

化学工程 卷Ⅱ 三版 SI单位

单元操作

[英] J.M. 柯尔森 J.F. 李嘉森 著

化学工业出版社

化 学 工 程

卷 II

单 元 操 作

第 三 版

(SI 单 位)

〔英〕 J. M. 柯尔森 J. F. 李嘉森 著

丁 绪 淮 等 译

化 学 工 业 出 版 社

CHEMICAL ENGINEERING

Volume Two

UNIT OPERATIONS

J. M. Coulson and J. F. Richardson

J. R. Backhurst and J. H. Harker

Third Edition

(SI units)

Pergamon Press 1978.

化 学 工 程

卷 II

单 元 操 作

第 三 版

(SI 单 位)

丁绪淮 等 译

责任编辑: 施承祯

封面设计: 季玉芳

•

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

人民交通出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

•

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张 $28 \frac{3}{4}$ 字数813千字印数1—2,670

1987年10月北京第1版1987年10月北京第1次印刷

统一书号15063·3919定价6.90元

本书是根据J. M. Coulson与J. F. Richardson合著、J. R. Baelehuuet与J. H. Harker 协助编纂的“Chemical Engineering”Vol. II 译出的。原书第一版由英国Pergamon 出版社于1955年出版,曾由天津大学化工系及机械系部分教师译出,译本由本社于1960年出版。现该书(卷II)已于1978年出版了第三版,内容较前增改甚多,并改用国际单位制(SI)。本书是按照第三版重新译出的。

本书(卷II)论述化工生产中的主要单元操作,包括基本原理、设备构造、设计计算等方面。本书说理比较严密有系统,内容尚详实,材料亦较新,并详细注明出处便于进一步钻研;每章所插入的例题都较切合实际,可作高等院校化工系师生的教学参考书。亦可供从事化学工程方面科研、设计、生产的工程技术人员参考。

参加本书翻译工作的各译者姓名如后:序、导论及第15章,丁绪淮;第1、2章,柳作良;第3、5、6、7、8章,汪家鼎、张良平、俞芷青、金涌;第4章,张远谋;第9章,金鼎五;第10章,张鏊;第11章,傅举孚;第12章,麦本熙;第13章,王绍亭;第14章,姚玉英;第15章,陈远明;习题、附录,陈涛。全部译文的统校工作由麦本熙担任。

第三版序

在编写第三版时,我们已借此机会不仅使内容刷新,而且把系统的所有物理性质和特征都用国际制(SI)单位来表示,如同已在卷 I 和卷 II 中所做的那样。在卷 I 中已详细叙述过的 SI 制,在欧洲已被广泛采用,而且在世界其它各处目前正在赢得拥护。不过,因为有些读者仍对以英尺、磅、秒为基础的英制单位较为熟悉,所以还是把旧的单位作为并用的单位,在凡是能够这样做而不致引起混乱的地方保留下来。

书中的内容在一定程度上已重新作了安排,第一章现在论述颗粒的特性和它们的整体行为、固体的混合以及按粒度或物料成分而进行的分类。随后几章描述颗粒在流体中运动时的行为与重力和离心力二者以及邻近的颗粒之间的相互作用的影响。现在已取消原来的离心机一章,而其内容则分散在其它各章的适当部分里。所考虑到的重要应用包括颗粒床和填充塔中的流动、流态化、悬浮颗粒的输送、过滤以及气体的净制。本书内容刷新的一个例子是增加了一小节流化床燃烧,后者可能是流化技术在工业上最重要的应用。此外,我们还纳入了有关絮凝的完全新的一节内容,这是斯旺西(Swansea)大学威廉斯(D. J. A. Williams)博士为我们准备的,我们非常感谢。

传质操作在化学处理过程中占支配的地位,这反映在对固-液萃取、蒸馏、气体吸收和液-液萃取这些操作所给与的持续不断的注意上面。这些课题的最后一个,连同有关液-液混合的内容在一起,现在放在液-液系统单独一章内加以处理,其余的内容,以往出现在混合一章内的,则已预先包括在固体混合一项之下了。本卷以蒸发、结晶和干燥这几章作为结束。

卷 I、II 和 III 形成一套完整的丛书,卷 I 讨论流体流动、传热和传质的基本原理,本卷即卷 II 讨论化学工程的物理操作,卷 III 则讨论

化学和生物化学的反应器设计的基础、某些目前日益显得重要的物理操作以及过程控制和计算的基本理论。卷 1 和 2 中所列习题的解答现在可分别在卷Ⅳ和卷Ⅴ中见到。而本丛书的另外一卷则正在准备之中，它将对化学工程设计提供一个导论并指出如何能把前几卷中所阐明的原理体现为化学工厂。

我们欢迎巴克赫斯特 (J. R. Backhurst) 和哈克尔 (J. H. Harker) 继他们协助编辑卷 1 的最新版并编著卷 4 和 5 之后，作为准备本版的共同著者的合作。我们也高兴地期待着辛诺特 (R. K. Sinnott) 关于化学工程设计的那一卷书的问世。

第 二 版 序

本教材讨论化学和有关工业中所用的物理操作。这些操作很方便地称为“单元操作”，以表示每种单独的操作，例如过滤，是在范围广泛的工业中，而且往往是在不同的温度和压力的情况下使用的。

自从1955年第一版问世以来，有关的科技文献曾有很大的增长，但大部分的发展是来自政府和大学的实验室而不是来自企业公司。其结果是，基于实验室数据的关联式并非都曾在工业规模上得到充分的证实。但是，在吸收塔一节中却包括有从工业设备中获得的数据，而蒸馏和蒸发两章中所采用的大部分公式是以工业实践的结果为依据的。

这次进行修订时，我们曾对第1、5、6、7、12、13和15章作了大量的改动，并借此机会把本卷的页码同卷1的分开。这次修订之所以有可能，只是由于纽卡斯尔 (Newcastle) 大学的桑顿 (J. D. Thornton) 教授(第12章)，波特 (J. Porter) 先生(第13章)，皮特 (K. E. Peat) 先生(第10章)和沃尔迪 (B. Waldie) 博士(第1章)以及利兹 (Leeds) 大学的党布劳斯基 (N. Dombrowski) 博士(第15章)的慷慨合作的结果。我们特别要对伦敦 (London) 大学药学院皮科克 (D. G. Peacock) 先生所完成的大量工作表示赞赏。他不但把整个修订本校对了一遍，而且对许多章增补了大量的内容并仔细检查了索引。

我们愿向慨允提供他们的设备插图的公司以及提出有益的批评和有用的建议的许多前一版的读者致谢。

化学工程不再局限于纯物理过程和单元操作了。一些重要的新课题，包括反应器设计、工厂的自动控制、生物化学工程以及对化工厂的过程设计和控制二者使用计算机，将在准备即将出版的卷3中加以论述。

自从本教材第一版以来，化学工程已经变得复杂和成长起来了。我们希望，新版将证明对新一代的大学生是有用的，同时对从事工业的人们是一册有帮助的参考书。

在刊行这个新版时我们谨向培加蒙 (Pergamon Press) 出版社表示谢意，该社在处理技术细节时曾克服了不少的麻烦。

J. M. 柯尔森

J. F. 李嘉森

注意：在现行版（第三版）中各章号码有所变动。

第一版序

在编写《化学工程》卷2时，我们曾企图把自己认为是化学工业中比较重要的单元操作包括在内。这些主要属于物理性质的单元操作，已尽可能地按传递操作的基本机理加以分类。遇到在物理过程之外还有化学反应发生时，只是在少数的情形下才有可能提出设计的程序。这种困难的发生，是由于当我们试图设计这一类的设备，例如有化学反应的吸收塔之时，我们还不能够提供一个绝对严格的解法。我们未曾叙述象在带式运输机或斗式升降机一类设备中进行的物料运输，我们觉得这些内容很显然是属于机械工程的范畴。

我们一直在纽伊特 (Newitt) 教授的系里工作了许多年，对书中所引论的很多材料，我们极其感谢他给予我们的种种便利。读者将会发现一些缺陷以及一些尚未充分发展的原理。化学工程是一个还有不少的研究尚待进行的领域，倘若此书能对这一方面的活动多少起一些鼓励作用，我们就会感到于愿已足。希望本书的编写方式，对于指引到目前为止科学研究者已经公诸于世的那些资料，有所裨益。化学工程尚在孩提时代，我们绝不应该设想一定要把本书所采用的治学方法看成在今后若干年内也是正确的。这门学科的优点之一就在于它的界限尚未明确划定。

最后，我们愿向下列友人对所提出的宝贵批评和建议，表示感谢：安德森 (G. H. Anderson) 先生，柯尔本 (R. W. Corben) 先生，德古赛 (W. J. De Coursey) 先生，古特 (M. Guter) 博士，卡坦 (L. L. Katan) 博士，莱辛 (R. Lessing) 博士，拉斯巴希 (J. Rasbash) 博士，沙威陶斯基 (H. Sawistowski) 先生，史密斯 (W. Smith) 博士，特雷恩 (D. Train) 先生，特罗布里奇 (M. E. O'K. Trowbridge) 先生，沃纳 (F. E. Warner) 先生和扎基 (W. N. Zaki) 博士。

导 论

对化学工厂设计和建造的了解，常认为是化学工程的基本内容。从化学家对某一制造过程的原始概念出发，需要明了化学、物理以及许多工程方面的特点，以便把实验室的过程扩大为工业的规模。在本卷中，我们主要是涉及那些在工业设备中发生的过程的物理性质，尤其是要决定那些影响物料传递速率的因素。这些操作的基本原理，即流体动力学以及传热和传质，业已在卷1中讨论过，而这些原理的应用，则是本卷的主要部分。

在整个化学制造工业中，许多物理操作是一些个别工业所共有的，而且，犹如在卷1中曾经解释过的，它们被称为单元操作。例如，用过滤从悬浮液中分离固体，用蒸馏分离液体，或者用蒸发或干燥除去水份，都是这一类的典型操作。为发酵工业、石油工业或有机化学工业设计一套蒸馏设备的课题，在原理上是相同的，其不同之处主要在于构造的细节。借蒸发以使溶液浓缩，这在处理糖、盐、或果汁方面又是一个基本上相似的典型操作，但是在最适当的安排方面会有一些差别。本书中采用了这种分类方法，但我们把这些操作按其传递机理加以归类，因之蒸馏、吸收和液-液萃取这些扩散过程就放在相衔接的几章里，而涉及固体在流体中的一些操作则归在一组来讨论。在考查许多这些单元操作时，将会发现，传热速率或流体流动的性质是起着支配作用的因素。固体或流体的运输是另一个例子，说明了解流体动力学的重要性。

设计的难题之一，是维持实验室设备和较大的工厂设备之间的相似状态。例如，若要把一个混合物在进行放热反应期间维持在某一个温度，就实验室的规模而言，维持等温状况很少有实际困难。另一方面，一只大反应器的外表面对其容积之比——这是与器的线性尺寸成反比的——在大多数情形下就属于不相同的数量级，而取出反应热的

问题遂成为设计中的一个主要项目。在讨论液-液系统的第十三章中考虑了与放大有关的某些一般性问题，而在许多章中也提到一些特殊的问题。此外，在大规模的操作中，反应物的加入和取出可能引起困难，特别是在它们含有腐蚀性液体或磨蚀性固体时。工业设备的普遍倾向是要提供一个连续的过程，其中往往包含着一系列的级。这样，放热反应可在一连串带有级间冷却的反应器中进行。

一座化学工厂的规划，包括首先决定最经济的制造方法，而后决定过程中所用单元操作的最经济的安排。这等于在设计一个化学制造过程中，要使投资和操作费用得到最有利的结合。在本卷中我们没有详细讨论费用的问题，但力求指出各种类型设备在最经济的情况下进行操作的条件。对各种操作所包含的物理原则没有充分的知识，就不可能替一个规定的制造过程选择最适当的操作。设计问题的这一方面，可举分离过程的一两个简单例子来讨论。在一个固-固物系中，可先按大小、其次按物料的性质，将颗粒分离。一般而言，筛析是使较粗的物料按大小分类的最令人满意的方法，但此法不适用于很细的颗粒而通常须采用一种沉降法。在前一种方法中，我们直接利用颗粒的大小作为分离的基础，而在后一种方法中，则以颗粒在流体中的行为随其大小的改变为依据。一种混合物料也能借沉降法分离为其组份，因为颗粒的形状和密度也影响它们在流体中的行为。其它的分离方法则依靠表面性质的不同（泡沫浮选）、磁性（磁力分选）以及在某一溶剂中溶解度的不同（沥取）。对于互溶液体的分离，通常采用的三种方法是：

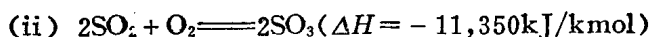
1. 蒸馏——依靠挥发度的不同；
2. 液-液萃取——依靠在某一液体溶剂中溶解度的不同；
3. 冷冻——依靠熔点的不同。

选择最适宜的操作问题，还将由于一些因素，例如引起结晶的液体浓度，而更加复杂化。譬如，对邻位、间位和对位硝基甲苯的混合物的分离，必须作出决定，是先蒸馏后结晶比较好，还是颠倒过来比较好。当我们在浓缩一种固体的溶液时，同样的问题也会发生；我们必须决定，是在已经达到某一固体浓度时停止蒸发，而后进行过滤、

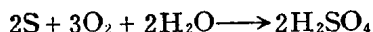
并继之以干燥，还是继续蒸浓到这样的程度，以致能省却过滤阶段而直接转入干燥。

在许多操作中，例如在一座蒸馏塔内，需要了解设备的流体动力学，以及传热和传质的关系。这些因素常是很复杂地互相依赖着，而有必要考虑它们每一个机理的独特贡献。此外，在化学反应中，过程的最终速率可能受传热或化学动力学的支配，而有必要决定那一个是控制的因素，这个问题将在卷3中讨论。

单元操作方面的知识的应用，可举硫酸厂之例以示其梗概。首先，需要选择制造过程和要使用的原料。可以假设，此过程包括使硫磺燃烧成二氧化硫，继而用通称的接触法使它氧化成为三氧化硫，并建议采用岩状硫磺、大气中的氧气和水。硫磺的其它来源包括有黄铁矿和石膏(硫酸钙)，但是，这些虽然比岩状硫磺便宜得多，可是要安装额外的设备以净化气体。其次，必须研究化学反应的动力学。此处基本上所涉及的反应有三：



于是总反应是



每一个反应都是放热的，而工厂的操作是否成功而且经济，就依靠这些反应热的取出及其随后的利用。第一个反应是一个简单的气相燃烧，它实际上是在绝热情形下完成的，故而不需要在燃烧室本身内取出热量。第二个反应进行得不够快，除非有催化剂存在，催化剂通常是分散在一种填充剂上的五氧化二钒，当温度大约在 675 K 以上时，此反应便能自给地进行下去。因为是强烈放热的反应，温度上升对平衡点有不利的影响，而且因此影响极其显著，故应该使反应尽可能在等温情况下进行。有催化剂存在时，反应的速率高而且可以视为在每个阶段都进行完毕。最后气体的组成能够作为温度的函数来计算，所以能定出在各个绝热阶段平衡混合气体的组成，因为所有的反应热都在产品中出现。从相继的各个反应器出来的气体，温度较低，因而

SO_3 的含量将上升。第三个反应包括在水中吸收 SO_3 并立刻发生化学反应以产生 H_2SO_4 。由于此反应是放热的，假如照这样进行，温度就会有相当大的上升并有雾滴形成。实际上，在98% H_2SO_4 中而不在水中吸收 SO_3 ，就能增加液相的热容。

由此可见，充分了解化学工厂内各个设备中所发生的物理过程，是化学工程师的训练中一项基本要求。只有通过对机理以及随后对设备建造方法的了解，才有可能窥得全貌，包括操作费用在内。

目 录

第三版序

第二版序

第一版序

导论

第一章	粒状固体	1
第二章	固体的破碎	54
第三章	颗粒在流体中的运动	98
第四章	通过颗粒床层与填充塔的流体流动	142
第五章	沉降	200
第六章	流态化	268
第七章	气力和水力输送	328
第八章	气体净制	353
第九章	过滤	376
第十章	沥取	436
第十一章	蒸馏	479
第十二章	气体吸收	617
第十三章	液-液系统	683
第十四章	蒸发	747
第十五章	结晶	806
第十六章	干燥	831

第一章 粒 状 固 体

1.1 引 言

在卷 I 中对流体(液体和气体)的性状,特别是对它们的流动性质以及传热和传质的特性已经作了考虑。一旦流体的组成、温度和压力已经规定,它相应的物理性质,如密度、粘度、热导率和分子扩散也就确定。在本卷的头几章中,我们将考虑含有固体颗粒的系统的性质和行为。这些系统通常都比较复杂、不仅因为可能存在复杂的几何排列而且还存在有对物质的物理状态完全地进行定义的基本问题。

一个单独颗粒的三个最重要的特性是其组成、粒度和形状。组成只要完全均匀,它将决定于密度和传导率这样一些性质。不过,在很多场合,颗粒将是多孔的,或者可能由一个分布着第二种物质的微小颗粒的连续基质组成。颗粒的粒度是很重要的,它影响到像单位体积的表面积和在流体中这些颗粒的沉降速率这样一些性质。颗粒的形状可以是规则的,像球形、立方形,也可以是不规则的,例如,像一块破碎的玻璃片。规则形状的可以精确地用数学方程式加以描述,不规则形状就不能,而不规则颗粒的性质通常也用规则形状的颗粒的某些特性来表示。

在工业规模中,我们涉及到大量颗粒的处理并且经常需要按整体来规定系统,这样就需要知道在混合物中颗粒粒度的分布并有可能规定一个平均粒度来替代颗粒粒度,而平均粒度在某些方面可以从整体上表达粒状物质的性状。与颗粒系统有关的重要操作包括在料斗中的储存,通过小孔和管道的流动和流量的测量。还经常需要缩减颗粒的粒度,或者反过来使其形成集聚物或熔结物。有时还可能需要将两种或多种固体物加以混合,而在别的时候又可能需要将一种混合物分离,为其组成物或不同的颗粒粒度。

在某些情况下，颗粒与周围流体之间的相互作用并不怎么重要，但是在另外的时候又可能对系统的行为有显著的影响。因此，在过滤中或流体流过颗粒层时，整个多孔物的特性就成为主要的特征，并且流动的阻力受到颗粒间自由空间的尺寸和形状的支配。在这些情况下，颗粒与相邻颗粒之间是物理接触，在颗粒间很少有相对移动。可是颗粒在液体中的沉降这样的过程中，每一个颗粒完全为流体所包围，并且在颗粒间可以相对地移动。只在简单的情况下有可能进行精确的理论分析，斯托克斯（Stokes）定律给出了单独的圆球形颗粒在周围极低速流体中相对移动时的阻滞力，它是在这一研究领域内最为突出的重要理论关系。实际上，很多经验定律是以对斯托克斯定律规定校正因数的概念为基础的。

1.2 颗粒的特性

1.2.1 单独颗粒

最简单的颗粒形状是圆球，由于它的对称性，方位问题可以不加考虑，也即颗粒在任何方向观察完全一样，并且不管它的方位如何，在流体中表现的行为也都相同。没有其他颗粒有这样的特性。不规则形状的颗粒通常用一个当量球(equivalent sphere)的尺寸来定义。不过，颗粒根据所选择的性质，用不同尺寸的球来表示。当量球的某些重要尺寸如下：

- (a) 与颗粒体积相同的球；
- (b) 与颗粒表面积相同的球；
- (c) 与颗粒单位体积的表面积相同的球；
- (d) 与颗粒在与运动方向垂直的平面上的投影面积相同的球；
- (e) 颗粒处在最大稳定度的位置时（也即在显微镜滑动片上）、从上观看与颗粒的投影面积相同的球；
- (f) 能刚好通过颗粒所能通过的相同方孔尺寸（如在一个筛子上）的球；
- (g) 与颗粒在特定流体中有相同沉降速度的球。

有几个定义与在特定方位上对颗粒的测量有关。因此弗雷特直径

(Feret dimeter)是两个刚好与颗粒接触的平行面之间的距离。很明显,这取决于颗粒相对于平面的方位。

有几个定义则与在特定方位上对颗粒的测量无关*。因此弗雷特统计直径(Feret statistical diameter)是颗粒在任意固定方向上与之相切的平行线间距离的平均长度,

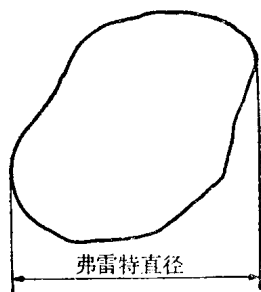


图1.1 弗雷特直径

而与颗粒相对于平行面的方位无关(参看图1.1)。

对一个颗粒形状的测量通常用按下式定义的圆球度 ψ 来表示:

$$\psi = \frac{\text{与颗粒有相同体积的球的表面积}}{\text{颗粒的表面积}} \quad (1.1)$$

另一种表示形状的方法是采用一个因子,颗粒尺寸的立方必须乘上这个因子才等于体积,在这情况下,颗粒的粒度通常用上述方法(e)来定义。

颗粒的其他性质有时也是重要的,如:它是结晶的或是无定形的,是否是多孔的;它的表面性质,包括粗糙度和存在吸附层。

如果颗粒要受到大的负荷则硬度也是重要的。

1.2.2 测量技术

不但对单独颗粒而且对颗粒系统,可用的测量技术的范围是广泛的。每一种方法实际上都适用于一定的粒度范围并给出一个特定的当量粒度,它与测量方法的特征有关。对于颗粒粒度测量方法的细节可以参看一些标准著作[1,2]。下面给出几个主要方法的原理。同时指出应用它们的粒度范围。

1. 筛分($>50\mu\text{m}$)。筛分分析可以用一套筛子来实现,其中一个比一个具有较小的筛孔尺寸。一般,筛子系列是这样安排的,根据所

• 原文为“一与在特定方位上对颗粒的测量有关”,可能有误。译者注。