

中華民國第 56 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 化學科

050207

二氧化碳氣體分子穿透速率變化之研究

學校名稱：國立臺東高級中學

作者： 高二 劉志奇 高二 胡峻浩 高二 胡沐恩	指導老師： 黃嘉慶
---	------------------

關鍵詞：二氧化碳、穿透、保鮮膜

摘要

閱讀文獻後發現，二氧化碳因其直線型分子的物理性質，可以穿透大部分的有機物質。因此我們設計裝置進行長時間的濃度變化檢測，數百次的實驗後發現除了 PVDC 保鮮膜與鋁箔亮面外，其他七種隔離物質均能讓二氧化碳穿透，所有的濃度變化速率都有先上升後下降的現象，達到最大值之前的速率變化可以由二次函數來描述($r=at^2+bt+c$)，且每種隔離物質均有不同的起始速率、最大速率。我們發現每種隔離物質的起始穿透速率越大，則最大速率越大，速率變化量也越大，且達到最大速率的時間越短。而隔離物質厚度越厚，或是表面積越小，則最大速率越小；裝置倒置、保鮮膜上加水或加二氧化碳水溶液也都能影響穿透速率以及達到最大速率的時間。

壹、 研究動機

我們參閱文獻，讀到二氧化碳分子有特殊的分子形狀(直線型)，具能夠穿透所有有機物質的特性(林育惠,2009)，我們對此極感興趣，因為高二化學關於氣體的部分提到格雷姆逸(擴)散定律，穿透速率應該是與分子量及溫度有關，怎會因分子形狀不同而有不同呢？因此我們自行製造一個不受外界空氣流動干擾的裝置，並將裝置分成兩部分，一部分填裝 100%的二氧化碳(A 罐)，另一部分維持一般空氣(B 罐)，中間以隔離物質隔絕，檢測裝空氣端的二氧化碳濃度變化。結果發現二氧化碳穿透隔離物質的速率並不是單純因兩罐的分壓差減小而持續減速穿透，反而起始時是有加速的現象，我們對此感到十分好奇，因此深入研究。

貳、 研究目的

- 一、藉由改變隔離物質材質，觀察長時間的二氧化碳穿透行為是否有普遍性。
- 二、藉由改變數個變因，找出各種變因如何影響二氧化碳穿透行為。
- 三、證實文獻中所提到「二氧化碳能穿透所有有機物質」的論說確實與否。

參、研究設備與器材



圖 1
A 罐+溫度計



圖 2
B 罐



圖 3
二氧化碳鋼瓶



圖 4



圖 5

PASCO CI-6561 CO₂ sensor

一、自行設計之組合裝置(A 罐+B 罐)

(一) A 罐部分(圖 1)：

罐口直徑約 10.70cm。所選梅子罐的罐身非圓柱體，而是罐身直徑>罐口直徑。罐底鑽兩個圓形小洞，分別以熱熔膠黏接一黃色橡皮管和一透明軟管，透明軟管外接一單向閥，接至二氧化碳鋼瓶。在實驗中，先於 A 罐開口處封上保鮮膜，在通入 100%的二氧化碳。

(二) B 罐部分(圖 2)：

罐口直徑 11.60cm 的垂直圓柱體。罐底開一圓洞，接上半截去掉活塞之針筒，以熱熔膠黏接針筒與圓洞，作為實驗中 PASCO CI-6561 CO₂ sensor 擺放的位置。

(三) 結合(圖 13、14)：

被保存醃梅子的罐子所啟發，許多家庭主婦會將一層塑膠袋蓋在罐口，再把罐蓋旋緊，

達到沒有空氣進入罐內的效果，可使梅子不易腐敗，保存更久。我們因此組合兩個罐口直徑差不多的罐子，在罐口較小的 A 罐罐口蓋上保鮮膜，再用較粗、厚的橡皮筋綁住罐口，保鮮膜加上橡皮筋的厚度可補足罐口的直徑差，進而使組合時密合。

二、二氧化碳鋼瓶(圖 3)

氣閥外接以透明軟管接至實驗裝置中 A 罐部分。

三、二氧化碳偵測器(圖 4、圖 5)

The PASCO Model CI-6561 CO₂ sensor 。

500Interface 主機 。

四、隔離物質

(一) PVDC-楓康吳羽保鮮膜

(二) PE-楓康理研保鮮膜

(三) LDPE -楓康 PE 保鮮膜

(四) HDPE-GLAD Press'n Seal

(五) 線性低密度 PE-蔬果保鮮袋(因標榜 2 倍透氣，因此以下簡稱超透氣袋)

(六) PVC-南亞保鮮膜

(七) PMP-妙潔耐高溫保鮮膜

(八) 鋁箔-楓康鋁箔



圖 6 由上至下為隔離材質(一)~(五)



圖 7 由上至下為隔離材質(六)~(八)

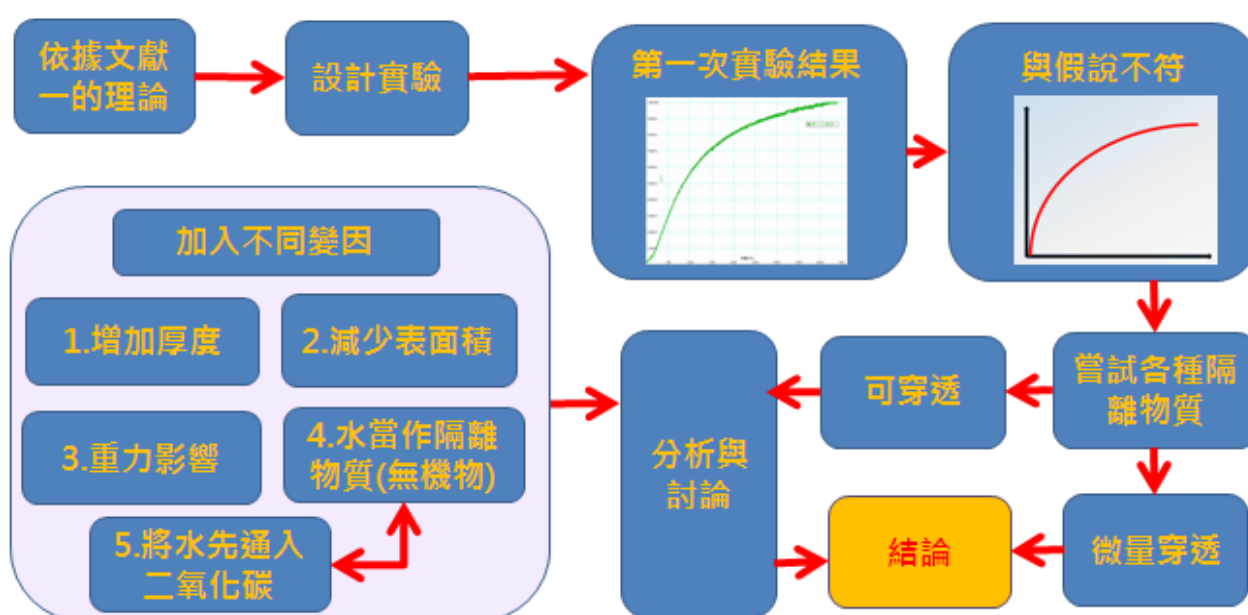
五、針型溫度計

將一磁鐵至於罐外，會吸附住罐內溫度計背後的磁鐵。監控 A、B 罐內的溫度、避免溫

度成為影響實驗結果的變因之一。

肆、研究過程或方法

因二氧化碳為僅有三個原子且分子質量稍大的直線型分子，根據文獻一指出較易穿透保鮮膜，自 A 罐穿透至 B 罐，進而使 B 罐中二氧化碳濃度上升，再用 PASCO CI-6561 CO₂ sensor 接在 B 罐下方，sensor 透過 500Interface 主機連接電腦，在程式中顯示長時間二氧化碳濃度上升的變化。以下是我們實驗結構。



一、基本實驗流程：

- (一) 取 A 罐，在開口處套上用來隔離的隔離物質，使開口圓圈範圍內的薄膜呈現平整狀態，並且以橡皮筋沿著瓶子開口最下面的凹痕綁牢(圖 8)，總共用一條細橡皮筋，以及一條粗橡皮筋。
- (二) 於桌面架起並固定裝置(膠帶台+綑綁之「」子形竹筷)，膠帶台(支撐裝置重量)置於桌緣，並緊壓竹筷，使竹筷部分伸出桌沿(圖 9)，以利連接 PASCO CI-6561 CO₂ sensor (於桌面外的 B 罐騰空之空間)。
- (三) 取欲連接 PASCO CI-6561 CO₂ sensor 的 B 罐(還未連接 sensor)，並從竹筷上方放下，接著將連著塞子的 sensor 自竹筷下方對準瓶子洞口插入固定(圖 10)。



圖 8



圖 9



圖 10



圖 11



圖 12



圖 13



圖 14



圖 15



圖 16



圖 17



圖 18



圖 19

(四) 將 A 罐開口朝下對準桌面放置，並開啟二氧化碳鋼瓶將其灌入，此時二氧化碳逐漸將瓶內空氣排出，我們將點燃的線香置於唯一的橡皮管出口前(圖 11)，測試瓶內是否充滿二氧化碳，待線香完全熄滅兩秒以上即確認完畢(圖 12)，確認完畢後把橡皮管以燕尾夾夾起。

(五) 最後，將 A 罐覆蓋於 B 罐上方，於完全緊密連接後(圖 13、圖 14)，使用 500 Interface 程式開始收集數據。

密合度測試：我們將 A 罐封上保鮮膜後加水，再通入二氧化碳，結合後將其靜置一天。發現保鮮膜明顯往 A 罐內部凹陷(圖 15)，直到將 A 罐黃色橡皮管打開連通空氣後才恢復鬆軟並有些皺紋的狀態並使保鮮膜碰觸塑膠棒。這是由於二氧化碳略溶於水。因此過夜後有少許已溶解於水中，使壓力下降小於大氣壓力，因此保鮮膜明顯往 A 罐部分凹陷，由此可知我們的裝置密合度十分良好。

二、改變不同的隔離物質：

在基本實驗流程中步驟(一)處，陸續更換九種不同的隔離物質，並進行基本實驗流程接下來的步驟。

三、改變厚度(層數)之實驗流程(圖 16)：

在基本實驗流程中步驟(一)處，將薄膜更換成 PMP 保鮮膜兩層、PMP 保鮮膜三層，重疊在 A 罐口處，並進行基本實驗流程接下來的步驟。

四、將裝置上下顛倒之實驗流程(圖 17)：

實驗步驟同基本實驗步驟的所有流程，但把 A 罐和 B 罐位置上下互換，使用 500 Interface 程式開始收集數據。

五、將 PMP 保鮮膜表面積減少之實驗流程(圖 18)：

在基本實驗流程步驟(一)處，將欲實驗的表面積(二分之一、四分之一)保留，剩餘部分用實驗結果中不可穿透二氧化碳的保鮮膜(PVDC)覆蓋壓密，並進行基本實驗流程接下來的步驟。

六、將 PMP 保鮮膜上層(A 罐)加水之實驗流程(圖 19)：

基本實驗流程步驟(一)處，PMP 保鮮膜上方添加不同高度的水，先測量出 A 罐的直徑為 10.7cm，計算出罐口圓面積，乘上所需高度得出需添加水的體積，使用吸量管將水從橡皮管緩緩滴入，完成後繼續進行基本實驗流程接下來的步驟。

七、將 PMP 保鮮膜上層(A 罐)加 CO₂ 水溶液之實驗流程：

基本實驗流程步驟(一)處，使用吸量管自含 CO₂ 水溶液的錐形瓶中取出實驗所需的水量，其餘步驟同加水實驗。

伍、 研究結果

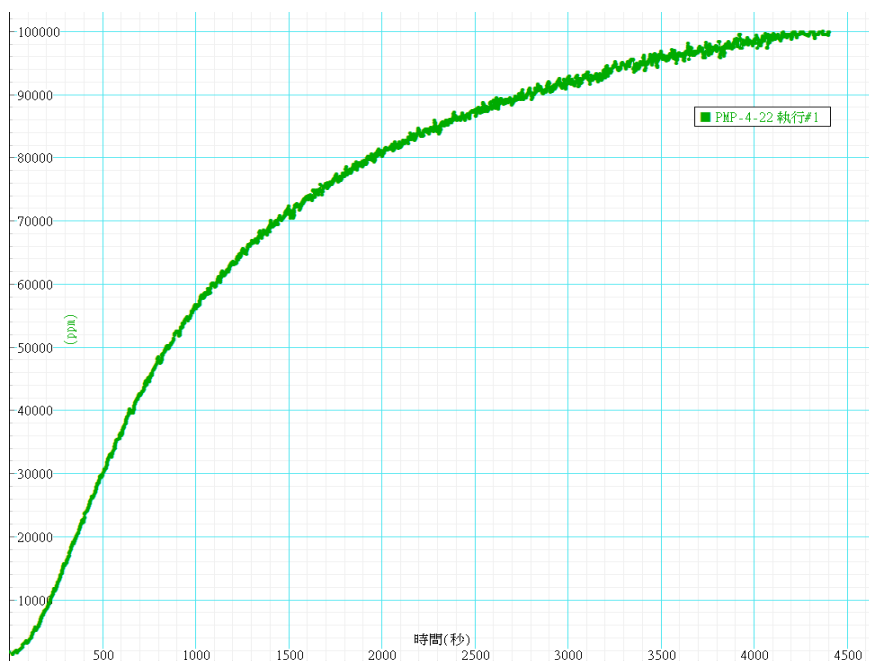


圖 20

PMP 濃度變化實驗結果(ppm)

基本實驗：

我們從第一次的實驗中，發現二氧化碳濃度上升的曲線都呈現先加速後減速的趨勢。圖 20 為以 PMP 保鮮膜作為隔離物質，持續偵測約 4400 秒，得到之二氧化碳在 B 罐中的濃度變化。

我們可以看出：

- (一) 二氧化碳濃度變化在時間約 500 秒以前，有加速度上升的現象。我們將之局部放大如下圖 21。

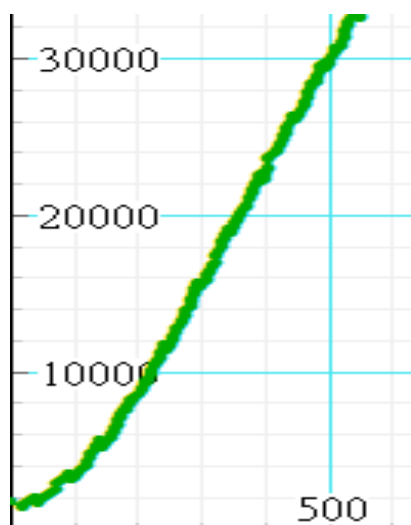


圖 21

PMP 濃度變化實驗結果-切線斜率增加部分(ppm)

- (二) 二氧化碳濃度變化在時間 500 秒後，到濃度達到 100000ppm 以前，都維持減速度上升的現象。
- (三) 二氧化碳濃度變化在時間 4000 秒以後，因機器能測之數值已達上限 100000ppm，因此無法測得 100000ppm 後的濃度變化，但可看出達至上限前斜率不為零，表示 CO₂ 仍繼續穿透保鮮膜。
- (四) 雖然機器有規律震盪，經縮小後看不太出來，但仍可明顯看出：實驗初期，濃度變化趨近一平滑曲線，但到了實驗後期卻出現震盪變大的現象。

這些情形與我們想像先快後慢的穿透速率不符。為了證明此現象之普遍性我們跟更換不同隔離物質，並將所有在 500 Interface 中的測得的數據匯入 excel 表格中製圖。我們實驗了以下九種不同材質的隔離物質，每種實驗至少 5 次，去除誤差值，我們得出 9 個結果：

一、更換隔離物質：

(一) PE-楓康理研保鮮膜

(二) LDPE -楓康 PE 保鮮膜

(三) HDPE-GLAD Press'n Seal

(四) 線性低密度 PE-蔬果保鮮袋(因標榜透氣，以下簡稱「超透氣袋」)

(五) PVC-南亞保鮮膜

(六) PMP-妙潔耐高溫保鮮膜

(七) 鋁箔-楓康鋁箔

1. 鋁箔霧面朝 A 罐口進行實驗(以下簡稱「鋁箔霧面」)

2. 鋁箔亮面朝 A 罐口進行實驗(以下簡稱「鋁箔亮面」)

(八) PVDC-楓康吳羽保鮮膜

綜合的九種不同隔離材質的結果如圖 22：

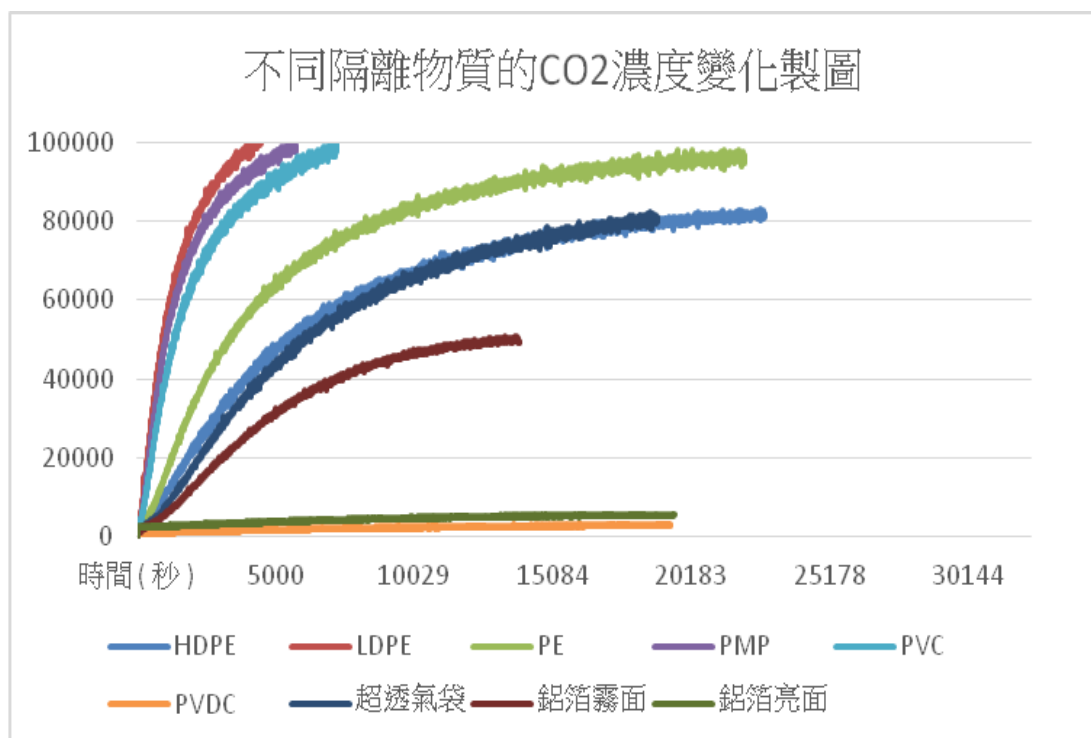


圖 22

不同隔離材質 CO₂ 濃度變化比較圖

二、改變 PMP 保鮮膜層數

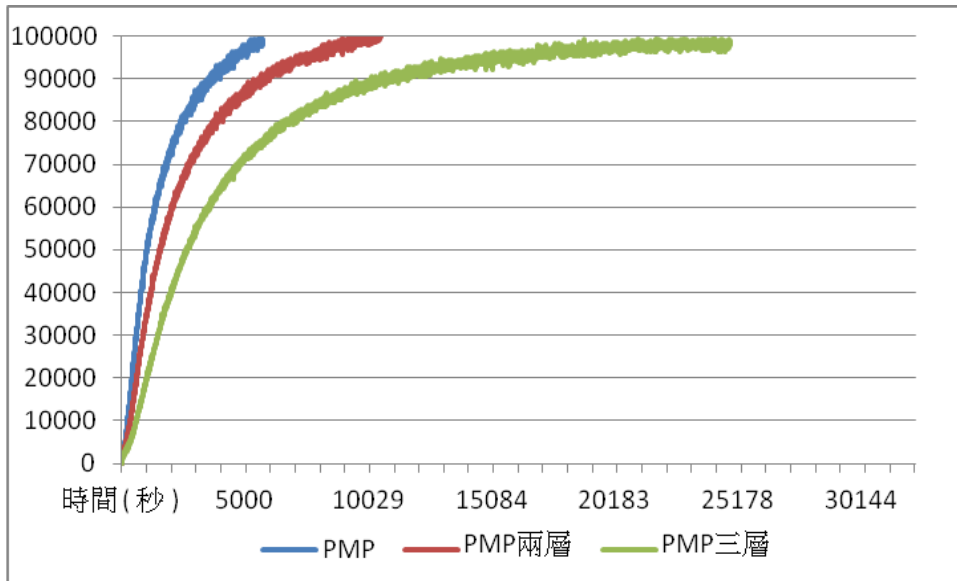


圖 23

PMP 層數不同的濃度變化比較圖

三、改變表面積(可穿透的 PMP 材質分別佔 1、1/2、1/4 面積)

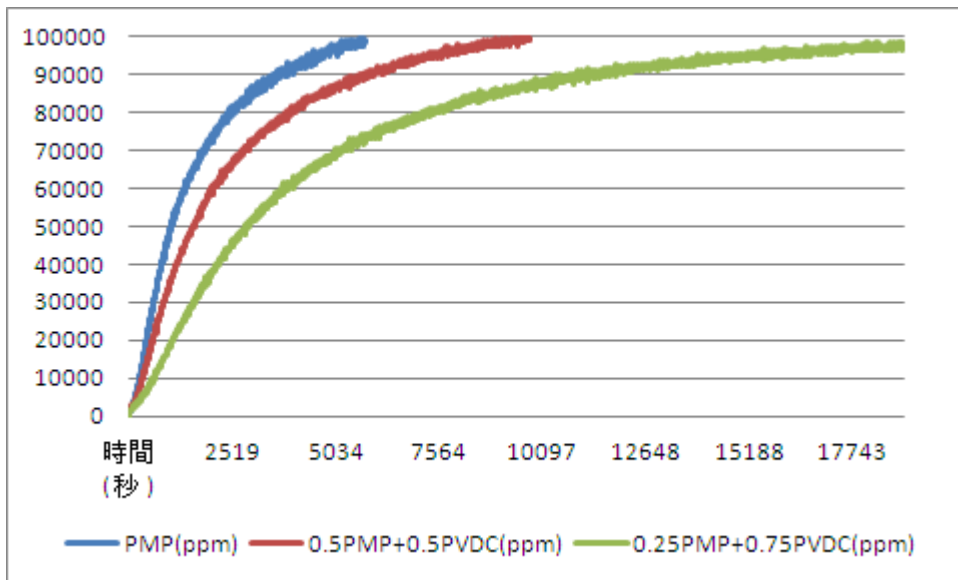


圖 24

PMP 表面積不同的濃度變化比較圖

四、改變裝置正反倒立

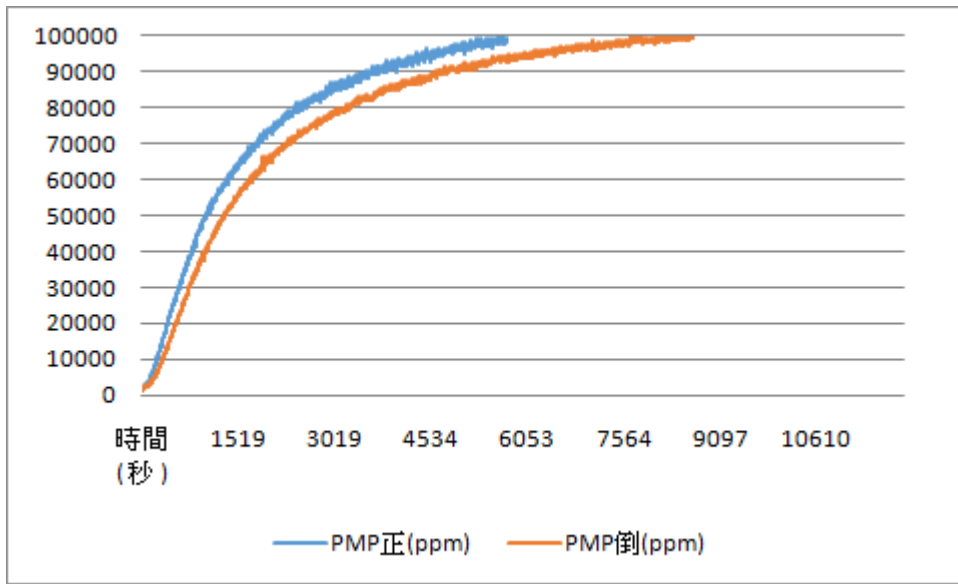


圖 25

使用 PMP 並使裝置正反立之濃度變化比較圖

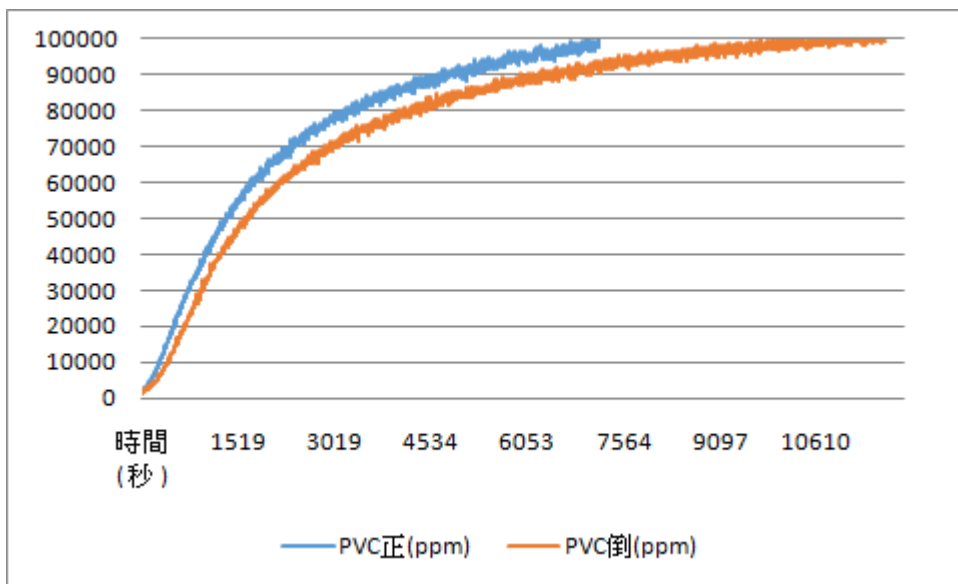


圖 26

使用 PVC 並使裝置正反立之濃度變化比較圖

五、在 PMP 保鮮膜上加水(A 罐)

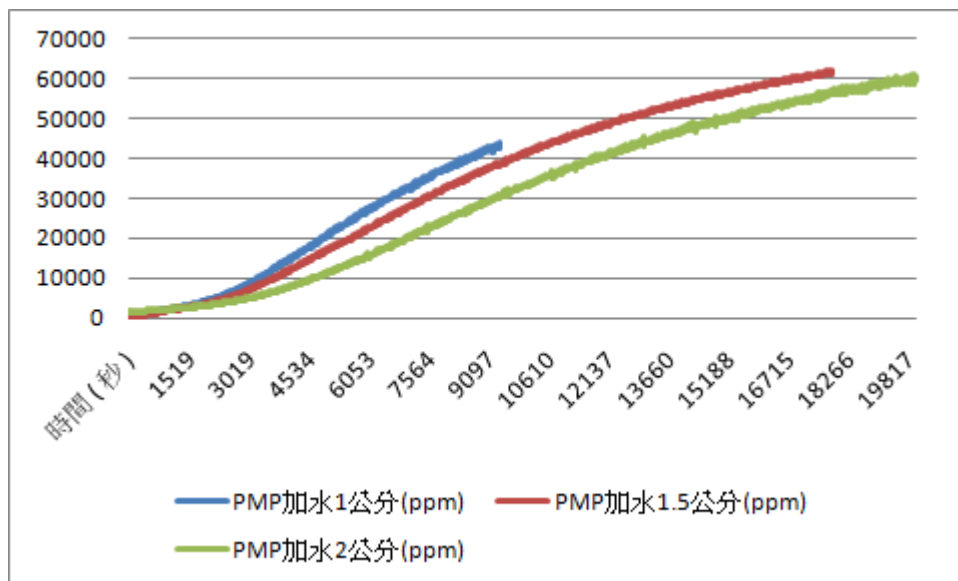


圖 27

PMP 加水 1、1.5、2 公分濃度變化比較圖

六、在 PMP 保鮮膜上加 CO₂ 水溶液(A 罐)

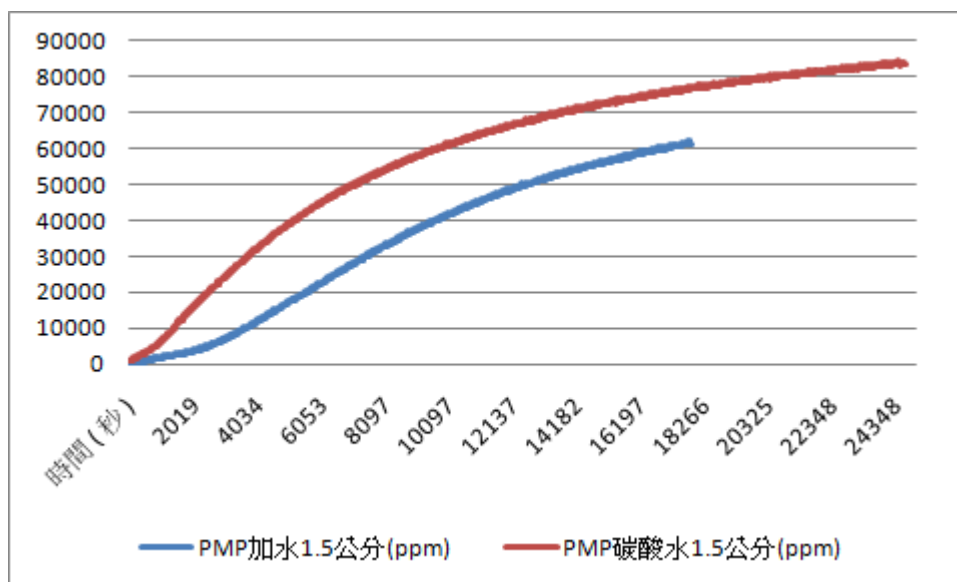


圖 28

PMP 上加 1.5 公分水與碳酸水之 CO₂ 濃度變化比較圖

陸、討論

一、不同材質

我們認為 0~500 秒左右的二氧化碳濃度變化會先加速上升是個很有趣的現象，因此我們更換不同材質的保鮮膜，做了近 50 次的實驗，得到圖 22 的結果。

我們可以發現九條線中有七種隔離物質都能讓 CO₂ 穿透，而且速率都有先加速再減速的現象，而且濃度上限各有不同，另外兩種隔離物質的穿透現象與其他種不同，分別是 PVDC-楓康吳羽保鮮膜與鋁箔亮面朝 A 罐口的實驗數據，即使經過 20000 秒以上，CO₂ 濃度仍然沒有明顯的上升，大約均只增加 2000ppm。因此我們將這兩種材質稱為微量穿透或不穿透，其他七種材質稱為可穿透。而此七種材質中，僅有 LDPE、PMP 與 PVC 材質的保鮮膜比較能使 CO₂ 快速穿透並且在 6000 秒內達到最大濃度 100000ppm，其餘四種材質不但穿透較緩慢經過長時間也無法使 CO₂ 濃度達到上限，其上升曲線便已接近平緩了。

因每秒鐘的濃度數據量實在過於龐大，且我們的 PASCO CO₂ sensor 會有規律上下跳動的數據，因此我們決定將原始數據濃縮 300 倍，如下圖 29，以每 5 分鐘計算此四種材質的平均穿透速率，並繪製成折線圖。

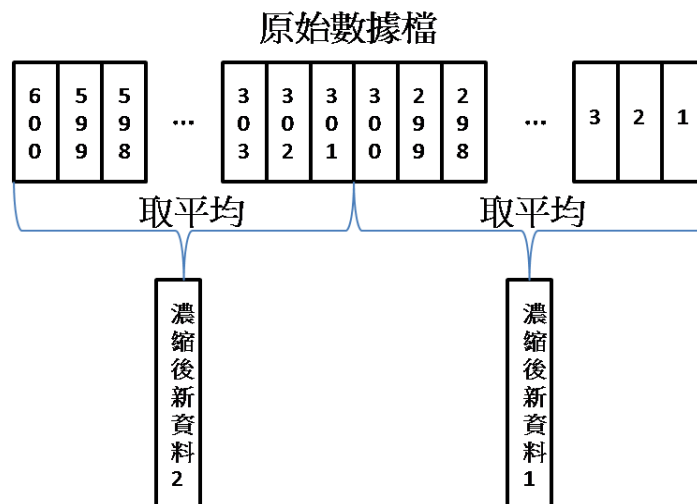


圖 29

每 300 秒平均濃度變化計算過程

首先，我們將濃度變化量除以時間間隔，得出不同隔離物質的速率變化。其中可得出以下九種速率變化圖(圖 30~38)，大致可以分為兩大類：可穿透與微量穿透；而可穿透又可分為兩小類：先上升後下降與持續下降。

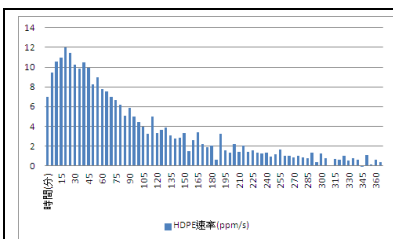


圖 30
HDPE 速率變化圖

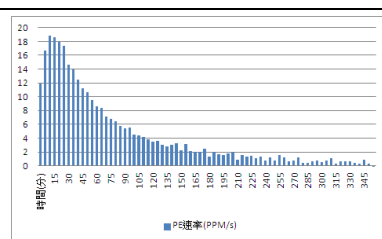


圖 31
PE 速率變化圖

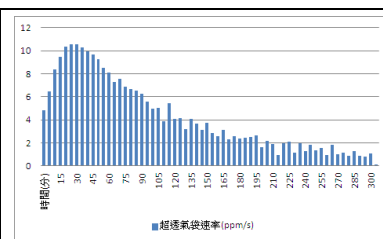


圖 32
超透氣袋速率變化圖

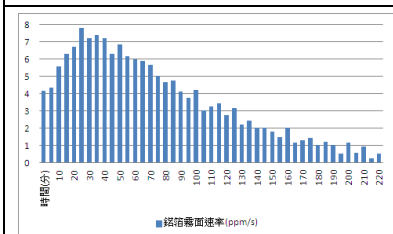


圖 33
鋁箔霧面速率變化圖

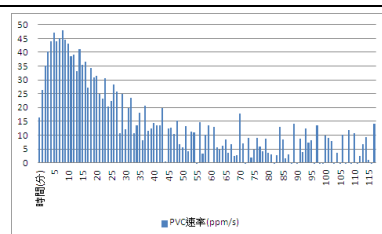


圖 34
PVC 速率變化圖

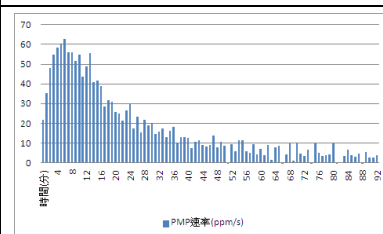


圖 35
PMP 速率變化圖

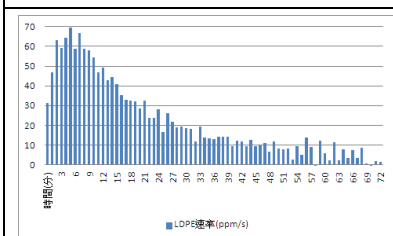


圖 36
LDPE 速率變化圖

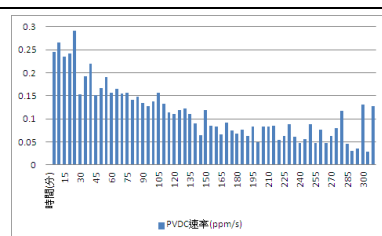


圖 37
PVDC 速率變化圖

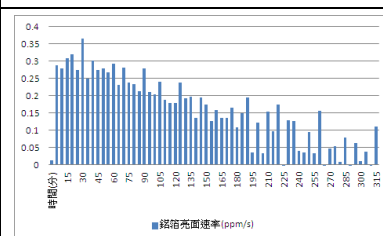


圖 38
鋁箔亮面速率變化圖

(一) 可穿透

1. 速率明顯先上升後下降：分別是(1)HDPE (2)PE (3)超透氣袋 (4)鋁箔霧面朝 A 罐

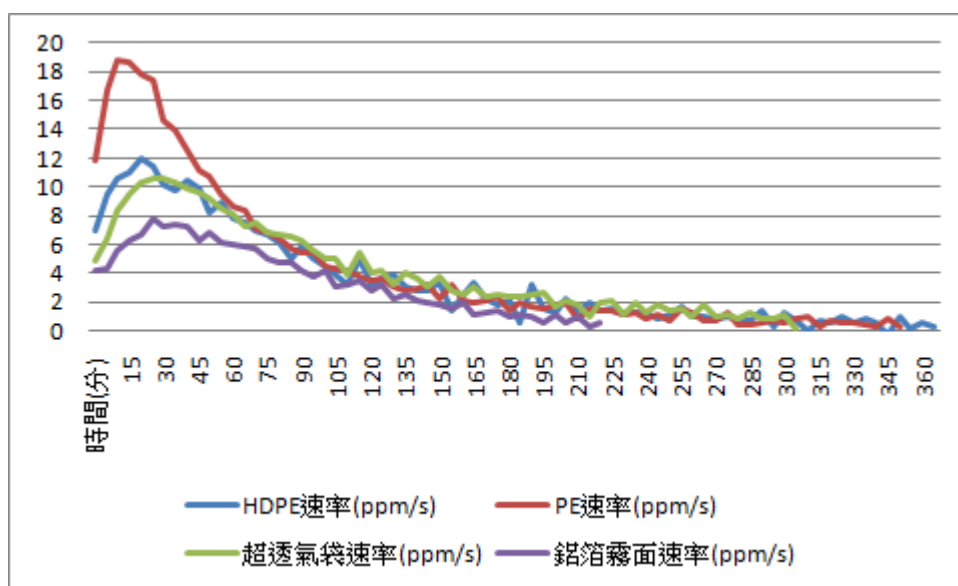


圖 39 HDPE、PE、超透氣袋、鋁箔霧面速率比較圖

上圖 39 明顯看出各曲線之速率皆有先經短時間上升，大約 15~30 分鐘到達最大速率後，再逐漸下降，直至趨近於零。我們認為速率逐漸減緩是因為 B 罐中濃度提升，A 罐中濃度下降，使得 CO₂ 的穿透逐漸達成平衡所導致。但前期速率會加速上升，實在是頗奇特的現象，原本考量 CO₂ 穿透保鮮膜後需經一段時間才能到達 CO₂ sensor，但我們計算 CO₂ 在室溫中的均方根速率 $v = (3RT/M)^{1/2} = (3 \times 8.314 \times 298.15 / 0.044)^{1/2} = 411.11 \text{ m/s}$ ，就算考量下層 B 罐中也裝滿空氣分子使得擴散速率不像分子運動速率這麼迅速，但保鮮膜距離 sensor 不過數公分，實在不太可能需要 15~30 分鐘才能大量擴散到 sensor 位置。

另外我們發現自開始穿透至速率加速到最大值所需的時間，似乎與速率最大值有關係。因此我們只取前 36 分鐘，每 3 分鐘計算其平均速率，做成圖 40 做比對：

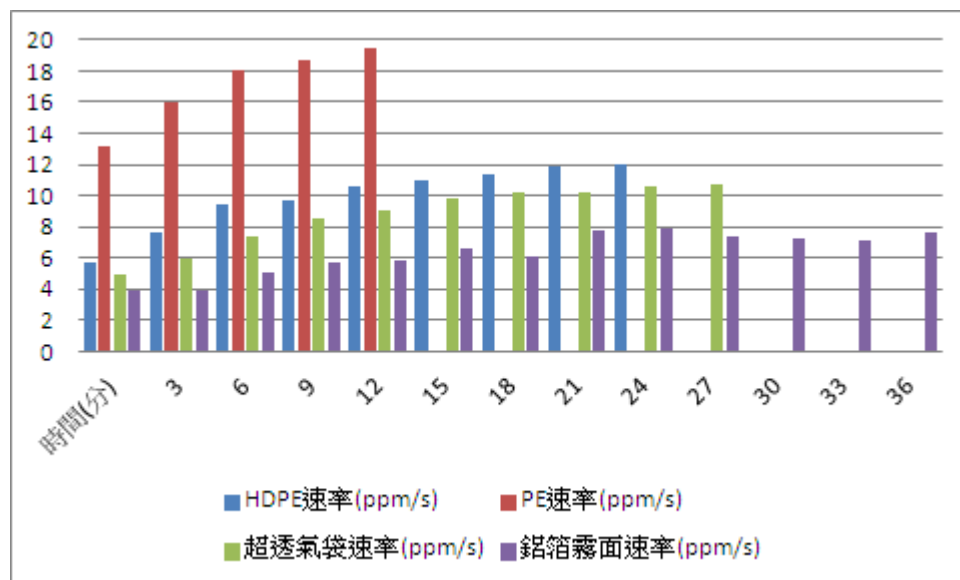


圖 40
HDPE、PE、超透氣袋、鋁箔霧面速率上升部分比較圖

我們由上圖發現起始速率 PE > HDPE > 超透氣袋 > 鋁箔霧面，最大速率也是 PE > HDPE > 超透氣袋 > 鋁箔霧面，恰好達到最高速率所需的時間，則是相反，亦即 PE < HDPE < 超透氣袋 < 鋁箔霧面，而且四者即使都是速率越來越快，也非等加速率上升，越接近最大數值，速率變化越小。

2. 穿透速率看起來持續下降，其實只是因為速率太快：(1)PVC (2)LDPE (3)PMP

以上三種材質穿透速率甚高，速率上升的時間很短，因此在觀察平均 5 分鐘的穿透速率

實無法明顯看出速率上升的部分，因此我們改以每 60 秒計算平均速率，得到折線圖如下：

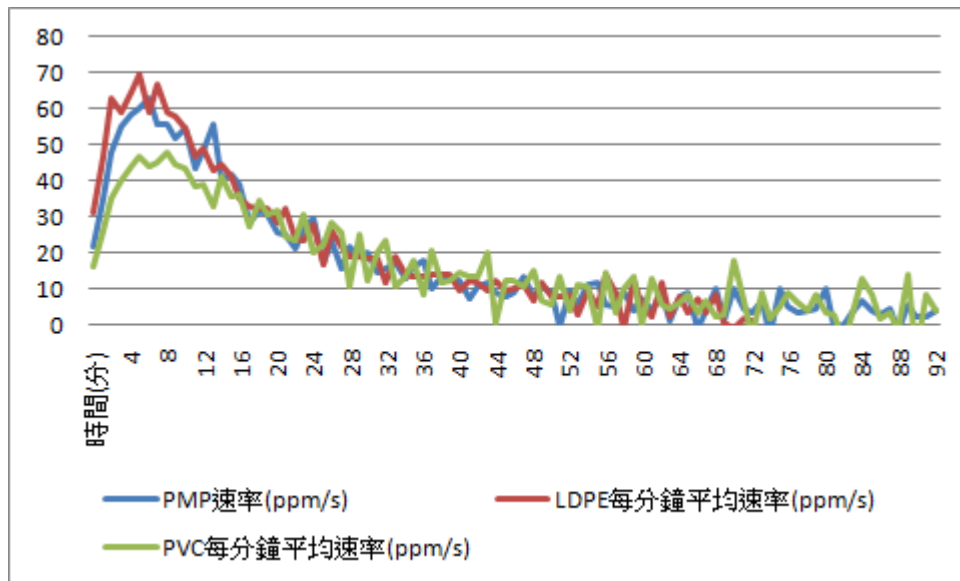


圖 41
PVC、PMP、LDPE 速率比較圖

我們發現改以每分鐘速率分析以上三種材質，便可明顯看出仍然有先加速再減速的現象，只是穿透速率太快使得原本的每 5 分鐘分析圖無法看出，為了比較以上三者的穿透速率變化，我們僅取其前 8 分鐘速率加速上升的部分製圖比較：

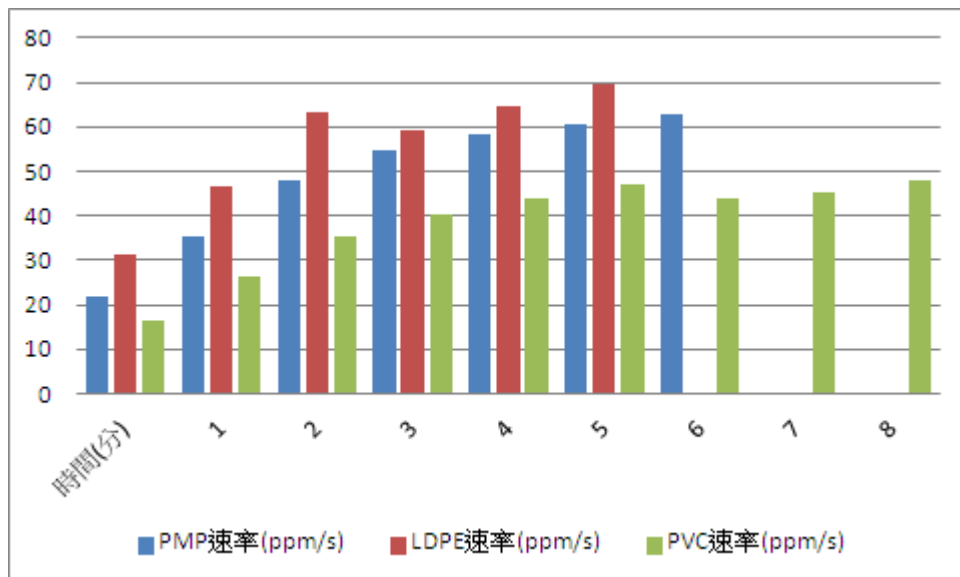


圖 42
PVC、PMP、LDPE 速率上升部分比較圖

由上圖發現穿透速率很快的三種材質其實與前面「先上升後下降」的圖表有相同的速率變化

現象，亦可看出最快穿透速率 $LDPE > PMP > PVC$ ，但達到最快速率的時間則是 $LDPE < PMP < PVC$ ，此現象與圖 40 一致，我們進一步將七種材質(LDPE、PMP、PVC、PE、HDPE、超透氣袋、鋁箔霧面)之起始速率(r_0)、速率最大值(R)、速率變化量 ($\Delta r=R-r_0$)、起始至達到速率最大值所需時間(T)等四個項目加以探討，列出了如下的表 1：

隔離物質	r_0 (ppm/s)	R(ppm/s)	Δr (ppm/s)	T (分鐘)
鋁箔霧面	4.17	7.42	3.25	35
超透氣袋	4.84	10.53	5.69	30
HDPE	7.00	12.02	5.02	20
PE	11.90	18.85	6.95	10
PVC	16.48	47.04	30.56	8
PMP	21.85	62.93	41.08	6
LDPE	31.17	69.58	38.41	5

表 1
七種可穿透隔離物質的 r_0 、R、 Δr 、T 值整理

表 1 由上而下可看出， r_0 越大，R 就越大， Δr 也會越大，而 T 就會越短；反之， r_0 越小，R 就越小， Δr 也越小，T 則越長，呈現相當規律的關係，且我們發現其前期速率上升的部分類似二次函數曲線，因此假設二次函數 $f(x)=Ax^2+Bx+C$ ，頂點為速率達到最大值的點座標 $V(T,R)$ ，並定義起點座標 $S(0, r_0)$ 。接著計算 A、B、C 如下：

$$1. \text{令 } y=A(x-T)^2+R$$

$$S \text{ 點代入} \rightarrow r_0=AT^2+R$$

$$\rightarrow A=(r_0-R)/T^2=-\Delta r/T^2$$

$$y=(-\Delta r/T^2)(x-T)^2+R$$

2. 將 $y=A(x-T)^2+R$ 展開換成 Ax^2+Bx+C 的形式

$$f(x)=(-\Delta r/T^2)x^2+(-2AT)x+AT^2+R$$

$$=(-\Delta r/T^2)x^2-2(-\Delta r/T)x+(-\Delta r+R)$$

$$=(-\Delta r/T^2)x^2-2(-\Delta r/T)x+[-(R-r_0)+R]$$

$$=(-\Delta r/T^2)x^2+2(\Delta r/T)x+r_0$$

計算後可得出各個隔離物質的 A、B、C 值，再代入方程式與圖形對照。

隔離物質	A	B	C
鋁箔霧面	-0.00265	0.185714	4.17
超透氣袋	-0.00632	0.379333	4.84
HDPE	-0.01255	0.502	7
PE	-0.0695	1.39	11.9
PVC	-0.4775	7.64	16.48
PMP	-1.14111	13.69333	21.85
LDPE	-1.5364	15.364	31.17

表 2

七種可穿透隔離物質的 A、B、C 係數值整理

以下將 PMP 速率變化圖與依上述 PMP 的函數係數代入的方程式，HDPE 速率變化圖與依上述 HDPE 的函數係數代入的方程式，在 Logger Pro 程式上做分析、對照。

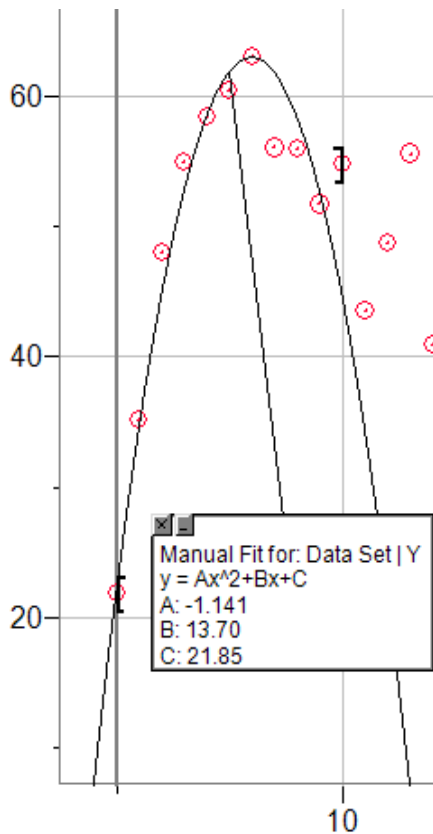


圖 43

PMP 速率變化與繪出方程式的趨勢線

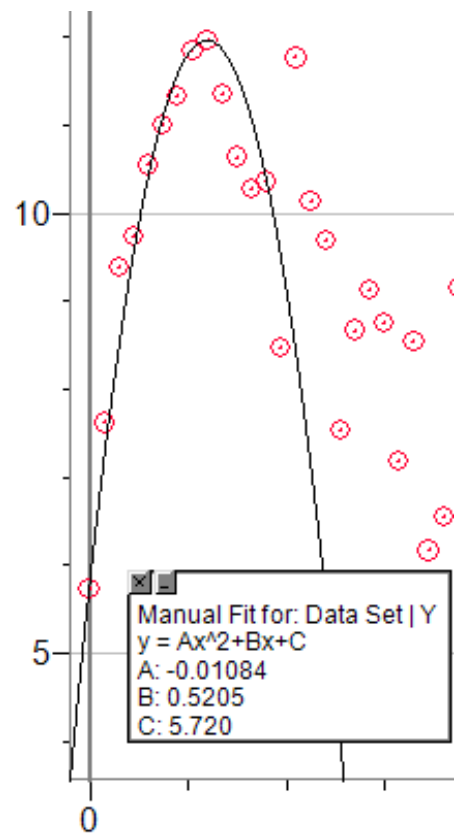


圖 44

HDPE 速率變化與繪出方程式的趨勢線

由圖 43、圖 44 我們觀察出速率在達到最大值之前，相當符合我們計算出的二次函數曲線(穿透速率為 Y 軸，時間為 X 軸)，由此可知在擴散的初期雖然速率持續上升，但是仍受某項因素的影響，使速率上升有規律性的減緩，直至最高點之後即開始下降。因此我們將每一種材質的行為帶入二次函數並計算其係數 A、B、C 列於上表 2 中，可以發現就如表 1 一樣，這些係數在表 2 中，由上而下有漸增或漸減的規律性關係。以二次函數來描述 CO₂ 在不同材

質中穿透速率的變化情形，可以幫助我們建造資料庫，只要將函數做簡單計算，即可算出各材質之初始速率(r_0)、最大速率(R)、最大速率變化量(Δr)以及達到最大速率的時間(T)，並可以做為未來研究氣體擴散行為的參考。

(二) CO₂ 不穿透(或稱微量穿透)的材質：包括 1. PVDC 2. 鋁箔亮面朝 A 罐

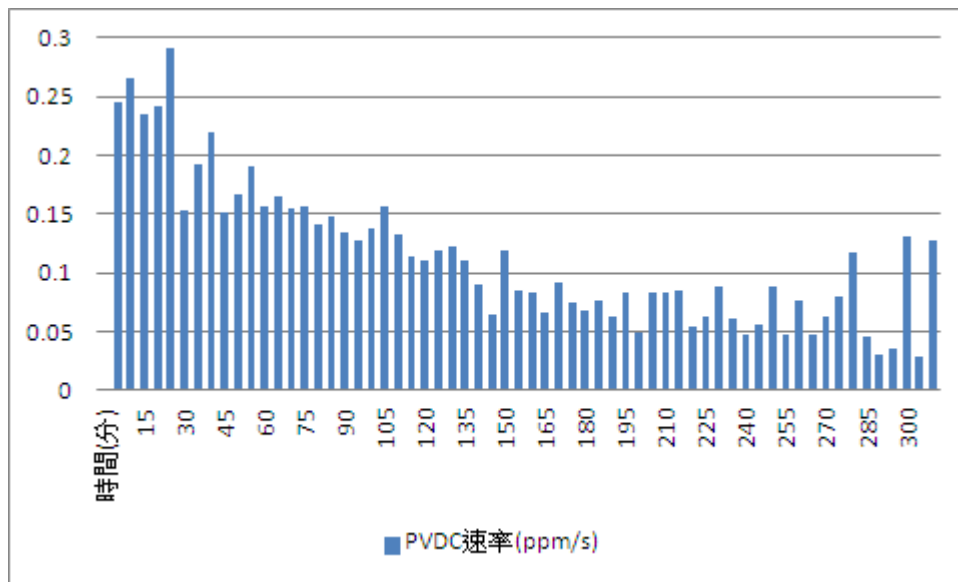


圖 45
PVDC 速率變化圖

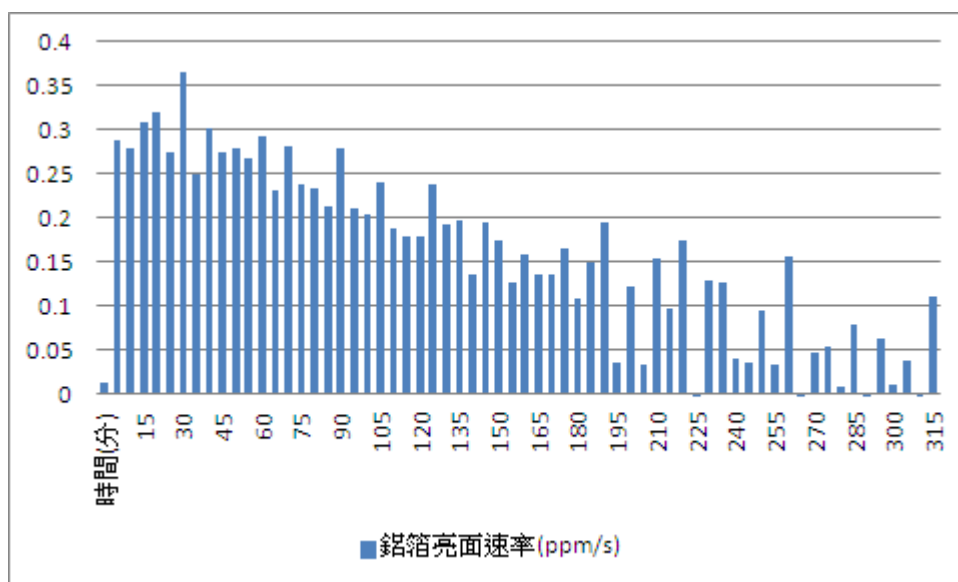


圖 46
鋁箔亮面速率變化圖

由上圖 45、46 可以發現此二種材質的最大速率均小於 0.4ppm/s，與其他可穿透的七種材質相比(最大速率從 7.42 到 69.58 不等)可謂極慢，且有多個不時突出或凹陷的速率數值，雖然仍可從中觀察出速率逐漸下降的趨勢。但我們認為突出或凹陷的數值變化是因機器本身誤差，由於縱座標軸單位的放大，才凸顯出誤差的數值。這兩個材質的表現，也證實二氧化碳分子並非可穿透所有有機薄膜物質，甚至同一鋁箔材質，其亮面與霧面對於二氧化碳分子的穿透也有甚大的影響，我們把鋁箔兩面的每 5 分鐘的平均穿透速率做成比較圖如下，可看出巨大的差異：

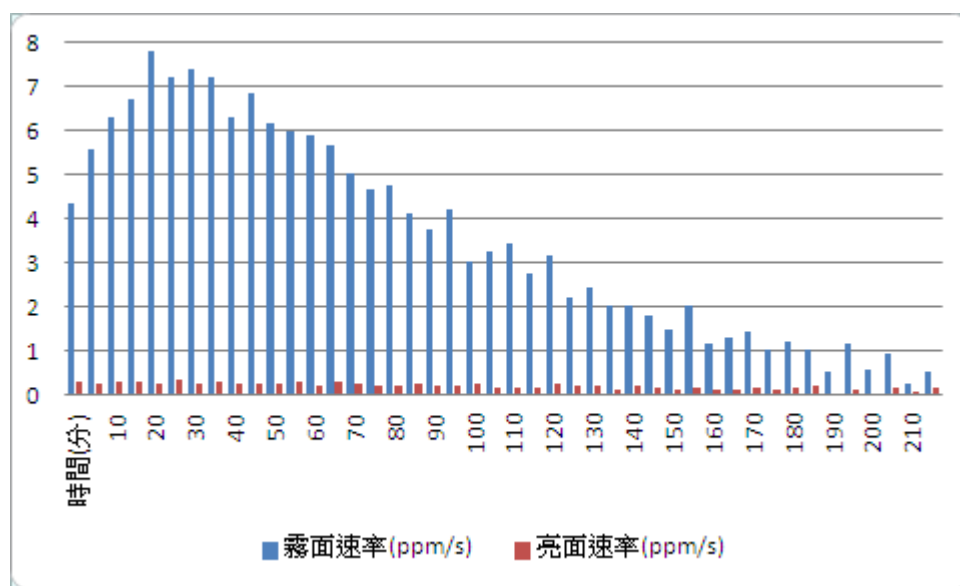


圖 47

鋁箔亮霧面速率變化比較圖

起初我們感到納悶，為何同一張鋁箔在數次實驗過程中會有兩種極端的數據，經過數十次實驗，我們終於發現在包覆隔離物質時，鋁箔亮面朝 A 罐與霧面朝 A 罐會分別出現微量穿透及可穿透的實驗數據。我們認為造成此差異的原因，在於鋁原子的排列密度。鋁箔亮面部分的鋁原子排列緊密，若二氧化碳分子撞擊緊密佈滿鋁原子的表面，二氧化碳分子很難找到空隙穿透至鋁原子分布較稀疏的表面，如圖 48。

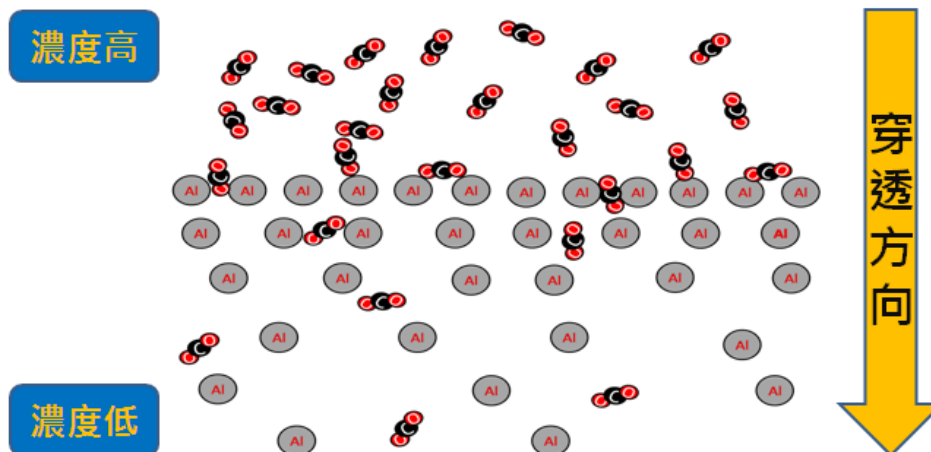


圖 48

相反的，若二氧化碳分子撞擊鋁分子較稀疏的霧面，二氧化碳分子會較易層層穿透至鋁原子較密集的鋁箔亮面，在加上 A 罐中大量的二氧化碳分子擠壓，使已穿透至鋁箔中央的二氧化碳分子更能夠穿透鋁箔亮面，如圖 49。

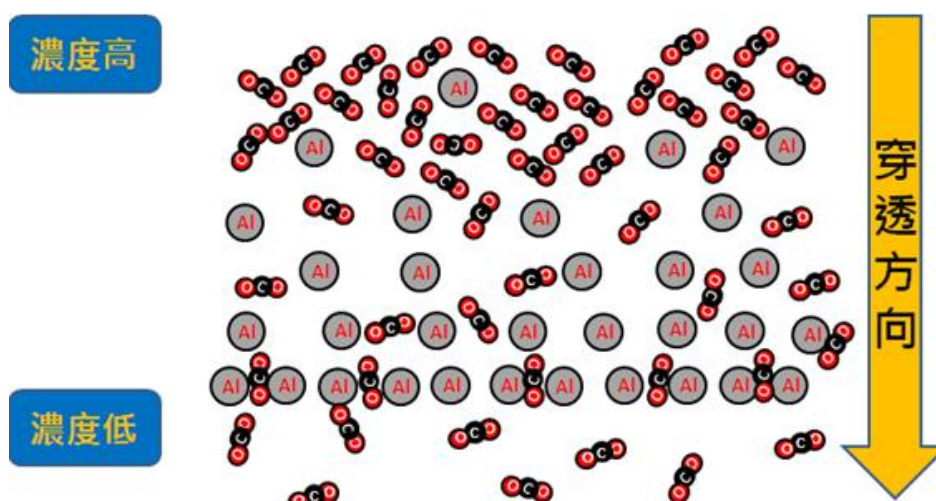


圖 49

此一有趣的現象使我們發現另類的單向膜，若我們想阻絕二氧化碳分子的穿透，則將鋁箔亮面面對二氧化碳濃度較高的一端。若我們想使二氧化碳分子的穿透，則將鋁箔霧面面對二氧化碳濃度較高的一端，未來或許可利用此一性質開發出各種裝置，應用於 CO_2 的吸收與固定，以改善大氣中 CO_2 濃度增加的問題，甚至研究出更優異的單向膜或其他氣體的單向膜，應用在生活中。

二、改變 PMP 保鮮膜層數的速率比較

圖 23 顯示不同層數 PMP 隔離物質的 CO₂ 濃度變化，我們一樣取其每 5 分鐘的平均逸散速率做比較，如下圖 50：

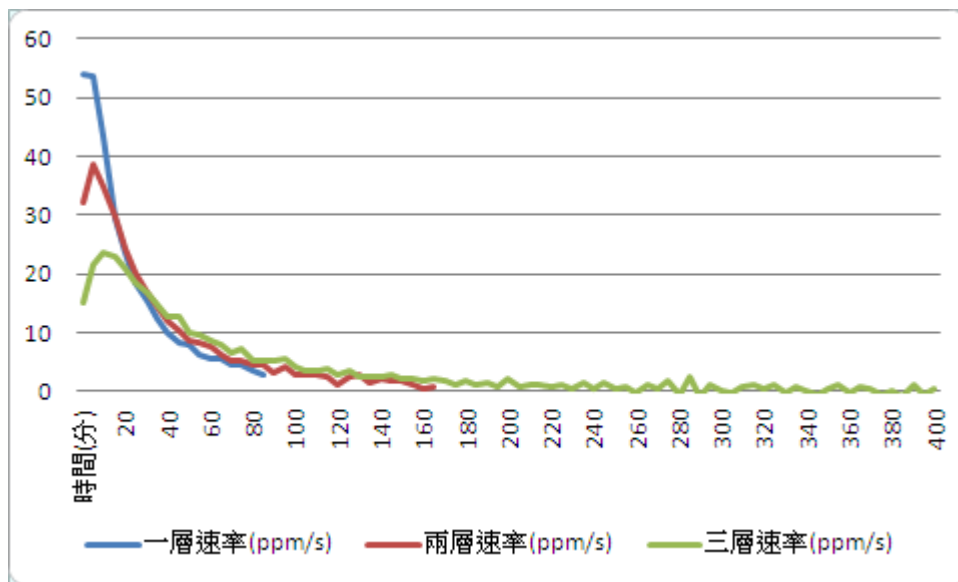


圖 50

PMP 層數不同的速率比較圖

我們試著改變隔離物質的厚度(層數)，檢視是否會影響 CO₂ 穿透隔離物質的速率。如圖 50 所示，顯示層數越多，最大穿透速率則越小，其最大穿透速率恰好與層數成負相關，如一層的最大速率值為 53.8ppm/s、兩層的最大速率值為 38.6ppm/s、三層的最大速率值為 23.5ppm/s，相差分別為 15.2ppm/s 和 15.1ppm/s，各層數間的最大速率值不單單只會隨著層數增加而下降，兩者之間似乎還存在著線性關係，且斜率為負值。但在大約經過 20 分鐘後，不同層數的速率卻完全相近，幾乎完全重疊。顯示一層雖然起始速率與最大速率都是最高，但是在最大值與重合點之間呈大幅下降，二層與三層則是中幅度與小幅度下降，最後導致三者速率完全一樣，也是非常有趣的現象。

三、PMP 與 PVC 裝置正反速率比較

我們將 PMP 與 PVC 兩實驗裝置上下顛倒，以比較 CO₂ 分子的穿透速率是否受重力影響，得到濃度變化如圖 25、26。因 CO₂ 分子量 44，而空氣平均分子量 28.8，我們原先猜想顛倒裝置後，所得到之速率會明顯下降，且更早降至接近零，但實驗結果顯示，仍然只有初始速率

與最大速率有所不同，速率在到達最大值不久後，兩者速率又會接近重疊為同一曲線。

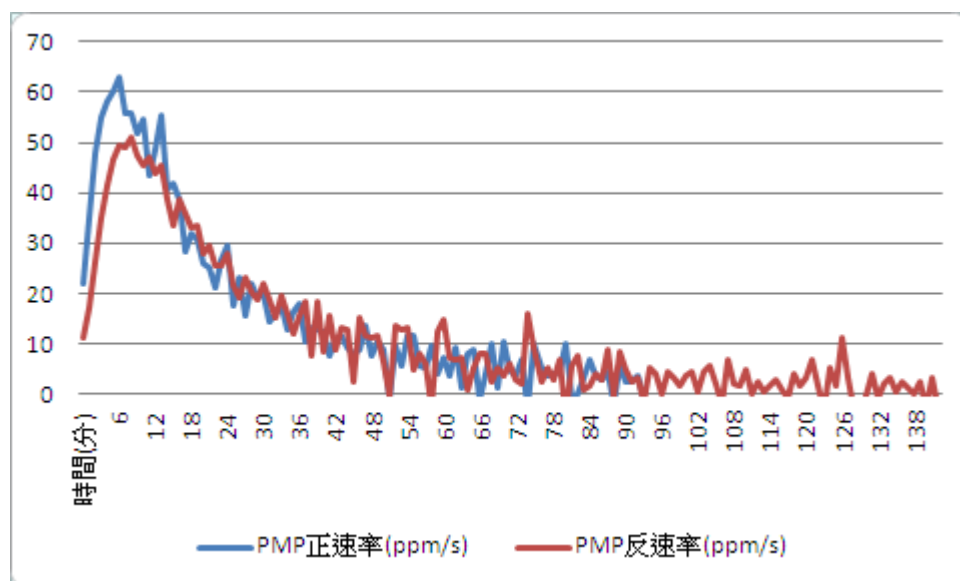


圖 51

PMP 裝置正反速率比較圖

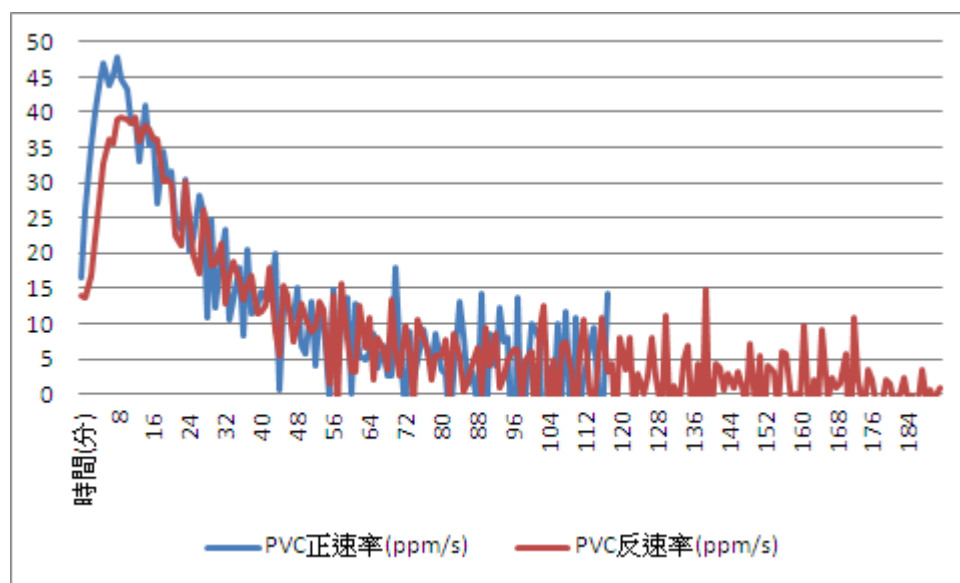


圖 52

PVC 裝置正反速率比較圖

在圖 51、圖 52 中我們認為時間越到後來時，速率起伏震盪不定是因為原始數據末期，濃度的變化差異較大所造成。但重力還是會多少造成起始速率與最大速率的不同。因此，A 罐在上的實驗有較大的起始速率與最大速率，而 B 罐在上的實驗有較小的起始速率與最大速率。

四、PMP 不同透氣面積的速率比較

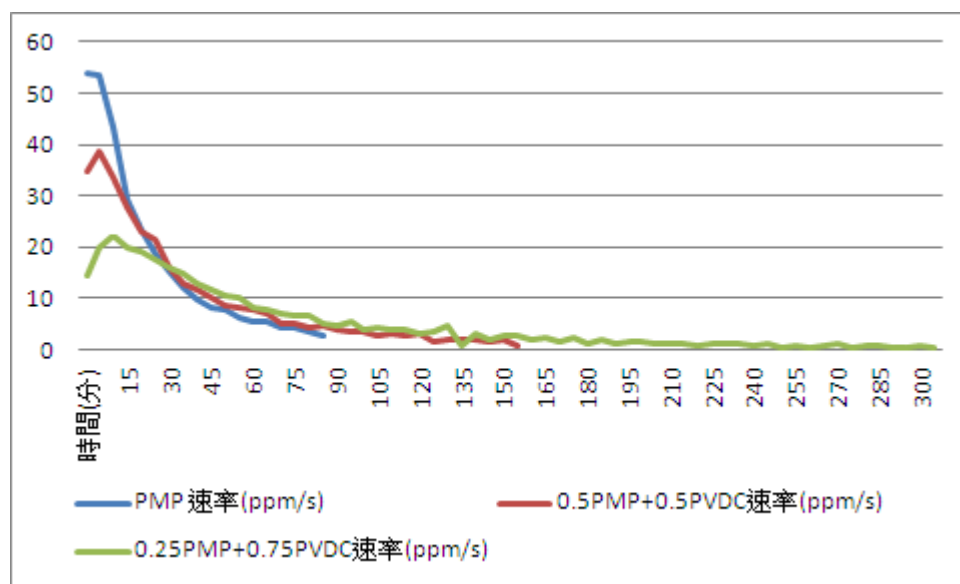


圖 53

PMP 表面積不同的速率比較圖

我們改變 A 罐與 B 罐間透氣材質(PMP)的表面積，取微量穿透(不穿透)的材質 PVDC，貼合可以透氣的 PMP 材質，使 PMP 剩下 1/2 與 1/4 面積可以讓 CO₂ 穿透，將穿透速率做成圖 53，其中我們選擇微量穿透的隔離物質中較軟的 PVDC 而非較硬的鋁箔亮面，係因為鋁箔的摺痕較銳利，很容易刺破 PMP 保鮮膜，造成實驗誤差。第二個原因是保鮮膜與保鮮膜間便較易重疊而沒有空氣滲入。圖 53 顯示透氣面積越小，起始速率與最大速率都會越小，呈現正相關，有趣的是，與圖 50 相同，速率最高的曲線後來也呈現大幅度下降，使得某個時間點之後，三者的速率都接近重疊了。

五、PMP 加水(A 罐)速率比較

透過加水及改變水的高度，是希望檢測二氧化碳分子是否能在用水(液體)當作隔離物質的情況下穿透，以及水高是否會影響穿透速率得快慢。因為水是液體，我們無法將其固定於 A、B 罐中間，因此我們先將 A 罐以 PMP 保鮮膜封口，再從橡皮管加水於 A 罐中，使水流至 PMP 保鮮膜上方，再進行實驗。

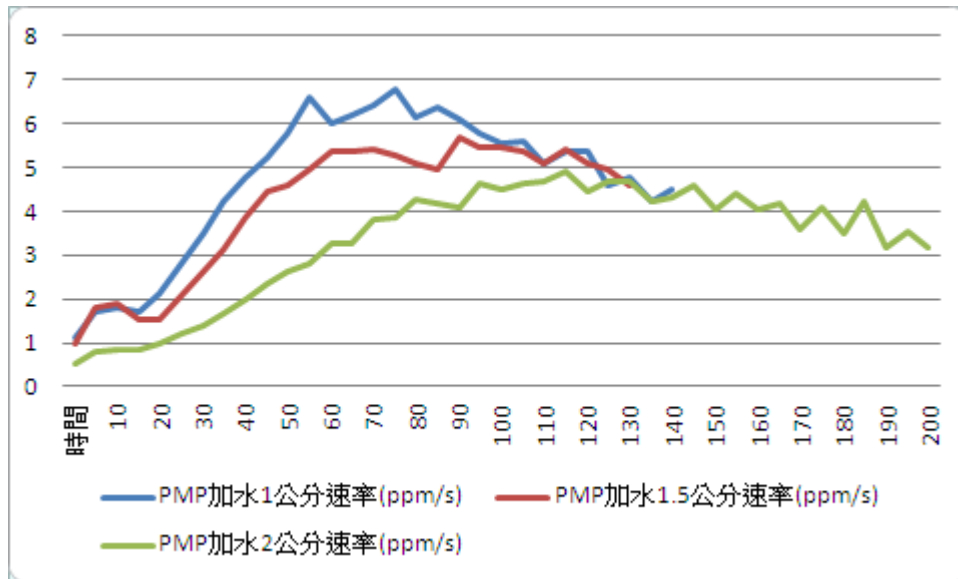


圖 54

PMP 加水 1、1.5、2 公分速率比較圖

因二氧化碳分子會微溶於水，我們原先認為 CO_2 會因此難以穿透保鮮膜。但實驗後發現用水作為隔離物質時，還是有穿透的現象發生，但穿透速率明顯下降，原本 PMP 的最大穿透速率為 62.93ppm/s ，並且在第 6 分鐘即達到最高速率(表 1)，但上圖顯示最高速率降到 7ppm 以下，且達到最高速率的時間均超過 50 分鐘。

在此我們採用三種不同的水高(1cm、1.5cm、2cm)。我們發現在起始速率的部分三者均在 1ppm/s 左右，差異不大，且遠比未加水的 21.85ppm/s 小多了，這部分符合我們預期，我們認為 CO_2 會先溶解在水中再由底部析出穿透至下層的 B 罐，所以初始速率相當慢而且差異不大；在達到最大速率的時間，各種水高的差異明顯出現，加水公分數越多，速率變化曲線斜率越平緩，不但最大速率最低，而且達到最大速率的時間也最晚，三者的時間也大約為 1:1.5:2，與水的高度呈現正相關。

六、PMP 加飽和碳酸水(A 罐)速率比較

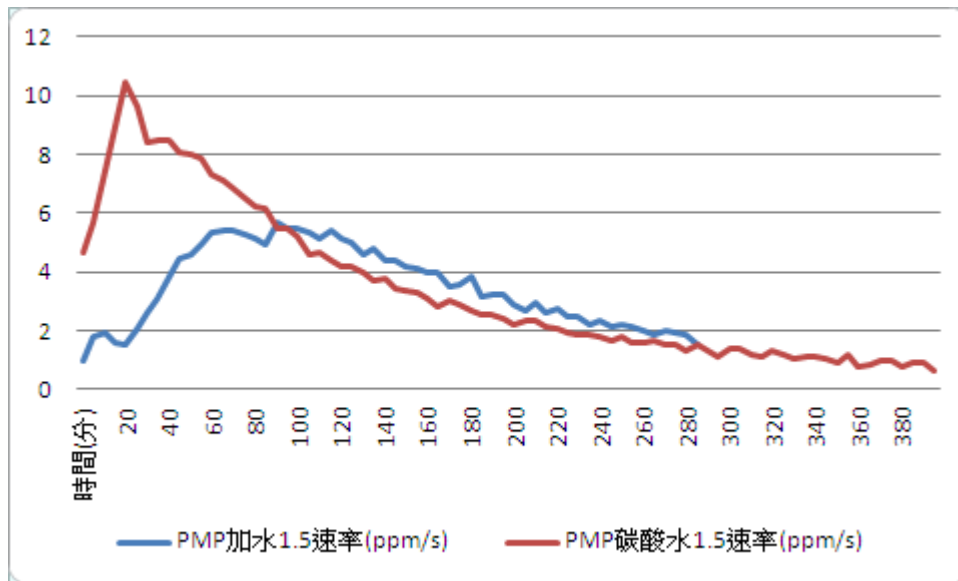


圖 55

PMP 加水 1.5 公分與加 CO₂ 水溶液 1.5 公分速率比較圖

上一個實驗中，我們認為 CO₂ 會先溶解在水中再由底部析出穿透至下層的 B 罐，為了驗證此想法，我們另外製備 CO₂ 水溶液，先將鋼瓶中的 CO₂ 導入錐形瓶的水中，通氣 5 分鐘使 CO₂ 溶解在水裡，並加進去實驗裝置 1.5 公分高以進行測試，與加水 1.5 公分進行比較，藉此來觀察 CO₂ 能否因此省去溶解於水的時間，減少穿透所需時間，並且提升穿透的速率。

從加水實驗與 CO₂ 水溶液實驗的速率比較圖 55，我們可以發現：CO₂ 水溶液實驗的起始速率與最大速率值，皆大於加水實驗，前者為後者三到四倍左右，且達到速率最大值的時間也縮短為大約 1/4，此結果印證了我們的假設：改用 CO₂ 水溶液可省去溶解於水的時間，減少穿透所需時間，並且提升穿透的速率。我們另外發現，CO₂ 水溶液實驗速率變化的曲線，一開始呈極為陡峭的斜直線上升，是我們鮮少觀察到的現象，與我們公式討論出來的二次曲線有些出入。另外，CO₂ 水溶液實驗是接近一直線的上升，不同於加水實驗的各個曲線，最一開始都會有小幅不規則變化的情形。速率比較圖中也可發現，過了最大速率值後，加水與碳酸水實驗的曲線又會漸漸重疊為相似的一條線的趨勢，與前面的實驗相同，每一個可穿透 CO₂ 的材質在達到最大速率之後，穿透速率都會漸漸減緩成相近重疊的曲線。

柒、結論與未來展望

一、結論

- (一) 二氧化碳穿透隔離物質可分為可穿透與不穿透(微量穿透)，可穿透的隔離物質穿透速率並非一直維持相同，濃度變化速率都有先上升後下降的現象，且我們發現七種材質的隔離物質有可穿透的現象。
- (二) 我們目前發現兩種隔離物質屬於微量穿透，分別是 PVDC 保鮮膜與鋁箔亮面朝濃度高的部分。
- (三) 每種可穿透的隔離物質自開始至達到最大速率的時間、起始速率、最大速率以及速率變化量都有規律的關係：起始速率越大，最大速率就越大，速率變化量也越大，而從實驗開始至速率達到最大值的時間就會越短。
- (四) 穿透速率對時間作圖，其前期速率上升部分的變化符合二次函數曲線，經過實驗我們得知 $f(x) = (-\Delta r/T^2)x^2 + 2(\Delta r/T)x + r_0$ [$f(x)$ 為穿透速率， x 為時間]
- (五) 隔離物質越厚(越多層)，二氧化碳穿透的最大速率越小，但一段時間後速率會相同。
- (六) 罐口表面積越大，二氧化碳穿透的起始速率與最大速率越大，但一段時間後則歸於相同。
- (七) 裝置倒放的最大速率受重力影響，略小於裝置正放的最大速率。
- (八) 二氧化碳分子也會穿透水與 PMP 保鮮膜合成的隔離物質，且加水公分數越多，最大速率值越小；且加水公分數越多，自實驗開始至速率達到最大值所需時間越長。
- (九) 藉由加 CO_2 水溶液的實驗結果得知， CO_2 水溶液實驗的起始速率與最大速率值，皆大於加同公分數水的實驗，且達到速率最大值的時間也明顯較短，同時， CO_2 水溶液速率變化的曲線，一開始便呈現快速且規律上升的現象。

二、未來展望

- (一) 藉由二氧化碳的直線分子形狀以及穿透速率變化的性質，找出可利用之處，或確切原因。
- (二) 利用速率變化的數學關係 $f(x) = Ax^2 + Bx + C$ ，進一步探究 CO_2 穿透薄膜時分子動力理論。
- (三) 探討穿透較快速的隔離物質(如：PMP 保鮮膜)，其濃度變化超過 100000 後的濃度變化。
- (四) 探討單向穿透膜的開發與應用。

(五) 尋找更多會影響氣體穿透隔離物質的變因。

(六) 嘗試更多種隔離物質 Ex:輪胎內胎、籃球皮.....等等，使實驗結果更貼近日常生活。

捌、參考資料及其他

一、林育惠(2009)。「來去自如的氣體分子—氣體穿過氣泡的行為研究」。臺灣國際科展優勝。

二、徐恆文(2007)。「二氧化碳減量：二氧化碳的捕獲與分離」。《科學發展》。413 期。24 ~ 27 頁。

三、維基百科：二氧化碳。2016 年 3 月 28 日。取自：

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%8C%E6%B0%A7%E5%8C%96%E7%A2%B3>

四、乙烯-乙炔醇共聚物 -乙炔醇共聚物(EVOH) EVASIN 益膜新

[http://www.ccp.com.tw/PRODUCT.NSF/0/161de51997f60e05482573b4000870b0/\\$FILE/ATT](http://www.ccp.com.tw/PRODUCT.NSF/0/161de51997f60e05482573b4000870b0/$FILE/ATT)

[YAXL8.pdf/EVASIN%20%E4%B8%AD%E6%96%87%E5%9E%8B%E9%8C%84%202013.](http://www.ccp.com.tw/PRODUCT.NSF/0/161de51997f60e05482573b4000870b0/$FILE/ATT)

[pdf](http://www.ccp.com.tw/PRODUCT.NSF/0/161de51997f60e05482573b4000870b0/$FILE/ATT)

【評語】 050207

整體實驗簡單有趣，容易施做，並能觀察到氣體動力學與不同材質薄膜間的穿透行為差異，從中做出合理解釋。

實驗發現在初升段有加速行為，並非簡單氣體動力學所能解釋，在該團隊第二階段提問時能夠加入材質本身與 CO_2 分子作用力觀點提出有趣觀點，值得嘉許。