

精细化工后处理装备

洪家宝 主编

化学工业出版社

精细化工后处理装备

洪家宝 主编

化学工业出版社

(京)新登字039号

内 容 简 介

本书主要介绍精细化工产品后处理技术中, 过滤、干燥、粉碎和混合等过程所用装备的性能、结构和材质, 对除尘和通风所用的设备也作了适当介绍。本书汇集了近年来, 国内精细化工行业装备调研情况和国内、外部分先进装备, 对加快精细化工后处理装备的革新改造工作有促进作用。

本书主要供从事精细化工产品生产的工程技术人员参考, 也可供大中院校有关专业的师生参考。

精细化工后处理装备

洪家宝 主编

责任编辑: 张红兵

封面设计: 任 辉

•

化学工业出版社 出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号)

三河印刷厂印刷

三河印刷厂装订

新华书店北京发行所经销

•

开本 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张20 字数503千字

1990年11月第1版 1994年7月北京第2次印刷

印 数 2,901—6,550

ISBN 7-5025-0807-4/TQ-463

定 价 18.00元

前 言

“精细化工”一词，近几年才在国内常见。但许多行业(如医药、染料、油漆、农药等)在我国已有较长历史，并逐步形成独立行业。随着科学技术的发展，社会对精细化工产品的质量要求愈来愈高。而在后处理部分(亦称“商品化”过程，其中包括工艺技术问题)，我们的精细化工产品质量与国外产品比，差距较大，问题较多。往往这方面的技术又比较难于引进。即使装备引进了，还有配套、翻版制造的消化工作。为适应生产需要，不少化工企业自行研制或改造后处理装备。由于缺乏这方面的理论和实践，工厂之间的信息交流又比较差，以致不是低水平的重复，便是用生产设备摸索操作技术条件。不仅浪费人力、物力，而且容易挫伤革新改造的积极性，影响装备水平的提高。

为加快后处理装备革新改造的进程，在化工部有关司局的大力支持下，我们总结整理了几年来国内某些行业装备调研情况、交流会资料，并收集了有关的实用理论和国内外部分先进装备的资料，编写成册，以供工厂从事后处理装备革新工作的同志和工程技术人员参考。期望对精细化工后处理装备水平的提高，作微薄贡献。这是发起编写此书的同志们的初衷，也是全体编写人员孜孜以求的目标。为此，本书比较注重理论联系实际，且侧重于应用。

本书主要讨论了过滤、干燥、粉碎和混合等过程的装备，及除尘、通风等附属设备。因各行业包装型式各异，又限于篇幅，本书对包装部分未作介绍，出版部门计划另编专著。

本书由化学工业部化工司、炼化司组织部分企业的同志集体编写的，并请有关大专院校、科研设计单位的专家进行了审阅，作了较大的增删和修改。全书由洪家宝同志主编，1至4章的编写负责人分别为洪家宝、高炎武、范增君、杨汝田。参加绪论和各章编写工作的有刘伯英、崔玺民、王济群、刘桂华、杨金年、王兆禄、俞卫国、张浸、韩庭本等同志。

借本书出版之际，谨向参加审阅工作的袁凯瑞、姚公弼、周海泉(第1章)，王喜忠、李楨、孙尚亮、金裕生(第2章)，梁光星、孙宏道、蔡敏轩、乐加信(第3章)，缪丽娟、金国贵、赵亮(第4章)等同志，以及关心、支持本书编写工作的各级领导和同志们致谢！

精细化工所涉及的面很广，由于编写人员水平和行业的局限，本书在应用实例方面，受到一定限制，其它缺点，错误也在所难免，热忱地欢迎广大读者批评指正！

编 者

概 述

精细化工后处理装备,虽亦属化工装备,因用于生产精细化学品的后处理过程,在性能、结构和材质等方面颇有特色。随着精细化工日新月异的发展,愈来愈引起了人们的重视。

精细化工,是生产各种精细化学品的工业的总称。精细化学品,是指经过深度化学加工制得的具有高功能或最终使用性能的化学品。医药和染料是较早投入工业生产的精细化学品,它们赋予了精细化工悠久的历史。随着科学技术的进步,新技术革命前沿的信息科学、生命科学和材料科学的崛起,使精细化工的生产门类、品种不断增加,领域日益扩大,被赋予新兴工业的活力。目前,国际上对精细化工的范围和分类,还没有统一的概念。按我国目前的情况,精细化工大致包括三十多个门类。发展较早的有医药、染料、有机颜料、农药、涂料、无机颜料、化学试剂、粘合剂、感光材料、磁性记录材料、日用化学品、化妆品、合成洗涤剂、油墨等,已形成一些独立行业,催化剂、助剂、表面活性剂、溶剂、矿物浮选剂、油品添加剂等,发展也较早、较快,虽未形成独立的行业,但已有一定的生产基础。此外,还有饲料添加剂、食品添加剂、水处理剂、金属表面处理剂、油田化学品、造纸化学品、皮革化学品、电子工业用化学品、功能高分子材料、生命科学用材料等,七十年代才在我国发展起来,生产基础还比较薄弱,有的尚在探索研究,称之为精细化工新领域,正在迅速发展。

精细化学品具有品种多、产量小、质量要求高、技术密集度高、附加价值和利润率大、更新换代快等特点,应用领域遍及国民经济各部门和人民物质文化生活的各个方面,具有很大的经济效益和社会效益。

精细化学品的生产和一般化工产品一样。包括化学反应过程和后处理两部分。前者是将基本化工和有机化工原料或中间体,经过各种化学反应和单元操作,加工制成各种精细化学品。这时的产品,各行业有不同的称呼,如染料工业称原染料,医药行业称原料药,农行业称原油或原药等。这些产品尚需作进一步加工,并添加各种辅料、助剂、乳化剂等,以满足用户对商品性能的要求。这些加工大多属物理过程,一般称之为后处理过程。两者在生产过程中的“分界线”,有的行业并不严格,有的行业则有明确分工。如农药生产,乳剂一般在原药生产厂直接包装出厂,而粉剂则多数由如工厂加工而成。由于各种产品的标准、要求不同,各行业后处理所包含的工序也不完全一样,本书拟从过滤讲起,即包括过滤、干燥、粉碎、混合和包装等主要工序。由于包装涉及面很广,不易概括,且受人力所限,暂不讨论。

“工欲善其事,必先利其器”。精化工后处理装备用于精细化学品的商品化,直接影响产品的质量、产量、原材料消耗、能耗和生产环境等。它的规模远比不上基本化工原料、化肥工业装备的大型化,却要能适应千差万别的商品化要求,而且要不断以高效、低耗、安全的新型装备,满足不断涌现的精细化工新产品的要求,满足人民生活的需要、提高社会效益。这正是装备工作者为之努力的课题。

当前我国精细化工的后处理装备水平,总的说是不高的。大多数工序仍停留在半机械化阶段、基本上是人工包装,既影响产品质量的提高,工人劳动强度也很大,劳动条件比较恶劣。结构型式陈旧的设备数量多,缺乏新型装备,在一定程度上影响了精细化学品质量和新产品投产。必须通过研制、对引进技术和设备的消化吸收等途径,加速后处理装备的技术改造。下面仅就几个主要操作单元装备、作简要讨论。

1107209

过滤设备。液固分离有离心分离和过滤两种方法。一般来说，离心分离的机械化程度较高，设备种类也较多，可供选择的余地较大。但颗粒很细、且粘度大的产品，则需用压滤机来过滤。过滤是精细化工产品生产中很重要的一个环节，目前，国内普遍采用的板框压滤机，不仅劳动强度大，而且存在漏料的问题。从国外引进的全自动板框压滤机，机件复杂，机修困难，零部件不耐腐蚀、易损坏，板与框间隙小，滤饼易被卡住，不易清洗，更换品种较困难，而且投资高。在西欧一些先进的工厂里，也很少采用全自动板框压滤机，大多对现有板框压滤机加以改进，如：（1）加大过滤面积，普遍采用 $1.2\text{米} \times 1.2\text{米}$ ，比我国常用的 $0.8\text{米} \times 0.8\text{米}$ 过滤机的面积大1.2倍，劳动强度可降低一半。（2）滤布四周涂布一圈橡胶，加强板与框之间的密封，减少漏料。（3）在压滤机支架横杠外，加一组拉开板框的自动装置，以减轻劳动强度。（4）用合成材料代替木材，如聚丙烯、酚醛树脂、不饱和聚酯玻璃钢等材料，也有采用硬橡胶的，很少用木材。虽购置费高些，因使用寿命长、漏料少、还是合算的。（5）压滤机一般的安装高度为离地面一米左右，下面放置盛滤饼的不锈钢斗车，容积一般为 1米^3 ，运送滤饼方便，还可防止铁锈混入滤饼。也有在压滤机下装置卧式打浆罐，直接将滤饼打浆，用泵输送到下一个工序加工。（6）采用两侧增加橡皮膜的新型过滤板。当物料充满过滤室后，橡胶膜与滤板间充入压缩空气，鼓起橡胶膜，压挤滤饼，不但可以降低滤饼内的母液含量，而且容易卸料。

国外某些染料厂，在一些不溶性染料或中间体的生产中，为了提高染料质量和收率，往往采用在溶剂中结晶后过滤的后处理工艺，这样可以除去一些副反应的杂质，还可节约大量的热能。分散染料和有机颜料的晶形与应用性能之间有密切联系、往往在生产中进行加热升温处理，以改变晶形。为此，多采用一种自动化程度较高的密闭式加压平板过滤机，滤板有保温夹套，可保证在恒温下过滤。

1978年在西德举行的世界化工设备展览会上，瑞士埃斯舒伟斯公司(Escher Wyss Co.)展出一台旋转连续过滤器。这种设备结构简单，密闭操作，可过滤有机溶剂的物料，是很值得重视的一种新型过滤型过滤设备。

目前，在电子工业、生物工程、食品化工和医药化工等精细化工领域里，除了传统的过滤方法，超过滤法、微孔过滤等膜分离技术，日趋成熟，成为确保产品质量不可缺少的超净手段。超过滤用于某些含有各种小分子量可溶性溶质和高分子物质，如蛋白质、酶、病毒等溶液的浓缩分离。除了用于水系处理的聚丙烯、聚乙烯、醋酸纤维、芳香聚酰胺、聚丙烯腈、聚碳酸酯和尼龙等，还有性能优异的可分离有机溶剂的非水系聚酰亚胺超滤膜。国外一般制成膜组件使用，国内尚未工业化。微孔过滤采用一种由特种纤维素酯或高分子聚合物制成的网状结构的滤膜。微孔膜在国外已商品化，我国只有纤维素酯型一种。微孔过滤器的型式，除平板式外，尚有筒式、折叠式、卷式和中空丝式等多种型式。

干燥设备。干燥是精细化学品生产中很重要的一个环节。目前干燥设备的种类很多，如箱式干燥器，滚筒干燥器、真空耙式干燥器、气流干燥器、喷雾干燥器等等，可满足不同性质物料的干燥要求。如箱式干燥器，虽笨重，操作劳动强度大，热效率低（国内的较高水平也仅达12%左右），是一种陈旧落后的设备。但对小批量品种，则具有简便的特点，相对来说还是经济的。当某些精细化学品有特殊要求时，它更有其独到之处。如某些有机颜料，由于结晶水和其它原因，在干燥过程中物料不能受振动，否则干燥后，成品的性能大大下降。这时，箱式干燥器便是比较理想的干燥设备。

随着对精细化学品使用性能方面愈来愈高的要求，喷雾干燥器的应用与日俱增。它使产

品有一个尽可能准确的粒度范围，而且能控制细颗粒的量；能根据需要产生一亲水或疏水的表面；使颗粒具有较高的机械强度，不致在装运中破碎等。在喷嘴结构和热能利用方面不断改进。新型喷雾干燥器，具有穿流旋转仓、回流喷嘴，克服了一般喷雾干燥器的缺点，能成功地调节、控制不同浓度物料的颗粒分布；并能按不同要求，加工成一定的几何形状。

因干燥机理比较复杂，目前理论计算与实际还有较大差距，大都需通过实验来选型和确定设备结构参数。由于受现场条件所限，许多干燥设备的性能并不先进，往往干燥工艺的选择不够合理，设备本身存在缺陷，使物料在干燥过程中变质和飞扬，降低收率、浪费热能。国外有些专业公司，从事干燥技术和设备的开发、制造和技术服务，其技术水平较高，如丹麦的尼罗（NiRO）公司。最近我国也有了为后处理提供技术服务的公司，虽然它的规模还较小，服务项目也比较少，但是它把科研、设计、制造、技术服务结合在一起，必定能起到加快后处理装备革新的步伐，提高干燥、研磨等后处理装备水平的作用。

粉碎设备。在精细化工的后处理中，粉碎的主要问题是提高细度和研磨效率。当前对许多精细化工产品提出“超细粉”的要求，所以装备工作者在努力寻求高效的研磨设备。目前，国内干式研磨以气流粉碎机为主，湿式研磨则以砂磨机用的较多。研磨在后处理中的地位，通过研磨在染料生产中的位置可见一斑。由于印染工艺的改进，要求水不溶性染料的内在细度愈来愈高，要求分散染料和还原染料的细度，适应悬浮体轧染、散纤维染色、筒子纱染色、卷轴染色等工艺的要求。因目前国内生产的分散染料或还原染料的“超细粉”。采用滴滤纸润圈的检验方法。这个方法不能真正反映印染工艺对染料细度的要求。往往级别高的染料，在印染中实际应用效果并不好；印染中实际应用的染料，测定的级别并不好。这个方法遮盖了染料本身的某些缺点，如颗粒大小的分布范围太大，超细的颗粒过多，往往引起染料在印染过程中的“泳移”现象，而超细的颗粒也容易“凝聚”，在织物上产生色斑。所以检验方法的缺陷，遮盖了研磨工艺中存在的问题。当然，生产符合悬浮体轧染或高温高压所需用的染料，影响的因素很多，如染料的纯度，晶型，助剂的品种、配方、质量，以及研磨后的粒径等。这里仅讨论研磨问题。在测定国外的分散染料和还原染料的粒径时，发现颗粒直径分布较窄。国内大多采用砂磨锅研磨染料，很难达到颗粒直径分布狭的要求。因砂磨锅在研磨时，锅壁和中心、锅的上部和下部所研磨的程度不同。锅壁和下部染料磨得就细，而中间和上部染料颗粒就粗，设备愈大，这种差别愈严重。所以西欧的染料厂，使用砂磨机较普遍。

随着科学技术的发展，气流粉碎机的性能不断改进，气流速度提高到音速的两倍以上。不但能得到细度高（小于 $1\mu\text{m}$ ）具有一定粒度分布的产品，而且更适用于热敏性物料。在能耗方面也有明显改善。较新型的耙式气流粉碎机，国内尚处于研制阶段。

混合设备和其它。混合是精细化学品实现商品化的重要工序。如染料成品（固—固）混合，染料喷雾干燥前的湿拼混（液—液）；农药原药与载体（液—固）混合等。混合设备除传统的滚筒式混合机外，单螺旋和双螺旋锥形混合机及气流式混合机使用较多。较新型的犁浆式混合机开始用于生产高含量的粉剂农药等。

在后处理过程中，物料回收是重要的组成部分，所以本书对除尘设备和风机等，也做了介绍。

精细化工的后处理装备，除各工序的设备正确选型外，一些辅助材料，应予以足够的重视。例如过滤机（器）中的滤布——过滤介质，砂磨机内装填的玻璃珠、瓷珠等——研磨介质。它们不仅影响产品质量，而且直接影响后处理装备性能的发挥，及生产的经济效益，是一个不容忽视的重要课题。

81.171
5-

目 录

前言

概述

第1章 过滤	1
第1节 过滤过程原理	2
一、概述	2
二、滤液的流动	3
三、过滤速度与过滤速率	4
四、滤饼的阻力	5
五、过滤介质的阻力	5
六、过滤基本方程式	6
七、过滤基本方程式的应用	7
第2节 悬浮液的预处理	9
一、凝聚和絮凝	9
二、助滤剂	14
三、其他预处理方法	15
第3节 过滤介质	16
一、过滤介质的分类	16
二、过滤机理	17
三、常用挠性过滤介质的纤维特性和结构	18
四、过滤介质的微孔尺寸和微粒滞留性的测定	22
五、过滤介质的稳定性和强度	22
六、过滤介质的透过度	23
七、过滤介质性能测定方法	24
第4节 滤饼的洗涤和脱水	28
一、滤饼的洗涤	28
二、滤饼的脱水	31
第5节 压力过滤	32
一、板框式压滤机	32
二、全自动式板框压滤机	35
三、立式滤布全行走型压滤机	37
四、管式可变滤室压滤机	39
五、螺旋式压榨机	40
六、圆盘式V型压榨机	41
七、机械挤压式连续压滤机	42
八、快开式水平加压叶片过滤机	44
九、密闭式加压耙式过滤机	45

十、压滤操作中挤压和吹干的效果	48
第6节 真空过滤	48
一、间歇式真空过滤槽	49
二、连续转鼓真空过滤机	49
三、滤布行走式转鼓真空过滤机	50
四、连续水平带式真空过滤机	51
第7节 离心过滤	53
一、选择离心过滤机的标准	53
二、离心场中滤饼内在渗透性的测定	54
三、离心过滤机的类型	55
第8节 动态过滤	62
一、动态过滤的特征	62
二、旋管式过滤机	64
三、旋叶式圆盘过滤机	64
第9节 固液分离设备的选型	67
一、沉降或过滤	67
二、沉降设备	68
三、过滤试验	68
四、悬浮液中固体颗粒的特性	71
五、过滤设备	71
六、过滤技术的发展趋势	73
参考文献	74
第2章 干燥	75
第1节 干燥的基本理论	75
一、干燥特性曲线	75
二、恒速干燥	76
三、降速干燥	77
四、干燥时间的计算	78
第2节 干燥器分类和选型	78
一、干燥器分类	78
二、干燥器选型	79
第3节 箱式干燥器	81
一、箱式干燥器结构	81
二、箱式干燥器的运行及计算	82
第4节 回转圆筒干燥器	86
一、工作原理及结构	86
二、回转圆筒干燥器的设计和计算	87
三、直接加热旋转窑	89

四、间接加热蒸汽管干燥器	90	四、粉碎机的选择	171
五、直接加热的罗托-卢佛尔干燥器	90	五、粉碎的能量消耗	171
第5节 真空耙式干燥器	92	六、粉碎机的节能探讨	174
一、结构及干燥流程	92	第2节 干法粉碎及装置	177
二、提高真空耙式干燥器效率的途径	94	一、环辊研磨机	177
三、真空耙式干燥器使用情况	95	二、球磨机	177
第6节 通道式干燥器	96	三、振动磨	182
一、通道式干燥器工作原理及应用	96	四、气流粉碎机	184
二、通道式干燥器的基本结构及操作	96	五、锤式粉碎机	191
三、通道式干燥器对干燥物料的剂型要求	96	六、内分级涡轮粉碎机	192
第7节 薄膜干燥器	98	第3节 干法加料及筛析装置	197
一、滚筒薄膜干燥器的原理与设计	98	一、干法加料装置	197
二、刮板薄膜干燥器	104	二、干法筛析装置	203
第8节 气流干燥器	104	第4节 湿法研磨	206
一、工作原理和特点	104	一、砂磨机	207
二、粒子运动方程	105	二、双锥型砂磨机	221
三、粒子的传热	108	三、砂磨锅	222
四、气流干燥管的压力损失	110	四、行星砂磨机	223
五、气流干燥器的设计	111	五、其它湿法研磨装置	225
六、气流干燥器几种型式	113	第5节 湿法分散装置	228
第9节 喷雾干燥器	115	一、齿型圆盘分散器	228
一、喷雾干燥器的工作原理和特点	115	二、双轴高速分散器	230
二、液滴的干燥特性	116	三、行星叶轮分散器	230
三、喷雾干燥器的设计	121	四、叶轮匀质分散器	231
四、雾化器	128	五、高效分散机	232
第10节 流化床干燥器	136	第6节 湿法筛析装置	234
一、流态化干燥原理	136	一、圆筒过滤器	234
二、流化床干燥器	147	二、离心式分级机	236
三、设计及计算	153	第7节 粒度及粒度分布的测定	237
第11节 几种新发展的干燥器	162	一、筛分法	238
一、强化沸腾干燥器	162	二、显微镜法	239
二、旋转闪蒸干燥器	162	三、沉降法	243
三、空心桨叶干燥器	163	四、风动粒度测定方法	248
第12节 干燥过程的节能	164	五、激光粒度测定法	251
一、干燥器的热效率	164	第8节 粉碎助剂	253
二、干燥过程的节能	165	一、粉碎助剂的类型	253
第3章 粉碎	167	二、应用效果	256
第1节 概述	167	三、作用机理	257
一、定义	167	参考文献	257
二、粉碎方法	168	第4章 混合、除尘与气力输送	259
三、粉碎方式的分类	169	第1节 混合	259
		一、概述	259
		二、固相混合机	262

三、液相混合器	276
四、混合程度的检测	274
第2节 除尘	275
一、概述	275
二、旋风除尘器	277
三、袋式除尘器	282
四、洗涤式除尘设备	284
五、除尘器的卸料装置	289
六、气流含尘浓度测定	292
第3节 气力输送	293

一、气力输送的类型及装置	294
二、装置的设计	294
三、气力输送在精细化工生产中的 应用	304
四、气力输送的发展方向	304
附录 风机	307
一、风机的选择	307
二、应用实例	309
参考文献	310

第1章 过 滤

化学工业中采用固液分离技术是一种历史悠久的古老操作，也是现代广泛应用的一种必不可少的重要处理过程。通过各式各样的大小过滤装置，每天都有百万吨左右的化工产品和废液在处理着。现代化的工业几乎都在不同的程度上与固液分离技术息息相关，而且到目前为止仍在不断地扩大，甚至人们的日常生活也是和固液分离技术分不开的。

有关过滤的著作以我国发表得最早。在著作中画有一种原始的过滤结构，形成象古代希伯来人的涡形管。公元三世纪的埃及资料中描述了一些用于染料的过滤器，是由一只底部钻孔的陶制染缸制成——在缸底放有一张草垫，上面铺有一层石灰，并将粘土加到溶液中作为助滤剂，后来到了中世纪，人们采用了通过织物的重力过滤。

第一份关于过滤器的专利是在1789年由法国政府发布的。该专利的内容是以一块海绵状物为基础。到了1791年英国的一份专利描述了一种“斜度过滤法”。这项发明是以一个容器，底部放置粗砂，上面铺有砂子并形成一个小斜坡，一根中心管把水从顶端引入砂石，然后从靠近砂子上部的容器侧面流出滤液。这些滤液可以聚集起来，并通过过滤器返回。后来在十九世纪七十年代出现了各种连续过滤器的专利，它们是装有圆筒，其内外侧裹以织物作为过滤介质。这些圆筒覆盖干燥用的热空气罩，并装有各种清洗织物的机构。

精细化工生产中经常遇到悬浮液的液固分离问题。悬浮液系液体中含有固体颗粒的两相混合物，而各种固体颗粒具有不同的几何形状，如颗粒状，片状，纤维状和不规则形状。因为固体颗粒微小而能够均匀地悬浮在液体中，不易分离。根据产品的不同要求，有的是要分离以得到液体，有的是要求得到固体颗粒，也有的是要求两者兼得的。由于在精细化工生产中悬浮液的种类繁多，因此在分离时要根据悬浮液的不同特性采用不同的分离方法。

悬浮液中固体颗粒的直径大小与分离的关系很大。一般固体颗粒的粒径愈大，愈易分离。当固体颗粒的粒径小于 $0.5\mu\text{m}$ 时，由于颗粒的布朗运动现象，分离较为困难。悬浮液的粘度、重度的差异也影响分离，尤其是粘度愈大，愈难分离。此外组成悬浮液的固体颗粒与液体有重度差别，重度相差愈大，愈易分离。

今天无论在化学工业中还是在其它行业中采用着各式各样的过滤装置。发展到能够过滤微米级的固体颗粒。并能够经受各种温度和各种腐蚀性物质，使过滤技术日趋完善以及过滤技术的应用要求日益专门化。但是以往对过滤技术的机理和研究介绍不多，因此在设计和制造过滤装置时多凭经验进行。尤其是在选择过滤设备方面缺乏系统的技术数据和资料。近年来，固液分离应用范围不断地扩大，要求也越来越高。涉及到为适应时代发展而不断进步的固液分离技术，以及提高质量、节约能源、有效利用资源，改善环境保护等要求。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。

当前在固液分离技术中待研究和开发的重要课题有：

- I 能使滤饼含水率降至最低的机械压榨法；
- II 压滤机操作的进一步机械化；
- III 旋转式压滤机之类的动态过滤法；
- IV 超滤器及其适用范围；

- V 螺旋沉降离心机的改进；
- VI 浮选技术的高级化和适用范围的扩大；
- VII 多级重力沉降分离器与澄清过滤装置的高效化。

第1节 过滤过程原理

一、概述

过滤的定义是悬浮液通过可渗透性介质实现截留固体颗粒的固液分离过程。

为了得到通过过滤介质的滤液，应该在过滤介质两边保持一定的压力降 Δp ；从原理上说，这个压力降是由推动力而得到的，见图1-1。推动力有四种类型：即重力，真空，压力和离心力。

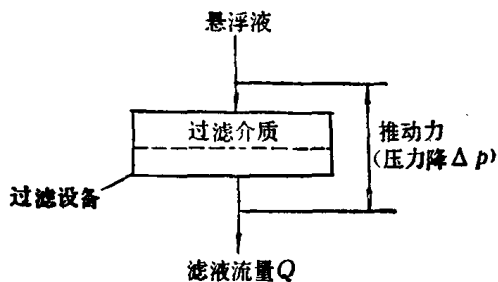


图 1-1 过滤过程示意图

在实际操作中使用的过滤主要有两种方式：表面过滤又称滤饼过滤，其中固体颗粒以滤饼的形式沉积在过滤介质进料的一边；深层过滤，固体颗粒沉积在过滤介质内部。

在表面过滤过程中，过滤介质的开始压力降比较低。如图1-2所示，大于过滤介质孔隙的以及孔隙大小相等的颗粒拥向孔隙，形成一些更狭窄的通道。这些更狭窄的通道将进料液

中更小的颗粒分离出来便是滤饼。滤饼层在以后的悬浮液的过滤中起着过滤介质的作用。

表面过滤过程用于过滤悬浮液的含固量高于1%的物料。由于过滤含固量低的悬浮液会产生过滤介质堵塞现象，这种现象可以通过提高悬浮液的含固量或者是添加助滤剂来避免，因为助滤剂具有很多孔隙，可以改善滤饼的渗透性。而使含固量低的和难以过滤的悬浮液进行滤饼过滤。

图1-2系常规过滤过程的滤饼模型，其中固体颗粒和液体均以 90° 角向过滤介质运动。而另一种“延迟滤饼形成”的过滤方式，系用水力或机械搅拌方法防止形成滤饼，即固体颗粒不断地被搅回悬浮液中。于是，悬浮液逐渐变稠。这样，固体颗粒的有效运动与过滤介质平行。而液体则以一定的角度向过滤介质运动。依据这一原理制造的连续过滤机有实用价值。经证

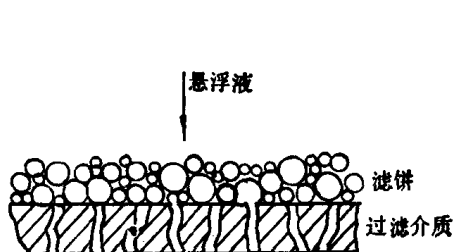


图 1-2 滤饼过滤机制

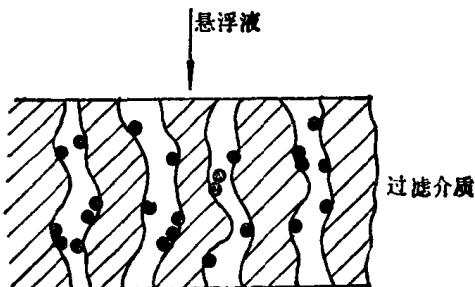


图 1-3 深层过滤机制

明采用机械搅拌可以显著地提高过滤效率，而且降低滤饼的孔隙率。因此提出了延迟滤饼过滤的数学模型。适用于旁路离心过滤，即固体颗粒在离心力作用下离开过滤介质，而液体则从过滤介质的孔隙通过。

在深层过滤器中，固体颗粒小于过滤介质的孔隙，因此这些颗粒可以进入长而弯曲的孔隙，在重力、扩散和惯性等作用下，被收集起来，并且在分子力和静电力作用下附着于过滤介质内表面上。

深层过滤过程的开始压强降一般比表面过滤过程高。随着固体颗粒的不断被收集，深层过滤器的压强降逐渐升高。深层过滤器一般用于净化，即将含固率很低的悬浮液中细小的固体颗粒分离出来。图1-3。

在以上两种过滤方式中，滤饼过滤应用较广，特别是在化学工业上大多数过滤都是需要滤饼而不是滤液。

过滤过程的主要特性是流量与压强降关系和分离效率等操作特性。因为影响过滤过程的因素较多（滤饼厚度，单位面积的质量，比阻力系数，悬浮液的粘度和含固量，悬浮液中固体颗粒度大小等），关系很复杂。

二、滤液的流动

滤饼是由被截留的固体颗粒沉积而成的固定床层，颗粒之间存在着网络状的空隙，滤液即从中通过，这样的固定床层可作为一个截面形状复杂多变而空隙面积保持恒定的流通管道。管道的当量直径可由床层的空隙率和颗粒的比表面来计算。

单位体积床层中的空隙体积称为空隙率，以 ε 表示：

$$\text{即：} \quad \varepsilon = \frac{\text{空隙体积}}{\text{床层体积}}$$

式中 ε ——床层的空隙率， m^3/m^3 。

单位体积颗粒具有的表面积称为比表面，以 a 表示。

$$\text{即：} \quad a = \frac{\text{颗粒表面积}}{\text{颗粒体积}}$$

式中 a ——颗粒的比表面， m^2/m^3 。

依照非圆形管道当量直径的定义，当量直径：

$$d_e = 4 \times \text{水力半径} = \frac{\text{管道截面积}}{\text{润湿周边长}}$$

故对颗粒床层的当量直径可写出：

$$d_e \propto \frac{\text{流道截面积} \times \text{流道长度}}{\text{润湿周边长} \times \text{流道长度}}$$

$$\text{则} \quad d_e \propto \frac{\text{流道容积}}{\text{流道表面积}}$$

取截面积为 1m^2 、厚度为 1m 的滤饼考虑：

$$\text{床层体积} = 1 \times 1 = 1\text{m}^3$$

$$\text{流道容积（即空隙体积）} = 1 \times \varepsilon = \varepsilon\text{m}^3$$

若忽略床层中因颗粒相互接触而彼此复盖的表面积，则：

$$\text{流道表面积} = \text{颗粒体积} \times \text{颗粒比表面} = 1(1 - \varepsilon)a\text{m}^2$$

所以床层的当量直径为：

$$d_e \propto \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)a} \quad (1)$$

式中 d_c ——床层流道的当量直径, m

由于构成滤饼的固体颗粒通常很小, 颗粒间孔隙十分细微, 液体流速很低, 而液固之间的接触面积很大, 故流动为粘性摩擦力所控制, 常属于滞流流型。这一论点在1830年就已为地下水渗过砂层的研究工作所证实, 即压强降与流速成直线关系。因此, 可以按照圆管内滞流流动的泊谟叶公式来描述滤液通过滤饼的流动。泊谟叶公式为:

$$u = \frac{d^2(\Delta p)}{32\mu l} \quad (2)$$

式中 u ——圆管内滞流流体的平均流速, m/s;

d ——管道内径, m;

l ——管道长度, m;

Δp ——流体通过管道时产生的压强降, kgf/m²;

μ ——流体粘度, kgf·s/m²

仿照式 2 可以写出滤液通过滤饼床层的流速与压力降的关系为:

$$u_1 \propto \frac{d_c^2(\Delta p_c)}{\mu L} \quad (3)$$

式中 u_1 ——滤液在床层孔道中的流速, m/s;

L ——床层厚度, m;

Δp_c ——压强降, kgf/m²;

μ ——滤液粘度, (kgf·s)/m²

在与过滤介质层相垂直的方向上, 床层空隙中的滤液流速 u_1 与按整个床层截面积计算的滤液平均流速 u 之间的关系为:

$$u_1 = \frac{u}{\varepsilon} \quad (4)$$

将式 1、4 代入式 3, 并写成等式, 得:

$$u = \frac{1}{k} \cdot \frac{\varepsilon^3}{a^2(1-\varepsilon)^2} \cdot \frac{\Delta p_c}{\mu L} \quad (5)$$

式 5 中的比例常数 k , 对于颗粒床层内的滞流流动, k 值可取为 5, 于是:

$$u = \frac{\varepsilon^3}{5a^2(1-\varepsilon)^2} \left(\frac{\Delta p_c}{\mu L} \right) \quad (5a)$$

三、过滤速度与过滤速率

式 5a 中的 u 为单位时间通过单位过滤面积的滤液体积, 称为过滤速度, m/s。通常将单位时间得到的滤液体积称为过滤速率, m³/s。过滤速度是单位过滤面积上的过滤速率, 应防止将二者相混淆。若过滤过程中其它因素维持不变, 则由于滤饼厚度不断地增加而使过滤速度逐渐减小。任一瞬间的过滤速度应写成如下形式:

$$u = \frac{dv}{Ad\theta} = \frac{\varepsilon^3}{5a^2(1-\varepsilon)^2} \left(\frac{\Delta p}{\mu L} \right) \quad (5b)$$

而过滤速率为:

$$\frac{dv}{d\theta} = \frac{\varepsilon^3}{5a^2(1-\varepsilon)^2} \left(\frac{A\Delta p_c}{\mu L} \right) \quad (5c)$$

式中 v ——滤液量, m^3 ;
 θ ——过滤时间, s ;
 A ——过滤面积, m^2 。

四、滤饼的阻力

对于不可压缩性滤饼, 式5中的空隙率 ε 可视为常数, 颗粒的形状、大小也不改变, 因而比表面 a 亦为常数。式5b和5c中的 $\frac{\varepsilon^3}{5a^2(1-\varepsilon)^2}$ 反映了颗粒的特性, 其随物料而不同。若以 r 代表其倒数, 则式5b可写成:

$$\frac{dv}{Ad\theta} = \frac{\Delta p_c}{\mu r L} = \frac{\Delta p_c}{\mu R} \quad (6)$$

式中 r ——滤饼的比阻, l/m^2 。其计算式为:

$$r = \frac{5a^2(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (7)$$

R ——滤饼阻力, l/m 。其计算式为:

$$R = rL \quad (8)$$

式6表明当滤饼不可压缩时, 任一瞬间单位面积上的过滤速度与滤饼上、下游两侧的压力差成正比, 而与当时的滤饼厚度成反比, 并与滤液的粘度成反比。同时, 过滤速率也可表示推动力与阻力之比的形式表示: 过滤推动力, 即促成滤液流动的因素, 即压力差 Δp_c ; 而单位面积上的过滤阻力便是 $\mu r L$ 。其中又包括两个方面的因素, 一是滤液本身的粘性(μ), 二是滤饼阻力(rL)。

比阻 r 是单位厚度滤饼的阻力, 它在数值上等于粘度为 $1(kgf \cdot s)/m^2$ 的滤液以 $1m/s$ 的平均流速通过厚度为 $1m$ 的滤饼层时所产生的压力降。比阻反映了颗粒形状、大小及床层空隙率对滤液流动的影响。床层空隙率 ε 愈小及颗粒比表面 a 愈大, 则床层愈紧密, 对液体流动的阻滞作用也愈大。

五、过滤介质的阻力

滤饼过滤中, 过滤介质的阻力一般都较小, 但却不能忽略, 尤其在初始过滤阶段的滤饼层较薄的期间。过滤介质的阻力也与其厚度及本身的紧密程度有关。通常将过滤介质的阻力作为常数, 仿照式6可以写出滤液穿过过滤介质层的速度关系式:

$$\frac{dv}{Ad\theta} = \frac{\Delta p_m}{\mu R_m} \quad (9)$$

式中 Δp_m ——过滤介质上、下游两侧的压力差, kgf/m^2 ;

R_m ——过滤介质阻力, l/m

由于难于划分过滤介质与滤饼之间的分界面, 更难测定分界面处的压力, 因而过滤介质的阻力与最初所形成的滤饼层的阻力一般是无法分开的, 所以过滤操作中总是将过滤介质与滤饼合并起来考虑。滤液通过这两个多孔层的速度表达式为:

$$\text{滤饼层} \quad \frac{dv}{Ad\theta} = \frac{\Delta p_c}{\mu R}$$

$$\text{过滤介质层} \quad \frac{dv}{Ad\theta} = \frac{\Delta p_m}{\mu R_m}$$

由于滤饼与过滤介质的面积相同，所以两层中的过滤速度应相等，则，

$$\frac{dv}{Ad\theta} = \frac{\Delta p_c + \Delta p_m}{\mu(R + R_m)} = \frac{\Delta p}{\mu(R + R_m)} \quad (10)$$

式中 $\Delta p = \Delta p_c + \Delta p_m = \frac{dv}{Ad\theta} \cdot \mu R + \frac{dv}{Ad\theta} \cdot \mu R_m$ ，代表滤饼与过滤介质两侧的 压力降，称为过滤压力差。式10表示，可用滤液通过滤饼与过滤介质的总压力降来表示过滤推动力，用两层的阻力之和来表示总阻力。

为便利起见，以一层厚度为 L_c 的滤饼来代替过滤介质，而过滤仍能完全按照原来的速率进行，这层滤饼就应当具有与过滤介质相同的阻力，即： $rL_c = R_m$
于是式10可写为：

$$\frac{dv}{Ad\theta} = \frac{\Delta p}{\mu(rL + rL_c)} = \frac{\Delta p}{\mu r(L + L_c)} \quad (11)$$

式中 L_c ——过滤介质的当量滤饼厚度，或称假设滤饼厚度，m。

在一定的操作条件下，以一定过滤介质过滤一定悬浮液时， L_c 为定值，但同一过滤介质在不同的过滤操作中， L_c 值不同。

六、过滤基本方程式

以每获得 1m^3 滤液所形成的滤饼体积为 $V\text{m}^3$ ，则在任一瞬间的滤饼厚度 L 与当时已经获得的滤液体积 v 之间的关系应为：

$$LA = vV$$

则

$$L = \frac{vV}{A} \quad (12)$$

式中 v ——滤饼体积与相应的滤液体积之比，无因次，或 m^3/m^3 。

同理，如生成厚度为 L_c 的滤饼所应获得的滤液体积以 V_c 表示，则：

$$L_c = \frac{vV_c}{A} \quad (13)$$

式中 V_c ——过滤介质的当量滤液体积，或称假设滤液体积， m^3 。

在一定的操作条件下，以一定过滤介质过滤一定的悬浮液时， V_c 为定值；但同一过滤介质在不同的过滤操作中， V_c 值不同。

于是，式11可以写成：

$$\frac{dv}{Ad\theta} = \frac{\Delta p}{\mu r v \left(\frac{V + V_c}{A} \right)} \quad (14)$$

或

$$\frac{dv}{d\theta} = \frac{A^2 \Delta p}{\mu r v (V + V_c)} \quad (14a)$$

或13是当滤饼不可压缩时的过滤速率与各有关因素间的关系式。

可压缩滤饼的情况比较复杂，它的比阻是两侧压强差的函数，通常可用下面的经验公式

来粗略估算压强差增大时比阻的变化, 即:

$$r = r'(\Delta p)^s \quad (15)$$

式中 r' ——单位压强差下滤饼的比阻, $1/\text{m}^2$;

Δp ——过滤压力差, kgf/m^2 ;

s ——滤饼的可压缩性指数, 无因次。 $s = 0 \sim 1$ 。对于不可压缩滤饼, $s = 0$

在一定压强范围内, 式15对大多数可压缩滤饼适用。

将式15代入式14 a, 将得到:

$$\frac{dv}{d\theta} = \frac{A^2 \Delta p^{1-s}}{\mu r' v (V + V_e)} \quad (16)$$

式16称为过滤基本方程式, 表示过滤过程中任一瞬间的过滤速率与各有关因素间的关系, 是进行过滤计算的基本依据。式16适用于可压缩滤饼及不可压缩滤饼。对于不可压缩滤饼, 因 $s = 0$, 故式16简化为式14 a。

应用过滤基本方程式作过滤计算时, 还需根据过程进行的具体方式对式16积分。一般过滤操作有恒压、恒速及先恒速、后恒压三种方式。

七、过滤基本方程式的应用

在工业生产中, 过滤有两种不同的操作方法, 即过滤时压强差保持不变, 过滤速率逐渐降低, 称为恒压过滤。反之, 保持过滤速率不变, 逐渐增大压力降的操作, 称为恒速过滤。

实际上, 通常以恒压过滤操作为主, 例如, 板框式压滤机多系在 $3\text{kgf}/\text{cm}^2$ 压力降下操作, 真空回转过滤机多系在 500mmHg 下操作。一般都不采用恒速过滤, 但是合理的过滤操作应先是恒速, 然后再转为恒压过滤。因为开始过滤时, 过滤介质表面尚未形成滤饼层, 因此过滤阻力很小, 如即采用最大压强, 将使悬浮液中的固体颗粒穿过过滤介质的微孔, 造成滤液混浊, 或者堵塞微孔, 阻碍滤液通过。

1. 恒压过滤

上面说过恒压过滤是最常用的过滤方法。连续过滤机上的过滤都是恒压过滤, 间歇过滤机的过滤也多数是恒压过滤。恒压过滤时, 滤饼不断增厚, 致使过滤阻力亦逐渐增加, 但推动力 Δp 恒定, 因而过滤速率逐渐减小。

对于一定的悬浮液, 若 μ 、 r' 及 v 均可作为常数, 令:

$$k = \frac{1}{\mu r' v} \quad (17)$$

式中 k ——表示过滤物料特性的常数, $\text{m}^4/\text{kg} \cdot \text{s}$

将式17代入式16, 得:

$$\frac{dv}{d\theta} = \frac{k A^2 \Delta p^{1-s}}{V + V_e}$$

恒压过滤时, 压力差 Δp 不变, k 、 A 、 s 、 V_e 又都是常数, 所以上式的积分形式为:

$$\int (V + V_e) dv = k A^2 \Delta p^{1-s} \int d\theta$$

如前所述, 与过滤介质阻力相对应的假设滤液体积为 V_e (常数), 假定得到体积 V 的滤液所需的过滤时间为 θ (常数), 则积分的边界条件为: