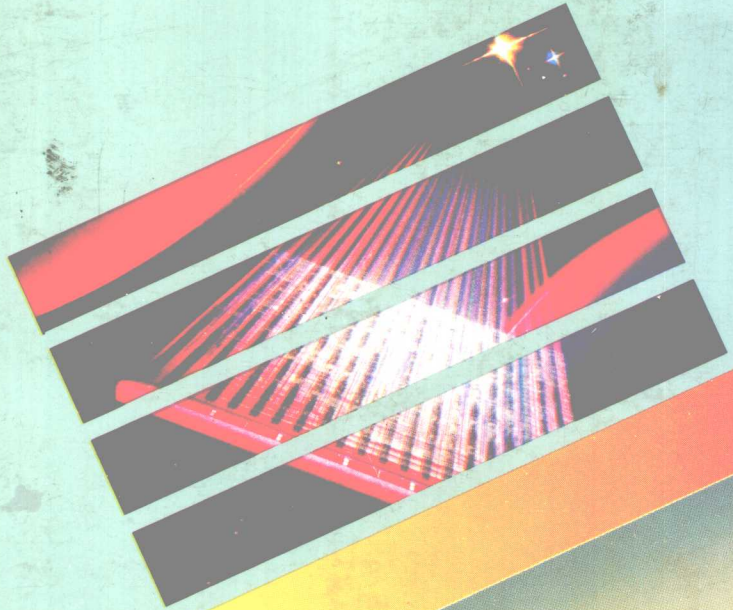


工程科技叢書

工業用熱交換器設計

黃秉鈞 鄭耀宗 蔡英良 編譯



368

工程科技叢書

工業用熱交換器設計

黃秉鈞、鄭耀宗、蔡英良譯

工程科技叢書編審委員會

主任委員：虞兆中

編審委員：于惠中

呂維明

於幼華

郭德盛

黃正義

葉超雄

羅文偉

王瑞材

林世昌

施振纓

陳義男

黃丕陵

鄧啓福

李家同

孟繼洛

夏鑄九

陳興時

黃秉鈞

劉清田

工業用熱交換器設計

76.9.0836

中華民國七十六年九月初版
保有版權・翻印必究

定價：新臺幣二〇〇元

譯者	黃鄭蔡	秉耀英	鈞宗良
發行人	王	必	成

出版者 聯經出版事業公司
臺北市忠孝東路四段561號
電話：7631000—706
郵政劃撥帳戶第0100559-3號

行政院新聞局出版事業登記證局版臺業字第0130號

・ 44006-23 ・

編譯者序

這本工業用熱交換器設計的內容包括管殼式熱交換器、板式熱交換器、氣冷式熱交換器和燃燒加熱爐設計的原理、方法和實例，可做為一般大專工科學生修習熱交換（heat transfer）課程，以及工廠工程師設計熱交換器的參考使用。

至於本書的取材主要係參考 Chemical Engineering 和 Hydrocarbon Processing 兩本雜誌歷年來所刊登有關各種熱交換器的資料，再加以編譯整理而成。其中最主要的三本參考資料為：

Heat Exchanger Design Handbook, Hydrocarbon Processing (1974)

Design of Air-Cooled Exchangers, Chemical Engineering (1978)

Fired Heater, Chemical Engineering (1978)

熱交換器設計應為一項相當基本的工業設計能力，本書的出版，希望對國內此種設計知識的推廣和應用有所助益。同時由於編譯者學驗有限，時間匆促，而且科技知識日益增進，因此如有錯誤，尚祈指正。

黃秉鈞 鄭耀宗 蔡英良 謹識

目錄

編譯者序

第一章 管殼式熱交換器

1-1	如何選定最佳之管殼式熱交換器·····	1
1-2	管殼式熱交換器之設計計算·····	18
1-3	層流液體之熱交換器設計·····	55
1-4	熱交換器設計圖解法·····	73
1-5	如何以圖解化簡熱交換器設計計算·····	91
1-6	熱交換器設計要點·····	105
1-7	管殼式熱交換器之震動問題與防制·····	121
1-8	熱交換器管材料之選擇(1)·····	142
1-9	熱交換器管材料之選擇(2)·····	151
1-10	熱交換器管材料之選擇(3)·····	158

第二章 板式熱交換器

2-1	如何使用板式熱交換器·····	167
-----	-----------------	-----

2-2	螺旋狀板式熱交換器之設計.....	184
2-3	板式熱交換器材料之選擇.....	207
2-4	如何防止板式熱交換器之積垢.....	214

第三章 氣冷式熱交換器

3-1	氣冷式熱交換器之簡單設計估算.....	225
3-2	氣冷式熱交換器之設計計算.....	234
3-3	氣冷式熱交換器之風扇設計.....	252
3-4	水冷式與氣冷式熱交換器之選擇.....	262

第四章 燃燒加熱爐設計

4-1	燃燒加熱爐種類.....	291
4-2	燃燒加熱爐之機械構造、材料與性能.....	304
4-3	燃燒加熱爐之設計.....	331
4-4	如何減少燃燒加熱爐之燃料消耗.....	363

第一章

管殼式熱交換器

§1-1 如何選定最佳之管殼式熱交換器

由於管殼式熱交換器傳遞能量時不需活動元件，工程師或許會誤以為其設計十分簡單。雖然此種熱交換器並非很複雜的設備，但要達到最佳設計仍必須考慮許多狀況。

由於設計方式應視製程的需要而定，本文並不針對設計公式或特殊設計方法作說明，而是列舉出此種設計牽涉的因素及其複雜性。

本節之圖表取自管式熱交換器製造委員會（Tubular Exchanger Manufacturers Assn.），簡稱 *TEMA*。圖表包含一般熱交換器構造上的特性以及其用語。

另外本節中尚有多種熱交換器價格的曲線圖及資料，此外各種管長的熱交換器吸熱面積對體積的關係亦以曲線圖表出。以這些圖表可以估計管殼式熱交換器大略的體積及其價格。

熱交換器的設計與設計者的知識以及對熱傳遞、機械設計、使用、保養等等的經驗和價格有關。由於對熱交換器最佳設計的考量及選擇很難以數量化的方式說明，因此設計者的經驗為最重

要的因素。

每位設計者的目標都是一致的，也就是要以最低的價格提供使用者所需的操作需求，並且要能使用長久、故障少。由於設計變數的相互關聯以及設計上的複雜性，一種用途的熱交換器有各種不同的設計，在此種狀況下，最佳設計決定於採購者的需求。

雖然設計者都有把握他的設計能符合需求，但在選擇設計時必須站在使用者的立場考量許多問題，例如：

- 對於某一容許壓力降，熱交換器殼側的最大熱傳效率是否作了適當的計算？

- 爲了防止震動產生的破壞或流蝕，流體速度是否在合理的限制中？

- 通風口和洩流口是否置於適當位置？

- 是否考慮了管和殼間的微量膨脹呢？

- 管和固定板間的接合以何種裝置最適當？

- 使用的金屬是否合於機械設計，是否好焊？

欲設計良好而合理的熱交換器應對上述的問題作一考慮。

通常要改良熱交換器的缺點所花費的修理費用僅及該熱交換器售價的一小部分，但如未加修護則工廠每日生產上的損失可能是該熱交換器價格的好幾倍。

有些熱交換器是用於極高壓或極高溫下的，更有些用於危險氣體下的，例如氫氣。採購者必須衡量廠商是否有設計良好的記錄，是否有設計這些危險狀況的經驗。

使用者指定之操作數據

熱交換器的熱傳遞及機械設計計算是十分耗時的，因此熱交換器很難作任意的改變，因此當採購者提出採購計劃時必須對設

計需求提出明確指示。廠商對於設計及估價的選擇常常是耗時且耗錢的。

欲設計一最佳的熱交換器，製造商及設計者必須由使用者提供以下的資料：(1)總熱負荷，Btu/h；(2)進入及離開熱交換器的流量，lb/h；(3)比熱、熱傳導係數、粘度、流體的分子量或比重（以適當的單位）；(4)熱交換器入口及出口溫度， $^{\circ}\text{F}$ ；(5)操作壓力，Psia；(6)可容許壓力降，Psi；(7)積垢因數；(8)設計壓力及溫度，Psia 及 $^{\circ}\text{F}$ ；(9)熱交換器形式；(10)結構的材料；(11)管壁耐腐蝕厚度，in；(12)可容許腐蝕；(13)規格說明，規範 (code) 以及標準；(14)大小和空間限制；以及(15)水平或垂直安裝。

製程之條件

由於熱交換器大小及價格與對數平均溫差 (log-mean-temperature, 或 LMTD) 有很大的關係，因此製程設計師在早期的製程設計上就應該考慮操作溫度所產生的影響。

通常對數平均溫差越高則熱交換器尺寸越小，因此當考慮操作溫度時，我們可以提高流體溫度來增大對數平均溫差。溫度太過接近則入口及出口溫度差小，這將導致較低的對數平均溫差。

要決定最佳的操作溫度並無特定的規則，而是端賴熱交換器的使用狀況來作決定。對數平均溫差太高或太低都會使熱交換器的設計及操作缺乏效率。一個可以多方面使用的良好設計，其殼側及管側流體的溫差，低者至少要超過 10°F ，高者必須超過 40°F 。

流量——殼側及管側的流體流量均可影響熱交換器的大小及設計。當流量低、對數平均溫差低，但殼側及管側流體溫差大時，設計師很可能必須使用串聯多殼式熱交換器，且這種狀況一定要使用逆向流 (countercurrent flow)。

在低流量狀況下，設計者必須使用串聯多殼式以便達到合理的流速及熱傳率。若流量太高時，則必須使用並聯多殼式以便達到合理流速及壓力降，以及有效率的熱交換器設計。

積垢因數——灰塵、污垢及其他沉積物會形成阻礙管路內側或外側熱流的物質，這些物質稱為積垢。熱交換器大小及價格和積垢熱阻有很大關係，積垢因數任意的臆測可能會引起相當大的損失。

由於積垢因數很難決定，因此必須靠經驗獲取，所以熱交換器的使用者應就其操作的經驗提供設計者積垢因數。欲對特定的使用狀況下的積垢因數作一精確的估計，目前可使用的資料仍十分有限。積垢因數取決於許多因素，如管路使用的材料、流體的種類、溫度、流速以及其他的操作狀況，因此積垢因數的決定十分主觀。熱交換器操作時產生的缺失通常並非由於熱學上設計的錯誤，而應歸咎於積垢。

如果操作時會產生厚積垢，則必須準備定期作機械式或化學式的清洗。如果積垢係產生於管側，則必須使用直管、大管徑（至少 1 吋的外徑）的管路，但如果積垢產生在殼側，則必須使用可移出的管束，並使管路作方形的排列，以便清洗管束。

可容許壓力降——選擇最佳壓力降必須考慮整個製程。較高的壓力降可能起因於較小（較便宜）的熱交換器¹，因此較小的熱交換器會引起較昂貴的操作費用，此二者必須仔細地衡量其得失。

一般合理的設計中，操作壓力在 10psig 時，可容許壓力降應該在 5psi 或高些。在許多狀況中，使用較大的壓力降並不合實際，因為這樣將使流速增加，進而造成沖蝕或對熱交換器零件引起震動破壞。

熱交換器之種類及維護

由於管殼式熱交換器的種類繁多，選擇熱交換器時應該根據所需的使用特性及維護特性來做決定。在管式熱交換器製造協會 (Tubular Exchanger Manufacturers Assn., TEMA) 有各種熱交換器及其構造特性的標準，本節圖 1—1 及圖 1—2 即摘自該標準。各種常見熱交換器的相對比較價格可由圖中看出，進一步的補充資料將在本節中說明。

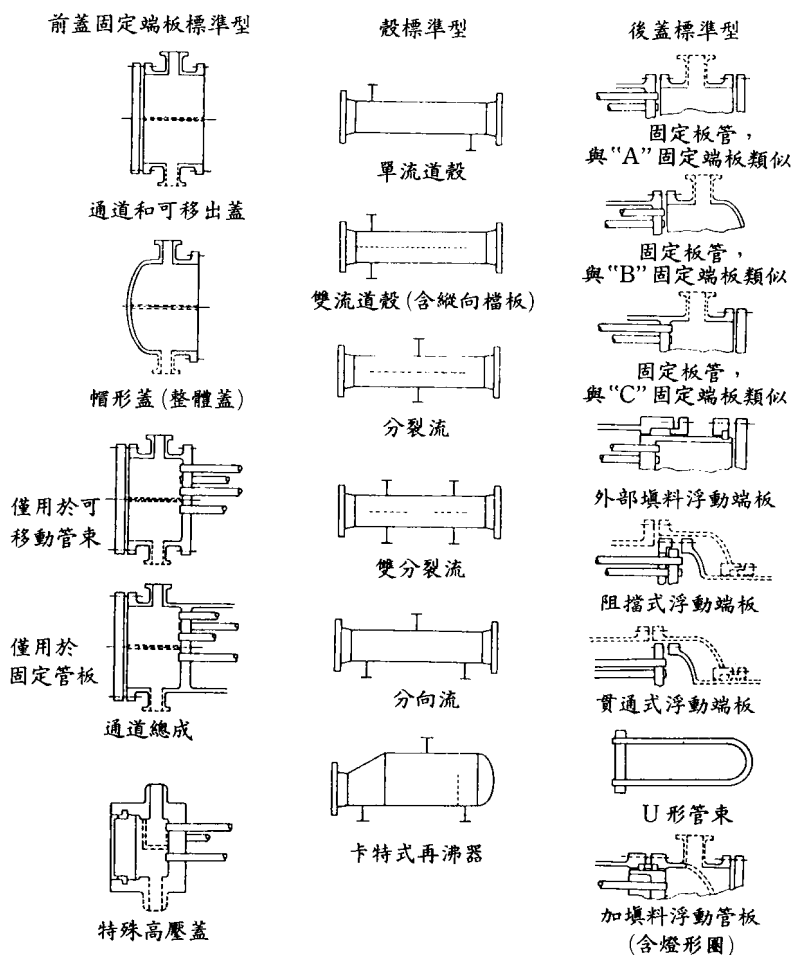
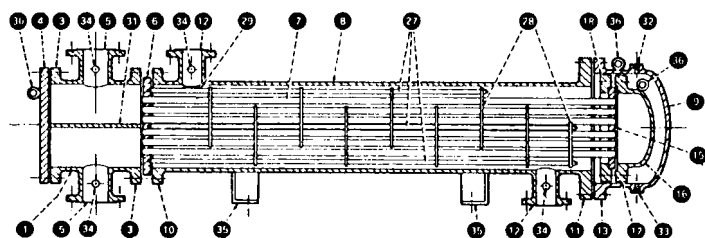


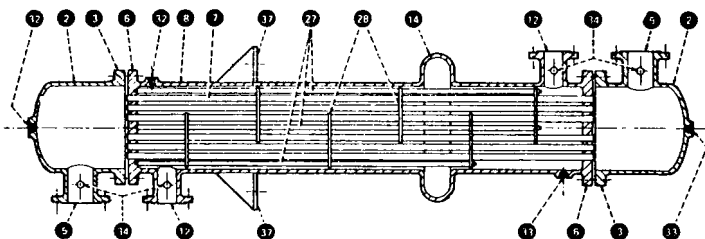
圖1—1 TEMA規定之管殼式熱交換器之殼、前蓋、後蓋標準型

圖1—2 熱交換器零件之用語

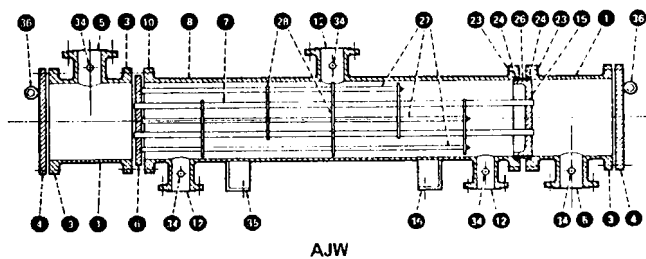
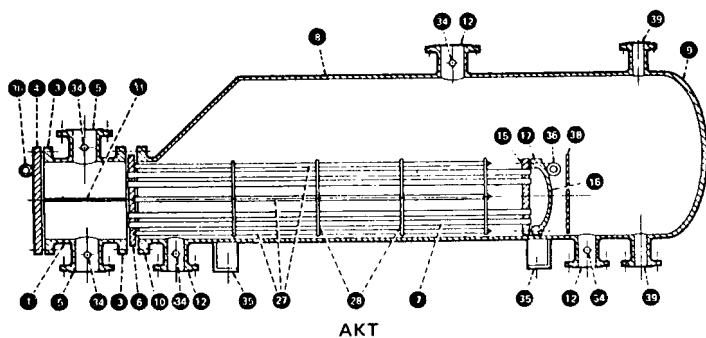
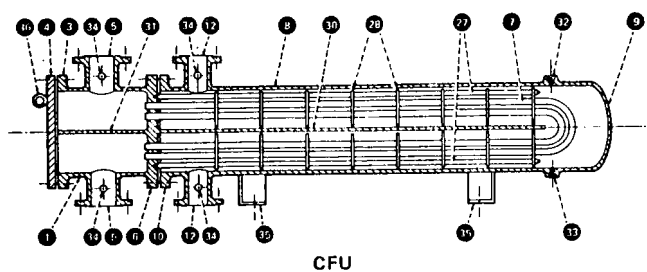
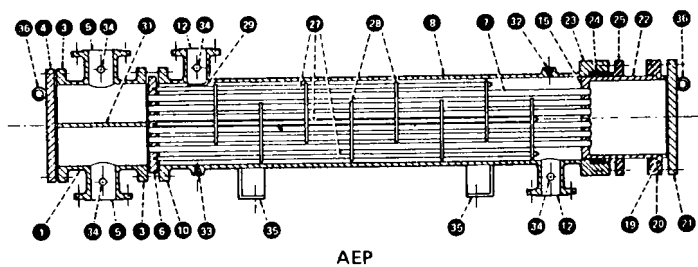
- | | |
|--|---|
| 1. 固定端板—通道
(Stationary head—channel) | 19. 剪力環 (Split shear-ring) |
| 2. 固定端板—帽形蓋
(Stationary head—bonnet) | 20. 滑動凸緣
(Slip-on backing flange) |
| 3. 固定端板凸緣—通道或帽形蓋
(Stationary-head flange—channel or bonnet) | 21. 滑動端板蓋—外部
(Floating-head cover—External) |
| 4. 通道蓋 (Channel cover) | 22. 浮動管板緣
(Floating-tubesheet skirt) |
| 5. 固定端板噴嘴
(Stationary-head nozzle) | 23. 填料函凸緣 (Packing-box flange) |
| 6. 固定管板 (Stationary tubesheet) | 24. 填料 (Packing) |
| 7. 管 (Tubes) | 25. 填料從動環 (Packing follower ring) |
| 8. 殼 (Shell) | 26. 燈形環 (Lantern ring) |
| 9. 殼蓋 (Shell cover) | 27. 連結桿及分隔管
(Tie rods and spacers) |
| 10. 殼凸緣—固定端板端
(Shell flange—stationary-head end) | 28. 橫擋板或支持板
(Transverse baffles or support plates) |
| 11. 殼凸緣—後端
(Shell flange—rear-head end) | 29. 衝擊板 (Impingement baffle) |
| 12. 殼端噴嘴 (Shell nozzle) | 30. 縱擋板 (Longitudinal baffle) |
| 13. 殼蓋凸緣 (Shell-cover flange) | 31. 流道間隔板 (Pass partition) |
| 14. 膨脹接頭 (Expansion joint) | 32. 氣體排放管接頭 (Vent connection) |
| 15. 浮動管板 (Floating tubesheet) | 33. 液體排放管接頭 (Drain connection) |
| 16. 浮動頭蓋 (Floating-head cover) | 34. 儀器接頭 (Instrument connection) |
| 17. 浮動端板凸緣
(Floating-head Hange) | 35. 鞍形支持物 (Support saddle) |
| 18. 浮動端板阻擋裝置
(Floating-head backing device) | 36. 吊環 (Lifting lug) |
| | 37. 支持角架 (Support bracket) |
| | 38. 堤壩 (Weir) |
| | 39. 液面計接頭
(Liquid-level connection) |



AES



BEM



使用者及採購者應詳細地提供設計的情況及構造用的材料，因為這些因素以及可容許腐蝕和管壁厚度，皆與此設備的使用年限有關。通常構造用材料的選擇取決於溫度——壓力的需求、對流體腐蝕的抵抗力以及經濟分析，其中經濟分析即考慮使用年限和售價的關係。

選擇管壁厚度及材料必須特別小心，因為熱係由管壁傳遞的，因此設計時管壁材料熱傳導係數宜高，管壁厚度宜小。

流體的分配

物理性質的數據應力求精確，比熱、密度或分子量、熱傳導係數和粘度應提供給設計師以便設計。

欲決定何種流體應在管中，何種流體應在殼中，必須先考慮下列因素：

腐蝕——若管中含腐蝕性流體，則應使用較廉價的合金作為元件。

積垢——管中使用易積垢的液體時，應有良好的流速控制；增加流速將使積垢減少。直管可在不移動管束的情況下作機械式清洗。

溫度——在高溫操作下必須用到特殊或昂貴的合金材料，如果熱流體用於管中時，所需的合金元件將會減少。

壓力——將高壓流體用於管中，所需的耐高壓元件將會減少。

壓力降——對相同的壓力降而言，管側的熱傳係數比較高。如果流體可容許壓力降較低的話，通常應用於管中。

粘度——通常將高粘度的流體用於殼側可得較高的熱傳速率。

流量——通常將較低流量的流體置於殼側可得較經濟的設

計。就能產生紊流的速度來說，殼側較管側低得多。

設計師的考量

熱交換器的設計師設計時應先了解該熱交換器大小及空間的限制。如果熱交換器要和其他設備一起裝置在一建築物內，則空間上便有了限制。

大小的限制很可能會影響價格，因為有了限制，設計師便無法作出最佳設計，尤其是當管長受到限制時。

設計師除了必須是熱傳遞的專家外，更應具備機械設計、製造學以及設備價格方面豐富的學識。設計師必須衡量以下各個特性所牽涉的許多可變因素：(1)管外徑和管長；(2)管距；(3)管路徑數；(4)殼路徑數；(5)隔板數及隔板種類；(6)殼數；(7)流體速度；(8)實際壓力降；(9)殼尺寸；(10)流體在殼入口及出口的分布；(11)管和管板的接合；(12)維護容易與否；以及(13)震動、操作時管和殼的微量熱膨脹，以及其他潛在的問題。

管之尺寸及長度

通常熱交換管徑較小的（ $\frac{5}{8}$ 吋至1吋外徑）比管徑大的設計較符合經濟原則，這是因為管徑小則熱交換器構造較緊密之故。但若管側可容許壓力降較低的話，這樣的設計便不能使用。在正常狀況下，製程用熱交換器中， $\frac{5}{8}$ 吋外徑算是最小的了，在有些狀況下，小管徑是比較合適的，大管徑的管路通常用於積垢嚴重，且管內部必須作機械式清洗的狀況下。

由於 $\frac{5}{8}$ 吋至1吋外徑的熱交換器較為普遍，因此這種尺寸的管子較易獲得，且有各種材質可供選擇。在相同的速度之下，管徑較小時，熱傳係數較高，而壓力降也較高。

通常，熱交換器愈長，每單位熱傳面積的投資額愈低，因此採購者應盡量避免長度受到限制。除了構造上長管較節約外，在顯熱傳遞的使用下，長管更可增加熱傳速率。

管距及排列

管殼式熱交換器管的排列有三種：三角形排列、方形排列和旋轉方形排列。雖然同樣的管徑會有不同的管距，但一個好的機械設計應盡量縮小管中心距，如同 TEMA 所示。

三角形排列的管殼式熱交換器在顯熱熱交換器中的效率比較高，且對相同的管徑會有較大的熱傳面積。方形排列多用於當管子外部須作機械式清洗之時。不過方形排列和旋轉方形排列產生的壓力降較小，在大多數顯熱熱交換的狀況下有較低的熱傳係數。

有些設計爲了產生較低壓力降或較低殼側流速時，必須用間距較大的三角形排列。間距較大的排列亦可用於產生特殊的管和管板的接合或其他特殊的機械設計特性。

管側及殼側的流道數

熱交換器的最佳設計中，管側及殼側的流道數的決定端賴操作溫度、可容許壓力降、流體流速、相對價格以及設計師的經驗。

管側可用單流道或多流道的設計，多流道是用於增加流速以便增加熱傳速率的。在選擇管側流道數時，流速應加以限制，使壓力降在可容許範圍內，並防止管材的流蝕。

殼側的流道數或殼中流線的情況（單流道、雙流道、分裂流或分向流等等）主要爲操作溫度、流量及可容許壓力降的函數。

由於殼側及管側的流道數對對數平均溫差有影響，所以熱交換器的大小及價格和流動形態 (flow configuration) 的選定有很大的關係。除非管側或殼側有一流體為定溫，逆向流 (counter-current flow) 有明顯的優點。在順向流 (cocurrent flow) 中，由於熱流體無法冷卻至比冷流體出口溫度更低的溫度，因此順向流回收熱量的能力大受限制。在多流道熱交換器中，如果以逆流及順向流交互安排時，其 LMTD (對數平均溫差) 較逆向流為低，但較順向流為高。

殼側擋板

殼側擋板的安置有多種方法，擋板可以有許多的種類，流向可以是垂直的或水平的，擋板開口可以是大的或小的。殼側的流路係根據擋板的種類及安置決定的，在許多情況下，流動方式對性能有很大影響，但有些情況，流動方式對性能影響並不大。例如當殼側中有液體的蒸發、氣體的凝結，或殼側的熱傳係數較管側多出很多時，流動方式便沒有太多影響。

通常擋板是用於引導殼側流體流向一規定路徑，並可用來支持管束中的管子，如果擋板主要用於支持管子，有時亦可稱作管支持板 (tube supports)。擋板最常見的有三種：切片擋板 (segmental baffle)、多切片擋板 (multisegmental baffle) 以及縱向擋板 (longitudinal baffle)。

切片擋板——此種擋板可提供高度的擾流及極佳的熱傳遞，這是因為它導引流體以垂直管子的方向流經管路。除非殼側流體有凝結的現象，最好使用水平切片擋板，以防止沉積物聚積於殼底部，並可防止殼側流體產生層狀流。臥式冷凝器則必須使用垂直切片擋板，以便使凝結物可以流動，如此才不致覆蓋在太多的