



全国高等职业教育示范专业规划教材  
热能动力类专业

# 热交换器

RE JIAOHUANQI

王亚荣 田智敏 马洪源 编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

配电子

全国高等职业教育示范专业规划教材  
(热能动力类专业)

# 热 交 换 器

王亚荣 田智敏 马洪源 编

ISBN 978-7-111-28704-8



NLIC2970804860



机械工业出版社

本书参照高等职业院校动力类专业关于“热交换器”教学内容的要求和大纲编写,概括介绍热交换器在国民经济中的地位和作用,重点介绍常用热交换器的分类,各种类型热交换器的工作原理、构造、特点以及应用,并且分别以几种常见的热交换器为例阐述了有关热交换器的运行和维护问题,同时列举了热交换器的有关新技术。

本书可作为高职院校的教学用书,也可作为相关职业资格和岗位技能的培训教材,以及高职学生有关动力类专业的选修课用书,还可以作为从事热交换器相关技术人员的参考用书。

本书配有电子课件,凡使用本书作为教材的教师可登录机械工业出版社教材服务网 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 注册后下载。咨询邮箱: [cmpgaozhi@sina.com](mailto:cmpgaozhi@sina.com)。咨询电话: 010-88379375。

## 图书在版编目(CIP)数据

热交换器/王亚荣,田智敏,马洪源编. —北京:机械工业出版社, 2012. 5

全国高等职业教育示范专业规划教材·热能动力类专业  
ISBN 978-7-111-38246-1

I. ①热… II. ①王…②田…③马… III. ①热交换器-高等职业教育-教材 IV. ①TK172

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 086168 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王海峰 责任编辑:王海峰

版式设计:霍永明 责任校对:陈秀丽

封面设计:鞠杨 责任印制:杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2012 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·9 印张·220 千字

0 001—2 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-38246-1

定价: 19.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

销售二部: (010) 88379649

教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

热交换器作为一种通用设备，在工业生产中应用非常广泛。电力、动力、制冷、冶金、化工、航空、建筑、机械制造、供热、医药及食品等各行各业都离不开热交换器，热交换器在国民经济中占有重要的地位。

高等职业教育肩负着培养面向生产、建设、服务和管理第一线的高技能人才的使命。近年来，我国的高职教育蓬勃发展，为现代化建设培养了大量高素质技能型人才。同时，高职教育的发展也迎来了新的挑战和机遇。为了提高教学质量，实现人才培养目标，高质量的高职配套教材是基本保证。但是，目前市场上关于热交换器的高职教材比较少，于是编者将日常的教学经验和内容汇集到本书中，希望对读者有所帮助。

本书严格执行高职教育人才培养方案，遵循“必须、够用”的原则，力求充分体现高职教育的特色。在编写中既注意到知识内容的科学性和系统性，又考虑到所面对专业的特点和要求。注重理论和实际的结合，内容的取舍和编排努力突出针对性和实用性。本书适用于高职热能动力工程、火电厂集控运行、供热通风与空调、城市供热等专业，既可作为教学用书，也可作为相关职业资格和岗位技能的培训教材，以及高职学生动力类专业的选修课参考用书。

本书由保定电力职业技术学院王亚荣、田智敏、马洪源合编。其中，王亚荣编写绪论、第一章、第二章的第一节至第六节、第十节、第十一节以及第七章，田智敏编写第三章、第五章以及第六章的第一节和第二节，马洪源编写第二章第七节至第九节、第四章以及第六章第三节。

本书由湖南省火电建设公司李维国高级工程师、保定电力职业技术学院赵广然副教授审定，感谢他们对本书的仔细审阅以及提出的宝贵建议。本书在编写过程中，参阅了大量文献资料，还得到了出版社和学院同事们的大力支持，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中肯定存在缺点和不足，敬请读者朋友予以批评指正。

编 者

# 目 录

前言		第十一节 其他形式的间壁式热	
绪论	1	交换器的工作原理及	
第一章 热交换器基础知识	4	构造	81
第一节 热交换器的分类	4	复习思考题	84
第二节 热交换器的基本传热		第三章 混合式热交换器	85
原理	8	第一节 混合式热交换器的工作	
第三节 平均温差	9	原理及构造	85
第四节 传热有效度	15	第二节 混合式热交换器与间壁	
第五节 流体流动方式的选择	19	式热交换器的比较	92
第六节 热交换器的计算方法	21	复习思考题	93
复习思考题	22	第四章 蓄热式热交换器	94
第二章 间壁式热交换器	23	第一节 蓄热式热交换器的工作	
第一节 管壳式热交换器的工作原		原理及构造	94
理及构造	23	第二节 蓄热式热交换器与间壁	
第二节 螺旋板式热交换器的工作		式热交换器的比较	96
原理及构造	44	复习思考题	97
第三节 板式热交换器的工作原理		第五章 热交换器的选型及	
及构造	48	传热强化	98
第四节 板翅式热交换器的工作原		第一节 热交换器的选型	98
理及构造	53	第二节 热交换器的传热强化	105
第五节 翅片管式热交换器的工作		复习思考题	111
原理及构造	58	第六章 热交换器的运行与检修	112
第六节 板壳式热交换器的工作原		第一节 间壁式热交换器的运行与	
理及构造	60	检修	112
第七节 热管热交换器的工作原理		第二节 混合式热交换器的运行与	
及构造	62	检修	119
第八节 蒸发器的的工作原理及		第三节 蓄热式热交换器的运行与	
构造	67	检修	122
第九节 冷凝器的工作原理及		复习思考题	131
构造	72	第七章 新型热交换器的介绍	132
第十节 空气冷却器的工作原		复习思考题	138
理及构造	78	参考文献	139

## 绪 论

热交换器又称换热器，是将某种温度较高的流体的热量以一定的传热方式传递给温度较低的流体的设备。其中至少有两种温度不同的流体参与传热，温度较高的流体（即所谓热流体）放出热量，温度较低的流体（即冷流体）吸收热量。

热交换器是一种通用设备，普遍应用于能源与动力、制冷、化工、冶金、石油、轻工业等行业，在各个生产领域是不可缺少的重要组成部分。例如，热能动力工程中锅炉设备的过热器、省煤器、空气预热器、高压加热器与低压加热器、除氧器、冷水塔；制冷工业中蒸气压缩式制冷的蒸发器、冷凝器；在现代石油化工行业中，热交换器的投资更是占到总投资的30%~40%。另外，依据我国“能源开发与节约并重，把节能放在首位”的基本能源政策，本着“节约为先，效率为本”的根本途径，热交换器的应用又与能源的开发和节能紧密相连。

由此可见，热交换器对企业、能源和应用都非常重要。提高热交换器的传热性能并保障其安全运行，在能源日趋短缺的今天更具有明显的经济效益和社会效益。

### 一、热交换器的选择

热交换器的种类繁多，结构各有不同，每种结构形式的热交换器都有自身的结构特点和工作特性，它在某种情况下使用效果可能是非常好的，但是在另外的情况下使用就不一定合适，甚至根本不能用。因此热交换器的选择直接影响到设备的安全运行和工艺过程的实现。根据热交换器在生产中的地位 and 作用，它应满足不同行业多种多样的要求。但一般来说，基本的选择标准是相通的：

- 1) 满足工艺过程所提出的要求，使热交换强度高，热损失少，在有利的平均温差下工作。
- 2) 要有与温度和压力条件相适应的不易遭到破坏的工艺结构，能够在所要求的工程实际环境下正常工作，热交换器应该具有对工作环境和工作介质的耐腐蚀性，并具有合理的抗结垢能力。
- 3) 设备结构紧凑，单位体积内的传热面积尽可能大。
- 4) 保证较低的流体流动阻力，以减少热交换器的动力消耗。
- 5) 制造简单，安装方便，经济合理，运行可靠。
- 6) 易于维护和维修。

随着科学技术的进步和生产技术的现代化发展，热交换器技术的研究必须满足各种情况特殊而又条件苛刻的要求。热交换器的结构要与生产相适应，流体的种类、流体的运动、设备工作的压力和温度等也都必须满足生产过程的要求。随着高温、高压、高速、低温、超低温等技术在热交换器上的应用，高强度、高效率的紧凑热型交换器也层出不穷。

随着热交换器的发展，对热交换器的基本要求也体现在了新的方面：

- 1) 提高热交换器的制造水平，大力采用新技术、新工艺。



- 2) 迫切需要发展新材料。
- 3) 重视对钢板的预处理工艺。
- 4) 重视管板加工制造技术和焊接工艺。
- 5) 加快对紧凑型热交换器的研究。
- 6) 发展和推广强化传热管技术, 改善结构。
- 7) 重视对热交换器防垢、防腐的研究。
- 8) 研究新型传热强化技术及数值传热技术。

### 二、热交换器的型号表示法

国标规定, 用三个英文字母来表示热交换器主要组成部分的结构形式, 热交换器的型号具体表示方法举例如下:

1) 固定管板式热交换器。封头管箱, 公称直径  $\phi 700\text{mm}$ , 管程设计压力  $2.5\text{MPa}$ , 壳程设计压力  $1.6\text{MPa}$ , 公称换热面积  $200\text{m}^2$ , 较高级碳钢或低合金钢冷拔换热管外径  $\phi 25\text{mm}$ , 管长  $9\text{m}$ , 四管程, 单壳程固定管板式热交换器型号为

BEM700-2.5、1.6-200-9、25-4 I

2) 浮头式热交换器。平盖管箱, 公称直径  $\phi 500\text{mm}$ , 管程和壳程的设计压力均为  $1.6\text{MPa}$ , 公称换热面积  $54\text{m}^2$ , 较高级碳钢或低合金钢冷拔换热管外径  $\phi 25\text{mm}$ , 管长  $6\text{m}$ , 四管程, 单壳程的浮头式热交换器型号为

AES500-1.6-54-6/25-4 I

### 三、换热网络的发展

在实际应用中, 由于工艺的需要, 会要求使用多台热交换器, 由此它们会构成一个由多台热交换器组成的换热网络。在这个网络中, 不仅要考虑单台热交换器的效率问题, 而且要考虑整个网络的匹配问题。对换热网络进行综合优化的目标是: 既能满足冷、热流体的初温和终温的要求, 同时又具有最少的公用工程用量和最少的热交换器台数。

对换热网络的研究主要包括: 换热网络的最优合成, 换热网络的可操作性分析和设计, 换热网络的结构优化, 以及流程模拟等。

### 四、热交换器相关技术的发展

随着热交换器在各行各业的广泛应用, 热交换器相关技术也不断发展和提高, 同时也促进了各种新型高效热交换器的不断推出。

#### 1. 强化技术

各种新型、高效热交换器逐步取代常规产品, 电场动力效应强化传热技术、添加物强化沸腾换热技术、通入惰性气体强化传热技术、微生物传热技术、磁场动力传热技术及纳米流体传热技术等将得到发展。

#### 2. 防腐技术

近年来, 各国在热交换器防腐领域的研究和设计中取得了较为显著的进步。比如阳极保护技术的开发和新型防腐材料的应用都为热交换器的防腐带来了无限生机。另外, 非金属材料的应用也大大提高了热交换器的防腐性能。

### 3. 防结垢技术

热交换器的结垢不仅造成传热效果的降低和输送动力的增加,而且大大减小有效传热面积,从而增大材料浪费,甚至使传热面上发生堵塞而失效。如果定期停止设备进行机械清洗,不但影响生产,而且费时费力。随着人们对结垢机理的深入研究,防止结垢的方法也层出不穷,如采用表面涂层或特殊表面形状、改变流道结构、管内弹簧插入物或清洗球等在线除垢、声波除垢、使用除垢剂等方法。

### 4. 抗振技术

以管壳式热交换器为例,振动会使换热管发生疲劳、磨损,甚至泄漏等事故,造成巨大经济损失。现在已有多种新型壳程支撑结构来抵抗振动。另外,减小管束跨距、加载阻尼器等方法也取得了一定的减振效果。

### 5. 制造技术

制造技术的进步体现在各种加工工艺的成熟和新材料的应用上。

### 6. 大型化和小型化并重

随着成套装置的大型化,热交换器也向大型化的方向发展,大热交换器的传热面积达到万平方米级,同时,航空航天、医疗、材料科学、微电子等领域要求热交换器向小型化方向发展。小型热交换器的主要特点体现在其单位体积内的传热系数很大,其单位体积内的传热系数比普通热交换器的传热系数高1~2个数量级。

### 7. 研究手段

随着科学技术的发展和计算机软、硬件技术的飞速进步,对热交换器的研究手段越来越先进。

总之,热交换器制造水平的提高,新能源的逐步开发和利用、研究手段的日益发展,必将促进热交换器朝着更高效、更经济、更环保的方向发展。





# 第一章 热交换器基础知识

## 第一节 热交换器的分类

热交换器的种类和形式很多，早期的设备，如夹套式热交换器和蛇管式热交换器结构简单，换热面积小，体积较大，传热效率低。随着工艺的发展，在工业生产中出现了一种单位体积内能提供较大传热面积、传热效果较好的设备，即管壳式或列管式热交换器，它以突出的优势，占据了热交换器的主流地位。后来，又逐步出现了板式热交换器等一些新型热交换器。在科学技术大力发展的推动作用下，高强度、高效率的紧凑型热交换器层出不穷，使热交换器的种类更加丰富。基于各种热交换器的用途、工作原理、结构、材料、温度状况，以及其中工作流体的种类、数量、流动方向等差别很大，为了研究和使用方便，一般按照它们的一些共同特征对热交换器进行分类。

### 一、按传热原理的不同分类

按传热原理不同，即依据传热方式不同分类，可以将热交换器分为混合式热交换器、蓄热式热交换器和间壁式热交换器三大类。

#### 1. 混合式热交换器

混合式热交换器又称为直接接触式热交换器，如图 1-1 所示。其工作原理是利用冷、热流体的直接接触与混合来进行热量交换。

混合式热交换器中，接触面积直接影响到传热量的大小。在实际操作中，为了获得较大的接触面积，一般是在设备中放置格栅或填料，有时也将液体喷成细滴。混合式热交换器具有传热效率高、单位容积提供的传热面积大、设备结构简单、价格便宜等优点。但它仅适用于工艺上允许冷、热流体混合的场合。两种温度不同的流体通常一种是气体，另一种是液体。例如，冷水塔、电厂的除氧器、洗涤塔及喷射式减温器等都属于混合式热交换器。下面以冷水塔为例，说明其结构和工作原理。

冷水塔种类很多，根据循环水在塔内是否与空气直接接触，可分为干式冷水塔和湿式冷水塔。干式冷水塔是把循环水送到散热器内被空气冷却，多用于水源奇缺而不允许有水分散失或者循环水有特殊污染的情况。湿式冷水塔则让水与空气直接接触，把水中的热传给空气。

图 1-2 所示为各种类型的湿式冷水塔。图 1-2a 所示为开放式冷水塔，这种形式的冷水塔利用风力和空气的自然对流作用使空气进入冷水塔，冷却效果受到风力和风向的影响，水的散失比较大。图 1-2b 所示为风筒式自然通风冷水塔，它

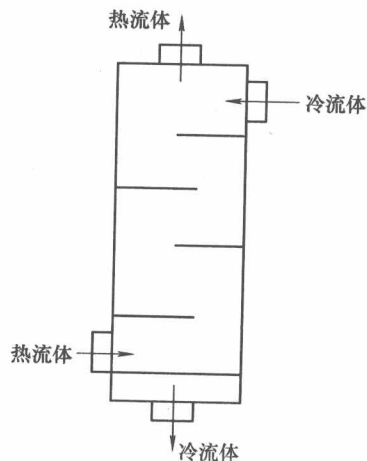


图 1-1 混合式热交换器

利用较大高度的风筒以及空气形成的自然对流，使空气流过塔内与水接触进行传热，它的特点是冷却效果比较稳定。在机械通风冷水塔中，空气是由鼓风机送入（见图 1-2c），或以抽风机吸入的（见图 1-2d、e），它的特点是冷却效果好、稳定可靠，它的淋水密度（淋水密度是指单位时间内通过冷水塔单位截面积的水量）远高于自然通风冷水塔。对于抽风式冷水塔，又可依据热交换区段水和空气的流动方向的不同，分为逆流式（见图 1-2d）和横流式（见图 1-2e）两种。逆流式中水和空气的流动方向相反，横流式中水和空气的流动方向垂直交叉。

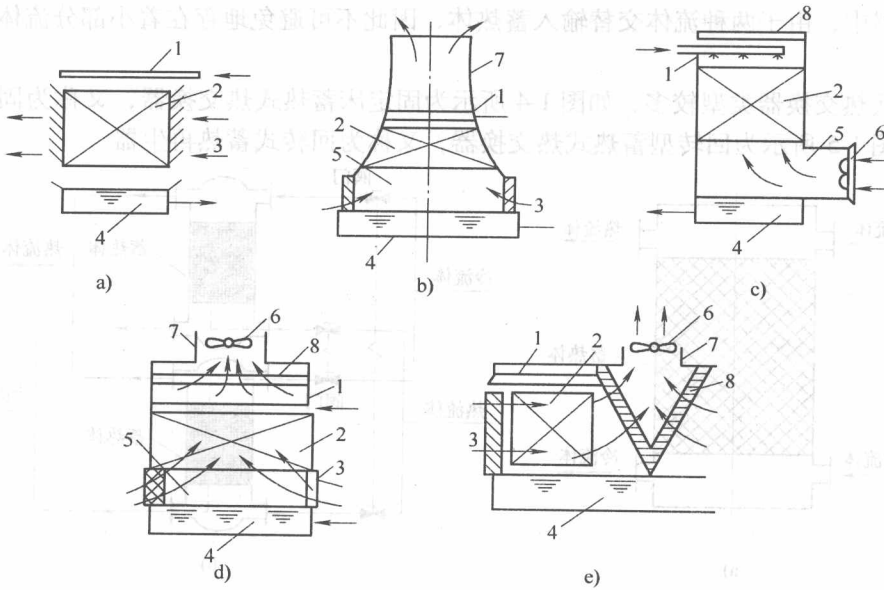


图 1-2 各种类型的湿式冷水塔

- a) 开放式冷水塔 b) 风筒式自然通风冷水塔 c) 鼓风机逆流式冷水塔
- d) 抽风逆流式冷水塔 e) 抽风横流式冷水塔
- 1—配水系统 2—淋水系统 3—百叶窗 4—集水池 5—空气分配区
- 6—风机 7—通风筒 8—收水器

各种形式的冷水塔虽然结构各有不同，但一般都包括淋水系统、配水系统、通风筒三个主要部分。淋水系统的作用是将进入冷水塔需要冷却的水尽可能形成细小的水滴或水流膜，以增加水和空气的接触面积，延长接触时间，促进热交换的进行。配水系统的作用是将热水均匀地分配到整个淋水面积上，从而使淋水系统发挥最大的冷却能力。通风筒是冷水塔的外壳、气流的通道，它的作用是创造良好的空气动力条件，并将排出冷水塔的湿热空气送往高空，减少或避免湿热空气的回流。

## 2. 蓄热式热交换器

蓄热式热交换器又称蓄能式热交换器、回热式或再生式热交换器，如图 1-3 所示。在这类热交换器中，能量传递是通过蓄热体来完成的。蓄热体多由填料或格子砖等构成，两种温度不同的流体轮流通过蓄热体。当热流体流过蓄热体时，热流

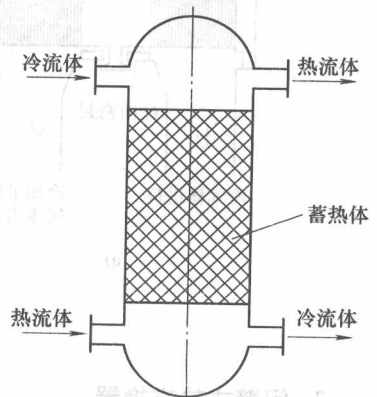


图 1-3 蓄热式热交换器

体放热，把热量积蓄在蓄热体中，蓄热体温度升高；当冷流体通过蓄热体时，冷流体吸热，蓄热体放出热量，温度逐渐降低，如此反复进行，从而达到冷、热流体热交换的目的。

在这种热交换器里所进行的热传递过程不是稳态过程，而是蓄热体被周期地加热和冷却的过程，在此过程中，温度每时每刻都在变化。蓄热式热交换器结构紧凑，价格便宜，单位体积内的传热面积大，比较适合气-气热交换，主要用于存在高温废气而又需要获得高温预热空气的场合，如炼铁厂的热风炉和各式加热炉、电厂的回转式空气预热器等。但是在蓄热式热交换器中，由于两种流体交替输入蓄热体，因此不可避免地存在着小部分流体相互掺混的现象。

蓄热式热交换器类型较多，如图 1-4 所示为固定床蓄热式热交换器，又称为固定床蓄热再生器。图 1-5 所示为回转型蓄热式热交换器，又称为回转式蓄热再生器。

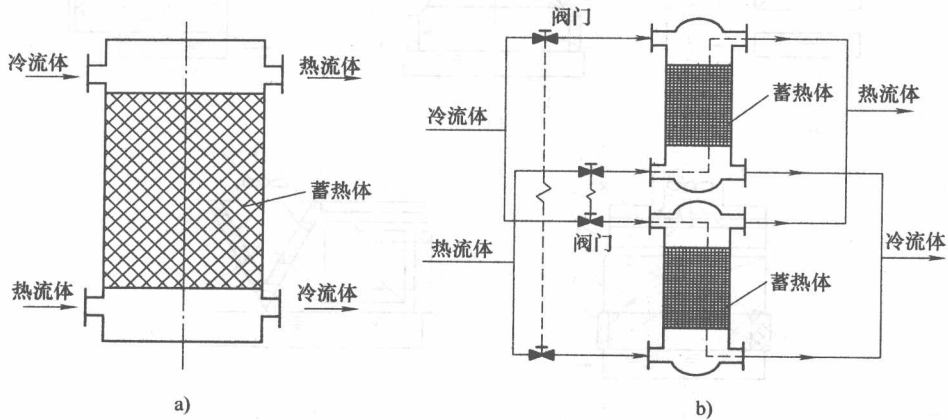


图 1-4 固定床蓄热式热交换器

a) 工作原理图 b) 具有两个蓄热体的形式

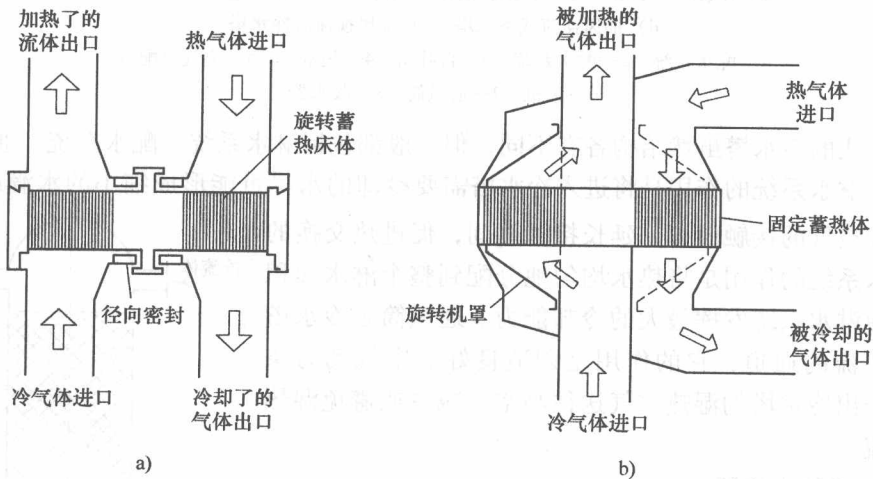


图 1-5 回转型蓄热式热交换器

a) 转子回转型 b) 外壳回转型

### 3. 间壁式热交换器

间壁式热交换器是工业上应用最广泛的一种热交换器，它是两种温度不同的流体分别在固

定壁面，即传热面两侧的空间里流动，通过两侧流体与壁面的对流换热或复合换热（对流换热与辐射换热同时起作用的换热方式）以及壁面内部的导热而进行热量传递的热交换器。在这种热交换器中两种流体不直接接触，热量是通过壁面进行传递的，如图 1-6 所示。

间壁式热交换器的传热面大多采用性能良好的金属，在一些特殊需要防腐的场合，也可用石墨、聚四氟乙烯等非金属材料。

间壁式热交换器的结构形式很多，按传热面的形状和结构不同分类，主要有管式、板式以及其他形式，见表 1-1。间壁式热交换器的具体结构及工作原理详见第二章。

表 1-1 间壁式热交换器的分类

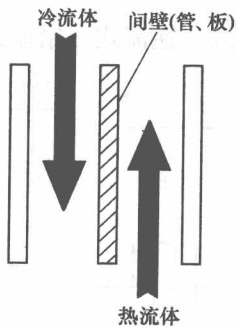
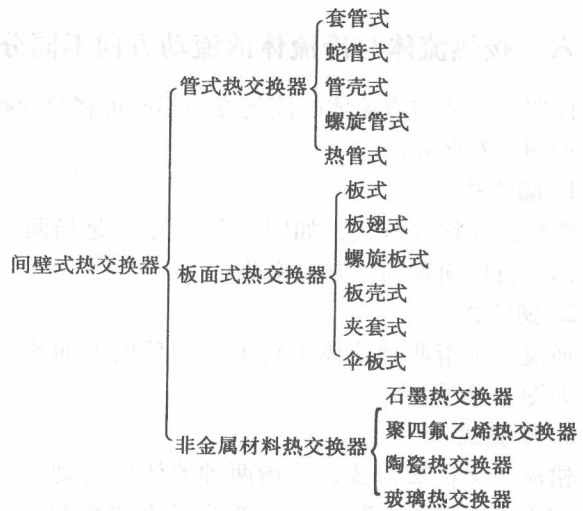


图 1-6 间壁式热交换器的工作原理

## 二、按制造热交换器的材料不同分类

按制造热交换器的材料不同，可以把热交换器分为金属的、陶瓷的、塑料的、石墨的、玻璃的等。金属材料的热交换器以碳钢、不锈钢、铝、铜、镍及其合金较为多见，在生产中使用最为广泛。但是在石油化工、核工业等某些高温高压、剧毒或深冷等工艺条件下，必须采用特殊材料的热交换器，如陶瓷、工程塑料、石墨或玻璃等，或者采用一些稀有金属。

## 三、按用途不同分类

按用途不同可以把热交换器分为预热器、加热器、过热器、蒸发器、再沸器、冷却器、冷凝器、深冷器等。

## 四、按温度状况不同分类

按温度状况不同可将热交换器分为温度工况稳定与温度工况不稳定两种。温度工况稳定的热交换器，单位热流量的大小以及在指定热交换区域内的温度不随时间的变化而变化；温度工况不稳定的热交换器，单位热流量和温度都随时间的变化而改变。

## 五、按流体的相态不同分类

按热交换器中流体的相态不同分类，可将热交换器分为气—液、液—液、气—气热交换

器三大类。

### 1. 气—液热交换器

大部分气—液热交换器都是翅片管式紧凑型热交换器，液体走管内。例如，散热器、汽车的水冷式发动机等。

### 2. 液—液热交换器

大部分液—液热交换器都是管壳式的。液体侧换热的基本方式是强制对流换热。

### 3. 气—气热交换器

这种热交换器一般用在尾气—空气预热热交换器、中间冷却器、后冷却器等。

## 六、按热流体与冷流体的流动方向不同分类

按照热流体与冷流体的流动方向不同可将热交换器分为顺流式、逆流式、错流式和混流式，如图 1-7 所示。

### 1. 顺流式

顺流式又称并流式，如图 1-7a 所示，是指两种流体平行地向着同一方向流动。

### 2. 逆流式

逆流式是指两种流体平行地向相反的方向流动，如图 1-7b 所示。

### 3. 错流式

错流式又称叉流式，是指两种流体的流动方向互相垂直，如图 1-7c 所示。当交叉次数在四次以上时，可以根据两种流体流向的总趋势将其看成逆流（见图 1-7d）或将其看成顺流（见图 1-7e）。

### 4. 混流式

混流式是指两种流体在流动过程中既有顺流又有逆流，如图 1-7f 和图 1-7g 所示。

总之，热交换器的种类繁多，分类方法也不一样，上述是一些最常见的分类方法。

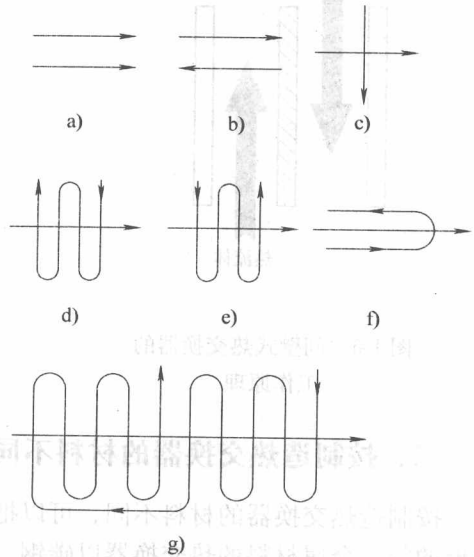


图 1-7 流体的流动方向

- a) 顺流式 b) 逆流式 c) 错流式  
d) 总趋热逆流式 e) 总趋热顺流式 f)、g) 混流式

## 第二节 热交换器的基本传热原理

热交换器的发展为传热学提供了日渐广泛而深刻的研究课题，而传热学的研究又为热交换器在传热性能和设计方面提供了切实有效的理论依据和计算方法。本节主要介绍热交换器设计中热力计算部分的基本传热原理。

热力计算是热交换器设计与计算的基础，分为设计性热力计算和校核性热力计算两种。设计性热力计算的目的在于确定热交换器的传热面积；而校核性热力计算的目的是针对已有的热交换器，确定流体的出口温度，并了解其在非设计工况下的性能变化，判断是否能够完成非设计工况下的热交换任务。两种热力计算所采用的基本传热原理是一致的，即两个基本

方程式：传热基本方程式和热平衡方程式。

### 一、传热基本方程式

$$\Phi = KA \overline{\Delta t} \quad (1-1)$$

式中  $\Phi$ ——热负荷 (W);

$K$ ——整个传热面上的平均传热系数 [ $W/(m^2 \cdot K)$ ];

$A$ ——传热面积 ( $m^2$ );

$\overline{\Delta t}$ ——冷、热流体间的平均温差 (K 或  $^{\circ}C$ )。

### 二、热平衡方程式

如果不考虑散热损失, 在热交换器中, 冷流体所吸收的热量与热流体所放出的热量相等, 也等于传热过程中所传递的热量。这时, 热平衡方程为

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi \quad (1-2)$$

$$\Phi_1 = q_{m1} c_1 (t_1' - t_1'') \quad (1-3)$$

$$\Phi_2 = q_{m2} c_2 (t_2'' - t_2') \quad (1-4)$$

由于  $\Phi_1 = \Phi_2$ , 则

$$q_{m1} c_1 (t_1' - t_1'') = q_{m2} c_2 (t_2'' - t_2') \quad (1-5)$$

式中  $\Phi_1$ ——热流体所放出的热量 (W);

$\Phi_2$ ——冷流体所吸收的热量 (W);

$q_{m1}$ ——热流体的质量流量 (kg/s);

$q_{m2}$ ——冷流体的质量流量 (kg/s);

$c_1$ ——热流体在进、出口温度范围内的平均比定压热容 [ $J/(kg \cdot K)$ ];

$c_2$ ——冷流体在进、出口温度范围内的平均比定压热容 [ $J/(kg \cdot K)$ ];

$t_1', t_1''$ ——热流体在热交换器中的进、出口温度 (K);

$t_2', t_2''$ ——冷流体在热交换器中的进、出口温度 (K)。

令  $C = q_m c$ ,  $C$  称为热容, 表示流体的温度每改变 1K 所需要的热量 (W/K), 由式 (1-5) 可知, 在热交换器内, 两种流体的温度变化与它们的热容成反比。

任何实际的热交换过程都存在散热损失, 如果考虑散热损失, 热平衡方程式应该写成

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi' \quad (1-6)$$

式中  $\Phi'$ ——散热损失 (W)。

## 第三节 平均温差

### 一、流体的温度分布

由于冷、热流体在热交换器内流动的过程中分别吸收和放出热量, 因此它们的温度不一定保持不变。图 1-8 所示为流体平行流动时的温度分布, 图中纵向表示温度大小, 横向表示传热面。



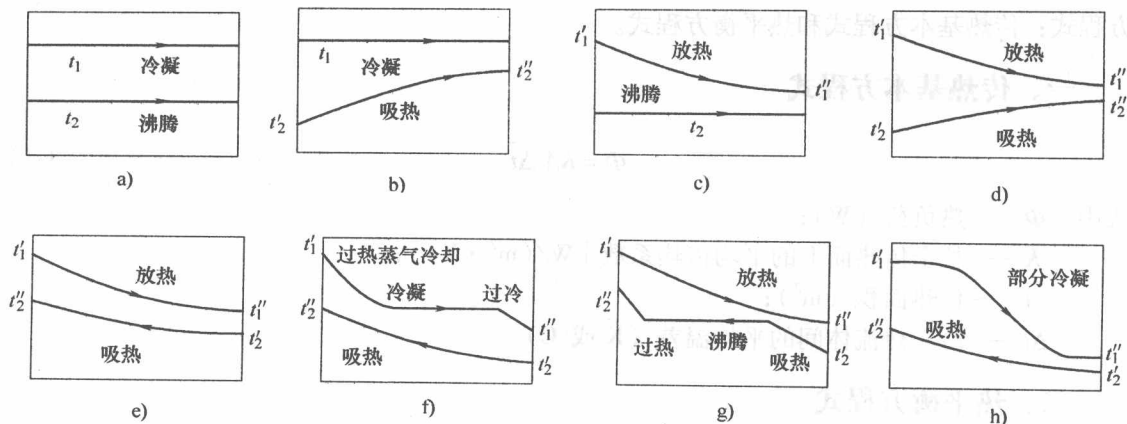


图 1-8 流体平行流动时的温度分布

- a) 两种流体都有相变 b) 热流体有相变 c) 冷流体有相变 d) 顺流, 无相变 e) 逆流, 无相变  
f) 热流体冷却、冷凝、过冷 g) 冷流体吸热、沸腾、过热 h) 可凝蒸气和非凝结性气体混合物的冷凝

热交换器如果一侧为蒸气冷凝, 而另一侧为液体沸腾, 则两种流体都伴随有相变。因为冷凝和沸腾都是在等温下进行的, 故两种流体的温度在整个传热面上各自保持不变, 传热温差也在各处保持相同的数值, 如图 1-8a 所示。如果热流体在等温下冷凝而将其热量传给温度沿着传热面不断提高的冷流体, 其传热温差则从进口端的  $\Delta t' = t_1 - t_2'$  变化到出口端的  $\Delta t'' = t_1 - t_2''$ , 如图 1-8b 所示。与之相应的另一种情况, 是冷流体在等温下沸腾, 而热流体的温度沿传热面不断降低, 其传热温差从进口端的  $\Delta t' = t_1' - t_2$  变化到出口端的  $\Delta t'' = t_1'' - t_2$ , 如图 1-8c 所示。上述几种情况还有另外一个共同的特点, 即对于每种情况, 无论流动方式为顺流还是逆流, 冷、热流体的温度差沿整个传热面的变化情况是一样的, 无所谓顺流还是逆流。

热交换器中相对遇到情况最多的还是两种流体都没有发生相变, 此时必须得注意区分顺流和逆流。图 1-8d 所示为顺流的情形, 两种流体向着同一方向平行流动。热流体的温度沿着传热面不断降低, 冷流体的温度沿着传热面不断升高。两者的温差从进口端的  $\Delta t' = t_1' - t_2'$  变化到出口端的  $\Delta t'' = t_1'' - t_2''$ 。逆流的情形如图 1-8e 所示, 两种流体以相反的方向平行流动, 传热温差从一端的  $t_1' - t_2''$  变化到另一端的  $t_1'' - t_2'$ 。

图 1-8f 所示为过热蒸气 (温度高于所在压力对应的饱和温度的蒸气) 进入热交换器, 在其中首先冷却到饱和温度, 然后在等温下冷凝, 在凝结液离开热交换器之前还产生液体的过冷 (温度低于所在压力对应的饱和温度)。冷流体可以是顺流或逆流通过, 传热温差的变化如图 1-8f 所示, 情形更为复杂。与之对应, 图 1-8g 所示为冷流体在液态情况下进入热交换器吸热、沸腾、过热的情况。图 1-8h 所示为热流体由可凝蒸气和非凝结性气体组成时的情况, 温度变化也相当复杂。

综上所述可见, 一般情况下, 热交换器内沿传热面两种流体之间的传热温差都是变化的, 因此在热交换器的热力分析中必须采用平均温差, 如式 (1-1) 传热基本方程式中的  $\Delta \bar{t}$ 。

所谓平均温差, 是指整个热交换器传热面各处冷、热流体温差的平均值。根据采用的平均方法不同, 有算术平均温差、对数平均温差等表示方法。

## 二、顺流和逆流情况下的平均温差

假设条件：

- 1) 两种流体的质量流量和比热容在整个传热面上保持定值。
- 2) 传热系数在整个传热面上不变。
- 3) 热交换器没有热损失。
- 4) 沿管子的轴向导热可以忽略。
- 5) 同一种流体从进口到出口的流动过程中，不能既有相变，又有单相对流换热。

图 1-9 所示为顺流时热交换器中流体温度的变化，图 1-10 所示为逆流时热交换器中流体温度的变化，两图中纵向表示温度大小，横向表示传热面。

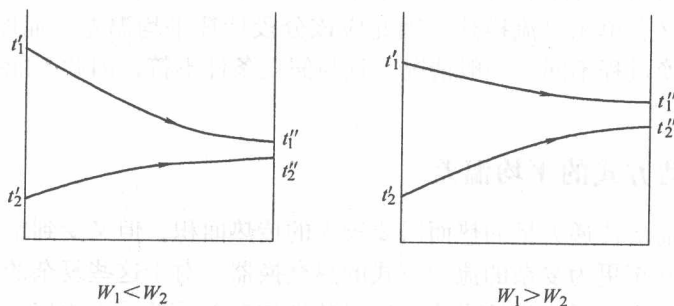


图 1-9 顺流时热交换器中流体温度的变化

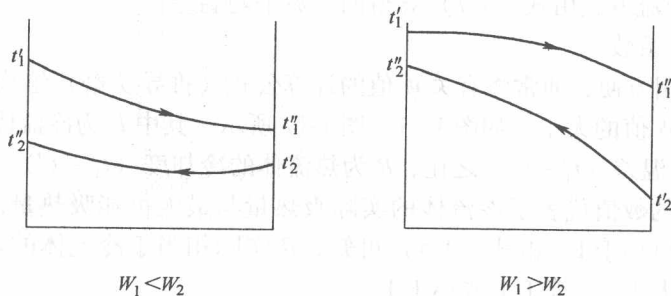


图 1-10 逆流时热交换器中流体温度的变化

由图 1-9 和图 1-10 可见，在顺流时，不论热、冷流体的热容  $W_1$ 、 $W_2$  值的大小如何，在热流体从进口到出口的方向上，两流体间的温差  $\Delta t$  总是不断减小的；而对于逆流，沿着热流体进口到出口的方向上，当  $W_1 < W_2$  时， $\Delta t$  不断减小；当  $W_1 > W_2$  时， $\Delta t$  不断增大。但对于顺流和逆流，均可适用的平均温差计算公式为（推导过程略）

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}} \quad (1-7)$$

式中  $\Delta t_{\max}$ ——传热面两端冷、热流体温差  $\Delta t'$  和  $\Delta t''$  中的较大值 (°C);  
 $\Delta t_{\min}$ ——传热面两端冷、热流体温差  $\Delta t'$  和  $\Delta t''$  中的较小值 (°C)。

式 (1-7) 中包含了对数项, 因此称这种平均温差为对数平均温差。实践证明, 对数平均温差的计算误差较小。

如果  $\Delta t_{\max}/\Delta t_{\min} < 2$ , 即流体的温度沿传热面变化不太大时, 也可用算术平均的方法计算平均温差, 并称之为算术平均温差, 即

$$\bar{\Delta t} = \frac{\Delta t_{\max} + \Delta t_{\min}}{2} \quad (1-8)$$

对于图 1-8b 和 1-8c 所示的热交换器, 由于有一种流体在相变的情况下进行传热, 它的温度沿传热面不变, 因此在平均温差的计算上无顺流和逆流的区别,  $\Delta t_{\max}$  恒在无相变流体的进口处,  $\Delta t_{\min}$  恒在无相变流体的出口处。对于图 1-8f 和图 1-8g 所示的热交换器, 由于都有一种流体既有相变又有单相对流换热, 因此应该分段计算平均温差。而图 1-8h 所示的热交换器, 由于其热交换过程不同于一般情况, 且与假设条件不符, 因此不能按上述方法计算其平均温差。

### 三、其他流动方式的平均温差

工程上, 由于需要传递大量的热而需要较大的传热面积, 但又受到空间的限制, 因此要采用多流程、错流甚至更为复杂的流动方式的热交换器。对于这些复杂的流动方式, 常将热交换器依流体的进、出口温度先按逆流算出对数平均温差, 然后再用修正系数修正, 修正系数是考虑流动方式不同于逆流而引入的, 即

$$\bar{\Delta t} = \psi \bar{\Delta t}_{\text{逆}} \quad (1-9)$$

式中  $\bar{\Delta t}_{\text{逆}}$ ——按逆流方式由式 (1-7) 算得的对数平均温差;  
 $\psi$ ——修正系数。

工程上, 为使用方便, 通常将有关  $\psi$  值的计算公式 (推导从略) 绘成线图, 根据  $P$ 、 $R$  值的大小即可查出  $\psi$  值的大小, 如图 1-11 ~ 图 1-17 所示。其中  $P$  为冷流体的加热度 ( $t_2'' - t_2'$ ) 与两流体的进口温差 ( $t_1' - t_2'$ ) 之比,  $R$  为热流体的冷却度 ( $t_1' - t_1''$ ) 与冷流体的加热度 ( $t_2'' - t_2'$ ) 之比。 $P$  的数值代表了冷流体的实际吸热量与最大可能吸热量的比值, 该比值称为温度效率, 该值恒小于 1。由式 (1-5) 可知,  $R$  实际相当于冷流体的热容与热流体的热容之比, 其值可以大于 1、等于 1 或小于 1。

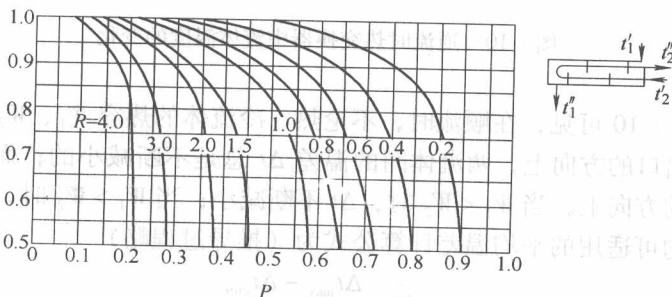


图 1-11 <1-2> 型热交换器的  $\psi$  值