

化工设备设计全书

# 换 热 器

《化工设备设计全书》编辑委员会  
秦叔经 叶文邦 等编



化学工业出版社  
工业装备与信息工程出版中心

化工设备设计全书

# 换 热 器

《化工设备设计全书》编辑委员会

秦叔经 叶文邦 等编

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北 京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

换热器/秦叔经, 叶文邦等编. —北京: 化学工业出版社,  
2002.12

(化工设备设计全书)

ISBN 7-5025-4146-2

I. 换… II. ①秦…②叶… III. 换热器 IV. TQ051.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 085763 号

---

化工设备设计全书

换 热 器

《化工设备设计全书》编辑委员会

秦叔经 叶文邦 等编

责任编辑: 李玉晖

责任校对: 李 林

封面设计: 蒋艳君

\*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行  
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 27 $\frac{1}{4}$  字数 934 千字

2003 年 5 月第 1 版 2003 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4146-2/TQ·1630

定 价: 56.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 前 言

《化工设备设计全书》第一版由原化学工业部化工设备设计技术中心站组织全国高校、科研、设计、制造近百家单位参与编写。

《化工设备设计全书》以结构设计、强度计算为主，从基础理论、设计方法、结构分析、标准规范、计算实例等方面进行了系统的阐述，并对相应的化工原理作简介。《全书》在重视结构设计、强度计算的同时，结合化工过程的要求去研究改进设备的设计，提高设备的效率，降低设备的成本，以求实现化工单元操作的最佳化，并力求反映当前国内及国际的先进技术。《全书》自20世纪80年代出版发行后，因其内容的实用性，得到化工、石化、医药、轻工等相关行业的设备专业人员欢迎。

近十余年来，我国化工装置的设计，化工设备的研究、开发、制造和标准化工作有了较大的发展，建造设备用的结构材料也有了新的进展，有必要对《全书》的内容加以更新、补充，以适应现代工程建设要求，满足广大工程技术人员，特别是年轻一代工程技术人员需要。中国石油和化工勘察设计协会、中国石化集团上海医药工业设计院、全国化工设备设计技术中心站组成了《化工设备设计全书》编辑委员会，负责《全书》的修订工作。《全书》的修订原则是“推陈出新”，以符合现代工程建设要求。

《化工设备设计全书》计划出版15种，计有：《化工设备用钢》、《化工容器》、《高压容器》、《超高压容器》、《换热器》、《塔设备》、《搅拌设备》、《球罐和大型储罐》、《废热锅炉》、《干燥设备》、《除尘设备》、《铝制化工设备》、《钛制化工设备》、《石墨制化工设备》和《钢架》等。

本书为《换热器》。原编写者有：方维藩、钱领文、谭盈科、罗运禄、林培森、毛希澜、沈含基、戴季煌、姚金源、张石铭、杜培德、孙守璋、袁果前、董其伍、高升荣、浦季英。现编写者为：张延丰、赵亮（第一章）；秦叔经（第二章）；戴季煌、叶文邦（第三章~第七章）；张延丰、张峥（第八章），由秦叔经、叶文邦定稿。

## 内 容 提 要

《化工设备设计全书》计划出版 15 种，计有：《化工设备用钢》、《化工容器》、《高压容器》、《超高压容器》、《换热器》、《塔设备》、《搅拌设备》、《球罐和大型储罐》、《废热锅炉》、《干燥设备》、《除尘设备》、《铝制化工设备》、《钛制化工设备》、《石墨制化工设备》和《钢架》等。

本册为《换热器》，首先介绍了换热器的概况和流体流动及传热的计算，然后详细讲解了管壳式换热器结构设计、制造、检验、安装、使用和维修，换热器元件的强度计算以及螺旋板式换热器、板片式换热器及其它换热器的设计计算。

本书可供从事换热器设计、研究、制造、使用及监督管理的工程技术人员及各类院校有关专业的师生参考。

## 《化工设备设计全书》编辑委员会

主任委员 袁 纽 中国石油和化工勘察设计协会  
副主任委员 华 峰 中国石化集团上海医药工业设计院  
洪德晓 全国化工设备设计技术中心站  
委 员 叶文邦 钱小燕 黄正林 汪 扬 金国森  
应道宴 魏兆灿 秦叔经 虞 军 曹文辉

# 目 录

<b>第一章 概论</b> .....	1	一、膨胀节	78
第一节 换热器在工业中的应用	1	二、管箱结构	80
第二节 换热器分类	3	三、壳程结构	83
第三节 换热器的结构和使用特点	4	第五节 带蒸发空间卧式换热器	99
第四节 换热器的材料及防腐	12	第六节 套管式换热器	101
第五节 换热器研究现状及发展动向	13	参考文献	103
参考文献	14	<b>第四章 换热器元件强度计算</b>	104
<b>第二章 流体流动及传热</b>	16	第一节 概述	104
第一节 流体流动状态	16	第二节 筒体、封头、法兰和开孔补强	104
第二节 流动阻力	16	一、筒体	104
一、直管阻力的计算式	16	二、封头	104
二、局部阻力的计算	18	三、法兰	107
三、管壳式换热器流动阻力的计算	18	四、开孔补强	107
第三节 传热计算	28	五、钩圈	107
一、传热基本方程	29	第三节 管板计算	110
二、热传导和傅立叶定律	29	一、概述	110
三、对流传热	32	二、GB 151《管壳式换热器》	110
四、辐射传热	48	三、TEMA 管式换热器管板厚度计算	144
第四节 换热器的传热设计	52	四、德国 AD 压力容器规范	155
一、平均温度差的计算	52	五、QB/T 2068—1994 轻工用管壳式蒸 器管板设计计算规定	161
二、传热系统 K	52	第四节 膨胀节	168
三、换热间壁的壁温计算	54	一、概述	168
四、传热效率和传热单元数	54	二、判断是否需要设置膨胀节	168
参考文献	60	三、膨胀节强度计算	169
<b>第三章 管壳式换热器的结构设计</b>	62	第五节 支座	215
第一节 概述	62	一、卧式鞍座	215
第二节 管壳式换热器形式及结构	62	二、立式支座	221
一、固定管板式换热器	62	三、吊耳	222
二、浮头式换热器	62	参考文献	223
三、U 形管式换热器	64	<b>第五章 螺旋板式换热器</b>	224
四、外填料函式换热器	64	第一节 概述	224
五、滑动管板填料函换热器	65	第二节 螺旋板式换热器的结构	224
六、双管板换热器	65	一、结构特点	224
七、薄管板换热器	68	二、分类	225
第三节 管板与壳体、管箱、换热管 的连接	70	三、结构设计	229
一、壳体与管板的连接结构	70	第三节 螺旋板式换热器的设计	231
二、管箱与管板的连接结构	72	一、螺旋通道的几何计算	231
三、换热管与管板连接结构	74	二、螺旋板式换热器的传热工艺计算	233
第四节 其它各部结构	78	三、螺旋板式换热器压力损失	241

四、螺旋板式换热器的强度和刚度 计算 .....	243	八、陶瓷热管 .....	375
五、螺旋板式换热器的制造简介 .....	254	第五节 氟塑料换热器 .....	376
第四节 应用实例 .....	256	一、概述 .....	376
一、传热工艺计算 .....	256	二、结构形式 .....	378
二、流体压力降 $\Delta p$ 计算 .....	258	三、管束制造 .....	381
三、螺旋板的强度、挠度计算与校核 .....	258	四、设计计算 .....	384
四、螺旋板式换热器的结构尺寸 .....	259	五、规格和系列 .....	391
参考文献 .....	261	第六节 石墨换热器 .....	393
<b>第六章 板片式换热器</b> .....	262	一、概述 .....	393
第一节 板式换热器 .....	262	二、石墨换热器的种类及结构 .....	397
一、结构特点 .....	262	三、结构设计 .....	401
二、设计计算 .....	268	第七节 玻璃换热器 .....	403
三、设计举例 .....	284	一、概述 .....	403
第二节 板翅式换热器 .....	287	二、玻璃换热器的种类和结构 .....	406
一、结构特点 .....	287	三、玻璃换热器的应用 .....	409
二、设计计算 .....	296	参考文献 .....	412
三、设计举例 .....	312	<b>第八章 管壳式换热器的制造、检验、         安装、使用和维修</b> .....	414
第三节 伞板换热器 .....	314	第一节 材料 .....	414
一、结构特点 .....	314	一、材料要求 .....	414
二、设计计算 .....	319	二、材料验收 .....	414
三、设计举例 .....	322	三、下料 .....	414
参考文献 .....	323	第二节 卷板 .....	415
<b>第七章 其它换热器</b> .....	325	第三节 结构尺寸和加工 .....	415
第一节 蛇管式换热器 .....	325	一、圆筒 .....	416
一、沉浸式蛇管换热器 .....	325	二、管箱 .....	416
二、喷淋式蛇管换热器 .....	330	三、管板 .....	416
第二节 板壳式换热器 .....	334	四、管孔加工 .....	417
一、概述 .....	334	五、孔桥宽度偏差 .....	419
二、结构形式 .....	335	六、管板与壳程圆筒、管箱圆筒的连接 方式 .....	419
三、设计计算 .....	341	七、换热管 .....	420
第三节 回转换热器 .....	343	八、换热管与管板的连接 .....	421
一、概述 .....	343	九、折流板和支持板 .....	424
二、多室式回转换热器 .....	343	十、管束 .....	424
三、搅拌式换热器 .....	344	十一、拉杆、定距管 .....	425
四、离心式换热器 .....	354	十二、导流筒与防冲板 .....	425
第四节 热管 .....	360	十三、防短路结构 .....	426
一、概述 .....	360	第四节 焊接 .....	426
二、热管种类 .....	360	一、焊接工艺评定 .....	426
三、热管的工作极限及其计算 .....	362	二、焊接材料 .....	426
四、热管的工作特性 .....	364	三、焊接坡口 .....	426
五、热管在化工和机械方面的应用 实例 .....	364	四、施焊环境 .....	427
六、热管的设计 .....	366	五、预热 .....	427
七、热管的制造 .....	375	六、焊接要求 .....	427



七、后热 .....	427	第六节 无损检测 .....	429
八、焊缝返修 .....	427	第七节 产品焊接试板 .....	429
第五节 焊后热处理 .....	427	第八节 耐压试验和气密性试验 .....	429
一、需焊后热处理的条件 .....	427	第九节 安装、使用、维修 .....	430
二、焊后热处理方法 .....	428	一、换热器的清洗 .....	430
三、热处理工艺 .....	429	二、换热器的维护和检修 .....	432

# 第一章 概 论

## 第一节 换热器在工业中的应用

换热器在工、农业的各领域应用十分广泛，在日常生活中传热设备也随处可见，是不可缺少的工艺设备之一。因此换热设备的研究备受世界各国政府及研究机构的高度重视，在全世界第一次能源危机爆发以来，各国都在下大力气寻找新的能源及在节约能源上研究新途径。在研究投入大、人力资源配备足的情况下，一批具有代表性的高效换热器和强化传热元件诞生。随着研究的深入，工业应用取得了令人瞩目的成果，得到了大量的回报，如板式换热器、大型板壳式换热器和强化沸腾的表面多孔管、T形翅片管、强化冷凝的螺纹管、锯齿管等都得到了国际传热界专家的首肯，社会效益非常显著，大大缓解了能源的紧张状况。

国内各研究机构、高等院校对传热理论及高效换热器的研究一直非常重视，走过了从引进、消化、吸收、发展到自主开发的历程。从20世纪50~60年代的照搬发展到70年代消化和吸收，进入80年代以来国内又出现了自主开发传热技术的新趋势，大量的强化传热元件被推向市场，形成第一次传热开发浪潮。到90年代中期，大量的强化传热技术应用于工业装置中，带来了良好的社会效益和经济效益。近几年国内应用的强化传热技术基本上是80年代中期开发的，由于国内市场较大，使用者多不了解，认为很多技术都是新开发的。在90年代大量应用的基础上，积累了很多经验，预计在2005年以后将会再掀起一次传热技术开发的新高潮。国内80年代传热技术高潮时期的代表杰作有折流杆换热器、新结构高效换热器、高效重沸器、高效冷凝器、双壳程换热器、板壳式换热器、表面蒸发式空冷器等一批优良的高效换热器。

计算机应用的普及大大提高了工作效率，工艺设计技术水平随之提高，HTFS、HTRI软件技术的引进，缩短了国际间传热技术水平的差距。换热流程优化软件和物性模拟软件的引进使得装置的热强度有了飞跃性的提高，已从单套装置的热强度 $5000\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ 提高到 $6000\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ 以上，个别已达到 $7000\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ 以上。国内像SW6、Lansys强度软件及新的强化传热技术软件包的开发为上述提供了可靠的保证，目前国内已基本形成自己独特的传热技术软件包并具有开发能力，这些将在未来的十年内使中国步入HTFS、HTRI等具有国际公认水平的技术领域。

换热器是一种实现物料之间热量传递的节能设备，是在石油、化工、石油化工、冶金、电力、轻工、食品等行业普遍应用的一种工艺设备。在炼油、化工装置中换热器占总设备数量的40%左右，占总投资的30%~45%。近年来随着节能技术的发展，应用领域不断扩大，利用换热器进行高温和低温热能回收带来了显著的经济效益。目前，在换热设备中，使用量最大的是管壳式换热器。管壳式换热器按用途分为无相变传热的换热器和有相变传热的冷凝器和重沸器。

随着环境保护要求的提高，近年来加氢装置的需求越来越多，如加氢裂化，煤油加氢，汽油、柴油加氢和润滑油加氢装置等建设量增加，所需的高温、高压换热器数量随之加大。螺纹锁紧环换热器、 $\Omega$ 密封环换热器、金属垫圈式换热器、密封盖板式换热器技术发展越来越快，不仅在承温、承压上满足装置运行要求，而且在传热与动力消耗上发展较快，同时亦适用于乙烯裂解、化肥中合成氨、聚合和天然气等场合，可满足承压高达35MPa，承温达 $700^\circ\text{C}$ 的使用要求。在这些场合，换热器占有的投资占50%以上。

在 $500\sim 1200^\circ\text{C}$ 燃气、合成气、烟气使用的石油、化工、乙烯、原子能、航天、化肥等领域使用的换热器主要是用特殊材料制造的废热锅炉，各种结构和用途的废热锅炉的应用回收了大量的热能。如温度高达 $550\sim 780^\circ\text{C}$ 炼油装置燃气系统， $450\sim 1200^\circ\text{C}$ 的航天发动机燃气系统， $680\sim 1100^\circ\text{C}$ 化肥中合成气系统， $650\sim 900^\circ\text{C}$ 乙烯裂解气系统都采用具有特殊结构的一种管壳式换热器。

进入20世纪90年代以来，随着装置大型化的发展要求，大型换热器的使用需求增加，乙烯换热器就是一个例子：换热器直径达2.4m，炼油重整装置进料换热器直径达2.4m，重量达120t，传热面积已达 $3300\text{m}^2$ ，高度达30m。如何提高传热效率，减少振动损失，是两项十分重要的课题。大型化使得换热面积要达到 $5000\text{m}^2$ ，国外已达到 $8000\text{m}^2$ ，这样大面积的换热器制造难度大，使用要求高，安装难度更大。如何解决大型化的难题，经过20年的努力，在传热技术上国内已研制成功的双壳程换热器、大型板壳式换热器，具有强化传热的高效换热器，有效地解决了传热效率低的问题；折流杆换热器的应用有效地克服了管束的振动，延长了管子的寿命，解决了振动损坏，提高了工艺性能，降低了动力消耗，且宜用于较

脏的场合。

板翅式换热器的发展,使换热器的效率提高到新的水平,结构更紧凑。这种换热器的采用,满足了飞机发动机中间冷却和内燃机车发动机、汽车发动机冷却的需要。由于具有体积小、重量轻、效率高、可处理两种以上介质的优点,这种换热器迅速在石油化工、乙烯装置中得到推广应用。在低温场合( $-185^{\circ}\text{C}$ 的氮气冷却、 $-177^{\circ}\text{C}$ 液态空气冷却、 $-130\sim 150^{\circ}\text{C}$ 的乙烯冷却、 $-165^{\circ}\text{C}$ 的天然气冷却和空分装置的冷却),采用板翅式换热器可减小体积5~15倍,节约重量20~30倍以上。随着铝及铝合金钎焊技术的日趋发展,应用场合及范围将越来越广泛。

新型高效、紧凑式换热器的另一个结构形式——板式换热器及板壳式换热器的应用亦不断得到拓展,由于城市集中供热的需求,越来越多的板式换热器得到使用,节省了占地面积,节约了金属耗量。随着城市中集中供热规模越来越大,面积小于 $1000\text{m}^2$ 、使用温度小于 $200^{\circ}\text{C}$ 、压力小于 $2.0\text{MPa}$ 的板式换热器已不能适应工况的需要。如山西某城市供热系统 $200\text{MW}$ 的场合,换热面积单台需要 $3600\text{m}^2$ ,这无疑需要大型板壳式换热器,单板面积可达 $12\text{m}^2$ (板式换热器单板面积国外 $2.4\text{m}^2$ ,国内 $1.8\text{m}^2$ ),单台传热面积可达 $5000\text{m}^2$ ,板壳式换热器承温可达 $700^{\circ}\text{C}$ ,承压可达 $20\text{MPa}$ 。用板壳式换热器取代管壳式换热器,重量可节省1倍左右,占地面积可节省60%,多回收热量可达总热负荷10%以上,节省设备长度近2倍,节约投资10%左右。单套60万吨/年重整装置的立式换热器采用管壳式换热器,换热面积约需 $3350\text{m}^2$ ,重量125t,高度30m。而采用板壳式换热器,换热面积约需 $1800\text{m}^2$ ,重量55t,高度13m,每年可节省燃料油600t,节省操作费用125万元。国产第一台 $350\text{m}^2$ 板壳式换热器,已在中国石油克拉玛依分公司运行1年零2个月;国产 $3000\text{m}^2$ 板壳式换热器亦即将在中国石油乌鲁木齐石化分公司40万吨/年重整装置中应用,结束了我国大型板壳式换热器依赖进口的局面,这一领域技术已达到国际先进水平。

螺旋板式换热器目前在石油、化工、冶金、电力中的应用较普遍,结构上已开发出可拆和不可拆两种。作为紧凑式换热器品种之一,它的主要优点是:占地面积较小,安装方便。材料主要有碳钢、不锈钢、钛及其合金,主要用于设计压力小于 $2.5\text{MPa}$ 、温度小于 $300^{\circ}\text{C}$ 的中、低温位的冷却,化工装置中采用较多,食品、医药中较干净的介质多使用这种换热器。如山东铝厂使用6台 $90\text{m}^2$ 的螺旋板换热器取代列管式换热器,节省传热面积 $390\text{m}^2$ ,节省钢材55t,节省占地面积2倍,使用温度小于 $200^{\circ}\text{C}$ 。但螺旋板换热器在有应力腐蚀的场合应慎重使用。某厂使用的

不锈钢螺旋板用于有 $45\mu\text{L/L}$ 氯离子含量的介质中,使用20多天即腐蚀开裂,主要是螺旋板焊缝比例大,无法进行整体固熔处理。另外,在介质较脏的场合亦应慎重使用不可拆式螺旋板换热器。

随着人民生活水平的提高,牛奶、果汁、明胶用量越来越大,大型多效板式蒸发器的开发适应了食品加工工业的发展。板式蒸发器国内技术已达到国际先进水平,板间大量蒸发降温既要满足杀菌作用,同时要达到浓缩和保证蛋白质的营养。它的板片形状较为特殊,结构上与普通板式换热器不同,带有很大的蒸发空间,单台面积可达 $50\text{m}^2$ ,可处理 $20\text{t/h}$ 的牛奶、果汁等介质。

在化肥、天然气液化、乙烯、煤气化装置中,螺旋绕管式换热器开发于70年代,应用于制氧等低温过程中。螺旋绕管式换热器结构是芯筒与外筒之间的空间内将传热管按螺旋线形状交替缠绕而成,属盘管换热器之列。相邻两层螺旋状传热的螺旋方向相反,一般分为单层和多层,可同时处理两种以上介质。传热管管程一般采用 $\phi 8\sim \phi 12$ 的传热管,所以传热面积相对较大,结构紧凑,可达 $100\sim 170\text{m}^2/\text{m}^3$ 。该换热器承压 $\leq 2.2\text{MPa}$ ,有自行补偿热膨胀性能,单台传热面积可达 $25\ 000\text{m}^2$ 。由于管径较小,在用于结垢较重的场合易发生堵塞现象,而且无法机械清洗。

在氯碱行业及化工行业中强酸、强碱的强腐蚀场合较多,为了有效解决强腐蚀的问题,近年来研制成功的列管式石墨换热器、板式石墨换热器、玻璃钢换热器、氟塑料换热器、陶瓷纤维复合换热器等非金属材料换热器已在耐温、耐压上有所突破,在上述工业装置中得到推广使用。可处理的介质有盐酸、硫酸、醋酸和磷酸等强腐蚀介质,其传热面积最大可达 $1000\text{m}^2$ ,使用温度可达 $800^{\circ}\text{C}$ 以内,重量节约2倍,耐压可达 $2.0\text{MPa}$ ,占地面积节省 $\frac{1}{3}\sim \frac{1}{4}$ 。

在低温余热回收系统,热管的应用带来了巨大的社会效益,在烟气余热回收系统,国内普遍采用热管来回收低温热源,达到节能的目的。目前开发的无机热管不仅在工业装置中应用,而且适用于家庭热水系统,既方便又节约能源。热管主要是利用小的表面积来传递较大的热量,是20世纪60年代中期发展起来的传热元件。国外50年代进入民用工业,具有效率高、压降低、结构紧凑等优点。如某厂在一座 $190\times 10^4\text{kcal/h}$ 的加热炉回收余热,烟气从 $399^{\circ}\text{C}$ 降到 $168^{\circ}\text{C}$ ,使空气温度提高 $230^{\circ}\text{C}$ ,每小时回收余热 $25.2\times 10^4\text{kcal}$ ,使加热炉燃料减少15%,获得显著的经济效益。

由于我国目前油田多进入中、后期开采,原油中盐、硫含量升高,常减压装置常压塔顶及减压塔顶的腐蚀越来越严重。在这些场合,碳钢换热器的寿命仅

为4~18个月左右,防腐已从单纯的涂层发展到采用钛材料的防腐,使钛换热器已从原来化工装置的应用发展到炼油装置。国内早期用于炼油常压塔顶的是齐鲁石化公司炼油厂,目前国内多数炼厂已在此场合应用钛换热器来提高换热器的寿命,一般寿命可达5~10年左右,对长周期运行起到了重大作用。钽和锆换热器近年来发展也较为迅速,在化工工业中得到应用。虽然这些稀有金属价格昂贵,但由于具有特殊的优良性能如耐温、耐蚀等而应用较广,现已开始制定钽和锆压力容器的行业标准,在化工深加工装置中将得到进一步的应用。

防腐涂层换热器的发展也较为迅速,从20世纪80年代中期投资低、防腐效果好的847防腐涂料开始,发展到90年代的901,不仅在冷却水系统成功防腐,而且还具有抗垢性能,Ni-P非金属化学镀层在60℃以下海水和氯离子的防腐方面也起到了重要的作用,在110℃以下对硫的防腐也发挥了较大的作用,不仅防腐而且起到了耐冲蚀、耐磨作用。

随着装置大型化的发展,在66万吨/年乙烯装置、800万吨/年常减压装置、350万吨/年重催装置、计划新建的240万吨/年重整装置中换热器也随之大型化。在国外,管壳式换热器最大直径已达到 $\phi 4650$ ,国内已达到 $\phi 3200$ ,面积达到7000m<sup>2</sup>,重量达到260t。在换热器大型化过程中,管束的振动是不可忽视的问题,由于核电站换热器的振动破坏的出现,振动损失因此而被重视起来,振动使管子破裂,产生噪声,破坏环境,损坏设备基础和管路。90年代中期以前,国内换热器应用直径普遍小于 $\phi 1500$ ,90年代中后期直径超过 $\phi 1500$ 的换热器应用日增。如燕山乙烯一台直径 $\phi 2000$ 的水冷器,如按常规设计,壳程介质进口处管束诱导振动指数达到7,大大超过标准规定,如不采取措施将在很短的时间内生产振动损失。美国菲利普斯公司于20世纪70年代开发了折流杆换热器用于换热器大型化,有效地克服了管束的振动,延长了管子的寿命。国内90年代初期已成功用于大型化装置中,结果表明,不仅克服了振动损失,而且壳程压降降低了 $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{6}$ 。目前该换热器已在冷凝、沸腾介质的换热器中应用,在压缩机级间冷却场合也得到普遍应用,效果非常明显。

随着全球水资源日益紧张,空冷式换热器已在石油、化工、冶金、核能、电力行业得到大量的应用。空冷式换热器利用空气作为冷却介质,替代了循环水系统对环境的污染,节能效果非常明显。常用的空冷式换热器有干式空冷器和湿式空冷器,干式空冷器介质温度一般可冷却到高于环境温度15~20℃,湿空

冷介质温度一般可冷却到高于环境温度5~10℃,90年代中期以后国内兰州石油机械研究所针对全球气温变暖,环境温度增高,常规空气冷却能力下降的现实,根据凉水塔的原理,开发了表面蒸发式空冷器用于炼油、化工、乙烯、天然气、冶金装置中,可使介质温度冷却至高于环境湿球温度5℃,既节省占地面积1/2,又节省操作费用67%,目前已在工业中大量推广使用,一年内收回全部投资。新世纪开始后,代表国际领先技术水平的板式空冷器研制成功,它结构紧凑、占地面积小(仅为1/4)、重量轻(仅为1/3)、换热面积大(单台3×3,可达860m<sup>2</sup>)、压降低(用于减顶空冷压降3.23mmHg<sup>①</sup>、投资低(可节省10%),将在工业装置中起到巨大的作用。

近年来国内在节能、增效等方面改进换热器性能,在提高传热效率,减少传热面积,降低压降,提高装置热强度等方面的研究取得了显著成绩。流程优化软件技术的发展带来了换热器应用的增多。20世纪80年代常减压装置的换热器用量在70台左右,90年代换热器用量达90~100台,90年代末至今已超过140台。换热器的大量使用有效地提高了能源的利用率,使企业成本降低,效益提高。

## 第二节 换热器分类

换热器作为传热设备随处可见,在工业中应用非常普遍,特别是耗能量十分大的领域,随着节能技术的飞速发展,换热器的种类开发越来越多。适用于不同介质、不同工况、不同温度、不同压力的换热器,结构和型式亦不同,换热器种类随新型、高效换热器的开发不断更新,具体分类如下。

### (一) 按传热原理分类

1. 直接接触式换热器 这类换热器的主要工作原理是两种介质经接触而相互传递热量,实现传热,接触面积直接影响到传热量。这类换热器的介质通常是一种是气体,另一种为液体,主要是以塔设备为主体的传热设备,但通常又涉及传质,故很难区分与塔器的关系,通常归口为塔式设备,电厂用凉水塔为最典型的直接接触式换热器。

2. 蓄能式换热器(简称蓄能器) 这类换热器用量极少,原理是通过一种固体物质,热介质先通过加热固体物质达到一定温度后,冷介质再通过固体物质被加热,使之达到传递热量的目的。

3. 板、管式换热器 这类换热器用量非常大,占总量的99%以上,原理是热介质通过金属或非金属材料将热量传递给冷介质的传热设备,这类换热器是我

① 1mmHg = 133.32Pa。

们通常称为管壳式、板式、板翅式或板壳式换热器。

## (二) 按传热种类分类

1. 无相变传热 一般分为加热器和冷却器。

2. 有相变传热 一般分为冷凝器和重沸器。重沸器又分为釜式重沸器、虹吸式重沸器、再沸器、蒸发器、蒸汽发生器、废热锅炉。

## (三) 按结构分类

分为浮头式换热器、固定管板式换热器、填料函式换热器、U形管式换热器、蛇管式换热器、双壳程换热器、单套管换热器、多套管换热器、外导流筒换热器、折流杆式换热器、热管式换热器、插管式换热器、滑动管板式换热器。

## (四) 按折流板分布分类

分为单弓形换热器、双弓形换热器、三弓形换热器、螺旋弓形换热器。

## (五) 按板状分类

分为螺旋板换热器、板式换热器、板翅式换热器、板壳式换热器、板式蒸发器、板式冷凝器、印刷电路板换热器、穿孔板换热器。

## (六) 按密封形式分类

此类换热器多用于高温、高压装置中，具体分为：螺旋锁紧环换热器、 $\Omega$ 环换热器、薄膜密封换热器、钢垫圈换热器、密封盖板式换热器。

## (七) 非金属材料换热器分类

分为石墨换热器、氟塑料换热器、陶瓷纤维复合材料换热器、玻璃钢换热器。

## (八) 空冷式换热器分类

分为干式空冷器、湿式空冷器、干湿联合空冷器、电站空冷器、表面蒸发式空冷器、板式空冷器、

能量回收空冷器、自然对流空冷器、高压空冷器。

## (九) 按材料分类

主要为金属和非金属两大类。金属又可分为低合金钢、高合金钢、低温钢、稀有金属等。

## (十) 按强化传热元件分类

分为螺纹管换热器、波纹管换热器、异型管换热器、表面多孔管换热器、螺旋扁管换热器、螺旋槽管换热器、环槽管换热器、纵槽管换热器、翅管换热器、螺旋绕管式换热器、T形翅片管换热器、新结构高效换热器、内插物换热器、锯齿管换热器。

换热器的种类繁多，还有按管箱分类等，各种换热器各自适用于某一种工况。为此，应根据介质、温度、压力的不同选择不同种类的换热器，扬长避短，使之带来更大的经济效益。

## 第三节 换热器的结构和使用特点

换热器作为节能设备之一，在国民经济中起到非常重要的作用。换热器的结构决定了换热器的性能，一种性能能否发挥作用取决于设计者如何选择合理结构，任何一个场合都有适应于这个场合特点的换热结构。要使传热效率提高、能耗下降，就必须了解换热器的结构特点，下面着重介绍典型换热器的结构及使用特点。

### (一) 浮头式换热器

浮头式换热器(见图1-1)是由管箱、壳体、管束、浮头盖、外头盖等零部件组成。最大的特点是管束可以抽出来，管束在使用过程中由温差膨胀而不受壳体约束，不会产生温差应力，其优点是：

① 管束可以抽出，以方便清洗管、壳程；

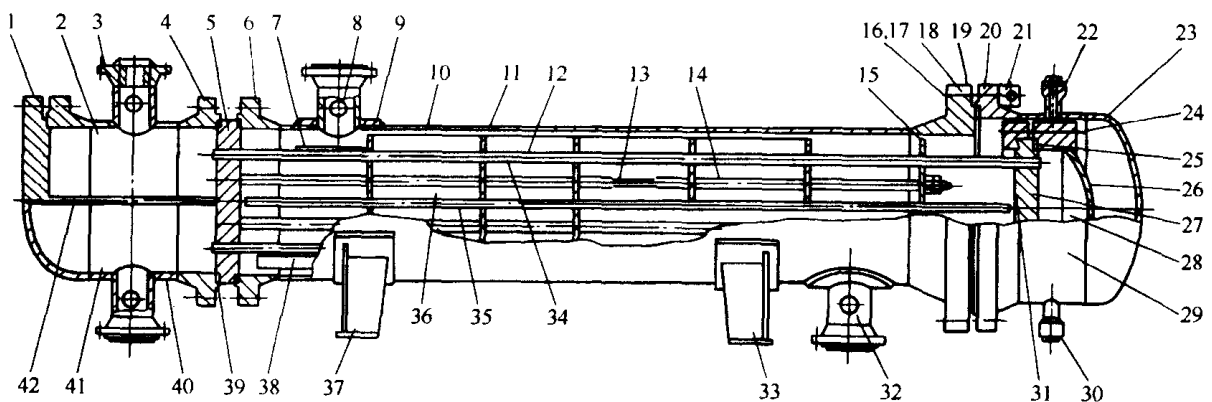


图1-1 浮头式换热器

1—平盖；2—平盖管箱(部件)；3—接管法兰；4—管箱法兰；5—固定管板；6—壳体法兰；7—防冲板；8—仪表接口；9—补强圈；10—壳体(部件)；11—折流板；12—旁路挡板；13—拉杆；14—定距管；15—支持板；16—双头螺栓或螺栓；17—螺母；18—外头盖垫片；19—外头盖侧法兰；20—外头盖法兰；21—吊耳；22—放气口；23—凸形封头；24—浮头法兰；25—浮头垫片；26—球冠形封头；27—浮动管板；28—浮头盖(部件)；29—外头盖(部件)；30—排液口；31—钩圈；32—接管；33—活动鞍座(部件)；34—换热管；35—挡管；36—管束(部件)；37—固定鞍座(部件)；38—滑道；39—管箱垫片；40—管箱圆筒(短节)；41—封头管箱(部件)；42—分程隔板

② 介质间温差不受限制；

③ 可在高温、高压下工作，一般温度 $\leq 450^{\circ}\text{C}$ ，压力 $\leq 6.4\text{MPa}$ ；

④ 可用于结垢比较严重的场合；

⑤ 可用于管程易腐蚀场合。

缺点：

① 小浮头易发生内漏；

② 金属材料耗量大，成本高 20%；

③ 结构复杂。

## (二) 固定管板式换热器

固定管板式换热器（见图 1-2）是由管箱、壳体、管板、管子等零部件组成。其结构较紧凑，排管较多，在相同直径情况下面积较大，制造较简单，但最后一道壳体与管板的焊缝无法无损检测。其优点是：

① 传热面积比浮头式换热器大 20%~30%；

② 旁路漏流较小；

③ 锻件使用较少，成本低 20% 以上；

④ 没有内漏。

缺点：

① 壳体和管子壁温差一般易小于等于  $50^{\circ}\text{C}$ ，大于  $50^{\circ}\text{C}$  时应在壳体上设置膨胀节；

② 管板与管头之间易产生温差应力而损坏；

③ 壳程无法机械清洗；

④ 管子腐蚀后造成连同壳体报废，壳体部件寿

命决定于管子寿命，故设备寿命相对较低；

⑤ 不适用于壳程易结垢场合。

## (三) U 形管换热器

U 形管换热器（见图 1-3）是由管箱、壳体、管束等零部件组成，只需一块管板，重量较轻。同样直径情况下，换热面积最大，结构较简单、紧凑，在高温、高压下金属耗量最小，目前加氢换热器基本上全部采用 U 形管换热器。其优点是：

① 管束可抽出来机械清洗；

② 壳体与管壁不受温差限制；

③ 可在高温、高压下工作，一般适用于温度 $\leq 500^{\circ}\text{C}$ ，压力 $\leq 10\text{MPa}$ ；

④ 可用于壳程结垢比较严重的场合；

⑤ 可用于管程易腐蚀场合。

缺点：

① 在管子的 U 形处易冲蚀，应控制管内流速；

② 管程不适用结垢较重的场合；

③ 单管程换热器不适用；

④ 不适用于内导流筒，故死区较大。

## (四) 双壳程换热器

双壳程换热器（见图 1-4），其结构与浮头式换热器、U 形管换热器与固定管板换热器相同，所不同的是在管束中心放置一块纵向隔板，折流板被上下隔开，用密封片将壳程一分为二，改变了壳程介质的流动方式，增加了流体的湍流程度，管壳程介质呈纯逆

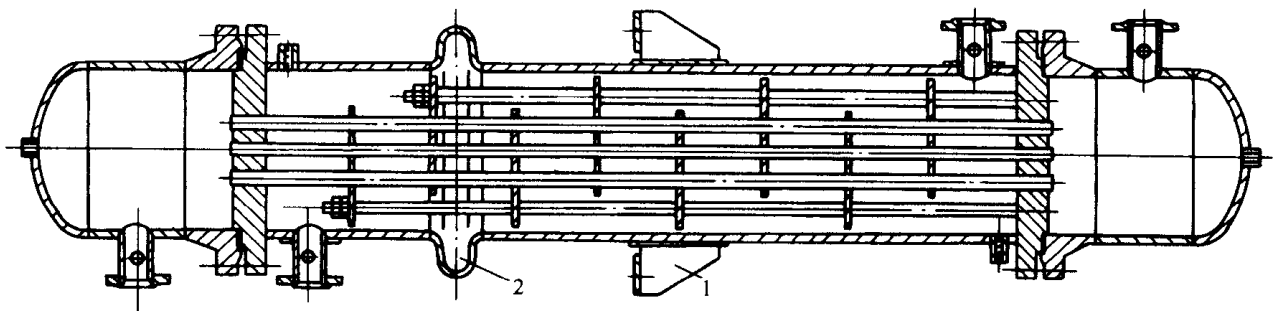


图 1-2 固定管板式换热器

1—耳式支座（部件）；2—膨胀节（部件）

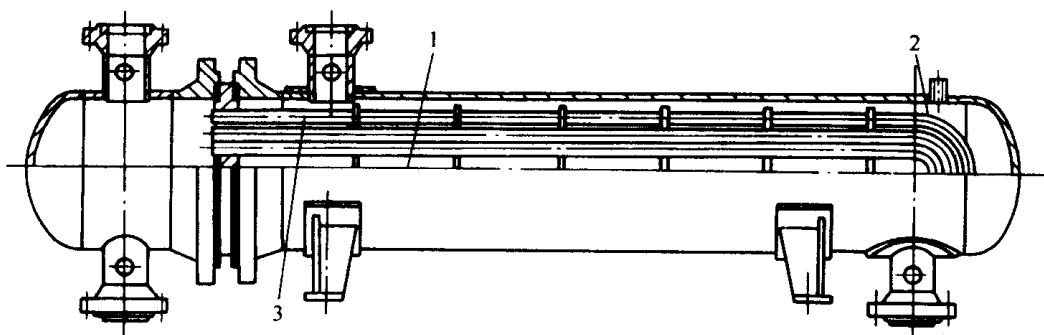


图 1-3 U 形管换热器

1—中间挡板；2—U 形换热管；3—内导流筒

流流动，无温度交叉，除具备相应浮头式换热器和固定管板式换热器优缺点外，还具备如下优点：

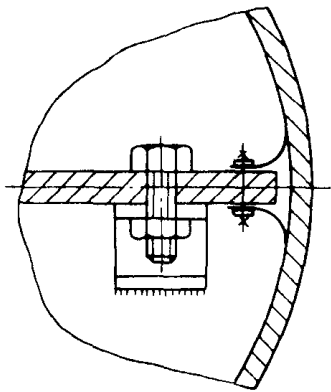


图 1-4 双壳程换热器壳程隔板

- ① 对数温差校正系数为  $F_T = 1.0$ ；
- ② 传热面积可减少 10% ~ 30%；
- ③ 减少设备数量和金属耗量；
- ④ 传热效率提高；
- ⑤ 适用于大型化装置；
- ⑥ 适用于串联台数较多；
- ⑦ 适用于高温、高压场合。

缺点：

- ① 壳程压降约提高 4 倍；
- ② 分程隔板与壳体密封片处易泄露；
- ③ 壳体直径圆度要求较高。

#### (五) 外导流筒换热器

外导流筒换热器（见图 1-5），其结构与浮头式换热器基本相同，所不同的是壳程进出口接管与导流筒不同。在进出口处增大壳体直径，使流体流动改变，并使传热管可排满整个壳体，从而使旁路泄漏和进出口死区减少，效率增加，压降减少。其优点具体为：

- ① 进出口压降降低 90% 以上；
- ② 进出口处流动死区、旁路漏流减小，可提高

传热有效面积 7% 以上；

③ 在 DN325 ~ 1800 系列范围内，可增加 5% ~ 16% 传热面积；

④ 进出口处流体分布均匀；

⑤ 总传热效率相应提高 12% ~ 23%；

⑥ 适应与壳程压降要求较小的场合，如减压塔顶冷却器、压缩机级间冷却器、塔顶冷凝、冷却等场合。

缺点：

① 金属耗量增加 10%（按相同直径比较）；

② 制造难度加大，外导流筒处焊缝要求 100% 射线探伤。

#### (六) 折流杆换热器

折流杆（见图 1-6）换热器，其结构与浮头式换热器、U 形管式换热器与固定管板式换热器基本相同，其差别是将折流板用折流环所取代，流体流动状态为顺管轴向方向流动（称为顺流），防振动效果最好，压降比折流板低几分之一甚至几十分之一，流体流过杆时形成卡曼涡阶，来实现湍流而强化传热。其优点是：

① 不易发生诱导振动损失；

② 传热死区小，传热效率提高 20% 以上；

③ 压降小；

④ 抗垢性能优良；

⑤ 有强化冷凝的机理；

⑥ 适用于换热器大型化，特别是在核电换热器应用；

⑦ 适用于冷凝、沸腾场合的换热器；

⑧ 适用于压缩机级间冷却和烟气预热器。

缺点：

① 在低雷诺数  $Re < 6000$ （液相）、 $Re < 10000$ （气相）热效率较低；

② 造价提高 3% ~ 5%。

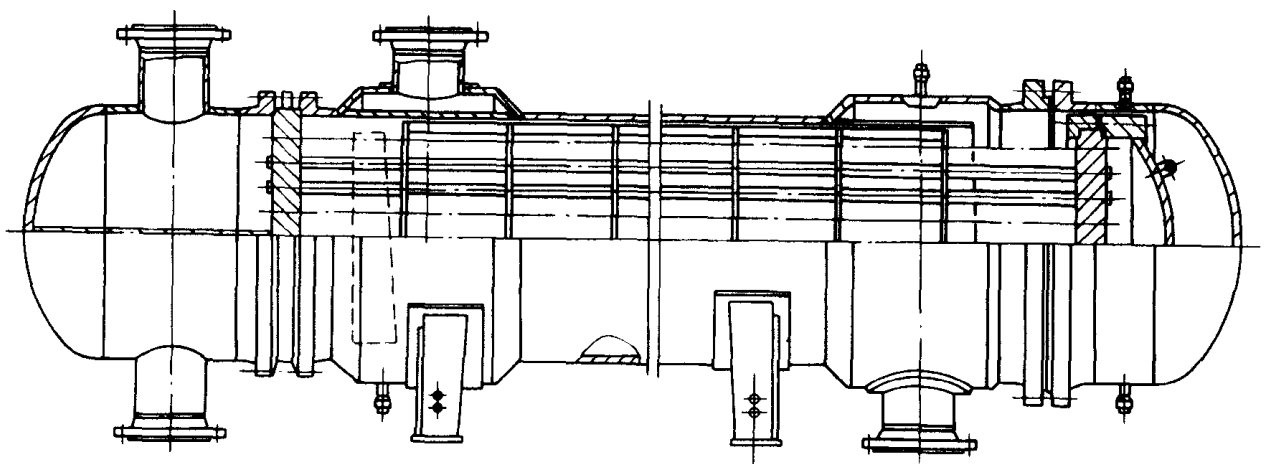


图 1-5 外导流筒换热器

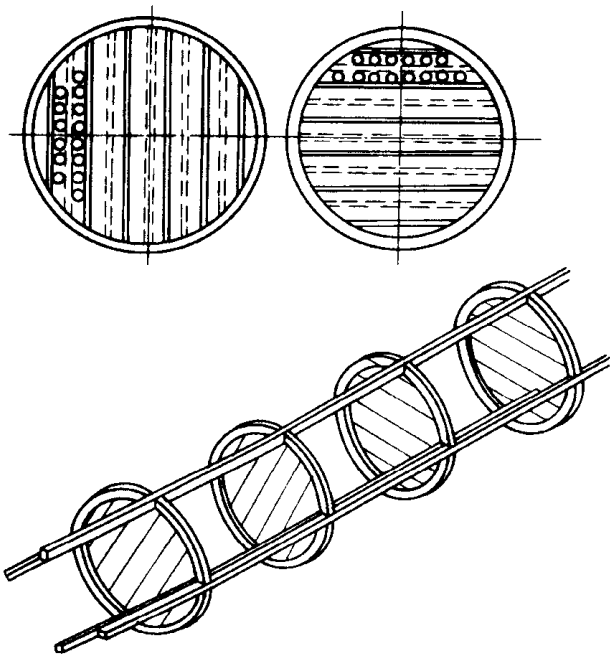


图 1-6 折流杆换热器

### (七) 新结构高效换热器

新结构高效换热器（见图 1-7），其结构与浮头式换热器和固定管板换热器基本相同，所不同之处是管

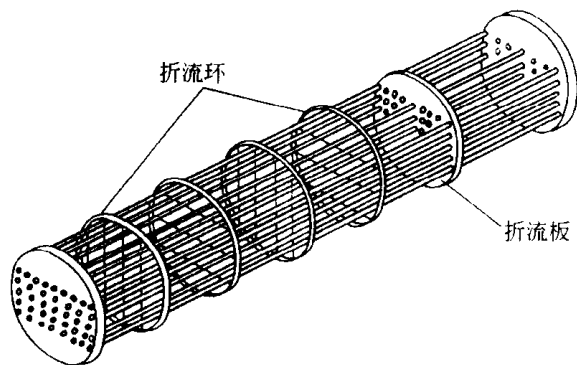


图 1-7 新结构高效换热器

束壳程在折流杆基础上进行了改进，用数块喷射板与折流环组成，其特点是流体在低雷诺数区流体流过喷射板时形成环向喷射流而使流体达到湍流状态而实现强化传热，流体流动为沿管子方向顺流，压降较低，流动死区小。其优点是：

① 液相传热  $Re < 600$ ，气相传热  $Re < 3000$ ，传热效率提高 25% 以上；

② 压降比折流板式换热器小 1 倍以上；

③ 适用于带固体颗粒的场合；

④ 抗垢性能优良；

⑤ 适用于低温位冷却场合。

缺点：

① 不适用于有相变传热；

② 压降比折流杆式换热器大。

### (八) 高效重沸器

高效重沸器（见图 1-8），其结构与釜式重沸器相同，其差别是：换热管采用 T 形翅片管，T 形翅片管（见图 1-9）结构上机械加工形成汽化核心的汽室，从而强化了沸腾传热，这种管子被第六届世界传热学会誉为四种最佳强化传热元件之一，具有抗垢性能好，低温差推动力大的特点，其优点是：

① 有自清洗作用；

② 给热系数比光管提高 3.3~10 倍以上；

③ 总传热系数提高 40% 以上；

④ 节约设备重量 25% 以上；

⑤ 适用于塔底重沸器、侧线虹吸式重沸器；

⑥ 适用于化工、制冷系统重沸器或再沸器；

⑦ 抗腐蚀性能良好。

缺点：

① 在重油设备上，如渣油、原油设备无应用历史；

② 造价上升 10%~15%；

③ 不适用于有湿硫化氢场合。

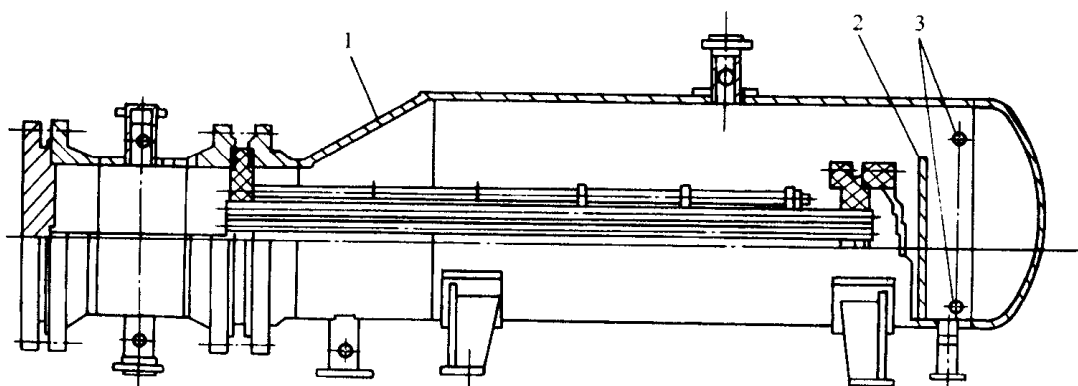


图 1-8 高效重沸器

1—偏心锥壳；2—堰板；3—液面计接口



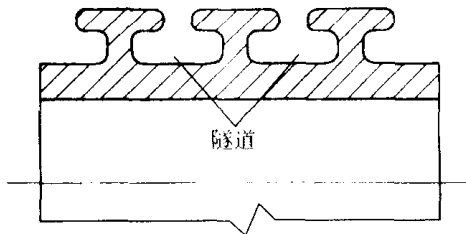


图 1-9 T形翅片管

### (九) 螺纹管换热器

螺纹管（见图 1-10）换热器作为一种强化传热高效换热器，其结构与浮头式换热器、固定管板式换热器和 U 形管式换热器基本相同。所不同的是管束中的光管由以扩展表面强化传热的螺纹管所替代，可与折流杆、外导流筒、新结构高效换热器组合。是目前强化传热管用量最大，推广较好，使用场合多的强化传热元件，属成熟技术。其优点是：

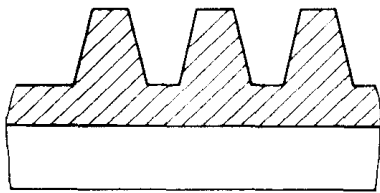


图 1-10 螺纹管截面

- ① 总传热系数可提高 30% 以上；
- ② 具有良好的抗腐蚀性能；
- ③ 具有良好的抗垢性能；
- ④ 比光管外表面增加 2.5 倍以上（以  $\phi 25$  管子为例）；

- ⑤ 强化冷凝效果显著，给热系数可提高 1 倍以上；
  - ⑥ 特别适用于重油系统传热；
  - ⑦ 适合于各种无相变传热。
- 缺点：
- ① 管内膜系数与管外膜系数之比  $< 1.5$  不能使用；
  - ② 管外雷诺数  $Re < 600$  不能使用；
  - ③ 管内压降增加 14%；
  - ④ 不适用于 CrMo 钢场合。

### (十) 表面蒸发式空冷器

表面蒸发式空冷器（见图 1-11），其结构由水箱、光管管束、喷淋除雾、预冷、风机等零部件组成，是一种将水冷与空冷，传热与传质过程融为一体，且兼有两者之长的新型、高效冷却设备。具有结构紧凑、传热效率高、投资省、操作费用低、安装维护方便、占地面积小等特点。适用于炼油、化工、冶金、制冷、轻工、电力等行业。其原理是管外水膜的蒸发强化传热，即从目前普通空冷的显热传热升华为潜热传热。其优点是：

- ① 可使介质冷却至环境湿球温度  $+ 5^{\circ}\text{C}$ ；
- ② 占地面积节省 1 倍以上；
- ③ 操作费用节省 35.5%；
- ④ 投资费用节省 15%；
- ⑤ 传热效率提高 40% 以上；
- ⑥ 适用于温度  $< 170^{\circ}\text{C}$ ，压力  $< 20\text{MPa}$  的场合；
- ⑦ 节水、节电效果显著；
- ⑧ 特别适合于目前全球气温变暖、水源紧张的情况；

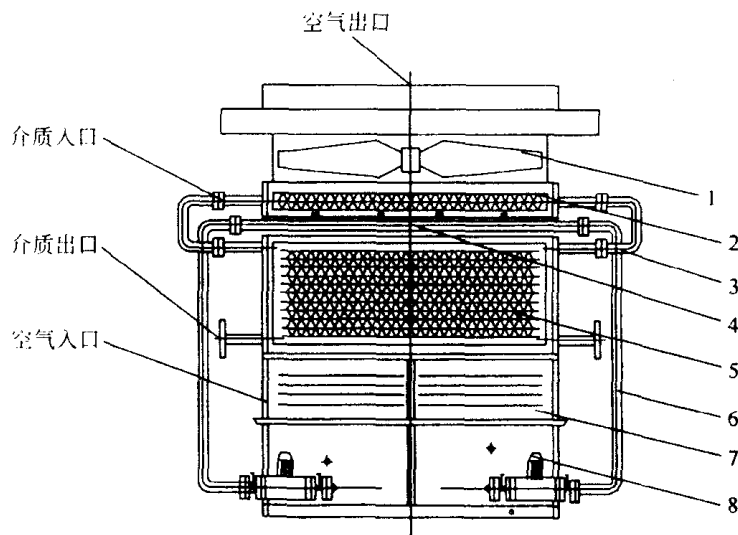


图 1-11 表面蒸发式空冷器

- 1—风机；2—除雾器；3—U形弯管；4—喷水系统；  
5—管束；6—上水管；7—构架水箱；8—循环水泵