DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201706035

粗集料针片状含量对沥青混合料结构影响

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

(1.哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院,哈尔滨 150090;2. 中国路桥工程有限责任公司,北京 100011;
3. 山西省交通科学研究院,太原 030006; 4.利物浦大学 管理学院,利物浦 L693BX)

摘 要: 为研究引起沥青混合料内部结构差异的因素,提出并测定了不同针片状颗粒含量的沥青混合料结构参数和体积指标. 运用工业CT断层成像技术和图像处理技术,采用颜色标尺标注空隙结构,以及Image-Pro Plus 6.0图像处理软件提取计算沥青混合料的空隙率,并测量沥青混合料断面粗集料颗粒的形貌参数,采用面积、纵横比AR_1和AR_2、主轴偏角均值、颗粒趋向参数Δ和棱角性等参数评价沥青混合料的结构特征. 结果表明:针片状颗粒的增加使得沥青混合料毛体积密度减小,空隙率增大,且通过工业CT计算得到的空隙率大于实测空隙率;大孔隙结构主要分布于试件的中下部位,试件顶端空隙较小;随着针片状颗粒的增加,颗粒纵横比期望AR_1和AR_2线性增加,横断面粗集料颗粒面积和减小,棱角性期望增大,但是对偏角均值和Δ影响不够明显.

关键词: 针片状;沥青混合料;体积指标;结构参数;图像处理;细观结构
中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)09-0040-07

Effects of flat and elongated particles content in coarse aggregate on asphalt mixture structure

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

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. China Road & Bridge Co., Ltd., Beijing 100011, China; 3. Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China;
4. School of Management, University of Liverpool, Liverpool L693BX, UK)

Abstract: To investigate the reasons of different performance of asphalt mixture, volume index and structural parameters were measured in asphalt mixtures with different flat and elongated particles content. Void ratio of asphalt mixture was calculated based on industrial CT scanning and image processing technology, and color scale was used to mark the void structure. The parameters such as area, aspect ratio-AR_1 and AR_2, mean value of spindle deflection angle, particle trend parameter-Δ and angularity were adopted to evaluate the structural characteristics of asphalt mixture. Results show that with the increase of flat and elongated particles, the volume density of asphalt mixture decreases and the porosity increases, and the void ratio calculated by industrial CT is larger than the measured. Macro-pore structure is mainly distributed in the middle and lower part of the specimens, but the voids at the top of the specimens are smaller. With the increase of the flat and elongated particles content in mixture, the aspect ratio expectation of particles-AR_1, AR_2 and angularity expectation increases, and the cross section area of coarse aggregate particle decreases, but the influences on the mean deviation of deflection angle and grain trend are not obvious.

Keywords: flat and elongated particles; asphalt mixture; volume index; structural parameters ; image processing; meso-structure

针片状颗粒(或称细长扁平颗粒)是指粗集料颗粒的长度与厚度之比超过3∶1的颗粒[1],沥青混合料中若使用过于细长或扁平针片状颗粒,易造成矿料颗粒之间互相搭接,细小颗粒无法进入,增大集料空隙,在施工中易折断,致使混合料不密实,粘聚性降低,使路面易出现早期破坏[2]. 国内外的学者虽然研究了针片状含量对于沥青混合料性能的影响[3-9],但相关的研究并没有具体清楚描述针片状颗粒与沥青混合料的结构的影响机制.

为此,本文基于工业X-Ray CT扫描成像技术和图像处理技术对不同针片状含量的沥青混合料内部结构进行分析和研究,系统地阐释沥青混合料空隙结构、体积指标、结构参数及细观结构中针片状颗粒含量的影响. 基于此研究,可以更好地理解沥青混合料结构中针片状颗粒的角色,以期明确和掌握其与沥青混合料结构和性能的相关性.

收稿日期: 2017-06-06
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,hit15765197767@163.com

1　试验概况

1.1　原材料

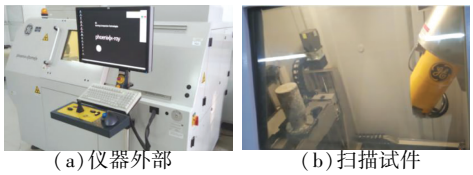
沥青采用 SBS 改性沥青，粗集料和细集料为哈尔滨阿城区生产的安山岩，矿粉为石灰岩磨制的石粉，采用省内某实际工程中使用的纤维. 沥青混合料试件制备之前，先对粗集料和细集料进行筛分，再将 4.75 mm 以上粗集料中的针片状颗粒挑选出来. 然后将针片状颗粒按照 0%、10%、20%、30%、40%、50%的比例进行回配.

1.2　最佳沥青用量及试件制备

考虑分析的全面性，本文级配选用道路工程中常用的两种典型级配：AC－16 和 SMA－16 级配中值，试验得知，AC－16 混合料的最佳沥青用量为 4.5%，SMA－16 混合料最佳沥青用量为 6.2%，纤维用量为 0.3%. 沥青混合料试件采用旋转压实仪成型，试件直径 100 mm＋0.2 mm、高 150 mm＋0.2 mm.

1.3　工业 CT 扫描技术

采用德国 Phoenix v|tome|x s 微焦点工业 CT，如图 1 所示.

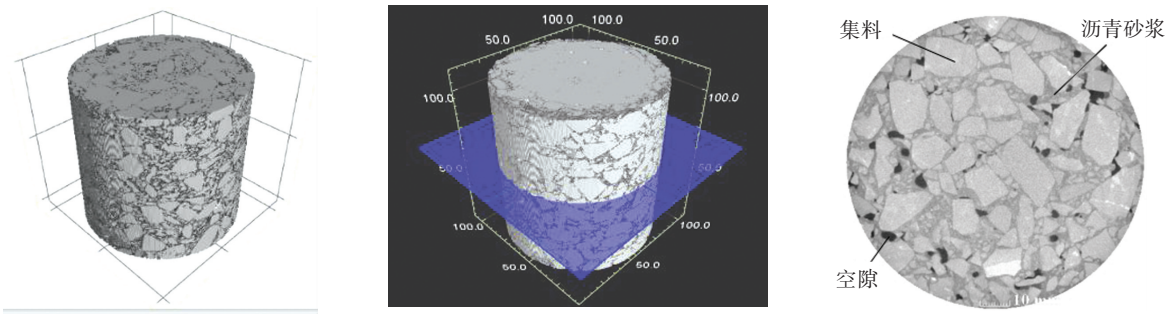


(a)仪器外部　　(b)扫描试件

图 1　德国 Phoenix v|tome|x s 微焦点工业扫描 CT

Fig.1　Phoenix v|tome|x s micro focus industrial scanning CT made in Germany

利用工业 CT 对 AC－16 和 SMA－16 不同针片状颗粒含量的 12 种沥青混合料试件进行了扫描和重构. 为保证测量的准确性，避免成型的影响，扫描试件为切去试件两端得到 Φ100 mm×H150 mm 的试件. 采用 phoenix datosx 2 软件进行重构，同时结合三维可视化软件 VG Studio MAX2.2 可进行沥青混凝土试件内部结构提取和分析[5]. 图 2 为试件三维重构效果和断面结构提取过程示意图.



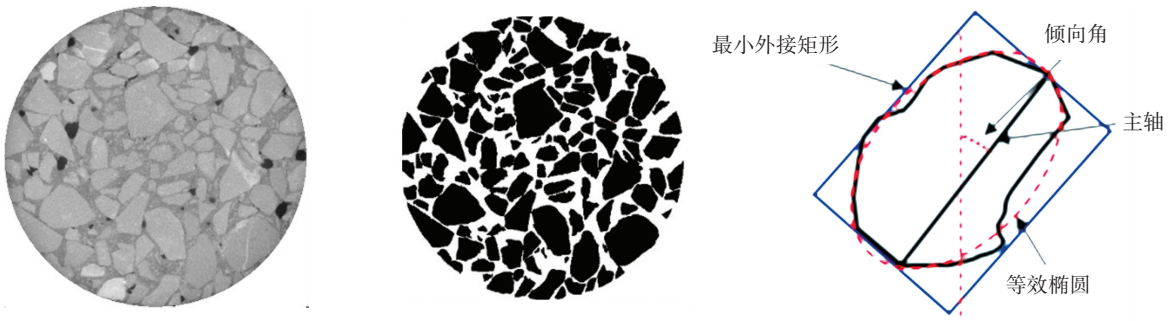
(a)三维重构　　(b)断面截取　　(c)断面截取效果图

图 2　沥青混凝土扫描试件的三维重构及断面提取过程示意

Fig.2　Sketch map of scanning specimen reconstruction and section extraction of asphalt mixture

1.4　图像处理技术

从二维断面中进行粗集料颗粒的提取，从而对粗集料颗粒的形貌参数进行研究. 本文对粗颗粒的特征图像通过 Image-Pro Plus 6.0(以下简称 IPP)图像分析处理软件进行的，同时采用该软件测量了粗集料颗粒的长度、面积等以及颗粒等效图形的长度、面积等几何等形貌参数[10]. 提取及测量过程见图 3.



(a)原图重构　　(b)颗粒提取　　(c)颗粒形貌参数

图 3　粗集料颗粒提取及参数获取过程示意图

Fig.3　Sketch map of coarse aggregate particle extraction and measurement parameters

1.5　参数与因素的显著性检验及相关性分析方法

采用方差分析的方法检验针片状含量是否对沥青混合料中的粗集料颗粒体积指标、结构参数产生了显著性影响. 分析中，将 F 值与临界值比较，如果 F 大于临界值，说明变量对指标影响显著，反之则影响不显著[11].

采用 Pearson 相关性检验方法检验针片状含量

与体积指标、结构参数是否存在线性相关，Pearson 相关系数 r 计算公式为

$$r_{xy,z}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}}. \quad (1)$$

式中：$\bar{x}$、$\bar{y}$ 分别为变量 x、y 的均值，x_i、y_i 分别为变量 x、y 的第 i 个观测值.

2 针片状含量对沥青混凝土结构影响分析

2.1 试件设计

空隙结构经过工业 CT 扫描重构之后其灰度接近于 0，且灰度均匀. 因此将空隙结构从扫描后的试件中提取并计算其体积，再将该体积与试件总体积做比值即可得到“扫描空隙率”. 同时采用表干法对试件进行测量，计算了不同针片状含量的沥青混合料的体积指标，见表 1（表中“Z”代表 AC-16 中值级配，“SZ”代表 SMA-16 中值级配）.

可见，沥青混合料的空隙率、矿料间隙率、骨料间距随粗集料针片状含量增加而增大；而混合料的毛体积密度、沥青饱和度与之呈负相关.

同时发现实测空隙率显著小于“扫描空隙率”，究其原因，认为是因为表干法测定密度时，混合料表面开口空隙的水分流失，从而导致了实测值偏小.

表 1 不同粗集料针片比的沥青混凝土结构参数

Tab. 1 Volume index of asphalt mixture with different flat and elongated particles content of coarse aggregate

编号	针片比/%	毛体积密度/(g·cm^{-3})	实测空隙率/%	扫描空隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%
Z1	0	2.411	6.50	6.31	16.39	60.61
Z2	10	2.395	7.11	7.39	16.96	58.25
Z3	20	2.381	7.62	7.69	17.44	56.33
Z4	30	2.379	7.75	7.92	17.50	56.06
Z5	40	2.371	8.03	8.93	17.80	54.94
Z6	50	2.363	8.33	9.63	18.06	53.91
SZ1	0	2.397	4.50	5.28	18.10	72.74
SZ2	10	2.361	5.81	7.55	18.98	68.07
SZ3	20	2.361	6.15	8.21	19.15	67.86
SZ4	30	2.356	6.57	8.15	19.50	67.64
SZ5	40	2.345	6.97	9.15	19.85	65.46
SZ6	50	2.339	7.49	9.87	20.30	63.92

2.2 针片状含量对沥青混合料空隙结构影响分析

利用 VG Studio MAX2.2 进行空隙提取，并采用颜色标尺标注不同体积的空隙结构如图 4 所示，颜色越红说明空隙越大（图 4 标尺自下而上，标识的空隙为逐渐增大）. 可见，随着针片状颗粒的增加，沥青混合料的空隙结构明显增大. 同时，由于在过程中，采用旋转压实方法制作试件，近于压头的部分容易被压实，而远于压头的部分相反，造成上部出现空隙体积小的结构，下部出现空隙体积大的结构.

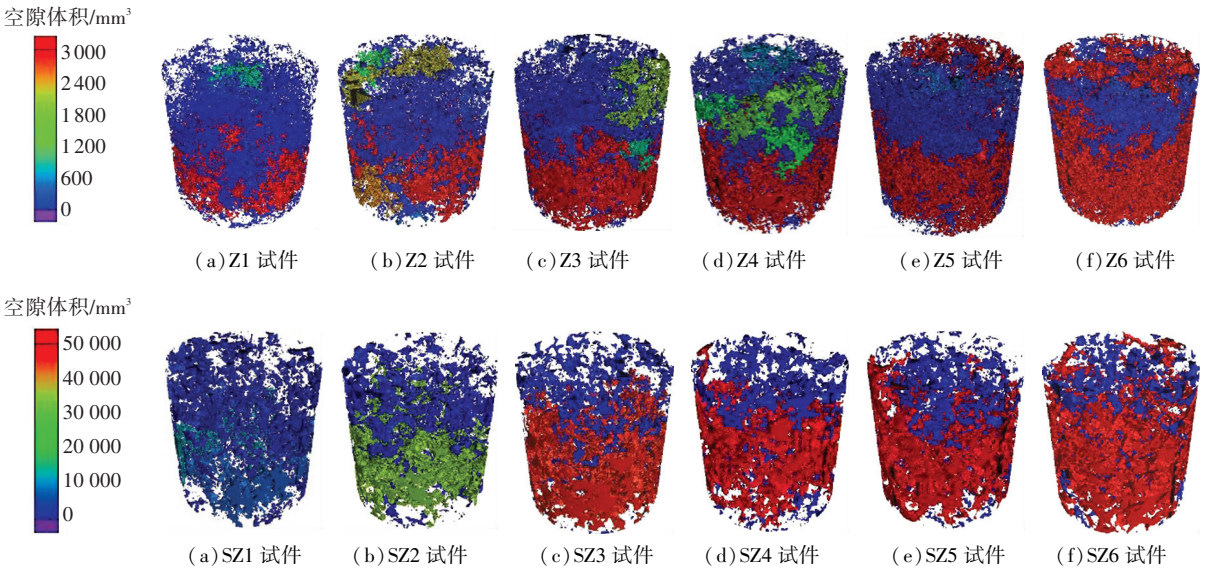


图 4 不同针片状含量的沥青混凝土三维空隙结构对比

Fig.4 Comparison of three-dimensional void structure of asphalt mixtures with different flat and elongated particles content

3　针片状对混合料中粗集料形貌特征的影响

粗集料的形貌特性的描述参数和位置分布研究较多[12-16]，分别用集料的针片度、轮廓棱角的突出程度以及集料表面的粗糙度从轮廓形状、棱角性和表面纹理 3 个方面分别反映了集料的形貌特征.

3.1　针片状对混合料中粗集料纵横比的影响

采用 IPP 分别测量得到了粗集料颗粒最小外接矩形和等效椭圆的长短轴(图 3)，将长短轴比值分别定义为纵横比 AR_1 和 AR_2，其中，将集料颗粒最小外接矩形的长轴与短轴的比值称为纵横比 AR_1，将颗粒等效椭圆的长轴与短轴的比值称为纵横比 AR_2. 求得沥青混凝土试件的一个二维断面上的所有颗粒纵横比 AR_1 和 AR_2，其累计分布概率服从三参数威布尔分布，其拟合图像见图 5，函数表达式和期望表达式分别为

$$F_w(t;m,\eta,\gamma) = 1 - e^{-(\frac{t-\gamma}{\eta})^m}, \tag{2}$$

$$E_w(t) = \gamma + \eta\Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right). \tag{3}$$

式中：m 为形状参数，η 尺度参数，γ 为位置参数，$E_w(t)$ 为函数期望，$\Gamma(m)$ 伽马函数.

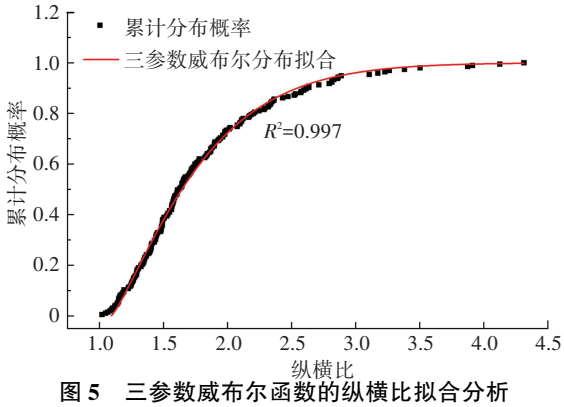
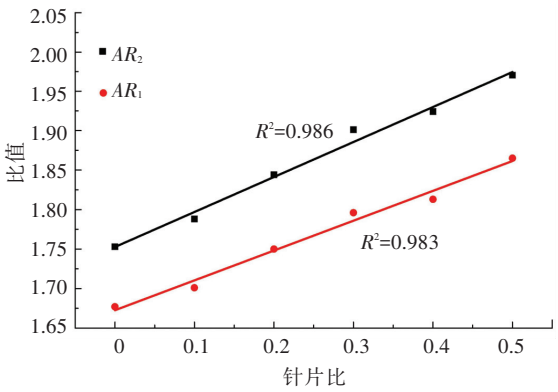


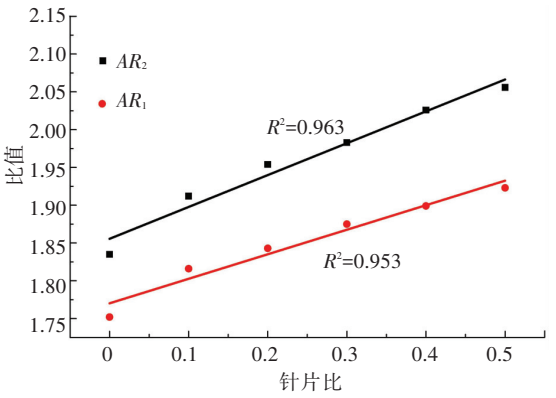
图 5　三参数威布尔函数的纵横比拟合分析

Fig.5　Fitting Weibull Function of three parameters of aspect ratio

利用式(2)和式(3)求得不同针片状含量沥青混合料断面的粗集料纵横比期望值，作出 AR_1 和 AR_2 期望值随针片比的变化趋势图如图 6 所示. 由图可知，AR_1 和 AR_2 和随着针片状颗粒的增加呈现明显的增大趋势，粗集料针片比和纵横比期望值的曲线拟合相关系数都在 0.953 以上，相关性显著.



(a) AC-16 针片状含量与纵横比变化图



(b) SMA-16 针片状含量与纵横比变化图

图 6　针片状含量与纵横比变化关系图

Fig.6　Relationship between the content of the flat and elongated particles and the aspect ratio

3.2　针片状含量对混合料中粗集料主轴偏角影响

Eyad Masad[10] 提出了采用粗集料颗粒主轴偏角(见图 3)平均值和趋向参数 Δ 评价沥青混合料粗颗粒分布一致性，$\bar{\alpha}$ 和 Δ 表达式分别为

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^{N}\alpha_k}{N}, \tag{4}$$

$$\Delta = \frac{100}{N}\sqrt{\left(\sum_{1}^{N}\sin 2\alpha_k\right)^2 + \left(\sum_{1}^{N}\cos 2\alpha_k\right)^2}. \tag{5}$$

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；Δ 值在 0~100 之间，表示粗集料颗粒主轴分布一致性，数值越大，分布一致性越高.

按式(4)、(5)统计 AC-16 和 SMA-16 级配不同针片状含量的沥青混合料偏角均值和 Δ，如图 7、8 所示. 采用方差分析进行针片状影响显著性检验，采用 Pearson 相关性检验计算针片比和主轴偏角、Δ 及相关系数见表 2.

对比偏角均值统计图 7 和表 2 发现，在 AC 沥青混合料中，针片状颗粒与横断面偏角均值变化之间的方差检验不显著，也不具有线性相关，即横断面偏角均值不受针片状含量的影响或影响不大；纵断面方差检验结果具有显著性，具有正相关性微弱. 在 SMA 沥青混合料中，横断面偏角均值不受针片状含量的影响或影响不大，纵断面检验结果的显著性反之，但是具有较弱的线性相关性.

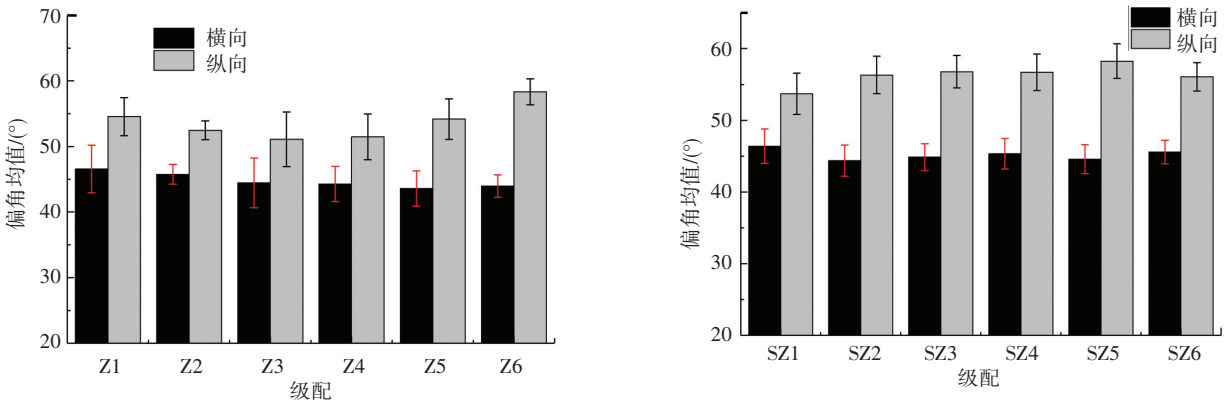


图 7 主轴偏角均值对比

Fig.7 Comparison of mean deviation of spindle angle

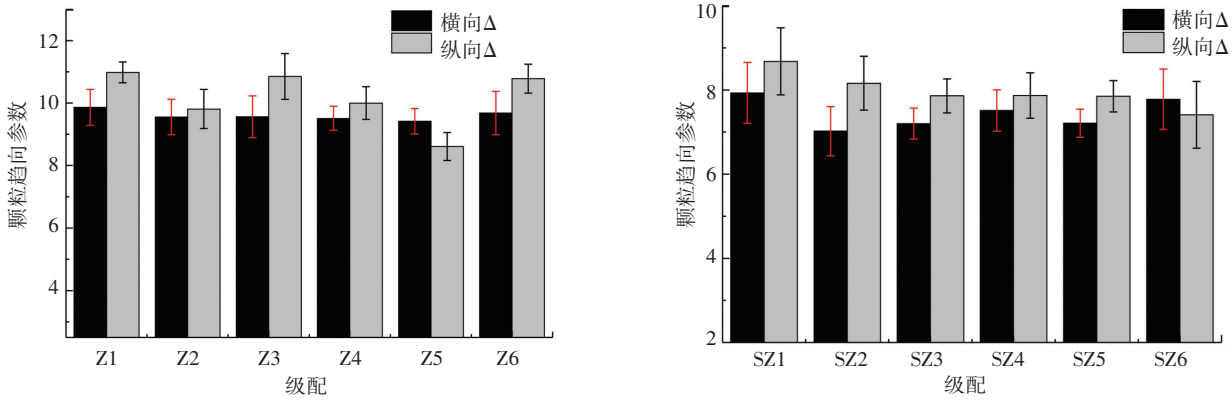


图 8 颗粒趋向统计图

Fig.8 Grain trend diagram

表 2 各参数的显著性及相关性检验结果

Tab.2 Test results of significance and correlation

参数	级配类型	F	临界值(0.05)	R	P	显著性水平
横向 Δ	Z1～Z6	0.432	4.476	−0.113	0.475	—
	SZ1～SZ6	5.616	2.349	0.489	0.000	0.01
纵向 Δ	Z1～Z6	15.231	4.476	−0.267	0.087	—
	SZ1～SZ6	7.732	2.349	0.094	0.437	—
横向 $\bar{\alpha}$	Z1～Z6	1.281	4.476	−0.296	0.057	—
	SZ1～SZ6	1.247	2.349	0.240	0.044	0.05
纵向 $\bar{\alpha}$	Z1～Z6	6.566	4.476	0.345	0.025	0.05
	SZ1～SZ6	6.454	2.349	−0.280	0.018	0.05

结合图 8、表 2 分析得出，在 AC−16 沥青混合料中，横断面上，随着针片状掺量增大，颗粒趋向参数 Δ 变化不大，临界值大于 F 值，说明前者对后者影响不显著，二者相关性差；纵断面上，后者受前者影响显著，但是二者相关性差. 对于 SMA−16 沥青混合料，横断面和纵断面上 Δ 受针片状颗粒掺量影响显著，横断面上具有较好的线性正相关，而纵断面相关性较差.

3.3 针片状含量对沥青混合料横断面粗颗粒面积影响

采用 IPP 测得了沥青混合料断面上每个粗集料颗粒的面积，求得每个试件断面的颗粒面积和的平均值汇总见图 9，方差分析和相关性分析见表 3.

表 3 面积参数的显著性及相关性检验结果

Tab.3 Significance and correlation test results of area parameters

级配类型	F	临界值(0.05)	R	P	显著性水平
Z1～Z6	1.972	4.476	−0.449	0.003	0.01
SZ1～SZ6	9.451	2.346	−0.578	0.000	0.01

由图 9 和表 3 可知，沥青混合料横断面上粗集料的平均面积随着粗集料针片状颗粒掺量的增加而减小，当 AC−16 和 SMA−16 级配沥青混合料的横断面面积平均值下降了大约 10%时，此时粗集料针片

状掺量均增加到 50%. 产生这种现象的原因是随着针片状颗粒的逐渐增加，空隙逐渐增加，使得粗集料距离变大，在每个断面上粗颗粒面积平均值将会减小. Z1～Z5 中，临界值大于 F 值，说明影响不显著，但是 Pearson 检验的相关系数大于 0.45，且显著线性负相关，显著性水平 0.01. SZ1～SZ6 中，方差检验临界值小于 F 值，Pearson 相关系数−0.58，说明线性负相关性很好.

3.4　针片状含量对沥青混合料颗粒棱角性的影响

采用基于颗粒周长计算的棱角性指标，即颗粒的棱角性 $Ag(P)$ 为颗粒实际周长与等效椭圆的周长的比值的平方，表达式为

$$Ag(P)=\left(\frac{Pr}{Pr_e}\right)^2, \tag{6}$$

式中 Pr 为集料颗粒周长，Pr_e 为等效椭圆周长.

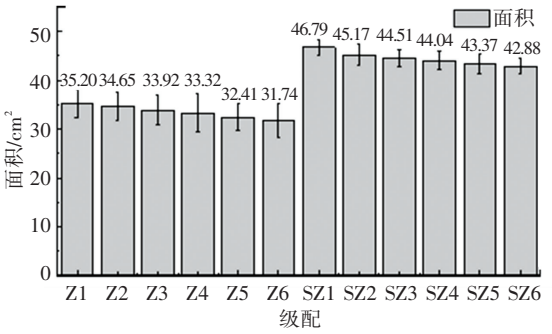


图 9　粗集料面积对比图

Fig.9　Area contrast histogram of coarse aggregate

由表 4 和图 10 分析可得，在 AC 类沥青混合料和 SMA 类沥青混合料中，棱角性指标 $Ag(P)$ 均与针片状颗粒含量的变化呈正相关，方差检验结果影响显著. 说明针片状颗粒的增加使得粗集料的不规则增加，进一步使得沥青混合料棱角性期望值增加.

表 4　棱角性参数的显著性及相关性检验

Tab.4　Significance and correlation test of angularity parameter

参数	级配类型	F	临界值(0.05)	R	P	显著性水平
棱角性	Z1～Z6	13.925	4.476	0.431	0.004	0.01
	SZ1～SZ6	6.776	2.349	0.537	0.000	0.01

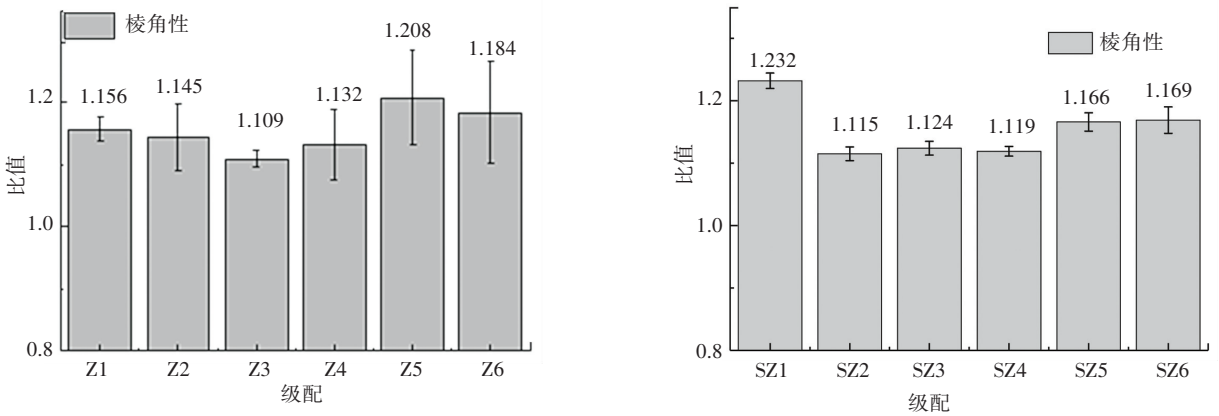


图 10　棱角性指标变化图

Fig.10　Change histogram of angularity index

4　结　论

1）沥青混合料空隙率、矿料间隙率随着集料针片状颗粒含量的增加逐渐增加；而毛体积密度沥青饱和度随之逐渐减小；扫描计算空隙率大于表干法测得的空隙率，试件的中下部位出现大孔隙结构.

2）纵横比 AR_1 和 AR_2 累计分布概率服从三参数威布尔分布，其期望值随着针片状含量的增加呈现线性增大.

3）在沥青混凝土 CT 扫描所得的横断面上，粗集料面积平均值随针片状含量的增大而趋于变小，粗集料颗粒的偏角均值基本不变；针片状颗粒对 AC−16 趋向参数 Δ 影响不显著，而随着针片状颗粒含量的增加，SMA−16 横截面趋向参数 Δ 增大，纵断面变化不明显.

4）棱角性指标累计分布概率服从三参数威布尔分布，其期望值随针片状颗粒的增加逐渐增大.

参考文献

[1] 谢兆星，李鼎乐，韩森，等.针片状颗粒含量对沥青混合料性能的影响[J].建筑材料学报，2007，10(6)：736
XIE Zhaoxing, LI Dingle, HAN Sen, et al. Effect of needle particle content on the performance of asphalt mixture [J].Journal of Building Materials, 2007, 10 (6): 736

[2] 余志凯，黄刚，胥吉.针片状颗粒含量对沥青混合料路用性能的影响[J].北方交通，2010(6)：14
YU Zhikai, HUANG Gang, XU Ji. Effect of needle particle content on road performance of asphalt mixture [J].Northern Communica-

tions, 2010 (6): 14
[3] VAVRIK W R, FRIES R J, CARPENTER S H, et al. Effect of flat and elongated coarse aggregate on characteristics of gyratory compacted samples [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1999, 1681(1):28
[4] CHEN J S, WONG S Y, LIN K Y. Quantification of movements of flat and elongated particles in hot mix asphalt subject to wheel load test[J]. Materials and Structures, 2005, 38(3):395
[5] 王大庆. 细集料几何特征参数的表征及对沥青混合料性能影响研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013
WANG Daqing. Characterization of geometric characteristic parameters of fine aggregate and its influence on performance of asphalt mixture [D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2013
[6] 谭忆秋,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, JI Lun, et al. Analysis of influencing factors of asphalt mixture voids accuracy based on X-ray CT [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46 (6): 65
[7] ALOMARI A A, MASAD E. Analysis of HMA permeability through microstructure characterization and simulation of fluid flow in X-ray CT images[C]// Middle East International Conference on Advances in Civil, Mechanical, and Materials Engineering. Amman, Jordan: [s.n.], 2005: 21
[8] WANG L,SUN W, LALLY E M,et al. Application of LADAR in the analysis of aggregate characteristics[M]. Washington DC: The National Academies Press, 2012: 42
[9] ARAMBULA E, MASAD E, MARTIN A E. Influence of air void distribution on the moisture susceptibility of asphalt mixes[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(8): 655
[10] MASAD E, MUHUNTHAN B, SHASHIDHAR N, et al. Quantifying laboratory compaction effects on the internal structure of asphalt concrete[J]. Transportation Research Record, 1999(1):179
[11] 卢纹岱.SPSS统计分析[M].北京:电子工业出版社,2010:301
LU Wendai. SPSS statistical analysis of [M].Publishing House of Electronics Industry, 2010:301
[12] 廖一平.基于数字图像处理的沥青混合料集料形状及分布研究[D].衡阳:南华大学,2015
LIAO Yiping. Research on aggregate shape and distribution of asphalt mixture based on digital image processing [D]. Hengyang:University of South China, 2015
[13] 高磊,解建光,吴成浩,等.基于粗集料形状特征的沥青混合料三维数字试件生成[J].东南大学学报(自然科学版),2017,47(4):793
GAO Lei, XIE Jianguang, WU Chenghao, et al. Production of 3D digital specimens of asphalt mixture based on the shape characteristics of coarse aggregate [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017,47 (4): 793
[14] GONG F, LIU Y, YOU Z, et al. Mineral aggregate morphological evaluation with MATLAB Fourier radial gradient transform analysis [J]. Journal of Testing & Evaluation, 2016, 45(1):20160141
[15] GONG F, YAO S, LIU Y, et al. A new method for characterizing coarse aggregate morphology through a MATLAB program[C]//Geo-China International Conference. New York:American Society of Civil Engineers,2016:53
[16] LIU Y, GONG F, YOU Z, et al. Aggregate Morphological characterization with 3D optical scanner versus X-Ray computed tomography[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30 (1):04017248

(编辑 魏希柱)

(上接第39页)

[6] 白焱,张志峰. 采用模糊云模型的武器研制项目风险传导评估[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(10): 168.DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.10.025
BAI Yan, ZHANG Zhifeng. Risk conduction assessment of weapon development projects by using fuzzy cloud model[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(10): 168.DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.10.025
[7] 杨晓艳, 贡金鑫, 张启伟. 随机车辆荷载作用下斜拉索索力的概率模型及可靠度分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(2): 90
YANG Xiaoyan, GONG Jinxin, ZHANG Qiwei. Analysis of probabilistic model of stay cable stress and reliability under random vehicle loads[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31 (2): 90
[8] ARANGIO S, BONTEMPI F. Structural health monitoring of a cable-stayed bridge with Bayesian neural networks[J]. Structure & Infrastructure Engineering, 2015, 11(4): 575. DOI: 10.1080/15732479.2014.951867
[9] WANGWEI, HU Chuanbo, CHEN Nengcheng, et al. Spatio-temporal enabled urban decision-making process modeling and visualization under the cyber-physical environment[J]. Science China Information Sciences, 2015, 58(10): 1.DOI: 10.1007/s11432-015-5403-x
[10] 熊文, 涂雪, 肖汝诚. 基于变异系数与趋势因子的斜拉桥索力评估[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(11): 1575
doi:10.3969/j.issn.0253-374x.2011.11.003
XIONG Wen, TU Xue, XIAO Rucheng. Condition assessment of stay cable forces based on variation and trend coefficients[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2011, 39(11): 1575
[11] LI Xingxin, REN Weixin, BI Kaiming. FBG force-testing ring for bridge cable force monitoring and temperature compensation [J]. Sensors and Actuators A—Physical, 2015, 223(3): 105. DOI: 10.1016/j.sna.2015.01.003
[12] VAN LE, H, NISHIO M. Time-series analysis of GPS monitoring data from a long-span bridge considering the global deformation due to air temperature changes[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2015, 5(4): 415.DOI: 10.1007/s13349-015-0124-9
[13] WENG Lina, ZHANG Ping, FENG Zhiyong, et al. Short-term link quality prediction using nonparametric time series analysis[J]. Science China Information Sciences, 2015, 58(8): 1. DOI: 10.1007/s11432-014-5270-x
[14] DAN Danhui, ZHAO Yiming, YANG Tong, et al. Health condition evaluation of cable-stayed bridge driven by dissimilarity measures of grouped cable forces [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013, 2013(2013): 818967-1. DOI: 10.1155/2013/818967
[15] LIU Xiaoling, HUANG Qiao, REN Yuan. Anomaly detection algorithm for stay cable monitoring data based on data fusion[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2016, 23(3): 39. DOI:10.11916/j.issn.1005-9113.2016.03.003

(编辑 魏希柱)