

垂直矩形盒中左隔板對熱質順向自然對流現象 之研究

王士榮¹、王立文²、劉淑慈¹、廖文賢¹、林俊源¹

¹南亞技術學院機械系

²元智大學機械工程研究所

摘 要

本實驗探討具左側隔板垂直矩形盒熱質順向自然對流現象，研究固定浮力比（ N 值）、隔板位置所展現流場型態。實驗裝置為展弦比等於 0.5 矩形盒，以銅板及壓克力板構成，盒內側板位置板放置隔板。工作溶液為硫酸銅水溶液，溫度梯度由兩個恒溫水槽來維持，濃度梯度以電化學方法造成。盒內流場現象採用雷射光暗影法（shadowgraphy）來觀察。另為瞭解流場結構，對流場的溫度及濃度作量測分析。

本實驗預計無因次參數研究範圍如後：

$Ar=0.5$, $Ap=0.75$, $Pr=7\sim 8$, $Sc=1700\sim 2500$, $N=5.01\sim 8.16$, $Gr_t=8.16\times 10^5$, $Gr_m=4.36\times 10^6\sim 6.15\times 10^6$

關鍵詞：質熱、自然對流、隔板



Aiding Thermosolutal Convection Transfer in Vertical Enclosures With Left Partition

Shu-Lung.Wang¹、Lin-Wen.Wang²、Shu-Tzu.Liu¹、

Won-Hson.Liao¹、Chun-yuan.Lin¹

¹ Department of Mechanical Engineering Nan-Ya Institute Technology

² Department of Mechanical Engineering Yuan-Ze University

Abstract

The current study is primarily motivated to gain better understanding of the flow pattern, the temperature distribution and concentration distribution caused by thermosolutal convection in an electrochemical system with a left partially divided vertical enclosure. The test cell is a rectangular enclosure formed with acrylic and copper plates, which is wrapped with foam insulator to ensure an adiabatic boundary condition, and its aspect ratio is 0.5. The temperature is maintained uniform and controlled by two separated constant-temperature baths, which circulate heated or cooled water through the heat exchanger. The working solution used is aqueous copper sulphate. An electrochemical method based on a diffusion-controlled electrode reaction will be employed in this work for creating the concentration gradient.

To visualize the flow, the shadowgraph technique are used. To understand the flow structure, the temperature distribution and concentration distribution are investigated.

Finally, the correlations between Sherwood number and solutal Grashof number are also need to be analyzed. The ranges of the parameters in this work are :

$Ar=0.5$, $Ap=0.75$, $Pr=7\sim 8$, $Sc=1700\sim 2500$, $N=5.01\sim 8.16$, $Gr_t=8.16\times 10^5$, $Gr_m=4.36\times 10^6\sim 6.15\times 10^6$

keywords : Thermosolutal 、 Natural convection 、 Partition

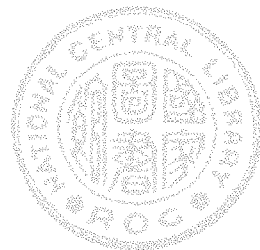


壹、前言

自然對流在密閉盒中之熱和質傳遞可應用在工業和幾何物理上，例如石油化學工業過程、食品工業、晶粒回復、電化學過程、燃料電池、污染污物驅散和地下水之電解，至此介於熱和濃度之浮力之相關性為所關心的，雙擴散被分類成以下種類，熱和質之梯度以沿密閉盒水平放置，其一為順向或逆向，其它分類為熱和質之梯度為垂直放置，或為順向或逆向。

封閉區域內具隔板之自然對流現象除了和房間內的空氣品質有關外，它在太陽能收集器、室內隔間的能量傳遞、容器內電子元件發熱之自然冷卻、核能反應器冷卻及晶體成長各方面。此為本計畫致力探討具傾斜矩形封閉盒內熱質自然對流雙圓柱效應之動機。Brown 及 Solvason (1962) [1] 曾在兩個 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，Nansteel and Greif (1981, 1984) [2] [3] 發現隔板在封閉盒中可能產生 recirculation zone 降低熱傳效應，Bejan et al. (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。Winters (1982) [5] 則針對不同雷利數 ($10^6 \sim 10^{11}$) 做數值上的分析，發現當雷利數較低時 (10^6)，流體之分流主要產生於隔板之後，而在高雷利數時，流體之分流產生在隔板之前。Patankar (1990) [6] 針對立方空間具垂直分隔板的自然對流現象做分析，雷利數控制在 $10^4 \sim 10^7$ ，工作流體為水，結果顯示當隔板高度相同時，二維流場的 \overline{Nu} 值比三維流場的 \overline{Nu} 大 15%~66%，當雷利數提高時，二維與三維 \overline{Nu} 值的差距越小。

C.Gau and D.Z.Jeng (1995) [7] 在傾斜矩形盒中，以硫酸銅水溶液做純質自然對流實驗中發現角度越大質 boundary-layer 所造成堆積現象會降低質傳遞率，角度變小時所產生 solutal plume 會強化質傳遞率。L.W.Wang (1990) [8] 為第一個以溫度兼具濃度梯度在傾斜低 Aspect ratio ($AR < 1$) 密閉盒中針對熱與熱質對流之實驗首創者，其發現在純熱傳實驗正角時 ($\theta > 0$) 會有 corner cell 產生，而負角則為 unicell。熱質實驗中 solutal plume 則會出現在 corner 或 bulk flow，且 solutal plume 和 secondary cell 會影響晶粒成長，結果認為此研究有更深入探討的



價值。由以上的回顧，可知目前對有傾斜變化的低展弦比質傳系統下自然對流現象及其質傳遞率之分析仍很缺乏。

以電化學方法配合前面所提的隔板在矩形封閉盒中之對流效應，模擬各種不同狀況流體流過障礙物的流場，有助於了解環境污染、晶體成長、洋流、空調等問題。

貳、實驗方法

實驗裝置

本實驗之矩形密閉盒由銅板和壓克力板所組成，盒內所使用的溶液為硫酸銅水溶液。左右銅板用來當作電極，前後壓克力板則作為流場觀察視窗用。將左右兩板分別接上銅管，由恆溫水槽通入水流後，將熱均勻傳到銅板上，使整板達到均溫，如此便可造成恆定的溫度梯度。而本實驗展弦比 (Ar) 為0.5的矩形盒，其尺寸圖如圖1。極板之輸入電源，乃電源經一直流電源供應器轉變為直流電後所提供的，並經一可變電阻與電流計串接，用以量度容器所通過之電流，極板再與電壓計並聯，用以量度容器兩端電位降，其設備電路圖如圖2所示。

實驗過程

- (1) 由於極板表面經長時間電解作用，故每次實驗前須將銅板以金鋼砂紙磨平拋光，再用蒸餾水沖洗，烘乾後用乙醇擦拭乾淨備用。
- (2) 按照計劃的預定濃度值調配溶液，本實驗採用的硫酸銅水溶液濃度範圍為0.05~0.069 M，硫酸濃度約為1.5 M。
- (3) 組合盒子，將硫酸銅溶液注入密閉盒內，然後放置旋轉實驗平台，並使用量角器校正所需傾斜角度。
- (4) 控制室溫為溶液平均溫度，設定盒內溫度梯度約6~8小時，待盒內溶液出現熱穩定狀態後，加入質傳效應。直接加入質傳效應，觀察流場。另設定盒內溫度梯度約6~8小時，待盒內溶液出現熱穩定狀態後，以熱電偶量測溫度或量測濃度。



(5) 測定極限電流。打開電源，以50 mV的增加量，記錄電壓和電流的變化，起初兩者呈線性關係，當電流增加至某一值後再增加電壓，溶液的電流值僅呈現微量變化，此值即所謂的極限電流，將此值除以反應極板的面積，可得極限電流密度。

維持電流密度在極限電流情況下，在極限電流情況下進行4~6小時，採用雷射光暗影法(shadowgraphy)。為捕捉流體運動情形，以單眼相機採直接曝光方式，減低室外光線干擾，以增強影像對比效果，調節適當快門，讓底片感光。本實驗所採用的照相器材為F-601相機，Kodak-Tmax 3200軟片及Nikon micro 55 mm的鏡頭。

參、結果與討論

一、熱質流場觀察（頂板冷板陽極，底板熱板陰極）

當硫酸銅溶液為0.05M， $Gr_m = 4.36 \times 10^6$ 、 $Gr_t = 8.16 \times 10^5$ 、 $N = 5.34$ 之情況下，當溫度場達到穩定後，溫度效應所造成的流向，在溫度邊界層內，熱板附近流體受熱平行向上運動，遇到左側隔板後越過隔板流體順勢向上流向冷板，與冷板較重流體混合，由於冷板間區域累積冷而重的流體，流體向下流動並順勢流向底板，如此形成一個循環。

加入質傳後，溫度效應使靠近熱板（底板）附近的流體受熱上升，而濃度效應，因熱板（陰極）產生銅離子，流體局部濃度變小而上升，因熱效應較強，熱板附近低濃度流體受熱垂直上升往冷板移動，同時冷板附近溫度效應伴隨濃度作用，高濃度流體便轉向下沉。受左側隔板阻隔，便在隔板上方顯現微量層狀堆積，濃度流體便越過隔板垂直向下流至底板，如圖3(a)。所顯示之質動線。隨著時間的增加，熱而輕之低濃度流體向上，受左隔板阻隔及向下冷流體流向限制，造成在隔板下方形成 recirculation zone 且逐漸有淡濃度流體累積，如圖3(b)。當時間的增加至 $t = 180 \text{min}$ 時整個流場為一紊亂流動型態，此現象的成因乃為低溫高濃度的流體向下沉時，除了有濃度擴散、溫度擴散外伴隨著重力加速作用，與向上之熱而輕之濃度流體交互作用而形成一種濃度極不均勻且紊亂的現象。如圖



3(b)~3(c)。

當硫酸銅溶液濃度增為 0.069M， $Gr,m=6.15 \times 10^6$ 、 $Gr,t=8.16 \times 10^5$ 、 $N=7.53$ 之情況下， N 濃度差與溫度差造成之浮力比值 $\pm \frac{\bar{\beta}\Delta C}{\beta\Delta T}$ 的絕對值增大，熱效應減小。加入質傳後，冷板附近因冷板（陽極）產生銅離子，流體局部濃度變大而下降，濃度流體受濃度作用及重力效應影響較強便平行下游。在左側隔板上處，濃度流體受隔板阻隔及下降流速快之影響，流體碰觸隔板後便轉向，在隔板右頂端處偏離，且傾斜向下往熱板流動。同樣地，溫度效應使靠近熱板附近的淡流體受熱平行上升，在左側隔板處受隔板阻隔和下游之冷而重流體流向限制，便轉向熱板向下移動，在隔板下方形成由上而下之 recirculation zone。整體流場型態即為冷板（陽極）濃度及重力效應所影響之流場形態，如圖 4(a)~4(c)。

二、溫度量測

溫度量測使用 T type 熱電偶計伸入流場內量取 $x/W=0.125$ 、 0.479 、 0.875 ， $z/L=0.5$ 處 y 方向之溫度分佈，硫酸銅溶液為 0.069M、 $Gr,t=8.16 \times 10^5$ 、 $Gr,m=6.15 \times 10^6$ 。

如圖 5 當頂板冷板陽極，底板熱板陰極，溫度場達到穩定後。在純溫度效應下，熱板附近的流體因為受熱而以平行熱板方式向上流動， $\bar{x}=0.125$ 位置時， $t=0$ min 其無因次溫度接近 0.6。另由頂板（冷板）附近產生之流體，流體遇冷收縮，局部密度變大，沿著冷板平行下降，如圖 $\bar{x}=0.479$ 及 $\bar{x}=0.875$ 位置之 $t=0$ min 時其無因次溫度均接近 0.6。且受熱而輕熱流體由兩側上升影響 $\bar{x}=0.875$ 其兩側位置無因次溫度更上升接近 0.7。

加入質傳後，陰極（底板熱板）附近的流體受熱上升，同理，陽極（頂板冷板）附近的高濃度的流體遇冷而下降，受冷而重高濃度及重力作用，在流場各個位置無因次溫度變動不大，其無因次溫度均保持或下降至 0.6 左右。整個流場均為溫度效應之冷流體主導之流場型態。



三、質傳遞率分析

本部份實驗以展弦比 $Ar=0.5$ 為例，固定 Gr,m 及隔板位置來觀察 Sh 與 Gr,t 之關係，其結果如圖 6 所示， Sh 會隨著 Gr,t 的增加而增加。原因是 Gr,t 增加時，兩板的溫度差增加，流體的溫度效應增加，流體的對流效應加強。當加入質傳時，均會帶動質量的傳遞，故會造成質傳遞率的增加。

肆、結 論

根據前面的實驗結果可以得到以下結論

一、流場型態：

頂板及底板下方會形成熱堆積或冷堆積。加入質傳後，亦會形成高濃度或低濃度質邊界層之堆積或 density surface 層化現象。

二、溫度分佈：

純溫度梯度達到穩定後，除熱堆積及冷堆積外，溫度分佈大致隨 y 增加而增加。到達熱堆積或冷堆積區域時，溫度會有較大變化。

三、濃度分佈：

當隔板位於側板，則冷板與隔板間區域的無因次濃度值最高，而熱板與隔板間區域的無因次濃度值最低。

四、質傳遞率分析：

固定 Gr,m 來觀察 Sh 與 Gr,t 之關係， Sh 會隨著 Gr,t 的增加而增加。

伍、參考文獻

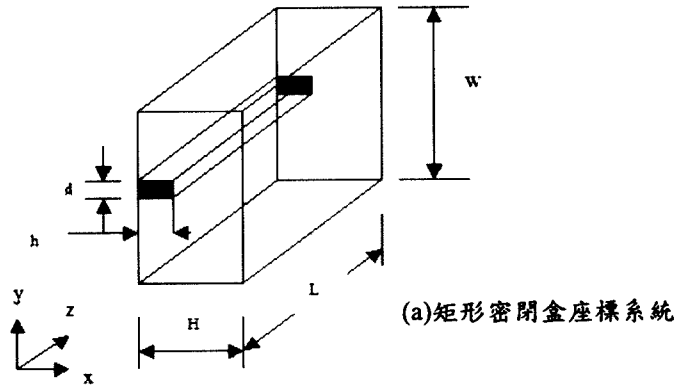
- 1.W.G. Brown and K.R. Solvason "Natural Convection Through Rectangular Openings in Partitions -1" Int, J. Heat and Mass Transfer, Vol.5, pp.859-868.1962



-
- 2.M.W. Nansteel and R. Greif , " Natural Convection in Undivided and Partially Divided Rectangular Enclosures" Journal of Heat Transfer, Vol.103, pp.623-629, 1981
 - 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 Transfer, Vol.27, No.4, pp.561-571. 1984
 - 4.N.N. Lin, and Adrian Bejan, "Natural Convection in a Partially Divided Enclosure" Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol.26, No.12, pp.1867-1878.1983
 - 5.K.H. Winters, "The Effect of Conducting Division on the Natural Convection of Air in a Rectangular Cavity with Heated Side Walls" ASME Paper No.82-TH69, 1982
 - 6.S.V. Patankar, "Natural convection in a Partitioned Cubic Enclosure", Journal of Heat Transfer Vol.114, pp.410-417,1992
 - 7.C.Gau and D.Z Jeng, "Solutal Convection and Mass Transfer in Inclined Enclosures", J. of Thermophysics and Heat Transfer, Vol.9, No.2, pp.262-269. 1995
 - 8.L.W.Wang, "Ground-Based Experiments on Thermal and Thermalsolutal Convection in Inclined Low-Aspect-Ratio Enclosures", 28th Aerospace Sciences Meeting, AIAA 90-0413, pp.1-7, 1990



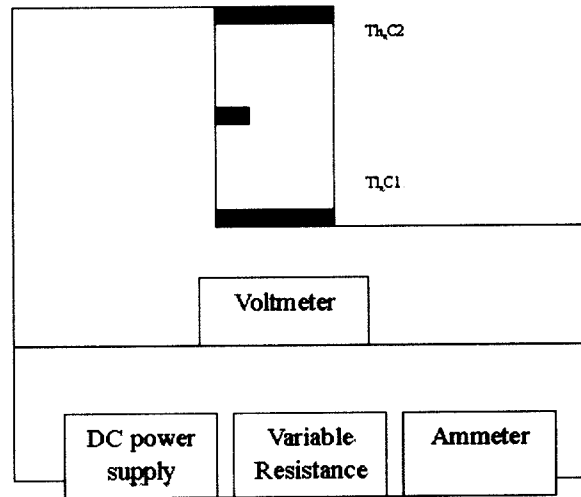
垂直矩形盒中左隔板對熱質順向自然對流現象之研究



H	W	L	h	d	ΔT	$\Delta \rho$
36mm	72mm	130mm	9mm	3mm	0.5	0.75

(b) 矩形密閉盒尺寸圖

圖 1. (a) 矩形密閉盒座標系統，(b) 矩形密閉盒尺寸圖



■ : copper plate ■ : acrylic plate

圖 2. 實驗裝置之設備電路圖



垂直矩形盒中左隔板對熱質順向自然對流現象之研究

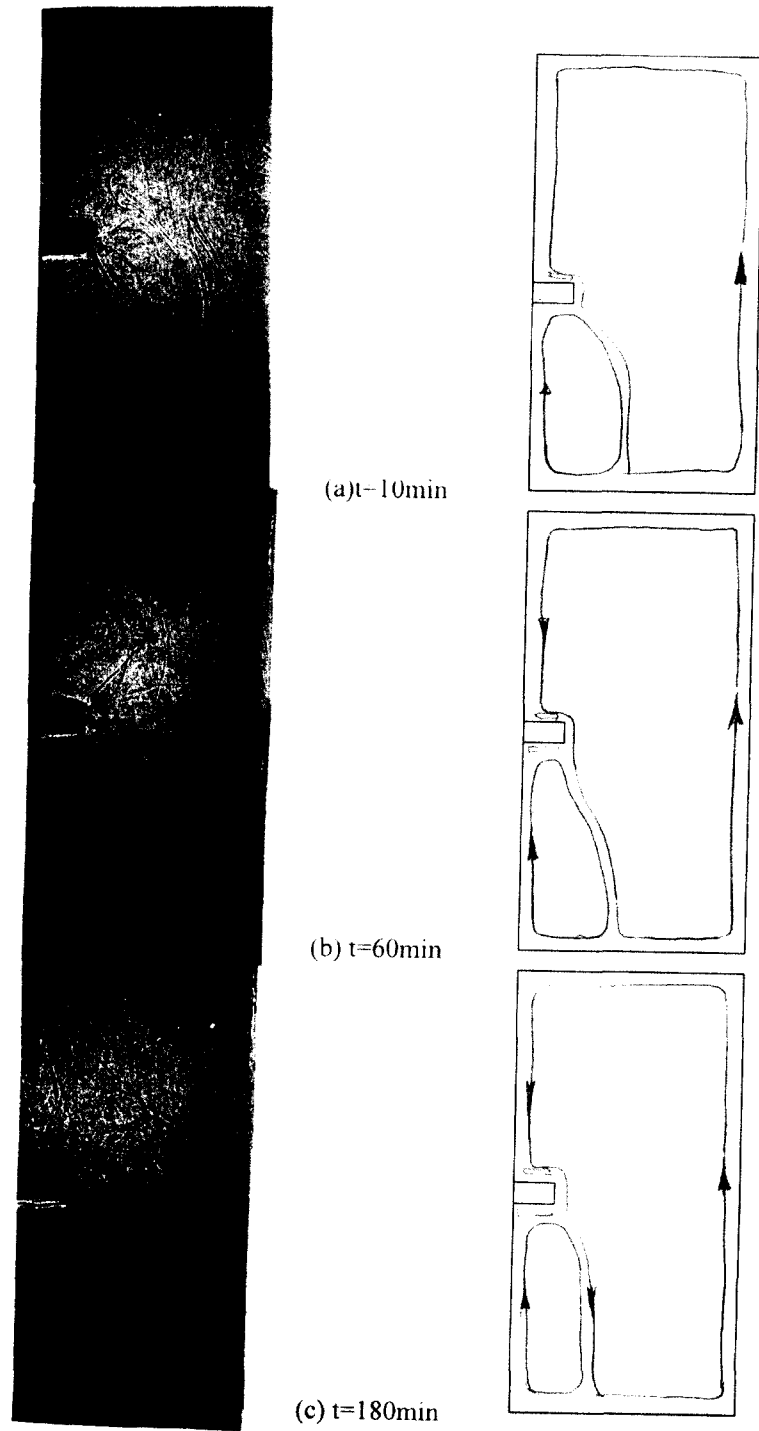
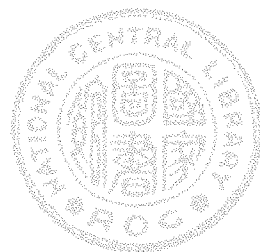


圖3. $\theta=90^\circ$, $Ar=0.5$, $Ap=0.75$, $Gr,m=4.36 \times 10^6$, $Gr,t=8.16 \times 10^5$

$N=5.34$ (順向流場)具隔板雷射光暗影法流場型態



垂直矩形盒中左隔板對熱質順向自然對流現象之研究

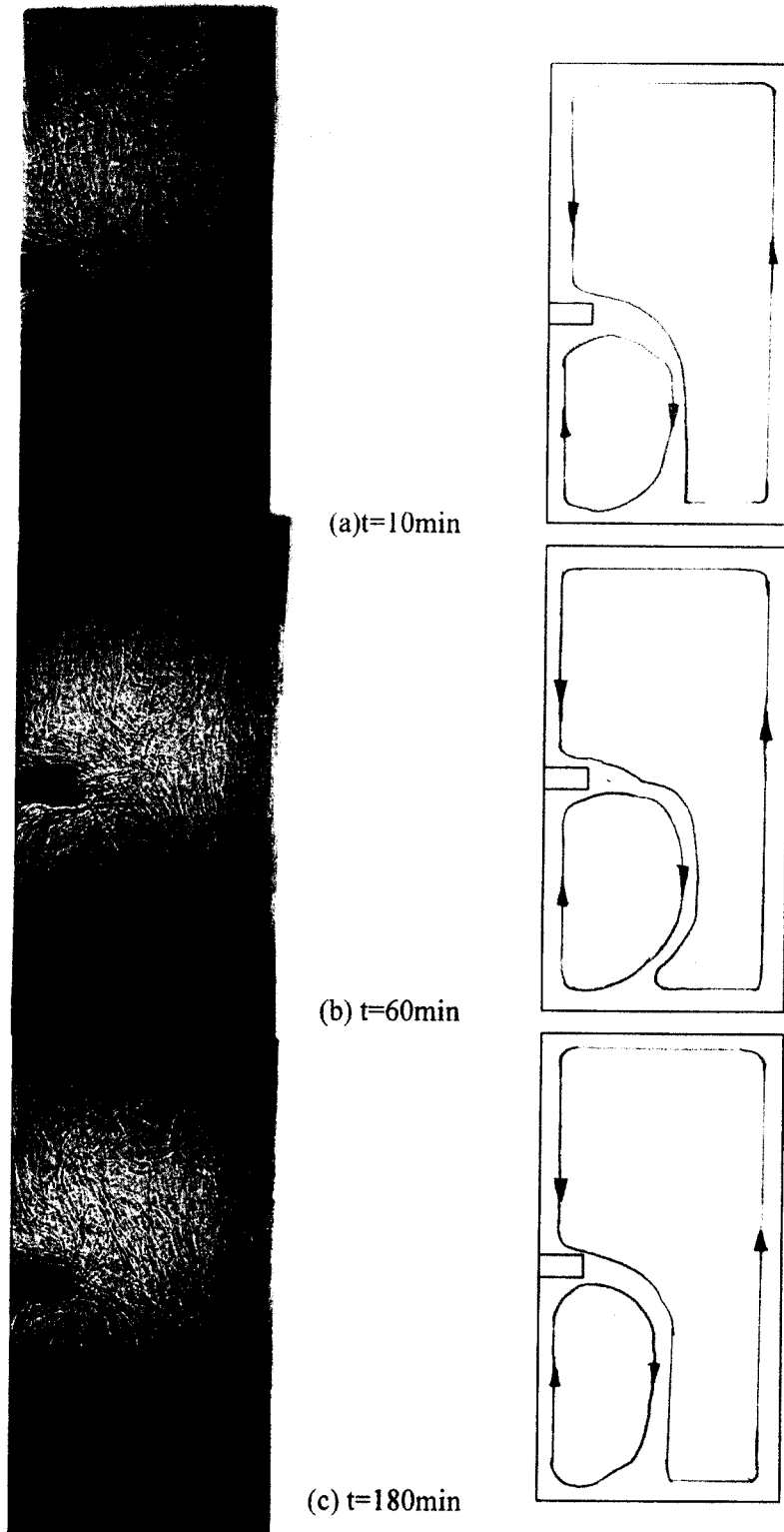
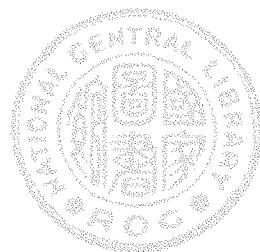


圖 4. $\theta=90^\circ$, $Ar=0.5$, $Ap=0.75$, $Gr_m=6.15 \times 10^6$, $Gr_t=8.16 \times 10^5$

$N=7.53$ (順向流場)具隔板雷射光暗影法流場型態圖



垂直矩形盒中左隔板對熱質順向自然對流現象之研究

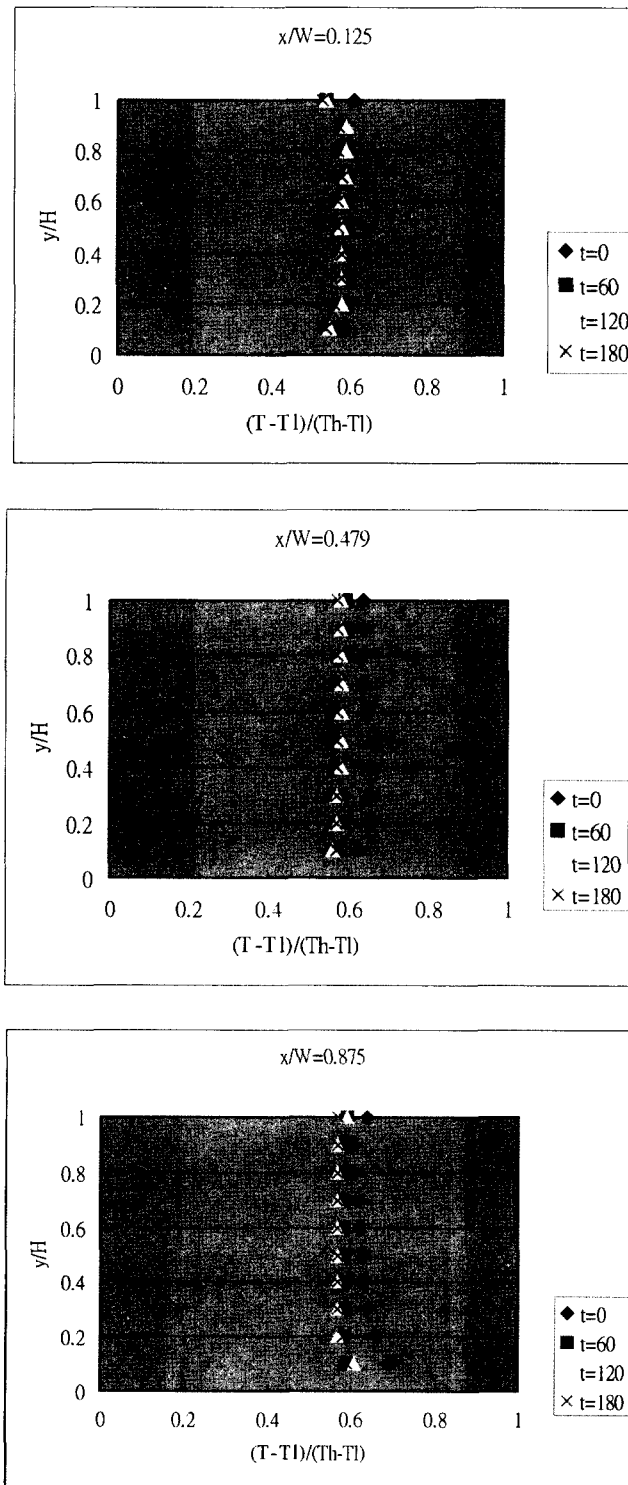


圖 5. $\theta=90^\circ$, $Ar=0.5$, $Ap=0.75$, $Gr_m=6.15 \times 10^6$, $Gr_t=8.16 \times 10^5$,

$N=7.53$ (順向流場) 下隔板溫度分佈圖



垂直矩形盒中左隔板對熱質順向自然對流現象之研究

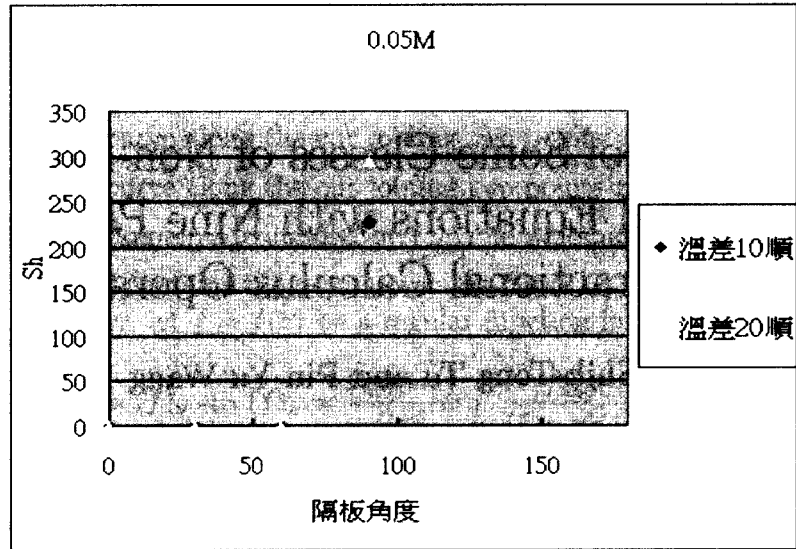


圖 6. 固定 $Gr,t (=8.16 \times 10^5)$ 及 $Gr,m (=4.36 \times 10^6)$,
Sh 與 θ 角關係圖

