

集料表观形态与沥青混合料性能相关性分析

袁海

(重庆交通大学 土木工程学院,重庆 400074)

摘要:采用集料图像测试系统(AIMS II)分别测定普通集料和广东省中山集料厂精细加工集料的二维形状指数、棱角性指数、纹理指数、球度指数等4个表观形态指标,并进行比较分析。按1:1的比例混合普通集料和精细加工集料,将其定义为特定组合集料,分别用3种不同集料制备AC-13混合料和SMA-13混合料,采用室内试验测试了不同沥青混合料的高温稳定性和水稳定性,并运用灰关联分析方法分析各集料表观形态指标对混合料性能影响的显著程度。研究表明,精细加工工艺能提升集料表观形态指标;棱角性指数对混合料高温性能影响最为显著,纹理指数对混合料水稳定性影响最为显著。

关键词:道路工程;集料;表观形态指标;精细加工;灰关联分析

中图分类号:U414 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2019)03-0064-06

集料体积占沥青混合料体积85%以上,集料质量是决定混合料性能优劣的关键因素,其中集料表观形态特征对沥青混合料路用性能具有重要影响^[1-3]。近年来,研究人员使用先进的数字图像分析系统^[4-7]测量集料的表观形态指标,取得了大量研究成果。Aragão等^[8]提出,粗集料的几何形状与混合料抗车辙性能有明显的相关性,同时,粗集料的表面纹理也对混合料性能有着明显影响;Chen等^[9]提出,相较针片状或圆盘状粗集料颗粒,形状接近立方体的粗集料颗粒能够有效提升SMA混合料抗车辙能力;Xie等^[10]提出,细集料的几何形状和表面纹理同样与混合料性能有明显相关性;Bessa等^[11]提出,基于现有研究成果,应通过采用不同加工工艺生产的集料制备混合料,进行试验来分析集料表观形态对混合料性能的影响。

本文选用普通集料和广东省中山集料厂精细加工工艺^[12]生产的精细集料,采用集料图像测试系统(AIMS II)进行表观形态检测,评价了普通集料和精细加工集料的表观形态;制备AC-13混合料、SMA-13混合料,进行高温性能及水稳定性测试,并通过灰关联分析方法分析了各表观形态

指标对混合料性能的影响程度。

1 试验概况

1.1 原材料

沥青选用克拉玛依牌70#基质沥青及SBS改性沥青,技术指标如表1所示。粗、细集料选用广东省河源市辉绿岩碎石,分别采用普通工艺和精细加工工艺加工而成;矿粉选用广东省云浮市石灰岩碎石磨制而成,集料及矿粉各项技术指标均符合规范要求^[13]。

表1 沥青技术指标

Table 1 Asphalt technical indicators

性能指标	70#基质沥青	SBS改性沥青
针入度(25℃,100g,5s)/0.1mm	69.3	77.2
延度(15℃,5cm·min ⁻¹)/cm	166	40.3
软化点/℃	52.8	71.3

1.2 级配选择

选用AC-13沥青混合料和SMA-13沥青混合料,混合料级配如表2所示。

收稿日期:2019-03-28

基金项目:重庆交通大学研究生科创基金项目(2018S0113);重庆交通大学研究生科创基金项目(2018S0107)

作者简介:袁海(1995—),男,四川遂宁人,硕士生,主要研究方向为路面材料及结构。

表2 混合料级配组成
Table 2 Asphalt mixture gradation (by mass)

混合料类型	油石比/%	通过下列筛孔(方孔筛,mm)的矿料质量百分率/%									
		16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-13	4.7	100	95	76	53	37	27	19	14	11	6
SMA-13	6.0	100	99	64	27	21	18	15	13	12	10

1.3 AIMS 测试系统

如图1所示,集料图像测试系统 AIMS II 是一套可以客观反映并测量集料各项表观特性的测试系统,系统集集料图像采集模块和数据分析程序为一体,可以测量采集集料的表观信息,并对集料的各项表观信息进行分析计算,将其转换为直观的数据,供研究人员进行研究分析。该系统由图像采集系统和数据分析系统两部分组成。图像采集系统主要由高倍率的照相机、集料托盘、照明系统和显微镜构成;数据分析系统由计算机和分析软件构成。对采样图像进行分析,并利用 Excel 对分析数据进行输出,按照规定的格式输出各项形状特征的累积分布曲线,同时可以直观地显示出集料颗粒的个数、各项指标的平均值、标准差等,方便在试验后对所需要的数据进行调用和提取。

AIMS II 具有多种测试模式,其中测量集料表观特性的模式为 shape 模式。Shape 模式下测量集料表观特性可以分为2类:一种是对粗集料(≥ 2.36 mm)进行测试分析,得到粗集料的棱角、纹理、球度和长细比指标;另一种是对细集料(< 2.36 mm)进行测试分析,得到细集料的棱角和二维形状指标。纹理指标在灰度图模式下分析得到,其余指标在黑白图像模式下分析得到。

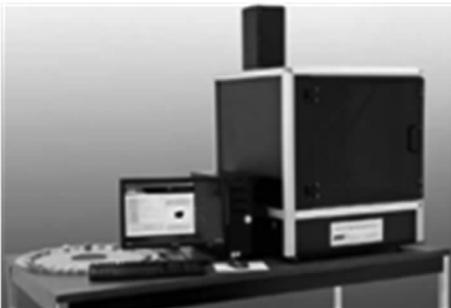


图1 集料图像测试系统(AIMS II)

Fig 1 Aggregate image measurement system (AIMS II)

1.4 集料表观形态指标

集料的形态特征可用形状、棱角性和表面纹理等3个特征分量具体描述^[14]。本文所用的集料图像测试系统(AIMS II)通过二维形状指数、球度指数2个形状指标,以及棱角性指数、纹理指数,对集料表观形态进行描述。

1.4.1 二维形状指数(F)

二维形状指数用于描述细集料二维形状,其数值范围为[0,20],当集料颗粒的二维形状为圆形时该指数等于0。

$$F = \sum_{\theta=0}^{360-\Delta\theta} \left[\frac{R_{\theta+\Delta\theta} - R_{\theta}}{R_{\theta}} \right] \quad (1)$$

式中: θ 为方向角; R_{θ} 为集料在角度为 θ 处的半径; $\Delta\theta$ 为测量时的角度差值。

1.4.2 棱角性指数(I_{Ga})

棱角性指数反映集料棱角性大小,采用梯度方法定量表征粗、细集料颗粒的大小及其轮廓的变化。其数值范围为[0,10 000],棱角性指数为0表示该集料颗粒为无棱角的圆形。

$$I_{Ga} = \frac{1}{\frac{n}{3-1}} \sum_{i=1}^{n-3} |\theta_i - \theta_{i+3}| \quad (2)$$

式中: i 为集料轮廓线上采集的第 i 个点; n 为集料轮廓线上所采集点的总数; θ_i 为集料轮廓线上第 i 个点的倾斜角。

1.4.3 纹理指数(I_{Tx})

纹理指数反映粗集料颗粒表面的粗糙程度,采用小波分析方法,分解集料图像,在横向、纵向、斜向等3个不同图像中描述集料表面纹理,计算特定分解度下的小波系数作为纹理指数,其数值范围为[0,1 000],该指数为0时表示集料颗粒表面完全光滑。

$$I_{Tx} = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N (D_{i,j}(x,y))^2 \quad (3)$$

式中: D 为图像分解方程; N 为单个图像中的小波系数的总数; i 为图像编号,取值为1、2、3; j 为小波系数指数; (x,y) 为小波系数在变换域中的坐标。

1.4.4 球度指数(I_{Sp})

球度指数用于描述粗集料的三维形状,其数值范围为[0,1]。球度指数为1表示该集料各方向长度相等,是一个球体。

$$I_{Sp} = \sqrt{\frac{d_s d_l}{d_L^2}} \quad (4)$$

式中: d_s 为集料最短方向尺寸; d_l 为集料中间方向尺寸; d_L 为集料最长方向尺寸。

2 试验结果与分析

将不同粒径的精细加工集料和普通集料按1:1配合,制成特定组合集料,并利用AIMS II系统测试不同粒径特定组合集料的表现形态。为反映不同级配的沥青混合料中集料表现形态的整体变化,将不同粒径集料的表现形态测试值按各自在不同级配混合料中的占比进行加权平均,得到该级配混合料的集料表现形态指标综合值^[15],如表3所示。

表3 集料表现形态测试结果

Table 3 Aggregate shape properties test results

混合料类型	集料表现形态指标			
	二维形状	棱角性	纹理	球度
	指数	指数	指数	指数
AC-13J	6.518	2.941	628	0.731
AC-13T	6.454	2.836	612	0.719
AC-13P	6.391	2.590	576	0.649
SMA-13J	6.524	2.733	625	0.730
SMA-13T	6.461	2.690	602	0.653
SMA-13P	6.398	2.526	579	0.645

注:J表示集料类型为精细加工集料;T表示集料类型为特定组合集料;P表示集料类型为普通集料。

采用三种集料分别制备AC-13混合料和SMA-13混合料,进行60℃车辙试验、浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验,测试结果如表4所示。

由表3、表4可知,对比不同集料制备的混合料,集料表现形态指标、动稳定度(60℃)、浸水马歇尔试验残留稳定度、冻融劈裂试验残留强度比的大小关系均为:AC-13J > AC-13T > AC-13P, SMA-13J > SMA-13T > SMA-13P;对比AC-13混合料和SMA-13混合料,精细加工集料的棱角性指数、纹理指数、球度指数较普通集料均有一定提升,AC-13混合料的三个集料表现形态指标分别提高了13.6%、9.0%、12.6%,SMA-13混合料的三个表现形态指标分别提高了8.2%、7.9%、13.1%。

表4 路用性能测试结果

Table 4 Performance test results

混合料类型	动稳定度(60℃)/ (次·mm ⁻¹)	MS ₀ /%	TSR/%
AC-13J	1 957	82.1	81.6
AC-13T	1 799	76.3	75.2
AC-13P	1 604	72.1	71.6
SMA-13J	10 568	95.5	92.0
SMA-13T	8 762	88.5	86.5
SMA-13P	7 514	79.3	75.9

注:MS₀代表浸水马歇尔试验残留稳定度;TSR代表冻融劈裂试验残留强度比。

研究表明:(1)精细加工工艺能够在一定程度上改善集料的表现形态;(2)相较普通集料制备的混合料,精细加工集料制备的混合料的路用性能均有不同程度的提升,尤其是相较SMA-13P,SMA-13J的动稳定度提高了40.6%;(3)在普通集料中掺加精细加工集料制成特定集料,其表现形态指标优于普通集料,特定集料制备的混合料的路用性能指标同样优于普通集料制备的混合料。

3 关键影响因素分析

灰关联分析是研究系统中各因素关联程度的方法。通过一定数据处理,在随机因素序列中找到其关联性,提炼出影响系统的主要因素和因素间对系统影响的差别^[16]。灰关联度计算如下:

(1) 灰关联系数

X 为灰关联因子集, $X_0 \in x$ 为参考列, $X_i \in x(i=1,2,\dots,m)$ 为比较列。比较列与参考列间的灰关联系数为:

$$\xi_i[x_0(k), x_i(k)] = \frac{\min_i \min_k \Delta_i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_i(k)} \quad (5)$$

式中, $X_0 = \{x_0(k) | k=1,2,\dots,n\}$, $X_i = \{x_i(k) | k=1,2,\dots,n; i=1,2,\dots,m\}$; ρ 为分辨系数,通常取0.5; $\min_i \min_k \Delta_i(k)$ 为两极最小差; $\max_i \max_k \Delta_i(k)$ 为两极最大差。

(2) 灰关联度

$$\xi(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i[x_0(k), x_i(k)] \quad (6)$$

3.1 高温稳定性分析

根据灰关联分析方法,对表3、表4中的试验结果进行初值化处理,以动稳定度(60℃)作为参

考序列,计算得出二维形状指数、棱角性指数、纹理指数、球度指数等 4 个影响因素的灰关联系数及灰关联度,如表 5 所示。

表 5 以动稳定度为参考序列的灰关联系数及灰关联度

Table 5 Grey correlation coefficient and grey relations with dynamic stability as reference sequence

影响因素	混合料类型						灰关联度
	AC-13J	AC-13T	AC-13P	SMA-13J	SMA-13T	SMA-13P	
二维形状指数	1	0.969	0.933	0.337	0.391	0.439	0.678
棱角性指数	1	0.980	0.973	0.333	0.386	0.429	0.684
纹理指数	1	0.976	0.958	0.337	0.388	0.434	0.682
球度指数	1	0.972	0.970	0.337	0.384	0.430	0.682

各影响因素对动稳定度的影响程度如图 2 所示。

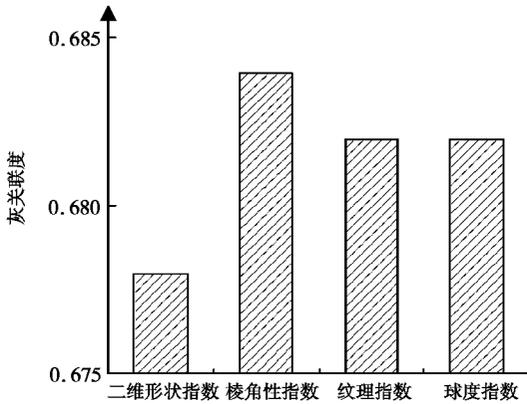


图 2 各因素与动稳定度间的灰关联度

Fig 2 Grey correlation between different factors and dynamic stability

由图 2 可知,各影响因素对动稳定度影响大小为:棱角性指数 > 球度指数/纹理指数 > 二维形

状指数,各影响因素对动稳定度的关联度均大于 0.6,说明集料表观形态对沥青混合料高温稳定性影响显著,其中,棱角性指数对高温稳定性影响最大。

结合表 3、表 4 分析,对于同种级配,随集料棱角性指数的增加,集料的微观棱角性更加丰富,骨料间的摩擦性显著增大,混合料结构稳定性增加,动稳定度增加;对比不同级配,AC-13 的动稳定度远小于 SMA-13 的动稳定度,二者均随集料棱角性指数下降而明显下降,SMA-13 动稳定度下降尤为明显,相较密级配混合料 AC-13,集料外形变化对间断级配混合料 SMA-13 性能的影响更为显著。

3.2 水稳定性分析

以浸水马歇尔试验残留稳定度、冻融劈裂试验残留强度比作为参考序列,计算得出各因素灰关联系数和灰关联度,如表 6、表 7 所示。

表 6 以浸水马歇尔试验残留稳定度为参考序列的灰关联系数及灰关联度

Table 6 Grey correlation coefficient and grey relations with MS0 as reference sequence

影响因素	混合料类型						灰关联度
	AC-13J	AC-13T	AC-13P	SMA-13J	SMA-13T	SMA-13P	
二维形状指数	1	0.66	0.53	0.42	0.57	0.88	0.678
棱角性指数	1	0.77	0.98	0.33	0.42	0.52	0.670
纹理指数	1	0.72	0.75	0.41	0.49	0.73	0.684
球度指数	1	0.68	0.92	0.42	0.39	0.58	0.666

表 7 以冻融劈裂试验残留强度比为参考序列的灰关联系数及灰关联度

Table 7 Grey correlation coefficient and grey relations with TSR as reference sequence

影响因素	混合料类型						灰关联度
	AC-13J	AC-13T	AC-13P	SMA-13J	SMA-13T	SMA-13P	
二维形状指数	1	0.59	0.49	0.44	0.59	0.66	0.628
棱角性指数	1	0.70	0.97	0.33	0.41	0.58	0.665
纹理指数	1	0.65	0.71	0.43	0.49	0.92	0.702
球度指数	1	0.62	0.91	0.43	0.37	0.67	0.667

各影响因素对两个水稳定性评价指标的影响程度分别如图 3、图 4 所示。

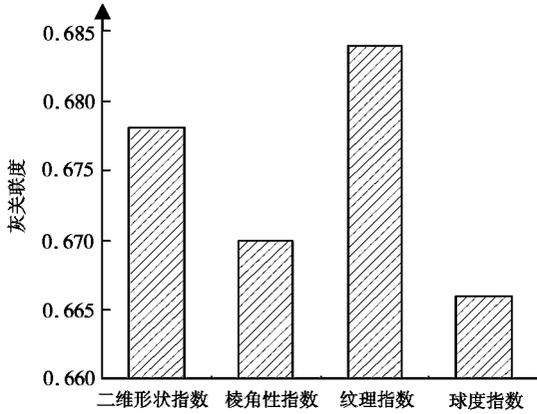


图 3 各因素与浸水马歇尔试验残留稳定度间的灰关联度

Fig 3 Grey correlation between different factors and MS₀

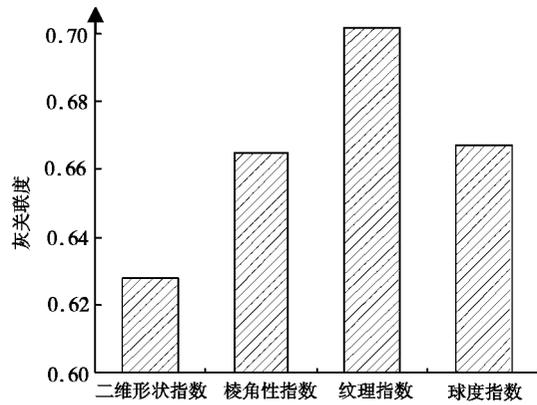


图 4 各因素与冻融劈裂试验残留强度比间的灰关联度

Fig 4 Grey correlation between different factors and TSR

由图 3、图 4 可知,各影响因素对浸水马歇尔试验残留稳定度影响的大小依次为:纹理指数 > 二维形状指数 > 棱角性指数 > 球度指数;对冻融劈裂试验残留强度比的影响大小依次为:纹理指数 > 球度指数 > 棱角性指数 > 二维形状指数;各影响因素对两个水稳定性评价指标的灰关联度均大于 0.6。说明集料表观形态对混合料水稳定性影响显著,其中,纹理指数对水稳定性影响最大。集料表面纹理越粗糙,比表面积越大,沥青与集料的接触面积增加,有利于形成较厚的沥青膜,使沥青不易从集料表面脱落,保证沥青混合料的骨架强度,提高其抗水损害能力。

4 结论

(1)不同加工工艺生产出的集料的表观形态存在差异,与普通集料相比,精细加工集料形状饱满,纹理及棱角性均有所提高。

(2)相较普通集料制备的混合料,精细加工集料制备的混合料整体结构性更好,内部集料颗粒间嵌挤、摩擦作用强,沥青与集料间的机械粘附力强,其高温性能和抗水损害能力强,具有更好的高温稳定性和水稳定性。

(3)通过灰关联分析结果可知,集料的 4 个表观形态指标中,对混合料高温性能影响最大的是棱角性指数;对混合料水稳定性影响最大的是纹理指数。因此选用多棱角、表面粗糙的集料制备沥青混合料,其高温抗车辙能力和抗水损害能力更好。

参考文献:

[1] 张东,侯曙光,边疆.粗集料形态对沥青混合料性能的影响研究现状[J].南京工业大学学报(自然科学版),2017,39(6):149-154.

[2] 刚增军.集料颗粒形态特征对沥青混合料高温性能的影响[J].筑路机械与施工机械化,2017,34(1):47-51.

[3] 魏建国,胡峻铭,王永胜.集料形状特征及其对热拌沥青混合料性能的影响[J].中外公路,2018,38(2):217-221.

[4] MAHMOUD E, GATES L, MASAD E, et al. Comprehensive evaluation of AIMS texture, angularity, and dimension measurements[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010,22(4):369-379.

[5] ORTIZ E M, MAHMOUD E. Experimental procedure for evaluation of coarse aggregate polishing resistance[J]. Transportation Geotechnics, 2014,1(3):106-118.

[6] 李晓燕,卜胤,汪海年,等.粗集料形态特征的定量评价指标研究[J].建筑材料学报,2015,18(3):524-530.

[7] MAHMOUD E, PERALES G, BESHEARS S. Accelerated laboratory testing of aggregate friction properties[J]. Transportation Geotechnics, 2016,9:49-56.

[8] ARAGÃO F T S, PAZOS A R G, MOTTA L M G D, et al. Effects of morphological characteristics of aggregate particles on the mechanical behavior of bituminous paving mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2016,123:444-453.

- [9] CHEN J S, HSIEH W, LIAO M C. Effect of coarse aggregate shape on engineering properties of stone mastic asphalt applied to airport pavements[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2013, 6(5):595-601.
- [10] XIE X G, LU G Y, LIU P F, et al. Evaluation of morphological characteristics of fine aggregate in asphalt pavement[J]. Construction and Building Materials, 2017, 139: 1-8.
- [11] BESSA I S, BRANCO V T F C, SOARES J B, et al. Aggregate shape properties and their influence on the behavior of hot-mix asphalt[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(7):04014212.
- [12] 廖能武. 精益制造集料特性对沥青混合料性能的影响[D]. 重庆:重庆交通大学, 2018.
- [13] 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面施工技术规范 JTG F40—2004[M]. 北京:人民交通出版社, 2004.
- [14] 袁峻, 钱野. 粗集料形态特征及其对沥青混合料高温抗剪强度的影响[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(4):17-22.
- [15] 胡力群, 熊伟明, 王军. 粗集料棱角性对 OGFC 多孔沥青混合料性能的影响[J]. 功能材料, 2014, 45(20):20150-20154.
- [16] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 5版. 北京:科学出版社, 2010.

Analysis of Correlation between Aggregate Apparent Morphology and Asphalt Mixture Performance

YUAN Hai

(School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In this paper, the aggregate image test system (AIMS II) is used to determine the two-dimensional shape index, the angular index, the angular index, the texture index and the sphericity index of the ordinary aggregate and the fine processing aggregate of the Zhongshan Aggregate Factory in Guangdong Province. And it carries on the comparative analysis. AC-13 and SMA-13 mixtures were prepared by mixing common aggregates and Fine-processed aggregates in a ratio of 1:1 and defining them as specific aggregates. The high temperature stability and water stability of different asphalt mixtures were tested by laboratory tests, and the significance of the apparent morphological indexes of aggregates on the performance of mixtures was analyzed by grey relational analysis method. The results show that fine processing technology can improve the apparent morphological index of aggregates, the angular index has the most significant impact on the high temperature performance of the mixture, and the texture index has the most significant impact on the water stability of the mixture.

Keywords: road engineering; aggregate; apparent morphology index; fine-processed; grey relation analysis

(责任编辑:熊璐璐)