

細水霧對遮蔽火源之滅火實驗研究-以汽車火災為例

謝煒東¹ 張尚文² 紀人豪³ 王天志⁴

¹ 成功大學機械系博士後研究員

² 明道大學綠環境設計學系助理教授

³ 吳鳳科技大學助理副教授

⁴ 內政部建築研究所研究員

摘要

有研究指出，人為縱火為停車空間內車輛起火之主因之一。當火源由車輛座椅開始燃燒時，熱釋放率可達 5MW，並可能延燒到周圍車輛及建築物。汽車火災的特性為火源被車殼遮蔽造成滅火困難，曾有理論及部分實驗指出，細水霧可以撲滅遮蔽火災。本研究模擬車窗被打破，車內遭縱火之情形，以不同配置的細水霧防護，觀察防護效果。結果發現，細水霧僅可能控制火勢，防止延燒，增加圍閉性可能提高防護效果。此外，由於火源被車殼保護著，如果細水霧不是直接噴向車內的火源，光靠飄散進入車內的細水霧，它的滅火能力遠低於火勢成長力道，亦即，在非圍閉空間，細水霧對遮蔽火源的滅火能力，有待考驗。

關鍵詞：細水霧、遮蔽火災、汽車火災

Abstract

Researches indicate that arson has been the major cause of car fire in parking space. When the car fire starts from car seats, the heat release rate can reach 5MW and the fire is dangerous to surrounding cars and building. The car fire is difficult to put off due to the fire is usually shielded by its shell. Literatures have indicated that the water mist is capable of putting the shielded fire off. In this study, we simulated an arson fire in a broken window car. The arrangement of water mist nozzles were varying to observe its effect on the fire fighting. Results showed that the water mist could prevent the fire from spreading. By increasing the enclosure, the fire fighting capability of water mist can be enhanced. In addition, since the fire source is protected by the car shell, the water mist is relatively weaker than fire and therefore it can't penetrate into the fire source inside the car. That is, in a non enclosure space, the fire fighting capability of water mist still needs more validations.

Key words: water mist, shielded fire, vehicle fire

一、研究緣起

細水霧省水、高效能且應用廣，為近年來被先進國家大力研發的消防產品，歐美各國已有相關規範(如 UL2167、NFPA750、ISO6182-9…)，且有大量民間資源投入研發。惟台灣無相關規範，國內業界均持觀望態度，整體競爭力已大幅落後世界先進國家甚多，應用規範之擬定，刻不容緩，若能對細水霧之性能認定有明確的定義，則可使用性能式設計認定的方式，對細水霧系統進行審核。

細水霧之耗水量遠小於撒水頭和水霧噴頭，災後的清理也較容易，且對於環境較友善 (ECO-Friendly)，值得推廣，但限於台灣目前並未針對細水霧有明確的規範，因此需建立一細水霧噴頭檢測規範草案以及實場測試規範草案，供作細水霧性能評估之依據。此外，車輛火災成長速度快，危險性極高。依據建研所細水霧對機車火災防護效果之實驗發現細水霧若設計得當，可以壓制機車火災，而國內對於停放汽、機車等的室內停車場空間應用細水霧滅火之可行性未有相關研究，因此本研究使用室內停車空間作為對象，進行實驗測試，探討細水霧應用於此種空間之可行性。

二、文獻回顧

茲將國內細水霧相關研究與主要成果整理如表 1 所示：

表 1 國內細水霧相關研究與主要成果

年度	研究題目	研究人員	主要成果
92	細水霧滅火系統審查作業制度與認可基準之研究	簡賢文、趙鋼	1. 以 UL2167 為藍本，配合國內撒水頭測試項目，編定細水霧滅火系統審查作業制度與認可基準
92(委)	水系統火災控制技術之研究(II)-細水霧滅火系統技術研發之規劃研究	陳俊勳、陳皓然	1. 蒐集細水霧滅火系統各項元件及系統測試規範，並將這些資料依各種須求分門別類予以整理，提供作相關測試試驗場設施的重要依據。 2. 使用 FIREDASS 執行細水霧應用於半導體廠中排氣管路火災防護之數值效能分析，並應用性能設計程序介紹整體的防火性能，作為實場火災測試的設計依據。
93(委)	滅火系統技術研發之規劃研究(II)細水霧滅火系統技術研發之規劃研究	陳俊勳、	1. 利用 FDS 模擬撒水頭效能與 FIREDASS 模擬細水霧效能。並於 6.13x3.26x2.94m 的空間中進行 FMRC 機械空間火災情境模擬，並使用撒水頭與細水霧進行滅火比較。 2. 撒水頭與細水霧均可撲滅遮蔽與非遮蔽火源，其中細水霧所需滅火時間較撒水

			<p>頭短。</p> <p>3. 滅火時間定義為火源引然後到其溫度降至 328K (55°C) 所需的時間。</p>
93(自)	細水霧系統火災控制與應用之研究 (1/3)	陳建忠、蘇鴻奇、張尚文	<p>1. 建立建研所細水霧噴頭特性實驗室、量測設備與技術。</p> <p>2. 提出「內政部建築研究所細水霧粒徑速度量測方法(草案)」</p>
94(自)	細水霧系統火災控制與應用之研究 (2/2)	陳建忠、蘇鴻奇、張尚文、謝煒東	<p>1. 進行細水霧噴頭特性檢測，包含撒水分佈、粒徑量測並以 30x30x30cm 油盤，置入 2L 汽油進行細水霧滅火實驗，結果顯示噴頭高度對於滅火效能影響最明顯，其次是細水霧做動時間，噴水壓力影響最小。</p> <p>2. 細水霧工作壓力高，因此在抗洩漏試驗、液體靜壓強度試驗需嚴格要求。</p> <p>3. 附錄中節錄 FM、UL2167 測試規範與自動撒水設備技術規範以及 UL2167 之全文。</p>
94(委)	水霧式隔煙系統之技術與應用研究 (1/3)	蔡榮豐、李正國、陳亮廷	<p>1. 建立水霧式隔煙系統實驗室，並採用市售規格品扇形與實圓錐噴霧器組成水霧幕，實驗結果顯示其可有效降溫，且滌煙效果良好。</p> <p>2. 提高噴射壓力，可增加水霧射程、縮短水霧與火源之距離，使水霧容易隨空氣進入火焰，降低燃燒反應速率，抑制火勢並降低溫度。</p> <p>3. 提出「水霧式隔煙系統」與「水霧幕分區消防滅火之方法及其裝置」專利申請。</p>
95(協)	水霧式隔煙系統之技術與應用研究 (2/3)	蔡榮豐、李正國、陳亮廷	<p>1. 建構水霧幕滌煙/隔煙系統，探討排煙設備的啟動(強制通風)對水霧系統隔煙效果影響。</p> <p>2. 排煙設備雖可將濃煙排出，卻也引入空氣，擴大火勢，造成更大濃煙，反而不力逃生與救災。</p> <p>3. 僅用單邊水霧幕，雖可藉引流效應將水霧送入火盆，但僅具隔煙熱功能，無法面火。</p> <p>4. 雙邊水霧可迅速達滌煙、隔煙與隔熱之目的。</p>
96(協)	水霧式隔煙系統之技術與應用研究 (3/3)	何明錦、蔡榮豐、周奕廷、黃俊友	<p>1. 實驗證實，只要結合國產之柱塞水泵、水霧噴頭，即可建構「水霧幕」，達成隔煙、隔熱、滌煙、滅火、抑制閃燃及防止竄燒等多功能消防系統。</p> <p>2. 適當設計水霧幕、可藉由捲吸作用撲滅開放式與遮蔽性油類火災</p>

96(協)	建築物水系統對火災熱輻射危害控制與驗證	何明錦、鐘基強、吳友烈、陳又嘉	<ol style="list-style-type: none"> 1. 研究水霧粒徑與撒水頭裝設高度對抑制火焰之影響，透過理論與實尺寸實驗，找出不同水霧粒徑之差異。結果顯示高度對於水霧撒水系統有影響，且粒徑越大所造成的影響程度也越高。 2. 水霧撒水系統相較於一般傳統撒水頭更有吸收與遮蔽熱輻射之效果，尤其是火災初期，使用水霧撒水系統對於控制火焰延燒相當有幫助。 3. 防火區劃兩側需要淨空距離以防止熱輻射造成延燒，本研究結果證明水霧撒水系統之裝設可替代淨空距離之要求。 4. 水霧撒水系統對熱輻射的遮蔽率大約是傳統撒水系統的 5~6 倍，降溫效果為 2~4 倍。
97(委)	細水霧系統火災控制整合應用技術研究	陳俊勳、徐一量、黃勝安、周枝興	<ol style="list-style-type: none"> 1. 細水霧在排煙情況下，亦能有效撲滅油盆火災。滅火時間隨排煙風量增加而增長，且能有效降低火場濃煙度、CO、CO2 與溫度，降低火場內部危害，延長火場內人原避難逃生時間。 2. 細水霧對於木堆火源抑制能力與降溫效果都比傳統撒水頭佳。 3. 由 FIREDASS 模擬結果顯示，細水霧作動可強化排煙效果，有效降低火場溫度與危害氣體濃度，且排煙量越大，細水霧降低危害的效果越佳，與實驗吻合。 4. 彙整國際細水霧規範 FMRC 5570、UL2167、IMO668、IMO728、IMO Res. A. 800、VDS2498 等。 5. 提出「細水霧測試火源與場景設立規範草案」供未來相關實驗參考。

三、細水霧之滅火機制

(一) 細水霧的滅火原理

維持火源繼續燃燒的三要素為不斷供應的燃料（可燃物），不斷供應的氧氣（助燃物），以及最小發火能量並維持燃燒繼續所需的熱源（熱量）。上述三要素移除其中之一即可滅火，故以移除法排除可燃物，以窒息法排除助燃物，以冷卻法排除熱量，來達到滅火的目的。自動撒水設備係以大量的水直接澆置於火源吸收火源的熱量（冷卻法），並且沾濕火焰旁尚未引燃的可燃物，使之無法引燃（移除法）來達到滅火的目的。至於細水霧的滅火機制有下列看法：

1. Braidech^[1] 提出細水霧滅火機制主要為 (1) 空氣稀釋、(2) 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，同時這些水霧粒子也提供了降低火場溫度的冷卻效果。
2. Mawhinney【2】等人提出細水霧的滅火機制可分為主要及次要兩類，主要滅火機制包括 (1) 熱移除(Heat Extraction)、(2) 氧氣排擠效應(Oxygen Displacement)、(3) 降低熱輻射效應(Blocking of Radiant Heat)；次要滅火機制包括 (4) 因水蒸汽將空氣稀釋、(5) 流場的動態效應。
3. SFPE 的防火工程手冊【3】則記載細水霧主要滅火機制為 (1) 冷卻效果(Gas phase cooling)、(2) 稀釋氧氣及可燃蒸汽 (Oxygen depletion and flammable vapor dilution)、(3) 沾濕與冷卻可燃物表面 (Wetting and cooling of the fuel surface)；而次要的滅火機制為 (4) 降低輻射回饋 (Radiation attenuation)、(5) 細水霧運動效應 (Kinetic effects)。

(二) 細水霧的其他特性

1. 特性 1：細水霧對於大火的滅火效果較佳

不少針對細水霧滅火效果與火源大小關係之研究發現，細水霧對於大火源的滅火效果較佳，對於小火的滅火效果並不顯著。

2. 特性 2：細水霧在不通風的空間滅火效果較佳

在通風條件底下細水霧滅火設備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%。通風會降低細水霧的滅火效果，而通風量過大時甚至將使細水霧失效。通風對於細水霧的滅火有顯著的影響。

3. 特性 3：細水霧安裝在大空間的滅火效果差

在樓地板面積 2800m²、天花板高度為 18m 的大空間進行細水霧的滅火實驗中，安排細水霧噴頭之間的水平間距均為 1.5m，分別針對 1MW 到 6MW 的噴撒火源以及油盤火源進行滅火實驗發現，無論是使用高壓或是低壓的細水霧滅火設備，甚至噴頭從 30 顆增加至 100 顆均無法有效的將火勢給撲滅。

4. 特性 4：細水霧有足夠的動量穿透火焰滅火效果較佳

以不同速度、粒徑與入射角的細水霧來進行滅火實驗，並利用高解析度攝影觀察發現，液滴需在有足夠動量穿越火焰的情形才能有效滅火。粒徑、速度與火場氣流流速均應考慮。

5. 特性 5：細水霧可以應用於遮蔽火焰^[4]

於 6.1m×3.5m×2.9m 的防護空間，模擬機械設備底部著火，進行有遮蔽下的油盤火源

實驗發現，細水霧可以有效撲滅有遮蔽的火源。

6. 特性 6：細水霧可以應用於 A 類、B 類及 C 類火災

細水霧可以應用於住宅類、圖書館等 A 類火災的防護；也可以應用在油池火災、渦輪機室火災、車輛火災等 B 類火災的防護；也可以應用在電機設備等 C 類火災的防護。

7. 細水霧的其他特性：

除了細水霧的噴灑密度、噴頭位置對於滅火效果有絕對的影響外，噴頭特性中，噴頭的噴撒角度、噴出水霧的行進速度以及水霧粒徑大小的分布情形或添加劑等，也會影響滅火效果。

由此可知，細水霧可能藉由流場的動態效應到達車輛內的火源，進而稀釋車輛周圍的氧氣濃度。理論上，細水霧可以飄散撲滅遮蔽處的火源，能否藉由飄散作用撲滅車內火源，為本研究觀察重點。

四、實驗安排

(一) 車輛空燒實驗

車輛空燒實驗旨在觀察並記錄當車輛起火時所產生之現象，並量測其熱釋放率之變化與總熱量，作為後續滅火實驗對照數據。

車輛擺設方向如圖 1，車體呈南北向，車頭朝南。為模擬車輛遭人縱火之情境，兩側之前車窗皆開啟，而引火源為 2 公升之汽油倒於駕駛座處，車體置於無頂蓋之框架中，框架結構長 5.6m、寬 2.4m、高 2m。產生之煙氣由 10MW 集煙罩收集並計算其熱釋放率與總熱量，在車體內外均設有熱電偶以量測實驗進行中之溫度變化。



圖 1 車輛擺設方向圖

實驗歷程如圖 2 所示，倒入汽油並點火後，由於兩側前車窗開啟，火焰立即由車窗處竄出(圖 2 (a))。在 96 秒時，前擋風玻璃遭燒穿，火焰由該處竄出並迅速增大(圖 2 (b))，此時火勢仍集中前座處，而逐漸向後座延燒。至 230 秒時，後座車窗破裂，中段車廂完全遭火焰吞沒(圖 2 (c))，但前後車廂尚未受波及。前後車廂分別到 671 秒與 725 秒時才有火焰冒

出(圖 2 (d))，並隨之引燃前後車輪。而至 864 秒後全車引燃，火勢達到最大(圖 2 (e))。隨後由於中後段車廂可燃物燒盡，僅餘前車廂繼續燃燒，火勢逐漸轉小直到 2250 秒實驗結束。



(a) 點火



(b) 前擋風玻璃燒穿



(c) 後車窗破裂



(d) 前後車廂引燃

圖 2 車輛空燒實驗相片

而實驗中之熱釋放率變化及總熱量如圖 3 所示，其中 THR 為累計熱量，而 CO₂&CO、O₂C-ISO 及 GTR 分別為利用一氧化碳與二氧化碳產生率法、氧氣消耗法與質量損失率法計算所得之熱釋放率，當中氧氣消耗法其準確度較佳。由圖可知，車輛空燒其總熱量約在 3500MJ 上下，而熱釋放率之變化可與實驗歷程對照：由點火到火勢在中段車輛完全成長，僅費時約 200 秒，而在 864 秒全車引燃前，火勢被局限於中段車廂，其熱釋放率約為 1.7MW；在全車引燃後，熱釋放率快速上升至最大值約 5MW 而後逐漸下降直到實驗結束。將實驗歷程整理如表 2 所示。

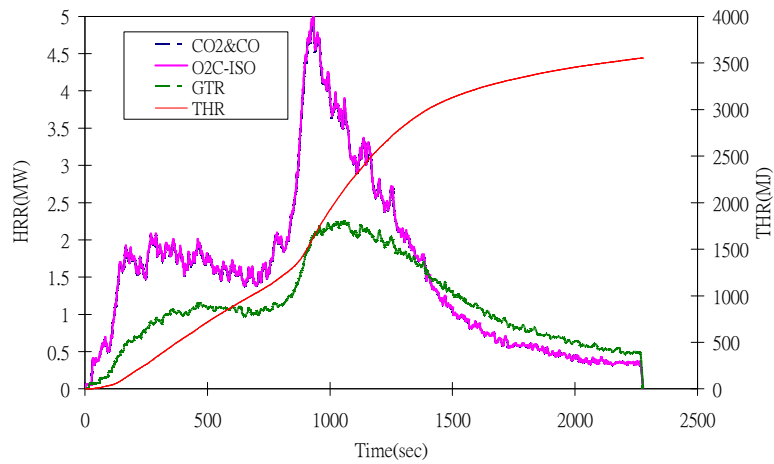


圖 3 總熱量及熱釋放率圖(車輛空燒)

表 2 車輛空燒實驗歷程

0s	引燃	798s	保險桿脫落
45s	頂部脫落	809s	東側前輪爆破
88s	燒穿頂部	864s	全車引燃
96s	前擋風玻璃燒破	876s	東側後輪爆破
212s	後照鏡脫落	916s	西側前輪爆破
230s	東側後窗燒破	940s	西側後輪爆破
300s	西側副駕玻璃破	1113s	大量火焰由前車箱兩側冒出
485s	東側後門膠條脫落	1229s	西側後輪避震器爆破
510s	西側後窗火冒出	1364s	西側前輪避震器爆破
360s	東側後門燒穿	1616s	火勢轉小
580s	引擎蓋冒煙	2250s	實驗結束
671s	引擎室起火		
725s	後車箱起火		
745s	引擎室燒穿		
781s	西側前車輪起火		

(二) 車輛細水霧滅火實驗

車輛水霧滅火實驗噴頭採用 4 顆分別搭配 5 個子噴頭的建研所專利噴頭(如圖 4a)，裝設位置如圖 4b，為左右對稱，各裝設兩顆噴頭，噴頭間距各為 2m，向下噴射，噴射水壓為 60 kg/m²，噴霧錐角約為 55 度，使用水泵為建研所之高壓泵，可提供穩定之水壓，配合消防水管供水下，可長時間供水，4 顆噴頭加總之噴水量約為 40 LPM。

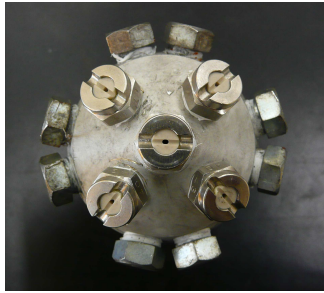


圖 4a 細水霧噴頭

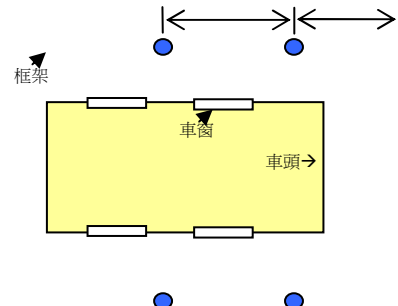


圖 4b 細水霧噴頭位置圖

倒入 2 公升汽油並點火 30 秒後，細水霧系統啟動(圖 5 (a))。細水霧啟動後，隨即產生大量黑煙 (未燃碳) 與白煙 (水蒸氣)。130 秒時，前擋風玻璃破裂，而在 200 秒後，不斷有火焰竄出 (圖 5 (b))。而到 1290 秒時，引擎蓋下方有火焰冒出。此結果顯示此細水霧系統仍有效制止了前後車廂的起火，未有全車引燃之現象，車內火焰在 1485 秒時，可以引火部分的可燃物耗盡熄滅，1775 秒實驗結束，此時仍有小火於車底，以消防水柱滅火。



(a) 啟動水霧



(b) 火焰竄出

圖 5 車輛水霧滅火實驗相片

實驗中熱釋放率變化及總熱量如圖 6，總熱量約在 920MJ，而熱釋放率緩慢上升，在 400 多秒時達到最大值約 1.5MW，但僅維持 200 秒。600 秒後熱釋放率急降至約 0.6MW，但實驗中並無特殊發現，熱釋放率而後緩慢下降直到實驗結束。實驗中亦觀察到，細水霧作用下，由於強力的細水霧噴射會造成氣場擾動，啟動初期，新鮮空氣將更容易進入燃燒的車室內，此時，細水霧噴頭於此種配置下會增加車內燃燒，但由於細水霧的降溫與稀釋作用等滅火機制

逐漸發揮效用，整體而言，其危害度仍較空燒狀況下來得低。將實驗歷程整理如表 3 所示。

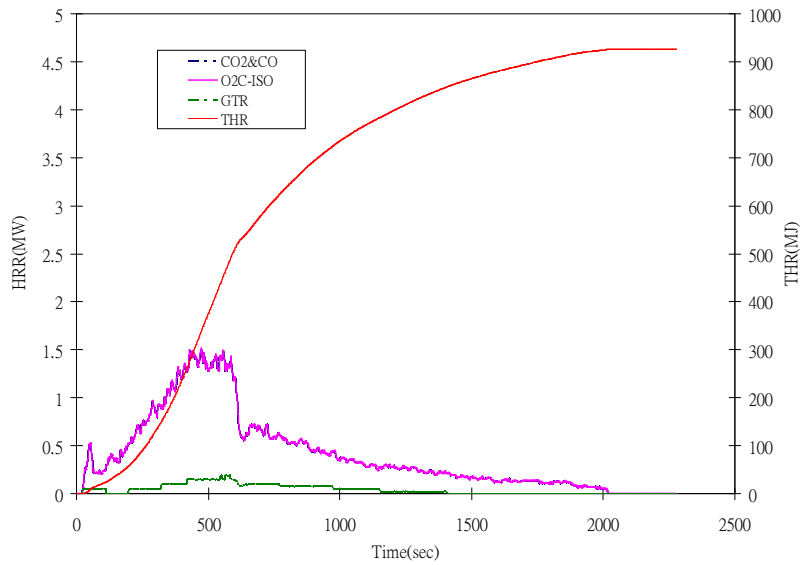


圖 6 總熱量及熱釋放率圖(車輛水霧滅火)

表 3 車輛細水霧滅火實驗歷程

0s	引燃
13s	大量黑煙
30s	水霧啟動
42s	大量白煙及黑煙
110s	火焰自右窗竄出
130s	前窗破裂
200s	前座大量火焰
380s	右後車窗破裂
440s	後座門把燃燒
465s	爆破聲，後車窗破裂
1001s	火勢轉小
1290s	引擎蓋下方出現火焰
1485s	車內火焰熄滅
1775s	停止撒水，實驗結束

(資料來源：本研究)

五、分析討論

- (一) 比較二個實驗結果，有防護時總熱量約在 920MJ，較無防護時的 3500MJ 低許多，與實驗觀察部分區域沒有完全燃燒的現象相符。由此推測，細水霧的作用可能阻止火勢蔓延，使汽車部分區域不完全燃燒，因而縮小可燃範圍，由於火勢被侷限，大幅降低了持續燃燒以及向外擴張延燒的力道，可能藉由此機制，讓部分燃燒處的火焰熄滅，未完全燃燒。
- (二) 有防護下，在 400 多秒時達到最大值約 1.5MW，維持 200 秒，600 秒後熱釋放率急降至

約 0.6MW，實驗中並無特殊發現，熱釋放率而後緩慢下降直到實驗結束。相較之無防護時，全車引燃後，熱釋放率快速上升至最大值約 5MW。可以瞭解，在本實驗配置的細水霧及前車窗開啟的狀態下，細水霧可以有效抑制汽車火災，即使車窗未開啟，也可能因為車窗內外溫度差異，造成車窗爆裂，讓細水霧有機會進入車輛內部。

- (三) 在細水霧防護下，雖能抑制火勢，依據實驗觀察結果，由於細水霧無法直接命中火源，因此滅火力道不足，而汽車內的火勢會延燒到的地方，例如引擎室、車底，這些地方的遮蔽性更高，由實驗二，於 1775 秒實驗結束，此時仍有小火於車底之情形研判，即使車底的火焰不大，然而細水霧卻無法將之撲滅，文獻 4 的實驗結果說明細水霧可以撲滅遮蔽火焰，該研究係在密閉空間進行，本實驗是在開放空間進行，故此推論，細水霧對於「開放空間中的遮蔽火焰」，滅火效果相當有限。

六、結論

在本實驗設定的條件下，得出下列結論：

- (一) 細水霧僅可能抑制及控制火勢，防止延燒，對於開放空間遮蔽火焰的滅火效果有限。
- (二) 對車輛火災而言，火源被車殼保護著，光靠飄散進入車內的細水霧，它的滅火能力遠低於火勢成長力道，故無法滅火。

七、文獻回顧

- 【1】 M.M. Braidech, J.A. Neale, A.F. Matson and R.E. Dufour, “The mechanisms of extinguishment of fire by finely divided water”, Underwriters Laboratories Inc. for the National Board of Fire Underwriters.
- 【2】 J.R. Mawhinney, B.Z. Dlugogorski and A.K. Kim, “A closer look at the fire extinguishing properties of water mist”, Fire Safety Science-Proceedings of Fourth International Symposium, p.p. 47.
- 【3】 “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (Third Edition)-Water Mist Fire Suppression Systems(Chapter 4-14)”, Society of Fire Protection Engineers, 2002.
- 【4】 陳俊勳，「滅火系統技術研發之規劃研究（II）細水霧滅火系統技術研發之規劃研究」，內政部建築研究所，2004 年。

致謝：本研究得以完成感謝內政部建築研究所自行研究案經費支應，及內政部台南防火實驗中心支援辦理。