

花蓮縣第 61 屆中小學科學展覽會
作品說明書

科 別:物理科

組 別:國中組

作品名稱:火龍升起- 探討火龍捲的特性

關鍵詞:火龍捲模型、甲醇燃燒溫度下降、導流板偏斜角度(最多三個)



編 號:

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，若導流板偏斜度越大、燃燒面積愈大或縮小進氣口大小，使氣流流入速率變快，火焰高度會越高。但是火力強度增加會導致進氣不足使得甲醇燃燒不完全，因而紅火現象更多。火龍捲產生時，甲醇蒸發速率變大，導致甲醇的液體溫度較低，此結論和科學人的推測完全相反。發現導流板偏斜 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，能達到較好的加熱效果，導流板的導引作用使火焰較穩定、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。

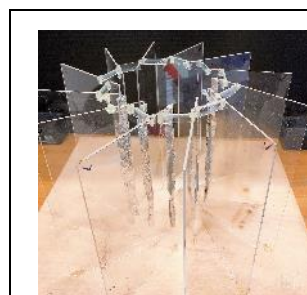
壹、研究動機

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、探討火龍捲對甲醇燃燒速率的影響。
- 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、火龍捲燃燒時對甲醇溫度的影響。
- 六、探討火龍捲裝置的實用性和功效。

參、研究設備及器材



導流板火龍捲裝置



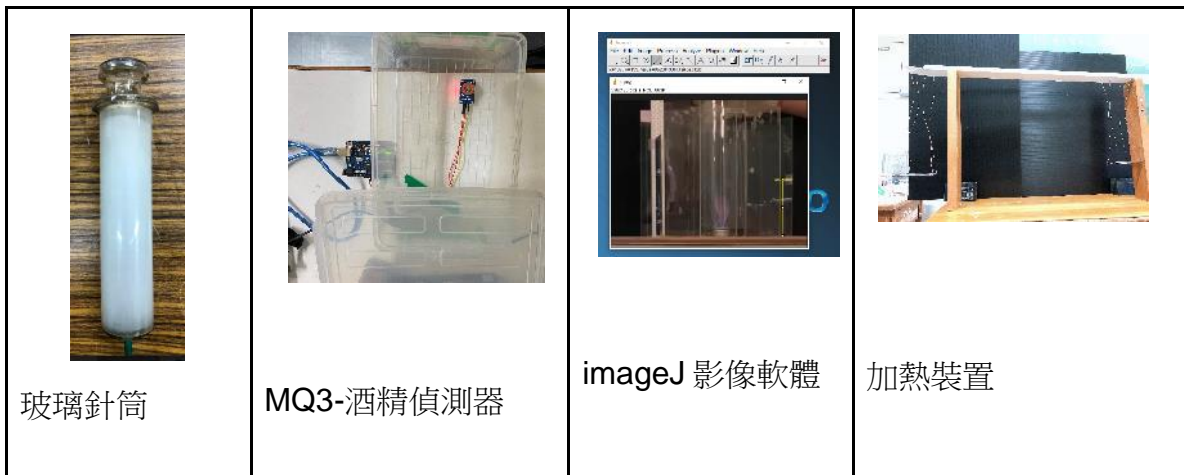
鋁杯、鋁盒



精密電子秤



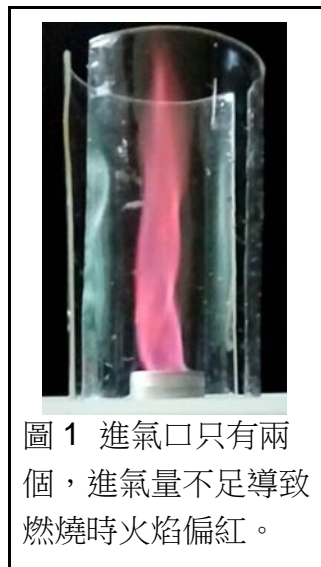
K-type 熱耦溫度計



肆、參考文獻

已知天然災害中龍捲風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：

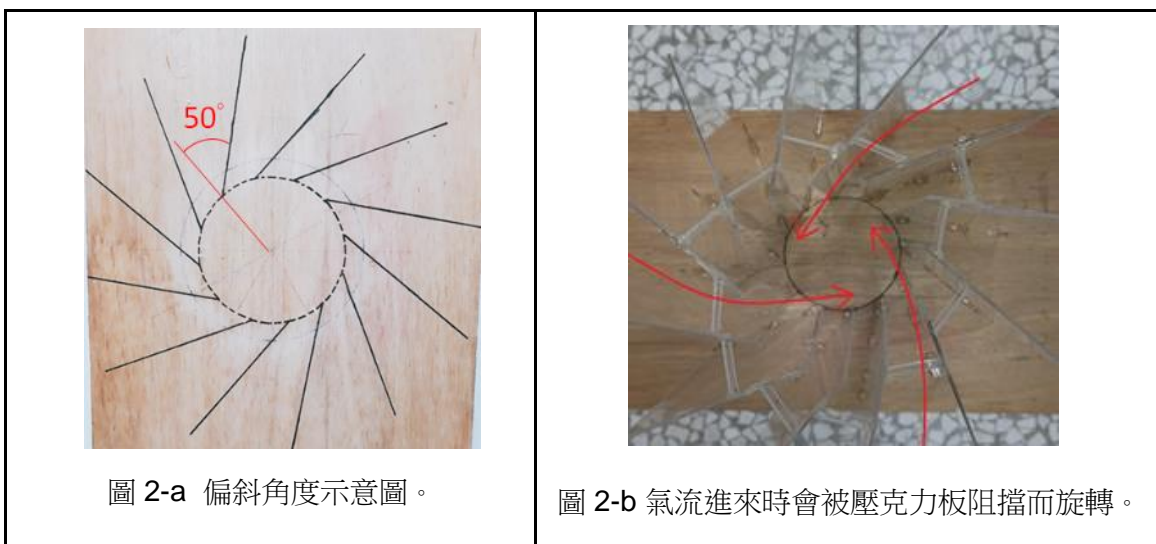
- 一、如科學人文章中作法：在火焰四周加裝風扇，朝單一方向驅動氣流使之旋轉，這種方法雖然可以使氣流旋轉，也能使火焰高度竄升，但是額外使用了電能驅動氣流，而且要加裝風扇，因此不是一個便宜有效的方法。
- 二、網路上製作火龍捲的方法，把一個透明的大玻璃筒縱向剖半，稍微平行錯開 2 個半圓筒，使空氣便可以從錯開的空隙流入火焰，這樣也可以有效使火焰竄升，但是火焰顏色偏紅黃，判斷因為進氣口只有 2 個，所以燃燒所需要的氧氣供應不夠，產生不完全燃燒使得燃燒火焰顏色偏紅，如圖 1。



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。

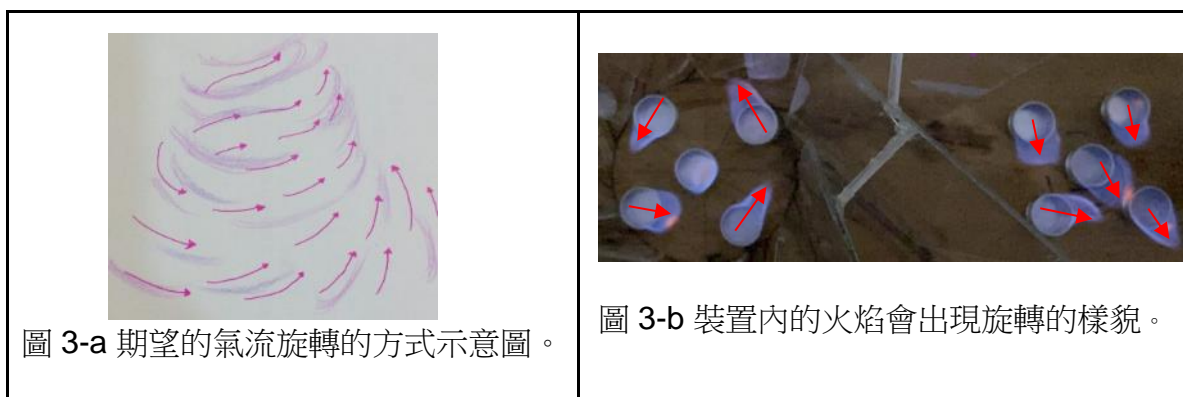
此裝置設計的俯視圖如圖 2-a 及其可能導引的氣流構想如圖 2-b，其中直立了 12 片 11*22cm*cm 的壓克力板以導引氣流形成逆時針方向轉動，圖 2-a 中的壓克力板朝徑向向右偏斜 50 度，我們稱呼此導流板的偏斜角度。



伍、研究結果及討論

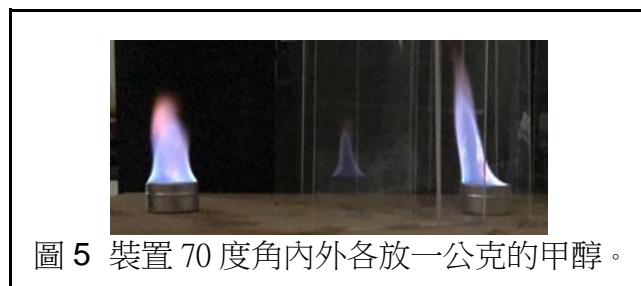
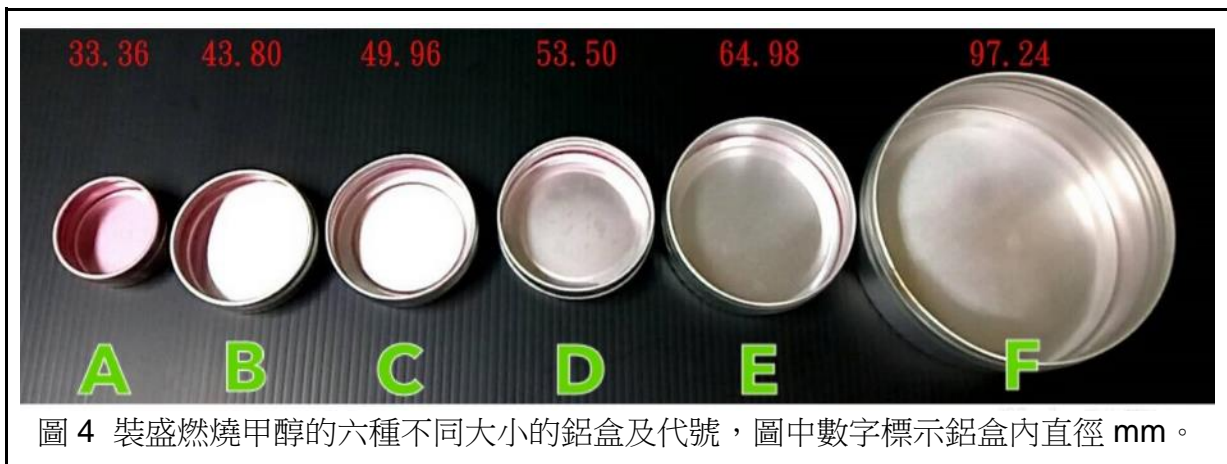
實驗一、探討火龍捲對甲醇燃燒速率的影響。

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。

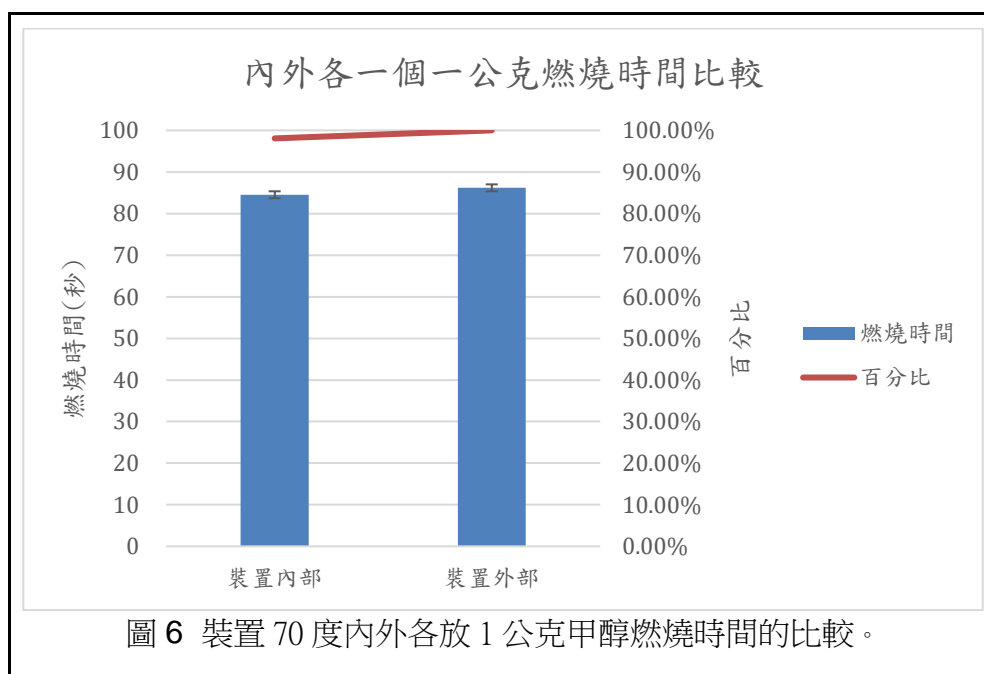


確認使氣流達到旋轉模式後，我們將檢驗此裝置用於燃燒時消耗甲醇的速率。

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。



實驗結果如下:



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：

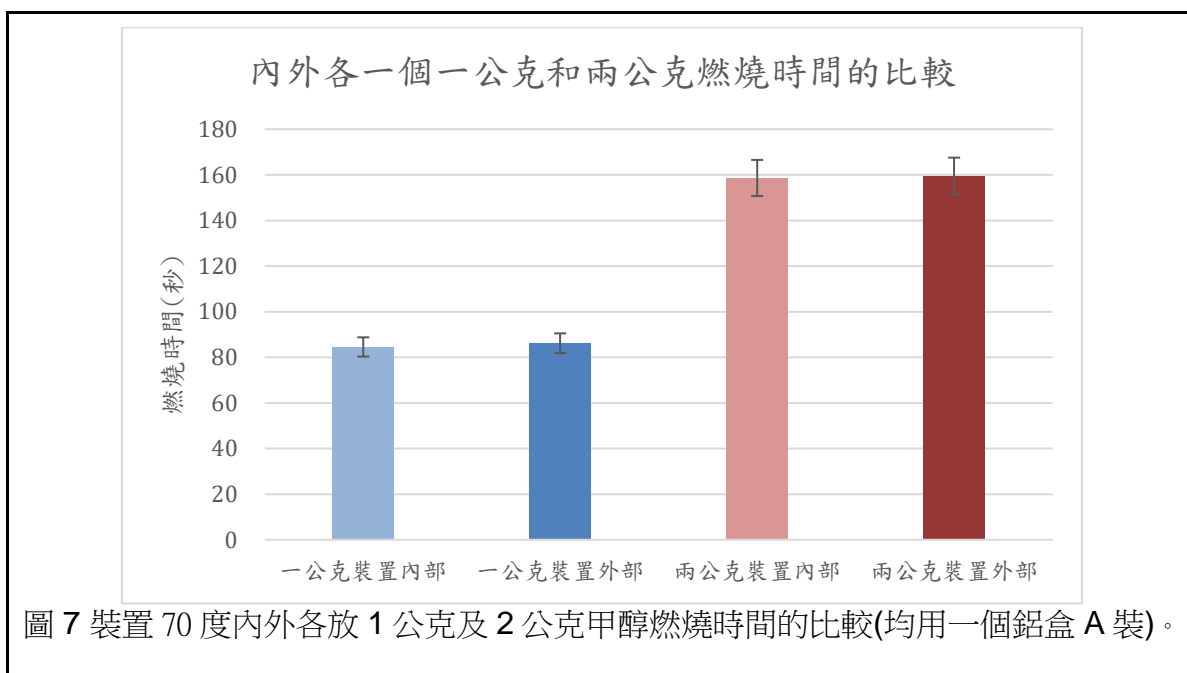
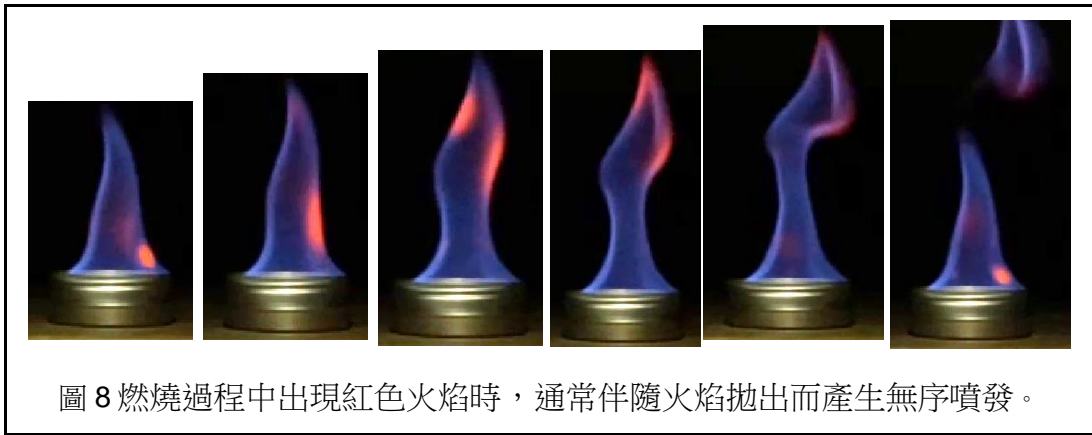


圖 7 裝置 70 度內外各放 1 公克及 2 公克甲醇燃燒時間的比較(均用一個鋁盒 A 裝)。

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。

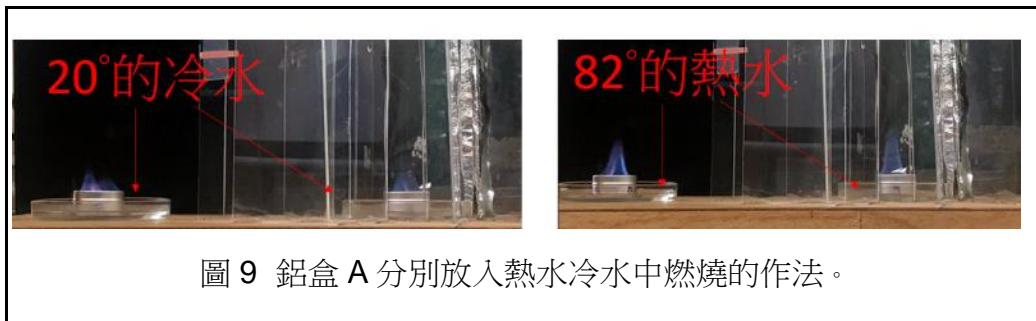
此外發現裝置外的甲醇燃燒時,火焰有斷斷續續的現象，在燃燒過程中火焰會跳動，如圖 8，畫面中可以看出火焰中紅色火點起後向上拋出一團火焰，我們猜測可能是甲醇在燃燒過程中鋁盒金屬溫度上升導致甲醇沸騰，還未燃燒的甲醇蒸氣衝破火焰向上竄升，拋出的甲醇蒸氣接觸到更多氧氣後還是可以燒起來。



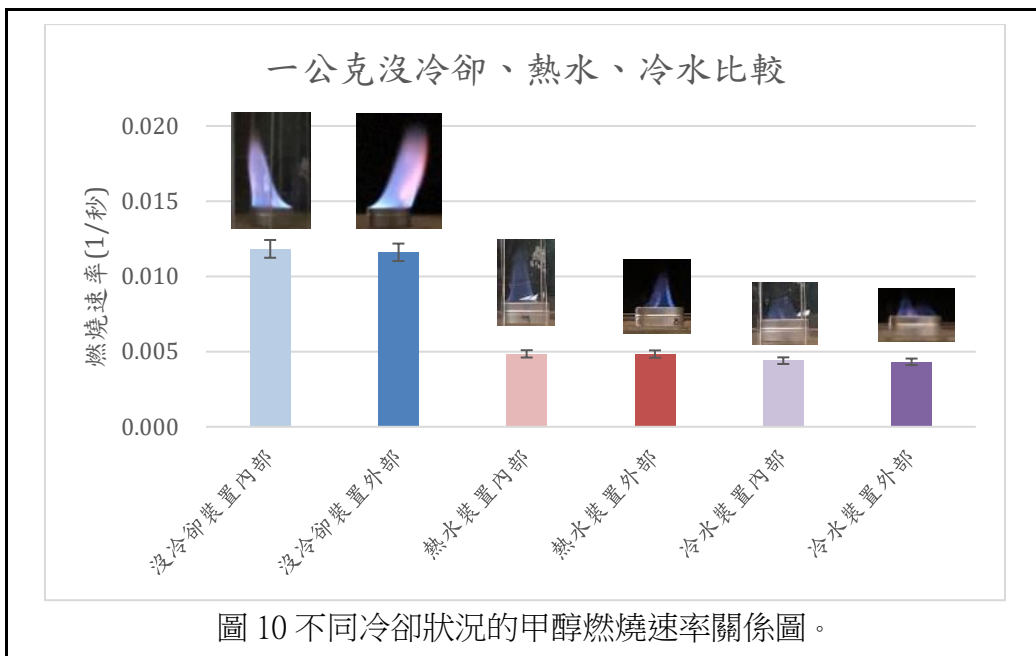
實驗二、探討不同溫度的甲醇燃燒速率的差異。

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)和熱水(約 78~88°C)，裝甲醇的鋁盒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的噴發干擾後，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，只和酒精的溫度有關。
- 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如圖 10，並在火熄滅之後杯底會有殘留液體，並且那些液體點火也無法再次燃燒，因此我們判斷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。
- 3.我們懷疑火龍捲裝置不會使燃料加速消耗，是否是因為火焰不夠強，導致上升氣流不夠強呢？於是在火龍捲裝置內外各放置兩個一公克的甲醇，如圖 11，希望看看以兩倍的火力驅動上升氣流後是否有不一樣的結果，仍燃燒 8 次，記錄的燃燒時間是 2 個鋁盒燃燒時間的平均值。



圖 11 裝置內外使用鋁盒 A 各放兩個 1 公克的甲醇。

實驗結果如下:

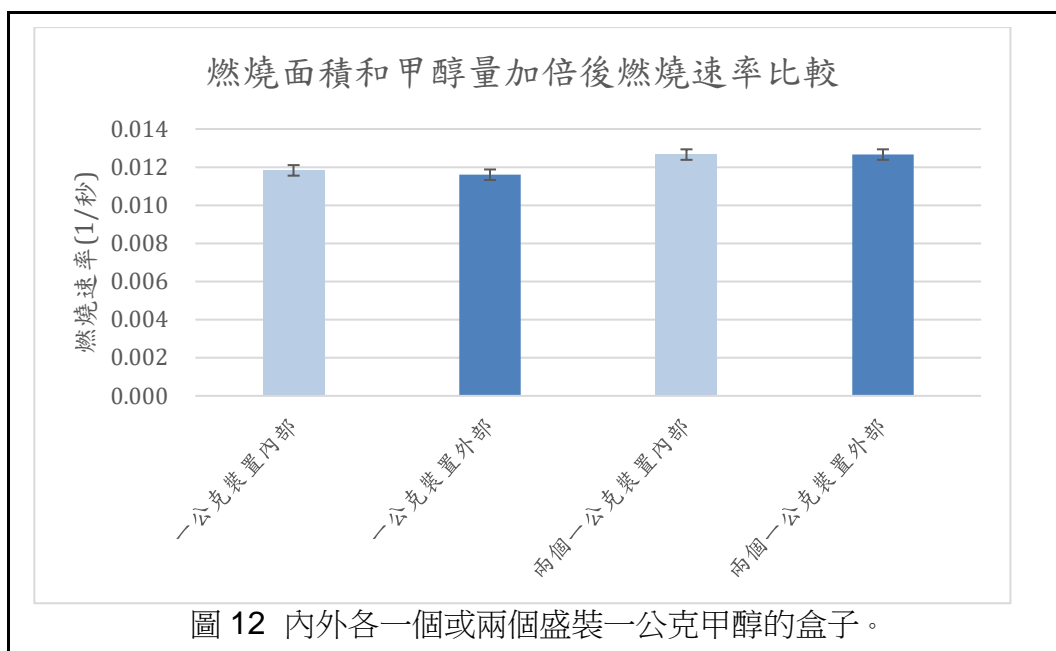


圖 12 內外各一個或兩個盛裝一公克甲醇的盒子。

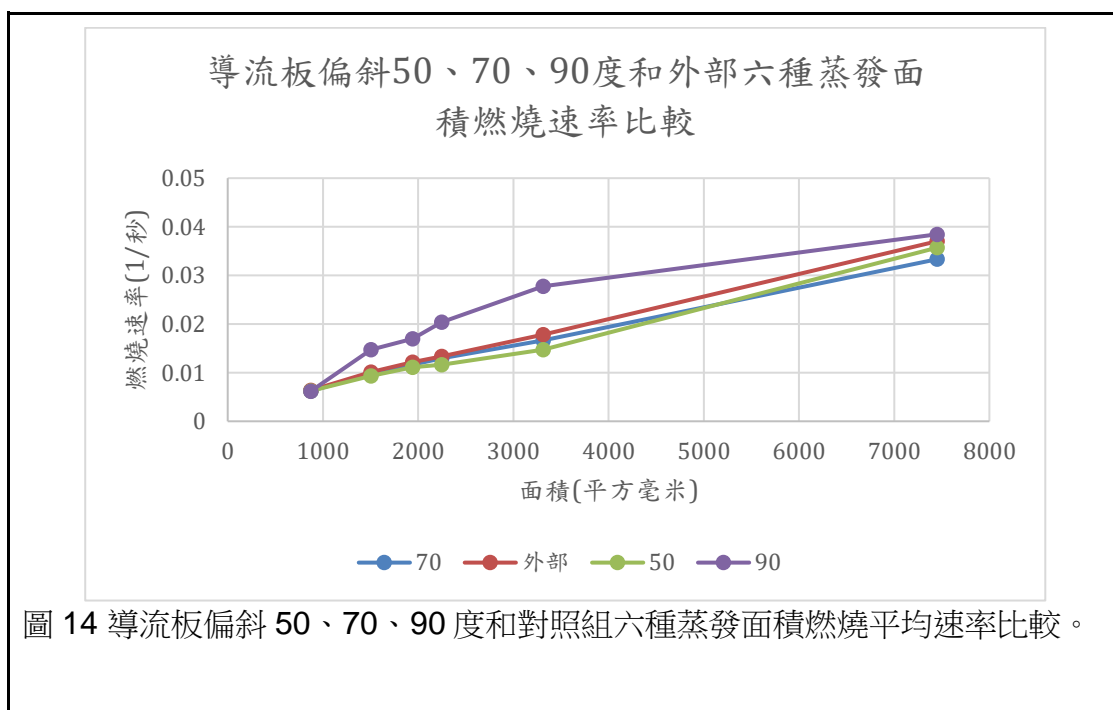
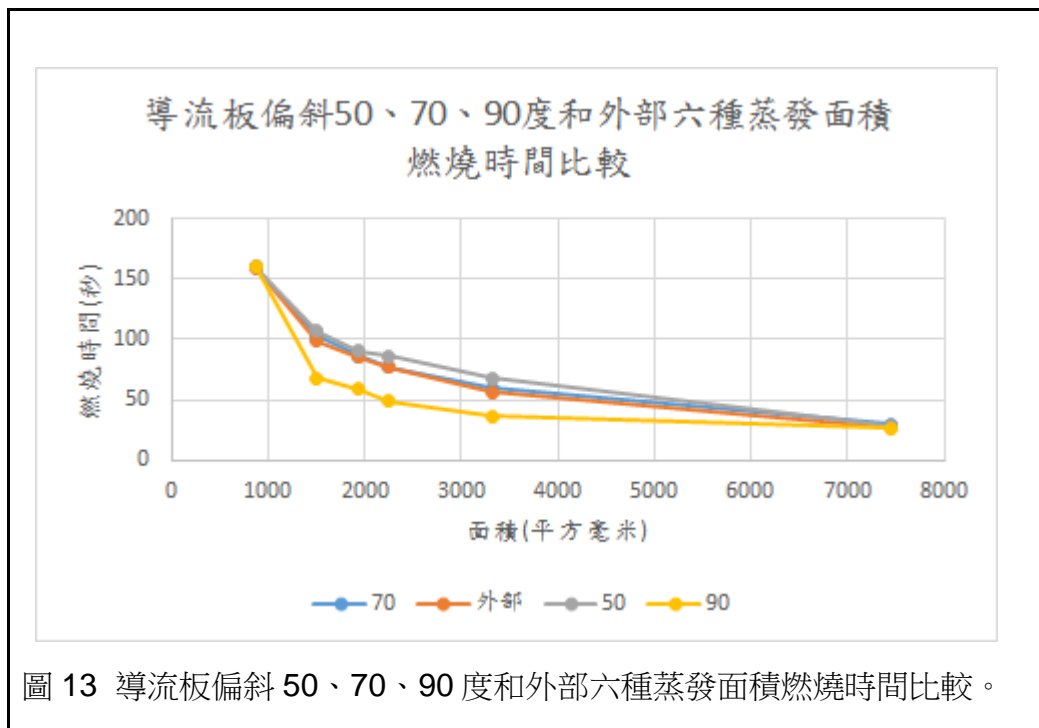
圖 12 結果顯示

1. 結果加強火力之後，裝置內外燃燒的速率仍然是幾乎相同的，但是 2 個一起燃燒的速率都變快了，應該是他們互相加熱導致彼此溫度都升高，甲醇蒸發量變大，燃燒更快。

目前可以確定在某一程度火力之下 70 度的火龍捲裝置和對照組燃燒速率幾乎是相同的。液體蒸發變成氣體進行的這類燃燒，液體的蒸發量只和液體的溫度有關，但是和捲動的上升氣流大小沒有太大關係。這點和我們一開始的想法並不一致，我們不死心繼續試驗。這次我們找不同大小的鋁盒來測試，這次測試不同面積，也測試偏斜 50、90 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甚麼狀況發生。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 8 次，求其平均值。實驗結果如下：



1. 以上圖 13 和圖 14 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 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 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。

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 A 分別盛裝 2 公克甲醇置入三種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 15。



圖 15 四個火焰由左到右分別是導流板偏斜 90 度、70 度、50 度和對照組。

我們看到，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 15 中 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 16 可以發現 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。

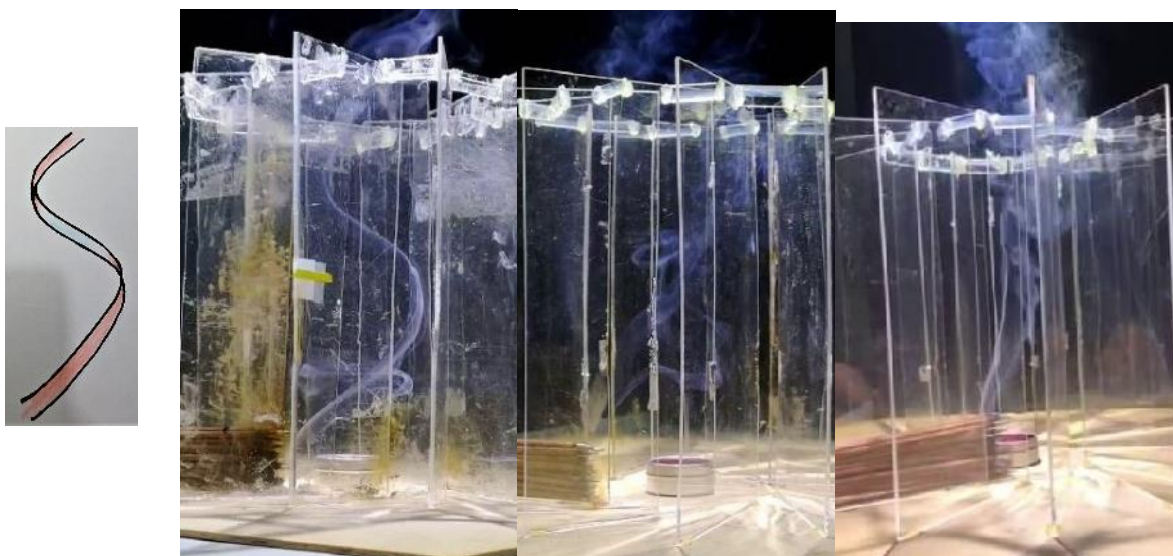


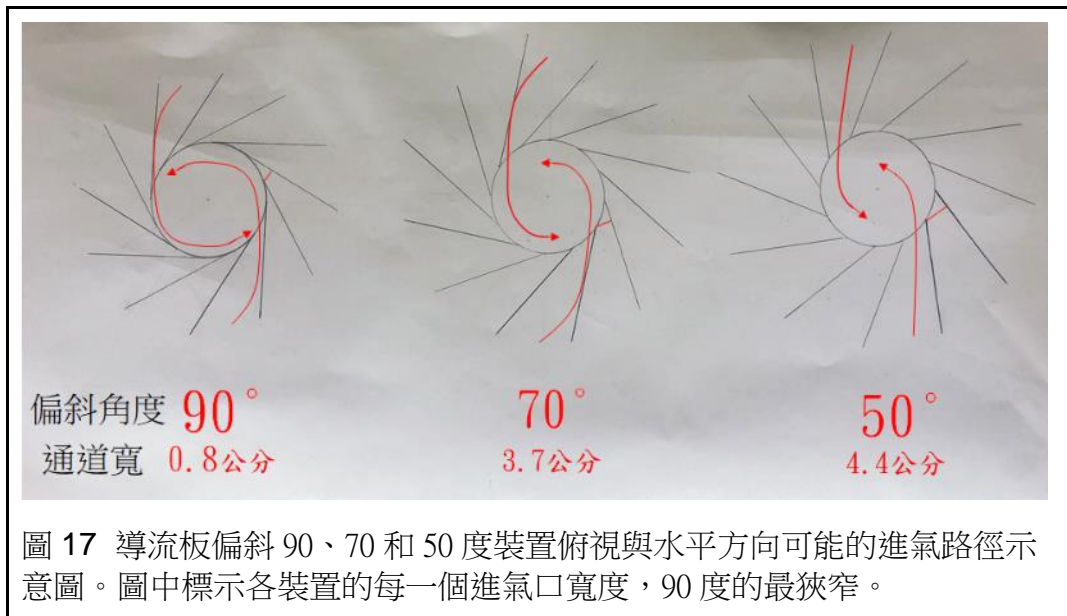
圖 16 線香軌跡圖由左而右分別是導流板偏斜 90 度、70 度、50 度。可以看出 90 度的捲動效果最明顯，70 度在中央產生小圈圈，50 度幾乎直接上升。

1. 從下圖 17 俯視示意圖來看 90 度的裝置有三個特點:

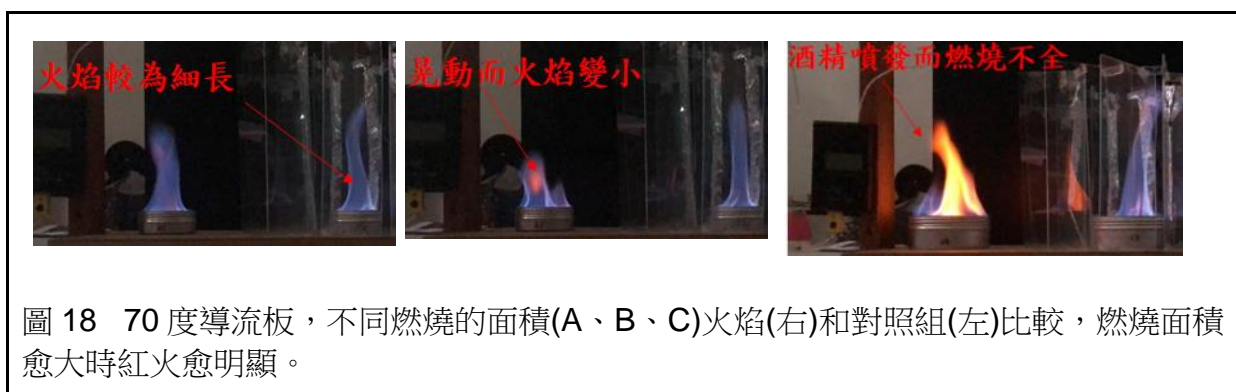
- (1)合圍效果最好，就像一支真正的煙囪，較能保護熱氣直直向上抬升而不從旁邊流失。
- (2)進氣口最窄，如果由裝置向上排出的燃燒廢氣體相同，那麼從裝置外向內流入補充的空氣體積也相同，所以進氣口愈狹窄，氣流流入的速率愈快，轉動效果愈好。

(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。



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 18 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，所以我們就想不同偏斜裝置燃燒後的甲醇蒸氣會不會有殘留？



作法：如圖 19，用玻璃注射筒在裝置頂端中央吸取 100ml 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。

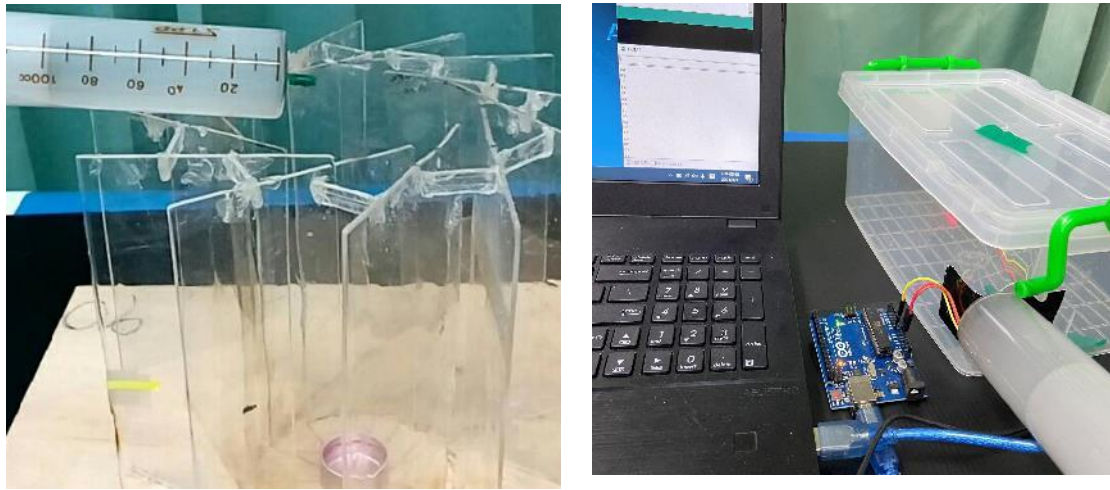


圖 19 左圖用玻璃針筒吸 100ml 甲醇燃燒後氣體。右圖把氣體打進有 MQ3 偵測器的塑膠盒，可以測量燃燒後殘餘的酒精蒸氣，塑膠盒內容積 3330ml。

測得的結果如圖 20:

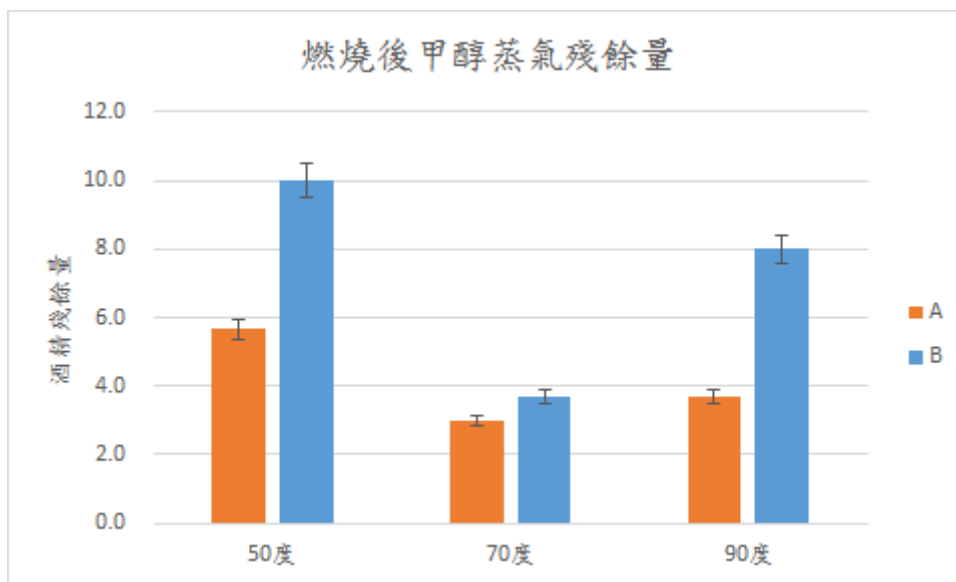


圖 20 各偏斜角度裝置，燃燒後甲醇蒸氣殘餘量。小火力和中火力分別是鋁盒 A、B。

- 1.由上圖 20 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。而七十度是最穩定的，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。

實驗五、火龍捲燃燒時對甲醇溫度的影響。

因為火龍捲燃燒後裝盛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甲醇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 21 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，火龍捲燃燒後更不可能會有液體殘留。研究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的結果。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 22，放入明確產生火龍捲的 90 度裝置中，如圖 23。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 24，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：



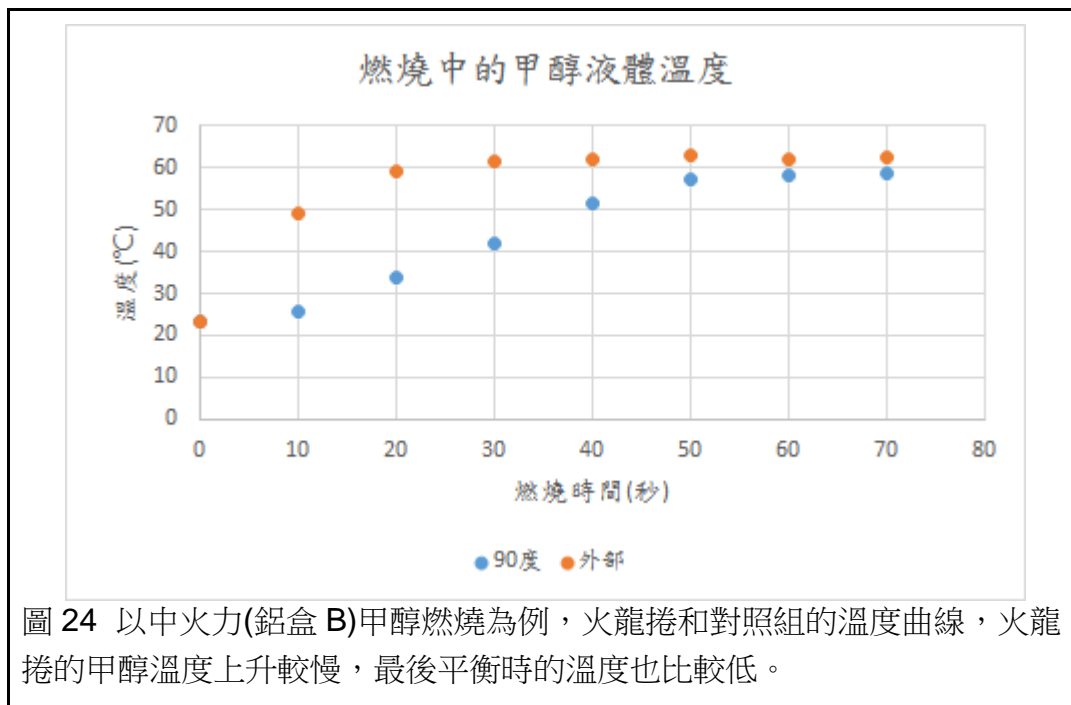
圖 21 藍色氯化亞鈷試紙檢驗火龍捲燃燒後留下含水的殘留物。



圖 22 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。

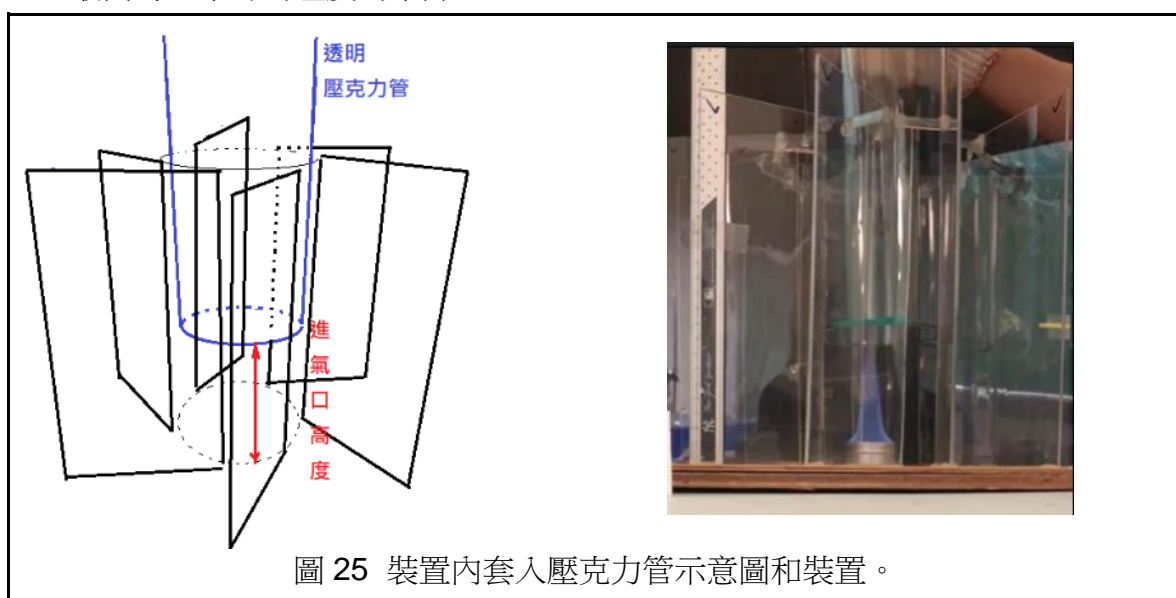


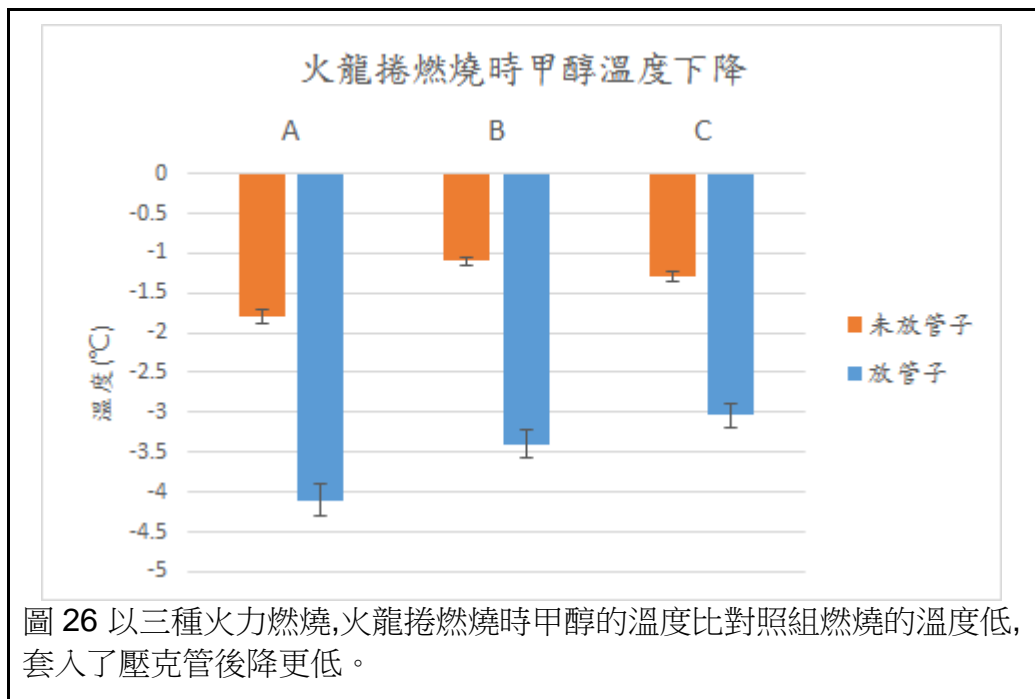
圖 23 將有 K-type 溫度計的鋁盒放進裝置後裝入八分滿甲醇燃燒。



由圖 24 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)。因為在圖 17 看到 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 90 度的導流板放進真的煙囪(壓克力管)會不會對甲醇溫度有什麼影響呢？

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 30cm，外徑 10cm 的壓克力管(火龍捲裝置的內徑 11cm)。火龍捲燃燒達平衡時甲醇的溫度和對照組相比為負值。圖 26 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，套入後降到某個適當高度使得火焰高度最高時，甲醇的溫度的下降量。



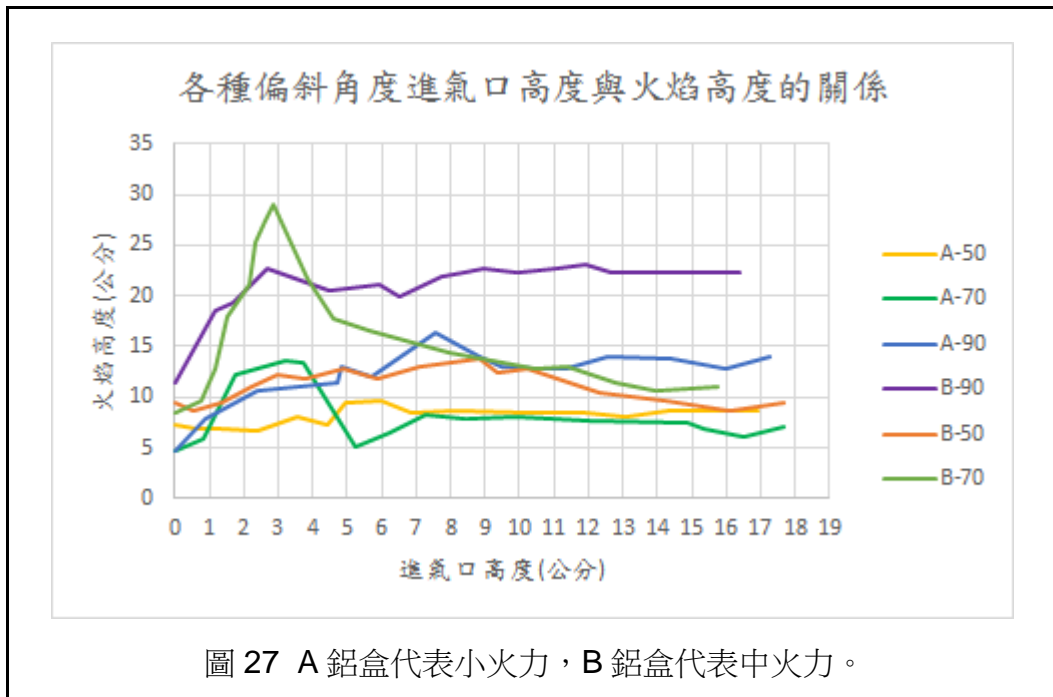


1.圖 26 橘色長條可以發現，一般火龍捲燃燒時液體的溫度上升達平衡時，甲醇溫度比裝置外的對照組燃燒的溫度低 1~1.7°C。

2.圖 26 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，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。

火焰強弱對溫度計的輻射影響很難探討，但氣流流入的強弱可以用套入壓克力管看火焰的變化的實驗來說明。想法是套入壓克力管後，如果火焰有變大，表示蒸發更快導致甲醇溫度下降更多。做法是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 1.5cm 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，裝盛甲醇燃燒的鋁盒使用圖 4 中 A 和 B，所得結果如圖 27 所示。

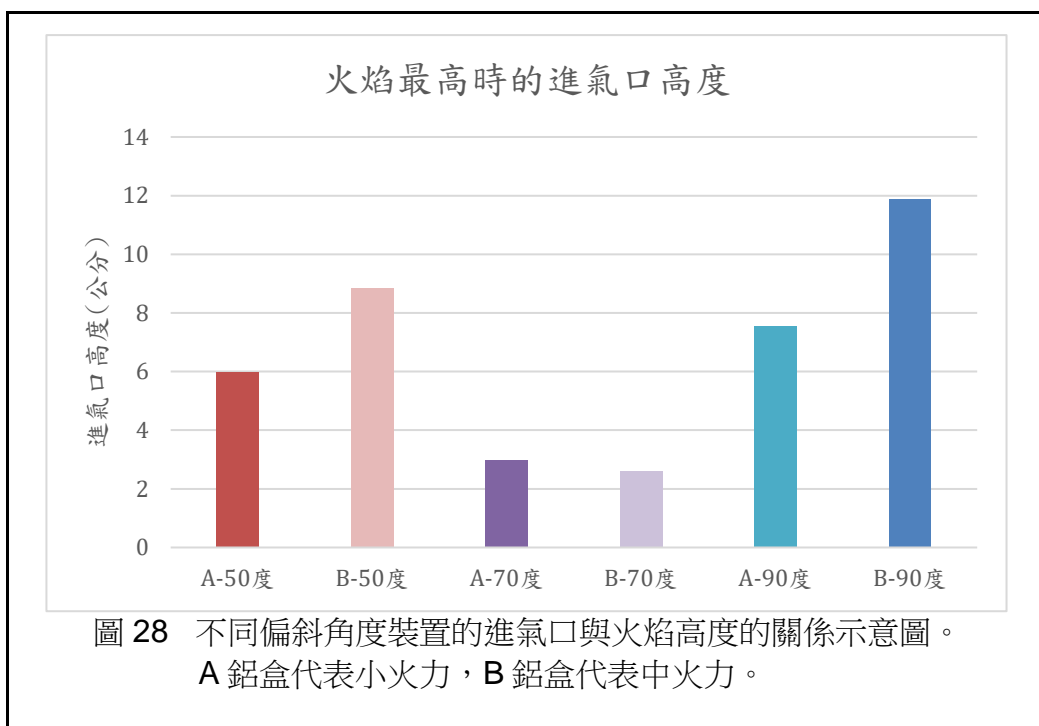


可以知道偏斜角度 50 度時，小火力和中火力的火焰高度都不大，而且各種進氣口高度的火焰高度變化不大，所以我們認定 50 度的偏斜裝置不能產生火龍捲。

偏斜 90 度的火焰平均高度最大，火焰外觀捲動的也最明顯，所以我們認定 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 公分進氣口高度時火焰高度突然竄高。

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 28：



50 度的裝置，火焰變化不大，不當成火龍捲看待。90 度的實驗可以看出火焰高度愈大，表示氣流流入更快導致甲醇的溫度愈低。70 度的裝置對限制進氣口的差異最顯著，原本因為氣流旋轉角度不夠大導致火焰不大，但是限制了上方氣流之後，氣流只由下方進入，火焰高度劇烈升高。這個現象對了解火龍捲的成因非常重要。

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，是酒精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，至少對進氣口高度有個限制，圖 27 就是我們找到的這個進氣口高度的限制。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或流出，另一方面它讓下方流入氣流加速(以下會證明)，同時增強甲醇的蒸發量而導致溫度降低(如圖 26 藍色長條)，也增加了氣流旋轉效果使火焰上升到某個最高高度。但在自然情境下，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。

接下來我們證明壓克力管從上方放下，限制進氣口後，下方氣流流入的流速會增加。

作法：剪 1*3cm*cm 衛生紙捲熱耦溫度計探頭(如圖 29)，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甲醇被火焰的熱輻射加熱，衛生紙上滴上 3 滴甲醇後蒸發降溫。室溫下，自然蒸發會使溫度降至 6.2°C 左右達成熱平衡後再慢慢回溫。如果甲醇蒸發的吸、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甲醇蒸發變快，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。從自然蒸發降溫達平衡後在裝置內點火開始，我們記錄 15 秒內溫度下降量，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 30。



圖 29 用 1*3cm*cm 的衛生紙捲熱耦溫度計探頭，滴 3 滴甲醇讓它蒸發降溫。

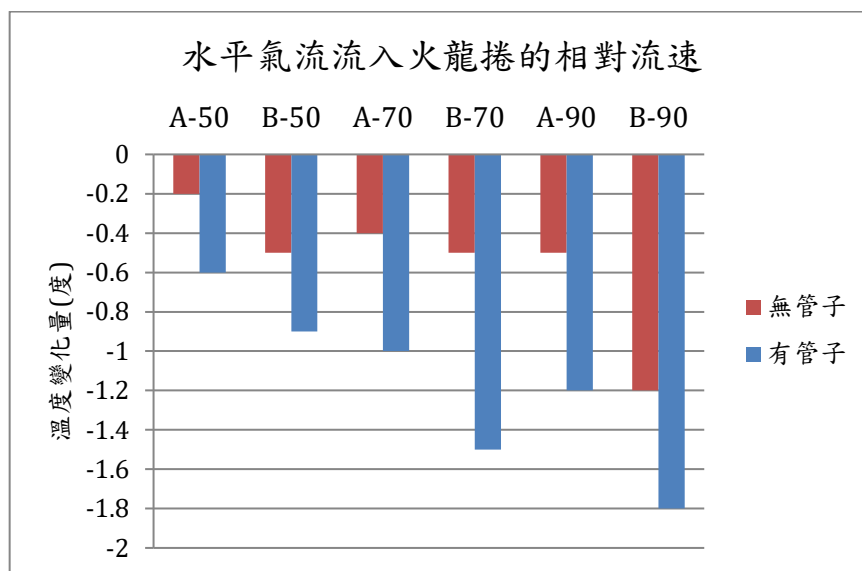


圖 30 50 度、70 度與 90 度的水平氣流流入火龍捲的相對流速，溫度降幅愈大就代表流速愈快。

可以看出火焰燃燒時引導氣流流入火龍捲裝置時都加速了甲醇蒸發，使溫度降低，大火通常比小火燃燒時流入的速度更快。以 70 度 90 度中火力為例，進氣口寬度分別是 3.7、0.8,當火焰最大時進氣口高度分別是 3、12 所以進氣口截面積分別是 11.1、9.6cm* cm 說明 90 度的風速還是要比 70 度的風速快一點,才會有一樣的進氣量套入壓克力管縮小氣流的通道大小加速了氣流，有兩個可能的效果，一個是縮小了通道口後，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。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不會受到高空水平氣流干擾，包括熱量交換和運動干擾，使得向上流動變快。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.高空較少水平氣流，最好只有平地旋轉的水平氣流，能像煙囪一樣讓火焰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:模型如圖 31。

- 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的高度會較高，因此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.使得火焰更瘦更細的自我回饋循環。

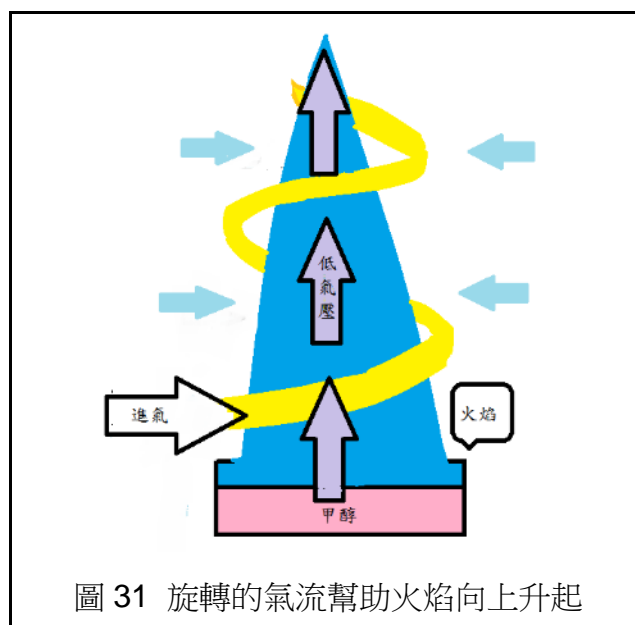


圖 31 旋轉的氣流幫助火焰向上升起

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。

實驗六、探討火龍捲裝置的實用性和功效。

燃燒時間的長短代表了燃料的消耗速率的大小，但是其加熱效能究竟如何呢？

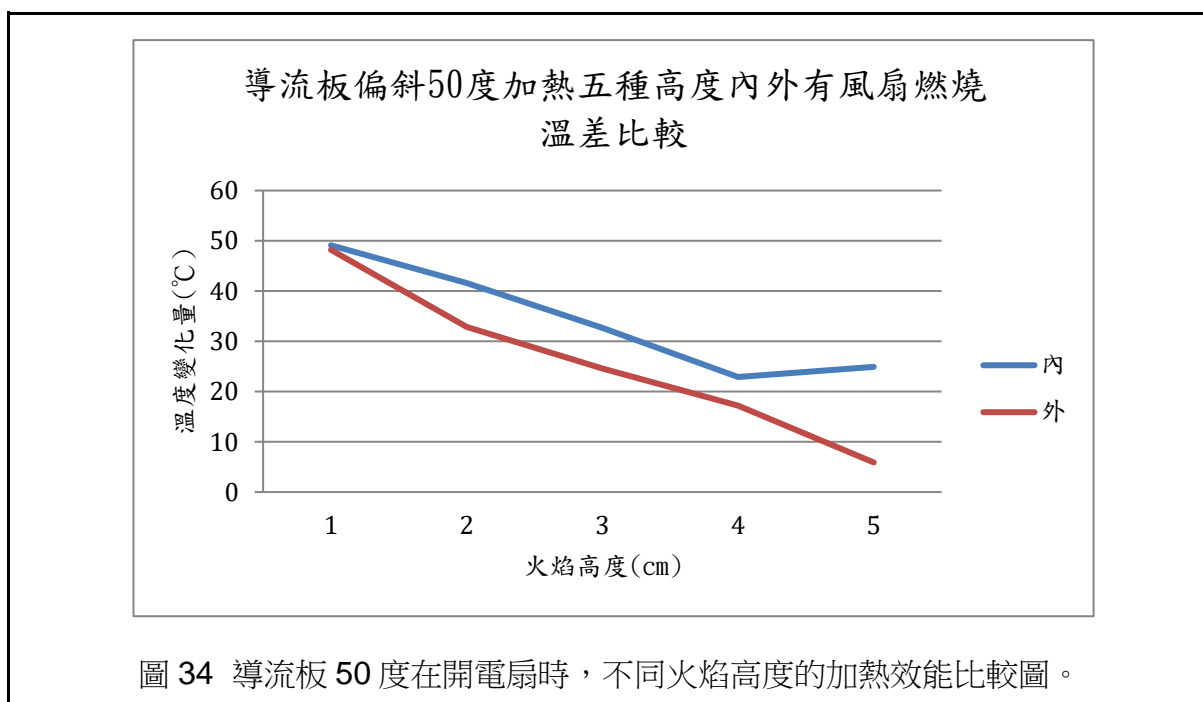
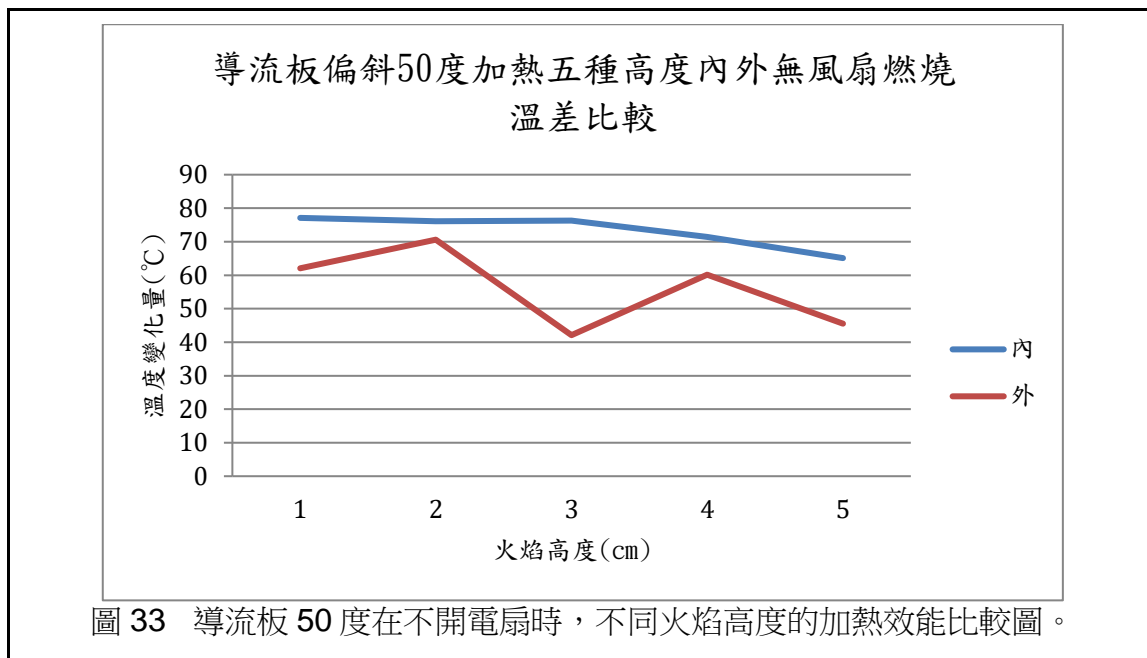
我們從查閱的資料知道火焰的內外部溫度是不一樣的，一般來說外焰溫度比較高，所以我們想知道被加熱的杯子底部距離火焰底部的高度不同，對被加熱的水溫變化產生甚麼影響？

作法：考量到裝水鋁杯的適當容量，我們以鋁杯裝 **45CC** 的水，以下簡稱水杯，分別放到裝置內外加熱，壓克力板徑像偏斜 **50** 度，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 **32**，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 **33、34**。

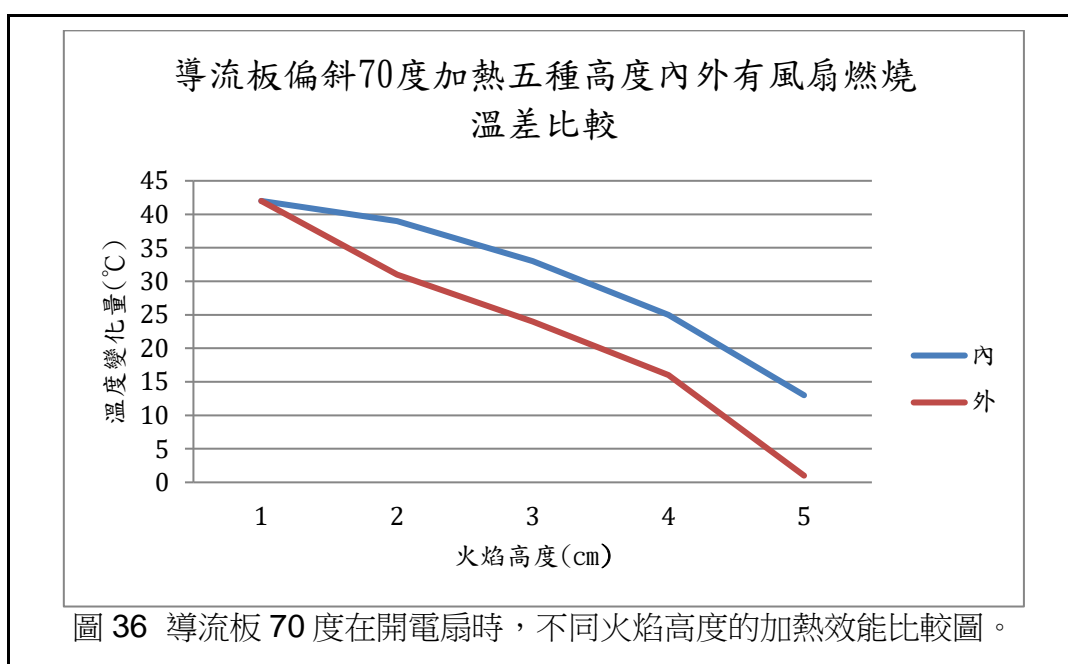
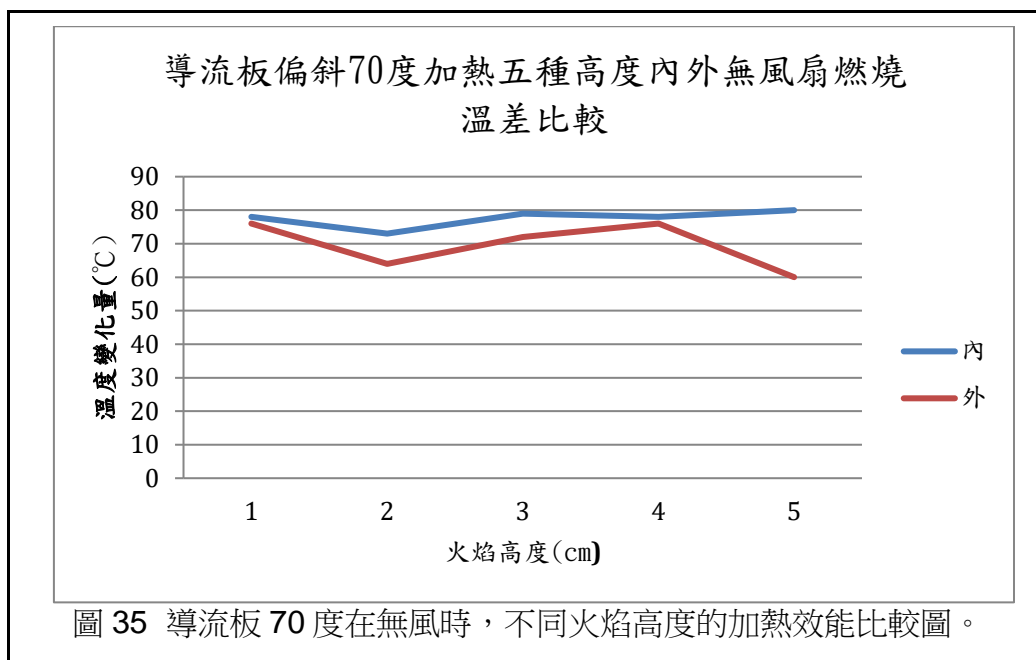
實驗結果如下：



圖 32 火焰高度與加熱裝置示意圖。



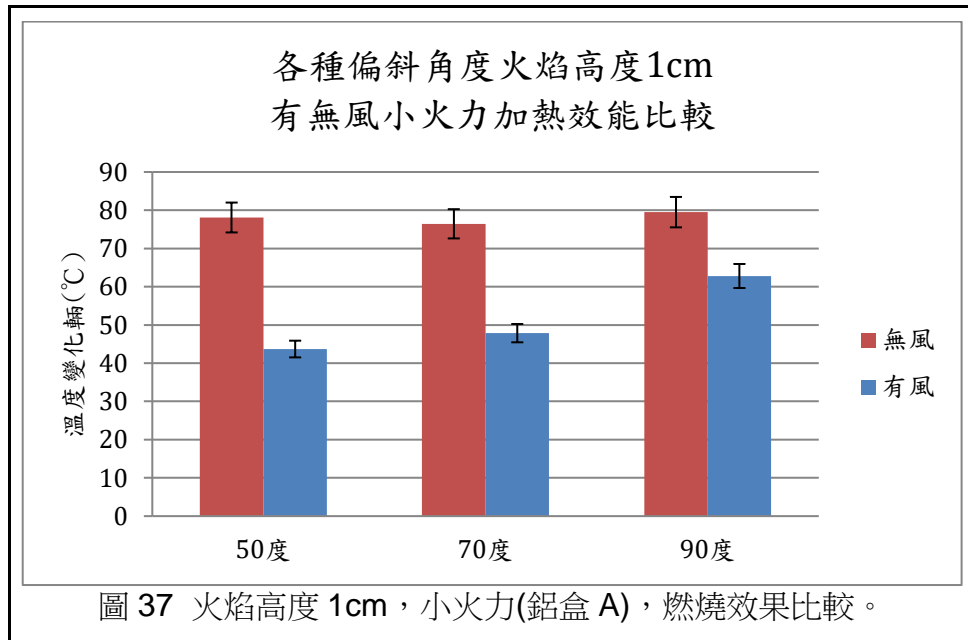
- 1.根據上面兩張圖我們可以發現在未開電風扇的情況下內部 1 公分的燃燒效能是最佳的，接下來效能隨高度增加略為遞減。
 - 2.可以發現在無風扇的情況下，外部的加熱效能並無規律，這說明藉由甲醇蒸氣燃燒進行加熱的效果非常容易受外界環境影響，開了風扇的情況下影響更明顯。
 - 3.不論有沒有開風扇，火龍捲裝置的加熱效能受高度增加的影響比較小。
- 以下是所有高度在 70 度的裝置內有無風扇的燃燒時間比較圖：



- 1.由圖 35、36 可知，70 度偏斜的導流板，它的加熱效果和 50 度的很類似。
- 2.在有開風扇的情況下，火焰高度 1c.m.時裝置內外加熱效果幾乎一致，也就是說加熱時火焰距離杯底愈近愈好，但是其餘高度都有明顯的溫差。

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。

在研究四檢測過各種偏斜角度裝置裡的甲醇燃燒後，50 度的酒精蒸氣殘留量最多，70 度的最少。這樣對於加熱裝置的加熱效果產生甚麼影響嗎？



從圖 37 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(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 38)

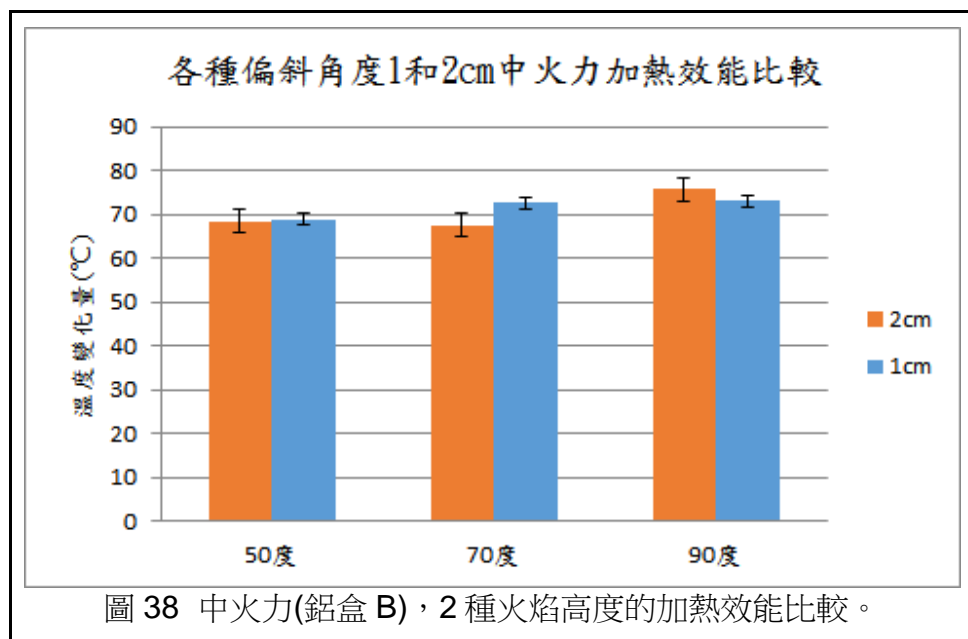


圖 38 對於兩種火焰高度還是呈現不出多大的差別，也就是說，以此方式加熱的時候杯底稍微靠近火源即可。但是比較圖 37 和圖 38，還是可以看出 90 度的裝置加熱效果最好，且各裝置的小火力比中火力溫度上升較多，可以差到 10 度。

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 16)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。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 39，觀察加熱裝置和對照組的表現。結果呈現在圖 40。



圖 39 隔著陶瓷纖維網加熱的裝置。

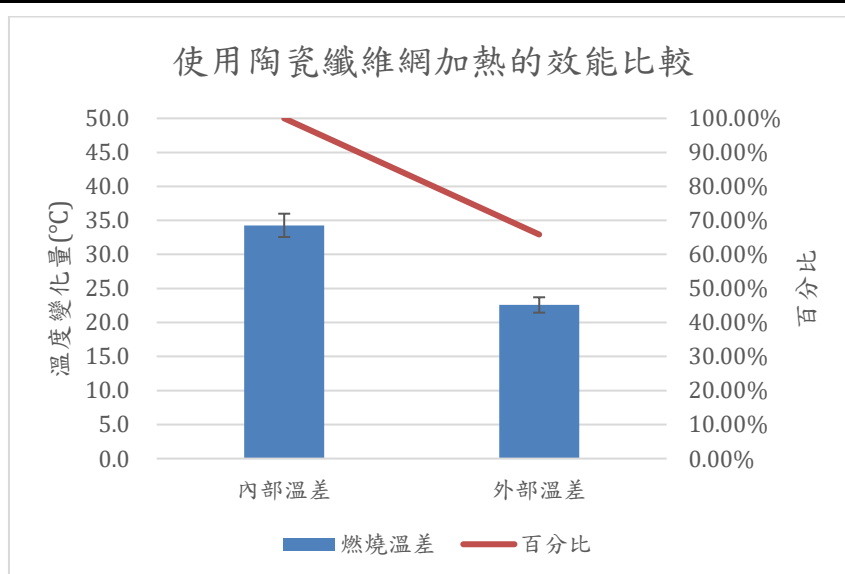


圖 40 70 度的裝置，小火力(鋁盒 A)，無風，火焰高度 1 公分隔著陶瓷纖維網加熱。

隔了一層陶瓷纖維網之後加熱效能明顯下降，圖 40 和圖 37 相比，70 度的加熱裝置溫度上升量不到原先的一半。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。

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. 燃料的使用率：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。
3. 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。
4. 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。
5. 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。
6. 對冷水的加熱效能：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，加熱效果相差不大；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。
7. 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://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%85%92%E7%B2%BE%E7%81%AF>

維基百科·酒精燈

5.翰林出版，109學年度八上自然課本 5-5 吸熱/放熱反應

6. [https://www.ntsec.edu.tw/Science-](https://www.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?cat=50&a=6821&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=6&sid=12593)

[Content.aspx?cat=50&a=6821&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=6&sid=12593](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