

# 第十八屆旺宏科學獎

## 成果報告書

參賽編號：SA18-136

作品名稱：氮氣牙膏~H<sup>+</sup>催化 NH<sub>4</sub>Cl+NaNO<sub>2</sub> 生成 N<sub>2</sub> 的研究

姓名：王奎鈞

關鍵字：H<sup>+</sup>催化、反應速率、氮氣牙膏

## 摘要

一、反應式： $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NaNO}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$  催化劑： $\text{H}^+$

二、反應速率： $R = k [\text{NH}_4\text{Cl}]^x [\text{NaNO}_2]^y [\text{H}^+]^z$

三、活化能： $E_a = (\ln A - \ln k) RT$

1. 以  $\text{NH}_4\text{Cl}$  及  $\text{NaNO}_2$  的水溶液製造氮氣，並加入氫離子作為催化劑加速此反應，藉由改變反應物濃度、催化劑濃度及溫度等變因，探討對產生氮氣之反應速率的影響。
2. 發現此反應  $R = k [\text{NH}_4\text{Cl}]^{1.15} [\text{NaNO}_2]^{1.23} [\text{H}^+]^{0.886}$  約為三級反應。
3. 由反應速率常數與溫度間的關係，計算出反應活化能約為  $72.7\text{kJ/mol}$ 。
4. 一篇關於亞硝酸鹽與氯化物反應的論文指出實際參與的反應物為  $\text{NH}_3$  及  $\text{HNO}_2$ ，酸只作為影響溶液平衡的離子，因此以兩種截然不同的論點釐清反應機構。依據論文給定的  $\text{NH}_3$  及  $\text{HNO}_2$  反應級數帶入我們的速率定律式，發現和我們實驗的結果非常接近。
5. 成功將快速產生氮氣的方程式，運用在"大象牙膏"的實驗中，非常快速且安全。

## 壹、研究動機

在高中課本實驗製備氮氣的過程中，使用固體  $\text{NH}_4\text{Cl}$  及  $\text{NaNO}_2$  作為反應物，除了不易混和均勻(非勻相反應)，反應產生之水也易導致試管爆炸的可能性增加，而且使用酒精燈直接加熱也較容易發生意外，還有此反應的速率過快，較容易發生危險。

因此，我們研究將固體反應物配置成水溶液的方法，如此一來比較溫和，不僅不用考慮反應產生的水所造成的危險性，也可算出反應物濃度與反應速率間的關係\*。但使用水溶液的方法仍需加熱反應才能快速進行，故希望尋找能夠催化此反應的藥劑，經過資料搜尋及多次實驗後，我們發現酸具有不錯的催化效果，進一步的應用在大象牙膏中。

大象牙膏的實驗中，使用高濃度的雙氧水作為反應物，但是具有危險性。因此我們希望利用我們的實驗條件，可以快速且安全的製造泡沫大量噴的效果。

\* 參考資料:107 年全國科展佳作\*\*高中『一「氮」遇見你，氯化銨與亞硝酸鈉的邂逅』

## 貳、研究目的

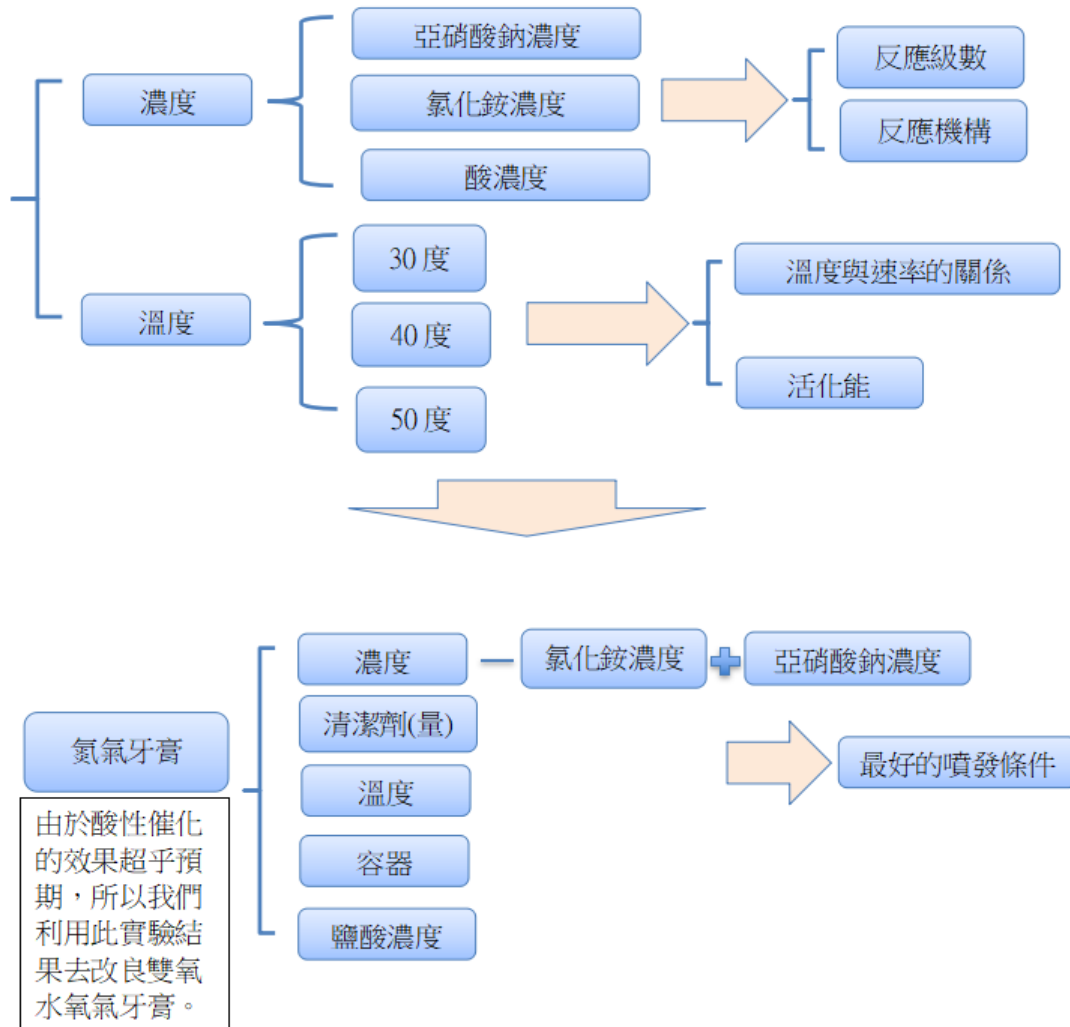
- 一、藉由改變反應物的相狀態，使此實驗能夠更安全地進行。
- 二、探討反應物濃度、催化劑濃度、溫度三個變因與反應速率之間的關係。
- 三、計算反應物的級數、催化劑的級數及反應活化能，並探討之。
- 四、設計以酸性催化常溫水溶液態來進行製造氮氣的實驗，納入未來的高中實驗課程。
- 五、改良大象牙膏的實驗，並設計為危險性較低的氮氣牙膏趣味實驗。

## 參、研究設備及器材

### 實驗器材

鐵架、溫度計、攪拌子、電磁攪拌器、燒杯、橡皮管、塞子、電子天秤、容量瓶、秤量紙、硬試管、量筒、滴定管、吸量管、pH 儀、紅外線偵測儀二、實驗藥品  
氯化銨( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )、亞硝酸鈉( $\text{NaNO}_2$ )、清潔劑、稀鹽酸( $\text{HCl}$ ，製備氮氣的催化劑，約 0.1 M)、鹽酸( $\text{HCl}$ ，大象牙膏的催化劑，約 3 M)、鄰苯二甲酸氫鉀(KHP)、氫氧化鈉( $\text{NaOH}$ ，約 0.1 M)、酚酞、標準液(pH=7.00、pH=4.01)

# 氮氣的酸性催化



## 肆、研究過程或方法

### 1. 反應速率與 $\text{NaNO}_2$ 濃度的關係

(一) 秤取 1.338 克(25 mmol)、2.675 克(50 mmol)的  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ，分別加入鹽酸 25 mL，配成 1 M 與 2 M 之  $\text{NH}_4\text{Cl}$  的鹽酸溶液。

(二)稱取 1.725 克(25 mmol)的  $\text{NaNO}_2$ ，加水至 25 mL，配成 1 M 之  $\text{NaNO}_2$  的水溶液。

(三)恆溫後(25 °C)，以排水集氣法收集氮氣，每 30 秒紀錄一次氮氣體積，並觀察  $\text{NH}_4\text{Cl}$  濃度對反應速率的影響，如圖(一)。

## 2. 反應速率與 $\text{NaNO}_2$ 濃度的關係

(一)稱取 2.675 克(50 mmol)的  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ，加入鹽酸至 25 mL，配成 2 M 之  $\text{NH}_4\text{Cl}$  的鹽酸溶液。

(二)稱取 1.725 克(25 mmol)、3.45 克(50 mmol)的  $\text{NaNO}_2$ ，分別加水至 25 mL，配成 1 M、2 M 的  $\text{NaNO}_2$  的水溶液。

(三)恆溫後(25 °C)，以排水集氣法收集氮氣，每 30 秒紀錄一次氮氣體積，並觀察  $\text{NaNO}_2$  濃度對反應速率的影響，如圖(一)。

## 3. 反應速率與氫離子濃度的關係

(一)配置稀鹽酸(約 0.1 M，標定 0.0947M)。

(二)稱取 2.675 克(50 mmol)的  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ，加入鹽酸 12.5 mL 或 25 mL，配成 2 M 之  $\text{NH}_4\text{Cl}$  的鹽酸(0.05 M 或 0.1 M)溶液。

(三)稱取 3.45 克(50 mmol)的  $\text{NaNO}_2$ ，加水至 25 mL，配成 2 M 之  $\text{NaNO}_2$  的水溶液。

(四)恆溫後(25 °C)，以排水集氣法收集氮氣，每 30 秒紀錄一次氮氣體積，並觀察鹽酸濃度對反應速率的影響。

## 4. 速率與溫度的關係

(一)稱取 1.338 克(25 mmol)的  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ，加入鹽酸至 25 mL，配成 1 M 之  $\text{NH}_4\text{Cl}$  的鹽酸溶液。

(二)稱取 1.725 克(25 mmol)的  $\text{NaNO}_2$ ，加水至 25 mL，配成 1 M 之  $\text{NaNO}_2$  的水溶液。

(三)分別放入 30 °C、40 °C、50 °C 的水恆溫。

(四)恆溫後，以排水集氣法收集氮氣，每 30 秒紀錄一次氮氣體積，並觀察溫度對反應速率的影響，如圖(一)。

## 5. 反應過程中 pH 值的測量

(一)稱取 1.338 克(25 mmol)、2.675 克(50 mmol)的  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ，加入鹽酸 25 mL，配成 1 M 與 2 M 之  $\text{NH}_4\text{Cl}$  的鹽酸溶液。

(二)稱取 1.725 克(25 mmol)、3.45 克(50 mmol)的  $\text{NaNO}_2$ ，加水至 25 mL，配成 1 M 與 2 M 之  $\text{NaNO}_2$  的水溶液。恆溫後(25 °C)，以 pH 儀每 30 秒測量混和溶液之 pH 值並記錄，如圖(二)。

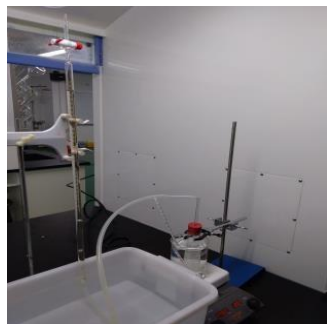
## 6. 大象牙膏(以最佳結果為例)

(一)稱取 32.1 克(0.6 mol)的  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ，以分度吸量管加入鹽酸(約 3 M) 100 mL(0.3 mol)。

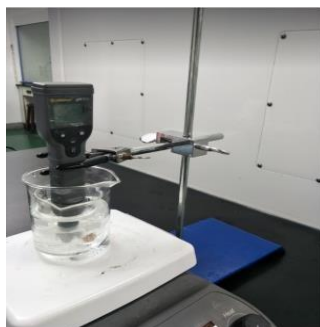
(二)稱取 31.05 克(0.45 mol)的  $\text{NaNO}_2$ ，以分度吸量管加入蒸餾水 50 mL。

(三)分別將兩種溶液泡入溫水中，以加熱板使其溫度上升至  $50\text{ }^\circ\text{C}$ ，並將 250 mL 容量瓶放置在溫水中預熱。

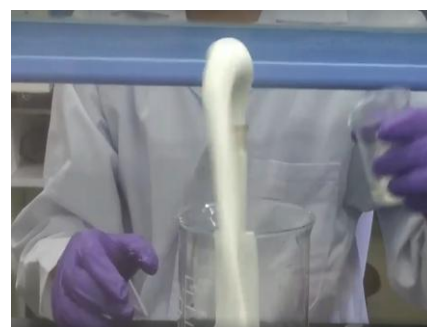
(四)把容量瓶放在 1000 mL 的燒杯中，將  $\text{NH}_4\text{Cl}$  的鹽酸溶液倒入已預熱的容量瓶，再倒入些許清潔劑(約 5 mL)，搖晃容量瓶使清潔劑與鹽酸溶液混和，打開抽氣櫥，最後將  $\text{NaNO}_2$  水溶液快速倒入容量瓶，觀察其爆發過程，如圖(三)。



圖(一)排水集氣法收集氫氣



圖(二)pH 值測定

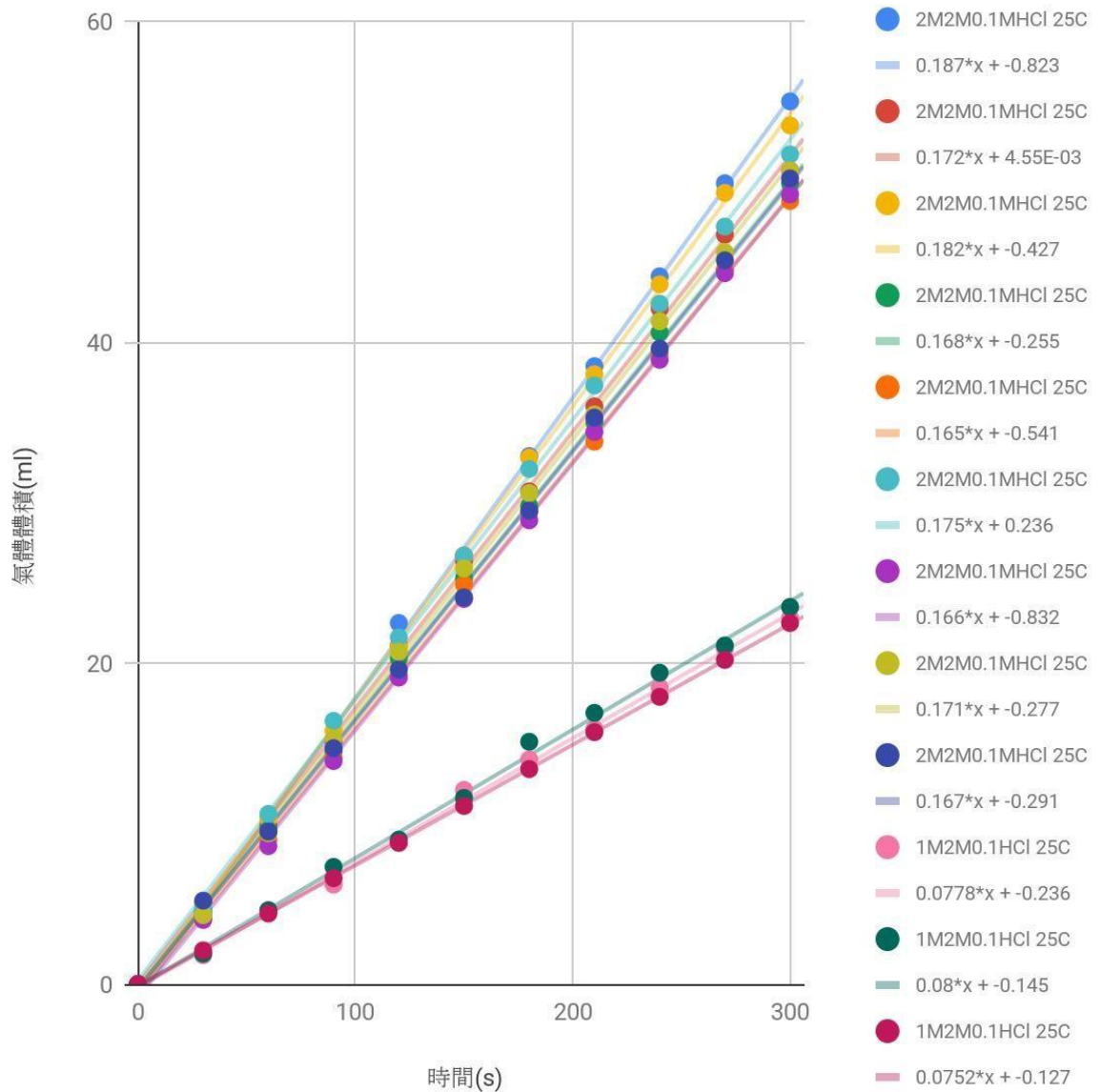


圖(三)大象牙膏實驗

## 五、研究結果

### 一、反應速率與 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 濃度的關係

## NH<sub>4</sub>Cl濃度對反應速率的影響



斜率即為氣體產生速率

25 °C 2 M NH<sub>4</sub>Cl (0.0947 M HCl<sub>(aq)</sub>) + 2 M NaNO<sub>2(aq)</sub> 的平均速率為 0.173 mL/s

25 °C 1 M NH<sub>4</sub>Cl (0.0947 M HCl<sub>(aq)</sub>) + 2 M NaNO<sub>2(aq)</sub> 的平均速率為 0.0777 mL/s

$$R_{2M} / R_{1M} = 2^x$$

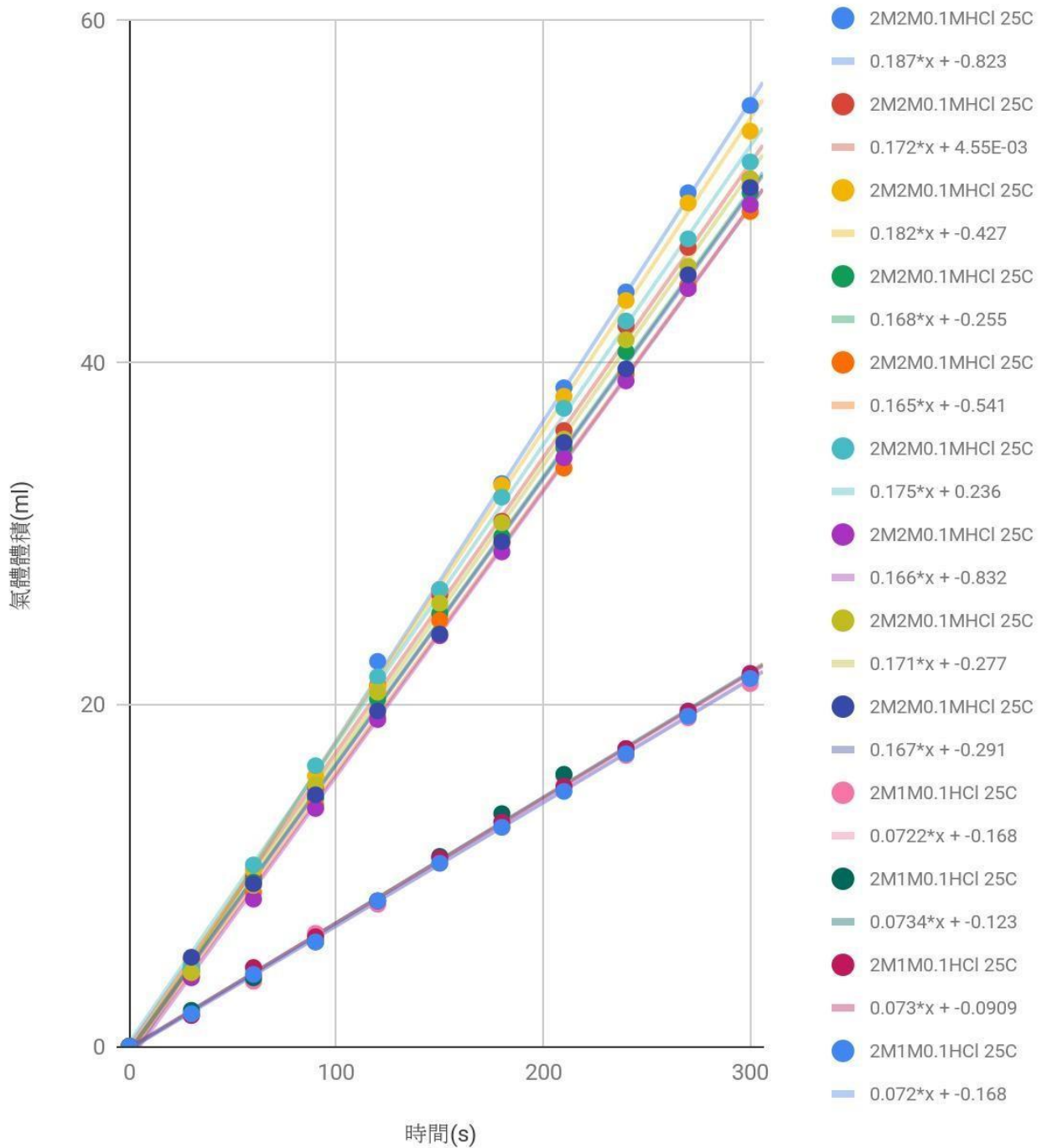
$$\Rightarrow x = \log_2(R_{2M}/R_{1M}) = \log_2(0.173/0.0777) = 1.15$$

$$\Rightarrow R \propto [\text{NH}_4\text{Cl}]^{1.15}$$

二、反應速率與 NaNO<sub>2</sub>濃度的關係



NaNO<sub>2</sub>濃度對反應速率的影響



斜率即為氣體產生速率

25 °C 2 MNH<sub>4</sub>Cl (0.0947MHCl<sub>(aq)</sub>) + 2 MNaNO<sub>2(aq)</sub>的平均速率為 0.173 mL/s

25 °C 2 MNH<sub>4</sub>Cl (0.0947MHCl<sub>(aq)</sub>) + 1 MNaNO<sub>2(aq)</sub>的平均速率為 0.0739 mL/s

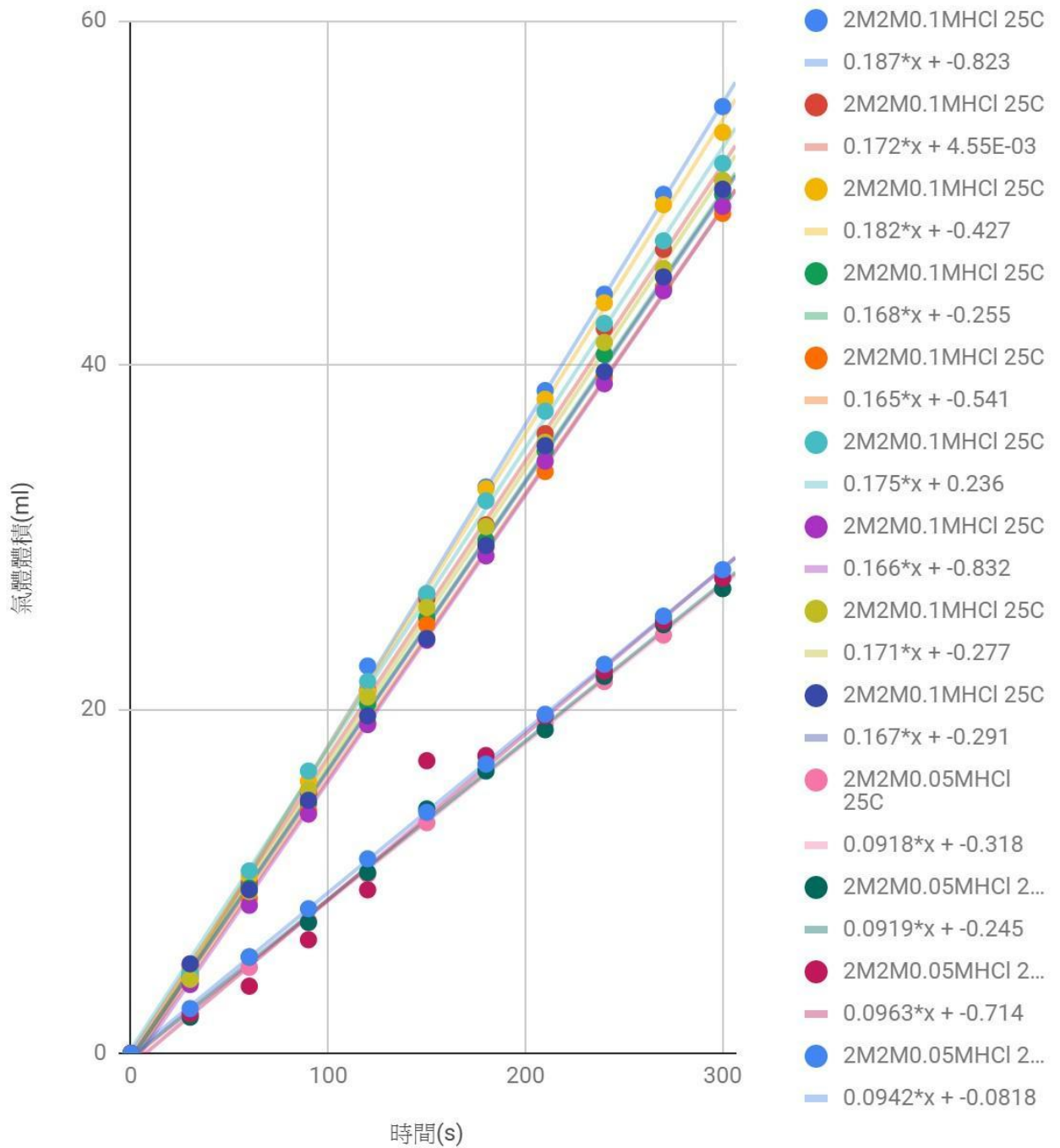
$$R_{2M} / R_{1M} = 2^x$$

$$\Rightarrow x = \log_2(R_{2M}/R_{1M}) = \log_2(0.173/0.0747) = 1.23$$

$$\Rightarrow R \propto [\text{NaNO}_2]^{1.23}$$

### 三、反應速率與催化劑 H<sup>+</sup>濃度的關係

酸濃度對反應速率的影響



斜率即為氣體產生速率

25 °C 2 MNH<sub>4</sub>Cl(0.0947MHCl<sub>(aq)</sub>) + 2 MNaNO<sub>2(aq)</sub>的平均速率為 0.173 mL/s

25 °C 2 MNH<sub>4</sub>Cl(0.0474MHCl<sub>(aq)</sub>) + 1 MNaNO<sub>2(aq)</sub>的平均速率為 0.0936 mL/s

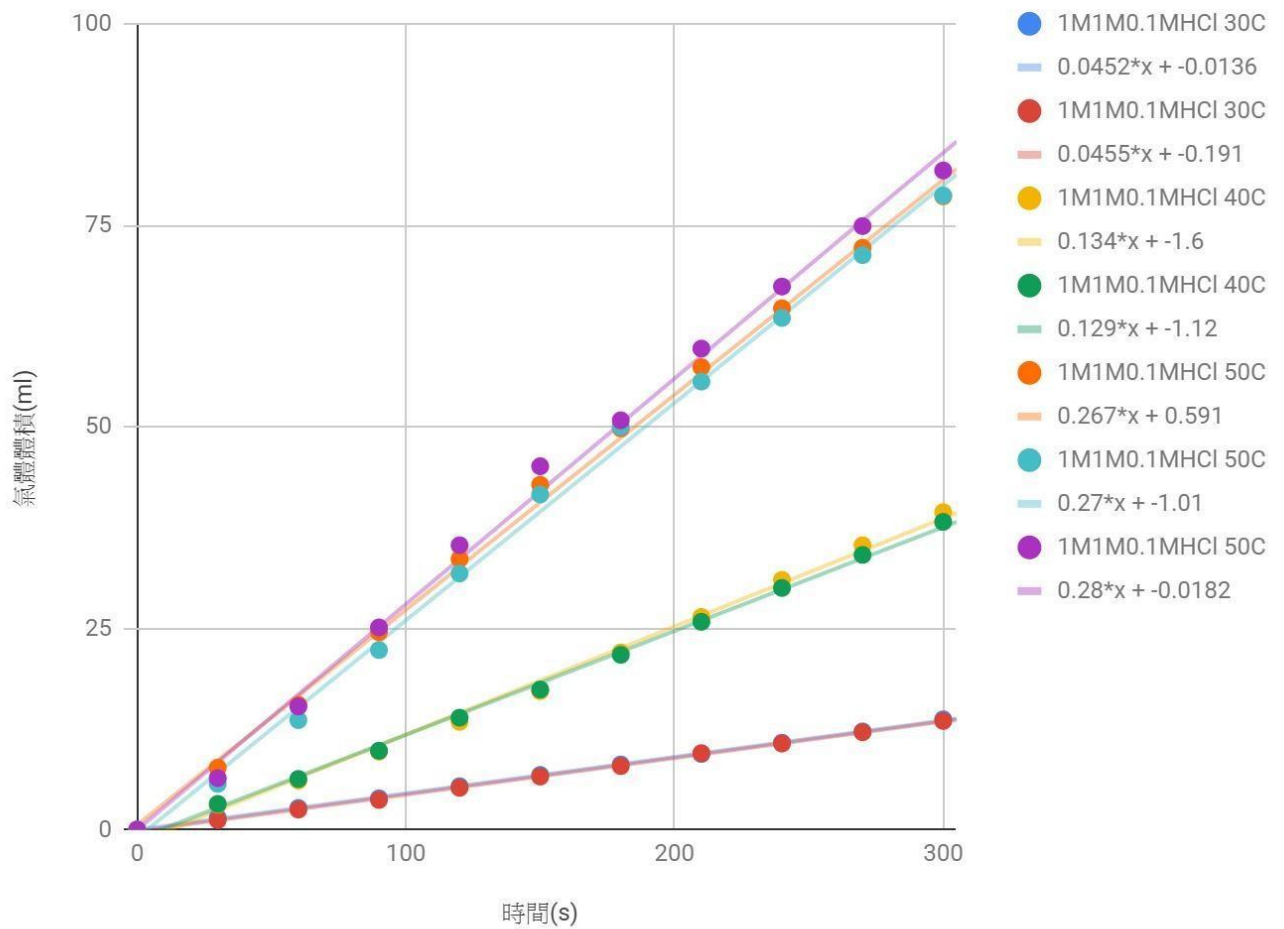
$$R_{0.1M} / R_{0.05M} = 2^x$$

$$\Rightarrow x = \log_2(R_{2M} / R_{1M}) = \log_2(0.173 / 0.0936) = 0.886$$

$$\Rightarrow R \propto [H^+]^{0.886}$$

#### 四、反應速率與溫度的關係

溫度對反應速率的影響



30 °C 1 MNH<sub>4</sub>Cl(0.0884MHCl<sub>(aq)</sub>) + 1 MNaNO<sub>2(aq)</sub>的平均速率為 0.0454mL/s

40 °C 1 MNH<sub>4</sub>Cl(0.0884MHCl<sub>(aq)</sub>) + 1 MNaNO<sub>2(aq)</sub>的平均速率為 0.132mL/s

50 °C 1 MNH<sub>4</sub>Cl(0.0884MHCl<sub>(aq)</sub>) + 1 MNaNO<sub>2(aq)</sub>的平均速率為 0.272mL/s

R<sub>40°C</sub>/R<sub>30°C</sub>的平均比值：2.90

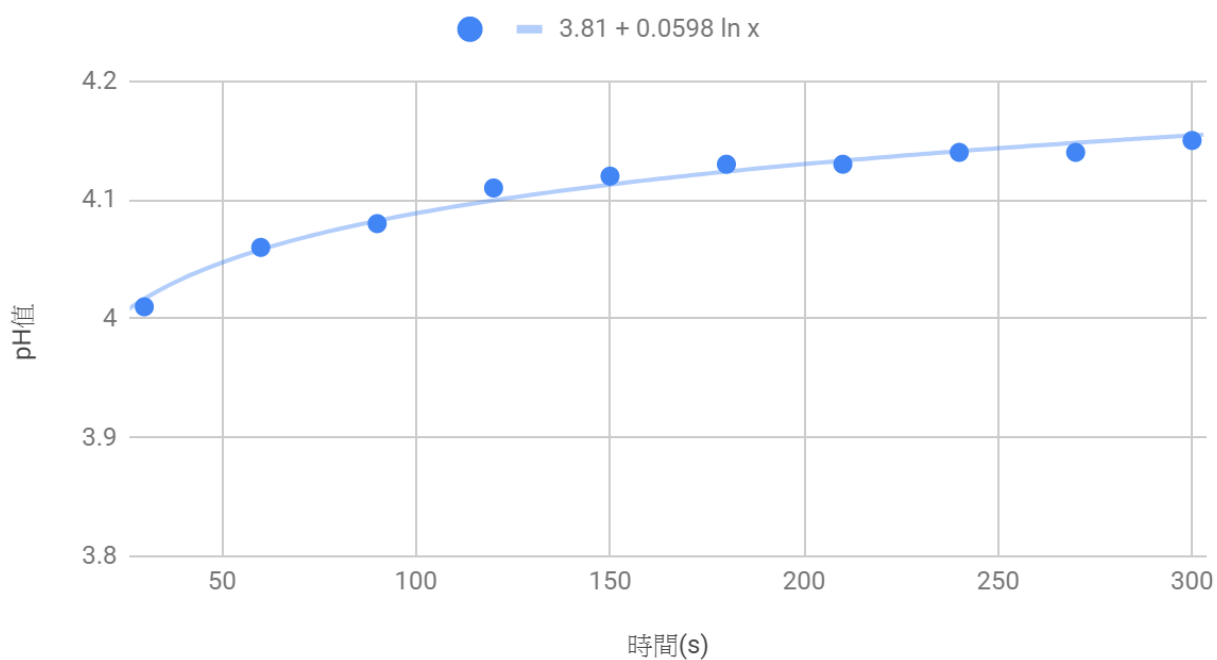
R<sub>50°C</sub>/R<sub>40°C</sub>的平均比值：2.03

## 五、pH 值隨時間的變化

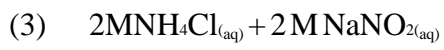
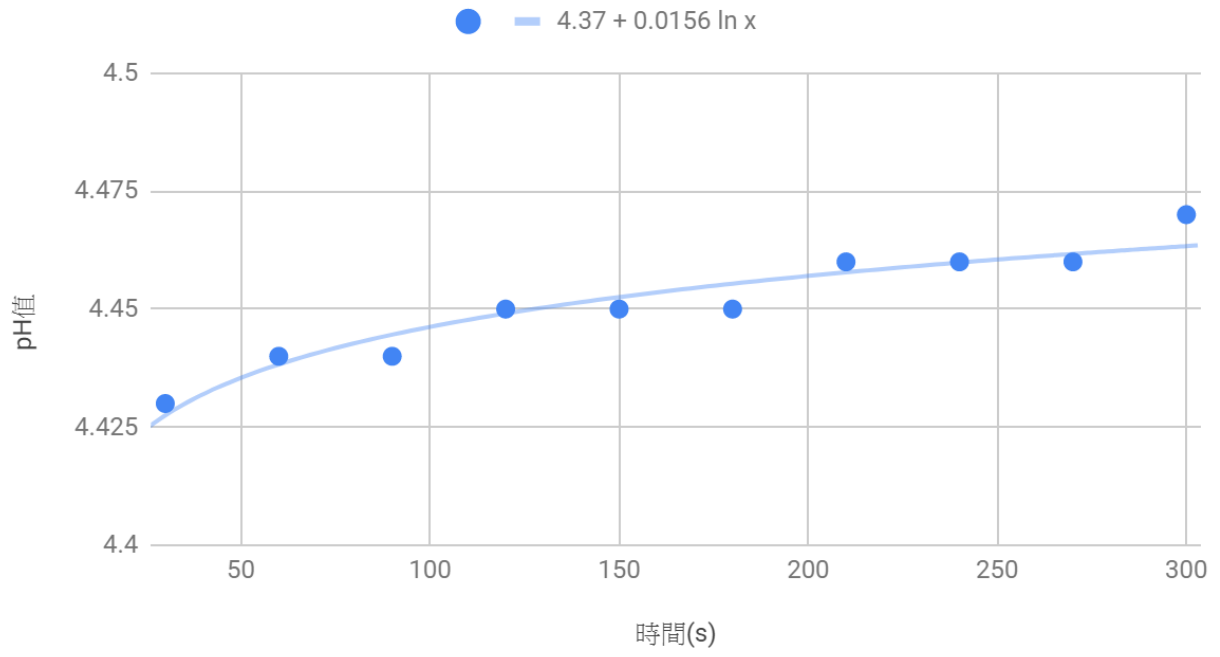
我們等待反應 30 秒後(待 pH 值固定)，每 30 秒利用 pH 儀測量  $H^+$  濃度，並且通過平衡算求出  $NH_3$  及  $HNO_2$  濃度(詳情見討論)。



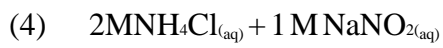
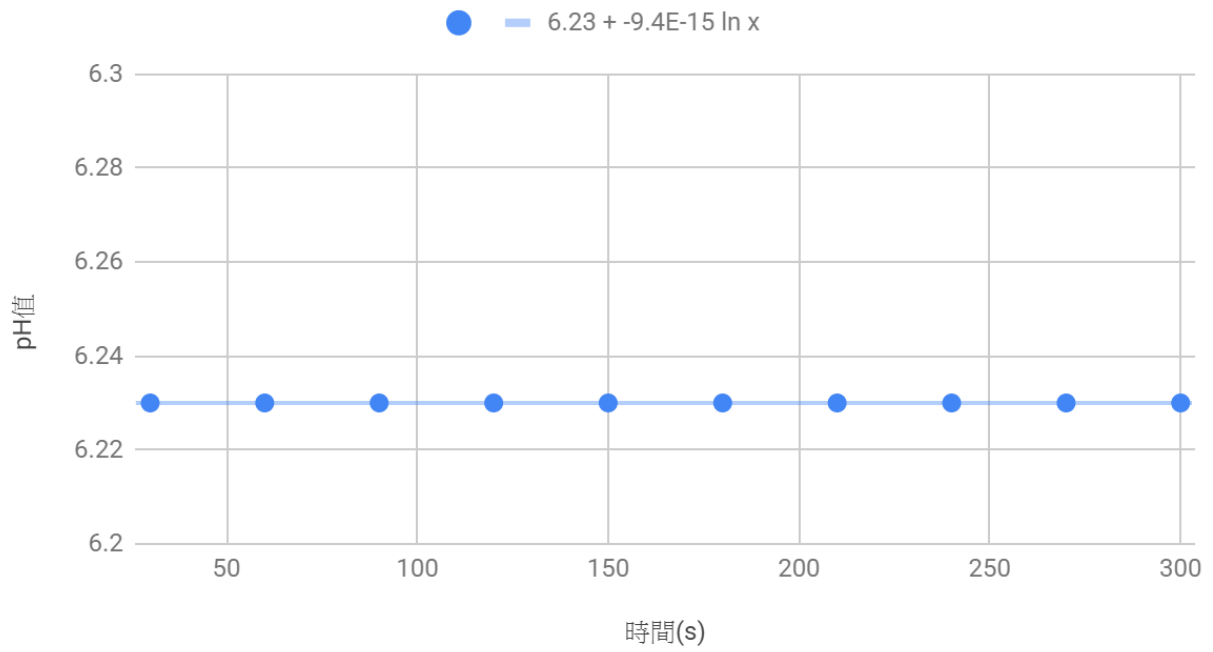
pH 值隨時間變化圖



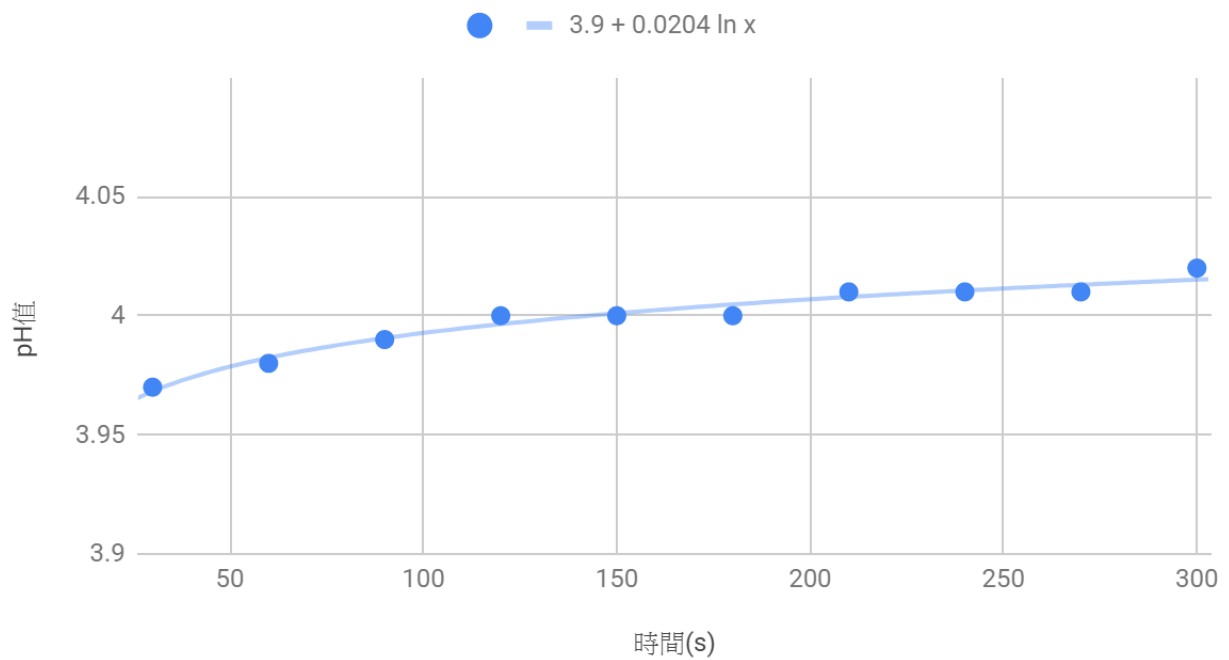
pH值隨時間變化圖



pH值隨時間變化圖

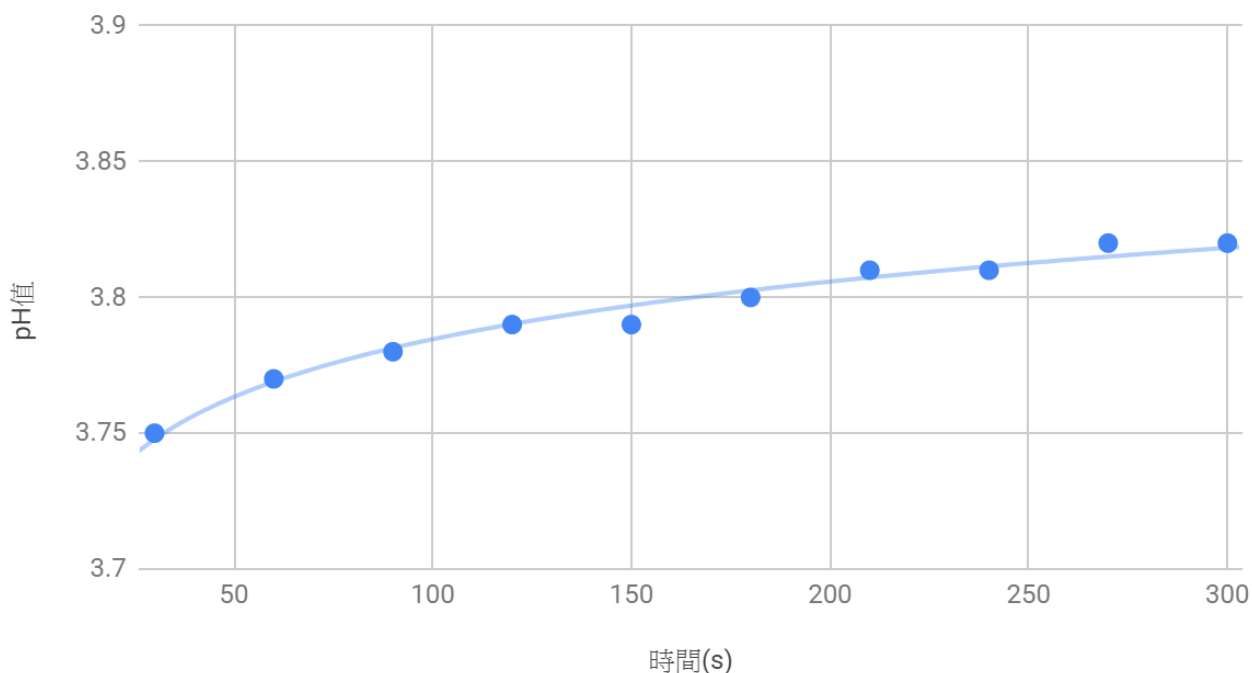


pH值隨時間變化圖

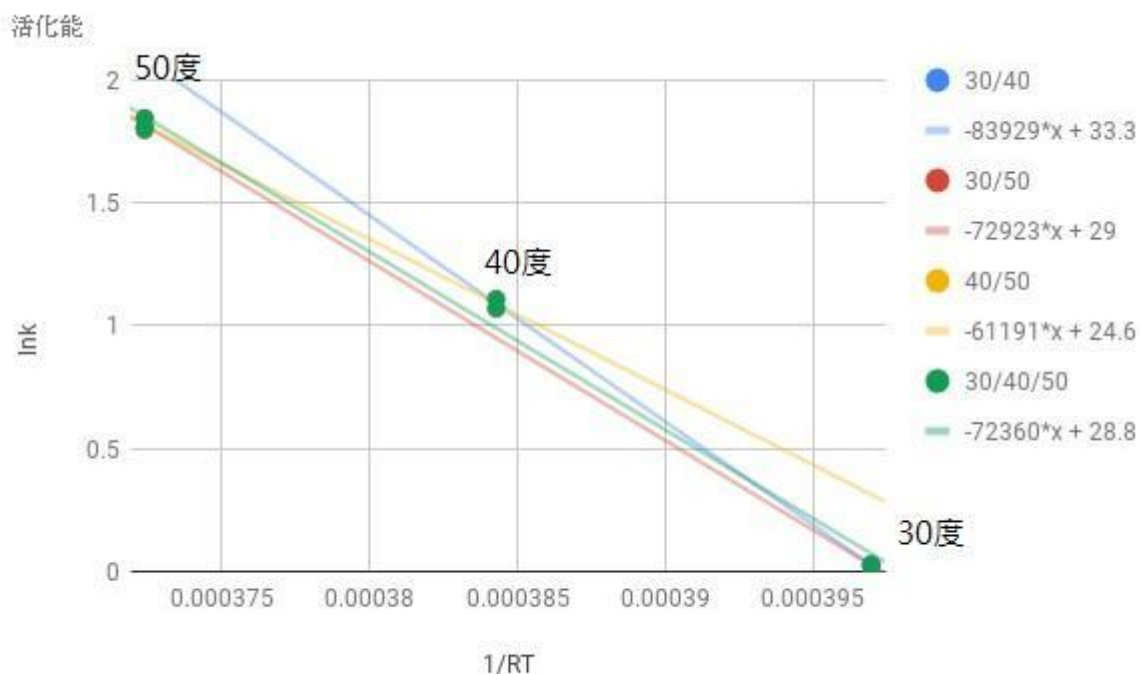




pH值隨時間變化圖



六、反應活化能



根據阿瑞尼斯方程式，我們能由不同溫度時的反應速率常數  $k$  值，取自然對數，並對  $1/RT$  作圖，則原方程式可改寫成  $\ln k = (-E_a)(1/RT) + \ln A$  可看成  $y = mx + b$ ，斜率則為  $(-E_a)$ ，根據圖形斜率並取平均，我們推得的活化能為  $72.7\text{KJ/mol}$ 。

## 七、大象牙膏的結果

我們以高濃度之  $\text{NH}_4\text{Cl}$  的鹽酸溶液、 $\text{NaNO}_2$  的水溶液反應，溫度為  $50\text{ }^\circ\text{C}$  的情況下，清潔劑所產生的泡沫，可於短時間內爆發出來。經過不斷測試後，確認  $\text{NH}_4\text{Cl}$  濃度為  $6\text{ M}$ 、 $\text{NaNO}_2$  濃度為  $4.5\text{ M}$  為最佳比例，以下為改變其他變因下的結果。

$\text{NH}_4\text{Cl}$ ( $\text{HCl}$ ) 混和前	$\text{NaNO}_2$ 混和前	容器	結果
$6\text{ M}$ ( $3\text{ M}$ ) $40\text{ mL HCl}_{(\text{aq})}$	$4.5\text{ M}$ ( $20\text{ mL H}_2\text{O}$ )	$100\text{ mL}$ 量筒	持續反應 無二氧化氮
$6\text{ M}$ ( $3\text{ M}$ ) $60\text{ mL HCl}_{(\text{aq})}$	$4.5\text{ M}$ ( $30\text{ mL H}_2\text{O}$ )	$500\text{ mL}$ 容量瓶	效果較好 持續反應 無二氧化氮
$6\text{ M}$ ( $3\text{ M}$ ) $200\text{ mL HCl}_{(\text{aq})}$	$4.5\text{ M}$ ( $100\text{ mL H}_2\text{O}$ )	$500\text{ mL}$ 容量瓶	液體爆發 有大量二氧化氮
$6\text{ M}$ ( $3\text{ M}$ ) $100\text{ mL HCl}_{(\text{aq})}$	$4.5\text{ M}$ ( $50\text{ mL H}_2\text{O}$ )	$250\text{ mL}$ 容量瓶	噴出 持續反應 有些微二氧化氮
$6\text{ M}$ ( $1.8\text{ M}$ ) $100\text{ mL HCl}_{(\text{aq})}$	$4.5\text{ M}$ ( $50\text{ mL H}_2\text{O}$ )	$250\text{ mL}$ 容量瓶	噴出 持續反應 無二氧化氮 (最佳狀態)



## 陸、討論

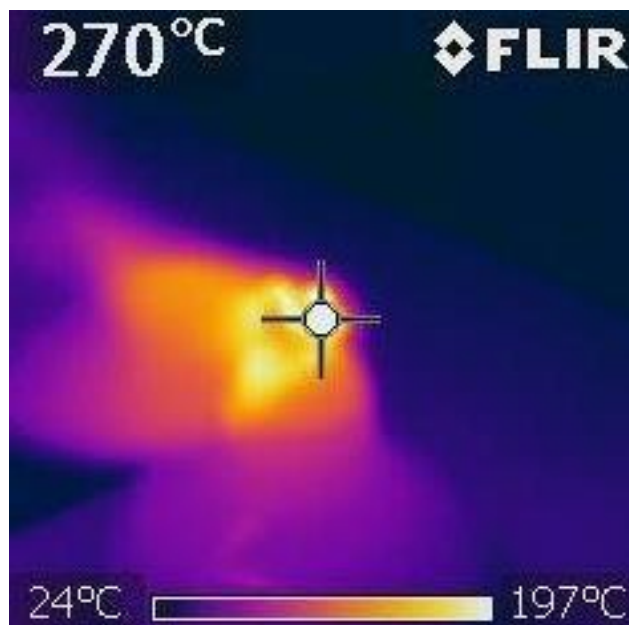
### 1、實驗的改良

#### (一)反應的相狀態

實際使用固體實驗時，要用酒精燈來回加熱，增加實驗之危險性，此外，也須在過程中避免小水滴回流否則試管因突然降溫爆裂。上述在學姊的科展作品中，改成比較安全的水溶液態，但仍要加熱至  $60^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 。

#### (二)加入催化劑，降低反應溫度

在反應中加入酸作為催化劑，使原本需要加熱才能快速進行的反應能在室溫下快速反應。



圖(四)以紅外線偵測儀拍攝燃燒的酒精燈

## 2.反應級數

### (一)僅考慮反應物初濃度

因為反應速率  $R = k[\text{NH}_4\text{Cl}]^x[\text{NaNO}_2]^y[\text{H}^+]^z$  :

1、 $[\text{NH}_4\text{Cl}]$ 、 $[\text{NaNO}_2]$ 的濃度固定，因此反應速率與 $[\text{H}^+]$ 的 0.886次方成正比。

2、 $[\text{H}^+]$ 、 $[\text{NaNO}_2]$ 的濃度固定，因此反應速率與 $[\text{NH}_4\text{Cl}]$ 的 1.15次方成正比。

3、同理，將 $[\text{H}^+]$ 、 $[\text{NH}_4\text{Cl}]$ 濃度固定，反應速率與 $[\text{NaNO}_2]$ 的 1.23次方成正比。

故由上述資料我們可以推得反應定律式： $R = k[\text{NH}_4\text{Cl}]^{1.15}[\text{NaNO}_2]^{1.23}[\text{H}^+]^{0.886}$ ，

總級數約為三級。

與文獻中的速率比較

根據文獻中，以理論計算算出不同反應物組合的反應速率圖，圖(五)，將我們實驗測得的平均有效濃度( $a_{\text{H}^+}$ )對應到  $\text{NH}_3 + \text{HNO}_2$  線上的點，圖(六)，並將該點的像素當作座標，再換算得到理論的速率比值，與我們實驗測得的平均速率比值非常接近，因此我們認為真正的反應物為氨與亞硝酸。

換算方式如下：

原始濃度 0.0489M 的 x 座標： $(5-4.45) \times 249 = 137$

原始濃度 0.0977M 的 x 座標： $(5-4.10) \times 249 = 224$

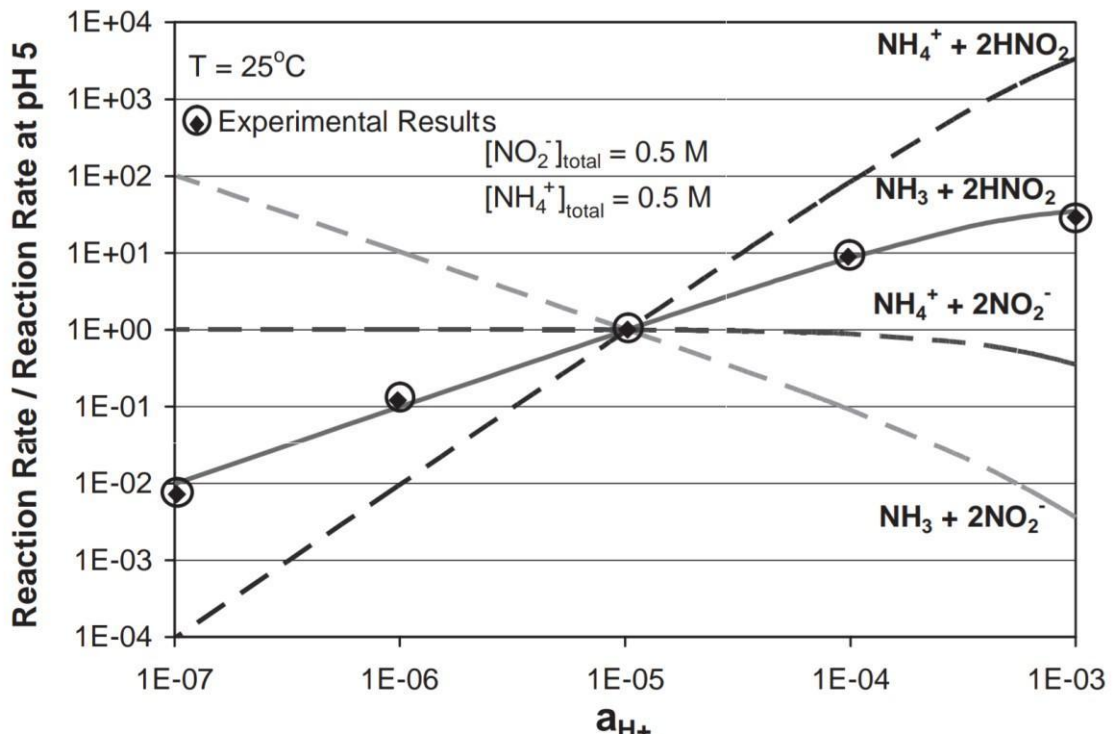
$\log(R_{\text{pH}=4.45}/R_{\text{pH}=5}) = (86-43)/86 = 0.5$

$\log(R_{\text{pH}=4.10}/R_{\text{pH}=5}) = (86-15)/86 = 0.826$

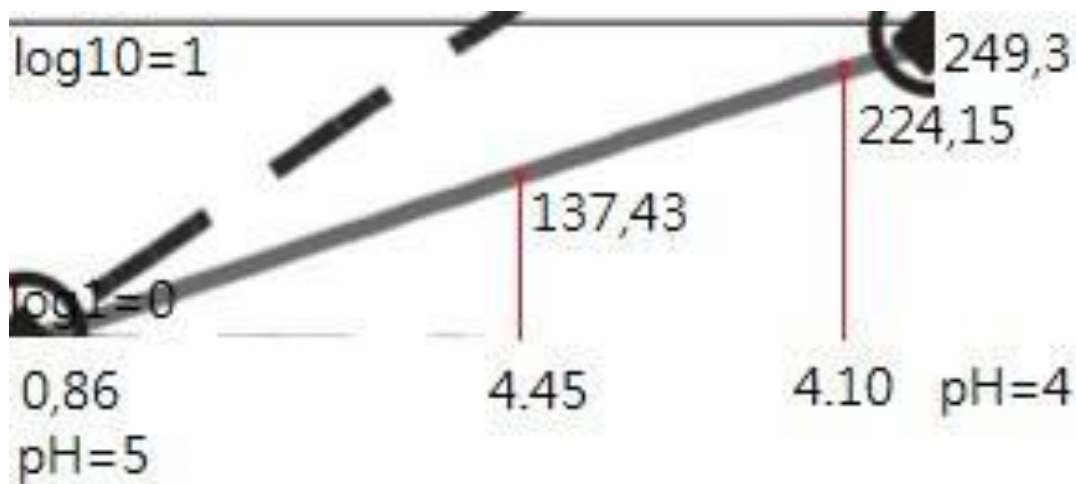
$$\log(R_{\text{pH}=4.10}/R_{\text{pH}=4.45}) = \log[(R_{\text{pH}=4.10}/R_{\text{pH}=5}) / (R_{\text{pH}=4.45}/R_{\text{pH}=5})] = \log(R_{\text{pH}=4.10}/R_{\text{pH}=5}) - \log(R_{\text{pH}=4.45}/R_{\text{pH}=5}) = 0.826 - 0.5 = 0.326$$

$$R_{\text{pH}=4.10}/R_{\text{pH}=4.45} = 10^{0.326} = 2.12$$

實驗值:  $R_{0.0947\text{M}} / R_{0.0474\text{M}} = 0.173 / 0.0936 = 1.85$

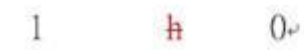


圖(五)文獻中不同反應物組合的反應速率比之理論值



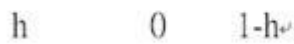
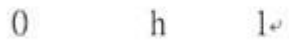
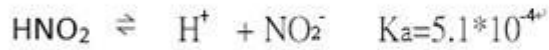
圖(六)

(三)考慮濃度及反應機構



$$\rightarrow [\text{H}^+] \cdot b / (1-b) = 5.7 \times 10^{-10}$$

$$\rightarrow b = [\text{NH}_3] = (5.7 \times 10^{-10}) / ([\text{H}^+] + 5.7 \times 10^{-10})$$



$$\rightarrow [\text{H}^+] \cdot (1-h+a) / (h-a) = 5.1 \times 10^{-4}$$

$$\rightarrow h-a = [\text{HNO}_2] = ([\text{H}^+]) / ([\text{H}^+] + 5.1 \times 10^{-4})$$

考慮到銨離子與亞硝酸根離子在溶液中會有緩衝效果，因此溶液中的氫離子濃度並不等於原始濃度，且會影響銨離子解離與亞硝酸解離的平衡，因此我們利用 pH 儀測量出的 pH 值算出溶液中氨與亞硝酸的濃度，再根據文獻中的反應級數與反應機構，因氫離子不參與反應，僅影響反應物氨與亞硝酸的濃度，因此代入速率定律式  $R = k[\text{NH}_3]^1 [\text{HNO}_2]^2$ ，發現的確與我們的實驗結果非常接近，所以我們認為氫離子的確不參與反應，只藉由影響反應物氨與亞硝酸的濃度來加快反應速率，且氨的級數與亞硝酸的級數約為 1 跟 2。

$$R_{0.0947M} / R_{0.0474M} = 0.173 / 0.0936 = 1.85$$

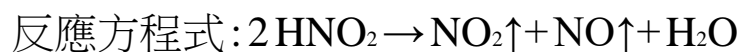
$$[\text{ratio}(\text{NH}_3)][\text{ratio}(\text{HNO}_2)]^2 = [0.445][2.11]^2 = 1.94$$

$$[\text{ratio}(\text{NH}_4^+)]^2 [\text{ratio}(\text{NO}_2^-)]^2 [\text{ratio}(\text{H}^+)] = [1.00][0.924]^2 [2.27] = 1.94$$

- 我們從溫度對反應速率的關係發現室溫附近反應時，溫度每增加 10 度，反應速率約增加 2~3 倍，與理論值的兩倍接近：40 °C / 30 °C 的平均比值:2.90，50 °C / 40 °C 的平均比值:2.03，因為推測此反應為放熱反應(文獻: $\Delta H = -79.95 \text{ kcal/mol}$ )所以當溫度變高的時候速率增加的倍數會越來越少，符合實驗結果。
- 經由不同溫度(30 °C、40 °C、50 °C)的反應速率，我們求出不同溫度時反應速率的 k 值，再取自然對數，並對  $1/RT$  作圖，算出斜率為-72360，又斜率為-Ea，所以此反應加入催化劑的活化能為 72.4 KJ/mol。比對學姊無催化劑的 106 KJ/mol，有催化劑的

Ea 比較小。

5. 在之前的實驗嘗試中，我們發現當高濃度的亞硝酸鈉與鹽酸反應時，會產生大量的二氧化氮，因此我們藉由降低亞硝酸鈉的濃度來降低二氧化氮產生的可能性。我們改變了許多的實驗變因，發現這個實驗可應用在大象牙膏，而在亞硝酸鈉為 4M 時，噴發效果最好，如圖(七)，但是量不宜太多，因為可能會有噴發二氧化氮的可能性，如圖(八)。



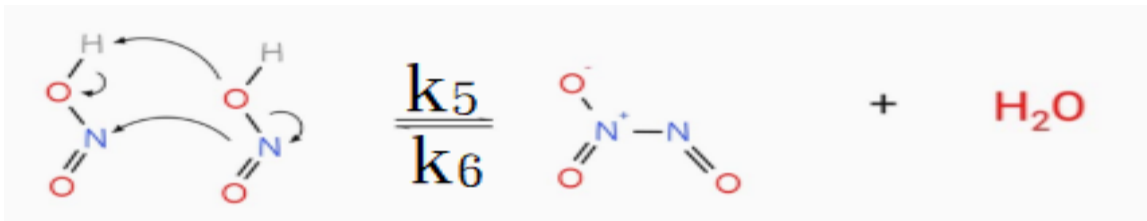
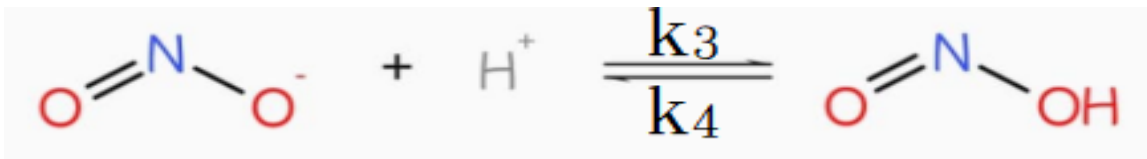
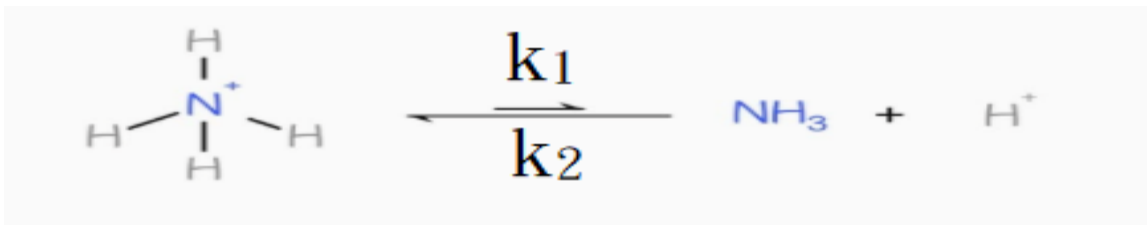
圖(七)氮氣牙膏



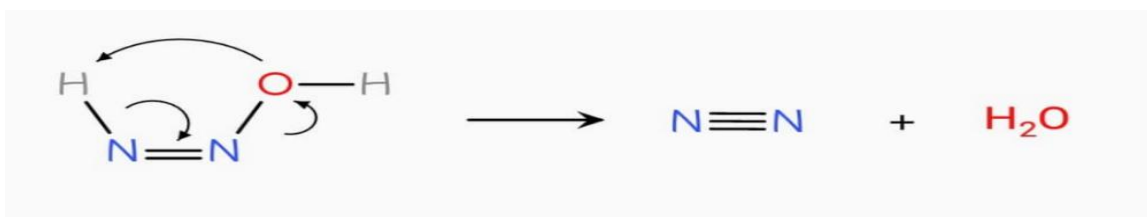
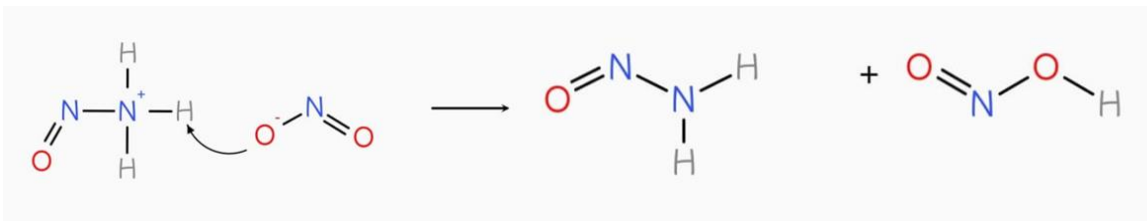
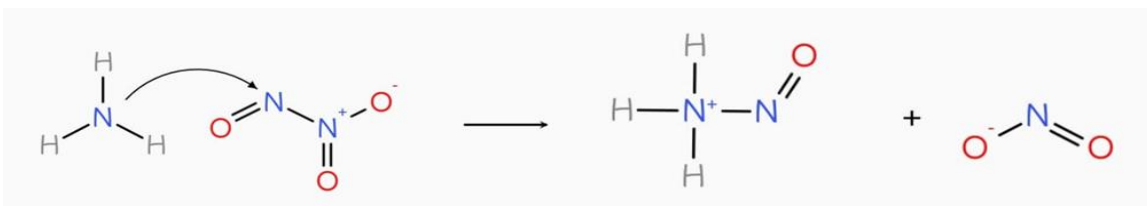
圖(八)氮氣牙膏(大量，含二氧化氮，危險)

## 6. 六、反應機構

論文觀點



速率決定步驟 slow step:



$$k_1[\text{NH}_4^+] = k_2[\text{NH}_3][\text{H}^+] \Rightarrow [\text{NH}_3] = (k_1/k_2) [\text{NH}_4^+]/[\text{H}^+] \text{-----(1)}$$

$$k_3[\text{NO}_2^-][\text{H}^+] = k_4[\text{HNO}_2] \Rightarrow [\text{HNO}_2] = (k_3/k_4) [\text{NO}_2^-][\text{H}^+] \text{-----(2)}$$

$$k_5[\text{HNO}_2]^2 = k_6[\text{N}_2\text{O}_3] \Rightarrow [\text{N}_2\text{O}_3] = (k_5/k_6) [\text{HNO}_2]^2 \text{-----(3)}$$

總反應速率=速率決定步驟速率= $k_7[\text{NH}_3][\text{N}_2\text{O}_3]$

$= k_7(k_1/k_2)([\text{NH}_4^+]/[\text{H}^+])(k_5/k_6)[\text{HNO}_2]^2 = k_7(k_1/k_2)([\text{NH}_4^+]/[\text{H}^+])(k_3/k_4)^2([\text{NO}_2^-][\text{H}^+)]^2$

$= k[\text{NH}_4^+][\text{NO}_2^-]^2[\text{H}^+]$

## 柒、結論與未來展望

### 1、 結論

(一)我們使用室溫水溶液狀態下的反應,降低了整個實驗的危險性。

(二)由討論中,改變反應物濃度、催化劑濃度、溫度變因的各疊圖中,由其數據發現濃度、催化劑濃度、溫度能造成反應結果顯著的影響。

(三)由兩反應物與催化劑之級數皆約為 1,得知反應總級數約為三級。反應速率定律式: $R = k[\text{NH}_4\text{Cl}]^{1.15}[\text{NaNO}_2]^{1.23}[\text{H}^+]^{0.886}$ 。

(四)此反應加入催化劑後的活化能為 72.4 KJ/mol,比學姊無催化劑實驗求出的活化能 106 KJ/mol 小。

(五)我們將實驗成果應用在製作氮氣版的大象牙膏時,以高濃度  $\text{NH}_4\text{Cl}$  的鹽酸水溶液及高濃度的  $\text{NaNO}_2$  洗碗精水溶液,能產生強烈的噴發感,比大象牙膏使用高濃度的雙氧水安全很多。

### 2、 展望及未來應用

(一)在固體實驗及用火焰加熱的安全性考量下,我們以更安全的水溶液態及室溫下的催化,即能將製造氮氣,希望我們的反應速率實驗可以納入未來高中實驗課程。

(二)經由我們所推出的速率定律式中,我們發現我們所推得的反應級數與文獻上的  $R = k[\text{NH}_4\text{Cl}]^{1.2}[\text{NaNO}_2]^{1.5}[\text{H}^+]^{1.6}$  有些許差異,因此我們打算做更多組數據,以期降低誤差值。

(三)測量高溫時反應中的 pH 值,並用文獻(二)的觀點計算活化能。

(四)在進行大象牙膏的實驗時,我們以安全無毒的  $\text{NaNO}_2$  及  $\text{NH}_4\text{Cl}$  溶液,並在溫熱的條件下以  $\text{HCl}$  催化產生安全的氮氣泡沫,在參考網路上曼陀珠加可樂的實驗影片,我們希望未來能以亞硝酸鈉固體加入氯化銨鹽酸溶液的方式製備氮氣版大象牙膏,增加噴發的威力及降低原實驗的可能發生危險的可能性,進一步應用在未來的教學上。

## 捌、參考資料及其他

### 二級反應

<http://www.wikiwand.com/zh-tw/%E4%BA%8C%E7%B4%9A%E5%8F%8D%E6%87%89#/%E7%AC%AC%E4%B8%80%E7%A7%8D%E6%83%85%E5%86%B5>

### 三級反應

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%89%E7%B4%9A%E5%8F%8D%E6%87%89> 化學反應速率

[http://www.mingdao.edu.tw/physics/pdf/matter\\_06.pdf](http://www.mingdao.edu.tw/physics/pdf/matter_06.pdf) 反應級數

<http://natural.cms.h.tc.edu.tw/senior/chem/h2text/7-1>

反應級數-維基百科

<https://zh.m.wikipedia.org/zh-tw/%E5%8F%8D%E5%BA%94%E7%BA%A7> 活化能

<http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=40809> 實驗一氮氣的製備與反應

<https://www.youtube.com/watch?v=D89VOyDLPy0&t=146s> 臺灣科學教育館

<https://twsf.ntsec.gov.tw/Article.aspx?a=41&lang=1>

$R=k[\text{NH}_4\text{Cl}]^{1.2}[\text{NaNO}_2]^{1.5}[\text{HCl}]^{1.6}$

[https://r.search.yahoo.com/\\_ylt=AwrTFSSTw9lbQR0Agr1r1gt.;\\_ylu=X3oDMTEyMzJnNWE0BG](https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrTFSSTw9lbQR0Agr1r1gt.;_ylu=X3oDMTEyMzJnNWE0BG)

<http://NvbG8DdHcxBHBvcwMxBHZ0aWQDQjY0NjJfMQRzZWMDc3I/RV=2/RE=1541026835/RO=10/RU=https%3a%2f%2fttu-ir.tdl.org%2fttuir%2fbitstream%2fhandle%2f2346%2f58550%2fAMINI-THESIS->



[2014.pdf%3fsequence%3d1/RK=2/RS=H\\_j\\_RV5NTb0CQzdg6pxPUK2bS7g-](#)

Study on the Kinetics of Reaction Between NaNO<sub>2</sub> and NH<sub>4</sub>Cl

[http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTOTAL-SYHH201209020.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-SYHH201209020.htm)

107 年全國科展佳作宜蘭高中『一「氮」遇見你，氯化銨與亞硝酸鈉的邂逅』

[https://l.facebook.com/l.php?u=https%3A%2F%2Fdocs.google.com%2Fdocument%2F%2F1e0HZZi4i\\_Aaryo2pZnN8cFgOTF\\_-866s0BPUOYny5TY%2Fedit%3Fusp%3Dsharing%26fbclid%3DIwAR3-Ned8K-onDVxR4NL-P3c8RAbPAjt9iAZmigruG-6zWHga1oQaAqBjDQ&h=AT0jeViNUT95ZmQsISM3PulrYod0oIvq5eaIQZriO5gRPqhVelfOJn7pCzM5MxfHJmXWcQMDvAp4dUyOxSBWkxH2KL0hUsI4XzMuPEIEr3BpSmVIRn7XPrRcHYGjeo7botGA](https://l.facebook.com/l.php?u=https%3A%2F%2Fdocs.google.com%2Fdocument%2F%2F1e0HZZi4i_Aaryo2pZnN8cFgOTF_-866s0BPUOYny5TY%2Fedit%3Fusp%3Dsharing%26fbclid%3DIwAR3-Ned8K-onDVxR4NL-P3c8RAbPAjt9iAZmigruG-6zWHga1oQaAqBjDQ&h=AT0jeViNUT95ZmQsISM3PulrYod0oIvq5eaIQZriO5gRPqhVelfOJn7pCzM5MxfHJmXWcQMDvAp4dUyOxSBWkxH2KL0hUsI4XzMuPEIEr3BpSmVIRn7XPrRcHYGjeo7botGA)

[0HZZi4i\\_Aaryo2pZnN8cFgOTF\\_-](#)

[866s0BPUOYny5TY%2Fedit%3Fusp%3Dsharing%26fbclid%3DIwAR3-Ned8K-onDVxR4NL-](#)

[P3c8RAbPAjt9iAZmigruG-](#)

[6zWHga1oQaAqBjDQ&h=AT0jeViNUT95ZmQsISM3PulrYod0oIvq5eaIQZriO5gRPqhVelfOJn7pCzM5Mxf](#)

[HJmXWcQMDvAp4dUyOxSBWkxH2KL0hUsI4XzMuPEIEr3BpSmVIRn7XPrRcHYGjeo7botGA](#)

反應機構

[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250903003178?fbclid=IwAR3ueghcAOuXV0MFaC1eVYVDt1nxhWa7rlhk3XPXb2ja\\_DqZCyPNBjndrKE](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250903003178?fbclid=IwAR3ueghcAOuXV0MFaC1eVYVDt1nxhWa7rlhk3XPXb2ja_DqZCyPNBjndrKE)

[ueghcAOuXV0MFaC1eVYVDt1nxhWa7rlhk3XPXb2ja\\_DqZCyPNBjndrKE](#)

## 玖、附錄

25 °C 2 MNH<sub>4</sub>Cl (0.0947M HCl<sub>(aq)</sub>) + 2 M NaNO<sub>2(aq)</sub>

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	4.6	9.8	15.1	22.5	26.7	32.9	38.5	44.1	49.9	55.0

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	5.1	9.9	15.2	21.1	26.4	30.7	36.0	42.1	46.7	50.7

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	4.9	10.3	15.8	21.0	26.7	32.8	38.0	43.6	49.3	53.5

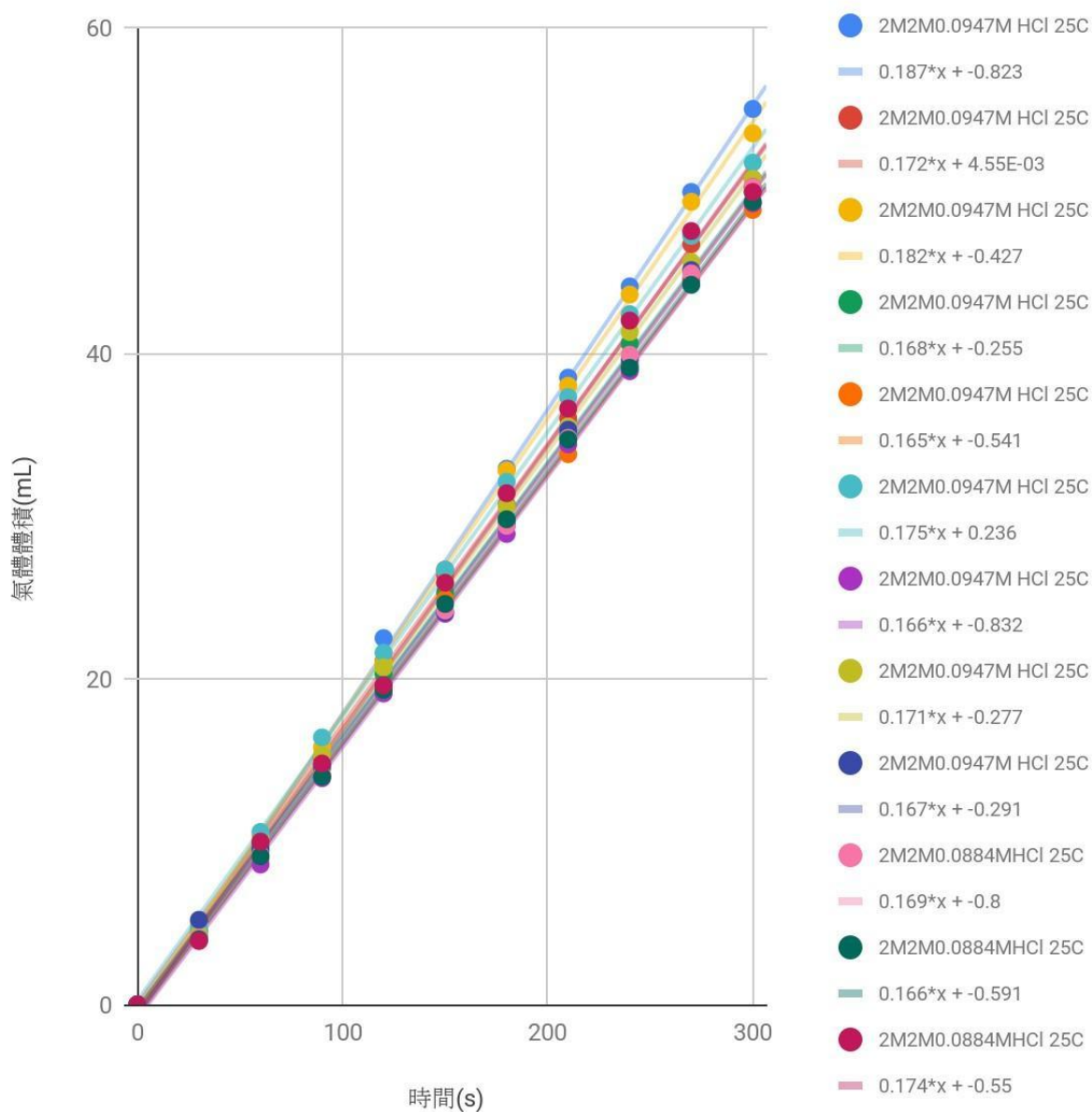
時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	4.1	9.0	14.1	19.2	24.9	29.4	33.8	39.3	44.5	48.8

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	4.7	10.6	16.4	21.6	26.7	32.1	37.3	42.4	47.2	51.7

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	4.0	8.6	13.9	19.1	24.0	28.9	34.4	38.9	44.3	49.2

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	4.3	9.4	15.3	20.7	25.9	30.6	35.5	41.3	45.6	50.7

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	5.2	9.5	14.7	19.6	24.1	29.5	35.3	39.6	45.1	50.2





25 °C 2 M NH<sub>4</sub>Cl (0.0474M HCl<sub>(aq)</sub>) + 2 M NaNO<sub>2(aq)</sub>

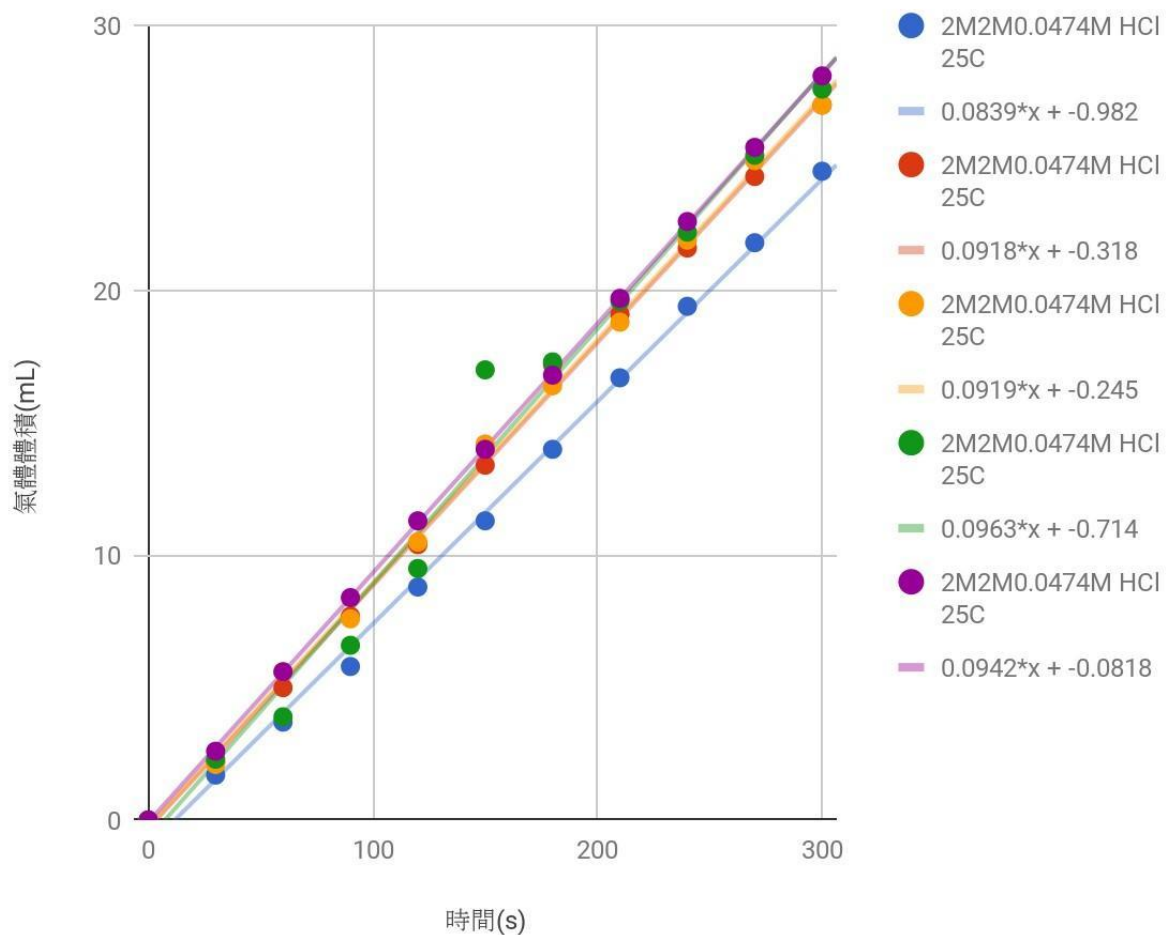
時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	1.7	3.7	5.8	8.8	11.3	14.0	16.7	19.4	21.8	24.5

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	2.2	5.0	7.7	10.4	13.4	17.2	19.1	21.6	24.3	27.0

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	2.1	5.6	7.6	10.5	14.2	16.4	18.8	21.9	24.9	27.0

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	2.3	3.9	6.6	9.5	17.0	17.3	19.6	22.2	25.1	27.6

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	2.6	5.6	8.4	11.3	14.0	16.8	19.7	22.6	25.4	28.1





25 °C 2 MNH<sub>4</sub>Cl(0.0947M HCl<sub>(aq)</sub>) + 1 M NaNO<sub>2</sub>(<sub>aq</sub>)

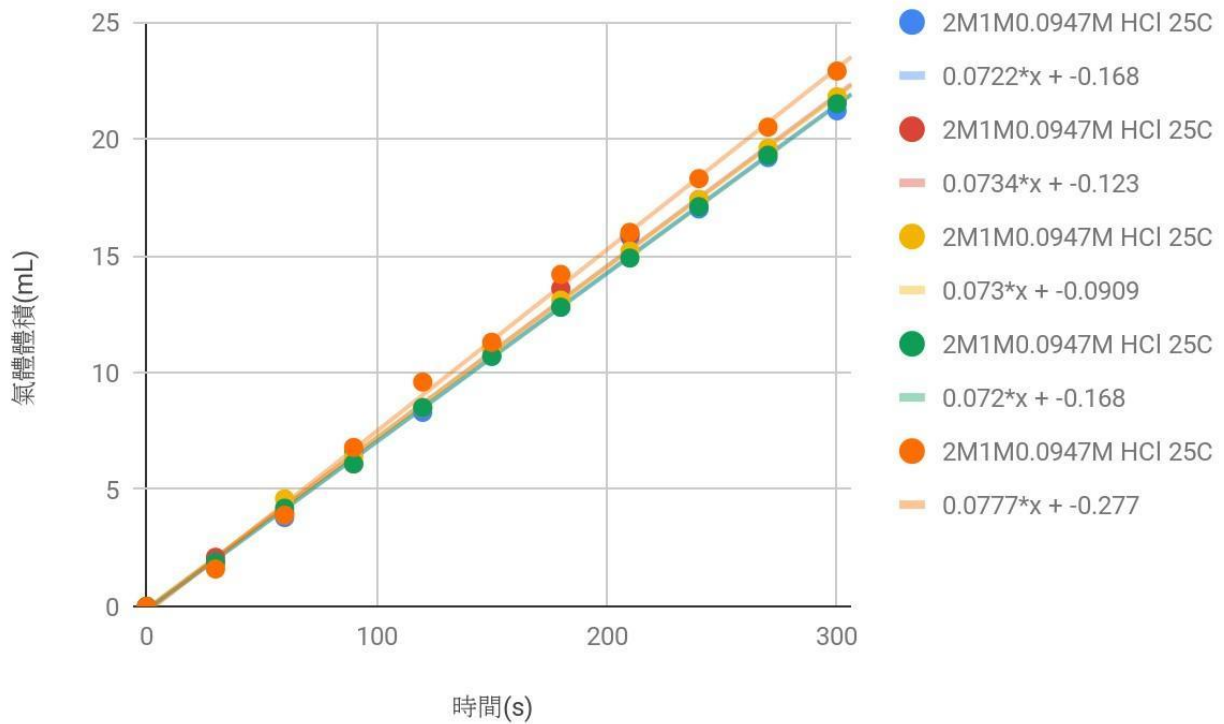
時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	1.8	3.8	6.6	8.3	10.7	12.8	15.8	17.0	19.2	21.2

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	2.1	4.0	6.1	8.5	11.1	13.6	15.9	17.4	19.4	21.6

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	1.8	4.6	6.4	8.5	11.0	13.1	15.2	17.4	19.6	21.8

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	1.9	4.2	6.1	8.5	10.7	12.8	14.9	17.1	19.3	21.5

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	1.6	3.9	6.8	9.6	11.3	14.2	16.0	18.3	20.5	22.9





25 °C 1 M NH<sub>4</sub>Cl (0.0947 M HCl<sub>(aq)</sub>) + 2 M NaNO<sub>2(aq)</sub>

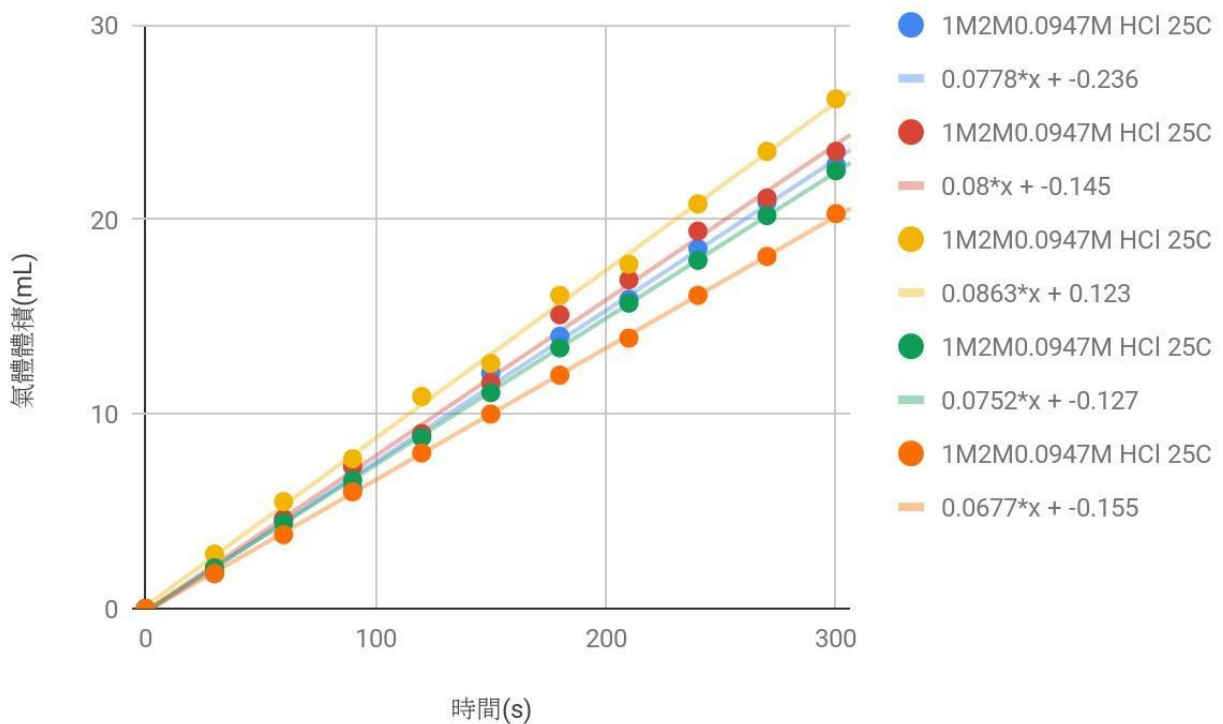
時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	1.8	4.6	6.2	8.9	12.1	14.0	15.9	18.5	20.9	22.8

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	1.9	4.6	7.3	9.0	11.6	15.1	16.9	19.4	21.1	23.5

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	2.8	5.5	7.7	10.9	12.6	16.1	17.7	20.8	23.5	26.2

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(m)	0	2.1	4.4	6.6	8.8	11.1	13.4	15.7	17.9	20.2	22.5

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	1.8	3.8	6.0	8.0	10.0	12.0	13.9	16.1	18.1	20.3



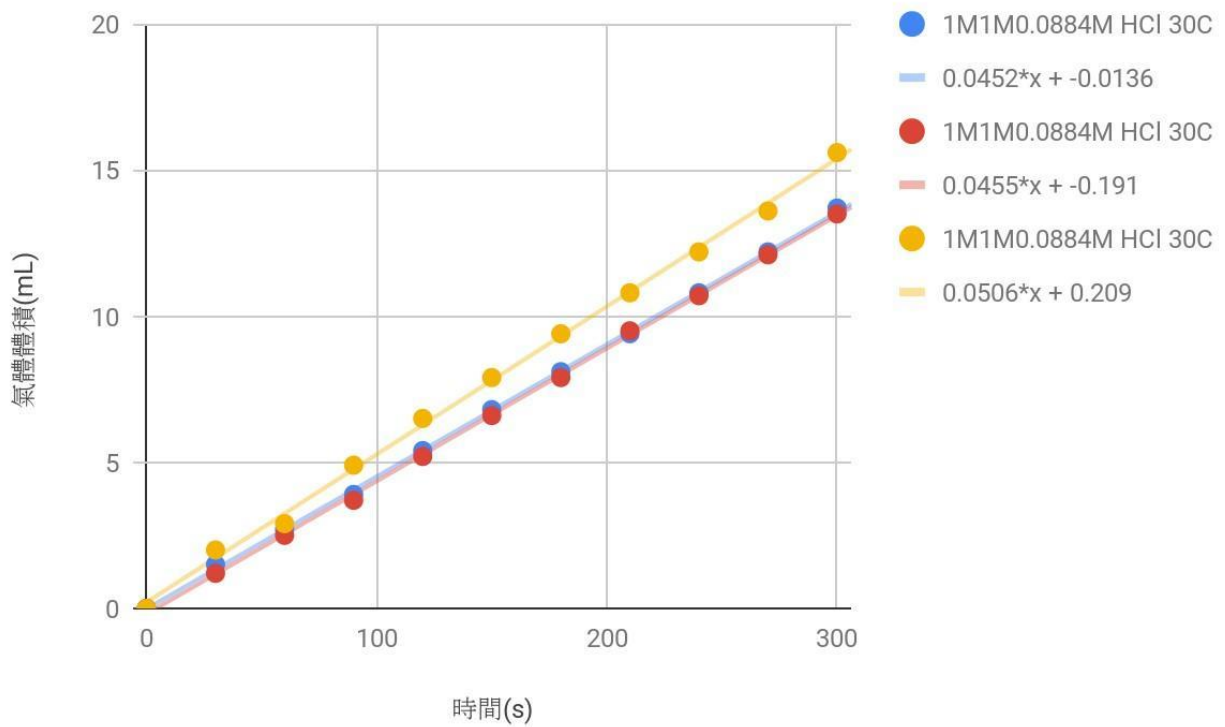


30 °C 1 M NH<sub>4</sub>Cl (0.0884 M HCl<sub>(aq)</sub>) + 1 M NaNO<sub>2(aq)</sub>

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	1.5	2.7	3.9	5.4	6.8	8.1	9.4	10.8	12.2	13.7

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	1.2	2.5	3.7	5.2	6.6	7.9	9.5	10.7	12.1	13.5

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	2.0	2.9	4.9	6.5	7.9	9.4	10.8	12.2	13.6	15.6

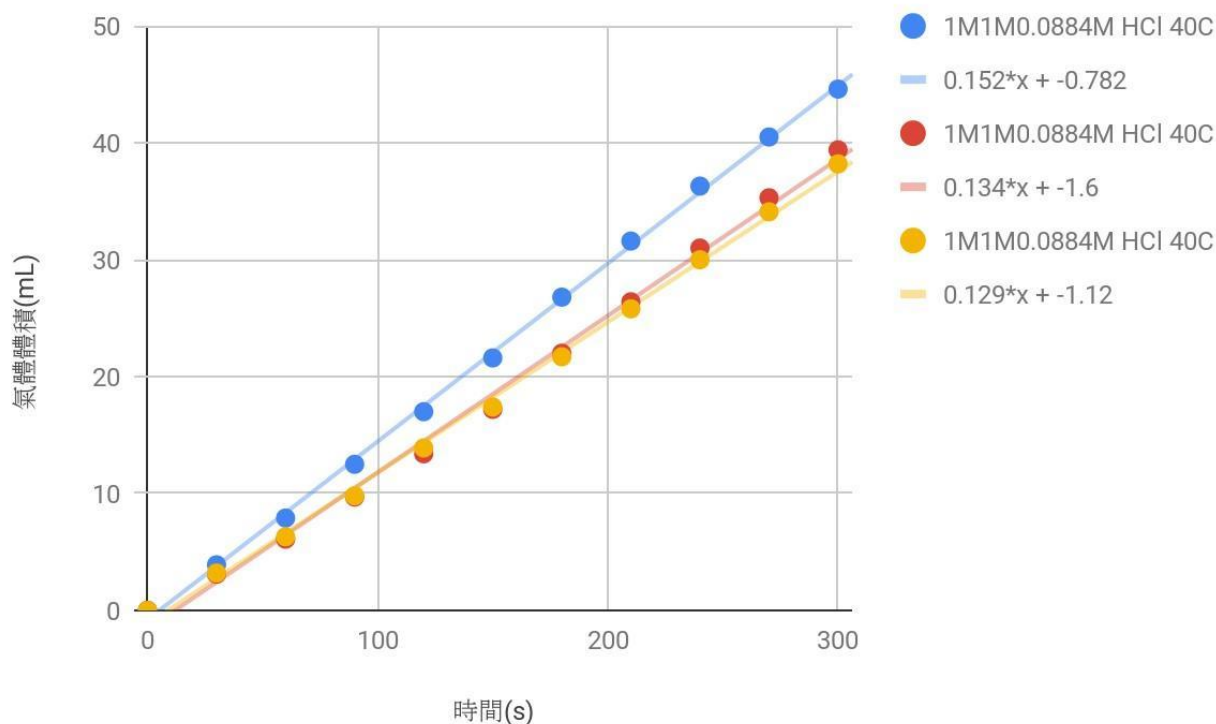


40 °C 1 M NH<sub>4</sub>Cl (0.0884 M HCl<sub>(aq)</sub>) + 1 M NaNO<sub>2(aq)</sub>

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	3.1	6.1	9.7	13.4	17.2	22.0	26.4	31.0	35.3	39.4

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	3.2	6.3	9.8	13.9	17.4	21.7	25.8	30.0	34.1	38.2

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	3.9	7.9	12.5	17.0	21.6	26.8	31.6	36.3	40.5	44.6

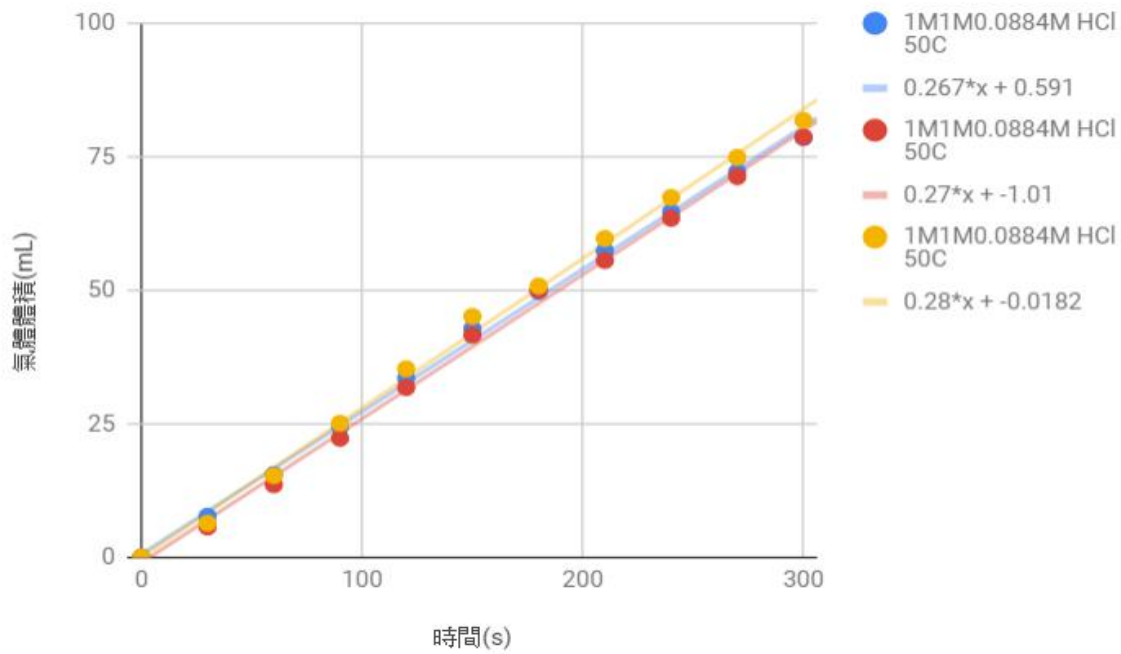


50 °C 1 M NH<sub>4</sub>Cl (0.0884 M HCl<sub>(aq)</sub>) + 1 M NaNO<sub>2(aq)</sub>

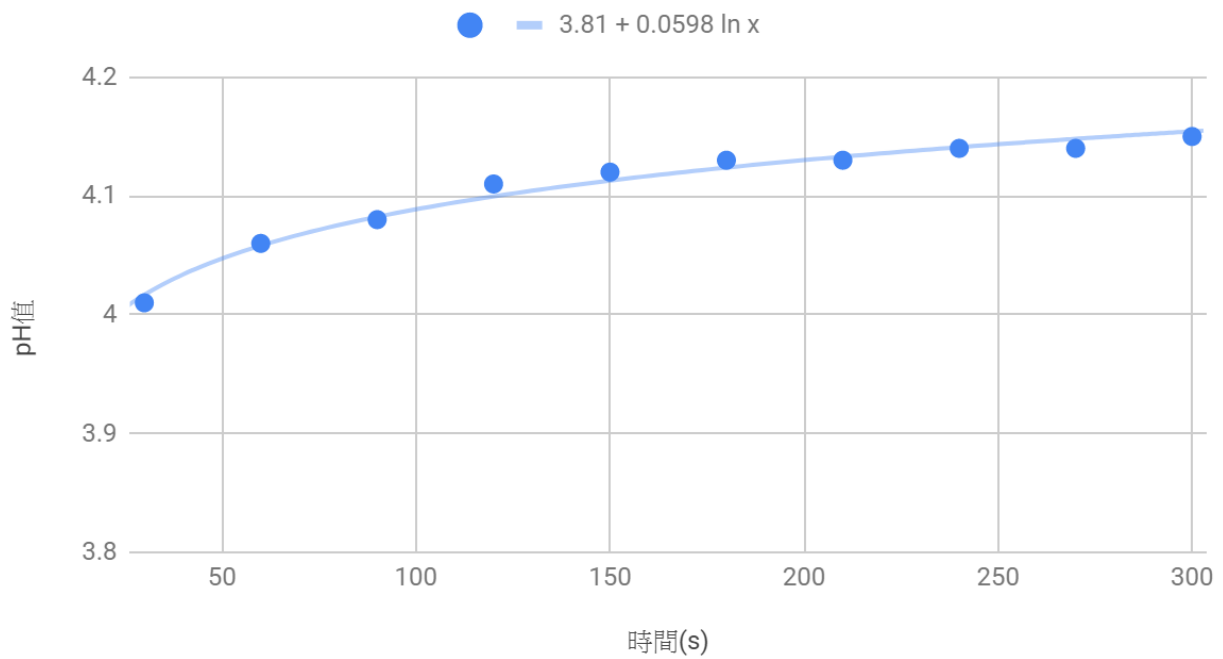
時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	7.70	15.5	24.5	33.6	42.8	49.8	57.4	64.7	72.2	78.6

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	5.70	13.6	22.3	31.8	41.6	50.0	55.6	63.5	71.3	78.7

時間(sec)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
氮氣(mL)	0	6.4	15.3	25.1	35.3	45.1	50.8	59.7	67.4	74.9	81.8



pH值隨時間變化圖

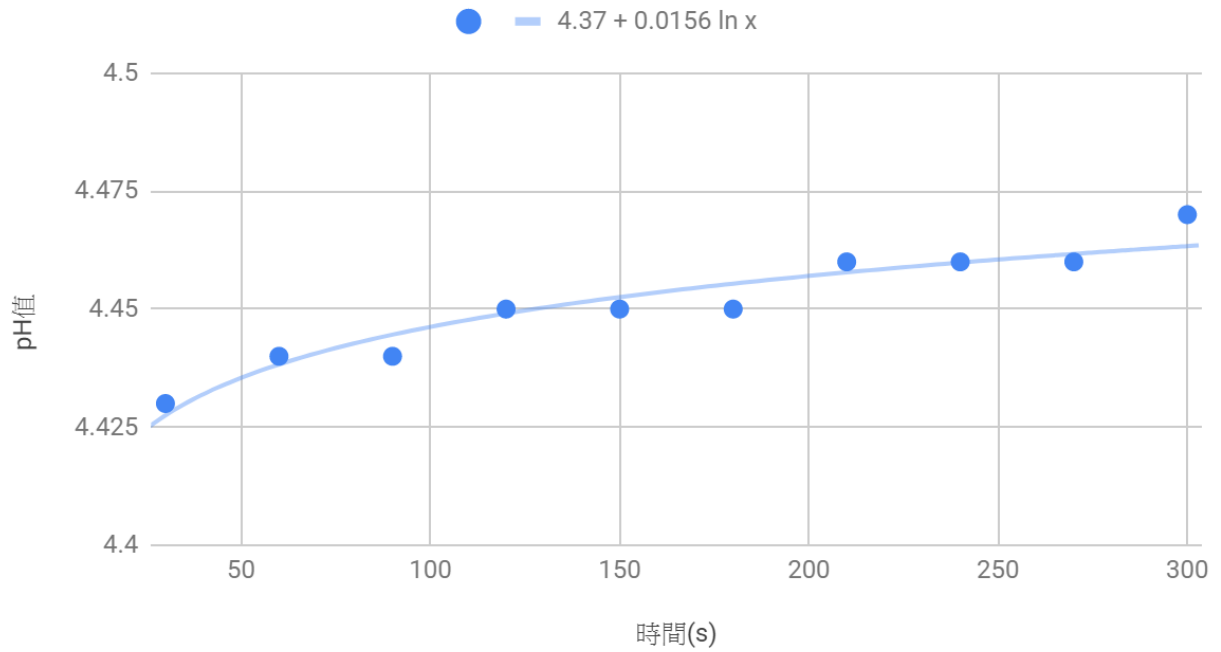


2019/4/13	2M2M0.1M	H0=0.0977/2=0.488	R=0.173	average
1st	H	NH3	HNO2	
4.03	0.00009332543008	0.000006107622737	0.1546850595	
4.04	0.00009120108394	0.000006249886657	0.1516981362	
4.07	0.00008511380382	0.000006696871215	0.1430210546	H
4.09	0.00008128305162	0.000007012482818	0.1374689354	0.00008003655126
4.10	0.00007943282347	0.000007175823354	0.1347614526	

4.11	0.00007762471166	0.000007342968525	0.1320991274	NH3
4.12	0.0000758577575	0.000007514006949	0.1294815278	0.000007169077838
4.12	0.0000758577575	0.000007514006949	0.1294815278	
4.13	0.00007413102413	0.000007689029309	0.1269082125	HNO2
4.13	0.00007413102413	0.000007689029309	0.1269082125	0.1355356344
4.14	0.00007244359601	0.0000078681284	0.1243787321	

2019/4/13	2M2M0.1M	H0=0.0977/2=0.488		average
2nd	H	NH3	HNO2	
3.90	0.0001258925412	0.000004527650438	0.1979776975	3.96
3.99	0.0001023292992	0.000005570221132	0.1671148177	4.01
4.05	0.00008912509381	0.000006395464287	0.1487587396	4.06
4.07	0.00008511380382	0.000006696871215	0.1430210546	4.08
4.12	0.0000758577575	0.000007514006949	0.1294815278	4.11
4.13	0.00007413102413	0.000007689029309	0.1269082125	4.12
4.14	0.00007244359601	0.0000078681284	0.1243787321	4.13
4.14	0.00007244359601	0.0000078681284	0.1243787321	4.13
4.15	0.00007079457844	0.000008051399179	0.1218926296	4.14
4.16	0.00006918309709	0.000008238938813	0.1194494408	4.14
4.16	0.00006918309709	0.000008238938813	0.1194494408	4.15

# pH值隨時間變化圖



2019/4/13	2M2M0.05M	H0=0.0977/4=0.244	
1st	H	NH3	HNO2
4.43	0.00003715352291	0.00001534151302	0.06790328738
4.43	0.00003715352291	0.00001534151302	0.06790328738
4.44	0.00003630780548	0.00001569885715	0.06646034546
4.44	0.00003630780548	0.00001569885715	0.06646034546
4.44	0.00003630780548	0.00001569885715	0.06646034546
4.44	0.00003630780548	0.00001569885715	0.06646034546
4.45	0.00003548133892	0.00001606452464	0.06504592622
4.45	0.00003548133892	0.00001606452464	0.06504592622
4.45	0.00003548133892	0.00001606452464	0.06504592622
4.46	0.00003467368505	0.00001643870933	0.06365955617
4.46	0.00003467368505	0.00001643870933	0.06365955617

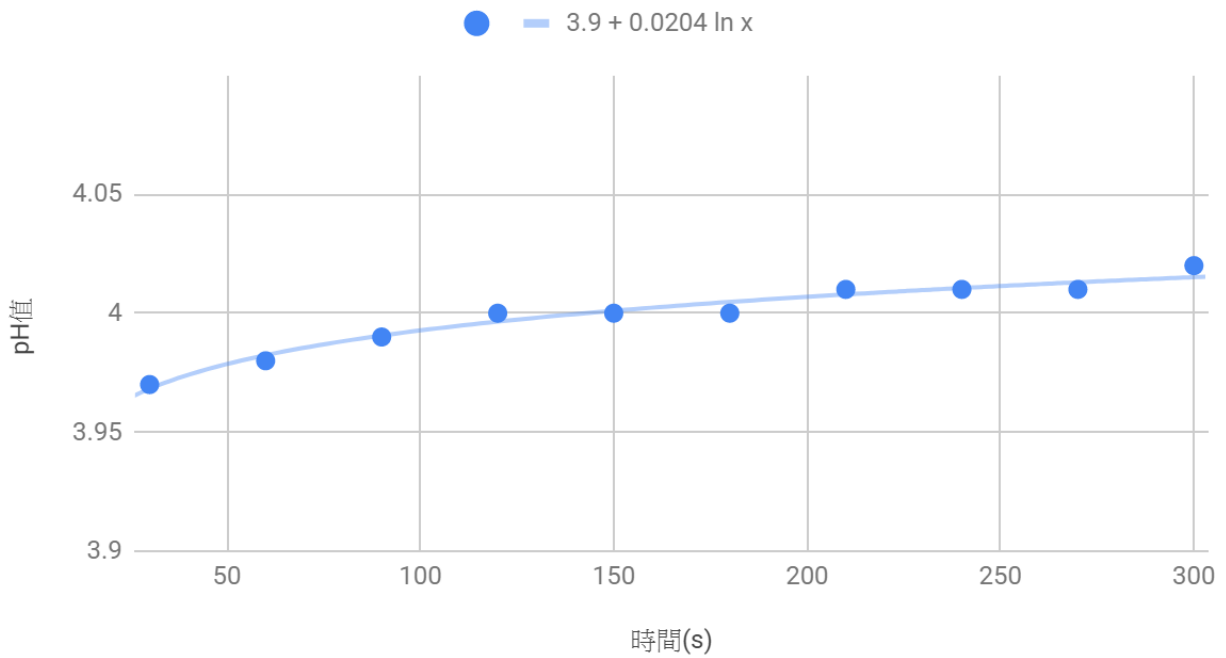
2019/4/13	2M2M0.05M	H0=0.0977/4=0.244		2M2M0.05M average
2nd	H	NH3	HNO2	
4.43	0.00003715352291	0.00001534151302	0.06790328738	4.43
4.44	0.00003630780548	0.00001569885715	0.06646034546	4.43
4.44	0.00003630780548	0.00001569885715	0.06646034546	4.44
4.45	0.00003548133892	0.00001606452464	0.06504592622	4.44



6.22	0.0000006025595861	0.000945070534	0.001180095115
------	--------------------	----------------	----------------

2019/4/13	2M2M0			average
2nd	H	NH3	HNO2	
6.25	0.0000005623413252	0.00101259288	0.001101415595	6.23
6.24	0.0000005754399373	0.000989566261	0.001127041946	6.23
6.24	0.0000005754399373	0.000989566261	0.001127041946	6.23
6.24	0.0000005754399373	0.000989566261	0.001127041946	6.23
6.24	0.0000005754399373	0.000989566261	0.001127041946	6.23
6.24	0.0000005754399373	0.000989566261	0.001127041946	6.23
6.24	0.0000005754399373	0.000989566261	0.001127041946	6.23
6.24	0.0000005754399373	0.000989566261	0.001127041946	6.23
6.24	0.0000005754399373	0.000989566261	0.001127041946	6.23
6.24	0.0000005754399373	0.000989566261	0.001127041946	6.23
6.24	0.0000005754399373	0.000989566261	0.001127041946	6.23
6.24	0.0000005754399373	0.000989566261	0.001127041946	6.23
6.24	0.0000005754399373	0.000989566261	0.001127041946	6.23

pH值隨時間變化圖



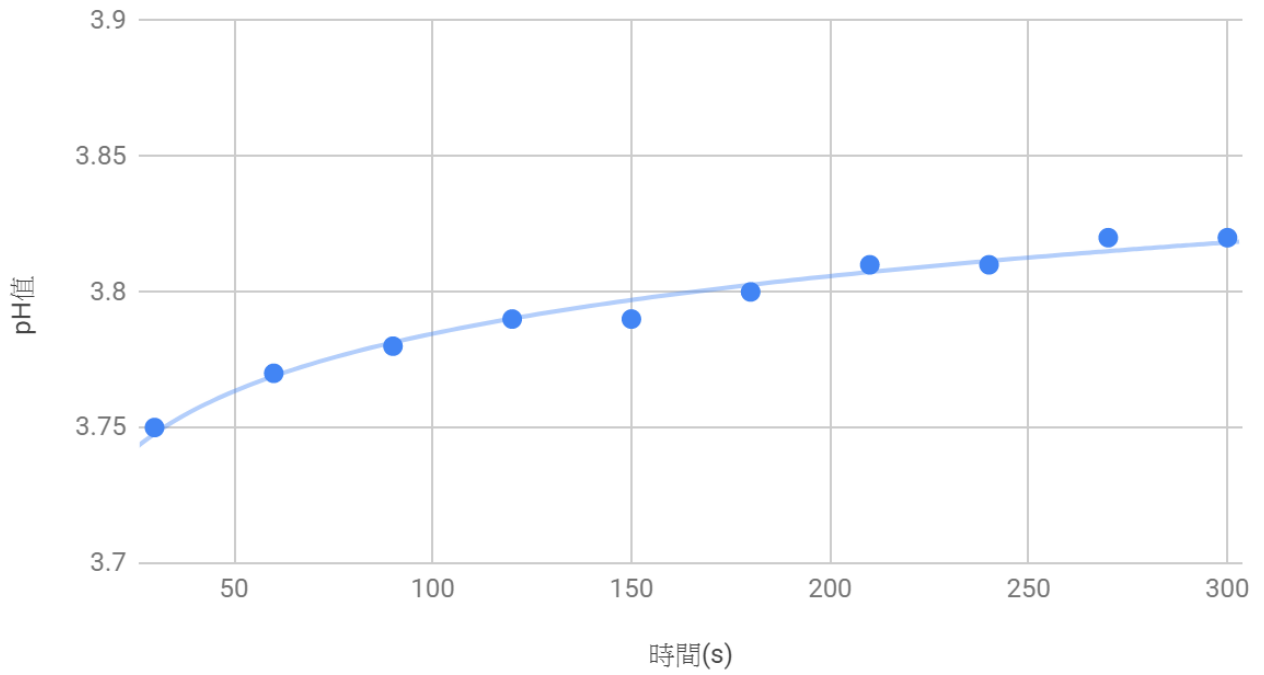
2019/4/13	2M1M0.1M	$H_0=0.0977/2=0.488$	$R=0.173$
1st	H	NH3	HNO2
3.97	0.0001071519305	0.000005319521217	0.1736232607
3.97	0.0001071519305	0.000005319521217	0.1736232607

3.98	0.0001047128548	0.000005443428109	0.1703443388
3.98	0.0001047128548	0.000005443428109	0.1703443388
3.99	0.0001023292992	0.000005570221132	0.1671148177
3.99	0.0001023292992	0.000005570221132	0.1671148177
4.00	0.0001	0.00000569996751	0.1639344262
4.01	0.0000977237221	0.000005832736035	0.1608028756
4.02	0.0000954992586	0.0000059685971	0.1577198605
4.01	0.0000977237221	0.000005832736035	0.1608028756
4.02	0.0000954992586	0.0000059685971	0.1577198605

2019/4/13	2M1M0.1M	H0=0.0977/2=0.488	R=0.173	2M1M0.1 average
2nd	H	NH3	HNO2	
3.97	0.0001071519305	0.000005319521217	0.1736232607	3.97
3.97	0.0001071519305	0.000005319521217	0.1736232607	3.97
3.98	0.0001047128548	0.000005443428109	0.1703443388	3.98
4.00	0.0001	0.00000569996751	0.1639344262	3.99
4.01	0.0000977237221	0.000005832736035	0.1608028756	4.00
4.01	0.0000977237221	0.000005832736035	0.1608028756	4.00
4.01	0.0000977237221	0.000005832736035	0.1608028756	4.00
4.01	0.0000977237221	0.000005832736035	0.1608028756	4.01
4.01	0.0000977237221	0.000005832736035	0.1608028756	4.01
4.02	0.0000954992586	0.0000059685971	0.1577198605	4.01
4.02	0.0000954992586	0.0000059685971	0.1577198605	4.02



pH值隨時間變化圖



2019/4/13	1M2M0.1M	H0=0.0977/2=0.488	R=0.173
1st	H	NH3	HNO2
3.70	0.0001995262315	0.000002856759071	0.2812105073
3.72	0.0001905460718	0.000002991393575	0.2719964888
3.75	0.000177827941	0.000003205335279	0.2585355005
3.76	0.0001737800829	0.000003279996884	0.2541461608
3.78	0.0001659586907	0.000003434577844	0.2455160249
3.78	0.0001659586907	0.000003434577844	0.2455160249
3.79	0.0001621810097	0.000003514579158	0.2412757983
3.8	0.0001584893192	0.000003596443929	0.2370857913
3.8	0.0001584893192	0.000003596443929	0.2370857913
3.81	0.0001548816619	0.000003680215561	0.232946208
3.81	0.0001548816619	0.000003680215561	0.232946208

2019/4/13	1M2M0.1M	H0=0.0977/2=0.488	R=0.173	1M2M0.1 average
2nd	H	NH3	HNO2	
3.78	0.0001659586907	0.000003434577844	0.2455160249	3.74
3.79	0.0001621810097	0.000003514579158	0.2412757983	3.75

3.8	0.0001584893192	0.000003596443929	0.2370857913	3.77
3.8	0.0001584893192	0.000003596443929	0.2370857913	3.78
3.81	0.0001548816619	0.000003680215561	0.232946208	3.79
3.81	0.0001548816619	0.000003680215561	0.232946208	3.79
3.82	0.0001513561248	0.000003765938471	0.228857221	3.8
3.82	0.0001513561248	0.000003765938471	0.228857221	3.81
3.83	0.0001479108388	0.000003853658109	0.2248189726	3.81
3.83	0.0001479108388	0.000003853658109	0.2248189726	3.82
3.84	0.0001445439771	0.000003943420984	0.2208315746	3.82

活化能(反應速率常數)

1M(0.1HCl)1M(a	R(mL/sec)	M*M*M	k(mL/M <sup>3</sup> *sec)	ln(k)	average ln(k)
0					0.4893950682
1.9	0.063333333333	0.04621195766	1.370496654	0.3151731951	
4.4	0.073333333333	0.04583431801	1.599965627	0.4699821457	
6.3	0.07	0.04554834808	1.536828512	0.429720885	
8.3	0.06916666667	0.0452482939	1.528602754	0.4243540853	
10	0.06666666667	0.04499402749	1.481678133	0.3931753194	
11.9	0.066111111111	0.04471069518	1.478641986	0.3911240894	
13.5	0.06428571429	0.04447279367	1.445506544	0.3684598097	
15.3	0.06375	0.04420591303	1.442114768	0.366110625	
17.2	0.0637037037	0.04392507704	1.450280978	0.3717573157	
18.9	0.063	0.04367456131	1.4424873	0.3663689149	
20.8	0.06303030303	0.04339542093	1.452464377	0.3732616841	
22.8	0.063333333333	0.04310255576	1.469363758	0.3848294897	
24.9	0.06384615385	0.04279611453	1.491868001	0.400029027	
27.2	0.06476190476	0.04246174277	1.525182448	0.4221140407	
29.5	0.06555555556	0.04212868238	1.556078943	0.4421691591	
30.9	0.064375	0.04192659203	1.535421719	0.4288050788	
34.1	0.0668627451	0.04146649573	1.612452268	0.4777561681	
36.4	0.06740740741	0.04113736947	1.638593043	0.4938379728	
38.4	0.06736842105	0.04085223867	1.649075381	0.5002147556	
42.5	0.06746031746	0.04027082049	1.675166203	0.5159123861	
44.6	0.06757575758	0.03997463474	1.690465917	0.5250041815	
46.5	0.06739130435	0.03970759917	1.697189096	0.5289734098	

2M(0.1MHCl)1M	R	M*M*M	k	ln(k)	average ln(k)
0					0.9215758945
0.4	0.013333333333	0.0464544589	0.287019452	-1.248205289	
2.2	0.03666666667	0.04624976934	0.7927967466	-0.2321883996	
5.7	0.063333333333	0.0458529115	1.381228176	0.3229730863	
9.3	0.0775	0.04544629892	1.705309384	0.5337465509	
12.7	0.08466666667	0.04506375092	1.878819782	0.6306438041	
16.2	0.09	0.04467144818	2.014709701	0.700475116	
19.6	0.093333333333	0.044291808	2.107236926	0.7453775755	
23	0.095833333333	0.04391360067	2.182315544	0.7803864893	
26.6	0.09851851852	0.04351470759	2.264028049	0.8171455493	
30.4	0.101333333333	0.0430953965	2.351372572	0.854999231	
34.2	0.1036363636	0.04267787523	2.428339346	0.8872076271	
38.1	0.105833333333	0.04225122764	2.504858184	0.9182321197	
41.9	0.1074358974	0.0418373331	2.567943257	0.9431052896	
45.6	0.1085714286	0.0414360503	2.620216642	0.9632570021	
49	0.1088888889	0.0410688	2.651377418	0.9750792852	
50.8	0.105833333333	0.04087495345	2.589197648	0.9513480393	
54.4	0.1066666667	0.04048846513	2.634495191	0.9686915853	
58	0.1074074074	0.04010358317	2.678249645	0.9851634637	
61.6	0.1080701754	0.03972030759	2.720778916	1.000918206	
68	0.1079365079	0.03904289513	2.764562095	1.016882248	
71.1	0.1077272727	0.0387165986	2.78245705	1.023334368	
74.2	0.1075362319	0.03839149322	2.801043222	1.029991927	

1M1M 0.093M 40度第A組		1M(0.093MHCl)1R		M*M*M	k	ln(k)	average ln(k)
1	2						
50	50	0					1.123379803
47.6	48.7	2.4	0.08	0.04613630578	1.733992322	0.5504264506	
43.7	44.8	6.3	0.105	0.04554834808	2.305242768	0.8351859932	
39.7	41	10.3	0.1144444444	0.04494923131	2.546082349	0.934555844	
35.6	37.5	14.4	0.12	0.04433925295	2.706405544	0.9956213869	
31.5	34.3	18.5	0.1233333333	0.04373344173	2.820114961	1.03677765	
27.2	31.1	22.8	0.1266666667	0.04310255576	2.938727517	1.07797667	
22.2	27.8	27.8	0.1323809524	0.04237473102	3.124054105	1.139131551	
17.8	25	32.2	0.1341666667	0.04173937176	3.214391138	1.167637958	
13	22.1	37	0.137037037	0.04105172611	3.338155298	1.205418349	
8.8	19.3	41.2	0.1373333333	0.04045472143	3.394741788	1.222227701	
4.9	16.4	45.1	0.1366666667	0.03990427546	3.424862752	1.231061399	
1.2	13.9	48.8	0.1355555556	0.03938554292	3.441759222	1.235982742	
0	11.4	50	0.1282051282	0.03921803415	3.269035049	1.184494849	
	8.9	51.3	0.1221428571	0.03903696916	3.128902161	1.140682196	
	6.6	55.2	0.1226666667	0.03849628784	3.186454423	1.158908833	
	4.2	59	0.1229166667	0.03797309688	3.236940802	1.174628687	
	2	62.5	0.1225490196	0.03749437734	3.268463922	1.184320126	
	0	65.7	0.1216666667	0.03705934836	3.283022288	1.188764427	
		68.9	0.120877193	0.03662685785	3.300233765	1.193993304	
		72.2	0.1146031746	0.0361835107	3.167276265	1.152871996	
		75	0.1136363636	0.03580945439	3.173362051	1.15479161	
		77.9	0.1128985507	0.0354240878	3.187055976	1.159097599	

1M1M 0.093M 50度第A組		1M(0.093MHCl)1R		M*M*M	k	ln(k)	average ln(k)
1	2						
50	50	0					1.89715317
50	47.8	9.8	0	0.0465	0		
40.2	38.8	21.2	0.1633333333	0.045023904	3.627702594	1.288599554	
28.8	29.6	33.6	0.2355555556	0.04333676857	5.435466541	1.692945357	
16.4	21	44.1	0.28	0.04153821845	6.740780189	1.908175673	
5.9	13.3	50.2	0.294	0.040045056	7.341730275	1.993574547	
-0.2	5.6	52.2	0.2788888889	0.03919015073	7.116300491	1.962387996	
	-0.7	61.2	0.2485714286	0.03891186188	6.388063088	1.854431106	
		70.4	0.255	0.03767183296	6.768983082	1.912350866	
		79	0.2607407407	0.03642500176	7.15829041	1.968271183	
		86.7	0.2633333333	0.03527845964	7.464422654	2.010148088	
		94.4	0.2627272727	0.03426746125	7.666960526	2.036920256	
		100.7	0.2622222222	0.03327116066	7.881366837	2.064501345	
			0.2582051282	0.03246693787	7.952863595	2.073532064	

1M1M 0.093M 50度第B組			1M(0.093MHCI)1R	M*M*M	k	ln(k)	average ln(k)
1	2	3					
50	49.8	49.8	0	0.3101555556			1.973608864
50	46	49	0		0.0465	0	
41	37.8	44.4	9	0.3	0.0451435092	6.64547363	1.893935966
32.4	29.5	39.7	17.6	0.2933333333	0.04386606771	6.687021396	1.900168543
22	22	34.8	28	0.3111111111	0.04234574694	7.34692699	1.994282129
11.4	15.2	30.2	38.6	0.3216666667	0.04082378013	7.879394452	2.064251055
1.3	8.5	25.8	48.7	0.3246666667	0.03939951809	8.240371516	2.10904543
0	3	21.4	50	0.2777777778	0.03921803415	7.082909273	1.957684738
		17.4	53.8	0.2561904762	0.03868994475	6.621629414	1.890341475
		13.5	62	0.2583333333	0.03756257993	6.877411878	1.928242401
		9.8	70.3	0.2603703704	0.03643844148	7.145485916	1.966480817
		6.3	77.8	0.2593333333	0.0354373416	7.318080917	1.990348124
		3	84.6	0.2563636364	0.03454173045	7.421852727	2.00442872
		-0.2	91.3	0.2536111111	0.03367050118	7.532145415	2.019179917
			96.8	0.2482051282	0.03296362991	7.529666146	2.018850704
			100.6	0.2395238095	0.03247962646	7.374586337	1.998039811
			105.2	0.2337777778	0.03189851691	7.328797713	1.99181148
			109.9	0.2289583333	0.03131019233	7.312581505	1.989596359
			114.8	0.2250980392	0.03070266318	7.331547686	1.992186638
			119.4	0.2211111111	0.03013774625	7.336683683	1.992886926
			123.8	0.2171929825	0.02960229927	7.337030833	1.992934242
			128.2	0.2034920635	0.02907165157	6.999673307	1.945863478
			132.2	0.2003030303	0.02859340924	7.005216784	1.946655126

完整數據:

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1MvCkqnsMVOBU45F\\_fOyWpsgzEAgctbxGQ4Tb6G3SP7Y/edit?ts=5bd85660#gid=1762578347](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1MvCkqnsMVOBU45F_fOyWpsgzEAgctbxGQ4Tb6G3SP7Y/edit?ts=5bd85660#gid=1762578347)