

# 传热基础

〔美〕 F·P·因克罗普拉 D·P·德威特 著

陆大有 于广经 朱谷君 王兴甫 译 金如山 校

宇航出版社

# 传 热 基 础

[美] F·P·因克罗普拉 著  
D·P·德威特

陆大有 于广经 译  
朱谷君 王兴甫

金如山 校

中航出版社

## 内 容 简 介

本书是当前美国各大学广泛采用的教科书之一。该书系统地论述了传热、传质过程的基本理论及其在工程实践中的主要应用。全书共十五章，分别阐述了热传导、对流换热、热辐射和辐射换热与传质的过程和理论。各章均有大量的例题和练习题。书末附录中给出了传热传质计算中常用的各种热物理性质的数值表。

本书译者还根据原著者手稿编译了本书的全部习题解，定名为《传热基础·600题详解》，另册出版。

本书可作为高等院校的热能动力、化工、机械、建筑、航天航空、热物理、冶金等专业的教科书或教学参考书，也是有关专业科研、工程技术人员必备的参考书。

## Fundamentals of Heat Transfer

Frank P. Incropera & David P. DeWitt

John Wiley & Sons, Inc. 1981

Published simultaneously in Canada.

## 传 热 基 础

【美】 F·P·因克罗普拉 D·P·德威特 著

陆大有 于广经 朱谷君 王兴甫 译

金如山 校

责任编辑：宋兆武

☆

宇航出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

天津静一胶印厂印刷

☆

开本：787×1092 1/16 印张：36.125 字数：885 千字

1987年7月第1版第1次印刷 印数：1—5000册

ISBN 7-80034-064-3/TB·022 定价：10.00元

# 译 序

本书系根据美国普渡大学F·P·因克罗普拉教授和D·P·德威特教授合著的《传热基础》(1981年第1版)译出。

本书着重讲述各种热交换问题的物理本质和求解方法。各章均列举较多的例题进行详细解答,以阐明这些理论的具体应用。书中例题和600个练习题的内容取材极其广泛,具有很强的工程实用性。因此,译者认为,该书的主要特点是理论与工程实践联系较好,是一本较理想的传热学教科书或教学参考书,是有关专业的大学生、研究生的必读书,也是相应专业(包括热能利用、机械、化工、航天航空、建筑、冶金、热物理等)的科研和工程技术人员的必备参考书。

本书译者:王兴甫译序言和第一、二章;于广经译第三至第五章;朱谷君(北京航空学院)译第六至第十章;陆大有(北京航空学院)译第十一至十五章和全书的附录。全书由北京航空学院的金如山同志校订。由于译者水平所限,难免有不妥或谬误之处,敬请读者批评指正。

我们还根据原著者手稿编译了本书的全部习题解,定名为《传热基础·600题详解》,另册出版,以飨读者。

最后,译者特别感谢本书的原著者F·P·因克罗普拉教授和D·P·德威特教授。他们热情支持我们翻译本书,还专门为中文版写了序言。这不仅是对我们译者的勉励,更是对我国教育事业和科学技术发展的支援,是中、美两国人民友好的象征。

译 者

1985年2月 于北京

## 中文版序言

这本《传热基础》（1981年第一版）已经成为美国各大学机械系和化工系最广泛采用的教科书之一。该书的成就可以用它已达到的三个主要目标来说明：（1）阐明对传热原理的领会；（2）建立这些原理与热系统特性之间的关系；（3）发展预估这些特性的方法。我们的目标是培养学生具备这类工程分析的能力，向他们提供关于热系统设计或性能方面的有用信息和数据。我们达到上述目标的方法是：让学生应用传热学去解决当代科学研究和工业中的各种实际问题。

我们非常荣幸能把这本书推荐给中华人民共和国的大学生、工程师和科学家们使用。我们期望本书不仅对贵国的教育界有用，还将有助于提高读者解决实际传热问题的技巧。

作者感谢金如山先生及其同事们为本书的翻译出版所做的努力。通过金先生两次在美国普渡大学机械工程系担任客座教授职务，我们早已注意到他那高深的学识、积极的组织才能和美好的人品。我们特别感谢中国精密机械公司的王兴甫先生（现在是我校的访问学者），他致力于本书的翻译工作和该项事务的具体联系。我们还感谢其他几位翻译者：北京航空学院的陆大有先生和朱谷君先生；航天工业部的于广经先生（以前是金先生的学生）。他们都是传热学领域的有成就的工作者，无疑是保证忠实翻译本教科书的合适人选。

我们完全相信，本书的中文版将会象它的英文原版在美国所起到的作用一样，在贵国也将是非常有用的。

F·P·因克罗普拉

D·P·德威特

1985年4月于普渡大学

美国印第安纳州、西拉斐特市

（宋兆武译）

# 英文版序言

在我们的周围总是存在着传热过程，并且传热与科学技术的关系也在逐年加深。如果人们要研究那些包含传热过程的传统的及新出现的问题，必须具备两个条件：一是必须了解传热过程的物理特征；二是必须掌握对传热过程进行定量分析的技巧。

本书有两个主要目标：

1. 培养学生理解决定传热现象的物理因素；
2. 教给学生解决各种实际问题的方法。

第一个目标就是，当一个问题摆在面前时，学生应能判别该问题中是否存在传热过程。如果确实存在传热，他们应能确定这个传热过程的具体性质。例如，是不是热传导在起重要作用？如果是这样，那么是否可以把它做为二维稳态热传导来处理？或者，所研究的问题的特征是多维的和或不稳定的传热过程？又如，是否与辐射换热过程有关？如果有关，那么与可能存在的对流换热相比较，辐射换热是否重要，等等。总之，主要目标是要使学生对每一个问题都能进行与此过程相类似的思考和分析。

第二个目标是训练学生能确定合适的简化假设，确定有关的因变量和自变量，选择或推导出计算因变量的适当的关系式。简单地说，学生必须会进行工程类型的分析。尽管这种分析并非总是那么精确，但却常常可以得到有关一个具体系统或传热过程的性能和或设计中的有用资料。

上述目标以及要将本书成为传热学基本教材这一事实，在很大程度上推动了我们写出这本书。我们根据这些考虑来确定本书内容的主次。例如，尽管书中对有关附面层流动的基本物理过程相当重视，但并不强调附面层解的详细推导；而是把重点放在解决包含有对流传热传质的实际问题所需要的经验结果上。

我们设想学生已经学习了热力学，同时已经学过或者正在学习流体力学方面的课程。因此，本书不再全面地把对流换热和动量交换（流体力学）结合起来介绍，而只是加强学生已有的流体力学的基础。此外，本书通过对能量守恒定律，特别是热力学第一定律的阐述，来加强学生在热力学方面的基础。书中先讲述能量守恒方程的一般的、但是简单的形式，并把它做为系统地处理后面各种应用问题（不论是用到微元体，还是有限控制体）的基础。并通过大量的例题和练习题充分地说明了热力学第一定律在传热分析中的重要性。

应当指出本书对有关数值计算方法的处理深度。由于数值计算方法常常是提供热传导问题精确解的唯一方法，所以本书十分重视有限差分方程的建立，以及求解这种方程的常用方法。但在书中没有给出求解这类方程的任何计算机程序或子程序，因为在绝大多数计算机软件库中，很容易得到这类软件。这类程序或子程序，学生也很容易编出。

虽然本书主要是讲传热的，但也确实有意识地包括了一些传质问题和传质效应。当然，传质是一个复杂的问题，不可能在这样一本基础性的教科书中加以详细阐述。但由于传质和传热非常相似，所以在这样入门性的传热教科书中介绍一下传质问题是合适的。也正因为如此，我们只在传质和传热问题可以类比的范围内才讨论传质问题。

处理传质问题的方式因传质的类型不同而不同。由于扩散传质在工程技术上应用不多，所以与这类传质有关的诸问题只在本书的最后一章单独进行讨论。如果教师想删减这部分内容时，完全可以不讲这一章。相反，由于对流传质过程在工程技术上应用很广泛，而且对流传质过程对蒸气-液体界面处的总能量交换影响很大，所以把对流传质和对流传热放在一起，通过两者之间很强的类比进行讲授。

本书全部内容分为十五章：

第一章叙述了热传导、对流和辐射三种传热方式的物理基础，强调了能量守恒定律的重要作用。通过精心选择的例题和练习题，培养学生鉴别各种实际问题中的相应传热过程的能力。第二章详细地叙述了热传导方程，讨论了傅里叶定律的本质和导出过程，推导了热传导方程的一般形式。强调了传热方程中各项的物理意义以及经常用到的该方程的各种简化形式。在第三、四、五章中讨论了关于用来解决一维的、二维的和非稳态传热问题的方法。这是按照经典传热学的讲述途径来安排的。

第六章介绍了对流传热和传质，以及与这种传热和传质有关的主要物理概念。建立了速度附面层、热附面层和浓度附面层的概念，并推导了相应的守恒方程。这一章强调了守恒方程中各项的物理意义，以及它们与壁面剪切力与跨过附面层的传热、传质的关系；通过把守恒方程无量纲化的方法，得出对流传热、传质的各种相似参数；并介绍了这些相似参数在概括传热、传质结果，使之普遍化方面所起的重要作用。进而再用无量纲形式的守恒方程讨论很重要的附面层类比问题。最后，在本章中讲述了紊流对于对流换热、传质的影响。

第六章在许多方面都是处理对流传热、传质的基础。这一章首先在物理概念方面给学生打下一个牢固的基础，为以后讲述工程计算方法准备条件。虽然不讲第六章的内容也可以讲以后各章，但是我们不提倡这样做。因为有意删弃基本物理原理去建立工程计算方法，本身就不是正确的工科教学方法。

后面几章讲述了各种具体的对流形式。第七章和第八章分别讲述了在外流和内流条件下，与对流传热、传质有关的特殊性质，着重讲述了计算方法。第九章和第十章分别讲述了自然对流及伴有相变的传热，而第十一章讲述了换热装置。

第十二章介绍辐射换热的基本原理，讨论了表面发射、吸收和反射的物理基础，并推导了有关物性和参数的表达式；还讲述了辐射过程的光谱效应和方向效应，建立了黑体和散射灰体表面的概念。我们认为，如果不认识、也不考虑辐射的方向性，就不能正确地讨论辐射传热这个题目，这个想法对我们编写本章时的影响很大。基于这个原因，在这一章中我们较早地引入了辐射强度的概念，并用这个概念导出表面发射、照射和辐射参数的方向性。对这种处理方法，虽然学生在开始阶段接受起来比较费力，但它的优点是对表面辐射过程描述得更加完整和真实。在第十三章中虽然讲到了吸收-发射介质中的容积效应，但重点是强调无中间介质时，两表面之间的辐射换热。

第十四章专门讲述复合传热效应。为了说明如何把前面讲过的各种方法系统地综合起来，以便有效地解决传热问题。我们列举了工业和环境工程中常遇到的各种问题，并把重点放在工程问题上。对这些工程问题，学生必须首先确定所要解决问题的目标，再进行一些适当的假设，然后进行推导，得出最符合所定目标的解答。本章的内容会极大地增强学生应用传热分析方法的信心，我们热切地希望教师把这一点纳入传热学教程的要求中去。

虽然在具体的传热课程中如何使用本教材主要地取决于授课时数和讲课教师的取舍，但

我们提出如下建议供参考：如果课时定为10周（一学期为10周的情况，30学时），按书中所列全部题目平均地讲是不可能的。较为合适的课程计划是：第一章（2学时），第二章（1学时），第三章（4学时），第五章5.1节到5.6节（3学时），第六章（2学时），第七章和第八章（5学时），第十一章（2学时），第十二章（5学时），第十三章13.1节到13.3节（3学时），剩下3个学时留作考试和机动时间。在上述安排中删去了二维热传导（第四章）、非稳态热传导的有限差分处理（5.7节）、自然对流（第九章）、伴有相变的对流（第十章）、容积辐射现象（13.4节）、复合传热效应（第十四章）以及扩散传质（第十五章）。

如果课时为15周（45学时），那么上述题目有许多可以讲述。例如可以讲第四章和第五章的5.7节，重点放在讲述热传导问题的数值解法。第九章、第十章也可以考虑讲，连同第十三章13.4节及第十四章一起来讲。如果课时可延续到每学期10周的两个学期，即20周（60学时），上面提到的各章节可以用更多的时间来讲。还可以讲扩散传质（第十五章）、热传导问题的分析解法（附录C）以及附面层问题（附录D和E）。

本书的例题和练习题可以分为两类：第一类习题是多少带点常规性的，这类习题常常随着新教材内容的引出而提出。通过这类习题使学生熟悉基本计算步骤及有关参数的单位和量级。第二类练习题比第一类习题的数量要大，对达到本书的教学目标具有更重要的意义。在这类习题中，有许多题目是用实际工程术语叙述的，并通过向学生讲明传输现象与现代科学技术之间的联系，来启发和激励学生。具体内容涉及到工业生产和工艺加工过程、能量的生成和转换，以及环境保护和控制等。解答可能不是十分明确的，但一般要求学生能周密思考并会系统地运用书中讲过的方法。事实上，许多练习题的安排是用来培养和训练学生对问题做出决定和判断的能力的。

关于解题，我们强调实用的解题方法，即在求解之前要进行全面考虑。必须用简图说明物理体系，并在图上标出所有相关过程。对所做的假设必须叙述清楚，并能正确地应用守恒方程和热流方程或传质流方程。

由于英制单位正在迅速地和国际单位制所取代，所以在本书中只使用国际单位制。本书也列出了使用英制单位的换算系数。

这本书是多年讲授传热课题的成果。在编写本教材的过程中，我们尽量照顾到学生学习上的需要和困难，精心地、系统地朝着本书预定的目标努力。书中在很多方面反映出了普渡大学长期以来在传热研究方面所取得的成果。我们感谢在完成本书过程中做出贡献的许多同事，尤其感谢P·E·莱利教授，他为本书提供了可靠的热物性数据；特别感谢R·W·福克斯教授，他花费很多精力校阅了本书的两次手稿，提出了许多宝贵意见，并且一直给予我们很大的支持。

最后，我们还要感谢在本书教学试用期间提出了不少建设性意见的许多学生。

F·P·因克罗普拉

D·P·德威特

# 符 号 表

|                             |                                                                                                                                        |                                      |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| $A$ 面积, $m^2$               | $Gz$ 格雷茨数                                                                                                                              | 的热通道数; 有限                            |
| $A_c$ 横截面积, $m^2$           | $g$ 重力加速度, $m/s^2$                                                                                                                     | 差分解中傅里叶数的倒                           |
| $A_s$ 表面积, $m^2$            | $g_c$ 重力常数, $1\text{ kg}\cdot\text{m}/$<br>$\text{N}\cdot\text{s}^2$ 或 $32.17\text{ ft}\cdot\text{lbm}$<br>$/\text{lb}\cdot\text{s}^2$ | 数                                    |
| $a$ 加速度, $m/s^2$            | $h$ 对流换热系数, $W/$<br>$m^2\cdot K$ ; 普朗克常数                                                                                               | $\dot{M}_i$ 组分 <i>i</i> 的质量流, $kg/s$ |
| $Bi$ 毕奥数                    | $h_{fg}$ 汽化潜热, $J/kg$                                                                                                                  | $\dot{M}_{1s}$ 由于化学反应组分 <i>i</i> 质   |
| $C$ 摩尔浓度, $kmol/m^3$        | $h_m$ 对流质量交换系 数 ,<br>$m/s$                                                                                                             | 量的增加率, $kg/s$                        |
| 比热容, $W/K$                  | $h_{rad}$ 辐射换热系数, $W/$<br>$m^2\cdot K$                                                                                                 | $\dot{M}_{1i}$ 进入控制体的质量流,            |
| $C_D$ 阻力系数                  | $I$ 电流, $A$ ; 辐射强度,<br>$W/m^2\cdot sr$                                                                                                 | $kg/s$                               |
| $C_f$ 摩阻系数                  | $i$ 电流密度, $A/m^2$ ; 单                                                                                                                  | $\dot{M}_{out}$ 离开控制体的质量流,           |
| $C_p$ 热容量, $J/kg$           | 位质量的焓, $J/kg$                                                                                                                          | $kg/s$                               |
| $C$ 比热, $J/kg\cdot K$ ;     | $J$ 有效辐射, $W/m^2$                                                                                                                      | $\dot{M}_{st}$ 控制体内存储质量的增            |
| 光速, $m/s$                   | $J_i$ 组分 <i>i</i> 相对于混合物摩                                                                                                              | 加率, $kg/s$                           |
| $C_p$ 等压比热, $J/kg\cdot K$   | 尔平均速度的扩散摩尔                                                                                                                             | $M_i$ 组分 <i>i</i> 的分子 量, $kg/$       |
| $C_v$ 等容比热, $J/kg\cdot K$   | 流, $kmol/s\cdot m^2$                                                                                                                   | $kmol$                               |
| $D$ 直径, $m$                 | $j_i$ 组分 <i>i</i> 相对于混合物质                                                                                                              | $m$ 质量, $kg$                         |
| $D_{AB}$ 双组分质量扩散系数,         | 量平均速度的扩散质量                                                                                                                             | $\dot{m}$ 质量流, $kg/s$                |
| $m^2/s$                     | 流, $kg/s\cdot m^2$                                                                                                                     | $m_i$ 组分 <i>i</i> 的质量分数,             |
| $D_h$ 水力直径, $m$             | $j_x$ 传热的考尔朋因子                                                                                                                         | $\rho_1/\rho$                        |
| $E$ 热内能 (显热), $J$ ; 电       | $j_m$ 传质的考尔朋因子                                                                                                                         | $N$ 热流图中的 温度增 量                      |
| 位, $V$ ; 辐射力, $W/m^2$       | $k$ 导热系数, $W/m\cdot K$ ;                                                                                                               | 数; 管束的排数; 封闭                         |
| $Ec$ 埃克特数                   | 波尔兹曼常数                                                                                                                                 | 体内的表面数                               |
| $\dot{E}_g$ 能量生成率, $W$      | $k_0$ 零阶均相反应率常数,                                                                                                                       | $Nu$ 努赛尔数                            |
| $\dot{E}_{in}$ 进入控制体的能量流,   | $kmol/s\cdot m^3$                                                                                                                      | $NTU$ 传热单元数                          |
| $W$                         | $k_1$ 一阶均相反应率常数,                                                                                                                       | $N_i$ 组分 <i>i</i> 相对于固定 坐标           |
| $\dot{E}_{out}$ 离开控制体的 能量流, | $1/s$                                                                                                                                  | 系的摩尔流, $kmol/s$                      |
| $W$                         | $k_1''$ 一阶均相反应率常数,                                                                                                                     | $N_i'$ 组分 <i>i</i> 相对于固定 坐标          |
| $\dot{E}_{st}$ 控制体内存储能量的增   | $m/s$                                                                                                                                  | 系的摩尔密流, $kmol$                       |
| 加率, $W$                     | $L$ 特征长度, $m$                                                                                                                          | $/s\cdot m^2$                        |
| $e$ 单位质量的热内能,               | $Le$ 柳伊斯数                                                                                                                              | $\dot{N}_i$ 单位体积内由于化学反               |
| $J/kg$ ; 表面粗糙度, $1/$        | $M$ 质量, $kg$ ; 热流图 中                                                                                                                   | 应组分 <i>i</i> 摩尔数的增加                  |
| $m$                         |                                                                                                                                        | 率, $kmol/s\cdot m^3$                 |
| $F$ 力, $N$ ; 换热器修正 因        |                                                                                                                                        | $\dot{N}_i''$ 组分 <i>i</i> 的表面反 应率,   |
| 子; 波带内黑体辐射的                 |                                                                                                                                        | $kmol/s\cdot m^2$                    |
| 份额; 角系数                     |                                                                                                                                        | $n_i'$ 组分 <i>i</i> 相对于固定 坐标          |
| $Fr$ 傅里叶数                   |                                                                                                                                        | 系的质量密流,                              |
| $f$ 摩阻因子; 相似变量              |                                                                                                                                        |                                      |
| $G$ 照度, $W/m^2$             |                                                                                                                                        |                                      |
| $Gr$ 葛拉晓夫数                  |                                                                                                                                        |                                      |

|                      |                                                                                                |                 |                                           |             |                                                                              |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $\dot{n}_i$          | $\text{kg/s}\cdot\text{m}^3$<br>单位体积内由于化学反应组分 <i>i</i> 的质量增加率,<br>$\text{kg/s}\cdot\text{m}^3$ | <i>T</i>        | 温度, K                                     | $\theta$    | 天顶角, rad; 温差, K                                                              |
| $P_L, P_T$           | 管束的无因次纵向间距和无因次横向间距                                                                             | <i>t</i>        | 时间, s                                     | $\kappa$    | 吸收系数, 1/m                                                                    |
| <i>P</i>             | 周长, m; 通用流体性质的符号                                                                               | <i>U</i>        | 总传热系数, $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$        | $\lambda$   | 波长, $\mu\text{m}$                                                            |
| <i>Pe</i>            | 贝克列数 ( $Pe = Pr$ )                                                                             | <i>u, v, W</i>  | 流体质量平均速度的分量, m/s                          | $\mu$       | 粘度, $\text{kg/s}\cdot\text{m}$                                               |
| <i>Pr</i>            | 普朗特数                                                                                           | $u^*, v^*, W^*$ | 摩尔平均速度的分量, m/s                            | $\nu$       | 运动粘度, $\text{m}^2/\text{s}$ ; 辐射频率, 1/s                                      |
| <i>P</i>             | 压力, $\text{N/m}^2$                                                                             | <i>V</i>        | 体积, $\text{m}^3$ ; 流体速度, m/s              | $\rho$      | 质量密度, $\text{kg/m}^3$ ; 反射率                                                  |
| <i>Q</i>             | 传热量, J                                                                                         | <i>v</i>        | 比容, $\text{m}^3/\text{kg}$                | $\sigma$    | 斯忒藩-波尔兹曼常数; 电导率, $1/\Omega\cdot\text{m}$ ; 粘性正应力, $\text{N/m}^2$ ; 表面张力, N/m |
| <i>q</i>             | 热流, W                                                                                          | $\dot{W}$       | 单位时间所作的功, W                               | $\Phi$      | 粘性耗散函数, $1/\text{s}^2$                                                       |
| $\dot{q}$            | 单位体积的能量生成率, $\text{W/m}^3$                                                                     | <i>Y, Y, Z</i>  | 单位体积的彻体力分量, $\text{N/m}^3$                | $\varphi$   | 方位角, rad                                                                     |
| $q'$                 | 单位长度的热流, W/m                                                                                   | <i>x, y, z</i>  | 直角坐标系, m                                  | $\psi$      | 流函数, $\text{m}^2/\text{s}$                                                   |
| $q''$                | 比热流 (热流密度), $\text{W/m}^2$                                                                     | $x_o$           | 向紊流转变的临界位置, m                             | $\tau$      | 切应力, $\text{N/m}^2$ ; 透射率                                                    |
| <i>R</i>             | 圆柱半径, m                                                                                        | $x_{fd,o}$      | 浓度进口段长度, m                                | $\omega$    | 立体角, sr                                                                      |
| <i>ℜ</i>             | 通用气体常数                                                                                         | $x_{fd,h}$      | 水力进口段长度, m                                | 下标          |                                                                              |
| <i>Ra</i>            | 瑞利数                                                                                            | $x_{fd,t}$      | 热进口段长度, m                                 | <i>A, B</i> | 双组分混合物中的组分                                                                   |
| <i>Re</i>            | 雷诺数                                                                                            | $x_i$           | 组分 <i>i</i> 的摩尔分数, $C_i/C$                | <i>abs</i>  | 吸收的                                                                          |
| <i>R_o</i>           | 接触热阻, K/W                                                                                      | 希腊字母            |                                           | <i>am</i>   | 算术平均                                                                         |
| <i>R_e</i>           | 电阻, $\Omega$                                                                                   | $\alpha$        | 导热系数 (热扩散率), $\text{m}^2/\text{s}$ ; 吸收率  | <i>b</i>    | 以延伸表面为基准的; 黑体                                                                |
| <i>R_f</i>           | 污垢因子, $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$                                                       | $\beta$         | 体积热膨胀系数, $1/\text{K}$                     | <i>c</i>    | 横截面的; 浓度, 冷流体                                                                |
| <i>R_m</i>           | 质量交换阻力 (质阻), $\text{s/m}^3$                                                                    | $\tau$          | 膜态凝结中单位宽度的质量流, $\text{kg/s}\cdot\text{m}$ | <i>cr</i>   | 临界绝热厚度                                                                       |
| $R_{m,n}$            | 节点 <i>m, n</i> 的余数                                                                             | $\delta$        | 水力边界层厚度 (速度边界层厚度), m                      | <i>cond</i> | 传导                                                                           |
| <i>R_i</i>           | 热阻, K/W                                                                                        | $\delta_o$      | 浓度边界层厚度, m                                | <i>conv</i> | 对流                                                                           |
| $r_o$                | 圆柱或圆球半径, m                                                                                     | $\delta_t$      | 热边界层厚度, m                                 | <i>CF</i>   | 逆流                                                                           |
| $r, \varphi, z$      | 圆柱坐标系                                                                                          | $\varepsilon$   | 黑度; 充填床的孔隙度; 换热器效率                        | <i>D</i>    | 直径; 阻力                                                                       |
| $r, \theta, \varphi$ | 球坐标系                                                                                           | $\varepsilon_f$ | 肋片效率                                      | <i>dif</i>  | 扩散; 漫射                                                                       |
| <i>S</i>             | 溶解度, $\text{kmol/m}^3$ ; 二维扩散的形状因子, m                                                          | $\varepsilon_H$ | 紊流热扩散率, $\text{m}^2/\text{s}$             | <i>e</i>    | 过度; 发射                                                                       |
| <i>S_o</i>           | 太阳常数                                                                                           | $\varepsilon_M$ | 紊流动量扩散率, $\text{m}^2/\text{s}$            | <i>evap</i> | 汽化                                                                           |
| <i>Sc</i>            | 什米特数                                                                                           | $\varepsilon$   | 紊流质量扩散率, $\text{m}^2/\text{s}$            | <i>f</i>    | 流体性质; 肋片状态; 饱和和液体状态                                                          |
| <i>Sh</i>            | 舍位德数                                                                                           | $\eta$          | 相似变量                                      | <i>d</i>    | 充分发展状态                                                                       |
| <i>St</i>            | 斯坦顿数                                                                                           | $\eta_f$        | 肋片效率                                      | <i>g</i>    | 饱和蒸汽状态                                                                       |
| $S_D, S_L, S_T$      | 管束的对角线间距、纵向间距和横向间距, m                                                                          |                 |                                           | <i>H</i>    | 传热状态                                                                         |

|     |                          |       |            |           |                   |
|-----|--------------------------|-------|------------|-----------|-------------------|
|     | 态; 管进口状态; 投入<br>辐射       | R     | 再辐射表面      | x         | 表面上局部状态           |
| L   | 以特征长度为基准的                | r,ref | 反射辐射       | $\lambda$ | 光谱的 (单色的)         |
| l   | 饱和液体状态                   | rad   | 辐射         | $\infty$  | 自由流状态             |
| lm  | 对数平均状态                   | S     | 太阳状态       | 上标        |                   |
| M   | 动量交换状态                   | s     | 表面状态; 固体性质 | '         | 脉动量               |
| m   | 质量交换状态; 管截面<br>上的平均值     | sat   | 饱和状态       | •         | 摩尔平均的, 无因次量       |
| max | 流体最大速度                   | sky   | 天空状态       | 上横线       |                   |
| o   | 中心或中心平面状态;<br>管出口状态; 外部的 | sur   | 环境的        | —         | 表面平均状态; 时间平<br>均的 |
|     |                          | t     | 热的         |           |                   |
|     |                          | tr    | 透射的        |           |                   |
|     |                          | v     | 饱和蒸汽状态     |           |                   |

# 单位换算系数表

|            |                      |                                                                                                                                                                                                                              |
|------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 加速度        | 1 m/s <sup>2</sup>   | = 4.2520 × 10 <sup>7</sup> ft/h <sup>2</sup>                                                                                                                                                                                 |
| 面积         | 1 m <sup>2</sup>     | = 1550.0 in <sup>2</sup><br>= 10.764 ft <sup>2</sup>                                                                                                                                                                         |
| 能量         | 1 J                  | = 9.4787 × 10 <sup>-4</sup> Btu                                                                                                                                                                                              |
| 力          | 1 N                  | = 0.22481 lb <sub>f</sub>                                                                                                                                                                                                    |
| 热流 (传热率)   | 1 W                  | = 3.4123 Btu/h                                                                                                                                                                                                               |
| 比热流 (热流密度) | 1 W/m <sup>2</sup>   | = 0.3171 Btu/h·ft <sup>2</sup>                                                                                                                                                                                               |
| 单位体积的热生成率  | 1 W/m <sup>3</sup>   | = 0.09665 Btu/h·ft <sup>3</sup>                                                                                                                                                                                              |
| 热交换系数      | 1 W/m <sup>2</sup> K | = 0.17612 Btu/h·ft <sup>2</sup> ·°F                                                                                                                                                                                          |
| 运动粘度和扩散率   | 1 m <sup>2</sup> /s  | = 3.875 × 10 <sup>4</sup> ft <sup>2</sup> /h                                                                                                                                                                                 |
| 潜热         | 1 J/kg               | = 4.2995 × 10 <sup>-4</sup> Btu/lb <sub>m</sub>                                                                                                                                                                              |
| 长度         | 1 m                  | = 39.370 in<br>= 3.2808 ft                                                                                                                                                                                                   |
| 质量         | 1 km                 | = 0.62137 mi                                                                                                                                                                                                                 |
| 质量密度       | 1 kg                 | = 2.2046 lb <sub>m</sub>                                                                                                                                                                                                     |
|            | 1 kgm <sup>3</sup>   | = 0.062428 lb <sub>m</sub> /ft <sup>3</sup>                                                                                                                                                                                  |
| 质量流量       | 1 kg/s               | = 7936.6 lb <sub>m</sub> /h                                                                                                                                                                                                  |
| 质量交换系数     | 1 m/s                | = 1.1811 × 10 <sup>4</sup> ft/h                                                                                                                                                                                              |
| 压力和应力*     | 1 N/m <sup>2</sup>   | = 0.020886 lb <sub>f</sub> /ft <sup>2</sup><br>= 1.4504 × 10 <sup>-4</sup> lb <sub>f</sub> /in <sup>2</sup><br>= 4.015 × 10 <sup>-3</sup> in water<br>= 2.953 × 10 <sup>-4</sup> in Hg<br>= 1 standard atmosphere<br>= 1 bar |
| 比热         | 1 J/kg·K             | = 2.3886 × 10 <sup>-4</sup> Btu/lb <sub>m</sub> ·°F                                                                                                                                                                          |
| 温度         | K                    | = (5/9) °R<br>= (5/9) (°F + 459.67)<br>= °C + 273.15                                                                                                                                                                         |
| 温差         | 1 K                  | = 1 °C<br>= (9/5) °R = (9/5) °F                                                                                                                                                                                              |
| 导热系数       | 1 W/m·K              | = 0.57782 Btu/h·ft·°F                                                                                                                                                                                                        |
| 热阻         | 1 K/W                | = 0.52750 °F/h·Btu                                                                                                                                                                                                           |
| 粘度 (动力的)   | 1 N·s/m <sup>2</sup> | = 2419.1 lb <sub>m</sub> /ft·h<br>= 5.8016 × 10 <sup>-6</sup> lb <sub>f</sub> ·h/ft <sup>2</sup>                                                                                                                             |
| 体积         | 1 m <sup>3</sup>     | = 6.1023 × 10 <sup>4</sup> in <sup>3</sup><br>= 35.314 ft <sup>3</sup>                                                                                                                                                       |

|      |                          |                                                |
|------|--------------------------|------------------------------------------------|
|      |                          | $= 264.17 \text{ gal}$                         |
| 体积流量 | $1 \text{ m}^3/\text{s}$ | $= 1.2713 \times 10^5 \text{ ft}^3/\text{h}$   |
|      |                          | $= 2.1189 \times 10^3 \text{ ft}^3/\text{min}$ |
|      |                          | $= 1.5850 \times 10^4 \text{ gal/min}$         |

\*压力的国际单位制 (SI) 的名称是帕 (Pa), 其单位是  $\text{N}/\text{m}^2$  或  $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}^2$ .

\*也可用当量单位  $\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}$  表示。

# 物 理 常 数

通用气体常数

$$\begin{aligned} R &= 8.205 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{atm} / \text{kmol} \cdot \text{K} \\ &= 8.314 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{bar} / \text{kmol} \cdot \text{K} \\ &= 8.315 \text{ kJ} / \text{kmol} \cdot \text{K} \\ &= 1545 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f / \text{lbmole} \cdot ^\circ \text{R} \\ &= 1.986 \text{ Btu} / \text{lbmole} \cdot ^\circ \text{R} \end{aligned}$$

阿伏伽德罗数

$$N = 6.024 \times 10^{23} \text{ molecules/mol}$$

普朗克常数

$$h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} / \text{molecule}$$

波尔兹曼常数

$$k = 1.380 \times 10^{-23} \text{ J/K} \cdot \text{molecule}$$

真空中光速

$$c_0 = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

斯忒藩-波尔兹曼常数

$$\begin{aligned} \sigma &= 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \\ &= 0.1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ \text{R}^4 \end{aligned}$$

黑体辐射常数

$$\begin{aligned} C_1 &= 3.7420 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2 \\ &= 1.187 \times 10^8 \text{ Btu} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{h} \cdot \text{ft}^2 \\ C_2 &= 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K} \\ &= 2.5897 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot ^\circ \text{R} \\ C_3 &= 2897.7 \mu\text{m} \cdot \text{K} \\ &= 5215.6 \mu\text{m} \cdot ^\circ \text{R} \end{aligned}$$

重力加速度 (海平面)

$$g = 9.807 \text{ m/s}^2$$

标准大气压力

$$p = 101,325 \text{ N/m}^2$$

# 目 录

符号表

单位换算系数表

物理常数

|                      |      |
|----------------------|------|
| 第一章 绪论               | (1)  |
| 1.1 传热的含义和传热方式       | (1)  |
| 1.2 物理机理和热流方程        | (1)  |
| 1.2.1 热传导            | (2)  |
| 1.2.2 对流换热           | (4)  |
| 1.2.3 热辐射            | (5)  |
| 1.2.4 传热学与热力学的关系     | (7)  |
| 1.3 能量守恒             | (8)  |
| 1.3.1 控制体的能量守恒       | (8)  |
| 1.3.2 表面的能量守恒        | (10) |
| 1.3.3 能量守恒定律的应用: 方法论 | (12) |
| 1.4 传热问题的分析方法        | (12) |
| 1.5 传热的重要性           | (13) |
| 1.6 单位和量纲            | (13) |
| 1.7 本章提要             | (16) |
| 练习题                  | (17) |
| 第二章 热传导概论            | (22) |
| 2.1 传导热流方程           | (22) |
| 2.2 物质的热物理性质         | (25) |
| 2.2.1 导热系数           | (25) |
| 2.2.2 其它有关的热物理性质     | (28) |
| 2.3 热传导方程            | (29) |
| 2.4 边界条件和起始条件        | (35) |
| 2.5 本章提要             | (37) |
| 参考文献                 | (37) |
| 练习题                  | (38) |
| 第三章 一维稳态热传导          | (43) |
| 3.1 平壁               | (43) |
| 3.1.1 温度分布           | (43) |
| 3.1.2 热阻             | (44) |
| 3.1.3 复合壁            | (45) |
| 3.1.4 接触热阻           | (48) |

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 3.2 分析热传导问题的替换方法 .....     | (49)  |
| 3.3 径向对称系统 .....           | (51)  |
| 3.3.1 圆柱 .....             | (52)  |
| 3.3.2 圆球 .....             | (56)  |
| 3.4 具有内热生成的热传导 .....       | (58)  |
| 3.4.1 平壁 .....             | (58)  |
| 3.4.2 径向对称系统 .....         | (62)  |
| 3.4.3 热阻概念的应用 .....        | (66)  |
| 3.5 延伸表面的传热 .....          | (66)  |
| 3.5.1 延伸表面热传导的一般分析方法 ..... | (67)  |
| 3.5.2 等截面肋片 .....          | (69)  |
| 3.5.3 肋片的性能 .....          | (73)  |
| 3.6 本章提要 .....             | (77)  |
| 参考文献 .....                 | (77)  |
| 练习题 .....                  | (77)  |
| <b>第四章 二维稳态热传导</b> .....   | (88)  |
| 4.1 几种求解方法 .....           | (88)  |
| 4.2 图解法 .....              | (89)  |
| 4.2.1 热流图的绘制方法 .....       | (89)  |
| 4.2.2 热流的确定 .....          | (90)  |
| 4.2.3 热传导的几何因子 .....       | (91)  |
| 4.3 热模拟 .....              | (94)  |
| 4.4 有限差分方程 .....           | (96)  |
| 4.4.1 节点网络 .....           | (96)  |
| 4.4.2 有限差分形式的热传导方程 .....   | (97)  |
| 4.4.3 能量平衡法 .....          | (97)  |
| 4.5 有限差分方程 .....           | (101) |
| 4.5.1 松弛法 .....            | (101) |
| 4.5.2 高斯-塞德尔迭代法 .....      | (104) |
| 4.5.3 逆矩阵法 .....           | (106) |
| 4.6 本章提要 .....             | (108) |
| 参考文献 .....                 | (109) |
| 练习题 .....                  | (109) |
| <b>第五章 瞬态热传导</b> .....     | (117) |
| 5.1 集总热容法 .....            | (117) |
| 5.2 集总热容法的有效性 .....        | (119) |
| 5.3 通用解法 .....             | (122) |
| 5.4 具有对流边界条件的一维系统 .....    | (124) |
| 5.5 半无限大固体 .....           | (132) |

|                             |              |
|-----------------------------|--------------|
| 5.6 多维效应.....               | (135)        |
| 5.7 有限差分法.....              | (139)        |
| 5.7.1 热流方程的离散化.....         | (139)        |
| 5.7.2 能量平衡法.....            | (141)        |
| 5.7.3 其它因素的分析.....          | (142)        |
| 5.8 电模拟.....                | (149)        |
| 5.9 小结.....                 | (151)        |
| 参考文献.....                   | (151)        |
| 练习题.....                    | (152)        |
| <b>第六章 对流导论.....</b>        | <b>(160)</b> |
| 6.1 对流传递问题.....             | (160)        |
| 6.2 对流边界层.....              | (164)        |
| 6.2.1 速度边界层.....            | (164)        |
| 6.2.2 热边界层.....             | (165)        |
| 6.2.3 浓度边界层.....            | (166)        |
| 6.2.4 边界层的意义.....           | (168)        |
| 6.3 层流和紊流流动.....            | (168)        |
| 6.4 对流传递方程.....             | (169)        |
| 6.4.1 速度边界层.....            | (170)        |
| 6.4.2 热边界层.....             | (173)        |
| 6.4.3 浓度边界层.....            | (175)        |
| 6.5 近似性及特殊条件.....           | (180)        |
| 6.6 边界层的相似性: 通用的对流传递方程..... | (182)        |
| 6.6.1 边界层相似参数.....          | (182)        |
| 6.6.2 解的函数形式.....           | (184)        |
| 6.7 无因次参数的物理意义.....         | (188)        |
| 6.8 边界层类比.....              | (190)        |
| 6.8.1 传热和传质的类比.....         | (190)        |
| 6.8.2 蒸发冷却.....             | (194)        |
| 6.8.3 雷诺类比.....             | (196)        |
| 6.9 紊流效应.....               | (197)        |
| 6.10 对流系数.....              | (199)        |
| 6.11 本章提要.....              | (199)        |
| 参考文献.....                   | (200)        |
| 练习题.....                    | (200)        |
| <b>第七章 外部流动.....</b>        | <b>(208)</b> |
| 7.1 经验关系式的性质.....           | (208)        |
| 7.2 平板平行流动.....             | (210)        |
| 7.2.1 层流流动.....             | (210)        |