



过程装备与控制工程丛书

纵流壳程换热器

董其伍 刘敏珊 编著



化学工业出版社

过程装备与控制工程丛书

纵流壳程换热器

董其伍 刘敏珊 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书内容包括：纵流壳程换热器结构，换热器中流体流动型态分布以及纵流壳程换热器的流体阻力计算，换热器的传热方式、传热计算，纵流换热器元件强度计算，纵流壳程换热器的制造特点、组件的制造与装配，纵流壳程换热器优化的原理、方法和计算，纵流壳程换热器 CAD 系统的开发设计，以及纵流壳程换热器的流体流动和传热的仿真模拟。

本书可供传热设备设计、制造工程技术人员和传热强化研究人员参考，可以指导相关企业进行新型纵流壳程换热器的开发利用，帮助其提高市场竞争力。也可作为高等院校本科生、研究生的教材或参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

纵流壳程换热器/董其伍, 刘敏珊编著. —北京: 化学工业出版社, 2006. 12
(过程装备与控制工程丛书)
ISBN 978-7-5025-5773-7

I. 纵… II. ①董…②刘… III. 化工过程-换热器
IV. TQ051.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 161304 号

责任编辑: 程树珍 金玉连

责任校对: 周梦华

装帧设计: 于兵

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16½ 字数 415 千字 2007 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

序

按照国际标准化组织 (ISO) 的认定, 社会经济过程中的全部产品通常分为四类, 即硬件产品 (hardware)、软件产品 (software) 和流程性材料产品 (processed material) 以及服务产品 (service)。在 21 世纪初, 我国和世界上各主要发达国家都已经把“先进制造技术”列为自己国家优先发展的战略性高技术之一。通常, 先进制造技术主要是指硬件产品的先进制造技术和流程性材料产品的先进制造技术。所谓“流程性材料”则是指以流体 (气、液、粉粒体等) 形态为主的材料。

过程工业是加工制造流程性材料产品的现代国民经济的支柱产业之一。成套过程装置则是组成过程工业的工作母机群, 它通常是由一系列的过程机器和过程设备, 按一定的流程方式用管道、阀门等连接起来的一个独立的密闭连续系统, 再配以必要的控制仪表和设备, 即能平稳连续地把以流体为主的各种流程性材料, 让其在装置内部经历必要的物理化学过程, 制造出人们需要的新的流程性材料产品。单元过程设备 (如塔、换热器、反应器与贮罐等) 与单元过程机器 (如压缩机、泵与分离机等) 二者统称为过程装备。为此, 有关涉及流程性材料产品先进制造技术的主要研究发展领域应该包括以下几个方面: ①过程原理与技术的创新; ②成套装置流程技术的创新; ③过程设备与过程机器——过程装备技术的创新; ④过程控制技术的创新。持续推进这些技术的创新, 就有可能把过程工业需要实现的最佳技术经济指标, 即高效、节能、清洁和安全不断推向新的技术水平, 以确保该产业在国际上的竞争实力。

过程装备技术的创新, 其关键首先应着重于装备内件技术的创新, 而其内件技术的创新又与过程原理和技术的创新以及成套装置工艺流程技术的创新密不可分, 它们互为依托, 相辅相成。这一切也是流程性产品先进制造技术与一般硬件产品的先进制造技术的重大区别所在。另外, 这两类不同的先进制造技术的理论基础也有着重大的区别, 前者的理论基础主要是化学、固体力学、流体力学、热力学、机械学、化学工程与工艺学、电工电子学和信息技术科学等, 而后者则主要侧重于固体力学、材料与加工学、机械机构学、电工电子学和信息技术科学等。

“过程装备与控制工程”本科专业在 21 世纪的根本任务是为国民经济培养大批优秀的能够掌握流程性材料产品先进制造技术的高级专业人才。

四年多来, 教学指导委员会以邓小平同志提出的“教育要面向现代化, 面向世界, 面向未来”的思想为指针, 在广泛调研的基础上, 分析了国内外化工类与机械类高等教育的现状、存在问题和未来的发展, 向教育部提出了把原“化工设备与机械”本科专业改造建设为“过程装备与控制工程”本科专业的总体设想和专业发展规划建议书, 于 1998 年 3 月获得教育部的正式批准, 建立了“过程装备与控制工程”本科专业。以此为契机, 教学指导委员会制订了“高等教育面向 21 世纪‘过程装备与控制工程’本科专业建设与人才培养的总体思路”, 要求各院校从转变传统教育思想出发, 拓宽专业范围, 以培养学生素质、知识与能力为目标, 以发展先进制造技术作为本专业改革发展的出发点, 重组课程体系, 在加强通用基础理论与实践环节教学的同时, 强化专业技术基础理论的教学, 削减专业课程的分量, 淡化专业技术教学, 从而较大幅度在减少总的授课时数, 以加强学生自学、自由探讨和发展

的空间，并有利于逐步树立本科学生勇于思考与创新的精神。

高质量的教材是培养高素质人才的重要基础，因此组织编写面向 21 世纪的迫切需要的核心课程教材，是专业建设的重要内容。同时，为了进一步拓宽高年级本科学生和研究生专业知识面，进一步加强理论与实际的联系，进而增强解决工程实际问题能力，我们又组织编写了这套“过程装备与控制工程”的专业丛书，以帮助学生能有机会更深入地了解专业技术领域的理论研究与技术发展的现状和趋势，力求使高校的课堂教学与社会工程实践能够更好地衔接起来。

这套丛书，既可作为选修课教材，也可作为毕业设计环节的教学参考书，还可供广大工程技术人员作为工程设计理论分析与实践的有力助手。

“过程装备与控制工程”本科专业的建设将是一项长期的任务，以上所列工作只是一个开端。尽管我们在这套丛书中，力求在内容和体系上能够体现创新，注重拓宽基础，强调能力培养。但是，由于我们目前对于教学改革的研究深度和认识水平都有限，在这套丛书中必然会有许多不妥之处。为此，恳请广大读者予以批评和指正。

全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会

副主任委员兼化工装备教学指导组组长

大连理工大学 博士生导师

丁信伟 教授

2001 年 10 月于大连

前 言

传热设备作为一种通用设备广泛应用于化工、炼油、动力、冶金、轻工、原子能、制药、航空、食品及其它许多工业部门，尤其在化工和炼油行业，传热设备占有很大的投资比例。目前，在传热设备中，应用最多的是管壳式换热器。近年来，由于工艺要求、能源危机和环境保护等诸多因素，传热强化技术和换热器的现代设计方法得到飞速发展，改进管壳式换热器壳程的结构形式、改善流体流动状况及提高其传热效率是当前管壳式换热器强化传热的重要方向之一。

新型纵流壳程换热器作为管壳式换热器中的重要一支，通过采用新的管束支撑结构来代替传统的折流板支撑结构，使壳体内流体主要呈纵向流、斜向流方式流动，从而改变传统折流板换热器中流体流动方式。纵流壳程换热器具有传热效率高、流体阻力小、有效消除流体诱导振动，且抗结垢能力强、质量轻、寿命长、设备投资及操作费用低等优点，随着强化传热和数值模拟技术的发展，纵流壳程换热器的结构和理论也在不断发展与完善。

作者多年来从事纵流壳程换热器及其相关技术的研究与工程应用，结合多年所承担的国家及省部级重大科研课题和教学工作的成果和经验，系统地总结和阐述了纵流壳程换热器的结构特点、流动与传热特性、分析设计计算、工程应用、数值模拟、计算机辅助设计等相关技术。为新一代管壳式换热器的研究与开发应用提供了重要的关键技术。

科技部“九五”、“十五”国家重点科技攻关计划，河南省杰出人才创新基金和河南省重大科技攻关项目，对本领域及相关学科的研究和开发应用给予了大力支持，作者特此表示由衷的感谢。作者多年来在“新型高效纵流壳程换热设备技术研究与应用”方面，得到了兄弟单位以及有关专家、学者的关心和指导，在此表示真挚的感谢！

王永庆、古新、赵晓冬、安万辉、徐广辉、李军杰、夏立荣等参加了本书的编写工作。

由于作者水平有限，书中存在疏漏之处在所难免，诚恳欢迎同行专家及广大读者给予批评指正。

编著者
2006年6月

目 录

1 绪论	1	阻力损失	43
1.1 换热器在工业中的应用	1	3.2.3 折流板换热器壳程阻力	
1.2 换热器的分类及特点	1	损失	44
1.2.1 管式换热器	2	3.2.4 允许压降的选取	45
1.2.2 板面式换热器	6	3.3 纵流壳程换热器壳程流体流动	
1.2.3 其它型式换热器	8	阻力计算	45
1.3 换热设备特性与选型	9	3.3.1 Phillips 石油公司的设计	
1.4 近代研究成果及发展趋势	10	方法	45
1.4.1 管壳式换热器的发展趋势	10	3.3.2 郑州大学热能工程研究中心	
1.4.2 纵流壳程换热器的发展		的设计方法	46
前景	12	3.3.3 其它设计方法	47
1.4.3 紧凑式换热器的发展趋势	12	4 传热及其计算	49
1.4.4 换热网络的研究进展	13	4.1 传热的一般概念	49
1.4.5 换热器相关技术发展动向	13	4.1.1 传热的学概述	49
2 纵流壳程换热器结构	16	4.1.2 热量传递的基本方式	49
2.1 概述	16	4.2 传热过程的基本公式	51
2.2 管程及换热管的排列方式	16	4.2.1 平板两侧传热过程	51
2.2.1 管程分程	16	4.2.2 圆管两侧传热过程	52
2.2.2 管板	17	4.2.3 热阻	52
2.2.3 管箱	18	4.2.4 污垢热阻	53
2.2.4 换热管排列方式	19	4.3 热传导	53
2.3 管束及支撑结构	20	4.3.1 热传导的方程及计算	53
2.3.1 高效换热管	20	4.3.2 非定态热传导	57
2.3.2 新型管束支撑	23	4.4 对流换热	57
2.4 流体分布结构	27	4.4.1 概述	58
2.5 其它各部分结构	29	4.4.2 无相变对流换热	59
2.5.1 膨胀节	30	4.4.3 自然对流换热	63
2.5.2 防冲板	30	4.4.4 有相变传热	65
2.5.3 防短路结构	31	4.5 换热器壳程传热系数关联式	69
2.5.4 拉杆与定距管	31	4.5.1 折流杆换热器壳程传热系数	
3 流体流动及阻力计算	33	关联式	69
3.1 流动型态的分布	33	4.5.2 折流板或无折流装置换热器	
3.1.1 流动型态的描述	33	壳程传热系数关联式	74
3.1.2 管内外流体流态分布	33	4.6 换热器工艺计算	74
3.1.3 管壳式换热器壳程流体流态		4.6.1 设计计算基本步骤	75
分布	35	4.6.2 相关计算与选择	77
3.2 流体阻力计算的一般方法	42	4.7 纵流壳程换热器传热计算示例	81
3.2.1 流体阻力概述	42	4.7.1 壳程流体参数	81
3.2.2 直管阻力损失及换热器管程		4.7.2 管程液体参数	82
		4.7.3 总的热交换量	82

4.7.4 筒体参数、布管及传热系数	82	6.2.1 螺旋槽管的制造	134
4.7.5 核算 K 及传热量	84	6.2.2 翅片管的制造	135
5 纵流换热器元件强度计算	86	6.3 管束的制造与装配	136
5.1 概述	86	7 纵流壳程换热器的优化	138
5.2 换热器强度计算与分析基础	86	7.1 概述	138
5.2.1 解析法计算理论基础	86	7.1.1 目标函数与数学模型	138
5.2.2 管板强度计算的理论基础	89	7.1.2 设计变量	139
5.2.3 有限元理论基础	90	7.1.3 约束条件	140
5.3 筒体、封头、法兰及开孔补强设计	92	7.2 最优化问题的求解方法	140
5.3.1 筒体强度计算	92	7.2.1 一维优化搜索方法	141
5.3.2 封头强度计算	95	7.2.2 无约束优化问题的求解	142
5.3.3 法兰强度计算	96	7.2.3 线性规划问题的求解	144
5.3.4 开孔补强	101	7.2.4 约束优化问题的求解	145
5.4 管板计算	103	7.3 变尺度优化原理及程序	148
5.4.1 影响管板应力计算的 因素	104	7.4 模糊优化原理及程序	149
5.4.2 几种管板强度设计标准	104	7.4.1 发展现状	149
5.4.3 管板强度计算	106	7.4.2 基本概念	150
5.4.4 薄管板技术	109	7.4.3 多目标与模糊优化	151
5.5 膨胀节计算	110	7.4.4 模糊线性规划方法	152
5.5.1 膨胀节的设置	110	7.4.5 多目标模糊优化问题的 解法	152
5.5.2 U形膨胀节应力计算	112	7.4.6 纵流壳程换热器中应用模糊 优化的探讨	153
5.5.3 ANSYS 软件在膨胀节中的 应用	114	7.5 优化问题的数值计算	154
5.6 组合结构强度分析	114	7.5.1 优化方法程序库 OPB	154
5.6.1 用解析法计算纵流式组合式 换热器	115	7.5.2 MATLAB 优化工具箱	155
5.6.2 ANSYS 软件在组合式换热器 中的应用	120	7.6 工程应用及示例	158
5.6.3 实验	123	8 纵流壳程换热器计算机辅助设计	162
5.7 换热器中 H 形结构分析	124	8.1 概述	162
5.7.1 H 形结构的理论分析	124	8.2 管壳换热器计算机辅助设计	164
5.7.2 H 形结构强度的数值 分析	127	8.3 纵流壳程换热器计算机辅助 设计	164
5.7.3 H 形结构计算结果及 分析	130	8.3.1 纵流壳程换热器 CAD 开发 理论	164
6 纵流壳程换热器的制造	131	8.3.2 纵流壳程换热器 CAD 系统 的分析建模	166
6.1 概述	131	8.3.3 纵流壳程换热器 CAD 系统 的设计建模	173
6.1.1 材料	131	8.3.4 纵流壳程换热器 CAD 系统 的数据库	174
6.1.2 纵流壳程换热器的加工 工艺	131	8.3.5 纵流壳程换热器 CAD 系统 的开发环境及用户界面	176
6.1.3 换热器的装配流程	134	8.3.6 纵流壳程换热器 CAD 子 系统	178
6.2 强化换热管的制造	134	8.3.7 纵流壳程换热器 CAD 系统	

的参数化图形技术及三维造 型技术	185	9.4 换热器导流筒的数值仿真与 模拟	226
8.3.8 纵流壳程换热器 CAD 系统 集成技术	188	9.4.1 计算模型的建立与计算参数的 选择	227
8.3.9 换热设备 CAD/CAE 系统的 集成	194	9.4.2 导流装置内流场的计算结果与 分析	229
9 纵流壳程换热器流体流动和传热的仿 真模拟	199	9.4.3 夹套式变截面导流筒的结构 优化	232
9.1 概述	199	9.5 基于周期性单元流道计算模型的 换热器数值模拟	235
9.1.1 引言	199	9.5.1 模型的建立与合理化 验证	235
9.1.2 数值计算方法的进展	200	9.5.2 流体流场显示和细观分析 研究	240
9.1.3 换热设备数值模拟技术 进展	204	9.5.3 流体温度场显示和分析	241
9.2 流体流动和传热的数学描述	207	9.5.4 结构参数变化对流动和传热 性能的影响	242
9.2.1 流体运动的基本方程	208	9.6 基于周期性全截面计算模型的换 热器数值模拟	245
9.2.2 湍流方程模型简介	210	9.6.1 周期性全截面计算模型的 模拟结果	245
9.2.3 多孔介质模型简介	213	9.6.2 折流杆换热器壳程对流传热 系数和压降的模拟修正	247
9.2.4 换热器流动与传热的数学 模型	215	9.6.3 实现新结构形式的管壳式 换热器的开发	248
9.3 流体流动与传热仿真模拟的数值 实现	219	参考文献	249
9.3.1 一般 Galerkin 有限元法	219		
9.3.2 有限元方程的解法	222		
9.3.3 换热器流体流动与传热数值 模拟的程序实现	224		
9.3.4 通用商业 CFD 软件简介	226		

1 绪 论

1.1 换热器在工业中的应用

换热器是在两种或两种以上具有不同温度的流体之间传递热量的设备。在工业生产中,换热器的主要作用是将热量由温度较高的流体传递到温度较低的流体,使流体温度达到工艺流程规定的指标,以满足工艺流程上的需要。换热器是化工、炼油、动力、食品、轻工、原子能、制药、航空及其它许多工业部门广泛使用的一种通用设备。在化工厂中,换热器的投资约占总投资的10%~20%;在炼油厂中,该项投资约占总投资的35%~40%。

目前,在换热设备中,应用最多的是管壳式换热器。近年来,由于工艺要求、能源危机和环境保护等诸多因素,传热强化技术和换热器的现代研究、设计方法获得了飞速发展,设计人员已经开发出了多种新型换热器,以满足各行各业的需求。如为了适应加氢装置的高温高压工艺条件,螺纹锁紧环换热器、 Ω 密封环换热器、金属垫圈式换热器技术获得了快速发展,并在乙烯裂解、合成氨、聚合和天然气工业中大量应用,可达到承压35MPa,承温700℃的工艺要求;为了回收石化、原子能、航天、化肥等领域使用燃气、合成气、烟气等所产生的大量余热,产生了各种结构和用途的废热锅炉;为了解决换热器日益大型化所带来的换热器刚度增大、振动破坏等问题,纵流壳程换热器获得了飞速的发展和应用,纵流壳程换热器不仅提高了传热效果,也有效地克服了由于管束振动引起的换热器破坏现象。另外,各种新结构高效换热器、高效重沸器、高效冷凝器、双壳程换热器等也大量涌现。

板式换热器的发展,使换热器的效率提高到一个新的水平,结构也更加紧凑。这种换热器由于体积小、重量轻和效率高,最早用于飞机发动机、内燃机车发动机及汽车发动机的冷却,而后逐渐在石油化工、乙烯装置中得到推广应用。紧凑型换热器的另一种结构形式——板式换热器及板壳式换热器的应用也不断拓展,在城市供热系统中,越来越多的板式换热器得到了应用,大大节省了金属耗量和占地面积。另外,螺旋板式换热器在石油、化工、冶金、电力中的低压、中低温冷却以及食品、医药中干净介质的处理方面也获得了普遍应用。

在氯碱行业及化工等行业的强腐蚀场合,近年来研制成功的石墨换热器、氟塑料换热器、陶瓷纤维换热器等非金属换热器得到了推广应用。在低温余热回收系统,如烟气余热回收系统、家庭热水系统等,以及核工业中,热管换热器获得了有效的应用。在盐、硫含量较高的原油处理装置中,由于腐蚀越来越严重,钛换热器开始用来代替碳钢换热器以提高换热器的寿命。

此外,换热器作为一种能源利用与能源节约的有效设备,在太阳能利用和地热能利用等方面也起着重要的作用。随着生产规模的扩大和生产技术的逐步现代化,工业领域内的换热器技术也将得到日益得到重视与发展。

1.2 换热器的分类及特点

在工业生产中,由于用途、工作条件和物料特性的不同,出现了各种不同形式和结构的

换热设备。

按换热设备热传递原理或产热方式进行分类，可分为以下几种主要形式：直接接触式换热器、蓄热式换热器、间壁式换热器及中间载热体式换热器。其中，间壁式换热器用的最多，在此仅对该类换热器进行介绍。

1.2.1 管式换热器

管式换热器都是通过管子壁面进行传热的换热器。管式换热器虽然在传热效率、结构紧凑性（换热器单位体积中的传热面积， m^2/m^3 ）和单位传热面积的金属消耗量（ kg/m^2 ）等方面都不如其它新型换热器，但其具有结构坚固、可靠性高、适应性强、易于制造、能承受较高的操作压力和温度等优点。在高温、高压和大型换热器中，管式换热器仍占绝对优势，是目前使用最广泛的一类换热器。

按管式换热管的结构形式不同大致可分为蛇管式换热器、套管式换热器、缠绕管式换热器和管壳式换热器。

(1) 蛇管式换热器

蛇管式换热器一般由被弯曲成所需形状（如圆盘形、螺旋形和长蛇形等）的金属或非金属材料管子来构成。它是最早出现的一种换热器，具有结构简单和操作方便等优点。按使用状态不同，蛇管式换热器又可分为沉浸式蛇管换热器和喷淋式蛇管换热器两种。

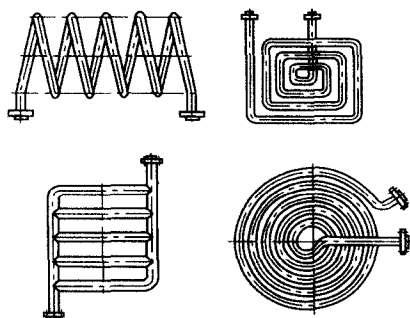


图 1-1 沉浸式蛇管

① 沉浸式蛇管换热器 如图 1-1 所示，蛇管多以金属管子弯绕而成，或由弯头、管件和支管连接组成，也可制成适合不同设备形状要求的蛇管。使用时沉浸在盛有被加热或被冷却介质的容器中，两种流体分别在管内、外进行传热。它的特点是：结构简单，造价低廉，操作敏感性较小，管子可承受

较大的流体介质压力。但是，由于管外流体的流速很小，因而传热系数小，传热效率低，需要的传热面积大，设备显得笨重。沉浸式蛇管换热器常用于高压流体的冷却，以及反应器的传热元件。

② 喷淋式蛇管换热器 如图 1-2 所示，蛇管成排地固定在钢架上，被冷却的流体在管内流动，冷却水由管排上方的喷淋装置均匀淋下。与沉浸式相比较，喷淋式蛇管换热器主要

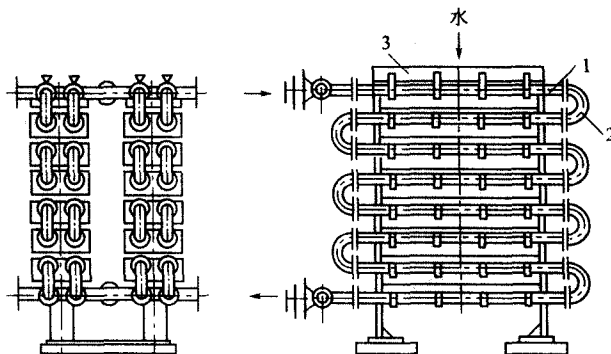


图 1-2 喷淋式冷却器

1—直管；2—U 形管；3—水槽

优点是管外流体的传热系数大，且便于检修和清洗。其缺点是体积庞大，冷却水用量较大，有时喷淋效果不够理想。

(2) 套管式换热器

套管式换热器由两种不同直径大小的管子组装成同心管，两端用 U 形弯管将它们连接成排，并根据实际需要，排列组合形成传热单元，如图 1-3 所示。传热时，一种流体走内管，另一种流体走内外管之间的环隙，内管的壁面为传热面，一般按逆流方式进行传热。两种流体都可以在较高的温度、压力和流速下进行传热。

套管式换热器的优点是：结构简单，工作适应范围大，传热面积增减方便，两侧流体均可提高流速，使传热面的两侧都可有较高的传热系数；缺点是单位传热面积的金属消耗量大，检修、清洗和拆卸都较麻烦，在可拆连接处容易造成泄漏。

套管式换热器一般适用于高温、高压、小流量流体和所需要传热面积不大的场合。

(3) 管壳式换热器

管壳式换热器是目前应用最为广泛的换热设备。它的基本结构如图 1-4 所示，在圆筒形壳体中放置了由许多管子组成的管束，管子的两端（或一端）固定在管板上，管子的轴线与壳体的轴线平行。为了增加流体在管外空间的流速并支撑管子，改善传热性能，在筒体内间隔安装多块折流板（或其它折流元件），用拉杆和定距管将其与管子组装在一起。换热器的壳体上和两侧的端盖上（偶数管程在一侧）装有流体的进出口接管，有时还装设检查孔、安置测量仪表等用的接口管、排液孔和排气孔等。

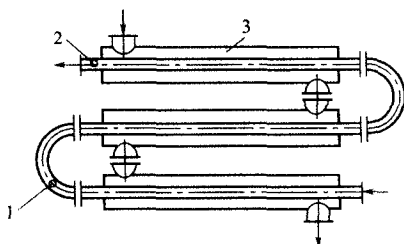


图 1-3 套管式换热器

1—U 形弯管；2—内管；3—外管

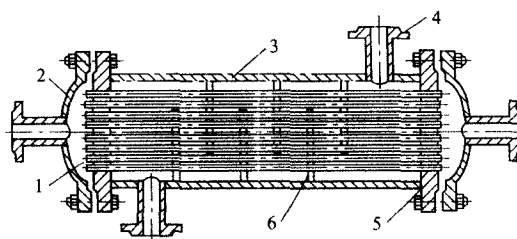


图 1-4 管壳式换热器

1—管子；2—封头；3—壳体；4—接管；
5—管板；6—折流板

管壳式换热器的特点是：结构坚固、可靠性高、适应性广、易于制造、处理能力大、生产成本较低、选用的材料范围广、传热表面的清洗比较方便、高温和高压下亦能应用。但从传热效率、结构的紧凑性以及单位传热面积所需金属的消耗量等方面均不如一些新型高效紧凑式换热器。

根据管壳式换热器的结构特点，可将其分为固定管板式、浮头式、U 形管式、填料函式和釜式重沸器五类。

① 固定管板式换热器 其典型结构如图 1-5 所示。管束连接在管板上，管板与壳体焊接。其优点是结构简单、紧凑，能承受较高的压力，造价低，管程清洗方便，管子损坏时易于堵管或更换；缺点是当管束与壳体的壁温或材料的线膨胀系数相差较大时，壳体和管束中将产生较大的热应力。这种换热器适用于壳程介质清洁且不易结垢，并能进行清洗，管、壳程两侧温差不大或温差较大但壳侧压力不高的场合。

为减少热应力，通常在固定管板式换热器中设置柔性元件（如膨胀节、挠性管板等），来减少热膨胀差。

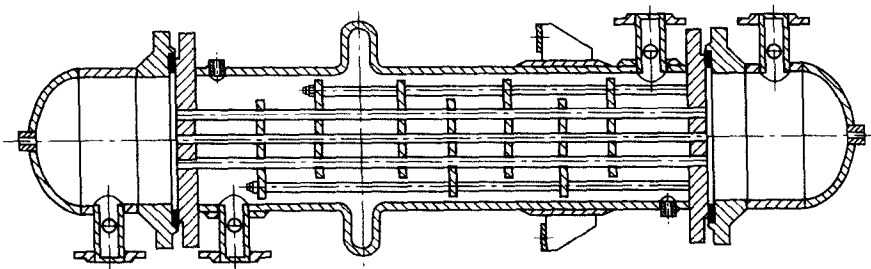


图 1-5 固定管板式换热器

② 浮头式换热器 其典型结构如图 1-6 所示。两端管板中只有一端与壳体固定，另一端可相对壳体自由移动，称为浮头。浮头由浮头管板、钩圈和浮头端盖组成，是可拆连接，管束可从壳体内抽出。管束与壳体的热变形互不约束，因而不会产生热应力。

浮头式换热器的特点是管间和管内清洗方便，不会产生热应力；但其结构复杂，造价比固定管板式换热器高，设备笨重，材料消耗量大，且浮头端盖在操作中无法检查，制造时对密封要求较高。适用于壳体和管束之间壁温差较大或壳程介质易结垢的场合。

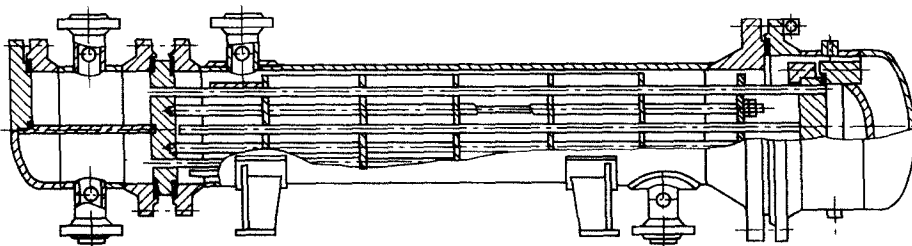


图 1-6 浮头式换热器

③ U 形管式换热器 其典型结构如图 1-7 所示。这种换热器的结构特点是：只有一块管板，管束由多根 U 形管组成，管的两端固定在同一块管板上，管子可以自由伸缩。当壳体与 U 形换热管有温差时，不会产生热应力。

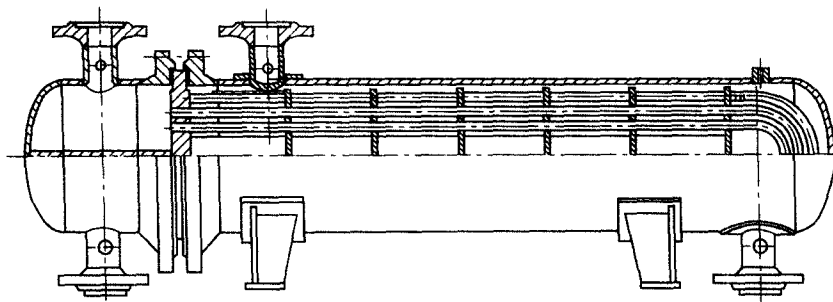


图 1-7 U 形管式换热器

由于受弯管曲率半径的限制，其换热管排布较少，管束最内层管间距较大，管板的利用率较低，壳程流体易形成短路，对传热不利。当管子泄漏损坏时，只有管束外围处的 U 形管才便于更换，内层换热管损坏后不能更换，只能堵死，而且损坏一根 U 形管相当于损坏两根管，报废率较高。

U 形管式换热器结构比较简单、价格便宜、承压能力强，适用于管、壳壁温差较大或

壳程介质易结垢需要清洗，又不适宜采用浮头式和固定管板式的场合。特别适用于管内输送清洁而不易结垢的高温、高压、腐蚀性大的物料的场合。

④ 填料函式换热器 其典型结构如图 1-8 所示。这种换热器的结构特点与浮头式换热器相类似，浮头部分露在壳体以外，在浮头与壳体的滑动接触面处采用填料函式密封结构。由于采用填料函式密封结构，使得管束在壳体轴向可以自由伸缩，壳壁与管壁不会产生热变形差从而避免了热应力。其结构较浮头式换热器简单，加工制造方便，节省材料，造价比较低廉，且管束可以从壳体内抽出，管内、管间都能进行清洗，维修方便。

因填料处易产生泄漏，填料函式换热器一般适用于压力在 4MPa 以下的工作条件，且不适用于易挥发、易燃、易爆、有毒及贵重介质的工况，另外使用温度也受填料的物性限制。填料函式换热器现在已很少采用。

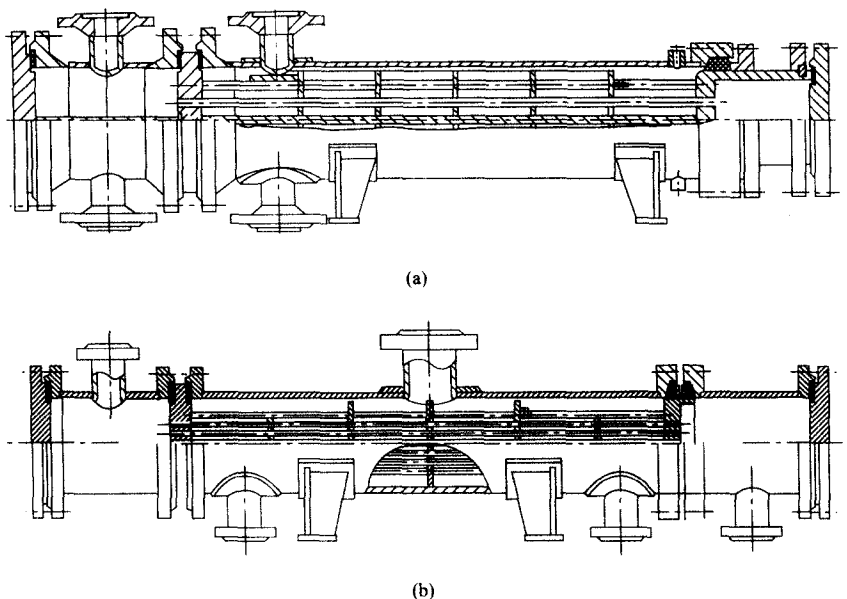


图 1-8 填料函式换热器

⑤ 釜式重沸器 釜式重沸器如图 1-9 所示，这类换热器的管束可以为浮头式、U 形管和固定管板式结构，所以它具有浮头式、U 形管式换热器的特性。在结构上与其它换热器不同之处在于壳体上部设置一个蒸发空间，蒸发空间的大小由产气量和所要求的蒸气品质所决定。产气量大、蒸气品质要求高者蒸发空间大，否则可以小些。

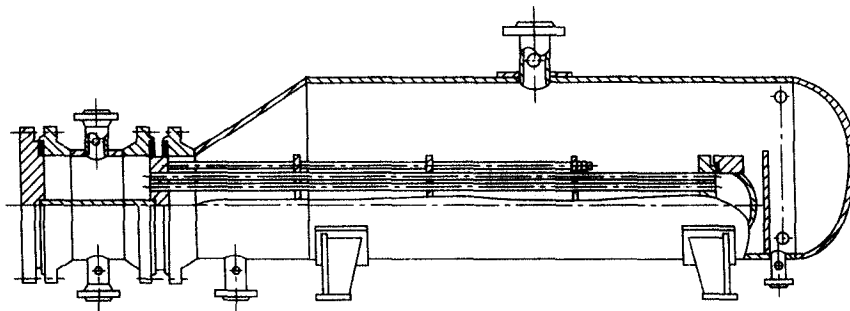


图 1-9 釜式重沸器

此种换热器与浮头式、U 形管式换热器一样，清洗维修方便，可处理不清洁、易结垢的介质，并能承受高温、高压。

(4) 缠绕管式换热器

缠绕管式换热器是在芯筒与外筒之间的空间内将换热管按螺旋线形状交替缠绕而成，相邻两层螺旋状换热管的螺旋方向相反，并采用一定形状的定距件使之保持一定的间距，如图 1-10 所示。缠绕管可以采用单根绕制，也可采用两根或多根组焊后一起绕制。管内可以通过一种介质，称为单通道型缠绕管式换热器，如图 1-10(a) 所示；也可分别通过几种不同的介质，而每种介质所通过的换热管汇集在各自的管板上，构成多通道型缠绕管式换热器，如图 1-10(b) 所示。缠绕管式换热器适用于同时处理多种介质、在小温差下需要传递较大热量且管内介质操作压力较高的场合，如制氧等低温过程中使用的换热设备等。

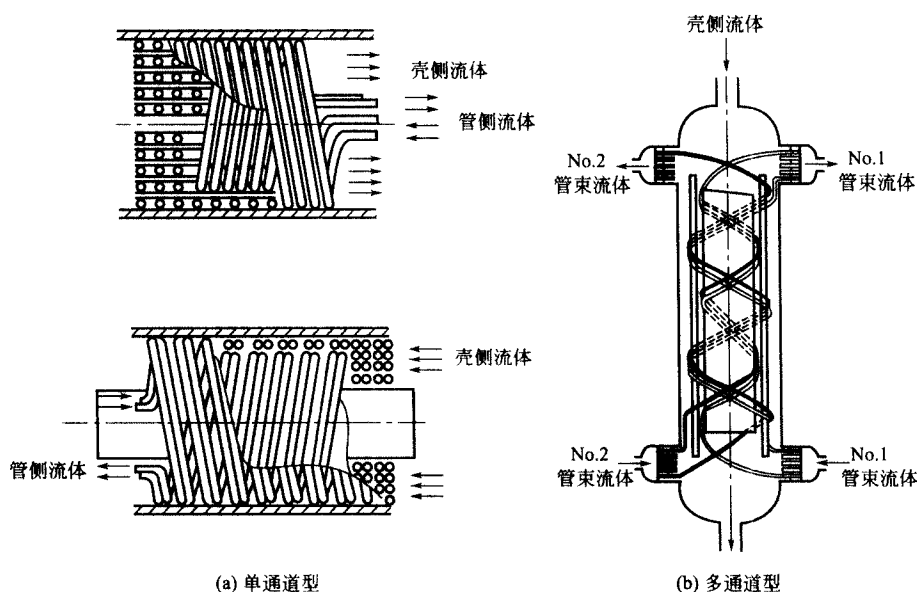


图 1-10 缠绕管式换热器

1.2.2 板面式换热器

板面式换热器是通过板面进行传热的换热器。

板面式换热器的传热性能要比管式换热器优越，由于其结构上的特点，使流体能在较低的速度下就达到湍流状态，从而强化了传热。板面式换热器采用板材制作，在组织大规模生产时，可降低设备成本，但其耐压性能比管式换热器差。

板面式换热器按传热板面的结构可分为螺旋板式换热器、板式换热器、板翅式换热器、板壳式换热器和伞板式换热器五种。

(1) 螺旋板式换热器

螺旋板式换热器如图 1-11 所示，是由两张平行钢板卷制成的具有两个螺旋通道的螺旋体构成，并在其上安装有端盖（或封板）和接管。螺旋通道的间距靠焊在钢板上的定距柱来保证。

螺旋板式换热器的结构紧凑，单位体

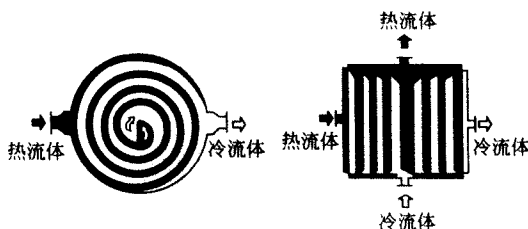


图 1-11 螺旋板式换热器

积内的传热面积约为普通管壳式换热器的 2~3 倍，传热效率比管壳式高 50%~100% 左右；制造简单；材料利用率高；流体单通道螺旋流动，有自冲刷作用，不易结垢；可呈全逆流流动，传热温差大。适用于液-液、气-液流体传热，对于高黏度流体的加热或冷却、含有固体颗粒的悬浮液的传热，尤为适合。

(2) 板式换热器

板式换热器是由一组长方形的薄金属传热板片和密封垫片以及压紧装置组成，其结构类似板框压滤机。板片表面通常压制成为波纹形或槽形，以增加板的刚度，增大流体的湍流程度，提高传热效率。两相邻板片的边缘用垫片夹紧，以防止流体泄漏，起到密封作用，同时也使板与板之间形成一定间隙，构成板片间流体流动的通道。冷热流体交替地在板片两侧流过，通过板片进行传热，其流动方式如图 1-12 所示。

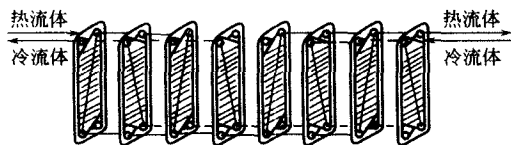


图 1-12 板式换热器流动示意

板式换热器由于板片间流通的当量直径小，板型波纹使截面变化复杂，流体的扰动作用较大，在较低流速下即可达到湍流，具有较高的传热效率。同时板式换热器还具有结构紧凑、使用灵活、清洗和维修方便、能精确控制传热温度等优点，应用范围十分广泛。其缺点是密封周边太长，不易密封，渗漏的可能性大；承压能力低；使用温度受密封垫片材料性能的限制不宜过高；流道狭窄，易堵塞，处理量小；流动阻力大。

板式换热器可用于处理从水到高黏度的液体的加热、冷却、冷凝和蒸发等过程，适用于经常需要清洗、工作环境要求十分紧凑等场合。

(3) 板翅式换热器

板翅式换热器的基本结构是在两块平行金属板（隔板）之间放置一种波纹状的金属导热翅片，翅片称为“二次表面”，在其两侧边缘以封条密封而组成单元体，对各个单元体进行不同的组合和适当的排列，并用钎焊焊牢，组成板束，把若干板束按需要组装在一起，便构成逆流、错流、错逆流板翅式换热器，如图 1-13 所示。

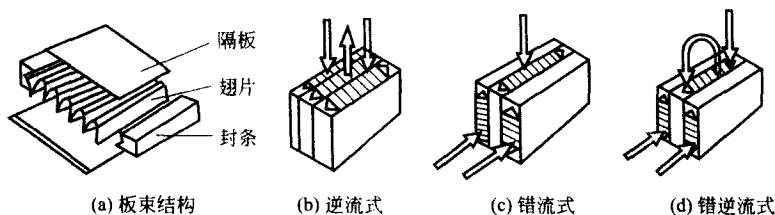


图 1-13 板翅式换热器

冷、热流体分别流过间隔排列的冷流层和热流层而实现热量交换。一般翅片传热面占总传热面的 75%~85%，翅片与隔板间通过钎焊连接，大部分热量由翅片经隔板传出。不同几何形状的翅片使流体在流道中形成强烈的湍流，使热阻边界层不断破坏，从而有效地降低热阻，提高传热效率。另外，由于翅片焊于隔板之间，起到骨架和支撑作用，使薄板单元结构有较高的强度和承压能力。

板翅式换热器是一种目前传热效率较高的换热设备，其传热系数比管壳式换热器大 3~10 倍。板翅式换热器结构紧凑、轻巧，单位体积内的传热面积一般都能达到 2500~4370m²/m³，几乎是管壳式换热器的十几倍到几十倍，而相同条件下换热器的重量只有管壳

式换热器的10%~65%；适应性广，可用作气-气、气-液和液-液的热交换，亦可用作冷凝和蒸发，同时适用于多种不同的流体在同一设备中操作，特别适用于低温或超低温的场合。其主要缺点是结构复杂，造价高，流道小，易堵塞，不易清洗，难以检修等。

(4) 板壳式换热器

板壳式换热器主要由板束和壳体两部分组成，介于管壳式和板式换热器之间的一种换热器。板束相当于管壳式换热器的管束，如图1-14所示，每一板束元件相当于一根管子，由板束元件构成的流道称为板壳式换热器的板程，相当于管壳式换热器的管程；板束与壳体之间的流通空间则构成板壳式换热器的壳程。板束元件的形状可以是多种多样的。

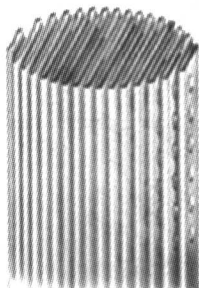


图 1-14 板壳式换热器板束

板壳式换热器具有管壳式和板式换热器两者的特点。结构紧凑，单位体积包含的传热面积较管壳式换热器增加了70%；传热效率高，压力降小；与板式换热器相比，其焊接技术要求高。板壳式换热器常用于加热、冷却、蒸发和冷凝等过程。

(5) 伞板式换热器

伞板式换热器是由中国独创的新型高效换热器，从板式换热器发展、演变而来。伞板式换热器是由伞形传热板片、异形垫片、端盖和进出口接管等组成。它以伞形板片代替平板片，从而使制造工艺大为简化，成本降低。蜂螺型伞板换热器工作原理如图1-15所示。伞形板式结构稳定，板片间容易密封。该类设备的螺旋流道内具有湍流花纹，增加了流体的扰动程度，因而提高了传热效率。伞板式换热器具有结构紧凑、传热效率高、便于拆洗等优点。但由于设备的流道较小，容易堵塞，不宜用于处理较脏的介质，目前一般只适用于液-液与液-蒸气传热、处理量小、工作压力及工作温度较低场合。

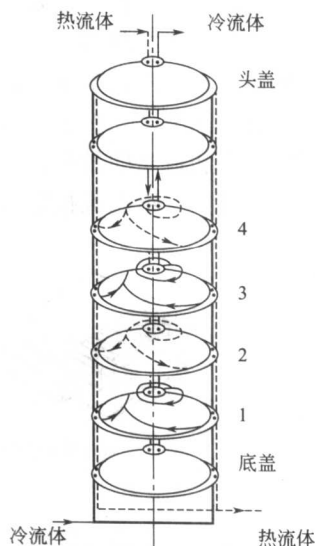


图 1-15 蜂螺型伞板换热器工作原理

1.2.3 其它型式换热器

本小节主要介绍几种具有特殊结构的换热器，一般是为了满足工艺特殊要求而设计的换热器。

(1) 石墨换热器

石墨换热器是一种用不渗透性石墨制造的换热器。由于石墨具有优良的物理性能和化学稳定性，除了强氧化性酸外，几乎可以处理一切酸、碱、无机盐溶液和有机物。石墨的线膨胀系数小、导热系数高、不易结垢，因而石墨换热器具有良好的耐腐蚀性能和传热性能，将它用于腐蚀性强的液体和气体场合，最能发挥它的优越性。但由于石墨的抗拉和抗弯强度低、易脆裂，在结构设计中应尽量采用实体块，以避免石墨受拉伸和弯曲，同时，应在受压的条件下装配石墨件，以充分发挥它抗压强度高的特点。此外，换热器的通道走向必须符合石墨的各向异性所带来的最佳导热方向。根据这些情况，石墨换热器有管壳式、块式和板式等多种形式，其中尤以管壳式和块式更为常用。