

第二十屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA20-413

作品名稱：氯銅學的氫鋁行—氯離子、銅離子、氫離子對鋁金屬產氫的影響
探討

姓名：夏煒傑

關鍵字：產氫反應、氯離子催化、反應速率

目錄

摘要	1
壹、研究動機	2
貳、研究目的	2
參、研究設備及器材	3
肆、研究過程	4
伍、實驗主張討論與應用	25
陸、結論	27
柒、參考文獻資料	28

摘要

鋁的金屬性強，但氧化的速率通常很慢，因為外層氧化鋁薄膜阻礙內層鋁進一步反應，鋁與氫離子、銅離子反應皆是如此。本研究觀察到金屬鋁加入硫酸銅與鹽酸的混合溶液時，氫氣生成的速率會快速提升。

本研究改變銅離子、氯離子、氫離子濃度以及等重鋁的樣態，觀察氫氣生成的反應速率。發現三者對於產氫反應速率皆有一定的影響，氯離子的穿透對產氫反應有決定性的催化作用，銅離子的伽凡尼效應是產氫反應加速主因，而且鋁箔能有最佳的產氫反應速率。

我們透過微型實驗的觀察，提出鋁金屬氧化還原的整體反應機構，解釋了氯離子所扮演的角色，也對反應中銅離子析出銅的伽凡尼效應提出了描述。本研究鋁箔產氫最適反應速率，銅離子、氯離子、氫離子三種離子缺一不可。最後利用濃度和速率做出線性迴歸得到反應速率式 $r_{\text{H}_2} = 4.7[\text{Cu}^{2+}]^{2.1}[\text{H}^+]^{0.68}[\text{Cl}^-]^{1.6}$ 。

壹、 研究動機

偶然間看到一段國外氧化還原的實驗影片「極光焰舞」^[1]覺得非常有趣，在影片中硫酸銅 CuSO_4 與鹽酸 HCl 的水溶液當加入鋁箔 Al ，過程中大量的銅離子 Cu^{2+} 快速還原成金屬銅 Cu ，水溶液從深藍色褪至淡藍色，同時也產生大量的氫氣 H_2 ，當點燃氫氣時還能產生淡藍綠色的火焰，火焰就如同跳著舞的極光。

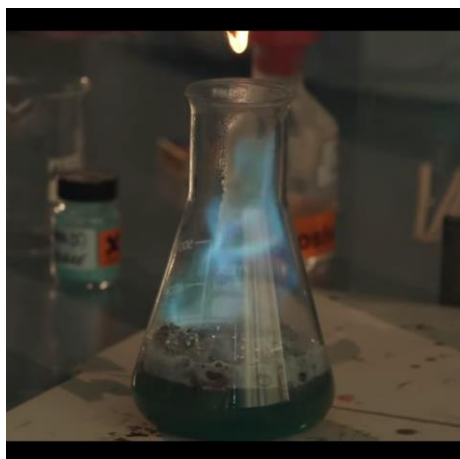


圖 1 極光焰舞影片^[1]

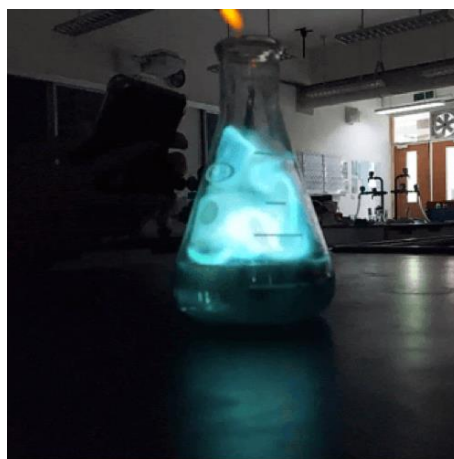


圖 2 自行還原影片實驗

出於好奇，我們想要深入探討這個反應背後的化學原理以及生成氫氣 H_2 的反應速率，並試著改變實驗變因，研究鋁金屬 Al 在硫酸銅 CuSO_4 和鹽酸 HCl 水溶液的產氫實驗中，各種反應物的進行過程以及對實驗結果的影響。我們預計將探討銅離子 Cu^{2+} 和鹽酸 HCl 在此反應中彼此間所扮演的角色，同時也研究他們對生成氫氣反應速率的影響。

貳、 研究目的

- 一、 探討銅離子 Cu^{2+} 濃度對產氫反應的影響。
- 二、 探討不同金屬陽離子對產氫反應的影響。
- 三、 探討氫離子 H^+ 對產氫反應的影響。
- 四、 探討氯離子 Cl^- 對產氫反應的影響。
- 五、 探討鋁金屬 Al 不同樣態（鋁箔、鋁片、鋁粉）對產氫反應的影響。
- 六、 探討生成氫氣 H_2 的反應速率與反應級數。
- 七、 以微型實驗探討各項離子對產氫反應的影響。
- 八、 探討不同鹵素陰離子對產氫反應的催化影響。

參、 研究設備及器材

一、 藥品

藥品用途	名稱
鋁金屬 Al	鋁箔、鋁片、鋁粉
金屬陽離子	硫酸銅 CuSO_4 、硫酸亞錳 MnSO_4 、硫酸汞 HgSO_4 、硫酸鋅 ZnSO_4
酸性溶液	鹽酸 HCl 、硫酸 H_2SO_4
鹵素離子固體	氟化鈉 NaF 、氯化鈉 NaCl 、溴化鈉 NaBr 、碘化鈉 NaI

二、 器材

抽氣過濾機	電子秤	秤量紙	刮勺	玻棒
磁石攪拌器	攪拌子	pH 計	烘箱	燒杯
安全吸球	吸量管	容量瓶	漏斗	水缸
攝影器材	橡皮塞	洗滌瓶	錐形瓶	量筒
布氏漏斗	培養皿	實驗衣	抽濾瓶	滴管
打火機	溫度計	密封袋	鐵架	濾紙

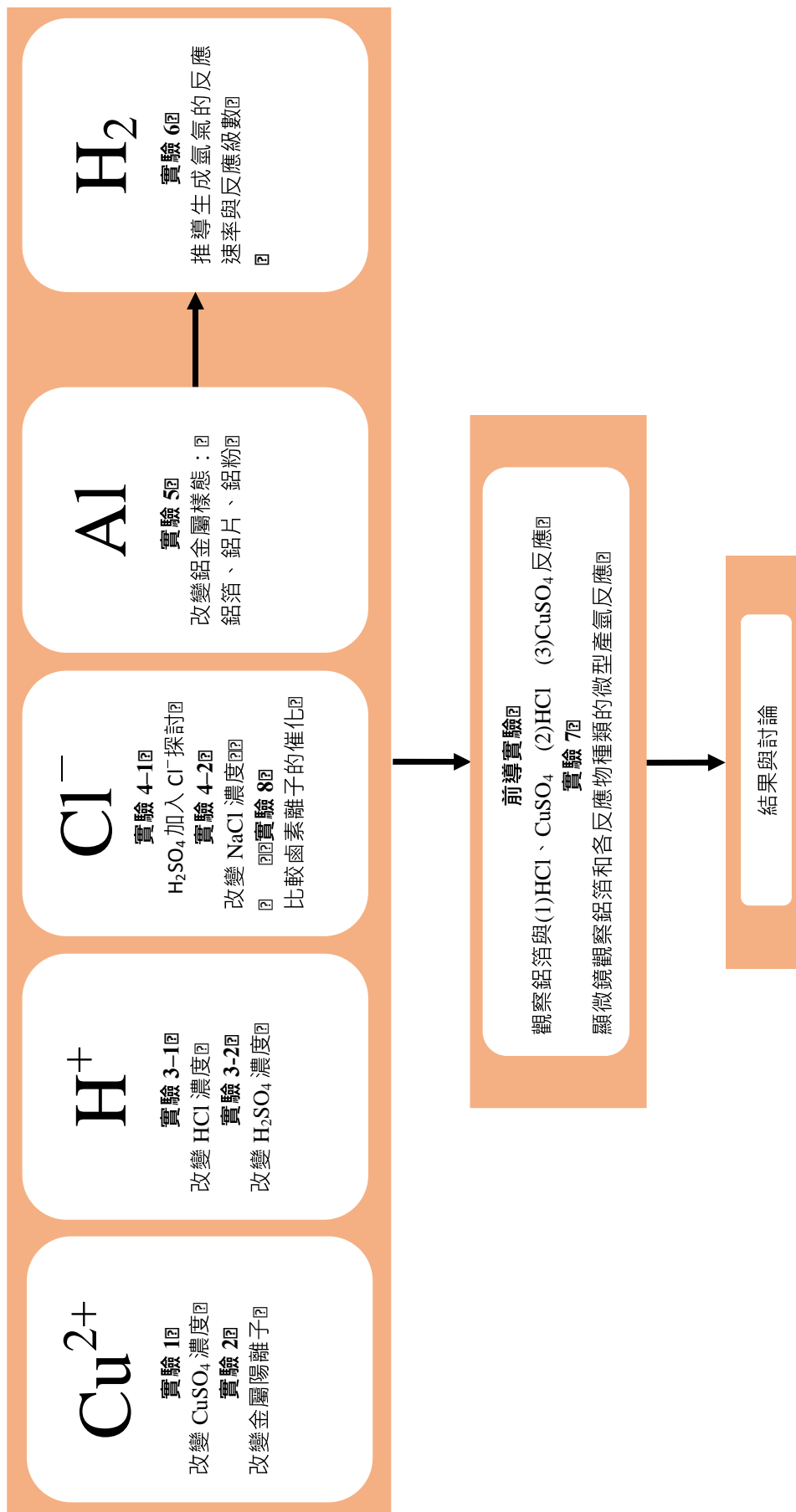
三、 實驗裝置



圖 3 排水集氣裝置

肆、研究過程

一、本實驗研究架構



二、文獻回顧與提出實驗主張

(一) 鋁金屬 Al 產氫反應的速率研究

Shmelev, Nikolaev, Lee, 與 Yim(2016)^[2]文獻研究提出鋁箔 Al 的產氫反應有不同處理方式：方法 1 鋁金屬與鹼性溶液 (KOH)；方法 2 鋁鍍銅；方法 3 鋁銅合金；方法 4 鋁片與銅離子 Cu^{2+} 、氯離子 Cl^- 。方法 1 為現行常見的產氫反應製作方式，以鹼性溶液洗去鋁金屬表面的氧化層，使活性大的鋁金屬產生氫氣；方法 2 與 3 的銅金屬 Cu 加速電子的傳遞，使產氫反應加速，最後，方法 4 產氫速率為方法 1 的 50 倍。Shmelev, Nikolaev, Lee, 與 Yim(2016) 指出方法 4 具有後續研究發展潛力，因為海水的主要成份含有氯離子，以海水作為反應的溶劑，希望將可替代鹼性溶劑的使用，並且使產氫速率更快。

(二) 產氫反應鋁金屬 Al 與銅離子 Cu^{2+} 、氫離子 H^+ 、氯離子 Cl^- 的反應過程

1. 氯離子 Cl^- 與酸性環境的加速催化

氯離子 Cl^- 易穿透的特性，氯離子會穿透鋁金屬 Al 的氧化層 Al_2O_3 取代氧原子，使鋁金屬氧化形成易溶於水的氯化物^[3] (氯化鋁 $\text{AlCl}_3(\text{aq})$)，因此當生成鋁離子 Al^{3+} 時就會脫離金屬表面 (圖 4)。根據鋁金屬的電位-pH 值圖^[4] (圖 5) 可知在酸性環境 pH 值小於 4 時，鋁金屬具有較高的金屬性會反應傾向形成鋁離子。

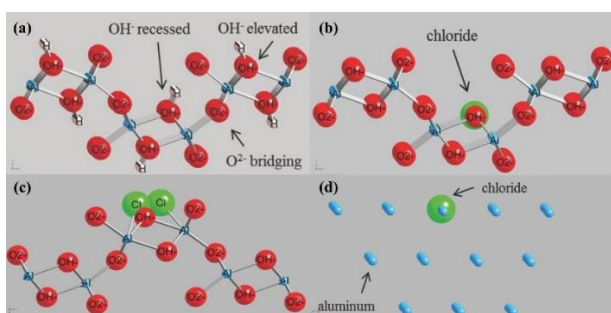
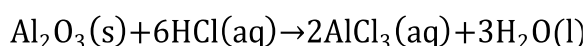


圖 4 氯離子 Cl^- 的加速催化^[3]

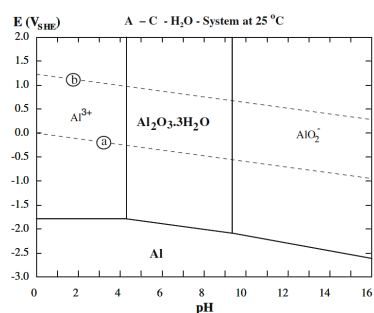
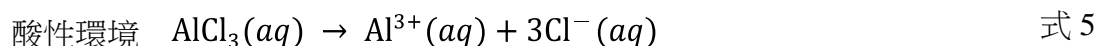
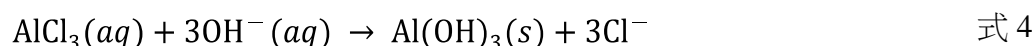
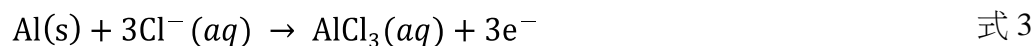


圖 5 鋁金屬 Al 的電位-pH 值圖^[4]

2. 水溶液中的氧化還原反應

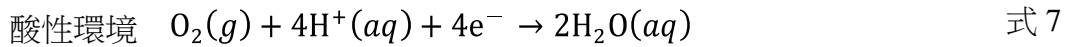
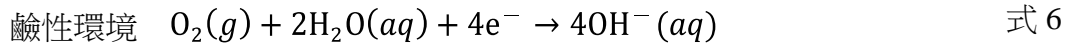
(1) 陽極反應：鋁金屬 Al 發生氧化反應



由上述反應過程中可知在酸性環境中氯離子 Cl^- 會被釋放出來 (式 5)，進一步再催化與鋁金屬 Al 產生反應 (式 3 式 4)，造成鋁金屬氧化不斷的釋出電子而形成鋁離子 Al^{3+} ，本研究中產氫反應的氯離子扮演催化劑的角色來加速反應。

(2) 陰極反應：氧氣 O_2 、氫離子 H^+ 、銅離子 Cu^{2+} 發生還原反應

a. 氧氣 O_2 還原



b. 氫離子 H^+ 生成氫氣 H_2



c. 銅離子 Cu^{2+} 生成銅金屬 Cu



本研究產氫反應的氧化還原中可以得知當鋁金屬 Al 氧化時，將會還原氧氣 O_2 、氫離子 H^+ 和銅離子 Cu^{2+} 等氧化劑，生成水 H_2O (式 7)、氫氣 H_2 (式 8)、銅金屬 Cu (式 9)，因此在收集氫氣的過程中會在銀白色的鋁箔上看見紅銅與氫氣的產生。本研究之氧化還原進行如圖 6 所示。

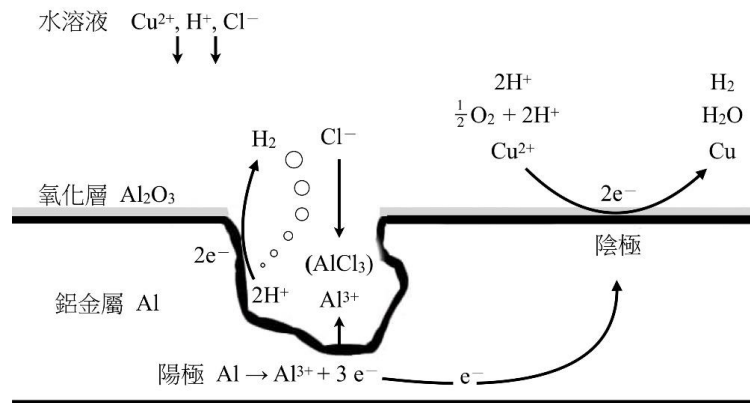


圖 6 本研究之氧化還原過程

3. 伽凡尼效應(Galvanic Effect)^[51]使氫氣 H_2 加速生成

本研究中的伽凡尼效應(Galvanic Effect)，當鋁金屬 Al (活性較大) 與附著在鋁箔上的銅金屬 Cu (活性較小)，形成局部伽凡尼電池(Galvanic Cell)，鋁金屬成為陽極而形成鋁離子 Al^{3+} ，銅金屬成為陰極而受到保護，並協助傳遞電子，加速氫離子 H^+ 生成氫氣 H_2 ，如圖 8。

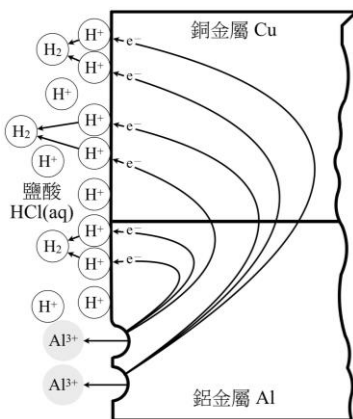


圖 7 伽凡尼效應

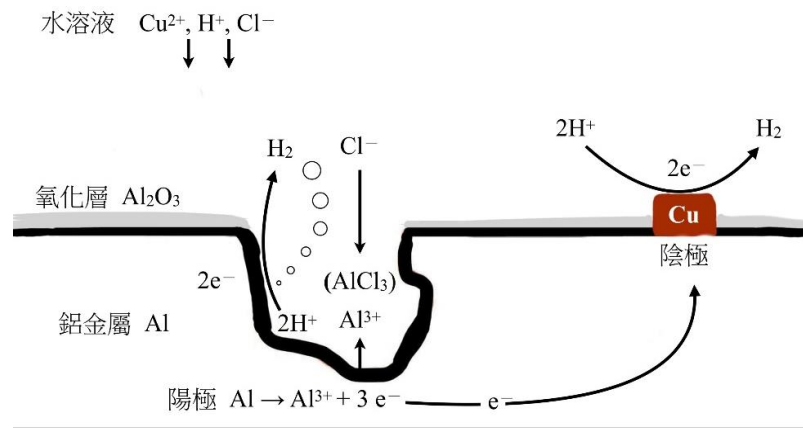


圖 8 本研究之伽凡尼效應 (Galvanic Effect)

(三) 缺一不可的快速產氫反應：銅離子 Cu^{2+} 、氫離子 H^+ 、氯離子 Cl^-

由上述反應關係中，在鋁金屬 Al 的氧化反應中，氯離子 Cl^- 催化鋁金屬失去電子，而還原反應裡生成氫氣 H_2 與銅金屬 Cu ，其中銅金屬的伽凡尼效應加速氫氣的生成，使整體產氫反應加速生成氫氣，整體反應過程如下圖 9。

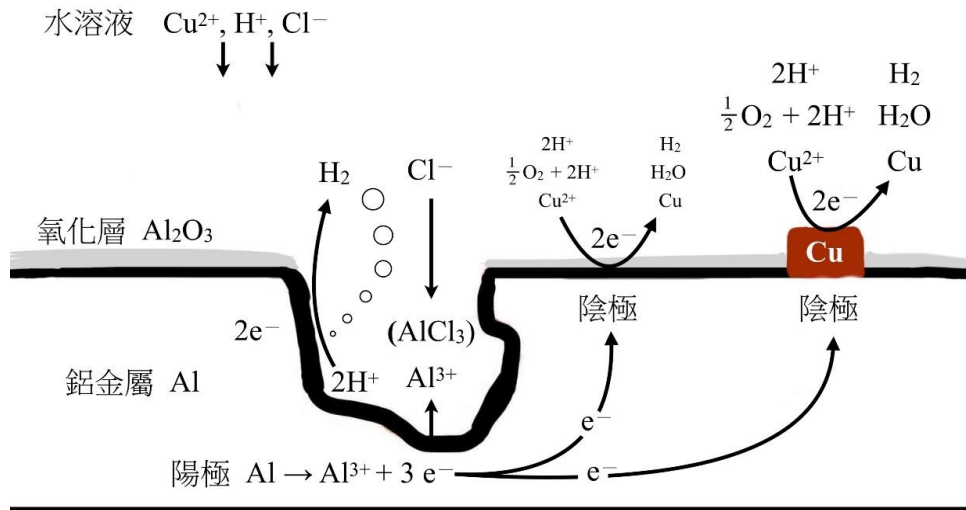


圖 9 本研究之產氫反應整體過程

(四) 本研究對於鋁金屬產氫反應的實驗主張

根據研究目的與文獻回顧，我們提出對於本研究實驗主張有：

1. 銅離子 Cu^{2+} 的伽凡尼效應是產氫反應加速主因
2. 鹵素離子皆可穿透鋁金屬氧化層起催化作用
3. 鋁金屬 Al 與金屬離子電位差愈大愈有明顯的產氫反應
4. 鋁金屬 Al 的表面積愈大產氫效果愈佳
5. 快速的鋁箔產氫反應：銅離子 Cu^{2+} 、氫離子 H^+ 、氯離子 Cl^- 缺一不可

三、研究方法

(一) 標準實驗流程

1. 室溫下，取抽濾瓶，加入攪拌子及「水溶液」100mL。
2. 打開加熱攪拌器至轉速三。
3. 加入 2.5×2.5 公分的鋁箔 Al 共 3 片(約 0.33 克)後密閉。
4. 以排水集氣法蒐集氫氣 H_2 ，並在第一顆氣泡產生時開始計時。
5. 紀錄 15 秒內的生成氫氣 H_2 體積及完全反應後的產量體積。
6. 點燃抽濾瓶內的氣體，紀錄焰色燃燒情況。
7. 標準實驗流程皆進行二重複。



圖 10 排水集氣法收集氫氣 H_2 (步驟 1、2 及 4)



圖 11 將 5x5 公分摺成 2.5x2.5 公分的鋁箔 Al (步驟 3)

四、研究流程

(一) 前導實驗

1. 實驗目的：反應物依序與鋁箔 Al 進行實驗，觀察產氫反應之產量與反應時長。
2. 實驗步驟
 - (1) 按照「**標準實驗流程**」配製三只錐形瓶 X、Y 和 Z。
 - (2) 錐形瓶 X 水溶液組成包含 1M 鹽酸 HCl 與 1M 硫酸銅 $CuSO_4$ 。
 - (3) 錐形瓶 Y 水溶液組成包含 1M 鹽酸 HCl。
 - (4) 錐形瓶 Z 水溶液組成包含 1M 硫酸銅 $CuSO_4$ 。

(二) 實驗 1

1. 實驗目的：探討不同的硫酸銅 $CuSO_4$ 濃度對產氫反應的影響。
2. 實驗步驟
 - (1) 按照「**標準實驗流程**」進行實驗 1。
 - (2) 水溶液組成包含 1M 鹽酸 HCl 與不同濃度硫酸銅 $CuSO_4$ ，並進行二重複。
 - (3) 改變硫酸銅 $CuSO_4$ 濃度為 1M、0.5M、0.25M。

(三) 實驗 2

1. 實驗目的：探討不同金屬陽離子(Cu^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Zn^{2+})對產氫反應的影響。
2. 實驗步驟
 - (1) 按照「**標準實驗流程**」進行實驗 2。
 - (2) 水溶液組成包含 1M 鹽酸 HCl 與不同金屬陽離子，並進行二重複。
 - (3) 改變金屬陽離子種類： Cu^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Zn^{2+} ，濃度皆為 0.1M。

(四) 實驗 3-1

1. 實驗目的：探討不同的鹽酸 HCl 濃度對產氫反應的影響。

2. 實驗步驟

- (1) 按照「**標準實驗流程**」進行實驗 3-1。
- (2) **水溶液**組成包含 1M 硫酸銅 CuSO_4 與不同濃度鹽酸 HCl ，並進行二重複。
- (3) 改變鹽酸 HCl 濃度為 2M、1M、0.5M、0.25M。

(五) 實驗 3-2

1. 實驗目的：改變酸的種類，探討不同濃度的硫酸 H_2SO_4 對產氫反應的影響。

2. 實驗步驟

- (1) 按照「**標準實驗流程**」進行實驗 3-2。
- (2) **水溶液**組成包含 1M 硫酸銅 CuSO_4 與不同硫酸 H_2SO_4 濃度。
- (3) 改變硫酸 H_2SO_4 濃度分別為 2M、1M、0.5M、0.25M，並進行二重複。
- (4) 由於反應過慢，實驗 3-2 採用靜置模式，放置大約三天（不攪拌）。

(六) 實驗 4-1

1. 實驗目的：以硫酸 H_2SO_4 作為氫離子 H^+ 來源，探討氯離子 Cl^- 的存在對產氫反應的影響。

2. 實驗步驟

- (1) 按照「**標準實驗流程**」進行實驗 4-1。
- (2) 水溶液組成包含 1M 硫酸銅 CuSO_4 和 1M 硫酸 H_2SO_4 ，並進行二重複。
- (3) 當反應 5 分鐘後，實驗組加入 0.1 莫耳的氯化鈉 NaCl 。
- (4) 當反應 5 分鐘後，對照組不加入氯化鈉 NaCl 。

(七) 實驗 4-2

1. 實驗目的：探討不同的氯離子 Cl^- 來源(NaCl)對產氫反應的影響。

2. 實驗步驟

- (1) 按照「**標準實驗流程**」進行實驗 4-2。
- (2) **水溶液**組成包含 1M 硫酸銅 CuSO_4 與不同濃度的氯化鈉 NaCl 。
- (3) 改變氯化鈉 NaCl 濃度分別為 1M、0.5M、0.25M，並進行二重複。

(八) 實驗 5

1. 實驗目的：改變鋁金屬 Al 的樣態，探討鋁箔、鋁片、鋁粉對產氫反應的影響。

2. 實驗步驟

- (1) 按照「**標準實驗流程**」進行實驗 5。
- (2) **水溶液**組成包含 1M 硫酸銅 CuSO_4 和 1M 鹽酸 HCl ，並進行二重複。
- (3) 鋁箔組加入鋁箔 0.33 克。
- (4) 鋁片組加入鋁片 0.33 克。
- (5) 鋁粉組加入鋁粉 0.33 克。

(九) 實驗 6

1. 實驗目的：推導生成氫氣 H_2 的反應速率與反應級數。

2. 實驗步驟

- (1) 假設產氫反應速率方程式為 $r_{H_2} = k[Cu^{2+}]^a[H^+]^b[Cl^-]^c$ 。
- (2) 按照「標準實驗流程」進行實驗 8，水溶液組成如(3)、(4)、(5)步驟。
- (3) 計算銅離子 Cu^{2+} 之反應級數，固定 1M 的氫離子 H^+ 與氯離子 Cl^- ，
改變銅離子 Cu^{2+} 濃度為：1M、0.8M、0.6M、0.4M、0.2M，並進行五重複。
- (4) 計算氫離子 H^+ 之反應級數，固定 1M 的銅離子 Cu^{2+} 與氯離子 Cl^- ，
改變氫離子 H^+ 濃度為：1M、0.8M、0.6M、0.4M、0.2M，並進行五重複。
- (5) 計算氯離子 Cl^- 之反應級數，固定 1M 的銅離子 Cu^{2+} 與 0.2M 的氫離子 H^+ ，
改變氯離子 Cl^- 濃度為：1M、0.8M、0.6M、0.4M、0.2M，並進行五重複。

(十) 實驗 7-1

1. 實驗目的：以顯微鏡觀察鋁箔 Al 和各反應物組合的微型產氫反應。

2. 實驗步驟

- (1) 準備蒸餾水及配置硫酸銅 $CuSO_4$ 、鹽酸 HCl 、硫酸 H_2SO_4 、氯化鈉 $NaCl$ 等種溶液各別濃度為 0M、0.1M、1M。
- (2) 在鋁箔上按濃度 0M、0.1M、1M 將銅離子 Cu^{2+} 、氫離子 H^+ 、氯離子 Cl^- 等三種離子溶液彼此依序混合反應，共有 21 種反應組合。
- (3) 以顯微鏡觀察各種反應作用，並以手機錄影。
- (4) 每 3 秒截圖記錄結果共 6 張截圖，依序記錄如下如圖 12。

1 第 3 秒	2 第 6 秒	3 第 9 秒
4 第 12 秒	5 第 15 秒	6 第 18 秒

圖 12 實驗 6 全反應組，微型產氫反應實驗記錄

- (5) 將有氣泡生成的反應組合，放慢影片至 0.5 倍播放，每七秒截圖紀錄實驗結果共 5 張截圖，依序記錄如圖 13。

1 第 7 秒	2 第 14 秒	3 第 21 秒	4 第 28 秒	5 第 35 秒
------------	-------------	-------------	-------------	-------------

圖 13 實驗 6 氣泡生成組，微型產氫反應實驗記錄

(十一) 實驗 7-2

1. 實驗目的：以顯微鏡觀察鋁箔 Al 和銅離子 Cu^{2+} 、汞離子 Hg^{2+} 的微型產氫反應。

2. 實驗步驟

- (1) 準備蒸餾水及配置硫酸銅 CuSO_4 、鹽酸 HCl 、硫酸汞 HgSO_4 等 3 種溶液各別濃度為 1M。
- (2) 在鋁箔上將銅離子 Cu^{2+} 、汞離子 Hg^{2+} 與鹽酸 HCl 等溶液彼此依序混合反應，共有 2 種反應組合。
- (3) 以顯微鏡觀察各種反應作用，並以手機錄影並截圖。

(十二) 實驗 8

1. 實驗目的：探討不同鹵素陰離子對產氫反應的催化效果。

2. 實驗步驟

- (1) 按照「標準實驗流程」進行實驗 8。
- (2) 水溶液組成包含 1M 硫酸銅 CuSO_4 與不同鹵素離子，並進行二重複。
- (3) 改變鹵素離子種類： Cl^- 、 F^- 、 Br^- 、 I^- ，皆為 0.5 莫耳加入溶液。

五、實驗結果與討論

(一) 前導實驗：反應物依序與鋁箔 Al 進行實驗，觀察產氫反應之產量與反應時長。

1. 前導實驗結果

表 1 前導實驗 各錐形瓶反應過程

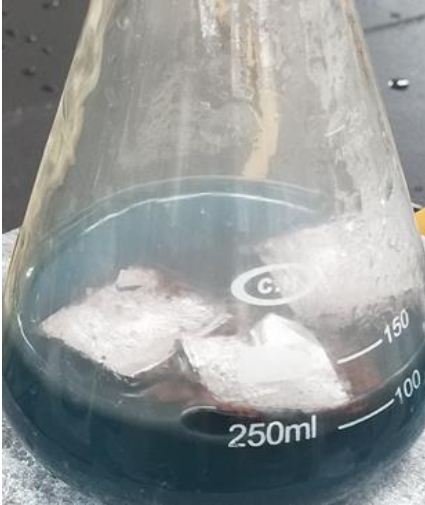
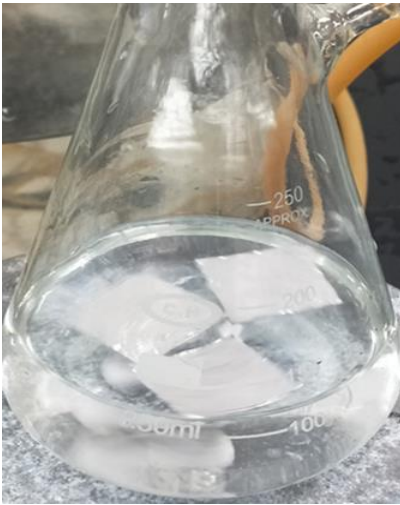
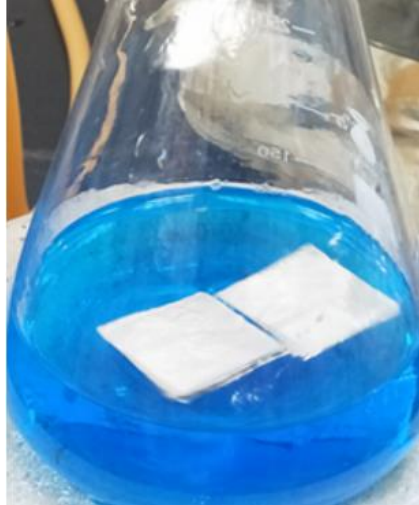
X 瓶：鋁箔、鹽酸、硫酸銅	Y 瓶：鋁箔、鹽酸	Z 瓶：鋁箔、硫酸銅
		

表 2 前導實驗 各錐形瓶反應結果

錐形瓶	水溶液組成			氫氣 H_2 產量(mL)	反應時長
	鋁箔 Al	鹽酸 HCl 濃度	硫酸銅 CuSO_4 濃度		
X	0.33g	1M	1M	90.5	2 分鐘
Y	0.32g	1M	—	382.5	1 天
Z	0.33g	—	1M	0	11 天

2. 前導實驗討論

以錐形瓶 X 來比較錐形瓶 Y 與 Z 的反應時長關係可知，鋁金屬 Al 置換成銅金屬 Cu 是相當緩慢的，而鋁金屬在鹽酸 HCl 中的反應較快，似乎是當硫酸銅 CuSO_4 與鹽酸少了對方，

速率都變得非常慢！在錐形瓶 X 三者反應物的作用下，雖可使產氫速率變快，但最終氫氣 H₂ 產量卻變少了，鹽酸與硫酸銅之間的濃度比例，似乎有著競爭關係。

在表 2 結果可得知，當約 0.3g 的鋁箔 Al 完全氧化時可釋出 0.03 莫耳的電子（式 10）。在錐形瓶 Y 反應中當只有鹽酸 HCl 與鋁箔的情況下，氫氣 H₂ 產量平均高達 382.5mL，生成 0.0156 mole 的氫氣（式 11），又由式 12 可知氫離子 H⁺ 得到電子莫耳數為 0.03 莫耳，此實驗反應相當完全。



$$PV = nRT \Rightarrow 1 \times \left(\frac{382.5}{1000} \right) = n_{\text{H}_2} \times 0.082 \times 298 \Rightarrow n_{\text{H}_2} = 0.0156 \text{ mole} \quad \text{式 11}$$



(二) 實驗 1：探討不同的硫酸銅 CuSO₄ 濃度對產氫反應的影響。

1. 實驗 1 結果

表 3 實驗 1 不同硫酸銅 CuSO₄ 濃度對產氫反應結果

硫酸銅 CuSO ₄ 濃度	鹽酸 HCl 濃度	氫氣 H ₂ 產量(mL)	r _{H₂} (mL/s)
1M	1M	90.5	2.75
0.5M	1M	94.0	1.17
0.25M	1M	131.0	0.40

註：速率表示法 r_{H₂}(mL/s) 為前 15 秒內的氫氣產量(mL)除以 15 秒(s)，以下實驗皆同。

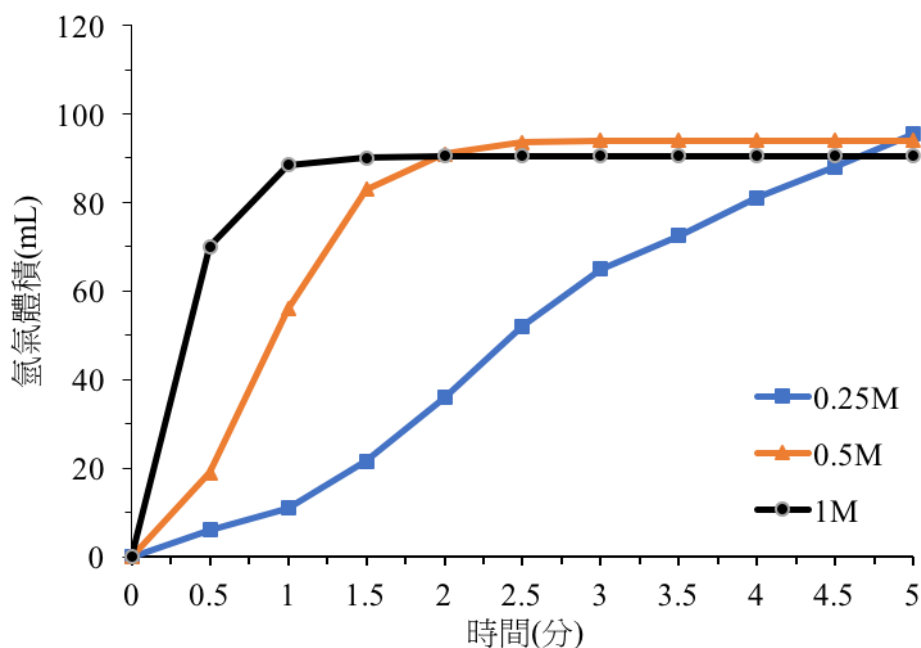


圖 14 實驗 1 不同硫酸銅濃度[CuSO₄]生成氫氣體積—時間關係圖

2. 實驗 1 討論

由上方表 3 的數據顯示，硫酸銅 CuSO_4 濃度愈大，產生氫氣 H_2 速度愈快，但氫氣的產量較少。

我們的推測根據鋁 Al 與銅 Cu 的氧化電位差異較大（附錄 1 式 15、式 19），使鋁金屬較能產生氧化反應，釋出電子，因此一開始溶液中的電子較多，產氫速率較快。但由最終產量得知，1M 硫酸銅為濃度最高生成的氫氣 H_2 產量卻是最少，我們推測硫酸銅 CuSO_4 與鹽酸 HCl 兩者為競爭關係。隨著硫酸銅濃度的增加，電子被還原電位比氫離子 $\text{H}^+(0\text{V})$ 更高的銅離子 $\text{Cu}^{2+}(0.34\text{V})$ 所搶走，於是使最後產生的產物粗銅重增加，氫氣減少。銅離子較氫離子更容易獲得電子。故硫酸銅濃度愈大，氫氣產生速率愈快，伽凡尼效應愈明顯，但最終氫氣產量較少。

(三) 實驗 2：探討不同金屬陽離子(Cu^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Zn^{2+})對產氫反應的影響。

1. 實驗 2 結果

表 4 實驗 2 探討不同金屬陽離子(Cu^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Zn^{2+})對產氫反應結果

#	水溶液組成			氫氣 H_2 產量(mL)	反應時長
	鋁箔 Al	鹽酸 HCl 濃度	0.1M 陽離子		
1	0.33g	1M	—	>250	1 天
2	0.33g	1M	Mn^{2+}	>250	1 天
3	0.33g	1M	Zn^{2+}	>250	1 天
4	0.33g	1M	Cu^{2+}	236	20 分
5	0.33g	1M	Hg^{2+}	>250	1.5 小時

2. 實驗 2 討論

由表 4 的實驗結果可知，銅離子 Cu^{2+} 與汞離子 Hg^{2+} 能有效加速氫氣 H_2 的產生，反應時長由一天縮短為數小時甚至數分鐘。推測銅離子與汞離子的還原電位較氫離子 H^+ 電位高，使鋁金屬 Al 氧化反應更容易發生，伽凡尼效應愈明顯，使氫離子更容易形成氫氣。

銅離子 Cu^{2+} 的加速效果甚至較汞離子 Hg^{2+} 佳，推測為汞離子還原為汞金屬 Hg 後，密度較大沉於溶液底部不利於鋁金屬 Al 傳遞電子，使汞離子反應較銅離子的產氫反應慢。

亞錳離子 Mn^{2+} 與鋅離子 Zn^{2+} 不能加速氫氣 H_2 產生的速率，反應時間仍為一天。推測亞錳離子與鋅離子的還原電位較氫離子 H^+ 電位低，無法使鋁金屬 Al 的氧化反應更容易發生，亞錳金屬與鋅金屬置換反應更慢，亦不利於鋁金屬傳遞電子，因此生成氫氣速率緩慢。

(四) 實驗 3-1：探討不同的鹽酸 HCl 濃度對產氫反應的影響。

1. 實驗 3-1 結果

表 5 實驗 3-1 探討不同的鹽酸 HCl 濃度對產氫反應結果

鹽酸 HCl 濃度	氫氣 H_2 產量(mL)	$r_{\text{H}_2}(\text{mL/s})$
2M	156.5	10.483
1M	86.75	4.200
0.5M	68.75	2.683
0.25M	63.00	1.150

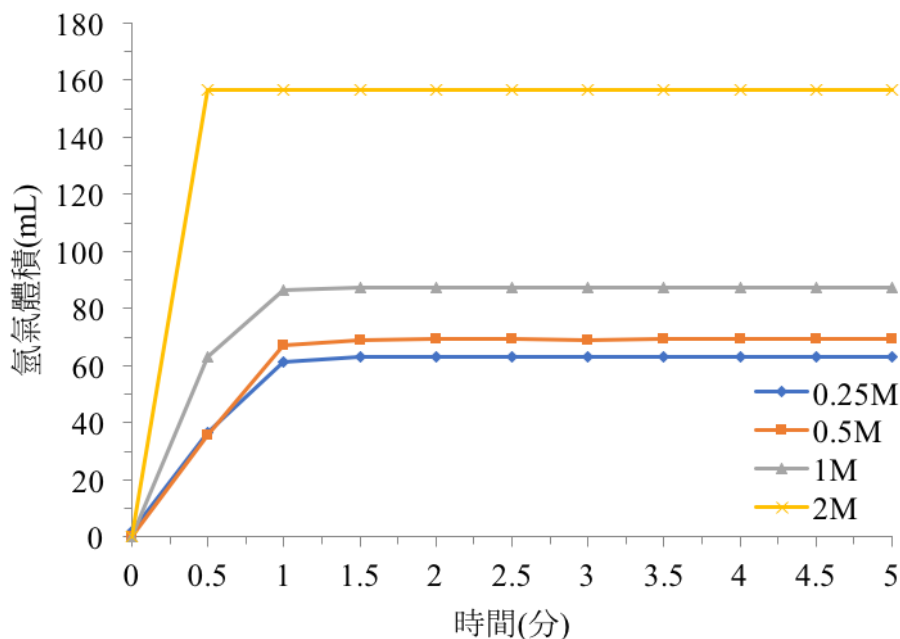


圖 15 實驗 3-1 不同鹽酸濃度[HCl]的氫氣體積—時間關係圖

2. 實驗 3-1 討論

由上方的表 5 和圖 15 顯示，當鹽酸 HCl 濃度愈大，氫氣 H₂ 產生速度愈快，且最終產量也愈最多，跟實驗 1 預測相同：鹽酸與硫酸銅 CuSO₄ 之間的濃度比例，似乎有著競爭關係。

根據實驗 3-1 結果，我們做個進一步的推測：當鹽酸 HCl 濃度愈大，氫氣 H₂ 產生速率愈快也產出最多的氫氣。而鹽酸具有氫離子 H⁺ 和氯離子 Cl⁻，我們想以不同的酸進行實驗，於是進行實驗 3-2，觀察鹽酸和硫酸 H₂SO₄ 產氫反應比較。

(五) 實驗 3-2：改變酸的種類，探討不同濃度的硫酸 H₂SO₄ 對產氫反應的影響。

1. 實驗 3-2 結果

表 6 實驗 3-2 探討不同濃度的硫酸 H₂SO₄ 對產氫反應結果

硫酸 H ₂ SO ₄ 濃度	氫氣 H ₂ 產量(mL)
2M	0
1M	0
0.5M	0
0.25M	0

2. 實驗 3-2 討論

根據表 6 結果顯示，硫酸 H₂SO₄ 不論濃度高低，靜置 3 天幾乎都不產生氫氣 H₂！我們推測當溶液中沒有氯離子 Cl⁻，即使有銅離子 Cu²⁺、氫離子 H⁺，也無法產生氫氣 H₂。於是設計實驗 4-1，比較加入氯離子對產氫反應的影響。

(六) 實驗 4-1：以硫酸 H_2SO_4 作為氫離子 H^+ 來源，探討氯離子 Cl^- 的存在對產氫反應的影響。

1. 實驗 4-1 結果

表 7 實驗 4-1 探討氯離子 Cl^- 的存在對產氫反應結果

組別	氯化鈉 NaCl 濃度	氫氣 H_2 產量(mL)
實驗組	1M	113
對照組	0M	0

2. 實驗 4-1 討論

根據表 7 可知，當產氫反應改為硫酸 H_2SO_4 作為氫離子 H^+ 來源下，原本的產氫反應將不產生氫氣 H_2 ，但實驗組的過程中當反應進行 5 分鐘後，加入 0.1 莫耳的氯化鈉 NaCl ，產氫反應立即產生氫氣，證實了產生氫氣需要氯離子的催化。

(七) 實驗 4-2：探討不同的氯離子 Cl^- 來源(NaCl)對產氫反應的影響。

1. 實驗 4-2 結果

表 8 實驗 4-2 不同的氯離子 Cl^- 來源(NaCl)對產氫反應的影響

氯離子濃度 $[\text{Cl}^-]$	氫氣 H_2 產量(mL)	r_{H_2} (mL/s)
1M	71.50	0.666
0.5M	62.00	0.266
0.25M	59.75	0.216

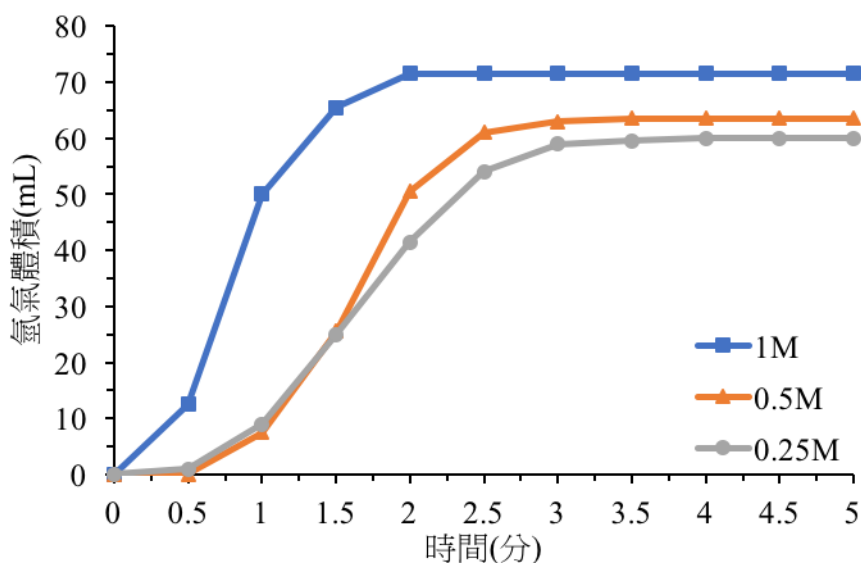


圖 16 實驗 4-2 不同氯化鈉濃度 $[\text{NaCl}]$ 的氫氣體積-時間關係圖

2. 實驗 4-2 討論

實驗 4-2 結果發現，在表 8 與圖 16 比較可知，氯化鈉 NaCl 濃度對於氫氣 H_2 最終產量不具有很大的差異，皆為 60mL 左右，而氯離子 Cl^- 濃度愈大，產氫速率愈快。

綜合上述（實驗 3 與 4）比較，我們推測：氫離子 H^+ 濃度愈大，氫氣 H_2 產量和產氫速率皆愈大。故氯離子 Cl^- 的催化只影響速率，氫離子 H^+ 則影響產量與速率。

(八) 實驗 5：改變鋁金屬 Al 的樣態，探討鋁箔、鋁片、鋁粉對產氫反應的影響。

1. 實驗 5 結果

表 9 實驗 5 探討鋁箔、鋁片、鋁粉對產氫反應過程

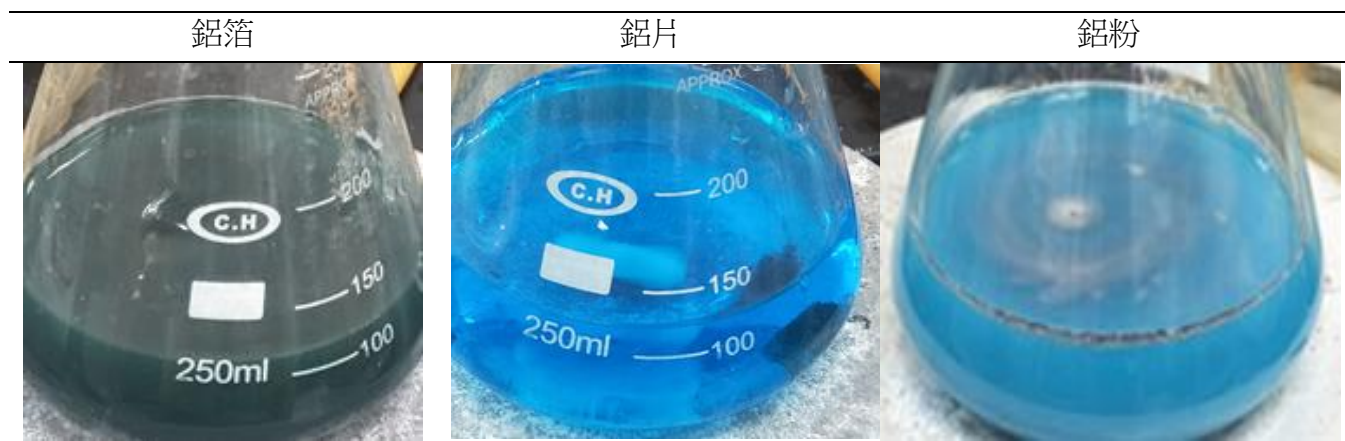


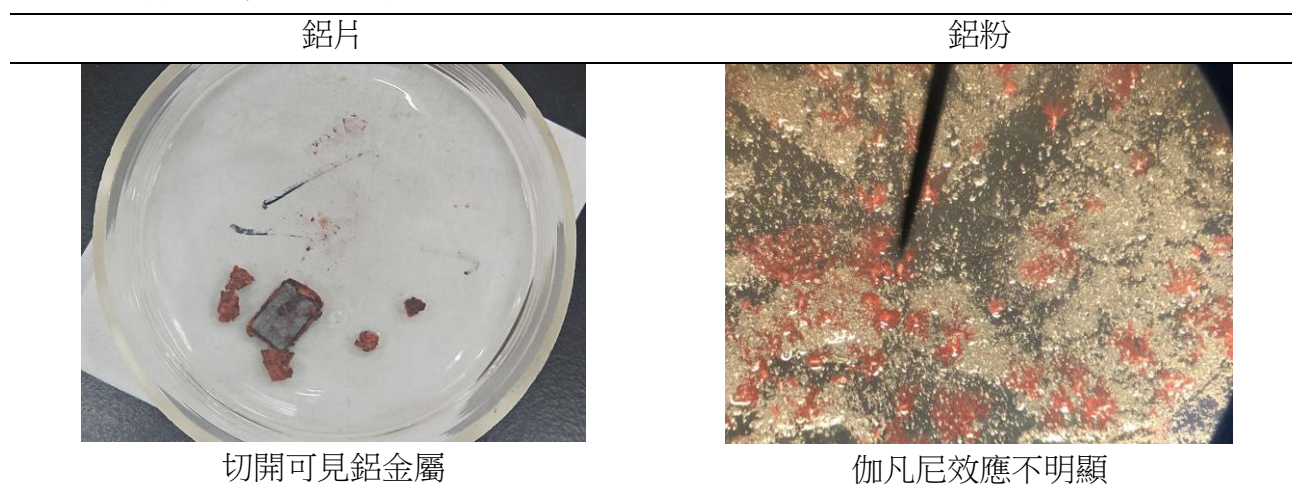
表 10 實驗 5 探討鋁箔、鋁片、鋁粉對產氫反應結果

鋁金屬 Al	氫氣 H ₂ 產量(mL)	反應時長
鋁箔	90.5	2 分鐘
鋁片	38	3 天
鋁粉	30	3 天

2. 實驗 5 討論

依據表 10 結果，鋁箔組的產氫反應，不但氫氣 H₂ 產量最多且反應速率也是最快的。故後續的實驗皆採用鋁箔進行產氫反應。

表 11 鋁片與鋁粉反應結果



鋁片組的氫氣 H₂ 產量明顯比鋁箔組少，當切開產物後尚可發現銀白色的鋁金屬，推測溶液只與外層的鋁金屬進行反應，產生氫氣與銅金屬包覆阻礙反應，使內層的鋁金屬反應緩慢。

鋁粉組反應速率並沒有預期的快，氫氣 H₂ 量也很少，我們推測鋁粉皆較鋁箔與鋁片分散，伽凡尼效應不完整，鋁金屬 Al 將無法連續傳遞電子給銅離子 Cu²⁺ 與氫離子 H⁺，只能在單一鋁金屬 Al 顆粒進行還原銅離子或氫離子反應，因此鋁粉組的氫氣產量較少且反應速率較慢。

(九) 實驗 6：推導生成氫氣 H_2 的反應速率與反應級數。

1. 實驗 6 結果

實驗 6 改變各反應物濃度，銅離子 Cu^{2+} 、氫離子 H^+ 以及氯離子 Cl^- 濃度進行產氫反應，我們記錄 15 秒內氫氣 H_2 產量，換算成氫氣的生成速率 r_{H_2} ，然後代入產氫反應的速率方程式： $r_{H_2}=k[Cu^{2+}]^a[H^+]^b[Cl^-]^c$ ，以線性迴歸求出銅離子 Cu^{2+} 、氫離子 H^+ 以及氯離子 Cl^- 的反應級數及速率常數 k 。

線性迴歸方法如下，以求出銅離子 Cu^{2+} 濃度為例：

(1) 將 $r_{H_2}=k[Cu^{2+}]^a[H^+]^b[Cl^-]^c$ 的 $k[H^+]^b[Cl^-]^c$ 視為定值 k' 。

(2) 將 $r_{H_2}=k'[Cu^{2+}]^a$ 式子左右兩項取 \log 運算，得

$$\log r_{H_2} = a \log [Cu^{2+}] + \log k'$$

(3) 以 $\log r_{H_2}$ 為縱軸、 $\log [Cu^{2+}]$ 為橫軸作圖，斜率 a 為反應物 $[Cu^{2+}]$ 之級數。

表 12 實驗 6 計算銅離子 Cu^{2+} 之反應級數（實驗溫度：20 °C）

實驗代號	$[Cu^{2+}]$ (M)	$[H^+]$ (M)	$[Cl^-]$ (M)	15 秒內氫氣體積 V_{H_2} (mL)					r_{H_2} (mL/s)
				1	2	3	4	5	
A0	1M	1M	1M	66	68	70	75	71	4.7
A1	0.8M	1M	1M	46	17	28	20	65	2.3
A2	0.6M	1M	1M	12	10	19	18	13	0.96
A3	0.4M	1M	1M	10	9	10	4	6	0.48
A4	0.2M	1M	1M	1.7	2.4	2.2	2.6	1.7	0.14

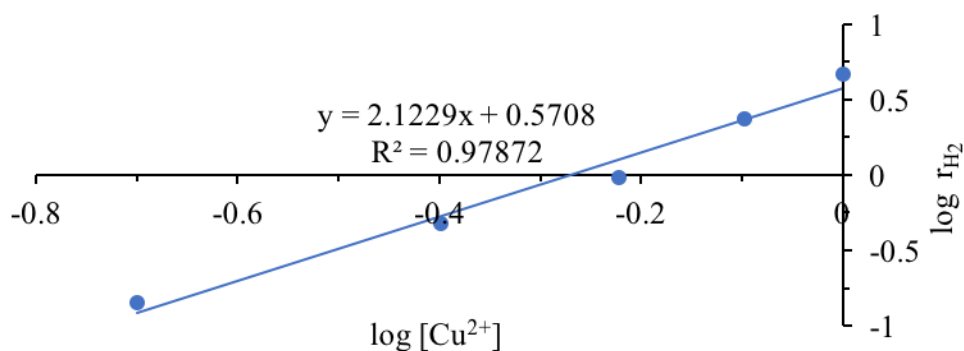


圖 17 實驗 6 $\log r_{H_2}$ 與 $\log [Cu^{2+}]$ 之關係圖

表 13 實驗 6 計算氫離子 H^+ 之反應級數 (實驗溫度：19 °C)

實驗代號	$[Cu^{2+}]$ (M)	$[H^+]$ (M)	$[Cl^-]$ (M)	15 秒內氫氣體積 V_{H_2} (mL)					r_{H_2} (mL/s)
				1	2	3	4	5	
B0	1M	1M	1M	66	68	70	75	71	4.7
B1	1M	0.8M	1M	60	68	67	76	42	4.2
B2	1M	0.6M	1M	56	55	38	54	63	3.4
B3	1M	0.4M	1M	44	38	35	34	27	2.4
B4	1M	0.2M	1M	33	30	17	25	18	1.6

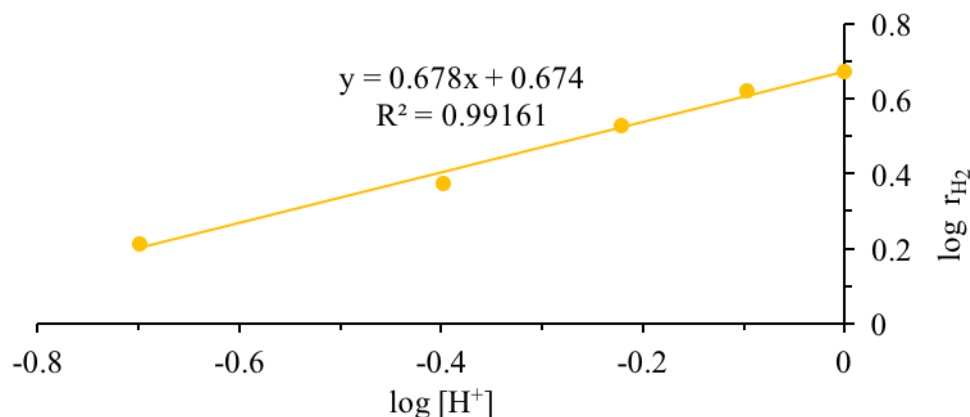


圖 18 實驗 6 $\log r_{H_2}$ 與 $\log [H^+]$ 之關係圖

表 14 實驗 6 計算氯離子 Cl^- 之反應級數 (實驗溫度：19 °C)

實驗代號	$[Cu^{2+}]$ (M)	$[H^+]$ (M)	$[Cl^-]$ (M)	15 秒內氫氣體積 V_{H_2} (mL)					r_{H_2} (mL/s)
				1	2	3	4	5	
C0	1M	0.2M	1M	24	33	22	28	28	1.7
C1	1M	0.2M	0.8M	28	19	5	5	32	1.2
C2	1M	0.2M	0.6M	15	13	11	7	6	0.69
C3	1M	0.2M	0.4M	6	4	9	6	9	0.45
C4	1M	0.2M	0.2M	1.2	0.8	4.0	2.3	1.7	0.13

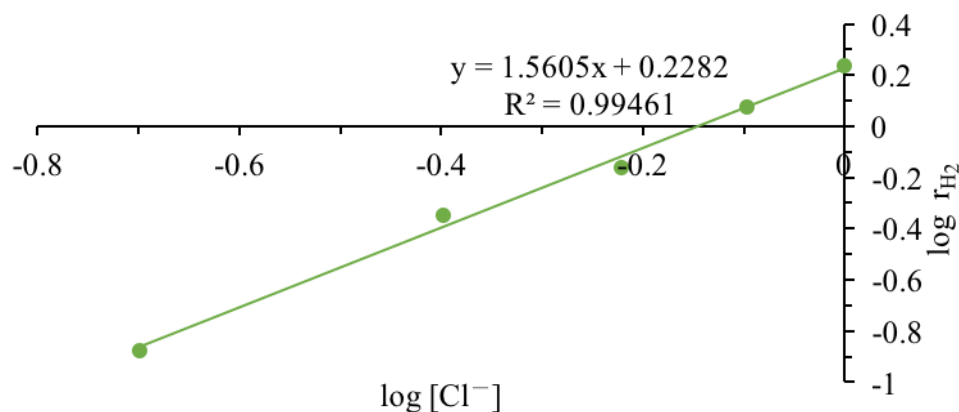


圖 19 實驗 6 $\log r_{H_2}$ 與 $\log [Cl^-]$ 之關係圖

2. 實驗 6 討論

表 15 實驗 6 銅離子 Cu^{2+} 、氫離子 H^+ 以及氯離子 Cl^- 的反應級數及相關係數 R^2

線性迴歸法	$[\text{Cu}^{2+}]$	$[\text{H}^+]$	$[\text{Cl}^-]$
反應級數	2.1	0.68	1.6
相關係數 R^2	0.9787	0.9916	0.9946

我們經由表 15 得知，依照反應速率可求出 $r_{\text{H}_2} = k[\text{Cu}^{2+}]^{2.1}[\text{H}^+]^{0.68}[\text{Cl}^-]^{1.6}$ ，銅離子 Cu^{2+} 的反應級數是三者之中最大的，其濃度為影響產氫反應速率的主要關鍵因子，以實驗代號 A0 與 B0 可求出速率常數 k 為 $4.7\text{mL}^1\text{M}^{-3.38}\text{s}^{-1}$ ，為了確保線性迴歸的精準度，我們也回推了實驗 7 之 r_{H_2} 數值。

表 16 實驗 6 產氫速率實驗 r_{H_2} 與理論 r_{H_2} 比較

實驗代號	$[\text{Cu}^{2+}]$ (M)	$[\text{H}^+]$ (M)	$[\text{Cl}^-]$ (M)	實驗 r_{H_2} (mL/s)	理論 r_{H_2} (mL/s)
A1	0.8M	1M	1M	2.3	2.9
A2	0.6M	1M	1M	0.96	1.6
A3	0.4M	1M	1M	0.48	0.7
A4	0.2M	1M	1M	0.14	0.16
B1	1M	0.8M	1M	4.2	4.0
B2	1M	0.6M	1M	3.4	3.3
B3	1M	0.4M	1M	2.4	2.5
B4	1M	0.2M	1M	1.6	1.6
C1	1M	0.2M	0.8M	1.2	1.1
C2	1M	0.2M	0.6M	0.69	0.69
C3	1M	0.2M	0.4M	0.45	0.36
C4	1M	0.2M	0.2M	0.13	0.11

由表 16 的實驗結果比較表可以得知，理論數值和實驗數值接近，可以確定此速率方程式 $r_{\text{H}_2} = 4.7[\text{Cu}^{2+}]^{2.1}[\text{H}^+]^{0.68}[\text{Cl}^-]^{1.6}$ 各反應物的級數應該是接近實驗結果。

(十一) 實驗 7-1：以顯微鏡觀察鋁箔 Al 和各反應物組合的微型產氫反應。

1. 實驗 7-1 結果

表 17 實驗 7-1 以顯微鏡觀察 18 秒內鋁箔 Al 與各溶液的微型產氫反應全組合結果

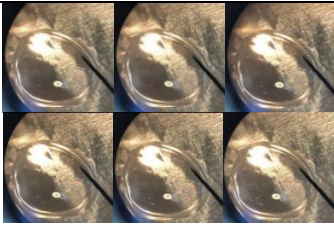
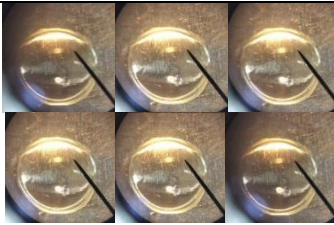
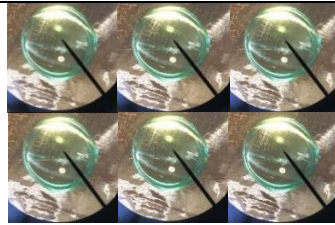
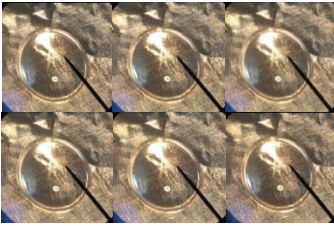

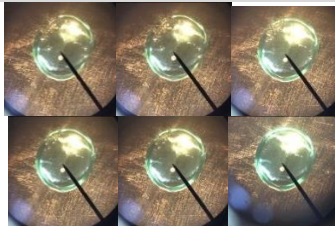
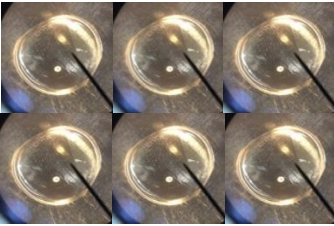
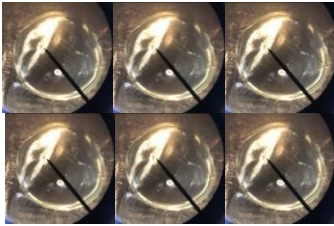
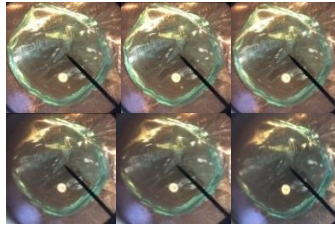
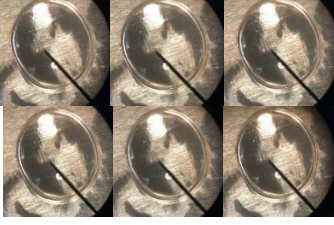
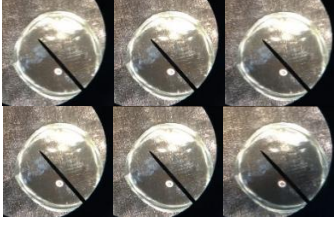
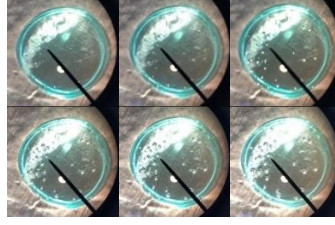
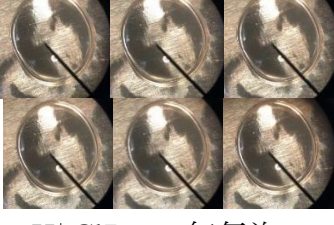
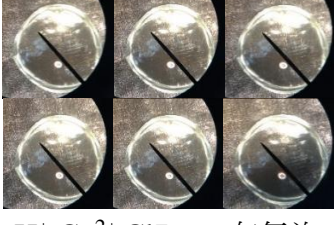
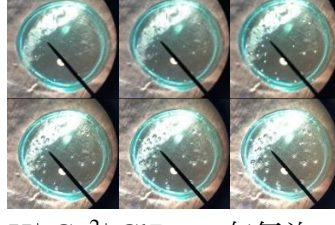
溶液	0M (蒸餾水)	0.1M CuSO ₄	1M CuSO ₄
蒸餾水 (0M)	 × 無氣泡	 Cu ²⁺ 無氣泡	 Cu ²⁺ 無氣泡
1M NaCl	 Cl ⁻ 無氣泡	 Cu ²⁺ Cl ⁻ 有氣泡	 Cu ²⁺ Cl ⁻ 有氣泡
0.1M NaCl	 Cl ⁻ 無氣泡	 Cu ²⁺ Cl ⁻ 有氣泡	 Cu ²⁺ Cl ⁻ 有氣泡
1M HCl	 H ⁺ Cl ⁻ 無氣泡	 H ⁺ Cu ²⁺ Cl ⁻ 有氣泡	 H ⁺ Cu ²⁺ Cl ⁻ 有氣泡
0.1M HCl	 H ⁺ Cl ⁻ 無氣泡	 H ⁺ Cu ²⁺ Cl ⁻ 有氣泡	 H ⁺ Cu ²⁺ Cl ⁻ 有氣泡

表 17 實驗 7-1 以顯微鏡觀察 18 秒內鋁箔 Al 與各溶液的微型產氫反應全組合結果 (續)

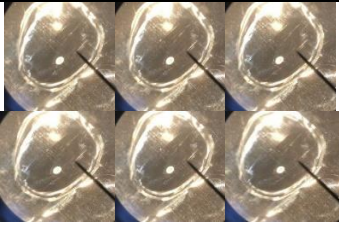
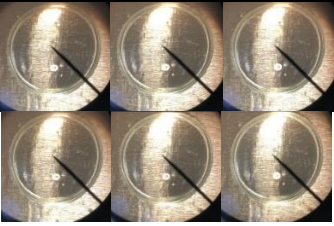
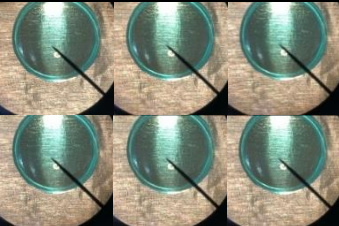


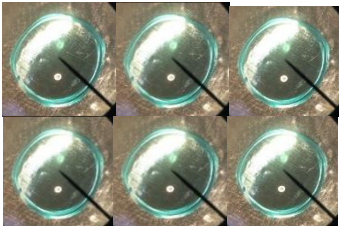

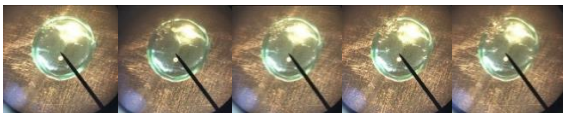
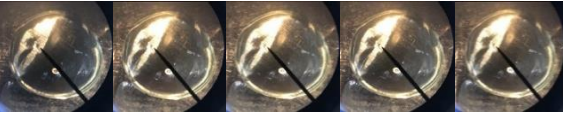
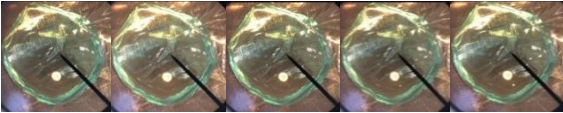
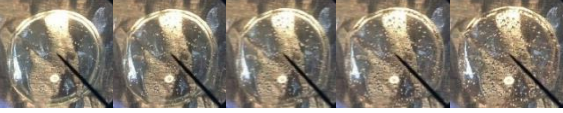
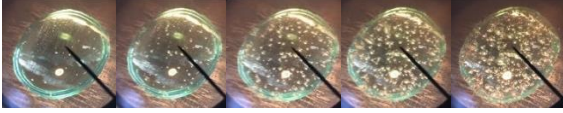
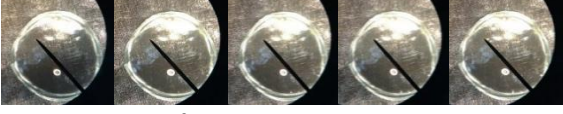
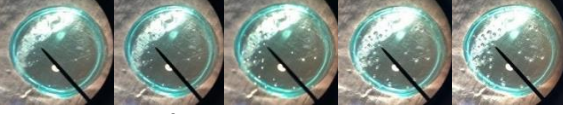
溶液	0M (蒸餾水)	0.1M CuSO ₄	1M CuSO ₄
1M H ₂ SO ₄			
	H ⁺ 無氣泡	H ⁺ Cu ²⁺ 無氣泡	H ⁺ Cu ²⁺ 無氣泡
0.1M H ₂ SO ₄			
	H ⁺ 無氣泡	H ⁺ Cu ²⁺ 無氣泡	H ⁺ Cu ²⁺ 無氣泡

表 18 實驗 7-1 以 0.5 倍率每 7 秒截圖一次，微型產氫反應有氣泡組結果

溶液	0.1M CuSO ₄	1M CuSO ₄
1M NaCl	 0.1M Cu ²⁺ 、1M Cl ⁻ 看見氫氣 H ₂ 生成：第 5 秒 看見銅 Cu 生成：第 15 秒	 1M Cu ²⁺ 、1M Cl ⁻ 看見氫氣 H ₂ 生成：第 3 秒時 看見銅 Cu 生成：第 17 秒時
0.1M NaCl	 0.1M Cu ²⁺ 、0.1M Cl ⁻ 看見氫氣 H ₂ 生成：第 7 秒 看見銅 Cu 生成：第 14 秒	 1M Cu ²⁺ 、0.1M Cl ⁻ 看見氫氣 H ₂ 生成：第 5 秒 看見銅 Cu 生成：第 16 秒
1M HCl	 0.1M Cu ²⁺ 、1M H ⁺ 、1M Cl ⁻ 看見氫氣 H ₂ 生成：第 2 秒 看見銅 Cu 生成：第 4 秒	 1M Cu ²⁺ 、1M H ⁺ 、1M Cl ⁻ 看見氫氣 H ₂ 生成：第 0 秒 看見銅 Cu 生成：第 5 秒
0.1M HCl	 0.1M Cu ²⁺ 、0.1M H ⁺ 、0.1M Cl ⁻ 看見氫氣 H ₂ 生成：第 5 秒 看見銅 Cu 生成：第 10 秒	 1M Cu ²⁺ 、0.1M H ⁺ 、0.1M Cl ⁻ 看見氫氣 H ₂ 生成：第 2 秒 看見銅 Cu 生成：第 18 秒

2. 實驗 7-1 討論

將表 17 微型實驗結果整理成下表 19，根據影片與實驗結果紀錄得知，在 18 秒內的反應時間中，可觀察到銅離子 Cu^{2+} 、氫離子 H^+ 與氯離子 Cl^- 三者將使產氫反應速率變快。

反應組合為銅離子與氯離子的實驗結果，也會生成氫氣 H_2 與銅金屬 Cu ，我們認為因銅離子溶於水中會發生水解反應提供氫離子，其水溶液 pH 值接近 4 呈酸性，因此符合上述之觀察結果，當銅離子 Cu^{2+} 、氫離子 H^+ 與氯離子 Cl^- 三者皆參與產氫反應時，反應速率較快。

根據表 17 結果，使我們觀察到銅離子 Cu^{2+} 、氫離子 H^+ 與氯離子 Cl^- 為速率關鍵因素。表 19 全反應組，微型實驗結果整理

反應組合	溶液組成	18 秒內產氫反應結果
一種	H^+ Cl^- Cu^{2+}	無氫氣 H_2 氣泡且無紅色銅金屬 Cu 生成
兩種	H^+ 、 Cl^- H^+ 、 Cu^{2+}	
兩種	Cu^{2+} 、 Cl^-	可觀察到有氫氣 H_2 生成且紅色銅金屬 Cu 析出
三種	Cu^{2+} 、 H^+ 、 Cl^-	

我們將生成氣泡反應組合整理成表 18 之觀察結果，在顯微鏡觀察中裡，氫氣 H_2 的氣泡大多數皆在銅金屬 Cu 外緣生成（如圖 20），而比較少觀察到氫氣 H_2 氣泡直接生成於鋁箔 Al 上，我們推測銅金屬與鋁金屬 Al 的伽凡尼效應，協助鋁金屬傳遞電子，更容易在水溶液中與氫離子 H^+ 行還原反應生成氫氣。

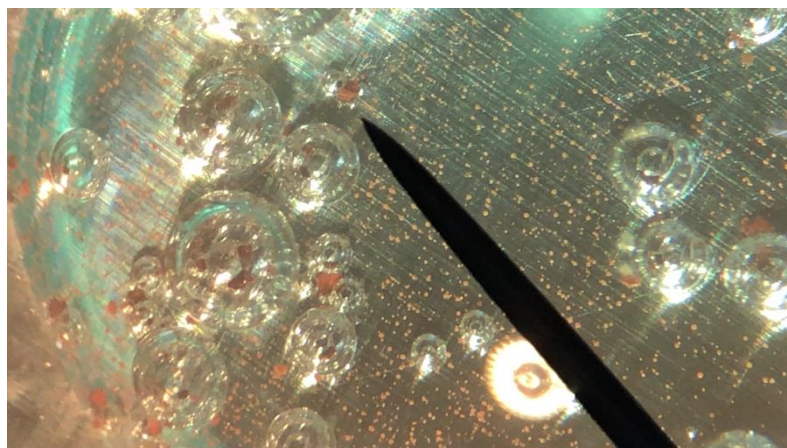


圖 20 氫氣 H_2 氣泡生成於銅金屬 Cu 外緣

氫氣 H_2 氣泡生成都會在第一時間觀察到，而銅金屬 Cu 的生成接續在氣泡之後，我們推測是氫氣與銅金屬應該是同時生成，但銅金屬生成時顆粒過小較無法觀察，氫氣生成浮出水面則較易觀察到。

不論是表 17 或表 18 我們都可以得知，在左右欄比較裡，當銅離子 Cu^{2+} 濃度較高時，氫氣 H_2 的生成速率較快；在上下列比較中，當氯離子 Cl^- 濃度較高時，穿透鋁氧化層催化愈多，氫氣 H_2 的生成速率也較快；在氯化氫 HCl 與氯化鈉 NaCl 兩組比較中，當氫離子 H^+ 濃度較


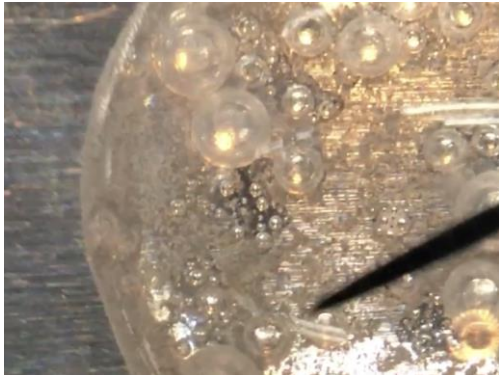
高時，氫氣 H_2 的生成速率也是較快。此外，銅離子 Cu^{2+} 、氫離子 H^+ 和氯離子 Cl^- 三者皆有的兩組實驗裡，三種離子的濃度愈高，氫氣 H_2 生成速率皆比銅金屬 Cu 析出速率快。

因此，在表 18 的濃度與實驗結果的關係中，由氣泡數的多寡表示氫氣生成速率，當銅離子 Cu^{2+} 、氯離子 Cl^- 或氫離子 H^+ 的濃度愈大，生成氫氣 H_2 的速率愈快。

(十二) 實驗 7-2：以顯微鏡觀察鋁箔 Al 和銅離子 Cu^{2+} 、汞離子 Hg^{2+} 的微型產氫反應。

1. 實驗 7-2 結果

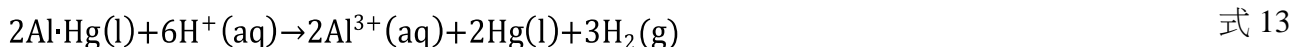
表 20 實驗 7-2 鋁箔 Al 和銅離子 Cu^{2+} 、汞離子 Hg^{2+} 的微型產氫反應結果

溶液	1M $CuSO_4$	1M $HgSO_4$
1M HCl	 <p>1M Cu^{2+}、1M H^+、1M Cl^-</p>	 <p>1M Hg^{2+}、1M H^+、1M Cl^-</p>

2. 實驗 7-2 討論

在表 20 的實驗結果顯示無論是銅離子 Cu^{2+} 或是汞離子 Hg^{2+} 均能夠生成金屬與氫氣 H_2 。當銅離子反應生成銅金屬 Cu 時，可以從銅金屬的外圍生成氫氣，來證實產氫反應中有伽凡尼效應使產氫速率增快加速。

在汞離子 Hg^{2+} 反應中同樣也觀察到液態汞 Hg 的生成，除了在汞金屬的外圍生成氫氣 H_2 ，整體表面都有氣泡生成，由汞離子參與的產氫反應會有伽凡尼效應外，氫氣的生成也來自鋁汞齊 $Al \cdot Hg$ 遇到氫離子 H^+ 生成氫氣(如式 13)。產氫反應中，銅離子 Cu^{2+} 比汞離子產氫速率快許多，我們推測在置換成汞金屬時，鋁汞齊的生成使得產氫速率下降。



(十三) 實驗 8：探討不同鹵素陰離子對產氫反應的催化效果。

1. 實驗 8 結果

表 21 實驗 8 探討不同鹵素陰離子催化產氫反應過程

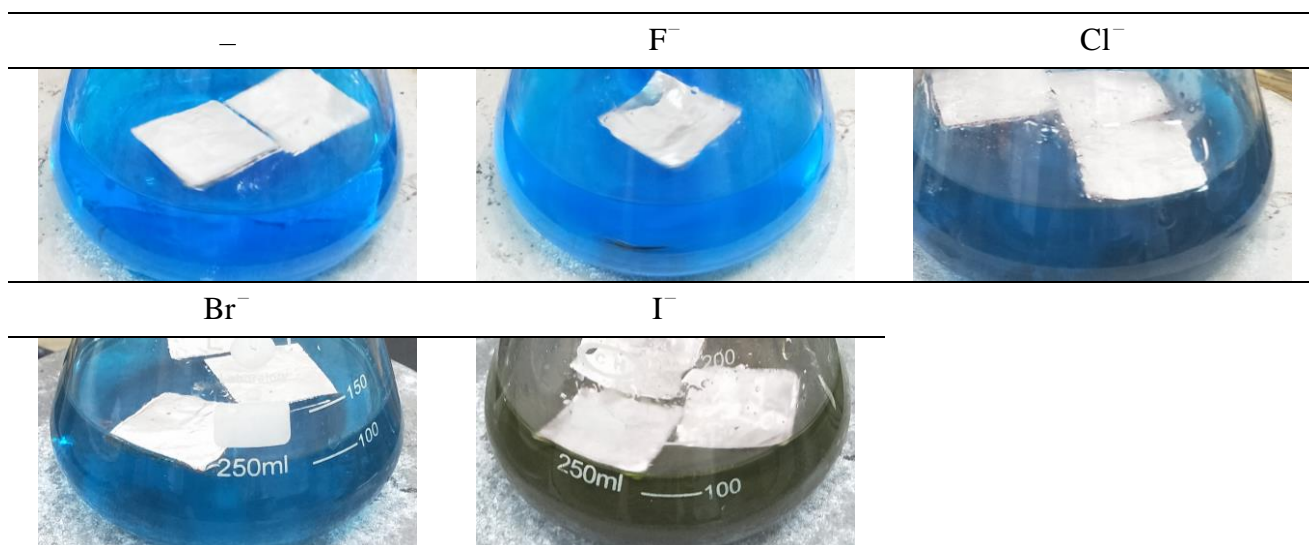


表 22 實驗 8 探討不同鹵素陰離子催化產氫反應結果

#	水溶液組成			氫氣 H ₂ 產量(mL)	r _{H₂} (mL/s)
	鋁箔 Al	硫酸銅 CuSO ₄ 濃度	0.5M 鹵素離子		
1	0.33g	1M	-	0	0
2	0.33g	1M	F ⁻	0	0
3	0.33g	1M	Cl ⁻	60.0	0.200
4	0.33g	1M	Br ⁻	55.5	0.100
5	0.33g	1M	I ⁻	0	0

2. 實驗 8 討論

表 22 的實驗結果中，並非所有的鹵素離子皆對產氫反應具有催化效果，氯離子 Cl⁻ 和溴離子 Br⁻ 的加入催化產氫反應進行，並且持續加速直到反應結束，兩者速率相比之下，氯離子反應較溴離子快。

氟離子 F⁻ 完全沒有起任何反應，推測氟離子活性相對安定，因此不具有催化效果。碘離子 I⁻ 則是和銅離子 Cu²⁺ 發生了沉澱形成碘化亞銅 CuI 沈澱(如式 14)，也不具有催化效果。



伍、 實驗主張討論與應用

一、 鋁金屬產氫反應實驗主張討論

(一) 銅離子 Cu^{2+} 的伽凡尼效應是產氫反應加速主因

我們認為銅離子 Cu^{2+} 的伽凡尼效應是產氫反應的加速主因。由實驗 1 的結果得知，當銅離子濃度愈高可使產氫反應的速率愈快，且在實驗 7 微型實驗中觀察到當銅金屬 Cu 析出時，其銅金屬外緣可見氫氣 H_2 氣泡的生成。根據伽凡尼效應之銅金屬的陰極保護，使得產氫的氧化還原反應加速。

因此我們認為，銅離子的伽凡尼效應是使氫氣加速生成的主因。

(二) 修正主張：鹵素離子皆可穿透鋁金屬氧化層起催化作用

根據文獻得知氯離子 Cl^- 具有破壞鋁箔氧化層的催化能力，因此我們大膽主張鹵素離子皆具有穿透鋁氧化層起催化效果。根據實驗 3 與實驗 4 的綜合結果，當反應具有氯離子時將可以催化產氫反應，加速氫氣 H_2 的生成速率；我們在實驗 7 得到了有氯離子參與才會有氫氣的生成結果。但根據實驗 8 結果：氟離子 F^- 與碘離子 I^- 對產氫反應無催化作用。

因此，我們反駁最初的主張，修正主張為氯離子 Cl^- 與溴離子 Br^- 能穿透鋁氧化層對產氫反應具有催化作用。

(三) 修正主張：鋁金屬 Al 與金屬離子電位差愈大愈有明顯的產氫反應

我們一開始主張：鋁金屬 Al 與汞離子 Hg^{2+} 的電位差比鋁金屬與銅離子 Cu^{2+} 大，能有明顯的伽凡尼效應，使產氫反應愈快速。根據實驗 2 與實驗 7 的綜合結果，銅離子 Cu^{2+} 與汞離子均具有伽凡尼效應使產氫反應加速，理論上汞離子的反應應會比銅離子更有效，但銅離子的產氫速率較快，我們推論汞金屬 Hg 的生成與鋁金屬生成鋁汞齊，使氧化鋁 Al_2O_3 不斷的重新生成，且汞的密度大沈澱底部，無法析出汞在鋁箔表面造成無伽凡尼效應（實驗 2 的銅離子速率高於汞離子的主因），導致產氫反應不如銅離子來得快速。

所以，我們反駁此一主張，修正主張為銅離子 Cu^{2+} 與鋁箔的產氫反應具明顯的伽凡尼效應能使產氫反應加速生成。

(四) 修正主張：鋁金屬 Al 的表面積愈大產氫效果愈佳

我們認為鋁金屬 Al 的表面積愈大，產氫反應愈佳，但是根據實驗 5 結果，在相同的鋁金屬 Al 質量下，鋁箔的完全反應效果最佳（2 分鐘），鋁片與鋁粉完全反應時間則是三天。

我們推論鋁箔厚薄適中使氯離子 Cl^- 的催化適宜，並且鋁箔的帶狀表面達到伽凡尼效應，產氫反應最佳。鋁片較厚使氯離子穿透效果緩慢；鋁粉因鋁金屬顆粒小直接還原成銅金屬 Cu 無法達到伽凡尼效應，造成鋁片與鋁粉的產氫速率緩慢。

因此我們反駁一開始的主張，修正主張為鋁箔能有最佳的產氫反應速率。

(五) 快速的鋁箔產氫反應：銅離子 Cu^{2+} 、氫離子 H^+ 、氯離子 Cl^- 缺一不可

我們認為使鋁箔有快速的產氫反應，銅離子 Cu^{2+} 、氫離子 H^+ 、氯離子 Cl^- 三種離子缺一不可。根據實驗 1、3-1、4-2 當單一離子濃度愈高，產氫速率愈快；再者，實驗 7 結果顯示

三種離子濃度皆高的情況下，與鋁箔的產氫反應最有效率；最後，實驗 6 的反應速率式：

$$r_{\text{H}_2} = 4.7[\text{Cu}^{2+}]^{2.1}[\text{H}^+]^{0.68}[\text{Cl}^-]^{1.6}$$

。各項離子：銅離子級數為首、氯離子其次，氫離子最後。

我們推論，銅金屬 Cu 的出現造成伽凡尼效應是反應速率加速的主因，因此銅離子 Cu^{2+} 級數最大，且氯離子 Cl^- 穿透氧化層扮演啟動產氫反應的催化效果，使得鋁金屬 Al 得以與銅離子及氫離子 H^+ 反應生成氫氣 H_2 。

因此要使鋁箔的產氫反應速率達到最快，則三種離子缺一不可。

二、未來實驗應用

(一) 氫氣燃料電池

提供未來乾淨且便宜的燃料能源，氫氣將會扮演不可或缺的角色，氫氣能源中以鋁金屬產氫反應將可以帶來便宜且快速的氫氣來源。本研究中所提出的產氫速率定律式，期望將作為後續氫氣燃料電池研究的一環，製作可調節氫氣速率的燃料電池，另外，在海水（氯離子）與銅離子的參與下，成為啟動鋁金屬產氫的關鍵開關，相信會是未來能源發展研究的基石。

(二) 綠氫煉鋼減少碳排放

面對全球氣候變遷，極端氣候已經走到「家門口」，國際上 128 國宣告 2050 年淨零碳排放，使碳排放量與減碳排量相等，達成淨零碳排放量之目標。鋼鐵產業的煤炭使用量為最大宗的能源需求。使用氫氣取代煤炭作為還原劑，過程中產物只會產生水，不會有額外的有害污染，本實驗的產氫反應，將有助成為未來低碳冶金產業的發展。

(三) 高中教學用途

我們希望能鋁箔的產氫反應能作為高中的教學使用，納入的單元可以是氧化還原、反應速率等高中化學課程，也可以作為探究與實作課程的化學實驗。學生能觀察氫氣的生成速率與各離子濃度的關係，進而試著推導出速率定律式；學生也能透過微型實驗的觀察，發現氯離子的催化作用與銅離子的伽凡尼效應等現象，認識鋁金屬氧化還原生成氫氣等關鍵因素。

三、未來展望

(一) 延伸其他變因來探討本研究之速率關係

1. 鹼性環境推導產氫反應的速率定律式，並以四氨銅錯離子 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ 為 Cu^{2+} 來源。
2. 以鹼洗清鋁氧化層後，以硫酸銅鍍上銅金屬，作為銅鋁合金進行此產氫反應之研究。

(二) 利用高端儀器觀察反應機構

利用高端儀器，例如：核磁共振波譜儀，來推導實驗的反應機構，進一步驗證鋁金屬產氫反應的速率定律式。

陸、 結論

- 一、銅離子 Cu^{2+} 的伽凡尼效應是產氫反應加速主因。當鋁表面鍍上銅的產氫反應具有伽凡尼效應，讓銅離子濃度愈高，氫氣生成速率愈快。
- 二、氯離子 Cl^- 與溴離子 Br^- 能穿透鋁氧化層對產氫反應具有催化作用，氟離子 F^- 與碘離子 I^- 對產氫反應無催化作用。氯離子濃度愈大，產氫速率愈快。
- 三、銅離子 Cu^{2+} 與汞離子 Hg^{2+} 皆具有伽凡尼效應。由於生成鋁汞齊 $\text{Al}\cdot\text{Hg}$ ，使氧化鋁 Al_2O_3 阻礙產氫生成，因此銅離子產氫速率大於汞離子。
- 四、鋁箔能有最佳的產氫反應速率。鋁片的催化效果不佳，鋁粉無法達到伽凡尼效應，而鋁箔的厚薄適中與帶狀表面能展現氯離子催化與伽凡尼效應，故具備最佳的產氫速率。

- 五、本研究產氫反應速率式 $r_{\text{H}_2} = 4.7[\text{Cu}^{2+}]^{2.1}[\text{H}^+]^{0.68}[\text{Cl}^-]^{1.6}$ 。利用濃度和速率做出線性迴歸得知，銅離子 Cu^{2+} 為此反應中級數最大者，故銅離子最能夠影響實驗的產氫速率
- 六、鋁箔產氫最適反應速率，銅離子 Cu^{2+} 、氫離子 H^+ 、氯離子 Cl^- 三種離子缺一不可。氯離子催化破壞鋁氧化層，銅離子的伽凡尼效應，氫離子與鋁生成氫氣，三者離子皆對產氫速率具決定性的影響，整體加速反應過程如圖 21。

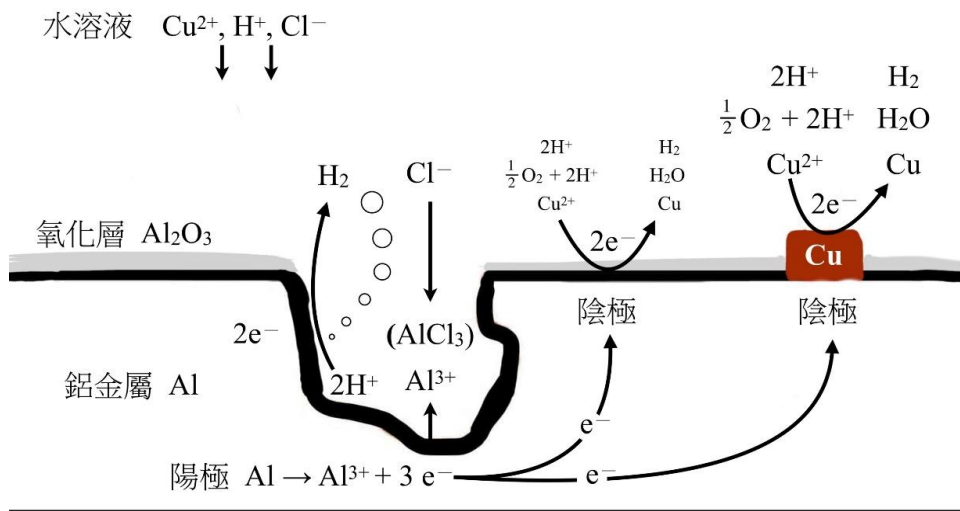


圖 21 本研究之加速鋁箔產氫速率整體反應過程

柒、 參考文獻資料

- [1] 鄭永銘 (2017 年 10 月 15 日)。化學示範實驗 (一) *NORTHERN LIGHTS*。跟著鄭大師玩科學。取自：<https://www.masters.tw/186174>
- [2] Shmelev, V., Nikolaev, V., Lee, J. H., Yim, C. s. (2016). Hydrogen production by reaction of aluminum with water. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(38), 16664-16673.
- [3] Natishan, P. M. and O'Grady, W. E. (2014). Chloride Ion Interactions with Oxide-Covered Aluminum Leading to Pitting Corrosion: A Review. *Journal of The Electrochemical Society*, 161(9), C421-432.
- [4] Skilbred, E. S. (2016). *Corrosion of Nickel-Aluminium Bronze - How does the different alloying elements effect the corrosion properties?* (Unpublished doctoral dissertation). Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- [5] 張育唐、陳藹然 (2011 年 11 月 3 日)。賈法尼電池。科學 Online。取自：<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=40742>
- [6] 吳孟原 (1988 年)。Cl-(aq)的催化現象。國立臺灣科學教育館第 28 屆全國中小學科學展覽會高中組化學科第一名。取自：<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/28/pdf/28h/028.pdf>

附錄 1 各物質氧化電位

