

化學花園與溶液氣體論－滲透作用之研究

高中組化學科第三名

高雄市立高雄高級中學

作者：方勇駿、羅偉仁、陳介章、蘇士捷

指導教師：柳信榮

一、研究動機

國一暑假參加南區國中資優生夏令營時，曾做過一個名為「化學花園」的實驗，當時只知其然而不知其所以然。升上高二有更多機會接觸化學，經老師指導，才從課外資料得知「化學花園」與晶體滲透作用有關；而在高二上學期的第一冊化學第五章「溶液」中也學到一些有關滲透作用及滲透壓之基本概念，因而產生了研究滲透作用的興趣，便在老師指導下，利用課餘及寒假進行實驗設計，詳實操作觀察，以求解決疑問。

二、研究目的

1. 利用簡單器材，以學過的基本原理，自行設計實驗，觀察滲透作用，增進對滲透現象的了解，並嘗試解決問題，以達學以致用的目的。
2. 以實驗驗證高中化學第一冊第五章第104頁所敘之有效性，其敘述：「在稀薄溶液，滲透壓的大小 π 與溶質的莫耳數 η 和絕對溫度 T 成正比、與溶液體積 V 成反比，而與溶質、溶劑的種類無關。此關係與理想氣體方程式 $PV = \eta RT$ 所表示的很相似，也可用 $\pi V = \eta RT$ 表之，其比例常數 R 也等於氣體常數 R 。
3. 因 $\pi V = \eta RT$ 之關係與理想氣體性質相似，故稱溶液氣體論（Gaseous Theory of Solution），經由實驗求得此方程式的有效條件。
4. 依 $\pi V = \eta RT$ 方程式，可測蛋白質之數目分子量。
5. 經由「化學花園」實驗之製作與觀察，對晶體滲透作用有更深入的了解。

三、研究過程方法

第一部 化學花園——晶體滲透作用實驗

爲了要揭開化學花園形成的秘密，我們聯想到一些問題，爲求問題之解決，我們設計相關實驗來加以求證，第一個問題是化學花園出現美麗不同色彩的晶芽，此一現象是否與過渡元素難溶鹽有關，所以我們設計甲實驗。第二個問題是若化學花園形成與滲透作用有關，則在晶芽形成過程是否有薄膜類似半透膜的 formed，因此設計乙實驗，

第三個問題是爲了了解沈澱與薄膜形成是否與晶芽的形成有關，故設計丙實驗，第四個問題是爲要找出晶芽與那些因素有關，故設計了丁實驗，有關甲、乙、丙、丁四個實驗的步驟，結果詳實分述於后。

(一) 實驗器材及試藥：

1. 器材：試管、燒杯、培養皿、量筒、滴管、玻棒、刮勺、稱藥紙、電磁攪拌器、分析天平、恆溫槽。
2. 試藥： Na_2O 、 χ SiO_2 、 Na_3PO_4 、 $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 、 $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ 、 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 、 BaCl_2 、 $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ 、 MnCl_2 、 MnSO_4 、 FeCl_2 、 FeCl_3 、 FeSO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 CoCl_2 、 $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ 、 NiSO_4 、 CuCl_2 、 CuSO_4 、 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 、 ZnCl_2 、 $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$ 、 ZnSO_4 、 $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$ 、 AgNO_3 、 CdCl_2 、 HgCl_2 、蒸餾水。

(二) 實驗步驟：

(甲) 實驗 矽酸鹽、磷酸鹽、鐵氰化鹽及亞鐵氰化鹽溶解度定性觀察。

1. 配製0.1M之下列水溶液：

$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$ 、 CuSO_4 、 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 、 CuCl_2 、 MnSO_4 、 MnCl_2 、 ZnSO_4 、 ZnCl_2 、 FeSO_4 、 FeCl_2 、 FeCl_3 、 NiSO_4 、 AgNO_3 、 CoCl_2 、 $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ 、 CdCl_2 、 HgCl_2 、 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$ 、 $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ 、 $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{BaCl}_2(0.05\text{M})$ 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3(0.05\text{M})$ 。

2. 配製水玻璃溶液（體積比水玻璃：水=1：5）、飽和之 Na_3PO_4 溶液、0.1 M $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 溶液、0.1 M $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ 溶液。

3. 步驟1中所配製之溶液，各取8mL分別盛入A、B、C、D四組試管中：

A組再分別加入8mL水玻璃溶液，

B組再分別加入8mL飽和磷酸鈉溶液，

C組再分別加入8mL鐵氰化鉀溶液，

D組再分別加入8mL亞鐵氰化鉀溶液。

4. 觀察A、B、C、D四組的現象，並紀錄結果。

(乙) 實驗 矽酸鹽、磷酸鹽、鐵氰化鹽、亞鐵氰化鹽薄膜形成之定性觀察：

1. 取E、F、G、H四組培養皿，將金屬鹽溶液分別傾入10mL於E、F、G、H四組培養皿中：

E組再分別滴入數滴水玻璃溶液，

F組再分別滴入數滴飽和磷酸鈉溶液，

G組再分別滴入數滴鐵氰化鉀溶液，

H組再分別滴入數滴亞鐵氰化鉀溶液。

2. 觀察E、F、G、H四組的現象，並記錄結果。

(丙) 實驗 化學花園形成的定性觀察

1. 取24支試管各盛8mL水玻璃溶液，並分別加入(甲)實驗中各種金屬鹽小顆粒。
2. 重覆步驟1，但將溶液改為飽和 Na_3PO_4 溶液、 $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 溶液、 $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 溶液。
3. 將(甲)實驗中各種金屬鹽溶液取8mL分盛於48試管並加少量 $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 、 $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 晶體。
4. 觀察1、2、3、4之滲透現象，及晶芽之生成情形，並記錄之。

(丁) 實驗 化學花園形成的定量觀察

※由甲、乙、丙實驗結果，發現有些金屬鹽晶體能在水玻璃溶液及飽和磷酸鈉溶液產生“晶體滲透作用”，因此我們選用這些晶體進行實驗，以觀察金屬鹽用量，水玻璃溶液濃度、溫度等因素對晶體滲透作用之影響。

1. 配製四種濃度水玻璃溶液，體積比(1)水玻璃：水=1：5(比重1.112)，(2)水玻璃：水=1：10(比重1.056)，(3)水玻璃：水=1：15(比重1.046)，(4)水玻璃：水=1：20(比重1.028)。在室溫下，取四組試管各盛前述四種水玻璃溶液，再加入0.001 mol之各種金屬鹽晶體，測量晶芽高度，每隔五分鐘記錄一次。
2. 重覆步驟1，將金屬鹽改為0.05g，作同樣測量，記錄結果。
3. 重覆步驟1、2，將溫度改為30°C、40°C、50°C、作同樣測量，並記錄結果。
4. 重覆步驟1、2、及3，將水玻璃溶液改為各溫度下之飽和 Na_3PO_4 溶液，作同樣測量，並記錄結果。

第二部分 溶液氣體論實驗

高中化學所談 $\pi V = \eta RT$ 關係式與理想氣體方程式相似，故稱溶液氣體論(註①)。為驗證 $\pi V = \eta RT$ 有效條件為稀薄溶液，我們進行滲透壓測定。

(一) 實驗原理

1. 滲透作用發生時，滲透管內液面逐漸上升，到某一高度才停止，此時管內液柱高所呈現壓力稱滲透壓。
2. 滲透過程中，滲透流通率(J與滲透壓 π 及半透膜兩端液體靜壓 ΔP 成下列關係：)
 $J = L(\pi - \Delta P)$ (註②)，L為滲透係數。本實驗以薊頭漏斗為滲透管。滲透流通率J和液柱上升速率 $\frac{\Delta h}{\Delta t}$ 成正比， ΔP 可以h水柱高度表示， $\frac{\Delta h}{\Delta t} \propto (\pi - h)$ 即 $\pi - h = k \left(\frac{\Delta h}{\Delta t} \right)$

3. 由上述知，以 $\frac{\Delta h}{\Delta t}$ 對 Δt 時距內平均高度 h 作圖，便可由 $\pi - h = k \left(\frac{\Delta h}{\Delta t} \right)^n$ 求得

$\frac{\Delta h}{\Delta t} \rightarrow 0$ 時之 h ，也就是滲透壓的實驗值。

4. 由 $\pi V = \eta RT$ 可得滲透壓之理論值，便可計算實驗值之百分誤差。

註：(1) 見參考資料一 P.114 (2) 見參考資料二 P.22

(二) 實驗器材及試藥

1. 器材：薊頭漏斗、燒杯、量瓶、量筒、溫度計、凡士林、半透膜、電磁攪拌器、分析天平。
2. 試藥：蔗糖、蛋白、NaOH、蒸餾水。

(三) 實驗步驟

1. 半透膜處理：

- (1) 以蒸餾水煮沸 5~7 分。
- (2) 煮沸後的半透膜順序浸於各個低於 10% 之 NaOH(aq) 各數小時。
- (3) 把半透膜以蒸餾水浸洗，保存其中。

2. 測定溶液滲透壓：

- (1) 配製 0.0625M ((甲) 實驗)、0.25M ((乙) 實驗)、0.5M ((丙) 實驗)、1.0M ((丁) 實驗)、2.0M ((戊) 實驗) 之蔗糖溶液。
- (2) 在粗口端包有半透膜的薊頭漏斗中盛各種濃度溶液，置入裝水的燒杯中，使管內液面等於水面。定時測量管內液柱高與溫度。
- (3) 取 30.0g 之蛋白，以蒸餾水稀釋成 330mL 溶液，作滲透壓測定，以計算其數目平均分子量。

四、實驗結果

第一部分 化學花園——晶體滲透作用

1. 甲實驗中“十”表示有沈澱，“一”表示無沈澱；乙實驗中“十”表示形成薄膜，“一”表示沒有薄膜；丙實驗中“十”表示有晶芽，“一”表示沒有晶芽。

實驗 金屬鹽	溶液 別	水玻璃溶液			$\text{Na}_3\text{PO}_4(\text{aq})$			$\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6](\text{aq})$			$\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6](\text{aq})$		
		甲	乙	丙	甲	乙	丙	甲	乙	丙	甲	乙	丙
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$		+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$		+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$		+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
BaCl_2		+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$		+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
$\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$		+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
MnCl_2		+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+
MnSO_4		+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+
FeCl_2		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
FeCl_3		+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+
FeSO_4		+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$		+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+
CoCl_2		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$\text{Co}(\text{NO}_3)_2$		+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+
NiSO_4		+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+
CuCl_2		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
CuSO_4		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
ZnCl_2		+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+
ZnSO_4		+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+
CdCl_2		+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+
HgCl_2		+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+
AgNO_3		+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	-

2. 丁實驗中各種溫度與濃度下，晶芽最高高度如下：

金屬鹽		水玻璃 溶液	溫度 (°C)	高度 (cm)	時間 (min)
MnSO ₄	0.001mol	1 : 5	40°C	6.2	30
	0.05g	1 : 5	40°C	4.7	30
FeSO ₄	0.001mol	1 : 5	25°C	7.8	30
	0.05g	1 : 5	40°C	7.0	30
CoCl ₂	0.001mol	1 : 5	30°C	7.8	20
	0.05g	1 : 10	50°C	7.8	20
Co(NO ₃) ₂	0.001mol	1 : 20	50°C	7.8	30
	0.05g	1 : 15	50°C	7.8	20
NiSO ₄	0.001mol	1 : 5	50°C	3.9	30
	0.05g	1 : 5	25°C	2.0	30
Cu(NO ₃) ₂	0.001mol	1 : 5	50°C	7.8	15
	0.05g	1 : 5	25°C	7.8	20
CuSO ₄	0.001mol	1 : 20	50°C	5.5	30
	0.05g	1 : 15	40°C	6.2	30
ZnCl ₂	0.001mol	1 : 10	25°C	6.7	30
	0.05g	1 : 20	25°C	5.5	30

金屬鹽		溫度 (°C)	高度 (cm)	時間 (min)
MnSO ₄	0.001mol	30°C	1.2	30
	0.05g	50°C	1.1	20
FeSO ₄	0.001mol	50°C	0.7	20
	0.05g	25°C	0.5	15
CoCl ₂	0.001mol	25°C	7.8	25
	0.05g	50°C	2.5	30
NiSO ₄	0.001mol	50°C	0.5	25
	0.05g	50°C	0.4	5
CuSO ₄	0.001mol	25°C	0.4	20
	0.05g	50°C	0.3	15

第二部分 溶液氣體論

1. 各實驗測得之滲透壓實驗值、理論值與百分誤差：

實驗名稱	甲	乙	丙	丁	戊
蔗糖溶液濃度	0.0625M	0.25M	0.5M	1.0M	2.0M
滲透壓實驗值 (cm - 液柱)	1554.47	6460.66	12117.03	27211.90	61809.02
滲透壓理論值 (cm - 液柱)	1573.27	6293.07	12586.15	25172.29	50344.59
百分誤差	1.2%	2.66%	3.73%	8.10%	22.77%

2. 蛋白質溶液滲透壓實驗值為58.852083cm-液柱。由 $\pi = C_M RT$ 求得蛋白質的數目平均分子量：

$$\frac{58.852083}{1033.6} = \frac{30}{330} \times 1000 \times 0.082 \times 297$$

$$\rightarrow M = 38883.554 \text{ (g/md) } \circ$$

五、結 論

第一部分 化學花園——晶體滲透作用

1. 「化學花園」現象是金屬鹽晶體投入水玻璃溶液、 $\text{Na}_3\text{PO}_4(\text{aq})$ 、 $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ (aq)、 $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6](\text{aq})$ 內生成的晶芽。其原因是晶體滲透作用；以水玻璃溶液為例，加入金屬鹽晶體時，金屬陽離子與 SiO_3^{2-} 作用，在晶體表面形成具半透性的偏矽酸鹽薄膜，因而水玻璃溶液的水經此膜向晶體內滲透，使晶體溶解，進而使半透膜膨脹破裂，溶解的鹽溶液流出，流出液表面又形成半透膜，水又滲透進入，再度破裂，周而復始，晶芽便漸漸長高。
2. 第一列過渡元素、IIA族的金屬陽離子會與電荷較高的陰離子（如 SiO_3^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$ 、 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ ）反應形成不溶性鹽類即晶芽。
3. 影響晶芽生長的因素①溫度②水玻璃溶液濃度③金屬鹽的本性④溶液本性。

第二部分 溶液氣體論

1. 由實驗結果知，蔗糖溶液滲透壓測定之百分誤差分布情形：濃度在0.5M以下時低於4%，1.0M為8.1%，2.0M則將近23%。證實 $\pi V = \eta RT$ 僅適用於稀薄溶液。
2. 以 $\pi - h = k\left(\frac{\Delta h}{\Delta t}\right)$ 可計算滲透壓的實驗值。
3. 高分子聚合物分子量可由 $\pi V = \eta RT$ 求得。如蛋白質之數目平均分子量為38883.55 g/mol。

六、參考資料

- (一)化學實驗下冊 雷敏宏等 高立圖書。
(二)薄膜分離 郭文正等 高立圖書。

評語

本作品的目的在試圖了解化學花園形式的原理，由仔細的觀察而察覺與水玻璃之產生半透膜有關，進而試做蔗糖的半透膜實驗，雖然水玻璃產生之半透膜和市售半透膜不同，但研究中考慮周詳，實驗仔細，經評為第三名，以茲鼓勵。