

新观点 新技术 新装备

# 水泥颗粒特征与 现代水泥粉磨技术

原子能出版社出版

新观点 新技术 新装备

# 水泥颗粒特征与 现代水泥粉磨技术

王文义 等编

原子能出版社出版

**图书在版编目(CIP)数据**

水泥颗粒特征与现代水泥粉磨技术/ 主编:王文义

—北京: 原子能出版社, 2004.7

ISBN 7-302-01672-2

I.水… II.王… III.粉磨工艺 IV.TQ172.72-67

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 00130636 号

**出 版 者:** 原子能出版社

北京市 2108 信箱

**责任编辑:** 张少周

**封面设计:** 赵博一

**印 刷 者:** 北京后沙峪印刷厂

**发 行 者:** 新华书店科技出版所发行 各地新华书店经售

**开 本:** 185×260 **印张:** 33 **字数:** 850千字

**版 次:** 2004年7月第1版 2004年7月第1次印刷

**书 号:** ISBN 7-302-01672-2/TU·216

**印 数:** 1~5000

**定 价:** 87.00 元

---

(如有印刷装订问题,本部负责调换)

## 前 言

随着我国基本建设的快速发展,至 2002 年我国水泥年产量已超过 7 亿吨,约占世界水泥总年产量的 40% 以上,因此我国水泥工业的可持续发展已成为人们普遍关注的热点话题,而水泥颗粒特征与粉磨技术是这个话题的重要议题。

以往,我国水泥企业普遍存在一个“重密轻磨”的偏见,要提高水泥的产量、质量、降低能耗,只重视密的状况,对水泥粉磨的作用重视不够。实际上,密和磨是水泥企业提高产量、质量和降低能耗的两条基本途径。本书专门就水泥粉磨问题作了较全面的论述。

粉磨工艺落后是广大水泥企业的突出问题。采用传统的球磨机将块状物料磨制成粉状物料的有效能耗利用率很低,据权威专家测定,有效利用率不足 3%,绝大部分电能没有充分利用。节能型辊压机和辊式磨的诞生及大型化正在改变着粉磨工艺的落后状态。各种形式的细碎机的应用,正在实现着“磨外预粉磨”的新工艺。以康必丹磨为先导的磨机内部结构改造技术正在推广应用。第三代高效选粉机的应用对于提高粉磨效率和磨制最佳粒度分布的水泥起到了重要作用。

水泥粉磨工艺的技术进步,还应体现在磨制出的水泥产品具有最适宜的颗粒特征,如颗粒形貌、颗粒级配和紧密堆积等,改变传统水泥粉磨质量控制只采用细度(或比面积)的粗放型方式,实现水泥颗粒度特征的现代控制方法。

发展水泥,保护环境,既是保护人类赖以生存的大自然的需要,也是建设美好家园和社会文明的体现。如果用 1 吨熟料和大量工业废渣(如矿渣、粉煤灰等)生产出 2-3 吨高性能水泥,不但可以适应高性能砼的配制需要,而且有利于环境保护。实现这个目标的关键在于水泥粉磨,采用工业废渣与熟料分别粉磨(或在一定条件下混合粉磨)工艺,合理控制熟料和工业废渣的粒度分布,充分挖掘熟料的潜在活性,充分利用工业废渣的活性,发挥微粉的紧密堆积效应,就可以生产出大掺量混合材料的高性能水泥,为水泥工业的可持续发展开辟广阔前景。

为了满足广大水泥企业的要求,中国建筑材料科学研究院水泥与新材所邀请国内一些著名专家,就水泥颗粒特征与现代粉磨技术的国内外发展状况、科研成果及应用效果,撰写了二十余篇论文,同时收集了国内外有关专家、学者近年来发表的相关论文、文章,汇编成《水泥颗粒特征与现代粉磨技术》这本书。该书分水泥颗粒特征、现代水泥粉磨、球磨机粉磨新技术、粉磨与水泥工业可持续发展等四

个部分,汇集了当代广大水泥技术工作者的新观念、新技术、新成果,构筑起了水泥粉磨技术领域学术交流的平台,展示了当代水泥粉磨技术的总体水平和发展趋势。该书为广大水泥企业的厂长、技术人员提供了宝贵信息资源和实用技术,是水泥企业的良师益友。

汇编该书得到了南京工业大学、北京磨利特水泥粉磨技术研究中心、南京中大建材设备有限公司、珠海欧美克科技有限公司等单位的大力支持和帮助,在此衷心致谢。同时真诚感谢为该书提供大量技术、知识的广大专家、学者和企业界人员,感谢您们为该书奉献了这样好的论文。

由于时间紧迫,经验不足,在编著该书的工作中不免出现偏漏,恳切希望大家多方赐教,提出宝贵意见。

#### 编委会

主 编:王文义

副主编:张少明 于铁军 张福根

顾 问:乔龄山 隋同波 袁克兰

编 委:(以姓氏笔划排序):

于铁军	万品阶	王 昕	王文义	王玉明	王仲春	王复生	方 莹
孔祥忠	牛全林	刘福军	刘仁德	傅广杰	冯庆革	乔 彬	乔龄山
朱 明	朱 彭	李 铨	李跃宏	李涛平	孙小明	孙锡承	成 建
邹俊甫	张大康	张少明	张吉平	张永辉	张永娟	张长森	张福根
赵 勇	赵介山	陈政新	周士琼	金诚生	易新渝	徐忠奎	徐建荣
徐培涛	梁颖涵	郭文英	柴星腾	高长明	袁克兰	龚汉保	程 伟
隋同波	鲁幼勤						

编 者

2004年7月7日

# 目 录

## 前 言

### 一、水泥颗粒特征

#### 1. 综述

- 加强和改进粉磨工艺是提高水泥产质量的基本途径 ..... (1)
- 我国水泥标准同国际接轨后改进产品质量的分析 ..... (20)

#### 2. 颗粒特征与性能

- 水泥的最佳颗粒分布及其评价方法 ..... (34)
- 水泥颗粒特性参数及其对水泥和混凝土性能的影响 ..... (42)
- 水泥颗粒形貌及其改善途径的研究 ..... (55)
- 颗粒分布对水泥标准稠度、凝结时间的影响 ..... (65)
- 再论水泥细度与其强度的关系 ..... (70)
- 水泥颗粒特征及粉磨工艺对水泥性能的影响 ..... (76)
- 不同密型水泥颗粒一些特性的研究 ..... (85)
- 掺煤矸石的水泥性能与颗粒分布的关系研究 ..... (90)

#### 3. 颗粒微细化水泥

- 水泥基材料的微细化及其对水泥水化性能的影响 ..... (96)
- 多元胶体粉体复合效应的研究 ..... (102)
- 用机械力化学原理提高水泥混合材掺量 ..... (110)
- 超细粉煤灰—水泥间粉体效应的试验研究 ..... (114)

#### 4. 粒度测试

- 激光粒度仪(干法)在水泥质量控制中的应用 ..... (119)
- 水泥粒度(颗粒级配)测试方法及应用 ..... (129)

## 二、现代水泥粉磨

### 1. 综述

国际水泥工业粉磨技术发展概论 .....	(148)
----------------------	-------

### 2. 立磨

立磨粉磨水泥 .....	(159)
--------------	-------

立磨在水泥工业中的应用 .....	(164)
-------------------	-------

### 3. 辊压机

辊压机与辊式磨在预粉磨系统中的节能效果比较 .....	(182)
-----------------------------	-------

$\Phi 3 \times 11$ 水泥挤压联合粉磨系统的调试与生产 .....	(191)
---	-------

辊压机工艺问题探讨 .....	(196)
-----------------	-------

### 4. 筒辊磨

水平筒式辊压机(法国 FCB 公司粉磨技术评述) .....	(200)
--------------------------------	-------

HORO 磨粉磨技术 .....	(205)
------------------	-------

HORO 磨在水泥粉磨系统的应用 .....	(210)
------------------------	-------

## 三、球磨机粉磨新技术

### 1. 综述

水泥工业粉碎技术开发与研究 .....	(213)
---------------------	-------

新形势下的水泥粉磨系统技改方案选择 .....	(221)
-------------------------	-------

### 2. 球磨机

现代粉磨技术在水泥企业中的应用 .....	(230)
-----------------------	-------

高细粉磨技术进展 .....	(236)
----------------	-------

高细高产磨的技术创新与进展 .....	(241)
---------------------	-------

对现有小型水泥粉磨系统进行优化改造 .....	(250)
-------------------------	-------

分级衬板的进展与研究 .....	(257)
<b>3. 选粉机</b>	
粉磨系统中高效选粉机的研究与应用 .....	(271)
NHX 高效转子式选粉机的性能及应用 .....	(276)
离心式选粉机的改造机理及应用 .....	(283)
NHMF 高效转子式煤粉分级机的性能研究 .....	(288)
旋风式选粉机的改造机理及应用 .....	(294)
<b>4. 细碎机</b>	
预破碎技术与磨机的增产节能 .....	(299)
预粉磨设备及其评价 .....	(307)
冲击式破碎机在水泥生产中的应用 .....	(311)
<b>5. 粉磨工艺</b>	
采用串联粉磨适应新标准的要求 .....	(318)
粉煤灰在串并联磨中的应用 .....	(321)
超细产品及超细选粉机 .....	(325)
空气喷射型选粉机在超细矿渣生产线中的应用 .....	(333)
矿渣高细粉磨技术 .....	(337)
$\Phi 2.2 \times 7\text{m}$ 闭路磨改为开路筛分磨生产矿渣粉 .....	(345)
高细矿渣水泥生产及应用 .....	(348)
矿渣微粉在混凝土中的应用 .....	(353)
<b>6. 粉磨工艺相关技术</b>	
“充气梁”技术在篅冷机改造中的应用 .....	(359)
富勒型篅式冷却机技术改造 .....	(362)
水泥熟料易磨性的影响因素 .....	(366)
助磨剂应用技术 .....	(371)



水泥生产微机应用新成果 .....	(375)
利用水泥工艺外加剂技术提高水泥产质量 进一步降低水泥成本 .....	(380)
水泥工艺外加剂技术及应用 .....	(386)
采用现代测控技术 实现自动率值配料和配热 .....	(393)
大型生料辊式磨技术的新进展 .....	(408)
变频器在水泥厂的应用 .....	(419)

#### 四、粉磨与水泥工业可持续发展

关于当前我国水泥工业发展问题的思考 .....	(424)
水泥工业是可持续发展的工业 .....	(428)
立窑水泥企业技术进步的若干问题 .....	(430)
试论我国水泥工业的新型工业化道路 .....	(450)
我国水泥工业的绿色化发展方向 .....	(455)
粉煤灰的综合利用前景广阔 .....	(464)
环保型胶凝材料——按高性能混凝土需要生产的高性能胶凝材料 .....	(470)
水泥工业结构调整的瓶颈问题 .....	(477)
水泥工业的环境保护 .....	(487)

# 加强和改造粉磨工艺是提高水泥产质量的基本途径

中国建筑材料科学研究院 王文义

在以往,我国水泥企业普遍存在一个“重窑轻磨”的偏见,要提高水泥的产质量,降低能耗,只重视窑的状况,对水泥粉磨的作用重视不够。实际上,窑和磨是水泥企业提高产质量、降低能耗的两条基本途径。这里就粉磨问题作一分析。

## 1 加强和改造粉磨工艺是水泥企业的突出问题

### 1.1 粉磨能耗太高

水泥的生产从原燃料到产品出厂是一个相当复杂的过程,要想达到产量高、质量好、能耗低,需要各方的技术支撑。然而水泥生产过程的核心是粉磨和烧成,俗称“两磨一烧”,即生料粉磨、水泥粉磨和熟料烧成。

煨烧水泥熟料的窑炉有:立窑、湿法窑立波尔窑、干法中空窑、干法预热器窑和干法窑外分解窑(新型干法窑)。新型干法窑是当代最高技术水平的窑,它单机产量高,从1000t/d、2000t/d、4000t/d到7000t/d,国外最高达1万t/d以上;它的产品质量好;它的热耗降低到850~750kcal/kg熟料,已向理想热耗迈进。

生料磨和水泥磨,长期以来主要采用球磨机进行粉磨。球磨机是依靠冲击和研磨作用对物料实现粉碎的,这种作用通过研磨体表面传递给物料颗粒使其粉碎,单一颗粒的受力是偶然性的,而大量能量消耗在研磨体之间以及研磨体与衬板之间的碰撞和磨损,因此粉磨效率是很低的。据Ansel的测定:轴承、齿轮等纯机械损失占12.3%,随产品散失热量占47.6%,从磨机筒体表面散发的辐射热量占6.4%,空气带走的热量占31.4%,而粉碎的理论能量不足3%。

据粗略分析,一个水泥企业生产总电耗中有70%用在了生料和水泥粉磨,这么多电耗的97%作了无用功,仅仅有3%的电耗才真正起到了粉碎功能。所以,粉磨节能是当前和相当长的时期内水泥企业的基本任务。

### 1.2 我国水泥细度太粗

我国水泥细度太粗是同国外水泥质量差别的突出问题。80年代初我院对美、英、德、法、日以及香港、泰国等国家和地区的水泥实物样品进行系统试验研究,发现国外水泥细度大都<1%,并未引起我们的高度重视。80年代末期我国水泥大量出口,引起国外强烈反映,其中一个重要原因在于我国水泥细度太粗,当时大多在3~8%。

1997~1999年我院研究GB强度与ISO强度关系中发现,国外水泥和国内合资企业的水泥由GB强度过渡到ISO强度时下降很少,只有1~3MPa,而我国水泥普遍下降10MPa,有的下降达15~17MPa。追其原因,仍然在细度粗上,见表1。

表 1 水泥细度对 ISO 强度和 GB 强度的影响

水泥类别	熟料 28 天抗压强度						硅酸盐水泥 28 天抗压强度					
	比面积 (m <sup>2</sup> /kg)	R <sub>ISO</sub> (MPa)	R <sub>GB</sub> (MPa)	$\frac{R_{ISO}}{R_{GB}}$	R <sub>ISO</sub> - R <sub>GB</sub> (MPa)	$\frac{R_{ISO} - R_{GB}}{R_{GB}}$ (%)	比面积 (m <sup>2</sup> /kg)	R <sub>ISO</sub> (MPa)	R <sub>GB</sub> (MPa)	$\frac{R_{ISO}}{R_{GB}}$	R <sub>ISO</sub> - R <sub>GB</sub> (MPa)	$\frac{R_{ISO} - R_{GB}}{R_{GB}}$ (%)
江南小野田	318	58.6	70.0	0.83	-11.4	-16.3	376	66.3	72.0	0.92	-5.7	-7.9
大连华能小野田	303	48.7	57.3	0.85	-8.6	-15.0	380 (细度为 0%)	63.9	67.6	0.95	-3.7	-5.5
山东三菱	302	53.1	59.6	0.89	-6.5	-10.9	361	61.2	65.4	0.94	-4.2	-6.4
法国水泥	/	/	/	/	/	/	396	71.5	73.7	0.97	-2.2	-3.0

由表 1 可知, 合资企业的水泥熟料在 300m<sup>2</sup>/kg 情况下, ISO 强度与 GB 强度之差也达到 6.5 ~ 11.4MPa, 同我国水泥的两者之差接近了。而合资企业和法国的水泥产品, 比面积在 361 ~ 396m<sup>2</sup>/kg 的情况, ISO 强度与 GB 强度之差大大缩小, 只有 2.2 ~ 5.7MPa, 同外国水泥的两者之差一样了。因此可以说, 降低水泥细度是缩小 ISO 强度与 GB 强度差距, 提高水泥 ISO 强度的有效途径。

### 1.3 我国水泥粉磨工艺落后

粉磨节能和设备大型化是粉磨技术的发展方向。在国外粉磨工艺的改造和新建的大型水泥企业, 在我国 90 年代以后建的大型新型干法生产线上, 都体现了这个发展方向。如劳兰设计制造, 用于原苏联的  $\Phi 6.5 \times 9.65\text{m}$  生料磨, 传动功率 8100kW, 台时产量达 1000t/h。台湾亚洲水泥公司采用 HKD $\Phi 1.7 \times 2.0\text{m}$  的辊压机, 生料台时产量 510t/h。我国冀东水泥厂的水泥磨  $\Phi 4.8 \times 7.5\text{m}$ , 加 CKP-RS 立磨预碎, 装机功率 2500kW, 台时产量 180 ~ 200t/h。

但是, 我国几千家中小水泥企业在粉磨技术方面还是相当落后的, 主要体现在:

第一, 磨机规格太小。如  $\Phi 1.83 \times 6.5\text{m}$ ,  $\Phi 2.2 \times 7.0\text{m}$ ,  $\Phi 2.4 \times 11\text{m}$  等都是普遍用的小型磨机, 它的粉磨效率比大磨更低。

第二, 磨机内部结构落后。

第三, 粉磨工艺系统不完善, 工艺条件不合理。

第四, 从事粉磨工艺的技术力量薄弱。

## 2 水泥细度状态与控制方法

水泥性能取决于水泥的细度状态。细度状态应包括: 磨细程度(俗称细度、比面积)、颗粒分布、颗粒形貌和堆积密度。

### 2.1 水泥细度

我国水泥标准规定水泥产品的细度小于 10%，这个细度是指 0.08mm 筛余量%。这个方法简单易行，在一定的粉磨工艺条件下，细度与水泥强度存在一定关系。但是用这种方法进行水泥质量控制也存在一些问题。

第一，当水泥磨很细的情况下，如小于 1%，控制意义就不大了。国外水泥普遍磨得很细，所以在国外水泥标准中几乎都取消了这个指标。

第二，当粉磨工艺发生变化时，细度值也发生变化，如开路磨细度值偏大，闭路磨细度值偏小，有时很难根据细度控制水泥强度变化。

第三，细度值是指 0.08mm 筛筛余量(%)，即水泥中  $80\mu\text{m}$  颗粒含量(%), 众所周知， $>64\mu\text{m}$  颗粒水化活性已很低了，所以用大于  $80\mu\text{m}$  含量多少进行水泥质量控制不能全面反映水泥真实活性。

建议水泥企业采用  $45\mu\text{m}$  筛进行内部质量控制。

## 2.2 水泥比面积

国外水泥标准大都规定比面积指标，采用勃氏比面积仪测定比面积值。我国的硅酸盐水泥和熟料强度同国外一致。

勃氏比面积是把水泥干粉压实到一定空隙率下，观测一定量的空气透过时间，计算出水泥的总外表面积。水泥愈细，比面积愈大。水泥比面积与水泥性能存在着较好关系。

单位体积的物料如  $80\mu\text{m}$  一个球，如果磨细成小球，其球的个数与总的外表面积，存在表 2 的关系。

表 2 一个直径  $80\mu\text{m}$  球磨细后的结果

球的直径( $\mu\text{m}$ )	80	40	20	10	5	2.5	1.25
球的个数(个)	1	8	64	512	4102	32948	261410
总表面积(倍数)	1	2	4	8	16	32	64

用比面积控制水泥质量主要有两方面的不足。

第一，比面积对水泥中细颗粒含量多少反应很敏感。有时比面积并不很高，水泥颗粒级配合理，水泥强度却是很高的。

第二，掺有混合材料的水泥比面积不能真实反映水泥的细度状态，如掺有火山灰质混合材料，比面积会产生虚高现象。

## 2.3 水泥的颗粒级配

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~ $32\mu\text{m}$  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~ $24\mu\text{m}$  的颗粒对水泥性能尤为重要，含量愈多愈好。小于  $3\mu\text{m}$  的细颗粒，易结团，不要超过 10%。大于  $65\mu\text{m}$  的颗粒活性很小，最好没有。

依据这种意见，将水泥最佳颗粒级配绘制成示意图 1。

水泥颗粒级配通常都为“凸型”曲线，类似于高斯概率曲线，依此推导出颗粒级配 RRB 方程：

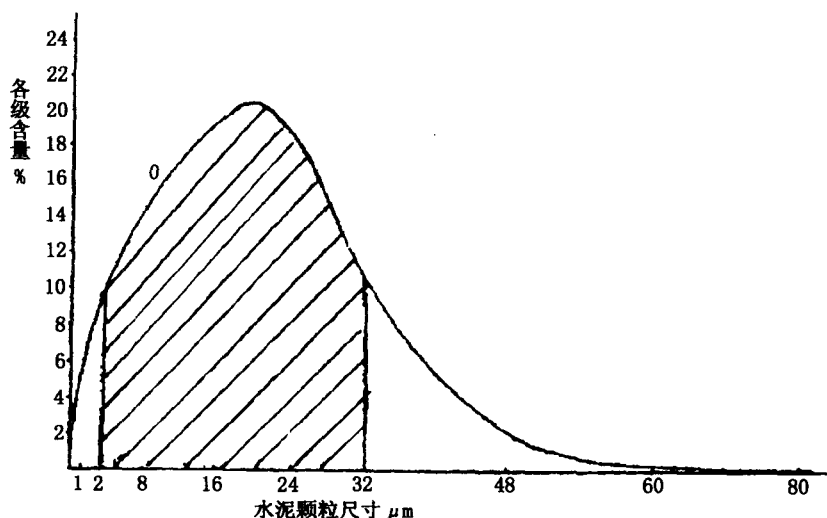


图1 水泥颗粒级配示意图

$$R_{(X)} = 100e^{-\left(\frac{x}{\bar{x}}\right)^n} \quad (1)$$

式中： $R_{(X)}$ ——某一粒径  $X$  的筛余量(%)；

$x$ ——颗粒粒径， $\mu\text{m}$ ；

$\bar{x}$ ——当量粒径或特征粒径， $\mu\text{m}$ ；

$n$ ——曲线斜率或均匀性系数。

将(1)式取二次对数便得一直线方程：

$$\ln \ln \frac{1}{R_{(X)}} = n \ln \frac{x}{\bar{x}} \quad (2)$$

$$\therefore n = \frac{\ln \ln \frac{1}{R_{(X)}}}{n \ln x - \ln X - \ln \bar{X}} \quad (3)$$

当(1)式  $X = \bar{X}$  时，

$$R_{\bar{X}} = e^{-1} = \frac{1}{2.718} = 36.8\% \quad (4)$$

由式(1)~(4)可知，任一粒径  $X$  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，愈小，水泥愈细。 $n$  值是“凸型”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。

水泥颗粒级配的测定方法，80年代以前大多采用沉积法，由于它测定时间长，精度低和比重不同的混合料不适应，所以80年代以后大多采用激光粒度分析仪测定水泥颗粒级配，这种方法测定时间短，精度高，适应性强，已广泛应用。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、 $n$ 、体积比面积等众多参数，供人们分析研究。

#### 2.4 水泥颗粒形貌

20世纪90年代人们开始研究水泥颗粒形貌对水泥性能的影响。水泥颗粒如果放在电子

显微镜下观察,它的形貌并不是圆的,犹如破碎堆积的石灰石,有棱角少的,有棱角大的,有片状的,有针状的。水泥颗粒形貌与粉磨工艺有关。

水泥颗粒形貌通常用圆度系数表示,它是颗粒断面积与其外接圆面积之比,正圆形颗粒圆度系数等于1,其他形状都小于1。圆度系数计算一般采用:

$$\text{圆度系数 } f = \frac{4\pi \times \text{颗粒投影面积}}{(\text{投影面周长})^2} \quad (5)$$

国外水泥的圆度系数  $f$ ,大多在 0.67 左右。我院测定的我国部分大中型水泥企业水泥的圆度系数平均值为 0.63,波动在 0.51~0.73 之间。我院在水泥颗粒形貌的研究中还发现;水泥磨机的研磨能力愈强, $f$  值愈大;高细磨水泥  $f$  值大;带滚压机预碎的磨机磨制出的水泥  $f$  值也较高。

日本北村昌彦等试验研究表明,将水泥颗粒的圆度系数由 0.67 提高 0.85 时,水泥砂浆 28 天抗压强度可提高 20~30%,配制砼的水灰比可降低 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%。

2000 年我国黄有丰等人研究结果列于表 3 中。

表 3 水泥颗粒形貌对水泥性能的影响

类别	比面积 (m <sup>2</sup> /kg)	圆度系数	标准稠度 (%)	3 天抗压强度 (MPa)	28 天抗压强度 (MPa)
S	325	0.47	30.4	35.3	49.8
P	328	0.73	27.3	32.1	66.4

## 2.5 最紧密堆积理论

硬化水泥浆体性质与水泥粉体在拌水前的堆积状态有着密切关系,超细粉的优良填充作用就是要使粉体实现紧密堆积。

### 圆形球的堆积密度——Horsfield 模型

此模型假设所有的堆积颗粒均呈球形,根据其添加顺序,分为 1 次球、2 次球……6 次球,同一次添加的球径相同。设半径为  $r$  的 1 次球以 6 方最紧密方式堆积,则此时体系的孔隙率是 25.94%,然后在 1 次球的孔隙中添加可容纳的最大 2 次球,其半径为  $0.414r$ ,此时系统的孔隙率为 20.70%,依次填充,结果见表 4。

表 4 Horsfield 模型中孔隙率变化规律

球	添加球径	系统空隙率
1	$1r$	0.2594
2	$0.414r$	0.2070
3	$0.225r$	0.1900
4	$0.177r$	0.1580
5	$0.116r$	0.1490
6	min	0.0390

粒径连续分布的最紧密堆积方程——Fuller 方程

实际水泥粉体的粒径大多是连续分布的,颗粒间的填充是随机的,并不是细颗粒刚好填充到粗颗粒的间隙。在这种粒径分布情况下,Fuller 根据砂石骨料紧密堆积公式,提出粉状物料最紧密堆积方程:

$$A = 100\left(\frac{d_i}{D}\right)^{0.4} \quad (6)$$

式中:  $A$ ——筛析通过量, %;

$d_i$ ——筛孔尺寸,  $\mu\text{m}$ ;

$D$ ——最大颗粒直径,  $\mu\text{m}$ 。

依式(6)计算水泥等粉状物料的最紧密堆积时颗粒分布如表 5。

表 5 粉状物料最紧密堆积的粒度分布累计含量(%)

$d_i(\mu\text{m})$ $D(\mu\text{m})$	1	2	3	4	8	16	24	32	40	63
0~63	19.07	25.16	29.18	33.20	43.80	57.80	67.97	76.26	83.38	100

最紧密堆积的理论和工艺在欧美一些工业发达国家日趋普及,在桥梁、隧道、高性能砼、耐磨砼、耐腐蚀砼等工程中都有应用,取得了很好效果。

### 3 水泥细度状态与水泥性能的关系

水泥的粉磨工艺与水泥的能耗、产量、质量及水泥的颗粒分布、形貌都有密切关系。这里着重就水泥的细度状态与水泥性能的关系,结合水泥生产实际进行分析。

#### 3.1 水泥磨制细度与产质量关系

在一定条件下球磨机的磨制细度与产量成反比,与质量成正比。细度与产量的大致关系见表 6。

表 6 在一定条件下磨机产量与细度(0.08mm 筛余量%)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

表 6 中水泥磨制细度 10% 时,产量作为 100%,当细度为 3% 时,磨机产量降低到 66%。

广西飞来石水泥厂(立窑)对粉磨细度、产量与 ISO 强度变化进行了试验,结果列于表 7 中。

表 7 水泥粉磨细度与水泥产质量关系

序号	细度(%)	比面积 ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	磨机产量 ( $\text{t}/\text{h}$ )	ISO 强度(MPa)	
				3 天	28 天
1	8.5	308	30	20.5	38.5
2	6.0	314	28	24.4	40.2
3	5.0	326	26	24.8	46.5
4	4.5	338	24	26.2	51.4
5	3.6	340	22	28.5	54.6
6	2.4	345	20	30.1	58.2

由表 7 看出,当细度由 8.5%降低到 2.4%时,28 天 ISO 强度由 38.5MPa 提高到 58.2MPa,升了近两个强度等级。相应之下,磨机产量由 30t/h 降到了 20t/h。

昆明水泥厂实施水泥新标准后,采用本厂熟料,主要通过调整水泥粉磨细度与混合材掺量,可以生产 32.5、42.5、52.5、62.5 四个强度等级的水泥,其中 ISO62.5 等级的水泥在市场上很受欢迎。

由于水泥磨制细度对 ISO 强度比 GB 强度更敏感,见图 2、图 3,所以实施新标准水泥企业更加重视粉磨工艺,全国的水泥细度也有了普遍降低,这是提高我国水泥质量的一件好事。

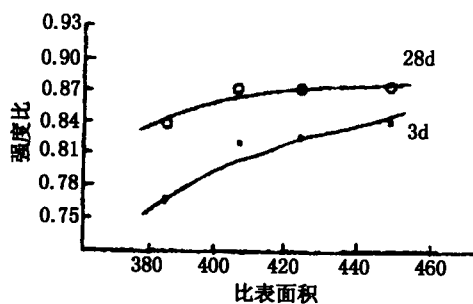


图 2 比表面积与 ISO/GB 抗压强度比关系

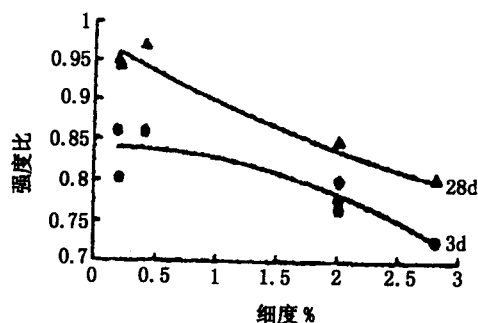


图 3 细度与 3d、28dISO/GB 抗压强度比关系

但是我们也听到有的建筑施工单位反映,转标后水泥太细了,需水量增加了,同外加剂适应性差了。水泥企业如何接受建筑施工单位的意见,改进产品质量呢? 重要的是调整好水泥的颗粒级配,问题就解决了。

### 3.2 水泥颗粒级配与水泥性能关系

#### (1) 水泥颗粒级配对水泥性能的影响

80 年代我院施娟英的研究结果列于表 8 中。

表 8 水泥颗粒级配与水泥性能关系

编号	颗粒级配 (%)				平均粒径 ( $\mu\text{m}$ )	比面积 ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	标准稠度 (%)	$\text{C}_3\text{S}$ 含量 (%)	小试体胶砂强度 (MPa)*			
	< 10 $\mu\text{m}$	10 ~ 30 $\mu\text{m}$	30 ~ 60 $\mu\text{m}$	> 60 $\mu\text{m}$					1d	3d	28d	1 年
$d_1$	98.5	1.5	0	0	4.76	920	43.0	56.7	27.3	29.8	38.6	42.0
$e_1$	13.2	86.8	0	0	16.56	200	28.5	54.9	3.5	7.1	17.6	34.1
$F_1$	1.4	23.6	75.0	0	39.49	74	28.0	51.5	2.5	5.1	7.5	14.3
$H_1$	2.7	3.0	5.3	89.0	74.05	40	28.0	46.8	1.4	2.7	3.9	7.6
原水泥	27.7	42.0	25.1	5.1	/	300	28.0	52.7	6.4	11.9	16.4	26.5

\* 试体为  $\phi 1.6 \times 1.6\text{cm}$  小试体,数据仅作参考。



由表 8 看出,  $d_1$  水泥  $< 10\mu\text{m}$  颗粒占到 98.5%, 比面积  $920\text{m}^2/\text{kg}$ , 标准稠度需水量达 43.0%。当大于  $10\mu\text{m}$  颗粒增多后, 水泥比面积大幅度降低, 标准稠度降至 28.5% 以下, 如  $e_1$ 、 $F_1$ 、 $H_1$  水泥。

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, 施娟英的测定结果是:

0 ~  $10\mu\text{m}$  颗粒, 一天水化达 75%, 28 天接近完全

10 ~  $30\mu\text{m}$  颗粒, 7 天水化接近一半

30 ~  $60\mu\text{m}$  颗粒, 28 天水化接近一半

$> 60\mu\text{m}$  颗粒, 3 个月后水化还不到一半

学者 Meric 认为, 粒径  $1\mu\text{m}$  以内的小颗粒, 在加水拌和中很快就水化了, 对砼强度作用很小, 反而造成砼较大收缩。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。

## (2) 国内外实物水泥颗粒级配比较

乔龄山对德国不同强度的水泥颗粒进行分析, 见图 4。在图 4 中同时列出了我国部分水泥颗粒级配与 Fuller 曲线。

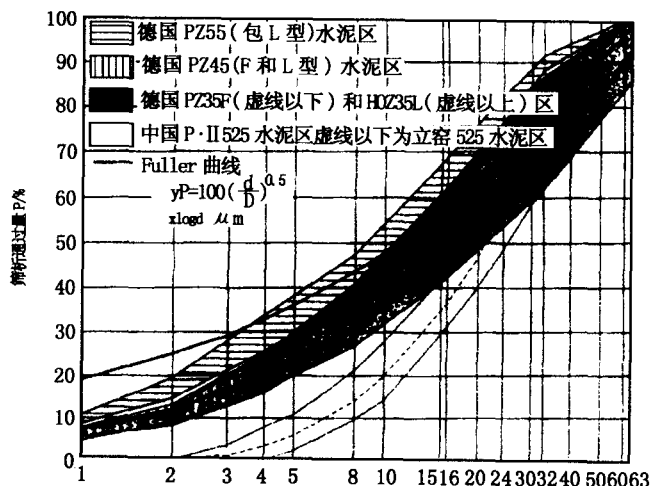


图 4 不同水泥颗粒分布曲线与 Fuller 曲线的比较

从图 4 可以看出, 德国水泥颗粒分布细颗粒含量多, 强度愈高细颗粒愈多。而我国水泥细颗粒含量太少。

1998 ~ 2001 年在世界水泥检测大对比中选用了不同强度等级的法国水泥, 国际试验室的检测结果列于表 9 中。