

国外机械工业基本情况

# 分 离 机 械

机械部通用机械研究所主编

机械工业出版社

一 九 八 七

## 内 容 简 介

本资料为《国外机械工业基本情况》的分离机械部分。内容主要介绍了国外分离机械行业概况、企业规模、产品水平及发展趋势等，可供从事分离机械生产及研究部门的科研人员、管理人员及大专院校的教学工作者参考。

## 分 离 机 械

机械工业部通用机械研究所 主编

\*

机械工业部科学技术情报研究所编辑

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

机械工业出版社发行·机械工业出版社书店经售

\*

开本787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张10·字数243千字

1987年2月北京第一版·1987年2月北京第一次印刷

印数 0,001—1,500·定价：3.20元

\*

统一书号：15033·7060Q

## 出版说明

机械工业肩负着为国民经济各部门提供技术装备的重任。为适应四化建设的需要，必须大力发展机械工业。上质量、上品种、上水平，提高经济效益，是今后一个时期机械工业的战略任务。为了借鉴国外机械工业的发展道路、措施方法和经验教训，了解国外机械工业的生产、技术和管理水平，以便探索我国机械工业具有自己特色的发展道路，我们组织编写了第三轮《国外机械工业基本情况》。这一轮是在前两轮的基础上，更全面、系统地介绍了国外机械的行业、企业、生产技术和科学研究等方面的综合情况，着重报导了国外机械工业七十年代末和八十年代初的水平以及本世纪末的发展趋向。

第三轮《国外机械工业基本情况》共一百余分册，参加组织编写的主编单位包括研究院所、工厂和高等院校共一百余个，编写人员计达一千余人。本书为《分离机械》分册，由机械部通用机械研究所主编。

参加编写人员有机械部通用机械研究所肖承明；沈阳化工学院唐立夫、唐显达、王维一；北京工业学院梁树端；成都科技大学孙启才、方善如；北京化工学院范德顺；天津大学朱企新、金鼎五、李儒；浙江工学院石晓薇、贾高顺；河北工学院李鹏龄；北京轻工业学院陆守道；辽宁省机械研究院周二如、戴文举、于宁。

责任编辑：杨云秀

机械工业部科学技术情报研究所

# 目 录

## 第一篇 离 心 机

第一章 综述	( 1 )
第一节 离心机的类别和应用	( 1 )
第二节 离心机及离心分离技术的发展	( 3 )
第三节 离心分离理论及试验研究	( 6 )
第二章 离心机的行业与企业	( 13 )
第一节 行业概况	( 13 )
第二节 企业概况	( 17 )
第三章 各类离心机的发展	( 26 )
第一节 三足式离心机	( 26 )
第二节 上悬式离心机	( 32 )
第三节 卧式刮刀卸料离心机	( 40 )
第四节 卧式活塞推料离心机	( 49 )
第五节 离心力卸料离心机和振动离心机	( 56 )
第六节 进动卸料离心机	( 61 )
第七节 螺旋卸料过滤式离心机	( 67 )
第八节 螺旋卸料沉降式离心机	( 70 )
第九节 碟式分离机	( 77 )

## 第二篇 过 滤 机

第四章 综述	( 85 )
第一节 过滤机的类别和应用	( 85 )
第二节 过滤机及过滤技术的发展	( 86 )
第三节 过滤理论和试验研究进展	( 88 )
第四节 过滤介质	( 92 )
第五章 行业与企业情况	( 101 )
第一节 过滤机行业	( 101 )
第二节 过滤机主要企业	( 103 )
第三节 世界过滤行业的学术交流活	( 105 )
第四节 过滤机行业生产展望	( 106 )
第六章 各类过滤机的发展	( 108 )
第一节 转鼓过滤机	( 108 )
第二节 圆盘真空过滤机	( 113 )

第三节	叶滤机.....	(115)
第四节	带式过滤机.....	(122)
第五节	压滤机.....	(126)
第六节	管式及筒式压滤机.....	(131)
第七节	旋叶压滤机.....	(137)
第八节	滤油机.....	(145)
第九节	其它类型过滤机.....	(148)

# 第一篇 离心机

## 第一章 综述

### 第一节 离心机的类别和应用

离心机是借离心力为推动力，将液—固，液—液，或液—液—固等悬浮液或乳浊液加以分离的机械。

靠离心力将液—固分离的旋液分离器，近年来，国内外已广泛用于化工、冶金、医药、及食品等工业中的悬浮液分离，且结构简单、价格便宜，本书将略加介绍。

#### 一、离心机的分类

离心机按传统可分为过滤式和沉降式两类，这两类离心机又可按其出料方式或结构特征分为不同类型，详见图1-1及图1-2。

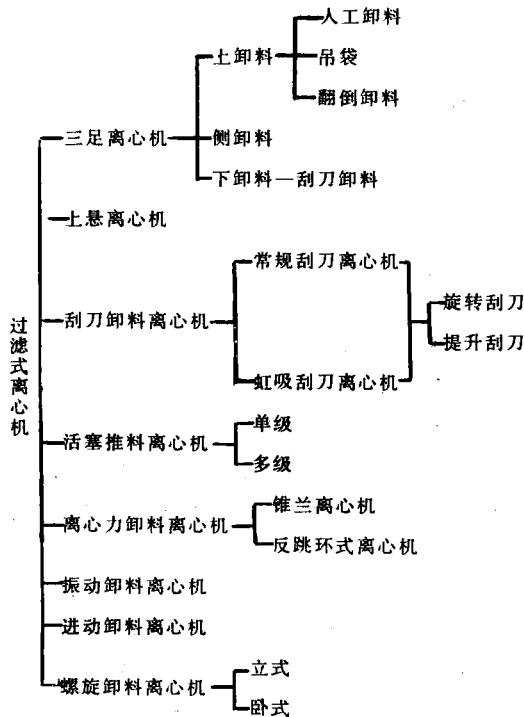


图 1-1 过滤式离心机类型

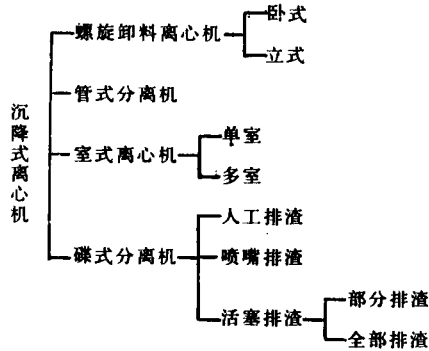


图1-2 沉降离心机类型

除图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。离心机种类及规格型号繁多，而且随着人民日常生活及各类加工工业（如：化工、石油、医药、食品、采矿、洗煤、国防技术）以及环境保护等的需要和发展，生产上专业化的需要，满足各种生产要求的专业离心机应运而生。如瑞典 Alfa-Laval 公司生产的碟式分离机，根据该公司 1980.6 的新标准单按用途分类共31种计有<sup>[1]</sup>：

- AB ——用于抗菌素分离；
- AF ——用于动物油分离；
- AV ——用于废水处理；
- BP ——用于血浆分离；
- BR ——用于啤酒分离；
- CF ——用于食用动物油分离；
- CR ——用于柑桔油分离；
- FE ——用于酵母分离；
- MA ——用于舰船上油水分离；
- MR ——用于牛奶分离；
- ST ——用于淀粉分离；
- TV ——用于制皂加工工业中的分离等。

各种类型分离机除用途代号外，还可按进料方式，固渣与清液的排出方式以及结构型式等，进一步分为或派生成几百种规格型号的产品。一般讲过滤离心机适用于快速沉降物料的分选，而沉降离心机则适用于中、低速沉降物料的分选。所谓快速沉降物料是指悬浮液中的固相颗粒在重力场中的沉降速度大于12厘米/秒的，而小于12厘米/秒的则称为中、低速沉降物料。

## 二、离心机的应用<sup>[2][3]</sup>

离心机的离心力可比重力高几十倍到数万倍。离心机能分离的物料愈来愈多，用途愈来愈广。例如，从能源开发到环境保护，从各种加工工业到人民日常生活的各行各业中均有应用。由于篇幅有限，仅就其工艺上的一些通用性能，概括一下，并列成表格，以供选用者参考。

各类过滤离心机适用于分离悬浮液中固相粒度尺寸、浓度及处理量等情况，见表1-1。

表1-1 过滤离心机的应用范围<sup>〔2〕</sup>

悬浮液性质	连续卸料			间歇卸料			
	离心力卸料	振动卸料	螺旋卸料	活塞推料	刮刀卸料		人工卸料
					卧式	立式	
固相粒度, 微米							
最小值	250	500	150	40	20	20	10
最大值	10000	10000	500	5000	2000	1000	1000
固相浓度 (以重量%计)	40~80	40~80	25~75	15~75	10~50	5~20	2~10
形成一厘米厚滤饼需要的时间*秒/厘米	0~3	0~3	1~5	1~10	3~20	10~30	20~60
每小时固相的生产能力, 吨/小时	5~40	5~150	1~150	0.5~50	0.25~20	0.1~5	0.1~1
洗涤性能	中	劣	中	良	良	优	优
卸出滤饼情况	干粒状	干粒状	干粒状	干粒状	干粒状	干硬粒	膏状
滤液的澄清度	中	中	劣	良	良	优	优

\* 形成一厘米厚滤饼所需过滤时间是用布氏漏斗或滤叶, 在真空吸滤下做的试验数据。

各类沉降离心机适用于分离悬浮液的固相粒度, 浓度及处理量等情况, 见表1-2。

表1-2 沉降离心机的应用范围<sup>〔2〕</sup>

悬浮液性质	连续卸料		间歇卸料			
	卧螺	喷嘴排渣 碟式分离机	人工排渣 碟式分离机	活塞排渣 碟式分离机	其它形式 沉降离心机	管式
固相粒度, 微米						
最小值	2	5	5	5	5	1
最大值	20000	500	500	500	20000	100
固相浓度, % (以重量计)	5~50	6~25	≤1	1~10	1~5	<1%
生产能力 (最大物料通过量), 米 <sup>3</sup> /小时	60	200	75	60	15	3
排渣容积, 升	—	0.4~16	0.2~16	0.4~16	70以上	2~5.25
洗涤可能性	有限	有限	不能	不能	不能	不能
卸出滤渣状况	半流态	流态	密实	流态	密实	密实

## 第二节 离心机及离心分离技术的发展

近几年来, 国外各种加工工业在不断的开发和发展, 新出现很多难以分离的物料。为了适应这一情况, 离心机无论在改善结构, 增加过滤及沉降速度, 开发新技术和新产品, 以及在某些理论研究上都有不同程度的发展。



## 一、提高过滤及沉降速度

过滤离心机中物料的过滤速度及沉降离心机悬浮液中固相颗粒的沉降速度，均是离心分离过程中重要参数。例如密闭加压的虹吸刮刀离心机<sup>[4]</sup>，实际上是将真空过滤、加压过滤及离心过滤三个过滤过程结为一体，即在常规刮刀离心机上增加虹吸装置及加压密闭装置便成为加压的虹吸刮刀离心机，推动力相应的增加，所以过滤速度也大为提高。又如行星式过滤离心机<sup>[5][6]</sup>有两个或多个转鼓，诸转鼓在自转的同时又绕共同的主轴公转，利用适当的两个角速度差，在转鼓某一特定区域内实现无滤饼过滤，从而减少过滤阻力，提高过滤速度。这类离心机最适用于粘性物料的分选。再如传统单级或多级活塞推料离心机只能用于粗粒产品，法国 De. Dietrich 公司对活塞推料离心机进行了研究和改进<sup>[7]</sup>，使其不仅可应用于粗粒而且也适用于细粒级产品的过滤分离，并可用于高粘度物料的分选。在结构上的改进主要是添装一无孔锥形转鼓，并用滤液洗涤掉转鼓内的细粒物料，解决了转鼓内壁与过滤筛网之间固相积聚堵塞影响过滤速度的问题。这种活塞推料离心机在很多情况下可以代替旋转真空过滤机，卧螺离心机及卧式刮刀离心机。新近出现的一种袋式滤网离心机<sup>[8]</sup>，滤渣的运动不是与筛网垂直而是在筛网上滚动，类似横向流动过滤，可以提高过滤速率。

## 二、为适应物料的物理变化在技术上的改进和发展

由于各种生产不断的高速发展，出现了很多新的悬浮液物料，或对现有物料的分选精度要求愈来愈高。因此，推动了液固分离机械的技术向前发展。例如，处理牛奶用碟式分离机，过去只要求将杂质、牛奶、脂肪三相分开，但新发现了某种母牛产出的牛奶中，含有属 *Clostridium butyricum* 类细菌。因此，须进一步将细菌从乳酪牛奶中分离出来。Westfalia 公司研制出 CNB 45、130、215 系列分离机，可将上述细菌予以分离。CNB 系列分离机排出细菌浓缩液大约为进料量的 2~4%，再用 130°C~140°C 的高温消毒装置进行消毒杀菌<sup>[9]</sup>。又如，由于能源紧张，航海船舶采用劣质燃料油，要求油水分离机具有较强的适应能力，既能处理低密度、低粘度的高级燃料油，又能处理高密度、高粘度的低级燃料油。Westfalia 公司利用 OSA 型号分离机（OSA 型分离机取消了重力环，亦即分离区域可控的分离机）进行单级或两级处理低级燃料油<sup>[10]</sup>。单级处理时，将定量的油通过两台并联的带 Varizone 电子控制装置的 OSA 分离机，可增加低级燃料油在碟片间的停留时间，从而改善分离效果。双级处理时将两台 OSA 分离机串联使用，第一台采用 Verizone 电子控制全排渣的净化型 OSA 分离机，而第二台则采用带有 Secutrol 电子装置来控制操作的 OSA 型分离机，这是一种新型的处理劣质燃料油的装置，Westfalia 公司将它总称为 Verizone 分离机和 Secutrol 澄清机联体安全处理装置。这种联体装置可处理高粘度燃料油，其重度可达 1.05 克/毫升（在 15°C 时）。瑞典 Alfa-Laval 公司为了保持油水分离机在国际市场上的竞争地位，新近开发了包括 FOPX 系列碟式分离机的一种 ALCAP 装置，用以处理低级重燃油（在 15°C 时，重度不超过 1.010 克/毫升）。该装置中的 FOPX 系列分离机，不设重力环，操作简单，当油的重度、粘度、流速等发生变化时，可自动调节，保持最佳的分离效率。

## 三、新结构及自动化进一步发展和应用

在离心机上应用一些新工艺或新结构，可以提高分离能力、延长使用寿命、改善操作条件及减少能耗。如 Pennwalt 公司的 Sharples 卧螺离心机 P 3400，在螺旋面上粘焊烧结碳化钨片，使卸料螺旋的寿命比一般硬化表面的卸料螺旋提高 8 倍以上，一般卸料螺旋的寿命大约为 6 个月，P 3400 机上的卸料螺旋可运转 4 年以上。又如 Thomas-Broadbent 公司用 15 毫

米厚烧结陶瓷片贴附在用于煤粉脱水及矿浆脱水的大直径卧螺离心机的螺旋面及转鼓内壁上,减少了磨损,提高使用寿命。Westfalia公司为了防止进动离心机的过滤栅条间的缝隙被物料堵塞,在转鼓操作旋转时,栅条间可作纵向错动,就可避免物料堵塞栅网。在上悬离心机中采用一套扭矩传动系统<sup>[11]</sup>,可以减少启动功率,节省能耗。Alfa-Laval公司对上悬式沉降离心机上盖的分离液排出口(溢流口),增加了垂直向上带法兰的圆筒形部分,分离液只经过法兰上表面甩入集液室,减少液体排出时摩擦阻力消耗<sup>[12]</sup>。1979年国际过滤与分离设备展览会(Fittech/79)上,Krauss-Maffei展出用微处理机对离心机的操作加以监控<sup>[13]</sup>。Alfa-Laval公司展出的ALCAP分离重燃料油的装置上装有MARST 1微处理机,处理从水传感器发出的信号,水传感器装在FOPX分离机净油出口管线上,专供测量分离出的澄清油中含水量的多少,其精度可达0.05%。微处理机MARST1还每隔6秒校验传感器的功能作用一次,这样就能得到可靠而精确的澄清油的质量参数。

Westfalia公司在重燃料油处理装置系统中,采用了电子仪器VESA-E 2型的计时及监控仪,可以同时安全可靠地对两台活塞排渣碟式分离机进行控制操作和监视<sup>[10]</sup>。

丹麦生产的RS三足式下卸料离心机,所采用的电子技术可对在离心机运转过程中由于操作失误而引起的振动实行监控和自动排除。处理各种不同物料时,可自动进行离心机转速的调整,借助加料指示器和计时器可自动排除装料过载问题。

联邦德国生产的一些专供科研用的高速小型离心机上,如Heracus-Christ公司生产的Cryofuge 8000离心机利用微电子技术(存有16种应用程序,一套固定程序),对其操作、安全可靠、加速和制动时间、转速以及温度等都可借微处理机进行监控。又如日立生产的282及ABS-7型高速离心分离装置,采用日立生产的DA-7型微型机系统的计算技术,对操作进行监控,并对沉降系数和分子量等参数进行测定和计算。

#### 四、新产品的开发和应用

由于各行各业的生产发展需要,促进了新产品的开发和应用。如Alfa-Laval公司为了适应生物工程酶制品的需要,开发一种分离因数大于15000的AX 215大型碟式澄清机<sup>[14]</sup>,系全密闭操作,可分离粒度0.5微米的颗粒,该机比AX 213(1977年开发分离因数14200)产量增加27%。在Fittech/79上,Simsons展出的Flottweg 234泥浆分离用离心机,用在北海钻井平台上<sup>[15]</sup>;丹麦Rustfri展出带有电子控制以及能加热或冷却介质的下卸料离心机<sup>[16]</sup>;KHD公司展出新开发的大转鼓沉降卧式螺旋卸料离心机,其处理量可达120米<sup>3</sup>/小时。Bird公司<sup>[17]</sup>生产的卧螺离心机,最大型号为6400型,转鼓长达5.5米,生产量可达100米<sup>3</sup>/小时;Bird公司生产沉降过滤组合式离心机,转鼓直径从150~1350毫米;该公司生产的“H”系列低速脱水卧螺离心机,转鼓直径从350~900毫米;该公司生产的活塞推料离心机,处理能力可达70吨/小时。英国Humboldt Wedag公司<sup>[18]</sup>生产的卧螺离心机70%用于城市污水处理;S系列脱水用卧螺离心机,可处理悬浮液其浓度为25~30%,推料螺旋的寿命达20000小时,共有九个规格,最新开发的S61机型,其处理量可达230米<sup>3</sup>/小时。英国P. C. T. 设备有限公司研制的Ferrum系列卸料离心机,既可用液压控制,也可用电气控制,转鼓直径从630~1600毫米,且可密闭操作及卸料<sup>[19]</sup>。丹麦的Rustfri Stal Montage公司生产的三足下卸料CPB类型的RS离心机,用惰性气密闭操作,适用于有爆炸性物料的处理,该系列机型上设有振动控制装置可自动减振<sup>[20]</sup>。Westfalia公司研制SA 160活塞排渣澄清型碟式分离机<sup>[21]</sup>,应用于食品饮料,化学及医药加工工业,转鼓重达2000公斤,沉

磁容积为58立升，其处理量达  $150\text{米}^3/\text{小时}$ ，一小时可排出固相4500升，而原有这一系列的机型处理量最大的仅达  $60\text{米}^3/\text{小时}$ ，沉渣容积为25~30升，所以一台 SA 160可代替 2~3 台原有澄清机。国外碟式分离机新产品的开发除了适用生产要求外，同时向大型化发展，美国 Sharples 公司开发一种包括喷嘴碟式分离机的燃料油洗涤装置，用于处理供燃气轮机燃烧用的重柴油或低级柴油，该装置中碟式分离机系 Gravitrol 的 C 系列喷嘴油水分离机，而与其它公司有不同之处。

### 第三节 离心分离理论及试验研究

#### 一、离心沉降

自从 C. M. Ambler 等人于1952年根据“活塞”流动模型建立了“ $\Sigma$ ”理论<sup>[22]</sup>，给出了各种沉降式离心机及分离机的“ $\Sigma$ ”值的计算式<sup>[23]</sup><sup>[24]</sup>，迄今仍作为衡量沉降式离心机和分离机生产能力的标志以及选型和模拟放大的重要依据。

由于 Ambler “活塞”流动模型的假设与液流在分离机内流动的实际情况有一定的出入，因此，关于流动模型的研究以及终端效应和待分离的固体颗粒形状因数的影响方面的研究正在进展中<sup>[25]</sup>。

此外，用“ $\Sigma$ ”概念描述离心分离机的分离效率也是不完善的，“ $\Sigma$ ”概念以分割粒径  $X_{50}$  来计算离心机的生产能力，并不能反映分离总效率（悬浮液中固相回收率）。但悬浮液中的粒度分布却直接影响总效率，即在相同的分割粒径  $X_{50}$  的情况下，由于粒度分布不同，可以有不同的总效率。

L. Svarovsky 等人认为充分描述沉降式离心机和分离机分离效率的理想方式是级效率曲线<sup>[25]</sup>。随着粒度测试技术的发展<sup>[26]</sup> 理论级效率函数与实验级效率曲线的研究正在不断发展。目前，已经建立了管式分离机和碟式分离机的理论级效率函数。

L. Svarovsky 根据“活塞”流动模型所建立的管式分离机的理论级效率函数<sup>[25]</sup> 如下所示：

$$G(x) = \frac{r_3^2}{r_3^2 - r_1^2} \left[ 1 - \exp(-2KK_2x^2) \right] \quad (1-1)$$

式中  $r_3$ ——管式分离机内径，

$r_1$ ——管式分离机溢流半径

$$K_2 = \pi L (r_3^2 - r_1^2) / Q \quad (1-2)$$

$L$ ——管式分离机转鼓长度，

$Q$ ——进料流量；

$K = \frac{\Delta\rho\omega^2}{18\mu}$ ，其中  $\Delta\rho$  代表固液密度差； $\mu$  为液体粘度； $\omega$  则为分离机转鼓的角速度。

管式分离机的理论级效率函数的很多假设前提与实际情况不符。假设之一是已经沉降在离心机中的颗粒忽略不计，而实际上已沉降之固渣不断地在减少物料通过面积，从而减少了液体在转鼓中的停留时间，致使分离效率逐渐下降。另一方面就是流动模型的假设。“活塞”流动模型的根本特征是假定轴向液流速度沿径向的分布是均匀的。而实际轴向液流速度应当是半径的函数。加之终端效应的影响，液流速度不可能是十分均匀的。因此，理论级效率曲

线与直接利用粒度测试结果而得到的实验级效率曲线之间存在着一定的差异。

L. Svarovsky 提出的碟式分离机的理论级效率函数<sup>(5)</sup>为:

$$G(x) = \frac{a - y_1}{a} = \frac{x^2}{x_{\max}^2} \quad (1-3)$$

式中  $y_1$  —— 粒度为  $x$  之颗粒进入分离区的瞬间位置至下碟片的最小垂直距离;

$a$  —— 相邻碟片的垂直距离;

$x_{\max}$  —— 级效率为 100% 之最小颗粒粒径。

$$a - y_1 = Kx^2 \frac{2\pi na}{3Q} \cot\theta (r_2^3 - r_1^3) \quad (1-4)$$

$$x_{\max}^2 = 3Q / 2\pi nK \cot\theta (r_2^3 - r_1^3) \quad (1-5)$$

以上两式中

$K$  —— 沉降常数 (同前);

$n$  —— 碟片间隔数;

$\theta$  —— 碟片半锥角;

$r_1$  —— 碟片小端半径;

$r_2$  —— 碟片大端半径;

$Q$  —— 进料流量。

Fitch 对碟式分离机的理论级效率方程作过详细的研究和检验之后, 发现根据颗粒粒度测试结果所得到的实验级效率要比理论所预示的结果低得多。他认为主要是由于在碟片上的定位筋条附近有涡流存在的原因, 并从实拍的碟式分离机流动模型的照片上得到证实。

对于螺旋卸料沉降离心机, 由于所涉及的因素更为复杂, 尚未能建立理论级效率函数, 因此, 就目前来看, 运用理论级效率曲线正确地指导实践还有一定距离。

近年来, 由于粒度测试技术的发展和电算技术的广泛应用, 有可能运用数学方法和电算技术对实验数据进行拟合, 就各主要参数变化的范围建立级效率曲线的数学模型, 编制电算程序, 在主要参数发生变化时, 通过电子计算机预示粒度分布, 从而指导生产在最佳分离能力的条件下进行。同时可以计入相应条件下每吨产品的能量消耗, 维持费用和折旧费用等, 便可以得到一个不仅包括技术因数, 而且包括经济因数的数学模型, 从而可以进行产品多目标优化。

K. R. Gibson 曾对喷嘴排渣碟式分离机, 螺旋卸料沉降式离心机等进行了这方面的尝试<sup>(27)</sup>。对于喷嘴排渣碟式分离机, 成功地得到了分割粒径  $X_{50}$  的函数式, 为包括喷嘴直径、进料密度和进行体积流量等诸参量的多项式。实践证明运用该多项式计算所得的粒度分布结果与实测结果误差仅为  $\pm 2\%$ 。

对于螺旋卸渣沉降离心机, Gibson 仅研究了进料流量和进料浓度与分割粒径  $X_{50}$  的关系。并在某一进料流量范围得到了  $X_{50}$  与进料浓度的直线函数关系。他的研究结果与 Alfa-Laval 公司所得的相应的数学模型接近, 这方面的工作正在发展中。

然而, 苏联 В. И. Соколов 则认为以级效率曲线来描述离心机和分离机性能, 对于容易出现颗粒凝聚或絮凝的过程没有条件进行粒度测试的场合是困难的。为此, 建议对这类情况仍以 “ $\Sigma$ ” 值作为描述离心机和分离机性能的手段, 但在 “ $\Sigma$ ” 值的基本方程中引入设备效率系数  $\beta$ <sup>(28)</sup>, 即

$$Q = \beta V_g \Sigma \quad (1-6)$$

式中  $Q$ ——离心机和分离机的生产能力；  
 $V_g$ ——由 Stokes 方程所规定的重力沉降速度；  
 $\Sigma$ ——离心机和分离机的当量沉降面积；  
 $\beta$ ——设备效率系数，该系数为雷诺准数  $Re$ ，福鲁德准数  $Fr$  和阿基米德准数  $Ar$  的函数。

В.И.Соколов 还给出不能取得颗粒粒度分布数据的情况下估算生产能力  $Q$  的方法<sup>[28]</sup>，即：

$$Q > \Sigma \alpha K_\epsilon^2 \quad (1-7)$$

式中  $Q$ ， $\Sigma$  同前

$$\alpha = \frac{2\Delta g}{9\mu} \quad (1-8)$$

式中  $\Delta$ ——分散相与分散介质的密度差；  
 $\mu$ ——分散介质的粘度；  
 $g$ ——重力加速度；  
 $K_\epsilon$ ——与清液带出之颗粒的相对量  $\epsilon$  相对应的数，

$$K_\epsilon > \sqrt[3]{\frac{3c_0\epsilon}{4\pi\rho_1\gamma}} \quad (1-9)$$

式中  $c_0$ ——单位体积悬浮液中分散相的质量；  
 $\epsilon$ ——清液带出之颗粒的相对量；  
 $\rho_1$ ——分散相的密度；  
 $\gamma$ ——悬浮液的颗粒浓度即单位体积悬浮液内所包含的颗粒数。

最后得

$$\frac{Q}{\Sigma} > \alpha \left( \frac{3c_0\epsilon}{4\pi\rho_1\gamma} \right)^{2/3} \quad (1-10)$$

如果悬浮液中球形颗粒的比表面  $S_{v\epsilon}$  为已知则应有：

$$\frac{Q}{\Sigma} > \alpha \left( \frac{3\epsilon}{S_{v\epsilon}\rho_1} \right)^{2/3} \quad (1-11)$$

应用不等式 (1-10) 和 (1-11) 可以在不知粒度分布的情况下，确定清液中固体颗粒带出量小于  $\epsilon$  时的最小生产能力。

Соколов 在不同类型的离心分离机上进行实验并把运用 (1-6) 式得出的实验结果与应用 (1-10) 式得出的计算结果进行比较，两者基本接近。说明这种估算方法的精确度不高，但与“ $\Sigma$ ”理论法相比并不逊色。

## 二、离心过滤

近年来，离心过滤方面的研究多将其分为过滤、甩干和洗涤三个过程来进行。

1. 过滤过程<sup>[29]</sup> 滤饼上的液层由自由液面移至滤饼表面的过程，目前计算这个过程的过滤速率仍根据 Maloney<sup>[30]</sup>，Hassett<sup>[31]</sup>，Storrow & Burak<sup>[32]</sup>，Grace<sup>[33]</sup>，Storrow & Haruni<sup>[34]</sup> 等人在五十年代所建立的方程。

$$Q = \frac{dv}{dt} = \frac{\pi\rho\omega^2 kh (r_o^2 - r_i^2)}{\ln(r_o/r_c)} \quad (1-12)$$

由式 (1-12) 可导出过滤过程周期所需时间  $\tau$  :

$$\tau = \frac{\ln(r_o/r_c)}{k\rho\omega^2} \ln \frac{r_o^2 - R^2}{r_o^2 - r_c^2} \quad (1-13)$$

式中  $Q$ ——过滤速率;

$V$ ——滤液体积;

$t$ ——过滤时间;

$\omega$ ——转鼓角速率;

$\rho$ ——液体密度;

$h$ ——转鼓高度;

$k$ ——滤饼固有渗透性 (intrinsic permeability);

$$k = \frac{K}{\mu} \quad (1-14)$$

$K$ ——滤饼渗透性,

$$K = \frac{1}{\alpha\rho_s(1-\epsilon)} \quad (1-15)$$

$\mu$ ——液体粘度;

$\alpha$ ——滤饼比阻;

$\rho_s$ ——固体密度;

$\epsilon$ ——滤饼孔隙率;

$r_f$ ——液面内径;

$r_c$ ——滤饼内径;

$r_o$ ——滤饼外径。

方程 (1-12) 未计入过滤介质阻力, 这在滤饼比阻  $\alpha$  比较高的情况下是可以忽略的, 而在滤饼比阻  $\alpha$  较低时, 会造成 10% 左右的误差。

Grace 提出了计入过滤介质阻力的下列方程:

$$Q = \frac{dv}{dt} = \frac{\pi\rho\omega^2 h (r_o^2 - r_f^2)}{\mu(2\rho_s(1-\epsilon)\ln(r_o/r_c) + R/r_o)} \quad (1-16)$$

式中  $R$  为过滤介质阻力。

方程 (1-16) 可改进为与一般过滤方程相同的形式

$$Q = \frac{\Delta P_t}{\mu \left( \frac{2W}{A_{ar}A_{Lm}} + \frac{R}{A_o} \right)} \quad (1-17)$$

式中  $\Delta P_t$ ——总的压力降

$$\Delta P_t = \rho\omega^2 (r_o^2 - r_f^2) / 2 \quad (1-18)$$

$A_{ar}$ ——平均过滤面积;

$A_{Lm}$ ——对数平均过滤面积;

$A_o$ ——过滤介质面积;

$W$ ——每单位面积上的固体质量。

对于可压缩性滤渣, 滤饼比阻  $\alpha$  应取平均滤饼比阻  $\bar{\alpha}$ ,  $\bar{\alpha}$  可由下式计算

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta P}{(1-\epsilon) \int_0^{\Delta P} dP / (1-\epsilon) \alpha} \quad (1-19)$$

式中 $\Delta P$ 是推动流体在滤饼中流动的压力降。

试验证明,在静力学条件下通过渗透小室所取得的 $\alpha$ 值与在动力学条件下即离心过滤条件下取得的 $\alpha$ 实验值相比,二者有较大差别。目前广泛采用由 K. Zeitsch 所提出的方法<sup>[5]</sup>。Zeitsch 法所采用的装置为一个由透明材料制作的滤杯,该滤杯带有刻度,杯底为一孔板,上置金属丝网和滤布。滤杯置于实验离心机内使用,并采用频闪观察器(或闪光仪)进行观测,详见文献<sup>[5]</sup>。

在实用条件下测得的 $k$ (或 $\alpha$ )值,其重要性不仅在于正确地估算过滤速率与过滤周期,而且是过滤离心机放大设计的重要依据。

## 2. 洗涤过程<sup>[5][29]</sup>

洗涤过程一般分为两个阶段。洗涤的开始阶段为置换过程,滤饼中的母液由洗液进行置换。洗液穿过滤饼中的空隙,由于各空隙大小并不一致,洗液以较快速度通过较大的空隙,加之沿空隙横断面的洗液流动速度存在梯度,因此,在实践中这一阶段只能除去滤饼中所保留之母液的30~86%。第二阶段是依靠混合与扩散联合作用而进行的质量传递过程。置换过程以后母液以膜的形式覆在颗粒表面,或陷入相邻颗粒间的孔隙之中,如果颗粒本身有孔隙或为絮凝物等,还将有一部分母液积存在颗粒自身的孔隙之中。以上这些部分母液的除去,只能依靠质量传递过程。

目前描述传质洗涤过程的模型较好的是侧微孔模型(Side pore model)<sup>[5]</sup>,该模型所描述的是母液以液膜形式覆于颗粒表面并与滞留于相邻颗粒之间同时存在的情况。根据此模式得到的质量平衡为基础,建立了数学模型,给出了这些数学模型的解,并绘出相应解的曲线图,以便实际应用,详见文献<sup>[5]</sup>。

洗涤速率 $Q$ ,当洗涤过程中不会改变滤饼比阻 $\alpha$ 的介质阻力 $R$ 时,洗涤速率等于过滤速率,可以按照方程(1-16)来决定。

根据清洗速率 $Q$ ,所要求回收的可溶成份量和滤饼的剩余饱和度 $S$ 等,运用上述有关图表可以算得洗液用量和洗涤所需时间。

## 3. 甩干过程

Ambler<sup>[35]</sup>提出在离心甩干条件下确定平衡含湿量 $S_\infty$ 和任意时刻 $t$ 的瞬时含湿量 $S_t$ 的方程。

$$S_\infty = K (d)^{-0.5} (\omega^2 r/g)^{-0.5} \rho^{-0.25} \quad (1-20)$$

$$S_t = \frac{K'}{d} \left( \frac{\mu g}{\rho \omega^2 r} \right) \frac{(r_o - r_c)^x}{t^y} + S_\infty \quad (1-21)$$

式中 $K$ 和 $K'$ 由实验确定的系数,滤饼厚度指数 $x$ 的范围为 $0.5 < x < 1.0$ (对于可压缩滤饼)。而甩干时间指数 $y$ 的范围为 $0.3 < y < 0.5$ 。

文献(5)(36)介绍用毛细管数的新参数 $N_c$ 来确定平衡饱和含湿量 $S_\infty$ 。 $S_\infty$ 与 $N_c$ 的关系可如下:

$$S_\infty = \text{常数} \times N_c^2 \quad (1-22)$$

$$N_c = \frac{\epsilon^3 \bar{d}^2 \rho N^2 r}{(1-\epsilon)^2 \sigma} \quad (1-23)$$

式中  $\bar{d}$ ——平均粒度，米；  
 $r$ ——滤饼中点位置半径，米；  
 $\rho$ ——液体密度；公斤/米<sup>3</sup>；  
 $\epsilon$ ——滤饼孔隙率；  
 $\sigma$ ——表面张力，牛顿/米。

对于离心过滤所形成之滤饼则有

$$S_{\infty} = 0.0524 N_c^{-0.19} \quad 10^{-5} \leq N_c \leq 0.14 \quad (1-24)$$

$$S_{\infty} = 0.0139 N_c^{-0.86} \quad 0.14 < N_c \leq 10 \quad (1-25)$$

(1-23) 式中的平均粒度可由下式来决定

$$\bar{d} = 13.4 \left( (1 - \epsilon) / \alpha \rho_s \epsilon^3 \right)^{0.5} \quad (1-26)$$

(1-23) 式也可以按滤饼比阻  $\alpha$  和固体比重  $\rho_s$  近似表示为：

$$N_c = \frac{180 N^2 r \rho}{\alpha \rho_s (1 - \epsilon) \sigma} \quad (1-27)$$

Zeitz<sup>[37]</sup> 提出了对于按毛细管模式甩干的分析，毛细管的直径分布为波茨曼分布，给出在滤饼的渗透性  $K$  或比阻  $\alpha$  为已知的情况下计算平衡饱和含湿量  $S_{\infty}$ ， $S_t$  和甩干时间的方程。

$$S_t = S_{\infty} + \frac{1}{D^2 \left( \frac{1}{D} + \phi t \right)} \left[ \frac{1}{\frac{1}{D} + \phi t} \cdot \exp \left\{ - \left( \frac{1}{D} + \phi t \right) \right\} - \frac{\sqrt{\pi} \left\{ 1 - \operatorname{erf} N \left( \frac{1}{D} + \phi t \right) \right\}}{2 N \left( \frac{1}{D} + \phi t \right)} \right] \quad (1-28)$$

式中  $D = \frac{K r_b^2 \omega^4 \rho^2 H^2}{\epsilon \sigma^2 \cos^2 \theta}$  称为 Zeitz 离心甩干数 (1-29)

$$\phi = \frac{\sigma^2 \cos^2 \theta}{2 \mu H^3 \rho r_b \omega^2} \text{ 称为甩干速率因数} \quad (1-30)$$

$$S_{\infty} = 1 - \exp \left( -\frac{1}{D} \right) + \frac{\sqrt{\pi} \sqrt{D}}{2 D} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \frac{1}{\sqrt{D}} \right\} \quad (1-31)$$

式中除前述已作规定者外：

$r_b$ ——转鼓半径；

$H$ ——滤饼厚度；

$K$ ——滤饼渗透性，它可由 (1-15) 式来决定。

通过 (1-15)，(1-29)，(1-30)，(1-31) 诸式可以直接估算平衡饱和含湿量  $S_{\infty}$ ，并假定一系列的  $\phi t$ ，由 (1-28) 式算出一系列  $S_t$ ，从而可得达到任意含湿量  $S_t$  所需的时间。

### 参 考 文 献

- (1) 国外分离机械标准汇编，南京船用辅机厂，1982
- (2) Derek B. Purchas, Solid/Liquid Separation Technology, Uplands Press, 1981
- (3) 《国外机械工业基本情况》参考资料，分离机械，一机部科技情报所，1980

1 D  
1  
分 离 机 械



- ( 4 ) *Filtr. & Separ.* , 1981, No 2 , P121
- ( 5 ) L. Svarovsky, *Solid-Liquid Separation*, 2<sup>nd</sup> ed. , *Butterworths*, 1981
- ( 6 ) 美国专利, No2013098
- ( 7 ) *Filtr. & Separ.* , 1981, No 5 , P 400
- ( 8 ) 美国专利, No4254904
- ( 9 ) *Filtr. & Separ.* , 1984, No 1 , P 9
- ( 10 ) *Westfalia Specification, Treatment of lowgrade fuels with Separators, Type OSA*, 1983
- ( 11 ) 美国专利, No 4223829
- ( 12 ) 美国专利, No 4356960
- ( 13 ) *Filtr. & Separ.* , 1979, No 6 , P600
- ( 14 ) *Filtr. & Separ.* , 1983, No 4 , P 259
- ( 15 ) *Filtr. & Separ.* , 1983, No 4 , P256
- ( 16 ) *Filtr. & Separ.* , 1979, No 6 , P601
- ( 17 ) *Filtr. & Separ.*, 1983, No 4 , P257
- ( 18 ) *Filtr. & Separ.* , 1981, No 5 , P368
- ( 19 ) *Filtr. & Separ.* , 1981, No 2 , P173
- ( 20 ) *Filtr. & Separ.* , 1979, No 2 , P147
- ( 21 ) *Filtr. & Separ.* , 1980, No 3 , P193
- ( 22 ) C. M. Ambler, *C.E. P.* 1952, V 48
- ( 23 ) C. M. Ambler, *J. Biochem. & Microbiol. Tech. Eng.* , 1959, v1 , No 2 , P185
- ( 24 ) 车濂次郎, *化学工业 (别册)*, 1972, V 10, No24
- ( 25 ) L. Svarovsky, *Chem Eng.*, 1979, July
- ( 26 ) T. Allen, *Partide Size Measurement*, 1982
- ( 27 ) K. R. Gibson, *Proceeding of the Symposium on Solid-Liquid Separation Practice*, 27~29, March, 1979
- ( 28 ) В. И. Соколов, *Хим. и Неорт. Маш.* , 1983, No11
- ( 29 ) A. Rushton, *Filtr. & Separ.* , 1981, No 5
- ( 30 ) J. D. Maloney, *Ind. Eng Chem.* , 1946, V 38, No24
- ( 31 ) N. J. Hasset, *Chem. & Ind. (Rev.)* , 1956, 35, 917
- ( 32 ) J. A. Storrow and N. Burak, *J. Soc. Chem. Ind.* , 1950, 69, 8
- ( 33 ) H. P. Grace, *Chem. Eng. Progress*, 1953, 49, 154
- ( 34 ) J. A. Storrow and M. Haruni, *Chem. Eng. Sci.* , 1952, 1, 154
- ( 35 ) C. A. Ambler, *Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineer*, Section 4. 5, 1979
- ( 36 ) R. J. Wakeman, *Filtr & Separ.* , 1979, No6
- ( 37 ) K. Zeitz, *Int. Symp. Soc. Belgè Filtration, Antwep*, June, 1978