

某种环形自由液膜在下游障碍物触发下的全局形态突变与推测存在双稳态迟滞的现象初报

本文为现象初报，旨在完整描述该现象的特征，计划开展定量实验研究。

本文报告了一种在环形自由液膜构型中观察到的全局失稳现象，本文将从首先详细介绍观察到的物理现象及定性物理解释与原理推测，涉及的流体力学方向与概念，该现象的学术意义及潜在价值。

为便于读者快速建立后续讨论所需的共同概念基础，避免因术语理解差异而产生阅读偏差，也能减少正文中重复解释的篇幅，现就本文所涉及的若干流体力学已知概念做简要说明：

本文描述的环形液膜射流是自由液膜的一种经典构型，产生此类射流的方式多样，其中一种简易方法为突扩管原理：流体从较窄流道高速进入突然扩大的流道时，在突扩处发生流动分离并形成环形回流区，回流区将射流推向外侧使其附着于管壁，使其在喷口出口处形成附壁的空心环形薄层液膜。本文所述实验即采用基于该原理的特殊喷口产生研究对象。

惯性力与表面张力的竞争，在无外界扰动时，环形液膜射流从喷口射出后，呈现“先扩张、后收缩”的空间演化特征，其空间形态由惯性力与表面张力的竞争所主导。液膜刚从喷口高速喷出，动能充足，表现为圆环半径沿轴向增大。随着液膜向前发展、铺展变薄、流速降低，惯性力逐渐减弱。收缩段表面张力总是试图最小化液膜的表面积，它像一个均匀作用于液膜曲面的“收紧力”。在这个力的作用下，扩张的液膜被拉向中心轴线，表现为圆环半径缓慢、匀速地减小，这是由惯性力与表面张力共同塑造的动态平衡结构。表面张力在此处的作用作为收缩段的直接驱动力是流体力学中已充分确立的已知原理，而非本文的新发现。

椭圆形效应，在流体力学中，流动的数学性质可分为椭圆型和双曲型两类。亚音速流动（包括本实验中的水流）具有椭圆型特征，其根本物理含义是：流场中任意一点发生的扰动，其影响可以向四面八方传播，包括向上游传播。这意味

着，下游的扰动信息可以通过流场传递到上游，改变上游的流动状态。

迟滞与双稳态，在非线性动力学系统中，当控制参数变化时，系统的状态切换可能具有路径依赖性。具体表现为：系统从状态 A 切换至状态 B 的临界参数值，与从状态 B 恢复至状态 A 的临界参数值不重合。此现象称为迟滞。在迟滞区间内，同一参数下系统可稳定存在于两种不同状态，即双稳态。迟滞与双稳态是非线性系统的典型特征，广泛存在于物理、材料、生物等领域的各类非平衡系统中。

本文研究的是类似水钟原理的高速空心环形薄层液膜射流。以喷口为起点，沿水流喷射方向观察，这个空心环形薄层液膜射流的形态呈现扩张、收缩、水膜破碎的变化。扩张段：水流从喷口喷出后，圆环的直径沿喷射方向逐渐增大，增大速率先快后慢，类似抛物线的增长趋势，在距离喷口约 1.5 厘米处，圆环直径达到最大值约 6 毫米。收缩段：经过最大直径处之后，圆环直径开始沿喷射方向缓慢减小，减小速率近似均匀。在约 1.5 厘米的距离内，直径从约 6 毫米减小到约 5 毫米。破碎段：收缩段之后，圆环的直径继续减小，同时环状结构开始杂乱破碎，最终失去清晰的圆环特征，液膜破碎雾化成杂乱水滴。直径的继续减小与破碎过程同时发生，难以分辨先后顺序。在整个过程中，射流液膜是空间连续的：从喷口至破碎点之前，环形液膜连接为一体，不存在断裂。因为是较高速喷出的射流，无论喷出方向，射流大致可以被判断为轴向对称。

本文主要只讨论由喷口喷出到水膜破碎位置的水流现象，不讨论水膜破碎及之后水流的影响，所以严格意义上不属于一个完整的水钟，文章以下将该环形自由液膜研究对象简称为环形液膜射流。

实验装置由以下核心部件构成

一特殊设计的喷口，连接至稳定水源，产生沿轴线方向喷射的上文描述的环形液膜射流。一个法线于射流轴线方向放置的障碍物，表面光滑，固定于精密手动位移滑台上，可沿液膜轴线方向以亚毫米精度前后移动。成像系统采用高帧率慢动作摄像，配合高亮度补光灯与深色背景板，以获取透明液膜的清晰形态记录。

实验在室温、常压条件下进行。水流由恒定水压驱动，流量在实验过程中保持稳定。为便于描述，定义空间坐标系如下：喷口位于原点，环形液膜射流方向为轴向正方向，依次是扩张段、收缩段、水膜破碎段。

观察到的现象实验过程

将障碍物从远离喷口的下游位置缓慢向喷口方向移动。当障碍物首次接触液膜时，其初始接触点位于收缩段末端或破碎区附近，在此阶段，肉眼可察的液膜形态变化仅限于接触点附近，接触点上游的液膜形态保持完好，与本征形态无明显差异，水流在接触障碍物后发生偏转。

当障碍物继续向喷口方向推进，其接触点进入收缩段与最大直径处之间的某一区域时，液膜的全局形态发生了一次突然的、质的转变。在某一精确的轴向位置，以下称为临界位置，液膜原有的收缩趋势被显著削弱。具体表现为：突变前，液膜在最大直径处之后存在一个清晰的收缩段，圆环直径沿轴向逐渐减小；突变后，这一收缩趋势基本消失，液膜从喷口开始，持续向外扩张，直至接触障碍物。原有“扩张-收缩”的空间演化模式被一种“持续扩张”的模式所取代。该转变具有突变性、全局性和信息的上传。

在突变发生后，将障碍物从临界位置缓慢向下游撤回，这是初步定性，观察中我注意到流场恢复的障碍物位置似乎与突变发生的位置不一致，当障碍物后退至原先触发突变的位置时，液膜并未恢复其原有的“扩张-收缩”形态，而是继续保持“持续扩张”的状态。只有当障碍物继续向下游后退，越过临界位置、到达一个更远的距离时，液膜才突然恢复其原有的收缩趋势和完整的“扩张-收缩”形态。虽然手动操作和肉眼观测存在误差，且尚未进行系统的重复性验证，但基于其物理原理考虑，认为该系统中大概率存在迟滞行为。

定性物理解释与原理推测

本节基于上述现象观察，提出一个定性的物理解释框架。需要明确指出，以下解释系基于经典流体力学原理所做的逻辑推演和推测，尚未经过定量的实验验证。本节的目的在于为后续定量研究提供一个可检验的理论出发点，而非宣称已完成了对该现象的最终物理证明。

下游障碍物扰动导致上游变化的原理推测是椭圆形效应

在本实验中，椭圆型效应的物理传播介质是液膜自身的表面张力连续体。由于液膜从喷口至破碎点之前是一张物理上连续不间断的曲面，当障碍物在临界位置切断液膜时，被切断的下游部分飞溅脱离，其原先施加在连续液膜上的表面张力瞬间卸载。这一“张力归零”的力学状态变化，推测沿尚存的连续液膜以表面张力波的形式向上游传播。上游液膜“感知”到下游收缩拉力减小后，其力学平衡被打破，形态随之发生重构。

迟滞与双稳态的原理推测

该迟滞行为可能源于破坏与重建两种物理过程的能量路径不对称（再次强调，由于当前阶段依赖手动操作，存在视觉判断误差，且未进行重复性验证，尚不能确认迟滞行为的存在，是两个物理上不对称的过程，预测破坏阈值与恢复阈值不重合，系统存在迟滞回线）。

涉及的流体力学方向与概念

在流体力学中，研究障碍物对流动的影响，有经典的构型是钝体绕流——流体绕过圆柱、球体等钝体时，在钝体后方形成尾涡区。主流关注点是：流体绕过障碍物后发生了什么。研究者改变的是来流条件（速度、湍流度）或障碍物的形状和尺寸，观察的是障碍物下游的流动结构，射流冲击研究则关注射流撞击障碍物后，在障碍物表面形成的压力分布和传热特性。这两类研究的共同点是：关注的焦点在障碍物处及其下游

本实验中，环形液膜完全撞击在障碍物上。然而，核心现象是障碍物的位置改变，导致了上游液膜形态发生了全局性改变。收缩趋势的削弱发生在障碍物上游的液膜区域。

双稳态和迟滞是非线性动力学系统的经典特征，在流体力学中已有丰富的实验和理论案例。该领域的主流研究关注双稳态存在的参数区间、状态切换的临界条件、迟滞回线的形状与系统参数的关系。研究者通过系统改变控制参数（通常是雷诺数或相关无量纲量），测量状态变量。这些研究的共同前提是：控制参数的改变，是切换状态的驱动力。

在本实验中，控制参数是一个下游边界条件。这意味着状态切换的驱动力来源不同：不是“上游条件变了”，而是“下游边界条件变了”。本现象为双稳态和迟滞研究提供了一个由下游边界条件驱动的新案例。

最后基于上述现象观察及与现有研究的对比，阐述本工作可能具有的学术意义与潜在应用价值

椭圆型效应是流体力学的经典概念。然而，在实验教学和基础研究中，椭圆型效应的直观演示并不常见。传统的演示方法通常依赖于封闭管道中的压力传感器测量或数值模拟，存在缺乏可视化的桌面级实验方案。本实验为椭圆型效应提供了一个极为直观的观察案例。在本构型中，障碍物在下游某一临界位置的存在，导致了上游液膜形态的同步改变，这正是椭圆型效应的定义性特征。与传统的压力驱动演示不同，本构型中的椭圆型效应以自由液膜为载体，其结果存在明显的肉眼可见的液膜形态重构。该构型成本较低、现象清晰且可重复性强，为流体力学教学中抽象物理概念（如椭圆型效应、双稳态迟滞）提供直观演示。

对椭圆型效应定量研究的潜在价值。椭圆型效应的实验研究通常依赖压力传感器或数值模拟。本构型提供了一个替代途径：障碍物的临界位置，即触发全局形态突变的精确轴向坐标，可被视为椭圆型效应强度的一个可测量指标。

由于临界位置对液膜的力学状态敏感,通过系统改变液体物性(如表面张力、粘度)或流动参数(如入口流速),并测量临界位置的系统性移动,可能建立起椭圆型效应强度的定量关联。这一研究路径若被后续工作验证,可为椭圆型效应在自由液膜系统中的定量表征提供一个新的实验方法。

结语

本文为现象初报,所呈现的内容均为定性观察与机制推测。后续如有液膜内部速度场的定量测量、临界位置的系统标定等定量实验研究,将另文报道。其中关于迟滞行为的记录尚属初步观察,未完成系统的重复性验证;物理机制部分均为推测性解释。上述内容均可能在后续研究中被修正或推翻。

附录

本文描述的环形自由液膜是流体力学中已知且普遍的射流构型,可由多种方式产生。本文以突扩管原理为例,产生了符合描述的空心、环形、薄层射流。推测能产生具有上述核心特征液膜空间连续、直径先增大后减小环形液膜的装置,均可观察到本文描述的扰动现象。若更换其他喷口设计,可能引入额外流动变量,其是否影响现象的存在,目前尚不明确,有待后续研究。

文中所列具体数值均为单次观测的目视估算,仅用于帮助读者建立数量级认知,不构成精密测量结果。读者在复现或引用时,不应将其作为定量参考。

To ensure the accuracy of the phenomenological description, this preliminary report is written in Chinese.

参考文献

[1] Taylor, G. I. (1959). The dynamics of thin sheets of fluid. III. Disintegration of fluid sheets. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical

Sciences, 253(1274), 313-321.

[2] Clanet, C. (2001). Dynamics and stability of water bells. *Journal of Fluid Mechanics*, 430, 111-147.

[3] Durst, F., Melling, A., & Whitelaw, J. H. (1974). Low Reynolds number flow over a plane symmetric sudden expansion. *Journal of Fluid Mechanics*, 64(1), 111-128.

[4] Anderson, J. D. (2017). *Fundamentals of Aerodynamics* (6th ed.). McGraw-Hill.

[5] Durst, F., Pereira, J. C. F., & Tropea, C. (1993). The plane symmetric sudden-expansion flow at low Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 248, 567-581.