

固液两相过滤及分离技术

Solid-Liquid Filtration and Separation Technology

(原著第二版)

Second, Completely Revised Edition

[英] A. 拉什顿 A.S. 沃德 R.G. 霍尔迪奇 著

A. Rushton, A.S. Ward, R.G. Holdich

朱企新 许莉 谭蔚 等译

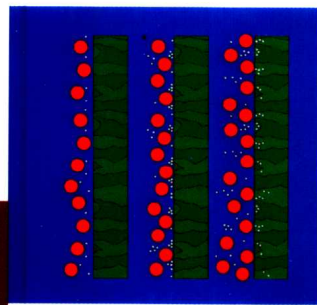
WILEY-VCH

A. Rushton, A.S. Ward, R.G. Holdich

**Solid-Liquid
Filtration
and Separation
Technology**

Second, Completely Revised Edition

Chemical Industry Press



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

固液两相过滤及分离技术

(原著第二版)

[英] A. 拉什顿 A.S. 沃德 R.G. 霍尔迪奇 著
朱企新 许莉 谭蔚 等译



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

固液两相过滤及分离技术/[英] 拉什顿 (Rushton, A.), [英] 沃德 (Ward, A. S.), [英] 霍尔迪奇 (Holdich, R. G.) 著; 朱企新等译. —北京: 化学工业出版社, 2005. 5

书名原文: Solid-Liquid Filtration and Separation Technology
ISBN 7-5025-7007-1

I. 固… II. ①拉…②沃…③霍…④朱… III. ①固体-液体混合物-过滤②液固分离 IV. TQ028.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 038445 号

Solid-Liquid Filtration and Separation Technology, Second, Completely Revised Edition/by A. Rushton, A. S. Ward, R. G. Holdich
ISBN 3-527-29604-2

Copyright © 2000 by WILEY-VCH. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by WILEY-VCH.

本书中文简体字版由 WILEY-VCH 出版公司授权化学工业出版社独家出版发行。
未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2004-0412

固液两相过滤及分离技术

(原著第二版)

[英] A. 拉什顿 A. S. 沃德 R. G. 霍尔迪奇 著

朱企新 许莉 谭蔚 等译

责任编辑: 辛田

责任校对: 洪雅琳

封面设计: 于兵

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

[http:// www. cip. com. cn](http://www.cip.com.cn)

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 23¼ 字数 614 千字

2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7007-1

定 价: 56.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

译 序

本书是根据 WILEY-VCH 2000 年出版的, 由 A. Rushton, A. S. Ward, R. G. Holdich 三位固液分离方面的专家共同撰写的《Solid-Liquid Filtration and Separation Technology》(Second Edition) 译出。

全书主要内容包括: 过滤、沉降(包括浮选)增浓、澄清过滤、离心过滤、离心沉降、水力旋流器等的原理、工艺与设备; 过滤介质种类、性能及截留、架桥、堵塞机理、选择方法; 预处理技术(包括絮凝、凝聚、助过滤); 后处理过程(脱液、洗涤、再生)及设备; 膜过程及膜技术; 过滤设备及设计等, 并有“颗粒尺寸、形状、粒度分布”、“料浆流变学”、“计算机文件格式”三个附录。

本书的特点是: 理论分析全面、深入, 系统性强, 覆盖面宽, 资料新, 并介绍了一些新的理论和国外的一些新的研究成果; 另外, 在理论分析的同时, 重视实践应用, 工艺说明、计算与设备并重, 在有关章节中附有 19 个例题和 4 个工业应用实例。因此, 本书是一本指导应用过滤分离基础知识、理论联系实际, 并能引导创新方向的专著, 值得向读者推荐。

随着近代科学与工程技术的发展, 固液分离技术与设备已渗透到能源、环境、生物、新材料、信息等高新技术与新兴工业领域, 成为这些新科学技术及现代化工、石油化工、制药(包括中药现代化)、轻工、食品、矿产品加工、农副产品加工、水资源开发与再生利用等工业不可或缺的技术。近 20 多年来, 固液分离技术发展更快, 对固液分离的要求也更高、更严。大处理量、高分离效率、高精度以及难过滤物料(高黏度、高分散度、高可压缩性、胶状物料、胶体、超细物料乳化液以及上述物质共存的料浆等)的过滤与分离技术的研究与工业应用更为迫切, 在这方面我们与国外水平的差距很大, 因此要求从事过滤与分离技术研究、教学、设计与工程应用的专业人员尽快提高水平, 以适应这一日益增长的需要。但我们必须看到与其他学科相比, 有关固液过滤与分离方面的专著较少, 引进翻译的国外同类专著就更少。这就是组织翻译本书的目的。希望能对国内从事过滤与分离技术研究、教学、设计、生产、工程应用的相关专业人员有所帮助。

参加本书翻译的有: 朱企新、谭蔚、许莉、赵扬、褚良银、张建伟、李桂水、徐坦、朱晨、张青。特别是许莉博士协助我完成了全部译稿的修改、统稿与审定工作; 赵扬教授级高级工程师不仅参加了本书部分章节的翻译, 还在全书翻译过程中提供了不少咨询与答疑。对他们付出的辛勤劳动, 在此一并表示感谢!

本书涉及专业领域宽, 翻译尚有不妥之处, 敬请有关专家、读者批评指正。

天津大学化工学院

朱企新

2005 年 1 月

第二版序言

任何事物都不是一成不变的，技术进步的步伐也从来没有停止过。自本书的第一版出版以来，在过滤和分离领域里又发表了很多新的研究工作成果，因此非常有必要对第一版进行修改并补充最新的研究成果。本书第一版受到广大读者的热烈欢迎及友好的评价。但由于作者的水平有限，失误和欠缺在所难免，所以作者很高兴能有这次机会，对第一版进行修改和更新。

第二版的特色在于对论述过滤和沉降基本过程章节的修改和更新。本书详细地介绍了如何模拟过滤滤饼和沉积层的形成，包括对可压缩物料的滤饼过滤及沉降池中泥浆沉降过程的描述。书中还列举了过滤分离设备的新图片和插图，并介绍了这些设备的应用。对相关章节的内容，还提供了用计算机电子制表软件包建立的模拟模型的信息。为了让读者能方便地下载相关文件，书中还列出了这些文件的网址。

本书对膜技术这一章的十字流微滤部分做了大量的修改，包括它的新兴应用领域，例如脱除饮用水中的隐孢菌虫卵。另外，在新的部分里包括可减少结垢的微滤膜的设计和避免渗透通量衰减而采用临界通量的策略。

本书介绍了表面活性剂在凝聚和絮凝中的作用以及通常用于解释一些反常行为的扩展 DLVO 理论，在沉降与浮选的关系中还讨论了表面活性剂的应用以及其他表面效应，例如 Zeta 电位的影响等。

关于工艺过程装备和计算的章节也进行了修改，修改后的内容包括了对过滤工艺过程经济性的进一步分析。

在本书中，还增添了很多新的图、表和图片。

A. Rushton

A. S. Ward

R. G. Holdich

2000 年 1 月

第一版序言

采用过滤和其他综合（复合）技术将固体颗粒从液体中分离出是十分重要的，通常也是许多工业生产过程中的关键步骤。在这些工业过程中产生了一系列扑朔迷离的液固分离问题。将具有可渗透性阻挡层的过滤器放在流动的悬浮液之中通过过滤以实现分离。阻挡层如滤网、过滤介质或膜经常是根据其表面截留悬浮颗粒的多少以及液体的澄清程度来选择的。其他在不同模式下操作的系统，如深层床或滤芯过滤器，将促使悬浮颗粒沉积在过滤介质内部的孔隙间。滤液的进一步澄清也可以通过吸附过程实现。在进行此过程之前，对欲分离的两相物料还要经过必要的重力或离心力沉降等预处理。

关键的操作问题集中在颗粒与过滤介质的相互作用上。过滤介质的阻塞或由于滤液流过过滤机时的压力而引起的颗粒的压实（或破坏）都会严重降低处理能力。这种影响通常与所处理的颗粒尺寸大小有关，因此可以采用加入凝聚剂或絮凝剂的预处理方法使固体颗粒的有效尺寸增大。这些技术将在正文中进行详细讨论，同时也包括了近期所报道的关于分离装备的改进，如可变滤室容积的压滤机、十字流过滤过程和陶瓷脱水过滤机等。

随着固液分离技术的不断发展以及研究者对此过程的深入理解，人们对过滤过程进行了很多新的改进。幸运地是，过滤过程正被越来越多的科学家和工程师所关注。大量的研究文献为过滤提供了丰富的设计和操作信息，使其具有更加合理的科学基础。

然而，绝大多数颗粒粒径分布的无规律性使得过滤机械种类繁多。因此如何选择最佳的分离技术是一个难题。作者认为运用已知的科学数据可以解决许多现存的分离问题。本书将给出理论和实际的信息以提高使用者针对特定颗粒分离选择最适宜设备的能力。对于新出现的极有商业意义的环保装备，人们在对其进行选择时越来越需要这些知识。

作者在几年内以本书的内容作为所授课程的讲义。这些课程包含大量的固液分离（SLS）领域的实际问题，本书中还包含其中一些问题的实例。

各章的过程计算中重复使用了基本理论公式，这使得读者在使用本书时可以节省查阅参考文献的时间。

A. Rushton
A. S. Ward
R. G. Holdich
1996 年 1 月

目 录

第 1 章 固液分离技术	1
1.1 引言	1
1.2 过滤过程	3
1.3 过滤原理	4
1.4 沉降过程	6
1.5 过滤介质	7
1.6 预处理技术	9
1.7 澄清过滤	10
1.8 沉降与浮选	14
1.9 洗涤和脱液	17
1.10 膜过滤	18
1.11 过滤工艺设备和计算	20
1.12 参考文献	21
1.13 符号说明	22
第 2 章 过滤基础	23
2.1 引言	23
2.2 多孔介质内流体的流动	23
2.3 渗透率	24
2.4 滤饼过滤	25
2.4.1 单位过滤面积上沉积的滤饼质量与滤饼比阻	26
2.4.2 固体颗粒浓度	27
2.5 滤饼过滤方程的几种形式	28
2.5.1 恒压过滤	29
2.5.2 恒速过滤	31
2.5.3 变压变速过滤	32
2.6 压力对滤饼过滤的影响	32
2.6.1 恒压过滤	34
2.6.2 恒速过滤	35
2.6.3 滤饼内的流体流动分析	35
2.6.4 可压缩滤饼的变速变压过滤	38
2.6.5 利用增量分析模拟滤饼过滤过程	39
2.7 其他过滤模式	43
2.8 非牛顿型流体过滤	46
2.9 实验室测试	47

2.9.1 真空滤叶装置	47
2.9.2 压缩渗透试验装置	48
2.9.3 毛细管吸引时间	50
2.9.4 其他实验测试及步骤	51
2.10 过滤模型的发展与认识	52
2.11 参考文献	53
2.12 符号说明	54

第3章 沉降基本原理	56
3.1 稀释悬浮液的沉降	56
3.2 干涉沉降	63
3.2.1 孔隙率函数	63
3.2.2 间歇沉降：Kynch 理论	63
3.2.3 间歇通量	65
3.2.4 利用间歇通量曲线求局部浓度	66
3.3 具有明显压缩效应的沉降	68
3.4 斜面沉降	71
3.4.1 中村-黑田 (Nakamura-Kuroda) 方程	72
3.4.2 格拉晓夫数 (Grashof Number) 和沉降雷诺数	72
3.5 参考文献	73
3.6 符号说明	74

第4章 过滤介质	75
4.1 概述	75
4.2 编织滤布	77
4.3 滤布选择	79
4.3.1 纱线种类和编织方式的影响	79
4.3.2 选择的标准	80
4.4 过滤机中编织滤布的使用	81
4.4.1 纱线内固体颗粒的容纳能力	81
4.4.2 细菌的生长	81
4.4.3 溶液的沉淀	81
4.4.4 排水不充分	81
4.4.5 临界浓度	82
4.4.6 临界压力	82
4.4.7 颗粒的分级	82
4.4.8 气泡的影响	83
4.4.9 蒸发作用	83
4.4.10 织物结构的影响	83
4.4.11 滤布下排水的影响	84
4.5 滤布的选择和性能	84
4.5.1 滤布的收缩性	85
4.5.2 滤布的延展性	85

4.5.3 滤饼的卸除	85
4.5.4 滤布结构的影响	87
4.5.5 滤布清洗方法	88
4.6 非编织过滤介质	89
4.7 流体流过过滤介质的数学模型	90
4.7.1 清洁过滤介质的渗透性	90
4.7.2 过滤介质截留颗粒的能力	91
4.7.3 非编织纤维过滤介质	92
4.7.4 编织过滤介质	94
4.7.5 滤布孔隙上颗粒的架桥	96
4.7.6 架桥失败和颗粒穿过滤介质	99
4.7.7 使用过的过滤介质的流动阻力	99
4.8 参考文献	101
4.9 符号说明	102

第5章 预处理技术	104
5.1 概述	104
5.2 凝聚和絮凝	105
5.3 助滤剂	113
5.4 参考文献	118
5.5 符号说明	118

第6章 澄清过滤	120
6.1 截留机理	120
6.2 深层床过滤	124
6.2.1 性能	125
6.2.2 清洗	125
6.2.3 设计	126
6.2.4 实验室试验装置	130
6.2.5 设计计算	131
6.3 预敷过滤	132
6.4 滤芯过滤	133
6.5 微滤器	135
6.6 筒式过滤	136
6.6.1 测试与表征	140
6.6.2 过滤元件尺寸确定	142
6.6.3 系统的布置	143
6.7 参考文献	143
6.8 符号说明	144

第7章 沉降与浓缩	146
7.1 间歇试验和分析	146
7.2 连续沉降的设计方法	149

7.2.1 连续沉降：稀释体系	149
7.2.2 连续沉降：干涉体系/浓缩	151
7.2.3 连续沉降：特殊设计	154
7.3 沉积强化槽	155
7.4 浮选法	157
7.5 斜面装置：薄层分离器	162
7.5.1 稀释系统	163
7.5.2 干涉体系	165
7.6 参考文献	168
7.7 符号说明	169

第8章 离心分离 171

8.1 基本理论	171
8.1.1 角速度和加速度	171
8.1.2 离心力场中的颗粒速度	172
8.2 离心沉降	172
8.2.1 设计	173
8.2.2 Σ (Sigma) 理论	174
8.2.3 颗粒捕集效率	176
8.2.4 离心机的干涉沉降	177
8.2.5 螺旋卸料沉降离心机	178
8.2.6 碟式分离机	180
8.2.7 设计计算例题	181
8.3 水力旋流器	182
8.3.1 分割点和分级	183
8.3.2 修正级效率	184
8.3.3 速度	185
8.3.4 零轴向速度包络面和单面	187
8.3.5 平衡轨道理论	187
8.3.6 停留时间模型	189
8.3.7 无量纲数群模型	189
8.3.8 连续性和流动的数值求解	191
8.3.9 一般关系式	192
8.3.10 排列、类型和设计	192
8.3.11 应用	194
8.4 离心过滤	194
8.4.1 间歇卸料式离心机	194
8.4.2 间歇卸料式离心机的性能	195
8.4.3 连续卸料式离心机	196
8.4.4 过滤离心机的选择	196
8.4.5 离心机生产能力	198
8.4.6 离心过滤和渗透	198
8.4.7 洗涤时间	200

8.4.8	旋转干燥	200
8.4.9	实际平衡饱和度的研究	202
8.4.10	脱水动力学	202
8.4.11	离心机的理论过滤速度	203
8.4.12	离心过滤滤饼厚度的动态特性	204
8.4.13	过滤离心机的发展	207
8.5	参考文献	207
8.6	符号说明	208
第 9 章	后处理过程	210
9.1	引言	210
9.2	洗涤	210
9.2.1	洗涤比	212
9.2.2	纵向分散、混合与扩散	213
9.2.3	扩散系数	216
9.2.4	洗涤效率	217
9.2.5	脱水后的滤饼	217
9.2.6	断续洗涤	217
9.2.7	其他的数学模型	218
9.2.8	再化浆洗涤	218
9.3	脱液	219
9.4	洗涤和脱液设备	223
9.5	参考文献	224
9.6	符号说明	224
第 10 章	膜技术	226
10.1	微滤	229
10.2	超滤	232
10.3	膜器设计	233
10.4	过滤阻力	234
10.5	设备的比例放大和模型	234
10.5.1	渗透通量衰减模型	237
10.5.2	稳态渗透通量模型	240
10.6	渗滤	245
10.7	渗透通量的保持与再生	246
10.8	应用与研究	249
10.9	参考文献	250
10.10	符号说明	251
第 11 章	过滤工艺设备及计算	253
11.1	引言	253
11.1.1	过滤机生产能力计算基础	254
11.1.2	过滤机滤饼的脱水与洗涤	255

11.2 工业用连续真空过滤机.....	259
11.2.1 转鼓真空过滤机.....	259
11.2.2 圆盘过滤机.....	266
11.2.3 卧式过滤机.....	268
11.3 间歇操作, 工业用真空过滤机.....	275
11.4 加压过滤.....	277
11.4.1 压滤机.....	277
11.4.2 可变滤室过滤机.....	288
11.4.3 连续过滤与压榨.....	294
11.4.4 加压叶滤机和筒式加压过滤机.....	297
11.5 参考文献.....	302
11.6 符号说明.....	304
 附录 A	 307
 附录 B	 316
 附录 C	 319
 索引	 334

第 1 章 固液分离技术

1.1 引言

工业规模化生产过程多种多样,涉及许多技术与设备,从学术观点要赋予某特定过程一个准确的分类是有一定困难的,本书主要展现固液分离(SLS)技术的多样性。

斯瓦洛夫斯基[Svarovsky, 1981]根据固液分离中过滤与分离两大基本模式,对种类繁多的固液分离过程与设备进行了分类。

(1) 过滤,固液混合物的过滤是将其直接通过“过滤介质”(如筛、纸、编织滤布、膜等)进行固液两相分离,液相或流动的滤液通过过滤介质,而固体颗粒被截留,它不是被截留在过滤介质表面就是在过滤介质里面。

(2) 由沉积或借助(重力、离心力)场力作用下的沉降进行分离,它有利于固相和液相密度不同物料的分离。在一定的作用力条件下,液体中的固体颗粒就能够下沉。与之相反的过程是浮选,即由于固体颗粒自身原因或因为吸附空气气泡而使“固体颗粒”密度降低,颗粒可穿过液体而上浮。

图 1-1 列出了不少过滤与分离设备。从欲分离的固体颗粒角度看,分类界限并不十分确定,小粒径区域尤其如此。

固液两相混合物的可滤性和沉降速度是由悬浮物的分散状态决定的,后者同时受固液两相表面状态的明显影响,因为它能影响混合物的稳定性和控制颗粒与颗粒间相互接触的状态。这些物系的性质可能与时间也有关,因为有些悬浮液可滤性与沉降速度会随时间变化[Tiller, 1974]。

固液混合物系的分散力和凝聚力与物系的 pH 值、温度和搅拌情况、泵送的条件等有关,所有这些复杂的情况均和悬浮液性质有关,因此不能仅用流体的流动条件来解释。尽管有许多难题,但为了消除许多生产过程中的固液分离这一“瓶颈”现象,采用现代过滤和分离技术还是能够解决这些表面看似难以处理的问题的。

首先是从过滤、沉降或将这两种技术的结合中选择最适宜的技术。通常,沉降方法比过滤方法更为经济,特别是那些涉及大处理量、连续液体流的情况,重力沉降法被认为是首选的[Piereson, 1981]。

当固液两相密度差很小时,尽可能不要采用沉降方法进行固液两相分离,除非密度差能增加,或通过离心力的作用来增加其所受到的力。在利用重力进行分离的方法被证明为不可能的情况下,或由于固体颗粒的性质使得分离很“困难”时,仍可以使用增加沉降作用的方法。在处理废水或其他污水中小的、亚微米级颗粒或软的、可压缩性固体颗粒时会遇到这些情况。有些固液分离要求采用沉降和过滤相结合的方法,对固体颗粒的预增浓可以降低要过滤物系的液体量,也可以减少过滤设备尺寸的大小。

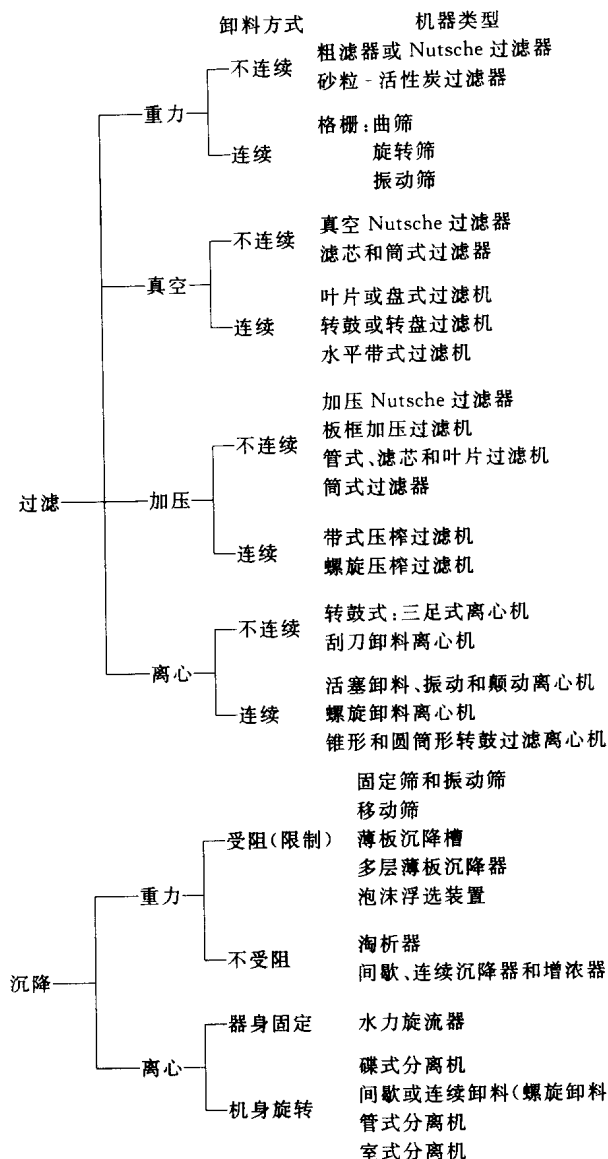


图 1-1 固液分离设备分类

在决定了上述大致的分离方法后, 进一步要考虑的是在两种分离方法中选择哪一种分离技术更为有效, 这些分离方法如下:

(1) 沉降: 重力、离心力、静电场、磁场;

(2) 过滤: 重力、真空、加压、离心力。

另一个值得考虑的, 就是连续还是不连续操作对分离的影响。不连续操作也就是大家所熟知的“间歇”操作过程。在这种情况下, 分离设备在加料与卸料操作程序之间是间歇进行的。在进料中固体颗粒浓度和单位时间需处理的数量也是影响选择方法的因素, 如图 1-1 所示。

由于分离过程很少单独存在, 就使得这个过程更为复杂。1974 年 Tiller 提出了包括固液分离过程在内的前后各种预处理与后处理方法 (图 1-2)。对悬浮液的预处理, 其沉降速度或过滤速度可以通过用化学或物理方法进行预处理使之得到改善。过滤后得到的湿的 (不是绝干的) 固体颗粒, 也许还需要有进一步的脱液过程, 也就是降低滤饼中液体含量; 有时

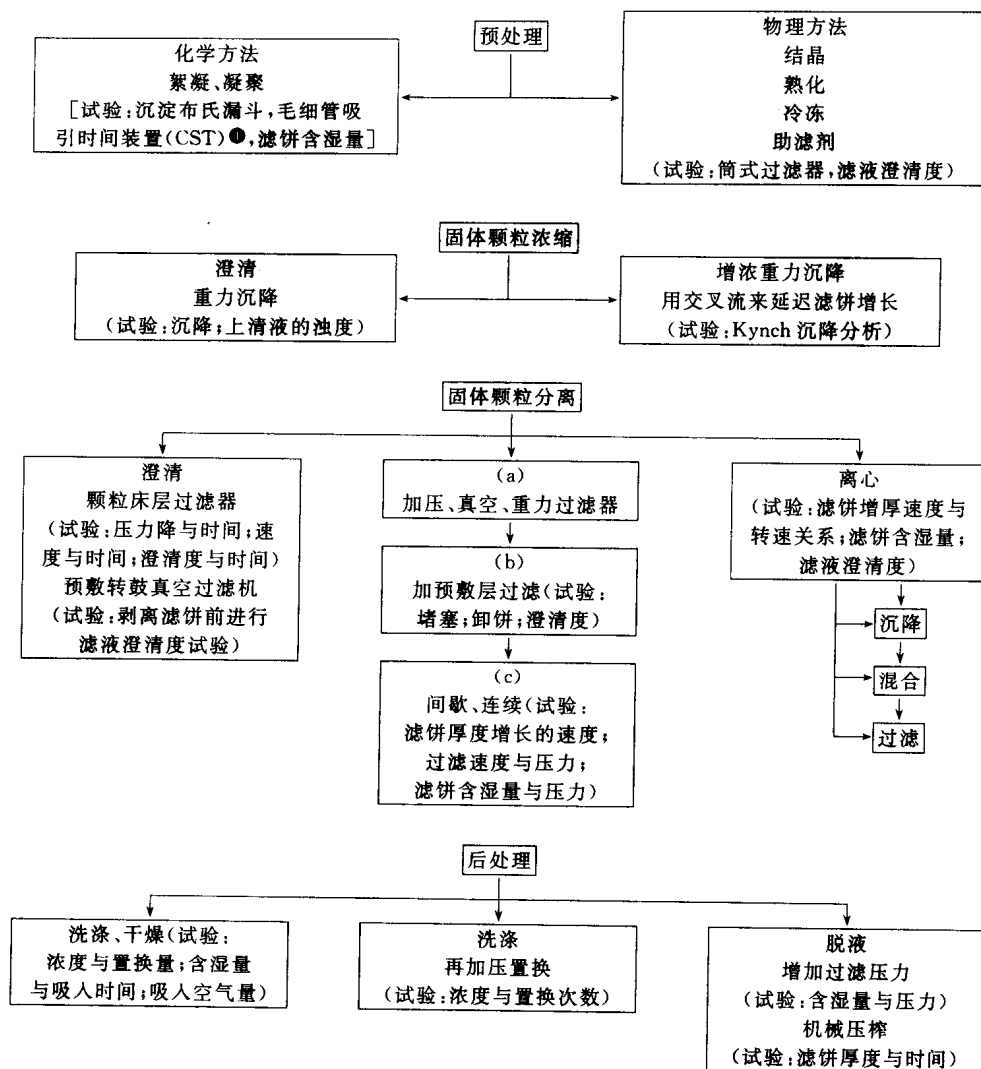


图 1-2 固液分离的不同阶段和方法 [Tiller, 1974]

候, 滤饼作为重要的产品还要求用洗涤液来进行洗涤。

显然, 典型的工艺过程有: (1) 对稀浓度的料浆增加其固体颗粒的浓度; (2) 用预处理方法改善其分离特性; (3) 固体颗粒的分离; (4) 脱液和洗涤, 也可能是多种分离机械和技术的结合。这种结合虽然不是最理想的, 但在一定范围内是解决问题的恰当方式。如果想要采用完全理想的方式, 则不可避免地耗费大量的时间和费用。在本章的最后将讨论过滤与分离设备的选择, 在第 11 章讨论加压过滤过程的计算。

1.2 过滤过程

如上所述, 金属丝编织网是一种典型的过滤粗颗粒物料的过滤介质, 它能在筛网表面截留一定粒径的颗粒。由于大直径颗粒的减少, 进一步分离就需考虑用其他“筛网”, 如机织

① 译者注: 毛细管吸引时间装置 (简称 CST) (Capillary Suction Time Apparatus)。

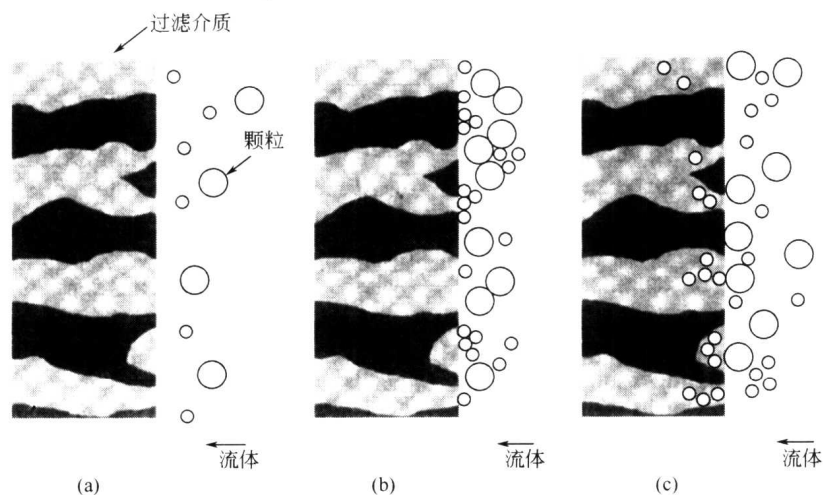


图 1-3 过滤过程中固体颗粒的沉积

滤布、膜等。它们有非常细微的结构和非常小的开孔或微孔。流体通过该系统的过程，如图 1-3 所示。当浓度很低和颗粒非常小时，颗粒可能积存在过滤介质的内部，如水的澄清所采用的砂滤器。

过滤介质安装在各种形式的过滤设备上，可以不同的方式进行操作，并利用泵送或其他相应的装备，以提高流体压力的方法来增加设备的有效处理能力。因此在大于大气压的条件下进行“加压”过滤操作，依靠压力差使得流体流过过滤介质从而通过过滤设备。这种类型的设备可以在不同的恒压或恒流量下进行操作。在后一种情况下，当在常压操作时，随时间延长，压力差将增大，滤液流速将随过滤时间的延长而降低。

低于大气压的真空操作已得到广泛应用。在这些真空过滤操作中，由真空泵来控制，使过滤介质的下游保持一个很低的绝对压力。这一类过滤基本上是在大气压作用下，使悬浮液能及时地通过过滤机，这种过程是典型的“恒压过滤”。当然，真空过滤操作也可以认为是一种特殊情况下的加压过滤。此时可以采用一个相当小的压差，但要注意压力的损失。例如，由于欲过滤的流体在相关管线和配件中流动引起的摩擦损失。应该注意，流动液体在低压条件下由于溶解的气体或气泡从液体中释放出来能导致“空穴”现象。物料通过下游高压区时，如在泵出口，引起气泡塌陷，并对泵材料造成危害。

真空过滤在工业生产的许多领域和实验室研究中都有广泛应用。人们常在实验室用真空过滤装置进行实验来评价悬浮液的可滤性，检验过滤介质是否适用。此时，我们只要记录特定压差下，由物料中固体颗粒和过滤介质形成的阻力所决定的料浆流量就足够了。固液分离过程完整的定量描述，将在以后的章节中给出。

离心机转鼓带动料浆一起旋转，会使料浆产生惯性离心力，可达到固液两相分离的目的。因此，装有合适过滤介质的过滤离心机广泛应用于食品、酒精、饮料和医药等工业中。

1.3 过滤原理

了解固液分离中过滤设备的过滤机理，对于解决应用中设备的合理使用、拓宽应用领域或消除选择新过滤设备的困难都是十分必要的。帕切斯（Purchas）长期从事过滤领域技术咨询工作，获得了丰厚的积累，于 1987 年全面阐述了液体流速、黏度、固体颗粒粒径分布

及浓度、过滤介质名义孔径等因素间的定量关系以及它们对过滤过程的影响。

前已述及,分离过程很少单独进行,它常常随对多孔滤饼沉积层的干燥或脱水和/或洗涤后被回收固体颗粒的提纯同时进行。与主体过滤过程相比,絮凝、凝聚、液压压榨等预处理或后处理过程,对于决定(有时是控制)整个分离过程的时间具有同样的重要性。为了找出可能存在的“瓶颈”,确定在分离过程中各个阶段所需的操作时间至关重要,特别是对于有严格脱水和洗涤要求的系统更是如此,可以举出很多符合过程要求的过滤机使用的实例。在选择设备之前,用小型过滤设备进行过滤实验时,了解各阶段所占时间对于过程设计是必须的。这个问题处理不好,设计就不尽合理。然而,很遗憾,这些信息不一定总是可以得到的,致使不得不在具有相当少的相关数据的情况下进行设备的选择。

分离方式的成功选择与能否选择和合理使用过滤介质密切相关。对工业化规模的大处理量的固液分离系统,不确定因素更多。以图 1-3 所描述的方式,将颗粒碰撞与过滤介质孔径之间的相互作用联系在一起是困难的。所有沉积下来的固体颗粒都滞留在过滤介质表面是不可能实现的。沉积物能够向过滤介质或膜的孔内部渗透,导致了滤液流过过滤介质的阻力增加,并逐渐堵塞全部流道。假定过滤介质所有的孔隙都比所处理的混合物中最小的颗粒还要小,上述情况就可以避免,下面进行详细讨论。

有效的固液分离需要考虑的理论和实际问题,在本书的许多章节中都有详细说明,特别是第 2 章关于过滤原理方面的描述。“表面沉积”模型如图 1-3 (b),它由下述两种流体阻力来描述的。

(1) 过滤介质阻力 R_m 。

(2) 颗粒层或“滤饼”阻力 R_c 。

由于过滤介质内有许多小的孔隙,流体流动通过大小孔隙,在层流条件下产生阻力。因而,滤液以 V_0 速度通过清洁的过滤介质。 V_0 与作用于过滤介质的压力差 Δp 成正比,与流体黏度 μ 和过滤介质阻力 R_m 成反比。这些关系可用数学公式表达:

$$V_0 = \frac{\Delta p}{\mu R_m} \quad (1-1)$$

在同样压力差下,在颗粒沉积形成滤饼后,过滤速度减少到 V_f :

$$V_f = \frac{\Delta p}{\mu (R_c + R_m)} \quad (1-2)$$

这个简单的表达式,包括颗粒浓度的影响及其与滤饼可压缩性的相互关系等,将在第 2 章中进一步描述。

上面的方程式是建立在假定过滤过程中过滤介质阻力不变的基础上的。第 4 章中将进一步讨论过滤介质的影响。通常对于开大孔的过滤介质如金属编织网, R_m 比较低;而用于微滤、超滤和反渗透的膜过滤阻力就很大。使用到后期过滤介质阻力比金属编织筛网阻力要高出无数倍。这些固有的过滤介质特性被用于去除非常细小的颗粒,在第 6 章和第 10 章膜技术中会详细讲述。

从像砂子类很易过滤的颗粒到阻力很大的污泥,滤饼阻力变化很大。通常,较小颗粒其滤饼阻力会较大。而滤饼阻力对于料浆浓度、流体速度、流体压力、温度等工艺参数的变化是很敏感的。固液分离工艺中过滤机理的物理和数学模型的发展,已经引起人们的注意 [Shirato and Tiller, 1987]。

如上所述,在固液分离操作中,后处理过程中脱液和滤饼洗涤是很重要的。在第 9 章中

① 译者注:原文有误,应是 R_c 而不是 R 。

② 译者注:原文有误,式中应是 R_c 而不是 R 。