

不同構造板式熱交換器 性能分析比較

楊秉純

前言

熱交換器或相關設備係能源轉換或消耗的一種裝置，舉凡石油化學工業、紡織纖維工業、製藥或食品加工業、鋼鐵或金屬加工業、玻璃工業、造紙工業等均有此類裝置及設備，在能源有92%依存進口的台灣地區，如何有效設計、製造或使用這些熱交換設備以節省能源、增加產能或提升設備使用率便益形重要；它如因製程或應用場所、使用流質種類等所衍生熱交換器拆裝、維修（如因結垢而須拆清熱交換器零組件）以提高熱交換器使用效率等相關問題，或製造成本等亦關係著整個熱交換器技術發展。環顧國內現階

段有關熱交換器之設計製造等技術尚脫離不了舊有的傳承，如何研發新型式或高效率熱交換器及設備便成爲相當重要的科技研究工作。而板式熱交換器即是針對這項需求而研發出來之新型式熱交換器。此類熱交換器依其組合方式可分爲硬鐸型板式熱交換器、組合型板式熱交換器及螺旋型板式熱交換器等三大類。本文探討之對象則侷限於目前國內使用已逐漸廣泛之硬鐸型及組合型板式熱交換器；至於螺旋型板式熱交換器，一方面其使用尚不普遍，另一方面則在國內之發展可謂尚缺乏，因此將留待進一步之研究。

板式熱交換器工作原理

板式熱交換器在構造上係由凹凸圖型且抗酸之不鏽鋼板片所組成，平板之花紋方向相反而使相鄰板片上之花紋脊線彼此相交叉而構成接觸點，當將此等接觸點以真空硬鐸（或螺桿）結合在一起後乃構成緊密而能耐高壓之板式熱交換器，其材料實際上皆充分作熱交換使用（其密集度，compactness，約爲120-660m²/m³）。經硬鐸（或組合）後，各板片上之溝槽乃構成兩個相分離之槽道，能使兩種流體相互交叉流動而存在其中，這種錯綜複雜的渠道乃產生強大的紊流狀態而導致最大的熱傳效果^{(1),(2)}，但相對的其磨擦係數也高，也就是說會有較高之壓降，此結果就構成高效率之板式熱交換器。此時其雷諾數（Reynolds Number）依通道之水力直徑（hydraulic diameter）之大小其值約在10-8000之間。其一般之性能及尺寸可如表

表1 板式熱交換器之一般性能表

項目	規格
最大表面積	2500 m ²
板片數	3-700
出入口尺寸	400mm(max)
板片厚度	0.3-1.2mm
板片大小	0.03-3.6 m ²
板片間距	1.5-5mm
板片寬度	0.05-5m
工作壓力	0.1-2.5MPa
工作溫度	-40-260°C
最大流速	6m/s
通道流量	0.05-12.5 m ³ /h
溫度回復	1°C
效率	93% (最大)
熱傳係數	3000-7000 W/ m ² °C

1所示，至於所用之材料依其應用之對象而有不同之選擇。其中應用至冷凍空調、油冷卻器及一般工業製程中是以不銹鋼(AISI 304及316)最常用；至於在一些可能會有腐蝕性液體之場合則以鈦合金為主⁽³⁾。

在影響具山型紋路之板式熱交換器性能的三個重要變數中(主要係指板片之幾何構造)，一般人均針對傾斜角進行研究分析，很少人對其它兩個變數(即山型紋之節距及振幅)進行探討，為了建立本身之資料庫並使研究成果能更趨於完整，我們特別針對這兩

個變數設計了一系列之實驗^{(5),(4)}，以提供必要之性能資料供作板片型式改良之依據。同時對山型紋之傾斜角已有甚多之文獻可供參考^{(6),(7),(8)}，但仍和其特殊之構造及出入口和分佈區之設計有密切之關係，因此本文也將針對已設計完成並進行生產之特定板片型式，改變不同之傾斜角但維持同樣之出入口和分佈區之設計，並進行系列性之測試和分析以了解此變數對板式熱交換器性能影響之程度，並提供作為此型板片改良

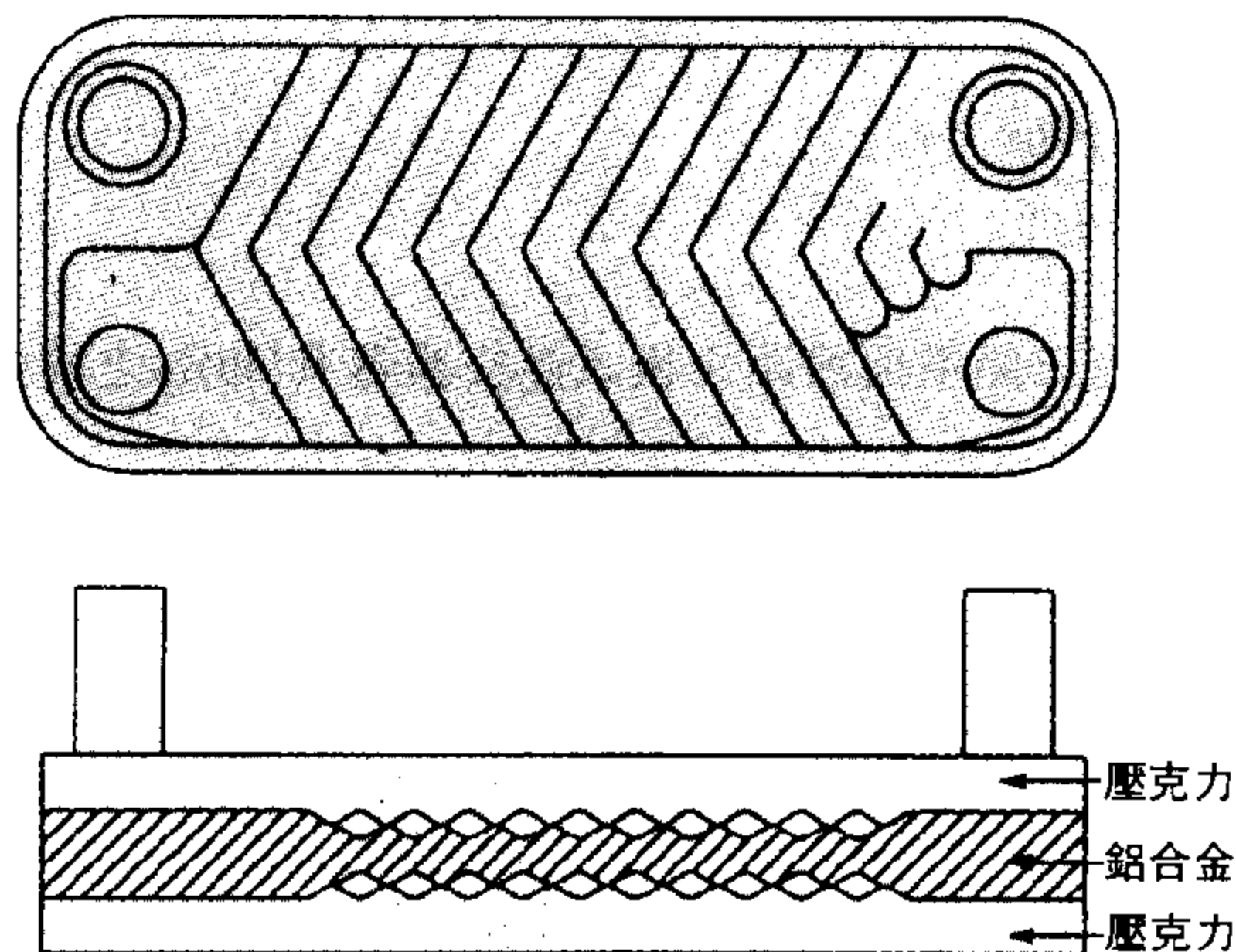


圖1 測試用板式熱交換器示意圖

表2 測試用板式熱交換器規格表

名稱	A	B	C	D	E
傾斜角 β	60°	60°	60°	60°	60°
節距 P (mm)	6	8	8	8	10
振幅 δ (mm)	2.2	1.8	2.0	2.2	2.2
板片寬度 W (mm)	72	72	72	72	72
板片平均間隙 b (mm)	2.2	1.8	2.0	2.2	2.2
出入口距離 (mm)	161	161	161	161	161
展開長度 (mm)	192	174	177	181	173
流動面積 $W \times b$ (cm ²)	1.584	1.296	1.440	1.584	1.584
投影面積 A_{proj} (cm ²)	115.9	115.9	115.9	115.9	115.9
展開面積 A_{dev} (cm ²)	155.2	139.1	141.8	141.8	137.8
面積比 ϕ^*	1.335	1.2	1.223	1.223	1.118
水力直徑 $De = 2b$ (mm)	4.4	3.6	4.0	4.4	4.4
水力直徑 $Dh = 2b/\phi^*$ (mm)	3.30	3.00	3.27	3.60	3.70

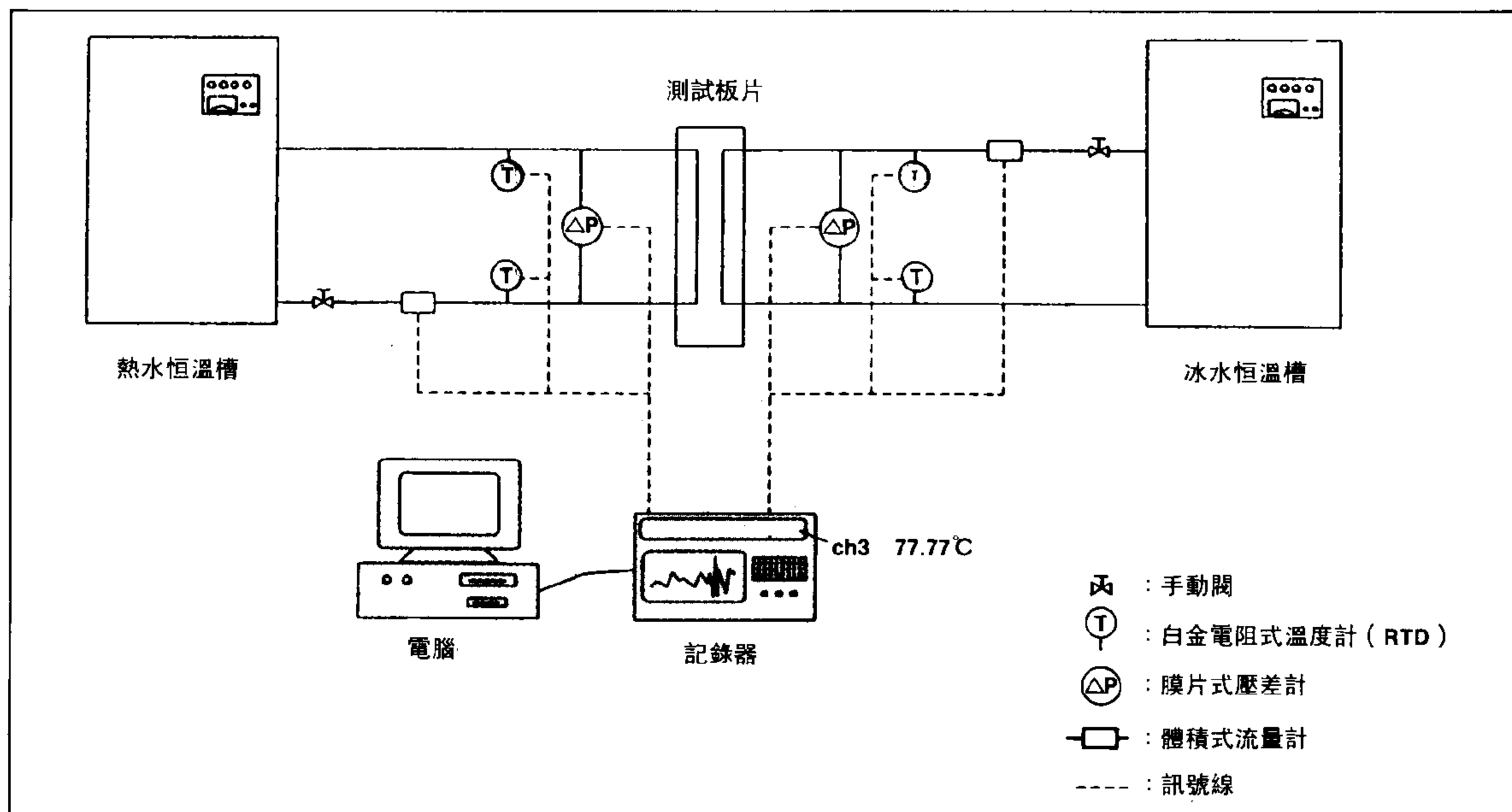


圖2 板式熱交換器性能測試系統佈置圖

之依據。

節距及振幅對板式熱交換器性能之影響

這實驗主要是設計一系列不同節距及振幅之板式熱交換器，為了節省開發模具及沖片之費用，這系列測試用板式熱交換器之材料係採用壓克力及鋁合金，並利用CNC加工而成，其構造圖如圖1所示，而這五組測試用板式熱交換器之詳細規格如表2所示。

實驗之進行則採用水對水之方式進行，其實驗之佈置如圖2所示。冷、熱水分別由兩恆溫槽供應並調控，其中熱水恆溫槽之加熱能力為80kW，冷水恆溫槽之冷凍能力為2.5RT；流體流向之安排則以反向流方式(counter flow)，熱水為上進下出，冷水則是下進上出。實驗進行時，熱水入口溫度保持 $70 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 。冷水則維持 $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 。；冷、熱水進出口均利用白金電阻式溫度計(RTD)量測，此RTD事先用恆溫槽及精確度為 0.001°C 的石英溫計校正，其精確度可在 0.1°C 內。兩側流量比保持相等，並由2LPM漸增至9LPM；水流量由手動閥的開度控制，熱水側為一解析度 0.002 1/s 之電磁式流量計，冷水側則採用體積式流量計，精校正過而得一標準差約為 0.05 1/min 之校正曲線。流體通過熱交換器之壓降則由一膜片式差壓計量測，此差壓計利用高壓氮氣提供與大氣間之壓差，串聯一精確度為 $\pm 2.5\%$ 之重錘式壓力計加以校正。

首先係針對A、D、E等三組具不同節距之板式熱交換器進行系列之測試和分析，其結果可以由熱側及

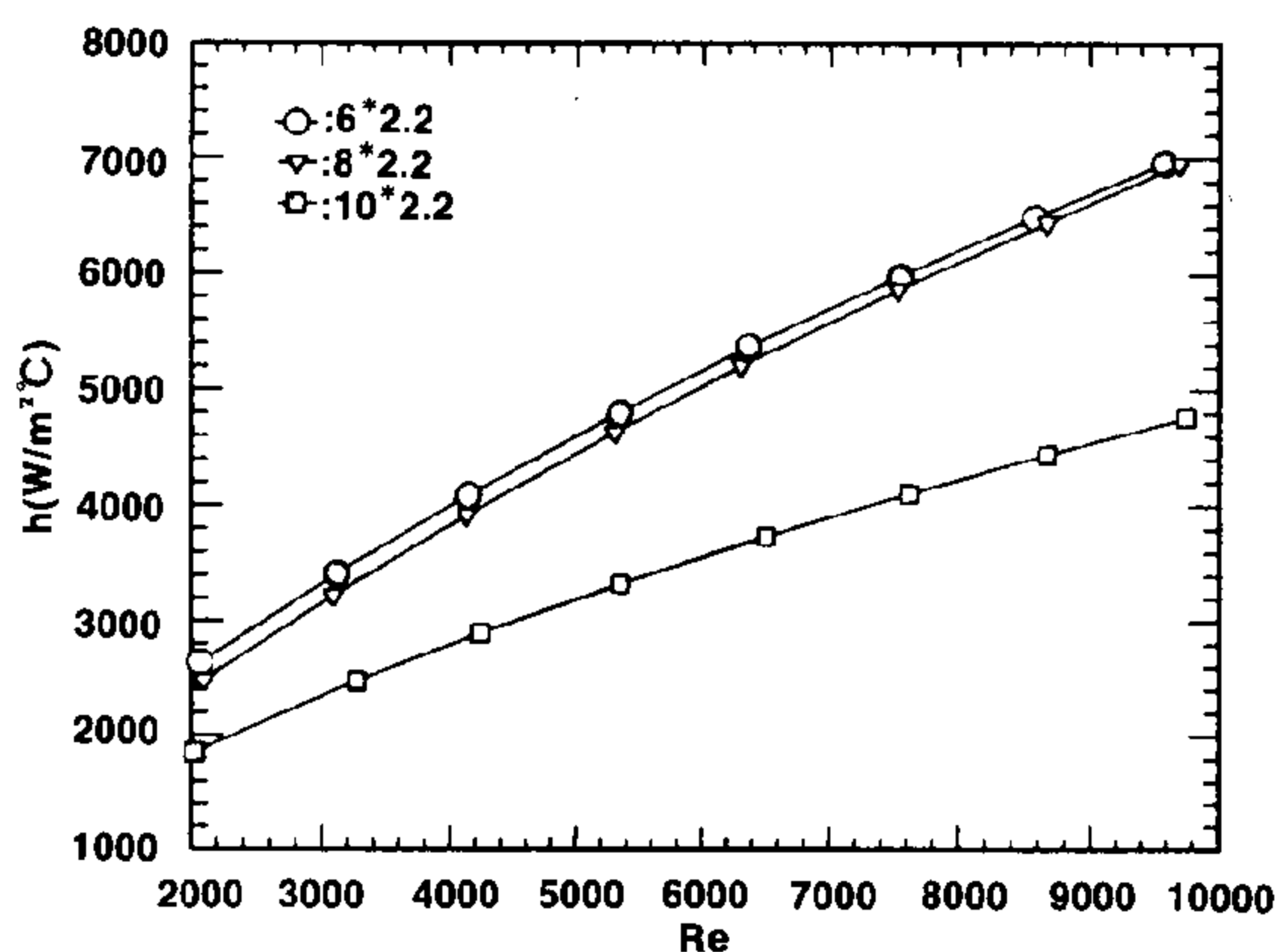


圖3 不同節距板片熱側熱傳係數

冷側之對流熱傳係數加以說明(如圖3及圖4所示)。此結果顯示A和D這兩組(即節距分別為6mm及8mm)之熱傳效率相差不超過7%，然而D和E(即節距分別為8mm及10mm)之差卻高達33%。因此山型紋間節距的縮小，固然可以增加單位長度內之接觸密度，因而增加流體之擾動而獲致較佳之熱傳效果，但過密之接觸點也會減弱在接觸點間產生增強熱傳效果的二次渦流強度(secondary swirling flow)，使得整體熱傳增強效果並不顯著。

實驗所量得之這三組熱交換器之壓降如圖5所示，如將壓降表示為無因次磨擦因子f：

$$f = \frac{\Delta P Re}{2 \rho u^2 L}$$

針對這三組不同節距之板式熱交換器其f和Re之關係

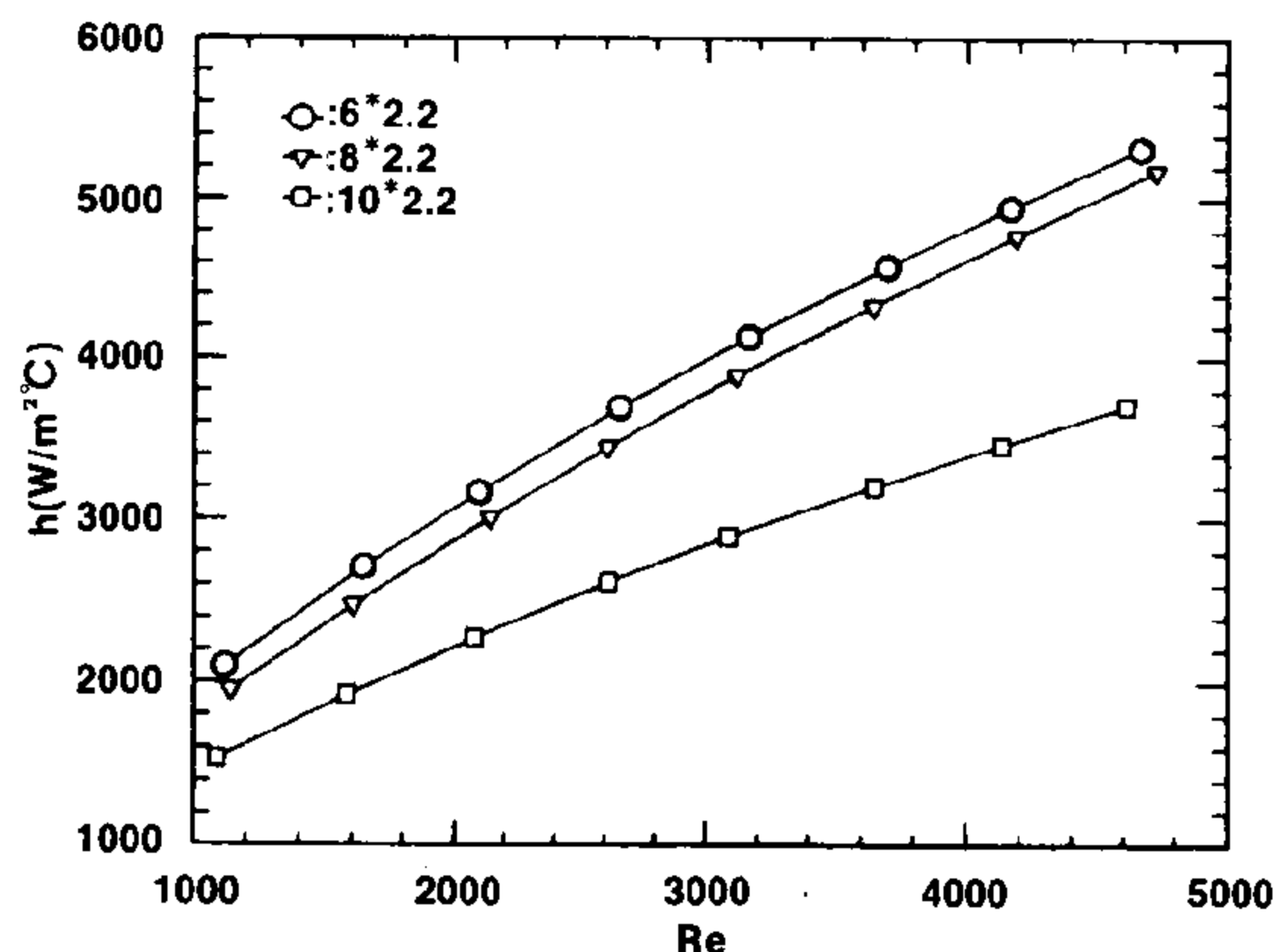


圖4 不同節距板片冷側熱傳係數

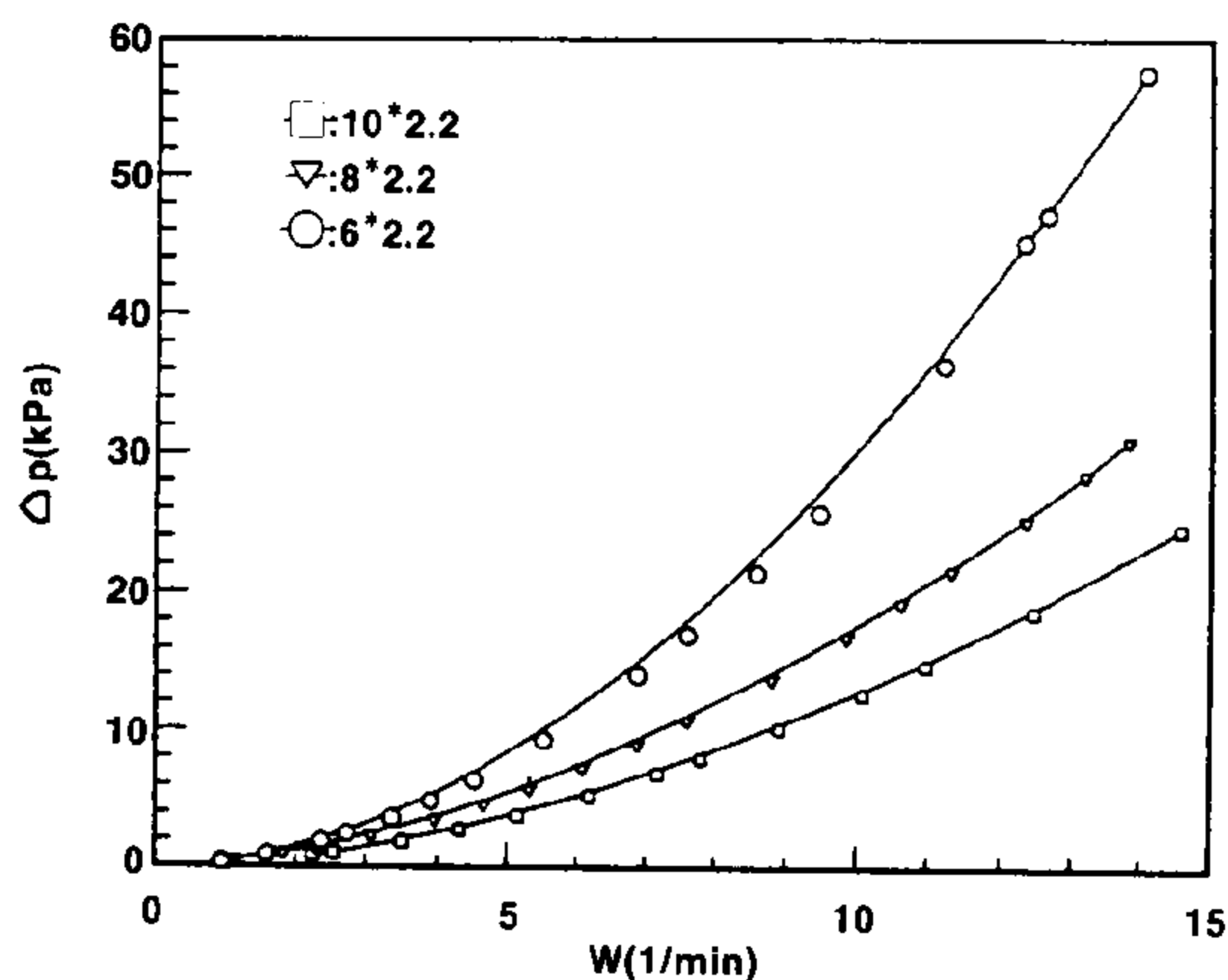


圖5 不同節距板片壓降與流量關係圖

可用圖6來示。

比較這三組熱交換器之熱傳特性和壓降性能，顯示當山型紋間之節距縮小時，由於流場之擾動增加，導致熱傳性能增加之同時壓降也相對增加，但節距減少至一極值後，對壓降增加的影響效果遠大於對熱傳增加的影響。

其次，從B、C、D等三組不同振幅板式熱交換器之測試結果顯示，在相同Reynolds Number下，振幅愈小其熱傳性能愈好，這可以從圖7及圖8中兩側對流熱傳係數對流量之變化情形加以說明。這是因為在相同的Reynolds Number下，愈小之水力直徑代表流體在板片間之流動速度愈快，因此熱交換效率較高。此外，不同振幅除了因與流動截面積有關而影響流體在內部

流動之流速外，同時也會影響山型紋之波形，圖9中壓降之變化情形可以看出振幅愈小時，其壓降愈大。這是在相同之節距下，振幅愈小也就代表山型紋之波形愈陡，而這會增強流體流動之二次渦流之強度，因此導致熱傳與壓降均增加，所以振幅同樣對板式熱交換器性能有正反兩面之效果。

針對這三組不同節距之板式熱交換器其 f 和 Re 之關係可表示成如圖10所示。由於振幅之大小會影響到流體的速度場，其對壓降之影響效應大於對熱傳之影響。由圖10中發現，振幅2.0mm之板片具有最小之磨擦係數。這可能是因在相同流量以及同樣雷諾數下，振幅2.2mm之板片其山型紋之波形較陡，因而造成流體流動較大之動量損失；而對振幅1.8mm之板片，由

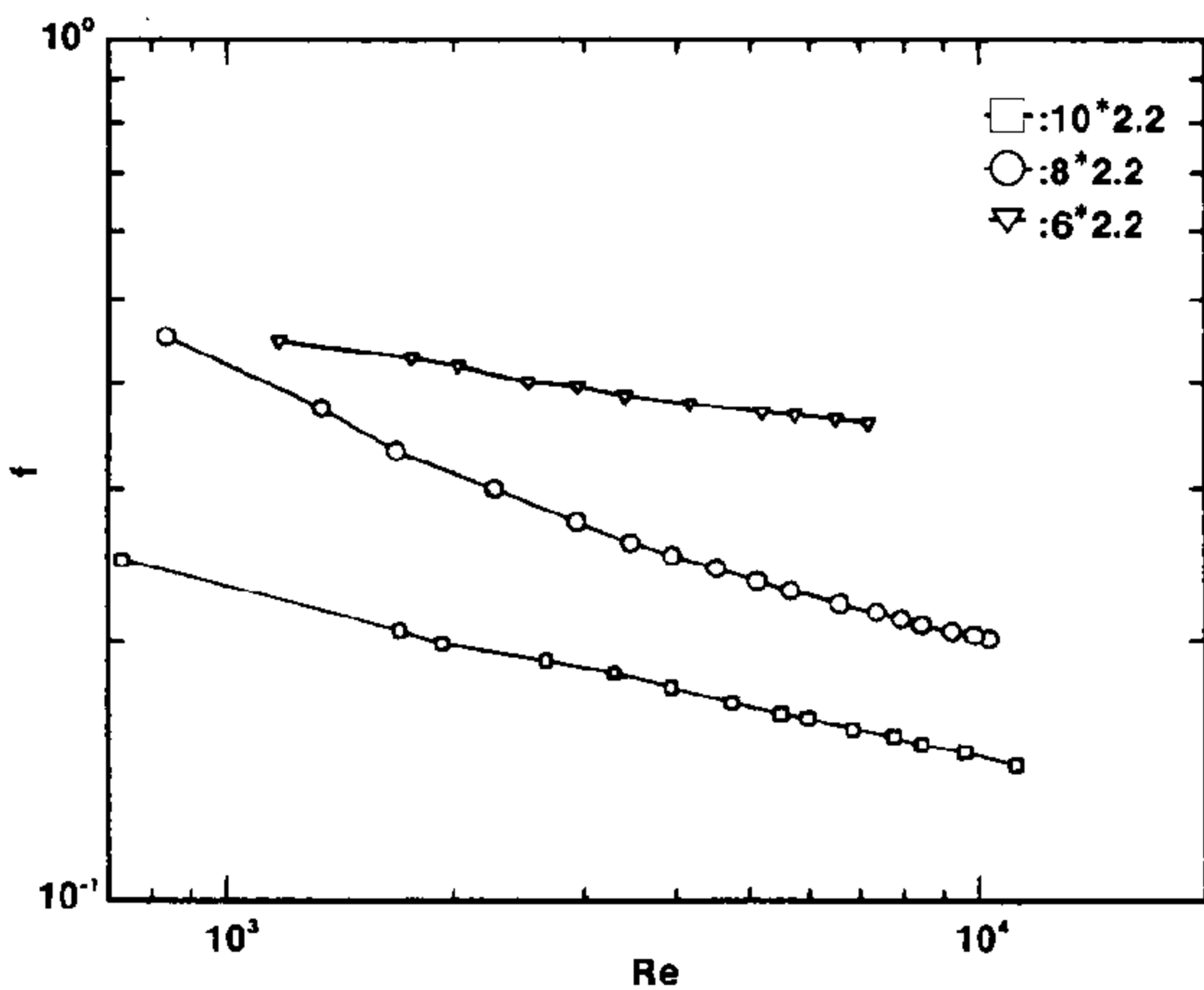


圖6 不同節距板片磨擦係數分佈圖

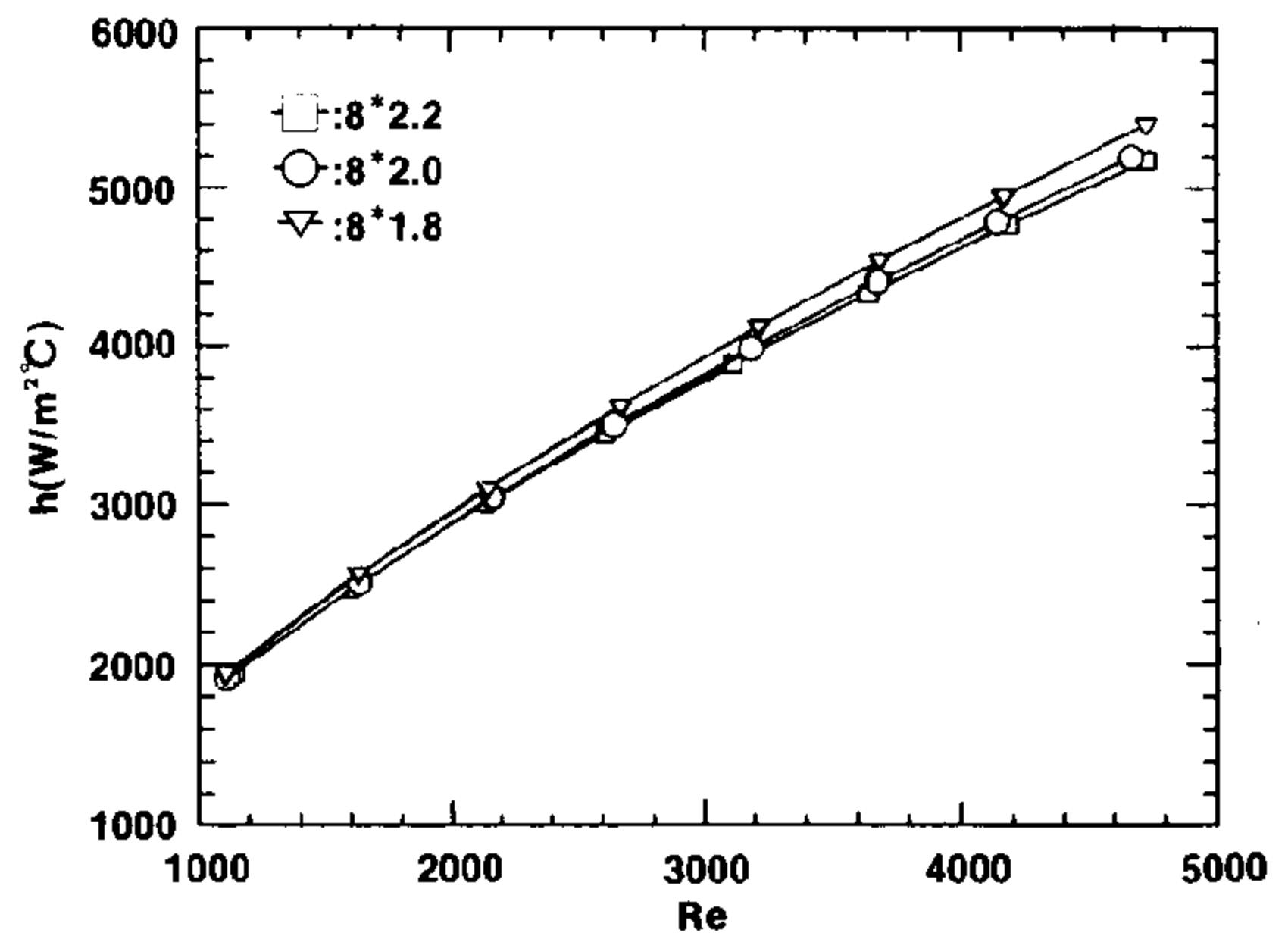


圖8 不同振幅板片冷側熱傳係數

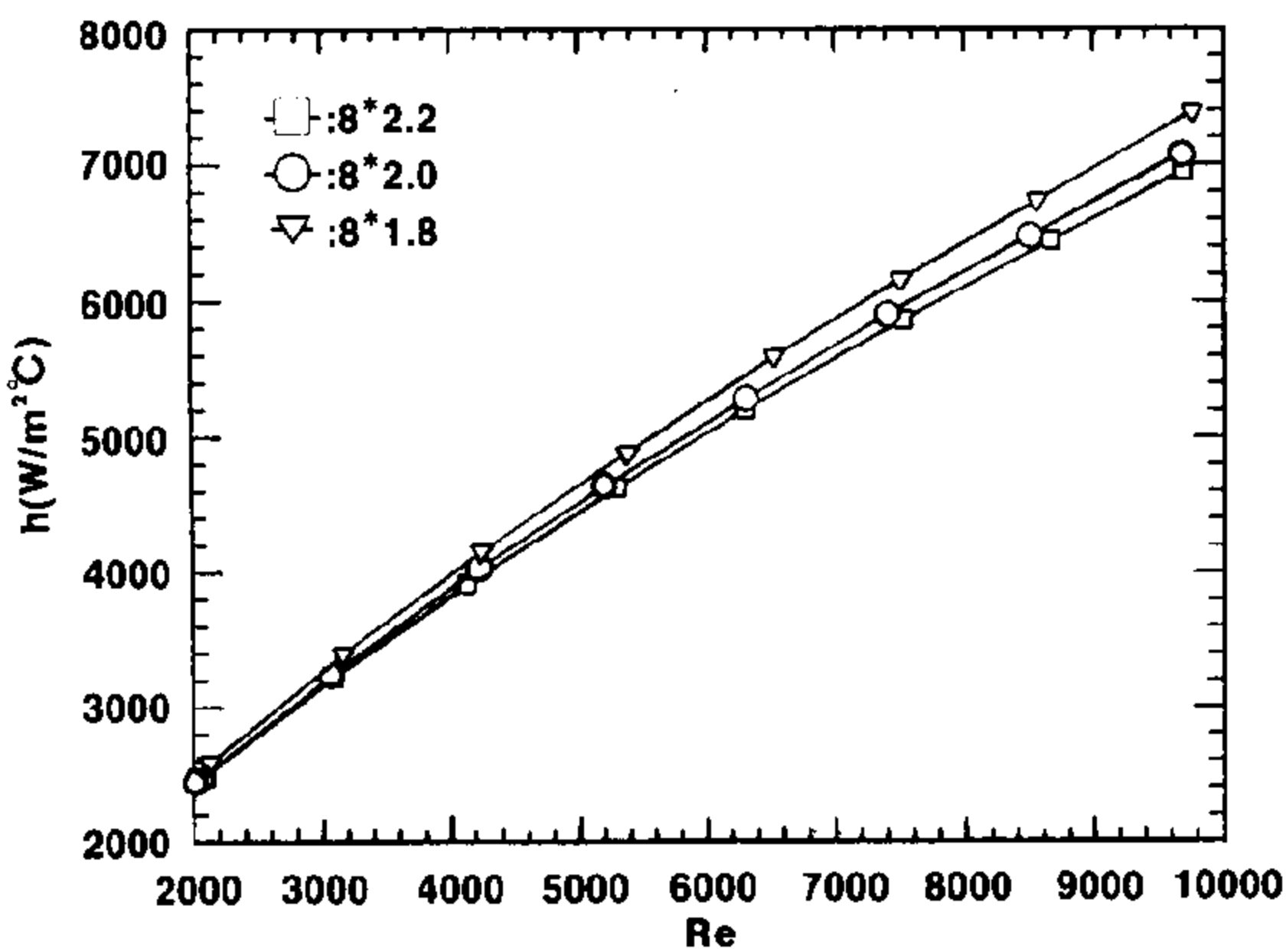


圖7 不同振幅板片熱側熱傳係數

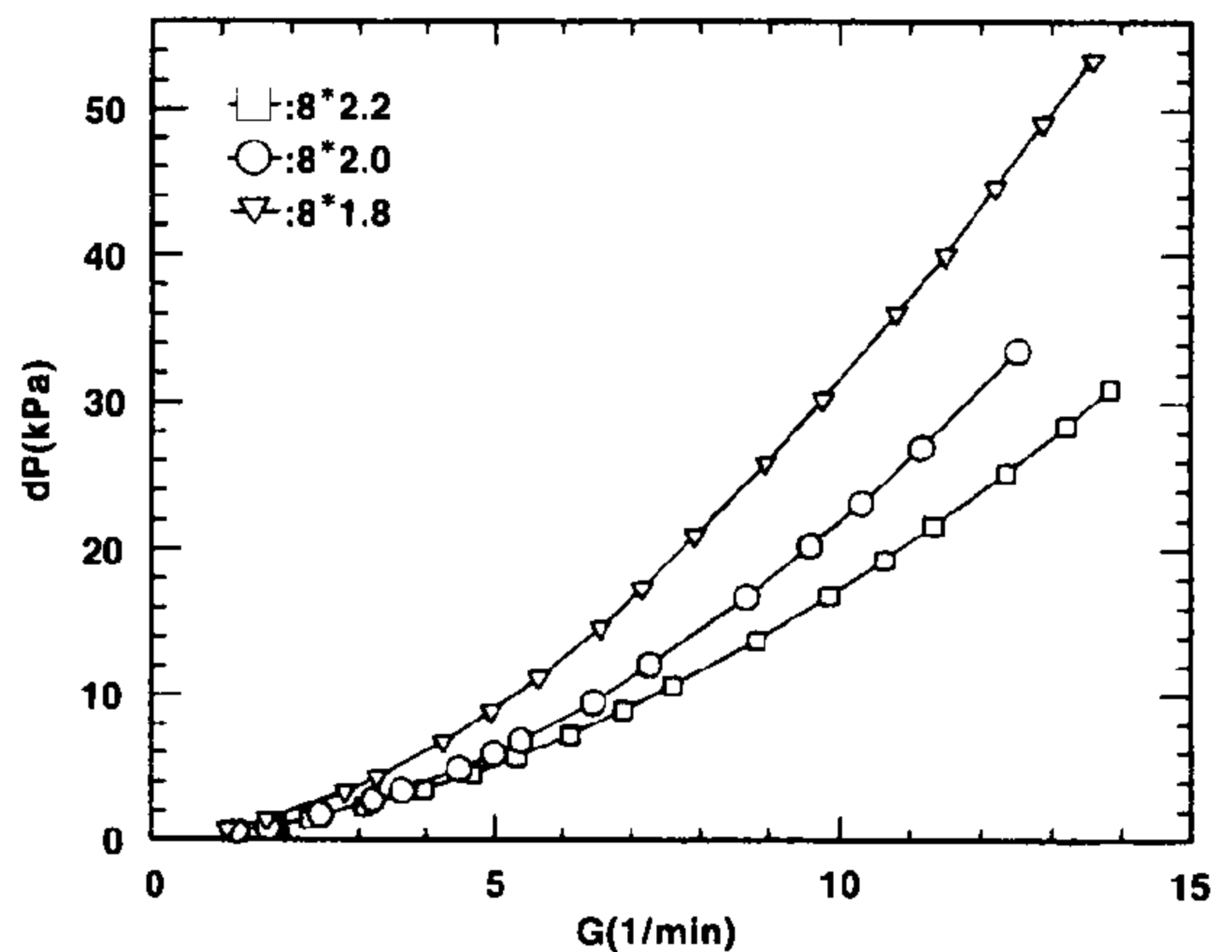


圖9 不同振幅板片壓降與流量關係圖

於流動截面積較小，流體在進出口之壓損較其它兩者為大。但在流量愈大時，板式熱交換器的磨擦係數和山型紋形狀(即振幅大小)及進口效應逐漸無關而使各組板式熱交換器的磨擦係數趨於一致。

傾斜角對板式熱交換器性能之影響

爲了要了解這個變數對板式熱交換器整體性能的影響，同樣使用壓克力及鋁合金製造了七組相同構造但不同傾斜角之測試用板式熱交換器(規格如表3所示)。

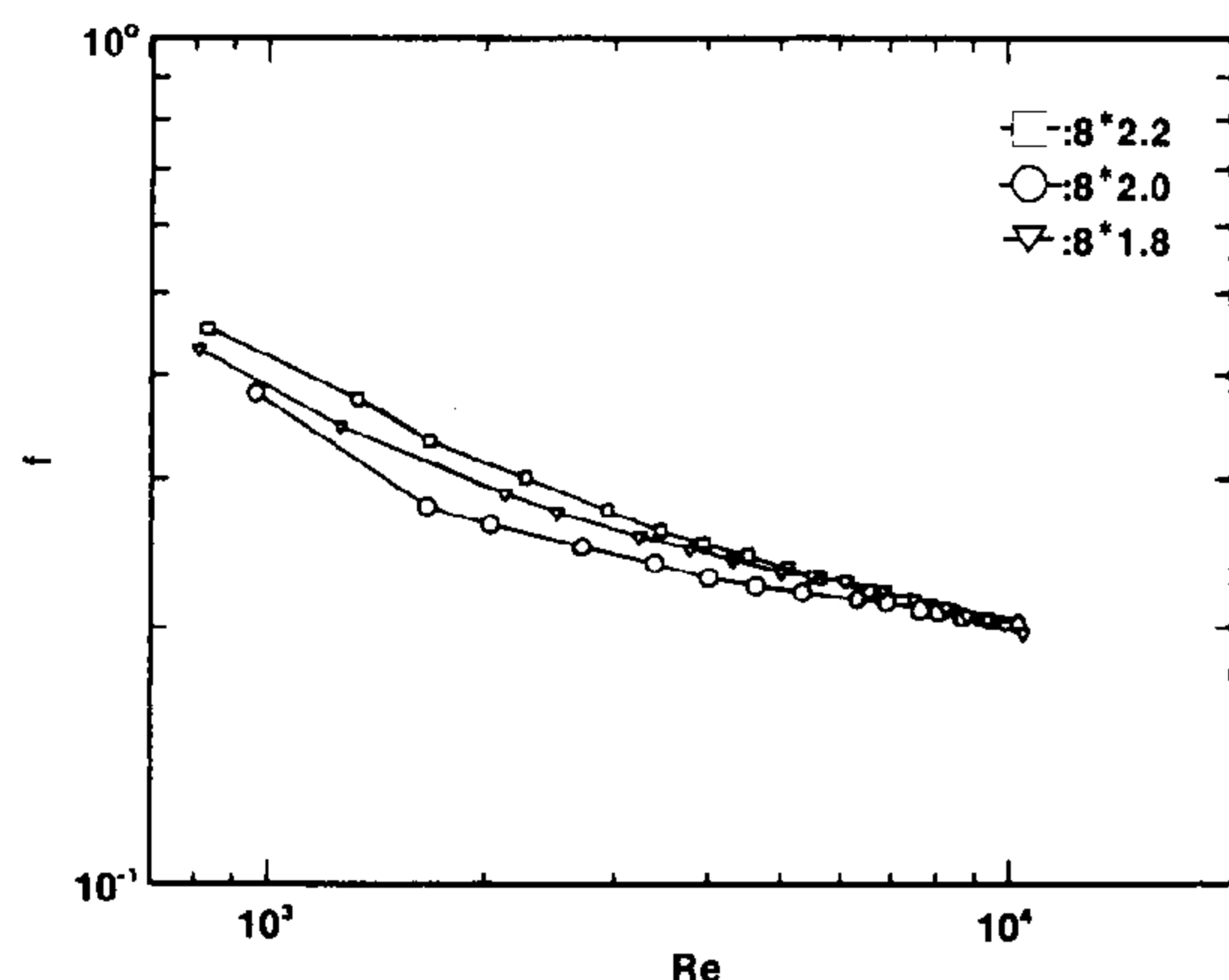


圖10 不同振幅板片磨擦係數分佈圖

表3 傾斜角性能影響實驗用板式熱交換器規格

傾斜角 β	10°-70°
節距 P (mm)	10
振幅 δ (mm)	2.5
板片寬度 W (mm)	120
板片平均間隙 b (mm)	2.5
出入口距離 (mm)	450
展開長度 (mm)	505.5
流動面積 $W \times b$ (cm ²)	3.0
投影面積 A_{proj} (m ²)	0.054
展開面積 A_{dev} (m ²)	0.061
面積比 ϕ^*	1.123
水力直徑 $De = 2b$ (mm)	5.0
水力直徑 $Dh = 2b/\phi^*$ (mm)	4.45

同樣是採用水對水之測試及分析方式。實驗結果顯示傾斜角度愈大愈容易造成流場擾動，增加紊流程度，因此熱傳係數愈大。但在50°、60°、70°三者之間卻有奇怪的現象，即具50°傾斜角板片之熱傳係數比具60°傾斜角之板片還高，而且也接近甚或高過具70°傾斜角之板片。這和一般文獻上之報導稍有出入，這之間的差異係由於在板片上由進出口至主熱交換區之所謂分配區設計不同所造成。當初因板片上流體進出口至主熱交換區太遠，而流道愈長、壓降愈大，流量可能會有降低之現象，所以設計四條導槽，其截面積隨進口距離愈遠而漸增，希望能藉此減少壓降，讓流體分佈均勻。但由流場之觀測卻發現，當流體離開這段分配區，要進入主熱交換區處，卻有一轉折角，當傾斜角逐漸增大時，流體流動之轉折角度愈小、愈尖，流動阻力變大，而在該處形成一迴旋(circulation)，流體在此打轉而不易擴散⁽⁴⁾。此一產生迴旋之現象將造成流體分佈不良(maldistribution)的現象，由於此局部分佈不均現象抵消了因傾斜角增加對熱傳效應提升之效果，故造成整體熱傳係數反而較低。由觀測上之發現，這迴旋現象在傾斜角是60°時特別明顯，這也是爲什麼50°之板片其熱傳係數比60°及70°均高之原因。圖11及圖12分別顯示了熱側及冷側之對流熱傳係數。

同樣，當傾斜角增加時，壓降也會隨之而增加，其變化在這七組板式熱交換器中約略可以分成三區

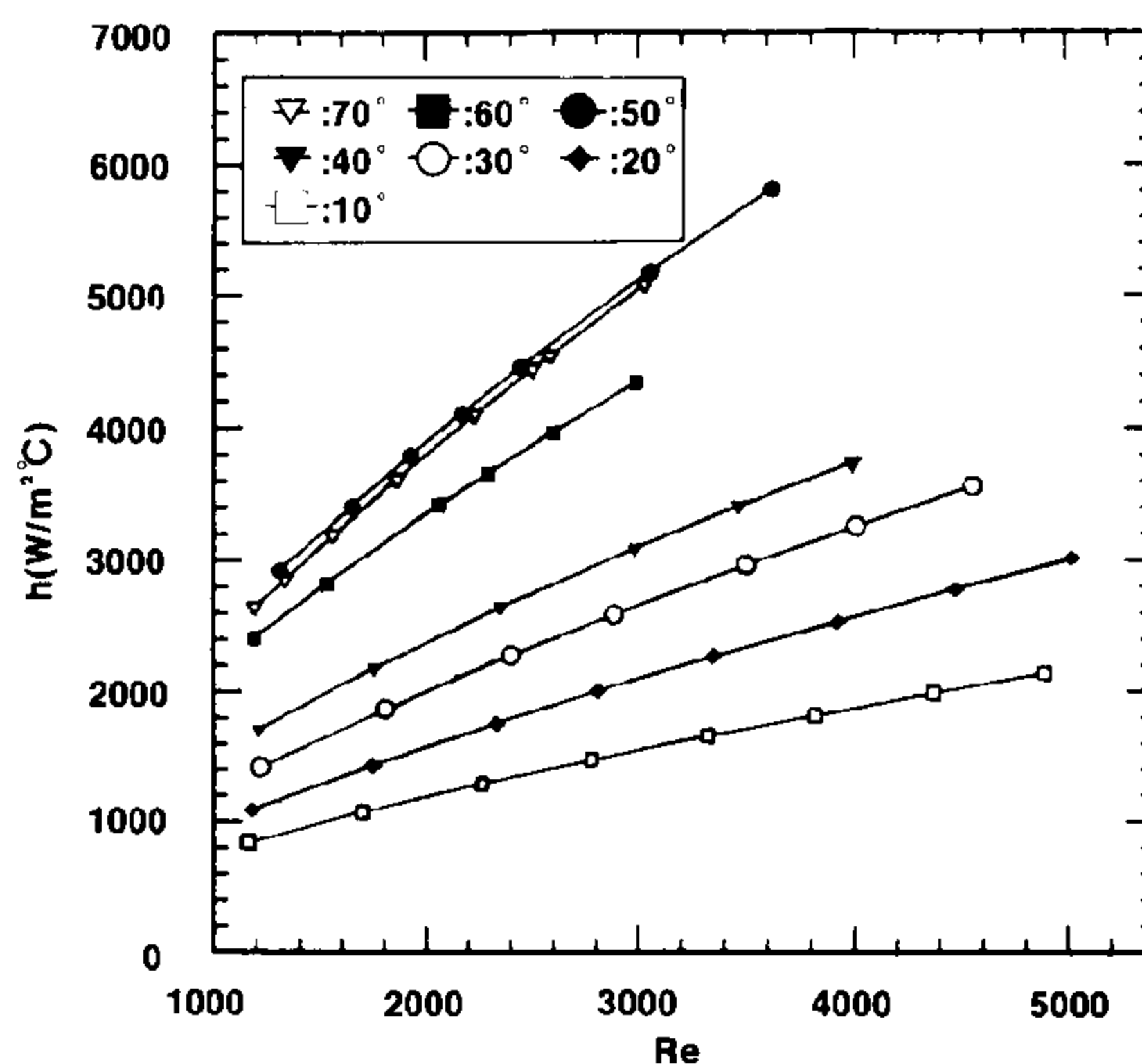


圖11 不同傾斜角板片熱側熱傳係數

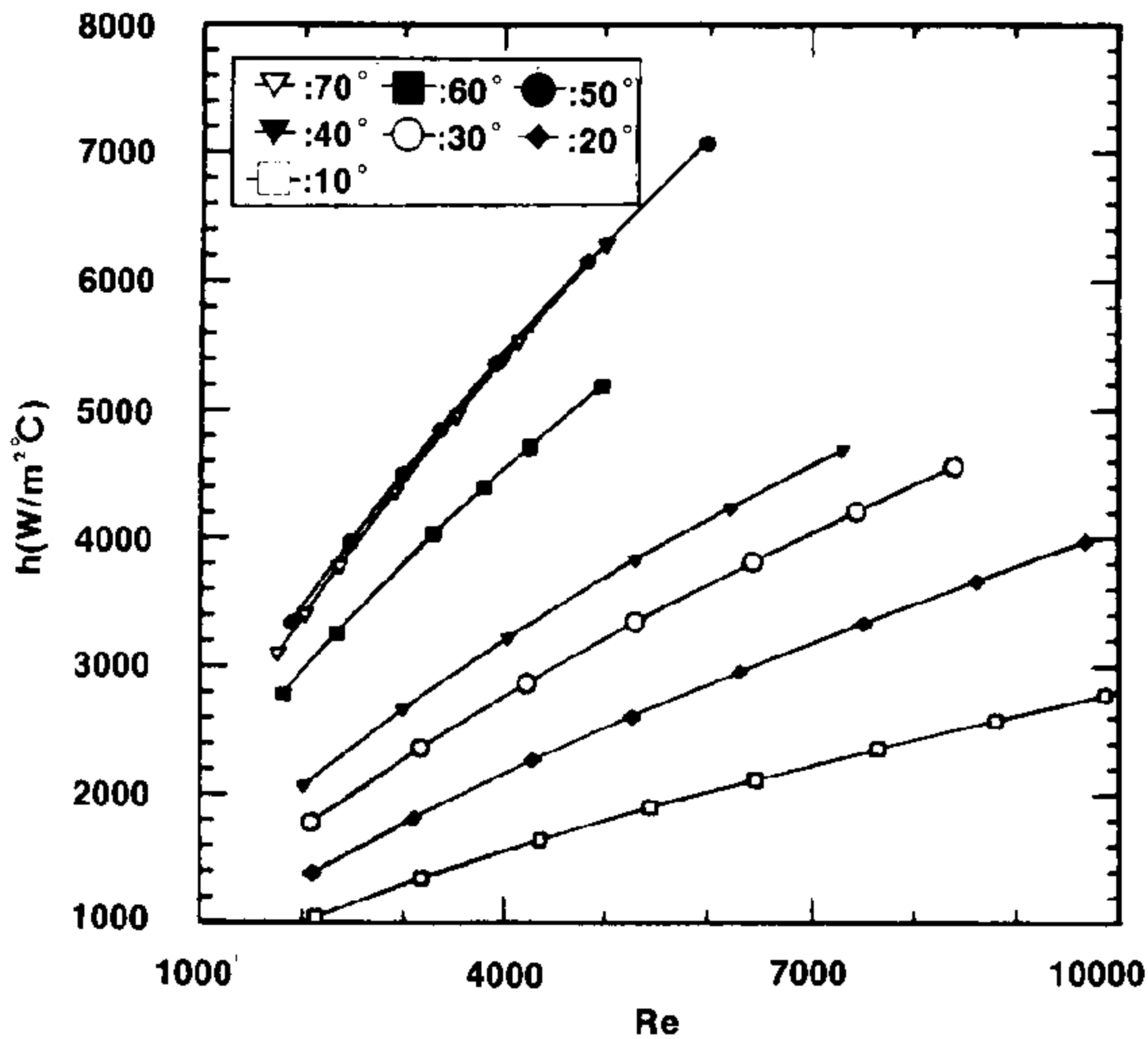


圖12 不同傾斜角板片冷側熱傳係數

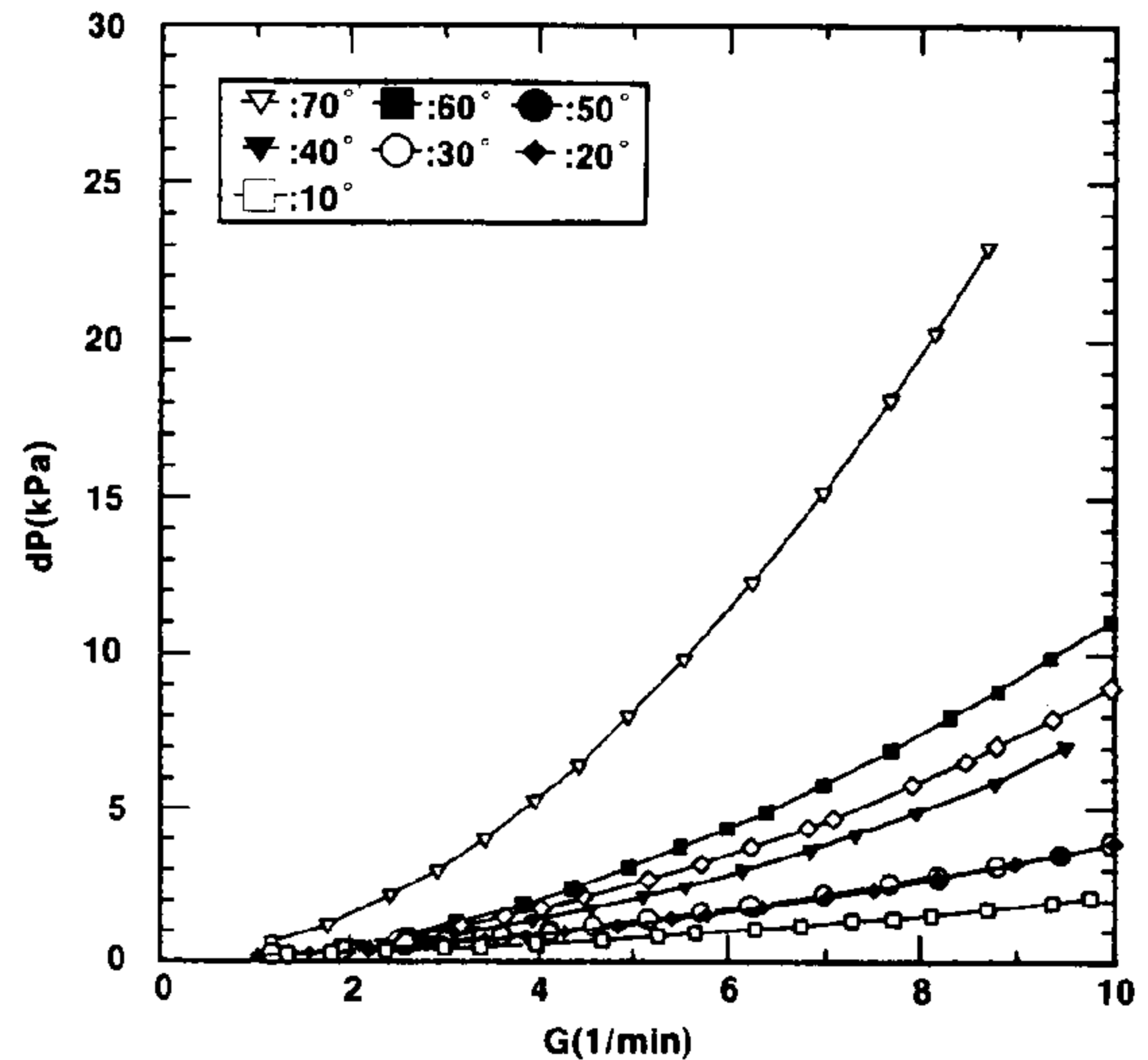


圖13 不同傾斜角板片壓降與流量關係圖

(如圖13所示)。在 $10^\circ \sim 30^\circ$ 間，其壓降變化非常小；但在 30° 變成 40° 時壓降有一較大之增加，然後至 60° 前則較平穩之增加；而至 70° 時卻又是一極大之增加。由此可知傾斜角愈大，熱傳效果雖較好，但壓降也較大；因此板式熱交換器之設計必需在熱傳及壓損兩者之間取得一折衷點，以達成所謂之較佳化設計。而不是一味增加傾斜角，因過大之傾斜角將導致流場高度擾動，可能發生動量損失的影響遠超過熱傳性能的提升。

結 論

由於板式熱交換器具有比傳統殼管式熱交換器更多之優點，故其應用已逐漸廣泛。板式熱交換器之應用以液體對液體之熱交換為主，但使用於一側具相變化之場合(如冷凍系統之蒸發器或冷凝器)仍有相當高之整體效率；至於氣對氣之場合則以前述之板片結構而言並不恰當。但目前卻有類似之產品可應用至氣體間之熱交換，其構造係在無凹凸狀平板間置入鱗片以增加熱傳面積來補償氣體熱傳係數偏低之缺點⁽¹⁰⁾。

故傳統上板式熱交換器之應用如以行業來分可歸納如下：

1. 食品與飲料業中液體之高溫消毒或預熱
2. 化學與製藥業中製程上各式熱交換
3. 加熱與冷凍工程中之蒸發器或冷凝器
4. 造船與煉鋼廠中各式冷卻水系統之熱交換

5. 汽車工業中之油冷卻器或過冷器
6. 紙漿造紙工業中各式冷卻水系統之熱交換或鍋爐排放水之熱回收
7. 紡織工業中染色機之高溫冷凝水之熱回收
8. 其它工業設施與加工，如油壓機械中之油冷卻器

而在最常被業者使用之山型紋路之板片中，節距(P)、振幅(δ)及傾斜角(β)等三因素是影響該型板式熱交換器性能之主要變數。在這一系列研究中，我們使用壓克力及鋁合金為材料，並利用CNC加工技術製作數組具不同變數的測試用板式熱交換器。雖然由於材料之差異而無法直接得出絕對之性能係數，但卻得出了相對性能之差異，並能提供實際板式熱交換器設計之參考。因此我們也可以藉此系列之研究分析得到下列之結論：

- 節距愈小時，其對壓力損失之影響遠大於熱傳係數之提高。
- 節距與振幅大小均會影響到山型紋波形，因而對流場亦會造成影響，至於影響程度的大小端賴波紋形狀的設計而定。
- 板片分配區的設計不但會影響到流體由進口至主熱交換區的壓降及流動情形，更會對流體在整個板片間分佈是否均勻有絕對性之影響，而這又是該型板式熱交換器整體性能是否良好一個重要的決定因素，因此在設計板片時對於此分配區之設計必需很小心。

參考資料

1. Shah, R.K. and Focke, W. W., "Plate Heat Exchanger and Their Design Theory", Heat Transfer Equipment Design, edited by R. K. Shah, E. C. Subbarao and R. A. Mashelkar, P. 227-254, Hemisphere Publishing Corp., Washington, DC, 1988
2. Chahal Vaie, A. A., "The Performance of Plate Heat Exchangers", Ph.D. Thesis, University of Bradford, U. K., 1975
3. Marriott, J., "Where and How to use Plate Heat Exchangers", Chemical Engineering, Vol. 78, No. 8, P. 127-133, April 5, 1971
4. 陳任元, 「板式熱交換器之板片數對其性能影響之分析」, 碩士論文, 淡江大學, 臺灣, 中華民國, 1995
5. 林佩芝, 「幾何參數對板式熱交換器性能之影響」, 碩士論文, 交通大學, 臺灣, 中華民國, 1995
6. Heavner, R. L., Kumar H., and Wanniarachchi, A. S., "Performance of an Industrial Plate Heat Exchanger : Effect of Chevron Angle", AIChE Symposium Series, No. 295, Vol. 89
7. Yang, B. C., Wu, C. C., and Huang, C. L., "Effect of Chevron Angle on the Performance of Plate Heat Exchanger", 7th International Symposium on Transport Phenomena in Manufacturing Processes, P. 18-22, Acapulco, Mexico, August 28-31, 1994
8. Fock, W. W., Zachariades, J., and Olivier, L., "The Effect of Corrugation Inclination Angle on the Thermohydraulic Performance of Plate Heat Exchangers", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, P. 1469-1479, 1985
9. Fock, W. W., and Knibble, P. G., "Flow Visualization in Parallel Plate Ducts with Corrugated Walls", CSIR Report CENC M-519, CSIR, Pretoria, South Africa, 1984
10. Bond, M. P., "Plate Heat Exchanger for Effective Heat Transfer", The Chemical Engineer, Vol. 367, P. 162-166. April 1981

(楊先生現任職於工研院能資所研究員)

繼續前行 一路平安

無論是個人或是團體，
唯有持續地努力前行，
才能走向更光明的未來。

在1996年裡，

我們願與您——

攜手同行，

認真學習，

踏實工作，

以求得一個充實的一年。

■ 化工技術



鰭片(FIN) 在熱交換設備的應用

陸平皆・黃正雄

鰭片使用簡介

冷熱流體在換熱器中，透過傳熱面積傳送熱量。這種換熱器的使用已廣泛用於化學工業、空調及冷凍工業。換熱器的投資在整個投資中也佔相當大的份量，因此如何減輕換熱器的費用，常是在設計過程中必須考慮的課題。

對於乾淨的管子及管壁阻力可以忽略時，總傳熱系數 U_c 與管外/管內之傳熱係數(h_o/h_{io})之關係如下：

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{io}} = \frac{h_o \cdot h_{io}}{h_o + h_{io}}$$

因此當 h_o 與 h_{io} 比較顯得很小時，則 U_c 接近 h_o ，即傳熱速率主要是受到管外傳熱係數所控制。為減輕管外熱傳不佳的影響，就必須增加外表面積，因此才引進鰭管。

實際上鰭管的使用已不限於管外。在某些場合，如果管內傳熱係數遠小於管外傳熱係數，也可考慮使用管內鰭管。但因管內空間有限，故管內鰭片均屬於螺紋式或粗糙表面處理方式。

鰭管使用之場合最多是管外為氣體，管內是液體或發生相變化之傳熱。因在此場合，管外之氣體傳熱係數遠低於管內，故效果特別顯著。

當然天下事有利即有弊。使用鰭管須考慮下列幾點：

1. 鰭管之壓力降高於裸管，因此須要消耗較多之動力。

2. 鰭管是否適用於容易結垢之流體，至今仍是見人見智。一般以為鰭管較易結垢且不易清洗，故認為不適用於結垢流體。但有人以為當結垢發生時，鰭片之熱傳效率也提高，而且由於表面積增大，反而可以減緩結垢之影響。故認為在結垢流體中使用鰭片，反而可以減輕結垢對熱傳之影響。

3. 使用溫度與鰭片材質之配合

鰭片使用的困難是對熱傳與壓降之計算較具不確定性。因為鰭片的種類很多，各家有其自己的構造，其熱傳與壓降計算又常不易見於文字，故使用者對鰭片的使用常會遲疑，無法很快判斷是否要引用。此方面有待鰭管之製造廠家對資料公開之協助。

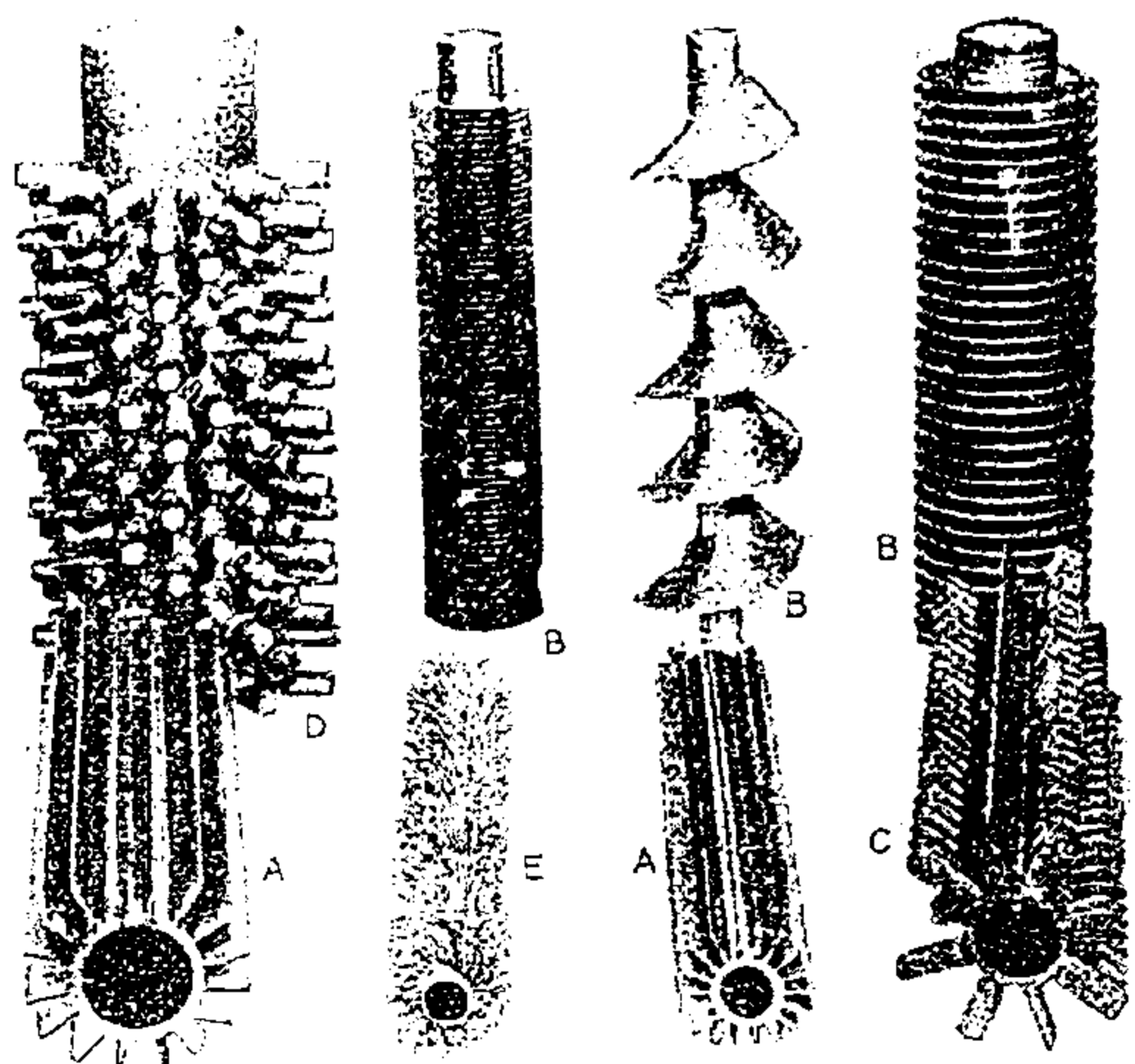
各種鰭片的介紹

鰭片之種類很多，尤其近來各式各樣之鰭片被開發出來。最早常用在工業界之鰭片有：

1. 長條型鰭片 (longitudinal fin)
2. 橫列型鰭片 (transverse fin)
3. 不連續鰭片
4. 圓柱釘形鰭片 (studs fin)
5. 針狀突起鰭片 (spines fin)

如圖1所示，這些鰭片各有其適用對象，例如長條型鰭片適用於沿管軸方向流動之換熱管；橫列型鰭片較適用於氣體與管子垂直接動的換熱管；圓柱釘型與針狀突起型較適用在高溫及容易結垢之換熱管。

近來各種狀形的鰭片被開發出來，有的鰭片適用



A 長條型鰭片 B 橫列型鰭片 C 不連續鰭片
D 圓柱釘形鰭片 E 針狀突起鰭片

圖1 工業界常用之鰭片

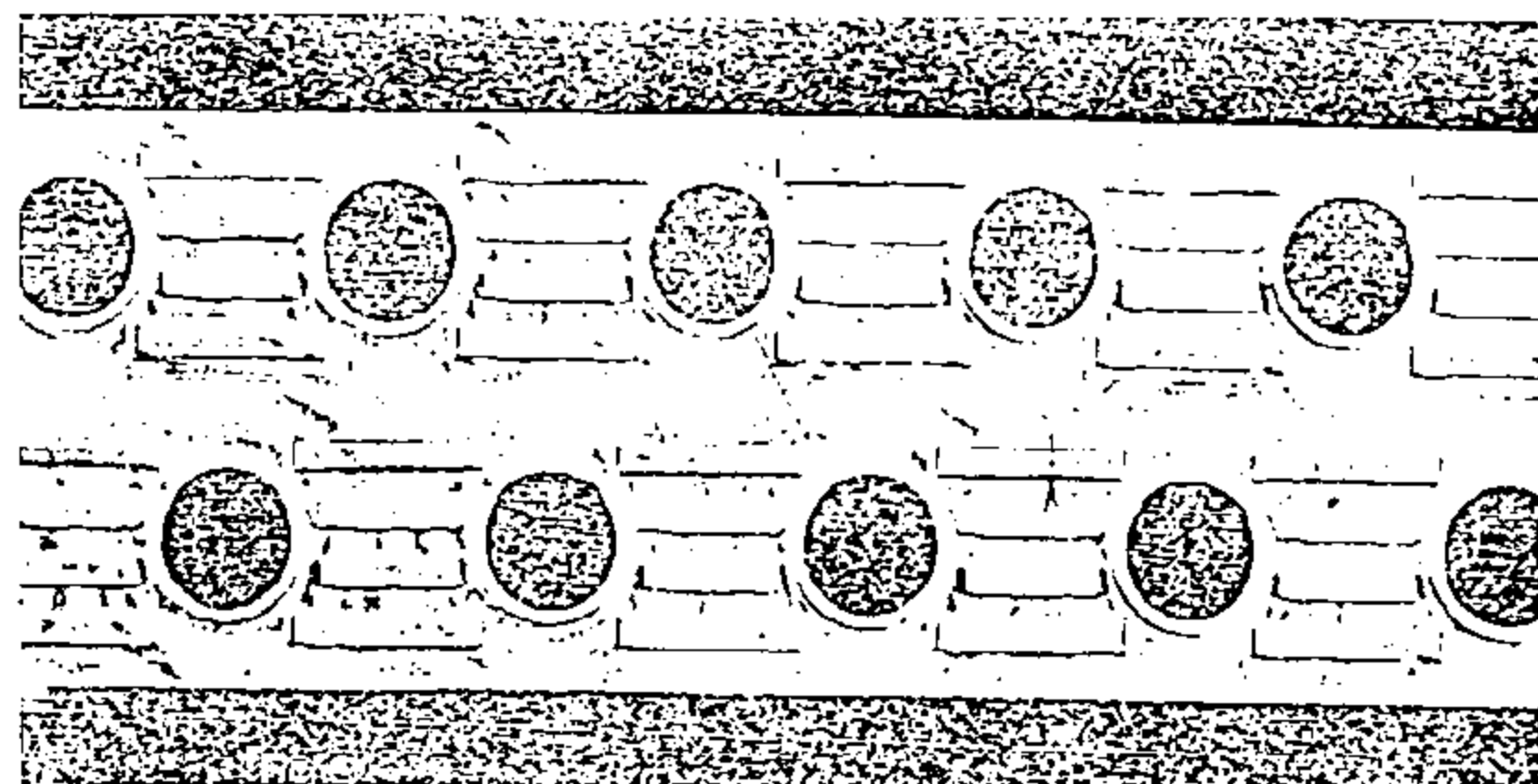


圖2 羽片形鰭片構造

在鰭片換熱器中，鰭片的表面會形成靜滯層 (boundary layer)，而在換熱器進口的鰭片前端，靜滯層較薄，也因此有較大的傳熱係數。但當空氣沿著鰭片流動時，靜滯層會越來越厚，傳熱係數也會隨著降低。

爲了克服此種問題，羽片形鰭片在鰭片表面有突起的羽板，因此鰭片的靜滯層不會增厚而達到提高傳熱的效果。根據實驗，與波浪形鰭片比較，約可提高60%，至於壓力降，與波浪型鰭片比較則大略相同。

本公司開發的此種新型羽片鰭管，是用於冷凍庫之chiller，整體表面積約可減少20%，使用情況相當良好，未來本公司將加強推廣。

於沸騰傳熱，有的鰭片適用於凝結傳熱，如WOLVERINE TUBE公司的蒸發管與冷凝管。爲了提高管內傳熱係數，有些公司發展管內螺紋管，可以提高管內的蒸發傳熱係數，例如可用於直接膨脹式的冷凍蒸發器。

新式羽片形鰭片 (louver fin) 應用實例

接下來介紹一種新式羽片形鰭片。傳統上空調使用的蒸發器，管壁與冷媒之熱傳阻力約佔20%，而空氣與鰭片之熱傳阻力約佔80%，因此如何提高空氣側之熱傳係數是很重要的事。爲了改善鰭片與空氣之熱傳，我們可以改變鰭片的形狀，例如將鰭片由平板變爲波浪形 (corrugated fin)；另外也可改變管子的排列，由正方形改爲三角形。但這些改善均會引起壓降的損失，並不令人滿意。

羽片形鰭片則可在相同的壓降下，增加鰭片與空氣的熱傳係數約1.6倍。羽片形鰭片之構造如圖2所示。

鰭片應用今後趨向

在資源有限、能源成本日趨高漲的今日，使用鰭管以提高能源利用率是衆趨所歸，尤其在空調及冷凍工業，機器不但講求效率高，而且體積重量最好是輕薄短小，這些都要透過使用鰭管才能達成。

而鰭片的使用也不只限於管外，管內的鰭片使用也日漸受到重視，有的場合甚至使用內外管鰭片以增強整體效果。

最後，開發新鰭片是各製造公司所追求的，良好的鰭片不但能夠提高傳熱效率，其壓力降亦不會顯著提高。同時鰭片的製造成本也須努力降低，資料要更公開，如此鰭片的應用才會日趨廣泛。 6

(陸先生現任允升工業公司董事長)

(黃先生現任職於高雄煉油總廠組長)