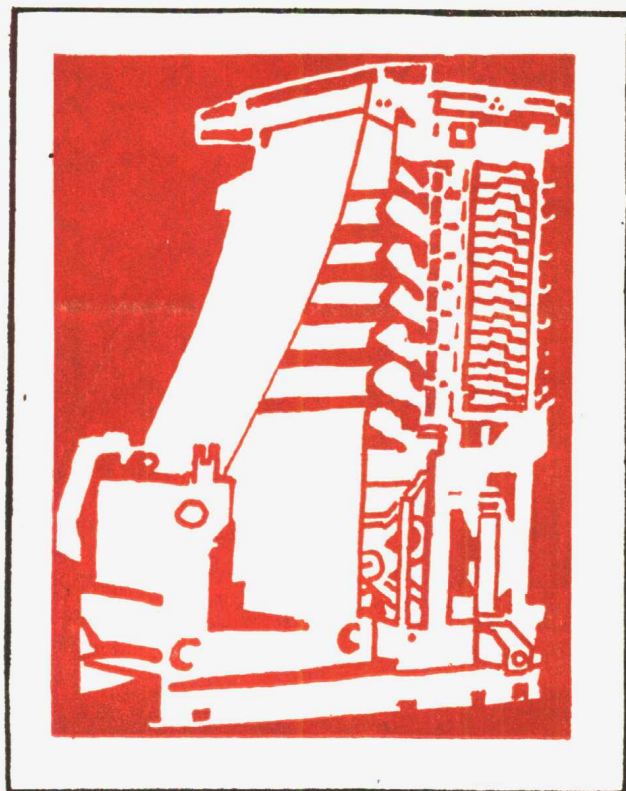


GUO LU JI



过滤机

唐立夫 王维一 张怀清 编

机械工业出版社

51.8

过 滤 机

唐立夫 王维一 张怀清 编



机械工业出版社

本书共分十章。前五章主要阐述过滤技术的新近发展、过滤理论、滤饼的洗涤与脱水、过滤介质及悬浮液的预处理；第六、七章较全面地介绍了各种类型的真空过滤机、加压过滤机及加压-压榨过滤机的原理、结构、材质及性能等；最后三章主要介绍了过滤机的机械计算、选型及过滤机的比例放大。

本书可供从事过滤机的研究、设计、制造和使用部门中的工程技术人员参考，也可作为高等工科院校有关专业（化工、轻工、冶金、环保、制药及石油化工）的教学参考。

过 滤 机

唐立夫 王维一 张怀清 编

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（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

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $15^{1/4}$ ·字数 371 千字

1984 年 6 月北京第一版·1984 年 6 月北京第一次印刷

印数 0,001—4,500·定价 1.95 元

*

统一书号：15033·5591

前 言

过滤分离技术在国民经济各个部门中应用很广。从人民日常生活，资源、能源的开发利用，国防尖端，到保护环境，防止公害等方面，都离不开过滤分离技术。例如圆盘式硅藻土过滤机可用于酒类、清凉饮料、植物油及乳品等过滤分离。加压过滤机用于选煤厂尾煤的回收，铝厂氧化铝溶液与赤泥的分离，铝镁合金厂碳酸镁的过滤，冶炼厂碱式碳酸镍的过滤，化工染料厂中间体及成品染料的分离、陶瓷厂泥浆的过滤以及石油化工厂脱蜡车间重油的脱蜡。黑色及有色金属选矿厂的精矿粉脱水，广泛使用不同种类和规格的真空过滤机。在环境保护中，对各种生产过程和城市生活排放的污水分离，也需使用过滤机。过滤机和过滤分离技术不仅应用广，而且是某些生产过程中的关键性设备之一，若采用不当，不但生产任务完不成，产品质量上不去，而且会造成资源浪费，环境污染，使整个生产经济效益很低。

在各种不同的生产系统中，由于被过滤的物料种类繁多，其物理化学性质千差万别，如粒度、粘度、重度、固相含量、pH值等因素，都对过滤机的分离效率和被分离的产品质量有影响。因此，必须根据物料的种类及生产上的要求，研究、设计和制造各种不同系列、规格和型号的过滤机，以适应各种不同生产的需要。

当前，我国过滤分离技术水平较落后，发展速度缓慢，影响了许多工业部门的生产。为了促进我国过滤分离技术的发展，满足四个现代化的需要，我们编写了本书。

书中对固液过滤过程的基本理论，各种类型过滤机的结构、选用和设计、以及对过滤介质和悬浮液的预处理，均作了较系统的阐述。

本书主要是参考国外资料进行编写的。在编写过程中，收集与参考了有关过滤机的国外专利、国际会议文献、国外期刊上发表的文献、新近出版的固液分离书籍、以及国外生产过滤机专业公司的最新产品说明书等。也参考了国内部分资料。所参考资料的详细名称，见各章参考文献。

本书由沈阳化工学院的唐立夫（前言、第四章），王维一（第一章、第三节，第五章，第六章，第七章、第九章），张怀清（第一章、第一、二节，第二章，第三章，第十章），龙期伟（第八章）等编写。全书由龙期伟、唐立夫进行初校和统一整理。

本书最后经过天津大学化机教研室金鼎伍副教授和北京有色冶金设计研究总院丁启圣工程师审稿。

由于编者水平有限、书中缺点错误在所难免，恳切希望广大读者批评指正。

编者 1982.3.

目 录

前言	
第一章 绪论	1
第一节 过滤在工业上的应用	1
第二节 过滤过程的基本特性	2
一、过滤过程的特点	2
二、过滤过程的分类	3
第三节 过滤机的发展和分类	6
一、真空过滤机的发展	6
二、加压过滤机的发展	8
三、过滤机的分类	9
第二章 过滤理论	10
第一节 过滤理论的发展	10
第二节 过滤基本方程的推导	14
一、不可压缩滤饼过滤基本方程	14
二、可压缩滤饼过滤基本方程	16
第三节 过滤基本方程的应用	21
一、过滤的操作方式	21
二、恒压过滤的计算	22
三、恒速过滤的计算	29
四、先恒速后恒压过滤的计算	30
五、变压变速过滤的计算	32
六、恒压过滤、先恒速后恒压过滤、 变压变速过滤之间的比较	35
第三章 滤饼的洗涤与脱水	37
第一节 滤饼的洗涤	37
一、滤饼的洗涤机理	37
二、洗涤计算	38
第二节 滤饼的脱水	42
第四章 悬浮液的预处理	46
第一节 凝聚和絮凝	46
一、悬浮液的电学性质	46
二、凝聚	49
三、絮凝	51
第二节 助滤剂	55
第三节 其他预处理方法	56
一、冻结与融化	56
二、超声波处理	56
三、加热处理	57
四、调整液体的粘度	57
五、表面张力的调节	57
第五章 过滤介质	59
第一节 过滤介质的分类	59
一、按作用原理分类	59
二、按制造材质分类	59
三、按结构分类	59
第二节 介质的过滤机理和技术特性	60
一、过滤机理	60
二、技术特性	61
第三节 常用挠性过滤介质	62
一、滤布	62
二、滤网	68
三、非织造纤维介质	69
四、薄膜	72
第四节 刚性多孔介质	73
一、陶瓷	73
二、金属陶瓷	73
第五节 松散固体介质	74
一、硅藻土	74
二、膨胀珍珠岩	78
第六节 过滤介质的选择	79
一、正确选择过滤介质的意义	79
二、选择过滤介质的方法	79
第六章 真空过滤机	82
第一节 刮刀卸料式转鼓真空过滤机	82
一、结构和工作原理	82
二、特征	83
三、用途	83
四、规格	83
第二节 无格式转鼓真空过滤机	84
一、结构和工作原理	84
二、反吹空气和滤布洗涤液的供给装置	85
三、无格式转鼓过滤机的工艺计算特点	86
四、特征	86
五、用途	86

六、规格	87	四、规格	122
第三节 预涂层转鼓真空过滤机	87	第十三节 水平回转翻盘真空过滤机	123
一、结构和工作原理	87	一、结构和工作原理	123
二、防止预涂层脱落的方法和装置	90	二、特征	124
三、滤饼卸除装置	91	三、用途	125
四、预涂层过滤机的特征	92	四、规格	125
五、用途	92	第十四节 水平带式真空过滤机	125
六、规格	93	一、结构和工作原理	125
第四节 滤布行走式转鼓真空过滤机	93	二、特征	132
一、结构和工作原理	93	三、用途	133
二、滤饼卸除装置	94	四、规格	133
三、滤布洗涤装置	95	第十五节 垂直回转圆盘真空过滤机	133
四、滤布跑偏修正装置	98	一、结构和工作原理	133
五、特征	101	二、特征	135
六、用途	101	三、用途	136
七、规格	102	四、规格	136
第五节 半连续式转鼓真空过滤机	103	第十六节 浓缩过滤机	136
一、结构和工作原理	103	一、结构和工作原理	136
二、特征	104	二、特征	138
第六节 绳索卸料式和辊卸料式转鼓真空 过滤机	105	三、用途	138
一、绳索卸料式转鼓真空过滤机	105	第七章 加压过滤机	140
二、辊子卸料式真空转鼓过滤机	107	第一节 压滤机的分类	140
第七节 螺旋弹簧式过滤机	108	第二节 滤布固定式凹板型压滤机	141
一、结构和工作原理	108	一、无压榨机构的滤布固定式凹板型 压滤机	141
二、特征	108	二、有压榨机构的滤布固定式凹板型 压滤机	142
第八节 其他形式转鼓真空过滤机	109	第三节 滤布单人行走式凹板型压滤机	144
一、顶部加料式转鼓真空过滤机	109	一、ISD型	145
二、内部加料式转鼓真空过滤机	109	二、UF型	146
三、侧部加料式转鼓真空过滤机	110	第四节 滤布全行走型压滤机	147
第九节 转鼓过滤机上减少滤饼水分的 装置	111	一、卧式滤布全行走型压滤机	147
一、加压辊脱水装置	111	二、立式滤布全行走型压滤机	148
二、蒸汽脱水装置	114	第五节 各种压滤机的比较	151
第十节 转鼓真空过滤机的分配头	116	第六节 压滤机的自动控制	152
一、面对式分配头	116	一、操作程序的控制	152
二、径向式分配头	120	二、计算机控制系统	153
第十一节 转鼓真空过滤机的材质	120	三、滤板压紧力的自动调节装置	154
第十二节 水平台型真空过滤机	121	四、最佳开板卸料时刻的控制装置	155
一、结构和工作原理	121	第七节 滤板、滤框、压榨板	157
二、特征	122	一、材质	157
三、用途	122	二、压榨型复式压滤机的滤板和滤框	158

三、单式压滤机的压榨滤板	159	五、用途	206
四、诺模图	163	六、规格	206
第八节 滤布的悬吊和张开装置	164	第十九节 V型盘压榨脱水机	207
第九节 滤板的移动装置	166	一、构造	207
一、链式滤板移动装置	166	二、工作原理	208
二、摆动导杆式滤板移动装置	170	三、特征	208
三、连续式滤板移动装置	170	四、用途	208
第十节 滤布行走装置	171	五、规格	208
一、单独滤布行走装置	171	第二十节 螺旋压榨脱水机	209
二、无端滤布行走装置	173	一、构造和工作原理	209
第十一节 滤浆供给装置	174	二、特征	210
一、中央给料式滤浆供给装置	174	三、用途	210
二、边部给料式滤浆供给装置	175	四、规格	210
第十二节 加压叶型过滤机	176	第八章 过滤机的机械计算	213
第十三节 垂直滤叶型加压叶型过滤机	178	第一节 板框压滤机的强度计算	213
一、水平槽垂直滤叶型加压叶型过滤机	178	一、压紧力的计算	213
二、垂直槽垂直滤叶型加压叶型过滤机	182	二、滤板和滤框的强度计算	214
第十四节 水平滤叶型加压叶型过滤机	183	第二节 真空过滤机转鼓的强度计算	217
一、垂直槽离心力卸料加压叶型过滤机	184	第九章 过滤机的选型	220
二、垂直槽振动卸料加压叶型过滤机	190	第一节 选型时应考虑的主要因素	220
三、滤叶垂直振动卸料加压叶型过滤机	193	一、滤浆的过滤特性	220
四、过滤槽旋转式加压叶型过滤机	193	二、生产规模	221
第十五节 转鼓加压过滤机	195	三、操作条件	221
一、构造和原理	195	四、过滤目的	221
二、特征	196	五、结构材料	221
三、用途	196	第二节 过滤机选型的基本原则	222
四、规格	197	一、滤浆的性质	222
第十六节 全密闭式旋转过滤机	197	二、过滤操作的周期	223
一、构造和原理	197	三、过滤的推动力	224
二、操作程序	198	四、滤饼的剥离排出	224
三、特征	198	五、滤饼的洗涤	225
四、用途	198	六、过滤机的辅助装置	225
五、规格	198	第三节 过滤机选型的试验方法和装置	227
第十七节 旋转式压滤机	198	一、真空滤叶实验	227
一、构造和原理	199	二、加压滤叶实验	227
二、特征	201	三、切削过滤器	228
三、用途	201	四、CST装置和标准剪切试验搅拌机	228
四、规格	201	第十章 过滤机的比例放大	231
第十八节 过滤带型压榨脱水机	201	第一节 连续过滤机的比例放大	232
一、污泥的预处理	202	一、中试装置比例放大法	232
二、结构	203	二、小型滤叶比例放大法	232
三、工作区	205	第二节 板框过滤机的比例放大	235
四、特征	206		

第一章 绪 论

第一节 过滤在工业上的应用

过滤是从流体中分离固体颗粒的过程。其基本原理是：在压强差的作用下，迫使流固两相混合物通过多孔介质（过滤介质），固体颗粒则截留于介质上，从而达到流体与固体分离的目的。

工业上过滤涉及的范围很广。从简单的粗滤到高精复杂的分离，流体可以是液体，也可以是气体；固体颗粒可能是粗的、细的、坚硬的、可塑的、球形的、长条的、分散的以及聚集的；所处理的悬浮物可能是浓稠的、稀释的、高温的、低温的、真空下的以及加压的。

工业上经常需要采用过滤的方法来分离液体与固体的混合物。其目的：有的是为了获得液体产品；有的则为了获得固体产品；有时二者兼要；有时并不是为了获得产品，而是为了将过滤分离所得的液体和固体分别作进一步的处理。就一般而论，要求得到滤液为产品的过滤操作，比要求得到滤饼为产品的过滤操作易于实现。过滤操作的好坏，直接影响到产品的质量、成本和生产水平，因此它在工业中的地位是十分重要的。

近十年来，随着工业发展，要求提供巨大的能源。大量固体燃料的使用，低品位矿石的开发，环境保护的苛刻要求，使得过滤技术得到很大的发展，日益受到人们的重视。

在工业上实现液固分离操作除过滤外，还有沉降、水力旋分、离心分离和喷雾干燥等几种常见的方法。一般说来，过滤比离心分离和喷雾干燥经济，但所得到的固体产品湿含量高；沉降和水力旋分比过滤更为简便易行，但分离效率又不及过滤。对于细状颗粒悬浮液或固体含量较少的悬浮液，都不宜采用离心分离，最好采用加压过滤。因此，在液固分离技术中，总是首先考虑过滤操作。只要选用适当，得益是显见的。如某铝厂分离赤泥（偏铝酸钠），先是用沉降法，后改为压滤，结果设备重量减少 59%，工程投资减少 52%，氧化铝成本每吨降低 5.08 元。

表 1-1 列出一些物料实现过滤的可能性。当然，此表远没有全部包括能用过滤方法进行分离的物料。如果在生产中需要分离的物料与表 1-1 中所列的类似，也可参照选用。当然，是否采用过滤，还决定于过程的经济性，而经济性又依

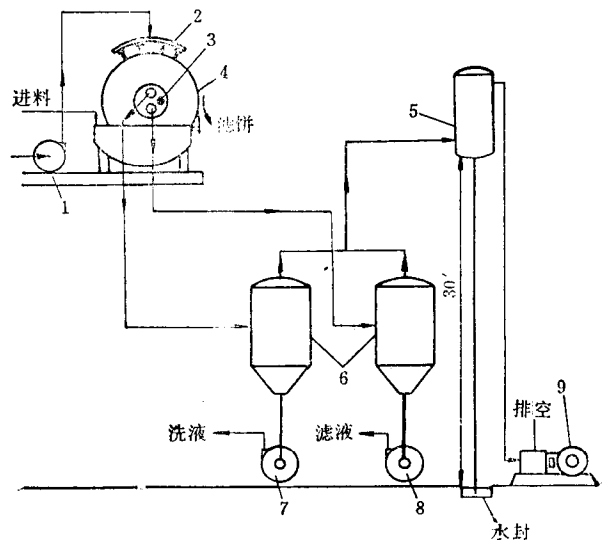


图1-1 连续真空过滤机流程图

- 1—洗液泵 2—洗涤喷头 3—空气接口 4—过滤机 5—除雾器
6—贮罐 7—洗液泵 8—滤液泵 9—真空泵

表1-1 一些物料的过滤性能

物料种类	例 举	过 滤 性 能
有机溶剂, 非极性液体等	醇, 苯	过滤不太困难
室温下是固体的有机化合物或有机混合物	脂肪, 蜡, 树脂	加热到熔点以上, 可以过滤
粗颗粒状或结晶颗粒物料	有机结晶物, 淀粉, 染料, 大多数无机化合物	容易过滤
低浓度的极细颗粒	有机制剂, 糖, 油及果品	加助滤剂过滤
胶体颗粒	碳雾、金属溶胶、胶态硫	不易过滤
纸浆, 细胞组织, 扁平状颗粒	果品压榨物, 动物和蔬菜萃取物, 纤维素	常需将物料进行粗分后再过滤分离
低于熔点的脂肪、蜡等	蜡乳状液, 牛奶, 动、植物萃取物	过滤困难
高粘度物料	果胶, 藻类, 粘胶	过滤速度极低, 可采用挤压和加压过滤
微生物, 细菌等	培养基, 生物制剂, 药物制剂	可以采用过滤, 但要完全分离比较困难
血清, 疫苗等	抗毒素, 各种血清	可以采用细孔硬性介质过滤
动物浸取物, 生物制剂	腺和肉的浸取物, 激素和维生素萃取物	过滤较困难, 要采取一定措施防止过滤时物料变质
树脂, 果胶	水果和蔬菜水解物	pH值对过滤有较大影响
焦油状混合物	大多数有机反应残余物	过滤困难
蛋白溶胶, 蛋白凝胶	动物胶, 凝胶, 谷类混合物	pH值, 电解质, 温度对过滤都有影响
糖类	从谷物, 粗蔗糖中制取的麦芽糖和葡萄糖	含有胶体物质, 一般采用助滤剂进行过滤

赖于料浆、滤液和滤饼的物化性质。

一种物料用过滤方法来进行分离, 在实验室中比较易于实现。从实验室到工业生产, 还必须解决不少具体问题, 大体有下列几个方面:

1. 有的料浆有剧毒, 对人体皮肤和呼吸器官有害。另外有些物料是易燃易爆的有机溶剂, 故在处理这类物料时, 应选用适当型式的过滤机和适当工艺条件, 确保生产安全。

2. 有些料浆具有强烈的腐蚀性, 必须采取相应的防腐措施。

3. 大量的颗粒在管道中沉积起来, 往往会堵塞管道和设备, 因此必须适当地控制料浆中固体颗粒的沉降速度。

4. 有时过滤操作前的工序对过滤本身的影响也很大, 因为料浆制备常常关系到颗粒形状、大小分布等状况, 这些参数恰是对过滤过程有着决定性的影响。因此必须全面考虑。

一个具有工业规模的过滤过程, 其中关键设备是过滤机。除此之外还有一些附属设备、输送和供压机械、连接管线以及控制系统等。典型的连续转鼓真空过滤机生产流程如图1-1所示。

第二节 过滤过程的基本特性

一、过滤过程的特点

从物理学的观点来看, 过滤操作属于流动过程, 即复相流体通过多孔介质的流动过程。

这一过程有两个显著特点：

1. 流体通过多孔介质（包括过滤介质和滤饼）的流动是属于极慢运动（也即滞流运动）。影响这种流动有两类因素：一类为宏观的流体力学因素，诸如过滤介质特性，滤饼结构，压差，滤液的粘度等；另一类为微观物化因素，如电动现象，毛细现象，絮凝现象等。固体粒径越大，宏观因素影响越占主导地位；固体粒径越小，则微观物化因素的影响越占主导地位。粒径在10~20微米之间，物化因素的影响更为突出。由此可见，影响过滤过程的因素十分复杂，单纯从理论上分析、处理这一过程非常困难。尽管近年来在这方面作了不少努力，但经验的或半经验的公式在过滤计算中仍有较大的作用。

2. 悬浮于流体中的固体粒子是连续不断地沉积在介质内部孔隙中或介质表面上，沉积在介质表面上的滤饼不断受到压缩，因此随着过滤的进行，流动阻力是不断增加的。

分析任何一种过滤过程，都可从上面的两个基本特点得到启发。

二、过滤过程的分类

工业上过滤过程一般分为两大类：滤饼过滤和深层过滤。

1. 滤饼过滤如图1-2 a)所示。滤浆通过过滤介质后，固体粒子被介质截留，在介质表面上形成一层厚度约6毫米或大于6毫米的滤饼。滤饼对流动产生的阻力远大于过滤介质所引起的阻力。工业上的过滤过程大都属于滤饼过滤。

2. 深层过滤如图1-2 b)所示，固体粒子被截于介质内部的孔隙中。在介质表面一般不形成滤饼。这种过滤常用在料浆浓度极稀、固体粒子粒径极细的场合。如空气和气体的净制，饮水净化以及从合成纤维纺丝液中除去极细固体粒子等均属于此类。使用深层过滤时，料浆浓度一般低于0.1%（体积浓度）。浓度大于1%的料浆一般采用滤饼过滤。对于浓度为0.1%~1%的料浆，可以采用添加助滤剂或预滤层过滤。从图1-2 b可见，深层过滤时，固体颗粒直径小于过滤介质孔径。在介质表面上不希望形成滤饼，因为那样将会增加床层压降，缩短操作周期。

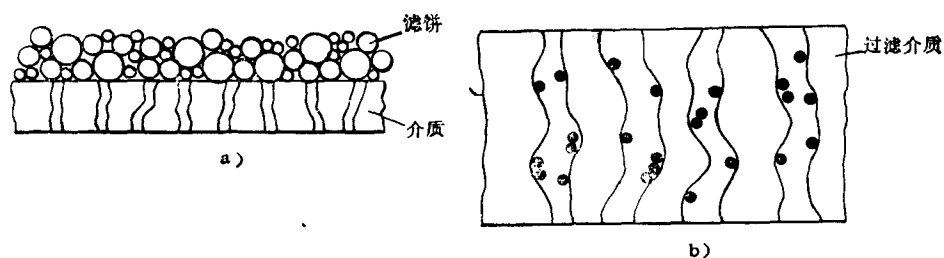


图1-2 两种不同的过滤方式

a) 滤饼过滤 b) 深层过滤

深层过滤器中的过滤介质，一般采用0.4~2.5毫米的砂粒或其它多孔介质。料浆流动方向通常都是向下的。深层过滤大多采用间歇操作。过滤进行时，随着料浆中的固体粒子被截留，床层阻力逐渐增加，如图1-3所示。当床层压降 ΔP 增加到一个最大允许值时，过滤必须停止。随后进行清洗。清洗方式一般是反向流动回洗。有时也用空气吹洗装置或洗涤喷头进行清洗。

深层过滤时，流出液中固相浓度随时间的变化关系如图1-3所示。开始一段时间浓度是下降的，然后历经一个恒定阶段，最后逐渐增加。浓度增加，说明料浆对床层发生突破，浓

度增加到一个允许最大值时，相应的床层压降也增加到一个最大的允许值。通过这样的曲线关系，可以充分利用床层截留固相的能力。

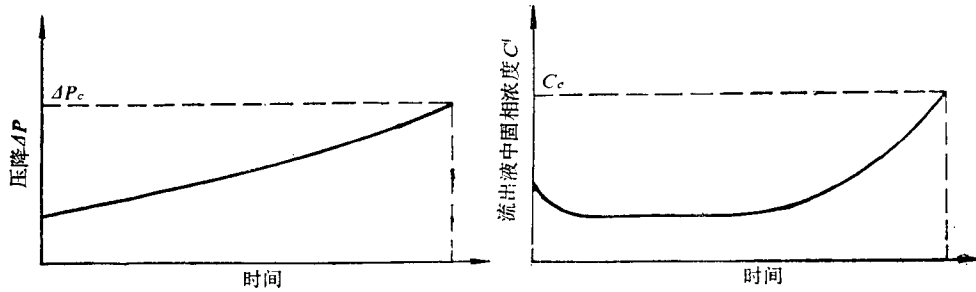


图1-3 深层过滤时，压降和流出液中固相浓度与时间的关系

滤饼过滤和深层过滤特点是不同的。滤饼过滤阻力的增加是滤饼增厚所致，而深层过滤的阻力增加，则是过滤介质阻力增加之故。滤饼过滤应用最为广泛，因此，本书的过滤理论部分仅讨论滤饼过滤。

对于滤饼过滤的操作，当过滤开始时，滤液要通过一定的管道和过滤介质，因此必须克服管道和介质对流动产生的阻力。当过滤介质表面上形成滤饼后，还必须克服滤饼和过滤介质（如滤布）的联合阻力。滤布和滤饼的联合阻力往往比单独的滤布和滤饼阻力加起来要大。因为有部分固体粒子不可避免地嵌入滤布之中。滤饼沉积到相当厚度时，滤饼阻力起主导作用，这时介质阻力可略而不计。由此可见，滤饼的结构对滤液的流动将产生决定性的影响。

要使过滤能够进行，必须在过滤介质两侧保持一定的压强差以克服过程阻力。为此，料浆可以在重力、加压或真空下进行过滤。它们分别称为重力过滤、加压过滤或真空过滤。重力过滤即悬浮液借助于本身的静液柱高度作为过程的推动力。这种由料浆液柱提供的压差并不大，一般约为 0.5 公斤力/厘米² 左右，故工业上较少采用。加压过滤的压强是用压缩机或泵来提供的。若为压缩机供压，工业上常采用的过滤压强约为 $0.5 \sim 3$ 公斤力/厘米²。用泵来提供过滤压强时，通常不超过 5 公斤力/厘米²。特殊场合可以超过此值。

前已述及，滤饼结构特性对过滤过程产生决定性的影响。滤饼可分为不可压缩滤饼与可压缩滤饼两类。所谓不可压缩滤饼是指滤饼的特征参数不受固粒压缩力的影响；可压缩滤饼则受固粒压缩力的影响。当滤饼呈不可压缩时，一定体积的滤饼所产生的流动阻力，既不显著地受固粒压缩力的影响，也不明显地受固体粒子沉积速度的影响。对于可压缩滤饼，滤饼两端的压强差或流动速率的增加，都将促使形成更为紧密的滤饼，因而具有较大的阻力。所以，可压缩性很大的物料，只能略微增加压强，使过滤速率作有限地增加。如果超过某一临界压强，过滤速率反而减少。不可压缩滤饼是一种理想状态。把滤饼看成是不可压缩的，将使滤饼过滤大为简化，方便计算。严格说，绝对不可压缩滤饼是不存在的。因为由易变形的固体粒子组成的滤饼，往往易于压缩；而由不易变形的固体粒子组成的滤饼，也可能显示出某些压缩性，这是由于颗粒受压缩时重新排列的缘故。

一个完整的过滤操作，除了过滤过程本身外，还要配合一些必要的辅助工序。例如由过滤得到的滤饼，其中包含一部分滤液。这部分滤液一般均需要用另一种液体（如水）去洗掉，

这一操作称为滤饼洗涤。洗涤后的滤饼湿含量较高，一般均需要去湿(或称脱水)，故这一操作称为滤饼脱水。最后是滤饼卸除。故一个完整的过滤操作包括过滤、洗涤、去湿及卸料四个阶段，如此循环进行。任何一种过滤机都必须能很好地完成这四个操作。它们既可间歇进行也可连续进行，即根据生产上的需要而选定。

过滤机的生产能力通常用两种方法表示：一种是用每单位时间获得的滤液量来表示；另一种是以每单位时间每单位过滤面积上获得的滤饼量来表示。值得注意的是，计算过滤机生产能力的时数，应是过滤、洗涤、脱水、卸料四个阶段所需时间的总和。

过滤操作的技术经济指标主要包括过滤强度(公斤滤液/米²·小时)；动力利用指标(公斤滤液/千瓦·小时)以及劳动生产率(公斤滤液/工时)三个方面。其中以过滤强度作为评选过滤设备的主要依据。

由于过滤操作的速率一般较低，故在工业生产中往往面临如何强化过滤操作的问题。强化过滤操作一般有两个途径：一是加大过滤面积，改进过滤机的结构，减少连接管路的流动阻力；二是从生产工艺角度改变料浆的物性，以有利于获得疏松、多孔、低阻的滤饼。即用减少滤饼阻力的方法来提高过滤速率。改变料浆特性的方法，称为料浆的预处理操作。这一操作通常采用改变悬浮液的温度、pH值或加入助滤剂、电介质等方法来获得低阻滤饼。有时需要改变过滤前结晶工序(如果有的话)的工艺条件，以利于产生粒径大，分布均匀的结晶粒子。这对降低过滤操作的阻力也是一个不可忽视的手段。在生产中还可采用减少滤液粘度的方法来提高过滤速率。降低滤液粘度的方法有两种：一是提高滤浆的温度。如滤液为水，温度从20℃提高到60℃时，不可压缩滤饼的过滤速率将增加一倍。对可压缩滤饼，温度影响较为复杂。但总的说来，增加温度或多或少都有利于提高过滤速率。增加温度的范围受到加热费用的限制，对于真空过滤，还受到滤液蒸汽压的限制。另一种减少滤液粘度的方法，是向料浆添加适当的低粘度的物质。当然所加的低粘度的物质应对过程是无害的，并在下一步操作中易于分离除去。使用这种方法的主要问题是确定添加低粘度物质的量。如添加不足，料浆的粘度没有得到应有的改善，过滤速率仍是很慢的。如添加过量，虽然降低了滤液的粘度，使过滤速率有所提高，但最后所得到的滤液中含添加物的量也较大，结果滤液净增加速率未必很大。因此应确定添加物的最佳量。对于这个问题，文献〔6〕提出了一个计算方法。

有关过滤理论的研究，尽管近20年来有一些进展，由于涉及的问题非常复杂，进展仍是缓慢的。至今人们还不能从理论上提出一个普遍的公式，单纯从料浆特性去计算滤饼特性。因此，就目前而论，过滤操作还是一门对实践和经验依赖性很强的技术。例如从理论分析导出的过滤方程式中，包含有关滤饼性质的特征数值，都必须针对不同的料浆，由实验获得。由于悬浮液料浆具有“时效性”(即料浆的物化性质往往随搁置时间的长短而发生变化)，即使是从实验中得到的参数，直接应用到工业生产中去，也会发生某些偏差。因此不少从事过滤理论的研究工作者，都特别强调了实践经验的重要性。如卡门〔8〕在1937年就指出：“处理过滤问题的时候，要越过理论和应用之间的鸿沟，存在着很大的困难”。提勒〔9〕在1977年说：“由于数据的缺乏，在过滤设计中，试验和经验仍起重要作用”。茹日可夫〔2〕还提出：过滤理论计算值与实际数值的偏差不超过25%就很理想。尽管情况如此，仍不能否认过滤理论对过滤实践的指导作用。就滤饼过滤而言，理论方程揭示出的一般规律，在实际上都得到证明。在处理实际过滤问题中，理论仍起指导作用。所以过滤的理论研究和应用研究是很有意义的。理论研究主要在于能够导出更能全面地反映过滤实际过程的过滤方程。而应用研究则

是针对实际的过滤过程，通过实验验证各种理论；通过实验确定过滤方程中的各类常数值，以解决设计、生产中出现的具体问题；通过实验找出强化过滤过程的途径和最佳操作条件。

第三节 过滤机的发展和分类^[11]

过滤机的出现和发展，可归结于19世纪中叶制造业的迅速发展和随后城市人口增加所致的环境保护问题。从过滤机发展历史来看，欧洲的历史较久。在那里，过滤机主要是随着甜菜糖、饮料、水处理、陶瓷业以及各种化学工业的发展而开发的。而在美国，过滤机多数是随着19世纪采矿冶金工业的发展而发展起来的，其历史较短。

世界上最早出现的过滤机是压滤机、叶滤机和旋转过滤机。研制这些过滤机的推动力，在英国是粗糖的精制，在德国和法国则是从甜菜中回收糖。现代的压滤机是从1880年左右开始发展的，当时用于污泥脱水。由于污水处理的需要，以及19世纪末，处理当时某些难以处理的悬浮液的需要，成了研制连续过滤机的强大刺激因素。连续过滤机中的转鼓真空过滤机的设计，起源于真空叶滤机的概念。威尼曼等人于1872年发表了有关转鼓真空过滤机的第一个专利。

到了近代，过滤机的发展更为迅速，即使在经济不景气的年代也是如此。例如，在标准型基础上发展起来的带卸料式转鼓真空过滤机，现在已面目一新，成为用户欢迎的机种；在一向是间歇操作的叶滤机方面，已经出现了多性能连续叶滤机；一度被认为是落后、笨重的压滤机，已于1958年实现了全自动运转，并可通过计算机实行多台控制，成为成熟而又完善的过滤机种。此外，其他型式的过滤机也在相继出现，并在实践中发挥着很好的效能。

我国的过滤机制造业还很年轻，但是随着我国实现四个现代化的进程，各行各业对过滤提出的要求越来越多。环境保护法的公布，过滤操作作为新兴的环保工业的重要一环，必然会获得迅猛的发展。

下面就真空过滤机和加压过滤机的发展情况作一梗概介绍。

一、真空过滤机的发展

真空过滤机的工业发展史已有160余年。经过这一个多世纪以来的发展，真空过滤机取得了长足的进步，现以转鼓真空过滤机为主来说明真空过滤机发展的几个方面：

1. 大型化

过去转鼓真空过滤机的尺寸并不大。最大的转鼓过滤机直径也不过2.5米，鼓宽为2.5米。那时，尺寸不能增大的原因是受到铸造工艺的限制以及给转鼓包覆橡胶的热压机的限制。自从转鼓整体铸件改成现场组焊装配的结构之后，情况就完全不同了。现在，外型简单而尺寸特大的转鼓已不罕见，以带卸料式转鼓真空过滤机为例，其转鼓直径已达7.3米，宽6.1米，过滤面积为139.4米²。而最小的转鼓过滤机，其直径只有300毫米，过滤面积仅为0.1米²。

其他真空过滤机的大型化发展也相当可观。如垂直回转圆盘过滤机的过滤面积已达400米²，水平回转翻盘过滤机的直径已达23米，P₂O₅的日处理量达1000吨。

2. 采用了新的结构材料

直到几年前，过滤有腐蚀性物料的转鼓过滤机，仍采用橡胶覆层结构的转鼓。但是由于橡胶包覆费较高，所以现在宁可采用不锈钢转鼓。又由于转鼓是在低速和低压下工作，所以

用贵金属制造薄壁转鼓是可行的。例如用高镍铬合金钢制成的转鼓，壁厚仅为6毫米，甚至可降到4毫米。应当指出，今后钛在过滤机上的应用一定会越来越广泛。这是因为其表面很容易形成一层结合力很强的惰性氧化膜，该膜比铝和不锈钢表面上的氧化膜稳定得多。现在钛的提取技术的进步，也为钛的广泛应用创造了条件。此外从经济上考虑，蒙乃尔合金、耐蚀耐热镍基合金等，也常用来制造与料液相接触的部件。

现在，塑料在过滤机上的应用也逐渐增加。因为它不仅对无机酸、有机酸、碱、氧化剂和盐类都有很好的耐腐蚀能力，而且用玻璃纤维增强后，强度也不低。因此，全塑料的转鼓真空过滤机在十几年前已出现，迄今已经达到了较为普遍的程度。塑料除了耐腐蚀外，还有其他可称道的性质，因而常用来制造真空过滤机的各种部件，例如利用它对滤饼的非粘性来制造滤饼刮刀。

3. 过滤介质

过滤介质是过滤机的一个极为重要的组成部分，常常是整个过滤操作的关键。过滤介质的发展表现在以下几方面：

(1) 制造工艺 以前，转鼓过滤机滤带的接头曾引起许多问题。现在，拉链式接头等已有成功的使用经验。如果采用粘接法和焊接法，可以获得无缝滤带。此外，合成滤带往往通过热处理来获得较大的刚性，同时也提高了表面光洁度。

(2) 结构尺寸 随着过滤机单机尺寸的不断增大，滤带的尺寸也在相应地增加。例如，铸造结构的转鼓，最大的滤布尺寸仅为 2.5×8 米；而现在，带卸料式过滤机的滤布尺寸一般为 5.5×17 米。

(3) 新型滤布 以前的滤布大都是天然纤维布、人造纤维布以及各种金属网。近来，随着合成纤维和塑料工业的发展，以及不使用刮刀的卸料技术的改进，出现了许多合成材料制成的滤布。其中最常用的是聚丙烯、聚酰胺和聚酯滤布。此外一种更为新型的耐蚀聚四氟乙烯无纺滤布已进入工业市场。目前，世界上的工业滤布已有200余种。

4. 滤饼的干燥和卸除方法

(1) 滤饼的干燥 关于降低湿滤饼湿含量的问题，现在特别受重视。一种办法是向封闭罩里通热空气或蒸汽；另一种办法是采用附加压榨机构。例如最近出现了带压榨机构的转鼓真空过滤机，正用于污水处理方面。

(2) 滤饼的卸除 带卸料式转鼓过滤机虽早在1920年提出，但是其滤饼卸除系统直到最近几年才得到公认。原因是曾受到滤带编织尺寸不稳定的限制。为了保证滤带始终在正确的路径上运行，可借助于机械的、气动的、电器的自控系统。

关于卸除滤饼的辅助装置，出现了电-气动脉冲阀，它通过压缩空气给滤布以瞬时冲击，从而使滤饼松动并脱落。

此外还出现了极粘滤饼的卸除系统。

5. 自动化

由于所有回转真空过滤机的操作都是连续的和自动进行的，因而操作方面的改进均集中在自动化方面。其中值得重视的有以下几方面：

(1) 根据滤浆贮槽或滤液贮槽的液位，自动调节转鼓的转速。

(2) 通过自动调节真空度来控制过滤机的产量。

(3) 自动控制滤饼的厚度和组合调节转鼓的转速、浸没深度、真空度，以期保证滤饼

具有合格的湿含量，稳定热干燥机的蒸发负荷。

6. 过滤机的新设计方案

现在发展新型过滤机的主导思想是：在苛刻条件下实现对难过滤悬浮液的连续过滤，减少体力劳动和增加经济性。近来，人们发展过滤机的注意力大都集中在水平移动带型过滤机上。

二、加压过滤机的发展

面对着生产的全自动化、连续化以及滤浆中固体颗粒细微化等情况，近来有一种从真空过滤转为加压过滤的倾向。下面就各种加压过滤机的发展情况作一简单介绍。

1. 压滤机

由于压滤机的适应性很强，因此从上个世纪中叶出现以来，便广泛地应用于各个领域。但是过去由于手工操作，工人劳动强度大，效率也不如连续式真空过滤机。

1958年，全自动压滤机研制成功了。从此以后，压滤机逐渐发展成为成熟而又完善的基本过滤机种。现代的压滤机分为滤布行走型和滤布固定型，以及卧式和立式。其中又以凹板型结构为最多。由于近代压滤机的操作是自动进行的，加上有了压榨隔膜，便使压滤机应用领域更广。现在大型压滤机的滤室数为200，过滤面积达1400米²。国外还研制了一种全聚丙烯的压榨用的凹板，用来代替带有橡胶膜的凹板。

2. 加压叶滤机

叶滤机被广泛地用于澄清过滤。滤饼的自动卸除是个主要问题。目前采用的卸料方法有：气流反吹卸料法、压力水冲洗卸料法、离心力卸料法以及振动卸料法。

现在垂直滤叶型叶滤机的过滤面积已达100米²以上。此外在叶滤机上也采用了滤饼压榨机构。例如英国OMD过滤机，是在水平圆筒内装有垂直圆形滤叶组的加压叶滤机，通过悬垂着的压榨用橡胶膜，对生成的滤饼进行压榨脱水，特别适用于啤酒工业和各种化学工业。

另外一种型式的叶滤机是水平滤叶型叶滤机。其过滤方法虽与垂直滤叶型完全相同，但是在卸料方法和残液处理方面都有了许多改进。在所有加压叶滤机中，以水平滤叶型革新最多。其中又以瑞士芬达过滤机最负盛名。

以前，叶滤机都是间歇操作的，近来出现了连续操作的垂直滤叶型叶滤机。

3. 压榨脱水过滤机

随着生产的发展和水平的提高，工业废水和城市污水排量日益增大，同时环境保护的法规也愈加严格，这就要求研制出高效能的污泥脱水装置。压榨脱水过滤机就是在这样的形势下出现的。

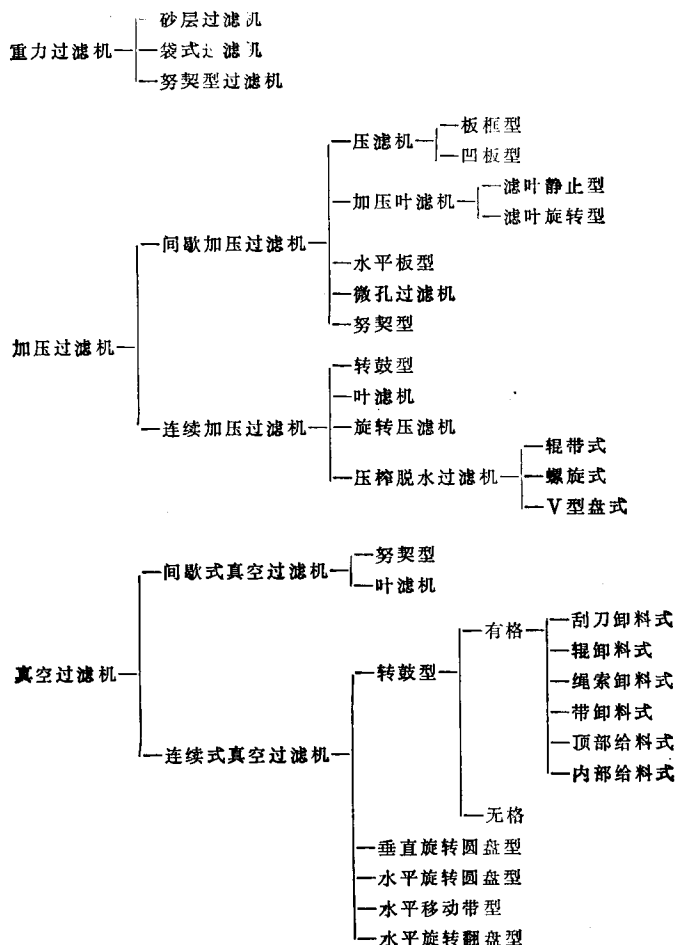
这种过滤机于70年代初期已在欧洲研制成功，现已达20多种型式。其中有连续式的、半连续式的、立式的、卧式的、单级压榨脱水式的、以及多级压榨脱水式的。采用这种过滤机之后，大大减少了污泥的运输费和焚烧费。

除了以上加压叶滤机外，还出现了其他一些机型。例如在顶部加料的真空旋转过滤机的基础上，出现了顶部加料的加压叶滤机。在连续压榨脱水过滤机方面，出现了V型盘式压榨脱水机。还有高效能的滤浆浓缩机等其他型式的过滤机。

今后过滤机的发展方向是自动化、连续化、机械化、大型化。随着能源问题的出现，人们对煤、页岩、焦油砂的液化很重视，在这项技术中，要求在高温和高压下进行固-液分离，从而对研制新型连续过滤机特别寄予期望。

三、过滤机的分类

过滤机的分类方法有多种，其中有按过滤推动力和重力的相对方向来分类的，还有按过滤推动力的类别来分类的。由于过滤机的种类繁多，任何一种分类方法都很难一一区分它们。例如近年出现的压榨脱水过滤机，既有重力脱水段也有压榨脱水段。若按过滤推动力来分，它既属重力过滤型，又属加压过滤型。不过这种过滤机是以压榨为主的，因此将此过滤机并入加压过滤机一类。下面按照过滤推动力的类别，将过滤机分为三类：



参 考 文 献

- [1] Jordan D. G, "Chemical Process Development", 1968.
- [2] Жужиков В. А, "Фильтрование", «Химия», Москва, 1971.
- [3] McCabe W. L, Smith J. C, "Unit Operations of Chemical Engineering" 3 Edition, 1976.
- [4] Dickey G. D, "Filtration", 1961.
- [5] Purchas D. B, "Industrial Filtration of Liquids" 2nd Edition, London, 1971.
- [6] Циборовский Я, "Процессы химической технологии", 1958.
- [7] Svarovsky L, Chem. Eng, Vol. 86, №14, 1979.
- [8] Carman P. C, Trans. Inst. Chem. Engrs, Vol. 16, P. 168, 1938.
- [9] Tiller F. M, Crump J. R, Chem. Eng. Progr, Vol. 73, №10, P. 65, 1977.
- [10] "国内过滤设备调查", 化工部化工设备专业技术中心站, 1971.
- [11] 《分离机械基本情况》编写小组, "分离机械", 第一机械工业部科学技术情报研究所, 1980年.

第二章 过滤理论

第一节 过滤理论的发展^[1,2,3]

过滤过程的物理实质是流体通过多孔介质的流动过程。而流体通过均匀的、不可压缩的固体床层的流动规律是研究过滤过程的基础。比较复杂的滤饼过滤及其理论公式的推导，大致都是从这个基础出发的。对于这个问题，最早的实验研究是由达西 (Darcy) 进行的。当时他曾考察水流经不同厚度的砂床时，水流速率的变化规律，1856年提出著名的经验公式：

$$\frac{V}{At} = u = \frac{K\Delta P}{L} \quad (2-1)$$

式中 V ——时间 t 内通过床层的流体体积 (米³)；
 A ——床层的截面积 (米²)；
 u ——流体通过床层的平均线速度 (米/秒)；
 ΔP ——流体通过床层的压强差 (公斤力/米²)；
 L ——床层厚度 (米)；
 K ——与床层及流体物性有关的常数。

达西的经验公式后来陆续被人们所证实。式 (2-1) 说明两点：一是流速与压降成直线关系，因此流体经过床层的流动属于滞流；二是通过颗粒床层的流体线速度与压强差成正比，与床层厚度成反比。

因为流体的粘度在滞流运动中有突出的影响，后来人们习惯将式 (2-1) 写成如下的形式：

$$u = \frac{K'\Delta P}{\mu L} \quad (2-2)$$

此式称为修正的达西公式。式中 K' 为渗透系数， μ 为流体的粘度。式 (2-2) 还可表示为下面的形式：

$$u = \frac{\Delta P}{\alpha_v \mu L} \quad (2-3)$$

式中 α_v ——滤层平均体积比阻 (1/米²)；
 μ ——流体的粘度 (公斤力·秒/米²)。

过滤过程理论的研究最初起源于豪根—泊稷叶 (Hogen-Poiseuille) 方程的应用。对于流体在圆形直管中作滞流运动时，豪根—泊稷叶于1842年从理论上导出流速与压强降之间的关系如下：

$$u_0 = \frac{d_0^2}{32\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (2-4)$$

式中 ΔP ——流体流过圆管的压强降 (公斤力/米²)；
 u_0 ——流体在圆管中的流速 (米/秒)；
 d_0 ——圆管直径 (米)；
 L ——圆管长度 (米)；