

第七屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA7-407

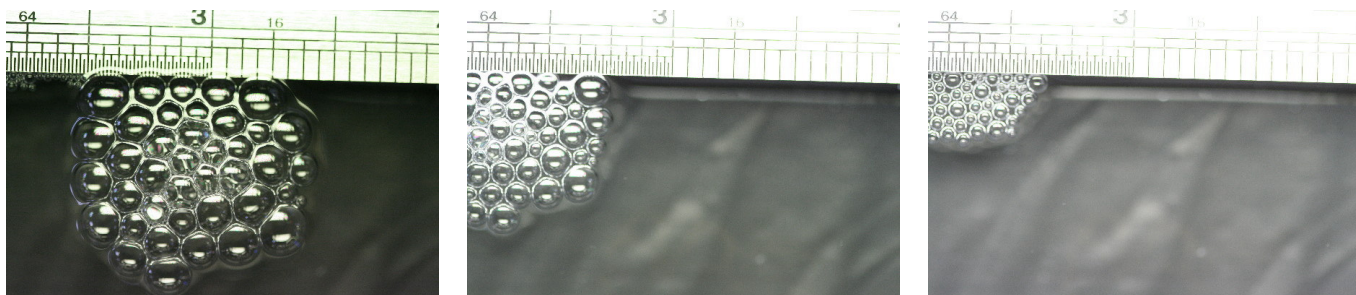
作品名稱：CO₂、C₂H₂ 和 N₂O 的啤酒效應

姓名：林育惠

關鍵字：CO₂、泡泡

摘要

某次喝沙士的時候，發現有些氣泡從杯底冒上來後，並不是如一般人的印象直接破掉，而是漸漸縮小。氣泡並沒有完全消失，但可以看出氣泡體積有明顯的改變。



沙士中所含的氣體最主要是 CO_2 。我們猜測氣泡縮小的原因有兩個： CO_2 溶進水裡，或者經由泡膜逸散至外界。但沙士對 CO_2 而言是過飽和溶液，卻還能迅速溶解 CO_2 氣體，讓我們感到十分疑惑。為了證實 CO_2 溶進溶液裡的假設是否正確，我們將 CO_2 氣體以及其他溶解度較 CO_2 大的氣體打進肥皂水，卻發現除了 CO_2 之外，其他氣體所形成的氣泡並沒有明顯的縮小現象。

後來我們猜測 CO_2 氣體是經由泡膜逸散至外界，並且假設氣體穿透泡膜的能力與氣體分子大小有關，我們試著將一些分子體積比 CO_2 小的氣體通入肥皂水，卻發現除了 CO_2 外，其他氣體所形成的氣泡並沒有明顯的縮小現象。

在肥皂水裡只有 CO_2 氣泡有縮小的現象，我們懷疑 CO_2 氣泡縮小的情況或許是肥皂水或稀薄水溶液特有的。我們想知道若將肥皂水換成其他溶液，是否會出現相同的結果。於是我們嘗試將幾種不同的氣體通入各種溶液，發現 CO_2 氣泡在我們所試的溶液中所形成的氣泡都有明顯的縮小現象，而其他氣體所形成的氣泡體積卻沒有明顯的改變。

我們假設 CO_2 氣體是藉著擴散進出泡膜，溫度和氣泡外部的 CO_2 分壓應該對氣泡縮小的情況造成影響。在改變外部環境 CO_2 分壓的實驗中，我們發現外部 CO_2 分壓越高，氣泡縮小的情況越不明顯。甚至在灌滿 CO_2 的密閉空間裡打入由一般空氣所形成的氣泡，氣泡會明顯得變大！這些實驗結果都可以證實我們的假設，但仍然無法解釋為何只有 CO_2 可以輕易穿透泡膜。

後來我們發現 CO_2 甚至會穿過氣球膜和塑膠袋。另外，我們也發現了 C_2H_2 和 N_2O 所形成的氣泡也有縮小的現象。因為沙士的泡泡和啤酒的泡泡都有迅速縮小的現象，所以我們將這個現象稱之為「啤酒效應」。

最後，我們藉由定量的實驗，來探討 CO_2 等氣體的「啤酒效應」與表面積以及氣泡內外 CO_2 濃度差的關係，希望能進一步了這奇特的現象。

壹、研究動機

某次喝沙士的時候，發現氣泡上升至液面後慢慢縮小了。氣泡縮小這個現象引起我們的興趣，但只有沙士的氣泡有這個現象嗎？或是所有碳酸飲料都可以觀察到這個現象？可否推到更一般的情況（例如蒸餾水或稀薄水溶液中的氣泡）？於是我們決定對此現象做更深入的探討。

貳、研究目的

- 一、研究氣泡內氣體種類與氣泡是否縮小的關係。
- 二、研究形成泡膜的溶液與氣泡是否縮小的關係。
- 三、研究壓力差與表面張力對氣泡是否縮小的影響。
- 四、量化 CO_2 分壓與氣泡縮小速率的關係。
- 五、量化氣泡表面積與氣泡縮小的關係。
- 六、推論「啤酒效應」的機制。

參、研究設備及器材

高壓氣體鋼瓶：

100%二氧化碳(CO_2)

100%氮氣(N_2)

100%乙炔(C_2H_2)

100%笑氣(N_2O)

75% CO_2 +25% N_2

50% CO_2 +50% N_2

25% CO_2 +75% N_2

鋅片

碳酸鈣(CaCO_3)

亞硫酸鈉(Na_2SO_3)

硫化鈉(Na_2S)

鹽酸($\text{HCl}_{(\text{aq})}$)

培養皿

寶特瓶

注射器(2.5mL)

注射器(60mL)

花生油

沙拉脫

水

蛋白

沙士

95%乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)

環己烷(C_6H_{12})

丙酮($(\text{CH}_3)_2\text{CO}$)

異丙醇($(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$)

正己烷($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$)

氣球

塑膠袋

熱熔膠

橡皮筋

刮勺

酒精燈

三腳架

陶瓷纖維網

溫度計

量筒

試管

燒杯

Canon EOS 350D+450D

Canon EF 100mm Macro

Canon EF 28-300mm

kenko 接寫環

小型透明塑膠收納箱

橡皮手套

格子紙

浮子式氣體流量計

(20~100 mL/min)

肆、研究過程、方法及結果

● 第一階段：肥皂水所形成的泡膜的定性現象觀察

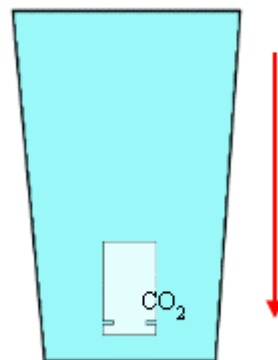
- 一、 因為一開始是在沙土發現這個現象，我們推測氣泡裡的氣體主要成分是二氧化碳。我們想知道這個現象是否為沙土特有，所以我們在水裡通入二氧化碳，並觀察其氣泡是否有縮小的現象。

水的表面張力較大，泡泡壽命太短，難以觀測和記錄到氣泡的縮小情形，所以我們決定以肥皂水代替（3mL 沙拉脫+200mL 水），發現二氧化碳氣泡在肥皂水中也有明顯的縮小現象（氣泡的半徑可在十秒內縮減至原來的一半）。

- 二、 我們想或許是 CO_2 的溶解速率受壓力影響極大，一方面在氣泡從液面下冒上來的過程中，部分泡膜露在空氣中，使得表面張力所造成的合力變大，為了使氣泡存在，內部壓力也必須跟著變大，而內部壓力變大使得 CO_2 氣體溶解速率增加，迅速溶回水中，使得氣泡變小；另一方面因為氣泡內部的壓力比外部壓力大，氣泡內部 CO_2 的因為壓力較大的關係溶進膜裡，膜裡的 CO_2 因為氣泡外壓力較小的關係而由泡膜逸散到大氣中，於是氣泡明顯縮小。

由 $P_{in}=P_{out}+(2T/R)$ 得知氣泡半徑越小，氣泡內外壓力差越大。但在我們的實驗過程中，我們發現 CO_2 氣泡的直徑即使很大（約等於 1.5cm），也會有明顯的縮小現象，這個現象與我們原本的假設矛盾。

為了證實這個假設是否正確，我們以排水集氣法在廣口瓶裏收集滿滿的 CO_2 ，將廣口瓶倒放在高約一公尺的垃圾桶裡，垃圾桶裡裝滿水。垂直移動廣口瓶，可以改變廣口瓶所受的壓力。若氣泡直徑 1cm，由 $P_{in}=P_{out}+(2T/R)$ 以及水在常溫下的表面張力 $T=7.28 \times 10^{-2} \text{nt/m}$ 可算出 $P_{in}-P_{out} \approx 29.12 \text{pa} \approx 2.8 \times 10^{-4} \text{atm}$ ，遠小於一公尺高的水柱所造成的壓力（約等於 0.1atm）。但即使我們將廣口瓶壓到底部， CO_2 的溶解速率並沒有明顯變化。這個實驗結果推翻我們原本的假設。



- 三、 我們嘗試在肥皂水裡通入其他氣體，以測試氣泡縮小這個現象是所有氣體共有的現象，還是二氧化碳在水裡特有的現象。我們本來猜測因為 CO_2 氣體溶進溶液裡所以氣泡縮小，所以決定嘗試溶解度更高的氣體：

(一) 製備二氧化硫並通入肥皂水

在注射器內置入二氧化硫並打入肥皂水中，發現二氧化硫氣泡沒有明顯的縮小現象（約一分鐘後仍無法以肉眼觀察到氣泡半徑的改變）。

(二) 製備硫化氫並通入肥皂水

在注射器內置入硫化氫並打入肥皂水中，發現硫化氫氣泡沒有明顯的縮小現象。這個實驗結果使我們相當驚訝，因為我們原本假設二氧化硫所形成的氣泡和硫化氫所形成的氣泡會縮小得很快，但實驗結果出乎我們意料之外，令人匪夷所思。我們發現在肥皂水液面上的 CO_2 氣泡縮小至某個程度後就不再縮小，而氣泡最後

的大小與原本的大小成正相關。由後面所做的實驗推論，我們認為應該是收集的 CO₂ 過程中摻入了一定比例的其他氣體，這些氣體無法穿透泡膜，使得泡泡最後維持在固定的大小。

四、我們用 60mL 的注射器裡抽入 CO₂ 氣體，針頭沾上肥皂水，在半空中打出直徑約 3cm 的 CO₂ 氣泡，發現 **CO₂ 氣泡明顯的縮小**。而氣泡縮小的體積明顯大於泡膜所能溶解的 CO₂ 的量。這個實驗結果證實了 CO₂ 氣體並不是溶進泡膜裡。

五、後來我們猜測氣體是經由泡膜逸散至外界，我們想分子體積較小的氣體說不定較容易通過泡膜，於是想嘗試分子更小的氣體。

(一) 製備氫氣並通入肥皂水

在注射器內置入氫氣並打入肥皂水中，**發現氫氣氣泡沒有明顯的縮小現象**。

(二) 將氮氣通入肥皂水

將氮氣鋼瓶接上注射器並把氮氣通入肥皂水中，**發現氮氣氣泡沒有明顯的縮小現象**。

六、我們認為氣體穿透泡膜的能力與組成泡膜的溶液的性質有關，於是我們將肥皂水換成花生油、乙醇、乙醚、環己烷、正己烷、丙酮、異丙醇等極性與非極性液體，重複在各種液體中打入各種氣體（一般空氣、二氧化碳、氮氣、氫氣、二氧化硫、硫化氫、氨氣）以形成氣泡，發現仍然**只有 CO₂ 氣泡有明顯的縮小現象**。

七、在嘗試許多種氣體後，我們終於找到另外兩種通入肥皂水後，所產生的氣泡有類似現象的氣體：**C₂H₂ 和 N₂O**。

我們所做的實驗結果可以歸納成下列表格：

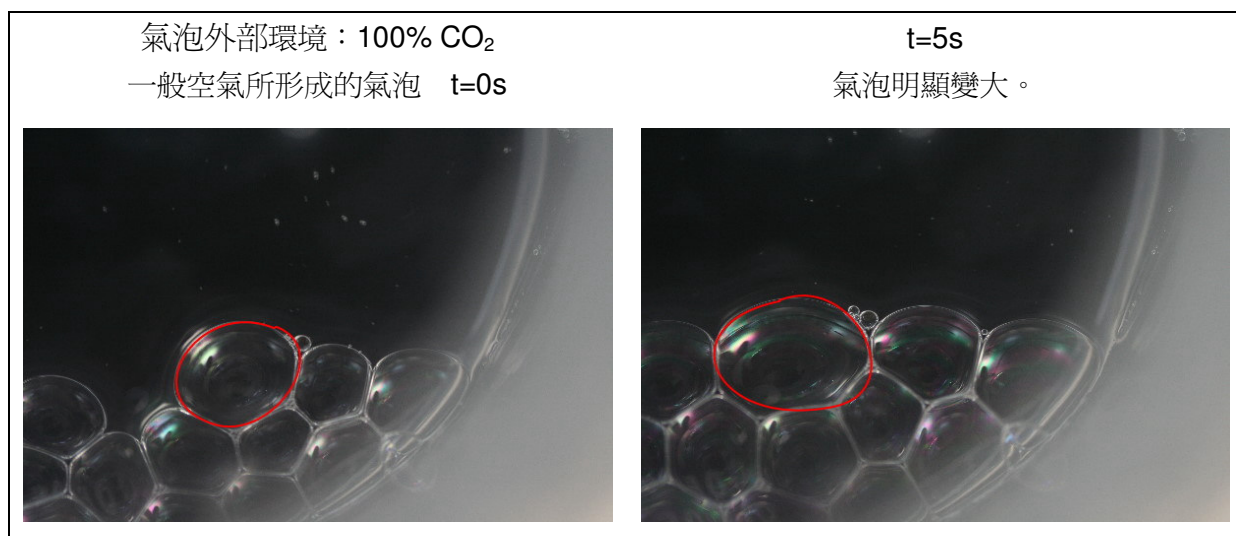
溶 液 \ 氣 體	二氧 化 碳 (CO ₂)	二氧 化 硫 (SO ₂)	一 般 空 氣	氮 氣 (N ₂)	硫 化 氫 (H ₂ S)	氫 氣 (H ₂)	乙 炔 (C ₂ H ₂)	笑 氣 (N ₂ O)
沙士	V	X	X	X	X	X		
肥皂水	V	X	X	X	X	X	V	V
花生油	V	X	X	X	X	X		
95%乙醇 (C ₂ H ₅ OH)	V	X	X	X	X	X	V	
環己烷(C ₆ H ₁₂)	V	X	X	X	X	X		
丙酮 ((CH ₃) ₂ CO)	V	X	X	X	X	X	V	
異丙醇 ((CH ₃) ₂ CHOH)	V	X	X	X	X	X		
正己烷 (CH ₃ (CH ₂) ₄ CH ₃)	V	X	X	X	X	X		

V：氣泡明顯縮小—氣泡的半徑在十秒內縮減至原來的一半

X：氣泡沒有明顯的縮小現象—約一分鐘後仍無法以肉眼觀察到氣泡半徑的改變

由上面的表格發現，二氧化碳氣泡在極性與非極性的溶液裡都有縮小的現象，而其他氣體則沒有。

八、經過《一》～《八》的實驗，我們猜測 CO_2 是經由泡膜逸散至外界。如果 CO_2 氣體可以經由泡膜逸散至外界，應該也可以經由泡膜進入氣泡內部。為了證實這個猜想，我們將培養皿接上寶特瓶身，在裡面灌入 100% 的 CO_2 並將寶特瓶身罩在肥皂水上，以注射器在肥皂水中通入一般氣體。由一般氣體所形成的氣泡在這樣的環境下明顯的變大了。



八、我們做了一個有趣的實驗：在桌面上打出一個直徑約 3cm 的 CO_2 氣泡，並在旁邊打出一個大小相若的空氣氣泡，使兩個泡泡靠在一起，泡膜互相緊貼。我們發現 CO_2 氣泡仍有縮小的現象，但令人驚喜的是：空氣泡泡明顯的變大了！我們認為這是因為 CO_2 藉由 CO_2 氣泡和空氣氣泡彼此共用的泡膜往空氣氣泡中擴散，然而因為空氣氣泡中所含的 CO_2 濃度比 CO_2 氣泡裡所含的 CO_2 濃度低，所以空氣氣泡中 CO_2 擴散出去的速率較慢，而 CO_2 氣泡藉著彼此共用的泡膜往裡面中補充 CO_2 的速率較快，所以空氣氣泡才明顯的變大。若 CO_2 氣泡迅速縮小的原因是因為 CO_2 溶進泡膜，那在 CO_2 氣泡縮小的同時，空氣氣泡的體積應該不會有明顯的改變，但我們所觀察的結果並非如此。我們認為這個現象完全可以解釋 CO_2 氣泡縮小的原因並不是 CO_2 溶進水裡。

● 第二階段：填充 CO_2 、 C_2H_2 與 N_2O 的氣球與塑膠袋的定性現象觀察

一、我們在兩個大小形狀相同的氣球裡分別灌入 CO_2 和一般空氣，我們盡量將兩個氣球的體積控制為一樣的大小，但因為氣球的大小難以控制，所以我們讓灌入 CO_2 的氣球的體積稍微大一點。過了約二十分鐘後，發現灌入 CO_2 的氣球的體積明顯變得比灌入一般空氣的氣球體積小！

二、在兩個大小形狀相同的氣球裡分別灌入 C_2H_2 、 N_2O 和一般空氣，重複上述實驗步驟，過了約二十分鐘後，發現灌入 C_2H_2 和 N_2O 氣球的體積明顯變得比灌入一般空氣的氣球體積小。



三、我們把密封罐灌滿 CO_2 ，並在密封罐裡放入灌有一般空氣的汽球。過了約半個小時後，可觀察到氣球體積明顯變大（如左圖）；過了約兩個小時後，氣球爆炸了。若將密封罐裡的 CO_2 改成 C_2H_2 ，也有一樣的現象發生。

四、我們在數種不同的塑膠袋中分別灌入 CO_2 和一般空氣，綁緊後再以橡皮筋緊緊綁住塑膠袋。過了一個下午後，發現的灌入 CO_2 的塑膠袋明顯凹陷，而灌入一般空氣的塑膠袋大致維持原狀。

而由塑膠袋凹陷這個現象可以確定綁緊後再以矽利康封住縫隙的塑膠袋是氣密的。因為塑膠袋沒有彈性，若塑膠袋不是氣密，使 CO_2 和空氣可以藉由未密封的縫隙進出兩端，那裝入 CO_2 的塑膠袋應該只會因為重力的關係微微塌陷，而不是被擠扁。我們認為裝入 CO_2 的塑膠袋變扁的原因是因為可以 CO_2 穿透塑膠袋，而一般空氣不行，在 CO_2 跑出塑膠袋的同時，塑膠袋內的壓力變得比外界大氣壓力低，所以就被擠扁了。

五、我們用 C_2H_2 充了一個氣球，放進密封罐裡。等它變小後打開密封罐，拿已點燃的衛生紙靠近罐口，罐口立刻冒出火燄。這證明了 C_2H_2 的確經由氣球膜逸散到外界。

● 第三階段：以定量實驗探討 CO₂ 擴散速率和表面積以及膜兩端 CO₂ 濃度差的關係

一、 以定量實驗探討 CO₂ 擴散速率和表面積的關係。我們認為 CO₂ 擴散速率和表面積應該成正比。

✓ 方法一：

我們找了一個圓錐形的杯子，在底部鑿洞並接上橡皮管，以熱熔膠加以固定，在鋼瓶上接上氣體流量計以控制流量。若在錐形杯子較大那邊的開口封上泡膜，因為表面張力的關係，泡膜會沿著杯壁往較小開口那端滑動。等泡膜滑到杯子底部，將杯子裡所有空氣排出後，再以橡皮管接上氣體鋼瓶，若氣體流量大於由膜擴散出去的速率，那麼泡膜便會向外膨脹；若氣體流量小於由膜擴散出去的速率，則泡膜往內滑動；當泡膜不再改變位置時，由膜擴散出去的速率便等於氣體流量。由氣體流量計讀取氣體流量，並以游標尺量出泡膜停留位置的直徑，就可以算出氣體每秒每單位面積經泡膜擴散出的量。

◇ 優點：(1)實驗裝置較簡便。

(2) 我們所使用的 CO₂ 鋼瓶並不完全是 100% 的 CO₂，而且操作實驗的時候我們沒有可靠的方法來確定氣泡內部是否參雜些許空氣，因此氣泡內部的 CO₂ 濃度低於 100%。因為只有 CO₂ 才能穿越泡膜，若氣泡內部的 CO₂ 濃度不是 100%，那麼在氣泡縮小的同時，氣泡內的一般空氣所佔比例提高，氣泡內外 CO₂ 濃度差變小，氣泡縮小的速率便會減緩。這個實驗裝置因為一直補充 CO₂，泡膜兩端 CO₂ 壓力差大致維持相等，不會隨著時間經過而降低。

◇ 缺點：(1)這個實驗需要精密的氣體流量計，而我們的流量計誤差太大，流量也不穩定，我們無法得到準確的數據。

(2)泡膜在杯子上滑動時會逐漸變薄，容易破裂，不容易觀察及記錄實驗數據。

✓ 方法二：

將鋼瓶接上流量計已控制流量，再將橡皮管接在流量計上，用橡皮管將泡泡打在已護貝的格子紙上，並依每分鐘六十次的頻率按相機快門，紀錄每一秒的泡泡直徑。將相片傳入電腦後，用影像處理軟體量出泡泡直徑。若氣體往外擴散的速率和表面積成正比，則

$$\frac{dR^3}{dt} \propto R^2 \rightarrow R \propto t$$

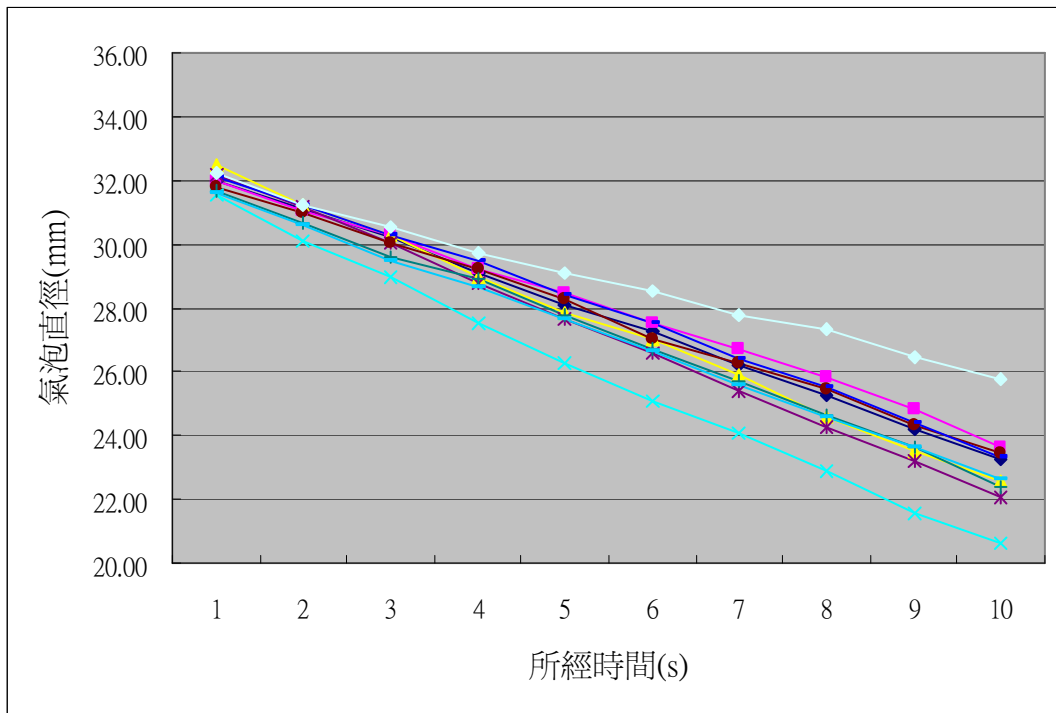
將氣泡直徑對所經過的時間做圖，若近似一條直線，則大概可以確定我們的猜測是正確的。

◇ 優點：不需要精密的流量計就可以完成這個實驗。加上流量計的原因只是為了控制氣體流量，而不是為了讀取數據。

◇ 缺點：(1)氣泡不容易拍清楚，在判讀氣泡大小時容易造成誤差。

(2)我們所使用的 CO₂ 鋼瓶並不完全是 100% 的 CO₂，而且操作實驗的時候我們沒有可靠的方法來確定氣泡內部是否參雜些許空氣，因此氣泡內部的 CO₂ 濃度低於 100%。因為只有 CO₂ 才能穿越泡膜，若氣泡內部的 CO₂ 濃度不是 100%，那麼在氣泡縮小的同時，氣泡內的一般空氣所佔比

例提高，氣泡內外 CO_2 濃度差變小，氣泡縮小的速率便會減緩。而我們在做實驗時都將氣泡內部的 CO_2 濃度當成 100%，所得到的數據與實際情形有所差異。



二、以定量實驗探討 CO_2 擴散速率和膜兩端 CO_2 濃度差的關係。我們猜想 CO_2 擴散速率和膜兩端 CO_2 濃度差應該成正比。

- ✓ 實驗方法：我們在小型透明置物箱側面鑽了三個洞，一個作為不同濃度的 CO_2 氣體入口，一個接上流量計和橡皮管，是吹泡泡的氣體的入口，一個洞黏上橡膠手套，方便將手伸入箱子內操作實驗。在側面黏上已護貝的格子紙，並放入以培養皿裝著的少量肥皂水後，用垃圾袋將箱子開口封住，並擠壓垃圾袋以排出箱子裡的空氣，然後從開口通入不同濃度的 CO_2 ，使垃圾袋鼓脹且箱子裡的氣壓略大於外界氣壓，便可以製造不同 CO_2 分壓的環境。接著再箱子另一端架設相機，經由橡皮管在箱子內的格子紙上打出由 100% CO_2 所形成的氣泡，



並依每分鐘六十次的頻率按相機快門，紀錄每一秒的泡泡直徑。在拍照的時候，必須將吹泡泡的那個流量計關閉，以避免多餘的 CO_2 影響箱子內的 CO_2 濃度。將氣泡

直徑對所經過的時間做出的圖應是一條直線，若「膜兩端 CO_2 分壓越小，則擴散速率越慢」這個猜測是正確的，則外界 CO_2 濃度越高時，所畫出的直線斜率越平緩。

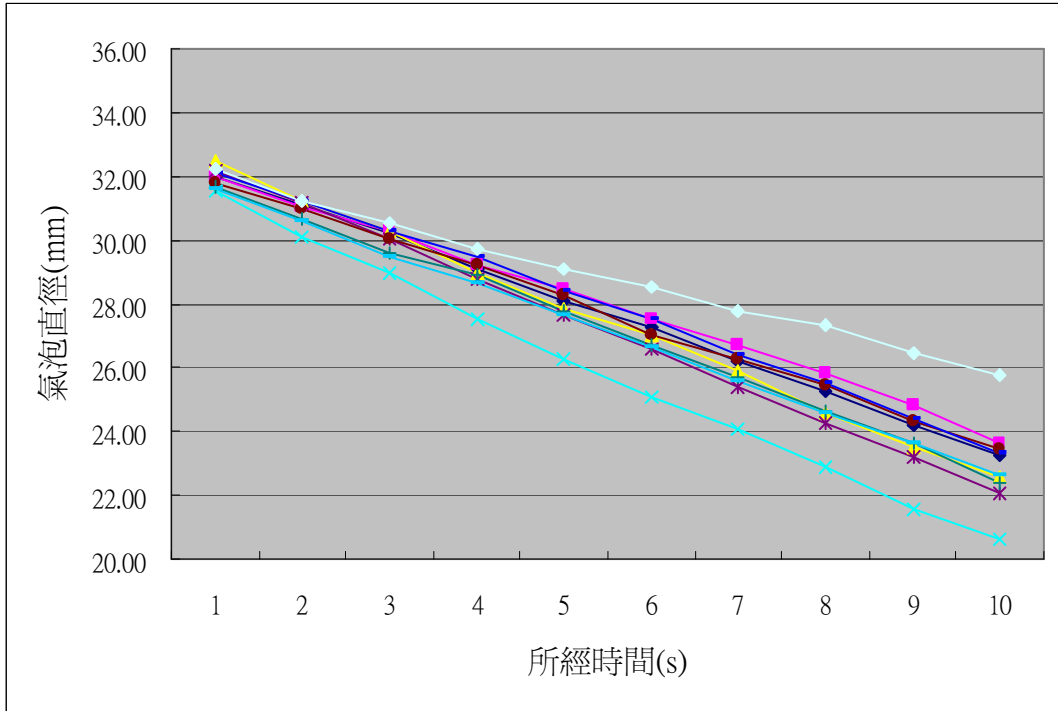
✧ 優點：不需要精密的流量計就可以完成這個實驗。加上流量計的原因只是爲了控制氣體流量，而不是爲了讀取數據。

✧ 缺點：(1)箱子不夠氣密、體積太小，都容易造成實驗誤差。

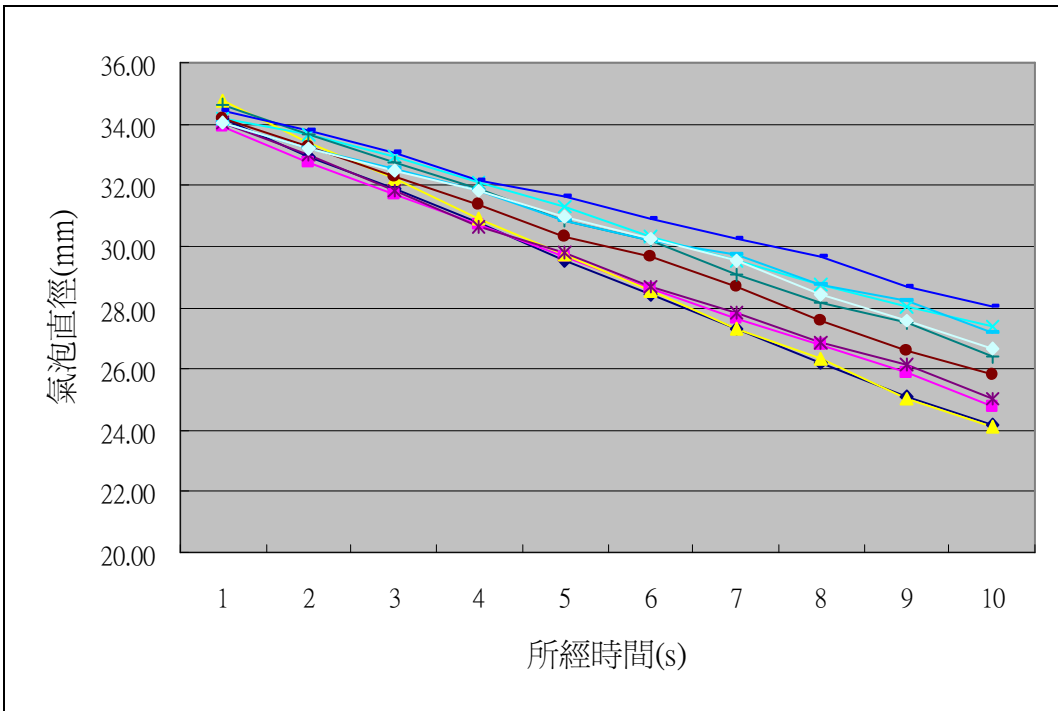
(2)氣泡不容易拍清楚，在判讀氣泡大小時容易造成誤差。

(3)我們所使用的 CO_2 鋼瓶並不完全是 100% 的 CO_2 ，而且操作實驗的時候我們沒有可靠的方法來確定氣泡內部是否參雜些許空氣，因此氣泡內部的 CO_2 濃度低於 100%。因爲只有 CO_2 才能穿越泡膜，若氣泡內部的 CO_2 濃度不是 100%，那麼在氣泡縮小的同時，氣泡內的一般空氣所佔比例提高，氣泡內外 CO_2 濃度差變小，氣泡縮小的速率便會減緩。而我們在做實驗時都將氣泡內部的 CO_2 濃度當成 100%，所得到的數據與實際情形有所差異。

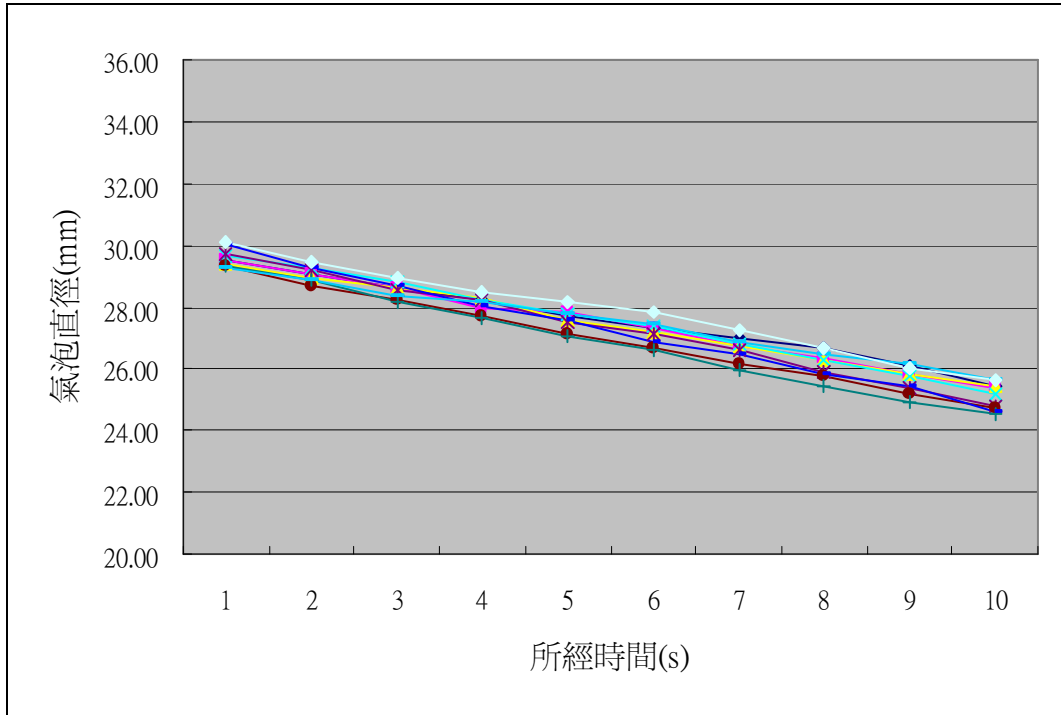
內外壓力差 100%



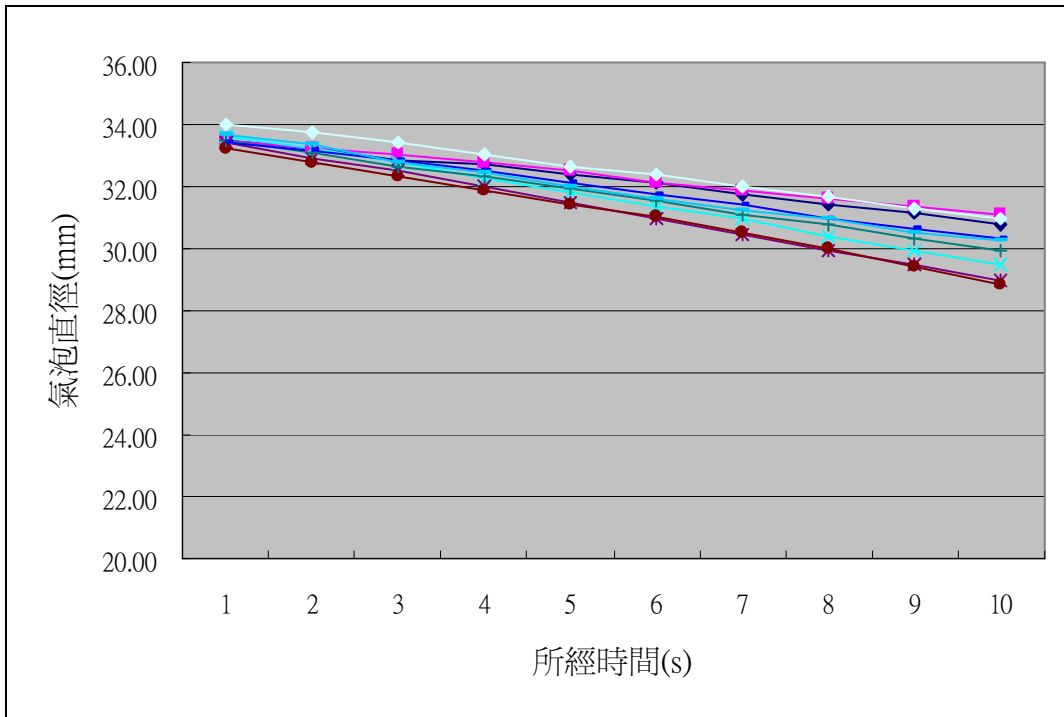
內外壓力差 75%



內外壓力差 50%

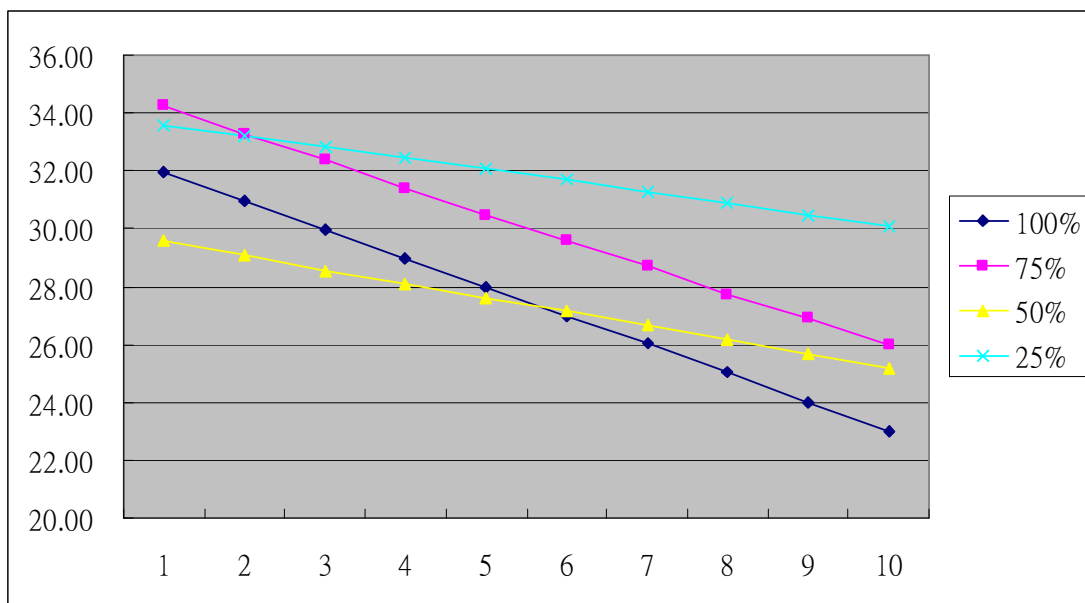


內外壓力差 25%

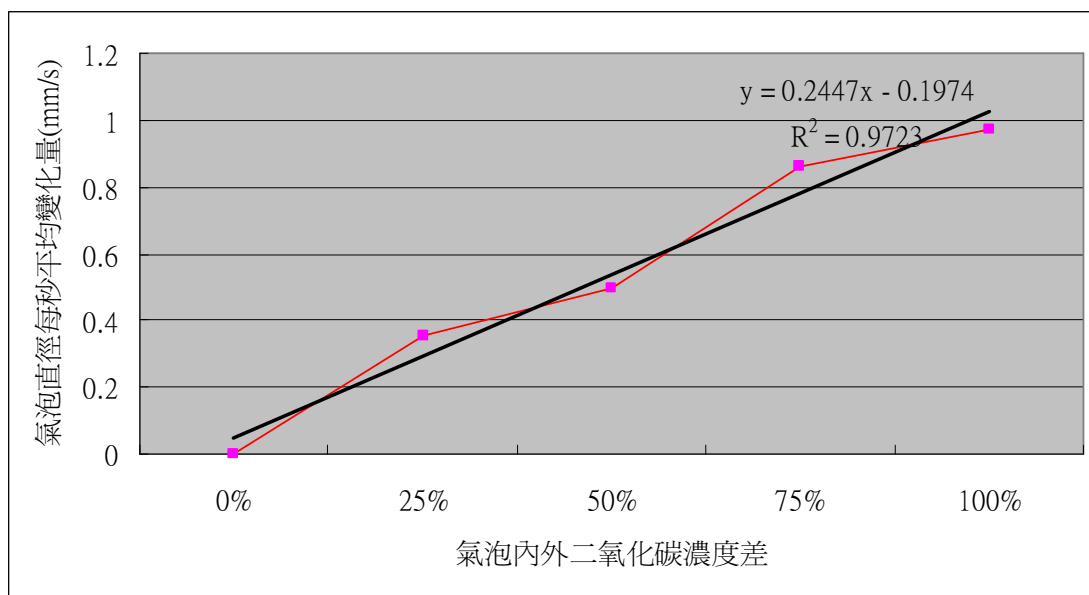


如果我們把每組資料的第一張照片、第二張照片、第三張照片……第十張照片中的泡泡直徑平均，以泡泡平均直徑為縱軸，時間為橫軸做圖，則所描繪的圖會非常接近直線，並且可以明顯看出泡泡內外 CO₂ 濃度差越大，斜率越平緩。由下表可以換算 CO₂ 在不同濃度差時每單位面積每秒的擴散速率：

CO ₂ 濃度差	擴散速率(mL/cm ² · s)
100%	0.097
75%	0.086
50%	0.043
25%	0.017



如果我們以氣泡直徑每秒平均變化量為縱軸，氣泡內外 CO₂ 濃度差為橫軸，以(0,0)為起點，並以一次函數圖形符合我們所紀錄的數據，可得到相當高的相關係數，與我們的猜測相符。



伍、討論

● 定性觀察

- 一、除了 CO_2 、 C_2H_2 和 N_2O 氣泡，其他氣泡並沒有明顯的縮小現象，或許要經過足夠久的時間，才觀察的到。
- 二、一開始我們認為 CO_2 等氣泡縮小的原因是因為 CO_2 等氣體溶進泡膜裡或肥皂水中。如果這個推測正確，二氧化硫氣泡和氨氣氣泡縮小的情況應該更明顯，但我們並未觀察到這個現象，推翻了我們原本的假設。
- 三、由改變裝 CO_2 氣體的廣口瓶所受的壓力的實驗中，我們發現「 CO_2 溶解速率受壓力影響極大」是個錯誤的假設，因此可以確定 CO_2 氣體並不是溶回水裡。
- 四、在半空中打出的 CO_2 氣泡縮小的體積明顯大於泡膜所能溶解 CO_2 的量，這個實驗結果證實了 CO_2 氣體並不是溶進泡膜裡。
- 五、後來我們認為 CO_2 並不是溶進溶液裡，而是經由泡膜逸散至外界，如果穿透泡膜的能力跟氣體分子的大小有關，氮氣氣泡和氫氣氣泡縮小的情況應該更明顯，但我們並未觀察到這個現象。
- 六、我們認為氣體穿透泡膜的能力或許跟溶液的極性有關，於是試了我們所能找到的任何溶液，甚至在蛋白裡打入 CO_2 氣泡、二氧化硫氣泡和一般空氣所組成的氣泡，但仍然只有 CO_2 氣泡有明顯的縮小現象。 CO_2 氣泡在蛋白裡縮小的速率很緩慢，但經過夠長的時間仍觀察的到。
- 七、在改變肥皂水溫度的實驗中，為了方便拍照，我們將肥皂水注入培養皿中，再將 CO_2 通入肥皂水中。但培養皿容量較小，在以溫度為變因的實驗中易造成極大的誤差。下一步我們希望能在恆溫槽中進行這個實驗。
- 八、我們曾試著在乙醚中打入各種氣體，但乙醚揮發的速度太快，氣泡容易破掉，我們無法在短時間內觀察它是否縮小。我們也曾經試著製備氨氣並打入肥皂水中，但發現自己製備的氨氣純度太低，無法作為可靠的實驗樣本。
- 九、在實驗的過程中，我們發現 CO_2 氣泡到最後會縮小至一定的大小，體積就不再改變，而氣泡最後的大小與原本的大小成正相關。我們猜想應該是收集的 CO_2 過程中摻入了一定比例的其他氣體，這些氣體無法穿透泡膜，使得泡泡最後維持在固定的大小。
- 十、我們在氣球裡分別灌入 CO_2 、 C_2H_2 和 N_2O 以及一般空氣，氣球膜是固體，和由液體所形成的泡膜有極大的差異，但我們發現在這樣的情況下， CO_2 、 C_2H_2 和 N_2O 逸散的情況仍比一般空氣明顯許多，大約經過二十分鐘就可以觀察到 CO_2 、 C_2H_2 和 N_2O 氣球體積明顯的差異。這個實驗結果讓我們感到非常非常驚訝！我們做了許多組實驗，都得到相同的結果。但是氣球的品質難以控制，在吹氣球的時候也很難將氣球的體積控制成一樣的大小，這是實驗需要再改進的地方。

● 實驗：

- 一、用相機將泡泡拍得很清楚是一件非常困難的工作，因此藉由照片不容易精準的量出泡泡的直徑，用影像軟體量出泡泡直徑這個步驟便有可能造成誤差。
- 二、我們拍照紀錄泡泡直徑的方式是看著手錶的秒針，秒針每移動一格就按一下快門，這樣的操作方式容易造成誤差。
- 三、我們發現進行「CO₂擴散速率和表面積的關係」這個實驗的時候，隨著實驗時間越長，我們所得到的平均每秒直徑變化率就越小。我們認為這是因為拍照紀錄的時候我們沒有將流量計旋緊，若橡皮管開口又剛好在泡泡附近，就會使泡膜兩端 CO₂ 分壓的壓力差略為下降，於是氣泡縮小的速率變慢。
- 四、進行「CO₂擴散速率和膜兩端 CO₂分壓的壓力差的關係」這個實驗的時候，比較外界 CO₂ 濃度分別為 75%、50%、25% 所得到的數據，發現外界 CO₂ 濃度為 50% 的數據的標準差最小。我們認為造成外界 CO₂ 濃度為 75% 的實驗的誤差的原因，是因為當箱子內 CO₂ 分壓遠高於外界 CO₂ 分壓時，CO₂ 向外擴散速率極快。因為我們做的實驗裝置不夠氣密，使得 CO₂ 不停的向外界擴散而影響實驗結果。我們可以確定這時候 CO₂ 的擴散方式並不是藉由垃圾袋往外擴散，因為 CO₂ 藉由塑膠袋往外擴散需要較長的時間，在我們操作實驗的這段時間內，CO₂ 藉由塑膠袋往外擴散的量幾乎可以忽略不計。
- 五、我們認為造成外界 CO₂ 濃度為 25% 的實驗的誤差的原因，是因為我們不停的在箱子裡打出由 100% CO₂ 所形成的氣泡，而 CO₂ 從氣泡內擴散到箱子內，使箱子內 CO₂ 濃度提高。若一開始箱子內 CO₂ 濃度越低，CO₂ 由氣泡內擴散到箱子內所造成的影響就越明顯。而我們使用的箱子太小，也是箱子內的 CO₂ 濃度較容易受影響的原因。如果箱子夠大，由氣泡內擴散到箱子內的 CO₂ 相較於箱子體積的比例極低，那麼這部份造成的誤差就會小的多。
- 六、我們用的格子紙最小刻度為 1mm，讀取數據的時候應該只能取一位估計數字。但當氣泡內外 CO₂ 壓力差小的時候，氣泡直徑經過一秒的變化可能不到 0.1mm，若數字只取到小數以下第一位，將數據製成圖表時我們無法感受氣泡直徑的變化。我們採取的方式是用影像處理軟體讀取泡泡的直徑，這個時候所得到的數據的單位是像素 (pixel)，再用影像處理軟體量出照片中 1mm 的格子等於幾個像素，便可以將氣泡直徑的單位換算成 mm。
- 七、我們希望能藉由實驗找出 CO₂ 擴散速率和膜兩端 CO₂ 分壓的壓力差的關係，但我們所做的樣本太少（只有外界 CO₂ 濃度分別為 0%、25%、50%、75% 的數據），實驗技術和設備也需要改進，我們才能得到更可信的數據，描繪出準確的圖形。
- 八、我們希望可以找出 CO₂ 擴散速率和環境溫度的關係。因為溫度和氣體的方均根速率的平方成正比，我們猜測 CO₂ 擴散速率應該會和絕對溫度的二分之一一次方成正比。但即使我們有很好的恆溫裝置，可以製造 0°C ~ 100°C 的環境，因為 $\sqrt{\frac{373}{273}} = 1.169$ ，這個數字在我們的誤差範圍內。如果我們無法改善我們的實驗，使誤差範圍小於 17%，那麼以溫度為操控變因的這個實驗所得到的數據就不足以拿來證實我們的推測。
- 九、我們也希望將「籠罩在高濃度 CO₂ 裡，由一般空氣組成的氣泡會變大」這個現象量

化，但在這個現象中，泡泡內的 CO_2 濃度會隨時間經過而增加，膜兩端的 CO_2 濃度差逐漸下降，而不是定值，我們沒有足夠的數學能力來解決這樣的問題。

陸、結論

由我們做的實驗發現，氣泡縮小的情況似乎與氣體在溶液的溶解度無關。由我們所做的實驗可以確定 CO_2 、 C_2H_2 與 N_2O 的確經由泡膜逸散至外界，但不曉得為何 CO_2 、 C_2H_2 與 N_2O 進出泡膜的能力比其他氣體強上許多，甚至在氣球膜兩端也能來去自如！因此我們猜想「啤酒效應」並不是由化學實驗所引起的現象，而是由 CO_2 、 C_2H_2 與 N_2O 特殊的物理性質造成的。這三種氣體的分子形狀都是直線形，因此我們提出「飛刀理論」——直線形分子的質量集中在小小的截面積上，就像一把長長直直的飛刀，可以輕易的射穿泡膜、氣球，甚至塑膠袋。當然要射穿一層物質不是容易的事情，由我們所做的實驗，我們可以算出在溫度為 300K 十，一大氣壓的環境下，每秒每單位面積撞出薄膜的氣體分子個數，大概佔每秒每單位面積撞上薄膜所有氣體分子的 $1/10^6 \sim 1/10^7$ 。

柒、未來展望

關於我們的實驗，還有許多有待改進的地方。如果我們可以訂製 10%、20%、30%……90%各種不同濃度的 CO_2 鋼瓶，如果我們有一間小小的氣密房間可以形成 CO_2 濃度穩定的環境，如果我們有一個符合我們需求的 CO_2 壓力計可以讓我們清楚的知道外界 CO_2 濃度（市面上可以買到的 CO_2 濃度計可以準確到 40ppm，但測量範圍太小；我們所需要的濃度計不需要非常精準，最小刻度大約 1%即可，但測量範圍必須從 0%~100%。目前我們還找不到符合我們需求的 CO_2 濃度計），我們才能得到更可信的數據以證實我們的猜想。

另外， CO_2 與 N_2O 都是極強的溫室氣體，我們希望能藉由 CO_2 與 N_2O 這種特殊的性質，發展出簡單方便的方法以收集和固定 CO_2 與 N_2O 。

捌、參考資料及其他

- 一、維基百科 <http://wikipedia.tw/>
- 二、NIST Chemistry WebBook <http://webbook.nist.gov/chemistry/>
- 四、部編版高中物理課本第二冊第九章一流體力學
- 五、《大氣》，曾國輝編著，建弘出版社。
- 六、H.A. Daynes "Proceeding of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character ,Vol 97 No.685(Jun,1,1920) page.286~307