

第十六屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA16-486

作品名稱：煙滅火絕

Fire Stopper: A study on the movement
of fire and smoke in passages

姓名：朱昱蓁

關鍵字：黑煙、火災、燃燒反應

煙滅火絕

Fire Stopper: A study on the movement of fire and smoke in passages

目錄

- 一、研究動機
- 二、研究目的
- 三、研究過程
- 四、結論
- 五、討論及應用
- 六、參考資料

煙滅火絕

Fire Stopper: A study on the movement of fire and smoke in passages

一、研究動機：

在今年寒假期間，學校網站招募志工參與台灣女科技人學會於台北市防災科學教育館所舉行之防火實驗展演。在實驗培訓課程與消防專家說明的過程中，講者提及當火災來臨時，往何處逃生才會有最大生存機率，也說明火場中的致命殺手是黑煙。我很高興獲選參加擔任實驗關主並且以「黑煙哪裡來」為主題，進行分組負責活動當天的實驗展演。我負責的實驗關卡中，利用乙炔的燃燒不完全來模擬黑煙產生狀況，在我操作及展示數十次的實驗中，看著試管內竄著的黑煙，我觀察發現有時候黑煙在管內的移動速率有些許差異。我不禁開始思考，是否有可能改變建築物的通道設計以及建材運用，如果能讓火災現場黑煙四竄的速率變得較慢，也是能爭取更多的求生時間，因此我決定研究建築物通道形狀之設計，對於黑煙行進方向與燃燒速度的影響，並且改良裝置，希望找出通道內可以造成煙滅火絕的方法。

二、研究目的：

- (一) 探究由不同方向燃燒與黑煙移動速率之間的關係，並尋找原因。
- (二) 尋求不同形狀的通道對黑煙移動速率的關聯，並得知不同形狀通道對點火管口火焰熄滅的時間的影響。
- (三) 探討通道中放置不同物體和黑煙移動速率的影響。
- (四) 研究通道內可以造成煙滅火絕的因素，思考改變建築物的通道設計、建材爭取求生時間的可能。

三、研究過程：

(一)實驗器材

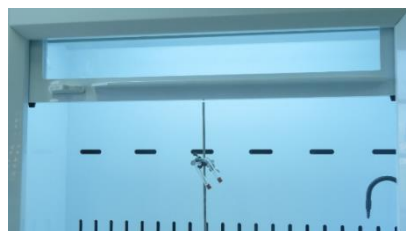
1. 試劑與器材：

電石、水、氣體製造器(100mL-塑膠滴瓶、橡膠導管)、塑膠盆、30cm 直玻璃管、U型玻璃管、矽膠塞、矽膠管、滴管、棉花、鋼絲絨、鑷子、打火機、試管架、鐵架與萬用夾、熱熔膠、銅片、銅線、陶瓷刀(切割玻璃用)、相機。

2. 安全防範措施：

實驗室排煙櫃、護目鏡。

(本研究實驗全程都在學校排煙櫃裡操作，並且在點火之後會馬上拉下透明門板為保護)



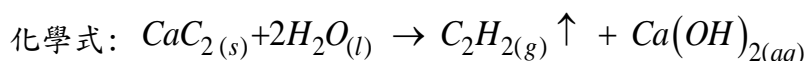
(二)實驗步驟

依據參考資料以及實驗培訓經驗，點燃不同比例的乙炔與空氣之氣體混合物可得到不同的實驗結果，點燃充滿乙炔和空氣體積比約為 1：1 的氣體混合物時除了試管口有火以外，會有黑煙隨著從點火處衝向試管底的火球而產生在火球的後方。待火球達試管底部就消失，只剩下黑碳遺留在試管中。此為乙炔的不完全燃燒。而本研究想透過實驗，模擬黑煙在火場的情形。

實驗一：直玻璃管內黑煙移動方向的特性

選用比試管還要長的 30 cm 的口徑 1.80cm 的玻璃管，作為透明通道以便觀察測量。以下是實驗步驟：

1. 將其一端先以矽膠塞塞住，並讓管內裝入管內容量 1/2 的水量。
2. 用適量的碳化鈣 (CaC_2) 放入裝有 8 分滿水且連接一根橡膠管的塑膠滴瓶內，使瓶內產生乙炔



3. 以排水集氣法將乙炔收集於玻璃管內。
排水集氣後，管內的水一旦排空就停止收集乙炔氣體，此時管內的乙炔和空氣體積比(莫耳數比)約為 1：1。
4. 收集完畢後將內含乙炔及部分空氣的玻璃管架起並調整不同傾斜程度點火，觀察其燃燒情形及黑煙的速率。
過程如圖(1)所示：



實驗二：U 型與 S 型玻璃管內黑煙移動方向的特性

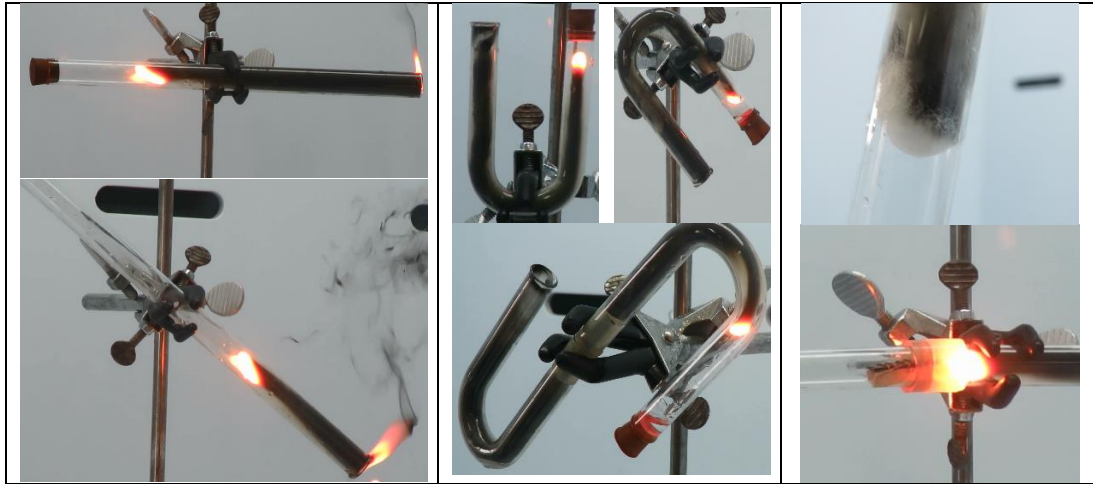
很多大樓通道不是直線型，而且樓層之間是樓梯上下通道，因此採用學校現有的 U 型管來模擬大樓通道的迂迴及樓梯上下情形。為了研究跨層之間是樓梯上下通道，將 U 型管連結成為 S 型管來模擬大樓三層之間通道的迂迴樓梯上下情形。過程如圖(1)所示：

實驗三：通道內障礙物對於黑煙移動方向的特性

樓層通道常堆有雜物，因此將管中間連結裝入一些堆積物，模擬樓梯通道堆積衣物、鞋櫃、雨傘架、鐵櫃等物。過程如圖(1)所示：

實驗四：通道材料與結構對於煙滅火絕的效應

連續研究過程，發現通道材料與結構也影響黑煙移動方向的特性，甚至造成管內火球自動熄滅，因此進一步研究下列變因。過程如圖(1)所示：

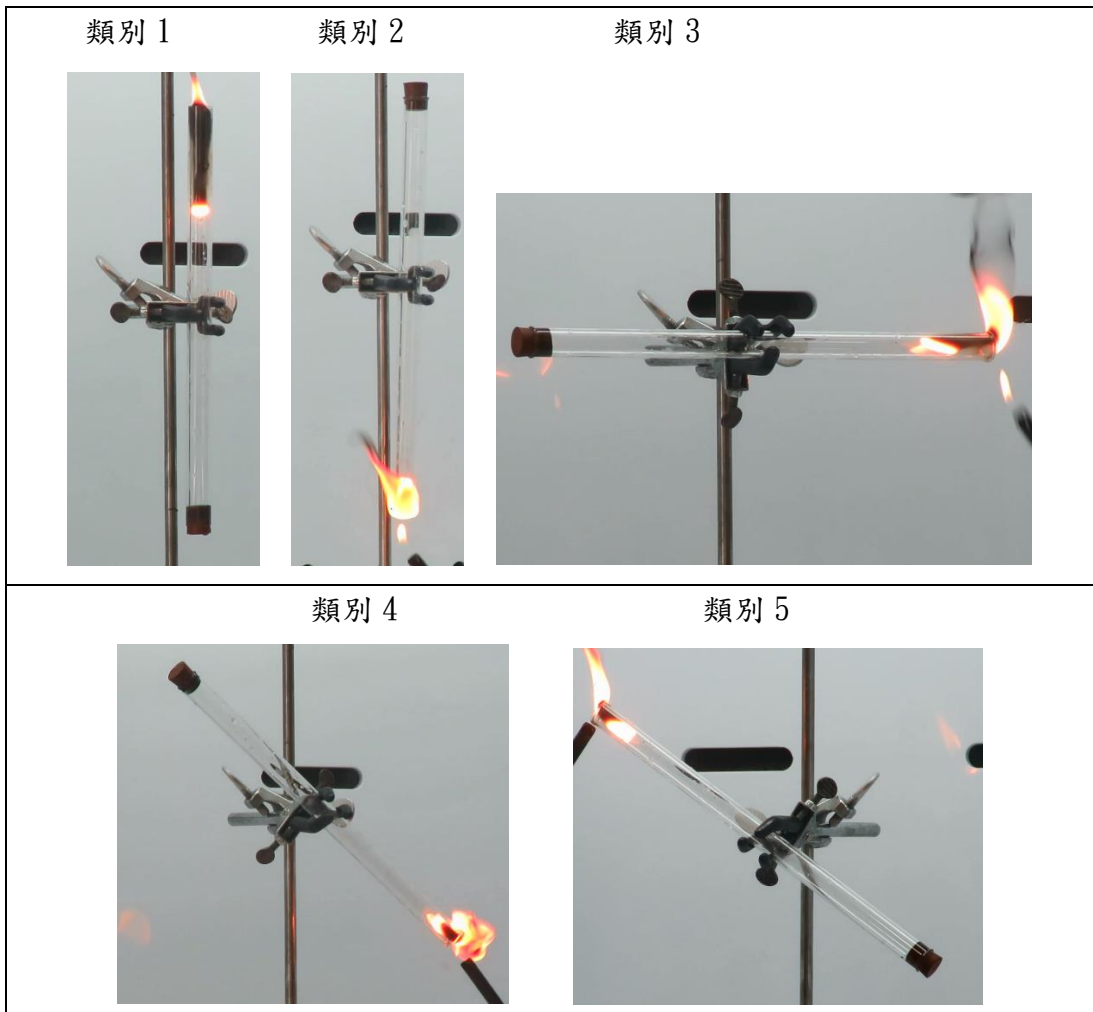


圖(1) 實驗一到四的各種實驗裝置與燃燒現象

(三)實驗結果與討論

實驗一：直玻璃管內黑煙移動方向的特性






歸納五種直玻璃管燃燒方向，分為類別 1~5，實際實驗照片如圖(2)所示：



圖(2)：類別 1~5 的黑煙行進路線與燃燒現象。



黑煙移動方向的特性與現象紀錄如下表(1)、表(2)與圖(3)。

表(1)：直玻璃管內黑煙移動方向的特性與現象

類別	圖示	特性與現象
類別 1： 由上到下		讓黑煙「由上到下」需要最久時間。管口的火焰在黑煙約在到達玻璃管底時熄滅。黑煙不會從點火管口大量冒出。
類別 2： 由下到上		黑煙「由下到上」需要時間偏少。管口的火焰熄滅時間通常晚於黑煙到達管底的時間。黑煙會從點火管口大量冒煙。
類別 3： 由右到左		黑煙「由右到左」需要時間偏少。另外，水平橫放玻璃管時，玻璃管下方的黑煙移動速率較上方慢且其二者速率差隨時間增加，黑煙前方火球也是如此。管口的火焰熄滅時間通常晚於黑煙到達管底的時間。黑煙不會從點火管口大量冒出。
類別 4： 右下到左上		黑煙從「右下到左上」需要時間偏少。玻璃管下方的黑煙移動速率較上方慢但其速率差較類別 3 少。管口的火焰熄滅時間通常晚於黑煙到達管底的時間不少。黑煙會從點火管口大量冒出。
類別 5： 左上到右下		黑煙從「左上到右下」所花時間第二多。玻璃管下方的黑煙移動速率較上方慢但其速率差與類別 4 相近。管口的火焰約在黑煙到達玻璃管終點時熄滅。黑煙不會從點火管口大量冒出。

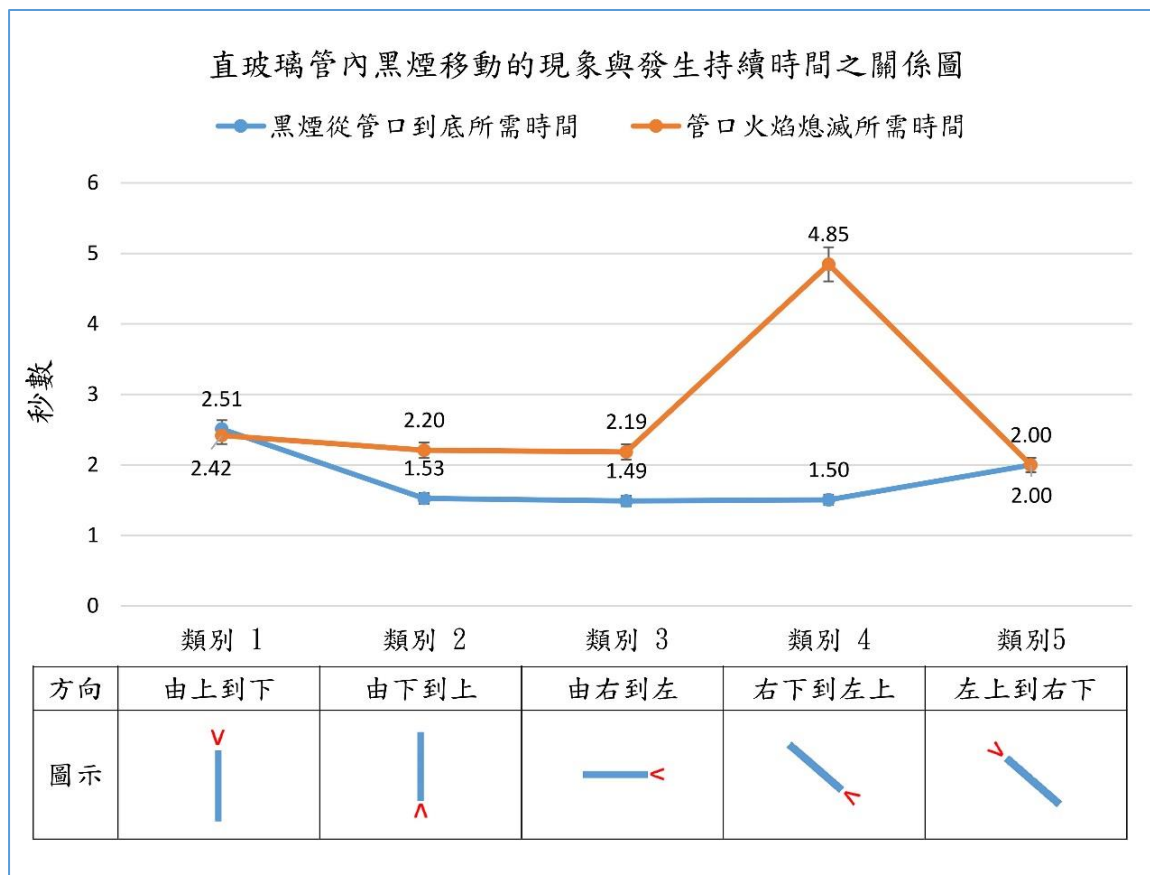
註：圖示藍色圖代表玻璃管，紅色打勾代表點火處，左右鏡射方向則省略。

表(2)：黑煙移動方向的特性與現象紀錄與發生持續時間

類別	圖示	現象	現象紀錄與發生持續時間(單位為秒)			
			第一次	第二次	第三次	平均
類別 1： 由上到下		管內黑煙移動	2.66	2.49	2.38	2.51
		端點火焰續燃	2.39	2.49	2.38	2.42
		端點火焰熄冒煙	x	x	x	
類別 2： 由下到上		管內黑煙移動	1.52	1.60	1.46	1.53
		端點火焰續燃	1.52	3.06	2.04	2.21
		端點火焰熄冒煙	v	v	v	

類別	圖示	現象	現象紀錄與發生持續時間(單位為秒)			
			第一次	第二次	第三次	平均
類別 3： 由右到左		管內黑煙移動	1.42	1.61	1.44	1.49
		端點火焰續燃	2.10	2.36	2.09	2.19
		端點火焰熄冒煙	x	x	x	
類別 4： 右下到左上		管內黑煙移動	1.49	1.48	1.54	1.50
		端點火焰續燃	6.85	2.15	5.54	4.85
		端點火焰熄冒煙	v	v	v	
類別 5： 左上到右下		管內黑煙移動	2.06	1.96	1.97	2.00
		端點火焰續燃	2.06	1.96	1.97	2.00
		端點火焰熄冒煙	x	x	x	

註：管內黑煙移動時間是紀錄管內移動火球的移動時間。



圖(3)：直玻璃管內黑煙移動的現象與發生持續時間之關係圖

由圖(3)得知實驗一的特性：

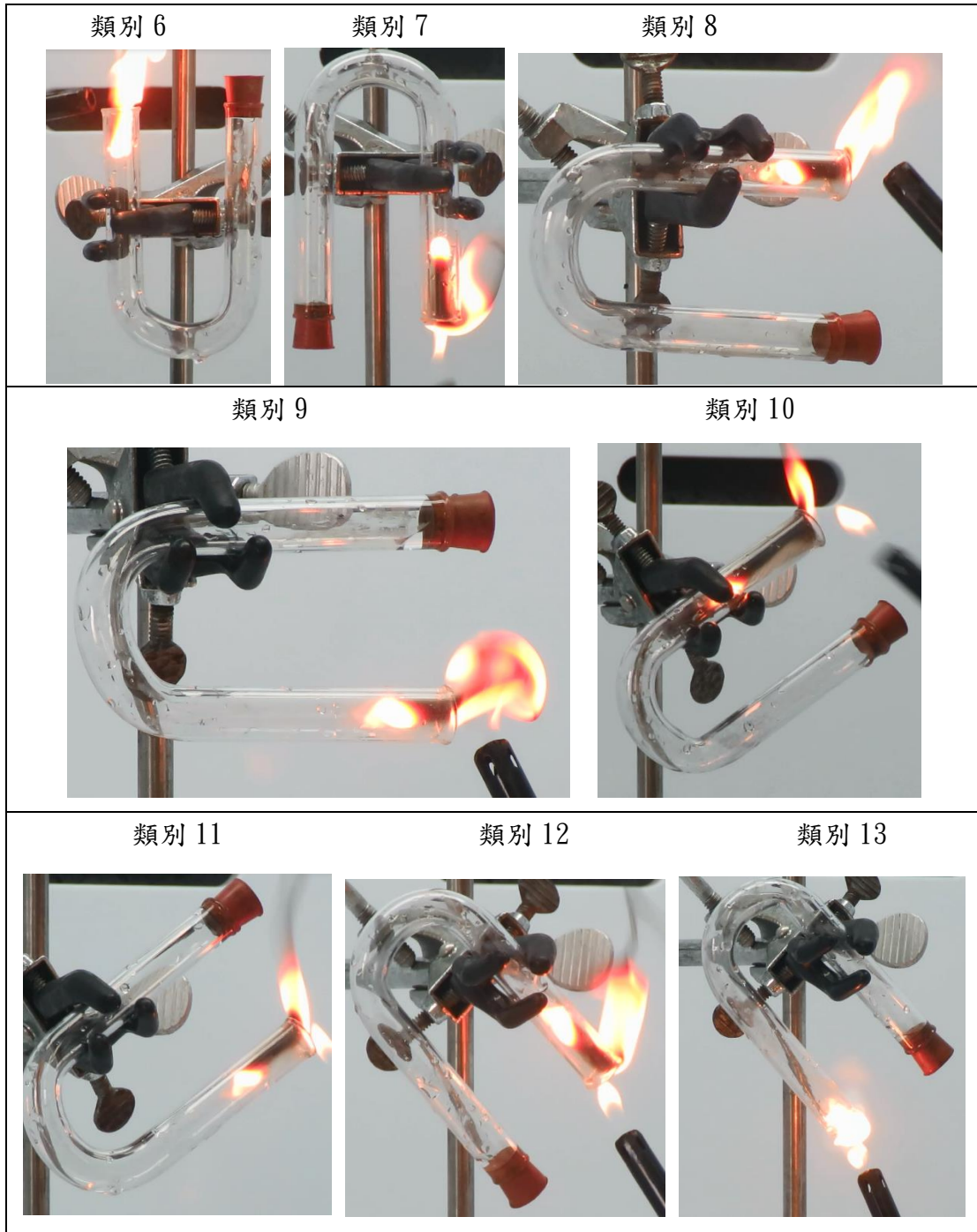
- (1)在上端點火的類型，例如類別 1(由上到下)、類別 5(左上到右下)，以及橫向的類別 3(由右到左)，管口的火焰約在管內黑煙到達玻璃管終點時熄滅，黑煙不會從點火端的管口大量冒出。如圖(2)之類別 1 照片所示。
- (2)在下端點火的類別 2(由下到上)與類別 4(右下到左上)，管口的火焰約在管內黑煙到達玻璃管終點時熄滅，黑煙會從點火端的管口大量冒出。
- (3)圖(3)，管內黑煙是追著空氣移動，不會因方向改變而無法燃燒，類別 1(由上到下)的燃燒方向最費時，類別 2(由下到上)、類別 3(由右到左)、類別 4(右下到左上)需要時間偏少。
- (4)如圖(3)，端點續燃現象，類別 4(右下到左上)需要時間最多，其所費時間為管內黑煙移動時間的 3 倍。

實驗二：U型與S型玻璃管內黑煙移動方向的特性

很多大樓通道不是直線型，而且樓層之間是樓梯上下通道，因此採用學校現有的U型管來模擬大樓通道的迂迴及樓梯上下情形。

實驗 2-1 以 U 型玻璃管

一樣先以橡皮塞塞住一端，並讓管內裝入管內容量一半的水量，重複之前的實驗一步驟 1~4。但 U 型玻璃管與直玻璃管不同的是它有 8 種燃燒方向(圖中拔出橡皮塞的一端為點火處)，分別為類別 6~13 實際實驗照片如圖(4)所示：



圖(4)：類別 6~13 的黑煙行進路線與燃燒現象。


表(3)：U形管內黑煙移動方向的特性與現象

類別	圖示	特性與現象
類別 6： 下彎 上點火		黑煙從起點到終點所花時間中等。管口的火焰約在黑煙移動完五分之四 U 型管時熄滅。當黑煙移動至 U 型管彎道時，上方的黑煙移動速率較下方快，黑煙前方火球也是如此。黑煙到達終點之後不會再從點火管口大量冒出。
類別 7： 上彎 下點火		黑煙從起點到終點所花時間偏多。管口的火焰約在黑煙到達終點時熄滅。當黑煙移動至 U 型管彎道時，上方的黑煙移動速率較下方快，黑煙前方火球也是如此。黑煙到達終點之後會再從點火管口大量冒出。
類別 8： 左彎 上點火		黑煙從起點到終點所花時間為偏少，管口的火焰在黑煙到達玻璃管終點時熄滅。當黑煙移動至 U 型管直道時，上方的黑煙移動速率較下方快，黑煙前方火球也是如此。黑煙到達終點之後不會再從點火管口大量冒出。
類別 9： 左彎 下點火		黑煙從起點到終點所花時間為很少，管口的火焰在黑煙到達玻璃管終點時熄滅。當黑煙移動至 U 型管直道時，上方的黑煙移動速率較下方快，黑煙前方火球也是如此。黑煙到達終點之後不會再從點火管口大量冒出。
類別 10： 左下彎 上點火		黑煙從起點到終點所花時間偏多，管口的火焰時間略多於黑煙從起點到終點所需時間。當黑煙移動約五分之三 U 型管的距離的剎那，上下方黑煙速率一致。之後又變回上方的黑煙移動速率較下方快。黑煙到達終點之後不會再從點火管口大量冒出。
類別 11： 左下彎 下點火		黑煙從起點到終點所花時間偏少，管口的火焰約在黑煙到達玻璃管終點時熄滅。原本上方的黑煙移動速率較下方快。當黑煙移動約五分之三 U 型管的距離的剎那，上下方黑煙速率一致。之後又變回上方的黑煙移動速率較下方快。黑煙到達終點之後不會再從點火管口大量冒出。
類別 12： 左上彎 上點火		黑煙從起點到終點所花時間偏多。管口的火焰約在黑煙到達玻璃管終點時熄滅。原本上方的黑煙移動速率較下方快。當黑煙移動約五分之三 U 型管的距離的剎那，上下方黑煙速率一致。之後又變回上方的黑煙移動速率較下方快。黑煙到達終點之後會再從點火管口大量冒出。
類別 13： 左上彎 下點火		黑煙從起點到終點所花時間中等，管口的火焰熄滅時間通常晚於黑煙到達玻璃管終點所需時間。原本上方的黑煙移動速率較下方快。當黑煙移動約五分之三 U 型管的距離的剎那，上下方黑煙速率一致。之後又變回上方的黑煙移動速率較下方快。黑煙到達終點之後會再從點火管口大量冒出。

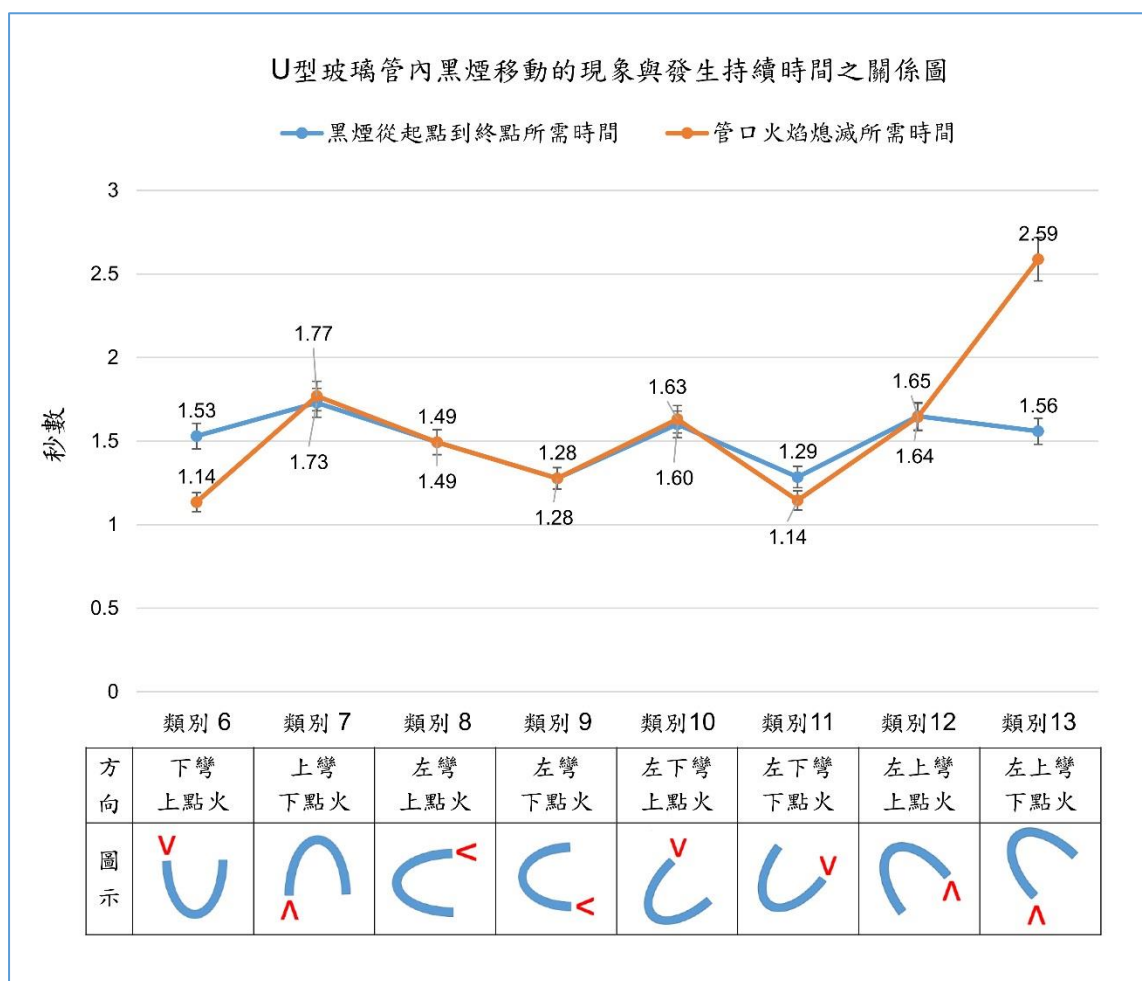
註：圖示藍色圖代表玻璃管，紅色打勾代表點火處，左右鏡射方向則省略。

表(4)：U型管內黑煙移動方向的特性與現象紀錄與發生持續時間

類別	圖示	現象	現象紀錄與發生持續時間(單位為秒)			
			第一次	第二次	第三次	平均
類別 6： 下彎 上點火		管內黑煙移動	1.33	1.56	1.70	1.53
		端點火焰續燃	1.01	1.10	1.29	1.14
		端點火焰熄冒煙	x	x	x	
類別 7： 上彎 下點火		管內黑煙移動	1.85	1.78	1.68	1.77
		端點火焰續燃	1.81	1.74	1.64	1.73
		端點火焰熄冒煙	v	v	v	
類別 8： 左彎 上點火		管內黑煙移動	1.29	1.67	1.52	1.49
		端點火焰續燃	1.29	1.67	1.52	1.49
		端點火焰熄冒煙	x	x	x	
類別 9： 左彎 下點火		管內黑煙移動	1.18	1.36	1.29	1.28
		端點火焰續燃	1.18	1.36	1.29	1.28
		端點火焰熄冒煙	x	x	x	
類別 10： 左下彎 上點火		管內黑煙移動	1.82	1.48	1.50	1.60
		端點火焰續燃	1.88	1.48	1.54	1.63
		端點火焰熄冒煙	x	x	x	
類別 11： 左下彎 下點火		管內黑煙移動	1.31	1.12	1.42	1.29
		端點火焰續燃	1.31	1.13	0.99	1.14
		端點火焰熄冒煙	x	x	x	
類別 12： 左上彎 上點火		管內黑煙移動	1.57	1.69	1.68	1.65
		端點火焰續燃	1.56	1.69	1.68	1.64

類別	圖示	現象	現象紀錄與發生持續時間(單位為秒)			
			第一次	第二次	第三次	平均
		端點火 熄冒煙	v	v	v	
類別 13： 左上彎 下點火		管內黑 煙移動	1.45	1.61	1.61	1.56
		端點火 焰續燃	1.45	3.17	3.14	2.59
		端點火 熄冒煙	v	v	v	

註：管內黑煙移動時間是紀錄管內移動火球的移動時間。



圖(5)：U型管內黑煙移動的現象與發生持續時間之關係圖

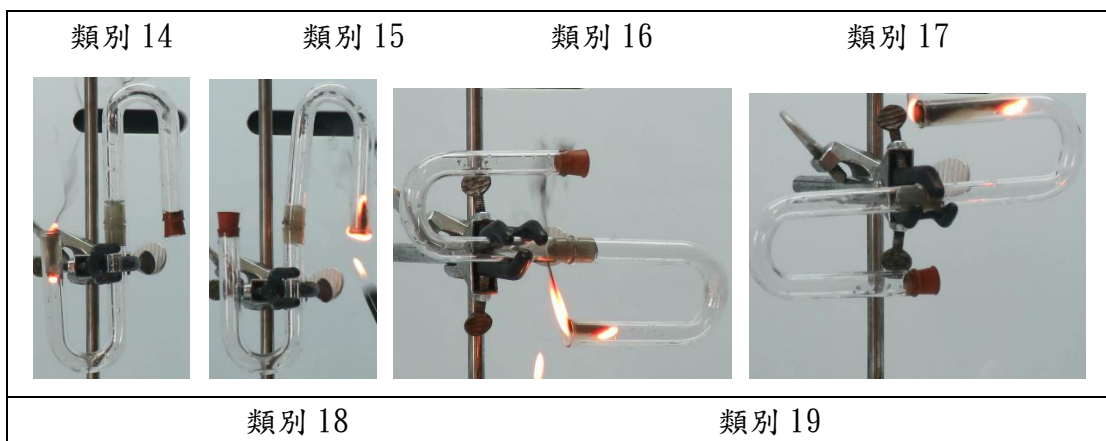
由實驗 2-1 得知 U 型管內黑煙的特性：

- (1) U 型管內管口火焰續燃現象與直玻璃管的續燃現象不同，而黑煙移動的現象則大約一致。
- (2) 以圖(4)類別 8(左彎上點火)為例，當黑煙水平移動時，上方的黑煙移動速率較下方快，垂直移動時則速率相同，黑煙前方火球也是如此。

- (3)只要點火端位處下方位置，例如：類別 7(上彎下點火)、類別 12(左上彎上點火)、類別 13(左上彎下點火)，黑煙會從點火端的管口大量冒出(如圖(4)所示)
- (4)圖(5)，可知端點續燃現象，類別 13(左上彎下點火)需要時間最多。類別 7(上彎下點火)、類別 10(左下彎上點火)與類別 12(左上彎上點火)黑煙從起點到終點較為費時。類別 8(左彎上點火)、類別 9(左彎下點火)、類別 11(左下彎下點火)則黑煙從起點到終點所需時間少。
- (5)圖(5)，類別 7、8、9、10、12 端點火焰續燃與黑煙移動到達終點的時間幾乎一致；而類別 6、11、13 卻不相同。類別 6(下彎上點火)、類別 11(左下彎下點火)兩者為黑煙通過 U 型管中間點後需往上移動長距離且終點沒有低於點火端的類型，這兩者為首次觀察到端點火焰燃燒時間短於黑煙移動到達終點時間。
- (6)圖(5)，類別 13(左上彎下點火)其端點火焰燃燒時間高於黑煙移動到達終點時間，也相差約 1.7 倍。此情況與實驗一的直玻璃管類別 4(右下到左上)很類似，兩者的黑煙移動方式一開始都是往斜上方移動的類型。

實驗 2-2 以 S 型玻璃管

為了研究跨層之間是樓梯上下通道，將 U 型管連結成為 S 型管來模擬大樓三層之間通道的迂迴樓梯上下情形。U 型管間以用一個恰好能卡入管子的橡皮管將兩個 U 型管連接在一起，接著重複實驗一的步驟 1~4。而這裡的燃燒方向歸納做了六種，圖中(將)拔出橡皮塞的一端為點火處。類別 14~19 實際實驗照片如圖(6)所示：






圖(6): 類別 14~19 的黑煙行進路線與燃燒現象。






表(5): S 型管內內黑煙移動方向的特性與現象


類別	圖示	特性與現象
類別 14: 上下彎 上點火		黑煙從起點到終點所花時間為偏多。管口的火焰約在黑煙移動完第一個 U 型管的九分之八時熄滅。當黑煙在 U 型管彎道移動時，上方的黑煙移動速率較下方快；當黑煙在 U 型管直道移動時，兩者速率大約相等，黑煙前方火球也是如此。黑煙到達終點之後不會再從點火管口大量冒出。
類別 15: 上下彎 下點火		黑煙從起點到終點所花時間偏多。當黑煙在 U 型管彎道移動時，上方的黑煙移動速率較下方快；當黑煙在 U 型管直道移動時，兩者速率大約相等，黑煙前方火球也是如此。黑煙到達終點之後會從點火管口大量冒出。
類別 16: 水平彎 下點火		黑煙從起點到終點所花時間為偏少(與類別 17 相近)。原本上方的黑煙移動速率較下方快。當黑煙移動至第一個 U 型管最彎處的剎那，上下方黑煙速率一致。之後到了 U 型管直道變回上方黑煙移動速率較下方快。接著當黑煙移動至第二個 U 型管最彎處的剎那，上下方黑煙速率一致。最後到了 U 型管直道又變回上方黑煙移動速率較下方快，黑煙前方火球也是如此。黑煙到達終點之後不會再從點火管口大量冒出。
類別 17: 水平彎 上點火		黑煙從起點到終點所花時間為偏少(與類別 16 相近)。管口的火焰通常約在黑煙移動完第一個 U 型管的九分之八時熄滅。當黑煙移動至第一個 U 型管最彎處的剎那，上下方黑煙速率一致。之後到了 U 型管直道變回上方黑煙移動速率較下方快。接著當黑煙移動至第二個 U 型管最彎處的剎那，上下方黑煙速率一致。最後到了 U 型管直道又變回上方黑煙移動速率較下方快，黑煙前方火球也是如此。黑煙到達終點之後不會再從點火管口大量冒出。
類別 18: 斜彎 下點火		黑煙從起點到終點所花時間偏多(與類別 15 相近)。當黑煙在 U 型管直道移動時，上方的黑煙移動速率較下方快。在兩個剎那，上方的黑煙移動速率較下方快，都是 U 型管的最彎處，黑煙前方火球也是如此。黑煙到達終點之後會從點火管口大量冒出。

類別	圖示	特性與現象
類別 19： 斜彎 上點火		黑煙從起點到終點所花時間少。當黑煙在 U 型管直道移動時，上方的黑煙移動速率較下方快。在上方的黑煙移動速率較下方快的兩個剎那，都是 U 型管的最彎處，黑煙前方火球也是如此。黑煙到達終點之後不會再從點火管口大量冒出。

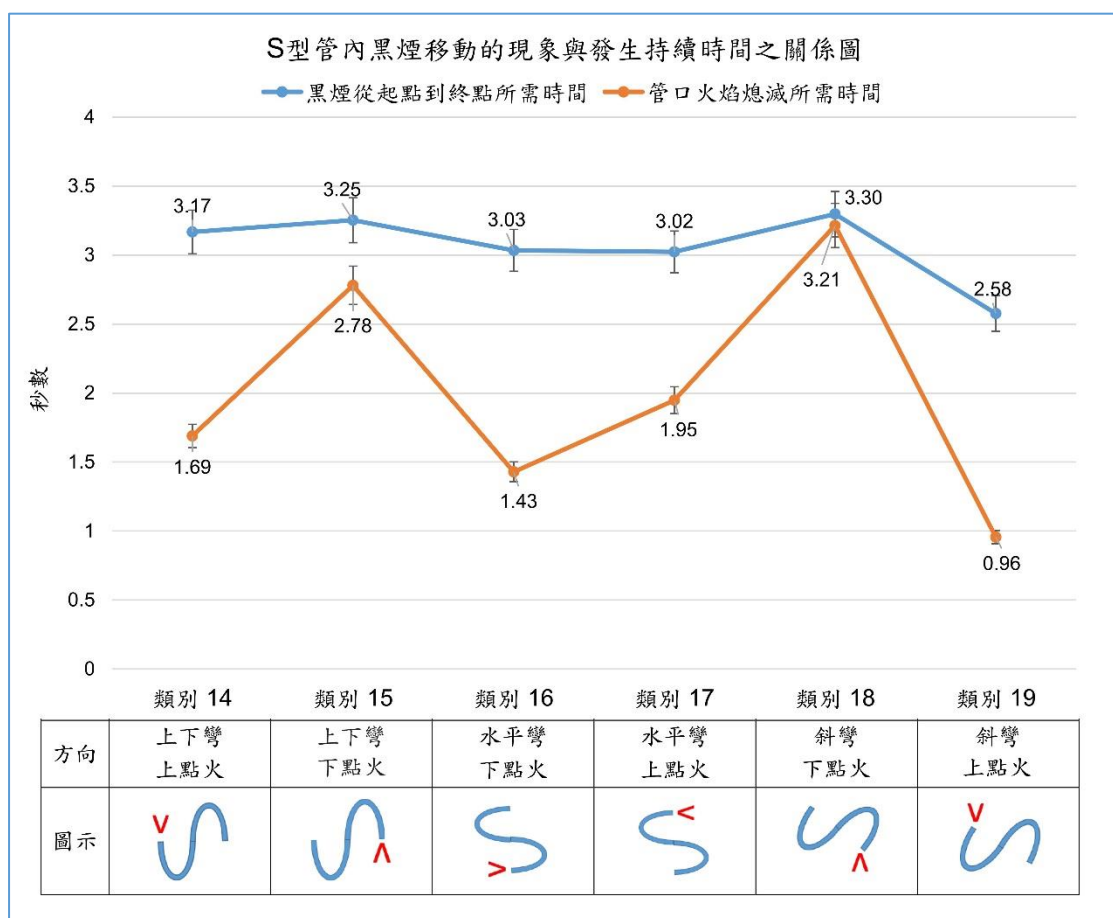
註：圖示藍色圖代表玻璃管，紅色打勾代表點火處，左右鏡射方向則省略。

表(6)：S 型管內黑煙移動方向的特性與現象紀錄與發生持續時間

類別	圖示	現象	現象紀錄與發生持續時間(單位為秒)			
			第一次	第二次	第三次	平均
類別 14： 上下彎 上點火		管內黑煙移動	3.28	3.06		3.17
		端點火焰續燃	2.05	1.33		1.69
		端點火焰熄冒煙	x	x		
類別 15： 上下彎 下點火		管內黑煙移動	3.33	3.17		3.25
		端點火焰續燃	3.15	2.41		2.78
		端點火焰熄冒煙	v	v		
類別 16： 水平彎 下點火		管內黑煙移動	2.69	2.94	3.48	3.03
		端點火焰續燃	0.62	0.55	3.11	1.43
		端點火焰熄冒煙	x	x	x	
類別 17： 水平彎 上點火		管內黑煙移動	2.93	3.29	2.85	3.02
		端點火焰續燃	1.12	3.29	1.43	1.95
		端點火焰熄冒煙	x	x	x	
類別 18： 斜彎 下點火		管內黑煙移動	3.28	3.31		3.30
		端點火焰續燃	3.13	3.29		3.21
		端點火焰熄冒煙	v	v		

類別	圖示	現象	現象紀錄與發生持續時間(單位為秒)			
			第一次	第二次	第三次	平均
類別 19： 斜彎 上點火		管內黑煙移動	1.57	3.32	2.84	2.58
		端點火焰續燃	1.25	1.39	0.23	0.96
		端點火焰熄冒煙	X	X	X	

註：管內黑煙移動時間是紀錄管內移動火球的移動時間。



圖(7)：S型管內黑煙移動的現象與發生持續時間之關係圖

由實驗 2-2 得知 S 型管內黑煙的特性：

- (1)圖(7)，端點續燃時間皆少於黑煙從起點到終點所需時間，由此可知當通道有足夠的長度，點火端火焰便會先熄滅。
- (2)圖(7)，可知端點續燃現象，類別 18(斜彎下點火)、類別 15(上下彎下點火)需要時間較多；類別 19(斜彎上點火)需要時間最少。
- (3)圖(7)，類別 19(斜彎上點火)其端點燃燒時間約為黑煙移動達達終點時間的 0.4 倍。

- (4)圖(7)，類別 14~18 黑煙移動所需時間約相同，類別 19 (斜彎上點火) 黑煙移動所需時間最少。
- (5)只要點火端位處下方位置(相較於玻璃管)，例如：類別 15(上下彎下點火)、類別 18(斜彎下點火)，黑煙會從點火端的管口大量冒出。

實驗三：通道內障礙物對於黑煙移動方向的特性

在實驗二研究中也發現特殊現象，發現火有時會在管內直接熄滅，讓黑煙的移動速率減緩。此現象連想到樓層通道常堆有雜物，因此將管中間連結裝入一些植物纖維類與金屬類的堆積物，模擬樓梯通道堆積衣物、鞋櫃、雨傘架、鐵櫃等物。所以，開始在管內塞東西模擬在火場通道堆積物體的燃燒黑煙移動，並暫時先以直玻璃管作為通道，在管內中央放置等量的鋼絲絨或棉花，接著重複在實驗一的步驟 1~4。不同堆積物實際實驗照片如圖(8)所示：



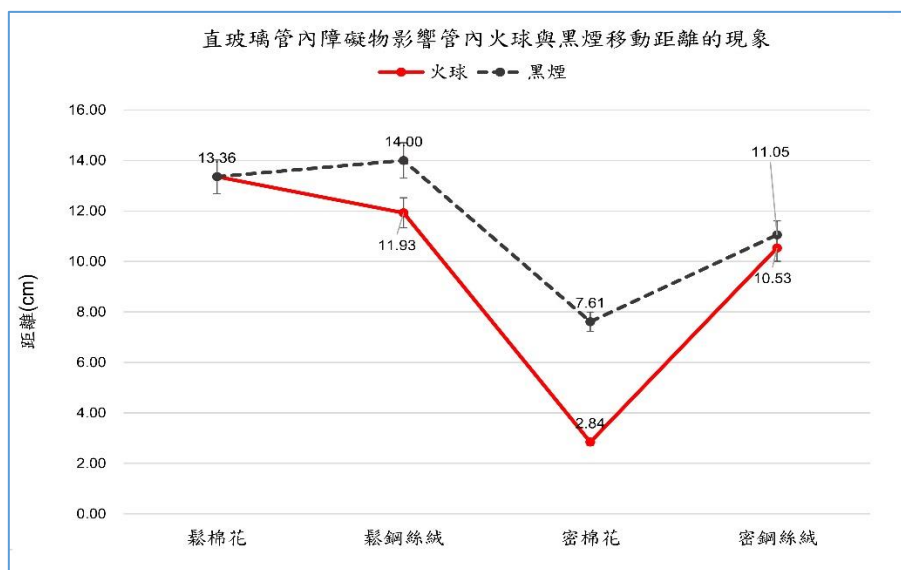
圖(8)：模擬在火場通道堆積物體的燃燒黑煙

表(7)：直玻璃管內障礙物影響管內火球與黑煙移動距離的現象

距離(cm)	第一次		第二次		第三次		平均	
	火球	黑煙	火球	黑煙	火球	黑煙	火球	黑煙
鬆棉花	^13.53	*13.53	^13.36	*13.36	^13.17	*13.17	13.36	13.36
鬆鋼絲絨	6.59	12.82	^13.91	*13.91	>15.28	#15.28	11.93	14.00
密棉花	3.55	11.86	4.75	6.31	0.23	4.67	2.84	7.61
密鋼絲絨	^13.80	*13.80	4.04	5.96	^13.76	*13.76	10.53	11.05

^表示火球在抵達障礙物時熄滅；>表示火球在通過障礙物時熄滅。

*表示黑煙抵達障礙物後移動速率下降；#表示黑煙在通過障礙物時移動速率下降。



圖(9)：直玻璃管內障礙物影響管內火球與黑煙移動距離的現象

由圖(9)得知實驗三的特性：

透過實驗發現，當玻璃管中央塞有較多的鋼絲絨或棉花時，較有機會使黑煙不能竄至距離點火處約二分之一玻璃管處，以密棉花效果最為顯著。而當鋼絲絨或棉花較稀疏時，黑煙與火球最多只能移動到障礙物就停止了。由此可知，障礙物確實會對火球與黑煙的行進造成影響。

實驗四：通道材料與結構對於煙滅火絕的效應

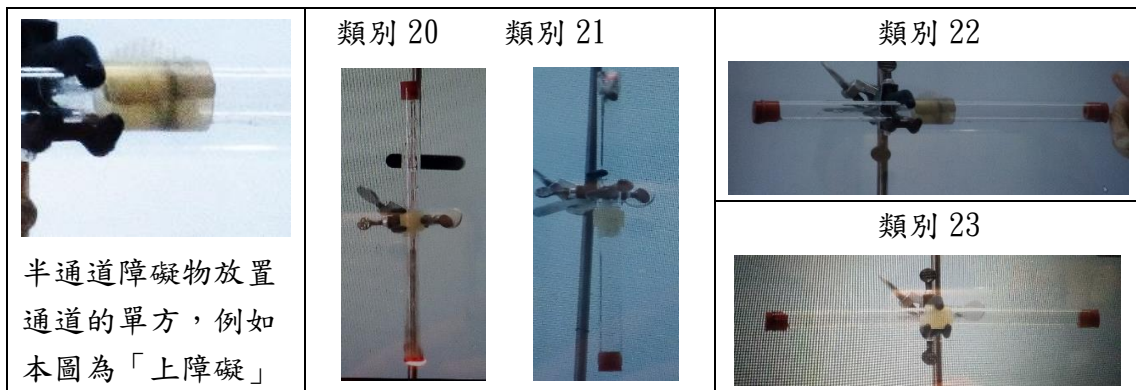
實驗三的結果說明了在通道放置物體確實會影響火與黑煙的行進，甚至造成火焰熄滅。依據燃燒三要素的原理判斷，在可燃物與助燃物仍然共存條件下，溫度降低是造成煙滅火絕的主要因素。因此，進一步研究可能改變通道溫度的變因，例如材料的熱傳導(thermal conductivity)特性、通道結構造成的層流(laminar flow)與紊流(turbulent flow)之物理現象等。因此，將 30cm 玻璃管切成兩半(圖(10))，同時運用矽膠管套在被裁切的玻璃管外做連接，使用熱熔膠與銅片、銅線等不同導熱性質的物體做了恰可塞住玻璃管口徑一半的 3cm 半通道障礙物，並如此便可輕易將半通道障礙物放入與拿出(圖(11))。直玻璃管作為通道，在管內中央放置熱熔膠半通道障礙物，接著重複實驗一的 1~4。歸納直管方向及點火位置，共四種放置方式，分為類別 20~23，如圖(13)。



圖(10): 將 30cm 玻璃管切成兩半的方法，先用陶瓷刀切鋸，再小心折斷。



圖(11): 半通道障礙物：由左到右分別為(1)熱熔膠、(2)熱熔膠貼銅片、(3)熱熔膠貼銅片及繞銅線、(4)熱熔膠貼四層銅片及繞多圈銅線使表面凹凸不平。



圖(12): 直玻璃管內中央放置半通道障礙物的黑煙實驗裝置。

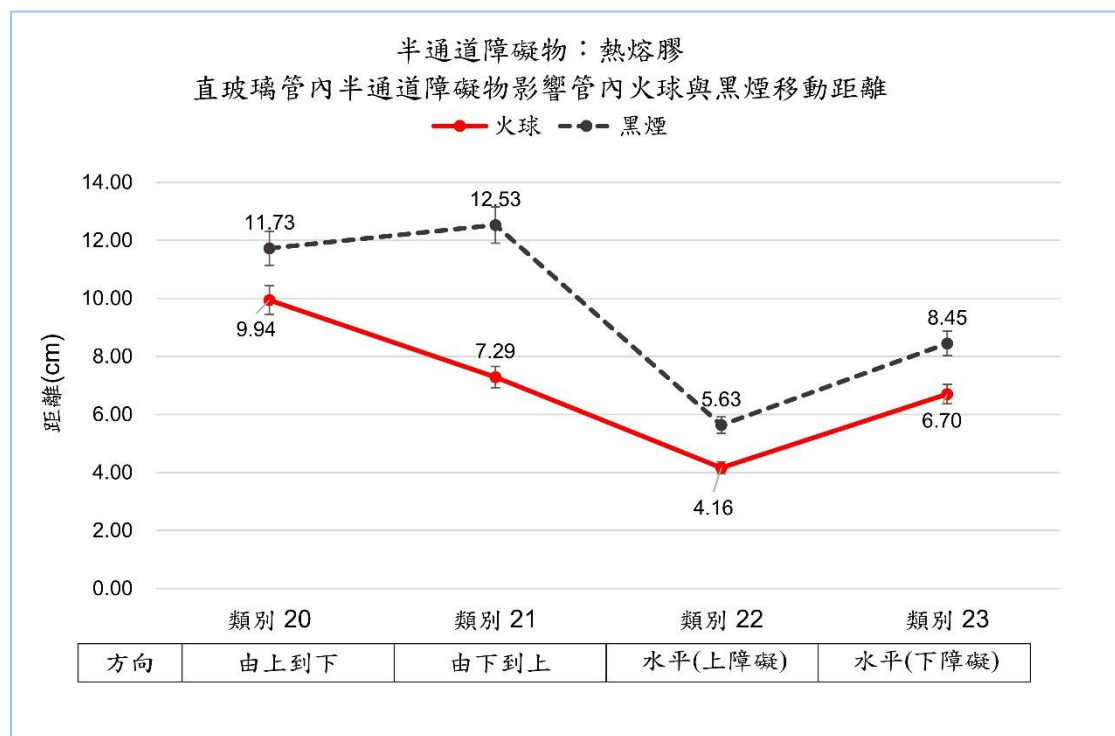
實驗 4-1 半通道障礙物：熱熔膠

表(8)：直玻璃管內熱熔膠製成半通道障礙物影響管內火球與黑煙移動距離的現象

距離(cm)	第一次		第二次		第三次		平均	
	火球	黑煙	火球	黑煙	火球	黑煙	火球	黑煙
類別 20： 由上到下	^13.51	*13.51	3.44	8.79	^12.88	*12.88	9.94	11.73
類別 21： 由下到上	2.49	*13.57	^14.23	#14.23	5.15	9.78	7.29	12.53
類別 22： 水平(上障礙)	3.11	5.24	3.35	4.74	6.02	6.92	4.16	5.63
類別 23： 水平(下障礙)	2.97	7.07	^12.92	*12.92	4.20	5.35	6.70	8.45

^表示火球在抵達障礙物時熄滅；>表示火球在通過障礙物時熄滅。

*表示黑煙抵達障礙物後移動速率下降；#表示黑煙在通過障礙物時移動速率下降。



圖(13)：半通道障礙物：熱熔膠，影響管內火球與黑煙移動距離由實驗 4-1 可知：

- (1) 圖(13)，類別 22(水平(上障礙))最有效的讓火球與黑煙移動距離最少，火球與黑煙尚未到達半通道障礙即停止。
- (2) 黑煙與火球最多只能移動到障礙物就停止了。

實驗 4-2 半通道障礙物：熱熔膠貼銅片

表(9)：直玻璃管內半通道障礙物影響管內火球與黑煙移動距離的現象

距離(cm)	第一次		第二次		第三次		平均	
	火球	黑煙	火球	黑煙	火球	黑煙	火球	黑煙
類別 20： 由上到下	6.06	7.94	2.07	9.21			4.07	8.58
類別 21： 由下到上	^^^30.00	****30.00	6.03	*13.02	^^^30.00	****30.00	22.01	24.34
類別 22： 水平(上 障礙)	3.91	5.75	>14.52	#14.52	4.00	4.55	7.48	8.27
類別 23： 水平(下 障礙)	^^26.75	****30.00	^16.31	*16.31	7.29	9.30	16.78	18.54

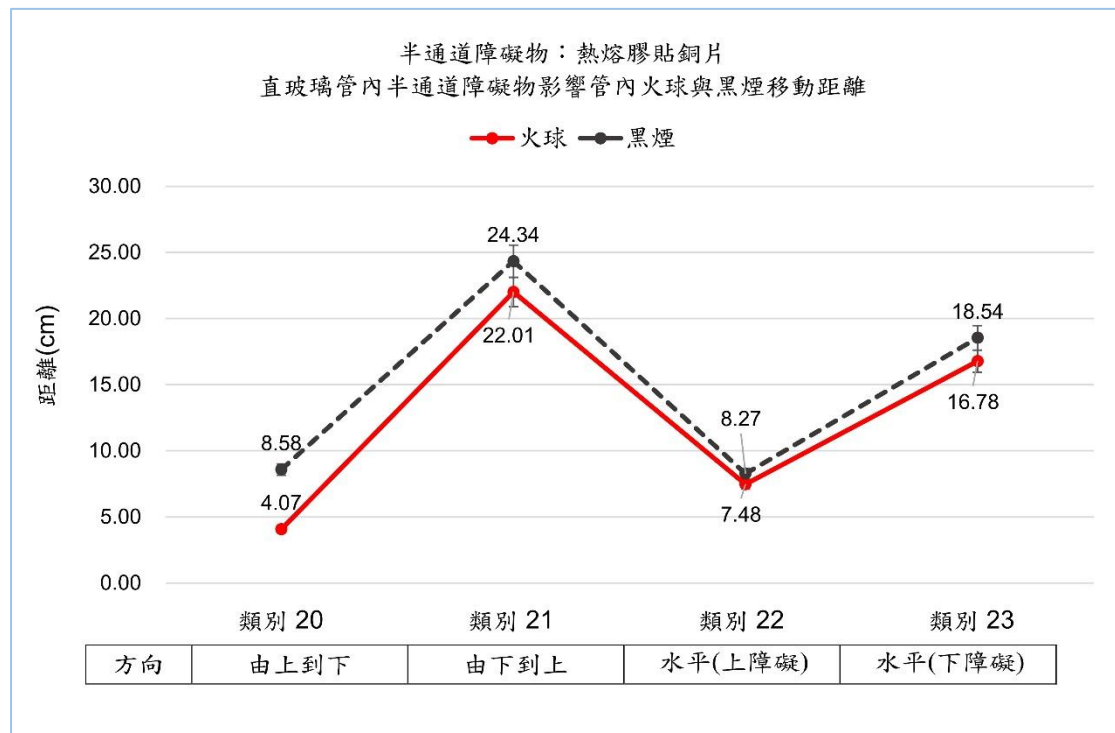
^表示火球在抵達小障礙物時熄滅 >表示火球在通過小障礙物時熄滅

^^^表示火在超過小障礙物後(未抵達端點前熄滅) ^^^^表示火抵達端點

*表示黑煙抵達小障礙物後移動速率下降 #表示黑煙在通過小障礙物時移動速率下降

***表示黑煙在通過小障礙物後(未達端點前)移動速率下降

****表示黑煙抵達端點



圖(14)：半通道障礙物：熱熔膠貼銅片，影響管內火球與黑煙移動距離

由實驗 4-2 可知：

(1) 圖(14)，可知類別 20(由上到下)、類別 22(水平(上障礙))火球與黑煙移動

距離較少。類別 21(由下到上)火球與黑煙的移動距離最多。

- (2) 表(9)，類別 21(由下到上)第二次、第三次實驗數據，火球與黑煙抵達終點，平均花費 1.59 秒，比實驗一直玻璃管類別 2(由下到上)所花費的時間多一點。
- (3) 表(9)，類別 23(水平(下障礙))第一次實驗數據，黑煙抵達終點，花費 1.77 秒，比實驗一直玻璃管類別 2(由下到上)所花費的時間多。

實驗 4-3 半通道障礙物：熱熔膠貼 4 層銅片繞 1 圈銅線

表(10)：直玻璃管內半通道障礙物影響管內火球與黑煙移動距離的現象

距離(cm)	第一次		第二次		第三次		平均	
	火球	黑煙	火球	黑煙	火球	黑煙	火球	黑煙
類別 20： 由上到下	14.60	#15.72	1.50	#14.35	1.69	8.87	5.93	12.98
類別 21： 由下到上	20.27	***28.56	^^^30.00	***30.00	22.00	***30.00	24.09	29.52
類別 22： 水平(上障礙)	2.48	6.50	15.78	#15.78	>14.53	#14.53	10.93	12.27
類別 23： 水平(下障礙)	^^^17.70	***22.79	>15.97	#15.97	>14.53	**15.07	16.07	17.94

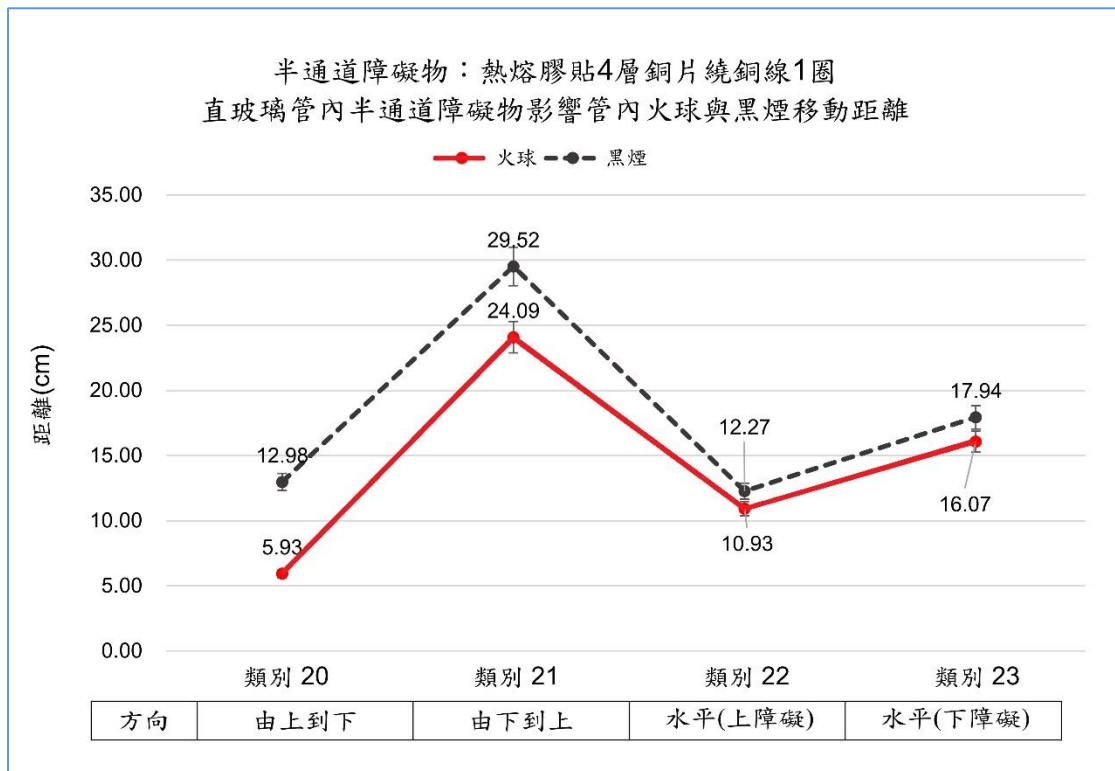
^表示火球在抵達小障礙物時熄滅 >表示火球在通過小障礙物時熄滅

^^^表示火在超過小障礙物後(未抵達端點前熄滅) ^^^^表示火抵達端點

*表示黑煙抵達小障礙物後移動速率下降 #表示黑煙在通過小障礙物時移動速率下降

***表示黑煙在通過小障礙物後(未達端點前)移動速率下降

****表示黑煙抵達端點



圖(15)：半通道障礙物：熱熔膠貼 4 層銅片繞 1 圈銅線，影響管內火球與黑煙移動距離

由實驗 4-3 可知：

(1)圖(15)，可知類別 20(由上到下)、類別 22(水平(上障礙))火球與黑煙移動距

離較少，最多只能移動至半通道障礙。類別 21(由下到上)火球與黑煙的移動距離最多，尤其黑煙有很大機率竄至管底。

- (2) 表(10)，類別 21(由下到上)第二次、第三次實驗數據，火球與黑煙抵達終點，平均花費 1.58 秒，比實驗一直玻璃管類別 2(由下到上)所花費的時間多一點。

實驗 4-4 半通道障礙物：熱熔膠貼 4 層銅片繞 6 圈銅線

表(11)：直玻璃管內半通道障礙物影響管內火球與黑煙移動距離的現象

距離(cm)	第一次		第二次		第三次		平均	
	火球	黑煙	火球	黑煙	火球	黑煙	火球	黑煙
類別 20： 由上到下	4.22	10.05	1.87	4.98			3.05	7.52
類別 21： 由下到上	3.21	10.91	^^^30.00	****30.00	^13.82	*13.82	15.68	18.24
類別 22： 水平(上障礙)	^13.67	*13.67	2.64	4.69	>14.91	#14.91	10.41	11.09
類別 23： 水平(下障礙)	3.56	7.17	3.83	6.38	^14.14	*14.14	7.18	9.23

^表示火球在抵達小障礙物時熄滅 >表示火球在通過小障礙物時熄滅

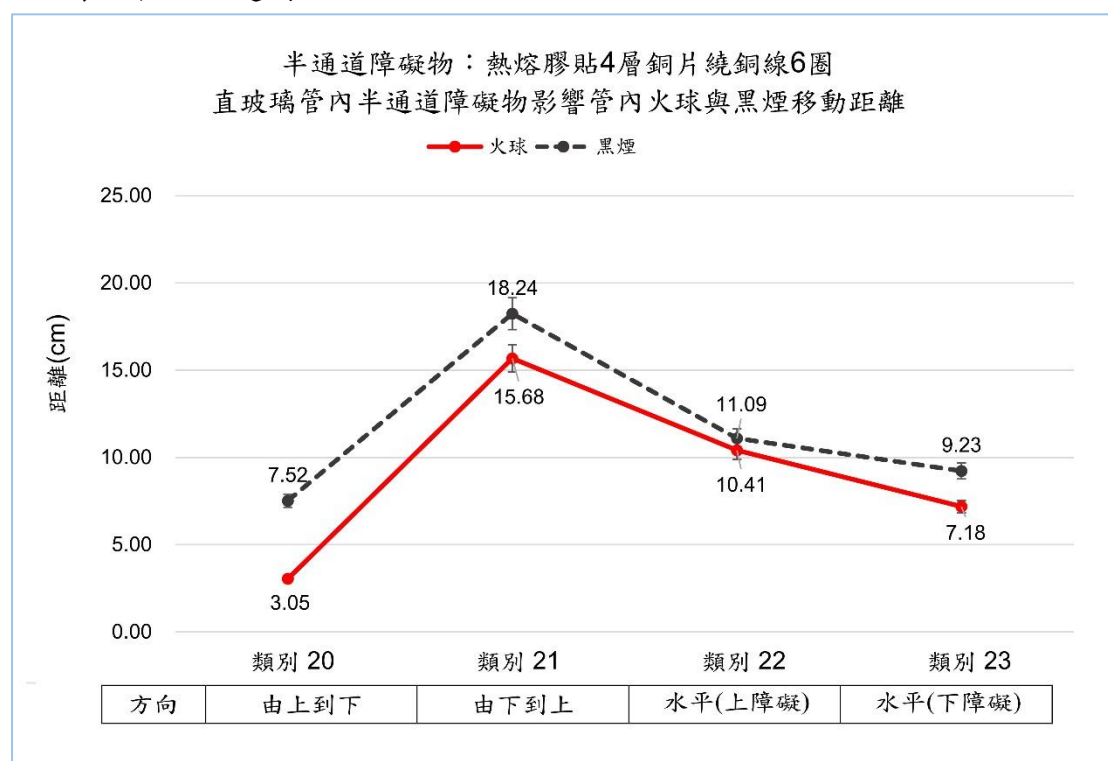
^^^表示火在超過小障礙物後(未抵達端點前熄滅)

****表示火抵達端點

*表示黑煙抵達小障礙物後移動速率下降 #表示黑煙在通過小障礙物時移動速率下降

***表示黑煙在通過小障礙物後(未達端點前)移動速率下降

****表示黑煙抵達端點



圖(16)：半通道障礙物：熱熔膠貼 4 層銅片繞 6 圈銅線，影響管內火球與黑煙移動距離

由實驗 4-4 可知：

- (1) 圖(16)，可知類別 20(由上到下)、類別 22(水平(上障礙))、類別 23(水平(下障礙))火球與黑煙移動距離較少，最多只能移動至半通道障礙。類別 21(由下到上)火球與黑煙的移動距離最多。
- (2) 表(11)，類別 21(由下到上)第二次實驗數據，火球與黑煙抵達終點，花費約 1.91 秒，與實驗一的直玻璃管類別 2(由下到上)所花費的時間多。

實驗 4-1~4-4 綜合討論：

- (1) 類別 21(由下到上)的火球與黑煙移動最有可能從起點移至終點。
- (2) 類別 22(水平(上障礙))的火球與黑煙移動距離恆最接近，類別 20(由上到下)只有在實驗 4-1 時黑煙與火球移動距離差與其他類別相比不為最大。
- (3) 表(8)，熱熔膠為半通道障礙是最有效的讓火球與黑煙停止。表(10)，熱熔膠貼銅片繞一圈銅線為半通道障礙時，有最多火球與黑煙超過障礙物才熄滅和停止，甚至直接抵達端點。
- (4) 氣流會影響火球與黑煙移動，熱熔膠貼 4 層銅片繞 6 圈銅線的半通道障礙(表面凹凸不平)比熱熔膠貼 4 層銅片繞 1 圈銅線的半通道障礙更容易使火球熄滅，黑煙停止。
- (5) 材質會影響火球與黑煙移動，熱熔膠半通道障礙比起熱熔膠貼 1 層銅片半通道障礙更易使火球與黑煙在障礙前熄滅、停止。

四、結論

黑煙在直玻璃管、U型管、S型管移動情形：

共同：

- (1)管內黑煙是追著空氣移動，不會因方向改變而無法燃燒。
- (2)下端點火的類型，黑煙會從點火端的管口大量冒出。
- (3)當黑煙水平移動時，上方的黑煙移動速率較下方快，垂直移動時則速率相同，黑煙前方火球也是如此。
- (4)當通道有足夠的長度點火端火焰便會先熄滅。
- (5)當點火端位處黑煙移動方向的下側時點火端火焰續燃時間會持續較久。
- (6)往斜上方移動的類型：直玻璃管右下到左上、U型管左上彎下點火端點火端燃燒時間多於黑煙移動到達終點時間。

直玻璃管：

- (1)上端點火的類型，管口的火焰約在管內黑煙到達玻璃管終點時熄滅。
- (2)由上到下的燃燒方向最費時；由下到上、由右到左、右下到左上需要時間少。
- (3)端點續燃現象，右下到左上需要時間最多。

U型管：

- (1)火焰續燃現象與直玻璃管的續燃現象不同
- (2)端點續燃現象，類別 13(左上彎下點火)需要時間最多。
- (3)上彎下點火、左下彎上點火、左上彎上點火，黑煙從起點到終點較為費時。類別 8(左彎上點火)、類別 9(左彎下點火)、類別 11(左下彎下點火)則黑煙從起點到終點所需時間少。

S型管(跨樓層通道)：

- (1)端點續燃時間皆少於黑煙從起點到終點所需時間
以斜彎上點火黑煙移動所需時間最少。

對煙滅火絕之特性研究：

共同：

- (1)當玻璃管中央放有障礙時，有機會使火球與黑煙在障礙物附近熄滅和停止。
當玻璃管中央放有較密的障礙時，較有機會使黑煙不能竄至距離點火處約二分之一玻璃管處。
- (2)放有障礙物時，由下到上的火球與黑煙移動最有可能從起點移至終點。
- (3)在水平(上障礙)的實驗中火球與黑煙移動距離恆最接近，而由上到下只有在放置熱熔膠辦通道障礙時，黑煙與火球移動距離差與其他類別相比不為最大。

- (4) 氣流會影響火球與黑煙移動，表面凹凸不平的半通道障礙更容易使火球熄滅，黑煙停止。
- (5) 材質會影響火球與黑煙移動，熱熔膠半通道障礙比起熱熔膠貼 1 層銅片半通道障礙更易使火球與黑煙在障礙前熄滅、停止。
- (6) 若放有障礙物但火球、黑煙仍從起點移動至終點，至少可以降低其移動速率。

就實驗三：通道內障礙物對於黑煙移動方向的特性：

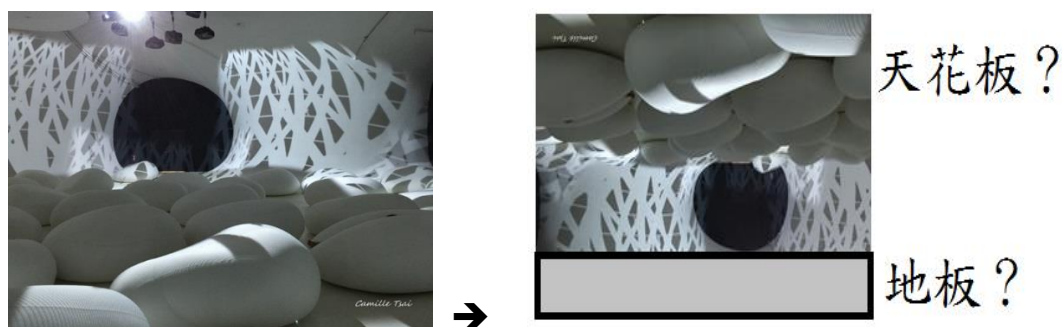
- (1) 密棉花障礙物使黑煙不能竄至距離點火處約二分之一玻璃管處效果最為顯著。

就實驗四：通道材料與結構對於煙滅火絕的效應：

- (1) 熱熔膠為半通道障礙是最有效的讓火球與黑煙停止。
- (2) 熱熔膠貼銅片繞一圈銅線為半通道障礙時，有最多火球與黑煙超過障礙物才熄滅和停止，甚至直接抵達端點。

五、討論及應用

消防專家提過黑煙是火場的殺手，因為黑煙前端的火球快速的燒過後是缺氧的環境，伴隨著大量黑煙讓被燒傷的人嗆傷，逼向死亡。依照本研究的實驗結果，若在水平通道設計可於火災發生時從天花板下降半層樓高度的不導熱且凹凸不平的裝置(相當於上半塞)，結構想像翻轉後，則凹凸的天花板及兩側坑疤的表面材料可以有效降低火球與黑煙對人造成的傷害，寬闊的地板也有力火災現場的通道逃生逃生，將死亡率降低。另外，根據本研究可用來判斷建築物通道的安全性(見圖(17)、圖(18))，並提供嶄新的方法預防火災的發生。通常建築物會用防火塗料等來預防火災發生，若能在建築設計後，要蓋之前，先以迷你樣品屋利用本研究的方法測試火球與黑煙在其中的燃燒情形、移動速率等，事先了解此建築的設計結構、材質對火球與黑煙的影響，如此改善根本可以讓火災的死傷降低。



圖(17) (左)台中歌劇院伊東豐雄的劇場夢—觀念建築展凸凸廳，有凹凸不平障礙的通道火球、黑煙移動速率會減緩甚至熄滅。(右)翻轉後的結構想像圖



圖(18):台北車站地下街，空曠的地下街加上導熱的商店鐵門是很容易讓火與黑煙快速四竄

六、參考資料：

- [1] 科技大觀園。從法拉第的演講看蠟燭科學。2003/10/15，取自 <https://scitechvista.nat.gov.tw/c/07G3.htm>
- [2] 科學月刊。「碳」為觀止—煙類燃燒反應與碳簇概述。2010/02/09，取自 http://scimonth.blogspot.tw/2010/03/blog-post_1391.html
- [3] 科學Online。化學實驗室實驗：乙炔的簡易製備和反應。2011/05/26，取自 <http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=27502>
- [4] 奈米碳來排隊-科普實驗影片- YouTube。2013/04/22，取自 <https://www.youtube.com/watch?v=JTNbXxxbNIY>
- [5] Magichem 奈米碳粒尋蹤記- YouTube。2010/10/29，取自 https://www.youtube.com/watch?v=4C5E_05ArCU
- [6] 中興工程季刊，第105期2009年10月，pp51-59。火災煙控系統之應用。
tao.wordpress.com/pdf_down.aspx?filename=J000001088_105_51-59
- [7] 瑞德消防雜誌。211全球女科大團圓-防災闖關慶元宵。2017/02/15，取自 <http://blog.hexsave.com/211%E5%85%A8%E7%90%83%E5%A5%B3%E7%A7%91%E5%A4%A7%E5%9C%98%E5%9C%93-%E9%98%B2%E7%81%BD%E9%97%96%E9%97%9C%E6%85%B6%E5%85%83%E5%AE%B5>
- [8] 新聞稿。少女防火志工學生陪民眾度過有意義的元宵節。2017/02/14，取自 <http://tcgwww.taipei.gov.tw/ct.asp?xItem=267169466&ctNode=82924&mp=108051M>
- [9] 高中基礎化學(二)，有機化合物/乙炔
圖片來源：
<https://udn.com/news/story/3/2322516>
<https://udn.com/news/story/3/2322516>