

换热器内的对流传热

〔苏〕 A. A. 茹卡乌斯卡斯 著

科学出版社

换热器内的对流传热

〔苏〕A. A. 茹卡乌斯卡斯 著

马昌文 居滋象 肖宏才 译

科学出版社

1986

内 容 简 介

本书是关于建造高效单相换热器主要技术问题的著作。它论述了各种液流和气流中的流体力学和换热的有关问题。

书内提供了苏联及世界其他国家有关层流、湍流、脱体流等工况下对流换热方面的最新的试验数据和理论研究结果。其数据包括了很大的雷诺数和普朗特数的范围。

在本书中,强化传热、绕流问题、水力振动、高效紧凑换热器等方面受到很大重视。对一些新发展的换热技术领域,如“超”高温气流换热、有化学反应存在时的换热等,作了系统化阐述的尝试。对换热器的热工、流体力学计算提出了实用的计算公式。

本书可供动力装置及各工业部门换热设备的制造、设计和研究人员使用。也可供高等学校热工专业的教师和高年级学生作为教学参考。

А. А. Жукаускас
КОНВЕКТИВНЫЙ ПЕРЕНОС
В ТЕПЛООБМЕННИКАХ
Издательство «НАУКА», 1982

换热器内的对流传热

[苏] А. А. 茹卡乌斯卡斯 著
马昌文 屠滋象 肖宏才 译
责任编辑 陈文芳

科学出版社出版
北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986年3月第一版 开本: 850×1168 1/32
1986年3月第一次印刷 印张: 19 1/4
印数: 0001—3,200 字数: 506,000

统一书号: 15031·703
本社书号: 4525·15—10

定价: 5.40 元

前 言

立陶宛苏维埃共和国科学院动力技术物理研究所多年来对对流换热过程进行了广泛的研究。其成果对于新动力领域的发展和高效换热设备的建造都具有重要的意义。研究成果已系统地发表于自 1968 年开始出版的论文丛书《热物理》中,此丛书迄今已出版了十三集。近年来,在各种液流的换热和高温气流方面,动力技术物理研究所又获得了大量新的资料,这对广大领域的专家们都可能很有意义的。

本书在很大程度上反映了此研究所在建造高效单相换热器的换热和流体力学方面多年来的集体成果。这些与不久前部分地引用和发表于《热物理》论文丛书中的资料一道,都是动力技术物理研究所、其他苏联研究所以及一些外国研究中心所获得的这方面的最新资料。

И. И. 茹格日达、А. А. 皮亚季舒斯、Р. В. 乌林斯卡斯、Ю. В. 维列玛斯、В. И. 马卡里亚维丘斯、А. Б. 阿姆勃拉齐亚维丘斯、С. М. 巴尔特库斯、П. П. 瓦依杰库纳斯、Л. И. 达基斯、А. А. 扎利亚乌斯卡斯、Г. Б. 兹达纳维丘斯、В. И. 卡京纳斯、К. Ф. 马尔齐纳乌斯卡斯、П. С. 波什卡、М. М. 塔莫尼斯、В. А. 切斯纳及我的其他很多同事都积极地参加了共同的研究,并给予本书若干章节的准备工作以很大的帮助。

动力技术物理研究所的科学方向,是在与苏联国内换热方面的主要专家保持经常联系的情况下,在苏联科学院高温研究所、莫斯科动力学院、以 Г. М. 克尔日让诺夫斯基命名的动力研究所及莫斯科、列宁格勒、基辅、新西伯利亚、明斯克等地的一系列热动力科学中心的协助下形成的。

谨向苏联科学院通讯院士 Б. С. 佩图霍夫和 Р. И. 索洛乌欣

以及 A. A. 什兰恰乌斯卡斯教授表示深切的感谢，是他们阅读了手稿并提出了宝贵的建议。

谨向 П. M. 达乌约塔斯、P. M. 德里茹斯、Л. K. 布尔卡娅、C. A. 伊尔古年娜和所有其他参加手稿出版准备工作的同事们表示衷心的感谢。

A. 基卡乌斯卡斯

主要符号表

- α 导温系数, $[\text{m}^2/\text{s}]$
- $c_f = 2\tau_w/(\rho U^2)$ 摩阻系数
- c 常数;比热, $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
- d 管子直径, $[\text{m}]$
- D 扩散系数
- f 元面积, $[\text{m}^2]$; 振动频率, $[\text{Hz}]$
- F 总面积, $[\text{m}^2]$
- h 焓, $[\text{J}/\text{kg}]$
- k 粗糙元高度, $[\text{mm}]$; 传热系数, $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$
- $k^+ = \frac{k u_*}{\nu}$ 无因次粗糙元高度
- l, L 长度, $[\text{m}]$
- P 压力, $[\text{N}/\text{m}^2]$
- q, Q 热流量, $[\text{W}/\text{m}^2]$ 或 $[\text{J}]$
- r 半径, $[\text{m}]$
- t, T 温度, $[\text{°C}]$, $[\text{K}]$
- u, v, w 速度分量, $[\text{m}/\text{s}]$
- u', v', w' 脉动速度分量, $[\text{m}/\text{s}]$
- U_0 来流速度, $[\text{m}/\text{s}]$
- U 最大速度, $[\text{m}/\text{s}]$
- $\bar{u}$ 平均速度, $[\text{m}/\text{s}]$
- $u_* = \sqrt{\tau_w/\rho}$ 动力速度, $[\text{m}/\text{s}]$
- $u^+ = u/u_*$ 无因次速度
- x, y, z 笛卡儿坐标, $[\text{m}]$
- $y^+ = y u_* / \nu$ 无因次距离
- $\text{Pr}_t = \varepsilon_t / \varepsilon_q$ 湍流普朗特数
- $\text{Tu} = \sqrt{u'^2}/U$ 湍流度
- α 放热系数, $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$

- β 体胀系数, [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]
- δ 流体力学边界层厚度, [m]
- δ^{**} 动量损失厚度, [m]
- δ^* 挤出厚度, [m]
- δ_T 热边界层厚度, [m]
- ϵ_r 湍流粘度系数, [m^2/s]
- ϵ_t 湍流导温系数, [m^2/s]
- ϑ 以壁温为基准的温度, [$^{\circ}\text{C}$]
- $\vartheta^+ = q_w / (\rho c_p \mu_w)$ 无因次温度
- κ 卡门常数
- λ 导热系数, [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
- μ 粘度系数, [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
- ν 动粘度系数, [m^2/s]
- ξ 阻力系数
- ρ 密度, [kg/m^3]
- τ 切应力, [N/m^2]
- φ 角度, [$^{\circ}$]

下标

- f 按液流温度(主流温度)取值
- w 壁面上的值
- φ 按周向取值
- x 化学的
- i 第 i 种分量的
- ox 进口处的值
- $oblx$ 出口处的值
- $\partial, \partial u \phi$ 扩散的
- M 分子的
- cp 平均的
- cl 薄层的
- $cuл$ 强的
- T, t 湍流的
- ϑ, ϑ_K 当量的

目 录

前言	vii
主要符号表	ix
第一章 绪言	1
1.1 概况	1
1.2 单相对流换热器	2
1.3 热计算的原理	5
1.4 平均温压	7
1.5 传热系数	10
1.6 对流放热的特点	12
第二章 载热质的物理性质	15
2.1 载热质的一般特性	15
2.2 液体的性质	17
2.3 液体的普朗特数	22
2.4 燃烧产物的性质	24
2.5 空气和氮的性质	32
2.6 气体的普朗特数	35
第三章 对流迁移方程	37
3.1 前言	37
3.2 连续性方程	38
3.3 粘性流体的运动方程	39
3.4 能量方程	40
3.5 辐射传递与状态方程	42
3.6 扩散方程	43
3.7 气流中的换热方程	43
3.8 不可压缩液流中的换热方程	45
3.9 二维对流换热方程	47
3.10 平均湍流方程	48

3.11	热边界层方程	51
3.12	边界条件	55
第四章	换热器的模化	57
4.1	相似理论和因次法	57
4.2	换热过程的模拟	61
4.3	数字模化	64
4.4	模拟试验的设备	66
第五章	层流边界层	78
5.1	平板上的边界层	78
5.2	梯度绕流	85
5.3	小雷诺数的情况	87
第六章	层流放热	89
6.1	等温面的放热	89
6.2	有梯度绕流时的放热	93
6.3	流体变物性的影响	96
6.4	不加热的初始段的影响	103
6.5	非等温壁面的放热	109
第七章	湍流边界层	117
7.1	湍流边界层的一般特性	117
7.2	过渡流动工况	121
7.3	湍流迁移的模拟	124
7.4	平板边界层内的迁移	131
7.5	流体变物性的影响	141
7.6	气流中的迁移特性	144
7.7	表面粗糙度的影响	148
7.8	表面横向曲率的影响	152
7.9	液流湍流度的影响	155
7.10	液流加速的影响	160
第八章	边界层内的湍流特性	165
8.1	温度及速度的脉动强度	165
8.2	相关特性	171
8.3	大尺寸漩涡的作用	175

8.4	湍流普朗特数	180
第九章	湍流流动中的放热	185
9.1	在过渡流动工况下平板的放热	185
9.2	光滑表面的放热	190
9.3	液体变物性的影响	194
9.4	粗糙表面的放热	199
9.5	液流湍流度的影响	205
9.6	液流加速时的放热	207
第十章	横掠圆柱	210
10.1	掠过圆柱的特点	210
10.2	圆柱迎面部分的绕流	216
10.3	圆柱上的压力分布和切应力分布	220
10.4	圆柱的阻力	230
第十一章	横掠圆柱时的放热	234
11.1	前驻点处的放热	234
11.2	圆柱体的局部放热	239
11.3	壅塞对局部放热的影响	253
11.4	圆柱的平均放热	255
11.5	液流湍流度对平均放热的影响	264
11.6	壅塞对平均放热的影响	267
11.7	粗糙圆柱的放热	269
11.8	各种截面形状的柱体	271
第十二章	横掠管束的绕流工况	275
12.1	绕流的特征	275
12.2	压力分布与流速分布	278
12.3	束中管的流动阻力	290
12.4	管束的流动阻力	292
12.5	倾斜管束的流动阻力	300
12.6	粗糙表面管束的流动阻力	301
第十三章	横掠管束的放热	306
13.1	束中管的放热	306
13.2	束中管的局部放热	308

13.3	载热质物理性质的影响	317
13.4	束中管的平均放热	318
13.5	流动冲击角的影响	329
13.6	粗糙管的放热	330
13.7	管束平均放热的计算	335
第十四章	横掠肋化管的绕流工况与放热	339
14.1	肋化管的管束	339
14.2	肋化管的导热	340
14.3	肋片的效率	344
14.4	绕流肋化管束的流动特性	348
14.5	定性参数的确定	350
14.6	肋化管束的流动阻力	352
14.7	肋化管束的局部放热	358
14.8	肋化管束的平均放热	363
第十五章	换热器管的振动	371
15.1	在载热质液流中管的水力振动	371
15.2	横掠单管的振动	377
15.3	横掠管束的振动	381
15.4	管振的统计分析	389
15.5	倾斜管束的振动	393
15.6	径向排列管束的振动	397
15.7	管振的计算及预防	399
第十六章	流道内的层流放热	409
16.1	稳定流动的流体力学	409
16.2	入口段内的流动	411
16.3	圆管内流体力学稳定流动的换热过程	417
16.4	非圆形截面流道内的换热	423
16.5	圆管入口段内的换热	432
16.6	平行平板内入口段的放热	435
第十七章	流道内的湍流放热	441
17.1	湍流迁移的特征	441
17.2	湍流的流体力学	443

17.3	放热系数与摩阻系数之间的关系	448
17.4	在稳定流动工况下圆管内的湍流放热	448
17.5	环形流道内的换热	451
17.6	在非圆形流道内及纵掠释热棒束情况下的流体力学及换热	453
17.7	入口段内的换热与流体力学	461
17.8	物性变化的影响	466
17.9	粗糙表面的流道	474
第十八章	高温气流的换热	479
18.1	前言	479
18.2	管内湍流换热	480
18.3	离解对换热的影响	485
18.4	平面通道中的换热	487
18.5	管和隙缝式换热器中的换热	488
18.6	通道内的流动阻力	491
第十九章	有化学反应存在时的换热	493
19.1	对流-扩散换热	493
19.2	“冻结”边界层	495
19.3	平衡边界层	500
19.4	有限化学反应速度情况下的边界层	503
第二十章	对流传递与辐射之间的相互作用	507
20.1	基本定义和平衡辐射的各种定律	507
20.2	在气体中连续辐射和线纹辐射的吸收系数	512
20.3	分子气体光带形式的辐射	515
20.4	气体的半球辐射	520
20.5	辐射流的一维近似	522
20.6	复杂换热的相似参数	526
20.7	在平面通道中层流流动时的对流-辐射换热	530
20.8	在通道内的湍流对流-辐射换热	534
第二十一章	制造高效换热器	540
21.1	强化换热过程	540
21.2	紧凑式换热器	550
21.3	换热表面的结垢	554

21.4 换热装置的有效性	558
参考文献	565
汉俄人名对照表	582
内容索引	594

第一章 绪 言

1.1 概 况

世界上能量和燃料的需求增长很快,如果说在 1920 年全世界消费了大约 20 亿吨标准燃料,则在本世纪末,预计将增长到 200 亿吨。大部分燃料用于发电、集中供暖和工业供热。在苏联,用于动力和工业供热的燃料占总消费量的 60% 左右。故恰当而有效地利用燃料——动力资源是最重要的问题之一^[1]。

在生产过程中,大部分燃料的能量是通过各种换热设备传递的。粗略的计算表明: 只需提高热动力装置的动力效率百分之几,在苏联这样大的国家里,就可以节省几千万吨燃料。

随着生产规模和动力功率的日益增大,所采用的换热器的容量也愈来愈大。减小体积、造出更紧凑的换热器能大量地节约材料和金属,降低劳动消耗量。

提高动力效率及换热器的紧凑性是与强化换热过程密切相关的。同时,传热过程的强度及换热器的效率在相当大的程度上取决于换热表面的流动阻力和绕流特性。

在动力、化工和另一些工业领域中,日益广泛地采用大型的换热设备,它的主要部件是外绕流的管束。提高流体动力载荷和换热器的容量不可避免地要遇到为载热质液流所激发的管系振动问题。

现代的高效动力装置和换热器的进一步发展是建筑在热交换和流体动力学理论最新成就的基础之上的。对新的换热途径的探索推动着换热器结构的不断发展,并改善其运行特性。随着换热器功率的增大,开展了发展换热器类型和改善其结构的工作。

按一种介质向另一种介质传递热量的过程进行分类,换热设

备可分为混合式和表面式两大类。在混合式换热设备中,换热是靠冷热液体(或气体)的直接混和来实现的。而在表面式设备中,换热是发生在固体壁面与流过其上的载热质之间。换热过程既可能发生在单相介质中,也可发生在载热质集态改变情况下。在动力、交通、石油化学及其他一些工业领域中,换热时载热质集态不发生变化的表面式换热器占有很大的比重。

表面式换热设备可分为隔离式与再生式两类。在隔离式换热设备中,热流体将热量传给冷流体要通过一层固体壁。而在再生式设备中,则在同一换热表面上周期性地时而流过热流体,时而流过冷流体。

同时,在最近,由于核动力和电加热的发展,有内能源的换热器具有日益重要的意义。在这种换热器中,热量由设备部件本身发出,而由液体或气体从壁上传走。

在现代的大型动力和工艺装置中,稳态的对流换热过程起着重要作用,它是隔离式换热器和具有内能源的换热器内的基本换热过程。

1.2 单相对流换热器

按照所用载热质的种类进行分类,对流换热设备可分为“气-气”式、“液-气”式和“液-液”式换热器,还有“液体-蒸汽介质”及“气体-蒸汽介质”式换热器,通常在这些换热器中,在管子式流道壁面的一侧或两侧进行单相对流换热。

在对流换热器中,载热质循环是强迫循环,其换热强度及换热表面积都在很大程度上取决于载热质的种类。例如,在流速及其他条件相同的情况下,水流的放热系数通常要比空气流的放热系数高1—2个数量级。但是,空气在地球大气层中是取之不尽的,它不具有象水那样强的侵蚀性,不造成腐蚀和盐类沉积。这就允许采用较便宜的碳钢或轻合金来制造换热器。

放热、外绕流过程及流动阻力也取决于边界层的状况。在边

界层内, 粘度沿液层厚度的变化起很大的作用。 动粘度系数随温度的变化很剧烈, 例如, 温度由 80°C 降低到 20°C 时, 航空油的动粘度系数增加 26 倍, 水增加 1.7 倍, 而空气则减小到其初始值的 $1/1.4$ 。

因此, 当设计换热器时, 选择载热质种类及适当的温度工况具有重要的意义。 这就需要考虑具体的流体物性, 对换热器的工作条件进行深入的分析。

选择换热器内载热质的流动方向也是一个重要问题。 在这个意义上可将换热器划分为最具典型性的三类: 顺流式(图 1.1, *a*)、逆流式(图 1.1, *b*) 和叉流式(图 1.1, *c*)。 在顺流式换热器中两种载热质向着同一方向平行流动; 在逆流式换热器中两种载热质流动方向相反; 而在叉流式换热器中, 一种载热质的流动方向与另一

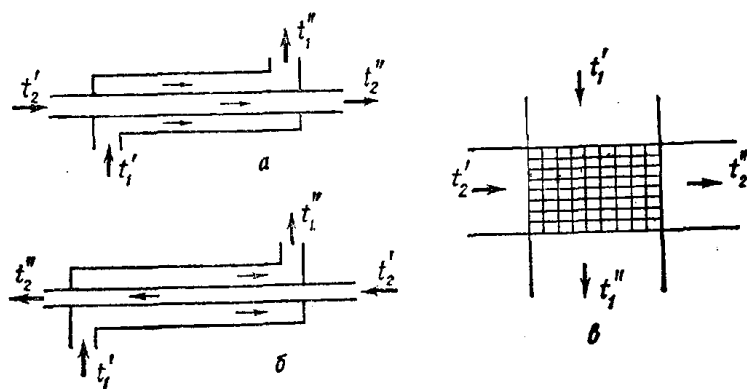


图 1.1 换热器内载热质流动示意图

a——顺流式, *b*——逆流式, *c*——叉流式

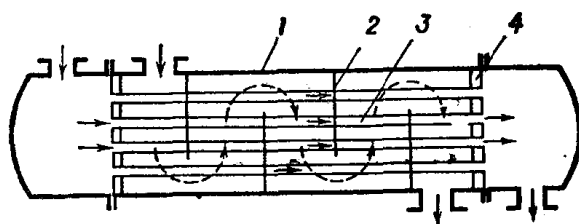


图 1.2 多流程管-壳式换热器

1——外壳, 2——隔板, 3——管子, 4——管板

种载热质的流向相垂直。

在实用方面,单流程和多流程式换热器都有应用。在单流程换热器中,载热质的流动方向不变,而在多流程换热器中,载热质流经若干个流程并改变流向。多流程换热器通常按叉流方式工作。在多流程换热器中(见图 1.2),一种液流多次调头作反向流动并与另一种液流流向相交叉。

在前面谈到的示意图中,管子是换热器的主要部件。管内通常流过加热流体,而管外则是冷却流体,在此情况下载热质液流或横向,或纵向,或成一定角度冲刷管子。

从图 1.2 可以看出,在圆筒形的外壳内,管子可按下述方式进行布置:使管束的轴线与换热器外壳的轴线相平行。这种换热器叫做管-壳式换热器。作为加热器或作为冷却器,在动力、石油加工、化学、食品及其他一些工业部门,这种类型的换热器获得了广泛的应用。壳内管束的整个绕流过程和传热过程都是相当复杂的,要求深入地进行研究。

在食品及其他一些工业部门也采用蛇形管式换热器。在这种换热器的外壳内装有蛇形管式加热面。在此情况下换热进行得比较强烈,其加热面本身也确是扩展了,但管子的清洗很困难。

上面列举的换热器应用于各个不同的技术部门。在食品工业中,当压力和温度不高时,广泛采用板式换热器。在这种换热器中两种流体被平板所隔开,并通过这层平板进行传热。在此型换热器内的换热过程与管-壳式换热器内的换热过程大不相同。

在现代动力部门和国民经济的其他很多部门中,都采用了气体或空气冷却器及预热器。作为载热质,气体和空气的主要缺点是传热性能远较液体为差。随着压力的增加,气体载热质的效能大为提高。在此情况下,例如用于燃气轮装置的换热器,高压气体在管内流动,这就可避免圆筒壳承受内部高压。可是在大多数情况下,空气冷却器的管内循环着液体,而管外则是空气。因此,为了载出由液体传来的哪怕相对来说数值不大的热量,也必须增大空气侧的传热面积。在此情况下应用着各种不同结构的肋化管。