

文章编号:1007-9629(2011)06-0808-06

基于 CT 图像的粗集料颗粒接触特性细观尺度研究

段跃华^{1,2}, 张肖宁¹, 李红杰¹, 苑苗苗¹, 张顺先¹, 王 辉¹

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640;

2. 广东华路交通科技有限公司, 广东 广州 510420)

摘要: 采用工业 CT 获取沥青混合料断面扫描图像, 利用数字图像处理方法将粗集料从图像中分离, 并解决了颗粒粘连问题, 使粗集料颗粒成为单独个体. 确立了粗集料颗粒之间接触的判定准则, 并设计 5 像素×5 像素大小的窗格沿颗粒边缘进行接触搜索. 对 640 张断面图像遍历处理后获得的数据进行定性分析, 尝试建立了接触度指标 C . 采用 4 种概率密度分布函数对 C 数据进行拟合, 并通过 Kolmogorov-Smirnov 及 Chi-square 2 种方法复合检验, 最终选定了对数正态分布来描述沥青混合料内部粗集料颗粒接触特性.

关键词: 沥青混合料; 接触度; 粘连; 概率密度分布函数; 假设检验

中图分类号: TU528.42

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2011.06.017

Research on Contact Characteristics of Coarse Aggregates Particles within Meso-scale by CT Images

DUAN Yue-hua^{1,2}, ZHANG Xiao-ning¹, LI Hong-jie¹, YUAN Miao-miao¹,
ZHANG Shun-xian¹, WANG Hui¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangdong Hualu Communications Technology Co., Ltd., Guangzhou 510420, China)

Abstract: The industrial CT was used for getting the cross-section images of asphalt mixture. Based on digital image processing methods, the coarse aggregates were extracted from the images, and the adhesion problem of coarse aggregates particles was resolved successfully. The judgment criterion of contact between particles was established, and a 5 pixel×5 pixel size window was designed for contact searching along the particle boundary. After total 640 images were searched by these procedures, the data were analyzed qualitatively, and a contact degree indicator(C) was tried to establish. Four different probability density distribution functions were used to fit C data, and the validity of fit was tested by Kolmogorov-Smirnov and Chi-square methods. Finally, the lognormal distribution was determined for describing the contact characteristics of coarse aggregates particles.

Key words: asphalt mixture; contact degree; adhesion; probability density distribution function; hypothesis testing

随着交通量的不断增大,道路拥堵及超载超限现象日益突出,沥青路面早期损害问题严重,其中尤

以车辙病害为甚. 国内外道路科研工作者为此进行了大量的研究工作,除了采用各类改性沥青加强混

收稿日期:2010-08-27; 修订日期:2011-01-12

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAG07B00);国家自然科学基金重点项目(51038004);西部交通建设科技项目(2009318000078)

第一作者:段跃华(1978—),男,湖南湘潭人,广东华路交通科技有限公司工程师,博士. E-mail:dyh_scut@yahoo.com.cn

通信作者:张肖宁(1951—),男,黑龙江人,华南理工大学教授,博士生导师,博士. E-mail:prozx@163.com

合料路用性能,还出现了 SMA,OGFC 等嵌挤型沥青混合料^[1-2],以及 CAVF 等以粗集料孔隙填充为设计理念的沥青混合料设计方法^[3],前者是从原材料角度出发,后者则以粗集料充分嵌挤形成骨架结构承受荷载为核心思想。

沥青混合料中粗集料颗粒接触程度是判断粗集料是否形成骨架结构的有效依据。《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)判断骨架形成与否主要依靠 VCA_{mix} 和 VCA_{drc} 参数,其中 VCA_{mix} 表示粗集料间隙率, VCA_{drc} 表示粗集料在捣实状态下的间隙率。判断粗集料形成骨架结构的条件是: $VCA_{mix} \leq VCA_{drc}$ 。然而参数计算中粗集料间隙体积是通过混合料毛体积密度及质量间接获得的,计算过程也没有考虑吸附沥青的影响,试验过程完全人工操作,试验结果往往误差较大,从而不能完全真实地评价沥青混合料的路用性能。

文献[4]用彩色石料成型试件,通过切割断面并以数码相机拍摄图像,再采用数字图像处理手段来直接获取 VCA_{mix} 数值。文献[5]建立了表征粗集料颗粒接触特性的量化指标——接触对,对车辙板试件的 72 幅切片图像进行了分析,此类方法均为利用数码相机结合数字图像处理手段对试件切割断面进行分析。

工业 CT 的出现使得对沥青混合料内部结构进行无损检测从技术上成为可能,国内外学者也尝试利用这种技术手段对沥青混合料进行研究,其中对粗集料的研究主要集中于形态表征等方面^[6-8]。

从工业 CT 扫描获得的沥青混合料断面图像(图 1)可以看出,利用其丰富的断层图像信息及较高的图像分辨率,可以对断面内部的颗粒接触或者接触形式予以数字化描述,同时可以结合高效的数字图像处理手段对整个试件不同位置的几何信息进

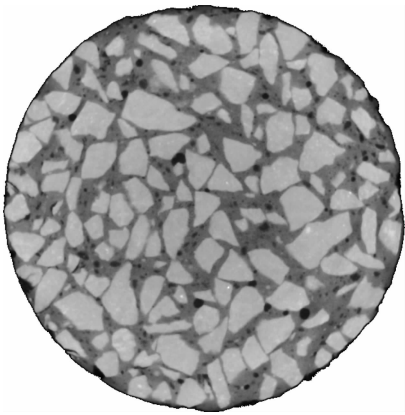


图 1 CT 扫描断面图像
Fig. 1 CT scan cross-section image

行汇总统计分析。本文尝试利用 CT 扫描断面图像从细观尺度对沥青混合料内部粗集料颗粒接触特性进行研究。

1 沥青混合料 CT 扫描断面图像获取及内部材质区分

利用马歇尔击实法制作 AC-13C 沥青混合料试件,级配采用《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中值,沥青采用重交 70[#] 普通沥青。为了提高图像对比度,采用珍珠岩轻质集料经过准确的密度测试后等体积置换细集料部分,如此处理后图像的质量得到大幅改善,集料、胶浆及孔隙 3 类物质灰度值差异明显,具备良好的图像分割基础。采用德国 YXLON 公司组配 225KV 工业 CT 扫描及重建。扫描完成后共获得 640 张有效断面图像,其大小为 1 024 像素×1 024 像素,XY 平面及 Z 轴方向的像素大小均为 0.11 mm。

以最大类间方差法(OTSU)为核心步骤的数字图像处理技术运用 2 次二分类的策略较好地 will 将断面图像分割为粗集料、胶浆、孔隙及背景 4 类物质,图 2 为分割效果图,其中黑色部分代表粗集料。

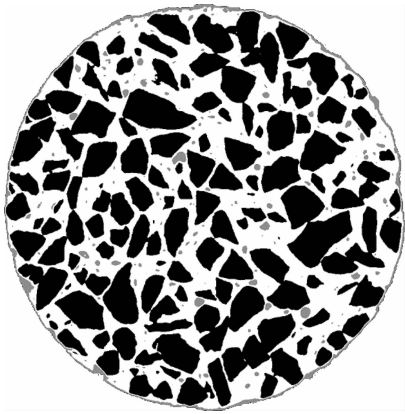


图 2 分割效果图
Fig. 2 Segmentation result map

2 粗集料颗粒粘连问题处理

2.1 粘连成因分析

仔细观察图 2 可以发现,在对原 CT 扫描断面图像进行分割并将粗集料提取出来后,部分粗集料颗粒出现了粘连现象,如图 3 所示。

粘连现象的成因非常复杂,概括说来主要是受到原始图像质量的限制,而原始图像质量又主要受工业 CT 密度分辨率、空间分辨率及伪像等几个方面的综合影响;此外,对于工业 CT 这样的成像系统,一个理想的点状物体的图像都会扩散成为一个



图3 粘连现象
Fig. 3 Adhesion problem

分布(点扩散函数),其结果是小细节对应的图像尺寸可能变大,使得边界模糊不清,也会降低图像对比度;同时成像过程不可避免会出现噪声,即使电噪声和散射噪声能降到最小,扫描射线(X射线)本身的量子统计噪声也是无法避免的。在颗粒接触紧密的部位,颗粒与颗粒之间的间隔物质的密度对比度差异又并非十分显著,加上CT扫描射线的能量限制等因素,无法将其边界完全区分清楚。上述表明,粘连现象的出现是不能完全避免的。

2.2 粘连处理手段

不同颗粒粘连在一起,无法进行单一个体分析,必须通过数字图像处理手段将其分割开来。混凝土、岩土领域中类似问题的解决方法是利用PHOTO-SHOP、IMAGEPRO等图像处理软件手工逐点对单张图片进行分割^[9],但这样不仅效率较低,且在颗粒众多的情况下容易产生遗漏,同时对于CT扫描断面图需要批处理数百张图片而言显然也是不切实际的。

在复杂的细胞学和组织学显微图像中,由于细胞会出现交叠及聚团现象,使得显微图像也会出现类似的粘连问题,给后续研究带来困难。文献[10]提出了命名为MSD(基于形态学的多尺度分解技术)的算法来处理粘连问题,此算法共分为两大步骤:第一步TOPDOWN,即不断利用腐蚀函数处理原图,直至图像的单个个体完全消失,并记录每一步结果;第二步BOTTOMUP,即在原来腐蚀图像的基础上不断利用膨胀函数逆向重构,重构的过程中利用基于分水岭算法建立不同个体间的边界,使得膨胀过程中每个个体都不会超过预先设立的边界,最终将粘连的细胞较好地分割开来成为独立的个体。

本文借鉴此算法的思想,结合沥青混合料CT扫描断面图像的具体特点,尝试编程实现分割过程,通过不断调整参数,最终获得了较好的粗集料粘连颗粒分离效果。

3 接触判定及统计分析

3.1 接触判定方法

可以认为,如果粗集料颗粒完全接触,颗粒图像边缘应该是极为接近的,这里涉及到一个沥青膜厚度的问题。按照常理,如果沥青混合料搅拌均匀,则粗集料颗粒表面应该都能完全覆盖上一层沥青膜。有研究者^[11]利用扫描电镜(SEM)对沥青膜厚度进行了专门研究,结果表明:将沥青膜平均厚度认作为 $8\sim 14\mu\text{m}$ 的传统观点过于笼统,与实际观测结果不符。覆盖粗集料颗粒的沥青膜并非单一沥青膜而是沥青胶浆膜,其厚度并不均匀,其形态也没有固定规律,并且厚度大于 $100\mu\text{m}$ 。按照这个结论笔者假设:粗集料颗粒均被沥青胶浆膜覆盖。如果2个临近颗粒完全接触,根据图像实际分辨率大小,其颗粒边缘应该相距不超过2个像素。

接触判定流程如下:设计大小为5像素 $\times$ 5像素大小的正方形窗格,提取单个颗粒边缘作为搜索路径,进行全周长搜索,代表颗粒边缘的像素点始终位于窗格中心位置。窗格搜索示意图如图4所示。搜索过程中若发现在窗格范围内有其余颗粒的像素单位进入窗格,则视为有接触发生,即为一个有效接触点出现。编写程序记录每个断面扫描图像内所有有效接触点个数,及每个有效接触点的接触像素数,同时设定以下约束条件:窗格内属于颗粒自身的像素不统计;搜索过程中窗格移动时搜索到的重复像素点不可累计统计。

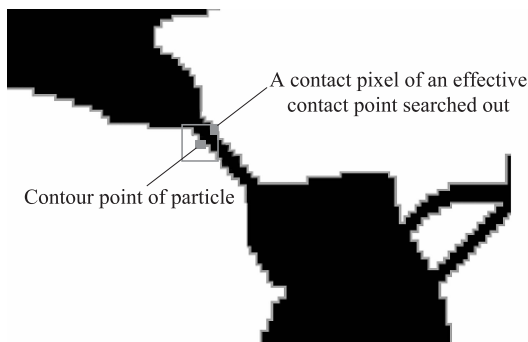


图4 接触搜索示意图
Fig. 4 Contact search diagram

3.2 接触程度统计分析

根据上文确定的方法编写程序,对前面获取的640张断面图像遍历处理,每张图像获取每个颗粒的周长、面积及接触像素数等数据。采用胞元数组形式存贮结果,以便分类调用。计算过程采用普通PC机处理,总计算时间为40h左右。

计算完成后对数据分类汇总,结果显示:640个

断面共搜索到 16 984 个有效接触点,单个接触点的接触像素最小值为 1,最大值为 145,分别对应为 0.11 mm 及 15.95 mm,最大值与此档混合料粗集料最大粒径基本契合,这验证了搜索过程的有效性。

断面内有效接触点个数变化情况如图 5 所示。由图 5 可以看出,试件上端 6.5 mm 及下端 11.0 mm 左右范围的有效接触点个数明显多于中间部位。因试件由常规马歇尔击实法成型,故可以推断在落锤击实下试件顶部及底部的颗粒接触更为紧密。而断面颗粒数则没有明显的规律可言,如图 6 所示。

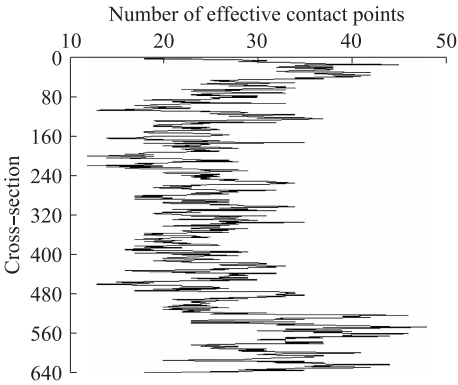


图 5 断面有效接触点个数统计图

Fig. 5 Cross-section effective contact points statistic chart

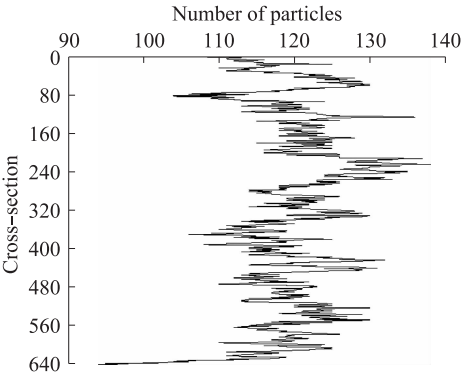


图 6 断面颗粒数统计图

Fig. 6 Cross-section particles number statistic chart

对 640 个断面接触点以 10 个像素为间距的区间分段统计其频数并绘制柱状图如图 7 所示。从图 7 可以看出,接触点的像素分布基本符合指数分布的形式,其分布区间集中在 0~20 个像素之间,换算成实际单位应该在 2.2 mm 以内,其累计分布频率为 69.5%。这说明:AC 类悬浮密实结构沥青混合料内部粗集料颗粒接触大都以“点接触”形式存在。可以设想,如果粗集料颗粒棱角形及针片状等形态参数良好,且沥青混合料级配合适能够充分形成嵌挤,则粗集料颗粒间的接触应该普遍以“面接触”的形式存在,反映在二维断面图像上应该是接触像素数的

普遍提高。

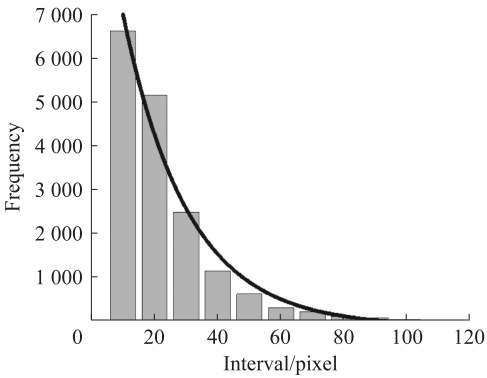


图 7 接触点频数柱状图

Fig. 7 Contact points frequency histogram

3.3 接触程度定量指标建立

单纯统计接触像素数并没有太大实际意义,只有结合颗粒分布形态及几何信息才能客观评定颗粒接触程度。为此,笔者尝试建立基于 CT 扫描断面图像的接触度指标 C ,即将每个断面的颗粒总数汇总(G_{total}),然后将搜索到的接触像素总数(N_{pixels})与其进行比较:

$$C = \frac{N_{pixels}}{G_{total}} \tag{1}$$

C 数据个数与计划处理的扫描断面图片数吻合,即 640 张扫描断面图共可获取 640 个 C 值。

绘制变量 C 的频数分布直方图如图 8 所示。根据直方图的特点,采用 4 种广泛使用的概率密度分布函数——对数正态(lognormal)分布函数、威布尔(Weibull)分布函数、伽马(Gamma)分布函数、正态(normal)分布函数对 C 数据进行拟合。4 种概率密度分布函数的表达式见式(2)~(5),其中 b, c 为相关分布函数的形态参数。

对数正态分布函数:

$$y = \frac{1}{xc} \frac{\exp \left[\frac{-(\ln x - b)^2}{2c^2} \right]}{\sqrt{2\pi}} \tag{2}$$

威布尔分布函数:

$$y = \frac{c}{b} \left(\frac{x}{b} \right)^{c-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{b} \right)^c \right] \tag{3}$$

伽马(Γ)分布函数:

$$y = \frac{b^c}{\Gamma(c)} x^{c-1} e^{-bx} \tag{4}$$

正态分布函数:

$$y = \frac{1}{c} \frac{\exp \left[\frac{-(x - b)^2}{2c^2} \right]}{\sqrt{2\pi}} \tag{5}$$

从图 8 很难凭肉眼直观判断究竟哪个概率密度分布函数拟合效果最优,故对 4 种分布拟合模型使

用 Kolmogorov-Smirnov(KS)及 Chi-square(卡方)2 种方法进行拟合优度复合检验,显著性水平取 0.05. 基本步骤为:先判断选定的概率密度分布函数能否

通过上述 2 种方法的检验,对于通过的分布函数类型比较 KS 检验及卡方检验的统计值,统计值越小表明该分布的拟合效果越好. 检验结果见表 1.

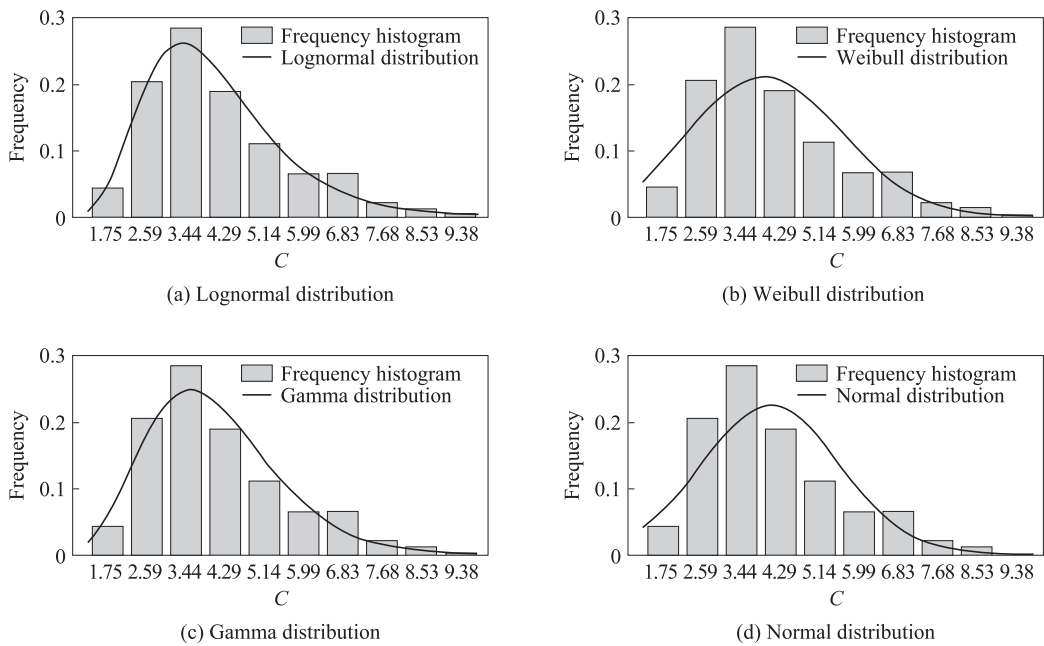


图 8 C 数据的概率密度分布函数拟合效果
Fig. 8 Fitting effect of probability density distribution functions for data C

表 1 参数估计值及 Kolmogorov-Smirnov 检验、Chi-square 检验统计值
Table 1 Parameters estimation and Kolmogorov-Smirnov test and Chi-square test results

Variable	Probability density distribution function	Parameter estimating value		Kolmogorov-Smirnov test			Chi-square test		
		<i>b</i>	<i>c</i>	<i>h</i>	<i>p</i>	Statistic value	<i>h</i>	<i>p</i>	Statistic value
<i>C</i>	Lognormal distribution	1.343	0.357	0	0.177 2	0.043 2	0	0.291 6	47.581
	Weibull distribution	4.586	2.863	1	0.000 0	0.102 4	1	0.000 0	149.162
	Gamma distribution	7.984	0.512	1	0.005 7	0.067 4	1	0.044 9	65.786
	Normal distribution	4.084	1.501	1	0.000 0	0.113 7	1	0.000 0	160.193

Note:*h* is 0 means passing the corresponding hypothesis testing; *h* is 1 means not passing corresponding hypothesis testing; The significance level is 0.05 all.

从表 1 可以看出,只有对数正态分布在显著性水平取 0.05 时通过了 2 种方法的检验,其 *p* 值分别为 0.177 2 及 0.291 6,*b*(随机变量 $\ln x$ 的平均数)为 1.343,*c*(随机变量 $\ln x$ 的标准差)为 0.357. 上述表明,变量 *C* 的原始数据具有明显的统计意义,而从表达式来看,其物理意义也是比较明确的,即可以解读为断面内单个颗粒的平均接触像素数,这在一定程度上定量描述了沥青混合料内粗集料颗粒的接触程度. 当然,此参数的适用性还需要通过扫描不同沥青混合料级配类型的数据并进行统计分析等工作来进一步验证.

本研究利用工业 CT 可以无损获取沥青混合料

内部空间结构的特殊优势,对于粗集料颗粒接触特性进行了数字化描述并尝试建立了相关的定量评价指标,相对于传统试验而言,避免了人工操作试验误差大,及间接测定体积参数方法无法完全反映混合料真实体积组成的局限性,对于沥青混合料的设计有较好的指导意义.

4 结论

(1)利用工业 CT 扫描获取的断面图像并辅助有效的数字图像处理手段可以在细观尺度下对沥青混合料内部粗集料颗粒接触情况进行直观科学分析.

(2)马歇尔击实成型试件上下一定范围的有效接触点数明显多于试件中部,粗集料颗粒接触更为紧密,而断面颗粒数则没有明显的规律。

(3)AC 类悬浮密实结构沥青混合料内部粗集料颗粒接触多以“点接触”形式存在,“面接触”较少,其接触点的像素分布基本符合指数分布的形式,分布区间集中在 0~20 个像素之间,换算成实际单位应该在 2.2 mm 以内。

(4)尝试建立了细观尺度下的接触度指标 C ,并据此对沥青混合料内部粗集料颗粒接触程度进行了定量分析。采用 4 种概率密度分布函数对 C 数据进行拟合,通过 Kolmogorov-Smirnov 及 Chi-square 2 种方法复合验证,证明以对数正态分布函数来描述 C 数据分布规律最合适。

参考文献:

[1] 秦永春,黄颂昌,徐剑,等. 基于表面活性剂的温拌 SMA 混合料性能[J]. 建筑材料学报,2010,13(1):32-35.
QIN Yong-chun, HUANG Song-chang, XU Jian, et al. Performance of SMA mixture based on evotherm-DAT warm mix asphalt technology[J]. Journal of Building Materials,2010,13(1):32-35. (in Chinese)

[2] 房建果,郭忠印,王松根. 大粒径透水性沥青混合料水稳定性能对比研究[J]. 建筑材料学报,2009,12(4):493-496.
FANG Jian-guo, GUO Zhong-yin, WANG Song-gen. Comparative study on moisture susceptibility of large stone porous asphalt mixtures[J]. Journal of Building Materials,2009,12(4):493-496. (in Chinese)

[3] 张肖宁,王绍怀,吴旷怀,等. 沥青混合料组成设计的 CAVF 法[J]. 公路,2001(12):17-20.
ZHANG Xiao-ning, WANG Shao-huai, WU Kuang-huai, et al. CAVF method of asphalt mixture design[J]. Highway, 2001(12):17-20. (in Chinese)

[4] 徐科,张肖宁,王端宜. 基于数字图像处理技术的 VCA_{max} 量测方法[J]. 公路,2005(11):151-154.

XU Ke, ZHANG Xiao-ning, WANG Duan-yi. A measurement method of percent voids in coarse mineral aggregates in asphalt mixtures based on digital image processing technique [J]. Highway,2005(11):151-154. (in Chinese)

[5] 魏鸿,英红,凌天清. 沥青混合料集料接触特性切片图像评价方法[J]. 土木建筑与环境工程,2010,32(3):69-74.
WEI Hong, YING Hong, LING Tian-qing. Aggregates contact characteristics evaluation of asphalt mixtures by analyzing cut images[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering,2010,32(3):69-74. (in Chinese)

[6] MASAD M, SAADEH S, AL-ROUSAN T, et al. Computations of particle surface characteristics using optical and X-ray CT images[J]. Computational Materials Science,2005,34:406-424.

[7] WANG L B, FROST J D, LAI J S. Three dimensional digital representation of granular material microstructure from X-ray tomography imaging[J]. Journal of Computing in Civil Engineering,2004,18(1):28-35.

[8] GARBOCZI E J. Three-dimensional mathematical analysis of particle shape using X-ray tomography and spherical harmonics: Application to aggregates used in concrete[J]. Cem Concr Res,2002,32(10):1621-1638.

[9] 徐文杰,岳中琦,胡瑞林. 基于数字图像的土、岩和混凝土内部结构定量分析和力学数值计算的研究进展[J]. 工程地质学报,2007,15(3):289-313.
XU Wen-jie, YUE Zhong-qi, HU Rui-lin. Current status of digital image based quantitative analysis of internal structures of soils, rocks and concretes and associated numerical simulation[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(3):289-313. (in Chinese)

[10] SCHMITT O, HASSE M. Morpho-logical multiscale decomposition of connected regions with emphasis on cell clusters [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2009, 113(2):188-201.

[11] ELSEIFI M A, AL-QADI I L, YANG Shih-hsien, et al. Validity of asphalt binder film thickness concept in hot-mix asphalt [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2057:37-45.

文章编号:1007-9629(2011)06-0814-05

污泥防辐射功能集料的制备及性能

丁庆军¹, 杨 堃¹, 黄修林², 孙 华¹, 胡曙光¹

(1. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 湖北大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430062)

摘要: 基于重金属元素对高能射线具有优良屏蔽性能的特点,以含 10%(质量分数,下同)钡元素的某化工厂污泥为原材料,辅以高岭土、分析纯化学物质为校正材料,通过对生料的配合比优化设计,在一定的煅烧制度下制备出了重金属离子溶出率小、射线屏蔽性能较好的功能集料. 试验结果表明:该集料的表观密度达 $2.95 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,吸水率达 1.57%,抗压强度达 82 MPa, Ba 离子浸出率低至 1 mg/L,线性衰减系数达 0.2439 cm^{-1} ,可作为集料替代天然重晶石集料制备防辐射混凝土.

关键词: 污泥; 功能集料; 物理性能; 屏蔽性能

中图分类号: TU528.041

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2011.06.018

Preparation and Properties of Radiation Shielding Functional Aggregate Based on Sludge

DING Qing-jun¹, YANG Kun¹, HUANG Xiu-lin², SUN Hua¹, HU Shu-guang¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. College of Materials Science and Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China)

Abstract: Considering that heavy metal elements possess the characteristic of high-energy radiation shielding, chemical sludge containing 10%(by mass) barium was used as raw material. Meanwhile, kaolin and analytically pure chemicals were supplemented as correction materials. Through optimization design of the mix proportion of raw material, the functional aggregate with low heavy metal release rate and excellent performance of radiation shielding was prepared in proper calcination system. The results show that, the functional aggregate bulk density reaches $2.95 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, water absorption is as low as 1.57%, compressive strength is as high as 82 MPa, barium ion leaching rate is 1 mg/L, and the linear attenuation coefficient is as low as 0.2439 cm^{-1} . Therefore, the functional aggregate is expected to be able to replace barite ore in the radiation shielding concrete.

Key words: sludge; functional aggregate; physical property; radiation shielding capacity

在核工业飞速发展的 21 世纪,混凝土材料以其经济性好、屏蔽性能、力学性能和耐久性能均较好,尤其作为固定堆屏蔽材料时不受体积限制等优点,被最为广泛地应用于 X、 γ 等射线的屏蔽建筑材料.

在现今的防辐射混凝土制备中,国内外普遍以重晶石、赤铁矿、磁铁矿等密度较大的天然矿物作为

防辐射混凝土的集料.然而,这些密度较大的天然矿物数量有限,大量使用必然导致资源匮乏,盲目地索取不符合国家可持续发展的战略目标,因此寻求天然矿物的替代品具有重要意义.笔者调研了国内一些化工厂、钢铁厂、造纸厂、电镀厂排污区所沉积的污泥成分,结果表明:污水处理厂污泥中主要含有

收稿日期:2010-09-06; 修订日期:2010-11-25

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAJ04B05);国家自然科学基金资助项目(50872100)

第一作者:丁庆军(1962—),男,吉林蛟河人,武汉理工大学教授,博士生导师,博士. E-mail:dingqj@whut.edu.cn