

传热与传质

E.R.G. 埃克尔特
R.M. 德雷克

科学出版社

81.171
457
C.3

传热与传质

E. R. G. 埃克尔特, R. M. 德雷克著

徐明德译

张闻骏校

科学出版社

HEAT and MASS TRANSFER
by E. R. G. Eckert
with Part A, Heat Conduction
and Appendix of Property Values
by Robert M. Drake, Jr.
Second Edition of
INTRODUCTION TO THE TRANSFER
OF HEAT AND MASS
McGraw-Hill Book Company, Inc.
1959

內 容 簡 介

本书系統而全面地論述了传热、传质过程的現代基本理論，并介紹了它們在工程实践中的主要应用。全书共分五篇，前三篇分別討論有关传热三种基本形式(导热、对流传热、热輻射)的理論，第四篇闡述传质过程，第五篇介紹换热器的設計計算方法，书末附有附录，納入了传热、传质計算中常用的各种物质热物理性质的数值图表，书中各章、节均配有具体的例題和习题，书中物理量的单位已参照俄譯本換用了公制单位。

本书可供热能动力、化工、建筑、冶金、电工等技术部門的科研、工程技术人員参考，亦可供高等院校有关上述部門各专業师生用作教学参考书。

传 热 与 传 质

E. R. G. 埃克尔特 R. M. 德雷克著

徐 明 德 譯

张 開 駿 校

*

科 学 出 版 社 出 版 (北京朝陽門大街 117 号)

北京市書刊出版业营业許可証出字第 061 号

北京市印刷一厂印刷 新华书店总經售

*

1963 年 12 月 第 一 版

書号: 2904 字数: 455,000

1963 年 12 月 第一次印刷

开本: 850×1168 1/32

(京) 0001—3,300

印張: 17 5/16 插頁: 3

定价: 3.30 元

38700

原 序

本书之目的乃是向讀者介紹一般传递过程、特别是传热和传质过程中的基本物理現象, 并且使讀者熟悉已經获得的、用来描述这些基本物理現象的規律和分析方法。本书的意图与第一版的相同, 但是, 由于以往八年中的大量研究及知識的积累, 因而在致力于上述目的时, 有必要作某些改动。

在第一版中, 就企图将內容作到使一个受过正規工程課程訓練的讀者能沒有分外困难跟得上本书的推导。从我所得到的关于这方面的許多好評看来, 似乎以保持这种表达方式为宜。不过, 这就有必要把討論限制于針对一些經选择过的題目。选择这些題目时, 抱着这样的目的, 在我們目前对重要传热現象的本质和規律具备一定理解程度的情况下, 尽可能多地考察它們。現今, 仍然还有相当多的传热情况是我們所不够了解的, 一般說来, 就是热流所通过的表面或分界面的形状不很明确时的传热情况。由于我們对这种过程还缺乏了解, 因而有关这方面的知識主要是限于經驗关系式, 这些关系式可以在很多传热学的参考书中找到。

同时, 在选题时, 一般是从不造成过多的数学运算、而尽可能多介紹一些物理概念这一观点出发的。工程研究工作者所面临的主要問題是将物理过程轉化为数学語言。这是肯定应当由他本人做的工作; 然而, 倘若他立出了問題的方程式而不善于求解这些方程式, 那是可以請教数学家的。在某些新的章节中, 并不完全可以这样做。在那里, 內容已被修飾和精炼过, 因而比起其他章节来, 要求較多的数学知識。本书中包括这种章节是由于它們对了解传热或传质的特殊情形来讲是必要的; 但是, 我們可以越过它們而不致于影响閱讀本书的其他內容。第 3-8, 4-1, 4-2, 5-1, 5-2, 6-3, 6-6, 7-2, 7-6, 10-3, 11-3 和 16-2 节就是属于这种类型的章节。

在参考文献方面, 并不想全部搜罗完备, 即使重要参考文献也

符 号

- a 加速度; 供应系数(第 292 頁)。
- b 壁厚度; 肋厚度。
- c 比热。
- c_p 定压比热。
- d 直径。
- d_h 水力直径。
- f 流体通过管子时的摩擦系数; 无因次流函数。
- f_c 柱体的阻力系数(第 168 頁)。
- f_p 平板的摩擦系数(第 147 頁)。
- $f_s^{1)}$ 速度滑动系数(第 292 頁)。
- g 重力加速度。
- h 膜传热系数。
- i 焓。
- i_{fg} 蒸发热。
- j 自由度。
- k 导热率。
- l 长度。
- m 质量。
- $\dot{m}$ 质量流量率。
- n 法綫; 諧波的号数(第 103 頁); 分子数(第 248 頁)。
- p 压力。
- q 每单位時間內单位面积的热流量(比热流量率)。
- r 半径; 恢复系数(第 268 頁)。
- s 厚度; 距离; 分子途比(第 305 頁)。
- t 温度。
- t_B 整体温度(第 199 頁)。
- u 内能。

1) 在第 292 頁中称为鏡反射系数——譯者注。

- u, v, w 分速度。
 v 比容。
 $v^{*1)}$ 切应力速度(第 162 頁)。
 x, y, z 坐标。
 x_0 波长(第 108 頁)。
 A 面积。
 C 常数;周长。
 E 电压;能量。
 F 力。
 J 湍动强度(第 133 頁);电流;积分。
 L 长度。
 L_e 进口段长度。
 M 分子量。
 Q 每单位时间的热流量。
 R 阻力;气体常数。
 R_c 导热热阻。
 R_t 对流热阻。
 T 绝对温度。
 U 内能;总传热系数。
 V 体积;速度。
 $\dot{V}$ 体积流量。
 W 重量;功。
 α 角度;热扩散率;物质特性的参数(第 248 頁)。
 β 角度;主流速度的参数(第 158 頁);膨胀系数。
 γ 壁面温度的参数(第 196 頁);比热之比。
 δ 边界层厚度;相位滞后(第 103 頁)。
 δ^* 边界层位移厚度。
 δ_t 边界层动量厚度。
 δ_t 热边界层厚度。
 ε 孔率。
 ε_m 湍流动量扩散率(第 229 頁)。

1) 在第 162 頁中,对切应力速度并未采用符号 v^* ——譯者注。

- ε_g 湍流热扩散率(第 230 頁)。
- ζ 热边界层厚度对流动边界层厚度之比。
- η 离开壁的无因次距离(第 156 頁);肋效能(第 51 頁)。
- θ 溫度差;描述溫度用的参数(第 195 頁)¹⁾。
- k 玻耳茲曼常数。
- λ 速度分布綫的形状参数(第 154 頁);特征值(第 84 頁);平均自由路程(第 283 頁)。
- μ 动力粘度。
- ν 运动粘度。
- ρ 密度;半径;电阻率。
- σ 表面张力。
- τ 切应力;時間。
- τ_0 周期。
- ϕ 热耗散;热源;肋效能。
- ψ 流函数。

无 因 次 数

- Bi 毕奥数(第 49 頁)。
- E^2) 耗散数(第 245 頁)。
- Fo 傅里叶数(第 80 頁)。
- Gr 传热的格腊晓夫数(第 247 頁)。
- Gr_D 传质的格腊晓夫数(第 490 頁)。
- Le 刘伊斯数(第 476 頁)。
- Ma 馬赫数(第 250 頁)。
- Nu 努塞尔特数(第 183 頁)。
- Pe 佩克累数(第 185 頁)。
- Pr 普朗特数(第 181 頁)。
- Pr_t 湍流普朗特数(第 231 頁)。
- Re 雷諾数(第 133 頁)。
- Sc 施米特数(第 474 頁)。
- St 斯坦登数(第 216 頁)。

1) 在第 195 頁上是写成 θ' 的——譯者注。

2) 在第 245 頁上称为埃克尔特数——譯者注。

标 注

- b 层流底层与湍流边界层交界处的值。
- cr 转变为湍流时的临界值。
- d 基于直径 d 。
- dy 动力值(动压等)。
- e 出口。
- f 流体。
- i 进口;基于焓。
- l 液体。
- m 平均值。
- p 部分的。
- r 恢复。
- s 边界层外主流内的值。
- st 静止值(静压等)。
- t 湍流的。
- v 蒸汽。
- w 壁面上的值。
- x 基于长度 x 。
- B 整体的。
- M 算术平均值。
- T 总值(总压等)。
- 0 参考点的值。
- ∞ 远离物体处的值。
- $-$ 平均值。
- $*$ 定性的。
- $'$ 脉动值;无因次的。

热辐射的补充部分

- a 吸收系数(第 394 页)。
- c 光速。
- e 发射本领。

- h 普朗克量子。
- i 輻射强度。
- κ 每个分子的气体常数。
- n 折射率。
- p_r 輻射压力。
- u 輻射密度。
- B 离开相互照射的面的总輻射(第417頁)。
- E 誤差。
- F 形状因数(第 408 頁)。
- H 照射=射达相互照射的面上的总輻射(第4 22頁)。
- L_e 当量半径。
- α 吸收率。
- β 角。
- ε 发射率。
- η 效率。
- λ 波长。
- ν 頻率。
- ρ 反射率。
- σ 玻耳茲曼常数。
- τ 透射率。
- ω 立体角。

标 注

- b 黑的。
- c 对流;顏色的。
- e 相当的。
- g 气体;綠色的。
- i 入射的。
- n 表面的法綫。
- r 輻射;紅色的。
- s 表面。
- β 在 β 角之下的。
- λ 单色的。
- c 浓度。

传质的补充部分

- h_D 传质系数。
 i 焓。
 n 分子数。
 r 相对湿度。
 s 比湿。
 w 质量分数。
 C_p 单位体积的比热。
 D 扩散系数。
 N 模尔数。
 $\mathcal{R}$ 通用气体常数。
 δ_D 扩散边界层厚度。
 σ 蒸发系数(第 492 頁)。
 $\varphi^{1)}$ 描述质量分数的参数(第 474 頁)。

标 注

- a 空气。
 s 饱和。
 v 蒸汽。

热交换器计算的补充部分

- ε 热交换器效能(第 497 頁)。
 η 时间的无因次参数(第 502 頁)。
 ξ 长度的无因次参数(第 502 頁)。

标 注

- l 大的。
 s 小的。
 C 冷的。
 H 热的。
 L 每单位长度。
 P 周期。
 S 固体。

1) 在第 474 頁上是写成 φ' 的——譯者注。

目 录

原序	vii
符号	ix
第一章 引言	1
1-1. 因次和单位	1
1-2. 传热的各种方式	7
1-3. 导热率, 膜传热系数和总传热系数	9
1-4. 顺流、逆流和叉流	14

第一篇 导 热

第二章 导热理论和导热方程式	25
2-1. 导热的概念	25
2-2. 导热的基本定律	26
2-3. 导热方程式	30
各向同性材料的导热方程式	30
非各向同性材料的导热方程式	32
第三章 稳定导热	37
3-1. 稳定状态下的简单导热方程式的解	37
3-2. 边界面上的热对流	39
3-3. 绝缘的临界厚度	40
3-4. 细杆	41
3-5. 肋受热面	45
3-6. 具有热源的壁	61
3-7. 埋设的电缆	63
3-8. 二维稳定导热	66
第四章 不稳定导热	79
4-1. 瞬变导热	79
4-2. 周期导热	102
第五章 边界移动时的导热	116

5-1. 熔化或凝固时的导热	116
5-2. 移动热源	119

第二篇 对流传热

各种类型的对流传热	126
第 六 章 沿表面的流动和槽内流动	129
6-1. 边界层和湍动	129
6-2. 边界层动量方程式	136
6-3. 层流边界层方程式	139
6-4. 纵向流动中的平板	143
6-5. 沿表面的压力梯度	154
6-6. 平板的层流边界层方程式的正确解	155
6-7. 管内流动	159
6-8. 横向流动中的柱体	167
6-9. 绕旋转对称物体的流动	170
第 七 章 层流受迫对流	174
7-1. 边界层热流方程式	174
7-2. 层流边界层能量方程式	176
7-3. 纵向流动中的平板	180
7-4. 壁面温度任意变化的平板	186
7-5. 横向流动中的柱体	191
7-6. 层流边界层能量方程式的正确解	194
7-7. 通过管子的流动	198
第 八 章 湍流受迫对流	210
8-1. 动量传递与热量传递之间的比拟	210
8-2. 管内流动	216
8-3. 纵向流动中的平板	225
8-4. 湍流传热理论的新发展	228
第 九 章 分离流动中的受迫对流	240
9-1. 传热的因次分析	240
9-2. 横向流动中的管和管束	250
9-3. 球体和填充床	260

第 十 章 特殊传热过程	266
10-1. 高速流动下的传热	266
10-2. 高速流动气体中的传热	272
10-3. 稀薄气体中的传热	283
10-4. 液态金属中的传热	310
10-5. 流逸冷却(transpiration cooling)与薄膜冷却	313
第 十 一 章 自由对流	323
11-1. 豎板和水平管上的层流传热	324
11-2. 豎板上的湍流传热	335
11-3. 边界层方程式的推导	338
11-4. 两块平壁之间的流体内的自由对流	340
11-5. 混合的自由与受迫对流	343
第 十 二 章 凝結和蒸发	346
12-1. 凝結	346
12-2. 蒸发	352

第三篇 热 辐 射

基本概念	365
第 十 三 章 热辐射特性	367
13-1. 黑体	372
13-2. 固体和液体	383
13-3. 气体	393
第 十 四 章 辐射热交换	407
14-1. 黑体	407
14-2. 固体、液体和气体	415
14-3. 包壳内的辐射热交换	420
14-4. 火焰辐射	432
14-5. 辐射传热系数	436
14-6. 温度测量中的辐射误差	440
14-7. 高温测量	443
14-8. 太阳辐射	447

第四篇 传 质

第十五章 二元混合物的关系式	454
15-1. 二元气体混合物的基本方程式	454
15-2. 湿空气的基本方程式及其 $s-i$ 图	455
第十六章 传质	464
16-1. 扩散	464
16-2. 具有传质和传热的平板上的层流边界层	472
16-3. 传质的边界层积分方程式	479
16-4. 传质的相似关系式	484
16-5. 水份向空气内的蒸发	492

第五篇 热 交 换 器

第十七章 热交换器的计算	496
17-1. 传递式热交换器	496
17-2. 储蓄式热交换器	500
特性数值附录	510

第一章 引 言

1-1. 因次和单位

用数学形式来表示物理学的、还有传热的规律是最为有效。但是,物理方程式是涉及物理量的,因而不同于数学方程式。物理量具有因次(长度、速度、能量),并且用一定的单位(米、米/秒、公斤_力·米¹⁾)来量度。只有说明了量度一个物理量的单位,并给出了这个物理量含有这一单位的数目,该物理量才是已知的。因此物理方程式中的每个符号是代表一个数与一个单位的乘积($V=3$ 米/秒)。我们要把基本单位(米、公斤、秒)与导出单位加以区别;后者是由一群基本单位组成(如:米/秒、公斤_力·米)。对于因次和单位这两个概念,必须明确加以区分。一个物理量只有一种因次,但却可以用不同的单位来表示。例如,长度因次可以用米、厘米或毫米来量度。同一因次的不同单位能够相互进行换算。例如,

$$1 \text{ 小时} = 3600 \text{ 秒};$$

$$1 \text{ 英热单位} = 778.26 \text{ 呎} \cdot \text{磅}_\text{力};$$

$$1 \text{ 千卡} = 426.936 \text{ 公斤}_\text{力} \cdot \text{米}.$$

但决不能将一种因次换算成另一种因次。保持基本单位的个数较少是有利的。各种不同单位制度是根据它们以那些单位作为基本单位而区分。

物理单位制是基于以下三种单位;以厘米(cm)作为长度因次的单位,以克(g)作为质量因次的单位,以秒(sec)作为时间因次的单位。有时候,采用百分温度(°C)作为第四种基本单位。所有其他的单位都是由这些基本单位组成的导出单位。基本单位的个数并非天生就规定的。譬如,运用了热力学定律,我们可以把百分温

1) 今后为了区别质量和重量的单位“公斤”起见,当用它作为质量单位时,写成“公斤”,而用它作为重量单位时,则写成“公斤_力”——译者注。

度(°C)用基本单位厘米、克来表示。原则上还可以把基本单位的数目进一步减少。譬如, 我们可以利用万有引力定律以消去作为质量基本单位的克。相距 r 的两个质量 m_1 和 m_2 之间的相互吸引力用牛顿万有引力定律表示; 通常把它写成

$$F = K \frac{m_1 m_2}{r^2}. \quad (1-1)$$

这个式子中包含一个通用常数 K , 在物理单位制中, $K = 6.685 \times 10^{-8}$ 厘米³/克·秒²。如果用这个方程式来推导质量单位, 那末就去掉常数 K , 而把方程式写成

$$F = \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

把它与牛顿定律相合併以消去力 F ; 譬如, 对于受到加速度 a 的质量 m_1 , 牛顿定律写成

$$F = m_1 a.$$

合併这两个方程式, 得到

$$m_2 = a r^2.$$

可以看出, 方程式右边具有因次厘米³/秒²。由于一个物理方程式中的不同项应当具有相同的因次, 就这样, 我们获得了可用来量度质量的因次。然而, 习惯上, 除了上述那些基本单位外, 仍然保持克作为质量的基本单位。

由于工程上的需要, 已经形成了工程单位制; 在这个国家(指美国——译者注)里, 它是基于英制单位的。但是实际上, 工程单位制却未曾发展成为象物理单位制那样的明确和普遍被采纳。譬如, 工程单位制中所采用的基本单位的种类及数目并没有完全一致。通常, 工程单位制是这样规定的: 基本单位用于长度因次(米)、力因次(公斤_力)、时间因次(秒)和温度因次(°C)。但是, 除了上面所列的基本单位以外, 还经常采用其他一些单位(厘米、小时、°K)。此外, 在工程文献中, 还常常采用公斤同时表示质量和力。

在 1954 年举行的第十届权度全会 (Tenth General Conference for Units and Weights) 上, 各国采用了一种称为 mksa 制或

乔吉制(Giorgi system)的新单位制;它是基于下列单位的:

m=米(长度);

kg=公斤(质量);

s=秒(时间);

A=安培(电流);

°K=开耳芬度(温度);

cd=烛光(光通量).

在这种单位制中,能量以焦耳($1\text{ 焦耳}=1\text{ 米}^2\cdot\text{公斤}/\text{秒}^2$)或千焦耳($1\text{ 千焦耳}=1000\text{ 焦耳}$)量度;功率以瓦($1\text{ 瓦}=1\text{ 米}^2\cdot\text{公斤}/\text{秒}^3$)或千瓦($1\text{ 千瓦}=1000\text{ 瓦}$)量度.

有下列关系存在:

$$\begin{aligned} 1\text{ 千焦耳} &= 0.23844\text{ 千卡}^{1)} = 2.7783 \times 10^4\text{ 千瓦}\cdot\text{小时} \\ &= 101.972\text{ 公斤}_\text{力}\cdot\text{米} = 0.94621\text{ 英热单位}^{1)}. \end{aligned}$$

这种单位制有很多优点.例如,它使电学单位跟力学和热力学单位自然而然地结合起来.许多国家已规定采用这种单位制.这种单位制可望在美国得到日益广泛的应用.

由于传热的各种不同应用,在物理学杂志和工程杂志上都会看到这方面的文章.所以对于这个领域内的每一个工作者来讲,有必要经常把数值从某种单位制换算成另一种单位制.如果在进行这种换算时,遵照了下列法则,那末就可以使得计算时造成巨大误差的可能性大为减少.

1. 经常记住,仅当说明了一个物理量的单位,以及它包含该单位的数目后,才能说该物理量已被描述.因此,对于用来进行数值计算的物理方程式中的每个符号,不仅要引入一个数,而且还需引入相应的单位.后面几节中所举的一些例子将表明这条法则的使用.

2. 必须记住,只有同类量,也就是具有相同因次的量,才能相加、相减或相互比较.因此,一个物理方程式中的所有项应当具有

1) 国际蒸汽表数值.