

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

TK124-43

248

传 热 学

赵镇南



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

传热学/赵镇南. —北京: 高等教育出版社,
2002.7

本科教材

ISBN 7-04-010723-6

I. 传… II. 赵… III. 传热学-高等学校-教材
IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 043649 号

传热学

赵镇南

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

传 真 010-64014048

购书热线 010-64054588

免费咨询 800-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京地质印刷厂

开 本 787×960 1/16

印 张 33.75

字 数 610 000

版 次 2002 年 7 月第 1 版

印 次 2002 年 7 月第 1 次印刷

定 价 38.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

序 言

热现象是自然界与科学技术领域中最普遍的物理现象之一，热能是人类利用自然界能源资源最主要的一种能量形式。我国能源资源总量丰富，但人均占有量却远远低于世界平均水平，同时，我国目前相当多的主要工业产品的单位产值能耗却是发达国家的数倍。所有工程技术领域的工作都离不开用能，而且各种形式的能量最终都将以热能的形式散失到环境和宇宙中。我国国民经济必须走可持续发展的道路，合理用能与节约能源既是当务之急，也是长久之计。因此，作为介绍热能的有效合理利用以及传递、转换规律的热工类课程应该作为 21 世纪工科各专业学生的一门公共技术基础课，学习热工类课程应该成为培养复合型工程技术人才科学素质的一个不可缺少的环节。以上基本观点是教育部面向 21 世纪“热工系列课程教学内容与课程体系改革的研究与实践”项目组经过近 5 年的研究论证所得出的一个重要结论。

为了实施上述思想，需要编写相应的教材。以往的传热学教材通常针对比较窄的专业或者行业来编写，近年来，国外和国内的传热学教材都出现了一些显著的变化，主要是专业适用面的进一步拓宽、综合性的不断增强以及与工程实践的紧密结合。我高兴地看到这样一本不受专业对口限制，也不硬性规定教学时数的新教材已经由赵镇南副教授编写出来了。

与一般的传热学教材相比，本书具有以下一些特色：在取材方面内容广泛、新颖，如增加了非傅立叶导热及导热反问题等内容；介绍了在生物、材料、医学、电子等领域中传热学的应用；在教材内容的编排方面，把能量守恒原理作为主线贯穿全书，在许多环节的叙述方面都做了革新的尝试。本书还特别注意紧密联系工程实际中的传热问题，60 多道例题中大部分都与工程问题有关。在习题的编排方面作者也作了积极的改革，编入了一部分无确定解和设计型的题目，这有利于培养学生解决工程实际问题的能力。特别值得一提的是，本书是国内第一本配有电子材料的传热学教材，除了基本概念的自我检测以外，还开发了一个求解器。相信这些对于提高学生的学习兴趣，提高学习效率都会起到积极的作用。

本书作者是面向 21 世纪“热工系列课程教学内容与课程体系改革的研

究与实践”项目组的成员，多年来在传热学教学中积累了丰富的经验。在执行项目的过程中，经过广泛的调查研究、反复的修改以及热工课程教学指导委员会的评审，编写出了这本教材，这是本项目的重要研究成果。在教材即将付印之际，写了这些话，爰以为序。

陶文铨

2002年3月于西安

前 言

1996年6月，由原国家教委下达的“面向21世纪高等教育教学内容和课程体系改革计划”的立项中，由西安交通大学牵头的《热工系列课程教学内容与课程体系改革的研究与实践》项目获得批准并开始实施。该项教学研究课题历时4年多，于2000年9月通过了教育部组织的专家评审，获得极高评价。在项目组各成员单位对国内外传热学教材的现状和发展趋势进行了广泛的调查、研究和认真研讨并取得广泛共识的基础上着手编写本教材。

本教材的写作宗旨是：宽专业面向，彻底抛弃教材按行业划分的格局，不再有任何专业对口的局限，从一定意义上讲是还“传热学”以它的本来面目；紧密结合工程实际，增强综合性，加强工程设计与设计优化观念的教育和灌输；注重培养学生养成正确的思维习惯并切实提高解决工程实际问题的能力。

为了实践这个宗旨，特别在以下几方面作了大胆的改革和探索：

1. 在教材内容的编排和讲述方式方面：（1）把章节内容的编排尽量细化、条理化，以提高叙述的逻辑性；（2）突出强调能量守恒原理在传热问题研究中的极端重要性，并把这个思想作为主线贯穿全书；（3）加强了对强化传热原理和应用的介绍；（4）把复合换热的概念和传热过程的计算提到前面，为全书自始至终加强对综合性问题的分析讨论铺平了道路；（5）把数值计算的内容融入全书中，即把编程解题视为一种常规手段，鼓励学生用它来求解各种工程传热问题（与配套的求解器软件相结合）；（6）采用无量纲化方法简化边界层方程并推出特征数方程的函数形式，方法简洁，概念清楚；（7）把角系数的定义和推导建立在灰体的基础上；（8）对重要概念、基本定律和计算方法必须遵守的条件作了明确、严格的说明，如傅里叶定律、导热热阻网络、瞬态导热正规状况阶段起始时刻与穿透时间的关系、基尔霍夫定律三个表达式的应用条件、角系数概念的正确表达和前提条件、辐射换热计算的封闭腔概念等；（9）每章最后一节均安排有“本章提要”，对一章的重要概念和公式进行了全面的总结和归纳。

2. 在教材内容的选取上也相应作了一些调整 and 变化。如在绪论中全面介绍了传热现象在传统工农业和各高新技术领域中的诸多应用及发展趋势，帮助学生在学本课程之初就建立起对传热学的整体概念和初步认识。在导热部分，给出了各向异性、超级隔热材料、非傅里叶导热、导热反问题、混合物质的导热系数、第四类边界条件等概念，还给出了变截面肋的技术经济分析，半无限大物体在三类不同边界条件下的瞬态导热解，周期性非稳态导热解等。在

对流换热部分给出了肋片管外掠流动换热关联式，在第 6、7、9 和 10 章中均设专节介绍各种强化传热技术的基本原理和它们的重要应用。介绍了液态金属、非牛顿流体和高速流动换热的基本特点，给出了填充床、流化床、冲击射流以及发散冷却与烧蚀的概念和简介。在相变换热一章中给出了混合工质冷凝与沸腾传热时表面传热系数的基本特点。在辐射强化传热部分介绍了各种热控涂层的特点和应用。在换热器热计算中给出了优化设计的概念和效能-传热单元数方法的双向计算公式，以及紧凑式换热器和微型换热器的应用与发展概况等。另外，根据实际需要把部分理论推导过程和图表移到了书末的附录中。

相对来说，传热学是一门比较古老和传统的学科，但是近年也出现了不少新变化，特别是与材料、生物、医学、电子、激光等学科相互交叉、渗透形成了若干新的学科分支。作为面向 21 世纪的传热学教材，有责任把这些新进展、新变化介绍给年青一代学子。为此本教材选取若干典型内容，作了入门性的介绍，并给出了这些领域中比较权威的参考书，供读者进一步学习时阅读。

3. 传热学是一门深深植根于工程的学科，例题是体现教材紧密联系工程实际最重要的途径。对学生来说，例题更是掌握基础理论与解决实际问题之间的一座桥梁。本书共编写了 69 道例题，除少量属于理论分析类型外，大多数都与工程实际紧密相联系。全书例题采用统一格式，突出了建模训练，并在求得基本结果以后，对问题所涉及的基本概念、简化条件的合理性以及当给定参数发生可能的变化时将对结果产生什么影响等作了比较详细深入的分析讨论。相信这对学生深刻理解基本概念、开阔解题思路和切实提高解题能力有很大益处，同时也是把传热学与工程设计、参数优化结合起来的一种新尝试。课后习题总计 468 道，作了分类以便于师生选题。编制习题的主导思想一是尽力拓宽题目的专业领域，二是紧密联系工程实际并加强综合性。鼓励学生用多种方法解题。为了增强工程意识及灌输工程设计观念，并培养学生的创新能力，首次在习题中编入了一部分所谓“无确定解 (open-ended problems)”和“设计型 (what-if)”题目，大部分属于参数影响程度分析和优化类型的题目，共计 112 道，大约占习题总量的 24% (凡此类题目均用 作了标记)。作者希望这些措施能够对提高学生解决工程实际问题的能力有所裨益。

4. 作为一种新的探索和尝试，研制了一套与本教材相配套的学生用课后型软件。主要包括以下两方面内容：(1) 基本概念的总结复习和自我检测。以自编思考题为主，总量约 140 道。思考题的目的是加深对基本概念的理解和正确运用，仅靠背书一般难以回答。(2) 求解器，或称解题器，是帮助学生在有限的课后时间里完成较多工程传热问题建模和计算训练的辅助性软件。目的在于让学生摆脱重复、繁琐、耗时的计算工作，把更多的时间和精力用到强化建模训练，提高分析和解决实际问题的能力上来。该求解器的主要功能包括：

(i) 建立了教材中大部分基本计算类型问题的数学模型, 可供直接使用。同时该软件还具有良好的灵活性和适应性——使用者可以自主地扩展、增添新的模型, 从而使软件的应用范围变得越来越广。

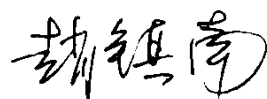
(ii) 实现了教材中多数图表和曲线的数字化, 如肋效率、诺模图、黑体辐射函数表、角系数曲线、 ε -NTU 关系式, 以及部分材料的热物性参数等。使用本软件求解有关类型问题时, 可以摆脱既费时又不准确的查图、查表, 只需输入已知变量就立即得出结果, 准确、快速, 不需要再通过插值计算物性。

(iii) 软件内嵌若干数学工具, 如数值积分, 高次方程及各种特殊代数方程求解, 线性方程组求解等。对导热和辐射问题的数值计算可提供直接帮助。软件还具有初步的将计算结果自动绘图并作简单参数分析的能力。

作者愿在此衷心感谢本教材的主审人, 东南大学施明恒教授对书稿提出的宝贵和重要的意见, 同时感谢参加 2000 年 9 月兰州审稿会议的西安交通大学、东南大学、华中理工大学、重庆大学、中国科学技术大学、华南理工大学、上海交通大学、太原重型机械学院以及清华大学、北京科技大学、兰州铁道学院的代表所提出的诸多建设性的意见。作者还要借此机会特别感谢华中理工大学黄素逸教授, 是他的鼓励才使作者下了动笔的决心。还要特别感谢西安交通大学陶文铨教授, 作为热工课委会的主任委员和“热工系列课程教学内容与课程体系改革的研究与实践”项目的总负责人, 在繁忙的工作中非常详细地审阅了书稿全文, 提出了许多中肯和珍贵的意见, 对提高本书的质量起了重要的作用。作者还要感谢北京工业大学马重芳教授和西安交通大学王秋旺教授, 他们慷慨地向作者提供了咨询意见和大量的参考资料。

本教材没有专业对口的限制, 也没有硬性规定教学时数。根据实际需要从中选取、删减或者增添必要的内容, 完全是教师的权利和职责。

历时 4 年的写作历程, 感慨良多。对于这样一本改革力度比较大的新教材, 能在多大程度上获得同行的认可, 实在心中无数。真诚地期待并欢迎国内热工界的前辈和同行, 使用本教材的所有师生以及企业界的工程技术人员对书中的谬误和不足提出改进意见(来函请寄: 天津市天津大学电气自动化与能源工程学院热能工程系(邮编 300072), 电子信箱: zn_zhao@sina.com)。



于天津大学 新园村
2002 年 元月

内 容 提 要

本书是教育部面向 21 世纪“教学内容和课程体系改革计划”中《热工系列课程教学内容与课程体系改革的研究与实践》项目的研究成果之一，是在对国内外现有的传热学教材进行了广泛调查、分析和研究的基础上，根据 21 世纪我国高等工科教育改革的要求编写的面向 21 世纪传热学教材。

本书的主要特点是宽专业面向，紧密联系工程实际，注重使读者掌握分析传热问题的正确方法，强调对综合性传热问题的建模训练并切实提高解决实际问题的能力。在讲述基本概念时准确严格，在文字表达上条理清楚、逻辑严密、重点突出。在内容取材和编排方面均颇有新意。作为国内正式出版的传热学教材，还首次配有软件光盘（介绍见前言）。

全书共 10 章，分别介绍了导热、对流和辐射传热的基本原理、计算方法以及热交换器的热设计计算。全书把正确运用能量守恒原理放在突出地位，显著加强了对综合性传热问题的分析讨论和对强化传热原理及应用的介绍，并把数值计算方法的应用贯穿在全书中。书中配有例题 69 道、习题 468 道，涉及各工程领域中范围十分广泛的传热问题，习题中还包括了 112 道“无确定解”的参数分析和设计型题目。

本书可作为各类专业开设传热学课程的教材，对正在复习准备考研的学生将能提供重要的启发和帮助，也可以作为企业工程技术人员自学、进修的教材或参考书。

主要符号表

英文字母符号

a	热扩散率 (或导温系数), m^2/s
A	面积, m^2
c	比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
C_f	范宁摩擦系数
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
d	直径, m
E	辐射力, W/m^2 ; 总能, J/kg
f	达西摩擦系数
F	力, N
g	重力加速度, m/s^2
G	投射辐射, W/m^2
h	对流换热表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
h_r	辐射换热表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
H	高度, m
i	节点编号
I	电流, A
j	节点编号
J	有效辐射, W/m^2
k	总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
K_λ	光谱减弱系数, m^{-1}
l	长度, m
L	(定向) 辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$
n	管束的排数; 法向
N	管束的总管数
p	压力, Pa
P	功率, W ; 物体的周长, m
q	热流密度, W/m^2
q_m	质量流量, kg/s
q_v	体积流量, m^3/s
Q	热量, J
r	径向坐标; 汽化潜热, kJ/kg
R	半径, m ; 热阻, $\text{m}^2\cdot\text{C}/\text{W}$
R_c	对流换热热阻, $\text{m}^2\cdot\text{C}/\text{W}$
R_r	辐射换热热阻, $\text{m}^2\cdot\text{C}/\text{W}$
R_λ	导热热阻, $\text{m}^2\cdot\text{C}/\text{W}$
S	气体辐射的射线行程长度, m ; 管间距, m ; 导热形状因子, m

t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
T	热力学温度, K; 周期, s
u	速度, m/s
U	无量纲 ^① 速度
v	速度, m/s; 比体积, m^3/kg
V	体积, m^3 ; 无量纲速度
w	宽度, m
W	功, J
x	笛卡尔坐标
X	无量纲坐标; 角系数 (必须具有双角码)
y	笛卡尔坐标
Y	无量纲坐标
z	笛卡尔坐标

希腊字母符号

α	吸收比; 体积膨胀系数, K^{-1}
β	肋化系数; 初始相位角, rad
γ	表面张力, N/m
χ	管间距修正因子
δ	厚度, m; 边界层厚度, m
ε	发射率 (或称黑度); 换热器效能
η	动力粘度, Pa·s; (肋) 效率
φ	径向坐标
λ	导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 波长, m
λ_0	变导热系数表达式中的常数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
μ	特征值
ν	运动粘度 (动量扩散率), m^2/s
θ	过剩温度, $^{\circ}\text{C}$ 或 K; 球坐标系中的纬度角, rad
Θ	无量纲过剩温度比
ρ	密度, kg/m^3 ; 反射比
ρ_c	电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$
σ	斯忒藩-玻耳兹曼常数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$
τ	时间, s; 透过比; 切应力, Pa
τ_c	时间常数, s
ψ	换热器对数平均温差修正系数
Φ	热流量, W
$\dot{\Phi}_v$	内热源的热功率, W/m^3
Ω	立体角, sr
Λ	(周期性导热的) 波长, m

① 按照现行国家标准 GB 3100-200-93, “无量纲”应该称为“量纲 1”, 习惯上称为无量纲, 下同。

ω 波动的角频率, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$

相似特征数

- Ar 阿基米德数, $\rho_l g (\rho_l - \rho_v) l^3 / \eta_l^2$
- Bi 毕渥数, hl / λ
- Bo 邦德数, $g (\rho_l - \rho_v) / \gamma$
- Ec 埃克特数, $u_\infty^2 / [c_p (t_w - t_\infty)]$
- Fo 傅里叶数, $a\tau / l^2$
- Ga 伽利略数, $g l^3 / \nu^2$
- Gr 格拉晓夫数, $g\alpha \Delta t l^3 / \nu^2$
- Gr^* 修正格拉晓夫数, $g\alpha q l^4 / \lambda \nu^2$
- Gz 格雷茨数, $RePr d / l$
- j 科尔本因子, 或称 j -因子, $St Pr^{2/3}$
- Ja 雅各布数, $c_p (t_w - t_\infty) / r$
- Nu 努塞尔数, hl / λ
- Pe 贝克来数, $Re Pr$
- Pr 普朗特数, ν / a
- Ra 瑞利数, $Gr Pr$
- Re 雷诺数, $u_\infty l / \nu$
- St 斯坦顿数, $Nu / RePr = h / (\rho c_p u_\infty)$

角码

- app 表观的
- b 肋基, 沸腾, 黑体
- c 冷侧, 临界, 接触, 对流, 凝结
- cond 导热
- conv 对流
- d 以直径为特征尺寸
- e 发射, 当量
- ent 入口段
- e+r 发射+反射
- f 肋的, 流体的
- fd 充分发展的
- h 热侧
- in 入口
- l 层流的, 凝液的
- m 平均
- n 法向
- opt 最佳值
- out 出口
- r 径向, 辐射

s	太阳, 滞止
sat	饱和
st	储存
sur	环境
t	总的, 湍流, 热的
w	壁面的
v	蒸气的
x	局部值
λ	光谱的
θ	定向的

总 目 录

主要符号表	1
第 1 章 绪论	1
1.1 传热的基本概念	1
1.1.1 传热	1
1.1.2 热量传递的基本方式	2
1.1.3 传热学与热力学的关系	3
1.2 传热的工程应用	4
1.2.1 在传统工业和农业领域中的应用	4
1.2.2 在高新技术领域中的应用	7
1.3 传热方式与热流速率方程	10
1.3.1 热传导	11
1.3.2 热对流	11
1.3.3 热辐射	13
1.3.4 复合换热	14
1.3.5 总传热系数	15
1.4 传热问题的研究方法	16
1.4.1 研究传热问题的一般方法	16
1.4.2 能量守恒法则	17
1.5 本章提要	22
习题	23
参考文献	29
第 2 章 导热的理论基础	31
2.1 导热热流速率方程	32
2.1.1 温度场与温度梯度	32
2.1.2 傅里叶定律	33
2.2 物质的导热特性	34
2.2.1 固体: 金属与保温材料	34
2.2.2 液体	37
2.2.3 气体	37
2.2.4 各向异性	37
2.3 导热微分方程与单值性条件	38
2.3.1 直角坐标系中的导热微分方程	39
2.3.2 径向坐标系中的导热微分方程	40
2.3.3 单值性条件	41
2.4 本章提要	48
习题	49
参考文献	52

第3章 稳态导热分析与计算 54

3.1 一维稳态导热	54
3.1.1 单层与多层平壁: 热阻分析方法	55
3.1.2 径向系统中的一维导热	61
3.1.3 有内热源时的导热	67
3.1.4 变导热系数	69
3.1.5 接触热阻	73
3.2 扩展表面的导热与传热	74
3.2.1 扩展表面导热的理论分析	74
3.2.2 肋壁的传热性能	78
3.2.3 变截面肋及其优化	84
3.2.4 肋壁的工程应用	85
3.3 多维导热问题	86
3.4 稳态导热的数值计算方法	88
3.4.1 求解区域的离散化	88
3.4.2 节点方程组的建立	89
3.4.3 差分方程的求解	92
3.5 本章提要	100
习题	102
参考文献	118

第4章 非稳态导热 120

4.1 非稳态导热的基本概念	121
4.1.1 非稳态导热问题的类型	121
4.1.2 瞬态导热过程的基本特征	121
4.2 集总参数分析方法	123
4.2.1 基本概念	123
4.2.2 集总参数分析方法	123
4.2.3 适用条件与误差估计	126
4.3 对流边界条件下的一维瞬态导热	131
4.3.1 一维大平壁对称冷却(加热)	131
4.3.2 长圆柱与球体	134
4.3.3 正规状况阶段	134
4.4 半无限大固体的非稳态导热	138
4.4.1 第一类边界条件	138
4.4.2 第二类边界条件	140
4.4.3 第三类边界条件	140
4.5 周期性非稳态导热	145
4.5.1 半无限大物体内的温度响应	145
4.5.2 周期性导热的热量传递	148
4.6 多维非稳态导热	150
4.7 非稳态导热数值解	153
4.7.1 差分方程: 能量平衡方法	153

4.7.2	显式格式的稳定性条件	155
4.7.3	隐式差分格式	155
4.8	本章提要	159
	习题	161
	参考文献	172
第 5 章	对流换热的理论基础	173
5.1	对流换热问题概述	174
5.1.1	局部值与平均值	174
5.1.2	对流换热问题的分类	174
5.1.3	对流换热问题的求解方法	174
5.1.4	影响对流换热的主要因素	176
5.2	对流换热微分方程组	178
5.2.1	连续性方程	178
5.2.2	动量微分方程	178
5.2.3	能量微分方程	179
5.2.4	边界条件	181
5.3	边界层概念	182
5.3.1	速度边界层	182
5.3.2	热边界层	184
5.3.3	边界层概念的重要意义	185
5.4	边界层对流换热微分方程组	185
5.4.1	局部表面传热系数	185
5.4.2	对流换热方程组的简化	186
5.4.3	解的无量纲函数形式	188
5.4.4	层流边界层微分方程相似解	190
5.4.5	层流边界层积分方程近似解	192
5.5	湍流以及动量和热量传递的类比	196
5.5.1	湍流流动和传递特征	197
5.5.2	湍流传递问题的求解方法	198
5.5.3	动量和热量传递的类比	198
5.5.4	类比关系的应用	199
5.5.5	湍流边界层厚度	202
5.6	对流换热的实验研究方法	205
5.6.1	相似原理	206
5.6.2	相似特征数	208
5.6.3	特征数方程	209
5.7	本章提要	211
	习题	213
	参考文献	218
第 6 章	对流换热的工程计算	219
6.1	掠过平板的强迫流动换热	210

6.1.1	层流	210
6.1.2	湍流	210
6.1.3	有未加热起始段	211
6.2	绕流圆柱体的强迫流动换热	224
6.2.1	流动边界层	224
6.2.2	绕流单管	225
6.2.3	绕流光管管束	228
6.2.4	绕流肋片管束	231
6.3	绕流球体的强迫流动换热	234
6.4	管内强迫流动换热	238
6.4.1	管内流动边界层	238
6.4.2	管内热边界层和换热	240
6.4.3	截面平均温度的沿程变化	242
6.4.4	管内对流换热的特征数方程	245
6.5	特殊对流换热问题	256
6.5.1	液态金属	256
6.5.2	非牛顿流体	257
6.5.3	高速流动换热	258
6.6	强化传热	259
6.6.1	传热强化的原理	259
6.6.2	强化传热的基本途径	260
6.7	对流换热的若干工程应用	265
6.8	自然对流换热	273
6.8.1	自然对流边界层	274
6.8.2	动量和能量微分方程	275
6.8.3	自然对流相似特征数	276
6.8.4	大空间自然对流换热计算	277
6.8.5	有限空间自然对流换热计算	283
6.8.6	混合对流换热	286
6.9	本章提要	287
	习题	290
	参考文献	302

第 7 章 沸腾与凝结

7.1	相变换热的基本概念	307
7.2	沸腾换热	308
7.2.1	池沸腾换热曲线	308
7.2.2	池沸腾换热的计算关系式	311
7.2.3	影响核态沸腾换热的主要因素	314
7.2.4	强迫对流沸腾	315
7.3	凝结换热	318
7.3.1	表面凝结的形态	318
7.3.2	竖壁层流膜状凝结理论解	319
7.3.3	湍流膜状凝结换热计算	322