

化学工程 卷Ⅲ 二版 SI单位

化学反应器设计 生化反应工程计算方法与控制

[英] J.M. 柯尔森 J.F. 李嘉森 著

化学工业出版社

化 学 工 程

卷 III

化学反应器设计 生化反应工程 计算方法与控制

第二版 (国际单位制)

[英] J. M. 柯尔森 J. F. 李嘉森 著
徐明善 王骥臣 王树青 童衍传 译

化 学 工 业 出 版 社

本书是根据 J. M. Coulson 与 J. F. Richardson 著“Chemical Engineering” vol. III 译成的、原书的第一、二版由英国 Pergamon 出版社出版。第一版于 1971 年出版,第二版于 1979 年出版。内容较前增补很多,并改用国际单位制。

本书(卷 III)中化学工程所涉及的范围则已包括了着重于系统设计的新内容,在这些系统中既可发生化学反应,甚至还可发生生物化学反应。本卷共介绍七章内容:反应器设计的基本原理;非均相催化反应器的设计和操作;开发生物化学和微生物工艺过程的特殊器件;非牛顿流体技术;计算机及计算方法;过程控制;吸附过程。

本书可作高等院校师生的教学参考书,亦可供从事化学工程、生化工程方面科研、设计、生产的工程技术人员参考。

Chemical Engineering

Volume Three

Chemical Reactor Design, Biochemical Reaction Engineering including Computational Techniques and Control

J. M. Coulson and J. F. Richardson

Editors of Volume Three

J. F. Richardson and D. G. Peacock

Second Edition

(SI units)

Pergamon Press 1979

化 学 工 程

卷 III

化学反应器设计 生化反应工程 计算方法与控制

第二版(国际单位制)

徐明善 王骥臣 王树青 童衍传 译

责任编辑:施承薇

封面设计:季玉芳

化学工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 23 字数 653 千字

1988 年 9 月北京第 1 版 1988 年 9 月北京第 1 次印刷

印 数 1—3000

ISBN 7-5025-0087-1/TQ·49

定 价 6.60 元

第一版序

正如我们今天所知道的，在两次战争之间的年代里，化学工程在英国已经发展成为一门重要的工程学科，而且从那时起就已经迅速成长起来了。这一门学科对于化学工业和其它类似工业中一些过程的工业规模发展的独特贡献，首先要归因于在认识上进步，这种认识进步提出了传递过程（流体流动，传热，传质）和对单元操作设计原理的发展，几乎所有的这些单元操作都涉及到将均相和非均相的复杂混合物以物理方法分离成为各个单独组分。在这方面，化学工程师以往对反应器出来的产物的分离和提纯要比对反应器本身的设计更为重视。

现在则已完全改变了这种情况。在物理分离过程已取得相当成功的同时，注意力已在很大程度上转向于反应器的设计，此时，有关流体流动、传热和传质诸过程可能都是同样重要的。此外，通过正确选择反应器内的各种操作条件，就可以事先排除一些不容易分离的困难问题。化学生产已变得更需要较高的经济效益比，以便在高级化学产品、化学药品、抗生素和聚合物等方面进行生产而获得利益，这里仅列举了这几种产品，而这些产品在不多年以前即使在实验室也是不知道的。利润率既已受到了限制，就要从原料中尽可能获得最高的收率以便产生长远而更巨大的经济鼓励。因此，反应器的设计就已成为化学工程师工作中一个极其重要的组成部分。

第一、二两卷虽然现在看来并没有太不恰当之处，但这两卷却已反映了本世纪五十年代初期化学工程有意义的主要方面。在第三卷中，化学工程所涉及的范围则已包括了着重于系统设计的新内容，在这些系统中既可发生化学反应，甚致还可发生生物化学反应。本卷所包括的几章的内容有：反应器设计的基本原理；使用非均相催化反应器的设计和操作；以及开发生物化学和微生物工艺过程的特殊器件。在化学反应器和生物化学反应器中，所加工的很多物料在物理结构上

是很复杂的，还有一些具有非牛顿型流动性质的物质，这些都是值得考虑加以特殊处理。随着计算机的广泛应用，一些太复杂难于用解析法求解或图解法求解的设计问题，现在都可以用数值法求解；与此同时，已将计算机应用于化学工程问题单独作为一章的题目。与化学工厂复杂性增长的同时，已经研究对它们的操作需要有更严格的控制，如是，加入了有关过程控制一章。

第三卷的每一章都是一位专家在其特定范围内的成果。本书的这些作者现在或者曾经都是英国斯旺西（Swansea）大学工学院化学工程系参谋部（Staff）的成员。W. J. 托马斯现在是在美国缅因州巴思（Bath）工业技术大学；J. M. 史密斯是在荷兰代尔夫特的霍格技术学校（Technische Hogeschool, Delft）。

J. M. C.

J. F. R.

D. G. P.

第二版前言

第三卷的第二版除了一般的修正和改进以外，主要的变动是在第一、二章增加了反应器的设计，并在附录中增加了误差函数表。

在第一章中加入了两部分新内容。第一部分是讨论反应器内非理想流动的一些情况，以及这些情况对停留时间分布和反应器性能的影响。第二部分论述了气-固非催化一类很重要的化学反应。在这两章中同时加入这两部分内容，也就大大的增加了本书在这方面的价值。

所有的参数在第二次印刷时都是用国际单位制 (SI units) 表示，还考虑把本丛书以前各卷所列的参考文献作了一些改进，这些改进最近已在各卷的第三版内作了实质上的表示。

第二次印刷前言

已抓住这次印刷机会改正了一些错，并采用了无论在那种场合下都能使用的国际单位制 (SI units)。国际单位制仍然在细节上 要进行一些改进，只要表示的方法在没有完全标准化以前，国际单位制总会有一些要修改的。应当强调的是：国际单位制的主要优越性是在于作计算，而以日常用的各种单位来表示时，往往会表现出一些问题。有时，数据只能适用于某一种旧单位，所以，化学工程师就必须有能力处理各种问题，不管它们所表示的是什么单位。

作、译者名单

第一章 反应器设计基本原理

J. C. Lee (University College of Swansea)

译者: 徐明善

第二章 催化反应器的设计

W. J. Thomas (Bath University of Technology)

译者: 徐明善

第三章 过程控制

A. P. Wardle (University College of Swansea)

译者: 王骥程

第四章 计算机及计算方法

D. J. Gunn (University College of Swansea)

译者: 王树青

第五章 生物化学反应工程

B. Atkinson (University of Manchester Institute of Science and Technology)

译者: 童衍传

第六章 非牛顿流体技术

J. M. Smith (Technische Hogeschool, Delft)

译者: 童衍传

第七章 吸附过程

J. H. Bowen (University College of Swansea)

译者: 童衍传

目 录

第一版序言

第二版序言

第二次印刷前言

谢启 (从略)

作、译者名单

第一章 反应器设计基本原理	1
1.1 反应器设计的基本任务	1
1.1.1 副产物及其经济上的重要性	2
1.1.2 反应器设计的初步评价	3
1.2 反应器的分类和反应器型式的选择	3
1.2.1 均相反应器和非均相反应器	3
1.2.2 间歇反应器和连续反应器	4
1.2.3 半间歇操作中反应物接触方式的变动	5
1.2.4 反应热对反应器型式的影响	7
1.3 工艺条件的选择	12
1.3.1 化学平衡和化学动力学	12
1.3.2 平衡转化率的计算	13
1.3.3 反应器条件的最佳选择	18
1.4 化学动力学和速率方程式	19
1.4.1 反应速度、反应级数和速度常数的定义	19
1.4.2 温度的影响、活化能	21
1.4.3 速率方程和反应机理	22
1.4.4 可逆反应	24
1.4.5 适用于恒定体积间歇反应器的速率方程	26
1.4.6 动力学常数的实验测定	27
1.5 总物料衡算和热量衡算	29
1.6 间歇反应器	32

1.6.1	反应时间的计算; 基本设计方程式	33
1.6.2	等温操作的反应时间	35
1.6.3	最大生产速率	36
1.6.4	非等温操作的反应时间	38
1.6.5	绝热操作	40
1.7	管式流动反应器	42
1.7.1	管式反应器的基本设计方程	44
1.7.2	非等温操作的管式反应器	51
1.7.3	管式反应器内的压力降	52
1.7.4	由管式反应器求取动力学数据	52
1.8	搅拌槽式连续反应器 (CSTR)	54
1.8.1	理想混合的假设停留时间	55
1.8.2	示踪物通过搅拌槽系统的流动	55
1.8.3	搅拌槽式连续反应器 (CSTR) 设计方程	59
1.8.4	图解法	63
1.8.5	自供热的操作	66
1.8.6	从搅拌槽式连续反应器求动力学数据	67
1.9	有关单个反应的间歇反应器, 管式反应器和搅拌槽反应器的比较。	
	反应器的收率	68
1.9.1	间歇反应器和管式活塞流反应器	69
1.9.2	搅拌槽式连续反应器	70
1.9.3	各种反应器的比较	72
1.10	有关复杂反应的间歇反应器, 管式反应器和搅拌槽式反应器的比较。反应器的收率	74
1.10.1	复杂反应的类型	74
1.10.2	收率和选择性	75
1.10.3	反应器的型式和返混	76
1.10.4	平行反应	77
1.10.5	两种反应物的平行反应	80
1.10.6	连串反应	83
1.10.7	两种反应物的连串反应	88
1.11	气-液反应器	89
1.11.1	适用于带有化学反应的传质方程	91

1.11.2 选择合适的反应器	96
1.12 化学反应器中的非理想流动和混合	99
1.12.1 示踪物的实验方法	99
1.12.2 物流离开容器的年龄分布——E- 曲线	102
1.12.3 示踪物数据资料对反应器的应用	103
1.12.4 非理想流动模型	107
1.13 气-固非催化反应器	111
1.13.1 建立模型和气-固反应器的设计	113
1.13.2 单个颗粒未反应的核心模型	113
1.13.3 设备类型和接触方式	118
1.14 补充读物	122
1.15 参考文献	123
1.16 符号一览表	124
1.17 习题	128
第二章 催化反应器的设计	133
2.1 设计问题提要	133
2.1.1 速率限制步骤	134
2.2 多孔固体内的传质	137
2.2.1 有效扩散系数	137
2.3 多孔催化剂颗粒内的化学反应	141
2.3.1 多孔催化剂颗粒内的等温反应	142
2.3.2 颗粒内的扩散对实验参数的影响	150
2.3.3 多孔催化剂颗粒内的非等温反应	152
2.3.4 扩散控制准则	157
2.3.5 催化反应中的选择性受传质和传热作用的影响	158
2.3.6 催化剂中毒	171
2.4 从流体的主流到固体表面的传质	175
2.5 非均相催化反应的化学动力学	180
2.5.1 反应物的吸附成为速率决定步骤	182
2.5.2 表面反应成为速率决定步骤	183
2.5.3 产物的脱吸成为速率决定步骤	185
2.5.4 有关其它机理的速率决定步骤的一般叙述	185
2.6 设计计算	186

2.6.1 填充管式反应器	186
2.6.2 流化床反应器	208
2.6.3 填充反应器的热性能	209
2.7 补充读物	219
2.8 参考文献	219
2.9 符号一览表	221
2.10 习题	225
第三章 过程控制	228
3.1 控制回路与方块图	228
3.2 过程控制设备	230
3.2.1 测量元件	231
3.2.2 最终控制元件	234
3.2.3 控制器	237
3.3 控制系统动特性	249
3.3.1 传递函数	249
3.3.2 控制系统环节的阶次	252
3.3.3 容量系统的传递函数	252
3.3.4 距离—速度滞后	262
3.3.5 控制器的传递函数	264
3.3.6 强迫函数作用下控制回路环节的响应	264
3.3.7 反馈控制系统的传递函数	282
3.3.8 对过程作强迫函数的实验应用	285
3.4 控制系统的设计	289
3.4.1 非稳定系统的测试	289
3.4.2 整定反馈控制器参数法	303
3.5 其它更高级控制技术	308
3.5.1 串级控制	308
3.5.2 前馈控制	309
3.5.3 多变量系统及关联	311
3.5.4 自适应控制	312
3.5.5 采样系统	312
3.5.6 计算机控制	314
3.6 附录	316

3.6.1 线性化与叠加定理	316
3.6.2 从二阶系统的传递函数求阶跃响应	317
3.7 补充读物	322
3.8 参考文献	322
3.9 符号一览表	325
3.10 习题	328
第四章 计算机和计算方法	336
4.1 数字计算机	337
4.1.1 计算机的早期历史	337
4.1.2 电子计算机	337
4.1.3 计算机存储器的组成	342
4.1.4 与计算机交换信息	343
4.1.5 程序和语言	346
4.2 FORTRAN	347
4.2.1 Fortran变量和常数	347
4.2.2 算术语句	349
4.2.3 控制语句	350
4.2.4 输入和输出指令	351
4.2.5 FORMAT (格式)说明: 数场	352
4.2.6 格式说明: 字母数字场	354
4.2.7 宽行打印机输出格式控制的特殊性质	355
4.2.8 格式说明: 空格场和箭的记录	356
4.2.9 格式说明: 输入和输出清单关系	356
4.2.10 数组的输入和输出	357
4.2.11 程序组织: 函数和例行子程序	359
4.2.12 在一程序或子程序中语句的顺序	363
4.2.13 用于排顺序的计算机程序	363
4.3 计算方法	366
4.3.1 超越函数和多项式方程的根	366
4.3.2 线性联立方程组系统	374
4.3.3 有限差分	388
4.3.4 常微分方程	400
4.3.5 偏微分方程的数值解	411

4.3.6	线性和非线性目标函数的最优化方法	422
4.4	补充读物	435
4.5	参考文献	436
	习题	436
第五章	生化反应工程	440
5.1	微生物反应器原理	440
5.1.1	微生物的生理学	440
5.1.2	微生物的分类	444
5.1.3	生化工程及生化反应工程的作用	446
5.1.4	微生物反应器的主要类型	447
5.1.5	生物学速率方程	449
5.1.6	微生物反应器与化学反应器的特点	451
5.2	单个微生物的模型	452
5.3	微生物群体的模型	455
5.4	生物学速率方程	458
5.5	生物学速率系数的测定	464
5.5.1	有关微生物絮状物的试验	464
5.5.2	有关微生物膜的试验	468
5.5.3	利用微生物膜反应器得出的数据计算生物学速率系数	474
5.6	包含有微生物絮状物的过程的设计	479
5.6.1	间歇过程	479
5.6.2	连续过程	483
5.7	固定床过程的设计	491
5.7.1	充满液相的空隙空间	492
5.7.2	膜式流动反应器	496
结语		497
致谢		499
5.8	补充读物	499
5.9	参考文献	500
5.10	符号一览表	501
5.11	术语词汇表	503
第六章	非牛顿流体工艺学	506
6.1	粘性流体运动的微分方程	508

6.2 非弹性、非时间依赖性流体的剪切行为	511
6.2.1 用于描述流体等温剪切速率依赖性的方程	518
6.3 流体性能测定	521
6.3.1 管式粘度测量法	522
6.3.2 旋转式粘度测量法	523
6.3.3 平行板式粘度计	526
6.3.4 无限流体型粘度计	526
6.4 简单几何形状流动的解析方程	527
6.4.1 管内的层流流动	528
6.4.2 管内流动的通式	533
6.4.3 采用特定流体模型情况下层流流动时压降-流速关系的 解析方程	537
6.4.4 非牛顿流体广义雷诺数	538
6.4.5 过渡流动及湍流流动	539
6.4.6 具有温度依赖性及压力依赖性的方程	545
6.4.7 时间依赖性	548
6.5 粘弹性流体	551
6.5.1 Weissenberg效应	555
6.5.2 振荡试验	556
6.5.3 在稳态剪切条件下的垂直应力效应	557
6.5.4 其它类型的流变仪	558
6.5.5 描述粘弹性行为的方程式	558
6.5.6 伸长粘度	559
6.5.7 二次流现象	560
6.5.8 粘弹性流动的无因次表征	563
6.6 过程操作	564
6.6.1 泵送操作	564
6.6.2 混合操作	570
6.7 补充读物	580
6.8 参考文献	581
6.9 符号一览表	582
6.10 习题	585
第七章 吸着过程	587

7.1 普通吸着剂	589
7.2 吸着设备	595
7.2.1 固定床 (或填充床)	596
7.2.2 短循环操作	603
7.2.3 离子交换	604
7.2.4 色谱	605
7.2.5 同时应用许多小床	611
7.2.6 移动床	612
7.3 平衡性质	622
7.3.1 气-固等温吸着线; 单一吸着物	622
7.3.2 平衡理论	624
7.3.3 气-固等温吸着线; 两个或两个以上的吸着物	638
7.3.4 化学吸附	639
7.3.5 液-固等温吸着线	641
7.3.6 平衡数据的解释	648
7.4 吸着装置的过程设计	654
7.4.1 固定床方程	656
7.4.2 等温操作	659
7.4.3 等温操作的非平衡情况	663
7.4.4 非等温操作	684
7.5 补充读物	698
7.6 参考文献	699
7.7 符号一览表	702
附录	710

第一章 反应器设计基本原理

1.1 反应器设计的基本任务

在化学工程中，诸如流体流动、传热、传质和分离过程等物理操作都已在第一卷和第二卷中用了大量篇幅作过讨论。但是，在任何一个有化学变化发生的生产过程中，化学反应器则是工厂的核心。

就规模和外形来看，反应器往往有可能是那些最不引人注意的设备之一，但是，对它的要求以及其性能方面则通常是整个工厂设计中最重要的一环。

当开发一项新的化学过程时，在能够作出整个研究项目的任何经济评价以前，至少需要指出反应器的某些特性。当这个项目得到发展而且其经济上的可行性又得到证实时，则对于所涉及的各种化工操作过程应进一步落实。于是，在达到实际设计详细的反应器阶段时，就会给整个方案带来一个相当明确的轮廓。在这些已经作出的决定中，主要的是所期望的产品的产量，而产量则一定要根据产品的需要量和所估计的销售价格对市场的预测来决定。制造一种产品所使用的各种反应物及其化学纯度都应加以规定。有关过程的基本化学原理几乎都已进行过研究，而且通过反应所得产物的，包括任何副产物在内的有关组成的数据一定要是可靠的。

从另一方面来看，有可能要将反应器的设计作为改进某项工艺过程的一部分。因为新反应器与现有的各项装置有关系，所以它的各项功用比整个过程全是新的时更能明确加以规定。当然，在实践中，一定要把现有反应器的有关详细操作经验与新反应器的设计联系起来。

一般我们可以这样说：设计反应器的基本任务是要在给定的产率下，由已知的一些反应物生产所指定的产品。但是为了获得最好的结果，应进一步作出一系列的重要决定，而且还可能有相当巧妙的方法