

DOI: 10.3901/JME.2023.01.219

微域保护气对金属微滴喷射过程影响机制研究^{*}

周 怡 齐乐华 罗 俊 苏 林
(西北工业大学机电学院 西安 710072)

摘要: 金属微滴喷射 3D 打印过程需在低氧环境(氧含量低于 50 ppm)下进行, 现有设备常采用带除氧系统的密闭手套箱来维持低氧环境, 但因其空间受限, 操作不便, 很难适应该技术向应用领域拓展。在微滴喷射出口处构建微域低氧环境, 既可保护微滴喷射时不被氧化, 又能扩大该技术应用范围并提高操作灵活性, 是促进金属微滴喷射 3D 打印技术工程化应用的一个关键。但施加保护气会产生气流扰动, 不利于微滴稳定喷射和精确沉积。为解决现有微域保护技术不足, 设计开发一种新型环形射流微域保护装置, 结合微域保护下的锡合金微滴喷射试验与微域气流流场模拟, 揭示氧化和气流动力学对微滴喷射过程作用机制。研究发现当保护气供应不足时, 金属射流由于氧化表面张力降低、黏度增大(即 Oh 数增大), 会断裂为带锥形拖尾的单颗熔滴; 当保护气供应过大时, 气流在射流根部产生二次涡, 使射流二次断裂, 并生成多颗熔滴。最终在合适参数下打印出较长沉积距离融合良好、堆叠整齐的锡合金立柱和尺寸均匀、落点准确的凸点阵列, 证实环形射流微域保护装置的有效性。研究成果可为金属微滴喷射 3D 打印技术的推广应用提供关键技术支持和理论基础。

关键词: 金属微滴喷射; 微域保护气; 氧化; 气流动力学

中图分类号: TH16

Investigation on the Effect Mechanism of Micro-domain Shielding Gas on Metal Droplet Ejection Process

ZHOU Yi QI Lehua LUO Jun SU Lin

(School of Mechatronic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: A closed glove box with a deaeration system is widely applied for maintaining a low-oxygen environment (the oxygen content of <50 ppm) in metal droplet-based 3D printing. However, it is disadvantageous to the industrial application of the technology because of the narrow space of a glove box. Thus, it is very significant to construct a micro-domain low-oxygen environment at the exit of metal droplet ejection, which can prevent droplets from oxidation, broaden applicability, and improve flexibility. Meanwhile, an excellent micro-domain shielding environment is a key to promoting the engineering application of metal droplet-based 3D printing. However, shielding gas will generate airflow disturbance, which inhibits the stability and accuracy of the droplet printing. To address this problem, a novel annular gas jet micro-domain shielding device is designed and developed, the mechanisms of oxidation and airflow-dynamics during tin alloy droplet ejection process are studied by the combination of experiments and simulations. Results show that when the supply of shielding gas is insufficient, oxidation will decrease the surface tension and increase the viscosity of a metal jet (i.e. the Oh value of a metal jet increases), which leads to the generation of a single droplet with a conical tail. When the supply of shielding gas is excessive, the secondary vortex appears at the root of a metal jet, which causes a secondary breakup occurs, and then multiple metal droplets are formed. Furthermore, a long well-fused tin alloy pillar with an ordered arrangement and a size-uniform bump array with accurate landing-points are successfully printed under appropriate parameters, which confirms the effectiveness of the annular gas jet micro-domain shielding device. The current investigation may provide crucial technical and theoretical support for the application of metal droplet-based 3D printing.

Key words: metal droplet ejection; micro-domain shielding gas; oxidation; airflow-dynamics

^{*} 国家自然科学基金 (51772245、51972271)和中央高校基本科研业务费专项资金 (3102019ZX049)资助项目。20220112 收到初稿, 20220726 收到修改稿

0 前言

金属微滴喷射 3D 打印技术是一种不同于传统金属 3D 打印的新技术,该技术通过将块料金属在坩埚内直接熔化,对熔融金属施加扰动,借助微小喷孔形成球形金属熔滴,同时结合三维平台运动,使金属微滴在特定位置相互熔合、凝固,基于“离散-叠加”成型原理逐点、逐层堆积,最终可实现复杂三维结构快速成型。与现有主流金属 3D 打印技术相比,该技术具有喷射材料范围广、微滴尺寸和位置可控,且无需昂贵能量源和专用设备等优点^[1],在微小复杂金属件制备、电子封装以及结构件原位修复等多个领域具有广泛应用前景^{[2][3]}。

由于金属熔液在大气环境下表面会发生氧化,导致微滴喷射失稳,因此需要对其喷射过程进行低氧保护。现有低氧保护方式有整体保护和局部保护两种:整体保护主要通过惰性气体手套箱构建低氧环境,局部保护主要通过喷嘴出口处施加保护气流形成低氧环境。手套箱能形成密封低氧环境^[1],具有保护范围大、低氧环境不受外界因素影响等优势,但密封环境难以实现物料快速供给,零件加工尺寸受限,对于大型部件难以进行现场实时加工与修复。在喷嘴出口施加惰性气体构建微域保护气氛,形成开放的低氧环境,可极大提高成形灵活性,有利于设备小型化、集成化和便携化。但在喷嘴出口引入保护气流,过大会扰动金属微滴飞行轨迹,过小则会导致金属熔滴氧化,从而影响金属微滴的喷射稳定性和沉积精度。因此,需开发可靠的金属微滴喷射微域保护装置,明确保护气对金属微滴喷射过程的影响机制,以实现微滴喷射沉积过程的稳定控制。

根据微域保护装置内部流道形状和保护气流动形式,目前用于金属微滴喷射微域保护的装置主要有“星形”喷嘴式和侧吹式。德国弗雷堡大学 TROPMANN 等^[4]提出“星形”喷嘴用于铝微滴和锡微滴的喷射。该喷嘴在普通圆孔喷嘴的基础上通过深反应离子刻蚀法加工成四周排布凹槽的“星形”喷嘴,当射流通过喷嘴中心时,保护气流通过喷孔四周的凹槽包裹金属射流从而实现低氧保护。目前该方案受限于微滴产生的扰动方式且对喷嘴加工精度要求较高。加拿大多伦多大学 FANG^[5]和 AMIRZADEH 等^[6]通过在喷嘴附近侧吹保护气以实现锡微滴喷射过程的低氧保护。由于保护气流向与微滴下落方向不一致,微滴轨迹易受保护气流横向

脉动作用而偏斜,因此保护气形成的有效保护距离短。日本三菱电机公司 YOKOYAMA 等^[7]通过对侧吹式微域保护结构进行改进,有效减弱了侧吹气流对微滴喷射过程的直接扰动,但该方案在打印直径为 300 μm 的凸点阵列时,需要保持 2.7 mm 的沉积距离才能实现较高微滴定位精度(定位精度标准偏差为 32 μm),不能从根本上解决侧吹式方案保护距离短的问题。因而,如何在减小气流对微滴喷射过程扰动的同时增大微域保护距离,是金属微滴喷射微域保护方案设计的难点所在,也是实现金属微滴喷射 3D 打印技术工程化应用的一个关键。但现阶段缺乏保护气流对金属微滴喷射过程的影响机制研究,制约了微域保护方案的改进和相关技术推广。

基于此,本文提出了一种新型金属微滴喷射环形射流微域保护装置,以锡合金微滴稳定喷射过程为研究对象,通过微域保护环境下的微滴喷射试验与保护气流场数值模拟,研究了不同保护气流量下氧化作用和气流动力学行为对金属微滴喷射过程的影响机制,打印出较长沉积距离熔合良好、堆叠均匀的锡合金立柱和尺寸均匀、落点准确的凸点阵列,验证了所开发的环形射流微域保护装置的有效性,为金属微滴喷射 3D 打印技术的工程化应用奠定了基础。

1 微域保护试验平台的设计与实现

1.1 微域保护试验平台的开发

设计开发的微域保护试验平台原理图如图 1a 所示。该试验平台包括试验控制系统和微域保护系统,试验控制系统用于试验过程中工艺参数的调节,微域保护系统用于局部低氧工作环境的构建。

试验控制系统主要由金属微滴喷射控制子系统、运动控制子系统和温度控制子系统等三个子系统所组成。在金属微滴喷射控制子系统工作时,工控机由控制卡产生脉冲信号,再经信号放大器调节后作用于压电陶瓷。压电陶瓷将电能转化为机械能,并通过激振杆在金属液中产生微小扰动,进而在喷嘴处形成金属微滴。由于压电陶瓷不能长期工作于超过 150 $^{\circ}\text{C}$ 的温度环境,否则会造成压电元件性能产生不可逆衰减,故在压电陶瓷外围需使用冷却水循环流动,以实现设备工作时对压电陶瓷的冷却保护。在运动控制子系统中,电机驱动器接收到控制卡产生的运动信号后作用于三维运动平台,平台带动基板平移及升降从而实现微滴沉积位置的控制。温度控制子系统通过温控仪、热电偶及加热炉等实

现坩埚内金属块料的加热熔化。

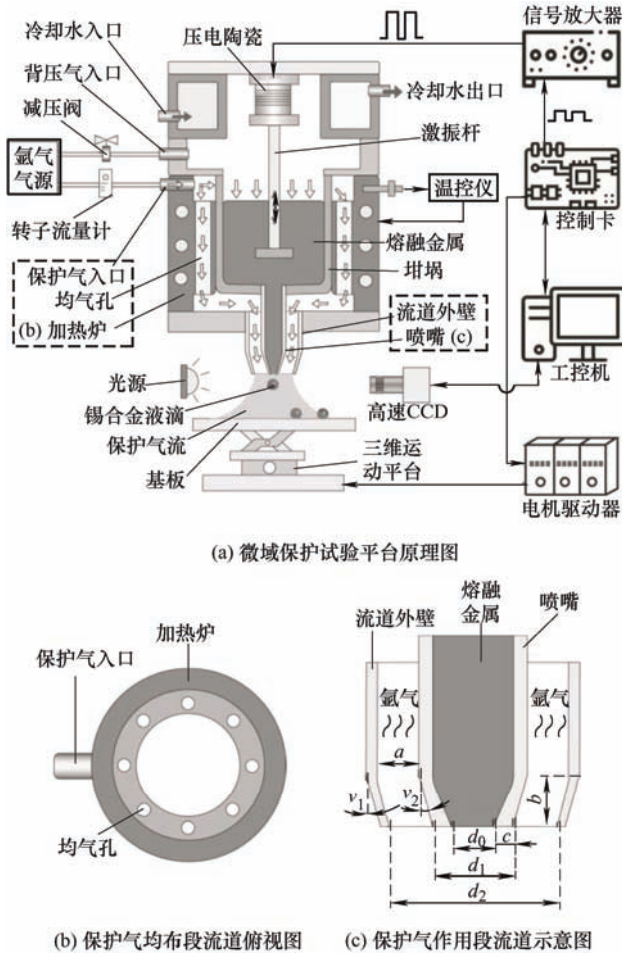


图 1 微域保护试验平台的设计

1.2 微域保护气流道的设计与实现

本文设计的微域保护气流道分为保护气均布段流道和保护气作用段流道两个部分。

保护气均布段流道位于加热炉内,其入口设置于加热炉上部,保护气经加热作用后流向喷嘴附近以防止其温度过低对射流产生冷却作用。此外,为提高加热炉对气流的加热效率并实现保护气的均布,在加热炉内部设计了 8 个均气孔,保护气流经加热炉内壁上的均气孔后流动到喷嘴出口附近(图 1b)。保护气作用段流道主要由喷嘴和流道外壁组成(图 1c)。为减小气流对微滴飞行方向的扰动,同时获得较大低氧保护范围,本文采用了保护气供应方向与微滴下落方向相一致的环形射流保护气流道形式。同时,在流道前端 3 mm 距离内设置了小角度收缩(流道收缩角 $\gamma_1 \approx 15^\circ$)来防止气流发散。为实现喷嘴和流道外壁的高精度成型,本文采用拉针仪对玻璃毛细管进行高温拉制,再对喷嘴处进行研磨处理以保证其精度。试验所采用的保护气作用段流道主要尺寸如表 1 所示,设计开发的微域保护试验装

置实物照片如图 2 所示。

表 1 保护气作用段流道尺寸

参数	数值
喷嘴直径 $d_0/\mu\text{m}$	250
流道出口内径 d_1/mm	1.5
流道出口外径 d_2/mm	4.5
保护气作用段流道入口间隙 a/mm	0.5
流道前端收缩长度 b/mm	3
喷嘴壁厚 c/mm	0.625
保护气流道收缩角 $\gamma_1/(\circ)$	15
喷嘴外壁收缩角 $\gamma_2/(\circ)$	26.5

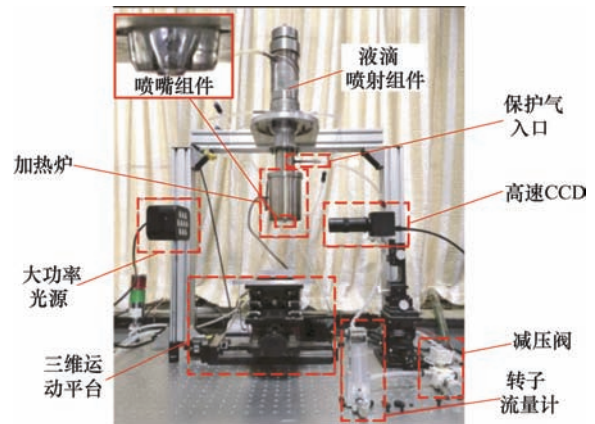


图 2 微域保护试验装置实物照片

2 保护气流场特性建模与分析

根据环形射流保护气轴线上流体的流动状态,可将其流场分布分为回流区、过渡区和稳定区三个区域^[8](图 3a)。在喷嘴出口附近的回流区,由于流道突然截止会产生中心壁效应,其气流流动方向与保护气初始流动方向相反,且回流区与过渡区交界处存在气流流速为 0 的驻点 S ,回流区的尺寸可用驻点 S 到喷嘴出口的距离 L_0 来表示;过渡区以驻点 S 和气流平均速度横向梯度 $d\bar{u}/dx=0$ 的位置为边界,在这个区域内环形气流向轴线逐渐交汇,轴线气流速度逐渐增大;在稳定区,气流在外界气体作用下动能逐渐降低直至与外界气体融合。

为避免回流区反向气流对金属射流形成过程产生不利影响,回流区尺寸应越小越好。根据 DAVIES 等^[8]的研究,在环形射流中,回流区尺寸主要取决于射流面积阻塞比 B 和喷嘴前端几何形状。其中射流面积阻塞比 B 为环形流道截面内外圆面积之比,即 $B = d_1^2/d_2^2$ (本文中 $B \approx 0.11$),喷嘴前端形状在本文中主要取决于前端收缩角 γ_2 和喷嘴壁厚 c 。当喷

嘴壁厚 $c=0$ mm 时, 可将回流区尺寸控制在最小值。但由于在试验过程中, 喷嘴壁厚太小会导致其强度不足而容易产生缺损。因此, 为保证喷嘴耐用性, 将收缩后的喷嘴壁厚控制在 0.65 mm 左右, 此时喷嘴前端收缩角 $\gamma_2 \approx 26.5^\circ$ 。

为详细了解微域保护气的流动特性, 本文基于 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型建立了保护气为氩气时的气流流动模型。假设保护气为定常不可压缩流动, 则模型中湍动能 k 和湍流耗散率 ε 的约束方程分别为^[9]

$$\frac{\partial(\rho_g k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_g + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho_g (P_k - \varepsilon) \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_g \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_g + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho_g C_1 E \varepsilon - \rho_g C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu_g \varepsilon}} \quad (2)$$

式中, ρ_g 为气体密度, t 为时间, x_i 、 x_j 分别为各坐标分量, u_j 为速度分量, μ_g 、 ν_g 分别为气体动力黏度和运动黏度, μ_t 为气体湍流黏度, σ_k 、 σ_ε 分别为湍动能 k 和湍流耗散率 ε 的湍流普朗特常数, P_k 为湍动能生成项, C_1 、 C_2 为经验常数, E 为主流时均应变率张量的模。模型中主要常数取值分别为: $\sigma_k=1$ 、

$\sigma_\varepsilon=1.2$ 、 $C_2=1.92$ 、 $C_1=\max(0.43, \eta/(\eta+5))$, 且 $\eta=\sqrt{2E_{ij}E_{ij}k}/\varepsilon$ 。

图 3b 为 $q=3$ L/min 时保护气流场模拟图, 由保护气流速云图可对环形射流的三个区域位置进行确定。根据回流区附近气流流线图(图 3c)可知回流区尺寸 $L_b \approx 650 \mu\text{m}$ 。当喷嘴壁厚与喷嘴直径满足 $c=0$ mm、 $d_0=0 \mu\text{m}$ 时(此时喷嘴前端收缩角 $\gamma_2 \approx 36^\circ$), 回流区将被完全消除。由于回流区尺寸 L_b 与收缩角 γ_2 成反比例关系, 假设 L_b 与收缩角 γ_2 呈一次线性负相关, 则可推算出当 $\gamma_2 \approx 26.5^\circ$ 时回流区尺寸为

$$L_b(\gamma_2 \approx 26.5^\circ) \approx 0.264 L_b(\gamma_2 = 0^\circ) \quad (3)$$

KO 等^[10]和 MIYATA 等^[11]分别采用热线风速计和激光多普勒测速仪对环形气体射流的速度场进行测量。根据 KO 等^[10]的研究, 当 $B=0.2$ 、 $\gamma_2=0^\circ$ 时环形射流回流区尺寸为 $L_b(\gamma_2=0^\circ) \approx 0.5d_2$, 根据式(3)可得 $L_b(\gamma_2 \approx 26.5^\circ) \approx 594 \mu\text{m}$; 根据 MIYATA 等^[11]的研究, 当 $B=0.16 \sim 0.64$ 、 $\gamma_2=0^\circ$ 时回流区尺寸为 $L_b(\gamma_2=0^\circ) \approx 0.35 \sim 0.6(d_1+d_2)$, 根据式(3)可得 $L_b(\gamma_2 \approx 26.5^\circ) \approx 554.4 \sim 712.8 \mu\text{m}$ 。这与本文回流区尺寸模拟结果(图 3c)相近, 说明本文回流区尺寸模拟值准确性较好。

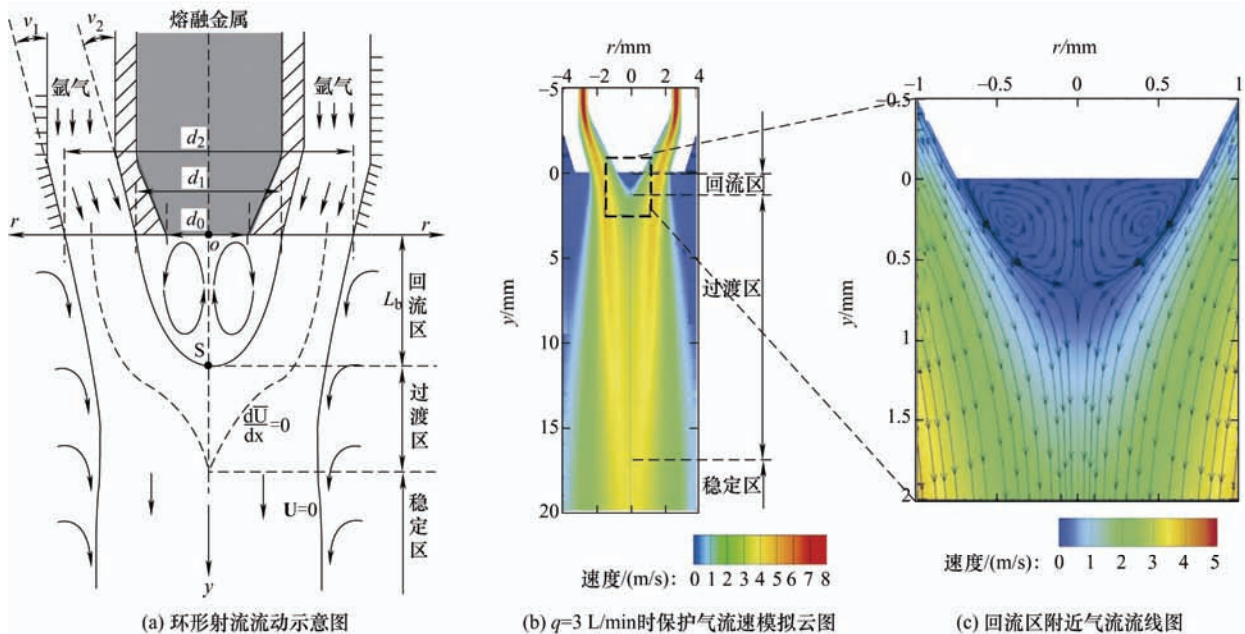


图3 保护气流场特性示意图及模拟结果

3 金属微滴喷射微域保护试验与分析

为明确保护气对金属微滴喷射过程的影响机制, 采用试验为主、模拟及理论模型分析为辅的方

法, 对微域保护环境下的微滴喷射过程进行探究。金属微滴喷射试验过程选用 Sn99.3-Cu0.7 作为打印材料, 氩气作为保护气体。将喷射信号幅值和脉宽分别控制在 4.4 V 和 497 μs 附近以保证射流顺利断裂, 保护气流量 q 变化范围为 0~3 L/min。同时采

用高速 CCD(英国 iX Cameras, i-speed 220)对微滴喷射动态过程进行实时捕捉。

3.1 微域保护下的金属微滴喷射过程

根据金属流体形态差异一般可将微滴喷射过程分为图 4a~4d 所示的四个阶段^[12], 图 4e 为对应的微域保护环境下锡合金微滴喷射过程 CCD 图。

(1) 弯月面移动阶段, 当压电陶瓷接收到高电平喷射信号后带动激振杆前推, 喷嘴内部金属熔液弯月面开始向下移动, 如图 4a 及图 4e 中 0~500 μs 所示。

(2) 射流形成阶段, 激振杆挤压金属熔液, 使得金属熔液压力增大并流出喷嘴形成射流, 如图 4b 及图 4e 中 750~875 μs 所示。

(3) 射流颈缩阶段, 压电陶瓷接收到低电平喷射信号后带动激振杆后退, 导致喷嘴内熔液流出速度变小, 射流前端和后端产生速度差, 在表面张力

作用下发生“颈缩”现象, 如图 4c 及图 4e 中 1 000~1 375 μs 所示。

(4) 射流断裂回缩阶段, 随着激振杆进一步后退, “颈缩”现象加剧, 射流前端逐渐脱离射流并形成单颗规则球形微滴, 剩余射流则在负压作用下回流至喷嘴内部, 如图 4d 及图 4e 中 1 500~1 875 μs 所示, 同时激振杆回到初始位置完成一次完整的微滴喷射过程。

根据不同保护气流量下锡合金射流断裂 375 μs 后的形态变化 CCD 图(图 5)可知, 在不同保护气流量下射流均能发生颈缩断裂。根据形成的微滴形貌和数量, 可将不同保护气流量下的微滴喷射行为划分为图 5 所示的三个区域, 其中 I 区、II 区、III 区分别代表: “单颗有拖尾微滴区”、“单颗圆滑微滴区”和“两颗微滴区”。

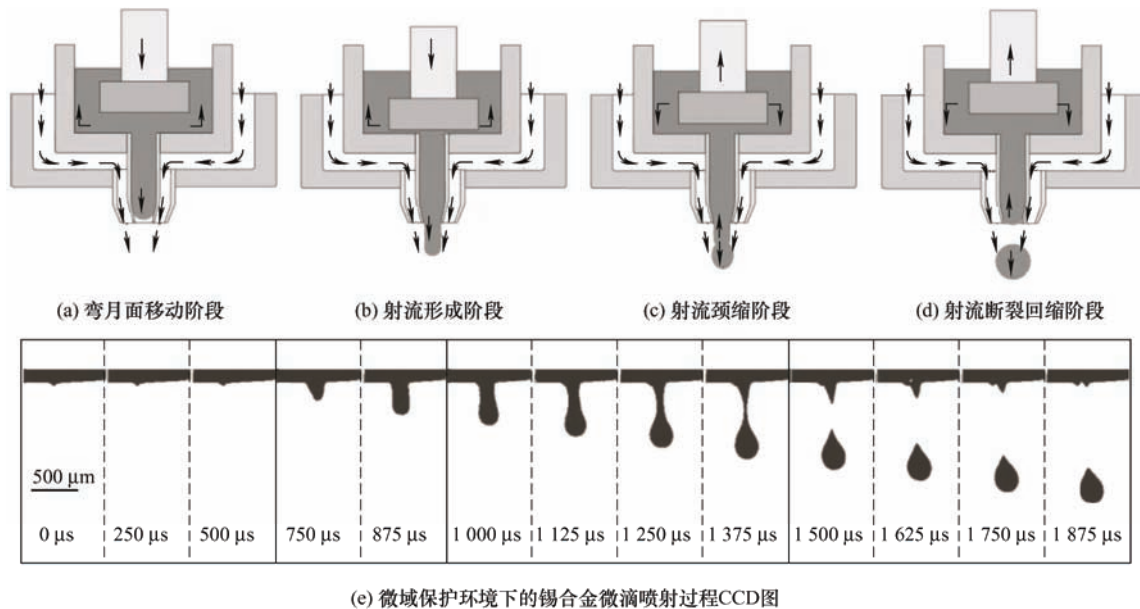


图 4 微域保护下的金属微滴喷射过程

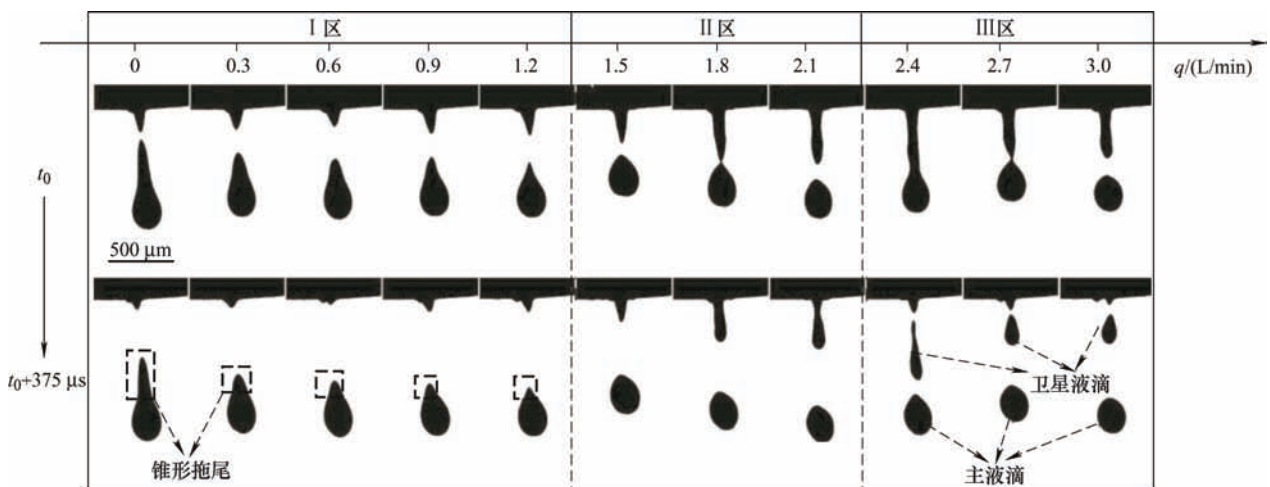


图 5 锡合金射流断裂 375 μs 内射流形态变化试验结果

由于锡合金表面张力较大,射流断裂后会在表面张力作用下形成外观圆滑的单颗微滴^[13]。但在 I 区中当保护气流量较小时,射流在断裂后形成的微滴为带有尖锐锥形拖尾的单颗微滴,这与正常圆滑微滴在形貌上有明显区别。随着保护气流量的增加,微滴尖锐拖尾逐渐消失,形成 II 区所示的无拖尾单颗圆滑球形微滴。同时,这也表明了 I 区中微滴的拖尾现象是由保护气供应流量不足使得射流发生氧化行为所致。继续增大保护气流量至 III 区时,较大的保护气流速导致射流在气流动力学作用下发生二次断裂并形成比正常液滴小的卫星液滴。由此可见,不同保护气流量对微滴喷射过程的影响主要有氧化作用与气流动力学作用,氧化作用影响微滴的生成形貌,气流动力学作用影响微滴的生成数量。

3.2 保护气对金属微滴喷射过程影响机制分析

3.2.1 氧化作用对金属微滴喷射过程的影响

在微滴喷射过程中,射流的流体动力学行为可用表征射流粘性力与表面张力相对作用强度的 Oh 数^[14]进行初步判断

$$Oh = \frac{\mu_j}{\sqrt{\sigma_j \rho_j D_j}} \quad (4)$$

式中, μ_j 为射流动力黏度; σ_j 为射流表面张力, ρ_j 为射流密度, D_j 为射流直径。当 $Oh \geq 1$ 时,射流粘性力起主导作用,在收缩过程中能够保持稳定的射流形态;而当 $Oh \leq 0.01$ 时,射流表面张力起主导作用,射流形态将变得不稳定,容易在表面张力作用下发生颈缩断裂。在本文中,射流直径 D_j 可近似看作等于喷嘴直径(约 250 μm)。当微滴没被氧化时,根据式(4)可得 Oh 数约为 2.1×10^{-3} ,表面张力在射流断裂过程中起主导作用。但当保护气供应流量不足时,金属射流受氧化作用会使表面张力和黏度发生变化。随着氧化程度增加,锡熔液表面张力会降低^[15-16],同时由于锡射流表面固体氧化物杂质颗粒的增多会使表面生成固液混合的黏糊状薄膜,导致其黏度增大^[17-18]。因此,射流氧化程度越高,Oh 数越大,射流形态稳定性的提高将阻碍射流颈缩断裂。

微滴断裂形貌和射流断裂位置可用微滴长宽比 E 与射流断裂相对位置 P 两个无量纲数来表示(图 6a)。其中微滴长宽比 E 为微滴长度 L_d 与宽度的 W_d 比值,射流断裂相对位置 P 为射流断裂后的长度 L_2 与断裂前的长度 L_1 的比值

$$E = L_d / W_d \quad (5)$$

$$P = L_2 / L_1 \quad (6)$$

图 6b 为射流断裂相对位置 P 和微滴长宽比 E 随保护气流量 q 的变化关系,计算结果由相邻 5 颗微滴

喷射数据取平均值得到。

由图 6b 可知随着保护气流量的增大,金属射流断裂位置逐渐从根部向前端移动,导致射流断裂相对位置 P 逐渐增大、微滴长宽比 E 逐渐减小。这是由于随着氧化作用的减小,射流 Oh 数逐渐降低,表面张力的主导作用越来越强,颈缩过程变得越来越容易。随着保护气流量进一步增大,射流断裂相对位置 P 与微滴长宽比 E 也逐渐趋于稳定,且微滴长宽比 E 稳定在 1.25 附近,微滴成型形貌趋于圆球形,说明此时射流受氧化作用影响很小,可实现正常断裂。因此,当射流氧化程度较大时,射流 Oh 数的增加会使射流颈缩过程受阻,从而导致射流断裂位置越来越靠近根部并产生长宽比较大的单颗带拖尾微滴。

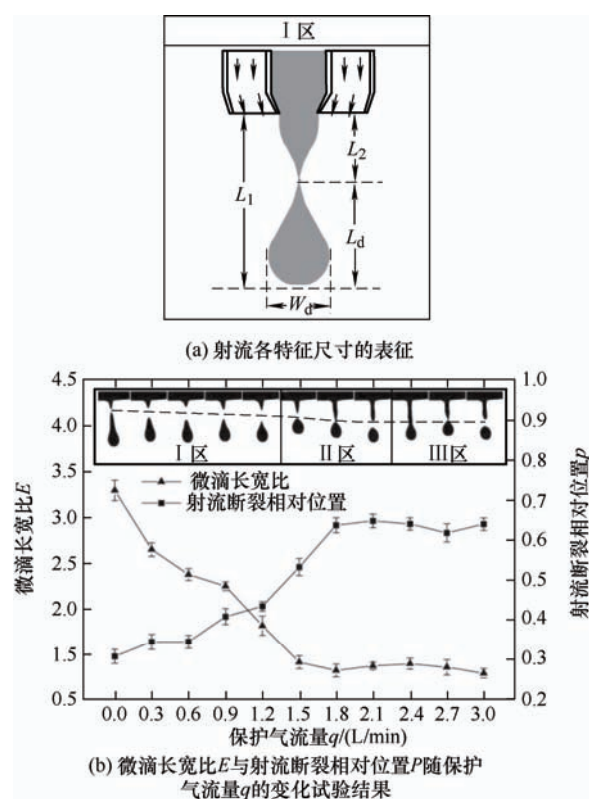


图 6 微滴断裂形态随保护气流量 q 的变化关系试验结果

3.2.2 气流动力学对金属微滴喷射过程的影响

为深入研究气流动力学作用对微滴生成过程的影响,本节对射流不同特征位置的纵坐标变化进行了统计。图 7a 为射流发生二次断裂时各特征位置纵坐标示意图,其中 y_1 为射流前端纵坐标, y_2 、 y_3 分别为主液滴前端和后端纵坐标, y_4 、 y_5 分别为卫星液滴前端和后端纵坐标。保护气流量 $q = 2.7 \text{ L/min}$ 时射流各特征位置随喷射时间变化关系如图 7b 所示。由图 7b 可知,在微滴喷射过程中,射流前端坐标 y_1 值经历了两次骤降,分别对应主液滴与卫星液滴的断裂过程。由于射流前端具有较大的初始速度

(约为 1 m/s), 射流前端可轻易穿过回流区, 回流区气流没有对主液滴生成产生抑制作用。另外, 卫星

液滴的形成发生在剩余射流向喷嘴内部的回流过程中, 且射流二次断裂位置靠近射流根部。

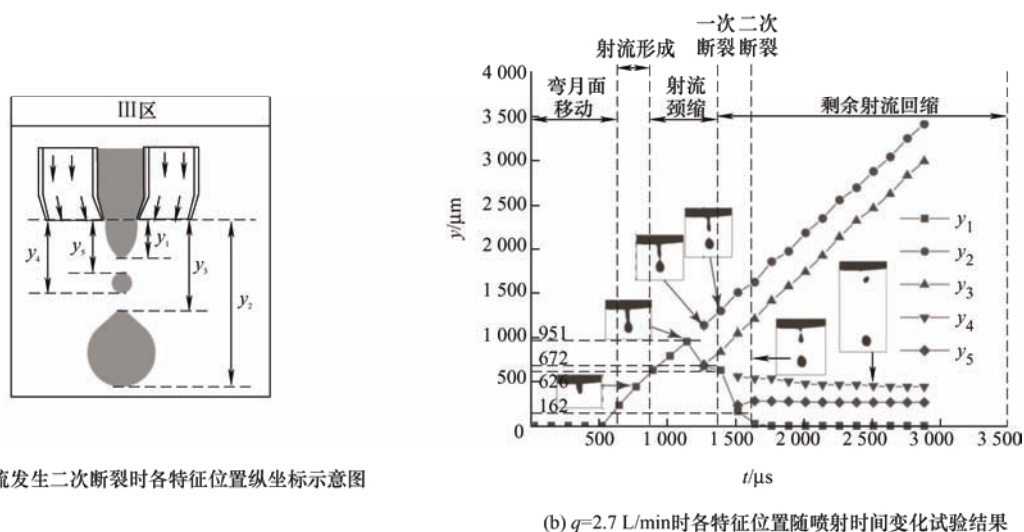


图 7 III 区内射流各特征位置随喷射时间变化试验结果

图 8 为当 $y_1 = 770 \mu\text{m}$ 、 $q = 3$ L/min 射流发生颈缩时的保护气流场状态模拟图。由图 8a、8b 可知由

于在射流与喷嘴下壁面交界处存在直角过渡, 当回流区的上升气流流动到喷嘴下壁面时会形成与回流

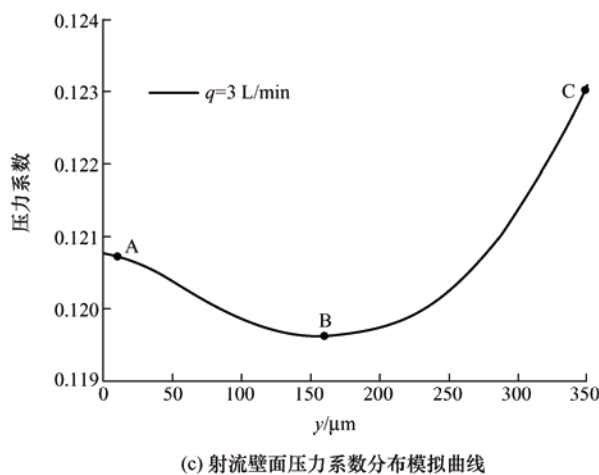
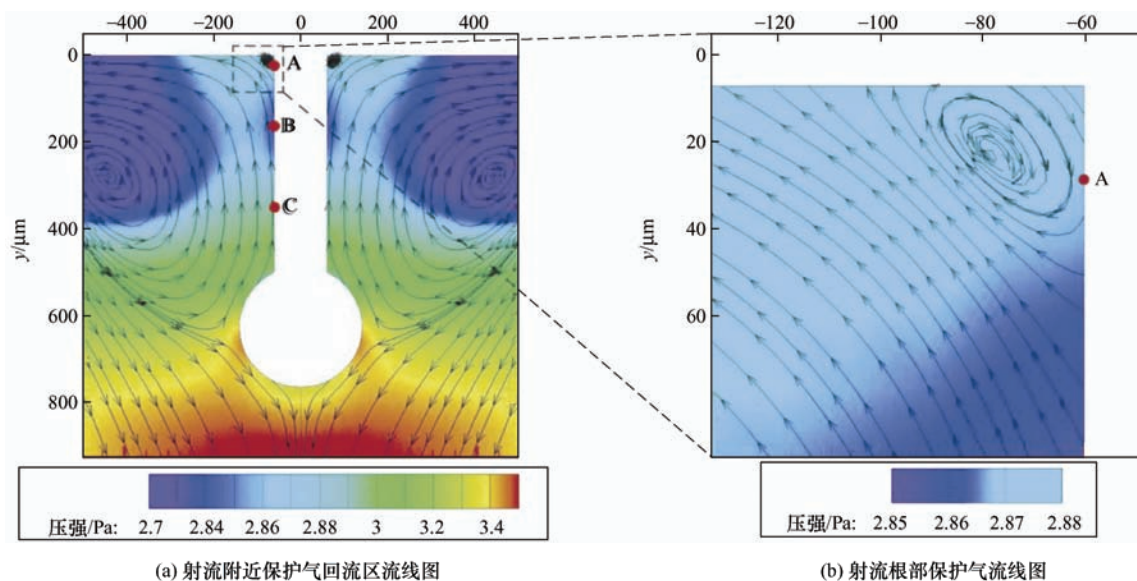


图 8 $y_1 = 770 \mu\text{m}$ 、 $q = 3$ L/min 时保护气在射流附近的流动状态模拟结果

区气流流动方向相反的二次涡。且二次涡流动方向朝向射流壁面并使射流 A 点成为迎风面, 导致射流根部位置承受较大压强; 由于在射流中部回流区气流与射流壁面相背离, B 点位置形成背风面, 导致射流中部承受压强较小; 在射流前端, 回流区气流流向逐渐朝向射流壁面并在 C 点附近产生迎风面, 导致射流前端承受压强逐渐增大, 从而在射流壁面呈现压强先降后升趋势(图 8c)。

射流在保护气压力作用下发生二次断裂的过程是由表面张力引起的拉普拉斯附加力作为驱动力, 拉普拉斯附加力的不平衡会导致射流各位置

流体发生不同方向的流动^[19]。图 9a 和图 9b 分别为剩余射流发生二次颈缩前和二次颈缩时内部流体的流动模型示意图, 图中参考点 $A(r_A, y_A)$ 、 $B(r_B, y_B)$ 、 $C(r_C, y_C)$ 点分别对应图 8 中的点 A 、 B 、 C 。各参考点所在截面第一曲率半径分别为 r_A 、 r_B 、 r_C , 第二曲率半径分别为 R_A 、 R_B 、 R_C , 喷嘴内部流体产生的压力为 P_0 , P_A 、 P_B 、 P_C 分别为横截面 $y = y_A$ 、 $y = y_B$ 、 $y = y_C$ 内部的拉普拉斯附加压力, Q_A 、 Q_B 、 Q_C 分别为各参考点附近的环境气体压力。由拉普拉斯公式可知 P_A 、 P_B 、 P_C 分别为

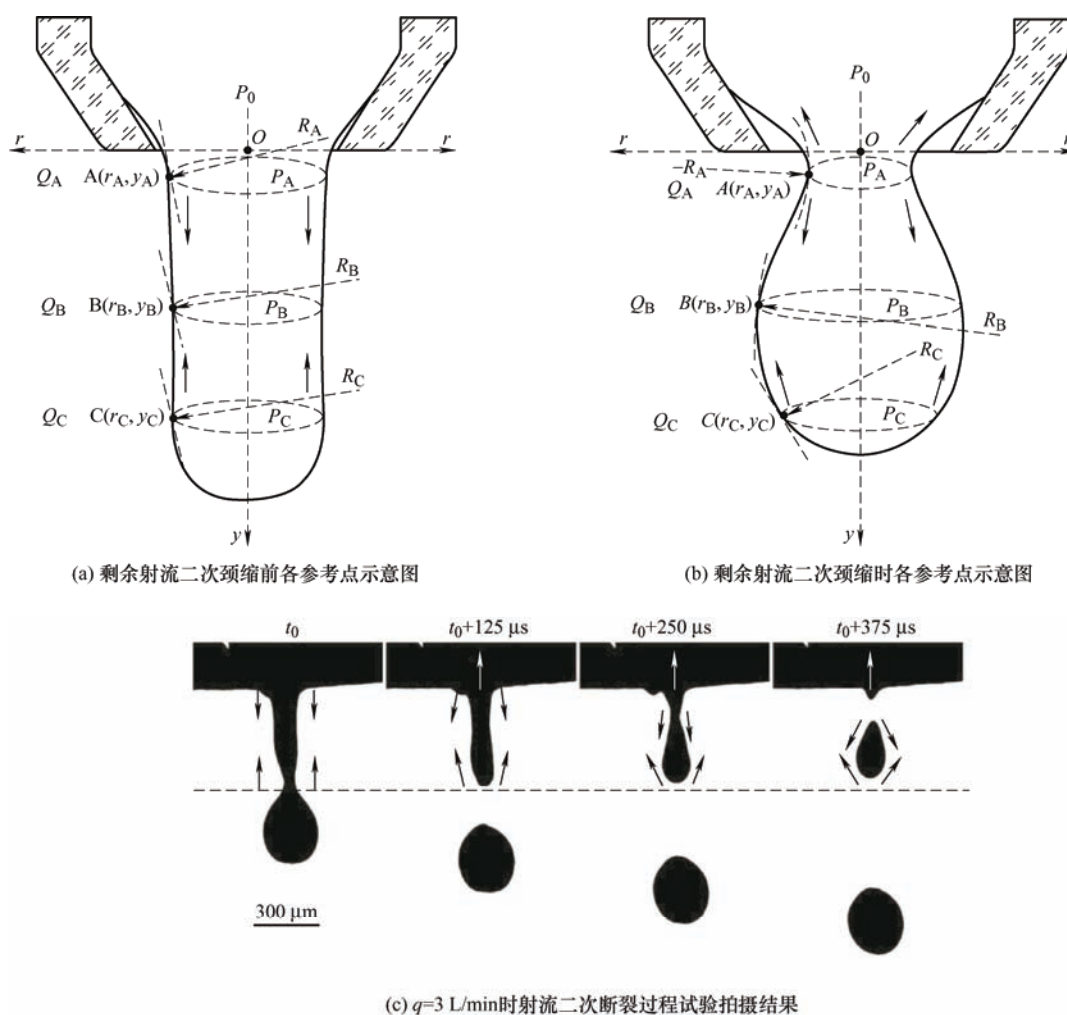


图 9 锡合金射流二次断裂过程中内部流体流动模型

$$P_A = \sigma \left(\frac{1}{r_A} + \frac{1}{R_A} \right) + Q_A \quad (7)$$

$$P_B = \sigma \left(\frac{1}{r_B} + \frac{1}{R_B} \right) + Q_B \quad (8)$$

$$P_C = \sigma \left(\frac{1}{r_C} + \frac{1}{R_C} \right) + Q_C \quad (9)$$

由于射流各截面第一曲率半径远小于第二曲率半径, 即 $r_A \ll R_A$ 、 $r_B \ll R_B$ 、 $r_C \ll R_C$, 因此第二曲率半径引起的压力变化可忽略不计。又由于发生二次颈缩前射流近似呈圆柱形, 因此 $r_A \approx r_B \approx r_C$ 。由图 8c 可知 $Q_A > Q_B < Q_C$, 则根据式(7)~(9)可得各横截面内部压力关系为

$$P_A > P_B < P_C \quad (10)$$

在射流内部拉普拉斯附加力的驱动下，射流横截面 $y = y_A$ 、 $y = y_C$ 附近流体将向面 $y = y_B$ 流动，如图 9a 中实心箭头所示。在射流形成阶段，由于激振杆的前进挤压作用喷嘴内部流体压力 P_0 为正压，射流横截面 $y = y_A$ 处不断受到来自喷嘴内部流体的补充，因此很难在保护气作用下发生二次颈缩。而在剩余射流回缩阶段，由于在激振杆回程作用下喷嘴内部流体压力 P_0 为负压，导致射流横截面 $y = y_A$ 附近流体向上下游流动(图 9b)。因此射流的二次断裂往往发生在剩余射流回缩阶段。当射流在根部附近发生颈缩时，横截面 $y = y_B$ 附近由于受到两端流体的补充开始不断膨胀， r_A 不断减小， r_B 不断增大，导致 P_A 进一步增大， P_B 进一步减小，颈缩现象的不断加剧导致射流最终在根部附近发生二次断裂形成卫星微滴。剩余射流内部流体的流动伴随着射流形态的演化，图 9c 为 $q = 3 \text{ L/min}$ 时射流二次断裂过程的试验拍摄结果。由图 9c 可以看到当保护气流量较大时，剩余射流的前端和根部位置向中间不断发生挤压变形最终导致射流二次断裂。由此可见，当保护气流量较大时，射流的二次断裂现象是由于射流在保护气作用下内部流体受力不均而产生相对流动所致。

图 10a 为射流断裂形成单颗无拖尾微滴时各特

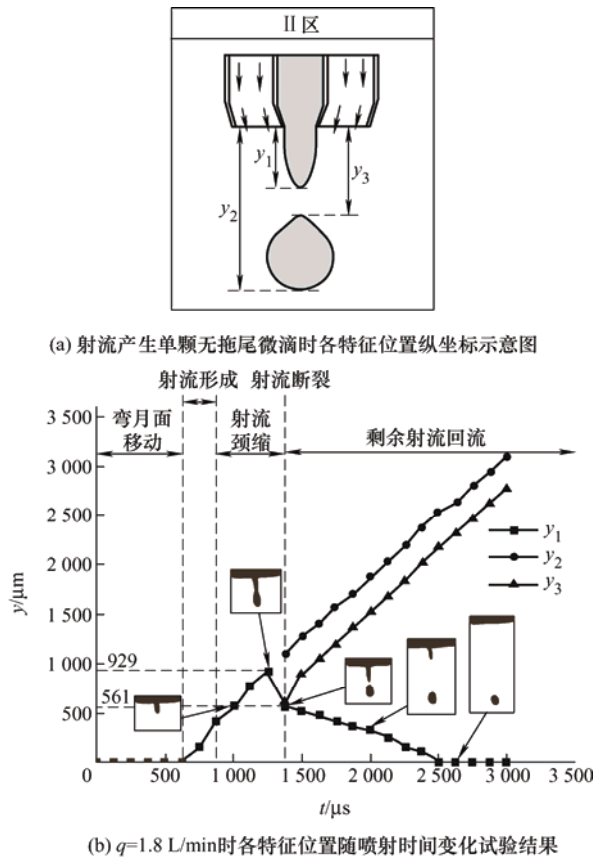


图 10 II 区内射流各特征位置随喷射时间变化试验结果

征位置纵坐标示意图，其中 y_1 为射流前端纵坐标， y_2 、 y_3 分别为主微滴前端和后端纵坐标。图 10b 为保护气流量 $q = 1.8 \text{ L/min}$ 时射流各特征位置随喷射时间变化图。由图 10 可知当 $q = 1.8 \text{ L/min}$ 时，射流断裂形成一颗无拖尾圆滑微滴后，剩余射流在激振杆回程负压作用下能顺利回流至喷嘴内部。说明这时微滴喷射过程基本不受氧化作用和气流动力学作用影响，保护气能为微滴喷射过程提供可靠的保护环境。因此，在本文开发的微域保护装置上进行锡合金微滴喷射过程时，为防止射流受氧化作用和气流动力学作用影响，保护气供应流量应控制在 II 区内，即 $1.5 \text{ L/min} \leq q \leq 2.1 \text{ L/min}$ 。

4 锡合金样件打印试验

为验证本文所建微域保护装置的有效性，进行了锡合金立柱和凸点阵列打印试验。样件最终打印形貌采用体视显微镜(中国天诺翔, CM2000)和扫描电子显微镜(日本日立, TM400 Plus)进行观测。相关试验参数如表 2 所示。

表 2 锡合金样件打印试验参数

参数	锡合金立柱	锡合金凸点阵列
保护气流量/(L/min)	1.8	1.8
微滴直径/ μm	280	280
打印步距/mm	0	0.8
最远沉积距离/mm	21.6	5.0

图 11 为喷嘴距离基板 21.6 mm 时打印的单根锡合金立柱形貌图，从图中可以看出，打印的立柱总长为 20 mm，立柱整体较直，但局部表面形貌随沉积距离变化而显著变化，随着沉积距离的降低，立柱打印形貌也越匀称。当沉积距离大于 6.6 mm 时，由于距离保护气出口较远，微滴受氧化和冷却作用影响沉积形貌极不规则，沉积位置随机性较高，使得立柱打印形貌较粗糙，相邻微滴搭接界面存在明显间隙；当沉积距离小于 6.6 mm 时，由于距离保护气出口较近，微滴受氧化和冷却作用影响较小，沉积形貌呈规则球冠状，且能精确沉积到相邻微滴正上方，并与相邻微滴熔合形成均匀光滑形态，进而在顶端形成一段(约 5 mm 长)熔合良好、堆叠整齐的立柱。由此可见，微域保护装置在靠近气流出口 6.6 mm 距离内能为微滴稳定喷射和精确沉积提供较大范围低氧保护环境。

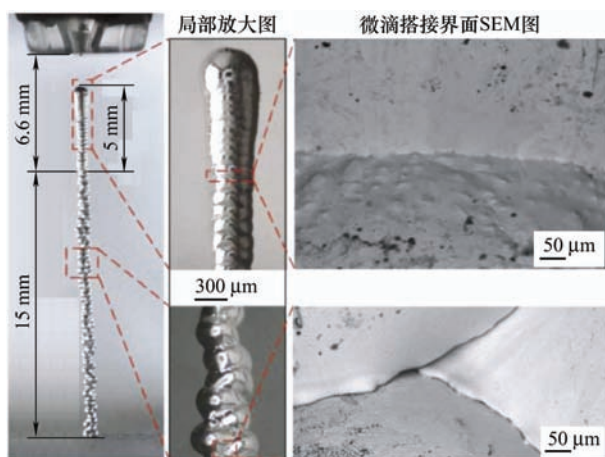


图11 微域保护环境下锡合金立柱打印样件

图12a为在微域保护环境下打印的12×12锡合金焊球凸点阵列样件，图12b为单个焊球凸点的扫描电镜图。凸点阵列按照图12c所示的“弓”字形轨迹依次进行沉积，且相邻凸点之间间隔0.8 mm。从图12a、12b可见，打印的凸点阵列尺寸均匀，落点位置没有明显偏差，且凸点形貌呈带有层叠波纹^[20]的半球形状。

为了对凸点沉积精度进行量化分析，本文通过对凸点阵列照片二值化处理后，采用灰度重心算

法提取出每个凸点的中心位置坐标。假设以第一颗凸点中心位置为坐标原点，凸点阵列图像分辨率为 $m \times n$ ，坐标 (x, y) 处的图像灰度为 $g(x, y)$ ，第 i 行第 j 列凸点的理论沉积位置 (x_{ij}, y_{ij}) 和实际沉积位置 (x'_{ij}, y'_{ij}) ，则单个凸点的实际沉积位置横纵坐标可表示为

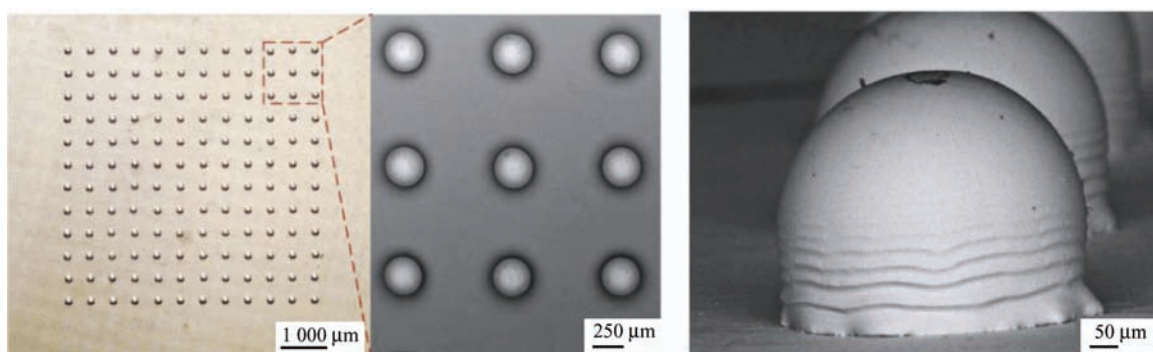
$$x'_{ij} = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n g(x, y)x}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n g(x, y)} \quad (11)$$

$$y'_{ij} = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n g(x, y)y}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n g(x, y)} \quad (12)$$

单个凸点的沉积位置误差 e_{ij} 可表示为

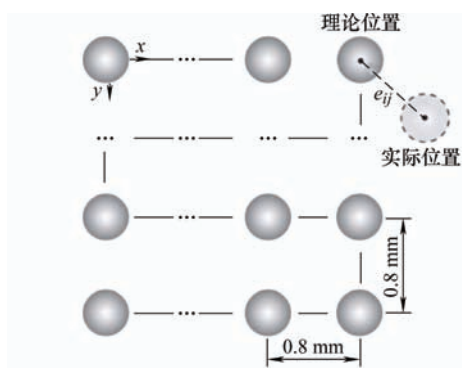
$$e_{ij} = \sqrt{(x_{ij} - x'_{ij})^2 + (y_{ij} - y'_{ij})^2} \quad (13)$$

图12d为凸点沉积位置误差的概率密度函数分布图，由图可见凸点阵列沉积位置误差大致服从正态分布，误差均值为23.57 μm，定位精度标准偏差为11.92 μm，分别仅为微滴直径尺寸的8.4%和4.3%。可见本文装置在较长沉积距离下凸点阵列仍能保持比较高的沉积精度，验证了本文开发的环形射流微域保护装置在开放环境下进行金属微滴精准打印的可行性。

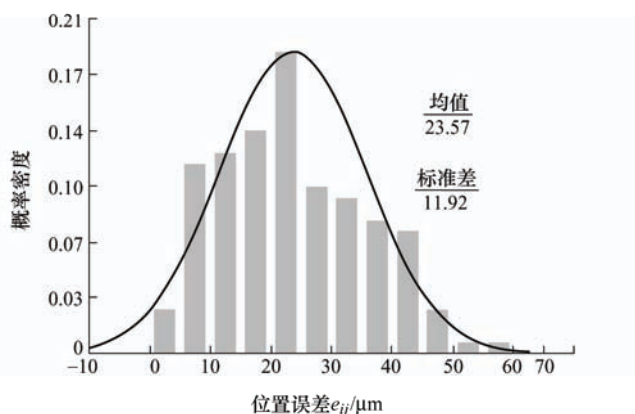


(a) 12×12锡合金焊球凸点阵列打印样件

(b) 单个凸点SEM形貌图



(c) 凸点阵列打印轨迹示意图



(d) 凸点沉积位置误差概率密度函数分布图

图12 微域保护环境下焊球凸点阵列打印

5 结论

(1) 设计开发了新型微域保护装置用于金属微滴喷射过程, 可以在减小气流对微滴喷射过程横向扰动同时获得较大保护范围, 为金属微滴喷射的微域保护提供了新方案。

(2) 揭示了微域保护气流对金属微滴喷射过程的影响机制。当保护气流量较小时, 金属射流受氧化作用影响会断裂为带锥形拖尾的单颗微滴; 当保护气流量过大时, 金属射流会在保护气产生的二次涡作用下发生二次断裂并生成卫星液滴。为金属微滴喷射 3D 打印技术在微域保护环境下的高精度打印建立了理论支撑。

(3) 在设计开发的环形射流微域保护装置上进行了锡合金样件打印试验, 得到了一段熔合良好、堆叠整齐的锡合金立柱和尺寸均匀、位置准确的凸点阵列。证明了本文研发微域保护装置的有效性, 为金属微滴喷射 3D 打印技术的推广应用奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] 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.
QI Lehua, ZHONG Songyi, LUO Jun. Three-dimensional printing technology based on uniform metal droplet ejecting[J]. Scientia Sinica Informationis, 2015, 45(2): 212-223.
- [2] QI Lehua, CHAO Yanpu, LUO Jun, et al. A novel selection method of scanning step for fabricating metal components based on micro-droplet deposition manufacture[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 56(1): 50-58.
- [3] LUO Jun, QI Lehua, ZHONG Songyi, et al. Printing solder droplets for micro devices packages using pneumatic drop-on-demand (DOD) technique[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(10): 2066-2073.
- [4] TROPMANN A, LASS N, PAUST N, et al. Pneumatic dispensing of nano-to picoliter droplets of liquid metal with the StarJet method for rapid prototyping of metal microstructures[J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2011, 1(12): 75-84.
- [5] FANG M, CHANDRA S, PARK C B. Building three - dimensional objects by deposition of molten metal droplets[J]. Rapid Prototyping Journal, 2008, 14(1): 44-52.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] DAVIES T W, BEER J M. Flow in the wake of bluff-body flame stabilizers[C]// Symposium (International) on Combustion. Elsevier, 1971, 13(1): 631-638.
- [9] 张淑佳, 李贤华, 朱保林, 等. $k-\varepsilon$ 涡粘湍流模型用于离心泵数值模拟的适用性[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 238-242.
ZHANG Shujia, LI Xianhua, ZHU Baolin, et al. Applicability of $k-\varepsilon$ eddy viscosity turbulence models on numerical simulation of centrifugal pump[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 238-242.
- [10] KO N, CHAN W T. The inner regions of annular jets[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1979, 93(3): 549-584.
- [11] MIYATA M. Flow structure in developing region of annular jet (Special Nozzle)[C]// The Proceedings of the International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF) 2005. The Japan Society of Mechanical Engineers, 2005: 203-208.
- [12] 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.
TAO Yuan, YANG Fang, LUO Jun, et al. Experimental research and development of metal drop-on-demand spray apparatus driven by the stress wave[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(7): 162-167.
- [13] CHAO Yanpu, QI Lehua, XIAO Yuan, et al. Manufacturing of micro thin-walled metal parts by micro-droplet deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(2): 484-491.
- [14] SCHULKES R. The contraction of liquid filaments[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1996, 309: 277-300.
- [15] SANGIORGI R, SENILLOU C, JOUD J C. Surface tension of liquid tin-oxygen alloys and relationship with surface composition by auger electron spectroscopy[J]. Surface Science, 1988, 202(3): 509-520.
- [16] PASSERONE A, RICCI E, SANGIORGI R. Influence of

- oxygen contamination on the surface tension of liquid tin[J]. Journal of Materials Science, 1990, 25(10): 4266-4272.
- [17] YIM P. The role of surface oxidation in the break-up of laminar liquid metal jets[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1996: 99-123.
- [18] ELTON E S, REEVE T C, THORNLEY L E, et al. Dramatic effect of oxide on measured liquid metal rheology[J]. Journal of Rheology, 2020, 64(1): 119-128.
- [19] 朱东彬, 吴民强, 王竹贤, 等. 基于微滴喷射 3D 打印的纳米颗粒悬浮墨水稳定喷射研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(9): 243-251.
- ZHU Dongbin, WU Minqiang, WANG Zhuxian, et al. Research on stable jetting of nanoparticle suspension ink for inkjet 3D printing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(9): 243-251.
- [20] XIONG Wei, QI Lehua, LUO Jun, et al. Experimental investigation on the height deviation of bumps printed by solder jet technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243: 291-298.
-
- 作者简介: 周怡, 男, 1996 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机械制造及其自动化。
E-mail: yizhou@mail.nwpu.edu.cn
- 齐乐华(通信作者), 女, 1957 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为金属微滴喷射快速成形方法、金属半固态成形及人工智能及应用等。
E-mail: qilehua@nwpu.edu.cn
- 罗俊, 男, 1981 年出生, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械制造及其自动化、金属微滴喷射快速成形方法等。
E-mail: luojun@nwpu.edu.cn