

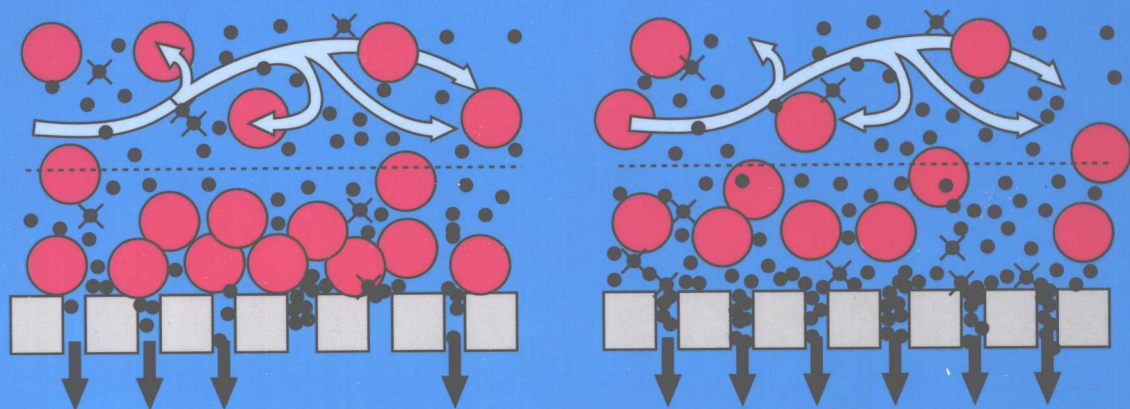
液体过滤

与

过滤介质

康勇 罗茜 编著

YETI GUOLÜ YU
GUOLÜ JIEZHI



化学工业出版社

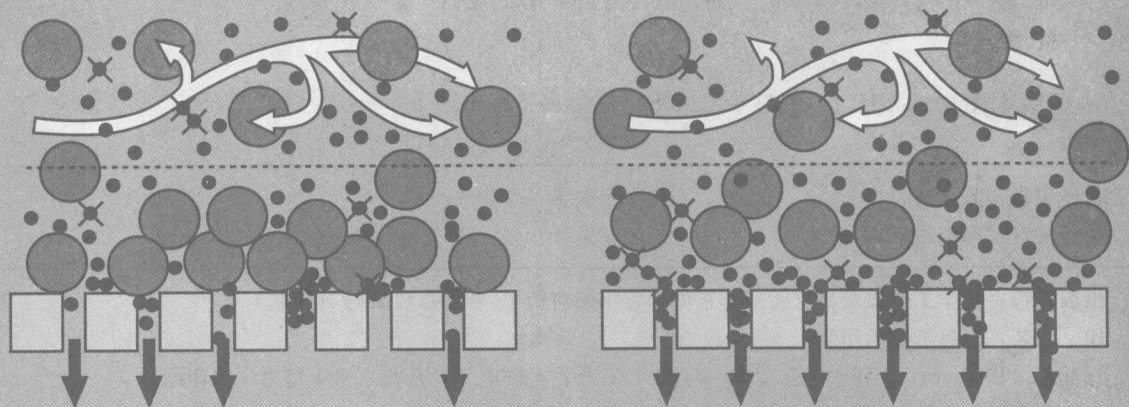
液体过滤

与

过滤介质

康勇 罗茜 编著

YETI GUOLÜ YU
GUOLÜ JIEZHI



化学工业出版社

·北京·

本书内容主要包括液体过滤原理和理论基础、液体过滤方法和设备、悬浮液的性质及预处理、液体过滤的后处理技术、膜过滤、常用液体过滤介质各论（包括过滤介质基本性能测试、过滤介质的评价和选择、过滤介质的堵塞及防治等）。本书较为系统地介绍了液体过滤和过滤介质的各个方面，在吸收同行的研究成果，结合作者的教学和研究经验的基础上，同时参考借鉴了国内外关于液体过滤和过滤介质方面的文献和书籍，力求反映国内外液体过滤和过滤介质的新技术和新进展。

本书可供液体过滤和过滤介质技术学习、研究、生产、检测和应用等方面的人员参考，也可供大专院校相关专业师生阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

液体过滤与过滤介质/康勇, 罗茜编著. —北京: 化学工业出版社, 2008. 2

ISBN 978-7-122-01911-0

I. 液… II. ①康…②罗… III. 液体-过滤-化工过程
IV. TQ028.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 006650 号

责任编辑: 陈志良

文字编辑: 丁建华

责任校对: 陶燕华

装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 29 $\frac{1}{4}$ 字数 732 千字 2008 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 62.00 元

版权所有 违者必究

前 言

液体过滤是一门应用极为广泛的工程技术，涉及的学科比较多。自 20 世纪 80 年代到目前，我们在从事固液分离技术的科研和教学中，发现了不少值得探讨的问题，包括理论上的和实践上的，例如过滤的基本理论、过滤阻力（包括滤饼阻力和介质阻力）、过滤介质的孔径和过滤物料颗粒粒度的关系、过滤介质的主要性质、滤饼的可压缩性等。通过对这些问题的研究和思考，我们深切感受到要想深入了解液体过滤技术的实质，必须把相关的基础理论知识和具体的分离过程结合起来，把其他领域新的研究成果引入到液体过滤的研究中，这样才有可能从基础上提高液体过滤技术的研究水平和应用能力，其所谓“器欲尽其利，必先刃其技”。

近十年来，国内外相继出版了若干质量上乘的有关液体过滤方面的著作。本书是在积极吸收同行研究成果的基础上，结合我们在液体过滤方面的教学和研究经验编著而成的。

本书主要包括液体过滤原理和理论基础、液体过滤方法和设备、悬浮液的性质及预处理、液体过滤的后处理技术、膜过滤、常用液体过滤介质各论（包括过滤介质基本性能测试、过滤介质的评价和选择、过滤介质的堵塞及防治等）。全书力求反映国内外液体过滤和过滤介质的新技术和新进展，可供液体过滤和过滤介质技术学习、研究、生产、检测和应用等方面的人员借鉴、参考，也可供大专院校相关专业师生阅读。

本书的成稿得益于许多先行的国内外同行，为我们创造了有利的条件，尤其是丁启圣和王维一两位先生的《新型实用过滤技术》给了我们许多启迪和帮助，在我们编写本书时，丁启圣和王维一两位先生无私地给我们提供了许多资料和建议。金鼎伍先生和朱企新先生也给予了不少指点和关注。许多在国外工作的同行、学长和学生为我们提供了文献资料和信息，尤其是陈树忠先生、陈晓女士千方百计地为我们收集了大量国内无法得到的最新资料。在本书具体成稿过程中，天津大学的冯颖博士、张忠国博士以及孔新军、姚鹏、魏巧莲、刘佳佳、孔琦、范福洲、安晓娇、常晓雷、侯金良、崔邵华、俞成林和丰兰等硕士进行了大量细致的工作，东北大学的徐新阳教授也给予了许多帮助，书中浸盈了他们的汗水，在此一并表示谢意。

本书第 1、2、3、4、5 章及第 8 章的 1、4、9 节由罗茜执笔，其余各章由康勇执笔。全书由康勇负责统筹、完善，最后由罗茜定稿。由于水平和能力有限，书中不妥之处望广大同仁不吝赐教，批评指正。

编著者
2008 年 3 月

目 录

上篇 液体过滤的理论基础与设备

第1章 引言	3
1.1 液体过滤的分类	4
1.2 液体过滤的应用	5
1.3 过滤分离效率	5
1.3.1 滤液浊度	5
1.3.2 过滤精度和过滤等级	6
1.3.3 过滤效率或效率级别	7
1.3.4 过滤机纳污能力	9
1.4 过滤料浆的预处理和过滤后处理	9
参考文献	10
第2章 液体过滤的理论基础	12
2.1 多孔介质	12
2.1.1 多孔介质的定义及分类	12
2.1.2 多孔介质的特征参数及测量方法	13
2.2 流体在多孔介质中的流动	19
2.2.1 液体在多孔介质中的渗流	20
2.2.2 两互不溶流体的层流渗流	23
2.2.3 通过滤饼孔隙的多相流动	23
2.2.4 高黏性流体通过多孔介质的流动	24
2.3 界面现象	25
2.3.1 毛细现象	25
2.3.2 吸附和附着	32
2.3.3 界面电现象和双电层	34
参考文献	38
第3章 液体过滤原理	40
3.1 成饼过滤	40
3.1.1 成饼过滤的分类及基本参数	40
3.1.2 过滤动力学	41
3.1.3 滤饼的可压缩性和比阻	44
3.1.4 过滤介质的阻力	49

3.1.5	过滤速率和过滤机处理能力计算	51
3.1.6	成饼过滤的计算机模拟	55
3.1.7	压榨脱水	56
3.2	动态过滤	58
3.2.1	横流过滤	59
3.2.2	其他形式的动态过滤设备	71
3.2.3	电渗-电泳动态过滤	72
3.3	深层过滤(过滤介质过滤)	75
3.3.1	深层过滤的颗粒捕获机理	76
3.3.2	深层过滤过程	80
3.3.3	深层过滤实践	83
3.3.4	深层过滤设备	86
	参考文献	89
第4章 液体过滤方法和设备		93
4.1	真空过滤机	93
4.1.1	转鼓真空过滤机	93
4.1.2	圆盘真空过滤机	97
4.1.3	水平带式真空过滤机	101
4.1.4	翻转式和圆台式圆盘真空过滤机	105
4.2	压滤机	106
4.2.1	板框和厢式压滤机	107
4.2.2	带式压滤机	118
4.2.3	旋转压滤机	124
4.2.4	压榨脱水机	125
4.2.5	罐式压滤机	130
4.3	离心过滤机	146
4.3.1	卧式刮刀式离心过滤机	148
4.3.2	推进卸料连续离心过滤机	149
4.3.3	翻袋离心过滤机	149
4.3.4	加高压气的卧式翻袋离心过滤机	150
4.3.5	螺旋卸料离心过滤机	151
4.3.6	Heinkel GTL 直立滤网离心机	151
4.4	聚合物的过滤	152
4.4.1	过滤聚合物的过滤介质	153
4.4.2	聚合物过滤设备	154
4.4.3	筛转移器	156
4.5	过滤机的选择	159
	参考文献	164
第5章 悬浮液的性质及预处理		169
5.1	流体及悬浮液的性质	169

5.1.1	水的特殊性质	169
5.1.2	液体的黏性与流变性	170
5.1.3	流体的密度	175
5.1.4	悬浮液的性质	176
5.2	悬浮液的预处理	180
5.2.1	悬浮液凝聚与絮凝的基础理论	180
5.2.2	高分子聚合物的絮凝作用	185
5.2.3	扩展的 DLVO 理论	187
5.2.4	凝聚动力学	188
5.3	化学助滤剂	190
5.3.1	表面活性剂型助滤剂	190
5.3.2	高分子絮凝剂型助滤剂	194
	参考文献	198
第 6 章 液体过滤的后处理技术		199
6.1	滤饼脱液	199
6.1.1	气体置换脱液	199
6.1.2	穿透压差和脱干饱和度	201
6.1.3	离心力及重力脱液	204
6.1.4	机械压榨脱液	204
6.2	滤饼洗涤	218
6.2.1	洗涤过程的相关概念	218
6.2.2	洗涤工艺的设计计算	222
	参考文献	231
第 7 章 膜过滤		233
7.1	概述	233
7.1.1	国外膜产业的现状	234
7.1.2	我国膜产业的现状	235
7.2	膜过程	236
7.2.1	微滤和超滤	236
7.2.2	纳滤	242
7.2.3	反渗透	246
7.3	膜组件及设备	255
7.3.1	国内、外主要膜及膜组件的发展概况	255
7.3.2	膜组件及膜过滤设备	258
7.3.3	膜的清洗以及防污、抗污	263
7.3.4	组件的排布与连接	264
	参考文献	268

下篇 液体过滤介质

第 8 章 常用液体过滤介质各论	273
-------------------------------	------------

8.1	概述	273
8.1.1	过滤介质分类	273
8.1.2	过滤介质的基本性质	274
8.1.3	过滤介质截留最小颗粒粒度与过滤效率	287
8.1.4	过滤介质孔径和料浆颗粒粒度间的关系	288
8.1.5	过滤介质的发展方向	289
8.1.6	过滤介质的耐温、抗磨和抗腐性及相对成本	290
8.2	滤芯	291
8.2.1	滤芯的分类	291
8.2.2	滤芯的性能及基本测试方法	293
8.2.3	常见液体过滤滤芯	295
8.3	刚性过滤介质	300
8.3.1	烧结金属过滤介质	300
8.3.2	泡沫状多孔金属过滤介质	304
8.3.3	烧结塑料粉末过滤介质	305
8.3.4	泡沫塑料	307
8.3.5	多孔陶瓷	308
8.4	编织纤维过滤介质	311
8.4.1	编织纤维过滤介质简介	311
8.4.2	编织过滤介质的原料及性质	330
8.4.3	编织纤维和织物的力学与物化性质	338
8.4.4	金属丝网和冲孔板过滤介质	356
8.5	非织造过滤介质	362
8.5.1	滤纸	362
8.5.2	滤板	369
8.5.3	滤毡和针刺滤毡	372
8.6	松散性过滤介质	373
8.6.1	预敷型松散过滤介质	373
8.6.2	深层过滤型松散过滤介质	378
8.7	膜、膜材料及膜的制备	384
8.7.1	膜的分类	384
8.7.2	膜材料	396
8.7.3	膜的制备方法	399
8.8	过滤介质基本性能测试	405
8.8.1	过滤介质厚度、耐磨性及刚度	405
8.8.2	过滤介质机械强度	409
8.8.3	过滤介质密度	412
8.8.4	编织过滤介质纱线捻度的测定	413
8.8.5	孔径及孔隙率	415
8.8.6	透气性及透水性	422
8.8.7	截留性能	434

8.9 过滤介质的选择	437
8.9.1 选择过滤介质的一般原则	437
8.9.2 选择过滤介质的程序和方法	439
8.10 过滤介质的堵塞与防治	446
8.10.1 机织过滤介质堵塞的模型	446
8.10.2 机织过滤介质上固体颗粒的沉积及堵塞机理	447
8.10.3 机织过滤介质的堵塞类型	449
8.10.4 过滤介质堵塞的表征	451
8.10.5 过滤介质堵塞的预防措施及介质再生	452
参考文献	454

上篇 液体过滤的理论基础与设备

第1章 引言

“过滤”既是一个专有名词，又是一个非常通俗的用语。非均相分离领域所说的“过滤”是指液（或气）-固两相体系中的液体（气体）以渗流的方式穿过多孔介质的孔隙，而固体颗粒被截留在过滤介质的一侧或被阻留在过滤介质的孔隙内，从而达到固体与液体（气体）的分离。本书仅介绍液体过滤。

液体过滤常用达西渗流公式来描述：

$$v = K \frac{\Delta p}{\mu(R_1 + R_2)} \quad (1-1)$$

式中 v ——流体穿过过滤介质的平均速度，m/s；

μ ——流体黏度，Pa·s；

Δp ——过滤压差，Pa；

R_1 ——过滤介质的阻力，m；

R_2 ——滤饼的阻力，m；

K ——渗透系数， m^2 。

由定义可见，多孔过滤介质在过滤作业中起着控制过滤速度和分离效果的关键作用，是过滤过程的核心部件。用于过滤的多孔介质的种类繁多，包括滤布、滤纸、金属丝网、滤芯、石英砂、无烟煤以及非织造布、烧结多孔材料和微孔滤膜等。实践上通常并不能直接使用一种过滤介质，而是将过滤介质组装起来，就组成过滤元件，以整体单元在过滤机上安装和拆卸、维修或更换。这些方面内容将在以后详细介绍。

关于过滤机与过滤器的区别，习惯上认为“过滤机”是一种机械，其结构相对比较复杂，是有运动部件的设备；而“过滤器”一般结构比较简单，没有运转部件，而国外则统称为“filter”。无论是过滤机还是过滤器都是由基本部件即过滤介质或过滤元件以及其他诸如过滤室、搅拌部件、卸料部件、运转部件（过滤器通常没有）和进出料管道组成。

除过滤外，液体通过多孔介质的流动还有很多过程，诸如石油工业中的采油、土壤的保墒和压实、地壳裂隙中的渗流、物理吸附、色谱分离、离子交换以及生物体内的诸如流体穿过肺和肾等脏器，气体通过多孔介质的情况也很多，它们和过滤过程有相似之处，但本质不同。液体过滤的特点是含固形物的流体即悬浮体系通过多孔介质并达到液固分离。

可以毫不夸张地说，当代液体过滤作业渗透到每个工业技术领域和人类的日常生活活动中，从重工业、轻工业、精密化工的产品过滤到电子工业所需超纯水的装备；人类的衣（例如化纤原液的除杂、染料制备等）、食（生活用水、饮料、药品的制备等）、住（各种装饰涂料、油漆制品等）、行（燃料油精制、净化等）没有一项可以离开过滤。净化环境更是人类保护这唯一的地球、维持人类可持续发展的根本大业，环境保护更必须靠高效、高质量的过滤技术。

如上所述，过滤是一门综合技术，它的基本过程是流体通过多孔介质的流动和固形物颗粒分离，但需要强调的是所有这些过程都是发生在多相界面上，存在许多物理-化学现象，所以过滤是以多相流体力学和渗流力学为基础，与化学、物理化学、胶体化学和界面化学

等知识密切相关。概括地说，过滤是有多相参与的、存在许多物理-化学界面现象的流体在多孔介质中的流动。

1.1 液体过滤的分类

液体过滤是一个相对复杂的技术领域。首先，液体的种类非常多，待分离的固形物种类更不胜数，过滤的目的和要求也千差万别，这就导致过滤技术和设备的多样性、复杂性；另外，还必须指出的是沉降作业虽然常常是作为过滤作业的预处理以提高料浆的浓度，但在过滤作业中通常也存在着沉降过程，因为无论哪种过滤方式，都要受到重力或离心力的作用，都会导致料浆的沉降，这些都会对过滤过程产生影响。

液体过滤的分类方法很多，按固体颗粒在过滤介质上的滞留情况可以分为表层过滤和深层过滤；按悬浮液的含固量可以分为澄清过滤和成饼过滤；按料浆在过滤器内的流动方向可以分为终端过滤和横流过滤（又称十字流过滤、错流过滤或动态过滤）。在推动力作用下，从过滤过程操作方式上分为恒速过滤、恒压过滤和先升压后恒压过滤。恒压过滤是在整个过滤过程中维持过滤压差不变，但过滤速率会逐渐降低，工业用真空过滤是典型的恒压过滤方式。恒速过滤则正好和恒压过滤相反，工业上用定量泵供料浆的过滤就是这种过滤方式，用螺杆泵供料浆时，由于过滤开始时滤饼薄、阻力小，螺杆泵的压头低，随着滤饼加厚、阻力增大，螺杆泵的出口压力也逐渐增加到某一给定的操作压力值，达到恒压过滤，形成先升压后恒压的一种理想的过滤方式。

按处理的固形物颗粒大小可将过滤分为五类：粗粒过滤、微滤、超滤、纳滤和反渗透，后四种统称为膜滤，故又可分为一般过滤和膜过滤（精密过滤）。粗粒（或一般）过滤所处理的物料粒度一般大于 $1/20\text{mm}$ ，可达 1mm 左右；膜滤是除去小于 $10\mu\text{m}$ 的固形物。

表 1-1 列出了按悬浮液的含固量大小对液体过滤较详细的分类情况。

表 1-1 过滤过程分类^[1]

I 级分类	II 级分类	III 级分类	IV 级分类
成饼过滤	真空过滤 加压过滤 离心过滤 压榨过滤 磁力过滤 助滤料过滤 加电场的过滤		
澄清过滤	粒状层过滤	缓速过滤 快速过滤 生物过滤 吸附过滤 离子交换	向上流、向下流、上下向流、水平流 好氧型、厌氧型 下向流固定层、上向流固定层、流动层、移动床 顺流、逆流
	直接过滤	滤芯式过滤 细网过滤	
	膜过滤	微滤 纳滤 超滤 反渗透	

1.2 液体过滤的应用

液体过滤的任务一般是：澄清液体；回收固体；回收固体和液体；为方便下一段作业或使其得到改善。

澄清是除去浓度大致低于 15%（质量分数）的悬浮液中的固体，采用的过滤方法基本上是过滤介质过滤和膜滤，主要介质是卵石层、砂层、滤芯和各种滤膜，澄清过滤的指标是澄清度。相对于其他过滤机，澄清过滤在矿业、纯化工等生产中不很重要，但在水净化、环保、食品、蔬菜、医药制备、油净化分离、电镀溶液回收以及纤维拉丝和膜拉伸等生产中应用较多。

应用最多的是用过滤法回收固体，这时的悬浮液的浓度必须达到能形成足够厚的、可卸下的滤饼，对各种料浆达到此浓度的值不一致，例如对化学料浆可能需 10%，而对纸浆则仅 0.5% 就可以形成滤饼。当要保证或提高滤饼的质量或纯度时，必须增加滤饼洗涤，以将影响固体产品质量的液相清洗除去^[2]。

要在过滤同时回收固体和液体一般仍是用成饼过滤，但要增加滤饼洗涤过程，并且要洗得很充分，要将滤饼中的有价滤液充分洗涤出来，同时提高滤饼的质量。

在化工、冶炼、湿法提取等生产中，过滤常作为预处理或中间作业，而在选矿、染料、粉体制备等生产中和污泥处理过程中，过滤通常是产品生产或污泥处理的最终作业或是干燥前的作业^[2,3]。

1.3 过滤分离效率^[4,5]

过滤是一个综合技术过程，是通过过滤介质的孔隙以及过滤设备的参与而实现固液或固气分离的过程。由于应用场合和应用目的等的多样性，表示过滤效果的出发点和目的就比较复杂，既有固-液或固-气分离的总效果，又同时存在被截留固体颗粒的大小和多少，还有滤液的澄清效果和所含固形物颗粒的大小以及多少等，所以难以用简单的关系表明过滤的效果。

1.3.1 滤液浊度

从总体上看，过滤的总目的是得到澄清的（即不含固相）液体（滤液），因此澄清度或浊度应是最基本的指标。通常用每升滤液、悬浮液或液体中固形物的质量来表示它们的浊度，即 mg（或 g）/L。测定浊度可采用下述方法。

① 当固形物含量高的时候可用烘干-称重法，即接取一定量的滤液样品，精确地测定其体积 V (mL)，然后将其中的液体蒸发烘干，再测定固形物质量 m (mg)，则滤液浊度 Z 的计算公式为：

$$Z = m/V \quad (\text{mg/mL}) \quad (1-2)$$

② 当固形物含量不是很高时，可取一定量的滤液，按固形物颗粒的大小，用相应的滤纸或膜进行再过滤，然后测定固形物的质量，再根据上式计算该滤液的浊度。

实际上滤液的固形物含量都相当低 [一般应小于零点几至几毫克/升 (mg/L)]，所以多用光电式浊度计测量。

1.3.2 过滤精度和过滤等级^[6~9]

之所以说过滤介质或过滤元件是过滤机的“心脏”，是因为过滤机的性能基本上由它们所决定，也因此很难区别二者的许多性能。过滤介质既决定了过滤速率又控制了滤液浊度及其中的固形物的粒度和粒度分布。不仅要求过滤机和过滤介质的过滤速率和容纳量高，而且要求滤液澄清且其所含固形物的粒度最小，所以仅用滤液浊度就不能充分表明过滤的效果。为此许多与过滤相关的部门都制定了多个标准来全面反映过滤的效果，包括固形物质量（数量）、粒度和粒度分布、过滤介质孔径、强度、截留或捕获能力等，并形成一些国际 ISO 标准。

过滤精度是一个在国内外使用极为普遍但又极不清楚、极不统一的概念。过滤精度是我国的传统提法，日本也是这样提，欧、美及国际标准称为 filtration rating 实际上是过滤级别，“rating”没有精度的解释，按英文，精度是 accuracy 或 precision，如精度等级是 accuracy class，精度测量是 accuracy test，而且由于在实际过滤时很难将过滤介质和过滤器分开，因此过滤精度又常和过滤介质的孔径大小难区分。按 ISO 的标准是过滤级别（filtration rating），包括名义过滤（机）级别（nominal filtration rating 或 nominal filter rating）、绝对过滤级别（absolute filtration rating）和过滤比（Beta filtration rating）。基于我国的传统习惯仍可将 rating 称作精度。

名义过滤（机）级别是在一定的过滤设备上过滤介质所能截留的最小颗粒粒度、进入滤液中的最大颗粒粒度或过滤介质或过滤机（器）对不同尺寸颗粒的滤出能力。他们可以规定对于给定浓度的悬浮体系在特定试验条件下以 90%（也有以 95%、98% 计的）的截留质量来确定一个名义过滤级别。此试验应该用通常的“过滤试验方法”标准来确定。例如 Bekipor[®] 不锈钢金属纤维烧结滤毡的过滤级别对液体是 3 μm 、对气体是 0.3 μm ，其中前者是表示在液体过滤时，大于 3 μm 的颗粒就不会通过介质进入滤液中。

绝对过滤级别是在既定条件下通过过滤介质的最大球直径，一般以微米表示。此概念于 1950 年由美国 Pall 公司的 Pall 博士首先提出，而后美国流体动力协会（NFPA）定义绝对过滤级别为“在规定的测试条件下，能够通过的硬质球颗粒的最大直径，它也就是过滤介质的最大孔径的读数”。美国流体动力研究中心定义绝对过滤级别是过滤效率达 99% 的颗粒尺寸，过滤效率为 95% 的相应的颗粒尺寸为公称过滤级别。到了 20 世纪 70 年代，美国自动化学会（SAE）和美国试验和材料协会（ASTM）用过滤比来表示过滤级别，则更接近如上所述的过滤的实际情况。测定过滤比的具体做法是同时截取过滤机的人料和滤液的样品，用规定的方法测定样品中固形物颗粒的粒度，并绘制它们的粒度分布曲线，规定某一粒级，例如 5 μm 、10 μm 、15 μm 、20 μm 等，ASTM 是用一个窄级别，例如 10~12.6 μm ，若定为 >10 μm ，从曲线上查出它们在入料中和滤液中的含量（颗粒个数），分别设为 N_{f10} 和 N_{y10} ，则可得一比值，称之为 β 比值，即 $\text{Beta}(x) = \text{入料中粒径大于 } x \text{ 的颗粒数} / \text{滤液中粒径大于 } x \text{ 的颗粒数}$ ，也可以 β_x 表示，其中 x 单位为 μm （Beta 比值仅用于液-固分离）。当规定 $x = 10\mu\text{m}$ ，则有

$$\beta = N_{f10} / N_{y10} \quad (1-3)$$

显然，过滤比或 β 值越大，表明过滤的去除率越高，也可以说是过滤精度越高，即大部分粗颗粒都被截留在介质上或其中。

平均过滤级别是过滤元件开口的平均值的测量。

随着精细过滤的发展，过滤悬浮液中的固体颗粒和过滤介质孔径均达到微米级范围，所以又出现过滤机微米级别（filter micron rating），也用名义微米级别、绝对微米级别和 Beta

级别表示,但现在还没有国际标准,有的厂家定义名义微米级别是指过滤机对一定粒度的颗粒的捕收率,以%表示。绝对微米级别是通过单流通试验,根据流体中通过过滤机平薄片过滤介质的玻璃球大小来确定,有的厂家规定名义级别是以截住的微米级颗粒的百分数表示。

1.3.3 过滤效率或效率级别

按国际标准,过滤效率 (filtration efficiency) 或效率级别 (efficiency rating) 是指过滤机在特定的试验条件下,去除给定浓度料浆的一个指定粒度级别固形(污染)物的能力,以%表示,即过滤效率为:

$$E_x = \frac{\text{过滤入料中某一粒度的颗粒数} - \text{滤液中同一粒度的颗粒数}}{\text{过滤入料中某一粒度的颗粒数}} \times 100\% \quad (1-4)$$

很显然,过滤效率和过滤比实际上是一致的,它们间的关系为:

$$E_x = (100 - 100/\beta_x)\% = 100(1 - 1/\beta_x)\% \quad (1-5)$$

$$\beta_x = 1/(1 - E_x) \quad (1-6)$$

β 和过滤效率(去除率)间的关系见表 1-2。

表 1-2 β 和去除率间的关系

β	1	2	4	20	50	75	100	200	1000	10000	100000
去除率/%	0	50	75	95	98	98.67	99	99.5	99.9	99.99	99.999

在实际应用中,过滤比一般用于过滤机间的比较。例如一个过滤机去除了 100 个颗粒中的 60 个,其过滤机效率是 60%,而其过滤比为 $100/(100-60)=2.5$,如果另一个过滤机去除 80 个颗粒,其过滤效率为 80%,而其过滤比为 $100/(100-80)=100/20=5$,则过滤比大一倍,比较起来就很明显。但也容易产生错觉,例如 99.5% 和 99.6% 的效率仅差 0.1%,但过滤比却分别是 $100/(100-99.5)=200$ 和 $100/(100-99.6)=250$ 。又如 20% 和 30% 的效率相差达 10%,但过滤比则仅为 $100/80=1.25$ 和 $100/70=1.43$ 之差。

按习惯,绝对过滤 (absolute filtration) 定义为 Beta 比是 75,即过滤效率为 98.667% [$100/(100-98.667)=100/1.333=75$]; 在 SAE 中定义是过滤机效率 90%,即 Beta 比为 10 是名义过滤 (nominal filtration)。要注意:如果一个厂家说他们的过滤机可对 $40\mu\text{m}$ 有 90% 的过滤效率(即 $B_{40}=10.0$),而另一厂家说其过滤机对 $25\mu\text{m}$ 有 85% 的过滤机效率(即 $B_{25}=6.7$),则不能一定认为前者比后者好。

美国国家标准协会 (ANSI) 规定平均效率级别 (Mean Efficiency Rating: ANSI B93.2) 是用多次试验 (multi-pass testing) 在过滤比为 2 时得到的过滤介质的效率。绝对效率 (Absolute Efficiency Rating: ANSI B93.2) 是在控制的试验条件下通过过滤元件的以微米计的最大颗粒,此时是在平均过滤比 (BETA) = 75.0 (效率为 98.7%) 的条件下。

通常将 $\beta=10000$ 作为绝对孔径的界限。而取 $\beta=75$ 作为该过滤器的过滤级别,是因为经过研究发现取此级别时,试验测定的重复性最大。此方法已有相应的 ISO 4572 标准,为国际所公认。

为说明过滤级别和过滤效率的关系,现举例如下^[10]: 两块金属烧结毡过滤介质 1# 和 2# 的基本性能如下。

鼓泡点: 1# $P_1=1800\text{Pa}$, $P_2=2300\text{Pa}$;

2# $P_1=1780\text{Pa}$; $P_2=2400\text{Pa}$ 。

测试方法相同, 试验粉尘是 AC 粉, 测试粒级为 $>3\mu\text{m}$ 、 $>5\mu\text{m}$ 、 $>6\mu\text{m}$ 、 $>8\mu\text{m}$ 、 $>10\mu\text{m}$ 、 $>15\mu\text{m}$ 。配制两种浓度的悬浮液, 它们过滤前后的固形物颗粒个数如表 1-3 和表 1-4 所示。

表 1-3 过滤前的悬浮液的浓度/(个/10mL)

介质号	粒 级					
	$>3\mu\text{m}$	$>5\mu\text{m}$	$>6\mu\text{m}$	$>8\mu\text{m}$	$>10\mu\text{m}$	$>15\mu\text{m}$
1#	238169	161293	125095	84306	53205	21619
2#	476783	344171	275721	193831	126624	52505

表 1-4 滤液固体含量/(个/10mL)

介质号	粒 级					
	$>3\mu\text{m}$	$>5\mu\text{m}$	$>6\mu\text{m}$	$>8\mu\text{m}$	$>10\mu\text{m}$	$>15\mu\text{m}$
1#	13306	6557	4484	2368	1102	216
2#	14853	3933	2163	1144	379	92

按过滤比计算出各级的 β 值如表 1-5 所示。

表 1-5 介质的 β 值

介质号	粒 级					
	$>3\mu\text{m}$	$>5\mu\text{m}$	$>6\mu\text{m}$	$>8\mu\text{m}$	$>10\mu\text{m}$	$>15\mu\text{m}$
1#	17.9	24.6	27.9	35.6	48.3	100
2#	32.1	87.5	127.5	169.4	334.1	570.7

由表 1-5 可见, 同一个过滤介质, 对料浆各粒级的过滤比差别很大。当按 $\beta=75$ 考虑时, 样品 1# 的过滤级别是 $12.6\mu\text{m}$ 、2# 是 $4.55\mu\text{m}$, 而它们的泡点压力基本相同。

由上述数据可按式(1-5) 计算过滤效率(见表 1-6)。

表 1-6 两样品的过滤效率/%

介质号	粒 级					
	$>3\mu\text{m}$	$>5\mu\text{m}$	$>6\mu\text{m}$	$>8\mu\text{m}$	$>10\mu\text{m}$	$>15\mu\text{m}$
1#	94.4	95.9	96.4	97.2	97.9	99
2#	96.9	98.6	99.2	99.4	99.7	99.8

若按上述绝对过滤级别的概念, 即过滤效率为 99% 时的过滤级别, 则 1# 是 $>15\mu\text{m}$, 2# 大约是 $>6\mu\text{m}$, 也相差很大。泡点压力相同意味着最大孔径相同, 而在此试验中表明它们的绝对过滤级别并不相同, 说明过滤级别和介质孔径是有区别的, 例如孔径为 $10\mu\text{m}$ 的过滤介质, 其过滤级别可小至 $0.1\mu\text{m}$ 。这与过滤过程有关, 将在以后论述。

当以浊度来表示悬浮液的质量时, 过滤效率可用悬浮液过滤前后的浊度变化来表示, 即

$$E = (c_1 - c_2) / c_1 \quad (1-7)$$

式中 c_1 ——过滤的人料悬浮液的浓度(浊度);

c_2 ——滤液的浊度。

国际上制订了许多和测定过滤介质及过滤机性能有关的标准, 包括液体和悬浮液中自动颗粒计数的标准 ISO 4402 (由 ISO/FDIS 11171 代替) 和 ISO 11943、污染水平分级标准 ISO 4406、泡点试验标准 ISO 4003、透气率试验标准 ISO 4002 等。