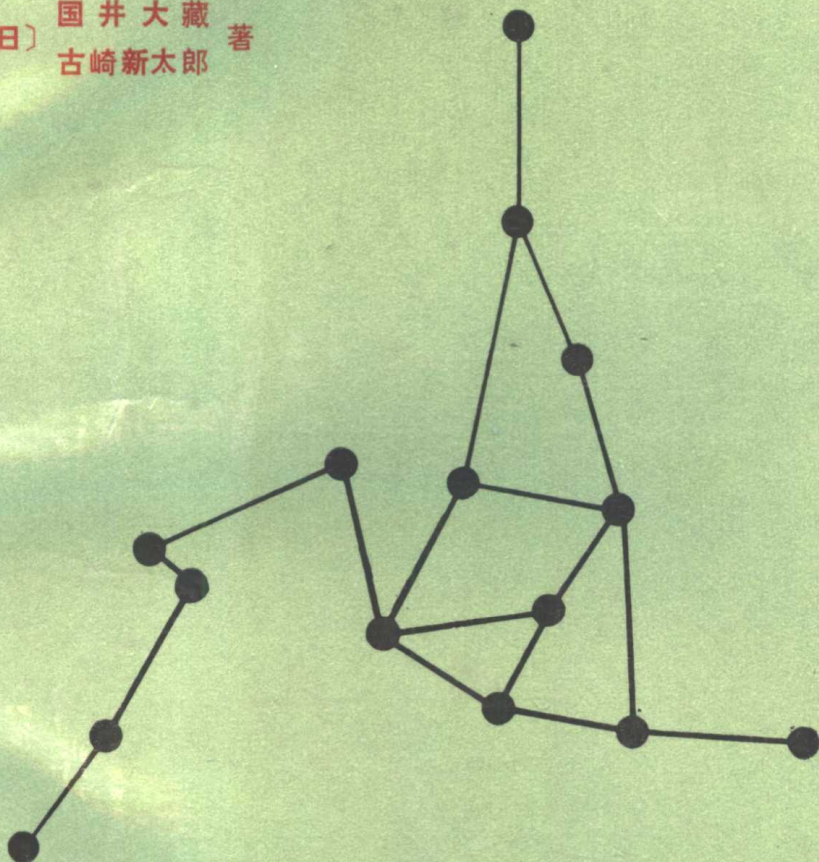


传递动力学

〔日〕 国井大藏 著
古崎新太郎



机械工业出版社

传递动力学

〔日〕国井大藏 著
古崎新太郎

张 克 张立平 译

烃加工出版社

内 容 提 要

动量、热量、质量传递过程动力学，始终是化工单元操作和反应工程的核心和理论基础。本书以流体在不同流体状态下的传递过程为线索，以三传相似性为切入点，内容由浅入深，简明扼要，涉及面广。书中介绍了传递过程的基本知识和物性参数；介绍了流体力学的基本理论；讨论了层流场、边界层和湍流场的传递动力学；还通过应用实例，介绍了一些复合传递过程。

本书不仅可作为大专院校的教学参考书，还可作为在职工程技术人员继续教育的教材。

移動速度論

国井大藏 古崎新太郎 共著
日本培風館 昭和55年初版

传递动力学

国井大藏 著
〔日〕 古崎新太郎
张 克 张立平 译

烃加工出版社出版
同兴印刷厂排版
同兴印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 9⁵/₈印张 213千字 印1—2000
1990年7月北京第1版 1990年7月北京第1次印刷
ISBN 7-80043-088-X/TK·003 定价：3.90元

译者说明

“传递动力学”是综合考察“化工单元操作”中有关动量、热量和质量传递速度规律的一门学科。从本世纪五十年代开始，它与“反应工程”一起作为化学工程学的两大重要支柱而发展起来，到本世纪七十年代，国内外重要高等院校的化学工程专业都先后开设了“传递过程（或原理）”课程。各种教科书、教学参考书先后问世。但是，作为一本专门研究化工过程和化工装置中有关动量、热量和质量传递速度的专著，还是很少见的。本书是按日本东京大学国井大藏教授和古崎新太郎副教授合著的《移動速度論》译出的。它作为一本专门探讨“化工单元操作传递速度”的教科书，使人耳目一新。本书是以作者在东京大学应用化学系的讲课笔记为基础编写的，通过例题使抽象的传递动力学和实际的化学工程计算结合起来。特别值得提出的是，本书抛开一般“传递过程”教材的先动量、热量再质量传递的编排顺序，按流体不同的流动状态时的传递过程为线索，同时探讨三种传递过程问题，内容由浅入深、简明扼要，自成体系，不失为一本有益的教科书或参考书。

本书另一特点是它涉及面较广，除了介绍层流场、边界层和湍流场的传递过程外，还涉及了通过界面的质量传递、伴有化学反应和热质同时传递的过程，以及混合特性对传递过程的影响等。

本书在翻译过程中，承蒙袁乃驹教授的关心和帮助，还

得到了白丁荣、王佩林二同志的帮助在此一并表示感谢。

限于译者水平，译文中难免有缺点和不妥之处，希望批评指正。

译 者

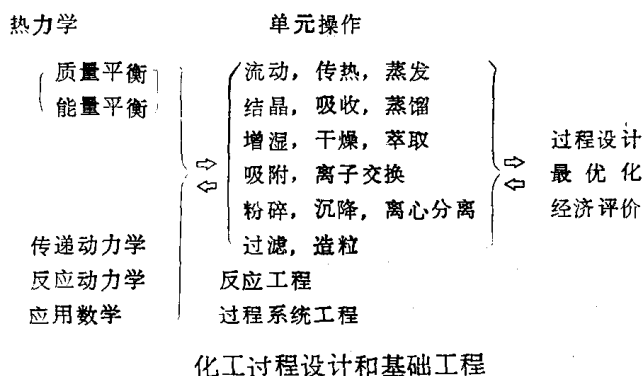
序 言

传递动力学是装置设计的基础，是统一考察动量、热量和质量的传递速度的学科。因此，也是工程学的基础学科之一。特别是对于化学工程来说，传递动力学与热力学及反应动力学共同作为基础学科，起着重要的作用。如果把单元操作，反应工程学及过程系统工程学作为联接化工过程设计的纵向链节，则应把传递动力学、热力学及反应动力学看作是联接化工过程设计的横向链节。

蒸馏塔及传热装置的设计分别确立了蒸馏、传热的单元操作，学习这些单元操作可以满足一般工程之用。此外，设计在反应装置时，研究反应工程学这一问题也就可以了。但是，要想深入学习这些工程学知识，其基础或许在于对基本规律的理解。培养解决新问题的能力，是专门从事化学工程学科的人员所必须的。这就是传递动力学的目的。因此，在学习化学工程学的过程中，掌握传递动力学是极为重要的。本书即根据此观点，简明地讲解了作为化学工程学预备知识的必要内容。

从历史上看，单元操作的概念是1915年由 A.D.Little 与 W.H.Walker 提出的。1923年 Walker、Lewis 和 Mc-Adams 等人著的《化工原理》(《Principles of Chemical Engineering》)作为最早的化学工程书出版了。至于传递动力学的书，1958年出版了 Bird、Stewart 和 Lightfoot 的《传递现象笔记》(《Notes on Transport Phenomena》)。从

此，传递动力学成为一种从理论上对单元操作进行综合论述的强有力的武器。单元操作和传递动力学具有表里一体的关系，但是从学科的发展看，单元操作因其捷足先登而引人注目。而传递动力学作为一个完美的理论，尽管得以光辉夺目地发展，但要把它作为化学工程和有关工程的研究开发的预测手段，使之具有更大的价值，还有待于今后研究者的努力。



本书是笔者以在东京大学工学部应用化学系，对四年制的二、三年级学生的讲义为基础，选择整理而成。为了尽量把抽象的传递动力学和实际的化学工程计算结合起来，编排了促使读者理解的例题。考虑到初学化学工程的学生和想把传递动力学应用于新过程开发的技术人员，本书尽量写得简明易懂。但由于笔者才学浅薄，书中难点恐怕不少，对此，深感歉意。

本书的结构如下：首先，对作为传递动力学基础的物性常数，特别是动力学物性进行说明。第二章以后的内容为流体力学基础及其应用，论述了层流、边界层、湍流的概念及各种流动中的传递速度。特别是着重介绍关于动量、热量和

质量传递的相似原理。这里，不是把这三种量分别讨论，而是力图综合论述。第七章以后，对实际应用中一些基本的传递现象，举例说明了其动力学的处理方法。若能由此进一步加深对单元操作的理解，笔者将感到非常欣喜。

著 者

本书主要参考书

- 1) Bird, R.B., W.E. Stewart, and E.N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, Wiley, 1960.
- 2) Schlichting, H., *Boundary-Layer Theory*, translated by J. Kestin, 7th. ed., McGraw-Hill, 1979.
- 3) Sherwood, T.K., R. L. Pigford, and C.R. Wilke, *Mass Transfer*, McGraw-Hill, 1975.
- 4) Welty, J.R., R. E. Wilson, and C.E. Wicks, *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*, 2nd. ed., Wiley, 1976.
- 5) 浅野康一, 物質移動論, 共立出版, 1976.
- 6) 国井大藏编, 移動速度論 I, I, 岩波講座基礎工学, 1968.
- 7) 城塚正, 平田彰, 村上昭彦, 化学技術者のための移動速度論, オーム社, 1968.
- 8) 平岡正勝, 田中幹也, 移動現象論, 朝倉書店, 1971.

目 录

第一章 物性常数及其推算	1
1.1 分子间力与对比态原理	1
1.2 临界常数的推算	9
1.2.1 临界温度的推算	10
1.2.2 临界压力的推算	10
1.3 热力学物性值的推算	13
1.3.1 焓	13
1.3.2 比热	14
1.3.3 逸度	15
1.4 混合物物性值的推算	16
1.5 动力学物性	17
1.5.1 粘度	17
1.5.2 导热系数	27
1.5.3 扩散系数	34
1.5.4 动力学物性间的相似性	43
第二章 传递动力学基础	49
2.1 连续性方程	49
2.2 Lagrange表示法及Euler表示法	53
2.3 动量平衡	56
2.4 势流	64
2.5 能量平衡	69
2.6 因次分析与无因次准数	71

2.7 层流、湍流及边界层	78
第三章 层流体系的传递过程	84
3.1 平板间的层流	84
3.1.1 两平板间的流动	84
3.1.2 两平板间的热量传递	86
3.2 圆管内的层流	89
3.2.1 圆管内层流的速度分布	89
3.2.2 圆管内层流时的热量传递	90
3.2.3 传递动力学在层流中的应用	95
3.2.4 质量传递	100
第四章 边界层理论	102
4.1 边界层中传递现象的相似性	102
4.2 层流边界层中的热质传递	105
4.3 自然对流时平板表面附近的边界层	114
4.4 边界层动量积分方程式	116
4.5 Pohlhausen的近似解	124
4.6 平板周围边界层的动力学过程的近似	134
4.7 湍流边界层中的传递动力学	142
第五章 湍流场的传递过程	149
5.1 圆管内表面和湍流流体间的传递过程	149
5.2 圆管内湍流的动量传递	150
5.3 圆管内湍流热量和质量的传递性质	159
5.4 圆管内湍流时动量、热量和质量传递的 相似性	161
5.4.1 旋涡的传递现象	161
5.4.2 管内湍流时动量、热量和质量传递 的相似性(Reynolds类似律)	167

5.4.3 其它类似律	169
第六章 各向同性湍流概论	179
6.1 湍流场的表示方法	179
6.2 各向同性的湍流场	182
6.3 湍流中能量的光谱分布	183
6.4 Kolmogoroff的相似假定	186
6.5 Heisenberg的研究方法	187
6.6 湍流中的扩散	190
第七章 通过界面的传递过程	197
7.1 通过静止界面的传递过程	197
7.2 通过静止的固体球的热量及质量传递	202
7.3 流体间传递现象的研究方法	203
7.3.1 双膜理论	203
7.3.2 渗透理论	209
7.3.3 表面更新理论	210
7.4 各种接触装置中的传质系数	212
第八章 复合传递过程	218
8.1 干湿球湿度计	218
8.2 伴有反应的质量传递	220
8.2.1 一级不可逆反应	222
8.2.2 瞬间二级不可逆反应	226
8.3 固体催化剂的有效系数	233
第九章 混合特性	240
9.1 理想流动和非理想流体	240
9.2 非理想流动的特性	243
9.3 微观混合状态	247
9.4 均相体系的处理方法	249

9.4.1	扩散模型	250
9.4.2	理想混合釜串联模型	253
9.4.3	返混模型	254
9.4.4	均相系统中混合特性对速度过程的影响	255
9.5	非均相系的速度过程和混合特性	258
9.5.1	非均相系平推流逆流接触装置	258
9.5.2	存在混合时的非均相体系逆流接触装置	260
附录: 数学基础和附表		268
A.1	建立数学模型的方法	268
A.2	矢量和张量	274
A.3	Laplace变换	279
A.4	保角变换	283
A.5	无因次准数	288
A.6	某些物质的临界常数	292
A.7	单位换算	293

第一章 物性常数及其推算

在研究传递动力学之前，要先论述一下各种物性常数。在表示传递速度时，虽然物性常数是必须使用的物理量，但各种物质的物性常数从手册中是经常查不到的，特别是遇到混合物时更是如此。这时，物性常数就常常需要推算。本章介绍传递动力学所用的物性值的推算方法，以及有关动力学物性的性质及其一般的参考方法。关于推算方法，Reid 等人的著作¹⁾中有详细介绍，想进一步学习的读者可以参考。

1.1 分子间力与对比态原理

众所周知，常温常压下各种气体的压力-体积-温度的关系，不遵守波义耳·查理定律，该定律通常被称为理想气体定理。即使对于粘度和导热系数这类的物性常数，要能导出与气体种类无关的一般性关系，则这些常数的推算当然就容易了，这即为对比态原理的考虑方法。下面首先对作为对比态原理基础知识的分子间力进行简要说明。此处只讨论气体或液体即流体，不涉及固体。

流体的物性常数（也称为物性数据）取决于流体分子间的相互作用力即分子间力。分子间力包括分子引力和排斥力，它们在各方面对分子起着重要的影响。例如，没有引力，蒸汽不会凝聚成液体，液体也不会结晶成固体；而没有排斥力，即使压缩气体和液体，压力也丝毫不会上升。分子间力大致可分为以下四种。

(1) 色散力 (dispersion forces)。1930 年由 London 发现, 因此, 有时也称为 London 力^{*}。由于色散力的作用, 非极性分子之间也存在着分子间力。根据 London 的观点, 若以时间平均, 则非极性分子是没有极性的。但是, 如果仅考虑某一瞬间, 非极性分子则存在着瞬时偶极矩(dipole moment)。这一偶极矩是振动的, 方向和大小通常是高速变化的。由于该瞬间偶极子的存在, 分子间受到电力。

现以 $F(N)$ 表示分子间力, $\Gamma(J)$ 表示位能, 则 F 和 Γ 间的关系如下式:

$$F = -\frac{d\Gamma}{dr} \quad (1.1)$$

式中 r 是分子间距离。用矢量表示时, 上式则变为:

$$F = -\nabla\Gamma \quad (1.2)$$

色散力用引力表示为 $\Gamma_1 = -B/r^6$, 用排斥力表示则为 $\Gamma_2 = A/r^n$ 。二者的合力用下式表示:

$$\begin{aligned} \Gamma &= \Gamma_1 + \Gamma_2 \\ &= \frac{A}{r^n} - \frac{B}{r^6} \end{aligned} \quad (1.3)$$

Mie 和 Lennard-Jones 令 $n=12$, 导出下式:

$$\Gamma = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \quad (1.4)$$

式中 σ 是与分子间距离有关的因子, 即碰撞直径(collision diameter), ϵ 是与势能有关的因子。图1.1所示为 Lennard-Jones 势。式 (1.4) 中的 σ , ϵ 在推算物性常数时提供了重要线索, 是很重要的。Pitzer 提出了下面的关系式:

* Van der Waals (1873年) 提到了这一力, 因此也往往称为 Van der Waals 力。

$$\sigma = 2^{-1/6} r^* \quad (1.5)$$

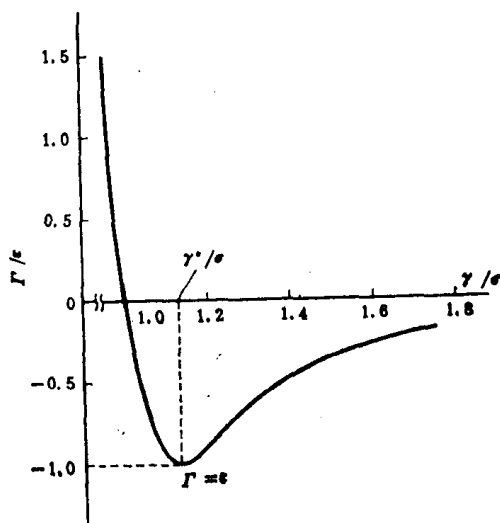


图 1.1 Lennard-Jones 势曲线

如图1.1所示, r^* 为最稳定的分子间的距离。 σ 和 ϵ 的值详见 Reid 等¹⁾ 和 Hirshfelder 等²⁾ 的著作。

(2) 静电力 (electrostatic forces)。这虽是由电荷产生的分子间力, 但是, 可分为荷电离子间作用的力 (Coulomb 力) 和在具有偶极矩的分子间作用的力 (偶极子间力)。

在荷电离子的情况下, 设电荷电量分别为, $e_1 (=Z_1 \tilde{\epsilon})$, $e_2 (=Z_2 \tilde{\epsilon})$, 存在下述关系:

• 1 Debye = 10^{-18} esu·cm = 3.33×10^{-20} C·m

$$\Gamma = \frac{e_1 e_2}{4\pi\epsilon_0 D r} = \frac{Z_1 Z_2 e^{-2}}{4\pi\epsilon_0 D r} \quad (1.6)$$

Z_1 、 Z_2 为电荷数， e 是单位电荷具有的电量，其值为 $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ 。 D 是介电常数 (dielectric constant)，在真空中其值约为 1，空气中约为 1.00054，水中约为 80。 ϵ_0 是比例常数，也称为真空中的介电常数，其值为 $8.8542 \times 10^{-12} \text{C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$ 。将式 (1.6) 代入式 (1.1)，则力 F 可以表示为：

$$F = \frac{e_1 e_2}{4\pi\epsilon_0 D r^2} \quad (1.7)$$

此式也称为库仑 (Coulomb) 定律。

在偶极子间作用着力的情况下， Γ 可用下式表示：

$$\Gamma = - \frac{\mu_1 \mu_2}{4\pi\epsilon_0 D r^3} [2\cos\theta_1 \cos\theta_2 - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)] \quad (1.8)$$

μ_1 、 μ_2 是分子偶极矩值，一般用 Debye^{*} 作为单位。 θ_1 和 θ_2 、 ϕ_1 和 ϕ_2 分别表示两个偶极子 1 和 2 在极坐标中的两个方向的角度。

(3) 诱导力 (induction forces)。这是由永久偶极子诱导所产生的瞬时诱导偶极子分子间的力。而使在电场中，由于电场的作用，也会产生诱导偶极子，并由此产生分子间力。由永久偶极子诱导所产生的偶极子间的诱导力可用下式表示：

$$\Gamma = - \frac{(\alpha_1 \mu_2^2 + \alpha_2 \mu_1^2)}{4\pi\epsilon_0 D r^6} \quad (1.9)$$

式中 α_1 、 α_2 分别为分子 1 和分子 2 的极化率 (polarizability)。

(4) 分子结合及生成复合体时产生的分子间力。 这

是各种分子间结合时所产生的分子间力的总称，即分子以氢键、共价键、配位键以及以离子键结合时的各种结合力。

由于物性常数受分子相互作用的影响，因此就与上述分子间力有关。在很多体系中，色散力起着主要的作用，所以通常在推算物性常数时，常以色散力的影响为主，而在某一极性体系中再加以修正。

对于各种物质的物性常数，如果能用既普遍适用又简单的关系式计算，则极为方便。方法之一，要用到前面提到过的对比态原理 (theory of corresponding States)。说到对比态原理，会令人感到很深奥，其实在宏观地表述这一原理时，就要用到有名的 Van der Waals 方程式 (1.10)：

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v-b) = RT \quad (1.10)$$

式中 P 是压力， v 是摩尔体积， T 是绝对温度， R 是气体常数。如果各量的单位为： $P[\text{atm}]$, $v[\text{l/mol}]$, $T[\text{K}]$ ，则 $R = 0.08205 \text{ atm} \cdot \text{l/mol} \cdot \text{K}$ ；在 SI 制中，各量的单位为： $P[\text{Pa}]$, $v[\text{m}^3/\text{mol}]$, $T[\text{K}]$ ，则 $R = 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ 。对于式 (1.10)，在临界点 (P_c , T_c , v_c) 上，存在下述关系：

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{\partial^2 P}{\partial v^2}\right)_T = 0 \quad (1.11)$$

式(1.10)中的 a 、 b 是 P_c 、 T_c 或 v_c 的函数，因此，式 (1.10) 一般又可以表示为：

$$F\left(\frac{v}{v_c}, \frac{T}{T_c}, \frac{P}{P_c}\right) = 0 \quad (1.12)$$

这就是对比态原理。所以，可把 $P-v-T$ 的关系一般用对比态原理表示，下面简介此法。

气体或液体的 $P-v-T$ 之间，通过分子间力存在着某些