

CHENJIANG NONGSUO LILUN
JI SHUXUE MOXING

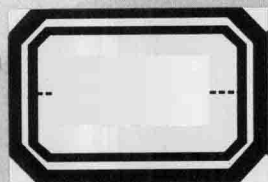
沉降-浓缩理论 及数学模型

郭亚兵 胡钰贤 王守信 著



化学工业出版社

CHENJIANG NONGSUO
JI SHUXUE MOXING



沉降-浓缩理论 及数学模型

郭亚兵 胡钰贤 王守信 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书共6章,主要介绍了沉降理论基础、动态沉降过程数学模型、瞬态沉降-浓缩过程数学模型、稳态沉降-浓缩过程数学模型、试验及模型参数的拟合等内容。

本书将沉降理论、公认的现象学理论方法、数学理论与沉降理论在工业沉降过程中的应用紧密结合在一起,书中许多数学模型及其在工业生产中的应用都是近年来作者及其他研究人员在沉降理论研究的最新成果,具有较强的应用性和参考价值。

本书可供化学化工、环境工程等领域的研究人员、技术人员参考,也可供高等学校相关专业师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

沉降-浓缩理论及数学模型/郭亚兵,胡钰贤,王守信著. —北京:化学工业出版社,2014.5

ISBN 978-7-122-20114-0

I. ①沉… II. ①郭…②胡…③王… III. ①沉降-数学模型-研究 IV. ①X11

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第054943号

责任编辑:刘兴春

文字编辑:荣世芳

责任校对:顾淑云 王 静

装帧设计:张 辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:北京云浩印刷有限责任公司

710mm×1000mm 1/16 印张11½ 字数161千字

2014年11月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:68.00元

版权所有 违者必究

前言

沉降-浓缩是重要的工业工艺过程，广泛应用在冶金、矿山、化工、废水处理、市政工程等工业领域。本书向读者展现了沉降-浓缩过程最新的理论、工业应用及沉降数学模型，其特点是理论与工业应用相结合，可适用于不同层次的读者。其中部分内容适用于工作在工业第一线的工艺工程师，可作为浓缩机选型设计、工艺参数设计的重要参考，如第2章浓缩机选型设计方法及第6章试验及模型参数的拟合。另一部分可作为从事固液分离、废水处理的本科高年级学生、研究生及固液分离模型研究工作者的参考资料，从第3章到第5章，对理想浓缩池、沉淀浓缩池等瞬态、稳态数学模型进行了研究。

本书中的许多数学模型及其在工业生产中的应用，都是近年来作者及其他研究人员在沉降理论研究方面的最新成果。本书的显著特点是将沉降理论、公认的现象学理论方法、数学理论与沉降理论在工业沉降过程中的应用紧密结合在一起，为沉降理论的进一步研究及在工业沉降过程中的实际应用提供了有价值的参考。

在本书第1章中，介绍了沉降-浓缩在全球的发展历史及在中国的发展过程，同时也介绍了沉降-浓缩的基本概念。

第2章展示了沉降理论的发展及现状，对经典的沉降-浓缩理论进行了研究，包括静态沉降方法，如Coe-Clevenger方法、Kynch方法、Talmage-Fitch方法、Oltman方法；连续沉降方法，如Yoshioka-Hassett方法、Wilhelm-Naide方法等。根据作者多年的沉降试验、浓缩机选型设计等实践、研究，给出了实用的试验方法及数据处理方法，并介绍了这些方法在工业生产实践中的应用。

第3章对具有压缩区的沉降过程进行研究，利用现象学原理及数学理论

建立了沉降过程数学模型；并对强降解偏微分方程的数值解法进行研究，建立了EO广义逆向外插法差分格式，此方法具有处理解不连续的功能；在沉降过程的泥水界面处，方程的类型发生改变，产生一个激波不连续，数值方法具有激波捕捉性能，因此算法能够收敛到所求问题的一个正确解。利用本书作者开发的沉降-浓缩分析软件对不同物料的2L沉降实验进行了模拟分析。

第4章对理想浓缩过程及澄清-浓缩瞬态过程进行了研究，建立了相应的沉降数学模型，并建立了数学模型的数值解法。利用分析软件对不同形状的澄清浓缩瞬态过程进行模拟分析，探讨了沉降容器形状对浓度分布的影响。

第5章对理想浓缩过程及澄清-浓缩瞬态过程进行了研究，建立了相应的沉降数学模型，并建立了数学模型的数值解法。利用分析软件对不同固体处理量时的澄清浓缩稳态过程进行模拟分析，探讨了不同固体处理量对浓度分布及固体床层高度的影响。

第6章利用固体通量理论及流变学原理，建立数学模型中重要的固体通量密度函数及有效固体应力函数，并研究相对应的试验方法，以正确地反映固体的沉降特性及压缩特性，为沉降数学模型提供必要的拟合参数。

本书在著写的过程中，得到了同行专家、本教研室教师及研究生的指导及帮助，在此表示感谢。

限于著者水平及著写时间，书中疏漏和不足之处在所难免，敬请读者提出修改建议。

郭亚兵

2014年6月于太原科技大学

目 录

第 1 章 概述

1

- 1.1 沉降过程的历史 2
- 1.2 沉降过程基本概念 4
 - 1.2.1 沉降过程 4
 - 1.2.2 静态沉降过程 5
 - 1.2.3 连续沉降过程 6
 - 1.2.4 浓缩机的原理及设计特点 7

第 2 章 沉降理论基础

9

- 2.1 沉降理论发展历史 10
- 2.2 浓缩机选型设计方法 17
 - 2.2.1 Coe-Clevenger 方法 17
 - 2.2.2 Kynch 方法 21
 - 2.2.3 Talmage-Fitch 方法 23
 - 2.2.4 Oltman 方法 26
 - 2.2.5 临界压缩点的确定 26
- 2.3 连续沉降过程方法 30
 - 2.3.1 Yoshioka-Hassett 方法 31
 - 2.3.2 Wilhelm-Naide 方法 32
- 2.4 浓缩实验及浓缩机设计 35
 - 2.4.1 静态沉降试验 35
 - 2.4.2 连续沉降试验 60

3.1 悬浮液的沉降过程	64
3.1.1 静态沉降现象描述	64
3.1.2 悬浮液的沉降特点	65
3.2 理想悬浮液的沉降模型	67
3.2.1 理想悬浮液假设	67
3.2.2 在理想浓缩机中的局部平衡	68
3.2.3 固体通量函数	74
3.2.4 静态沉降问题图解法	77
3.3 絮凝悬浮液的沉降模型	82
3.3.1 混合理论	82
3.3.2 固-液粒子系统	83
3.3.3 动态沉降过程	87
3.3.4 初值和边界条件	88
3.4 动态沉降过程数值方法	89
3.4.1 偏微分方程差分格式	89
3.4.2 强降阶方程差分格式	91
3.5 沉降过程分析软件及实例	92
3.5.1 沉降过程分析软件	92
3.5.2 应用实例	95

4.1 理想沉降-浓缩数学模型	105
4.1.1 理想浓缩池原理	105
4.1.2 理想浓缩过程平衡方程	106
4.1.3 理想浓缩机数学模型	107
4.2 沉降-浓缩数学模型	109

4.2.1	沉降-浓缩机原理	109
4.2.2	沉淀-浓缩过程平衡方程	109
4.2.3	变截面浓缩机数学模型	111
4.3	沉降-浓缩过程数值方法	113
4.3.1	沉降-浓缩过程差分格式	113
4.3.2	初始值及边界条件	114
4.4	数学模型的应用	115
4.4.1	模型仿真软件简介	115
4.4.2	实例分析	116

第5章 稳态沉降-浓缩过程数学模型

122

5.1	概述	123
5.2	浓缩过程稳态模型	123
5.2.1	理想浓缩机稳态模型	123
5.2.2	理想浓缩机稳态模型数值解法	126
5.3	沉降-浓缩设备数学模型	129
5.3.1	普通浓缩机模型	133
5.3.2	高效浓缩机模型	135
5.4	沉降-浓缩设备模型数值解法	137
5.4.1	四阶 Runge-Kutta 方法	138
5.4.2	二分法	140
5.4.3	数学模型的应用	140

第6章 试验及模型参数的拟合

147

6.1	概述	148
6.2	通量密度函数及沉降试验	148

6.2.1	固体通量密度函数	148
6.2.2	沉降试验	150
6.2.3	固体通量密度函数的拟合	151
6.3	有效固体应力函数及流变学试验	154
6.3.1	有效固体应力函数	154
6.3.2	流变学试验原理	155
6.4	流变学参数	165
6.4.1	塌落度试验	165
6.4.2	黏度计试验	165
6.5	有效固体应力拟合	169
6.6	沉降理论及数学模型的发展	170

参考文献

173

第1章

概述

1.1 沉降过程的历史

沉降和浓缩过程描述一种粒状固体在另一种流体如水、空气中的沉降情况，但是每种处理过程是不同的。沉降过程处理固体含量非常低的悬浮液；浓缩过程处理固体含量较高的浆液。

沉降浓缩并不是一种现代的固液分离技术，无论什么样的矿物要得到有用的精矿物质，都必须以两种部分分割的工艺进行加工：破碎和选别。有证据表明，在埃及王朝四世，即大约公元前 2500 年，古埃及人就开始挖金矿和通过洗涤进行选金；同样有证据表明在苏丹Ⅺ王朝就已经进行淘金作业。在埃及，最早用文字记载利用破碎和洗涤工艺进行选金的是 Agatharchides，他是一位希腊地理学家，生活在公元前 200 年。Ardaillon 是《古代矿业概论》一书的作者，1897 年他在这本书中描述了希腊从公元前 4 世纪到公元前 3 世纪大规模的破碎及洗涤选金作业。1994 年威尔逊在他的《活着的岩石》一书中描述了从埃及王权的衰落到中世纪及文艺复兴时期在地中海的金矿与铜矿开采活动。选矿工艺从未经训练的工人的作业发展成为技术工人甚至在科学理论指导下的工业活动，在很大程度上取决于 16 世纪初德国的撒克逊人和英国的康沃尔郡人，两国之间开展了国际技术交流并持续了很长一段时间。1556 年德国历史学家、矿物学和采矿学的先驱者阿格里科拉出版了他的巨著《论矿冶》。在这本著作中，他详细论述了当时欧洲矿藏的开采和冶炼技术，包括进行金、银、锡等其他金属矿物选别的工艺方法；同时对选矿设备进行了论述，包括用于分级的沉淀池、跳汰机、浓缩机及用于浓缩或澄清的沉淀槽，这些设备以间断状态或半连续状态运行，见图 1-1。工艺过程描述如下：为了进行铜的选别，首先对矿石进行破碎，并通过三个相邻的洗涤筛对矿石进行洗涤，细颗粒通过一个完全

浸没在装满水的圆桶中的筛子进行洗涤，并沉淀在圆桶的底部；当沉淀物达到一定的程度后，将圆桶上的塞子拔掉，让桶中的水流出；沉淀的污泥用铲子铲出，进入到第二个桶中，然后是第三个桶中，整个工艺不断重复；沉淀在最后一个桶中的铜精矿被收集并进行冶炼。

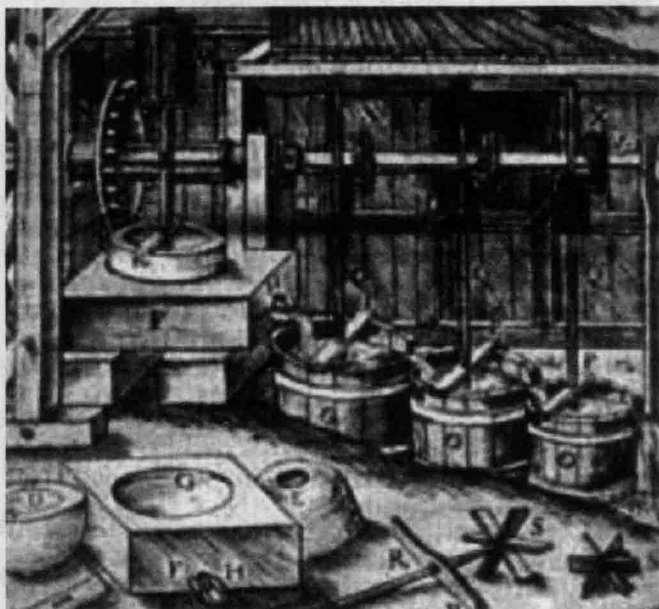


图 1-1 间断运行及半连续运行浓缩机

上述描述已经表明，利用洗涤和筛分工艺，古埃及、古希腊及中世纪的德国撒克逊人和英国康沃尔郡人了解了矿石中不同的组分具有不同的密度，并通过沉降原理进行矿物的分选。今天，这些活动被定义为分级、澄清和浓缩。同样也有证据表明在古代这三种工艺之间没有清晰的差别。

阿格里科拉的著作《论矿冶》，不仅在矿山工业，甚至在整个社会上产生了巨大的影响。这本采矿及冶金方面著作的领导地位在非英语世界最少保持了 300 年。《论矿冶》除了它巨大的实践价值外，还为矿业学科教育系统的建立奠定了基础，并很快在

世界范围内被采用。1715 年第一所矿业技术学校在俄罗斯的彼得罗扎沃茨克建立；1765 年，在德国建立了弗赖伯格矿业专科学校；20 年后，建立了巴黎矿业大学，但在当时并没有受到重视。尽管当时的技术传播在强烈、持续地进行，但英国在采矿技术教育界出现了倒退，在 19 世纪没有任何机构进行选矿原理的研究。1851 年，皇家矿业学院在伦敦成立，1859 年 Combarn 矿业学院成立。

中国的矿业生产具有悠久的历史。根据考古学家的研究，中华民族的祖先在旧石器时代就开始利用石片、石块等石料矿产制作石器工具来采集食物和抵御毒虫猛兽的袭击。中国的矿业生产在近代发展较快，铁矿开发利用的矿山有 40 多处，有些矿山生产规模较大，并开始使用新的机器设备进行采掘、选矿和运输。在有色金属方面，1908 年和 1918 年在江西南部先后发现了西华山钨矿和大吉山钨矿，由于军需和国际市场对钨的需求迫切，这两个钨矿很快投入开发，因此钨精矿产量大增。古代早已开采的云南个旧锡矿，自采铅开始，继之开采锡矿，近代开始较大规模的开采。在贵金属方面，除炼铅锌矿提取银外，一些地区也开采金矿。

1.2 沉降过程基本概念

1.2.1 沉降过程

沉降过程是利用固体与液体的密度差，颗粒受自身重力作用沉降，使悬浮液分为澄清液和浓浆，最终达到固液分离目的。分离、沉淀和浓缩都是描述一种粒状固体在另一种液体中的沉降情况，但是每种处理过程是不同的。沉降过程可分为两个工艺过程：澄清过程（clarification）和浓缩过程（thickening）。澄

清过程处理固体含量非常低的悬浮液，得到高质量的溢流水；浓缩过程处理固体含量较高的浆液，要求获得固体浓度较高的底流。

1.2.2 静态沉降过程

静态沉降可在一个沉降柱内进行。在量筒内装满混合均匀且絮凝的悬浮液，在沉降开始时，固体颗粒在沉降柱内保持均匀分布。在静止状态下沉淀一定时间后，可以观测到整个沉降过程和4个沉降区域。如图1-2所示。

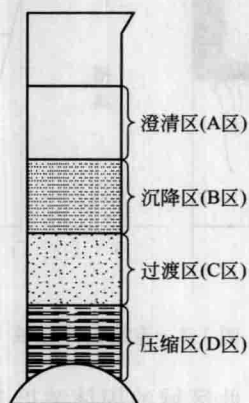


图 1-2 沉降柱中的沉降区域

① 澄清区 随沉降时间推移，在沉降柱的上部澄清液体出现，称为清水区。

② 沉降区 在澄清区以下是沉降区，沉降区的浓度是均匀的并与开始沉降前的悬浮液浓度相同，称为等浓度区。

③ 过渡区 沉降区与压缩区之间存在一个过渡区，这一区域在沉降区与压缩区之间并无一明显界限，称为变浓度区。

④ 压缩区 在沉降柱的底部形成一个固体颗粒的压缩层，在这一区域固体颗粒之间相互接触、挤压，固体浓度达到最大，

称为压实区。

1.2.3 连续沉降过程

实际的沉降设备（沉淀池、浓缩池）中，沉降过程连续发生。当沉降设备达到稳态运行时，一般存在四个区域：澄清区、干涉沉降区、压缩区和耙架运动区，如图 1-3 所示，其特点如下。

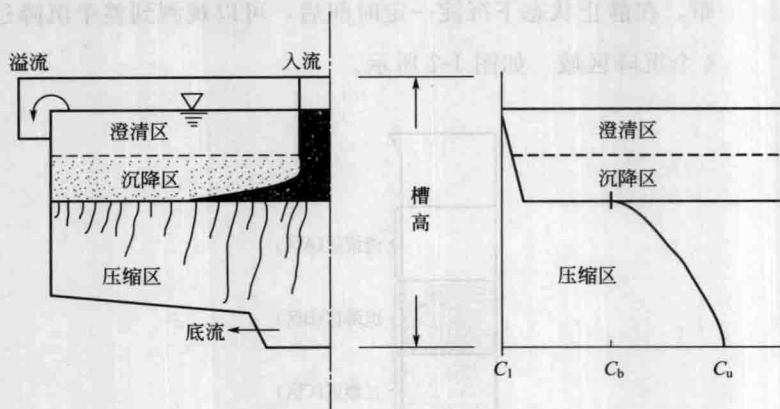


图 1-3 连续沉降区域

① 澄清区 此区域的固体浓度非常低，固体颗粒以最大的速率沉降，相互之间互不干涉，称为自由沉降区。

② 干涉沉降区 固体浓度较低，固体颗粒快速沉降，沉降过程中颗粒与颗粒之间产生干涉，称为干涉沉降区。

③ 压缩区 固体浓度很高，沉降速度变得非常小。固体与固体颗粒相互接触、支撑。上层的固体颗粒对下层固体产生压缩作用，下层固体中的水被挤出。固体接触应力迅速提高，固体浓度迅速提高。

④ 耙架运动区 耙架在高浓度固体中缓慢旋转，将沉淀固体从池底输送到池子中心的底流排放口；同时在固体床层中开出小的通道，床层中的包含水通过这些通道逸出。

1.2.4 浓缩机的原理及设计特点

浓缩机在本质上是产生溢流上清液的澄清池。浓缩机的设计是基于最慢的沉降颗粒的沉降速率以及固体颗粒沉降所允许的介质（水）产生的干扰最小的条件。为达到这些目标，浓缩池采用带有锥形或平底圆柱形池，浆液进入沉淀池的速度应降到最低，以减小沉淀池中的紊流。

（1）结构原理

小型中心转动轴驱动浓缩机主要有浓缩池、支撑架、传动装置、传动轴、耙架、过载保护装置、耙架提升装置、给料装置和卸料装置等组成，如图 1-4 所示。

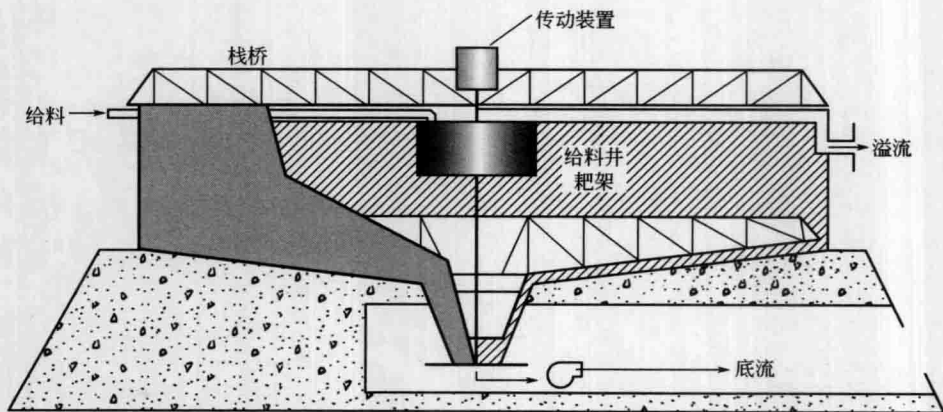


图 1-4 浓缩机结构示意图

（2）工作原理

在浓缩池的中间安装有一根竖轴，轴的下端固定有一个十字形耙架，耙架的下面装有刮板，耙架与水平面成 $8^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ，竖轴由固定在支架上的驱动装置带动旋转，当竖轴旋转时，矿浆沿着支承架上的给矿槽流入池中心的给料筒，并向浓缩池的四周流动，矿浆中的固体颗粒渐渐沉降到浓缩池的底部，并被耙架下面

的刮板刮入池中心的卸料斗，用砂浆泵排出，上层澄清液从池上部的周边溢流槽溢出。当排料浓度过高、沉淀固体过厚就会引起浓缩机过负荷，设有过载保护装置和耙架提升装置，利用提升控制实现耙架的下放、提升及耙架的旋转（图 1-4）。

用泵将澄清液（清液）排出池外，并泵入沉淀池中心的卸料斗，用砂浆泵排出，上层澄清液从池上部的周边溢流槽溢出。

当排料浓度过高、沉淀固体过厚就会引起浓缩机过负荷，设有过载保护装置和耙架提升装置，利用提升控制实现耙架的下放、提升及耙架的旋转（图 1-4）。

图 1-4 图例：池内装置示意图

当排料浓度过高、沉淀固体过厚就会引起浓缩机过负荷，设有过载保护装置和耙架提升装置，利用提升控制实现耙架的下放、提升及耙架的旋转（图 1-4）。

图 1-4 图例：池内装置示意图

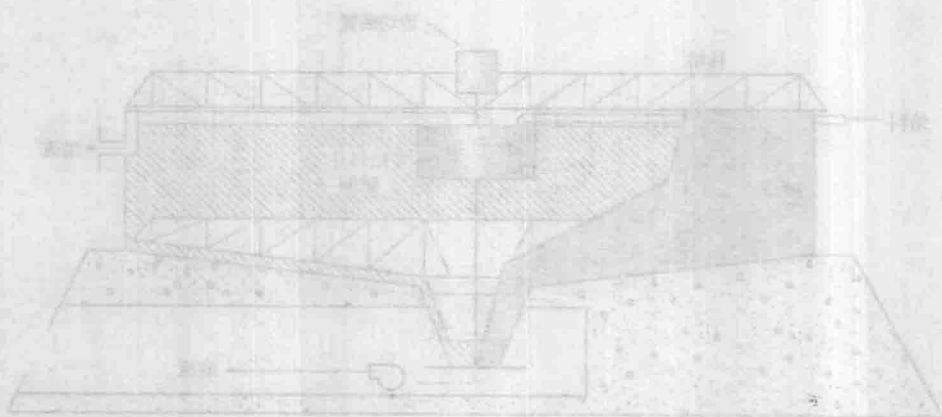


图 1-4 图例：池内装置示意图

图 1-4 图例：池内装置示意图

当排料浓度过高、沉淀固体过厚就会引起浓缩机过负荷，设有过载保护装置和耙架提升装置，利用提升控制实现耙架的下放、提升及耙架的旋转（图 1-4）。