

固液 分离

主编 罗茜 副主编 余仁焕 徐继润



冶金工业出版社

固 液 分 离

主 编 罗 茜
副主编 余仁焕 徐继润

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书是在作者从事固液分离教学、科研取得的成果和经验基础上,并吸收国内外固液分离最新成果编写而成的。全书分为导论、悬浮液的基本性质、凝聚与絮凝、筛分脱水、重力浓缩、离心沉降、过滤原理、真空过滤、压滤、滤饼脱水、滤饼洗涤、深层过滤和离心过滤、助滤剂、膜滤、动态过滤和过滤介质等十六章。

本书可作为从事化工和精细化工、矿业和冶金、石油、水利和电力、轻工、食品、饮料、制药、环保等从事固液分离的技术人员的参考书,亦可作为大专院校有关师生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

固液分离/罗茜主编. -北京:冶金工业出版社, 1996

ISBN 7-5024-1945-4

I. 固… II. 罗… III. 固体-液体混合物-分离
IV. TQ028.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第18533号



责任编辑:黄淦祥

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷39号, 邮编100009)

北京昌平长城印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1997年3月第1版, 1997年3月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 17.5印张; 426千字; 269页; 1-1200册

32元

前 言

倘若说“每个工业部门都有固液分离作业”似乎有些夸张,但固液分离作业的应用的确非常广泛,从化工和精细化工、矿业和冶金、石油、水利和发电、轻工、食品、饮料、制药到机械、电子各工业部门,无一没有固液分离作业,而废水、污水治理更离不开固液分离。随着人类对资源的珍惜和更深入、广泛而巧妙地利用,对美好环境和生活质量的要求越来越高(而世界范围内的环境污染却日益严重),对固液分离的要求也日益提高和严格,迫使固液分离技术必须迅速提高以适应这种紧迫的形势。

当然,固液分离在各部门和环保中的地位和作用不同,或为主体或为辅助,或为中间作业或为最终作业;或要求固液分离比较充分(绝对分离是不可能的)或仅要求一定程度地分开;分离的目的或收回固相或液相、或二者皆收或皆不收,总之,没有统一的要求和目的。

固液分离属非均相分离学科,由上可知,固液分离处理的悬浮液异常复杂。固相的尺寸可大至上百毫米(mm)小至纳米(nm)级,形式可由规则晶体到细菌、微生物;液相除水以外可以是其它牛顿或非牛顿液体;悬浮液的总体的流变性也差异很大。因而,固液分离所利用的原理和方法必十分多样,包括筛分脱液、固相在液相中的沉降(利用重力或惯性离心力)、液固相在压差作用下经过多孔介质(包括膜)的过滤、气泡上浮分离、磁分离以及凝聚与絮凝(包括化学法、磁、电、超声波法等)等,随着科学技术的发展还在不断扩展,诸如应用计算机模拟和控制的范围及层次正在扩大和加深;超高压压滤、超滤的方法和设备正日新月异;微波、红外技术逐渐引向固液分离工业应用等等。这些充分表明固液分离同时是一门内容非常广泛的综合技术、综合学科。

虽然固液分离很重要、应用很广泛,但一方面是大多数生产中固液分离的确少居主体,另一更重要的方面是人们尤其是我国对资源利用和环境保护重要性的认识尚不太够,因而不仅工程投资少,技术研究和改进少,而且书刊也少,目前,国内除翻译出版了英国L. 斯瓦洛夫斯基(Svarovsky)编著的第1、2版《固液分离》(1990年出了英文第3版)外,虽然还有一些相关的参考书,但与其他学科相比数量仍嫌太少。增加固液分离参考书,促进国内固液分离技术的发展,就是我们编著此书的目的。

作者多年从事固液分离的教学、培养研究生和科研工作,在一些方面做了一些研究,如水力旋流器、重力浓缩、压滤、絮凝与凝聚、助滤剂、过滤介质、膜滤等。所以本书的特点是具有比较完整的系统,内容上尽可能反映国际上(包括我们自己的)最新的研究成果和动态,同时我们希望本书除对读者有一定的参考价值外,更希望能引起大家的研究兴趣,因此,个别观点可能并不太成熟,但我们也在书中提及。也正为这样做,书中的错误乃至谬误更在所难免,祈望指正。限于篇幅,本书不可能面面俱到,而且是多人分章编写,风格和取材上不会相同,例如有的章理论偏重,实践偏少,而有的章又恰好相反。

本书可以作为大学本科生、研究生教材或教学参考书,也可作为从事固液分离技术工作的同行提供参考。

参加本书编写的有:东北大学的徐继润(2、8)、胡筱敏(3、13)、邓常烈、康勇(5)、余仁焕(7、10、11、16)、徐新阳(9)、罗茜(1、15)和天津大学的赵宗艾(14)以及四川联合大学的褚良银(4、6、12)、正副主编共同完成参加了编审工作。全书最后由罗茜统一修改和编纂。

主编 罗茜 1996. 6. 14

目 录

1 导论	(1)
1. 1 概述	(1)
1. 2 固液分离效率	(5)
1. 2. 1 总效率	(5)
1. 2. 2 级效率	(6)
1. 2. 3 修正效率	(7)
参考文献	(8)
2 悬浮液的基本性质	(10)
2. 1 液相的基本性质	(10)
2. 1. 1 水的极性	(10)
2. 1. 2 水的粘性	(11)
2. 1. 3 水的表面张力	(12)
2. 2 固相的基本性质	(13)
2. 2. 1 颗粒粒度	(13)
2. 2. 2 颗粒的形状	(15)
2. 3 固液体系的基本性质	(16)
2. 3. 1 固液体系的稳定性	(17)
2. 3. 2 悬浮液的流变性	(17)
2. 3. 3 水在固体物料中的赋存状态	(18)
2. 3. 4 颗粒表面的电性及润湿性	(20)
参考文献	(22)
3 凝聚与絮凝	(24)
3. 1 概述	(24)
3. 2 凝聚与絮凝理论	(24)
3. 2. 1 颗粒间的相互作用	(24)
3. 2. 2 DLVO 理论	(31)
3. 2. 3 异相凝聚理论	(31)
3. 2. 4 DLVO 理论的扩展	(32)
3. 2. 5 凝聚动力学	(33)
3. 3 絮凝理论	(34)
3. 3. 1 絮凝剂在颗粒表面上的吸附机理	(34)
3. 3. 2 絮凝过程及机理	(35)
3. 4 凝聚剂和絮凝剂	(37)
3. 4. 1 凝聚剂	(37)
3. 4. 2 絮凝剂	(38)
3. 4. 3 生物絮凝剂	(40)

3. 5 实验和实际应用的絮凝器	(41)
3. 5. 1 实验室用絮凝器	(41)
3. 5. 2 实际应用的絮凝器	(42)
参考文献	(44)
4 筛分脱水	(46)
4. 1 概述	(46)
4. 2 脱水筛	(46)
4. 2. 1 固定筛	(46)
4. 2. 2 振动筛	(48)
4. 3 脱水筛筛面	(52)
4. 3. 1 条缝筛板	(52)
4. 3. 2 网状丝布	(52)
4. 4 影响脱水筛脱水效果的因素	(53)
4. 4. 1 物料性质	(53)
4. 4. 2 脱水筛的结构性能	(53)
4. 4. 3 操作因素	(54)
参考文献	(54)
5 重力浓缩	(55)
5. 1 沉降试验及沉降曲线	(55)
5. 1. 1 沉降过程的分区现象	(55)
5. 1. 2 沉降试验	(55)
5. 1. 3 沉降曲线	(57)
5. 1. 4 沉积曲线	(57)
5. 2 重力浓缩设备	(58)
5. 2. 1 耙式浓缩机	(58)
5. 2. 2 倾斜板浓缩箱和倾斜板浓缩机	(63)
5. 2. 3 深锥浓缩机	(66)
5. 2. 4 重力浓缩设备的选型原则	(66)
5. 2. 5 絮凝剂的供给系统	(67)
5. 3 重力浓缩理论及浓缩机的计算	(69)
5. 3. 1 重力浓缩过程	(69)
5. 3. 2 重力浓缩模型	(69)
5. 3. 3 浓缩机参数的计算	(77)
参考文献	(78)
6 离心沉降	(80)
6. 1 概述	(80)
6. 1. 1 离心力场中固体颗粒在液相介质中的自由沉降	(80)
6. 1. 2 离心沉降设备的分类	(82)
6. 2 水力旋流器	(82)

6. 2. 1 液体在水力旋流器内的流动	(83)
6. 2. 2 固相颗粒在水力旋流器内的运动	(86)
6. 2. 3 水力旋流器的主要工艺指标	(88)
6. 2. 4 固液分离用水力旋流器的设计	(92)
6. 3 沉降离心机	(94)
6. 3. 1 沉降离心机主要性能指标	(94)
6. 3. 2 沉降离心机的类型	(99)
6. 3. 3 沉降离心机的选用	(102)
参考文献	(103)
7 过滤原理	(105)
7. 1 概述	(105)
7. 2 不可压缩滤饼的过滤过程	(106)
7. 2. 1 不可压缩滤饼和可压缩滤饼	(106)
7. 2. 2 过滤的基本方程	(107)
7. 2. 3 过滤方程的应用	(109)
7. 3 可压缩滤饼的过滤	(115)
7. 3. 1 可压缩滤饼内的流动特性	(115)
7. 3. 2 可压缩滤饼的基本过滤方程	(116)
7. 3. 3 可压缩滤饼过滤基本方程的应用	(118)
7. 4 影响过滤的基本因素	(120)
7. 4. 1 固体颗粒粒度	(121)
7. 4. 2 料浆粘度	(123)
7. 4. 3 过滤压差与料浆浓度	(124)
参考文献	(126)
8 真空过滤	(128)
8. 1 真空过滤的基本过程	(128)
8. 2 真空过滤的基本设备	(130)
8. 2. 1 转鼓式真空过滤机	(130)
8. 2. 2 圆盘式真空过滤机	(132)
8. 2. 3 卧式移动带真空过滤机	(135)
8. 3 真空过滤的影响因素	(137)
8. 3. 1 设备因素	(137)
8. 3. 2 给料因素	(138)
8. 4 真空过滤实验及设备选择	(139)
8. 4. 1 过滤实验	(139)
8. 4. 2 真空过滤机的选择	(142)
8. 5 真空过滤的数学模型	(143)
参考文献	(144)
9 压滤	(146)

9. 1	概述	(146)
9. 2	板框压滤机	(146)
9. 2. 1	工作原理	(147)
9. 2. 2	结构	(147)
9. 2. 3	板框压滤机的应用	(151)
9. 3	带式压滤机	(151)
9. 3. 1	结构	(151)
9. 3. 2	工作原理	(154)
9. 3. 3	类型和应用	(156)
9. 4	气压罐式连续压滤机	(157)
9. 4. 1	KHD 型气压罐式压滤机的构造	(158)
9. 4. 2	KDF 型气压过滤机	(161)
9. 4. 3	气压过滤机的过滤机理	(162)
9. 5	加压叶滤机	(164)
9. 5. 1	快开式水平加压叶滤机	(164)
9. 5. 2	立管式滤叶压滤机	(165)
9. 6	其他型式的压滤机	(166)
9. 6. 1	密封式加压耙式过滤机	(166)
9. 6. 2	可变滤室管式压滤机	(167)
9. 7	压滤试验及压滤设备选择	(167)
9. 7. 1	压滤试验	(167)
9. 7. 2	压滤机计算	(170)
	参考文献	(172)
10	滤饼脱水	(174)
10. 1	概述	(174)
10. 2	气体吹除脱液	(175)
10. 2. 1	穿透压力	(176)
10. 2. 2	脱液动力学	(178)
10. 2. 3	脱干饱和度和最优化	(180)
10. 2. 4	表面活性剂的作用	(182)
10. 3	压榨脱液	(182)
	参考文献	(184)
11	滤饼的洗涤	(185)
11. 1	概述	(185)
11. 2	置换洗涤	(185)
11. 2. 1	洗涤机理	(185)
11. 2. 2	洗涤曲线性质分析	(187)
11. 2. 3	滤饼洗涤的计算	(189)
11. 3	再制浆洗涤	(192)

11. 3. 1 多级逆流再制浆洗涤·····	(192)
11. 3. 2 多级并流再制浆洗涤·····	(193)
11. 3. 3 图解法确定逆流洗涤段数·····	(194)
11. 4 洗涤模型和最优化·····	(195)
参考文献·····	(196)
12 深层过滤和离心过滤·····	(197)
12. 1 概述·····	(197)
12. 2 深层过滤·····	(197)
12. 2. 1 深层过滤理论·····	(197)
12. 2. 2 深层过滤器的设计与操作·····	(200)
12. 2. 3 深层过滤的应用与发展·····	(200)
12. 3 离心过滤·····	(201)
12. 3. 1 离心过滤理论与设备性能·····	(201)
12. 3. 2 过滤离心机类型与选择·····	(204)
参考文献·····	(210)
13 助滤剂·····	(212)
13. 1 概述·····	(212)
13. 2 介质型助滤剂·····	(212)
13. 2. 1 介质型助滤剂的作用·····	(212)
13. 2. 2 介质型助滤剂的种类·····	(213)
13. 3 化学助滤剂·····	(215)
13. 3. 1 高分子絮凝剂型助滤剂·····	(215)
13. 3. 2 表面活性剂型助滤剂·····	(217)
13. 4 化学助滤剂的发展前景·····	(221)
13. 4. 1 化学助滤剂的应用前景·····	(221)
13. 4. 2 高效助滤剂的发展方向·····	(222)
参考文献·····	(222)
14 膜过滤·····	(224)
14. 1 膜过滤的分类及特点·····	(224)
14. 1. 1 膜过滤分类·····	(224)
14. 1. 2 膜过滤的特点·····	(225)
14. 2 膜过滤的原理·····	(226)
14. 2. 1 微孔过滤原理·····	(226)
14. 2. 2 超滤原理·····	(226)
14. 2. 3 膜过滤的特性参数·····	(227)
14. 2. 4 膜过滤的传质理论·····	(228)
14. 3 滤膜·····	(229)
14. 3. 1 滤膜的材质·····	(229)
14. 3. 2 滤膜的结构与形态·····	(230)

14. 4 膜过滤设备	(231)
14. 4. 1 板框式膜滤器	(231)
14. 4. 2 管式膜滤器	(231)
14. 4. 3 螺旋卷绕式膜滤器	(232)
14. 4. 4 中空纤维式膜滤器	(233)
14. 5 膜过滤的工艺及应用	(235)
14. 5. 1 膜过滤的工艺过程	(235)
14. 5. 2 膜过滤的应用举例	(237)
14. 5. 3 膜过滤过程的强化	(238)
参考文献	(239)
15 动态过滤	(240)
15. 1 概述	(240)
15. 2 横流过滤	(241)
15. 2. 1 旋叶压滤机	(241)
15. 2. 2 旋管式横流过滤机	(246)
15. 3 其他动态过滤	(247)
15. 3. 1 旁流过滤	(247)
15. 3. 2 电泳-电渗过滤	(249)
参考文献	(252)
16 过滤介质	(254)
16. 1 概述	(254)
16. 2 编织过滤介质	(255)
16. 2. 1 滤布	(255)
16. 2. 2 滤网	(259)
16. 3 非编织过滤介质	(260)
16. 3. 1 滤毡	(260)
16. 3. 2 滤纸	(261)
16. 3. 3 过滤衬垫	(261)
16. 3. 4 非织造滤布	(262)
16. 4 刚性多孔介质	(262)
16. 4. 1 陶瓷	(262)
16. 4. 2 金属陶瓷	(263)
16. 4. 3 多孔塑料	(263)
16. 5 松散固体介质	(263)
16. 6 过滤介质的选择及评估	(264)
16. 6. 1 过滤介质的捕集性能	(264)
16. 6. 2 过滤介质的渗透性能	(266)
16. 6. 3 过滤介质的堵塞和再生	(267)
16. 6. 4 过滤介质的选择	(267)
参考文献	(268)

1 导 论

1.1 概述

固液分离作业广泛用于化工、矿业、湿法冶金、发电、制药、饮料、生物发酵、环保等许多工业部门。所谓固液分离，就是把生产中含水的中间或最终产品（包括排出物）的液相和固相分开，其目的不外乎是：

- (1) 回收有价的固相；
- (2) 回收有价的液相；
- (3) 同时回收两相；
- (4) 不回收任何一相。

随着对资源和产品的综合利用要求的提高，固液分离的发展趋势将是同时回收固液两相。

由于固液分离涉及的范围很广，因此被分离的固液种类繁多，颗粒粒度范围很大。例如，脱水筛处理的固体颗粒粒度可达几十毫米，而膜过滤处理的固体悬浮液的固体颗粒则是微米级的。狭义的固相是指有一定体积和形状的颗粒，包括弹性体和塑性体；广义的固相还包括诸如酒糟、糖渣、蛋白酶等。液相包括水、有机液体等牛顿流体及非牛顿流体。

固液分离属于固液两相流范畴，其中固体颗粒为分散相，连续状态的液相为分散介质，由于它们具有不同的物理性质，所以可用机械方法将之分离。实现分离的基本要点是使固液相间产生相对运动，参照参考文献 [1] [2] 提出图 1-1 所示简图，概括了固液间相对运动的方式及相应的分离方法。

由图 1-1 可粗略地将固液分离分为两大类，即浓缩和过滤。在一些工业部门，如化工、矿业、环保等，也就相应地形成两段脱水作业：第一段浓缩，第二段过滤，或者说浓缩为过滤的准备作业。

1980 年，联邦德国的 H. F. 特瑞文斯基 (Trawinski) 教授^[3]提出应从统一的物理角度分析所有固-液分离过程。他认为所有的固液分离均包含两类因素或参数：一类是指分离浆体性质的量参数；一类是确定场梯度的强度参数。定义的量参数与强度参数有：

过滤的量参数	$Q_F = \frac{d_p^2}{32\eta};$
沉积的量参数	$Q_S = \frac{d_p^2}{18\eta}(\rho_p - \rho_l);$
重力场的强度参数	$I_G = g;$
离心力“场”的强度参数	$I_C = C;$
过滤时的压力梯度	$I_{FP} = \Delta P/L;$
在重力作用下	$I_{FG} = g \cdot \rho_l/L;$

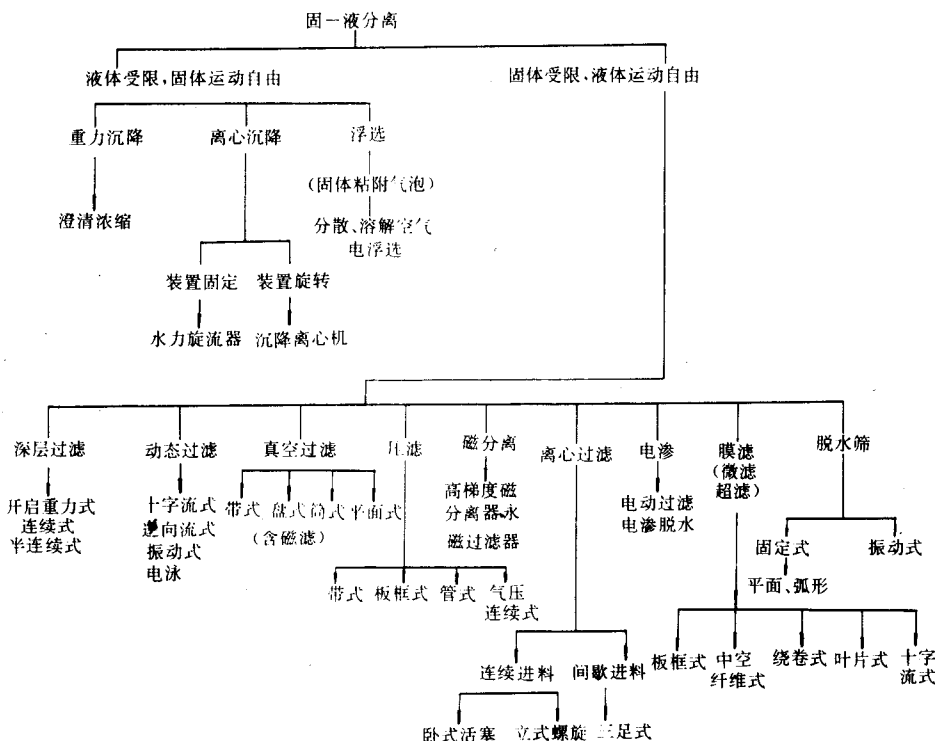


图 1-1 固液分离分类图

在离心力作用下为

$$I_{FC} = g \cdot \rho_l \cdot Z/L;$$

在上列诸参数中： d_p 为颗粒直径； η 为液体粘度； ρ_p 、 ρ_l 分别为颗粒及液体密度； g 为重力加速度； C 为离心加速度； ΔP 为过滤压力； L 为滤饼厚度； Z 为离心力强度， $Z=C/g$ 。

所有的固-液分离方法或设备都基于两个参数的乘积：

$$\text{重力浓缩 / 澄清速度: } v_s = Q_s \cdot I_g = \frac{d_p^2}{18\eta} g(\rho_p - \rho_l);$$

$$\text{重力过滤, 线性过滤速率: } f_G = Q_F \cdot I_{FG} = \frac{d_p^2}{32\eta} \rho_L \cdot g;$$

$$\text{离心过滤: } f_C = Q_F \cdot I_{FC} = \frac{d_p^2}{32\eta} \rho_L \cdot g \cdot Z;$$

$$\text{压力过滤(真空、压滤): } f_P = Q_F \cdot I_{FP} = \frac{d_p^2}{32\eta} \frac{\Delta P}{L}$$

对几乎所有的固液分离设备，甚至包括分级、脱泥、重力分选等相关设备均可按上述关系作出分析。

动态过滤又称限制滤饼成长的过滤，是近 20 年发展起来的新过滤技术^[4~6]。在传统的过滤设备中，滤饼在成饼过程中不受干扰，悬浮液和固体颗粒均以过滤介质为流动终端，故称为终端过滤 (dead end filtration)，由于滤饼不断增厚，过滤阻力逐渐增大，过滤速率渐减。为防止和减轻这种情况而出现了限制滤饼增厚的动态过滤 (dynamic filtration)。实现

动态过滤的措施很多,其中以横流或十字流方式最成功,故有时将十字流或横流过滤(cross-flow filtration)称为动态过滤。这种过滤方式当前主要用于微滤。

利用磁分离器(或称永磁“过滤器”)除去悬浮液中的强磁性固体微粒,以净化某些液体(例如,净化液压回路中的油)的方法已普遍使用。20世纪70年代后出现了高梯度磁分离器(HGMS)^[7,10,11],由于在高场强的均匀磁场中放置了不锈钢毛或钢丝,在它们附近形成了很大的磁场梯度,所以这种磁力分离器可以截住具弱顺磁性,如 Fe_2O_3 、 K_2O 等的微细颗粒(可小至零点几微米)。高梯度磁分离器除作为一种矿物分选设备外,还广泛用于工业废水处理和水的净化,例如,炼钢烟尘废水、轧钢废水的处理等。将溶液中的铀(U)离子覆盖于微生物(细菌)上,可形成铀酰的顺磁性物质,可顺利地利用高梯度磁选机去除。高梯度磁选机的均匀磁场一般由电磁铁形成。由于稀土永磁体的发展,永磁高梯度磁过滤机也可获得高场强。例如,美国伊利兹磁性元件公司生产的永磁磁过滤机的磁场强度可达 1.6T ^[8]。

浮选(flotation)是一种快速的液固分离方法^[9~11],它和沉降正好相反,是使固体微粒吸附于气泡,上浮到液面实现液固分离的。产生气泡有机械法、气溶法和电解水法,其中以气溶法(dissolved air),亦即溶气浮选(dissolved air flotation-DAF)最为经济,形成的气泡大小最为适宜处理含微细粒乃至胶体的悬浮液(气泡直径小于 $60\mu\text{m}$)。溶气浮选是将在压力作用下被气体饱和的水用喷嘴或阀门射入浮选槽中,由于压力降低,溶解于水中的气体便形成大量小气泡析出,碰到分散的固体微粒,便将之带至浮选槽液面,如图1-2所示

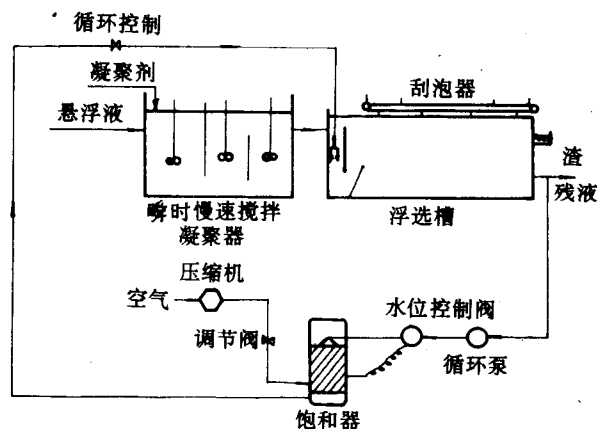


图 1-2 循环溶气浮选

示。因为唯有表面疏水及粒度足够大的颗粒才能附着于气泡上,因此需加入那些能使微粒表面疏水化的表面活性剂和凝聚剂或絮凝剂。因为絮团经过喷嘴时部分会遭破坏,而图1-2所示的循环式流程则有些弥补作用,也可采用非循环式的。浮至浮选槽液面的浮起物用刮泡器刮出。刮泡器的运行速度必须适当。气固比(气耗量)、流速(流量)、饱和器和喷嘴的性能是设计和生产的主要因素。气固比大约为 $4\sim 100$ 。已确认,当气泡和颗粒表面电荷相反时,基于异相凝聚可使亚微米级颗粒附于微米级气泡上。在此情况下可以不用表面活性剂。DAF的第一个专利登记于1924年,此法开始用于回收造纸厂的纤维和处理白水,但直到1947年用于小麦洗涤水处理时,DAF才取得突破性进展,由分离纤维、油脂等,扩展

到固液分离。

电浮选设备示于图 1-3。水中氢、氧离子向电极迁移产生氢、氧气，产出直径小于 $30\mu\text{m}$ 的气泡。由于成本和能耗较高，电浮选法还难以投入大规模生产。机械分散气体的浮选法和设备与矿物浮选机相似，产生的气泡较大，可达 1mm ，不适宜处理含微小（小于几微米）颗粒的悬浮液。

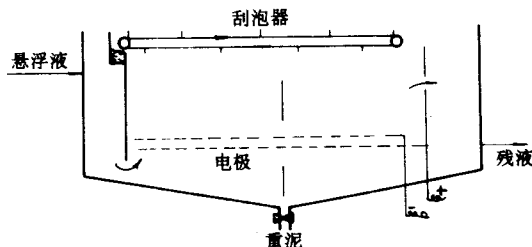


图 1-3 电浮选槽

人们早已认识了电动现象 (electrokinetic phenomena)。1808 年，罗伊斯 (Reuss) 在做直流电位的影响实验时，发现水透过粘土隔膜层向阴极移动，而自由的粘土粒子则移向阳极。按胶体化学定义：质点相对于其四周的连续相发生移动所产生的电动效应为电泳，溶液相相对于固定不动壁发生移动所产生的电动效应为电渗^[12]。电动脱水不仅开发较早，而且方式多、应用范围广。它包括电力沉降、电力沉积、电力过滤、真空电滤、压滤电渗、电力-声波脱水、电渗析、电化学凝固、电动增稠等。C. S. 格兰特 (Grant) 引用了一个综合脱水方法图^[13]，可看到电渗脱水的地位。

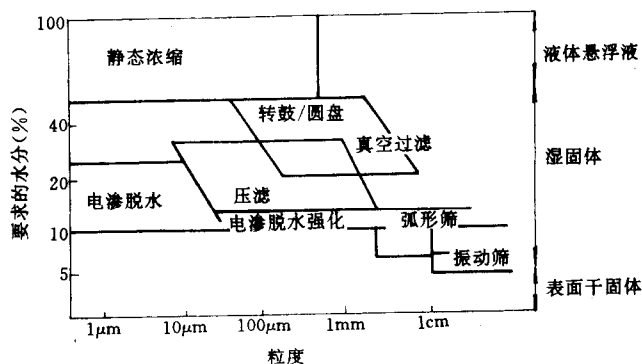


图 1-4 电渗脱水的作用

电渗-电泳脱水的模型示于图 1-5。

1993 年他相当详尽地总结回顾了自 1990 年以来电动脱水的应用和发展^[13]，认为在固液分离中电动现象的应用是非常广泛的。

应特别指出的是 S. P. 莫利克 (Moulik) 等人在 60 年代末期对粗粒（ -2mm 目）膨润土所做的电渗压滤试验。他们的试验结果表明，对加入 NaCl 的悬浮液，只要有足够的电压（ $<60\text{V}$ ），就可在不积存滤饼的情况下保持恒速过滤^[14]。

70 年代初，M. 蒂利 (Tiller)、M. 白户 (Shirato) 等提出了限制滤饼层增厚的过滤理

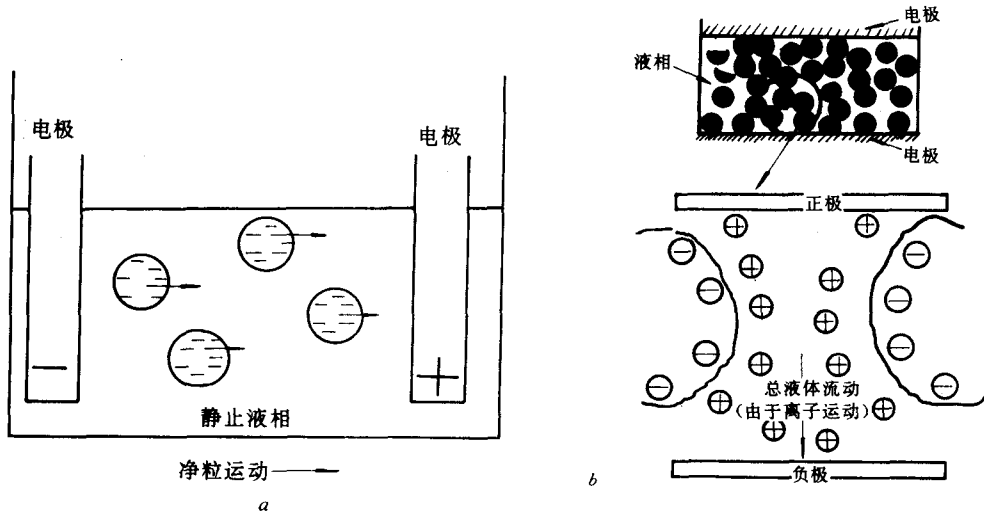


图 1-5 电泳-电渗脱水示意

a—电泳现象；b—电渗现象

论。电渗过滤因为是限制滤饼层增厚的有效措施而倍受重视。此后，电动过滤就更多地用于膜滤，以解决膜的污染。研究表明，加入直流电场后可以大幅度减少颗粒在膜表面的堆积。例如，约瑟夫 (Joseph) 的试验表明，粘土悬浮液的电渗膜滤速率比没有电场大了 3~7 倍^[15]。电渗加十字流微滤 (EF-CF) 已成为微滤的基本方式^[15~17]。R. Ben Aim 研究了电极交变的影响^[18]；V. S. Lo 等研究了非水体系的电渗微滤^{[17][19]}。70 年代后期，电渗过滤理论日趋深入和系统化，K. 小林 (Kobayashi) 等人提出计入电场强度和双电层内电场强度的毛细管电渗流的纳维-斯托克斯 (Navier-Stokes) 方程^[20]，1994 年，M. 岩田 (Iwata) 又根据小林方程和 M. 蒂利、M. 白户的可压缩滤饼过滤理论提出了可压缩性固-液混合物电渗脱水 (过滤) 速率方程^[21]。

20 世纪 60 年代以后，出现超滤用合成膜^[22]。膜分离技术得到了工业应用，利用微孔膜可以截留几微米的颗粒 (微滤-Microfiltration) 和 10000~1000000g/mol 以上的分子 (超滤-Ultrafiltration)，使传统过滤向着精细过滤发展。为了改善膜过滤中由于微孔堵塞或浓度极化所引起的膜污染现象，十字流 (横流) 动态过滤和电渗过滤，尤其是前者得到了普遍应用，形成微滤就是十字流 (横流) 过滤的局面^[23]。

早在 20 世纪 40 年代，凝聚技术^{[24][25]}就已进入固液分离领域，根据舒采-哈德 (Schulze-Hardy) 规则添加高价电解质降低颗粒表面 ξ 电位，促使颗粒凝聚。50 年代^[26]已开始利用人工合成的聚合电解质 (高分子化合物) 进行悬浮液的预处理。现在，凝聚和絮凝技术已成为固液分离技术和理论的组成部分。一些分离设备的出现和发展是和凝聚与絮凝技术分不开的，例如，高效浓缩机、深锥浓缩机、带式压滤机、水平真空过滤机，甚至溶气浮选机等。1991 年，莫德吉尔和沙伊纳编著了《絮凝和脱水》一书^[27]，汇集了当时所能收集到的几乎所有关于絮凝和脱水的论文。

1.2 固液分离效率^[1,28,29]

1.2.1 总效率

如图 1-6 所示，进入分离单元 (单个设备或系统) 的体积流量为 V_i (m^3/h) 质量流量

为 M_f (kg/h), 固液分离后的液相产品 (暂且称为溢流) 和固相产品 (暂且称为沉渣) 的体积流量分别为 V_c 、 V_u ; 质量流量分别为 M_c 、 M_u ; C_f 、 C_c 、 C_u 分别为入料、溢流和沉渣的质量浓度, 即固体的质量含量百分数 (%)。

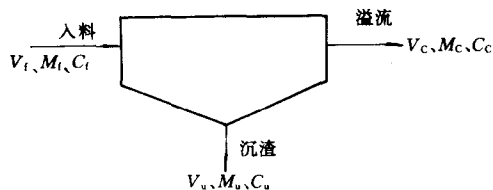


图 1-6 固液分离结果

定义固液分离总效率为:

$$E_0 = M_u / M_f \quad (1-1)$$

由固体质量平衡得

$$E_0 = 1 - M_c / M_f \quad (1-2)$$

由液体质量平衡式:
$$\frac{M_u}{\rho} \cdot \frac{1 - C_u}{C_u} + \frac{M_c}{\rho} \cdot \frac{1 - C_c}{C_c} = \frac{M_f}{\rho} \cdot \frac{1 - C_f}{C_f}$$

可以得到:

$$\frac{M_c}{M_f} = \frac{C_c(C_f - C_u)}{C_f(C_c - C_u)} \quad (1-3)$$

于是:

$$E_0 = \frac{C_u(C_f - C_c)}{C_f(C_u - C_c)} \quad (1-4)$$

(1-4) 式表明, 可以由检测入料悬浮液和固液分离后所得产品的质量浓度计算出分离设备或过程的总效率。

假设固液分离过程不发生固体颗粒粒度的变化 (实际上难免), 则小于和大于某一特定粒级 $x_i + x_j$ 的物料的质量也应在入料和产品中保持平衡。假定该物料在入料和分离产品中的质量百分数分别为 γ_{ix} 、 γ_{cx} 、 γ_{ux} ,

则
$$M_f \cdot \gamma_{ix} = M_c \cdot \gamma_{cx} + M_u \gamma_{ux} \quad (1-5)$$

亦即
$$M_{ix} = M_f \cdot \gamma_{ix}; M_{cx} = M_c \cdot \gamma_{cx}; M_{ux} = M_u \cdot \gamma_{ux} \quad (1-6)$$

从中导出:
$$\frac{M_u}{M_f} = \frac{\gamma_{ix} - \gamma_{cx}}{\gamma_{ux} - \gamma_{cx}} \quad (1-7)$$

于是
$$E_0 = \frac{\gamma_{ix} - \gamma_{cx}}{\gamma_{ux} - \gamma_{cx}} \quad (1-8)$$

(1-8) 式说明也可以由入料和产品的粒级含量 (或质量百分数) 计算总效率 E_0 。

由 (1-8) 式, 若知入料和产品的粒级组成, 即可求出各粒级的 $\gamma_{ix} - \gamma_{cx}$ 和 $\gamma_{ux} - \gamma_{cx}$ 的值, 作 $\gamma_{ix} - \gamma_{ux} - \gamma_{ux} - \gamma_{cx}$ 的图, 应为一条过坐标原点的直线, 斜率即为 E_0 。实际上由于粒度检测的误差, 一般得不到一条直线。

1.2.2 级效率

几乎所有的固液分离设备的性能都和它处理的物料粒度密切相关, 而且每个粒级在同一设备中的分离效率不同, 所以用级效率来描述某些固液分离设备的分离性能更为贴切。

定义级效率 E_x 为:

$$E_x = M_{ux} / M_{uf} = \frac{M_{ux}}{M_{ux} + M_{cx}} = \frac{M_u \cdot \gamma_{ux}}{H_u \cdot \gamma_{ux} + M_c \cdot \gamma_{cx}} \quad (1-9)$$

可由(1-6)式导出
$$E_x = \frac{M_u}{M_f} \cdot \frac{\gamma_{ux}}{\gamma_{fx}} = E_0 \cdot \frac{\gamma_{ux}}{\gamma_{fx}} = \frac{E_0 \gamma_{ux}}{\gamma_{cx} + E_0(\gamma_{ux} - \gamma_{cx})} \quad (1-10)$$

再将(1-7)式代入, 便得
$$E_x = \frac{(\gamma_{fx} - \gamma_{cx})\gamma_{ux}}{(\gamma_{ux} - \gamma_{cx})\gamma_{fx}} \quad (1-11)$$

对不同的粒级— $x_i + x_j$ 均可计算出其级效率 E_x , 由 $E_x \sim x$ 绘制的曲线称为级效率曲线, 如图 1-7 所示之例, 可以用数学函数来描述此曲线, 不同的分离设备有不同形状的级效率曲线。例如图 1-7 所示的水力旋流器的级效率曲线呈准 S 型。

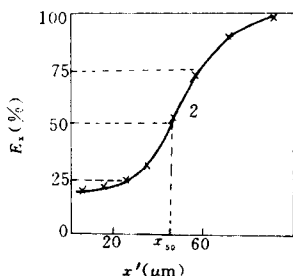


图 1-7 水力旋流器的级效率曲线

级效率曲线除可描述在分离设备中物料各粒级的分离效率外, 还有以下几个性质。

(1) 概率特性: 级效率值具有概率特性是因为颗粒通过分离设备时所处的条件不同, 每个颗粒的行为具有随机性, 所以级效率曲线又称为概率分配曲线, 有时简称为分配曲线, 可以把 E_x 值理解为概率值。

(2) 分割粒度—— x_{50} : 在图 1-7 所示的曲线上, 称对应于 50% 概率的粒度为分割粒度, 以 x_{50} 表示, 即这种粒度分配到两种产品中的概率均为 50%, 有时称 x_{50} 为分离粒度。

(3) 分割精度: 由图 1-7 所示曲线可见, 拟分离的两种产品的相互混杂越少, 既分离越精确, S 曲线的形状越接近“J”状, 在此情况下, 所有大于 x_{50} 的颗粒均进入“沉渣产品”, 所有小于 x_{50} 者均进入“溢流”产品。因此, 曲线的斜率就表示了分割精度, 通常以 $E_p = \frac{x_{25} - x_{75}}{2}$ 来衡量, 式中 x_{25} 、 x_{75} 分别是 E_x 为 25% 和 75% 所对应的曲线点距 x_{50} 直线的距离 (见图 1-7), 显然 E_p 值越小, 分离越精确。

利用 E_p 值来衡量分离设备性能的优点, 一是方便, 二是在用于对比不同 (包括类型、规格等) 设备的性能时比较合理。

1.2.3 修正效率

如上所述, 在分离器中, 实际上有一部分固-液相未得到分离, 它们只是被“分配”到两种产品中去了, 在“沉渣”量比例大, 但浓度小 (含液相多) 的情况下, 若按 (1-2) 或 (1-9) 式计算可能有较高的 E_0 或 E_x 值, 但实际的分离效果并不佳, 对此提出许多修正的意见, 参照修正分级效率的概念, 提出修正效率 E'_0 应为:

$$E'_0 = \frac{M_u - (M_{u2} + M_c)}{M_f} \quad (1-12)$$

式中 M_{u2} 是沉渣中和溢流质量流量 M_c 以及部分液体流量共同组成和入料浓度 C_f 相同的部分质量流量, 认为这部分料浆是没有得到分离的。由物料平衡, 可导出