

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 物理科

040107

對流妙妙屋

學校名稱：桃園市私立新興高級中學

作者： 高二 羅佳華 高二 陳柄志 高二 吳承宇	指導老師： 劉亞浚
---	------------------

關鍵詞：對流、亂流、熱阻

摘要

為驗證「酒精燈燃燒速率與環境熱阻成反比」之理論，本實驗仿參考文獻【一】作法並重現其實驗系統，做法為補強數據點並使用更多比對方式，實驗結果顯示該理論符合實驗再現性。

為實踐理論之應用性，設計縮小比例之「具有煙囪房屋」模擬對流系統，並使酒精燈芯蕊於爐火中心燃燒，透過設計、改變環境熱阻之變因，觀察酒精燈燃燒速率及煙霧走向，藉以了解環境熱阻及氣流如何變化。

本實驗根據模擬屋實驗結果設計對流風管系統，最後發現透過控制轉速及風洞開口大小可使火爐燃燒速率制控於「燃燒速率最大值為最小值之5倍」。

壹、研究動機

近年來智慧屋的想法蔚為風潮，但由於諸多複雜的變因難以用公式推導，在觀看過「流言追追追一天降黃金雨」的影片後，發現可以利用模擬的方式解決多重變因問題，於是決定製作模擬對流屋來探討智慧屋的概念及其設計，而閱讀學長先前有關於熱對流的報告，發現其公式理論及結果能應用於模擬對流屋中，於是便開始著手此次的實驗計畫。

貳、研究目的

主題一：驗證酒精燈燃燒速率與環境熱阻成反比之現象

主題二：模擬並探討環境熱阻改變後對『具有煙囪房屋』之對流穩定性的影響

主題三：討論可穩定制控『具有煙囪房屋之環境熱阻』的方法

參、研究設備及器材

一、研究設備器材

名稱	數量	名稱	數量
不同尺度的玻璃管	7支	PVC板（測試版對流屋）	10片
保麗龍浮座	數組	壓克力板（正式版對流屋）	7片
自製酒精燈	2個	手電筒	1支
酒精（乙醇95%）	數瓶	放大鏡	1支
打火機	數把	碼表	1個
芯蕊	數公尺	水平儀	1個
鐵尺（15cm）	數把	小型千斤頂	1臺
透明膠帶	數捆	鑷子	1支
布膠帶	數捆	鐵夾	1支
中性矽利康	數罐	皮尺（10公分）	1條
剪刀	數支	捲尺（3.2公尺）	1個
鐵管模擬煙囪 （內直徑6cm、39cm）	1管	鐵管模擬煙囪 （內直徑4cm、39cm）	1管
鋁製模擬小火爐	1組	螺絲組	數組
美工刀	3支	火盆（木材、碳、烤肉架）	1組
模擬家具	數組	美術用紙（樹、風洞）	數張
竹筷	數包	泡綿膠	1捆
電子秤	1臺	直流電源供應器	1臺
鐵支架	數支	電池	數顆
電風扇	1臺	風扇（長7cm寬7cm高1.5cm）	1臺
線香	數包	瓦楞板	數片



圖 3-1 實驗器材



圖 3-2 電子秤



圖 3-3 直流電源供應器



圖 3-4 測試用房屋

二、本實驗為承接前人之實驗（見參考文獻【一】），因該作品並無存查於全國賽作品中，故主題一為呈現該實驗之再現性，主題二及主題三為呈現該實驗理論之應用性，故本實驗設計兩個對流系統，分別為

(一) 對流系統（甲）：圓管熱阻測試系統

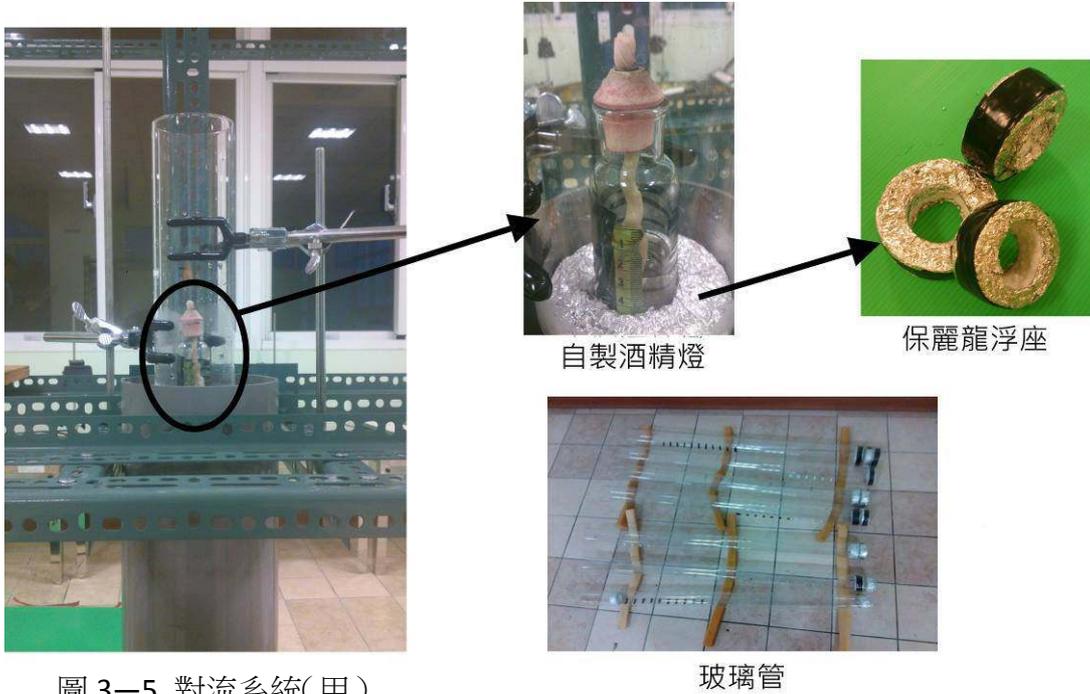


圖 3—5 對流系統(甲)

(二) 對流系統（乙）：對流屋系統

對流風管系統：

1. 直流靜音風扇：
可隨電壓改變轉速，進而控制燃燒速率。
2. 整流器：
緊密的風巢設計，用於增加風的穩定性。

可拆式煙囪酒精燈組：

1. 酒精燈芯：
酒精燈芯1公分露出，作為系統燃燒依據。
2. 可拆式煙囪：
以方便添加酒精，及觀察燃燒情形。

密封電子秤：

1. 電子秤：
精準至0.01，連接電腦做數據分析。
2. 密封壓克力板：
避免酒精燈下方對流，限制對流方向，以降低誤差。

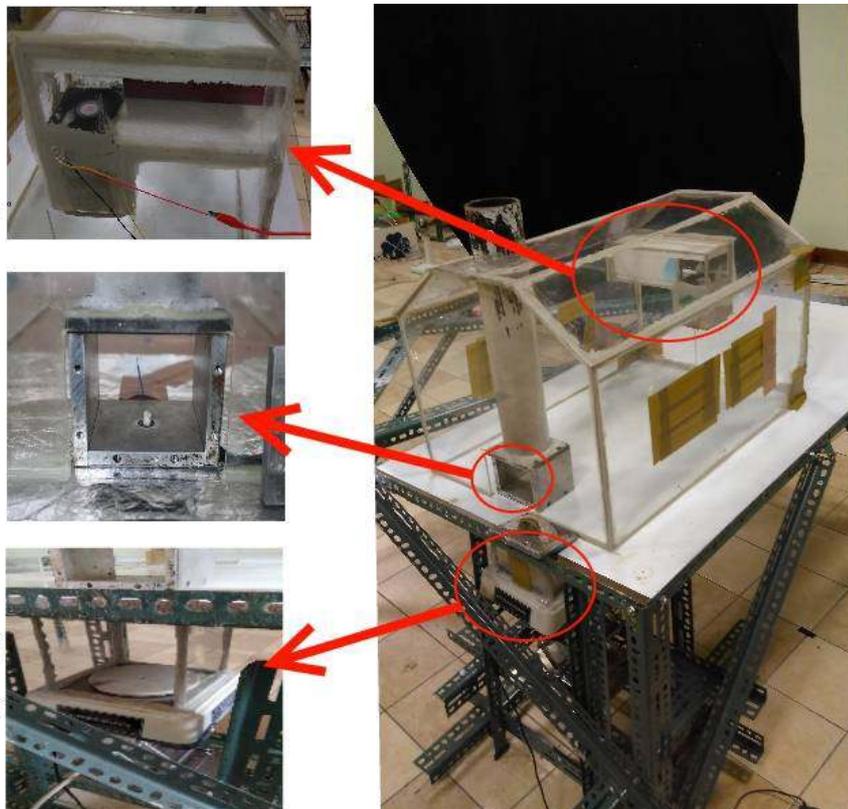
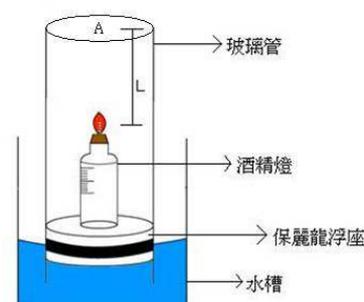


圖 3-6 對流系統（乙）

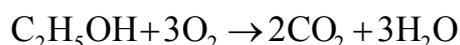
肆、研究過程或方法

一、實驗理論模型及原理

右圖為對流系統（甲）之示意圖，在玻璃管底部酒精燈燃燒產生之對流現象，氣體之進出會發生碰撞，此一碰撞結果導致熱阻現象，參考文獻【一】中提及玻璃管熱阻大小與管面積成反比、與管長成正比，此一結果可由下述理論推導：



酒精燈燃燒反應式如下：



令 Δt 秒內有 N 個酒精分子與 $3N$ 個氧分子作用，同時間有 $2N$ 個 CO_2 分子、 $3N$ 個 H_2O 分子及 $12N$ 個 N_2 分子向上對流。

根據氣體分子動力論，每個分子之內能與自身的溫度成正比，故每種分子內能表示如下：

$$U_{\text{CO}_2} = X_1 kT$$

$$U_{\text{N}_2} = X_2 kT$$

$$U_{\text{H}_2\text{O}} = X_3 kT$$

（註：理想氣體分子之氣體運動模式及種類有關及分子性質有關，根據參考文獻【四】可知 $X_1 = 1.33$ ， $X_2 = 1.4$ ， $X_3 = 1.33$ ）

若每個分子之起始溫度 T_i 及對流至外界後的溫度 T_f 均相同，根據冷卻定律藉由對流傳遞至外界之熱量可以下式表示：

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{T_i - T_f}{R_L + R_0} \dots\dots\dots(4-1)$$

在此模型中總熱阻值為管內熱阻（ R_L ）加上管外熱阻（ R_0 ），在對流過程中每秒傳遞至外界之熱量可視為每個分子減少之內能，可以下式表示：

$$\Delta Q = \Delta U = \Delta U_{\text{CO}_2} + \Delta U_{\text{N}_2} + \Delta U_{\text{H}_2\text{O}} \dots\dots\dots(4-2)$$

根據氣體分子動力論，(4-2) 式可以改寫成

$$\begin{aligned}\Delta Q &= X_1(2N)k(T_i - T_f) + X_2(12N)k(T_i - T_f) + X_3(3N)k(T_i - T_f) \\ &= N(T_i - T_f)k(2X_1 + 12X_2 + 3X_3) \dots\dots\dots(4-3)\end{aligned}$$

將 (4-3) 式帶回 (4-1) 式可以得到

$$\frac{Nk(T_i - T_f)(2X_1 + 12X_2 + 3X_3)}{\Delta t} = \frac{T_i - T_f}{R_L + R_0} \dots\dots\dots(4-4)$$

因本實驗燃燒皆採用酒精，故 $2X_1 + 12X_2 + 3X_3$ 為定值，故式子 (4-4) 可改寫成

$$\frac{N}{\Delta t} \propto \frac{1}{R_L + R_0} \dots\dots\dots(4-5)$$

前文假設 Δt 秒內有 N 個酒精分子和氧氣作用，故燃燒速率

$$v \propto \frac{N}{\Delta t} \dots\dots\dots(4-6)$$

比較 (4-5) 式及 (4-6) 式可得到下式

$$v \propto \frac{1}{R_L + R_0} \dots\dots\dots(4-7)$$

因管內熱阻之形成為氣體團碰撞所造成，熱阻形成之因素與電阻類似，故管內之熱阻可表示為下式

$$R_L = \rho \frac{L}{A} \dots\dots\dots(4-8)$$

將 (4-8) 式帶回 (4-7) 式，可得到下式

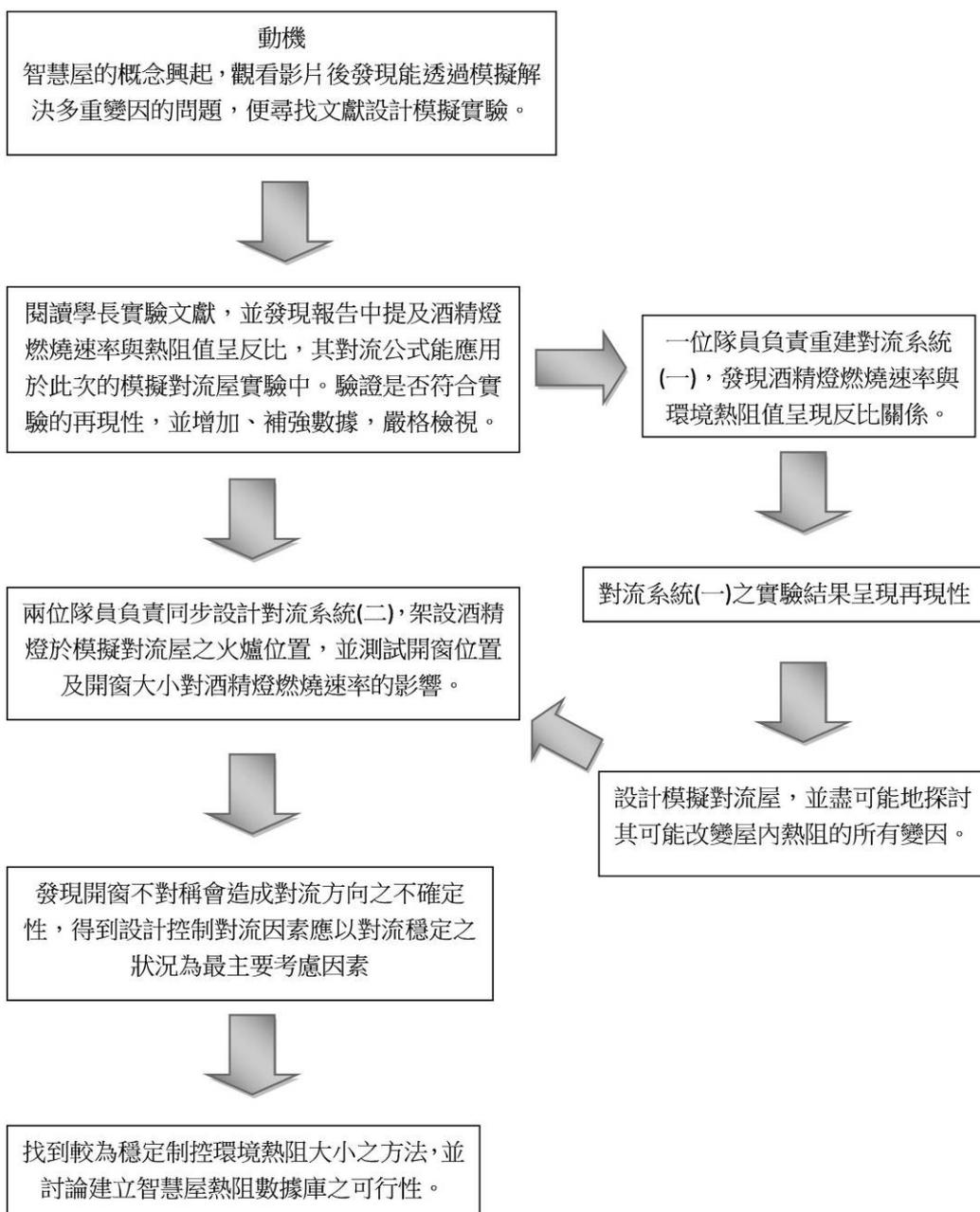
$$v = \frac{\alpha}{\rho \frac{L}{A} + R_0} \dots\dots\dots(4-9) \quad (\alpha \text{ 為常數})$$

(4-9) 式經過整理之後可以得到下式

$$\frac{1}{v} = \frac{\rho L}{\alpha A} + \frac{R_0}{\alpha} \dots\dots\dots(4-10)$$

如圖 3-6 中所架構系統之目的為放置酒精燈於火爐下方，但只有芯蕊伸出火爐中，下方電子秤可接電腦紀錄不同時間酒精之質量，因此可測得酒精燈在各種模擬屋環境因子改變時之燃燒速率，但由於影響環境熱阻之變因過多，故採用模擬的方式，根據 (4-7) 式，燃燒速率和環境熱阻值成反比，將此理論套用於對流屋中，當測得酒精燈燃燒速率較大即代表此時環境熱阻較小即對流較順暢，本實驗流程圖可表示如下，找出公式之應用性，以建立智慧屋熱阻數據庫為本實驗主要目的。

實驗流程圖



二、主題二及主題三操作及改變變因之方法

(一) 模擬對流屋火爐點燃之方法：

調整千斤頂高度使酒精燈置頂，使其將火爐之空隙完全密封（如圖 4-1-1），利用鑷子將燈芯放置於酒精瓶中（如圖 4-1-2），若實驗過程中燈芯出現燒焦之狀態（如圖 4-1-3），則將火熄滅再剪去燒焦部分。



圖 4-1-1



圖 4-1-2



圖 4-1-3

(二) 實驗 2-1、2-2 開窗大小制控：

先以瓦楞板覆蓋窗戶大部分之面積（如圖 4-1-4），再利用布膠帶制控出實驗所需的開窗大小（如圖 4-1-5）



圖 4-1-4



圖 4-1-5

(三) 實驗 2-3 家具擺設之方法：

為求每次放置家具時位置的準確性，裁切瓦楞板並將其黏貼於房屋地上（如圖 4-1-6），再依序將家具擺放於設計好之位置上。



圖 4-1-6



圖 4-1-7 家具示意圖

(四) 實驗 2-5 樹之排列：

	圖 4-1-8 樹疏排列	圖 4-1-9 樹密排列
圖示		

三、對流風管系統簡介：

(一) 對流風扇：

將 12volt 之直流風扇外接一直流電源供應器如圖 3-3 所示，其作用為控制進入屋內之進氣量及產生強制對流之強度。

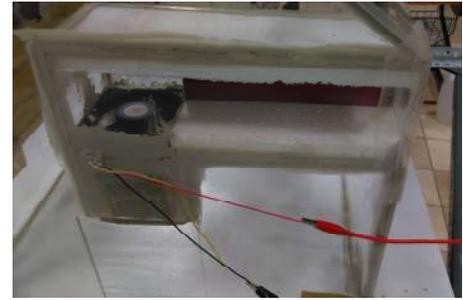


圖 4-1-10 主題三制控裝置

(二) 整流器：

此風巢之大小為 $7cm \times 7cm \times 5.5cm$ ，其截面積為 $49cm^2$ 且截面上有網格狀風巢(如圖 4-1-11)，本實驗中之網格密度約為 12.7 格/平方公分，其目的為對流風扇之紊流在流經此裝置後能夠形成層流進入屋內。

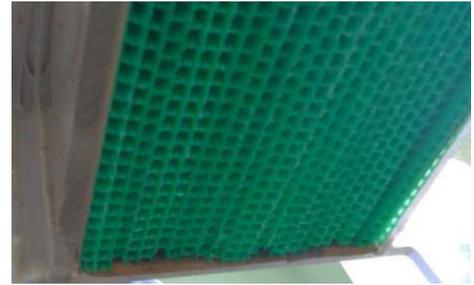


圖 4-1-11 自製整流器

上述裝置均為一體成形於 L 型風管中，此風管接於對流屋 $5cm \times 5cm$ 之風洞，如圖 4-1-10 所示，風洞開口寬度亦為本實驗中所操控的變因之一。

四、實驗安全注意事項

- (一) 酒精為易燃易揮發之物，實驗中應避免加過量酒精於酒精燈中，以免有氣爆之虞。
- (二) 酒精燈內酒精須保持至少6分滿，於測量結束時用濕抹布蓋住玻璃管口使火焰熄滅。
- (三) 實驗中玻璃管受熱可能造成固定夾上之塑膠熔化，需隨時觀察是否有鬆動，以避免玻璃管脫落造成危險。
- (四) 玻璃管為易碎物品應小心輕放，實驗後應等待玻璃管降溫後再進行拿取之動作。

五、酒精燈燃燒緊急應變措施

於模擬對流屋旁放置乾粉滅火器，當地震來臨造成酒精燈傾倒、燃燒時，能易於控制火勢並及時撲滅。



圖 4-2-1 對流屋安全措施



圖 4-2-2 滅火器示意圖

伍、研究結果

一、主題一：驗證酒精燈燃燒速率與環境熱阻成反比之現象

實驗系統：採用對流系統（甲），如圖3-5

實驗目的：設計對流系統以驗證式子（4-10）之正確性及參考文獻【一】之實驗再現性

（一）實驗1-1

實驗目的：探討固定玻璃管截面積（A），改變芯蕊中點至玻璃管頂之距離（L），並觀察酒精燈燃燒速率（ v ）的變化

控制變因：玻璃管截面積（A）、芯蕊裸露在酒精燈外之長度（1cm）

操作變因：裸露在外之芯蕊中心至玻璃管頂之距離（L）

應變變因：酒精燈燃燒速率（ v ）

實驗結果圖形：

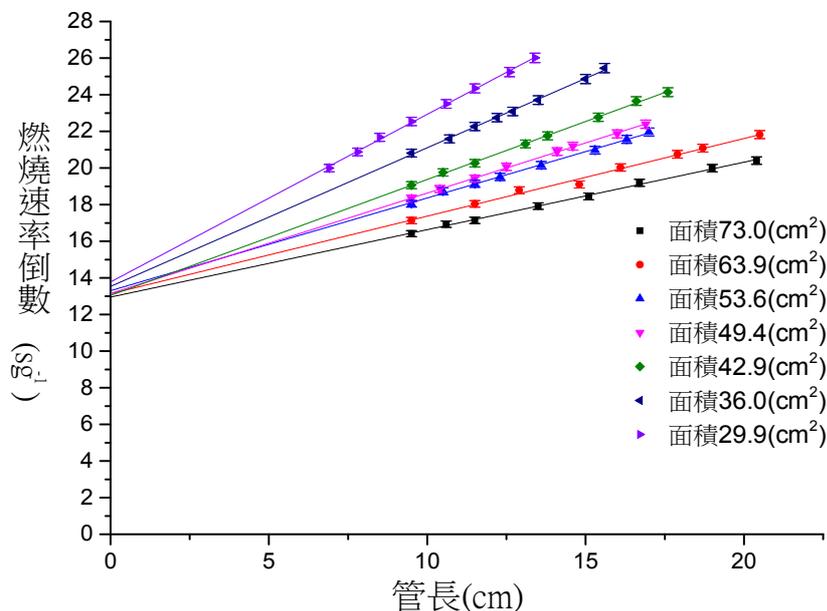


圖5-1 相同管徑下，高度與速率倒數的關係圖

圖5-1中每一條趨勢線均代表相同截面積之情形下，管長L與酒精燃燒速率倒數 $\frac{1}{v}$ 的關係，可發現每條趨勢線之結果皆呈現一次線性關係，且每條趨勢線的截距大致相等，茲將此七條

趨勢線之斜率及截距陳列於下表：

管徑平方	73.05121	63.93602	53.69958	49.44902	42.94181	36.03601	29.93184
斜率倒數	2.77	2.38	2	1.85	1.58	1.33	1.09
斜率	0.36	0.42	0.5	0.54	0.63	0.75	0.91
截距	12.95	13.13	13.30	13.15	13.04	13.53	13.78
R平方值	0.999	0.996	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999

表5-1 七條趨勢線之資料統整

(二) 實驗1-2

實驗目的：探討固定芯蕊中點至玻璃管頂之距離（L），在不同玻璃管截面積（A）之情況下觀察酒精燈燃燒速率（ v ）的變化

控制變因：芯蕊中點至玻璃管頂之距離（L）、芯蕊裸露在酒精燈外之長度（1cm）

操作變因：玻璃管截面積（A）

應變變因：酒精燈燃燒速率（ v ）

實驗結果圖形：

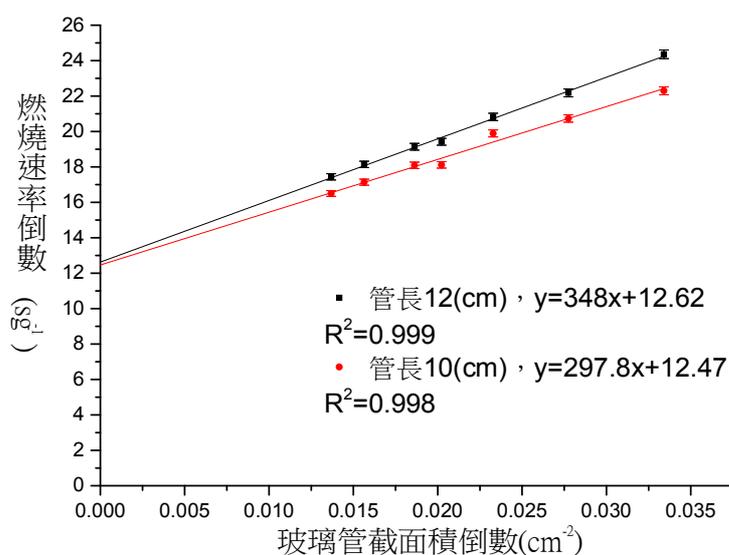


圖5-2相同管長L下，燃燒速率倒數與玻璃管截面積倒數關係圖

由圖5-2可知在相同管長L下玻璃管截面積倒數 $\frac{1}{A}$ 與燃燒速率倒數 $\frac{1}{v}$ 成正比（見討論一），也可觀察出兩管長L與斜率比例大致相等。

	斜率	截距	R平方值
管長L12cm	348.0	12.62	0.999
管長L10cm	297.8	12.47	0.998

表5-2斜率及截距之詳細列表

二、主題二：模擬並探討環境熱阻改變後對『具有煙囪房屋』對流穩定性的影響

實驗系統：採用對流系統（乙），如圖 3-6，並固定芯蕊長度為 1cm

實驗目的：設計對流系統以模擬「具有煙囪房屋」燃燒情形，探求環境熱阻制控之可能性

實驗步驟：

- （一）每隔五秒紀錄一次，紀錄九次之後為第一次燃燒速率，並繪圖後求得趨勢線斜率為燃燒速率且紀錄第一次相關係數。
- （二）將窗戶封閉五秒後再開啟並重複步驟（一），得到第二次燃燒速率及相關係數。
- （三）重複步驟（一）及（二）十次，故可共得到十次燃燒速率及相關係數。

表 5-3 中之燃燒速率平均值為十次燃燒速率平均值，表 5-3 中相關係數平均值即為此數次相關係數之平均值，表 5-3 中燃燒速率變動率為求得「所記燃燒速率之標準差兩倍」所造成與平均值比較之偏差百分比（詳細定義見討論二）。因本實驗操作過程中酒精燈芯蕊約 40 分鐘後會燒焦，故表中所有燃燒速率之平均值皆為以「無風、無樹、無家具、開一扇窗為 0.2cm」之讀數作為歸一之基準變因，理由為此基準之變動率最小，故每次改變變因時均先「測量十次」此基準變因之燃燒速率。

（註：相同變因做一輪需重複測量十次燃燒速率方可得到一個變動率數值。）

實驗結果：

表 5-3 主題二各種變因之結果分析

	控制變因	操作變因	酒精燈平均 燃燒速率 (數據歸一化)	燃燒速率 變動率 (%)	燃燒速率 相關係數 平方 (r^2) 平均值
實驗 2-1-1	無風、室外溫度、開窗一扇、開窗位置、煙囪高度、內部無家具，外部無樹木。	開窗 0.2cm	1.0000	2.9%	0.996
		開窗 0.4cm	1.0971	1.6%	0.997
		開窗 0.6cm	1.1379	3.6%	0.995
		開窗 0.8cm	1.1570	3.4%	0.997
		開窗 1.0cm	1.1869	4.7%	0.997
		開窗 1.2cm	1.2062	2.0%	0.995
		開窗 1.4cm	1.1529	7.3%	0.997
		開窗 1.6cm	1.1603	4.5%	0.996
		開窗 1.8cm	1.0729	7.3%	0.996
		開窗 2.0cm	1.2153	5.7%	0.997
		開窗 5.0cm	1.0930	5.5%	0.997
		開窗 10.0cm	1.0855	11.7%	0.995
實驗 2-1-2	風速、風向（東風，迎風）、室外溫度、開窗一扇、開窗位置、煙囪高度、內部無家具，外部無樹木。	開窗 1cm	1.2156	4.2%	0.996
		開窗 2cm	1.2446	5.6%	0.996
		開窗 5cm	1.1192	7.6%	0.997
		開窗 10cm	1.1110	9.6%	0.996

實驗 2-2-1	室外溫度、開窗一扇、開窗大小（均為 1cm）、煙囪高度、內部無家具，外部無樹木。	無風	1.1869	2.3%	0.997
		迎風	1.2267	5.9%	0.997
		背風	1.0437	5.9%	0.996
實驗 2-2-2	室外溫度、開窗一扇、開窗大小（均為 1cm）、開窗位置、煙囪高度、內部無家具，外部無樹木。	南風（0 度）	1.2267	5.9%	0.997
		東南風（45 度）	1.3077	2.2%	0.997
		東風（90 度）	1.2044	3.9%	0.998
實驗 2-3-1	無風、室外溫度、開窗一扇、開窗大小（均為 2cm）、煙囪高度、外部無樹木。	無家具擺置	1.0239	7.7%	0.990
		家具擺置 1	1.0267	8.6%	0.990
		家具擺置 2	1.0211	8.8%	0.990
實驗 2-3-2	風速、風向、室外溫度、開窗一扇、開窗大小（均為 2cm）、煙囪高度、外部無樹木。	無家具擺置	1.0707	5.2%	0.990
		家具擺置 1	1.1673	9.4%	0.991
		家具擺置 2	1.1197	7.3%	0.992
實驗 2-4	無風、室外溫度、開窗一扇、開窗大小（均為 2cm）、開窗位置、煙囪高度、內部無家具。	無樹	0.9891	7.7%	0.995
		樹隨機排列 1（較散）	0.9986	7.7%	0.987
		樹隨機排列 2（較密）	0.9932	10.4%	0.979

實驗結果分析：

本次實驗對流屋方位及窗戶位置之情況如圖 3-6，環境變因為有無風、風向開窗大小、開窗位置、家具及樹木，紀錄酒精燈燃燒率方式為每隔五秒讀取一次電子秤讀數，四十五秒內共可讀取九個數據點並做趨勢線分析，趨勢線斜率即為此次測量之燃燒速率。

(一) 由實驗 2-1 可繪圖如圖 5-3，圖中可知在開窗寬度為 0.2cm~1.2cm 區間，開窗面積和酒精燈燃燒速率呈現正相關之關係。

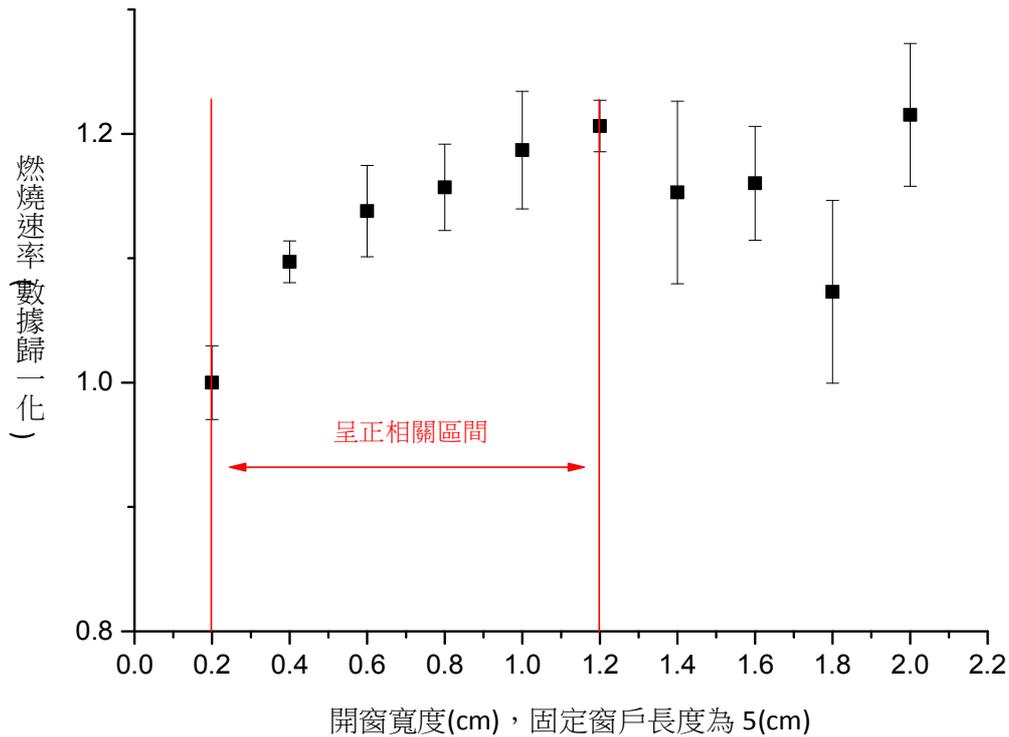


圖 5-3 不同開窗寬度下與燃燒速率關係圖

(二) 由實驗 2-2-1 比較，可見到當模擬對流屋在有風的環境時，燃燒速率會略微提升，而當窗戶開口在迎風面時，酒精燈燃燒速率較背風面大，觀察實驗 2-2-2，風向由正對窗口變化至東南 45 度窗口的操作過程中發現燃燒速率平均值漸漸變大，風向由東南窗口變化至平行窗口後燃燒速率平均值漸漸變小。

(三) 觀察實驗 2-3、2-4，擺置家具與在四周種樹並不會造成明顯的燃燒速率改變。

(註：詳細分析見討論四)

三、主題三：討論可穩定制控『具有煙囪房屋之環境熱阻』的方法。

實驗系統：採用對流系統（乙），如圖3-6，並固定芯蕊長度為1cm

實驗目的：設計L型風管，加裝風扇及整流器（如圖4-1-10），以制控屋內熱阻

（一）實驗 3-1

實驗系統：採用對流系統（乙）如圖 3-6

實驗目的：討論對流風扇轉速對酒精燈燃燒速率的影響

操作變因：對流風扇轉速

控制變因：風洞開口寬度 0.5cm、芯蕊長度 1cm、無風、煙囪高度、內部無家具、外部無樹木、室溫

實驗結果：

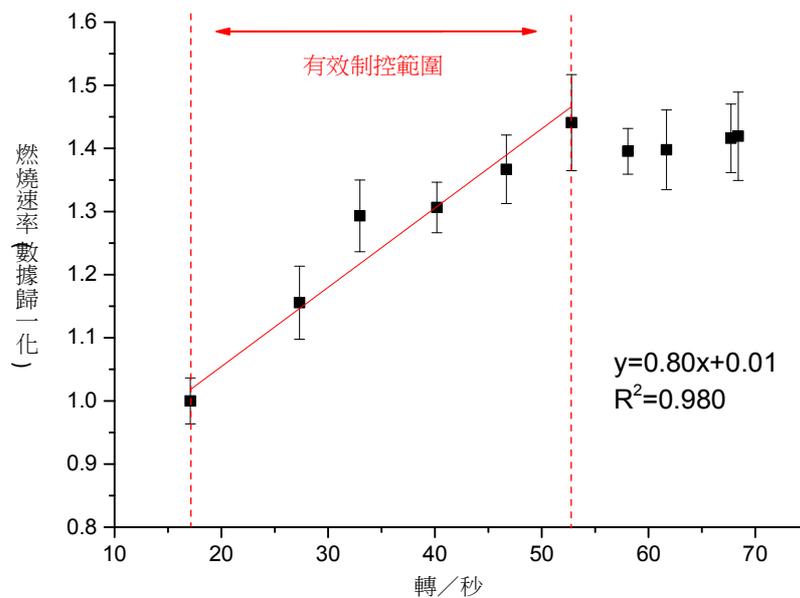


圖5-4固定風洞開口大小，對流風扇轉速與酒精燈燃燒速率之關係圖

結果分析：

- 1.酒精燈燃燒速率之變動率約為 3.6%~7.6%。
- 2.上圖得知最佳制控區間為 17.09 轉/秒~52.78 轉/秒，歸一化後並以最小值為 1，可知圖中量得最大燃燒速率為最小值的 1.4 倍，此為制控範圍之重要依據。

（註：詳細分析見討論六）

(二) 實驗 3-2

實驗系統：採用對流系統（乙）如圖 3-6

實驗目的：討論風洞開口大小對酒精燈燃燒速率的影響

操作變因：風洞開口寬度（註：風洞為 L 型對流風管系統接合房屋處，並非窗戶。）

控制變因：風洞開口長度 5cm、對流風扇轉速、芯蕊長度 1cm、無風、煙囪高度、內部無家具、外部無樹木、室溫

實驗結果：

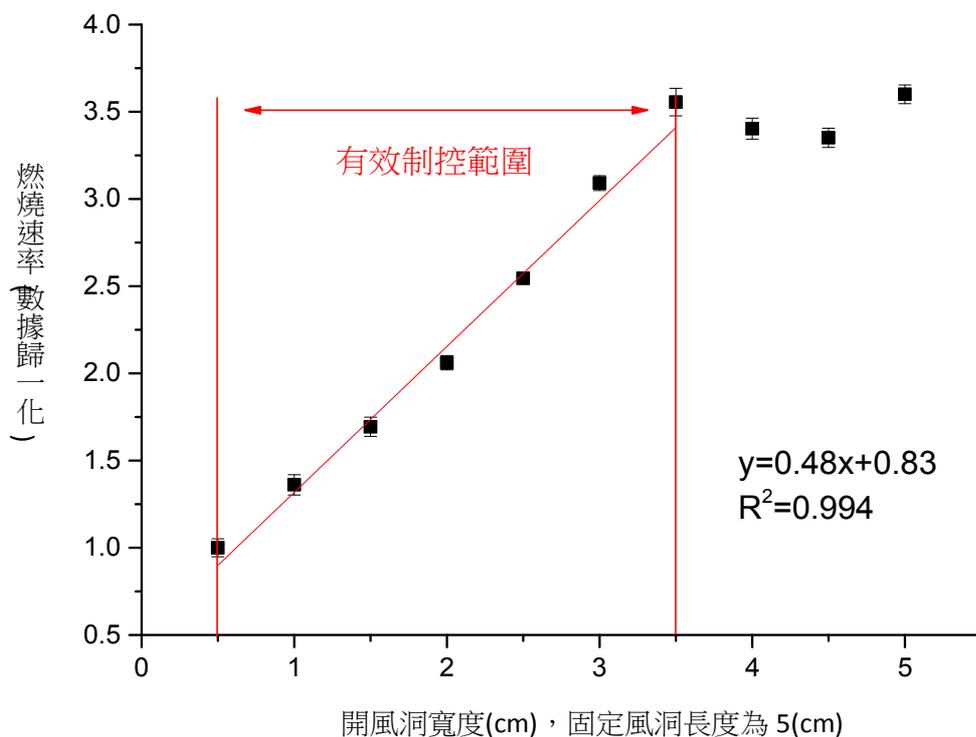


圖5-5固定對流風扇轉速為52.78轉/秒，風洞開口寬度與酒精燈燃燒速率之關係圖

結果分析：

1. 酒精燈燃燒速率之變動率約為 2.1%~7.8%。
2. 上圖得知最佳制控區間為風洞開口寬度 0.5cm~3.5cm，歸一化後並以最小值為 1，可知圖中量得最大燃燒速率為最小值的 3.5 倍，此亦為制控範圍之重要依據。

（註：詳細分析見討論六）

陸、討論

一、主題一之結果與參考文獻【一】結果比較：

對流系統（甲）主要為驗證下式：

$$\frac{1}{v} = \frac{\rho L}{\alpha A} + \frac{R_0}{\alpha} \dots\dots\dots(6-1)$$

而式中所隱含之意義為酒精燈之燃燒速率與環境熱阻成反比，主題一之目的主要為驗證該式之正確性及呈現參考文獻【一】實驗之再現性，本實驗與文獻之實驗方法及驗證方式不同處可分為下列數點討論：

（一）該實驗採用三種不同截面積之玻璃管，而本實驗新增為七種不同截面積之玻璃管，故在比較不同截面積之實驗中增加數據點，可更精確地說明該式之正確性。

（二）觀察該式中若固定參數A，則 $\frac{1}{v}$ 和L呈現一次線性關係，此一結果可見於參考文獻【一】之圖6-2-1，而該圖只有一條趨勢線，若比較主題一之實驗結果圖5-1可發現有七支玻璃管呈現不同之趨勢線，由公式可知不同趨勢線之斜率意義為 $\frac{\rho}{\alpha A}$ ，而截距在本實驗中為定值，故可推知「斜率倒數比」即為「面積比」，參考文獻【一】因只有一條趨勢線故無法以斜率意義驗證公式之正確性，可由本實驗表5-1得到下列結果：

面積比：1：0.875：0.735：0.676：0.587：0.493：0.409

斜率倒數比：1：0.859：0.722：0.667：0.570：0.480：0.393

由上述比例吻合度可以驗證此公式之正確性。

由公式可推得截距之意義為 $\frac{R_0}{\alpha}$ ，此一截距值在本實驗中應為定值，因本實驗

趨勢線共可呈現七個截距值（見表5-1），取其平均平均值為13.26、兩個標準差值為0.58，故理論上此截距為定值而言，本實驗結果與事實之誤差百分比為2.72%，而參考文獻【一】並未比對截距之誤差。

（三）實驗1-2為固定公式中之參數L，以驗證 $\frac{1}{v}$ 與 $\frac{1}{A}$ 為一次線性關係，此圖亦可見於參考

文獻【一】之圖6-2-2，該圖中因只有三種截面積之玻璃管，故只有三個數據點，為提升驗證公式之嚴謹度，本實驗選取七種截面積之玻璃管，呈現之結果如圖5-2，由公式中可知趨勢線之斜率意義為 $\frac{\rho L}{\alpha}$ ，故「斜率比」即為「高度比」，以本實驗之結果可由表5-2得到下列結果：

高度比：1：0.833

斜率比：1：0.854

此二值誤差百分比約為0.6%，此外圖5-2中兩條趨勢線之截距意義與圖5-1截距意義相同，然而表5-1之截距平均值範圍為 13.26 ± 0.58 、表5-2之截距平均值範圍為 12.54 ± 0.1 ，誤差百分比約為3%~7%，但以圖5-2趨勢線相關係數較圖5-1較為小，故推估截距值以實驗1-1之七條趨勢線截距平均值範圍 13.26 ± 0.58 較為正確。

(四) 從公式可觀察到若固定參數 v ，則 L 及 A 兩參數關係為成正比關係且圖形將會通過原點，參考文獻【一】中圖5-2-1(a)中可以看到雖然只有三種管面積，以此做 L 及 A 兩參數之圖形符合固定參數 v 之情況，但因最低燃燒速率為一不穩定值，為測量時無法到達之情況，故本實驗分析方式更改為選定兩個固定之燃燒速率，並內插於圖6-1中求得七玻璃管在此二固定高度之燃燒速率，此一做法之意義及步驟如下：

1. 圖5-1中趨勢線相關係數均大於0.99，內插之準確性應相當高。

2. 內插得到之數據畫出兩條參數 A 及參數 L 之斜直線，由公式得之此二斜直線之斜率

(m) 為下式：

$$m = \frac{\alpha}{\rho} \left(\frac{1}{v} - \frac{R_0}{\alpha} \right) \dots \dots \dots (6-2)$$

3. 選取 $\frac{1}{v_1} = 20 \text{sg}^{-1}$ 及 $\frac{1}{v_2} = 24 \text{sg}^{-1}$ 內插圖6-1中七條趨勢線，結果整理如表6-1：

內插符合速率倒數為 20sg^{-1} 之管長及對應截面積	$A_1=229.3 \text{cm}^2$	$A_2= 200.7 \text{cm}^2$	$A_3= 168.6 \text{cm}^2$	$A_4= 155.2 \text{cm}^2$	$A_5=134.8 \text{cm}^2$	$A_6=113.1 \text{cm}^2$	$A_7=93.9 \text{cm}^2$
	$L_1= 19.1 \text{cm}$	$L_2= 16.2 \text{cm}$	$L_3= 13.2 \text{cm}$	$L_4= 12.5 \text{cm}$	$L_5=11 \text{cm}$	$L_6= 8.5 \text{cm}$	$L_7=6.8 \text{cm}$

內插符合速率倒數為 24s g^{-1} 之 管長及對應 截面積	$A_1'=229.3\text{ cm}^2$	$A_2'=200.7\text{ cm}^2$	$A_3'=168.6\text{ cm}^2$	$A_4'=155.2\text{ cm}^2$	$A_5'=134.8\text{ cm}^2$	$A_6'=113.1\text{ cm}^2$	$A_7'=93.9\text{ cm}^2$
	$L_1'=29.9\text{ cm}$	$L_2'=25.5\text{ cm}$	$L_3'=21.1\text{ cm}$	$L_4'=19.8\text{ cm}$	$L_5'=17.3\text{ cm}$	$L_6'=13.8\text{ cm}$	$L_7'=11.1\text{ cm}$

表6-1 內插圖6-1得到固定燃燒速率倒數，不同管長所對應之面積

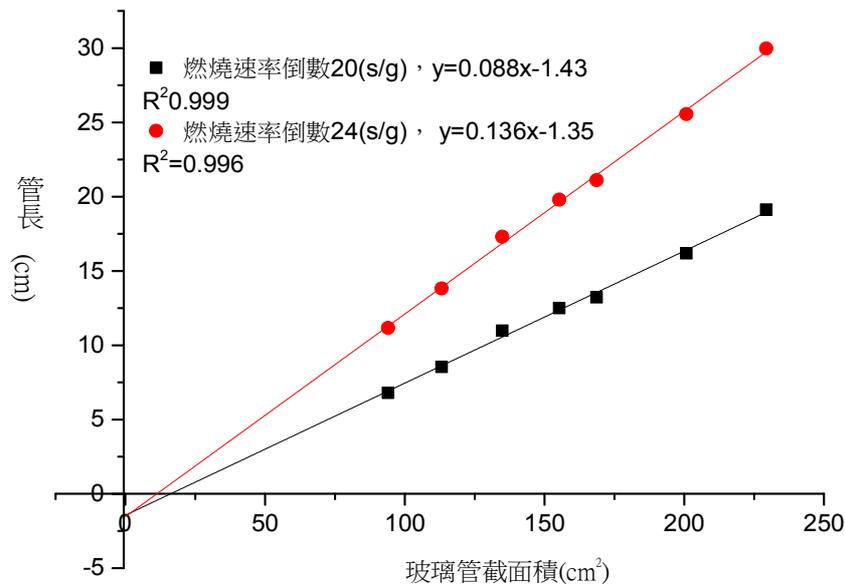


圖6-1 相同燃燒速率倒數 $\frac{1}{v}$ 下，玻璃管截面積A與管長L關係圖

圖6-1即為根據上表畫出之兩條參數A及參數L之關係圖，圖中趨勢線知斜率比為1：1.54，此一斜率可與下列方式求得之斜率比對：

1.根據(6-2)式可知斜率比可表示為下式：

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{\frac{1}{v_1} - \frac{R_0}{\alpha}}{\frac{1}{v_2} - \frac{R_0}{\alpha}} \dots\dots\dots(6-3)$$

2.將 $\frac{1}{v_1}$ 及 $\frac{1}{v_2}$ 分別帶入20s/g及24s/g;且圖5-1-1之截距可得 $\frac{R_0}{\alpha} = 13.26 \pm 0.58$

3.將兩者帶入後可得 $\frac{m_2}{m_1} = 1.59 \pm 0.11$

因此圖6-1中斜率比為1.54，而由式子（6-3）求得之斜率比為 1.59 ± 0.11 ，兩者皆為實驗值且取平均之誤差率約為3%。

圖6-1中所有點並非在趨勢線上而造成趨勢線有些許之偏移而未通過原點，推論誤差原因為氣流對流時所造成亂流及本實驗並非理想之點熱源。然而圖5-1及圖5-2之相關係數皆為0.99以上，且根據式子（6-3）求得之斜率比符合圖6-1之斜率比，根據此二結果驗證「酒精燈之燃燒速率與環境熱阻成反比」為正確之邏輯。

二、主題二及主題三之燃燒速率變動率是否為儀器所造成的誤差？

本實驗記錄燃燒速率的方式為每紀錄九次電子秤讀數為計算一次燃燒速率，接著關閉窗口，經過五秒後讓對流重新啟動並以同樣動作此紀錄十次於相同變因下燃燒速率之實驗值，如圖 6-2 共可分為十個區間，但均為同一個變因只是有重新啟動對流，區間與區間時間為不連續，但只取斜率意義故化成連續圖形。

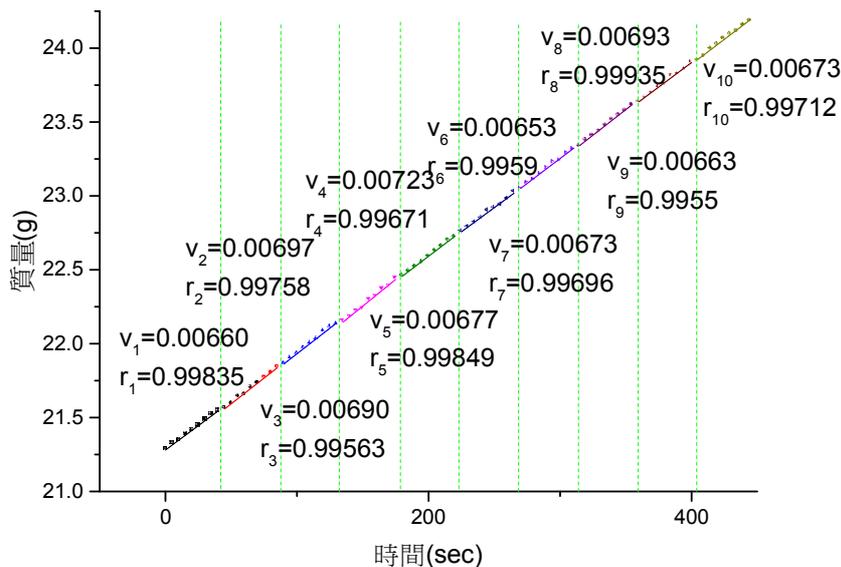


圖 6-2 相同變因下紀錄十次燃燒速率之實驗值

圖 6-2 所示將此十次燃燒速率測量值之標準差兩倍為 2σ 且取平均值為 A ，本實驗中燃燒速率變動率定義為下式：

$$\Delta v = \frac{2\sigma}{A} \times 100\% \dots \dots (6-4)$$

圖 6-2 中為記錄一次酒精質量隨時間變化圖形，因時間為電腦紀錄之過程故忽略其誤差，本實驗採用電子秤質量準確至 0.01 公克，因此量取之讀數存在誤差，圖中顯示之酒精質量誤

差棒即為 0.01 公克，亦可得知圖中斜率為燃燒速率並以 Origin 分析誤差棒造成之斜率偏差比例約為 1.8%，即代表電子秤造成測量酒精燃燒速率之誤差為 1.8%，從主題二發現同一變因重新啟動對流後發生變動率約為 1.6%~11.7%，此一結果遠遠超過電子秤造成測量燃燒速率的誤差，故同一變因之十次測量值所產成的燃燒速率變動率並非儀器所造成之誤差。

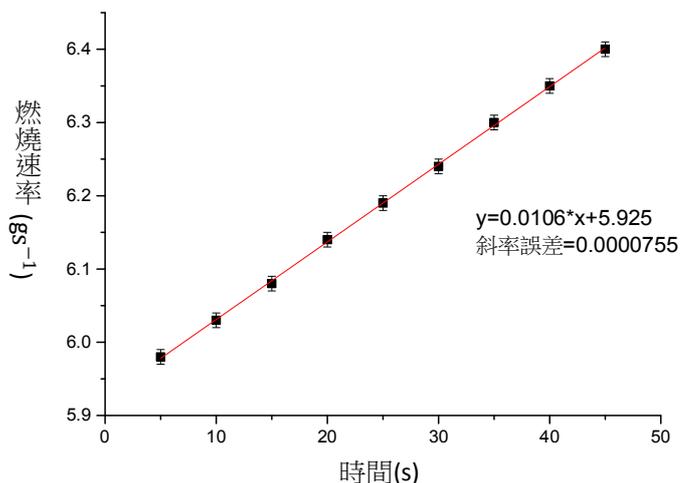


圖 6-3 酒精質量隨時間變化之圖形

三、主題一之燃燒速率變動率較主題二及主題三燃燒速率之變動率較小的原因探討：

	圖 6-4-1 對流系統（甲）氣流正撞示意圖	圖 6-4-2 對流系統（乙）開側窗氣流側撞示意圖
圖示		

氣體藉由對流將內能傳遞至外界的過程中，因進出方向的不確定導致氣體團碰撞而形成「對流熱阻」，例如圖 6-4-1 中表示為若對流系統（甲）中之空管長度相同之情況下，若其中

一空管上方以一隔板區隔，則可以發現酒精燈之燃燒速率變大，此一結果可見於參考文獻【一】，代表加入隔板後氣體團進出口明確，使氣體團因碰撞造成對流阻力之機會降低，因此熱阻值下降的結果也使酒精燈燃燒速度變大，然而由圖 5-1 及 5-2 中可以發現對流系統(甲)發生燃燒速率之變動率相當的小，試想變動率若為 1.6%~11.7%，則圖中測得的點很難在同一直線上，討論一交叉比對公式斜率意義亦不可能符合公式結果。對流系統(甲)之燃燒速率變動率遠小於對流系統(乙)之結果可做以下分析：

(一) 根據參考文獻【三】雷諾數代表流體慣性力與黏滯力之比值，僅為大小的量度，能夠代表流體之流動情形，由文獻【四】知當雷諾數 Re 大於 4000 時，慣性力較重要而形成亂流(紊流)，而空氣的黏滯系數較低，故容易形成紊流且具有下列各點特性：

1. 流體質點的運動極不規則，流場中各種流動參數的值具有脈動現象。
2. 由於脈動的急劇混摻，流體動量、能量、溫度以及含有物的濃度的擴散速率較層流為大。
3. 紊流是有渦流動，並且具有三維特徵。

(二) 根據參考文獻【二】有關層流及紊流著名例子：

「煙霧離開線香數公分內為層流現象，而數公分後則消失而成為亂流」

本實驗亦以線香之煙霧觀察氣體團在屋內流動的情況，如圖 6-4-2 所示為無風的情況下煙霧由窗進入到屋內，藍色箭號為實際觀察到層流的情況，但箭號的末端就變成亂流，橘色箭號為我們想像室內氣體流往火爐的流動方向，可以發現橘色箭號與藍色箭號發生側撞的現象，圖 6-4-1 為對流系統(甲)想像對流的情況，因為方向為上沖下洗故氣體團為正撞機率遠大於側撞的現象，因此得到下列推論：

1. 紊流之理論說明一旦形成漩渦，則規模大小、分部及方向均為隨機分布。
2. 圖 6-4-1 中氣流正撞導致的渦流並不會造成燃燒速率很大的變動，中間溫度較高故氣體由兩側進入到管內至酒精芯蕊處反應，隨後由中間對流至外界，且流體正撞渦流較少，隨機發生渦流難以改變進出氣體的模式，故燃燒速率變動率很小。
3. 圖 6-4-2 中氣流為側撞，渦流產生的較多，好比水流側向匯集處容易產生渦流，且氣體進

出方向為不對稱，故較多的渦流若隨機分布在側撞點則會影響氣流的走向，故對流模式隨機變動的情況下，熱阻隨時間變動而造成酒精燈燃燒速率發生變動率，實驗中也發現開側邊的窗戶會導致火焰左右飄動。

4.以氣流之自由度而言，對流系統甲中之氣流多為上下，對流系統乙中氣流由外界進入屋內再對流至火爐之過程中，流經的空間定義為對流通道，此通道較不像對流系統甲一般為較明確的上下對流，故氣流的自由度較大，故可以聯想到若某一電阻在固定電壓下，引用電學迴路中兩種假想情況來比喻本實驗的兩個實驗系統：

- (1) 對流系統（甲）的對流通道為明確上下對流，可比喻成迴路中電阻長短和粗細不隨時間改變，故熱阻變動率小。
- (2) 對流系統（乙）的對流通道自由度較大，可比喻成迴路中電阻長短粗細隨時間改變，故熱阻變動率大。

故由上述二點可推知實驗上看到對流系統乙之酒精燈燃燒速率變動率大是因為對流系統乙之氣流通道在屋內的自由度較大。

四、主題二之變因與燃燒速率影響

（一）開窗面積大小與燃燒速率之關係：

如圖5-3所示，開窗長度均為10cm，在無風的環境下，開窗寬度與燃燒速率的關係圖，數據點為測量十次燃燒速率之平均值，誤差棒為燃燒速率變動率，此實驗重複測量兩次後分析並將變動率整理於表6-2。

開窗寬度	0.2cm	0.4cm	0.6cm	0.8cm	1.0cm	1.2cm	1.4cm	1.6cm	1.8cm	2.0cm
變動率	2.9%	1.6%	3.6%	3.4%	4.7%	2%	7.3%	4.5%	7.3%	5.7%

表6-2 不同開窗寬度燃燒速率變動率一覽表

此一結果可以觀察到：

1.開窗寬度在1.2cm以內，變動率均小於5%，且在此範圍內呈現開窗愈大則燃燒速率愈大。

2.開窗寬度超過2cm後變動率均逼近於10%，此範圍內燃燒速率平均值也不易隨開窗寬度變寬而變大。

使二點為開窗實驗觀察到的結果，我們並拍攝煙霧在屋內對流之情況，發現無風開窗2cm的情況下煙霧在室內流動的實際拍攝如圖6-5-1示，可以發現氣體由外界進入屋內有一段層流的現象，而開窗5cm（圖6-5-2）後觀察煙霧的情況發現亦有層流的現象，但進入屋內維持層流的長度比開窗2cm較短。

由觀察煙霧的實驗對照與酒精燈燃燒速率之實驗比對可得到下列兩點結論：

- 1.開窗面積小則觀察到層流比較明顯，對流通道較明確的情況下則熱阻變動小，故量得酒精燈燃燒速率變動率較小。
- 2.開窗面積愈大則燃燒速率愈大，我們認為開窗面積越大則加大了對流強制性，故雖然煙霧觀察到的層流較不明確，但強制對流效果大於開窗面積小的情況。

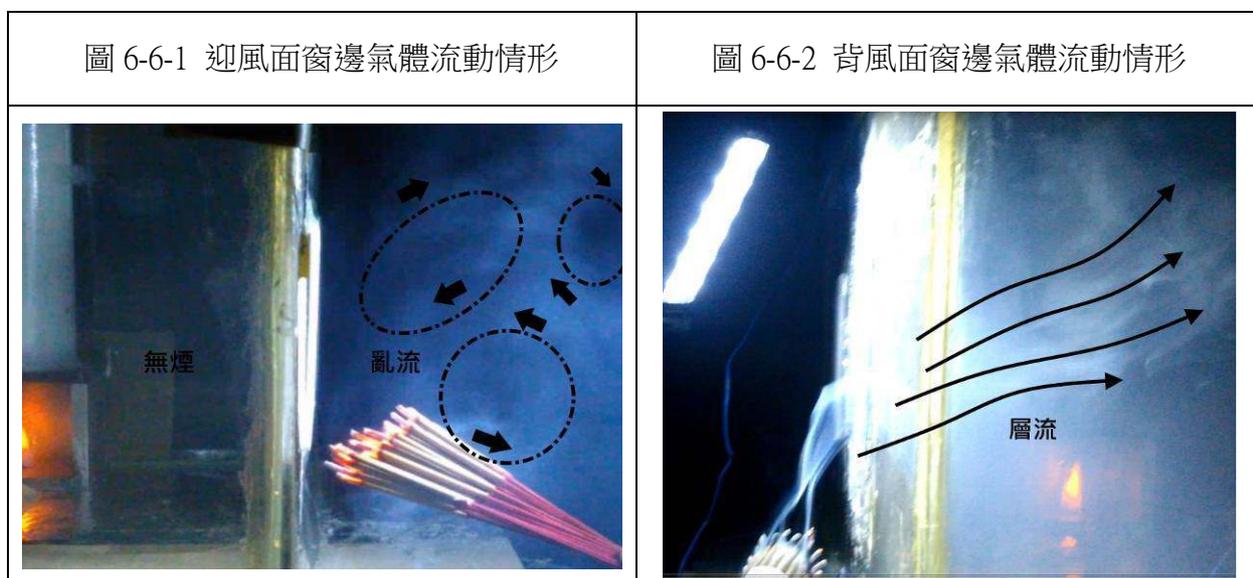


（二）環境的風對燃燒速率大小及變動率影響之討論

根據表 5-3 中實驗 2-2-1 之結果可發現開窗寬度均為一公分的情況下，環境有風和無風之燃燒速率在考慮變動率後仍有變化，此結果分析如下：

- 1.嘗試以煙霧觀察有風情況下，如圖 6-6-1 所示迎風面窗邊氣體流動的情況幾乎是一團混亂，毫無層流進入窗內的現象，此一現象讓對流比無風時更不明確。
- 2.有風的情況下氣體流內部雖亂，但氣流流量大加強了強制對流的效果。

3.圖 6-6-2 為煙霧在背風面開窗拍攝氣流由窗進入屋內之情況，可發現層流的現象相當明確，根據前面的討論可知層流較明確可降低熱阻，即酒精燈燃燒速率變大且變動率會變小，但背風流速不快所以無法形成明確對流趨勢，故開背風面窗之燃燒速率較開迎風面窗之燃燒速率略小，且變動率差異不大。



(三) 屋內家具、屋外種樹與燃燒速率關係

根據實驗2-3之模擬，無風狀態下，家中家具擺置對氣體對流較無影響，有風時則略為降低燃燒速度，此一結果顯示亂流造成燃燒速率變動率在置入家具前本身就很大，故家具造成的亂流程度影響並不大。

根據實驗2-4之模擬，雖本實驗樹木已距窗甚近，但造成環境熱阻之大小及變動率亦無法與沒種樹之環境熱阻區分，因此推知種樹若要影響燃燒速率大小必須要貼近窗戶，此一結果於現實中為少數情況，故結論為種樹後造成環境熱阻之改變並不大。

五、主題三對流風管設計之理由為何？

主題三之對流風管系統為根據主題一及主題二的實驗結果為根據所設計出來的，理由可以分為三點討論：

- (一) 圖3-6中之對流風管系統出風口位置為屋內幾何對稱位置，其理由為減低氣流側撞造成紊流，藉以減低酒精燈燃燒速率之變動率。

(二) 由主題二開窗大小對酒精燈燃燒速率影響的實驗結論可知，層流越明確則酒精燈燃燒速率變動率越小，觀察煙霧層流長度亦有此趨勢，圖4-1-11中整流器之設計概念即依據此實驗結果。

(三) 由主題二比較迎風、背風及無風之實驗結果推知，迎風之強制對流效果佳，可導致酒精燈燃燒率加大，對流風扇之設計概念即依據此實驗結果。

綜合上述三點可知風管之設計理念為藉由對流風扇控制對流之強制性，並企圖透過出風口位置之對稱性及整流器兩個措施使屋內氣流亂度降低。

六、對流風管系統之設計是否能夠有效制控爐火之燃燒速率？

若要有效制控酒精燈燃燒速率，其實驗結果必須符合下列條件：

(一) 制控之範圍必須夠大，例如情況一為量得酒精燈燃燒速率最小值 V_{\min} ，情況二為量得

酒精燈燃燒速率之最大值 V_{\max} ，若 $\frac{V_{\max}}{V_{\min}}$ 值越大則代表制控效果越佳。

(二) 酒精燈之燃燒速率變動率會因為屋內氣流亂度增加而變大，從制控的角度而言，若變動率太大，則透過調整變因去改變酒精燈燃燒速率就毫無意義。

根據主題三之實驗結果評估是否可透過對流風管系統製制控爐火燃燒速率之討論如下：

(一) 圖5-4中為固定風洞開口為0.5cm，且發現到於17.08轉/秒時燃燒速率為最小，令其最低

燃燒率為 V_{\min} ；該圖中以對流風扇轉速為52.78轉/秒時酒精燈燃燒速率最大，令其燃

燒速率為 V ，分析數據可知 $V_{\min} : V \approx 1.00 : 1.44$ 。

(二) 圖5-5中為固定對流風扇轉速為52.78轉/秒，且發現風洞開口0.5cm時燃燒速率為最小，

因此點和圖5-2中之最大值相同情況，故此時燃燒速率亦為 V ；圖5-5中風洞開口寬度

為3.5公分時酒精燈燃燒速率最大，令其燃燒速率為 V_{\max} ，分析數據可知

$V : V_{\max} \approx 1.00 : 3.55$ 。

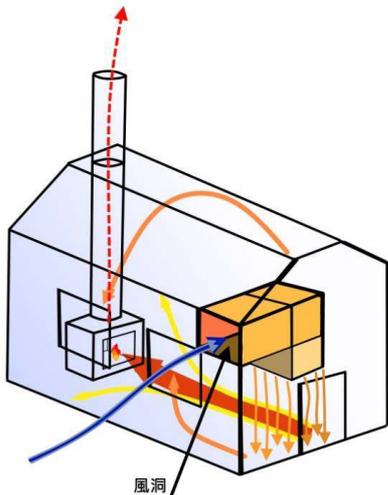
(三) 綜合上述兩點可以利用連比推得 $\frac{V_{\max}}{V_{\min}} = 5.11$ ，代表本系統透過制控對流風扇轉速及風

洞寬度兩變因，可以將制控範圍達到「燃燒速率最大值為最小值之5倍」。

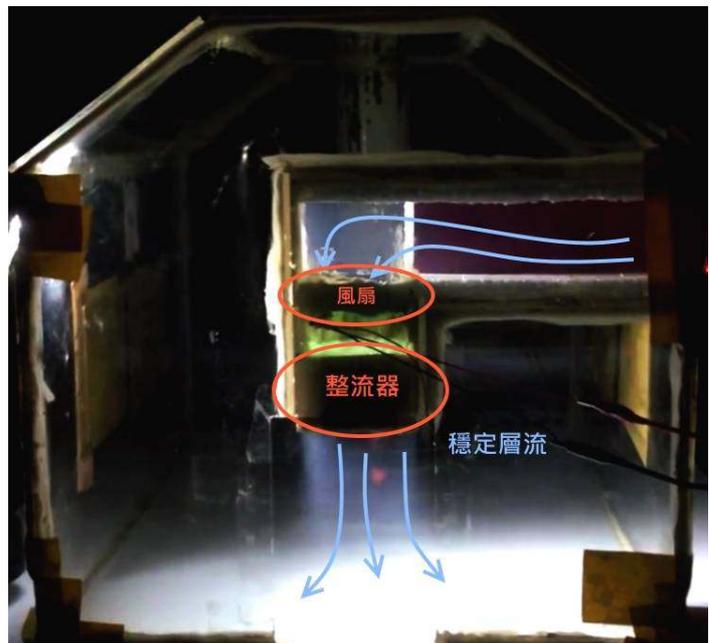
(四) 分析圖5-4及圖5-5之變動率可發現約為2~7%，根據(三)之制控範圍而言影響並不大。

(五) 圖4-1-6及圖4-1-7為擺置簡單家具之示意圖，擺入家具後造成燃燒率變化約在5%以內，對制控之影響並不大。

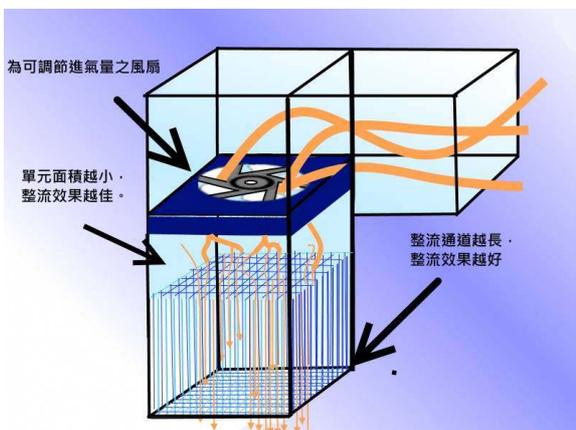
綜合上述實驗結果分析得知：對流風管系統可以達到制控爐火燃燒速率之效果，但為何未討論外界風之影響，其理由為可在屋外設計掩蔽措施以避免風直接灌入屋內，不致使變因過於複雜。



↑ 圖 6-7 對流系統(乙)加裝風管



↑ 圖 6-8 煙霧流經風管之情形



← 圖 6-9 風管加裝風扇及整流器示意圖

柒、結論

- 一、主題一中採用對流系統（甲）以驗證前人之實驗再現性，分別採用增加數據點、斜率及新增截距分析，以更嚴謹的方式驗證，實驗結果顯示「酒精燈之燃燒速率與環境熱阻成反比」為正確邏輯。
- 二、主題二中採用對流系統（乙）主要目的為實踐理論之應用性，實驗結果發現環境熱阻會因為氣流側撞形成亂流而導致對流模式改變，此一結果發現各種環境變因造成的燃燒速率變動率大約 1.6~11.7%。
- 三、對流系統（甲）之公式驗證中發現呈線性之圖形仍且可交叉比對斜率及截距，此一結果顯示在此系統中燃燒速率變動率甚小，推測氣流正撞產生紊流較氣流側撞不明顯。
- 四、主題三對流風管系統之設計為依據主題二實驗結果，若出風口位於幾何對稱位置，可減少氣流側撞產生紊流；若屋內之氣流為層流，則爐火燃燒速率變動率較小；若強制對流之強度在一定的範圍內，則可使爐火的燃燒速率與進入屋內風量呈正相關改變。
- 五、主題三中制控屋內爐火燃燒速率之實驗結果顯示：對流風扇轉速最佳制控範圍介於 17.08 轉／秒與 52.78 轉／秒之間；風洞開口固定長度為 5.0cm，則最佳制控範圍介於開口寬度 0.5cm~3.5cm 之間，二變因搭配操控可使制控範圍達到「酒精燈燃燒速率最大值約為最小值之 5 倍」。
- 六、承五，實驗結果亦顯示酒精燈燃燒速率之變動率介於 2%~7%，此一變動率僅些微影響本實驗制控範圍之準確度。

未來展望

本次實驗之模擬屋內擺設僅以簡單家具作為背景，未來希望可以結合室內設計、資訊工程及氣候學者共同合作以實踐對流智慧屋之概念。

捌、參考資料及其他

- 一、黃致穎、葉佑豪、劉韋廷（民99）。第51屆國立暨縣（市）公私立高級中等學校第2區科學展覽：『熱阻？電阻！傻傻分不清楚…』。
- 二、洪儒熙、方淳民、黃仁偉（2011）。物理（上）（第九版）（Ch14流體）。新北市：全華圖書。
- 三、國立台灣科技大學朱敬平教授 <http://elixirr.myweb.hinet.net/>
- 四、維基百科 <http://zh.wikipedia.org/wiki>
- 五、台灣Wiki <http://www.twwiki.com/wiki/紊流>
- 六、國立科學教育館 <http://www.ntsec.gov.tw/User/index.aspx>
- 七、台中一中物理學科中心 <http://physical.tcfsh.tc.edu.tw/>
- 八、教育部數位教學資源入口網
http://content.edu.tw/vocation/chemical_engineering/tp_ss/content-wa/wchm1/wpage1-3.htm
- 九、智慧生活體驗館 <http://www.fbblife.com.tw/25033339/article/content.aspx?ArticleID=1333>
- 十、Reynolds Number（1：44~2：23） <https://www.youtube.com/watch?v=kmjFdBxbV08>

【評語】 040107

對流是熱傳導的模式之一，作者做了許多模型來探討熱對流的現象。詳細觀察並記錄玻璃管內的燃燒的速率，作為標準比較之參考，然而燃燒速率與氧氣的供給有絕對的關係，在標準比對組應該要注意此一變因的控制。雖然作者以燃燒的速率作為比較的標準，但在模型中，加裝了風扇與整流器做強制對流，就與標準組的環境不同。所探討的對流空間刻意做成房屋模型，所以影響房子對流的因素應該是隔間，而非傢俱。隔間造成空氣流動的長度增加與阻礙，這方面應該做一探討。