

换热器原理及计算

朱聘冠

清华大学出版社

内 容 提 要

本书介绍换热器的工作原理、基本结构、工作特性及设计计算方法。从理论结合实际和换热器技术发展的要求出发，主要介绍了对流换热各种工况的计算方法，有相变（凝结和沸腾）的换热原理和计算，换热过程和换热器的强化原理和研究成果，各种类型换热器的结构、工作特性及传热计算，并结合例题对典型换热器的设计方法作了较详细的论述。每章附有习题和思考题，书后附录了有关图表和数据。

本书可供大专院校有关专业师生参考，也可供化工、石油、动力、原子能、食品、轻工、冶金、建筑等部门从事换热器设计、研究、和生产的技术人员参考。

换热器原理及计算

朱聘冠 编著

☆

清华大学出版社出版

（北京清华园）

北京海淀吴海公司印刷厂排版

北京海淀吴海公司印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

☆

开本：787×1092 1/16 印张：25 $\frac{1}{8}$ 字数：643千字

1987年7月第1版 1987年7月第1次印刷

印数：0001—5000

书号：15235·290

定价：4.50 元

序

我们正面临着新的技术革命和社会信息化的时代。能源是影响经济发展战略决策的重要问题。我国当前的经济改革形势正在蓬勃发展，改革的目的是深挖潜力以发展生产，加速社会主义四化建设的进程，实现 2000 年的宏伟目标。随着城乡经济改革的不断深入，作为战略重点之一的能源问题势必日益引起人们的重视。其中心问题是如何便于合理使用和综合利用能源，不断提高能量有效利用率。

换热器是各种工业部门最常见的通用热工设备之一。换热器不仅是保证工艺流程和条件所广泛使用的设备，也是开发利用工业二次能源、实现热回收和节约能源的主要设备。然而长期以来，由于在我国缺乏能耗的观点，沿用迄今的换热器很多已失诸陈旧，甚至还没有专设的重点生产厂家。有关的专业著作也较缺乏。这显然不能适应更新技术的发展需要。

朱聘冠同志根据这几年在清华大学热能工程系多次开设专门课的教学经验，将原编写的试用教材“对流换热和换热器”整理修改成本书，由清华大学出版社公开出版，以供高校有关专业师生作教学参考。其内容也可兼供科技人员更新设计、制造和运行维护换热器的工作参考。值此付稿之际，愿略书数语，算是简单的介绍。

王补宣

1985.4

前言

换热器作为通用工艺设备，在化工、石油、动力、原子能、食品、轻工等许多工业部门有着广泛的应用。出于不同的使用目的和工艺要求，换热器的型式很多而且仍在不断发展。当前，为了适应我国四个现代化的需要，无论从有关工业本身的发展或从能源的开发、利用和节约来看，对换热器都提出了更高的要求。

编写本书的目的首先是为了放宽专业面、扩大知识面的教学改革需要，同时也考虑了从事实际工作的同志学习和设计计算的需要。

鉴于我国目前为换热器专门编写的书籍较少，把传热原理和换热器结构及工艺计算结合在一起的书籍尤其缺乏，本书在内容上除第四章介绍了各种类型换热器的结构和工作特性及传热计算外，在第一章介绍了换热器的对流换热原理并提供了各种工况下的常用计算公式；为了掌握冷凝器、蒸发设备或余热锅炉的原理和计算，本书第二章专门论述了相变换热的问题；为了适应换热器日益向大容量、高参数、微型化和高效能发展的需要，本书第三章对换热器强化的原理和方法作了综合性的分析和介绍；限于篇幅和避免过于繁琐，本书第五章介绍换热器设计时，不可能对每一种型式的换热器整体设计作逐一介绍，而只是对典型的管壳式换热器的设计作了较详细的论述，编者认为，在掌握了管壳式换热器设计的原则、思路和方法以及本书前四章知识后，不难在参考有关资料后掌握其它型式换热器的设计方法。为了开阔眼界和了解换热器技术的发展，本书第四章中还对某些新型换热器和高效换热元件“热管”的结构和特性作了概括的简介。

本书采用国际单位制，考虑到目前我国处于工程单位制向国际单位制过渡阶段，除书后附录单位换算表外，对某些工程单位制的公式和线图都经过了换算或标出了换算系数；由于我国现行国际单位制中水蒸汽表中压力的单位为 bar (10^5N/m^2)，加之 bar 与现用工程单位制中的 atm (kg/cm^2) 十分接近，因而本书中压(强)力单位除用 Pa (N/m^2) 外，更多地用了 bar 。

本书编写中承王补宣教授指导并作序，任泽濡教授认真审阅了全书并提出了许多宝贵意见，李宁同志为本书的绘图、抄写和复制等做了很多工作，编者在此表示由衷的感谢。已故的张九洲同志为本书的绘图工作付出了辛勤的劳动，编者对他深表怀念。

本书可供大专院校有关专业的师生参考，也可供有关工程、科技工作人员参考。

限于编者水平，书中如有谬误或欠妥之处，欢迎读者指正。

朱聘冠

1985年4月于清华大学

主要符号表

A 通道的横断面积,	m^2	半径, 球半径,	m
吸收率,	—	r 单位面积热阻,	$m^2 \cdot ^\circ C/W$
a 肋(翅)片的断面积,	m^2	r _d 污垢热阻,	$m^2 \cdot ^\circ C/W$
流通面积,	m^2	汽化潜热,	kJ/kg
B 折流板板间距,	m	半径,	m
b 管板厚度,	mm	s 有效辐射层厚度,	m
c _p 定压重量比热,	$kJ/kg \cdot ^\circ C$	管间距,	m
D 壳体直径,	mm	T 物体的绝对温度,	K
d 管径,	mm	t 物体的摄氏温度,	$^\circ C$
d _e 通道当量直径,	mm	U 润湿周长,	m
E 物体的辐射力,	W/m^2	V 容积,	m^3
E 材料的弹性模量,	N/m^2	v 比容积,	m^3/kg
F 传热面积,	m^2	W 质量流速,	$kg/m^2 \cdot s$
F _w 汽泡所受惯性力,	N	w 流速,	m/s
f 摩擦系数,	—	x 热力学含汽量,	kg/kg
汽化频率,	$1/s$	Y 麻花铁的扭曲比,	—
G 质量流量,	kg/s	α 导温系数,	m^2/s
g 重力加速度,	m/s^2	材料的线胀系数,	$1/^\circ C$
H 高度,	m	β 体积膨胀系数,	$1/K$
Nm^3 标准立方米, 气体容积单位		Γ 冷凝负荷,	kg/ms
h 对流换热系数,	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	δ 厚度, 间隙尺寸,	mm
h _r 辐射换热系数,	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	ε 黑度,	—
h _d 污垢系数,	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	ξ 圆管阻力系数,	—
I 气体的焓,	kJ/kg	η 肋(翅)片效率,	—
i 液体、蒸汽的焓,	kJ/kg	λ 波长,	μm
j _h 传热因子,	—	μ 动力粘度,	$Pa \cdot s$
K (总) 传热系数,	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	ν 运动粘度,	m^2/s
k 导热系数,	$W/m \cdot ^\circ C$	ρ 质量密度,	kg/m^3
L 特征尺寸, 长度,	m	σ 表面张力,	N/m
l 长度,	m	σ_0 黑体的辐射常数,	$W/(m^2 \cdot K^4)$
M 分子量,	—	$[\sigma]$ 许用应力,	Pa
N _t 管子总数,	—	τ 时间,	s
N _c 冷凝液流股数, 旁路挡板对数,	—	ϕ 温差校正系数,	—
n _t 管程数,	—	ψ 角度,	度或弧度
n _c 壳程数,	—	ω 冲刷系数,	—
P 压力,	Pa 或 bar		
Q 热流量,	W	下标	
q 热流密度,	W/m^2	e 当量值	
R (总) 热阻,	$^\circ C/W$	f 流体平均温度定性	
		g 气体	

- i 内部
- l 液体, 凝液
- m 膜平均温度定性
- o 外部
- s 饱和状态, 壳程
- t 管程
- w 壁面温度定性
- x 局部值
- ∞ 尺寸趋于无穷大时的值或远离壁面处之值

无因次数

$$Nu = \frac{hL}{k}$$

努塞尔数

$$Bi = hd/2\beta k,$$

毕屋数

$$Gr = \beta g \Delta t L^3 \rho^2 / \mu^2,$$

葛拉晓夫数

$$Gz = \frac{\pi}{4} Re Pr (d/L),$$

格雷茨数

$$Pe = Re \cdot Pr,$$

皮克莱数

$$Pr = \mu c_p / k$$

普朗特数

$$Re = wd/\nu = wd\rho/\mu,$$

雷诺数

$$Ra = Gr \cdot Pr,$$

雷莱数

$$St = Nu/Pr Re = h/\rho w c_p,$$

斯坦敦数

缩写词组

- CHF, critical heat flux 临界热流密度或称传热危机,
- DNB, departure from nucleate boiling 偏离核态沸腾或膜态沸腾,
- ONB, outset of nucleate boiling 开始核沸腾或始沸点.

目 录

序

前言

主要符号表

第一章 对流换热基础	1
§ 1-1 传热过程概述	1
§ 1-2 影响对流换热的因素	7
§ 1-3 对流换热的求解途径	14
§ 1-4 单相流体自然对流换热计算	18
一、大空间自然对流	16
二、有限空间的自然对流	20
§ 1-5 单相流体强制对流换热计算	23
一、平壁上的对流换热	23
二、管内对流换热	24
三、环状通道内的对流换热	29
四、液态金属的对流换热	31
五、外部横掠单管和管束的对流换热	31
§ 1-6 混合对流换热	37
§ 1-7 对流-辐射综合换热	40
习题	56
第二章 相变换热	58
§ 2-1 凝结换热分析	58
§ 2-2 凝结换热计算	62
一、单一饱和蒸汽的冷凝	62
二、过热蒸汽的冷却和冷凝	69
三、冷凝液的过冷	70
四、混合蒸汽的冷凝	71
五、冷凝器的设计	72
§ 2-3 沸腾换热概述	79
一、液体汽化的方式	79
二、沸腾的类型	80
三、沸腾换热特点及应用	81
§ 2-4 汽泡形成的过程与条件	81
一、汽泡形成的过程	82
二、汽泡形成的条件	84

§ 2-5 池沸腾	88
一、池沸腾曲线	88
二、池沸传热计算	89
§ 2-6 管内沸腾两相流型的换热特点及沸腾图	97
§ 2-7 管内沸腾计算	102
一、不同换热区域的划分	102
二、换热系数的计算	105
三、临界热负荷和恶化含汽量的计算	110
四、管壁温度的计算	115
五、水平管内沸腾传热特点	117
§ 2-8 影响沸腾换热的因素	120
习题	121
第三章 换热器传热过程的强化	123
§ 3-1 强化传热的途径	123
一、加大传热系数	124
二、加大平均温差	126
三、采用高效能传热面	128
四、评价传热强化的方法	131
§ 3-2 单相对流换热强化的一般分析	131
一、自然对流换热强化分析	131
二、强制对流换热强化分析	133
§ 3-3 加大扰动强化对流换热的方法	135
一、搅拌	135
二、受热面振动	138
三、流体的脉动或振动	138
四、静电场强化传热	138
五、加装折流板	139
六、粗糙壁面	141
七、添加物	144
八、旋转流动	149
§ 3-4 添加剂强化换热	150
一、气流中加入少量固体细粒	150
二、液体中加入固体细粒	152
三、气流中喷入液滴	153
§ 3-5 凝结换热和冷凝器的强化	154
一、不断排除不凝性气体或提高蒸汽流速	154
二、加装中间泄液装置	154
三、蒸汽喷注壁面	155
四、控制冷却介质流速或换热系数	155

五、控制冷凝负荷·····	155
六、珠状凝结·····	155
七、高效能冷凝面·····	156
八、流体振动和电磁场作用·····	159
§ 3-6 沸腾换热的强化和恶化的防止·····	159
一、合理选择参数·····	159
二、薄膜蒸发·····	160
三、采用粗糙壁面—螺纹管等·····	160
四、添加物扰流器—麻花铁等·····	161
五、表面处理·····	162
六、添加剂·····	163
七、外力场作用·····	163
习题·····	164
复习思考题·····	164
第四章 换热器的结构和特性 ·····	166
概述·····	166
§ 4-1 管壳式换热器·····	166
一、固定管板式换热器·····	167
二、浮头式换热器·····	167
三、U 形管式换热器和套管式换热器·····	167
§ 4-2 翅片管和翅片管换热器·····	169
一、翅片管的结构·····	169
二、翅片管的工作特性·····	171
三、翅片管的应用·····	171
四、翅片管的传热计算·····	172
§ 4-3 板式换热器·····	191
一、基本结构·····	191
二、工作特点和应用场合·····	193
三、传热计算·····	193
§ 4-4 螺旋板换热器·····	198
一、结构·····	198
二、工作特点和应用·····	200
三、结构设计要点·····	202
四、传热计算·····	204
§ 4-5 板翅式换热器·····	205
一、构造和工作原理·····	205
二、工作特点·····	207
三、结构设计要点·····	208
四、传热计算和阻力计算·····	210

§ 4-6 板壳式换热器	213
一、构造和工作原理	213
二、工作特点	214
三、结构设计问题	215
§ 4-7 蓄热式换热器	216
一、结构和工作原理	216
二、回转式空气预热器的工作特性	218
三、设计计算问题	218
§ 4-8 直接接触式换热器	228
一、工作特点和传热原理	228
二、混合式换热器的型式及应用	229
§ 4-9 热管	234
一、热管的结构	235
二、热管工作原理和传热过程	236
三、热管的工作特点及应用	238
四、热管计算	240
§ 4-10 特殊型式的换热器简介	244
一、多孔换热器	244
二、离心式换热器	246
三、石墨换热器	246
四、聚四氟乙烯换热器	247
五、玻璃换热器	248
六、稀有金属换热器	248
习题	249
复习思考题	250
第五章 换热器设计	251
§ 5-1 概述	251
§ 5-2 管壳式换热器的标准和基本参数	252
§ 5-3 操作条件的确定	253
一、流速和允许压降的选取	253
二、介质压力、温度和换热终温的决定	256
三、平均温差的决定	257
四、管程和壳程介质的确定	257
§ 5-4 管壳式换热器的结构设计	253
一、管子设计	258
二、管板设计	261
三、管箱和管程分程	263
四、壳体、壳侧分程和折流板的设计	267
五、分流换热器的采用	274

六、进、出口管的设计	275
§ 5-5 管壳式换热器的热补偿问题	278
一、热补偿的概念	278
二、热补偿的方式和措施	279
三、温差应力的计算	281
四、管子拉脱力的计算	284
§ 5-6 换热器振动问题	284
一、振动的危害及起因	284
二、对付振动的措施	285
§ 5-7 换热器的蚀损问题	286
一、蚀损的种类	286
二、金属腐蚀的原因与类型	286
三、对付腐蚀的措施	287
§ 5-8 高温高压管壳式换热器的设计特点	288
一、型式选择	289
二、结构设计问题	290
三、材料选用	292
§ 5-9 换热器设计中的污垢问题	292
一、污垢的影响	292
二、污垢的种类、形成及处理方法	293
三、污垢热阻或污垢系数	293
§ 5-10 管壳式换热器的传热计算	294
一、热流量计算	294
二、传热系数和总热阻的计算	294
三、换热系数的计算	296
四、定性温度及壁面温度的计算	302
§ 5-11 管壳式换热器压降计算	303
一、管程压降计算	303
二、壳程压降计算	304
§ 5-12 管壳式换热器设计中的合理调整	306
一、管程流体流态的调整	306
二、壳程流体流态的调整	306
三、管、壳程换热系数的比较	306
四、管、壳程压降的比较	308
§ 5-13 管壳式换热器的热力计算	308
一、对换热器计算的研究	308
二、换热器计算的一般程序	309
三、管壳式换热器计算示例	310
§ 5-14 套管式换热器的设计	321

一、结构	321
二、工作特点和应用	322
三、结构设计	322
四、换热系数的计算	323
五、平均温差的计算	323
六、压降计算	324
§ 5-15 传热单元数法	325
一、换热器效能和传热单元数	325
二、 E 和 NTU 的关系	325
三、 $E-NTU$ 法和 $LMTD$ 法的比较	329
习题	331
复习思考题	332
附录	333
附录 1 常用单位制及其换算表	333
附录 2 干空气的热物理性质	335
附录 3 烟气的热物理性质	336
附录 4 气体的热物理性质	336
附录 5 干饱和水蒸汽的热物理性质	338
附录 6 饱和水的热物理性质	339
附录 7 几种饱和液体的热物理性质	340
附录 8 常用固体材料的热物理性质	341
附录 9 指数函数和双曲函数表	342
附录 10 温差校正系数 ϕ	343
附录 10-1 多程折流式换热器 ϕ 值	343
附录 10-2 错(交)流式换热器 ϕ 值	347
附录 10-3 烟道中受热面 ϕ 值	349
附录 11 物体的黑度	352
附录 11-1 常用材料的黑度	352
附录 11-2 低温下某些材料的黑度	353
附录 12 估算传热系数的参考数据	354
附录 12-1 管壳式换热器的传热系数	354
附录 12-2 套管式换热器的传热系数	355
附录 12-3 板式换热器的传热系数	355
附录 12-4 螺旋板式换热器的传热系数	355
附录 12-5 一侧或两侧为气体的换热设备	356
附录 13 污垢热阻	357
附录 13-1 污垢层导热系数	357
附录 13-2 水的结垢热阻	357
附录 13-3 一些液体的污垢热阻	358

附录 13-4 气体及蒸汽的污垢热阻	358
附录 13-5 概略判断结水垢的 A 、 B 、 C 、 D 数值	358
附录14 壳程压降结垢影响校正系数	359
附录15 当量直径计算方法	360
附录16 固定管板式换热器基本参数	361
附录17 浮头式换热器基本参数	363
附录18 浮头式冷凝器系列基本参数	371
附录19 升温降压表	371
附录20 换热器管板设计中管数计算表	372
附录21 固定管板式换热器管板图及尺寸	374
附录 21-1 固定管板式换热器管板图	374
附录 21-2 固定管板式换热器管板尺寸	375
附录22 浮头式换热器固定管板图及尺寸	377
附录 22-1 浮头式换热器固定管板图	377
附录 22-2 管径 $\phi 25$ 的浮头式换热器固定管板尺寸	377
附录23 管径 $\phi 19$ 的浮头式换热器固定管板尺寸	379
附录24 浮头式换热器浮动管板图及尺寸	381
附录 24-1 浮头式换热器浮动管板图	381
附录 24-2 管径 $\phi 25$ 的浮头式换热器浮动管板尺寸	381
附录25 管径 $\phi 19$ 的浮头式换热器浮动管板尺寸	383
参考文献	385

第一章 对流换热基础

§1-1 传热过程概述

按热力学第二定律,有温差就有热量传递。传热现象在自然界普遍存在。在工程技术领域中,掌握传热体系内的传热量和温度分布最具实际意义。对于无内热源的稳定传热过程,传热量(Q 或 q)和传热温差 Δt 的关系可表示为下列一般形式:

$$Q = qF = \Delta t / R \quad \text{W} \quad (1-1)$$

$$\text{或} \quad q = Q/F = \Delta t / r \quad \text{W/m}^2 \quad (1-1a)$$

式中 Q 亦称热流量, q 亦称热流率或热流密度, Δt [$^{\circ}\text{C}$] 亦称传热推动力, F [m^2] 为传热面积, R [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$] 为热阻, $r = RF$ [$\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$] 称单位面积热阻。

传热的基本方式有传导、辐射和对流三种,实际换热过程往往是以一种形式为主的复合换热方式。

一、热传导

同一物体内部或互相接触的物体之间,当温度不同但没有相对的宏观位移时的传热方式叫热传导或导热。微观来看,气体导热基于分子或原子的彼此碰撞;液体和非导电固体导热的机理是分子或原子振动产生的弹性波作用;而金属导热则主要靠自由电子的扩散传播能量^[1]。

导热的基本规律是付立叶(J.B.J.Fourier)定律:

$$q = -k \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1-2)$$

式中 $\partial t / \partial n$ 代表等温面法向温度梯度, k [$\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$] 为导热系数,代表物质的导热能力,各类物质的 k 值查附录 1~8,一般情况下大致为:

气体 $0.01 \sim 0.6 \quad \text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C};$

液体 $0.01 \sim 0.7 \quad \text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C};$

非导电固体 $0.02 \sim 3.0 \quad \text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C};$

金属 $15 \sim 420 \quad \text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C};$

绝热材料 $< 0.23 \quad \text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}.$

同一物质的 k 值并非常量,通常受温度影响较大,但也与纯度、湿度和压力等有关。

工程上常见的平壁和圆筒壁导热属于一维稳定导热,由付立叶定律可导出下列式子,

单层平壁

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\delta/kF} = \frac{\Delta t_{1-2}}{R_1} \quad (1-3)$$

多层平壁 (图 1-1)

$$Q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{k_i F}} = \frac{\Delta t_{1-n+1}}{\sum_{i=1}^n R_{k,i}} \quad (1-4)$$

式中 $t_1 \cdots t_{n+1}$ 代表各层壁面温度, δ_i 及 $R_{k,i}$ 分别代表第 i 层的壁厚和导热热阻, 各层传热面积 $F_i = F$ 均相同, $\sum_{i=1}^n R_{k,i} = R_{k,1} + R_{k,2} + \cdots + R_{k,n}$ 代表 n 层平壁的总导热热阻。

单层圆筒壁

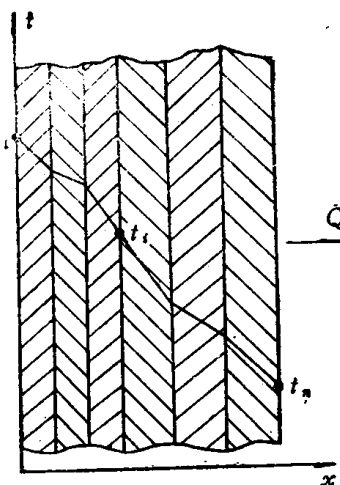


图 1-1 多层平壁

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\ln(d_2/d_1)/2\pi k l} = \frac{\Delta t_{1-2}}{R_k} \quad (1-5)$$

圆筒壁导热也可按它展开的平壁导热来处理, 即:

$$\theta = \frac{k}{\delta} \frac{\pi \bar{d} l}{\phi_1} (t_1 - t_2) \quad (1-5a)$$

以上式中 $\delta = (d_2 - d_1)/2$ [m] 为壁厚, $d_1, d_2, \bar{d} = \frac{d_1 + d_2}{2}$ [m] 分别为内径, 外径及平均直径, l [m] 为长度, $\phi_1 = f(d_2/d_1)$ 称形状系数, 见图 1-2⁽¹¹⁾。

多层圆筒壁 (图 1-3)

$$Q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{d_{i+1}}{d_i}\right)/2\pi k_i l} = \frac{\Delta t_{1-n+1}}{\sum_{i=1}^n R_{k,i}} \quad (1-6)$$

或处理为

$$Q \approx \frac{\pi l (t_1 - t_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{\phi_i}{d_i} \frac{\delta_i}{k_i}} \quad (1-6a)$$

以上式中 $d_i, d_{i+1}, \bar{d}_i$ 分别为第 i 层的内径, 外径和平均直径, ϕ_i 为第 i 层的形状系数, 其它符号同前。

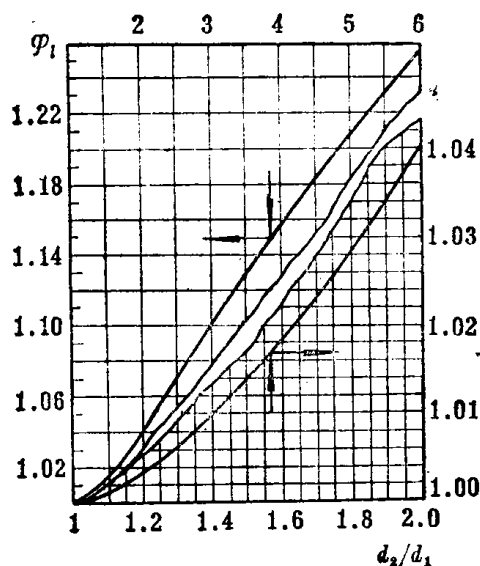


图 1-2 形状系数

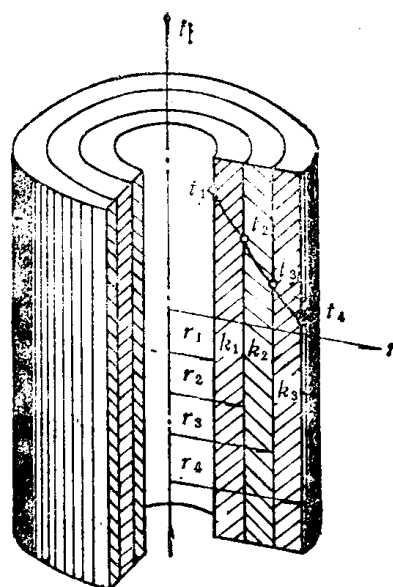


图 1-3 多层圆筒壁

由于圆筒壁面内外各层传热面积不同，因而计算热流密度时应区别开来，即：

以内表面积为基准时 $q_1 = Q / \pi d_1 l$;

以外表面积为基准时 $q_2 = Q / \pi d_2 l$ 。

二、热辐射

物体通过电磁波传播能量的过程叫辐射，热辐射则专指波长为 $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$ 的热射线在空间传播能量的现象。任何物体均能不断地向外界发射辐射能同时又接受来自周围物体的辐射能。物体把热能以电磁波形式发射出去，接受这种电磁波的物体又将其转变为热能，两物体间的辐射换热为相互辐射热量的差额。热辐射不需要媒介质并伴随着能量形式的转化是辐射换热的特点。辐射能可以在真空中、少数透明固体和气体中传播；在大多数固、液体中无法传播，而在表面被吸收或反射；热射线通过含有多原子气体的气层，可在透过气层厚度时被逐步吸收。

热辐射的主要规律是斯蒂芬-波尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 定律 (四次方定律)，

$$E_0 = \sigma_0 T^4 \quad \text{W/m}^2 \quad (1-7)$$

$$\text{或 } E = \varepsilon \sigma_0 T^4 \quad \text{W/m}^2 \quad (1-7a)$$

式中 E_0 和 E 为黑体和实际物体的辐射力， T [K] 为绝对温度， $\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$ 或 $4.88 \times 10^{-5} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4$ ，称为黑体的辐射常数，实际物体的黑度 $\varepsilon = E/E_0$ ，物体表面的黑度由实验测定，它取决于物质种类、物体表面的状况和温度 (参看附录 11)。根据辐射基本定律，两个相距很近但温度不同的平行平板间的辐射换热 (图 1-4)，当其中之一为黑体时可表示为

$$Q = E - AE_0 = \sigma_0 (\varepsilon T_1^4 - AT_1^4) F \quad (1-8)$$

式中 T_1 和 T_2 为黑体 1 和实际物体 2 的绝对温度, A 和 ε 为 2 的吸收率和黑度, 工程材料多属漫灰体, A 等于同温度下的 ε 值。两实际物体之间或高温烟气和壁面间的辐射换热计算较式 (1-8) 复杂, 将在 §1-7 介绍。

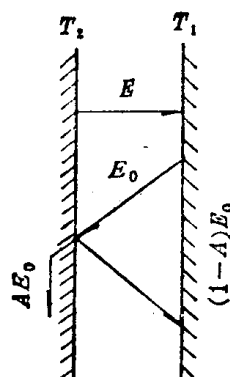


图 1-4 平行平板间的辐射换热

三、热对流

由于流体各部分宏观位移引起的热量转移现象称为热对流。流体内部存在温度差从而存在密度差, 在体积力(浮升力等)作用下所产生的热对流称自然对流, 借助于机械外力(泵或风机等)推动的热对流称强制对流。当流体内部温度分布不均匀时必然要发生导热, 因此, 热对流总是伴随着流体的导热。

流体流过温度不同的固体壁面时的传热过程称对流换热, 对流换热在工程上(如换热器中)最具实际意义。边界层理论和实践证明, 由于流体的粘性作用, 在壁面处存在一个具有速度梯度的速度边界层(图 1-5), 同时存在一个具有温度梯度的热边界层, 即使是湍流边

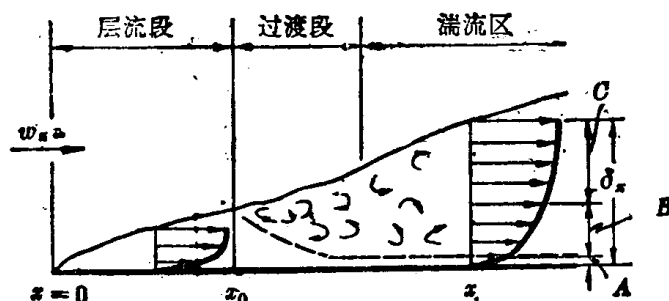


图 1-5 纵掠平板时边界层的发展

A-层流底层, B-缓冲层, C-湍流核心

界层, 总还是存在一个紧贴壁面的层流底层。层流底层内垂直于壁面方向的传热只能靠导热, 而层流底层以外则主要靠热对流, 因此, 对流换热是集导热和热对流于一体的综合现象。对于流速不高的高温多原子气体, 辐射换热占相当比重, 不能随便忽略。

对流换热热量通常用牛顿(L. Newton)冷却定律计算:

$$Q = hF\Delta t \quad (1-9)$$

式中 Δt [$^{\circ}\text{C}$] 为壁面温度与流体温度之差; 对流换热系数 h 是对流换热强度的集中指标, 它与物性、流动及几何条件等因素有关。 h 值的大致范围如表 1-1 所示。