

在重力场中下落颗粒穿过肥皂膜的动力学 研究

赵钻钥

摘要：本文研究了颗粒在重力场中下落并垂直穿过其运动轨迹上的肥皂膜的动力学过程。我们理论上给出了关于较大球体穿过皂膜前后机械能变化的表达式，并对得到的理论预言进行了定性验证。本文设计的实验验证了环径，球径，皂液表面张力系数对液膜能量吸收能力的影响。我们分别利用颗粒及液滴可大致得出皂膜可承载的质量区间，实验发现皂膜可承载的固体颗粒质量在 $0.05\text{g}\sim 0.1\text{g}$ ，可承载的液滴质量在 $0.05\text{g}\sim 0.06\text{g}$ 。

关键词：表面活性剂 固液界面张力 自修复 反向筛选 机械能变化

2020 S.-T. Yau High School Science Award

目录

1 理论分析.....	3
2 实验探究.....	6
2.1 装置设计.....	6
2.1.1 皂液配置及皂膜制作方法.....	6
2.1.2 实验器材.....	7
2.2 皂液基本性质测量.....	8
2.2.1 皂液表面张力系数测量.....	8
2.2.2 皂液固液界面张力测量.....	8
2.3 球状物体穿过皂膜的动力学过程.....	9
2.4 球体通过时对皂膜稳定性的影响.....	11
2.4.1 不同球膜直径比情况下小球的成功通过率.....	12
2.4.2 不同释放高度下小球的成功通过率.....	12
2.5 实验验证影响皂膜吸收能量的因素.....	13
2.5.1 皂膜浓度对皂膜吸收能量的影响.....	13
2.5.2 环直径对皂膜吸收能量影响.....	15
2.5.3 球直径比对皂膜吸收能量的影响.....	16
2.6 对皂膜可承载质量的探究.....	18
2.6.1 颗粒状物体截留.....	18
2.6.2 液滴截留.....	19
3.结论与展望.....	20

2020 S.-T. Yau High School Science Award

引言:

加入表面活性剂的液体在固液界面张力的作用下,可以在环之间形成薄膜而不聚集成液滴,形成的薄膜具有自修复,自洁净的性质,薄膜稳定性足够高的情况下,可以容许动能高的物体通过,截留动能低的物体,在2020年新冠爆发时,世界各国多地设置方舱医院(尤其是众多发展中国家),在人口流量极大的病患聚集区,想要实现隔离保存药品和各种医疗设施需要不小的开销,利用该种薄膜所具有的反向过滤性质,可以实现在应急情况下快速构筑隔离墙,只需要不断更新膜上液体,就可以在短期内维持内外环境的隔离,大幅缩短隔离用的时间及开销。且该种隔离措施也可以应用于野外需要隔离蚊虫和应急隔离,能以较低的成本形成较稳定内部环境。以日常生活中的肥皂膜为代表的加入表面活性剂的液膜拥有在破创较小的情况下自修复的特性,自修复指物体穿过液膜后液膜在一定程度内可以自我修复并回复原状,该种特性主要决定于液膜表面性质和液量是否充足,该种特性可应用于颗粒分离,菌尘隔离,可以有效提升筛选效率及降低隔离成本。对于该现象, Birgitt Boschitsch Stogin, Luke Gockowski 等人从能量角度对物体穿过皂膜的条件^[1]给出了理论分析,本文基于其理论推导进行实验验证,测量了皂膜可承载的质量区间。

1 理论分析

忽略空气阻力,将液膜简化为仅两层表面的极轻液膜,因其有维持最小表面积的趋势,所以最终会形成悬链线,故满足:

$$x = a \cos \left(\frac{y}{a} \right) \quad (1)$$

其中 a 为常数。根据能量守恒,则对于穿过液膜的小球(忽略空气阻力)满足:

$$\Delta E_p = \Delta E_s + E_{diss} + E_{ub} \quad (2)$$

其中 ΔE_s 为表面能增量 E_{diss} 为因黏附摩擦损失的能量 ΔE_p 为重力势能改变量, E_{ub} 为小球动能增量。

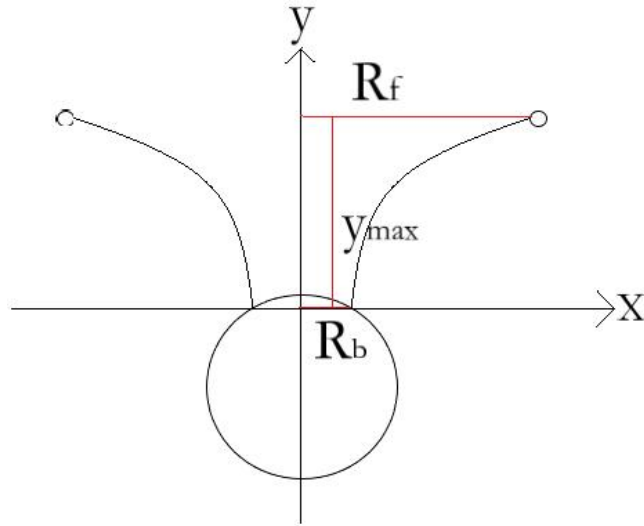


图 1 建立的坐标系和各物理量

如图 1 所示，取球体与液膜分离的临界位置做分析（假设此时皂膜与球接触位置皂膜切线方向与水平方向垂直），以球膜接触点所在截面的圆心为原点建立直角坐标系，可得以下三式：

$$x(y_{\max}) = R_f \quad (3)$$

$$x(y = 0) = R_b \quad (4)$$

$$\left. \frac{dx}{dy} \right|_{y=0} = 0 \quad (5)$$

其中 y_{\max} 为截面与环的垂直距离， R_f 为环半径（最初液膜半径） R_b 为截面半径
将（3）（4）（5）代入悬链线方程得：

$$y_{\max} = R_b \cosh^{-1} \left(\frac{R_f}{R_b} \right) \quad (6)$$

对（6）式积分得出最大拉伸面积为：

$$A = \pi R_b^2 (\sinh \varphi + \varphi) \quad (7)$$

此处 $h = y_{\max}$ ， $\varphi = 2 \cosh^{-1} \left(\frac{R_f}{R_b} \right)$ 最终得到表面自由能的增量为

$$\Delta E_{s \max} = 2\pi\gamma \left\{ R_b^2 [\sinh \varphi + \varphi] - R_f^2 \right\} \quad (8)$$

接下来本文继续讨论因黏附摩擦损失的能量 F_{diss} ，液膜与小球的黏附摩擦力由 Furmidge 给出：

$$F_{\text{diss}} = 2\gamma\pi R(\alpha) (\cos\theta_R - \cos\theta_A) \quad (9)$$

其中

$$R(\alpha) = R_m \sin\alpha \quad (10)$$

R_m 为球半径， α 为球膜接触点与球心连线与重垂线形成的夹角，则因黏附摩擦力损失的能量为：

$$E_{\text{diss}} = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} 2\pi\gamma R_m^2 \sin\alpha \cdot (\cos\theta_R - \cos\theta_A) d\alpha \quad (9)$$

取 $\alpha_1=0$ ， $\alpha_2 = \pi$ 时，有：

$$E_{\text{diss}} = 4\pi\gamma R_m^2 (\cos\theta_R - \cos\theta_A) \quad (10)$$

在完整的下落过程中有：

$$\Delta E_p = \rho_b g H \left(\frac{4}{3} \pi R_m^3 \right) \quad (11)$$

将 E_{diss} 和 ΔE_p 进行比较得到：

$$\frac{E_{\text{diss}}}{\Delta E_p} \ll 1 \quad (12)$$

因此 E_{diss} 可忽略，小球下落的过程中能量可近似为：

$$\rho_b g H \left(\frac{4}{3} \pi R_b^3 \right) = \pi\gamma \{ R_b^2 [\sinh\varphi + \varphi] - 2R_f^2 \} + E_{\text{ub}} \quad (13)$$

利用（13）式即可通过 E_{ub} 的正负来判断物体能否通过皂膜。具体实验中发现球膜接触后，在一段极短时间内速度突然减小，这是因为球膜发生碰撞，因此实际情况中（13）式成立的条件，球（ M ）与液膜（ m ）的质量应满足关系：

$$M \gg m \quad (14)$$

同时考虑到碰撞时液膜的微小形变会增加两者碰撞面积，而本文讨论的是球状物体，影响正碰面积主要由球体的曲率半径（半径 R_m ）决定， R_m 越大，碰撞能量损失 E_{diss} 越大， E_{diss} 与 R_m 呈正相关。

结合以上对球状物体的质量和半径的讨论，小球的质量越大，半径越小，（13）式描述此现象的准确性越高。所以（13）式更适合用来讨论小球通过液膜前后的机械能变化，简化得到：

$$\Delta E = \Delta E_{s\text{max}} = \pi\gamma \{ R_b^2 [\sinh\varphi + \varphi] - 2R_f^2 \} \quad (8)$$

（8）式中存在有液膜垂直拉伸高度 h ，而垂直拉伸高度的临界情况便是液膜与球体表面脱离（ $h = y_{\text{max}}$ ），针对该时刻的接触位置有：

$$\pi\gamma R_b^2 (\sinh\varphi + \varphi) = F_{sl\text{max}} \quad (15)$$

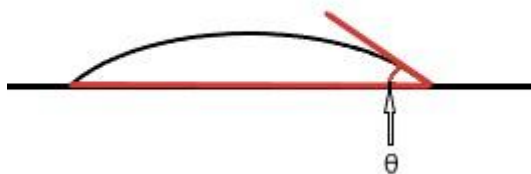


图 2 湿润角示意图

其中 F_{sl} 表示固液界面张力，即固体对液体的吸附力。引入湿润角来表征固液界面张力的大小。如图 2 所示，湿润角最初定义是液体滴落在水平固体表面时，接触位置液滴切线方向与地面形成的夹角，该接触角理论上可以由杨-拉普拉斯方程推导，即：

$$\cos\theta = \frac{\gamma_s - \gamma_{sl}}{\gamma_l} \quad (16)$$

湿润角的大小可以直观体现固液界面张力大小，即 $\cos\theta$ 越大， F_{slmax} 越大。由于在材料不改变的情况下湿润角的大小不变，即得最大表面积恒为(7)式：

$$A = \pi R_b^2 (\sinh\varphi + \varphi)$$

此处： $\varphi = 2\cosh^{-1} \left(\frac{R_f}{R_b} \right)$ ， $h = y_{max}$ 。

由几式可知，当 R_f 增大时， h 会减小， φ 会增大，故 ΔE_{smax} 与 R_f 呈反相关；当 R_m 增大时， R_b 会增大， h 会增大， φ 会增大，故 ΔE_{smax} 与 R_b 呈正相关；当 γ 增大时， F_{slmax} 增大，故 ΔE_{smax} 与 γ 呈正相关。

2 实验探究

2.1 装置设计

2.1.1 皂液配置及皂膜制作方法

皂液制备方法：

- ①将水、甘油、正常肥皂分别按照 179：20：1 的比例配成质量分数为 0.5% 的皂液
- ②水浴加热至 80℃（高于肥皂类表面活性剂 Krafft 点）以上，等待溶液中没有固体残留
- ③自然冷却至室温。

按照上述方式，制成质量分数 1% 的皂液（甘油质量占比不变）。当达到近似动态平衡后，滴一滴皂液在肥皂膜上，若液滴能在皂膜中央静止，则皂膜已经水平。将铁环浸入皂液

中 1~2cm，脱离皂液后，将补液装置开启，调节液体的补充速度。



2.1.2 实验器材

图 3 皂膜的制作装置——铁环

如图 3 所示，铁环规格为外环直径 7.864cm，内环直径 7.408cm，环横截面直径为 3.834mm。

图 4



[a. 皂膜的制作过程](#)

[b. 毛细管上升法测量皂液表面张力的装置。](#)

[c. 滴液法测每滴皂液的质量以及皂液密度的装置](#)

[d. 物体穿过皂膜的拍摄装置](#)



[a. 测量工具](#)



[b. 抓取工具](#)



[c. 实验颗粒大小确定工具](#)



[d. 压力传感器](#)

2.2 皂液基本性质测量

2.2.1 皂液表面张力系数测量

本文利用毛细管上升法测量表面张力系数。将内直径 d 为 1.473mm 的洁净、干燥的玻璃管竖直插入已冷却至室温的皂液当中，等待管内液柱达到平衡状态，测量液柱凹液面最低处相对外液面高度 h ，并测量肥皂水的密度 ρ ， g 为当地的重力加速度，将数据代入式 (17) 得表面张力系数 c

$$C = \frac{1}{4}d\rho g \left(h + \frac{d}{6} \right) \quad (17)$$

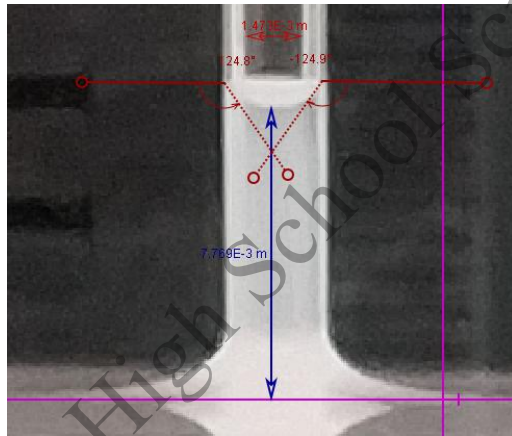
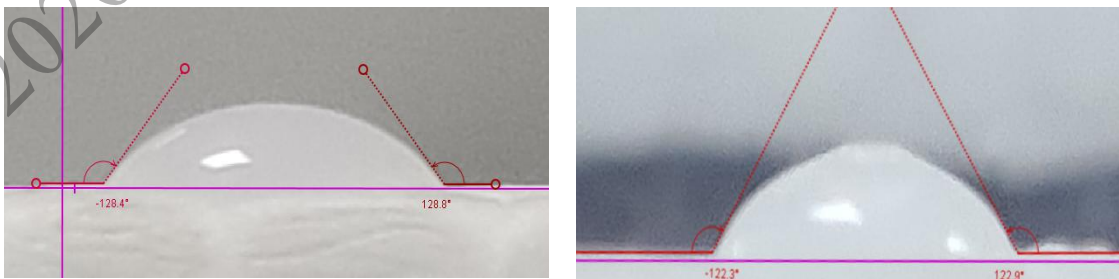


图 6 毛细管法测量表面张力系数

计算得到 $C_1 = 39.7\text{mN/m}$ $C_2 = 35.6\text{mN/m}$ ，其中 C_1 : 0.5%浓度皂液表面张力系数， C_2 : 1%浓度皂液表面张力系数

2.2.2 皂液固液界面张力测量



a. 0.5%浓度的湿润角 $\theta_1 = 51.4^\circ$

b. 1%浓度的皂液的湿润角 $\theta_2 = 57.4^\circ$

图 7 不同浓度皂液的湿润角的测量结果

根据图 7 所示，湿润角测量结果为： $\cos\theta_1 = 0.624 > \cos\theta_2 = 0.539$ ，较低浓度湿润角较小，故浓度较低的 F_{slmax} 较大

2.3 球状物体穿过皂膜的动力学过程

将一个泡沫小球由较低高度自由释放穿过皂膜（皂液浓度：0.5%， $v_y < 2m/s$ ），小球自脱离后做向下的加速运动，在与皂膜接触时速度发生一段持续时间极短的突然减小，接下来继续加速穿过肥皂膜，此时小球的加速度相较自由下落时无明显下降，随后小球逐渐减速，速度在皂膜与小球的接触面相切的时候达到最小值，之后肥皂膜逐渐脱离小球表面，基本脱离后小球恢复自由落体运动。期间两次趋势变化的时间节点分别发生在小球刚接触皂膜时，和皂膜基本聚拢脱离小球表面时。该过程（每张图之间约间隔 12fps）如图 8 所示：

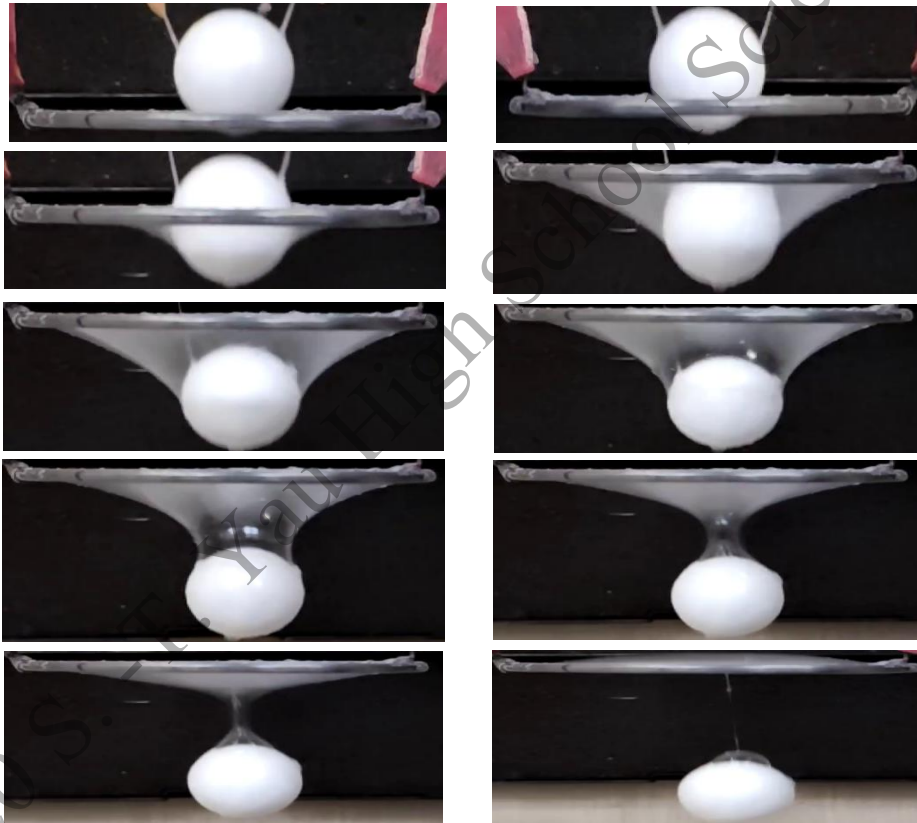


图 8 泡沫球穿过皂膜过程

本次实验使用的是空心的泡沫小球（ $M < 1g$ ），体积较大，在该种状况下可以观测到较明显的碰撞减速过程，减速极为为明显。将下落过程导入 tracker 打点得到小球的速度的图像如图 9 所示：

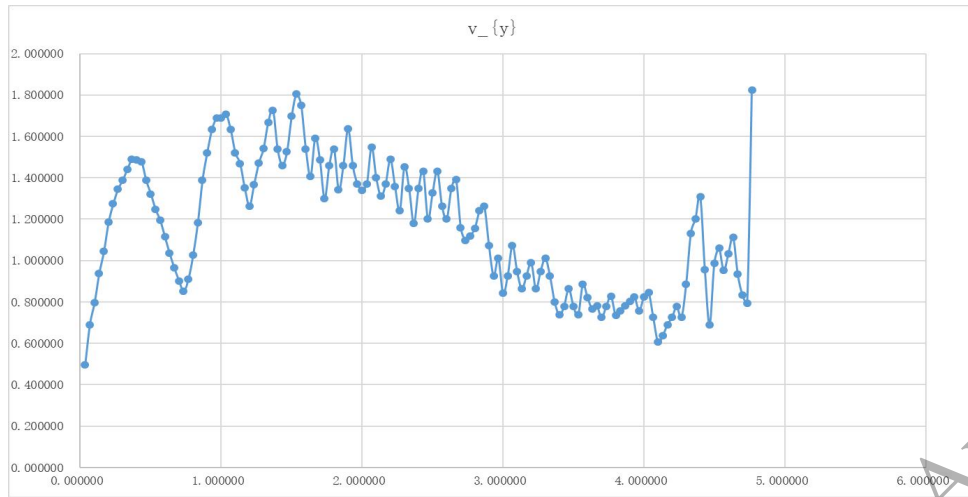


图 9 泡沫球垂直方向速度时间图像

如图 9 所示在小球的整个运动过程中，皂膜状态主要有三个阶段，第一阶段是小球接触皂膜时与皂膜发生碰撞，存在极为明显的减速过程。若碰撞强度过大，可能会导致皂膜破裂。（一般发生曲率半径较大的球体上）

第二阶段为皂膜随小球被拉伸，小球的表面与皂膜吸附在一起，减速效果逐渐增强，若皂膜拉伸过快，皂膜内部出现表面张力不均，尚未回流便可能会因为表面张力局部过大而断裂（如图 10 所示为皂膜破裂图）。

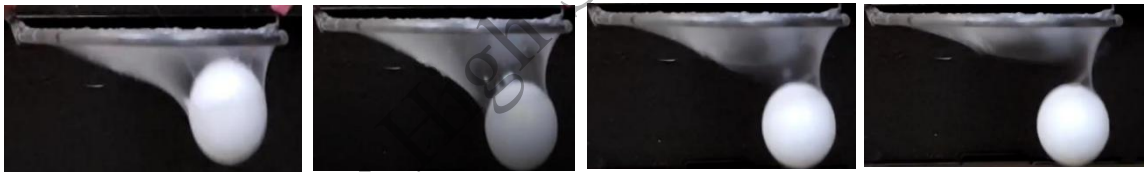


图 10 泡沫球穿过时，皂膜破裂图像

第三阶段为皂膜持续沿球面移动，当皂膜的空隙收束较小（在使用该泡沫球的情况下会收束成液丝）若小球的下落速度过快，皂膜没有足够的时间收束至足够小的位置，皂膜同样也会破裂。

上述过程即为球体穿过皂膜完整的运动过程，和皂膜破裂的原因。除此之外，实验中还发现一种特殊现象：在颗粒被截停于极少数球体穿过时，如图 11 所示，皂膜会与水面一样体现出能传导波动的性质。

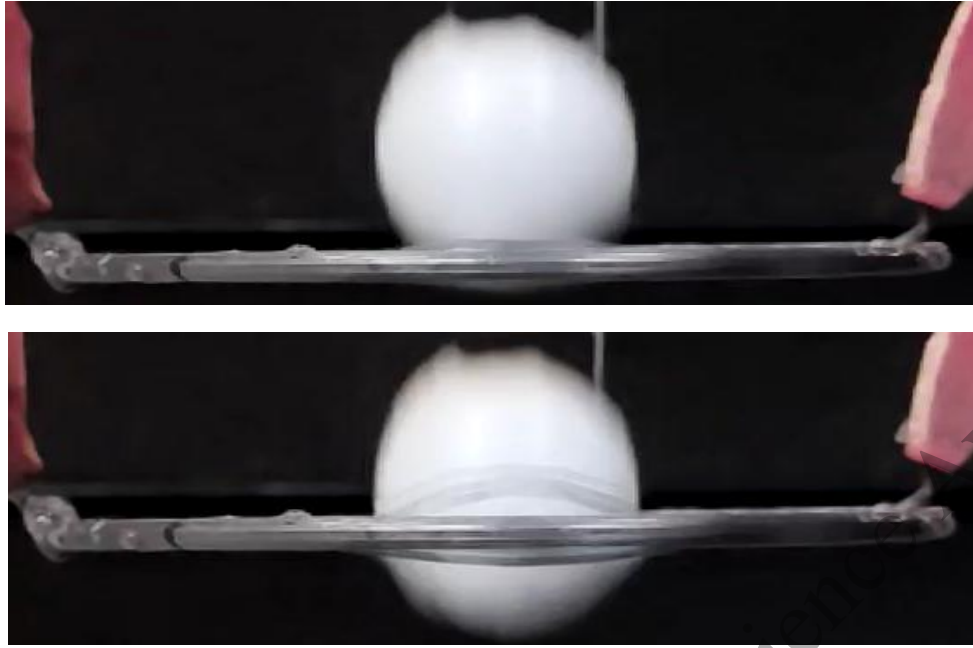


图 11 皂膜波动图像

这种波动在截留和穿过时都会出现（穿过时极少）。因为存在该种波动现象，皂膜将多余能量转化为内能耗散，但波动同样会影响皂膜的稳定性，鉴于穿过情况下出现的波动较少，暂不对其做过多的分析。

2.4 球体通过时对皂膜稳定性的影响

在探究球体对皂膜稳定性的影响时，为了避免水平方向上的速度对实验结果的影响，实验中增加了一个轨道对其进行释放，如图 12 所示，使其仅有竖直方向的初速度。



图 12 轨道图及垂直释放示意图

为了寻找皂膜维持稳定的条件，结合 2.2.1 节中观察到的实验现象，本实验在改变不同初始条件（球膜直径比，释放高度）的情况下进行多次释放（500 次），将球体成功通过而皂膜未破裂视作成功，从而统计不同情况下的成功率。

2.4.1 不同球膜直径比情况下小球的成功通过率

在释放高度均为 5cm 的条件下，使用 0.5%浓度皂液和 PTFE 球在不同球膜直径比的情况下进行实验，得到的结果如表 1 及图 13 所示。

表 1 不同球膜直径比成功率

球膜直径比	1:20	1:15	1:12	2:15	1:5	3:10
成功率	100%	97%	89%	76%	11%	0%

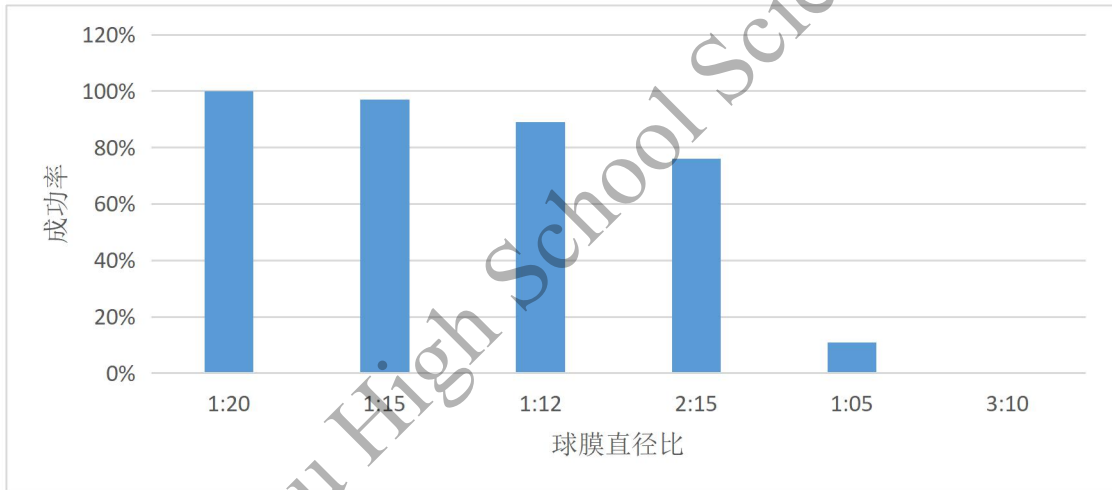


图 13 不同球膜直径比成功率

可以发现，小球通过的成功率在球膜直径比为 2: 15 和 1: 5 之间有一个大幅下降的过程，在两者之间存在着球体成功通过的临界值，结合实验结果，皂膜更适合用于较小物体的筛选与阻隔。

2.4.2 不同释放高度下小球的成功通过率

球膜直径比均为 1: 5，利用 0.5%浓度皂液和 PTFE 球在不同释放高度下进行实验，得到的结果如表 2 及图 14 所示。

表 2 不同释放高度成功率

释放高度 (cm)	20.0	10.0	5.0	2.5	1.0
成功率	0%	1%	13%	47%	100%

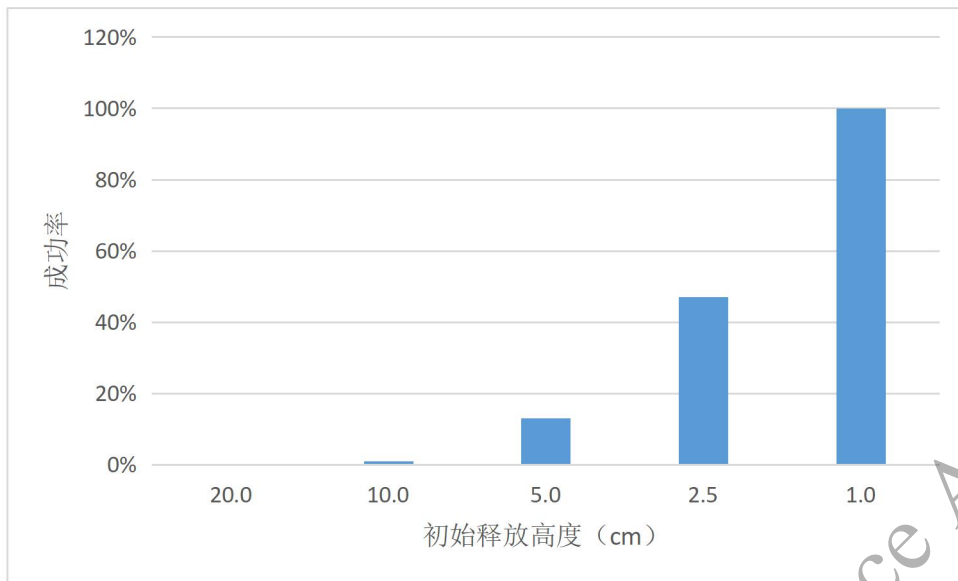


图 14 不同释放高度成功率

对比实验结果，与在 2.2.1 中得到的结果基本一致，皂膜释放高度和球膜直径比的增加都会加剧皂膜的不稳定性，使得其破裂的概率上涨，实际应用中应尽量避免过大的物体通过及过高位置释放。通过实验，能发现使用最小的球体也不能停留在皂膜表面，所以皂膜能承载的质量区间应小于所用球体。

2.5 实验验证影响皂膜吸收能量的因素

进一步地，实验中针对在理论分析中预测的三个定性关系进行验证。

2.5.1 皂膜浓度对皂膜吸收能量的影响

利用已测量过湿润角及表面张力系数的 0.5% 浓度，1% 浓度的皂液进行实验，根据 2.1 节中的测量可知 0.5% 浓度皂液 $C_1 = 39.7 \text{ mN/m}$ ， $\theta_1 = 51.4^\circ$ ， $\cos\theta_1 = 0.624$ ；1% 浓度皂液 $C_2 = 35.6 \text{ mN/m}$ ， $\theta_2 = 57.4^\circ$ ， $\cos\theta_2 = 0.539$

使用 8mm 直径的 PTFE 球，8cm 的环直径，释放高度均为 1cm，得到两球的减速过程如图 15 16 所示（利用 32 倍慢放拍摄，横纵坐标均有等比缩放）。

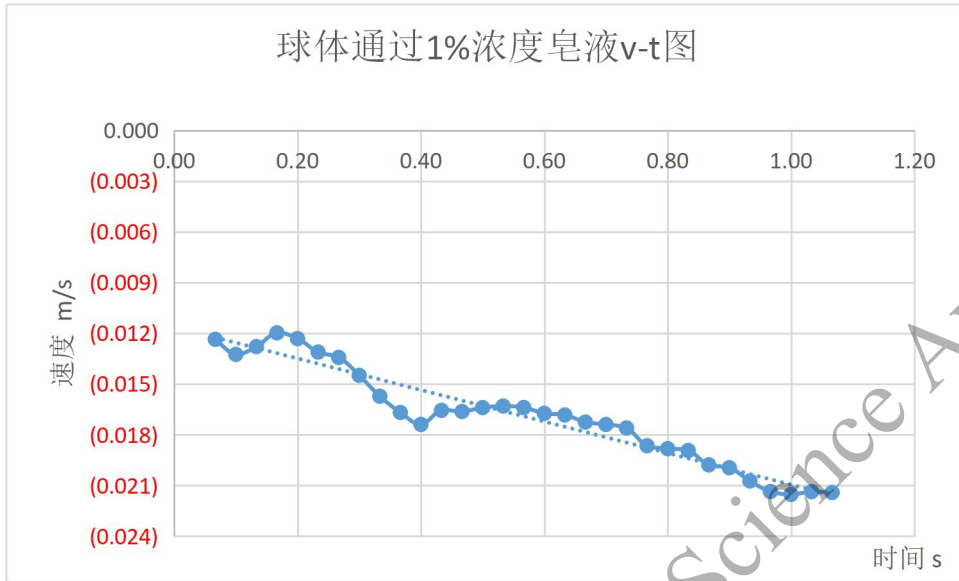


图 15 球体通过 1%浓度皂液 v-t 图

因为初始释放高度相同，球接触皂膜的初速度几乎一致（约为 0.4m/s），1%浓度皂液的通过时间约为 0.03s，脱离速度约为 0.67m/s.

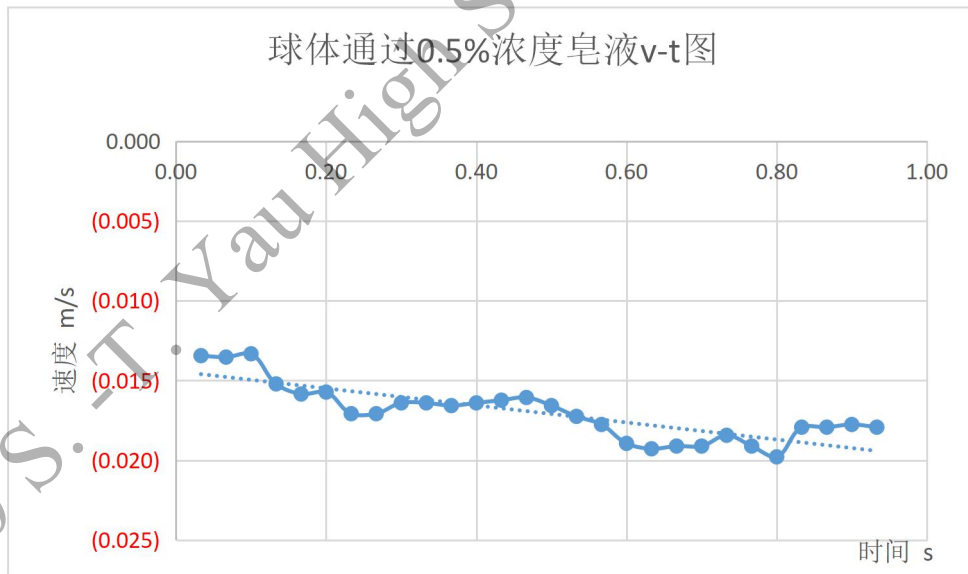


图 16 球体通过 0.5%浓度皂液 v-t 图

测量得到的 0.5%浓度皂液的通过时间约为 0.03s，脱离速度约为 0.64m/s.针对通过皂膜的重力势能改变量可以进行简单估算，假设球体的运动过程为匀加速直线运动，计算结果如表 3 所示

表 3 不同皂液浓度实验结果

皂液浓度	1%浓度	0.5%浓度
重力势能改变量 (J/kg)	0.161	0.156
动能改变量 (J/kg)	0.144	0.125
机械能减少量 (J/kg)	0.017	0.031

对比两种浓度下的能量变化可以得到表面张力系数越大，皂膜吸收能量越多，与理论相符。

2.5.2 环直径对皂膜吸收能量影响

实验选择 8mm 的 PTFE 球，释放高度 1cm，皂液浓度 0.5%，环直径分别为 5.5cm，8cm，得到结果如图 17 18 所示：

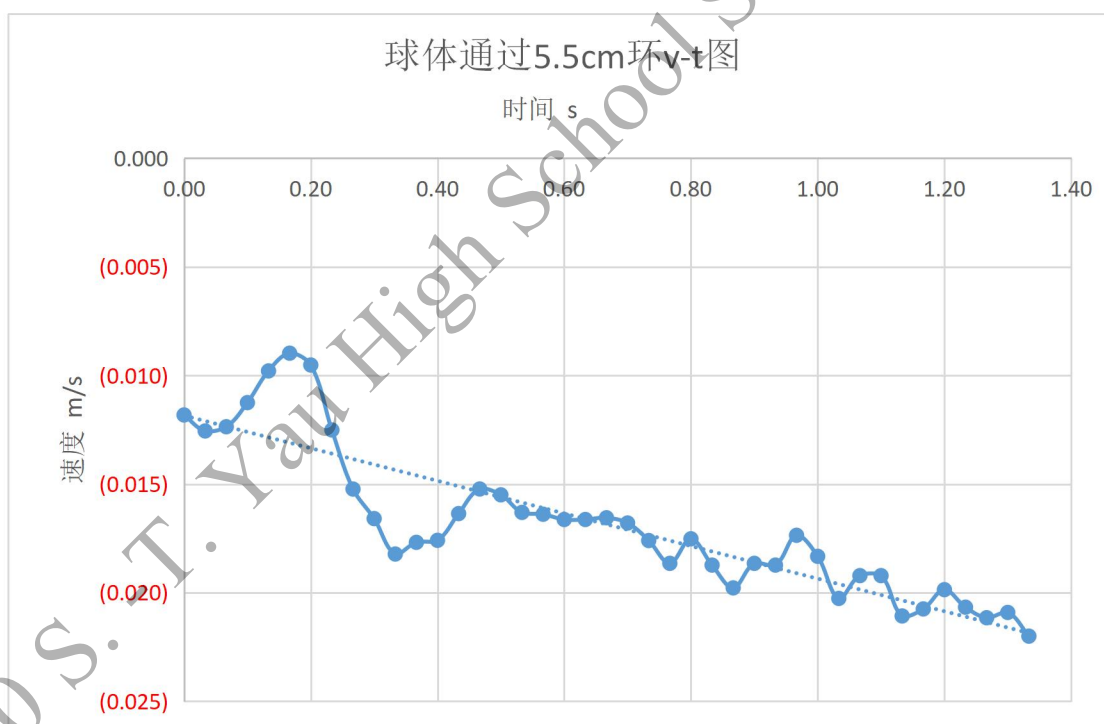


图 17 球体通过 5.5cm 环 v-t 图

测量得到 5.5cm 环的初速度约为 0.4m/s，通过时间约为 0.04s，末速度约为 0.70m/s。

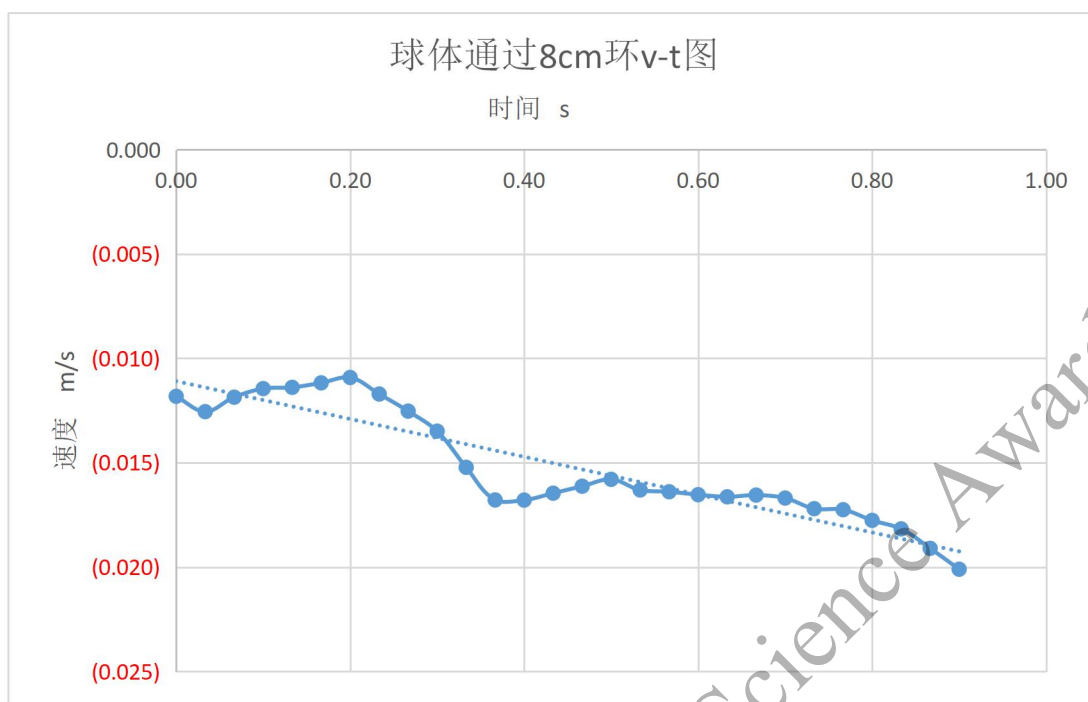


图 18 球体通过 8cm 环 v-t 图

测量得到 5.5cm 环的初速度约为 0.4m/s，通过时间约为 0.03s，末速度约为 0.64m/s.

表 4 不同环径实验结果

环直径	5.5cm 环	8cm 环
重力势能改变量 (J/kg)	0.213	0.156
动能改变量 (J/kg)	0.165	0.125
机械能减少量 (J/kg)	0.048	0.031

对比两种环直径下的能量变化可以得到环径越小，皂膜吸收能量越多，与理论相符。

2.5.3 球直径比对皂膜吸收能量的影响

实验选择直径 5.5cm 环，0.5%浓度皂液，释放高度 1cm，分别选择 8mm 和 5mm 直径的 PTFE 球，因为该实验中涉及球的规格变化，通过测量，5mmPTFE 球质量约为 0.15g，8mmPTFE 球质量约为 0.62g，得到的实验结果如图 19 20 所示：

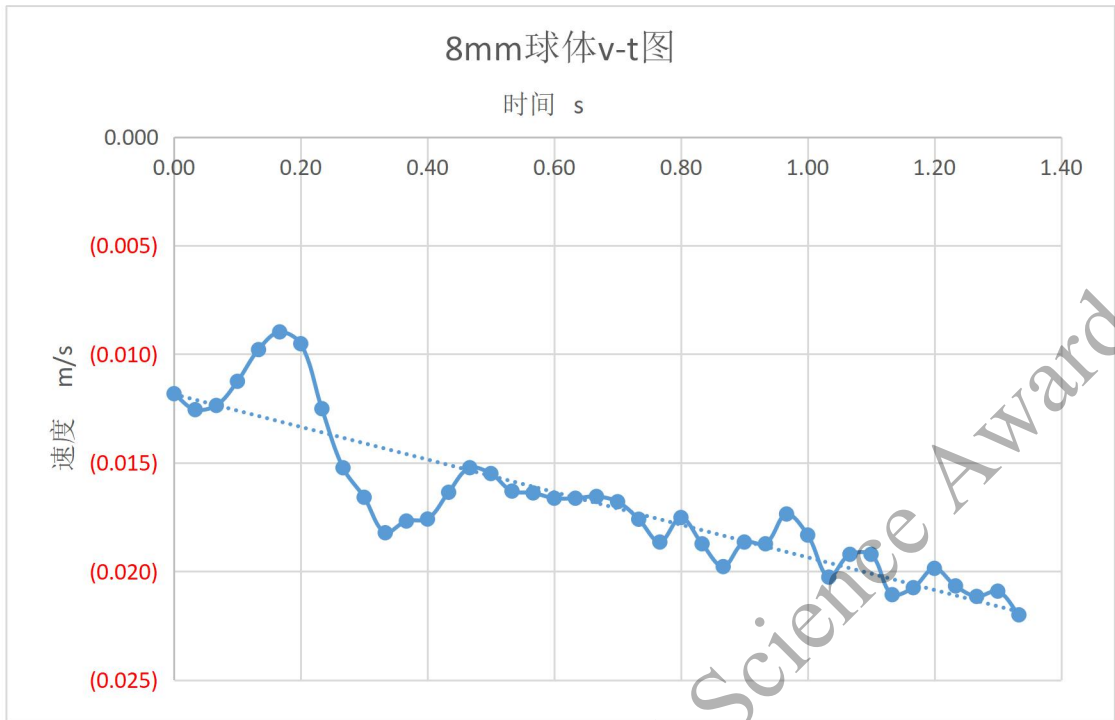


图 19 8mm 球体 v-t 图

8mm 球的初速度约为 0.4m/s，通过时间约为 0.04s，末速度约为 0.70m/s

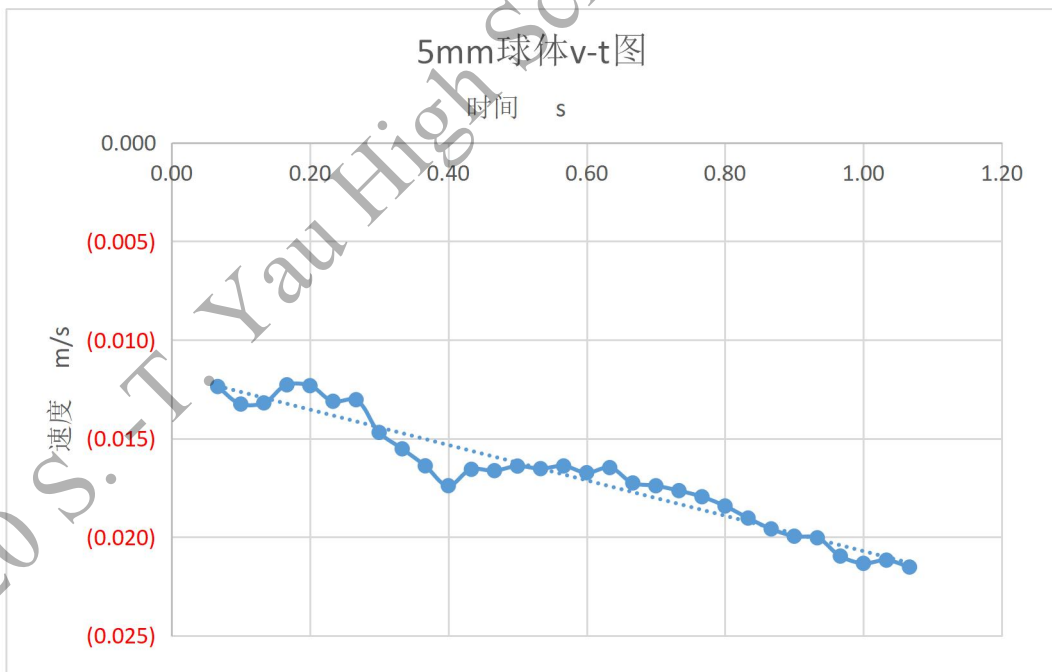


图 20 5mm 球体 v-t 图

5mm 球的初速度约为 0.40m/s，通过时间约为 0.03s，末速度约为 0.65m/s

表 5 不同球尺寸实验结果

球尺寸	8mm 球	5mm 球

重力势能改变量 (J/kg)	0.213	0.156
动能改变量 (J/kg)	0.165	0.125
机械能减少量 (J)	2.98×10^{-5}	3.3×10^{-6}

对比两种球直径下的能量变化可以得到球径越大，皂膜吸收能量越多，与理论相符。

2.6 对皂膜可承载质量的探究

2.6.1 颗粒状物体截留

相较于体积较大的球状物体而言，在有皂液补给的情况下，少数颗粒物质（20目以上）几乎无法对皂膜的稳定性造成影响，实验发现颗粒的穿过条件基本与小球等物体保持一致（较大的速度），所以我们做了有关皂膜能承载颗粒质量的研究。鉴于单独颗粒的质量极小，且测量的误差较大，所以利用筛网选取目数不同的颗粒来进行区分。

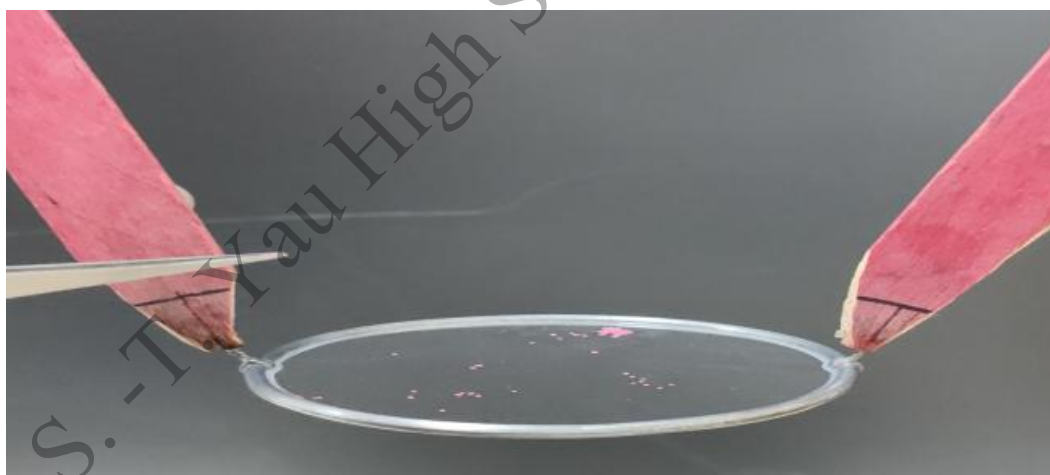


图 21 颗粒漂浮皂膜表面图

速度较低的颗粒（小于 0.2m/s）基本都会被截留在皂膜上，因为质量小，基本不会对液膜的稳定造成影响，但承接的颗粒会在重力作用下逐渐聚集在一处（图 21），当颗粒聚集到一定数量时便会脱离皂膜，同时带走大量皂液，如果没有皂液补充，皂膜便会破裂，在该实验条件下，因为固体颗粒的干扰较大，只能得到大致范围是在 0.05g~0.1g

2.6.2 液滴截留

利用电子称（精度为 0.1g）记录液滴滴落数量及对应的质量变化，计算出液滴重量的平均值（100 滴），通过多次测量，我们发现滴液装置的流速越快，滴出的液滴质量越大。在同一恒定速度下，得出液滴质量约为 0.016g，如表 6 所示。

表 6 滴液装置液滴质量测量

皂液滴数	质量(g)	皂液滴数	质量(g)	皂液滴数	质量(g)	皂液滴数	质量(g)	皂液滴数	质量(g)
1	0	21	0.3	41	0.7	61	1	81	1.3
2	0	22	0.3	42	0.7	62	1	82	1.3
3	0	23	0.3	43	0.7	63	1	83	1.3
4	0	24	0.4	44	0.7	64	1	84	1.3
5	0	25	0.4	45	0.7	65	1	85	1.3
6	0.1	26	0.4	46	0.7	66	1.1	86	1.3
7	0.1	27	0.4	47	0.7	67	1.1	87	1.4
8	0.1	28	0.4	48	0.8	68	1.1	88	1.4
9	0.1	29	0.4	49	0.8	69	1.1	89	1.4
10	0.1	30	0.5	50	0.8	70	1.1	90	1.4
11	0.2	31	0.5	51	0.8	71	1.1	91	1.4
12	0.2	32	0.5	52	0.8	72	1.1	92	1.4
13	0.2	33	0.5	53	0.8	73	1.2	93	1.5
14	0.2	34	0.5	54	0.9	74	1.2	94	1.5
15	0.2	35	0.6	55	0.9	75	1.2	95	1.5
16	0.2	36	0.6	56	0.9	76	1.2	96	1.5
17	0.3	37	0.6	57	0.9	77	1.2	97	1.5
18	0.3	38	0.6	58	0.9	78	1.2	98	1.5
19	0.3	39	0.6	59	0.9	79	1.2	99	1.5
20	0.3	40	0.7	60	1	80	1.3	100	1.6

保持滴液装置的滴出的速度不变，在滴液装置下方约 1cm 处将皂膜固定，记录下从滴落装置中滴落的液滴数量，皂膜上滴落下的液滴数量，发现两者比值恰为 4: 1，接下来用

测量液滴质量的方法测量皂膜上滴落下的液滴质量（见表7）。

表7 皂膜聚合液滴质量测量

膜承载滴数	示数	膜承载滴数	示数	膜承载滴数	示数	膜承载滴数	示数
1	332.8	11	333.2	21	333.7	31	334.1
2	332.8	12	333.3	22	333.7	32	334.1
3	332.9	13	333.3	23	333.8	33	334.2
4	332.9	14	333.3	24	333.8	34	334.2
5	333	15	333.4	25	333.8	35	334.3
6	333	16	333.4	26	333.9	36	334.3
7	333	17	333.5	27	333.9	37	334.4
8	333.1	18	333.5	28	333.9	38	334.4
9	333.1	19	333.6	29	334	39	334.5
10	333.2	20	333.6	30	334	40	334.5

测量结果约为 0.045g，其中存在有 0.019g 左右的差值，原因是液滴在脱离皂膜时液滴会被重力拉长，形成下大上小的水滴状，重力继续作用下，液滴将会在上部断裂，大部分液滴向下落下，少部分液滴向上补充皂膜。所以最终选取 0.05~0.06g 作为皂膜承载液滴的极限值。

3.结论与展望

本文制造了 1%浓度及 0.5%浓度的皂液，测量对比了其湿润角与表面张力大小。理论分析中利用悬链线拟合皂膜曲线，得到最大拉伸面积，依据能量守恒给出了机械能改变量的表达式 ($\Delta E = \Delta E_{s, \max} = \pi\gamma \{R_b^2[\sinh \varphi + \varphi] - 2R_f^2\}$)，利用实验定性验证了损耗能量与表面张力系数，环径，直径的关系。探究了物体通过的运动过程，给出了影响皂膜稳定性的三种情况，利用成功率对通过速度（1m/s 以下）与球膜直径比（2: 15 以内）进行验证，试验结果表明现实情况下物体的直径尽量小（控制在毫米级）通过速度维持在 2m/s 以内，能维持皂膜的稳定。最后测量了皂液能承载的固体颗粒质量在 0.05~0.01g 之间能承载的液滴质量在 0.05~0.06g 之间。

通过本文中的实验可以发现对于极小的颗粒性物质，皂膜表现出良好阻隔作用的同时拥

有较高的稳定性，只需要形成完整的液体循环系统就能将其应用于尘菌隔离，于一般意义上的隔离不同的是，皂膜同时拥有自修复的特性，该项特性允许其在保持内环境封闭的情况下通过较大的物体，如果能找到性质较好的表面活性剂，便能制造出在手术室，医药储存，生鲜保存等多方面有实用意义的保护膜。

参考文献

[1] Birgitt Boschitsch Stogin, Luke Gockowski, Hannah Feldstein, et al, Free-standing liquid membranes as unusual particle separators, science advances [J] 2018;4:eaat3276

2020 S.-T. Yau High School Science Award