

进行二维流体动力学实验的肥皂膜装置及相关研究

赵文景³ 纪文杰^{1,2} 蓝鼎^{1,2*} 王进^{3**} 王育人^{1,2}

1 (中国科学院微重力重点实验室, 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

2 (工程科学学院, 中国科学院大学, 北京 100190)

3 (机械与汽车工程学院, 青岛理工大学, 青岛 266520)

* landing@imech.ac.cn ** wangjin@qut.edu.cn

摘要: 旨在介绍一种利用稳定流动的肥皂膜进行二维流体动力学实验的装置。其中, 着重描述了该装置的具体结构。还简要介绍了肥皂膜作为近似二维界面的性质, 以及制作稳定流动的肥皂膜所需的条件。同时, 将研究并概述用于采集肥皂膜图像以及观测肥皂膜流动性质的实验装置及技术。

关键词: 肥皂膜, 二维流动

本研究受国家自然科学基金的资助 (编号 11472275, U1738118)

引言

纯水是难以形成水膜的, 其原因是水的表面张力会使水膜瞬间破裂。而将细铁丝绕成一个圈, 浸入肥皂溶液中, 缓慢拉出就可以轻松获得一个肥皂膜。这是由于肥皂溶液中存在表面活性剂, 降低了表面张力^[1], 在合适的条件下, 肥皂膜可以存在很长时间而不会破裂。

研究^[2,3]发现, 肥皂膜由两层表面活性剂层和中间表面活性剂溶液层组成, 外表面活性剂层与大气接触, 为纳米数量级, 中间表面活性剂溶液层为微米数量级。肥皂膜的厚度总体来说为微米数量级, 在一定的实验条件下, 肥皂膜的流动是准二维的, 它可能是最接近二维物理概念的真实的二维流体, 因此可以将肥皂膜近似看成二维结构。如果通过实验可以获得稳定的肥皂膜, 肥皂膜可以作为一个实验平台, 用来进行二维流体动力学研究, 从而了解海洋或者气象领域中出现的流的基本物理特性。

历史上 Newton 和 Gibbs, Isenberg^[4]和 Mysels 等人^[5]都发表过很多关于肥皂膜的文章, 他们推荐肥皂膜用于热力学和流体动力学研究。Couder^[6,7]是第一个考虑将肥皂膜作为二维流体动力学研究平台的人, 他的实验是在水平静止的肥皂膜中拉动物体形成二维涡流, 从而研究涡流稳定性, 不过这种静止的肥皂膜由于蒸发极容易破裂, 不易做定态测量。Gharib 等人^[8]制作了一种沿刚性轨道流动的肥皂膜, 利用纯水和肥皂膜之间的表面张力差使肥皂膜向前流动。这种肥皂膜解决了静止肥皂膜由于蒸发引起的破裂的问题, 可以持续较长时间, 但是仍存在缺点, 例如肥皂膜不稳定不易调节, 流速存在限制等。Kellay 等人^[9]开发了一种利用肥皂膜自身重力使其垂直向下加速流动的方法, 这种肥皂膜能够持续很长时间, 且流动稳定, 适合于二维流动的研究, 为之后的研究提供了新思路; 缺点是由于重力的影响, 肥皂膜流速不能过低, 无法研究低速的二维流动, 同时, 肥皂膜也存在不均匀的现象。Rutgers 等人^[10]在此基础上从引导线、肥皂膜通道、牵引线三个方面改进了 Kellay 的装置: 使引导线从喷嘴中伸出, 肥皂液均匀地流到两根引导线上, 二维流动更稳定; 肥皂膜通道分成了三个部分, 在测试区域能够获得稳定的流动速度; 独特的引线和导丝的连接设计, 使得引线对肥皂膜的影响降到最低。杨义红等人^[11]还成功研发了一套竖直肥皂膜水洞, 对储水装置进行了改进。

Rutgers 等人^[10]研制的垂直流动的肥皂膜装置在保证肥皂膜流速稳定和膜厚均匀上有了极大的进展, 其装置也较为复杂不易实现。在此基础上, 我们从优化装置的角度思考, 参照 Rutgers 等人的装置, 主要从水泵和进料系统两方面着手, 进行改进: 将复杂的齿轮泵和隔膜泵换成实验室常见的蠕动泵, 将进料管和喷嘴通过螺纹有效连接, 更容易在肥皂膜上实现稳定均匀的二维流动。

1 装置组成及功能

1.1 整体构成

我们将利用稳定流动的肥皂膜进行二维流体动力学实验的装置分为成膜系统和观察系统两部分，成膜系统又分为外框架、注射模块、成膜模块、收集模块。观察系统又分为光路结构和采集系统。其中，外框架由铝型材搭建而成，有3米高，其结构如图2(a)所示；注射模块、成膜模块和收集模块为建立稳定流动肥皂膜的关键部分，如图2(b)所示，1是上层储液缸，2是蠕动泵，3是进料管和喷嘴，4是尼龙导线，5是尼龙拉线，6是肥皂膜，7是张紧重量，8是底部储液缸。装置整个运行流程如下：肥皂溶液在储液缸内，由蠕动泵传输到进料管及喷嘴。之后两条尼龙导线从喷嘴口伸出，连接一个张紧重量，其中间部分由四条细尼龙拉线牵引，由滑轮连接到绕线上。当肥皂液传输到导线上时，转动绕线轴将尼龙导丝分开，形成六边形。肥皂液最终从张紧重量处滴入底部的储液缸内。

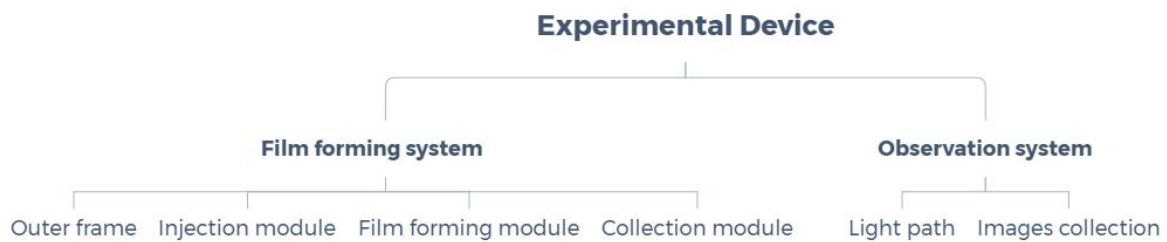


图1 装置整体构成
Fig.1 Overall composition

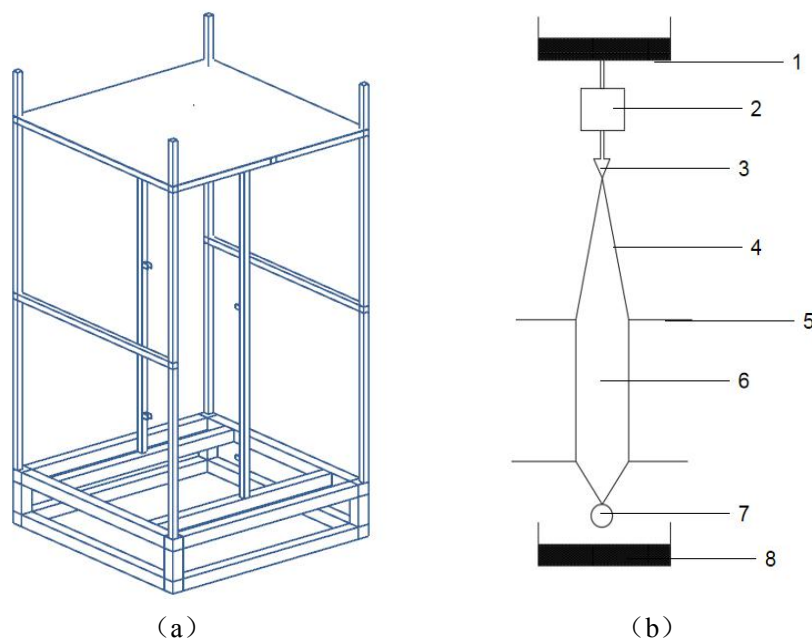


图2 (a) 外框架 (b) 注射、成膜、收集模块

Fig.2 (a) Outer frame (b) Injection、forming and collection module

1.2 注射模块

注射模块由储液缸、蠕动泵、进料管和喷嘴组成，目前使用的注射方案是直接通过蠕动泵，将肥皂液从储液缸中传输到进料管及喷嘴中，喷嘴再将肥皂液注射到尼龙导丝上。如图2(b)所示，进料管由一段连接在蠕动泵接头的内径为3mm的硅胶管和不锈钢管道组成，进料管的不锈钢管部分如图3所示。喷嘴的左右两边各有一直径为1mm的小孔，尼龙导丝一端通过小孔，另一端打绳结从喷嘴伸出，具体结构如图所

示。另外，由于尼龙导丝的直径为 0.5-1 毫米，喷嘴内的孔截面为 1×2 毫米的椭圆形，这种尼龙导丝通过小孔与喷嘴的连接方法有助于尼龙导丝和喷嘴有更紧密的连接和密封。

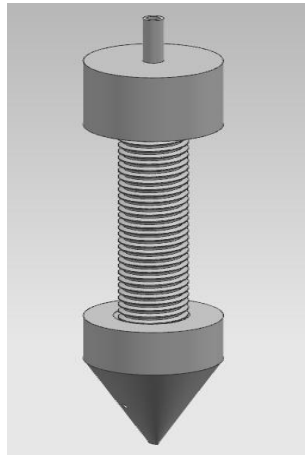


图 3 进料管及喷嘴

Fig.3 Feed tube and nozzle

1.3 成膜模块

成膜模块即由尼龙导丝、细尼龙拉线和张紧重量形成的六边形肥皂膜区域。我们使用的六边形肥皂膜区域的上部分的三角区域高度通常为 1 米，宽度由喷嘴口的 1 毫米到中间区域的 5-10 厘米，上三角区为肥皂液输入区，由于肥皂液的流动通常不能形成稳定的肥皂膜，不利于进行实验，但是调整上三角区的高和宽有利于六边形中间区域肥皂液渐进形成均匀的肥皂膜。

六边形肥皂膜中间区域高度为 1 米，由两条平行的尼龙导线形成，为测试阶段的主要实验区域。将两条尼龙导丝分开的尼龙拉线比尼龙导线更细，约为 0.2 毫米，这是为了减少对肥皂膜在导丝和拉线连接处肥皂液流动的扰动，同时也可以减少薄膜再生所需的时间。

肥皂膜的下三角区域由于重力的影响，通常聚集了较厚的肥皂液，肥皂膜不均匀不稳定，通常也不适用测试相关实验数据。此外，肥皂膜下三角区域的高度通常在 20-30 厘米以上，因为尼龙导丝从中间区域 10 厘米宽突然收缩到一点上会对尼龙导线和尼龙拉线施加张力，产生一定的气流，从而导致肥皂膜破裂。

1.4 收集模块

收集模块从尼龙导丝末端的张紧重量处开始，肥皂液经过尼龙导丝后从张紧重量处滴入底部的储液缸中。两条尼龙导丝被绑在同一个张紧重量上，这里张紧重量使用的是砝码。当肥皂膜由于气流不稳定而破裂时，为了重新获得肥皂膜，我们将转动绕线轴，松开尼龙拉线，此时，张紧重量可将两条尼龙导线拉直贴合，重新拉动尼龙拉线即可重新形成所需肥皂膜。

2 建立稳定流动肥皂膜的条件

2.1 肥皂液配方

本文中使用的肥皂液是用 1%-2%的液体洗洁精加上 98%-99%的去离子水配制而成的^[10]。在前期实验中，我们使用的是生活中常见的起泡剂例如洗洁精、沐浴露等的主要成分十二烷基硫酸钠作为原料，然而，实验结果并不理想。虽然十二烷基硫酸钠溶液用于棉线包裹住的铁圈（直径 20 厘米）可以制作比较长久稳定的肥皂膜，但是用于更大的实验平台则坚持不了几秒钟。另外，我们也在肥皂液中加入甘油^[12]进行了实验，实验结果表明，加入甘油很难获得均匀稳定的肥皂膜，原因是甘油属于一种粘性流体，它通常不能在实验测试阶段均匀地扩散。

2.2 实验环境

在实验过程中，肥皂膜不可避免地有经常性的破裂，下列几种方法在特定的时候可以有效地避免这种情况的发生。例如，保持肥皂液的清洁，如果长期循环使用，肥皂液浓度降低或受到污染都将可能导致肥

皂膜的破裂；尽量使肥皂膜免受气流的影响，气流不仅会影响对肥皂膜性质和流动可视化的研究，还会使肥皂膜破裂，可以使用防尘布将实验装置围起来，达到与外界隔离开的效果。

如果有微小气流影响实验，可以用以下方法监测^[13]：一束光以一定角度通过玻璃棒照射到肥皂膜上，光线穿过肥皂膜在天花板上形成光点，如果天花板上的光点波动，则说明肥皂膜有波动，此时可以改善环境再进行试验。

2.3 装置材料

肥皂液虽然在生活中很常见，但是意外地具有一定的腐蚀性，肥皂膜每一次破裂都会产生一层肥皂溶液雾，会喷溅到装置上，长久下去会腐蚀大多数金属，包括许多不锈钢。为了尽量减少腐蚀问题，装置的材料尽量使用聚四氟、玻璃或品质好的不锈钢。

形成肥皂膜的导线和拉线最好采用尼龙线即钓鱼线。尼龙导线的直径比拉线的直径要宽，如果导线很细，薄膜的稳定性会受到影响，原因是较细的导线不能够引导喷嘴口附近的肥皂膜向前流动。

3 肥皂膜可视化技术

可视化是进行任何流体动力学实验的一个极其重要的方面，对于流动肥皂膜的可视化，本文选取了三种方案，可以进行进一步的研究。

3.1 染料法^[14]

在流体流动的某些点上注入染料是一种最传统的方法，染料分子可以溶解在肥皂液中，通过注入的染料点的流体颗粒的轨迹来可视化。通过解释流体颗粒的轨迹对流动特性进行全面的了解。染料法分析的一个基本假设是，染料颗粒的运动跟随邻近流体的运动。

3.2 光学干涉法^[15]

最简单的可视化方法根本不需要向流体中添加染料。它依赖于肥皂膜的前后表面之间的光学干涉，这也是肥皂膜常见颜色的来源。如果一束光以一定的角度照射到肥皂膜上，由于肥皂膜的外表面活性剂层和表面活性剂溶液层的折射率不同，光波会因相互干涉而形成新的光波。

3.3 纹影法^[16]

对于非常厚的薄膜，光学干涉可能行不通，因为条纹间距将会变得很小，无法用相机拍摄出来。在这种情况下，可以使用阴影绘制技术，即纹影法。平行光从远处的光源照射到镜面上，光线通过镜面反射以一定角度穿过肥皂膜，肥皂膜由于重力作用上下不均匀，且较厚的地方存在轻微弯曲，此时薄层和厚层之间薄膜的轻微弯曲使光从平行方向弯曲，然后光线被聚焦到相机上。

4 肥皂膜流动观察

在我们目前的实验条件下，通过光学干涉法能够得到比较清晰的肥皂膜的二维流动图像，如图4所示。

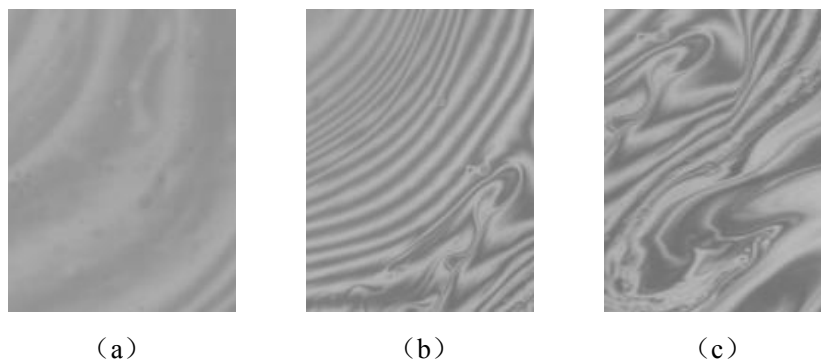


图4 肥皂膜各区域流动图像

Fig.4 images of flowing soap films

这种方法与肥皂膜的倾斜角度有关。倾斜的肥皂膜在重力作用下，形成了薄厚不同的楔形，当平行光源从膜的前表面和后面表面分别反射频率相同、方向相同的光波时，能产生干涉，在肥皂膜的一些地方，平

行光反射回来时，恰是波峰和波峰的叠加，光波的振动加强，形成亮条纹；在另一些地方，波谷和波峰叠加，光波振动抵消，形成暗条纹^[17]。图4(a)(b)为肥皂膜较稳定均匀的区域，由于肥皂膜在(a)处非常薄，蒸发最快，光学干涉不明显，(b)处肥皂膜较厚，能够清晰地形成亮暗条纹，(c)为肥皂膜受重力影响不稳定均匀区域，肥皂膜较厚且流速较快，形成清晰的涡流。

5 结论

在适当的条件下，改进的利用稳定流动的肥皂膜进行二维流体动力学实验的装置不仅可以更简单地获得稳定均匀的肥皂膜，还能够作为实验平台采集二维流动图像并观测其特性。

参考文献

- 1 Sane, A., S. Mandre, and I. Kim, Surface tension of flowing soap films. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018. 841.
- 2 Y. Couder and C. Basdevant, "Experimental and numerical study of vortex couples in two-dimensional flows," *J. Fluid Mech.* 173, 225 (1986).
- 3 M. Rivera, P. Vorobieff, and R. E. Ecke, "Turbulence in flowing soap films: velocity, vorticity and thickness fields," *Phys. Rev. Lett.* 81, 1417 (1998).
- 4 C. Isenberg, "The Science of Soap Films and Soap Bubbles," Dover, New York, (1992).
- 5 K. J. Mysels, K. Shinoda, and S. Frankel, "Soap Films, Studies of Their Thinning and a Bibliography," Pergamon, New York, (1959).
- 6 Y. Couder, "The observation of a shear flow instability in a rotating system with a soap membrane," *J. Phys. (France) Lett.* 42, 429 (1981).
- 7 Y. Couder, J. M. Chomaz, and M. Rabaud, *Physica D* 37, 384 (1989).
- 8 M. Gharib and P. Derango, "A liquid film (soap film) tunnel to study two-dimensional laminar and turbulent shear flows," *Physica D* 37, 406 (1989).
- 9 H. Kellay, X. L. Wu, and W. Goldburg, "Experiments with turbulent soap films," *Phys. Rev. Lett.* 74, 3975 (1995).
- 10 M. A. Rutgers, X. L. Wu, W. B. Daniel, "Conducting fluid dynamics experiments with vertically falling soap films," *Rev. Sci. Instr.* 72, 3025 (2001).
- 11 YANG Yi hong, YIN Xie zhen, LU Xi yun, "Experimental methods in a soap film tunnel," *Journal of Experiments in Fluid mechanics*, 19, 36 (2005).
- 12 D. A. Edwards, H. Brenner, and D. T. Wasan, *Interfacial Transport Processes and Rheology* (Butterworth-Heinemann, Boston, MA, 1991).
- 13 M. Rutgers et al., *Phys. Fluids* 8, 2847 (1996).
- 14 S. Harris and R. Miles, R. Miles, W. Lempert, and S. Harris, Princeton University (personal communication).
- 15 Yang TS, Wen CY, Lin CY (2001) Interpretation of color fringes in flowing soap films. *Exp Therm Fluid Sci* 25(34):141 - 149.
- 16 Auliel, M.L., et al., Schlieren technique in soap film flows. *Experiments in Fluids*, 2017. 58(5).
- 17 Jaszowski, D., Rzeszut, J. Interference colours of soap bubbles. *Visual Computer*. 2003, 19:252-270.