

# 激光粒度仪对水泥粉磨过程的指导作用

张福根 郭 华  
(珠海欧美克科技有限公司)

## 1 引 言

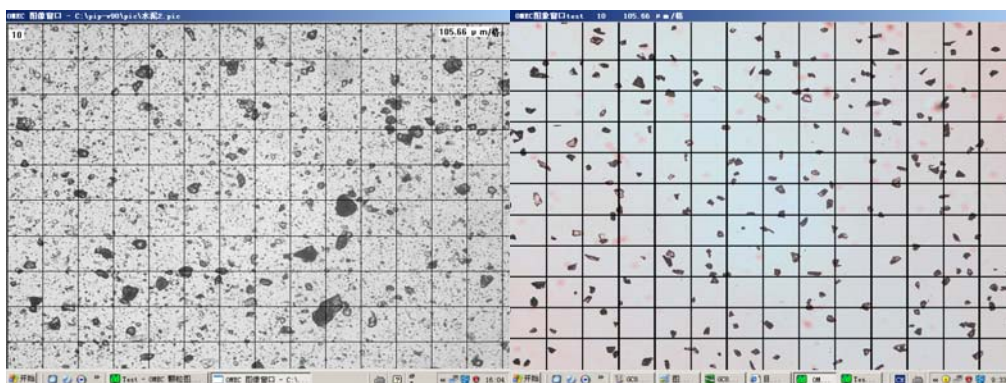
水泥是一种粉体产品。和其他粉体一样,粒度分布(简称“粒度”,水泥行业称“颗粒级配”,本文统称“粒度”或“粒度分布”)对水泥性能(比如强度、流动性、混合材的掺加比例等)有强烈影响。然而到目前为止,粒度测试技术在水泥行业的应用并不普遍。究其原因,作者以为主要有两点:(一)水泥的粒度分布较宽,测量比较困难,加上水泥不宜在水介质中测量,测量成本高;(二)水泥的生产和使用都是粗放式的,对粒度这类“微观”、深层次的问题没有去细究。随着社会的进步,人们对水泥性能的要求越来越高。例如,泵送混凝土要求强度能满足需要的前提下,流动性也足够好;环保政策要求水泥在生产过程中能源消耗要降低,混合材的添加要增加等等。在熟料指标确定的情况下,改善粉磨工艺,使水泥粒度达到较理想的目标,是水泥工业满足社会进步要求的主要途径之一。国家发改委于 2006 年 5 月发布了建材行业推荐性标准《水泥颗粒级配测定方法 激光法》<sup>[1]</sup>,目前国内外激光粒度仪的技术水平也完全能够满足水泥粒度测量的需要,这些都为粒度测量技术在水泥行业的推广应用打下良好基础。鉴于目前水泥行业的研究和工程技术人员对粒度测量理论、粒度仪器以及粒度数据如何指导粉磨过程等问题还不十分了解,作者特作此文,以助推水泥行业粉磨技术的进步。

## 2 粉体粒度的基本概念及水泥的粒度特点

### 2.1 粒径的定义

在讨论粒度分布之前,先明确粒径的概念是有必要的。所谓粒径,就是颗粒的直径、大小或尺寸。如果颗粒是圆球形的,粒径就是圆球的直径,其数值是确定的,物理意义也非常明确。但是现实的粉体颗粒,如水泥颗粒,其形状是不规则的(见图 1a),在粒度测量中,我们又只能用一个参数去描述它的大小。对不规则物体,哪个参数代表它的大小呢?实际上,粒度测量都是等效测量;迄今为止的任何一种粒度仪器或设备(含筛子),都是假定颗粒是圆球形的条件下测量颗粒大小的,即认为“如果颗粒是个圆球,那么它应该是(等效于)这么大”。文献[2]对粒径作了如下定义:

**当被测颗粒的某种物理特性或物理行为与某一直径的同质球体(或其组合)最相近时,就把该球体的直径(或其组合)作为被测颗粒的等效粒径(或粒度分布)。**



(a) 水泥颗粒

(b) 碳化硅磨料颗粒

图 1 两种典型的粉体颗粒显微照片

根据该定义，当我们借以将待测颗粒与球体进行比较的物理特性或物理行为不同，即仪器的原理不同时，测量结果一般是不同的。例如：激光粒度仪给出的粒径可称为等效散射光粒径；库尔特计数器给出的粒径可称为等效电阻粒径等等。用它们测量同一不规则颗粒时，结果将是不同的。有时甚至同一种原理的仪器，测试条件不同，结果也可能不同，例如，筛分测量的结果同筛分的时间有关。

## 2.2 粒度分布（颗粒级配）

粒径是用来描述一个颗粒的大小的。一种粉体样品的各种颗粒，大小往往互不相同（见图 1，其中磨料微粉是通过机械粉碎、分级方法得到的最均匀的微粉之一），这时要用粒度分布才能较全面地描述粉体的整体颗粒大小。粒度分布在水泥行业又称颗粒级配，是指各种大小的颗粒占颗粒总数的比例。将粒径分成多个粒径区间：

$$[x_0, x_1], [x_1, x_2], \dots, [x_{n-1}, x_n],$$

各区间内的颗粒数占总数的百分比：

$$w_1, w_2, \dots, w_n$$

就组成了粒度分布。这种以各粒径区间内的颗粒占总颗粒的百分比表示的粒度分布，又称为粒度的微分分布或频度分布。此外还可以用累积（积分）分布来表示。累积分布表示小于某代表粒径  $x_i$  的颗粒占颗粒总数的百分比，用大写的  $W_i$  表示：

$$W_i = \sum_{j=1}^i w_j。$$

在现实的粒度测试报告中，粒度分布经常用表格（称为“粒度分布表”，见表 1）或曲

线（称为“粒度分布曲线”，见图 2）表示。

表 1 典型的水泥粒度分布（表）示例

| 粒径<br>(um) | 微分<br>(%) | 累积<br>(%) | 粒径<br>(um) | 微分<br>(%) | 累积<br>(%) | 粒径<br>(um) | 微分<br>(%) | 累积<br>(%) |
|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| 0.5        |           |           | 4.44       | 2.57      | 20.66     | 39.47      | 6.34      | 86.5      |
| 0.58       | 0.21      | 0.21      | 5.19       | 2.74      | 23.39     | 46.13      | 4.94      | 91.43     |
| 0.68       | 0.43      | 0.64      | 6.07       | 2.67      | 26.07     | 53.92      | 4.15      | 95.59     |
| 0.8        | 0.74      | 1.38      | 7.09       | 2.62      | 28.69     | 63.03      | 2.64      | 98.23     |
| 0.93       | 1.22      | 2.6       | 8.29       | 2.64      | 31.32     | 73.67      | 1.18      | 99.41     |
| 1.09       | 1.19      | 3.8       | 9.69       | 3.07      | 34.39     | 86.11      | 0.12      | 99.53     |
| 1.28       | 1.25      | 5.05      | 11.33      | 3.68      | 38.07     | 100.65     | 0.05      | 99.58     |
| 1.49       | 1.21      | 6.25      | 13.24      | 4.29      | 42.36     | 117.64     | 0.06      | 99.64     |
| 1.74       | 1.37      | 7.62      | 15.48      | 4.84      | 47.2      | 137.51     | 0.13      | 99.77     |
| 2.04       | 1.88      | 9.5       | 18.09      | 5.19      | 52.39     | 160.72     | 0.12      | 99.89     |
| 2.38       | 1.95      | 11.45     | 21.14      | 5.64      | 58.03     | 187.86     | 0.11      | 99.99     |
| 2.78       | 2.15      | 13.6      | 24.72      | 6.69      | 64.72     | 219.58     | 0.01      | 100       |
| 3.25       | 2.17      | 15.77     | 28.89      | 7.79      | 72.51     | 256.66     | 0         | 100       |
| 3.8        | 2.32      | 18.08     | 33.77      | 7.56      | 80.07     | 300        | 0         | 100       |

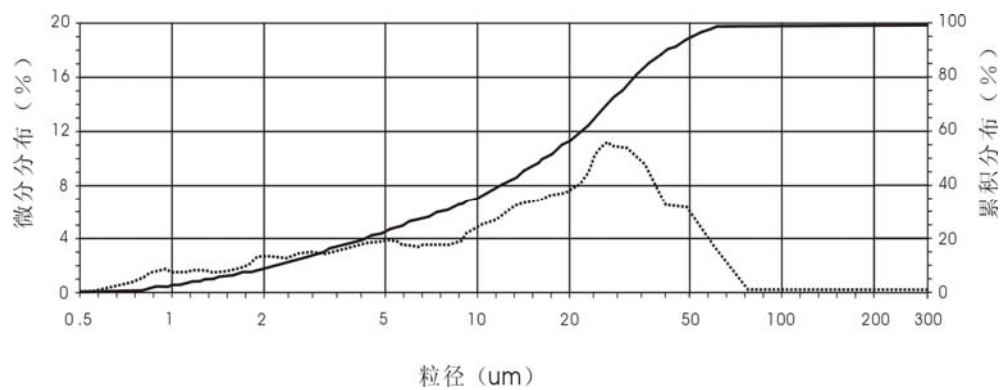


图 2 典型的水泥粒度分布（曲线）示例

以上粒度分布是用离散的代表粒径组成的粒径区间内的颗粒百分比来表示的，现实仪器的测量结果均这样表示。在进行理论研究时，有时用连续函数表示会更方便些。先看累积分布，可用函数  $W(x)$  表示。它代表小于  $x$  的颗粒占颗粒总数的百分比。显然

$$W(0)=0;$$

$$W(\infty)=100\%=1。$$

$$w_i= W(x_i) - W(x_{i-1})。$$

用连续函数表示的“微分分布”称为粒度分布密度  $w(x)$ ,

$$w(x)=dW(x)/dx;$$

$$W(x)=\int_0^x w(x)dx。$$

RRSB 函数是一种理想化的粒度分布的表示。据研究，绝大多数单一成分的固体材料经机械方法粉碎得到的粉体，基本上满足该规律。现在被普遍应用于水泥颗粒级配的研究。其方程如下：

$$W(x) = 1 - \exp[-(x/D_e)^N]$$

式中， $x$  表示粒径， $W(x)$  表示小于  $x$  的颗粒百分比， $D_e$  和  $N$  分别称作特征粒径和均匀性（宽度）系数。 $D_e$  是累积百分比为 63.4% 时对应的粒径，并与体积平均粒径（ $D(4,3)$ ）在数值上相近。 $N$  越大，颗粒的均匀性越好。水泥的  $N$  值在 1 左右。图 3 是一种典型水泥的 RRSB 曲线，其中  $D_e=21.66$  微米， $N=1.03$ 。

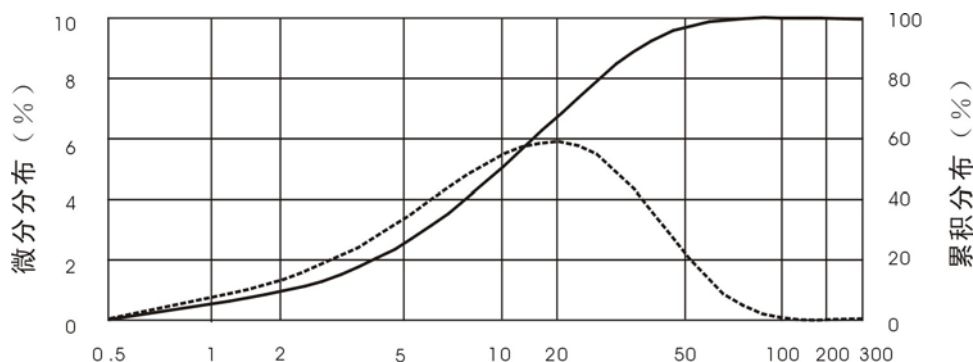


图 3 RRSB 分布曲线示例

长期以来，水泥行业都用 RRSB 曲线描述水泥的粒度分布。它的优点是表述简洁，物理意义明确，且能够从筛余数值求出分布（只要做两种筛孔的筛余）。需要指出的是，RRSB 分布只是水泥实际粒度分布的一种近似表达。

### 2.3 水泥的粒度分布（颗粒级配）及其与传统相关参数之间的关系

水泥是典型的宽分布（不均匀）粉体，最小颗粒达  $1\mu\text{m}$  以细，最大则可达  $80\mu\text{m}$  以粗（见图 2、表 1）。在粒度测量中，样品的粒度范围越宽，测量越困难，测量精度也越低。

粒度分布是水泥颗粒大小的全面描述。水泥行业传统的颗粒参数有细度和比表面积，它们分别代表  $80\mu\text{m}$  以粗颗粒的百分含量和（表面积）平均粒径（又称 Sauter 粒径），均可从粒度分布数据导出。RRSB 分布是一种近似的理论粒度分布，当然也可从实测的粒度分布数据得出。

$$\text{细度} = [1 - W(80)] \times 100。$$

它在粒度分布曲线上的表示如图 4。

将现代粒度仪的测量结果同传统的筛分方法对比时，应注意以下几点：

(1) 由于两种方法所依据的原理不同, 测量结果也可能不同, 这是正常的; 我们说两种方法得到的结果一致性好, 是指二者的相关性好, 不是说绝对值完全相等。

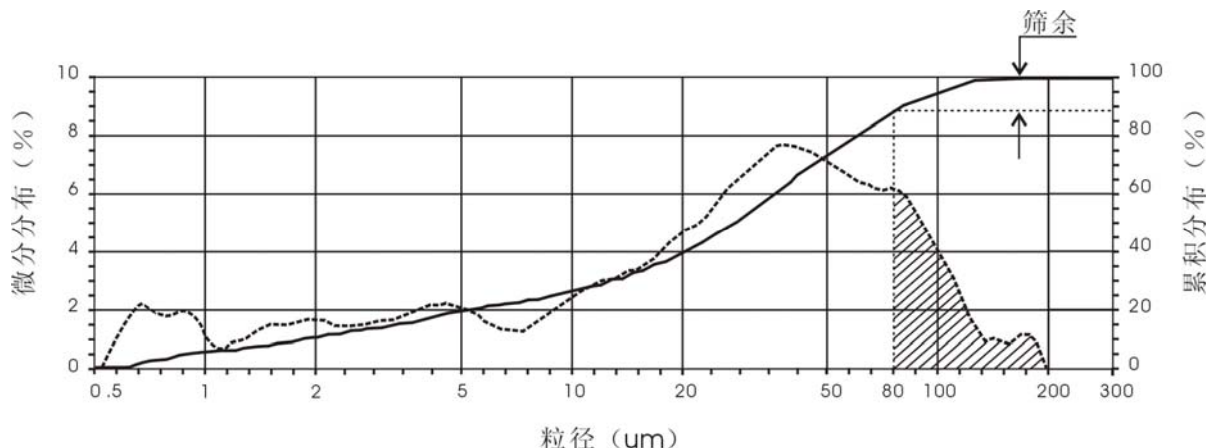


图 4 筛余在粒度分布图上的表示

(2) 细度接近于零时, 用仪器测得的  $W(80)$  和传统筛分法测得的筛余的重复精度都将变得很低, 这是由小概率事件的随机涨落规律决定的。这时不宜将两种方法获得的结果进行对比。

比表面积 (SSA) 为

$$SSA = K / [\rho D(3, 2)]$$

式中,  $D(3, 2)$  是粉体样品的表面积平均粒径, 又称 Sauter 平均粒径;  $K$  称为形状系数, 当颗粒为理想球形时,  $K=6$ 。上式表明, 比表面积与表面积平均粒径  $D(3, 2)$  成反比, 即样品的粒径越小, 比表面积越大。

RRSB 分布是一种理想化了的粒度分布函数, 可以通过传统的筛析法确定。现代的粒度仪器可以精确地测量水泥的粒度分布, 用最小二乘法拟合可以得到更精确的 RRSB 函数。见图 5。特征粒径 ( $D_e$ ) 和均匀性系数 ( $N$ ) 是 RRSB 分布函数的两个参数, 可以简约地表征水泥的平均粒径和颗粒均匀性。

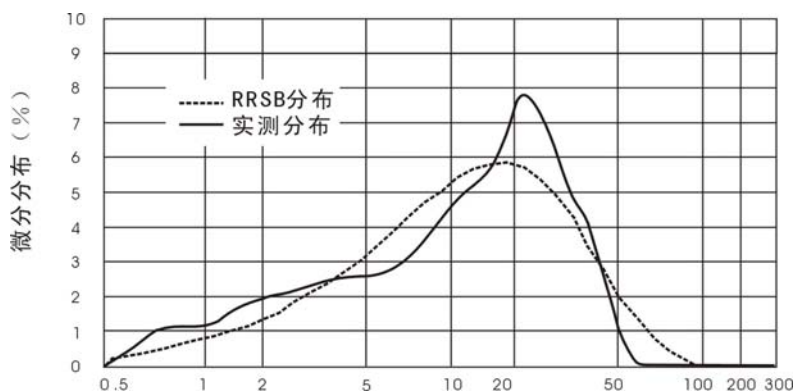


图 5 根据实测粒度分布拟合 RRSB 分布示例

### 3 激光粒度仪适合水泥粒度测量的理由

现代比较流行的粒度测试仪器有：激光粒度仪、沉降粒度仪、电阻法颗粒计数器、颗粒图像仪以及动态光散射仪等。其中动态光散射仪的测量范围主要在亚微米和纳米级，显然不适合水泥的测量；沉降仪、电阻法计数器和图像仪的测量范围虽然主要在微米级，但它们的动态范围不够。所谓动态范围就是粒度仪器在一个量程内能测量的最大与最小粒径之比。前述三种仪器的动态范围均在 20:1 左右，而一个水泥样品的粒度分布范围大约在 100:1 左右，所以这三种仪器难以满足水泥的粒度测试需要。在上世纪七、八十年代，我国水泥行业尝试过推广沉降天平，最终没有成功。原因有很多，其中原理性的原因就是动态范围不够。

激光粒度仪适合测量水泥的粒度分布，首先因为其动态范围可以达到 1000:1 以上，大于水泥的粒度分布范围；其次它在样品分散方式上还可使用空气作为介质（干法分散），做到了既方便又低成本。下面简要介绍一下激光粒度仪的原理和结构。

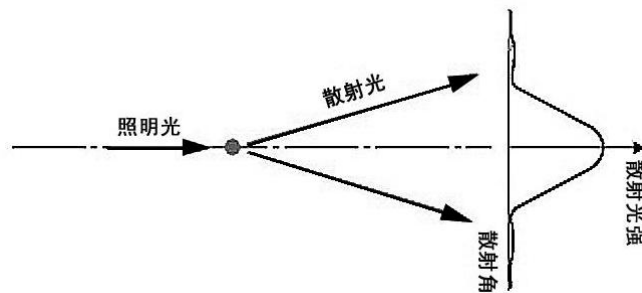


图 6 光的散射现象

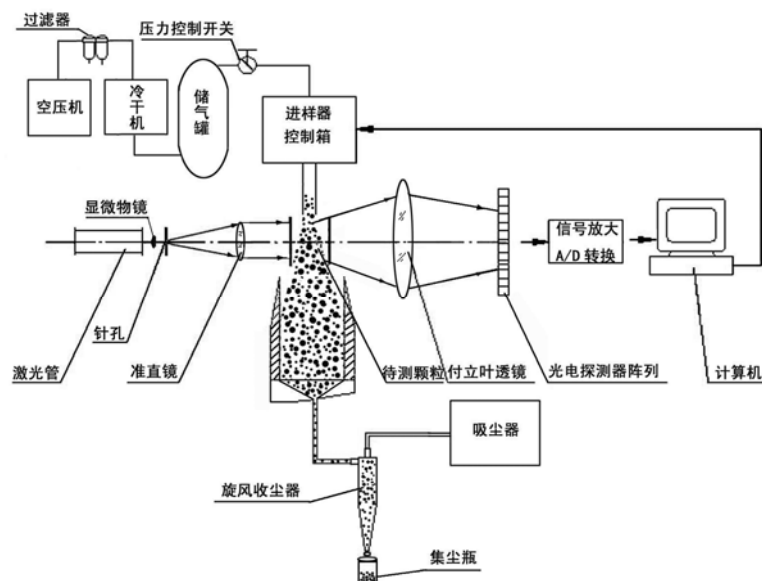


图 7 干法激光粒度仪结构示意图

激光粒度仪是根据光的散射现象测量颗粒大小的。光波（线）在行进中遇到小颗粒时，会发生散射现象（见图 6），颗粒越小，散射光的分布范围（散射角）越大。散射光的分布与颗粒大小之间的定量关系可以用“Mie 散射理论”或“Fraunhofer 衍射理论”来描述。前者是根据光的电磁波理论——Maxwell 方程严格推导出来的，严格但数值计算比较复杂；后者是根据光的机械波理论——Huygens 原理推导出来的，数值计算简单但在有些情况下不准确。欧美克激光粒度仪采用 Mie 理论。

图 7 是欧美克 LS-C 型激光粒度仪的结构示意图。它以激光作光源，激光束先经过一个倒置的显微物镜聚焦，在焦点处放置一个针孔滤波器，以滤去杂散光。通过针孔的光是纯净的发散光束，经过准直镜后变成平行光。样品窗口处在平行激光束的照射之下。待测的颗粒样品以分散状态被输送到测量窗口后，激光就会被散射。散射光被富里叶透镜聚焦，使得同样散射角的光聚集在光电探测器阵列的同一点上，因此光电探测器阵列输出的光电信号分布，就代表散射光强的分布。光电信号经放大、A/D 转换后送入计算机。计算机自动将散射光强分布转换成粒度分布。

样品颗粒被送到测量窗口时，要求处于分散状态。如果颗粒是分散在液体介质中，则称为湿法测量。湿法测量最常用的介质是水，显然不适用于水泥。其他介质如酒精、煤油等，则测量成本较高。另外水泥中的大颗粒难以稳定悬浮，如果湿法进样器设计或操作不当，不易测到大颗粒。LS-C 型仪器可以用空气作为分散介质，称为干法进样。参考图 7，干粉进样器由空气压缩净化系统、进样控制系统、光学窗口和收尘系统组成。空气压缩净化系统包含空压机、冷干机、储气罐和空气过滤器，它为进样器提供高压、清洁、干燥的气源。进样控制箱则由料斗和控制电路组成，它是待测样品的入口，并负责协调进样器各个部件的工作。测量窗口是粉体样品的喷射区，样品经过此区域时处于完全分散状态。收尘系统则由旋风收尘器和家用真空吸尘器组成，它为进样器提供一个负压环境，保证测穿过窗口的样品全部被收集起来。

#### 4 根据粒度数据分析水泥特性，调整粉磨系统

在熟料已经确定的情况下，水泥性能由粒度决定。虽然对粒度——水泥特性的研究还缺乏系统性和完整性，但是已经得到的如下结论对于我们分析水泥特性还是很有指导意义<sup>[3]</sup>（参照图 8）

（1）1 微米以细颗粒由于在和水的拌和过程中就完全水化，对强度没有贡献。其含量增加，说明存在过粉磨，浪费了粉磨能量；同时显著增加了拌和的需水量，降低了浇筑性能。因此，该组分颗粒是有害的，应尽可能减少。



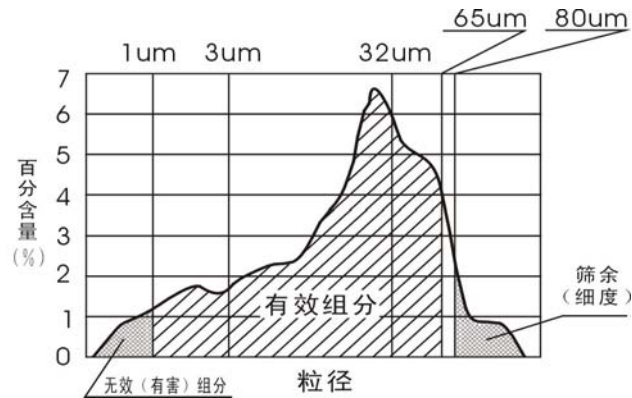


图 8 水泥各特征组分示意

(2) 1~3 微米颗粒含量高, 3 天强度就高, 同时需水量会相应增加, 浇筑性能下降。因此, 该组分颗粒在 3 天强度能满足要求的前提下, 也应尽可能低。

(3) 浇筑 28 天后的水化深度约为  $5.46\mu\text{m}$ 。这就意味着大于两倍水化深度(约  $11\mu\text{m}$ )的颗粒, 总是有一部分内核未水化, 见图 9。未被水化的内核在混凝土中只起骨架作用, 对胶凝没有贡献。16、32 和  $64\mu\text{m}$  颗粒的水化率分别为 97%、72%和 43%, 因此通常认为 3~ $32\mu\text{m}$  颗粒对 28 天强度其主要作用。 $32\mu\text{m}$  以上颗粒, 尤其是  $65\mu\text{m}$  以上颗粒水化率较低, 是对熟料的浪费, 应尽可能降低。

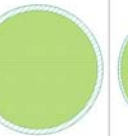
| 粒 径<br>( $\mu\text{m}$ ) | 8                                                                                   | 16                                                                                  | 32                                                                                  | 64                                                                                   | 128                                                                                   |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 图 示                      |  |  |  |  |  |
| 水化率                      | 100%                                                                                | 97%                                                                                 | 72%                                                                                 | 43%                                                                                  | 23%                                                                                   |

图 9 各种颗粒水化深度示意图

(图中, 外轮廓表示颗粒大小, 被归一化了, 因而看起来一样大; 水化深度按照归一化系数等比例变化, 所以颗粒越大, 看起来的水化深度越浅, 在图中用阴影线表示。涂黑部分表示未水化的内核)

(4) 3~ $16\mu\text{m}$  颗粒含量越高, 熟料的作用发挥得越彻底, 相同条件下混合材添加量就可以越高。

(5)  $32\mu\text{m}$  以上颗粒含量过高, 泌水性会增大。

(6) 混合材在粒度上如果能与熟料互补, 形成最佳堆积, 则混合材的添加不仅



不会降低水泥强度，而且还能增加强度。

下面试举两例，说明粒度数据对粉磨系统调整的指导作用：

例 1：强度指标高了，但浇筑性能变差。该样品的粒度分布见图 10 和表 2。由于 1~3 $\mu\text{m}$  和 3~32 $\mu\text{m}$  颗粒的含量都足够高，因此 3 天和 28 天强度都很高，但同时 1 $\mu\text{m}$  以下颗粒含量过高，因此浇筑性能差。应调整磨机配球、选粉机转速和给料量等参数，减少 1 $\mu\text{m}$  以下颗粒含量。

表 2 典型的强度指标高、浇筑性能差的水泥的颗粒级配

| 粒径区间 | <1 微米 | 1~3 微米 | 3~32 微米 | 32~65 微米 | >65 微米 |
|------|-------|--------|---------|----------|--------|
| 百分含量 | 8.25  | 14.16  | 68.63   | 8.95     | 0.01   |

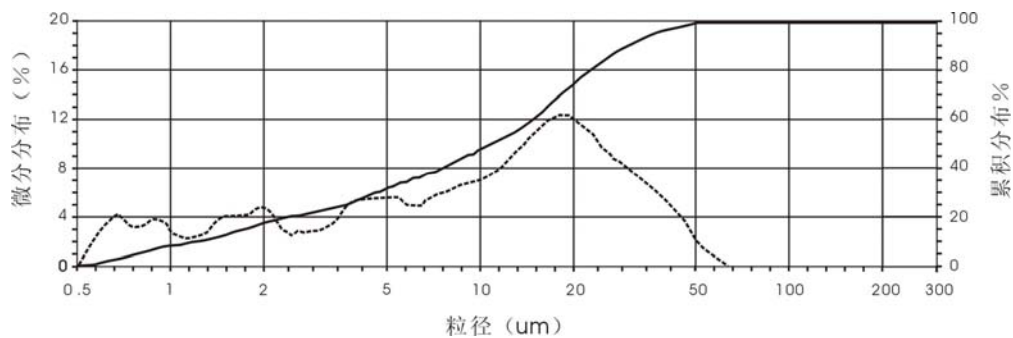


图 10 典型的强度指标高、浇筑性能差的水泥的粒度分布图

例 2：3 天强度高，但 28 天强度不高。该样品的粒度分布情况见图 11 和表 3。由于 1~3 $\mu\text{m}$  含量够高，因此 3 天强度够高，但 3~32 $\mu\text{m}$  含量偏低，所以 28 天强度不够。一般出现这种情况的都是开路的小磨。厂家为了降低细度，进行了过粉磨造成的。

表 3 典型的 3 天强度高、28 天强度不高的水泥的颗粒级配

| 粒径区间 | <1 微米 | 1~3 微米 | 3~32 微米 | 32~65 微米 | >65 微米 |
|------|-------|--------|---------|----------|--------|
| 百分含量 | 5.94  | 16.97  | 50.72   | 18.23    | 8.13   |

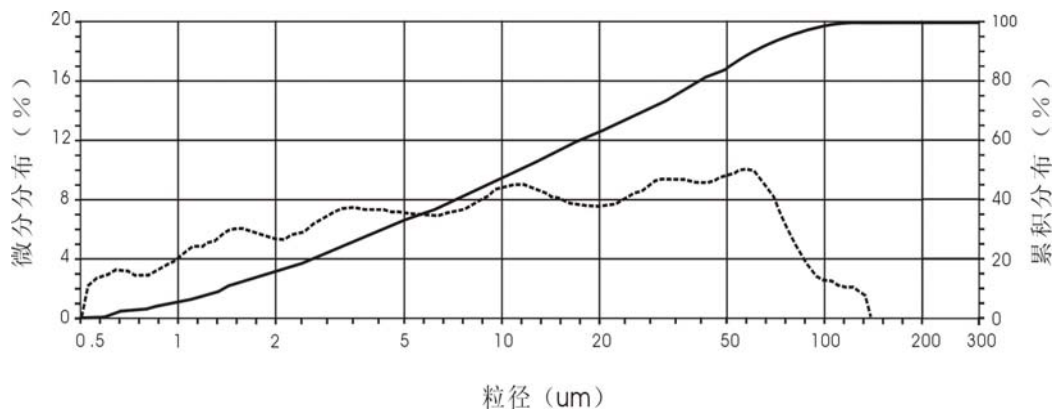


图 11 典型的 3 天强度高、28 天强度不高的水泥的粒度分布图

5 结束语：我国水泥粉磨技术的改进方向及意义

作者曾经测过全国十多个省的数百家水泥厂的产品粒度分布，发现一个比较普遍的问题是粒度分布较宽，平均粒径较粗，因而难以兼顾浇筑性能、混和材添加与强度的关系。表 4 是国内粉磨水平处于中上游的某省 100 多个水泥样本粒度数据中的最佳值、平均值和最差值的对比<sup>[4]</sup>。我们假设这里的最佳样品的粒度分布是一种比较理想且大家通过努力都能实现的粒度分布，那么该省水泥企业通过改进磨机系统，平均而言，熟料的未化率可降低近 8%，即节约熟料 8%，增加混合材 8%；粉磨能耗降低 10%。对最差的样品，改进后可节约熟料 17%，混合材增加 17%；粉磨能耗减少 13%。

表 4 某省水泥的代表性粒度数据及相应的延伸参数

| 参数<br>样品 (%) | <1 μ m 含量 | <3 μ m 含量 | > 65 μ m 含量 | 未 化 率* | 过 磨 率** |
|--------------|-----------|-----------|-------------|--------|---------|
| 最好样品         | 5.02      | 14.87     | 0.52        | 10.92  | 23.3    |
| 平均结果         | 5.40      | 14.44     | 7.55        | 18.81  | 33.0    |
| 最差样品         | 6.65      | 11.93     | 19.57       | 27.94  | 36.0    |

说明：\* “未化率”指浇筑后第 28 天样品中所有未水化的颗粒内核的体积之和与全部颗粒总体积之比。\*\* “过磨率”指消耗在 1μm 以细颗粒上的粉磨能耗与粉磨总能耗之比。

由于该省在粉磨技术上处于中上游水平，全国平均来说降耗节能的潜力更大。另外这里作为理想粒度分布参照物的数据是该省一家优质企业实际已经做到的粒度数据，并不是理论上限，即参照物本身还可以做得更好，所以我国水泥在粉磨技术上可挖掘的潜力还很大。

而要提升粉磨水平，激光粒度仪的普及应用是必须的。

### 参考文献

- 1、中华人民共和国建材行业标准，JC/T 721-2006，水泥颗粒级配测定方法 激光法
- 2、张福根，等，粒径测量及用于磨料的各种颗粒仪器，中国粉体技术，2000，（1）
- 3、乔龄山，水泥的最佳颗粒分布及其评价方法，水泥，2001（8）
- 4、张福根，曾学敏，粒度检测与控制技术的应用对水泥工业节能降耗的贡献，2007 中国国际水泥峰会论文集，P113