

〔联邦德国〕 E. U. 施林德尔 主编

换热器设计手册

第二卷

流体力学与传热学

HEX
HEAT EXCHANGER
DESIGN
HANDBOOK

2

Fluid mechanics
and heat transfer

机械工业出版社

内 容 简 介

本书是《换热器设计手册》的第二卷。该手册是在“国际传热传质中心”倡议和赞助下，由75位各国专家合作写成的，是一部内容详尽、新颖的权威著作，共分五卷出版。

本卷详细地介绍了传热学和流体力学知识，共有九章，分别叙述热量、质量、动量传递基本原理；牛顿型与非牛顿型流体的内部与外部单相流动与传热；固定床与流化床内的流动与传热、热传导及接触热阻；多相流动与传热；一元及多元组份的凝结和沸腾；辐射传热及传热强化技术。

本卷不仅介绍了换热器设计师应当掌握的传热学和流体力学公式及资料，而且全面深入地介绍了传热学各分支学科的基本原理及最新发展。因此，本卷不仅是动力、化工、冶金、建筑、航空、航天等专业热工技术人员有价值的工具书，也可供传热学与流体力学的研究人员和教学人员参考。

Heat Exchanger Design Handbook
Vol. 2, Fluid mechanics and heat transfer
Ernst U. Schlünder, Editor-in-Chief
Hemisphere Publishing Corporation, 1983

换热器设计手册

第二卷

流体力学与传热学

〔联邦德国〕 E. U. 施林德尔 主编

马庆芳 马重芳 主译

责任编辑：蒋有彩

封面设计：郭景云

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092^{1/16}·印张 50^{1/2}·字数 1229千字
1989年6月北京第一版·1989年6月北京第一次印刷
印数 0,001—2,460·定价：38.00元

ISBN 7-111-00595-3/TK·23



译者序

《换热器设计手册》是在“国际传热传质中心”(ICHMT)倡议和赞助下,由国际学术界、工业界和出版界合作,费时十年编写成的大型工具书。其内容的完整、详尽和新颖,作者的权威性和资料的实用性,都超过以往任何一本有关换热器和传热传质学的专著和手册。因此本书受到世界各国学者及工程技术人员的重视和好评。

本书内容系统、完整,理论与实际并重。全书共分五卷:《换热器原理》、《流体力学与传热学》、《换热器的热设计与流动设计》、《换热器的机械设计》、《物理性质》。五卷有机地组合成书,包含了换热器基本原理、设计方法、设计资料、制造、检验、贮存、成本估算等各个方面,同时五卷都能独立成书,可供对某一专门领域感兴趣的读者参考。原书有五千个精选的计算公式和图表。各章节都是由本领域知名的75位专家撰写的,反映了换热器的最新发展水平。参加编写工作的有美、苏、英、联邦德国等国的学者,可以说本书是一部“世界级”的高水平换热器和传热学专业手册。

众所周知,换热器是传热过程常用的设备,几乎一切工业部门都有使用,化工、冶金、动力、交通、航空、航天等领域应用尤广泛。近年来,由于新技术的发展和能源开发,改进换热器性能越来越受重视。换热器设计资料和传热计算公式散见于各国公开文献及各企业内部资料,设计师往往很难找到需要的合适技术资料。有时面对几个不同公式,不知如何适从。本书经过国际第一流专家的多年努力,搜集大量换热器设计资料,严格分析筛选,为解决上述问题做出了贡献。有鉴于此,我们愿意把本书介绍给我国读者,相信它将对换热器设计师和工程师、工程热物理学学科的研究人员、教学人员有所裨益,有助于我国在这一领域尽快赶上世界先进水平。

手册第二卷《流体力学与传热学》是手册中篇幅最大、通用性最强的一卷。它系统详尽地介绍传热学以及相关的流体力学知识。本卷是为没有足够传热学知识的换热器设计师撰写的,除了向读者推荐了各种适用的传热计算公式和试验数据外,还详细介绍了传热学各分支领域的基本原理及截止到八十年代初期为止的最新发展。例如,非牛顿型流体的传热、多相流动和传热、固定床与流化床传热、多元混合物的凝结和沸腾等专题,在本卷都有详尽的叙述,而这些传热新课题在一般传热学教程,甚至传热学专著中都很少涉及或介绍不多。本卷对基本传热问题的讨论具有相当的理论深度,例如辐射传热,作者不满足于一般工程计算,而是从近代物理学出发,探讨了镜射表面和漫射表面辐射的本质。辐射传热一章完全可以作为一本专著单独出版。因此,就本卷叙述的深度和广度而言,不仅为换热器设计师提供了有用的传热学资料,而且也为传热学和工程流体力学的研究和教学人员提供了一本内容全面、详尽、新颖的参考书。

由于参加编写的人员多,因此统稿工作比较困难。原书的公式、图、表等基本上按节自成体系,因此显得有些散。在翻译中,我们尽可能做了统一,除了公式多,编号改动困难,并且容易出错,仍保持原书按节编号外,图和表都按章编顺序号。原书的符号表也较分散,现将常用符号表置于卷首,便于查找。对原书中疏漏之处,以译者注的形式作了说明。

本书译名尽可能采用国家标准,例如,按照国家标准GB3102.4—82《热学的量和单位》,我们把 heat-transfer coefficient 译为传热系数,而过去一些传热著作常称为换热系数或放热系数。类似这样的译名,有些读者可能暂时不习惯,但我们相信标准译名将会被广大读者逐步接受。

本卷由R. C. 阿姆斯特朗等五十人撰写,已在每章(节)前面注明了作者。参加本卷翻译的有周其成(2.2.3~2.2.8、2.3.1、2.3.2)、华诚生(2.1、2.2.1、2.2.2)、李金林(2.3.3、2.3.4、2.4、2.5.1~2.5.5)、李希伦(2.9)、马庆芳(2.5.13、2.8.1、2.8.2)、陈焕倬与马重芳(合译2.6.1~2.6.5、2.6.7)、李静(2.5.6、2.5.11、2.6.6、2.7.9)、施明恒与马重芳(合译2.7.1~2.7.8)、吴子静(2.5.7)、江经善(2.5.8~2.5.10、2.5.12、2.8.3、2.8.4)。西安交通大学陈长春、郭有仪和袁秀玲同志认真审阅了译稿,中国科学院工程热物理研究所葛绍岩教授对本书的翻译给予了热情的支持和帮助,译者对此表示衷心感谢。限于我们的水平,书中难免有疏漏与错误之处,欢迎读者批评指正。

译者 1986年6月

总 序

编写一本换热器设计手册的想法，起源于1972年由“国际传热与传质中心”(ICHMT)在南斯拉夫 Trogir 组织召开的“换热器的最新发展”的学术讨论会上。

尽管现在已有许多传热数据及有关的关系式，但它们都分散在各种公开发行的文献中，或深藏在专有组织机构的档案里。对于传热设备的生产厂家、销售商与用户，不仅在获取日益增多的传热资料方面，而且在对不同来源的数据与关系式进行比较方面都越来越感到困难。加之，这些来源不同的资料往往不相一致，因而用户就很难确定哪些数据和关系式对他们最为合适。再者，多年来许多传热方面的出版物，越来越具有分析性和学术性，这就影响了从事实际工作中的传热工程师们对它们的直接应用。

鉴于这种情况，一些传热专家决定根据现有的公开文献，同时也尽可能搜集专有资料，以形成传热资料的基础，在经过选择的实验资料基础上推荐的关系式，可作为各种换热器的设计资料。

尽管对这种想法的热情很高，但直到1974年在东京召开的第五届国际传热学术讨论会时，所取得的进展并不大。会后才把此想法具体化，决定在国际传热与传质中心的赞助下，由半球出版公司（该中心的出版机构）出版。由大学、工业界与专有机构的八位代表组成编委会，并立即着手制定本手册的范围与体制。作为共同努力的结果，计划出版下列五卷：

第一卷：叙述换热器原理、定义并解释在换热器热设计、流动设计以及评估时所必须的全部参数及概念。

第二卷：根据可用资料，推荐计算设计参数与评估参数的关系式。尽可能把试验数据与推荐公式一并提出，以便既揭示数据的一致性，也揭示公式的可靠性。

第三卷：指出在解决实际换热器设计及评估问题时，如何应用第一、二卷提供的材料。由于材料数量太大，不可能在该卷中包括所有已知种类的换热器，仅对大多数常用设备及其有关的装置进行详细的讨论，如冷却塔与燃烧室等。

第四卷：本卷致力于换热器的机械设计。实际上它与热力及水力设计是不可能分开的。本卷还包括一些主要国家标准在实用上的比较。

第五卷：包括其它四卷内的设计计算所需用的物理性质的数据。

这五卷中，每卷都有一名编委作为责任编辑。尽管每位责任编辑都接受了专门一卷的额外行政责任，但整个手册仍出于共同的努力，每位编辑都分担了对整个材料的审查与编辑工作。

许多作者都是本学科有名望的专家，对本手册作出了贡献。每篇手稿都经历了审核的过程，而且许多手稿都在定期的编委会议上讨论过。这种会议自从1975年以来，一直是每六个月举行一次。

尽管如此，本手册还应被看成是初步的，而且许多地方需要改进。

深切希望本手册的使用者与我们联系，以增补遗漏之处，并对改进本手册的内容及其适用性提出建议。这种读者与编者之间的相互交流与合作，不仅可以改善本手册的质量，而且会根据换热器设计的要求，更进一步地促进研究工作。

编委会在此对出版社及各位有贡献的作者所给予的十分有价值的合作表示感谢。

Ernst U. Schlünderw

第二卷 前 言

Frank W. Schmidt

热设计工程师只能以已经公开发表或未公开发表的关联式或实验结果作为设计依据。但应承认,许多这样的关联式的精度是不确定的。编写本卷手册的目的,就是介绍和评价最有用的关联式。只要有可能,还将通过与可靠的实验结果进行比较,以表示关联式的预定精度。

考虑到在很多情况下,对这一技术领域还不熟悉的工程师将参阅本手册,以帮助进行设计,所以一些作者把有关基本现象的讨论也包括进来了。在必须给予特殊考虑,以避免造成不希望或不合格的设计结果时,作者也特别提醒要小心谨慎。虽因篇幅有限,仅能给出最常用的一些关联式,但大多数作者还是开列了内容广泛的参考文献目录,这将有助于手册的使用者,在研究中获得更为详尽的资料。

换热器有许多不同的类型,所以设计换热器所需的关联式,应能在很宽的换热过程及换热器几何形状范围内适用。编辑委员会看到了这一点,力图尽可能完整地把与换热设备有关的重要技术领域都写入手册。结果,这部分内容不仅对设计与计算换热器的工程师,而且对热设计所有方面均感兴趣的读者都有很大的参考价值。

2.1回顾了热、质量和动量交换的基本原理。

在2.2中讨论了牛顿型和非牛顿型流体在通道、光管和肋管管束中,以及绕浸没物体的单相流动,这一章还介绍了在固定床及流化床内的流动。

在2.3中,讨论了各种多相流动及压降。在介绍了这类流动的基本原理后,又详细地讨论了气-液、固-气和固-液流动。

2.4介绍了热传导。讨论了有相变、无相变的稳态及瞬态热传导。还包括了一节接触热阻内容。

2.5介绍了单相对流换热的关联式。其中有受迫对流、自然对流和自然与受迫混合对流。讨论了在牛顿型、非牛顿型和液态金属系统中的换热。还阐述了用于强化传热的技术。

在2.6中介绍了关于纯净蒸气、蒸气 \ominus 混合物及含有不相混合液体的蒸气混合物的凝结。在这一章中还讨论了珠状凝结、起雾和强化方法。

2.7的主题是沸腾和蒸发。介绍了单组份流体池沸腾、管内和管外沸腾及管束沸腾时,预计换热及蒸气形成速率的方法。还讨论了二元及多元混合物的沸腾。

2.8讨论了在有气体流动和没有气体流动的固定床中,在流化床中以及在摇动填充床中气-固系统的传热。

在2.9中,全面地介绍了辐射传热,详细讨论了表面辐射性质,镜射表面和漫射表面间的辐射换热以及气体辐射。

\ominus “气”与“汽”并无严格的区分。“汽”有时用来指临界温度以下任一温度时的气体,有时被限定用来指和液相平衡的气体,即饱和蒸汽。这个词实际是不需要的。因为当通过在气和汽曲面部分上的临界等温线时,物质的性质都不发生突变(摘自F. W. Sears等著,郭泰运等译,《大学物理学》第二册,人民教育出版社,1979)。因此本书通常只使用“气”这一术语。——译者注

符 号 表

1. 基本量

| 名 称 | 符 号 | 单 位 |
|--------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 热流率 | \dot{Q} | W |
| 热量 | $Q = \int \dot{Q} dt$ | J |
| 热流密度(热通量) | $\dot{q} = \dot{Q}/A$ | W/m ² |
| 时间 | t | s |
| 频率 | f | 1/s |
| 质量 | M | kg |
| 质量流率 | \dot{M} | kg/s |
| 质量流速(单位面积的质量流率) | \dot{m}/S | kg/(m ² ·s) |
| 质量通量(质量流密度) | \dot{m}_s/A | kg/(m ² ·s) |
| 摩尔数 | N | mol |
| 摩尔流率 | \dot{N} | mol/s |
| 摩尔流速 | $\dot{n} = \dot{N}/S$ | mol/(m ² ·s) |
| 摩尔分子量 | \bar{M} | g/mol |
| 密度 | ρ | kg/m ³ |
| 浓度 | c | kg/m ³ |
| 摩尔密度 | $\bar{\rho}$ | mol/m ³ |
| 摩尔浓度 | \bar{c} | mol/m ³ |
| 质量百分数 | x_i, y_i | kg _i /kg |
| 质量载荷(mass loading) | X_i, Y_i | kg _i /kg _j |
| 摩尔百分数 | \bar{x}_i, \bar{y}_i | mol _i /mol |
| 摩尔载荷 | \bar{X}_i, \bar{Y}_i | mol _i /mol _j |
| 体积 | V | m ³ |
| 体积流率 | \dot{V} | m ³ /s |
| 速度 | u, v, w | m/s |
| 表面积 | A | m ² |
| 横截面积 | S | m ² |
| 长度或直径 | L, D, l, d, s | m |
| 坐标 | $\psi, \varphi, r, x, y, z$ | |
| 空隙百分数 | ϵ | |
| 体积流率百分数 | ϵ | |
| 干度⊖(Quality) | x | |
| 流量干度 | x^* | |
| 功 | W | |

⊖ 干度也称含气量、蒸气含量或蒸气品质，为无量纲数。——译者注

2. 传输系数

| 名称 | 符号 | 单位 |
|-------------------|------------------------------------|-------------------|
| 传热系数 [⊖] | α | $W/(m^2 \cdot K)$ |
| 传质系数 | β | m/s |
| 总传热系数 | U | $W/(m^2 \cdot K)$ |
| 阻力系数 | ξ | |
| 摩擦因子 | f | |
| 发射率(辐射率、黑度) | ϵ | |
| 角系数(形状系数) | φ_{12} | |
| 导热系数 | λ | $W/(m \cdot K)$ |
| 扩散系数 | D | m^2/s |
| 运动粘度 | ν | m^2/s |
| 动力粘度 | η | $kg/(m \cdot s)$ |
| 热扩散系数 | $\kappa \equiv \lambda / \rho c_p$ | m^2/s |
| 表面张力 | σ | N/m |
| 切应力 | τ | $Pa(N/m^2)$ |
| 压力 | P | $Pa(N/m^2)$ |
| 压降 | ΔP | $Pa(N/m^2)$ |

⊖ 传热系数也称换热系数、给热系数，依据国家标准，应称为传热系数。——译者注

3. 热力学量

| 名称 | 符号 | 单位 |
|-----------------|-----------------|------------------|
| 比焓 [⊖] | h | J/kg |
| 比内能 | u | J/kg |
| 比Gibbs函数自由焓 | $g = h - T_s$ | J/kg |
| 比自由能 | $f = u - T_s$ | J/kg |
| 比熵 | s | $J/(kg \cdot K)$ |
| 化学势 | μ | J/kg |
| 比热 | c_p, c_v | $J/(kg \cdot K)$ |
| 温度 | T | $K, ^\circ C$ |
| 对数平均温差 | ΔT_{LM} | $K, ^\circ C$ |

⊖ 对于全量则用大写字母表示，例如焓以 H 表示。其它物理量也按此规则。——译者注

4. 化学反应量

| 量 | 符号 | 单位 |
|------------|------------|---------------------|
| 反应焓，相应焓，潜热 | Δh | J/kg |
| 活化能 | ΔE | J/kg |
| 平衡常数 | K | 各种单位 |
| 比率常数 | k | 各种单位 |
| 反应率 | r | $mol/(m^3 \cdot s)$ |
| 活度系数 | γ_i | |
| 逸度系数 | γ_f | |
| 化学计量因子 | ν_i | |

5. 物理常数

| 名称 | 符号 | 单位 |
|------------|-----------------|--|
| 气体常数 | \bar{R} | 8.314J/(mol·K) |
| 洛施米特数 | \bar{L} | 6.0252×10^{23} |
| 阿佛加德罗数 | \bar{L} | 1/mol |
| 斯蒂芬-波尔兹曼常数 | C_s | $5.6697 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ |
| 重力加速度 | g | m/s^2 |
| 标准重力加速度 | $g_s = 9.80665$ | m/s^2 |

6. 下标

| 量 | 符号 | 量 | 符号 |
|----|----|----|-----|
| 壁面 | w | 液态 | l |
| 主体 | b | 气态 | g |
| 平均 | m | 进口 | in |
| 固态 | s | 出口 | out |

7. 常用无量纲数

| 名称 | 符号及定义 |
|-------------------|--|
| 阿基米德数 | $Ar = g l^3 \Delta \rho / \nu^2 \rho = g l^3 \rho \Delta \rho / \eta^2$ |
| 比奥数 | $Bi = \alpha_p l / \lambda_s$ 或 $\alpha_r l / \lambda_s$ |
| 效率 | E |
| 欧拉数 | $Eu = \Delta p / (\rho u^2 / 2)$ |
| 傅里叶数 | $Fo = \kappa t / l^2 = \lambda t / \rho c_p l^2$ |
| 弗劳德数 | $Fr = u^2 / g l$ |
| 伽里略数 | $Ga = l^3 g / \nu^2 = l^3 g \rho^2 / \eta^2$ |
| 格拉晓夫数 | $Gr = g l^3 \Delta \rho / \nu^2 \rho = g l^3 \rho \Delta \rho / \eta^2$ |
| 格雷茨数 | $Gz = u d^2 / \kappa l = u d^2 \rho c_p / \lambda l = Re Pr \frac{d}{l}$ |
| 克努森数 | $Kn = l_0 / l$ (l_0 为分子平均自由程) |
| 路易斯数 | $Le = \kappa / \delta = \lambda / \rho c_p \delta$ |
| 马赫数 | $Ma = u / u_{*0}$ (u_{*0} 为声速) |
| 传热单元数 | NTU |
| 努塞尔数 | $Nu = \alpha l / \lambda$ |
| 贝克来数 | $Pe = u l / \kappa = u l \rho c_p / \lambda = Re Pr$ |
| 相变数 | $Ph = c_p \Delta T / \Delta h_{g1}$ |
| 普朗特数 | $Pr = \nu / \kappa = \eta c_p / \lambda$ |
| 瑞利数 | $Ra = Gr Pr$ |
| 雷诺数 | $Re = u l / \nu = u l \rho / \eta = \dot{m} l / \eta$ |
| 施密特数 | $Sc = \nu / \delta = \eta / \rho \delta$ |
| 舍伍德数 [⊖] | $Sh = \beta l / \delta$ |
| 斯坦顿数 | $St = \alpha / \rho u c_p = Nu / Re Pr$ |
| 斯特罗哈数 | $Sr = f l / u$ |
| 韦伯数 | $We = u^2 \rho l / \sigma$ |

⊖ 无量纲传质数用无量纲传热数加上标“'”表示,例如 $Bi' = \beta l / \delta$; 又如 $Nu' = \beta l / \delta = Sh$, $Pr' = \nu / \delta = \eta / \rho \delta = Sc$ 。

目 录

| | |
|--|----|
| 译者序 | |
| 总序 | |
| 第二卷前言 | |
| 符号表 | |
| 2.1 传热和传质的基本原理 | 1 |
| 2.1.0 引言 | 1 |
| 2.1.1 迁移现象的物理机理 | 2 |
| A. 由不连续效应引起的对唯象定律的限制 | 2 |
| B. 由湍流引起的对唯象定律的限制 | 5 |
| 2.1.2 传热和传质的工业应用 | 6 |
| A. \bar{U} 方法 | 6 |
| B. $\bar{U}-\bar{\alpha}$ 方法 | 11 |
| C. $U-\alpha$ 方法 | 13 |
| D. 小结 | 15 |
| 2.1.3 传热和传质数据介绍 | 16 |
| 2.1.4 均匀和非均匀系统内的传热与传质 | 23 |
| 2.1.5 传热与传质的比拟及其局限性 | 27 |
| 2.1.6 传热与传质的混合过程 | 31 |
| A. 干燥 | 31 |
| B. 混合物凝结 | 32 |
| 2.1.7 传热与传质研究现状 | 35 |
| A. 受迫与自然对流条件下, 在典型的通道流动及流过浸没物体流动中, 对固体和流体的传热和传质 | 35 |
| B. 填充、搅动和流化床中的传热与传质 | 37 |
| C. 凝结 | 38 |
| D. 蒸发和沸腾 | 41 |
| 2.1.0~2.1.7 参考文献 | 43 |
| 2.2 单相流体流动 | 45 |
| 2.2.1 引言和基本原理 | 45 |
| A. 流体运动的基本方程 | 45 |
| B. 量纲分析和相似理论 | 59 |
| C. 湍流流动的基本原理 | 62 |
| D. 边界层理论 | 67 |
| 2.2.1 参考文献 | 85 |
| 2.2.2 管道 | 88 |
| A. 完全展开圆管道流动 | 88 |

| | |
|----------------------------|-----|
| B. 完全展开非圆管道流动 | 97 |
| C. 展开中的管道流动 | 98 |
| D. 可压缩管道流动 | 101 |
| E. 不稳定管道流动 | 103 |
| F. 管子部件的压力损失 | 104 |
| 2.2.2 参考文献 | 112 |
| 2.2.3 浸没物体 | 115 |
| A. 流动状态 | 115 |
| B. 作用在物体上的作用力 | 117 |
| C. 圆柱绕流 | 118 |
| D. 各种不同形状柱体的绕流 | 122 |
| 2.2.3 参考文献 | 124 |
| 2.2.4 光管管束和肋管管束 | 125 |
| A. 引言 | 125 |
| B. 管束的阻力和压降 | 127 |
| C. 肋管管束的压降和粗糙表面的管束压降 | 140 |
| D. 管束中分离流的流体动力学参数 | 143 |
| 2.2.4 参考文献 | 144 |
| 2.2.5 固定床 | 145 |
| 2.2.5 参考文献 | 149 |
| 2.2.6 流化床 | 150 |
| A. 总体性能 | 150 |
| B. 气-固流化床局部结构 | 153 |
| 2.2.6 参考文献 | 158 |
| 2.2.7 联箱、接管和回流室 | 159 |
| A. 引言 | 159 |
| B. 接管 | 161 |
| C. 联箱 | 163 |
| D. 回流室 | 168 |
| E. 例题 | 168 |
| 2.2.7 参考文献 | 171 |
| 2.2.8 非牛顿流体 | 171 |
| A. 引言 | 171 |
| B. 非牛顿流体的实验特性 | 171 |
| C. 非牛顿流体的模型 | 176 |
| D. 体积流量和压降的关系 | 180 |
| E. 非牛顿流体的湍流流动 | 183 |
| 2.2.8 参考文献 | 185 |
| 2.3 多相流体的流动和压降 | 187 |
| 2.3.1 引言和基本原理 | 187 |
| A. 多相流的分类 | 187 |
| B. 多相流装置的设计参数 | 188 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| C. 多相流的守恒方程 | 189 |
| D. 漂移流率及其有关模型 | 195 |
| 2.3.1 参考文献 | 199 |
| 2.3.2 气-液流动 | 199 |
| A. 两相流的一般性描述; 流型 | 199 |
| B. 一维方程的应用 | 206 |
| C. 几种具体流动状态下的流体动力学 (垂直流动) | 221 |
| D. 几种具体流动状态下的流体动力学 (水平流动) | 228 |
| E. 临界两相流 | 232 |
| 2.3.2 参考文献 | 236 |
| 2.3.3 固-气流 | 237 |
| A. 气动输送原理 | 237 |
| B. 流型 | 238 |
| C. 压降简图表示法 | 238 |
| D. 空气驱动的重力输送机 | 238 |
| E. 计算原理 | 239 |
| 2.3.3 参考文献 | 247 |
| 2.3.4 固-液流 | 248 |
| A. 液压输送原理 | 248 |
| B. 流型 | 248 |
| C. 流动方式; 水平输送 | 249 |
| D. 压力损失的基本关系式 | 249 |
| 2.3.4 参考文献 | 254 |
| 2.4 热传导 | 255 |
| 2.4.1 基本方程式 | 255 |
| 2.4.2 稳态热传导 | 256 |
| A. 无内热源的平壁、圆筒壁和球壁 | 256 |
| B. 有内热源的规则物体内的温度 | 258 |
| 2.4.3 温度阶跃变化的瞬态特性曲线 | 259 |
| A. 一维系统 | 259 |
| B. 多维系统 | 272 |
| C. 耦联温度场 | 275 |
| 2.4.4 熔化和凝固 | 276 |
| 2.4.5 温度周期性变化 | 279 |
| 2.4.1~2.4.5 参考文献 | 282 |
| 2.4.6 接触热阻 | 283 |
| A. 引言 | 283 |
| B. 接触热传导 | 283 |
| C. 数值实例 | 285 |
| D. 讨论 | 286 |
| 2.4.6 参考文献 | 286 |
| 2.5 单相对流换热 | 287 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| 2.5.1 槽道内受迫对流 | 287 |
| A. 引言 | 287 |
| B. 传热系数的定义 | 287 |
| C. 层流换热 | 288 |
| D. 湍流换热 | 292 |
| 2.5.1 参考文献 | 299 |
| 2.5.2 浸没物体周围的受迫对流 | 301 |
| A. 光滑平板 | 301 |
| B. 各种形状的简单物体 | 305 |
| 2.5.2 参考文献 | 310 |
| 2.5.3 光管束和肋管束 | 311 |
| A. 横掠流动的单排管和管束 | 311 |
| B. 肋管 | 319 |
| 2.5.3 参考文献 | 327 |
| 2.5.4 固定床 | 328 |
| A. 引言 | 328 |
| B. 计算过程 | 328 |
| C. 附注 | 329 |
| D. 与实验数据的比较 | 332 |
| 2.5.4 参考文献 | 333 |
| 2.5.5 流化床中流体对颗粒的换热 | 334 |
| A. 前言、流化范围、床的膨胀 | 334 |
| B. 流化床中流体对颗粒传热系数的推荐公式 | 335 |
| C. 与实验数据的比较 | 336 |
| D. 对低贝克莱数传热和传质系数的说明 | 337 |
| E. 说明实例 | 340 |
| 2.5.5 参考文献 | 342 |
| 2.5.6 射流冲击 | 342 |
| A. 引言 | 342 |
| B. 局部传热系数的变化 | 343 |
| C. 平均传热系数 | 345 |
| D. 喷嘴的最佳空间排列 | 349 |
| 2.5.6 参考文献 | 352 |
| 2.5.7 绕浸没物体的自然对流 | 354 |
| A. 竖板 | 355 |
| B. 倾斜表面和水平表面 | 368 |
| C. 通道中浮升力引起的流动 | 373 |
| D. 水平圆柱 | 375 |
| E. 垂直与倾斜圆柱 | 376 |
| F. 垂直锥体 | 379 |
| G. 球体 | 379 |
| H. 其它浸没形体 | 380 |
| I. 通解和普适算式 | 380 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 2.5.7 参考文献 | 384 |
| 2.5.8 夹层和包壳中的自然对流 | 387 |
| A. 从下面加热的无限大水平流体夹层 | 388 |
| B. 从下面加热的包壳 | 389 |
| C. 侧壁加热和冷却的矩形包壳 | 394 |
| D. 竖直弯曲表面被加热和冷却的圆环形夹层 | 401 |
| E. 水平圆柱 | 402 |
| F. 水平环形夹层 | 403 |
| G. 同心球夹层 | 405 |
| H. 倾斜包壳 | 406 |
| I. 蜂窝结构 | 411 |
| 2.5.8 参考文献 | 412 |
| 2.5.9 绕浸没物体混合的自然对流和受迫对流 | 413 |
| A. 同向对流 (助流) | 413 |
| B. 反向对流 (反流) | 416 |
| C. 横向对流 | 417 |
| 2.5.9 参考文献 | 419 |
| 2.5.10 管内混合物的自然对流和受迫对流 | 420 |
| A. 竖管 | 421 |
| B. 水平槽道 | 428 |
| 2.5.10 参考文献 | 432 |
| 2.5.11 传热的强化 | 432 |
| A. 引言 | 432 |
| B. 自然对流 | 435 |
| C. 受迫对流 | 436 |
| D. 性能评价标准 | 441 |
| 2.5.11 参考文献 | 442 |
| 2.5.12 非牛顿流体的换热 | 444 |
| A. 引言 | 444 |
| B. 物性 | 445 |
| C. 控制方程和无量纲数群 | 448 |
| D. 在有限槽道中, 无粘性加热稳态流动时的换热 | 451 |
| E. 粘性加热对换热的影响 | 455 |
| F. 聚合物稀溶液的湍流换热 | 459 |
| 2.5.12 参考文献 | 459 |
| 2.5.13 液态金属的换热 | 460 |
| A. 槽道中的流动 | 460 |
| B. 液态金属换热器 | 462 |
| 2.5.13 参考文献 | 463 |
| 2.6 冷凝 | 465 |
| 2.6.1 引言 | 465 |
| A. 冷凝的方式 | 465 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| B. 冷凝的热阻 | 465 |
| 2.6.2 纯蒸气的膜状冷凝 | 467 |
| A. 引言 | 467 |
| B. 竖壁与竖管的冷凝 | 468 |
| C. 水平和倾斜管外的冷凝 | 476 |
| D. 水平管内的冷凝 | 480 |
| E. 界面热阻 | 484 |
| F. 液态金属的特殊效应 | 484 |
| 2.6.2 参考文献 | 486 |
| 2.6.3 蒸气混合物的冷凝 | 488 |
| A. 引言 | 488 |
| B. 一般近似方法 | 489 |
| C. 带不凝性气体的单组份蒸气 | 492 |
| D. 二元蒸气混合物 | 495 |
| E. 多组份混合物 | 496 |
| 2.6.3 参考文献 | 498 |
| 2.6.4 形成非互溶液体的蒸气混合物的冷凝 | 498 |
| A. 引言 | 498 |
| B. 共晶混合物的冷凝 | 499 |
| C. 非共晶混合物的冷凝 | 507 |
| D. 带有不凝性气体的非互溶液体的蒸气混合物的冷凝 | 502 |
| 2.6.4 参考文献 | 504 |
| 2.6.5 珠状冷凝 | 505 |
| A. 引言 | 505 |
| B. 传热系数的数量级 | 505 |
| C. 珠状冷凝的传热机理 | 505 |
| D. 珠状冷凝的传热计算 | 505 |
| E. 助聚剂 | 507 |
| 2.6.5 参考文献 | 508 |
| 2.6.6 冷凝的强化 | 508 |
| A. 蒸气空间冷凝 | 508 |
| B. 受迫对流冷凝 | 509 |
| 2.6.6 参考文献 | 511 |
| 2.6.7 雾化 | 512 |
| A. 引言 | 512 |
| B. 过饱和 | 512 |
| C. 核的形成: 纯蒸气 | 512 |
| D. 产生过饱和的条件 | 513 |
| E. 雾的形成所造成的影响 | 514 |
| F. 减小雾的形成的构想 | 515 |
| 2.6.7 参考文献 | 515 |
| 2.7 沸腾与蒸发 | 516 |

| | |
|-------------------------------|-----|
| 2.7.1 单组份液体的沸腾：基本过程 | 516 |
| A. 蒸气的形成 | 516 |
| B. 蒸发 | 517 |
| C. 均匀核化 | 517 |
| D. 非均匀核化 | 518 |
| E. 活化核化点的尺寸 | 520 |
| F. 气泡的生长 | 521 |
| G. 气泡的脱离和频率 | 523 |
| 2.7.1 参考文献 | 524 |
| 2.7.2 池内沸腾 | 525 |
| A. 核态沸腾起始区 | 526 |
| B. 核态沸腾 | 527 |
| C. 临界热流密度 | 535 |
| D. 过渡沸腾 | 539 |
| E. 最小热流密度 | 539 |
| F. 膜态沸腾 | 540 |
| 2.7.2 参考文献 | 542 |
| 2.7.3 垂直管内沸腾 | 543 |
| A. 引言 | 543 |
| B. 过冷沸腾 | 547 |
| C. 饱和沸腾 | 552 |
| D. 临界热流密度 | 556 |
| E. 超临界热流密度区的传热 | 575 |
| 2.7.3 参考文献 | 583 |
| 2.7.4 水平管内对流沸腾 | 586 |
| A. 水平管、弯头和螺管中的干涸 | 586 |
| B. 水平管、弯头和螺管中的传热系数 | 589 |
| 2.7.4 参考文献 | 591 |
| 2.7.5 管外和管束外的沸腾 | 592 |
| A. 横掠单管外的沸腾 | 592 |
| B. 横掠单管外的临界热流密度 | 593 |
| C. 膜态沸腾 | 595 |
| D. 水平管束中的管外沸腾 | 595 |
| E. 管束中水平管外的传热系数 | 596 |
| F. 管束中水平管外的临界热流密度 | 597 |
| 2.7.5 参考文献 | 600 |
| 2.7.6 二元和多组分混合物的沸腾：基本过程 | 600 |
| 2.7.6 参考文献 | 608 |
| 2.7.7 二元和多组份混合物的沸腾：池内沸腾 | 609 |
| A. 核态沸腾 | 609 |
| B. 临界热流密度 | 612 |
| C. 过渡沸腾 | 614 |

| | |
|---|-----|
| D. 最小热流密度 | 614 |
| E. 膜态沸腾 | 615 |
| 2.7.7 参考文献 | 615 |
| 2.7.8 二元和多组份混合物的沸腾: 受迫对流沸腾 | 616 |
| A. 饱和核态沸腾 | 616 |
| B. 两相受迫对流区 | 617 |
| C. 二元和多组份蒸发的简单处理 | 619 |
| D. 二元和多组份混合物蒸发时分界面的质交换 | 620 |
| E. 受迫对流沸腾的临界热流密度 | 622 |
| 2.7.8 参考文献 | 624 |
| 2.7.9 沸腾和蒸发的强化 | 625 |
| A. 池内沸腾 | 625 |
| B. 管内沸腾 | 626 |
| 2.7.9 参考文献 | 628 |
| 2.8 气-固系统的传热 | 630 |
| 2.8.1 固定填充床 | 630 |
| A. 传热状态的描述 | 630 |
| B. 二维温度场 $T(r, t)$ 的控制方程 | 630 |
| C. 一些有价值的传热参数 | 631 |
| D. 一维温度 $\bar{T}(t)$ 的控制方法 | 641 |
| E. 热量 Q | 642 |
| 2.8.1 参考文献 | 644 |
| 2.8.2 有气体流过的填充床 | 645 |
| A. 传热情况的描述 | 645 |
| B. 二维温度场 $T(r, z)$ 的控制方程 | 645 |
| C. 一些有价值的传热参数 | 646 |
| D. 一维温度场 $\bar{T}(z)$ 的控制方程 | 651 |
| E. 加热量 \dot{Q} | 652 |
| F. 固相温度场 $T_s(r, z)$ 和气相温度场 $T_g(r, z)$ 的控制方程 | 652 |
| 2.8.2 参考文献 | 653 |
| 2.8.3 填充床和扰动床 | 653 |
| A. 填充床的传热 | 653 |
| B. 移动床和扰动床的传热 | 656 |
| 2.8.3 参考文献 | 661 |
| 2.8.4 流化床 | 662 |
| A. 引言 | 662 |
| B. 预算公式 | 664 |
| C. 浸没的管道 | 666 |
| 2.8.4 参考文献 | 668 |
| 2.9 辐射换热 | 669 |
| 2.9.1 引言 | 669 |
| A. 热设计中的辐射换热 | 669 |