

传递现象

〔荷兰〕 W.J.比克 〔西德〕 K.M.K.穆察尔

化学工业出版社

传递现象

〔荷兰〕W. J. 比克 〔西德〕K. M. K. 穆察尔

谭天恩 蒋斐等译

化学工业出版社

本书根据W. J. 比克和K. M. K. 穆察尔合著“传递现象”译出。全书包括物理传递现象导论、流动现象、热量传递和质量传递共四章，可供大专院校化工类及其它有关专业作教学参考书，也可供有关的研究、设计部门和生产单位技术人员参考。

全书由浙江大学传递工程教研室蒋斐（第二章节Ⅱ.1及以前）、陈维桓（第二章节Ⅱ.2及其后）、王高生（第三章）、谭天恩（第四章）译出，最后由蒋斐和谭天恩校阅、定稿。

W. J. Beek and K. M. K. Muttzall

TRANSPORT PHENOMENA

John Wiley & Sons Ltd, 1975

传 递 现 象

谭天恩 蒋斐 等译

化学工业出版社出版

（北京和平里七区十六号楼）

北京市通县曙光印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本850×1168^{1/32}印张10^{5/8}字数278千字印数1—7,110

1983年10月北京第1版1983年10月北京第1次印刷

统一书号15063·3520定价1.30元

译者说明

“传递过程”是在“化工单元操作”或“化工原理”的基础上，进一步综合其中有关动量、热量和质量传递的共同基本规律而发展起来的新课程。过去国内尚未出版这类教材或参考书（已在组织编写）。本书按W. J. Beek和 K. M. K. Muttzall 合著的“Transport Phenomena (1975) 译出(其实“Phenomena”一字在此的含义，不仅是指“现象”，而更多地是指过程的“实质”或“机理”)。该书的特点除原序中作了些介绍以外，特再补充W. Kast写的书评。译者认为：该书的篇幅不大，而对传递过程作了比较全面、系统的阐述，内容简明扼要；原作者注意到了科学性、实用性和趣味性，因而提出了不少有益的习题；原书不论在编排上或论证方法方面均有其独到之处，不失为一本读之有益的参考书。

另一方面，由于原书省略了那些比较繁、难的数学推导，因而有些公式的来源就不易清楚，须查阅有关书刊，但对于某些概念译者则作了简短的补充说明以便阅读方便。原著中凡已发现的错误都作了更正，除少数在译者注中说明以外，其余的则未再解释，以节省篇幅。

本书基本上是采用国际单位制。书后由译者增加了主要符号说明。

由于我们的水平有限，译文中可能存在有缺点或错误，希望读者及时批评、指正。

1981年

原 序

动量、热量和质量的传递，在自然界中几乎是无所不在。即使是清晨煮鸡蛋^①或泡茶一类日常活动都受本书研究的有关定律所支配。从事传递科学实践工作的化学和工艺工程师等人员，应当在传递过程原理方面具备坚实的基础。

传递现象的教学史，开始于基础理论不足的实用方法，通过短期的实践和学院式的方法，达到了目前的复杂方法。从教育和工业两方面的经验得知，目前的抽象概念并不能适应所有的学生和工程师的要求，他们很容易被大量的文献和艰难的数学弄得不知所措。因此，本书的宗旨在于整理大量的新知识，并以有助于专业工程师或工程学学习者的工作的方式，提供这些新知识。

本书包括了很多基础知识，并试图说明这些基础理论的实际应用。此外，本书对于太难的理论则介绍了一些实际资料，并提供一两个有用的经验关系。本书是根据W. J. 比克于1962至1968年在德尔夫特（Delft）大学讲授传递现象课程的教本，书中的一部分内容和大部分练习曾在研究生的三门课程中采用过。

每章节的末尾都附有一定数量的习题，这是本书不可缺少的构成部分，我们希望读者尽可能多做这些习题，这是吸收和消化这些理论最好的方法。所有的习题都附有答案，以备读者核对自己所得的结果。对某些预计有困难的题目我们还作了详细的说明。此外，我们还介绍了一位科学“侦探”——约翰（本书中虚构的人物——译者注），希望读者喜欢他解决问题的思路，他具有从事“侦探”工作的才能的原因显然是：他读过本书并完成了全部习题。

① 对于相对温度相同的鸡蛋，其傅立叶数 $Fo = at/d^2 = \text{常数}$ 。显然，对于所有的蛋：煮沸时间 $\times (\text{质量})^{-2/3} = \text{常数}$ 。知道了某种蛋的最适宜煮沸时间，即可预定其他蛋类（即使是鸵鸟蛋）所需的煮沸时间。

有关对原作的书评

〔译自 *Chemie-Ing. -Techn.*, 47, Nr. 18, 782(1975)〕

本书在简明地阐述了动量、能量及质量守恒定律后，接着以三个主要篇章着重描述动量、热量、及质量传递现象；适合于具有这方面基础知识的学生作为教本或供自学参考之用。

本书文笔精炼易懂，与一般教本的文体迥然不同。虽然在处理所涉及的数学问题时，舍弃了严格的推导，但对各种传递过程的物理概念，叙述还是非常明确的。全书篇幅不大，然而对于不论是稳定的或不稳定的、流过或环绕固体颗粒的，有无相变化以及有无化学反应的等实际问题，均能予以精辟阐明。

本书引人注目之处，不仅在于作者以其独到的见解，流畅的文笔，使读者易于理解和掌握书中的内容，而且还汇总了 165 个有启发意义的实用习题。这些习题分别附于各有关章节的后面，对于较深的习题，则有简短的提示。另外，本书还别具一格，即在每章所属各节之前，均载有由一虚构的“刑事检查官”（*Kriminalinspektor*）——约翰，先提出一个有待判定的事件的情况和原始数据，随即根据该节将要讨论的定律和知识，经过科学分析，作出正确的判断，并在该章节所附习题中，加以计算验证。这些事件均有其实际意义，且饶有风趣。这样，不仅有助于说明该节中原来是枯燥或难以理解的内容，提高学习兴趣，而且可以培养使用学过的有关定律和知识，来解决以后所遇到的实际问题的能力。因此，本书既可作为教本，又是化工工程技术人员有价值的参考书。

卡斯特 (W. Kast)

目 录

译者说明

原序

有关对原作的书评

第一章 物理传递现象导论	1
I.1 守恒定律	2
I.2 分子传递过程的速率	11
I.3 微观衡算	16
I.4 国际单位制 (SI units)	23
I.5 因次分析	28
I.6 习题	32
第二章 流动现象	41
II.1 层流	42
1. 两水平平板间的稳定层流	43
2. 通过水平圆管的稳定层流	46
3. 通过水平环隙的稳定层流	48
4. 由移动表面引起的流动	51
5. 通过其它截面管道的流动	54
6. 不稳定流动	55
7. 习题	58
II.2 湍流	62
1. 管内湍流	62
2. 直通道内的压力降	67
3. 管系的压力降	72
4. 习题	82
II.3 能量损耗可以忽略不计的流动	87
1. 液体从孔口流出	88
2. 气体流经孔口的流动	90

3. 液体通过堰的流动	96
4. 习题	98
II.4 流量计	100
1. 文丘里流量计	101
2. 孔板	102
3. 转子流量计	103
4. 习题	104
II.5 绕过障碍物的流动	107
1. 总论	107
2. 球形颗粒	110
3. 液滴的自由沉降	114
4. 不稳定流动中的颗粒	115
5. 颗粒群的沉降速度	116
6. 垂直于流向的圆柱体	117
7. 习题	118
II.6 通过颗粒床层的流动	122
1. 固定床	123
2. 流经颗粒床层的过滤	125
3. 流化床	127
4. 习题	128
II.7 搅拌和混合	131
1. 搅拌器的类型和流体的流动形态	132
2. 功率消耗	133
3. 泵送能力和混合时间	135
4. 习题	136
II.8 停留时间分布	137
1. F 函数	137
2. E 函数	139
3. F 函数和 E 函数的初步应用	141
4. 连续流动模型	143
5. 流动系统中的对流扩散	149
6. 习题	153
第三章 热量传递	157

III.1	稳定导热	159
1.	平壁的导热	159
2.	圆筒壁的导热	160
3.	球体外的导热	162
4.	计算温度分布的一般方法	163
5.	圆柱体中有均匀内热源时的温度分布	164
6.	习题	166
III.2	不稳定导热	170
1.	进入半无限大介质的热渗透	171
2.	进入有限介质的热渗透	175
3.	外侧传热系数的影响	181
4.	习题	182
III.3	管内强制对流传热	187
1.	管内层流传热	187
2.	湍流传热	190
3.	分传热系数和总传热系数	192
4.	习题	195
III.4	换热器	199
1.	平均温度差的确定	199
2.	传热单元高度	203
3.	换热器的设计	204
4.	习题	211
III.5	绕过障碍物的强制对流传热	214
1.	沿平板的流动	214
2.	降膜的传热	215
3.	绕过球体和圆柱体的传热	216
4.	填充床中的传热	218
5.	流化床中的传热	219
6.	习题	220
III.6	自然对流传热	222
1.	自然对流传热	222
2.	习题	226
III.7	冷凝和沸腾传热	230

1. 膜状冷凝	230
2. 滴状冷凝	233
3. 沸腾	233
4. 蒸发器中的传热	234
5. 习题	236
III.8 搅拌容器内的传热	237
1. 习题	241
III.9 辐射传热	242
1. 习题	246
第四章 质量传递	248
IV.1 稳定扩散和质量传递	250
1. 稳定扩散	250
2. 传质系数	254
3. 计算浓度分布的一般方法	257
4. 膜理论	258
5. 习题	260
IV.2 不稳定扩散	264
1. 习题	267
IV.3 强制对流时的传质	271
1. 与传热的类比	271
2. 层流时的传质	273
3. 湍流时的传质	278
4. 习题	280
IV.4 传质设备	284
1. 热力学平衡	284
2. 设备的选择	286
3. 传质设备尺寸的决定	287
4. 理论板概念	290
5. 习题	292
IV.5 伴有化学反应的传质	297
1. 慢速均相 1 级反应	298
2. 快速均相 1 级反应	300
3. 均相 n 级反应	303

4. 均相 2 级反应	304
5. 伴有非均相化学反应的传质	308
6. 习题	311
IV.6 热量和质量的联合传递	321
1. 干燥	321
2. 习题	323
主要符号说明	325

第一章 物理传递现象导论

在工程装置的设计中，定性考察和定量考察具有重要的意义。

在定性（有时是半定量）考察的基础上，才能作出以经济的方法获得某种预期产品的适宜可行的初步方案。操作类型的选择，如蒸馏还是萃取；或溶剂的选择，都取决于这种论证。其中实际经验和正确的经济观点起着重要的作用。

在选出生产单元的一两个初步方案后，即可进而细致分析不同的生产步骤。这就要求借助于单元操作的数学模型作定量估算。质量、能量、动量不灭的实际经验提供了三个守恒定律，物理和化学过程的定量分析全是依据这三个定律，装置的过程设计也基于此。“化学工程”和“化学反应工程”学科的目的在于能设计反应器或质量、动量和能量（或热量）交换装置的主要尺寸。这些学科的基本概念，是在“传递现象”和“化学（反应）工程科学”上建立的。这些理论依赖于演绎科学，因而有思维分析的优点；但当目的在于综合时，则缺少以经验为依据的归纳法的长处。

在建立一装置时，定性论证和定量论证是不可分割的。换言之，对过程设计工程师的忠告是：即使过程设计做得再好，也不如由更好的构思而认真设计的装置。对研究工作者而言，其座右铭应是：无论构思怎样卓越的研究，若没有定量的基础，就不能在竞争性的生产装置上取得成果。

在以下领域中的问题，必须是感觉和推理的很好配合，才能运用科学以得到益处。例如，原料、中间产物和最终产物所可能具有的倾向性；材料、特别是结构材料的选择；副反应对完成后续步骤的影响；产品质量以及最终使用性能的考虑等。这类问题

虽然对设计工程师的知识的完整性是重要的，但在本书中却不准备涉及，这正是本书的界限。本书系应用分析的方法，为化学工程师论述守恒诸定律的实用结果。在提出如此多的各种重要问题并要求回答的情况下，本书并不虚夸可达到全面的、科学的精确性。但也应想到：“牢固掌握所介绍的知识的的关键部分，至少能满足解决全部问题中的一部分。”

在节 I .1 中将介绍质量、能量、动量守恒定律。在节 I .2 或 I .3 中则将扩展到分子规模的物理现象。节 I .4 讨论物理量的因次，特别是国际单位制。而节 I .5 讨论因次分析方法。在本章末（以及以后各章的大多数节的末尾）安排了一些供作练习的建议以及某些习题求解的提要。

以后三章将各研究三个物理量守恒定律之一。第二章研究流体动力学（主要是动量传递）。第三章研究能量传递（主要为热量传递）。第四章研究质量传递。这几章将分别详细论述本导论中所提出的主题的概念和观点。

I .1 守 恒 定 律

约翰考察了曾经是动物胶和凝胶工厂的废墟烟烬。大火是由作为骨头脱脂用的己烷萃取装置的爆炸所引起。他记得，己烷装置的容量为 6000m^3 ，其温度比外界高 30°C ，每24小时消耗70吨蒸汽和9吨己烷。他很快计算得出结论：在稳定状况下，装置中的己烷蒸气浓度较爆炸极限——1.2%（体积比）为低。必然是发生了意外情况才导致爆炸。

物理技术基于三个经验法则：物质、能量、动量不能消灭。

物质守恒定律以拉瓦锡（Lavoisier）的大量工作为依据，他证实了在化学反应中没有物质损失，也就是没有质量（质量是物质最重要的性质）损失。物质守恒律并非永远有效。例如在核技术中，物质可以转化为能量，但这种例外对化学或物理技术并不重要。当然，物质有可能从一种需要的形式转化为另一种并非所期望的形式。（例如聚合物的降解，最终导致仅是 CO_2 ， H_2O 等等。）

能量守恒律基于焦尔 (Joule) 的许多工作, 他证实了机械能和热能的等价性。他的工作最终导出了热力学第一定律, 用其描述一流动系统时, 即得到所要求的能量守恒律。两个多世纪前, 这一从封闭系统导出的定律转变成能应用于流动系统的形式, 在科学史上具有重要意义。

牛顿根据固体导出了动量守恒定律的最初的、最简单的形式: 作用于一物体的诸力之和如不为零, 则合力 (在数值和方向上) 等于物体的质量乘加速度。该定律与牛顿第三定律, 即作用力等于反作用力一道, 构成了动力学和流体动力学的基础。从最初描述刚体的这一概念转而更普遍地描述流体流动以来, 还不超过一个世纪。

这些守恒定律在日常生活中也很重要, 例如一磅钱不能当作两磅钱用, 你欠某人的一磅和某人欠你一磅不同。在我们的研究中, 用相同的方法处理经济原则和守恒原则: 建立衡算式, 计算有关的输入、输出和积累量。

令 X_e 表示某一货币量、质量、能量或动量。可将说明所有物理范畴变化现象的基础的守恒律表达为^①:

$$\frac{\text{系统中 } X_e \text{ 的积累量}}{\text{时间}} = \frac{\text{进入系统的 } X_e \text{ 流量}}{\text{时间}} - \frac{\text{出系统的 } X_e \text{ 流量}}{\text{时间}} + \frac{\text{系统中 } X_e \text{ 的产量}}{\text{时间}} \quad (I.1)$$

系统可以是一个国家、一个企业、一个工厂、一个装置、装置的一部分 (如一块塔板)、一根管、一无限小的体积微元等等。这些听来似乎很普通和容易, 但日常实践说明: 对于一个系统必须作定性的判断, 以求尽可能按方便于分析的原则来定义它。为此目的, 必须通过许多定量的训练, 建立分析科学在定性方面的

① 原书用 X 表示, 因与后面定义为物理量的体积浓度的符号混淆, 故改为 X_e 。
——译者

② 本书在以后基于式 (I.1) 的多种衡算式中, 常包括有动量、热量、质量传递的速率方程, 即属于一种广义的衡算式。——译者

概念。如果这些问题在开始时没有弄清楚，则在作这类练习时很容易陷入混乱。我们研究的主题是守恒三定律，其表现方式有许多种，这并不是基本规律很多，而是由于要研究很多不同的系统。

如果只注意宏观性质，例如所选体积中的平均浓度、或平均温度下的变化速率等，则可选一宏观的划定体积 (Control volume)。例如整个反应器、整个触媒床层等等，以进行所要求的物理性质的衡算。反之，如着眼于温度或浓度的分布，则必须先建立微观的衡算，即在一微元中建立衡算，再将所得到的微分式在总体积 (宏观) 范围内积分。本章和以下各章将详细讨论这两种衡算。

现在将试用文字形式表示的守恒律 (I.1) 写成较明确的公式。为此，应用以下各符号：

V ——系统体积 (空间体积，所包含的总数等)；

$\phi_{v,\lambda}$ 和 $\phi_{v,\text{出}}$ ——进入和离去的体积流量，见图 I.1；

r ——在单位时间内以体积计算的 X_0 产生量；

X ——所研究物理量 X_0 的体积浓度。

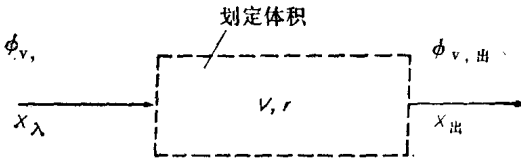


图 I.1 宏观衡算

单位时间、单位体积中的累积量可用 $\frac{dX}{dt}$ 表示。因此，单位

时间内系统中的累积量为 $V \frac{dX}{dt}$ 。某物流的体积流量为 ϕ_v ，含有所研究物理量的体积浓度为 X ，则表示该物理量的体积流量为 $\phi_v X$ 。故可列守恒律方程如下：

$$V \frac{dX}{dt} = \phi_{v,\lambda} X_{\lambda} - \phi_{v,\text{出}} X_{\text{出}} + V r \textcircled{1} \quad (\text{I.2})$$

现将该式应用于作货币量、质量、能量、动量的衡算。

货币衡算

可从最普通的日常生活开始，作钱袋中货币的衡算（定义钱袋为系统，虽则某些操作是很不“系统”的），钱袋中的辨士数定为 X 。（ $V=1$ ）。则式（I.2）可写为：在钱袋中每星期积存的辨士数（也可能是负数！）等于这星期中我所收入和支出的辨士数之差，加上这期间我所“生成”的辨士。最后补加的这一项听起来有些神秘或非法，但可表示以正当手段用其它硬币兑换而“生成”的辨士。相同的定律可用以表示其它硬币，以及钱袋中的全部货币。在所有这些状况下，在以真正的价值而不是以个数表示时，生成项 r 都必须等于零。换言之，即在货币流通过程中的兑换，并不能形成正的增益。设想当 X 不是表示钱，而是表示质量、能量或动量时，试列出衡算式并分析其结果，将会发现其陈述会何等简单！

质量衡算

质量衡算和货币的衡算很相似。在此 $X=C_A$ ，即 A 组分在混合物中的体积浓度。 C_A 的单位以 kg/m^3 计。 $\textcircled{2}$

例如在人造纤维工厂中，使用了 NaOH （制粘胶）和 HCl （在纺丝浴中）， $\text{NaOH}(A)$ 的守恒律如下：

在一个月（或任选其它时间单位）中 NaOH 的累积量，等于在此时间内交付该厂的 NaOH 量，扣除从该厂以 NaOH 形式分配掉的量，再加上此时间内产生的 NaOH 量（当 NaOH 作为反应物时，产生量为负值）。

$\textcircled{1}$ 为完全准确计应写如下式：

$$V \frac{d\bar{X}^v}{dt} = \phi_{v,\lambda} \bar{X}^f - \phi_{v,\text{出}} \bar{X}^f + V r$$

式中上角标“ v ”表示体积平均值；“ f ”表示流量平均值。

$\textcircled{2}$ 从一开始就采用 $\text{kg}, \text{m}, \text{s}, \text{C}$ 为比较物理现象的基本单位（节 I.4）。

对另一反应物HCl (B) 和生成物NaCl (C) 及H₂O (D) 也可建立类似的衡算。再者, 各物的生成速率之和为零:

$$r_A + r_B + r_C + r_D = 0 \quad (\text{拉瓦锡})$$

对于改变工厂输入量和输出量的动力学结果与守恒律间的关系, 工厂会计的关心程度多半要超过主管生产的工程师。

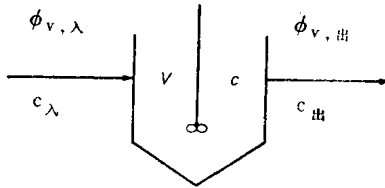


图 I.2 搅拌容器的物料衡算

图 I.2所示的充分搅拌的连续流动槽式反应器, 提供了物料衡算的一个实例。“充分搅拌”意味着指定的物质(如盐)在容器中各处的浓度都相同, 故流出物料的浓度与器内的物料浓度相等。设器内浓度在 $t=0$ 时为 c_0 。自 $t=0$ 开始, 纯水(盐的浓度 $c=0$) 连续通入器内, 问器内盐的浓度随时间如何变化?

对此可作两组物料衡算: 一为水的衡算, 一为盐的衡算。第一衡算说明: 如反应器内液体体积恒定, 则液体进入反应器的流量和离开反应器的流量相等, 即 $\phi_{v,\text{出}} = \phi_{v,\lambda}$ 。第二衡算为单位时间内容器 (Vc) 中盐的减少量等于盐从容器中流出的流量 ($\phi_{v,c}$)。所以

$$\frac{d(Vc)}{dt} = 0 - \phi_{v,c}$$

或

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{\phi_{v,c}}{V} = -\frac{c}{\tau}$$

式中: $\tau = V/\phi_v$ 为流体在容器中的平均存留时间。在 $t=0$, c_0 和 t , c 间积分, 得

$$\frac{c}{c_0} = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$