

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

## 實驗與理論探討上下振動式Π型管道內混合對流之研究(第 1年) 期中進度報告(精簡版)

計畫類別：個別型  
計畫編號：NSC 97-2221-E-009-144-MY2  
執行期間：97年08月01日至98年07月31日  
執行單位：國立交通大學機械工程學系(所)

計畫主持人：傅武雄

處理方式：期中報告不提供公開查詢

中華民國 98年05月13日

## 摘要

本研究主要目的在以實驗方法去探討混合對流在一振動 U 型渠道內對壁面熱傳效率之影響情形，並搭配數值模擬來提高實驗之可信度。實驗設備大致上可以分為三部份：冷卻渠道、往復運動機構、溫度控制系統，工作流體為空氣。另外使用放煙線法進行流場可視化的拍攝，以實際流場變化情形與數值模擬之流線圖互相驗證，兩者結果非常吻合。

實驗針對不同的進口流體雷諾數和渠道無因次往復振動頻率及不同溫差下來進行討論，由結果得知熱傳效率會因為渠道振動而提高，熱傳增益受到進口流體雷諾數增加影響較大，相較之下渠道低無因次振動頻率增加效果較不明顯，所得到最大熱傳增益在 35% 以內。且溫度增加會使得自然對流效應增強，使部分加熱區熱傳效率增加。整體看來混合對流其熱傳效率較強制對流來的好。

In order to investigate the heat transfer phenomena in a U-shaped channel with reciprocating motion, an experimental work is conducted and validated by an auxiliary computational procedure simultaneously. The experimental apparatus consist of three parts, a cooling channel, reciprocating mechanism and heating control. The working fluid is air and the parameters of Reynolds number, temperature and oscillating frequency are varied. In addition, a flow visualization using the Smoke-wire method is adopted to indicate the flow field and compared with the streamline of the numerical

results. The comparisons between experimental and numerical results are consistent well. The results show that the heat transfer rate is mainly dominated by Reynolds number, and less affected by increasing the low oscillating frequency. The enhancement of the heat transfer is confirmed and within 35% in this study. In general, the aid of mixed convection is to remove more heat than force convection.

關鍵字：往復運動、混合對流

## 一、緒論

近年來機械元件加工技術的精進以提升能源效率，但相對來說機械元件所需承受的熱負載也是不斷增加，當元件處於高溫高壓下會縮短其使用的年限並且容易發生破損的現象，為解決此現象所衍生的元件損害與故障，機構熱傳效率的提昇一直是重要的研究課題。

由於活塞冷卻通道內之冷卻流體會隨活塞作往復運動，其流場與其熱傳特性除與管道的幾何形狀有關外，也會受系統往復運動時所產生的往復力影響，形成脈衝流(pulsatile flow)。在過去，Grassmann and Tuma[1]在 1979 年以實驗量測一受脈動力之平滑管流，於紊流狀態下之質傳特性。結果證明其 Sh No. (Sherwood number)可增加至一般穩態管流的 250%。Patera and Mikic[2]指出此現象是因為流體受脈動力影響，自壁面處產生分離(separation)及回流(flow reversal)兩種混合(mixing)現象，進而增加了流場的不穩定性(hydrodynamics instability)所造成的效果。Kim[3]等

人更利用數值模擬方法，發現受脈動力影響之流場，其熱傳特性也會受其所施的脈動力大小不同而有所差異。Nishimura[4-6]實驗與模擬，利用波浪形管道取代平滑管道研究脈動流的熱傳變化，發現隨著雷諾數增加熱傳率也有顯著的增加，其流動的型態則直接影響熱傳速率，且與往復頻率有關。Mackley、Tweddle and Wyatt[10]利用脈衝流流經內有嵌入擋板的管道中，結果發現 Nu. no. (Nusselt number) 跟穩流流經光滑的管壁相比明顯地增加，Mackley and Ni[11]利用脈衝流流經安插週期性擋板的管道，結果發現軸向混合 (radial mixing) 效果相當良好，Chang[12]利用實驗量測方法，比較內設凸起物之靜止流場與受往復運動之動態流場的熱傳性能。結果發現往復運動下的熱傳效果，會隨著往復運動速度的增加而提昇，當達到其實驗中的最高往復運動速度時，熱傳效果可比在靜止流場中增加 45%。之後 Chang[13] 又對往復平滑面反重力式盲管進行熱傳實驗，發現於往復管中慣性力相對強度提升可提高熱傳但亦增加無因次壁溫，視管壁區間及往復數範圍，增加往復力相對強度可提高或降低無因次壁溫。

比較上述各種增加熱傳量的方法，利用被動式方法是由於受到流場在熱傳面上形成的速度與溫度邊界層妨礙熱量傳出的影響，因此熱傳效率的增加受到限制。根據熱傳導的傅利葉定律，在溫度梯度小的情況下，熱傳量也比較小。因此，溫度邊界層的存在將限制壁面所能傳出之熱傳量。為了大幅提高高溫壁面的熱傳效率，必須移除熱傳面上的邊界層，使高溫

壁面直接與低溫流體接觸，進而提高壁面與流體之間的溫度梯度，達到增加壁面熱傳量的目的。因此，Fu et al.[14] 採用在加熱壁面上裝置移動薄塊的方式，藉由薄塊在加熱壁面上快速地往復運動有效掃除壁面的邊界層，有效增加管道內的熱傳效果，結果顯示最大的熱傳可以增加98%。但是利用薄塊掃除溫度邊界層以增加熱傳效果的方法，由於受限於往復機構必須在溫度邊界層內才能達到要求的熱傳效益，因此無法有效的應用在具有凹槽、凸塊以及複雜幾何形狀外型的管道內壁。以上是利用振動讓熱傳增加，所以有人提出振動對熱傳的影響。例如Fu et al.[16-17]即針對密閉環境中變動加速度和振動對自然對流的影響加以探討，並發現簡明的修正公式以預測共振頻率及紐塞數的變化。Kim[18]在實驗中，發現了振動頻率變化會影響熱傳的傳遞，但是往往熱傳率的最大值不一定是在頻率最大的時候，而是會在一個特定的自然頻率下產生共鳴，稱之為共振頻率。Fu 與 Huang[19-20]利用數值分析的方法探討垂直通道中，加熱振動面之振動頻率、振幅以及雷利數(Rayleigh number)對於自然以及混合對流的影響；在相同的雷利數下，加熱面以不同的振動頻率與振動幅度之組合下，其熱傳速率有可能會小於固定不動的狀態，也就是在不同的振動頻率與雷利數組合之下可以找到一臨界振動頻率，並可利用振幅與雷利數來表示之。

賴[22]的研究認為，實際的活塞頂部受到引擎室爆炸的影響溫度非常之高，該區流場受溫度效應影響的比例非常大，因此自然對流效應不容忽

視。因此賴模擬的過程中，加入了溫度對於自然對流的影響，並針對不同噴入氣流的雷諾數、活塞震盪頻率、活塞振幅、重力方向，比較其熱傳效益。其結果顯示當重力方向和進口流相反時，活塞頂部的流體容易由於高溫而形成溫度層化，導致活塞頂部熱傳效率降低；當進口流體雷諾數變大時，除了導致流體衝擊高溫壁面的現象更加明顯外，流體隨活塞做往復運動期間，流道內部流場的擾動也會隨著雷諾數增加而變大，因此活塞頂部高溫壁面的熱傳效益會明顯的隨著流體雷諾數的增加而增加；而當重力方向和流體的進口方向相同時，由於浮力效應會將高溫流體帶離高溫壁面，因此增加了管道內冷流體接觸高溫壁面的機會，而有使熱傳效率增加的情形。

余[24]跟陳[25]將廖[21]的模擬做實驗的驗證，其管道與地面水平放置，所對應之  $Gr/Re^2$  值範圍為 0.03~0.23 之間，未考慮重力影響之自然對流，主要以強制對流為主，靜止的狀態下其頂部之強制對流熱傳效率以前段最好、中段次之、後段加熱區最差；在相同的雷諾數下，熱傳效率並不會因為震動頻率升高而呈現逐漸增加或減少的趨勢，但是內部流場存在一個自然頻率，在此頻率下可以大幅度的提升頂部熱傳；在相同的振動頻率下，熱傳效率會因雷諾數的提升有增加的趨勢。

所以本實驗將根據自然對流引發的浮力效應做混合對流之實際的驗證，並與模擬相互對照，且在考慮重力的影響下  $Gr/Re^2$  值的範圍為 0.8~3.64 之間，將 U 型渠道垂直擺

置，探討進口流體與重力方向同向來進行熱傳效率分析，並在流場中施予不同振動頻率，研究流體受往復運動的影響下，在不同的參數範圍中，如  $Re$ 、 $Gr$ ，其活塞頂面紐塞數(Nusselt Number)變化情形，藉此得到一個熱傳效率較高的設計參數，希望能藉由此分析結果，對工業界實務應用上有所幫助，且能提供活塞內部冷卻系統設計的參考。

## 二 實驗設備

本實驗將探討活塞內部冷卻渠道之冷卻流體隨活塞進行往復運動對活塞壁面散熱效率影響情形，圖 2-1 (b) 為活塞加裝一冷卻渠道在汽缸內作往復運動之示意圖，由於活塞會上下進行往復運動，在壁面附近留有一冷卻渠道會隨著活塞進行運動，所以本實驗將實驗設備架設與地面垂直，進一步考慮了重力的影響，從流體進口速度與重力方向同向觀察，希望藉此往復機制可以增加活塞高溫壁面的熱傳效率。為了進行此實驗分析，實際架設一設備如圖 2-2 所示，進行進口速度與重力方向同向之實驗，首先是冷卻流體部份，利用送風機 (1) 提供穩定且連續的空氣來作為工作流體，用以冷卻高溫壁面，空氣經由風機送出以後，利用圓管輸送經方形轉接頭進入冷卻渠道 (4)，冷卻渠道分為延長渠道 (41)、方形套管 (42) 和 U 型渠道 (43)，其中 U 型渠道為本實驗之測試段，因此在渠道的頂部壁面放置自製加熱片，用以提供熱量作為模擬活塞內部的高溫壁面，並方便於實驗時計算壁面紐塞數，進而了解壁面的

熱傳效率，並將此部份渠道固定在一往復機構(5)上，當往復機構開始運作時，渠道會隨之進行往復運動，此時裡面的冷卻流體受到振動影響，對壁面散熱也會有不同的效果，最後利用個人電腦擷取各項所需數據，經過處理以後進行壁面的熱傳分析。

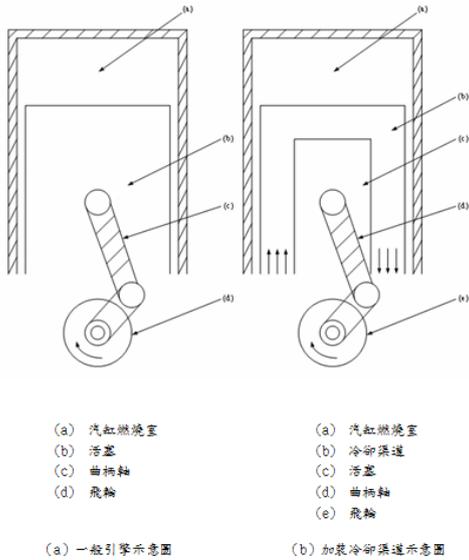


圖 2-1 引擎活塞機構示意圖

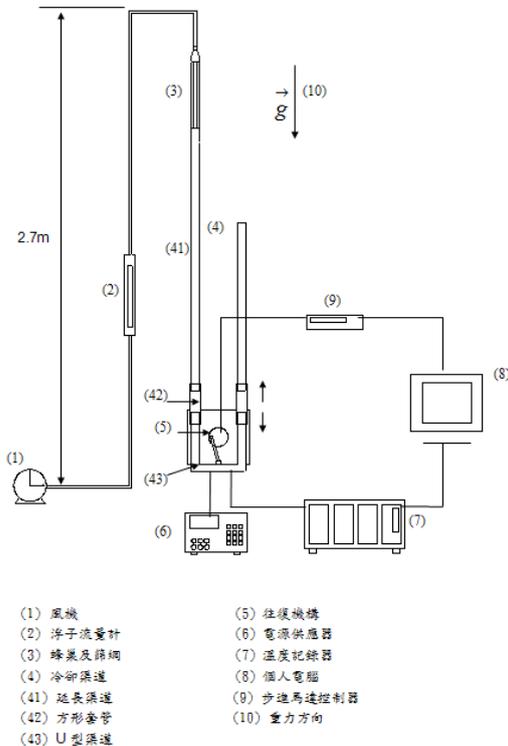


圖 2-2 實驗設備總圖

由於數值模擬部份設定渠道進行正弦波之往復運動，以下說明為渠道進行正弦波往復運動之原理：

$s$ ：滑塊與連桿接點至套筒圓心之距離  
渠道運動位置方程式

$$S = \frac{s}{W} = L_c \sin(2\pi F_c \tau) - \sqrt{L^2 - (L_c \cos(2\pi F_c \tau))^2} \quad (2-1)$$

$S$  的運動範圍為  $-L_c - L \leq S \leq L_c - L$

定義新的座標： $S_p = S + L$

$$S_p = S + L = L_c \sin(2\pi F_c \tau) - \sqrt{L^2 - (L_c \cos(2\pi F_c \tau))^2} + L \quad (2-2)$$

$S_p$  的運動範圍為  $-L_c \leq S_p \leq L_c$

將位置方程式對時間取一次微分可得渠道運動速度方程式

$$V_c = \frac{v_c}{u_0} = 2\pi F_c L_c \cos(2\pi F_c \tau) - 2\pi F_c L_c^2 \frac{\cos(2\pi F_c \tau) \sin(2\pi F_c \tau)}{\sqrt{L^2 - (L_c \cos(2\pi F_c \tau))^2}} \quad (2-3)$$

圖 2-6 為式 (2-3) 之結果，橫座標為時間軸，縱座標為無因次渠道振盪速度，當  $l/l_c$  趨近於無限大，也就是說連桿長度無限長，渠道往復運動將會呈現正弦波  $S = L_c \sin(2\pi F_c \tau)$  振盪，一次微分的無因次振盪速度方程式則為  $V_c = 2\pi F_c L_c \cos(2\pi F_c \tau)$ ，當  $l/l_c = 1.5$  時的速度方程式與理想的弦波振盪則有一段差距，此實驗機構  $l/l_c = 4$ ，由圖觀察得知與正弦波振盪差異甚小。

為得到較佳的高溫壁面與方便量測各點溫度用以計算此實驗之紐塞數，以銅片、鎳鉻絲及巴沙木等材料製成加熱片，並由電源供應器提供電能，使鎳鉻絲發熱產生熱量每片加熱片上均黏有熱偶線，用以量測該點溫

度。各組加熱區塊詳細位置如圖 2-8 所示，依流體入口方向加熱區分為前、中、後段加熱區，各個加熱區塊僅中間加熱片為實驗計算所用，上下左右四塊加熱片則為熱保護用。為了減低熱量從組合間縫隙散失，在加熱區塊周圍及後方貼附絕熱泡棉。

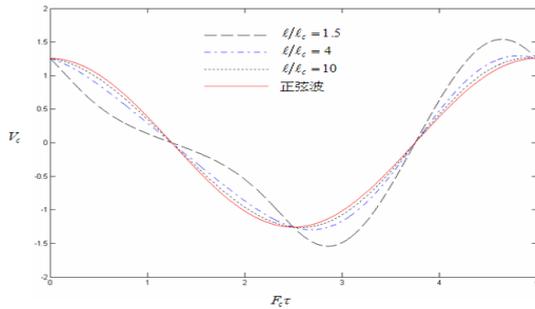


圖 2-6 通道振盪速度圖

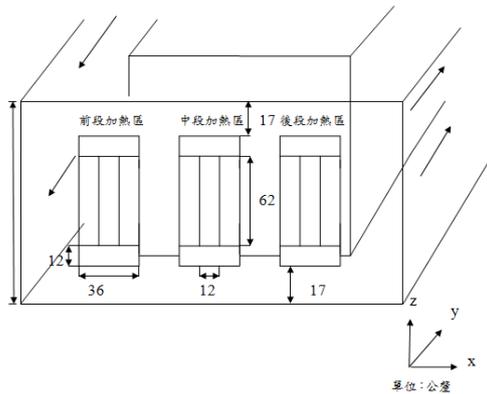


圖 2-8 加熱區段位置圖

### (一) 無因次參數

本研究討論的實驗參數，其定義如下：

(a) 雷諾數：

$$Re_w = u_0 \cdot W / \nu$$

$W$  為 U 型渠道寬度

$u_0 = \frac{Q}{A}$  為流體平均速度

$Q$  為空氣流量

$A$  為渠道截面積

$\nu$  為空氣動黏滯係數

(b) 無因次振動幅度：

$$L_c = \ell_c / W$$

$\ell_c$  為 U 型渠道進行往復運動的振幅

(c) 無因次振動頻率：

$$F_c = f_c \cdot W / u_0$$

$f_c$  為 U 型渠道進行往復運動的頻率

(d) 參數

$$V_c = \frac{v_c}{u_0} = \frac{2\pi F_c L_c \cos(2\pi F_c \tau) - 2\pi F_c L_c^2 \frac{\cos(2\pi F_c \tau) \sin(2\pi F_c \tau)}{\sqrt{L^2 - (L_c \cos(2\pi F_c \tau))^2}}}{L^2 - (L_c \cos(2\pi F_c \tau))^2}$$

(3-4)

$v_c$  為 U 型渠道進行往復運動的速度

(e) 參數

$$Gr / Re_w^2 = g \times \beta \times \Delta T_w \times W / u_0^2$$

(3-5)

$\beta$  為空氣熱膨脹係數

$g$  為重力係數

### 三、結果與討論

本章節為探討渠道進行往復運動，對於 U 型渠道底部壁面的熱傳效率影響，共分為渠道處於靜態與動態狀態下來進行研究。

實驗首先量測靜止狀態下 U 型渠道底部壁面溫度，並換算成紐賽數與數值計算做比對，以驗證實驗機構的完備性且增加實驗可信度，隨後再著手討論 U 型渠道於往復運動狀態下底部的熱傳效率分析，靜態實驗的流體進口雷諾數範圍從 300、200 到 150，配合溫差 10°C~40°C，每增加 10°C 進行一次實驗；動態實驗的部分，進口流體雷諾數則分別為 300、200 和 150，配合溫差 10°C 及 40°C，再搭配無因次振動頻率為 0.2、0.4 進行實驗。

$Gr / Re_w^2$  為流場強制對流與自然對流效應強弱的判定值，其物理意義為浮力與慣性力的比值，當  $Gr / Re_w^2 \ll 1$  時，表示浮力效應不顯著，因此流場為強制對流主導的狀態；如果  $Gr / Re_w^2 \gg 1$ ，表示浮力效應不可忽略，流體慣性力較無影響。

如果此值接近 1，表示浮力及慣性力都不可忽略，則視為混合對流。從所有實驗組別參數得知  $Gr/Re_w^2$  值介於 0.40~6.47 之間，主要以混合對流為主，所以強制對流與自然對流效應都不可忽略。

實驗首先進行渠道處於靜止狀態下之底部壁面熱傳分析，此結果用以與渠道進行振動下相互比較以了解振動對於渠道內部熱傳增益情形，進口流體雷諾數從 300、200 和 150，配合溫差由 10°C 增至 40°C，每增加 10°C 進行一次實驗，在表格中分別記錄數值模擬和實驗所得到之平均紐塞數，表中的數值模擬是由實驗室中楊忠霖同學所計算，利用 StarCD 以  $k-\varepsilon$  model，紊流強度 (turbulent intensity) 1% 計算得到。

在相同的雷諾數下，因為渠道的幾何形狀限制影響下，可以發現 U 型渠道底部之熱傳效率以前段加熱區最好，中段加熱區次之，後段加熱區為最差。由實驗數據觀察可以明顯看出當熱傳效率降低時，也就是平均紐塞數較低時，其巴沙木熱傳導帶走的比率增大， $Re_w=300$ ， $F_c=0.0$ ， $\Delta T_w=10^\circ\text{C}$  的後段加熱區其巴沙木熱傳導帶走比率高達 50%，故了解渠道內部的冷卻流體並無法發揮效能。由數值模擬得知  $Re_w=300$ ， $F_c=0.0$ ， $\Delta T_w=10^\circ\text{C}$  之流場的流線圖，如圖 4-2 所示，觀察其原因得知，前段加熱區位於流場入口的位置，受到流體進口直接衝擊的影響，有效的破壞此區域的溫度邊界層，移除熱傳面上的邊界層，使高溫壁面直接與低溫流體接觸，進而提高壁面與流體之間的溫度梯度，達到增加壁面熱傳量的目的，故熱傳效果相當良好，平均紐塞數最大；中段加

熱區為流體轉彎後較為平順的流過，無法破壞熱邊界層，熱傳效果較差，平均紐塞數降低；後段加熱區則處於流體將要轉向流向出口，在途中將會發生與壁面分離的現象，在渠道角落的地方則發生迴流現象，當此迴流一旦發生會導致的結果，其一因為迴流在角落盤旋，溫度也跟著流體在此滯留，導致 U 型渠道後段溫度無法散逸，其二此區域的流體速度較低，自然對流效應增強，此時的流場的強制對流效應該無法發揮功用，故熱量只能藉由空氣和巴沙木熱傳導散逸。圖 4-3 則為  $Re_w=300$ ， $\Delta T_w=10^\circ\text{C}$  等溫線分佈圖，前段加熱區的等溫線分佈較密集，表示此區域的溫度變化較劇烈，故熱傳效果最好，後段加熱區之等溫線分佈相較之下稀疏，故熱量容易累積在此，熱傳效率較差，中段加熱區則介於兩者之間。 $Re_w=300$ ， $\Delta T_w=10\sim 40^\circ\text{C}$  實驗結果與數值模擬之紐塞數分佈於圖 4-4 至圖 4-7 所示，可看出實驗與數值模擬趨勢大致上相同，都是前段加熱區最高，中段後段加熱區依序次之。

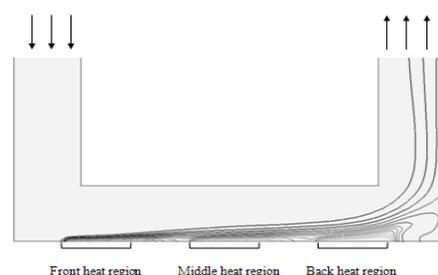


圖 4-3  $Re_w=300$ ， $\Delta T_w=10^\circ\text{C}$  等溫線分佈圖

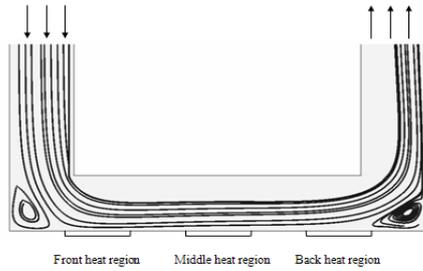


圖 4-2  $Re_{pr}=300, \Delta T_p=10^\circ\text{C}$  流線圖

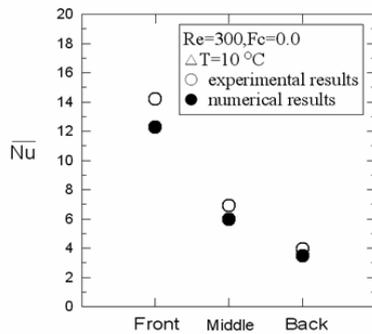


圖 4-4  $Re_{pr}=300, Gr/Re_{pr}^2=0.40, \Delta T_p=10^\circ\text{C}$  靜態實驗與模擬紐塞數分佈

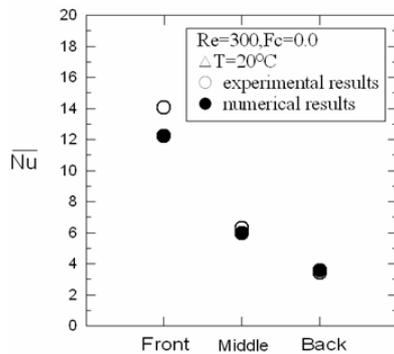


圖 4-5  $Re_{pr}=300, Gr/Re_{pr}^2=0.81, \Delta T_p=20^\circ\text{C}$  靜態實驗與模擬紐塞數分佈

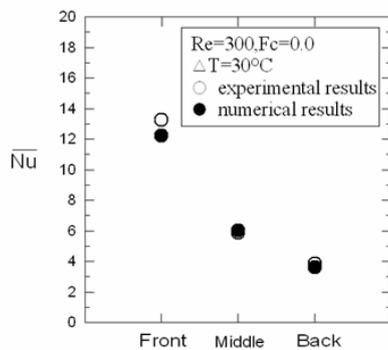


圖 4-6  $Re_{pr}=300, Gr/Re_{pr}^2=1.21, \Delta T_p=30^\circ\text{C}$  靜態實驗與模擬紐塞數分佈

表 4-5 (a) 為進口流體雷諾數 300，無因次振動頻率在 0.2 及 0.4 下之數值模擬和實驗結果之平均紐塞數，並且比較其差異度將其列出，如表所示。

以加熱區位置來說，渠道振動之後仍然是前段散熱最好，中段次之，後段最差，跟渠道靜止時比較壁面整體平均紐塞數增加比率，如表 4-6 所示，熱傳效率大幅的增加，由此可見在此情形下振動對於渠道壁面散熱有良好的增益。

表 4-5 動態實驗與數值模擬之結果

$Re_{pr}=300$ $F_c=0.2$	$Gr/Re_{pr}^2$	0.40			1.62		
	$\Delta T_p$ ( $^\circ\text{C}$ )	10			40		
	heat region	F	M	B	F	M	B
	$\overline{Nu}$ (numerical results)	14.07	6.89	4.90	13.62	6.82	5.08
	$\overline{Nu}$ (experimental results)	15.01	8.72	6.03	16.10	8.67	6.28
	$\varepsilon$ (deviation)	6.2%	21.0%	18.6%	14.1%	21.3%	19.1%

表 4-6 渠道在振動下平均紐塞數增益情形

$Re_{pr}=300$ $Gr/Re_{pr}^2=0.40$ $\Delta T_p=10^\circ\text{C}$	$F_c$	0.2	0.4
	Total nusselt number	9.92	10.06
	En (enhancement)	34.4%	36.3%

(a)

$Re_{pr}=200$ $Gr/Re_{pr}^2=0.91$ $\Delta T_p=10^\circ\text{C}$	$F_c$	0.2	0.4
	Total nusselt number	8.42	8.61
	En (enhancement)	33.4%	36.4%

(b)

$Re_{pr}=150$ $Gr/Re_{pr}^2=1.62$ $\Delta T_p=10^\circ\text{C}$	$F_c$	0.2	0.4
	Total nusselt number	6.65	7.4
	En (enhancement)	8.6%	21.1%

(c)

為了印證模擬之真實性，使用放煙線法來進行流場可視化，觀看實際流場是否與數值模擬有相同的現象，

如圖 4-21 至圖 4-22 所示，圖 4-21(b) 為數值模擬得到之靜態 U 型渠道入口處的流場圖，鎳鉻絲擺放相對應位置為圖中黑線所示，圖 4-21 (a) 流場可視化照片中白色線所指的即為鎳鉻絲發煙處。數值與實驗結果的對照，可說明實驗與數值的結果互相吻合。

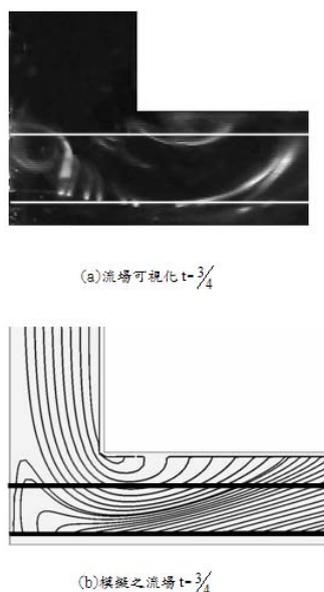


圖 4-21  $Re_p = 150$ ,  $\Delta T_p = 40^\circ\text{C}$  動態  $t = \frac{3}{4}$  時入口之流場可視化與模擬比較

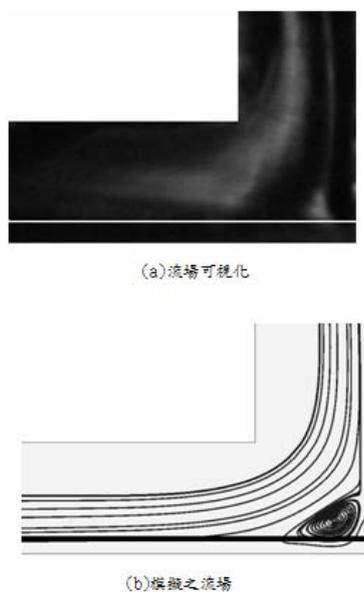


圖 4-22  $Re_p = 150$ ,  $\Delta T_p = 40^\circ\text{C}$  靜態出口之流場可視化與模擬比較

#### 四、結論

為瞭解一冷卻渠道進行往復運動

下，混合對流對 U 型渠道底部的熱傳效率影響，實際架設一組實驗設備來進來實驗，對 U 型渠道於靜止與往復運動狀態下，探討不同雷諾數、不同溫差及搭配不同無因次振動頻率下的組合，並以數值模擬比對，提高實驗結果的可信度。最後將結果歸納成以下結論：

1. U 型渠道處於靜止狀態下時，由於受渠道幾何形狀的影響，所以前段加熱區熱傳效率最佳、中斷加熱區次之、後段加熱區最差。
2. 當渠道進行振動時，壁面熱傳效率較靜止狀態時改善許多，在本實驗中最大熱傳增益約為 35%。
3. 渠道在往復運動狀態下時，其熱傳效率主要是以雷諾數的提升而增加，相較於無因次振動頻率的改變影響較小。
4. 溫度差愈增加，前段加熱區的熱傳效率也會隨之增加，中後段加熱區則無明顯的規則。
5. 本實驗以混合對流去探討熱傳效率的情形，與文獻陳[25]中以強制對流為主主的實驗比較，本實驗熱傳效率較佳，說明在冷卻渠道內自然對流對於熱傳效率有一定的助益。

#### 參考文獻

1. P. P. Grassmann, and M. Tuma, "Applications of the Electrolytic Method- II . Mass Transfer within a Tube for Steady, Oscillating and Pulsating Flows," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.22, pp.799-804, 1979.
2. A. T. Patera, and B. B. Mikic,

- “Exploiting Hydrodynamic Instabilities Resonant Heat Transfer Enhancement,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.29, No.8, pp.1127-1138, 1986.
3. S. Y. Kim, B. H. Kang, and A. E. Hyun, “Heat Transfer in the Thermally Developing Region of a Pulsating Channel Flow,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.36, No.17, pp.1257-1266, 1993.
  4. T. Nishimura, A. Taurmoto, and Y. Kawamura, “Flow and Mass Transfer Characteristics in Wavy Channels for Oscillatory Flow,” International Journal of Heat Mass Transfer, Vol.30, pp.1007-1015, 1987.
  5. T. Nishimura, S. Arakawa, D. Murakami, and Y. Kawamura, “Oscillatory Viscous Flow in Symmetric Sinusoidal Wavy-Walled channels”, Chemical Engineering Science, Vol. 44, pp. 2137-2148, 1989.
  6. T. Nishimura, S. Arakawa, D. Murakami, and Y. Kawamura, “Oscillatory Flow in a Symmetric Sinusoidal Wavy-Walled Channel at Intermediate Strouhal Numbers,” Chemical Engineering Science, Vol. 46, pp. 757-771, 1991.
  7. A. E. Bergles, “Heat Transfer Enhancement – The Encouragement and Accommodation of High Heat Fluxes,” ASME Journal of Heat Transfer, Vol.119, pp.8-19, 1997.
  8. R. L. Webb, E. R. G. Eckert, and R. J. Goldstein, “Heat Transfer and Friction in Tubes with Repeated-Rib Roughness,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.14, No.4, pp.601-617, 1971.
  9. J. C. Han, “Heat Transfer and Friction in Channels with Two Opposite Rib-Roughed Walls,” ASME Journal of Heat Transfer, Vol.106, pp.774-781, 1984.
  10. M. R. Mackley, G. M. Tweddle, and I. D. Wyatt, “Experimental Heat Transfer Measurements for Pulsatile Flow in Baffled Tubes,” Chemical Engineering Science, Vol.45, No.5, pp.1237-1242, 1990.
  11. M. R. Mackley, and X. Ni, “Mixing and Dispersion in a Baffled Tube for Steady Laminar and Pulsatile Flow,” Chemical Engineering Science, Vol.46, No.12, pp.3139-3151, 1991.
  12. S. W. Chang, and L. M. Su, “Influence of Reciprocating Motion on Heat Transfer Inside a Ribbed Duct with Application to Piston Cooling in Marine Diesel Engines,” Journal of Ship Research, Vol.41, No.4, pp.332-339, 1997.
  13. S. W. Chang, L. M. Su, W. D. Morris, and T. M. Liou, “Heat Transfer in a Smooth-Walled

- Reciprocating Anti-Gravity Open Thermosyphon,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 42, pp. 1089-1103, 2003.
14. Wu-Shung Fu, Wen-Wang Ke, and Ke- Nan Wang, “Laminar forced convection in a channel with a moving block,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.44 pp.2385-2394,2001
  15. L.A. Florio, “Use of a plate to enhance natural convection cooling of a discrete heat source in a vertical channel,” Applied Thermal Engineering, Vol.27, pp.2276-2293, 2007
  16. Wu-Shung Fu, and Wen-Jiann Shieh, “A study of thermal convection in an enclosure induced simultaneously by gravity and vibration,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.35 , No.7, pp1695-1710, 1992
  17. Wu-Shung Fu, and Wen-Jiann Shieh, “Transient thermal convection in an enclosure induced simultaneously by gravity and vibration,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.36, No.2, pp437-452, 1993
  18. Sung Ki Kim, Seo Young Kim, and Young Don Choi, “Resonance of natural convection in a side heated enclosure with a mechanically oscillating bottom wall,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.45, pp3155-3162, 2002
  19. 黃建平, “垂直通道內振動對高溫面熱傳增益之研究”, 國立交通大學機械工程學系博士論文, 2007。
  20. 廖英皓, “活塞頂部之熱傳分析”, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 2003。
  22. 賴昱志, “增進活塞熱傳效益之數值模擬”, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 2004。
  23. 連信宏, “利用多孔性介質增強活塞頂面之熱傳效率”, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 2005。
  24. 余政倫, “往復式冷卻渠道之熱流實驗”, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 2006。
  25. 陳沅佑, “實驗探討T型振動管之熱傳現象”, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 2007。
  26. W. S. Fu, S. H. Lian, and Y. H. Liao, “An investigation of heat transfer of a reciprocating piston,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.49, pp.4360-4371, 2006.
  27. S. J. Kline, “The Purpose of Uncertainty Analysis,” ASME Journal of Heat Transfer, Vol.117, pp.153-160, 1985.