

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 物理科

第二名

080106

膜透心思-薄膜滲透之研究

學校名稱：彰化縣彰化市南郭國民小學

作者： 小四 楊舒策 小六 尤亭勻 小五 洪朝乾	指導老師： 許淑惠 賴明助
-----------------------------------	---------------------

關鍵詞：薄膜滲透、薄膜屏障、篩小不篩大

摘要

傳統的過濾器(如濾網、濾紙)是留下較大的物體而讓較小的顆粒通過孔隙，但液體薄膜(如皂膜)卻是相反的過濾機制，它允許大顆粒通過而保留住小顆粒且液膜在顆粒穿透後會有自我修復的特性。本研究以保麗龍球對皂膜的穿透實驗來探討球體大小、皂膜半徑、球體掉落距離、皂膜調配比例等因素對皂膜過濾機制的影響，並確認皂膜對顆粒分離「通過與保留」的選擇，取決於球體落下能量與液膜拉伸的表面能之轉換有著密切關係。

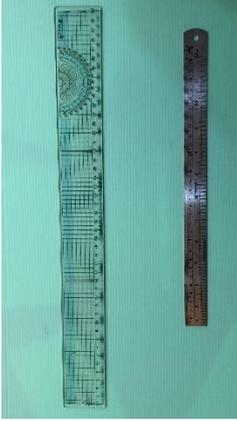
壹、研究動機：

在新冠肺炎猖獗肆虐下，口罩成了珍貴且必備的防疫物資，但口罩的種類很多，有棉布口罩、活性炭口罩、醫療用口罩、N95 口罩等，它們的特性及用途有何差別呢？經查詢資料後得知，棉布口罩只能用來阻擋較大的灰塵，而醫療用口罩則可用來阻擋約九成的飛沫及 5 微米以上的微粒，所以可過濾透過飛沫傳染的病毒、細菌，但若遇到空氣污染的 PM2.5 小顆粒就沒辦法阻擋，而 N95 口罩更進一步可阻擋 95% 0.3 微米以上的微粒，在 PM2.5 的防範上比較有效。綜觀這些口罩的共通原理不外乎「阻擋大顆粒，但小顆粒會通過」。我們在查詢口罩原理的過程中，意外發現某些文獻資料顯示：液體膜的「逆向過濾」現象，即液體形成的膜會「讓大的通過而阻擋下小的」之作用機制，這引起我們的研究興趣，於是在和老師討論後，進行了相關實驗的探究。

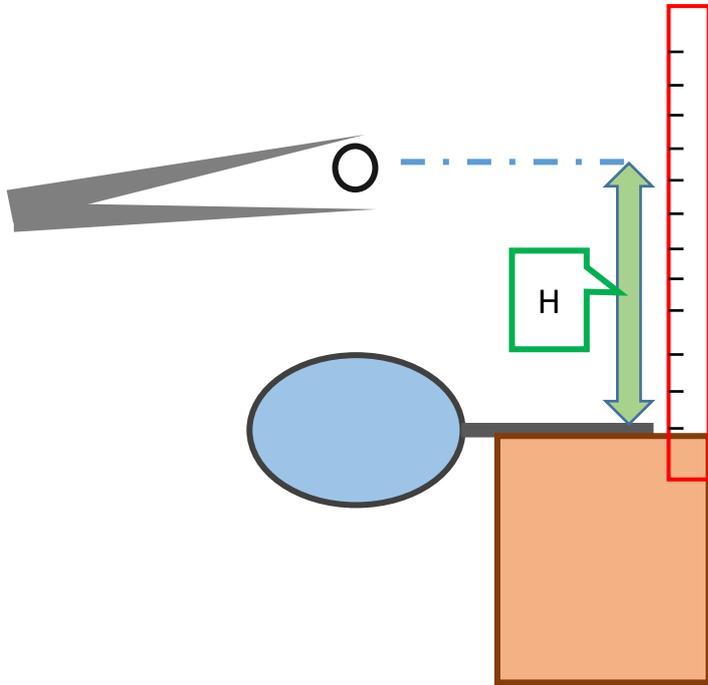
貳、研究目的：

- 一、探討不同保麗龍球體半徑對皂膜滲透的影響
- 二、探討球體的不同落下高度對皂膜滲透的影響
- 三、探討不同皂膜半徑對球體滲透皂膜的影響
- 四、探討皂膜溶液的配置比例對皂膜滲透的影響

參、研究設備及器材：

		
<p>各式大小的圓環</p>	<p>電子磅秤</p>	<p>棉線(用於纏繞圓環)</p>
		
<p>清潔劑、甘油、膠水、水</p>	<p>直尺</p>	<p>支架組</p>
		
<p>各種半徑大小的保麗龍球</p>	<p>測量表面張力裝置</p>	

肆、研究過程或方法：



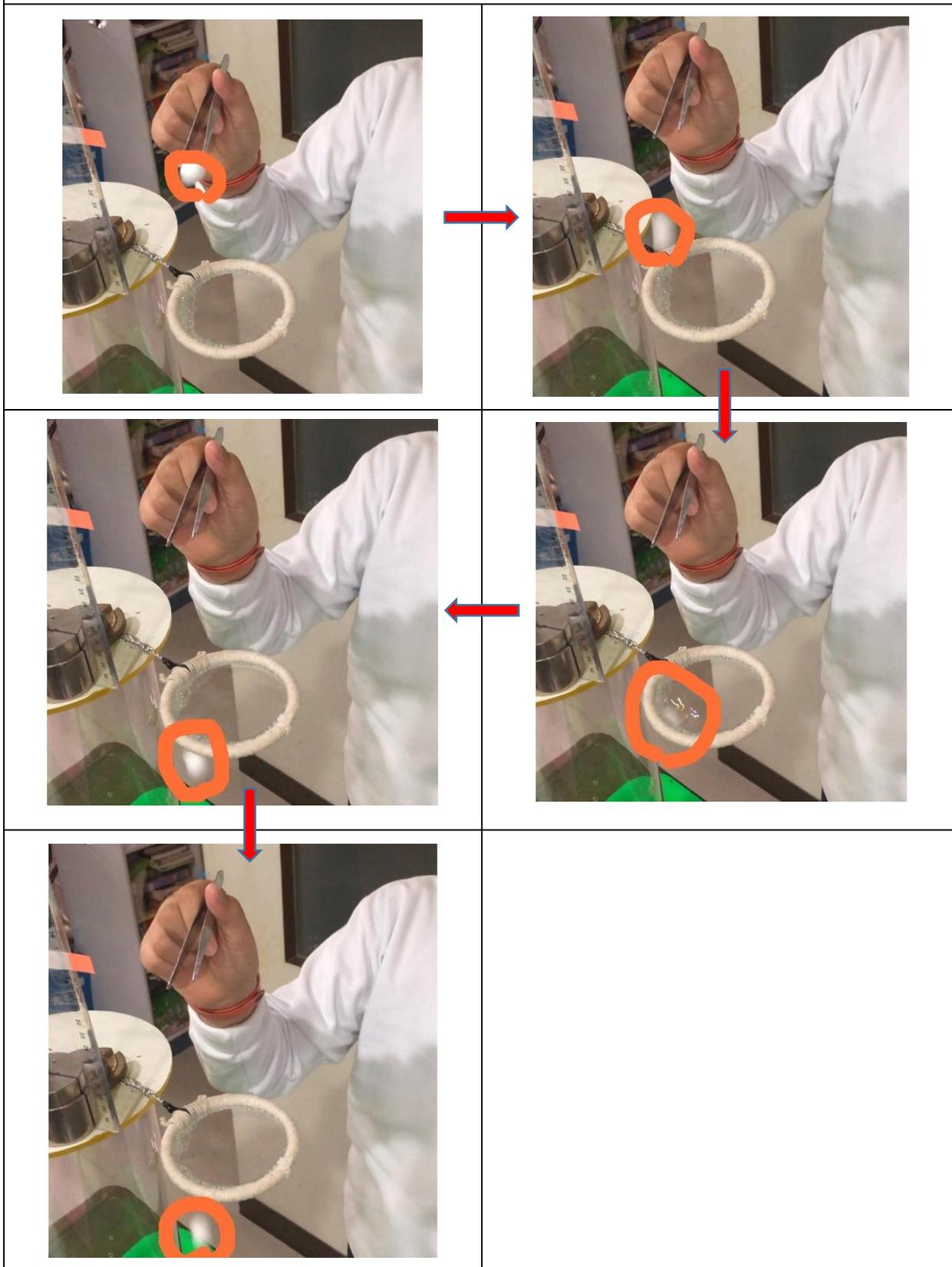
圖一：實驗裝置示意圖



圖二：實驗裝置實體圖

- 一、實驗裝置如圖一，以棉線纏繞圓環，記錄下圓環的半徑。
- 二、以清潔劑、甘油、膠水及蒸餾水配置肥皂水溶液，記錄下各成分的配置比例，並測量溶液的表面張力大小。
- 三、將圓環浸入肥皂水溶液使皂膜結構成型。
- 四、如圖一所示，將圓環及直尺固定於基座上，並以此定為物體落下高度的零位面。
- 五、以鑷子夾取物體(本實驗採用保麗龍球，並量測其半徑與質量)。
- 六、記錄物體位置的高度後，使物體自由落下，觀察物體通過皂膜的現象(計有「停留在膜上」、「穿透但膜回復完整」、「穿透但膜破滅」等三種現象)，並對其慢動作攝影。

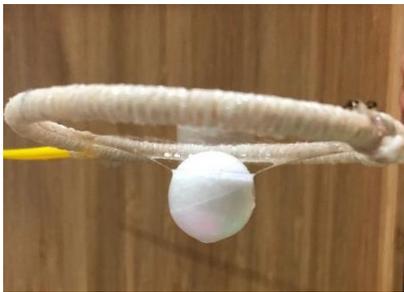
穿透但皂膜回復完整 (正常攝影之連續截圖)



穿透後，皂膜仍回復完整（慢動作攝影之連續截圖）



停留在皂膜上



七、研究一： 使用半徑 5.2 公分的圓環，皂膜水溶液的比例為水：清潔劑：甘油：膠水= 4：3：2：1，且將保麗龍球的落下高度分別固定在 3 公分及 10 公分，研究以不同球體半徑對皂膜的滲透表現 (球體半徑計有 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.75、1、1.25、1.5、1.75 公分)，並重複落下 20 次，以百分率的方式記錄實驗結果。

八、研究二：從各式球體半徑中，挑選其中三種半徑大小 (分別為 0.3、0.75、1 公分) 研究不同落下距離(落下距離由 1 公分起，依序每次增加 1~2 公分，直到 14 公分)對皂膜的滲透表現，並重複落下 20 次，以百分率的方式記錄實驗結果。

九、研究三： 從各式球體半徑中，挑選其中三種半徑大小 (分別為 0.3、0.75、1 公分) 研究其對於不同皂膜半徑(0.39、0.52、0.72 公分)的滲透表現，並重複落下 20 次，以百分率的方式記錄實驗結果。

十、研究四：從各式球體半徑中，挑選其中三種半徑大小 (分別為 1、1.25、1.5 公分) 研究皂膜溶液的配置比例(水：清潔劑：甘油：膠水)的比例分別為「4：3：2：1」、「3：3：2：1」、「1：3：2：1」對皂膜滲透的表現，並重複落下 20 次，以百分率的方式記錄實驗結果。

十一、本研究中，使用的保麗龍球體由於重量太小，電子磅秤無法測出單獨一顆的球體質量，故球體質量的測定方式採用一定數量的球體作集體秤重，再求得平均一顆的重量，如圖三所示。



圖三

十二、皂膜水溶液的表面張力測定方法：

(一)以「水：清潔劑：甘油：膠水= 4：3：2：1」的比例將皂膜水溶液配置完成。

(二)製作一個周長 $L=15$ 公分的金屬環，秤重為 $W_0 = 1.4$ 公克重。

(三)皂膜水溶液連同容器，秤重為 158.4 公克重。

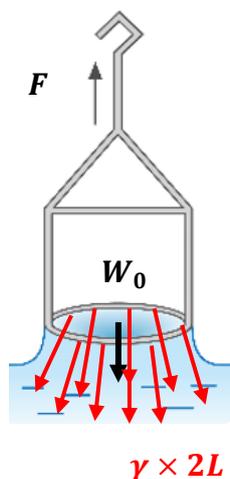
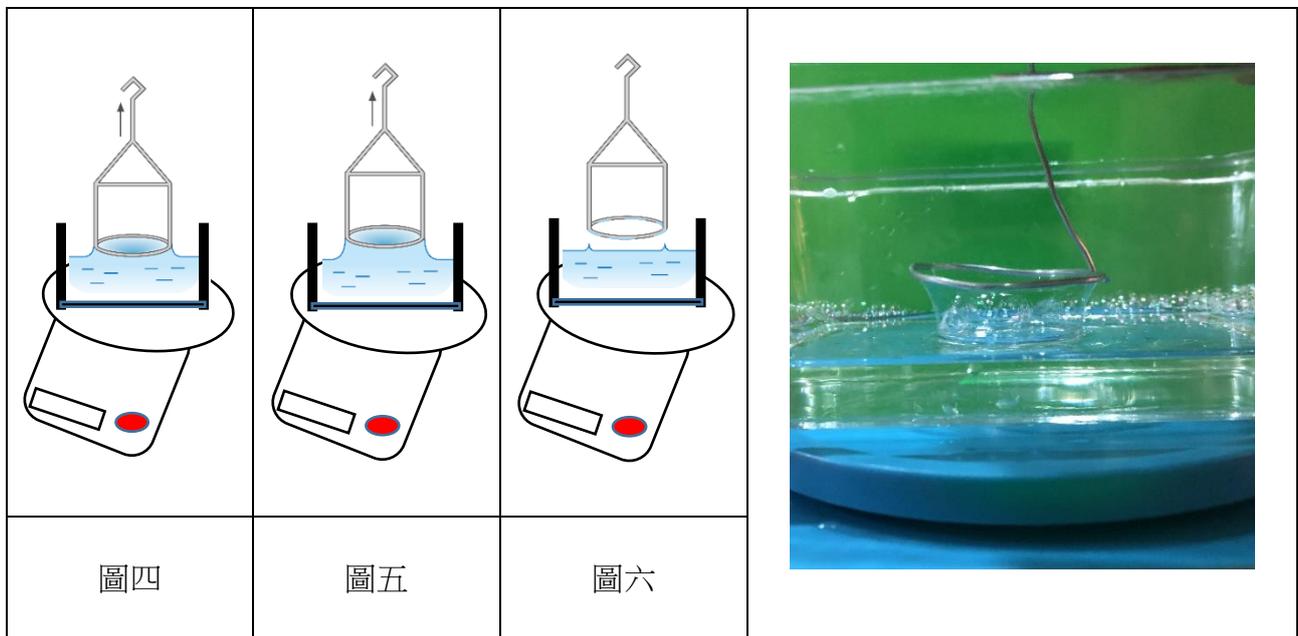
(四)將金屬環置入皂膜水溶液內，秤重合計為 159.8 公克重。

(五)將金屬環極緩慢地往上拉(如圖四、圖五)，最後金屬環與液膜分離(如圖六)，過程中，

電子秤讀數的最小值來到 157.6 公克重。

(六)電子秤減輕的重為 2.2 公克重 ($159.8 - 157.6 = 2.2$)，此 2.2 公克重即為手的拉力 F 。

(七)再以金屬環作受力分析，拉力 F 用以平衡金屬環重力及皂膜對環的表面張力總和。



$$F = W_0 + \gamma \times 2L$$

$$\therefore \gamma = \frac{F - W_0}{2L} = \frac{2.2 - 1.4}{2 \times 15} = 0.0267 \text{ gw/cm} = 0.026 \text{ N/m}$$

說明：

γ 為表面張力大小：以單位長度的作用力呈現，單位為 gw/cm

$\gamma \times 2L$ ：表面張力的作用總和：表面張力 \times 總作用長度
(因為環內徑及環外徑周長皆有皂膜的接觸，故總作用長度為 $2L$)

伍、研究結果：

一、探討不同保麗龍球體半徑對皂膜滲透的影響：

表 1-1：落下高度 3 公分時，不同保麗龍球體半徑對皂膜滲透的研究

皂膜半徑(cm)	落下高度(cm)	球體半徑(cm)	停留	穿透但膜回復	穿透但膜破滅
5.2	3	0.1	100%	0%	0%
5.2	3	0.2	100%	0%	0%
5.2	3	0.3	100%	0%	0%
5.2	3	0.4	100%	0%	0%
5.2	3	0.5	100%	0%	0%
5.2	3	0.75	90%	0%	10%
5.2	3	1	90%	5%	5%
5.2	3	1.25	5%	80%	15%
5.2	3	1.5	0%	30%	70%
5.2	3	1.75	0%	0%	100%

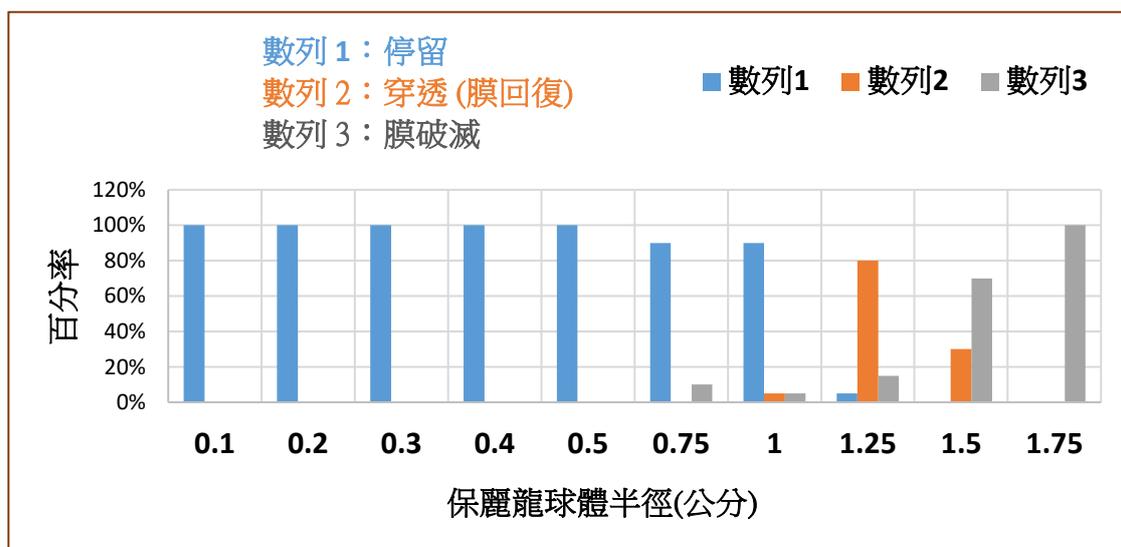


圖 1-1：落下高度 3 公分時，不同球體半徑對皂膜滲透的研究

表 1-2：落下高度 10 公分時，不同保麗龍球體半徑對皂膜滲透的研究

皂膜半徑(cm)	落下高度(cm)	球體半徑(cm)	停留	穿透但膜回復	穿透但膜破滅
5.2	10	0.1	100%	0%	0%
5.2	10	0.2	100%	0%	0%
5.2	10	0.3	100%	0%	0%
5.2	10	0.4	95%	0%	5%
5.2	10	0.5	90%	10%	0%
5.2	10	0.75	25%	70%	5%
5.2	10	1	0%	100%	0%
5.2	10	1.25	0%	75%	25%
5.2	10	1.5	0%	15%	85%
5.2	10	1.75	0%	0%	100%

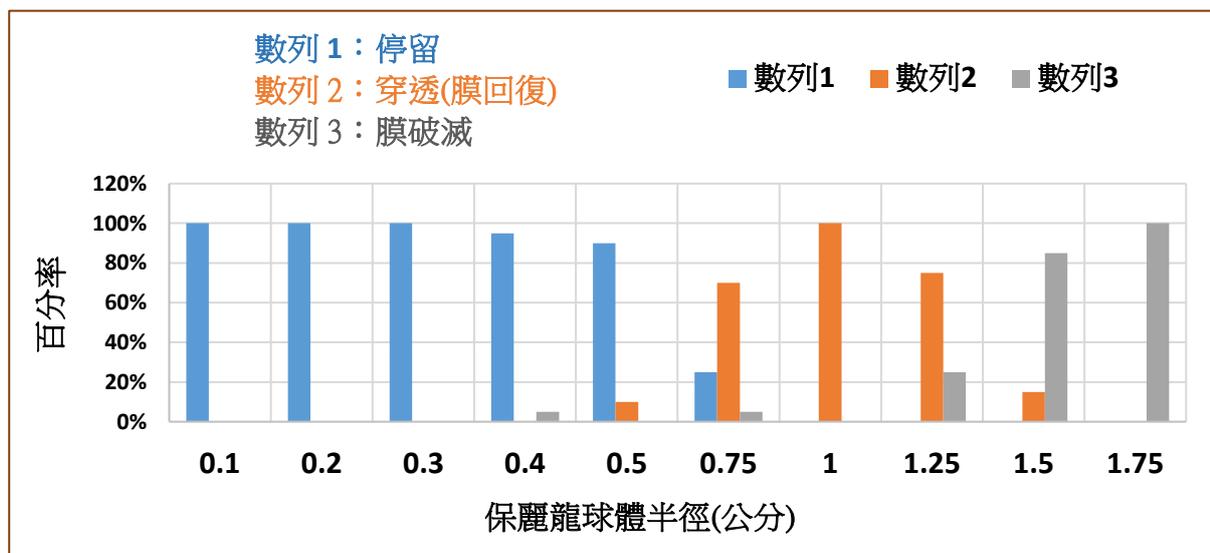


圖 1-2：落下高度 10 公分時，不同球體半徑對皂膜滲透的研究

研究發現：半徑在 0.5 公分以下的球體無法穿透皂膜，半徑在 0.75 公分~1 公分的球體是否穿透皂膜，則和「落下高度」有關 (落下距離 3 公分時被膜屏蔽，10 公分時則穿透)，半徑 1.5 公分以上者，使皂膜破滅的機率很高。

二、探討球體的不同落下高度對皂膜滲透的影響：

表 2-1：半徑 0.3 公分的保麗龍球，不同落下高度對皂膜滲透的研究：

皂膜半徑(cm)	球體半徑(cm)	落下高度(cm)	停留	穿透但 膜回復	穿透但 膜破滅
5.2	0.3	1	100%	0%	0%
5.2	0.3	2	100%	0%	0%
5.2	0.3	3	100%	0%	0%
5.2	0.3	4	100%	0%	0%
5.2	0.3	5	100%	0%	0%
5.2	0.3	6	100%	0%	0%
5.2	0.3	8	100%	0%	0%
5.2	0.3	10	100%	0%	0%
5.2	0.3	12	100%	0%	0%
5.2	0.3	14	100%	0%	0%



圖 2-1：半徑 0.3 公分的保麗龍球，不同落下高度對皂膜滲透的研究

研究發現：半徑 0.3 公分的小球體在落下距離 14 公分以內皆無法穿透皂膜。

表 2-2：半徑 0.75 公分的保麗龍球，不同落下高度對皂膜滲透的研究：

皂膜半徑(cm)	球體半徑(cm)	落下高度(cm)	停留	穿透但膜回復	穿透但膜破滅
5.2	0.75	1	95%	0%	5%
5.2	0.75	2	90%	0%	10%
5.2	0.75	3	90%	0%	10%
5.2	0.75	4	100%	0%	0%
5.2	0.75	5	90%	5%	5%
5.2	0.75	6	90%	10%	0%
5.2	0.75	8	65%	25%	10%
5.2	0.75	10	25%	70%	5%
5.2	0.75	12	0%	100%	0%
5.2	0.75	14	0%	90%	10%

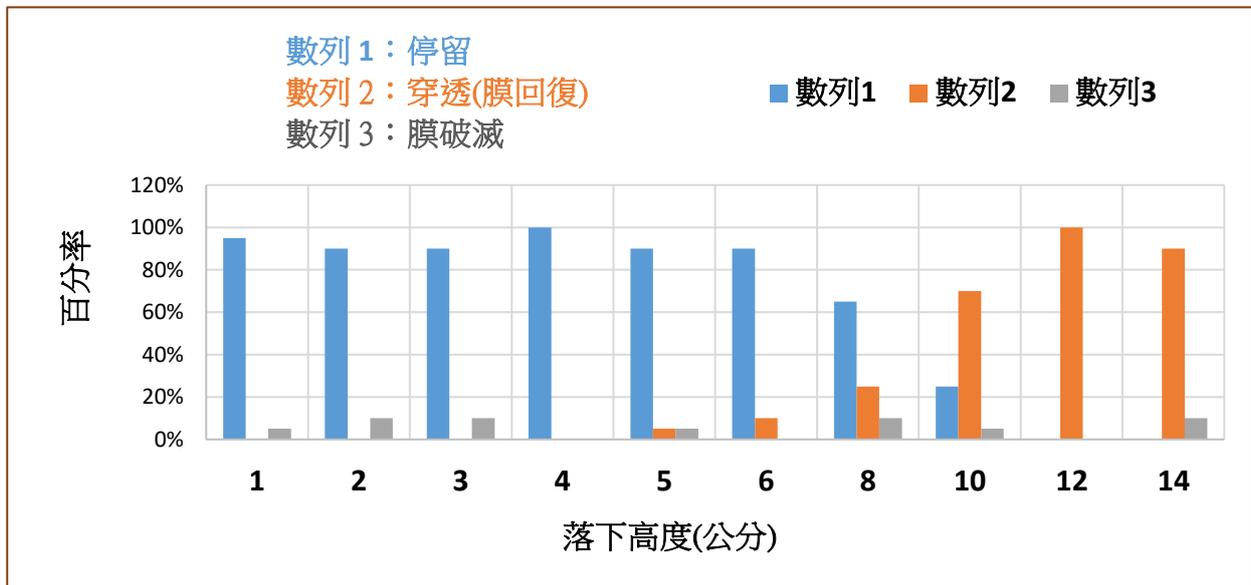


圖 2-2：半徑 0.75 公分的保麗龍球，不同落下高度對皂膜滲透的研究

研究發現：半徑 0.75 公分的球體，落下高度達 10 公分以上，會從被膜屏蔽轉變為穿透。

表 2-3：半徑 1 公分的保麗龍球，不同落下高度對皂膜滲透的研究：

皂膜半徑(cm)	球體半徑(cm)	落下高度(cm)	停留	穿透但膜回復	穿透但膜破滅
5.2	1	1	85%	0%	15%
5.2	1	2	95%	0%	5%
5.2	1	3	90%	5%	5%
5.2	1	4	80%	20%	0%
5.2	1	5	50%	50%	0%
5.2	1	6	20%	80%	0%
5.2	1	8	0%	90%	10%
5.2	1	10	0%	100%	0%
5.2	1	12	0%	100%	0%
5.2	1	14	0%	95%	5%

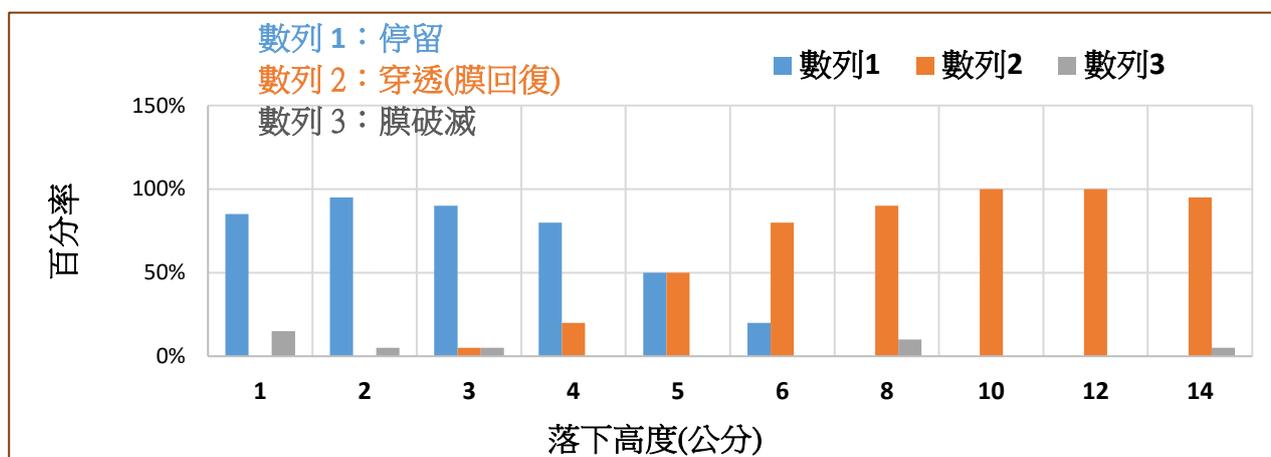


圖 2-3：半徑 1 公分的保麗龍球，不同落下高度對皂膜滲透的研究

研究發現：半徑 1 公分的球體，落下高度達 6 公分以上，會從被膜屏蔽轉變為穿透。

結論：落下高度會影響球體對皂膜的滲透情形，以半徑 0.75 公分和 1 公分的球體來看，落下高度須達到一定距離，即能穿透皂膜，而半徑 0.3 公分的小球體則在落下距離 14 公分以內皆無法穿透皂膜。關於此現象的原因，我們將在後面的實驗討論中做探討。

三、探討不同皂膜半徑對球體滲透皂膜的影響：

表 3：不同皂膜半徑對球體滲透皂膜的影響：

皂膜半徑(cm)	球體半徑(cm)	落下高度(cm)	停留	穿透但膜回復	穿透但膜破滅
3.9	0.3	5	100%	0%	0%
5.2	0.3	5	100%	0%	0%
7.2	0.3	5	100%	0%	0%
3.9	0.75	5	80%	20%	0%
5.2	0.75	5	90%	5%	5%
7.2	0.75	5	90%	0%	10%
3.9	1	5	35%	60%	5%
5.2	1	5	50%	50%	0%
7.2	1	5	65%	25%	10%

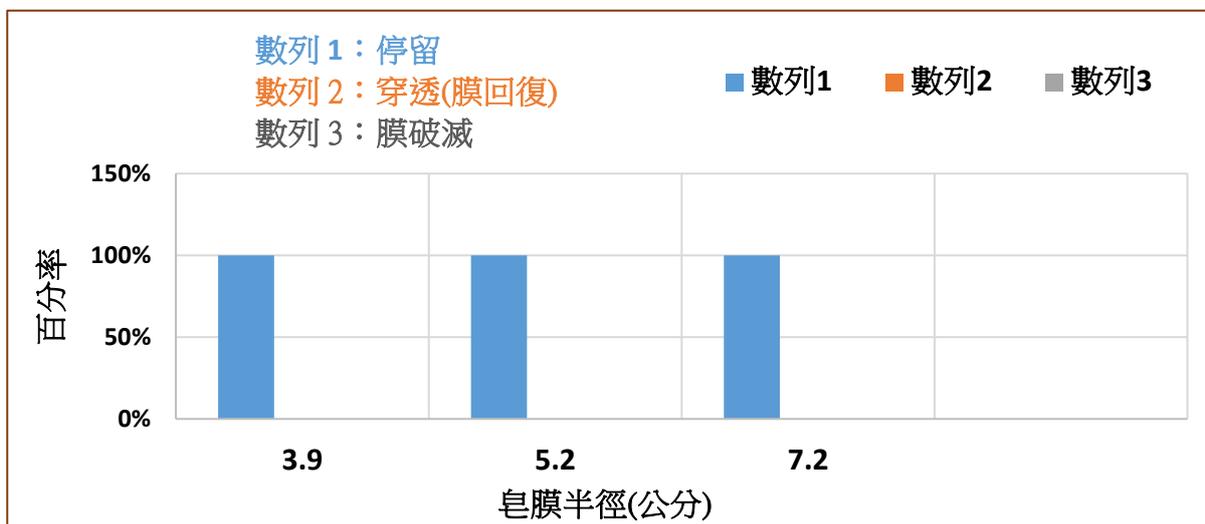


圖 3-1：半徑 0.3 公分的保麗龍球，對不同皂膜半徑的滲透研究

研究發現：皂膜半徑變大(由 3.9 至 7.2 公分)，對於半徑 0.3 公分的球體，屏蔽結果並未改變。

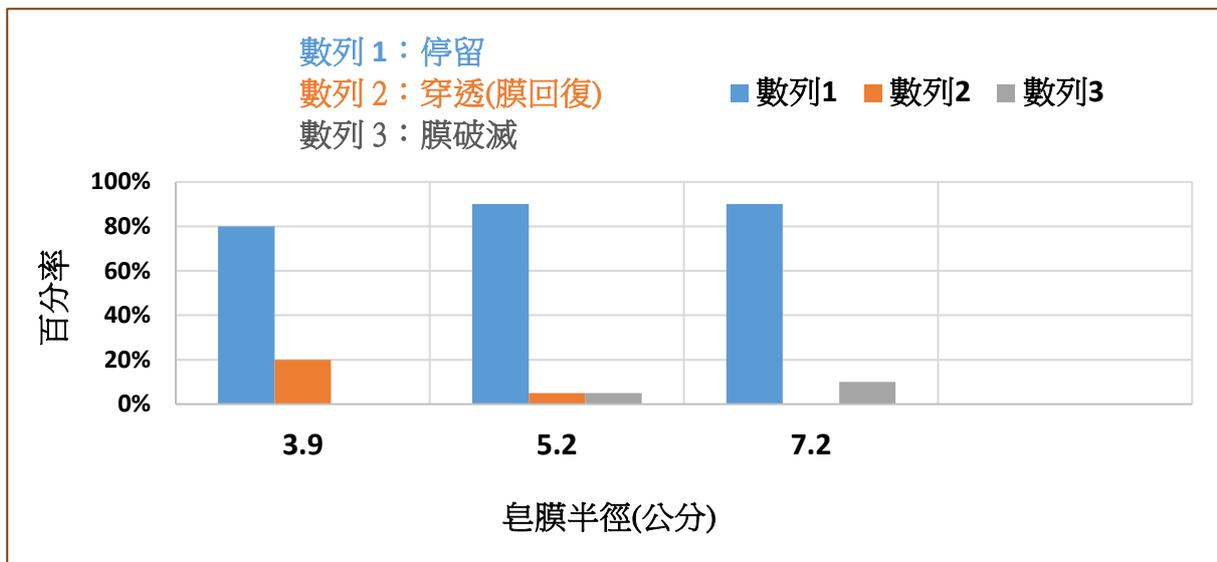


圖 3-2：半徑 0.75 公分的保麗龍球，對不同皂膜半徑的滲透研究

研究發現：皂膜半徑變大，對於半徑 0.75 公分的球體，穿透皂膜的比率略為下降。

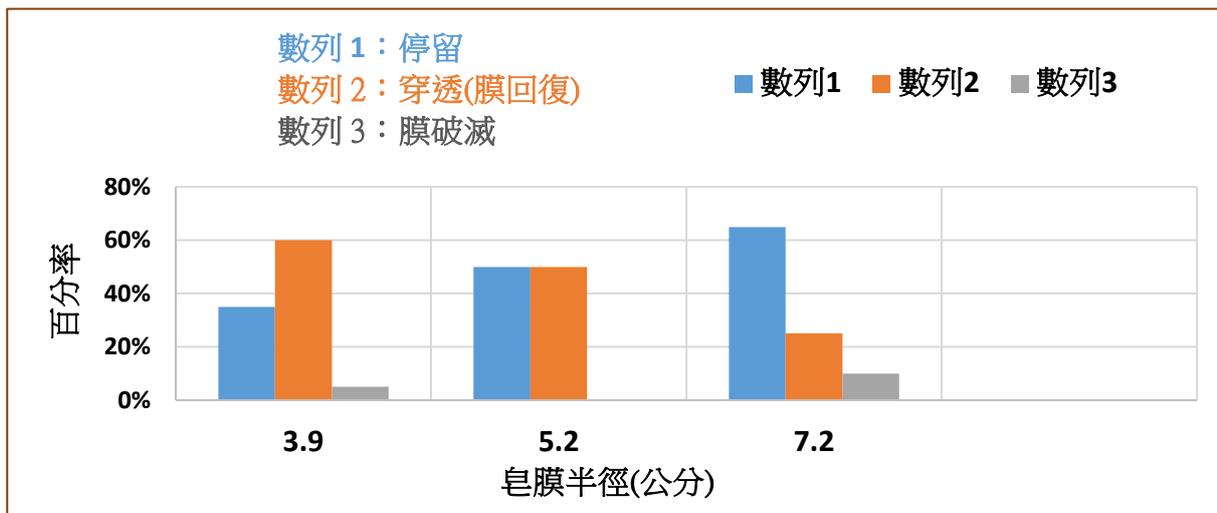


圖 3-3：半徑 1 公分的保麗龍球，對不同皂膜半徑的滲透研究

研究發現：由圖 3-3 發現，對於半徑 1 公分的球體，遇到半徑大的皂膜則穿透率比較低。

結論：對於達一定大小的球體顆粒而言，皂膜半徑愈大，則屏蔽顆粒的效果愈好。

關於此現象的原因，我們將在後面的實驗討論中做探討。

四、探討皂膜溶液的配置比例對皂膜滲透的影響：

表 4： 不同皂膜水溶液的配置比例對皂膜滲透的影響：

皂膜配置比例 (水：清潔劑：甘油：膠水)	皂膜 半徑 (cm)	球體 半徑 (cm)	落下 高度 (cm)	停留 停留	停留約 數秒 再穿透	穿透 但膜 回復	膜 破滅
4：3：2：1	5.2	1	6	20%	0%	80%	0%
3：3：2：1	5.2	1	6	15%	25%	60%	0%
1：3：2：1	5.2	1	6	20%	10%	70%	0%
4：3：2：1	5.2	1.25	6	0%	0%	85%	15%
3：3：2：1	5.2	1.25	6	0%	40%	40%	20%
1：3：2：1	5.2	1.25	6	0%	20%	50%	30%
4：3：2：1	5.2	1.5	6	0%	0%	30%	70%
3：3：2：1	5.2	1.5	6	0%	10%	15%	75%
1：3：2：1	5.2	1.5	6	0%	10%	10%	80%

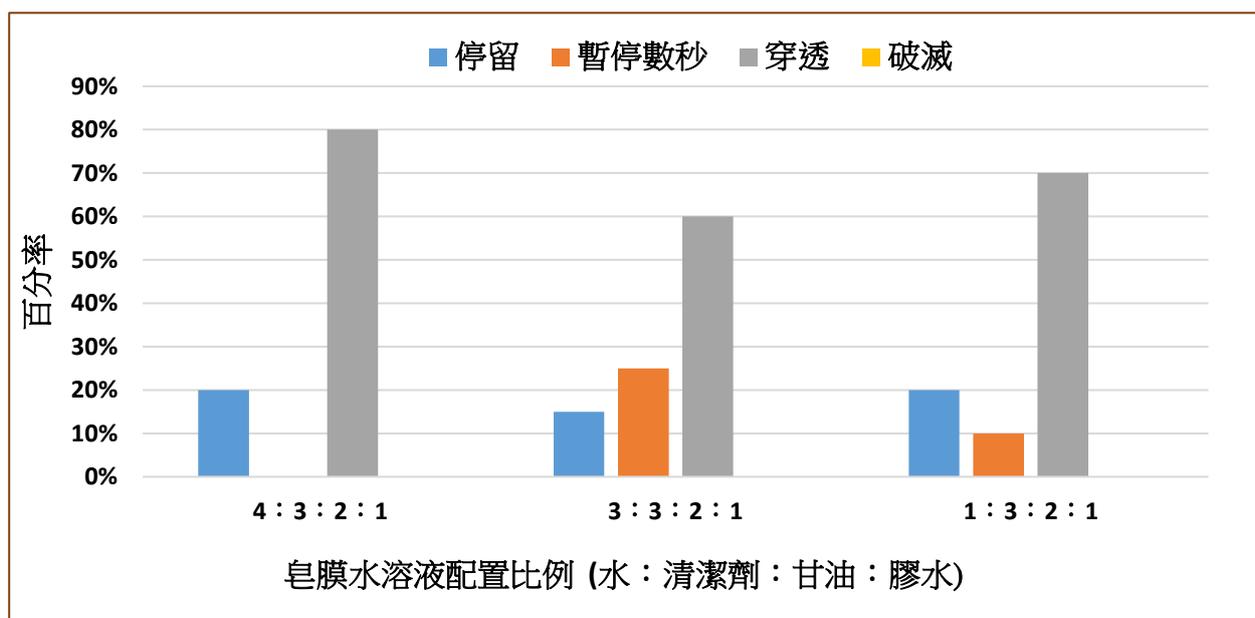


圖 4-1：半徑 1 公分的保麗龍球，對不同溶液比例的皂膜之滲透研究

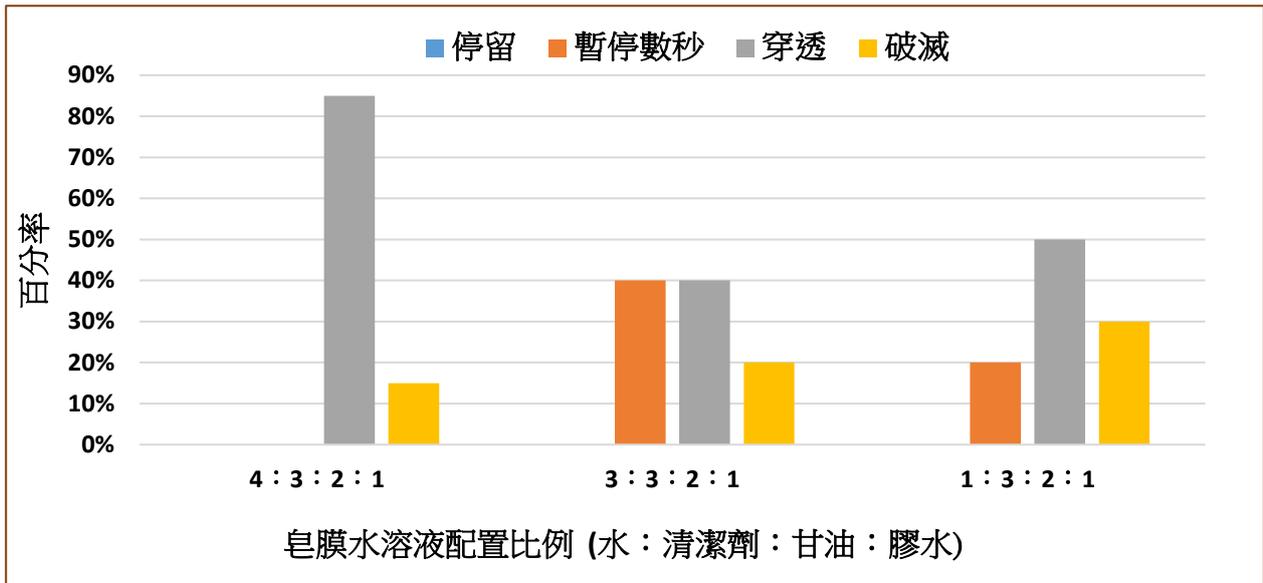


圖 4-2：半徑 1.25 公分的保麗龍球，對不同溶液比例的皂膜之滲透研究

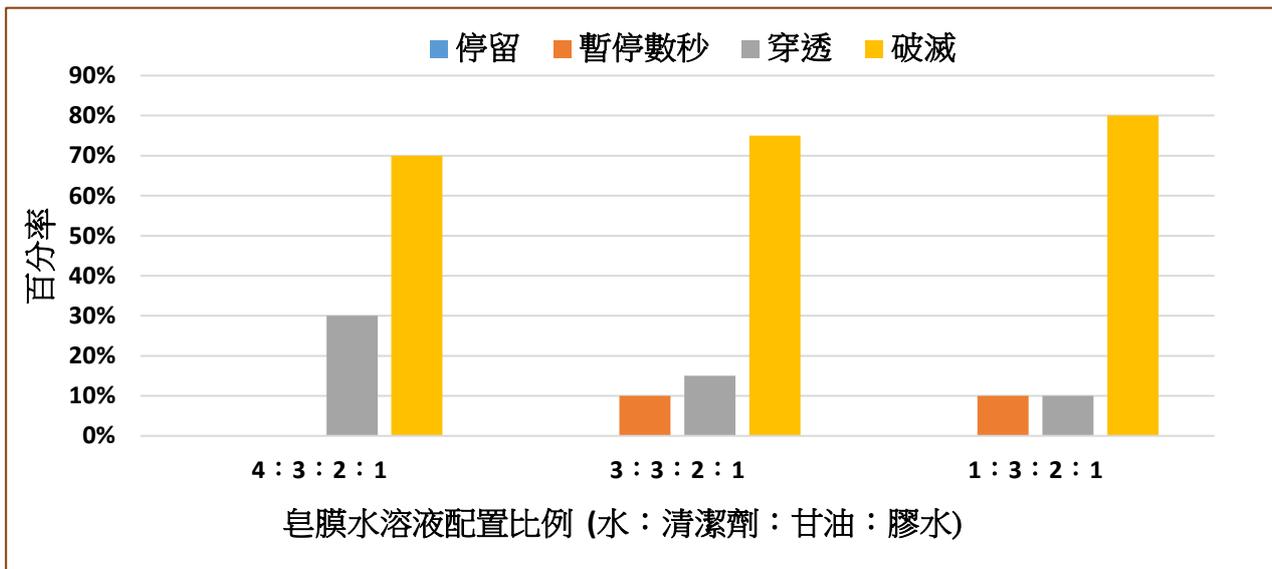


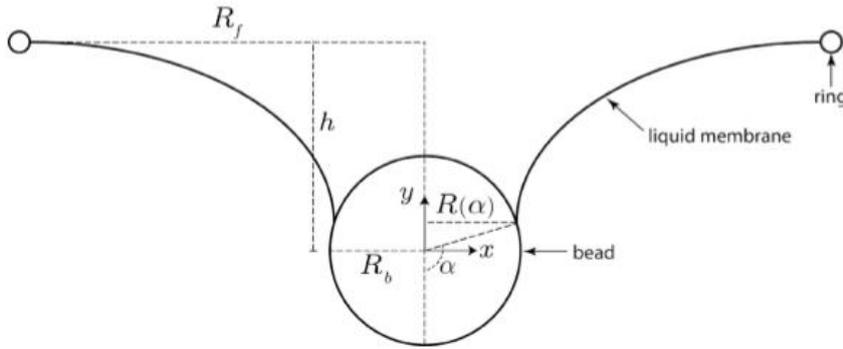
圖 4-3：半徑 1.5 公分的保麗龍球，對不同溶液比例的皂膜之滲透研究

研究發現：（1）降低水的比例後，皂膜水溶液變得更濃稠，膜的黏性更大，出現一種特別現象，就是「球體先停留在膜上數秒，再穿透過膜，但膜能回復完整」。

（2）降低水的比例後，不能降低大顆粒球體使膜破滅的機率，反而有增加破滅機率的現象，這顯現若想增強膜的韌性，水的比例是重大關鍵。

陸、討論：

一、根據文獻，當落下的顆粒撞擊液體薄膜時，薄膜將形成類瀑布的形狀。薄膜將因拉伸而引起表面能量的變化，其表面能 E_s 的公式如下：



R_f ：皂膜半徑

R_b ：保麗龍球體半徑

γ ：表面張力大小

$$E_s = \pi\gamma\{R_b^2[\sinh\phi + \phi] - 2(R_f^2 - R_b^2)\} \quad ; \quad \text{其中 } \phi = 2\cosh^{-1}\left(\frac{R_f}{R_b}\right)$$

茲將本實驗的研究數據代入表面能公式，獲得如表 5 的表面能數值

表 5： 不同半徑之球體對不同半徑皂膜的表面能數值

R_b (cm)	R_f (cm)	ϕ	$\sinh\phi$	表面張力 γ (N/m)	表面能 E_s (焦耳)
0.1	5.2	9.2886	5406.9999	0.0026	8.39953×10^{-7}
0.2	5.2	7.90175	1350.9996	0.0026	2.90681×10^{-6}
0.3	5.2	7.08989	599.8881	0.0026	5.94356×10^{-6}
0.4	5.2	6.51323	336.99852	0.0026	9.81208×10^{-6}
0.5	5.2	6.06527	215.31768	0.0026	1.44156×10^{-5}
0.75	5.2	5.24849	95.13697	0.0026	2.86707×10^{-5}
1	5.2	4.66489	53.07058	0.0026	4.61715×10^{-5}
1.25	5.2	4.20779	33.59632	0.0026	6.62432×10^{-5}
1.5	5.2	3.82971	23.01384	0.0026	8.83171×10^{-5}
1.75	5.2	3.50518	16.62873	0.0026	1.11888×10^{-4}
0.3	3.9	6.51323	336.99852	0.0026	5.5193×10^{-6}
0.75	3.9	4.66486	53.07058	0.0026	2.59715×10^{-5}
1	3.9	4.07453	29.403	0.0026	4.12894×10^{-5}
0.3	7.2	7.74153	1150.9996	0.0026	6.42261×10^{-6}
0.75	7.2	5.90437	183.3173	0.0026	3.16943×10^{-5}
1	7.2	5.32474	102.6751	0.0026	5.15948×10^{-5}

二、由研究發現「半徑愈大」、「距離愈大」的球體，穿透皂膜的現象愈明顯，加上球體撞擊

皂膜時所引起的表面能量 E_s ，因此我們想進一步研究「球體落下的能量」和「皂膜表面能」之間的關係是否是影響皂膜滲透結果的原因。

若以皂膜高度為零為面，球體與皂膜的距離為 H ，球體的質量為 m ，重力場強度為 g ，則球體落下所具有的能量 $E_u = m \times g \times H$ ，

若以能量守恆的概念來看，因為球體穿透皂膜時，必先撞擊皂膜而引起皂膜拉伸，且穿透後的球體因仍具有速度(動能)繼續往下運動，因此球體落下的能量若大於皂膜拉伸的表面能變化，應該能提高穿透皂膜的可能性。

球體落下能量 $E_u =$ 皂膜拉伸的表面能 $E_s +$ 球體穿透皂膜後的動能 + 損耗的能量

(損耗的能量可能來自空氣阻力及摩擦力的作用)

故推測 $\frac{E_u}{E_s} > 1$ ，在能量轉換的觀點上，比較符合球體能穿透皂膜的條件。

以下我們將利用本實驗所獲得的數據，來計算「球體落下能量 E_u 」和「皂膜表面能量 E_s 」的比值，並對照實驗觀察到的皂膜滲透結果，設法釐清兩者之間的關聯。

表 6： $\frac{E_u}{E_s}$ 比值與皂膜滲透現象的關係

球體半徑 (公分)	皂膜半徑 (公分)	表面能 E_s (焦耳)	球體 質量 (公克)	落下 距離 (公分)	落下能量 E_u (焦耳)	E_u/E_s	膜透 現象
0.1	5.2	8.399×10^{-7}	0.0001	3	2.94×10^{-8}	0.035	停留
0.2	5.2	2.906×10^{-6}	0.0008	3	2.352×10^{-7}	0.081	停留
0.3	5.2	5.943×10^{-6}	0.0027	3	7.938×10^{-7}	0.134	停留
0.4	5.2	9.812×10^{-6}	0.0064	3	1.881×10^{-6}	0.192	停留
0.5	5.2	1.441×10^{-5}	0.0125	3	3.675×10^{-6}	0.255	停留

球體半徑 (公分)	皂膜半徑 (公分)	表面能 E_s (焦耳)	球體 質量 (公克)	落下 距離 (公分)	落下能量 E_u (焦耳)	E_u/E_s	膜透 現象
0.75	5.2	2.867×10^{-5}	0.042	3	1.234×10^{-5}	0.431	停留
1	5.2	4.617×10^{-5}	0.1	3	2.94×10^{-5}	0.637	停留
1.25	5.2	6.624×10^{-5}	0.16	3	4.704×10^{-5}	0.710	穿透 80%
1.5	5.2	8.831×10^{-5}	0.22	3	6.468×10^{-5}	0.732	破滅 70%
1.75	5.2	1.118×10^{-4}	0.425	3	1.249×10^{-4}	1.117	破滅
0.1	5.2	8.399×10^{-7}	0.0001	10	9.8×10^{-8}	0.117	停留
0.2	5.2	2.906×10^{-6}	0.0008	10	7.84×10^{-7}	0.270	停留
0.3	5.2	5.943×10^{-6}	0.0027	10	2.646×10^{-6}	0.445	停留
0.4	5.2	9.812×10^{-6}	0.0064	10	6.272×10^{-6}	0.639	停留
0.5	5.2	1.441×10^{-5}	0.0125	10	1.225×10^{-5}	0.850	停留
0.75	5.2	2.867×10^{-5}	0.042	10	4.116×10^{-5}	1.436	穿透 70%
1	5.2	4.617×10^{-5}	0.1	10	9.8×10^{-5}	2.123	穿透
1.25	5.2	1.118×10^{-4}	0.16	10	1.568×10^{-4}	2.367	穿透 75%
1.5	5.2	8.831×10^{-5}	0.22	10	2.156×10^{-4}	2.441	破滅 85%
1.75	5.2	1.118×10^{-4}	0.425	10	4.165×10^{-4}	3.722	破滅
0.3	5.2	5.943×10^{-6}	0.0027	1	2.646×10^{-7}	0.045	停留
0.3	5.2	5.943×10^{-6}	0.0027	2	5.292×10^{-7}	0.089	停留
0.3	5.2	5.943×10^{-6}	0.0027	3	7.938×10^{-7}	0.134	停留
0.3	5.2	5.943×10^{-6}	0.0027	4	1.058×10^{-6}	0.178	停留
0.3	5.2	5.943×10^{-6}	0.0027	5	1.323×10^{-6}	0.223	停留
0.3	5.2	5.943×10^{-6}	0.0027	6	1.587×10^{-6}	0.267	停留
0.3	5.2	5.943×10^{-6}	0.0027	8	2.116×10^{-6}	0.356	停留

球體半徑 (公分)	皂膜半徑 (公分)	表面能 Es (焦耳)	球體 質量 (公克)	落下 距離 (公分)	落下能量 Eu (焦耳)	Eu/Es	膜透 現象
0.3	5.2	5.943×10^{-6}	0.0027	10	2.646×10^{-6}	0.445	停留
0.3	5.2	5.943×10^{-6}	0.0027	12	3.175×10^{-6}	0.534	停留
0.3	5.2	5.943×10^{-6}	0.0027	14	3.704×10^{-6}	0.623	停留
0.75	5.2	2.867×10^{-5}	0.042	1	4.116×10^{-6}	0.144	停留
0.75	5.2	2.867×10^{-5}	0.042	2	8.232×10^{-6}	0.287	停留
0.75	5.2	2.867×10^{-5}	0.042	3	1.235×10^{-5}	0.431	停留
0.75	5.2	2.867×10^{-5}	0.042	4	1.646×10^{-5}	0.574	停留
0.75	5.2	2.867×10^{-5}	0.042	5	2.058×10^{-5}	0.718	停留
0.75	5.2	2.867×10^{-5}	0.042	6	2.470×10^{-5}	0.861	停留
0.75	5.2	2.867×10^{-5}	0.042	8	3.293×10^{-5}	1.148	停留 65%
0.75	5.2	2.867×10^{-5}	0.042	10	4.116×10^{-5}	1.436	穿透 70%
0.75	5.2	2.867×10^{-5}	0.042	12	4.939×10^{-5}	1.723	穿透
0.75	5.2	2.867×10^{-5}	0.042	14	5.762×10^{-5}	2.010	穿透
1	5.2	4.617×10^{-5}	0.1	1	9.8×10^{-6}	0.212	停留
1	5.2	4.617×10^{-5}	0.1	2	1.96×10^{-5}	0.424	停留
1	5.2	4.617×10^{-5}	0.1	3	2.94×10^{-5}	0.637	停留
1	5.2	4.617×10^{-5}	0.1	4	3.92×10^{-5}	0.849	停留
1	5.2	4.617×10^{-5}	0.1	5	4.9×10^{-5}	1.061	無法判斷
1	5.2	4.617×10^{-5}	0.1	6	5.88×10^{-5}	1.274	穿透 80%
1	5.2	4.617×10^{-5}	0.1	8	7.84×10^{-5}	1.698	穿透
1	5.2	4.617×10^{-5}	0.1	10	9.8×10^{-5}	2.123	穿透
1	5.2	4.617×10^{-5}	0.1	12	1.176×10^{-4}	2.547	穿透

球體半徑 (公分)	皂膜半徑 (公分)	表面能 E_s (焦耳)	球體 質量 (公克)	落下 距離 (公分)	落下能量 E_u (焦耳)	E_u/E_s	膜透 現象
1	5.2	4.617×10^{-5}	0.1	14	1.372×10^{-4}	2.972	穿透
0.3	3.9	5.519×10^{-6}	0.0027	5	1.323×10^{-6}	0.240	停留
0.75	3.9	2.597×10^{-5}	0.42	5	2.058×10^{-5}	0.792	停留 80%
1	3.9	4.129×10^{-5}	0.1	5	4.9×10^{-5}	1.187	穿透 60%
0.3	7.2	6.423×10^{-6}	0.0027	5	1.323×10^{-6}	0.206	停留
0.75	7.2	3.169×10^{-5}	0.42	5	2.058×10^{-5}	0.649	停留
1	7.2	5.159×10^{-5}	0.1	5	4.9×10^{-5}	0.950	停留 65%

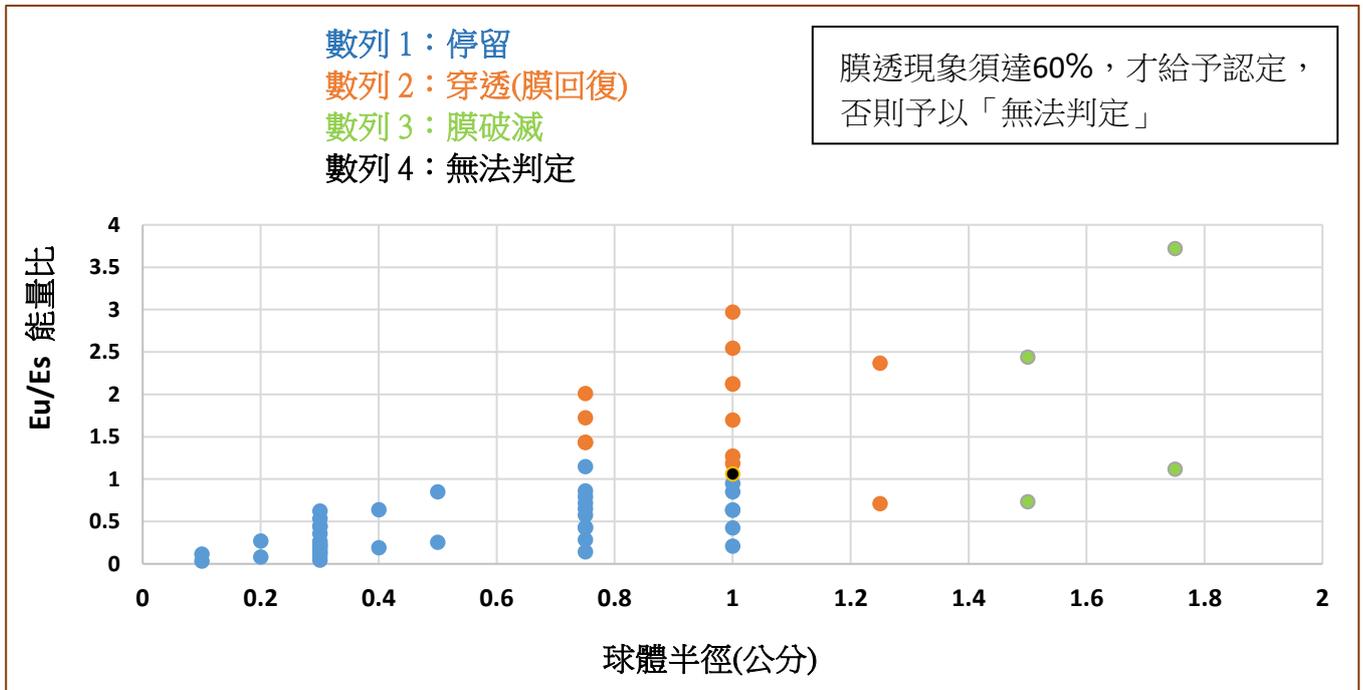
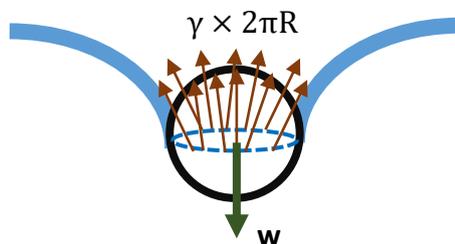


圖 6： $\frac{E_u}{E_s}$ 比值與皂膜滲透現象的關係

- 由圖 6 可發現， $\frac{E_u}{E_s} > 1$ 球體發生穿透機率極大，而當 $\frac{E_u}{E_s} < 1$ 球體大多是停留在膜上。
- 球體半徑 1 公分，以距離 5 公分落於半徑 5.2 公分的皂膜時，會出現「穿透」和「停留」機率相當的情況，此情況的 $\frac{E_u}{E_s} = 1.061$ ，即「球體落下能量」很接近「皂膜表面能」時，會出現「穿透或屏蔽停留」的臨界標準。

(3) 當球體半徑 1.5、1.75 公分，皂膜會破滅，此時 $\frac{E_u}{E_s}$ 比值無法作為穿透與否的判斷依據。

為何半徑半徑 1.5、1.75 公分的球體落下時，易使皂膜破滅？我們試著分析原因，可能是「球體的重量」超過了「表面張力總和」的承受。



w 為球體重量

γ 為表面張力：本實驗皂膜水溶液的表面張力經測定為 $0.0267 (g^w/cm)$

$\gamma \times 2\pi R$ ：表面張力的作用總和：表面張力 \times 總作用長度

表 7： 球重與表面張力的比較

球體半徑大小	半徑 1 公分	半徑 1.5 公分	半徑 1.75 公分
球重 $w (gw)$	0.1	0.22	0.425
皂膜表面張力 $\gamma (g^w/cm)$	0.0267	0.0267	0.0267
表面張力作用總和 $\gamma \times 2\pi R (gw)$	0.167	0.251	0.293
球重與張力作比較	$w < \gamma \times 2\pi R$	$w \cong \gamma \times 2\pi R$	$w > \gamma \times 2\pi R$
皂膜破滅機率	極低機率破滅	高機率破滅	必破滅

三、綜合上述的討論，我們發現液態薄膜能屏蔽小顆粒，卻讓大顆粒穿透薄膜的特性，除了

液體分子的特殊結構作用外，其 $\frac{E_u}{E_s}$ 的能量轉換關係可能也是值得參考的物理條件。

另外並非所有能量足夠的大顆粒皆能在「不破壞薄膜」的情況下穿透薄膜，薄膜的穿透仍有其限制性，推測其中一項物理條件可能是「顆粒重量不超過表面張力的承受上限」。

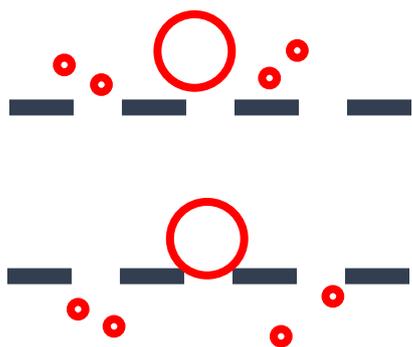
柒、結論：

一、探討不同保麗龍球體半徑對皂膜滲透的影響：

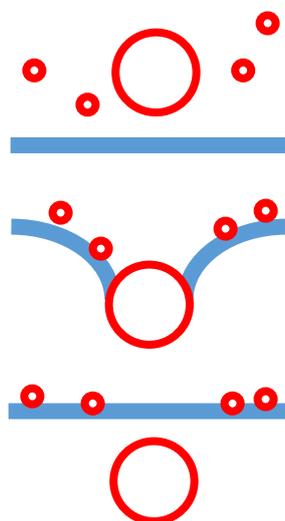
(一)由圖 1-1 及圖 1-2 可發現，在落下距離固定下，球體半徑較小的可被皂膜屏蔽而停留在皂膜表面，球體半徑較大的，則可穿透皂膜且膜被穿透後會自動修復。

(二)半徑超過一定大小 (如表 1-1、表 1-2 研究顯示的 1.5、1.75 公分)，會使膜破滅，因此皂膜對於物體的屏蔽與滲透作用仍有其限制條件，其條件可能為討論三所探討的「顆粒重量不能超過表面張力的承受上限」。

(三)傳統的過濾機制 (如圖七所示)，是利用濾層介面的孔隙來達到「篩大不篩小」的目的，但液體膜的過濾特性卻是一種反向的機制，它能達到「篩小不篩大」的作用 (如圖八所示)。



圖七：傳統固體介面的過濾現象



圖八：液體膜的過濾現象

二、探討球體的不同落下高度對皂膜滲透的影響：

(一) 由圖 2-2 及圖 2-3 可發現，半徑 0.75 及 1 公分的球體，在落下距離增加時，會從停留在膜上轉變為穿透皂膜，可見球體大小不是「能否穿透皂膜」的唯一因素。

(二) 由表 6 及圖 6 的探討發現，落下距離的改變影響「球體落下能量」，而由研究發現，

「球體落下能量 E_u 」與「皂膜拉伸的表面能 E_s 」有著密切關係，即 $\frac{E_u}{E_s} > 1$ ，

球體才能成功的穿透皂膜而不被屏蔽。

三、探討不同皂膜半徑對球體滲透皂膜的影響：

- (一) 由討論一的表 5 可發現，相同球體落於愈大半徑的皂膜時，所造成的表面能量 E_s 就愈大，就理論來說，會增加穿透的困難度。而在圖 3-3 的研究結果也驗證皂膜半徑愈大時，球體穿透皂膜的機率會降低。
- (二) 皂膜半徑大小也會影響物體對皂膜的屏蔽或穿透效應，雖然其引起的表面能變化並不很大，但對於需要「很精細地調控過濾物的尺寸差異時」，皂膜的大小就成為極佳的調控策略。

四、探討皂膜溶液的配置比例對皂膜滲透的影響：

- (一) 會選擇以「水+清潔劑+甘油+膠水」作為皂膜水溶液的組成，其原理是因為清潔劑分子具有親油性及親水性的兩端，使其易於包覆水分子形成薄膜，膠水的作用則使皂膜增加黏性更能延展，而甘油的作用就像保濕劑，讓皂膜可以持久一點，避免水分蒸發造成膜變薄而易破。本研究中發現當水的比例減少時，會增加膜破滅的機率，推論皂膜包覆的水分比例若低，在皂膜的水分一經蒸發時，膜將更快達到破滅的厚度。
- (二) 如何改善液膜的脆弱性及維持液膜的持久性，是值得研究的課題。除了溶液的配置比例外，溶液的組成成分也很重要，我們可以添加讓液膜維持更久或讓膜更堅韌的成分，未來尋求最佳的液膜配方，會是液膜過濾技術的重大發展方向。

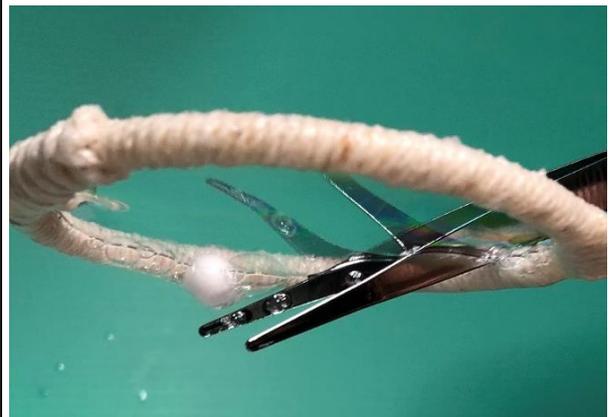
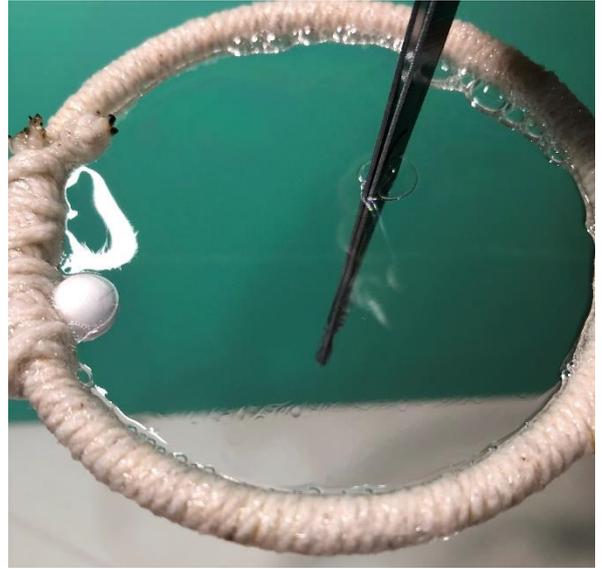
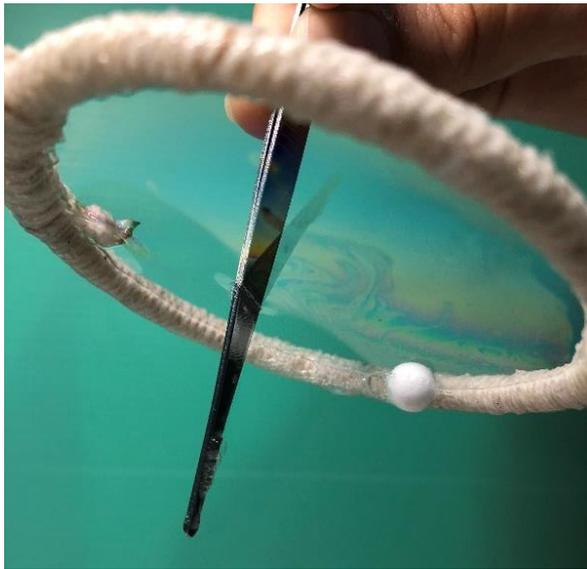
五、應用與展望：

液體薄膜的「篩小不篩大」及「膜被穿透後的自我回復」特性，不但對「顆粒分離」的科學研究有重要發展，也對醫療及公共衛生帶來極具希望的潛在應用。

- (一) 顆粒屏蔽的特性：由於顆粒愈小及愈輕的物體，其撞擊膜的能量愈小，容易被阻擋於液膜表面，因此透過膜的特製，我們可以決定讓什麼大小的物體能通過，也能阻擋我們想阻擋的物體，例如阻擋灰塵、花粉、塵蟎、昆蟲或細菌等等。
- (二) 公共衛生的提升：由於液膜過濾特性，可以用來作為固體廢物及氣味管理的簡單方案，例如：露天排便及無水馬桶（缺水時）的惡臭問題，像前陣子遇到水庫乾旱而造成限水，學校眾多學生面臨上廁所沒有水的困擾，因此若能發展相關的液膜屏蔽原理的技術，就可以把造成惡臭的氣體微粒阻擋在膜外，讓其和固體排泄物分離。
- (三) 醫療及手術的應用：當醫療及手術無法在無菌的手術室進行時，例如：偏鄉、野外、戰場或者事出緊急時，這時候可以應用液膜屏蔽原理，建立一層外科手術薄膜，不但

可以阻擋手術過程中的的汙染物，而手術工具又能穿透薄膜正常運作且不會干擾能見度。如圖九所示，皂膜雖然阻擋球體的落下，但金屬鑷子仍然可以穿透皂膜而不破壞膜的結構。

圖九： 金屬鑷子能穿透皂膜正常運作，同時皂膜亦能阻擋球體落下



捌、參考資料及其他：

一、L.Courbin,H. A.Stone,Impact, puncturing, and the self-healing of soap films.Phys. Fluids18,091105(2006).

二、

https://advances.sciencemag.org/content/advances/suppl/2018/08/20/4.8.eaat3276.DC1/aat3276_SM.pdf?fclid=IwAR155vskSU7NYATVeBpcB7-Nh8cwaxTNU9mfhjFiv8fBK1yubTqPUPyGbPI#page186

三、BomBom Story，劉永承(2017年9月25日出版)。漫畫大英百科 力與能量。三采文化。

四、Gomdori co. (2015年3月5日出版)。科學實驗王 溶液與浮力。三采文化。

五、https://www.amtech.com.tw/custom_60479.html

六、<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/表面张力>

【評語】 080106

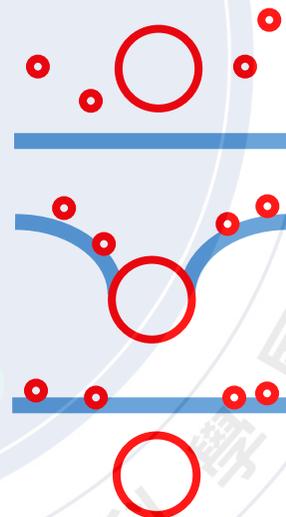
1. 本作品探討保麗龍球穿透皂膜與否的現象，能充分採用相關變數進行研究，控制變因做得非常完整。
2. 現象觀察記錄得非常仔細，尤其除了定性分析，更有定量的分析，作品具有很好完整度。
3. 能經由定量的表面張力量測與對應計算出表面能等物理量，進行對實驗數據的合理分析，研究過程合理與邏輯性佳。
4. 能從實驗結果中所觀察到的現象，進而提出可行的未來的應用與展望，本作品是一件非常完整且具有參考價值的研究。

作品簡報

膜透心思-薄膜滲透之研究

組別：國小組

科別：物理科



前言

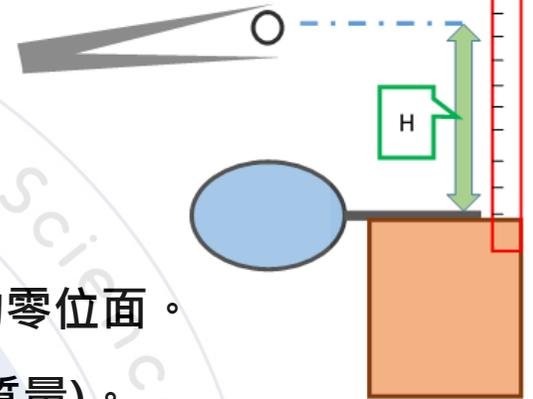
在新冠肺炎肆虐下，口罩成了珍貴且必備的防疫物資，但口罩的防護原理和濾紙、濾網相同，皆是「阻擋大顆粒，但小顆粒會通過」。我們在查詢口罩原理的過程中，意外發現某些文獻提到：液體膜的「逆向過濾」現象，即液體形成的膜會有「讓大的通過而阻擋小的」之作用機制，這引起我們的研究興趣，於是在和老師討論後，進行了相關實驗的探究。

研究目的

- 一、探討不同保麗龍球體半徑對皂膜滲透的影響
- 二、探討球體在不同落下高度時，對皂膜滲透的影響
- 三、探討不同皂膜半徑對皂膜滲透的影響
- 四、探討皂膜溶液的配置比例對皂膜滲透的影響

研究方法

- 一、實驗裝置如圖一，以棉線纏繞圓環，記錄下圓環的半徑。
- 二、以清潔劑、甘油、膠水及蒸餾水配置肥皂水溶液。
- 三、將圓環浸入肥皂水溶液使皂膜結構成型。
- 四、將圓環及直尺固定於基座上，並以此定為物體落下高度的零位面。
- 五、以鑷子夾取物體(本實驗採用保麗龍球，並量測其半徑與質量)。
- 六、記錄下物體位置的高度 H ，使物體自由落下，觀察物體通過皂膜的現象
(計有「停留在膜上」、「穿透但膜回復完整」、「穿透但膜破滅」等三種現象)。



圖一：實驗裝置示意圖

穿透但皂膜回復完整

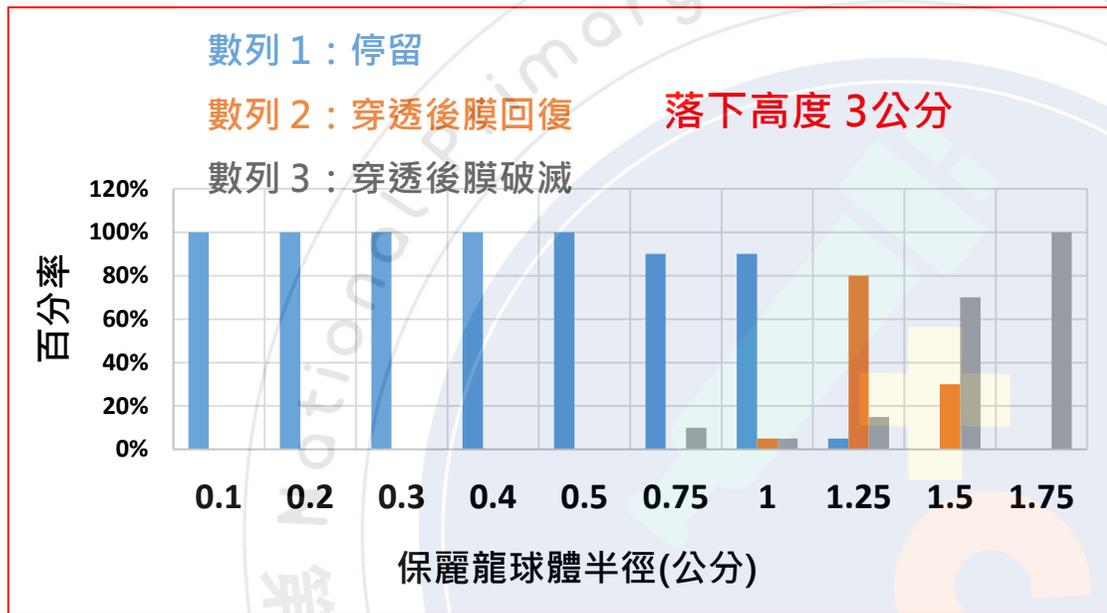


停留在皂膜上



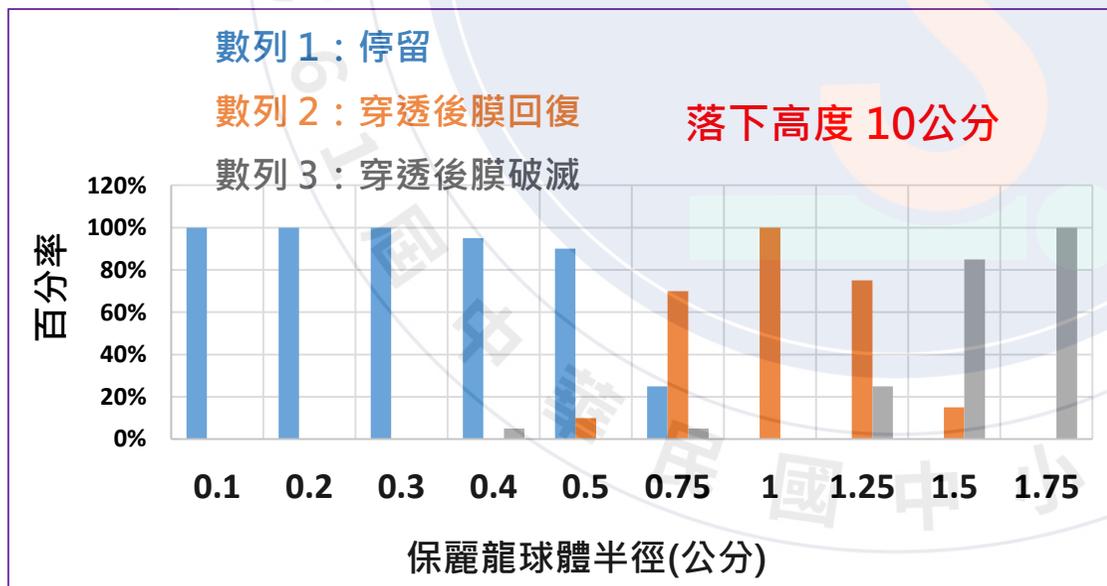
研究結果與解釋

一、探討不同保麗龍球體半徑對皂膜滲透的影響：



研究發現：

- (1) 落下距離固定時，球體半徑較小的可被皂膜屏蔽在表面，球體半徑較大的則可穿透皂膜，且膜會自動修復。
- (2) 半徑在0.75公分與1公分的球體在落下高度增加後，會從「屏蔽」轉變成「穿透」。
- (3) 半徑1.5公分以上的球體，使皂膜破滅的機率很高。



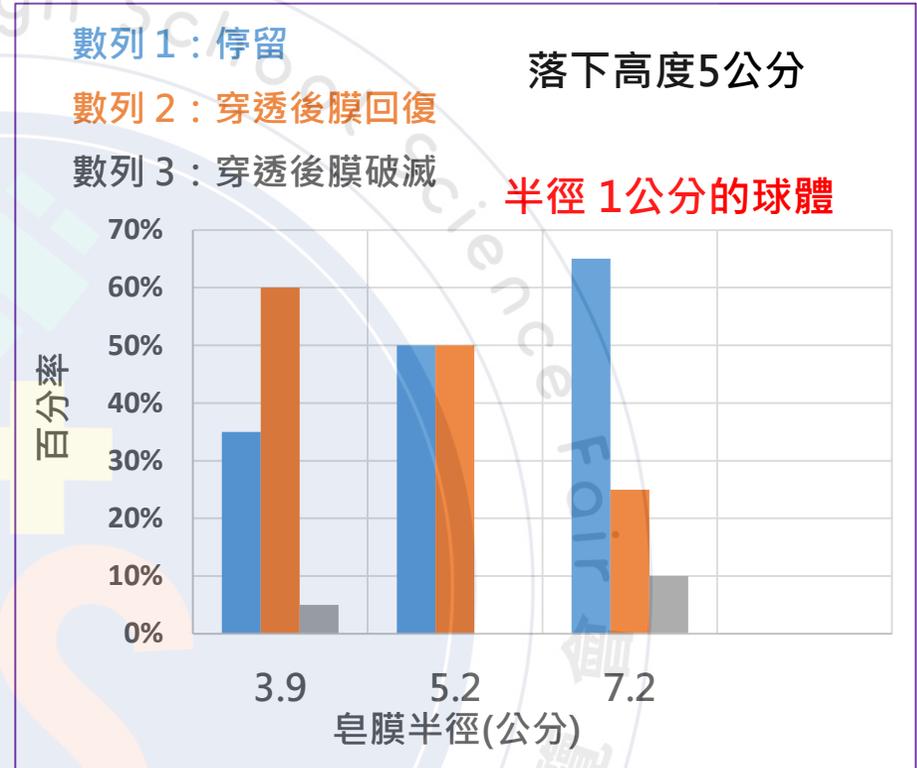
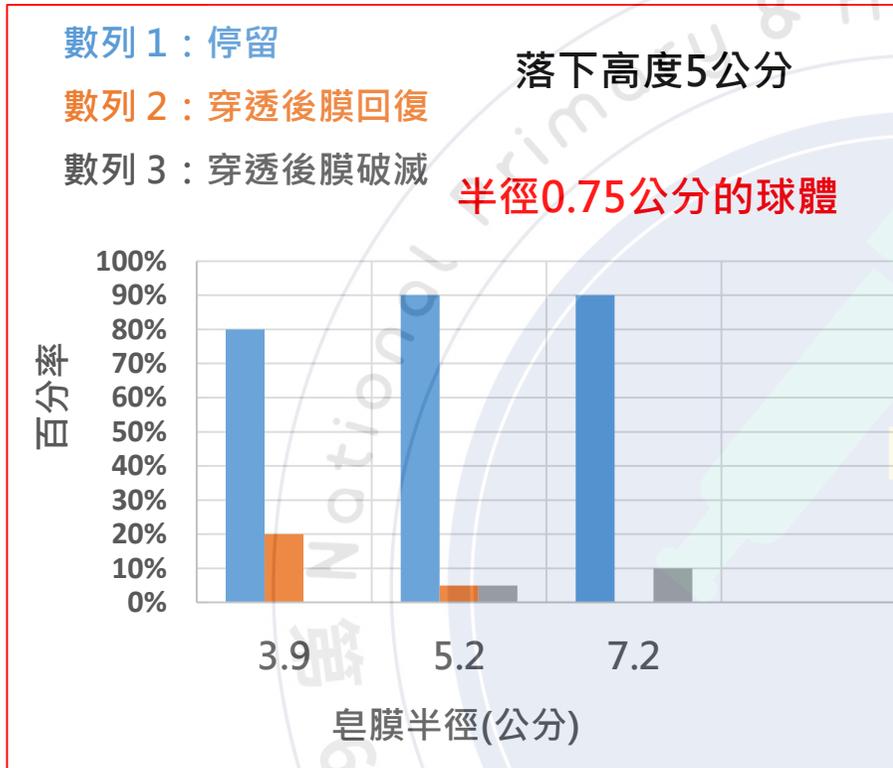
二、探討球體的不同落下高度對皂膜滲透的影響：



研究發現：

落下高度會影響球體對皂膜的滲透情形，以半徑0.75公分和1公分的球體來看，落下高度須達到一定距離以上即能穿透皂膜。可見球體大小不是「能否穿透皂膜」的唯一因素。

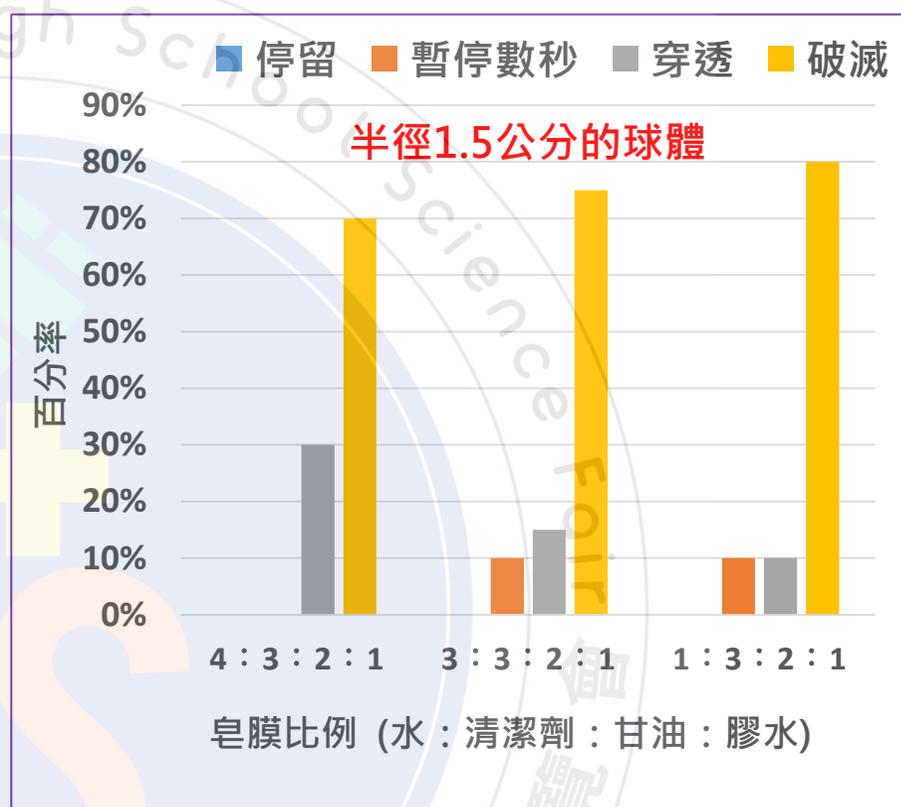
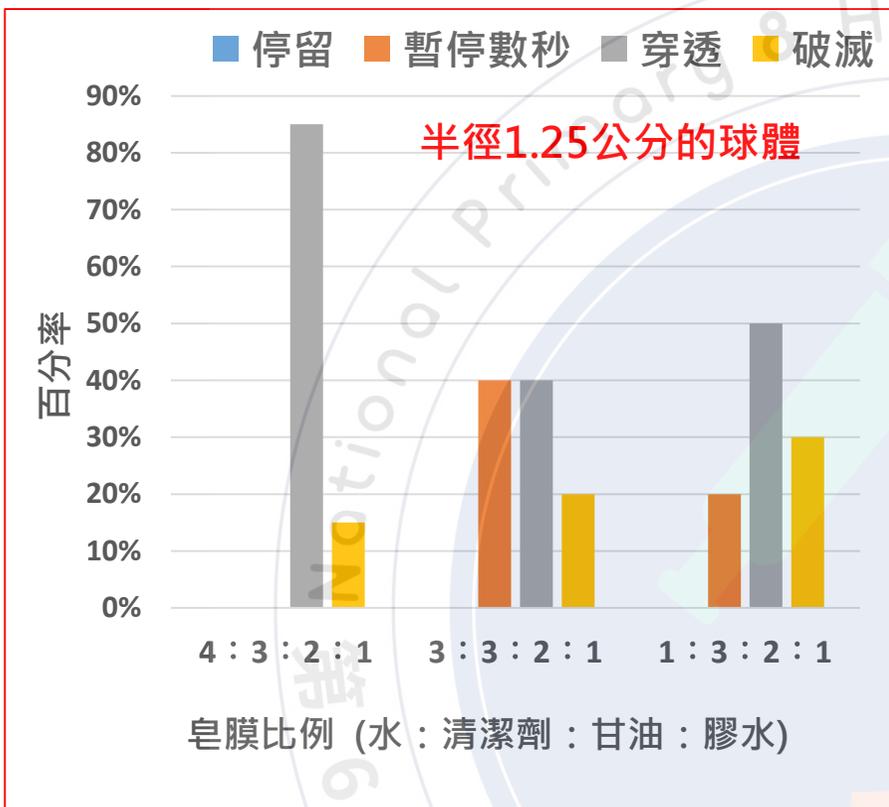
三、探討不同皂膜半徑對皂膜滲透的影響：



研究發現：

由右圖可以明顯發現，半徑1公分的球體，遇到半徑較大的皂膜則穿透率會下降，即皂膜半徑愈大，屏蔽顆粒的效果愈好。

四、探討皂膜溶液的配置比例對皂膜滲透的影響：

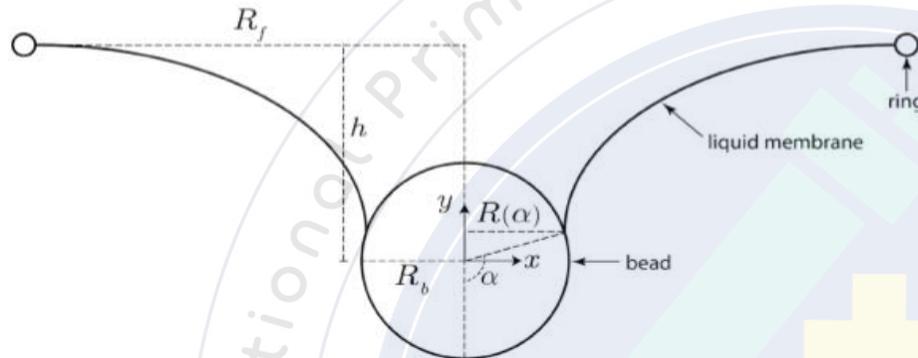


研究發現：

- (1) 降低水的比例後，皂膜水溶液變得更濃稠，膜的黏性更大，會出現「球體先停留在膜上數秒，再穿透過膜」的特別現象。
- (2) 降低水的比例後，膜破滅的機率反而增加，這顯現「水的比例」是影響「膜韌性」的關鍵。
- (3) 如何改善液膜的脆弱性及維持液膜的持久性，是值得研究的課題。除了溶液的配置比例外，未來我們可以尋求更佳的液膜配方，例如添加能讓液膜維持更久或使膜更堅韌的成分。

結論

- 一、根據文獻，當落下的顆粒撞擊液體薄膜時，薄膜將形成類瀑布的形狀。薄膜將因拉伸而引起表面能量的變化，其表面能 E_s 的公式如下：



R_f ：皂膜半徑

R_b ：保麗龍球體半徑

γ ：表面張力大小

$$E_s = \pi\gamma\{R_b^2[\sinh\phi + \phi] - 2(R_f^2 - R_b^2)\} \quad ; \quad \text{其中 } \phi = 2\cosh^{-1}\left(\frac{R_f}{R_b}\right)$$

R_b (cm)	R_f (cm)	ϕ	$\sinh\phi$	表面張力 γ (N/m)	表面能 E_s (焦耳)
0.75	5.2	5.24849	95.13697	0.0026	2.86707×10^{-5}

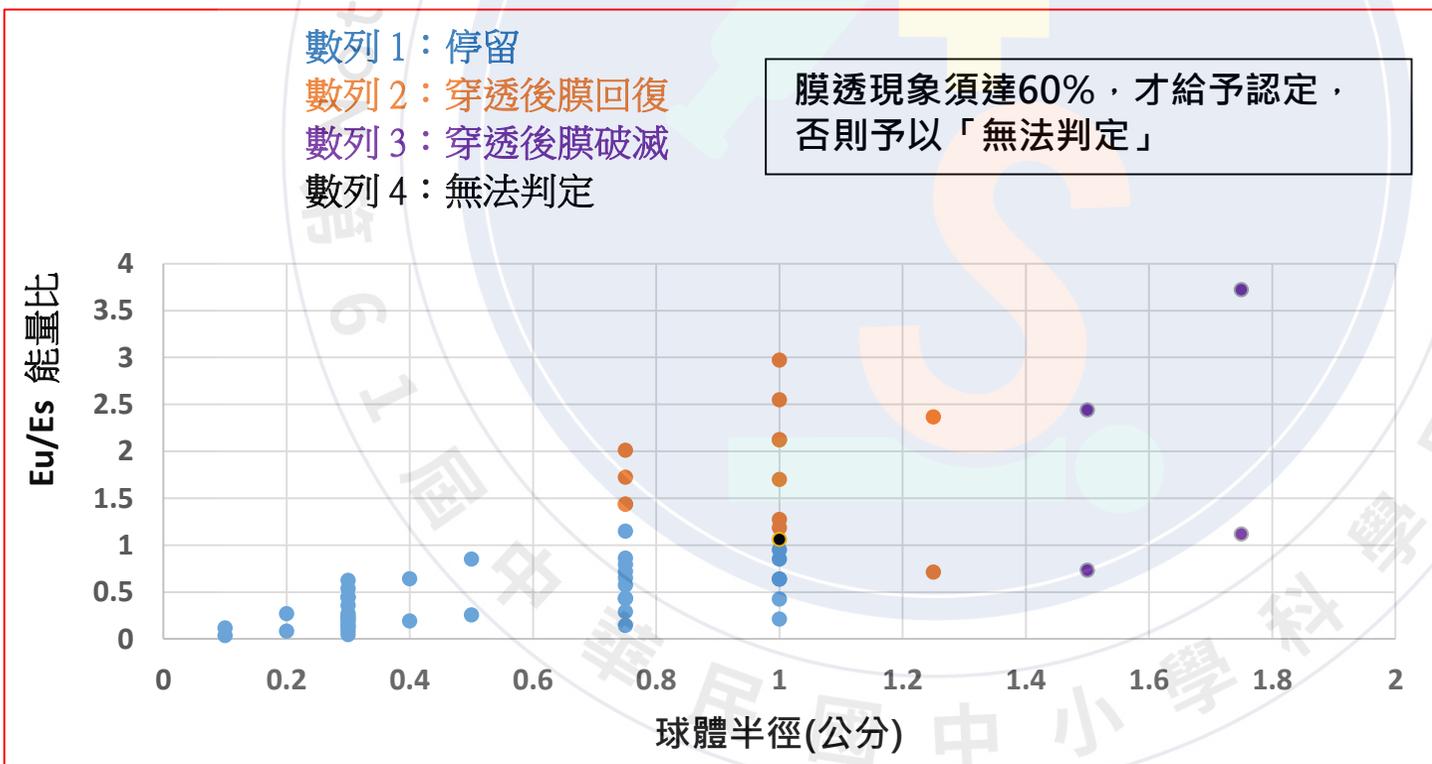
- 二、若以能量守恆的概念來看，因為球體穿透皂膜時，必先撞擊皂膜而引起皂膜拉伸，且穿透後的球體仍具有動能繼續往下運動，因此推論能夠穿透皂膜的球體，其「落下的能量 E_u 」應大於「皂膜拉伸的表面能變化 E_s 」。
- 球體落下所具有的能量 $E_u = m \times g \times H$

球體落下能量 $E_u =$ 皂膜拉伸的表面能 $E_s +$ 球體穿透皂膜後的動能 + 損耗的能量

故推測 $\frac{E_u}{E_s} > 1$ ，在能量轉換的觀點上，比較符合球體能穿透皂膜的條件。

以下我們將利用本實驗所獲得的數據，來計算「球體落下能量 E_u 」和「皂膜表面能量 E_s 」的比值，並對照實驗觀察到的皂膜滲透結果，設法釐清兩者之間的關聯。

球半徑(公分)	皂膜半徑(公分)	表面能 E_s (焦耳)	球體質量 (公克)	落下距離 (公分)	落下能量 E_u (焦耳)	E_u/E_s	膜透現象
1	5.2	4.617×10^{-5}	0.1	3	2.94×10^{-5}	0.637	停留
1	5.2	4.617×10^{-5}	0.1	5	4.9×10^{-5}	1.061	無法判斷
1	5.2	4.617×10^{-5}	0.1	8	7.84×10^{-5}	1.698	穿透
1	7.2	5.159×10^{-5}	0.1	5	4.9×10^{-5}	0.950	停留 65%



圖二 $\frac{E_u}{E_s}$ 比值與皂膜滲透現象的關係

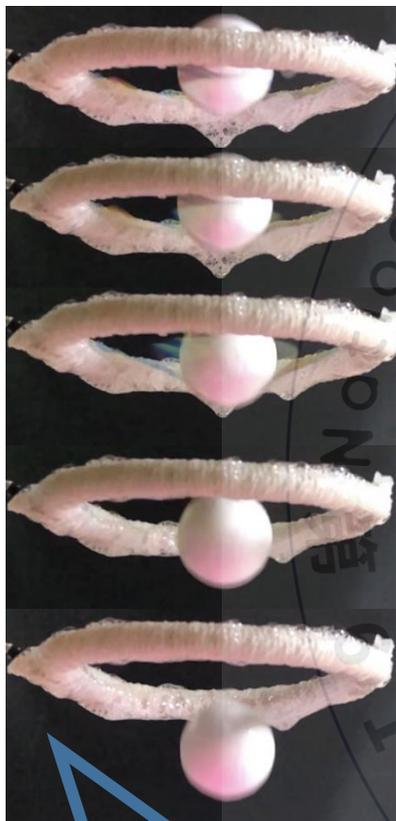
由圖二可發現，

$\frac{E_u}{E_s} > 1$ 球體穿透機率極大。(約94%)

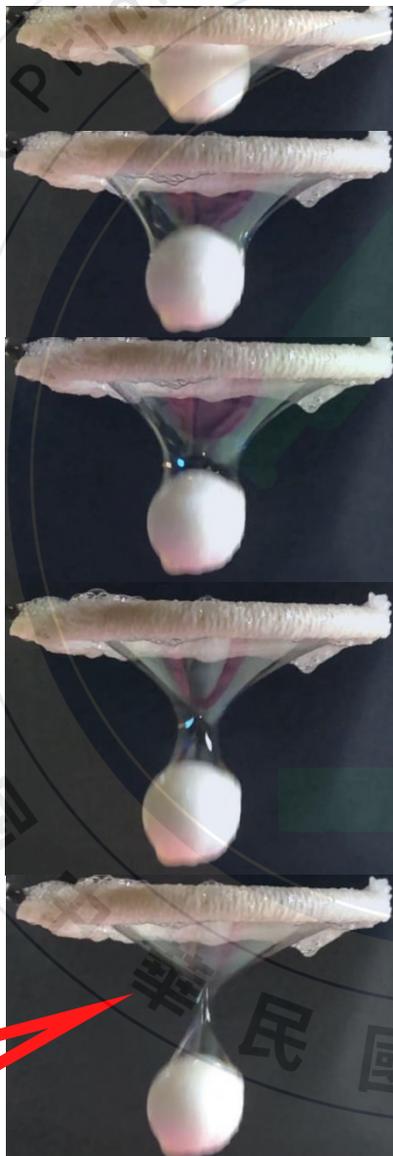
$\frac{E_u}{E_s} < 1$ 球體大多停留在膜上。(約95%)

而當 $\frac{E_u}{E_s} = 1.061$ 時，會出現「穿透」和「停留」機率相當的情況。可視為「穿透或屏蔽停留」的臨界標準。

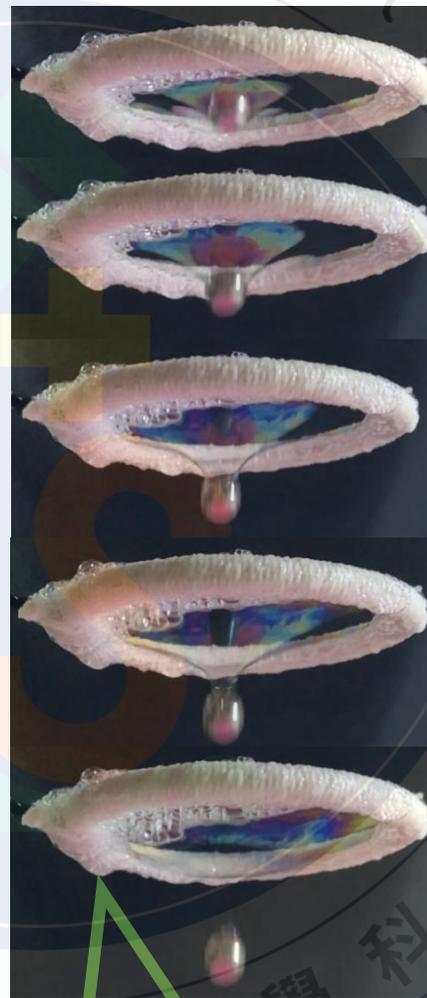
當球體半徑為1.5與1.75公分時，穿透皂膜後會使膜破滅，我們當初以為是球的重量超過表面張力的承受所致，但後來發現「重量更大的小鋼珠」與「沾濕肥皂水的同大小保麗龍球」卻能穿透皂膜後，膜仍可回復。這促使我們去探究膜會破滅的條件及使膜癒合的原因。



圖三 半徑1.5公分的(乾燥)保麗龍球穿透後使膜破滅



圖四 半徑1.5公分的(沾濕)保麗龍球穿透後使膜癒合

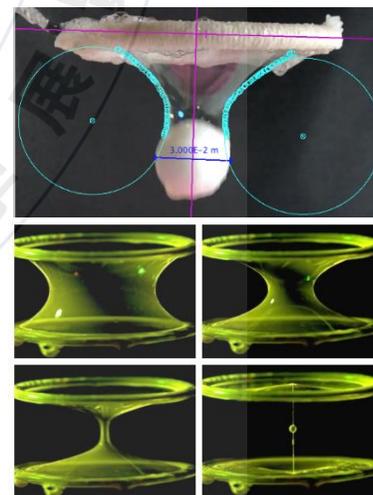


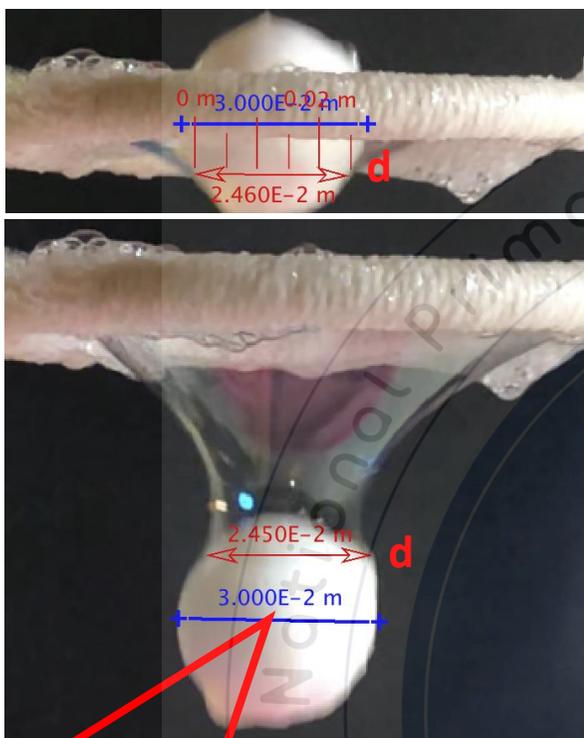
圖五 半徑0.5公分(乾燥)小鋼珠穿透後使膜癒合

我們發現：

穿透皂膜後是否使膜破滅和「球體半徑大小」與「球體表面性質」有關。

當膜兩段被拉太長，會達到一個不穩定的狀態，這時候如果膜是「先窄再寬」的形狀(如下圖所示)，則膜會往中間縮，最後變成兩個上下分開的膜，則上層的皂膜就癒合在一起。





圖六：利用 tracker 軟體測定「球體和膜兩端接觸的距離 d 」

	半徑1.5公分 乾保麗龍球	半徑1.5公分 濕保麗龍球	半徑0.5公分 鋼珠
球體與皂膜兩端接觸點的距離 d (公分)			
變大 ↓	1.327	2.459	0.853
	2.151	2.894	0.961
	2.802	2.763	0.904
	皂膜破裂	2.449	0.745
		1.910	0.607
		皂膜癒合	皂膜癒合

當球體穿透皂膜的過程中，「球體與皂膜兩端接觸點的距離」會逐漸變大，但如果此距離能在變大後又逐漸縮小回來，膜就能夠癒合。

小鋼珠：球體半徑小，因此「觸膜距離」本就不大，且鋼珠表面光滑能讓此距離變大後再漸縮小。

沾濕的保麗龍球：球體表面若沾「水、甘油、清潔劑、肥皂水」等液體時，膜皆可癒合。但若表面沾「沙拉油」則膜破滅，推論若表面沾濕的液體能與皂膜水溶液迅速互溶者，則「觸膜距離」能夠沿球體表面滑移而縮小，使膜達到癒合的條件。

三、總結：(1)球體能否穿透皂膜決定於能量關係，即 $\frac{E_u}{E_s}$ 的比值。

(2)皂膜被穿透後會不會破滅，則受「球體大小」及「球體表面性質」等因素影響。

應用與展望

液體薄膜的「篩小不篩大」及「膜被穿透後的自我回復」特性，不但對「顆粒分離」的科學研究有重要發展，也對醫療及公共衛生帶來極具希望的潛在應用。

(一) 顆粒屏蔽的特性：我們可以決定讓什麼大小的物體能通過，也能阻擋我們想阻擋的物體，例如，阻擋灰塵、花粉、塵蟎、昆蟲或細菌等等。

(二) 公共衛生的提升：由於液膜過濾特性，可以用來作為固體廢物及氣味管理的簡單方案，例如：露天排便及無水馬桶（缺水時）的惡臭問題，就可以把造成惡臭的氣體微粒阻擋在膜外，讓其和固體排泄物分離。

(三) 醫療及手術的應用：當醫療及手術無法在無菌的手術室進行時，例如偏鄉、野外、戰場或者事出緊急時，這時候可以應用液膜屏蔽原理，建立一層外科手術薄膜，不但可以阻擋手術過程中的的汙染物，而手術工具又能穿透薄膜正常運作且不會干擾能見度。如圖七所示，皂膜雖然阻擋球體的落下，但金屬鑷子仍然可以穿透皂膜而不破壞膜的結構。

圖七



參考資料

1. https://advances.sciencemag.org/content/advances/suppl/2018/08/20/4.8.eaat3276.DC1/aat3276_SM.pdf?fbclid=IwAR155vskSU7NYATVeBpcB7-Nh8cwaxTNU9mfhjFiv8fBK1yubTqPUPyGbPI#page186
2. <https://www.cam.ac.uk/research/news/a-new-twist-on-soap-films>