

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.02.009

基于彩色数字图像技术的粗集料 松方密实方法选择

万成^{1,2}, 徐科³, 张肖宁⁴, 易强^{1,2}

(1. 广西大学 广西工程防灾与结构安全重点实验室, 广西 南宁 530004;

2. 广西大学 防灾减灾与工程安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004;

3. 广东长大公路工程有限公司, 广东 广州 511431; 4. 华南理工大学 土木交通学院, 广东 广州 510640)

摘要: 为确保沥青混合料集料骨架结构的形成, 需要找到一种与路面沥青混合料相近的粗集料密实成型方法。基于彩色阈值分割技术, 准确提取粗集料颗粒, 根据颗粒的积聚状态特点, 利用粗颗粒长轴与 X 轴正方向的夹角角度为评价指标, 研究振实、捣实和旋转压实 3 种粗集料密实方法的粗集料堆积形态, 并与沥青混合料试件粗颗粒长轴夹角进行对比。结果表明: 基于彩色图像处理技术, 避免了大颗粒被判断为小颗粒的误差, 保证全部粗集料颗粒均被有效提取。捣实法粗集料夹角明显小于沥青混合料试件统计结果, 粗集料松方振实法与沥青混合料试件颗粒长轴夹角统计结果数据最为接近, 与捣实和旋转压实相比, 是一种更为准确的粗集料密实方法。

关键词: 道路工程; 松方密实; 彩色数字图像技术; 粗集料; 颗粒

中图分类号: U414.03

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2017)02-0056-06

Selection of Coarse Aggregate Loose Square Compaction Method Based on Color Digital Image Technology

WAN Cheng^{1,2}, XU Ke³, ZHANG Xiao-ning⁴, YI Qiang^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China;

2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China; 3. Guangdong Provincial Changda Highway Engineering Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 511431, China;

4. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: In order to ensure the formation of aggregate skeleton structure of asphalt mixture, a coarse aggregate compaction forming method, which is similar to that of pavement asphalt mixture, is necessary. Based on color threshold segmentation technology, the coarse aggregate particles are extracted accurately. According to the characteristic of particle accumulation, taking the angle between long axis of coarse particles and the X -axis as the evaluation index, the accumulation forms of coarse aggregate under vibrating, tamping and gyratory compaction methods are studied, and compared with the long axis angle of coarse particles in asphalt mixture specimen. The result shows that (1) the color image processing technology can avoid the error that large particles judged to be small particles, and all coarse aggregate particles are effectively extracted; (2) the coarse aggregate angle of tamping compaction is obviously less than that of the statistical result of asphalt mixture specimen, the result from loose square compaction method for coarse aggregate is the

收稿日期: 2016-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51568007, 51378224, 51208212); 广西自然科学基金项目(2015GXNSFBA139217); 广西重点实验室系统性研究项目(2016ZDX0); 广西交通科技计划项目(桂AC16380107)

作者简介: 万成(1982-), 男, 湖南桃江人, 博士后, 副研究员。(wancheng_hn@126.com)

closest to the statistical data of asphalt mixture specimen particle long axis angle, it is a more accurate method for compacting coarse aggregate compared with tamping and gyratory compaction methods.

Key words: road engineering; loose square compaction; color digital image technology; coarse aggregate; particle accumulation

0 引言

粗集料松方间隙率(VCA)是骨架型沥青混合料设计的重要指标,可根据粗集料堆积状态、振实状态、捣实状态的松方密度计算获得^[1]。我国及美国的SMA设计指南^[2-3]中都明确提出:粗集料的干插捣间隙率(本研究中以 VCA_{DRC} 表示)必须大于压实混合料中粗集料间隙率(本研究中以 VCA_{mix} 表示)^[4],并以此作为骨架结构形成的判据。骨架是沥青混合料抗车辙能力的主要来源,也是形成粗糙抗滑表面的重要保证,对于确保安全高速行驶车具有重要意义。

卢永贵^[5]指出: VCA_{DRC} 与 VCA_{mix} 在密实方法、测量精度、换算密度指标等方面存在系统误差。在密实方法上,无论是堆积、振实、干捣都与路面实际混合料密实方法存有明显差异。为确保骨架结构的形成,需要找到一种与路面混合料相近的粗集料密实成型方法。

而以往由于研究手段的限制,只能通过测定各种密实方法下的 VCA 数值大小判定粗集料的骨架是否形成^[6],而更为重要的是,各种密实方法下粗集料内部的堆积形态是否与实际沥青路面内骨架接近,则无从判断。认识到此问题,研究人员开始应用数字图像处理技术,分析沥青混合料内部结构^[7-9],对试件切割截面。然而,利用颗粒截面的几何参数获得颗粒粒径的归类,本身存有较大的系统误差,该误差来源于切割过程中,颗粒截面位置的随机分布,它将极有可能使大集料颗粒误判为小颗粒,因此,有必要研究合适的方法,准确提取混合料试件截面中的粗集料颗粒,评价粗集料的骨架堆积形态是否与真实沥青内部粗集料形态接近。

基于彩色的粗集料颗粒提取方法为解决颗粒误判提供了可能。本研究基于彩色阈值分割技术,准确提取粗集料颗粒,根据颗粒的积聚状态特点,利用颗粒长轴与 X 轴正方向的夹角为指标,评价振实、捣实和旋转压实3种粗集料密实方法的粗集料堆积形态,并与沥青混合料试件粗颗粒长轴夹角进行对比,比选一种与沥青路面混合料相近的粗集料密实成型方法。

1 基于彩色的沥青混合料数字图像处理技术

相对于常规灰度的沥青混合料数字图像处理技术,使用彩色阈值提取集料颗粒不需要将试件的彩色截面图转换为灰度图,而是直接利用彩色灰度直方图选定阈值。对彩色截面图进行初步处理后,可直接得到截面图的红、绿、蓝三原色直方图^[10-12]。因此,采用红色石料作为粗集料,会导致红色灰度直方图呈明显的双峰,而绿色与蓝色直方图双峰效果不明显。因此,可直接根据红色灰度直方图选定适合的阈值,对图像进行二值化处理,从而完成对粗集料颗粒的提取,如图1和图2所示。

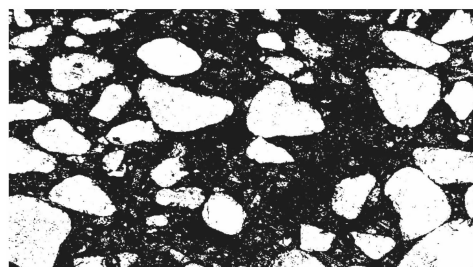


图1 图像二值化结果图

Fig.1 Binary result of image

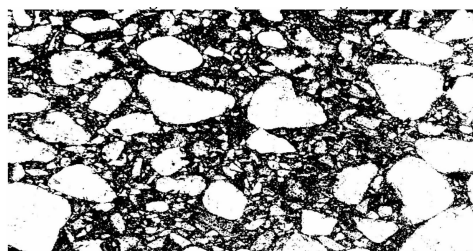


图2 黑白灰度直方图的图像分割结果

Fig.2 Image segment result based on black and white grey histogram

对比图1与图2,可知彩色阈值提取方法可准确地提取粗集料颗粒信息。

利用彩色灰度直方图选定适合阈值,提取粗集料颗粒的方法,可避免单纯利用颗粒几何参数特征提取粗集料颗粒的弊端。彩色的集料颗粒,其任意截面均为彩色,采用彩色阈值分割图像,可避免大颗粒被判断为小颗粒的误差,保证全部粗集料颗粒均被有效提取。

必须指出的是,采用彩色阈值分割图像的方法主要适用于以全部粗集料颗粒为研究对象,如研究粗集料中各粒径颗粒的分布情况,需协同采用彩色阈值图像分割法与颗粒几何参数特征提取法,这样必然使结果带有一定的系统误差。如条件允许,此时可采用多种不同彩色的粗集料颗粒制备试件,利用各彩色的灰度直方图确定阈值,分割图像,从而保证各档集料颗粒提取结果的准确性。

2 粗集料松方密实试验

在一般的沥青路面作业过程中,沥青混合料的配合比设计往往先于路面施工。这就要求在配合比

设计阶段,需要通过室内成型试件模拟路面实际混合料的成型方法。试件成型方法可能会影响粗集料在沥青胶浆中的排列特性,从而影响粗集料在沥青混合料中的堆积状态,可采用堆积、振实、捣实与旋转压实法密实粗集料。而堆积法与路面实际沥青混合料成型方式有较大差异,未将其列入本研究方案。

2.1 试验方案

使用 Superpave 旋转压实仪成型 AC-13, AC-16, SMA-13 及 SMA-16 沥青混合料试件。粗集料使用天然红色石料,细集料使用花岗岩和石灰岩矿粉,沥青采用改性沥青。每级配成型试件 3 个,级配如表 1 所示。

表 1 旋转压实试件级配
Tab. 1 Gradation of gyratory compacted specimens

级配类型	通过以下筛孔 (mm) 的集料百分比/%											沥青/%
	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
AC-13	100.0	100.0	95.0	70.0	41.5	30.0	22.5	16.5	12.5	8.5	6.0	4.5
AC-16	100.0	95.0	71.0	57.5	35.0	25.0	17.5	13.0	9.5	7.0	5.0	5.0
SMA-13	100.0	100.0	95.0	62.5	27.0	20.5	19.0	16.0	13.0	12.0	10.0	6.0
SMA-16	100.0	95.0	75.0	55.0	26.0	19.5	18.0	15.0	12.5	11.5	10.0	6.0

设置压力为 600 kPa, 压实次数为 100 次。试件成型后,使用双面锯沿试件轴线方向切割,如图 3 所示。

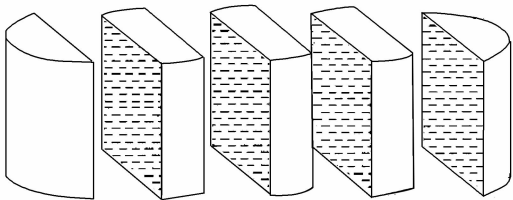


图 3 试件切割方法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of specimen cutting method

振实法:将定量粗集料装入旋转压实试模,集料表面配约 1 kg 的圆盖一块,将试模放在振动台,振动 2 min。量测深度,计算体积,得到松方密度。捣实法:将试样装入旋转压实试模中达到 1/3 高度,由边至中用捣棒均匀捣实 25 次;再向试模中装入 1/3 高度的试样,用捣棒均匀地捣实 25 次,捣实深度约至下层的表面;然后重复上一步骤,加最后一层,放置圆盖,在圆盖上捣实 25 次。量测深度,计算体积,得到松方密度。旋转压实法:将试样装入旋转压实试模中,整平表面,上置圆盖;设置压力 600 kPa, 压实次数为 100 次;压实完成后,量测深度,计算体积,得到松方密度。

分别使用前述的振实法、捣实法及旋转压实法量测粗集料松方空隙率,每种密实方法平行试验两

次。使用的粗集料为红色石料,级配如表 1 所示,取其粗集料部分。考虑试模的体积,兼顾试验精度,选取试样重质量 3 500 g。

为了研究各种密实方法作用下粗集料颗粒的聚集状态,使用沥青作为凝固剂将试样颗粒固结。利用双面锯切割试样,分析其截面图中颗粒长轴与 X 轴正向的夹角规律。具体方法如下:

量测高度参数后,将试模连同试样置入 160 ℃ 烘箱恒温约 2 h 后,灌入 150 ℃ 左右的基质沥青,保证此时的沥青有很好的流动性。灌入时流速需缓慢,避免液体表面张力影响。灌至沥青溢出试样表面约 1 cm 时停止。待试样与试模冷却至室温后,将其置入冰柜中约 -10 ℃ 左右环境。放置 1 d 后,使用双面锯按图 3 所示方法切割试样。将切开的试件再置入冰柜 -10 ℃ 左右环境放置约 1 d 后,可取出进行截面的拍摄。拍摄时为增强对比度,可用浸水湿布擦拭截面,效果如图 4 所示。

3 各级配粗集料颗粒夹角

按李智^[13]方法分析各试件截面图,得到各密实方法作用下颗粒长轴与 X 轴正向夹角数据如表 2 ~ 表 5 所示。

由表可知,在振实法作用下颗粒长轴夹角统计

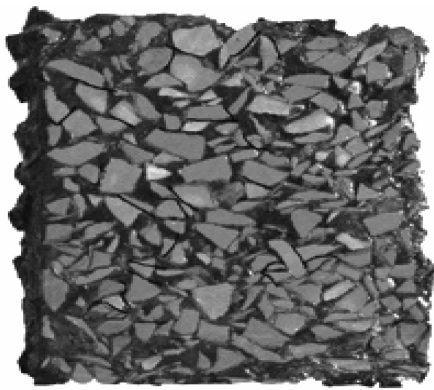


图4 试件截面效果

Fig.4 Sectional effect of specimen

结果与旋转压实成型的沥青混合料试件结果最为接近, 其偏差度最小为 1.7; 捣实法与旋转压实数偏差

度较大, 分别达到 3.6 与 3.9。

4 松方密实方法评价

根据表 2 ~ 表 5 数据, 利用偏差度 σ 计算各种密实方法下各级配试样颗粒长轴夹角与混合料试件中颗粒夹角趋近程度。偏差度 σ 可利用式 (1) 得到。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 (A_{ri} - B_i)^2}{4}}, \tag{1}$$

式中, σ 为偏差度。 A_n 为级配为 i 的试样在序号 r 的密实方法作用下颗粒长轴夹角统计结果, $i = 1, 2, 3, 4$, 分别代表 AC-13, AC-16, SMA-13 及 SMA-16 级配; $r = 1, 2, 3$ 分别代表捣实法, 旋转压实法及振实法。 B_i 为级配为 i 的沥青混合料试件颗粒长轴夹角统计结果。

表 2 AC-13 试样长轴与 X 轴夹角分析

Tab.2 Analysis of angle between long axis and X-axis in AC-13 samples

密实方法	试件序号	以下级配试件截面颗粒长轴夹角分析结果/ (°)								均值/ (°)	平均结果/ (°)
		1	2	3	4	5	6	7	8		
捣实法	AC-13-1	34.3	37.6	32.0	33.0	36.3	34.3	35.4	32.6	34.4	34.8
	AC-13-2	34.3	35.9	34.3	37.4	35.5	34.9	34.5	36.5	35.4	
	AC-13-3	31.0	34.0	34.9	38.2	32.8	35.9	33.8	36.5	34.6	
旋转压实法	AC-13-1	30.9	28.3	35.4	33.3	34.2	31.7	34.8	31.8	32.5	31.9
	AC-13-2	30.0	31.4	30.8	29.7	30.4	33.8	35.2	—	31.6	
	AC-13-3	29.6	31.2	33.3	29.2	31.1	32.3	31.7	35.1	31.7	
振实法	AC-13-1	32.6	38.6	41.6	40.6	42.5	38.6	35.9	32.6	37.9	37.0
	AC-13-2	41.4	37.0	40.7	33.3	34.8	38.4	35.7	37.7	37.4	
	AC-13-3	37.8	35.5	37.7	37.5	33.3	33.0	33.8	37.8	35.8	
混合料试件	AC-13-1	40.2	40.8	44.7	41.0	41.8	39.8	40.1	42.0	41.3	39.2
	AC-13-2	41.0	39.6	37.8	40.3	39.6	36.2	38.9	40.0	39.2	
	AC-13-3	40.3	37.0	40.2	36.3	36.5	34.2	34.0	38.7	37.2	

注: “—” 处截面颗粒夹角分析结果因故缺失, 下同。

表 3 AC-16 试样长轴与 X 轴夹角分析

Tab. 3 Analysis of angle between long axis and X-axis in AC-16 samples

密实方法	试件序号	以下级配试件截面颗粒长轴夹角分析结果/ (°)								均值/ (°)	平均结果/ (°)
		1	2	3	4	5	6	7	8		
捣实法	AC-16-1	32.9	34.1	35.6	35.2	37.0	53.5	33.5	37.6	37.4	35.5
	AC-16-2	35.4	35.8	32.6	32.3	33.7	35.5	33.1	33.3	34.0	
	AC-16-3	34.1	36.4	33.6	30.4	34.0	37.7	37.9	36.4	35.1	
旋转压实法	AC-16-1	35.2	36.4	34.8	35.5	33.3	37.5	29.7	30.5	34.1	34.7
	AC-16-2	34.0	33.0	35.2	31.2	31.6	32.6	33.8	30.9	32.8	
	AC-16-3	34.0	34.1	30.5	31.3	42.3	41.7	41.7	42.1	37.2	
振实法	AC-16-1	40.7	35.5	32.4	34.9	44.7	34.8	37.4	33.1	36.7	36.0
	AC-16-2	33.6	33.7	37.0	34.7	36.8	36.6	36.1	35.0	35.4	
	AC-16-3	38.3	33.0	32.4	34.0	40.3	34.2	38.2	35.9	35.8	
混合料试件	AC-16-1	39.3	33.3	32.7	38.5	35.4	38.4	38.0	36.7	36.5	36.5
	AC-16-2	37.6	37.7	35.4	35.7	35.0	34.4	36.9	37.8	36.3	
	AC-16-3	39.8	33.0	34.5	37.4	38.0	34.6	36.5	39.4	36.7	

表 4 SMA-13 试样长轴与 X 轴夹角分析
Tab. 4 Analysis of angle between long axis and X-axis in SMA-13 samples

密实方法	试件序号	以下级配试件截面颗粒长轴夹角分析结果/(°)								均值/ (°)	平均结果/ (°)
		1	2	3	4	5	6	7	8		
捣实法	SMA-13-1	32.6	30.9	30.9	31.1	30.5	34.3	31.5	35.2	32.1	32.3
	SMA-13-2	33.9	33.5	34.7	30.5	32.0	31.8	31.2	33.8	32.7	
	SMA-13-3	34.6	29.7	31.1	30.2	36.9	31.7	28.9	34.3	32.2	
旋转压实法	SMA-13-1	35.7	34.5	30.4	35.0	33.0	47.1	42.3	45.7	38.0	36.7
	SMA-13-2	38.2	32.5	32.8	30.0	38.5	35.7	36.9	38.4	35.4	
	SMA-13-3	39.8	37.5	36.2	34.1	37.2	36.1	33.8	38.5	36.6	
振实法	SMA-13-1	38.7	39.7	39.4	37.4	37.8	38.6	—	—	38.6	39.6
	SMA-13-2	41.7	37.7	37.6	39.8	49.1	42.7	45.0	42.5	42.0	
	SMA-13-3	39.1	41.2	37.4	36.1	39.2	36.7	33.9	41.7	38.2	
混合料试件	SMA-13-1	37.4	36.6	39.0	36.2	36.3	37.1	39.3	36.9	37.4	37.1
	SMA-13-2	33.1	37.1	36.1	35.2	36.9	37.7	35.0	36.6	36.0	
	SMA-13-3	40.0	34.8	35.2	38.1	37.8	39.7	39.5	38.3	37.9	

表 5 SMA-16 试样长轴与 X 轴夹角分析
Tab. 5 Analysis of angle between long axis and X-axis in SMA-16 samples

密实方法	试件序号	以下级配试件截面颗粒长轴夹角分析结果/(°)								均值/ (°)	平均结果/ (°)
		1	2	3	4	5	6	7	8		
捣实法	SMA-16-1	33.5	34.2	28.7	33.3	32.5	37.7	34.9	35.4	33.8	35.0
	SMA-16-2	34.5	34.2	35.9	37.1	35.9	32.2	38.7	38.2	35.8	
	SMA-16-3	36.6	32.3	36.7	35.3	36.8	37.2	33.0	—	35.4	
旋转压实法	SMA-16-1	34.4	34.1	33.3	35.7	36.8	35.9	35.4	39.1	35.6	35.8
	SMA-16-2	40.8	37.3	34.0	36.2	34.5	34.5	33.9	37.1	36.0	
	SMA-16-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
振实法	SMA-16-1	37.1	37.1	39.8	40.5	41.7	40.3	36.7	44.5	39.7	38.9
	SMA-16-2	39.6	38.8	39.0	38.7	37.5	36.4	—	—	38.3	
	SMA-16-3	39.2	41.3	37.2	38.5	36.8	—	—	—	38.6	
混合料试件	SMA-16-1	38.2	37.3	36.3	37.1	37.4	35.1	35.2	38.7	36.9	38.0
	SMA-16-2	38.8	37.0	38.7	40.9	38.6	38.9	42.2	35.4	38.8	
	SMA-16-3	38.7	40.4	35.4	37.2	36.9	36.1	39.2	42.6	38.3	

将各密实方法与混合料试件长轴夹角统计结果绘于图 5, 从图可知, 振实法与沥青混合料试件颗粒长轴夹角统计结果数据较接近, 变化趋势相似; 捣实法结果普遍明显小于沥青混合料试件统计结果。这可能是由于在使用捣实法密实试样时需分 3 次对粗集料颗粒进行插捣。颗粒在自然堆积状态时, 其势能较大, 颗粒长轴夹角度数较大, 在插捣过程中, 捣棒直接接触部分颗粒边缘, 对颗粒发生作用, 使颗粒产生转动, 颗粒长轴夹角相应减小; 使用旋转压实法密实粗集料颗粒时, 由于颗粒间无任何沥青砂胶进行缓冲、阻滞, 使粗集料颗粒在旋转压力的作用下产生了较大的转动, 导致颗粒长轴夹角相应减小; 使用振实法密实粗集料颗粒时, 粗集料颗粒在震动台的激震力与配重圆盖的重力作用下, 颗粒的聚积状态逐渐稳定, 颗粒长轴的夹角逐渐减小。

在适合的振动时间与配重重量时, 颗粒长轴夹角的统计结果与沥青混合料试件结果接近。

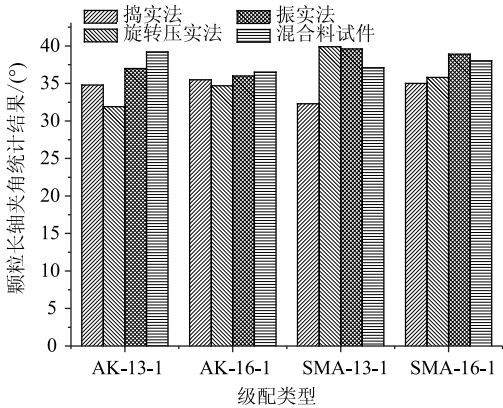


图 5 各级配试样颗粒长轴与 X 轴夹角汇总数据
Fig. 5 Summary of angles between long axis and X-axis for all samples

5 结论

(1) 为了避免系统误差,准确提取粗集料颗粒,研究一种使用彩色阈值分割图像,提取粗集料颗粒信息的方法。该方法可避免单纯利用颗粒几何参数特征提取粗集料颗粒的弊端。彩色的集料颗粒,其任意截面均为彩色,采用彩色阈值分割图像,可避免大颗粒被判断为小颗粒的误差,保证全部粗集料颗粒均被有效提取。

(2) 粗集料松方间隙率可根据集料在堆积状态、振实状态、捣实状态的松方密度计算获得。在密实方法上,无论是堆积、振实、干捣都与路面实际混合料密实方法存有明显差异。本研究通过彩色数字图像处理方法,根据颗粒的积聚状态特点,利用颗粒长轴与X轴正方向的夹角为指标,比较3种常规粗集料密实方法。粗集料松方振实法与沥青混合料试件颗粒长轴夹角统计结果数据较接近,变化趋势相似,说明采用振实法形成的集料骨架与沥青混合料真实粗集料形态最为接近。

(3) 粗集料密实后,其颗粒长轴夹角统计结果与沥青混合料试件相接近,只是评价密实方法的指标之一。全面评价密实方法,需从密实机理、测量精度、换算密度指标和颗粒积聚状态多方面进行综合考察。

参考文献:

References:

- [1] JTGE42—2005,公路工程集料试验规程[S].
JTGE42—2005, Test Methods of Aggregate for Highway Engineering [S].
- [2] JTGF40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].
JTGF40—2004, Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavements [S].
- [3] AASHTO T—19, Standard Specification for Design of Stone Matrix Asphalt (SMA) [S].
- [4] 徐科,张肖宁,王端宜. 基于数字图像处理技术的VCA_(mix)量测方法[J]. 公路, 2005 (11): 156—159.
XU Ke, ZHANG Xiao-ning, WANG Duan-yi. A Measurement Method of Percent Voids in Coarse Internal Aggregates in Asphalt Mixtures Based on Digital Image Processing Technology [J]. Highway, 2005 (11): 156—159.
- [5] 卢永贵,赵可,张登良. SMA骨架标准研究[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2002, 22 (1): 4—9.
LU Yong-gui, ZHAO Ke, ZHANG Deng-liang. Study on the Criterion of SMA Framework [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22 (1): 4—9.
- [6] BROWN E, HADDOCK J. Method to Ensure Stone-on-stone Contact in Stone Matrix Asphalt Paving Mixtures [J]. Transportation Research Record, 1997, 1583: 11—18.
- [7] 肖倩,张蕾. 路用粗集料形态可视化识别及其评价方法综述[J]. 公路交通科技, 2016, 33 (5): 46—51.
XIAO Qian, ZHANG Lei. A Review of Visual Identification and Evaluation of Coarse Aggregate of Road Pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (5): 46—51.
- [8] MASAD E, MUHUNTHAN B, SHASHIDHAR N, et al. Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete Using Image Analysis [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1999, 13 (2): 88—95.
- [9] YUE Z Q, MORIN I. Digital Image Processing for Aggregate Orientation in Asphalt Concrete Mixtures [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1996, 23 (2): 480—489.
- [10] KENNETH R. Castleman 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.
KENNETH R. Castleman Digital Image Processing [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 1998.
- [11] 姚秋玲. 基于数字图像处理技术的沥青混合料组成特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
YAO Qiu-ling. Research on Composition Characteristics of Asphalt Mixture Based on Digital Image Processing Technology [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [12] KALLEN H, HEYDEN A, ÅSTROM K, et al. Measuring and Evaluating Bitumen Coverage of Stones Using Two Different Digital Image Analysis Methods [J]. Measurement, 2016, 84: 56—67.
- [13] 李智. 基于数字图像处理技术的沥青混合料体积组成特性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.
LI Zhi. Analysis of Volume Composition of Asphalt Mixture Based on Digital Image Processing Technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2002.