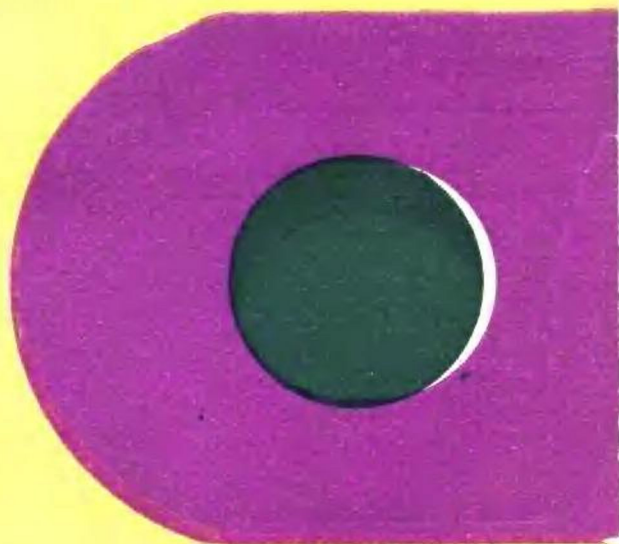


管壳式换热器 设计原理

● 换热器结构动力学

钱颂文 编著



华南理工大学出版社

内 容 简 介

本书共分七章。主要内容有：管壳式换热器，折流杆高效换热器及冷凝器，壳程流路分析与壳程设计，强化传热与强化传热管，高效及新型换热器的管板机械设计，管束振动特性与流体振动，换热器的外导流筒等。

本书可作为高等院校及大、中专院校化工机械和化学工程专业教学用书，亦可供有关专业和设计院、工矿企业的工程技术人员教学与设计参考。

管壳式换热器设计原理

· 换热器结构动力学 ·

钱颂文 编著

责任编辑 潘宜玲

华南理工大学出版社出版发行

(广州 五山)

各地新华书店经销

番禺县印刷厂印装

开本787×1092 1/32 印张9.5 字数214千

1990年3月第1版 1990年3月第1次印刷

印数：0001—1000

ISBN 7—5623—132—8/TQ·6 (课)

定价：1.90元

序

换热器是化工、石油、轻工、食品、医药、动力、核能、电站以至空调、制冷等许多行业都广泛使用的主要设备，它涉及能源的充分利用与节能问题。换热器中最广泛使用的则是管壳式换热器，它占换热器的80—90%。近年来，各种新型管壳式换热器与高效管壳式换热器，以及强化传热管的应用，在国外得到很大的发展，在国内也取得了不少进展，有的还定在世界前列。可是在国内企业和工程中，至今仍主要采用50年代的传统单弓形折流板光滑管换热器，效率十分低，投资高，能耗大。为了使我国高等院校的师生、工矿企业工程技术人员和设计院所的同志能更好地了解与掌握推广新型与高效管壳式换热器技术，我们根据近期所收集到的有关国外文献，国外专家教授的讲学，主要是根据华南理工大学及作者们本人在科研上所取得的成就，撰写了这本书。内容包括：折流杆等换热器流体动力学和流路分析；螺旋槽管等强化传热和防垢机理；异型管板应力及温度场和温差应力；管束的流体振动特性和防振 FIVER-ROD 以及外导流筒的压力与温度补偿等。

本书以机械结构设计原理为主，加上管壳式换热器的壳程传热与流体力学计算，重点环绕作者提出的“换热器结构动力学”这一新概念而撰写，建立了一个新的理论体系。本书内容新颖实用，偏重于设计原理，可作为高等院校和大专或中等专科院校化工机械和化学工程专业教学用书，亦可供

化工、石油化工、轻工、食品、热工、动力等有关专业和设计院、工矿企业工程技术人员教学及设计参考。

参加本书编写的还有岑汉钊、江楠、陈键、胡明辅、黄发林、舒海涛、周国庆和王家中等同志。在编写过程中，郭崇志、马小明、曾文明、何强民等同志给予了很大帮助，在此表示衷心的感谢！

作者
一九八九年

目 录

第一章 管壳式换热器	(1)
第一节 管壳式换热器的分类	(1)
一、单程式换热器	(1)
二、多程式换热器	(3)
第二节 管壳式换热器的结构	(8)
第二章 折流杆换热器及冷凝器	(17)
第一节 折流杆换热器的结构与流体动力学	(17)
一、折流杆换热器的结构	(17)
二、折流杆换热器的流体动力学	(21)
三、传热系数	(28)
第二节 国内折流杆换热器进展及其性能	(33)
一、气-气折流杆换热器	(34)
二、油品折流杆换热器	(37)
第三节 冷凝器的设计计算	(39)
一、热传递关系式	(41)
二、卧式管束的管外冷凝计算	(44)
第三章 壳程流路分析与壳程设计	(47)
第一节 壳程流机理的简化模型及流路分析法基	
本原理	(47)
一、Tinker 模型	(47)
二、影响壳程传热与流阻的因素	(51)
三、各流路的分析	(55)
四、流路分析的简要原理	(57)

第二节	壳程设计法简述与比较	(58)
一、	Bell-Delaware 法	(59)
二、	其他几种方法及与 Delaware 法的比较	(60)
第三节	壳程设计的台立华 (Delaware) 法	(65)
一、	台立华法的发展历史	(65)
二、	台立华法计算的基本结构	(66)
三、	台立华法对非 E 型结构的其他几何换热器 的计算准则	(72)
第四节	中央及周边不布管盘环形折流板换热器 壳程流路分析及流体网络模型	(76)
第四章	强化传热与强化传热管	(93)
第一节	强化技术现状及国内外应用	(97)
一、	管子内表面粗糙度	(97)
二、	换热面的表面处理与传热强化剂的应用	(100)
三、	喷淋式换热器的传热强化	(101)
四、	管外强制对流强化技术的应用	(103)
五、	沸腾传热的强化	(105)
六、	冷凝给热的强化	(111)
七、	强化垂直管和波纹管	(114)
第二节	螺旋槽管与强化传热	(117)
一、	传热强化机理	(119)
二、	传热和流阻计算与设计	(121)
三、	国内的研究情况	(125)
四、	螺旋槽管的加工方法	(129)
五、	螺旋槽对管子强度的影响	(134)
第三节	螺旋槽管的防垢性能与机理	(136)
第四节	管内插入物强化单相流体的传热	(150)
一、	管内插入物及其流态	(152)

二、传热及阻力实验结果与讨论.....	(156)
三、传热强化机理.....	(158)
四、工业生产应用实例.....	(164)
第五节 螺纹管及其应用	(165)
第五章 高效及新型换热器的管板机械设计.....	(170)
第一节 管板当量弹性常数.....	(171)
一、管板当量弹性常数处理的发展阶段.....	(171)
二、正方排列的管板问题.....	(178)
三、有效弹性常数在压力容器规范中的应用.....	(179)
第二节 异型管板机械设计.....	(182)
第三节 管桥温度	(210)
第四节 双管(壳)程及异型管板的温度场与温 差应力	(218)
一、管板温度场的计算机程序.....	(218)
二、管板温度场的实例计算及结果分析.....	(219)
第六章 管束振动特性与流体振动	(232)
第一节 U管束固有频率	(232)
一、半圆弧管固有频率的理论计算.....	(232)
二、U型管的固有频率.....	(242)
三、U型管固有频率的计算实用公式.....	(249)
第二节 双弓形折流板管束的振动特性	(253)
一、管束的固有频率.....	(253)
二、管子在液流作用下的激振响应.....	(257)
三、固有频率测试实验结果.....	(261)
四、符号表.....	(262)
第三节 管束防止流体振动的FIVER-ROD设计 及其作用原理	(263)
一、不同支承条件下耦合振动的管子固有频率.....	(266)

二、小结.....	(274)
第七章 换热器外导流筒	(276)
参考文献	(293)

第一章 管壳式换热器

第一节 管壳式换热器的分类

管壳式换热器是历史最悠久，应用最广泛的一种常用热交换设备。由于其优点很多，使用很广，故结构类型很多，其分类方法也各异。以管程与壳程两介质相互间的流程形式的不同来分，可以分为错流式、并流式、逆流式、混合流式，以及各种分流式热交换器等。

一、单程式换热器

有错流式热交换器和并流式以及逆流式三种类型，当该热交换器的管程和壳程介质流向彼此互相垂直时即为错流式流动。高效紧凑式换热器中最经常使用的型式之一就是这种结构，因为这种型式能大大简化每股流体进、出口管箱设计。若期望换热器的效率高一点（例如高于80%），则错流式结构的尺寸将变得过大，在这种情形下，使用逆流式换热器将会更好些。

在错流式中，两股流体的流程有没有存在“混合”式流动的可能性要取决于设计。当一股流体流过壳侧或管程而在相邻的流道间没有流体的混合流动形式出现，则认为该股流体为“非混合”式流，这时就称为全错流式。图1-1中的流体1与流体2都属“非混合”式流的全错流式形式。图1-2中，流体2由于其相邻流道间是呈“混合”式流的，而流体1则是“非混合”式流。“非混合”式的全错流式流体的温

度，从图 1-1 可看出是二维坐标 y 和 z 的函数。

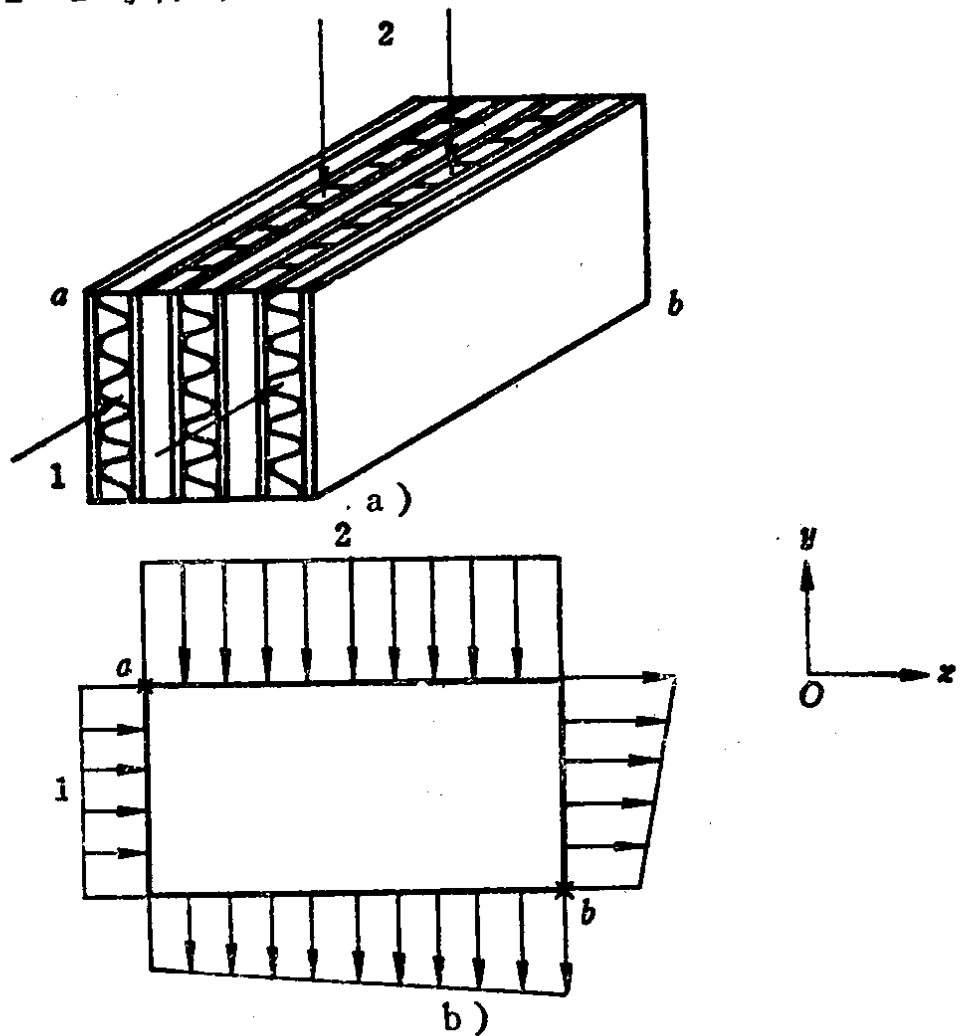


图 1-1 全错流式

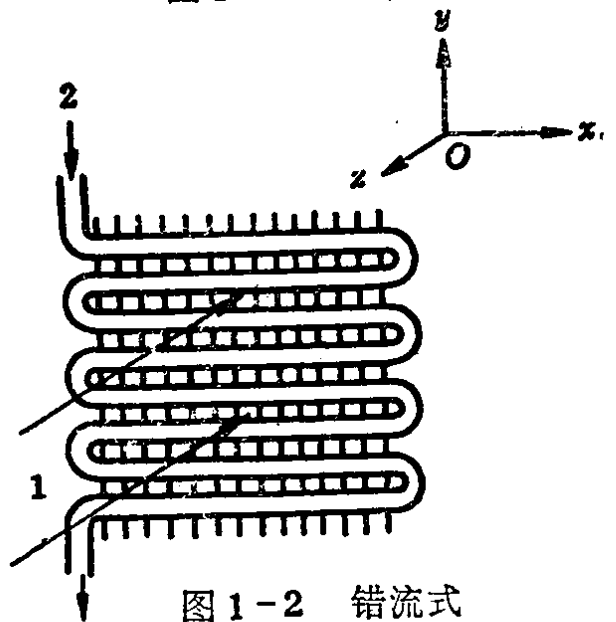


图 1-2 错流式

因而，不能认为在垂直于主流方向的横截面上温度分布是个常数。在换热器出口区截面上的“非混合”流的全错式流的流体，它的典型的温度分布见图 1-1。“混合式流”流体的温度（在图 1-2 中的流体 2），可看作仅是坐标 y 的函数，即图 1-2 中流体 2 的每个流程的温度变化（沿 x 轴方向），相比起来是很小的。在折流板式“管-壳”式换热器中，壳程流体被认为是混合流式的，而单程的管程流体则被认为是非混合式流的。这样，对错流式换热器来说，三种理想的流道布置组合是：

（1）两股流体都是“非混合”流式的（全错流式）。

（2）一股流体为“混合”流式，而另一股流体则为“非混合”式流。

（3）两股流体均为“混合”流式（对单程式换热器，实际上是比较少有的次要的一种形式）。

在其他所有参数均不变的情况下，“混合式流”的程度越高，则单程换热器的效率越低。

二、多程式换热器

所有上述三种基本的错流式流路布置的换热器，都可以做成多程式的换热器结构。这种多程式换热器的主要优点之一，是它的总效率可比单程换热器的效率有所提高。若两流体的主流方向选定为错流的话（图 1-3 与图 1-4），则随着程数的增加，换热器的总效率可接近于一个纯粹的全逆流式换热器的效率。

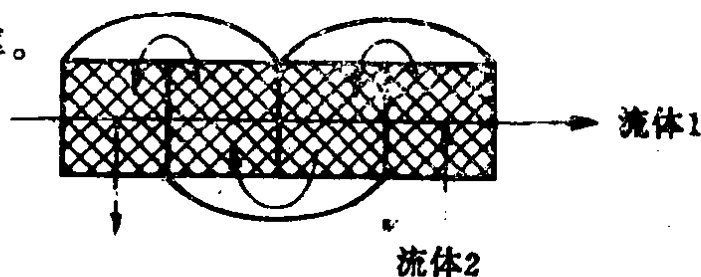
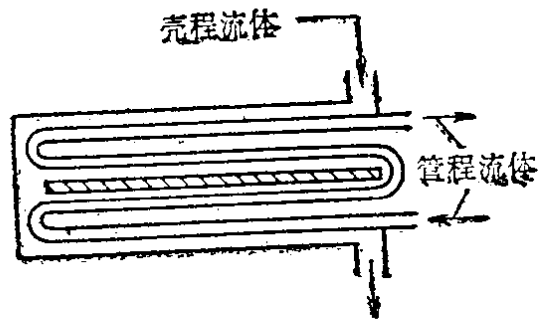
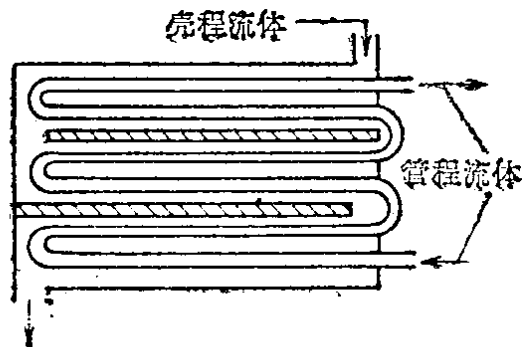


图 1-3 四程错流的逆流式换热器



a) 二壳程四管程换热器



b) 三壳程六管程换热器

图 1-4

1. 总体错-逆流式

在这种型式中，采用壳程介质流体组成二壳程以上布置的结构型式，而每个壳程中，一般为呈错流形式。虽然前面所述的三种基本错流形式中的任一种都可以采用，但通常一流体（例如在管侧）为直接以直线方式直通地流过，而另一侧流体（例如壳侧）则从一壳程转向另一壳程拐弯流过。通常其流向的选择是从使获得总体上为呈逆流的形式流动，如图 1-4 所示。

这种流程布置的换热器的效率，取决于每一侧的程间流体是处于“混合流”式状态，还是“非混合流”式状态。

如多程式结构能做到保持像单程错流式换热器型式的那

样的优点，则就有可能对一个总体为“错-逆流”式布置模型（若采用U形管壳式换热器、发夹式管的话^[2]，则可以认为在壳程中的流动为“非混合流”式的），在热力性能上做到接近于纯逆流式换热器的效果。对于一个具有几个壳程串联换热器，相对于具有相同终端温度的单程错流设计来说，其结构温差就可减少几倍。在温度高的情况下，这种多壳式结构可做到在不同的壳程中采用不同的材料，以减少费用。

2. 总体“错-并”流式

这种布置形式除了两股流体总体方向是相同的外，其他方面，和上述的“错-逆”流式形式是相类似的。因此，若将图1-4的流体2方向反过来，就可以得到总体并流。有时这种布置形式用于防止热流体在接近于冷流体（如空气）进口处而冻结的情况下。当壳程跨程数增多时，这种形式的总体效率就变成纯并流式换热器的效率。

3. “并-逆”流式而壳程流体呈“混合”式

这是“管-壳”式换热器中最常用的一种布置形式。这

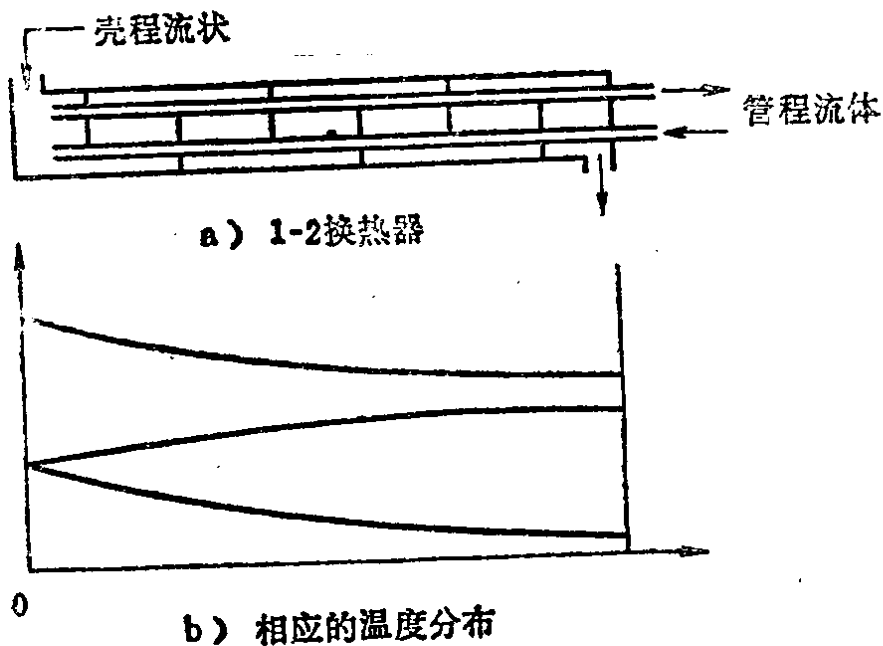


图1-5 1-2换热器及温度分布

种形式的最简单的一种是，一个多跨的单壳程流和两个管程流路，见图1-5。这种布置形式的换热器，也称之为“1-2”换热器。当壳程流体达到理想化的良好的“混合”式流时，它的温度在任一横截面上都是均匀分布的，因此当把管内的流体流向反向时，将不会过大改变图1-5b的理想化的温度分布和换热器的效率。

折流板是用于“混合”式壳程的结构，以保持壳程的流体方向与管子垂直。和管子相垂直的流体的给热系数 α 比平行于管子流动的并流式流体的 α 值要高得多。

甚至将管子流程数目从二增到四、六、 (n) ^①等，其换热器效率也只是降低少许。而管程流体流速可得到很大的提高，因而管程流体传热膜系数有较大的提高。当只有一个壳程流路而管程流路增到无穷大时，换热器的效率接近于两股流体均为混合流式的单程错流式换热器的效率。常见的管程大多都为多程的形式，见图1-6。

每个壳体的管程数若是奇数时，其换热器的效率将会好一些，因为这时壳程流体与管程流体在大半个管程流路上为逆流。但是，这种形式并不常用，因为有可能在制造与设计上引起结构方面问题和热应力问题。

由于“1-n”换热器效率低，因此，可把这种基本形式改成采用使壳程多程化来达到接近于逆流的效果。这时这种形式的换热器将有 m 个壳程流程和 n 个管程流程。但由于结构上等因素，对于管壳式换热器，一般最多只做成2壳程的结构。

4. 分流式

(1) J型分流——壳程流体混合流式

①这种换热器称为1-n换热器。

这种型式壳程流体从中央进口管进入，然后分成两股等流路，最后在换热器两端流出，见图1-7。TEMA和我国规范中J型壳就是这种形式的流程布置。

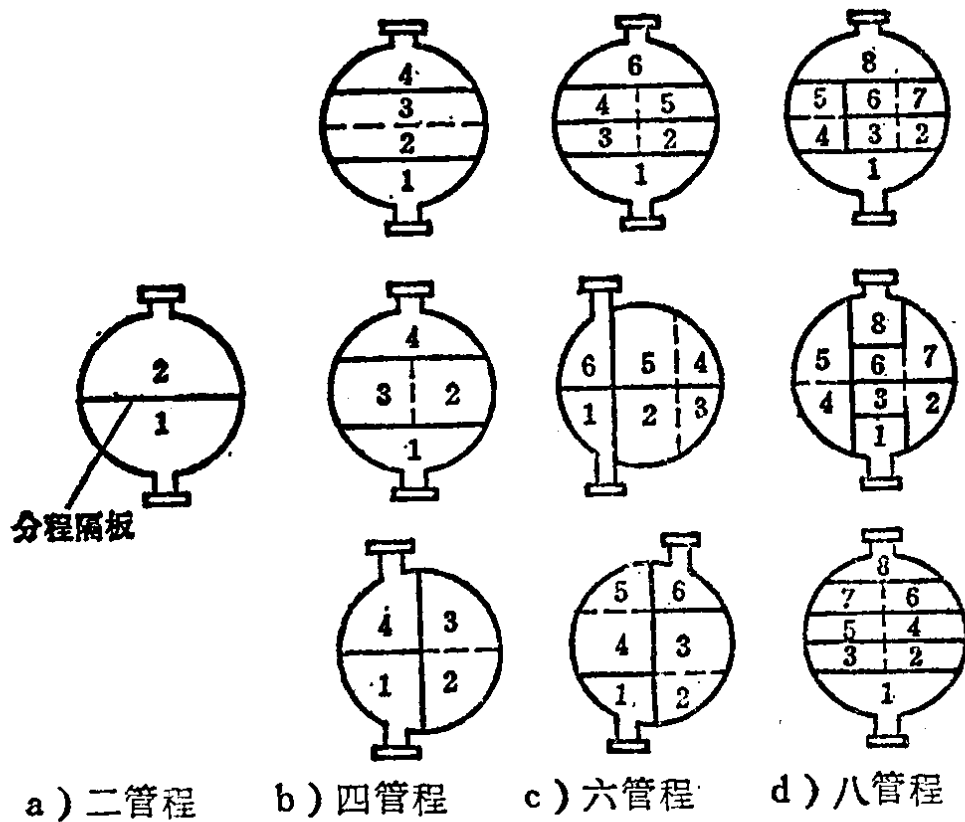


图1-6 常见的多管程布置形式

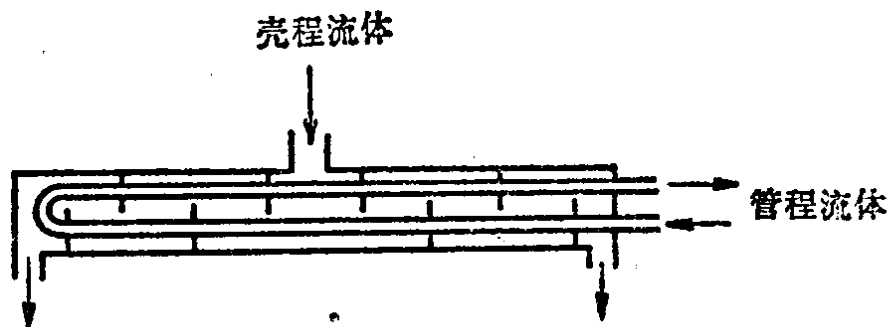


图1-7 J型分离流（壳程流体呈混合流式）

(2) G型分流——壳程流体混合流式

这种型式和前面一种型式有两点不同：一是使用了纵向挡板；二是只有一个出口。这种型式见图1-8，它是“1-2”换热器的变形。

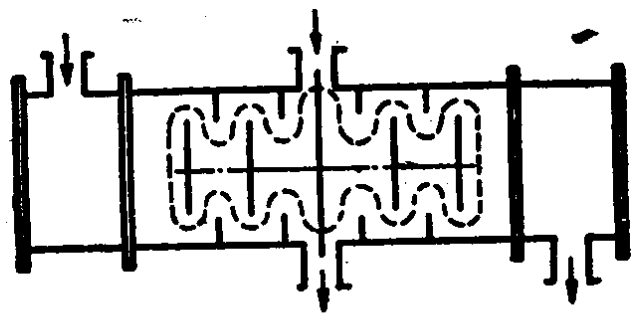


图1-8 G型分流(壳程流体呈混合式)

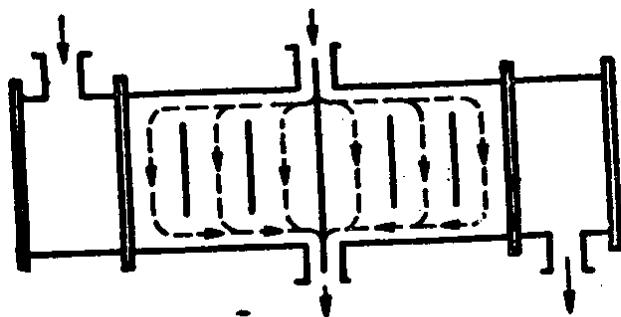


图1-9 X型壳程(全错流式)

TEMA 和我国规范的“G型”换热器就是这种流动形式。因为这种型式的流体呈混合流形式的程度，没有图1-5的“1-2”换热器严重，因此效率较高。

(3) X型——壳程流体全错流式

如图1-9所示。

第二节 管壳式换热器的结构

在换热器中，换热器管子的形式是多样的，管子的外表面可以是光滑的，也可以是低翅片式的，或其他类型的强化传热管。当管外流体（壳侧流体）比管内流体（管侧流体）的传热膜系数低时，常采用低翅片管子，低翅片管子能提供传热面积是光滑管的2.5—5倍，并且它有助于强化补偿较低的管外给热系数。假如使用低翅片管子，必须考虑由于较长的热传导路径所引起的附加的热阻。用于管壳式换热器中的低翅片管的翅片效率，其典型的情况是在数量级为0.9的

范围。

由于低翅片管的翅片外径稍小于无翅片的管端的外径，因此它们可以像光管束一样穿过管板孔。而一种重要的考虑是沿管长的在每支承板处作成无翅段，以满足管子必须穿过折流（支承）板而受到的折流板的支撑时的要求。

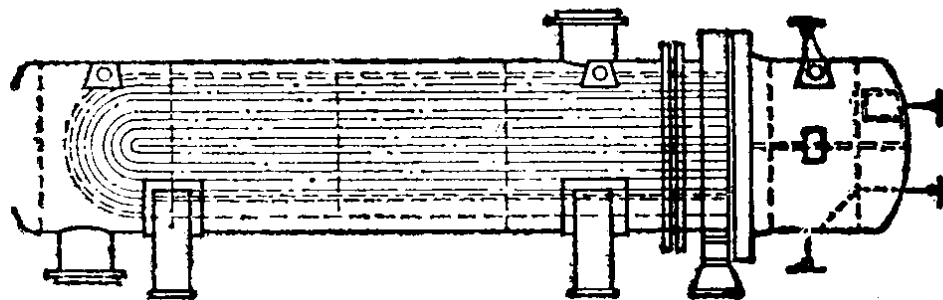


图 1-10 双管板换热器

为了避免两种流体的混合（通过管板孔泄漏），此时就应当使用图 1-10、1-11所示的双管板结构（但在此种情况下，成本大量增加）^[2]。两管板间的空间系联通于大气，以致任何一种流体的泄漏都能很快地探测到。对于易爆炸和高价值流体，常常采用三层管板（允许各种流体在没有混合的情况下分别单独泄漏到大气中），甚至具有惰性气体保护罩，或泄漏再循环系统的更加奇异的设计。对于管板，除了要满足机械要求外，还必须能承受热交换器中的两种流体引起的腐蚀。

在壳体结构中，为了避免入口处的高速射流直接冲击在第一排管子上，因此正对进口接管处，在壳体内常常设有一块防冲板(图 1-12中)。因为这样的冲击会引起磨损腐蚀、点