

題目名稱：星火燎原鋼絲絨

一、摘要

本研究旨在探索鋼絲絨經通電燃燒，其反應機制、質量變化、反應速率與鋼絲絨燃燒後的生成物性質。經初步測試後，線徑較粗的鋼絲絨不易通電起火或燃燒不完全，故本研究以電阻 $0.1\Omega/10\text{cm}$ 的 0000 號極細鋼絲絨，接觸 9V 電池通電燃燒進行實驗。經進一步實驗結果發現，鋼絲絨燃燒時，含有的許多非金屬與氧氣反應生成二氧化碳、一氧化碳等非金屬氧化物逸失於空氣中，造成一些質量的損失。當非金屬氧化物逸失於空氣的質量大於金屬燃燒所增加的氧氣量時，燃燒後鋼絲絨的總質量變輕；反之，則燃燒後之總質量變重。此外，經電子式溫度計測量，約介於 $200\sim 300^\circ\text{C}$ 之間，此為生成四氧化三鐵的溫度、呈現灰黑色細條狀、可被磁鐵吸引，判斷為 Fe_3O_4 或 $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。

二、探究題目與動機

鐵在一般環境與空氣中的生鏽，屬於非常緩慢且較複雜的氧化過程。自然科教學上多採用鐵絲置入裝水的密閉玻璃管中，等待一週、甚至更久的時間讓鐵絲逐漸生鏽，除了過於曠日廢時之外，也因「水」參與反應，產生三氧化二鐵水合物 ($\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot n\text{H}_2\text{O}$) 與氫氧化鐵 ($\text{FeO}(\text{OH})$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$)。我們如何讓鐵能快速氧化、又不至於產生較複雜的氧化物或水合物呢？

此外，以燃燒鐵絲方式雖可加速鐵氧化，卻也可能因含碳的燃料，例如以甲烷為燃料的本生燈、或乙醇或甲醇為燃料的酒精燈、主成分為烷類的蠟燭、或具有更複雜組成的火柴等熱源，容易形成二氧化碳、一氧化碳、其他氧化物等生成物而不易分析實驗結果。是否有較簡便的實驗器材、較簡易的操作方法、可降低熱源所造成的實驗誤差、以及加速鐵氧化的實驗設計呢？

經參酌與考量許多實驗器材以促進鐵絲氧化的方式，我們採用 9 伏特電池對於極細的鋼絲絨通電，並且進一步檢測其反應的結果與反應後的生成物性質，透過一連串簡化的器材與實驗設計，或可增進學生對於鐵氧化的理解與探究課程的學習成效。

三、探究目的與假設

根據上述探究題目與動機，本研究以五金行所販售不同粗細的鋼絲絨採用 9 伏特電池對其通電，進一步探究鋼絲絨通電後之鐵氧化歷程、反應速率與生成物的性質，羅列探究問題如下所示。

1. 鋼絲絨經電池通電燃燒之反應歷程與反應機制為何？
2. 鋼絲絨經電池通電燃燒之反應速率為何？
3. 鋼絲絨通電前與燃燒後之質量變化為何？
4. 不同粗細的鋼絲絨經電池通電燃燒後之生成物為何？

四、探究方法與驗證步驟

(一) 實驗器材：

不同粗細的鋼絲絨包括 1 號、0 號、00 號、000 號、0000 號、電子秤、電子式溫度計、鐵盤、9V 電池、三用電表、電源供應器。如下圖 1 所示。



圖 1.星火燎原鋼絲絨實驗器材

(二)探究方法與實驗設計：

鋼絲絨又稱鋼棉，主要於用廚房廚具餐具的清潔以及其它五金機械用品的清潔。一般較常用的鋼絲絨由粗到細的型號包括 4#、3#、2#、1#、0#、00#、000#、0000#。

鋼絲絨具有極少量的鎳、鈷與碳等元素之不鏽鋼的材質。本實驗採用較細的鋼絲絨取代鐵絲，經接觸 9V 電池進行通電引燃，與常用來刷鐵鍋或油漆工用來刷牆壁「粗鋼絲絨」有所不同！因為，愈細的鋼絲絨，通電之後愈容易引燃，燃燒速率愈快，而且愈細的鋼絲絨內部的空氣量愈多，燃燒時的空氣對流也愈旺盛。因此，星星之火便能引燃整團的鋼絲絨。另外，9V 電池碰觸鋼絲絨便直接燃燒可視為「短路」現象，即鋼絲絨易因通電產生較大的電流強度與高電功率而極易燃燒。

經過以 9V 電池碰觸粗細不同鋼絲絨之初步測試後發現，2 號至 3 號等較粗的鋼絲絨無法以 9V 電池接觸引燃，而 000 號、00 號、0 號與 1 號鋼絲絨可用 9V 電池引燃，但是燃燒不完全。0000 號最易引燃且完全燃燒殆盡，因此，我們皆以 0000 號鋼絲絨進行以下的探究實驗。

探究 1.不同粗細的鋼絲絨經電池通電燃燒之反應機制與歷程

1.探討鋼絲絨經電池通電燃燒之反應歷程

我們為了解鋼絲絨經電池通電燃燒之歷程，根據以下實驗步驟進行測試。

步驟 1.將鐵盤放置於電子秤上並將電子秤歸零。

步驟 2.將鋼絲絨放入鐵盤中，測得鋼絲絨在燃燒前的質量，如圖 2 所示。

步驟 3.以 9V 電池接觸鋼絲絨之後，觀察鋼絲絨的反應，如圖 3 與圖 4 所示。

步驟 4.鋼絲絨完全燃燒並冷卻後，觀察鋼絲絨燃燒後的變化，如圖 5 所示。



圖 2.將鐵盤置於電子秤並歸零



圖 3.以 9V 電池接觸並引燃鋼絲絨



圖 4.觀察燃燒過程之質量變化



圖 5.觀察鋼絲絨燃燒殆盡之質量

從上述實驗步驟中，我們反覆進行多次測試，結論如下：

- (1)鋼絲絨不可揉成與壓縮得「太過緊密」。因為鋼絲絨壓得太過緊密時，最外層的鋼絲絨燃燒後，包裹得愈內層的鋼絲絨就無法被燃燒殆盡，易造成較大的實驗誤差，包括反應時間與總質量變化。
- (2)鋼絲絨也不能揉得「太過膨鬆」。因為鋼絲絨壓得太過膨鬆時，最外層鋼絲絨燃燒時的火星會「噴濺」到鐵盤外面影響質量的測量誤差，且反應速率過快。
- (3)以 9V 電池碰觸鋼絲絨時，必須固定接觸的位置，例如必須固定接觸鋼絲絨的中間位置，與接觸鐵盤內的鋼絲絨側邊之反應速率有差異。

2.探討鋼絲絨經電池通電燃燒之反應機制

我們進一步以三用電表與電源供應器測試長度 10cm 的 0000 號鋼絲絨發現：

- (1)長度 10cm 的鋼絲絨電阻約為 0.1Ω 。
- (2)長度 10cm 的鋼絲絨只要約 1.0V 的電壓就能夠引燃起火，鋼絲絨兩端低於 1.0V 的電壓接觸時只會發熱而變紅，無法立即燃燒。
- (3)根據以上(1)與(2)測試結果，長度 10cm 的鋼絲絨要引燃起火，至少需要電功率約為 $I^2 \cdot 0.1 = 10w$ ，即 10 瓦特的電功率可引燃 10cm 的鋼絲絨。
- (4)因為 0000 號鋼絲絨線徑極細，所以任何一絲或外層鋼絲絨被引燃後，就開始向內層延燒直到鋼絲絨燃燒殆盡為止。
- (5)從外層鋼絲絨開始通電燃燒後，溫度逐漸升高並延燒到內層的鋼絲絨時，內層如果較為蓬鬆就會產生對流現象，造成燃燒愈來愈旺盛。

探究 2.不同粗細的鋼絲絨經電池通電之燃燒速率

我們採用 0.5g~6g 鋼絲絨與 9V 電池接觸引燃，從 9V 電池接觸引燃鋼絲絨至完全燃燒殆盡計算反應時間，我們為了方便觀察「反應速率」的數據變化，特別將鋼絲絨質量改為毫克(mg)進行計算，測試結果如下表 1 所示。

表 1.不同質量之鋼絲絨對於通電燃燒時間

| | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 鋼絲絨質量(g) | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 |
| 通電燃燒時間(s) | 12 | 22 | 33 | 34 | 38 | 29 | 39 | 42 | 34 | 34 | 35 | 43 |
| 每毫克燃燒速率 (1/s*mg) | 166.7 | 45.5 | 20.2 | 14.7 | 10.5 | 11.5 | 7.3 | 6.0 | 6.5 | 5.9 | 5.2 | 3.9 |

整理表 1 繪製成圖 6「鋼絲絨質量與通電燃燒時間關係圖」、圖 7。「鋼絲絨質量與燃燒速率關係圖」，如圖 6 與圖 7 所示。

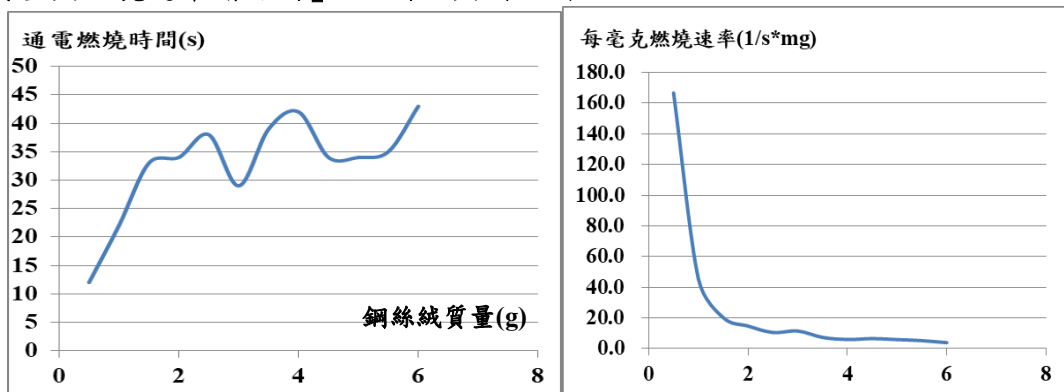


圖 6.鋼絲絨質量與燃燒時間關係圖

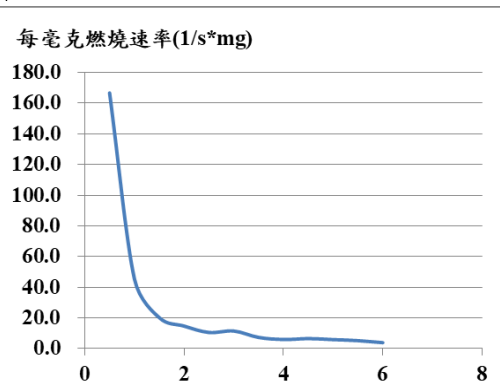


圖 7.鋼絲絨質量與燃燒速率關係圖

從圖 6 得知，「鋼絲絨質量與通電反應時間大致上成正相關」的關係，亦即鋼絲絨質量愈多，通電而燃燒的反應時間大致上愈長。至於有時反應時間變短的主要原因，我們推論可能來自鋼絲絨燃燒時較內層產生熱對流，熱對流的空氣擾動之變因無法完全控制，而且通電點燃鋼絲絨的位置不同也會影響其燃燒速率。

再從圖 7 得知，鋼絲絨質量愈小，每毫克鋼絲絨燃燒速率愈快。我們推測，如上述「當鋼絲絨燃燒至較內層產生熱對流時」會因為內層氧氣量較少，燃燒逐漸變慢，導致整個鋼絲絨燃燒時間增加、燃燒速率變慢。

經多次對不同質量鋼絲絨通電燃燒的觀察結果，鋼絲絨質量大約超過 4g 時，通電初期的最外層鋼絲絨燃燒速率很快，當鋼絲絨欲往內層延燒，燃燒速率逐漸變慢，導致整個反應時間延長。

探究 3. 不同粗細的鋼絲絨通電前與燃燒後之質量變化

每一組燃燒鋼絲絨之多次質量測量，鋼絲絨經電子磅秤測量初始質量之後，以 9V 電池引燃，再測量燃燒後的質量。每一組產生多組的實驗數據，檢視燃燒後總質量變輕或變重？探討為何鋼絲絨燃燒前後質量變輕或變重之可能原因？

我們同樣採用 0.5g~6g 鋼絲絨與 9V 電池接觸引燃，從 9V 電池接觸引燃鋼絲絨至完全燃燒殆盡計算總質量與質量變化量，並且捨棄「未完全燃燒的鋼絲絨」之實驗數據以降低實驗誤差。

經實驗結果如表 2 所示。經整理表 2 繪製成「鋼絲絨燃燒前與燃燒後的質量變化量」，如圖 8 所示。

表 2. 鋼絲絨燃燒前與燃燒後的質量變化量

| | | | | | | | | | | | | |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 鋼絲絨質量(g) | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 |
| 燃燒後質量(g) | 0.6 | 1.2 | 1.6 | 2.4 | 2.8 | 3.5 | 4 | 4.8 | 5.6 | 6.2 | 6.6 | 7.1 |
| 質量變化量(g) | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.4 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.8 | 1.1 | 1.2 | 1.1 | 1.1 |

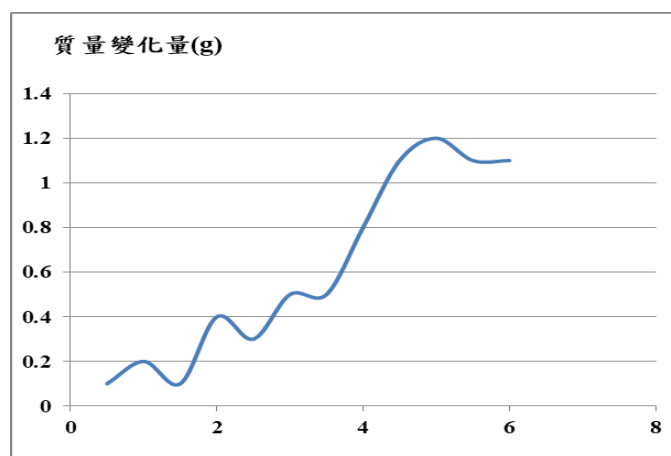


圖 8. 鋼絲絨燃燒前與燃燒後的質量變化量圖

從表 2 與圖 8 得知：

1. 以 0.5g~6g 鋼絲絨與 9V 電池接觸引燃，燃燒後的總質量增加。
2. 參與通電燃燒反應的鋼絲絨質量並未與增加的質量變化量成正相關的關係，我們推論原因如下：
 - (1) 鋼絲絨並非「純鐵」而是屬於含碳或其他非金屬元素的混合物。因此，當鋼絲絨燃燒時，會有許多鋼絲絨內的碳元素或其他非金屬元素，與空氣中

的氧氣反應生成二氧化碳、一氧化碳或其他逸失於空氣中的化合物，造成一些質量的損失。

- (2)當鋼絲絨質量愈大、燃燒愈旺盛，上述(1)中的非金屬氧化物也可能逸失於空氣愈多，而鋼絲絨中鐵或鎳等金屬形成金屬氧化物所增加的氧氣量，必須扣除非金屬氧化物逸失於空氣的質量。
- (3)經過上述(1)與(2)的推論過程，假如鋼絲絨燃燒之「非金屬氧化物逸失於空氣的質量」>「金屬形成金屬氧化物所增加的氧氣量」時，燃燒後鋼絲絨的總質量反而變輕了！

我們再進一步重複進行 0.1~0.4g 鋼絲絨通電起火燃燒時發現，總質量反而減少，這也可能表示鋼絲絨燃燒之「非金屬氧化物逸失於空氣的質量」>「金屬形成金屬氧化物所增加的氧氣量」。

探究 4.不同粗細的鋼絲絨通電燃燒後之生成物

當鋼絲絨以通電方式燃燒後，究竟是產生哪一種鐵氧化物呢？經查詢相關文獻得知，最常見的鐵氧化物包括：氧化亞鐵、氧化鐵、四氧化三鐵等三類，而此三類的鐵氧化物不論在生成條件、顏色、或物理與化學性質皆有差異，不同鐵氧化物之性質比較茲羅列如表 1 所示。

表 1.常見的不同鐵氧化物比較表

| 鐵氧化物 | 氧化亞鐵(一氧化鐵) | 氧化鐵(三氧化二鐵) | 四氧化三鐵 |
|------------------------|--------------------------|---|--|
| 化學式 | FeO | Fe ₂ O ₃ | Fe ₃ O ₄ (或 FeO·Fe ₂ O ₃) |
| 外觀 | 黑色粉末(約 770°C) | 黃褐色(約 1,500°C) | 灰黑色(150~600°C) |
| 密度(g/cm ³) | 5.7 | 5.24 | 5.1 |
| 礦物 | 方鐵礦 | 鐵鏽與赤鐵礦 | 磁鐵礦 |
| 磁鐵 | 不可吸引 | 不可吸引 | 可吸引 |
| 與鹽酸反應 | 產生 FeCl ₂ | 產生 FeCl ₃ | 產生 FeCl ₂ 與 FeCl ₃ |
| 化學反應式 | 2Fe+O ₂ →2FeO | 4Fe + 3O ₂ → 2Fe ₂ O ₃ | 3Fe + 2O ₂ → Fe ₃ O ₄ |

從上述表 1 中得知，三種鐵氧化物之「密度」很接近、三種鐵氧化物皆可「與鹽酸反應」且產生 FeCl₂與 FeCl₃的也不易檢測其性質。因此，我們從鋼絲絨燃燒後的鐵氧化物之「外觀(顏色)」並採用磁鐵吸引檢測其「磁性」最為簡便。

雖然多數文獻指出，鋼絲絨燃燒後會變成氧化鐵(三氧化二鐵 Fe₂O₃)，但是，我們經測試結果發現，不論粗細的鋼絲絨燃燒過程中測得溫度約介於 200~300°C，鋼絲絨燃燒後的鐵氧化物都呈現「灰黑色」的細條狀、少量呈現粉末狀、皆能被磁鐵吸引。因此，我們判斷此鐵氧化物應為俗稱磁鐵礦的「四氧化三鐵(Fe₃O₄或 FeO·Fe₂O₃)」！

五、結論與生活應用

我們嘗試採用整團鋼絲絨通電起火後，放入敲打成較為細碎的烤肉用木炭發現，細碎的木炭因快速燃燒的鋼絲絨之高溫作用下也跟著引燃，表示可運用於作為野炊時快速取火的方式，甚至可以取代火種或俗稱的火雞來烘烤木炭起火。

另外，因為本活動採用的鋼絲絨與 9V 電池既方便、取材簡易、攜帶方便，也遠比攜帶瓦斯噴槍還要配帶瓦斯罐的安全性高，不失為未來野炊或野外取火的最佳方式。再者，本實驗也適用於物理「電學」單元以及化學金屬的「氧化還原」單元中，用來教導「短路」與「電功率」等物理概念。

六、參考資料

- 1.環保能源-檸檬電池(李維剛、張璉凌，2016)。2016 全國科學探究競賽-這樣教我就懂。
- 2.步步高升-證明空氣中氧氣含量及新反應器研製(陳玉樺、王亭懿、戴辰芳，2006)。中華民國第 46 屆中小學科學展覽會作品說明書，國立科學教育館，未出版。
- 3.科展達人「鏽」(李晉愷、李奇華、陳佳和、吳采軒、林憶帆，2017)。中華民國第 57 屆中小學科學展覽會作品說明書，國立科學教育館，未出版。
- 4.課本錯？還是我錯？鐵生鏽會用掉空氣 vs 鐵生鏽會產生氣體(呂宗恆、陳芝儀、陳炫理，2007)。中華民國第 47 屆中小學科學展覽會作品說明書，國立科學教育館，未出版。
- 5.探究直流電加熱不同金屬產生燃燒條件及其改進教材中有關空氣中氧含量之實驗設計(曾得嘉、陳世恩、王繹程，2013)。中華民國第 53 屆中小學科學展覽會作品說明書，國立科學教育館，未出版。