

桃園創新技術學院教師專題研究計畫
成果報告

以熱質順向對流實驗模擬傾斜角 30° 太陽能

真空管流場之研究

計畫編號：教專研 102P-014

計畫類別：個別型計畫

執行年度：102 年度

執行期間：102 年 1 月 1 日至 102 年 12 月 31 日

計畫主持人：王月花

執行單位：通識教育中心

研發小組審查：同意結案不同意結案

簽名：

(審查人不得與計畫主持人相同)

中華民國一百零二年十一月十日

一、中文摘要

本研究是以實驗的方法探討具隔板傾斜矩形盒之熱質自然對流現象，針對固定浮力比（ N 值）、隔板位置所展現的流場型態，傾斜盒內溶液溫度及濃度的變化情形。

實驗裝置為展弦比等於 2.0 之矩形盒，以銅板及壓克力板構成，在盒內放置隔板，設計矩形盒傾斜角度為 30° 。工作溶液為硫酸銅水溶液，溫度梯度是由兩個不同溫度的恆溫水槽來維持。而濃度梯度乃使用電化學方法造成的，即利用電解方法在兩邊銅板附近形成不同濃度的邊界層。對於盒內流場現象以採用雷射光暗影法來觀察流場，並且以相機拍照記錄，以便瞭解流場結構，對流場的溫度及濃度和質傳遞率作量測分析。

關鍵詞：集熱器、流場、溫度、濃度、鹽手指。

二、前言

太陽能熱水器是一種吸收太陽輻射能轉換成熱能，產生熱水的一種設備。太陽能熱水器加熱原理是利用冷水比重比熱水大的原理，冷水往下流，熱水往上升，利用這種自然對流循環，使水箱中之水不斷的加熱。儲熱水箱及真空管內均充滿水，真空管在太陽光線的作用下，管內水逐漸被加熱，由於熱水受熱比重下降，而往水箱上浮，而水箱中的冷水比重大，往真空管下沉，這時真空管之水不斷的被加熱，與水箱中的冷水形成溫差自然循環，在適當的循環過程下，將整個儲水箱的水加熱到一定的溫度。太陽能真空管熱水器結構如同一個拉長的暖瓶膽，內層與外層之間為真空。在內玻璃管的表面上利用特種工藝塗有光譜選擇性吸收塗層，用來最大的限度吸收太陽輻射能。經陽光照射，光子撞擊塗層，太陽能轉化成熱能，水從塗層外吸熱，水溫升高，密度減小，熱水往上運動，而比重大的冷水往下降。熱水始終位於上部，即水箱中。劉耀文、呂珍謀(98年)[1]。

三、研究動機

現今真空管太陽能集熱器之真空管設計仍多為採用傳統式真空管無隔板模式為主軸，流進/流出真空管之順暢度及速度慢，以致於無法達到溫度控制及高效率熱能之目標。因而本研究以真空管之隔板變化進行設計分析，並針對以下方向做探討：

- 1.增加真空管工作流體流進/流出真空管之順暢度以提高熱效率。
- 2.避免真空管內底部產生死水區，使管內熱水可全部被導出而不殘留，以提高系統之熱能釋放效率。
- 3.避免真空管內之熱水與冷水混合，以提高真空管之熱水溫度。

四、文獻回顧與探討

太陽能熱水器利用工作流體變化以傳遞熱能的熱虹吸管，不僅具備熱傳效果佳、成本低廉之優點，同時其被動式設計，使其具有良好的可靠度，因此具有成為儲能系統的潛力。自然循環式太陽能熱水器，為利用熱虹吸原理（集熱器內的水受熱，密度變小往上升至儲水槽，而冷水由儲水槽下降，形成自循環，吸收太陽熱能），此系統不需外加動力及控制裝置，構造簡單，為一般家庭所常用如圖 1 所示。

與隔板相關文獻有以下可參考：W.G.Brown 等人（1962）〔2〕在兩個 chambers 中加了一個隔板，而隔板上又有小的開口實驗條件下進行“質熱”自然對流的觀察研究。M.W.Nansteel 等人（1981）〔3〕發現隔板在封閉盒中可能產生 recirculation zone 降低熱傳效應。N.N.Lin 等人（1983）〔4〕以水為工作流體，探討具隔板密閉空間自然對流的實驗研究，指出開口比對於熱傳遞及流場形態有很大影響。D.A.Olson 等人（1990）〔5〕針對密閉區間內有無隔板與隔板的熱傳現象做一系列的觀察，並對於不同位置的速度場、溫度場做比較，結果發現有隔

板的密閉區間，其熱傳率比無隔板的熱傳率降低 10%~15%，且隔板將會改善在隔板附近二次流的現象。E.Zimmerman 等人 (1986) [6] 在密閉方盒上下兩隔板中，發現主流強度隨隔板熱傳增加而降低，而 Nusselt 隨有隔板和隔板熱傳導增加而降低。S.Acharya 等人 (1989) [7] 以空氣為工作流體，Rayleigh 數的範圍 $10^4 \sim 10^9$ 間，針對下隔板在不同位置與不同開口比效應下，做一系列的模擬與分析。發現開口比的差異對平均 Nusselt 有明顯的影響，而不同位置的隔板擺置對系統的平均 Nusselt 則幾無影響。

五、實驗設計與方法

(一)實驗原理

密閉空間自然對流受密度梯度變化可分:垂直重力方向、平行重力方向。當流體之密度因溫度的升高而逐漸變小，因而對流體形成向上浮力；反之當流體溫度下降時密度變大。然而，就具有極大密度之流體處於特定溫度，其流體溫度之密度並不如一般我們所想像的一樣。

矩形盒中長隔板所造成流道的自然對流的研究不論是數值分析或是實驗觀察法已相當完整其中以 B.S.Kim 等人(2008) [8] 使用 immersed boundary method 模擬一個二維，非穩態封閉盒中的自然對流問題， Rayleigh number = $10^3 \sim 10^6$ 。在封閉盒中為一環狀物，沿

著中心線改變環狀物的位置，討論在不同狀況下流場的情況。

J.L.Wright 等人(2006) [9] 利用實驗的方法探討一個高大的封閉盒中自然對流的流場情況。發現當 Rayleigh number $< 10^4$ 時流場是一個穩定的情況，當超過 $< 10^4$ 後則變成不規則的情況。當流場在轉換成 fully turbulent flow 的情況下，會有 3-D 的情況出現。M. El Alami 等人(2005) [10] 討論在不同熱源間距下之流場結構和熱傳現象。

C.R.Wilke 等人(1953)[11] 指出海洋受日照影響在海洋上層造成熱且濃的流體，由於鹽水濃度擴散速率遠小於溫度擴散速率，導致了濃度極不均勻的現象，稱之為鹽手指(salt-fingers)。Xuegeng Yang 等人(2007) [12] 利用實驗的方法探討一個 1 立方公分的封閉盒內為 0.1M 的硫酸銅水溶液，在左右板上加入不同的電極，利用光學干涉計觀察流場的情況，並且討論小的 aspect ratio 的影響。發現隨著濃度分佈不同的情況下 intrusion layer 具有一定規則。熱質自然對流研究方面，早期在海洋學頗受重視，一般而言，質傳實驗比熱傳實驗困難，L.W. Wang 等人(1985) [13] 接著探討密閉盒內垂直溫度梯度與濃度梯度之流場形態，發現在熱質浮力逆向的例子會有鹽手指(salt-fingers)的產生。

(二)實驗設計

本實驗之矩形密閉容器是由壓克力板及二銅板所組成，密閉容器

內所使用的溶液為硫酸銅水溶液。二銅板本身用來當作電極，前後壓克力板作為流場觀察視窗。將二銅板柱分別接上恆溫水槽以造成恆定的溫度梯度。(左為熱板，右為冷板)

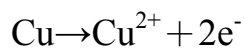
(三)溫度梯度的建立

使用兩台恆溫水槽設定溫度後，使水循環流過兩銅板，即可造成恆定的溫度梯度。

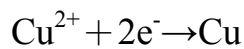
(四)濃度梯度的建立

為了造成恆定的濃度梯度，本實驗使用電化學線路圖方法 (electrochemical) 如圖 2 所示，實驗中溶液為硫酸銅(CuSO₄)水溶液，加入硫酸(H₂SO₄) 為輔助電解質。通入電流後，在左右銅板附近產生化學變化。

陽極會產生銅離子的解離(dissolution)



陰極則為銅的析出(deposition)



銅離子由陽極釋放出來，經由溶液之對流及擴散作用到達陰極而為銅板所吸附。因陽極表面離子濃度較本體溶液之離子濃度高，而本體溶液離子濃度又較陰極表面離子濃度高，如此就可以形成一穩定濃度梯度而造成對流。對本實驗而言，質量的傳遞即指銅離子的傳送，而造成銅離子傳送的因素有三：

- 1.遷移(migration)效應：在電場的影響下帶電離子的移動。遷移效應的大小，即表示溶液中電場效應的大小。
- 2.擴散(diffusion)效應：此乃由於濃度梯度的差異，物質受影響而產生的移動。
- 3.對流(convection)效應：由於強制對流或自然對流產生流體移動。

由於本實驗係研究溫度及濃度所造成的影響，是以加入硫酸為輔助電解質，增加溶液的導電度，降低電場強度，抑制遷移效應，使之與擴散及對流效應比較，顯得不重要而可忽略不計。在此狀況下，根據 J.Chang 等人(1993) [14] 指出質傳遞係數 K_m (mass transfer coefficient)

$$K_m = \frac{I}{nF(c_b - c_o)}$$

I = 電流密度

n = 離子電荷數

F = 法拉第常數(96500C/mole)

c_b = 本體濃液濃度

c_o = 陰極表面離子濃度

上式中陰極表面離子濃度 c_o 很難測量，最簡單的方式是讓電極反應達到最大(即達極限電流)，讓整個系統保持穩定態，此條件即是電流的加入會使陰極表面離子濃度趨於零($c_o \sim 0$)。因此可得

$$K_m = \frac{I_L}{nFC_b}$$

I_L = 極限電流密度

實際上對任一電流密度而言，在介於本體溶液與陰極表面間可建立穩定態的濃度梯度。隨著電流密度逐漸遞增的狀態，陰極表面之反應離子濃度也逐漸降低，當電流增加到理論極限電流值，則陰極表面的反應離子濃度應趨近於零，而得到最大的質傳遞率。

由以上敘述的方法可建立一穩態的濃度梯度，在陰極板附近濃度趨於零，本體溶液濃度為 C_b ，陽極板附近濃度趨近為 $2C_b$ 。因此，即使更換不同濃度的硫酸銅水溶液進行實驗，只要均在其極限電流條件下操作，便可預知最大濃度度數，及獲得與濃度相關的各項無因次參數，如 Gr_m ， Ra_m 等，並可求得質傳遞係數 K_m 。

(五) 統御方程式與重要參數

為討論方便，在矩形密閉盒上設定一共用的直角座標系統。其中 X 方向代表沿底板寬邊的方向，Y 方向代表垂直底板的方向，而 Z 方向代表沿底板長邊的方向，整個座標系統如圖 3 所示。本實驗基本上可視為二維的問題，統御方程式如下：

連續方程式：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

χ 方向動量方程式：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + \beta g (C - C_b) \cos \theta$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + \beta g (C - C_b) \sin(90 + \theta)$$

忽略粘性消耗即可壓縮功之能量方程式：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right)$$

為方便討論，本文採用無因次化參數如下：

$$\bar{x} = \frac{x}{H}, \quad \bar{y} = \frac{y}{H}, \quad \bar{t} = \frac{t}{H^2}$$

$$\bar{U} = \frac{u}{H}, \quad \bar{V} = \frac{v}{H}, \quad \bar{P} = \frac{P}{\rho H^2}$$

$$\bar{C} = \left(\frac{C - C_{ca}}{C_b - C_{ca}} \right), \quad A = \frac{H}{L}, \quad S_c = \frac{V}{D}$$

$$R_a = \frac{\beta g C_b H^3}{(\nu D)}$$

C.Gan 等人(1989)[15]將上述統御方程式化為：

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{y}} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{t}} + \bar{U} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{x}} + \bar{V} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{y}} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} + S_c \left[\frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{y}^2} \right] + R_a \cdot S_c \cdot \bar{C} \cdot \cos \theta$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{t}} + \bar{U} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{x}} + \bar{V} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{y}} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} + S_c \left[\frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{y}^2} \right] + R_a \cdot S_c \cdot \bar{C} \cdot \sin(90 + \theta)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{t}} + \bar{U} \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{x}} + \bar{V} \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{y}} = \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{y}^2}$$

(六)實驗裝置

本實驗邊界條件及展弦比 $Ar(\text{盒})$ 為 2.0 的矩形盒 $Ar(\text{板}) = 21.667$ 之對稱高展弦比隔板，依恆溫水槽建立溫度梯度另根據 Tobias(1953)理論極限電流值，採用電化學系統形成系統內的質傳，其流場是以雷射光暗影法 (shadowgraph) 觀察，如圖 4 所示。

1.工作流體

0.05M 硫酸銅水溶液 ($\text{CuSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$)。

2.矩形盒

依實驗需要設計出研究用矩形盒，尺寸大小如圖 5 所示。

3.器材

實驗上所有設備其含有具有 35mW 氬氖雷射紅色光射出，經過物鏡 (objective lens)，擴散成圓錐光區，將紅色光聚光再經雙凸透鏡 (collimating lens)，集光後使成一平行光面，照射在矩形盒上，穿過硫酸銅水溶液；矩形盒又受到極限電流，物質反應和兩側恆溫槽溫差效應之下，因溶液密度差異使投射到文宣紙上的影像，有亮暗之別，而能觀察流場型態以單眼照相機拍照。並以濃度透光率儀器量溶液之透光率記之，以熱電偶計(T type)在矩形盒上小孔上量其溫度並記錄。

(七)實驗過程

- 1.將矩形盒放在傾斜角度 30° 之治具上，以電線“-”極接在左邊(35°C 熱水)銅螺絲上，電線“+”極接在右邊(25°C 溫水)銅板螺絲上。作順向實驗，溶液開始循環4小時使之成為穩態流場，即以時間 $t=0$ 開始記錄，觀察流場繪圖。
- 2.使用相機拍照矩形盒內流場型態，並用濃度透光率量測濃度，使用熱電偶計量取溫度。
- 3.測定極限電流。
- 4.以此方式作 $t=30$ 分鐘、 $t=60$ 分鐘、 $t=90$ 分鐘、 $t=120$ 分鐘、 $t=180$ 分鐘等記錄。
- 5.記錄好後再加入質傳效應，並且在左邊加以恆溫熱水 35°C ，右邊加以恆溫冷水 15°C ，以兩銅板間相差 20°C 作流場型態觀察。

(八)流場觀察

為討論方便，在矩形密閉盒上設定一共用的直角座標系統。其中 x 方向代表沿底板寬邊的方向， y 方向代表垂直底板的方向，而 z 方向代表沿底板長邊的方向，整個座標系統如圖 3。

1. 雷射光暗影法

雷射光暗影法：使用一具 $35\text{mW}/633\text{nm}$ 的氦氖雷射(He-Ne laser)發出紅色光束，經過物鏡(objective lens)擴散成圓錐光區，再經由

凸透鏡(collimating lens)使成一平行光面，穿透過硫酸銅水溶液，因溶液密度差異，使投射在屏幕的影像，有亮暗之別，而能觀流場現象。

2. 溫度的量測

流場溫度量測使用 T type (銅，銅鎳合金) 熱電偶計，素線徑 0.32 mm、容許差為 ± 0.5 °C，以二維定位器固定，伸入流場內量取 $x/W=0.15$ 、 0.687 ， $z/D=0.5$ 處 y 方向的溫度分佈，並由溫度資料收集器讀取溫度值。

3. 濃度的量測

流場濃度的量測是用非干擾(nonintrusive)的方法來求得。這方法主要是利用一具 35mW 的固體雷射發出紅色光束為光源，量取 $\bar{x}=0.15$ ， 0.687 處 y 方向的溫度分佈；光線透過硫酸銅溶液時，被硫酸銅所吸收的光強度和溶液的濃度關係，亦即光源強度的改變量。根據 Lambert Beer's law 經過容易之光強度(I_{λ})與未經過容易之光強度($I_{\lambda 0}$)的關係是如下：

$$I_{\lambda} = I_{\lambda 0} e^{-a_{\lambda} d}$$

a_{λ} ：溶液的衰減係數(extinction coefficient)其

為波長的函數。

d ：光在溶液所經過的距離。

C : 量測點的溶液濃度。

上面的式子可以寫成

$$\frac{I_{\lambda 0}}{I_{\lambda}} = e^{a_{\lambda} dC}$$

兩邊 log

$$A_{\lambda} = a_{\lambda} dC$$

$A_{\lambda} = \log(I_{\lambda 0}/I_{\lambda})$ 是溶液的吸收度(absorbance of solution)

依 C. Gan 等人(1989) [15]所做的實驗，使用波長為 632.8nm 的雷射光為光源，硫酸銅水溶液的 $a_{\lambda} = 1.1814$ ，有 4% 的誤差。

六·實驗結果與討論

本部分實驗在矩形盒內放置隔板，並改變矩形盒傾斜角度 30° ，當流場達到穩定狀態(thermal steady state)後，使用電化學方法加入質傳，探討矩形盒內隔板及傾斜角對流場的影響。實驗參數如下：

$$Ar=2, Ap=0.81, Pr=7\sim 8, Sc=1700\sim 2500, N=5.34\sim 26.67,$$

$$Gr, t=0.0302\times 10^6, Gr, m=0.1617\times 10^6, \theta=30^{\circ}$$

(一)雷射光暗影法流場分析

本實驗的流場結構為溫度效應與濃度效應互相影響的結果，所以必須先對二者的性質做充分的了解。一般而言，溫度邊界層厚度與濃度邊界層厚度的關係，在 $Pr > 1, Sc > 1$ 時，由 Y.K. Kamotani 等人

(1985)[16]指出：

$$\frac{\delta_t}{\delta_m} = \left(N \frac{Sc}{Pr} \right)^{1/4}$$

其中 N 為濃度效應與溫度效應所形成的浮力比，亦為濃度的 Grashof 數與溫度的 Grashof 數之比值。在本實驗中的 Pr 值為 7~8， Sc 值約為 1700~2500，而 N 值約在 10.69，所以可以知道 δ_t/δ_m 的範圍在 7.34，所以溫度邊界層厚度比濃度邊界層厚度大；此外，在溫度效應和濃度效應所造成的特徵速度比為：

$$\frac{V_t}{V_m} = \left(\frac{Sc}{Pr} \frac{1}{N} \right)^{1/2}$$

在本實驗中， $1/N$ 約為 0.1，所以 V_t/V_m 的值在 5.00，所以溫度效應所造成的特徵速度比濃度效應的特徵速度大。

由以上兩比值 (δ_t/δ_m ， V_t/V_m) 可知濃度邊界層較薄，且濃度的特徵速度比較小，所以在濃度邊界層以外所顯現的熱效應應該會比濃度邊界層內的明顯。

隔板順向之熱質流場觀察

1. $\theta = 30^\circ$ 順向實驗(左板熱板陰極，右板冷板陽極)

傾斜角 30° 時，溫度梯度效應達到穩定後，由熱板循環到冷板的流體在密閉區間內由於隔板的效應，致使熱而輕的流體，在隔板與頂端間造成了 trap 的效果，而形成了該區域內流動緩慢的現象。

加入質傳後，熱板附近低濃度流體受熱上升沿頂端移動，受到隔板 trap 效應，高溫低濃度流體逐漸在隔板與頂端間區域堆積，形成高溫低濃度層。而溫度效應無法將熱板之高濃度流體往上帶至頂端，部分流體在到達隔板時便以 finger type flow 狀向下流。同樣地，冷板附近高濃度流體隨主流下降至底端再至熱板。

隨質傳時間的增加，低濃度流層會降至隔板底端，當低濃度流體到達冷板時，在冷板溫度邊界層內，由於溫度效應較大，將部分低濃度流體往下帶，在離開邊界層後溫度效應減弱，低濃度流體便以 finger type flow 型態向上流，如圖 6 所示。

2. $\theta = 30^\circ$ 順向實驗溫差 20°C (左板熱板陰極，右板冷板陽極)

傾斜角 30° 時，當熱板以 35°C 、冷板以 15°C 供應之情況下，熱板以溫度梯度效應達到穩定後，由熱板循環到冷板的流體在密閉區間內由於隔板的效應，致使熱而輕的流體，在隔板與頂端間造成了 trap 的效果，而形成了該區域內流動緩慢的現象。

加入質傳後，受到隔板的 trap 效應，在頂端和隔板之間累積了高溫低濃度的流體，形成高溫低濃度層。而溫度效應無法將熱板之高濃度流體往上帶至頂端，部分流體在到達隔板時便以 finger type flow 狀向下流。同樣地，冷板附近高濃度流體隨主流下降至底端再至熱板。

隨質傳時間的增加，低濃度流層會降至隔板底端，當低濃度流體到達冷板時，在冷板溫度邊界層內，由於溫度效應較大，將部分低濃度流體往下帶，在離開邊界層後溫度效應減弱，低濃度流體便以 finger type flow 型態向上流，如圖 7 所示。

(二)流場的溫度分布

隔板順向溫度分布

1. $\theta = 30^\circ$ 順向實驗(左板熱板陰極，右板冷板陽極)

當純溫度梯度效應達到穩定時，流場的溫度分佈大致隨著高度的增加而增加，但溫度變化不大，熱板在溫度邊界層內受熱流體影響。

加入質傳後，由於熱板附近得較清流體受熱上升，在 $\bar{x} = 0.15$ 位置即隔板和頂端間累積熱而輕的流體，形成一個熱堆積區域，逐漸沿水平方向擴展流體的溫度會略微升高。隨著時間增加在 $t = 180\text{min}$ 熱堆積區域接近熱板溫度，如圖 8 所示。

2. $\theta = 30^\circ$ 順向實驗溫差 20°C (左板熱板陰極，右板冷板陽極)

傾斜角 30° 時，當熱板以 35°C 、冷板以 15°C 供應之情況下，當左板熱板陰極，右板冷板陽極時，純溫度梯度效應達到穩定後的溫度分佈圖來看，隨著高度的增高流場各個位置的溫度程等溫線式分佈即集中某一無因次溫度範圍。由於熱板附近的流體受熱上升，在隔板和頂端間累積熱而輕的流體，形成一個熱堆積區域，此區

域的流體流動緩慢，對流效應微弱，熱量的傳遞主要靠傳導效應。所以此區域的溫度接近熱板的溫度。

加入質傳後，由於熱板附近得較清流體受熱上升，在 $\bar{x}=0.15$ 位置即隔板和頂端間累積熱而輕的流體，接近底板因冷流體流動效應影響皆下降，如圖 9 所示。

(三)流場的濃度分布

隔板順向濃度分佈

1. $\theta=30^\circ$ 順向實驗(左板熱板陰極，右板冷板陽極)

溫度效應達穩定時，各點濃度等於本體濃度，在 $t=0\text{min}$ 時 $x=0.687$ 頂板位置無因次濃度值略小於本體濃度。加入質傳後，陽極板(冷板)附近高濃度流體遇冷往下游，沿傾斜底板流至隔板，在底板和隔板右側之間累積了冷而重的高濃度流體。受高濃度流體堆積影響，部分濃度流 $t=180\text{min}$ 時濃度亦略為增加，如圖 10。

2. $\theta=30^\circ$ 順向實驗溫差 20°C (左板熱板陰極，右板冷板陽極)

傾斜角 30° 時，當熱板以 35°C 、冷板以 15°C 供應之情況下，溫度效應達穩定時在 $t=0\text{min}$ ，各點濃度等於本體濃度。加入質傳後，陽極板(冷板)附近高濃度流體遇冷往下流，沿傾斜底板流越過隔板，至底板而至熱板。混合了熱板之熱而輕流體受溫度效應影響，將所有濃度流體往上帶。由濃度分佈圖所示各個位置除頂板及底板受流動之

淡濃度流體和高濃度流體影響外。各點濃度幾等於本體濃度，但隨質傳時間增加整體濃度，逐漸上升。流場仍為純溫度效應主導之流場型態，如圖 11。

(四)質傳遞率 Sh 值分析

無因次質傳遞率 Sherwood No. 的定義為：

$$Sh = \frac{K_m \times H}{D}$$

Sherwood No. 在純濃度場所代表的物理意義類似於 Nusselt No. 在純熱傳流場所代表的物理意義。然而在熱質綜合流場中，Sh 與 Gr, t 、 θ 、 Gr, m 皆有關係。

本實驗以展旋比 $Ar=2$ 之質熱順向為例，固定 $Gr, t=0.0302 \times 10^6$ 針對濃度 $Gr, m=0.1617 \times 10^6$ 觀察 Sh 與質熱順向之關係，其結果如圖 12 所示。發現濃度在 0.05M 時，順向實驗溫差 20°C 較順向實驗溫差 10°C 之 Sh 為高，原因是濃度效應與溫度效應同向，促使流體對效應增強，造成質傳遞率的增加。

七、結論

本實驗藉由實驗方法來討論太陽能真空管流場與熱質對流之研究，其由溫度梯度和濃度梯度所引起的熱質自然對流現象。本實驗利

用幾何形狀與邊界條件的設計並觀察傾斜角度 30° 在順向流場所造成之影響，針對相關無因次參數探討其對於封閉河內流場結構的影響，綜合前面的實驗結果作以下幾點歸納：

(一) 30° 傾斜角流場形態分佈

矩形密閉中因冷板陰極產生低濃度堆積較不明顯，而高濃度流場則在隔板上方處與熱板間形成堆積。

(二) 30° 傾斜角流場溫度分佈

純溫度梯度達到穩定後，加入質傳溫度分佈皆隨 Y 方向增加而上升，在熱質順向實驗中，當熱堆積或冷堆積區域溫差產生較明顯增加或降低。在熱質逆向實驗中，高溫高濃度隨著 finger type flow 落入底板導致底板無因次溫度增加。其冷板處低溫低濃度流體受 finger type flow 上升至頂板，亦即頂板無因次溫度為降低。但在隔板間因為冷流體與熱流體之交會區，因此該區域無因次溫度較不明顯。而增加溫度梯度時，流體溫度整體向上提高，且隔板間會流區因此向下發展。

(三) 30° 傾斜角流場濃度分佈

在純熱流場溫度梯度達到穩定後，流場分布相當均勻因此各點無因次濃度近似本體溶液濃度。加入質傳後順向或逆向流場皆呈現三種濃度分布層，其中上層屬於淡濃度層；逐漸隨時間增加向下堆積。下

堆積現象亦有不同厚度。其餘流場無因次濃度大致呈現上層淡濃度，下層高濃度與中層為本體溶液濃度之無因次濃度趨勢。

(四)30°傾斜角無因次質傳遞率

當增加溫度梯度時觀察 Sh 與質熱順向之關係，發現提高溫度溫差為 20°C 時，Sh 會比溫差 10°C 之 Sh 大。

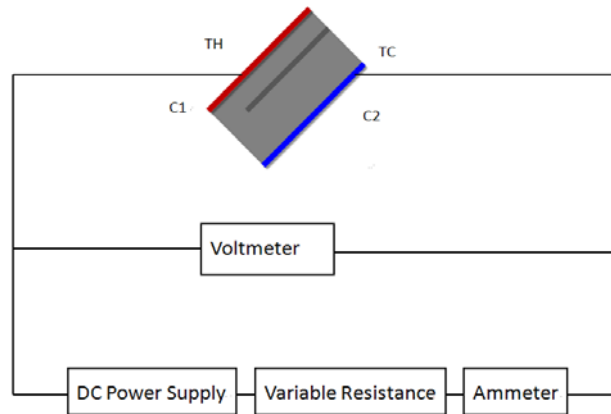
參考文獻

- [1] 劉耀文、呂珍謀"Study on the flow field and heat convection of an evacuated tubular solar collector".國立成功大學，水利及海洋工程研究所碩士論文，民國 98 年。
- [2] W.G.Brown and K.R. Solvason "Natural Convection Through Rectangular Openings in Partitions-1" Int,J Heat and Mass Transfer, Vol.5,pp.859-868,1962.
- [3] M.W.Nansteel and R. Greif, "An Investigation of Natural Convection in Enclosures with Two-and Three-Dimensional Partitions" Int. J. of Heat and Mass ransfer,Vol.27,No.4, pp.561-571.1984.
- [4] N.N.Lin,and Adrian Bejan, "Natural Convection with in a Partially Divided Enclosures" Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol.26, No. 12 , pp.1867-1878.1983.
- [5] D.A.Olson,L.R.Glicksman and H.M.Ferm "Steady-State Natural Convection in Empty and Partitioned Enclosures at High Rayleigh Numbers",Journal of Heat Transfer,Vol.112,pp. 640-647,1990.
- [6] E.Zimmerman and S. Acharya, "Free Convection Heat Transfer in a Partially Divided Vertical Enclosures with Conducting end Wall" Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol.30, pp.319- 331 ,1987.
- [7] S.Acharya and R. Jetli " Heat Transfer Due to Buoyancy in a Partially Divided Square Box " Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol.33, No.5,pp.931-942,1990.
- [8] B.S.Kim ,D.S. Lee ,M.Y. Ha ,H.S. Yoon ,"A Square Enclosure with a Circular Cylinder at Different Vertical Locations" Int. J. of Heat and Mass Transfer.51 pp.1888-1906,2008.
- [9] J.L.Wright ,H. Jin , K.G.T. Hollands ,D. Naylor ,"Flow Visualization of Natural Convection in a Tall ,Air Filled Vertical Cavity"

- Int. J. of Heat and Mass Transfer.49 pp.889-904,2006.
- [10] M.ElAlami,M.Najam,E.Semma,A.Oubarra,F.Penot,"Electronic Components Cooling by Natural Convection in Horizontal Channel with Slots", Energy Conversion and Management.46 pp.2762-2772, 2005.
 - [11] C.R.Wilke, M. Eisenberg and C.W. Tobias, "Correlation of limiting currents under free convection conditions", J. of the electrochemical society, Vol. 100,pp.513-523,1953.
 - [12] Xuegeng Yang ,Kerstin Eckert, Armin Heinze, Margitta Uhlemann , "The Concentration Field During Transient Natural Convection between Vertical Electrodes in a Small Aspect Ratio Cell "J. of Electroanalytical Chemistry 2007.
 - [13] L.W.Wang and D.J. Sun, "Convection mass transfer in enclosures with vertical temperature and concentration" J. of national cheng-kung university, Vol.20,pp.313-322, 1985.
 - [14] J.Chang,T.F.Lin and C.H. Chien, "Unsteady Thermosolutal Opposing convection of A Lique-Water Mixture in a Square Cavity-I, Flow Formation and Heat and Mass Transfer Characteristics", Int. J. of Heat and Mass Transfer Vol.36,No.5,pp.1315-1331,1993.
 - [15] C.Gau and K.H. Wu, "A Nonintrusive Technique for Concentration Distribution Measurement in Enclosure", Experiment Heat Transfer, Vol.2, pp.215-226,1989.
 - [16] Y.Kamotani,L.W.Wang, S. Ostrach and H.D. Jiang, "Experimental Study of Natural Convection in Shallow Enclosures with Horizontal Temperature and Concentration Gradients", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.28,No.1,pp.165-173,1985.

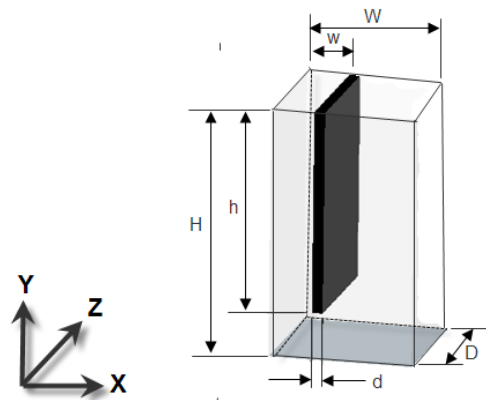


圖 1. 傳統式無隔板真空管



順向流場：左板陰極、溫度高；右板陽極、溫度低 $TH > TC, C1 < C2$,
 逆向流場：左板陽極、溫度高；右板陰極、溫度低 $TH > TC, C1 > C2$,

圖 2. 電化學線路圖



(a) 矩形密閉盒座標系統

| W | H | D | h | w | d | Ar(盒) | Ar(板) | Ap(板) |
|----|----|----|----|----|---|-------|--------|--------|
| 40 | 80 | 40 | 65 | 12 | 3 | 2 | 21.667 | 0.1875 |

(b) 矩形密閉盒尺寸圖 單位：mm

圖 3. (a) 矩形密閉盒座標系統 (b) 矩形密閉盒尺寸圖

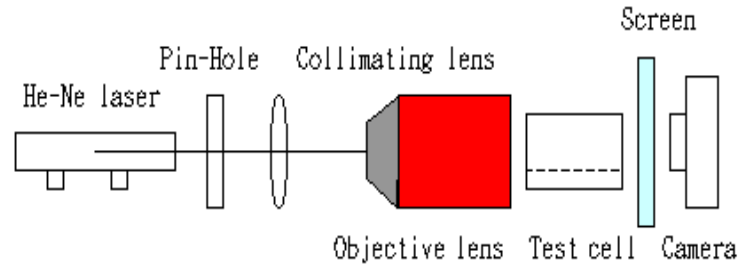


圖 4. 雷射光暗影法

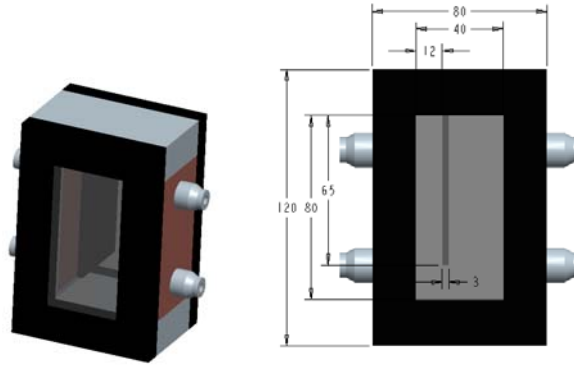


圖 5. 矩形盒外形尺寸

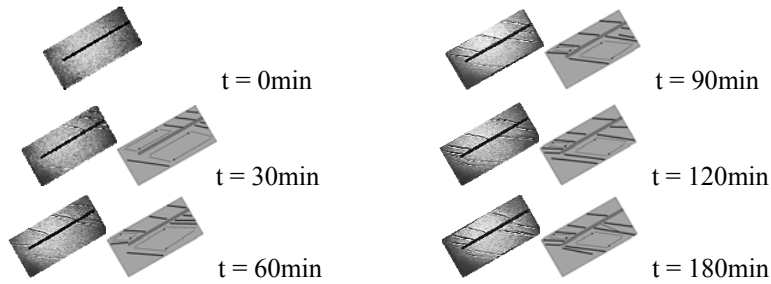


圖 6. $\theta=30^\circ$, $Ar=2$, $Ap=0.081$, $Gr_t=0.0302 \times 10^6$, $Gr_m=0.1617 \times 10^6$,
(順向實驗, 左板熱板陰極, 右板冷板陽極)雷射光暗影流場型態

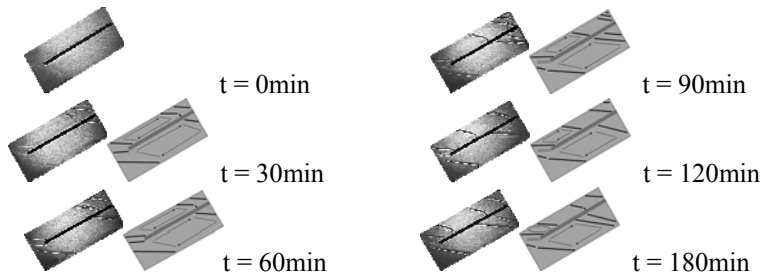


圖 7. $\theta=30^\circ$, $Ar=2$, $Ap=0.081$, $Gr_t=0.0604 \times 10^6$, $Gr_m=0.1617 \times 10^6$,
(順向實驗溫差 20°C , 左板熱板陰極, 右板冷板陽極)雷射光暗影流場型態

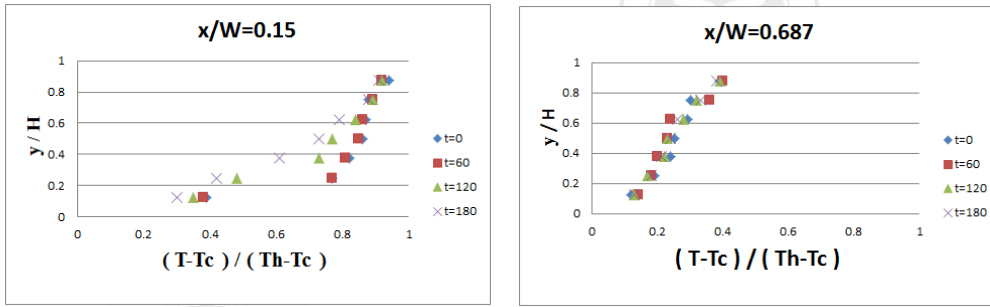


圖 8. $\theta=30^\circ$, $Ar=2$, $Ap=0.081$, $Gr_t=0.0302 \times 10^6$, $Gr_m=0.1617 \times 10^6$, (順向流場)溫度分布圖

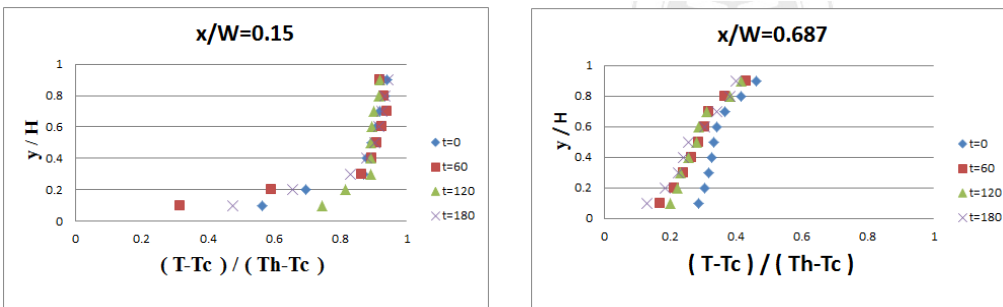


圖 9. $\theta=30^\circ$, $Ap=0.081$, $Gr_t=0.0604 \times 10^6$, $Gr_m=0.1617 \times 10^6$, (順向流場溫差 20°C)溫度分布圖

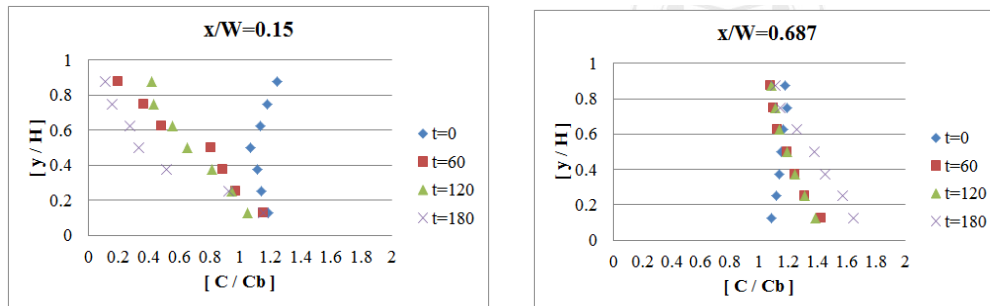


圖 10. $\theta=30^\circ$, $Ar=2$, $Ap=0.081$, $Gr_t=0.0302 \times 10^6$, $Gr_m=0.1617 \times 10^6$, (順向流場)濃度分布圖

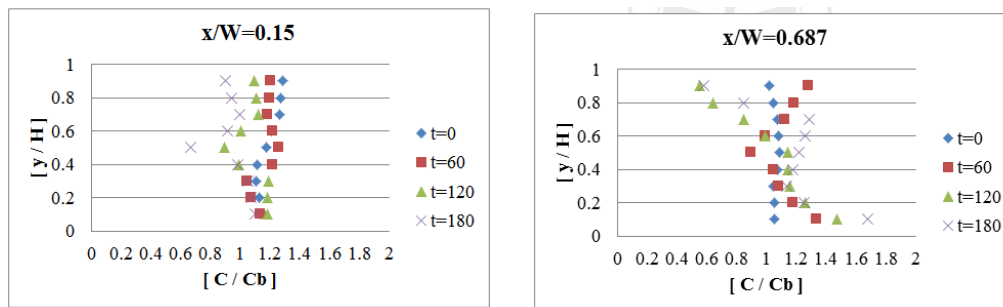


圖 11. $\theta=30^\circ$, $Ar=2$, $Ap=0.081$, $Gr_t=0.0604 \times 10^6$, $Gr_m=0.1617 \times 10^6$, (順向流場溫差 20°C)濃度分布圖

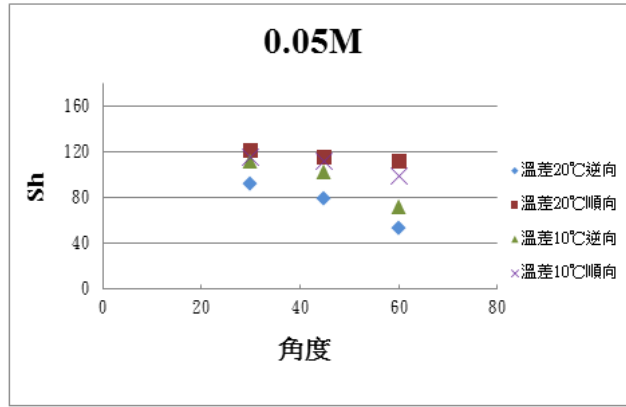


圖 12. 固定 Gr_m ， Sh 與 θ 角關係圖