

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

佳作

030119

火龍升起－探討火龍捲的特性

學校名稱：花蓮縣立國風國民中學

作者： 國二 林君 國一 賴可崑	指導老師： 黃耀輝
--------------------------------	------------------

關鍵詞：火龍捲模式、甲醇燃燒溫度下降、
導流板偏斜角度

摘要

本實驗分別以 50、70、90 度三種偏斜角度的 12 片導流板圍成一圈做為實驗裝置，若導流板偏斜角度、氣流旋轉半徑、燃燒面積越大或是氣流流入速率變快，火焰高度會越高。火苗以下流入的氣流會促使火焰升高，愈低處的幫助愈大，火苗上方流入的則對火焰產生抑制作用。火龍捲的火焰愈高、甲醇蒸發速率愈大，導致甲醇的液體溫度愈低，此結論和科學人的推測完全相反。導流板偏斜 70 度時，甲醇的蒸發燃燒和氧氣的供應組合會使燃燒效率達到最高，使火焰上方燃燒後甲醇蒸氣殘留量最低。對水的加熱結果說明：火龍捲裝置比起對照組，使火焰較穩定、直立，且燃燒較完全，在有開風扇的情況下，也不易被風吹斜，因此能有效加熱，其中尤其是 90 度的表現最好。

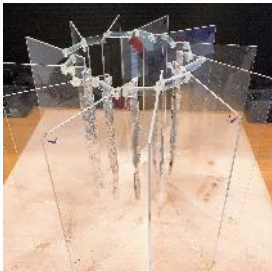



壹、研究動機

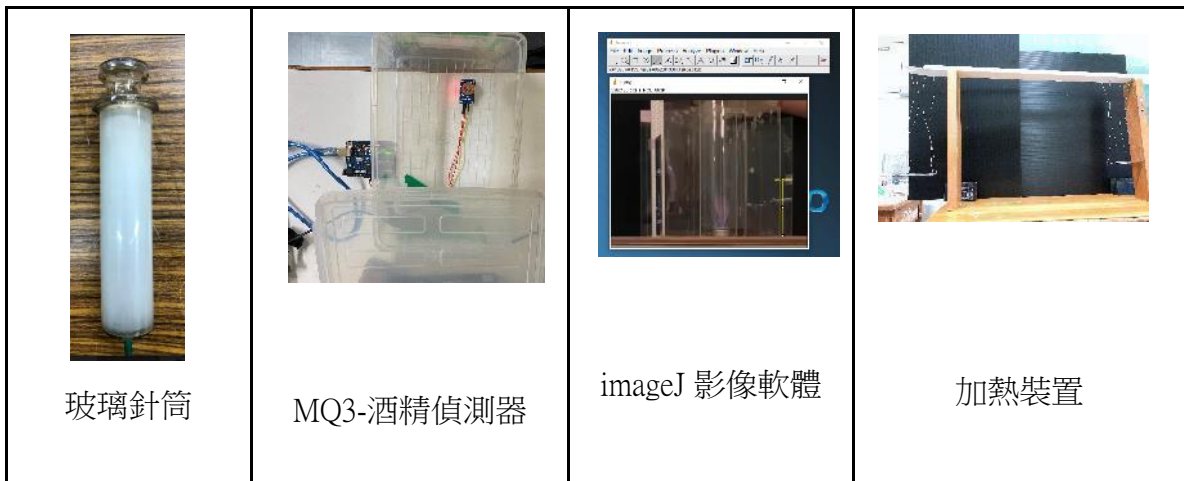
在科學人 2020/3 月號一篇探討火焰龍捲風文章中，我們了解到火龍捲的破壞力，聯想到是否能把燃燒旺盛的災害轉成應用它的優點，讓燃燒更有效率。因此著手深入的探討火龍捲的各種燃燒特性，希望能夠有效駕馭火龍捲，在實驗室中打造更節能、更有效率的加熱裝置。

貳、研究目的

- 一、測試使用自製導流板的燃燒速率。
- 二、探討不同溫度的甲醇燃燒速率的差異。
- 三、探討不同燃燒面積對火龍捲燃燒的影響。
- 四、探討不同的進氣角度對火龍捲燃燒的影響。
- 五、水平氣流旋轉半徑對對火龍捲燃燒的影響。
- 六、火龍捲燃燒時對甲醇溫度的影響。
- 七、探討火龍捲裝置的實用性和功效。

參、研究設備及器材

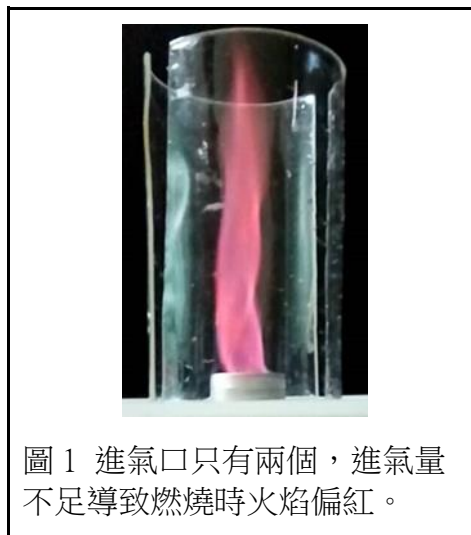
 <p>導流板火龍捲裝置</p>	 <p>鋁杯、鋁盒</p>	 <p>精密電子秤</p>	 <p>K-type 熱耦溫度計</p>
---	--	---	---



肆、參考文獻

已知天然災害中火龍捲中心有強烈的上升氣流，力量甚至強大到足以將可燃物、車輛等向上拉起並拋出，有關火龍捲中心氣流的升力也有類似的報導。所以我們構想是如果能在實驗室情境中製造出捲動的上升氣流，應該等同於加速四周的空氣流向中心並抬升，如此應該能加速氧氣供應、加速燃燒，製作一個加熱效能更高的加熱器。以下是查閱過所有能夠讓氣流旋轉的方法：

- 一、如科學人文章中作法：在火焰四周加裝風扇，朝單一方向驅動氣流使之旋轉，這種方法雖然可以使氣流旋轉，也能使火焰高度竄升，但是額外使用了電能驅動氣流，而且要加裝風扇，因此不是一個便宜有效的方法。
- 二、網路上製作火龍捲的方法，是把一個透明的大玻璃筒縱向剖半，稍微平行錯開 2 個半圓筒，使空氣便可以從錯開的空隙流入火焰，這樣也可以有效使火焰竄升，但是火焰顏色偏紅黃，判斷因為進氣口只有 2 個，所以燃燒所需要的氧氣供應不夠，產生不完全燃燒使得燃燒火焰顏色偏紅，如圖 1。



三、55 屆科展－轟!火龍出沒，他們使用電動馬達帶動圓筒狀金屬網旋轉，金屬網帶動四周空氣旋轉，雖然也成功製造出火龍捲，也增加了加熱效能，但是仍然有額外耗能，且裝置複雜，不利於後續應用。

四、參考了第 57 屆科展，風力罩得住酷炫發電機，他們使用了導流板的設計結構類似如圖 2，推測此方法用於加熱的進氣效果更好，可以依照需求來增加或減少進氣口，而且沒使用到額外的電能，是一個很有潛力的加熱裝置。

此裝置設計的俯視圖如圖 2－a 及其可能導引的氣流構想如圖 2－b，其中直立了 12 片 $11 * 22 \text{ cm} * \text{cm}$ 的壓克力板以導引氣流形成逆時針方向轉動，圖 2－a 中的壓克力板朝徑向右偏斜 50 度，我們稱呼此導流板的偏斜角度。

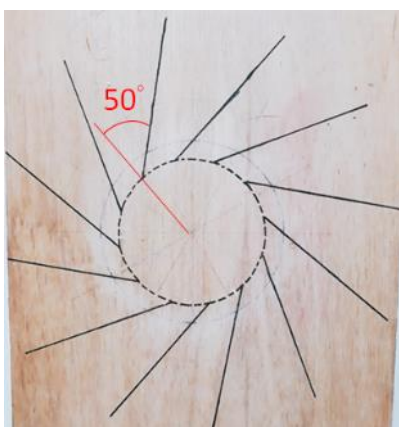


圖 2－a 偏斜角度示意圖。



圖 2－b 氣流進來時會被壓克力板阻擋而旋轉。

伍、研究結果及討論

實驗一、測試使用自製導流板的燃燒速率。

我們希望造成的氣流旋轉模式如圖 3－a 並且透過觀察裝置內外各 5 個燃燒的甲醇火焰偏斜的差異，可以看出圖 3－b 左，裝置內的氣流真的出現了旋轉的模式。



圖 3－a 期望的氣流旋轉的方式示意圖。



圖 3－b 裝置內的火焰（左）會出現旋轉的樣貌。

確認使氣流達到旋轉模式後，我們將檢驗此裝置用於燃燒時消耗甲醇的速率。

作法：使用如圖 4 的鋁盒 A，將 1 公克的甲醇裝在兩個鋁盒中，分別放在偏斜 70 度角的火龍捲裝置（以下簡稱裝置）內與裝置外（當成對照組）燃燒，實驗裝置如圖 5，使用手機攝影後再從錄影畫面計算出燃燒時間，目的是想了解哪一個火焰可以燃燒較久。實驗進行 8 次，求其平均值。



圖 4 盛裝燃燒甲醇的六種不同大小的鋁盒及代號，圖中數字標示鋁盒內直徑（mm）。



圖 5 裝置 70 度角內外各放一公克的甲醇。

實驗結果如下：

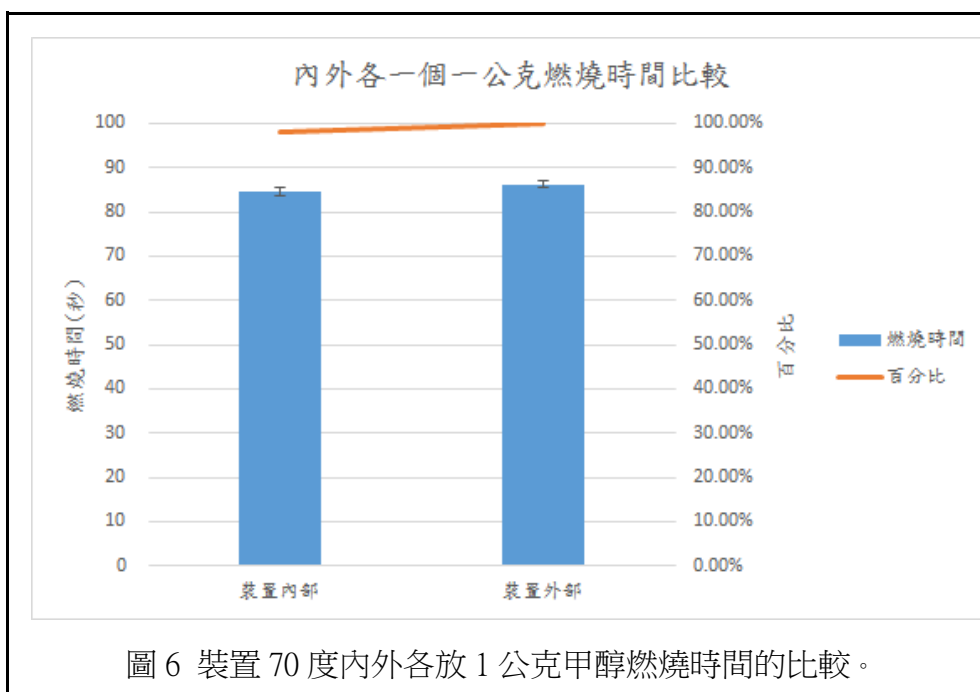


圖 6 裝置 70 度內外各放 1 公克甲醇燃燒時間的比較。

如圖 6 的結果顯示，裝置內的甲醇微微領先燒完，但甲醇在裝置內外燃燒的時間大約差距 2~3%，差別不大。這是否可能是因為甲醇量太少以致燃燒時間不夠久而無法產生顯著差異呢？於是我們把甲醇量加倍變成 2 公克再進行 8 次實驗求平均值。

實驗結果如下：

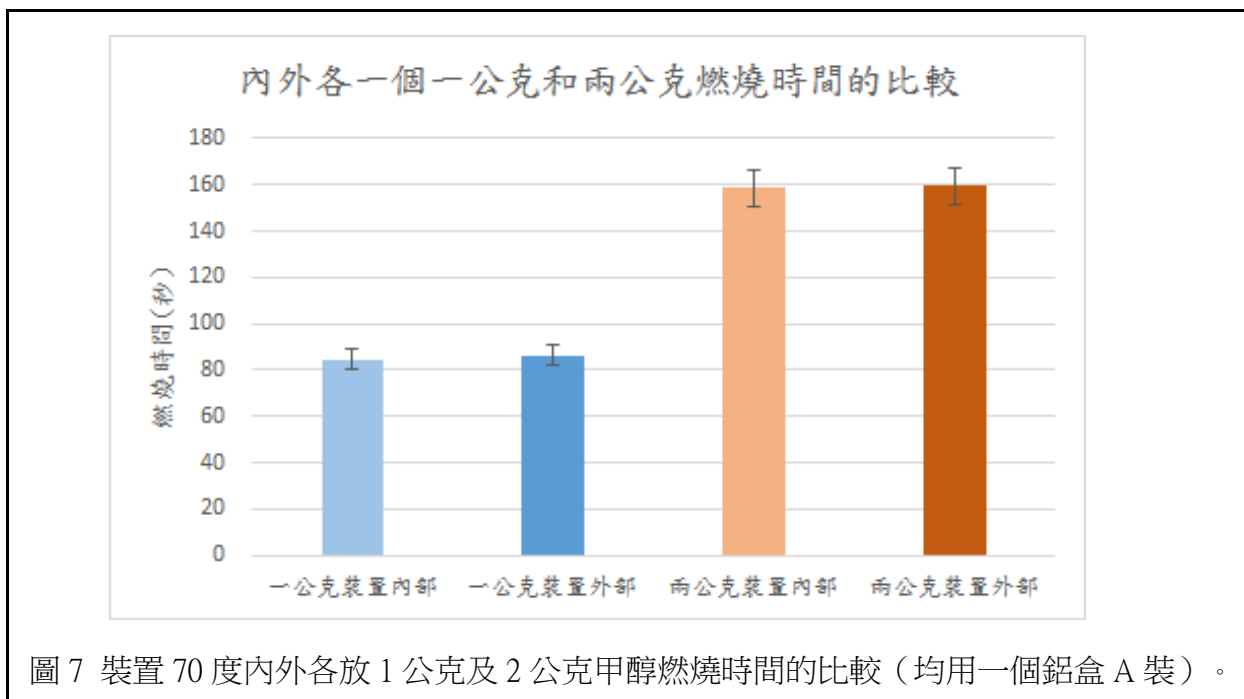
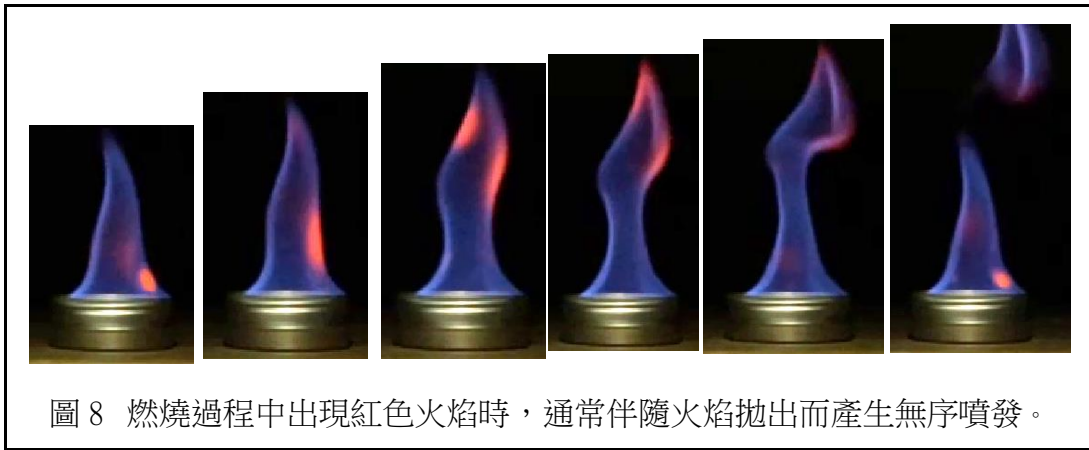


圖 7 裝置 70 度內外各放 1 公克及 2 公克甲醇燃燒時間的比較（均用一個鋁盒 A 裝）。

如圖 7 的結果顯示：

1. 裝置內外甲醇燃燒時間仍然差異不大，所以我們可以推測：即使裝置內的甲醇燃燒時火焰升得較高，但是火焰是由甲醇蒸發出來的蒸氣燃燒產生，所以火龍捲的燃燒方式其旋轉的上升氣流並不會讓甲醇這種可燃物蒸發得更快，這結果有點出乎意料。
2. 2 公克的甲醇燃燒的時間差一點就是 1 公克甲醇燃燒時間的 2 倍，這說明剛開始點火燃燒的時候，溫度低、火苗小，燃燒速率慢，但是很快就達到穩定燃燒的狀態。

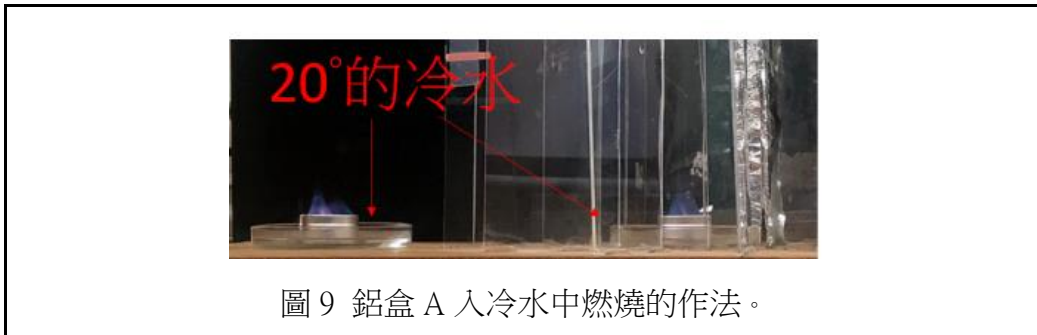
此外發現裝置外的甲醇燃燒時，火焰有斷斷續續的現象，在燃燒過程中火焰會跳動，如圖 8，畫面中可以看出火焰中紅色火點起後向上拋出一團火焰，我們猜測可能是甲醇在燃燒過程中鋁盒金屬溫度上升導致甲醇沸騰，還未燃燒的甲醇蒸氣衝破火焰向上竄升，拋出的甲醇蒸氣接觸到更多氧氣後還是可以燒起來。我們稱此為無序的噴發，這現象在對照組產生較多，我們想知道這種無序的噴發會不會加速了對照組的燃燒速率，因而使得對照組的燃燒速率追上火龍捲裝置的實驗組呢？



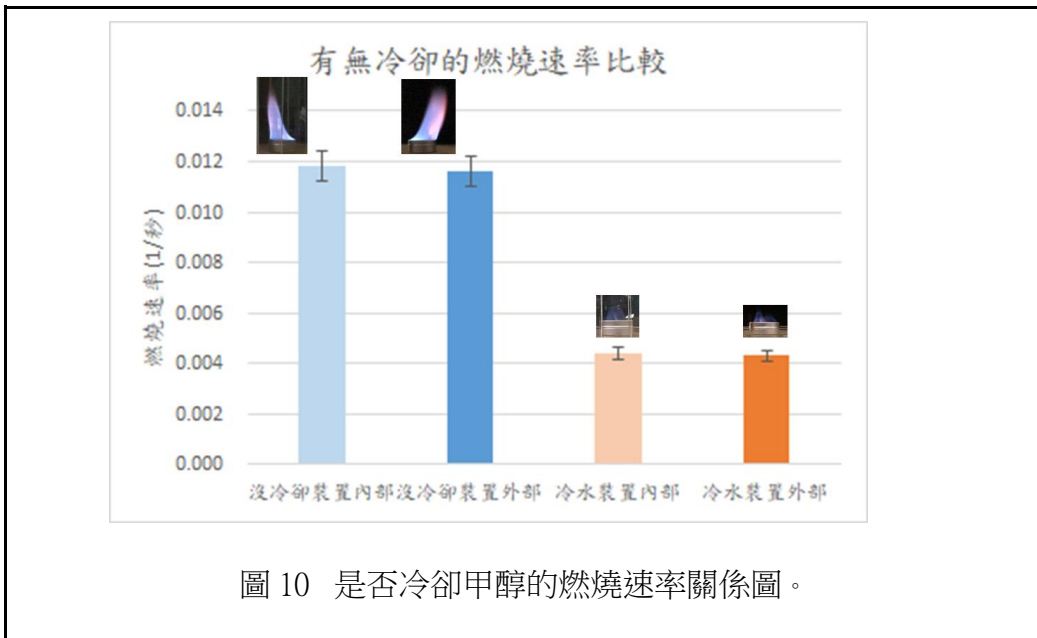
實驗二、探討不同溫度的甲醇燃燒速率的差異。

我們觀察到沸騰氣泡產生的地方都是在鋁盒跟甲醇接觸的地方，為了去除甲醇沸騰導致雜亂無序的噴發產生干擾，我們把裝甲醇的鋁盒浸泡在水中，藉由水的降溫使金屬鋁盒溫度不會太高，甲醇盡量不達到沸騰狀態，希望藉此達到穩定的燃燒，再分別比較燃燒時間和火焰的狀態。

做法：培養皿分別裝 15 公克的冷水（約 20°C），裝甲醇的鋁盒 A 置入其中並點火燃燒，實驗裝置如圖 9，進行 8 次實驗求平均值，倒數之後轉換成燃燒速率。



實驗結果如下：



如圖 10 的結果顯示：

1.我們可以看出控制了無序噴發的干擾後，裝置內外燃燒的速率仍然幾乎相同，以目前的火焰強度之下，不管火焰的強或弱，火龍捲裝置並不會讓燃燒加速消耗燃料，且這狀況也和無序的噴發無關，只和甲醇的溫度有關。

2.用水冷卻的甲醇燃燒較慢，火焰高度較低並且沒有跳動向上噴發的現象，其中以冷水冷卻的狀況最穩定，如圖 10，並在火熄滅之後杯底會有殘留液體，那些液體點火也無法再次燃燒，因此我們推測那是殘餘的甲醇並含有水分。無法燃燒的原因是因為甲醇的蒸氣濃度過低，而造成蒸氣濃度過低的情況是因為燃燒時放在水中，溫度較低，導致甲醇被工業酒精中極少量的水吸引而無法蒸發，甲醇蒸氣濃度不足而無法燃燒。

接下來我們找不同大小的鋁盒來測試，測試不同面積，也測試偏斜 50、90、100 度角的裝置。

實驗三、探討不同燃燒面積和偏斜角度對火龍捲燃燒的影響。

作法：這次把同樣 2 公克的甲醇分別裝進大小不同的鋁杯中燃燒，看看相同質量的甲醇，但是不同的蒸發面積燃燒時會有什麼狀況發生。我們使用的鋁盒如圖 4 所示，用游標尺測量鋁杯內徑再轉換成面積。實驗進行 5 次，求其平均值。實驗結果如下：

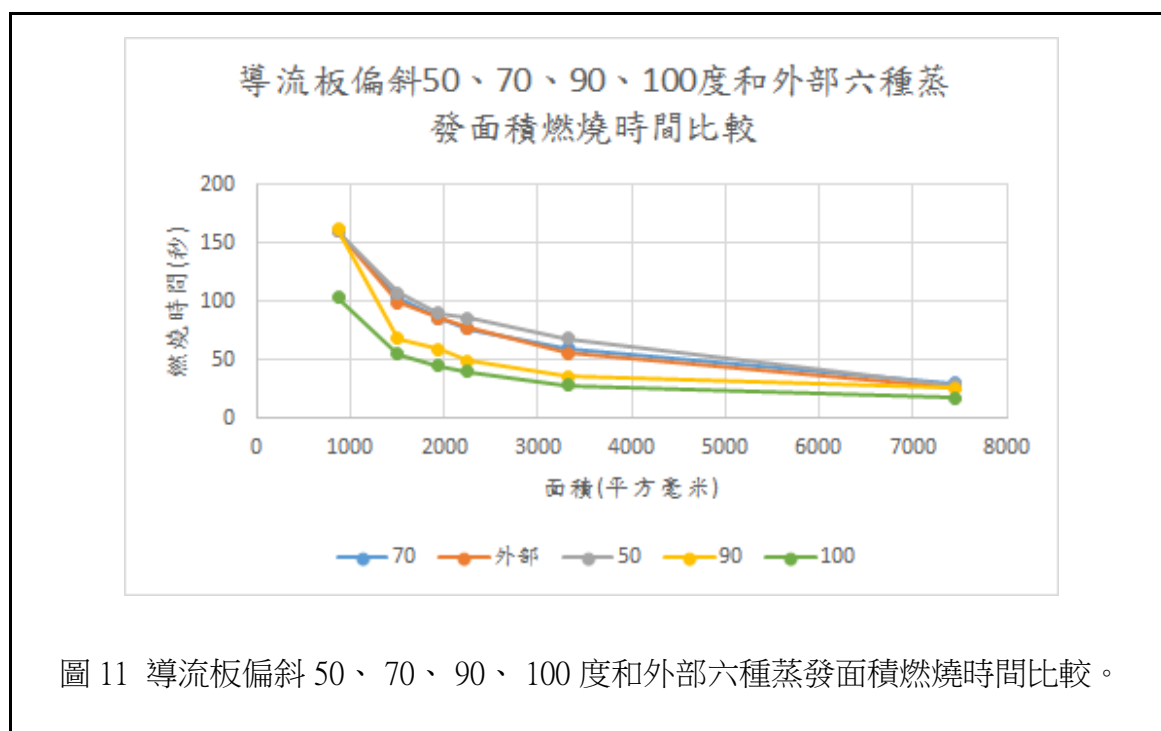


圖 11 導流板偏斜 50、70、90、100 度和外部六種蒸發面積燃燒時間比較。

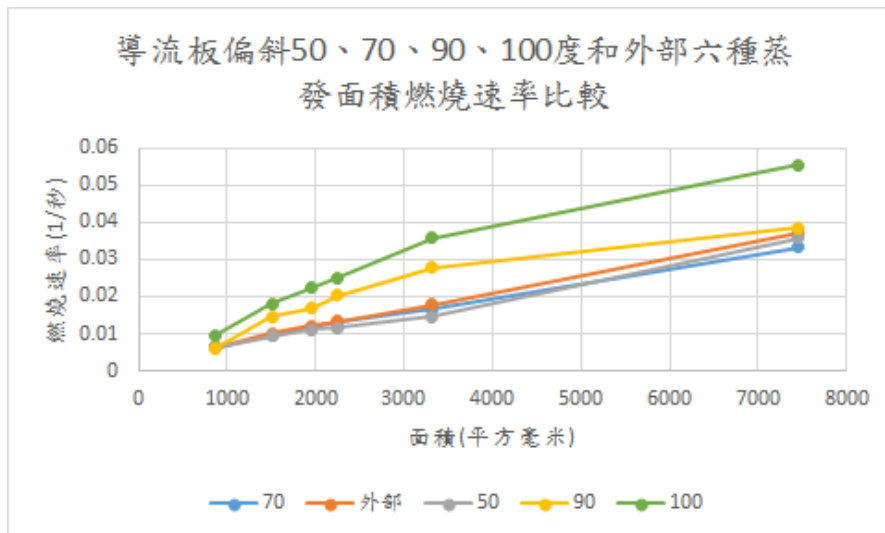


圖 12 導流板偏斜 50、70、90、100 度和對照組六種蒸發面積燃燒平均速率比較。

1. 以上圖 11 和圖 12 可以看出，一般燃燒速率幾乎是和甲醇的蒸發面積成正比，因此，70 度、50 度和對照組表現一樣，所以都不能算是火龍捲，90、100 度的燃燒有很不一樣的表現。當鋁盒小，火焰小，火龍捲裝置內外燃燒速率因上升氣流不足而各組差異仍小，如先前實驗呈現的結果。但是當火焰增強後，90 度這組的差距總算拉開了一些。但是鋁杯更大時雙方差距又縮小，推測是火焰大時需要更多氧氣進氣供應，但受限於偏斜 90、100 度導板進氣口太小，使得氧氣供應不足，限制了火龍捲的燃燒速率。既然導流板的偏斜角度對燃燒速率有顯著的影響，那我們接下來仔細檢驗其差別吧。

實驗四、探討不同的進氣角度對火龍捲燃燒的影響。

作法：使用鋁盒 B 分別盛裝 2 公克甲醇置入不同偏斜角度的火龍捲裝置中燃燒，得到火焰燃燒外觀的比較如圖 13。

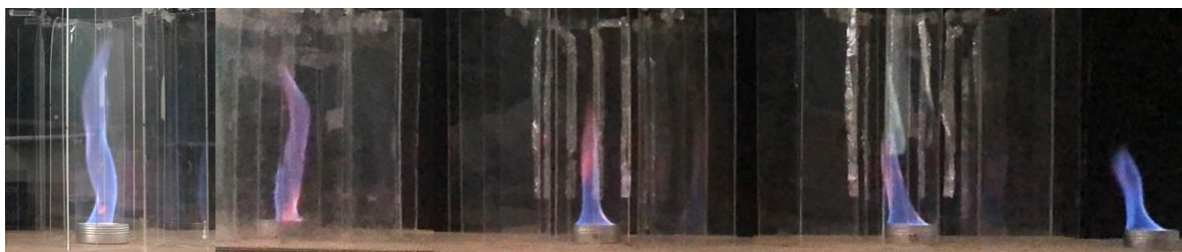
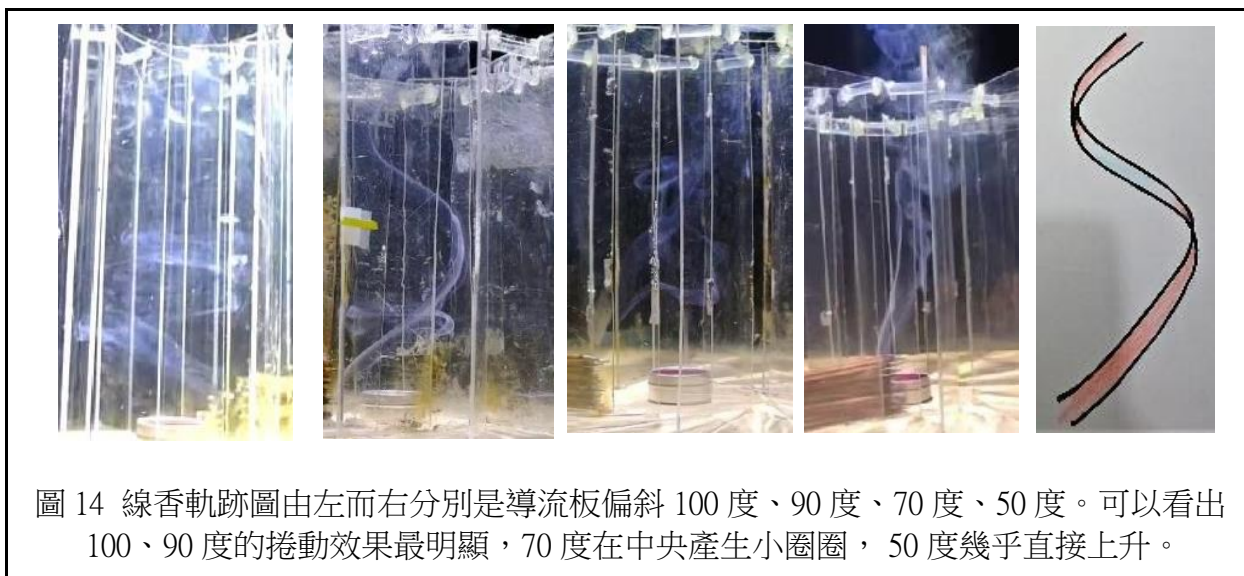


圖 13 五個火焰由左到右分別是導流板偏斜 100 度、90 度、70 度、50 度和對照組。

我們看到，100 度、90 度、70 度的火焰比較直立，不容易受到外界氣流干擾，這個應用於加熱時，比較不容易受到環境氣流影響，應該會有比較好的加熱效果。

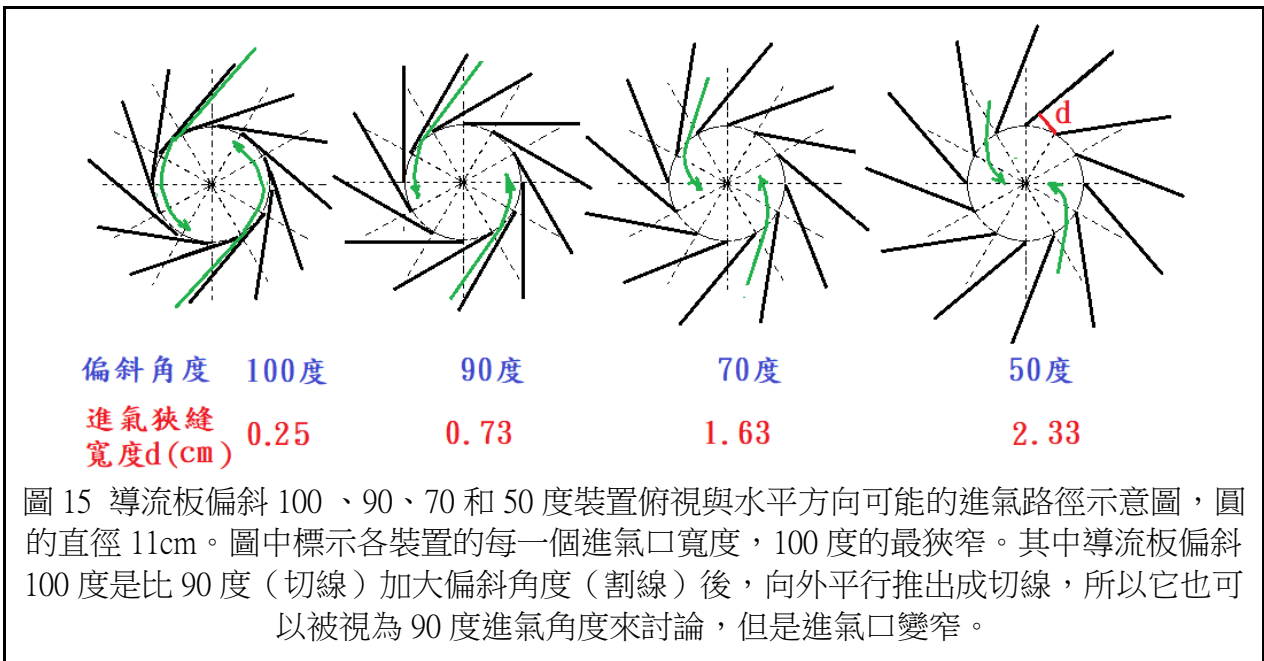
我們想知道在上圖 13 中 100 度、90 度的裝置為何能產生顯著的火龍捲現象？他的氣流有什麼不一樣？於是借助線香呈現它的軌跡。從圖 14 可以發現 100 度、90 度的裝置氣流旋轉的狀況最明顯，煙霧也不會從旁邊逸出。



1. 從下圖 15 俯視示意圖來看 100 度的裝置有三個特點：

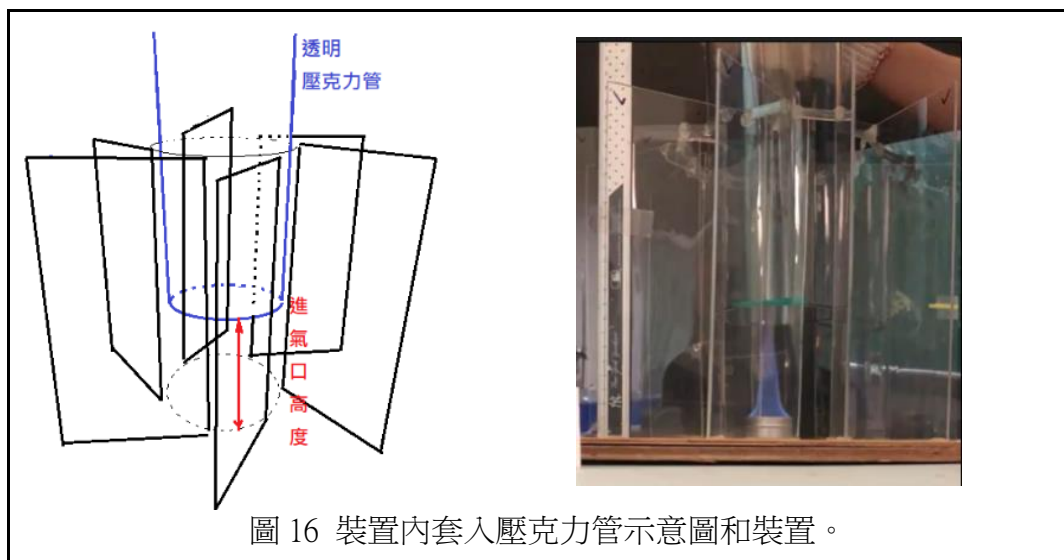
- (1) 合圍效果最好，就像一支真正的煙囪，較能保護熱氣直直向上抬升而不從旁邊流失。
- (2) 進氣口最窄，如果由裝置向上排出的燃燒廢氣體相同，那麼從裝置外向內流入補充的空氣體積也相同，所以進氣口愈狹窄，氣流流入的速率愈快，轉動效果愈好。
- (3) 進氣時不會直直衝進火源（位在圓心處），當最中央、最熱的空氣上升時，剛從外界流入的空氣就流入填補並因旋轉半徑縮小而增加轉速，較有機會從裝置底部把甲醇蒸氣向上抬升，火焰高度較高也較細。

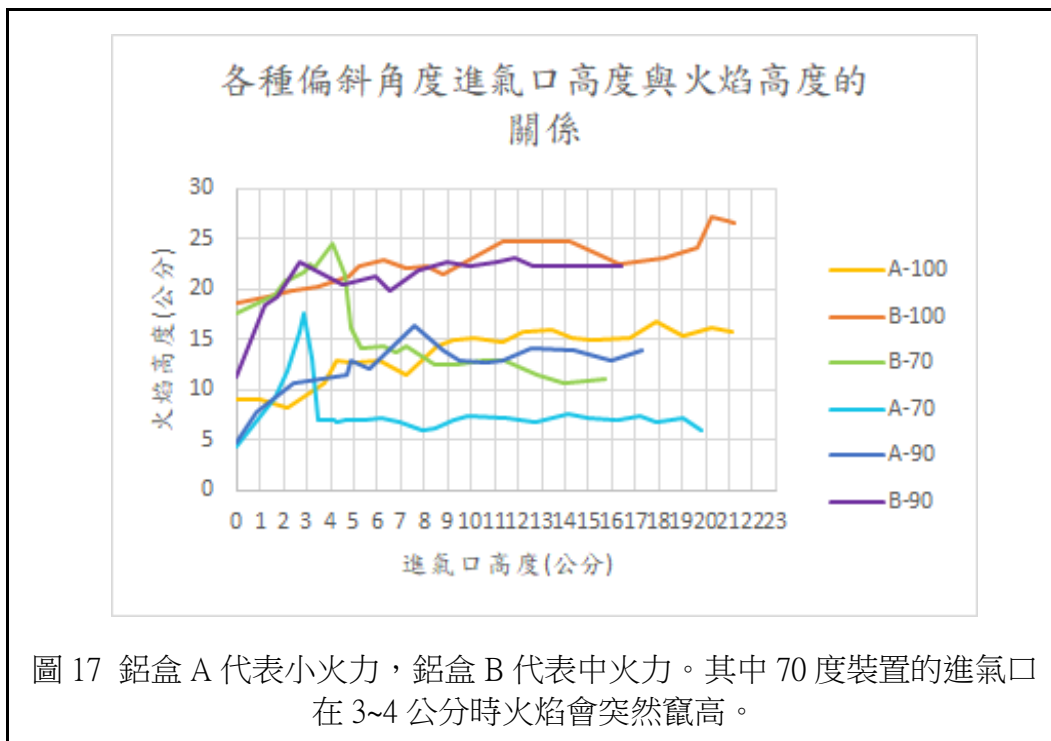
2. 50 度的進氣口最大，氣流進入時直衝火源，沒有旋轉就直接被抬升的可能性也最大。



因為在圖 14 看到 100 度和 90 度的裝置導流板在內圈合圍的狀況最好，使得上升的煙霧不會從裝置內向外逃走，就像一支煙囪。於是我們就想到如果給火龍捲的導流板放進真的煙囪（壓克力管）會不會對火焰的高度有什麼影響呢？

作法：點燃火龍捲裝置內的甲醇燃燒穩定後，緩慢從火龍捲裝置上方套入一個長 30 cm，外徑 10 cm 的壓克力管（火龍捲裝置的內徑 11 cm），如圖 16。套入壓克力管後慢慢降低高度，用手機拍攝整個過程，觀察火焰高度變化，用 tracker 軟體播放此過程，約下降 1.3 cm 就截一張圖，截圖後用 image J 軟體測量高度，找出不同進氣高度對應的火焰高度，盛裝甲醇燃燒的鋁盒使用圖 4 中 A 和 B，所得結果如圖 17 所示。



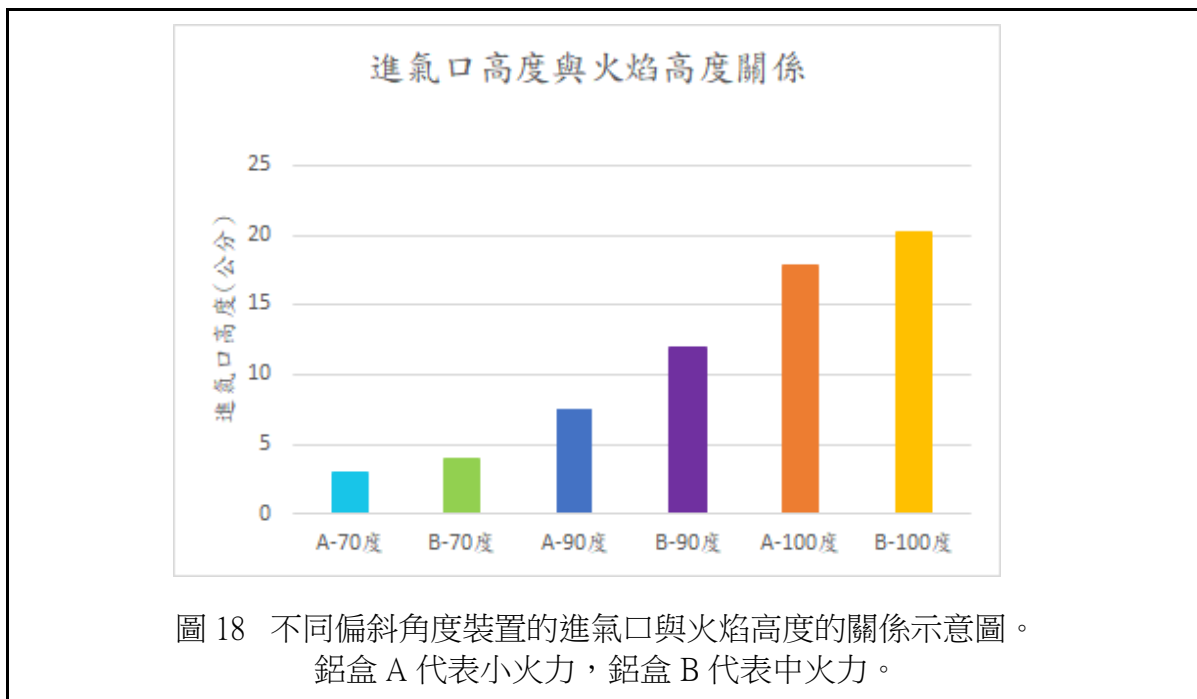


導流板偏斜角度 50 度時，小火力和中火力的火焰高度都不大，而且各種進氣口高度的火焰高度變化不大，所以我們認定 50 度的偏斜裝置不能產生火龍捲，故在上圖中捨棄。

偏斜 100 度的火焰平均高度最大，火焰外觀捲動的也最明顯，但是和 90 度的差異不大，所以我們認定 100 度和 90 度的偏斜裝置能夠產生火龍捲，尤其火力變大時更明顯。

偏斜 70 度的火焰高低變化最明顯，底下留約 3~4 公分進氣口高度時火焰高度突然竄高，很值得探討。

仿照以上結果，整理不同的偏斜角度裝置燃燒結果，整理出當它燃燒最旺盛時的進氣口高度如下圖 18：

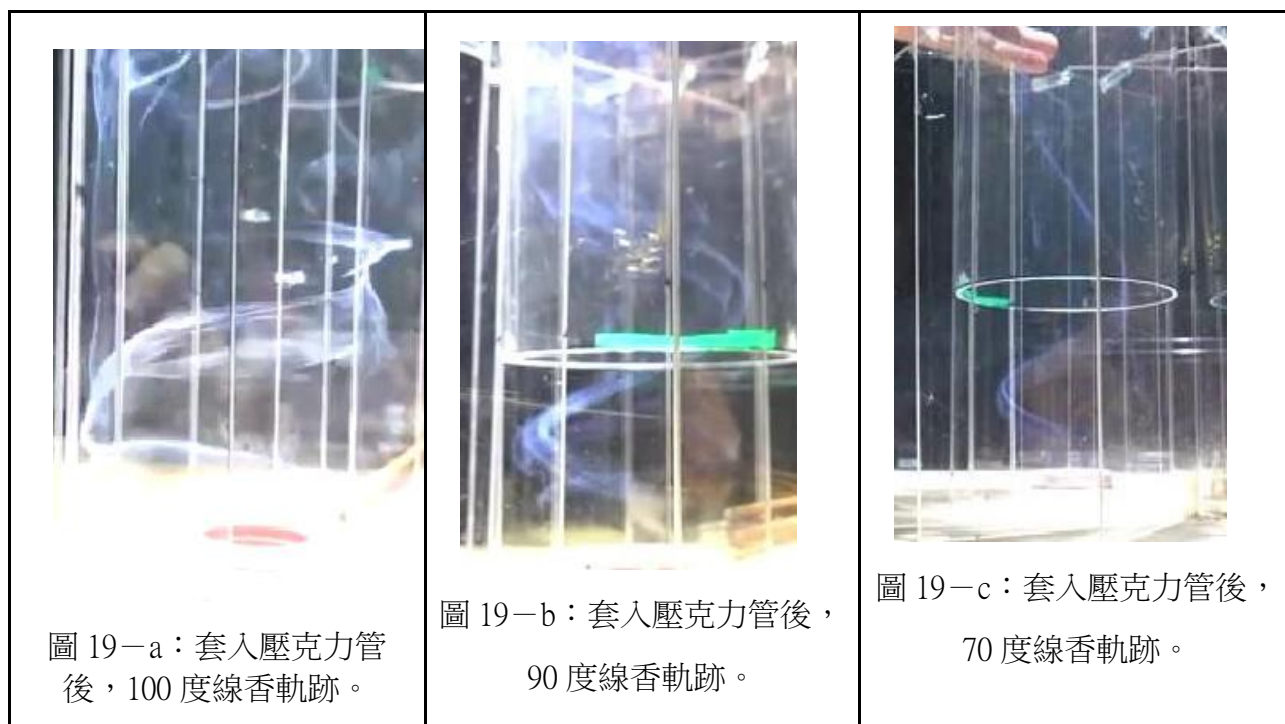


從這個圖可以發現：

1. 導流板的偏斜角度愈大（由圖 15 知進氣口愈狹窄），讓火焰達到最大高度所需的進氣口高度就愈高。
2. 燃燒的火力愈大，所需的進氣口高度也會愈高。

這產生一個疑問，如果以燃燒需要氧氣供應來思考，為何不是把進氣口全開（就是不套入壓克力管）能獲得更充足的氧氣供應？

為了回答這個問題，我們必須先知道套入壓克力管在各自的最佳進氣口高度之後，氣流發生了甚麼改變，所以再觀察線香軌跡，結果如下：

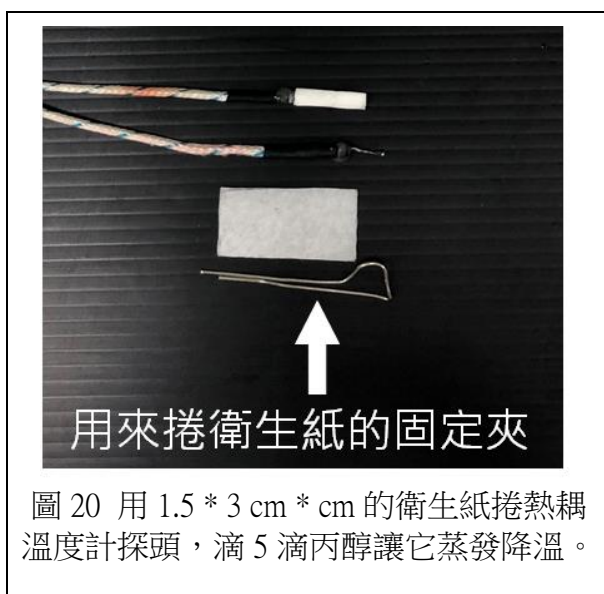


發現線香流入以及轉動的速率都變快，在現場可以觀察到這些改變，且 70 度的裝置中線香旋轉得更大圈也更加明顯。

套入壓克力管後，氣流流入裝置內的流速變快了，所以導致供氧量彌補了回來，且由下方進入的氣流直接吹進底部的火焰附近，氧氣使用率更高使得火焰燃燒得更大。

到底氣流流速變快了多少呢？我們沒有風速計可以放進導流板間進氣口的狹窄空間，但是在測試許多材料之後，找到一個好辦法：

作法：剪 1.5 * 3 cm * cm 衛生紙捲熱耦溫度計探頭（如圖 20），每一次實驗後都換掉衛生紙，放置在裝置的某一個進氣口處，旁邊的壓克力板用鋁箔貼著防止丙醇被火焰的熱輻射加熱，衛生紙上滴上 5 滴丙醇後蒸發降溫。室溫下，自然蒸發會使溫度在約兩分鐘降至 17.2 °C 左右達成熱平衡後再慢慢回溫。如果丙醇蒸發的吸、放熱達平衡的時候開始點燃裝置內火焰，開始由外導入氣流，由於氣流經過進氣口時會讓丙醇蒸發變快，所以溫度會再下降，氣流流入的速度愈快、甲醇蒸發的速率就愈快，溫度下降的幅度就變大。從一開始自然蒸發降溫達平衡（大約 17.2 °C）後在裝置內點火開始，我們記錄溫度再次下降量，當成氣流流速的指標。套入壓克力管限制通道在最適當的高度後測量氣流流速也是用相同的辦法，實驗結果整理成圖 21。



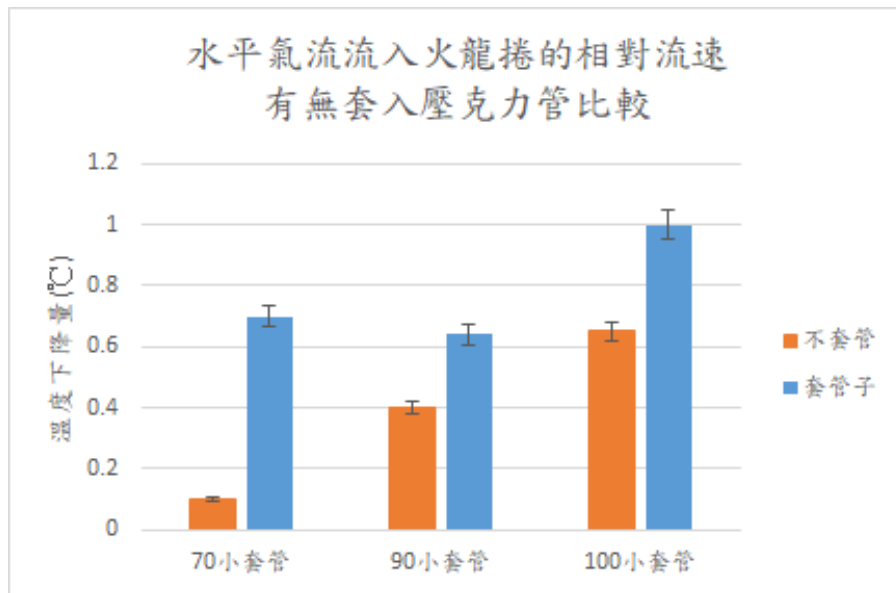


圖 21 比較套入壓克力管前後氣流相對流速，溫度下降量愈大代表氣流流速愈快。

可以看出，因為 70 度偏斜裝置套入壓克力管留下的進氣口高度最小（如圖 18，大約只有 3 公分），如果總進氣量不變，套入壓克力管後氣流流入速度增快的幅度最大。

因為套入壓克力管後只比較了低處流入的氣流速率變化，我們還想知道較高層的氣流產生了甚麼影響？所以我們採用同樣的方法，把 22 公分高的導流板分成低中高三個位置分別測量相對的水平氣流流入速率，測得的結果如圖 22 所示。

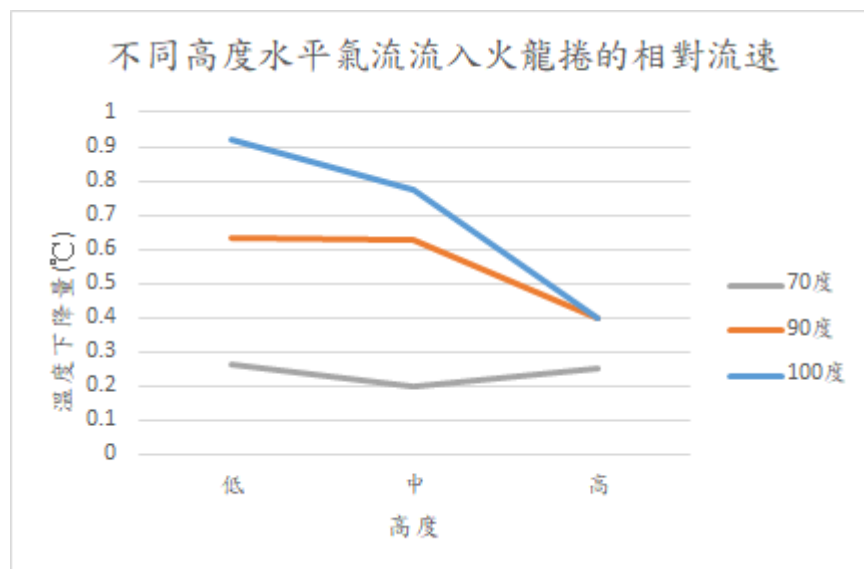


圖 22 各種偏斜角度裝置，分別在低、中、高三層測到的丙醇蒸發導致溫度下降量，溫度下降愈多代表氣流的流速愈快。

因為測量的日期不同，每天蒸發狀況也不會完全一樣，所以降溫幅度會有微小的差異，但同類型相互比較的數據會在同一天完成。

可以看出：1. 低處的水平氣流最快，愈高處氣流流入的速率愈慢，但以火龍捲來說，其實中間的流速也不弱。

2. 100 度裝置的進氣口最窄所以流速也最快。

以燃燒總進氣量不變為前提，我們把上方的水平氣流遮擋後，為了彌補需要的氧氣，下方的氣流流速就要加快，圖 22 中數據的增幅剛好說明了這個推論。但是注意這個重要的前提：「燃燒總進氣量不變」，可是套入壓克力管後，火焰變大，所以進氣總量應該要增加。那麼，遮蔽掉上方的水平氣流除了迫使氣流加速由下方流入之外，還產生甚麼效果？

我們想到的方法是使用 4 個很小的小風扇（長寬都 2.5 cm）每次升高 1 公分，從不同的高度向內吹氣（如圖 23），然後觀察火焰高度的變化，結果呈現在（圖 24），如果火焰高度變高就是幫助，變低就是抑制。

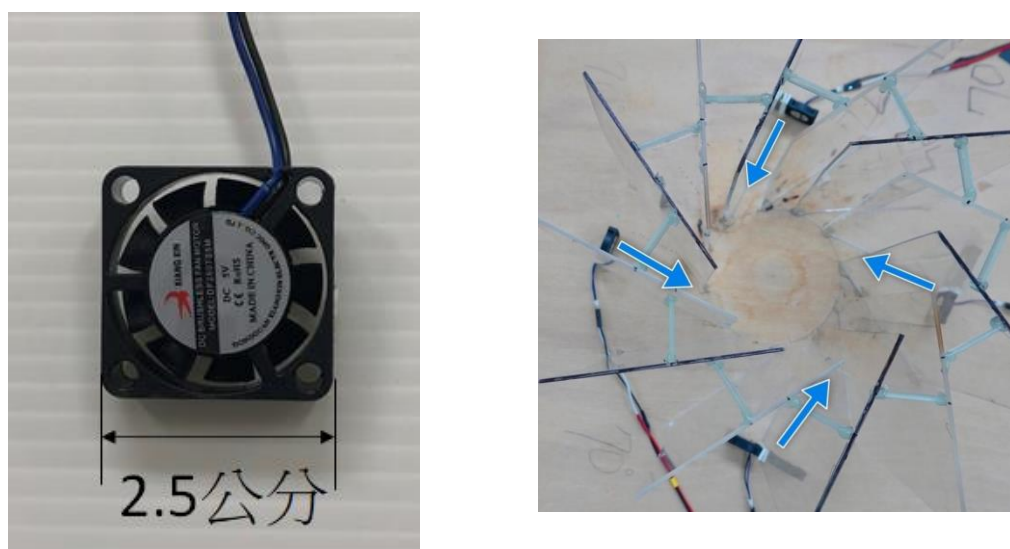
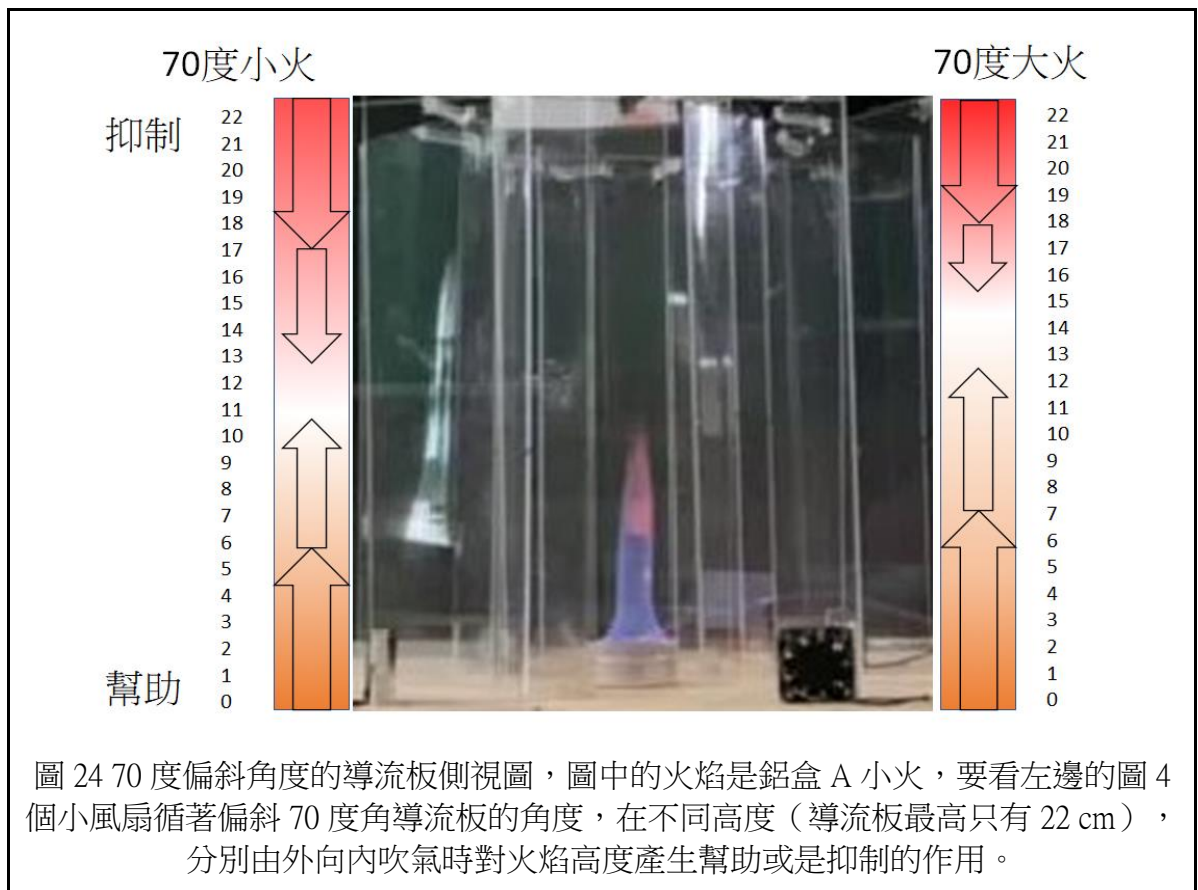


圖 23 70 度偏斜角度的導流板俯視圖。4 個小風扇一起向內吹氣，然後每次上升 1 公分，記錄火焰的高度變化。火焰在圓心處。



可以發現低處吹進來的水平氣流會使火焰變高，高處的水平氣流會有抑制作用，在火苗尖端附近發生轉換，不容易判別。如果火焰高度愈高，能夠幫助火焰上升的氣流就會愈多，產生一個正回饋使火焰竄升更高。從線香的軌跡也能看出，高處流入的氣流並不旋轉，他直接被下方火焰推向上升，所以此氣流會產生一個反作用力把火焰向下壓。在火焰尖端以下的氣流全都有幫助火焰竄高的作用，愈低處流入的氣流對火焰的竄升幫助愈大。所以研究火龍捲產生的條件時，對當時大氣垂直高度上各層的水平氣流流動狀況也要掌握。根據我們的研究結果顯示，一旦地面的火焰周圍有快速的旋轉氣流產生時如果沒有高層氣流，火龍捲就沒有受到抑制的作用。如果沒有中層氣流，那麼氣流將由地面加速流入火焰周圍，則幫助火焰升起的效果最好所以火焰竄起也更高。

實驗五、水平氣流旋轉半徑對對火龍捲燃燒的影響。

因為 100 度的偏斜裝置是把偏斜超過 90 度，圓的割線向外平移到切線的位置，所以 90 度和 100 度兩種裝置，氣流流入的角度都算是沿著切線方向流入，唯一的差別是 100 度的進氣口較狹窄，結果它產生火龍捲的效果比較好（雖說氣體都由切線方向流入，為了區別二者，我們還是說它 100 度）。

為了驗證進氣口寬度和火龍捲的火焰大小的關係，我們把導流板偏斜 90 度的裝置 12 片導流板圍繞的半徑變大 1.4 倍（15.4 cm），所以進氣口寬度也變大 1.4 倍，然後用第 13 頁的方法測量其低中高三個位置的流速，如圖 25 所示，流入火焰周圍的氣流流速真的都變小了。

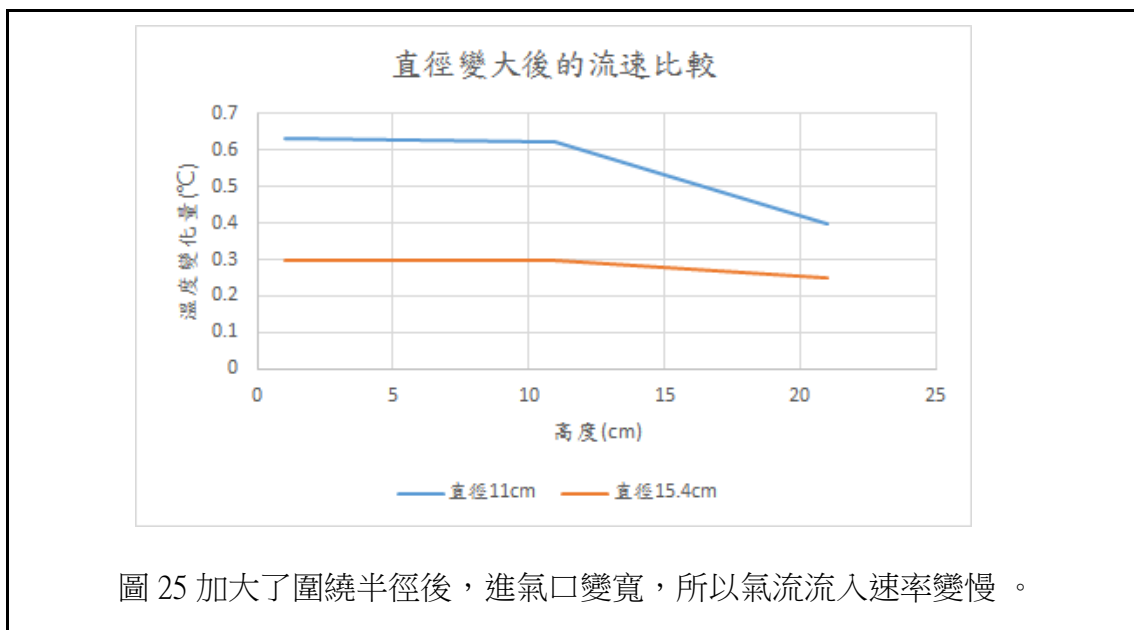


圖 25 加大了圍繞半徑後，進氣口變寬，所以氣流流入速率變慢。

接著再檢驗其燃燒速率(如圖 26)，卻發現它反而燃燒變快了。

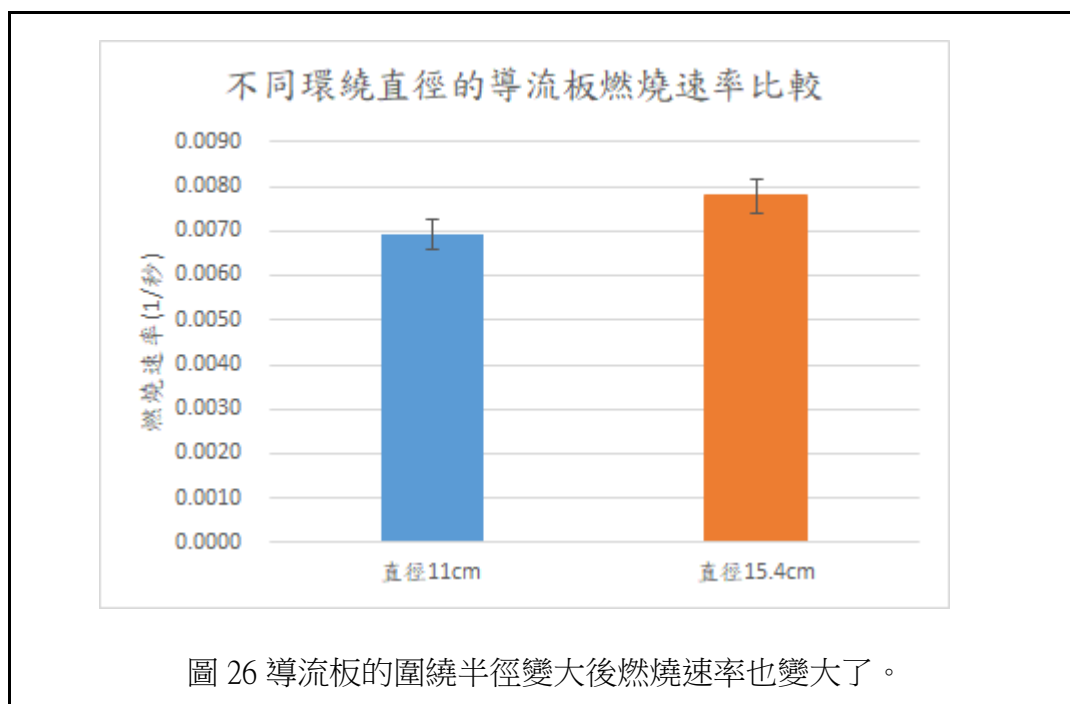
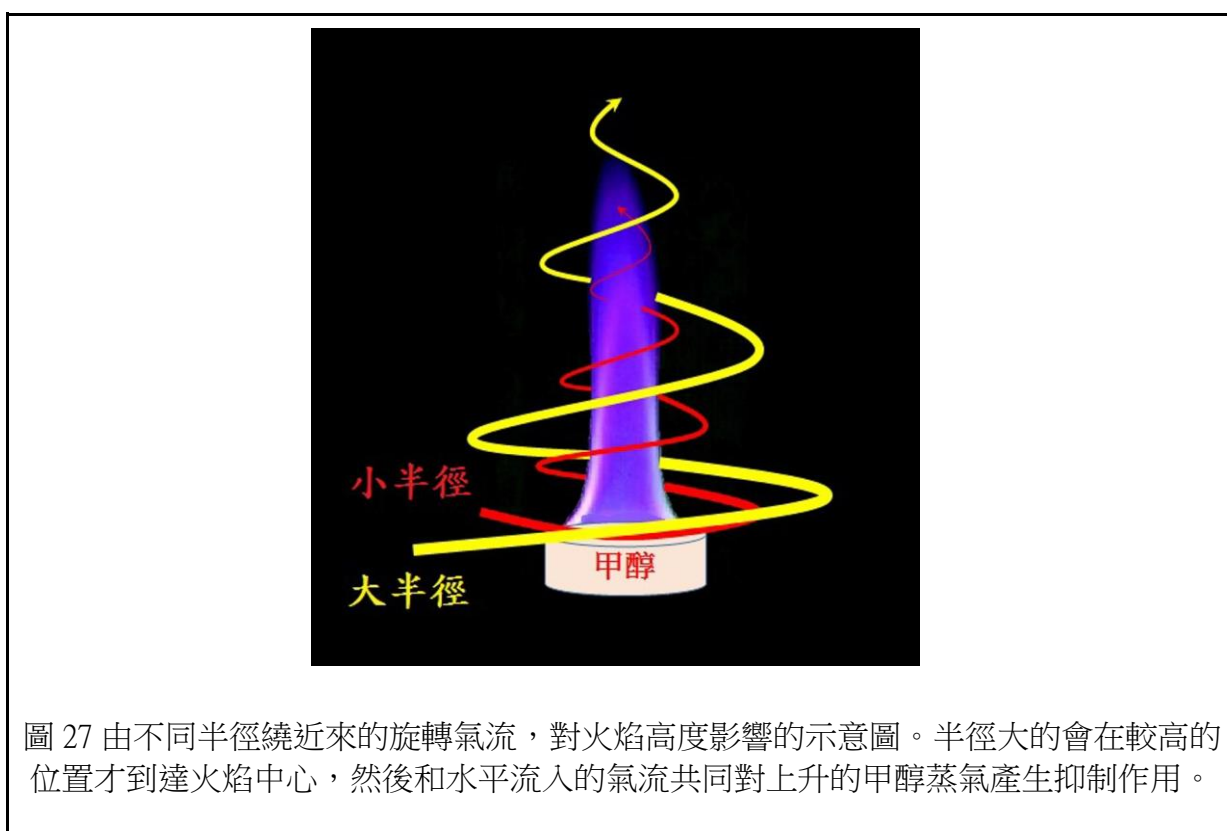


圖 26 導流板的圍繞半徑變大後燃燒速率也變大了。

對這個預測之外的結果，我們觀察到：1.它燃燒的火焰高度變更高。2.由中間高度流入的線香軌跡觀察到它流入後環繞火焰旋轉的效果比較明顯，表示對火龍捲的火焰高度更有幫助。但是這個現象對造成火龍捲的效果比較好是因還是果？目前還很難論斷。目前推測環繞半徑變大導致火焰變高，只能由線香軌跡來猜測：一般氣流從底部流入火焰周圍而盤旋向上時，可能受到較高層氣流流入的擠壓而使環繞半徑變小（套入壓克力管遮蔽掉高層流入氣流時則無此現象），導致較高層的氣流擠在一起影響了可燃物氣體向上升起，所以對火焰產生抑制作用。如下圖 27 所示，實驗的氣流環繞半徑變大後，氣流從較遠處流入，一邊旋轉一邊上升的氣流要流入中心處就要跑更遠且上升到較高的地方才產生抑制作用，於是火焰就可以上升較高造成燃燒速率變大。在我們的實驗情境中，這個說法仍需要中心處燃燒的火力足夠大可以帶動周圍的氣體流入才成立，當我們燃燒的火焰很小的時候，兩種裝置的燃燒速率就沒有可區別的差異。



實驗六、火龍捲燃燒時對甲醇溫度的影響。

因為火龍捲燃燒後盛裝工業酒精（主要是甲醇）的鋁盒內總會殘留一些無法再被點燃的液體，於是我們利用活性碳把添加的紅色色素濾掉之後，把火龍捲燃燒後的殘留物用藍色氯化亞鈷試紙檢測，發現其含有水，檢測結果如圖 28 所示。這是很奇特的現

象，明明火焰很旺盛卻不能把甲醇溶液燒完，反而一般正常燃燒，燃燒後的燃料卻是一滴都不剩。

科學人雜誌猜測造成火龍捲燃料消耗率很高的原因是，火龍捲水平旋轉的強風似乎能把火焰向下推往乙醇表面，使其升溫進而提高乙醇蒸發速率和燃燒速度。不過如果原因是這樣的話，溫度升高所以燃燒後更不可能會有液體殘留。實驗二中也有觀察到用冷水冷卻的甲醇燃燒後鋁盒留有殘留物，所以我們推測兩者留下殘留物的原因都是因為溫度降低導致含有水的殘留。甲醇快速消耗燃料是因為甲醇快速蒸發，因為蒸發是吸熱反應，快速蒸發代表快速吸熱，所以火龍捲燃燒時甲醇液體的溫度反而是比較低的，也因此導致了殘留物不能蒸發。所以我們推測快速消耗燃料的原因並非火焰往下壓，與此相反，我們認為是火龍捲的火焰中心像一個抽氣機快速把氣體向上抽高，導致甲醇液面氣壓降低，於是甲醇快速蒸發而帶走熱量使溫度降低。接下來我們想辦法測量燃燒時的甲醇液體溫度。

作法：將盛裝甲醇的三種大小鋁盒（A、B、C）的蓋子旁邊鑽一個小洞，然後將 K-type 溫度計探頭伸進去，用熱溶膠封好洞並確認溫度計未碰觸鋁盒底部，如圖 29，放入明確產生火龍捲的 90 度裝置中，如圖 30。裝入八分滿的甲醇使其液面高於溫度計，使溫度計能記錄到液體甲醇燃燒中的溫度，用手機記錄燃燒時的甲醇溫度一直到平衡過程，和裝置外的對照組燃燒做比較，製成下圖 30，此圖僅呈現鋁盒 B 的蓋子在 90 度裝置和裝置外部燃燒的比較情形：



圖 28 藍色氯化亞鈷試紙檢驗火龍捲燃燒後留下含水的殘留物。



圖 29 用 K-type 熱耦溫度計測量燃燒中的甲醇溫度。大中小三種火力是分別用鋁盒 C、B、A 的蓋子裝甲醇燃燒。



圖 30 將有 K-type 溫度計的鋁盒放進裝置後裝入八分滿甲醇燃燒。

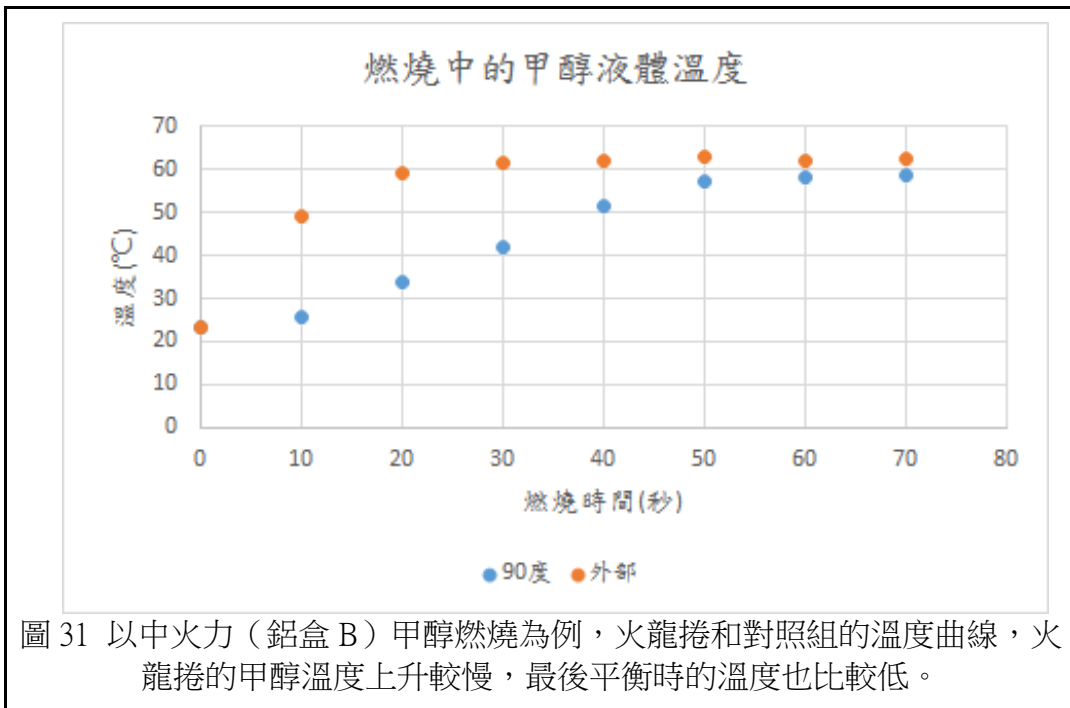


圖 31 以中火力（鋁盒 B）甲醇燃燒為例，火龍捲和對照組的溫度曲線，火龍捲的甲醇溫度上升較慢，最後平衡時的溫度也比較低。

由圖 31 可以看出火龍捲從開始燃燒升溫一直到穩定平衡的過程中，它的甲醇溫度一直比一般正常的燃燒還要低（兩者都不會達到甲醇的沸點 64.7°C）。

火龍捲燃燒達平衡時甲醇的溫度和對照組相比為負值。圖 32 是整理火龍捲燃燒時，和裝置外的對照組相比，甲醇溫度下降的量值。橘色條形圖是一般未套入壓克力管火龍捲燃燒甲醇溫度下降量，藍色長條是從上方套入壓克力管，套入後降到如圖 18 的進氣口高度而使得火焰高度最高時，甲醇的溫度的下降量。

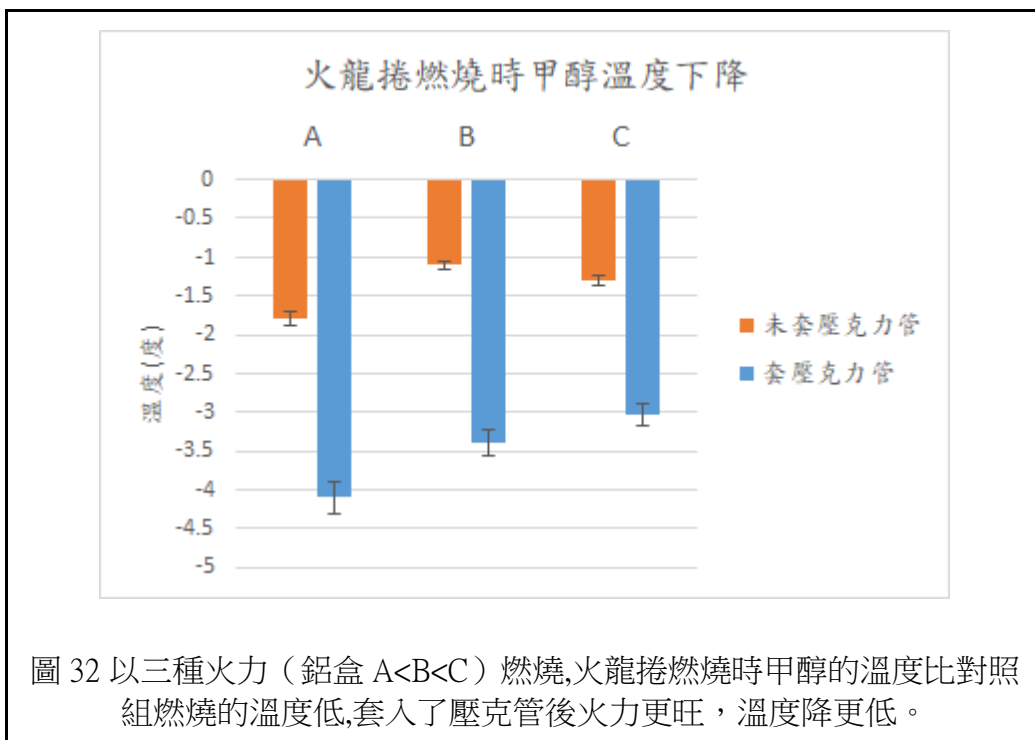


圖 32 以三種火力（鋁盒 A<B<C）燃燒，火龍捲燃燒時甲醇的溫度比對照組燃燒的溫度低，套入了壓克力管後火力更旺，溫度降更低。

- 1.圖 32 橘色長條可以發現，一般火龍捲燃燒時液體的溫度上升達平衡時，甲醇溫度比裝置外的對照組燃燒的溫度低 1~1.7 °C。
- 2.圖 32 藍色長條可以發現，套入壓克力管後，火龍捲燃燒時的甲醇溫度會再下降 2~3°C。說明套入壓克力管後，限制了上方的氣流流入流出火龍捲裝置，並且縮小了下方進氣口的大小，導致氣流流速更快、燃燒更旺盛、甲醇燃燒的溫度會更低。

實驗結果呈現的溫度下降，能充分解釋為何火龍捲燃燒後會有含水的殘留物，但是三種不同火力燃燒降溫的程度並不相同，原因仍不能完全掌握。可能他們的火焰強弱對溫度計的輻射量值不同、氣流上升或流入的強度都不相同，但是也有可能只是溫度計不是同一支。

理論上，氣流流入速度更快導致蒸發量更大，蒸發量變大後火力更強又使得上升氣流更大，回過頭又吸引入更多氣流。這是一個典型的自我反饋系統，但是液體燃燒時有個抑制作用，是甲醇溫度也在這過程中降低而限制了蒸發。所以燃燒液體的狀況不會使系統一再循環下去，總會有個限制。當緩緩向下套入壓克力管後，一方面它限制了上方氣流流入，另一方面它讓下方流入氣流加速，同時增強甲醇的蒸發量而導致溫度降低，但溫度降低會抑制蒸發，所以研究火龍捲不宜以液體燃燒當成熱力來源。在自然情境下，不會有液體的降溫抑制作用，只要環境有上述的配合條件，原本不起眼的火災將迅速轉變成自我回饋的系統，變成致命的火龍捲。

套入壓克力管縮小氣流的通道大小加速了氣流，有三個可能的效果：

1. 由上方縮小了通道口後，若燃燒時每秒向上排出的氣流量固定那麼流入補充的氣流量體積也會固定，如果流體流動的截面積愈小那麼每秒流入的氣流長度就要變大，而且由下方流入的氣流對火焰高度增加幫助較大。
2. 另一個效果是煙囪，封閉的流動管道使氣流受熱向上流動時獲得一個加速通道，使得向上流動變快。
3. 免除了高層水平氣流產生的抑制作用。

以上的說明可以協助建立火龍捲形成時的環境條件，高空中氣流的溫度和水平流動與否也是要列入考慮的，不能只是關注地面附近的旋轉氣流和火力大小。

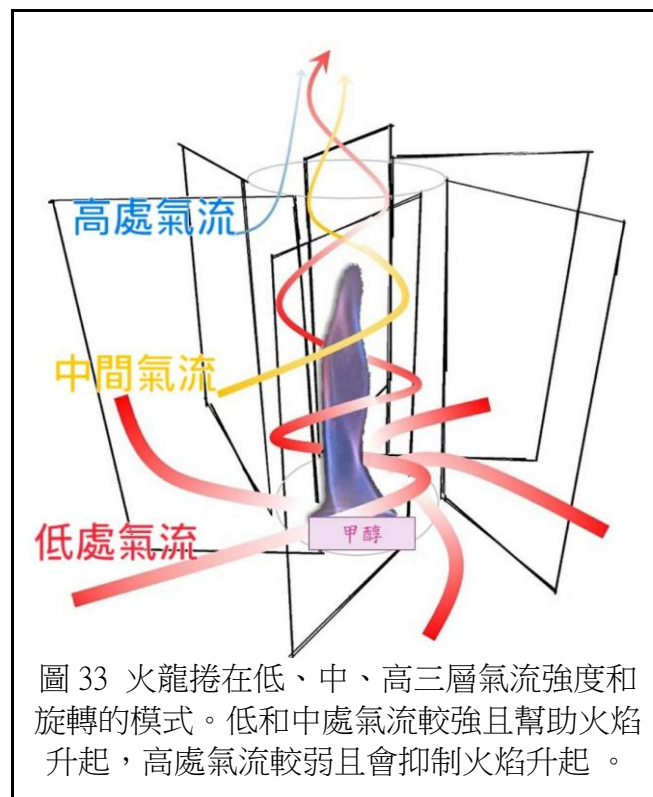
討論：目前的實驗結果說明火龍捲形成的要件：

- 1.環繞火焰的氣流，旋轉角度要夠大，最好和半徑方向垂直。
- 2.環繞火焰的氣流，旋轉流入的速度要大。
- 3.火焰強度要強。
- 4.環繞火焰的氣流，旋轉的半徑要大。

5.最好的情況是沒有高空水平氣流對火焰產生抑制作用，只有平地旋轉的水平氣流，這樣能使燃燒的所有可燃物在騰起的上升氣流穩定地向上加速。

以下說明為何旋轉的水平氣流會使得火焰變大：模式如圖 33。

- 1.水平氣流流入繞著火焰旋轉會把火焰侷限在中心，使得火焰較瘦較細。如果氣流直接流向火焰的話，火焰會直接抬升流入的氣流，不過同時火焰得到一個反作用力被向下壓而變得較為矮胖。
- 2.燃燒的甲醇蒸氣量（火焰的體積）不變的狀況下，較細瘦的火龍捲中心火焰的高度會較高，火焰高度以下旋轉流入能夠幫助火焰升起的氣流會更多，且在火焰中心處的甲醇蒸氣得到一個較長的向上加速通道，所以甲醇蒸氣從中心處向上抬升會被加速。
- 3.加速向上離開的甲醇蒸氣使得中心處的氣壓下降，導致火焰內外壓力差更大而有更多氣體由外向內推入。
- 4.氣體加速被推入等於更多氧氣供應使得火焰變大，且由於流速加大使得旋轉效果更好，於是回到步驟 1.使得火焰更瘦更高的自我回饋循環。

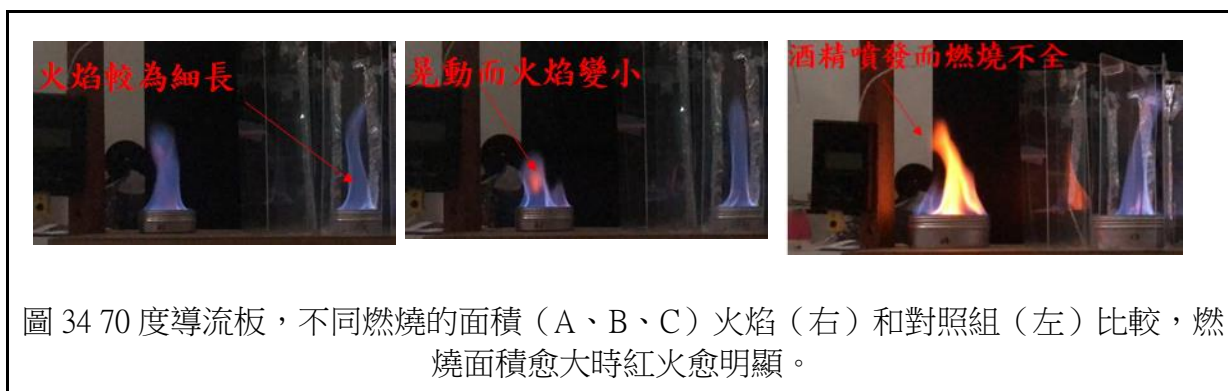


這個模型解釋了：

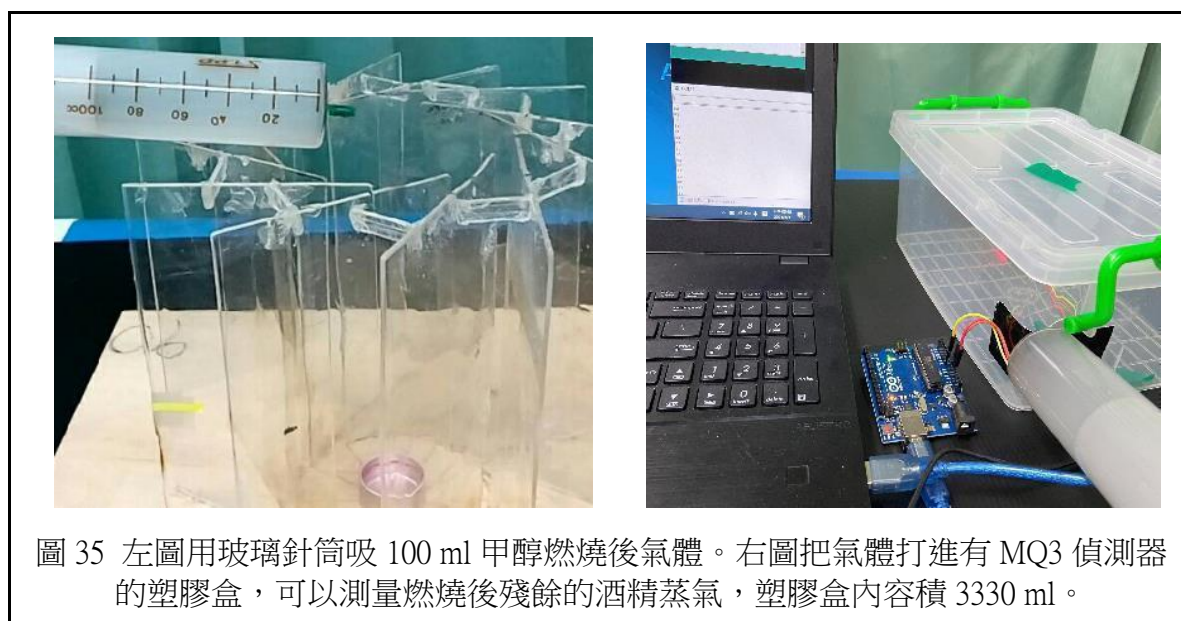
- 1.火龍捲燃燒時甲醇溫度降低，火焰升得愈高，代表液體蒸發愈快，甲醇的溫度就愈低。
- 2.火焰升起得愈高，流入的氣流愈快。

實驗七、探討火龍捲裝置的實用性和功效。

我們操作以上實驗改變燃燒面積（火力強弱）時，發現火力愈強時對照組產生的紅火現象愈明顯，（如圖 34）所示。放入導流板裝置的燃燒就比較沒有紅色火焰，如果紅色火焰代表燃燒較不完全，可能會有燃料（甲醇蒸氣）沒有燒完而浪費，所以我們猜測不同偏斜裝置燃燒後的甲醇蒸氣會不會有所不同？



作法：如圖 35，用玻璃注射筒在裝置頂端中央吸取 100 ml 的燃燒後的空氣，然後打進裝有 MQ3 酒精偵測器（原名照登）的塑膠盒去偵測燃燒後的甲醇蒸氣殘餘量。MQ3 可搭配 arduino 使用，有自由程式可供下載。塑膠盒中飽和甲醇蒸氣測得數值為 817，正常的空氣數值 54，此數值只是呈現相對大小，不能呈現任何實際單位。



測得的結果如圖 36：

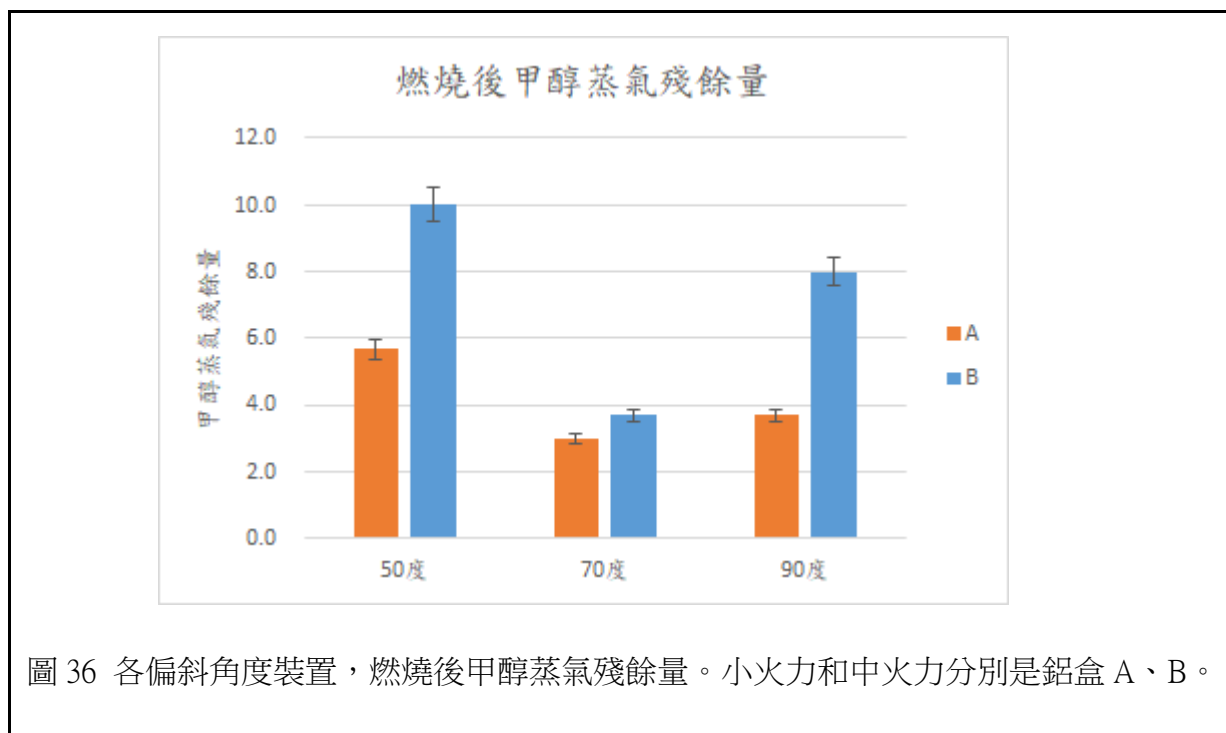


圖 36 各偏斜角度裝置，燃燒後甲醇蒸氣殘餘量。小火力和中火力分別是鋁盒 A、B。

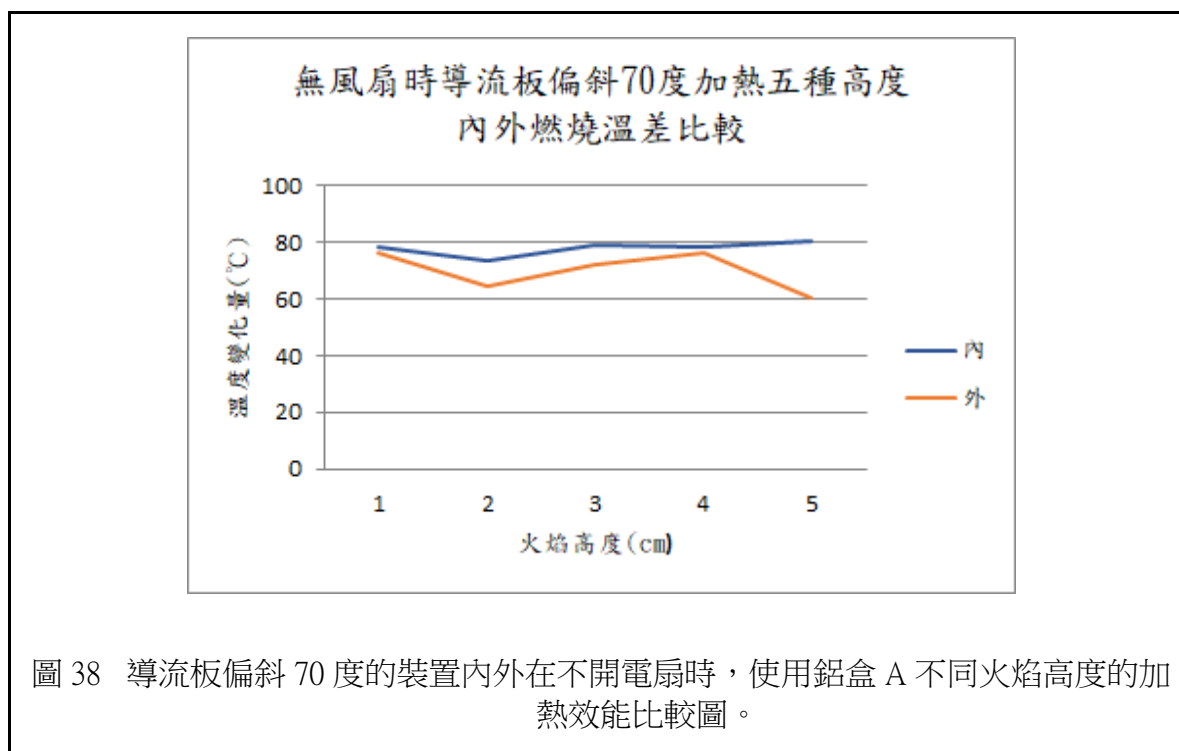
1. 由上圖 36 可以發現，燃燒火力較大時殘留的甲醇蒸氣比較多，且三種偏斜裝置中，50 度的甲醇蒸氣殘留最多，90 次之，70 最少。
2. 推測原因是 50 度在燃燒時並不穩定，會快速的跳動，將甲醇蒸氣拋出。90 度則是因為有火龍捲在快速上升，火焰竄得比較高，但進氣量不足，因此燃燒不完全。而 70 度是最穩定的，進氣量和甲醇蒸發速率搭配比例最佳，火焰的顏色是這三個中最藍的，所以燃燒也最完全，因此燃燒後的甲醇蒸氣殘留量最低。燃燒後甲醇蒸氣的殘留量不同，代表他們對燃料的使用率也不同，是否也會使得他們用來對水加熱時效果也因此不同呢？

我們從查閱的資料知道火焰的內外部溫度是不一樣的，一般來說內焰溫度比較高(我們吸取火焰內部的蒸氣，測量其甲醇蒸氣殘餘量高達 200 以上，可能是火焰內部沒有接觸到氧氣，所以還沒燃燒)我們想知道被加熱的杯子底部距離火焰底部的高度不同，對被加熱的水溫變化產生甚麼影響？

作法：考量到裝水鋁杯的適當容量，我們以鋁杯裝 45 CC 的水，以下簡稱水杯，分別放到裝置內外加熱，壓克力板徑向偏斜 70 度為例，水杯杯底分別距離裝甲醇鋁盒上緣 1、2、3、4、5 公分，裝置如圖 37，測量水溫的熱耦溫度計探頭用塑膠管圍住，避免量到了金屬水杯的溫度，下方的鋁盒裝 2 公克甲醇，點火燃燒並攝影，

火焰熄滅後記錄燃燒時間和水溫變化量，另啟動教室內吊扇模擬環境中風的流動對加熱產生的影響。實驗進行 8 次，每 4 次交換溫度計，並求取平均值。實驗結果整理成圖 38、39。

實驗結果如下：



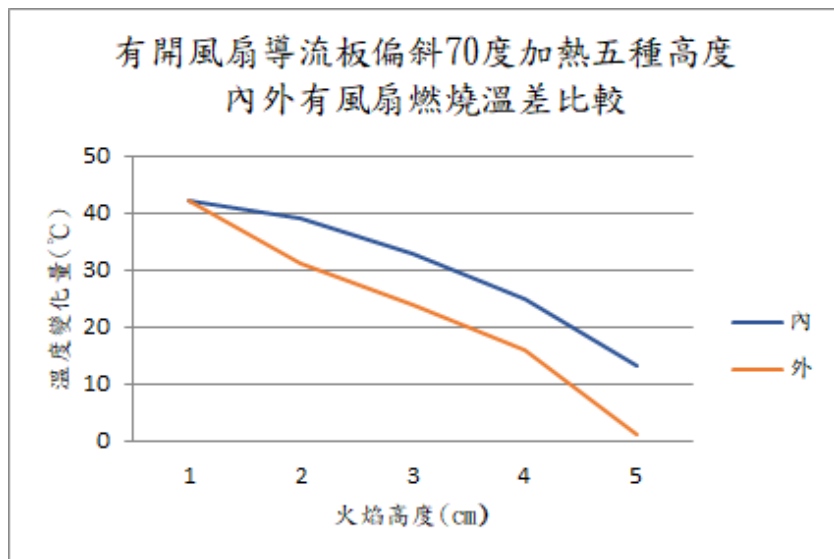
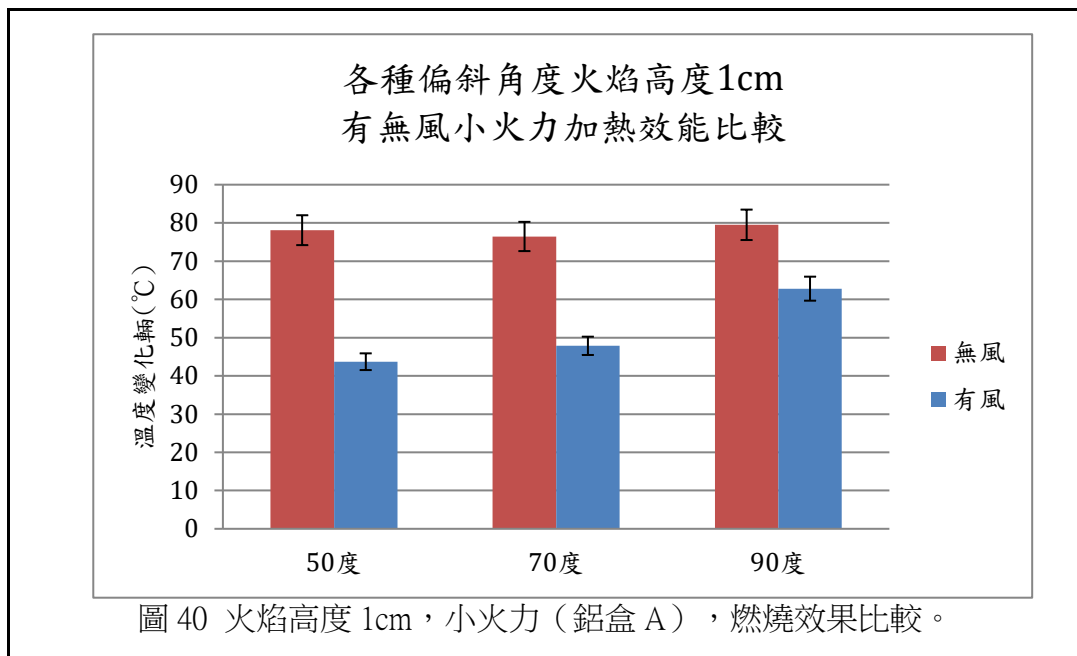


圖 39 導流板偏斜 70 度小火力（鋁盒 A）在開電扇時，不同火焰高度的加熱效能比較圖。

- 1.根據上面兩張圖我們可以發現在未開電風扇的情況下內部 1 公分的燃燒效能是最佳的，接下來效能隨高度增加略為遞減。
- 2.可以發現在無風扇的情況下，外部的加熱效能並無規律，這說明藉由甲醇蒸氣燃燒進行加熱的效果非常容易受外界環境影響，開了風扇的情況下影響更明顯。
- 3.不論有沒有開風扇，火龍捲裝置的加熱效能受高度增加的影響比較小。

以上的加熱實驗說明，火焰距離杯底的距離大約 1 或 2 公分，加熱效果最好。這個結果和資料呈現的外焰溫度較高，沒有明顯的關聯性。我們的看法是，甲醇蒸氣和火焰會包圍杯底及四周，杯底如果愈靠近甲醇，火焰蒸氣上升時對杯底的包覆效果最好，尤其是沒有風的時候。



從圖 40 結果實在看不出燃料的殘留量和加熱效果有甚麼關聯。偏斜 90 度的加熱效果稍微好一點，尤其是有風的時候差別更大。但是這結果和火龍捲無關，因為火焰上升 1 公分就碰到杯底，根本沒有龍捲的效果，實驗結果和火焰包覆鋁杯的程度有關。外界氣流很不容易直接吹到 90 度的裝置裡的火焰，所以干擾最少，進氣口最夾窄並沒有降低它的加熱效果。

中火力（鋁盒 B）的加熱效果又如何呢？因為火焰更大時，環境中有風會吹歪火焰使得四周的壓克力板燒起來，於是我們只做無風的比較。結果呈現在（圖 41）

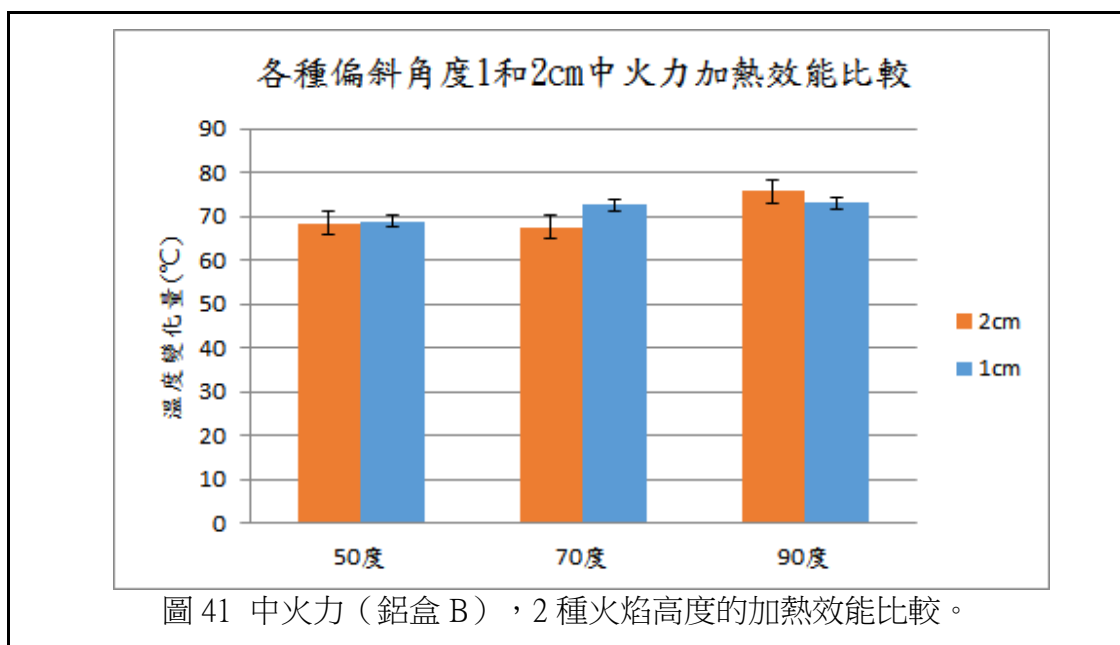


圖 41 對於兩種火焰高度還是呈現不出多大的差別，也就是說，以此方式加熱的時候杯底稍微靠近火源即可。但是比較圖 40 和圖 41，還是可以看出 90 度的裝置加熱效果最好，且燃燒等量的燃料時各裝置的小火力比中火力溫度上升較多，可以差到 10 度。

這可以說明，當裝置內溫度很高時，熱量較容易在未被使用的狀況下流向裝置外而逸散，90 度裝置在（圖 14）的線香煙霧觀察時，煙霧沒有從裝置內向外逸出，所以更能保住熱量。

在以上實驗觀察到的藍色火焰能包覆住杯底，但是學校的加熱實驗都隔著陶瓷纖維網對燒杯加熱，火焰不會包覆杯底。接下來也試著模擬在學校實驗室真正加熱方法，裝上了陶瓷纖維網來加熱。

作法：將陶瓷纖維網裁剪成適當大小（7*7）後放在水杯的下面加熱，其餘加熱程序同上，因為不同角度的加熱裝置效能不會差別太多，我們使用偏斜 70 度的裝置進行實驗。實驗裝置如圖 42，觀察加熱裝置和對照組的表現。結果呈現在圖 43。



圖 42 隔著陶瓷纖維網加熱的裝置。

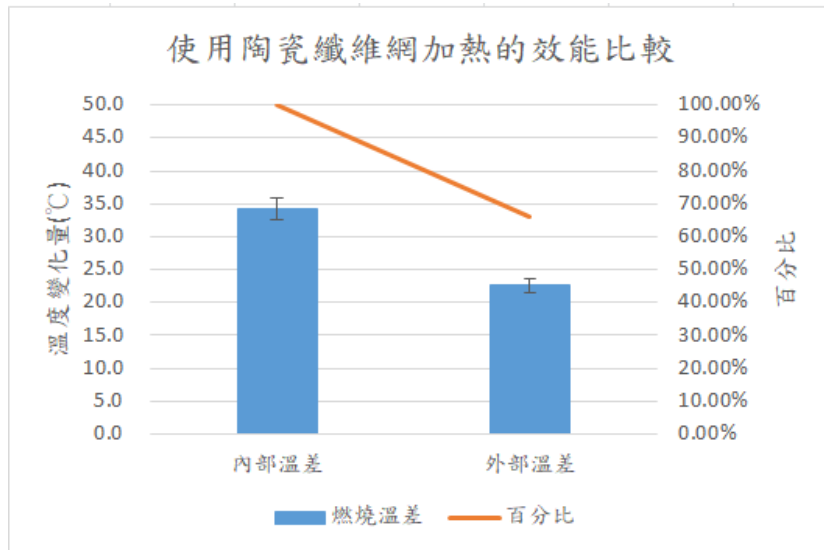


圖 43 70 度的裝置，小火力（鋁盒 A），無風，火焰高度 1 公分隔著陶瓷纖維網加熱。

隔了一層陶瓷纖維網之後加熱效能明顯下降，圖 40 和圖 43 相比，70 度的加熱裝置溫度上升量不到原先的一半。雖然陶瓷纖維網沒有在實驗前先預熱，我們是否應該思考為了受熱均勻而大幅犧牲加熱效能的合理性，有沒有別的替代方法可用？

裝置內部的溫差百分比增加了，這說明當加熱效能不彰時，導流板裝置仍然能有效地把熱量鎖住，使得加熱效能還是比對照組高出 35%。

陸、結論

1. 火焰燃燒與甲醇液體溫度的關係：在我們控制燃燒液體溫度時，溫度越低火焰越小，但是火龍捲燃燒時，火焰越大時甲醇的液體溫度越低。
2. 導流板偏斜角度造成的影響：火龍捲裝置導流板偏斜角度越大、導流板之間的縫隙就越小，因此氣流流入速度最快，產生火龍捲的效果愈好。偏斜最大的導流板（偏斜 90 度）本來就能夠產生火龍捲，氣流流入火焰中是以切線方向流入，旋轉角度最大。偏斜 70 度的導流板本來產生的只是普通火焰，但是如果從底部加速了氣流且限制上方氣流不水平流動，也能產生火龍捲，應該預防這種轉變。
3. 不同高度流入的氣流：從高度愈低處流入的氣流速率愈快。高度在火苗以下流入火龍捲的氣流都會對火焰高度產生幫助的作用，愈低處流入的氣流幫產生的幫助愈大，火苗以上流入的氣流則會產生抑制作用。
4. 火焰周圍氣流旋轉半徑：如果火焰燃燒時能夠帶動周圍氣流，則氣流環繞火龍捲旋轉的半徑大，造成的火龍捲效果比較好。

5. 火龍捲跟對照組燃燒時甲醇液體的降溫差異：對照組的甲醇燃燒時液體溫度從室溫上升至 62.4 °C 左右，以火龍捲的狀態燃燒時溫度從室溫上升至 61.2 °C 左右，兩者皆比甲醇的沸點 64.7 °C 還要低，如果加速了從底部流入的氣流，火龍捲的火焰竄升更高，甲醇溫度也會再降大約 2 °C。
6. 推測野外的火龍捲形成模型：實驗情境中，甲醇燃燒，溫度降低會產生一個拮抗作用，抑制甲醇蒸氣蒸發，所以火焰的高度不會竄升得非常高。但是野外火龍捲形成時，就沒有這種拮抗作用。旋轉氣流使火焰變得瘦長，於是形成更長的熱氣上升加速道，使可燃物上升更快，於是火焰中心的氣體快速上升，造成中心處氣壓降低，於是內外壓力差更大而帶動低處更多空氣旋轉流入，一直循環。
7. 燃料的使用率和對冷水的加熱效能：使用各種偏斜角度的導流板裝置燃燒都會有甲醇蒸氣殘留。其中以偏斜 70 度的裝置殘留最少，燃料使用率最高。50 度、70 度、90 度的三種導流板，在無風的狀態下，杯底距離火焰底部近時，加熱效果比較好但是和對照組相差不多；杯底距離火焰底部遠時，火龍捲的加熱效能就能明顯的比對照組好。有風的狀態時，火龍捲的加熱效能普遍都高於對照組。
8. 陶瓷纖維網的影響：加熱時使用陶瓷纖維網的目的是為了加熱均勻，以鋁杯裝水來受熱的狀況下，加了陶瓷纖維網之後，即使它的加熱效能剩下不到原來的一半，但是如果使用導流板裝置，它的加熱效能還是比對照組高出 35%。

柒、參考資料及其他

1. <https://sakb.ylib.com/article/202003.9494> 福瑟佛（2020）·火焰火龍捲·科學人期刊，75
2. <https://www.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?cat=86&a=6821&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=1&sid=13626> 陳亭儒、林玟蕙、黃翊(2017)·風力罩得住酷旋發電機·第 57 屆科展國中生活與應用科學科
3. <https://kknews.cc/news/qvg89er.html> 每日頭條(2018 年 12 月 18 日)·現實版的火焰龍捲風來襲~
4. <https://www.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?cat=50&a=6821&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=6&sid=12593> 楊炫儒、李冠廷、蕭敦輔(2015)·轟！火龍出沒！·第 55 屆科展高中物理組
5. <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%85%92%E7%B2%BE%E7%81%AF> 維基百科·酒精燈
6. 翰林出版，109 學年度八上自然課本 5—5 吸熱/放熱反應

【評語】 030119

本作品實驗設計相當細緻，也得到相當好的數據與分析。是一件好的科展作品。

作品簡報

火龍升起

探討 火龍捲 的特性

組別：國中組

科別：物理科

編號：030119

動 機

我們從科學人2020/3月號雜誌探討火焰龍捲風文章中，了解到火龍捲的破壞力，聯想到是否能對火龍捲有更多了解，所以我們就開始自製火龍捲裝置，期望可以把燃燒旺盛的災害轉成應用它的優點。

探 究 文 獻

● 用風扇驅動：

科學人217期文章中，採用在火焰四周加裝風扇，朝單一方向驅動氣流使之旋轉，但是額外使用了電能驅動氣流，因此不是一個便宜有效的方法。

● 錯開的2個半圓筒：

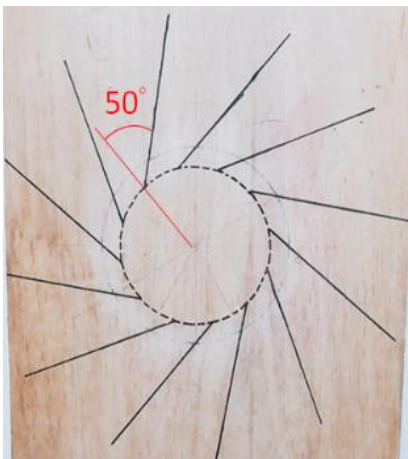
網路上，把一個透明的大玻璃筒縱向剖半，稍微平行錯開2個半圓筒，但是進氣口只有2個，所以燃燒所需要的氧氣供應不夠，產生不完全燃燒使得燃燒火焰顏色偏紅。

● 旋轉的金屬網：

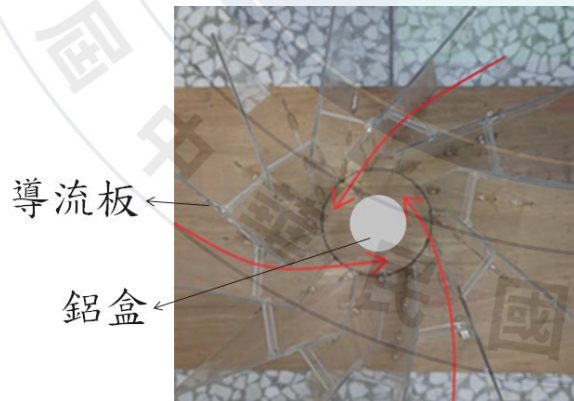
55屆科展，電動馬達使金屬網旋轉以帶動四周空氣旋轉，仍額外耗能且裝置複雜，不利應用。

改 良 方 法

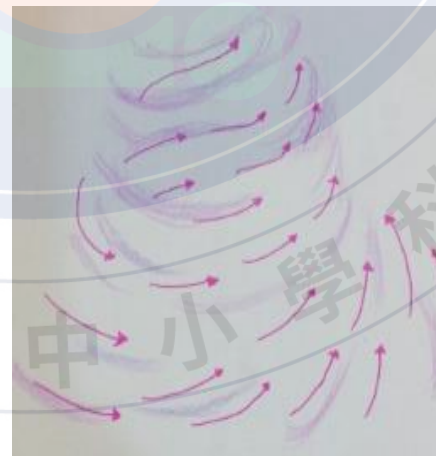
裝置設計圖



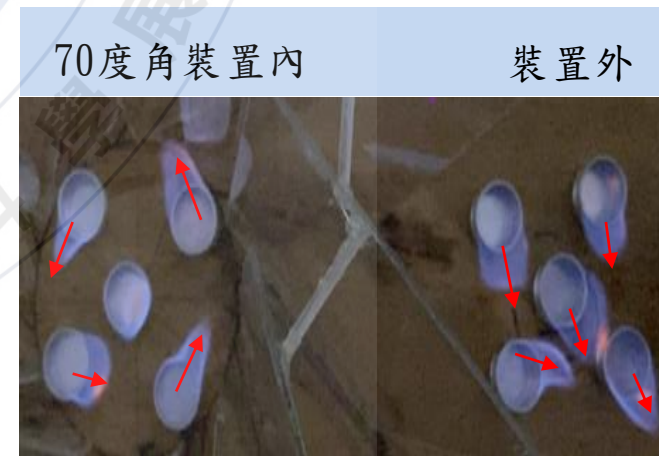
火龍捲裝置俯視圖



期望造成的氣流



實際造成的效果



目的

一. 測試自製導流板的燃燒速率並探討影響實驗的因素

二. 燃燒面積、進氣角度對火龍捲燃燒的影響

三. 氣流旋轉半徑對火龍捲燃燒的影響

四. 火龍捲燃燒時對甲醇溫度的影響

五. 火龍捲裝置的應用

結果與討論

實驗一

**自製導流板的燃燒速率

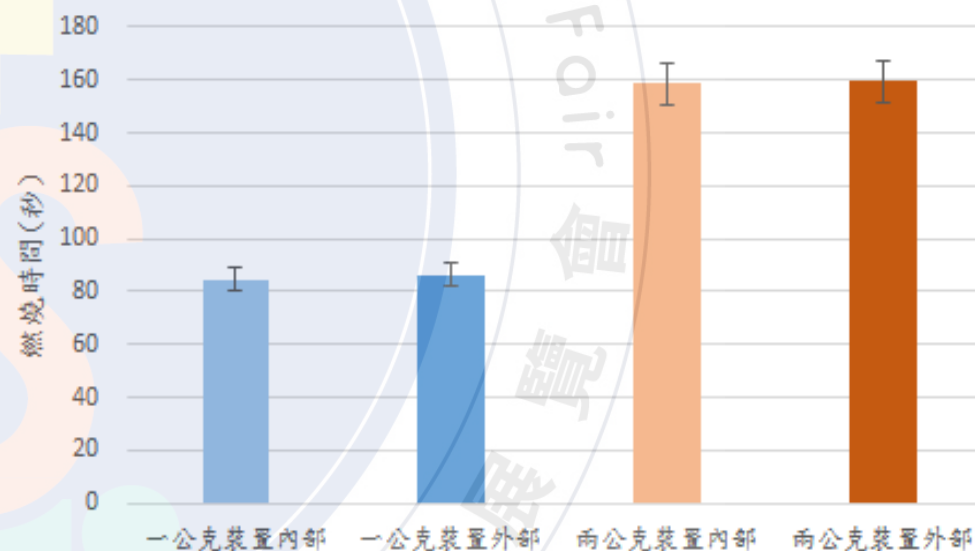
控制變因 鋁盒大小、導流板角度70度、甲醇的量。

操作變因 鋁盒放置的位置（裝置內、外）。

結果
→ 本實驗鋁盒產生的火力小，此裝置能使火焰旋轉，但不能加速燃燒。
→ 對照組的鋁盒周圍產生較多無序噴發。

延伸探討
無序噴發是否加速了它的燃燒速率而產生對照組與實驗組燃燒狀態無差異的錯覺？

內外各一個一公克和兩公克燃燒時間的比較

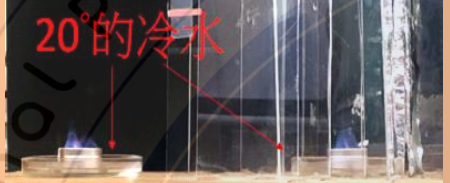


鋁盒

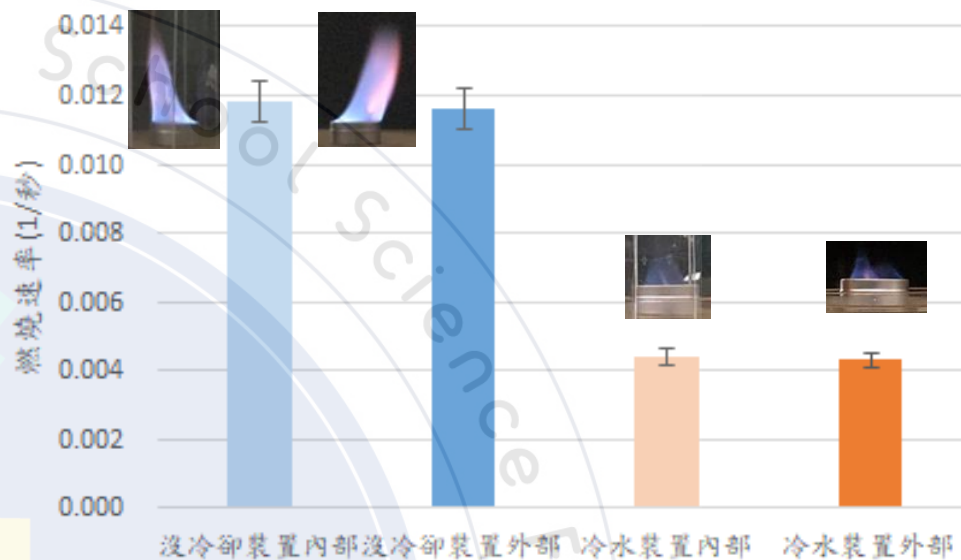


無序噴發的火焰

**無序噴發是否影響燃燒速率

控制變因	鋁盒大小、導流板角度70度、燃料甲醇的量。
操作變因	鋁盒有無放置在裝水培養皿內冷卻、鋁盒放置的位置（導流板裝置內、外）。 
結果	→無序噴發不影響燃燒速率。 →冷卻後的甲醇燃燒更慢。

有無冷卻的燃燒速率比較

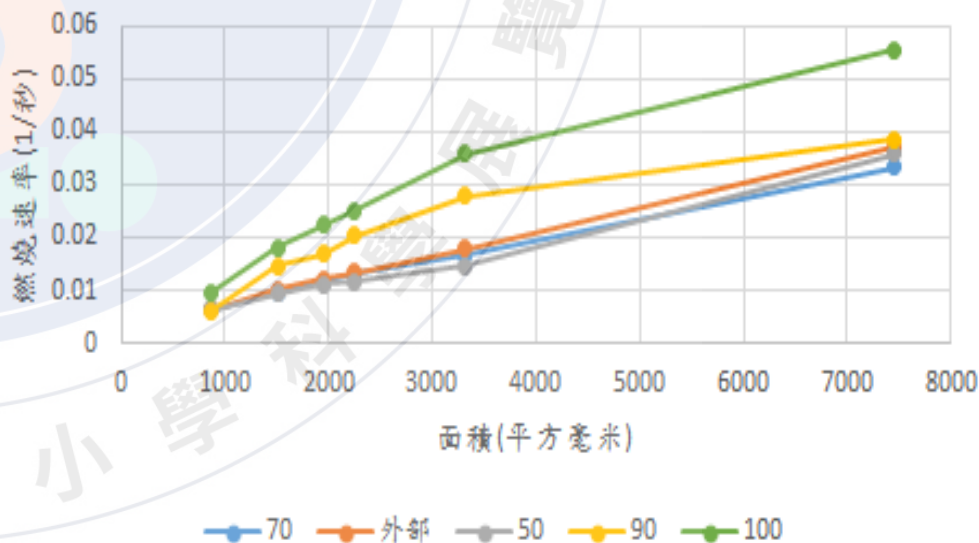


實驗二

**不同燃燒面積和進氣角度對火龍捲燃燒的影響

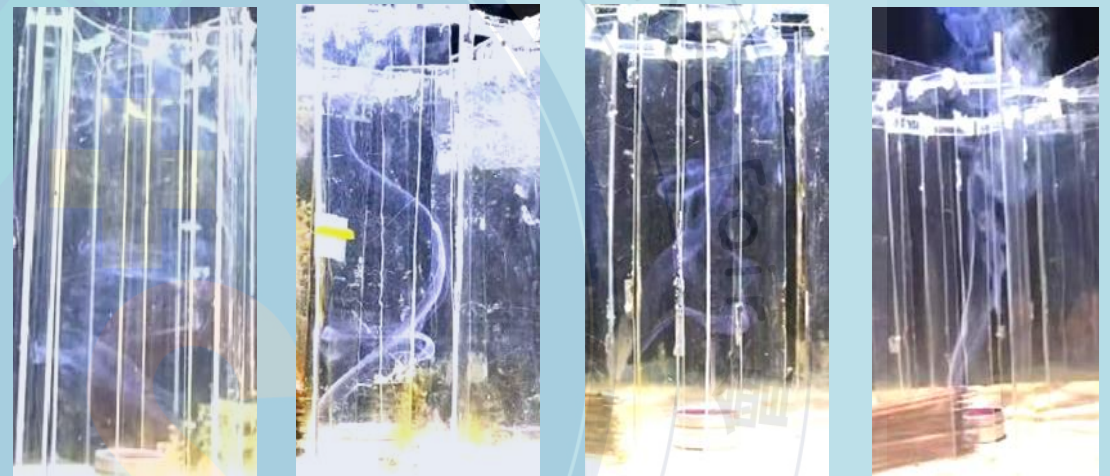
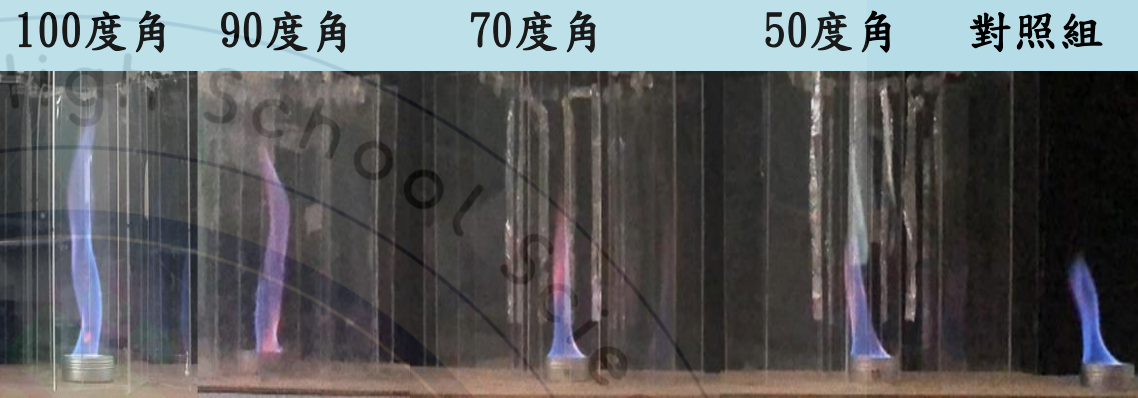
控制變因	甲醇的量 (2g)、鋁盒高度。
操作變因	鋁盒大小、導流板角度。 
結果	→燃燒的表面積愈大其燃燒速率愈快。 →90度與100度的燃燒速率偏離正比的曲線，可視為火龍捲。 →偏斜角度100度和90度的裝置，氣流都是從切線方向引入裝置內。

導流板偏斜50、70、90、100度和外部六種蒸發面積燃燒速率比較



**不同偏斜裝置產生的變化

控制變因	甲醇的量 (2g)、鋁盒B。
操作變因	導流板角度、 燃燒材料 (甲醇、線香)。
結果	<ul style="list-style-type: none"> → 偏斜角100度的裝置，火焰最大，燃燒速率最快。 → 偏斜角100度的氣流旋轉效果最明顯，目視線香煙霧流速最快。

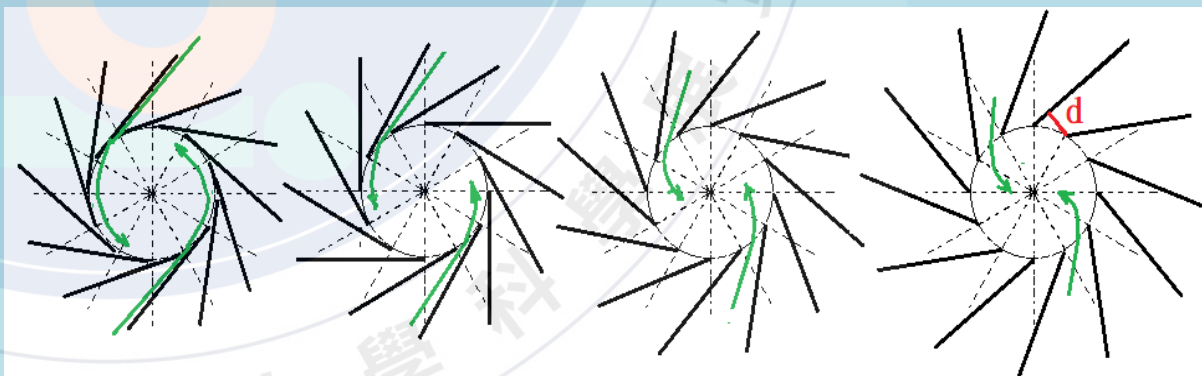


100度角

90度角

70度角

50度角



偏斜角度 100度

90度

70度

50度

進氣狹縫
寬度d(cm)

0.25

0.73

1.63

2.33

**不同偏斜裝置的俯視圖及模擬氣流路徑

控制變因	甲醇的量 (2g)、鋁盒B。
操作變因	導流板角度。
結果	<ul style="list-style-type: none"> → 100度的裝置進氣口最窄 → 若進氣量相同，100度的裝置其氣流流速最快。 → 100度的裝置其氣流旋轉半徑最大。

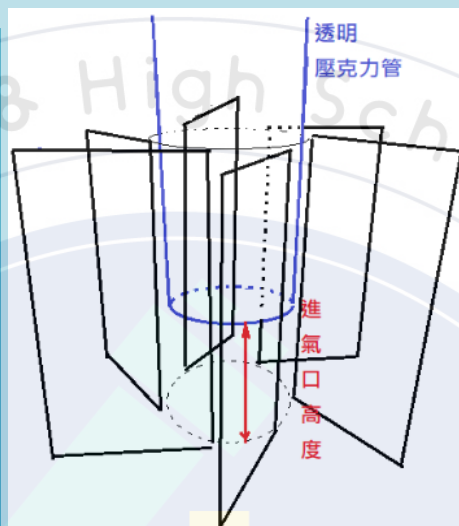
延伸探討 導流板100度時排列最緊密，像是煙囪，若將不同偏斜角度裝置套入壓克力管，其影響？

**不同偏斜裝置套入壓克力管的變化

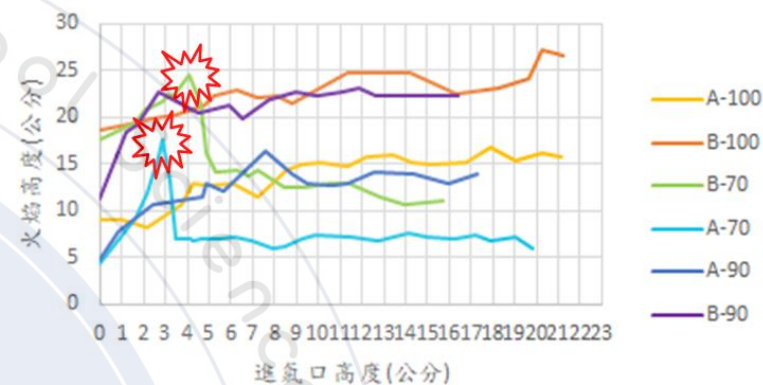
控制變因 甲醇的量 (2g)、鋁盒A。

操作變因 →不同導流板角度。
→套入壓克力管不同高度。

結果 →70度的裝置在進氣口高度3~4公分處火焰明顯的竄升。
→進氣口愈狹窄，達到最大火焰所需的進氣高度愈大。



各種偏斜角度進氣口高度與火焰高度的關係



**套入壓克力管之氣流路徑及速率

控制變因 甲醇的量 (2g)、鋁盒A。

操作變因 導流板角度。

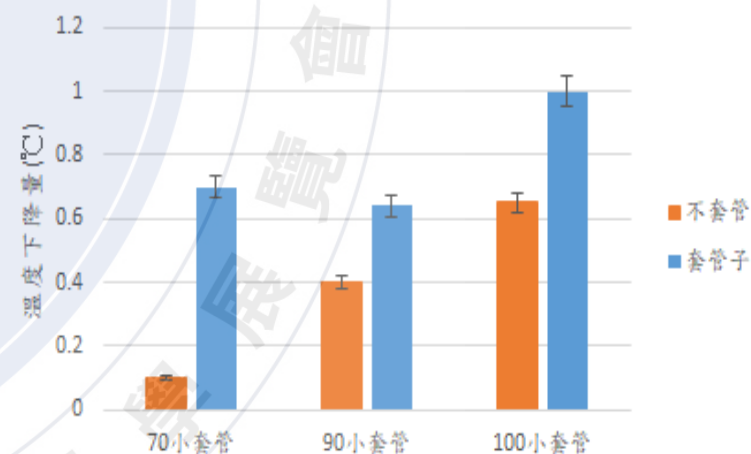
結果 →氣流旋轉效果更明顯。
→氣流流入速率更快。

延伸探討 與氣流流入的速率有關?



100度角 90度角 70度角

水平氣流流入火龍捲的相對流速
有無套入壓克力管比較



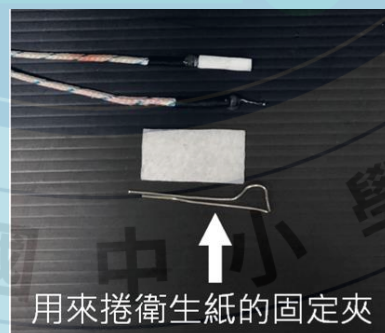
**套入壓克力管氣流相對流速的變化

(用氣流通過沾濕丙醇衛生紙使溫度下降來測量)

控制變因 甲醇的量 (2g)、鋁盒A。

操作變因 導流板角度、壓克力管。

結果 →氣流流入速率更快。

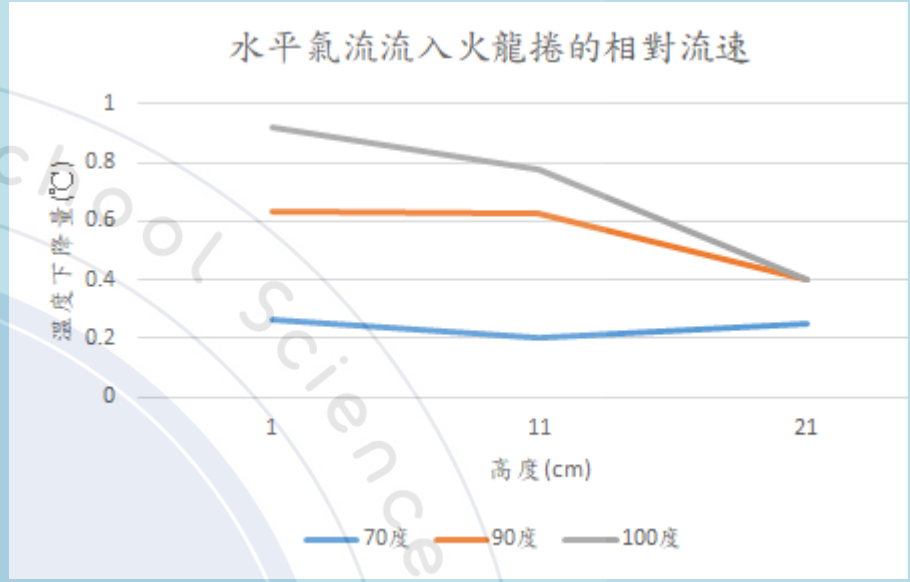


進氣口變小，進氣速率變大

**不同高度的氣流產生的變化

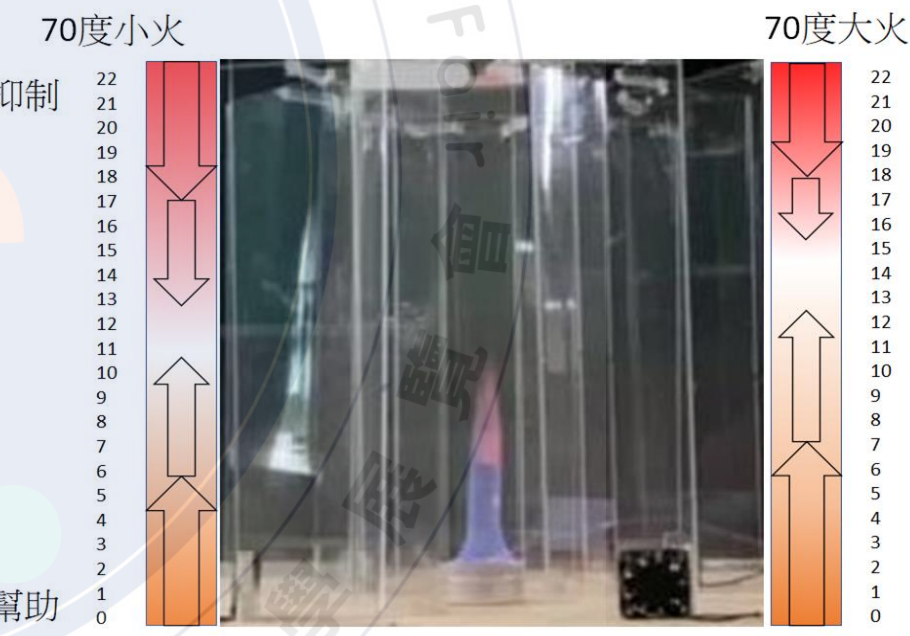
不同高度的進氣速率為何？

控制變因	甲醇的量 (2g)、鋁盒A、流速的測量方法。
操作變因	導流板角度、不同高度 (1、11、21公分)。
結果	→所有角度的裝置皆為在低處進氣時流速較快。 →100度裝置的氣流流入速率最快。



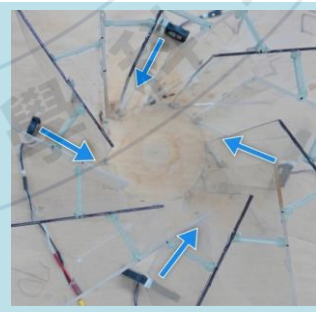
那麼不同高度的氣流有甚麼不同的影響？

控制變因	甲醇量 (2g)、鋁盒A、小風扇、90度角裝置。
操作變因	風扇在不同高度向裝置內吹入氣流。
結果	→火焰高度以下的水平氣流對火焰的高度有幫助的作用，上方的氣流有抑制作用。愈低或愈高處作用明顯，火苗頂端處的作用不明顯。 →解釋了套入壓克力管後火焰會變大，因其防止了上方抑制火焰的氣流，加速下方幫助的氣流。



推測 火龍捲產生時，若上方沒有氣流流動，造成的結果是地面附近的氣流會加速流入、旋轉效果更好、對火焰高度幫助愈大。

延伸探討 100度與90度裝置的氣流都是從切線方向流入如圖，但100度裝置的進氣口比90度的窄，且產生的火龍捲效果較好，若固定住偏斜角90度，放大進氣量結果會如何？

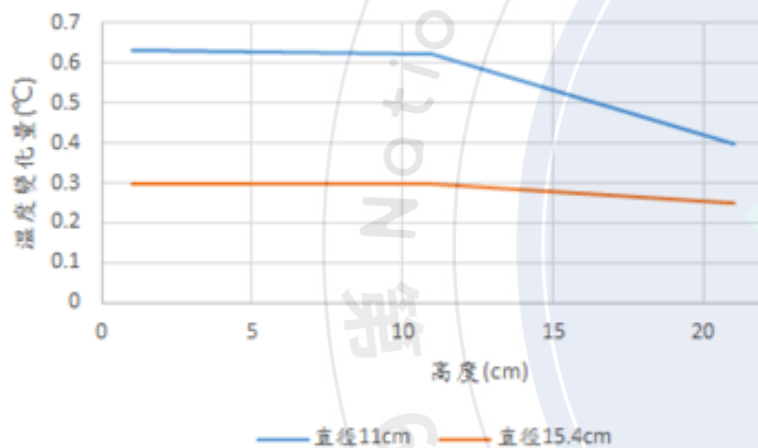


實驗三

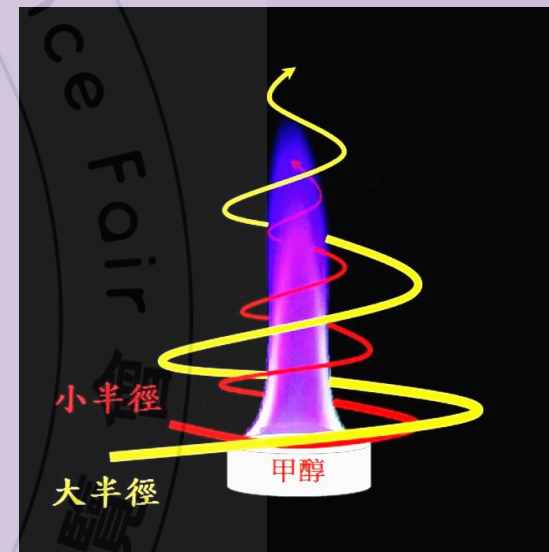
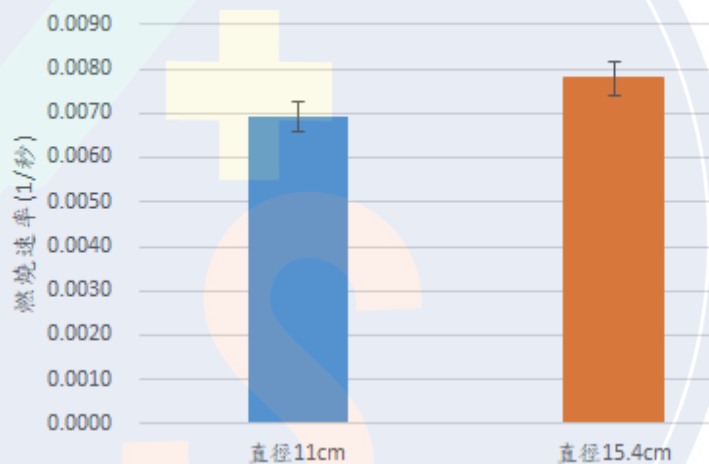
**水平氣流旋轉半徑對火龍捲燃燒的影響

控制變因	鋁盒A、甲醇的量。
操作變因	裝置的半徑（變1.4倍）。
結果	→其低中高三個位置的氣流流入速率，真的變慢。 →檢驗其燃燒速率，發現它反而燃燒變快了。
探討	半徑大的會在較高的位置才到達火焰中心，下方對火焰高度有幫助的水平氣流較多。

直徑變大後的流速比較



不同環繞直徑的導流板燃燒速率比較



實驗四 **火龍捲燃燒時對甲醇溫度的影響

科學人雜誌與我們的想法不一致，我們想釐清其中的差異。

控制變因 皆使用甲醇。

操作變因 是否過濾色素。

結果 →發現其中含有水分。

探討 火龍捲燃燒時甲醇液體的溫度如科學人所說是上升的嗎？

旋轉半徑對火焰高度影響
旋轉半徑小對照內部小火焰



控制變因 導流板角度90度、套入壓克力管、熱耦溫度計。

操作變因 鋁盒大小、鋁盒放置的位置(裝置內、外)。

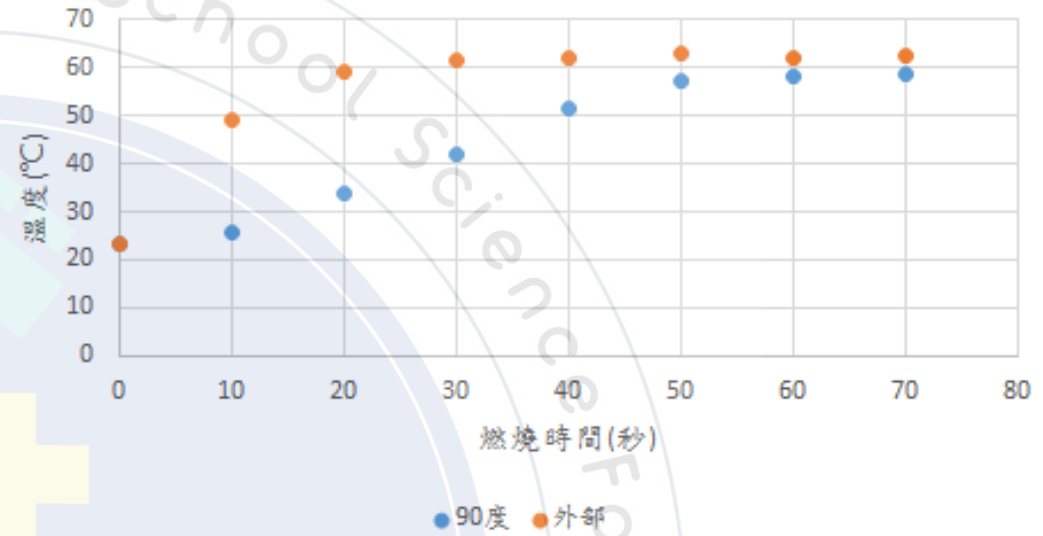
結 果

- 火龍捲的火力大於對照組，溫度較低。套入壓克力管後，火力愈大溫度更低。
- 火龍捲的火焰中心快速把氣體向上抽高，導致甲醇液面氣壓降低，快速蒸發而帶走熱量使溫度降低。
- 套入壓克力管後，限制了上方的氣流且縮小了下方進氣口，導致氣流流速更快、燃燒更旺盛、蒸發更多、甲醇液體的溫度會更低。

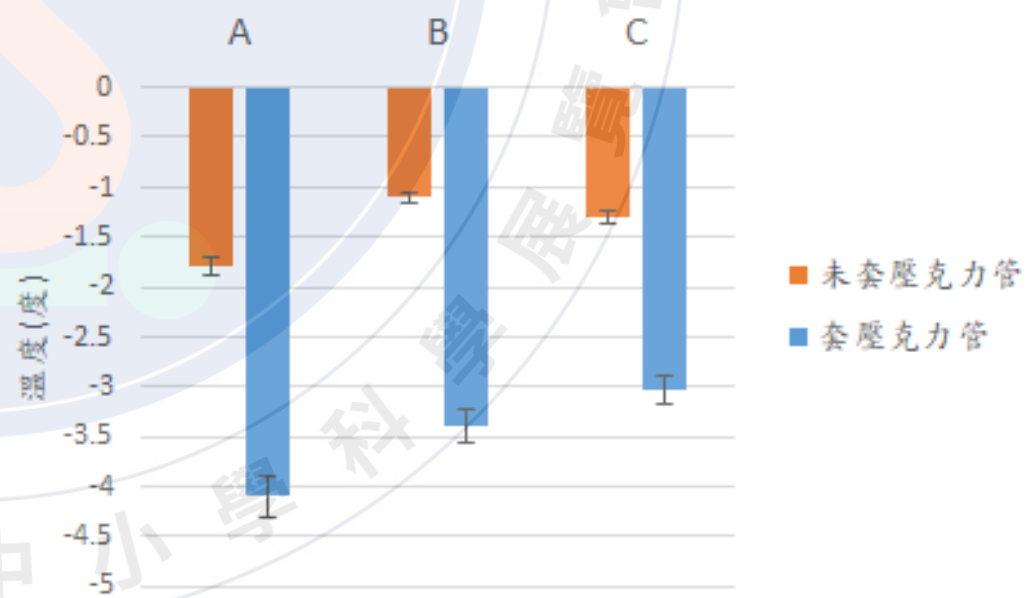
探 討

一般實驗演示火龍捲時多採用液體燃料，燃燒時液體溫度會下降，導致蒸發量變少。這對火焰高度的增加是一個抑制作用，不能完全表現出火龍捲燃燒的真實樣貌。

燃燒中的甲醇液體溫度



火龍捲燃燒時甲醇溫度下降

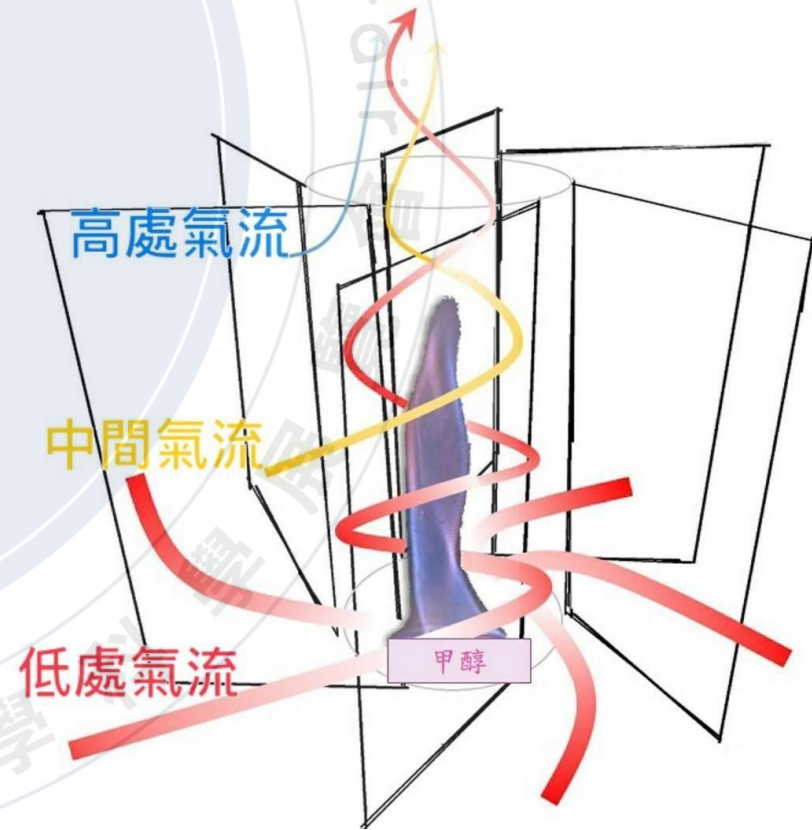


****火龍捲形成的要件有：**

1. 環繞火焰的氣流，旋轉角度要夠大，最好和半徑方向垂直。
2. 環繞火焰的氣流，旋轉流入的速度越大，火龍捲火焰越強。
3. 環繞火焰的氣流，旋轉的半徑越大，火龍捲火焰越強。
4. 燃燒面積或火力越大，越有機會形成火龍捲。
5. 沒有高空水平氣流對火焰產生抑制作用，只有平地旋轉的水平氣流的幫助作用，這樣能使燃燒的所有可燃物在上升的氣流中穩定地向上加速。

****產生火龍捲的模式：如右圖**

1. 水平氣流流入繞著火焰旋轉會把火焰侷限在中心，使得火焰較瘦較細。反觀若是氣流直接流向火焰，火焰會直接抬升流入的氣流，不過同時火焰得到一個反作用力向下而變得較為矮胖。
2. 火焰的體積不變的狀況下，較細瘦的火龍捲中心火焰的高度會較高，能夠幫助火焰升起的水平氣流會更多，甲醇蒸氣得到較長的向上加速通道，甲醇蒸氣從中心處向上抬升會被加速。
3. 加速向上離開的甲醇蒸氣使中心處的氣壓下降，導致火焰內外壓力差更大而有更多氣體由外向內推入。
4. 氣體加速被推入等於更多氧氣供應使得火焰變大，且由於流速加大使得旋轉效果更好，於是回到步驟 1. 使得火焰更瘦更高的自我回饋循環。

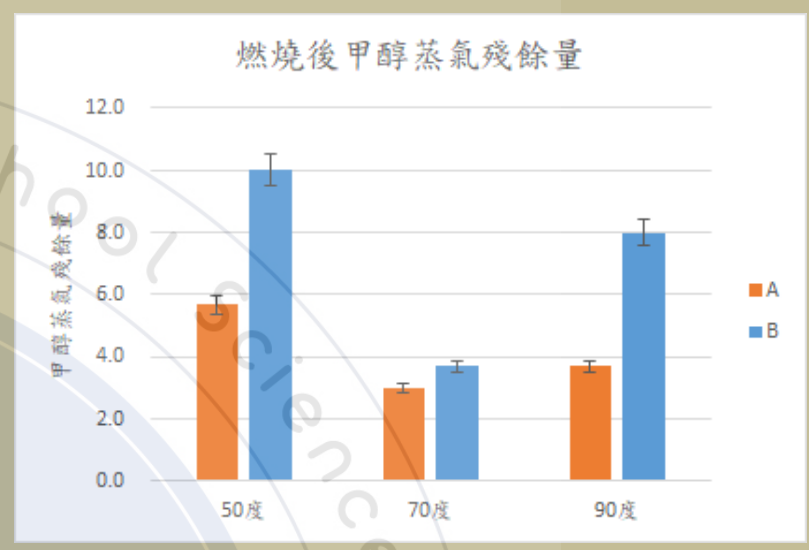


低處氣流較強，高處氣流較弱。

實驗五

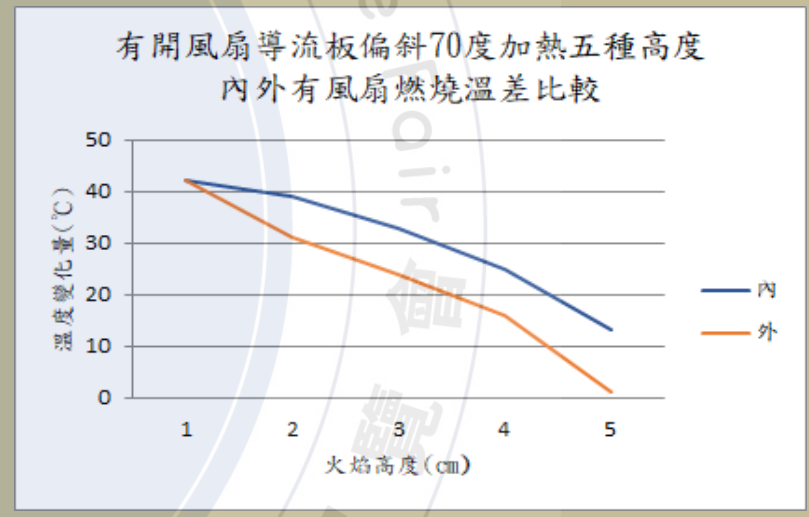
**不同偏斜裝置燃燒後的甲醇燃料使用率

控制變因	甲醇的量 (2g)、鋁盒A。
操作變因	在裝置中央頂端吸取100ml的空氣，打進裝有MQ3酒精偵測器的塑膠盒去偵測燃燒後的甲醇蒸氣殘餘量。
結果	70度裝置火焰最穩定、最藍、燃燒最完全蒸氣殘留量最低。

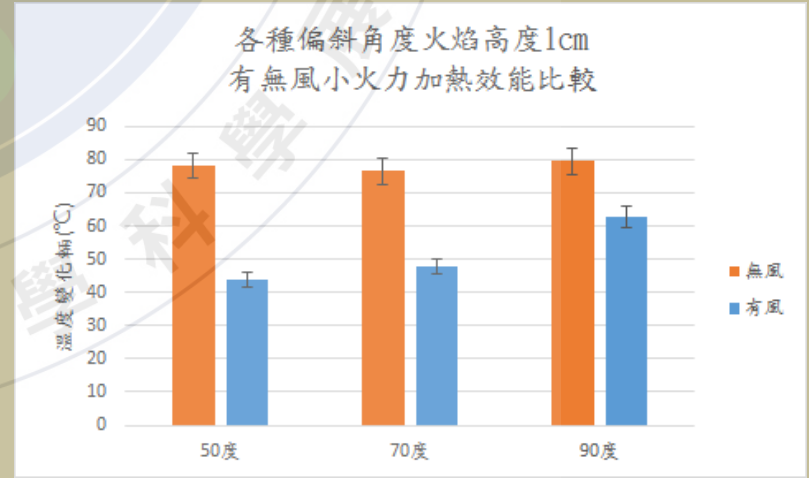


**對冷水加熱的效果

控制變因	甲醇的量 (2g)、鋁盒A。
操作變因	火焰高度1、2...5公分、導流板偏斜角度。
結果	越靠近火焰時加熱效果越好。 90度的裝置加熱效果最好。



控制變因	甲醇的量 (2g)、鋁盒A。
操作變因	裝上了陶瓷纖維網來加熱。
結果	溫度上升量不到原先的一半。 裝置內部的溫差百分比增加了，顯示導流板裝置仍然能有效地把熱量鎖住。



結 論

1. 導流板偏斜角度的影響：火龍捲裝置導流板偏斜**角度越大**、導流板之間的**進氣口就越小**，產生火龍捲的效果愈好。偏斜最大的導流板(偏斜90度)本來就能夠產生火龍捲，**旋轉角度最大**。偏斜70度的導流板本來只能產生普通火焰，但是若**加速了底部氣流且限制上方氣流水平流動**，也能產生火龍捲，應小心這種轉變。
2. 不同高度的氣流：愈低處流入的氣流流速較快，對火焰產生的幫助較大。高度在**火苗以下**流入火龍捲的氣流都會**幫助**火焰長高，**火苗以上**流入的氣流則會產生**抑制**作用。
3. 火焰周圍氣流旋轉半徑：如果火焰燃燒時能夠帶動周圍氣流，則氣流環繞火龍捲旋轉的**半徑大**，使火龍捲效果較好。
4. 火龍捲燃燒時甲醇液體的降溫差異：液體燃燒時溫度都會降低，火焰愈大其溫度愈低。
5. 推測野外的火龍捲形成模型：液體燃燒，溫度降低減少蒸發，對燃燒產生一個**拮抗作用**，所以火焰的高度不會竄升得非常高。但是野外火龍捲形成時則沒有這種拮抗作用。旋轉氣流使**火焰變得瘦長**，於是形成更長的**熱氣上升加速道**，使**可燃物上升更快**，火焰中心的**氣體快速上升**，造成**中心處氣壓降低**，內外壓力差更大而**帶動低處更多空氣旋轉**流入，使火焰更旺，一直循環。
6. 燃料的使用率和對冷水的加熱效能：液體燃燒會有蒸氣殘留未燒完。偏斜70度的裝置殘留最少，燃料使用率最高，但90度裝置加熱效果最好。
7. 陶瓷纖維網的影響：加熱時使用陶瓷纖維網是為了**加熱均勻**，加了陶瓷纖維網之後，使它的加熱效能**剩下不到原來的一半**，但是如果使用導流板裝置，它的加熱效能仍**比對照組高出35%**。

參考資料及其他

1. <https://sakb.ylib.com/article/202003.9494> 福瑟佛(2020)·火焰火龍捲·科學人期刊，75
2. <https://www.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?cat=86&a=6821&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=1&sid=13626> 陳亭儒、林玟葳、黃翊(2017)·風力罩得住酷旋發電機·第57屆科展國中生活與應用科學科
3. <https://kknews.cc/news/qvg89er.html> 每日頭條(2018年12月18日)·現實版的火焰龍捲風來襲~
4. <https://www.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?cat=50&a=6821&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=6&sid=12593> 楊炫儒、李冠廷、蕭敦輔(2015)·轟!火龍出沒!·第55屆科展高中物理組b