

中華民國第 52 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 化學科

040210

以 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 取代 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 之秒錶反應研究

學校名稱：新北市立三民高級中學

| | |
|---|------------------|
| 作者： 高二 李世賢 高二 吳祖寧 高二 洪振嘉 | 指導老師： 林妙津 |
|---|------------------|

關鍵詞：秒錶反應、硫代硫酸鈉、光電計時器

以 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 取代 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 之秒錶反應研究

摘要

利用 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 取代 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 進行秒錶反應實驗，發現硫代硫酸鈉在酸中的穩定性比焦亞硫酸鈉高，並進一步研究 $[\text{KIO}_3]$ 、 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ 及 $[\text{H}^+]$ 與反應速率 ($R = \frac{-\Delta[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]}{\Delta t}$) 之關係，求得反應速率定律式 $R = [\text{IO}_3^-][\text{S}_2\text{O}_3^{2-}]^2[\text{H}^+]$ 。

另嘗試以光電計時器取代碼錶與眼睛判讀顏色變化的計時方式，結果發現以光電計時器並配合適當反應槽，對反應速率的測量是可行且再現性佳。

壹、研究動機

- 一、在高中實驗課程中，反應速率之測定利用焦亞硫酸鈉與碘酸鉀進行氧化還原反應並以澱粉當指示劑來測定；但焦亞硫酸鈉不易保存，盡量須在實驗當天配製，造成準備上之困擾，本研究希望能找出能取代焦亞硫酸鈉且穩定的還原劑，使實驗能更順利進行，並完成反應速率定律式。
- 二、實驗過程中以眼睛判讀顏色變化並配合碼錶的計時方式，實驗誤差大，因此希望能找出一個能自動計時且再現性佳的計時方法。

貳、研究目的

- 一、研究以硫代硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)取代焦亞硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)進行秒錶反應的可行性，並求出 $\text{KIO}_3/\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 與 $\text{KIO}_3/\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 的反應速率定律式。
- 二、研究應用光電計時器自動計時之可行性。

參、研究設備及器材

一、研究設備

恆溫槽、加熱板、微量天平、烘箱、光電計時器、自製反應槽、不同光源的 LED 燈數顆、20mL 試管數十支、500mL 量瓶 4 支、50mL 量瓶 10 支、計時器乙只(手錶)。

二、藥品

可溶性澱粉、碘酸鉀(KIO_3)、焦亞硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)、硫代硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)與濃硫酸。

肆、研究過程與方法

- 一、硫酸加入 KIO_3 (A 溶液)中，再與焦亞硫酸鈉/澱粉溶液(B 溶液)反應；硫酸加入焦亞硫酸鈉溶液(B 溶液)中，再與 KIO_3 (A 溶液)反應，對藍色出現的時間差的探討。
 - (一)取 0.020M 的 KIO_3 溶液 5mL 於 1 號試管，並加入 1mL 0.010M 的硫酸溶液；另取 2 號試管，加入 4mL 0.002M 焦亞硫酸鈉/澱粉溶液。
 - 1.將 1 號試管溶液倒入 2 號試管，觀察並記錄溶液混合情形。
 - 2.將 2 號試管溶液倒入 1 號試管，觀察並記錄溶液混合情形。

(二)取 0.002M 的焦亞硫酸鈉/澱粉溶液 4mL 於 1 號試管，並加入 1mL0.010M 的硫酸溶液；另取 2 號試管，加入 5mL0.020M KIO₃ 溶液。

1.將 1 號試管溶液倒入 2 號試管，觀察並記錄溶液混合情形。

2.將 2 號試管溶液倒入 1 號試管，觀察並記錄溶液混合情形。

二、參考氧化還原反應電位表，找尋適合的還原劑，並試做實驗數次，確定新還原劑是否仍能出現藍色反應。

寫出反應方程式後，再比照 KIO₃ 與 Na₂S₂O₅ 反應方式，進行測試反應。

(一)KIO₃ 與 Na₂S₂O₃ 反應

1.取一支試管加入 0.02M KIO₃ 溶液 5mL 與 0.01M 硫酸溶液 1mL。

2.另取一支試管加入 4mL 0.002M 硫代硫酸鈉/澱粉溶液。

3.將上述二支試管溶液混合，觀察溶液是否變色。

(二)KIO₃ 與 Na₂C₂O₄ 反應

1.取一支試管加入 0.02M KIO₃ 溶液 5mL 與 0.1M 硫酸溶液 1mL。

2.另取一支試管加入 4mL 0.002M 草酸鈉/澱粉溶液。

3.將上述二支試管溶液混合，觀察溶液是否變色。

三、硫酸溶液對焦亞硫酸鈉與硫代硫酸鈉的影響

(一)碘酸鉀與焦亞硫酸鈉反應

1.取 1~2 號試管，各加入 0.002M [HSO₃⁻]/澱粉溶液 4mL，其中 1 號試管先加入及 0.05M 硫酸溶液 1mL，2 號試管則否。

2.另取 1'~2'號試管，各加入 0.02 M 的 KIO₃ 溶液 5mL，其中 2'號試管先加入 0.05M 硫酸溶液 1mL，1'號試管則否。

3.將這四支試管置入 30°C 恆溫槽中 30 分鐘後，1 號與 1'號試管反應及 2 號與 2'號試管反應，並比較其反應結果。

(二)碘酸鉀與硫代硫酸鈉反應

1.取 1~2 號試管，各加入 0.002M [Na₂S₂O₃]/澱粉溶液 4mL，其中 1 號試管先加入及 0.05M 硫酸溶液 1mL，2 號試管則否。

2.另取 1'~2'號試管各加入 0.02 M 的 KIO₃ 溶液 5mL，其中 2'號試管先加入 0.05M 硫酸溶液 1mL，1'號試管則否。

3.將這四支試管置入 30°C 恆溫槽中 30 分鐘後，1 號與 1'號試管反應及 2 號與 2'號試管反應，並比較其反應結果。

四、尋找 KIO₃ 與焦亞硫酸鈉(Na₂S₂O₅)反應與 KIO₃ 與硫代硫酸鈉(Na₂S₂O₃)反應適當的濃度比。

(一)KIO₃ 與焦亞硫酸鈉(Na₂S₂O₅)的濃度比

1.分別配製 0.020M、0.010M、0.0067M、0.005M 的焦亞硫酸鈉溶液，各取 5mL 後，置入 1~4 號試管中。

2.另取四支試管各置入 0.020M、5mL 碘酸鉀溶液，與 1mL、0.100M 硫酸溶液。

3.如圖一裝置,將(KIO_3/H^+)與($[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5]/$ 澱粉)溶液混合,觀察各試管顏色之變化。
(二) KIO_3 與硫代硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)的濃度比

- 1.分別配製 0.020M、0.010M、0.0067M、0.005M、0.0033M、0.002M 的焦亞硫酸鈉溶液,各取 5mL 後,置入 1~6 號試管中。
- 2.另取六支試管各置入 0.020M、5mL 碘酸鉀溶液,與 1mL、0.100M 硫酸溶液。
- 3.如圖一裝置,將(KIO_3/H^+)與($[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]/$ 澱粉)溶液混合,觀察各試管顏色之變化。

五、 KIO_3 與焦亞硫酸鈉反應中, $[\text{KIO}_3]$ 、 $[\text{HSO}_3^-]$ 及 $[\text{H}^+]$ 與反應速率之關係

(一)改變 $[\text{KIO}_3]$ 對反應速率的影響

- 1.分別配製 0.0025M、0.00375M、0.0050M、0.0075M、0.0100M、0.0150M、0.0200M 的 KIO_3 溶液,各取 5mL 後,置入 1~7 號試管中。
- 2.於每支試管中加入 1mL、0.010M 的硫酸溶液。
- 3.另取 1'~7'七支試管,分別加入 4mL 0.002M 的 $[\text{HSO}_3^-]/$ 澱粉溶液。
- 4.將(KIO_3/H^+)與($[\text{HSO}_3^-]/$ 澱粉)溶液反應,並測量藍色出現的時間。
- 5.每一組不同 $[\text{KIO}_3]$ 重複實驗數次,取三次最接近的數據,求測定時間的平均值。

(二)改變 $[\text{H}^+]$ 對反應速率的影響

- 1.分別配製 0.010M、0.025M、0.050M、0.075M、0.100M、0.150M、0.200M 的 H_2SO_4 溶液。
- 2.各取上述 H_2SO_4 溶液 1mL,分別置入含 0.02M 5mL KIO_3 溶液的 1~7 號試管中。
- 3.另取 1'~7'七支試管,分別加入 4mL 0.002M 的 $[\text{HSO}_3^-]/$ 澱粉溶液。
- 4.將(KIO_3/H^+)與($[\text{HSO}_3^-]/$ 澱粉)溶液混合,並測量藍色出現的時間。
- 5.每一組不同 $[\text{H}^+]$ 重複實驗數次,取三次最接近的數據,求測定時間的平均值。

(三)改變 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5]$ 對反應速率的影響

- 1.分別配製 0.0005M、0.0010M、0.0015M、0.0020M、0.0030M、0.0040M、0.0050M、0.006M 的 $[\text{HSO}_3^-]/$ 澱粉溶液,各取 4mL 後,置入 1~8 號試管中。
- 2.另取 1'~8'八支試管,先加入 5mL 0.02M 的 $[\text{KIO}_3]$ 溶液後,再分別加入 0.2M 硫酸溶液 1mL。
- 3.將(KIO_3/H^+)與($[\text{HSO}_3^-]/$ 澱粉)溶液混合,並測量藍色出現的時間。
- 4.每一組不同 $[\text{HSO}_3^-]$ 重複實驗數次,取三次最接近的數據,求測定時間的平均值。

六、 KIO_3 與硫代硫酸鈉反應中, $[\text{KIO}_3]$ 、 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ 及 $[\text{H}^+]$ 之與反應速率關係

(一)改變 $[\text{KIO}_3]$ 對反應速率的影響

- 1.分別配製 0.0025M、0.00375M、0.0050M、0.0075M、0.0100M、0.015、0.0200M 的 KIO_3 溶液,各取 5mL 後,置入 1~7 號試管中。
- 2.於每支試管中加入 1mL、0.1M 的硫酸溶液。
- 3.另取 1'~7'六支試管,分別加入 4mL 0.002M 的 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]/$ 澱粉溶液。
- 4.將(KIO_3/H^+)與($[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]/$ 澱粉)溶液混合,並測量藍色出現的時間。
- 5.每一組不同 $[\text{KIO}_3]$ 重複實驗數次,取三次最接近的數據,求測定時間的平均值。

(二)改變 $[H^+]$ 對反應速率的影響

- 1.分別配製 0.050M、0.075M、0.150M、0.100M、0.200M 的 H_2SO_4 溶液。
- 2.各取上述 H_2SO_4 溶液 1mL，分別置入含 0.02M 5mL KIO_3 溶液的 1~5 號試管中。
- 3.另取 1'~5'五支試管，分別加入 4mL 0.002M 的 $[Na_2S_2O_3]$ /澱粉溶液。
- 4.將 (KIO_3/H^+) 與 $([Na_2S_2O_3]/澱粉)$ 溶液混合，並測量藍色出現的時間。
- 5.每一組不同 $[H^+]$ 重複實驗數次，取三次最接近的數據，求測定時間的平均值。

(三)改變 $[Na_2S_2O_3]$ 對反應速率的影響

- 1.分別配製 0.002M、0.003M、0.004M、0.005M、0.006M 的 $Na_2S_2O_3$ /澱粉溶液，各取 4mL 後，置入 1~5 號試管中。
- 2.另取 1'~5'五支試管，先加入 5mL 0.02M 的 $[KIO_3]$ 溶液後，再分別加入 0.05M 硫酸溶液 1mL。
- 3.將 (KIO_3/H^+) 與 $([Na_2S_2O_3]/澱粉)$ 溶液混合，並測量藍色出現的時間。
- 4.每一組不同 $[Na_2S_2O_3]$ 重複實驗數次，取三次最接近的數據，求測定時間的平均值。

七、光電計時器測量反應速率

(一)尋找適合的反應槽。

(二)以透明的壓克力板自製反應槽。

(三)尋找適合的光源。

- 1.分別以白光、紅光、黃綠光、藍光與紫光五顆 LED 燈替代原光柵的紅外線光源，測定遮光效應。
- 2.每組測試溶液均含 0.02 M 的 KIO_3 溶液 10mL、2mL 0.1M 硫酸溶液與 0.002M 8mL $[Na_2S_2O_3]$ /澱粉溶液。

(四)以光電計時方式求 KIO_3 與硫代硫酸鈉反應的反應速率定律式。

1.改變 $[KIO_3]$ 對反應速率的影響

- (1)分別配製 0.0025、0.00375M、0.0050M、0.0075M、0.0100M、0.0150M、0.0200M、0.04M 的 KIO_3 溶液，各取 10mL 後，置入 1~8 號試管中。
- (2)於每支試管中加入 2mL、0.10M 的硫酸溶液。
- (3)另取 1'~8'八支試管，分別加入 8mL 0.002M 的 $[Na_2S_2O_3]$ 澱粉溶液。
- (4)將 (KIO_3/H^+) 與 $([Na_2S_2O_3]/澱粉)$ 溶液反應，並測量藍色出現的時間。
- (5)每一組不同 $[KIO_3]$ 重複實驗三次，求測定時間的平均值。

2.改變 $[H^+]$ 對反應速率的影響

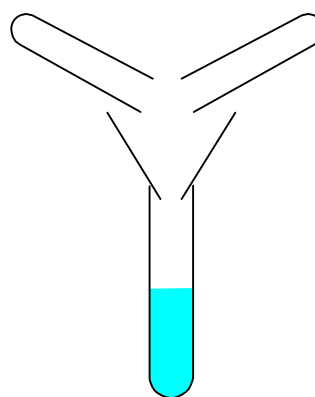
- (1)分別配製 0.050M、0.075M、0.100M、0.150M、0.200M 的 H_2SO_4 溶液。
- (2)各取上述 H_2SO_4 溶液 2mL，分別置入含 0.02M 10mL KIO_3 溶液的 1~5 號試管中。
- (3)另取 1'~5'五支試管，分別加入 8mL 0.002M 的 $[Na_2S_2O_3]$ /澱粉溶液。
- (4)將 (KIO_3/H^+) 與 $([Na_2S_2O_3]/澱粉)$ 溶液混合，並測量藍色出現的時間。
- (5)每一組不同 $[H^+]$ 重複實驗三次，求測定時間的平均值。

伍、研究結果

一、溶液 A 與溶液 B 加入先後順序對藍色出現的時間差的探討。

| H ⁺ /KIO ₃ | | H ⁺ /Na ₂ S ₂ O ₅ | |
|---|---|---|---|
| KIO _{3(aq)} 倒入 Na ₂ S ₂ O _{5(aq)} | Na ₂ S ₂ O _{5(aq)} 倒入 KIO _{3(aq)} | KIO _{3(aq)} 倒入 Na ₂ S ₂ O _{5(aq)} | Na ₂ S ₂ O _{5(aq)} 倒入 KIO _{3(aq)} |
| 上層先變色→下層 →均勻變色 | 較均勻變色但變色 緩慢 | 下層先變色→上層 →均勻變色 | 較均勻變色但變色 緩慢 |

溶液 A 與溶液 B 比重不同，會影響藍色出現的均勻度，進而造成觀測時間上的誤差，依上表測定結果，無論以何種方式均會造成觀察不易的困擾。故本實驗採圖一之測定方式，利用無頸漏斗使溶液迅速且同步進入試管中混合，使方法使得顏色變化較均勻且易觀察測定。



圖一 實驗裝置圖

二、依標準還原電位表：

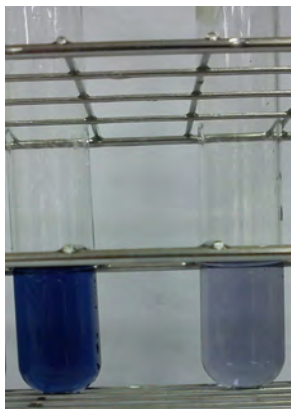
| | |
|---|-----------------------------|
| $\text{IO}_3^- + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow \text{I}^- + 3\text{H}_2\text{O}$ | $E^\circ = 1.085 \text{ v}$ |
| $2\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ | $E^\circ = -0.49 \text{ v}$ |
| $\text{S}_4\text{O}_6^{2-} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ | $E^\circ = 0.08 \text{ v}$ |
| $2\text{SO}_4^{2-} + 10\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-} + 5\text{H}_2\text{O}$ | $E^\circ = 0.283 \text{ v}$ |

(一)由標準還原電位表，硫代硫酸鈉的的氧化產物有 $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$ 與 SO_4^{2-} 二種，以氧化產物為 $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$ 的氧化電位較高 ($-0.08 \text{ v} > -0.283 \text{ v}$)，故推論碘酸鉀與硫代硫酸鈉的反應應為： $\text{IO}_3^- + 6\text{S}_2\text{O}_3^{2-} + 6\text{H}^+ \rightarrow \text{I}^- + 3\text{S}_4\text{O}_6^{2-} + 3\text{H}_2\text{O}$ $\Delta E^\circ = 1.005 \text{ v} > 0$ 自發性反應。試做實驗數次後，結果發現溶液仍會呈現藍色，表示硫代硫酸鈉可代替焦亞硫酸鈉進行秒錶反應。

(二)理論上碘酸鉀與草酸反應： $\text{IO}_3^- + 3\text{C}_2\text{O}_4^{2-} + 6\text{H}^+ \rightarrow \text{I}^- + 6\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ $\Delta E^\circ = 1.575 \text{ v} > 0$ ，為自發性反應。但試做實驗數次後，結果發現溶液不會呈現藍色，表示草酸鈉與碘酸鉀反應的 ΔE° 值雖大於硫代硫酸鈉與碘酸鉀反應的 ΔE° 值 ($1.575 > 1.005$)，可能草酸根的反應需要較大的活化能，故在常溫下反應不易發生；加熱或許可使反應順利進行，但溫度過高 (大於 40°C) 又會破壞 I_2 分子與澱粉的結合，溶液不易出現藍色，故依實驗結果顯示草酸無法代替焦亞硫酸鈉進行秒錶反應。

三、硫酸溶液對焦亞硫酸鈉與硫代硫酸鈉的影響

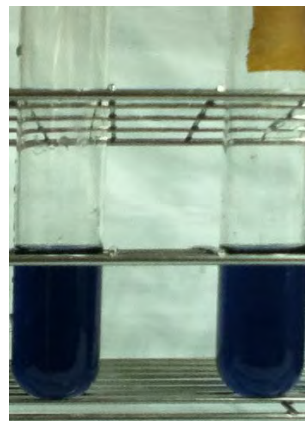
- 1.圖二與圖三為酸預先加入焦亞硫酸鈉與硫代硫酸鈉溶液，與酸未預先加入焦亞硫酸鈉與硫代硫酸鈉溶液，均靜置 30 分鐘後再與 KIO_3 溶液之反應結果比較。
- 2.由圖二右管發現預先加入酸的 $[\text{HSO}_3^-]$ /澱粉溶液，經過 30 分鐘後再與 KIO_3 反應，溶液顏色明顯變淡，而圖三右管中預先加入酸的 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ /澱粉溶液則否。
- 3.實驗結果證明硫酸確實會與焦亞硫酸鈉反應產生 $\text{SO}_2(\text{g})$ ，使其失去還原能力。



圖二 硫酸對焦亞硫酸鈉之影響

左管：0.05M 硫酸先加入 $[\text{HSO}_3^-]$ /澱粉

右管：0.05M 硫酸未加入 $[\text{HSO}_3^-]$ /澱粉



圖三 硫酸對焦亞硫酸鈉之影響

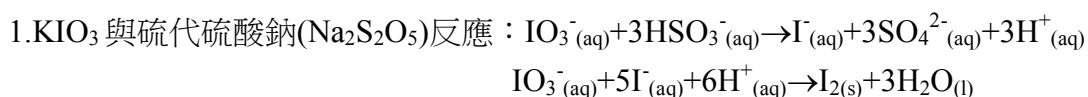
左管：0.05M 硫酸先加入 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ /澱粉

右管：0.05M 硫酸未加入 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ /澱粉

- 4.研究過程中為了實驗方法的一致性，本研究均採將酸加入含 KIO_3 溶液試管再與 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ /澱粉溶液或 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ /澱粉溶液的混合方式。

四、確定 KIO_3 與焦亞硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)反應與 KIO_3 及硫代硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)反應產生藍色物質時的濃度比。

(一) KIO_3 與焦亞硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)的濃度比



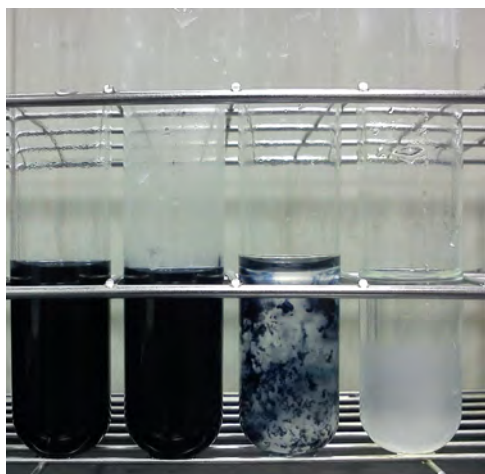
(1)焦亞硫酸根離子用盡時，碘酸根才可與碘離子反應產生 I_2 ， I_2 再與溶液中澱粉結合而使溶液呈現藍色。

(2)若溶液中仍含有亞硫酸氫根離子(HSO_3^-)，則碘被還原生碘離子，深藍色消失，反應方程式如下：
$$\text{I}_2 (\text{s}) + \text{HSO}_3^- (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \rightarrow 2\text{I}^- (\text{aq}) + 3\text{SO}_4^{2-} (\text{aq}) + 3\text{H}^+ (\text{aq})$$

2.實驗結果如圖四所示，當 $\frac{[\text{IO}_3^-]}{[\text{HSO}_3^-]} = \frac{1}{3}$ 時，會出現點狀的藍色分佈，經過一段

時間後藍色會逐漸消失；當 $\frac{[\text{IO}_3^-]}{[\text{HSO}_3^-]} = \frac{1}{4}$ 時，溶液則完全不變色。

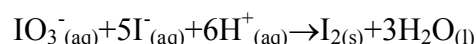
3.本研究中實驗濃度配製均以 $\frac{[\text{IO}_3^-]}{[\text{HSO}_3^-]} > \frac{1}{3}$ 為基準。



圖四 $\frac{[\text{IO}_3^-]}{[\text{HSO}_3^-]}$ 不同濃度比的實驗結果由左而右 $\frac{[\text{IO}_3^-]}{[\text{HSO}_3^-]}$ 分別為 $\frac{1}{1}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{3}$ 、 $\frac{1}{4}$

(二) KIO_3 與硫代硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)的濃度比

1. KIO_3 與硫代硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)反應： $\text{IO}_3^- + 6\text{S}_2\text{O}_3^{2-} + 6\text{H}^+ \rightarrow \text{I}^- + 3\text{S}_4\text{O}_6^{2-} + 3\text{H}_2\text{O}$



(1) 硫代硫酸根離子用盡時，碘酸根才可與碘離子反應產生 I_2 ， I_2 再與溶液中澱粉結合而使溶液呈現藍色。

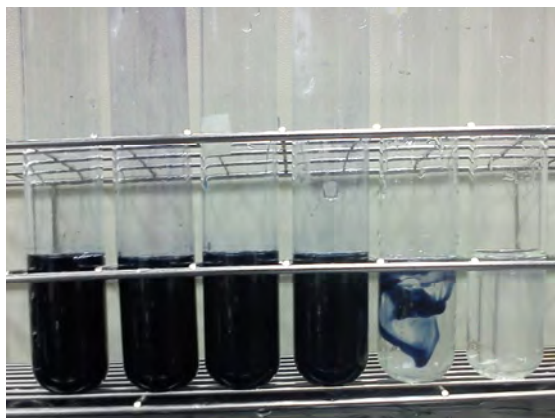
(2) 若溶液中仍含有硫代硫酸根離子時，則碘被還原生碘離子，深藍色消失，反應方程式如下： $\text{I}_2 (\text{s}) + 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-} (\text{aq}) \rightarrow 2\text{I}^- (\text{aq}) + \text{S}_4\text{O}_6^{2-} (\text{aq})$

2. 實驗結果如圖五所示，當 $\frac{[\text{IO}_3^-]}{[\text{S}_2\text{O}_3^{2-}]} = \frac{1}{5}$ 雖顏色分佈不均勻但溶液仍會出現藍色；

但當 $\frac{[\text{IO}_3^-]}{[\text{S}_2\text{O}_3^{2-}]} = \frac{1}{6}$ 時，溶液混合的瞬間會出現藍色，隨後顏色立即消失，因此時

IO_3^- 離子已完全用盡，無法再與 I^- 離子產生 I_2 。

3. 依照反應方程式，硫代硫酸鈉與碘酸鉀進行秒錶反應時，碘酸根與硫代硫酸根的濃度比需大於 $\frac{1}{6}$ ，但依本實驗結果顯示，以 $\frac{[\text{IO}_3^-]}{[\text{S}_2\text{O}_3^{2-}]} > \frac{1}{5}$ 的反應效果較佳。



圖五 $\frac{[\text{IO}_3^-]}{[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]}$ 不同濃度比的實驗結果由左而右 $\frac{[\text{IO}_3^-]}{[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]}$ 分別為 $\frac{1}{1}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{3}$ 、

$$\frac{1}{4}、\frac{1}{5}、\frac{1}{6}$$

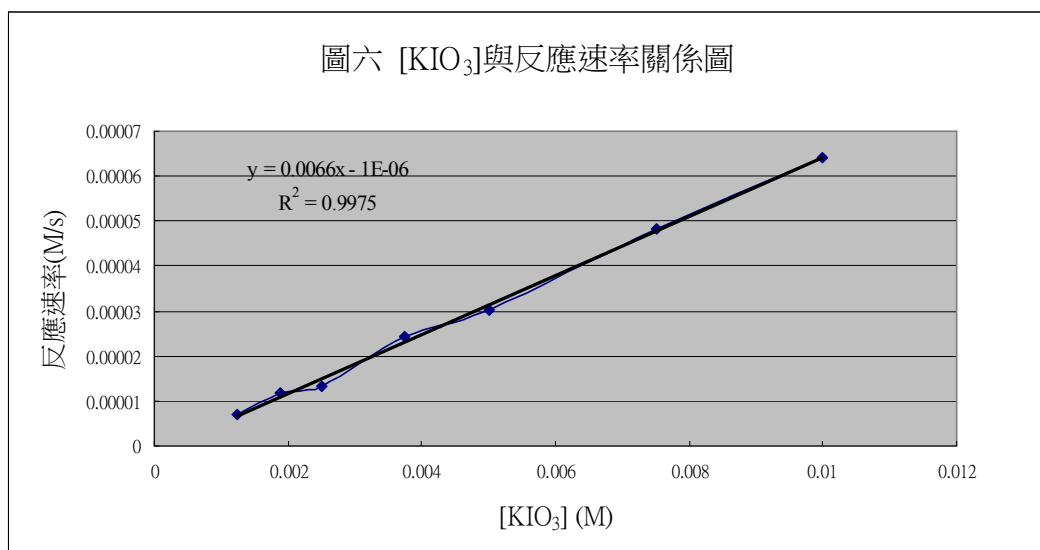
五、KIO₃ 與焦亞硫酸鈉/澱粉溶液反應

(一)改變[KIO₃]對反應速率的影響

實驗數據如表一，反應速率與[KIO₃]關係圖如圖六，由圖六可得知碘酸鉀濃度與反應速率之關係為一斜直線，其線性相關係數達 0.9975，可判定混合後碘酸鉀濃度在 0.00125M~0.01M 的範圍內為一級反應，即 $R \propto [KIO_3]$ 。

表一 改變[KIO₃]對反應速率的影響

| 編號 | 混合後 [KIO ₃] | 混合後 [HSO ₃ ⁻] | 反應時間(sec) 三次平均值 | 反應速率(M/s)= $\frac{-\Delta[HSO_3^-]}{\Delta t}$ |
|----|----------------------------|---|--------------------|--|
| 1 | 0.00125 | 0.0008 | 114.8 | 6.97×10^{-6} |
| 2 | 0.00188 | 0.0008 | 68.6 | 1.17×10^{-5} |
| 3 | 0.00025 | 0.0008 | 59.9 | 1.34×10^{-5} |
| 4 | 0.00375 | 0.0008 | 32.7 | 2.45×10^{-5} |
| 5 | 0.00500 | 0.0008 | 26.5 | 3.02×10^{-5} |
| 6 | 0.00750 | 0.0008 | 16.6 | 4.83×10^{-5} |
| 7 | 0.01000 | 0.0008 | 12.5 | 6.41×10^{-5} |

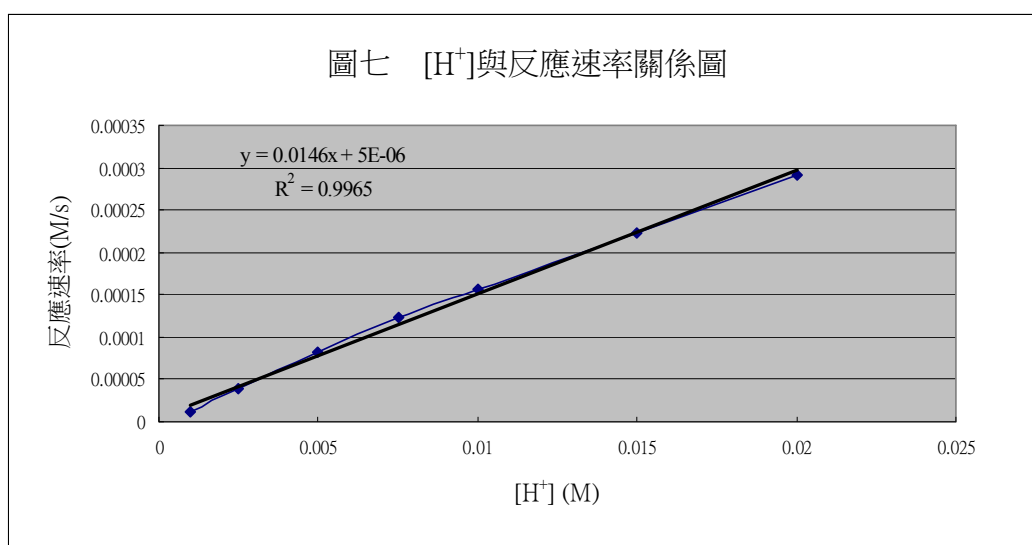


(二)改變[H⁺]對反應速率的影響

實驗數據如表二，反應速率與[H⁺]關係圖如圖七，由圖七可得知氫離子濃度與反應速率之關係為一斜直線，其線性相關係數達 0.9965，可判定混合後氫離子濃度在 0.001M~0.02M 的範圍內為一級反應，即 $R \propto [H^+]$ 。

表二 改變[H⁺]對反應速率的影響

| 編號 | 混合後 [H ⁺] | 混合後 [HSO ₃ ⁻] | 反應時間(sec) 三次平均值 | 反應速率(M/s)= $\frac{-\Delta[\text{HSO}_3^-]}{\Delta t}$ |
|----|--------------------------|---|--------------------|---|
| 1 | 0.0010 | 0.0008 | 72.06 | 1.11×10^{-5} |
| 2 | 0.0025 | 0.0008 | 20.30 | 3.94×10^{-5} |
| 3 | 0.0050 | 0.0008 | 9.74 | 8.21×10^{-4} |
| 4 | 0.0075 | 0.0008 | 6.54 | 1.22×10^{-4} |
| 5 | 0.0010 | 0.0008 | 5.12 | 1.56×10^{-5} |
| 6 | 0.0150 | 0.0008 | 3.60 | 2.22×10^{-4} |
| 7 | 0.0200 | 0.0008 | 2.74 | 2.94×10^{-4} |

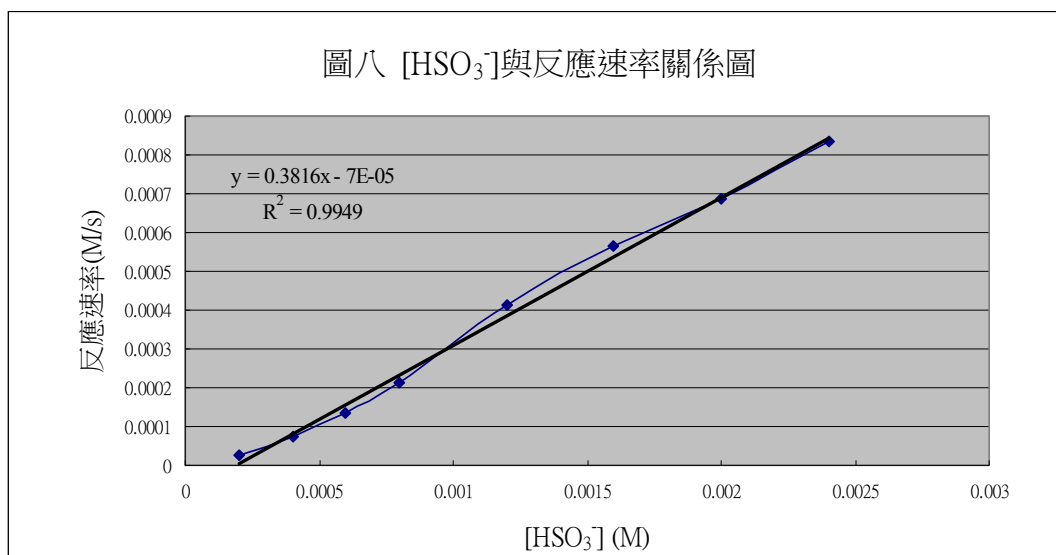


(三) 改變[HSO₃⁻]對反應速率的影響

實驗數據如表三，反應速率與[HSO₃⁻]關係圖如圖八，由圖八可得知氫離子濃度與反應速率關係為一斜直線，其線性相關係數達 0.9949，可判定混合後[HSO₃⁻]濃度在 0.0002M~0.0024M 的範圍內為一級反應，即 $R \propto [\text{HSO}_3^-]$ 。

表三 改變[HSO₃⁻]對反應速率的影響

| 編號 | 混合前 [HSO ₃ ⁻] | 混合後 [HSO ₃ ⁻] | 反應時間(sec) 三次平均值 | 反應速率(M/s)= $\frac{-\Delta[\text{HSO}_3^-]}{\Delta t}$ |
|----|---|---|--------------------|---|
| 1 | 0.0005 | 0.0002 | 7.52 | 2.66×10^{-5} |
| 2 | 0.0010 | 0.0040 | 5.45 | 7.34×10^{-5} |
| 3 | 0.0015 | 0.0060 | 4.46 | 1.35×10^{-4} |
| 4 | 0.0020 | 0.0080 | 3.78 | 2.12×10^{-4} |
| 5 | 0.0030 | 0.0012 | 2.90 | 4.14×10^{-5} |
| 6 | 0.0040 | 0.0016 | 2.82 | 5.67×10^{-4} |
| 7 | 0.0050 | 0.0020 | 2.92 | 6.85×10^{-4} |
| 8 | 0.0060 | 0.0024 | 2.88 | 8.33×10^{-4} |



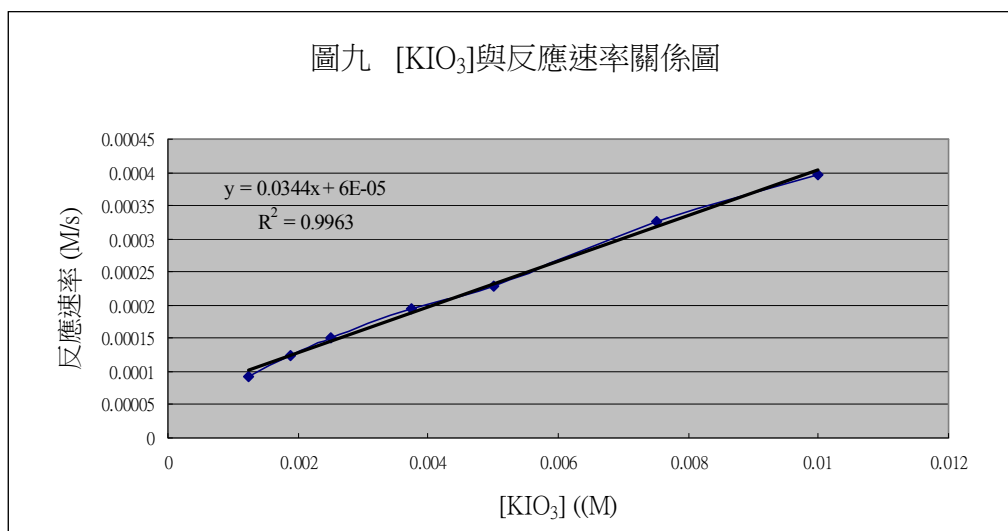
六、KIO₃ 與硫代硫酸鈉/澱粉溶液反應

(一) 改變[KIO₃]對反應速率的影響

實驗數據如表四，反應速率與[KIO₃]關係圖如圖九，由圖九可得知碘酸鉀濃度與反應速率之關係為一斜直線，其線性相關係數達 0.9963，可判定混合後[KIO₃]濃度在 0.00125M~0.0075M 的範圍內為一級反應，即 $R \propto [KIO_3]$ 。

表四 改變[KIO₃]對反應速率的影響

| 編號 | 混合後 [KIO ₃] | 混合後 [Na ₂ S ₂ O ₃] | 反應時間(sec) 三次平均值 | 反應速率 (M/s) = $\frac{-\Delta[Na_2S_2O_3]}{\Delta t}$ |
|----|----------------------------|---|--------------------|--|
| 1 | 0.00125 | 0.0008 | 2.02 | 3.96×10^{-4} |
| 2 | 0.00188 | 0.0008 | 2.46 | 3.25×10^{-4} |
| 3 | 0.00025 | 0.0008 | 3.50 | 2.29×10^{-4} |
| 4 | 0.00375 | 0.0008 | 4.12 | 1.94×10^{-4} |
| 5 | 0.00250 | 0.0008 | 5.34 | 1.50×10^{-4} |
| 6 | 0.00500 | 0.0008 | 6.42 | 1.25×10^{-4} |
| 7 | 0.00750 | 0.0008 | 8.64 | 9.26×10^{-5} |

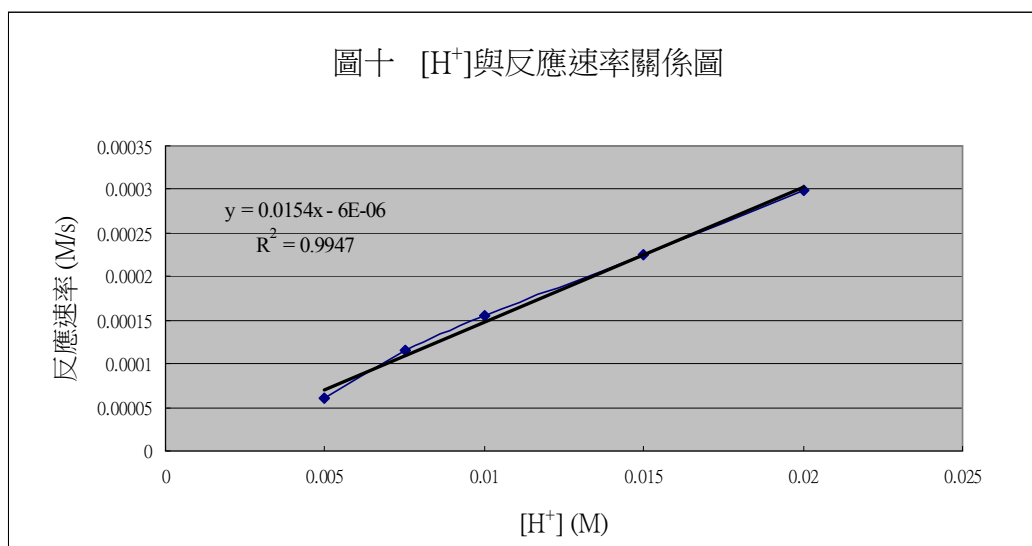


(二)改變[H⁺]對反應速率的影響

實驗數據如表五，反應速率與[H⁺]關係圖如圖十，由圖十可得知氫離子濃度與反應速率之關係為一斜直線，其線性相關係數達 0.9947，可判定混合後[H⁺]濃度在 0.005M~0.02M 的範圍內為一級反應，即 $R \propto [H^+]$ 。

表五 改變[H⁺]對反應速率的影響

| 編號 | 混合後 [H ⁺] | 混合後 [Na ₂ S ₂ O ₃] | 反應時間(sec) 三次平均值 | 反應速率 (M/s) = $\frac{-\Delta[Na_2S_2O_3]}{\Delta t}$ |
|----|-----------------------|--|--------------------|--|
| 1 | 0.0050 | 0.0008 | 2.68 | 6.13×10^{-5} |
| 2 | 0.0075 | 0.0008 | 3.54 | 1.15×10^{-4} |
| 3 | 0.0100 | 0.0008 | 5.16 | 1.55×10^{-4} |
| 4 | 0.0150 | 0.0008 | 6.96 | 2.26×10^{-4} |
| 5 | 0.0200 | 0.0008 | 13.04 | 2.99×10^{-4} |

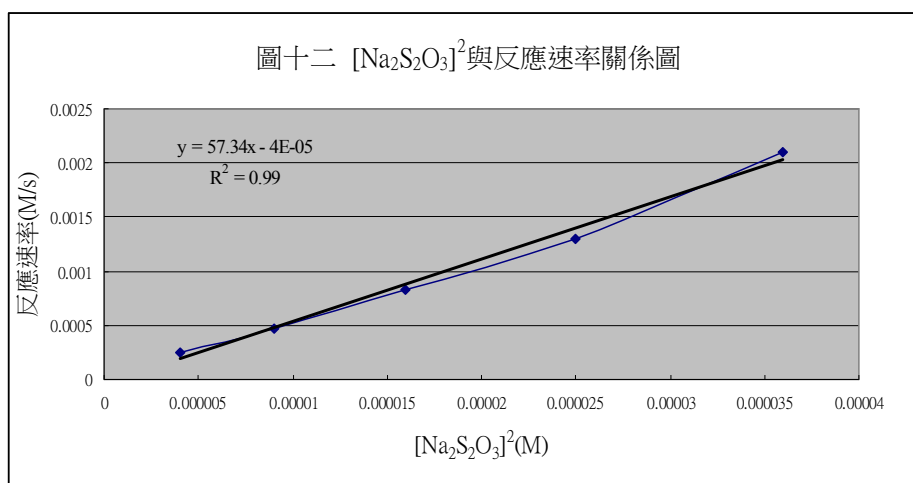
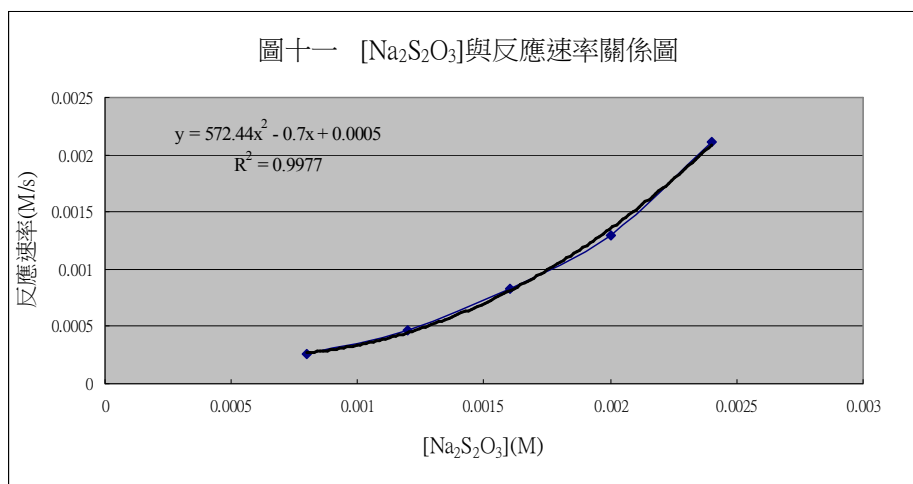


(三)改變 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ 對反應速率的影響

- 1.實驗數據如表六，圖十一為反應速率與 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ 關係圖，由圖十一可得知硫代硫酸鈉濃度與反應速率之關係為二次函數，其線性相關係數達 0.9977。
- 2.再將 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ 濃度的平方與反應速率作圖可得圖十二，圖形則呈一斜直線，線性相關係數為 0.99。
- 3.據此推論混合後 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ 濃度在 0.0008M~0.0024M 的範圍內應為二級反應，即 $R \propto [\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]^2$ 。

表六 改變 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ 對反應速率的影響

| 編號 | 混合前 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ | 混合後 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ | 反應時間(sec) 三次平均值 | 反應速率 $(\text{M/s}) = \frac{-\Delta[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]}{\Delta t}$ |
|----|--|--|--------------------|--|
| 1 | 0.002 | 0.0008 | 3.14 | 2.55×10^{-4} |
| 2 | 0.003 | 0.0012 | 2.54 | 4.72×10^{-4} |
| 3 | 0.004 | 0.0016 | 1.92 | 8.33×10^{-4} |
| 4 | 0.005 | 0.0020 | 1.54 | 1.23×10^{-3} |
| 5 | 0.006 | 0.0024 | 1.14 | 2.11×10^{-3} |



七、以光電計時器測量反應速率

(一)圖十三為光電計時計與光柵圖。光電計時計在物理實驗中主要是測量自由落體的速率，而本實驗嘗試以光電計時取代碼錶計時。當溶液加入時，因溶液擾動，造成光線暫時阻斷而得以啟動計時；當溶液出現藍色時，又會對光線產生遮光效果，使計時器停止計時。



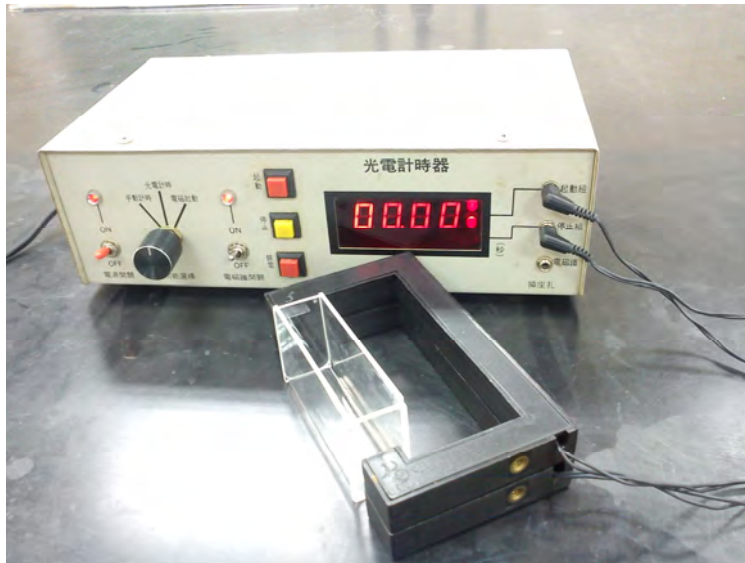
圖十三 光電計時計與光柵

(二)自製反應槽

- 1.光電計時器的口字型光柵寬約 9 公分，以一般試管(直徑約 2 cm)當反應槽，測試發現無法順利以試管當反應槽，而使計時器順利啟動與中止計時。
- 2.改以 500 mL 燒杯置入光柵中，則可順利啟動與中止計時，顯示光徑長度會影響實驗結果。
- 3.以燒杯當反應槽，所需溶液量甚多，故自製一長 8 cm 寬 2 cm 高 3 cm 的壓克力反應槽，反應槽如圖十四，測定裝置如圖十五所示。



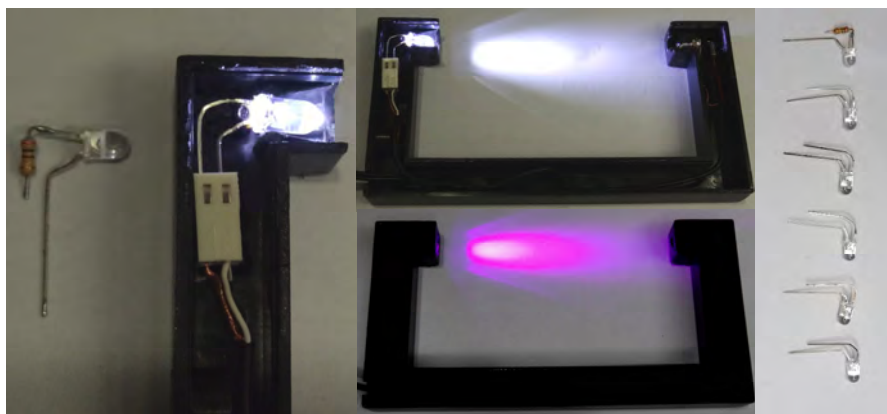
圖十四 自製反應槽



圖十五 測定裝置

(三)尋找適合的光源

不同 LED 燈源的光柵如圖十六所示，實驗結果如表七，由數據顯示紅光與黃綠光反應速率較快，代表此二色光遮光效果較佳，本實驗採用紅色 LED 光源。



圖十六 不同 LED 燈源的光柵

表七 不同 LED 光源與反應時間之關係

| 光源 | 白光 | 紅光 | 黃綠光 | 藍光 | 紫光 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 反應時間 1 | 2.43s | 1.09s | 1.04s | 1.17s | 1.42s |
| 反應時間 1 | 2.48s | 1.09s | 1.08s | 1.28s | 1.30s |
| 反應時間 1 | 2.45s | 1.03s | 1.05s | 1.20s | 1.35s |
| 標準偏差 | 0.03s | 0.03s | 0.02s | 0.06s | 0.06s |

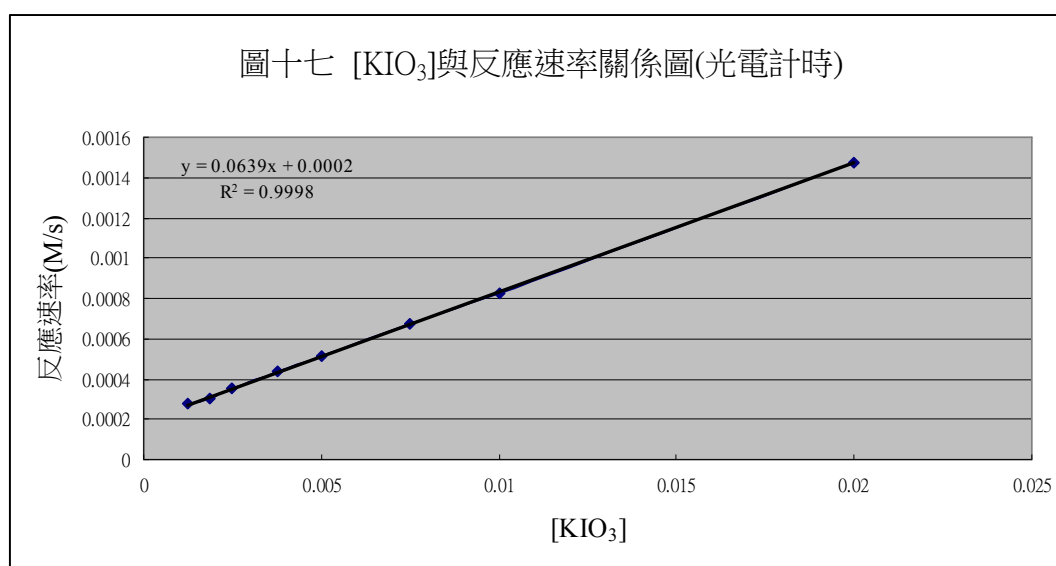
(四)以光電計時方式求 KIO_3 與硫代硫酸鈉反應的反應速率定律式。

1.改變 $[\text{KIO}_3]$ 對反應速率的影響

實驗數據如表八，反應速率與 $[\text{KIO}_3]$ 關係圖如圖十七，由圖十七可得知碘酸鉀濃度與反應速率之關係為一斜直線，其線性相關係數達 0.9998，可判定混合後 $[\text{KIO}_3]$ 濃度在 0.0013M~0.02M 的範圍內為一級反應，即 $R \propto [\text{KIO}_3]$ 。

表八 改變[KIO₃]對反應速率的影響

| 編號 | 混合後 [KIO ₃] | 混合後 [Na ₂ S ₂ O ₃] | 反應時間(sec) 三次平均值 | 反應速率 (M/s)= $\frac{-\Delta[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]}{\Delta t}$ |
|----|----------------------------|---|--------------------|--|
| 1 | 0.0200 | 0.0008 | 0.54 | 1.48×10^{-3} |
| 2 | 0.0100 | 0.0008 | 0.97 | 8.25×10^{-4} |
| 3 | 0.0075 | 0.0008 | 1.23 | 6.50×10^{-4} |
| 4 | 0.0050 | 0.0008 | 1.53 | 5.22×10^{-4} |
| 5 | 0.0038 | 0.0008 | 1.83 | 4.38×10^{-4} |
| 6 | 0.0025 | 0.0008 | 2.35 | 3.41×10^{-4} |
| 7 | 0.0019 | 0.0008 | 2.59 | 3.09×10^{-4} |
| 8 | 0.0013 | 0.0008 | 2.81 | 2.84×10^{-4} |

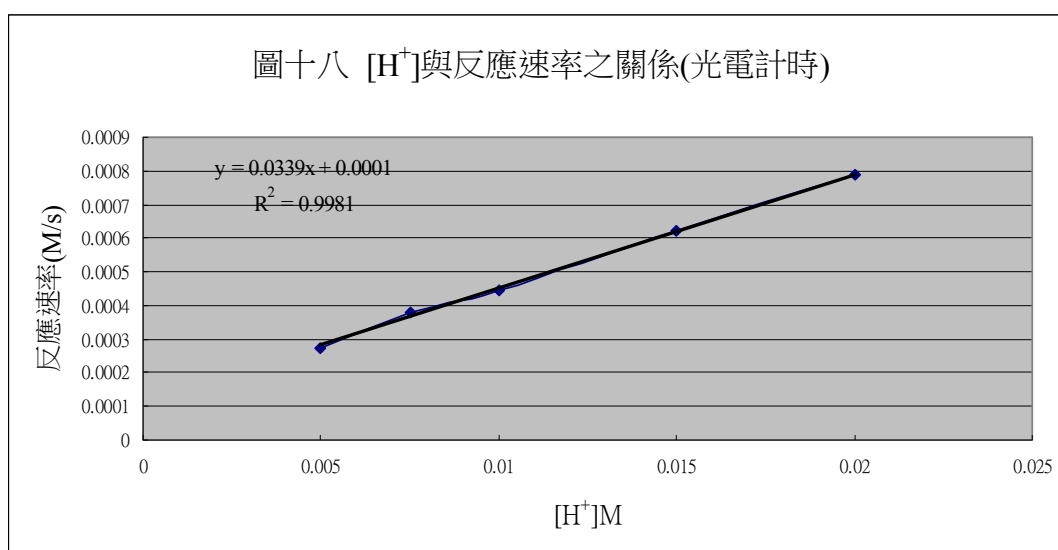


2. 改變[H⁺]對反應速率的影響

實驗數據如表九，反應速率與[H⁺]關係圖如圖十八，由圖十八可得知氫離子濃度與反應速率之關係為一斜直線，其線性相關係數達 0.9998，可判定混合後[H⁺]濃度在 0.005M~0.02M 的範圍內為一級反應，即 $R \propto [\text{H}^+]$ 。

表九 改變[H⁺]對反應速率的影響

| 編號 | 混合後 [H ⁺] | 混合後 [Na ₂ S ₂ O ₃] | 反應時間(sec) 三次平均值 | 反應速率 (M/s)= $\frac{-\Delta[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]}{\Delta t}$ |
|----|--------------------------|---|--------------------|--|
| 1 | 0.0200 | 0.0008 | 1.01 | 7.89×10^{-4} |
| 2 | 0.0150 | 0.0008 | 1.29 | 6.20×10^{-4} |
| 3 | 0.0100 | 0.0008 | 1.80 | 4.44×10^{-4} |
| 4 | 0.0075 | 0.0008 | 2.10 | 3.80×10^{-4} |
| 5 | 0.0050 | 0.0008 | 2.93 | 2.73×10^{-4} |



陸、討論

一、當焦亞硫酸鈉溶於水時： $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaHSO}_3$ ，而 NaHSO_3 不穩定，易與酸(H⁺)反應生成 $\text{SO}_{2(g)}$ 逸散，使溶液中 $[\text{HSO}_3^-]$ 減少，還原力下降，進而影響反應速率之測定；相較之下，硫代硫酸鈉在酸中的穩定度較高。

亞硫酸根離子與酸的反應方程式： $\text{HSO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

二、依標準還原電位表：

| | |
|--|-----------------------------|
| $\text{IO}_3^- + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow \text{I}^- + 3\text{H}_2\text{O}$ | $E^\circ = 1.085 \text{ v}$ |
| $\text{S}_4\text{O}_6^{2-} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ | $E^\circ = 0.08 \text{ v}$ |

反應： $\text{IO}_3^- + 6\text{S}_2\text{O}_3^{2-} + 6\text{H}^+ \rightarrow \text{I}^- + 3\text{S}_4\text{O}_6^{2-} + 3\text{H}_2\text{O}$ $E^\circ = 1.005 \text{ v} > 0$ 為自發性反應，實驗證明硫代硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)可以取代焦亞硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)進行秒錶反應。且硫代硫酸鈉的酸性水溶液比焦亞硫酸鈉的酸性水溶液穩定，故本研究建議高中秒錶反應實驗中可以硫代硫酸鈉取代焦亞硫酸鈉。

三、實驗證明碘酸鉀與焦亞硫酸鈉反應濃度比 $(\frac{[\text{IO}_3^-]}{[\text{HSO}_3^-]})$ 需大於 1/3 與理論相符；而碘酸鉀與硫代硫酸鈉反應濃度比 $(\frac{[\text{IO}_3^-]}{[\text{S}_2\text{O}_3^{2-}]})$ 則需大於 $\frac{1}{5}$ ，反應效果較佳。

四、速率定律式的測定

(一)碘酸鉀(KIO_3)與焦亞硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)的反應在高中實驗課程中，並未真正求的反應速率定律式，本實驗藉由反應速率 $\frac{-\Delta[\text{HSO}_3^-]}{\Delta t}$ 與 $[\text{KIO}_3]$ 、 $[\text{HSO}_3^-]$ 、 $[\text{H}^+]$ 的關係求得反應速率定律式。

- 1.混合後 $[\text{KIO}_3]$ 濃度在 0.00125M~0.011M 的範圍內， $[\text{KIO}_3]$ 與反應速率關係圖成一斜直線，線性相關係數達 0.9975，表示速率定律式中，對 $[\text{KIO}_3]$ 為一級反應。
- 2.混合後 $[\text{H}^+]$ 濃度在 0.001M~0.02M 的範圍內， $[\text{H}^+]$ 與反應速率關係圖成一斜直線，線性相關係數達 0.9965，表示速率定律式中，對 $[\text{H}^+]$ 為一級反應。
- 3.混合後 $[\text{HSO}_3^-]$ 濃度在 0.0002M~0.0024M 的範圍內， $[\text{HSO}_3^-]$ 與反應速率關係圖成一斜直線，線性相關係數為 0.9949，表示速率定律式中，對 $[\text{HSO}_3^-]$ 為一級反應。綜合上述 1,2,3 點，可推論碘酸鉀(KIO_3)與焦亞硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)的反應速率定律式為 $R=[\text{IO}_3^-][\text{HSO}_3^-][\text{H}^+]$ ，反應總級數為三級。

(二)碘酸鉀(KIO_3)與硫代硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)反應

- 1.混合後 $[\text{KIO}_3]$ 濃度在 0.00125M~0.00750M 的範圍內， $[\text{KIO}_3]$ 與反應速率 $(\frac{-\Delta[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]}{\Delta t})$ 成關係圖一斜直線，線性相關係數達 0.9963，表示速率定律式中，對 $[\text{KIO}_3]$ 為一級反應。
- 2.混合後 $[\text{H}^+]$ 濃度在 0.005M~0.020M 的範圍內， $[\text{H}^+]$ 與反應速率關係圖成一斜直線，線性相關係數為 0.9947，表示速率定律式中，對 $[\text{H}^+]$ 為一級反應。
- 3.混合後 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ 濃度在 0.0008M~0.0024M 的範圍內， $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ 與反應速率關係圖中，二者關係為二次函數，線性相關係數為 0.9977；再將 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]^2$ 與反應速率作圖，仍呈一直線，線性相關係數為 0.99，表示速率定律式中，對 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ 為二級反應。綜合上述 1,2,3 點，可推論碘酸鉀(KIO_3)與硫代硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)的反應速率定律式為 $R=[\text{IO}_3^-][\text{S}_2\text{O}_3^{2-}]^2[\text{H}^+]$ ，反應總級數為四級。

五、以光電計時器輔助計時的研究

- (一)光電計時器乃做物理實驗時，常用的感應計時裝置，有自動感應、計時精確的優點，故考慮以學校既有的光電計時器做實驗。
- (二)本實驗初期，因學校光電計時器老舊，停止計時之光柵時好時壞，無法順利進行實驗；但因曾有成功經驗，覺得此方法有可行性。
- (三)購置新光柵重新進行實驗，結果發現新光柵光源較強，亦無法順利停止計時。經適度調整澱粉濃度(不同批次的澱粉，即使相同濃度，溶液遮光效果不同)，並配合

將光源作適度的遮光後，實驗進行仍不順利。推測是因為光源為紅外光，穿透性較好，不易被遮蔽。

(四)將原光柵光源改為可見光，以不同顏色之 LED 進行測試，發現可見光範圍的所有燈源均能順利實驗，而其中以紅光與黃綠光感應較快，顯示溶液對紅光與黃綠光的遮光效果較佳，後續實驗乃以紅光 LED 進行實驗。

(五)限於時間因素，使用光電計時器部份的研究，僅完成 KIO_3 與硫代硫酸鈉/澱粉溶液反應中， $[\text{KIO}_3]$ 、 $[\text{H}^+]$ 與反應速率之關係

1.混合後 $[\text{KIO}_3]$ 濃度在 0.0013M~0.02M 的範圍內， $[\text{KIO}_3]$ 與反應速率 $(\frac{-\Delta[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]}{\Delta t})$

成關係圖一斜直線，線性相關係數達 0.9998，即反應速率定律式中，對 $[\text{KIO}_3]$ 為一級反應。

2.混合後 $[\text{H}^+]$ 濃度在 0.005M~0.02M 的範圍內， $[\text{H}^+]$ 與反應速率 $(\frac{-\Delta[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]}{\Delta t})$ 成

關係圖一斜直線，線性相關係數達 0.9981，即反應速率定律式中，對 $[\text{H}^+]$ 為一級反應。

3.硫代硫酸鈉濃度與反應速率的關係，可望在稍後完成。

(六)實驗結果顯示，以光電計時方式，可得與目測計時方式相同的結果。而光電計時方式計時方便，可以單人操作完成實驗，且計時精確，僅數秒的反應時間，亦能順利而精準的計時。

(七)反應槽的大小，乃依據光柵寬度設計，目前使用 20ml 的試劑可以進行實驗，試劑用量與傳統實驗相當。由於後來使用紅光 LED 光柵感應，對溶液變色相當敏感，較短光徑應也能有效感應，故若能修改反應槽大小，將長度減半、寬度稍減，試劑用量應能減少一半以上，達到減量實驗的目的。

柒、結論

一、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 可以取代 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 進行秒錶反應實驗，且硫代硫酸鈉對酸的穩定度較焦亞硫酸鈉佳。

二、由實驗結果可得知碘酸鉀與焦亞硫酸鈉的反應速率定律式為 $R=[\text{IO}_3^-][\text{HSO}_3^-][\text{H}^+]$ ，反應總級數為三級；碘酸鉀與硫代硫酸鈉反應速率定律式為 $R=[\text{IO}_3^-][\text{S}_2\text{O}_3^{2-}]^2[\text{H}^+]$ 反應總級數為四級。

三、以肉眼判讀顏色變化配合碼錶的計時方式，再現性較差；以光電計時器取代碼錶計時的方法計時方便且精確，即使數秒內的反應時間亦可順利計時，且可單人操作完成，故以光電計時器輔助計時方式較佳且可行。

捌、參考資料及其他

一、葉名倉等，基礎化學(三)，第二章，南一書局，2011 年。

二、葉名倉等，基礎化學(三)實驗手冊，實驗九，南一書局，2011 年。

三、Standard Reduction Potential，民 100 年 12 月 20 日，取自

http://www.jesuitnola.org/upload/clark/refs/red_pot.htm

【評語】 040210

在典型的碘鐘實驗上以 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 替換 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ，實驗數據詳實，
在題目新穎性上稍弱。