

水霧結合鐵捲門的防火性能研究

林昶豫*、高敬忠*、林大惠*

李鎮宏**、蔡明儒**、陳建忠**、陳瑞鈴**

*國立成功大學機械系

**內政部建築研究所

摘要

本研究目的在於實驗探討水霧結合鐵捲門的防火性能，並分析其在火場中的阻熱效果。研究係利用內政部建築研究所防火實驗中心的耐火爐，進行 3mx3m 鐵捲門耐火試驗，其加熱程序依據 CNS 14803 規範升溫曲線，同時使用水霧噴頭形成水霧而噴灑於鐵捲門的非曝火面；於實驗過程，觀察並量測鐵捲門非曝火面的表面溫度是否符合 CNS 14803 規範，進而判斷其防火性能與阻熱效果。實驗結果顯示由於水的高比熱和高蒸發潛熱性質，其水霧噴灑於鐵捲門所形成的水膜足以帶走大量的熱量，使得鐵捲門表面溫度變化符合規範要求；而表面少部分區域由於水膜覆蓋不全，故未能符合規範要求，阻熱效果稍差。

關鍵詞：防火測試、鐵捲門、水霧噴頭、CNS14803。

Abstract

This study experimentally examined the fire protection performance of an iron roll door incorporated with water sprays, and focused on the corresponding heat resistance characteristics. The fireproof test of a 3mx3m roll door was performed by using the test furnace at the Fire Experimental Center of the Architecture and Building Research Institute, according to the CNS 14803 Standard. In the test, water sprays were impinged onto the non-heating surface of the test specimen. Water has not only high specific heat but also high latent heat of vaporization; therefore, it can remove a lot of heat from the roll door during fire proof test. The roll door incorporated with water sprays met the fire performance criterion on most of the door surface in the test. However, a small part of the door surface still failed the fire performance criterion due to the incomplete coverage of the water film.

Keywords: Fire resistance test; Iron roll door; water spray; CNS14803.

一、前言

近年來隨著社會經濟的快速發展，城市面貌有了相當大的改變。高層建築的興建如雨後春筍，建築層數及面積都較以往增長許多，特別是大型商場、展覽綜合樓等。由於建築面積過大，若採用防火牆作為防火分隔，較不利於經營和管理，因此廣泛採用防火捲門代替防火牆。使用防火捲門代替防火牆進行防火分隔，既可解決防火分區的要求，又不影響其使用功能，因此，防火捲門已成為建築設計中不可或缺的重要消防設施之一。

防火捲門大多以鋼製為主。就材料特性而言，僅具有遮焰效果，而不具有阻熱的功用。在火場中，防火捲門雖然可以阻隔火勢擴展，但受到火場長時間加熱的影響，在火災中後期將會產生大量熱輻射，造成危害。因此，若需以防火捲門作為防火區劃之設備，則其阻熱性的問題必須列為首要克服的目標。

由於水具有高比熱和高蒸發潛熱的特性，所以目前採用水做為熱防護的應用相當普遍，回顧過去對於這方面的研究，Thomas 和 Sunderland[1]以及 Aihara 等人[2]均利用氣流噴霧方式在固體表面形成一層水膜，而後藉著水膜溫度升高及蒸發帶走熱量，達到冷卻物體的目的，研究結果顯示水膜在冷卻上具有相當良好的效果。另外，其他一些研究[3、4、5]，為了解整體散熱之情形，則在垂直管壁上附上一層水膜進行試驗，結果顯示整體熱傳主要來自於水膜之蒸發潛熱。

本研究團隊曾進行在水膜作用下玻璃之阻熱性及防焰性能研究[3-9]，採用水膜系統以及撒水頭系統應用於非阻熱型防火玻璃和一般玻璃上，探討兩系統在實際火災模擬中，對於熱量的吸收以及熱輻射隔絕能力的差異性。本研究團隊首先進行小尺度的耐火爐實驗[7]，研究結果指出，當水膜應用於非防火玻璃上時，在水膜厚度 1.5mm、流速 0.7m/s 條件下，其防火時效可從六分鐘提升至一百分鐘，證明水膜應用在一般玻璃取代防火玻璃是可行的。了解水膜阻熱特性後，便將實驗規模擴展成 3m×3m 的大尺度實驗[8]，最後又更進一步的使用木堆模擬實際火場，將實驗規模擴展成實際情景[99]。研究結果[99]指出，初期火災階段，水膜可以完全抑制玻璃表面溫度；當閃燃發生並產生更強烈的燃燒狀況時，玻璃表面溫度仍然可以控制在 100°C 左右。而在比較水膜系統與撒水系統的部分，我們發現水膜系統對於熱（對流熱以及熱輻射）的吸收以及阻絕上比撒水系統更有效率，而且更加地省水。

由以上研究結果顯示水膜的存在對於隔絕熱量有相當大的貢獻。水具有高潛熱特性，當其受熱達沸點時，便會蒸發成水蒸氣，並帶走大量的熱，因此在具有水膜沾濕的表面，其溫度可維持在 100°C 以下。利用水霧噴頭的優點，將其裝設於防火捲門上方，可增加防火捲門的阻熱性能。雖然捲門的水膜特性會與玻璃有所差異，但是基本的熱傳機制是相同的，因此

水膜玻璃之實驗與設計經驗可以適當的轉移至水霧防火捲門組合的應用上。

二、研究方法與實驗設備

1.1 研究方法

本研究目的為驗證鐵捲門結合水霧撒水系統是否能夠達到CNS14803「建築用防火捲門耐火試驗法」規定之阻熱性能：試體非加熱面不得有下列情形之一發生。(1)試驗中平均溫度超過攝氏 170°C。(2)試驗中在任一位置之溫度超過攝氏 210°C。實驗上並不局限於使用防火捲門，若使用普通鐵捲門也能達到阻熱效果，那更是大突破，故在此大膽選用傳統烤漆鋼板捲門(無防火時效與阻熱性)做為此實驗的試體，再依CNS14803 規定，待測試之試體應為與實物同樣製作完整之鐵捲門組件(含捲箱、五金及其他配件之組合)，且試驗面之尺度應與實物相同(寬 300×高 300cm)。在規定測試的尺寸下，門片則選用較合適的 75 型(門片寬 75mm)。

為結合撒水系統保護整個鐵捲門試體(包含捲箱與門片)，考慮到水流容易於較平整的面上有完整的覆蓋，且鐵捲門門片不甚平整，故設計捲箱與門片切齊，以利撒水系統於鐵捲門門片水流完整覆蓋的作用，鐵捲門試體實體圖如圖 1 所示。包含捲箱整個試體面尺寸為 300×300cm。

為了清楚了解整個試體表面的溫度分布，在溫度量測點熱電偶配置的部分，依CNS14803 規定於非曝火面測點數量不得少於 9 個，其中 1 個位於試體中心，4 個分別在試體四等分每一部分之中心，其餘 2 個則在兩側導軌中點，最上緣葉片中點及最下緣葉片中點各設 1 個，如圖 2 所示，c1~c9 為門片上的佈點，a1~a3 與 b1~b3 則分別為捲箱非曝火面與曝火面由右至左配置之，皆位於捲箱內部，且間距為 120cm。溫度測點a與b佈點目的在於了解加熱試驗中捲箱曝火面與非曝火面在溫度上有何關連性。



圖 1 鐵捲門試體實體圖

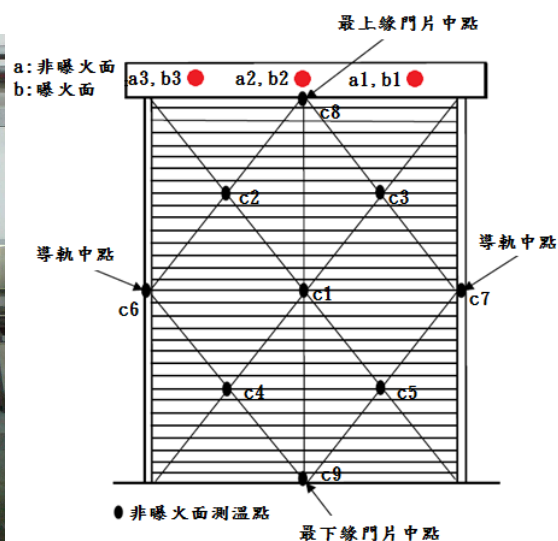
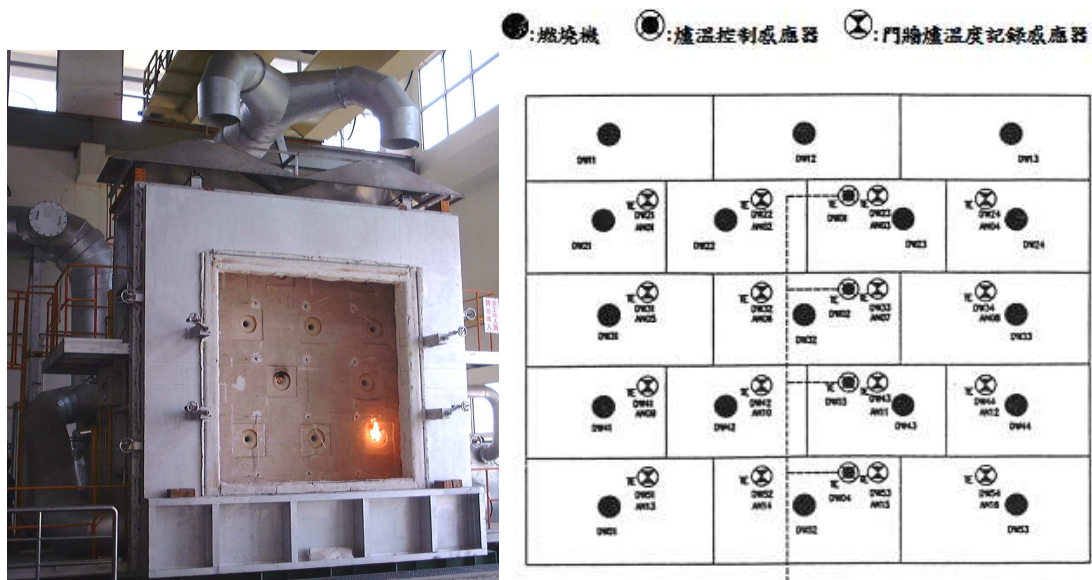


圖 2 鐵捲門試體溫度測點示意圖



(a) 實體圖

(b) 爐內熱電偶分布圖

圖 3 曝火面 4m×4m 大型門牆耐火加熱爐

1.2 燃燒系統

本研究的阻熱性能實驗使用曝火面 4m×4m 門牆用耐火加熱爐，實際設備如圖 3 (a)所示。主要針對一般防火門（包含鐵捲門、木門和鋼製門等）、牆或防火玻璃等項目，依照標準升溫曲線進行耐火試驗。加熱爐參考尺寸：爐內為 430W × 450H × 100L (cm)，爐外為 500W × 520H × 140L (cm)；試體加熱面積為 400W × 400H (cm)，加熱能力可達 4 小時。

圖 3(b)為整體門牆爐燃燒器與熱電偶分佈圖。爐內燃燒器為平火焰燃燒器(flat flame burner)，共有十七支由上而下分成五排設置，使用燃料為液化石油瓦斯(LPG)。爐內包含十六組熱電偶，由上至下分成五排設置，可同時由遠端電腦監控並記錄溫度變化情形。另外四組爐溫控制感應器，用來提供現場溫度控制以達到操作者所要求之溫度模式。整體門牆爐之升溫模式有三種，分別為CNS標準、ISO標準以及自訂模式標準。

1.3 水系統

本研究覆蓋捲門門片的水系統係由抽水機(pump)、水霧噴頭以及管路所構成。水霧噴頭方面採用具實心錐狀噴霧(full cone spray)型態的噴嘴，如圖 4 所示。圖 4 為型號 TF 噴嘴，其噴霧錐角在壓力 1kgf/cm² 以上即固定，有 60°、90°、120°...等多種選擇。

搭配噴嘴的抽水機總流率最大可達 2800cm³/s 當液體工作溫度介於 0~40°C 時，液體操作壓力則可以到達 1MPa；若是液體工作溫度介於 41~90°C，則操作壓力只能到達 0.6MPa。管徑為 38.1mm，出水管(discharge pipe)管徑為 31.75mm；同時在旁邊同時裝一旁通管回水管，主要將多餘未使用的水再排回水槽。



圖 4 水霧噴頭(TF)

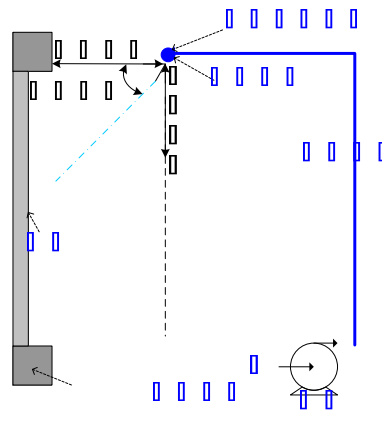


圖 5 水霧結合鐵捲門示意圖

三、冷流場實驗分析

在本研究中，使用實心錐狀水霧噴頭，由於鐵捲門試體之捲箱與門片並未完全切齊，門片相對捲箱向內凹約 3cm，為了避免因為水霧在噴撒時水無法順著門片順流而下，而是直接從捲箱下緣往下滴，故選用型號TF12，噴霧錐角(spray angle)為 120°，期望在水霧噴撒時捲箱與門片都能受到水霧保護。依不同操作條件下(壓力、噴射俯角、離試體水平距離以及離試體頂端垂直距離...等)進行冷流場測試，觀察水於鐵捲門試體上流動的情形，目的在於找出水能夠覆蓋住整個鐵捲門試體之最低流量與操作條件。

整體實驗設備如圖 5 所示，主要由鐵捲門試體、供水系統及推高機所構成。鐵捲門試體(包含捲箱與門片)尺寸為 300cm×300cm；推高機則用來支撐撒水管路，以及方便調整噴頭與捲箱水平與垂直距離。

圖 6 主要探討水霧噴頭之體積流率隨供水壓力變化之情形。由圖中可以發現，隨著壓力由 1 kgf/cm² 增加至 3 kgf/cm²，流量也從 9.2 L/min 增加至 15.7 L/min，但是流量本身與壓力並非呈線性關係。由於在試驗中使用噴霧錐角 120°之噴頭，若將噴射俯角增加至 30°，則會有部分水霧向下直噴地面，會造成不必要的浪費，故本研究往後實驗以噴射俯角 0°與 15°做為操作條件，來探討水霧於鐵捲門試體上覆蓋完整與否的關聯性，進而決定後續實驗參數。

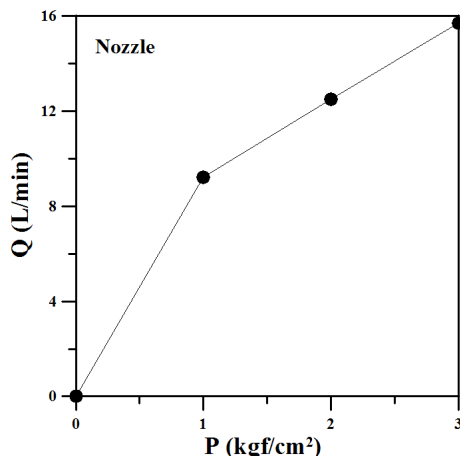
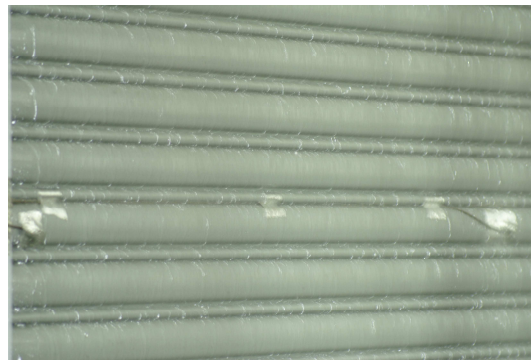


圖 6 水霧噴頭之流率隨操作壓力變化圖

在了解噴嘴基本特性數據之後，接著開始進行水霧噴頭結合鐵捲門冷流場實驗，噴頭彼此之間的距離必須有一最佳間距，距離太遠會形成部分捲門門片無水覆蓋，距離太近則可能在交界處行成柱狀液條，造成整體水覆蓋不均勻的情形發生。因此吾人選擇噴頭間距 50cm 做為實驗條件，使用了六個噴頭進行實驗，其噴射俯角依照上述實驗條件來調整。而位置則大概調整至距離捲箱水平距離 40cm、高度則與捲箱下緣同高，藉由改變不同供水壓力下，進行初步測試觀察水覆蓋於鐵捲門的完整性。

水霧噴頭實際噴射情形如圖 7 所示。圖(a)為噴頭實際噴射側視圖，從圖上可以發現水霧噴向捲門之模式可分為兩種：其一為直噴捲箱，這部分水會順著捲箱下緣滴落，並不會流經門片，因此對門片水覆蓋沒有幫助；其二為直噴門片的部分，而這部分的水就會順著門片往下流，一開始吾人以為會因為門片的不平整導致水流亂竄，然而本次試驗證實了門片水覆蓋還算均勻，經由改變不同操作壓力測試，發現在操作壓力 2kgf/cm^2 以上，水的流量足夠於捲箱與門片上形成完整之水流覆蓋，如圖 7 (b)所示。

接下來藉由改變不同噴射俯角、噴頭離試體水平距離與離試體頂垂直距離，也就是調整水霧噴射於捲箱與門片的流量比例，在捲箱表面皆有水保護的前提，儘量讓水能夠順著門片流下，使得水能得到最大利用。經由一連串的位置調整，吾人於噴射俯角 0° 與 15° 皆找出噴頭最適位置，分別為(1)噴射俯角 0° ：離試體水平距離 40cm、離試體頂垂直距離 40cm；(2)噴射俯角 15° ：離試體水平距離 40cm、離試體頂垂直距離 30cm。



(a)噴頭實際噴射側視圖

(b)門片水覆蓋情形

圖 7 供水壓力 2kgf/cm^2 噴頭水平(俯角 0°)噴射圖

四、鐵捲門結合水霧撒水系統阻熱性能實驗

本實驗中門牆爐加熱時間設定為兩小時，撒水系統相關參數設定則依上節冷流場實驗測試結果，吾人選用噴射俯角 0° 、離試體水平距離 40cm、離試體頂垂直距離 40cm 這組參數做為撒水系統之配置；而供水壓力方面，考慮到在加熱期間爐內溫度一直升高，水量如果不足，則覆蓋於試體門片上的水可能會在下游處產生乾涸的現象，故將水能夠覆蓋住整個鐵捲門試

體之最低供水壓力 2kgf/cm^2 提高至 2.5kgf/cm^2 ，整體流量由 75 L/min 提高至 84.6 L/min ；門牆爐點火同時進行撒水動作直到實驗結束。



(a) 實驗初期照相圖

(b) 實驗後期照相圖

圖 8 非曝火面阻熱性能實驗照相圖

表 1 實驗歷程記錄

時間	現象描述	時間	現象描述
0	門牆爐點火，開始撒水。	35:35	門片上方中間偏右捲片內凹。
0:21	開始出現水蒸氣。	40:00	撒水壓力增加至 3kgf/cm^2 。
2:44	水蒸氣明顯開始增加。	46:52	熱電偶 b2 失效。
8:34	大量水氣於門片形成渦旋。	48:55	門片中上偏左捲片開始內凹。
10:01	捲箱上方中間偏右內凹陷。	1:16:50	捲箱上方中間偏左凹陷。
13:48	捲箱凹陷更明顯。	2:00:00	實驗結束。
27:38	門片左上邊界出現局部變色		

實驗過程照相如圖 8 所示，實驗歷程記錄如表 1 所示。圖 8 (a)~(b) 為實驗初期、後期之情形。配合實驗歷程記錄可以發現，隨著加熱時間增加而爐溫越來越高，在 21 秒時門片開始有水蒸氣的出現，2 分 44 秒水蒸氣開始明顯增加，8 分 34 秒大量水氣充斥鐵捲門周遭，直到實驗結束，整個現場煙霧瀰漫。另外，在實驗進行到約 30 分鐘，發現部分門片溫度已經超過 100°C ，而且還在繼續上升，加上水從門片流下的量越來越少，吾人以為在供水壓力 2.5 kgf/cm^2 下的水量在兩小時的實驗期間內可能不足，故決定在實驗進行至 40 分鐘時將供水壓力提高至 3 kgf/cm^2 ，總流量則增加至 94.2 L/min 。直到實驗結束，試體底層一直都有多餘的水排出，表示水量是足夠的。

圖 9 則是實驗結束後試體非曝火面與曝火面的情形。從圖(a)與圖(c)來看，試體門片與實驗前比較，並無太大改變，顯示撒水系統於鐵捲門阻熱效果相當不錯。從圖(b)觀察，捲箱上

緣與門片捲軸接合處有部分內凹的情形，皆為高溫導致變形。另外，從圖(c)與圖(d)可看到曝火面門片上有水垢的產生，顯示有部分水可能透過這些凹洞噴進捲箱內，甚至流入爐內，而造成非曝火面上部分區域水流量減少；另一方面，試體變形也多少改變了水流本來的路徑，這些種種原因會使得水膜的完整性遭到破壞，導致門片部分區域溫度有偏高的現象。圖(c)與圖(d)為曝火面試體於實驗後的情形，捲箱為配合門片收合的關係，有一定的厚度。不像門片薄薄一層，只要有水流經其非曝火面即可迅速將熱量帶走。雖然並未於門片曝火面佈設測溫點，但從圖(c)觀察到門片還是相當地完整，故吾人推測門片曝火面於實驗加熱期間溫度並不會太高；而捲箱曝火面端如圖(d)所示，變形量蠻明顯的，顯示本次實驗撤水系統的配置方式，對於捲箱曝火面端並無保護作用。



(a) 非曝火面試體全景



(b) 非曝火面試體上緣



(c) 曝火面試體全景



(d) 曝火面試體上緣

圖 9 實驗結束後實際情形

溫度量測結果摘錄如 圖 10~圖 14。 圖 10 為本次實驗門牆爐內的平均溫度變化與CNS14803 規定之標準升溫曲線比較，其中C+、C-則分別代表規定中可容許誤差範圍，從圖上可以了解在這次實驗中，爐內溫度與標準升溫曲線比較有偏高的現象，不過大體上升溫的趨勢差不多。

圖 11 為鐵捲門捲箱非曝火面溫度變化圖，圖上虛線表示在實驗中將供水壓力從 2.5 kgf/cm^2 增加至 3 kgf/cm^2 的時間點。基本上，捲箱是屬於水霧直噴的區域，在實驗期間幾乎

都可以將溫度壓制在 100°C 以下，而 a1 在實驗後期不合理的升溫，是因為熱電偶鬆脫(熱電偶利用螺絲固定於捲箱內側)，所以量測出來的溫度其實是捲箱內部的溫度。圖 12 為鐵捲門捲箱曝火面溫度變化圖。先前提到在 10 分鐘即觀察到非曝火面之捲箱上緣有內凹的現象，導致部分水霧會噴入捲箱內；而此處熱電偶皆安裝於捲箱內部。溫度測點與爐內中間隔了一層鋼板防護，加上水霧於捲箱內汽化之熱損，所以量到的溫度相較於爐溫偏低，在 60 分後爐內已達 1000°C，此處溫度卻只達 800°C 左右，顯示水汽對捲箱內溫度的影響相當大，不過升溫的趨勢大致符合爐內升溫曲線；圖上也顯示了溫度有大幅度跳動的現象，最低溫大約為 100°C 左右，可能是因為噴入捲箱內的水滴碰到了熱電偶，導致熱電偶溫度瞬間降低至水的沸點附近。其中 b2 在 46 分即失效。

圖 13 為鐵捲門試體門片平均溫度變化圖，雖然從圖上觀察整體門片的平均溫度會上下跳動不是很穩定，顯示門片上水覆蓋完整性不足，不過並未超過規定的 170°C，在阻熱性能方面表現不錯。接下來分別針對門片上各溫度測點做細部分析，圖 14 為鐵捲門試體門片上各測點溫度變化圖，同時參考圖 2 門片溫度測點配置，c3、c5、c7 為門片右側佈點；依序由上到下 c8、c1、c9 為門片中間佈點；而 c2、c4、c6 為門片左側佈點。圖上發現門片右側溫度皆高於左側，且溫度變動的幅度也較大，顯示了右側水膜相當不完整。而中間測點部分，c1 溫度最高變動最大；c8 次之，因 c8 位於門片最上方，就算門片與捲軸接合處向內凹陷，水膜不完整，但畢竟為水霧直噴處，溫度變化自然不像中間高度之測點 c1 那麼劇烈；c9 位於門片最下方，為水流匯集處，溫度穩定地維持在約 95°C 左右。實驗後觀察了試體，發現捲箱內凹與最上端門片凹陷變形量最大的位置在試體中間偏右的位置，而門片溫度最高溫處正好出現在其下方之測點 c1 與 c3，溫度超過 CNS14803 規定單點最高溫 210°C；左側的部分，由於試體較無變形的問題，水膜趨於完整，所以 c2、c4、c6 溫度可以相當穩定地維持在 100°C 上下。

在本次鐵捲門結合撒水系統阻熱性能實驗中，證明了在適當撒水距離與角度下，只要能使水能夠完整覆蓋整個鐵捲門試體，且水量足夠，則鐵捲門結合水霧撒水是有阻熱性能的。另外在水量足夠的前提下，提高供水壓力，門片溫度並不會因流量增加呈等比例的降低，整體溫度還是接近於水的沸點 100°C。從實驗結果顯示試體的變形與否對水膜的完整性有很大的影響，雖然在實驗期間因為煙霧瀰漫，無法觀察水在門片上流動的情形，但是水膜覆蓋完整與否會直接反應於門片的溫度上，也就是說只要門片有水層覆蓋存在，就具有阻熱性。

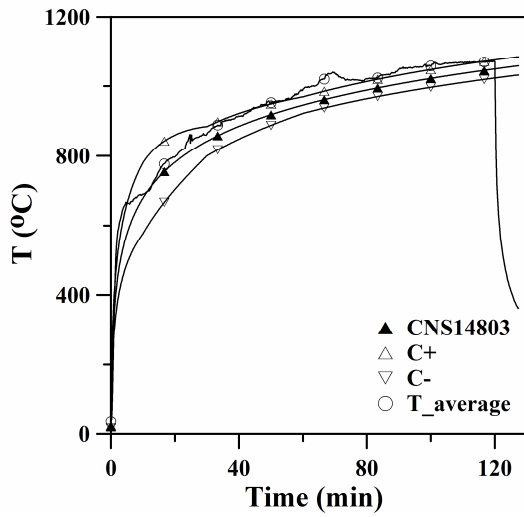


圖 10 門牆爐內溫度變化圖

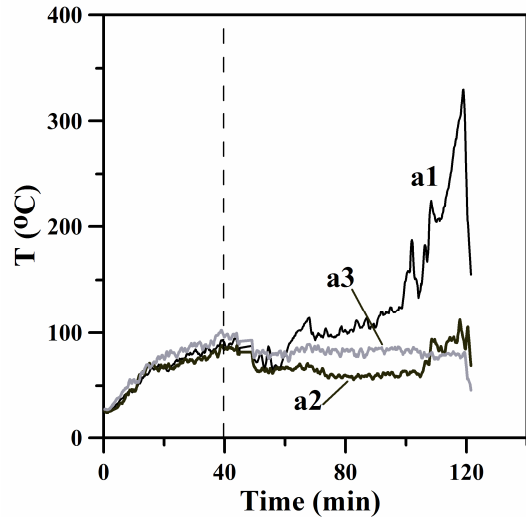


圖 11 捲箱非曝火面溫度變化圖

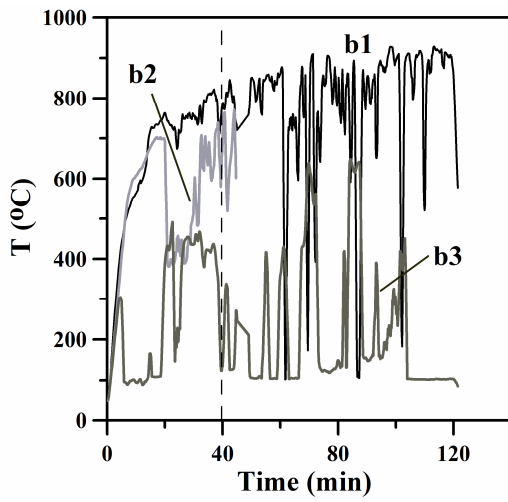


圖 12 捲箱曝火面溫度變化圖

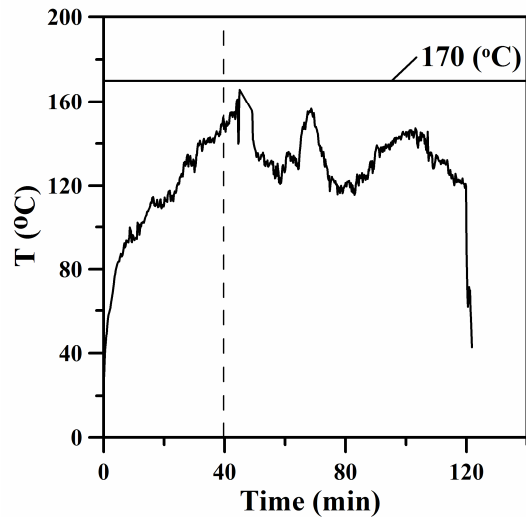


圖 13 門片平均溫度變化圖

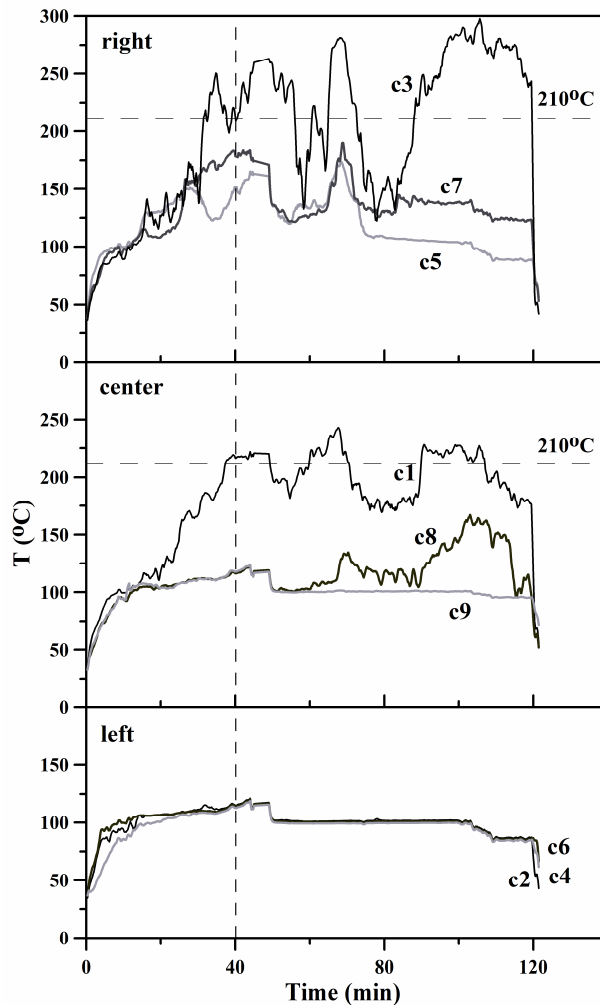


圖 14 門片溫度變化圖

五、結論

於冷流場實驗與阻熱性能實驗上，吾人對於撒水系統結合捲門之噴霧特性以及阻熱性能上有基本瞭解，整體結論如下：

1. 使用噴射模式為實心錐狀之水霧噴頭，於門片水膜覆蓋完整性主要與泵的供水壓力有關。
2. 在適當的噴頭位置，噴射俯角主要影響了捲門試體表面之噴濺程度以及水霧是否皆完全噴射在門片上，亦即將水做最大利用，避免無謂的浪費。
3. 由阻熱性能實驗，證明了如果門片有穩定水層覆蓋，撒水系統結合鐵捲門是可以符合 CNS14803 規範。
4. 在阻熱性能實驗中，發現捲門試體些微的變形量對於水膜的完整性影響很大，而捲門試體上主要變形皆於元件間接合處發現，若能夠強化之，則鐵捲門結合水霧撒水系統達到阻熱性能是可以更完善的。

六、參考文獻

1. Thomas, W.C. and Sunderland, J.E., "Heat Transfer Between a Plane Surface and Air Containing Suspended Water Droplet," *Ind. Eng. Chem. Fundam.* Vol. 9, pp. 369-374, 1970.
2. Aihara, T., Taga, M. and Haraguchi, T., "Heat Transfer from a Uniform Heat Flux Wedge in Air-Water Mist Flows," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 22, pp. 51-60, 1979.
3. Chang, C.J., Lin, T.F. and Yan, W.M., "Natural Convection Flows in a Vertical Open Tube Resulting from Combined Buoyancy Effects of Thermal and Mass Diffusion," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, pp. 1543-1552, 1986.
4. Yan, W.M., "Liquid Film Vaporization on Natural Convection Heat and Mass Transfer in a Vertical Tube," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 70, pp. 452-462.
5. Yan, W.M., "Binary Diffusion and Heat Transfer in Mixed Convection Pipe Flows with Film Evaporation," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 2115-2123, 1993.
6. 吳展維, "建築物開口部之防火防煙性能研究," 國立成功大學機械工程系博士論文, 2007。
7. Wu, C.W., Lin, T.H., Lei, M.Y., Chung, T.H., Huang, C.C., and Chiang, W.T., "Fire Test on a Non-Heat-Resistant Fireproof Glass with Down-Flowing Water Film," *Fire Safety Science - Proceedings of the 8th International Symposium*, p.327, 2005.
8. Wu, C.W., Lin, T.H., Lei, M.Y., Chung, T.H., Huang, C.H., and Chiang, W.T., "Fire Resistance Tests of a Glass Pane with Down-Flowing Water Film," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 31, No. 5, pp. 737-744, 2008.
9. Lin, T.H., and Wu, C.W., "Full-Scale Evaluations on Heat Resistance of Glass Panes Incorporated with Water Film or Sprinkler in a Room Fire," *Building and Environment*, vol. 42, pp. 3277-3284, 2007.