

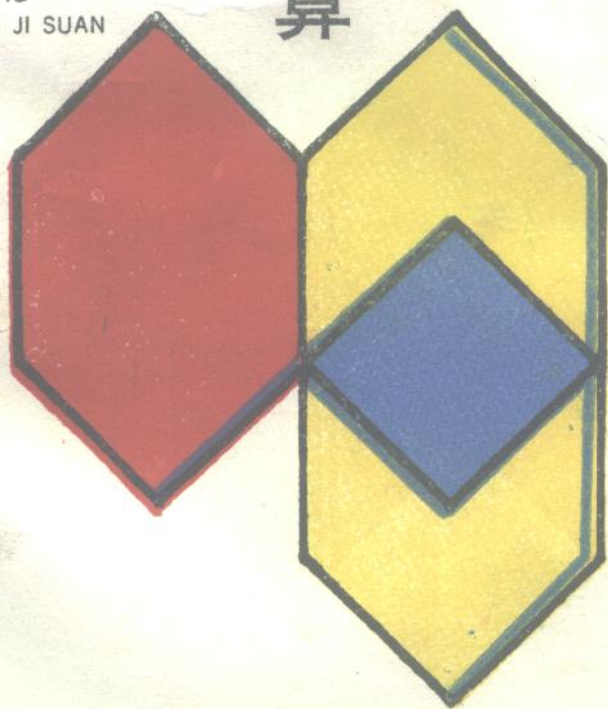
化工

工艺计算

物料，能量和烟衡算

吴志泉 涂晋林 徐 汎 编著

HUA GONG
GONG YI JI SUAN



华东化工学院出版社

TQ015
W99

361970

化 工 工 艺 计 算

(物料、能量和焓衡算)

吴志泉 涂晋林 徐 汛 编著



华东化工学院出版社

(沪)新登字 208 号

化工工艺计算

(物料、能量和焓衡算)

Huagong Gongyi Jisuan

(Wuliao、Nengliang he Yonghengsuan)

吴志泉 涂晋林 徐 汛 编著

华东化工学院出版社出版

(上海市梅陇路 130 号)

新华书店上海发行所发行

浙江上虞科技外文印刷厂排版

上海长鹰印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 13 插页 1 字数 347 千字

1992 年 10 月第 1 版 1992 年 10 月第 1 次印刷

印数 1—3000 册

ISBN 7-5628-0231-9/TQ·35 定价: 4.05 元

DU38/13

内 容 提 要

本书系统地介绍了化学工业生产中物料衡算、能量衡算及焓(有效能)衡算的基本原理与计算方法,并试图通过典型实例,把基础理论、解题方法和运算技巧融汇在一起,以帮助读者提高运用所学的基础知识,解决实际计算问题的能力;改进运用定量分析问题的方法,寻找降耗增产的薄弱环节的能力。因此,这些计算不仅是设计化工生产过程的依据,也是化工生产中节约原材料、节约能源、增加产量的重要依据。

本书可作为高校化工工艺专业的教材,也可供从事化工生产、设计及研究的工程技术人员参考。



前 言

化工工艺计算是工业化学的续篇,叙述化工生产中的物料衡算、能量衡算和焓衡算的基本原理及计算方法。它是化学工程学科的重要组成部分,是化工厂设计计算的核心内容,也是解决化工生产实际问题的重要工具与手段。本书将为培养和训练学生的工艺计算技能打下良好的基础。

本书涉及化工生产过程中的各类单元操作及化学单元过程,在阐述基本原理之后,列举了大量计算例题,详细说明其求解的步骤,使学生了解工业实例的计算思路及方法。

物料、能量及焓衡算的计算,关键在于学生能正确收集资料,查找有关物性数据,正确使用计算单位,并应用较简便的方法进行计算,因此学生在学习中要正确掌握计算技巧。本书是对学生进行工程训练,培养综合应用知识能力的较好教材之一,也有助于培养读者对新建化工厂进行最优化设计及对现有生产厂进行生产过程的工艺查定。

为了对复杂过程能应用计算机进行运算,本书对复杂过程的计算程序进行了说明,并列举了其中一部分例题的计算机程序及计算结果,以供学生及读者参考。

一般的同类书籍均无焓平衡的内容,本书特地加进此内容,以使读者在应用能量分析时能正确地断定用能过程的薄弱环节,采用有效的节能降耗措施,提高企业效益。

本书采用SI制。为了对其他单位有所了解,书中也列有其他单位,但结果均以SI制单位表示。

在编写本书中,尽可能与工业化学所述的过程结合,使学生与读者不仅了解工艺过程,也了解工艺计算的方法。

本书第1—6章由吴志泉、涂晋林编写,第7章由徐汛编写,全书由涂晋林统稿。其中计算机部分由乔沛荣副教授审阅,部分

例题已作为我院工业化学专业的大习题上机运算，并编制程序。
在此感谢在本书写作过程中曾帮助我们并作出贡献的各位同仁。
由于水平有限，书中有错误与不妥之处，祈请批评指正。

编 者

目 录

1 绪论	1
1.1 物料衡算	6
1.1.1 质量守恒定律	6
1.1.2 物料衡算的基本方程式	6
1.1.3 物料衡算的基本步骤	8
1.1.4 基准及其选择	9
1.2 计量单位	13
1.2.1 单位换算	14
1.2.2 温度换算	15
1.2.3 组成换算	17
1.3 物料平衡的一般分析	18
1.3.1 方程式及约束式	18
1.3.2 变量	19
1.3.3 设计变量	19
1.3.4 求解方法	21
1.4 原材料的消耗定额	22
2 无反应过程的物料衡算	34
2.1 简单过程的物料衡算	34
2.1.1 过滤	34
2.1.2 蒸发	36
2.1.3 混合	37
2.1.4 传质分离过程	38
2.1.5 闪蒸	40
2.1.6 固液分离和固固分离	45
2.2 多单元系统	47

3 反应过程的物料衡算	59
3.1 物料衡算的方法	59
3.1.1 直接计算法	59
3.1.2 利用反应速率进行物料衡算	65
3.1.3 元素平衡	71
3.1.4 以化学平衡进行衡算	77
3.1.5 以结点进行衡算	83
3.1.6 利用联系组分进行衡算	84
3.2 带有循环和旁路过程的物料衡算	86
3.2.1 循环过程	86
3.2.2 弛放过程	93
3.2.3 旁路	95
3.3 过程的物料衡算	95
3.3.1 一般求解方法	96
3.3.2 模块近似法	105
4 能量衡算	122
4.1 基本概念	122
4.1.1 能量守恒定律	122
4.1.2 能量衡算方程	125
4.1.3 热力学数据	128
4.1.4 反应热	142
4.1.5 气体的压缩和膨胀	150
4.2 能量衡算	152
4.2.1 能量衡算的一般方法	153
4.2.2 无化学反应过程的能量衡算	153
4.2.3 化学反应过程的能量衡算	164
5 过程的物料及能量衡算	186
5.1 物料及能量衡算方程式	186
5.1.1 物料衡算方程式	186
5.1.2 能量衡算方程式	187

5.2	简单过程的物料及能量衡算	188
5.3	复杂过程的物料及能量衡算	191
5.3.1	过程分析	191
5.3.2	物料及能量衡算方程联解	197
5.3.3	多单元过程的物料及能量衡算	207
5.3.4	优先排序法	216
5.4	整个过程的物料及能量衡算	216
6	非稳态过程	246
6.1	物料衡算	246
6.2	能量衡算	254
7	焓衡算	263
7.1	焓衡算的目的和意义	263
7.1.1	用能过程热力学第二定律的阐述	263
7.1.2	两种焓损失——外部焓损失和内部焓 损失	264
7.1.3	两种效率——能量利用率和焓利用率	264
7.2	稳态过程焓衡算式	265
7.2.1	稳态过程焓衡算式	265
7.2.2	稳态过程焓衡算式的应用	266
7.2.3	由熵产生量求内部焓损失	267
7.2.4	物料焓流的组成	267
7.2.5	物理焓 E_{xph} 计算	268
7.2.6	化学焓 E_{xch} 计算	269
7.2.7	热流焓 E_{xq} 计算	269
7.3	焓衡算实例	270
7.3.1	传热过程焓衡算实例	270
7.3.2	压缩过程焓衡算实例	272
7.3.3	化学反应过程焓衡算实例	273
7.3.4	精馏过程内部焓损失计算方法	275
7.3.5	混合过程焓损失计算	277

7.3.6	中压冷凝水回收不同方案的比较	278
7.3.7	地热利用过程焓分析	281
7.3.8	制冷过程焓分析	284
7.3.9	高温余热回收利用过程	289
7.3.10	某石化塑料厂焓分析及节能研究(焓经济优化)	296
参考书目		342
附录 I 计算机程序		344
附录 II		361
附表 II-1	计量单位换算表	361
附表 II-2	有机和无机化合物的物性数据	367
附表 II-3	一些气体的平均热容	377
附表 II-4	燃烧气体的焓值	378
附表 II-5	理想气体热容	379
附表 II-6	液体热容	384
附表 II-7	纯组分蒸气压力的安托因公式	388
附表 II-8	25℃ 下生成、溶解及稀释的积分热	390
附表 II-9	25℃ 下化合物的生成热和燃烧热	393
附表 II-10	饱和水蒸气表(以温度为准)	397
附表 II-11	饱和水蒸气表(以压强为准)	399
附表 II-12	元素的摩尔标准化学焓	401
附表 II-13	主要无机与有机化合物的摩尔标准化学焓 E_{sch}° 以及温度修正系数 ξ	403

1 绪 论

现代化学工业生产中，工程技术人员不仅要了解并掌握与工业生产有关的各种工程技术知识，而且必须善于把这些知识综合应用于工业生产，以产生显著的经济与社会效益。

在新工厂建设和老厂扩建改造的化学工程设计中，有关这方面的全部工程技术工作，通常称为工厂设计；其中为实现工艺过程所必需的各项设备和设施的实际设计，通常称为工艺设计，工艺设计是决定生产过程各项技术经济指标先进与否，工业生产能否发展的关键步骤。

工艺设计的主要内容包括：

- 1) 生产工艺；
- 2) 物料和能量衡算；
- 3) 温度和压力范围；
- 4) 原料和成品规格；
- 5) 收率、反应速率和生产周期；
- 6) 设备材质；
- 7) 对公用工程的要求；
- 8) 厂址选择与平面布置。

其中，物料和能量衡算是工艺设计中最基本的设计内容。因此，对于任何一个工艺过程来说，在生产、开发和设计中常常需要进行这种计算。

物料衡算是工艺设计的基础，通过对全过程或单元过程的物料衡算，可以计算出主、副产品的产量，原材料的消耗定额，生产过程的物料损耗量以及三废的生成量；并在此基础上作出能量衡算，计算出蒸汽、电、煤或其他燃料、水等的消耗定额；最后可以根据这些计算确定所生产产品的总的经济效果。同时根据衡算所得各单

元设备的流体流量及其组成、能量负荷及其等级,工程师就能对生产设备和辅助设备进行选择或设计,从而对过程所需设备的投资及其可行性进行估价。

在生产中,针对已有的化工装置,对全过程或某一单元设备进行物料衡算;或由实测得到的数据,计算出一些不能直接测定的数据。并由此对过程的生产情况进行分析,以确定实际的生产能力,衡量操作水平,找出薄弱环节,提出改进生产的方法。

此外,还可利用工厂已有的生产数据,进行分析比较,以选定先进而切实可行的数据作为新厂设计的指标,设计出先进的工艺流程。

焓衡算法也是过程衡算的重要组成部分。焓又称为有效能,是在一定环境条件下,理论上能够转变为有用功的那部分能量。焓衡算法(又称焓分析法)是热力学第一和第二定律的联合应用,是迄今为止较为完善的热力学分析方法。它不仅在数量上,而且从质量上研究能量的利用与转换。我们知道能量从数量上是守恒的,但能量的品质在使用过程中会发生降级,从而导致焓的损失。因此,应用焓分析法描述过程或装置在能量利用上的完善程度,分析过程方案的合理性,评价装置的能量转化、利用情况,是节约能源的重要手段。近年来焓衡算在国内外正日益受到人们的重视,焓衡算法也是过程衡算的重要组成部分。

化工工艺计算在工业上的应用,可用下面的工业实例说明。

国外某石油公司为提高本公司的竞争能力,研究利用炼油厂取得的某些烃中间体,来开发和生产生物可降解的合成洗涤剂,筹建一个年产 6800 吨的车间,为了对过程进行估价,进行了以下工作:

(1) 确定工艺流程

经查阅文献,以直链十二烯作为原料,生产生物可降解的十二烷基苯磺酸钠(ABS),其工艺流程如图 1-1 所示。

生产过程包括:在催化剂三氯化铝的作用下十二烯与苯进行反应;生成的混合物粗制品经分馏以回收所需沸点范围内的十二

烷基苯；十二烷基苯进行磺化，然后用苛性钠中和磺酸；再在得到的料浆中掺加化学“增效剂”，最后干燥。

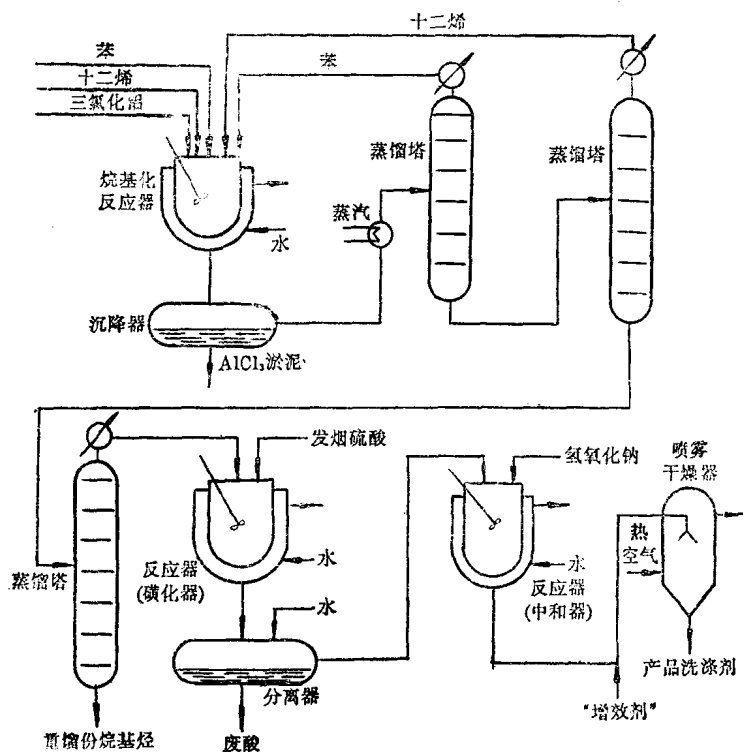


图1-1 生产十二烷基苯磺酸钠的流程简图

(2) 在图 1-1 工艺流程基础上,进行物料和能量衡算,得到生产十二烷基苯磺酸钠的物流图,如图 1-2。

(3) 根据物料衡算的数据,可进一步进行能量衡算及设备设计,由此可得生产十二烷基苯磺酸钠的工艺流程图,如图 1-3 所示。

根据工艺流程与工艺操作数据结合化学工程知识,就可对生产合成洗涤剂的各个设备进行设计与选型,进而可作建厂投资与

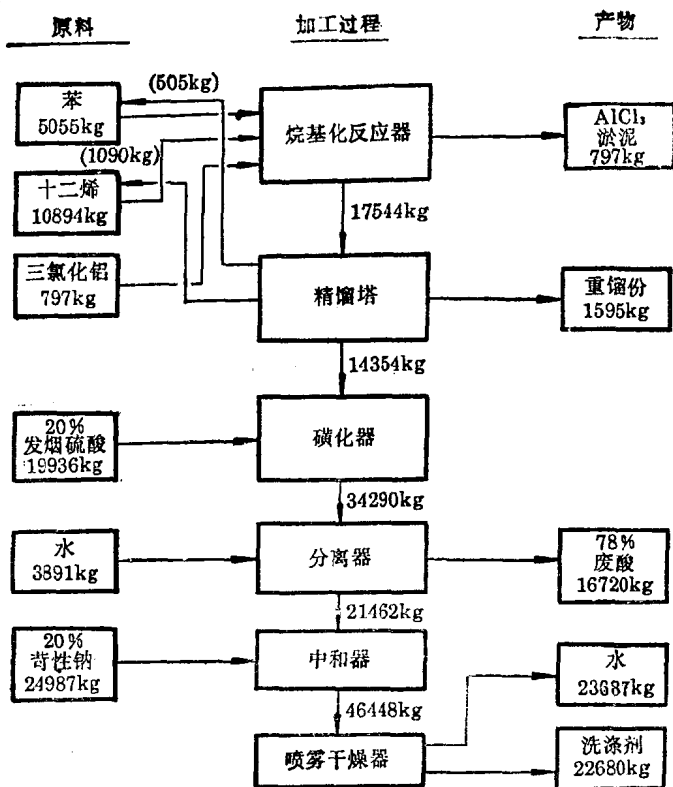


图 1-2 生产十二烷基苯磺酸钠的物流图

生产成本的计算。

由此说明,为了制定一个新型生产过程的计划,或者对一个现有的工艺过程进行分析,工程师必须进行必要的化工工艺计算。尤其在开发研究一个新的工艺过程中,必须对现有的各种生产过程进行技术经济指标的分析与评价,这样才有可能使所开发的工艺过程更经济,更先进,并对设备进行最佳设计及提出最佳的工艺操作条件。

因此,化工工艺计算可培养基本的计算技能,以用于研究和开

1.1 物料衡算

1.1.1 质量守恒定律

过程的物料衡算是质量守恒定律的应用，即物质的质量既不能被创造，也不能被消灭。实际上，根据著名的爱因斯坦质能互换关系式，若物质的能量改变，则物质的质量也就不会守恒。

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \quad (1-1)$$

式中 c 为光速。

若化学反应伴随着巨大的能量变化，则质量的变化可能也很大，如原子核反应，显然不能应用质量守恒定律。

对于一般化学反应，例如碳氢化合物的燃烧，每克碳氢化合物燃烧时放出的能量约为 42 kJ，因而由式(1-1)可得 10^{-3} kg 碳氢化合物燃烧而产生的质量变化只有 0.5×10^{-12} kg，也即质量的减少小于 10 亿分之一，可忽略不考虑。因此，对实际的化工过程，质量守恒定律可以应用于化学反应。而对于分离过程，如吸收、蒸馏、干燥等，其能量的变化更小，所以质量守恒定律也可以应用。

1.1.2 物料衡算的基本方程式

应用质量守恒定律计算流入和流出系统的物料量，一般可用物料平衡表示之。通过物料平衡的计算，可以得到系统中质量流量及其变化。系统中的物料衡算一般表示式为

$$\text{系统中积累} = \text{输入} - \text{输出} + \text{生成} - \text{消耗} \quad (1-2)$$

式中，生成或消耗项是由于化学反应而生成或消耗的量。积累项可以是正值，也可以是负值。当系统中积累项不为零时称为非稳态过程，积累项为零时，称为稳态过程。

稳态过程是一种理想化的概念。实际过程中，质量积累速率可能很小，然而不可能为零。流率不可能为一常数，而是在平均流率的上下变动。虽然如此，对积累量可忽略时，仍以稳态过程来

表示之。

稳态过程时,式(1-2)可化为

$$\text{输入} = \text{输出} - \text{生成} + \text{消耗} \quad (1-3)$$

对无化学反应的稳态过程,又可化为

$$\text{输入} = \text{输出} \quad (1-4)$$

物料衡算一般有总质量衡算式、组分衡算式及元素衡算式。

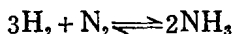
对稳态过程,无化学反应及有化学反应的情况,其适用情况如表 1-1 所示。

表 1-1 物料平衡形式(稳态过程)

	物料平衡形式	无化学反应	有化学反应
总平衡式	总质量平衡式	是	是
	总摩尔平衡式	是	非○
组分平衡式	组分质量平衡式	是	非○
	组分摩尔平衡式	是	非○
元素原子平衡式	元素原子质量平衡式	是	是
	元素原子摩尔平衡式	是	是

① 有时平衡式可能符合。

由表 1-1 可知,在无化学反应时,物料衡算既可用总的衡算式,也可用组分衡算式。采用哪一种形式要根据具体条件决定。在有化学反应的过程中,其物料平衡方程式多数不能用进、出口物料的量(摩尔)列出。这是因为反应过程前后的分子种类和数量可能发生变化,进入系统的物料总量(摩尔)不一定等于系统输出的总量(摩尔),如



有的过程如



虽然进、出物料的总量(摩尔)相等,但其分子种类却不相同,无法采用组分的平衡,只能用元素原子平衡进行计算。