

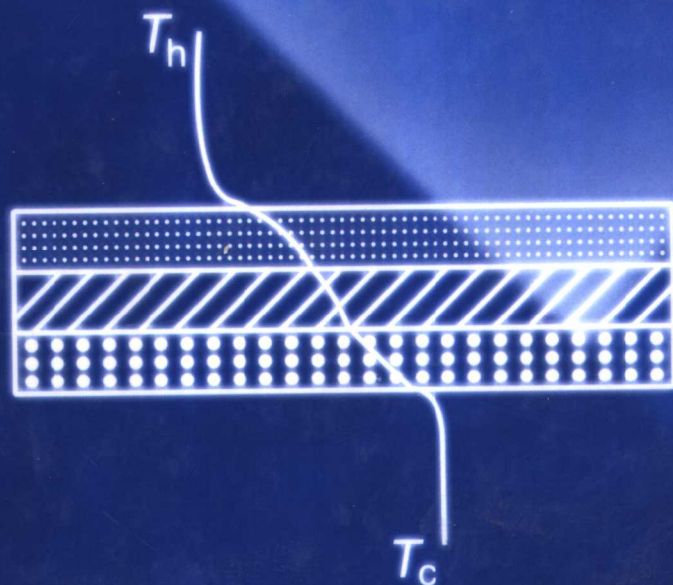


换热器设计手册

Heat Exchanger Design Handbook

T. Kuppan 著

钱颂文 廖景娱 邓先和 等译
马小明 冯毅 郭崇志



中国石化出版社

TQ051.5
2004642

换热器设计手册

T. Kuppan 著

钱颂文 廖景娱 邓先和 等译
马小明 冯毅 郭崇志



中国石化出版社

R2502/63

内 容 提 要

本手册内容丰富全面,包括传热工艺和流体力学分析、结构类型介绍、管板和膨胀节计算、管壳式换热器流体流动诱发振动、强化传热技术、材料和制造、检测、换热器污垢和腐蚀的类型,几乎无所不包,应有尽有,既有板壳式、板式、板翅式,还有蓄热式、管翅式、空冷器等。

本手册可供从事机械、化工、石油领域的工程技术人员阅读,对过程装备及压力容器设计者,对上述领域高年级本科生和研究生都不失为一本优秀的参考资料,可从中得到有益的参考和启发。

著作权合同登记 图字:01-2002-0678号

Heat Exchanger Design Handbook

T. Kuppan

Marcel Dekker, Inc., 270 Madison Avenue, New York, New York 10016

Original Edition Copyright(2002)by Marcel Dekker, Inc. All Rights Reserved.

中文版权(2002)为中国石化出版社所有。版权所有,不得翻印。

图书在版编目(CIP)数据

换热器设计手册/库潘(T. Kuppan)著;钱颂文等译.

—北京:中国石化出版社,2003

ISBN 7-80164-445-X

I. 换… II. ①库… ②钱… III. 化工过程-换热器-设计-手册
IV. TQ051.5-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 081083 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

北京大地印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 54.75 印张 1396 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月第 1 次印刷

定价: 158.00 元

译 序

本换热器设计手册内容丰富全面，包括传热工艺和流体力学计算分析，结构类型介绍，管板和膨胀节计算，管壳式换热器流体流动诱发振动，强化传热技术，换热器材料和制造、检测，换热器污垢和腐蚀的类型，几乎无所不包，应有尽有，既有管壳式、板式、板翅式，还有蓄热式、管翅式、空冷器等等，可给予读者有益参考和启发，可算是一本源典了。文献资料收集极广，特别是本书中的管壳式换热器流体流动诱发振动、美国 ASME 和 TEMA 振动规范和最新进展也是比较新颖和丰富的，对各种换热器的热效率和传热有效温差、校正因子介绍也很详细，列入的曲线图十分多。对整体翅板式管束的翅板计算内容也很新颖，此外，对换热器材料、腐蚀、制造、检测都十分详细，有别于其他换热器书。本书涉及理论不多，介绍的类型品种很多，但结构细节均没有作深入介绍，书中所述十分简单而不详，且作者为印度人，在用词用语也常常与一般不同，这使得读者在很多地方不易理解。译者在不影响作者原意下尽量作了修饰。

因本书内容庞大，翻译工作量极大，且内容广泛，用词也多人多次推敲。因此，特组织了 13 人的换热器不同方面的专家、教授、博士参加。本书由华南理工大学教育部传热及节能重点实验室化工过程设备专业的钱颂文教授，化工传热专业邓先和教授，材料和腐蚀专业廖景娱教授、冯毅副教授博士后、郭崇志副教授(原广东中山化机厂主任高工)等 13 人专人专节对口翻译。具体译校分工如下：钱颂文、邓先和、赵晓曦博士负责第一、第五章，钱颂文、杨丽明、方江敏副教授负责第二章和第十章，钱颂文负责第三章，钱颂文、邓先和、陈颖博士负责第四、第六、第八章，张亚君博士、钱颂文负责第七章、第九章，第十一章由马小明副教授、博士和罗小平副教授、博士及钱颂文负责；第十二章主要由廖景娱教授负责，部分是由余红雅讲师、郭崇志副教授所译；第十三章主要由冯毅负责，部分是由廖景娱、余红雅和郭崇志所译；第十四章、第十五章由郭崇志负责。全书由钱颂文统稿。

由于内容涉及太广，作者用词特别，我们虽然极尽全力，但不少地方翻译还有不够确切之处，望读者见谅和批评指正。

钱颂文

谨以此书献给

我的父母 *Thulukkanam*、*Senthamanai* 及

我的导师 *Ramesh K. Shah* 博士

前 言

换热器是一种使得两种或多种过程流体之间能够进行热交换的传热设备，它有着广泛的工业和家庭应用。关于换热器已有大量技术方面的文献，但主要散见于各种技术期刊、工业报告和技术标准手册中。本书旨在将换热器设计、材质选择、加工制造和工业实际中用到的基本设计概念和理论关系汇成一册。

本书仅讨论涉及单相流的换热器热设计方面的内容，如传热和压降，以及热力学设计方法和单相流流动诱发振动等方面的内容。涉及两相流的蒸发器和冷凝器在其它书籍和手册中可以查到。

本书对机械、化工和石油化工工程人员是一本很好的参考书，也可供过程装备和压力容器设计人员以及有关专业的大学高年级学生和研究生参考。

全书分为十五章，涵盖了换热器选型、设计、选材、制造、检测和操作所涉及的大部分内容。

第一章讨论换热器的分类和选型。除了工业中用到的主要换热器种类，如紧凑型换热器、管壳式换热器、再生器和板式换热器外，其它特殊种类的换热器，如双套管、热管、螺旋式、板壳式(lamella)、夹套式、玻璃材质、石墨材质和聚四氟乙烯材质的换热器也有介绍。

换热器成功的热设计需要热力学、水力学基本原理方面的知识。第二章阐述了热阻变量、总传热方程、温度分布、平均温差、温差校正因子、传热单元数、不同流动形式的效率公式、分程布置等，紧凑型 and 壳式换热器的热力学关系图表在第二章中也有示出。

换热器设计的方法，换热器设计和校核、计算机辅助热设计、压降分析、随温度变化的流体物性校正、性能失效、流体分布不均匀、不确定性等内容在第三章中讨论。

紧凑型换热器在实际应用中种类很多，由于人们追求换热器重量轻、占地面积省、使用经济，推动了紧凑型换热表面的发展。第四章讨论了基本的结构类型、换热表面几何参数、 j 和 f 因子、翅片效率、校核和设计确定尺寸等。使用空气作为冷却剂的空冷器在工业上被广泛采用，第四章对这类换热器也有详细介绍。

管壳式换热器是过程工业中广泛应用的设备，其主要结构特性、热设计、尺寸的设计计算确定和校核等在第五章中详细阐述。第五章中还讨论了盘环形折流板换热器和折流杆换热器的设计步骤。

过去 20 年来，能量价格的急剧增加使得废热回收越来越有吸引力。利用换热器从烟道气中回收废热可以提高整个工厂的效率，从而可以减少国家的能量需求，节约石油燃料。第六章旨在使读者了解各种类型的再生器及其结构，以及其热量回收以外的应用、热设计和机械设计。此外，也讨论了一些用于废热回收的工业再生器。

20 世纪 30 年代，为了满足乳品工业的卫生要求，出现了板式换热器(PHE)。如今，板式换热器在许多领域广泛应用，它们可替代管壳式换热器用于低中压液-液换热的场合。板式换热器的设计、结构的最近发展，以及螺旋板式换热器在第七章中叙述。

近年来，能量和材料费用的不断增加促进了各种强化传热表面和设备的发展。第八章介绍各种不同形式的强化传热设备。

大部分传热过程都会有人们不希望的物质沉积，通常指结垢。结垢可能是导致换热器设计和操作不确定性的主要因素，这往往会增加额外的设备投资和运行成本、降低传热性能。因此，对结垢现象的深入了解很有必要。第九章对结垢机理、防止与控制做了回顾。

管壳式换热器的设计中主要考虑因素之一是流动诱发振动问题，流动诱导振动可导致传热管故障。第十章回顾了流动诱发振动的机理、评价，以及防止振动需遵循的一些原则。

第十一章基于管壳式换热器的机械设计，讨论了最小厚度计算过程和不同压力部件如管板、封头端盖、法兰、膨胀节和非压力部件等的压力分析。对按照 ASME、TEMA、BS5500，以及 CODAP 等标准设计管板也做了详细解释。换热器和压力容器结构标准的重要细节在本章中也做了详细介绍。

金属腐蚀使设备材料慢慢受损，有必要认真考虑材质与环境之间的作用，否则会影响设备的性能和使用寿命。第十二章讨论了腐蚀原理、不同形式的腐蚀及其评价、腐蚀控制与防止、监控。除了个别例外，在工业过程中水是较好的移热载体。对换热器设计人员来说，了解冷却水的腐蚀机理很重要。与冷却水有关的大部分问题及其控制与防止在本章中都做了叙述。

选择合适的材料对达到一定的热性能、安全操作、使用寿命和经济性都很重要，因此，有必要对各种换热器材料及其结构全面了解。第十三章讨论了各种换热器广泛的材料谱的选择准则及其焊接制造方法。

近年来，人们开始关注世界市场上商品和设备的质量。就换热器和压力容器

而言，目的就是要避免设备运作时发生破坏事故，这可能给人类和环境造成灾难性的破坏。第十四章讨论质量控制与质量保证、检验、无损检测(NDT)的各个方面以及 NDT 技术的最近发展趋势。

换热器单元的热力学设计完成后，进入工场加工制造操作阶段。除了一定的理论知识背景，制造商还要求具备加工制造的实践知识才能有效地保证设备的质量和性能。第十五章讨论管壳式换热器的加工制造方法以及紧凑式换热器的铜焊和软焊方法。

本书的准备过程中参考了该领域内众多研究人员和学者的大量文献，本人非常感谢所有资料来源的作者并征求他们的许可，如有疏忽，在此真诚致歉。大部分作者和研究机构回复了我的请求，并提供了大量有用的数据和信息，有些我直接表示了感谢，有些通过随附的参考文献表示谢意。最后，我要特别提及我的顾问和导师 R. K. Shah 博士，他是 ASME(美国机械工程师协会)通讯理事会的副主席，还有 Delphi Harisson Thermal Systems, Lockport, New York，他们在本书的准备过程中自始至终给了我帮助，并提供了热设计、流动诱发振动、各种换热器的热力学关系式等方面的资料。

在本书的准备过程中，我的父母和家人牺牲了不少与我在一起的时间和乐趣，这些本来都是他们应该得到的，也向他们表示歉意。

T. Kuppan



第一章	换热器——引言、分类和选型	(1)
第二章	换热器热力学(Thermodynamic)基础	(20)
第三章	换热器热力设计	(106)
第四章	紧凑式换热器	(132)
第五章	管壳式换热器设计	(188)
第六章	蓄热式再生器	(246)
第七章	板式换热器与螺旋板式换热器	(283)
第八章	强化传热	(303)
第九章	污垢	(317)
第十章	管壳式换热器流动诱发振动	(341)
第十一章	管壳式换热器机械设计	(387)
第十二章	腐蚀	(456)
第十三章	材料选择与加工	(522)
第十四章	质量控制和质量保证、检验和无损检测	(662)
第十五章	换热器制造	(740)
参考文献	(808)
后记		

第一章 换热器——引言、分类和选型

1 引言

换热器是当两种或多种流体存在温差时内部热量传递的传热设备。大部分换热器内部的流体被传热面分开,理想情况下相互之间不发生混合。换热器用于过程、能源、石油、运输、空调、制冷、低温、热量再生、替代燃料以及其它工业。人们日常生活中最常见的换热器例子如汽车散热器、冷凝器、蒸发器、空气预热器和油冷器。换热器的分类有多种不同的方法。

2 换热器的构造

一台换热器由换热元件,如含传热面的芯或管阵(matrix),以及流体分配元件,如封头或管箱结构、进出口接管等构成。换热器中通常没有移动部件,但也有例外,例如在旋转式再生器中,蓄热体被设计成以一定的速度旋转。传热面与流体直接接触,从而热量以热传导的方式传递。传热面中将二种流体分开的那部分,即基本的或直接接触的传热面外,为了增大传热面积,二级接触面如翅片可以附在基本传热面上。

3 换热器的分类

总的来说,工业上的换热器按以下来分类:(1)结构;(2)传热过程;(3)传热面的紧凑程度;(4)流动形态;(5)分程情况;(6)流体的相态;(7)传热机理。在此,简要介绍分类情况(见图1),换热器分类的细节以及结构参见 Shah^[1,2], Gupta^[3], 以及 Graham Walker^[4]文献,关于换热器的分类和选型的步骤参见 Larowski 等^[5a,5b]文献。

3.1 根据结构分类

根据结构的不同,换热器可分为^[1]:

1. 管式换热器,包括双套管式、管壳式、盘管式等;
2. 板式换热器,包括垫片板片式、螺旋板式、板壳式(lamella)、面板盘绕式(plate coil)等;
3. 延伸表面换热器,包括管翅式、板翅式等;
4. 再生器,包括固定蓄热床式、旋转式等。

管式换热器

套管式换热器:套管式换热器由两个同心管构成,通常设计成U形,见图2。流动方向为逆流式,可以根据需要将多个套管式换热器串连或并连起来,适用于传热负荷较小的情形,一般小于300ft²,适用于高温高压场合,耐用性好^[5]。由于可以根据实际需要添加或拆除部分单独的单元,使用灵活,并且由于它是标准化的,所以不需要库存很多来备用。可在管内壁沿纵向或周向设置翅片来强化管内壁对管内流体的传热。其设计压力和温度与管壳式换热器类似。这种换热器设计方法简单,可用凯恩(Kern)法^[6],也可采用编写的程序。

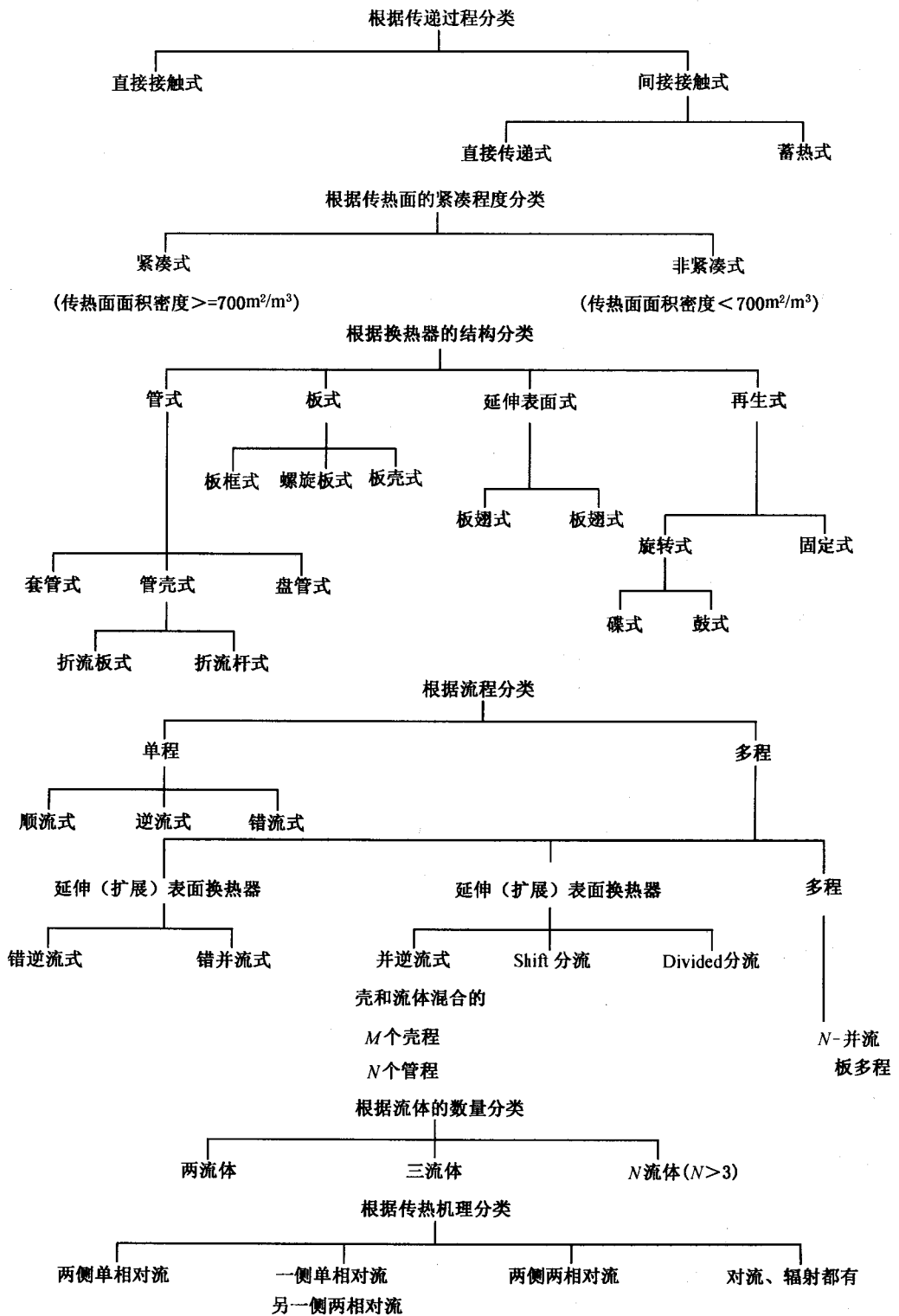


图1 换热器的分类^[1]

管壳式换热器：在过程工业中，管壳式换热器使用最多。工业中使用的换热器超过90%都是管壳式换热器^[7]，在工业过程热量传递中是应用最为广泛的一种换热器^[8]。由于长期以来人们建立了设计和加工制造这种换热器的一整套程序，很方便查找其设计和制造的标准，又可用多种材料制造，设计成各种尺寸及型式，对其操作温度和压力也没有太多限制，所以这种换热器往往是人们的首选。

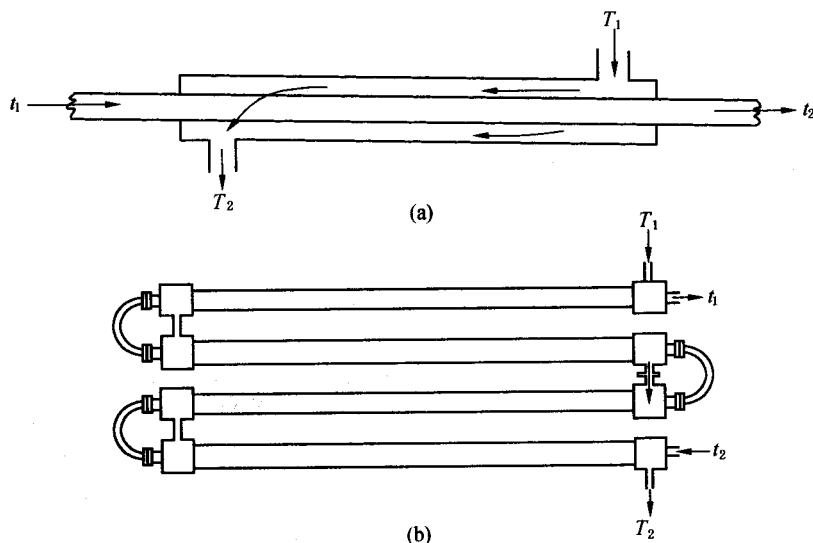


图2 套管式换热器

(a)逆流式单程；(b)逆流式多程

盘管式换热器：用于液化系统中。当今用于大规模液化系统中的三种经典换热器之一就是盘管式换热器(CTHE)，其结构见参考文献[5]和[9]。这种换热器的结构包括在一个中心管周围以螺旋状盘绕大量口径小的延性管子，一台换热器可以沿着主轴方向和径向有多层管，一层或多层内的管子可以组合在一起成为一个或多个管板，流过该盘管束内不同的流体对一单壳程流体可以呈逆流方式流动。

高压流路在小管内流动，而低压回流蒸汽在小管外侧的中心管与壳体之间的环形空间内流动。通过使用等长的传热管和改变这些不同层内的管间距，可使盘管内每一高压流路的压降相等。由于管壳两侧都具小口径管，盘管式换热器不能用机械方法清洗，适合处理无固体颗粒的流体或可用化学方法清洗污垢的流体。处理低温流体可用铝合金材质，处理高温流体采用不锈钢。

盘管式换热器具有独特的优点，尤其适合处理下列情形的低温流体^[9]：

1. 两股以上的流体同时传热；
2. 需要大量传热单元；
3. 涉及较高的操作压力。

盘管式换热器价格昂贵，因为需要较高的材料费用和盘管的加工费用，还有中心轴造成的费用，中心轴对传热来说无任何用处，但增大了壳体的直径^[5]。

玻璃盘管式换热器：这种换热器的轴心熔融在壳体上连为一体，可以防止轴心和壳侧流

体的泄漏^[10]，其示意图见图 3，有关细节请见第十三章。

板式换热器

板式换热器的使用不如管式换热器广泛，但也有其一定的优点。板式换热器可分为以下三类：

1. 板框式或称垫片板片式换热器，可替代管壳式换热器用于低、中压场合的液—液传热；
2. 螺旋板式换热器，可替代管壳式换热器，无需太多维护，尤其适用于易淤积或含有悬浮固体颗粒的流体；
3. 由凸鼓板制成的导管或盘管状板圈式或盘绕式换热器，以使液体与翅相耦合 (couple)。

板式换热器：板式换热器(PHE)实质上由一些压有波纹相互接触的金属板组成，每一块板有四个孔作为流体进口和出口，设计密封垫片使流体间隔地在各流道中流动，各板被夹紧在一个框内连接起来，可供流体流过。由于每一块板周围都用垫圈密封，板式换热器又叫垫片板片式换热器。见图 4。板式换热器的有关细节在第七章板式换热器中另作叙述。

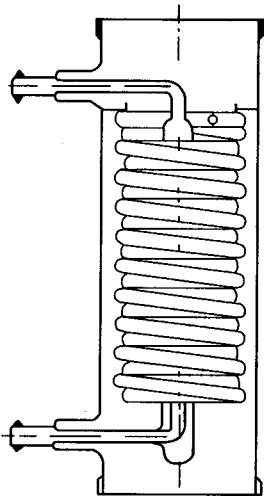


图 3 玻璃盘管式换热器^[10]

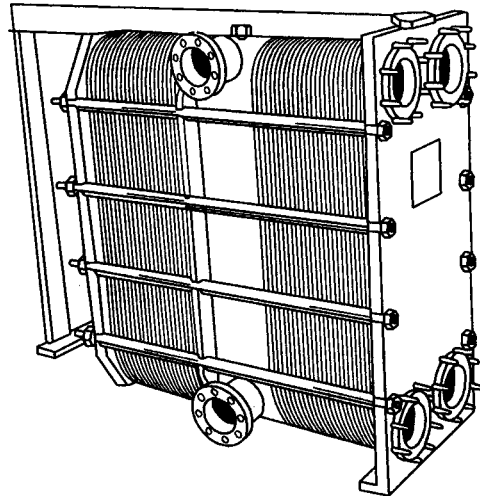


图 4 板式换热器[来源于 Hydrocarbon Processing
《烃加工》，p.123,(1996)]

螺旋板式换热器：螺旋板式换热器(SPHEs)从 20 世纪 30 年代开始使用，最初在瑞典用于纸浆厂的废热回收。这种换热器可以归结为一种焊接式的板式换热器，由两块长条形的金属板围绕轴心卷合制造而成，形成两个螺旋式的通道，卷合前将定距螺栓焊接在金属板上，使得各螺旋板通道间距在沿螺旋通道长度的方向保持均匀分布，螺旋板式换热器如图 5 所示。大部分情况下，在螺旋板的两端两个流道都被交错地焊接密封，但在某些情况下，一个流道畅开，另一个流道在板的两端密封，这两种结构可防止二种流体混合。

螺旋板式换热器特别适合下列情形^[5]：

1. 处理泥浆和有悬浮纤维的液体，以及固体含量达到 50% 的矿物质；
2. 对于特别高粘度的流体，譬如高达 500000cp 的流体冷却时，螺旋板式换热器是首选，这是因为由于分布不均匀，因而局部的过冷造成部分堵塞的可能，多半很少在一单通道换热

器中发生；

3. 螺旋板式换热器在再沸、冷凝、粘性和浆状流体的加热或冷却过程中也有应用^[11]。

关于螺旋板式换热器的细节在第七章板式换热器中另有叙述。

面板盘绕式换热器：这种换热器可以叫做面板盘绕式、卷板式(plate coil)、凸鼓(embossed)面板式或夹套式换热器。这种换热器根据流体在夹套内被冷却或加热用做热井或热源。这种换热器相对便宜，根据不同操作条件可以加工成需要的形状和厚度。因此，可应用于许多工业领域，如低温、化工、纤维、食品、涂料、制药、太阳能等。

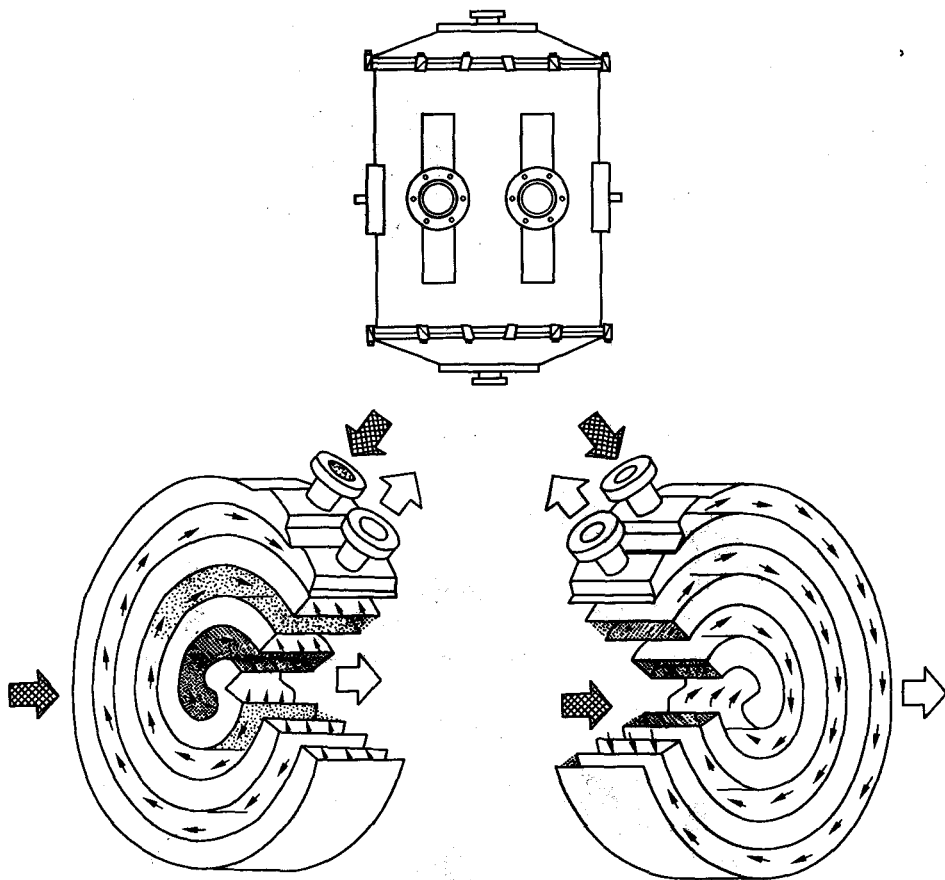


图 5 Alfa-Laval 螺旋板式换热器

面板盘绕式换热器的结构部件：图 6 示出了两种不同设计的面板盘绕式换热器，可用于电镀、金属抛光、化工、纺织、酿酒、制药、乳业、制浆造纸、食品、核能、饮料、废物处理以及很多其它领域。下面详细讨论面板盘绕式换热器的结构部件，这些资料由 M/s Paul-Muller 公司和 Springfield, MO 提供。

1. 单凸鼓表面。单凸鼓换热表面式[图 7(a)]是一种比较经济的形式，这种设计采用两种不同厚度的板材，可选用多种规格和工作压力的不锈钢、合金和碳钢材料制造。

2. 双凸鼓表面。采用两块相同厚度的板材，这种类型的结构[图 7(b)]利用了传热板的两侧，能够最大限度地加热和冷却。这种换热器通常用于浸没式的场合，可选用多种规格和

工作压力的不锈钢、合金以及碳钢材料制造。

3. 酒窝状表面。[图 7(c)]所示为酒窝状表面，这种表面由专门的机器冲出凹孔后焊接而成，可以提高流道的流动面积。可选用多种规格和工作压力的不锈钢、合金以及碳钢材料制造。

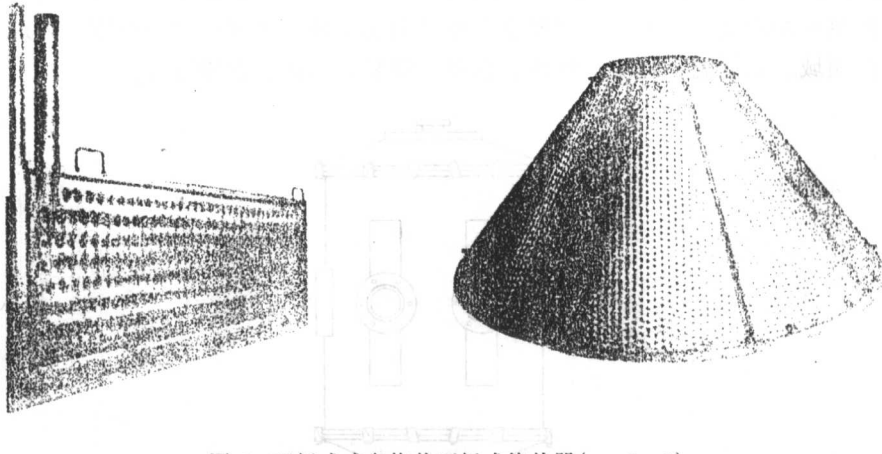


图 6 面板式或盘绕状面板式换热器(panel coil)

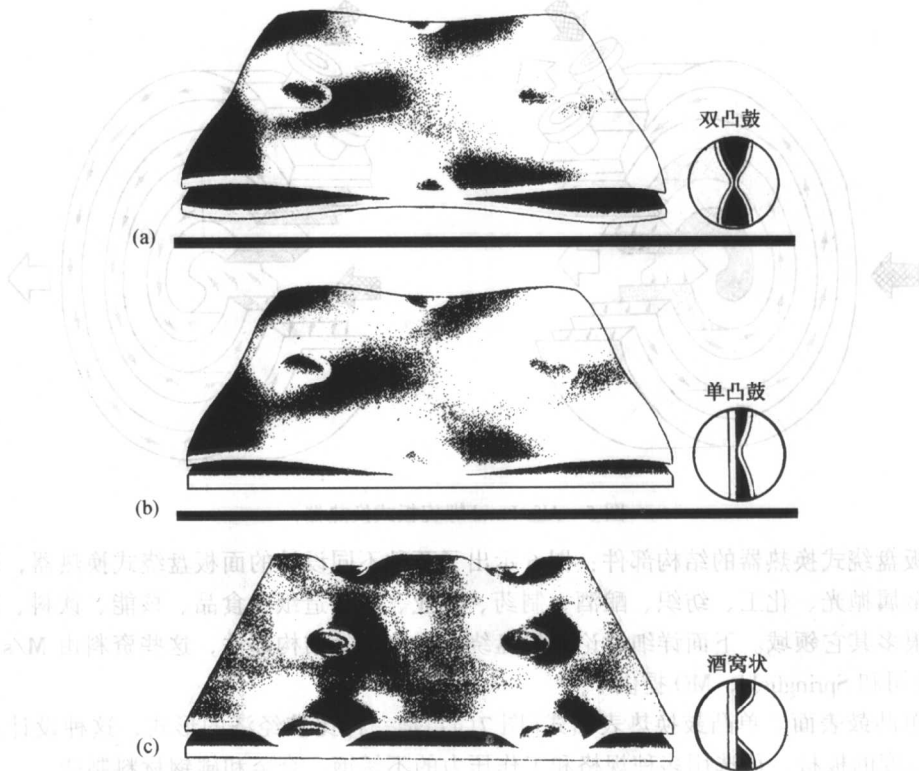


图 7 Paul - Muller 面板盘绕式换热器的凸鼓面图形

(a) 双凸鼓表面；(b) 单凸鼓表面；(c) 酒窝状表面

面板盘绕式换热器的制造方法。基本上有三种不同的方法用于制造面板盘绕式换热器：(1)一般采用阻抗点焊(RSW)和/或阻抗缝焊(RSEW)。另外一种可采用的阻抗点焊以焊接酒窝状面板盘绕式夹套是 GMAW 过程的周边焊接件(图 8)；(2)模压；(3)卷合粘接工艺。在模压过程中，流道模压在一块或二块金属薄板上；对于一块薄板凸鼓和连接到另一块非凸鼓的平板上时，形成为单侧凸鼓面板盘绕式；而二侧二块薄板均冲压凸鼓者，则形成双侧凸鼓面板盘绕式。



图 8 Paul-Muller 酒窝状夹套式模板气体金属弧焊(MIG)

面板盘绕的类型。容器外装夹套的方法通常采用以下三种方式(图 9)之一：常规式夹套；酒窝状夹套；半管式夹套^[12]。

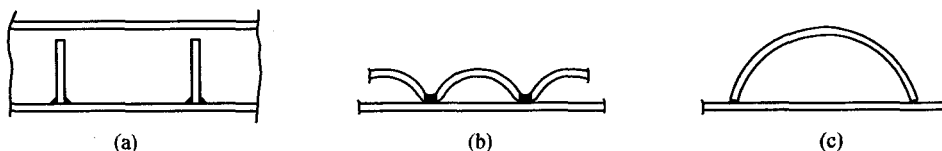


图 9 夹套结构部件

(a)常规式；(b)酒窝状；(c)半管式^[12]

面板盘绕式换热器的优点。它提供了一种最优的加热和冷却过程容器的方式，易于控制、高效、产品质量好。采用这种方法传热有以下优点^[12]：

1. 可用于处理任何种类的液体、蒸气及其它高压蒸汽；
2. 可以准确控制传热载体的循环、温度和速度；
3. 面板可用比容器本身便宜得多的金属制造而成；
4. 污染、清洁及维修等问题大大减少；
5. 具有最高效、最经济及灵活性等特点；
6. 为化学工程师给特定的过程设计反应器时选择传热媒体提供了很大的灵活性。

板壳式(lamella)换热器：板壳式换热器是一种结合了板式换热器和管壳式换热器两者的结构的焊接式换热器。在这种换热器中，用多对平行的金属薄板代替了传热管，这些金属薄板边缘焊接在一起，形成长的狭小流道，不同宽度的这些元件包一起组装成一个圆形的板束，然后装入壳体。板壳式换热器的横截面示意图如图 10 所示。采用这种设计，壳侧流动面积最小，与元件包内侧的流动面积相近，因此，两股流体的速度也就差不多^[13]。流体的流动实际上是管程和壳程的两股流体沿轴向作逆流式的二侧流动^[4]。传热元件包的一端固定，另一端浮动，便于热胀冷缩。固定在壳体一端的连接与普通的管壳式换热器一样，允许传热元件包抽出，故可接触到其外表面。

板壳式换热器可用碳钢、不锈钢、钛、镍基合金等材质制成，能处理大部分流体。板束可以浮动限制了其工作压力通常不大于 300psi。板壳式换热器的适用性一般比板式和管壳式换热器差，但相同的传热负荷下价格低于后者^[5]。板壳式换热器的设计一般由卖主完成。

延伸(扩展)表面换热器

在处理气体和一些液体时, 如果传热膜系数很低, 需要较大的传热面积来提高传热效率, 在基本传热面上附着翅片可以满足这一要求。管翅式和板翅式(图 11)换热器是最常见的延伸表面换热器, 其设计方法在第四章中的紧凑式换热器部分另有叙述。

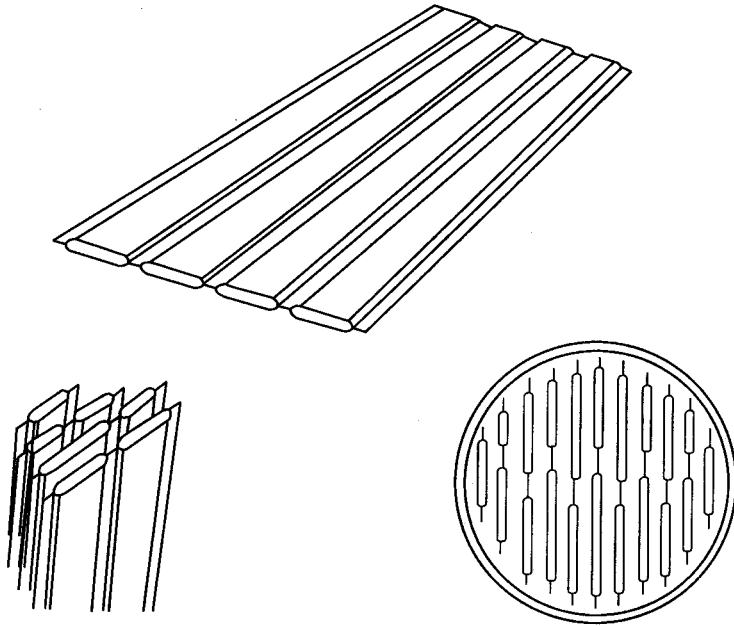


图 10 Alfa-Laval 板壳式换热器横断面示意图

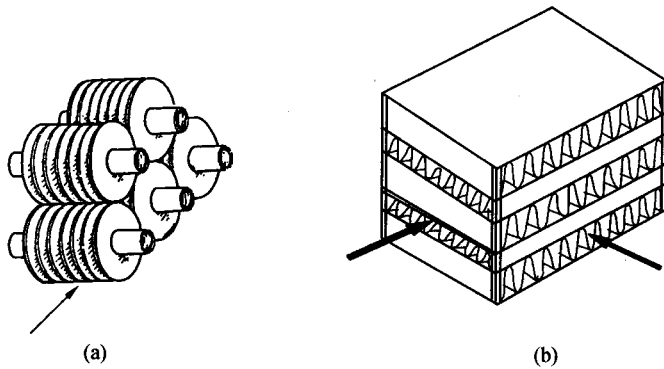


图 11 延伸(扩展)式表面换热器
(a)管翅式; (b)板翅式

再生器, 蓄热式换热器

再生是一门古老的技术, 可以追溯到第一台鼓风式的熔炉。制造和过程工业, 例如玻璃、水泥等消耗大量能量, 其中大部分的能量以高温尾气的形式被废弃, 从尾气中回收废热的换热器, 也就是再生器可以提高工厂的总热效率。

再生器的类型: 再生器一般分为固定床阵式的和旋转式的两种。固定式和旋转式再生器