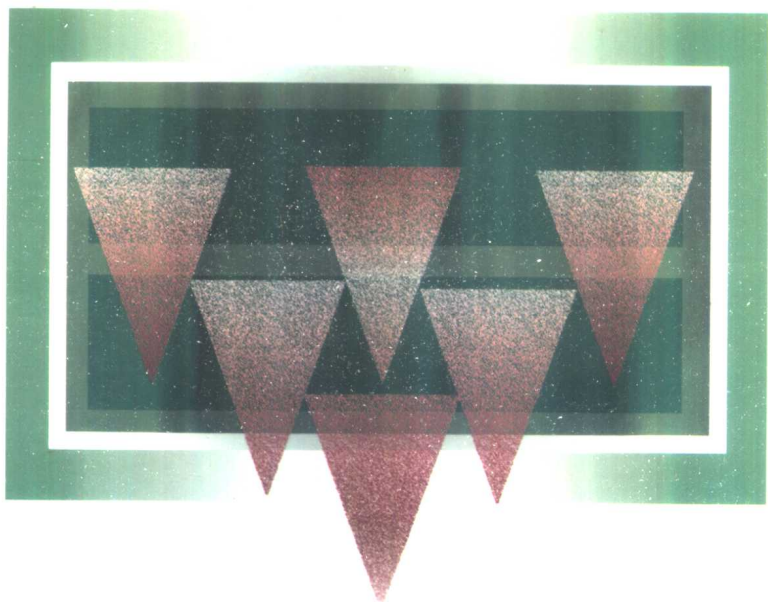




赵跃民 刘初升 著

干法筛分理论及应用

科学出版社

干法筛分理论及应用

赵跃民 刘初升 著

科学出版社

1999

内 容 简 介

本书基于振动理论、统计学理论和试验测试技术,系统地介绍并总结了潮湿细粒物料的干法筛分理论(概率筛分理论、等厚筛分理论、弛张筛分理论、低频大振幅筛分理论)的应用和发展情况,详细地研究了潮湿细粒物料筛分机的动力学问题、设计参数、工艺参数的取值范围,具体阐述筛面的形状及设计问题,列举了几种工业性装置的应用情况。

本书可供从事选矿工艺和选矿机械的工程技术人员和科研人员使用,也可供高校有关专业的教师、研究生、高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

干法筛分理论及应用/赵跃民,刘初升著.-北京:科学出版社,1999.3
ISBN 7-03-007143-3

I. 干… I. ①赵… ②刘… III. ①干法筛分-基础理论
②干法筛分-应用 N. TD921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 36370 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

新蕾印刷厂印刷



新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999 年 3 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32
1999 年 3 月第一次印刷 印张: 7 1/2 插页: 4
印数: 1—1 200 字数: 189 000

定价: 19.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

序

筛分是将松散的混合物料通过单层或多层筛面的筛孔，按照其粒度分成两种或若干不同粒级的过程。筛分作业可分为干式或湿式筛分，广泛应用于矿业、冶金、化工、材料、机械、建筑、食品、医药、能源及环境等诸多领域。

早在16世纪末，1589年英国煤炭工业首先使用了筛分设备，19世纪下半叶煤炭工业进行了广泛的按粒度实现机械筛分。20世纪40年代出现了振动筛，由于振动筛的结构简单，工作可靠，在煤炭工业得到了广泛的应用，60年代以来由于采煤综合机械化的实现，开采的煤炭粒度减小，粉煤量增大，井下防尘的喷水量增多，致使原煤水分增加，矿井来煤进入选煤厂的外在水分含量在8%左右，有时还高达14%，这就使潮湿煤炭细粒（13mm或6mm粒级）筛分时筛孔造成堵塞。近30年来，国内外为解决煤炭干法筛分的问题，提出一些筛分理论并研制了概率分级筛、等厚筛、旋转概率筛、弛张筛、强化筛、螺旋筛和琴弦筛等新型筛分机械。这些新型筛分机械在解决潮湿煤炭细粒筛分方面起到了较好的作用。但解决潮湿煤炭深度筛分问题仍是世界各国在干法筛分领域的一大难题。

赵跃民教授是我国矿业界有影响的青年学者，1982年就从事潮湿细粒煤炭的筛分研究工作，1986年和澳大利亚昆士兰大学J. 戴维斯博士合作进行煤用概率分级筛的数学模型的研究，之后在攻读博士学位期间仍继续潮湿煤炭细粒干法筛分的研究，1991年7月高水平地完成了该研究课题的博士论文，近年来承担了筛分领域的国家自然科学基金项目和“九五”国家重点科技攻关项目。现在赵跃民教授和刘初升博士将他们本人和中国矿业大学选矿工程研究中心的成员和研究生所从事干法筛分的理论研究和生

产实践的丰富成果撰写成《干法筛分理论及应用》，这是很有意义和价值的一件事情。书中还系统地对概率筛分、等厚筛分和弛张筛分的理论和实践进行了分析和研究，对进一步发展干法筛分科学技术具有推动作用。

我高兴地将这本书介绍给从事干法筛分的科研、工程、生产和管理的工作者们以及高校有关专业的师生作为研究和教学参考，能有所得益是这本书出版的愿望。



中国工程院院士

前 言

在人类生产活动中,煤炭的筛分加工具有悠久的历史,早在明末清初我国杰出的科学家宋应星编著的科学巨著《天工开物》中就有详细的记载。19 世纪下半叶,对煤炭进行筛分分级盛行起来,20 世纪 40 年代,振动筛的出现,形成了现代筛分技术,振动筛在煤炭筛分中得到广泛应用。近 30 年来,人们对于筛分科学的认识不断深入,概率筛分和等厚筛分的出现,标志着细粒干法筛分技术的新阶段。但是自 80 年代以来由于采煤机械化、井下防尘喷水、煤层渗水等原因使得采出原煤外在水分高、细粒含量大,因而在煤炭干法筛分时经常出现堵孔问题,造成筛分过程恶化,使得潮湿细粒煤炭干法筛分难以解决。在此背景下,在潮湿细粒煤炭干法深度筛分领域内出现多种学科相互渗透和交叉的局面,而振动力学、随机理论、表面物理化学、分叉、混沌理论成为解决这一难题的非常有效方法和工具,受到国内外学者的高度重视。

考虑到有关筛分理论和设备的基本知识已有众多的著作介绍,本书着重介绍作者及其合作者自 80 年代以来在潮湿细粒煤炭干法筛分领域内取得的重要研究成果。全书共分六章,第一章是研究粒群在筛面上运动沿筛面长度透筛分布规律和筛分数学模型,讨论了单颗粒在筛面上运动的分叉、混沌理论。第二章讨论了潮湿细粒煤炭的性质对筛分过程的影响和筛面堵孔的模型,然后提出防止堵孔的有效途径。第三章重点介绍了作者在设计潮湿细粒煤炭筛分机时建立的筛分机动力学模型、机械设计参数公式及参数的确定。第四章着重阐述了作者设计的煤用概率筛和弛张筛的运动参数、筛分工艺参数的实验优化结果。第五章详细介绍了作者近年来进行潮湿细粒煤炭干法筛分研究过程中申请的几种新型筛面的国家专利。第六章列举了作者设计的几种潮湿细粒煤

炭筛分机工业应用情况。

本书介绍的绝大部分内容是作者 1982~1997 年间在潮湿细粒煤炭干法深度筛分领域中的研究总结, 在这段研究过程中得到了国家自然科学基金、国家教育委员会高等学校博士点基金、煤炭科学基金、江苏省青年科技基金、煤炭高等学校跨世纪学术带头人基金、江苏省“333”工程跨世纪学术技术带头人基金的财政资助。

作者在研究生阶段, 师从陈清如院士, 深受他的教诲和指导, 是他把作者领进了矿物加工科学的殿堂, 可以说, 没有他便没有此书的诞生。

此外作者还得到了矿业、化工和冶金界前辈王淀佐院士、范维唐院士、郭慕孙院士、王祖谏教授、张荣曾教授、陈荃教授、任德树教授、卢寿慈教授、郭梦熊教授、顾民兆教授级高工、蒋志伟教授级高工等的关心和指导。

最后还要感谢中国矿业大学选矿工程研究中心的同志们, 书中有些内容借鉴了许多同事的研究成果, 在此一并致谢。

绪 论

煤炭是我国最重要的一次性能源，资源十分丰富，约占常规能源储量的 90%，远远超过石油和天然气的探明储量。同时，我国是世界上最大的煤炭生产和消费国家。煤炭提供了 76% 的发电能源，80% 的民用商品能源，75% 的工业原料，60% 的化工原料。截至 1996 年，我国煤炭消费量达 1.38Gt，占一次性能源的 75%。为保证我国国民经济持续、稳定的发展，在能源供应立足于国内的前提下，据专家预测，到 2000 年，我国煤炭需求量将达到 1.4Gt，2010 年煤炭需求量将为 1.8Gt，我国能源和经济发展条件决定了煤炭在未来 30~50 年内，仍将是我国的主要能源。

煤炭是非洁净能源，在开发和利用过程中对环境造成极大危害，我国的 84% 的煤炭直接用于燃烧，其中中小型工业锅炉和工业窑炉燃烧占有相当大的比重，全国约 3/4 的城镇仍以煤炭为日常生活燃料。由于原煤入洗比重低（仅 22%），燃煤技术落后和污染治理欠缺，煤烟型污染是我国大气污染的基本特征，全国约 90% 的 SO_2 和 80% 的烟尘为燃煤所排放（蔡昌凤，1996）。

我国煤炭资源的基本特征是高灰、高硫煤占相当比重。据有关资料的统计，我国煤炭资源平均灰分的平均值为 17.60%，其中高灰分煤（ $A > 25\%$ ）占 15.69%，中灰分煤（ $15\% < A < 25\%$ ）占 43.11%，低灰分煤（ $A < 15\%$ ）占 41.2%，多为待开发的优质年青煤。随着采煤机械化程度的提高，原煤矸石含量和灰分还将随之提高。从我国煤炭资源的分布来看，晋、陕、内蒙古、新疆等经济不发达的地区其煤炭资源的储存量占全国的 73.6%，而经济发达的华东、中南、东北三大区的煤炭储量分别占全国储量的 5.54%，2.98%，2.93%，这个特征决定了我国西煤东调的基本格局。煤炭占铁路运量的 40%，1995 年全国铁路运煤 695Mt，其

中有 440Mt 原煤, 约含 80Mt 矸石, 煤的平均运距约 600km, 多占了 $48\text{Gt} \cdot \text{km}$ 的运力 (蔡昌凤, 1996)。

针对上述基本情况, 以煤炭洗选为源头, 以煤炭气化为先导, 以煤炭洁净燃烧和发电为核心的洁净煤技术 (成玉琪, 1996) 在我国蓬勃开展起来。因此选煤是发展洁净煤的源头技术 (常规的物理选煤除去煤中 60% 灰分和 $1/3 \sim 1/2$ 的黄铁矿), 而筛分是选煤技术的重要环节, 我国大部分矿区动力煤具有粒度越小、灰分越低的特点, 适合采用筛选和洗选联合加工工艺, 即筛出的细粒级粉煤直接供应电厂等用户, 粗粒煤送跳汰机等进行洗选, 这样对降低洗煤厂的生产成本, 提高生产的经济效益, 具有重要的意义。然而对原煤进行干法深度筛分 (6mm, 3mm), 由于原煤外在水分的存在 (这是采煤防尘喷水、煤层渗水、露天堆放的必然结果), 使得潮湿细粒煤炭筛分时常常堵孔, 筛分过程难以进行, 因而潮湿细粒煤炭深度筛分是筛分技术的研究热点。近年来由于工业的需要和推动, 在潮湿细粒煤炭干法深度筛分理论和应用的研究中出现了大量的成果, 相继提出了概率筛分、等厚筛分、弛张筛分理论、低频大振幅筛分理论和强化筛分理论等, 并相应地研制了一批筛分设备。最近潮湿细粒煤炭的非线性运动及微观粘附机理成为筛分理论的研究热点, 以期在潮湿细粒煤炭的干法深度筛分上取得突破。

作者及合作者近年来在有关基金的资助下, 对潮湿细粒煤炭的干法深度筛分理论和设备进行了一些研究, 这些研究还很不深入, 有些还是刚刚起步, 很不成熟。这本书只是将我们近来的一些研究成果介绍给从事选矿和选煤科研工作者、高校教师、研究生和本科生, 起一个抛砖引玉的作用, 有待各位同行共同去开发、研究、探讨, 为我国煤炭加工利用事业作出贡献。

目 录

序

前言

绪论

第一章 潮湿细粒煤炭的筛分理论	1
§ 1.1 潮湿细粒煤炭的筛分理论回顾	1
§ 1.2 粒群沿筛面长度的透筛概率分布模型	3
§ 1.2.1 粒状物料的透筛概率理论	3
§ 1.2.2 粒群沿筛面长度的透筛概率分布模型的建立	6
§ 1.2.3 韦布尔分布的参数估计	9
§ 1.2.4 韦布尔分布的假设检验	15
§ 1.3 概率分级筛的筛分数学模型	15
§ 1.3.1 筛分数学模型的研究现状	16
§ 1.3.2 概率分级筛数学模型的提出	18
§ 1.3.3 模型参数的拟合和检验	20
§ 1.3.4 概率分级筛数学模型的进一步研究	24
§ 1.4 单颗粒在筛面上运动的分叉、混沌理论	31
§ 1.4.1 单颗粒在筛面上运动规律的不可预测性	32
§ 1.4.2 单颗粒在筛面上运动的分叉、混沌理论	34
第二章 潮湿原煤性质对筛分过程的影响	45
§ 2.1 原煤粒度组成对概率筛分过程的影响	45
§ 2.2 原煤外在水分对概率筛分过程的影响	49
§ 2.3 原煤粒度组成、外在水分、细泥含量对概率筛分 过程的综合影响	51
§ 2.4 潮湿细粒煤炭堵孔机理及筛分方法	54
§ 2.4.1 煤泥堵孔的假设与特性	54

§ 2.4.2 筛孔覆盖膜破裂过程的研究	57
§ 2.4.3 潮湿细粒煤炭堵孔问题的解决途径	61
§ 2.5 弹性筛面克服堵孔的机理	62
§ 2.5.1 弹性筛面动力学分析	63
§ 2.5.2 弹性振动筛面筛孔形状及克服堵孔的机理	68
第三章 潮湿细粒煤炭筛分机的设计理论	71
§ 3.1 潮湿细粒煤炭筛分设备的发展概况	71
§ 3.2 煤用概率分级筛的动力学模型及参数设计	83
§ 3.2.1 概述	83
§ 3.2.2 振动系统的动力学参数分析	84
§ 3.2.3 概率分级筛参数的设计计算	87
§ 3.3 琴弦概率筛的动力学模型及参数设计	89
§ 3.3.1 筛箱结构及动力学模型	90
§ 3.3.2 筛网的力学模型及其振动解	92
§ 3.3.3 琴弦筛网的设计公式	104
§ 3.4 ZGS 重型概率分级筛的参数设计	109
§ 3.4.1 ZGS 重型概率分级筛理论依据	110
§ 3.4.2 ZGS 重型概率分级筛参数确定	111
§ 3.4.3 动力学参数的设计计算	112
§ 3.5 弛张筛的力学模型及参数设计	115
§ 3.5.1 弛张筛传动机构的选型	115
§ 3.5.2 弛张筛筛面动力学参数研究	119
§ 3.5.3 弛张筛设计参数的研究	128
§ 3.6 2ZQB2030 干法脱介筛的设计	134
第四章 煤用概率分级筛和弛张筛的工艺参数试验研究	141
§ 4.1 煤用概率分级筛筛面倾角和振幅的研究	141
§ 4.2 煤用概率分级筛运动学参数和抛射强度的研究	148
§ 4.3 弛张筛筛分动力学参数试验研究	155
§ 4.4 弛张筛筛分效率与原煤性质的关系试验研究	159
§ 4.4.1 筛分效率与原煤外在水分的关系	159

§ 4.4.2 筛分效率与原煤细粒含量的关系	162
§ 4.5 弛张筛运动学参数试验研究	164
第五章 新型筛面的设计	168
§ 5.1 现有筛面存在的问题	168
§ 5.2 叠层琴弦筛面的研究	169
§ 5.3 变筛孔筛面的研究	170
§ 5.4 折线和弧线筛面	182
§ 5.5 捷线等厚筛面	184
第六章 琴弦概率筛和重型琴弦概率筛的工业应用	189
§ 6.1 郑煤集团芦沟煤 6mm 干法筛分的半工业性 试验	189
§ 6.2 郑煤集团芦沟煤矿 6mm 筛分的工业性试验	194
§ 6.3 QGS 琴弦概率筛在部分煤矿的半工业性试验	198
§ 6.4 QGS2020 琴弦概率筛在七台河市干法选煤厂 的工业应用	202
§ 6.5 ZGS 重型概率筛的工业应用	205
§ 6.6 ZQGS1520 重型琴弦概率筛的工业应用	212
参考文献	215

第一章 潮湿细粒煤炭的筛分理论

§ 1.1 潮湿细粒煤炭的筛分理论回顾

随着我国国民经济的迅速发展,对选煤技术的要求发生了根本性变化,以原煤为原料获取(二次)能源的要求在不断地增长。而我国大部分矿区的动力煤具有水分高、粉煤量大、粒度越小灰分越低的特点,适宜于筛选和洗选联合工艺,即筛出的低灰分细粒煤直接供应电厂等用户,粗粒煤采用洗选加工,以提高生产率,降低选煤成本。但是在煤炭开采过程中,由于煤层渗水、井下防尘喷水和 管理不善等原因常造成采出的原煤外在水分在 7% 以上,而潮湿细粒煤炭在外在水分和粘土成分作用下,互相粘结成团或附着在筛面上,导致筛分效率低下,筛分过程恶化。当外在水分达 7%~14% 时进行 6mm 或 3mm 筛分时,一般振动筛已很难完成这种筛分任务。为解决潮湿细粒煤炭的干法深度筛分,国内外对潮湿细粒物料的干法筛分理论进行了深入而广泛的研究。

在潮湿细粒煤炭筛分难易程度的评价方面,英国制定了潮湿细粒原煤干法筛分困难程度的评价方法(石德明,1986),即其困难程度用可处理性指数来衡量。他们把 12kg、25~0mm 原煤从振动圆锥卸出的时间(单位为 s)定为可处理性指数,时间越长,可处理性指数就越大,干法筛分的困难程度也就越大。当指数超过 5s 时,用普通振动筛进行筛分已经很困难。并指出可处理性指数与煤炭粒度组成、水分含量(特别是表面水分含量)、泥质页岩含量、泥化特性曲线有关。

在颗粒透筛理论研究上,早在本世纪 40 年代,Gaudin 在其《选矿原理》一书中就提出了单颗粒透筛概率理论,同期 Targgart 也在其《选矿手册》一书中提出了单颗粒的概率筛理论。随着振动

筛的出现,为了描述颗粒运动规律,于 50 年代 Klockhaus 提出物料平均运动速度公式,并经 Kluge 发展,提出了著名的抛射强度 $K_v=3.3$ 上限值理论。60 年代,瑞典学者 Mogensen 在详细研究了单颗粒透筛概率理论上提出了概率筛分原理,为以后研制概率筛奠定了理论基础(张恩广,1990)。70 年代,法国学者布尔斯特莱因首次提出了等厚筛分原理,为后来等厚筛的研制提供了理论基础(张恩广,1990)。它是通过调整筛面各段的抛射加速度或筛面倾角,使得物料在入料端有较大的抛射强度和运动速度,促使物料快速分层,而在排料端抛射加速度减小,排料速度减慢,这样就增加了细颗粒物料的透筛机会,通过这样处理使物料在沿整个筛面长度方向上,基本保持厚度一致或递减,即等厚。80 年代,赵跃民、陈清如突破中外学者提出的单颗粒透筛概率理论,提出了粒群沿筛面长度方向上的透筛概率分布模型,并发现了潮湿细粒原煤干法筛分时,由于颗粒间的粘附力作用引起筛分配曲线在细粒区间上出现反常的上翘现象。进入 90 年代,Beenken 把物料筛分过程划分为单颗粒、薄料层和厚料层三个区域,提出了各区域的动力学模型;Vaisberg 等人(1990)把振动筛面上物料分聚看成瞬间“爆炸”过程,建立了筛分概率模型,1994 年 Brereton 等(1994)^①提出筛分机工艺参数对筛分效果的影响,并提出了评价准则。

德国海茵·勒曼公司自 60 年代以来经过几十年的探索,提出了潮湿细粒煤炭弛张筛分原理,它是利用筛面交替地实行张紧和松弛,使筛面弯曲产生很大的加速度且引起筛孔变形,物料被垂直抛起呈跳跃式前进,从而使潮湿细粒物料得以良好的松散和分层,使得干法深度筛分得以顺利进行(石德明,1986;施密特,1980;Walenzik,1985)。

进入 90 年代,国内、外学者开始探索潮湿细粒物料的微观粘附机理及其对筛分过程的影响,德国学者 Norgate 和 Weller

^① Brereton, T. et al., 1994, The influence of screen feed rate and length on performance characteristics

(1993)在研究潮湿细粒物料筛分过程中,提出粘着细粒物料筛分模型,利用模型参数和给矿水分含量之间的关系,成功预测了给矿水分变化对产品质量和铁矿石干法筛分设备的影响。德国学者 Hollinder 和 Hoberg (1994)从物料表面物理、化学特性的角度详细研究了潮湿细粒物料在表面水分作用下互相粘附的粘附模型,并提出了减小潮湿细粒物料之间互相粘附粘结力的几种方法。我国选煤工作者从大量的潮湿细粒物料干法筛分实践中总结出潮湿细粒煤炭低频大振幅干法筛分的经验方法(郝凤印等,1993),其理论问题赵跃民、刘初升进行了进一步深入研究。

§ 1.2 粒群沿筛面长度的透筛概率分布模型

§ 1.2.1 粒状物料的透筛概率理论

粒状物料的筛分是一个复杂的随机过程,其基本原理是物料颗粒的透筛概率理论。影响颗粒透筛的因素很多,主要有物料的性质、筛分机的工艺结构和运动学参数。

Taggart (1944)和 Gaudin (1939)从颗粒大小与筛孔尺寸的关系出发,提出了单个颗粒垂直投射水平筛面时的透筛概率(如图 1-1),奠定了粒状物料筛分的理论基础。

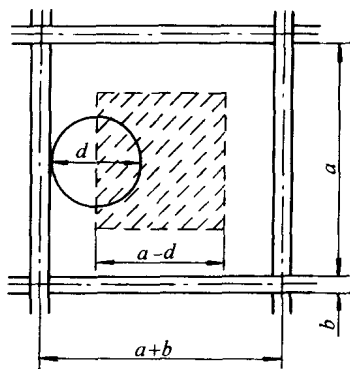


图 1-1 颗粒垂直透筛示意图

$$P = \frac{(a - d)^2}{(a + b)^2} \quad (1-1)$$

式中 a ——筛孔尺寸；
 b ——筛丝直径；
 d ——颗粒粒度。

1965年瑞典人 Mogensen 提出了单颗粒透筛的较完整的透筛概率理论，他研究了筛面倾角对颗粒透筛的影响，着重于排除难筛颗粒对透筛的阻碍作用，创造了概率筛分法。他指出相对粒度为 d/a 的物料从倾斜方向落到倾斜筛面的透筛概率为(如图1-2)：

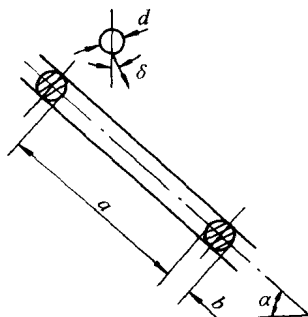


图 1-2 颗粒投向倾斜筛面的示意图

$$P = \frac{(a + \varphi b - d)[(a + b)\cos(\alpha + \delta) - (1 - \varphi)b - d]}{(a + b)^2\cos(\alpha + \delta)} \quad (1-2)$$

式中 α ——筛面倾角；
 δ ——物料下落时对筛面的相对运动方向线与垂直线的夹角；
 φ ——考虑物料与筛丝内倾碰撞后仍能落入筛孔的系数。

$$\varphi = e^{-2.84(\frac{d}{a} + 0.255)}$$

Mogensen(1965)研究了物料透过多层筛面的过程，推导出了透过 n 层筛面的颗粒量的公式(如图 1-3)：

$$q = \frac{(m + n - 2)!}{(m - 1)!(n - 1)!} p^n (1 - p)^{m-1} \quad (1-3)$$

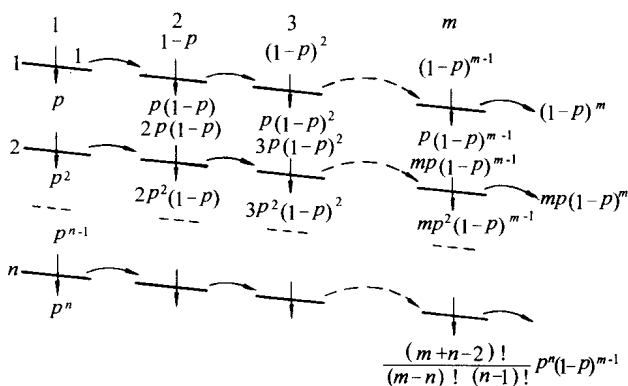


图 1-3 物料在等透筛概率筛面上的筛分情况

Schultz 和 Tippin(1970) 推导出了在整个筛面长度下筛分产品的分配方程(Schultz et al., 1970):

$$\sum_{m=1}^m q(n) = \sum_{m=1}^m \frac{(m+n-2)!}{(m-1)!(n-1)!} p^n (1-p)^{m-1} \quad (1-4)$$

Breteton(1975) 全面介绍了概率筛分理论, 并提出用分离粒度 d_p 和可能偏差 E_p 来评定概率筛分机的筛分质量。

闻邦椿(1982) 对颗粒粒度相同的粒群进行透筛概率分析, 给出了物料透过不同倾角筛面的透筛总概率。

上述概率筛分理论是基于单个颗粒投落在单个筛孔的透筛概率。

陈清如(1982) 根据实验室模拟概率筛分试验结果指出, 概率筛分物料时, 沿料流方向筛面各段的物料透筛概率基本不变。

实际上, 物料的筛分过程是粒群按自身的粒度组成进行分层和分离的过程, 仅研究单颗粒的行为是把复杂的筛分过程过于简单化了。而且, Mogensen(1965) 等人在推导物料透筛概率分布方程时都作了这样两个假设: ① 与筛面每次接触而未透筛的颗粒向物料前进方向跳移一个单位距离(单位距离是指筛网上相邻两金属丝中心线之间的距离); ② 颗粒之间相互没有影响。显然, 这两条假设是不符合实际的。