

前 言

离心分离是利用离心力对液-固、液-液-固、液-液等非均相混合物进行分离的过程。其过程分为离心过滤、离心沉降和离心分离三种型式，与之相应的离心机也分为过滤离心机、沉降离心机和离心分离机三大类。

最初用于工业上的离心机是在十九世纪中叶，自二十世纪五十年代以来，随着工业生产的发展，对离心分离过程的机理及影响分离效果的诸因素进行了许多研究，使离心机的品种日益增多，其应用范围不断扩大。离心机广泛用于化工、石油化工、石油炼制、轻工、制药、食品、纺织、冶金、煤炭、选矿、船舶、军工等工业部门及废水处理。

本书编写的目的在于全面介绍有关离心分离过程及离心机方面的知识。第一章绪论，着重介绍离心力场的特点及被分离物料的性质。第二章至第四章分别论述了离心过滤、离心沉降和离心分离过程的特点和机理，以及流体在转鼓内的动力学、生产能力的计算和分离效率等问题。第五章和第六章分别阐述了转鼓的强度计算和离心机的振动、动平衡和隔振。第七章至第九章分别介绍了过滤离心机、沉降离心机和离心分离机的工作原理、结构特点、性能和用途。第十章介绍了沉降离心机的传动装置，重点阐述了差速行星齿轮传动装置和增速螺旋齿轮传动装置。第十一章介绍了有关离心机的选型问题。

本书由成都科学技术大学孙启才、天津大学金鼎五主编，第一章由机械工业部通用机械研究所刘宝善编写，第二章由金鼎五编写，第三章由孙启才编写，第四、九和十一章由同济大学陈森编写，第五章由北京化工学院高淑之编写，第六章由河北工学院李鹏龄编写，第七章由天津轻工学院魏钟、王福元和杨富伟、天津大学朱企新和胡金榜、河北工学院王玉山、北京化工学院吴德钧、王其祥、北京轻工学院陆守道编写，第八章由成都科学技术大学梅文志和方善如编写，第十章由成都科学技术大学杨廷栋、肖忠实、周寿华和申哲编写。

在编写本书的过程中，中国科学技术情报研究所重庆分所和四川江北机械厂为我们提供了许多宝贵资料，在此谨表谢意。

编者

1983年9月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 离心机在工业上的应用与分类	1
一、离心机的应用及其发展	1
二、离心机的分离过程及分类	2
第二节 离心力场的基本特性	3
一、离心力和分离因数	3
二、哥氏力	4
三、离心液压	4
第三节 分离物料的特性	5
一、悬浮液的特性	5
二、固体颗粒的特性	6
三、乳浊液特性	15
参考文献	15
第二章 离心过滤	16
第一节 滤饼过滤的一般概念	16
一、贯穿多孔层的流体流动	16
二、滤饼层力学	17
三、平均过滤阻力	19
第二节 离心过滤速率通用方程式的建立及其简化	20
一、离心过滤速率通用方程式的建立	20
二、在特殊情况下用压缩-渗透率数据求解	23
三、用于不可压缩滤饼的简化速率方程式	24
第三节 离心过滤速率的工程计算法	25
一、料液层和滤饼层中的压力分布	26
二、滤饼内液体流量与过滤周期的计算	29
三、离心力场下滤饼固有渗透率的测定	31
第四节 过滤离心机滤饼的洗涤、甩干和操作循环	32
一、滤饼的洗涤	32
二、滤饼的甩干和残留液量计算	32
三、过滤离心机的操作循环	36
第五节 过滤离心机的生产能力计算和放大设计中应考虑的事项	37
参考文献	40
第三章 离心沉降	41
第一节 离心力场中的流体动力学	41
一、基本方程	41
二、沉降离心机转鼓内的流体流动	44

VI

第二节 离心力场中的沉降分离过程	53
一、离心力场中固相粒子在液相连续介质中的自由沉降速度	54
二、粒子形状和悬浮液浓度对沉降速度的影响	55
三、离心力场中沉降分离的极限	57
第三节 沉降离心机按悬浮液计的生产能力	58
一、按 Σ 理论计算生产能力	58
二、按层流理论计算生产能力	65
三、按流线理论计算生产能力	68
第四节 脱水区的沉渣动力学	71
一、沉渣在脱水区的滑动动力学	72
二、沉渣在脱水区的停留时间	76
三、螺旋的输渣效率	76
四、螺旋转矩及输渣功率	77
五、螺旋所受的轴向力	78
六、转鼓内表面与螺旋推渣表面的磨损性	79
第五节 沉降离心机按沉渣计的生产能力和沉渣含湿量	79
一、按螺旋输渣能力计的生产能力	80
二、沉渣脱水机理和含湿量	81
第六节 螺旋沉降离心机的技术参数选择	84
一、主要参数 D, L, n, F_r 的选择	84
二、有关沉降区参数的选择	86
三、有关脱水区参数的选择	87
四、螺旋沉降离心机的模拟放大	94
参考文献	96
第四章 离心分离	99
第一节 离心分离过程机理	99
一、离心澄清	99
二、离心分离	101
第二节 碟式离心机内的流体动力学	102
一、碟片间隙内液体流动状况	102
二、液体在碟片间隙内流动的雷诺数	103
三、 λ 准数及其对液流运动的影响	105
四、碟片间液体层流流动速度分析	106
五、液流轴不对称度的估计	108
六、液流非对称流动速度分析	109
七、粒度均一分散相颗粒沉降规律	111
八、沉降固粒不被液流带出的条件	112
九、碟片间流体阻力损失计算	114
十、碟片内分离过程的强化	116
第三节 碟式分离机的生产能力	117
一、离心澄清生产能力的计算	117
二、离心分离生产能力的计算	119

三、影响生产能力因素的分析	120
第四节 碟式分离机主要参数的设计计算	122
一、分离机型式的初步选定	122
二、碟片主要尺寸的确定	123
第五节 离心分离最佳化	127
一、离心分离最佳化目的	127
二、离心分离的数学模型及应用	127
参考文献	129
第五章 转鼓的强度计算	130
第一节 高速回转圆筒的应力和变形	130
一、鼓壁质量的离心力引起的应力和变形	130
二、物料离心压力引起的鼓壁应力和变形	132
三、筛网等附件的离心力引起的鼓壁应力和变形	133
第二节 高速回转圆锥形壳体的应力和变形	133
一、鼓壁质量的离心力引起的鼓壁应力和变形	133
二、被分离物料的离心力引起的应力和变形	134
三、筛网等附件的离心力引起的鼓壁应力和变形	135
四、大锥角圆锥形壳体的有力矩理论	135
第三节 轴对称边界载荷作用下的圆筒形及圆锥形壳体	139
一、圆筒形壳体	139
二、圆锥形壳体	143
第四节 高速回转圆盘的应力和变形	155
一、自由回转等厚度圆盘	155
二、在内、外表面上有径向载荷的静止等厚度圆盘的应力和变形	156
第五节 轴对称载荷作用下环板的应力和变形	158
一、沿内周边铰支外周边均布作用有总载荷 P 的环板	158
二、沿内周边铰支外周边单位长度上作用有力矩 M 的环板	158
三、沿外周边铰支内周边均布作用有总载荷 P 的环板	159
四、沿外周边铰支在外周边单位长度上作用有力矩 M 的环板	159
五、沿外周边铰支在内周边单位长度上作用有力矩 M 的环板	159
六、沿内周边铰支在内周边单位长度上作用有力矩 M 的环板	160
七、沿外周边铰支在板面上作用有均布载荷 p 的环板	160
八、沿内周边铰支在板面上作用有均布载荷 p 的环板	160
九、沿内周边半固定在外周边上均布作用总载荷 p 的环板	161
十、沿内周边半固定在外周边单位长度上作用有力矩 M 的环板	162
十一、沿外周边铰支在板面上作用有按抛物线分布的载荷 p 的环板	162
十二、沿内周边铰支在板面上作用有按抛物线分布的载荷 p 的环板	163
第六节 转鼓壁的强度计算	164
一、整体转鼓	164
二、开孔转鼓	165
三、加强转鼓	166
四、厚壁圆筒形转鼓	168

VIII

第七节 转鼓连接节点处的强度计算	170
一、边缘问题的一般解法	170
二、圆筒-顶(底)盖连接节点的边缘问题	174
三、圆锥体-法兰连接节点的边缘问题	176
四、圆筒-圆锥连接节点的边缘问题	179
五、圆锥小口与具有若干辐条的圆环相连接节点的边缘问题	179
六、圆筒-法兰连接节点的边缘问题	180
七、圆筒-圆锥小口连接节点的边缘问题	181
八、大锥角圆锥-圆筒连接节点的边缘问题	182
参考文献	183
第六章 离心机的振动	184
第一节 离心机临界转速的计算	184
一、有关临界转速的几个概念	184
二、几种离心机临界转速的计算	185
三、影响临界转速的其它因素	189
第二节 离心机的平衡	189
一、转子的平衡在离心机振动中所处的地位	189
二、转子的平衡和精度选择	190
第三节 离心机的减振设计	199
一、隔振原理	199
二、多自由度系统固有频率和振幅的计算	201
三、隔振器的选择和设计	202
参考文献	209
第七章 过滤离心机	211
第一节 三足式离心机	211
一、结构及类型	211
二、主要技术参数及其确定	213
三、主要部件的结构分析	214
四、各种卸料型式	218
五、驱动方式的类型	222
六、液压驱动操作原理	223
第二节 上悬式离心机	227
一、基本结构	228
二、基本部件特征	229
三、上悬式离心机的运动理论	239
四、离心机所需功率的计算	244
第三节 卧式刮刀卸料离心机	249
一、结构及型式	249
二、刮刀离心机自动控制原理简述	251
三、刮刀机构	252
四、刮刀片及刮刀的改进	255
五、刮削物料消耗的功率	256

六、刮刀离心机的振动	258
七、刮刀离心机的进展	261
八、虹吸刮刀卸料离心机	263
第四节 卧式活塞推料离心机	267
一、操作特性	269
二、生产能力计算	270
三、新型结构	275
四、油路控制系统	280
五、发展概况	282
第五节 离心力卸料离心机	284
一、物料的运动学分析	285
二、转鼓	287
三、筛网	290
四、旋转洗涤结构	296
五、糖膏的内加热装置	297
六、滤渣排出装置	299
七、反跳环过滤离心机	299
第六节 振动卸料离心机	301
一、结构分析	302
二、物料的运动学分析	308
三、动力学分析	312
第七节 进动离心机	318
一、结构和性能	318
二、参数选择	321
三、调节章动角的机构	322
四、运动分析	324
五、进动离心机的动力学分析	328
六、设计原则	330
七、振动和稳定问题的综合考虑-转鼓适宜结构参数的选择	332
参考文献	334
第八章 沉降离心机	338
第一节 卧式螺旋卸料沉降离心机	338
一、主要结构和简单的工作原理	338
二、主要优、缺点	339
三、主要性能和技术参数	341
四、常压卧螺离心机	341
五、密闭防爆卧螺离心机	345
第二节 卧螺离心机的应用	345
一、处理液-液-固三相混合物的卧螺离心机	346
二、处理固相密度比液相密度小的卧螺离心机	347
三、粒子分级用卧螺离心机	349
四、逆流洗涤卧螺离心机	350

X

五、并流式卧螺离心机	352
六、污泥脱水用卧螺离心机	353
第三节 立式螺旋卸料沉降离心机	363
一、主要结构和工作原理	363
二、结构特点	363
第四节 螺旋沉降离心机的主要部件结构	366
一、转鼓	366
二、螺旋输送机	371
三、过载保护装置	378
四、卸渣装置	383
第五节 其它沉降式离心机	384
一、管式高速离心机	384
二、处理气-液-固三相混合物的沉降式离心机	387
三、复合式离心机	390
参考文献	393
第九章 碟式分离机	395
第一节 碟式分离机的主要类型及基本结构	395
一、人工排渣碟式分离机	396
二、喷嘴排渣碟式分离机	398
三、活塞排渣碟式分离机	402
四、碟式分离机的传动系统	406
五、碟式分离机的向心泵	407
第二节 活塞排渣碟式分离机的自动控制	410
一、根据时间控制排渣循环	410
二、光电管监控排渣循环	410
三、按渣填充程度控制排渣	412
第三节 活塞排渣碟式分离机的结构发展	417
一、转鼓结构的发展	417
二、活塞结构改进	421
参考文献	424
第十章 沉降离心机的传动装置	426
第一节 螺旋卸料离心机差速器的选型	426
一、螺旋卸料离心机差速器的主要类型及其特点	426
二、渐开线行星齿轮差速器型式的选择	430
第二节 渐开线齿轮行星传动设计与计算	433
一、行星传动的运动学	433
二、行星传动的动力学	437
三、行星传动的几何计算	448
四、行星传动齿轮强度计算	461
五、均载装置、内齿圈和转臂的结构与计算	463
第三节 行星传动装置的可靠性和电子计算机技术的应用	479
一、行星传动装置的可靠性设计	479

二、电子计算机在行星传动设计中的应用	486
第四节 轴承和联轴器	490
一 轴承	490
二、液力联轴器和磁粉离合器	500
第五节 碟式分离机的传动装置	506
一、螺旋齿轮传动的特点与参数选择	506
二、螺旋齿轮传动的承载能力计算	509
三、提高螺旋齿轮传动寿命的措施	511
参考文献	525
第十一章 离心机的选型	526
第一节 固-液分离系统的分析	526
一、离心机和其它分离装置的选择比较	527
二、与选型有关的颗粒特性	528
三、悬浮液的预处理	529
第二节 固-液分离离心机的选型	530
一、沉降式离心机和过滤式离心机的选择比较	530
二、沉降式离心机的选用	532
三、过滤式离心机的选用	533
四、废水污泥机械脱水设备的选择	533
第三节 液-液分离离心机的选择	534
参考文献	536

第一章 绪 论

第一节 离心机在工业上的应用与分类

一、离心机的应用及其发展

在现代工业中,固-液系统(包括悬浮液和乳浊液)分离的目的是:(1)回收有价值的固相,排掉液相;(2)回收液相,排掉固相;(3)固、液两相都回收;(4)固、液两相都排掉(如污泥脱水)。达到固-液分离的主要操作方法有重力沉降、过滤和离心分离。利用离心力来达到固-液、液-液,以及液-液-固分离的方法通称为离心分离。实现离心分离操作的机械称为离心机。

离心机和其它分离机械相比,不仅能得到含湿量低的固相和高纯度的液相,而且具有节省劳力、减轻劳动强度、改善劳动条件,并具有连续运转、自动遥控、操作安全可靠和占地面积小等优点。因此自1836年第一台工业用三足式离心机在德国问世,迄今一百多年以来已获得很大的发展。各种类型的离心机品种繁多,各有特色,正在向提高技术参数、系列化、自动化方向发展,且组合转鼓结构增多,专用机种越来越多。现在离心机已广泛用于化工、石油化工、石油炼制、轻工、医药、食品、纺织、冶金、煤炭、选矿、船舶、军工等各个领域。例如湿法采煤中粉煤的回收,石油钻井泥浆的回收,放射性元素的浓缩,三废治理中的污泥脱水,各种石油化工产品的制造,各种抗菌素、淀粉及农药的制造,牛奶、酵母、啤酒、果汁、砂糖、桔油、食用动物油、米糠油等食品的制造,织品、纤维脱水及合成纤维的制造,各种润滑油、燃料油的提纯等都使用离心机。离心机已成为国民经济各个部门广泛应用的一种通用机械。

离心机基本上属于后处理设备,主要用于脱水、浓缩、分离、澄清、净化及固体颗粒分级等工艺过程,它是随着各工业部门的发展而相应发展起来的。例如18世纪产业革命后,随着纺织工业的迅速发展,1836年出现了棉布脱水机。1877年为适应乳酪加工工业的需要,发明了用于分离牛奶的分离机。进入20世纪之后,随着石油综合利用的发展,要求把水、固体杂质、焦油状物料等除去,以便使重油当做燃料油使用,50年代研制成功了自动排渣的碟式活塞排渣分离机,到60年代发展成完善的系列产品。随着近代环境保护、三废治理发展的需要,对于工业废水和污泥脱水处理的要求都很高,因此促使卧式螺旋卸料沉降离心机、碟式分离机和三足式下部卸料沉降离心机的进一步发展,特别是卧式螺旋卸料沉降离心机的发展尤为迅速。

离心机的结构、品种及其应用等方面发展很迅速,但理论研究落后于实践是个长期存在的问题。目前在理论研究方面所获得的知识,主要还是用来说明试验的结果,而在预测机器的性能、选型以及设计计算,往往仍要凭借经验或试验。造成这种现象的主要原因是由于离心分离过程的多样性和复杂性,例如悬浮液的物理性能和浓度非常容易变化,沉降速度、渗透率、孔隙率以及若干其它参变数,都随着悬浮液性质的改变而变化。特别是由于固体颗粒的大小、形状和运动的杂乱状态所带来的数学问题,在目前尚无法解决,给研究这一过程的理论带来了很大的困难。其次,要能真正了解液体与固体颗粒在离心力场中运动的真相,而又不干扰或破坏这些运动,这就需要科学的观察和测试手段,也许正是因为这种缘故,使离心分离理论的研究

受到了一定的影响。随着现代科学技术的发展,固-液分离技术越来越受到重视,离心分离理论研究迟缓落后的局面也正在积极扭转。离心机是固-液分离技术的主要设备之一,其发展前途大有可为。

二、离心机的分离过程及分类

离心分离根据操作原理可区分为两类不同的过程——离心过滤和离心沉降。而与其相应的机种可区分为过滤式离心机和沉降式离心机。

离心过滤过程从广义的概念上来说,可理解为包括加料、过滤、洗涤、甩干和卸渣等五个步骤。如果就狭义的概念而言,可分为两个物理阶段:生成滤渣和压紧滤渣。第一个阶段与普通过滤在原则上相近似,但其推动力不同;而第二阶段与普通过滤的规律根本不同。

离心沉降过程也可分为两个物理阶段:固体颗粒的沉降和形成密集的沉渣层。前者遵从固体在流体中相对运动的规律,而后者则遵从土壤力学的基本规律。离心沉降过程本身又可

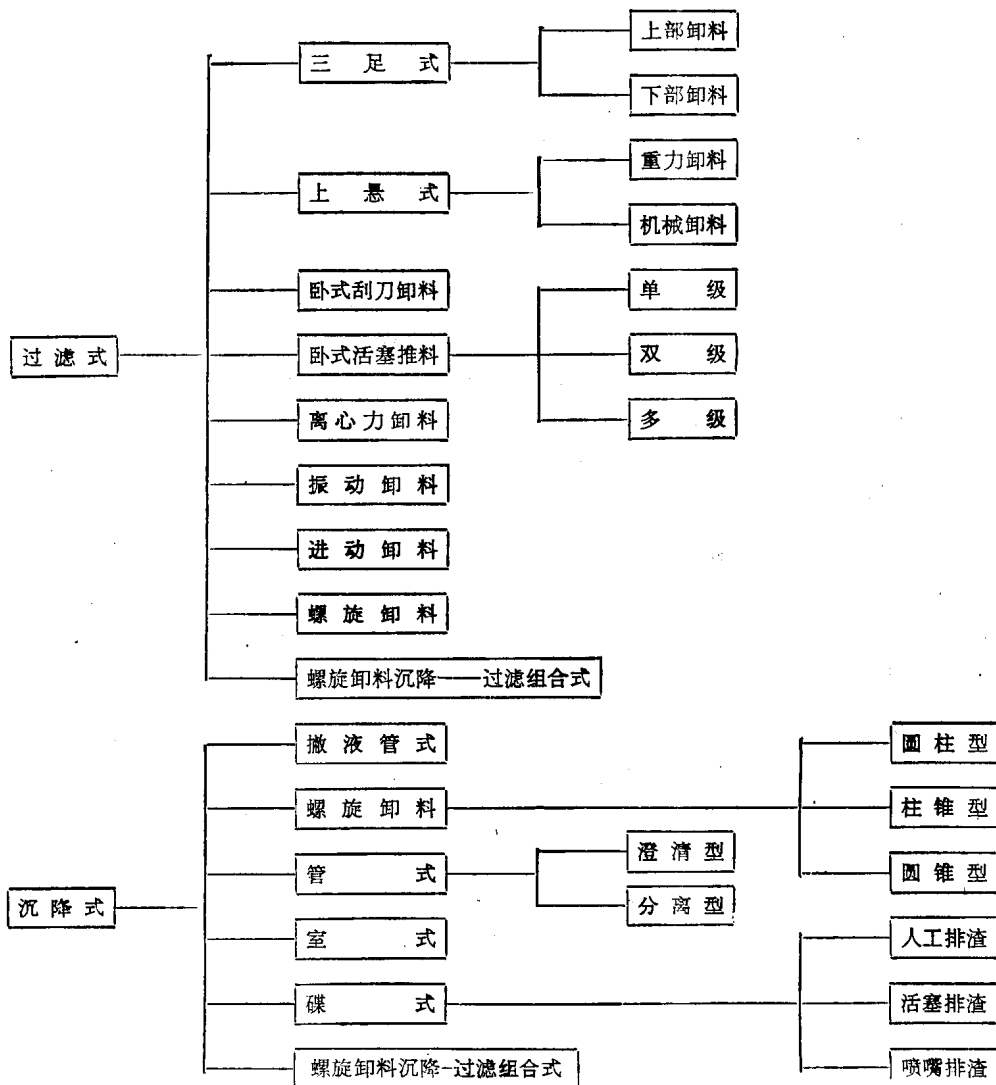


图 1-1 离心机的分类

分为离心沉降和离心分离。

一般情况下,离心沉降过程是指含有中等及大量固体颗粒的悬浮液的工艺分离过程。对于容积浓度不超过5%的低浓度悬浮液的分离,习惯上称为离心澄清过程。当离心沉降过程用于分离两种重度不同,而又互不相溶的液体所形成的乳浊液时(包括含微量固体颗粒的乳浊液,即液-液-固),称为离心分离过程。这种名称上的区别以及浓度的界限是相对的和人为的,实质上悬浮液或乳浊液中固体颗粒沉降过程的运动学和动力学规律是一样的。

这里必须强调指出,分离过程的描述仅仅是整个离心分离作用机理的一部分。在离心过滤和离心沉降分离固体颗粒的过程中都具有“压缩”现象,这一现象很值得重视。在离心过滤过程中,这种压缩效应使滤渣孔隙缩减,变得不易渗透,从而阻碍了脱水;在离心沉降过程中,这种压缩效应减小了沉渣的空隙,反而有助于降低沉渣的含湿量。

离心机的分类方法很多,可按分离原理、操作目的、操作方法、结构型式、分离因数、卸料方式等分类。本书按分离原理分类法分为过滤式和沉降式两类,详见图 1-1。

第二节 离心力场的基本特性

离心力场的基本特性基于等速回转运动的基本规律。描述离心力场基本特性的主要内容包括离心力、分离因数、哥氏力以及离心液压等。兹扼要分述如下:

一、离心力和分离因数

假设具有质量为 m 的质点,沿以 o 点为圆心、以 r 为半径的圆周作等速回转运动时(见图 1-2),回转角速度 ω 与转速 n 的关系式为:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (\text{弧度/秒}) \quad (1-1)$$

回转角速度 ω 和圆周速度 V_0 之间的关系式为:

$$V_0 = \omega r \quad (\text{米/秒}) \quad (1-2)$$

在任何一个等速回转运动中,都会产生向心加速度 a_n 以及与其等值而反向的离心加速度 a_c ,则

$$a_c = a_n = \omega^2 r \quad (\text{米/秒}^2) \quad (1-3)$$

作用在质点上的向心力 F_0 和离心惯性力(以下简称离心力) F_c ,数值相等方向相反。计算公式如下:

$$F_c = F_0 = m\omega^2 r \quad (1-4)$$

$$F_c = \frac{G}{g} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 r \approx \frac{Grn^2}{900} \quad (\text{公斤力}) \quad (1-5)$$

式中 G ——物体的重量(公斤);

g ——重力加速度(米/秒²)。

被分离的物料在离心力场中所受的离心力和它所受的重力的比值,称为分离因数 F_r ,则

$$F_r = \frac{F_c}{G} = \frac{m\omega^2 r}{mg} = \frac{\omega^2 r}{g} \quad (1-6)$$

显然,分离因数亦即离心加速度与重力加速度的比值。

分离因数的值一般是以转鼓的转速表示的,为实用起见,将公式(1-1)代入公式(1-6),

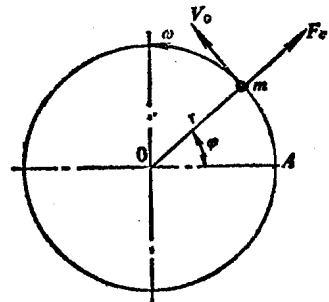


图 1-2 回转运动系统

换算后得到

$$F_r = \left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2 \frac{r}{g} \approx 1.12 \times 10^{-3} r n^2 \quad (1-7)$$

分离因数是表示离心机分离能力的主要指标,是代表离心机性能的重要标志之一。 F_r 值愈大,物料受的离心力愈大,分离效果也就愈好。因此,对于固体颗粒小、液相粘度大和难分离的悬浮液,要采用分离因数较大的离心机。现代工业用离心机, F_r 可由数百到数万。显然,离心机是一种高效率的分离设备。

分析公式(1-7)可以看到提高分离因数的途径。由于分离因数 F_r 与转鼓半径 r 成正比,因此增大转鼓尺寸时, F_r 值增长较平缓,但转鼓半径增大后,转鼓的应力状态却受到较大影响。而分离因数 F_r 与转鼓转速 n 却成平方关系,提高转速时, F_r 增长很快。故高速离心机的结构特点是转速高、直径小、分离因数大。分离因数的提高并不是任意无限制的,其极限值取决于转鼓的机械强度。

离心力场和重力场的主要区别是:在重力沉降和过滤操作中,固体颗粒或液体颗粒所走的距离和地球半径(6370公里)比起来是很微小的,因而可以认为重力场是均匀的,重力场的强度是固定不变的。而离心力场则不然,离心力场的强度是以分离因数来表示的,分离因数可以通过改变转鼓转速和转鼓半径来改变。就是同一台离心机的转鼓内,颗粒所受的离心力也随着颗粒的回转半径(颗粒在转鼓内的瞬时位置)的改变而改变。因此严格的讲,颗粒在转鼓内由中心向转鼓壁的移动过程中所受的离心力并不是固定不变的。

二、哥氏力

当研究回转运动的特性时,除了离心力外,还必须注意到可能出现的哥氏力 F_k 。哥氏加速度是哥氏力的来源,哥氏加速度是由于质点不仅作圆周运动,而且也作径向运动所产生的。

由理论力学得知^[4],当牵连运动为匀角速定轴转动时,哥氏加速度的大小为

$$\alpha_k = 2\omega V_r \quad (1-8)$$

式中 V_r ——质点相对于转鼓的径向速度。

α_k 方向与 V_r 垂直,即相当于把相对速度矢量 V_r 按动系的角速度 ω 的转向转过 90° 。

哥氏力 F_k 按下式确定

$$F_k = 2m\omega V_r \quad (1-9)$$

如果质点对回转的转鼓无相对运动,或者它的相对位移与回转轴线平行的话,则 $F_k=0$ 。

从理论上分析,哥氏力在离心机中确实存在,而且对物料在离心力场中的运动状态也有一定的影响。例如在研究离心机中液滴运动的理论模型时,曾考虑到哥氏力的影响,得到了液滴运动的曲线轨迹,并经实验所验证^[5]。但在一般设计计算中,由于其运算较繁琐复杂,因此在影响不大的情况下,与一般工程问题一样,常忽略不计。

三、离心液压

离心机工作时,处于转鼓中的液体和固体物料层,在离心力场的作用下,将给转鼓内壁以相当大的压力,称为离心液压。离心液压的计算公式如下:

$$p_c = \frac{\gamma}{g} \omega^2 \int_{r_1}^R r dr = \frac{\gamma \omega^2}{2g} (R^2 - r_1^2) \quad (1-10)$$

式中 p_0 ——离心液压(公斤力/米²);
 γ ——转鼓内被分离物料的重度(公斤力/米³);
 ω ——转鼓的回转角速度(1/秒);
 r_1 ——转鼓内物料环的内表面半径(米);
 R ——转鼓内表面半径(米);
 g ——重力加速度(米/秒²)。

当转鼓转速很大时,液面近似于与转鼓壁平行的同心圆柱面,此时 r_1 近似于常数。

离心液压 p_0 不仅作用在转鼓壁上,同时也作用在顶盖和鼓底上。计算转鼓的强度时必须把离心液压考虑进去。

第三节 分离物料的特性^{[3][4]}

一、悬浮液的特性

悬浮液是由液体(连续相)和悬浮于其中的固体颗粒(分散相)组成的系统。利用离心机分离悬浮液时,对其分离后的产品,必须考虑到三点:(1)滤液或分离液的澄清度;(2)滤渣或沉渣中的含湿量;(3)滤渣或沉渣中的可溶性物质。其中澄清度和含湿量是衡量分离效率的主要指标。从离心分离的观点来看,一般地说悬浮液的化学性质对分离的影响甚小,而其物理和物理化学性质则影响较显著。后者常称为悬浮液的特性。悬浮液的浓度以及固相和液相的特性确定了悬浮液的特性。

悬浮液可按固体颗粒的大小和浓度(可用重量百分数或体积百分数表示)来分类。可分为粗颗粒悬浮液,细颗粒悬浮液以及高浓度悬浮液、低浓度悬浮液等。固体颗粒的粒度和悬浮液的浓度与滤渣或沉渣的厚度增长率、离心机的处理能力有密切关系,在设备选型中占有重要的地位。劳埃德和沃德绘制了一张颇有参考价值的示意图,该图简要地表示出根据颗粒尺寸和悬浮液浓度选用固-液分离设备的一般情况,见图1-3。关于离心机的选型详见本书第十一章。

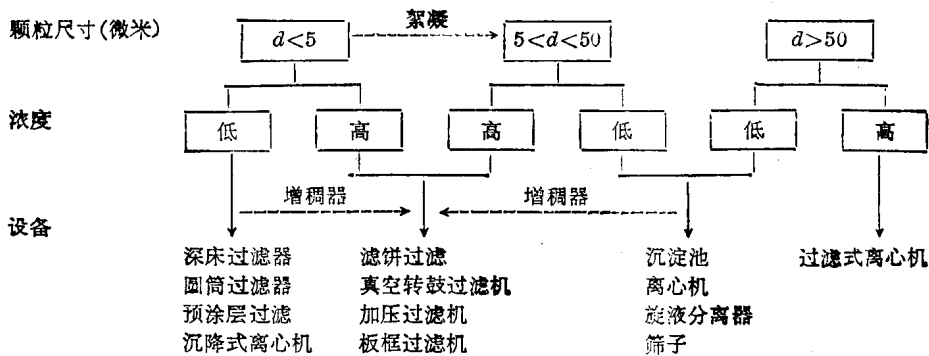


图 1-3 按颗粒尺寸和浓度选用固-液分离设备的示意图

悬浮液的粘度取决于液相的粘度和悬浮液的浓度。其关系可用下式计算:

$$\mu_1 = \mu_2(1 + 4.5\alpha_0) \quad (1-11)$$

式中 μ_1 ——悬浮液的粘度(公斤·秒/米²);

μ_2 ——纯液体的粘度(公斤·秒/米²);

x_0 ——悬浮液中所含固体颗粒的浓度,以体积百分比表示之。

此外,颗粒的聚集状态,静电力的作用,特别是固体颗粒的粒度分布都对悬浮液的粘度有所影响。

液体的物理性质如比重、粘度和表面张力对离心分离效率有较大影响。温度的升高,粘度和表面张力的下降,都有利于离心分离,因此有些悬浮液在进入离心机前应进行预加热。

二、固体颗粒的特性

(一)悬浮液中固体颗粒的特点

进入离心机的悬浮液或料浆中的固体颗粒,是由许多单个颗粒以及聚集在一起的颗粒团组成的混合物。因此研究固体颗粒的特性时,不仅涉及到颗粒的大小和几何形状,而且也涉及到颗粒与周围液体表面间的相互作用。这种相互作用是一个十分复杂的问题,在很大程度上取决于颗粒尺寸的大小和形状。随着颗粒尺寸的减小而其比表面积增大时,表面效应则越来越显著。这种相互作用的表现形式复杂多变,在分离操作过程的各个方面都占有重要的地位。

为了测定悬浮液中颗粒的大小与形状,必须了解颗粒与其周围液体之间的界面情况。有些颗粒由于结晶力或分子间的吸引力很强,因此把这种颗粒与液体区别开,相对来说是较容易的。例如金属粉末、砂粒以及某些结晶盐等,能够容易地找出可辨识的单个颗粒。而有些颗粒则不然,例如用硅胶、粘土、氢氧化铝、氢氧化铁等配制成含水的滤浆,要分清每个颗粒与液体的明显界面,就非常困难。在实际工程中,用离心机分离的物料种类十分广泛,情况也比较复杂,对绝大多数物料来说,明显地确定单个颗粒和周围液体界面的实况是比较困难的。因此要全面地描述所有颗粒的尺寸和形状是不可能的。

固体颗粒可分为坚硬的和软脆的。坚硬的颗粒比较稳定,软脆的颗粒则不稳定。在进行测定分析的过程中,颗粒的大小和形状可能发生变化,带来一系列的难题。对于易变形和易破碎的物料,通常需要采取间接的尺寸分析方法。在实际操作中,由于输送、搅拌、混合、凝聚等过程,都可能引起颗粒的破碎,而降低颗粒度将会影响固-液分离的效果。

用离心分离方法分离悬浮液时,由于悬浮在其中的固体颗粒大小的不同,所受的离心力便不同。当物料在离心力场的停留时间一定时,大于极限粒径 d_0 的颗粒,便在离心力的作用下,克服沉降阻力而沉降至鼓壁。而小于极限粒径 d_0 的颗粒仍悬浮在液体里。值得注意的是,在离心力场中,悬浮液的固体颗粒更倾向于凝聚,能使许多小于极限粒径 d_0 的微粒凝聚在一起,变成大颗粒或颗粒团而沉降。这种效应称为离心絮凝效应。它对于固体物料脱水和液体的澄清都极为有利,但对于固体颗粒的分级,却起反作用。用离心分离法进行颗粒分级时,防止这种现象的唯一途径是采用高效的分散剂。

颗粒特性一般系指颗粒群中颗粒的主要物理性质,包括颗粒的大小、粒度分布、形状、比重、表面性质等。它和液体的主要性质(比重、粘度)以及悬浮液的浓度和状态等决定了其它一些特性,例如颗粒的沉降速度、滤渣的渗透率和比阻等。

关于固相颗粒粒径的测定方法和计算方法等在各种专门书籍中已有详细介绍。本书只从离心分离的实用观点,简单地说明实际的测定计算方法。

(二)粒径的定义

作为被分离物料中的固体颗粒,情况极为复杂,不但颗粒粒径大小不同,形状也是各种各样。固-液分离工程上遇到的各种颗粒的尺寸范围如图 1-4 所示。

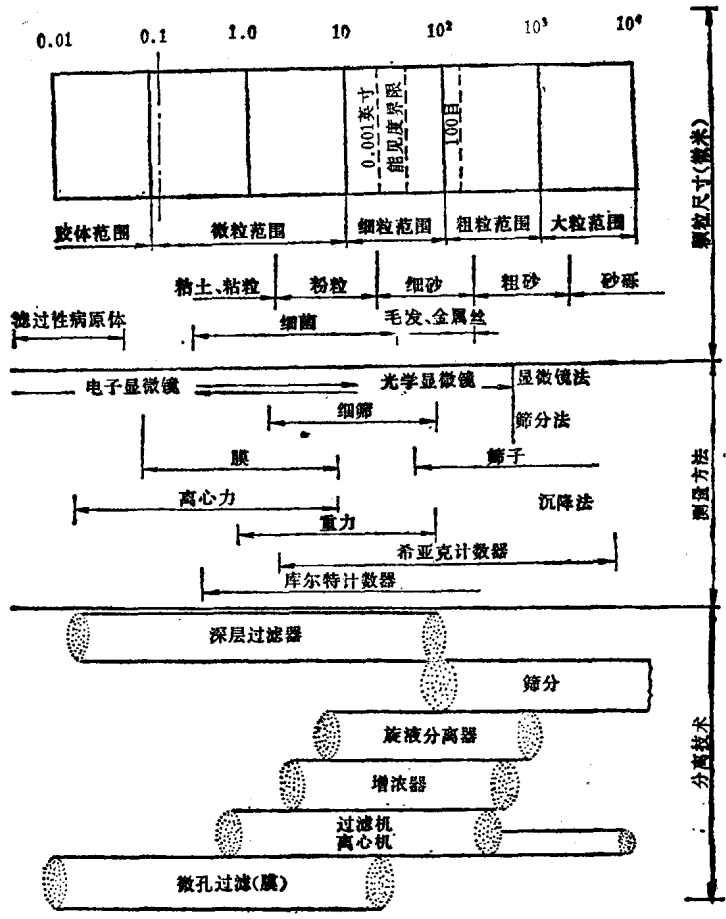


图 1-4 颗粒的尺寸范围

如果物料的颗粒是大小均匀的球形,可以取其直径作为粒径。若颗粒大小和形状不一,则必须按一定方法确定其粒径。表示粒径的方法基本上可分为三类:即“当量圆球直径”、“当量圆周直径”和“统计直径”。其定义见表 1-1、表 1-2 和表 1-3。

表 1-1 “当量圆球直径”的定义

符 号	名 称	圆 球 当 量 特 性
d_v	体积直径	体积
d_s	表面积直径	表面积
d_{sv}	比表面积直径	表面积与体积的比值
d_d	阻力直径	在同一种液体里以同样速度沉降时的阻力
d_f	自由沉降直径	同样的颗粒重度,在同一种液体里的自由沉降速度
d_{st}	斯托克斯直径	遵从斯托克斯定律 ($Re < 0.2$) 时的自由沉降速度
d_A	筛孔直径	通过相同的正方形的筛孔








表 1-2 “当量圆周直径”的定义

符 号	名 称	圆 周 当 量 特 性
d_a	投影面积直径	颗粒处于稳定位置时的投影面积
d_p	投影面积直径	颗粒处于任意位置时的投影面积
d_c	圆周直径	颗粒外形的圆周

表 1-3 “统计直径”的定义

符 号	名 称	测 量 尺 寸
d_F	费雷特直径	颗粒轮廓线上相对应边两切线间的距离
d_M	马丁直径	颗粒表面积平分线的长度
d_{SH}	切向直径	用切向目镜看到的颗粒宽度
d_{OH}	最大直径	颗粒轮廓线内最大的长度

颗粒粒径的“尺寸”取决于测量的方法。对尺寸为 $2 \times 1 \times 1$ 真实颗粒的各种当量直径的测量结果如图 1-5 所示。其中除筛分法外,其它方法测得的数值范围为 1.43~2.23,变化量约 60%。因此在实际工程中选用测定方法时要慎重考虑。

测定方法	测定的直径种类	当量圆球	直径的数值任何单位
	真实颗粒		
显微镜	投影面积直径		$d_a=1.58$
显微镜	最大的费雷特直径①		$d_F=2.23$
沉降	斯托克斯直径②		$d_{st}=1.43$
库尔特计数器	体积直径		$d_v=1.55$
筛	筛孔直径		$d_A=1$
希亚克计数器	表面面积直径		$d_s=1.77$

注: 1. 平行切线间的最大距离。

2. 斯托克斯直径包含在 $3\sigma\mu d$ 表示式中, $3\sigma\mu d$ 系作用在一个颗粒上的力(对于运动的阻力)。

图 1-5 当量直径

(三) 平均粒径

由于颗粒大小和形状不一,因此必须按一定的方法确定其平均粒径。表示粒度分布的平均粒径的方法很多,常用的主要有三种:即中径 d_{50} 、多数径 d_{mod} 和平均径 d_{av} 参见图 1-6。

平均粒径的计算方法见表 1-4^[5]。

从图 1-6 可以看到,若按中径、多数径和平均径三种方法计算同一种物料试样的平均粒径,显而易见 $d_{av} > d_{50} > d_{mod}$ 。而在平均径的各种计算方法中,一般构成的顺序是 $d_3 < d_2 < d_1 < d_4 < d_5$,所得的结果差别很大。实际上应根据不同的任务,即根据对物料所进行的物理、化学处理,来选择最为恰当的粒径计算方法。在固-液分离中一般取 d_{50} 为平均粒径的计算方法。

(四) 颗粒形状

实际上固体颗粒群中的绝大多数颗粒,形状都是不规则的。为了便于分析研究,最简单的

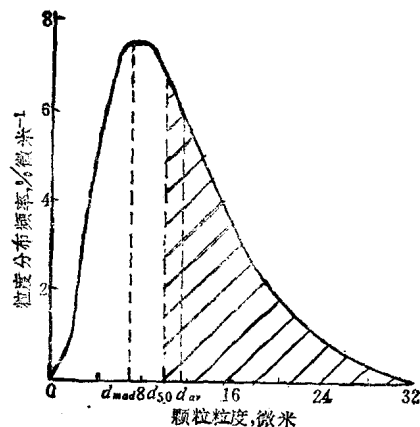


图 1-6 粒度分布的多数径、中径和平均径

表 1-4 平均粒径的计算方法

名称	符号	计算公式	物理意义
中径	d_{50}		以粒度分布的累积值为 50% 时的粒径表示
多数径	d_{mod}		以粒度分布中分布率最高的粒径表示
算术平均径	d_1	$d_1 = \sum nd / \sum n$	单一粒径的算术平均值
几何平均径	d_2	$d_2 = (d_1 \cdot d_2 \cdots d_n)^{1/n}$	几个粒径乘积的 n 次方根
调和平均径	d_3	$d_3 = \sum n / \sum (n/d)$	各粒径的调和平均值
平均表面积径	d_4	$d_4 = [\sum nd^2 / \sum n]^{1/2}$	将总表面积除以总个数取其平方根
平均体积径	d_5	$d_5 = [\sum nd^3 / \sum n]^{1/3}$	将总体积除以总个数取其立方根

方法是假定颗粒群中所有的颗粒都是规则的,亦即颗粒的尺寸、形状和特性完全一样。各种形状的颗粒尺寸见表 1-5。

具有代表性物料的颗粒形状系数范围见表 1-6。

颗粒的种类范围很广,形状变化多端,在悬浮液或料浆中常见到的典型颗粒见图 1-7~图 1-10。

表 1-5 颗粒尺寸

形状	一般值	最大值	最小值	表面积	体积	比表面
立方体	l	$\sqrt{3}l$	l	$6l^2$	l^3	$6/l$
长方体	l, b, t	$\sqrt{l^2 + b^2 + t^2}$	t	$2(lb + bt + tl)$	lbt	$2\left(\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{t}\right)$
球体	d	d	d	πd^2	$\frac{\pi d^3}{6}$	$\frac{6}{d}$
圆柱体	d, l	$\sqrt{d^2 + l^2}$	d 或 l	$\pi d \left(l + \frac{d}{2}\right)$	$\frac{\pi d^2 l}{4}$	$4\left(\frac{1}{2l} + \frac{1}{d}\right)$
椭球体	a, b, c	$2a$	$2c$		$\frac{4\pi}{3} abc$	
其它	d			$k_a d_{av}^2$	$k_v d_{av}^3$	$\frac{k_a}{k_v d_{av}}$

表中 k_a ——表面积形状系数; k_v ——体积形状系数。