

太陽能集熱板碳黑吸收膜之最佳化噴塗製程 參數研究

劉名育¹ 謝宗旻¹ 張克勤^{2*} 劉怡眉³

摘 要

太陽能熱水系統為迄今太陽熱能之最普及應用，文獻指出集熱板集熱效率影響最具關鍵的有吸收膜厚度的控制、表面分布均勻性，以及材料性質和其顆粒大小。本研究利用雙流體自動噴槍以及碳黑材料吸收膜噴覆至試片，選定四個控制因子包括噴槍氣液壓組合、噴塗高度、碳黑材料濃度與噴槍速率，採用田口方法得到此製程的最佳化參數組合。以 $L_9(3^4)$ 實驗直交表減少實驗的次數得到足夠的統計資料，同時量測試片的吸收率、吸收率及放射率比值與膜厚等性能資訊，進行變異分析以探討各因子的影響力。經變異分析後，根據需求選定最佳化控制因子及水準組合分別為氣液壓組合2.0/0.6 kgf/cm²、噴塗高度28 cm、漆與香蕉水比例1：2與噴槍速率29.57 cm/sec。經確認實驗後與原始設定製程比較，吸收率及放射率比值從1.384減少至1.379，S/N比從24.76 dB提升至26.02 dB；吸收率從0.910提升至0.914，S/N比從27.76 dB提升至28.89 dB。結果顯示雖然品質特性無明顯變化，但均勻度有些微提升。最後由日曬實驗量測試片之最終平衡溫度，最佳化製程達到了97.3°C相對於原始製程之95.6°C，驗證了田口式直交表實驗最佳控制因子及水準組合的結果。

關鍵詞：噴塗製程、碳黑吸收膜、太陽熱能、田口方法

1. 緒 論

1.1 選擇性吸收膜簡介

從十八世紀的工業革命到西元2015年的現今，人類對能源使用的需求及依賴大幅提升，從煤礦、天然氣、石油甚至到核能，儼然已成為人類社會中所有產業活動與經濟發展的命脈。在科技快速的發展之下，帶給人類更加便利、舒適的生活之同時，也已經面臨了自然資源逐漸匱乏、溫室效應造成氣候變遷等問題。

因此在解決這些問題及能源永續利用的趨勢之下，提升水力、風力、太陽能、生質能等再生能源的利用成為了世界多國皆重視的發展項目。

臺灣地狹人稠且沒有豐富的自然資源，由經濟部能源局對民國103年各項能源的統計資料(表1)顯示，自產能源僅佔全部總量的1.96%，極度仰賴國外進口的化石能源與核能。不過臺灣擁有位於亞熱帶地區(北緯22到25度)的地理條件，全年日照量豐富，是擁有發展太陽能的良好條件。太陽能應用的發展可分為太陽能光

¹ 成功大學航空太空工程學系 研究生

² 成功大學航空太空工程學系 教授

³ 成功大學能源研究中心 助理研究員

*通訊作者, 電話: 06-2757575#63679, E-mail: kcchang@mail.ncku.edu.tw

收到日期: 2015年09月30日

修正日期: 2015年12月28日

接受日期: 2016年03月29日

表1 中華民國103年臺灣地區能源總供給表(單位：千公秉油當量)

能源類別	總計		自產能源		進口能源	
	數量	分配比	數量	分配比	數量	分配比
總計	147,453.2	100.00%	2,894.0	1.96%	144,559.2	98.04%
煤炭及煤產品	43,053.1	29.20%	0	0.00%	43,053.1	29.20%
原油及石油產品	71,550.1	48.52%	9.1	0.01%	71,541.0	48.52%
天然氣	18,026.3	12.23%	337.2	0.23%	17,687.1	12.00%
生質能及廢棄物	1,826.7	1.24%	1,826.6	1.24%	0.1	0.00%
慣常水力發電	412.8	0.28%	421.8	0.28%	0	0.00%
核能發電	12,275.8	8.33%	0	0.00%	12,275.8	8.33%
太陽光電及風力發電	196.2	0.13%	196.2	0.13%	0	0.00%
太陽熱能	112.2	0.08%	112.2	0.08%	0	0.00%

資料來源：http://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/content/SubMenu.aspx?menu_id=141

電(Solar photovoltaic)及太陽熱能(Solar thermal)兩方向。其中太陽能熱水器屬於太陽熱能迄今之最成功應用項目，由集熱器、輔助加熱器、儲水槽、管路與其他配備所組成，其工作原理係由集熱器吸收來自太陽的輻射熱，將其轉換成熱能後加熱系統中的工作流體以達到集熱的目的，因此集熱器關係整個太陽能熱水系統的效率表現(張克勤等，2005)。

在集熱器的表面會塗上一層薄膜來吸收太陽輻射熱，影響集熱器的集熱效率主要有薄膜

本身的材料性質及厚度兩大因素，通常以吸收率及放射率之高低作為評量標準，且因為這種薄膜對不同的輻射波段有不同的吸收率及放射率的表現，故稱為「選擇性吸收膜」。針對太陽能熱水系統，其理想的選擇性吸收膜為對波長範圍在 $0.28\sim 3\ \mu\text{m}$ 的太陽輻射波段具有高吸收率而在其他波段($>3\ \mu\text{m}$)有較低的放射率的特性(如圖1)，以提高吸收太陽輻射熱的能力並同時減少自體輻射所損失的熱量，提高吸收膜的集熱效率使表面能達到較高的溫度。

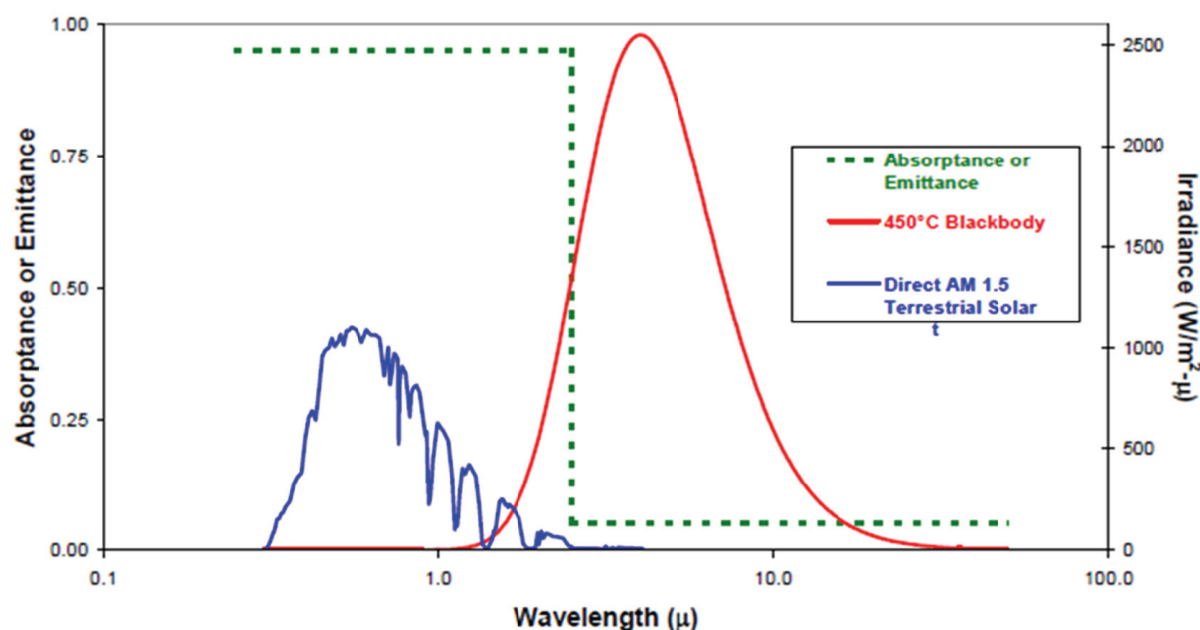


圖1 理想選擇性吸收膜光譜分布(Duffie & Beckman, 2006)

一般製造薄膜的方式有噴塗烤漆、電鍍及真空濺鍍等方法，對於國內太陽能板的製造商，大多以噴塗製程為主，因為其方法的技術與成本的門檻最低。目前國內業界中所使用的噴塗製程主要為人工手持噴槍，以人工的方式噴塗製造集熱板，其結果常常造成產品表面的吸收膜分布不均、過厚以及各集熱板之間的品質差異性過大等問題，因此本研究擬設計一個自動化的噴塗製程以解決上述問題。

1.2 文獻回顧

太陽集熱系統的工作溫度大多在 450°C 以下，由圖1可知此溫度下的輻射波段和太陽輻射波段交集不多，Duffie & Beckman (2006)指出不同的材料會在不同波段對應到不同吸收率，因此可選擇適當的選擇性吸收膜材料來提高集熱器的集熱效率。

集熱板上的選擇性吸收膜塗料可就表面光學性質對吸收膜厚度的敏感性分為厚度敏感(Thickness Sensitive Spectrally Selective, TSSS)和厚度不敏感(Thickness Insensitive Spectrally Selective, TISS)兩種類型。Orel & Orel (1988)研究結果顯示碳黑材料的選擇性吸收膜，發現其吸收率和放射率會隨膜厚的重量面積比(Wight/Area ratio, W/A ratio)增加而提升(如圖2)，且光學性質的最大值和對應W/A ratio上升的收斂速率會因為材料不同而有所差異，顯示薄膜厚度與吸收膜的集熱效率有最直接的關係，所以

控制膜厚是選擇性吸收膜製程中的一個重要關鍵。

Gunde *et al.* (1996)利用理論計算的方式對選擇性吸收膜與光學性質之關係做評估，預測效率最大值出現在吸收膜厚度 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 的範圍之間。另外指出吸收膜效率會因為選擇性吸收膜塗料體積濃度、塗料的顆粒大小、表面上塗料的分散性與分布情況有所影響(Gunde *et al.*, 2003)。

陳詠傑(2012)以單噴嘴進行選擇性吸收膜噴塗製程最佳化研究，測試GSP-1 Black¹、碳黑材料與C-SiO₂等三種國內業界常使用的吸收膜材料，對不同厚度的吸收膜進行日曬實驗，結果顯示碳黑材料的吸收膜有最高的平衡溫度，且發生於厚度約在 $3 \pm 1\ \mu\text{m}$ 的範圍之間(與Gunde等人的預測結果相近)，其最佳化控制因子及水準如表2所示。另外研究中亦提到烘烤時間、烘烤溫度與總壓等因子對膜厚影響力最低，因此不列入本研究所考慮的控制因子。謝宗旻(2014)則在陣列噴塗製程的研究中以多顆微霧型噴嘴陣列排放方式進行噴塗，分析吸收膜厚度之分布均勻性與集熱效能的關係，其最佳化控制因子及水準如表3所示，結果顯示均勻性的提升有助於提高吸收膜的集熱效率，但此製程有因各噴嘴特性之差異造成噴霧扇形重疊處膜厚不均、多噴嘴拆裝清洗不便且易堵塞等缺點，因此難以應用於業界。李晏綸(2014)對同型號的噴嘴進行測試，發現碳黑顆粒之粒徑

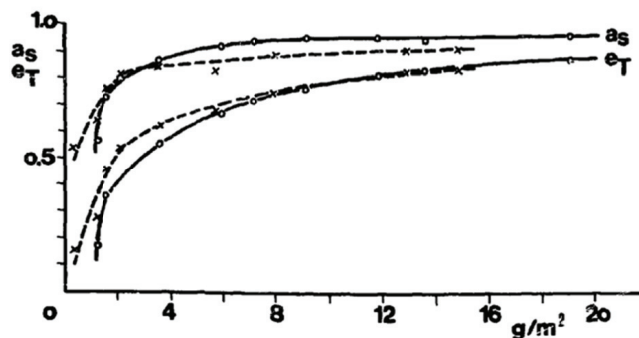


圖2 碳黑材料重量面積比與吸收率(a_s)及放射率(e_T)之關係(Orel & Orel, 1988)

¹ Okitsumo Co., http://www.okitsumo.co.jp/index_j.html

表2 單噴嘴噴塗製程最佳控制因子水準(陳詠傑, 2012)

控制因子	水準
溶劑比例(%)	50%
噴塗高度(cm)	7.0
輸送速度(cm/s)	6.7
氣體壓力(kgf/cm ²)	3.5
液體壓力(kg/cm ²)	1.0
烘烤時間(hr)	2.0
烘烤溫度(°C)	160
總壓(kgf/cm ²)	6.0

*以Okisumo公司所產日本漆為測試樣本

表3 多噴嘴陣列式噴塗製程最佳控制因子水準(謝宗旻, 2014)

控制因子	水準
噴嘴間距(cm)	13.5
噴塗高度(cm)	8
輸送帶速度(cm/s)	2.983
氣液壓(kgf/cm ²)	3.0/1.5

*以臺灣自產漆(碳黑材料為主)為測試樣本

大小、不同材料濃度對集熱性能與表面的分布均勻性有影響，如圖3、4所示，集熱效能隨粒徑從6.74 μm 增至14.35 μm 而增加，材料濃度由33%增加至66.7%則會造成集熱效率下降。由不同氣壓下，液壓與粒徑關係圖(圖5)可知，謝宗旻研究所使用之氣液壓組合對應到的噴霧粒徑約為15 μm 左右。

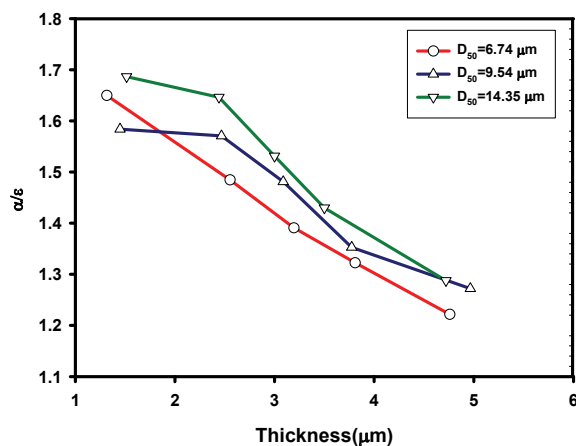


圖3 不同噴霧粒徑下集熱效能隨膜厚變化之關係圖(李晏綸, 2014)

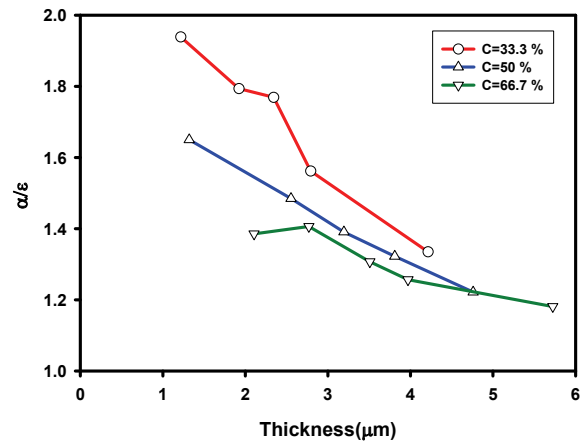


圖4 不同材料濃度下集熱效能隨膜厚變化之關係圖(李晏綸, 2014)

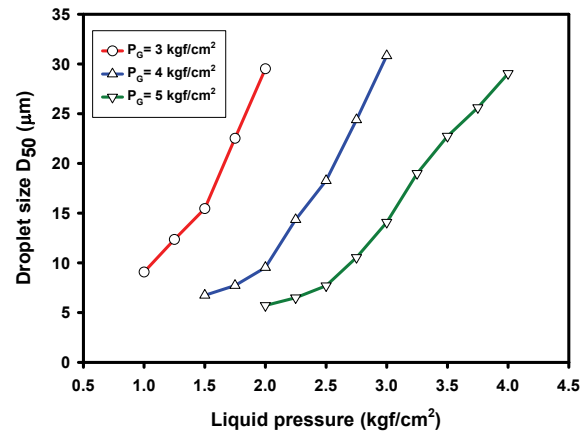


圖5 不同氣體壓力下噴霧粒徑隨液體壓力變化之關係圖(李晏綸, 2014)

1.3 研究動機與目的

過去文獻內容與結果均顯示，影響集熱板的集熱性能雖然和使用之吸收膜材質有關，但亦受下列因素的影響，包括吸收膜厚度的控制、表面上分布的均勻性，吸收膜材料的顆粒大小與濃度。目前國內業界中廣泛使用手動的噴塗製程，易產生噴塗不均勻且膜厚過厚的問題，無法有效提升集熱板集熱效率且品質差異大；陣列式噴塗製程則有前一小節所敘述之缺點。

本研究目的將以碳黑吸收膜製程自動化取代目前的手動噴塗製程，並改良為單顆噴嘴搭配往復式移動設備來回噴塗集熱板，控制厚度在一定的範圍內，使其光學性質有高吸收率

與吸收率及放射率比值之特性，以及較佳的分布均勻性。研究中採用雙流體自動噴槍，藉由往復式移動設備噴覆鋁試片，從中找出幾個影響膜厚及均勻度的控制因子進行田口實驗法(Taguchi Method, 李輝煌, 2011)，經由變異分析後找出最佳控制因子組合以達到製程最佳化之目的，最後進行日曬實驗測試最終平衡溫度以驗證最佳化製程的結果。

2. 研究方法

本研究探討碳黑材料在單根往復式自動噴槍噴塗系統中不同參數對於集熱效率之影響，並且找出噴塗製程之最佳化參數。實驗分成噴嘴特性測試、碳黑吸收膜材料噴塗以及日曬測試等三個部分來進行說明。

2.1 噴霧特性測試

針對實驗中所使用的雙流體噴槍進行噴霧特性測試，工作流體以水為主，量測噴霧粒徑，並調整不同的氣壓及液壓之參數，觀察其變化之關係。此實驗之設備包含空壓機、儲壓槽、空氣乾燥機、調壓閥、液體供料筒、自動噴槍以及Spraytec噴霧式雷射粒徑分析儀，示意圖如圖6所示。主要量測氣體控制壓力範圍在

1~3 kgf/cm²，液體控制壓力範圍在0.2~0.8 kgf/cm²之間，距離噴嘴孔20 cm處所對應到的粒徑大小。過程中須注意讓噴嘴持續噴一陣子，等待噴霧達到較穩定狀態時，再進行量測以減少實驗誤差。

2.2 碳黑吸收膜噴塗實驗

第二部分的實驗在了解噴槍的噴霧特性後，即進行碳黑吸收膜材料的噴塗實驗，工作流體係以碳黑粉末、二氧化矽粉末、提供固著力的亮光漆以及乙酸異戊酯(isoamyl acetate, 俗稱香蕉水)混和之溶液為主。噴塗系統由空氣壓縮機、儲壓槽、空氣乾燥機、調壓閥、液體供料筒、自動噴槍、往復式移動設備、定速輸送帶、待噴鋁試片以及烘烤箱所組成，示意圖如圖7所示。本實驗使用到的儀器有量測試片上膜厚分布的新表面粗度儀，量測光學性質的單光光譜儀和放射率量測儀，及觀測試片表面成膜情況的掃描式電子顯微鏡。

實務上若以此系統來噴塗完整尺寸之集熱板，須由輸送帶輸送集熱板，並由噴槍來回噴覆，如此則噴槍噴出漆料覆蓋範圍如圖8所示，紅色實線為由左到右之軌跡、虛線為右到左之軌跡，其中噴幅為 W (cm)、噴槍移動速率為 V_s (cm/s)、輸送帶速度為 V_c (cm/s)、噴槍移動全程

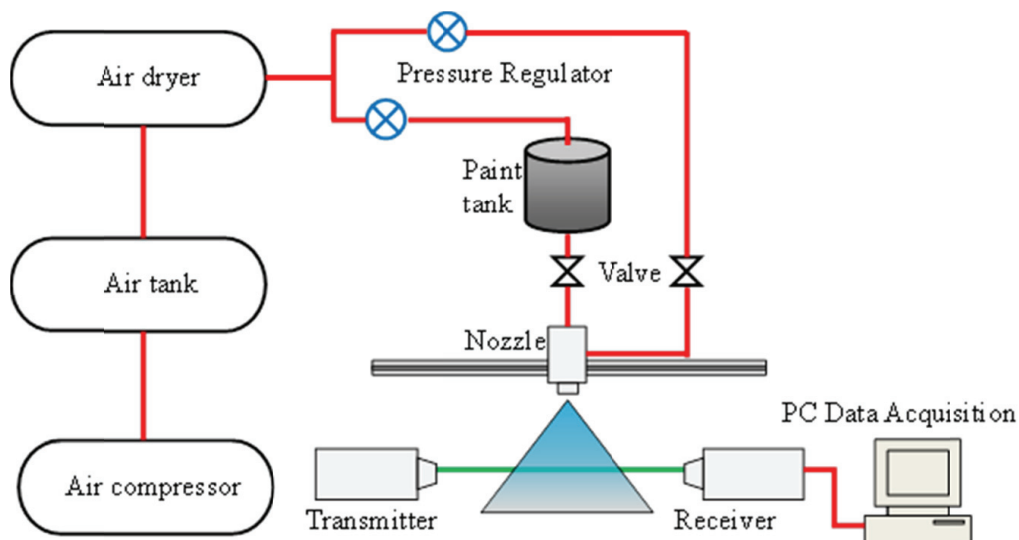


圖6 噴霧特性實驗示意圖

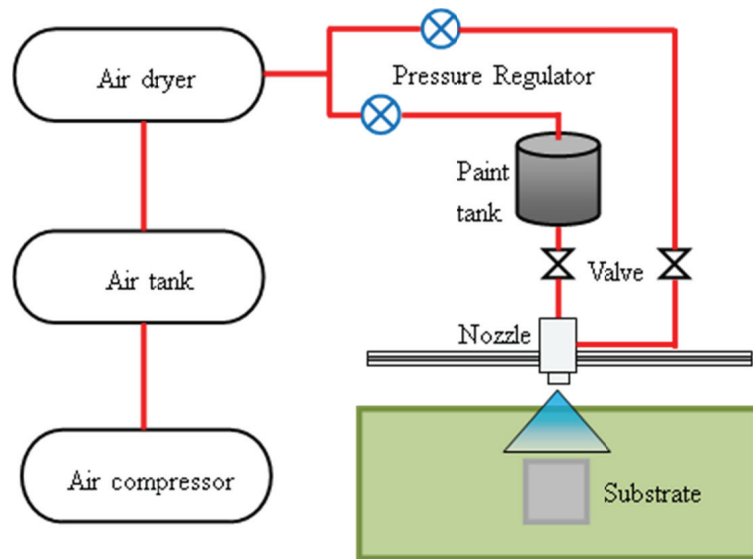


圖7 碳黑吸收膜噴塗示意圖

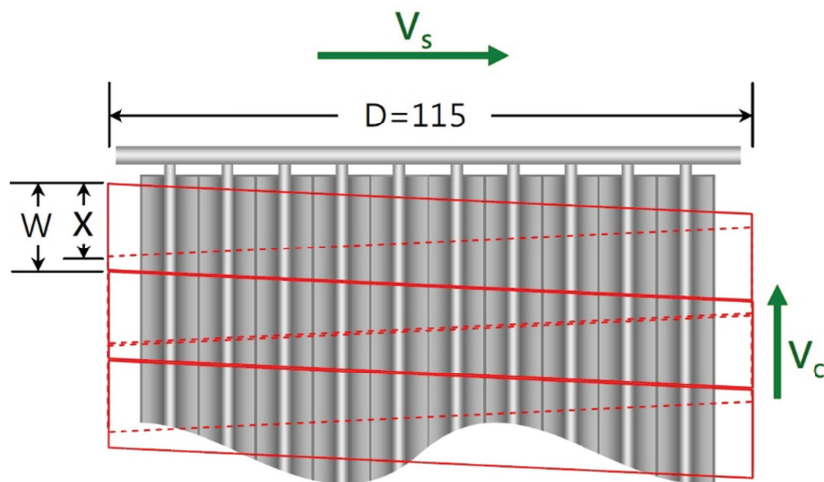


圖8 集熱板噴覆示意圖

距離為 Y (cm)。又假設噴槍往返一趟的時間為 t_s (sec)，則可得噴槍往返一趟的時間為

$$t_s = \frac{2Y}{V_s}$$

並可計算得到集熱板在噴槍往返一趟時間集熱板所前進之距離

$$X = V_c \times t_s$$

為了使漆料完整覆蓋，集熱板在噴槍往返一趟時間所前進的距離不能大於噴槍噴幅，否則會產生間隙，因此可得到 V_s 與 V_c 之關係如下

$$X \leq W \Rightarrow V_c \times t_s \leq W \Rightarrow V_c \leq W \times \frac{V_s}{2Y} \quad (1)$$

由於輸送帶速度主要影響到來回噴覆集熱板之重複覆蓋區域大小，與吸收膜厚度的控制較無直接關係，所以在目前的碳黑吸收膜材料噴塗實驗中，為求簡化，暫以試片代替集熱板，僅針對局部做碳黑吸收膜膜厚測試，並無探討重複覆蓋區域大小(W 值)之控制。因此在本研究中都將輸送帶固定不動，以減少實驗的控制因子數目。

本實驗中將噴塗製程自動化，搭配數個影響噴塗厚度之控制因子，在有限的參數操縱範

圍內測試並得到最佳參數之組合，使得集熱性能可有效提升且有更好的均勻度。本實驗採用的方式為「田口方法」(李輝煌，2011)，其方法步驟如下：

2.2.1 品質特性

本實驗利用自動噴槍進行不同控制因子的噴塗，量測吸收率及放射率，分析其不同組合及橫向位置的變異程度，從中量測的觀察值稱為「品質特性」。從圖2之結果得知，吸收率與放射率皆為膜厚的增函數，但選擇性吸收膜的厚度所對應的吸收率及放射率範圍卻有所不同，理想的厚度範圍($3 \pm 1 \mu\text{m}$)是能擁有高吸收率與較低放射率的性質，因此決定以吸收率(α)及吸收率放射率的比值(α/ϵ)作為本實驗的品質特性。

2.2.2 理想機能

品質特性的函數形式稱為「理想機能」，可分為四種基本型態：(1)理想值為一固定值的「望目」型(nominal-the-best)；(2)理想值越小越好的「望小」型(smaller-the-better)；(3)理想值越大越好的「望大」型(larger-the-better)；(4)理想值與信號因子成正比的「原點直線」型(zero-point-proportional)。本實驗品質特性的最佳目標為高吸收率且高吸收率及放射率比值，所以設定為望目型的理想機能。

2.2.3 控制因子及水準

選定4個影響噴塗膜厚及均勻度的控制因子分別為(A)噴槍的氣壓液壓組合，(B)噴塗高度，(C)吸收膜材料濃度，即原漆與香蕉水溶劑比例，(D)噴槍移動速率，及其水準範圍如表4所示。

2.2.4 實驗直交表

如果實驗欲包含4個控制因子3個水準的所有組合而採用全因子實驗法(Full-Factorial experiments)，共需做81(3^4)次實驗，考量到時

表4 噴塗製程之控制因子及其水準

因子	說明	Level 1	Level 2	Level 3
A	氣/液壓組合(kgf/cm ²)	1.5/0.4	2/0.6	2.5/0.8
B	噴塗高度(cm)	20	24	28
C	濃度(原料：香蕉水)	1:1	1:1.5	1:2
D	噴槍移動速率(cm/s)	19.52	24.54	29.57

間跟成本都是不符合經濟效益。因此我們採用田口式直交表實驗法(Taguchi's Orthogonal Arrays)，以較少的實驗次數來獲得有用的統計資訊，所以選定 $L_9(3^4)$ 直交表簡化至9組實驗如表5所示。

表5 $L_9(3^4)$ 田口式直交表

Exp.	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

2.2.5 S/N比

田口方法中以訊號雜訊比(S/N, signal-to-noise ratios, η ; 單位：分貝, decibel, dB)作為品質指標，對於不同類別的品質特性會有不同的S/N比計量方式。針對本實驗品質特性之吸收率及放射率，期望降低其變異程度，因此選用望目特性S/N比的計算公式來進行分析，公式如下

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{S^2}{\bar{y}^2} \quad (2)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (4)$$

其中 y 為品質特性量測值， S 為標準差。

2.3 日曬實驗

第三部分的日曬實驗是將樣本試片放置於日曬機台，藉由吸收太陽輻射熱提升溫度並量測其穩定溫度值。此日曬機台由全天日射計、超音波風速計、T型熱電偶以及一組訊號擷取系統所組成。

針對碳黑吸收膜噴塗實驗中各組實驗分別取兩片指標性樣本(分別為高吸收率與高吸收率及放射率比值)，裝置於實驗台車後進行戶外日曬測試，每個實驗試片分別連接兩隻T型熱電偶，並以雙層玻璃罩減少空氣對流所造成的實驗誤差，等待試片升溫達穩定後即擷取2000秒內溫度資訊紀錄其變化，觀測各組實驗可達到的最終溫度。

3. 結果與討論

在本章節中分成三個部分，首先進行噴塗實驗前先針對噴槍進行不同參數條件下的測試，依據噴霧粒徑之結果來決定氣液壓組合與噴塗高度兩控制因子的水準範圍。第二部分則

先進行初步測試取得一些樣本以確認光學性質與碳黑吸收膜厚度之間的關係，再進行田口式直交表實驗。將實驗之結果以變異分析來判斷控制因子的重要性，決定最佳控制因子其水準組合並進行確認實驗，其品質特性與S/N比結果與原始製程相比較。另外，再以SEM掃描式電子顯微鏡觀測試片表面碳黑材料分布之情形。最後將田口式直交表中9組實驗與最佳製程、原始製程實際進行日曬測試，比較各組最終平衡溫度以驗證吸收膜厚度之光學性質及其均勻性對集熱效能之影響。

3.1 氣液壓組合與噴霧粒徑之關係

噴霧粒徑測試之工作流體以水為主，在氣壓為1 kgf/cm²、1.5 kgf/cm²、2 kgf/cm²、2.5 kgf/cm²與3 kgf/cm²以及液壓為0.2 kgf/cm²、0.4 kgf/cm²、0.6 kgf/cm²與0.8 kgf/cm²的條件下，噴塗高度於20公分處量測噴霧粒徑(D_{50})。結果如圖9所示，圖中可觀察到粒徑皆會隨氣體壓力之降低、液體壓力之提升而明顯增加，如果我們固定氣體壓力為1.5 kgf/cm²，隨著液體壓力從0.2 kgf/cm²增加至0.8 kgf/cm²，噴霧粒徑會從27.35 μ m增大為47.78 μ m，這是由於液體壓力升高而增加更多的噴霧流量；若固定液體壓力為0.6 kgf/cm²時，隨著氣壓從1 kgf/cm²升高至3 kgf/cm²，噴霧粒徑從65.73 μ m減小為19.79 μ m，因為氣壓增加使得噴槍的霧化性能更明顯。

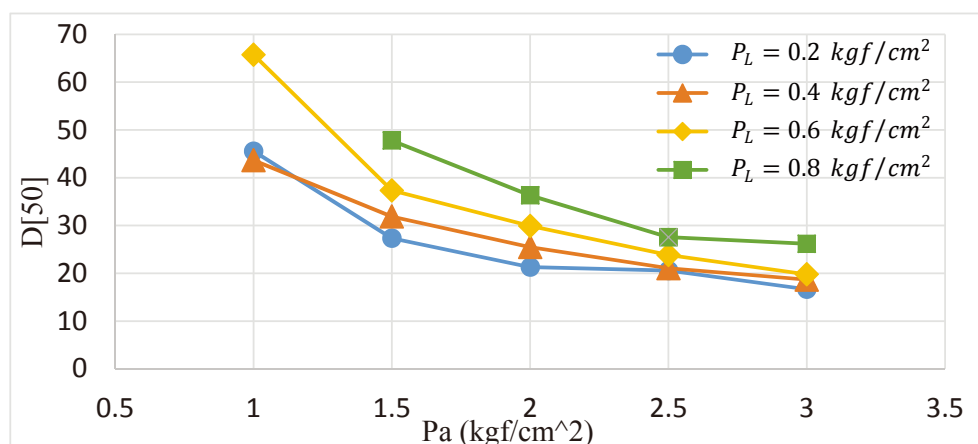


圖9 不同液體壓力下噴霧粒徑隨氣體壓力變化圖

由李晏綸(2014)的研究中顯示碳黑吸收膜之集熱性能會隨噴霧粒徑變大而增加，所以由噴霧特性測試的實驗結果，我們可以決定噴槍之氣體壓力及液體壓力分別在3 kgf/cm²以下及0.4 kgf/cm²到0.8 kgf/cm²之間，噴塗高度大於20公分的範圍外為控制因子的水準，此範圍所對應到的粒徑大小皆在20 μm以上，相較於謝宗旻(2014)研究中所對應到的粒徑有明顯增加。

3.2 碳黑吸收膜噴塗實驗

3.2.1 實驗數據及紀錄

本實驗所分析的品質特性為吸收率及吸收率放射率比值，每組實驗各有6個試片的量測

值，連同其實驗平均值、標準差及S/N比等計算值列在表6、表7中。

3.2.2 因子反應表及反應圖

控制因子的變動水準對S/N比或品質特性影響的大小稱為「因子效應」。當因子有3個水準，則該因子效應有兩個數值，如A因子由第一水準變動至第二水準S/N比的平均變動量記為 $E_A^{1 \rightarrow 2}$ ，第二水準變動至第三水準S/N比的平均變動量記為 $E_A^{2 \rightarrow 3}$ 。平均變動量是由該因子在各水準S/N比的反應值之差所得，以A因子為例， $\bar{\eta}_{A1}$ 稱為該因子在水準一時S/N比的反應值，參照品質特性吸收率之實驗平均值、標準差及S/N比表(表6)，計算如下

表6 吸收率量測值、平均值、標準差及S/N比

Exp	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆	\bar{y}	S	S/N
1	0.875	0.958	0.958	0.959	0.960	0.777	0.915	0.075	21.70
2	0.835	0.943	0.944	0.951	0.955	0.922	0.925	0.046	26.16
3	0.895	0.919	0.915	0.934	0.944	0.934	0.924	0.017	34.45
4	0.664	0.944	0.949	0.953	0.956	0.870	0.889	0.115	17.77
5	0.951	0.958	0.961	0.961	0.961	0.885	0.946	0.030	29.96
6	0.941	0.952	0.951	0.957	0.960	0.936	0.949	0.009	40.18
7	0.846	0.943	0.951	0.957	0.955	0.732	0.897	0.091	19.85
8	0.871	0.939	0.939	0.950	0.877	0.572	0.858	0.144	15.49
9	0.946	0.953	0.958	0.960	0.960	0.909	0.948	0.020	33.65
平均值							0.917		26.58

表7 吸收率放射率比值、平均值、標準差及S/N比

Exp	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆	\bar{y}	S	S/N
1	1.305	1.187	1.168	1.151	1.152	1.503	1.245	0.139	19.03
2	1.465	1.387	1.330	1.321	1.240	1.341	1.347	0.075	25.12
3	1.405	1.436	1.414	1.395	1.329	1.367	1.391	0.038	31.27
4	1.954	1.354	1.336	1.282	1.225	1.381	1.422	0.266	14.55
5	1.279	1.228	1.144	1.157	1.143	1.326	1.213	0.078	23.89
6	1.319	1.281	1.321	1.227	1.185	1.236	1.262	0.055	27.26
7	1.386	1.341	1.302	1.242	1.198	1.664	1.356	0.165	18.27
8	1.300	1.460	1.429	1.307	1.355	2.095	1.491	0.303	13.85
9	1.332	1.243	1.223	1.161	1.133	1.392	1.247	0.099	21.98
平均值							1.330		21.69

$$\begin{aligned}\bar{\eta}_{A1} &= \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3} \\ &= \frac{21.70 + 26.16 + 34.45}{3} \\ &= 27.43 \text{ (dB)} \\ \bar{\eta}_{A2} &= \frac{A_4 + A_5 + A_6}{3} \\ &= \frac{17.77 + 29.96 + 40.18}{3} \\ &= 29.30 \text{ (dB)} \\ \bar{\eta}_{A3} &= \frac{A_7 + A_8 + A_9}{3} \\ &= \frac{19.85 + 15.49 + 33.65}{3} \\ &= 23.00 \text{ (dB)}\end{aligned}$$

由上式結果可計算得到A因子的平均變動水準如下

$$\begin{aligned}E_A^{1 \rightarrow 2} &= \bar{\eta}_{A2} - \bar{\eta}_{A1} = 1.87 \text{ (dB)} \\ E_A^{2 \rightarrow 3} &= \bar{\eta}_{A3} - \bar{\eta}_{A2} = -6.30 \text{ (dB)}\end{aligned}$$

品質特性之因子效應計算方法亦按此原則進行。

從上方程序可得到各因子在各水準下的S/N比反應值，並計算各因子對S/N比的效應，依照其效應的變動範圍將因子的影響力大小排序，如表8、表9所示，稱為「因子反應表」。並且以圖10、圖11表示，稱為「因子反應圖」。同時也可得到品質特性反應值，並製成因子反應表(表10、表11)及反應圖(圖12、圖13)。

由因子反應圖可以了解每一個控制因子的變動水準對品質特性及S/N比影響的大小，可

表9 吸收率/放射率S/N比因子反應表

	A	B	C	D
Level 1	25.14	17.29	20.05	21.63
Level 2	21.90	20.95	20.55	23.55
Level 3	18.03	26.83	24.48	19.89
E1→2	-3.24	3.66	0.50	1.92
E2→3	-3.86	5.89	3.93	-3.66
Range	7.11	9.55	4.43	3.66
Rank	2	1	3	4

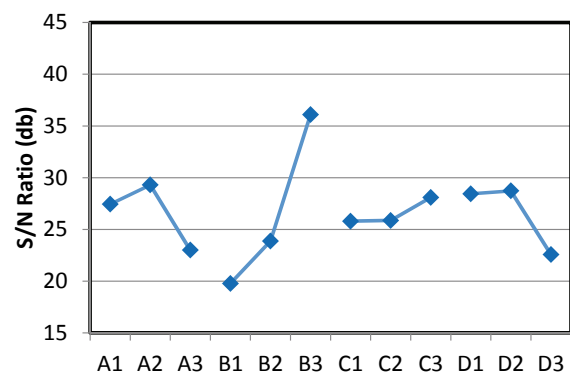


圖10 吸收率S/N比因子反應圖

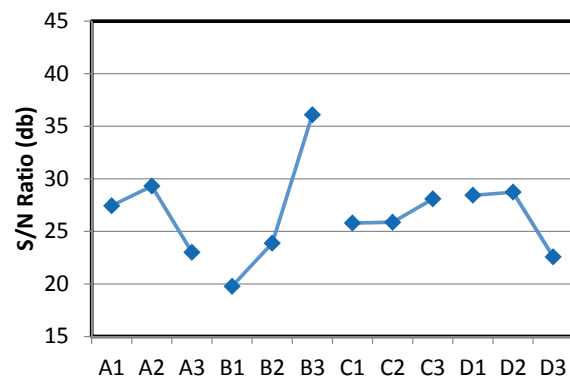


圖11 吸收率/放射率S/N比因子反應圖

表8 吸收率S/N比因子反應表

	A	B	C	D
Level 1	27.43	19.77	25.79	28.43
Level 2	29.30	23.87	25.86	28.73
Level 3	23.00	36.09	28.08	22.57
E1→2	1.87	4.10	0.07	0.29
E2→3	-6.30	12.22	2.22	-6.16
Range	6.30	16.32	2.30	6.16
Rank	2	1	4	3

表10 吸收率因子反應表

	A	B	C	D
Level 1	0.921	0.900	0.907	0.936
Level 2	0.928	0.910	0.921	0.924
Level 3	0.901	0.940	0.922	0.890
E1→2	0.007	0.009	0.013	-0.012
E2→3	-0.027	0.031	0.002	-0.034
Range	0.027	0.040	0.015	0.046
Rank	3	2	4	1

表11 吸收率/放射率因子反應表

	A	B	C	D
Level 1	1.328	1.341	1.332	1.235
Level 2	1.299	1.350	1.339	1.321
Level 3	1.365	1.300	1.320	1.435
E1→2	-0.029	0.010	0.007	0.087
E2→3	0.066	-0.050	-0.019	0.113
Range	0.066	0.050	0.019	0.200
Rank	3	2	4	1

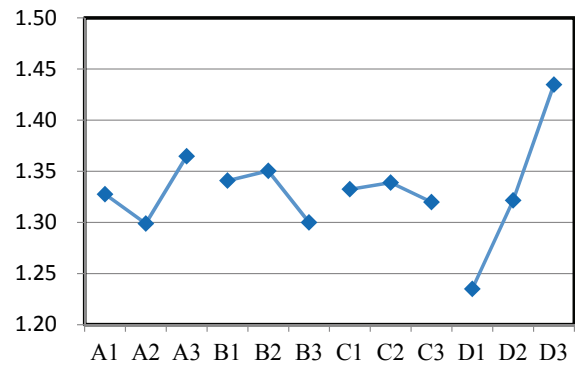


圖13 吸收率/放射率因子反應圖

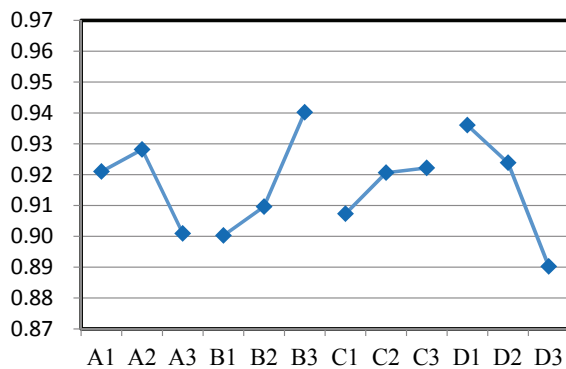


圖12 吸收率因子反應圖

推估各控制因子對品質改善的重要性。

3.2.3 光學性質與碳黑材料膜厚之關係

在進行田口式直交表實驗中，我們可量測到多組試片的吸收膜厚度所對應到的吸收率及放射率，將這些數據和陳詠傑(2012)、謝宗旻

(2014)的研究結果互相比對趨勢，其中我們實驗中所使用之鋁試片在膜厚為0時所測量到的吸收率與放射率分別為0.389、0.07，圖14為吸收膜厚度與吸收率之關係，從圖中可觀察到實驗資料與參考資料落在同一條趨勢線上，吸收率隨膜厚增加而提升，約在厚度超過3 μm 時漸減緩其上升的速率，此時吸收率約在0.895左右，然後在厚度超過5 μm 後，吸收率即維持於0.950左右；圖15為吸收膜厚度與放射率之關係圖，實驗資料同樣與參考資料落在同一條趨勢線上，放射率在膜厚超過6 μm 才逐漸收斂於0.78左右。

根據文獻可知道碳黑材料吸收膜厚度約在 $3 \pm 1 \mu\text{m}$ 之間有較好的集熱效率，對照圖14、圖15可發現在此範圍中，放射率對膜厚卻有較高的敏感度，我們同時可以用吸收率與放射率之

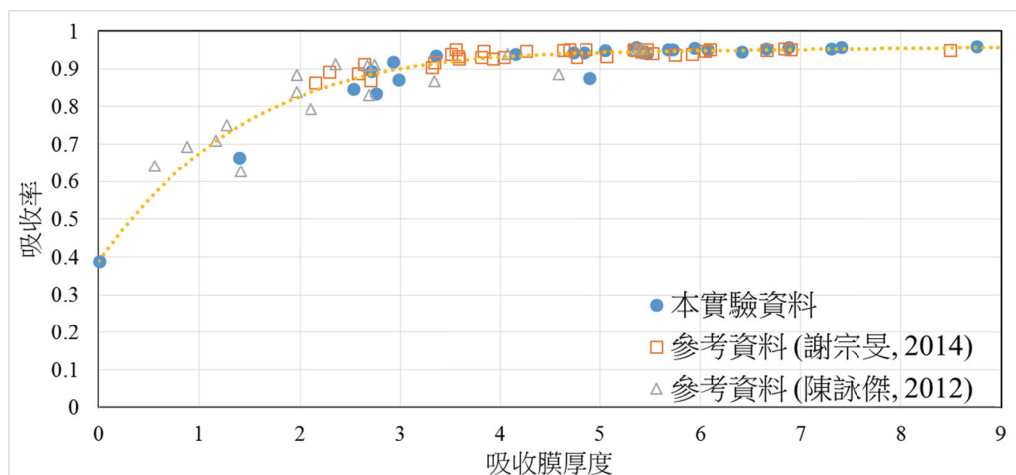


圖14 吸收膜厚度與吸收率之關係

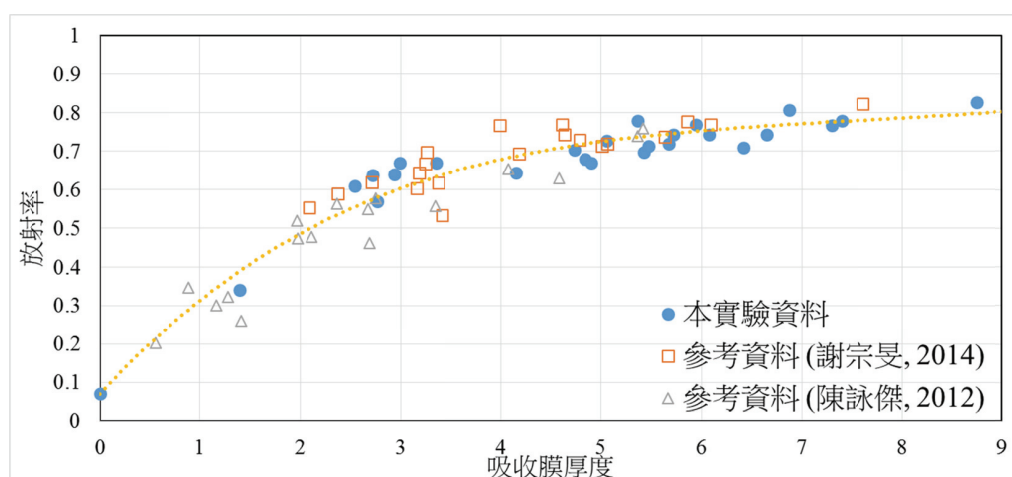


圖15 吸收膜厚度與放射率之關係

比值來表現其優勢，因此在接下來的田口式直交表實驗中，從變異分析的結果選取最佳化製程之控制因子組合時，以吸收率及放射率比值之品質特性的分析結果為主，吸收率之S/N比的分析結果為輔。

3.2.4 田口式直交表實驗之變異分析結果

由變異分析可評估實驗誤差及因子的重要性測試，重要性不足的因子效應被統合到實驗誤差中，並重新計算剩餘因子的重要性。此步驟首先建立吸收率之品質特性與S/N比的初步變異分析表，以80%信心水準(confidence)為門

檻，重要性低於門檻的因子統合到實驗誤差再重複進行變異分析，可得到品質特性的最後變異分析表(表12)，因子D視為重要控制因子；對於S/N比的初步變異分析表，將變異數最小的因子視為實驗誤差，再以新的誤差建立吸收率之S/N比最後變異分析表(表13)，以80%信心水準為門檻，因子A、因子B與因子D皆視為重要的控制因子。

同樣的步驟，對於吸收率及放射率之比值可建立品質特性的初步變異分析表與S/N比的初步變異分析表，並以80%信心水準為門檻，重要性低於門檻的因子統合到實驗誤差後，可再建立出品質特性最後變異分析表(表14)及S/

表12 吸收率品質特性的最後變異分析表

Factor	SS ¹	DOF ²	Var ³	F ⁴	Confidence	Significant?
A	Pooled					
B	Pooled					
C	Pooled					
D	0.02025	2	0.01013	1.818	83%	Yes
Error	0.28403	51	0.00557	S = 0.075		
Total	0.30428	53	*Note: At least 80% confidence level			

¹總變異向量平方和 $SS_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r y_{ij}^2 - n \times r \times \bar{y}^2$, y_{ij} : 實驗數據、i: 組別、j: 編號、P因子效應向量平方和 $SS_P = (n \times r) / L_P \sum_{k=1}^{L_P} (\bar{y}_{Pk} - \bar{y})^2$, n: 因子組合數量、r: 量測次數、誤差向量平方和 $SS_e = \sum_{i=1}^n S_i^2 \times (r-1)$

²DOF: 自由度

³變異數 $Var = SS/DOF$

⁴F測試 $F = (mS_z^2)/(S_y^2)$

表13 吸收率S/N比的最後變異分析表

Factor	SS	DOF	Var	F	Confidence	Significant?
A	62.907	2	31.454	6.151	86%	Yes
B	432.590	2	216.295	42.299	98%	Yes
C	Pooled					
D	72.382	2	36.191	7.078	88%	Yes
Error	10.227	2	5.114	S = 2.261		
Total	578.107	8	*Note: At least 80% confidence level			

表14 吸收率及放射率比值之品質特性最後變異分析表

Factor	SS	DOF	Var	F	Confidence	Significant?
A	Pooled					
B	Pooled					
C	Pooled					
D	0.36146	2	0.18073	7.405	100%	Yes
Error	1.24470	51	0.02441	S = 0.156		
Total	1.60616	53	*Note: At least 80% confidence level			

N比最後變異分析表(表15)，由80%信心水準為門檻可發現因子D對於品質特性的重要性高於門檻，因此視為具有影響力的控制因子；因子A、因子B與因子C對於S/N比皆低於門檻，故所有因子皆視為不具有影響力的控制因子。

由變異分析表可將對品質特性及S/N比皆具影響力的因子分為第一類控制因子，主要用來縮小品質的變異；而僅對品質特性有影響的因子分為第二類控制因子，用來調整品質特性至目標值，所以又稱「調整因子」；以及不影響品質特性及S/N比的第三類控制因子，通常選最經濟的設計來降低成本。表16、表17分別

為對吸收率、吸收率及放射率比值的控制因子分類表。

3.2.5 最佳化結果

以吸收率及放射率比值為主，吸收率為輔，控制因子D是能影響吸收率及放射率比值之品質特性的第二類控制因子，對照其因子反應圖(圖13)，選定第三水準以提升比值。對於吸收率，控制因子A、B、D皆歸類為會影響S/N比的第一類控制因子，對照其因子反應圖(圖10)選定控制因子A為第二水準、控制因子B為第三水準來降低實驗的變異性。最後對S/N比

表15 吸收率及放射率比值之S/N比最後變異分析表

Factor	SS	DOF	Var	F	Confidence	Significant?
A	75.922	2	37.961	0.545	35%	No
B	139.251	2	69.626	0.145	13%	No
C	35.301	2	17.650	0.254	20%	No
D	Pooled					
Error	20.124	2	10.062	S = 3.172		
Total	270.598	8	*Note: At least 80% confidence level			

表16 吸收率控制因子分類表

因子類別	是否影響 S/N?	是否影響 品質特性?	控制因子	用途
1	Yes	Yes/No	A,B,D	用來縮小變異
2	No	Yes		用來調整靈敏性至最大值
3	No	No	C	用來降低成本

表17 吸收率及放射率比值控制因子分類表

因子類別	是否影響 S/N?	是否影響 品質特性?	控制因子	用途
1	Yes	Yes/No		用來縮小變異
2	No	Yes	D	用來調整靈敏性至最大值
3	No	No	A,B,C	用來降低成本

及品質特性不具影響力的因子C，則選定第三水準以降低用漆量達到減少成本之目的。

3.2.6 確認實驗

經上述步驟所選定的最佳控制因子組合為
A2 B3 C3 D3

為求比對，本研究選定某廠商沿用之類似製程參數為原始設定製程之控制因子組合：

A (1.5/0.6) B (25 cm) C3 D (40 cm/sec)

進行確認實驗後量測吸收率與吸收率及放射率比值平均值、標準差、S/N比如表18、表19所示。由表可知對於吸收率及放射率比值平均值其品質特性從1.384些微減少至1.379、S/N比從24.76 dB提升至26.02 dB；對於吸收率平均值其品質特性從0.910些微提升至0.914、S/N

比從27.76 dB增加至28.29 dB。但相對於平均值的差異，最佳製程相較於原始製程的標準差(S)皆變小，亦即噴塗均勻性變佳。雖然由上述品質特性的結果可知，放射率的增加較吸收率略多，但由表面溫度近100°C的試片所放射出之輻射波段其波長較長(紅外線)，其對雙層玻璃罩的穿透率較太陽光(決大部分為可見光)低許多，所以輻射熱量不易散失出玻璃罩外。因此平均放射率值些微的增加(0.004)，相對於平均吸收率的上升，對試片吸收太陽能量能力的影響來得低，這個推論亦可從後續的日曬實驗中得到證實。

此結果顯示出雖然品質特性無明顯變化，但在變異度上來講是有減少的，亦即最佳化製程所得均勻性相對於原始製程是較佳的，而這

表18 吸收率之最佳化製程與原始製程比較表

	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆	\bar{y}	S	S/N
最佳	0.896	0.907	0.926	0.946	0.953	0.858	0.914	0.035	28.29
原始	0.874	0.905	0.926	0.945	0.949	0.859	0.910	0.037	27.76

表19 吸收率及放射率比值之最佳化製程與原始製程比較表

	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆	\bar{y}	S	S/N
最佳	1.411	1.440	1.397	1.305	1.283	1.442	1.379	0.069	26.02
原始	1.457	1.484	1.356	1.295	1.300	1.415	1.384	0.080	24.76

均勻性的差異對集熱效能影響的有多大？就必須由日曬實驗做進一步的確認。

3.2.7 掃描式電子顯微鏡觀測結果

從確認實驗中，最佳化製程與原始製程各取兩片膜厚較薄之試片，利用掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察表面特性。如圖16至圖19，分別為在橫向坐標-7.5 cm、-16.5 cm處，最佳製程與原始製程在倍率為500X下的照相圖。在-7.5 cm處，最佳化製程與原始製程膜厚分別為3.43 μm 與2.85 μm ，在表面可觀察到兩製程分布於表面之碳黑顆粒粒徑大小相當，但原始製程試片的表面上可觀察到有凹陷的情形發生，表示碳黑顆粒有不均勻分布的情況；在-16.5 cm處，最佳化製程與原始製程膜厚分別為2.88 μm 與2.12 μm ，表面更是可明顯看到原始製程試片的

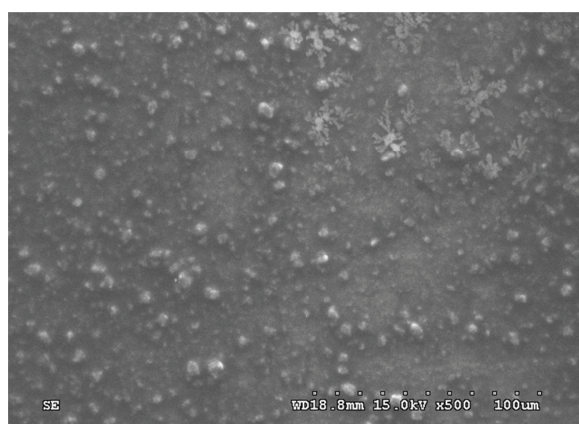


圖16 最佳化製程之SEM照相圖(X500)
(x = -7.5 cm、t = 3.43 μm)

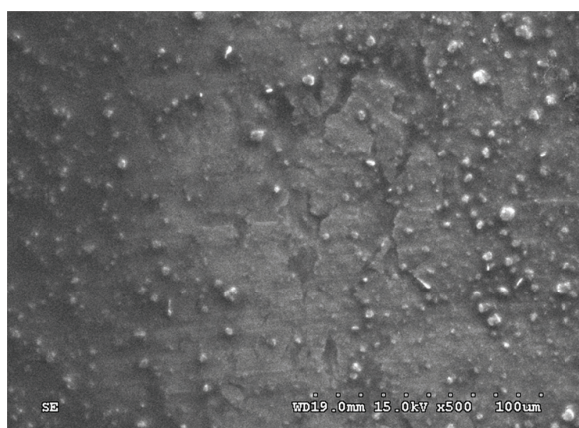


圖17 原始製程之SEM照相圖(X500)
(x = -7.5 cm、t = 2.85 μm)

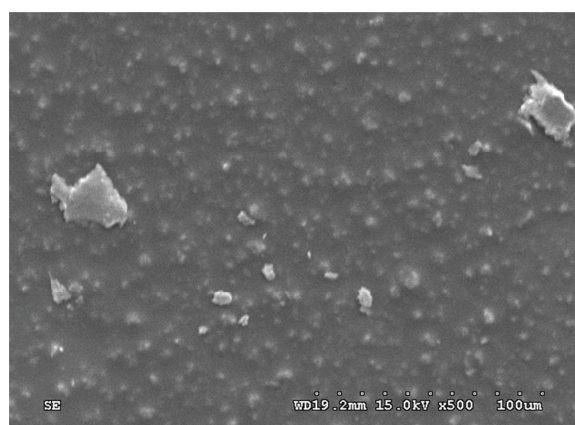


圖18 最佳化製程之SEM照相圖(X500)
(x = -16.5 cm、t = 2.88 μm)

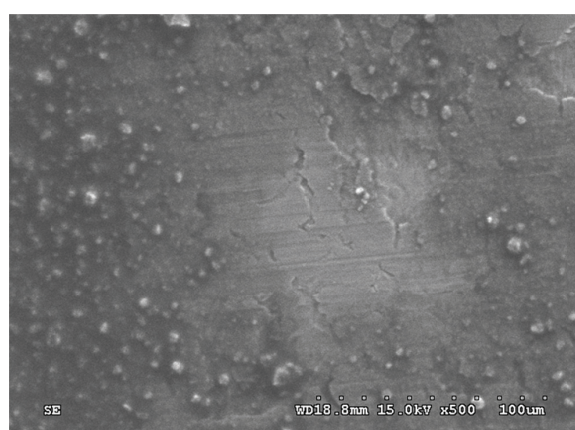


圖19 原始製程之SEM照相圖(X500)
(x = -16.5 cm、t = 2.12 μm)

底板裸露出來，最佳化製程試片在此位置除了有團聚之情形，其分布均勻度還是相當好。

3.3 日曬實驗

從田口式直交表中的9組實驗及原始製程、最佳化製程分別取兩片指標性試片，放置於日曬實驗台車進行日照測試。由於樣本數過多，所以實驗分成三組依次進行，每次實驗等待試片溫度平衡後，便紀錄其2000秒內的溫度、日射量及風速量測值，並取平均值作為日曬的結果。

首先是田口實驗第1組到第4組在日射量為892.98 W/m^2 、風速為2.86 m/s 的條件下所量測到溫度之變動曲線如圖20所示，在此組別其平衡溫度依序為89.6°C、95.8°C、101.7°C與

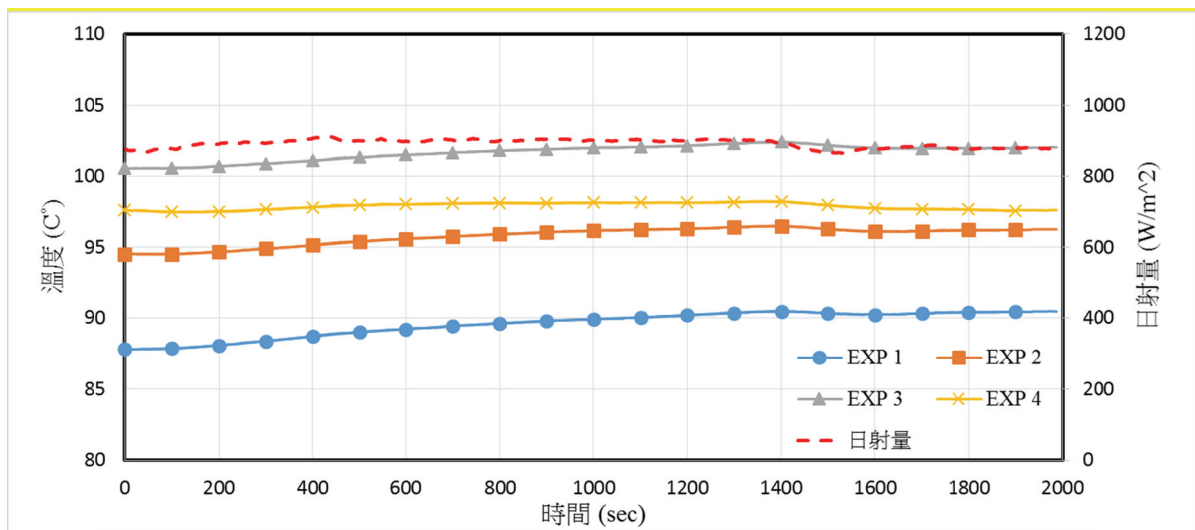


圖20 第1組到第4組田口實驗日曬實驗結果

97.9°C，第1組到第4組的平均膜厚分別為7.38 μm 、14.52 μm 、3.18 μm 與4.92 μm ，再對照表6、表7可發現第3組、第4組實驗分別有較高的S/N比和吸收率及放射率比值，因此日曬的結果顯示其集熱性能優於第1組、第2組實驗的結果；圖21是田口實驗第5組至第8組在日射量為745.53 W/m^2 、風速為2.42 m/s 的條件下所量測到溫度之變動曲線，在此組別其平衡溫度依序為89.3°C、89.6°C、93.7°C與95.0°C，第5組到第8組的平均膜厚分別為6.89 μm 、6.91 μm 、4.14 μm 與3.50 μm ，對照表6、表7可發現集熱性能也是在高吸收率及放射率比值的實驗組表現得

較好；最後是由田口實驗第9組、最佳化製程與原始製程在日射量為844.14 W/m^2 、風速為3.48 m/s 的條件下所量測到溫度之變動曲線，如圖22所示，此組別其平衡溫度依序為94.6°C、95.7°C與97.3°C，且平均膜厚分別為7.15 μm 、3.73 μm 與3.31 μm ，結果顯示最佳化製程的平衡溫度相對於原始製程高了約1.5~2°C，由表18、表19可知道最佳化製程與原始製程其品質特性的差異極小，但從SEM觀測結果，原始製程相較於最佳化製程的表面分布有較多凹陷與底板裸露之情形，因此最佳化製程有較好的均勻度，故集熱效能略高於原始製程，亦驗證了田口式直交

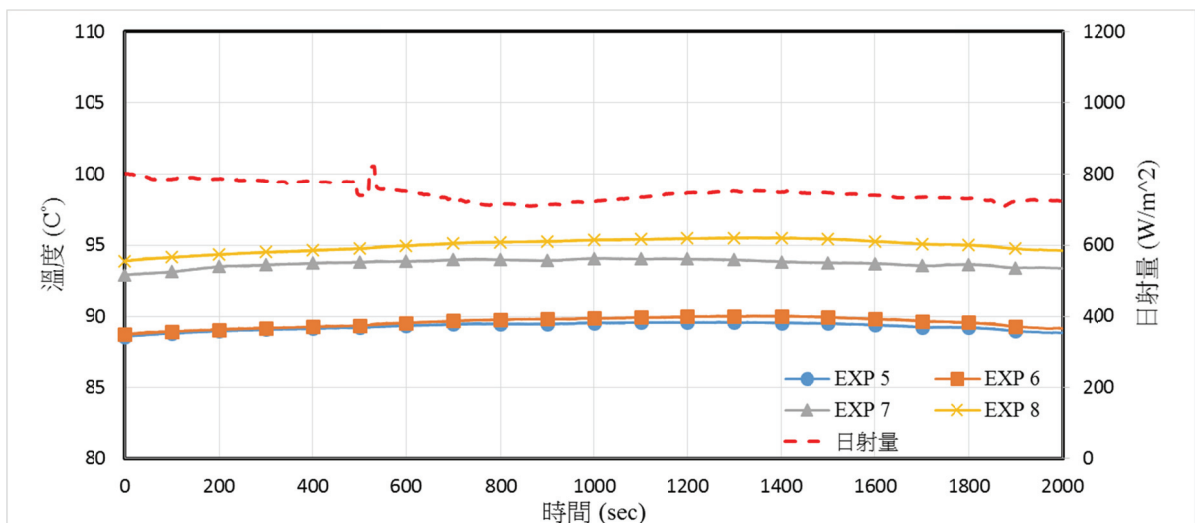


圖21 第5組到第8組田口實驗日曬實驗結果

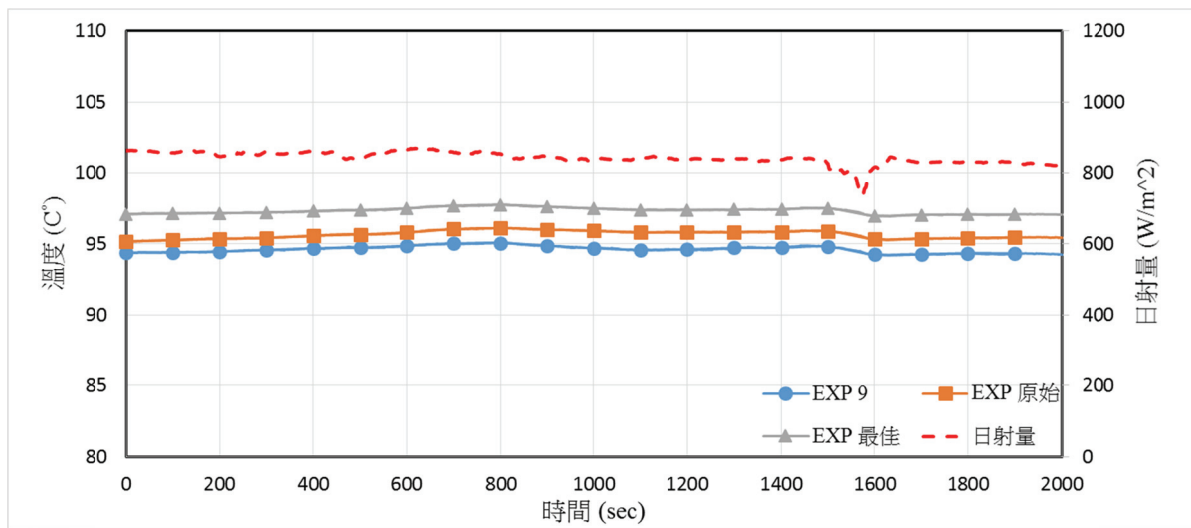


圖22 第9組田口實驗、最佳製程與原始製程日曬實驗結果

表實驗法最佳化控制因子組合及水準的結果。

田口實驗中可發現其餘組別之吸收率有較高的S/N比，但是在日曬實驗中沒有達到較高的平衡溫度，這是因為其製程中膜厚較厚，然而較高的膜厚所對應到的吸收率趨近於0.950，放射率趨近於0.78，所以各試片皆為高吸收率和高放射率，雖然擁有較低的變異程度，但因為高自體輻射散失較多熱量，無法使最終平衡溫度提高，顯示集熱效率並非最佳。

4. 結論與建議

4.1 結論

本研究對碳黑吸收膜往復式噴塗製程的噴槍氣液壓組合、噴塗高度、碳黑材料吸收膜濃度與噴槍速率等四項控制因子，以田口式直交表實驗法減少實驗的數量並提供足夠的統計資訊，經由變異分析與因子重要性的測試後找到控制因子其合適的水準，以最佳製程的控制因子組合和原始製程的結果比較其品質特性與均勻性，最後再進行日曬實驗驗證田口式直交表實驗法的結果。

經實驗結果和量測之統計資料的變異分析以及因子反應圖，噴槍氣液壓組合、噴塗高度

及噴槍速率在吸收率的S/N比最後變異分析表(表13)中的信心水準分別為86%、98%與88%，顯示對吸收率分布均勻性具有一定的影響力；同時噴槍速率在吸收率及放射率比值之品質特性最後變異分析表(表14)中的信心水準為100%，因此對吸收率及放射率比值較具有影響力。

噴槍速率在不改變噴霧扇形的條件下，會影響同時間、同試片表面面積中噴塗的總量。速率越慢會覆蓋較多的碳黑材料，使得吸收膜厚度增加，因此吸收率會因為膜厚大於5 μm 後趨近於0.950，所以S/N比在慢速中顯得較大；對於吸收率及放射率比值，其品質特性會因為膜厚較厚所造成的高吸收率高放射率而降低。

噴塗高度越高，表示噴出之液滴的飛行距離越長，且碳黑材料與香蕉水混和溶液成份中至少有50%以上為高揮發性的溶劑，在飛行過程中會快速揮發，若溶劑在液滴撞擊試片表面完全揮發，只剩下固體碳黑顆粒，則顆粒撞擊表面後無法附著而彈開，逸散於空氣中，在集熱板上不易形成均勻薄膜；但噴塗高度越低，其噴覆於表面的噴幅寬度變窄，膜厚分布情況傾向於中間厚兩邊薄的凸形分布，變異程度相對於距離較遠所噴出的均勻梯形分布來得大，綜合兩個原因的結果則為S/N比隨高度增

加而提升。

氣液壓組合之水準是經由數次測試而選定的三個噴幅寬、碳黑顆粒粒徑差異小的組合。且液滴會因壓差增加而分散較廣且較小，因此膜厚會更薄。漆與溶劑比例由因子反應圖可知，對吸收率及吸收率放射率比值都不會影響 S/N 比，亦不會影響品質特性。因此相同的溶液中，漆的比例越低，越能節省用漆量以達到降低成本的目的。

4.2 建議

本研究以碳黑吸收膜表面的吸收率與吸收率及放射率比值作為品質特性，其優點在於方便取得量測值且節省實驗成本。但是當膜厚分布大於一定的厚度之上時，吸收率、放射率的變化會逐漸收斂至一個定值，雖然會得到較佳的均勻度，但是集熱效率卻不會隨之變好。因此如果要使吸收率、吸收率及放射率比值能作為更有效的判斷，實驗上必須先將膜厚保持在 6 μm 內，其均勻度的表現更能反應集熱效率的優劣。

此外，實驗中的濃度控制因子，雖然對品質特性與均勻度不具有影響力，但很有可能是因為我們所選擇的水準範圍內的變化沒有表現出其影響力，因此建議日後可以再以更低的噴漆濃度做測試。

在進行戶外的日曬實驗時，外界環境，如日射量及風速等環境影響會對試片最終平衡溫度有不同的表現，因此不同天所作的日曬實驗之組別無法互相比較其優劣。若在室內採用可以給予穩定日射量的太陽光模擬機來進行設置，去除戶外環境造成的誤差，將可大幅提高日曬實驗的方便性及參考性。

如欲利用本研究最佳化參數組合噴覆全尺寸集熱板，則須配合輸送帶速度的設定使噴覆於集熱板上之吸收膜不會造成間隙，其速度的控制與噴槍噴幅及噴槍移動速率皆相關。本研究在最佳化參數設定下的噴槍噴幅約 32 cm，噴槍移動速率為 29.57 cm/s，由式(4)所推算出來的

輸送帶速度建議設定為 3.86 cm/s 會有最小重疊區域而不至於造成間隙。

致 謝

本文承蒙經濟部能源局委辦計畫(計畫編號 103-D0303)之經費支持，在此特於致謝。

參考文獻

- 李晏綸，2014。雙流體噴霧製程對太陽熱能吸收膜集熱效能之研究，國立成功大學航空太空工程研究所碩士論文。
- 李輝煌，2011。田口方法：品質設計的原理與實務，高立圖書有限公司。
- 張克勤、李聰盛、鍾光民，2005。陽光普照創造臺灣太陽能熱水系統發展契機，工程，第 78 卷第 1 期：74-81。
- 陳詠傑，2012。太陽能集熱板選擇性吸收膜之最佳化噴塗製程研究，國立成功大學航空太空工程研究所碩士論文。
- 謝宗旻，2014。太陽能集熱板選擇性吸收膜之最佳化陣列噴塗製程研究，國立成功大學航空太空工程研究所碩士論文。
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 2006, Solar Engineering of Thermal Process, 3rd edition, John Wiley & Sons: 189-201.
- Gunde, M. K., Logar, J. K., Orel, Z. C. and Orel, B., 1996, Optimum thickness determination to maximize the spectral selectivity of black pigmented coatings for solar collectors, Thin Solid Films, 277: 185-191.
- Gunde, M. K., Orel, Z. C. and Hutchins, M. G., 2003, The influence of paint dispersion parameters on the spectral selectivity of black-pigmented coatings, Solar Energy Materials & Solar Cells, 80: 239-245.
- Orel, B. and Orel, Z. C., 1988, Thickness sensitive spectrally selective (TSSS) paint for solar

collectors: optical properties,surface
characterization and application properties,
Solar Energy Materials, 18: 97-107.

符號說明

英文字母：

A, B, C, D	控制因子
D ₅₀	顆粒體積百分比累積到50%所 對應之顆粒粒徑(μm)
DOF	自由度；定義參見表12
E _A ^{1→2}	A因子由水準1變動至水準2的 效應
F	F測試；定義參見表12
m	樣本數目
P _a	雙流體噴槍氣體端壓力(kgf/ cm ²)
P _L	雙流體噴槍液體端壓力(kgf/ cm ²)
S	標準差
S/N	信號雜訊比
SS _p	平方和；定義參見表12

t	碳黑吸收膜膜厚(μm)
t _s	噴槍往返一趟所需時間(sec)
Var	變異數；定義參見表12
V _c	輸送帶速度(cm/s)
V _s	噴槍移動速率(cm/s)
W	噴槍噴幅(cm)
X	集熱板在噴槍往返一趟時間所 前進距離(cm)
Y	噴槍移動全程距離(cm)
y	品質特性
y _i	第i點的品質特性
\bar{y}	品質特性的平均值
z	樣本平均值

希臘字母：

α	吸收率
ε	放射率
α/ε	吸收率及放射率比值
η	S/N比
$\bar{\eta}$	平均S/N比
$\bar{\eta}_{A1}$	A因子在水準1時S/N比的反應 值

Parametric Study on Spray Coating Process for Selective Absorbing Film of Solar Collector

Ming-Yu Liu¹ Tsung-Min Hsieh¹ Keh-Chin Chang^{2*} Yi-Mei Liu³

ABSTRACT

Solar water heaters have been the most popular application of solar energy. The Thickness Sensitive Spectrally Selective (TSSS) characteristic of the absorbing film plays a key role in determining the thermal collection efficiency of solar collector. The key factors to determine the TSSS characteristic include the thickness, uniformity, and material with its powder size of the absorbing film. A parametric study in terms of (1) pressure of gas/liquid, (2) injection height, (3) concentration ratio of paint to solvent, and (4) moving speed of nozzle is performed with Taguchi method. Quality of TSSS characteristic is monitored by the absorptivity and emissivity of absorbing film. The performance of the spray coating process is justified using the absorptivity and emissivity of the TSSS characteristic in this study. The optimal combination of L9(36) orthogonal array is as follows: gas/liquid pressure of 2.0/0.6 kgf/cm², 28 cm for height, 0.5 for the ratio of concentrations between paint and solvent, and 29.57 cm/s for moving speed of nozzle. It turns out that the quality characteristic for α/ϵ is slightly decreased from 1.384 to 1.379, and the S/N ratio of absorptivity is increased from 27.76 dB to 28.89 dB, as comparing between the confirmation and original tests. From the measured equilibrium temperatures which were obtained from the sunshine field experiments, the temperature of the optimal process can reach 97.3°C as comparing to 95.6°C of the original process. It validates the result of the factor combination for optimal process made from Taguchi's orthogonal arrays.

Keywords: Spray coating, spectrally selective absorbing film, solar thermal energy, Taguchi method

¹ Graduate Student, Department of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University.

² Professor, Department of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University.

³ Assistant Researcher, Energy Research Center, National Cheng Kung University.

*Corresponding Author: Phone: +886-6-2757575# 63679, E-mail: kcchang@mail.ncku.edu.tw

Received Date: September 30, 2015

Revised Date: December 28, 2015

Accepted Date: March 29, 2016