

# 第一章 緒 論

## 1.1 前言

由於 Halon 系統對各類火災有優越的抑制效果以及所需的放射劑量少, 同時 Halon 在放射時不會對儀器設備造成額外的危害。因此, 在早期 Halon 滅火系統被廣泛的應用在各種場所當中, 但不幸的是, Halon 的組成成份中含有會有破壞臭氧層的鹵原子, 而在環境保護議題日益重視的情況下, 在 1987 年由美國及全球各大工業國家所署的蒙特婁公約中(Montreal Protocol), 禁止了 Halon 滅火系統的生產, 並規定在 2003 年 12 月時 Halon 滅火系統必須完全的停用。因此, 許多專家學者便開始致力於新型滅火系統的研究與開發, 例如細水霧, 壓縮空氣泡沫, 及氣體滅火器等, 作為 Halon 滅火系統代替用品, 而其中以細水霧滅火系統最具有優勢。

而什麼是”細水霧滅火系統”呢? 根據 2000 年 NFPA750 規範[1]中對細水霧系統的說明:細水霧滅火系統為一種噴撒滅火系統, 在系統中設置有一個或數個噴頭, 可放射細水霧用以控制、抑制、撲滅火源, 噴頭在最小設計工作壓力下, 噴出水之水滴平均粒徑至少 99%的應小於 1000 微米( $D_{0.99} \leq 1000 \mu m$ )。其平均粒徑大小的決定方式, 必須由 24 個量測點所決定。關於細水霧滅火系統的滅火性能機制的研究可以追溯到 20 世紀 50 年代中期, 1955 年在 Braidech, et al. [2] 研究裡提出, 細水霧滅火機制主要是為氧氣取代以及冷卻效果。在經過 40 餘年的研究驗證了該研究觀點的正確性, 而在近期 Mawhinney, et al. [3]的研究中發現細水霧滅火系統另有其它的滅火機制, 例如降低熱輻射效應, 水蒸汽將空氣稀釋與直接對末燃物品進行降溫的動作。

## 1.2 研究動機

細水霧系統自 1998 年起引進我國至今 2009 年已逾十年, 產官學界均有大量研究及探討, 尤其在特殊及高價值場所的消防防護, 它利用高密度極細水分子吸熱及控制氧濃度二大特性, 發揮其強大的滅火性能, 而其獨有的滌煙效果有效降低火災有毒濃煙殺傷力, 確保人命安全, 釋放時人員免疏散, 釋放後亦免換氣,

對大氣環境友善，完全沒有溫室效應…等等優良特性，應可以取代高水損的撒水系統及各種氣體滅火系統。

然而進入台灣十年確沒有獲得廣泛的應用，也直接代表了諸多的疑慮和不了解，無論是產官學界，均希望看到科學性的實驗驗證相關性能，進而訂定實用性規範，確保設計可用性，進一步達成和現有消防防護系統「等價有效性」，提供更多的選擇方案，理論上細水霧滅火特性包含撒水系統的冷卻及化學滅火系統的窒息原理，但超微細的水霧粒子若遇上通風的環境，可能遇到機械排煙，也可能遇到自然通風環境，非常容易形成細水霧系統設置於通風環境中，令人不禁擔心，它還會有效嗎？

上述的情境可能發生二十四小時保持機械通風的恆溫空間，例如中華電信機房、台積電晶圓廠、故宮國寶典藏館、引擎實驗室…等密閉空間，或者如木造歷史古蹟、台電變壓器、風力發電機組、挑高展覽場、飛機維修棚…等自然通風開放性空間，在這些特殊場所中若設置細水霧系統能否取代已往撒水或化學滅火系統？能否對抗不同通風條件的挑戰，而保持一定防護效果，保護財產及人命安全，還是如同氣體滅火系統會因為通風而完全失效？

在疑問和好奇中產生研究動機，希望利用實際燃燒實驗檢視，在通風環境下細水霧與燃燒交互作用有何重要特性，透過儀器記錄後分析提出火場中可用數據，可做為細水霧通風環境使用參考。

## 1.3 文獻探討

### 1.3.1 細水霧系統之發展

細水霧系統與一般撒水頭系統主要不同之處簡述如下：細水霧系統所產生水滴的VMD (volumetric mean diameter；體積平均直徑) 直徑約在 30 至 300 $\mu\text{m}$ ，因此其用水量會較一般傳統撒水頭少一個級數 (an order of magnitude) 換一句較通俗的字眼即是至少少十倍以上的用水量，除上述特性外，其功能與各項滅火系統之比較如表 1.3.1 所示。

最早敘述細水霧滅火機制的論述是由 Braidech[2]在 1955 年提出的，後經 Rasbash[4]等人証實其觀點，Braidech 提出細水霧滅火機制主要為空氣稀釋及冷

卻效果，這些細水霧遇到火災的熱源後，蒸發為水蒸汽排擠了新鮮且源源不斷供應的氧氣，使得燃燒區域內的氧氣大為減少，同時這些細水霧粒子也提供了降低火場溫度的冷卻效果。

Dundas [5]統計的結果指出由於防護氣體經由通風口的洩漏情況下，Halon 或者二氧化碳滅火系統無法有效將火源給撲滅的機率高達 37%。

表 1.3.1 各類滅火系統之比較

特性/作用	水系統 (Sprinkler)	海龍 (Halon)	二氧化碳 (CO <sub>2</sub> )	細水霧 (Water Mist)
無毒性	是	否	否	是
適用 A/B 類火災	否	是	是	是
不影響環境	是	否	否	是
需要幫浦	是	否	否	是
設備重量輕	否	是	否	是
服務容易性	是	是	是	是
高吸熱能力	否	否	否	是
維修成本低	否	否	否	是
人員疏散	否	是	是	否
服務及充填成本	N/A	否	否	是

資料來源：建研所整理

細水霧滅火系統的滅火性能會受測試空間內通風條件造成燃燒後的熱氣與外界新鮮空氣交換現象影響。然而，在通風條件下細水霧的滅火性能仍是較其它氣體滅火器：如二氧化碳滅火器及海龍替代用品來的優越。Pepi[6]在低壓細水霧滅火系統上研究的結果顯示，在通風條件底下，細水霧滅火系統仍然可以有效的將火勢給撲滅，但是火勢撲滅的時間卻較在無通風條件下增加 30%到 70%。

Kim 等人[7]在全尺寸火災實驗中顯示，在強制通風的測試條件下，使用連續性放射的細水霧滅火系統，無法將有遮蔽情況下的圓形油盤火源給撲滅。但

是，若將連續性放射方式改為間歇性放射時，在相同通風條件下，細水霧滅火系統卻能在 168 秒便將火勢給撲滅。而實驗中所測量到的最低氧濃度為 16% 而最大的二氧化碳濃度是 2.3%。另外，在 Kim 所規劃的另一火災情境中，對於噴撒火災（燃料為 Heptane）無論是連續性放射或者是間歇性放射的情況，火勢均可以有效的受到控制。而在間歇性防護情況下，在天花板附近的氣體溫度比連續性放射來的高。其原因是在間歇性放射的情況下，原本被抑制的火勢迅速恢復，在天花板附近的熱氣體的濃度增加。當細水霧滅火系統再次開動，則會有更多的水蒸汽在測試空間內生產，因而提升細水霧滅火系統的滅火效力。

細水霧的火災技術近幾年來在內政部建築研究所的努力推動下已累積相當不錯的研究成果，對於細水霧文獻的收集、檢測基礎的研究、細水霧量測實驗室的建置都有完善規畫及可觀成果。近幾年對水系統火災控制、細水霧滅火系統技術研發之規劃研究及隔煙系統之研究如下：

2003 年，陳俊勳、鍾基強等人[8]，針對水霧系統研究設施及驗證項目規劃及建立先期研究設施及驗證項目做了完整的文獻收集及比較。並對高風險危害情境分析、細水霧效能模擬分析、細水霧系統實場效能分析進行規劃。完成國內外相關細水霧研究探討比較、效能分析、測試與驗證方法及發展趨勢。協助建立及培訓人員完成全尺寸灑水系統實驗設備及量測技術。

2004 年，鍾基強[9]對於火災探測器與消防設備間的關係進行研究。針對密閉式及開放式撒水系統啟動機制及作動的影響參數、評估火災探測器發報時機及開放式撒水系統對排煙及煙沉降的影響。並針對目前消防法規設置標準（包括設置場所、位置及數量等）做探討並完成全尺寸實驗之滅火機制驗證。

陳建忠、張尚文及謝煒東[10, 11]，在 2004 及 2005 年建研所計劃內，研究比較了細水霧與各種滅火系統的優劣與適用情形，並由細水霧的滅火原理發現：細水霧噴頭特性的「粒徑」與「速度」對滅火效果的影響極具關鍵地位。針對噴頭滅火特性的探討發現，影響滅火速率的因子輕重分別為噴頭高度大於噴水時間大於噴水壓力。在細水霧量測實驗室的建置上，參照 IMO-Res. A. 800、UL-2167、NFPA-750 及 FM-Class5560 等先進國家關於細水霧的的規範，加上實際操作實驗的經驗研定「內政部建築研究所細水霧粒徑速度量測方法」乙種。

蔡榮鋒[12~14]，在 2004 至 2006 年建研所委辦案內，建置滌煙、隔煙測試實驗室來判斷實驗時煙塵之濃度與到達之時間及能見度；DV 錄影機紀錄火焰之變化，氣體分析儀量測排風口之氣體濃度。實驗結果顯示，水霧壓力從 50bar 提高至 70bar，不會降低水霧之平均粒徑（SMD），但可增加水霧衝力與射程，滌煙與隔熱效果相當明顯。比較水霧前方與後方之煙塵附著量、煙霧濃度（能見度）及溫度分佈：顯示水霧之降溫效率很高，位於水霧後方兩公尺之白紙沒有附著黑炭，集水管所盛接之水量很少（低於 5 mm）、甚至沒有；的確具有一定之滌煙與隔煙效果。結合國產之栓塞水泵及水霧噴頭即可建立水霧幕，達成隔煙、隔熱、滌煙、防止竄燒等多功能之消防系統。

2007 年，何明錦、鍾基強[15]，針對水滴粒徑及噴頭裝設高度對水滅火系統抑火效應之研究及輻射遮蔽效果進行全尺寸實驗。發現無論何種粒徑大小或是裝設高低不同，在火場中都能有效的阻隔輻射。小粒徑細水霧撒水頭對裝設的高度較不敏感，大粒徑細水霧撒水頭在提高裝設高度後，其吸收及阻隔熱輻射的效能反而下降。

國內學者對細水霧的研究還包括，陳俊勳、徐一量等人[16]，對國內半導體廠公司製程排氣風管設置細水霧系統做滅火效能評估研究。實驗的參數為噴頭流量、操作壓力及通風抽氣流速。液滴的粒徑大小在火場防護上扮演很重要的角色。細水霧在滅火效能上比傳統撒水頭好，壓力高時滅火性能也較佳。

2007 年，陳俊勳、張文耀、徐一量等人[17]，針對細水霧在高科技廠房溼式清洗台進行滅火效能評估。實驗參數包含油盤大小、噴頭個數及位置、操作壓力及門的開度。發現小油盆滅火效果較大油盆為佳。噴頭位於火源正上方及油盆兩側各一顆會有最好的滅火效果。操作壓力不足、噴頭位置及噴撒角裝設不恰當，都會造成火勢蔓延，造成更大的損失。

Fang 等人[18]使用 LDV/APV 系統，在不同壓力下量測水霧的粒徑以及速度。他們建立了一個小尺寸的實驗來偵測火燄熄滅時的燃油溫度。並量測燃油在 ISO9705 下的熱釋放率，配合熱傳導係數、噴頭噴撒角，潛熱等參數，可以計算出燃油被熄滅時的溫度。最重要的是可以計算出 y 方向上，動量足以穿越火燄的臨界速度。

Cary 等人[19]利用 PIV 系統觀測經過加熱或未加熱的 Body-Centered Cube (BCC)圓管的紊流。發現液滴分布主要取決於液滴大小及速度。較大的液滴及較快的速度會通過圓管而不受影響；較小的液滴及較慢的速度會在加熱圓管附近受熱蒸發形成可視流區。

### 1.3.2 國內法令規定探討

目前國內並無細水霧滅火設備之標準或規定。如欲選用細水霧做為防護系統，必須援用「各類場所消防全設備設置標準」中，第二、三條中新設備、工法對中央消防主管機關消防署，提出細水霧系統通案認可申請，經核準後，進行個案設計使用仍須提出個案認可申請，經核可後，才具有法定消防設備的身份，否則無法適用法令下，只能做為業主自行設置的防護系統。在各類場所第十八條規定應設自動滅火設備，以細水霧特性應可全面適用，如表 1.3.2 所示：

表 1.3.2 各類消防滅火系統設置場所比較表

應 設 場 所		水 霧	泡 沫	二 氧 化 碳	乾 粉	海 龍 替 代 品	自 動 撒 水	細 <sup>1</sup> 水 霧
一	屋頂直昇機停機場（坪）。		○		○			○
二	飛機修理廠、飛機庫樓地板面積在二百平方公尺以上者。		○		○			○
三	汽車修理廠、室內停車空間在第一層樓地板面積五百平方公尺以上者；在地下三層或第二層以上樓地板面積在二百平方公尺以上者；在屋頂設有停車場樓地板面積在三百平方公尺以上者。	○	○	○	○	○	○	○

四	升降機械式停車場可容納十輛以上者。	○	○	○	○	○	○	○
五	發電機室、變壓器室及其他類似之電器設備場所，樓地板面積在二百平方公尺以上者。	○		○	○	○		○
六	鍋爐房、廚房等大量使用火源之場所，樓地板面積在二百平方公尺以上者。			○	○	○		○
七	電信機械室、電腦室或總機室及其他類似場所，樓地板面積在二百平方公尺以上者。			○	○	○		○
八	引擎試驗室、石油試驗室、印刷機房及其他類似危險工作場所，樓地板面積在二百平方公尺以上者。	○	○	○	○	○		○
<p>註：</p> <p>一、大量使用火源場所係指最大消費熱量合計在每小時三十萬千卡以上者。</p> <p>二、廚房如設有自動撒水設備，且排油煙管及煙罩設簡易自動滅火裝置時，得不受本表限制。</p> <p>三、停車空間內車輛採一列停放，並能同時通往室外者，得不受本表限制。</p> <p>四、本表第七項所列應設場所得使用預動式自動撒水設備。</p>								

在十八條中各類特殊場所，雖建議全部納入細水霧，但其細部設計要求，仍須以通過全尺寸實驗，方能確保防護效能。

<sup>1</sup>本研究論文建議。

#### 1.4 細水霧滅火系統國際相關測試規範介紹

自從國際海事組織(International Maritime Organization, IMO)在 1994 年公告 IMO MSC/Cir 688 細水霧滅火系統測試規範起，國際上許多機構同步發展細水霧滅火系統測試協定，目的在進行細水霧滅火系統效能驗證，確保系統有效性。因

此 NFPA750 也針對測試機構進行調查列表，如表 1.4.1，包含 UL( Underwriters Laboratories, Inc.)、FM(Factory Mutual Global Corporation)、IMO(International Maritime Organization) 及 VDS(Verband der Schadenversichen e.V.)等測試機構及測試規範名稱，其中歐洲的 IMO 只制定規範而非測試機構，美國的 UL 及 FM 的測試規範大都延自 IMO 的規範，但加上 UL 及 FM 的一些自定測試項目，目前 UL 及 FM 可說是美國在細水霧滅火系統測試的主要機構，要進入美國市場一定要通過 UL 或 FM 的測試認證。目前國內尚未建立相關符合本土需求之細水霧滅火系統測試規範，故本研究收集整理國際測試規範及測試空間需求，可做為規劃一個符合性能式理念的標準測試場所與進行效能評估實驗參考，以提供國內業者、研究機構在細水霧滅火系統實場測試或特定火災情境全尺寸驗證建構參考。

表 1.4.1 細水霧滅火系統測試規範及空間分類表

機構名稱	規範名稱	測試項目	空間需求
FM	CLASS 5560	1. 室內燃氣渦輪機之細水霧系統要求。 2. C 類燃燒機房與特別危險機械空間之細水霧系統性能要求。 3. 輕度危險場所之細水霧系統性能要求。 4. 濕式清洗台之細水霧系統性能測試(1997)。	測試場所大小： 7.3 m×7.3 m×4.9m (260 m <sup>3</sup> )
UL	UL2167	1. 消防用細水霧噴頭標準(1998)。 2. 機械空間之細水霧系統性能測試。 3. 客艙之細水霧系統性能測試。	A 類機械空間與泵浦機房火災中：



		<p>4. 大於 12m<sup>2</sup>之客艙之滅火性能測試。</p> <p>5. 公共空間之細水霧系統性能測試。</p> <p>6. 住宿設施之細水霧系統性能測試。</p> <p>7. 輕度危險場所之細水霧系統性能測試。</p> <p>8. 普通危險場所之 I 及 II 類火災測試。</p> <p>9. 噴頭結構設計、標註及性能要求。</p>	<p>Class I 為 500m<sup>3</sup></p> <p>Class II 為 3000m<sup>3</sup></p>
IMO	MSC/ Circular 668	機械空間與泵浦機房之海龍滅火系統替代方案, 包括: 同等性能水系統滅火系統之組件製造標準與 A 類機械空間與泵浦機房之同等性能水系統滅火火災測試方法。	
	MSC/ Circular 728	修正 MSC/Circ 668 A 類機械空間與泵浦機房之同等性能水系統滅火設備火災測試方法 (1994)。	
	Res. A. 800 (19)	由 IMO Res. A. 800(19), 設置撒水系統認可準則, 包括: 細水霧噴頭組件製造標準, 客船住宿區、公共區及服務區之撒水系統同等性能火災測試。	
IMO	MSC/ Circular 913	針對局部防護測試基準, 使用柴油為 6MW 及 1 MW 測試火源, 噴頭採 2x2 或 3x3 配置	
VDS	VDS2498	纜線管溝細水霧噴頭要求。	

附註：

FM : Factory Mutual Global Corporation

UL : Underwriters Laboratories, Inc.

IMO : International Maritime Organization

VDS : Verband der Schadenversichen e. V.

### 1.4.1 細水霧滅火系統國際相關測試之測試空間需求

本節針對上節所述之測試規範進行整理，將各測試規範之測試項目及其空間需求進行列表整理。表 1.4.2 為針對 FM 的測試規範所整理出的空間需求，表 1.4.3 為針對 UL 的測試規範所整理出的空間需求，而表 1.4.4，表 1.4.5 及表 1.4.6 則為針對 IMO 的測試規範所整理出的空間需求。

表 1.4.2 FM 之測試規範空間需求列表

測試規範	防護對象	測試空間需求	備註
FM	燃氣渦輪機房	5.6 x 3.6 x 3.9(m)	防護空間小於 80m <sup>3</sup>
		7.31 x 7.31 x 4.7(m)	防護空間小於 260m <sup>3</sup>
	機械空間	7.31 x 7.31 x 4.7(m)	防護空間小於 260m <sup>3</sup>
	濕式清洗台	5.5x3.7x 5(m)	直徑 12in(0.3m)油池火災
	輕度危害空間	天花板面積 80m <sup>2</sup> ，高度不低於 2.5m	3 x 4 x 2.4m(火源)
	工商業用油鍋	2.6x2.6x0.5(m)	
	局部放射	3x3 (m) 油池	

表 1.4.3 UL2167 之測試規範空間需求列表

測試規範	防護對象	測試空間需求	備註
UL2167	船舶機械空間	Class 1: 10x10x5(m)	
		Class 2: 地板面積 100m <sup>2</sup> ，高 4~7.5 m	
		Class 3: 地板面積 300m <sup>2</sup> ，高 10m	
	船舶乘客客艙空間	3x4x2.4(m)	

	船舶公共區域	3.66x7.32x2.4(m)	
	輕度危害空間	可容納 4 個撒水頭的空間	
	中度危害群組 1 (開放空間)	天花板面積 232m <sup>2</sup> 高度不低於 2.5m	
	中度危害群組 2 (開放空間)	天花板面積 232m <sup>2</sup> 高度不低於 2.5m	

表 1.4.4 IMO MSC/Circ 668/728 A 類主機艙之測試規範空間需求表

分類	引擎形式	測試空間	燃油和潤滑系統中的油路和壓力	空間體積
Class1	輔機室，小型主機或淨化室	測試應在 100 m <sup>2</sup> 房間進行，具有開啟的 2 m × 2 m 的門作為通風之用及 5 m 高天花板。	燃油： 低壓 0.15-0.20 kg/s 於 3-6 bar 高壓 0.02 kg/s 於 200-300 bar 潤滑油：3-5 bar 液壓油：150 bar	500 m <sup>3</sup>
Class2	如渡輪般的中型船的柴油主機	測試應在地板面積超過 100 m <sup>2</sup> 的房間進行，具有開啟的 2 m × 2 m 的門作為通風之用；天花板 5-7.5 m 高使房間總體積達到 3,000 m <sup>3</sup> 。	燃油： 低壓 0.4-0.6 kg/s 於 3-8 bar 高壓 0.030 kg/s 於 250 bar 潤滑油：3-5 bar 液壓油：150 bar	3,000 m <sup>3</sup>
Class3	如油輪和	測試應在地板面	燃油：	>3,000 m <sup>3</sup>

貨櫃輪等大船的柴油主機	積超過 300 m <sup>2</sup> 的房間進行，天花板高度需超過 10m，且沒有任何影響空氣補給的限制。	低壓 0.7-1.0 kg/s 於 3-8 bar 高壓 0.20 kg/s 潤滑油：3-5 bar 液壓油：150 bar	
-------------	---	---	--

表 1.4.5 IMO 船上 A 類主機艙的火災測試情境分類表

測試編號	火災情境	測試用油
1	在四個噴嘴正下方模擬引擎的頂上低壓水平噴灑	商用燃油或柴油
2	在四個噴嘴正下方模擬引擎的頂上低壓水平噴灑 噴油嘴向上 45° 可衝擊到 1 m (39.4 吋) 外 12 - 15 mm (0.5 - 0.6 吋) 的桿子	商用燃油或柴油
3	低壓水平噴灑，火源在模擬引擎側面，噴油嘴由模擬引擎末端 0.1 m 位置噴入	商用燃油或柴油
4	綜合測試編號 1 - 3 最難的噴射火災，並在模擬引擎上有 4 m <sup>2</sup> (43 ft <sup>2</sup> ) 的油盤，下有 3 m <sup>2</sup> (32.4 ft <sup>2</sup> ) 的油盤	商用燃油或柴油
5	在四個噴嘴正下方模擬引擎的頂上高壓水平噴灑	商用燃油或柴油
6	在模擬引擎側方低壓低流水平噴灑火災，在引擎的側面，油料噴出離引擎末端 0.1 m (4 吋) 及一個 0.1 m <sup>2</sup> (1 ft <sup>2</sup> ) 位於引擎 1.4 m (4.6 ft) 及地板的內側	商用燃油或柴油
7	在引擎模型的正下方 0.5 m <sup>2</sup> (5.4 ft <sup>2</sup> ) 的油盤	庚烷
8	在引擎模型的正下方 0.5 m <sup>2</sup> (5.4 ft <sup>2</sup> ) 的油盤	SAE 10W30 礦物基潤滑油
9	在排氣板下底板上 0.5 m <sup>2</sup> (5.4 ft <sup>2</sup> ) 的油盤	庚烷

10	由引擎模型上竄出之持續火源(0.25 kg/s)	庚烷
11	2 m <sup>2</sup> (21.52 ft <sup>2</sup> ) A級(class A)木板疊架，庚烷 測試油盤 30 秒預燒，測試油盤離地面 0.75 mT	UL 1626 木板疊架 (wood crib)及庚 烷
12	鐵板 30 x 60 x5 cm (12 x 24 x 2 吋)偏移噴灑 嘴 20° 加熱至 350°C (662°F)，低壓低流噴嘴在 鐵板端 0.4 m (19.2 吋) 處，當板到達 350°C (662°F)時系統作動。一旦系統停止，油盤不得 在引燃。	庚烷
13	在引擎模型下 2 x 2 m (6.6 x 6.6 ft)的油盤	商用燃油或柴油

表 1.4.6 IMO 油料噴灑測試參數

測試參數	分類 A 主機艙		
火災型式	低壓	低壓, 低流	高壓
Spray nozzle	廣角(120 - 125°) 全錐形	廣角(80°) 全錐形	標準角 [在 6 Bar (87 psi)] 全錐形
公稱燃油壓力	8 Bar (116 psi)	8.5 Bar (123 psi)	150 Bar(2125 psi)
燃油流量	0.16 ~ 0.01 kg/s	0.03~0.005 kg/s	0.050~0.002 kg/s
燃油溫度	20.5°C (68.9°F)	20.5°C (68.9°F)	20.5°C (68.9°F)
公稱熱釋放率	5.8~0.6 MW	1.1~0.1 MW	1.8 ~0.2 MW
1 燃油	商用燃油或柴油	商用燃油或柴油供 火災測試 6 次及庚 烷供火災測試 12 次	商用燃油或柴油

#### 1.4.2 細水霧滅火系統相關測試規範之測試對象及項目說明

##### 1. FM 測試對象及項目整理

本節將FM細水霧滅火系統測試規範中的八種測試對象及細部項目整理如下表（表 1.4.7）：

表 1.4.7 FM 細水霧滅火系統測試規範測試對象及項目整理

項目編號	測試對象	測試項目
1	燃氣渦輪機房 (小於 80m <sup>2</sup> )	1MW 未遮蔽柴油噴撒火災 1MW 遮蔽柴油噴撒火災 遮蔽 1m <sup>2</sup> 柴油油池火災 復燃測試(1MW 遮蔽柴油噴撒火災) 有限制的自然通風測試 噴撒冷卻測試(無火源)
2	燃氣渦輪機房 (小於 260m <sup>2</sup> )	1MW 未遮蔽柴油噴撒火災 1MW 遮蔽柴油噴撒火災 遮蔽 1m <sup>2</sup> 柴油油池火災 復燃測試(1MW 遮蔽柴油噴撒火災) 有限制的自然通風測試 較小防護體積測試 噴撒冷卻測試(無火源)
3	機械空間 (小於 260m <sup>2</sup> )	1MW 未遮蔽柴油噴撒火災 1MW 遮蔽柴油噴撒火災 遮蔽 1m <sup>2</sup> 柴油油池火災 有限制的自然通風測試
4	燃氣渦輪機房或 機械空間 (大於 260m <sup>2</sup> )	低壓未遮蔽柴油噴撒火災 低壓具角度未遮蔽柴油噴撒火災 低壓遮蔽柴油噴撒火災 高壓柴油噴撒火災 低壓遮蔽柴油噴撒及油池火災

		遮蔽正庚烷油池火災 流動火源 疊架火源 噴撒冷卻測試(針對燃氣渦輪機房)
5	濕式清洗台	一、通風狀態測試 直徑 4in 聚丙烯油池火災 直徑 6in 聚丙烯油池火災 直徑 8in 聚丙烯油池火災 直徑 10in 聚丙烯油池火災 直徑 12in 聚丙烯油池火災 易燃性液體(丙酮、IPA、正庚烷)油池火災 通風狀態聚丙烯油池火災 通風狀態易燃性液體油池火災 二、工作表面測試 直徑 4in 聚丙烯油池火災 直徑 6in 聚丙烯油池火災 直徑 8in 聚丙烯油池火災 直徑 10in 聚丙烯油池火災 直徑 12in 聚丙烯油池火災 易燃性液體油池火災 飛濺測試 其他表面測試 三、無通風空間測試 聚丙烯油池火災 易燃性液體油池火災 其他無通風空間測試
6	輕度危險工作場所	測試室#1：小防護區域 10ft x 13ft x 8ft

		<p>測試室#2：大防護區域面積不大於 400ft<sup>2</sup>，高度不超過 8ft</p> <p>測試室#2：天花板面積至少 860 ft<sup>2</sup>之開放空間</p>
7	工業用油鍋	<p>具有 5in 深的自燃溫度火源( mock-up A，Hood up )</p> <p>具有 5in 深的自燃溫度火源(mock-up A，Hood down )</p> <p>具有 5in 深的自燃溫度火源( mock-up B，Hood up )</p> <p>具有 5in 深的自燃溫度火源(mock-up B，Hood down )</p>
8	局部放射	<p>正方形柴油油池火災</p> <p>管道柴油油池火災</p> <p>庚烷噴撒火源</p> <p>正方形柴油油池火災結合 6MW 柴油噴撒火源</p> <p>有遮蔽的正方形柴油油池火災</p> <p>Offset 正方形柴油油池火災</p> <p>具有外部點火源的 6MW 柴油噴撒火源</p>

## 2. UL2167 測試對象及項目整理

本節將 UL2167 細水霧滅火系統測試規範中的測試對象及項目整理如表

1.4.8 說明：



表 1.4.8 UL2167 細水霧滅火系統測試規範測試對象及項目整理

項目編號	測試對象	測試項目
1	船上機械空間 Class 1 : 500m <sup>3</sup> Class 2 : 3000m <sup>3</sup> Class 3 : >3000m <sup>3</sup>	Class 1 : 10 x 10 x 5m 的密閉空間進行測試。 Class 2 : 樓地板面積大於 100m <sup>2</sup> 密閉空間，天花板高度介於 5~7.5m，最大體積 3000m <sup>3</sup> 。 Class 3 : 樓地板面積大於 300m <sup>2</sup> 開放空間，天花板高度超過 10m。
2	小於 12m <sup>2</sup> 船上客艙	3 x 4 x 2.4m(10x13x8ft)的天花板中心進行連接到一個 1.5 x 12m(5x39.4ft)長，2.4m 高的走廊。
3	大於 12m <sup>2</sup> 船上客艙	邊長相等，高 2.4m(8ft)、以及樓地板面積最少 24m <sup>2</sup> (260ft <sup>2</sup> )且不超過 80m <sup>2</sup> (860ft <sup>2</sup> )的室內進行。
4	船上公共區域 輕度危險公共區域 中度危險公共區域	最少 80m <sup>2</sup> 的測試空間中進行。公共空間火災測試在測試第一階段進行時天花板高度為 2.5m，第二階段進行時天花板高度為 5m，在兩面 4.8m(15.7ft)寬的牆構成的轉角進行。
5	住宅區火災測試	3.7 x 7.4 x 2.4m(12x24x8ft)的測試空間進行。
6	輕度危險區域	符合船上輕度危險區域火災測試，相當於 4 個噴頭的最大間距及最大的天花板高度。
7	中度危險區域 群組 1	開放空間測試：在一個尺寸不小於 15m(50ft)的區域中，安裝一個面積最少 232m <sup>2</sup> (2500ft <sup>2</sup> )天花板。轉角火災測試：在一個雙面的密閉空間進行，密閉空間具有

		<p>最大的高度與最小的天花板區域，相當於 4 個噴頭以 2x2 噴頭配置所提供的覆蓋區域；或 9 個噴頭以 3x3 噴頭配置所提供的覆蓋區域。</p>
8	<p>中度危險區域 群組 2</p>	<p>開放空間測試：在一個尺寸不小於 15m(50ft)的區域中，安裝一個面積最少 232m<sup>2</sup>(2500ft<sup>2</sup>)天花板。轉角火災測試：在一個雙面的密閉空間進行，密閉空間具有最大的高度與最小的天花板區域，相當於 4 個噴頭以 2x2 噴頭配置所提供的覆蓋區域；或 9 個噴頭以 3x3 噴頭配置所提供的覆蓋區域。</p>



## 第二章 細水霧系統的構成探討

本研究針對細水霧系統在通風環境下性能表現，相關實驗進行前有必要先釐清定義何謂「系統」，在許勝雄等 [20] 人因工程一書中對「系統」的定義如下：「幾個特定組件在特定的環境與時間內完成特定功能，我們稱這些組件的組成為系統。」，從以上定義中我們發現許多細水霧研究中，都針對了細水霧噴頭，包括了細水霧噴頭放出細水霧的粒徑大小、速度、放射壓力，角度、水霧密度等等，可以統稱為「噴頭特性試驗」，另有部份研究針對各種模擬火災情境的全尺寸燃燒實驗，或者利用電腦模擬軟體做系統的效能模擬，較少對細水霧「系統」構成深入探討，經過各國法令比較及研究文獻探討，大家都可以確定許多細水霧功能特性，還有一些限制性，然而面對細水霧分類複雜，單壓力部份就分為  $12.1\text{kg}/\text{cm}^2$  以下的低壓系統和  $12.1\text{kg}/\text{cm}^2 \sim 34.5\text{kg}/\text{cm}^2$  的中壓系統及  $34.5\text{kg}/\text{cm}^2$  以上的高壓系統；對流體形式又可分為單流系統/雙流系統；以壓力來源則可區分鋼瓶式系統/泵浦式系統；就設計方式則可分為套裝式系統/非套裝式系統；就放射方式分為開放式/密閉乾式/密閉溼式/預動式四種系統，各種系統分類方式下的細水霧系統均包含了特定組件，每一個單一組件必須功能正常且全部組件更須搭配正確，這一套細水霧才有可能成為一個可以發揮功能的「系統」，任何一個組件異常都可能造成系統功能的完全失效。

從以上系統觀點我們可以知道，就算發明了最完美的噴頭，它可能具有超低水量、360 度零防護死角、上下水平全方位放射、具有全世界專利、適用於 A、B、C、D、K 類火災、不受任何通風條件限制…等等如眾家辛苦研究期盼的功能，卻可能因為系統中不受規範的一個小零件老化或失效，讓完美系統徹底當機。

1986 年 1 月 28 日上午，美國太空梭「挑戰者」號(Challenger)從佛羅里達州卡納維拉爾角肯尼迪航太中心的發射架上升空，73 秒鐘後突然爆炸，價值 12 億美元的太空梭被炸成碎片墜入大西洋，7 名機組人員全部遇難，太空梭挑戰者號，即肇因於燃料槽墊圈老化未能如期更新，升空七秒後在世人驚愕中爆炸解體，損失難以估計。

2000 年 11 月 11 日發生奧地利於滑雪勝地，登山用軌道車輛，因為方便在未

依原設計檢討下加裝一台一般浴室用加熱爐，也沒有加入整體系統驗證，使用不久即因裝設不當，引燃剎車油，不幸在隧道中造成174人死亡歷史慘劇，3000米隧道至今封閉中。

由上述災例中可發現，系統失效經常肇因於一個不起眼的組件，就如太空梭上的一只墊圈或軌道車輛上的一台加熱爐，均是未確實檢討並執行系統必要規範，無論任何高科技系統其可靠度同樣決定於，各組件的可靠度，及系統串並聯方式，因此本研究認為進行細水霧研究，有必要對細水霧系統性規範，做一個初步探討。

## 2.1 細水霧系統一般性規範應有的內容

在一般性的規範內容中應該可清楚看出，一個完整的安全防護檢討計劃，包含場所特性、火載量大小、人員特性、被動防火條件、系統概要等，其目的是為了能讓系統建造前，更周密的考慮到各種變數，對完成後的系統可靠度會提升許多，而它至少應包含以下各項系統設計相關資料：

1. 業主單位或所有人名稱。
2. 詳細安裝位置，包括樓層或高層。
3. 方位及圖例。
4. 防護牆及隔板之位置及結構。
5. 防火牆之位置。
6. 防護區剖面圖，包括樓地板／天花板上下兩面之結構及位置、樓梯、以及夾層。
7. 說明防護區之場所種類與危險特性，以及防護區是否平時有人。
8. 說明防護區周圍的暴露狀況。
9. 說明水源及氣體儲存容器之狀況，包括廠牌、內容量、儲存壓力，以及在正常溫度、壓力下以質量或體積表示其正常容量。
10. 說明所用之噴頭製造商、尺寸、噴頭孔口排列、尺寸及型號。
11. 說明配管與管件之材質規格、等級和壓力數值。
12. 說明使用之線路或電纜之等級、儀表（AWG）、保護裝置（shielding）、導線管內之線數、材質，以及顏色之明細表。不同的系統所使用的不同導線管

必須特別註明。線路末端的收尾方式必須特別說明。

13. 說明探測器的安裝方式。
14. 設備的材質規格表必須針對每一項設備，說明設備名稱、製造者、型號或零件編號、品質以及詳細說明。
15. 防護區的平面圖須繪出隔間牆（全高或半高）；供水系統，包括儲存容器及幫浦；氣體供應系統，包括氣體儲存容器；配管；噴頭；配管懸吊架及堅固的管路支撐之型式；探測器、警報器及控制系統之所有設備；線路末端設備之位置；控制設備如閘門及斷電器的位置；以及信號裝置的位置。
16. 細水霧噴灑系統的等角視圖須包括每一條配管的長度與管徑；算流量計算時有關的計算點；管件包括漸縮頭和過濾器；T字管的方向；噴頭的尺寸，噴口的結構及流量。
17. 若為防震建築結構，必須註明細水霧系統或水管通過建築接縫（joint）的情形；防震接縫可能的移動情形；水管配置的細部圖；以及所使用的防止地震位移的彈性連接結構。
18. 若主管機關要求必須具備防震裝置，則須附上耐震強度的計算數值。
19. 若經主管機關要求，須附上地圖式副機。
20. 配管須有支撐架之結構詳圖，以說明對配管及其結構安全性之處理方式。
21. 須有容器之結構詳圖，以說明對容器及其結構安全性之處理方式。
22. 完整的系統操作程序說明，內容須包括緊急停止裝置、保養開關、計時器、以及緊急斷電裝置。
23. 整個線路的配置及接點詳圖，包括系統控制盤的連接、探測器、系統設備、控制設備、外接設備以及繼電器，與地圖式副機。
24. 系統控制盤的詳細線路安裝圖。
25. 完整的防護區體積計算。
26. 所需之備用電池之用電量計算；決定聲音和視覺指示設備之數量及安裝位置之方法；探測器之數量及安裝位置。

以上 26 項為細水霧系統建造前，應先檢討的一般性規範，消防工程師應在完成初步規劃後，進入細部規範檢討設計。

## 2.2 子系統和組件細部規範

細水霧系統由數個的子系統或組件所組成，其中「噴頭」即是一個重要的組件，它是細水霧系中故障率最低而且可靠度非常高的組件，主要因為細水霧噴頭，如同撒水頭檢驗一樣，已有明確的檢驗與認證規範，作業進行多年非常成功，業界早已熟悉並信賴它的標準化，相對其他關鍵性的子系統的規範國內較少探討，以下將針對供壓系統和噴頭的規範及水力計算作一些探討和分析，希望系統應用研究之前，先做一些系統基本規範探討。

### 2.2.1 供壓系統介紹

細水霧系統之供壓系統視其使用之流體類型為單流或雙流而異，並非單指送水之功能，故不將其稱之為加壓送水裝置，而筆者認為應統稱為供壓系統。除了壓力水箱、重力水箱、消防幫浦等典型水系統的供水方式外，細水霧供壓可分為以下為幾種方式。

#### 1. 消防幫浦

單流系統中最常採行之方式，通常採用多段式或柱塞式消防幫浦以達高揚程之輸出，如圖 2.2.1。



圖 2.2.1 消防幫浦

#### 2. 高壓鋼瓶

通常用於雙流式系統，在電源容量不足或供電可靠度較低之場所，無需藉由消防幫浦之加壓，僅以微弱之控制電源即可驅動鋼瓶放射，一組氣體管

路至水槽加壓帶動內部水源放射，另一組氣體管路在噴頭前端與水流配管匯集，如圖 2.2.2。



圖 2.2.2 高壓鋼瓶

### 3. 空氣壓縮機

通常用於雙流式系統，僅由空氣壓縮機加壓，一組氣體管路放射至水槽，加壓帶動內部水源放射使氣體帶動氣體，另一組氣體管路在噴頭前端與水流配管匯集。

### 4. 消防幫浦+高壓鋼瓶

通常用於雙流式系統，液體由消防幫浦加壓，氣體由高壓鋼瓶供給，兩組管路在噴頭前端與水流配管匯集。

### 5. 消防幫浦+空氣壓縮機

通常用於雙流式系統，液體由消防幫浦加壓，氣體由空氣壓縮機供給，兩組管路在噴頭前端與水流配管匯集。

細水霧的供壓系統，由以上幾種方式組合運用，經國內調查後發現各種方式均有使用案例，其中以泵浦式最為廣用，而後續發展似乎也是以泵浦式加壓系統為主，其他方式可能在使用及維護成本等考量下，一直沒有增加案例。

## 2.2.2 各種供壓類型優缺點比較分析

在後續細水霧在通風環境性能研究及實驗中，須建立一套細水霧細水霧系統，在了解各種供壓方式的不同後，要進一步對各種方式做一個特性比較，深入了解其特性，和相對優缺點，如表 2.2.1，以利後續實驗建構和進行。

表 2.2.1 各種供壓類型優缺點比較

供壓類型	優點	缺點
高壓幫浦	高揚程可超過 120kg/cm <sup>2</sup> 以上，而傳統消防泵最多只能達 20kg/cm <sup>2</sup> ，高樓可免多段加壓，免設中繼泵及中繼水箱等。	流量小若以 40HP 為例流量僅 130LPM，如須大流量須以並聯供壓，構造較離心式精密，唯建構成本價格較高，須設置緊急發電機。
低壓幫浦	離心式構造簡單，維修容易，成本低廉取得容易，出水量極大，國內組裝技術成熟，可直接利用現有消防泵組。	揚程不足最多不超過 20kg/cm <sup>2</sup> ，高樓須加設中繼泵及中繼水箱浪費空間，壓力不足以串聯方式加壓，須設置緊急發電機。
高壓鋼瓶	唯一在無動力狀態仍可作用可直接供壓，免設緊急發電機，經常用於海上系統動力喪失備援動力，適用小空間防護。	釋放時間有限，150bar 氮氣供壓，再充填不易，僅適用於防護密閉空間，通風環境下不易完全撲滅火災。
空氣壓縮機	水霧粒徑大小最為平均，霧化效果最佳不需高壓配管，配合低壓泵浦供水，密閉空間滅火性能良好，噴頭不易阻塞。	與泵浦均需設發電機備援，使用多級空氣壓縮機保養不易，空氣與水管路須分開，設置成本較高，水霧粒子衝量較小。
複合式供壓	重要場所雙重備援，可靠度加倍，動力完全喪失，仍具防護功能，無論是泵浦或空氣壓縮機均高壓鋼瓶為備用。	維護不易，設置成本高，系統複雜度較高操作不易，安裝技術門檻也較高，空間佔用大。

### 2.2.3 高壓泵組常見的問題研究

經評估後，本研究將採用高壓水霧系統進行實驗，細水霧的供壓系統就如同



汽車引擎一樣重要，在前述幾種供壓系統，各有其優異之處，不過實際使用時，還是會發生一些令人困擾的異常狀況，最糟糕的情形就是供壓系統當機，造成無法正常供壓，將使得重要場所喪失自我防護能力，表 2.2.2 為高壓系統常見問題，若是能提早檢討並預防，可避免後續實驗進行時再度發生。

表 2.2.2 高壓系統常見問題

供壓方式	高壓幫浦組
主要組件	高壓活塞幫浦、馬達、連軸器、控制盤、進水管路、釋壓閥
常見問題	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 馬達與幫浦組裝未實施同軸校正，造成長期偏心運轉，使聯軸器破裂，無法運轉。</li> <li>2. 高精度活塞泵，未依規定定期運轉，累積水垢造成泵浦卡死，強迫運轉使得泵浦活塞斷裂或馬達線圈燒燬。</li> <li>3. 泵浦缺水停機保護失效，或隔離後強行運轉造成無水運轉，將使泵浦燒毀活塞斷裂，嚴重損壞。</li> <li>4. 幫浦出水過大，迴水釋壓閥匹配不良，無法順利迴水，造成機組過負荷或馬達燒燬。</li> <li>5. 機組未正確接地或控制用 24V 直流電源與 220V 動力電源未能明區分，相互影響功能。</li> <li>6. PLC 控制主機未留備份程式或遭原始供應商鎖碼，致系統主機更新，需做程式逆向工程。</li> <li>7. 泵浦機組停機保護過多，且標示不清，致停機異常時查線困難。</li> </ol>	
發生原因	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 調查發現消防用細水霧高壓機組國內並無專業生產商，組裝廠商均土法煉鋼，沒有對供壓機組做完整功能設計，亦無嚴格出廠品質管理，可靠度不足。</li> <li>2. 調查發現國內對消防加壓機組有認可基準，包含撒水、泡沫、水霧、採水、</li> </ol>	

- 消防栓專用泵浦組，但未包含細水霧高壓機組，國內無法可依循及要求。
3. 廠商基於成本考量，並使多數未使用原廠組裝機組，而使用現場拼裝方式，降低成本，各家廠商良莠不齊，各系統穩定度相差甚大。
  4. 合約未明確規定控制程式所有權，廠商基於自我保護未開放程式修改權。

#### 解決方法

1. 國外進口細水霧應檢附相關測試報告及認可文件送消防主管機關依消防法新設備工法，做認可審查。
2. 國內組裝消細水霧泵應向消防署或授權檢驗單位，提依消防法中新設備工法提出型式認可，國內雖無認可規定，可引援 NFPA750 細水霧規範及 NFPA20 消防泵浦規範做設計依據，及 UL/FM 消防泵浦認可測試項目做參考，若取得型式認可，便可於生產完成在提出個別審查，可利用現有消防泵檢測認可方式，進行功能廠測，若順利便可取得國內核可生產，也可以確保高壓細水霧供壓機組的可靠度。
3. 若無法順利取得官方認可書，至少應具備同樣水準的要求。

## 2.2.4 標準化的細水霧泵浦介紹

目前國內各式消防用泵浦包含消防栓泵、撒水泵、泡沫泵、水霧泵、採水泵、中繼泵等均依照消防泵認可基準實施認可測試通過，取得認可執照方能於市場行銷使用，而細水霧專用消防泵尚無相標準可供測試，也造成用各家產品無一致標準，功能良莠不齊差異非常大，火災防護的可靠度因為加壓機組，品質低劣而嚴重下降，反觀近年消防署推動各式消防泵認可標準化，各廠家製造產品構造、功能、外型都有所依循(如圖 2.2.3 所示)，經認可後的產品，可靠度明顯提高，無論操作或使用在標準統一下，人員無須另外學習，對設備工程師來說非常友善與方便，細水霧加壓泵應可朝向此方向，應取得主管機關標準化認證，對於系統可靠度將會有大幅提升作用，也可避免國內目前各家廠商如拼裝車一般的組裝方式。

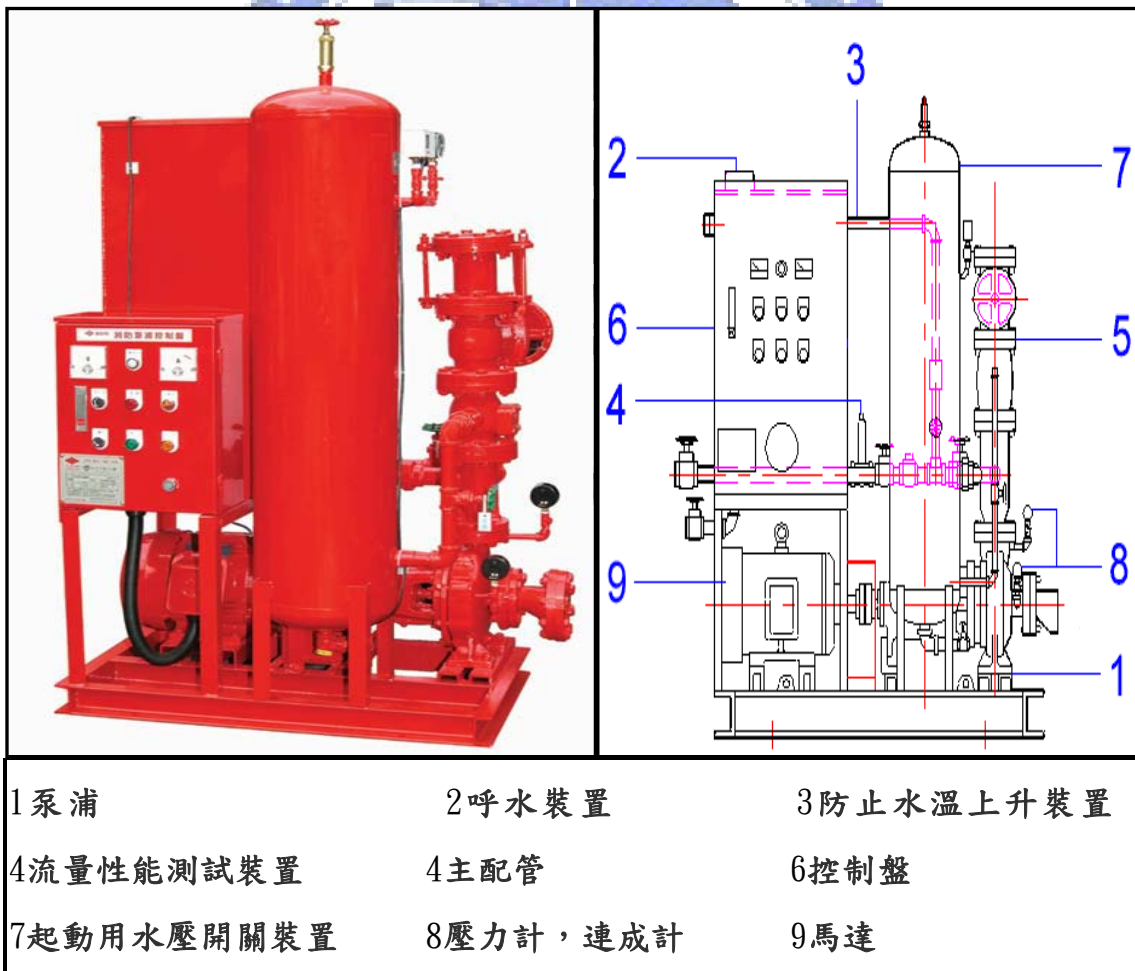


圖 2.2.3 標準化的消防泵浦

## 2.2.5 細水霧噴頭探討

### 1. 測試要求

噴頭是細水霧系統非常關鍵性的要件，其針對感溫式密閉噴頭，如圖 2.2.4 及圖 2.2.5 所示，在 UL2167 執行高達 29 項噴頭測試其測試方式類似我國撒水頭認可測試基準作業方式，只是更為多樣與複雜，包含如下項目：



圖 2.2.4 噴頭材質規定為銅或不銹鋼，如丹麥 Danfoss 不銹鋼噴頭



圖 2.2.5 丹麥 Danfoss 美觀型噴頭，用於高價值場所

- (1) 最小動作溫度
- (2) 動作溫度測試
- (3) 流量測試
- (4) 水量分布測試
- (5) 水滴粒徑大小與速度
- (6) 功能測試
- (7) 變流裝置/放射孔配件測試
- (8) 本體強度測試
- (9) 玻璃球元件強度
- (10) 易熔元件強度
- (11) 抗洩漏
- (12) 液體靜壓強度
- (13) 熱暴露測試
  - 玻璃球噴頭
  - 未塗裝之自動噴頭
  - 塗裝之自動噴頭
- (14) 熱衝擊
- (15) 腐蝕測試
  - 銅噴頭及零件之應力腐蝕
  - 不銹鋼噴頭及零件之應力腐蝕
  - 二氧化硫之腐蝕
  - 鹽霧腐蝕測試
  - 潤濕空氣暴露測試
- (16) 完整的噴頭塗層
  - 石蠟與瀝青的蒸發測試
  - 低溫抗性
  - 高溫抗性
- (17) 水錘測試



- (18) 動態加熱
- (19) Plunge Test
- (20) 延長 Plunge Test
- (21) 耐熱測試
- (22) 振動測試
- (23) 粗糙處理測試
- (24) 衝擊測試
- (25) 橫向放射
- (26) 30 天期耐洩漏
- (27) 耐真空
- (28) 堵塞測試
- (29) 冰凍測試

以上測試項目引進台灣，會將一些項目，如高緯度國家適用的冰凍測試等取消或適當修正以符合本地使用特性。

## 2. 噴頭應登錄項目

相對於國內消防設備標準尚無細水霧規範前，細水霧系統的設計、安裝、使用、保養，可參考照 NFPA750，其規範與國內重要場所撒水設計常引用 NFPA13 有相同架構，較容易為國內消防設計人員熟悉上手，只要遵循其規範，按部就班應可得到所須得一套完整的細水霧防護系統，針對噴頭登錄部份做一說明。

噴頭應個別登錄或與套裝系統一起登錄。登錄說明應包括：

- (1) 特定危險與保護目標。
- (2) 各噴頭的流量特性。
- (3) 防護空間之最大高度。
- (4) 噴頭頂端或迴水板與防護面間之最小距離。
- (5) 噴頭間之最大間距。
- (6) 各噴頭的最大涵蓋半徑。
- (7) 噴頭之最小間距。

- (8) 噴頭頂端或迴水板距天花板的最大距離。
- (9) 噴頭距障礙物之間隔標準。
- (10) 噴頭距牆之最大距離。
- (11) 噴頭最大與最小的額定工作壓力。
- (12) 噴頭垂直向下方向角度的允許範圍。
- (13) 熱感自動噴頭必須分類為快速、特殊、標準反應。
- (14) 最大防護區域體積(若適用)。
- (15) 細水霧輸送至最遠端噴頭之最大延遲時間。
- (16) 只有全新的噴頭才可安裝於細水霧系統。
- (17) 噴頭應永久標示製造商、類型、噴孔大小或型號。
- (18) 在高腐蝕性環境下，應使用附加之抗腐蝕保護，例如特殊抗腐蝕材料或被覆，如圖 2.2.6。被覆材質若符合要求，須由製造廠商使用於噴頭上，且含此被覆的噴頭應被登錄予以使用。
- (19) 當噴頭有可能因外來雜物而阻塞時，噴頭應提供易碎盤、掉落蓋或其他適合的裝置。在系統操作時，這些裝置應提供暢通的開口，並且應裝設於不傷及人員的地方。

每個細水霧噴頭至少應完成以上 19 項登錄，規定來自 NFPA750，國內廠家如欲進行研發噴頭，應可依循，如此才能充分表現噴頭的特性與設計使用規則。



圖 2.2.6 各種不同防護塗裝的噴頭式樣

### 3. 密閉式噴頭的溫度等級

密閉式噴頭的溫度等級如表 2.2.3，至於溫度等級應以最高室溫為考慮，經查核後發現此部份選用方式可完全參照自動撒水標準。密閉式噴頭的溫度等級、分類與顏色碼與 NFPA 13 撒水頭分類完全相同。

表 2.2.3 密閉式噴頭的溫度等級、分類與顏色碼

最高室溫		噴頭溫度等級		溫度等級	顏色碼	玻璃球顏色
°F	°C	°F	°C			
100	38	135~170	57~77	普通	無色或黑色	橘或紅
150	66	174~225	79~107	中等	白色	黃或綠
225	107	240~300	121~149	高等	藍色	藍
300	149	325~375	163~191	較高等	紅色	紫
375	191	400~475	204~246	非常高等	綠色	黑
475	246	400~475	260~302	超高等	橘色	黑
625	329	650	343	超高等	橘色	黑

### 4. 安裝規定備份

為了避免密閉式噴頭因少數破裂造成整個系統停用，或無法建立壓力，所以 NFPA 750 規定所有安裝的感溫式密閉噴頭，應依照下列規定給予備份：

- (1) 系統按裝噴頭數量低於 50 個時，應備份至少 3 個噴頭。
- (2) 系統按裝噴頭數量介於 50 至 300 個時，應備份至少 6 個噴頭。
- (3) 系統按裝噴頭數量介於 301 至 1000 個時，應備份至少 12 個噴頭。
- (4) 系統按裝噴頭數量高於 1000 個時，應備份至少 24 個噴頭。

### 2.3 細水霧系統的水力計算

了解系統特性及類別後，要進一步選擇系統的大小，需進行水力計算，在低壓細水霧系統部份，與一般撒水系統(NFPA 13)、水霧系統(NFPA 15)相似，因此



管材、管件、閥、配管尺寸可相互參照。低壓細水霧系統管路中的水流速度會與撒水系統落在相同範圍，因為低壓細水霧系統與一般撒水系統一樣使用 H-W 方程式來做運算，但 Hazen-Williams(H-W) 方程式無法對流體流速、流體溫度、粘度、管壁粗糙度因子作修正，但以上這些因子在亂流狀態(Turbulence)下會造成估算壓降上極大的影響。在細水霧系統中，中壓以及高壓系統(>12 bar to 270 bar) 最容易造成上述高流速(亂流)狀態。因 Darcy-Weisbach 方程式的計算中考慮到流體特性因素，在中壓及高壓系統下，水力計算應使用 Darcy-Weisbach(D-W) 方程式而非 Hazen-Williams (H-W) 方程式。

### 2.3.1 Darcy Weisbach 計算方式

這種計算方式適合用在中壓、高壓、單流系統上。

1. 配管的摩擦損失應該使用表 2.3.1 中的公式。

例外:最小管徑 3/4in(20mm)，最大流速不超過 25ft/sec(7.6m/s)之中、高壓系統，可使用 Hazen-Williams 方法作水力計算。

表 2.3.1 Darcy Weisbach 及其相關公式在中高壓系統下的壓降計算

英制 (English Units)	公制 (SI Units)
Darcy Wiesbach 公式： $\Delta p = 0.000216(fLpQ^2/d^5)$	$\Delta p_m = 2.252(fLpQ^2/d^5)$
雷諾數 $Re = 50.6Q / d$	$Re = 21.22Q / d$
相對粗糙度： 相對粗糙度 = $\epsilon / D$	相對粗糙度 = $\epsilon / d$
$\Delta p$ = 摩擦損失，psi L = 管長，ft $f$ = 摩擦係數，psi/ft	$\Delta p_m$ = 摩擦損失，bars L = 管長，m $f$ = 摩擦係數，bars/m

Q=流量，gpm	Q = 流量，L/min
d = 管子內徑，in	d = 管子內徑，mm
英制 (English Units)	公制 (SI Units)
D = 管子內徑，ft	
$\varepsilon$ = 管壁粗糙度，ft	$\varepsilon$ = 管壁粗糙度，mm
$\rho$ = 流體密度 lb/ft <sup>3</sup>	$\rho$ = 流體密度 kg/m <sup>3</sup>
$\mu$ = 絕對黏度，cP	$\mu$ = 絕對黏度，cP

2. Darcy Weisbach 公式中的摩擦係數  $f$ ，可由圖 2.3.1 (Moody Diagram) 計算得之，雷諾數及相對粗糙度可由表 2.3.1 計算得之，所需係數請參閱表 2.3.2 及 2.3.3。

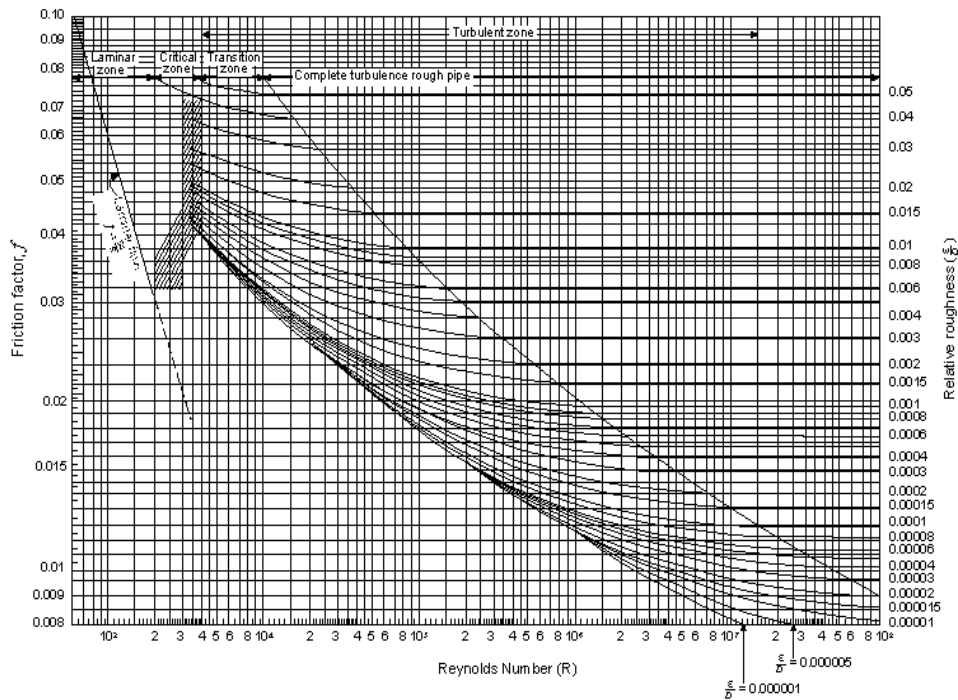


圖 2.3.1 Moody Diagram

表 2.3.2 絕對粗糙度建議值或不規則管壁有效高度建議值

管子的材質 (新的)	絕對粗糙度 $\epsilon$ 的設計值	
	英尺	公釐
銅, 銅鎳, 可扭管	0.000005	0.0015
不銹鋼	0.00015	0.045

表 2.3.3  $\mu$  的近似值, 絕對黏度。淨水的密度, 溫度範圍 40°F 至 100°F (4.4°C 至 37.8°C)

華氏溫度 °F	攝氏溫度 °C	水的密度 lb/ft <sup>3</sup>	水的密度 kg/cm <sup>3</sup>	$\mu$ 的近似值 cP
40	4.4	62.42	999.9	1.5
50	10.0	62.38	999.7	1.3
60	15.6	62.34	999.8	1.1
70	21.1	62.27	998.0	0.95
80	26.7	62.19	996.6	0.85
90	32.2	62.11	995.4	0.74
100	37.8	62.00	993.6	0.66

3. 最大及最小的噴頭操作壓力應該在所登錄的範圍下。
4. 系統管路的水力設計應該滿足製造商所登錄之流體輸送要求。

### 2.3.2 Hazen-Williams 計算法

細水霧系統的工作壓力不超過 175psi (12bars) 時, 應使用 Hazen-William 公式作水力計算。

#### 1. 摩擦損失公式

管中之摩擦損失應依據 Hazen-William 公式：

$$P_f = (4.52Q^{1.85}) / (C^{1.85} d^{4.87})$$

$$P_f = \text{摩擦損失}(\text{psi}/\text{配管長度ft})$$

$Q = \text{流量(gpm)}$

$d = \text{真實管內徑(in)}$

$C = \text{摩擦係數}$

若公制，則：

$$P_m = 6.05(Q_m^{1.85}) / (C^{1.85} d_m^{4.87}) \times 10^5$$

$P_m = \text{摩擦損失(bars/配管長度m)}$

$Q_m = \text{流量(L/m)}$

$d_m = \text{真實管內徑(mm)}$

$C = \text{摩擦係數}$

## 2. 動壓公式

管中充滿水時的動壓可以由下列公式計算：

$$P_v = 0.001123Q^2/D^4$$

$P_v$ ：動壓，psi

$Q$ ：流量，gpm

$D$ ：內徑，in

若用公制

$$P_v = 5.61 \times 10^{-7} (Q^2/D^4)$$

$P_v$ ：動壓，bars

$Q$ ：流量，L/min

$D$ ：內徑，mm

## 3. 正規壓力公式

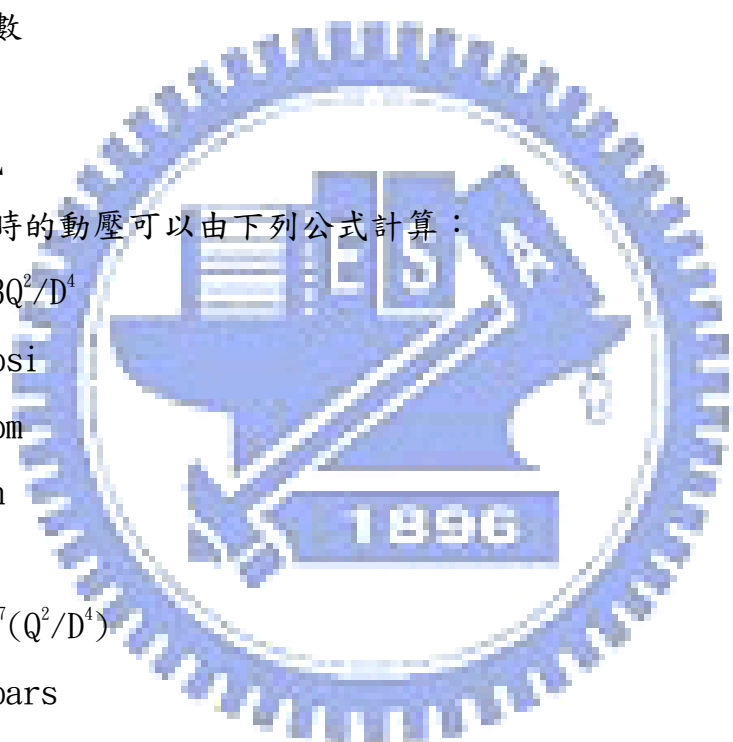
正規壓力 $P_n$ 可以由下列公式計算：

$$P_n = P_t - P_v$$

$P_n$ ：正規壓力

$P_t$ ：總壓，psi 或bar

$P_v$ ：動壓，psi 或bar



#### 4. 水力連節點

在水力連節點的壓力須保持平衡在 0.5 psi (0.03 bar )以內。水力連節點最高壓力以及流量的調整仍須包括在計算中。

#### 5. 閥與管件的等效管長

- (1) 除非製造商測試數據顯示有其他適當的參數之外，表 2.3.4 中的數值可以用來計算管件及裝置的等效管長。諸如鞍狀管件的摩擦損失，就超過表 2.3.4 的摩擦損失。其額外的摩擦損失也應包含在水力計算中。若內管徑不同於銅管，則表 2.3.4 的等效管長要再乘上 1 個係數，公式計算如下：

$$\left[ \frac{\text{真實內徑}}{\text{K 型銅管內徑}} \right]^{4.87} = \text{修正因子}$$

這個修正因子可參見表 2.3.5。

- (2) 表 2.3.4 只能使用在係數 C=150 的海生威廉公式下，若其他不同 C 值時，則表 2.3.4 應乘以表 2.3.5 的因子。
- (3) 一些特定的閥、過濾裝置、或其他特殊裝置的摩擦損失值或等效管長，應提供給主管機關。
- (4) 使用海生威廉公式計算管的摩擦損失時，C 值應參看表 2.3.6

表 2.3.4 銅管管件與閥的等效管長值表

標準	管件				閥				
	標準彎管		T 型管		管接頭	球閥	門閥	蝶閥	逆止閥
尺寸	90 度	45 度	邊通	直通					
(in) (mm)	(ft) (m)	(ft) (m)	(ft) (m)	(ft) (m)	(ft) (m)	(ft) (m)	(ft) (m)	(ft) (m)	(ft) (m)
3/8 9.53	0.5 0.15	-	1.5 0.46	-	-	-	-	-	1.5 0.46
1/2 127	1 0.31	0.5 0.15	2 0.61	-	-	-	-	-	2 0.61
5/8 15.88	1.5 0.46	0.5 0.15	2 0.61	-	-	-	-	-	2.5 0.76

3/4 19.05	2 0.46	0.5 0.15	3 0.91	—	—	—	—	—	—	3 0.91
1 25.4	2.5 0.76	1 0.31	4.5 1.37	—	—	0.5 0.15	—	—	—	4.5 1.37
11/4 31.75	3 0.91	1 0.31	5.5 1.68	0.5 0.15	0.5 0.15	— 0.15	—	—	—	5.5 1.68
11/2 38.1	4 1.22	1.5 0.46	7 2.13	0.5 0.15	0.5 0.15	— 0.15	—	—	—	6.5 1.98
2 50.8	5.5 1.68	2 0.61	9 2.74	0.5 0.15	0.5 0.15	0.5 0.15	0.5 0.15	0.5 0.15	7.5 2.29	9 2.74
21/2 63.5	7 2.13	2.5 0.76	12 3.66	0.5 0.15	0.5 0.15	—	1 0.15	10 3.05	11.5 3.51	
3 88.9	9 2.74	3.5 1.07	15 4.57	1 0.31	1 0.31	—	1.5 0.31	15.5 4.72	14.5 4.42	
31/2 88.9	9 2.74	3.5 1.07	14 4.27	1 0.31	1 0.31	—	2 0.46	—	12.5 3.81	
4 101.6	12.5 3.81	5 1.52	21 6.40	1 0.31	1 0.31	—	2 0.61	16 4.88	18.5 5.64	

表 2.3.5 C 修正因子

C 值	100	120	130	140
要乘上修正因子	0.472	0.662	0.767	0.88

表 2.3.6 海生威廉 C 值

一般管或小軟管	C 值
塑膠，所有各種型式都可	150
銅管或不銹鋼管	150

### 2.3.3 利用 Excel 表格化的水力計算

實用上可利用 Excel，如表 2.3.7，整合上述條件，依據細水霧系統壓力分別而採用 H-W 或 D-W 方程式將後，將方程式內建於試算表，整個水力計算表格化後，只須輸入各節點水量、外徑、管厚、彎頭、三通、高程等參數，即可得到系統水力損失，可為設計者節省不少水力計算時間。

表 2.3.7 Excel 表格化的水力計算

交通大學細水霧水力計算書(壓降損失) Pressure drop calculation

消防設備師黃聖安

Project: :TAIWAN FIRE CO. Section:

Nozzle: T-FOG

Water Temperature: 20°C

		Pipe													Height		Bendings		T-pieces		Valves		Fittings					
Fr.	To	D	t	d <sub>hy</sub>	A	Q	v	ν	ρ	Re	κ	κ/d <sub>hy</sub>	λ	l	Δp <sub>pipe</sub>	h	Δp <sub>height</sub>	ζ <sub>90</sub>	n	ζ <sub>T</sub>	n	ζ <sub>V</sub>	n	Σζ	Δp <sub>fit.</sub>			
		mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	l/min	m/s	mm <sup>2</sup> /s	kg/m <sup>3</sup>		mm			m	Bar	m	Bar								Bar			
1	2	28.0	2.00	24.0	452	128	4.7	1.004	998.2	1.1E+05	0.002	8.3E-05	0.017	109.0	8.693	5	0.49	0.15	10	0.5	1			2	0.222			
2	3	18.0	1.50	15.0	177	76.8	7.2	1.004	998.2	1.1E+05	0.002	1.3E-04	0.017	1.0	0.304	0	0.00	0.15	2					0.3	0.079			
3	4	18.0	1.50	15.0	177	51.2	4.8	1.004	998.2	7.2E+04	0.002	1.3E-04	0.019	3.0	0.449	0	0.00	0.15	2					0.3	0.035			
4	5	15.0	1.50	12.0	113	25.6	3.8	1.004	998.2	4.5E+04	0.002	1.7E-04	0.022	3.0	0.385	0	0.00	0.15	1					0.15	0.011			
5	6	10.0	1.00	8.0	50	12.8	4.2	1.004	998.2	3.4E+04	0.002	2.5E-04	0.023	1.0	0.262													
6	7	10.0	1.00	8.0	50	6.4	2.1	1.004	998.2	1.7E+04	0.002	2.5E-04	0.028	3.0	0.234													
																10.33	0.49											0.35

Calculated according to Danish Shipyard Standard DVS 09012 , converted to SI - unit.

- D mm Pipe diameter
- t mm Wall thickness
- d<sub>hy</sub> mm Internal diameter
- A mm<sup>2</sup> Cross-sectional area
- Q l/min Volume flow
- v m/s Flow velocity
- ν mm<sup>2</sup>/s Kinematic viscosity
- ρ kg/m<sup>3</sup> Density
- Re Reynold number
- κ mm Roughness
- λ Specific resistance, pipe
- l m Pipe length
- Δp<sub>pipe</sub> Bar Pressure drop, pipe
- h m Height of water column
- g m/s<sup>2</sup> Gravitation
- Δp<sub>height</sub> Bar Pressure drop, water column
- ζ Specific resistance
- n Number
- Σζ Total specific resistance
- Δp<sub>fit.</sub> Bar Pressure drop, fitting

$$d_{hy} = D - 2t$$

$$A = \pi * d_{hy}^2 / 4$$

$$v = 1000 * Q / (A * 60)$$

$$Re = 1000 * v * d_{hy} / \nu$$

$$\Delta p_{pipe} = \lambda * l * \rho * v^2 / (200 * d_{hy})$$

$$\Delta p_{height} = h * \rho * g / 100.000$$

$$\Sigma \zeta = (\zeta_{90} * n) + (\zeta_T * n) + (\zeta_V * n)$$

$$\Delta p_{fit.} = \Sigma \zeta * \rho * v^2 / 200.000$$

$$v = 1,004 \text{ mm}^2/\text{s at } 20^\circ\text{C}$$

$$\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3 \text{ at } 20^\circ\text{C}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\kappa = 0,002 \text{ for Stainless pipe}$$

For bending:

For T-side flow:

For T-thought flow and concentric reducer:

Ball valve, reduced area

Non-return valve, seated valve

Section and main valve

(Ball + Non-return valve)

λ according to diagram Danish Shipyard Standard DVS 09012 3.1

$$\zeta_{90} = 0.15 \text{ Smooth Pipe}$$

$$\zeta_{\alpha} = \zeta_{90} * \alpha / 90^\circ$$

$$n = \alpha / 90^\circ$$

$$\zeta_T = 1,3 \text{ } Q_{side} / Q = 1,0$$

$$\zeta_T = 1,0 \text{ } Q_{side} / Q = 0,5$$

$$\zeta_T = 0,9 \text{ } Q_{side} / Q = 0,2$$

$$\zeta \cong 0$$

$$\zeta_B = 1,0$$

$$\zeta_N = 1.2$$

$$\zeta_V = \zeta_B + \zeta_N = 2,2$$

Total pressure drop: 11.16

### 第三章 研究內容及方法

本研究針對細水霧系統在通風環境下效能評估，首先收集細水霧相關文獻如法規、準則、測試協定，國內外有關研究資料，匯整後擬定主要研究大綱與架構，進而選擇火災實驗情境及實驗參數，而後開始建制各項實驗設備，包括排煙設備、細水霧系統燃燒設備、監測與記錄設備…等。

實驗主要為二大部份包括機械通風環境與自然通風條件下，進行實場燃燒實驗，機械通風安排於一般居室條件中設排煙系統情境，將同時監測燃燒與滅火過程，各項影響生命安全指數變化，包括氧氣、一氧化碳、二氧化碳、火場溫度、煙濃度變化，確認居室通風條件下能否有效滅火，並確保人命安全。自然通風實驗情境主要參考 FM 5560 與 IMO MSC/Cir 913 局部放射護(Test Method for Fixed Water-Based Local Application)，分成二度空間油盤火和三度空間的噴濺火源，挑高五米測試高度分別於室內與室外進行，主要依據 FM 與 IMO 測試規定判斷能否成功滅火外，利用調整噴頭間距和角度，做定性觀測大空間自然通風下細水霧滅火特性。各部工作內容詳細說明如圖 3.1：

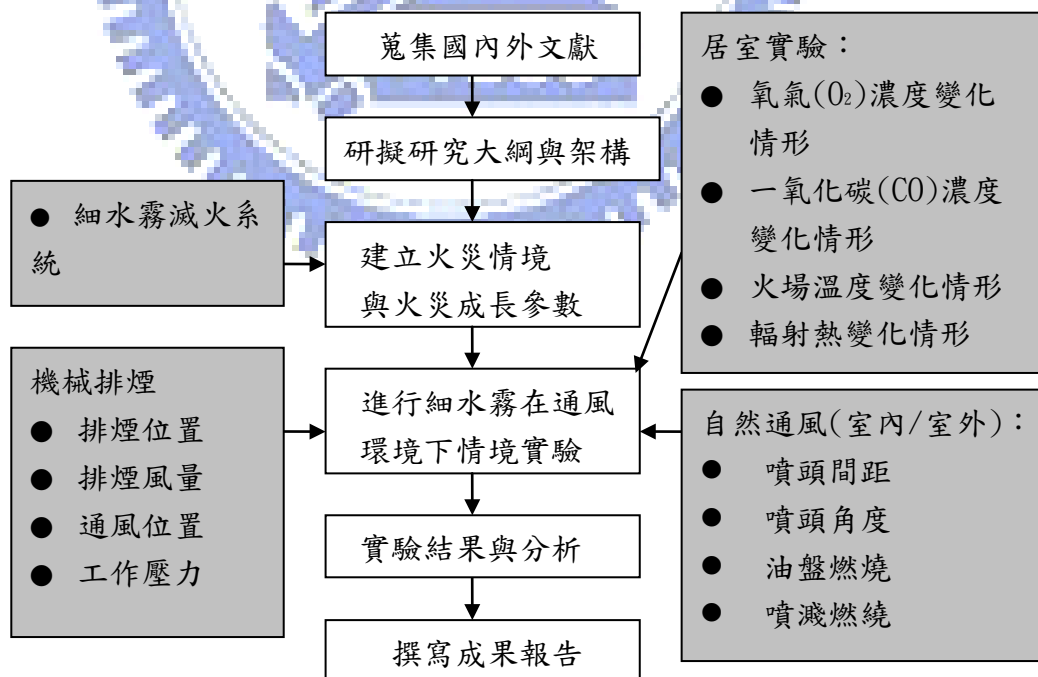


圖 3.1 本研究的實驗架構



### 3.1 收集資料

此部份係針對本研究執行必要之工作項目進行國內外相關文獻資料及法規之彙整，包括：系統應用對象之危害特性、欲分析對象物之情境建立、細水霧設計規範(NFPA 750、IMO、…)、情境模擬分析之參數收集(空間配置圖、火載量大小、排煙設施位置及流量、系統操作壓力、…)。尤其著重在細水霧過去相關研究[8~15 及 18]的整理和整合以作為本研究實驗的基本架構。

### 3.2 實驗設備與系統架設

本部份進行測試前的準備動作，首先完成測試場週邊設備設置，排煙閘門、排煙風管、風機、配電等基本設施及溫度、氣體偵測系統的設置。接著可進行噴頭、管件、pump 等防護系統架設及受測物架設，以利於實場測試之進行。

#### 3.2.1 實驗空間介紹

##### 1. 機械通風情境

實場測試場地現址位於建築研究所防火實驗中心的煙控實驗室內，空間大小為 12 公尺長，4 公尺寬，高度 3.5 公尺，在實場測試時除紀錄滅火時間外，也將紀錄滅火的影像(靜態及動態)，在滅火測試進行的同時，也紀錄火場中多處的溫度變化、輻射熱通量變化及氧、一氧化碳等氣體濃度，示意圖如圖 3.2.1 所示；在空間中包括有三條熱電偶樹、四個撒水噴頭、兩個排煙口、一個補氣口、煙濃度偵測器及氣體分析儀。煙濃度偵測器與氣體分析儀架設高度均為 1.8m，主要是因為 1.8m 為煙層的危險界線。

##### 2. 自然通風情境

- 測試室的空間應夠大，如圖 3.2.2 及圖 3.2.3，且提供適當的自然或機械通風，以確保在進行測試時，在局部防護式滅火系統沒有動作下，氧氣濃度能夠保持在 20%以上。
- 測試室的面積應至少  $100\text{m}^2$ ，且高度至少 5m。

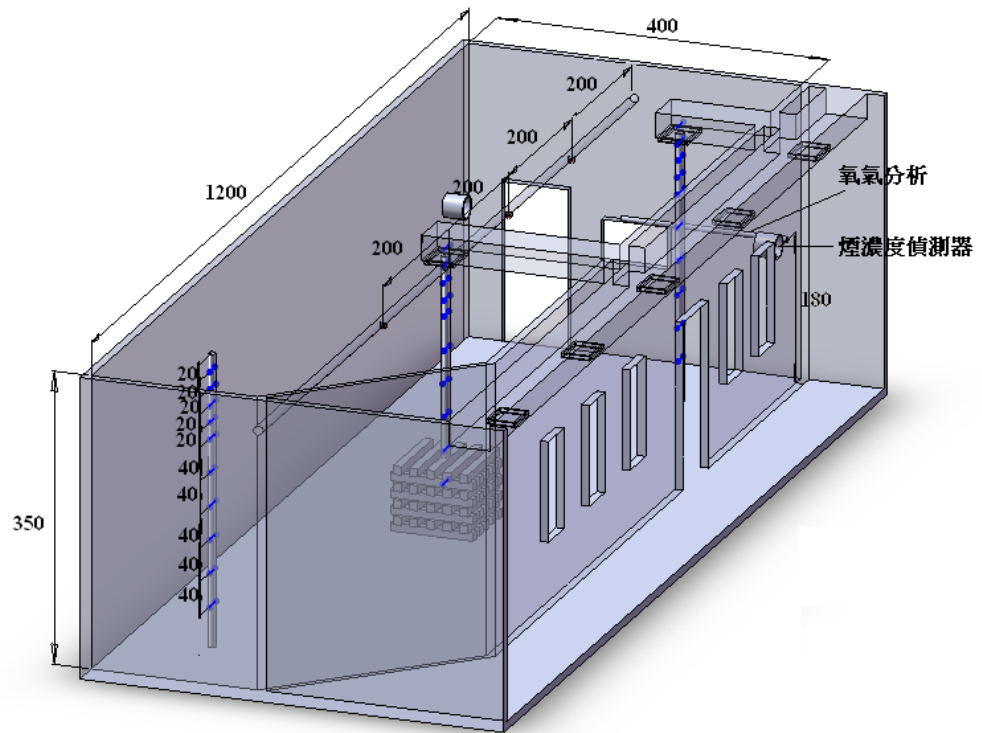


圖 3.2.1 機械通風條件之實驗場地配置圖



圖 3.2.2 室外空間實驗場地 5mx5mx5m 管架



圖 3.2.3 室內空間實驗場地 5m x 5m x 5m 管架

### 3.2.2 實驗場儀器設備

本研究主要內容是針對細水霧滅火系統 (Water Mist Fire Suppression System) 在通風環境下性能評估及應用。在機械排煙情境下，選定居室火災來做為火災場景，決定其火載量並以木堆及油盤當作標準火源。經由不同的噴霧條件、排煙條件及細水霧噴射位置與排煙口之相對位置，來觀察煙流動變化並且量測標準火源被撲滅的時間，以及火場內之溫度變化以深入探討細水霧與排煙系統設置之相對位置與其滅火能力之相關性。整個的實驗設備主要是由一個測試空間、不同的火災防護以及一些量測儀器所組成。而以上所提到的實驗設備，將會在接下來的部分作詳細的說明。下面將針對各項實驗設備作簡單的介紹。

#### 1. 氣體分析儀

本實驗中所用的氣體分析儀，如圖 3.2.4 是由 Testo 公司自行研發的軟體，透過 PCMCIA 卡所控制。當幫浦以手工或者自動的方式開始時，燃燒所產生的

氣體，會經由前端的陶磁過濾器將大部分的雜質（主要是 soot）過濾掉，而過濾後的氣體再經由探測管進去機器本體內。在進內氣體分析儀後，氣體的溫度會被冷卻到  $4-8^{\circ}\text{C}$  之間，這時氣體中所含的水氣便會凝結成液態的水，以確保能得到乾燥空氣，同時降低儀器內部元件因水氣所帶來的損害。然後，乾燥的空氣會透過幫浦提供的動力到達氣體感應器。這裡，乾燥的空氣會經由孔隙極小的橫隔膜擴散進傳感器，然後產生信號。最後，氣體再透過排氣管排放至外界。

## 2. 熱電偶樹

在本實驗中，一共設置有 3 條熱電偶樹(Thermocouple Tree)，如圖 3.2.5，其目的在於測量測試期間，機械空間不同位置溫度變化情況。設置的熱電樹分別標號為#1，#2 和#3，每條熱電偶樹均由十支 k-型的熱電偶(K-type Thermocouple) (量測範圍約  $-200^{\circ}\text{C} \sim 1370^{\circ}\text{C}$ ) 所組成。而實驗過程中所產生的訊號會經由訊號處理器(DU-100 與 DA-100) 如圖 3.2.6，透過乙太網路傳輸方式儲存在電腦中。



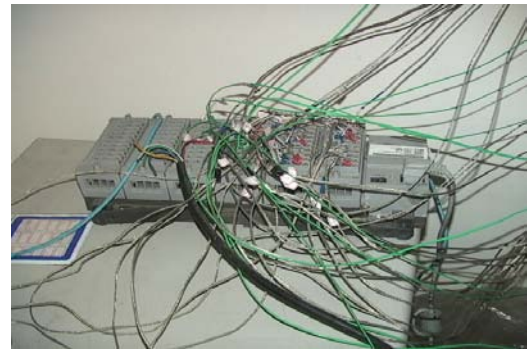
圖 3.2.4 氣體分析器



圖 3.2.5 熱電偶樹



(a)



(b)

圖 3.2.6 數據處理器(a) DA-100 (b)DU-100

### 3. 煙遮蔽量測器和雷射光源發射器

煙遮蔽量測器(CODEL Model 200t)包括一個信號處理機單位和兩台相同的雷射光源發射器，如圖 3.2.7 和圖 3.2.8 所示。兩台雷射光源發射器分別被安裝相對牆上 1.8 米高度，圖 3.2.8。信號處理機包含了電源以及控制的微處理器部份。



圖 3.2.7 煙遮蔽量測的訊號處理器



圖 3.2.8 雷射光源發射器

信號處理機/電源 可以調整雷射光源的波長，以及發射的雷射光強度，而雷射光強度衰弱量經訊號產生器(D100 以及 DA-100) 直接把一個電訊號轉變成一個電壓訊號，進而得到相對應的煙遮蔽率。

在雷射光源發射器部分包含一個感測頭(包括光源，一個檢測器和相關視覺的感應元件)；以及一面校準鏡和可旋轉的閥門。光源由兩個波長為 637 nm (在人眼睛可視範圍內)的高功率發光二極體(LED) 組成。

煙遮蔽率測量的詳細的工作原理描述如下。考慮兩個獨立的雷射光源分別設置在牆壁的两端的情況，此時，從雷射光線 1 發射至雷射光線 2 的關係可以用下列方程式來表示；

$$\pi_{21} = K_1(D_{12}/D_{22})$$

其中： $K_1$  = gain constant to product

$\pi = 1$  (100 % transmissivity, clean air condition)

$D_{12}$  = the detector output at unit 1 (internal reference level)

$D_{22}$  = the detector output at unit 2

或是從雷射光源 2 發射至雷射光源 1 的關係式，可以寫成下列式子：

$$\pi_{12} = K_2(D_{21}/D_{11}),$$

其中： $K_2$  = gain constant to product

$$\pi = 1 \text{ (100 \% transmissivity, clean air condition)}$$

$D_{21}$  = the detector output at unit 1

$D_{11}$  = the detector output at unit 2 (internal reference level)

另外從上面的兩個關係式，( $\pi$ )可以以下列關係式來表示：

$$\begin{aligned}\pi &= \pi_{12} \times \pi_{21} \\ &= K_1(D_{21}/D_{11}) \times K_2(D_{21}/D_{11})\end{aligned}$$

#### 4. 數位攝影機

在試驗將數位式攝影機（類型 DCR-TRV40，新力），放置在觀景窗(Viewing Window)的地方，以幫助記錄實驗過程中火場的變化情形。而錄製的影像透過影像轉換卡(IEEE1394 的插槽)，以及 Ulead 6.0 影像處理軟體，將所錄製的影片存放在電腦中。

#### 5. 雷射系統

在本實驗採用 Spectra Physics 公司的 Ar 雷射，連續波綠色可見光，增加了 CCD 感光度並且降低了實驗中雷射光源校準之困難性，雷射功率 2W、波長 532nm、光束直徑 2.3mm、光束擴散角 0.5mrad。將雷射架於光學平台，經圓柱透鏡將雷射光束轉為雷射光頁 (laser sheet) 厚度約 3.4mm，雷射光頁射入石英玻璃測試段，使光頁切於噴頭下方的中央部份的位置。

##### (1) 光學透鏡組

實驗所用之光學透鏡組，用於產生雷射光頁，包括光學平台、圓柱透鏡 (BK7 Precision Cylindrical Lenses)、圓柱透鏡支架與固定器，圓柱透鏡有效焦距為 6.4mm。

##### (2) 分析系統(analysis subsystem)

因應 PIV 所產生的大量影像資料，所以需要大容量、高處理速度儲存系統，由 Pentium 4 CPU 3.0GHz 及 1GB RAM，使用 NI 軟體後處理分析影像資料。

### 3.2.3 火源設計

本研究主要內容是針對細水霧滅火系統在通風環境下性能探討。火源選擇分為機械通風與自然通風測試環境下共計三種，分別為木堆火源、油盤火源及噴濺火源，其火載量分別如後說明。

#### 1. 木堆火源

木堆標準火源的設計將參考 CNS3658 Z1021 乙種標準模型，如圖 3.2.9，其使用 90 根木材堆疊而成的，每根木材長度為 73cm，木堆下方放置 1500C.C. 的汽油，依據 CNS3658 需使木堆預燃 3 分鐘方可進行滅火實驗。

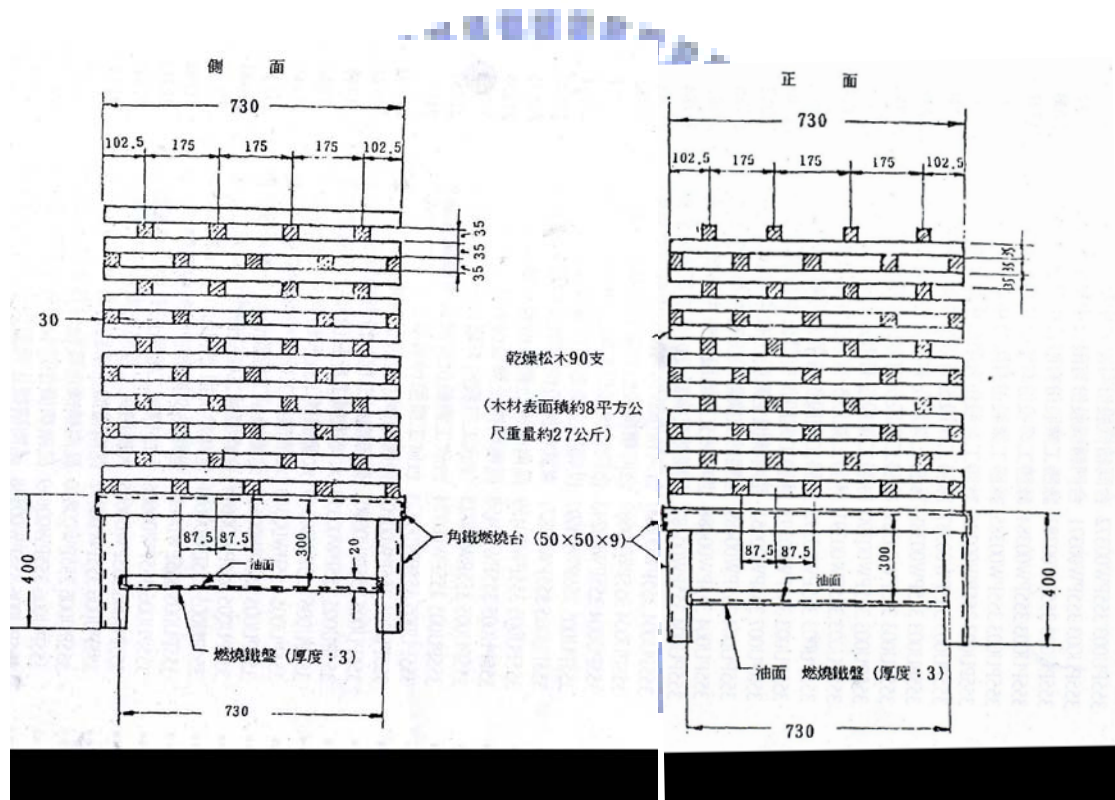


圖 3.2.9 木堆火源

#### 2. 油盤火源

油盤火災則以 FM Approval Standard for Water Mist Systems Class Number 5560 中針對局部防護(local application)所訂定之池火(pool fire)測試為測試情境，池火火源如圖 3.2.10 所示，油盆的大小選用室內為 40x40cm，室外為 60x60cm，並且選用汽油來作為油盆火災的標準火源。不同油量高度示意圖如圖 3.2.11。



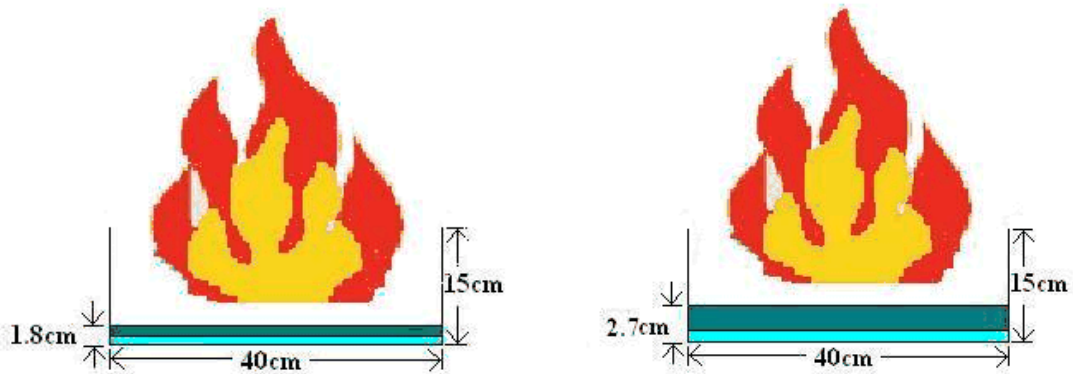
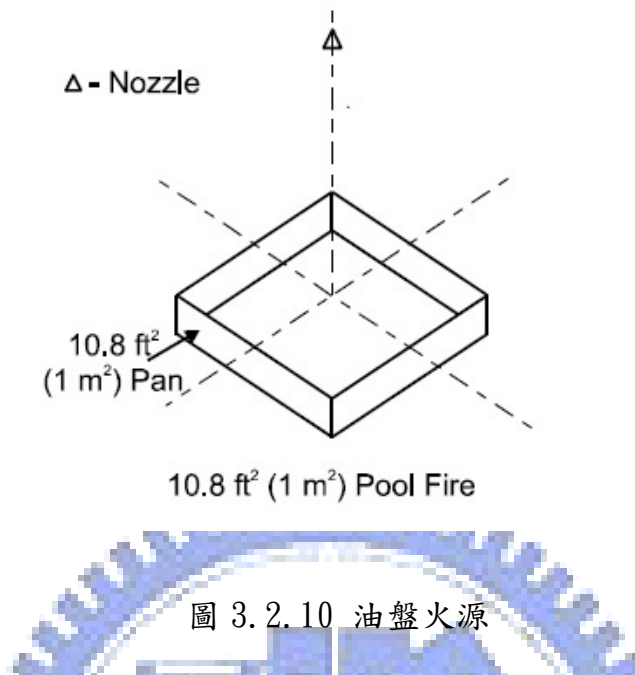


圖 3.2.11 不同油量高度示意圖

經由不同的噴霧條件、排煙條件及細水霧噴射位置與排煙口之相對位置，觀察流場變化並且量測標準火源被撲滅的時間，火場中溫度變化。探討細水霧與排煙系統設置之相對位置與其滅火能力之相關性。實驗的參數為火源位置、排煙設施位置、排煙風量、水霧工作壓力。其火災場景如下：

- (1) 火源位置對細水霧火場抑制的影響
- (2) 排煙口位置對細水霧火場抑制的影響

(3) 排煙風量對細水霧火場抑制的影響

(4) 工作壓力對細水霧火場抑制的影響

### 3. 噴濺火源

(1) 噴濺火災主要參考自 FM 5560 及 IMO MSC/Cir 913 局部護測試基準，規定以柴油為燃料，產生 6MW 及 1MW 的噴濺火災性情境，噴油流量及壓力如表

3.2.1。噴頭並有如下規定：

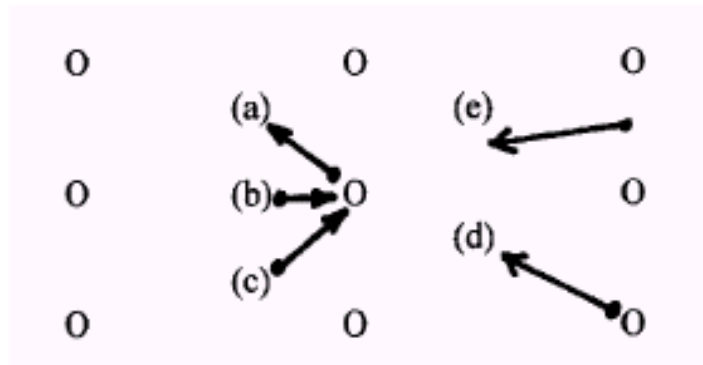
- 燃料噴撒噴頭應水平安裝，且指向格狀設置噴頭的中央。
- 燃料噴撒噴頭應位於地板上 1m 的高度，且距離四周牆壁(如果有的話)至少 4m。

表 3.2.1 噴濺火災參數

噴撒噴頭	噴撒角度(120°-125°)	噴撒角度(80°)
標稱油壓	8bar	8.5bar
油流量	0.16±0.01kg/s	0.03±0.005 kg/s
油溫	20±5°C	20±5°C
標稱熱釋放率	6MW	1MW

(2) 燃料噴撒噴頭之水平位置應依下列，格狀配置邊緣兩個噴頭之間這些位置可參考圖 3.2.12：

- 格狀況置中央一個噴頭下方
- 格狀配置中央兩個噴頭之間
- 四個噴頭之間
- 格狀配置邊緣一個噴頭下方



- Water nozzle locations
- ⊙ Fuel spray nozzle location and direction
- ( ) Test designation

圖 3.2.12 燃料噴撒噴頭位置

### 3.2.4 測試場週邊設備設置與系統整合

#### 1. 機械通風情境

圖 3.2.13 到圖 3.2.16 顯示週邊場地設備設置，包含了撒水變頻控制盤系統的改善與測試、偵熱與偵煙探測回路安裝、排煙風管含兩手動閘門安裝、細水霧懸吊系統以及天花板四周封板。



圖 3.2.13 撒水變頻控制盤系統



圖 3.2.14 偵熱與偵煙探測回路



圖 3.2.15 排煙風管



圖 3.2.16 細水霧懸吊系統

架設 3 條熱電偶樹，分別位於房間左上、正中及右下位置。煙濃度偵測器則架設於右上門入口 0.7m 處，高度為 1.8m，來探討火災發生細水霧啟動時對逃生的影響。氧氣及二氧化碳氣體偵測儀則架設於煙濃度偵測器旁邊。

## 2. 自然通風情境

測試噴頭的安裝要求如下：

- 局部式防護系統之噴頭配置應該均勻且方向垂直向下。
- 系統的噴頭格狀設置，應採 2x2 或 3x3。(本實驗採 2x2 設置，如圖 3.2.17)
- 噴頭應安裝在天花板下最少 1m。
- 噴頭的最大設置間距應依照製造商的設計安裝手冊。



圖 3.2.17 室外三度空間細水霧噴頭 2x2 間距 3 米放射實景

### 3.3 實驗操作步驟

#### 3.3.1 機械通風情境

1. 將筆記本電腦與桌上型電腦上頭所顯示的時間調成一樣。
2. 安裝熱電偶，煙遮蔽測量儀和氣體分析器儀器。然後，在開始實驗前，在對所連接的 channel 做進一步的確認，保證他們的訊號輸出正確地連接相應 channel。
3. 把汽油倒入油盆中(木堆火災則點燃後預燃)，並且攪拌燃料使其均勻分佈於油盤中。
4. 在油池的火(木堆火)被點燃之前，先開始記錄溫度，煙遮蔽和氣體濃度同時開始錄影。
5. 迅速離開測試空間並且把門給關上。
6. 進行細水霧滅火試驗的記錄觀察。
7. 當試驗結束時，關閉測量儀器。啟動排氣系統同時把門打開，把燃燒產物抽到外界，直到試驗環境返回原始狀態，再接著下一次試驗。

#### 3.3.2 自然通風情境

根據 IMO 913 之測試程序如下：

1. 預燃時間：在系統操作前，每次燃油噴撒皆應點燃，使其燃燒不超過 15 秒。(如圖 3.3.1 所示)



圖 3.3.1 室外三度空間噴撒燃燒預燃

## 2. 測量

### (1) 燃油噴撒系統

- 在測試前燃油噴撒系統的流量與壓力，應先檢查。
- 在測試當中燃油噴撒系統的壓力，應予以測量。

### (2) 火源處的氧氣濃度(本次實驗未裝設)

- 氧氣濃度的量測位置應在燃油噴撒噴頭下方 100mm 處。

### (3) 細水霧系統壓力與流量

- 系統的水壓與流量應使用適當的設備量測。

## 3. 滅火系統的操作

- (1) 系統應依照 1. 的說明，在預燃時間內啟動。
- (2) 在滅火之後系統應持續操作至少 1 分鐘。
- (3) 火災應在系統放射後五分鐘內撲滅。
- (4) 在滅火之後燃油噴撒至少持續 15 秒，如圖 3.3.2。



圖 3.3.2 噴灑火熄滅後仍持續噴撒 15 秒實驗

#### 4. 測試時的觀察

在測試時應觀察下列並紀錄：

- (1) 點燃程序的開始
- (2) 測試的開始
- (3) 滅火系統啟動的時間
- (4) 火災撲滅的時間
- (5) 滅火系統關閉的時間
- (6) 復燃的時間
- (7) 燃油供應停止的時間
- (8) 測試結束的時間

#### 5. 測試結果與判定解釋

(1) 局部防護式滅火系統被要求在開始放射後五分鐘之內撲滅測試火災。如果在這五分鐘的放射之後發生復燃，則測試便是失敗。

(2) 測試的結果應解釋為如下：

■系統採用 3×3 格狀配置，而能撲滅火災時，應視為成功的完成測試。在這種情況下，其外側噴頭應安裝在防護區的外面，最大噴頭間距的最少 1/4 的距離。

■系統採用 2×2 或 3×3 格狀配置，而能撲滅火災時，應視為成功的完成測試。在這種情況下，其外側噴頭應安裝在防護區的邊緣，這並非禁止噴頭的位置不可設於防護區外。

■最小與最大間距以及最低與最高操作壓力皆應達到能撲滅火災之要求。

■採用單一噴頭或一排噴頭而能有效防護時，其噴頭有效防護範圍定義為最大噴頭間距的 1/2。

### 3.4 細水霧噴霧液滴之粒徑量測

#### 3.4.1 雷射量測系統

影像處理技術可分為兩大界域，空間域以及頻率域。在空間域，影像上各部位的圖素均直接進行處理；在空間域影像則先必須經過傅利葉轉換成為傅利葉函數，然後加乘一組特定的濾鏡函數來得到處理後的影像函數。空間域以及

頻率域之間的轉換則是以迴旋定理來連接。為了節省轉換計算的時間，採用快速傅利葉轉換 (FFT) 是較適當的方法。

影像加強的主要目的在於針對要處理的目標，加強特定的特性來獲取所需的影像資料。影像加強是一種主觀且問題導向的處理方式，不須依循單一標準的條件。常用的加強方式有高斯低通濾波、均值濾波以及同調濾波。本研究採用高斯低通濾波，其優點在於可以有效降低影像中的雜訊，圓滑各粒子影像的邊緣，以及保有粒子影像本身的特性。

影像復原和影像加強擁有相同的目的，透過影像處理技術來增強影像的品質，唯一不同之處在於影像還原技術認定一開始取得的影像已經受到損傷，因此主要處理過程著重在消去額外的雜訊，透過退化函數來反推原始的影像。常用的方式有 Wiener 濾波以及主動式濾波。

噴霧特性是評估細水霧性能的重要依據，液滴的粒徑、大小分佈範圍、體積通量等特性，影響其與空氣之接觸表面積及混合之均勻度，會影響整個細水霧系統的滅火性能。數位影像分析已被視為量測非球狀或不規則狀粒子最有效方法之一。現有之數位技術已可量測影像中各物件的面積、周長、真圓度等特性，亦即是量測非球狀滴的幾何特徵與霧化過程。數位影像技術所需之硬體一般包含脈衝雷射、高解析度數位相機、高倍率鏡頭等設備，來建立一套噴霧幾何特性視覺量測系統，除了硬體需求外尚需要一套影像處理與粒徑分析軟體，軟體所採用的影像處理程序，由一系列的數位影像運算組成。在交大所建立的暗房中，利用 PIV 技術來量測細水霧粒徑大小，如圖 3.4.1，先可藉脈衝雷射照亮待攝物件，以短曝光照相術來拍攝取相，獲得清晰之噴霧影像。

此影像需先數位化處理，轉成 8 位元之 256 灰階圖。數位化之影像，可進行對比增強及低通濾波等運算，以去除背景雜訊、改善其可讀性。適當的選擇閾值(thresholding)，可藉二值化運算，將欲量測之液滴像素與背景，分離成黑色、與白色。在這整個處理程序中，同時就得到了液滴的粒徑、面積與周長，流程如圖 3.4.2 所示。





(a)

(b)

圖 3.4.1 粒徑量測場地圖(a)細水霧開啟以及(b)細水霧關閉

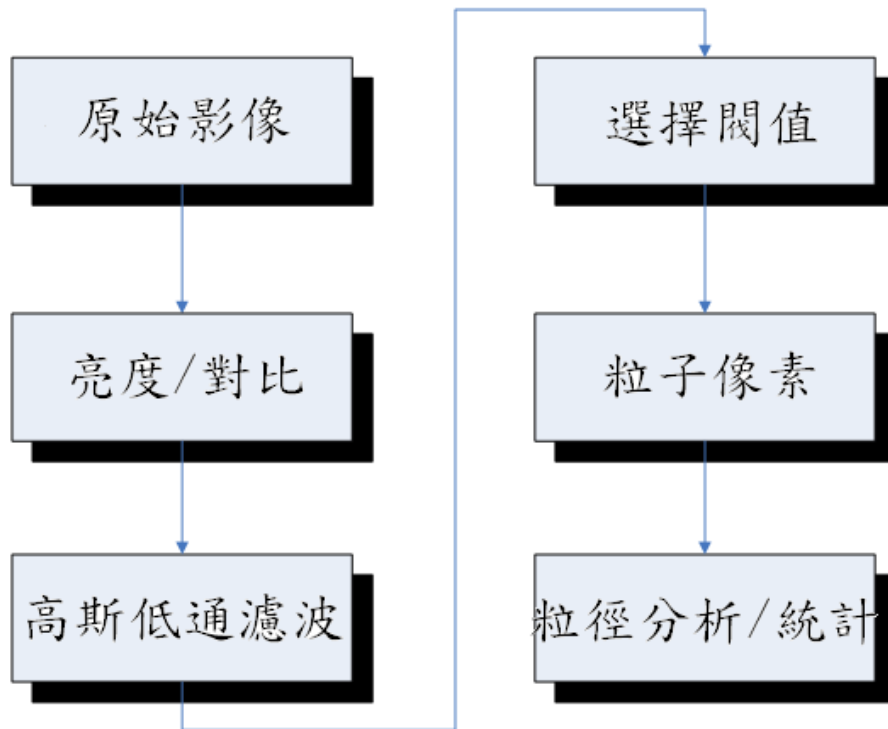


圖 3.4.2 數位影像處理流程

### 3.4.2 細水霧粒徑量測分析

此部份工作在交通大學校內執行，工作內容主要針對細水霧噴頭進行其噴撒角度、相對累積體積百分比及 SMD 粒徑分布及大小的量測。

實驗所使用的噴頭為 DANFOSS 公司所出產的細水霧噴頭，如圖 3.4.3 所示，

其 k factor=0.45，外環有四個噴嘴，工作壓力可達 100Bar。而其噴撒角(spray angle)經過量測後為  $135^\circ$ （工作壓力受限於實驗室能力只能為 50Bar）；如圖 3.4.4 所示。



圖 3.4.3 高壓細水霧系統噴嘴(a)正視圖以及(b)俯視圖

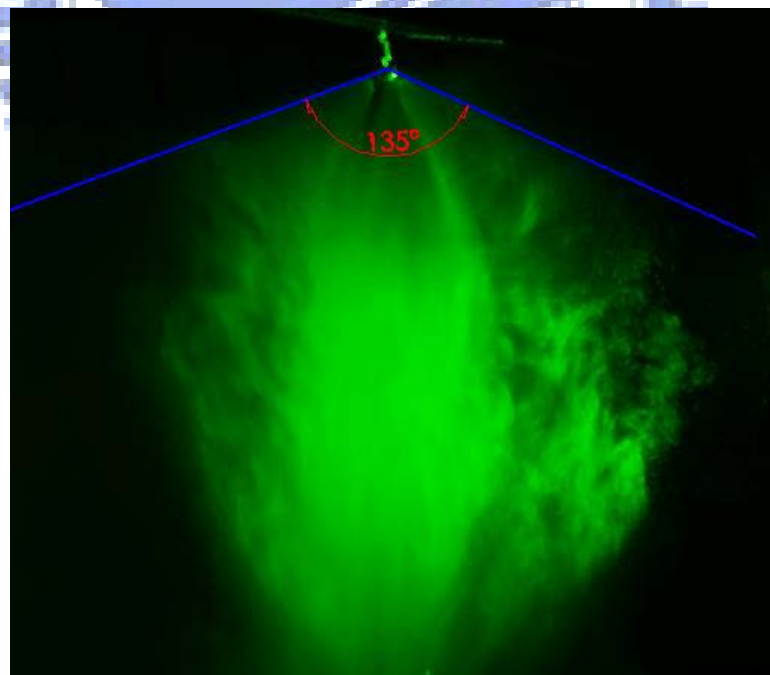


圖 3.4.4 噴頭噴撒角  $135^\circ$

透過 CCD 相機取得的原始影像，其影像處理流程包含以下幾項：亮度/對比調整、RGB 三原色分析、高斯平滑濾鏡、二值化以及粒子資料分析。亮度/對比技術可以將不在雷射平面上的水粒成象消除，僅保留在平面上的水粒，再透過

對比調整使得影像更加清晰；由於本研究採用之雷射為綠色單色光，因此透過 RGB 處理將影像中之綠色分佈像素獨立出來以利後續處理；高斯平滑濾鏡可以消去不必要的雜訊，以免分析粒徑時造成影響；選取適當的灰階值進行二值化，使系統有所判別依據來選取粒子影像，最後取得的各粒子影像透過程式即可計算其佔像素多寡，然後換算成實際的液珠直徑。根據所攝得的影像，經過數位影像處理後，再由 NI 的軟體計算其粒徑大小後，以直方圖繪出，如圖 3.4.5 所示。由圖可以發現大多數的水霧粒徑都在 500 $\mu\text{m}$  以下，由 NFPA750 Handbook[1] 的定義，由累積體積百分比為 99%的相對粒徑來區分水霧大小，此噴頭所對應的粒徑則介於 800-850  $\mu\text{m}$ ，見圖 3.4.6。因此只要有數顆大粒徑的水霧出現會大幅提昇所定義的水霧大小，這也是值得探討的地方。

依據 ASTM799-92「Standard Practice for Determining Data Criteria and Processing for Liquid Drop Size Analysis」進行數據整理分析，並從中計算得到細水霧之平均粒徑，如表 3.4.1。由  $D_{i1}$ 、 $D_{i2}$ 、 $D_{i3}$  來計算各區間的總和並算出 SMD 值。而各個間距取 50  $\mu\text{m}$ ，可以符合規範中需符合的關係式，而 40  $\mu\text{m}$  及 60  $\mu\text{m}$  則不符合需求。所得之 SMD 在  $P=40\text{Bar}$  時是 394.9  $\mu\text{m}$ ，依據 Fire Protection Handbook 累積 99%體積百分比的細水霧為 800-850  $\mu\text{m}$  介於 Class III 水霧範圍內；而累積 50%體積百分比的細水霧為 400-450 $\mu\text{m}$ ，如表 3.4.2。

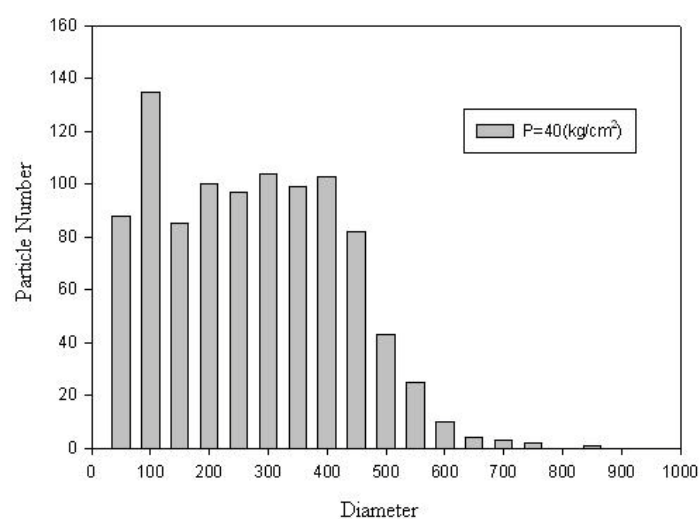


圖 3.4.5 粒徑個數分布直方圖

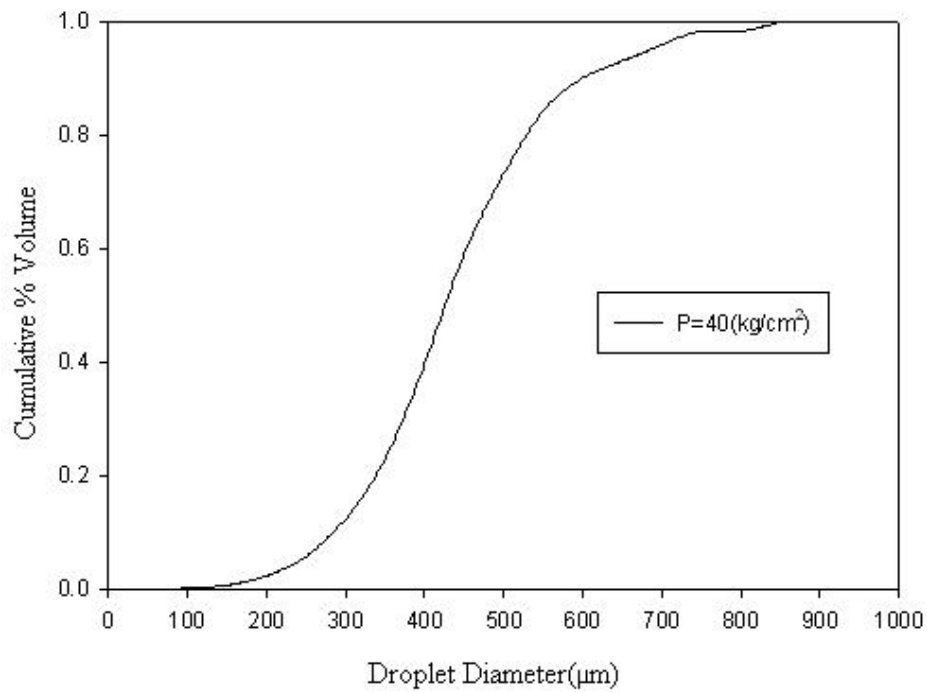


圖 3.4.6 相對累積體積百分比

表 3.4.1 SMD 計算樣本資料

Size Class	Class	No. of Drops	Sum of Di in Each Size Class			Vol. % in	Cum. %
Bounds	Width	in Class	Di	Di <sup>2</sup>	Di <sup>3</sup>	Class	by Vol.
0-50	50	88	2200	55000	1375000	4.23E-05	4.23E-05
50-100	50	135	10125	759375	56953125	0.001752	0.001795
100-150	50	85	10625	1328125	1.66E+08	0.005108	0.006902
150-200	50	100	17500	3062500	5.36E+08	0.016489	0.023391
200-250	50	97	21825	4910625	1.1E+09	0.033994	0.057385
250-300	50	104	28600	7865000	2.16E+09	0.066544	0.123929
300-350	50	99	32175	10456875	3.4E+09	0.104559	0.228488
350-400	50	103	38625	14484375	5.43E+09	0.167113	0.395601
400-450	50	82	34850	14811250	6.29E+09	0.193668	0.589269
450-500	50	43	20425	9701875	4.61E+09	0.141784	0.731053
500-550	50	25	13125	6890625	3.62E+09	0.1113	0.842353
550-600	50	10	5750	3306250	1.9E+09	0.05849	0.900843
600-650	50	4	2500	1562500	9.77E+08	0.030045	0.930889
650-700	50						0.9275
700-750	50						0.9274
750-800	50						0.9274
800-850	50	1	825	680625	5.62E+08	0.017276	1
850-900	50		0	0	0	0	1
900-950	50		0	0	0	0	1
950-1000	50		0	0	0	0	1
1000-1050	50		0	0	0	0	1
1050-1100	50		0	0	0	0	1
1100-1150	50		0	0	0	0	1
1150-1200	50		0	0	0	0	1

$$\frac{D_{kub} - D_{klb}}{D_{kub} + D_{klb}} \times \frac{\text{liquid volume in } K_{th} \text{ class}}{\text{total volume}} < 0.05$$

表 3.4.2 DANFOSS 細水霧噴頭量測數據

噴撒角度	135°
SMD	394.9 $\mu\text{m}$
Dv <sub>0.99</sub>	800-850 $\mu\text{m}$
Dv <sub>0.5</sub>	400-450 $\mu\text{m}$



## 第四章 火災實驗與結果探討

在完成實驗場地及各項設備架設後，以預設之實驗參數，做為火災測試情境，開始執行細水霧系統在通風環境下實場燃燒實驗，首先由居室中機械排煙情境開始，最後做大空間自然通風情境實驗，透過實際觀察與記錄分析，發現細水霧系統的確具有多項優異的性能，如撲滅汽油火災的窒息性，撲滅深層火災的高滲透力，機械通風下仍保有強大滅火性能…等，相對自然通風測試中也觀察到挑高空間、室外通風下，細水霧的限制條件等等，詳細的過程由下開始說明。

### 4.1 在機械排煙中的實場驗證

本實驗主要是針對在區劃空間中排煙對細水霧的影響來進行滅火的實驗，對於滅火時間、濃煙的情況，以及人員逃生來加以探討。

在火源方面，有使用油盆火源和木堆火源兩種。油盆火源預燃時間為 1 分鐘，在點火後第 55 秒的時候啟動排煙裝置，及第 60 秒的時候啟動細水霧裝置；木堆火源預燃時間為 3 分鐘，在點火後第 55 秒的時候啟動排煙裝置，及第 3 分鐘的時候啟動細水霧裝置。實驗結果所標示的時間為細水霧系統啟動後至火源撲滅的時間。

表 4.1 為改變的參數包括不同的油量、排煙口的位置、排煙風量的大小，以及細水霧與傳統撒水頭對木堆及油盤火場抑制的影響。

表 4.1 實驗參數

參數	類 別
油量	1500C.C.、3000C.C.
排煙口位置	中央、角落
排煙風量	50m <sup>3</sup> /min、75m <sup>3</sup> /min、120m <sup>3</sup> /min
噴頭	細水霧、傳統撒水頭
火源	油盤、木堆

#### 4.1.1 不同油量對細水霧火場抑制的影響

##### 1. 汽油 1500C.C. 的滅火時間

在汽油量 1500C.C. 的測試實驗，主要針對排煙口位置和火源位置在不同風量下的滅火測試，其滅火時間如表 4.1.1 所示：

表 4.1.1 汽油 1500C.C. 的滅火時間

排煙口位置	中 央				角 落	
風量(m <sup>3</sup> /min)	無	50	75	120	50	120
火源位置						
中 央	37 秒	222 秒(*)	202 秒(*)	油料耗盡	38 秒	244 秒(*)
角 落	油料耗盡	油料耗盡	油料耗盡	油料耗盡	油料耗盡	油料耗盡

註：(\*)表示可以復燃，但復燃情況不佳。

由實驗結果可得知，火源位置在中央的情境，當無風量和排煙位置在角落風量 50 m<sup>3</sup>/min 的狀況下，細水霧啟動的時候，油盆火源受到細水霧的影響，會開始劇烈的左右晃動，當火勢還在劇烈燃燒的時候，利用細水霧瞬間蒸發膨脹所產生氧氣置換的效果將火給撲滅。在實際狀況可由影片中可以清楚看到細水霧滅火的時候，是先從油盆底部先將燃油及火焰進行隔離後，火焰就隨之被撲滅，且在做復燃測試的時候，其復燃的情況相當良好；而在中央風量 50m<sup>3</sup>/min、75 m<sup>3</sup>/min 和角落風量 120 m<sup>3</sup>/min 的狀況下，細水霧在啟動的初期，其油盆火源會劇烈左右晃動，當經過一段時間後，火焰晃動的情況就慢慢穩定下來，且將火焰抑制在油盆邊緣竄燒，最後才將火源給撲滅。原本認定是因為油料燒完而使火源熄滅，但是在復燃的測試中仍可以復燃，不過復燃之後的火焰只沿著油盆周圍燃燒；在中央風量 120 m<sup>3</sup>/min 的實驗中，其滅火情況也與上列情況相同，但在復燃的測試中無法復燃，故判定其原因為油料燒完。

火源位置在角落的情境下，由於細水霧噴頭的覆蓋半徑為 2.1m，此火源位置已接近覆蓋半徑的臨界點，當細水霧啟動的時候，油盆火源的火焰依然會左右晃動，但晃動的程度比起火源位置在中央的情況還要來的小，在經過一段時間後，火焰就被抑制在油盆周圍竄燒，直到火焰被撲滅，其復燃測試中無法復燃，故原因為油料燒完。由於本實驗在無風量的情況下作滅火測試，其結果亦是無法撲滅，只能等油料燒完，所以當火源在角落的時候是無法撲滅，因此未來可探討噴頭位置架設的影響。

在本次汽油量 1500C.C. 的滅火實驗中，當火源和排煙口位置在中央的時候，無風量和有風量的火焰撲滅情況如前面所敘述，其對火焰撲滅的情況有很大的不同，加上風量 120m<sup>3</sup>/min 火勢熄滅時間為 3 分 02 秒，與風量 50m<sup>3</sup>/min 和 75m<sup>3</sup>/min 的時間相差不多，所以將油料增加至 3000C.C. 在火源和排煙口位置在中央的情境下來做實驗，來判斷油量的多寡是否為造成撲滅情況差異的影響。

## 2. 汽油 3000C.C. 的滅火時間

本次實驗將油量增加至 3000C.C.，主要是火源和排煙口位置在中央的情境下來做實驗，其滅火時間如表 4.1.2：

表 4.1.2 汽油 3000C.C. 的滅火時間

排煙口位置		中 央			
風量(m <sup>3</sup> /min)		無	50	75	120
火源位置	中 央	25 秒	54 秒	102 秒	油料耗盡
	中 央	25 秒	54 秒	102 秒	油料耗盡

從實驗結果可以得知，當油量增加至 3000C.C. 的時候，隨著風量的增加，其滅火的時間亦增加。在無風量、風量 50m<sup>3</sup>/min 和風量 75m<sup>3</sup>/min 的情況下，其



滅火情況是一致的。在細水霧啟動的初期，火焰受到細水霧的影響，會有左右劇烈晃動的情況出現，受到細水霧瞬間蒸發膨脹所產生的氧氣置換效果，而將火焰與燃油進行隔離，使火焰離開油盆燃料而撲滅，且在復燃測試中，復燃的情況也相當良好；而在風量  $120\text{m}^3/\text{min}$  的情況下，在細水霧啟動的初期，亦有劇烈晃動的現象，卻無法有效將火焰與燃油進行隔離，經過一段時間後，火焰被細水霧抑制在油盆底部竄燒，爾後將火焰給撲滅，且在復燃測試中亦無法復燃。故在中央風量  $120\text{m}^3/\text{min}$  時，其排煙裝置對細水霧滅火的影響很大。

#### 4.1.2 排煙與細水霧的影響

在這部分的實驗主要是針對在排煙風量的有無，以及在相同的排煙風量下，細水霧的有無對於區劃空間內濃煙和氣體濃度的影響。排煙影響的部份是對無風量的全尺寸燃燒和風量  $120\text{m}^3/\text{min}$  的全尺寸燃燒來加以討論；細水霧影響的部份則是從對風量  $120\text{m}^3/\text{min}$  的全尺寸燃燒和風量  $120\text{m}^3/\text{min}$  的細水霧滅火來加以討論，主要分為(一)60 秒至 115 秒(二)115 秒以後，從排煙開啟前後的兩個部份來討論圖 4.1.1 至圖 4.1.3 的趨勢：

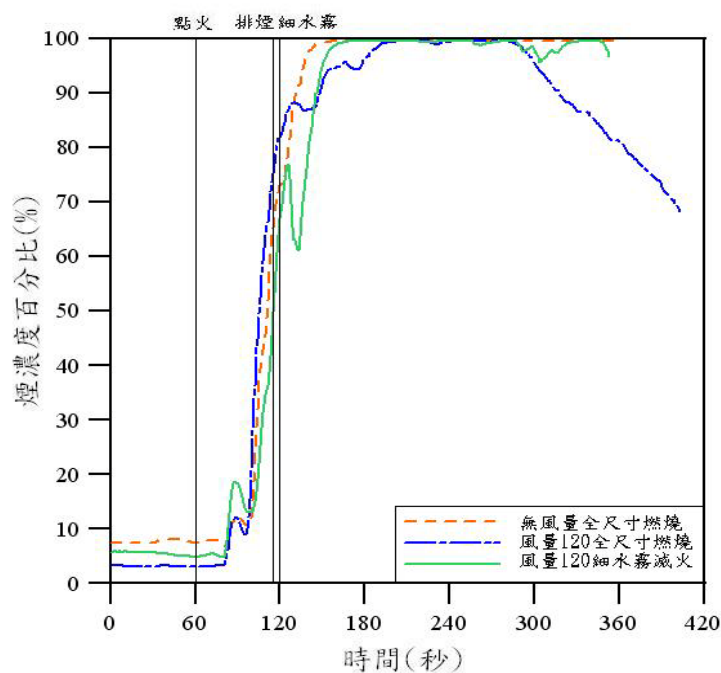


圖 4.1.1 煙濃度百分比的比較圖

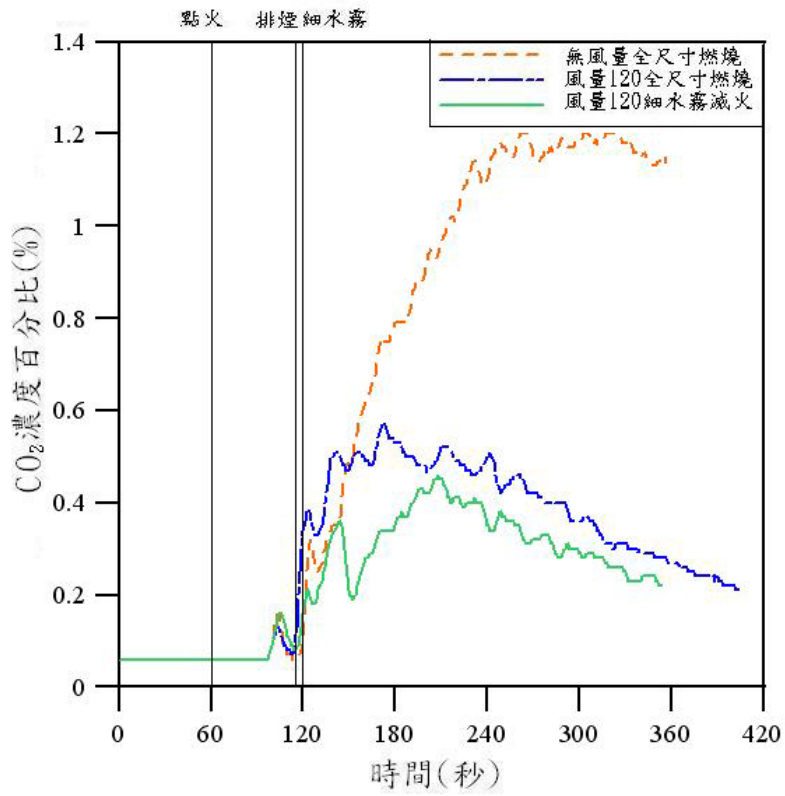


圖 4.1.2 CO<sub>2</sub>濃度百分比的比較圖

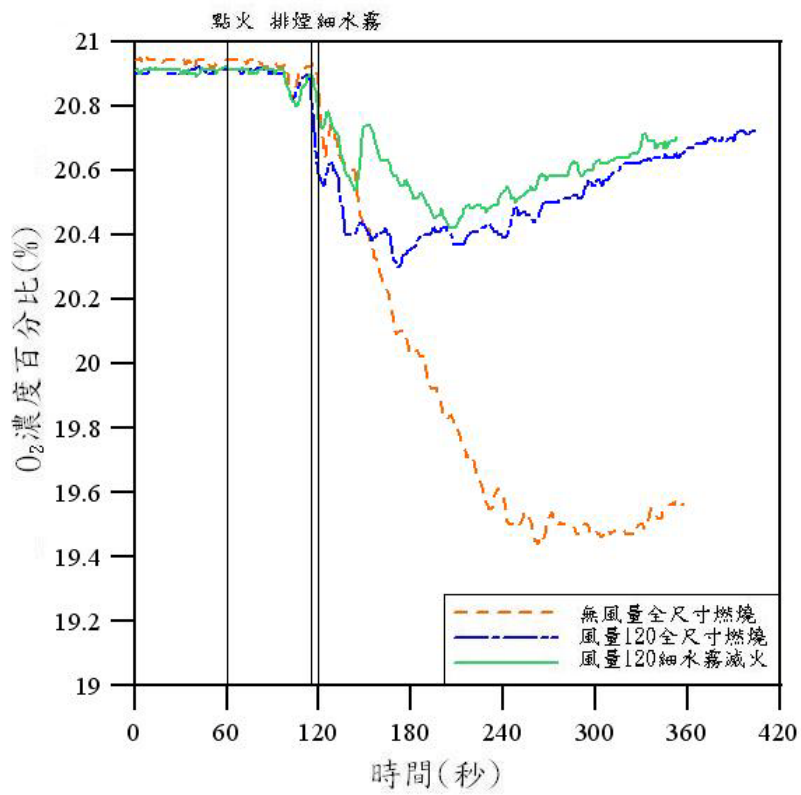


圖 4.1.3 O<sub>2</sub>濃度百分比的比較圖

## 1. 60 秒~115 秒

在點火之後和排煙裝置啟動之前，曲線會有一個起伏，是因為受到煙上升至頂部後往兩側擴散，當接觸到牆壁時，會開始往下擴散，從圖 4.1.1~圖 4.1.3 中可以看到煙濃度上升的同時，CO<sub>2</sub>濃度也隨之上升，而O<sub>2</sub>濃度下降，主要是因為火場內部煙流的影響。

## 2. 115 秒以後

第 115 秒為排煙裝置啟動的時間，當風量從 0 上升至 120m<sup>3</sup>/min穩定的時間約為 8 秒左右，從無風量和風量 120m<sup>3</sup>/min全尺寸燃燒的煙濃度曲線可以看出風量對煙濃度的影響，排煙裝置的啟動減緩了煙濃度上升的趨勢，同時使CO<sub>2</sub>濃度的曲線趨緩上升，進而下降；而O<sub>2</sub>濃度的曲線趨勢則為相反。

細水霧系統在第 120 秒的時候開始啟動，在煙濃度的比較圖中，可以看到風量 120m<sup>3</sup>/min的細水霧滅火曲線在細水霧啟動後，先是急速下降後再急速上升，其下降的幅度比風量 120m<sup>3</sup>/min的全尺寸燃燒還更大，急速下降的部份是因為除了排煙裝置減緩煙濃度的上升趨勢外，細水霧對空間中的粒子和CO<sub>2</sub>會有洗滌的效果，以及細水霧在一開始滅火的時候，會造成油盆的火有晃動的現象和細水霧受熱時瞬間膨脹產生蒸氣的影響，對火場空間的流場會造成非穩態的情形出現。從細水霧滅火的CO<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>濃度曲線圖就可看出，CO<sub>2</sub>的濃度曲線出現了先下降再上升的波段，而O<sub>2</sub>濃度曲線則是相反。

而煙濃度急速上升的部份，是因為煙濃度是利用遮光率來判定濃度百分比，在細水霧開啟後一段時間後，由於空間中細水霧的密度很高，造成光源的散射和遮蔽，使得煙濃度在風量 120m<sup>3</sup>/min細水霧滅火曲線比起風量 120m<sup>3</sup>/min全尺寸燃燒曲線的上升速度還要來的快。

在 180 秒後的煙濃度比較圖中，當風量 120m<sup>3</sup>/min全尺寸燃燒曲線在火勢變小或熄滅後，煙濃度就會開始下降；而風量 120m<sup>3</sup>/min細水霧滅火曲線在火勢熄滅後，其煙濃度依舊沒有下降的趨勢，主要原因則是受到細水霧的影響；而在CO<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>濃度比較圖中可以發現到，風量 120m<sup>3</sup>/min細水霧滅火曲線和風量 120m<sup>3</sup>/min全尺寸燃燒曲線的趨勢在 180 秒後，開始呈現出一樣的趨勢，在有排煙的情況下，會使CO<sub>2</sub>會有下降的趨勢，而O<sub>2</sub>則是有上升的趨勢；而在風量

120m<sup>3</sup>/min細水霧滅火的時候，CO<sub>2</sub>的值會比風量 120m<sup>3</sup>/min全尺寸燃燒的值較低，而O<sub>2</sub>的值則是較高。所以對於CO<sub>2</sub> 和O<sub>2</sub>來說，排煙和細水霧都能使其濃度有效的下降。

圖 4.1.4 為 CO 濃度比較圖，其濃度主要受到排煙裝置的影響，在有排煙裝置的時候，其濃度會比較低；而細水霧對 CO 濃度的影響，則無法從圖四中去加以判斷是否有直接的影響。所以對於 CO 濃度來說，排煙裝置是影響 CO 濃度的主要因素。

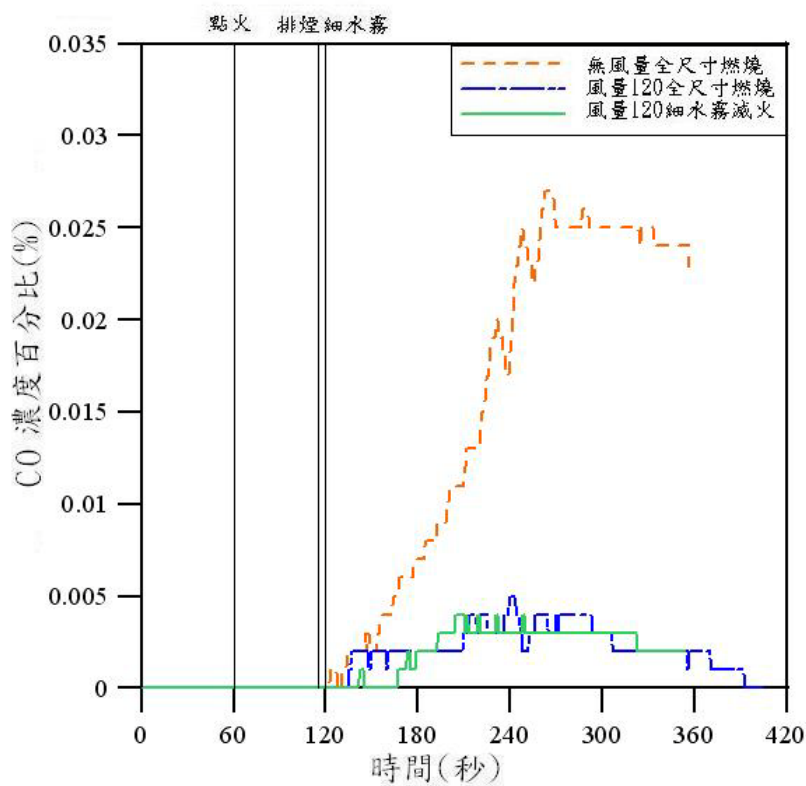


圖 4.1.4 CO 濃度百分比的比較圖

#### 4.1.3 排煙口位置對細水霧火場抑制的影響

由表 4.1.1 的滅火時間可得知，在相同的風量條件下，在風量 40m<sup>3</sup>/min 的時候，排煙口在角落比在中央的時候還要好，主要是因為當角落排煙量小的時候，火場內部流場對火源的影響比較小；當角落排煙量為 120m<sup>3</sup>/min 時，對於火

場內部流場的擾動會比較大，所以使得滅火效果較不好。而中央排煙量  $50\text{m}^3/\text{min}$  的時候，排煙口位置正好在細水霧噴頭和火源的正上方，直接對火源附近流場造成影響。圖 4.1.5 至圖 4.1.8 將藉由煙濃度，以及各氣體濃度的比較圖，針對不同位置的排煙口，來探討排煙對火場內部的影響。

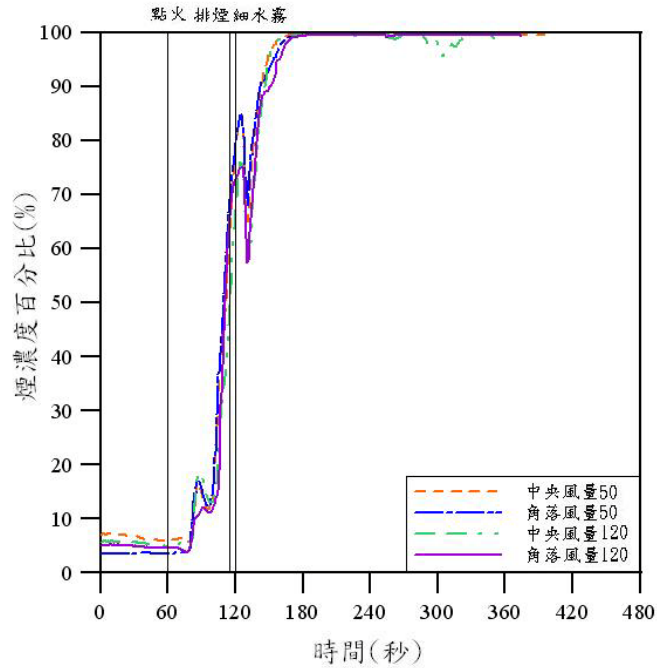


圖 4.1.5 煙濃度百分比的比較圖

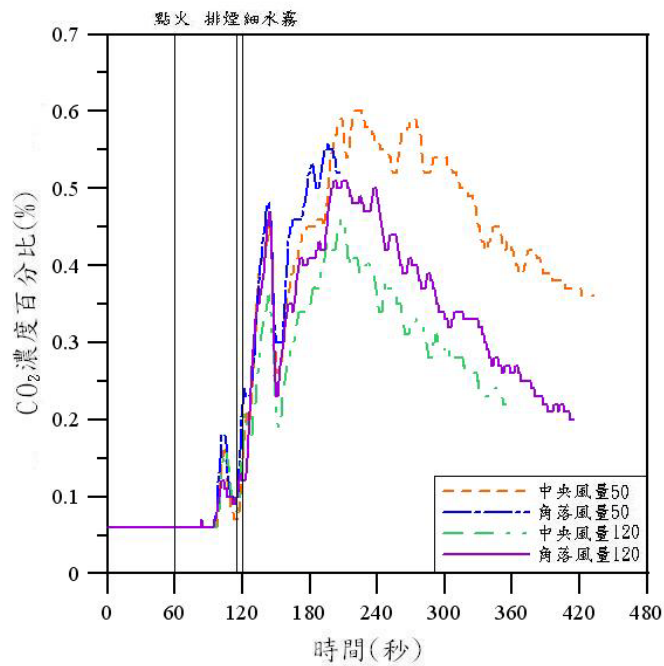


圖 4.1.6  $\text{CO}_2$ 濃度百分比的比較圖

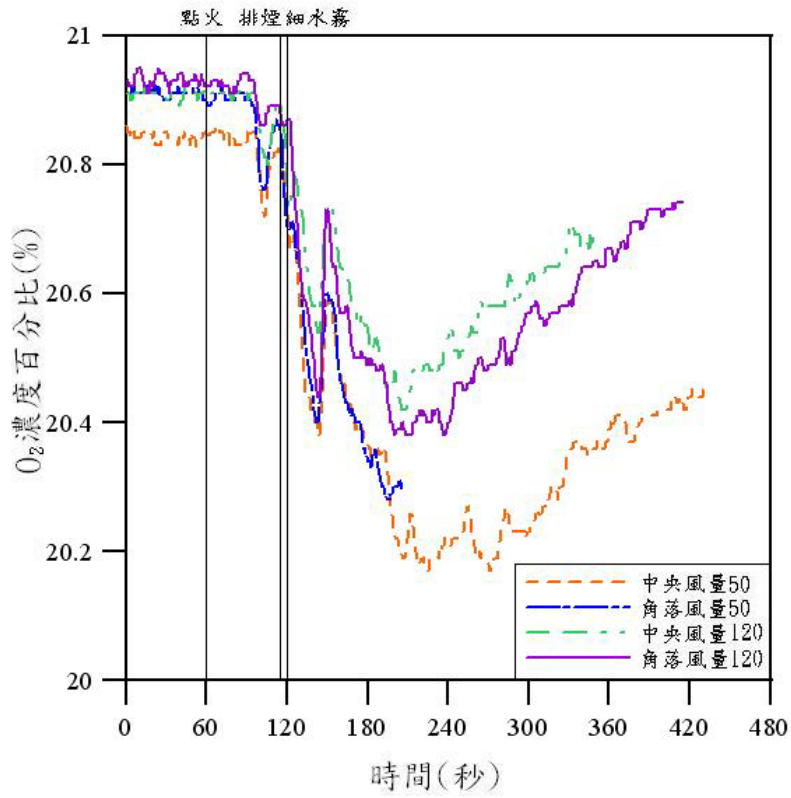


圖 4.1.7 O<sub>2</sub>濃度百分比的比較圖

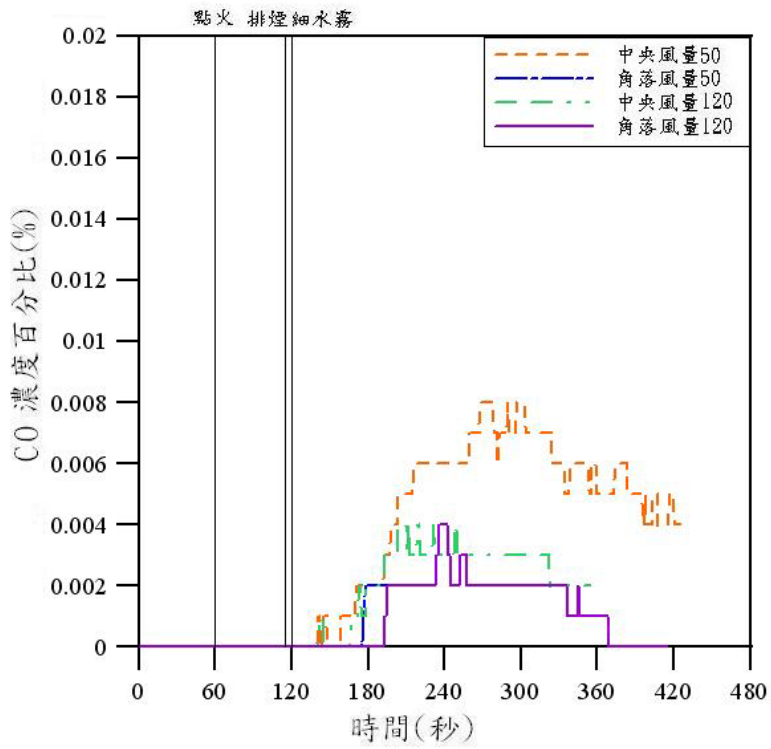


圖 4.1.8 CO濃度百分比的比較圖

當排煙口位於火源的正上方時，會有較好的排煙效果，其CO<sub>2</sub>的濃度會較低如圖 4.1.6，但是風量的大小會影響細水霧滅火的時間，當角落排煙口風量為50m<sup>3</sup>/min的時候，由於對火源附近的細水霧影響較小，所以能夠在短時間撲滅火源，但CO<sub>2</sub>的濃度相較於中央排煙口風量 50m<sup>3</sup>/min還要來的高，故排煙量大可以增加人員逃生的時間。

#### 4.1.4 排煙風量對細水霧火場抑制的影響

從 4.1.2 節的討論結果可知道細水霧滅火時，各氣體濃度與煙濃度會受到排煙的影響，本小節主要是探討不同的排煙風量與滅火時間的關係，以及各氣體濃度的比較，從表 4.1.2 的滅火時間來看，在排煙風量愈大的情況下，對於細水霧滅火的時間就愈長，且在實驗的過程中可看到，當火被撲滅後，火場內部的煙會被迅速排掉，可降低火場中濃煙的危害。以下圖 4.1.9 至圖 4.1.15 將針對 3000C.C. 的汽油滅火實驗，來分析滅火過程中隨著排煙風量的大小，火場內各氣體的濃度及火場溫度。其中#2 為火焰上方的溫度。

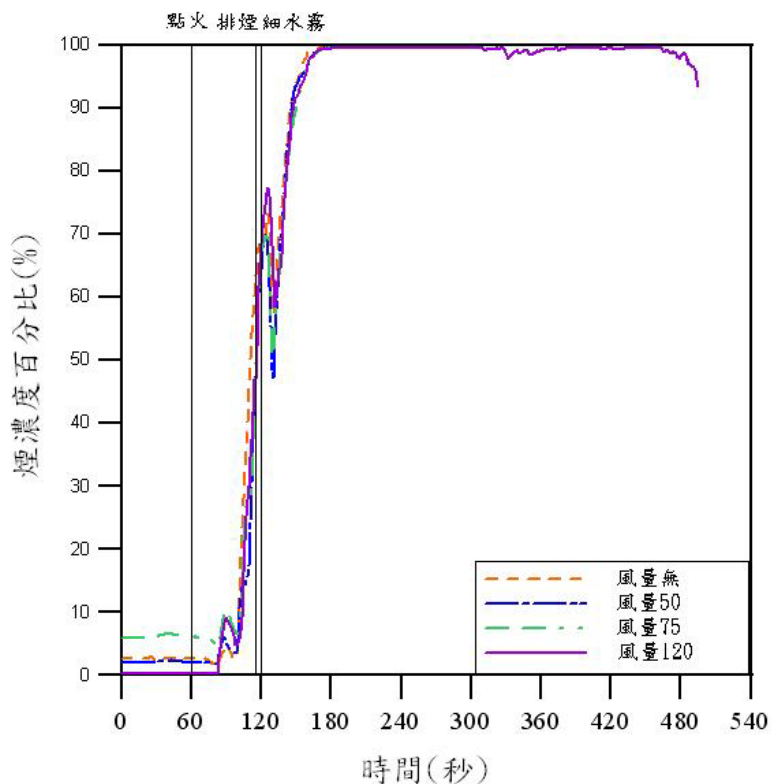


圖 4.1.9 3000C.C. 的煙濃度百分比

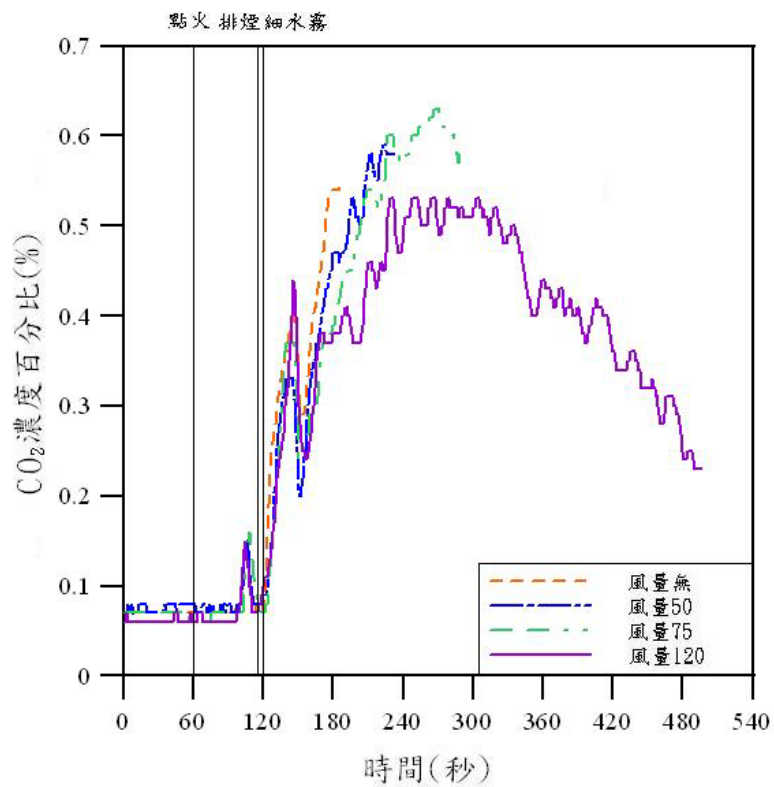


圖 4.1.10 3000C. C. 的CO<sub>2</sub>濃度百分比

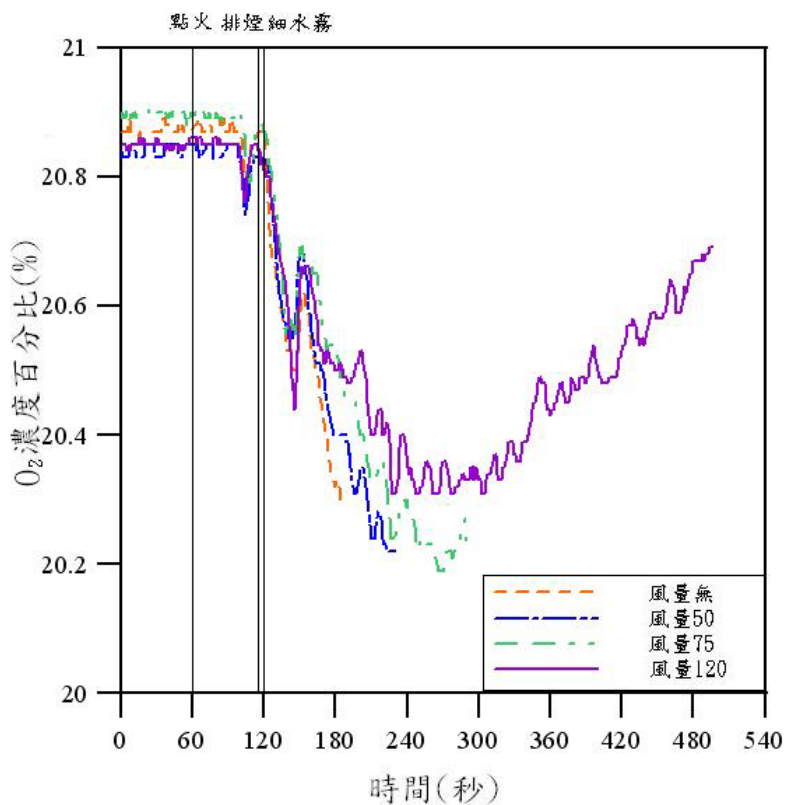


圖 4.1.11 3000C. C. 的O<sub>2</sub>濃度百分比



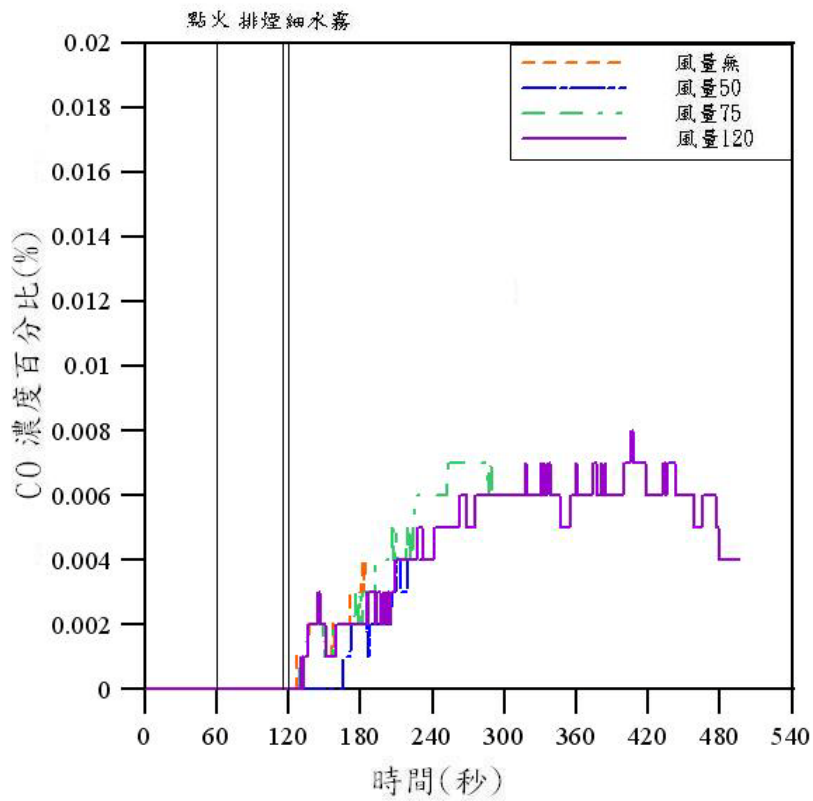


圖 4.1.12 3000C.C. 的 CO 濃度百分比

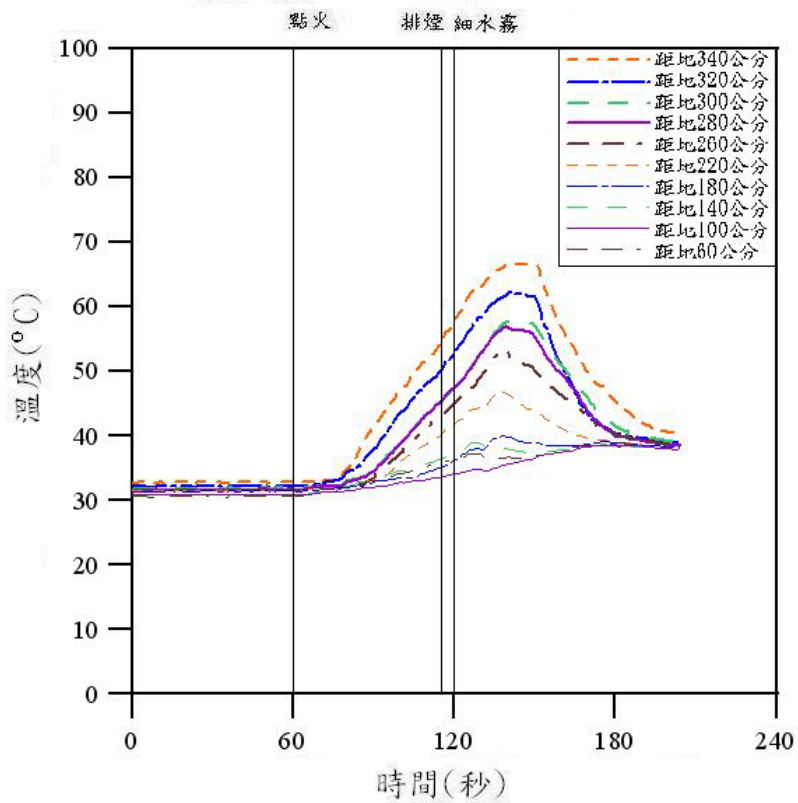


圖 4.1.13 #1 溫度圖

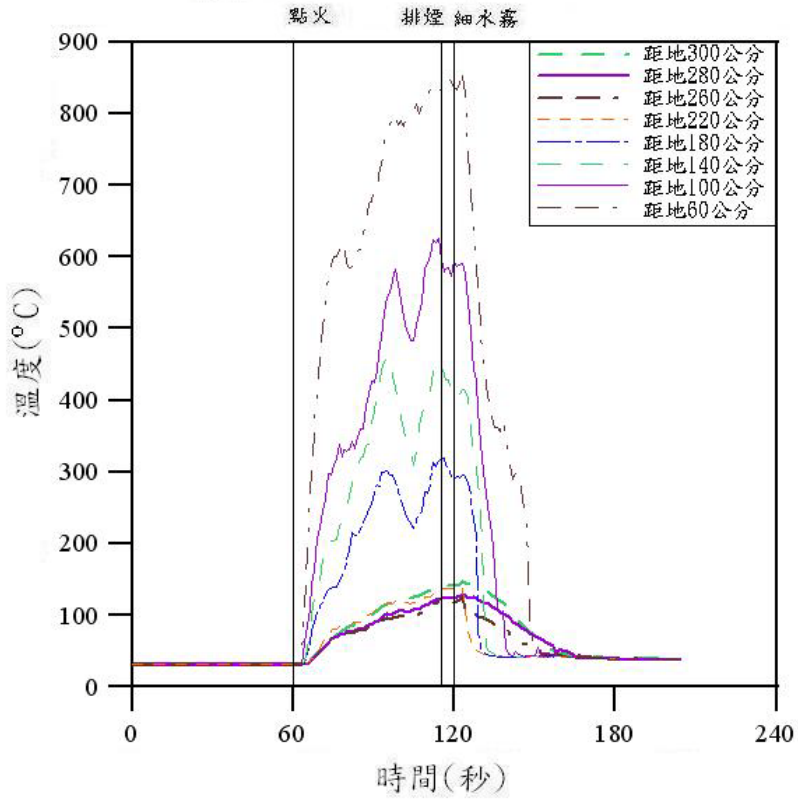


圖 4.1.14 #2 溫度圖

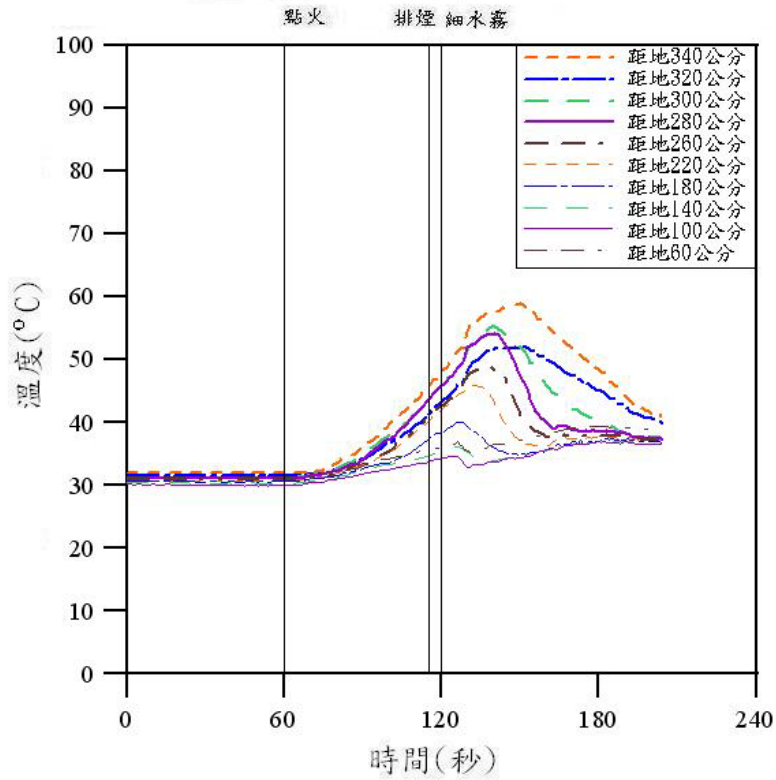


圖 4.1.15 #3 溫度圖

從圖 4.1.10 和圖 4.1.11 可得知，當排煙量大的時候，O<sub>2</sub>濃度的下降趨勢較為緩慢，CO<sub>2</sub>濃度的上升趨勢亦為緩慢，在細水霧啟動後的 1 分鐘，雖然排煙風量無和 50m<sup>3</sup>/min 分別在 25 秒和 54 秒就已經撲滅了，但其 O<sub>2</sub>濃度相較於排煙量 75m<sup>3</sup>/min 和 120m<sup>3</sup>/min 為低，CO<sub>2</sub>則是較高，所以排煙量大雖然會使滅火時間延長，但對於火場中的人員則會有更多的時間來進行疏散。

圖 4.1.13 至圖 4.1.15 為房間溫度的量測，其中圖 4.1.14 為火焰上方的溫度圖，由於位置在細水霧的正下方，當細水霧啟動後，可以看到溫度直接受到細水霧影響而急速降溫；圖 4.1.13 和圖 4.1.15 因為都沒受到細水霧直接噴灑的影響，可以看出來火場內環境溫度的變化，而圖 4.1.15 因為上方有排煙管路的影響，從溫度圖上可以看到管路對溫度的影響，故環境溫度會以 #1 位置的溫度圖來做比較。

#### 4.1.5 細水霧與傳統撒水頭對火場抑制的影響

由於傳統撒水頭對於油類火災無法有效的進行撲滅，所以藉由木堆火源的實驗來探討細水霧與傳統撒水頭隨著排煙風量大小的影響，對於滅火時間、煙濃度、CO<sub>2</sub>濃度、O<sub>2</sub>濃度和 CO 濃度的影響程度。細水霧與撒水噴頭特性比較如表 4.1.3。

從油盆滅火的實驗中，挑選出較具有代表性的實驗參數來進行木堆火源的實驗，針對火源和排煙位置在中央隨著排煙風量無、50m<sup>3</sup>/min 和 120m<sup>3</sup>/min 分別在細水霧與撒水頭的滅火實驗來進行分析。

表 4.1.3 細水霧與撒水噴頭特性比較

噴頭	DANFOSS 細水霧噴頭	傳統兩用型撒水頭
K factor	0.45 l/min/bar <sup>1/2</sup>	80 l/min/bar <sup>1/2</sup>
使用壓力	100bar	3.5bar
用水量	4.5 l/min	150 l/min

## 1. 木堆火源的滅火時間

在木堆的滅火實驗中，採用 90 根木材，每根木材長度為 73 公分，在木堆下方添加 1500C. C. 的油料，點火以後要讓木堆先預燃 3 分鐘後再進行滅火的動作，其中在第 55 秒的時候會先啟動排煙裝置，木堆下方的油料大約在 1 分 40 秒的時候就會燃燒完，直到第 3 分鐘再啟動滅火裝置去滅火，其滅火時間如表 4.1.4：

表 4.1.4 木堆在細水霧及撒水頭的滅火時間

噴頭種類	細水霧			撒水頭		
風量(m <sup>3</sup> /min)	無	50	120	無	50	120
火源種類						
木堆	8 秒	18 秒	28 秒	36 秒	62 秒	153 秒

在用細水霧滅火的實驗中，由於細水霧有氣體的特性，對於木堆內部的火源有比較好的降溫和抑制火源的效果，可以使每根木頭表面火焰在較快的時間內撲滅，在實驗中可以看到火勢隨著細水霧晃動進而撲滅；在傳統撒水頭方面，最主要是靠撒水頭撒出的水直接攻擊火源來進行撲滅，雖然撒水的水量遠比細水霧多，但是大部分的水無法直接對木堆內部進行降溫和抑制火源的效果，只能先將外部的火勢撲滅，再滲透至木堆內部滅火，所以對於木堆火源的抑制效果來說，細水霧比傳統撒水頭的效果還要來的好。

## 2. 細水霧與傳統撒水頭分析

針對細水霧與傳統撒水頭在木堆火源的實驗中，藉由煙濃度、CO<sub>2</sub>濃度、O<sub>2</sub>濃度、CO濃度和溫度，來比較出兩者在滅火過程中的差異，以及在不同的排煙風量下的影響。

在圖 4.1.16 中，可以看到細水霧在啟動後的一瞬間，對於煙濃度會有下降然後上升的趨勢，而在圖 4.1.17 中，傳統撒水頭在風量  $120\text{m}^3/\text{min}$  的時候，在撒水前後的下降趨勢並沒有多大的改變，主要是因為細水霧密度較高造成光源遮蔽和散射而使曲線往上升，而撒水卻不會影響到。從圖 4.1.18 至圖 4.1.23 中，可以發現到在風量愈小的情況下，細水霧對各氣體濃度所造成下降或上升的趨勢就愈明顯，而風量大的時候所造成的影響卻要小的多；而撒水的氣體濃度趨勢，在撒水啟動後一段時間雖然會有所影響，但主要的上升或下降趨勢卻影響不大。

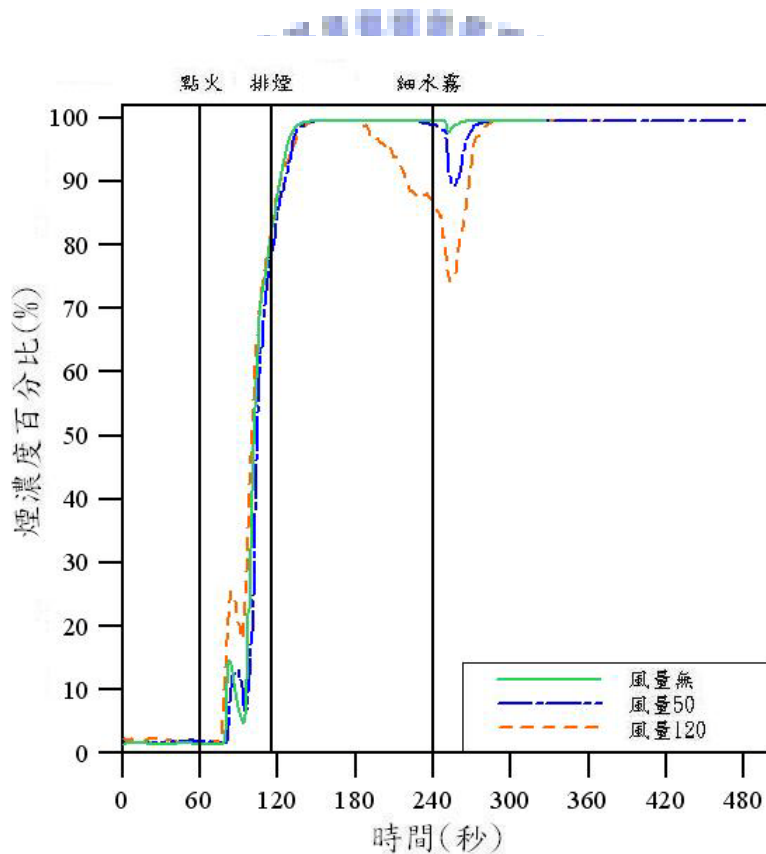


圖 4.1.16 細水霧木堆火源的煙濃度百分比

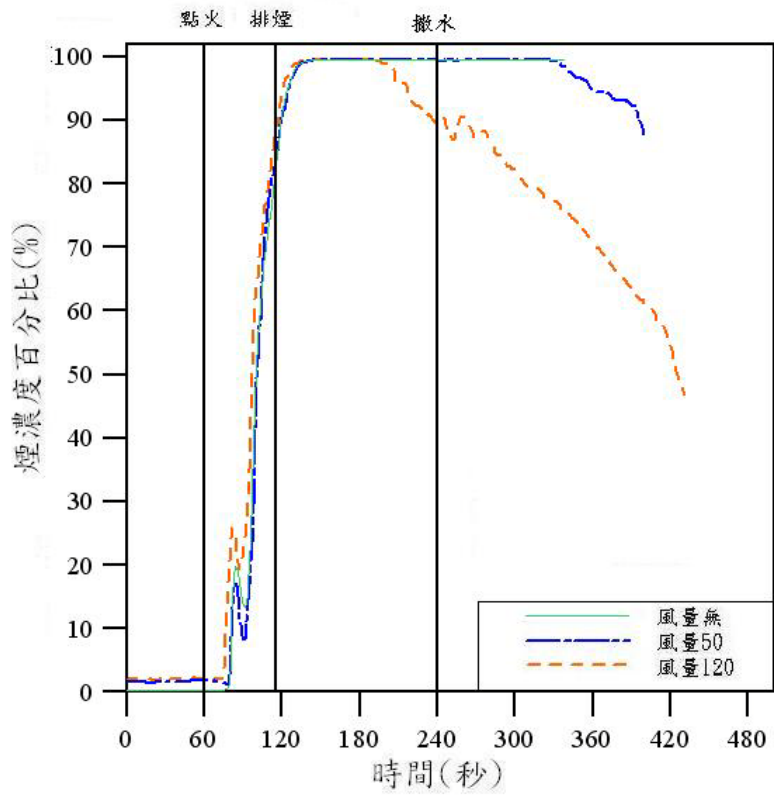


圖 4.1.17 撒水木堆火源的煙濃度百分比

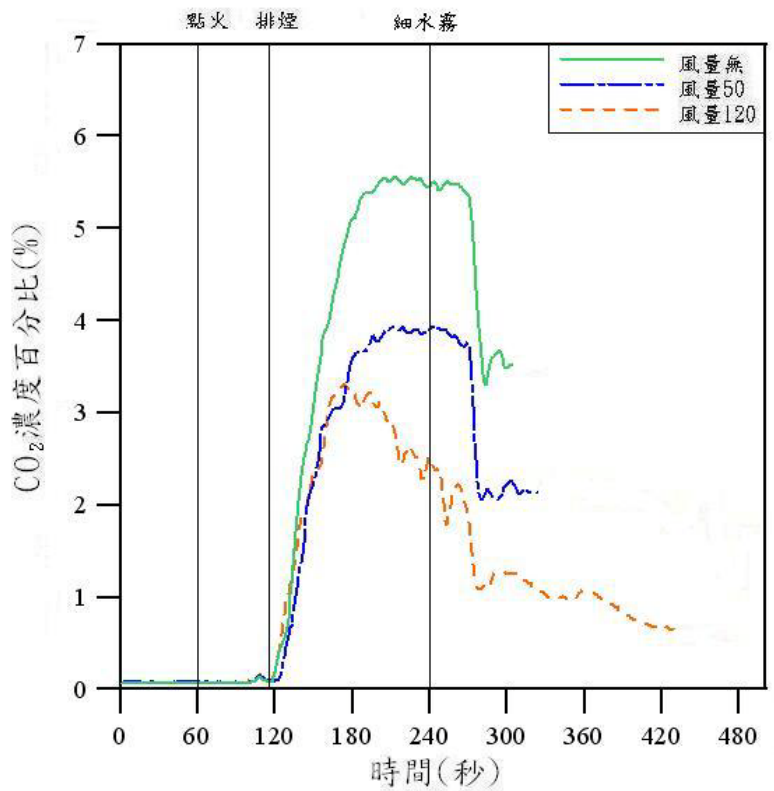


圖 4.1.18 細水霧木堆火源的CO<sub>2</sub>濃度百分比

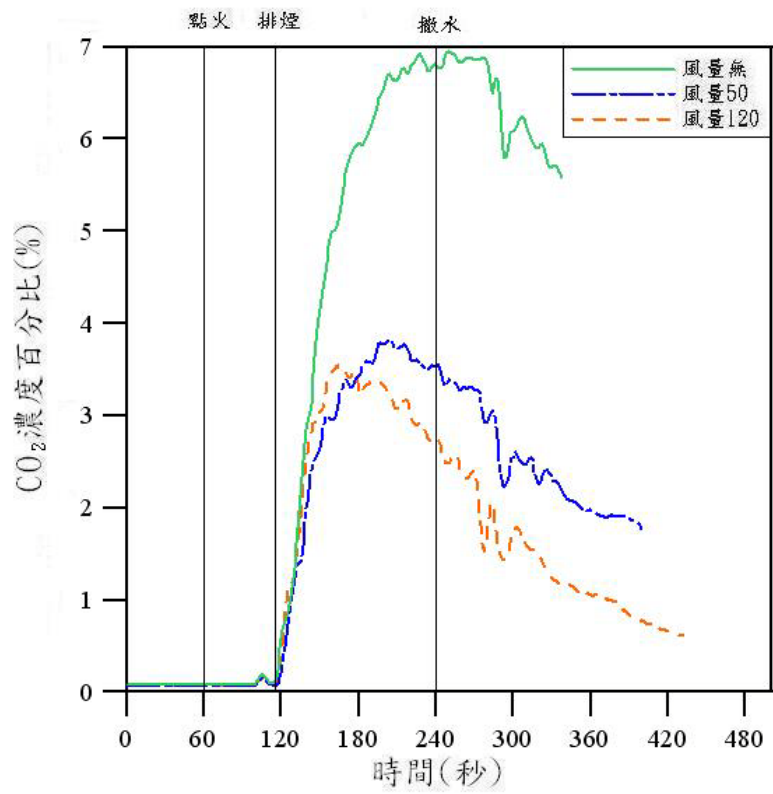


圖 4.1.19 撤水木堆火源的CO<sub>2</sub>濃度百分比

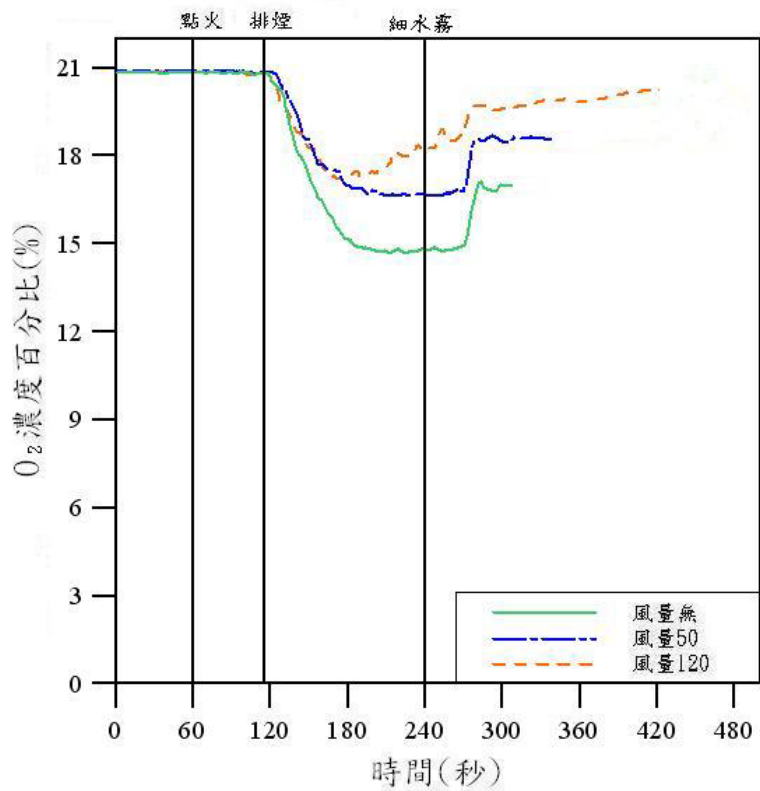


圖 4.1.20 細水霧木堆火源的O<sub>2</sub>濃度百分比

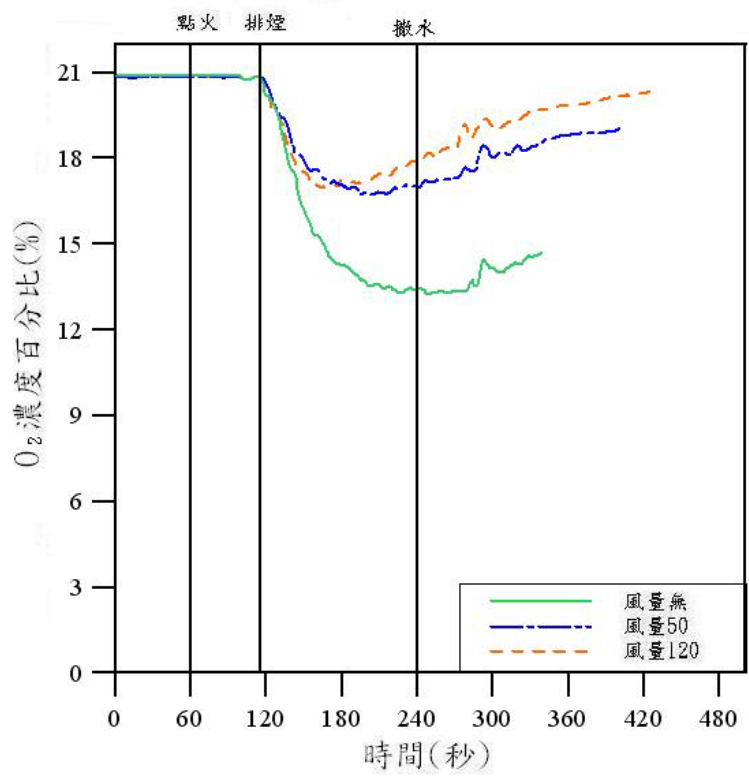


圖 4.1.21 撒水木堆火源的O<sub>2</sub>濃度百分比

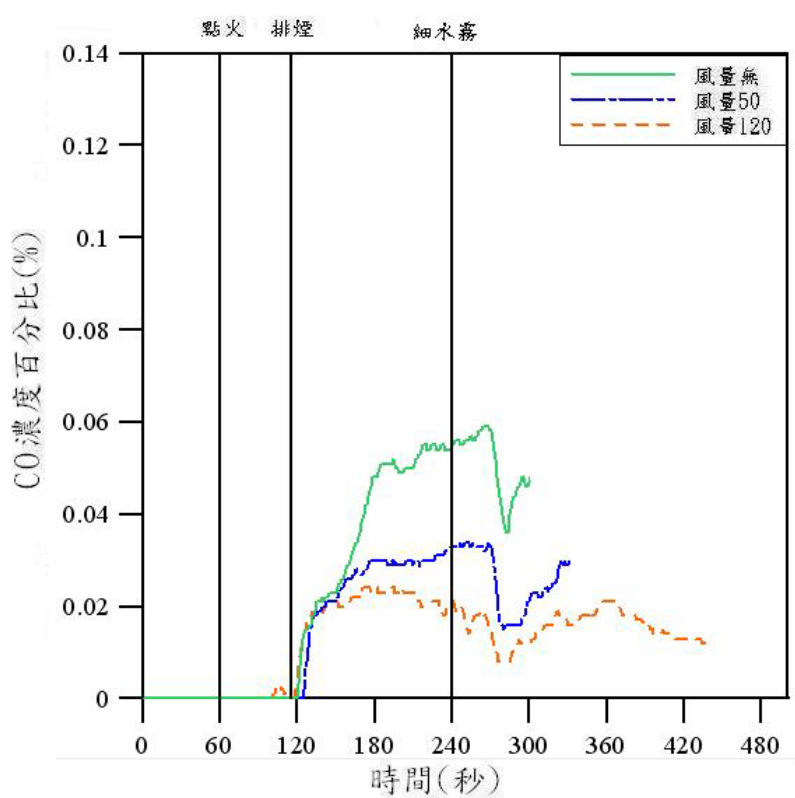


圖 4.1.22 細水霧木堆火源的 CO 濃度百分比



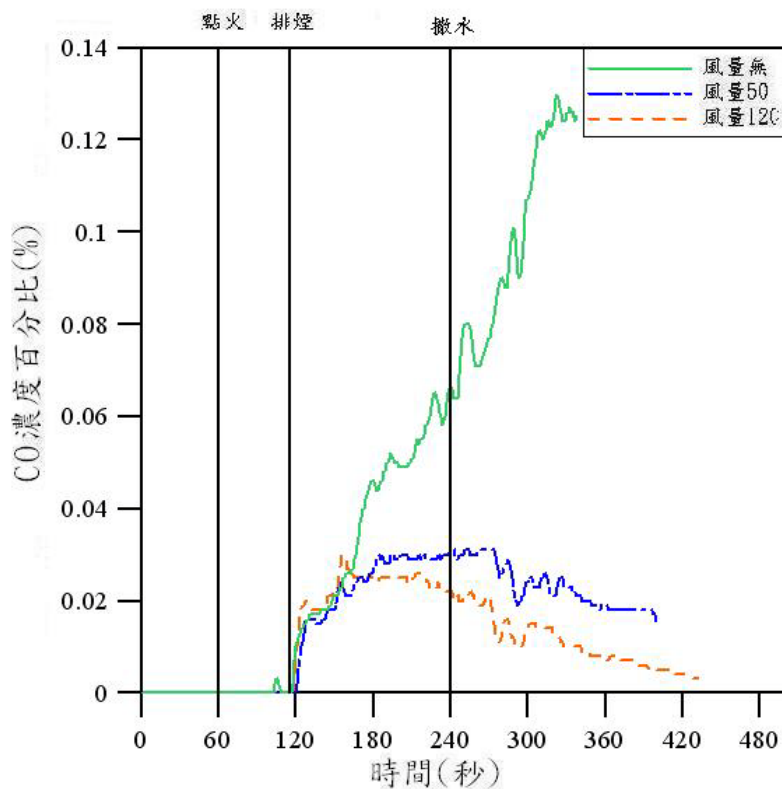


圖 4.1.23 撒水木堆火源的 CO 濃度百分比

圖 4.1.24 至圖 4.1.28 為火場環境溫度的比較圖，在傳統撒水頭的部份由於會量測點直接受到撒水影響，所以會有溫度直接下降的趨勢；細水霧的部份由上方的溫度曲線來對傳統撒水頭做比較，細水霧對於火場的降溫效果會比傳統撒水頭還要來的好；針對不同風量的溫度圖來做比較，可以發現到排煙風量愈大能夠有效降低火場內的溫度。

在木堆火源的滅火實驗中，在無風量的情況下，不管是細水霧或撒水頭，CO<sub>2</sub>的濃度均已超過 5%，如圖 4.1.18 及圖 4.1.19，而CO的濃度也偏高，如圖 4.1.22 及圖 4.1.23，對火場內的人員會有立即的危害，不利於人員的逃生與生存；當風量愈大的時候，其CO<sub>2</sub>和CO的濃度就會愈低，雖然會使滅火時間延長，但也增加火場內部人員逃生時間和生存條件，有更多的時間可以來進行人員的疏散。

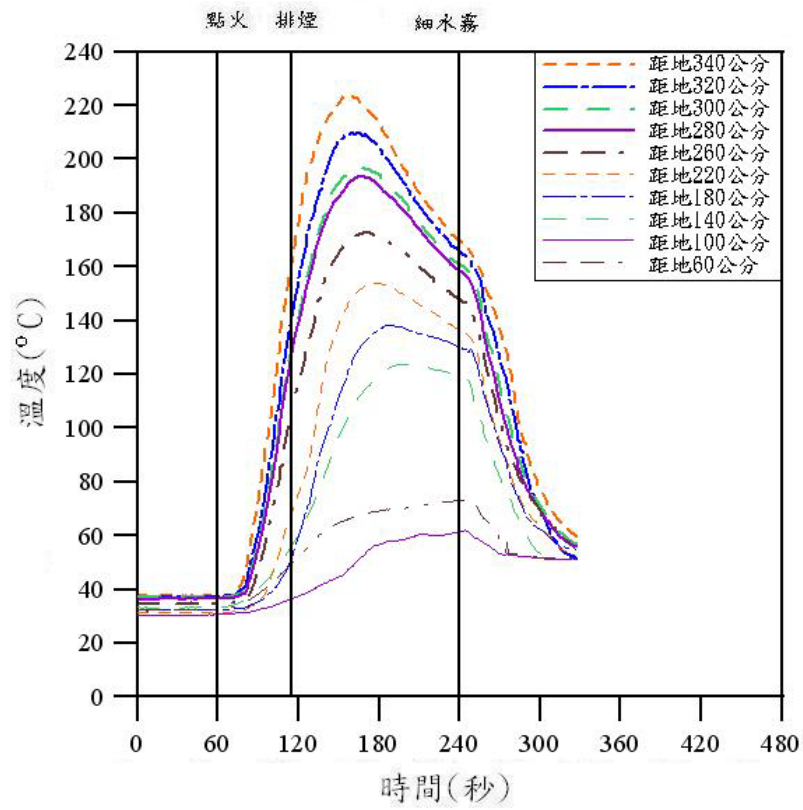


圖 4.1.24 細水霧木堆火源風量無#1 溫度圖

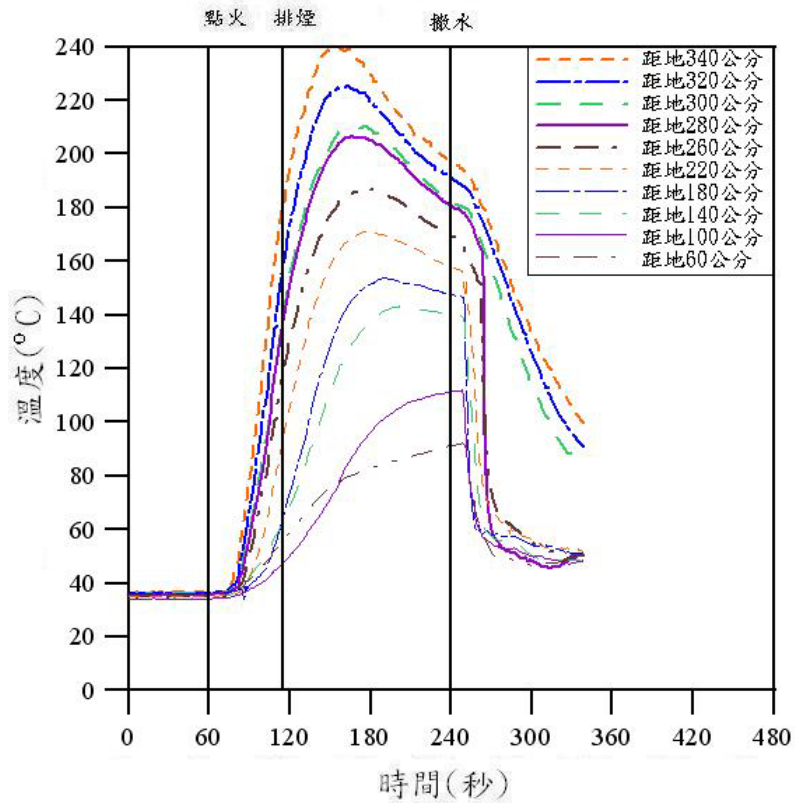


圖 4.1.25 撒水木堆火源風量無#1 溫度圖

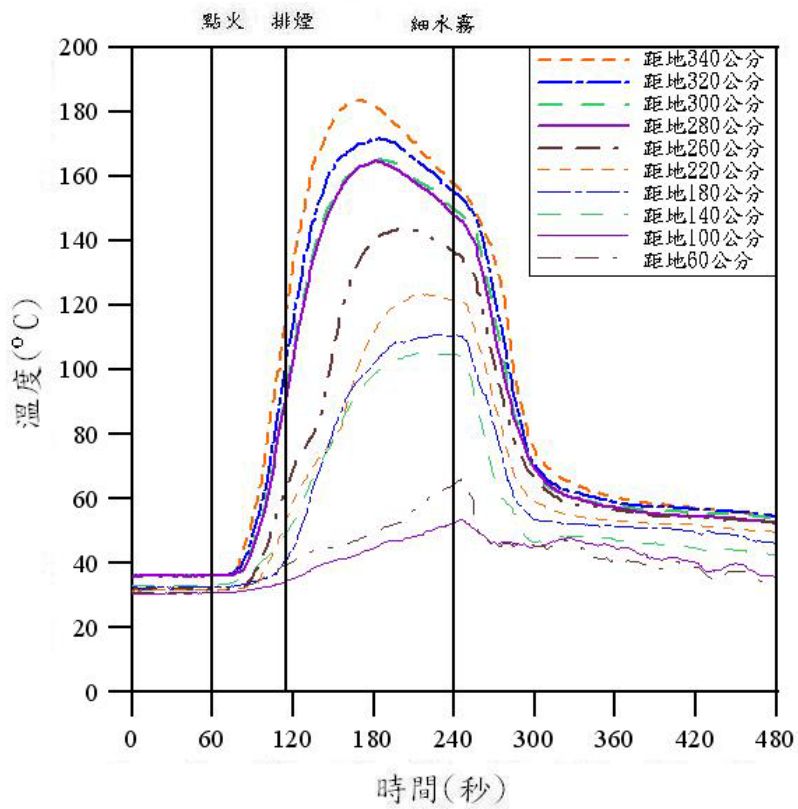


圖 4.1.26 細水霧木堆火源風量  $50\text{m}^3/\text{min}\#1$  溫度圖

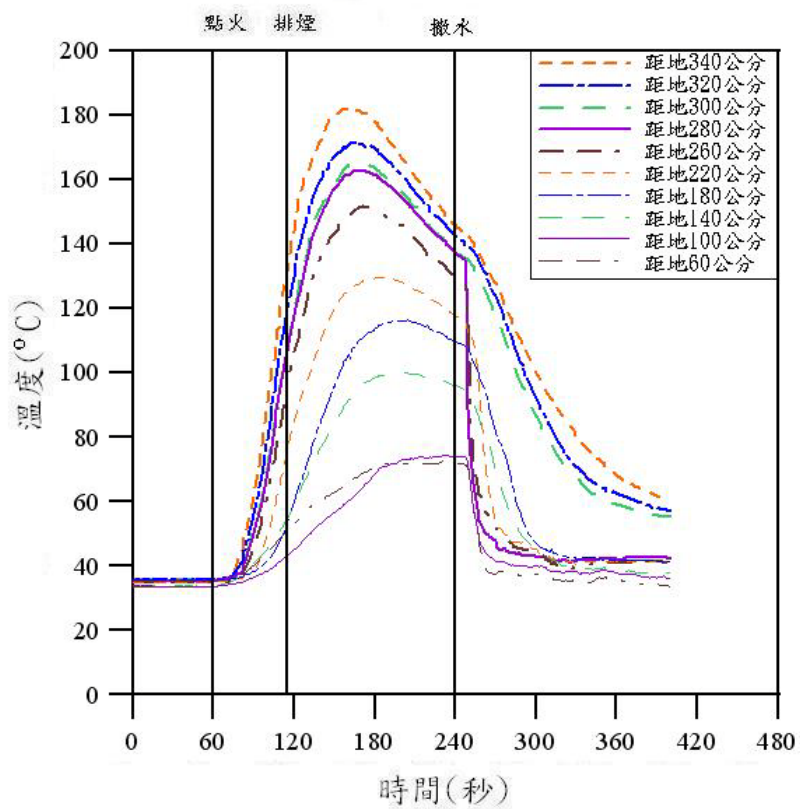


圖 4.1.27 撒水木堆火源風量  $50\text{m}^3/\text{min}\#1$  溫度圖

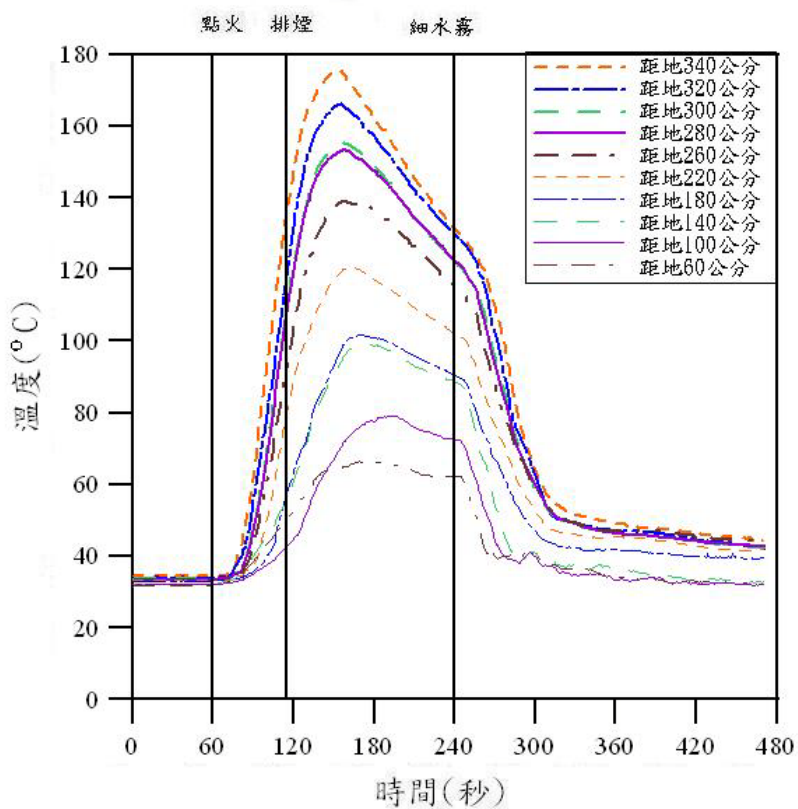


圖 4.1.28 細水霧木堆火源風量  $120\text{m}^3/\text{min}\#1$  溫度圖

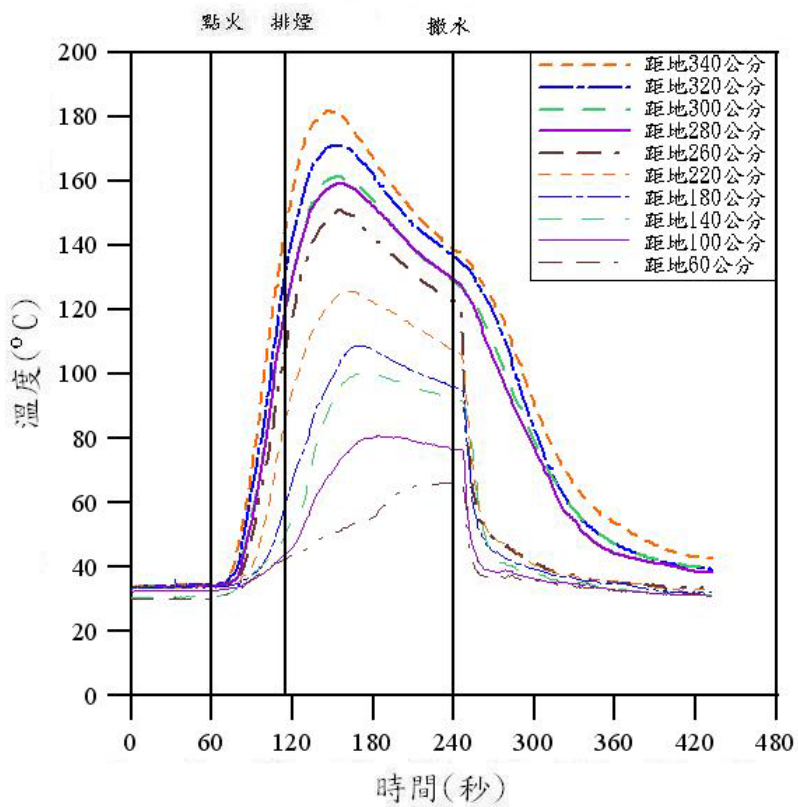


圖 4.1.29 細水霧木堆火源風量  $120\text{m}^3/\text{min}\#1$  溫度圖

#### 4.1.6 人員逃生的影響

一般而言，當火災發生的時候，濃煙對人員逃生的影響比較大，煙濃度高的時候會造成能見度不佳，以及人員的嗆傷和窒息等等的影響，在油盆的滅火實驗測試中，當排煙風量大的時候，雖然會延長細水霧滅火的時間，但也減緩了CO、CO<sub>2</sub>和溫度的上升趨勢，相對延長了人員逃生的時間；木堆火源的滅火實驗中，當風量無的時候，火場內部的氣體濃度會直接對人員產生危害，因此排煙的設置的有無就更為重要了。當進行風量大的實驗時，可以發現火場內CO、CO<sub>2</sub>氣體濃度有效的降低，除了不會直接對人員產生危害外，亦可增加人員逃生的時間。

#### 4.2 自然通風情境下的測試

研究細水霧系統在通風環境中性能表現，除了空調排煙類型的機械通風環境外尚有室內大空間或室外自然通風情境，例如台灣電力公司應用於室外變壓器防護即是一典型室外局部防護，它佔了台灣現有細水霧應用 95%以上，然而國內對於這種通風情境防護沒有較深入研究實驗，所以本研究調查 UL2167、FM5560、IMO668/728/913、CEN/TS14972、NFPA750 等測試方法後，決定以國際海事協會(IMO)MSC 913 規範為主要架構，進行自然通風下細水霧性能試驗，將利用兩種環境為室內大空間/室外空間，實施兩種型態，60cm\*60cm 二度空間柴油油盤燃燒，如圖 4.2.1 和圖 4.2.2 及 6MW 三度空間柴油噴濺燃燒情境，如圖 4.2.3 和圖 4.2.4，觀察細水霧與燃燒在不同通風環境下有何影響。

本測試方法係用來評估局部防護式細水霧系統之效能。依據廠家噴頭(此次實驗的噴頭樣本，如圖 4.2.5)的垂直及水平格狀設計標準評估噴頭最大間距，噴頭至危險物之最小與最大距離，在最低及最高壓力時之最小噴頭流量。



圖 4.2.1 室內大空間 60\*60CM 二度空間油盤火實驗



圖 4.2.2 室外空間 60\*60CM 二度空間油盤火實驗



圖 4.2.3 室外三度空間柴油噴濺火實驗



圖 4.2.4 室內三度空間噴濺火災實驗



圖 4.2.5 自然通風實驗用噴頭  $K=12.8$ , 工作壓力為  $100 \text{ Kg/cm}^2$

#### 4.2.1 柴油噴撒火災測試結果

1. 格狀況置中央一個噴頭下方  
點燃 15 秒內啟動細水霧系統  
滅火成功  YES (25 秒撲滅)  NO
2. 格狀配置中央兩個噴頭之間  
點燃 15 秒內啟動細水霧系統  
滅火成功  YES (40 秒撲滅)  NO
3. 四個噴頭之間  
點燃 15 秒內啟動細水霧系統  
滅火成功  YES (26.7 秒撲滅)  NO

#### 4.2.2 測試過程和結果的觀察與定性分析

細水霧系統應用於自然通風環境的實驗建構過程中，對二度及三度空間油類在室內和室外燃燒特性與細水霧滅火過程與各種特別現象觀察，如下報告：

##### 1. 室外通風對細水霧系統表現影響

當室內中進行平面或立體噴濺燃燒時細水霧都能符合測試要求時間內將火撲滅，但是室外進行却無法每一次順利將火撲滅，多次中細水霧系統只能有效



壓制燃燒，伴隨大量燃燒不完全的黑煙，可歸咎於室外不穩定風向，將使單位空間中霧通量不足，如防護網破洞一般，難以使油類燃燒因窒息滅火。

## 2. 噴頭安裝高度和間距對細水霧表現影響

本次實驗噴頭安裝高度高達五公尺，噴頭間距為 3 公尺對於油類火，要產生窒息性效果已經接近性能極限值，如非為高壓  $100\text{kg}/\text{cm}^2$  系統恐不易達成，最主要因為其水霧衝量會因高度增加而遞減，將使水霧無法深入火源根部產生讓火缺氧窒息的水蒸汽，或有效冷却高溫油表面。

## 3. 噴頭角度對細水霧表現影響

在汽油盤燃燒中特別發現，噴頭角度若調整對準火源，將能使大量高速細水霧進入火源內部造成水蒸汽排擠氧氣，吸收燃燒熱能使汽油燃燒立即中斷，若沒有調整噴頭放射角度，將難以使閃火點為  $-47^\circ\text{C}$  的汽油，在猛烈燃燒時立即中斷。

## 4. 粒徑大小對細水霧表現影響

測試結果完全可以顯示高壓細水霧，以極細粒徑又具有高衝量撲滅油類火源特性，而測試低壓大流量型細水霧則無法撲滅汽油火源，因為閃火點低於常溫的汽油火，須要明顯的窒息效果，而太大粒徑的水粒子來不及蒸發成水蒸汽就落入油表面沈入了油盤中，無法有效滅火。

## 5. 空間中水霧通量對滅火影響

在觀察室內外細水霧滅火成功，除了要有合適的水霧粒徑大小和衡量具備良好水霧粒子的「質」，也要有足的「量」。在單位空間的水霧通量要到達一定密度，較能順利將火撲滅。

## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

在本研究針對於細水霧應用於通風下的表現，並建立在機械排煙和自然通風兩種主要情境下進行實場驗證，室內機械排煙部份利用不同排煙口位置和排煙風量大小，比較細水霧與傳統撒水頭對設定火源抑制的狀況，並探討各參數對火場內部的煙濃度、CO<sub>2</sub>濃度、O<sub>2</sub>濃度、CO濃度和溫度的影響；同時藉由不同的排煙風量，找出對細水霧滅火時間的影響，以及火場內各種氣體濃度、煙濃度和火場溫度的比較，對於火災發生時，火場人員避難逃生的影響之關係，整理在機械排煙火災實驗結果可歸納下列幾項結論：

1. 細水霧在排煙的情況下，亦能有效的撲滅油盆火災。但滅火時間會受到排煙風量大小的影響，當排煙風量愈大，其滅火時間就愈長。
2. 當排煙風量愈大時，能有效降低火場的煙濃度、CO<sub>2</sub>、CO和溫度，並且降低了火場內部的危害，可以延長火場內人員避難逃生的時間。
3. 在木堆火源的實驗中，細水霧對於火場的抑制能力和火場內部的降溫效果，以及對氣體濃度的影響，都比傳統撒水頭還要好，對於人員的避難逃生也較為有利。

在自然通風情境實驗中，參考了 FM5560 及 IMO/MS/Cir913 Local Application 建構局部放射防護，在大空間自然通風下，確認細水霧能在氧氣無限供應下仍可有效撲滅火源，而且時間非常的短，不到一分鐘內即可完成，整理自然通風火災實驗結果歸納下列幾項結論：

1. 細水霧在大空間自然通風的情況下，因沒有四周圍壁造成水霧粒子飄散，若未能集中放射達一定程度的水霧通量，將會造成滅火失敗，若於室外進行時風向和風速更將造成滅火變數，因應變數必須調整噴頭高度間距角度及放射壓力。
2. 細水霧在局部防護時，其滅火挑戰將大於全區放射防護，須增加水霧通量，實驗中查核相關規範也都沒有具體數據，從實際滅火觀察中，發現自然風強度將和滅火效果成反比，因此如果要運用於室外的噴頭，至少

應明確說明適用風場條件，如風速等級下對應安裝高度及間距。

3. 二度空間和三度空間油類火災實驗中，細水霧對於火場的抑制能力與油類閃火點的溫度成正比，對於高閃火點的柴油火比低閃火點的汽油火易於控制，水霧粒徑愈大者對油類火控制能力也愈小。

## 5.2 建議

在全球一致性注重於減碳及環保議題下，近年來各國分別簽訂京都議定書和蒙特婁公約，常用的二氧化碳及鹵化烷系滅火系統，將因為溫室效應及臭氧層保護，逐步停用或取代，許多替代品中細水霧系統，利用最天然潔淨的「水」為滅火葯劑，真正對環境零污染和零傷害，且具有良好滅火效能，在國內僅止於少數應用，尚未見到廣泛性的應用，顯見推廣不易，實在非常可惜，本研究希望能拋磚引玉，見到更多產官學界的研究投入，提出以下建議：

1. 細水霧研究實驗如於室內進行，欲取代氣體滅火系統時，建議加做氣密性實驗，可以讓空間氧氣含量變化數據更加準確。
2. 細水霧粒徑量測實驗，現行方式容易取因樣誤差造成結果誤差，水霧粒子相互碰撞、干擾或結合因素未深入探討，可利用兩種以上粒徑量測方法交互比對。
3. 相對撒水系統以單位面積放水密度做為不同火載量防護因應，細水霧可以單位立方空間水霧通量做為火載量差異的防護因應，唯水霧通量單位尚待統一。
4. 大空間火災實驗具有重要意義，可避免因尺寸效應，造成實驗數據失真，相對成本雖高，長期性研究可有效降低架設成本。
5. 細水霧應用室外研究實驗，除本研究初次建構，尚未見相關研究計劃，鑑於國內細水霧多為台電室外局部防護，值得投入更多研究。

## 參考文獻

- [1] NFPA 750, “Standard for the Installation of Water Mist Fire Protection Systems”, 2000 Edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2000.
- [2] Braidech, M. M., J. A. Neale, A. F. Matson, and R. E. Dufour, “The mechanism of Extinguishment of Fire By Finely Divided Water,” Underwriter Laboratories Inc. for the national Board of Fire Underwriter, New York, 1955.
- [3] Mawhinney, J.R., Dlugogorski, B.Z. and Kim, A.K. “A Closer Look at the Fire Extinguishing Properties of Water Mist”, Fire Safety Science-Proceedings of Fourth International Symposium, Ottawa, ON, pp. 47, 1994.
- [4] Rasbash, D. J., Z. W. Rogowski, and G. W. V. Stark, “Mechanisms of Extinction of Liquid Fuel Fires with Water Sprays,” Combustion and Flame, 4, 1960, pp 223~224.
- [5] Dundas, R.E, “Experience with External Fires in Gas Turbine Installations and Implications for Fire Protection,” ASME Paper No:90-GT-375, 1990.
- [6] Pepi, J.S.,” Advance in the Technology of Intermediate Pressure Water Mist Systems for the Protection of Flammable Liquid Hazards” Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, 1998, p.417.
- [7] Kim, A.K., Liu, Z.G., “A Review of Water Mist Fire Suppression Technology: Part II - Application Studies,” Journal of Fire Protection Engineering, V.11, No.1, Feb. 2001, pp. 16-42.
- [8] 陳俊勳、鍾基強, ” 水系統火災控制技術之研究” , 內政部建築研究所研究報告, 2003。
- [9] 鍾基強, ” 滅火系統技術研發之規劃研究” , 內政部建築研究所研究報

- 告，2004。
- [10] 陳建忠、張尚文及謝煒東，”細水霧系統火災控制與應用之研究 (1/2)” ，內政部建築研究所研究報告，2004。
- [11] 陳建忠、張尚文及謝煒東，”細水霧系統火災控制與應用之研究 (2/2)” ，內政部建築研究所研究報告，2005。
- [12] 蔡榮鋒，”水霧式隔煙系統之技術與應用研究 (1/3)” ，內政部建築研究所研究報告，2005。
- [13] 蔡榮鋒，”水霧式隔煙系統之技術與應用研究 (2/3)” ，內政部建築研究所研究報告，2006。
- [14] 蔡榮鋒，”水霧式隔煙系統之技術與應用研究 (3/3)” ，內政部建築研究所研究報告，2007。
- [15] 何明錦、鍾基強，”建築物水系統對火災熱輻射危害控制與驗證” ，內政部建築研究所研究報告，2007。
- [16] Yi-Liang Shu, Wei-Jin Jeng, Chen-Wei Chiu, and Chiun-Hsun Chen, “Assessment of Fire Protection Performance of Water Mist Applied in Exhaust Ducts for Semiconductor Fabrication Process” , Fire Mater, Vol. 29, pp. 295-302, 2005.
- [17] Wen-Yao Chang, Ping-Kun Fu, Chiun-Hsun Chen and Yi-Liang Shu, 2007 “Performance Evaluation of a Water Mist System in Semiconductor Wet Bench Fires,” accepted by IChemE’s journal, Part B: Process Safety and Environmental Protection.
- [18] Yu-dong Fang, Yong-Feng Zhang, Lin Lin, Guang-Xuan Liao, Xin Huang, Bei\_Hua Cong, “Experimental studies on interaction of water mist with class K fires” , Chinese Science Bulletin, Vol. 51(24), pp. 3053-3058, 2006.
- [19] Cary Presser, George Papadopoulos, John F. Widmann, “PIV Measurements of Water Mist Transport in a Homogeneous Turbulent Flow past an Obstacle” , Fire Safety Journal, Vol. 41, pp. 580-604, 2006.

[20] 許勝雄、彭游、吳水丕，人因工程，第二版，編譯，滄海書局，2000。

