

# 压电喷墨液滴撞击光滑壁面铺展行为的数值研究

武秋敏, 马依礼, 李飒, 朱慧敏

(西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 西安 710048)

**摘要:** **目的** 研究典型流体相关无量纲参数对墨滴在光滑承印物表面铺展行为的影响, 确定各无量纲参数对铺展直径、铺展因子和稳定铺展时间的影响规律。**方法** 利用 Ansys 软件, 建立墨滴撞击光滑壁面的数值计算模型, 采用 VOF 模型追踪液滴形状, 采用 PISO 算法计算压力速度耦合。引入韦伯数、雷诺数、奥内佐格数来分析墨滴撞击光滑承印物表面的铺展行为。**结果** 计算获得不同韦伯数、雷诺数、奥内佐格数下墨滴的最大铺展直径、最终平衡铺展直径、最大铺展因子和最终铺展时间。**结论** 韦伯数和雷诺数对墨滴最大铺展直径的影响较大, 对最终平衡直径的影响较小。韦伯数或雷诺数越小, 回缩阶段越短, 越快达到平衡。韦伯数、雷诺数与最大铺展因子呈明显正相关。奥内佐格数对墨滴的最大铺展直径、最终平衡直径的影响都较小。奥内佐格数越小, 回缩阶段越短, 越快达到平衡, 奥内佐格数与液滴最大铺展因子呈不明显的正相关性。

**关键词:** 喷墨印刷; 液滴铺展; 铺展因子; 液滴撞击

**中图分类号:** TS853.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)03-0186-07

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.03.021

## Numerical Study of the Spreading Behavior of Piezoelectric Inkjet Droplets Impacting a Smooth Wall

WU Qiumin, MA Yili, LI Sa, ZHU Huimin

(Faculty of Printing, Packing and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the effect of typical fluid related dimensionless parameters on the spreading behavior of ink droplets on a smooth substrate surface, and determine the effect law of each dimensionless parameter on the spreading diameter, spreading factor, and stable spreading time. Ansys software was used to establish a numerical calculation model for ink droplet impacting a smooth wall. The VOF model was used to track the droplet shape, and the PISO algorithm was used to calculate the pressure velocity coupling. Weber number, Reynolds number and Ohnesorge number were introduced to analyze the spreading behavior of ink droplets impacting the smooth substrate surface. The maximum spreading diameter, final equilibrium spreading diameter, maximum spreading factor and final spreading time of ink droplets under different Weber numbers, Reynolds number points and Ohnesorge numbers were calculated. Weber number and Reynolds number have a greater impact on the maximum spreading diameter of ink droplets, and have a smaller impact on the final equilibrium diameter. The smaller the Weber number or Reynolds number is, the shorter the retraction stage is, and the faster the equilibrium reaches. Weber number and Reynolds number are positively correlated with the maximum spreading factor. Ohnesorge number has little effect on the maximum spreading diameter and final equilibrium diameter of ink droplets. The smaller the Ohnesorge number is, the shorter the retraction stage is, and the faster the equilibrium reaches. There is a slight positive correlation between the Ohnesorge number and

收稿日期: 2023-05-31

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2022JZ-30); 陕西省教育厅重点科学研究计划(20JY054); 国家自然科学基金(52075435)

the maximum droplet spreading factor.

**KEY WORDS:** inkjet printing; droplet spreading; spreading factor; droplet impact

喷墨印刷是现代数字印刷的主要技术<sup>[1]</sup>, 是一种非接触式印刷技术, 有着承印物范围广、绿色、环保、能满足个性化印刷等优点。墨滴喷射至光滑承印材料表面后, 在动能的驱动下不断铺展, 达到平衡后形成印刷记录点, 其铺展行为特性直接决定印刷品的质量。研究喷墨液滴在光滑承印物表面的动态铺展行为, 获得典型流体相关无量纲参数对墨滴在光滑承印物表面铺展行为的影响规律, 对于提高喷墨印刷品的质量具有重要意义。

## 1 压电喷墨及液滴铺展研究现状

压电式喷墨是喷墨印刷的一种方式, 其工作原理是利用压电装置, 在喷墨信号 (一般为驱动电压) 的控制下, 驱动器使得压电晶体产生机械变形, 从而挤压墨水腔室, 导致墨水腔室的体积发生变化。在腔室变形所产生的压力下, 墨滴喷射出喷嘴孔。喷出墨水的前端体积不断增大, 形成球型, 后端形成拖尾状, 前端速度较大, 后端速度较小, 从而形成长条形小液柱<sup>[2]</sup>。小液柱断裂后在空气中自由下落, 在墨水黏度和表面张力的作用下形成墨滴<sup>[3]</sup>, 如图 1 所示。墨滴以一定速度撞击承印物, 动能和表面自由能经过复杂的转化, 使得墨滴形态不断变化, 最终形成稳定的墨点。

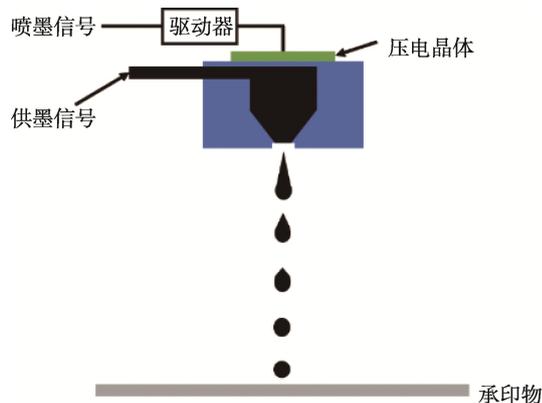


图 1 压电喷墨原理

Fig.1 Schematic diagram of piezoelectric inkjet

液滴在固体表面的撞击铺展是气液固三相变化的一个十分复杂的过程。学者们基于理论、实验、仿真研究了液滴在壁面的动力学行为。Chow<sup>[4]</sup>通过实验研究了微液滴在壁面的撞击铺展及沉积过程, 并将最大铺展因子扩展到对球面的研究。Park 等<sup>[5]</sup>通过实验和理论研究了室温下单液滴撞击光滑表面的扩散和回缩现象, 基于能量平衡理论建立模型, 预测低速下液滴撞击的最大伸展比。Laan 等<sup>[6]</sup>研究了不同黏度的普通液滴和具有剪切稀释特性的复杂液滴 (血液) 撞

击壁面时, 撞击速度和撞击角度对液滴最大铺展直径的影响。刘春格等<sup>[7]</sup>借助 Fluent 软件, 仿真研究了墨滴喷射速度、墨滴大小、墨水黏度、墨滴与基板的接触角等因素对碰撞铺展的影响。夏江龙等<sup>[8]</sup>通过实验研究了不同黏性液滴以不同速度撞击疏液表面的撞击现象及过程, 揭示了液滴黏度、撞击速度对液滴铺展、回缩、回弹及飞溅的影响。Wijshoff<sup>[9]</sup>通过实验, 研究了喷墨印刷液滴的形成, 以及液滴撞击铺展过程中液滴的动力过程。Guo 等<sup>[10]</sup>基于改进的 MPS 方法, 采用黏度模型、压力方程、压力梯度模型和改进的边界条件, 对早期液滴扩散铺展行为进行了数值研究, 并为预测早期液滴扩散铺展提供了有效的模型。García-Geijo 等<sup>[11]</sup>通过实验和理论研究了液滴垂直撞击壁面的铺展机制, 预测在低黏度下, 液滴撞击铺展在光滑干燥表面上的时变流场和液膜厚度。樊瑞瑞等<sup>[12]</sup>研究了微液滴撞击平面基底的铺展行为, 表明墨滴的铺展行为对喷墨网点大小、印刷成像质量具有重要影响。

为了更清楚地研究喷墨液滴在光滑承印物表面的铺展行为, 文中利用 Ansys 软件, 建立墨滴撞击光滑壁面的数值计算模型, 采用 VOF 模型追踪液滴形状, 采用 PISO 算法计算压力速度耦合。引入韦伯数、雷诺数、奥内佐格数等无量纲参数来分析墨滴撞击光滑承印物表面的铺展行为, 计算并获得不同韦伯数、雷诺数、奥内佐格数下墨滴的最大铺展直径、平衡铺展直径、最大铺展因子及最终铺展时间, 为提高喷墨印刷品质量提供理论参考。

## 2 墨滴铺展模型的建立及铺展特性分析

### 2.1 墨滴铺展模型的建立

基于 Ansys Geometry 建立了计算域为  $0.4 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$  的几何模型, 在 Mesh 中用正方形网格进行网格划分, 建立了墨滴撞击光滑壁面铺展的二维物理模型, 如图 2 所示。将初始墨滴定义为圆形, 处于空气介质中, 空气介质两侧及上边界为压力入口边界, 底部为光滑无滑移壁面。



图 2 墨滴撞击壁面的物理模型

Fig.2 Physical model of ink droplets impacting the wall

喷墨液滴体积的单位为 pL，常见液滴的体积范围为 5~400 pL。引入液滴体积  $V$  与液滴直径  $D_0$  之间的换算关系，见式 (1) [13]。

$$D_0 = \left( \frac{6V}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \approx 1.24V^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

通过计算得知，液滴直径  $D_0$  为 0.02~0.09 mm，选取初始直径为 0.04 mm 的墨滴进行仿真。采用基于欧拉系统的体积跟踪方法 VOF (Volume of fluid) 对两相界面进行跟踪。在 VOF 模型中，引入指定函数  $C$ ，该函数表示计算单元中液相所占的体积分数。通过计算，所选择油墨的雷诺数  $Re < 2000$ ，因此选取层流模型进行流动计算。对于液滴撞击类型的瞬态问题，带有邻域校正的 PISO 算法具有明显优势，其计算效率和收敛速度都相对较好，因此采用 PISO (Pressure implicit split operator) 算法进行压力速度耦合。经初始化后，通过 Patch 设定液滴初始速度和体积分数 (设定为 1)，其他条件为 fluent 默认设置。文中设定的墨滴初始属性及具体参数如表 1 所示。

表 1 仿真计算参数

Tab.1 Parameters of simulation calculation

液滴	密度 $\rho$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏度 $\mu$ ( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	表面张力系数 $\gamma$ ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ )	直径 $D_0$ mm	接触角/(°)
墨滴	1 000	5.0	$5 \times 10^{-2}$	0.04	45

喷墨印刷过程的限制条件如图 3 所示 [14]，从雷诺数和奥内佐格数的限制范围可以看出，在喷墨印刷中雷诺数过小，驱动力不够强，液滴难以从喷嘴喷出；雷诺数过大，则液滴动能过大，撞击承印物后会产生飞溅，严重影响印刷质量 (墨滴喷出的足够动能标准及墨滴飞溅标准详见参考文献 [15])；奥内佐格数过大 ( $>1$ )，则墨水黏性过大，导致喷墨困难；奥内佐格数过小 ( $<1$ ) 会形成不稳定的墨丝，还可能在液滴撞击壁面后分裂形成 2 个墨点，这种断裂铺展现象会引起

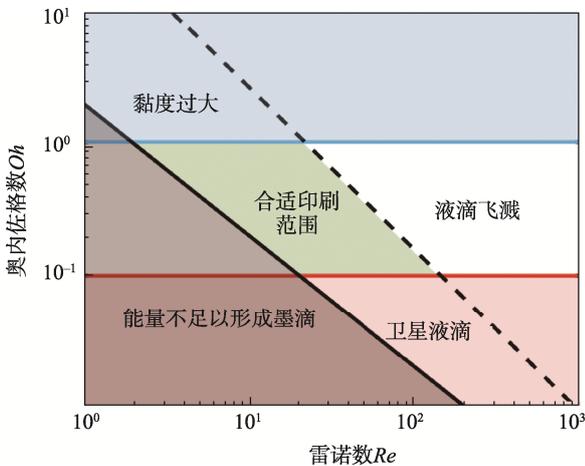


图 3 喷墨印刷限制条件  
Fig.3 Limitations of inkjet printing

承印物表面的墨膜层质地不均匀，严重影响印品质量，在印刷过程中应尽量避免此类现象的发生。

## 2.2 墨滴在承印物表面的撞击及铺展特性分析

撞击是液滴铺展的开始，铺展将伴随撞击承印物后的每个阶段。在撞击过程中，液滴的动能逐渐转化为黏性耗散功和液滴表面能 (随着液滴表面积的增加而增加)。液滴的撞击过程可以分为 4 个阶段：运动阶段、铺展阶段、弛豫阶段、平衡阶段。

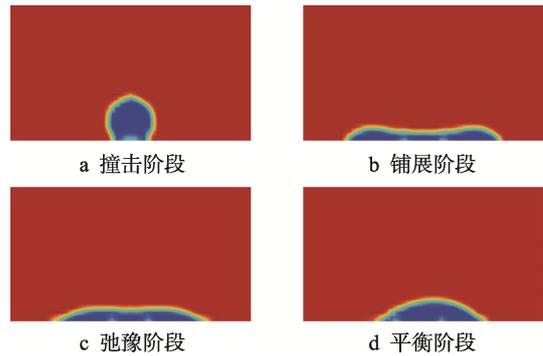


图 4 墨滴运动形态  
Fig.4 Ink droplet movement pattern diagram

1) 运动阶段。液滴与接触面发生碰撞，液滴的大部分区域保持原来的球体形状，持续时间一般为几微秒。直到接触半径等于液滴原始半径时，这阶段的惯性力起着主导作用，表面张力和黏性力的作用较小，如图 4a 所示。

2) 铺展阶段。以惯性力为铺展动力，在表面张力和黏性力为铺展阻力的共同作用下，液滴开始变形，在接触面的铺展半径快速增大，液滴的动能被消耗完毕，直到液膜铺展到最大，如图 4b 所示。

3) 弛豫阶段。液滴铺展到最大铺展半径，由于表面张力会出现“回缩”现象，由能量最低原理可知，液滴将发生回缩并趋于平衡，直到液滴回缩到最大程度，如图 4c 所示。

4) 平衡阶段。液膜在反复伸缩、振荡过程中伴随着能量的耗散，使得液滴的动能和势能不断衰减，直到达到最终的平衡状态，如图 4d 所示。

## 3 数值计算结果分析

为了描述液滴碰撞到承印物后的铺展行为，通常定义铺展因子为式 (2)。

$$\beta = D_{\max} / D_0 \quad (2)$$

式中： $D_{\max}$  为液滴碰壁后的最大铺展直径； $D_0$  为液滴的初始直径。液滴的最大铺展直径非常重要，它是研究墨滴扩散铺展过程的初始条件。液滴以不同速度撞击承印物时，可能发生反弹、沉积、飞溅等 3 种现象。引入 Sommerfeld 参数  $K$  来判断这 3 种现象，

见式 (3)。

$$K = \sqrt{We} \sqrt{Re} \quad (3)$$

研究表明, 当  $K < 3$  时, 液滴发生反弹; 在  $3 < K < 57.7$  时, 液滴形成沉积; 在  $K > 57.7$  时, 液滴发生飞溅。在喷墨印刷中, 为了保证印刷质量, 需取  $K$  的范围为  $3 \sim 57.7$ , 即喷墨印刷中需要墨滴形成沉积态。这里引入韦伯数、雷诺数、奥内佐格数等无量纲参数来更清晰地研究液滴直径、撞击速度、流体黏度、表面张力对液滴铺展行为的影响。

### 3.1 韦伯数对液滴铺展的影响

韦伯数  $We$  表示液滴的惯性力与表面张力的比例关系, 定量描述了铺展的驱动力, 表达式见式 (4)。

$$We = \rho D_0 V_0^2 / \gamma \quad (4)$$

式中:  $V_0$  为液滴撞击 (接触) 固体表面瞬间的质心速度;  $\rho$  为液滴密度;  $\gamma$  为表面张力。撞击速度越大, 则撞击过程中的能量作用更强。在墨滴密度、直径、表面张力确定的情况下, 韦伯数主要受到撞击速度的影响。仿真研究了撞击速度分别为 6、8、10 m/s, 韦伯数分别为 28.8、51.2、80.0, Sommerfeld 参数  $K$  分别为 14.1、20.2、26.8 (在  $3 < K < 57.7$  时形成沉积态) 时墨滴形状随时间的演化过程, 如图 5 所示。

由图 5 可知, 墨滴以一定速度撞击光滑壁面后, 在壁面经历了运动、铺展、弛豫、平衡等 4 个阶段, 最终在表面形成稳定的墨点。随着韦伯数的增大, 液滴的初始动能增大, 液滴撞击壁面的初始动能转化为横向铺展的动能增大, 液滴横向铺展越明显。在同一时刻, 液滴铺展直径随着韦伯数的增大而增大。

液滴铺展直径随韦伯数的变化曲线如图 6a 所示, 液滴铺展因子随韦伯数的变化曲线如图 6b 所示。由变化曲线可知, 随着速度的增大, 韦伯数增大, 最大铺展直径增大, 液滴铺展因子增大。在撞击铺展阶段, 液滴铺展直径随着韦伯数的增大而增大, 在回缩铺展 (即弛豫阶段) 液滴直径不断减小, 且随着韦伯数的增大, 液滴回缩铺展时间越长, 达到平衡状态的时间越长。当  $We=28.8$  时, 液滴的最大铺展直径为 0.151 8 mm, 最大铺展因子为 3.795, 液滴达到最大铺展直径的时间为 50  $\mu\text{s}$ , 稳定铺展的时间为 520  $\mu\text{s}$ 。当  $We=51.2$  时, 液滴最大铺展直径为 0.171 7 mm, 最大铺展因子为 4.293, 液滴达到最大铺展直径的时间为 40  $\mu\text{s}$ , 稳定铺展的时间为 590  $\mu\text{s}$ 。当  $We=80.0$  时, 液滴的最大铺展直径为 0.189 8 mm, 最大铺展因子为 4.745, 液滴达到最大铺展直径的时间为 30  $\mu\text{s}$ , 稳定铺展的时间为 660  $\mu\text{s}$ 。

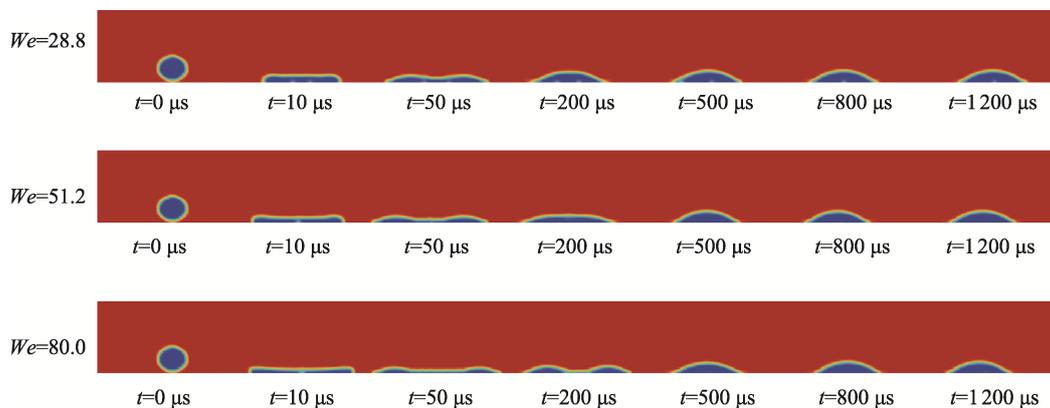


图 5 不同韦伯数下墨滴形状随时间的演化过程

Fig.5 Evolution of ink droplets shapes over time under different Weber numbers

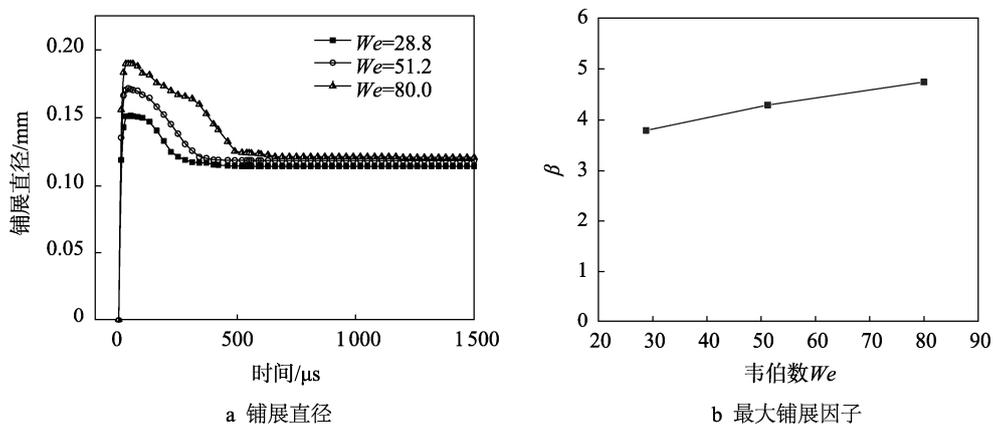


图 6 液滴铺展直径和铺展因子与韦伯数的关系

Fig.6 Droplet spreading diameter and spreading factor versus Weber number

从图 6a 中不难发现,当韦伯数分别为 28.8、51.2、80.0 时,液滴最终达到平衡状态的铺展直径分别为 0.114 5、0.118 7、0.120 9 mm,差距较明显;液滴的最大铺展直径分别为 0.151 8、0.171 7、0.189 8 mm,存在明显差距。由此可见,对于直径为 0.04 mm 的墨滴,韦伯数对液滴最大铺展直径的影响较大,对最终平衡铺展直径的影响次之。

### 3.2 雷诺数对液滴铺展的影响

雷诺数表示铺展过程中惯性力与黏性阻力的关系,其大小决定了黏性流体的流动特性,表达式见式(5)。

$$Re = \rho D_0 V_0 / \mu \tag{5}$$

式中:  $\mu$  为流体黏度。仿真研究了密度、半径及撞击速度相同,流体黏度分别为 4、6、8 mPa·s,雷诺数分别为 80、53、40, Sommerfeld 参数  $K$  分别为 22.1、20.8、19.8 时,液滴撞击光滑壁面的铺展行为,墨滴形状随时间演化的过程如图 7 所示。

如图 7 所示,墨滴在动能的驱动下撞击光滑壁面,在同一时刻,液滴铺展直径随着雷诺数的增大而增大。液滴铺展直径随雷诺数的变化曲线如图 8a

所示。液滴铺展因子随雷诺数的变化曲线如图 8b 所示。由变化曲线可知,随着雷诺数的增加,最大铺展直径增大,液滴铺展因子增大。在撞击铺展阶段,液滴铺展直径随着雷诺数的增大而增大,在回缩铺展阶段液滴直径不断减小,并且随着雷诺数的增大,液滴回缩铺展的时间越长,达到平衡状态的时间越长。

当  $Re=40$  时,液滴的最大铺展直径为 0.143 6 mm,最大铺展因子为 3.590,液滴达到最大铺展直径的时间为 30  $\mu$ s,稳定铺展的时间为 400  $\mu$ s。当  $Re=53.3$  时,液滴最大铺展直径为 0.159 4 mm,最大铺展因子为 3.985,液滴达到最大铺展直径的时间为 30  $\mu$ s,稳定铺展的时间为 460  $\mu$ s。当  $Re=80$  时,液滴的最大铺展直径为 0.185 7 mm,最大铺展因子为 4.643,液滴达到最大铺展直径的时间为 40  $\mu$ s,稳定铺展的时间为 550  $\mu$ s。值得注意的是,当雷诺数为 80 时,仿真计算中液滴的最终铺展直径最小,与理论上铺展直径随着雷诺数的增大而增大存在个别算例的差异。最终铺展直径整体的变化趋势与理论相同,即随着雷诺数的增大,液滴平衡铺展直径增大。

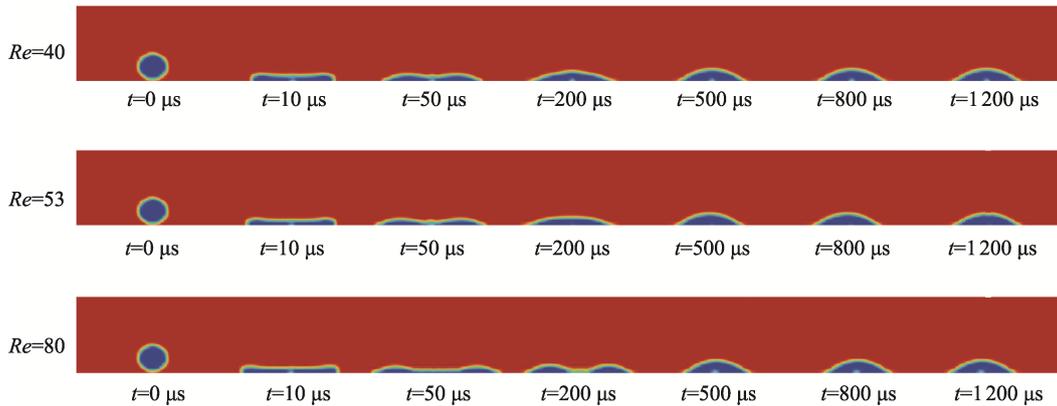


图 7 不同雷诺数下墨滴形状随时间演化过程  
Fig.7 Evolution of ink droplets shapes over time under different Reynolds numbers

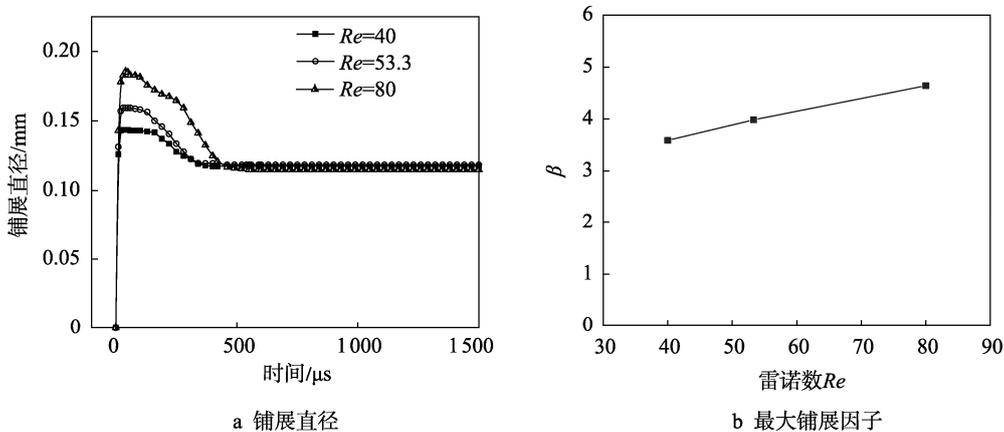


图 8 液滴铺展直径、铺展因子与雷诺数的关系  
Fig.8 Droplet spreading diameter and spreading factor versus Reynolds number

由图 8 a 可知, 当雷诺数分别为 40、53.3、80 时, 液滴最终达到平衡状态的铺展直径分别为 0.117 4、0.118 5、0.115 mm, 差距很小; 液滴最大铺展直径分别为 0.143 6、0.159 4、0.185 7 mm, 存在明显差距。与韦伯数对液滴铺展直径的影响类似, 对于直径为 0.04 mm 的墨滴, 与液滴稳定铺展直径相比, 雷诺数对液滴铺展过程中最大铺展直径的影响较大。

### 3.3 奥内佐格数对液滴铺展的影响

奥内佐格数表示液体黏性与流体效应的比例关系, 描述了铺展的阻力, 表达式见式 (6)。

$$Oh = \sqrt{We}/Re = \mu/\sqrt{\rho D_0 \sigma} \quad (6)$$

式中:  $\sigma$  为表面张力系数。仿真研究了密度、半径及流体黏度相同, 表面张力分别为  $3.5 \times 10^{-2}$ 、 $4.5 \times 10^{-2}$ 、 $5.5 \times 10^{-2}$  N/m, 奥内佐格数分别为 0.107、0.118、0.134, Sommerfeld 参数  $K$  分别为 19.3、21.3、24.2 时, 液滴撞击光滑壁面的铺展行为。墨滴形状随时间的演化过程如图 9 所示。

如图 9 所示, 墨滴在动能的驱动下撞击光滑壁面, 在同一时刻, 随着奥内佐格数的增大, 液滴最大铺展直径增大。液滴铺展直径随奥内佐格数的变化曲

线如图 10a 所示, 液滴铺展因子随奥内佐格数的变化曲线如图 10b 所示。由变化曲线可知, 奥内佐格数越大, 液滴的最大铺展直径越大。在回缩铺展阶段, 随着奥内佐格数的增大, 液滴回缩铺展的时间越长, 达到平衡状态的时间越久。

当  $Oh=0.107$  时, 液滴的最大铺展直径为 0.167 6 mm, 最大铺展因子为 4.19, 液滴达到最大铺展直径的时间为  $30 \mu s$ , 稳定铺展的时间为  $340 \mu s$ 。当  $Oh=0.118$  时, 液滴最大铺展直径为 0.173 4 mm, 最大铺展因子为 4.335, 液滴达到最大铺展直径的时间为  $40 \mu s$ , 稳定铺展的时间为  $400 \mu s$ 。当  $Oh=0.134$  时, 液滴最大铺展直径为 0.175 2 mm, 最大铺展因子为 4.38, 液滴达到最大铺展直径的时间为  $30 \mu s$ , 稳定铺展的时间为  $540 \mu s$ 。

由图 10 a 可知, 当奥内佐格数分别为 0.107、0.118、0.134 时, 液滴最终达到平衡状态的铺展直径分别为 0.117 4、0.118、0.118 1 mm, 差距很小; 液滴最大铺展直径分别为 0.167 6、0.173 4、0.175 2 mm, 差距相对较小。与韦伯数、雷诺数对液滴铺展直径的影响不同, 对于直径为 0.04 mm 的墨滴, 奥内佐格数对液滴平衡铺展直径和最大铺展直径的影响相对较小。

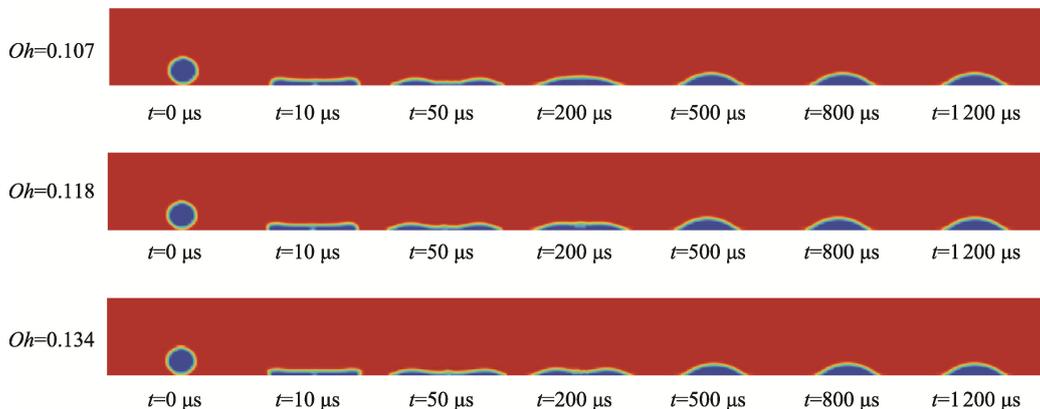


图 9 墨滴形状随时间演化过程  
Fig.9 Evolution of ink droplets shapes over time under different Ohnesorge numbers

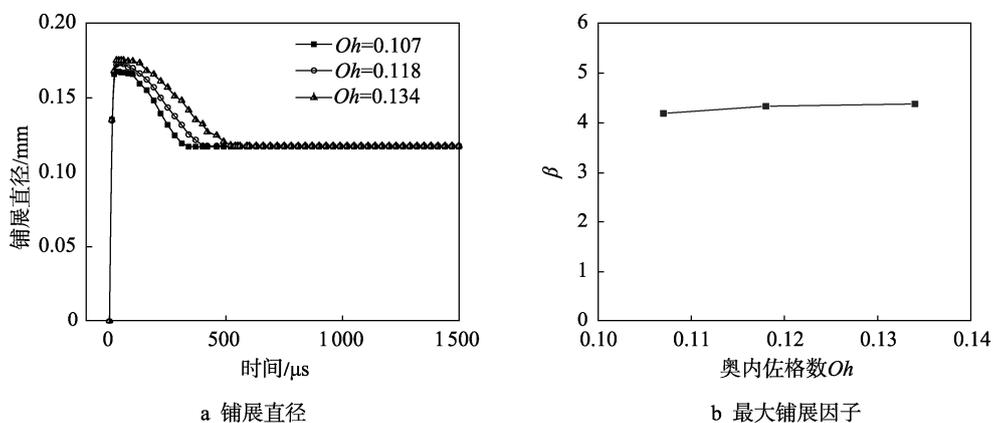


图 10 液滴铺展直径、铺展因子与奥内佐格数的关系  
Fig.10 Droplet spreading diameter and spreading factor versus Ohnesorge number

## 4 结论

利用 Ansys 软件,建立了压电喷墨液滴撞击光滑壁面的数值计算模型,对液滴在光滑壁面的铺展行为进行了研究。分析了韦伯数  $We$ 、雷诺数  $Re$ 、奥内佐格数  $Oh$  对液滴铺展直径、铺展因子及稳定铺展时间的影响规律。对于直径为 0.04 mm 的墨滴撞击光滑壁面,韦伯数和雷诺数对铺展过程中最大铺展直径的影响较大,对液滴最终平衡铺展直径的影响较小,韦伯数越小或雷诺数越小,液滴回缩阶段越短,越快达到平衡,韦伯数、雷诺数与最大铺展因子明显呈正相关。奥内佐格数对液滴铺展过程中最大铺展直径、最终平衡铺展直径的影响都较小,奥内佐格数越小,液滴回缩阶段越短,越快达到平衡,奥内佐格数与最大铺展因子呈轻微的正相关性。在喷墨印刷中,有必要依据韦伯数、雷诺数、奥内佐格数对墨滴铺展特性的影响规律,合理控制墨滴参数的范围,保证喷墨印刷的有序进行,生产出高质量的喷墨印刷产品。

### 参考文献:

- [1] 宁布,张睿,刘忠俊,等. 喷墨印刷技术研究现状与发展对策[J]. 包装工程, 2018, 39(17): 236-242.  
NING B, ZHANG R, LIU Z J, et al. Research Status and Development Countermeasure of Ink-Jet Printing Technology[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(17): 236-242.
- [2] 崔忻羽. 喷墨印刷液滴的铺展特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022: 7-11.  
CUI X Y. Study on Spreading Characteristics of Inkjet Printing Droplets[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022: 7-11.
- [3] 武秋敏,徐磊,袁方,等. 压电喷墨驱动器特性研究及参数优化[J]. 包装工程, 2021, 42(5): 187-192.  
WU Q M, XU L, YUAN F, et al. Characteristics and Parameter Optimization of Piezoelectric Inkjet Actuator[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(5): 187-192.
- [4] CHOW C K, ATTINGER D. Visualization and Measurements of Microdroplet Impact Dynamics on a Curved Substrate[C]// Proceedings of ASME/JSME 2003 4th Joint Fluids Summer Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, 2009: 405-413.
- [5] PARK H, CARR W W, ZHU J Y, et al. Single Drop Impaction on a Solid Surface[J]. AIChE Journal, 2003, 49(10): 2461-2471.
- [6] LAAN N, DE BRUIN K G, BARTOLO D, et al. Maximum Diameter of Impacting Liquid Droplets[J]. Physical Review Applied, 2014, 2(4): 044018.
- [7] 刘春格,唐正宁,邵文. 基于喷墨墨滴沉积铺展的数值模拟与分析[J]. 中国印刷与包装研究, 2011, 3(3): 37-42.  
LIU C G, TANG Z N, SHAO W. Numerical Simulation and Analysis of Deposition Spreading of Inkjet Droplets[J]. China Printing and Packaging Study, 2011, 3(3): 37-42.
- [8] 夏江龙,张明禄. 液滴撞击疏液表面的实验研究[J]. 流体动力学, 2020, 8(2): 30-37.  
XIA Jiang-Long, ZHANG Ming-Lu. Experimental Study on the Impact of Liquid Droplets on the Sparse Surface[J]. Fluid dynamics, 2020, 8(2): 30-37.
- [9] WIJSHOFF H. Drop Dynamics in the Inkjet Printing Process[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2018, 36: 20-27.
- [10] GUO K L, CHEN R H, WANG C L, et al. Modeling of Early Stage Droplet Spreading Based on Numerical Simulations[J]. Nuclear Engineering and Design, 2020, 369: 110855.
- [11] GARCÍA-GEIJO P, RIBOUX G, GORDILLO J M. Inclined Impact of Drops[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2020, 897: A12.
- [12] 樊瑞瑞,肖军杰,蒋小珊,等. Collings 模型预测微液滴最大铺展直径因数研究[J]. 绿色包装, 2022(1): 34-41.  
FAN R R, XIAO J J, JIANG X S, et al. Prediction of Maximum Spreading Diameter Factor of Micro Droplets Based on Collings Model[J]. Green Packaging, 2022(1): 34-41.
- [13] HOATH S. Fundamentals of Inkjet Printing: The Science of Inkjet and Droplets[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2016: 131-132.
- [14] LOHSE D. Fundamental Fluid Dynamics Challenges in Inkjet Printing[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2022, 54: 349-382.
- [15] MCKINLEY G H, RENARDY M. Wolfgang von Ohnesorge[J]. Physics of Fluids, 2011, 23(12): 127101.