

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

080114

奔跑吧！火焰！——單向繞圈移動火焰之探究

學校名稱： 桃園市桃園區中山國民小學

作者：	指導老師：
小六 陳柏羽	林文鄉
小六 魯耘碩	
小六 徐子喬	
小六 陳宥宏	

關鍵詞： 單向繞圈、移動火焰、繞圈火焰

作品名稱

奔跑吧！火焰！——單向繞圈移動火焰之探究

摘要

我們的研究主要在探討「單向繞圈移動火焰」現象的成因與影響因素。起初在網路上看到相關影片，引發我們的好奇，因此設計實驗驗證火焰是否真的能繞圈移動。經過多次嘗試後，我們以 3D 列印製作 ABS 塑料軌道，定義成功現象為火焰不分裂、不熄滅，且穩定繞行三圈以上。實驗結果顯示，火焰移動受氣流、燃料蒸發速度、軌道形狀等因素影響；其穩定性與速度與燃燒狀況及外界環境密切相關。不同軌道設計會影響火焰移動模式，與升溫速度及氧氣供應有關。我們曾記錄火焰持續繞行達 4 分鐘、最快速率達 55 cm/s。本研究不僅揭示了火焰繞圈移動的原理，也辨識出多項關鍵影響因素，期望能讓大家更了解這個有趣的現象。

壹、 研究動機

有一天，我和家人在網路上看到了一段非常有趣的影片。影片中，作者用花盆底座的外圈凹槽當作軌道，倒上燃料後點火，結果出現了一個像賽跑選手一樣在軌道上跑來跑去的火焰，而且一直繞圈轉不停。圖 1 是影片的截圖。這個現象讓我們看得目不轉睛，但也讓我們忍不住懷疑：這影片是真的嗎？火焰真的可以這樣移動嗎？這種現象會不會需要什麼特別的條件？因為對這個現象非常好奇，我找了幾個和我一樣有興趣的朋友，還請教了老師，希望一起來做研究。我們想通過實驗來找出火焰為什麼會這樣移動，還有哪些條件能夠讓它發生，也想知道會影響火焰移動速度的原因。我們希望能透過這些實驗了解背後的科學原理，並為火焰的動態行為研究提供一個有趣又不一樣的觀點。



圖 1 網路影片中移動火焰現象的截圖(詳見參考資料 1)。

貳、 研究目的

- 一、 探究單向繞圈移動火焰的科學原理和成功條件。
- 二、 軌道深度對於單向繞圈移動火焰的影響。
- 三、 軌道寬度對於單向繞圈移動火焰的影響。
- 四、 軌道長短對於單向繞圈移動火焰的影響。
- 五、 外界溫度對於單向繞圈移動火焰的影響。

參、 理論探討

- 一、 什麼是單向繞圈移動火焰？

單向繞圈移動火焰是由我們所觀察到的現象所自訂的詞彙，它是指有一團火焰不斷在一個圓形軌道上繞圈運行。而軌道中盛裝著一些燃料液，並在此過程燃燒消耗，如圖 2 所示。



圖 2 單向繞圈移動火焰(學生自拍)

二、 火焰相關科學原理

火焰的運動和很多有趣的科學現象有關，比如燃燒、熱空氣上升和氣體的流動。根據科學理論，要讓火焰出現需要有**可燃物、空氣和足夠高的溫度**一起合作。燃料燒起來後，產生的熱量不只讓火焰繼續燃燒，還會讓周圍的空氣變熱、流動起來，有時候還會讓氣體變得很不穩定。這些熱和氣體流動的變化，可能是火焰移動的重要原因。接下來，我們將介紹這些相關的科學原理。

1. 火焰原理

火焰是燃料和空氣中的氧氣發生化學反應，產生熱和光而形成的一種現象。根據科學理論，火焰可以分成三個部分，像圖 3 顯示的那樣：**內焰區**（燃料和氣體還沒燒完的地方）、**外焰區**（氧氣完全燃燒的地方）和**焰心**（主要是氣體燃料）。火焰的穩定和形狀會受到燃料的多少、空氣中的氧氣濃度和熱量流動的影響。如果燃燒產生的熱能讓更多燃料變成氣體並繼續燃燒，火焰就能一直存在，還會有一些變化和動態的特性。

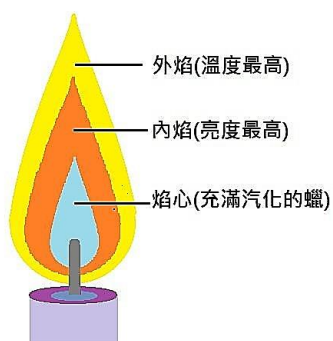


圖 3 火焰結構(詳見參考資料 2)

2. 燃燒機制

燃燒是一種常見的化學反應，對我們的生活和工業很重要。根據燃料和氧氣怎麼混合，燃燒可以分成兩種方式：**預混燃燒**和**擴散燃燒**。**預混燃燒**是指燃料和氧氣在點火前已經混合好，變成均勻的氣體。這種燃燒的速度受混合氣體的特性影響，比如它的成分、壓力和溫度。因為燃料和氧氣混得很均勻，預混燃燒的效率通常很高，但對混合比例的要求也很高。稍不注意，就可能發生危險的爆炸。**擴散燃燒**則是燃料和氧氣在燃燒時才慢慢接觸，這種方式比較穩定，但燃燒效率通常比預混燃燒低一些。兩種燃燒方式各有優點，根據用途不同選擇適合的方法很重要。另一方面，**擴散燃燒**是一種慢慢進行的燃燒方式，燃料和氧氣不是先混在一起的，而是在燃燒時才慢慢接觸，開始反應。這種燃燒的速度主要看燃料和氧

氣接觸得有多快。所以，像蠟燭火焰或柴油引擎的燃燒，就是擴散燃燒。燃料是液體或氣體，慢慢散開，碰到空氣中的氧氣才會燃燒。和預混燃燒比起來，擴散燃燒對燃料和氧氣混合的要求沒那麼高，但燃燒效率比較低，也沒有那麼穩定。這就是為什麼不同的燃燒方式適合不同的用途，要根據情況來選擇合適的方法。

在一些特別的情況下，比如火災或實驗時，可以看到火焰會移動。這種移動的火焰是因為燃料蒸發、空氣流動和熱量傳遞一起造成的。當燃料變成氣體和氧氣接觸時，就會在一些地方開始燃燒，形成小小的燃燒區。火焰怎麼移動，跟燃料氣體的分布、擴散速度，以及周圍的條件有關，比如空氣流動、壓力變化和溫度。如果這些條件一直改變，火焰的形狀和移動也會變得很複雜，看起來不太規則。

在高溫、高壓或空氣亂流的情況下，燃燒會變得更加特別，像是火焰會擴大、縮小，甚至上下晃動。研究這些現象不但能讓我們更懂得燃燒的原理，還可以幫助防止火災、提高燃燒效率，甚至發明新的燃燒技術。在圖 4(a)中，可以看到擴散燃燒形成的火焰，下面的火焰可能會一直存在或一陣一陣出現，上方則有火焰冒出的火羽。在圖 4(b)中，火焰的高度不同，溫度和氣流速度也會有變化，這些變化幫助我們更了解燃燒的細部特徵。

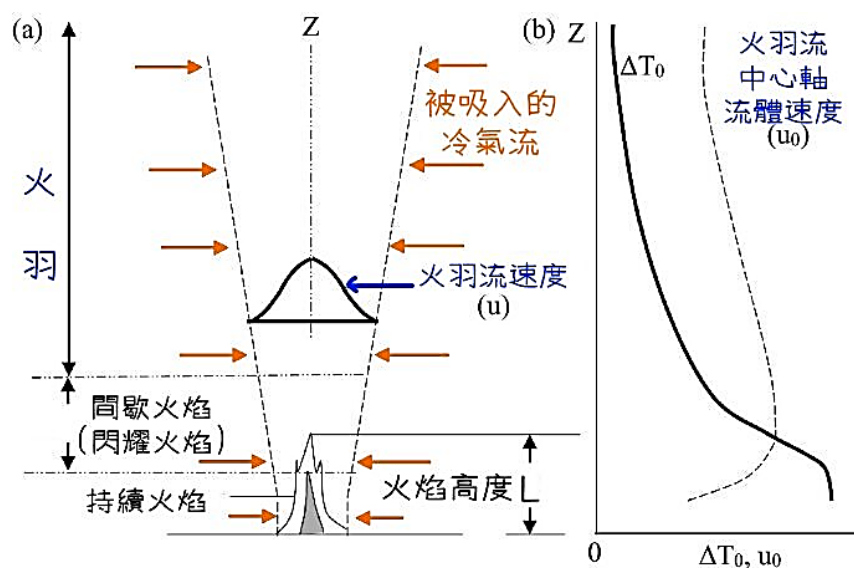


圖 4 擴散燃燒火焰結構圖(詳見參考資料 3)

3. 影響燃料汽化的因素

燃料變成氣體是燃燒中很重要的一步，特別是火焰移動時。當燃料從液體變成氣體，會影響可以燃燒的氣體供應，這也決定了火焰怎麼形成和傳播。下面是主要的影響因素介紹。

(1) 燃料的物理特性

燃料的特性，像容易不容易變成氣體（揮發性）、什麼溫度會變成氣體（沸點），還有它們產生氣體的能力（蒸氣壓），都會影響它變成氣體的速度。

容易變氣體的燃料：像酒精和丙酮，因為它們的沸點很低，還有很強的產氣能力，就算天氣很冷也能很快變成氣體，幫助火焰燃燒得更穩、更好。

不容易變氣體的燃料：像柴油或煤油，因為不容易變成氣體，需要比較高的溫度才能變氣體，所以火燒起來的速度也比較慢。另外，燃料裡的一些特殊分子（例如酒精中的羥基—OH），還會影響燃料變成氣體時需要的能量，因為它們會跟空氣中的其他分子互相作用。

(2) 環境溫度與壓力

溫度的影響：當環境溫度升高時，燃料分子的活動力增加，更快從液體變成氣體。高溫還能讓燃料表面產生熱氣流，使更多區域的燃料汽化，形成更多可燃氣體，燃燒起來更容易。

壓力的影響：壓力降低時，燃料分子能活動的範圍變大，液體分子更容易克服表面的阻力變成氣體，所以蒸發速度會加快。在高山這種高海拔地區，因為空氣壓力低，燃料汽化的速度明顯比平地快，燃燒的方式也可能不同。

溫度和壓力會影響燃料從液體變成氣體的速度，而這些因素的變化對燃燒的過程非常重要。

(3) 燃燒裝置設計和材料

容器形狀：像花盆底座那樣的弧形容器，可以把熱量集中起來，讓熱能更快傳到燃料表面，幫助燃料變成氣體的速度更快。

材料特性：容器的材質很重要，像金屬因為能很好地傳熱，可以快速把外面的熱送到燃料液面，但像陶瓷或其他隔熱材料，會讓燃料汽化得比較慢。

開口大小：容器的開口大小也會影響空氣流動，這會改變燃料蒸氣的擴散方式，進而影響燃燒效果。

這些設計細節會影響燃料的汽化速度，讓燃燒過程變得更快或更慢。

(4) 氣流的存在

氣流會影響燃料變成氣體後的擴散範圍，進而影響火焰形狀及行為。

氣流的方向：如果有氣流存在，它會把燃料的氣體帶走，讓火焰的形狀改變。例如，向上的氣流會讓火焰變高；橫向的氣流會讓火焰傾斜，甚至快速移動。但如果氣流太強，把燃料的氣體吹散，火焰就比較容易熄滅。

氣流的速度：氣流太強可能讓燃料氣體變得很稀薄，火焰不容易穩定；但若

氣流剛剛好，會幫助燃料的氣體和空氣中的氧氣混合，讓火焰燃燒得更好，也能傳得更快。氣流的方向和速度也會決定火焰的穩定性和燃燒的效果。

綜合影響：燃料變成氣體的速度，其實是很多因素一起影響的，而且這些因素常常會互相影響。例如，環境的溫度變化可能會配合氣流的方向加強效果，燃燒裝置的設計也可能同時改變熱量傳遞和空氣流動的方式。因為這些原因，火焰的移動路線和速度常常不是直線的，會變得複雜多變，這也讓研究燃燒的過程變得很不容易。不過，了解這些現象，可以幫助我們更好地控制火災，改良燃燒裝置，甚至讓能源使用更乾淨有效，對未來的科技發展有很大的幫助。

三、 相關科學展覽與文獻

當我們試著查詢相關的科學文獻或科展作品時，發現與燃燒火焰相關的研究大多關注在火焰的化學、物理屬性及其在日常生活中的應用，並強調火焰的燃燒過程對環境及能源效率的影響。而這些研究主要集中於靜態火焰行為與一般燃燒機制的探討。經過查詢，目前尚未發現與本實驗類似的科展或文獻研究，特別是在單向繞圈移動火焰這一現象方面。

以下是台灣中小學科展中，有關火焰燃燒相關的一些作品的統整：

1. 第 60 屆中小學科學展覽會（2020 年）

主題：火焰與燃燒反應的物理特性

內容：研究燃燒過程中不同材料的反應特性，並探討了火焰的溫度、燃燒速度以及火焰與煙霧產生的物理變化。藉由測量不同燃料的燃燒時間、溫度變化等，進一步分析燃燒過程的效率。

2. 第 59 屆中小學科學展覽會（2019 年）

主題：火焰能量的應用與能源效率

內容：探討了火焰作為熱源的應用，如何利用不同的燃燒方式提高熱效率，例如通過改變氧氣的供應量來改良燃燒過程，並研究不同材料在加熱過程中的熱傳導特性。

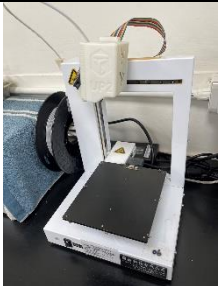
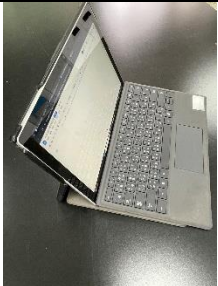
3. 第 58 屆中小學科學展覽會（2018 年）

主題：火焰的化學與物理反應

內容：學生探討了火焰的顏色與溫度之間的關聯，以及燃燒反應中不同化學物質的變化。他們展示了火焰在不同氧氣濃度下的行為，並測量了火焰在各種條件下的溫度與顏色變化。

在查詢歷屆科展文獻的結果後，我們了解到本實驗研究的現象非常有趣，而且是大家還沒研究太多的領域，這意味著這個現象有很多潛力，可以在實驗設計和科學探索中發現新東西，也為未來進一步了解它的原理和應用提供了機會。這樣的研究不僅能幫助我們解釋科學問題，還可能帶來更多創新的發現和實際應用。

肆、 研究工具(學生自拍)

3D 列印機	資訊處理、攝影器材	冷凍櫃	溫度計
			
微量滴管	碼錶	點火槍	電子點火式本生燈
			
剪刀	鑷子	黏土	口紅膠
			
液態燃料(輕油)	切口鉗	平底鏟	棉布手套(隔熱)
			
游標尺	3D 列印編輯軟體	3D 列印軟體	物理量測手機 app
			

伍、研究過程與方法

一、研究過程

第一階段：確定研究主題範圍，搜尋相關文獻資料，試作並且修正研究方向。

第二階段：以 3D 列印機製作實驗所需軌道，並發展實驗。

第三階段：數據處理，製作圖表資料相互比對並綜合討論。

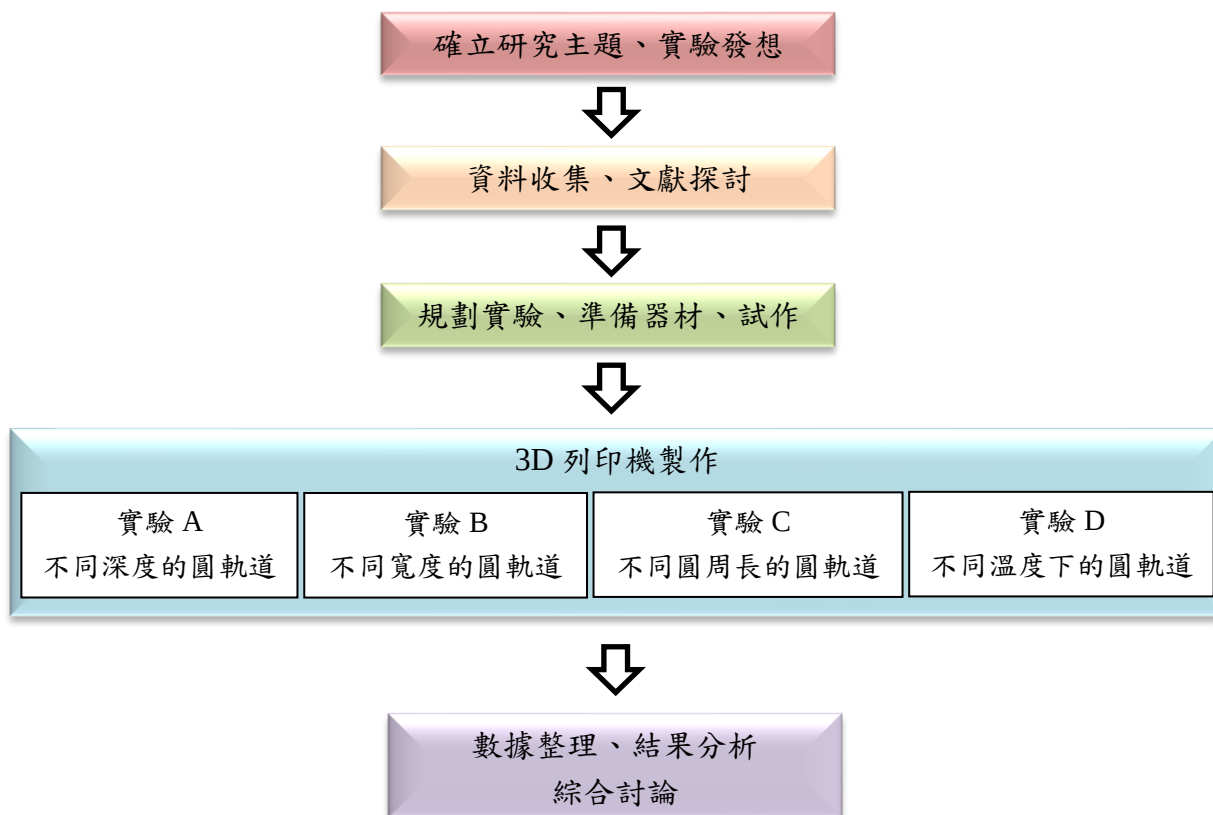


圖 5 實驗流程圖(學生自繪)

二、燃燒情形分析

1. 根據我們在實驗試作中的觀察，點火後的火焰會變得非常活躍，情況也很難預測。火焰會有很多不同的變化，有時候它會在一瞬間迅速蔓延，形成像「火皇冠」一樣的圓形火焰，這樣火勢會快速擴大，溫度也會變得更高，甚至有可能把周圍的東西燒著。我們為了安全，會準備濕抹布在旁邊，隨時準備應對。如果發現火焰燒到其他地方或是軌道燃燒起來，我們就能立刻把火熄滅，避免火勢失控。
2. 在燃燒過程中，有時會留下殘餘的火焰，或者火焰會分裂成幾個小火焰，這樣讓火焰變得更加複雜。如果氣流發生變化，火焰的強弱也會突然改變，有時候會變強，有時候會熄滅。

3. 在一些特定的情況下，我們有時會看到只有一個小小的火苗。這些火苗的行為很奇怪，有時會靜靜地待在原地燒，有時則會沿著軌道移動，看起來很有活力。但即使火苗開始繞圈移動，這也不一定會持續下去，它可能繞一圈就熄火，或者分裂成好幾個小火苗，最後變成殘火。這表示火焰的穩定性很差，會受到外界條件影響。
4. 綜合以上觀察，我們覺得影片中的現象並不是假的。影片應該是經過多次實驗後，選出最成功的畫面來做剪輯，展示了在某些條件下的理想效果。所以我們嘗試改變實驗條件，來了解這種繞圈火焰是怎麼產生的。

三、製作軌道材質選用

1. 在我們開始實驗的時候，我們選擇用了黏土來做軌道，因為黏土很容易塑形，還能很好地裝液體燃料，看起來是一個不錯的選擇。但是，當我們繼續實驗時，我們發現黏土在高溫下會有問題。當液體燃料點燃後，黏土承受不了火焰的高溫，會開始融化、軟化，變形了，如圖 6 所示。為了解決這個問題，我們開始考慮使用其他材料來做軌道，希望能找到更適合的材料來應對這個挑戰。

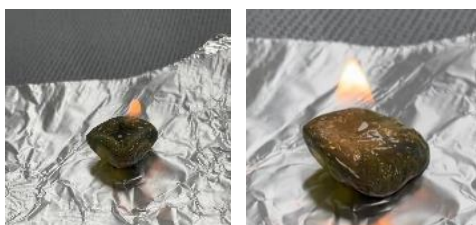


圖 6 黏土遇熱變形(學生自拍)。

2. 接下來，我們試著使用石膏來做軌道，因為石膏耐熱性很好，可以承受高溫。但我們發現石膏的表面有很多小孔，會讓燃料滲透進去，並擴散到軌道的外側。這樣會影響實驗效果，因為我們需要的材料不會讓燃料滲漏。因此，石膏不是最適合的選擇，我們開始找其他材料。
3. 我們接著嘗試了鋁箔來做軌道。鋁箔耐熱性好，表面光滑，不會吸收燃料，看起來不錯。但在實驗中，我們發現鋁箔不容易保持精確形狀，尤其是在受力或裝燃料後，它容易變形，無法保持穩定的軌道形狀，無法滿足我們的需求。
4. 經過這些嘗試，我們意識到需要找到一種能耐高溫、不吸燃料、形狀穩定的材料。老師建議我們使用 3D 列印技術來做軌道。老師說 3D 列印可以做出非常精確的軌道，這對實驗很重要。3D 列印能製作複雜設計並調整，讓我們能精確控制軌道。學校的 3D 列印機使用 ABS 塑料，它能耐高溫，雖然比石膏和鋁箔的耐熱性差，但能保證軌道不會變形，符合我們的需求。

四、以 3D 列印機印製軌道

1. 我們首先學習使用 Onshape 這個線上免費編輯軟體來繪製 3D 圖檔。老師為我們示範並指導我們如何將設計轉換為適合 3D 列印的格式。透過 Onshape 我們進行精確的軌道設計和調整，確保軌道細節能符合實驗需求，如圖 7、圖 8 所示。

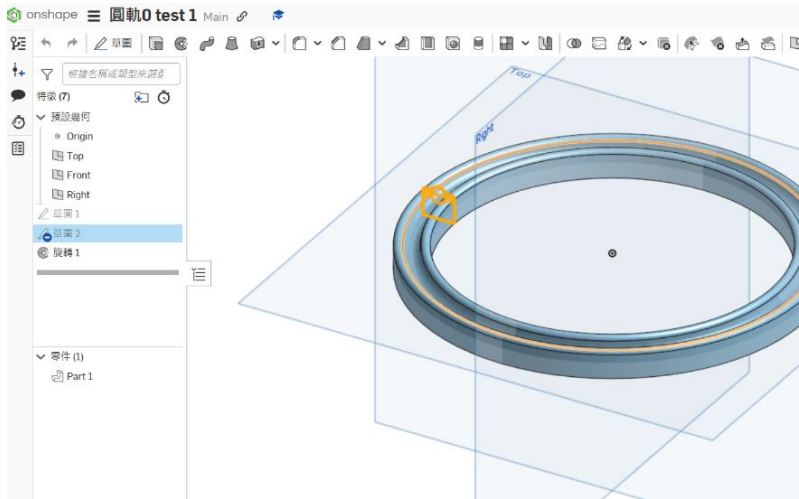


圖 7 利用 Onshape 繪製 3D 圖檔(學生使用軟體繪製)。圖 8 在老師指導使用 Onshape(學生自拍)。

2. 設計完成後，我們把圖檔輸出，然後使用 UP Studio 軟體來設置列印。這個軟體介面簡單，很容易使用，能幫助我們設定列印的參數，比如打印速度、層厚、填充密度等。當設置好之後，我們把檔案傳送到 3D 列印機，就像圖 9 所示那樣列印。
3. 我們使用的 3D 列印機是 UP 3D Plus 2，這是一台操作簡單且穩定的桌面型 3D 列印機，適合用來列印中小型的物品。這台列印機精度高，能夠準確地把我們在 Onshape 中設計的圖案打印出來。使用這台列印機，我們可以精確地列印出需要的軌道結構，並進行進一步的測試和調整，確保列印效果符合我們的需求。像圖 10 所示，我們能夠看到打印出的成品，然後根據測試結果進行修改。

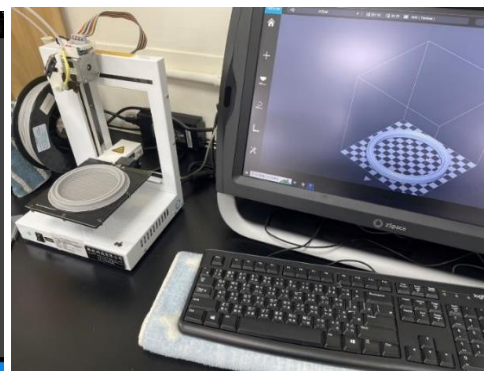
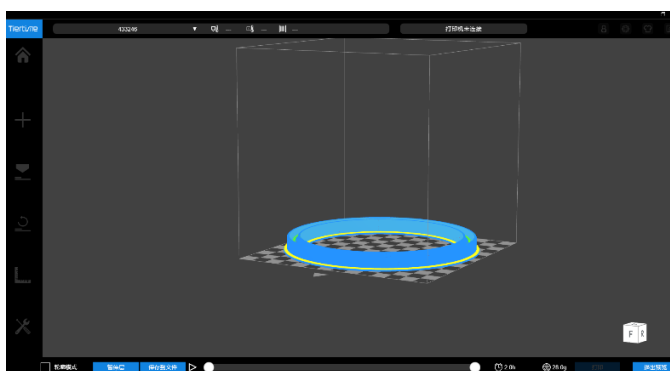


圖 9 學生以 UP Studio 軟體進行列印。圖 10 以 UP 3D Plus 2 列印成品(學生自拍)。

4. 完成的軌道雖然符合預期的形狀和精度，但在測試過程中，我們發現軌道內有些微小的空隙。這些空隙會讓液體燃料在運行過程中滲漏，影響實驗的穩定性和安全性。為了解決這個問題，我們決定對軌道進行修補，防止燃料再度滲漏。
5. 我們**使用燒熱的圓頭鑷子來修補軌道**。首先，我們將圓頭鑷子加熱到合適的溫度，然後輕輕地將其接觸到軌道的內側，這樣可以讓部分 ABS 材料熔化。熔化的 ABS 材料會填補軌道內空隙，並在冷卻後變硬，從而有效地封閉這些空隙，防止燃料滲漏。
6. 這個修補過程需要非常小心，因為我們要確保熔化的材料能均勻覆蓋並填平所有空隙，同時避免過度加熱導致其他部位變形。經過一番細心操作，我們成功地修補了軌道。之後，我們再次檢查軌道，確保在接下來的實驗中不會再出現燃料滲漏的情況，這樣我們的修補工作就完成了，如圖 11 所示。

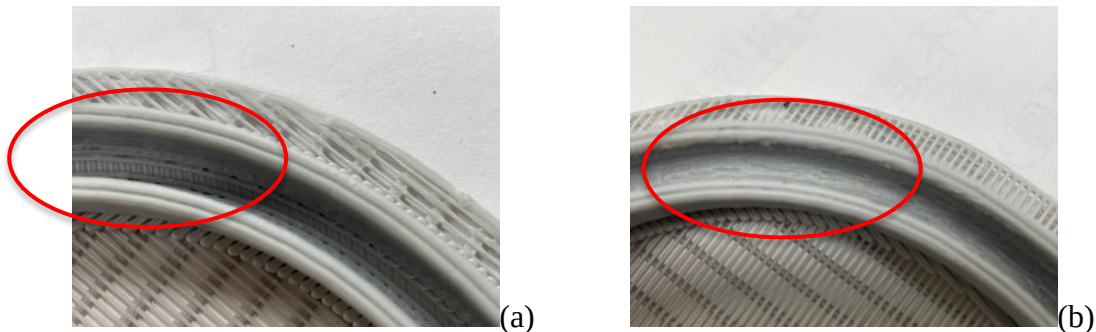


圖 11 軌道內修補前(a)孔隙多，有許多小凹坑。修補後(b)抹平凹坑(學生自拍)。

五、實驗過程標準化與研究現象定義

為了讓我們的實驗更準確，避免出錯，我們做了很多準備，確保每次都能做得一樣好：

1. **使用微量滴管(pipet)添加燃料**：我們用微量滴管把燃料添加到軌道上，這樣每次加的燃料都一樣多，燃燒就不會因為燃料量不同而受影響（像圖 12 那樣）。燃料我們都統一採用 Zippo 輕油。
2. **用紅外線測溫槍量溫度**：我們用紅外線測溫槍來測軌道的溫度，測量的時候每次都對準一樣的位置和距離，並記錄下來，這樣溫度數據會更準確。
3. **關掉空調**：我們把風扇、冷氣和門窗都關起來，避免外面的風影響火焰，這樣火焰的動作只會跟燃料和軌道有關。
4. **調暗燈光**：把燈光調暗一點，這樣我們可以更清楚地看到火焰的形狀和它的移動路線，不會被太亮的燈光干擾。

5. **固定點火方式**：每次點火的角​​度和位置都一樣，讓火焰的開始情況相同，避免因為不同的起點造成結果不同。
6. **記錄環境溫度**：每次實驗前，我們都記下當時的溫度，溫度改變時也會做對比測試，看看溫度是不是有影響。
7. **多做幾次取平均**：每種實驗我們都做至少 3 次，然後把結果平均起來，這樣就不會因為一次的意外影響整體結果。
8. **用相機錄影**：我們用攝影機拍下火焰的移動過程，這樣可以回頭仔細看，還能檢查實驗中有沒有做錯的地方。

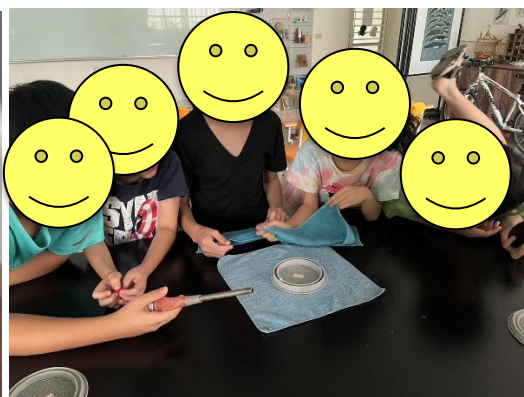


圖 12 使用微量滴管 圖 13 使用測溫槍 圖 14 實驗現場狀況 (學生自拍)

9. 我們要看看火焰在圓形軌道上跑圈是不是成功，必須先說清楚什麼叫「成功的火焰繞圈」，這樣才能討論結果，還可以把奇怪的情況排除掉。我們把成功的火焰繞圈定義成下面這些條件：
- (1) **只有一個火焰在跑**：在整個實驗中，軌道上只能有一個火焰在移動，不能冒出別的小火焰。如果火焰分裂成好幾個，或出現在其他地方，就算失敗了。
 - (2) **同一方向跑三圈以上**：火焰必須沿著圓形軌道按同一方向連續跑三圈以上，不能改變方向，也不能停下來。如果火焰只跑不到三圈就熄滅，這也不算成功。
 - (3) **不留下停住不動的火焰**：圓形軌道上不能有火焰停在某個地方燒很久。如果火焰沒有繼續移動，而是卡在某個地方，變成「火焰角落」，這樣也算失敗。

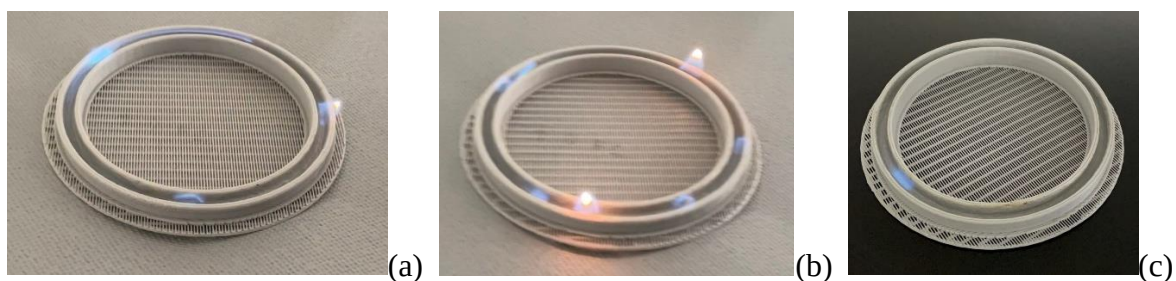


圖 15 (a)因為跑動的火焰不只一個判定為失敗，(b)存在「火焰角落」，判定為失敗，而 (c)只存在一個跑動火焰，若連續繞行三周以上則可判定為成功(學生自拍)。

六、實驗變因的設定

我們經過很多次試驗和討論，覺得火焰能在圓形軌道上穩定繞圈的原因，可能**燃料和氧氣的比例**還有**燃料的揮發速度**這兩點有關。

1. **燃料和氧氣的比例**：燃料和氧氣的比例會影響火焰能不能順利燃燒。如果比例不對，火焰可能燒得不完全，最後就會熄滅。如果燒得太旺，溫度會變得太高，可能會變成「火皇冠」這種現象。為了弄清楚比例，我們做了兩個實驗：

(1) **實驗 A：改變軌道寬度**，看看不同寬度怎麼影響火焰的燃燒，因為寬度加大可以增加燃料與空氣的接觸表面積。

(2) **實驗 B：改變軌道深度**，測試不同深度如何影響氧氣的供應和燃燒情況。

2. **燃料的揮發速度**：燃料的揮發速度會影響火焰的持續時間，而揮發速度和燃料的特性、氣溫、風都有關。我們為了讓結果更準確，固定用一種輕油作為燃料，先排除不同燃料的影響。然後我們做了下面兩個實驗：

(1) **實驗 C：改變軌道周長**，測試火焰跑的速度和燃料蒸氣生成速度的關係。如果軌道太短，蒸氣來不及產生，火焰可能繞一圈就熄滅了。

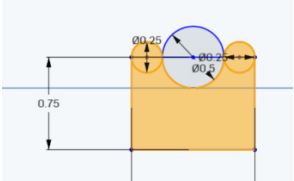
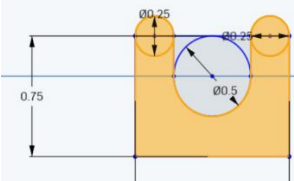
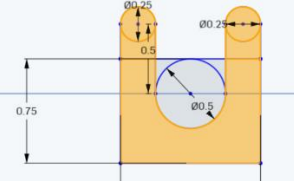
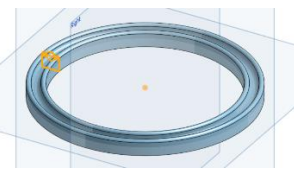
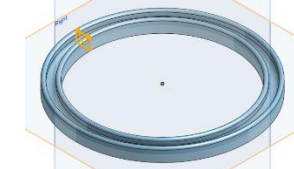
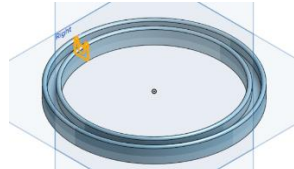
(2) **實驗 D：利用不同季節的溫度**，模擬不同的氣溫環境，看看溫度對燃料蒸氣生成和火焰穩定繞圈的影響。

我們覺得，只要控制好溫度，讓燃料蒸氣生成的速度和火焰繞圈的時間搭配得剛剛好，就可以讓火焰穩定地繞圈三圈以上不熄滅！

七、 各組實驗變因的執行方法(圖片為學生以軟體繪製)

1. 實驗 A-不同深度

我們設計了五種不同深度的軌道，詳細的尺寸可以在表 1 中找到。我們用這些軌道做實驗，點燃燃料後，觀察火焰的燃燒情況，並記錄火焰周圍的溫度變化。如果火焰成功地沿著軌道繞圈移動，我們會用攝影機錄下火焰的移動過程，這樣可以測量火焰的移動速度。根據這些結果，評估火焰在不同軌道條件下的穩定性和效果。

編號	圓軌 0 test 1	圓軌 0 test 2	圓軌 0 test 3
軌道剖面尺寸	 外直徑 12 cm 內直徑 10 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 0.375 cm	 外直徑 12 cm 內直徑 10 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 0.625 cm	 外直徑 12 cm 內直徑 10 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 0.875 cm
3D 圖稿			

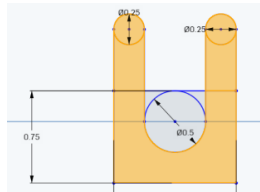
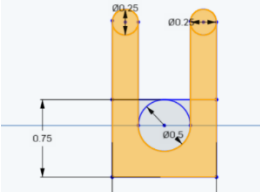
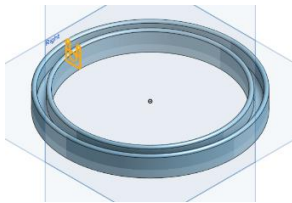
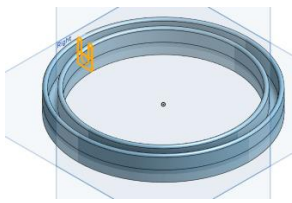
編號	圓軌 0 test 4	圓軌 0 test 5
軌道剖面尺寸	 外直徑 12 cm 內直徑 10 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 1.125 cm	 外直徑 12 cm 內直徑 10 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 1.375 cm
3D 圖稿		

表 1 不同深度的圓軌道尺寸

2. 實驗 B-不同寬度

我們設計了三種不同寬度的軌道，詳細的尺寸可以在表 2 中看到。我們用這些軌道來做實驗，觀察火焰的燃燒情況，並記錄火焰周圍的溫度變化。如果火焰成功地繞

著軌道跑圈，我們用攝影機錄下火焰移動的過程。我們把這些結果綜合起來，看看火焰在不同軌道條件下是不是穩定，效果又如何。

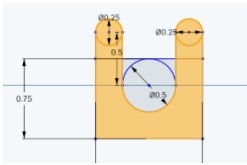
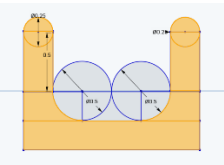
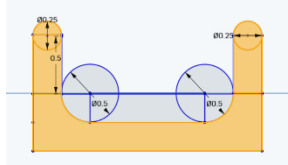
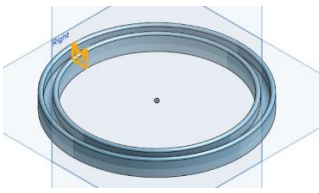
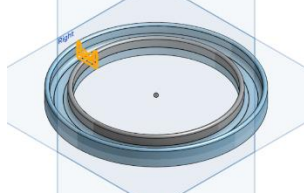
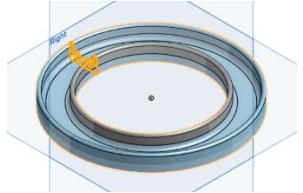
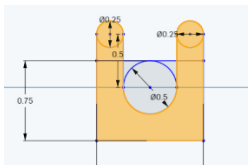
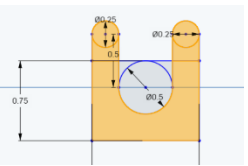
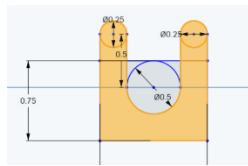
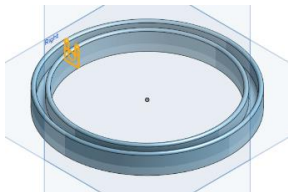
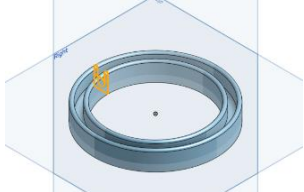
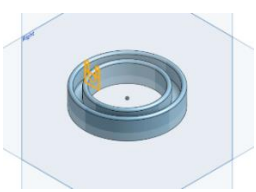
編號	圓軌 0 test 3	圓軌 0 test 3-寬+0.5	圓軌 0 test 3-寬+1.0
軌道剖面尺寸	 外直徑 12 cm 內直徑 10 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 0.875 cm	 外直徑 12 cm 內直徑 9 cm 軌內寬 1.0 cm 軌深 0.875 cm	 外直徑 12 cm 內直徑 8 cm 軌內寬 1.5 cm 軌深 0.875 cm
3D 圖稿			

表 2 不同寬度的圓軌道尺寸

3. 實驗 C-不同圓周長的圓軌道

為了看看火焰能不能在不同大小的圓形軌道上穩定繞圈，我們設計了六種不同圓周長的軌道。這些軌道的大小可以在表 3 中看到。我們用這些軌道來做實驗，觀察火焰的燃燒情況，還記錄了火焰附近的溫度變化。如果火焰成功地繞著軌道跑圈，我們會用錄影的方式把火焰移動過程拍下來，這樣可以測量火焰移動的速度。我們透過這些觀察和紀錄，來判斷火焰在不同軌道上的表現是否穩定。

編號	圓軌 0 test 3	圓軌 0 test 3-縮 1.5cm	圓軌 0 test 3-縮 3cm
軌道剖面尺寸	周長：34.56 cm  外直徑 12 cm 內直徑 10 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 0.875 cm	周長：25.13 cm  外直徑 9 cm 內直徑 7 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 0.875 cm	周長：15.71 cm  外直徑 6 cm 內直徑 4 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 0.875 cm
3D 圖稿			

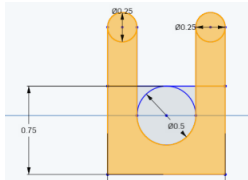
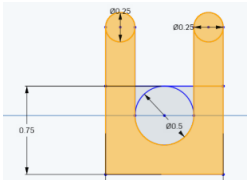
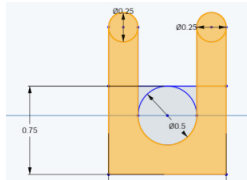
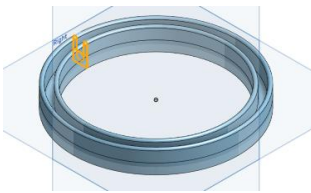
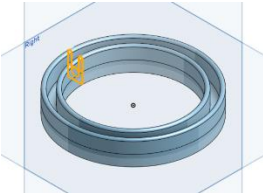
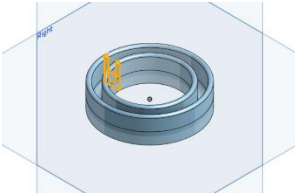
編號	圓軌 0 test 4	圓軌 0 test 4-縮 1.5cm	圓軌 0 test 4-縮 3cm
軌道剖面尺寸	周長：34.56 cm  外直徑 12 cm 內直徑 10 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 1.125 cm	周長：25.13 cm  外直徑 9 cm 內直徑 7 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 1.125 cm	周長：15.71 cm  外直徑 6 cm 內直徑 4 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 1.125 cm
	3D 圖稿 	3D 圖稿 	3D 圖稿 

表 3 不同圓周長的圓軌道尺寸

4. 實驗 D-不同溫度下的圓軌道

為了了解溫度怎麼影響燃料蒸氣的揮發速度，還有它和火焰繞圈的關係，我們試著用不同方法製造各種溫度環境。一開始，我們在圓形軌道的中心圓心處放冰塊，想降低溫度看看結果。但冰塊融化後的水常常弄濕了軌道，反而干擾了火焰的燃燒。後來，我們改把軌道放進冷凍庫預冷，這樣可以有不同的起始溫度來做對比實驗。除了人工降溫，我們還利用夏天和冬天的自然氣溫差，來測試溫度對火焰行為的影響。我們推測，如果軌道溫度升高得太快，燃料蒸氣可能會揮發得太多，讓火焰燒得太旺，甚至形成「火皇冠」。但如果溫度升高得剛剛好，或是散熱效果良好，燃料蒸氣的量就能保持穩定，這樣火焰就能規律地繞著圈跑下去，不容易熄滅。這些實驗幫助我們更了解火焰移動時，溫度對它的影響，也讓我們找到穩定燃燒的方法。

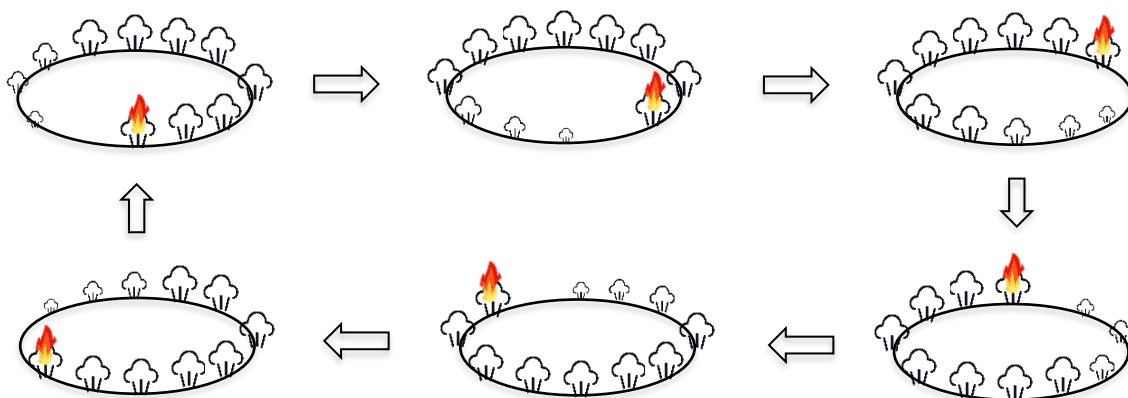
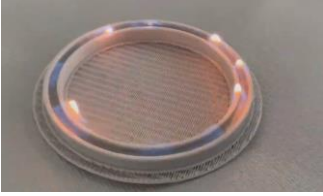
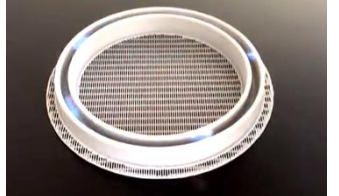


圖 16 單向繞圈移動火焰預想機制示意圖(學生自繪)。

陸、研究結果與討論

一、實驗 A-不同深度的圓軌道

研究結果(照片均由學生自拍)：

編號	圓軌 0 test 1	圓軌 0 test 2	圓軌 0 test 3
質性描述	燃燒劇烈，出現橘紅色火焰，容易引燃軌道	燃燒旺盛，容易分裂出火焰分支，少數橘紅火焰，有可能引燃軌道	多為藍色火焰，可以成功製造出單向繞圈移動火焰
照片			

編號	圓軌 0 test 4	圓軌 0 test 5
質性描述	產生藍色火焰，可以成功製造出單向繞圈移動火焰	僅產生藍色火焰，火焰移動慢或不移動，偶爾會成功製造出單向繞圈移動火焰
照片		

表 4 實驗 A 研究結果

討論一：最理想的單向移動火焰應該是藍色的火焰。

根據實驗結果，我們發現軌道的深淺對火焰的燃燒有很大的影響。如果軌道太淺，燃燒會變得很激烈，火焰會快速蔓延，形成像「火皇冠」一樣的現象。這種情況下，火焰容易失控，沒辦法穩定地繞圈移動。反過來說，如果軌道太深，火焰會變得很弱，燃燒不順利，也很難一直移動下去，說明太深的軌道不適合穩定燃燒。

我們覺得這可能跟燃料氣體和空氣中的氧氣混合有關。雖然深一點的軌道可以累積更多燃料蒸氣，但是氧氣供應量會不足，比例失衡。我們也可以從火焰的顏色看出來：比較淺的軌道會產生橘紅色的火焰，深的軌道會產生藍色的火焰，不會有燃燒不完全的橘紅色外焰區，太深的軌道則是連引燃都會有困難。

因此，成功的單向繞圈移動火焰實驗也告訴我們，穩定的燃燒過程需要保持適中的火焰強度。如果火焰太強，會釋放太多熱能，讓燃料蒸氣快速揮發，這樣會讓溫度升得太高，導致火焰不穩定。所以，我們認為，**最理想的單向移動火焰應該是藍色的火焰**，這樣可以讓火焰慢慢移動，確保燃燒過程既可控制又能持續。

討論二：**控制升溫速度很重要。**

我們在實驗中記錄了溫度變化，並把這些數據整理成圖表。圖表裡有四條升溫數據的趨勢線，還用不同的標記來區分成功和未成功的實驗結果。大菱形標記代表那些成功讓火焰繞圈移動的溫度條件，而小圓點則代表那些沒能讓火焰成功移動的實驗溫度。

從圖 17 可以看到，當軌道太淺時，燃燒會變得很劇烈，溫度會很快上升，讓升溫曲線變得很陡。這說明火焰太強，變得難以控制，不適合穩定移動火焰。相反，當升溫速度能夠控制在適當範圍內，燃燒就變得比較穩定，溫度上升也比較慢，這樣火焰就能穩定地移動。這告訴我們，**控制升溫速度很重要。**

另外，當軌道太深時，升溫曲線雖然上升比較緩慢，不像淺軌道那樣溫度急劇上升，但因為深軌道裡的燃燒條件不好，氧氣供應不夠，燃料蒸氣難以保持穩定，火焰會熄滅。這讓火焰沒辦法繼續移動，所以也無法成功產生單向移動火焰。

因此，我們認為，軌道的深度要找到一個平衡點，既不讓燃燒太劇烈，也要保證有足夠的氧氣，才能讓火焰穩定地繞圈移動。這樣，我們才能在實驗中達到最理想的結果，並確保火焰的移動是穩定的，並且可以長時間持續下去。

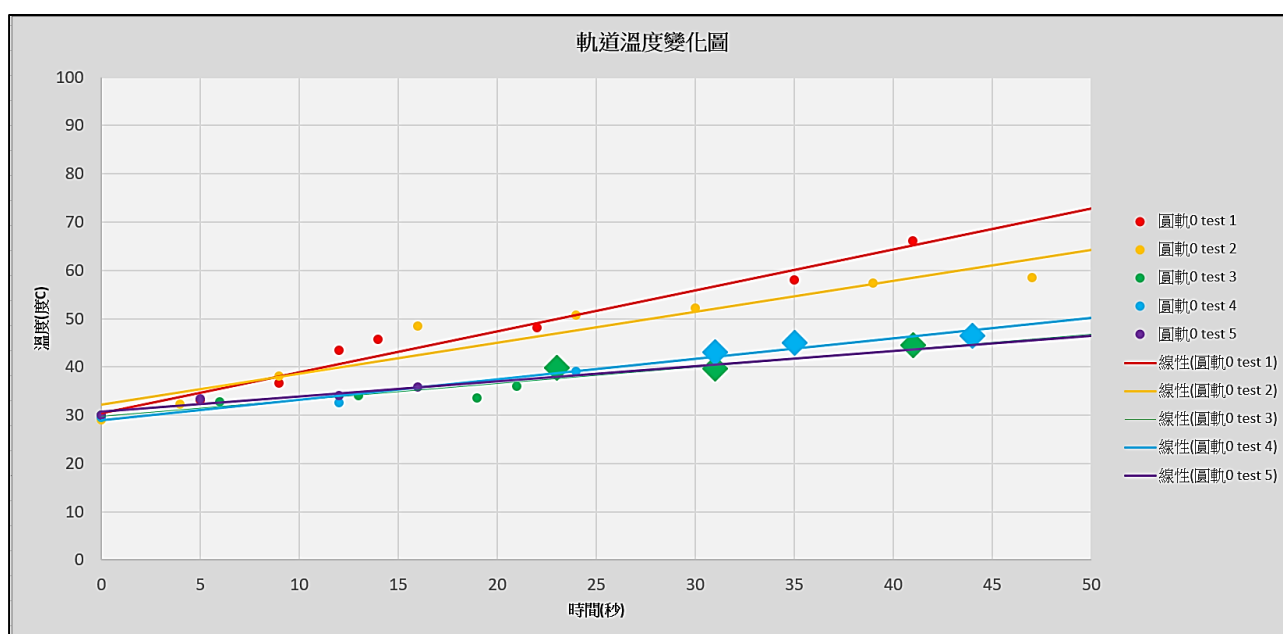


圖 17 不同深度圓軌道的溫度變化(學生以軟體繪製)

二、實驗 B-不同寬度的圓軌道

研究結果(照片均由學生自拍)：

編號	圓軌 0 test 3	圓軌 0 test 3-寬+0.5	圓軌 0 test 3-寬+1.0
質性描述	多為藍色火焰，可以成功製造出單向繞圈移動火焰	燃燒旺盛，明顯出現橘色火焰，易引燃軌道	燃燒劇烈，火皇冠現象顯著，隨即引燃軌道
照片			

表 5 實驗 B 研究結果

討論一：適中的軌道寬度是保持燃燒強度和穩定性之間平衡的關鍵。

接下來，我們針對不同寬度的軌道進行了一系列燃燒實驗，想了解軌道寬度對燃燒的影響。在實驗設計中，隨著軌道寬度的增加，我們調整了燃料的量，確保每次添加的燃料量讓燃料的液面高度保持在相同的水平高度。這樣可以避免因為燃料高度不同而影響實驗結果。具體來說，在標準寬度的軌道中，我們加入了 15mL 的燃料，而在較寬的軌道中，我們分別加入了 21.5mL 和 27.3mL 的燃料，這樣可以確保液面高度能夠保持一致。

軌道	軌道外側直徑(cm)	軌道內側直徑(cm)	軌道底面 (cm ²)	液面高(cm)	添加燃料 (mL)
圓軌 0 test 3	12	10	34.56	0.45	15.00
圓軌 0 test 3-寬+0.5	12	9	49.48	0.45	21.50
圓軌 0 test 3-寬+1.0	12	8	62.83	0.45	27.30

表 6 實驗 B 的燃料添加量

從實驗 B 的燃燒結果可以看到，隨著軌道變得越來越寬，火焰變得更加強烈，幾乎每次都會出現「火皇冠」現象。這個現象就是火焰會快速蔓延並向上升，最後覆蓋整個軌道。當軌道變得更寬時，我們還發現多個小火焰會慢慢靠近並合併成一個更大的火焰。這個合併後的大火焰看起來像一個尖尖的錐形，火勢變得更強，火焰也變得更高，幾乎佔據了整個實驗空間的上方。

這種火焰合併的現象告訴我們，寬軌道讓火焰能接觸到更多的空氣，這樣氧氣供應變得更充足，讓燃燒變得更強烈。不過，火焰變得太強，已經超過了我們希望控制的範圍，這樣就無法讓火焰穩定地繞圈移動。因此，我們認為**適中的軌道寬度是保持燃燒強度和穩定性之間平衡的關鍵**。如果軌道太窄或太寬，都會讓實驗變得不太成功。經過這些實驗，我們發現找到一個合適的軌道寬度非常重要，因為這樣可以讓火焰更穩定地移動，不會過於激烈，也不會太弱。

討論二：**當軌道變寬時，溫度上升的速度變得更快。**

從我們繪製的升溫曲線圖，圖 18 中，我們發現了一個很重要的現象：**當軌道變寬時，溫度上升的速度變得更快，升溫曲線的斜率變得更陡**，這使得燃燒過程變得失控，變得非常劇烈。在這種情況下，火焰會迅速被引燃並大量燃燒，釋放出更多的熱量，這些熱量又會使得燃料蒸氣揮發得更多，燃燒強度變得更強。這樣的反應就像一個正回饋效應，讓火焰越來越猛烈。如果我們不及時處理，溫度會繼續上升，甚至可能把整個軌道都點燃，造成實驗的危險。為了保護實驗的安全，我們通常會在發現「火皇冠」現象發生後，立刻用濕抹布覆蓋燃燒區域，這樣可以把火熄滅，防止溫度繼續升高，避免更多的危險。

另外，在較寬的軌道中，我們並未成功實現單向繞圈的移動火焰。這表明，當軌道過寬時，燃燒強度太大，完全無法實現火焰穩定的繞圈運動。這個結果再次證實了我們的想法：過寬的軌道會讓火焰變得非常猛烈，無法維持穩定的燃燒環境，也無法讓火焰穩定移動。因此，我們認為，適中的軌道寬度對實現成功的移動火焰非常重要。軌道太窄會讓燃燒不足，軌道太寬則會讓燃燒過於劇烈。只有當軌道寬度適中，才能在保持穩定燃燒的同時，確保火焰可以持續穩定地移動。

總結來說，軌道寬度的設計對燃燒過程有著重要影響。適中的軌道寬度能夠在穩定性與燃燒強度之間找到平衡，是實現單向移動火焰的關鍵因素之一。

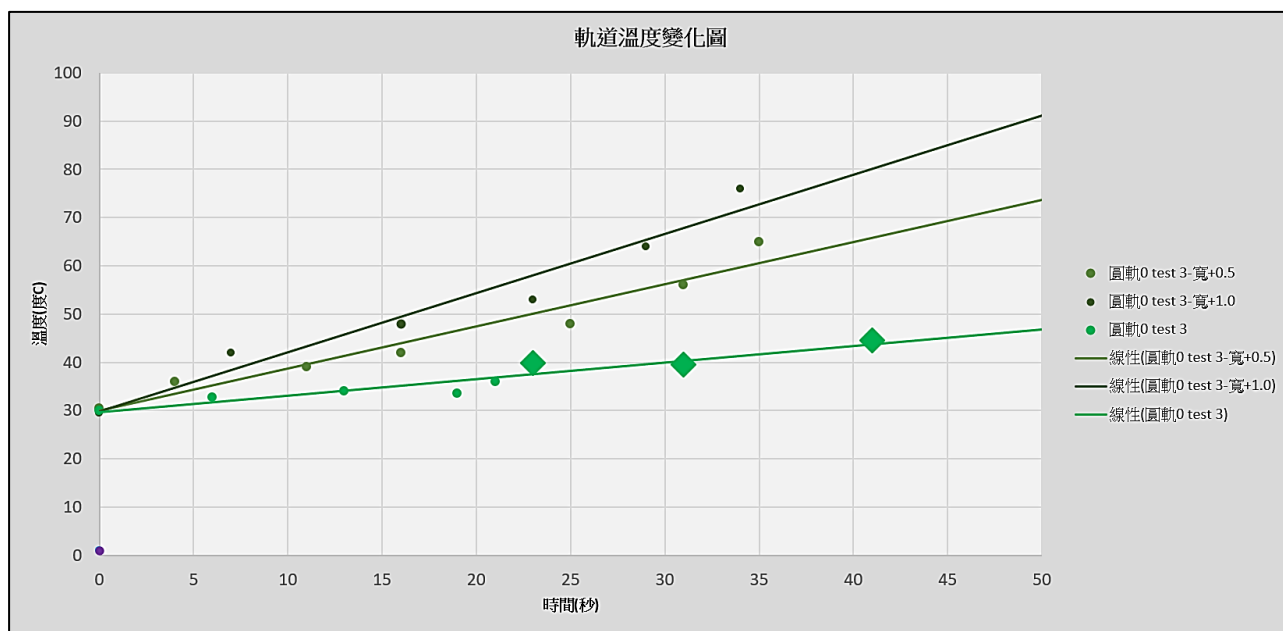


圖 18 不同寬度圓軌道的溫度變化(學生以軟體繪製)

三、實驗 C-不同圓周長的圓軌道

研究結果(照片均由學生自拍)：

編號	圓軌 0 test 3	圓軌 0 test 3-縮 1.5cm	圓軌 0 test 3-縮 3.0cm
質性描述	產生藍色火焰，可以成功製造出單向繞圈移動火焰	藍色火焰繞完一圈隨即熄滅	藍色火焰繞完一圈隨即熄滅，不易點燃
照片			

編號	圓軌 0 test 4	圓軌 0 test 4-縮 1.5cm	圓軌 0 test 4-縮 3.0cm
質性描述	僅產生藍色火焰，火焰移動慢或不移動，偶爾會成功製造出單向繞圈移動火焰	僅藍色火焰，幾乎不移動，火焰慢慢消退	僅藍色火焰，幾乎不移動，火焰慢慢消退，而且不易點燃
照片			

表 7 實驗 C 研究結果

討論：軌道圓周過短的情況下，燃料蒸氣的補充速度跟不上將導致燃燒無法持續。

為了進一步研究燃料蒸氣的累積速率是否會影響成功產生單向繞圈移動火焰，我們選擇了之前能穩定產生單向移動火焰的兩個軌道（軌道 0 test 3 和軌道 0 test 4）來進行實驗。我們設計了不同圓周長的圓形軌道，並進行實驗，觀察圓周長對燃燒行為的影響。我們的目的是通過改變圓周長來調查燃料蒸氣的累積速率與單向移動火焰產生的關係。圓周長較長的軌道可以讓更多燃料蒸氣積累，而較短的圓周長則限制了蒸氣生成速度。這樣的設計有助於觀察不同燃料蒸氣積累速率下火焰是否能穩定地繞行。

在先前的實驗中，我們測得軌道 0 test 3 的火焰移動速率約為 54.208 cm/s。這意味著，火焰完成一圈的運動僅需 0.64 秒。如此高的移動速率表明，在火焰繞行一圈後，燃料蒸氣需要在極短的時間內完成補充，才能夠支持下一次的引燃條件。如果軌道的圓周長進一步縮短，燃燒過程將要求蒸氣在更短的時間內累積至足夠濃度才能繼續燃燒。

我們的假設是，若火焰的移動速率過快，而圓軌道的圓周長不足以為蒸氣累積提供足夠的時間，則可能導致燃燒過程中斷，無法實現持續的單向繞圈火焰。相反，若圓軌道的周長足夠長，那麼燃料蒸氣將有更充裕的時間重新累積，確保火焰完成一圈運動後能具備充分的引燃條件。我們期待通過這些實驗進一步驗證蒸氣累積速率與單向移動火焰穩定性之間的關係。

軌道	軌道周長 (cm)	移動速率 (cm/s)	繞行一圈時間 (s)
圓軌 0 test 3	34.56	54.21	0.64
圓軌 0 test 4	34.56	49.30	0.70
圓軌 0 test 3-縮 1.5cm	25.13	(54.21)	(0.46)
圓軌 0 test 4-縮 1.5cm	25.13	(49.30)	(0.51)
圓軌 0 test 3-縮 3.0cm	15.71	(54.21)	(0.29)
圓軌 0 test 4-縮 3.0cm	15.71	(49.30)	(0.32)

表 8 軌道移動速率評估 (打括號數值為預估值，並未成功測出)

從實驗的結果及表 8 可以觀察到，當我們將軌道的半徑縮短 1.5 cm 時，偶然產生的單向移動火焰只能完成一圈燃燒後便熄滅。這樣的結果讓我們非常興奮，因為它證實了我們的假設：在縮短的軌道中，燃燒移動的時間過短，少於 0.64 秒，這會導致燃料蒸氣無法在火焰繞行一圈的過程中積累到足夠的濃度來支持持續的燃燒條件，從而中斷了燃燒的穩定性。

當我們進一步將軌道的半徑縮短 3 cm 時，情況變得更加極端。在這樣的條件下，實驗幾乎無法成功點燃第一個火焰。原因在於，點火時產生的燃燒會迅速耗盡軌道內蓄積的燃料蒸氣，導致燃燒能量不足以維持火焰的延續性。幾乎在點燃的同時，火焰便熄滅，無法形成穩定的單向移動火焰。

以上結果進一步證明，成功的單向移動火焰與軌道長短密切相關，蒸氣的累積量對火焰的穩定運動至關重要。在軌道圓周過短的情況下，燃料蒸氣的補充速度跟不上火焰的移動速度，導致燃燒過程無法持續。這也表明，軌道的設計應在長度與燃料蒸氣累積速率之間找到平衡，過短的軌道會限制火焰穩定移動的條件。

四、實驗 D-不同溫度下的圓軌道

討論一：要能控制實驗的溫度條件，才能有穩定且可控的火焰。

在我們的研究中，我們發現溫度對於單向移動火焰的生成非常重要。因此，我們進行了多次實驗，試圖了解溫度變化如何影響火焰的穩定性。實驗的第一個方法是將實驗軌道放入冷凍庫中，讓它達到非常低的溫度，看看這樣能不能提高單向移動火焰的成功率。結果發現，這樣的方法效果並不顯著。

實驗中，冷凍庫裡的低溫很快就會影響到實驗軌道。因為軌道的體積比較小，所以當外界環境發生變化時，它的溫度也會很快受到影響。尤其是在火焰點燃後，燃燒會釋放熱量，這些熱量會讓軌道的溫度迅速上升，原本的冰鎮效果很快就消失了。這樣一來，冰凍的效果就無法持續，並不能幫助我們穩定產生移動火焰。更重要的是，軌道本身的熱容比較小，無法有效地降溫散熱，這使得冷卻的效果變得更加有限。

考慮到使用冷凍庫這種方式存在一些挑戰，我們決定改變實驗的方法。由於創造恆溫環境需要較高的技術和成本，我們選擇了更簡單的方案：利用自然的氣候條件進行實驗。我們在不同季節進行了重複實驗，以觀察不同的氣溫對燃燒行為的影響。這樣，我們可以根據不同季節的氣溫差異，模擬出不同的散熱效果。

實驗結果顯示，在較冷的冬季，低溫有助於散熱，使得軌道能夠保持較為穩定的溫度。這樣一來，火焰在燃燒過程中不會過快升溫，從而減少了出現「火皇冠」現象的機會。這樣的條件下，單向移動火焰的成功率明顯提高，並且燃燒過程變得更加穩定。相對而言，在夏季，由於氣溫較高，軌道的散熱效果較差，這使得軌道的溫度更容易迅速升高，導致燃燒過程容易失控。

我們也在冬季的低溫環境下進行了另一個實驗，這次我們試圖將實驗軌道冰凍，看看能否通過低溫來穩定火焰的燃燒條件。儘管我們期望能夠在較低的環境溫度下創造出穩定的燃燒條件，但結果卻不如預期。我們發現，在低溫和冰鎮的雙重作用下，實驗

軌道的初始溫度過低，無法提供足夠的熱能來引燃燃料蒸氣。這使得火焰無法順利點燃，甚至在點燃後就很快熄滅了。

這一結果讓我們明白，冰鎮雖然有助於控制燃燒過程中的溫度上升，但當軌道的初始溫度過低時，燃燒反應的啟動會變得非常困難。燃燒需要達到一定的啟動溫度，這是成功點燃火焰的必要條件。而在低溫環境下，冰鎮反而降低了軌道的初始溫度，導致燃料蒸氣無法達到啟動燃燒所需的溫度，從而無法成功產生火焰。

這也進一步證明了，燃燒反應對初始溫度的要求是非常高的。雖然低溫有助於控制火焰燃燒過程中的溫度上升，但如果起始溫度過低，就會對燃燒反應產生不利影響，讓火焰無法穩定產生。

總結來說，實驗結果表明，氣溫和溫度控制對於單向移動火焰的生成至關重要。不同的季節和自然環境條件對火焰的穩定性有顯著影響，而冰鎮的方式並不能有效穩定地創造單向移動火焰。在進行燃燒實驗時，要能控制實驗的溫度條件，才能有穩定且可控的火焰。

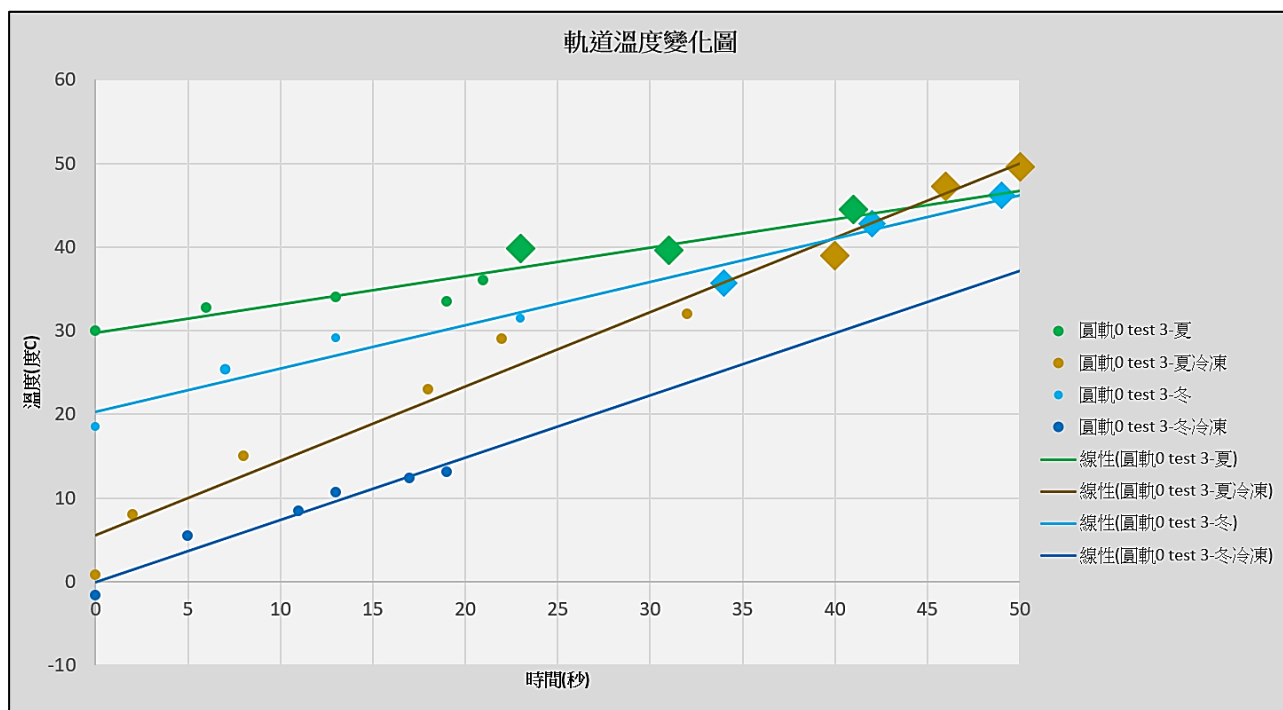


圖 19 不同溫度下圓軌道的溫度變化(學生以軟體繪製)

討論二：較高的環境溫度有助於促進燃燒反應的進行。

最後，我們對成功生成單向移動火焰的實驗影片進行了比對，並使用拖曳影片時間軸的方式精確計算了火焰的移動速率。將不同實驗條件下的火焰移動速率進行比較後，我們得到了如圖 20 所示的結果。

我們發現，冬季產生的單向移動火焰移動速率相對較慢。這一結果讓我們產生了進一步的思考，並嘗試從化學反應的角度來解釋。根據化學反應的碰撞理論，反應速率與分子間的碰撞頻率以及分子在碰撞時能夠達到的能量有關。在較高的溫度下，分子運動較快，這會增加反應物分子之間的碰撞機會，從而提高突破活化能的機會。也就是說，較高的環境溫度有助於促進燃燒反應的進行，並且有可能提高火焰的移動速率。

然而，儘管冬季氣溫較低，散熱效應有助於穩定火焰的燃燒條件，但我們的實驗結果顯示，較高的環境溫度能夠促使反應物分子更容易突破活化能，從而使燃燒反應速率加快。在這樣的條件下，燃燒反應雖然能夠保持較為穩定，但火焰的移動速度卻並未達到較高的速率。這讓我們了解到，在進行火焰移動的實驗中，火焰的移動速率受到環境溫度影響，因為環境溫度影響了分子間碰撞的頻率和活化能。另外，儘管低溫有助於穩定燃燒過程，過低的環境溫度可能會使火焰移動速率降低。相對而言，高溫環境則能促進燃燒反應，使火焰移動更為迅速。

綜上所述，我們的研究結果顯示，火焰的移動速率受到多重因素的影響，其中最為關鍵的是環境溫度所影響的燃燒反應速率。

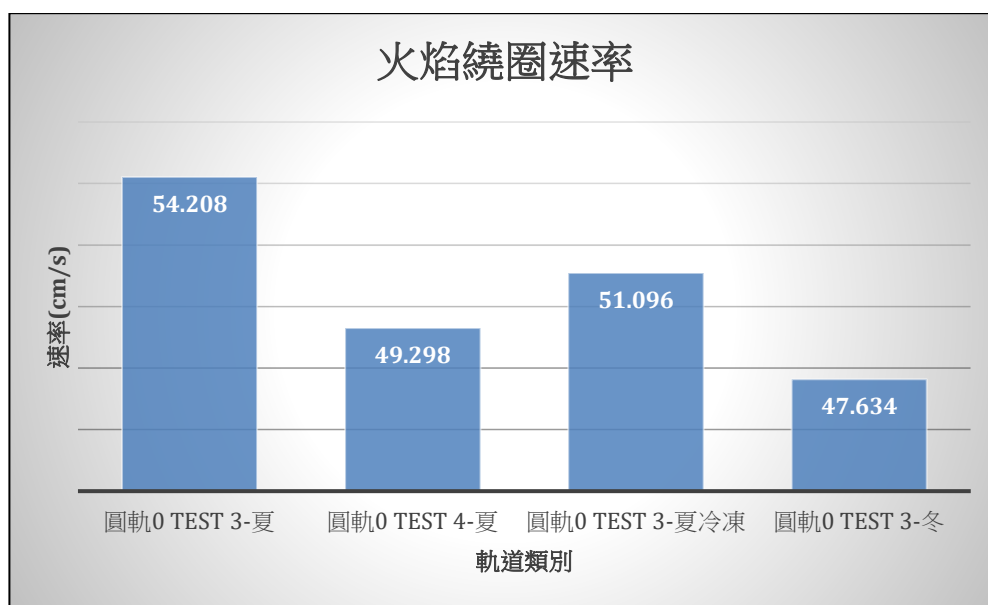


圖 20 單向繞圈移動火焰速率比較(學生以軟體繪製)

五、綜合討論

在我們的紀錄中曾經創下單向繞圈火焰維持 4 分鐘之久，最快的移動速率則可達 55 cm/s。我們認為要成功觀察到單向繞圈移動的火焰，需要滿足以下幾個關鍵條件：

1. 供氧環境適切

火焰的持續燃燒依賴於充足且穩定的氧氣供應。如果氧氣不足，火焰可能無法維持移動狀態；若氧氣過多，則可能導致燃燒過快或火焰分裂，影響繞圈移動的穩定性。因此，保持供氧量在適當範圍內是實現穩定火焰運動的基礎。

2. 溫度控制

燃燒過程中，溫度不應上升過快。過高的溫度可能導致燃料蒸氣過早燃燒，破壞燃燒的連續性，或者引發火焰分裂、蔓延的現象。穩定的溫度控制可以確保火焰持續受燃料蒸氣供應，支持單向繞圈的運動模式。

3. 適合的圓軌道長度

軌道的尺寸對火焰的運動也起到關鍵作用。圓軌道過短會導致燃料蒸氣的累積不足，無法支撐火焰完整繞圈。只有在軌道足夠長的情況下，燃料蒸氣能在環境中充分聚集，支持火焰穩定地繞圈運動。

4. 阻斷火焰向雙向擴散

在正常情況下，點火之後火焰會沿著軌道迅速往兩邊擴散燃燒，此時若存在擾動或刻意遮蔽，可以阻斷其中一個方向的燃燒，只留下另一個方向的火焰，就有可能製造出單向移動的火焰了。

從我們的觀察紀錄發現跑得快的時候，不一定跑的久，推測此時軌道處於較易引燃的狀態，然而這是不穩定的，很容易就會升溫過高，導致全面燃燒或者產生分裂火焰。而跑的久的時候，不會是跑最快的狀態，不過此時軌道可以維持在安全的溫度範圍。

柒、 結論

- 一、 網路上的影片是真實的，並非經過造假或虛構。然而，該影片應是經過多次實驗拍攝後所產出的，通常會將成功的案例進行篩選和剪輯，並根據需要呈現特定情境下的理想效果。這樣的剪輯過程可能會忽略或省略掉一些未達預期結果的實驗，從而使影片中的呈現更加完美和引人注目。因此，此繞圈移動火焰現象並不一定能在所有情況下複製出來。
- 二、 影響單向移動火焰現象的因素：**(1)燃料與氧氣的混合比例以及(2)燃料的揮發速率**兩項。而軌道的物理形狀例如深度、寬度會直接影響燃料與氧氣的混合比例，至於外界溫度及軌道圓周長則分別影響燃料的揮發速率及氣體燃料的累積量。
- 三、 **軌道深度與寬度對火焰穩定性的影響**：適中的軌道深度對保持火焰穩定性至關重要。過淺的軌道會讓火焰過於劇烈，並可能形成「火皇冠」現象，使得火焰難以控制；而過深的軌道會限制火焰的活動範圍，導致火焰微弱，無法持續燃燒。最佳的深度設計能平衡燃燒強度與氧氣供應，確保穩定的火焰移動。而隨著軌道寬度的增加，火焰強度增強，但若寬度過大，也容易引發「火皇冠」現象，導致火焰不穩定。適中的寬度設計有助於平衡火焰的強度與穩定性，使火焰能穩定地向前移動，避免無法控制的劇烈波動。根據實驗，深度與寬度的比值在 1.75 時(深度 0.875cm，寬度 0.5cm)有最佳的效果。
- 四、 **圓周長與火焰穩定性**：圓周長對燃料的提供有重要影響。較短的圓周長無法提供足夠的時間讓燃料蒸氣積聚，從而影響火焰的穩定移動；而較長的圓周長則能夠提供更長的反應時間，支持穩定的燃燒過程。根據實驗，**以輕油當燃料時，移動火焰繞行一周所需時間必須大於 0.64 秒，才能夠成功引燃下一圈火焰繞行。**
- 五、 **溫度對燃燒過程的影響**：較低的環境溫度有助於維持穩定的燃燒過程，避免火焰過度升溫這有助於提高火焰的穩定性。然而，過低的溫度可能使火焰難以點燃或導致燃燒不完全。較高的溫度則可能讓火焰燃燒過快，導致不穩定的燃燒過程。因此，維持適當的環境溫度對火焰的穩定性非常重要，根據實驗，**溫度大致上必須維持在攝氏 30~50 度的範圍內。**
- 六、 **火焰移動速率受溫度影響**：火焰的移動實際上是一個不斷引燃的過程，而非物質的實際運動。根據化學反應碰撞理論，較高的溫度會加速分子間的碰撞頻率，使得火焰更容易引燃。因此，在較高的溫度下，我們可以觀察到火焰移動速率的加快。然而，若

溫度繼續上升，會導致燃燒過程過於劇烈，從而引發「火皇冠」現象，這會使火焰變得不穩定，甚至失去可控性。

七、移動火焰處於藍色焰心狀態：移動火焰不應處於橘紅色火焰，因為在這種情況下，火焰的溫度過高，會導致燃料迅速揮發，從而引發全面性燃燒。這樣的劇烈燃燒會使火焰失去穩定性。相對地，若控制火焰處於藍焰燃燒的狀態，這時燃燒過程較為溫和，這樣能保持火焰的穩定移動並避免不穩定的燃燒反應。

捌、應用與未來展望

這項研究探討了影響火焰單向移動的原因，幫助我們更了解燃燒技術和火焰的應用。我們認為未來可以專注於改變火焰移動的路徑設計，特別是改變路徑裡面的形狀，來研究這些改變會如何影響火焰的穩定性和速度。希望我們能更準確地預測火焰在不同條件下的樣子，並提供一些數據，讓火焰技術在生活中更有幫助。

這些研究還能用來改進燃燒機器，特別是讓機器更有效率地燃燒，像是燃氣機、工業爐、焚化爐、烤箱等。如果火焰更穩定，燃料就能燒得更好，污染也會減少。我們還發現，像溫度和燃料混合比例這些因素，對火焰也有很大的影響。未來可以研究火焰在不同環境下的穩定性，比如在特別冷或特別熱的地方，這樣可以設計出能在極端環境下運行的燃燒設備，應用在更多的場合。

另外，我們的研究還能用在教育和表演上。例如，可以做一些有趣又漂亮的火焰秀，像火舞那樣，讓大家看到火焰是怎麼移動的，燃燒又是怎麼發生的。這些展示不但可以讓人更容易理解火焰的科學，還能激發大家對科學的興趣，讓更多人想要探索燃燒的秘密。我們希望這些應用不僅能讓生活更方便，也能讓科學更有趣！

玖、參考資料

1. Steve Mould 的影片 <https://www.youtube.com/watch?v=SqhXQUzVMIQ&t=51s>
2. 火焰五四三 <https://n.sfs.tw/content/index/13930?noframe=true>
3. 火災學燃燒理論 McCaffrey 火羽流理論 https://yamol.tw/item_essay-%E4%B8%80%E3%80%81%E5%9C%A8%E7%87%83%E7%87%92%E7%A4%E7%A5%81%E4%B8%AD%E7%BC%8C%E7%81%AB%E7%84%B0%E5%8F%AF%E5%8D%80%E5%88%86%E7%82%BA%E6%93%B4%E6%95%A3%E7%81%AB%E7%84%B0%E7%BC%88Diffusion+Flame%E7%BC%89%E5%92%8C%E9%A0%90%E6%B7%B7%E7%81%AB..-11578.htm
4. 翰林出版社編輯委員會。國小自然科學課本：六年級上冊。台北市：翰林出版，2022 年。
5. 翰林出版社編輯委員會。國中自然科學課本：八年級下冊。台北市：翰林出版，2022 年。
6. 台灣科學教育學會 <https://www.tsa.org.tw/>
7. 火災學概要 <https://yamol.tw/cat-%E7%81%AB%E7%81%BD%E5%AD%B8%E6%A6%82%E8%A6%81-759.htm/>

8. 台灣科學教育資源中心 (SERC) <https://www.serc.org.tw/>
9. 環境教育資源網 <https://www.epa.gov.tw/>
10. 科學探索網 <https://www.science.com.tw/>

【評語】 080114

此作品探討單向繞圈移動的火焰。理論說明，介紹火焰相關科學原理，包括了火焰原理，燃燒機制以及影響燃燒氣化因素。詳盡敘述實驗流程，找到了實驗的主要變因，對於各變因設計實驗驗證其影響。此研究揭示火焰繞圈移動的原理，因此更能瞭解這有趣的現象。總而言之，是件不錯的作品。

作品海報

奔跑吧！火焰！

—— 單向繞圈移動火焰之探究



研究動機

有一天，我和家人在網路上看到一段有趣的影片，作者在花盆底座的凹槽倒上燃料點火，結果火焰沿著軌道繞圈移動不停。這個現象讓我們驚奇，也產生疑問：這是真的嗎？火焰真的能這樣移動？需要什麼特定條件？帶著這些好奇，我與幾位同樣感興趣的朋友請教老師，並設計實驗探究**火焰移動的原因**及**影響因素**。我們希望了解哪些條件能讓這種現象發生，以及影響**火焰速度的因素**，進一步揭開**火焰動態行為**的**科學原理**，為相關研究提供新觀點。

什麼是單向繞圈移動火焰？



圖片由作者自行拍攝

研究目的

- 一、探究單向繞圈移動火焰的**科學原理**和**成功條件**。
- 二、**軌道深度**對於單向繞圈移動火焰的影響。
- 三、**軌道寬度**對於單向繞圈移動火焰的影響。
- 四、**軌道長短**對於單向繞圈移動火焰的影響。
- 五、**外界溫度**對於單向繞圈移動火焰的影響。

研究工具

3D列印機、筆電、攝影機、冷凍櫃、溫度計、微量滴管、碼錶、點火槍、酒精燈、剪刀、鑷子、口紅膠、液態燃料(輕油)、切口鉗、平底鏟、棉布手套(隔熱)、游標尺、3D列印編輯軟體、物理量測手機app。

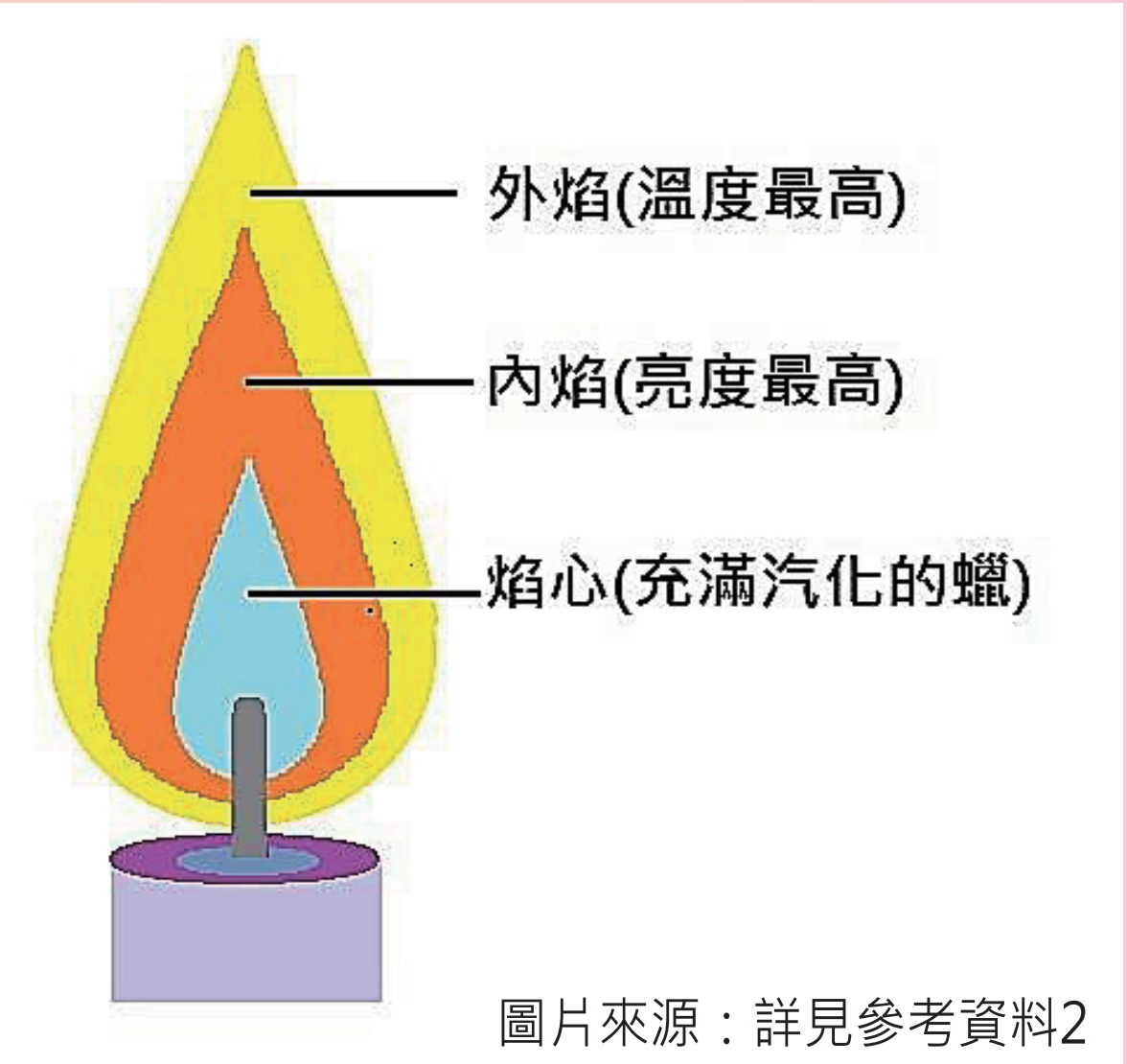
理論探討

火焰的運動與**燃燒**、**熱空氣上升**及**氣體流動**有關。燃燒需燃料、氧氣與足夠溫度，燃料燃燒時產生的熱量會影響周圍空氣，使其流動並可能導致火焰移動。

1. 火焰與燃燒機制

火焰是燃料與氧氣反應後釋放熱與光的結果，可分為內焰區、外焰區與焰心，受燃料供應、氧氣濃度與熱量影響。燃燒分為兩類：

- 預混燃燒**：燃料與氧氣先混合燃燒效率高但易爆炸，如瓦斯爐。
- 擴散燃燒**：燃料與氧氣燃燒時才混合接觸較穩定但效率低，如蠟燭。



圖片來源：詳見參考資料2

2. 影響燃料汽化的因素

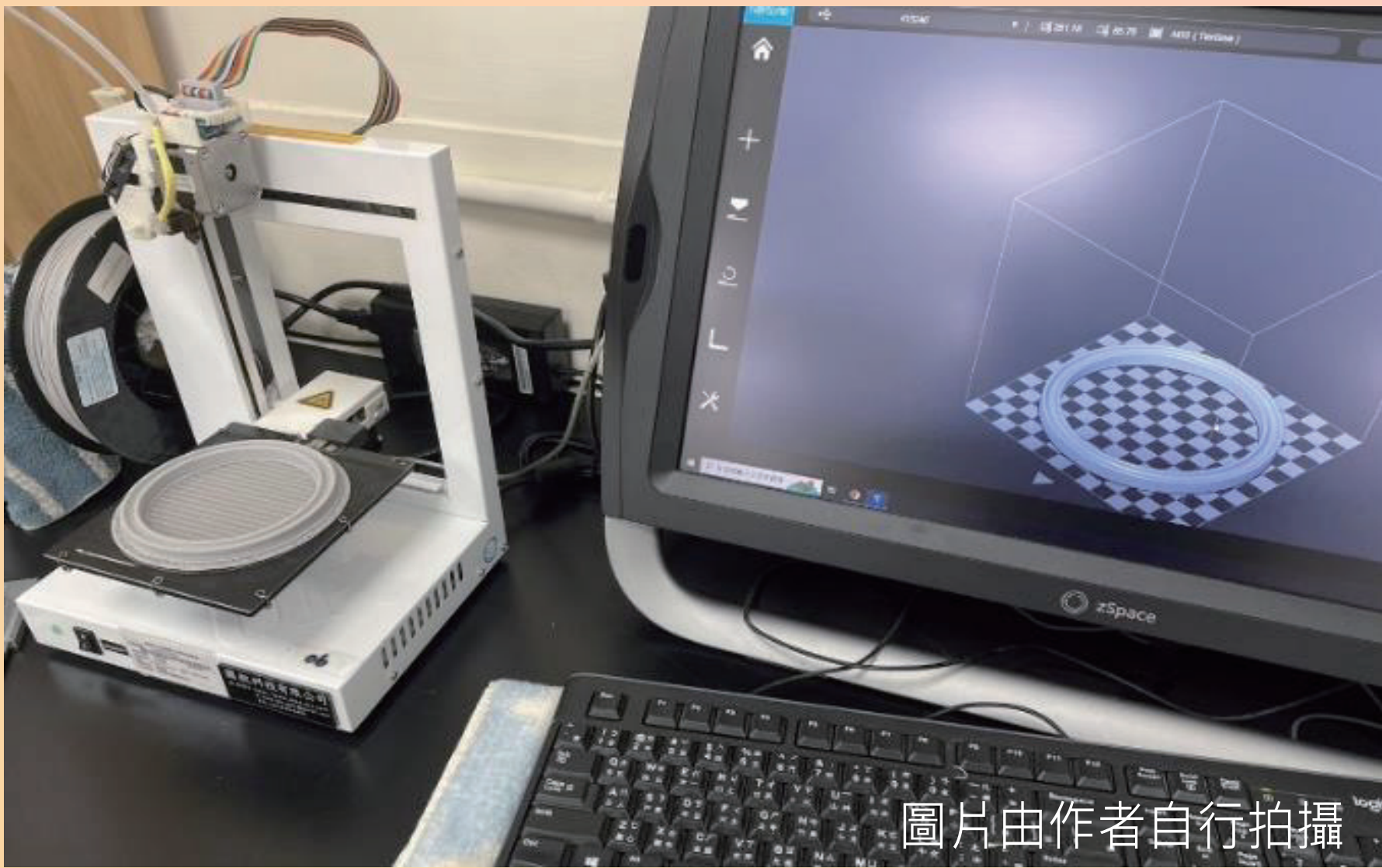
燃料汽化影響火焰的形成與移動，主要因素包括：**燃料特性**：揮發性高（如酒精）則易汽化，燃燒更穩定。**環境溫度與壓力**：高溫加速燃料汽化，低壓降低汽化所需能量。**燃燒裝置設計**：容器形狀、材質與開口影響熱傳導與燃燒效率。**氣流影響**：氣流方向與速度決定火焰形狀與穩定性，適當氣流可提升燃燒效率。火焰的移動路徑受多種因素影響，透過研究這些現象，可優化燃燒技術、提高能源效率，並應用於火災防治與工業燃燒控制。

研究過程與方法

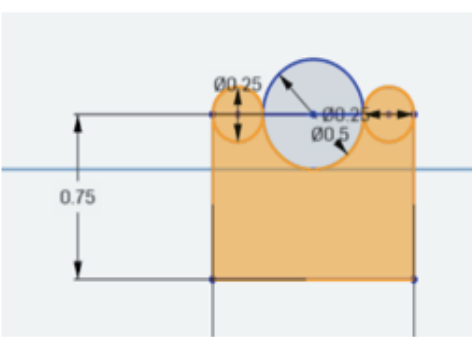
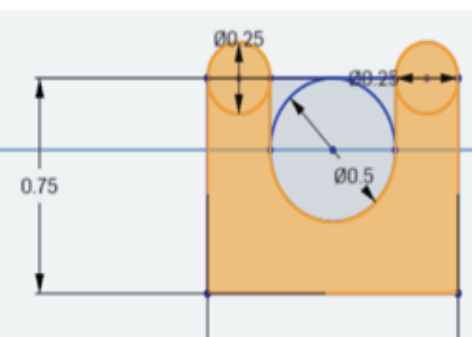
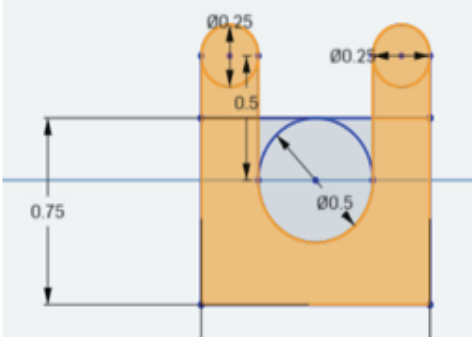
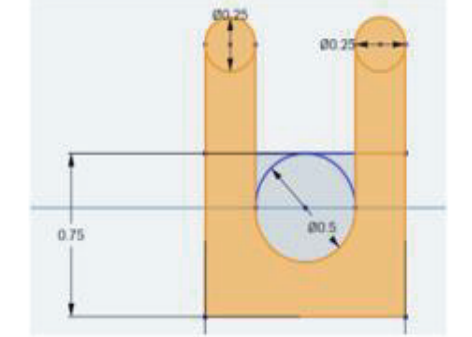
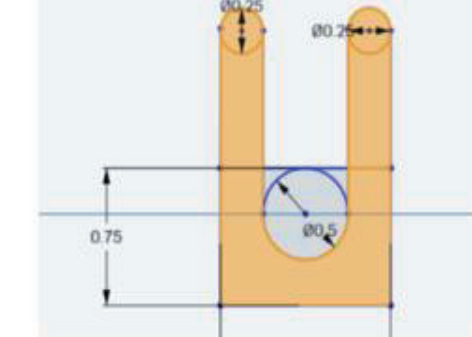
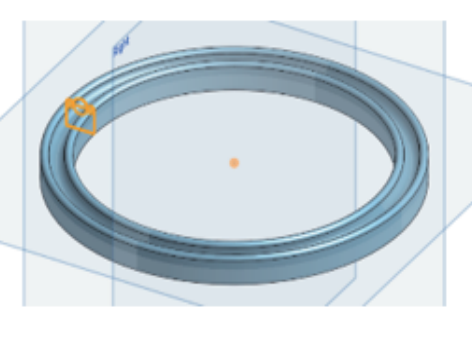
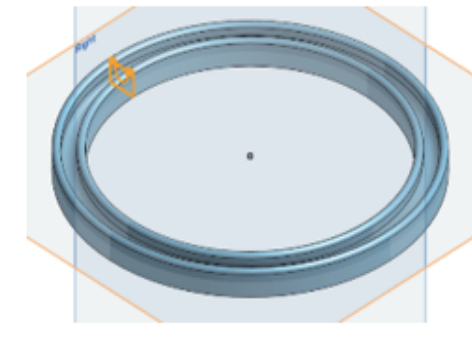
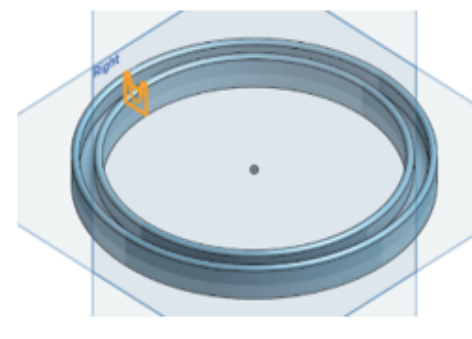
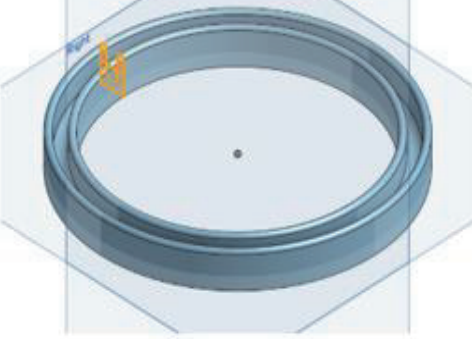
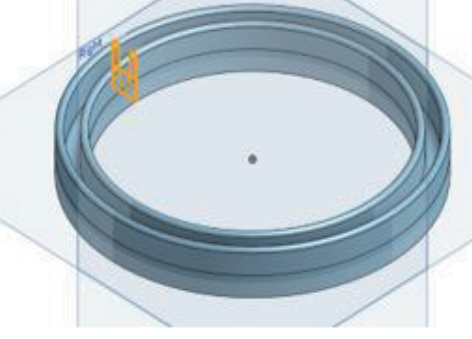


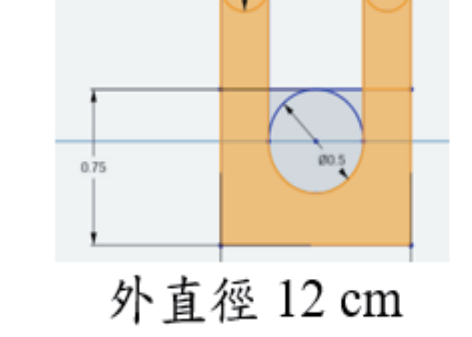
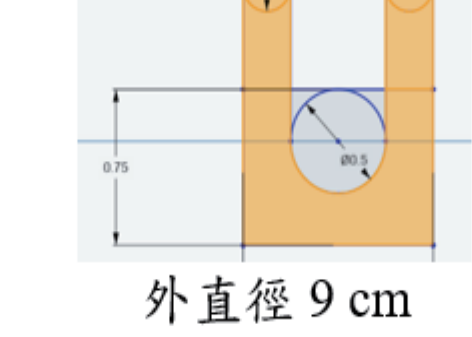
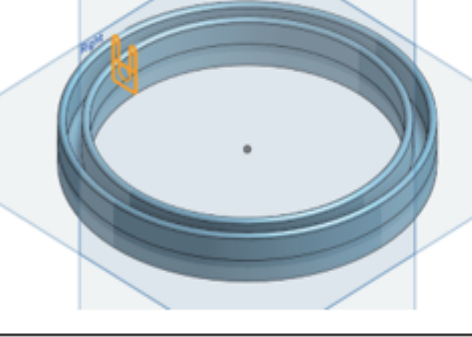
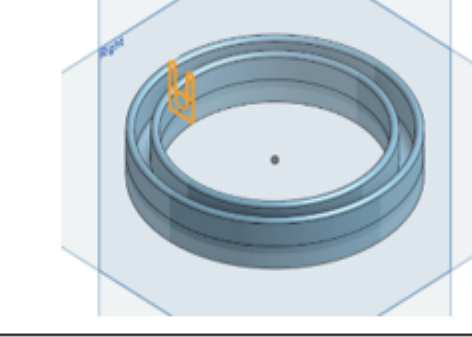
圖片由作者自繪

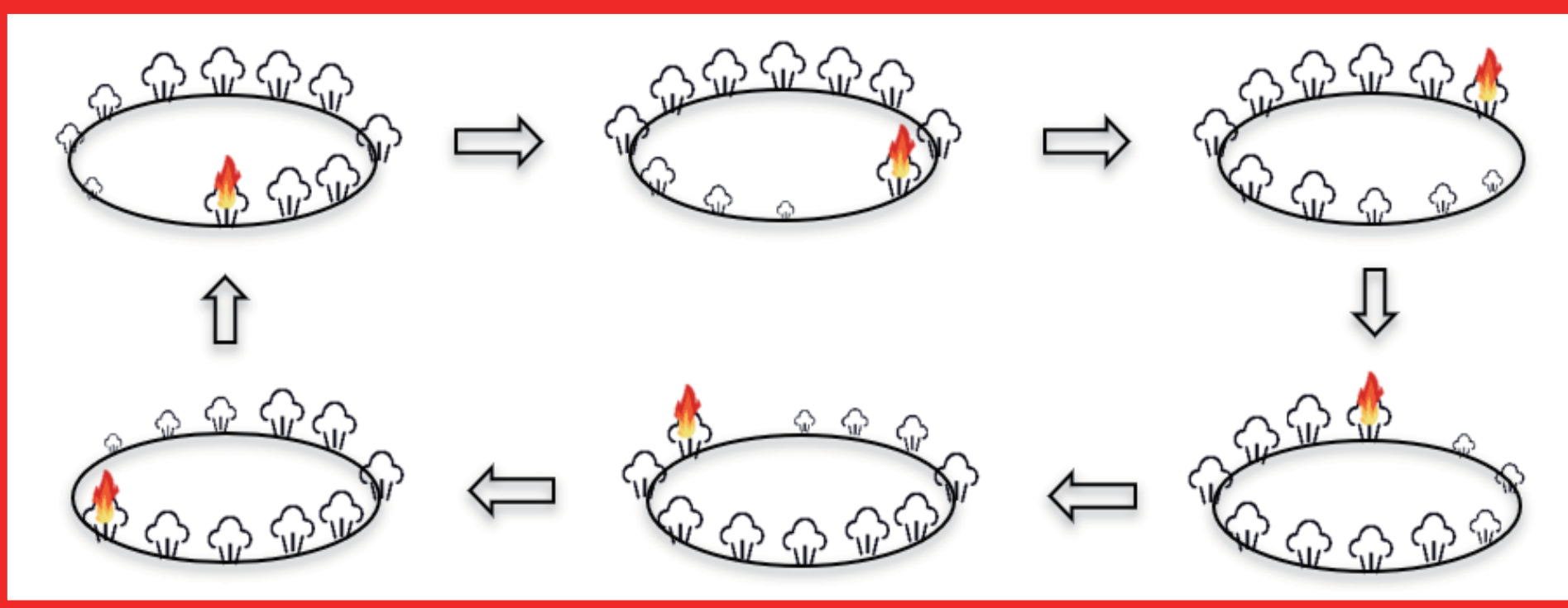
我們使用 Onshape 繪製 3D 圖檔，轉換為適合 3D 列印的格式，並透過 UP Studio 設定列印參數，使用 UP 3D Plus 2 列印軌道。測試時發現軌道有微小空隙，導致燃料滲漏，影響實驗穩定性。我們加熱圓頭鑷子，使 ABS 材料熔化填補空隙，確保密封性。修補過程需細心操作，避免過度加熱導致變形。經過檢查與調整，我們成功修補軌道，確保後續實驗順利進行，提高列印品質與安全性。



圖片由作者自行拍攝

實驗A-不同深度的圓軌道					
圖片為學生以軟體繪製					
編號	圓軌 0 test 1	圓軌 0 test 2	圓軌 0 test 3	圓軌 0 test 4	圓軌 0 test 5
軌道剖面尺寸					
	外直徑 12 cm 內直徑 10 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 0.375 cm	外直徑 12 cm 內直徑 10 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 0.625 cm	外直徑 12 cm 內直徑 10 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 0.875 cm	外直徑 12 cm 內直徑 10 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 1.125 cm	外直徑 12 cm 內直徑 10 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 1.375 cm
3D圖稿					

實驗C-不同圓周長的圓軌道		
圖片為學生以軟體繪製		
編號	圓軌 0 test 4	圓軌 0 test 4-縮 1.5cm
軌道剖面尺寸		
	外直徑 12 cm 內直徑 10 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 1.125 cm	外直徑 9 cm 內直徑 7 cm 軌內寬 0.5 cm 軌深 1.125 cm
3D圖稿		



實驗D-不同溫度下的圓軌道

為研究**溫度**對**燃料蒸氣揮發**及**火焰繞圈**的影響，我們採用不同方法調控環境溫度。最初在軌道中心放冰塊降溫，但融化的水影響燃燒，後改用冷凍庫預冷軌道以獲得不同起始溫度。此外，我們利用冬夏氣溫差進行測試，觀察自然環境對火焰行為的影響。我們推測，若軌道升溫過快，燃料蒸氣揮發過多，可能形成「火皇冠」；若升溫適中或散熱良好，燃料蒸氣穩定，火焰可持續繞行。進一步測試顯示，適當控制溫度有助於火焰穩定移動，這些實驗讓我們更了解溫度對燃燒行為的影響，並找到最佳的燃燒條件。

單向繞圈
移動火焰
預想機制

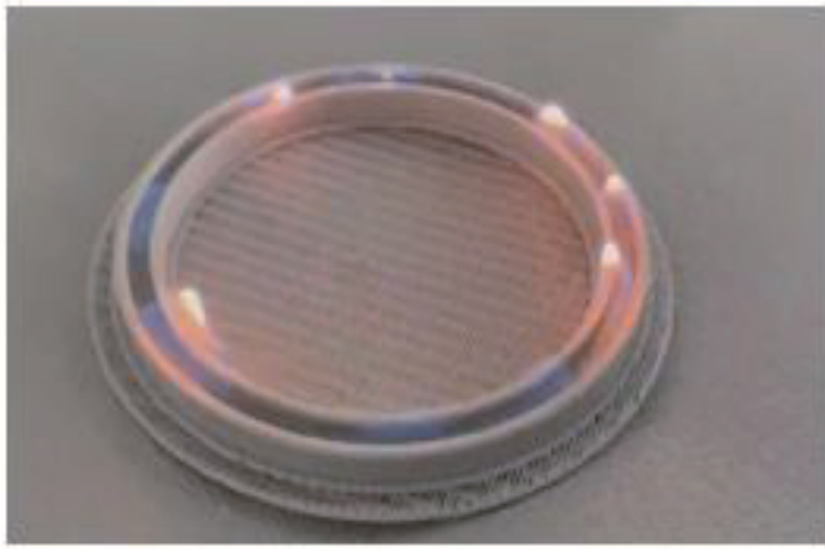
- 成功的「單向繞圈移動火焰」定義：
- 1.只有一個火焰在跑
 - 2.同一方向繞三圈以上
 - 3.不留下殘火，也不停駐

本圖片由作者自繪

研究結果與討論

實驗A-不同深度的圓軌道

照片均由作者自行拍攝

編號	圓軌 0 test 1	圓軌 0 test 2	圓軌 0 test 3	圓軌 0 test 4	圓軌 0 test 5
照片					
質性描述	燃燒劇烈，出現橘紅色火焰，容易引燃軌道	燃燒旺盛，容易分裂出火焰分支，少數橘紅火焰，有可能引燃軌道	多為藍色火焰，可以成功製造出單向繞圈移動火焰	產生藍色火焰，可以成功製造出單向繞圈移動火焰	僅產生藍色火焰，火焰移動慢或不移動，偶爾會成功製造出單向繞圈移動火焰

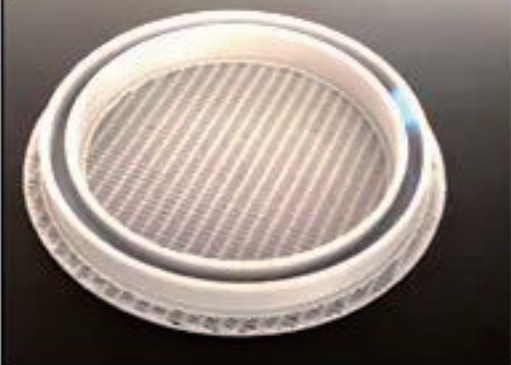
實驗B-不同寬度的圓軌道

照片均由作者自行拍攝

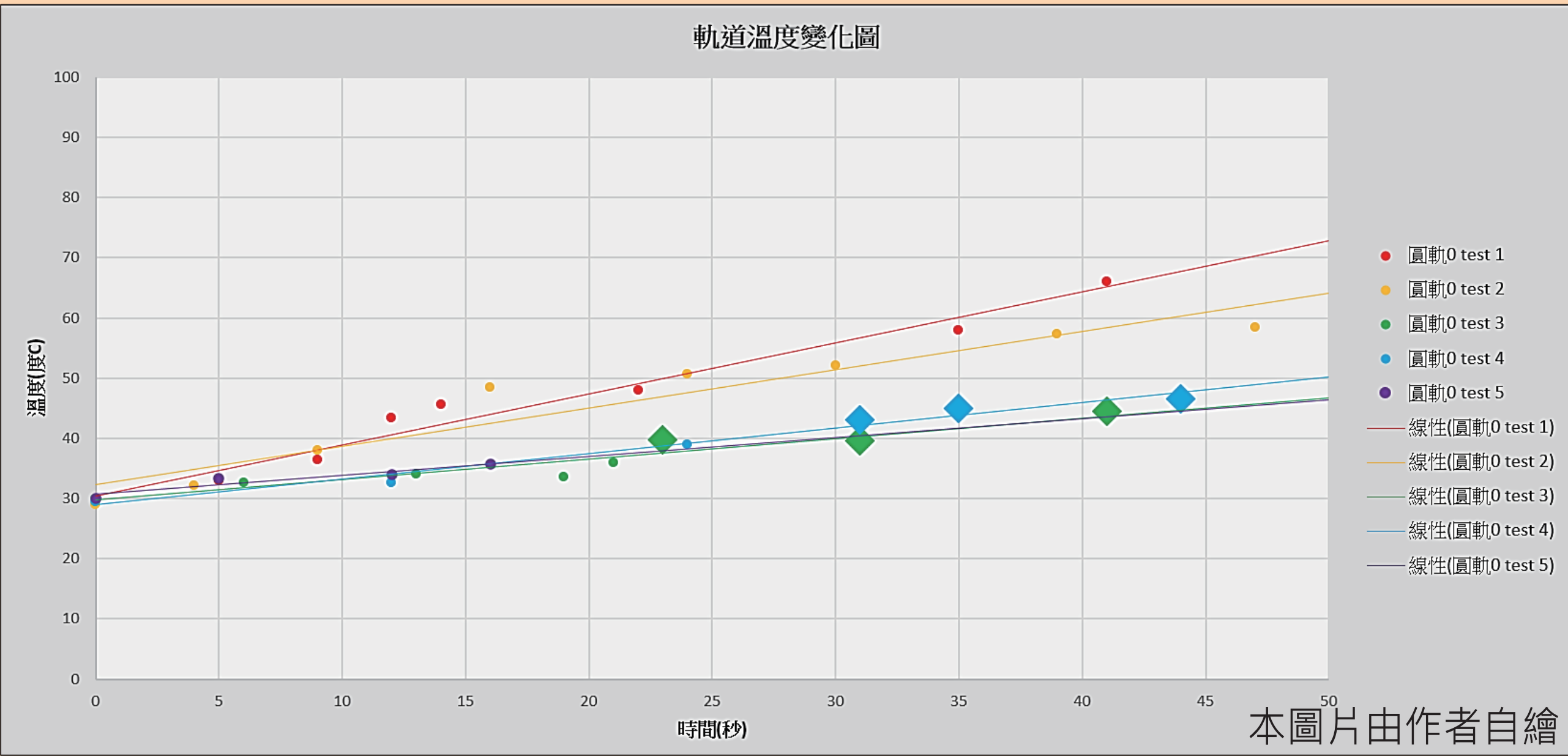
編號	圓軌 0 test 3	圓軌 0 test 3-寬+0.5	圓軌 0 test 3-寬+1.0
照片			
質性描述	多為藍色火焰，可以成功製造出單向繞圈移動火焰	燃燒旺盛，明顯出現橘色火焰，易引燃軌道	燃燒劇烈，火皇冠現象顯著，隨即引燃軌道

實驗C-不同圓周長的圓軌道

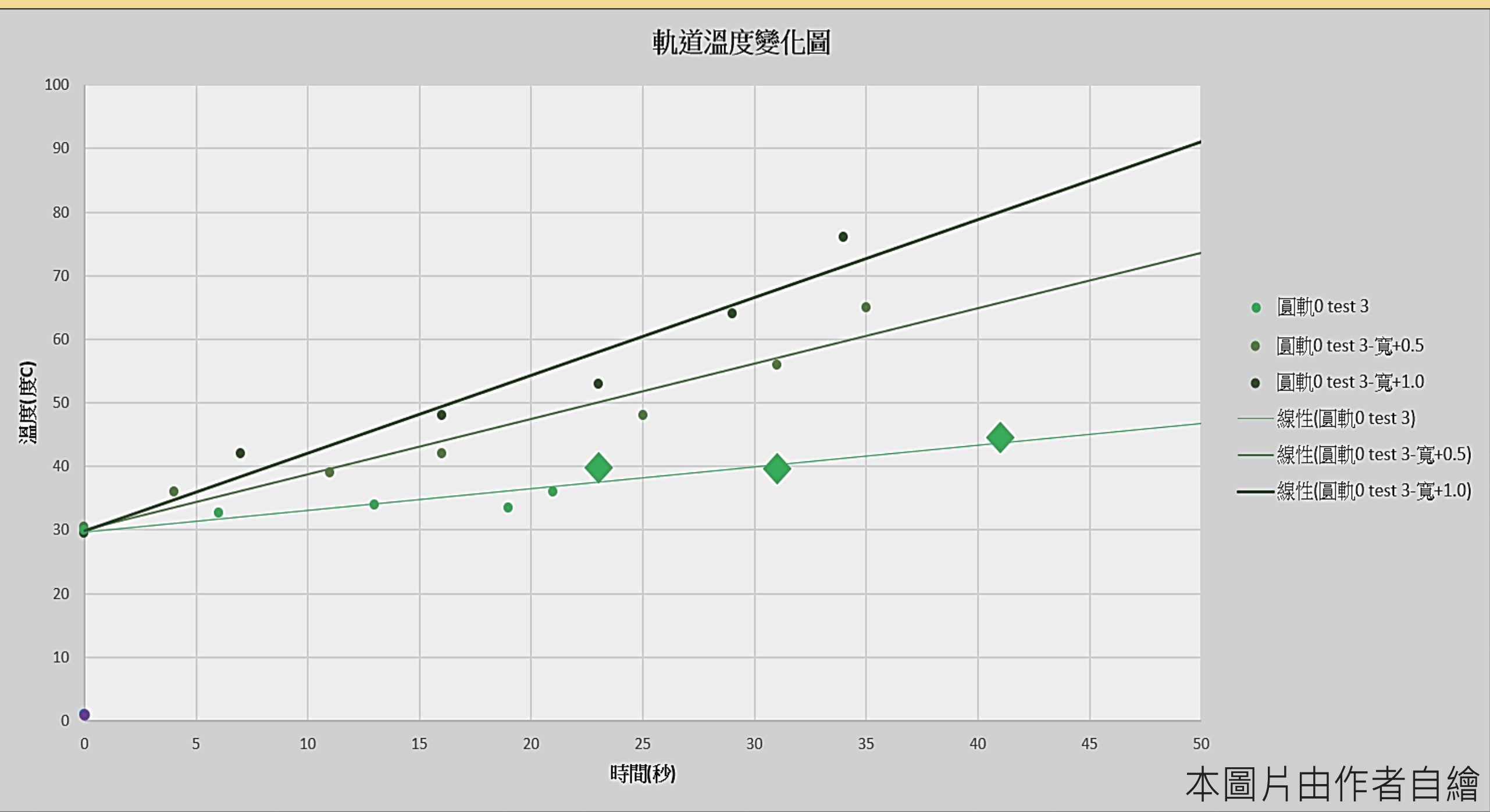
照片均由作者自行拍攝

編號	圓軌 0 test 3	圓軌 0 test 3-縮 1.5cm	圓軌 0 test 3-縮 3.0cm
照片			
質性描述	產生藍色火焰，可以成功製造出單向繞圈移動火焰	藍色火焰繞完一圈隨即熄滅	藍色火焰繞完一圈隨即熄滅，不易點燃

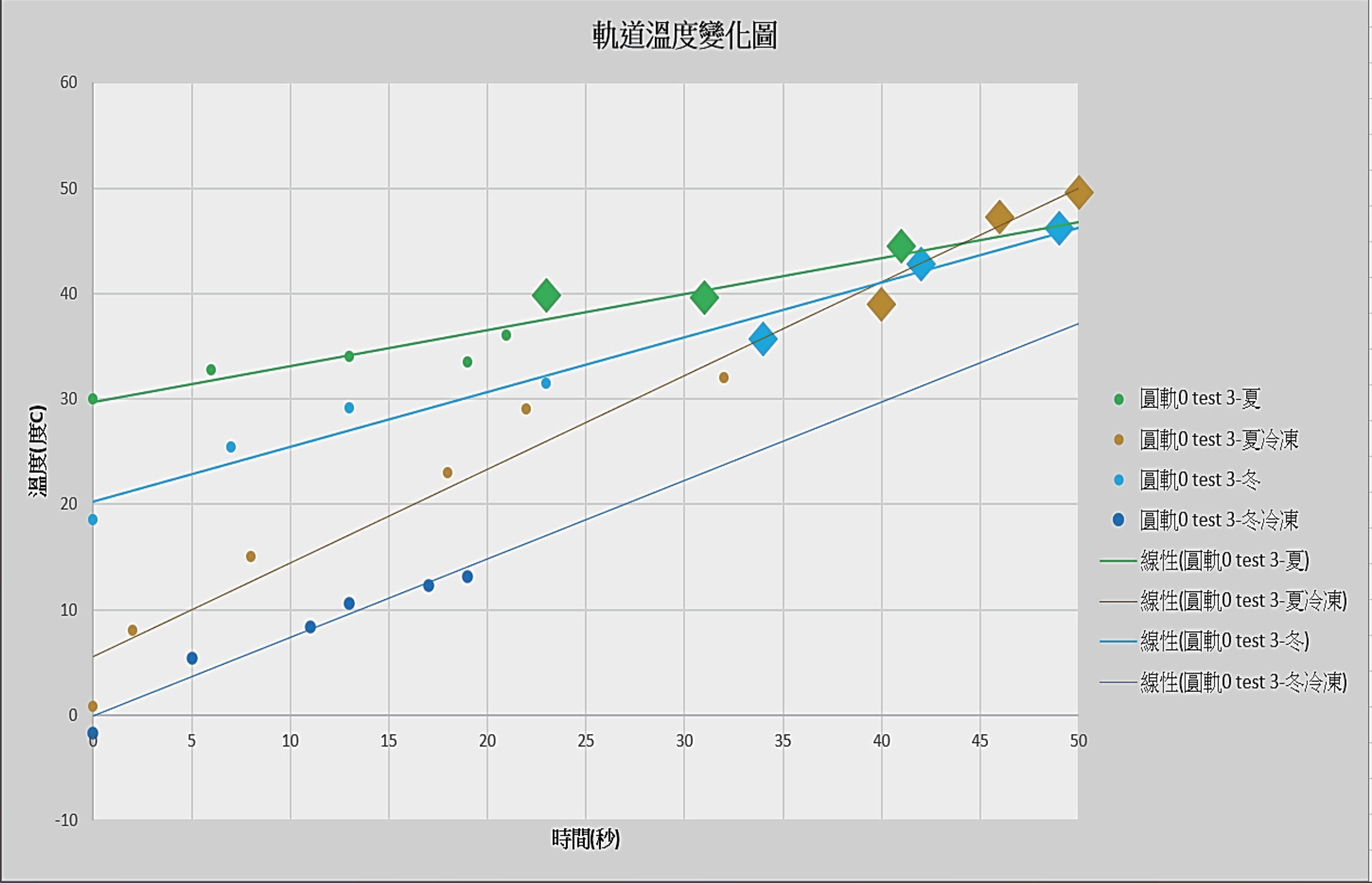
編號	圓軌 0 test 4	圓軌 0 test 4-縮 1.5cm	圓軌 0 test 4-縮 3.0cm
照片			
質性描述	僅產生藍色火焰，火焰移動慢或不移動，偶爾會成功製造出單向繞圈移動火焰	僅藍色火焰，幾乎不移動，火焰慢慢消退	僅藍色火焰，幾乎不移動，火焰慢慢消退，而且不易點燃



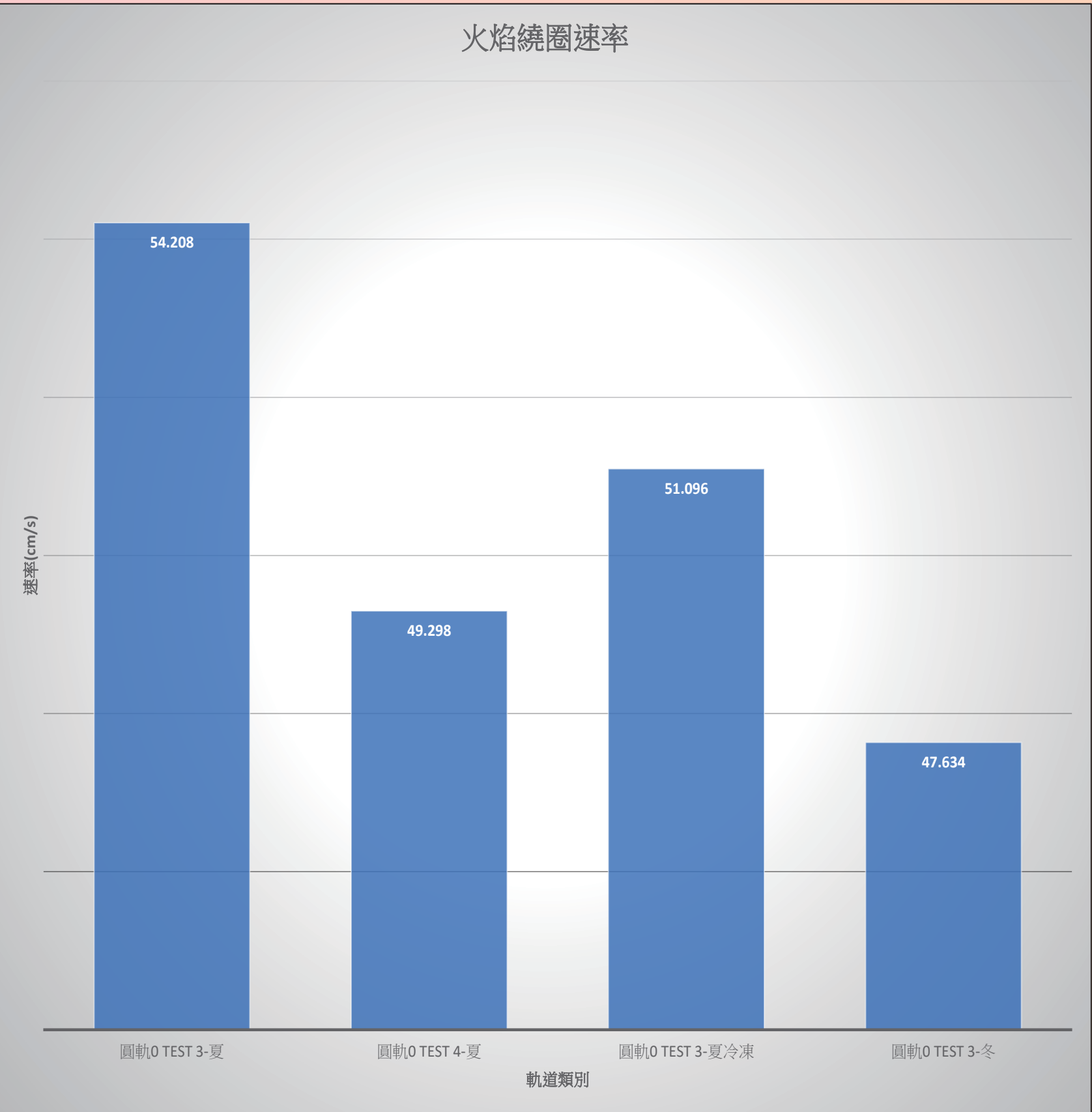
實驗顯示，**軌道深度**與**寬度**會影響火焰穩定與移動：淺或寬軌燃燒劇烈、易失控，深軌則因氧氣不足難以引燃。適中設計有助火焰穩定移動。實驗也進一步發現，若**圓軌過短**，**燃料蒸氣補充不及**，**火焰無法持續**。維持穩定燃燒須兼顧軌道尺寸與蒸氣累積速率。



實驗D-不同溫度下的圓軌道



本圖片由作者自繪



本圖片由作者自繪

將實驗軌道冷凍以提高火焰成功率，但發現燃燒釋放的熱量迅速升溫，使冷卻效果難以持續，無法穩定火焰。所以改用自然氣候條件實驗，結果顯示**冬季低溫**有助散熱，降低「火皇冠」現象，提高火焰穩定性；**夏季高溫**則散熱差，易導致燃燒失控。我們進一步在冬季冰凍軌道，但過低溫度反而阻礙燃料蒸氣點燃，火焰難以維持，顯示**燃燒需適當啟動溫度**。火焰移動速率實驗顯示，冬季火焰速率較慢，可能因低溫降低分子碰撞頻率、影響燃燒速率。高溫能促進燃燒，也似能提升移動速率。總結而言，**單向移動火焰受環境溫度影響，低溫穩定燃燒，高溫加快反應，須取得平衡以確保火焰穩定**。

成功觀察單向繞圈移動火焰需滿足以下條件：

- 1.適切供氧**：氧氣供應需穩定且適量，避免供氧不足或過量。
- 2.溫度控制**：燃燒溫度不宜上升過快，以防燃料蒸氣過早燃燒、火焰分裂或蔓延。
- 3.合適軌道長度**：軌道過短會使燃料蒸氣累積不足，影響火焰繞圈。
- 4.阻斷雙向擴散**：點燃後，火焰通常向兩側擴散。透過擾動或遮蔽可保留單向火焰。

結論

•影片真實性與可重現性

影片並非造假，而是透過多次實驗後篩選成功案例，再經過剪輯呈現最佳效果。

•影響移動火焰現象的主要因素

影響火焰單向移動的關鍵因素包括：**(1)燃料與氧氣的混合比例**及**(2)燃料的揮發速率**。這兩者決定了火焰是否能夠穩定傳遞。

•軌道深度與寬度對火焰穩定性的影響

軌道深度與寬度的設計影響火焰的穩定性。若**軌道過淺**，**火焰過於劇烈**，可能產生「火皇冠」現象，導致燃燒不受控；若**軌道過深**，則**限制火焰活動**，導致燃燒不完全或熄滅。寬度的增加會提升火焰強度，但若過寬，也會引發火焰不穩定的問題。當軌道深度與寬度的比值約為**1.75 (深度0.875cm，寬度0.5cm)**時，火焰移動效果最佳。

•圓周長對燃燒穩定性的影響

較短的圓周長可能無法提供足夠的燃料蒸氣，使火焰難以穩定延續；較長的圓周長則能讓燃料蒸氣充分累積，支持穩定燃燒。實驗顯示，**當使用輕油作為燃料時，移動火焰繞行一周所需時間應超過0.64秒**，以確保下一圈火焰順利點燃。

•環境溫度對燃燒過程的影響

適當的環境溫度能維持穩定燃燒。較低溫度（低於30°C）可能導致燃料揮發不足，使火焰難以點燃或燃燒不完全；較高溫度（超過50°C）則可能加快燃料揮發，影響穩定性。**維持環境溫度在30~50°C範圍內，有助於確保燃燒過程的可控性**。

•火焰移動速率與燃燒機制

火焰的移動並非實際物質運動，而是透過燃料持續引燃的過程。

•火焰狀態與燃燒效率

移動火焰應維持在藍焰燃燒的狀態，以保持穩定的移動特性。**控制火焰呈現藍色燃燒狀態，有助於維持穩定燃燒使火焰順利沿軌道移動**，避免因燃溫過高而失控。

未來展望

未來可進一步研究不同軌道與路徑設計對火焰移動行為的影響，並探討火焰在極端條件下的穩定性，以優化燃氣機、工業爐等燃燒設備設計，提高效率並降低污染排放。同時，本研究亦具教育與展示應用價值，可用於教學或火焰秀等科學表演，提升大眾對燃燒現象的理解與興趣。我們期望這些成果能促進燃燒技術與科普發展，讓科學更貼近生活、走入人群。

參考資料

- Steve Mould的影片 <https://www.youtube.com/watch?v=SqhXQUzVMIQ&t=51s>
- 火焰五四三<https://n.sfs.tw/content/index/13930?noframe=true>
- 火災學燃燒理論McCaffrey 火羽流理論https://yamol.tw/item_essay-%E4%B8%80%E3%80%81%E5%9C%A8%E7%87%83%E7%87%92%E7%A7%A4%E5%A5%81%E4%B8%AD%E7%BC%8C%E7%81%AB%E7%84%B0%E5%8F%AF%E5%8D%80%E5%88%86%E7%82%BA%E6%93%B4%E6%95%A3%E7%81%AB%E7%84%B0%E7%BC%88Diffusion+Flame%E7%BC%89%E5%92%8C%E9%A0%90%E6%B7%B7%E7%81%AB..-11578.htm
- 翰林出版社編輯委員會。國小自然科學課本：六年級上冊。台北市：翰林出版，2022年。
- 翰林出版社編輯委員會。國中自然科學課本：八年級下冊。台北市：翰林出版，2022年。
- 台灣科學教育學會<https://www.tsa.org.tw/>
- 火災學概要<https://yamol.tw/cat-%E7%81%AB%E7%81%BD%E5%AD%B8%E6%A6%82%E8%A6%81-759.htm/>
- 台灣科學教育資源中心 (SERC) <https://www.serc.org.tw/>
- 環境教育資源網<https://www.epa.gov.tw/>
- 科學探索網<https://www.science.com.tw/>