

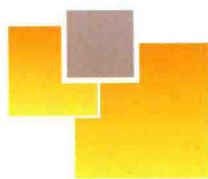
盐城工学院学术专著出版基金资助项目



XUANFENJI DE SHIYONG YU FENMO JIENENG JIANGHAO

选粉机的使用与 粉磨节能降耗

张长森 戴汝悦 吕海峰 编著



中国建材工业出版社

选粉机的使用与 粉磨节能降耗

张长森 戴汝悦 吕海峰 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

选粉机的使用与粉磨节能降耗/张长森, 戴汝悦,
吕海峰编著. -- 北京: 中国建材工业出版社, 2017.12
ISBN 978-7-5160-1350-2

I. ①选… II. ①张… ②戴… ③吕… III. ①水泥—
磨粉—化工设备—节能—研究 IV. ①TQ172.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 063215 号

选粉机的使用与粉磨节能降耗

张长森 戴汝悦 吕海峰 编著

出版发行: **中国建材工业出版社**

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 8.25

字 数: 200 千字

版 次: 2017 年 12 月第 1 版

印 次: 2017 年 12 月第 1 次

定 价: 49.80 元

本社网址: www.jccbs.com 微信公众号: zgjcgycbs

本书如出现印装质量问题, 由我社市场营销部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

球磨机对物料的粉碎主要是依靠研磨体对物料的冲击研磨作用来实现的，其冲击及研磨作用是通过研磨体的表面传递给与之相接触的物料，属于单颗粒粉碎。由于单颗粒粉碎的偶然性，造成大量的能量消耗在研磨体之间及研磨体与磨机衬板之间的碰撞与磨损上，大部分能量消耗对物料的粉磨来说毫无用处，粉磨效率很低。据 Anselm 的粉碎功能理论测定：轴承、齿轮等纯机械损失占 12.3%，随产品散热占 47.6%，从磨机筒体散发的辐射热占 6.4%，空气带走热量 31.4%，用于粉碎物料的理论能量消耗仅占很小的一部分，为 2%~3%。因此，在全球性能源短缺的今天，如何提高球磨机粉磨效率成为当今研究的重要课题。

目前，提高球磨机的粉磨效率主要措施有：一是减小入磨物料粒度，在磨外增加预破碎装置，使物料的破碎过程在球磨机外完成，让球磨机充分施展以研磨为主的细磨作用；二是改变内部装置，采用节能衬板、筛分隔仓板等措施；三是改变粉磨系统工艺，将原来的开路粉磨系统改为闭路粉磨系统，与之相应的，选粉机也因粉磨技术发展的需要，为提高选粉效率，降低系统能耗，由传统的第一代离心式选粉机，第二代旋风式选粉机发展到第三代高效选粉机。

开路粉磨系统具有流程简单、设备少、投资省、操作方便等特点。但由于出磨物料必须全部达到成品细度，因此，当细度要求较高时，已被磨细达到产品要求的部分物料不能及时从磨机中卸出，出现过粉磨现象，导致粉磨系统的粉磨效率降低、能耗增加。闭路粉磨系统由于配合了选粉机，能将粉磨后的合格物料及时分离出来，从而可有效地减少过粉磨现象，提高系统的粉磨效率及产量，降低能耗；并可通过调节选粉设备的操作参数灵活控制产品细度，以满足生产要求。缺点是系统流程较为复杂，投资较大。水泥粉磨是采用开路粉磨系统，还是采用闭路粉磨系统，主要取决于对产品细度的要求，有资料表明，当粉磨系统的产品比表面积低于 $310\text{m}^2/\text{kg}$ 时，两种粉磨系统的产品单位电耗相当；但当细度要求较高时，开路系统的单位电耗明显高于闭路系统。作为闭路粉磨系统的一个重要配套设备——选粉机，虽然本身并无粉碎物料的作用，但其性能好坏直接影响到系统的运行状态，即影响到系统的粉磨效率、产量及能耗。

随着人们对水泥颗粒与水泥性能关系研究的深入，对产品细度的要求有所提高；当初，作为水泥质量主要指标之一的水泥细度是用筛余控制的，用筛余控制只能反映成品中粗颗粒的多少，不能反映全部颗粒的粗细情况；后来发展到比表面积控制，水泥越细，比表面积越大。现在发现，即使是比表面积相同的水泥产品，因采用的粉磨流程、选粉方式不同，其强度也有差别，闭路粉磨或配高效选粉机粉磨生产的产品与开路粉磨生产的产品相比，同样的比表面积，其强度高；强度相同，则比表面积可以

低一些，其原因在于颗粒级配的不同。

研究表明，水泥颗粒组成中不同粗细的颗粒对水泥水化性能的作用是不同的。大于 $60\mu\text{m}$ 颗粒对水泥强度作用甚微，只起填料作用；小于 $3\mu\text{m}$ 的颗粒水化过程在硬化初期就已完成，只对水泥早期强度有利； $3\sim 30\mu\text{m}$ 是水泥的主要活性部分、承担强度增长的主要途径。由此可见，水泥质量与水泥成品中 $3\sim 30\mu\text{m}$ 颗粒的含量有很大关系。而在水泥粉磨作业中，要得到某一粒径范围含量较高，分布相对较窄的水泥产品，只有通过选粉机来调节、控制，否则难以实现。闭路系统更易于控制产品细度，改变产品品种，对市场的适应性更强，因此，闭路系统得到了广泛的应用。

本书由盐城工学院张长森教授负责内容组织和统稿，徐州亚星机械科技有限公司戴汝悦工程师参加了第5章和第6章的部分编写工作，江苏吉能达环境能源科技有限公司吕海峰高级工程师参加了第3章和第6章的部分编写工作。

本书参考了大量的资料文献，引用了他人公开发表或没公开发表的部分数据成果或重要理论成果，在此向这些文献的作者们表示衷心感谢。

很想把选粉机相关的各种技术和产品详细地介绍给读者，但限于篇幅，还有一些技术及产品未能述及，同时也限于作者的水平和经验，可能取舍不尽合理，叙述中可能有错误和疏漏，敬请读者批评指正。

编者

2017年12月

目 录

第 1 章 基本概念与基础知识	1
1.1 何为颗粒、粉体	1
1.2 粒度分布	1
1.3 水泥适宜的颗粒大小及粒度分布	2
1.4 颗粒大小影响水泥性能的原因	2
1.5 水泥颗粒分布符合什么函数	2
1.6 水泥颗粒分布对水泥标准稠度用水量的影响	3
1.7 水泥颗粒分布对水泥抗压强度等性能的影响	3
1.8 水泥颗粒分布范围对水泥性能的影响	5
1.9 水泥颗粒形状对水泥性能的影响	6
1.10 为什么水泥颗粒越接近球形水泥标准稠度需水量越小	6
1.11 为什么水泥颗粒接近球形水泥强度有所提高	7
1.12 为什么水泥颗粒接近球形水泥凝结时间延长	7
1.13 提高颗粒圆形系数的主要技术途径	7
1.14 水泥粉磨细度与磨机产质量有何关系	7
1.15 何为分级、筛分和选粉	8
1.16 选粉机及其分类	8
1.17 选粉机的作用	9
1.18 闭路粉磨系统中磨机与选粉机之间有何关系	9
1.19 什么是选粉效率、如何计算	9
1.20 什么是循环负荷、如何计算	10
1.21 何为牛顿分级效率、如何计算	11
1.22 何为分级粒径	11
1.23 何为分级精度	12
1.24 何为特劳姆 (Tromp) 曲线	12
1.25 如何用特劳姆 (Tromp) 曲线来评价选粉机的性能	13
1.26 粉磨效率和循环负荷、选粉效率之间的关系	15
1.27 选粉机与水泥成品粒度组成及比表面积的关系	17
1.28 何为选粉机的切割粒径	18
1.29 选粉机的选粉效率、循环负荷与磨机内研磨体级配之间关系	19
1.30 粉磨节能的选粉机效率	19

第 2 章 选粉机的类型及特点	20
2.1 选粉机的发展过程	20
2.2 粗粉分离器的构造及工作原理	21
2.3 粗粉分离器的特点	22
2.4 离心式选粉机的构造和工作原理	22
2.5 离心式选粉机分级上存在的主要缺陷	23
2.6 离心式选粉机中存在着几个分离区	23
2.7 旋风式选粉机的构造和工作原理	24
2.8 旋风式选粉机的特点	24
2.9 O-Sepa 选粉机构造和工作原理	25
2.10 O-Sepa 选粉机的特点	26
2.11 O-Sepa 选粉机的规格	26
2.12 Sepax 选粉机构造和工作原理	26
2.13 Sepax 选粉机的特点	27
2.14 Sepol 选粉机构造和工作原理	28
2.15 SKS 选粉机的构造和工作原理	29
2.16 TSV 型动态选粉机的构造和工作原理	29
2.17 S-SD 型高效选粉机的构造和工作原理	30
2.18 MDS 型高效选粉机的构造和工作原理	31
2.19 MDS 型高效选粉机的主要特点	31
2.20 双转子选粉机的构造和工作原理	31
2.21 T-Sepax 三分离选粉机的构造和工作原理	33
2.22 高分散型涡流选粉机构造、工作原理及特点	34
2.23 选粉机工作原理比较	35
2.24 V 型选粉机的构造和工作原理	36
2.25 V 型选粉机的特点	37
2.26 VSK 型动态选粉机的构造和工作原理	37
2.27 双传动双转笼分级机结构及工作原理	38
2.28 打散分级机构造、工作原理及特点	39
2.29 打散分级机和 V 型选粉机的比较	41
2.30 立磨选粉机结构及工作原理	42
第 3 章 选粉机的选型及主要参数	43
3.1 粉磨系统采用选粉机的优点	43
3.2 选粉机选型基本原则	43
3.3 选粉机科学选型与粉磨系统的节能降耗	44
3.4 选用高效选粉机应考虑的因素	44
3.5 粗粉分离器的最小分级粒径	45

3.6	粗粉分离器的产量或规格怎样确定	45
3.7	离心式选粉机的分级粒径	46
3.8	离心式选粉机的产量或规格怎样确定	47
3.9	离心式选粉机的主轴转速	47
3.10	离心式选粉机所需功率	47
3.11	旋风式选粉机的风量怎样计算	48
3.12	旋风式选粉机的主轴转速	48
3.13	旋风式选粉机的产量或规格怎样确定	48
3.14	O-Sepa 选粉机的产量或规格怎样确定	49
3.15	O-Sepa 选粉机分级粒径的计算	50
3.16	O-Sepa 选粉机所需功率计算	51
3.17	旋风式选粉机转子改为笼形转子时主要参数如何确定	53
3.18	如何确定离心式选粉机的尺寸比例	54
3.19	螺桨撒料盘与平板式撒料盘的区别	55
3.20	螺桨撒料盘叶片的倾斜角如何确定	55
3.21	高效笼式选粉机的分离粒径和转速如何确定	56
3.22	V 型选粉机的分级粒径	57
3.23	V 型选粉机的风量确定	58
第 4 章	选粉机在粉磨系统中的应用	60
4.1	选粉机使用与粉磨系统产量及能耗的关系	60
4.2	选粉机使用对水泥质量的影响	60
4.3	高效选粉机的优势	61
4.4	球磨机闭路粉磨系统	61
4.5	O-Sepa 选粉机的粉磨流程	62
4.6	Sepax 高效选粉机的粉磨流程	64
4.7	S-SD 型选粉机的粉磨工艺流程	65
4.8	TSV 型选粉机的粉磨流程	65
4.9	Sepol 型选粉机的粉磨系统	66
4.10	预粉磨及其工艺流程	67
4.11	分别粉磨中选粉机的应用	67
4.12	常用的预粉磨设备	68
4.13	辊压机配置不同入磨物料粒度分布情况	69
4.14	辊压机预粉磨系统流程	69
4.15	辊压机联合粉磨系统的选粉机应用	70
4.16	辊压机混合粉磨系统的选粉机应用	70
4.17	辊压机半终粉磨系统选粉机的应用	71
4.18	双闭路辊压机半终粉磨系统	72

4.19	外循环水泥立磨预粉磨系统	72
4.20	辊压机终粉磨系统中选粉机的应用	74
4.21	立磨作水泥终粉磨系统	74
4.22	外循环立磨终粉磨系统	75
第5章	选粉机操作技术及维护	77
5.1	正确认识选粉效率低	77
5.2	粗粉分离器产品细度的调整	77
5.3	粗粉分离器的维护	77
5.4	离心式选粉机主风叶（大风叶）的作用	78
5.5	选粉机撒料盘的作用及对选粉效率的影响	78
5.6	离心式选粉机产品细度如何调节	78
5.7	如何调整离心式选粉机的主风叶	78
5.8	离心式选粉机机体振动的原因及处理方法	79
5.9	离心式选粉机产品细度的控制	79
5.10	选粉机卸料管漏风原因及处理办法	79
5.11	选粉机电流突然波动较大的原因及解决措施	80
5.12	正常运转中，选粉机电流突然增大，产生的原因是什么？怎样处理	80
5.13	影响旋风式选粉机选粉效率的因素有哪些？怎样影响	80
5.14	旋风式选粉机产品细度如何进行调节	80
5.15	旋风式选粉机粗粉和细粉的出口为什么要安装锁风装置	80
5.16	旋风式选粉机的工况对产品细度的影响	81
5.17	旋风式选粉机的机械问题对产品细度的影响	81
5.18	怎样提高旋风式选粉机的选粉效率	81
5.19	如何正确操作旋风式选粉机	82
5.20	旋风式选粉机的辅助风叶改为分级圈	82
5.21	影响涡流空气选粉机（O-Sepa）分级性能的操作条件	82
5.22	O-Sepa 选粉机产品细度调节	84
5.23	O-Sepa 选粉机各次风量的调整对系统工况的影响	85
5.24	O-Sepa 选粉机循环负荷和比表面积的关系	85
5.25	高效选粉机参数的控制	85
5.26	离心式选粉机安装前转子平衡试验	86
5.27	普通离心式选粉机的安装技术要求和基本方法	89
5.28	离心式选粉机的试运行步骤	90
5.29	O-Sepa 选粉机安装的基本要求和方法	90
5.30	O-Sepa 选粉机的试运行	92
5.31	普通离心式选粉机常见故障有哪些？产生原因是什么	93
5.32	转子式选粉机常见故障及排除方法	94

5.33	高效选粉机常见故障有哪些? 产生原因是什么	95
5.34	影响旋风式选粉机选粉效率的因素有哪些	96
5.35	选粉机在正常工作时的巡检内容	96
5.36	选粉机停车后维护与检查的内容	96
5.37	V 型选粉机细粉粒度很细、但带料能力不足的原因和处理	96
第 6 章	案例	97
6.1	水泥粉磨系统工艺技术管理	97
6.2	T-Sepax 三分离选粉机改造开路水泥粉磨	102
6.3	辊压机+球磨机联合粉磨改双闭路水泥半终粉磨	103
6.4	水泥磨改建双闭路辊压机半终粉磨系统	108
6.5	用 Sepax 替代 O-Sepa 选粉机改造 $\phi 4.2 \times 13\text{m}$ 水泥磨	110
6.6	预粉磨+FPS 粗粉分级机系统节能高产	112
6.7	双分离式高效选粉机的改造	113
6.8	水泥闭路联合粉磨系统的改造	116
参考文献		119

第1章 基本概念与基础知识

1.1 何为颗粒、粉体

颗粒是具有一定尺寸和几何形状的粒状物，颗粒的大小是粉体诸物性中最重要的特性值。

粉体是同种或多种物质颗粒的集合体，颗粒是组成粉体的基本单元。

颗粒大小通常用“粒径”和“粒度”来表示，“粒径”是指颗粒的尺寸，“粒度”通常指颗粒大小、粗细的程度。“粒径”具有长度的量纲，而“粒度”则是用长度量纲以外的单位，如泰勒制标准筛的“目”等。习惯上表示颗粒大小时常用“粒径”，而表示颗粒大小的分布时常用“粒度”。

对于规则形状的颗粒，比如球体颗粒和立方体颗粒，其粒径分别用直径和边长表示，而对于形状不规则的颗粒，其粒径可由等效粒径来表示，等效粒径是指当一个不规则形状颗粒的某一物理特性与同质的球形颗粒相同或相近时，就用该球形颗粒的直径来代表这个不规则形状颗粒的直径。如颗粒沉降直径等。

1.2 粒度分布

粒度分布是指粉体中不同粒径区间颗粒的含量。有频率分布和累积分布两种表示方法。在粉体样品中，某一粒径(d_p)或某一粒径范围内(Δd_p)的颗粒在样品中出现的个数分数或质量分数(%),即为频率,用 $f(d_p)$ 或 $f(\Delta d_p)$ 表示。若 d_p 或 Δd_p 相对应的颗粒个数为 n_p ,样品中的颗粒总数为 N ,则有:

$$f(d_p) = \frac{n_p}{N} \times 100\% \tag{1-1}$$

或
$$f(\Delta d_p) = \frac{n_p}{N} \times 100\% \tag{1-2}$$

这种频率与粒径变化的关系，称为频率分布。也就是说频率分布是表示某一粒径或某一粒径范围内的颗粒在全部颗粒中所占的比例。

累积分布表示大于(或小于)某一粒径的颗粒在全部颗粒中所占的比例。按累积方式的不同，累积分布又可分为两种，一种是按粒径从小到大进行累积，称为筛下累积(用“-”号表示)；另一种是按粒径从大到小进行累积，称为筛上累积(用“+”号表示)，前者所得到的累积分布表示小于某一粒径的颗粒数(或颗粒质量)的百分数，而后者则表示大于某一粒径的颗粒数(或颗粒质量)的百分数。筛下累积分布常用 $U(d_p)$ 表示；筛上累积分布(累计筛余)常用 $R(d_p)$ 表示。可以得出，对于任一粒径 d_p 有：

$$U(d_p) + R(d_p) = 100\% \quad (1-3)$$

1.3 水泥适宜的颗粒大小及粒度分布

国内外长期试验研究证明,水泥颗粒级配对水泥性能有很大影响,目前比较公认的水泥最佳颗粒级配为: $3 \sim 32\mu\text{m}$ 的颗粒对强度增长起主要作用,其间粒度分布是连续的,总量不低于 65% ; $16 \sim 24\mu\text{m}$ 的颗粒对水泥性能尤为重要,含量越多越好;小于 $3\mu\text{m}$ 的细颗粒,易结团,不宜超过 10% ;大于 $60\mu\text{m}$ 的颗粒活性很小,最好没有。

按此要求,将水泥最佳颗粒级配绘制成颗粒分布图(图 1-1),可见水泥颗粒分布图通常都为“凸形”曲线,类似于高斯概率曲线。

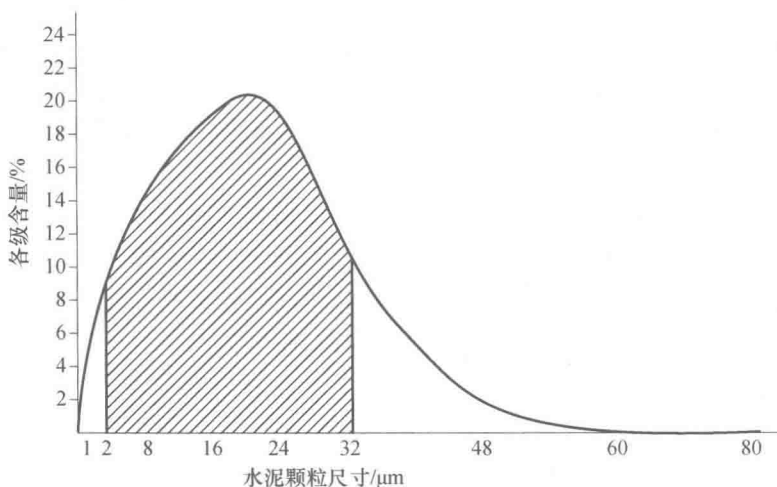


图 1-1 水泥颗粒分布图

1.4 颗粒大小影响水泥性能的原因

水泥颗粒级配对水泥性能产生的各种影响,主要是因为不同大小颗粒的水化速度不同。我国学者施娟英的测定结果为:

$0 \sim 10\mu\text{m}$ 颗粒,一天水化达 75% , 28d 接近完全水化;

$10 \sim 30\mu\text{m}$ 颗粒, 7d 水化接近一半;

$30 \sim 60\mu\text{m}$ 颗粒, 28d 水化接近一半;

$> 60\mu\text{m}$ 颗粒, 3 个月后水化还不到一半。

意大利学者 Menic 认为,粒径 $1\mu\text{m}$ 以内的小颗粒,在加水拌合中很快就水化了,对水泥混凝土强度作用很小,反而造成混凝土较大收缩。一个 $20\mu\text{m}$ 颗粒硬化一个月只水化了 54% ,水化进入深度才 $5.48\mu\text{m}$,剩留的熟料核只能起骨架作用,潜在活性没有发挥。

1.5 水泥颗粒分布符合什么函数

水泥产品的粒度组成符合 Rosin-Rammler-Bennet 分布方程(简称 RRB 方程),见式(1-4)。

$$R(d_p) = 100 \exp \left[- \left(\frac{d_p}{d_e} \right)^n \right] \quad (1-4)$$

式中 $R(d_p)$ ——粉体中某一粒径 d_p 的累积筛余, %;

n ——均匀性系数, 表示该粉体粒度分布范围的宽窄程度, n 值越小, 粒度分布范围越宽; 反之亦然;

d_e ——特征粒径, μm 。

当 $n=1$, $d_p=d_e$ 时, 则

$$R(d_p) = 100e^{-1} = 100/2.718 = 36.8\% \quad (1-5)$$

即: d_e 为 $R(d_p) = 36.8\%$ 时的粒径。

将式 (1-4) 的倒数取二次对数, 可得

$$\lg \left[\lg \left(\frac{100}{R(d_p)} \right) \right] = n \lg \left(\frac{d_p}{d_e} \right) + \lg \lg e = n \lg d_p + C \quad (1-6)$$

式中, $C = \lg \lg e - n \lg d_e$ 。在 $\lg d_p$ 与 $\lg \{ \lg [100/R(d_p)] \}$ 坐标系中, 式 (1-6) 呈线性关系。根据测试数据, 分别以 $\lg d_p$ 和 $\lg \{ \lg [100/R(d_p)] \}$ 作为横、纵坐标作图可得一直线, 该直线的斜率即为 n 值。由 $R(d_p) = 36.8\%$ 可求得 d_e , 将这一直线平移过 P 极, 可在图上查出 n 的值。这种图称为 Rosin-Rammler-Bennet 图 (简称 RRB 图), 如图 1-2 所示。

由式 (1-4) 可知, 任一粒径 d_p 的筛余量 (%) 与特征粒径和均匀性系数 n 有关。特征粒径是一个固定筛余为 36.8% 时的粒径, 特征粒径愈小, 水泥愈细。 n 值是“凸形”曲线直线化后的斜率, n 值愈大, 颗粒分布愈窄; n 值愈小, 颗粒分布愈宽。采用激光颗粒分析仪可以直接得出水泥颗粒分布状况和分布曲线图, 还可以给出 d_e 、 n 、体积比面积等众多参数。

1.6 水泥颗粒分布对水泥标准稠度用水量的影响

在一般情况下, 标准稠度用水量随比表面积的增加、特征粒径的减小和均匀性系数的提高而增大, 另外它也受材料早期活性和外加剂的影响。就普通波特兰水泥而言, 用水量随 4~32 μm 颗粒含量的增多而增大, 随 32~60 μm 颗粒含量的增多而减少。 n 值与 4~32 μm 颗粒含量有较好的对应关系。

1.7 水泥颗粒分布对水泥抗压强度等性能的影响

水泥抗压强度与水泥比表面积值、特征粒径 (d_e) 和 n 也有一定对应关系。比表面积值与特征粒径 (d_e) 的影响相同, 一般随着比表面积值和特征粒径的提高, 在其他条件相同的情况下水泥各龄期抗压强度都增大, 随着 n 值的提高, 强度增进率跟着提高。

中国建筑材料科学研究院研究了大掺量混合材料水泥, 得出水泥颗粒分布与其性能的关系如下:

(1) 水泥的比表面积 (S) 与 <3 μm 颗粒含量 (W_3) 存在着密切的线性关系。

$$S = 24 \times W_3 + 83 \quad (1-7)$$

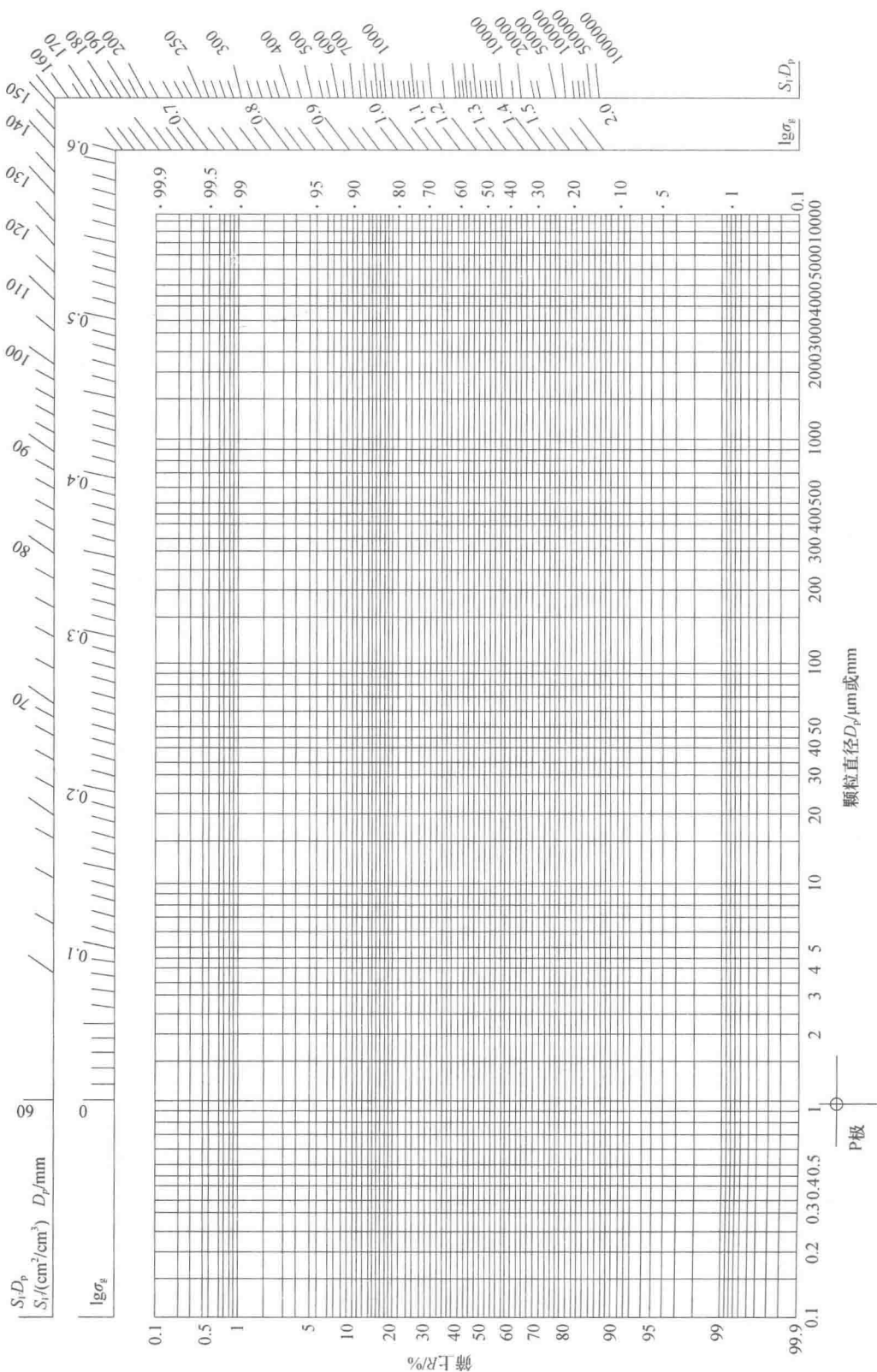


图1-2 Rosin-Rammler-Bennet图

(2) 水泥颗粒分布与水泥 28d 抗压强度 (R_{28}) 的关系:

$$R_{28}=A\times W_3+B\times W_{16}+C\times W_{32}+D\times W_{>32}$$

(1-8)

式中 $A、B、C、D$ ——经验系数;
 $W_3、W_{16}、W_{32}、W_{>32}$ ——分别为水泥中 $<3\mu\text{m}$ 、 $<16\mu\text{m}$ 、 $<32\mu\text{m}$ 和 $>32\mu\text{m}$ 颗粒的含量,%。

(3) 水泥中 $8\mu\text{m}$ 颗粒含量 (W_8) 与水泥 3d 抗压强度 (R_3) 的关系:

$$R_3=0.79 W_8+1.6$$

(1-9)

(4) 水泥中 $8\mu\text{m}$ 颗粒含量 (W_8) 与水泥 3d 水化热 (H_3) 的关系:

$$H_3=2.5W_8+166$$

(1-10)

(5) 水泥中 $32\mu\text{m}$ 颗粒含量 (W_{32}) 与水泥泌水率 (M) 的关系:

$$M=41.2-0.43W_{32}$$

(1-11)

表 1-1 为泥颗粒分布与水泥混凝土性能、粉磨工艺的大致关系。

表 1-1 水泥颗粒分布与水泥混凝土性能、粉磨工艺的大致关系

粒径	参考指标	水泥性能			粉磨工艺	混凝土性能
		比表面积	需水量	强度		
<3μm (熟料)	<15%	正常	正常	正常	正常	正常
	增加	增加	增大	早强	过粉磨现象	施工性变差
<3μm (矿渣)	适当	正常	正常	强度高	分别粉磨	混凝土性能优
3~32μm	>65%	正常	正常	强度高	研磨能力好	混凝土性能优
32~64μm	增加	变小	正常	强度低	研磨能力差	正常
>64μm	增加	变小	易泌水	强度低	粉磨能力差	混凝土保水性差
连续分布	一个凸形	正常	正常	正常	正常	正常
	两个凸形	—	—	—	研磨能力差	—
	一个口形	—	—	—	粉磨能力差	—

1.8 水泥颗粒分布范围对水泥性能的影响

颗粒分布宽 (n 值小) 时, 水泥分布的曲线更接近最佳堆积密度理想筛析曲线。

在比表面积相同的情况下, 宽颗粒分布的水泥早期水化速度稍快一些, 窄颗粒分布的水泥后期水化速度快些, 28d 龄期的水化程度也稍高一些。

颗粒分布及 n 值对水泥标准试体强度影响较大, n 值越高强度越高, 但与混凝土的相关性不好, n 值高时混凝土强度提高很小, 或没有提高甚至下降, 尤其是高水灰比 (如 0.60) 混凝土更是如此。

窄颗粒分布的水泥要用细粉填充料来调整堆积密度, 以保证混凝土的密实性。然

而填充料的加入是有限的,不论是惰性的还是活性的都会降低强度。有人还对如粉煤灰的掺量提出限定,认为不能低于15%,否则也有害处,填充料过多又会造成混凝土中的细粉含量超量,使干缩加大。

在水泥生产的质量控制中完全可以通过水泥细度控制预测水泥和混凝土的主要性能,如标准稠度用水量、混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度。RRB函数对水泥颗粒分布特征是适用的,主要的控制参数有比表面积值、特征粒径 d_e 和均匀性系数 n 值。

1.9 水泥颗粒形状对水泥性能的影响

水泥颗粒形状与粉磨工艺有关,水泥颗粒形状对水泥性能有较大影响,水泥颗粒越接近球形,水泥的性能越好。日本北村昌彦等试验研究表明,将水泥颗粒的圆形度由0.67提高到0.85时,水泥砂浆28d抗压强度可提高20%~30%,配制混凝土的水灰比可降低6%~8%,达到相同坍落时的单位体积用水量可减少14%~30%,减水剂掺量可减少1/3,水泥早期水化热可降低25%。

我国黄有丰等人研究结果见表1-2。

表 1-2 水泥颗粒形状对水泥性能的影响

类别	比表面积/(m^2/kg)	圆度系数	标准稠度/%	3d 抗压强度/MPa	28d 抗压强度/MPa
S	325	0.47	30.4	35.3	49.8
P	328	0.73	27.3	32.1	66.4

水泥颗粒形状通常用形状系数(圆度系数)表示,它是颗粒投影面积与其外接圆面积之比,正圆形颗粒圆形度等于1,其他形状都小于1。一般可用式(1-12)计算。

$$\text{形状系数 } \psi = \frac{\text{颗粒投影面积}}{\text{颗粒投影面外接圆面积}} \quad (1-12)$$

中国建筑材料科学研究院研究球磨机水泥和辊压机水泥在不同粒径区的颗粒形状系数分布表明,两种水泥颗粒形状上的差异主要在粗粉部分,如 $>63\mu\text{m}$ 的粗粉中,辊压机水泥不含形状系数为0.8~1.0的规整颗粒,球磨机水泥形状系数为0.8~1.0的规整颗粒约占50%。但 $<10\mu\text{m}$ 细粉部分两种水泥就没有多大差别了,这也说明若将水泥充分磨细,则不同工艺和设备制出的水泥在颗粒形状上不会有太大的差别。

1.10 为什么水泥颗粒越接近球形水泥标准稠度需水量越小

一是对单个颗粒而言,越接近于球形,表面积越小,则包裹颗粒表面的水量相对减少;二是颗粒越接近于球形颗粒表面趋于光滑,颗粒与颗粒相对滑动间的摩擦阻力减小;三是颗粒在水中旋转需水面越小,在水灰比相同的情况下,可以获得较高的流动度。因此,水泥标准稠度需水量减小。

另外,改善水泥颗粒形貌,使颗粒表面趋于光滑,不仅减少了需水量,更重要的

是胶砂和易性大大改善，且在相同工作条件下，可以获得更高的强度，在一定程度上有减水的效果，在改善流动性、提高其强度等方面起着积极作用。

1.11 为什么水泥颗粒接近球形水泥强度有所提高

水泥颗粒接近球形水泥强度有所提高，这主要是由于颗粒形貌接近球形后，水泥标准稠度需水量减少。在相同流动度的情况下用水量减少，形貌改善后，颗粒表面相对光滑、棱角少，颗粒与颗粒间以及颗粒与骨料颗粒间相对摩擦阻力小，便于颗粒的相对滑动，细小的水泥颗粒易于填充颗粒间的缝隙，使整体水泥胶砂更加密实。因此，改善水泥颗粒形貌，有利于改善水泥石的堆积结构，即减少了硬化水泥石中有害及多害大孔，无害细孔数量增多，中位孔径和总孔隙率降低，提高了水泥的强度，同时也有利于水泥的抗渗性、耐久性等性能。

1.12 为什么水泥颗粒接近球形水泥凝结时间延长

在石膏掺量相同、比表面积及颗粒级配相近的情况下，颗粒形貌改善后的水泥，无论是初凝还是终凝都比改善前凝结时间有所延长。这可能是由于颗粒形貌改善后，颗粒表面棱角少、较圆滑、颗粒间搭接绞合以及摩擦阻力相对减弱，生成为水泥产物相互间搭接绞合及黏附力受到了影响。如果颗粒形貌改善后水泥样品的密实度变大幅度较大，则凝结时间受到的影响相对较小。

1.13 提高颗粒圆形系数的主要技术途径

水泥颗粒形貌趋于圆形化，可以大大提高水泥物理性能。在各种块状物料粉碎过程中，都是当物料受到的外力大于内力时被粉碎，物料粉碎受到的外力方式一般有：挤压、劈碎、冲击、研磨等，这些外力作用到物料上主要表现为正应力和剪切应力两种应力。在粉磨工艺中，以正应力（挤压、冲击）作用为主粉碎物料的，颗粒圆形系数低，如辊压机粉碎或球磨机一仓冲击破碎；以剪切应力（研磨等）作用为主粉碎物料的，颗粒圆形系数高，如气流磨、球磨机尾仓研磨。

因此，提高颗粒圆形系数的主要技术途径有：加强球磨机研磨能力，采用高细磨，即降低研磨轮平均球径、增加小研磨体装载量；采用辊压机、立磨与球磨联合粉磨工艺；优化水泥颗粒组成，水泥颗粒粒径越小，圆形系数越高，在水泥中适当增加水泥中小于 $34\mu\text{m}$ 颗粒含量有利于提高水泥圆形系数。

1.14 水泥粉磨细度与磨机产质量有何关系

在一定条件下，球磨机粉磨水泥的细度与磨机台时产量成反比，与水泥质量成正比。细度与产质量的大致关系见表 1-3；表 1-4 为某厂对粉磨细度与水泥强度变化进行试验的结果。

表 1-3 在一定条件下磨机产量与细度（0.08mm 筛筛余%）的关系

细度/%	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	13	15	20
产量系数	0.50	0.66	0.72	0.77	0.82	0.87	0.91	1.00	1.04	1.09	1.13	1.20	1.43