DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201709105

沥青混凝土中粗集料形貌特征分析

纪 伦[1], 李 俊[1,2], 张 磊[3], 刘海权[1], 贺文栋[1,4]

(1.哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090;2.中建丝路建设投资有限公司, 西安 710075;
3.中国路桥工程有限责任公司, 北京 100011;4.山西省交通科学研究院, 太原 030000)

摘 要: 为分析沥青混凝土中粗集料形貌特征,了解其对沥青混合料性能的影响. 利用工业 CT 对不同级配沥青混凝土断面进行扫描,用图像处理技术和统计学方法从扫描图像中获取粗集料的形貌参数,分析粗集料级配对形貌参数的影响. 结果表明: CT 扫描结合图像处理技术可准确获取沥青混凝土中粗集料形貌参数; 粗集料颗粒的纵横比 AR_1 和 AR_2 和棱角性的累积分布概率服从三参数威博尔分布; 轮廓分形维数、纵/横向趋向参数、纵向偏角均值以及面积参数对粗集料级配的变化表现敏感;而纵/横向趋向参数、纵向偏角均值、轮廓分形维数、棱角性和面积参数,能够显著表征 4.75 mm 粒径集料的通过率变化.

关键词: 沥青混凝土;粗集料;形貌特征;CT 扫描;图像处理

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)03-0061-07

Analysis of the morphology characteristics of coarse aggregate in asphalt concrete

JI Lun[1], LI Jun[1,2], ZHANG Lei[3], LIU Haiquan[1], HE Wendong[1,4]

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. China State Construction Silk Road Investment Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 3. China Road & Bridge Co., Ltd., Beijing 100011, China; 4. Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030000, China)

Abstract: In order to investigate the shape characteristics of coarse aggregates in asphalt concrete and their influences on performances of asphalt mixture, asphalt concretes were scanned by industrial CT, and the morphology parameters of the coarse aggregates were obtained from the scanned images by image processing technique and statistical method. The influences of the coarse aggregate level grading on morphology parameters were studied and analyzed. Results showed that CT scanning combined with image processing technique could accurately obtain the coarse aggregate morphology parameters of asphalt concrete. The cumulative distribution probability of the aspect ratio and angularity of coarse aggregate particles obeyed the three-parameter Weibull distribution. Contour fractal dimension, longitudinal/lateral trend parameters, longitudinal declination mean, and area parameters were sensitive to changes in coarse aggregate gradation. The longitudinal/lateral trend parameters, longitudinal declination mean, contour fractal dimension, angularity, and area parameters could significantly characterize changes of the passing rate of the 4.75 mm particle size aggregate.

Keywords: asphalt concrete; coarse aggregate; morphology parameter; CT technology; image processing technique

在沥青路面施工过程中,沥青混凝土集料品质变异、级配组成变化等会对混合料的路用性能产生影响[1]. 粗集料是沥青混合料的重要组成材料,其级配组成和形貌特性会显著影响混合料的路用性能[2-4].

根据前人的研究,粗集料棱角性越强、表面纹理越丰富,沥青混合料稳定性越好[5]. 国内外学者虽然研究了粗集料对沥青混合料性能的影响,但多数从粗集料的物理化学性质、表面特性等角度进行,缺乏粗集料形貌特征分析的相关研究[6-8]. 为此,本文利用 CT 技术[9-13]和图像处理技术[14]对粗集料的形貌参数进行研究,准确量化集料颗粒形貌特征,探讨粗集料级配对形貌参数的影响. 基于此研究,可以开发沥青混凝土路面粗集料质量无损检测方法;深入理解沥青混合料组成特性,进而为构建混合料结构参数与性能关系提供技术支持.

1 试 验

1.1 原材料

沥青采用 90 号 SBS 改性沥青,粗集料和细集料为哈尔滨阿城区生产的安山岩,矿粉为石灰岩磨制的石粉.

1.2 级配设计

为便于对比分析,采用两组级配:1)第 1 组级配,采用 SMA-16 作为基准级配,保持该级配 4.75 mm及以下细集料筛孔通过率不变,9.5 mm 筛

收稿日期: 2017-09-19
基金项目: 国家重点研发计划(51078114)
作者简介: 纪 伦(1973—),男,副教授,硕士生导师
通信作者: 张 磊,hitjtxyzl@163.com

孔以上各粗集料通过率在基准级配通过率基础上增减 5%、10%，得到 5 组级配，编号 S1～S5，级配曲线如图 1 所示. 2）第 2 组级配，以规范中 SMA－16 中值级配为基础，仅调整 4.75 mm 筛孔集料的通过率，得到 SA～SD 4 组级配，其 4.75 mm 筛孔集料通过率分别对应为 20%、31%、36%和 40%.

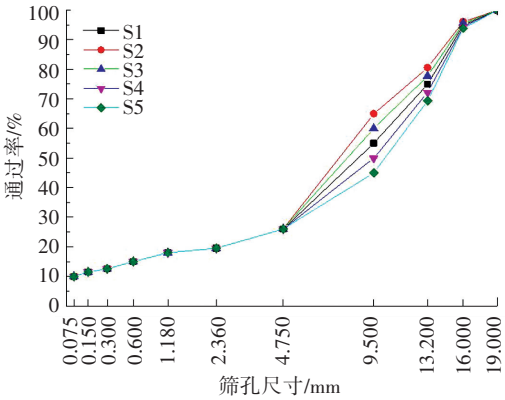


图 1 SMA－16 不同粗集料级配曲线

Fig.1 Coarse aggregates grading curves of SMA－16 asphalt concrete

1.3 最佳沥青用量及试件制备

采用马歇尔法确定沥青混凝土最佳沥青用量. SMA－16 级配中值的最佳沥青用量为 6.2%，其他级配均采用该沥青用量. 沥青混合料试件采用旋转压实仪成型，试件直径为 100 mm，高为 150 mm.

2 粗集料形貌特征指标

国内外学者在该领域开展了大量研究，提出了多种指标来评价粗集料的形貌特征，例如棱角性、形态学指标、纹理性指标等[15-18]. 本文分别筛选了以下 7 个指标进行研究.

1）纵横比 AR_1. 在集料断面外轮廓的最小外接矩形中，长轴 D_1 和短轴 D_2 的比值，定义为纵横比 AR_1，示意图见图 2(a)，表达式为

$$AR_1 = \frac{D_1}{D_2}, \tag{1}$$

式中 D_1 为最小外接矩形长轴长度，D_2 为最小外接矩形短轴长度.

2）纵横比 AR_2. 计算图像分析软件所得的集料截面等效椭圆的形状参数，将等效椭圆的长、短轴之比，定义为纵横比 AR_2，示意图见图 2(b)，表达式为

$$AR_2 = \frac{L_1}{L_2}, \tag{2}$$

式中 L_1 为等效椭圆长轴长度，L_2 为等效椭圆短轴长度.

3）颗粒倾向角 α. 在分析软件所得的集料截面图像中，连接集料边缘距离最大的两点间的轴定义为主轴. 颗粒倾向角为主轴与竖直方向所夹的锐角，示意图见图 2(c).

4）棱角性 Ag. 本文采用颗粒轮廓与等效椭圆的周长之比来定义颗粒棱角性，示意图见图 2(c)，表达式为

$$Ag = \left(\frac{P}{P_e}\right)^2, \tag{3}$$

式中 P 为集料颗粒周长，P_e 为等效椭圆短轴长度.

5）集料面积 A. 集料在 CT 扫描之后的二维截面面积.

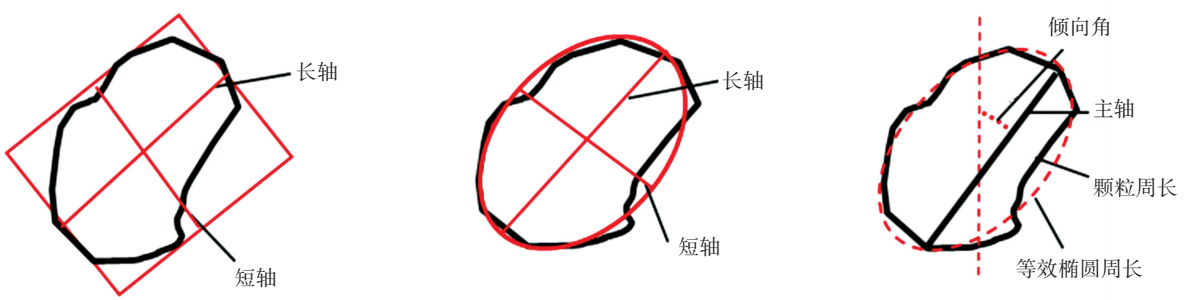
6）分形维数 D. 不同研究领域，分形维数的测量方法和定义有所区别[19]. 为研究粗集料的几何形貌，本文采用变尺码法测定分形维数，其原理如图 3 所示. 设定不同数量级的测量尺码为 ε，用测量尺码沿图形边界度量，所得长度为 L，则测量尺码与度量长度 L 之间幂律关系为

$$L = k\varepsilon^{1-D}, \tag{4}$$

对式(4)两边取对数，可得

$$\lg L = \lg k + (1 - D)\lg \varepsilon, \tag{5}$$

式中 k 为尺度常数. 分析时，用足够数量的测量尺码 ε 来测量所分析的二维界面，求得不同尺码下对应的度量长度. 然后，在双对数坐标系中线性回归，进而求得直线的斜率 $\alpha = 1 - D$，从而得到分形维数 $D = 1 + \alpha$.



(a) 集料断面最小外接矩形 (b)集料断面等效椭圆 (c)集料断面棱角性

图 2 粗集料形貌参数示意图

Fig.2 Schematic diagram of coarse aggregate morphology parameters

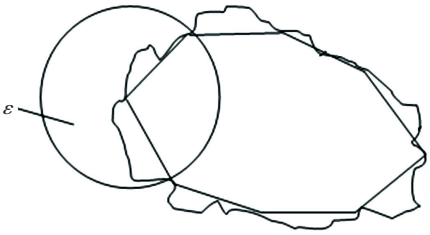


图 3　分形维数求解示意图

Fig.3　Fractal dimension solution diagram

7）颗粒趋向参数 Δ. 为研究集料颗粒主轴偏角分布特性，文献[20]提出了颗粒趋向参数 Δ，Δ 表示主轴分布一致性，数值在 0～100 之间，数值愈大，表示主轴偏角分布一致性越大，表达式为

$$\Delta = \frac{100}{N}\sqrt{\left(\sum_{1}^{N}\sin 2\alpha_k\right)^2 + \left(\sum_{1}^{N}\cos 2\alpha_k\right)^2}, \quad (6)$$

式中 $\bar{\alpha}$ 为主轴偏向角均值，α_k 为单个颗粒主轴偏向角，N 为颗粒个数.

3　粗集料形貌指标获取方法

使用工业 CT 扫描不同级配的 SMA-16 沥青混合料得到二维断面图像，利用 Image-Proplus 6.0（以下简称 IPP）图像分析处理软件，分析二维断面图像，计算得到粗集料颗粒断面的面积、周长，等效椭圆长、短轴长度等形貌参数[21-23]. 具体分析骤步如下所示.

1）分析粗集料面积参数. 在扫描后的沥青混凝土二维断面中，首先通过统计学方法分析粗、细集料断面面积的分界值，剔除细集料颗粒断面的影响. IPP 软件最小可识别 0.025 cm^2 的颗粒断面，绝大多数颗粒断面面积均在 1.0 cm^2 内，因此，将颗粒面积在 0.025～0.800 cm^2 之间划分为 12 个分级，进而分析颗粒面积与级配组成关系，具体分级见表 1. 按表 1 统计每一分级的颗粒个数，断面的颗粒数统计结果如图 4 所示. 在级配 SA～SD 和 S1 中，SA 中 2.36～4.75 mm 粒径的集料极少，其他级配的 2.36～4.75 mm 粒径集料数量稍多. 结合图 1 和图 4 级配曲线可见，随着 4.75 mm 筛孔通过率的增加，面积小于 0.05 cm^2 的小颗粒数量迅速增加，而在 0.025～0.04 cm^2 之间颗粒个数变化不大. 因此，在分析沥青混凝土 CT 扫描横断面粗集料颗粒的面积累计值时，可以以 0.04 cm^2 作为粗细集料横断面面积分界值.

表 1　集料颗粒二维断面面积分级

Tab.1　Particle 2D sectional area classification

分级	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级
面积/cm^2	0.025～0.030	0.030～0.040	0.040～0.050	0.050～0.060	0.060～0.080	0.080～0.100
分级	7 级	8 级	9 级	10 级	11 级	12 级
面积/cm^2	0.100～0.200	0.200～0.300	0.300～0.400	0.400～0.500	0.600～0.800	0.800～1.000

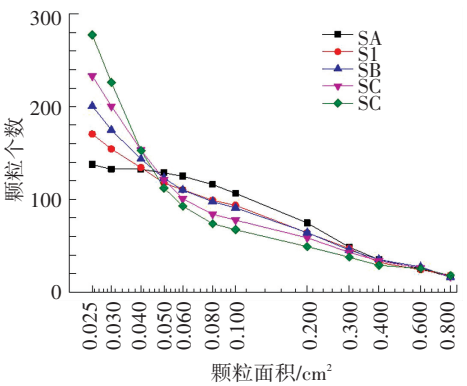


图 4　集料颗粒面积分级统计

Fig.4　Aggregate particle area classification

2）分析统计断层扫描图像的粗集料颗粒个数. 计算粗集料颗粒轮廓的分形维数，并求得平均值.

3）计算横断面主轴偏角，自小至大排列，分析排列后的主轴偏角累计分布概率. 求取各种情况下的主轴偏角统计平均值. 图 5（a）展示了扫描图主轴偏角的分布特征. 可见，累计分布概率随主轴偏角呈线性变化，相关性大于 0.99；主轴偏角分布拟合的斜率恒为 0.011，恰好等于 1/90，证实了集料颗粒的主轴偏角在整体上呈均匀分布.

4）计算分析粗集料颗粒的主轴偏角均值及趋向参数 Δ. 利用式（1）～（3）计算纵横比 AR_1、AR_2 和棱角性 Ag. 然后将各指标由小到大排列，计算各指标的累积分布概率，进行拟合分析，如图 5（b）～5（d）所示，上述分析指标均服从三参数威博尔分布，相关系数都大于 0.995. 三参数威博尔分布函数为

$$F_w(t;m,\eta,\gamma) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m}, \quad (7)$$

式中：m 为形状参数，η 为尺度参数，γ 为位置参数.

将纵横比 AR_1、AR_2 和棱角性 Ag 的三参数威博尔的拟合参数 m、η 和 γ，代入式（8），即可得到沥青混凝土的纵横比和棱角性的期望. 三参数威博尔分布的期望为

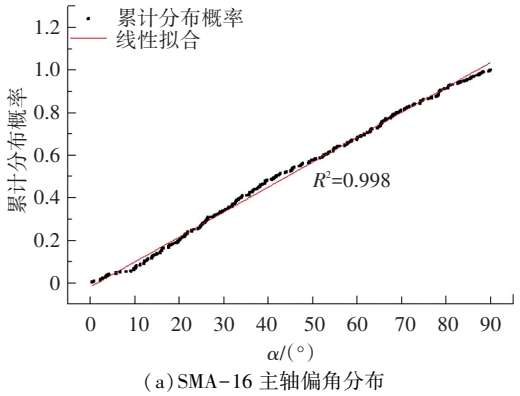
$$E_w(t) = \gamma + \eta\Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right), \tag{8}$$

式中 $E_w(t)$ 为期望，$\Gamma(m)$ 为伽马函数.

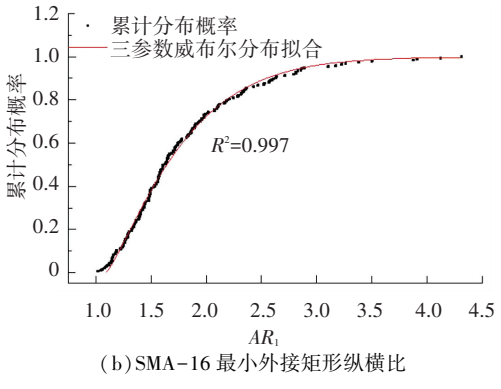
综上所述，为获得沥青混凝土中粗集料二维断面形貌特征，按照步骤 1~4 的方法，分析多张沥青混凝土扫描图像的粗集料形貌参数，求取平均值及统计特征，可得到形貌参数的代表值.

4 粗集料级配对沥青混合料中粗集料形貌指标影响的显著性分析

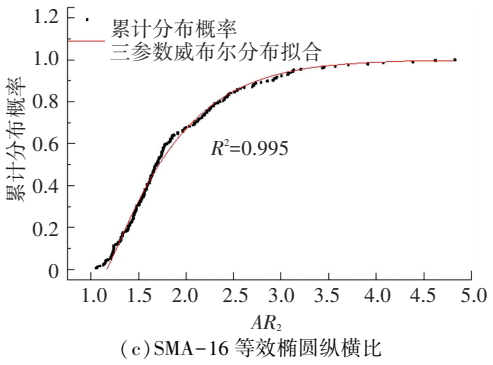
SMA-16 沥青混凝土中粗集料形貌参数的统计结果、各参数的显著性检验结果及相关性分析指标分别见图 6、表 2.



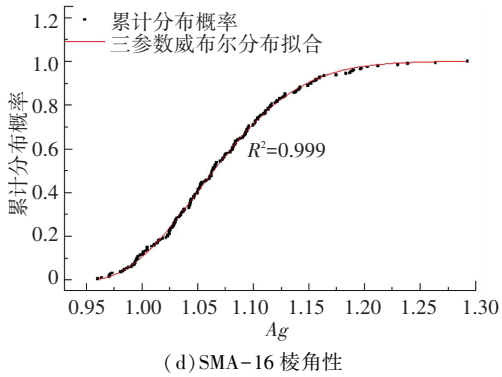
(a) SMA-16 主轴偏角分布



(b) SMA-16 最小外接矩形纵横比



(c) SMA-16 等效椭圆纵横比



(d) SMA-16 棱角性

图 5 粗集料颗粒细观指标

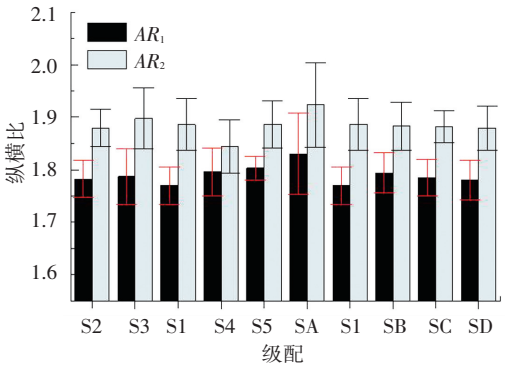
Fig.5 Coarse aggregate particle microscopic index

表 2 SMA-16 沥青混凝土中粗集料形貌参数的显著性及相关性检验结果

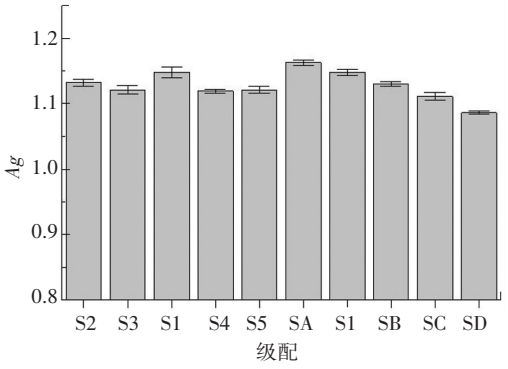
Tab.2 Significance and correlation test result of coarse aggregate morphology parameters of SMA-16 asphalt concrete

指标	级配	方差分析		Spearman 检验			Pearson 检验		
		F	临界值(0.05)	R	P	显著性水平	R	P	显著性水平
AR_1	S1~S5	1.13	2.65	−0.17	0.303	—	−0.09	0.563	—
	SA~SD、S1	1.92	2.65	−0.30	0.060	—	−0.25	0.121	—
AR_2	S1~S5	1.65	2.61	−0.16	0.307	—	−0.12	0.451	—
	SA~SD、S1	0.76	2.65	−0.22	0.165	—	−0.22	0.164	—
纵向 Δ	S1~S5	22.30	2.59	0.65	0	0.01	0.62	0	0.01
	SA~SD、S1	49.82	2.65	−0.82	0	0.01	−0.83	0	0.01
横向 Δ	S1~S5	12.53	2.57	0.72	0	0.01	0.68	0	0.01
	SA~SD、S1	47.12	2.65	0.90	0	0.01	−0.90	0	0.01
Ag	S1~S5	16.86	2.59	−0.17	0.247	—	−0.07	0.612	—
	SA~SD、S1	68.72	2.65	−0.92	0	0.01	−0.93	0	0.01
纵向 α	S1~S5	8.31	2.57	−0.30	0.025	0.05	−0.34	0.015	0.05
	SA~SD、S1	3.78	2.65	0.18	0.273	—	0.22	0.180	—
横向 α	S1~S5	3.30	2.57	0.49	0	0.01	0.42	0.001	0.01
	SA~SD、S1	1.22	2.65	−0.19	0.231	—	−0.12	0.444	—
D	S1~S5	20.24	2.57	−0.48	0	0.01	−0.49	0	0.01
	SA~SD、S1	36.81	2.61	0.46	0.002	0.01	0.57	0	0.01
A	S1~S5	13.16	2.59	0.74	0	0.01	0.72	0	0.01
	SA~SD、S1	16.53	2.59	−0.84	0	0.01	−0.75	0	0.01

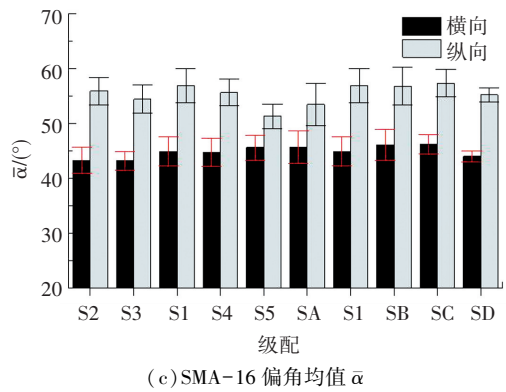
注：R 为相关系数，P 为不相关概率.



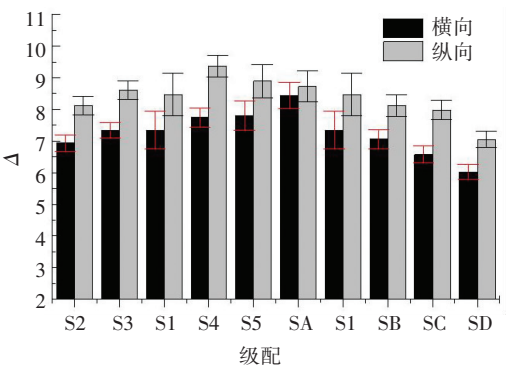
(a)SMA-16 纵横比



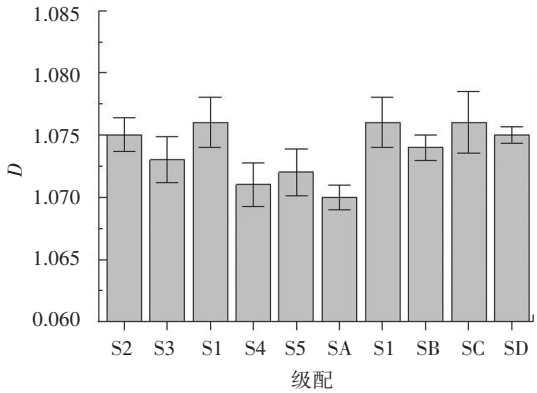
(b)SMA-16 棱角性



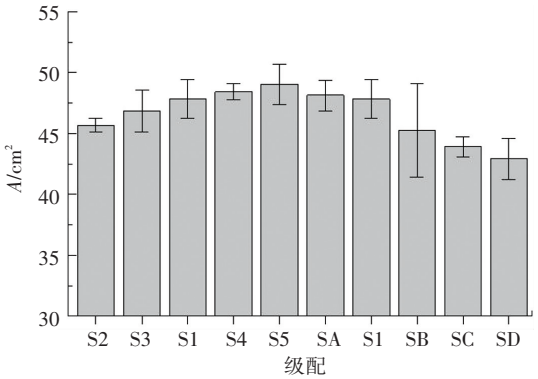
(c)SMA-16 偏角均值 $\bar{\alpha}$



(d)SMA-16 趋向参数 Δ



(e)SMA-16 轮廓分形维数



(f)SMA-16 面积参数

图 6　SMA-16 级配沥青混凝土中粗集料颗粒形貌参数

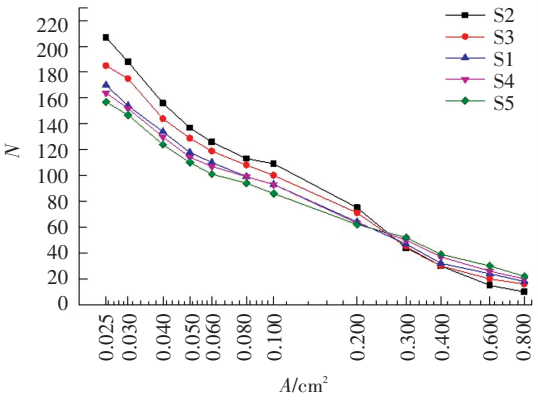
Fig.6　Coarse aggregate particle morphology parameters of SMA-16 asphalt concrete

由图 6(a)、表 2 可知,两种 SMA-16 混合料组成级配的变化形式对纵横比指标的影响都不显著. 由图 6(b)、表 2 可知,在 S1~S5 级配中,粗集料数量变化对棱角性指标有影响,但其相关性不十分明确. 对于级配 SA~SD 与 S1,随着 4.75 mm 筛孔集料通过率的增加,棱角性不断减小,沥青混凝土的棱角性期望不断减小,该指标和 4.75 mm 筛孔集料通过率呈现负相关关系. 由图 6(c)、表 2 可知,对于级配 S1~S5,横、纵向偏角均值会受级配变化的影响,呈现线性相关性. 对于级配 SA~SD 和 S1,横向偏角会受 4.75 mm 筛孔集料通过率影响,4.75 mm 筛孔集料通过率对纵向偏角的影响不显著,但均未表现出线性相关性. 由图 6(d)、表 2 可知,对于级配 S1~S5,在横、纵断面上,趋向参数 Δ 都会受级配变化的影响,二者线性相关. 对于级配 SA~SD 及 S1,随着 4.75 mm 筛孔集料通过率的增加,横断面上趋向参数趋于减小,纵断面上趋向参数趋于增大. 通过方差分析证明,4.75 mm 筛孔集料通过率对趋向参数有显著影响,线性相关系数大于 0.8. 由图 6(e)、表 2可知,粗集料越多,分形维数越小. 这说明细集料提高了轮廓分形维数的统计均值. 由图 6(f)、表 2 可知,对于级配 S1~S5,随着粗集料含量的增加,在 CT 扫描横断面上,粗集料颗粒的平均面积逐渐增加. 级配 S2 到 S5,粗集料颗粒的面积约增加 8%;方差分析发现, F 值大于临界值,Pearson 相关系数为 0.72,在 0.01 显著性水平下线性相关. 对于级配 SA~SD 和 S1,随着 4.75 mm 筛孔集料通过率的增加,沥青混凝土横断面扫描图像中粗集料颗粒面积

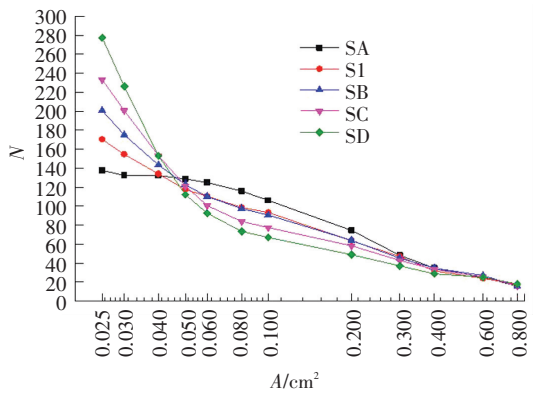
逐渐变小;级配 SA 到 SD,粗颗粒面积约减小 10%;经方差分析,F 值大于临界值,Pearson 相关系数为 −0.75,在显著性水平为 0.01 时线性相关.

对于 SMA−16 沥青混凝土,综上分析可知,受粗集料级配变化影响的形貌指标有:纵/横向趋向参数、纵向偏角均值、分形维数和面积参数;受 4.75 mm筛孔集料通过率变化影响的形貌指标有:纵/横向趋向参数、棱角性指标、纵向偏角均值、轮廓分形维数和面积参数.

SMA−16 沥青混凝土扫描分析的粗集料颗粒个数分级统计结果如图 7 所示.



(a)S1~S5 粗集料颗粒个数统计



(b)SA~SD 和 S1 粗集料颗粒个数统计

图 7 SMA−16 沥青混凝土扫描分析的粗集料颗粒个数分级统计

Fig.7 Coarse aggregate particle number statistics of SMA−16 asphalt concrete

由图 7(a)、7(b)所示,级配 S1~S5 的颗粒个数变化趋势分析可知,各个级配面积小于 0.25 cm^2 的小颗粒数量由大到小的顺序为 S2,S3,S1,S4,S5,面积大于 0.25 cm^2 的小颗粒数量由大到小的顺序为 S2,S3,S1,S4,S5. 即,随着粗集料增加,大颗粒个数逐渐增多,小颗粒个数逐渐减少,数值对应关系显著. 颗粒数量的分级统计分析结果准确地表征了级配变化趋势.

5 结 论

1)CT 扫描结合图像处理技术可准确获取沥青混凝土中粗集料形貌参数. 粗集料颗粒的纵横比 AR_1、AR_2 和棱角性 Ag 的累积分布概率服从三参数威博尔分布,纵横比的威博尔分布期望值受级配影响不显著.

2)随着粗集料颗粒的增加,粗集料形貌参数的大颗粒个数(面积大于 0.025 cm^2 颗粒个数)将逐渐增多,小颗粒的个数逐渐减少,变化规律与级配变化趋势吻合.

3)试验级配条件下,4.75 mm 筛孔集料通过率增加时,扫描分析的 0.04 cm^2 以下面积的小颗粒数量明显增加;同时,4.75 mm 以下粒径集料的最大断面面积不大于 0.04 cm^2,因此,可采用该值作为粗、细集料横断面面积界定值.

4)对于 SMA−16 沥青混凝土,与粗集料级配变化敏感的形貌指标有:轮廓分形维数、纵/横向趋向参数、纵向偏角均值以及面积参数. 受 4.75 mm 筛孔集料通过率变化影响显著的粗集料形貌指标有:轮廓分形维数、棱角性、纵向偏角均值、纵/横向趋向参数以及面积参数.

参考文献

[1] 王彦喆. 粗集料细观结构特征对沥青混合料性能的影响研究[D]. 西安:长安大学, 2012
WANG Yanzhe. Study on the influence of the microstructure characteristics of coarse aggregate on the performance of asphalt mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012

[2] 袁明园. 集料棱角性对沥青混合料性能的影响研究[D]. 西安:长安大学, 2011
YUAN Mingyuan. Study on theinfluence of aggregate angularity on the performance of asphalt mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011

[3] 张磊. 粗集料级配及形貌对沥青混合料结构和性能的影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017
ZHANG Lei. Study on the influence of coarse aggregate gradation and morphology on the structure and properties of asphalt mixture[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017

[4] XIE Heping, WANG Jinan. Direct fractal measurement of fracture surfaces[J]. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36(20):3073

[5] RAO C, TUTUMLUER E, KIM I T. Quantification of coarse aggregate angularity based on image analysis[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2002, 1787(1):117

[6] 陈国明. 沥青混合料中粗集料表面物理特性的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2005
CHEN Guoming. Study on surface physical properties of coarse aggregate in asphalt mixture[D].Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005

[7] 裴建中. 沥青路面细观结构特性与衰变行为[M]. 北京:科学出版社, 2010
PEI Jianzhong. Microstructure and decay behavior of asphalt pavement[M]. Beijing: Science Press, 2010

[8] 徐科, 张肖宁, 王端宜. 利用数字图像处理技术量测针片状颗粒含量[J]. 交通信息与安全, 2005, 23(5):46
XU Ke, ZHANG Xiaoning, WANG Duanyi. Measuring the content of needle-like particles by digital image processing technology [J]. Traffic Information and Security, 2005, 23(5):46

[9] 张肖宁. 基于 X-ray CT 的沥青混合料计算机辅助设计技术的研究进展[J]. 交通科学与工程, 2010, 26(2):1
ZHANG Xiaoning. Research progress of computer aided design technology of asphalt mixture based on X-ray CT[J]. Transportation Science and Engineering, 2010, 26(2):1

[10] JIN Can, YANG Xu, YOU Zhanping, et al. Aggregate shape characterization using virtual measurement of three-dimensional solid models constructed from X-ray CT images of aggregates[J]. Materials in Civil Engineering, 2018, 30(3):04018026

[11] WANG Hainian, WANG Chonghui, YOU Zhanjping, et al. Characterising the asphalt concrete fracture performance from X-ray CT Imaging and finite element modelling[J]. International Pavement Engineering, 2018, 19(3):307

[12] CHEN Ling, WANG Yuhong. Improved image unevenness reduction and thresholding methods for effective asphalt X-ray CT image segmentation[J]. Computing in Civil Engineering, 2017, 31(4): 04017002

[13] HU Jing, QIAN Zhendong, LIU Yang, et al. Microstructural characteristics of asphalt concrete with different gradations by X-ray CT [J]. Wuhan University of Technology(Materials Science Edition), 2017, 32(3):488

[14] FLETCHER T, CHAN Dan, MASAD E, et al. Aggregate imaging system for characterizing the shape of fine and coarse aggregates[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2003, 1832(1):67

[15] SHARMA K S, JIN Xin, HOLZNER C, et al. Experimental studies on few-view reconstruction for high-resolution micro-CT[J]. Journal of X-ray Science and Technology, 2013, 21(1):25

[16] YOU Zhanping, ADHIKARI S, EMIN K M. Dynamic modulus simulation of the asphalt concrete using the X-ray computed tomography images[J]. Materials and Structures, 2009, 42(5):617

[17] JIN Can, XU Yang, YOU Zhanping. Automated real aggregate modelling approach in discrete element method based on X-ray computed tomography images[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 18(9):837

[18] SANJEEV A, YOU Zhanping. 3D microstructural models for asphalt mixtures using X-ray computed tomography images. [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2008, 1(3):94

[19] 彭瑞东, 谢和平, 鞠杨. 二维数字图像分形维数的计算方法[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(1):22
PENG Ruidong, XIE Heping, JU Yang. Calculation method of fractal dimension of two-dimensional digital image [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(1):22

[20] MASAD E, MUHUNTHAN B, SHASHIDHAR N, et al. Quantifying laboratory compaction effects on the internal structure of asphalt concrete[J]. Transportation Research Record, 1999, 1681(1):179

[21] 任俊达. 基于 X-ray CT 沥青混合料细观结构及力学性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014
REN Junda. Study on microstructure and mechanical properties of asphalt mixture based on X-ray CT[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014

[22] 谭忆秋, 任俊达, 纪伦,等. 基于 X-ray CT 的沥青混合料空隙测试精度影响因素分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(6): 65
TAN Yiqiu, REN Junda, JI Lun, et al. Analysis of factors affecting void testing accuracy of asphalt mixture based on X-ray CT[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(6):65

[23] 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 characteristics of asphalt mixture based on digital image processing technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2002

(编辑　魏希柱)