

中華民國 第 50 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 化學科

佳作

040210

你濃我濃，到底要多濃？——電解 1A 族、2A
族金屬氯化物水溶液之性質探討

學校名稱：臺北市立第一女子高級中學

作者： 高二 黃兆蘭 高二 黃莞歲	指導老師： 詹莉芬
---------------------------------	------------------

關鍵詞：電解、食鹽水、氯化物

摘要

本研究以探討電解 1A 族、2A 族金屬氯化物(研究對象為 NaCl、KCl、MgCl₂、CaCl₂、SrCl₂、BaCl₂)水溶液反應性之研究，並配合高中化學所學的知識、實驗方法，運用簡易的實驗室器材搭配生活周邊可取得的材料，設計簡單、體積小的電解裝置，並可利用理想氣體方程式及氧化還原滴定的方法確定陽極產物 O_{2(g)}及 Cl_{2(g)}的莫耳數。

研究結果發現，高中教學所言之「電解高濃度食鹽水產生氯氣，電解低濃度食鹽水產生氧氣」應有修正，並擴大討論 1A 族及 2A 族金屬氯化物的電解反應，發現化學反應並非僅有「濃或稀」的分界，而是在不同的條件，譬如電解液種類、濃度、外加電壓的改變，化學反應會有動力學或熱力學的競爭，使得產物 O_{2(g)}及 Cl_{2(g)}的莫耳數比例也互有消長，得到有趣的實驗結果。

壹、研究動機

高一基礎化學課時化學老師提及：電解不同濃度的食鹽水溶液時，有兩種可能反應：

(1)電解低濃度食鹽水時相當於電解水，反應式為 $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_{2(\text{g})} + \text{O}_{2(\text{g})}$ ，NaCl 僅扮演電解質導電的角色。

(2)電解高濃度食鹽水時反應式為 $2\text{NaCl}_{(\text{aq})} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH}_{(\text{aq})} + \text{H}_{2(\text{g})} + \text{Cl}_{2(\text{g})}$ ，NaCl 就扮演了反應物的角色。

兩種反應的差別在於陽極產物分別是 $\text{O}_{2(\text{g})}$ 及 $\text{Cl}_{2(\text{g})}$ 。

高一化學專題研究課時的科展作品分享(第 48 屆科展作品：以銅為鏡可以正硝酸)，關於硝酸濃度與金屬銅的反應性討論，讓我們頗訝異的是原來國中所謂「銅與濃硝酸反應產生 $\text{NO}_{2(\text{g})}$ ，銅與稀硝酸反應產生 $\text{NO}_{(\text{g})}$ 」也不是這麼具有選擇性，兩種反應競爭下的產物其實都會隨濃度改變及溫度改變而互有消長。

而高二反應速率的秒錶反應實驗則是： $\text{IO}_3^-_{(\text{aq})} + 3\text{HSO}_3^-_{(\text{aq})} \rightarrow \text{I}^-_{(\text{aq})} + 3\text{SO}_4^{2-}_{(\text{aq})} + 3\text{H}^+_{(\text{aq})}$
當 HSO_3^- 為限量試劑反應耗盡後，才再進行 $\text{IO}_3^-_{(\text{aq})} + 5\text{I}^-_{(\text{aq})} + 6\text{H}^+_{(\text{aq})} \rightarrow 3\text{I}_{2(\text{s})} + 3\text{H}_2\text{O}$
在澱粉指示劑的存在下出現藍色，經查證 IO_3^- 選擇與 HSO_3^- 或 I^- 反應則是由其半電位數值決定，則很明確為具有選擇性的反應。

那麼，關於電解食鹽水陽極產物是「具有選擇性」還是「互有消長」？因此引發我們對於電解液濃度的不同時，陽極的產物種類及產量感到好奇。

查資料得知電解食鹽水的簡易電解裝置(第 40 屆科展作品：氫山氯水—環保電解實驗)，但該裝置主要以 9 V 高電壓、檢驗氯氣產生的速率探討，也因此引起我們的好奇，外加電壓是否也會影響陽極產物的種類及含量。我們希望能設計出最準確且方便的簡易電解裝置，使之能既有效率又精準的收集產物，並計算莫耳數，且設計實驗改變濃度、外加電壓、電解液種類等變因，希望能對於「電解 1A 族、2A 族金屬氯化物水溶液」有更深的認識。

貳、研究目的

- 一、本研究討論的電解液對象為 1A 族氯化物 MCl ($M=Na、K$)、2A 族氯化物 MCl_2 ($M=Mg、Ca、Sr、Ba$) 水溶液。
- 二、設計簡易的電解裝置，可以準確收集電解產物。
- 三、測量電解液產生電解反應所需之外加電壓。
- 四、固定外加電壓、電解液種類，改變電解液濃度，測量電解反應之陽極產生的氣體種類及莫耳數。
- 五、固定電解質種類、電解液濃度，改變外加電壓，測量電解反應之陽極產生的氣體種類及莫耳數。
- 六、比較 1A 族氯化物及 2A 族氯化物電解反應的結果。

參、研究設備及器材

一、藥品(均為試藥級)

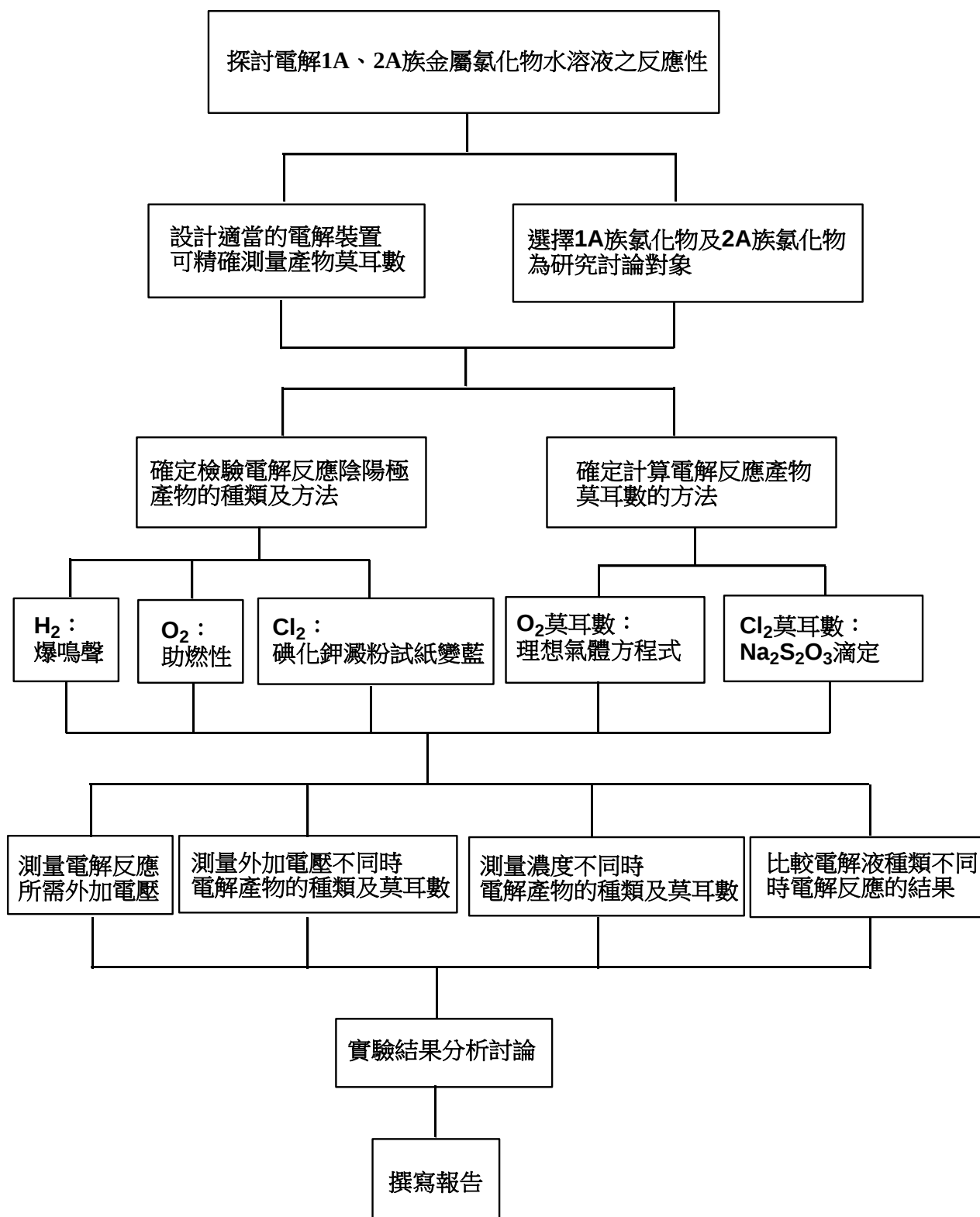
NaCl	H ₂ SO ₄
KCl	NaOH
MgCl ₂	Na ₂ S ₂ O ₃
CaCl ₂	澱粉
SrCl ₂	溴瑞香草藍指示劑
BaCl ₂	碘化鉀澱粉試紙
KI	

二、器材

試管(16×125 mm)	燒杯(1000 mL、500 mL、250 mL)
滴定管(50 mL)	量瓶(1000 mL、500 mL、250 mL)
分度吸量管(10 mL)	電子天秤(國產 Excell BH300 型)
鐵架	鱷魚夾
多功能鐵夾	直流電源供應器
保鮮盒(約 250、450 mL)	熱熔膠
白金絲	

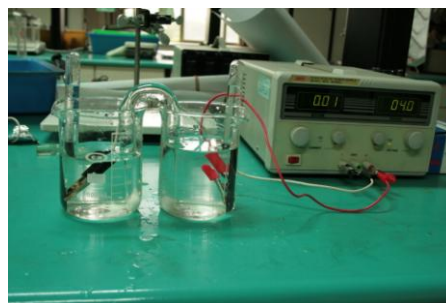
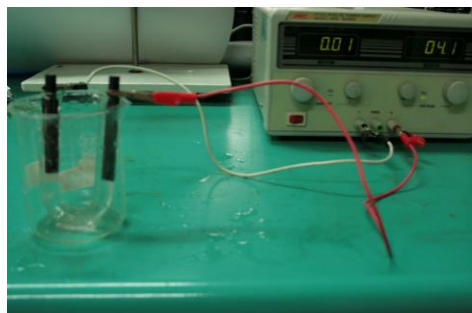
肆、研究方法

實驗流程圖：



一、設計適當的電解槽裝置

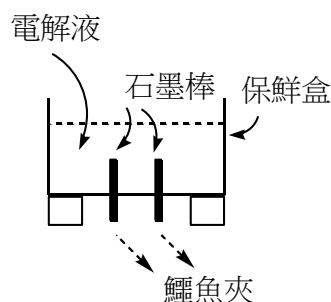
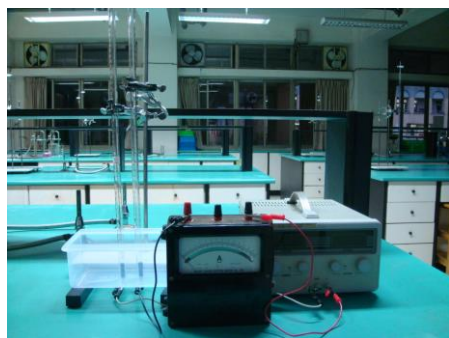
(一)根據高一基礎化學實驗之電解裝置，使用器材：石墨棒、U 型管、試管、鱷魚夾、三用電表、電源供應器，裝置如下：



缺點：(1)左圖裝置無法收集氣體。

(2)右圖裝置之鐵質鱷魚夾浸於溶液中，電解一段時間後鱷魚夾也氧化生鏽，使水溶液變為黃色，且電解速率很慢，部份氣泡從鱷魚夾附近逸散，無法被試管收集完全。

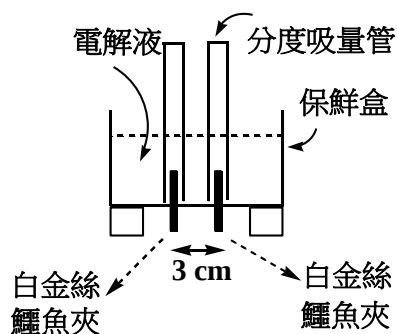
(二)使用材料：石墨棒、保鮮盒、滴定管、鱷魚夾、三用電表、電源供應器，裝置如下，右圖為電解槽之示意圖：



缺點：(1)碳棒竟然於電解實驗過程中碎裂成粉末。

(2)滴定管體積太大，實驗所收集體積約需 10 mL 氣體即可。

(三)取 450 mL 保鮮盒，以熱熔膠固定兩 3 cm 白金絲，距離 3 cm，兩支 10 mL 分度吸量管細口端以熱熔膠密封，並以鐵架固定於電極上方。將保鮮盒蓋子也穿兩個與盒底兩洞位置相符的圓孔，大小足以讓分度吸量管穿過。白金絲於保鮮盒下方露出部份以鱷魚夾接三用電表、電源供應器。每次實驗前均檢查熱熔膠密封處之是否漏水漏氣。裝置如下左圖，右圖為示意圖：



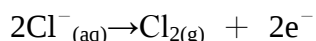
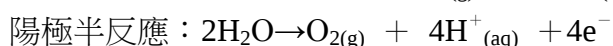
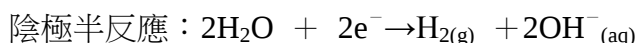
- 優點：(1)白金絲物性、化性穩定，沒有類似石墨碎裂狀況發生。
 (2)保鮮盒體積小，實驗操作方便。
 (3)分度吸量管刻度精準，且為我們實驗所需氣體體積範圍。
 (4)保鮮盒蓋減少實驗過程中電解液水份蒸發。

經過一連串的嘗試，我們以發展設計出(三)的裝置為電解反應實驗使用裝置。

二、檢驗陰陽極產物種類

- (一)氫氣：用火柴點火於收集氣體之管口，若有爆鳴聲表示產生氫氣。
 (二)氧氣：用點燃的線香移入收集氣體之管口，若線香火焰更旺盛表示產生氧氣。
 (三)氯氣：取陽極附近之溶液 0.5 mL，滴 3 滴 3 M $\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{aq})}$ 酸化、以碘化鉀澱粉試紙測試，若出現藍色表示產生氯氣。

三、測量電解反應之起始電壓



產生電解反應進行時可觀察到下表變化：

	陽極變化	陰極變化
觀察氣泡	有氣泡	有氣泡
溴瑞香草藍指示劑	綠色→黃色	綠色→藍色
硫酸、碘化鉀澱粉試紙	白色→藍色	---

將電解液外加電壓由 1.0 V 開始，每 0.2 V 遞增，當出現上表現象時之電壓數值，即為該電解液可發生化學反應之「起始電壓」。

四、計算陽極氣體莫耳數

(一)步驟

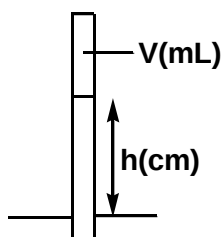
1.使 $\text{Cl}_{2(\text{g})}$ 完全溶於水中，查資料得 $\text{Cl}_{2(\text{g})}$ 溶解度約 2 g/100 mL 水(室溫)

(1)方法一：電解實驗結束移走電源，雙手戴手套，以手封住分度吸量管下方，將分度吸量管取出小心搖動，使收集氣體中的氯氣完全溶於水溶液中，再將分度吸量管架回原來位置，靜置一段時間，紀錄分度吸量管氣體體積 V_1 。

(2)方法二：與方法一相同，但從分度吸量管下方放進一小塊 $\text{NaOH}_{(\text{s})}$ ，使收集氣體中的氯氣完全溶於鹼性溶液中，再將分度吸量管架回原來位置，靜置一段時間，紀錄分度吸量管氣體體積 V_2 。

比較 V_1 和 V_2 的差異，經三次實驗都相差在 0.2 mL 內，故實驗操作選擇較簡單環保之方法一進行。

2.紀錄實驗當時之大氣壓力 $P(\text{hpa})$ 、室溫 $t(^{\circ}\text{C})$ ，參考該溫度之水蒸氣飽和蒸汽壓 $P^{\circ}(\text{mm-Hg})$ 、分度吸量管氣體體積 $V(\text{mL})$ 、分度吸量管內液面高度差 $h(\text{cm})$



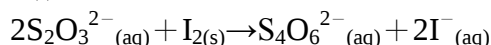
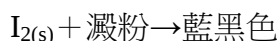
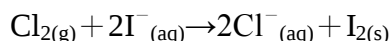
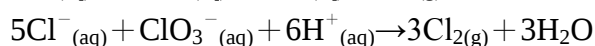
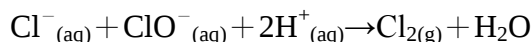
(二)由理想氣體方程式 $PV=nRT$ ，計算氧氣莫耳數 n ：

$$\left[\frac{P}{1013} - \frac{h}{1033.6} - \frac{P^o}{760}\right][V \times 10^{-3}] = nR[t + 273]$$

註 忽略 O_2 水中溶解度。查課本資料得 $O_{2(g)}$ 於 STP 時體積為 22.397 L/mol，視為理想氣體。

(三)由氧化還原滴定計算氯氣莫耳數

1.相關反應式：



2.步驟：

(1)混合保鮮盒及分度吸量管所有溶液。

(2)取 50 mL 溶液置錐形瓶中，緩慢冰浴中加入 1 M $H_2SO_{4(aq)}$ 5 mL，以減少氯氣逸散，再依序加入 1 M $KI_{(aq)}$ 10 mL、澱粉指示劑 3 mL，溶液變為藍黑色。

(3)以 0.01 M $Na_2S_2O_{3(aq)}$ 滴定藍黑色溶液，當溶液變為無色時，紀錄滴定終點的體積 $V(mL)$

(4)由「 Cl_2 轉移電子數 = $Na_2S_2O_3$ 轉移電子數」，計算氯氣莫耳數 n
 $n \times 2 = 0.01 \times [V \times 10^{-3}] \times 1$ ，重複 2 次，取平均值

(5)計算全部電解液中產生 $Cl_{2(g)}$ 的莫耳數

(四)計算陽極產物所佔比例，定義為

$$\text{氧氣所佔比例} = \frac{\text{氧氣莫耳數}}{(\text{氧氣莫耳數} + \text{氯氣莫耳數})} \times 100\%$$

$$\text{氯氣所佔比例} = \frac{\text{氯氣莫耳數}}{(\text{氧氣莫耳數} + \text{氯氣莫耳數})} \times 100\%$$

伍、實驗步驟

- 一、電解不同濃度 $\text{NaCl}_{(\text{aq})}$ 、 $\text{KCl}_{(\text{aq})}$ 水溶液，測量電解液的起始電壓 V (單位：V)，結果如下表：

濃度(M)	0.005	0.01	0.05	0.10	0.50	1.0	1.5	2.0
$\text{NaCl}_{(\text{aq})}$	2.81	2.72	2.66	2.62	2.50	2.48	2.35	2.22
$\text{KCl}_{(\text{aq})}$	---	2.84	2.77	2.61	2.59	2.30	2.2	2.0

估計 2A 族氯化物的起使電壓亦約 2~3V，經實驗操作得知，譬如以 4 V 電解 0.1 M NaCl 水溶液產生約 10 mL 氫氣所需時間為 20 小時，考量實驗操作時間，故以下實驗之外加電壓最小值為 4 V。

- 二、比較不同電解實驗條件所得到的陽極氧氣及氯氣莫耳數所佔比例。

(一)實驗條件

- 1.電解液種類： $\text{NaCl}_{(\text{aq})}$ 、 $\text{KCl}_{(\text{aq})}$ 、 $\text{MgCl}_{2(\text{aq})}$ 、 $\text{CaCl}_{2(\text{aq})}$ 、 $\text{SrCl}_{2(\text{aq})}$ 、 $\text{BaCl}_{2(\text{aq})}$ 共六種，每次實驗電解液體積 250 mL。
- 2.電解液濃度：0.001 M、0.005 M、0.01 M、0.05 M、0.1 M、0.5 M、1.0 M、1.5 M、2.0 M，共 9 種。
- 3.外加電壓：4V、6V、8V、10V、12V 共 5 種。

(二)電解裝置完畢後以外加電壓使之產生化學反應，當陰極產生氣體體積至 10 mL 時，停止電解。

(三)計算氧氣及氯氣莫耳數所佔比例。

陸、研究結果

說明：表格中項目：

體積：陽極上方 O₂ 體積

高度：陽極分度吸量管之液面高度差

Na₂S₂O_{3(aq)}：0.01 M

飽和蒸汽壓：水的飽和蒸汽壓，查表得知

表 1a：2.0 M NaCl_(aq)為電解液

外加電壓(V)	體積(mL)	高度(cm)	Na ₂ S ₂ O ₃ 體積(mL)	大氣壓力(hpa)	室溫(°C)	飽和蒸汽壓(mm-Hg)
12	0.79	31.86	13.24	1032	18.2	15.808
10	0.68	32.26	12.74	1032	18.2	15.808
8	0.63	32.49	14.90	1032	18.6	16.184
6	0.67	32.32	12.37	1033	17.1	14.774
4	0.40	33.40	14.76	1032	18.6	16.184

說明：計算 6 V 時電解 2.0 M NaCl_(aq)時，電解液總體積 250 mL，取 50 mL 滴定 Cl₂ 莫耳數

$$\text{氧氣毫莫耳數} = \left(\frac{1032}{1013} - \frac{14.774}{760} - \frac{32.32}{1033.6} \right) \times 0.67 \div 0.082 \div 290.1 = 2.73 \times 10^{-2} \text{ (mmol)}$$

$$\text{氯氣毫莫耳數} = \frac{1}{2} \times 0.01 \times 12.37 \times 250 \div 50 = 3.69 \times 10^{-1} \text{ (mmol)}$$

$$\text{氧氣比例} = \frac{0.0273}{0.0273 + 0.369} \times 100\% = 6.89\%$$

$$\text{氯氣比例} = \frac{0.369}{0.0273 + 0.369} \times 100\% = 93.11\%$$

其他實驗結果均類推並以 Excel 處理

表 1b：2.0 M NaCl_(aq)為電解液，經計算各產物的毫莫耳數(mmol)

外加電壓(V)	陽極		計算結果(%)	
	O ₂	Cl ₂	氧氣比例	氯氣比例
12	3.18×10 ⁻²	3.36×10 ⁻¹	8.64	91.36
10	2.77×10 ⁻²	3.29×10 ⁻¹	7.76	92.24
8	2.54×10 ⁻²	3.74×10 ⁻¹	6.36	93.64
6	2.73×10 ⁻²	3.69×10 ⁻¹	6.89	93.11
4	1.61×10 ⁻²	3.92×10 ⁻¹	3.95	96.05

表 2a：1.5 M NaCl_(aq)為電解液

外加 電壓 (V)	體積 (mL)	高度 (cm)	Na ₂ S ₂ O ₃ 體積 (mL)	大氣 壓力 (hpa)	室溫 (°C)	飽和蒸汽壓 (mm-Hg)
12	0.94	31.24	12.77	1029	19.5	17.03
10	0.79	31.83	14.22	1032	18.2	15.808
8	0.63	32.46	12.04	1032	18.2	15.808
6	0.57	32.72	12.57	1033	17.1	14.774
4	0.52	32.90	12.55	1032	18.2	15.808

表 2b：1.5 M NaCl_(aq)為電解液，經計算各產物的毫莫耳數(mmol)

外加電壓(V)	陽極		計算結果(%)	
	O ₂	Cl ₂	氧氣比例	氯氣比例
12	3.77×10 ⁻²	3.24×10 ⁻¹	10.42	89.58
10	3.21×10 ⁻²	3.56×10 ⁻¹	8.29	91.71
8	2.57×10 ⁻²	2.99×10 ⁻¹	7.92	92.08
6	2.32×10 ⁻²	3.77×10 ⁻¹	5.79	94.21
4	2.12×10 ⁻²	3.07×10 ⁻¹	6.46	93.54

表 3a：1.0 M NaCl_(aq)為電解液

外加 電壓 (V)	體積 (mL)	高度 (cm)	Na ₂ S ₂ O ₃ 體積 (mL)	大氣 壓力 (hpa)	室溫 (°C)	飽和蒸汽壓 (mm-Hg)
12	0.93	31.29	13.39	1029	19.5	17.03
10	0.87	31.52	14.29	1029	19.5	17.03
8	0.97	31.11	13.72	1029	19.5	17.03
6	0.90	31.41	10.9	1027	18.6	16.18
4	0.44	33.24	18.11	1028	19.3	16.842

表 3b：1.0 M NaCl_(aq)為電解液，經計算各產物的毫莫耳數(mmol)

外加電壓(V)	陽極		計算結果(%)	
	O ₂	Cl ₂	氧氣比例	氯氣比例
12	3.72×10 ⁻²	3.25×10 ⁻¹	10.27	89.73
10	3.49×10 ⁻²	3.30×10 ⁻¹	9.57	90.43
8	3.91×10 ⁻²	3.42×10 ⁻¹	10.27	89.73
6	3.61×10 ⁻²	3.26×10 ⁻¹	9.98	90.02
4	1.76×10 ⁻²	3.85×10 ⁻¹	4.38	95.62

表 4a：0.5 M NaCl_(aq)為電解液

外加 電壓 (V)	體積 (mL)	高度 (cm)	Na ₂ S ₂ O ₃ 體積 (mL)	大氣 壓力 (hpa)	室溫 (°C)	飽和蒸汽壓 (mm-Hg)
12	1.19	30.57	17.00	1026	19.5	17.03
10	1.20	30.55	13.00	1026	19.5	17.03
8	1.28	30.39	12.71	1028	19.3	16.842
6	0.99	31.03	11.65	1027	18.6	16.18
4	0.83	31.68	15.71	1026	19.5	17.03

表 4b：0.5 M NaCl_(aq)為電解液，經計算各產物的毫莫耳數(mmol)

外加電壓(V)	陽極		計算結果(%)	
	O ₂	Cl ₂	氧氣比例	氯氣比例
12	4.78×10 ⁻²	3.55×10 ⁻¹	11.89	88.11
10	4.82×10 ⁻²	3.24×10 ⁻¹	12.96	87.04
8	5.14×10 ⁻²	3.17×10 ⁻¹	13.93	86.07
6	4.00×10 ⁻²	3.43×10 ⁻¹	10.44	89.56
4	3.32×10 ⁻²	3.83×10 ⁻¹	7.96	92.04

表 5a：0.1 M NaCl_(aq)為電解液

外加 電壓 (V)	體積 (mL)	高度 (cm)	Na ₂ S ₂ O ₃ 體積 (mL)	大氣 壓力 (hpa)	室溫 (°C)	飽和蒸汽壓 (mm-Hg)
12	3.38	25.77	6.24	1024	19.7	17.218
10	3.33	25.87	6.38	1024	19.7	17.218
8	3.24	26.07	5.66	1028	19.9	17.406
6	2.87	26.88	6.24	1026	17.9	15.526
4	4.81	22.61	0.76	1023	22.7	20.038

表 5b：0.1 M NaCl_(aq)為電解液，經計算各產物的毫莫耳數(mmol)

外加電壓(V)	陽極		計算結果(%)	
	O ₂	Cl ₂	氧氣比例	氯氣比例
12	1.35×10 ⁻¹	1.54×10 ⁻¹	46.73	53.27
10	1.34×10 ⁻¹	1.58×10 ⁻¹	45.87	54.13
8	1.30×10 ⁻¹	1.40×10 ⁻¹	48.16	51.84
6	1.16×10 ⁻¹	1.86×10 ⁻¹	38.49	61.51
4	1.91×10 ⁻¹	1.91×10 ⁻²	90.89	9.11

表 6a：以電壓 6V 電解，以 $\text{NaCl}_{(\text{aq})}$ 為電解液

濃度(M)	體積 (mL)	高度 (cm)	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 體積 (mL)	大氣 壓力 (hpa)	室溫 (°C)	飽和蒸汽壓 (mm-Hg)
0.05	4.07	24.25	3.14	1024	17.7	15.338
0.01	6.82	18.00	0.05	1030	15.3	12.9
0.005	1.90	28.40	0.10	1029	16.6	14.304
0.001	6.82	18.00	0.50	1032	19.0	16.56

表 6b：以電壓 6V 電解，以 $\text{NaCl}_{(\text{aq})}$ 為電解液，經計算各產物的毫莫耳數(mmol)

	陽極		計算結果(%)	
濃度(M)	O_2	Cl_2	氧氣比例	氯氣比例
0.05	1.65×10^{-1}	9.26×10^{-2}	64.06	35.94
0.01	2.49×10^{-1}	1.28×10^{-3}	99.49	0.51
0.005	2.71×10^{-1}	8.41×10^{-3}	96.99	3.01
0.001	1.98×10^{-1}	9.48×10^{-5}	99.95	0.05

表 7a：2.0 M $\text{KCl}_{(\text{aq})}$ 為電解液

外加 電壓 (V)	體積 (mL)	高度 (cm)	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 體積 (mL)	大氣 壓力 (hpa)	室溫 (°C)	飽和蒸汽壓 (mm-Hg)
12	1.51	29.88	12.02	1024	19.7	17.218
10	0.91	31.37	13.38	1032	18.2	15.808
8	1.25	30.45	11.10	1032	18.6	16.184
6	0.90	31.42	13.94	1024	19.7	17.218
4	0.38	33.49	15.65	1032	18.6	16.184

表 7b：2.0 M $\text{KCl}_{(\text{aq})}$ 為電解液，經計算各產物的毫莫耳數(mmol)

	陽極		計算結果(%)	
外加電壓(V)	O_2	Cl_2	氧氣比例	氯氣比例
12	6.03×10^{-2}	2.99×10^{-1}	16.78	83.22
10	3.67×10^{-2}	3.26×10^{-1}	10.12	89.88
8	5.06×10^{-2}	2.79×10^{-1}	15.37	84.63
6	3.57×10^{-2}	3.48×10^{-1}	9.30	90.70
4	1.53×10^{-2}	3.94×10^{-1}	3.72	96.28

表 8a：1.5 M KCl_(aq)為電解液

外加電壓(V)	體積(mL)	高度(cm)	Na ₂ S ₂ O ₃ 體積(mL)	大氣壓力(hpa)	室溫(°C)	飽和蒸汽壓(mm-Hg)
12	0.87	31.54	14.73	1029	19.5	17.03
10	0.80	31.81	11.90	1032	18.2	15.808
8	0.66	32.34	12.70	1032	18.2	15.808
6	0.58	32.68	12.52	1026	19.7	17.218
4	0.32	33.71	15.71	1032	18.2	15.808

表 8b：1.5 M KCl_(aq)為電解液，經計算各產物的毫莫耳數(mmol)

外加電壓(V)	陽極		計算結果(%)	
	O ₂	Cl ₂	氧氣比例	氯氣比例
12	3.48×10 ⁻²	3.65×10 ⁻¹	8.69	91.31
10	3.23×10 ⁻²	2.95×10 ⁻¹	9.87	90.13
8	2.69×10 ⁻²	3.16×10 ⁻¹	7.84	92.16
6	2.32×10 ⁻²	3.14×10 ⁻¹	6.87	93.13
4	1.30×10 ⁻²	3.89×10 ⁻¹	3.24	96.76

表 9a：1.0 M KCl_(aq)為電解液

外加電壓(V)	體積(mL)	高度(cm)	Na ₂ S ₂ O ₃ 體積(mL)	大氣壓力(hpa)	室溫(°C)	飽和蒸汽壓(mm-Hg)
12	0.76	31.94	12.79	1029	19.5	17.03
10	0.85	31.62	13.84	1029	19.5	17.03
8	0.71	32.18	14.91	1029	19.5	17.03
6	0.97	31.13	12.09	1032	20.1	17.54
4	0.61	32.57	13.47	1028	19.3	16.842

表 9b：1.0 M KCl_(aq)為電解液，經計算各產物的毫莫耳數(mmol)

外加電壓(V)	陽極		計算結果(%)	
	O ₂	Cl ₂	氧氣比例	氯氣比例
12	3.07×10 ⁻²	3.19×10 ⁻¹	8.78	91.22
10	3.40×10 ⁻²	3.42×10 ⁻¹	9.03	90.97
8	2.83×10 ⁻²	3.68×10 ⁻¹	7.14	92.86
6	3.89×10 ⁻²	3.47×10 ⁻¹	10.08	89.92
4	2.44×10 ⁻²	3.36×10 ⁻¹	6.76	93.24

表 10a：0.5 M $\text{KCl}_{(\text{aq})}$ 為電解液

外加 電壓 (V)	體積 (mL)	高度 (cm)	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 體積 (mL)	大氣 壓力 (hpa)	室溫 (°C)	飽和蒸汽壓 (mm-Hg)
12	1.05	30.89	12.08	1024	19.7	17.218
10	1.15	30.67	10.96	1026	19.5	17.3
8	0.99	31.02	13.60	1028	19.3	16.842
6	0.84	31.66	12.02	1032	20.1	17.54
4	0.73	32.08	14.66	1026	19.5	17.03

表 10b：0.5 M $\text{KCl}_{(\text{aq})}$ 為電解液，經計算各產物的毫莫耳數(mmol)

	陽極		計算結果(%)	
外加電壓(V)	O_2	Cl_2	氧氣比例	氯氣比例
12	4.20×10^{-2}	3.01×10^{-1}	12.25	87.75
10	4.60×10^{-2}	2.73×10^{-1}	14.44	85.56
8	4.00×10^{-2}	3.40×10^{-1}	10.52	89.48
6	3.36×10^{-2}	3.58×10^{-1}	8.58	91.42
4	2.92×10^{-2}	3.66×10^{-1}	7.38	92.62

表 11a：0.1 M $\text{KCl}_{(\text{aq})}$ 為電解液

外加 電壓 (V)	體積 (mL)	高度 (cm)	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 體積 (mL)	大氣 壓力 (hpa)	室溫 (°C)	飽和蒸汽壓 (mm-Hg)
12	3.05	26.48	5.61	1024	19.7	17.218
10	2.72	27.21	6.67	1024	19.7	17.218
8	2.68	27.31	7.47	1026	19.5	17.03
6	2.73	27.19	6.85	1027	18.6	16.18
4	2.03	28.73	9.64	1032	18.2	15.808

表 11b：0.1 M $\text{KCl}_{(\text{aq})}$ 為電解液，經計算各產物的毫莫耳數(mmol)

	陽極		計算結果(%)	
外加電壓(V)	O_2	Cl_2	氧氣比例	氯氣比例
12	1.23×10^{-1}	1.41×10^{-1}	46.52	53.48
10	1.09×10^{-1}	1.68×10^{-1}	39.42	60.58
8	1.08×10^{-1}	1.86×10^{-1}	36.69	63.31
6	1.10×10^{-1}	2.05×10^{-1}	35.03	64.97
4	8.26×10^{-2}	2.35×10^{-1}	25.99	74.01

表 12a：以電壓 6V 電解， $\text{KCl}_{(\text{aq})}$ 為電解液

濃度(M)	體積 (mL)	高度 (cm)	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 體積 (mL)	大氣 壓力 (hpa)	室溫 ($^{\circ}\text{C}$)	飽和蒸汽壓 (mm-Hg)
0.05	4.41	23.50	2.32	1024	17.7	15.338
0.01	4.95	22.31	0.74	1029	16.6	14.304
0.005	5.03	22.14	0.42	1030	15.3	12.9
0.001	4.61	23.05	0.04	1030	15.3	12.9

表 12b：以電壓 6V 電解， $\text{KCl}_{(\text{aq})}$ 為電解液，經計算各產物的毫莫耳數(mmol)

濃度(M)	陽極		計算結果(%)	
	O_2	Cl_2	氧氣比例	氯氣比例
0.05	1.79×10^{-1}	6.91×10^{-2}	72.15	27.85
0.01	2.03×10^{-1}	2.13×10^{-2}	90.50	9.50
0.005	2.08×10^{-1}	1.23×10^{-2}	94.43	5.57
0.001	1.91×10^{-1}	9.98×10^{-5}	99.95	0.05

表 13a：以電壓 6V 電解， $\text{CaCl}_2_{(\text{aq})}$ 為電解液

濃度(M)	體積 (mL)	高度 (cm)	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 體積 (mL)	大氣 壓力 (hpa)	室溫 ($^{\circ}\text{C}$)	飽和蒸汽壓 (mm-Hg)
2.0	0.82	31.72	14.17	1028	19.9	17.406
1.5	0.56	32.78	13.73	1026	19.5	17.03
1.0	1.00	30.99	13.95	1026	19.5	17.03
0.5	0.48	33.07	15.04	1028	19.8	17.312
0.1	4.68	22.89	1.58	1028	19.9	17.406
0.05	5.09	22.01	0.00	1028	24.7	23.8
0.01	4.82	22.60	0.17	1028	24.7	23.8

表 13b：以電壓 6V 電解， $\text{CaCl}_2_{(\text{aq})}$ 為電解液，經計算各產物的毫莫耳數(mmol)

濃度(M)	陽極		計算結果(%)	
	O_2	Cl_2	氧氣比例	氯氣比例
2.0	3.28×10^{-2}	3.54×10^{-1}	8.48	91.52
1.5	2.22×10^{-2}	2.80×10^{-1}	7.36	92.64
1.0	4.02×10^{-2}	3.45×10^{-1}	10.44	89.56
0.5	1.93×10^{-2}	3.71×10^{-1}	4.93	95.07
0.1	1.89×10^{-1}	3.94×10^{-2}	82.77	17.23
0.05	2.01×10^{-1}	4.04×10^{-5}	99.98	0.02
0.01	1.90×10^{-1}	4.25×10^{-4}	99.78	0.22

表 14a：以電壓 6V 電解， $\text{MgCl}_{2(aq)}$ 為電解液

濃度(M)	體積 (mL)	高度 (cm)	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 體積 (mL)	大氣 壓力 (hpa)	室溫 (°C)	飽和蒸汽壓 (mm-Hg)
2.0	0.10	34.60	16.19	1026	19.5	17.03
1.5	0.12	34.52	15.02	1026	19.5	17.03
1.0	0.46	33.15	13.86	1026	19.5	17.03
0.5	1.33	30.27	10.05	1026	19.5	17.03
0.1	2.50	27.71	8.26	1028	19.8	17.312
0.05	4.24	23.87	2.05	1021	24.7	23.8
0.01	5.14	25.50	0.96	1028	24.7	23.8

表 14b：以電壓 6V 電解， $\text{MgCl}_{2(aq)}$ 為電解液，經計算各產物的毫莫耳數(mmol)

濃度(M)	陽極		計算結果(%)	
	O_2	Cl_2	氧氣比例	氯氣比例
2.0	4.04×10^{-3}	3.92×10^{-1}	1.02	98.98
1.5	4.78×10^{-3}	3.75×10^{-1}	1.26	98.74
1.0	1.85×10^{-2}	3.48×10^{-1}	5.05	94.95
0.5	5.33×10^{-2}	2.53×10^{-1}	17.40	82.60
0.1	1.00×10^{-1}	2.05×10^{-1}	32.89	67.11
0.05	1.66×10^{-1}	5.07×10^{-2}	76.59	23.41
0.01	2.02×10^{-1}	2.37×10^{-2}	89.48	10.52

表 15a：以電壓 6V 電解， $\text{SrCl}_{2(aq)}$ 為電解液

濃度(M)	體積 (mL)	高度 (cm)	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 體積 (mL)	大氣 壓力 (hpa)	室溫 (°C)	飽和蒸汽壓 (mm-Hg)
2.0	0.60	32.60	12.93	1028	19.8	17.312
1.5	0.85	31.59	12.72	1026	19.5	17.03
1.0	1.18	30.60	13.01	1026	19.5	17.03
0.5	1.13	30.71	12.32	1028	19.8	17.312
0.1	2.92	26.77	7.66	1028	19.8	17.312
0.05	3.46	25.58	5.10	1035	17.4	15.056
0.01	3.90	24.61	2.76	1028	17.4	15.056

表 15b：以電壓 6V 電解， $\text{SrCl}_{2(\text{aq})}$ 為電解液，經計算各產物的毫莫耳數(mmol)

濃度(M)	陽極		計算結果(%)	
	O_2	Cl_2	氧氣比例	氯氣比例
2.0	2.40×10^{-2}	3.22×10^{-1}	6.94	93.06
1.5	3.41×10^{-2}	3.17×10^{-1}	9.71	90.29
1.0	4.73×10^{-2}	3.25×10^{-1}	12.69	87.31
0.5	4.53×10^{-2}	3.09×10^{-1}	12.77	87.23
0.1	1.18×10^{-1}	1.91×10^{-1}	38.15	61.85
0.05	1.42×10^{-1}	1.27×10^{-1}	52.80	47.20
0.01	1.59×10^{-1}	6.82×10^{-2}	70.02	29.98

表 16a：以電壓 6V 電解， $\text{BaCl}_{2(\text{aq})}$ 為電解液

濃度(M)	體積 (mL)	高度 (cm)	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 體積 (mL)	大氣 壓力 (hpa)	室溫 ($^{\circ}\text{C}$)	飽和蒸汽壓 (mm-Hg)
1.0	1.92	28.97	10.79	1026	19.5	17.03
0.5	1.04	30.91	12.66	1028	19.8	17.312
0.1	1.91	28.99	8.73	1028	19.8	17.312
0.05	4.86	22.50	0.92	1028	17.4	15.056
0.01	4.61	23.06	0.10	1038	14.7	12.584

表 16b：以電壓 6V 電解， $\text{BaCl}_{2(\text{aq})}$ 為電解液，經計算各產物的毫莫耳數(mmol)

濃度(M)	陽極		計算結果(%)	
	O_2	Cl_2	氧氣比例	氯氣比例
1.0	7.71×10^{-2}	2.71×10^{-1}	22.17	77.83
0.5	4.17×10^{-2}	3.17×10^{-1}	11.64	88.36
0.1	7.69×10^{-2}	2.16×10^{-1}	26.20	73.80
0.05	1.99×10^{-1}	2.27×10^{-2}	89.76	10.24
0.01	1.93×10^{-1}	2.46×10^{-3}	98.74	1.26

柒、討論

- 一、固定電壓為 6V，電解不同濃度 1A 族、2A 族金屬氯化物水溶液陽極產物氧氣或氯氣所佔的比例：由表 1~12 以 1A 族金屬氯化物濃度為橫坐標，氧氣及氯氣所佔比例為縱座標可得圖 1a，其低濃度的放大圖為圖 1b；由表 13-16 以 2A 族金屬氯化物濃度為橫坐標，氧氣及氯氣所佔比例為縱座標可得圖 2a，其低濃度的放大圖為圖 2b(加入 1A 族金屬氯化結果)

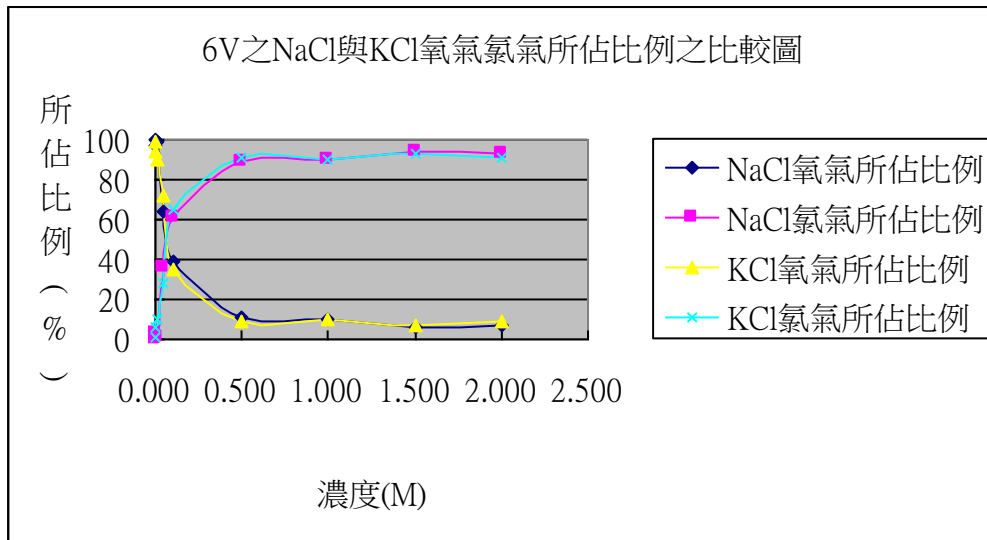


圖 1a 電壓 6V 電解不同濃度 $\text{NaCl}_{(\text{aq})}$ 、 $\text{KCl}_{(\text{aq})}$ 氧氣氯氣莫耳數比例分佈圖

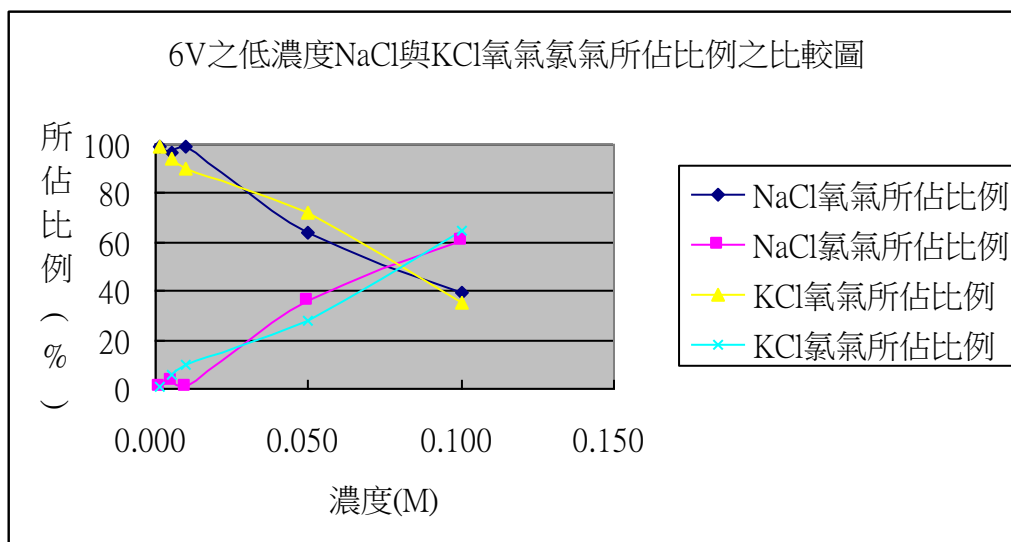


圖 1b 電壓 6V 電解低濃度 $\text{NaCl}_{(\text{aq})}$ 、 $\text{KCl}_{(\text{aq})}$ 氧氣氯氣莫耳數比例分佈圖

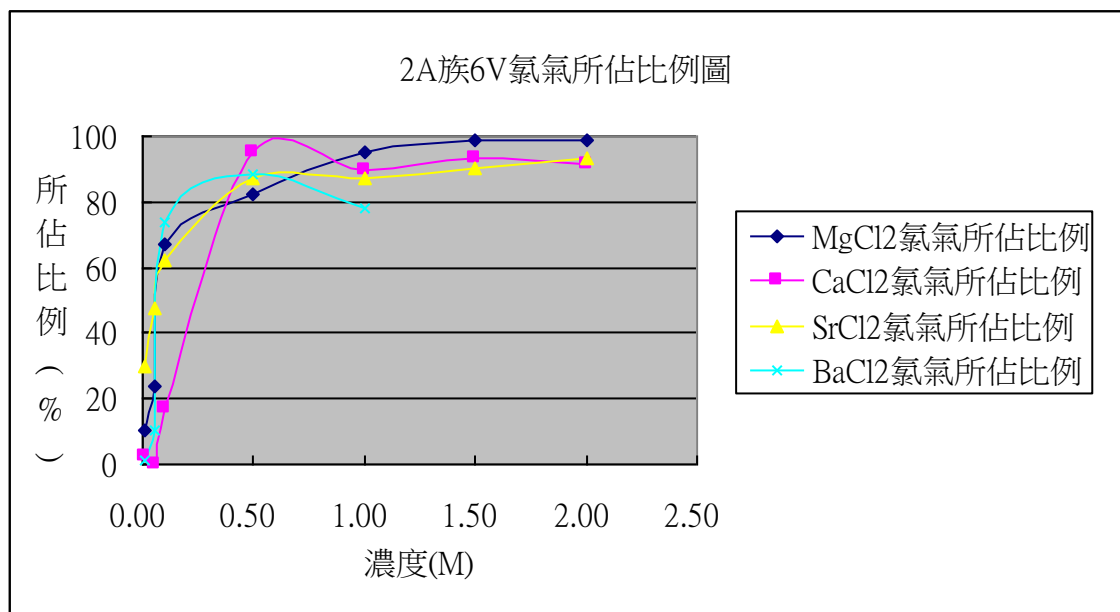


圖 2a 電壓 6V 電解不同濃度 $\text{MgCl}_{2(\text{aq})}$ 、 $\text{CaCl}_{2(\text{aq})}$ 、 $\text{SrCl}_{2(\text{aq})}$ 、 $\text{BaCl}_{2(\text{aq})}$ 氧氣、氯氣莫耳數比例分佈圖

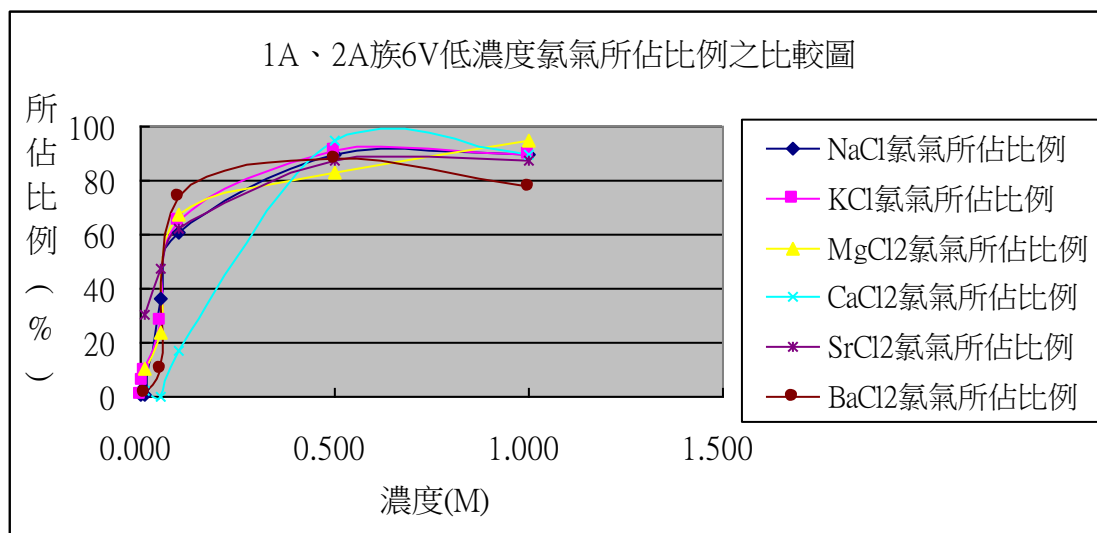


圖 2b 電壓 6V 電解不同濃度 $\text{NaCl}_{(\text{aq})}$ 、 $\text{KCl}_{2(\text{aq})}$ 、 $\text{MgCl}_{2(\text{aq})}$ 、 $\text{CaCl}_{2(\text{aq})}$ 、 $\text{SrCl}_{2(\text{aq})}$ 、 $\text{BaCl}_{2(\text{aq})}$ 氧氣、氯氣莫耳數比例分佈圖

(二)由實驗結果應修正高中化學教學所謂「電解高濃度食鹽水產生氯氣，電解低濃度食鹽水產生氧氣」，綜合整理如下：

電解液種類 電解液濃度	1A 族氯化物	2A 族氯化物
>0.5 M	電解產物主要是氯氣，莫耳數比例約 90%	與 1A 族實驗結果相似
0.1 M	兩種產物都會產生，氯氣莫耳數比例約 60%，沒有所謂「濃或稀食鹽水的界線」	(1)MCl ₂ (M = Mg、Sr、Ba)的氯氣莫耳數比例約 60% (2)電解液為 CaCl ₂ ，氯氣莫耳數比例僅剩下 20%
約 0.08 M (內插估計)	陽極產物氧氣開始佔優勢，當濃度下降產物氯氣的莫耳比例明顯下降	
0.05 M	氯氣莫耳數比例約 30%	(1)電解液為 MCl ₂ (M = Mg、Ca、Ba)的氯氣莫耳數比例低於 30% (2)電解液為 SrCl ₂ ，氯氣莫耳數比例還有 47%
<0.015 M	氯氣所佔比例小於 10%	與 1A 族實驗結果相似，僅電解液為 SrCl ₂ ，氯氣莫耳數比例還有 30%

(三)陽極半反應標準電位：



- 1.陽極有兩種反應物互相競爭產生兩種產物。就半電位來看，電解[Cl⁻]=1.0 M 水溶液 O₂ 應該是主要產物，但與實驗結果不合，查資料瞭解主要是電解反應產生 O₂ 的過電位比較大所造成。
- 2.又由 Nernst 方程式得知，當[Cl⁻]下降時，電解反應選擇半電位較大的進行，因此 O_{2(g)}開始是主要產物。

(四)由化合物的價數來看，相同濃度的 NaCl 與 MgCl₂，其[Cl⁻]應該相差兩倍，但在實驗數據中並沒有明顯的差別，查證高三化學課本「溶液的性質」，譬如 K₂SO₄ 在 0.1 m 時解離度 73%；0.01 m 時解離度 86%，推測 1A、2A 族氯化物實驗結果之差異可能與其解離度與真實存在濃度等因素有關。

(五)1A 族陽離子種類對於電解產物 O_{2(g)}及 Cl_{2(g)}沒有明顯的影響。但 2A 族的陽離子種類對電解結果是有差別的，尤其是電解低濃度 CaCl_{2(aq)}及 SrCl_{2(aq)}。

二、 $\text{NaCl}_{(\text{aq})}$ 與 $\text{KCl}_{(\text{aq})}$ 在不同濃度及不同電壓時的實驗結果

(一)由表 1~10 可作圖得圖 3a(0.5M~2M)及圖 3b(0.1 M)：

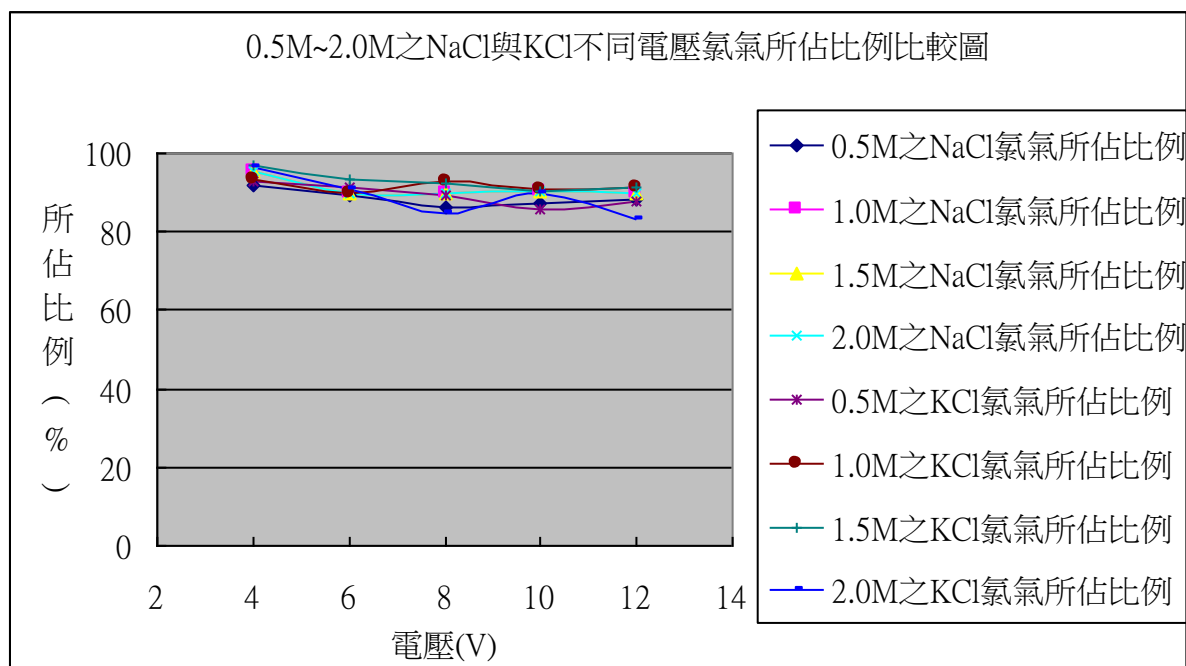


圖 3a 不同電壓電解不同濃度(0.5M ~2.0 M) $\text{NaCl}_{(\text{aq})}$ 及 $\text{KCl}_{(\text{aq})}$ 之氯氣比例分佈圖

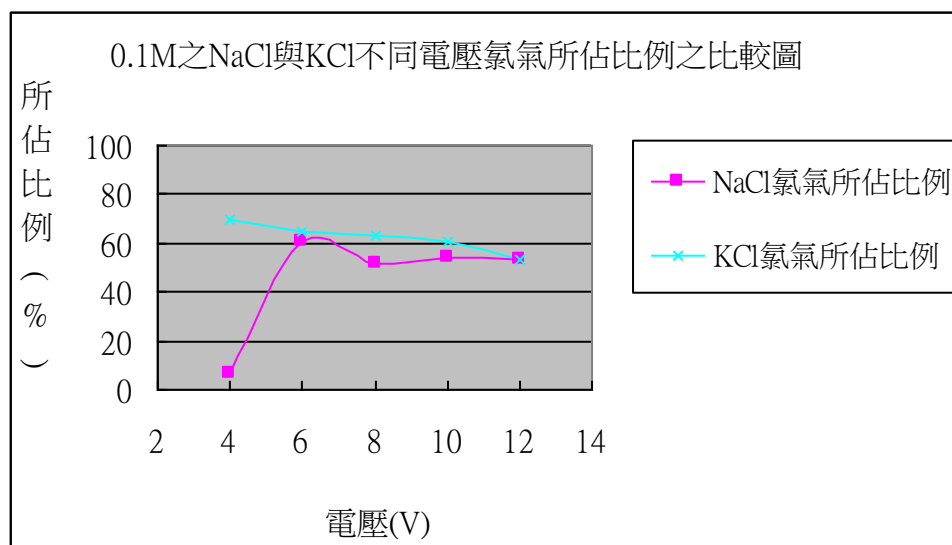


圖 3b 不同電壓電解 0.1 M $\text{NaCl}_{(\text{aq})}$ 及 $\text{KCl}_{(\text{aq})}$ 之氯氣比例分佈圖

(二)綜合比較不同條件下電解產物氯氣莫耳數比例如下表：

電解液濃度 及種類 外加電壓	0.05M	0.1 M		0.5M~2.0M
	NaCl、KCl	KCl	NaCl	NaCl、KCl
4 V	小於 10%	約 60%	小於 10%	約 90%
6~12 V	30%		約 60%	

- 1.當電解液濃度大、外加電壓大，提供較多能量，反應速率比較快，反應走動力學方向，電解 1A 族氯化物水溶液的陽極產物明顯 $\text{Cl}_{2(g)}$ 佔優勢。
- 2.當電解液濃度小、外加電壓小，反應速率比較慢，化學反應就會多考慮熱力學方向，故陽極產物 $\text{Cl}_{2(g)}$ 就優勢稍稍下降。
- 3.顯然在低電壓時，陽離子的種類會影響反應結果，查資料得離子移動率：
 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 分別是 5.2 、 7.62 、 $7.91(\mu_0 \cdot 10^8/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1})$ ，低濃度時如果陰陽離子移動率相差越多，越容易有濃度極化現象，進行該反應所需外加電壓越大，使反應更傾向熱力學方向，因此 4V 電解 0.1 M $\text{NaCl}_{(aq)}$ 時氯氣莫耳數比例明顯下降。

捌、結論

- 一、經由一連串的嘗試及改良，利用簡單的實驗室器材搭配生活中可得的材料，設計出由分度吸量管、白金絲、保鮮盒等所組成的一輕巧且準確的電解裝置，改善了傳統由 U 型管、大燒杯所組成的電解裝置之反應速率慢、操作不便、無法準確測量產物產量等缺點。並依據高中化學課程設計實驗方法可以精確測量陽極電解產物 O_2 及氯氣比例。
- 二、以電壓 6V 電解 1A 族及 2A 族氯化物水溶液，應修正教學習慣敘述之「電解高濃度食鹽水產生氯氣，電解低濃度食鹽水產生氧氣」，當濃度大於 0.5 M 時，氯氣所佔比例均約為 90%；當濃度變小，氯氣的比例逐漸減少，氧氣的比例逐漸增加：濃度為 0.1 M 時氯氣所佔比例下降到 60%；當濃度小於 0.015 M 時，氯氣所佔比例就小於 10%。電解 1A 族的 NaCl 、 KCl 兩者沒有因為陽離子種類不同而有明顯的實驗結果，而電解 2A 族的 CaCl_2 ，當濃度下降時，氯氣所佔比例下降較快，電解 SrCl_2 ，當濃度下降時，氯氣所佔比例下降較慢，電解其他兩種 2A 氯化物則沒有明顯的差異。
- 三、當外加電壓為 6~12 V， NaCl 、 KCl 濃度 0.5 M-2.0 M 時，電解陽極產物都約有 90% 的氯氣，反應走動力學路線；當外加電壓為 4 V， NaCl 、 KCl 濃度 0.1 M 時，陽極產物氯氣比例明顯下降，反應較傾向走熱力學路線。 NaCl 及 KCl 兩者可能由於離子移動率差異，電解 $\text{NaCl}_{(aq)}$ 得到的氯氣比例更低。
- 四、檢討本實驗：
 - (一)實驗所需時間甚長，動輒需電解半天一天，查資料得知若加界面活性劑，可讓電極更滑潤，讓氣泡能更快的離開電極表面，使得反應速率加快，期望將來能於此方面多加研究，增進實驗效率。
 - (二)氣體莫耳數的計算依據理想氣體方程式，但 $\text{O}_{2(g)}$ 的理想性不易估計修正。
 - (三)氧氣在水中的溶解度在實驗設計中「忽略」，顧理論上實驗中的產物 $\text{O}_{2(g)}$ 莫耳比例應該再稍增加一點，但應不影響實驗結果所能觀察歸納出的趨勢。

玖、參考資料與其他

一、高中化學課本

(一)高一基礎化學課本、實驗手冊。泰宇版。

(二)高二、高三化學課本。全華版。

二、歷屆全國科展作品說明書

(一)氫山氯水—環保電解實驗。40 屆。

(二)以銅為鏡，可以正硝酸。48 屆。

三、大學普通化學實驗。台大出版中心。

四、熊楚強、王月(2008)。電化學。台北縣：新文京。

【評語】 040210

研究對電解食鹽水產生氧氣及氯氣之現象作了相當深入的探討。研究結果有助於電解更深入的瞭解。尤其是溫度鹽類及過電壓對電解的影響。唯對數據的解釋宜更量化些。