



换热器 (第二版)

HEAT EXCHANGER

兰州石油机械研究所 主编

(上册)

中国石化出版社

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

换热器 (第二版)

HEAT EXCHANGER

兰州石油机械研究所 主编

(上册)

中国石化出版社

HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM

TK172

8-2

200

内 容 提 要

本书是换热器技术专著,分上、下两册,共计10篇63章。上册系统介绍了管壳式换热器、特种管壳式换热器、板状换热器,以管壳式换热器为主,全面介绍其工艺计算与设计、结构设计、强度计算,还重点介绍了流体诱发振动及强化传热新技术。下册主要介绍了空冷式换热器、热管换热器、特殊材料换热器以及其他换热器,还介绍了换热器计算机辅助设计、制造检验与使用安全管理等方面的内容。

本书可供换热器科研、设计、制造及现场的专业技术人员使用,也可供相关专业技术与管理 人员、高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

换热器 / 兰州石油机械研究所主编. —2 版.
—北京:中国石化出版社,2013.1
ISBN 978-7-5114-1253-9

I. ①换… II. ①兰… III. ①换热器 IV. ①TK172

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 271781 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

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 126.75 印张 3218 千字

2013 年 1 月第 2 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

定价:398.00 元(上、下册)

序

在现代化的能源动力、炼油和石油化工等大工业生产中，总需要热流体被冷却和冷流体被加热、包括有相变的气化和冷凝的换热设备。换热器不只保证流程的工艺条件，也是开发利用工业二次能源、实现热回收以节约能源消费的重要装备。

兰州石油机械研究所曾适时地主动搜集换热器设计、制造、运用、改进的国际进展动态，公开出版了《换热器》，推动了国内换热器的研制和石化工业的大型化、高效化。

二十多年来，科学技术的发展出现了信息化，新材料、新型工作流体、新的制造和测试技术、传热分析和强化传热的细致化和传热计算的精准化，带动了换热器性能的设计优化和抗污垢的技术探索。节能减排，重视生态环境的维护，要求我国换热器行业与时俱进地开拓创新。为此，兰州石油机械研究所邀集相关专家、学者集体修订原《换热器》，汇聚国内外研究新成果和实践经验，以适应我国经济发展的亟需。

不同的使用部门，选择换热器可有不同的考虑视角。换热器构造多种多样，可以硕大无比、实行模块化操控，也可以灵巧微型化；可以实现两种不同温度的流体相互间的换热，也可以实现多种不同温度的流体相互间的换热。但换热器的高性能化、紧凑化和运行长效化与安全可靠将是换热器发展的主导方向。在《换热器》(第二版)即将交付中国石化出版社出版之际，写此短序作介绍。希望本书汲取读者智慧在使用中充实提高。

王补宣

2012年10月于北京清华园

第二版前言

一般来说，物质世界具有物理和化学的属性。绝大部分的化学反应或传质传热过程都与热量的变化密切相关。凡与热量有关，为使传热过程得以实现都要使用换热设备。

换热设备在动力、原子能、冶金及食品等其他工业部门广泛应用着，而在炼油、化工及石化生产中更是不可缺少的重要设备。据统计，仅在炼油厂中换热设备的钢材耗量就占工艺设备总重量的40%左右，其投资占全部工艺设备总投资的35%~40%。而今，换热设备可以说几乎是无处不有。因而换热设备的技术进步直接关乎国民经济的发展和人民生活质量的提高。换热技术的发展时刻为人们所关注。

兰州石油机械研究所是国内从事换热设备研发和生产的重点单位之一，早在1971年曾组织行业力量编写过《换热器》(内部发行)一书，主要介绍国外20世纪60年代换热器技术的进展和水平，它的出版对当时国内科研、设计、生产以及高等教学工作都起过良好的促进作用。

1980年，为适应我国“四化”建设和改革开放的需要，满足赶超世界先进水平的要求，兰州石油机械研究所又一次组织行业力量编写出版了第一版《换热器》(公开发行)一书。这次不再是单纯介绍国外技术，而是国内外并重、资料混编，其内容包括了1971年至1980年间国内外换热器技术的新发展，又一次促进了国内换热器技术的大发展，并将我国换热器的创新技术推向世界。

第一版《换热器》一书公开出版发行后，深受广大工程技术人员和一般读者的欢迎，不久便销售一空，多次重印，但仍不能满足要求。近年来，广大读者还不断来函求购或希望重版。正是倾听了广大读者的呼声，考虑到近20余年来国内外换热器技术的飞速发展，大批新的科研成果和丰富的实践经验需要总结和建立数据库，也为了适应我国目前改革形势和国民经济大发展的需要，兰州石油机械研究所受中国石化出版社之约，再一次主持对《换热器》一书进行全面修订。这次修订的内容涉及1981年至2007年期间的资料和数据，第二版的编写力求内容全面、系统、新颖和实用。

第二版的特点是：突破了原来以炼油和石化行业用换热器为主的框架，增加了诸如新能源换热器、空调用全能换热器、卫生医药用换热器以及仪表用微通道换热器等新用途换热设备的比重；对原有各章都有不同程度的增删，其中不少章节是完全重新编写的；由于内容丰富，信息量大，原来按章编写难以容纳，故第二版在编写体例上增设了篇，同时依据各类换热器的技术发展实际按内容量将原来一些按章编写的内容设专篇论述，如热管换热器、强化传热等。

总之，本版总结了近20余年来国内外换热器技术的发展，汇集了有关换热器方面的最新数据和成果，介绍了国内外的实践经验和应用实例。本着推陈出新的方针，既保留了经典技术，又全面介绍了新技术；既有基础理论，又有实际应用；既有国外观点，又有国内见解，全面展示了当今国内外换热器技术的发展水平、动向和趋势。力求体系完整、结构合理、论述严谨、内容翔实。人们常说：“出好书功德无量，读好书受益无穷”。希望本版《换

热器》的出版将有助于广大工程技术人员更好地处理和解决换热器在科研、设计和生产中遇到的技术难题，并成为广大读者的良师益友。

第二版邀请了兰州石油机械研究所、天津大学、兰州石油化工机器厂、华南理工大学、北京化工大学、中国石化北京经济技术研究院、华东理工大学、北京燕山石化公司、上海高桥石化公司炼油厂、南京化工大学、西安交通大学、广西大学、杭州制氧机集团有限公司板换厂、上海江湾化工机械厂、兰州理工大学、清华大学、中南大学、中国石化工程建设公司、甘肃省锅炉压力容器检验研究中心的62位资深专家、知名教授和中青年学者参加编写。兰州石油机械研究所的领导十分重视和关心本书的编写，成立了编写工作组，所长、教授级高级工程师张延丰同志任组长，亲自领导了编写队伍的组建到大纲的编制，并且从人力和经费上给予大力的支持。编写工作具体由编写组副组长、高级工程师孙晓明和副译审曹纬共同主持和组织。曹纬副译审负责制订了编写大纲要目，起草了编写工作的各类文件，系统地检索了1981年至2005年期间的国内外各类文献，搜集了国内外有关换热器技术进步的最新资讯，汇集了国内外换热器的最新科研成果信息，为编写提供了所需的原始资料，并进行了全书的统稿工作。孙晓明高级工程师主要负责作者队伍的组建，在全书的编写过程中作了大量的组织和协调工作，并负责对编写工作中各类文件的修改和审核，参加了书稿的统稿和编辑工作。余德渊教授级高级工程师参加了部分编写组织工作。熊志立高级工程师进行了书稿的社外出版编辑工作。

中国石化出版社的领导对本书的编写始终给予高度重视，社长王子康亲临兰州参加指导《换热器》(第二版)编写工作会议，副总编王力健对整个编写过程给予了具体的指导，装备综合编辑室白桦主任和潘向阳副主任为本书的出版作了许多具体工作，在此谨向他们致以深切的谢意。

本书是在第一版的基础上进行修订的，因此，凡在第一版编写过程中作了贡献的同志，在第二版中自然仍留有他们的业绩。没有各方面同志的协作，什么事也做不成功、做不好。本书如能对广大读者起到有益的作用，应归功于所有参加过这一工作的同志们。这一项“名山事业”意义深远，光荣而崇高。

本书编写作者的具体分工如下：

概论：张延丰、余德渊

第一篇 管壳式换热器

第一章：刘明言、黄鸿鼎、李修伦、冯亚云；第二章：许燕、宋秉棠、万庆树、卢伟、陈韶范、邹建东、王海波(第一~九节)，高俊卿(第十节)；第三章：徐鸿(第一节之一、三、四，第三节)，罗小平(第一节之二)，陈志伟(第二节)；第四章：聂清德、谭蔚；第五章：石岩、潘家祯；第六章：郭建；第七章：蔡隆展

第二篇 特种管壳式换热器

第一章：虞斌、周帼彦、涂善东；第二章：朱大滨、潘家祯；第三章：涂善东、虞斌、周帼彦；第四章：白博峰

第三篇 管壳式换热器传热强化技术

第一、二章：钱颂文、朱冬生、孙萍；第三章：朱冬生、孙萍、钱颂文；第四章：孙萍、朱冬生、钱颂文

第四篇 板状换热器

第一章：周文学(第一、二、五、六节)，王中铮(第三、四节)；第二、三章：魏兆藩、王丕宏、周建新；第四章：林清宇、林榕端；第五章：阎振贵

第五篇 空冷式换热器

第一章：孔繁民、任书恒、张延丰(第一、二节、第四~十节、第十二、十三节)，孔繁民、姜学军(第三节)，赖周平(第十一节)；第二章：马军；第三章：郑天麟

第六篇 热管换热器

张红

第七篇 特殊材料换热器

廖景娉、余红雅

第八篇 其他换热器

第一、二、三章：李超；第四、五章：俞树荣、范宗良；第六章：姜培学；第七章：曹小林、吴业正；第八、九章：张中诚

第九篇 换热器计算机辅助设计

第一章：宋秉棠、陈韶范、宋俊霞；第二章：刘立、宋秉棠、陈韶范、宋俊霞；第三章：刘鹏、赵殿金、陈韶范；第四章：宋俊霞、刘伟、陈韶范；第五章：刘鹏、赵殿金；第六章：陈韶范

第十篇 换热器制造检验与使用安全管理

张铮

第二版稿件由张延丰、林瑞泰、宋秉棠、魏兆藩、吴宗列、钱才富、黎廷新、杨国义、陈旭、王秋旺、岑汉钊、叶国兴、余德渊、钱颂文、任书恒、王启杰、庄骏、刘振全、张镜清、吴业正、黄文豪、刘景兰、刘鹏、陈韶范、陈长宏等分章审校。

本书是由国内各方面的换热器技术领域的知名专家学者编写的，具有很高的权威性。相信本书的出版一定会再次受到广大读者的欢迎，并将对我国换热器技术的更进一步发展做出贡献。

由于编者水平有限，书中错误、不妥及疏漏处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

第一版前言

换热器是进行热交换操作的通用工艺设备，广泛应用于化学、石油、石油化学、动力、食品、冶金，原子能、造船、航空、建筑等工业部门中。特别是在石油炼制和化学加工装置中，占有重要地位。近二十年来，由于对节约能源和环境保护的重视，换热器的需求量随之增大，换热器技术亦获得迅速发展。

全国化工与炼油机械行业技术情报网曾于1971年组织编写过《换热器》一书，介绍国外六十年代换热器技术的进展和水平。对科研设计、工厂生产，以及高等学校教学工作等，都起了良好的作用。如今十余年过去了。在技术进步突飞猛进的时代里，十年往往是一个里程碑。在过去的十年中，换热器技术有了许多新的进展。

为了适应我们党和国家的工作重点的转移，加快四个现代化的进程，必须及时了解和掌握当代最新技术。对于化工与炼油工业来说，则迫切需要了解目前世界上炼油化工设备的技术进展情况。《换热器》一书正是在这种背景下产生的。

《换热器》包括十八章。一至十章是量大面广的管壳式换热器，其余各章是新型及其他型式的换热器。本书是一部有一定学术水平的技术专著。它在参阅了几千篇国内外文献资料的基础上，经过深入的对比分析与综合，系统地介绍了当代的换热器技术，包括理论与实践上的新成就、新技术、发展趋势与技术水平，并且概括了目前在生产实践中广为流行的成熟理论和技术。因此，它不但可作为科研、规划、技术革新和教学的重要参考资料，并且可为设计、制造和使用提供重要依据。笔者相信，它必将成为所有从事换热器技术工作的工程师们的良知益友。

本书是根据全国化工与炼油机械行业技术情报网的工作计划，由机械部兰州石油机械研究所组织编写的。直接参加编写和审核工作的有十三个单位共三十四位同志。兰州石油机械研究所胡华燃工程师为组织本书的编写，系统检索了1971~1980年间的国外文献线索，拟定了编写大纲要目，并且最后对全书进行了审核。本书的编写还得到了石油部科技情报所和石化总公司规划设计院的大力支持与协助。烃加工出版社陈允中同志从本书编写开始就对其内容与形式的要求给予帮助，并在随后的编写过程中始终给以关注。成都科技大学古大田教授对本书的编写也提出了许多宝贵的意见。谨在此一并致谢。

由于本书篇幅较大，编者甚多，在各章节内容的取舍和彼此的衔接等方面，难免有不妥之处，而且限于编者的水平，甚至可能还有错误之处，请批评指正。

兰州石油机械研究所

上册目录

概论	(1)
第一节 换热器技术发展概况	(1)
第二节 强化传热技术	(3)
第三节 全热换热器	(9)
第四节 换热网络的优化设计	(12)
第五节 换热器性能评价	(18)
第六节 换热器的几个特殊问题	(20)

第一篇 管壳式换热器

第一章 管壳式换热器工艺计算及设计	(28)
第一节 概述	(28)
第二节 无相变系统换热器的工艺计算	(31)
第三节 有相变系统换热器的工艺计算	(59)
第四节 换热器工艺设计中尚存在的某些问题	(86)
第二章 管壳式换热器的结构及设计	(102)
第一节 结构类型	(102)
第二节 工艺性结构设计	(109)
第三节 结构型式的合理选择	(127)
第四节 管束结构设计	(133)
第五节 管箱	(165)
第六节 密封垫片及紧固件	(179)
第七节 其他	(197)
第八节 耐压试验和气密性试验	(224)
第九节 检漏试验	(243)
第十节 管壳式换热器新结构的开发和应用概况	(251)
第三章 管壳式换热器强度的计算	(272)
第一节 一般计算方法	(272)
第二节 应力分析方法	(295)
第三节 管箱 - 管板 - 壳体间的螺栓法兰连接	(307)
第四章 流体诱发的振动	(329)
第一节 概述	(329)
第二节 流体诱发振动的机理	(332)
第三节 流体诱发振动的计算	(375)
第四节 管束的振动特性	(383)

第五节 防振设计及防振措施	(414)
第六节 国内外标准规范介绍与展望	(426)
第五章 管壳式换热器制造	(442)
第一节 概述	(442)
第二节 换热管	(443)
第三节 管板	(448)
第四节 胀接	(454)
第五节 焊接	(462)
第六节 胀焊并用	(465)
第七节 总装	(468)
第八节 无损探伤	(473)
第六章 管壳式换热器的检修与维护	(476)
第一节 概述	(476)
第二节 换热器的故障诊断与分析	(476)
第三节 换热器的阻垢与清洗	(486)
第四节 换热器的检测与修理	(497)
第七章 管壳式换热器的选材及腐蚀与防护	(514)
第一节 概述	(514)
第二节 管壳式换热器的腐蚀与防护	(516)
第三节 腐蚀的监测、检查及失效分析	(540)

第二篇 特种管壳式换热器

第一章 套管式换热器	(546)
第一节 概述	(546)
第二节 结构	(546)
第三节 设计计算	(550)
第四节 套管式换热器研究与应用的拓展	(560)
第二章 螺旋绕管式 (Linde-Hampson) 换热器	(567)
第一节 概述	(567)
第二节 螺旋绕管式换热器的特点及应用	(568)
第三节 螺旋绕管式换热器的结构形式	(568)
第四节 螺旋绕管式换热器的设计	(570)
第五节 螺旋绕管式换热器的制造与检修	(577)
第六节 螺旋绕管式换热器的材料	(580)
第三章 高温高压换热器	(584)
第一节 概述	(584)
第二节 高温高压换热器的设计基础	(589)
第三节 高温气冷堆换热器	(618)
第四节 钠冷快堆换热器	(629)

第五节	加氢换热器	(637)
第六节	超高压换热器	(652)
第七节	高温高压换热器的发展趋势	(664)
第四章	翅片管式换热器	(680)
第一节	概述	(680)
第二节	翅片管介绍	(683)
第三节	流动、传热特性与设计	(698)
第四节	应用研究	(718)

第三篇 管壳式换热器传热强化技术

第一章	无相变对流传热强化技术	(722)
第一节	肋槽管管内单相湍流传热强化技术	(722)
第二节	二类管型试验与分析	(745)
第三节	强化管管束高效换热器与壳程的传热强化	(755)
第二章	冷凝传热及冷凝强化技术	(774)
第一节	概述	(774)
第二节	单工质蒸气在水平翅肋管管外冷凝的传热及强化	(774)
第三节	卧式翅片管冷凝传热理论分析	(779)
第四节	螺旋槽管管外水平管束冷凝传热强化性能	(789)
第五节	水平管外绕丝水平管的管外冷凝强化传热性能	(791)
第六节	单组分工质在水平管束上的冷凝传热及管束冷凝强化	(792)
第七节	混合工质冷凝强化及管束效应	(798)
第八节	管内冷凝传热的强化	(803)
第九节	三维针翅管的冷凝强化传热	(821)
第三章	蒸发沸腾强化传热管技术	(830)
第一节	蒸发沸腾强化管及其性能概述	(830)
第二节	表面多孔管的沸腾强化传热性能	(832)
第三节	T形管的沸腾强化传热性能	(842)
第四节	针翅管的沸腾强化传热性能	(845)
第五节	水平管束沸腾传热效应与强化管束沸腾传热性能	(848)
第六节	管内蒸发沸腾强化管性能	(855)
第七节	内微翅管的蒸发沸腾强化传热性能	(860)
第八节	多组分混合溶液的沸腾效应及强化管的抑制效应	(865)
第九节	电场强化传热的电流体动力效应(EHD)——主动型强化沸腾传热	(868)
第四章	管内插入物传热强化技术	(875)
第一节	扭带插入物	(875)
第二节	内插螺旋线及其性能	(882)
第三节	片条插入物及其性能	(883)
第四节	斜环片插入物及其性能	(892)
第五节	静态混合器与 Kenics 混合器	(893)

第六节	交叉锯齿带及其性能	(898)
第七节	大空隙率多孔体内插物的强化传热	(900)
第八节	对各种内插件强化传热性能的综合评价与比较	(901)

第四篇 板状换热器

第一章 板式换热器	(908)
第一节 概述	(908)
第二节 结构特点及适用范围	(912)
第三节 流动与传热	(920)
第四节 板式换热器设计计算	(943)
第五节 人字形波纹的热力及阻力计算	(957)
第六节 安装、使用及清洗	(959)
第二章 板壳式换热器	(966)
第一节 概述	(966)
第二节 几种有代表性的板壳式换热器	(967)
第三节 国外大型板壳式换热器	(979)
第四节 LBQ 大型板壳式换热器	(989)
第三章 T-P 板	(998)
第一节 概述	(998)
第二节 基本结构	(998)
第三节 强度	(1002)
第四节 制造	(1004)
第五节 设计计算	(1005)
第六节 应用	(1007)
第七节 臃胀成形的受力分析及与其他成形方法的比较	(1012)
第四章 螺旋板换热器	(1015)
第一节 概述	(1015)
第二节 螺旋板换热器的结构形式	(1017)
第三节 螺旋板换热器工艺计算	(1022)
第四节 螺旋板换热器强度及稳定性计算	(1029)
第五节 螺旋板换热器的制造和检验	(1052)
第六节 螺旋板换热器的应用	(1056)
第五章 板翅式换热器	(1065)
第一节 概述	(1065)
第二节 结构设计	(1079)
第三节 传热计算	(1095)
第四节 流体流动阻力计算	(1111)
第五节 强度计算	(1126)
第六节 制造工艺	(1137)
第七节 板翅式换热器几个专题的探讨	(1150)

概 论

(张延丰 余德渊)

在 20 世纪 70 ~ 80 年代前期,以各类强化传热元件、传热技术和新型高效换热设备为重点而进行了开发、研究,并取得了一系列举世瞩目的重大成果。与此同时,在换热器的设计、大型化以及改进制造技术等方面也得到了同步发展,迎来了换热设备技术发展史上的第一个高潮。

这一时期最具代表性的成果有:Weiland 公司开发的 Gwea - T 管(即 T 型翅片管);日立公司开发的 E 管(机械加工表面多孔管);美国联合碳化物公司开发的 High Flux 管(通常叫做表面多孔管——烧结型)、C 管(锯齿管)以及各种形式的波纹管、纵槽管和内外翅片管等强化传热管。在单相流强化,特别在沸腾和冷凝强化传热方面,这些新型传热管都表现出了十分优越的性能。热管和热管换热器的开发和应用,是传热和换热设备技术发展的一个重大突破。由美国传热研究公司(HTRI - Heat Transfer Research Inc.)开发的管壳式换热器壳程流体流路分析法是换热器第一个工艺计算分析方法,迄今为止仍然是先进的工艺计算方法之一。在这一时期,为适应高效换热器这一发展主线还进行了各种结构改进的试探,但并无突破性进展。值得提及的是折流杆换热器的成功开发应用。长期以来,传热和压降这一矛盾对一直困扰着广大设计人员,似乎成为一个不可逾越的障碍。折流杆换热器的开发成功并应用于强化传热,在一定程度上缓解了这一矛盾对,既利用了其优越的抗振动性能,大大减小了压降,又以高流速获取了高的传热性能。以此为先导,换热器结构改进掀起了一个小高潮,如弓形折流板缺口区不布管等结构的出现,也基本上出于同一构想,既降低了压降又提高了流速进而得到了高的传热性能。

换热器在其传统领地,如石油、石油化工和能源等行业中取得高速发展的同时,在一些特殊领域应用的换热器也得到相应的发展。国外各主要工业国在非金属换热器领域,各自完成了标准化、系列化和专业化发展布局;核装置中使用的关键换热设备,各国分别开发出的结构形式已基本定型,各类特种换热器及其技术已逐渐趋于成熟,进入了稳定发展时期。

经历了这一时期的大发展,换热器技术进入了一个从初期发展走向成熟的时代,同时,也为新的飞跃做好了充分的技术准备。

第一节 换热器技术发展概况

80 年代中后期至 90 年代,换热器技术开始了它的第一个发展高峰时期。同前一时期比较,它显得更成熟、更广泛,也更为深刻。

在这一时期,换热器技术发展的基本特点大致可以概括如下:

(1) 在换热器的传统领地,主要是对前一时期繁如星海的诸多成果进行实践和验证,对筛选出来的成果从技术到理论进一步加以完善,建立实用的设计计算方法,逐步扩大应用范围并推广至工业生产装置中。在石油化工等领域,换热器技术总体上处于一个相对稳定

时期。

在这一领域中特别值得提及的是，美国 ASME 经长期研究，在古老的管壳式换热器设计中提出了全新的管板设计即分析设计计算的方法，该方法打破了 TEMA 长达 50 年的近乎垄断的地位。从某种意义上讲，该方法是管板、法兰及壳体强度设计的一个优化计算方法，相对于传统设计方法是一个突破^[1]。

(2) 强化传热研究仍然被广泛重视，但与前一时期不同的是，人们的着眼点已经从前一时期希望寻求一种应用较为广泛的设备和具有较为普遍的强化传热方法，转向为某一特定工况下针对性强的强化传热技术和设备的应用。

(3) 可以利用和回收的能源温位越来越低，范围越来越广，尤其是大量低温能源的回收利用，已成为研究对象中的一个主要侧面，开发研制更高性能的换热器已成为这一时期研究工作的主题。

(4) 在流体黏度极高而流速又很低的场合，利用流体自身流动很难实现强化传热，因此主动强化技术得到进一步发展。所谓主动强化技术，即施加外部动力(如机械搅动、电场或磁场等)使传热面附近的流体发生较大范围的搅动，不断更新边界层而实现强化传热^[2]。

(5) 以计算流体动力学 CFD(Computational Fluid Dynamics)及精确模型化技术为代表的先进设计技术，是这一时期最为耀眼的成就，它是换热器设计技术的一个革命性突破^[3]。

(6) 换热器技术的研究开发已从石油化工和能源等部门扩展到环保、各种场合的能量回收、新能源开发利用等极广泛的范围。从宏观领域到微观世界，如微型换热器、微通道传热技术及其换热器的研究应用也都取得了可喜的进展。

(7) 面对各种新型、高效和紧凑式换热器的迅速发展和强有力的挑战，古老的管壳式换热器的统治地位受到了越来越大的挑战，传统阵地受到进一步蚕食。但管壳式换热器靠其自身的技术发展，力图保住阵地，这仍然是换热器技术发展过程中的一个始终未能改变的趋势。据 HTFS 网站 2002 年报道，欧洲市场各类换热器市场占有率如图 0.1 所示。从该图可以看出，管壳式换热器虽然仍居主导地位，但已丧失半壁江山。

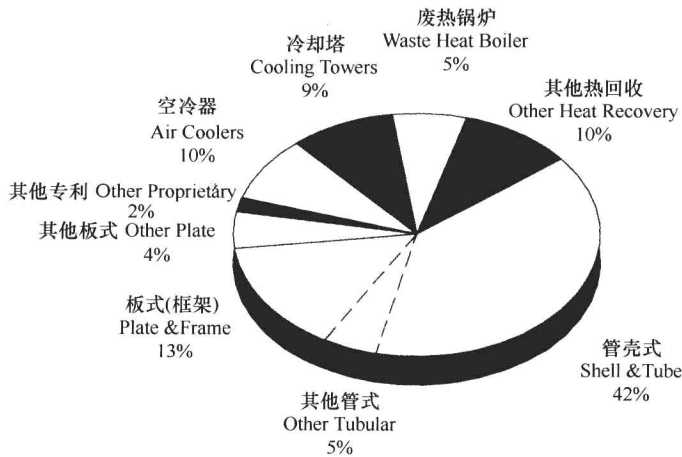


图 0.1 各类换热器在欧洲市场占有率

总之，随着工业的发展对换热设备在大型化、高效化、特殊性、低温差及低压降等方面的要求越来越高。如要求进一步降低能耗和设备成本，要求具有更高精确度的设计，要求建立更高的技术体系，以适应换热器技术发展的更高要求。

换热器技术发展有一定层次之后, 各类换热器为寻求自身发展而形成了互相竞争的格局, 但又有相互渗透和相互结合, 以致会突破传统模式和理念而形成了一种全新趋向, 这又进一步促进了换热器技术的发展。Hamon - Lumms 公司开发的“SRC”就是将空冷器用的椭圆管改造成的一种超扁平管(19×200), 亦即用板翅式换热器波形翅片卷制成的一种特殊翅片管。然后将这种翅片管以独特的单排人字形布置, 最后便得到了一种全新的高效换热设备。近年来, 日、美等工业国家开发了一种全热换热器, 这是一种从传热理念、传热元件到总体结构都不同于传统换热器的新型高效换热器^[3]。

第二节 强化传热技术

强化传热技术和新型高效换热器的研究开发, 始终贯穿在换热器技术发展的主线之中。

在各种类型的传热过程中, 传热阻力主要来自传热元件的壁面、在壁面上的污垢以及由于壁面的摩擦阻力而滞留于壁面附近的流体膜——边界层。强化传热研究, 主要就是寻求如何尽可能降低膜阻, 或者说如何力求提高膜传热系数的途径、减少污垢热阻等对传热的负面影响。

一、强化传热技术分类^[4]

从广义上讲, 强化传热技术可分为两大类, 即被动强化传热技术和主动强化传热技术。所谓被动强化传热技术, 是指不需外加动力, 仅仅依靠改造传热面, 改变流道形状或附设导流元件等措施来改变流体的流动, 并利用流体流动本身促使边界层流体发生较大的扰动, 以达到不断更新边界层流体, 进而获得单相流、沸腾或冷凝强化传热的效果。

主动强化技术, 则是指施以少量的外部动力, 如机械搅拌、施加电场或磁场等以获取一定的强化传热效果的方法。

这两类方法, 又分别有 3 个系列的强化措施, 见表 0.1。

表 0.1 强化传热技术分类

类别	被动强化技术	主动强化技术
改变传热面	高、低翅片管或翅片板, 以增大传热面为主	表面振动
改变流动	加工或处理表面, 改变流道形状, 以造成二次流或剥离流; 各种结构表面上增添移量式装置(元件), 以造成二次流或剥离流	机械搅动, 振动, 抽吸脉动(冲)流及附加电场或磁场等
除垢	微生物除垢, 化学除垢或采用阻垢剂	机械除垢

二、强化传热的基本思路

(一) 强化对流(无相变)传热^[4~5]

强化传热技术, 也可以简单地被说成是增加传热量的技术。根据传热基本方程:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (1)$$

可知, 欲增大传热量 Q , 可以通过使总传热系数 U 、传热面积 A 和传热温差 ΔT 三者之中任何一项的增大或使多项同时增大来实现。下面分别作一简要说明。

1. 传热温差 ΔT 的增大

我们知道, 传热过程是不可逆过程。传热温差越大, 有效能损失也越大, 从能量有效利

用的观点来看,使传热温差增大以力图使传热量增大的方法是不可取的。相反,采取合理的低温差,正是最大限度回收热能的重要手段之一。

2. 传热面积 A 增大

这里说的增大传热面积包括两个方面:对一个换热网络来说,增大换热面积可减少废热,回收更多的热量,但同时会增加设备投资,特别应当注意的是,增大传热面积的同时如果流速下降,将可能非但不能增加传热量,反而无法完成既定的传热过程,加速结垢,造成设备性能进一步恶化等事与愿违的后果。因此增大传热面积应当合理、适度。对单体设备而言,不增加设备重量而增大传热面积(如低翅片管),或者只增加了少许重量而大大增加了传热面积(如高翅片管、翅片板等)的方法,就是应用最早并已得到广泛推广应用的实用强化传热技术。

3. 总传热系数 U 增大

提高膜系数 h_1 和 h_2 ,降低壁阻,降低壁两侧污垢热阻均可提高总传热系数,这是强化传热技术研究的主流方向。

关于污垢及其防止和清除方法,本章将列专题阐述。对降低壁阻来说,当选用传热阻力很大的材料来作传热元件时,或者当两侧膜系数足够大且又不易结垢,而壁阻已成为影响总传热效果的重要因素时才是有效的。其办法是减薄壁厚,选用热导率大的材料,或者在材料中添加某种元素来增大材料的热导率等。在非金属换热器中,这是其重要的强化传热手段之一。

在大多数情况下,提高膜系数起着决定性作用,因此在强化传热研究中,提高膜系数的研究一直占据主导地位。其基本思路是,当 $h_1 \ll h_2$ 时,提高 h_1 便可显著提高总传热系数 U ,而提高 h_2 几乎无效,此时 h_1 被称之为控制膜。当两侧膜系数 h_1 和 h_2 数值相当,且 h_1 和 h_2 的数值都不大时,同时提高 h_1 和 h_2 仍然会收到十分显著的效果。

(二) 强化冷凝传热^[5-6]

水蒸气冷凝的膜系数很高,一般不需强化,通常只对某些介质膜系数相对较低时的冷凝才采取强化措施。如氟里昂等有机介质冷凝时,其膜系数比水蒸气冷凝低得多,如果另一侧用水作冷却介质,而水的流速又足够大,水侧也可以得到很高的膜系数。这时,对氟里昂等有机介质侧采取强化措施是非常有利的。

冷凝过程中的传热阻力主要来自于龄凝液膜,因此强化冷凝的基本出发点就是如何尽可能地增强排除壁面凝液的能力,最大限度地减少壁面液膜厚度。如用锯齿管(C管),就是利用翅片及齿尖来迅速排除凝液,强化冷凝的效果非常显著。如果能使凝液不在传热壁上形成液膜,即实现珠状冷凝,冷凝给热系数将增大 10~100 倍。实现珠状冷凝的基本条件是将壁面加工到非常光滑,并在介质中加入助聚剂,使壁面成为非润湿表面。但现实状况是,除水蒸气外,大多数工质都没找到非润湿材料,而大多数助聚剂几乎都是憎氟里昂类物质。因此在工业上要实现珠状冷凝,还有许多困难需要克服。

对垂直管冷凝,有时不必除去凝液就能使冷凝液膜处于强烈紊流状态,且也可得到非常高的膜系数。

(三) 蒸发器强化传热的基本思路^[5]

工业用蒸发器产品种类繁多,按照不同基准有不同的分类方法。笼统地划分,可分为带有蒸发空间的釜式和不带蒸发空间的虹吸式两类。更细致地划分,可分为如表 0.2 所示的多种类别。

表 0.2 蒸发器分类

按蒸发形态	按设备	按传热管设备	按流动
蒸发器	板式	水平管外蒸发	池沸腾
		垂直管外蒸发	降膜式
	管壳式	水平管内蒸发	强制流动型
		水平管外蒸发	强制流动型
直接接触式	板翅式		

概括地讲,蒸发器类设备强化传热的基本思路是:①激活气泡产生;②减少液膜厚度;③迅速导出蒸发出来的气体。

基本方法:对于①、②类情况,可采用处理或加工传热表面,以使传热表面成为高性能的传热表面。除这种被动强化技术之外,也可采用使传热面振动、回转或施加电场等主动强化技术的方法。

对于③类情况,则可用抽吸的办法迅速导出蒸气。这种办法在冷冻机中已有实用的示例。

(四) EHD 效应^[3]

这是一种主动强化传热技术。利用电气流体力学(EHD)效应强化对流、冷凝和沸腾传热。

EHD 效应,就是在绝缘性良好的流体(如氟里昂)气液界面附近,外加高压电极,当高压电极靠近气液界面的时候,液体被吸向电极,引起气液界面不稳定,并且产生液体在液面突起的现象。利用 EHD 效应,仅靠施加少量外部能量就可获得很好的强化传热效果,且可通过调节附加能量大小来控制强化程度。这不仅是一种新的强化传热技术,就是从传热控制技术方面来看,也是十分引人注目的。

在各类强化传热技术中,工业应用的主流仍然是被动型强化传热技术。为了实现强化传热的目的,通常是从上述各种方法中选取一种既能适合于该工况介质又适应流动特点的方法。但有时,也可将两种或两种以上的方法结合起来应用,即采用“复合强化”的方法,也有可能获得更为理想的效果。

三、几种典型的新型高效换热设备

(一) SRCTM^[3]

SRCTM (Single Row Condenser) 是 Lummus 公司于上世纪 80 年代开发的,直到之后的 90 年代初才应用于新型空冷式透平冷凝器(タービンコンデンザ)中。它采用了一种特殊的超扁平翅片管来强化传热,其基管尺寸为 19mm × 200mm。它将铝制波形翅片附着在管子平面两侧,连接非常牢靠。传热管布置也由过去的多排平行布置改为单排人字形布置(见图 0.2、图 0.3)后,大大减少了管子后面的流动死区。尤其是对空气,使其流线几乎成直线;单排人字形布局还消除了偏流的隐患。采用特殊翅片管和特殊的单排人字形结构之后,使 SRCTM 具有以下特点:

(1) 传热和流动性能优越,可实现设备紧凑化设计;

(2) 没有偏流,不易积垢,抗冻结性能好,适于高寒地带使用(在后面第六节将作专题阐述)。