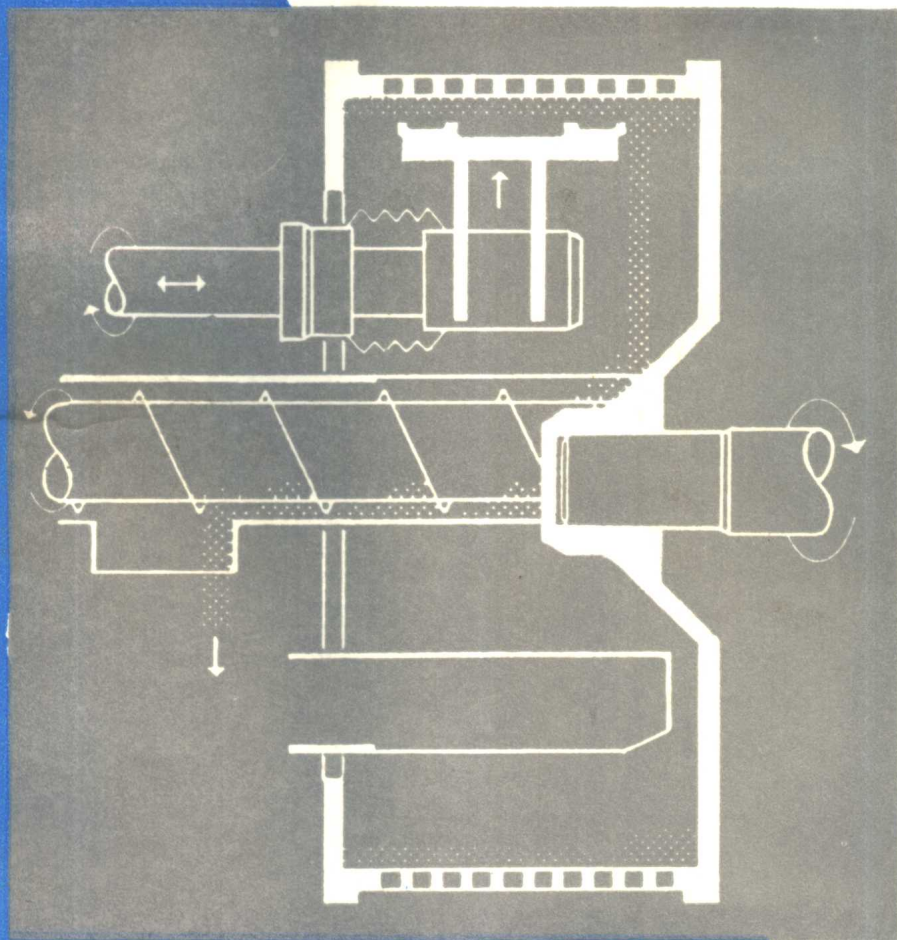


[英] L·斯瓦罗夫斯基 著

固液分离

第二版



化学工业出版社

固 液 分 离

第 二 版

〔英〕 L·斯瓦罗夫斯基 著

朱企新 金鼎五 等译

化 学 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书根据L. Svarovsky 所著《Solid-Liquid Separation》第二版所译。

本书共分二十章,分别论述了固液分离过程的基本理论和设备,以及与固液分离相关的聚凝,絮凝,助滤剂,滤饼洗涤等方面的问题,并系统介绍了固液分离过程的新进展。较第一版补充较多的内容,增加了限制滤饼增长的方法及浮选两章。

本书可作为化工、轻工、制药环保类高等院校有关专业本科生、研究生的教学参考书,亦可供生产、研究、设计等部门的工艺和设备方面的工程技术人员参考。

参加本书翻译的有金鼎五(第一章)、朱企新(第十四、十五、十八章)、李恩贵(第二十章)、赵宗艾(第二章)、宗润宽(第十一、十七章)、程金凤(第十、十五、十六章)、傅振铎(第八、九章)、张允任(第十四章)、赵扬(第十二、十三、十九章)、梅文志(第四、七章)、李建明(第三章)、杜燕(第五、六章)。全书由金鼎五、孙启才、朱企新审校,并约请魏钟、司克杰审校了第十、十五、十六章。

Radislav Svarovsky

Solid-Liquid Separation

Second Edition

London ~~Boston~~ Durban Sydney Toronto Wellington 1981

固 液 分 离

第 二 版

朱企新、金鼎五 等译

责任编辑: 骆文敏

封面设计: 任 辉

化学工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

开本850×1168 1/32印张18 1/2 字数52.4千字

1990年4月第1版 1990年4月北京第1次印刷

印 数 1—15 00

ISBN 7-5025-0394-3/TQ·284

定 价3.30元

译 序

本书是根据1981年出版的, L·斯瓦罗夫斯基等几位固液分离方面的专家共同撰写的“Solid-Liquid Separation”(Secon Edition)译出。

与1977年的第一版相比, 第二版有了较大的变动。根据近期固液分离技术的进展, 新增加了第十八章“限制滤饼增长的方法”第十九章“浮选”两章; 重新改写了第十章“助滤剂”、第十二章“压滤”、第十六章“滤饼脱水”、第十七章“过滤介质及其性能评定”; 在第三章“固液分离效率”中增加了串联和多级旁通分离设备系统的应用, 第四章“聚凝和絮凝”中增加了同向絮凝理论、实验室试验、实用絮凝剂、未来的发展等(4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11), 第五章“重力浓缩”中增加了高容量增稠系统、浓缩机和圆锥选煤机的絮凝剂供给系统(5.5, 5.6), 第九章“过滤原理”中增加了过滤理论的研究进展(9.7), 第十三章“真空过滤中增加了过滤机的选型、水平带真空过滤机、滤饼的形成、带式过滤机与回转转鼓真空过滤机的对比、带式过滤机是最有效的吗? 占地面积等(13.3, 13.4, 13.5, 13.6, 13.7, 13.8, 13.9), 第十五章“滤饼洗涤”中增加了连续过滤机的滤饼洗涤、洗涤排出液连续混合的间歇洗涤、脱水滤饼的加压洗涤、连续逆流洗涤系统(15.3, 15.4, 15.5, 15.7)等。

本书系统介绍了固液分离过程的新进展, 着重讨论了固液分离过程的基本理论和设备, 以及与固液分离相关的主要问题, 如聚凝与絮凝、助滤剂、洗涤等的应用, 并重点介绍了具体的工程应用。

随着科学技术与工业化程度的发展, 固液分离技术所涉及的学科、领域日益扩大, 所以自第一版问世之后不到五年, 作者又推出了内容有较大更新、变动、补充的第二版, 在此译出以供读者参阅。

在本书翻译时, 从翻译、审校以及组织等各方面始终得到余国琮教授的具体指导与帮助, 在此深表感谢。

原书中的排印错误，译文中均作了改正，但由于译、校者水平有限，错误难免，望读者指正。

译 者

1987年5月

目 录

第一章 固液分离导论 流体与颗粒的相互作用	1
1.1 固液分离过程	2
第二章 液体中悬浮的颗粒特性	6
2.1 绪言 颗粒特性的讨论	6
2.2 颗粒粒度的定义	7
2.3 颗粒粒度分布类型	9
2.4 集中趋势的量度	12
2.5 数据表示法	17
2.6 取样	25
2.7 颗粒粒度的实验室测定	26
2.8 在线测量技术	30
参考文献	32
第三章 固液(气)分离效率	33
3.1 绪言	33
3.2 基本定义和质量平衡方程	33
3.3 E_T 、 $G(x)$ 和两种产品粒度分布间的基本关系	41
3.4 底流与通过量的比值相当大时效率定义的修正	54
3.5 串联和多级旁通分离设备系统的应用	61
参考文献	64
第四章 聚凝和絮凝	65
第一部分	65
4.1 绪言	65
4.2 胶体模型	67
4.3 电动现象和 ζ 电位	74
4.4 ζ 电位的实际应用	77
4.5 用聚合电解质的絮凝	82
4.6 其他需要考虑的一些问题	86
参考文献	88

第二部分	88
符号	88
4.7 绪言	89
4.8 理论	90
4.9 实验室试验	97
4.10 实际应用的絮凝器	105
4.11 未来的发展	121
参考文献	123
第五章 重力浓缩	125
符号	125
5.1 绪言	126
5.2 沉降原理	126
5.3 影响沉降的因素	129
5.4 用于单元操作的各种浓缩机	131
5.5 高容量浓缩系统	144
5.6 浓缩机和圆锥选煤机的絮凝剂供给系统	150
附录5.1	153
参考文献	169
第六章 水力旋流器	170
6.1 绪言	170
6.2 液体流型	171
6.3 悬浮颗粒的运动	173
6.4 水力旋流器效率的预测	174
6.5 压力降	182
6.6 设计参数对性能的影响	183
6.7 水力旋流器的设计和比例放大	184
6.8 现有的并联旋流器的各种布局	193
6.9 水力旋流器的应用	194
附录6.1	196
参考文献	197
第七章 离心沉降分离	199
7.1 绪言	199
7.2 理论性能预测	200

7.3 设备	208
7.4 离心分离设备选型的影响因素	220
参考文献	222
第八章 筛分	223
8.1 绪言	223
8.2 筛的设计	225
8.3 筛的功能	226
8.4 筛的类型	228
8.5 筛面材料	234
8.6 筛分效率	241
8.7 脱水筛的设计	243
附录8.1 脱水筛的应用	248
附录8.2 矩形孔筛筛分效率计算公式	254
参考文献	256
第九章 过滤原理	257
9.1 绪言	257
9.2 流量速率与压力降的关系	260
9.3 过滤操作——基本方程, 不可压缩滤饼	263
9.4 过滤操作——基本方程, 可压缩滤饼	274
9.5 比滤阻、孔隙率和比表面之间的关系	277
9.6 滤饼水份修正——物料平衡	278
9.7 过滤理论的研究进展	280
参考文献	281
第十章 助滤剂	282
10.1 绪言	282
10.2 使用范围	282
10.3 助滤剂的特性	283
10.4 助滤剂的种类	284
10.5 助滤剂过滤	288
10.6 预敷——掺浆(压力)过滤系统	288
10.7 转筒预敷层过滤机	295
参考文献	301
书目	

第十一章 深层过滤	302
11.1 绪言	302
11.2 理论	303
11.3 设计和操作	311
11.4 今后的发展	320
参考文献	321
第十二章 压滤	322
12.1 绪言	322
12.2 压滤机	323
12.3 加压过滤机	327
12.4 变容积式过滤机	331
12.5 最佳循环时间	341
参考文献	342
第十三章 真空过滤	343
第一部分	343
符号	343
13.1 绪言	344
13.2 真空过滤设备	345
13.3 过滤机的选型	368
13.4 过滤机的性能	369
附录13.1	378
参考文献	383
第二部分 水平带式真空过滤机	384
13.5 绪言	384
13.6 滤饼的形成	385
13.7 带式过滤机与回转转鼓真空过滤机的对比	386
13.8 带式过滤机是最有效的吗?	388
13.9 占地面积	394
第十四章 离心过滤	395
14.1 绪言	395
14.2 通过过滤离心机滤饼的液流	395
14.3 离心力场中的过滤时间	403
14.4 离心力场中滤饼固有渗透率的测量	408

14.5	离心力场中旁流过滤过程	410
14.6	过滤离心机的设计和操作特性	420
14.7	卧式活塞推料离心机的特性	429
附录14.1		434
参考文献		436
第十五章	滤饼洗涤	437
符号		437
15.1	引言	439
15.2	置换洗涤	440
15.3	连续过滤机的滤饼洗涤	466
15.4	洗涤排出液连续混合的间歇洗涤	471
15.5	脱水滤饼的加压洗涤	472
15.6	再生料浆的洗涤	472
15.7	连续逆流洗涤系统	475
参考文献		484
第十六章	滤饼脱水	485
符号		485
16.1	绪言	486
16.2	定义	487
16.3	空气置换液体	488
16.4	滤饼龟裂	505
16.5	压缩脱水 (压榨)	505
参考文献		506
第十七章	过滤介质及其性能评定	507
17.1	绪言	507
17.2	通用过滤介质	509
17.3	滤芯	510
17.4	硬质多孔介质	512
17.5	非织造过滤介质	513
17.6	编织金属网	515
17.7	纤维织物	518
17.8	材料的选择	521
17.9	过滤介质性能评定	524

17.10 结束语	525
参考文献	526
第十八章 限制滤饼层增长的方法	528
18.1 绪言	528
18.2 利用质量力除去滤饼	529
18.3 机械法排除滤饼	530
18.4 通过逆向流动排除滤饼	530
18.5 通过振动来阻止滤饼的沉积	531
18.6 十字流过滤	531
参考文献	541
第十九章 浮选	542
符号	542
19.1 绪言	543
19.2 疏水性与浮选	544
19.3 浮选系统中气泡的形成	545
19.4 颗粒尺寸与浮选能力	546
19.5 气泡——颗粒的聚集	547
19.6 浮选的宏观动力学模型	548
19.7 工厂设计参数	551
参考文献	565
第二十章 固液分离设备的选择	567
20.1 绪言	567
20.2 沉降或过滤	567
20.3 沉降设备	569
20.4 过滤设备	572

第一章 固液分离导论

流体与颗粒的相互作用

L.Svarovsky

顾名思义,固液分离技术涉及的是两相,即固相和液相从悬浮液中的分离。它为许多过程所采用,其目的在于:

1. 回收有价值的固相 (含弃液相),
2. 回收液相 (含弃固相),
3. 同时回收固液两相,
4. 不回收任何一相 (但有其它目的,比如防止水污染)。

一个理想的固液分离过程应能做到液相走一条道,而干固体颗粒走另一条道。遗憾的是,没有一个分离装置能完美地操作,总存在着这样或那样的不足。典型情况 (见图 1.1) 是液相中夹带若干细小的固体颗粒,而固相中又存有若干液体,后者更是一个普遍问题。这种分离的不完善可用两种方式表征。一是分离效率,表示固相的质量回收率 (过滤操作中也称作截留率),通常写成百分数;二是含湿量 (重量百分比),表示回收的固相的干湿程度。这两个概念将在第3章和第16章中进一步讨论。有时为了调整固相中积存的液体,还需对固相进行洗涤,用洗液来置换母液。

除固液分离以外,还常常要求从产品中除去过粗或过细的颗粒 (除砂或脱泥)。这一过程叫做分级或固固分离。它可以在许多固液分离设备上实现,因为这些设备所

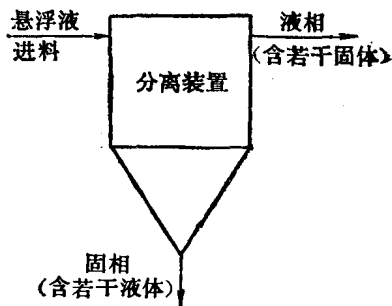


图 1.1 分离装置示意图

用的分离原理都与颗粒大小密切相关。在固液分离之先，也可预先进行分级，以使用最适宜的设备处理不同粒度范围的物料。

1.1 固液分离过程

固液分离过程按其涉及的原理分类（见图1.2）。如果液相受到限制而颗粒能在其中自由运动（由于加速度场的作用），我们就将其归类于沉降或浮选。对于沉降过程，固液两相必须存在密度差。如果利用介质使固相受到限制而允许液相穿过，我们就将其归类于过滤或筛滤，这类过程就无需密度差。

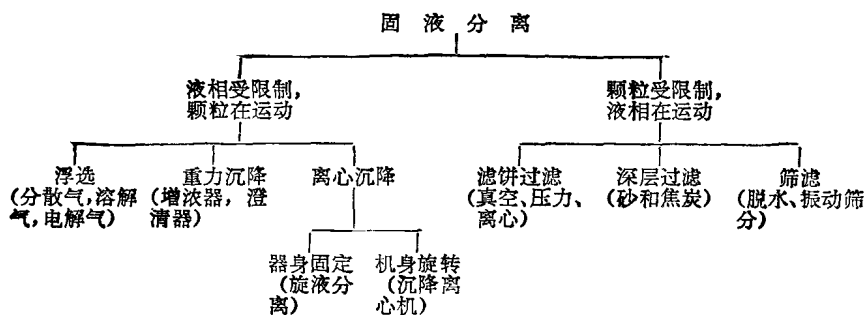


图 1.2 固液分离过程分类

上述两类的进一步划分见图 1.2。本书将对其中大部分过程进行适当深入的探讨，此处仅做简短的叙述。

1.1.1 浮选

浮选过程是以悬浮液内产生空气（或其它气体）泡和固体颗粒附着于气泡上为前提。固体颗粒由于浮力作用上升至水面后即可刮除。根据气泡产生的方式浮选可分为分散气、溶解气和电解气浮选三类。

在矿物分离中，浮选早已得到应用。而在其它领域例如造纸、精炼和污水处理中，被认为是一种固液分离的有效方法。

1.1.2 重力沉降

重力沉降是在重力作用下，将悬浮液分离为含固量较高的底流和清净的溢流的过程。其先决条件是在固相和悬浮液相间存在密度差。

几乎所有的连续沉降生产设备都做成比较简单的沉降槽。根据分离的目的区别沉降过程。如果注重于溢流的澄清度，则该过程叫做澄清，进料的浓度一般较稀。如果旨在获得稠厚的底流，则该过程叫做增浓，进料的浓度一般较浓。聚凝剂常用于强化沉降过程。

1.1.3 离心沉降

离心设备增加了作用在颗粒上的体积力，从而将沉降分离扩展到细小颗粒和乳浊液，后者在重力场下是不起作用的。现有的离心沉降设备分为器身固定的(旋液分离器)和机身旋转的(沉降离心机)两类。

1.1.3.1 旋液分离器

旋液分离器无回转部件，依靠切向加料产生旋流。旋液分离器中速度梯度很高，由此产生的剪切作用，将破坏可能产生的团块。这一点对分级过程十分有利却不是分离过程所要求的。然而，由于其操作可靠，费用低廉，还是在分离和分级两种过程中得到了广泛的应用。在分离过程中，它主要用于增浓。

1.1.3.2 沉降离心机

沉降离心机有一转鼓，悬浮液随转鼓旋转而一同转动。由于机内流体无显著剪切作用，使得沉降离心机最适用于分离操作，但它也常用于分级操作。现有的五类离心机中，碟式(喷嘴排渣)和沉降式(螺旋推料)离心机操作完全连续，沉降转鼓式离心机操作半连续但为全自动。沉降离心机分离出的固体含湿量较低(尤其对于沉降转鼓式和螺旋卸料沉降离心机更是如此)，一般情况下分离效率也较高。

1.1.4 滤饼过滤

滤饼过滤开始时，由于有渗透性的较薄的过滤介质的筛滤作用，使颗粒沉积在介质的表面。当刚有一层滤饼在介质表面形成，沉积作用即转移到滤饼本身，随后介质仅起支撑作用。

传统的过滤设备中，颗粒和液相一齐垂直于过滤介质运动，滤饼不受扰动。目前采用了几种方法，其中有机机械的和水利的，人为地限制滤饼层生长以保持高的过滤速率。可压缩滤饼的脱水可通过机械压榨作进一步改进，该过程是在滤室容积可变的过滤机内完成的。

滤饼过滤设备通常根据促使液体穿过多孔介质的推动力来分类，

有真空过滤机、加压过滤机和离心过滤机。

1.1.5 深层过滤

分离含固量极低的悬浮液是用深层过滤器，其床层有一定厚度。固体颗粒积聚在床层内部而不在表面。一般情况下，它回收的颗粒小于床层内部孔隙。大多数深层过滤为间歇操作，在重力下可以安排底部或顶部进料；也有一些是加压下进料，从而能成为连续式过滤器。

1.1.6 筛滤

与表面过滤器相似，筛滤也有赖于液相穿过介质流动。在此情况下，介质孔径较大，分离的推动力为重力。筛滤通常用于颗粒分级，但同样适用于粗颗粒和高凝聚态悬浮液的脱水。为确保所有前来后到的物料都有机会接近筛孔并防止筛孔堵塞，筛滤常辅以振动或其它形式的运动。

各种设计的粗滤器 (Strainers) 也属此类，它们常被置于悬浮液中截流为后继过程所不容许的粗颗粒。

1.1.7 滤芯式过滤器

这种滤器由滤纸、滤布或孔径低达 $0.2\mu\text{m}$ 的各种滤膜做成并易于更换。悬浮液直接泵入滤器，当滤器内积满颗粒，压差变得更高后，即予更换。

很难说清此处是滤饼过滤还是深层过滤机理占优，但对大多数滤芯过滤器来说很可能是后者。

为减少滤芯的更换次数，滤芯通常限于滤液的精滤，处理浓度低于 0.01% (重量) 的悬浮液。

滤芯过滤器的最重要特征包括它的级别 (穿过滤芯的最大球形颗粒)，压差与容渣量之间的关系和滤芯结构失效前所允许的最大压力降。

在果汁、药液和液压油生产中，滤芯过滤器用于精滤液体至所要求的透明度和除菌。

1.1.8 磁力分离

传统的磁力分离技术是在矿物处理中长期发展起来的，旨在除去杂铈或浓缩磁性矿石。它一般限于强磁性材料的分离，使用最广的是

鼓式磁分离器。磁性颗粒和非磁性颗粒通过此机进行分选。

在含杂质的流体中放进一具永磁“过滤器”可用来分离细小的铁磁性颗粒，这是传统磁分离器的扩大应用。这种过滤器结构非常简单，主要用于净化液压回路中的流体。其磁体部分一般采用陶瓷磁铁，合金磁铁或磁化钢球。清洗时，先抽出整个过滤器，除去磁铁，然后刷洗捕集表面，全部由人工完成。流速较低时，该过滤器可除去小至 $0.1\mu\text{m}$ 或更小一些的铁磁性颗粒，同时由于若干非铁磁性杂质与铁磁性颗粒聚成一体，所以也能伴随着除去。

近来高梯度磁力分离(HGMS)颇引人注目。它采用电磁铁使磁力大为增强，因而能够大规模地分离非常细小、磁性较弱的顺磁性颗粒。

高梯度磁力分离的特色在于它具有一层铁磁性钢毛（如不锈钢钢毛）作为过滤介质，它松散地堆积在均匀磁场中（堆积密度约为5%），流体流过这层钢毛行列时，其中弱顺磁性颗粒即被截留。

场强为零时，磁力很小，因此除去磁场后积存在钢毛层中的颗粒很容易清除。高梯度磁力分离器与传统的深层过滤器一样，采用分批操作模式。HGMS的这个特色使它很难根据图1.2分类，因为它的分离原理基于外加的加速度场而操作方式却与过滤器相同。

高梯度磁力分离器的主要优点是效率高，高流速下能在最低压头损失下流过过滤器。

和性能相当的传统分离设备相比，高梯度磁力分离器结构更为紧凑。无可回避，其投资费用极高，但这要视操作规模而定。由于其生产能力与直径的平方成正比，而耗铜量仅与直径本身成正比，因此大规模操作要较原型样机在经济上更为合算。

目前，高梯度磁力分离器在工业上应用极为广泛。在矿物处理工业中，它们用来分离亚微米级弱磁性杂质以增白高岭土。在电力工业（无论是核电厂还是火电厂）中，它们用来净化进料用水。而在造纸工业中，它们似乎较离子交换树脂更为经济。

除现已开发的各个领域，高梯度磁力分离还有许多潜在用途，例如在炼钢工业、煤加工工业和废水处理工业，这里要用磨细的磁铁作为晶种。此外它们还可以用来分离红血球以及从粉尘中回收石棉纤维。

第二章 液体中悬浮的颗粒特性

L.Svarovsky

2.1 绪言 颗粒特性的讨论

颗粒特性是对颗粒系统中颗粒基本性质的描述，是颗粒工艺中一切操作的基础。颗粒大小分布、颗粒形状、密度、表面特性和其它一些颗粒基本特性与液体的粘度、密度等基本性质以及悬浮液的浓度和分散状态等决定着颗粒的沉降速度、滤饼层的渗透性及滤饼的比阻等二次性质。这些特性知识对于固液分离设备的设计和操作来说是很重要的。

当然，若不考虑基本性质，而直接测量二次性质则不仅简单，往往还更为可靠。实际上是这样做的，但最终的目的还在于能从某个基本性质来预测二次性质。例如在流体力学中，当需要设计一个管道系统时，我们不去测定管道对流体的阻力，而是测定液体的基本性质（粘度和密度）和管线的基本性质（粗糙度），而后用已知的关系式即可确定阻力。在固液分离中由于这种关系相当复杂，且在许多情况下还不能利用，所以颗粒的基本特性大多只是用来对悬浮液状态做定性的评定，做为选择分离设备的指南。就颗粒粒度来说，粒度越细分离就越困难，而固体的浓度对分离也有很大的影响。Lloyd和Ward⁽¹⁾提出了一张很有用的图，稍加修改成图 2.1 所示。该图以图解方法给出了不同颗粒粒度所适用的固液分离装置的范围。

颗粒粒度对滤饼层的渗透性或过滤比阻影响很大。〔从式(9.36)可明显看出，由于构成滤饼层的颗粒比表面与颗粒粒度成反比，滤饼层比阻 α 用下式给出

$$\alpha \sim 1/x^2$$