

## 基于数字显微图像处理的水泥粒度分析\*

蓝章礼<sup>1</sup>, 梁爽<sup>1</sup>, 田文玉<sup>2</sup>

(1 重庆交通大学计算机与信息学院, 重庆 400074; 2 重庆交通大学学报(自然科学版)编辑部, 重庆 400074)

**摘要** 水泥颗粒形状特征对混凝土稳定性、强度和持久性有重要影响。提出利用背景去除、广义结构元和扩展形态学滤波等数字图像处理方法对水泥微粒的数字显微图像进行分析, 新的方法能快速分析水泥颗粒的形状和粒径的分布, 与激光分析方法的一致性较好, 并且能比传统方法提供更多的微粒形状信息。

**关键词** 水泥颗粒 显微图像 形状学滤波 形状分析 粒径分析

**中图分类号**: TB302.1; TP751.1

**文献标识码**: A

## Particle Analysis of Cement Based on Digital Microscopic Image Processing

LAN Zhangli<sup>1</sup>, LIANG Shuang<sup>1</sup>, TIAN Wenyu<sup>2</sup>

(1 School of Computer and Information, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074; 2 Editorial Department of Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), Chongqing 400074)

**Abstract** The particle shape characteristics of the cement used can significantly affect the stability, strength, and durability of the concrete produced. Digital image processing techniques which include background wiping, generalized structuring elements and expanded morphological filtering are used to analyze the digital microscopic image of cement. The novel method can analyze the particle shape and size distribution fast. The strong correlation between the proposed method and laser analyzer is achieved, and it yields more information about the particle shape than the traditional method.

**Key words** cement particle, microscopic image, morphological filtering, shape analysis, size analysis

材料粒度分析是了解材料特性的重要途径, 其中粒径分析是最常见的分析内容, 因而各种颗粒粒径的测量方法得以研究实现, 如筛分法、沉降法、显微镜法、马尔文激光粒度测量、库尔特、全自动颗粒粒径分析、颗粒计数器分析、电感应法等。筛分法和马尔文激光粒度测量法是比较常用的两种粒径测量手段。然而, 实践结果表明, 这两种粒径测量方式所得的结果存在巨大差异, 测量的可比性受到质疑<sup>[1]</sup>。而目前国内主要进行颗粒粒度的应用与实验比较研究<sup>[2-4]</sup>, 对微粒分析的方法研究较少。

为使粒度分析的结果更为直观, 同时增加对微粒形状、表面积、纹理等情况的分析, 一些学者开展了重要的研究工作, 如 Masad Eyad 等用 X 射线的 CT 成像图片进行了微粒表面特征的分析<sup>[5]</sup>; Garboczi E J 等不仅用 X 射线的 CT 成像图分析了颗粒形状, 还生成了 3 维水泥颗粒模拟图像<sup>[6]</sup>; Kwan A K H 等则利用数字图像处理方法进行了粗糙颗粒的形状和尺寸分布的研究<sup>[7,8]</sup>。这些方法对微粒的分析和研究起到了重要作用, 但用已有研究对数字图像进行处理时, 在去干扰、形态学滤波方法的设计和应用上还不够深入。本文通过分析水泥微粒的数字显微图像特征, 采用背景去除法滤掉干扰图像, 提出广义结构元和扩展形态学滤波, 用二值化、宽直径与面积比等方法分析得到水泥颗粒的形状、大小、分布、表面积、体积等参数, 并与传统方法进行了比较。

## 1 去除背景图像干扰

在显微图像中, 由于显微镜目镜、物镜和光通路上会存在一些固定的干扰, 如镜片上的灰尘、划痕等, 这些干扰会在最终的照片中形成固定的干扰图像。图 1 是两幅放大倍数相同且处于同一位置的两张显微照片局部, 可以看出这两幅图片中有许多地方存在完全一样的阴影, 这些阴影明显是背景干扰的结果, 如果不对干扰背景加以去除, 必然会严重影响分析结果的正确性。

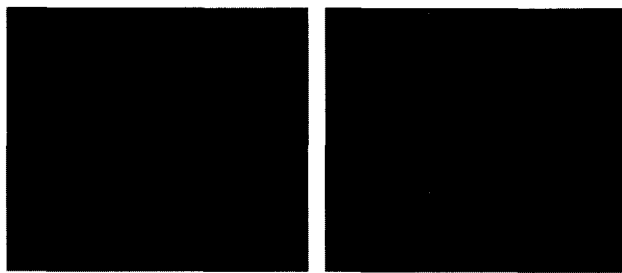


图 1 两幅有相同干扰的微粒图像

Fig. 1 Two particle microscopic images with same disturbance

由于上述干扰是固定的, 而水泥微粒是随机分布的, 因此可以利用其位置特点进行去除。在去除干扰背景时, 一是拍摄照片时要使显微镜的放大倍数保持恒定, 二是使用的光源以及数

\* 重庆市科技攻关项目(CSTC, 2008AC6099); 重庆市自然科学基金(CSTC, 2006BB2409, 2007BB2438); 重庆交通大学青年骨干教师基金资助

蓝章礼: 男, 1973 年生, 副教授, 博士, 主要研究方向为桥梁健康监测、数字图像处理与模式识别

码照相机的光圈、快门、感光度要保持恒定。在上述前提下,固定的干扰源形成的图像就会出现在每张照片的同一位置,且大小、亮度不变。

在图像样本比较少且微粒分布比较稀疏时,可利用图像相减去除固定干扰。由于数码相机的参数保持不变,且光源恒定,因此每两幅图像的相同部分(干扰背景)应该完全一致,对应相减后应为0,呈现的视觉效果为黑色。而实际存在的水泥颗粒是随机分布的,在稀疏分布时极不容易重合,所以相减后不为0。图2为图1中两幅图像对应相减的结果,从图2可以看出,相减后图中的干扰成分基本被去除,而水泥微粒能被很好地保留。

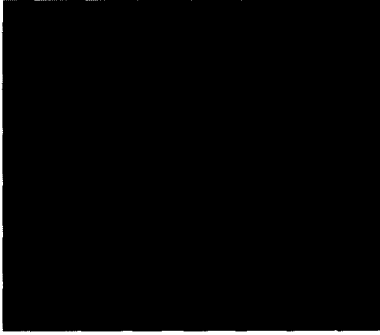


图2 去除干扰背景后的微粒图像

Fig. 2 Particle image after disturbance wiping

在图像样本比较多时,可利用多张图像相加然后求平均值。由于每幅图像中的干扰背景固定,平均后的图像干扰始终保持不变,而微粒分布是随机的,多张图片平均后的结果接近于背景,因此最后获得的图像即为干扰背景的图像。在分析每张图像时,先用它与干扰背景图像相减,即可获得每张图像中实际的微粒图像。若令处理前的图像为 $B$ ,处理后的图像为 $P$ ,则处理前后的图片应满足:

$$P_i = B_i - \bar{B} = B_i - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n B_k (i \in \{1, 2, 3, \dots, n\}) \quad (1)$$

## 2 形态学滤波

在背景去除后的图片中还存在一些明显的问题,主要表现在:第一,在显微图像中,光的衍射不可避免。因衍射是伴随微粒存在的,是动态的干扰,去除背景后衍射依然存在,这在图2中可以看出;第二,背景去除后的图片还存在一些不规则的随机干扰纹,这些干扰斑纹的随机性决定其不能通过去除干扰背景的方法来过滤;第三,由于照明光线的影响,一些微粒中心部位未被照亮,因而造成图像中的微粒中部出现黑点。

要滤除上述噪声,在不影响微粒本身形状的情况下,采用传统的方法无论在空间域还是在频率域使用图像增强均难以找到合适的滤波方法。传统的数字形态学方法只能处理二值图像和灰度图像,且灰度图像的滤波效果不理想,而去除背景干扰后得到的图像为彩色图像,因此采用传统的形态学方法难以完成滤波。本文提出采用广义结构元与扩展形态学滤波的方法进行。

### 2.1 广义结构元与扩展形态学滤波

广义结构元(Generalized structuring element, 简称GS)是一种收集图像信息的“探针”,具有如下特征中的1种或多种:一

定的几何形状,如圆形、正方形、十字形、有向线段等的集合,或者面积与宽直径之比满足一定的范围;一定的色彩空间,如色调、RGB值、色差分布等的集合;一定的亮度变化,如亮中心往四周的扩散或亮边缘往中心的收缩等的集合;一定的色彩变化,如黄色到黑色的过渡,暖色向冷色的过渡等的集合。

利用广义结构元进行的形态学滤波,其基本思想是用一定形态、颜色、亮度的结构元素去度量和提取图像中的对应部件以达到对图像分析和识别的目的。这是对利用传统结构元进行传统形态学滤波的扩展,因而叫作扩展形态学滤波。

### 2.2 利用广义结构元对微粒图像进行滤波

分析水泥颗粒图像,有如下特征:

颜色特征:水泥颗粒图像偏黄色,即RGB值中 $R$ 和 $G$ 的值较大,而 $B$ 值较小。更好的方法是将RGB转换到 $YC_bC_b$ 空间,用红色色差 $C_r$ 和蓝色色差 $C_b$ 进行判断,这样能降低图像中不同位置不同亮度的干扰,因此只需设定 $C_r$ 和 $C_b$ 的阈值范围。RGB转换到 $YC_bC_b$ 空间的方法如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_r \\ C_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.257 & 0.504 & 0.098 \\ 0.439 & -0.368 & -0.071 \\ -0.148 & -0.291 & 0.439 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} \quad (2)$$

亮度特征:水泥颗粒图像亮度较高,有的由中心至边缘亮度值逐渐降低,有的由中心至边缘亮度值逐渐增加,中心至边缘的梯度值较大。

形状特征:水泥颗粒呈圆形或接近于圆形,如果是一个标准的圆形,则微粒的直径 $d$ 与其面积 $S$ 之间的比例关系 $P$ 满足式(3)。

$$P = \frac{d}{S} = \frac{2\sqrt{\frac{S}{\pi}}}{S} = \frac{2}{\pi S} \sqrt{\pi S} \quad (3)$$

### 2.3 广义结构元设计与形态学滤波

由颜色特征设立颜色结构元为 $S_c$ :

$$S_c: T_{r1} \leq C_r \leq T_{r2} \& \& T_{b1} \leq C_b \leq T_{b2} \quad (4)$$

其中 $T_{r1}$ 和 $T_{r2}$ ,  $T_{b1}$ 和 $T_{b2}$ 分别表示红色色差和蓝色色差的上下阈值。

由亮度分布特征设立亮度梯度结构元为 $S_b$ :

$$S_b = |f(x, y) - f(x+1, y+1)| + |f(x+1, y) - f(x, y+1)| \geq T_G \quad (5)$$

其中梯度运算采用Robert算子, $T_G$ 为梯度阈值。

由形状特征设计形状结构元为 $S_m$ 。设 $D$ 为每个微粒的宽直径,即一个微粒中任意两点间的最大距离,则由于水泥颗粒接近于圆形,那么宽直径 $D$ 只略大于利用式(3)求得的 $P$ ,因此可设定 $D$ 的一个阈值。而其它干扰噪声基本为条纹,因此宽直径与面积之比远大于 $P$ ,由此可设:

$$S_m: \frac{D}{S} \leq 3P = \frac{6}{\pi S} \sqrt{\pi S} \quad (6)$$

综合以上特征,广义结构元GS设立为:

$$\begin{aligned} GS &= S_c \& \& S_b \& \& S_m \\ &= (T_{r1} \leq C_r \leq T_{r2} \& \& T_{b1} \leq C_b \leq T_{b2}) \& \& \\ &\quad (|f(x, y) - f(x+1, y+1)| + |f(x+1, y) - f(x, y+1)| \geq T_G) \\ &\quad \& \& (\frac{D}{S} \leq \frac{6}{\pi S} \sqrt{\pi S}) \end{aligned} \quad (7)$$

应用式(7)所设计的结构元对图2做微粒提取操作:

$$B \oslash GS = (((B \oslash S_1) \oslash S_2) \oslash S_3) \quad (8)$$

## 2.4 图像二值化

利用广义结构元与扩展形状学滤波后,对满足式(8)的图像像素设置为白色,表示微粒,对不满足式(8)的图像像素设置为黑色,表示背景,这样就可以得到二值化的微粒显微图像。如图3所示。

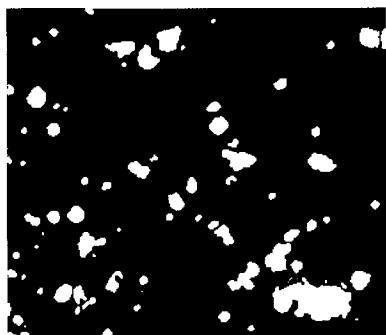


图3 二值化后的水泥颗粒图像

Fig. 3 Image of cement particle after binarization

## 3 粒度分析

在得到二值化后的水泥颗粒图像后就可以按颗粒的大小和形状统计各种颗粒的个数、形状、直径、表面积和体积。

### 3.1 比例标定

从最终获得的数字图像只能直接得到颗粒的像素大小,因而必须将像素转换为微米。最好的方法是拍摄1张摆放实际比例尺的参考图片,在显微镜放大倍数和照相机焦距不变的情况下,每张图片的像素与微米比相同。通过参考图片像素值的大小和实际微米值的大小,可以得到像素微米比,在对二值化图片分析时就能方便地将像素值转换为微米值。

### 3.2 形状和粒径分布

颗粒越接近于球形,其图像越接近于圆,因而其宽径与面积之比就越接近于式(3)的结果。通过分析各微粒的宽径与面积的关系,可以分析得到水泥颗粒的大致形状分布。同时可对每种粒径的颗粒进行数学统计,得到粒径大小的分布情况。

### 3.3 表面积、体积、比表面积等的运算

根据颗粒形状和粒径分布,可对各种形状、大小的颗粒进行表面积、体积、质量、比表面积等参数的运算。其中可将宽径 $D$ 接近式(3)求得的 $P$ 的颗粒拟合为球体进行表面积和体积的运算,其它颗粒可以拟合成柱体,或者仍然拟合为球体但进行相应的比例参数修正。

## 4 对比实验

为验证利用本文方法处理的结果,应用激光粒度分析仪和本文方法进行了比较。因激光粒度仪把微粒处理为球形进行运算,因此实验时对各个微粒均按球体进行处理。

图4是用本文方法和激光精度分析仪对同一水泥样本进行处理的结果比较图。

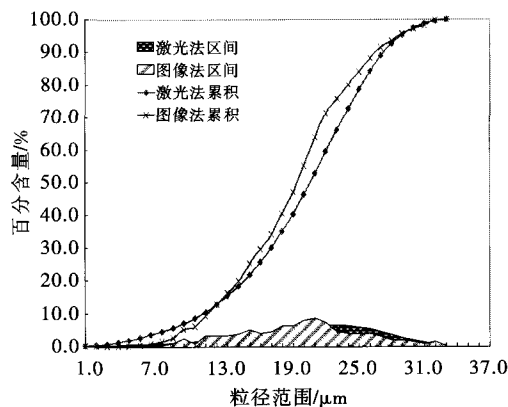


图4 图像法与激光法结果比较

Fig. 4 Comparing result of laser method and image method

结果表明,两种方法具备一致性。相比而言,本文采用的图像处理的结果曲线不如激光法光滑,这主要是因图像处理的方法时样本集较少,样本颗粒分布存在随机性造成的。

## 5 结论

利用数字显微图像对水泥粒度进行分析的方法不仅能较好地得到水泥粒径的分布情况,还能对颗粒的形状分布进行分析,分析的结果与激光分析方法基本一致,而且比较直观。本文提出背景去除、广义结构元和扩展形态学滤波的方法较好地处理了图片中的干扰因素,为解决材料微粒的分析提供了新的方法。

## 参考文献

- 李文凯,吴玉新,黄志民,等. 激光粒度分析和筛分法测粒径分布的比较. 中国粉体技术,2007,13(5):10
- 徐喜庆,刘军,秦春光,等. 应用激光粒度分析仪测定油田碎屑岩粒度分布. 中国粉体技术,2007,13(6):15
- 董银宽,张晋栋,杜海荣. 氧化铝和氢氧化铝颗粒分析方法. 理化检验-物理分册,2006,41(6):298
- 胡汉祥,丘克强. 激光粒度分析结果在形貌分析中的应用. 理化检验-物理分册,2007,42(2):72
- Masad Eyad, Saadeh Shadi, Al-Rousan Taleb, et al. Computations of particle surface characteristics using optical and X-ray CT images. Computat Mater Sci,2005,34(4):406
- Garboczi E J, Bullard J W. Shape analysis of a reference cement. Cem Concr Res,2004,34(10):1933
- Kwan A K H, Mora C F, Chan H C. Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing. Cem Concr Res,1999,29(9):1403
- Mora C F, Kwan A K H, Chan H C. Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing. Cem Concr Res,1998,28(6):921

(责任编辑 林 芳)