

湿法冶金技术丛书

杨守志 孙德堃 何方箴 编著

固液分离

冶金工业出版社

湿法冶金技术丛书

固 液 分 离

杨守志 孙德堃 何方箴 编著

北 京

冶金工业出版社

2003

内 容 提 要

全书共分7章,主要介绍固体颗粒的性质、液体的性质以及固液悬浮系统的性质;过滤的理论及实践,沉降分离的理论及实践;水力旋流器、液固流态化床等固液分离设备的理论及实践;固液分离的放大规律及方法等。

本书的内容汇集了作者多年来在湿法冶金领域中从事固液分离的设计、生产及实验等方面以及化工、轻工、生物化工等领域内从事固液分离工作的相关经验,同时也吸收了近年来国内外专家在此领域内取得的最新成就。

本书可供湿法冶金工作者作为工具书使用,也可供从事冶金、化工、轻工、生物化工等领域的科技人员及大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

固液分离/杨守志等编著. —北京:冶金工业出版社,
2003.5

(湿法冶金技术丛书)

ISBN 7-5024-3220-5

I. 固… II. 杨… III. 固液分离 IV. TQ028.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 011216 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

丛书策划 杨传福 谭学余 加工编辑 王之光 美术编辑 王耀忠

责任校对 侯 璐 责任印制 牛晓波

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2003 年 5 月第 1 版,2003 年 5 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 13 印张; 348 千字; 399 页; 1-3000 册

33.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

出版者的话

《湿法冶金技术丛书》是一套按湿法冶金单元过程编写的丛书。它包括《浸出》、《固液分离》、《离子交换与溶剂萃取》、《还原与沉淀》和《湿法冶金污染控制技术》。

湿法冶金和火法冶金是两种基本的冶金过程。与火法冶金相比,湿法冶金的优点是:(1)适合于处理低品位矿物原料;(2)能处理复杂矿物原料;(3)容易满足矿物原料综合利用的要求;(4)劳动条件好,容易解决环境污染问题。目前,世界上可供开采矿石品位不断下降,资源的综合利用越来越迫切,环境保护的要求越来越严格,对产品纯度要求越来越高,所有这些都会促进湿法冶金技术的迅速发展,并使之越发显得重要。为适应国内外有色金属工业的发展趋势,我们组织中国科学院过程工程研究所、同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室、中南大学冶金科学与工程学院等单位的专家、学者编写了这套丛书。本套丛书的组织和编写工作得到了参编者及其所在单位的热情支持,邓彤研究员帮助我们做了许多方面的工作,在此一并表示衷心的感谢。

湿法冶金流程虽然各种各样,但却都是由若干个单元过程组成的。我们试图通过这套丛书,较系统而详细地将有关湿法冶金各单元过程的实用技术介绍给读者。为此,要求编者撰写时除兼顾各单元过程的基本知识外,把重点放在新技术、新设备、新工艺的实际应用和操作要点上。本书的读者对象为从事湿法冶金、化工和环境保护的科研、生产、管理的工程技术人员,也可作为高等院校相关专业的教学参考书。

前 言

湿法冶金作为一种过程工业,它主要由浸取、固液分离、浸取液净化及溶液中回收金属等过程或单元操作组成。固液分离因不涉及化学反应,属单元操作,相对比较简单。但是它在湿法冶金过程中却占有重要地位,因为它直接关系到金属回收率的高低、环境治理、投资的大小以及生产作业的难易等等。在湿法冶金过程中,通常用于固液分离的设备均比较庞大,占地面积也大,投入的操作人员多,有时投资会占整个投资的一半以上。经常出现由于固液分离技术的成功与否而导致整个生产过程成败的情况。因此,必须对固液分离技术给予高度关注。首先应设计合理,选型适当;进而在生产中能正确处理操作中出现的问题,以便使湿法冶金过程正常运转,保持良好的环境,并达到预期的目标。

本书的内容汇集了作者多年来在湿法冶金领域中从事固液分离的设计、生产及实验等方面以及化工、轻工、生物化工等领域内从事固液分离工作的相关经验,同时也吸收了近年来国内外专家在此领域内取得的最新成果。

本书第1、2、3、7章由中国科学院过程工程(原化工冶金)研究所杨守志(研究员)编写;

第4、5章由中国有色工程(原北京有色冶金)设计研究总院孙德望(教授级高级工程师)编写;

第6章由中国有色工程(原北京有色冶金)设计研究总院何方箴(高级工程师)与杨守志合写。

参与全书审、校工作的有中国科学院过程工程(原化工冶金)研究所陈家镛(中国科学院院士)、中国有色工程(原北京有色冶

金)设计研究总院牟邦立(教授级高级工程师)、中国科学院过程工程(原化工冶金)研究所邓彤(研究员)等同志,特此表示感谢。

编 者

2003 年 1 月

目 录

1 概述	1
1.1 固液分离方法的分类	1
1.2 固液分离的辅助手段	4
1.2.1 分离助剂	4
1.2.2 磁性分离	6
1.2.3 电场分离	8
1.2.4 电泳沉降与电渗析脱水	8
1.2.5 电场过滤	9
参考文献	9
2 固体颗粒性质	10
2.1 固体颗粒的一般物性	10
2.1.1 真密度	10
2.1.2 堆密度	11
2.2 固体颗粒的形状	15
2.2.1 统计平均粒径	15
2.2.2 颗粒形状因数	17
2.2.3 颗粒的球度系数	18
2.2.4 比表面积	19
2.3 颗粒的粒度分布	19
2.4 累计频数分布、累计频率分布与平均粒径	21
2.5 颗粒粒度分布的数学表达式及特征统计变量	23
2.5.1 正态分布	23

2.5.2 对数正态分布	24
2.5.3 罗申-拉姆勒(Rosin-Rammler)分布	25
2.5.4 高登-舒曼分布	28
2.6 颗粒粒度的测量技术和方法	28
2.6.1 场扫描技术	29
2.6.2 流体扫描技术	30
2.6.3 筛分	32
2.6.4 重力沉降法	33
2.6.5 光学测定法	34
参考文献	35

3 固液系统的性质	36
3.1 固液系统的分离性质	36
3.1.1 液体的物理性质	37
3.1.2 固液悬浮液的性质	39
3.1.3 流变学与非牛顿流体	41
3.2 固液系统的胶体性质及絮凝理论	45
3.2.1 胶体的凝聚与絮凝	45
3.2.2 凝聚的机理	46
3.2.3 胶体表面的双电层模型	46
3.2.4 絮凝	50
3.3 颗粒的沉降性质与悬浮性质	56
3.3.1 自由沉降速度	56
3.3.2 干涉沉降	60
3.4 重力沉降与离心沉降	61
3.4.1 重力沉降	61
3.4.2 重力沉降理论及相关模型	62
3.4.3 离心沉降	70
3.5 固液系统的渗流理论及过滤介质	72
3.5.1 过滤介质的材质及结构	72

3.5.2	过滤机理	74
3.5.3	当量孔径	75
3.5.4	过滤介质的截留效率	77
3.5.5	过滤介质对流体的阻力	79
3.5.6	过滤介质的压力降	82
	参考文献	85
4	过滤	86
4.1	过滤的理论	86
4.1.1	过滤速度基本方程式	87
4.1.2	恒压过滤方程式	88
4.1.3	多相过滤理论	90
4.2	过滤设备的分类	91
4.2.1	真空过滤机	92
4.2.2	加压过滤机	92
4.2.3	离心过滤机	93
4.3	真空过滤机的性能与实践	94
4.3.1	真空吸滤盘	94
4.3.2	转鼓真空过滤机	97
4.3.3	圆盘真空过滤机	113
4.3.4	转台真空过滤机(水平旋转圆盘真空过滤机)	119
4.3.5	翻斗真空过滤机(水平旋转翻盘真空过滤机)	123
4.3.6	带式真空过滤机	127
4.3.7	真空过滤机的选型	135
4.4	压滤机的性能与实践	138
4.4.1	板框压滤机	138
4.4.2	厢式压滤机(凹板型压滤机)	149
4.4.3	加压叶滤机	155
4.4.4	微孔管加压过滤机	158
4.4.5	转鼓加压过滤机	158

4.4.6	圆盘加压过滤机(旋叶压滤机)	159
4.4.7	带式压滤机	162
4.4.8	气压罐式连续压滤机	165
4.5	离心过滤机的性能与实践	167
4.5.1	概述	167
4.5.2	三足式离心过滤机	168
4.5.3	卧式刮刀卸料过滤离心机	172
4.5.4	卧式活塞推料过滤离心机	173
4.5.5	翻袋卸料过滤离心机	174
4.5.6	离心力卸料过滤离心机	175
4.5.7	振动卸料过滤离心机	175
4.5.8	进动卸料过滤离心机	176
4.5.9	螺旋卸料过滤离心机	177
4.5.10	虹吸刮刀卸料离心机	177
4.5.11	过滤离心机的选择	178
4.6	滤布及助滤剂的性能与选择	180
4.6.1	滤布	180
4.6.2	助滤剂	187
	参考文献	191
5	沉降分离	193
5.1	沉降分离的理论	193
5.1.1	概述	193
5.1.2	重力浓缩理论及浓密机的计算	193
5.1.3	浓密机参数的计算	202
5.1.4	离心沉降	205
5.2	沉降设备的分类	209
5.2.1	重力沉降设备	209
5.2.2	离心沉降设备	213
5.3	连续沉降设备的性能与实践	214
	VI	

5.3.1	平流沉降槽	214
5.3.2	竖流沉降槽	215
5.3.3	辐流沉降槽	216
5.3.4	沉降过滤器	218
5.3.5	深锥浓缩机(深锥沉降槽)	221
5.3.6	沉降槽(浓密机)的性能参数	221
5.4	新型高效沉降设备的性能与实践	229
5.4.1	倾斜板(或倾斜管)沉降槽	229
5.4.2	向心辐流式沉降槽(浓密机)	230
5.4.3	矿浆直接加入浓缩带的沉降槽(高效浓密机)	231
5.5	离心沉降设备的性能与实践	237
5.5.1	管式离心分离机	238
5.5.2	室式离心分离机	239
5.5.3	无孔转鼓沉降离心机	240
5.5.4	螺旋卸料沉降离心机	241
5.5.5	碟式(盘式)离心分离机	243
5.5.6	沉降离心机的选型	245
5.6	絮凝剂的性能与选择	248
5.6.1	天然高分子絮凝剂	249
5.6.2	人工合成高分子絮凝剂	249
5.6.3	生物絮凝剂	252
5.6.4	絮凝剂的选择	253
5.7	絮凝剂的使用	254
5.7.1	絮凝剂的配制	255
5.7.2	絮凝剂溶液的供给	256
5.7.3	悬浮液(料浆)的 pH 值	257
	参考文献	257
6	颗粒分级设备及固液分离的洗涤效率	258
6.1	颗粒分级设备的理论基础	258

6.1.1	分级效率	258
6.1.2	粒级分离效率(Grade efficiency)	261
6.1.3	总分离效率、粒级分离效率与颗粒粒度分布间的关系 ...	263
6.1.4	分离效率的修正	269
6.1.5	截留颗粒粒度的简易评估法	270
6.1.6	底流分离效率的综合判据	274
6.1.7	多级串联分离设备的效率	275
6.2	固液分离洗涤效率	277
6.2.1	多级逆流洗涤	277
6.2.2	滤饼洗涤	281
6.2.3	滤饼的多级逆流浆化洗涤、过滤	294
6.3	液固流态化分级设备	298
6.3.1	水力分级机	301
6.3.2	流态化分级	304
6.4	水力旋流器的理论基础及工艺参数	317
6.4.1	旋流器基本工作原理	317
6.4.2	水力旋流器数学模型的基本参数	320
6.4.3	水力旋流器工艺参数	325
6.5	水力旋流器的工艺设计及设备选择	332
6.5.1	原始数据准备	332
6.5.2	水力旋流器设备选择和计算	333
6.5.3	产品的产率及粒度分布	335
6.5.4	压强计算及泵池和泵的设计	337
6.6	水力旋流器的应用及实践	339
6.6.1	水力旋流器的功能与其流程的关系	339
6.6.2	多级串联旋流器流程类型及其应用	339
6.6.3	旋流器在不同专业中的应用	342
6.6.4	水力旋流器应用例题	345
	参考文献	357

7 固液分离设备的放大规律及方法	359
7.1 固液分离过程的特点	359
7.2 固液分离的热力学分析	360
7.2.1 熵指数(Entropy index)	361
7.2.2 固液分离判据	362
7.2.3 估计沉淀物的空隙率	365
7.3 建立一个高效的实验室	365
7.4 固液分离生产设备的综合选择	366
7.4.1 固液分离设备的类型	366
7.4.2 沉降设备	367
7.4.3 过滤设备	369
7.5 关于统一滤饼过滤试验判据的探讨及滤饼的抽风干燥	373
7.5.1 引言	373
7.5.2 过滤速度及滤饼的性质	373
7.5.3 根据 SCFT 值确定过滤机的面积	374
7.5.4 滤饼的可压缩性及其对过滤速度的影响	375
7.5.5 SCFT 对压差及滤饼厚度的校正	379
7.5.6 测定 SCFT 的方法及步骤	379
7.5.7 滤饼的脱水干燥	380
7.6 滤饼的洗涤	392
7.7 关于设备放大的安全系数	393
7.7.1 连续过滤机	393
7.7.2 间歇过滤机	393
7.7.3 具体的选型步骤	393
参考文献	395
符号表	397

1 概 述

冶金、化工、轻工、食品、制药、环境治理、生物制品等过程工业无不包括固液分离。即使不属于过程工业的制造业,由于其产品常系固形物,因此也或多或少地依赖固液分离技术。对湿法冶金来说,固液分离的重要性就更为突出了。从某种意义上讲,一个湿法冶金过程的成功与失败,固液分离往往起决定性的作用。如果采用过滤机、离心机等设备,它在投资中的比重很高,有时会占到50%以上,这其中涉及许多因素,除经济因素外,本书将逐步予以分析。

固液分离的最终目的,从理论上说,应是將固液两相完全分开,获得各自纯净的成分:固体及液体。但在实际上很难做到,理论上的目标也就是人类生产活动追求的目标,为此人们努力奋斗,想尽办法,提供不同的手段,为实现这一目标而努力。作为例子,在本书的最后一章,也介绍了固液分离过程的热力学分析的部分成果,虽然它还远未达到实用的阶段,但理论终将为人类的生产活动指引前进的方向,因此它仍有重要的意义。

1.1 固液分离方法的分类

根据目前的发展,如前所述,固液分离基本上是两种方法,即沉降分离与过滤。也可以认为有第三种分离方法使固液两相均处于运动状态,如水力旋流器分级,流态化洗涤等,严格来说,它只能达到分级的目的,而远未达到分离的要求。

沉降分离基本上可分为两种,即重力沉降与离心沉降,或称为弱沉降分离与强沉降分离。重力沉降系借助自然力,故最为经济、少用能源,也可称其为环境友好工艺。虽系弱沉降分离,但均作为固液分离的首选手段。离心沉降、真空过滤、压滤、离心过滤等都

是较强的分离手段,因需借助外力,要消耗较多的能源,从长远来看,亦不可取。为此,采取辅助措施,降低能源消耗,乃是今后必须努力的方向。这些辅助措施包括:(1)采用联合流程:两种或两种以上的分离手段的合理搭配,优化配置。例如沉降与过滤的组合,旋流器与过滤及沉降分离的组合等。(2)利用凝聚与絮凝等手段及助剂以提高沉降速度及过滤速度,利用预涂层、助滤剂等改善过滤性能,提高过滤速度。(3)利用电场、磁场等辅助手段促进过滤分离。

固液分离方法的分类可参见图 1-1。

- 沉降分离:重力沉降——澄清槽(以获取清液为主)
 - 浓缩槽(以获取浓矿浆为主)
 - 脱泥槽(以脱除固体中的细泥为主)
 - 分级箱(将固体分成粗、细两种组分)
- 离心分离——水力旋流器(浓、稀分流,粗、细分级)
 - 沉降式离心机(液体上清,固体下沉)
- 过滤:重力过滤——砂滤(以净化水为主)
 - 格筛(粗矿石的过筛)
- 真空过滤——间歇式(板式、管式)
 - 连续回转式(鼓式、折带式、水平带式)
- 压滤机——板框式、管式、叶式、带式、螺旋式压榨机
- 离心式过滤——篮式、筐式(间歇、三足式)
 - 锥形、桶形(沉降式,间歇、连续)
 - 深层过滤(以获取清液为主)

图 1-1 固液分离技术的分类

固液悬浮系中固体是分散相,液体是连续相。从分离过程来看,固体是从高度分散状态向浓缩状态过度。在沉降分离中需要靠固体颗粒的运动,固体浓度越稀,越有利于此一过程的进行。而过滤则相反,在过滤中运动的是液相,所以含液相少即固体浓度高时对分离有利。

沉降分离的影响因素主要是固液之间的重力场的差值,其中包括固体与液体的密度差以及颗粒的大小。从图 1-2 可以看出,

在分离过程中固体是处在浓度、密度和粒度的三维空间上。其可操作范围只能在一定的空间范围内变化。当其接近原点时,处于浓度最高,粒度最小,密度最低,即最不利于分离的条件。当粒度小到 $1\mu\text{m}$ 时,受布朗运动的影响,沉降分离已不可能,而粒度大时,因受其他因素如化学反应等要求的影响,粒度也不宜太大,大致在 1cm 以下。就矿石的密度而言,最高的方铅矿为 $7500\text{kg}/\text{m}^3$,最低则可能接近水的密度 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 。至于矿浆浓度,一般稀到 2.5% 以下则应该采用砂滤、压滤机、深层过滤等形式。在低浓度范围,颗粒将处于自由沉降,即处于最有利的分离状态。当颗粒沉降至高密度的密集体时将处于干涉沉降范围,速度变慢,而最终可达到的最高体积浓度约为 60% (颗粒的最紧密排列的空隙率约为 40%)。这个范围大致如图 1-2 所示的沉降作业图中,固体的性质处于 A、B、C、D、E、F、G、H 的空间范围内。

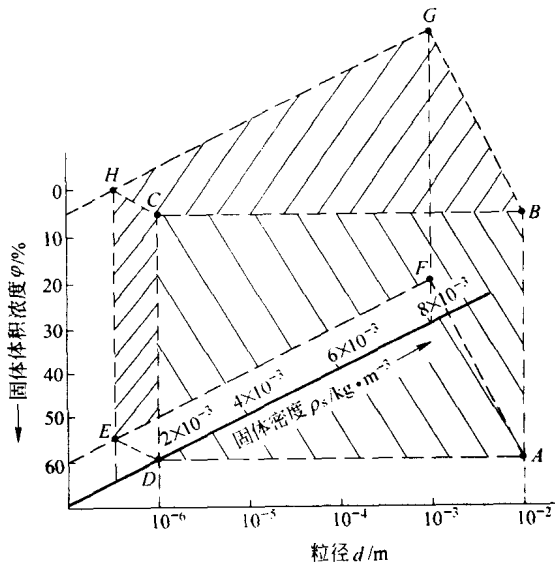


图 1-2 固液沉降分离中固体的状态空间

在沉降分离中,当颗粒直径为 1cm ,密度为 $7500\text{kg}/\text{m}^3$,即处

于最有利的条件下时,其分离推动力最大为:

$$(\pi/6)d^3(\rho_S - \rho_L)g = \pi 0.01^3(7500 - 1000)g/6 = 3.34 \times 10^{-2}N$$

或该颗粒的截面上所受的压力,其最大值只能达:

$$3.34 \times 10^{-2}/(\pi d^2/4) = 425Pa$$

如果一个 $10\mu m$ 的颗粒(例如细胞),当其密度只有 $1100kg/m^3$,即 $\Delta\rho$ 只有 $100kg/m^3$ 左右时,其分离推动力只约为上述最大值的千万分之一。为了提高分离的推动力,采用高速离心分离,将分离因数提高到 $10000g$,虽基本上可以满足要求。但这也只能是达到重力分离的中等推动力。

至于过滤,则是以滤液穿过固体沉积层的速度来衡量其生产能力。因此只有固体含量高,即液体含量低才比较有利。如果采用真空过滤,其最大推动力为 1 大气压,即 10^5Pa 。如果滤饼的厚度为 $2cm$,粒径 $1mm$,则穿过每个颗粒的压降约为 $5000Pa$,它远比沉降分离的推动力大很多。但是液体穿过固体的阻力也远大于固体在液体中沉降的阻力。

1.2 固液分离的辅助手段^[1]

1.2.1 分离助剂

在沉降分离、过滤、磁性分离的效果不理想时,往往可以加助滤剂以提高效率。这些助滤剂多系刚性、多孔、高渗透性粉粒,加入浆料后以提高过滤性能。其使用的方法如下:

(1) 形成预涂层:以制造一个过滤性能好的基底层,可以过滤极细的或易压缩的滤饼,可用以处理 5% 以上的矿浆。改进的预涂层过滤机可以利用渐进式刮刀将较薄的一层滤饼以及预涂层的上层(它已受到滤饼的渗透)一起刮下,以便预涂层可以更新。

(2) 预涂层过滤机当其不作为普通过滤机使用时,亦可作为澄清机使用。譬如可用以吸滤含微量固体(如 0.1%)的稀悬浮液,类似深层过滤的作用。当然,此种作业,采用过滤机更为有利。