



“十三五”普通高等教育本科规划教材

换热器原理与计算

张 利 李友荣 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

换热器原理与计算

张 利 李友荣 编
黄素逸 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

本书是为满足高等学校工科大类课程改革要求而编写的教材,力求既能满足高等学校工科类专业教学的需求,又能适应相关工程领域技术人员参考的需要。全书共8章,前两章主要介绍换热器的分类及热力计算方法;第3~7章主要介绍各种换热器的基本结构、主要特性及热力计算方法,包括管壳式换热器、板式换热器、蓄热式换热器、翅片管式换热器和热管换热器;第8章简要介绍了几种新型换热器,包括直接接触式换热器、流化床换热器、喷流式换热器和微型换热器等。

本书可作为普通高等学校能源动力类、化工类、机械类、材料类、航空航天类及土木类等专业的教材或教学参考书,也可供相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

换热器原理与计算 / 张利, 李友荣编. —北京: 中国电力出版社, 2017.8

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5198-0862-4

I. ①换… II. ①张…②李… III. ①换热器—高等学校—教材 IV. ①TK172

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 144883 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 吴玉贤(010-63412540)

责任校对: 王开云

装帧设计: 左 铭

责任印制: 吴 迪

印 刷: 北京市同江印刷厂

版 次: 2017 年 8 月第一版

印 次: 2017 年 8 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 16

字 数: 389 千字

定 价: 36.00 元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前言

换热器作为一种通用设备,在能源动力、石油化工、暖通空调、航空航天及冶金机械等很多工业领域都得到了非常广泛的应用。由于使用条件和目的不同,换热器的形式很多,而且仍处于不断发展中,各种新型换热器不断涌现。特别是在可再生能源的开发和各种余热回收领域中,更是对换热器提出了非常苛刻的要求。

为了满足高等学校工科大类课程改革的需求,扩大工科学生的专业知识面,反映换热器的最新发展动态,编者在分析了现有换热器教材并总结了近三十年来换热器教学工作的基础上编写了本书。全书力求深入浅出,注重理论联系实际,强调培养学生分析和解决实际问题的能力。

在内容的选择上,力求与本科传热学教学内容有机衔接,并能反映换热技术的最新研究成果。第1章主要介绍换热器的分类方法;第2章主要介绍换热器的两种典型热力计算方法,即平均传热温差法和传热有效度-传热单元数法;第3章以 GB/T 151—2014《热交换器》为基础,详细介绍了管壳式换热器的组成、分类及主要特性,并以典型的水-水式换热器热力设计为例,阐述了换热器的热力设计计算流程;第4~7章主要介绍了板式换热器、蓄热式换热器、翅片管式换热器和热管换热器的基本结构、主要特性及热力计算方法;第8章简要介绍了几种新型换热器,包括直接接触式换热器、流化床换热器、喷流式换热器和微型换热器等。本书按36~60学时编写。

本书由重庆大学张利、李友荣教授编写,华中科技大学黄素逸教授仔细审阅了稿件,并提出了宝贵的建议,在此表示衷心的感谢!

鉴于编者知识水平所限,虽经努力,缺点和不足在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2017.5

符 号 说 明

主要变量

a	常数; 流通面积, m^2
A	传热面积, m^2
b	间距, m ; 常数
B	宽度, m ; 折流板间距, m
c	声速, m/s ; 常数
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
C	附加厚度, m ; 卡门力系数
d	管子直径, m
D	壳体直径, m
DN	公称直径, mm
e	布管圆距壳体内壁间隙, m ; 绝对粗糙度, m
E	传热有效度; 弹性模量, Pa
f	频率, Hz ; 范宁摩擦系数; 常数
F	作用力, N
F_g	漏流修正系数
F_{th}	管形修正系数
G	质量流率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
h	表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 高度, m ; 比焓, J/kg
h_{fg}	汽化潜热, J/kg
H	翅片高度, m ; 距离, m
J	传热因子; 截面惯性矩, m^4
K	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Kn	努森 (Knudsen) 数
l	特征尺寸, m
L	管长, m ; 宽度, m
LN	公称长度, mm
m	质量, kg ; 指数; 翅片特征参数, $1/\text{m}$
n	交叉次数; 换热管数; 指数; 驻波模态数
N	程数; 管排数
NTU	传热单元数
Nu	努塞尔 (Nusselt) 数, $Nu = hl/\lambda$
p	压力, N/m^2
P	无因次温度; 功率, W

Pr	普朗特 (Prandtl) 数, $Pr=\nu/a=\mu c_p/\lambda$
q	热流密度, W/m^2
q_m	质量流量, kg/s
q_v	体积流量, m^3/s
r	半径, m ; 弓形折流板圆缺部分流通面积与总面积之比; 容积份额
R	热容量比; 无因次温度; 热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
R_f	污垢热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
Re	雷诺 (Reynolds) 数, $Re=wl/\nu$
s	管间距, m
St	斯特劳哈尔数
t	温度, $^{\circ}\text{C}$
u	温度变量, $^{\circ}\text{C}$
U	湿周长度, m
V	体积, m^3
w	流速, m/s
x	冲刷份额
X	管排修正系数

希腊字母

α	热扩散率, m^2/s ; 校正系数
β	翘化比; 系数
δ	厚度, m ; 伸长量, m
ϕ	通过折流板圆缺部分修正系数; 结垢校正系数
γ	比热容比
η	效率; 保温系数
λ	导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 特征值, $1/\text{m}^2$; 莫迪摩擦系数
ν	动量扩散率, m^2/s
μ	动力黏度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; 常数, K/W
Φ	传热量, W ; 黏度校正系数; 单位体积布置换热面积, m^2/m^3
ξ	热损失系数
ξ_h	旁流修正系数
θ	周向角度, $^{\circ}$
ρ	密度, kg/m^3
σ	应力, N/m^2 ; 表面张力, N/m ; 体积比
τ	时间, s
Ω	充液率
ψ	温差修正系数

下标

0	光
1	热流体

2	冷流体
a	绝热
c	中心；清洁；冷凝
e	有效；蒸发
f	翅片；流体
i	内壁；任意次；中间
j	交叉流
k	空气
m	平均值；质量
max	最大值
min	最小值
N	逆流
o	外壁
r	原表面
s	壳程；单的
S	顺流
t	管程；总的
w	壁面
x	任意位置
z	折流
上标	
'	进口
"	出口
p	压力
t	温度

目 录

前言
符号说明

第 1 章 概述	1
1.1 换热器的重要性	1
1.2 换热器的分类及常用换热器简介	3
1.3 换热器技术发展概况	6
第 2 章 换热器热力计算基础	9
2.1 传热过程分析	9
2.2 传热系数	11
2.3 平均传热温差	15
2.4 加权平均温差	31
2.5 传热有效度	35
2.6 热力计算方法比较	47
第 3 章 管壳式换热器	52
3.1 基本结构及工作特性	52
3.2 热力设计的流程与原则	57
3.3 结构设计	62
3.4 对流传热计算	76
3.5 流动阻力计算	82
3.6 换热器振动及其防止	90
3.7 换热器污垢及其防止	98
3.8 换热器热补偿	103
第 4 章 板式换热器	107
4.1 螺旋板式换热器	107
4.2 板式换热器	114
4.3 板翅式换热器	126
第 5 章 蓄热式换热器	140
5.1 概述	140
5.2 回转式空气预热器	141
5.3 传热过程分析	149
5.4 热力计算	152
第 6 章 翅片管换热器	157

6.1	概述	157
6.2	翅片管传热计算	161
6.3	翅片管空冷器	166
6.4	翅片管省煤器	176
第7章	热管换热器	179
7.1	热管工作原理	179
7.2	两相闭式热虹吸管	186
7.3	热管换热器类型与结构	189
7.4	热管换热器热力计算	192
7.5	热管换热器的应用	200
第8章	其他换热器	208
8.1	直接接触式换热器	208
8.2	流化床换热器	215
8.3	喷流式换热器	219
8.4	微型换热器	223
附录		231
附录1	双曲函数表	231
附录2	第一和第二类零阶与一阶贝塞尔函数值	232
附录3	误差函数表	234
附录4	金属材料的密度、比热容和导热系数	235
附录5	标准大气压下干空气的热物理性质	237
附录6	标准大气压下烟气的热物理性质	238
附录7	标准大气压下过热水蒸气的热物理性质	239
附录8	饱和水的热物理性质	240
附录9	干饱和水蒸气的热物理性质	241
附录10	管壳式换热器传热系数估计值	242
附录11	水的污垢热阻	243
附录12	其他流体污垢热阻	244
参考文献		245

第 1 章 概 述

1.1 换热器的重要性

工程上，将某种流体的热量以一定的传热方式传递给另一种流体的设备称为换热器。又称热交换器。在这种设备内，一般是两种温度不同的流体参与传热，一种流体温度较高，放出热量，另一种流体温度较低，吸收热量。但是，在某些换热器中，也有多于两种具有不同温度流体参与传热的，例如，空分装置中的板翅式换热器等。

这里所讲的换热器是指以传热为其主要目的的设备。在工业生产中的有些设备，如制冷设备、干燥设备、精馏设备等，在其完成指定生产工艺过程的同时，都伴随着热量的交换，但传热并不是其主要目的，因此，就不属于换热器的范畴。

换热器在工业生产中的应用极为普遍，例如，在热力发电厂中，锅炉设备中的再热器、过热器、省煤器和空气预热器等，热力系统中的凝汽器、除氧器、给水加热器和冷水塔等，都属于典型的换热器。如图 1.1 所示，在电力生产过程中，主要的单元设备是换热器，其数量众多，形式各异，传热机理也不相同，见表 1.1。

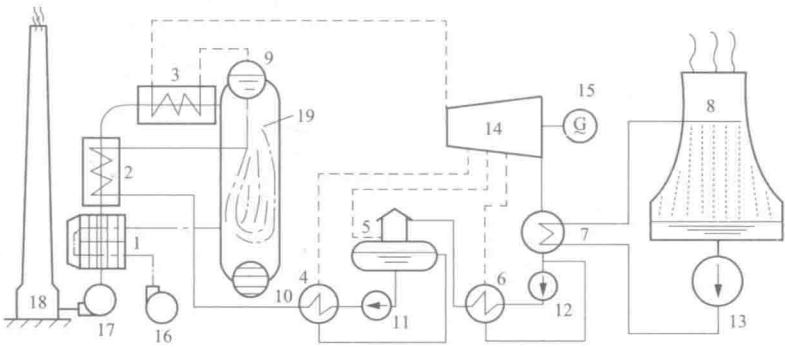


图 1.1 热力发电厂中的换热器

- 1—空气预热器；2—省煤器；3—过热器；4—高压加热器；5—除氧器；6—低压加热器；7—凝汽器；8—循环水冷却塔；
9—汽包；10—下联箱；11—给水泵；12—凝结水泵；13—循环水泵；14—汽轮机；15—发电机；16—送风机；
17—引风机；18—烟囱；19—锅炉炉膛

表 1.1 热力发电厂中主要换热器形式及传热机理

序号	名称	型式	传热机理
1	空气预热器	间壁式或蓄热式	对流→导热→对流 或：对流→蓄（放）热→对流
2	省煤器	间壁式	对流+辐射→导热→对流
3	过热器	间壁式	对流+辐射→导热→对流
4	高压加热器	间壁式	凝结→导热→对流

续表

序号	名称	型式	传热机理
5	除氧器	直接接触式	接触凝结传热
6	低压加热器	间壁式	凝结→导热→对流
7	凝汽器	间壁式	凝结→导热→对流
8	循环水冷却塔	直接接触式	接触传热+蒸发传热传质

在石油、化工企业中，换热器数量一般占设备总数的 40% 左右，换热器投资占总投资的 30%~45%。特别是近年来，随着节能技术的发展，新技术不断涌现，换热器的应用领域不断扩大。例如，温度高达 550~780℃ 炼油装置燃气换热、680~1100℃ 化肥生产中合成气换热以及 650~900℃ 乙烯裂解气换热等都采用了具有特殊结构的管壳式换热器。另外，进入 20 世纪 90 年代以来，随着装置大型化的发展，换热器的几何尺度也随之增大，最典型的例子就是炼油重整装置中的进料换热器，其直径已达 2.4m，重量达 120t，传热面积达 3300m²，高度达 30m。大型换热器不仅制造难度大、安装精度高，而且使用要求也非常苛刻，同时，如何提高传热效率、减小换热器振动也是大型换热器使用过程中需要解决的两个难题。

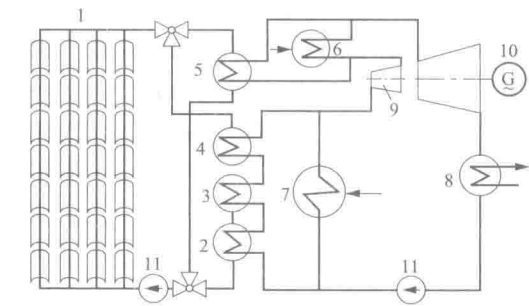


图 1.2 槽式太阳能热发电系统原理

- 1—槽式太阳能吸热器；2—预热器；3—蒸汽发生器；
4—过热器；5—太阳能再热器；6—天然气再热器；
7—天然气锅炉；8—凝汽器；9—汽轮机；
10—发电机；11—循环泵

换热器是高效利用现有能源、开发新能源的关键设备。由于世界上燃煤、石油、天然气等资源储量有限，都面临着能源短缺的困难局面，因此，大力开展余热回收、积极开发新能源是一项非常紧迫的工作。在余热回收过程中，通常是将余热介质携带的热量通过换热器传给另一种介质，由于余热源的温度范围广，余热介质成分复杂，因此，对余热回收换热器提出了更高的要求。新能源的开发也总是与换热器的应用密切相关，例如，在太阳能的利用中，总是先通过集热器将太阳的辐射能转化为热能，然后加以利用，图 1.2 所示为典型的槽式太阳能热发电系统原理，在该系统中，预热器、蒸汽发生器、过热器、再热器和凝汽器等都属于换热器。

此外，冶金工业中高炉的热风炉、炼钢和轧钢生产工艺中的空气或煤气预热器；制冷工业中蒸汽压缩式制冷机或吸收式制冷机中的蒸发器、冷凝器；制糖工业和造纸工业的糖液蒸发器和纸浆蒸发器等，都是换热器的应用实例。在航空航天工业中，为了及时取出发动机及辅助动力装置在运行时所产生的大量热量，换热器也是不可缺少的重要部件。

总之，换热器的应用遍及能源动力、石油化工、钢铁冶金、机械制造、食品医药及航空航天等各个工业部门，它不仅是一种广泛应用的通用设备，而且在某些工业生产中还占有非常重要的地位。

由于换热器种类繁多，用途各异，在实际生产中的作用和地位各不相同，因此，应满足的要求也多种多样。通常情况下，对所有换热器而言，应满足的基本要求包括：

- (1) 能完成工艺过程所提出的换热要求，传热强度高，热损失少，在有利的平均传热温

差下工作。

(2) 工艺结构能满足相应的温度和压力要求, 不易遭到破坏, 同时制造简单、安装方便、安全可靠、成本低。

(3) 设备紧凑, 占用的布置空间小。

(4) 流动阻力小, 运行维护费用低。

1.2 换热器的分类及常用换热器简介

1.2.1 换热器的分类

换热器作为一种传热单元设备, 在实际生产过程中得到了非常广泛的应用。随着节能技术的飞速发展及生产工艺的不断改进, 换热器的种类越来越多, 适用于不同介质、不同温度和不同压力的换热器结构和形式也不相同, 因此, 换热器的分类方法也很多, 主要有三种, 分述如下。

1. 按传热原理分类

按照换热器内的传热过程来分, 可将换热器分成间壁式、直接接触式、蓄热式和热管换热器四大类, 这种分类方法是换热器最主要的一种分类方法。

(1) 间壁式换热器。在间壁式换热器中, 热流体和冷流体之间有一固体壁面, 一种流体在壁的一侧流动, 另一种流体在壁的另一侧流动, 两种流体不直接接触, 热量通过壁面进行传递。

间壁式换热器是应用最广、数量最多的一种换热器。例如, 热力发电厂的省煤器、过热器、再热器、高(低)压加热器、凝汽器等都属于间壁式换热器。其主要优点是两种介质在换热中彼此不接触、不掺混, 能够保证介质不被污染; 缺点是传热效率低, 流动阻力大。因此, 目前关于间壁式换热器的各种强化传热技术层出不穷, 从而为间壁式换热器的应用提供了广阔的前景。

(2) 直接接触式换热器。直接接触式换热器又称混合式换热器。在这种换热器内, 主要依靠热流体与冷流体的直接接触进行传热。

如果冷、热流体是同一种介质, 则两流体混合后, 理论上应为同温同压的流体, 两者不能分开, 因此, 换热效率高。例如, 热力发电厂内的除氧器就属于这种情况。如果冷、热流体不是同一种介质, 则两流体在直接接触过程中, 接触面积大、传热强度高, 换热也非常充分。例如, 循环水冷却塔内水与空气间的换热过程。

(3) 蓄热式换热器。在蓄热式换热器中, 热量的传递是借助于固体构件组成的蓄热体来完成的。其中, 两种流体并非同时, 而是轮流地流过蓄热体, 当热流体流过时, 对蓄热体进行加热, 其温度逐渐升高, 把热量储蓄于蓄热体内; 当冷流体流过时, 蓄热体放出热量, 温度逐渐降低。如此反复进行, 就可以达到换热的目的。蓄热体可以是运动的, 也可以是静止的, 例如, 锅炉的回转式空气预热器和炼铁厂的热风炉等。

蓄热式换热器的最大特点是, 蓄热体被周而复始地加热和冷却, 温度不断变化, 因此, 流动和传热过程都是典型的非稳态过程。

(4) 热管换热器。严格来讲, 热管换热器也属于间壁式换热器, 但换热过程是通过热管进行的。由于热管传热能力强, 其加热段和冷却段可以自由布置, 便于强化传热。因此, 热管换热器传热强度大, 适应性强, 得到了越来越广泛的应用。

2. 按制造材料分类

按制造材料来分类时,可以把换热器分成两大类,即金属换热器和非金属换热器。

(1) 金属换热器。金属换热器是使用最多的换热器,常用的金属材料包括:碳素钢,合金钢,铝、铜、镍及其合金等,在特殊条件下,也可用稀有金属材料来制造换热器。金属换热器的最大优点是加工方便、成本低、传热性能好。

(2) 非金属换热器。在能源、化工、石油和冶金等工业生产过程中,经常会面临高温、高压、高真空、剧毒等恶劣的换热条件,同时伴随着对壁面的强烈腐蚀和磨损,此时,常用的金属材料已不能满足要求,需要研制和开发各种非金属材料换热器。

常用的非金属材料换热器有石墨、塑料、玻璃和陶瓷换热器等。

石墨不仅化学性能稳定、耐腐蚀能力强,而且具有线膨胀系数小、不易结垢、机械加工性能好等优点,因此,石墨换热器特别适宜处理腐蚀性强的液体或气体的换热过程。其主要缺点是石墨为各向异性材料,且强度低,易脆、不抗拉、不抗弯。

塑料换热器可采用的材料很多,但以聚四氟乙烯为最佳,其不仅换热性能接近于金属换热器,而且具有特殊的耐腐蚀性能,同时,由于表面光滑、憎水,因此,也不容易结垢和堵塞。聚四氟乙烯换热器主要用于强酸、强碱的换热过程,具有较好的经济性。

玻璃管换热器主要用于解决烟气换热过程中的低温腐蚀和磨损问题,陶瓷换热器主要用于高温介质的换热过程,它们都是针对一些特殊换热要求开发出的新型换热器。

3. 按用途分类

按换热器实际用途分类是工程上一种习惯的分类方法。例如,预热器(或加热器)、冷却器、冷凝器、蒸发器、热风炉等就是按其用途分类时给出的名称。顾名思义,预热器是对介质进行预热、使其温度达到工艺规定值的换热器;冷凝器是使蒸汽冷凝、放出汽化潜热而凝结成液体的换热器等。事实上,这种分类方法并不十分严格,但工程上非常实用。

1.2.2 常用间壁式换热器简介

间壁式换热器是使用最多的一类换热器。按照传热壁面形状的不同,间壁式换热器又可分为管壳式换热器、板式换热器、套管式换热器以及各种异形传热面组成的特殊形式换热器等。这里对几种主要的间壁式换热器的基本结构和特点进行简单介绍。

(1) 管壳式换热器。管壳式换热器又称列管式换热器,是在一个圆筒形壳体内设置许多

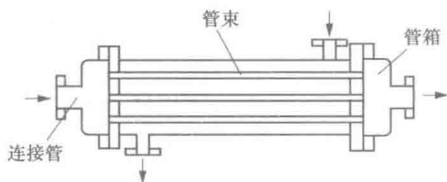


图 1.3 最简单的管壳式换热器

平行的换热管,让两种流体分别从管内空间和管外空间流过进行热量交换的换热器。通常将平行的换热管称为换热管束,把管内流体的流动空间称为管程,管外流体流动空间称为壳程。最简单管壳式换热器的基本结构如图 1.3 所示。

当管壳式换热器换热面积较大时,管子数量增多,从而使得壳体直径增大,壳程流体流通截面增加。这时如果流体的体积流量比较小,则流速很低,从而使得壳程流体表面传热系数降低。为了提高流体流速,可在管外空间装设与管束平行的纵向隔板或与管束垂直的折流板,从而使得壳程流体在壳体内曲折流动多次。加装纵向隔板后,壳程流体沿壳体轴向往返流动的次數称为壳程数。当加装折流板时,流体与换热管束多次往复交错流动,但其沿壳体轴向仅从一端流向另一端,因此,仍属于单壳程。

另外,若要提高管内流体的流速,也可在管箱内加装分程隔板,使进入的流体每次只流过部分管子,在另一端折返后再流过另一部分管子,这样也就把管内流体的流动分为了多程。图 1.4 为典型的壳程数为 1、管程数为 2 的折流换热器。为方便起见,可表示为<1-2>型管壳式换热器,其中,尖括号内第一个数字代表壳程数,后一个数字代表管程数。

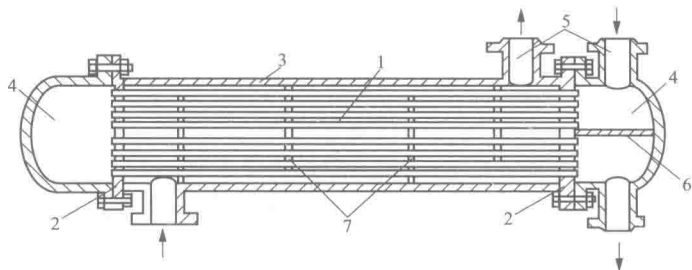


图 1.4 <1-2>型管壳式换热器

1—管束; 2—管板; 3—壳体; 4—管箱; 5—接管; 6—分程隔板; 7—折流板

管壳式换热器的主要优点是结构简单、造价较低、选材范围广、处理能力强,能满足高温高压的要求。虽然管壳式换热器传热性能较其他换热器差,但由于它的高度可靠性和广泛的适应性,至今仍然是使用最广泛的一种换热器。

(2) 板式换热器。虽然管壳式换热器具有结构简单、适应范围广等优点,但由于传热间壁为管壁,因此,传热性能较差、体积较大,当在某些特定场合需要使用传热性能好、结构紧凑的换热器时,管壳式换热器就不再适用,此时各种板式换热器是一个比较好的选择。

板式换热器也属于间壁式换热器,其传热间壁为采用了各种强化传热技术的板式表面。根据传热表面形式的不同,板式换热器可分为螺旋板式、板式和板翅式换热器等形式。

螺旋板式换热器主要由螺旋传热板、接管、密封结构等组成,其结构简单,材料利用率高。由于两种流体都是在螺旋板间的螺旋流道内流动,可在较低的雷诺数 ($Re > 500$) 下就达到湍流状态,因此,其传热效率高,通常比管壳式换热器高 1 倍以上。对两种换热介质而言,螺旋流道都只有一个,属于典型的单流道流动,因此,流体对流道具有自洁作用,流道不易结垢和堵塞。这种换热器的主要缺陷是焊缝较长,易泄漏、易产生应力腐蚀,同时,温度和压力都不能太高,最高工作温度为 300°C ,最高工作压力为 2.5MPa 。

板式换热器主要由板片、压紧板、密封材料、支架等组成,其传热表面是各种强化传热平板,因此,其传热效率高,结构紧凑,占地面积小,可适应于多种介质间的传热。另外,由于板片是通过压紧装置固定,无任何焊接件,因此,拆卸方便,可根据换热工况的变化调整换热面积。由于板式换热器中密封周边很长,因此,易泄漏,介质工作压力和温度都不能太高,最高工作压力为 2.0MPa ,最高工作温度为 200°C 。板式换热器特别适用于油冷器、水冷器、蒸发器和冷凝器等。

板翅式换热器主要由隔板、翅片、侧封条及进出口接管等构成,从总体结构上看与板式换热器类似,但其间壁为平隔板,两侧通过各种翅片对冷、热流体的传热过程进行强化。在这种形式的换热器中,所有的部件都通过钎焊固定在一起,因此,结构紧凑、强度高。由于翅片能有效地强化冷、热流体的对流传热过程,因此,传热效率高。这种换热器的主要缺点

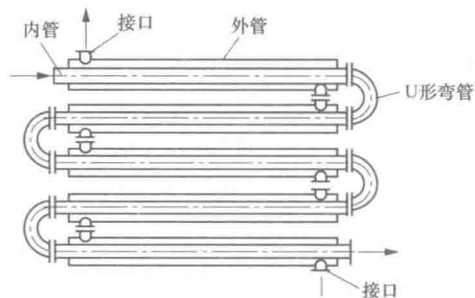


图 1.5 套管式换热器

是结构复杂、造价高，由于流道小，因此易堵塞，且清洗困难。

(3) 套管式换热器。套管式换热器是将直径不同的两根管子套成同心套管作为换热元件，然后把多个元件加以连接而组成的一种换热器，如图 1.5 所示。当采用不同连接方法时，可以使两种流体以纯顺流或纯逆流方式流动。套管式换热器的内管内径通常为 38~57mm，外管内径为 76~108mm。每根套管的有效长度一般不超过 4~6m，管子太长会使管子向下弯曲，造成管间间隙内流体流动不均匀，影响传热性能。

套管式换热器的优点是结构简单，适用于高温、高压流体，特别是小容量流体的换热过程。如果换热条件发生变化，可以改变套管数量，以适应换热器热负荷的变化。另外，如果制造成内管可以抽出的套管，还能方便地清除污垢，所以，它较适用于易结垢流体的换热。套管式换热器的主要缺点是流动阻力大，金属消耗量多，而且体积大，占地面积大，故多用于传热面积不大的换热器。

(4) 喷淋式换热器。喷淋式换热器是将冷却水直接喷淋到管外表面上，使管内的热流体冷却或冷凝，其常用结构如图 1.6 所示。在上、下排列着的管子之间，可借 U 形肘管连接在一起。为了分散喷淋水，在管组的上部装设了带锯齿形边缘的斜槽，也可用喷头直接向排管喷淋。在换热器的下面设有水池，用于收集流下来的水。

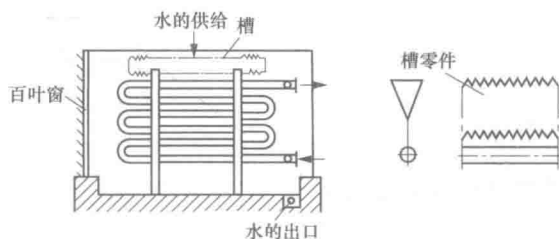


图 1.6 喷淋式换热器

当喷淋的水不够充分时，被喷淋的水会蒸发汽化，因此，喷淋式换热器最好安装在室外，为避免水被风吹失，在其周围需装设百叶窗式的护墙。

喷淋式换热器的主要优点是结构简单，易于制造和检修，便于清除污垢；由于水直接喷淋在管外，因此，表面传热系数大；同时，管外蒸发汽化也会吸收大量热量，所以，传热效果好。其主要缺点是当冷却水过少时，下部的管子不能被润湿，几乎不参与换热过程，因此，对于容易发生意外事故的石油产品或有机物的冷却不宜采用这种换热器。

喷淋式换热器传热管可采用耐腐蚀的铸铁管，故它特别适用于冷却具有腐蚀性的流体，例如硫酸工业中浓硫酸的冷却等。

1.3 换热器技术发展概况

1.3.1 换热器发展历史

在漫长的历史长河中，如果把 12 世纪炼金术者所使用的蒸馏器看成是最早的换热器，那么，换热器发展到今天已足足经历了 9 个世纪。在这么长的发展过程中，从换热器的设计制造的改进到传热新技术的开发从没间断过。

在 20 世纪 70 年代以前，换热器的发展主要以开发各种强化传热元件、研制新型高效换

热设备为重点,并取得了一系列重要进展;同时,在换热器的设计和大型化方面也取得了长足的进步。在强化传热管方面,Weiland公司开发出了T形翅片管(Gwea-T管);日立公司开发出了机械加工表面多孔管(E管);美国联合碳化物公司开发出了烧结型多孔管、锯齿管以及各种形式的波纹管、纵槽管、内外翅片管等。在设计计算方面,美国传热研究公司提出了一种新的管壳式换热器壳程流体流路分析方法,至今为止,这种方法仍然是最先进的工艺设计计算方法。在新型换热器的研制方面,开发出了折流杆换热器,有效地缓解了传热和压降的矛盾,可以在较低的压降下获得较好的传热性能。

从20世纪80年代以来,换热器技术得到了更快的发展。特别是随着能源的日趋紧张、环境保护要求的提高以及节能减排技术的发展更是给换热器提供了日益广阔的应用前景,促进了换热器技术的发展。这一时期换热器技术的主要进展和特点如下:

(1) 随着节能减排的深入,可以回收和利用的热能温度越来越低,为此,开发出了各种高性能的小温差换热器,其中,热管换热器是最典型的代表。

(2) 强化传热技术的开发从普适性向特殊性转化,即从寻找一种应用较为广泛、能适用于多种介质的强化传热方法,转向为针对某一特定条件和工况的强化传热技术。

(3) 主动强化传热技术得到了快速的发展。主动强化技术是指通过施加外部动力,如机械搅拌、振荡、电场和磁场等,使传热面附近的流体流动发生较大波动,从而破坏边界层结构,增大表面传热系数的强化传热技术。主动强化传热技术对于强化高黏度流体的对流传热过程非常有效。

(4) 计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)得到了非常广泛的应用,它可以提供换热器内部速度场和温度场的准确信息,从而为换热器结构优化和性能改进提供指导。

(5) 各种新型、高效、紧凑式换热器层出不穷,进一步挑战管壳式换热器的统治地位。虽然目前管壳式换热器仍占据主导地位,但其市场份额在逐渐降低。

1.3.2 换热器的发展方向

随着生产规模的扩大和生产工艺的改进,换热器必须满足各种特殊而又苛刻的换热要求,因此,换热器技术的改进是一个永恒的研究主题。目前,换热器技术的发展方向主要在以下几个方面。

(1) 强化传热技术的研究。采用各种高效强化传热技术的换热器将取代现有常规产品。电磁场强化传热技术、气体搅拌强化传热技术、珠状凝结传热等将会得到进一步的研究和发展,喷流式换热器、微通道换热器、流化床换热器等的应用会越来越多。

(2) 新型余热回收装置的研制。工业余热的利用潜力很大,对生产过程具有重要的影响。目前,对中温余热的回收利用技术比较成熟,但对于石油化工行业经常遇到的温度为 1000°C 左右的高温余热的回收利用还存在很多亟待解决的问题,例如,换热器的整体结构布置、管板的结构设计、热补偿的方法等。温度为 $100\sim 200^{\circ}\text{C}$ 的低温余热量大面广,因此,合理利用低温余热有着巨大的现实意义。在低温余热回收利用过程中的主要问题是传热温差小,所需换热面积大,因此,针对不同的余热源,寻找有效的强化传热方法、确定余热回收效益和投资成本的最佳平衡点将是一个长期的研究课题。

(3) 紧凑式换热器的改进。紧凑式换热器具有优良的传热性能,其形式很多,但一般都采用多流道布置。其中,板式换热器需要改进密封结构,增强板片刚度,同时,研究新的密

封材料和密封结构、提高工作温度和工作压力也是今后一个重要的发展方向。板壳式换热器从结构上很好地解决了耐温、抗压和高效传热之间的矛盾,因而,在化工行业得到了很好的推广应用,但其制造工艺复杂,焊接要求高,因此,需要不断地优化结构,发展新的成型和焊接工艺。

(4) 换热器自动设计系统的开发。利用计算机进行换热器自动设计不仅可以提高效率,而且可以对换热器进行最优化,使其达到最佳的技术经济性能。目前,美国传热研究公司开发的换热器设计软件最具代表性,其适应面广、计算精确度高。我国的研究院所和部分高校也开发出了针对不同换热过程和换热条件的换热器设计软件。

(5) 控制结垢及高效运行。换热器传热表面的积灰和结垢是影响换热器性能的主要因素,因此,必须对污垢形成机理、生长速度及影响因素进行深入研究,从而为控制结垢速度、确定清洗周期提供理论依据。另外,发展换热器清洗技术也应引起足够的重视,需要针对不同的污垢研究不同的清洗方法。

(6) 换热器振动的研究。为了适应装置大型化的要求,换热器的几何尺度也随之增大。在换热器的大型化过程中遇到的一个复杂问题就是换热管束的振动,尤其在高流速下更容易发生。换热管束的振动会使管子产生疲劳破裂,影响介质的流动和传热,同时产生比较严重的噪声。目前,对振动产生机理的认识还不是很充分,因此,为了避免振动,在设计中一般以实验和经验为基础来确定介质流速和管束的布置方式。

1.3.3 换热器主要研发机构

随着生产规模的扩大和工艺条件的改进,换热器必须能够满足各种特殊而又苛刻的换热条件,因而各国都很重视换热器的研究,并成立了专业的研究机构。例如,美国的传热研究公司(Heat Transfer Research Inc, HTRI),英国的传热及流体流动服务公司(Heat Transfer & Fluid Flow Service, HTFS),我国的兰州石油机械研究所、通用机械研究院等。

美国的传热研究公司是1962年发起组建的一个国际性非营利的合作研究机构,会员数百家,遍及全球。其研究工作涉及换热器内流动和传热的所有领域,包括无相变流动传热、两相流动与传热、相变传热、污垢形成机理与控制、换热器设计分析软件的开发等,取得了大量的研究成果,积累了换热器设计分析的丰富经验。特别是在计算机分析设计软件方面发展很快,所开发的网络优化软件、换热器设计软件不仅适应面广,而且计算精确度高。

英国的传热及流体流动服务公司成立于1967年,隶属于英国原子能管理局,其最大特点是与各大学和工业企业合作,共同进行专门课题的研究,并定期举行研究报告会,交流研究进展,因此,其研究成果不仅广泛应用于原子能工业,也用于一般的工业领域。主要研究方向包括深冷条件下的相变传热、两相流动与传热模型、壳程单相流动与传热、空冷器、火焰传热等。

兰州石油机械研究所主要从事换热器设备的研制工作,先后开发出了板式冷凝器、板式蒸发器、板壳式换热器、螺纹管换热器、折流杆换热器、表面蒸发空冷器等一批有实用价值的系列高效换热器。除此之外,国内的许多高校也在换热器传热强化及性能改进方面做出了非常出色的工作,华南理工大学相继开发出了烧结多孔管、螺旋槽管、波纹管等,西安交通大学对换热器内部的流动和传热进行了深入细致的数值模拟工作,重庆大学开发出了三维肋管,天津大学在流路分析、振动控制等方面也是成效显著,这些工作对于促进换热器技术的进步起到了重要的作用。