



普通高等教育“十二五”规划教材

# 热交换器原理与设计

战洪仁 王立鹏 李雅侠 张先珍 主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十二五”规划教材

# 热交换器原理与设计

战洪仁 王立鹏 李雅侠 张先珍 主编

中国石化出版社

## 内 容 提 要

本书详细介绍了传热学、流体力学的基本概念,以拓展读者的热交换器理论基础。介绍了工业上应用广泛的管壳式热交换器的设计方法,主要包括其工作原理、传热计算、结构计算、流动阻力计算、强度计算、材料选择,并扼要地对强化传热途径和性能评价作了探讨。同时,书中给出了大量的公式、图表和技术参数,各部分内容都配有实际工程设计计算例题,以解决工业实践和热交换器设计中遇到的实际问题。

本书可作为高等院校工程热物理、能源工程、制冷与低温技术等专业的教材,也可供化工、能源、机械、交通、冶金、动力以及航空航天等领域有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

热交换器原理与设计 / 战洪仁, 王立鹏主编.  
—北京: 中国石化出版社, 2015. 10  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-5114-3656-6

I. ①热… II. ①战… ②王… 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(2015)第 230651 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

### 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

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

\*

787×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 370 千字

2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷

定价:40.00 元

# 前 言

热交换器作为一种通用的传热工艺设备，在动力、化工、石油、冶金、核能、食品等各工业部门有着广泛的应用。随着全球能源形势的日趋紧张，常规能源的日益减少，节能降耗越来越受到人们的重视，因而热交换器的应用范围越来越广。

本书是作者根据热交换器的教学、工程设计经验，结合前人长期的工程实践与我国管壳式热交换器的现行有关标准编写的。本书编写的目的首先是考虑到扩宽学生的专业知识面，及提高学生解决工程实际问题的能力的教学改革的需要，同时为广大从事管壳式热交换器设计、制造、检验的工程技术人员提供一部包括管壳式热交换器传热工艺设计、结构设计、强度设计与制造检验验收于一体的具有工程应用特色的参考书。

本书共八章。第一章介绍了热交换器的发展状况及研究状况；第二章主要介绍了管壳式热交换器的总体结构、特点及选型；第三章论述了管壳式热交换器中的传热原理与传热设计计算及流体阻力计算；第四章、第五章、第六章以我国 GB 151《热交换器》为基础详述了管壳式热交换器的结构设计、强度设计、设计制造、材料选择中的技术要求，以及为提高管壳式热交换器的效率、延长使用的合理设计方案；第七章对热交换器强化传热的理论和方法作了综合性的分析和介绍；第八章讲解了实际工程设计计算例题，供读者应用时参考。

本书由战洪仁、王立鹏、李雅侠、张先珍合编。战洪仁编写第一章、第五章、第八章等；王立鹏编写第四章、第七章等；张先珍编写第二章、第三章等；李雅侠编写第三章、第七章等。全书由战洪仁统稿。金志浩教授在本书的编著过程中提供了详细指导，提出了许多宝贵意见。研究生韩冬雪、李春晓、吴众等同学为本书的出版做了大量工作，一并表示衷心的感谢。

限于作者水平，加之技术发展迅速，书中会有谬误或不足之处，敬请读者指正。



# 符号说明

- $a$ —热扩散率,  $\text{m}^2/\text{s}$   
 $A$ —换热面积,  $\text{mm}^2$   
 $B$ —折流板间距  
 $c_p$ —比定压热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$   
 $C$ —厚度附加量,  $\text{mm}$   
 $C_1$ —材料厚度负偏差,  $\text{mm}$   
 $C_2$ —腐蚀裕量,  $\text{mm}$   
 $C_s$ —壳程腐蚀裕量,  $\text{mm}$   
 $C_t$ —管程腐蚀裕量,  $\text{mm}$   
 $d_i$ —换热管内径,  $\text{mm}$   
 $d_j$ —拉杆直径,  $\text{mm}$   
 $d_o$ —换热管外径,  $\text{mm}$   
 $DN$ —公称直径,  $\text{mm}$   
 $D_L$ —布管限定圆直径,  $\text{mm}$   
 $D_i$ —壳程内径,  $\text{mm}$   
 $D_t$ —管板布管区当量直径,  $\text{mm}$   
 $E$ —辐射力,  $\text{W}/\text{m}^2$   
 $E_t$ —设计温度下换热管材料的弹性模量,  $\text{MPa}$   
 $E_s$ —设计温度下壳体材料的弹性模量,  $\text{MPa}$   
 $E_p$ —管板材料的弹性模量,  $\text{MPa}$   
 $f_v$ —频率,  $\text{Hz}$   
 $G$ —流体质量流速,  $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$   
 $h$ —弓形折流板缺口弦高,  $\text{mm}$   
 $K$ —总传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$   
 $L$ —换热管有效长度(两管板内侧间距),  $\text{mm}$   
 $l$ —换热管总长,  $\text{mm}$   
 $LN$ —公称长度,  $\text{mm}$   
 $n$ —换热管根数  
 $N_t$ —管程数, 即介质沿换热管长度方向往、返的次数  
 $N_s$ —壳程数, 即介质在壳程内沿换热管长度方向往、返的次数  
 $NTU$ —传热单元数  
 $p_t$ —管程设计压力,  $\text{MPa}$   
 $p_s$ —壳程设计压力,  $\text{MPa}$   
 $Q$ —热负荷,  $\text{W}$   
 $\gamma$ —汽化潜热,  $\text{J}/\text{kg}$

$r_o$ —管外污垢热阻,  $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$   
 $r_i$ —管内污垢热阻,  $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$   
 $s$ —换热管中心距, mm  
 $t_1$ —管内流体进口温度,  $^\circ\text{C}$   
 $t_2$ —管内流体出口温度,  $^\circ\text{C}$   
 $t_w$ —管壁温度,  $^\circ\text{C}$   
 $T$ —热力学温度, K  
 $w$ —流体速度, m/s  
 $w_i$ —管程流体的流速, m/s  
 $w_s$ —壳程流体的流速, m/s  
 $\varepsilon$ —传热能效  
 $\alpha_o$ —管外对流传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$   
 $\alpha_i$ —管内对流传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$   
 $\Psi$ —温差校正系数  
 $\delta_e$ —有效厚度, mm  
 $\delta_n$ —管板名义厚度, mm  
 $\Delta t_m$ —整个传热面积上的有效平均温差,  $^\circ\text{C}$   
 $\Delta t_{\max}$ —热交换器大温差端的流体温差,  $^\circ\text{C}$   
 $\Delta t_{\min}$ —热交换器小温差端的流体温差,  $^\circ\text{C}$   
 $\Delta p_f$ —圆直管内流体摩擦阻力损失, m  
 $\Delta p_j$ —局部阻力损失, m  
 $\Delta p_{sz}$ —热交换器壳程总压力降  
 $\Delta p_r$ —管束周边处沿程压力降  
 $\Delta p_b$ —导流板及导流筒的压力降  
 $\theta$ —折流板切口中心角  
 $\varphi$ —焊缝系数  
 $\sigma$ —黑体辐射常数,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$   
 $[\sigma]$ —在设计温度下筒体材料的许用应力, Pa  
 $[\sigma]_t$ —设计温度下换热管材料的许用应力, MPa  
 $[\sigma]_T$ —设计温度下管板材料的许用应力, MPa  
 $\lambda$ —导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$   
 $\xi$ —局部阻力系数  
 $\nu$ —流体运动黏度,  $\text{m}^2/\text{s}$   
 $\eta$ —流体在平均温度下的黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$   
 $\eta_w$ —管壁平均温度下的流体黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$

# 目 录

第一章 绪论 .....	( 1 )
1.1 概述 .....	( 1 )
1.2 换热器的类型及特点 .....	( 1 )
1.3 换热器发展及研究方向 .....	( 3 )
1.3.1 换热器的发展史 .....	( 3 )
1.3.2 发展现状 .....	( 4 )
1.3.3 发展差距 .....	( 5 )
1.3.4 换热器研究方向 .....	( 5 )
1.4 换热器的设计内容 .....	( 7 )
第二章 管壳式换热器的形式与总体结构 .....	( 8 )
2.1 管壳式换热器的形式及特点 .....	( 8 )
2.2 管壳式换热器型号的表示法 .....	( 11 )
2.2.1 型号表示方法 .....	( 11 )
2.2.2 型号标记示例 .....	( 13 )
2.3 管壳式换热器的选型 .....	( 14 )
第三章 换热器传热计算及流体阻力计算 .....	( 16 )
3.1 传热计算 .....	( 16 )
3.1.1 传热计算原理 .....	( 16 )
3.1.2 传热计算基本方程式 .....	( 20 )
3.2 换热器的传热设计 .....	( 21 )
3.2.1 平均温差 $\Delta t_m$ .....	( 22 )
3.2.2 传热系数 $K$ 的确定 .....	( 24 )
3.2.3 对流换热系数的确定 .....	( 37 )
3.2.4 定性温度的计算 .....	( 55 )
3.2.5 传热能效 $\varepsilon$ .....	( 57 )
3.3 流体阻力计算 .....	( 62 )
3.3.1 流动状态 .....	( 62 )
3.3.2 流动阻力 .....	( 62 )
3.4 传热计算步骤 .....	( 72 )
3.5 冷凝器的结构与原理简介 .....	( 73 )
3.5.1 传热计算 .....	( 73 )
3.5.2 冷凝器的结构 .....	( 74 )
3.5.3 冷凝器形式的确定 .....	( 75 )

3.5.4	冷凝器介质流程的选择 .....	( 76 )
3.3.5	冷凝器结构设计中的其他问题 .....	( 76 )
<b>第四章</b>	<b>管壳式热交换器的结构设计 .....</b>	<b>( 78 )</b>
4.1	管程结构 .....	( 78 )
4.1.1	管板 .....	( 78 )
4.1.2	换热管束 .....	( 86 )
4.1.3	管箱 .....	( 91 )
4.1.4	分程隔板 .....	( 96 )
4.2	壳程结构 .....	( 96 )
4.2.1	壳体 .....	( 97 )
4.2.2	折流板与支持板 .....	( 98 )
4.2.3	拉杆与定距管 .....	( 102 )
4.2.4	防短路结构 .....	( 104 )
4.2.5	壳程分程 .....	( 105 )
4.2.6	防冲板和导流筒 .....	( 107 )
4.2.7	滑道 .....	( 108 )
4.2.8	膨胀节 .....	( 110 )
4.3	其他结构 .....	( 111 )
4.3.1	接管 .....	( 111 )
4.3.2	法兰 .....	( 113 )
4.3.3	支座 .....	( 117 )
<b>第五章</b>	<b>热换热器合理设计 .....</b>	<b>( 119 )</b>
5.1	概述 .....	( 119 )
5.1.1	设计任务 .....	( 119 )
5.1.2	设计的原始数据 .....	( 119 )
5.1.3	设计的一般原则 .....	( 119 )
5.1.4	设计的内容和一般步骤 .....	( 119 )
5.2	管壳式热交换器的标准及参数 .....	( 120 )
5.2.1	管壳式热交换器的基本参数和型号表示方法 .....	( 120 )
5.2.2	管壳式热交换器的系列标准 .....	( 120 )
5.3	操作条件的确定 .....	( 120 )
5.3.1	流速的选取 .....	( 120 )
5.3.2	介质压力、温度和换热终温的确定 .....	( 123 )
5.3.3	平均温差的决定 .....	( 124 )
5.3.4	管程和壳程介质的确定 .....	( 125 )
5.3.5	管层、壳层换热系数的比较 .....	( 125 )
5.3.6	管、壳程压降的比较 .....	( 127 )
5.4	管壳式热交换器的部件结构尺寸计算 .....	( 127 )

5.4.1	管程流通截面积的计算	(127)
5.4.2	壳体直径的确定	(128)
5.4.3	壳程流通截面积的计算	(128)
5.4.4	进出口连接管直径的计算	(130)
5.5	管壳式热交换器热应力补偿的问题	(130)
5.5.1	热交换器所受的应力计算	(130)
5.5.2	温差应力计算	(131)
5.5.3	拉脱力计算	(132)
5.5.4	热补偿的方式和措施	(133)
5.6	热交换器管束振动的机理及防范措施	(135)
5.6.1	管束振动的机理	(135)
5.6.2	管壳式热交换器防振措施	(138)
5.7	热交换器材料的技术要求	(138)
5.7.1	材料的选择	(139)
5.7.2	有效成本材料的选择	(140)
5.7.3	使用中可能的失效模式和破坏	(140)
<b>第六章</b>	<b>管壳式热交换器的强度计算</b>	<b>(142)</b>
6.1	概述	(142)
6.2	壳体、封头、法兰和开孔补强	(142)
6.2.1	内压圆筒的厚度设计	(142)
6.2.2	内压封头的厚度设计	(144)
6.2.3	法兰连接设计	(148)
6.2.4	开孔补强计算	(150)
6.3	管板计算	(153)
6.3.1	概述	(153)
6.3.2	管板设计计算方法分析	(154)
6.3.3	管板设计计算	(155)
6.4	膨胀节设置计算	(173)
<b>第七章</b>	<b>热交换器的强化传热</b>	<b>(174)</b>
7.1	强化传热的原理	(174)
7.1.1	强化传热的途径	(174)
7.1.2	对流强化换热的物理机理	(175)
7.1.3	强化传热的评价	(175)
7.2	管程强化传热	(177)
7.2.1	采用异型换热管	(178)
7.2.2	管内安装扰元件	(178)
7.3	壳程强化传热	(179)
7.3.1	改变管子外形或在管外加翅片	(179)

7.3.2 改变壳程挡板或管束支撑物形式 .....	(180)
<b>第八章 管壳式热交换器传热计算示例 .....</b>	<b>(183)</b>
8.1 设计方案的确定 .....	(183)
8.2 设计计算过程 .....	(184)
<b>附录 .....</b>	<b>(191)</b>
附录 1 常用单位制及其换算表 .....	(191)
附录 2 干空气的热物理性质 .....	(193)
附录 3 烟气的热物理性质( $p = 760\text{mmHg}$ ) .....	(194)
附录 4 气体的热物理性质 .....	(194)
附录 5 干饱和水蒸气的热物理性质 .....	(196)
附录 6 饱和水的热物理性质 .....	(197)
附录 7 几种饱和液体的热物理性质 .....	(198)
附录 8 常用固体材料的热物理性质 .....	(199)
附录 9 流体污垢热阻参考数据(源自 GB 151) .....	(200)
附录 10 管壳式热交换器的传热系数范围 .....	(203)
附录 11 壳体、管箱壳体厚度 .....	(204)
附录 12 封头厚度 .....	(206)
附录 13 平盖系数 $K$ 选择表 .....	(208)
附录 14 管板计算相关查取图 .....	(211)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(226)</b>



# 第一章 绪 论

## 1.1 概述

在工业生产中，存在着各种各样的传热过程，如加热、蒸发、冷凝等。为了满足一定的工艺要求，需要设计专门的设备来保证这些传热过程按预定的要求进行。这些用于热量传递的设备就是热交换器，又称换热器。它的主要功能是保证工艺过程对介质所要求的特定温度，同时也是提高能源利用率的主要设备之一。作为一种通用的传热工艺设备，热交换器在动力、化工、石油、冶金、核能、食品等各工业部门有着广泛的应用。尤其在炼油厂和化工厂中，热交换器更为重要。在化学工业中热交换器的投资大约占设备总投资的 30%；在炼油厂中占全部工艺设备的 40% 左右；在热电厂中，如果把锅炉也看作是换热设备，热交换器的投资约占电厂总投资的 70%；在制冷机中，蒸发器的总质量占制冷机的 30%~40%；其动力消耗约占总值的 20%~30%；海水淡化工艺装置则几乎全部是由热交换器组成的。因此，热交换器的合理设计和良好运行对企业节约资金、能源都具有十分重要的意义，在能源日趋短缺的今天具有明显的经济效益和社会效益。

随着全球能源形势的日趋紧张，常规能源的日益减少，来自于经济增长和消耗强度的冲击，使得中国乃至世界不可再生能源消耗压力逐年增大，节能降耗越来越受到人们的重视。我国在注重新能源开发利用的同时把节能作为主线，随着节能技术的飞速发展，热交换器的应用范围越来越广，种类也越来越多。

20 世纪 70 年代初发生的世界性能源危机，有力地促进了传热强化技术的发展。为了节能降耗，减少环境污染，提高工业生产的经济效益，要求开发适用不同工业过程要求的高效能换热设备。因此，几十年来，人们在传统的管壳式热交换器基础上，开发和研究了如板式、螺旋式、折流杆式、纵流管束、块式及热管热交换器等高效换热新产品，同时对传统的管壳式换热设备的强化传热技术的研究也逐渐兴起，利用各种异型管代替原来的光滑管，如螺纹管、横纹槽管、缩放管、翅片管等，以及在管内插入扰流物体，如螺旋纽带、静态混合器等。这些异型管的开发和应用，将热交换器的热效率比光滑管提高了 40%~80%。

目前，世界各国在热交换器理论研究、新技术和新产品开发方面已经进入高层次的探索阶段，涉及领域很广。虽然近年来我国加大了对各种热交换器的研发，但在一些高效热交换器领域方面与发达国家相比还存在一定差距。因此，我国应借鉴国外先进热交换器技术，努力赶上国际先进水平。

## 1.2 热交换器的类型及特点

在各种工艺过程中，要求热交换器的类型和结构要与之相适应，随着科学和生产技术的发展，各种高强度、高效率的紧凑热交换器层出不穷。虽然热交换器的种类繁多，但仍然可以根据它们的某些共同特征加以区分。如按使用目的不同可将热交换器分为加热器、冷却

器、冷凝器、蒸发器、再沸器等；按其作用原理不同可分为混合式热交换器、蓄热式热交换器、间壁式热交换器等；按传热面形状不同可分为管式热交换器、板面式热交换器等；按材料不同可分为金属材料热交换器、非金属材料热交换器和复合材料热交换器等。每种热交换器又可根据其结构的不同分为若干种形式的热交换器。下面主要介绍按其作用原理不同划分的混合式热交换器、蓄热式热交换器、间壁式热交换器等的使用特点。

### (1) 混合式热交换器

混合式热交换器又称直接接触式热交换器，如图 1-1 所示，是依靠冷、热流体直接接触而进行传热的，这种传热方式避免了传热间壁及其两侧的污垢热阻，两种允许完全混合且不同温度的介质，在直接接触的过程中完成其热量的传递。只要流体间的接触情况良好，就有较大的传热速率。故凡允许流体相互混合的场合，都可以采用混合式热交换器，例如气体的洗涤与冷却、循环水的冷却、汽-水之间的混合加热、蒸汽的冷凝等。由于这类交换器的结构简单、价格便宜、常做成塔状、占地面积小，它的应用遍及化工和冶金企业、动力工程、空气调节工程以及其他许多生产部门。例如：冷水塔(凉水塔)、造粒塔、气流干燥装置、流化床等。

### (2) 蓄热式热交换器

蓄热式热交换器又称蓄能式热交换器，如图 1-2 所示。在这类热交换器中，能量传递是通过格子砖或填料等蓄热体来完成的。换热分两个阶段进行。第一阶段，热气体通过格子砖或填料，将热量传给格子砖或填料而贮蓄起来。第二阶段，冷气体通过格子砖或填料，接受其所储蓄的热量而被加热，因此不可避免地存在着一小部分流体相互掺和的现象，造成流体的“污染”。

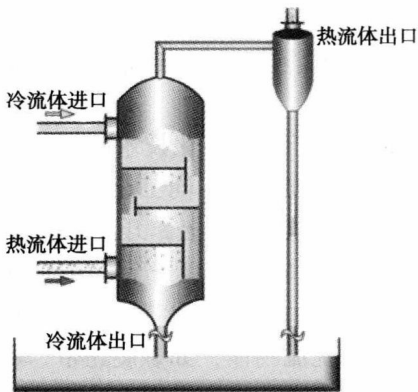


图 1-1 混合式热交换器

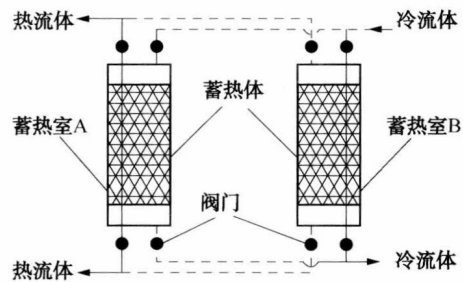


图 1-2 蓄热式热交换器

蓄热式热交换器结构紧凑、价格便宜、单位体积传热面大，故较适用于气-气热交换的高温场合。主要用于石油化工生产中的原料气转化和空气余热回收。回转蓄热式热交换器的结构特点是实现连续操作，热交换器中的蓄热体一般采用成型板片或金属丝网组装的扇形柜内，其外部由金属壳体密封，并以每分钟 1~4 转的慢速转动进行连续换热。

### (3) 间壁式热交换器

间壁式热交换器是冷、热两流体被固体壁面隔开，不相混合，通过间壁进行热量的交换，故称间壁式热交换器。间壁式热交换器的传热面大多采用导热性能良好的金属制造。在某些场合由于防腐的需要，也有用非金属(如石墨，聚四氟乙烯等)制造的。这是工业制造最为广泛应用的一类热交换器。按照传热面的形状与结构特点它可分为：

管式热交换器：如套管式、螺旋管式、管壳式、热管式等。

板面式热交换器：如板式、螺旋板式、板壳式等。

扩展表面式热交换器：如板翅式、管翅式、强化的传热管等。

其中，管壳式热交换器是目前应用最为广泛的一种热交换器。管壳式热交换器又称列管式热交换器。是以封闭在壳体中管束的壁面作为传热面的一种间壁式热交换器。管壳式热交换器由壳体、传热管束、管板、折流板(挡板)和管箱等部件组成，如图 1-3 所示。

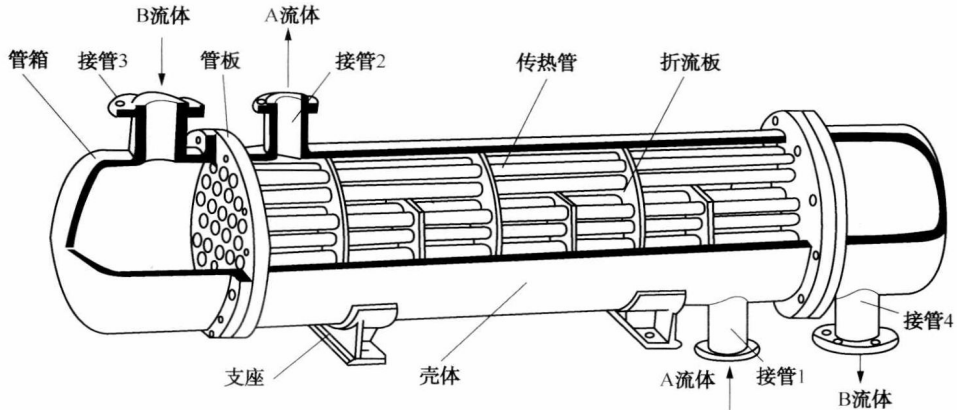


图 1-3 固定管板热交换器

热交换器的使用目的可归纳为如下几个方面：为了保证介质在稳定的温度下工作而对介质进行加热或冷却，如有机染料工业及化学工业中氯化、磺化、硝化反应中所采用的热交换器；为了节能和改善操作条件，以回收工艺过程中的余热为目的，如各种余热回收锅炉式热交换器；为了制取或回收纯净工质或将工质液化以便保存，如电厂、石油化工厂生产中的各种凝汽器、冷凝器、结晶器等；也有的用于对工质加热或冷却以满足后续生产的要求，如石油化工中常用的再沸器、蒸馏釜、裂化器、冷却器等。由于结构上的特点，管壳式热交换器可满足各种苛刻条件下换热要求，有的操作压力高达 250MPa，如高压聚乙烯装置中的热交换器，有的温度高达 1000℃ 以上(如某些制氯装置中的高温气体冷却器)，也有的同时高温高压下工作(如加氢裂解反应中的热交换器)。

无论是在国内还是在国外，在石油、化工、能源、动力等行业的热交换器设备中，管壳式热交换器都占据着主导地位，是标准化和规范化最早的换热设备。

总之，热交换器种类繁多，不同形式热交换器各自适用于某一工况。为此，在实际应用中应根据介质、温度、压力的不同，选择不同型式的热交换器，以便扬长避短，为工业生产带来更大的经济效益。

### 1.3 热交换器发展及研究方向

自 20 世纪 20 年代板式热交换器的出现至今，热交换器已经有近 100 年的发展历史，热交换器的形式越来越丰富。国家的重视也促进了热交换器的发展。

#### 1.3.1 热交换器的发展史

20 世纪 20 年代出现板式热交换器，并应用于食品工业，以板代管制成的热交换器，结

构紧凑，传热效果好，因此陆续发展为多种形式。30年代初，瑞典首次制成螺旋板热交换器。接着英国用钎焊法制造出一种由铜及其合金材料制成的板翅式热交换器，用于飞机发动机的散热。30年代末，瑞典又制造出第一台板壳式热交换器，用于纸浆工厂。在此期间，为了解决强腐蚀性介质的换热问题，新型材料制成的热交换器开始引起人们注意。

60年代左右，由于空间技术和尖端科学的迅速发展，迫切需要各种高效能紧凑型的热交换器，再加上冲压、钎焊和密封等技术的发展，热交换器制造工艺得到进一步完善，从而推动了紧凑型板面式热交换器的蓬勃发展和广泛应用。此外，自60年代开始，为了适应高温和高压条件下的换热和节能的需要，典型的管壳式热交换器也得到了进一步的发展。70年代中期，为了强化传热，在研究和发​​展热管的基础上又创制出热管式热交换器。

中国热交换器产业起步较晚。1963年抚顺机械设备制造有限公司按照美国TEMA标准制造出中国第一台管壳式热交换器，1965年兰州石油机械研究所研制出我国第一台板式热交换器，苏州新苏化工机械有限公司(原苏州化工机械厂)在60年代研制出我国第一台螺旋板式热交换器。之后，兰州石油机械研究所首次引进德国斯密特(Schmidt)热交换器技术，原四平热交换器总厂引进法国维卡勃(Vicarb)热交换器技术，国内热交换器行业在消化吸收国外技术的基础上，开始获得较快发展。

80年代后，中国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，国内传热技术高潮时期的代表作有折流杆热交换器、新结构高效热交换器、高效重沸器、高效冷凝器、双壳程热交换器、板壳式热交换器、表面蒸发式空冷器等一批优良的高效热交换器。

### 1.3.2 发展现状

进入21世纪后，大量的强化传热技术应用于工业装置，我国热交换器产业在技术水平上获得了快速提升，板式热交换器日渐崛起。如兰石换热设备公司板式热交换器成功进入国内核电建设项目常规岛和核岛领域，并陆续将板式热交换器用于大乙烯项目、钛白粉生产线等领域。四平巨元瀚洋板式热交换器公司也成功进入大亚湾二期岭澳核电站的常规岛和核岛领域。

最近几年，我国还在大型管壳式热交换器、大直径螺纹锁紧环高压热交换器、高效节能板壳式热交换器、大型板式空气预热器方面获得了重大突破。2008年8月，由中国石化集团上海工程公司与中国第一重型机械公司、兰州石油机械研究所、镇海炼化公司共同承担研制的镇海炼化百万吨/年乙烯项目——EO/EG装置大型管壳式热交换器国产化研制通过技术鉴定，标志着我国在大型管壳式热交换器领域获得了重大突破。该热交换器是国内正在制造的首台换热面积超过10000m<sup>2</sup>的超大型管壳式热交换器。

2009年4月，中国石化组织专家对“大直径螺纹锁紧环高压热交换器国产化研制攻关”项目进行了科学技术成果鉴定。该项目是依托中国石化青岛炼油化工有限责任公司千万吨级炼油项目中的3200kt/a加氢处理装置开展的，由中国石化工程建设公司、中国石化青岛炼油化工有限责任公司、兰州兰石机械设备有限公司、抚顺机械设备制造有限公司联合承担。该热交换器的国产化标志着我国已经具备设计和制造DN2000以下的螺纹锁紧环高压热交换器的能力，大大降低了石化工程建设成本，单台即可节约采购资金1400万元，且缩短了交货期，打破了国外公司垄断地位。2009年6月，由甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司研制开发的国产首台10500m<sup>2</sup>高效节能板壳式热交换器暨国产首台1000kt/a PX装置

10910m<sup>2</sup>板式空气预热器在上海通过出厂验收。该 10500m<sup>2</sup>高效节能板壳式热交换器应用在中国石油乌鲁木齐石化分公司 1000kt/a 芳烃联合装置,是目前国内单台换热面积最大的国产板壳式热交换器,其采用的 RZ4 板型、T 型分布器等多项技术属国际领先,热交换器整体已达到国际先进水平。10500m<sup>2</sup>高效节能板壳式热交换器的研制成功是国产板壳式热交换器发展的一个重要里程碑,标志着国产板壳式热交换器已跨入国际领先行列,结束了同类产品依靠进口的历史。国产首台总传热面积达 10910m<sup>2</sup>板式空气预热器应用于中国石油乌鲁木齐石化分公司 1000kt/a 对二甲苯(PX)芳烃联合装置,是国内首套加热炉空气预热器全部采用全焊接波纹板空气预热器的对二甲苯装置,也是首套排烟温度低至 100℃ 的装置,整体技术达到国际领先水平。这台空气预热器属高效、环保节能型热交换器,其研制成功标志着国产全焊接波纹板空气预热器的研制迈上了一个新台阶。

### 1.3.3 发展差距

尽管我国在部分重要热交换器产品领域获得了突破,但我国热交换器技术基础研究仍然薄弱。与国外先进水平相比较,我国热交换器产业最大的技术差距在于热交换器产品的基础研究和原理研究,尤其是缺乏介质物性数据,对于流场、温度场、流动状态等工作原理研究不足。

在热交换器制造上,我国在模具加工水平和板片压制方面与发达国家还有一定的差距。在设计标准上,我国热交换器设计标准和技术较为滞后。目前,我国的管壳式热交换器标准的最大产品直径还仅停留在 2.5m,而随着石油化工领域的大型化要求,目前管壳式热交换器直径已经达到 4.5m 甚至 5m,超出了我国热交换器设计标准范围,使得我国热交换器设计企业不得不按照美国 TEMA 标准设计。

更为严重的是,我国在大型专业化热交换器设计软件方面严重滞后。目前我国在热交换器设计过程中还不能实现虚拟制造、仿真制造,缺乏自主知识产权的大型专业计算软件。由于在热交换器的相关工艺计算、传热计算和振动模型的计算方面缺少大型专业化软件支持,使得我国对设计出来的热交换器产品无法准确预计其使用效果,这使得我国企业在热交换器产品招标过程中处于不利地位。

### 1.3.4 热交换器研究方向

近 20 年来,石油、化工等过程工业得到了迅猛发展。各工业部门都在大力发展大容量、高性能设备,因此要求提供尺寸小、重量轻、换热能力大的换热设备。特别是始于 20 世纪 60 年代的世界能源危机,加速了当代先进换热技术和节能技术的发展。强化传热已发展成为第二代传热技术,并已成为现代热科学中一个十分引人注目的、蓬勃发展的研究领域,主要的研究方向有以下几个方面:

#### (1) 物性模拟研究

热交换器传热与流体流动计算的准确性,取决于物性模拟的准确性。因此,物性模拟一直为传热界重点研究课题之一,特别是两相流物性模拟。两相流的物性基础来源于实验室实际工况的模拟,这恰恰是与实际工况差别的体现。实验室模拟实际工况很复杂,准确性主要体现与实际工况的差别。纯组分介质的物性数据基本上准确,但油气组成物的数据就与实际工况相差较大,特别是带有固体颗粒的流体模拟更复杂。为此,要求物性模拟在实验手段上更加先进,测试的准确率更高,从而使热交换器计算更精确,材料更节省。物性模拟将代表



热交换器的经济技术水平。

### (2) 分析设计的研究

分析设计是近代发展的一门新兴学科，美国 ANSYS 软件技术一直处于国际领先地位，通过分析设计可以得到流体的流动分布场，也可以将温度场模拟出来，这无疑给流路分析法技术带来发展，同时也给常规强度计算带来更准确、更便捷的手段。在超常规强度计算中，可模拟出应力的分布图，使常规方法无法得到的计算结果能更方便、快捷、准确地得到，使热交换器更加安全可靠。这一技术随着计算机应用的发展，将带来技术水平的飞跃，会逐步取代强度试验，摆脱实验室繁重的劳动强度。

### (3) 大型化及能耗研究

热交换器将随装置的大型化而大型化，直径将超过 5m，传热面积将达到单位  $10000\text{m}^2$ ，紧凑型热交换器将越来越受欢迎。板壳式热交换器、折流杆热交换器、板翅式热交换器、板式空冷器将得到发展，振动损失将逐渐克服，高温、高压、安全、可靠的热交换器结构将朝着结构简单、制造方便、重量轻发展。随着全球水资源的紧张，循环水将被新的冷却介质取代，循环将被新型、高效的空冷器所取代。随着保温绝热技术的发展，热量损失将减少到目前的 50% 以下。

### (4) 强化技术研究

各种新型、高效热交换器逐步取代现有常规产品。电场动力效应强化传热技术、添加物强化沸腾传热技术、通入惰性气体强化传热技术、滴状冷凝技术、微生物传热技术、磁场动力传热技术将会在新的世纪得到研究和发展。同心管热交换器、高温喷流式热交换器、印刷线路板热交换器、穿孔板热交换器、微尺度热交换器、微通道热交换器、流化床热交换器、新能源热交换器将在工业领域及其他领域得到研究和应用。

### (5) 新材料研究

材料将朝着强度高、制造工艺简单、防腐效果好、重量轻的方向发展。随着稀有金属价格的下降，钛、钽、锆等稀有金属使用量将扩大，CrMo 钢材料将实现不预热和后热的方向发展。

### (6) 控制结垢及腐蚀的研究

国内污垢数据基本上是 20 世纪 60~70 年代从国外照搬而来。四十年来，污垢研究技术发展缓慢。随着节能、增效要求的提高，污垢研究将会得到国家的重视和投入。通过对污垢形成的机理、生长速度、影响因素的研究，预测污垢曲线，从而控制结垢，这对传热效率的提高将带来重大的突破。

防腐蚀技术的研究将会有所突破，低成本的防腐涂层特别是金属防腐镀层技术将得到发展，电化学防腐技术成为主导。

目前世界各国在热交换器理论研究、新技术和新产品开发方面已经进入高层次的探索阶段，涉及领域很广，虽然近年来我国加大了对各种热交换器的研发，但在一些高效热交换器领域方面与发达国家还存在一定差距。因此，我国应借鉴国外先进热交换器技术，努力赶上国际先进水平。

虽然热交换器种类繁多，但传统的管壳式热交换器由于其具有操作弹性大、结构简单坚固、制造简便、使用材料范围广、可靠程度高等优点，在国外热交换器市场管壳式热交换器仍占主导地位，约占 64%，是目前应用最为广泛的一种热交换器。但是，管壳式热交换器在换热效率、设备紧凑性、单位面积的金属消耗量等方面，在结构和性能上都有待于进一步



的完善。因此，本书主要介绍管壳式热交换器的原理与设计。

## 1.4 热交换器的设计内容

热交换器的设计从收集原始资料开始，到正式绘出图纸为止，主要包括下面几方面的内容：

### (1) 结构设计

结构设计主要是根据设计任务来选定热交换器的基本形式(也可选若干种形式进行初步设计，进行比较分析后做出选择)。然后初定主要结构尺寸，进行热力计算和流体阻力计算，并根据计算进行结构尺寸调整，直到满足设计要求。

### (2) 热力设计计算

热力设计计算主要是根据传热要求来计算传热所需的面积，根据这一热力计算结果来调整结构尺寸，使结构设计的传热面积与传热计算的传热面积趋于一致，并有一定的裕量。

### (3) 流体阻力设计计算

流体阻力设计计算主要是根据结构、流体的流态要求等来计算阻力降，保证其阻力降在许可的范围内，而后再进行热力计算。

### (4) 强度、刚度、稳定性设计

强度、刚度、稳定性设计都是在结构设计、热力计算、流体阻力计算全部完成后进行。其主要任务是根据热交换器设计标准确定各零部件的强度尺寸、刚度尺寸及稳定性尺寸，为施工图绘制做准备。

### (5) 绘图

绘图的任务有两个，在设计计算完成前绘制初步结构设计图及阶段性结构设计图，供设计计算用；在设计计算完成后，根据有关的标准规范绘制出合格的热交换器施工图。

随着热交换器向大容量、高参数化发展，同时为了强化传热和减少结垢，流体流速普遍提高，这就带来一系列的振动问题。虽然振动不是引起管壳式热交换器机械破坏的唯一原因，但它已成为热交换器机械破坏的重要原因之一。管壳式热交换器中一旦发生振动，就可能引起换热管与换热管、换热管与折流板之间的碰撞、磨损等问题。因而在设计热交换器时，还必须对其振动情况进行预测或校核，判断有无产生强烈振动的可能，以便采取相应的减振措施，保证安全运行。