

# 速度和体积对油墨拉伸断裂行为影响实验研究

秦羽瑞<sup>1,2,3</sup>, 孟龙<sup>1,2,3</sup>, 李文浩<sup>1,2,3</sup>, 唐梅娜<sup>1,2,3</sup>, 季陈浩<sup>1,2,3</sup>, 程浩璞<sup>1,2,3</sup>, 张博<sup>1,2,3</sup>,  
乔俊伟<sup>4</sup>, 金琳<sup>4</sup>, 袁英才<sup>1,2,3,5\*</sup>

<sup>1</sup>北京印刷学院, 数字化印刷装备北京市重点实验室, 北京

<sup>2</sup>北京印刷学院, 印刷装备北京市高等学校工程研究中心, 北京

<sup>3</sup>北京印刷学院机电工程学院, 北京

<sup>4</sup>上海出版印刷高等专科学校, 上海

<sup>5</sup>北京印刷学院, 北京市印刷电子工程技术研究中心, 北京

收稿日期: 2026年5月12日; 录用日期: 2026年5月28日; 发布日期: 2026年6月26日

## 摘要

传统印刷方式中, 油墨的转移往往伴随着油墨在两界面间形成液桥并拉伸断裂, 断裂结果直接决定油墨向基材的转移量, 从而对印刷质量产生重大影响。近年来, 印刷电子运用传统印刷工艺, 实现了电子器件制造的规模化、低成本。因而, 油墨拉伸断裂行为已成为印刷和印刷电子领域研究的重点问题。本文通过高速摄像机记录流变仪中两同轴平板间细微油墨拉伸形成液桥并断裂过程, 对不同初始体积和拉伸速度的油墨拉伸断裂行为进行实验研究。实验测定了5种初始油墨体积(1  $\mu\text{L}$ , 3  $\mu\text{L}$ , 5  $\mu\text{L}$ , 10  $\mu\text{L}$ , 30  $\mu\text{L}$ )和6种拉伸速度(0.1 mm/s, 0.3 mm/s, 0.5 mm/s, 1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s)液桥的形态演化及断裂行为。实验结果表明: 初始体积是液桥断裂时间与断裂长度的主导因素; 拉伸速度对断裂时间影响较弱, 对断裂长度的影响具有非单调性和体积依赖性。研究结果能为解析传统印刷和印刷电子中的油墨微观流体机制提供一定的实验依据。

## 关键词

液桥, 拉伸速度, 断裂时间, 断裂长度

# Experimental Study on the Influence of Velocity and Volume on the Tensile Fracture Behavior of Ink

Yurui Qin<sup>1,2,3</sup>, Long Meng<sup>1,2,3</sup>, Wenhao Li<sup>1,2,3</sup>, Meina Tang<sup>1,2,3</sup>, Chenhao Ji<sup>1,2,3</sup>,  
Haopu Cheng<sup>1,2,3</sup>, Bo Zhang<sup>1,2,3</sup>, Junwei Qiao<sup>4</sup>, Lin Jin<sup>4</sup>, Yingcai Yuan<sup>1,2,3,5\*</sup>

<sup>1</sup>Beijing Key Laboratory of Digital Printing Equipment, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

\*通讯作者。

文章引用: 秦羽瑞, 孟龙, 李文浩, 唐梅娜, 季陈浩, 程浩璞, 张博, 乔俊伟, 金琳, 袁英才. 速度和体积对油墨拉伸断裂行为影响实验研究[J]. 力学研究, 2026, 15(2): 165-173. DOI: 10.12677/ijm.2026.152016

<sup>2</sup>Beijing Municipal University Engineering Research Center of Printing Equipment, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

<sup>3</sup>School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

<sup>4</sup>Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai

<sup>5</sup>Beijing Engineering Research Center for Printed Electronics, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

Received: May 12, 2026; accepted: May 28, 2026; published: June 26, 2026

## Abstract

In traditional printing methods, ink transfer is often accompanied by the formation and stretching rupture of liquid bridges between two interfaces. The outcome of rupture directly determines the amount of ink transferred to the substrate, thereby exerting a significant influence on printing quality. In recent years, printed electronics has adopted traditional printing processes to realize large-scale, low-cost manufacturing of electronic devices. Consequently, the behavior of ink stretching and rupture has become a key research issue in the fields of printing and printed electronics. In this paper, a high-speed camera is used to record the process of liquid bridge formation and rupture during the stretching of fine ink between two coaxial parallel plates in a rheometer. An experimental study is conducted on the stretching and rupture behavior of ink with different initial volumes and stretching speeds. The morphological evolution and rupture behavior of liquid bridges are experimentally measured for five initial ink volumes (1  $\mu\text{L}$ , 3  $\mu\text{L}$ , 5  $\mu\text{L}$ , 10  $\mu\text{L}$ , 30  $\mu\text{L}$ ) and six stretching speeds (0.1 mm/s, 0.3 mm/s, 0.5 mm/s, 1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s). The experimental results show that the initial volume is the dominant factor affecting the rupture time and rupture length of the liquid bridge. The stretching speed has a weak effect on rupture time, while its influence on rupture length is non-monotonic and volume-dependent. The findings can provide certain experimental evidence for analyzing the microscopic fluid mechanism of ink in traditional printing and printed electronics.

## Keywords

Liquid Bridge, Stretching Speed, Fracture Time, Fracture Length

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在柔性版印刷过程中, 油墨向承印物转移, 即为油墨在柔性版与承印物间形成液桥并拉伸断裂过程。液桥拉伸到断裂过程涉及从宏观的毛细现象到微观的奇点动力学, 涉及数学、流体力学、界面化学、材料学等学科[1], 同时, 液桥的拉伸断裂不仅决定油墨最终能否有效转移, 还直接影响转移率、残墨量、拉丝现象以及印刷图案的边缘清晰度。因此, 液桥拉伸到断裂过程的研究对于理解印刷成形机理和优化工艺参数具有重要意义。

液桥断裂本质上是一个由表面张力主导的毛细失稳过程, 同时受到黏性力、惯性力、接触线运动以及流体内部重排等多种因素的共同影响。Lord Rayleigh 在 1878 年首次从表面能最小化原理出发, 分析了液柱的稳定性, 提出了经典的毛细失稳理论, 为液桥断裂研究奠定了基础[2]。随着高速摄影技术的发展

和计算能力的提升,研究重点逐渐由静态稳定性转向动态拉伸与瞬态断裂过程。1997年, Eggers 等对自由表面流断裂行为进行了系统总结,指出液桥在近断裂阶段会出现局部颈缩,并呈现明显的奇点动力学特征[3]。2011年, Breuer 等人发现,当接触线开始后退时,会显著加速颈部变细,从而改变断裂位置和断裂过程[4]。2018年,杜凡等人采用能量变分法分析了平行板间准静态柱对称液桥的形态与受力,实验发现大面积薄液层会因界面正反馈发生非均匀快速退缩,形成分形指进结构并瞬间断裂,揭示了准静态均匀模型与大面积薄液层断裂的关键差异[5]。2021年,魏啸峰等人提出,通过调节欧奈舍数(Ohnesorge Number)和弗劳德数(Froude Number),可以实现从液滴转移到无碎屑拉伸的精准控制[6]。这些研究表明,液桥断裂并非单一的静态失稳,而是一个多因素耦合的非线性动力学过程。

对于印刷油墨体系而言,液桥断裂问题更为复杂。油墨通常并非理想牛顿流体,其流变行为常受到树脂、溶剂、颜料颗粒及助剂等组分的共同影响,表现出一定的黏弹性、非牛顿性以及润湿特性差异[7]-[9]。在液桥拉伸过程中,油墨内部的黏性耗散、界面张力、接触线移动及局部应力集中相互竞争,共同决定液桥的稳定性与最终断裂形态。因此,针对油墨液桥的拉伸断裂行为进行研究,不仅有助于揭示印刷转移的微观流体机制,也为提升油墨转移质量和印刷精度提供理论依据。

在影响液桥断裂的多种因素中,初始体积和拉伸速度是最直接、最关键的工艺参数。初始体积决定了液桥的几何尺度、曲率分布及毛细压力水平,从而影响液桥稳定性;拉伸速度则决定了液桥在外部拉伸作用下的应力积累速率以及液体内部流动重排的时间尺度。已有研究表明,体积与速度往往共同控制液桥的颈缩起始、断裂位置以及临界断裂长度,并可能导致断裂行为呈现明显的非线性特征[10][11]。然而,针对油墨体系中初始体积与拉伸速度耦合作用下液桥断裂行为的系统实验研究仍相对不足,尤其是不同速度条件下油墨液桥断裂时间、断裂长度及其变化规律尚缺乏定量分析。

本文以油墨液桥为研究对象,通过液桥拉伸断裂实验,系统考察不同拉伸速度和初始体积条件下液桥断裂时间与断裂长度的变化规律,分析二者对液桥稳定性和断裂行为的影响机制。研究结果可为柔性版印刷过程中油墨转移行为的精准调控提供实验依据。

## 2. 油墨拉伸断裂实验

### 2.1. 实验设备与材料

#### ① 实验设备:

流变仪: 型号 Anton Paar MCR302e, 使用 CP25 的转子(直径为 12.5 mm), 用来精确控制上下板的初始间隙与分离速度, 模拟印刷过程中的液桥拉伸。

高速摄像机: 型号佳能 EOS RP, 用来记录实验过程中液桥拉伸与断裂的动态形态。

#### ② 实验材料:

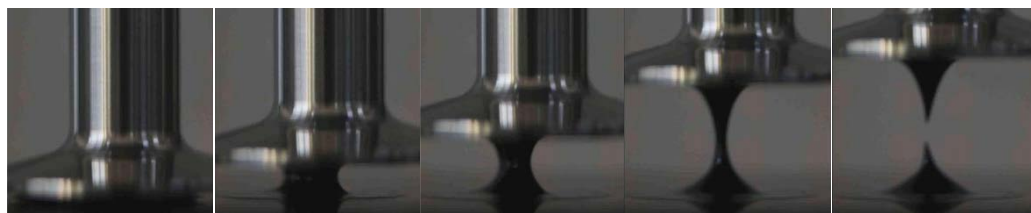
油墨: 柔性版印刷 UV 型油墨, 密度为  $1184 \text{ kg/m}^3$ , 表面张力为  $28 \text{ mN/m}$ 。

### 2.2. 实验参数设置

初始油墨体积:  $1 \mu\text{L}$ 、 $3 \mu\text{L}$ 、 $5 \mu\text{L}$ 、 $10 \mu\text{L}$ 、 $30 \mu\text{L}$ ; 拉伸速度:  $0.1 \text{ mm/s}$ 、 $0.3 \text{ mm/s}$ 、 $0.5 \text{ mm/s}$ 、 $1 \text{ mm/s}$ 、 $3 \text{ mm/s}$ 、 $5 \text{ mm/s}$ ; 初始间隙:  $0.05 \text{ mm}$ 。

### 2.3. 实验方法

油墨拉伸断裂是一个动态过程,使用高速摄像机对油墨拉伸形成液桥到断裂过程进行录像。然后将录像进行图像采集与处理,提取液桥在不同时刻的轮廓关键帧数据进行分析。油墨拉伸形成液桥至断裂全过程,典型图像如图 1 所示。



**Figure 1.** Experimental diagram of ink stretching and fracture process

**图 1.** 油墨拉伸断裂过程实验图

对各种初始体积油墨进行不同拉伸速度的拉伸断裂实验，记录每种情况的油墨液桥断裂时间和断裂长度。由于油墨拉伸断裂具有一定的随机性，对每种情况进行 5 次拉伸断裂测试，并 5 次测试数据的均值和标准差。

在提取断裂时间与断裂长度的基础上，利用高速摄像机图像序列对液桥接触线的动态行为进行了补充分析。逐帧测量液桥与上下板接触处的接触角及接触线半径，以量化接触线的运动规律。结果表明，在拉伸初期接触线近似处于钉扎状态，接触角随拉伸持续减小；当接触角降至临界值后，接触线开始向内退缩。退缩速度随初始体积增大而减小，与液桥断裂时间的变化趋势一致，表明接触线的退移行为对液桥稳定性具有重要影响。上述接触线动态数据为深入理解液桥断裂机制提供了进一步的实验依据。

### 3. 实验结果分析

**Table 1.** Fracture time under different initial volumes and stretching speeds

**表 1.** 不同初始体积和拉伸速度下的断裂时间

体积( $\mu\text{L}$ )	断裂时间(单位 s)					
	0.1 mm/s	0.3 mm/s	0.5 mm/s	1 mm/s	3 mm/s	5 mm/s
1	$5.58 \pm 0.39$	$6.11 \pm 0.07$	$5.91 \pm 0.35$	$6.07 \pm 0.04$	$6.10 \pm 0.06$	$5.90 \pm 0.09$
3	$7.21 \pm 0.04$	$7.75 \pm 0.41$	$7.14 \pm 0.01$	$7.18 \pm 0.09$	$7.16 \pm 0.09$	$7.22 \pm 0.08$
5	$7.10 \pm 0.06$	$7.20 \pm 0.04$	$7.43 \pm 0.20$	$7.25 \pm 0.05$	$7.42 \pm 0.37$	$7.33 \pm 0.12$
10	$7.60 \pm 0.44$	$7.71 \pm 0.33$	$7.79 \pm 0.22$	$7.93 \pm 0.13$	$8.16 \pm 0.11$	$8.14 \pm 0.05$
30	$8.80 \pm 0.28$	$8.81 \pm 0.36$	$8.84 \pm 0.18$	$8.79 \pm 0.21$	$8.78 \pm 0.21$	$8.49 \pm 0.34$

**Table 2.** Fracture length under different initial volumes and stretching speeds

**表 2.** 不同初始体积和拉伸速度下的断裂长度

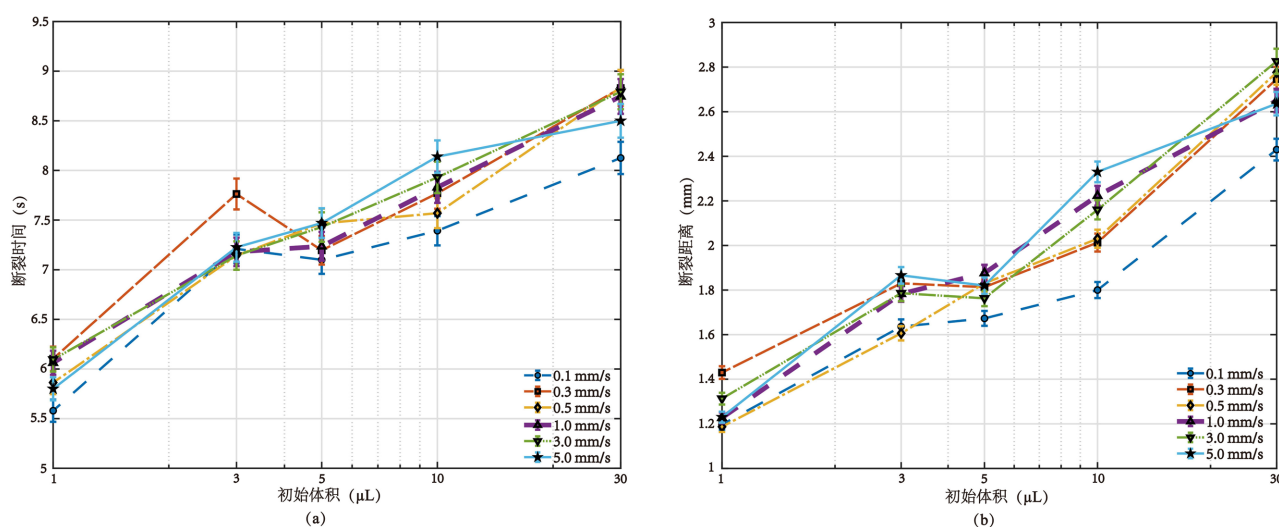
体积( $\mu\text{L}$ )	断裂长度(单位 mm)					
	0.1 mm/s	0.3 mm/s	0.5 mm/s	1 mm/s	3 mm/s	5 mm/s
1	$1.22 \pm 0.13$	$1.43 \pm 0.05$	$1.19 \pm 0.04$	$1.24 \pm 0.06$	$1.27 \pm 0.11$	$1.27 \pm 0.03$
3	$1.63 \pm 0.03$	$1.81 \pm 0.16$	$1.60 \pm 0.04$	$1.79 \pm 0.10$	$1.82 \pm 0.10$	$1.85 \pm 0.06$
5	$1.69 \pm 0.03$	$1.83 \pm 0.08$	$1.85 \pm 0.06$	$1.85 \pm 0.04$	$1.78 \pm 0.13$	$1.83 \pm 0.05$
10	$1.80 \pm 0.42$	$2.07 \pm 0.11$	$2.10 \pm 0.19$	$2.15 \pm 0.17$	$2.36 \pm 0.10$	$2.41 \pm 0.15$
30	$2.72 \pm 0.22$	$2.75 \pm 0.18$	$2.80 \pm 0.23$	$2.65 \pm 0.11$	$2.77 \pm 0.17$	$2.66 \pm 0.17$

油墨拉伸断裂实验的断裂时间、断裂长度测试结果，如表 1、表 2 所示。从表 1、表 2 中可以看出，断裂时间的标准差大多在 0.01~0.44 s，断裂长度的标准差在 0.03~0.42 mm。当体积较大时，数据的波动

往往更小，尤其是初始体积在 30  $\mu\text{L}$  时，速度数值都表现出很好的重复性，断裂时间与断裂长度的相对变化都比较平稳；初始体积在 3  $\mu\text{L}$ 、5  $\mu\text{L}$  时，部分条件下的标准差也很小，稳定性也相对不错；当初始体积在 1  $\mu\text{L}$  时，个别数据波动相对明显。根据标准差数据来看，初始体积大的油墨拉伸断裂过程中液桥更稳定；初始体积小的油墨，液桥更容易受到初始形貌、润湿状态、局部不均匀性影响，液桥的断裂过程更敏感，液桥断裂时间与断裂长度的波动增大。

为定量评估初始体积与拉伸速度及二者交互作用对断裂时间和断裂长度的综合影响，对全部实验数据进行双因素方差分析。结果显示，初始体积对断裂时间的影响极显著( $p < 0.001$ )，拉伸速度对断裂时间的影响不显著( $p > 0.05$ )，两者交互效应不显著；对断裂长度而言，初始体积的影响同样极显著( $p < 0.001$ )，拉伸速度在 10  $\mu\text{L}$  体积条件下对断裂长度表现出显著影响( $p < 0.05$ )，其余体积下影响不显著，进一步证实了拉伸速度对断裂长度的影响具有体积依赖性。

不同初始体积的断裂时间、断裂长度与拉伸速度的关系，如图 2 所示：



**Figure 2.** Relationship of initial volume with fracture time and fracture length. (a) Relationship between initial volume and fracture time at different stretching speeds; (b) Relationship between initial volume and fracture length at different stretching speeds

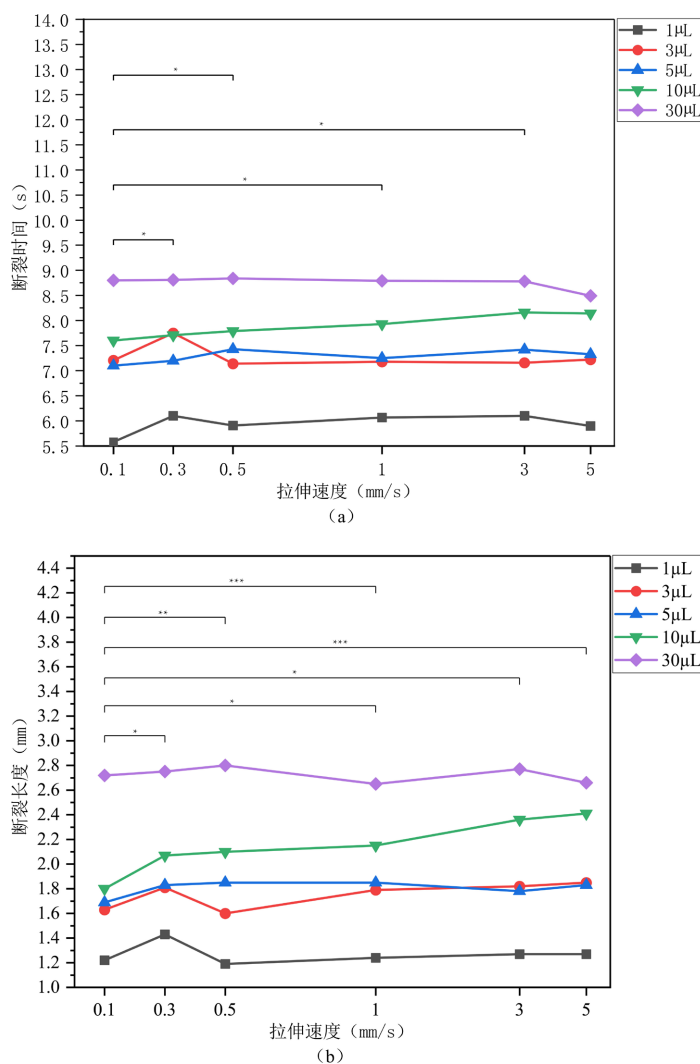
**图 2.** 初始体积与断裂时间和断裂长度的关系。(a) 不同拉伸速度下，初始体积与断裂时间的关系；(b) 不同拉伸速度下，初始体积与断裂长度的关系

由图 2 看出，在不同拉伸速度下，断裂时间与断裂长度均随着初始体积的增大而增大。当初始体积在 1  $\mu\text{L}$ ~3  $\mu\text{L}$  时，液桥断裂时间与断裂距离随速度变化明显，因为小体积液桥对于体积变化更敏感，这个体积区域的液桥半径、曲率、表面张力都很容易受到体积变化的影响。当初始体积在 3  $\mu\text{L}$ ~5  $\mu\text{L}$  时，断裂时间与断裂长度的变化出现较大波动，其原因在于这个体积范围内，油墨的润湿性、接触线效应、表面张力对液桥断裂时间或断裂长度有较大影响。初始体积在 10  $\mu\text{L}$  时，液桥受粘性力与重力作用增强，但对速度变化更加敏感。当拉伸速度慢时，液桥有更多的时间进行形变和应力反应；拉伸速度快时，液桥来不及充分反应。这说明，初始体积大于 10  $\mu\text{L}$ ，液桥断裂过程不再只由静态体积决定，而是进入了体积-速度耦合控制阶段。

不同拉伸速度的断裂时间和断裂长度与初始体积的关系，如图 3 所示。对统计上显著不同的组间连线标注\* ( $p < 0.05$ )、\*\* ( $p < 0.01$ )、\*\*\* ( $p < 0.001$ )，特别是初始体积间的比较。

图 3(a) 显示，在各种拉伸速度条件下，断裂时间整体随初始体积增大而增大。当初始体积由 1  $\mu\text{L}$  增加至 30  $\mu\text{L}$  时，液桥平均断裂时间从 5.95 s 增加至 8.75 s。该现象可以理解为，大体积液桥在拉伸过程中

因为内部的表面张力作用能以更快的速度维持颈缩形态，因此断裂时间与长度也显著提升。



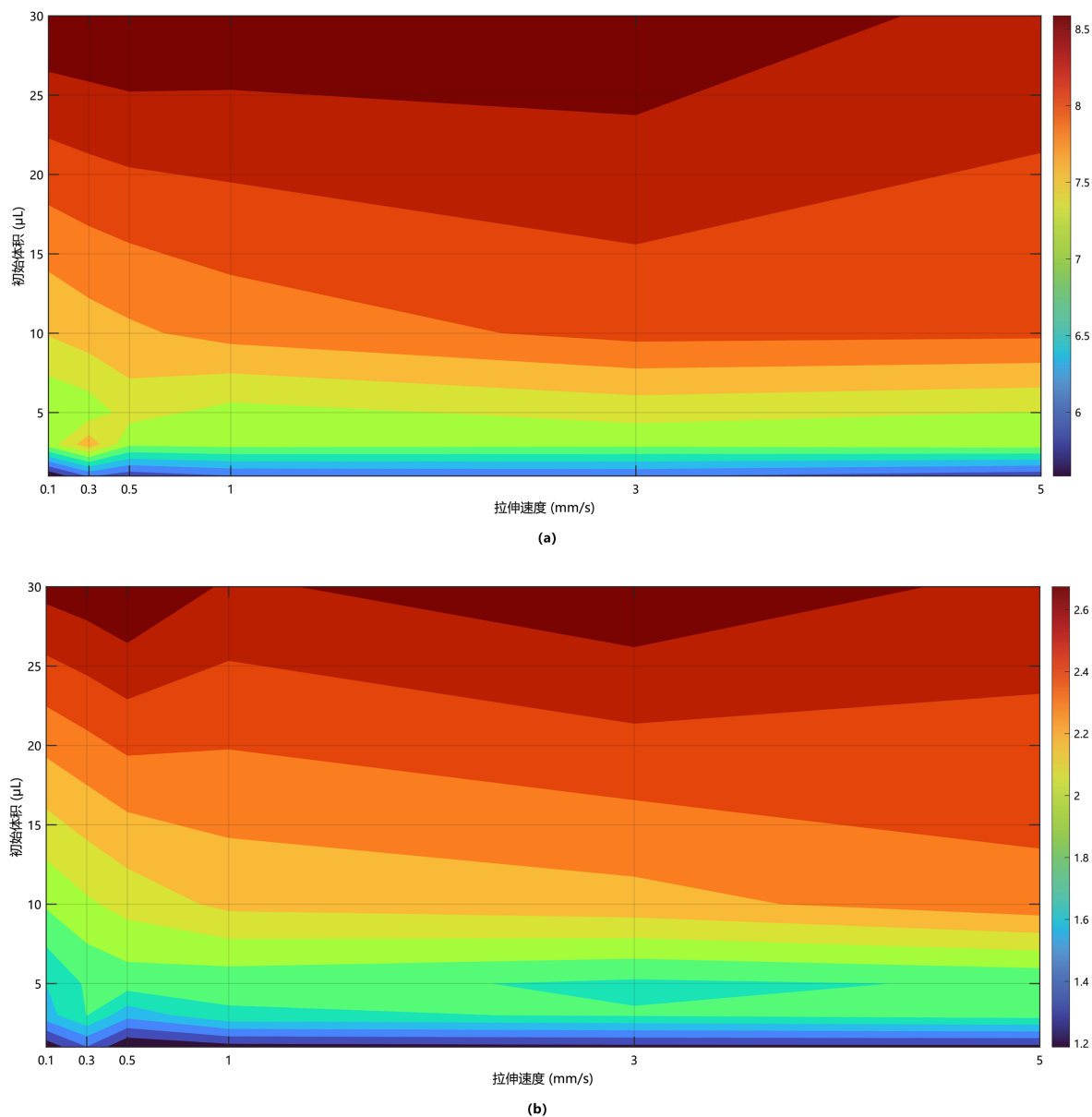
**Figure 3.** Relationship of stretching speed with fracture time and fracture length. (a) Relationship between stretching speed and fracture time under different initial volumes; (b) Relationship between stretching speed and fracture length under different initial volumes

**图 3.** 拉伸速度与断裂时间和断裂长度的关系。(a) 不同初始体积下，拉伸速度与断裂时间的关系；(b) 不同初始体积下，拉伸速度与断裂长度的关系

图 3(b)显示，拉伸速度对断裂长度的影响具有体积依赖性。当初始体积在 1~5 μL 时，断裂长度随速度变化波动较小，当初始体积在 10 μL 时，断裂长度随着速度提升呈现明显上升趋势，当初始体积达到 30 μL 时，断裂长度随拉伸速度引起的变化再次减弱。这种情况是因为拉伸速度的影响受到惯性力与表面张力等因素的共同影响，10 μL 初始体积的液桥在高速拉伸时，液桥内部的惯性力有效延缓了颈缩过程，导致断裂长度增加。对于断裂时间而言，在同一体积下，速度从 0.1 mm/s 提升到 5 mm/s，断裂时间的波动系数均低于 10%，这说明在本实验参数范围内，拉伸速度并不是液桥断裂的主导控制因素。

初始体积和拉伸速度对油墨拉伸断裂的综合影响，如图 4 所示。图 4(a)表明，液桥断裂时间在体积方向上呈现明显梯度变化，而在同一体积内随速度变化的梯度相对较弱，这进一步验证了前面得出的“初始体积为主要因素，拉伸速度为次要因素”的结论。图 4(b)显示，液桥断裂长度受初始体积与拉伸速度

双重影响，且速度影响并非均匀分布，在初始体积为  $5\sim 10\ \mu\text{L}$  内，水平方向颜色变化剧烈，而在  $1\sim 3\ \mu\text{L}$  和  $30\ \mu\text{L}$  范围内，水平颜色变化相对平缓。图中  $1\sim 3\ \mu\text{L}$  和  $10\ \mu\text{L}$  区域颜色最深，代表断裂长度最大。因此在工程应用中，若希望获得最大拉伸长度，应优先选用这些参数组合。



**Figure 4.** Comprehensive influence analysis of initial volume and stretching speed. (a) Relationship between volume-velocity coupling and fracture time; (b) Relationship between volume-velocity coupling and fracture length

**图 4.** 初始体积与拉伸速度综合影响分析图。(a) 体积 - 速度耦合与断裂时间的关系；(b) 体积 - 速度耦合与断裂长度的关系

综上所述，初始体积是液桥断裂行为的核心控制因素，拉伸速度对断裂时间无显著影响，而拉伸速度对液桥断裂长度的影响比较复杂，且存在明显的体积依赖性，有一个或多个“最佳”拉伸速度，使得液桥的稳定性达到最优。这通常与液桥的黏弹性有关，拉伸速度太慢或者太快，都会导致液桥的稳定性降低。

## 4. 结论

本研究通过液桥拉伸实验,系统探究了拉伸速度与初始体积对油墨分离行为的影响。实验结果表明,油墨拉伸形成液桥至断裂不是一个随初始体积、拉伸速度增大,其断裂时间、断裂长度线性增长的变化过程,而是受到表面张力、粘性力、惯性力、接触线行为共同影响的存在局部波动的非线性过程。实验可以得出以下结论:

1) 初始体积是液桥断裂时间与断裂长度的主导因素。在本实验范围内,断裂时间与断裂长度均随初始体积增大而增加;其中断裂长度的相对增幅更大,表明其对体积变化更敏感。

2) 拉伸速度对断裂时间影响较弱。不同速度下断裂时间曲线整体接近,说明拉伸速度对断裂特征的影响主要体现为局部波动而非单调变化。

3) 拉伸速度对断裂长度的影响具有非单调性和体积依赖性。在中等初始体积,约 5~10  $\mu\text{L}$  附近,拉伸速度为 0.3~1 mm/s 时,断裂长度达到最大值,这说明在此条件下,断裂长度对速度变化更敏感,存在“体积-速度耦合增强区间”。

本研究存在以下局限性,值得在未来工作中进一步完善:

1) 尺度差异: 本实验所选油墨体积(1~30  $\mu\text{L}$ )因设备条件限制,显著大于实际柔性版印刷中的转移墨量(通常在 nL 量级)。在缩小尺度下,重力效应相对于表面张力和粘性力将大幅减弱,液桥的断裂动力学可能呈现不同特征。因此,本文实验趋势可提供定性参考,但定量结论向实际印刷工况的直接推广需谨慎对待。

2) 平板模型的简化性: 本实验采用两同轴平行平板模拟印刷转移界面,忽略了实际柔性版印刷中版辊曲率、承印物柔性及多点接触等几何因素。平板模型提供了理想化的轴对称边界条件,简化了接触线行为和流场分布,与实际印刷过程存在一定差距,后续研究可引入更接近实际工况的几何模型加以修正。

3) 基材性质的缺失: 本研究未考察承印物表面能对液桥断裂行为的影响。实际印刷中,不同基材(如 PE 薄膜、铜版纸、织物等)的表面润湿性差异显著,可能导致接触线动态行为和油墨转移率产生明显变化。引入不同表面能基材的对比实验,以及结合油墨流变参数与无量纲分析进一步提升结论的普适性,是未来研究的重要方向。

## 基金项目

智能与绿色柔版印刷重点实验室 2024 年度招标课题(ZBKT202402)。

## 参考文献

- [1] 朱朝飞, 楚亚龙, 高姜明. 面向微纳技术的液桥断裂研究进展[J]. 过程工程学报, 2023, 23(6): 814-825.
- [2] Rayleigh, L. (1878) On the Instability of Jets. *Proceedings of the London Mathematical Society*, **1**, 4-13. <https://doi.org/10.1112/plms/s1-10.1.4>
- [3] Eggers, J. (1997) Nonlinear Dynamics and Breakup of Free-Surface Flows. *Reviews of Modern Physics*, **69**, 865-930. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.69.865>
- [4] Qian, B. and Breuer, K.S. (2011) The Motion, Stability and Breakup of a Stretching Liquid Bridge with a Receding Contact Line. *Journal of Fluid Mechanics*, **666**, 554-572. <https://doi.org/10.1017/s0022112010004611>
- [5] 杜凡, 陈宗强, 陈靖, 等. 平行板间薄液层的断裂过程的研究[J]. 大学物理, 2018, 37(12): 44-48+64.
- [6] Wei, X. and Zou, J. (2021) Mechanism of Liquid Bridges Stretched Out of a Liquid Bath. *Journal of Physics: Conference Series*, **1888**, Article ID: 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1888/1/012014>
- [7] Rogers, J.A., Someya, T. and Huang, Y. (2010) Materials and Mechanics for Stretchable Electronics. *Science*, **327**, 1603-1607. <https://doi.org/10.1126/science.1182383>
- [8] de Gans, B., Duineveld, P.C. and Schubert, U.S. (2004) Inkjet Printing of Polymers: State of the Art and Future

- 
- Developments. *Advanced Materials*, **16**, 203-213. <https://doi.org/10.1002/adma.200300385>
- [9] Derby, B. (2010) Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution. *Annual Review of Materials Research*, **40**, 395-414. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070909-104502>
- [10] Wijshoff, H. (2010) The Dynamics of the Piezo Inkjet Printhead Operation. *Physics Reports*, **491**, 77-177. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2010.03.003>
- [11] Hoath, S.D. (2016) *Fundamentals of Inkjet Printing: The Science of Inkjet and Droplets*. John Wiley & Sons.