

喷射式 3D 打印过程微滴沉积位置建模与预测

田东兴

(北华航天工业学院 机电工程学院, 河北 廊坊 065000)

摘要: 微滴沉积位置的准确性是影响喷射成型器件形貌精度的主要因素之一, 为了对微滴沉积位置进行控制, 需要建立微滴沉积位置的动态预测模型。建立了微滴在下落、沉积过程中的运动与传热模型, 并通过数值仿真和实验研究了单个微滴以及两个相邻微滴在沉积动态过程中的形心位置变化, 结果表明, 相比于数值仿真模型, 所建立的理论预测模型对单个微滴沉积位置预测误差为 0.45%, 相邻两个微滴间的沉积距离预测误差为 0.5%, 并通过实验进行了对比验证, 表明所建理论模型具有足够高的位置预测精度, 可用于微滴喷射 3D 打印过程中微滴沉积位置及打印轨迹在线控制的参考。

关键词: 3D 打印; 微滴沉积; 建模; 位置预测

Modeling and Prediction of Droplet Deposition Position for Jet 3D Printing

TIAN Dongxing

(School of Mechanical and Electrical Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering,
Langfang 065000, China)

Abstract: The accuracy of droplet deposition position is one of main factors, affecting the morphology accuracy of spray forming devices. In order to control droplet deposition position, a dynamic prediction model for droplet deposition position is proposed. This paper builds the motion and heat transfer model for micro droplets falling and deposition process, and studies the centroid position changes of a single micro droplet and two adjacent micro droplets during the dynamic deposition process through numerical simulation and experiment. The results show that compared to the numerical simulation model, the proposed theoretical prediction model has a prediction error of 0.45% for a single micro deposition position, with a prediction error of 0.5% for the deposition distance between adjacent micro droplets, and the comparative experimental results indicate that the proposed theoretical model has a high accuracy of position prediction, which provides a reference for the online control of droplet deposition position and printing trajectory during droplet spraying 3D printing process.

Keywords: 3D printing; microdroplet deposition; modeling; location prediction

0 引言

微滴喷射 3D 打印是以某种方式(脉冲气压、压电陶瓷、螺杆等)驱动喷头内的流体材料以单个微滴形式高频连续喷出, 同时喷嘴按指令轨迹运动使微滴逐点、逐层堆积、固化而形成三维实体, 该方法具有打印速度快、材料适应面广、成本低、设备易维护等特点, 适合小尺寸、结构复杂的零部件快速成形, 在组织工程、医疗修复、薄壁结构制备等方面已获得诸多应用^[1-2], 但受打印流体材料物化属性、温度、打印参数可选范围等的限制, 打印过程动力学特性呈现强烈的多参数非线性耦合特性, 且关键动态参数难以在线测量, 导致难以建立解析预测模型, 使其打印微观尺度和精度不够高, 还有待进一步改进^[3]。

目前, 国内外学者对微滴喷射-沉积动力学过程进行了大量的研究, 主要集中在微滴与基板碰撞后的动态成形过程对打印结构形性的影响方面, 例如通过数值仿真研究熔融微滴与基板碰撞后震荡、沉积与凝固过程^[4], 探究打

印速度和微滴与基板之间的接触角对微滴沉积形态的影响^[5], 文献[6]采用有限元法对金属微滴下落、铺展成形过程的温度变化进行了仿真, 获得了微滴凝固过程中的温度变化规律, 研究表明金属熔体在滴落过程中, 由外表面向内层逐渐凝固, 而且各个区域凝固速度不同, 即熔体外表面向中心温度下降梯度逐渐减小。文献[7]研究了 7075 铝合金沉积试样不同类型缺陷的形成机理。文献[8]研究了微滴打印过程轨迹尺寸预测模型, 并通过数值仿真和实验进行了验证。文献[9]利用 Rayleigh-Weber 射流理论探究了均匀液滴产生的基本工艺参数条件以及各参数对液滴直径、间距、器件整体散热性能的影响关系, 并开发相关实验装置进行了验证。文献[10]建立了水滴振荡模型, 并得到了液滴扩展半径的表达式。文献[11]研究了气压驱动微滴喷射过程中连续微滴稳定生成的参数条件。文献[12]研究了微滴喷射化学沉积工艺条件对成形银导线的影响, 文献[13]研究了基于微滴喷射的 3DP 工艺中渗透误

收稿日期: 2023-05-22; 修回日期: 2023-06-30。

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2020302)。

作者简介: 田东兴(1981-), 男, 硕士, 副教授。

引用格式: 田东兴. 喷射式 3D 打印过程微滴沉积位置建模与预测[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(5): 60-65.

差补偿算法, 文献 [14] 对同轴气流作用下压电驱动式微滴喷射行为进行了实验研究, 探索微滴可成形性的参数条件范围, 文献 [15] 对基于微滴喷射 3D 打印的纳米颗粒悬浮墨水稳定喷射进行了研究, 文献 [16] 研究了均匀金属微滴气动按需喷射行为及表面形貌控制方法, 文献 [17] 对微滴喷射工艺参数与液滴形态关系开展了数值模拟研究, 文献 [18] 对同轴气流作用下压电式微滴喷射过程进行了数值模拟, 文献 [19] 研究了压电式微滴按需喷射的过程控制和规律。

总体而言, 现有研究主要考虑了喷射式 3D 打印过程微滴可成形性、单个微滴单元的铺展—沉积动力学特性, 以及打印参数、材料物理参数等对单个微滴沉积动态特性的影响, 但未深入考虑连续微滴之间的相互作用以及相关参数对微滴沉积位置的影响规律, 而实际中微滴沉积位置的准确性是影响微滴 3D 打印形性质量的关键因素之一, 需要通过设置合理的微滴运动参数以及微滴与基板间的相对运动参数才能对微滴沉积位置进行精确控制, 但这些参数在实际中难以在线测量并反馈。针对这一问题, 本文通过理论建模、数值分析与实验, 重点研究各类运动参数对微滴沉积位置的影响规律, 建立微滴沉积位置的预测模型, 为打印过程微滴沉积位置控制提供理论依据和指导。

1 模型设计

微滴最终在基板上沉积后的形貌状态很大程度上取决于微滴和基板的初始状态, 主要是指微滴与基板碰撞瞬间的速度、温度和尺寸大小等, 但微滴碰撞瞬间时刻初始状态与微滴在下落过程中所受的空气阻力和热传等因素的共同影响, 这些影响包括动力学和热力学两方面的共同作用, 因此, 研究微滴打印成形时的状态, 需要考虑微滴热力学和动力学特性。

1.1 微滴凝固模型

在喷射式 3D 打印过程中, 微滴被高频、逐滴喷出, 单个微滴在基板上凝固的连续方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中, u 、 v 和 w 分别为液滴在 x 、 y 和 z 方向的速度。

微滴所受外力可用动量守恒方程描述为:

$$\begin{cases} \frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial (\rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial (\rho u)}{\partial z} = \\ - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + u \frac{\partial (\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial (\rho v)}{\partial z} = \\ - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + u \frac{\partial (\rho w)}{\partial x} + v \frac{\partial (\rho w)}{\partial y} + w \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = \\ - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{cases} \quad (2)$$

微滴在下落过程中仅与空气 (或其他保护介质) 进行热交换, 在沉积凝固过程中, 还与基板 (或前层已打印材料) 间以及同层的前一个已经沉积的相邻微滴间存在热交换, 热交换过程遵守能量守恒定律, 其能量守恒方程为:

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K}{C_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K}{C_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (3)$$

其中: C_p 、 T 、 ρ 分别为微滴的比热容、温度场和密度, K 为微滴与外界间的传热系数, S_T 为微滴材料的潜热, τ 为微滴所受的剪切应力, F_x 、 F_y 、 F_z 分别为微滴运动过程所受的 x 、 y 和 z 方向空气阻力。

1.2 微滴喷射形心轨迹

假设打印过程中, 每层的打印高度 (即喷嘴与沉积面的距离) h 不变, 每打印一层后, 通过基板下降或喷嘴向上移动一定的距离以控制打印层的厚度尺寸, 而在当前层打印过程中, 喷嘴只相对于基板做平面轨迹运动, 则在微滴从喷嘴喷出的瞬时, 在水平方向具有和喷嘴相同的瞬时速度, 在竖直方向以不为零的速度和加速度下落, 上述速度、加速度受喷嘴自身运动速度、微滴密度、尺寸、重力加速度、空气阻力等的影响, 最终将会影响微滴沉积的位置。

由于微滴下落过程中在表面张力的作用下其表面积会趋于最小, 且微滴体积越小, 其表面张力与重力的比就越大, 其形状愈接近球体, 因此可假设微滴在下落过程中的形状近似为球体。该下落过程中微滴的运动可根据牛顿第二定律可描述为:

$$\begin{cases} m \frac{du}{dt} = - \frac{1}{2} \rho_a \frac{\pi d^2}{4} C u^2 \\ m \frac{dw}{dt} = mg - \frac{1}{2} \rho_a \frac{\pi d^2}{4} C w^2 \\ m = \rho \frac{\pi d^3}{6} \end{cases} \quad (4)$$

其中: ρ_a 、 ρ 分别为空气和微滴的密度, m 为微滴质量, d 为微滴直径, C 为空气阻力系数, 据经验公式有^[20]:

$$C = \begin{cases} \frac{24}{Re} & Re \leq 1 \\ \frac{24}{Re^{0.646}} & 1 < Re \leq 400 \\ 0.5 & 400 < Re \leq 3 \times 10^5 \\ 3.66 \times 10^{-4} Re^{0.4275} & 3 \times 10^5 < Re \leq 2 \times 10^6 \\ 0.18 & 2 \times 10^6 < Re \end{cases}$$

Re 为空气雷诺数, 有 $Re = \rho_a w d / \mu_a$, μ_a 为空气粘度, 经计算当微滴下落速度的范围为 0.8~1.8 m/s、且微滴直径的范围在 600~1 200 μm 时, 可以得到雷诺数小于 140, 从而根据空气阻力计算经验公式可得空气阻力系数为:

$$C = \frac{24}{Re^{0.646}} \quad (5)$$

由式 (4) 可得任意时刻微滴在沿喷头前进的水平 and 垂直方向运动的加速度分别为:

$$\begin{cases} a_x = -\frac{3}{4} \frac{\rho_a}{\rho d} C u^2 \\ a_z = g - \frac{3}{4} \frac{\rho_a}{\rho d} C w^2 \end{cases} \quad (6)$$

速度分别为:

$$\begin{cases} u = \frac{4d\rho u_0}{3C\rho_a u_0 t + 4d\rho} \\ w = \frac{\left(4\sqrt{\frac{d\rho g}{3C\rho_a}} \omega_0 + \frac{8\rho g}{3C\rho_a}\right) e^{\sqrt{3C\rho_a g/\rho d} t}}{4\sqrt{\frac{d\rho g}{3C\rho_a}} e^{\sqrt{3C\rho_a g/\rho d} t} - \omega_0 - 2\sqrt{\frac{d\rho g}{3C\rho_a}}} - 2\sqrt{\frac{d\rho g}{3C\rho_a}} \end{cases} \quad (7)$$

位移分别为:

$$\begin{cases} S_x = \frac{4d\rho}{3C\rho_a} \ln(3C\rho_a u_0 t + 4d\rho) - \frac{4d\rho}{3C\rho_a} \ln(4d\rho) \\ S_z = \left(\sqrt{\frac{d\rho}{3\rho_a C g}} \omega_0 + \frac{2d\rho}{3\rho_a C}\right) \ln\left(4\sqrt{\frac{\rho g}{3C\rho_a}} e^{\sqrt{3C\rho_a g/\rho d} t} - \omega_0 - 2\sqrt{\frac{d\rho g}{3C\rho_a}}\right) - 2\sqrt{\frac{d\rho g}{3C\rho_a}} t - \left(\sqrt{\frac{d\rho}{3\rho_a C g}} \omega_0 + \frac{2d\rho}{3\rho_a C}\right) \ln\left(2\sqrt{\frac{d\rho g}{3C\rho_a}} - \omega_0\right) \end{cases} \quad (8)$$

其中: a_x, a_z 分别为微滴在水平、垂直方向的加速度; u_0 为微滴被喷出瞬时的水平速度 (与喷嘴当前水平前进瞬时速度相同), ω_0 为微滴喷出时在垂直方向的初始速度; S_x, S_z 为微滴相对于喷射瞬时位置的水平、垂直方向的位移。

1.3 微滴沉积形心轨迹

微滴完成空间下落后至基板上沉积过程中, 受与外界热交换以及空气阻力、前层已沉积材料间接的表面张力作用而逐渐凝固并发生变形, 其轮廓和形心位置发生改变。另一方面, 为了保证为滴沉积的轮廓连续性以获得连续的打印轮廓及致密度, 在打印参数设置时, 需要考虑使前后相邻两个微滴在沉积时保证存在一定的轮廓 (或位置) 重叠, 但该重合度难以准确设置或控制, 这是由于微滴尺寸非常微小, 一般为数微米级, 在合适的参数设置下, 当同一层的后一个打印微滴与相邻的前一个微滴接触时, 前一个微滴已处于凝固或即将完成凝固状态 (否则极难控形, 出现漫流等), 因而, 当后一个微滴以一定位置重合度与前一个微滴碰撞时, 会存在相对滑移, 导致位置误差和重叠区域尺寸与形貌的变化。

由于微滴尺寸极其微小, 可假设前一个已沉积的微滴体积不变, 且为球冠, 如图 1 所示, 设左球冠为前一个已凝固微滴轮廓, 右侧圆为后一个打印微滴与前一个微滴接触瞬时的轮廓, 则前一个微滴与基板碰撞后所得球冠半径与接触角 θ 的关系为:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 = 2R^3 (1 + \cos\theta)^2 - \frac{1}{3} R^3 (1 + \cos\theta)^3 \quad (9)$$

$$R = \left(\frac{4\pi}{(1 + \cos\theta)^2 (5 - \cos\theta)}\right)^{1/3} r \quad (10)$$

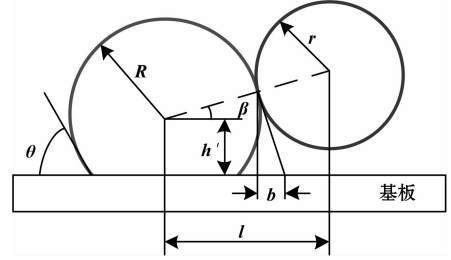


图 1 两个相邻微滴沉积位置关系示意图

其中: R 为前一个微滴在基板上沉积后形成的球冠半径, r 为后一个微滴与球冠接触时的半径。设微滴喷射频率为 f , 则两个微滴的圆心在水平方向的距离为:

$$l = \frac{u_{x1} + u_{x2}}{2} \times \frac{1}{f} + (u_{x2} - u_{x1})t \quad (11)$$

式中, u_{x1} 为第一个微滴的水平初始速度, u_{x2} 为第二个微滴的水平初始速度, 若喷嘴水平匀速运动, 则有 $u_{x1} = u_{x2}$, t 为微滴下落时间, 由 $S_z = h$ 时可以求得。

由动量守恒定理可知, 两个微滴碰撞后, 第二个微滴的速度大小不变, 只是方向改变。此时微滴速度方向沿着碰撞点的切线方向快速滑移。设两微滴中心连线与水平方向的夹角为 β (如图 1 所示), 则此时接触点与基板间的高度距离为:

$$h' = R \sin\beta + R \cos\theta \quad (12)$$

由简单的几何关系, 可求得微滴在速度影响下产生的形心位置偏差为:

$$b = h' \tan\beta \quad (13)$$

其中:

$$\cos\beta = \frac{l}{R + r} \quad (14)$$

两个微滴的重叠宽度为:

$$\delta = \begin{cases} 2R - b - l \left(\theta \leq \frac{\pi}{2}\right) \\ 2R \sin\theta - b - l \left(\theta > \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (15)$$

2 仿真实验

利用 FLOW-3D 有限元软件对微滴下落、沉积动态过程进行数值模拟, 可以跟踪得到每个时间步中微滴的形心坐标, 以表征微滴的实际沉积坐标。为了保证两个微滴之间重合宽度的均匀性, 必须要控制微滴在下落空间的水平位移影响而产生的沉积位移偏差和微滴碰撞后产生的滑移。而微滴的水平位移又与喷嘴水平运动速度、加速度以及喷嘴与基板间距 (影响微滴运动时间) 有关。

数值建模的计算域大小为 $0.04 \text{ m} \times 0.0015 \text{ m} \times 0.003 \text{ m}$, 将整个计算域均匀离散为正六面体网格单元, 单元长度为 $5 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。计算域中, 设置微滴下落时的初始中心到基板的垂直距离 $h = 0.0017 \text{ m}$, 下落初始速度 $u_y = 1 \text{ m/s}$ 、水平运动速度 $u_x = 0.03 \text{ m/s}$ 。仿真所用的材料物理参数如表 1 所示, 以模拟某低熔点合金熔融挤出喷射打印。使用隐式

GMRES 算法作为压力-速度求解器，这是一种精度和效率都较高的算法，适用范围极广，具有较好的收敛性和对称性及求解速度。微滴的粘性力、热传、表面张力、自由表面压力及对流求解器均使用显式算法，该算法简单且相对精确，但是需要限制最大求解时间步长（初始时间步长设置为 10^{-8} s）。利用分离 Lagrangian 算法计算液-气流体的体积对流，此算法在追踪复杂的三维界面变化中具有较高的精度，且累计体积误差较小。为了进一步提高计算精度，利用二阶单调滞点算法计算动量对流。

表 1 打印材料参数

属性	数值
粘性流体密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 200
参考温度 (K)	273.15
流体比热容 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	3 000
基板密度 * 比热 ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$)	5.0×10^6
流体导热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	5
基板导热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	29.7
流体表面张力系数 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.07
液相温度 (K)	303.15
固相温度 (K)	298.15
接触角 ($^\circ$)	90
潜热 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1.0×10^5

图 2 为计算得到的单个微滴与基板接触后不同时刻的三维形貌，可观察到微滴撞击基板后会产生铺展和回缩的震荡现象，这主要因为微滴与基板碰撞后存在惯性，导致内部动能快速释放，其震荡频率和状态与微滴自身动能、微滴所受表面张力、温度、与基板接触面状况以及流体材料粘度有关^[21]，在震荡过程中微滴的温度由中心向外层逐渐降低。

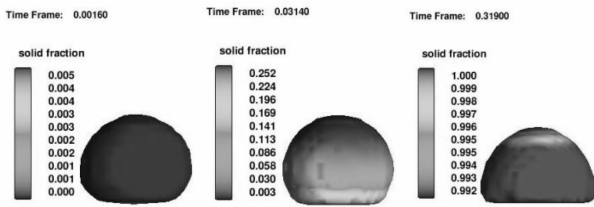


图 2 单个微滴固化仿真图

微滴与基板接触后，微滴和基板之间会通过热传递进行热量交换，同时，还会与空气间进行热对流而损失热量，进而快速凝固，但微滴与基板之间的传热速度比微滴与空气之间的传热速度明显快得多，因而，为了控制微滴的凝固速度，应合理选择基板材质和温度。随着热交换进行，微滴的温度快速降低，当微滴温度低于熔点时开始凝固，凝固顺序由底部（接触面）向上延伸。

在 $t = 1.6$ ms 时，第一个微滴与基板接触，而且接触部位开始凝固，其形心水平位置为 0.443 mm。在微滴接触基板后，形心的位置仍然在发生微小变化，这是由于微滴受其

初速度的影响，液滴内部因惯性存在运动，随着微滴的固化，微滴内部运动逐渐停止，形心位置开始稳定不变，直至在 $t = 0.32$ s 时微滴完全凝固，形心位置不变，直径 $d = 0.5$ mm。

以频率为 3 Hz 对应的时间间隔对第二个微滴进行打印，如图 3 所示，第二个微滴开始下落时的形心位置为 $x = 0.79$ mm，此时第一个微滴已经完全凝固，形心坐标为 $x = 0.445$ mm，在 $t = 0.328$ s 时，第二个微滴与第一个微滴碰撞，此时第二个微滴的形心坐标为 $x = 0.828$ mm，与初始位置有一定的偏差，这是由于受微滴初始水平速度的影响，且由于第二个微滴还处于液体状态，与第一个微滴碰撞时会与第一个微滴之间存在相对滑移，最终会沿着第一个微滴轮廓滑落到基板上。正是由于第二个微滴在极短会沿着第一微滴的球面运动，使其沉积位置不能简单地按照无接触运动方式进行计算和估计，仿真结果表明，在 $t = 0.328$ s 时，第二滴的形心坐标为 $x = 0.834$ mm。在 $t = 0.567$ s 时，第二个微滴完全固化，其形心坐标为 $x = 0.844$ mm，此时两微滴之间的形心间距为 $x = 0.401$ mm。所绘制的两个微滴从喷出瞬时至完全凝固的动态形心位置曲线图如图 4 所示。

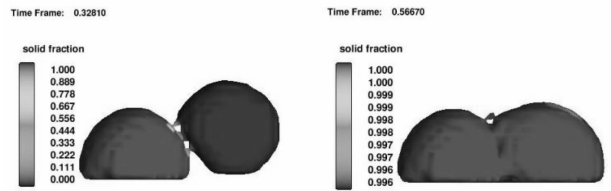


图 3 第二滴微滴沉积后的状态图

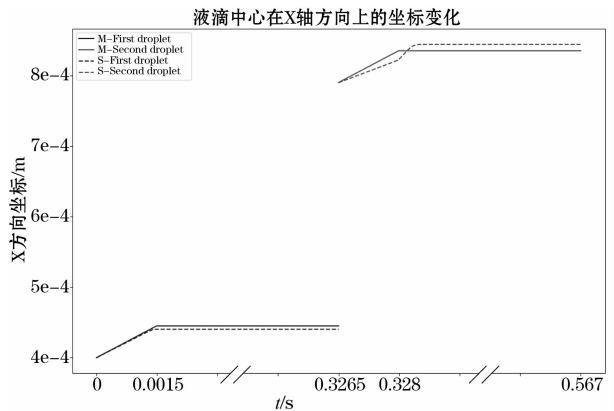


图 4 液滴形心在 X 轴方向上的坐标变化

由计算仿真所给的材料参数，代入上述所推导的理论模型进行验证，并同样绘制计算所得到的微滴形心坐标曲线便于与数值仿真结果进行比较（图 4），计算结果表明：单个微滴沉积后的直径为 $d = 0.54$ mm，且第一滴的沉积位置为 $x = 0.445$ mm，相对于仿真计算的位置误差为 0.002 mm，相对误差为 0.45%；第二个微滴的沉积位置为 $x = 0.848$ mm，

相对于仿真计算的位置误差为 0.04 mm，相对误差为 0.47%；两个微滴之间的形心间距为 $x=0.403$ mm，相对于仿真计算的误差为 0.002 mm，相对误差为 0.5%。理论建模结果与仿真结果相吻合，表明理论模型具有足够高的预测精度，可以作为微滴喷射 3D 打印过程中微滴沉积位置预测控制时的参考。

需要指出的是：第一个微滴在下落阶段形心坐标仿真结果与模型计算结果几乎完全吻合，但在基板上沉积凝固阶段（0.001 6 秒后），模型计算值稍大于数值仿真结果，这是由于在计算模型中，未能考虑微滴与基板接触后，微滴在水平方向因运动惯性使其位置变化的结果，导致计算出的结果相对喷出时的瞬时位置在水平方向的距离“更远”。另一方面，第二个微滴与前一个相邻微滴接触后，根据模型计算的形心坐标快速小于数值仿真的坐标，这是由于如前所述的第二个微滴在第一个微滴外表面产生相对滑动、使第二个微滴形心快速“向前”运动造成的。故以上分析结果与实际情况相吻合。

为不失一般性，进一步研究打印直线轮廓时喷头水平运动速度和加速度对微滴位置的综合影响。以下以对直径为 $400\ \mu\text{m}$ 的微滴进行变速连续堆积过程进行数值模拟。首先考虑在喷嘴水平初速度为 0.02 m/s 情况下，按打印各个微滴时喷嘴运动加速度分别为 $0.5\ \text{m/s}^2$ 、 $1\ \text{m/s}^2$ 、 $1.5\ \text{m/s}^2$ 进行打印，讨论在初始速度一定的情况下喷嘴水平运动加速度对微滴沉积位置的影响。然后分别设置喷嘴水平运动初速度为 0.025 m/s、0.03 m/s，重复上述 3 种加速度情况下的打印过程。比较 3 种喷头水平运动速度情况下，不同加速度对微滴连续沉积成形时微滴沉积位置的影响。为降低计算量，每种情况仅仿真连续打印 6 个微滴构成直线轨迹，并通过 python 和 openCV 软件编写图像处理程序，提取连续沉积的微滴轮廓曲线（俯视图），结果分别如图 5~7 所示。

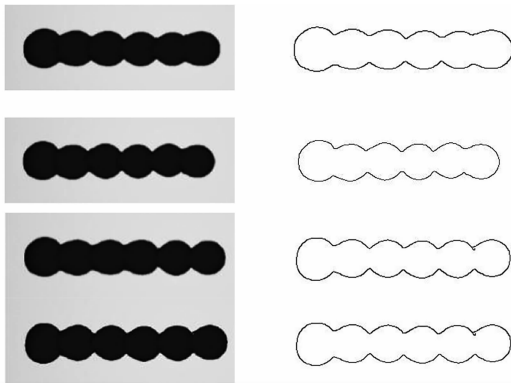


图 5 不同加速度下 $v=0.02\ \text{m/s}$ 连续打印仿真图

由图 5 可以发现初速度一定时，加速度越大，导致微滴间距变大，从而使得微滴堆积成直线时重叠宽度尺寸 δ 相对变小；同时可以看出，每种打印情况下，第一个微滴沉积后的轮廓尺寸比其他微滴稍大，而其他 5 个微滴的沉积尺寸相对一致，这是由于第一个微滴在震荡一沉积过程中

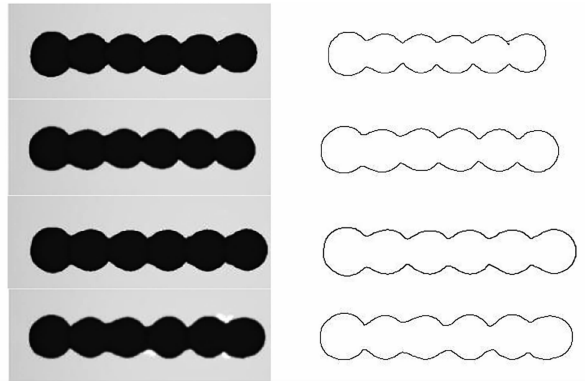


图 6 不同加速度下 $v=0.025\ \text{m/s}$ 连续打印仿真图

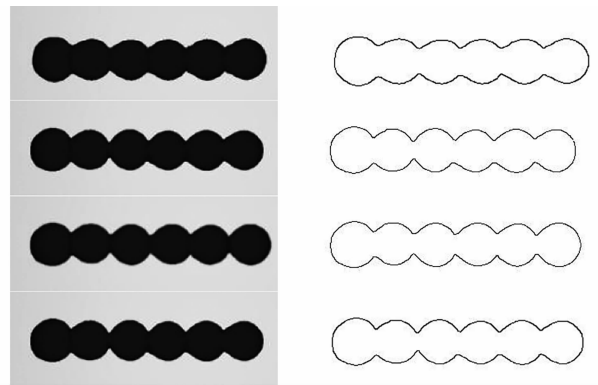


图 7 不同加速度下 $v=0.03\ \text{m/s}$ 连续打印仿真图

仅与基板和空气接触，不受相邻微滴作用力约束，导致其铺展空间增大的缘故。将图 5~7 进行横向比较时，发现在相同加速度的情况下，初速度越小，微滴堆积成直线时重叠宽度尺寸 δ 相对越大。这是由于微滴速度和加速度间间接改变微滴间距，最终造成微滴重合宽度的改变。

综合图 5~7 整体比较可知，当打印频率越低，即喷嘴运动的速度和加速度越小，打印直线轮廓时微滴的重合度会越大，但形成的直线轨迹轮廓会更平顺，形貌精度更高，但损失了打印效率；反之，当高频打印时，微滴间的重合率降低，轮廓波动幅度增大，轨迹连续性和轮廓精有所降低；当频率大于一定值时，打印轨迹将不连续，形成离散点。以上仿真结果表明，喷头运动速度、加速度对打印时微滴沉积位置以及微滴间的相互位置关系存在显著影响，并将进一步影响打印的整体轮廓尺寸与形貌。

3 实验验证

为了进一步分析微滴沉积铺展规律，采用气压驱动微滴喷射式 3D 打印平台进行实验验证，选择按需式可控喷射验证微滴碰撞沉积的动态过程。实验以低熔点铅锡合金为打印材料，其熔点为 $115\ ^\circ\text{C}$ ，采用陶瓷喷嘴，并通过电加热控制喷嘴内温度为 $120\ ^\circ\text{C}$ ；控制基板和环境温度为 $22\ ^\circ\text{C}$ ，因而可使微滴在基板上快速凝固；所采用的驱动脉冲气压幅值为 $0.1\ \text{MPa}$ ，脉动频率为 $6\ \text{Hz}$ ，采用内径为 $0.4\ \text{mm}$ 的喷嘴，喷嘴离基板高度为 $7\ \text{mm}$ ，水平运动速度为 $0.5\ \text{mm/}$

s, 利用帧频为 2 000 Hz 的高速摄像机对微滴下落和沉积过程图像进行水平拍摄, 并采用 LED 柔光伞补光以降低金属微滴反光的影响, 并突出微滴轮廓。选择拍摄的部分图像展示如图 8 所示。

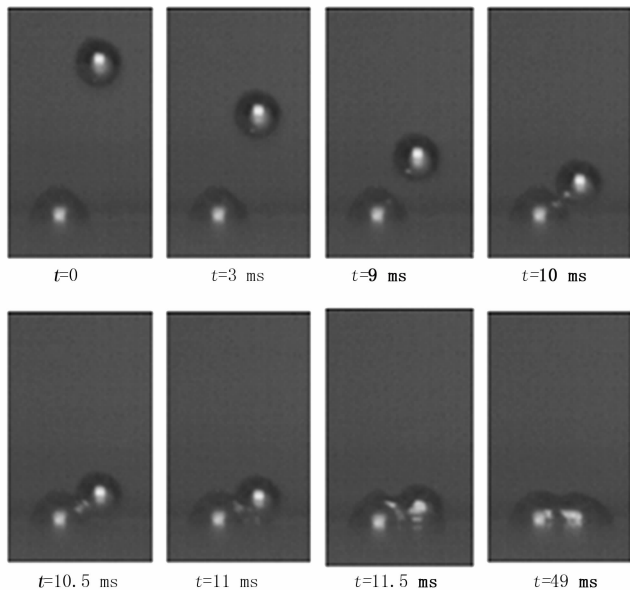


图 8 两个微滴连续沉积实验

由图 8 可以看出, 在单位时间内, 微滴下落的高度在逐渐增加, 这主要是由于重力加速度的影响, 并且在两微滴碰撞接触后, 例如 $t=10$ ms 时, 后一个微滴与前一个微滴接触, 由于受到前一个固化微滴的阻碍和水平速度的影响, 新的微滴震荡的方向, 不再是纯粹的上下震荡, 而是沿着与第一个微滴的接触面切线方向快速滑移并震荡, 使其铺展方向偏向右侧, 这也是导致微滴间距变大的原因。相邻沉积的微滴的表面形态存在差异, 这是因为前一个微滴在基板上沉积时, 不受其他周围障碍的影响, 属于自由沉积, 而后沉积的微滴会受到前一个微滴的影响, 例如与前一个微滴接触面的状况、前一个微滴实际固化程度、当前温度等, 导致其微滴间的结合曲面形状及质量并不是单一平顺的, 而是由许多因素共同控制的。

4 结束语

通过对微滴喷射 3D 打印过程中微滴热力学与运动学分析, 建立了微滴沉积位置预测理论模型, 并通过数值仿真进行了验证, 结果表明, 所建理论模型对单个微滴沉积位置及相邻两个微滴重叠沉积的位置关系均有较高的预测精度, 可以作为微滴喷射 3D 打印过程微滴沉积位置及打印轨迹控制的参考, 提高 3D 打印构件的形貌精度。

参考文献:

- [1] 高琛, 黄孙祥, 陈雷, 等. 液滴喷射技术的应用进展 [J]. 无机材料学报, 2004, 19 (4): 714-722.
- [2] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造 (3D 打印) 技术发展 [J]. 机械制

造与自动化, 2013, 42 (4): 1-4.

- [3] 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 (中文版), 2015, 45 (2): 212-223.
- [4] 曾祥辉, 齐乐华, 蒋小珊, 等. 金属熔滴与基板碰撞变形的数值模拟 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43 (3): 70-74.
- [5] 张丹, 肖渊, 申松. 微滴喷射碰撞沉积形态的数值模拟与分析 [J]. 西安工程大学学报, 2016, 30 (1): 112-117.
- [6] 李素丽, 刘伟. 基于传热凝固模型金属熔体滴落、铺展温度变化分析 [J]. 材料导报, 2014, 28 (18): 144-148.
- [7] 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 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42 (8): 1596-1600.
- [8] 陈从平, 胡琼, 吕添, 等. 微滴喷射 3D 打印尺寸建模与数值模拟 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2018, 40 (3): 84-87.
- [9] 薛松龄, 柴宝华, 王泽鸣, 等. 均匀液滴喷射性能的实验研究 [J]. 核科学与工程, 2021, 41 (5): 1042-1046.
- [10] CHEN S, WANG H, SHEN S Q, et al. The drop oscillation model and the comparison with the numerical simulations [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62 (20): 204702.
- [11] 刘赵森, 钟希祥, 杨刚, 等. 气动式微滴喷射中液滴稳定生成的动力学特性研究 [J]. 机械工程学报, 2020, 56 (23): 203-211.
- [12] 肖渊, 尹博, 李岚馨, 等. 微滴喷射化学沉积工艺条件对成形银导线的影响 [J]. 纺织学报, 2019, 40 (5): 78-83.
- [13] 杨伟东, 高翔宇, 刘卫胜, 等. 基于微滴喷射的 3DP 工艺中渗透误差补偿算法 [J]. 机械工程学报, 2021, 57 (21): 269-278.
- [14] 周健, 裴泽光. 同轴气流作用下压电驱动式微滴喷射行为的实验研究 [J]. 上海交通大学学报, 2020, 54 (2): 200-210.
- [15] 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, (9): 243-251.
- [16] 钟宋义. 均匀金属微滴气动按需喷射行为及表面形貌控制研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- [17] 高翔宇, 杨伟东, 王媛媛, 等. 微滴喷射工艺参数与液滴形态关系的数值模拟 [J]. 机械科学与技术, 2021, 40 (3): 475-480.
- [18] 刘作平. 同轴气流作用下压电式微滴喷射过程的数值模拟 [J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2021 (4): 75-83.
- [19] 刘赵森, 徐元迪, 逢燕, 等. 压电式微滴按需喷射的过程控制和规律 [J]. 力学学报, 2019, 51 (4): 1031-1042.
- [20] LIU H, RANGEL R H, LAVERNIE E J. Modeling of drop-let-gas interactions in spray atomization of Ta-2.5W alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 1995, 191 (1-2): 171-184.
- [21] 于佳田. 微滴喷射中液滴成形和沉积的研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018.