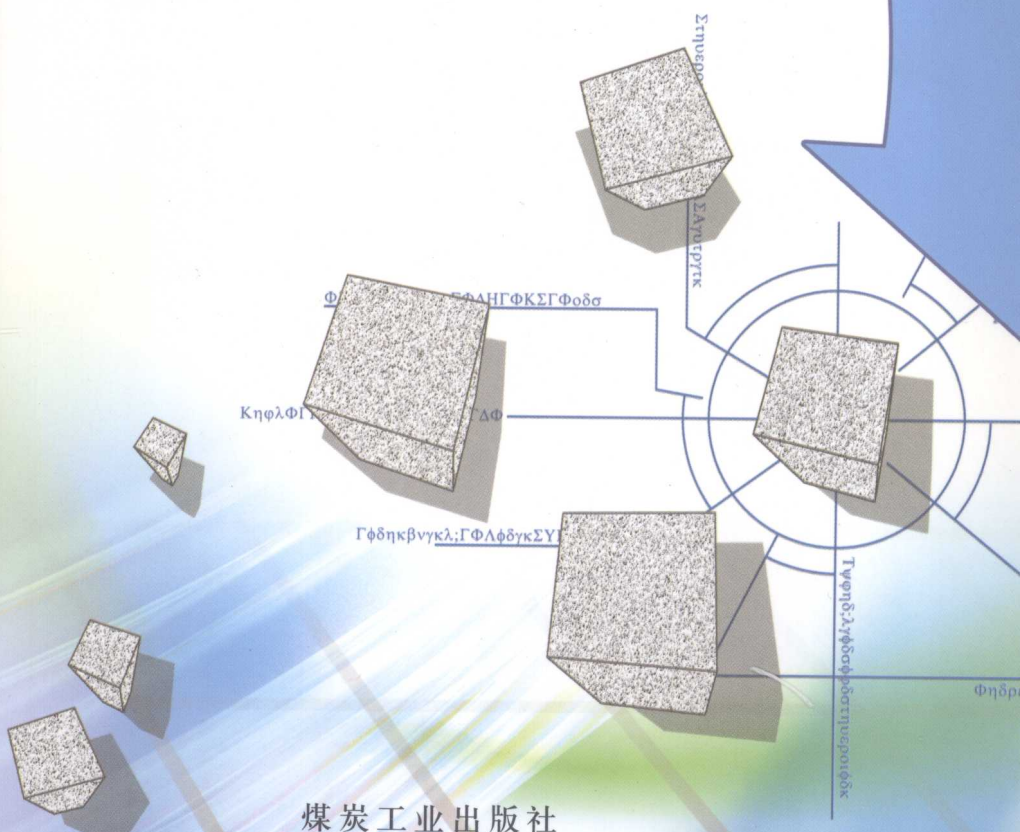


振动筛分过程解析

焦红光 著



河南理工大学矿物加工工程学科建设基金资助

振动筛分过程解析

焦红光 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

振动筛分过程解析/焦红光著. —北京: 煤炭工业出版社, 2008. 1

ISBN 978 - 7 - 5020 - 3193 - 0

I. 振… II. 焦… III. 筛分 - 研究 IV. TD921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 151345 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 850mm × 1168mm¹/₃₂ 印张 9³/₈

字数 241 千字 印数 1—1,500

2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷

社内编号 5994 定价 30.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 提 要

本书重点采用颗粒离散元法对振动筛分离过程进行了解析,同时对潮湿细粒物料的动态黏附模型和筛分效率及物料可筛性的评定方法进行了研究。全书共分8章:第1、2章分别对当前筛分技术和筛分数学模型进行了分析评述;第3~6章论述了离散元法的基本原理,提出了采用离散元法研究筛分过程的基本思想,分别介绍了振动平面上颗粒、粒群运动状态的模拟程序和筛分过程仿真程序 SieveDEM 的开发方法,论述了模拟结果的验证情况;第7章建立了潮湿物料在筛分过程中的动态黏附模型;第8章对筛分作业的分离粒度进行了理论分析,提出了评定入筛物料的可筛性和筛分效果的模糊数学方法。

本书可供从事矿物加工工程技术研究的科研人员及相关专业的师生参考。

序 言

随着世界科学技术和经济的迅速发展,以及各工程领域的互相渗透,近年来筛分技术的研究和应用已深入拓展,形成当前应用最广泛的散体物料按粒度分类的技术,在矿业、冶金、化工、材料、建筑、机械、农业、医药、能源及环境等领域有着极为广泛的应用。

筛分技术的发展史表明,无论指导生产实践,还是发明新的筛分方法及设备,都离不开筛分理论的指导。概率筛分理论和等厚筛分理论的成功应用,说明了筛分理论研究的重要性。传统的筛分理论是对物料筛分分离现象的物理解释,因此,筛分理论中定性的推论较多,而定量的物料筛分过程数学物理乃至物质的结构化学分析、论证较少,不能对筛分过程作出圆满的解释。离散元法是20世纪70年代发展起来的用来计算散体介质系统的力学行为的一种数值分析方法,目前在物料处理领域中也得到了应用,但在矿物筛分领域内的应用却处于起步阶段。

作者从事振动筛分技术的基础研究和技术开发,在国内首次采用颗粒离散元法对振动筛分分离过程进行研究,独立开发了批处理筛分作业的离散元法模拟软件 SieveDEM,成功地实现了批处理筛分作业全过程的动态模拟,同时建立了潮湿细粒物料的动态黏附模型,提出了评定筛分效率和物料可筛性的模糊数学方法,以此为主体内容撰写了这本《振动筛分过程解析》。这将对干法筛分技术的发展,以及颗粒离散元法更深入地应用于矿物加工过程的研究起到推动作用。

本书内容丰富,取材新颖,理论与实际结合,对颗粒学与矿

物加工学的研究和应用具有参考价值。我很高兴将这本书推荐给从事颗粒矿物筛分技术研究的科研人员及有关专业的师生，相信大家会有所受益。



中国工程院院士、中国矿业大学教授

2007 年 10 月

前 言

筛分作业是当前应用最广泛和最有效的物料按粒度分级的方法，它广泛地应用于矿业、冶金、建材、食品、医药、化工、能源及环境等诸多领域，是为了产品销售目的或为了调节其他过程的一种物料准备工艺。筛分作业的结果不仅对下一步作业的效率有着重要影响，而且对直接或间接产生的商品的价值有着很大的影响。

虽然筛分作业的应用领域不同，处理对象各异，但其筛分机理是一致的。从直观的角度来看，筛分作业是一个简单的分离过程：通过颗粒与筛孔进行尺寸比较，较筛孔小的颗粒透筛成为筛下物，较筛孔大的颗粒留在筛面上成为筛上物，从而实现粗细颗粒的分离。但是在实际的工业性应用中，由于一定处理量的要求，要使物料达到完善的按粒度分离并非易事。

伴随粉体颗粒技术、机械工程技术等相关领域的科技进步，众多的新思想、新技术和新材料被引入到筛分技术中来，筛分设备的处理能力和筛分效率有了长足的进步，但目前筛分基础理论的研究仍然落后于生产实践和筛分机械系统动力学研究，筛分理论尚处于假说和实验科学阶段。传统的筛分理论相当一部分属于对筛分过程的简单物理解释，或对试验结果的定量化总结，更着重于筛分结果而非筛分过程的研究，现有理论中定性的叙述性推论较多，而定量的数学分析、论证较少，还不能有效地解析筛分作业的全部动态分离过程。本书将颗粒离散元法引入到筛分过程的研究中，在总结和继承国内外相关研究成果的基础上，结合筛分作业的特点，从建立计算模型、设计程序、选择计算参数、验证模拟结果及筛面上物料的运动状态和透筛规律等方面进行了全面系统的理论分析和试验研究，同时诠释了筛分作业分离粒度

的物理意义,提出采用模糊数学的方法来评价入筛物料的可筛性及筛分效果,建立了潮湿物料的动态黏附模型,为筛分作业的理论分析及其工作参数的优化配置提供了新的方法和工具。

全书共分8章,第1章对当前筛分技术的状况、存在问题和发展趋势进行了分析评述;第2章对筛分数学模型进行了总结并建立了筛分作业的多项式数学模型;第3章总结了颗粒离散元法的应用现状,介绍了离散元法的基本原理,提出了采用离散元法研究筛分过程的基本思想;第4章开发了颗粒在筛面上运动状态模拟程序并对其进行了验证;第5章开发了粒群在振动平面上运动状态模拟程序,采用高速动态分析系统对模拟程序进行了验证;第6章在前两章的基础上最终开发出了筛分过程仿真程序SieveDEM,实现了对批处理筛分作业全过程的动态模拟,随后采用SieveDEM对入筛物料在筛面上的运动特征及筛分过程进行了模拟研究,并通过实验室试验、半工业试验和工业性试验对模拟结果进行了验证;第7章建立了潮湿物料在筛分过程中的动态黏附模型;第8章对筛分作业的分离粒度进行了理论分析,提出了评定入筛物料的可筛性和筛分效果的模糊数学方法。

本书得以出版,首先要感谢导师赵跃民教授的精心指导和谆谆教诲。作者从硕士研究生阶段就师从赵跃民教授从事潮湿细粒煤炭深度干法筛分的研究工作,赵先生渊博的学识、严谨的治学态度和无私奉献的拼搏精神一直激励着作者去克服困难、不断进取。同时,特别感谢矿业界前辈陈清如院士和北京农业大学徐泳教授提出的许多有益的建议。

目 次

1 振动筛分技术现状	1
1.1 概述	1
1.2 筛分过程的透筛概率理论	4
1.3 筛面上物料的运动规律	7
1.4 潮湿细粒物料的干法深度筛分理论及 设备	14
1.5 本章小结	20
2 振动筛分数学模型	21
2.1 概率模型	22
2.2 筛分过程动力学及动力学模型	23
2.3 其他筛分数学模型	25
2.4 基于粒群透筛 Weibull 模型的筛分数学 模型	27
2.5 本章小结	33
3 颗粒离散元法	34
3.1 离散元法的发展概况	34
3.2 颗粒离散元法在散体物料处理方面的 应用概况	38
3.3 颗粒离散元法的接触模型	41
3.4 颗粒离散元法公式推导	49
3.5 颗粒离散元法算法分析	55
3.6 本章小结	59

4	筛面上颗粒运动的数值模拟	61
4.1	概述	61
4.2	选取计算时步的恢复系数验证法	63
4.3	单颗粒模拟程序的验证	72
4.4	单颗粒模拟程序的确认	78
4.5	颗粒同筛面碰撞过程接触时间的模拟研究	85
4.6	筛面上物料运动规律的模拟研究	89
4.7	本章小结	107
5	振动平面上粒群运动的模拟及试验验证	108
5.1	概述	108
5.2	振动平面上粒群松散度的试验研究	112
5.3	振动平面上粒群运动状态的数值模拟	122
5.4	设置高密度以增大离散元法计算时步的可行性分析	131
5.5	本章小结	137
6	批处理筛分作业的离散元模拟研究	138
6.1	模拟场景简介	138
6.2	模拟程序的开发及其特点	140
6.3	筛面上“盲粒”堵孔行为的模拟及分析	144
6.4	概率筛分作业的模拟及验证	159
6.5	筛面配置及工业性试验的模拟研究	178
6.6	本章小结	201
7	筛分作业中潮湿物料的动态黏附模型	202
7.1	潮湿物料的黏附团聚机理	202
7.2	散状物料中液相的存在状态	205

7.3	潮湿物料间液桥力的基础理论	210
7.4	筛分作业中潮湿物料的动态黏附模型	213
7.5	潮湿物料间液桥力的理论分析	217
7.6	本章小结	225
8	分离粒度的确定与筛分效果评价	226
8.1	分离粒度的确定方法	226
8.2	概率筛面参数对筛分作业的影响	233
8.3	筛分作业评定的模糊数学方法	242
8.4	本章小结	252
附录 1	自定义类的头文件	253
附录 2	CSieveDEMDoc 类的头文件	263
参考文献		275

1 振动筛分技术现状

1.1 概述

1.1.1 筛分作业在散体物料处理工艺中的地位

将松散的混合物料通过单层或多层筛面的筛孔，从而按照粒度将其分成两种或若干种不同粒级产品的过程称为筛分作业。在人类的生产活动中，筛分作业具有悠久的历史。以煤炭加工业为例，英国的有关文献早在 1589 年就有关于煤炭筛分的记载^[1]。19 世纪下半叶，由于市场的需要，为了提供各种粒度的商品煤，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，标志着现代筛分技术进入了一个新的发展阶段。随着煤炭加工业的不断发展，筛分作业日益成为其不可缺少的一部分。在现代煤炭工业中，筛分作业的作用绝不仅仅体现在为其他选煤方法创造条件上，它还直接关系到煤炭产品的对路供应和生产部门的经济效益。通过筛分分级，可以提高煤炭产品质量、增加品种，这对于减少环境污染、提高煤炭利用效率和社会经济效益都有着重要的意义。可以认为，就煤炭加工而言，筛分作业和分选作业处于同等重要的地位。美国学者 D. Schreckengost 甚至认为，筛分作业是选煤厂中最重要的工艺环节，对能否有效地选煤、回收商品煤、产品脱水干燥等都具有深远的影响，一言以蔽之：筛分是选煤加工的“灵魂”^[2]。尤其值得一提的是：同煤炭的分选作业相比，筛分作业还具有简单易行、投资少、见效快、便于管理的特点。

潮湿细粒物料（6mm、3mm）的干法深度筛分历来是筛分领域研究的热点问题。仍以煤炭洗选加工业为例，众所周知，煤泥水系统是整个选煤生产系统中最复杂、生产成本最高、收益最

小（有时甚至会负收益）的环节，大量细粒煤进入到主洗设备中不仅会直接影响主洗设备的洗选精度和稳定性，而且，由于细粒煤经过洗选后的水分含量较高，还会降低整个产品的发热量并影响到产品的价格，因此，在选煤界素有“重选背浮选”之说。而另一方面，我国大部分矿区生产的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的联合加工工艺^[3-6]，即筛出的粉煤直接供应电厂等用户，粗粒煤再进一步洗选加工。这样，对简化工艺系统，降低生产成本，提高经济效益和保护环境等都具有十分重要的意义。

类似于煤炭工业，筛分作业在其他工业部门中也有着广泛的应用，并占有举足轻重的地位。例如，在三峡和小浪底等水利工程工地，就有众多的各种类型的筛分机械对砂石物料进行筛分处理^[7]；此外，在制盐、粮食加工等领域也广泛地采用筛分作业对物料进行净化处理^[8]。

筛分虽然是一种古老的分类方法，但到目前为止，筛分作业依然是应用最广泛和最有效的物料按粒度分类的方法，它可以处理从 0.1 ~ 300mm 甚至更大粒度的各种各样的物料^[9]。伴随粉体颗粒技术、机械工程技术等相关领域的科技进步，众多的新思想、新技术和新材料被引入到筛分技术中来，筛分设备的处理能力和筛分效率也有了长足的进步，设备的可靠性不断提高，同时很多新型的筛分设备不断问世。例如，近年来英国的 Russell Finex 公司成功地将超声波技术（Vibrasonic Screen Deblinding System）应用到超细粒级的筛分作业中^[10]，有效地解决了筛孔堵塞的问题，使得筛分技术得以取代以往某些只能采用风力分级来解决的细粒物料的分级作业，进一步拓展了筛分作业的应用范围。

1.1.2 研究筛分理论的实践意义

虽然筛分作业的应用领域不同，处理对象各异，但其筛分机理是一致的。从直观的角度来看，筛分作业是一个简单的分离过程：通过颗粒与筛孔进行尺寸比较，较筛孔小的颗粒透筛成为筛

下物，较筛孔大的颗粒留在筛面上成为筛上物，从而实现粗细颗粒的分离。但是在实际的工业性应用中，由于一定处理量的要求，要使物料达到完善的按粒度分离并非易事。作为一个由颗粒群体参与的错综复杂的分离过程，美国学者 R. E. Galloway 早在 1964 年就总结了 24 种影响筛分作业的因素^[11]。20 世纪 30 年代振动筛的出现^[3]，标志着现代筛分技术的形成。为了揭示筛分效果与其影响因素之间的关系，有关人员反复进行了大量的研究工作，涌现出许多新的筛分理论和新型筛分机械，人们对筛分科学的认识不断深入。但是由于筛分过程的复杂性和检测分析仪器、设备的不完备，许多相关论点都是在特定的前提条件下提出的，还有的仅仅是有待验证的假设，即使是目前已经得到广泛应用的一部分筛分理论和筛分数学模型，也一直没有摆脱经验和半经验模式，人们对筛分过程的认识还很不完善。澳大利亚学者 Standish 认为，从当代众多工业筛分的结果来看，筛分作业还远不够精确和高效^[12]。

以潮湿细粒煤炭的干法深度筛分作业为例，由于煤层渗水、井下防尘喷水和管理不善等原因，常常造成开采出的原煤具有一定的外在水分，使得潮湿细粒煤炭在筛分过程中发生黏附成团、堵塞筛孔的现象，导致筛分效率低下，筛分过程恶化，尤其是当原煤的外在水分达到 7% ~ 14% 时，用普通筛分方法即使是 13mm 分级也有相当的难度。为有效地对潮湿细粒物料进行干法深度筛分，国内外有关学者进行了广泛而深入的研究，研制出了多种类型的筛分设备，虽然收到了一定成效，但是迄今为止，潮湿细粒物料的干法深度筛分仍然是一个有待进一步深入解决的问题。

筛分技术的发展历史充分证实了无论是对现有的筛分设备进行改进，还是研制新型的筛分设备，都有赖于筛分理论的发展，其中概率筛分方法 PSM (Possibility Screening Method) 就是一个典型的事例。20 世纪 50 年代，瑞典学者 F. Mogensen 首先提出了概率筛分理论。随后，各国学者如中国的闻邦椿和陈清如、美国的 C. W. Schultz 和 R. B. Tippin 等人，分别在不同的行业对概

率筛分理论进行了深入研究,使得概率筛分设备在诸多领域得到了广泛的发展和应用。随后出现的等厚筛分法 TSM (Thick - Layer Screening Method 或 Iso - Thickness Screening Method)、弛张筛分法 FSM (Flip - Flow Screening Method),也都再一次证实了研究筛分理论的重要性。因此,筛分理论的研究也受到各国研究者的重视,荷兰的学术期刊《Powder Technology》、《Chemical Engineering Science》、《International Journal of Mineral Processing》和《Minerals Engineering》,德国的学术期刊《Aufbereitungs - Technik》(即《Mineral Processing》),英国的学术期刊《Filtration&Seperation》,美国的学术期刊《Coal Preparation》等每年都刊登有专门研究散体物料筛分技术的文献。

通过对筛分过程进行深入的理论研究,可以进一步认识物料在振动着的筛面上的运动机理,在此基础上寻找筛分机的最佳运动学参数(振幅、转速、筛面倾角、振动方向角),从而提高筛分效率,降低能耗,延长筛分机和筛面使用寿命,促进筛分机械设计的改进、优化及新型筛分机械的研制。全球每年都有数百亿吨的粒状物料要经过筛分处理,仅在我国,每年经过筛分作业处理的煤炭就有十几亿吨,对筛分过程的深入认识显然具有十分重要的经济意义。

1.2 筛分过程的透筛概率理论

1.2.1 单颗粒透筛概率理论

振动筛面上物料的筛分过程,是以概率论的原理为基础的,物料颗粒的透筛概率理论实质上就是筛分的基本原理。M. Gaudin^[24]和 F. Taggart^[25]最先提出了球形颗粒垂直于平置筛面运动时(图 1-1a)理论透筛概率 P_t 的计算公式:

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

随后,瑞典学者 F. Mogensen 进而提出了球形颗粒倾斜投射到倾斜筛面上时(图 1-1b)理论透筛概率 P_t 的计算公式:

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

式 (1-1)、式 (1-2) 中各符号的意义如图 1-1 所示。式 (1-2) 中的 ϕ 为颗粒与筛丝内侧碰撞后仍能透筛的系数，可由下式确定：

$$\phi = \exp \left[-2.84 \left(\frac{d}{a} + 0.255 \right) \right]$$

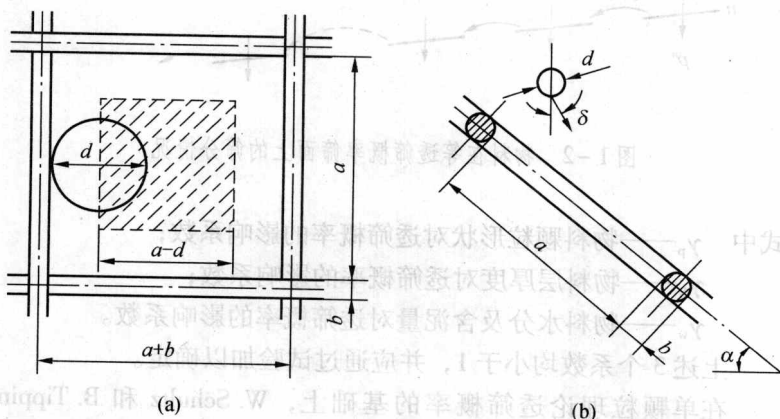


图 1-1 球形颗粒的透筛概率图

Mogensen 同时还研究了物料透过多层筛面的过程，推导出了透过 n 层筛面的颗粒量的计算公式 (图 1-2)。

上述颗粒透筛概率的计算公式均是理想情况下球形物料的理论透筛概率公式。事实上，物料颗粒形状并非为球形，同时筛分过程中物料厚度对透筛概率也有一定影响，物料中的水分及含泥量多少也会影响颗粒的透筛概率，因此，理论透筛概率应进行修正后才能符合实际情况。闻邦椿认为，实际透筛概率 P_p 与理论透筛概率 P_t 之间应存在以下关系^[9]：

$$P_p = \gamma_p \gamma_h \gamma_w P_t \quad (1-3)$$

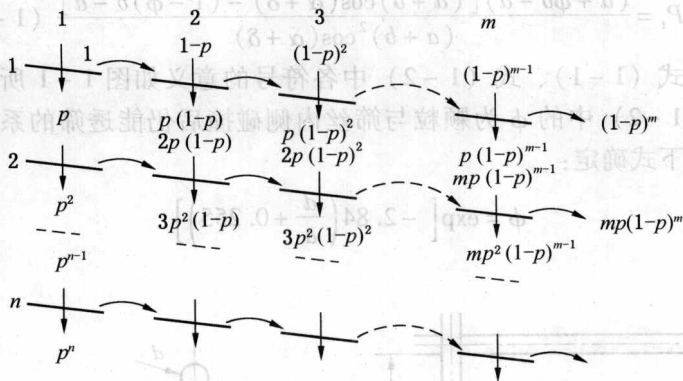


图 1-2 物料在等透筛概率筛面上的筛分情况

式中 γ_p ——物料颗粒形状对透筛概率的影响系数；
 γ_h ——物料层厚度对透筛概率的影响系数；
 γ_w ——物料水分及含泥量对透筛概率的影响系数。

上述 3 个系数均小于 1，并应通过试验加以确定。

在单颗粒理论透筛概率的基础上，W. Schultz 和 B. Tippin (1970) 推导出了整个筛面长度下筛分产品的分配方程^[26]，王亭杰 (1989) 则进一步分析了单一粒级、粒群的透筛概率^[27,28]。

1.2.2 粒群透筛概率理论

为考察粒群效应对物料颗粒透筛概率的影响，赵跃民 (1991) 采用概率统计学的方法对物料的分层透筛过程进行了进一步的研究。他把同一粒度的颗粒在筛面上的筛分时间（即颗粒在筛面上的滞留时间）视为一个随机变量，这样就把颗粒的透筛行为转化为一个“寿命”问题来研究（当某一颗粒透筛时，就认为其寿命终止），从而建立了粒群沿筛面长度的透筛概率分布模型——Weibull 模型：

$$P = 1 - e^{-AL^B} \quad (1-4)$$

式中 L ——筛面长度；