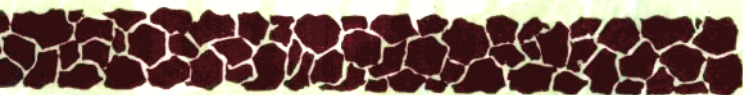


中国矿业大学学术著作丛书

筛分和重选理论 及其应用的新进展

陈清如 著



中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书主要介绍作者与合作者在十余年来从事筛分和重选理论及其应用研究的成果,全书内容有四部分:(一)近似筛分(概率筛分)的理论及应用;(二)空气重介流化床干法分选的理论及应用;(三)细粒煤的干法分选理论及应用;(四)微粉煤干法脱硫降灰。作者主持完成的上述研究项目多次获得国家及省、部级奖励,空气重介干法选煤生产厂成为世界上第一座工业生产厂,也是国家“八五”重点工业性试验项目。本书对这一生产厂的有关情况也作了介绍。

目 录

绪论	(1)
1 筛分和重选理论及工艺的回顾与进展	(3)
1.1 传统筛分和重选理论及工艺的回顾	(3)
1.2 筛分和重选理论及工艺的进展	(6)
2 近似筛分(概率筛分)的理论及应用	(11)
2.1 概率筛分的理论和应用	(12)
2.2 煤用概率分级筛的工艺参数	(25)
2.3 煤用概率分级筛的机械设计参数	(37)
2.4 煤用概率分级筛的动力学参数	(46)
2.5 煤用概率分级筛的数学模型	(54)
2.6 煤用概率分级筛的发展	(69)
2.7 琴弦概率分级筛的动力学模型	(77)
2.8 筛分设备工艺效果评定方法	(93)
参考文献	(104)
3 空气重介流化床干法分选的理论及应用	(107)
3.1 空气重介流化床分选的理论基础	(109)
3.2 5~10t/h 空气重介流化床干法选煤工艺和设备	(124)

3.3	γ 射线检测干法分选流化床的密度	(132)
3.4	空气重介流化床密度的稳定性	(140)
3.5	50t/h 空气重介流化床干法选煤示范厂	(155)
	参考文献	(169)
4	细粒煤的干法分选理论及应用	(171)
4.1	振动床中颗粒介质的混合	(171)
4.2	振动流化床分选细粒煤的基础理论	(184)
	参考文献	(192)
5	微粉煤干法脱硫降灰	(193)
5.1	煤的介电性质	(194)
5.2	高压静电分选机内电晕电流和场强分布规律	(207)
5.3	高压静电分选机的操作参数	(217)
	参考文献	(229)
附录	1982 年以来发表的主要论文	(230)

CONTENTS

Preface	(1)
1 Theoretical and technological review and development on the screening and gravity concentration	(3)
1.1 Theoretical and technological review on the traditional screening and gravity concentration	(3)
1.2 Theoretical and technological development on the screening and gravity concentration	(6)
2 Theory and application on the similar screening (probability screening)	(11)
2.1 Theory and application on the probability screening	(12)
2.2 Technological parameters of the probability screen for coal sizing	(25)
2.3 Mechanical parameters designed on the probability screen for coal sizing	(37)
2.4 Dynamical parameters of the probability screen for coal sizing	(46)

2. 5	Mathematical model on the probability screen for coal sizing	(54)
2. 6	Development on the probability screen for coal sizing	(69)
2. 7	Dynamical model on the piano-wire proba- bility screen for coal sizing	(77)
2. 8	Evaluation on the sizing results	(93)
	References	(104)
3	Theory and application on the air-dense medium fluidized bed concentration	(107)
3. 1	Theoretical basis on the air-dense medium flui- dized bed concentration	(109)
3. 2	Technology and equipments of the 5~10t/h air-dense medium fluidized bed for dry con- centration	(124)
3. 3	Measurement on the density distribution of fluidized bed for dry concentration	(132)
3. 4	Stabilization on the density of air-dense me- dium fluidized bed	(140)
3. 5	50t/h dry concentration demonstration plant with air-dense medium fluidized bed	(155)
	References	(169)
4	Theory and application on the dry concentration of fine coal	(171)
4. 1	Mixing on the particle medium in the vibrated	

fluidized bed	(171)
4. 2 Theoretical basis on the fine coal concentration in the vibrated fluidized bed	(184)
References	(192)
5 Dry removal of sulfur and ash from the extra fine coal	(193)
5. 1 Dielectric characteristic of coal	(194)
5. 2 Distribution on the corona current and field strength in the high-voltage electrostatic separator	(207)
5. 3 Operation parameters on the high-voltage elec- trostatic separator	(217)
References	(229)
APPENDIX The main theses published since 1982	
.....	(230)

绪 论

煤炭是我国最重要的一次能源,资源十分丰富,占一次能源探明总量的 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与消费国。1993 年产煤 11.4 亿吨,煤炭在一次能源生产与消费结构中的比重分别达到 73%与 76%,这种结构在世界主要产煤国中也占首位,而且今后相当长时期内煤炭作为最主要的一次能源的地位不会改变,预计 2000 年与 2020 年煤炭生产量将分别达到 14 亿吨和 21 亿吨,因此煤炭在开发与利用中的污染问题将更为突出。

选煤就是去除煤中所含的杂质,是煤炭在开发和利用中提高煤炭质量、提高热能利用效率和保护生态环境的重要基础。但是,我国选煤量仅占开采煤量的 18%,远远低于产煤发达国家。为此,提高煤炭的入选比重是实现煤炭洁净利用(也称洁净煤技术)的当务之急。

选煤理论的发展已有百余年的历史,至今选煤仍然是以跳汰、重介质和浮选等湿法分选方法作为常规的选煤手段。发展趋势表明:新的干法选煤理论正在各主要产煤国家获得重新重视,并予以大力研究。中国矿业大学选矿工程研究中心自 1980 年开始,经过 15 年长期不懈的研究,已经在中国建立了世界上第一座空气重介流化床干法选煤示范厂(处理能力 50t/h,处理粒级 50~6mm),实现了工业化生产,并于 1994 年 6 月通过国家鉴定验收。这对我国煤炭可采储量占全国三分之二以上的缺水地区、高寒地区和易泥

化煤炭的分选将起到十分重要的作用。由于这一新的干法选煤技术分选精度高、处理能力大、产品不需脱水且省去煤泥水处理系统,因此,该干法选煤工艺系统的基建投资和生产费用大大低于湿法选煤工艺系统,无环境污染,具有广阔的应用前景。

本书主要介绍作者与合作者 10 余年来在筛分和重选理论方面的研究成果,内容分为四个部分:(1)粒群透筛概率的研究。采用现代数理统计与概率论、控制论、振动力学和测试技术进行潮湿细粒煤对筛孔粘结和堵孔机理的研究,提出了近似筛分在大筛孔、大倾角情况下,可以防止堵孔及控制粒度的理论。在此基础上,研制了概率分级筛、重型概率分级筛和琴弦概率分级筛等系列产品,并在全国煤矿全面推广应用,取得了显著的经济效益和社会效益,这是潮湿细粒煤筛分的重要发展方向;(2)空气重介流化床稳态流化的研究。采用现代气—固两相流态化、颗粒学和测试技术对 50(80)~6(3)mm 粒级煤炭的干法分选的理论 and 实践进行探索,提供了浓相高密度流化床的均匀、稳定流化的理论。进行了实验室基础研究、模型试验、中间试验以及工业性试验,在上述研究的基础上建立了世界上第一座空气重介流化床干法选煤工业生产厂,这是块煤干法分选的重要发展方向;(3)振动流化床的研究。将振动的流化性能引入流化床,采用现代颗粒学、振动理论以及测试技术,使振动床和流化床的流化性能正向叠加,改善流化床似流体密度的均匀稳定性。引入振动机制,能有效地抑制和消除流化床中气泡的产生,对细粒煤($<6\text{mm}$ 粒级)的干法分选提供了理论基础,这是细粒煤干法分选的重要发展方向;(4)高压静电分选微粉煤的研究。以高压静电选对物质荷电、放电作用为基础,采用现代电子技术、煤岩学及测试技术等,根据不同煤种、共伴生矿物和矿物质的介电常数的差异,在电晕电场和静电场的作用下对微粉煤($<1\text{mm}$ 粒级)起到脱硫降灰的作用提供了理论基础和实践依据,是微粉煤干法分选的重要发展方向。

1 筛分和重选理论及工艺的回顾与进展

当今我国煤矿资源的显著特点是：① 煤炭储量约占全国三分之二的我国西北地区和山西省严重缺水；② 有些煤炭及伴生矿物遇水极易泥化；③ 随着采煤综合机械化的普及和开采深度的延伸，煤矿生产的原煤质量变差，含水量增高。为此，传统的筛分和重选理论和工艺正面临严重的挑战。本书将介绍新的矿物加工的概率筛分和空气重介分选的理论 and 工艺及其应用的现状和前景。

1.1 传统筛分和重选理论及工艺的回顾

1.1.1 传统筛分理论及其应用的回顾

筛分过程分为分层和透筛两个阶段。物料分层是完成筛分过程的条件，物料透筛是筛分的目的。物料在筛面上受筛面外力的作用处于一定的松散状态，使每一颗粒物料都能获得相互位移所必需的能量和空间，以保证细粒顺利透筛。

实际的筛分过程是大量粒度不同、粗细混杂的散状物料进入

筛面,只有一部分颗粒与筛面直接接触,而接触筛面的这部分物料中,又不全是小于筛孔的细料,大部分小于筛孔的细料,分布在料层的各个部位,但是由于物料与筛面作相对运动,筛面上的料层被松散,大颗粒本来就存在的颗粒间的较大孔隙被进一步扩大,小颗粒就穿过孔隙进入到下层;由于小颗粒间孔隙小,大颗粒不能穿过,因此大颗粒在运动中位置不断升高。于是,原来杂乱排列的粒群经过一段较长时间的析离,即按粒度分层,形成小粒在下、大粒在上的较规律的排列。这样,小于筛孔的细粒得到透筛,实现了粗细粒的分离,即完成了传统的“精确筛分”过程(分离粒度和筛孔尺寸相一致的筛分过程)。所谓“精确筛分”也不是所有小于筛孔的细粒都透过筛孔成为筛下产物。细粒透筛时,虽然颗粒都小于筛孔,但它们透筛的难易程度不同。实践证明,颗粒越小于筛孔,透筛越容易。和筛孔尺寸相近的颗粒,即粒度等于筛孔尺寸四分之三的颗粒,在可筛性上称为“易筛粒”。粒度小于筛孔但又大于筛孔尺寸四分之三的颗粒,称为“难筛粒”。而且“难筛粒”的直径越接近筛孔尺寸,其透筛的困难就越大。这也可以从 F. 摩根森(Mogensen)所提出的物料理论透筛概率(P)的公式加以说明。

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

式中 a ——筛孔尺寸;

d ——颗粒尺寸。

从公式(1-1)可知: d 较 a 值越小时,物料理论透筛概率越大,而 d 和 a 值相接近时,物料理论透筛概率几乎接近零,也即很难通过筛孔。因此,传统的“精确筛分”需要制备较长的筛面(如 7~9m),才能达到较高的筛分效率。而对潮湿细粒物料(如煤)的筛分就几乎是办不到了。因此,传统的“精确筛分”在筛细粒(6mm 粒级以下筛分)或潮湿物料时经常堵塞筛孔,严重影响筛分生产过程,即使采用不同筛型的筛子也无法解决问题。

1.1.2 传统重选理论及其应用的回顾

重力分选的基本原理是物料在重力场或离心力场中由于其密度的不同,其沉降末速不同而进行分选的。不同物料的沉降末速如下式所示

$$V_0 = K \sqrt{d \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0}} \quad (1-2)$$

式中 V_0 ——颗粒沉降末速;

d ——颗粒直径;

ρ ——颗粒密度;

ρ_0 ——介质密度;

K ——系数。

从式(1-2)中可以看出当分选介质密度 ρ_0 很小时, V_0 很大,不同密度的颗粒 V_0 差别极小,且达到末速的时间也很长。在分选设备中有限的时间和空间中,物料不可能按沉降末速的差别进行分层。风力选采用空气作为介质,其密度很小(1.23kg/m^3),所以,按其密度的分选作用是很小的。

颗粒的大小也要影响物料按密度分层。这种影响可以用等沉比来描述,如式(1-3)所示

$$e_0 = \frac{d_1}{d_2} = \frac{(\rho_2 - \rho_0)}{(\rho_1 - \rho_0)} \quad (1-3)$$

式中 e_0 ——等沉比;

d_1, d_2 ——沉降末速相等的颗粒直径;

ρ_1, ρ_2 ——上述颗粒相对应的密度。

从上式中可以看出,介质的密度越小,等沉比就越小。风力选时,空气介质的密度很小,按公式(1-3)只有把物料分成极窄的粒级分别入选才可能按密度分层,这实际上是办不到的。

由上可知,风力分选(如风力摇床、风力跳汰等)不可能按照沉

降末速的差别分选,而是在速度很大的上升气流场中进行分选。所以,在这种情况下物料粒度和形状对分选的影响是很大的,其分选精度必然是很差的,一般 E_p 值在 0.2 以上。所以,这种风力分选的方法在世界各国已经很少采用了。

从上述原理中可以看出,介质密度的提高,有利于分选的进行。如水介质跳汰,介质密度为 1g/cm^3 ,其沉降末速的差别和等沉比提高了很多,因此,其分选效果也得到改善。湿法重介质分选,介质密度基本上与分选密度一致,被分选物料的沉降末速的方向彼此是相反的,所以分选效果最好。

由以上分析可以得到的结论是:当今湿法分选技术已达到了成熟的程度。但面对我国缺水、严寒地区和遇水易泥化煤炭的分选,这些传统的重选理论和工艺是很难解决的,传统的干法风力分选也是很难解决的。

1.2 筛分和重选理论及工艺的进展

1.2.1 概率筛分(近似筛分)理论及其应用的进展

潮湿细粒煤的筛分技术是世界各国筛分散状物料的一大难题。解决这一问题可以用概率筛分(即近似筛分)的理论。

在筛分粒状物料的过程中,物料透筛概率的作用经常会影响到筛分的效果。不同相对粒度(颗粒直径 d /筛孔尺寸 a)的物料通过筛孔的透筛概率是不一样的,往往是相对粒度愈小的物料,通过筛孔的透筛概率愈大。因此,在普通的筛分(分离粒度与筛孔尺寸相同的筛分,即精确筛分)过程中,相对粒度小的粒状物料先通过筛孔成为筛下产物,相对粒度大的粒状物料后通过筛孔成为筛下产物。因此,为了提高普通振动筛的筛分效率或生产率,就必须增加

筛面长度(一般长度在7~9米),以延长筛分时间。

在振动筛上筛分物料时,粒状物料往往是倾斜投射在倾斜筛面上。可以从理论上计算出粒状物料的透筛概率,即

$$P = \frac{(1 - \frac{d}{a} + \phi \frac{b}{a})[(1 + \frac{b}{a})\cos(\alpha + \delta) - (1 - \phi) \frac{b}{a} - \frac{d}{a}]}{(1 + \frac{b}{a})^2 \cos(\alpha + \delta)} \quad (1-4)$$

式中 α, δ, a, b, d ——见第2部分图2-4;

ϕ ——考虑物料投落在筛丝上,重新弹跳后落入该筛孔的系数。

由式(1-4)可知,当分子括号中的 $[(1 + \frac{b}{a})\cos(\alpha + \delta) - (1 - \phi) \frac{b}{a} - \frac{d}{a}]$ 等于零时,理论透筛概率 P 为零,这样就可以计算出各粒级物料不能透筛的筛面临界倾角($\alpha_{\text{临界}}$)

$$\alpha_{\text{临界}} = \arccos \left[\frac{\frac{d}{a} + (1 - \phi) \frac{b}{a}}{1 + \frac{b}{a}} \right] - \delta \quad (1-5)$$

当 $\delta=0$,即粒状物料垂直投射到倾斜筛面上时,则

$$\alpha_{\text{临界}} = \arccos \left[\frac{\frac{d}{a} + (1 - \phi) \frac{b}{a}}{1 + \frac{b}{a}} \right] \quad (1-6)$$

由公式(1-6)可以绘出筛面临界倾角($\alpha_{\text{临界}}$)与相对粒度(d/a)的关系曲线(参见第2部分图2-5)。从曲线可看出,增大筛面倾角,就可采用较大筛孔尺寸的筛面以处理相对粒度较小的粒状物料。实际上,在设计煤用概率分级筛时,要求每一层筛面都出合格粒级的产品,根据我们大量的实验研究,概率筛分可以取得较好的效果。这就是利用概率筛分的原理,采用大筛孔、大倾角的筛面,大筛孔

的设计是防止筛孔被煤泥堵塞,大倾角的设计是控制分离粒度。当筛面倾角为 45° ,分离粒度为 6mm 时,筛孔尺寸设计为 $13\text{mm} \times 13\text{mm}$,也可设计成 $8\text{mm} \times 500\text{mm}$ 的长缝。在筛分潮湿细粒煤时,煤泥不堵筛孔。近年来,我们在分离 6mm 或 13mm 潮湿煤时,采用琴弦式的筛网,取得了更好的效果。

这种大筛孔、大倾角筛面的煤用概率分级筛,在物料透筛概率理论上,突破了传统的精确筛分的概念,在国内外首次将近似筛分理论成功地用于解决潮湿细粒煤的干法筛分问题,能够有效地处理原煤粒度为 $50 \sim 0\text{mm}$,外在水分为 $7 \sim 14\%$ 的煤炭分级,将其筛分成 >25 、 $25 \sim 13$ 、 $13 \sim 6$ 和 $<6\text{mm}$ 粒级的煤炭产品,其能耗仅为一般振动筛的六分之一。当筛分按 6mm 分级时,单位筛面处理量为 20t/h ,比一般振动筛高 6 倍。

通过大量的实验研究,从总体的角度建立了粒群沿筛面长度透筛概率的分布模型,突破了过去中外学者如 M. Gaudin, F. Mogenssen 等人提出的单颗粒透筛概率理论,揭示了物料筛分过程的实质,并且发现了潮湿细粒煤炭干法筛分时,由于粘附引起筛分分配曲线在细粒区间反常上翘这一重要现象,以粒群透筛概率为基础,采用分段函数拟合法描述分配率与粒度之间的关系;用幂函数表达细粒粘附造成的影响,建立了实用的概率筛分数学模型。国内外现有的筛分模型正是由于忽略这一现象而导致严重失真。该模型能对煤用概率分级筛的参数进行优化设计,可应用于工艺流程的模拟优化和控制,还可用于近似筛分效果的评定。

为适应粘湿细粒煤的筛分,又研制了一种新型的 QGS 型系列的琴弦概率分级筛,通过生产实践证明效果良好。为进一步优化设计这种类型的设备,提出了琴弦筛的力学模型,把琴弦筛网的振动简化为具有支承运动的弦的强迫运动,同时考虑了物料对筛丝振动的影响。对筛丝的稳态强迫振动解的分析表明,强迫振动解无偶数阶振型,其一阶主振型的幅值比高阶主振型的幅值大得多。并提

出了琴弦筛网的设计公式,使筛丝在共振状态下工作,因而筛分机可采用较小的加速度,而琴弦筛网却可获得较大的加速度,使筛网不易堵塞,同时筛分机动力消耗小,振动机体上的动应力小,筛分机能耐久地工作。

QGS 型琴弦概率分级筛工业应用效果如表 1-1 所示。

表 1-1 6mm 干法筛分试验表

序 号	入料性质		处理量 ($\frac{t}{m^2h}$)	一次筛分工艺效果			二次筛分工艺效果			筛上产 品的外 在水分 (%)
	外在 水分 (%)	<6mm 含量 (%)		限下率 (%)	限上率 (%)	总筛分 效率 (%)	限下率 (%)	限上率 (%)	总筛分 效率 (%)	
1	8.81	79.64	60.48	12.42	4.86	77.68	4.34	5.56	75.89	2.56
2	13.67	69.74	60.48	13.79	4.36	82.78	5.43	5.81	83.94	3.65
3	13.29	74.43	60.48	10.57	4.88	82.11	5.57	5.95	80.23	3.55
4	12.18	75.39	60.48	11.87	4.13	83.47	4.73	5.12	82.34	3.41

由表 1-1 可知,当入筛原煤外在水分含量达到 13.67%、<6 mm 粒级含量为 69.74%时,筛上产品的限下率为 5.43%,外在水分含量为 3.65%。这种两次筛分系统所达到的筛分产品质量是高的,也符合空气重介流化床干法选煤工艺对入料煤性质的要求。

1.2.2 空气重介流态化理论及其应用的进展

针对我国华北和西北缺水干旱地区(这一地区煤炭储量占全国煤炭储量的三分之二以上)的煤炭无法采用常规的湿法分选,也无法采用常规的风力分选(分选效率很低)的情况,中国矿业大学选矿工程研究中心从 1984 年开始,将气—固两相流态化技术引入选煤领域,这样的空气重介流化床不同于化工反应器上所采用的气—固两相流态化技术。作为分选用的流化床的固体是密度大

(4.6g/cm^3)和粒度粗($<500\mu\text{m}$)的磁铁矿粉,空气重介流化床在三维空间中的密度分布必须均匀稳定,这是分选煤炭的先决条件。达到这一条件有很大的难度,流化床面只允许极少的微气泡。从设计大压降的分布器和加重质的制备方面进行了大量的实验研究工作,在一定的操作条件(风压和风量)下,最终取得了空气重介流化床最佳流化特性状态——流化床三维空间密度均匀稳定的状态。

空气重介流化床干法选煤中间试验过程中的煤粉量的动态平衡是保持流化床密度均匀的关键。因此,对分选机中的流化床进行了分层分点采样,分析它们各自所占煤粉量的重量比和密度、粒度的组成,从而建立了分选过程中煤粉的产生量与床层密度和时间之间,以及分流量与床层密度和时间之间的相关动态模型。根据这一动态模型可预测床层密度的变化趋势,其计算值和实测值的相对误差小于 0.72% 。精度是高的。该模型的建立对实现流化床密度的均匀稳定具有重要意义。

通过加重质的粒度选配,对加重质 $\rho=4.6\text{g/cm}^3$ 的磁铁矿粉,用压缩空气通过特定的分布器实现了散式流化,确定了与散式流态化组分对应的粒径上限和粒度分布。对服从Trawinski分布的粒度组分,确定了粒度不分级的 α 限值: $\alpha\leq 2.55$;确定了散式流态化操作的床层高—径比 β 的限值: $\beta=1\sim 1.5$,实验证明:床层尺寸的变化,对系统流态化行为的影响不显著。并且,床径尺寸较大时,有利于抑制流化介质的分级行为。在床层面积增大的情况下,流态化特性良好。

由中国矿业大学选矿工程研究中心研究、设计的 50t/h 空气重介流化床干法选煤厂1992年6月在黑龙江省七台河市建成,该厂年设计能力为32万吨,被列为“八五”国家重点工业性试验项目。1992年9月正式投入工业性试验,1994年6月2~3日受国家计委委托,黑龙江省计委和煤炭部科教司联合组织了对这一重点工业性试验项目的鉴定验收。