理定义中部水平标线与下半

月面切线形成的角度为下形成角。此外,定义了如图 4 所示的变量。

图 4 微滴生成过程中的相关参数示意图

图中 P_1 和 P_2 分别为液桥的上下临界点, L_y 代表临界液桥长度(即 P_1 和 P_2 两点间的垂直距离),液桥长度不仅受到黏度、表面张力等因素的影响,同时还与脉冲气压、喷嘴直径等参数有关。 L_j 为射流长度, D_n 为喷嘴直径, D_d 为液滴直径, α 为上形成角, β 为下形成角。

3 结果分析与讨论

3.1 喷嘴直径对液滴尺寸和液桥断裂时间的影响

喷嘴直径作为影响生成液滴尺寸的一个关键因素,通过对不同直径喷嘴进行研究,找到直径对于液滴尺寸的影响关系。当喷嘴直径减少到 $50 \mu\text{m}$ 时,卫星滴现象很难消除^[28],结合现有喷嘴的加工精度,试验中采用的喷嘴直径分别为 $100 \mu\text{m}$ 、 $150 \mu\text{m}$ 、 $200 \mu\text{m}$ 、 $250 \mu\text{m}$ 、 $300 \mu\text{m}$,以去离子水为喷射材料,并保证工作频率(15 Hz)和脉冲宽度(0.5 ms)不变,通过调节供给压力来实现液滴的稳定生成。图 5 为不同喷嘴直径下生成单个稳定液滴的压力幅值和液滴直径之间的关系,可以看出,随着喷嘴直径的减少,液滴直径显著减少,同时产生单个液滴所需的供给压力显著增大。在供给压力为 24 kPa 时,液滴直径稳定在 $370 \mu\text{m}$ 左右,且最值波动较小。

在微尺度下,表面张力的作用更加明显。SCHULKES^[33]通过引入奥内佐格数来表征黏性力和表面张力对液滴生成的影响,定义为

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\sigma \rho d}} \quad (5)$$

当 $Oh < 0.01$ 时,表面张力起到主要作用。本试验中 Oh 值约为 0.0085 ,因此引入韦伯数来表征惯

性力与表面张力的重要性。定义为

$$We = \frac{\rho v_j^2 d}{\sigma} \quad (6)$$

图5 液滴直径和产生单个液滴的压力幅值随喷嘴直径的变化

图6为无量纲液滴直径和喷嘴直径的比值与韦伯数之间以及无量纲射流破碎长度与喷嘴直径的比值与韦伯数之间的关系,并分别对其变化关系进行拟合

$$D_d / D_n = 0.1901 \times We^2 - 1.262We + 3.455 \quad (7)$$

$$L_j / D_n = 0.3861 \times We^2 - 2.609We + 7.989 \quad (8)$$

可以看出,当喷嘴直径从300 μm减少到100 μm时,对应的We从3.51减小到0.33,说明在直径减少的过程中,液滴直径受到表面张力的作用愈加明显。喷嘴直径的减小,造成了液滴直径与喷嘴直径的比值急剧增大,由1.3倍扩大到3.1倍,同时为了克服表面张力的影响,供给压力也在迅速增大。喷嘴直径的减小也造成了相对射流长度的增加,从3.5倍增大到7.1倍,进而容易造成射流不稳定性,极易产生卫星滴。为此可以发现,单纯地通过降低喷嘴直径的方式来降低尺寸并不会得到最佳的效果。

图6 无量纲直径和射流破碎长度与韦伯数的关系

射流破碎及液桥的稳定断裂对于提高生成稳定性具有重要影响,图7为选取不同喷嘴直径下液滴生成过程中液面最低点的位移变化过程和液滴断裂时间,受到脉冲气压(脉冲宽度0.5 ms)的影响液滴的生成过程大致经历驱动力伸长(0~0.5 ms),惯性伸长(0.5~1.5 ms),断裂后自由下落三个过程。可以发现随着喷嘴直径从300 μm减少到100 μm,单位时间内液滴下落的位移量迅速减少,但液滴断裂的时间变化并不明显,保持在1.4 ms左右,能够满足试验中对工作频率的要求($f=15$ Hz)。在本试验研究的过程中,单次脉冲下单个液滴的稳定生成过程能够保证在2 ms内完成,同样试验条件下改变工作频率(0~500 Hz)均可以实现单个液滴的稳定生成,且生成效果保持一致。

图7 不同直径下液滴生成过程中液面最低点的位移变化过程和液滴断裂时间

试验中所示的趋势也可以用式(4)进行解释,同一脉冲气压下,流出喷嘴的射流主要由动能和表面能决定(公式等号右侧),随着喷嘴直径的减少,导致所需 E_r 增加,迫使增加供给压力克服 E_r 促进射流形成,同时由图7可知,未断裂前的射流速度随着喷嘴直径的减少而减少,从而造成射流动能降低,为了维持总能量平衡,最终导致射流表面积(无量纲射流破碎长度增加)增加以维持表面能增加。随着电磁阀关闭,总能量平衡不再利于射流下落,因此为了减少表面能量,射流末端开始凸起以抑制伸长,最终颈缩到断裂成球。

3.2 黏度变化对于液滴尺寸和液桥变化的影响

在理解表面张力对生成尺寸的重要作用后,有必要了解黏度变化对液滴生成稳定性的影响。试验采用喷嘴直径250 μm和不同配比的甘油-水溶液^[34]进行喷射试验(使用R/S CPS流变仪测得1:4、1:3、1:2、1:1配比的甘油-水溶液黏度值分别为2.18 mPa·s、2.67 mPa·s、3.59 mPa·s、8.21 mPa·s),研究液

体黏度对液滴生成尺寸和断裂过程的影响。值得注意的是添加的甘油-水混合物并没有显著改变液体的表面张力。图8给出了不同甘油黏度下的液滴生成图。

图8 不同黏度对应微滴生成图

随着流体黏度增加,脉冲压力作用于液面时造成黏性耗散和剪切耗散增大,需要增加供给压力来促进液滴的生成,同时黏度的增加也造成液滴直径的显著增大。由图9a可以看出,黏度从 $2.18 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 增加到 $8.21 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 时,供给压力从 65 kPa 增加 100 kPa ,液滴直径从 $343 \mu\text{m}$ 增加到 $607 \mu\text{m}$ 。图9b所示流体的黏度增加导致射流长度和临界液桥长度的显著增大,分别从 $1198 \mu\text{m}$ 增加到 $1767 \mu\text{m}$,从 $114 \mu\text{m}$ 增加 $162 \mu\text{m}$ 。因为黏性力的增大使作用于液桥界面的剪切阻力增大,与此同时,因液体的相对表面张力减小而导致收缩性下降,液桥长度也会有一定程度的增大。从式(4)的角度同样可以证

(a) 黏度变化对液滴直径和供应压力的影响

(b) 黏度变化对射流长度和液桥长度的影响

图9 黏度变化对生成过程中各参数的影响

明,当一个恒压脉冲产生一个液滴时,随着黏度的增加,造成了克服黏性耗散所需的能量增加,同时动能减少,因此,为了维持能量平衡,射流长度增加,同时液滴尺寸增大。

液桥的存在是反映卫星滴形成过程的一个重要参数,随着流体黏度的增加,相对液桥长度也相应增加,导致相对表面张力的减少,最终导致液桥收缩形成的卫星滴所具有的初始动量减小,带来的影响是卫星滴在轴向空间上的位移量较少,容易形成卫星滴。

3.3 形成角变化对液桥断裂的影响

形成角的变化过程反映着半月面、液桥和液滴之间的毛细压力变化,从而影响到液滴和液桥的断裂过程,因此把形成角作为分析液桥断裂过程的重要参数。试验中选用黏度为 $3.59 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的甘油-水溶液进行试验,通过改变供给压力大小来实现单颗液滴的稳定生成,并从能够实现单颗液滴产生的最小压力值 64 kPa 逐渐过渡到临界最大压力值 90 kPa 。试验中观察到实现单颗液滴生成的三个阶段,如图10所示。

图10 不同压力条件下形成角的变化

供给压力相对较低时,液滴在生成过程中液桥下端首先断裂,这是因为形成角 $\alpha > \beta$,导致液滴上部的曲率半径大于半月面的曲率半径,由于液桥界面的曲率半径更大,最终导致半月面处毛细压力大于液滴,迫使液桥下端首先断裂。液桥仍然与半月面相连,为了减少表面能量,开始随半月面一起向喷嘴口回缩,在此过程中液桥尾部因重力克服表面张力,导致上端发生第二次颈缩断裂。由于具有向上的初速度,所以卫星滴最终与喷嘴口半月面融合。该参数条件下的卫星滴始终能够消除,且形成角 α 略高于 β 。随着供给压力的进一步增大,形成角 α 逐渐增大,液桥的相对长度缩短,随着液桥下端断裂后,液桥上端不发生断裂,并随半月板直接回缩

到喷嘴。当供给压力超过 85 kPa, 即形成角 $\alpha > 65^\circ$ 时, 液桥下端断裂后, 仍然不会发生二次断裂。但由于供给压力过大, 射流过长导致回缩过程发生二次颈缩现象。当供给压力超过 90 kPa 时, 二次颈缩处发生断裂, 产生卫星滴。以式(4)能量方程作为理论, 黏度和喷嘴直径保持不变, 供给压力增加, 造成了射流动能和射流长度增加, 在较高供给压力条件下, 电磁阀关闭, 为了维持较大落差的能量平衡, 容易造成射流的二次颈缩, 即较大的卫星滴产生。

为了进一步理解形成角与黏度的关系, 得到了如图 11 所示的黏度变化与形成角的关系图, 研究发现随着黏度的增加, 形成角 α 从 57° 增加到 85° , β 基本保持不变, 稳定在 30° 左右。大量试验证明, 在该装置中由于表面张力和黏度的作用, 液滴形成角 α 始终大于 β , 导致了液桥下端点的优先断裂。

图 11 形成角与黏度的变化关系

4 结论

(1) 喷嘴直径的变化影响到表面张力的作用, 随着喷嘴直径的减小, 使得液滴直径和喷嘴直径的比值及射流破碎长度与喷嘴直径的比值急剧增大, 造成表面张力的作用更加明显。

(2) 黏度变化影响液滴尺寸和液滴生成稳定性, 随着液体黏度的增加, 供给压力、液滴尺寸、液桥长度都随之增加。

(3) 形成角作为判断液桥断裂过程的一个重要参数, 随着供给压力的增加, 形成角 α 逐渐增大, 液滴由临时卫星滴过渡到无卫星滴、最终二次颈缩产生卫星滴的过程。试验证明了在气动式喷射装置中, 液桥断裂顺序总是由下端首先断裂。

参 考 文 献

- [1] ORME M. A novel technique of rapid solidification net-form materials synthesis[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 1993, 2(3): 399-405.
- [2] 齐乐华, 钟宋义, 罗俊. 基于均匀金属微滴喷射的 3D 打印技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(2): 212-223.
- [3] QI Lehua, ZHONG Songyi, LUO Jun. 3D printing technology based on uniform metal droplet ejection[J]. Scientia Sinica Informationis, 2015, 45(2): 212-223.
- [4] GOGHARI A A, CHANDRA S. Producing droplets smaller than the nozzle diameter by using a pneumatic drop-on-demand droplet generator[J]. Experiments in Fluids, 2008, 44(1): 105-114.
- [5] YOKOYAMA Y, ENDO K, IWASAKI T, et al. Variable-size solder droplets by a molten-solder ejection method[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2009, 18(2): 316-321.
- [6] ŠTURM R, GRUM J, BOŽIČ S. Influence of the alloying elements in Al-Si alloys on the laser remelting process[J]. Lasers in Engineering, 2011, 22(1): 47-61.
- [7] ZHONG Songyi, QI Lehua, XIONG Wei, et al. Research on mechanism of generating aluminum droplets smaller than the nozzle diameter by pneumatic drop-on-demand technology[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(5-8): 1771-1780.
- [8] PARK B K, KIM D, JEONG S, et al. Direct writing of copper conductive patterns by ink-jet printing[J]. Thin Solid Films, 2007, 515(19): 7706-7711.
- [9] LI L, SAEDAN M, FENG W, et al. Development of a multi-nozzle drop-on-demand system for multi-material dispensing[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2009, 209(9): 4444-4448.
- [10] BERKLAND C, KIM K, PACK D W. Fabrication of PLG microspheres with precisely controlled and monodisperse size distributions[J]. Journal of Controlled Release Official Journal of the Controlled Release Society, 2001, 73(1): 59-74.
- [11] 蔡基利, 吴和保, 刘富初, 等. 微滴喷射快速成形 Al_2O_3 陶瓷微球的性能[J]. 材料工程, 2018, 46(11): 88-93.
- [12] CAI Jili, WU Hebao, LIU Fuchu, et al. Properties of Al_2O_3 ceramic microspheres by droplet injection rapid prototyping[J]. Materials Engineering, 2018, 46(11): 88-93.
- [13] XU J, ATTINGER D. Drop on demand in a microfluidic

- chip[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2008, 18(6): 065020.
- [12] EDD J F, DI CARLO D, HUMPHRY K J, et al. Controlled encapsulation of single-cells into monodisperse picolitre drops[J]. Lab on a Chip, 2008, 8(8): 1262.
- [13] SCHENA M, HELLER R A, THERIAULT T P, et al. Microarrays: Biotechnology's discovery platform for functional genomics[J]. Trends in Biotechnology, 1998, 16(7): 301-306.
- [14] VAEZI M, CHUA C K. Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 53(1-4): 275-284.
- [15] 张楠, 林健, 王同举, 等. 用于打印柔性导线的液态金属微滴制备过程研究[J]. 电子元件与材料, 2018, 37(7): 5-11.
- ZHANG Nan, LIN Jian, WANG Tongju, et al. Study on the preparation process of liquid metal microdroplets for printing flexible wires[J]. Electronic Components and Materials, 2018, 37(7): 5-11.
- [16] 肖渊, 吴姗, 刘金玲, 等. 织物表面微滴喷射反应形成导电路径基础研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(7): 216-222.
- XIAO Yuan, WU Shan, LIU Jinling, et al. Basic research on microdroplet spray forming conductive circuit on fabric surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(7): 216-222.
- [17] CHAO Y P, QI L H, XIAO Y, et al. Manufacturing of micro thin-walled metal parts by micro-droplet deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(2): 484-491.
- [18] YI H, QI L, LUO J, et al. Hole-defects in soluble core assisted aluminum droplet printing: Metallurgical mechanisms and elimination methods[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 148: 1183-1193.
- [19] 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: 145-154.
- [20] CHEN A U, BASARAN O A. A new method for significantly reducing drop radius without reducing nozzle radius in drop-on-demand drop production[J]. Physics of Fluids, 2002, 14(1): L1.
- [21] CHENG S, CHANDRA S. A pneumatic droplet-on-demand generator[J]. Experiments in Fluids, 2003, 34(6): 755-762.
- [22] CHENG S X, LI T, CHANDRA S. Producing molten metal droplets with a pneumatic droplet-on-demand generator[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 159(3): 295-302.
- [23] ZUO H S, LI H J, QI L H, et al. Effect of wetting behavior on generation of uniform aluminum droplets obtained by pneumatic drop-on-demand technique[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2566-2575.
- [24] WANG T J, LIN J, et al. Droplets generator: Formation and control of main and satellite droplets[J]. Colloids and Surfaces A, 2018, 558: 303-312.
- [25] GERDES B, ZENGERLE R, KOLTAY P, et al. Direct printing of miniscule aluminum alloy droplets and 3D structures by StarJet technology[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2018, 28(7): 074003.
- [26] AMIRZADEH A, CHANDRA S. Small droplet formation in a pneumatic drop-on-demand generator: Experiments and analysis[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(8): 1488-1497.
- [27] 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.
- [28] BANITABAEI S A, AMIRFAZLI A. Pneumatic drop generator: Liquid pinch-off and velocity of single droplets[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 505: 204-213.
- [29] ZHAO X, JIA Z, LI W, et al. Numerical simulation of micro droplet formation combined with pneumatic and piezoelectric drive[J]. Microsystem Technologies, 2018.
- [30] ZHANG D, QI L, LUO J, et al. Direct fabrication of unsupported inclined aluminum pillars based on uniform micro droplets deposition[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 116.
- [31] LUO J, QI L H, ZHOU J M, et al. Modeling and characterization of metal droplets generation by using a pneumatic drop-on-demand generator[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(3): 718-726.
- [32] TURKOZ E, PERAZZO A, KIM H, et al. Impulsively induced jets from viscoelastic films for high-resolution printing[J]. Physical Review Letters, 2018, 120(7): 074501.

- [33] SCHULKES R M S M. The contraction of liquid filaments[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1996, 309(309): 277-300.
- [34] HOSSAIN A, FARHAN N M, HOOMAN V T. Effects of fiber wettability and size on droplet detachment residue[J]. Experiments in Fluids, 2018, 59(7): 122-129.

作者简介: 刘赵淼(通信作者), 女, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为微尺度流体力学、血流动力学、流固耦合理论及工程应用。

E-mail: lzm@bjut.edu.cn

钟希祥, 男, 1992 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为微滴喷射增材制造技术。

E-mail: zhongxixiang@emails.bjut.edu.cn