

固液分离与工业水处理

 刘凡清 范德顺 黄 钟 编著

中国石化出版社

固液分离与工业水处理

刘凡清 范德顺 黄 钟 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书系统而全面地介绍了固液分离过程的基本理论、设计方法和生产实践;分章重点讨论了过滤与分离的典型设备及其工业应用和选用标准,列举了在化工、石油化工、电力、制药、冶金、纺织、染料、造纸、食品工业以及工业水处理等方面的最新科研成果和应用经验。

本书可供从事固液分离与工业水处理应用研究的工程技术人员阅读参考,也可作为大专院校相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

固液分离与工业水处理/刘凡清等编著.
—北京:中国石化出版社,2000
ISBN 7-80164-017-9

I. 固… II. 刘… III. ①固体-液体混合物-分离-
化工过程②工业用水-水处理 IV. TQ028.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 72598 号

中国石化出版社出版发行

北京市东城区安定门内大街 58 号

邮编 100011 电话 (010)84271859

<http://press.sinopec.com.cn>

北京精美实华图文制作中心排版

海丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

850×1168 毫米 32 开本 12.5 印张 333 千字 印 1-3000

2001 年 5 月第 1 版 2001 年 5 月第 1 次印刷

定价 24.00 元

前 言

所谓固液分离，系指从悬浮液中分离出固相和液相。迄今为止，固液分离设备(过滤机械和离心机械)已广泛应用于国民经济的各领域和许多不同的工艺过程，并能实现以下目的：回收有用固体(废弃液体)，回收液体(废弃固体)，回收固体和液体，固体和液体均不回收(例如防止水的污染)。

近年来，由于电力、石油化工、食品加工、生物工程、精细加工、环保水处理等部门中新技术的不断发展，对固液分离技术与装备提出了新的挑战 and 更高要求，不仅要求提供更多更新的品种和规格，而且迫切需要在分离效率上能有更大的提高。鉴于此，本书在编写过程中不仅加强了对固液分离过程的原理、设备以及与之相关的诸多重要问题的论述；而且还重点介绍了固液分离与水处理设备的工业应用以及结构设计问题。因此，本书对相关专业的工程技术人员，特别是对从事现场操作、设备设计以及试验安装和制造等方面的工程师大有裨益。

本书的许多章节曾先后在东北电力学院和北京化工大学的研究生和高年级本科生中作过专题讲座，并在国内外许多相关专业刊物(例如《工业水处理》、《过滤与分离》、《流体工程》、《化工与通用机械》、《Filtration & Separation》、《Chem. Eng. Res. Des》等)上发表过。在成书过程中，除取材于作者发表的论文以及过去编印的讲义外，还特别参考了国内外知名刊物和著作(已详尽列在书后的参考文献中)，力求反映最新的科研成果并做到理论和实践相结合。限于作者水平和经验，书中的缺点和差错在所难免，真诚希望广大读者批评指正。

作者简介

刘凡清 吉林电力学院教授，吉林省环境科学学会副理事长，吉林省环保产业协会常务理事，国家有突出贡献的中青年专家。九十年代创建飞特公司，现任上海凡清环境工程有限公司董事长、总经理。多年从事工业水处理设备的研究与应用推广。八十年代发明高效纤维过滤器，获国家发明三等奖、联合国发明创新科技之星奖，并被列为国家级重点科技新产品，取得中、美、德、芬兰、英、意、法、日等国专利。从八十年代至今发表了大量学术论文及专著，取得了较好的社会和经济效益。主要论著有《工业锅炉水处理及水质分析》、《ILY - 高效过滤器的研制》、《水的预处理与活性炭的再生》、《ILY - 高效过滤器滤层状态及其对过滤性能的影响》、《ILY - 高效过滤器水头损失公式的推导》、《高效纤维过滤器的原理及应用》、《ILY - 高效过滤器效率公式的建立》、《ILY - 高效过滤器的工业应用》、《企业行为对环境的影响》等。

范德顺 北京化工大学机械工程学院副教授，化学工业机械设备标准化技术委员会委员，一直从事离心机、混合机和过滤器的教学和设计研究工作，并取得多项国家专利。主持设计的WJ - 540卧式进动离心机荣获1996年北京市科学技术进步奖。主要论著有《材料力学解法技巧》、《离心机》及《实用应力分析》等，后者荣获1998年度北京市科学技术(科技专著)进步奖。

黄 钟 北京化工大学机械工程学院教授，从事应用力学的教学和研究工作。主要论著有《机械强度与刚度计算》、《材料力学解法技巧》及《实用应力分析》等，其中《实用应力分析》荣获1998年度北京市科学技术(科技专著)进步奖。

符号说明

A	面积、常数	M	质量、力矩
a	面积、常数、距离、绝对加速度	m	质量、质量比
B	常数、变化系数	N	转速
b	实验常数	n	指数、个数、压缩系数
C	滤液浓度、校正因子	O	
c		P	功率
D	筒径	p	压力
d	粒径、直径	Q	体积流量
E		q	表观速度
e	空隙比	R	半径、阻力
F	力、可滤性参数	r	半径
f	摩擦系数、分离因数	S	振荡力
G	级效率	s	表面积
g	重力常数	T	动能
H	总压头、滤饼层高度	t	时间
h	过滤层高度	U	平均速度
I	转动惯量	u	
i		V	体积
J	轴转动惯量	v	速度、体积
j		W	
K	常数、惯量比	w	固体颗粒重量
k	渗透率	X	
L	长度	x	坐标
l	长度	Y	
		y	坐标

Z		μ	动力粘度、摩擦系数
z	坐标	ν	运动粘度
α	平均比阻、实验常数、 角度	ξ	压力分布函数
β	指数、实验常数、角度	ρ	液体密度
γ	角度	Σ	当量沉降面积、求和号
Δ 、 δ	差值、孔隙直径	σ	比沉积量
ε	孔隙度	τ	环向分量
ζ	无因次压力	ϕ 、 ψ	角度
η		Ψ	角度、球度
θ	角度、时间	Ω	角速度
λ	无因次径向坐标	ω	角速度

目 录

第一章 总论	(1)
1-1 离心分离过程的分类	(1)
1-2 离心机的分类及应用	(4)
1-3 过滤过程的分类	(11)
1-4 过滤机的分类	(13)
1-5 工业水处理	(17)
第二章 渗流物理和过滤理论	(21)
2-1 多孔介质及其特征量	(22)
2-2 孔隙度的测量方法	(24)
2-3 达西定律	(27)
2-4 滤饼的阻力与压缩性	(34)
2-5 过滤过程的类型	(41)
2-6 深层过滤的机理	(46)
2-7 计算过滤器压力降的主要方法	(54)
第三章 过滤式离心机	(60)
3-1 三足式离心机	(60)
3-2 离心力卸料离心机	(72)
3-3 反跳环式离心机	(82)
3-4 振动式离心机	(88)
3-5 控制环离心机	(95)
3-6 过滤式螺旋卸料离心机	(106)
3-7 双级活塞推料离心机	(108)

3-8	上悬式自动卸料离心机	(111)
第四章	进动离心机	(115)
4-1	工作原理	(116)
4-2	消振原理及措施	(121)
4-3	章动角的调节和停留时间计算	(130)
4-4	料层分布	(141)
4-5	工业应用	(143)
5-6	物料滑动速度的测量技术	(153)
第五章	沉降式离心机	(156)
5-1	离心沉降理论	(156)
5-2	管式离心机	(168)
5-3	盘式离心机	(175)
5-4	螺旋卸料沉降式离心机	(178)
5-5	无孔转鼓离心机	(181)
5-6	设备选择的影响因素	(183)
第六章	水力旋流器	(185)
6-1	旋液的流型	(185)
6-2	悬浮颗粒的运动分析	(187)
6-3	效率预测	(189)
6-4	压强降	(193)
6-5	设计参数的合理选择	(195)
6-6	理论能力系数	(199)
6-7	盘式旋流器	(200)
第七章	相似理论与类比设计	(202)
7-1	量纲分析法简介	(202)

7-2	相似准则	(210)
7-3	在固液分离中的应用	(212)
第八章	粒状滤料过滤装置	(217)
8-1	粒状介质过滤机理	(217)
8-2	过滤材料	(221)
8-3	过滤过程中的水头损失	(226)
8-4	滤层的清洗与配水系统	(229)
8-5	压力式过滤器	(234)
8-6	各种滤池	(239)
8-7	混凝过滤	(244)
第九章	纤维深层过滤器	(248)
9-1	纤维球过滤器	(249)
9-2	高效纤维过滤器	(266)
9-3	其他纤维过滤器	(279)
第十章	加压过滤	(292)
10-1	加压式转鼓过滤机	(292)
10-2	压滤机	(296)
10-3	多级旋叶压滤机	(312)
第十一章	真空过滤机	(316)
11-1	水平带式真空过滤机	(316)
11-2	转鼓真空过滤机	(321)
11-3	转盘真空过滤机	(328)
11-4	浓缩过滤机	(330)
11-5	水平回转翻盘真空过滤机	(333)

第十二章 过滤介质 (336)

12-1 过滤介质分类 (336)

12-2 过滤介质的选择方法 (351)

12-3 织物的精加工和性能试验 (355)

第十三章 膜分离方法简介 (358)

13-1 膜分离过程的传递机理 (358)

13-2 膜的结构特性 (363)

13-3 典型的膜分离设备 (369)

13-4 错流微滤膜分离 (377)

13-5 膜污染的机理及防止措施 (381)

参考文献 (385)

第一章 总 论

过滤(filtration)与分离(separation)统称为固液分离(solid - liquid separation)，它是一种重要的单元操作。人们之所以对它产生浓厚的兴趣，主要是因为，第一，固液分离装置已成为一种量大面广的通用设备，广泛地应用于国民经济的各个方面；第二，固液分离的适用领域到目前为止仍在不断扩大并显示出巨大的经济效益和社会效益。

固液分离技术的国际性活动也非常活跃，继首次世界过滤会议 1974 年在巴黎召开之后，1979 年又在伦敦举行了第二届会议。由英国过滤学会主办的过滤技术会议和大型展览会也规定每逢奇数年举行。起初这些会议所讨论的内容范围很窄，涉及面不广；以后则面貌一新，开始涉及到适应时代发展而不断获得进步的固液分离新技术、新设备和新工艺，以及节能、资源的有效利用以及环保等社会呼声很高的课题。为适应社会上不断高涨的降低能耗的要求，目前迫切需要开发高分离速度、高脱水度、高分离精度的高性能固液分离技术。

作为总论，本章首先介绍固液分离概况以及离心机和过滤机的分类和应用，在以后诸章将对它们进行比较深入的专论。

1 - 1 离心分离过程的分类

借助离心机所产生的离心力场来分离非均相物系，是一种极为有效的方法，并称之为离心分离，它是许多新的工业过程的基础。离心分离方法可以相当精确和迅速地分离极不相同的非均相液态物系，例如原油和聚氯乙烯树脂悬浮液、润滑油和铵盐、煤泥和淀粉悬浮液、变压器油和酵母悬浮液。

一般来说，工业悬浮液和矿浆可以用两种方法进行离心分离：第一种方法是采用分散相的体积力(离心惯性力)进行分离；第二种方法则是利用分散介质和部分分散相的体积力进行分离。第一种情况所使用的设备为无孔转鼓离心机，而第二种则采用有孔转鼓离心机。

尽管离心力场的特性决定了这些过程间存在着重大差异，但仍可将无孔转鼓的分离与重力场中的澄清过程相比，有孔转鼓的离心分离可与矿浆等的过滤或压滤过程进行类比。

采用无孔转鼓离心分离悬浮液和矿浆的过程又可以分为离心澄清和离心沉降。前者是指借助于离心机来有效地清除液体中含有为数不多(小于5%)杂质的过程。这一过程可以视为在离心力场作用下液体中固相颗粒的自由沉降。例如，从清漆和润滑油中清除污垢和杂质，以便使清漆和润滑油再生；从丁醇中离析氧化钛以及从液体中分离出细菌等均可称作离心澄清。

离心沉降则是分离含有大量固相的悬浮液的过程，例如从煤泥中分离出水分，从污水中离析出固相等都属于离心沉降过程。离心沉降一般分为三个过程：(1)固相沉降；(2)沉渣压实；(3)从沉渣孔隙中部分清除液体。

采用有孔转鼓离心分离悬浮液和矿浆的过程称为离心过滤。它是靠离心惯性力场的作用而实现固液分离的。在一般情况下，它可分为下列三个过程：(1)过滤和形成滤渣，即在液体通过离心机转鼓多孔壁时将悬浮于液体的颗粒分离出来；(2)从所形成的滤渣中压出液体；(3)从滤渣中排除由分子力所保留的那部分残余液体。

形成滤渣的离心过滤与普通过滤极为相似，过滤后即能从滤渣中压出液体并同时滤渣压实，然后再排除颗粒各接触处以及颗粒表面所剩余的液体。例如，从洗涤液中分离间硫氮杂茛硫醇和从母液中分离亚硝基酚就是经过上述三个过程的离心过滤的实例。

由挤压与离心分离薄膜液体和毛细管液体所组成的过程称作离心挤压，例如硫酸铵的离心分离过程。只进行排除薄膜液体和毛细管液体的过程则称作离心干燥。在此情况，除薄膜液体和毛细管液体被排除外，液体也会因蒸气被流经转鼓壁的空气流带走而蒸发。

通常将乳浊液的离心分离称为乳浊液分离，其目的在于分离乳浊液或者将其浓缩。这一过程是在无孔转鼓中进行的，相当于在重力场中澄清乳浊液。从润滑油中将水分分离掉就是这种过程的一个典型实例。

上述离心分离过程的分类，可通过图 1-1 进行演示。

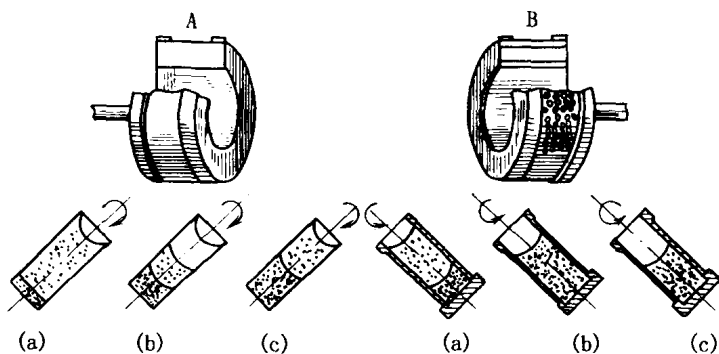


图 1-1 离心分离过程分类示意

A—无孔转鼓的离心分离(a)澄清；(b)和(c)离心沉降(固相沉降和压实沉降)

B—有孔转鼓的离心分离(离心过滤)(a)形成滤渣；(b)压实滤渣；

(c)排除薄膜液体和毛细管液体

与其他工艺过程的分类一样，离心分离过程也可以分为间歇式、连续式和混合式三种。

对于间歇式，其各个阶段或工序是在一台设备或机器上，但在不同时间中实现的。间歇离心分离时，从装料到卸料的时间间隔中，液相不断地从旋转着的转鼓中排出。间歇过程的某些参数(例如过滤速度、废液的固相浓度等)随时在变化。

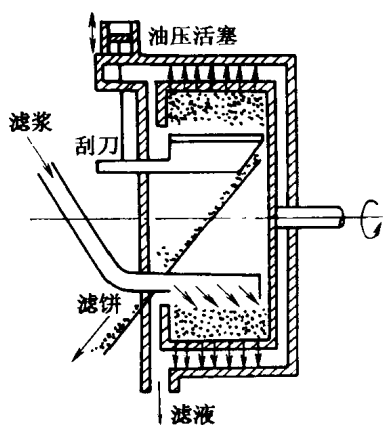


图 1-2 卧式刮刀卸料离心机

采用卧式刮刀卸料离心机 (图 1-2) 分离浓缩过的悬浮液，就是一个典型的间歇式离心分离过程。在缓慢旋转时，将物料装入离心机转鼓，然后使转鼓的转速达到最大值。当转鼓作等速旋转时，实现离心分离和洗涤产品。最后，制动转鼓，利用刮刀或刮板将滤渣从鼓壁上刮下。然后再重新重复这一生产循环。

对于连续式，其特点是所有各阶段同时进行，状态稳定和连续地卸出最终产品。在理想情况下，由于物料在转鼓任何一点或任何截面上状态都是稳定的，所以在过程进行的全部时间里有关参数或物理量始终保持不变，此时转鼓的转速是恒定不变的。离心机连续和断续地卸出由分离所得的产品，而且其生产能力和过程速度一直保持不变。例如，用螺旋卸料沉降离心机处理悬浮液，用碟片式分离机和管式高速离心机分离乳浊液就都是这种连续离心分离过程的典型代表。

用间歇地从周边将聚集于转鼓的沉渣卸出的碟式分离机连续澄清液体，可视为混合离心分离过程的例子。还可以将采用管式高速离心机澄清液体看作是混合离心分离过程，它在很长时间内连续地澄清液体而在间歇停车时卸出沉渣。

1-2 离心机的分类及应用

按传统的分类方法，可将离心机分为过滤式和沉降式两大类，这两类又可按其出料方式或结构特征分为不同类型，如表 1-1 和表 1-2 所示。

表 1-1 过滤式离心机类型

型 式 用 途		刮刀卸料		活塞推料		螺旋卸料	离心力卸料	振动卸料
		立式	卧式	单级	多级			
适用范围	分 级	×	×	×	×	×	×	×
	浓 缩	×	×	×	×	×	×	×
	澄 清	×	×	×	×	×	×	×
	脱 水	○	○	○	○	○	○	○
	滤并洗涤	○	○	△	○	△	△	△
	结晶破碎	○	△	○	○	△	○	○
	固-液分离	×	×	×	×	×	×	×
	固-液-液分离	×	×	×	×	×	×	×
分 离 因 数		<1500	<1500	<700	<1000	<1500	<2000	<100
主 要 用 途		砂糖、葡萄糖分离、一般化学、食品工业脱水分离	石膏脱水、淀粉分离、一般化学、食品工业脱水分离	尿素、食盐、硫酸铵等的脱水	尿素、食盐、硫酸铵等的脱水、洗糖的脱水	硫酸铵、芒硝、食盐、尿素的脱水	葡萄糖、砂糖分离、硫酸铁、石膏脱水	煤粉分离

表 1-2 沉降式离心机类型

型 式 用 途		碟 式			管 式	撇液式	螺旋卸料	
		人工排渣	活塞排渣	喷嘴排渣			圆锥形	圆柱形
适用范围	分 级	△	△	△	△	△	△	△
	浓 缩	△	○	△	○	△	△	△
	澄 清	○	○	○	○	△	△	○
	脱 水	×	×	×	×	△	○	○
	滤并洗涤	×	×	×	×	△	△	△
	结晶破碎	×	×	×	×	△	△	△
	液-液分离	○	○	○	○	×	×	×
	固-液-液分离	△	○	○	△	△	×	×
分 离 因 数		6000~8000	6000~8000	3000~8000	<15000	<1000	<4000	<4000
主 要 用 途		动植物油的精制, 矿物油的精制, 奶油分离	菌体分离, 淀粉乳浓缩	动植物油、矿物油的精制, 果汁澄清	淀粉乳精制, 废弃物分离	合成树脂脱水, 煤粉分离	下水污泥脱水, 废水污泥脱水	

注: ○: 最适用 △: 可适用 ×: 不适用

除表 1-2 所列的沉降离心机外，旋液分离器也属离心沉降的一种装置，近年来它已广泛应用于化工、冶金、医药及食品等工业领域，而且结构简单、价格便宜，本书将在第六章作简要介绍。

离心机所产生的离心力场的加速度 $\omega^2 r$ 很能代表离心机的特点，但在实践中便于探讨的却不是这个值，而是它与重力加速度 g 的无因次比

$$F_r = \omega^2 r / g$$

即所谓离心机的分离因数。

加大角速度 ω (被迫缩小转鼓半径 r 时) 在实践中可以取得分离因数的最大值。当然， ω 和 r 取决于离心机的结构特性。增大分离因数就必然会对与强度条件和稳定性条件等有密切关联的结构提出特殊要求。

在工程上常习惯于用诺模图(图 1-3)来计算分离因数 F_r 。图中 D 表示转鼓直径，单位取米； n 表示转速，单位为每分钟转数； $v = \pi n D / 60$ 表示环向速度，单位取米/秒。例如，若已知转鼓直径 $D = 800\text{mm}$ ，转速 $n = 1100\text{min}^{-1}$ ，则从图 1-3 立即可查找得此离心机的分离因数 $F_r \approx 540$ ，环向线速度 $v \approx 46\text{m/s}$ ，故使用起来非常方便。

由于分离因数 F_r 的大小常常决定着离心机的结构特点，故按此也可有条件地将离心机分成两类：常速离心机 ($F_r < 3500$) 和高速离心机 ($F_r > 3500$)。

在所有固液分离设备中，连续操作的离心机堪称最佳技术和最经济的选择。因为它们可以从大量物料中脱去水分，使最终的湿含量尽量降低，且只需要较小的占地空间、能源和时间。选择合适的离心机可以显著地降低干燥费用，甚至于不通过干燥就能达到或超过用户所要求的湿含量。

本书在下文所介绍和讨论的各种离心机，可为读者正确选型提供合理化建议，以期获得最大的社会效益和经济效益。