

文章编号: 1674-599X(2021)04-0085-08

砾石棱角性对沥青混合料路用性能的影响

刘力侨¹, 徐龙², 谢涛³, 汪秀根⁴

(1.昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2.拉萨市政设计院, 西藏 拉萨 850000; 3.中交一公局海威工程建设有限公司, 北京 通州 101100; 4.国家林业和草原局昆明勘察设计院, 云南 昆明 650000)

摘要: 通过ASTMD3398-97法和AASHTO TP56法, 分别对拉萨地区各级粒径下的砾石粗集料棱角进行表征。采用标准马歇尔、浸水马歇尔、冻融劈裂、车辙和小梁弯曲实验, 并结合灰色关联度理论, 建立浸水残留稳定度、动稳定度、应变能密度与砾石粗集料中各级集料棱角值的灰色关联。研究表明: 砾石粗集料棱角值表征中, AASHTO TP56法优于ASTMD3398-97法; 砾石粗集料棱角值对沥青混合料路用性能的影响程度为: 低温性能 > 高温性能 > 抗水损害能力; 砾石粗集料的棱角值与沥青混合料的高低温性能具有较高二次相关性。当平均棱角性在47.47%, 未压实空隙率约19.52%时, 砾石粗集料的棱角性显著提高沥青混合料的高温性能。粒径为13.2~16 mm粗集料棱角值对砾石沥青混合料的高低温性能影响最大; 砾石沥青混合料的抗水损害能力受沥青与集料的粘接性能影响显著。

关键词: 砾石粗集料; 棱角; 表征; 灰色关联法; 路用性能

中图分类号: TV422

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.011

The influence of gravel angular property on the road performance of asphalt mixture

LIU Li-qiao¹, XU Long², XIE Tao³, WANG Xiu-gen⁴

(1.College of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Lhasa Municipal Design Institute, Lhasa 850000, China;

3.Haiwei Engineering Construction Co., Ltd., Tongzhou 101100, China;

4. Kunming Survey and Design Institute of State Forestry and Grassland Administration, Kunming 650000, China)

Abstract: The ASTMD3398-97 and the AASHTO TP56 methods were used to analysis the characteristic of the edges of gravel coarse aggregate with different particle sizes in Lhasa. Based on the standard Marshall test, immersion Marshall test, freeze-thaw splitting test, rutting test, trabecular bending test and the gray correlation theory, the gray correlation between the immersion residual stability, dynamic stability, strain energy density and the edge angle value of gravel coarse aggregate was established. The results show that the AASHTO TP56 method is better than the AASHTO TP56 method to get the characterization of the edge angle value. The influence of the angle value of gravel coarse aggregate on pavement performance of the asphalt mixture can be indicated as: low temperature performance > high temperature performance > water damage resistance. When the average angularity is 47.47%, and the percentage of uncompacted void is around 19.52%, the high temperature performance of asphalt mixture can be significantly improved by the angularity of gravel coarse aggregate. The angle value of coarse aggregate with particle size of 13.2-16 mm has the significant influence on the high and low temperature performance of gravel asphalt mixture. The water damage resistance of gravel asphalt mixture is significantly affected by the adhesion between asphalt and aggregate.

Keyword: gravel coarse aggregate; edge angle; characterization; grey correlation method; road performance

收稿日期: 2021-05-24

作者简介: 刘力侨(1995—), 男, 昆明理工大学硕士生。

砾石是一种岩性较为复杂的沉积物,其主要成分为硅质岩、脉石英、石英砂岩、粉砂质板岩、粉砂岩、断裂岩等物质^[1]。砾石可用于道路的基层和底基层,而面层使用相对较少,其主要原因是砾石表面光滑,集料骨架互锁性弱,导致沥青混合料的骨架结构特性下降。其次,砾石中SiO₂含量较高,碱性活性不足,使得骨料与沥青反应较少,会造成沥青与骨料的黏附性较差。

国内对于砾石的研究主要集中于提高砾石与沥青的黏附性,而对集料特性研究相对较少^[2-4]。粗集料的特性主要体现在形状、棱角、纹理等方面,决定了沥青胶浆与集料的微观裹附效果,集料-沥青-集料夹层的剪切与拉伸性能受集料特性的影响较为显著,同时,对沥青混合料的高低温性能、水稳定性能、疲劳性能产生直接影响^[5-6]。在美国公路战略研究(strategic highway research program, 简称为SHRP)计划认定的集料特性中,粗集料的棱角性最重要,其重要性仅次于级配^[7-8]。中国对砾石粗集料的棱角有要求,但缺乏相应的实验,目前仅对破碎面作了要求。对于粗集料棱角特性的研究主要是采用数字图像处理技术,以圆度、长短比、棱角点、凸包面积差、梯度棱角性等指标对集料棱角进行表征,研究集料棱角特性对沥青混合料的影响^[9-11]。但林豪^[12]通过数字图像的粗集料形态学特征测试,发现与玄武岩和安山岩相比,卵石形态指标变异性大。通过数字图像处理技术对粗集料棱角表征虽然可以做到定量分析,但是各评价指标仍未有统一定论,并且用于工程实际存在一定难度。而通过集料特性优化沥青混合料的级配设计,当前研究较少^[13]。因此,本研究采用ASTMD3398-97和AASHTO TP56方法对砾石粗集料的棱角性进行表征,基于灰色关联理论建立砾石粗集料的棱角值与沥青混合料路用性能指标灰色关联,分析砾石粗集料的棱角特性对沥青混合料的影响。为砾石沥青混合料级配的优化设计提供依据。

1 材料及表征

1.1 原材料

采用拉萨地区砾石作为研究对象,经XRF检测得到砾石的化学成分,其中, $w(\text{SiO}_2)=68.82\%$,

$w(\text{Al}_2\text{O}_3)=16.10\%$, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)=3.76\%$, $w(\text{K}_2\text{O})=3.40\%$, $w(\text{Na}_2\text{O})=2.75\%$, $w(\text{CaO})=2.43\%$, $w(\text{MgO})=1.76\%$ 。砾石粗骨料的物理性质见表1,而沥青选用克拉玛依90#基质沥青,主要性能指标见表2。

表1 砾石粗骨料的物理性质

Table 1 Physical properties of gravel coarse aggregate

试验项目	毛体积 相对密度/ (g·cm ⁻³)	磨耗值/%	压碎值/%	与沥青 黏附性 (水煮法)
技术指标	≥2.50	≤30	≤28	≥4级
试验结果	2.601	17.8	15.6	2级
试验方法	T0304-2005	T0323-2000	T0312-2005	T0616-1993

表2 90#基质沥青性能指标

Table 2 Performance index of the 90# base asphalt

试验项目	针入度 (25°C, 100g, 5s) / (0.1mm)	软化点 (环球法) / °C	延度 (5 cm/min, 15°C) / cm
技术指标	80~100	≥44	≥100
试验结果	94	46.5	>100

1.2 砾石粗集料的棱角性表征

1.2.1 ASTM D3398-97方法

ASTMD3398-97法是由美国材料与试验协会(american society for testing and materials, 简称为ASTM)提出,用粗集料颗粒指数lap,进行表征粗集料的棱角性,但此法难以明显区分不同粗集料形状特性的差异。因此,刘振清等人^[14]考虑自然堆积状态下的粗集料间隙率进行方法修正,修正过后lap的计算式为:

$$\text{lap} = 2.5V_0 - 1.25V_{10} - 0.25V_{50} - 0.32. \quad (1)$$

式中: V_0 为自然堆积状态下的粗集料间隙率; V_{10} 为捣实10次状态下的粗集料间隙率; V_{50} 为捣实50次状态下的粗集料间隙率。

$$I = \sum_{i=1}^n p_i \times \text{lap}_i / 100. \quad (2)$$

式中: I 为整个级配的平均棱角性系数; P_i 为各粒径集料的质量百分含量; lap_i 为单级粒径的棱角性系数。

1.2.2 AASHTO TP56方法

该方法是美国国家公路与运输协会(american association of state highway and transportation officials, 简称为AASHTO)确定的测定粗集料棱角性的标准试验方法,在高等路面设计时用于检

验粗集料棱角性是否满足高温抗车辙的要求^[15], 其计算式为:

$$U=(V-F/G)/100。 \quad (3)$$

式中: V 为接收容器的体积; F 为粗集料试样的净重; G 为粗集料试样的干容重由(AASHTO T85)方法测得; U 为未压实空隙率。

以破碎面的数量为依据, 将各单档粒径的砾石粗集料分成棱角性差异较大的两组, 测其 I 、 U 值后, 将棱角性好的砾石粗集料分别按20%、40%、60%、80%的比例替换棱角性较差的砾石粗集料, 再分别测出不同掺配下各单档粒径的棱角性参数。ASTMD3398-97方法和AASHTO TP56方法表征下的砾石粗集料棱角性参数见表3。

表3 砾石粗集料棱角性参数计算结果

Table 3 Calculation results of angularity parameters of gravel coarse aggregate

粒径/mm	集料A (棱角性较好)		集料B (替换20%较差)		集料C (替换40%较差)		集料D (替换60%较差)		集料E (替换80%较差)		集料F (棱角性较差)	
	I	U	I	U	I	U	I	U	I	U	I	U
	16.00~19.00	6.70	2.65	6.18	2.48	5.85	2.43	5.74	2.42	5.70	2.36	5.51
13.20~16.00	13.43	5.61	13.58	5.33	12.75	5.13	12.04	4.79	12.06	4.83	11.42	4.59
9.50~13.20	8.75	3.68	7.89	3.26	7.72	3.22	7.58	3.43	7.79	3.26	7.57	3.18
4.75~9.50	20.66	8.17	19.82	8.45	19.04	8.18	18.76	8.07	17.86	7.84	17.51	7.49
Σ	49.54	20.11	47.47	19.52	45.36	18.96	44.12	18.71	43.41	18.29	42.01	17.58

1.2.3 砾石沥青混合料的级配设计

本试验选用AC-16连续密级配, 见表4。试验过程中采用分档筛分, 再用回配方式来保证混合料试件级配。采用6种不同棱角性的砾石粗集料进行混合料骨架结构的搭建。细集料则是破碎砾石、机制砂、河沙的互掺, 同时, 以石灰岩矿粉对混合料骨架作进一步填充。沥青选用克拉玛依90#基质沥青, 以5%油石比进行混合料配合比设计。

表4 砾石级配

Table 4 Gravel grading

筛孔孔径/mm	通过率/%	筛孔孔径/mm	通过率/%
19.00	100.0	1.180	18.8
16.00	92.2	0.600	15.2
13.20	78.5	0.300	11.1
9.50	68.9	0.150	7.0
4.75	49.6	0.075	4.8
2.36	30.5		

抗水损害能力的影响。首先, 采用平均棱角性及压实空隙率对砾石粗集料的棱角性表征, 为控制级配对沥青混合料抗水损害的影响, 将不同棱角性的砾石粗集料按同级配进行设计。然后, 马歇尔试件按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052-2011)^[16]进行成型, 马歇尔体积指标见表5。砾石沥青混合料的力学性能随棱角性变化如图1~2所示, 砾石沥青混合料抗水损害能力随棱角性变化如图3~4所示。

由表5可知, 砾石粗骨料的棱角性越差, 细骨料对沥青混合料的骨架填充作用越强, 导致空隙率逐渐降低, 马歇尔试件的毛体积相对密度越大。在相同配合比设计下, 当沥青用量不变时, 随着矿料骨架的空隙率随着降低沥青饱和度逐渐增大。

表5 马歇尔体积指标

Table 5 The Marshall volume index

实验组号	毛体积相对密度	沥青体积百分率/%	空隙率/%	矿料间隙率/%	饱和度/%
A	2.384	9.5	3.5	13.0	73.0
B	2.406	9.6	2.7	12.2	77.8
C	2.397	9.5	3.0	12.5	76.0
D	2.408	9.6	2.6	12.1	78.5
E	2.409	9.6	2.5	12.1	79.3
F	2.423	9.6	2.0	11.6	82.7

2 试验方法及结果分析

2.1 砾石粗集料棱角值对沥青混合料路用性能的影响

2.1.1 水损害

为探究砾石粗集料棱角性差异对沥青混合料

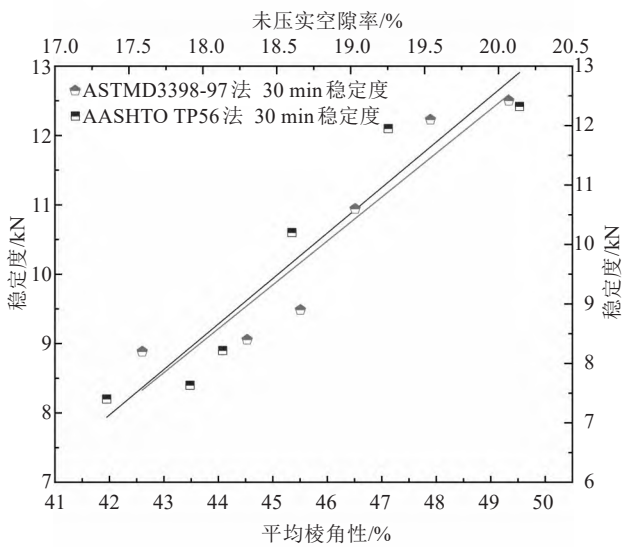


图1 30 min 稳定度随棱角值变化关系

Fig. 1 Relationship between the 30 min stability and the edge angle value

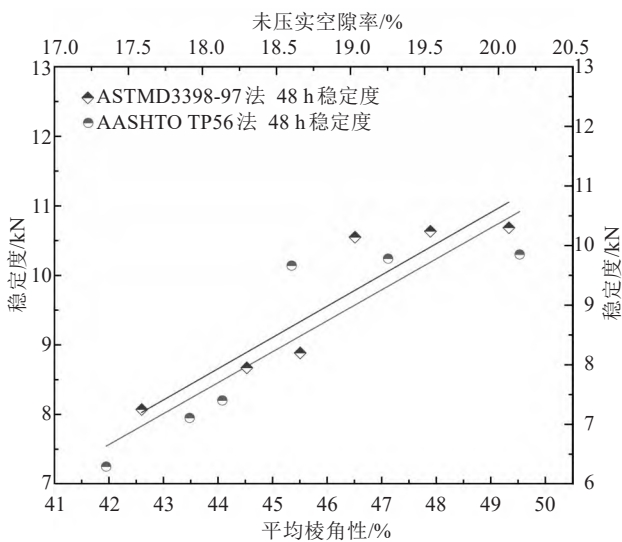


图2 48 h 稳定度随棱角值变化关系

Fig. 2 Relationship between the 48 h stability and the edge angle value

从图1~2中可以看出, 砾石粗骨料棱角与稳定度具有良好的线性相关性, 其相关度大于0.7。当砾石粗骨料的棱角性变差时, 无论是30 min时的马歇尔浸水残留稳定度, 还是48 h的浸水稳定度, 都是逐渐降低的。一方面, 随着砾石粗骨料的光滑面增多, 在整个沥青混合料的骨架结构当中粗糙界面减少, 粗骨料之间的接触点数目减少。同时, 粗骨料趋于圆润之后, 角度降低, 导致沥青混合料的骨架互锁性减弱。随着纹理减少, 不利于沥青胶浆与粗骨料的裹附, 从而影响沥青混

合料的结构特性。另一方面, 粗集料的棱角减少之后, 细集料对骨架填充作用明显, 沥青混合料的空隙率降低。在加载过程中, 马歇尔试件内部的应力无足够空间得到释放, 最终导致沥青混合料的稳定度降低。

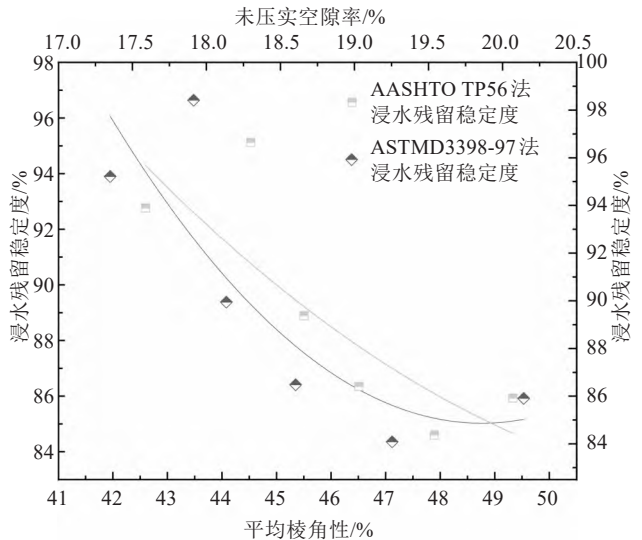


图3 浸水残留稳定度随棱角值变化关系

Fig. 3 Relationship between the MS_0 and the edge angle value

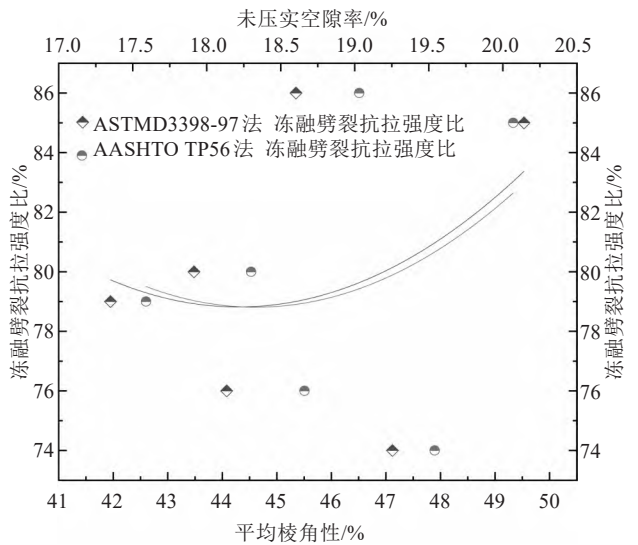


图4 冻融劈裂抗拉强度比随棱角值变化关系

Fig. 4 Relationship between the TSR and the edge angle

从图3~4中可以看出, 浸水残留稳定度与砾石粗骨料棱角值具有良好的二次相关性。在小范围内, 砾石粗骨料的棱角能够提高沥青混合料的水稳定性, 但随着棱角性降低之后, 骨架的互锁性减弱, 并且砾石表面孔隙率大, 结构疏松, 表面微观结构比较平顺, 微观比表面积较小, 不利于沥青与集料充分接触, 使得沥青胶浆裹附效果

变差^[17]。砾石中二氧化硅含量高达68.82%，呈酸性，其表面碱性活性中心较少，降低了沥青与骨料的黏附作用。因此，砾石粗骨料对水的敏感程度随集料的棱角变差而增大，尤其是在平均棱角性 <42.85 ，未压实空隙率 <17.82 时表现突出。表明：以冻融劈裂抗拉强度比评价砾石粗骨料棱角变化对砾石沥青混合料抗水损害时，冻融劈裂抗拉强度比的值出现较大离散。采用融劈裂抗拉强度比相较于用浸水残留稳定度评价沥青混合料的抗水损害能力的实验条件更为严格。砾石集料与沥青的黏接性能相较于混合料的结构特性，影响更为显著。

2.1.2 高温稳定性

通过车辙试验，探究砾石粗集料棱角性对沥青混合料的影响，沥青混合料车辙试件按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052-2011)^[16]进行成型，将成型好的试件在60℃环境下保温5h后，将轮碾仪荷重调至700N，轮压力设置为0.7MPa时进行试验，试验全过程为计算机控制，动稳定度随粗集料棱角性的变化关系如图5所示。

从图5中可以看出，砾石粗集料棱角值的变化与沥青混合料的高温性能较高二次相关性，相关度高达0.9425。就相关性而言， $R_1^2=0.8525$ ， $R_0^2=0.9425$ ，因此，未压实空隙率法优于平均棱角性法。根据拟合曲线可知，当平均棱角性在47.47%，未压实空隙率约19.52%时，砾石粗集料棱角值显著提高了混合料的高温性能；当平均棱角性小于43.41%，未压实空隙率小于18.29%时，砾石棱角值对动稳定度的影响程度显著，导致沥青混合料的高温稳定性已经无法满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTC F40-2004)^[18]中的设计要求。而当平均棱角性大于43.41%，未压实空隙率大于18.29%时，砾石集料棱角值对沥青混合料的高温抗变形能力有限。一方面，沥青混合料的骨架随着棱角值的增大使得互锁作用增强；另一方面，砾石粗骨料的尖角处在荷载作用下，出现应力集中现象，制约了沥青混合料高温稳定度的提高。因此，在平均棱角性为43.41%~47.47%，未压实空隙率为18.29%~19.52%时，随着棱角值的提高，沥青混合料动稳定度的变化浮动范围较小。

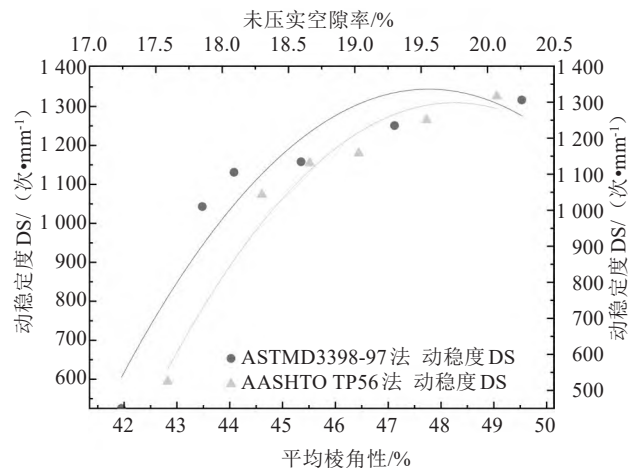


图5 DS随棱角值变化关系

Fig. 5 Relationship between the DS and the edge angle value

2.1.3 低温性能

沥青混合料在低温环境下受拉开裂，被视为能量消耗过程^[19]。当沥青混合料内部储存的弹性应变能更大时，抵抗载荷与低温耦合作用的性能更好，低温性能也会得到改善^[20]。因此，本研究以应变能密度作为评价指标，分析砾石粗骨料棱角值的变化对沥青混合料低温性能的影响，应变能密度计算式为：

$$\frac{dW}{dV} = \int_0^{\varepsilon_0} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (4)$$

式中： $\frac{dW}{dV}$ 为应变能密度； σ_{ij} 为应力分量； ε_{ij} 为应变分量； ε_0 为最大应力时所对应的应变。

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052-2011)中混合料弯曲试验的要求进行试验。试件长为 250 ± 2 mm、宽为 30 ± 2 mm、高为 35 ± 2 mm，试验温度为 $-10^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ ，加载速率为50 mm/min。试验在UTM上进行，在开始加载前，预先将试件放置在环境箱中进行保温处理。

砾石沥青混合料的应变能密度随棱角值变化关系如图6所示。从图6中可以看出，砾石粗集料的棱角值与沥青混合料在低温环境下开裂时，应变能密度具有良好的二次相关性，相关性大于0.6。就相关性而言， $R_1^2=0.6127$ ， $R_0^2=0.6901$ ，因此，未压实空隙率法优于平均棱角性法。根据拟合曲线可知，当平均棱角性为47.47%，未压实空隙率约19.52%时，砾石粗集料棱角值对混合料的低温性能提高显著。当平均棱角性小于43.41%，未压实空隙率小于18.29%时，应变能密度下降显著；

当平均棱角性大于43.41%，未压实空隙率大于18.29%时，应变能密度随着砾石粗集料的棱角值增大，出现了先增大后减小的变化。一方面，随着棱角值变大，集料表面纹理丰富，沥青混合料的骨架互锁作用增强；另一方面，随着砾石粗集料棱角值增大，集料之间的接触点数增加，伴随着接触点所在的软弱层增加，导致集料在受力情况下出现应力集中现象，削弱了沥青混合料的骨架互锁作用。虽然棱角值的提高增加了沥青混合料的结构特性，但抵抗低温抗变形的能力始终较小，这是由于砾石这种酸性集料与沥青的黏接性能较差，降低了沥青混合料的低温抗变形能力。

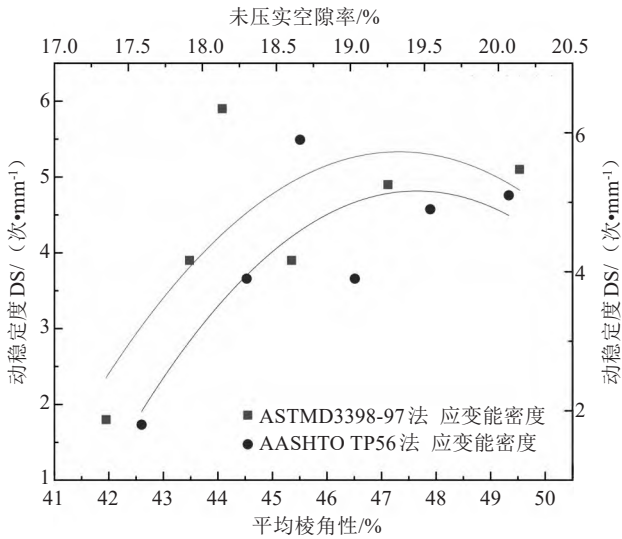


图6 应变能密度随棱角值变化关系

Fig. 6 Relationship between the strain energy density and the edge angle value

2.2 砾石粗集料单档粒径棱角值对沥青混合料路用性能的灰色关联分析

灰色关联度分析是通过多种因素之间发展态势的相似或相异程度来衡量因素之间的关联程度，找出对系统影响程度最大的主要因素或者特征，在沥青混合料的研究中运用广泛^[21-22]。用关联系数和关联度对相似程度进行描述，而关联度指各个

因素对结果的影响程度。关联度的计算式为：

1) 参考数列和比较数列计算式为：

$$x_0 = \{x_0(k), k = 1, 2, 3, \dots, n\}. \quad (5)$$

$$x_i = \{x_i(k), k = 1, 2, 3, \dots, n\},$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (6)$$

2) 原始数列无量纲处理如下：

$$y_0 = \left\{ \frac{x_0(k)}{\chi_0}, k = 1, 2, 3, \dots, n \right\}. \quad (7)$$

$$x_i = \left\{ \frac{x_i(k)}{\chi_i}, k = 1, 2, 3, \dots, n \right\},$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (8)$$

式中： χ_0 、 χ_i 分别是参考数列和比较数列的平均值。

3) 关联系数计算式为：

$$\xi_i = \left| \frac{\min \min \Delta_i(k) + \rho \max \max \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max \max \Delta_i(k)} \right|,$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n; k = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (9)$$

$$\Delta_i(k) = y_0(k) - y_i(k). \quad (10)$$

式中： $\Delta_i(k)$ 为生成数列的比较数列和参考数列的极差； ρ 为分辨系数，取0.9； $\min \min \Delta_i(k)$ 为极差最小值； $\max \max \Delta_i(k)$ 为极差最大值。

关联度计算式：

$$y_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k). \quad (11)$$

以沥青混合料的浸水残留稳定度、动稳定度、应变能密度作为参考数列，将砾石粗骨料各级粒径棱角值作为比较数列，建立砾石粗骨料各级棱角值变化对沥青混合料路用性能影响的关联度。分析砾石粗骨料中不同粒径的棱角值对沥青混合料路用性能的影响，砾石粗集料棱角值与路用性能指标关系见表6，通过MATLAB程序计算关联度，结果见表7。

表6 砾石粗集料棱角值与路用性能指标关系

Table 6 Relationship between the edge angle value of gravel coarse aggregate and the road performance index

实验组	浸水残留稳定度/ %	动稳定度/ kPa	应变能密度/ kPa	表征值	粒径/mm			
					16.00~19.00	13.20~16.00	9.50~13.20	4.75~9.50
A	82.9	1 316.5	5.1	U	2.65	5.61	3.68	8.17
B	77.7	1 250.8	4.9	U	2.48	5.33	3.26	8.45
C	86.4	1 158.0	3.9	U	2.43	5.13	3.22	8.18
D	92.1	1 131.0	5.9	U	2.42	4.83	3.43	8.07
E	94.6	1 043.0	3.9	U	2.36	4.59	3.26	7.84
F	93.9	525.0	1.8	U	2.32	5.61	3.18	7.49

表7 路用性能指标与各级粗集料棱角值的相关度计算结果

Table 7 Calculation results of correlation between the road performance index and the edge angle value of coarse aggregate of all levels

粒径/ mm	浸水残留 稳定度/ %	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	应变能密度/ kPa
16.00~19.00	0.713 3	0.784 2	0.790 8
13.20~16.00	0.703 0	0.788 4	0.796 6
9.50~13.20	0.712 3	0.778 4	0.796 1
4.75~9.50	0.698 2	0.778 8	0.793 8

由表7可知,砾石粗集料棱角值对沥青混合料路用性能的影响程度为:低温性能>高温性能>抗水损害能力。对于抗水损害能力影响而言,粒径为16.00~19.00 mm集料棱角值的影响最大,这是因为在沥青混合料的结构特性中,由粗集料提供骨架,受外部荷载情况下抵抗变形,大粒径集料棱角值直接影响了其表面纹理的粗糙程度,决定了与其周围集料的互锁能力和沥青的裹附效果,但由于砾石沥青混合料对水敏感较高,降低了沥青与集料的黏接性能,此时结构特性影响较为显著。而对于沥青混合料的高低温而言,粒径为13.20~16.00 mm集料棱角值的影响最大,这是因为13.20~16.00 mm的集料在粗集料中所占比例较多且骨料较大,棱角值大小决定了集料之间的接触特性,进一步影响了沥青混合料在受外部荷载时抵抗变形的能力。

3 结论

通过ASTMD3398-97法和AASHTO TP56法进行砾石粗集料的棱角表征,以AC-16砾石沥青混合料为例,研究了砾石粗集料棱角值对沥青混合料路用性能的影响,得到结论为:

1) 通过函数拟合所得到的相关度可知,集料通过AASHTO TP56法进行棱角值表征是优于ASTMD3398-97法的。

2) 砾石沥青混合料的抗水损害能力主要受沥青与集料的黏接性能影响较大,棱角值的影响较小。

3) 基于灰色关联分析可知,砾石粗集料棱角值对沥青混合料路用性能的影响程度为:低温性能>高温性能>抗水损害能力。

4) 砾石粗集料棱角值与沥青混合料的高低温性能具有二次相关性。当平均棱角性在47.47%,未压实空隙率约19.52%时,砾石粗集料棱角值显著提高了沥青混合料的高温性能。根据灰色关联度计算结果可知,13.20~16.00 mm集料的棱角值对砾石沥青混合料的高低温性能影响最大。

参考文献(References):

- [1] 刘庚寅,赵伟,魏方辉,等.湖南常德南斗姆湖地区早更新世砾石层砾组分析与沉积特征研究[J].中国地质调查,2019,6(2):68-75.(LIU Geng-yin,ZHAO Wei, WEI Fang-hui, et al. Study on gravel analysis and sedimentary characteristics of the early pleistocene gravel layers in doumuhu district of southern Changde [J]. Geological Survey of China, 2019,6(2): 68-75.(in Chinese))
- [2] 邓冲,罗蓉,张德润.基于表面能理论的破碎砾石沥青混合料水稳定性定量分析[J].公路交通科技,2020,37(7):17-23. (DENG Chong, LUO Rong, ZHANG De-run. Quantitative analysis on water stability of asphalt mixture with crushed gravel based on surface energy theory[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020,37(7): 17-23.(in Chinese))
- [3] 钟昆志,罗蓉,邓冲,等.高温多雨地区破碎砾石沥青混合料路用性能[J].公路交通科技,2018,35(7):9-14. (ZHONG Kun-zhi, LUO Rong, DENG Chong, et al. Performance of crushed gravel asphalt pavement in megathermal and rainy areas[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018,35 (7): 9-14.(in Chinese))
- [4] 陈锦.破碎砾石在沥青面层中的应用研究[D].长沙:长沙理工大学,2016.(CHEN Jin. Research on application of broken gravel in asphalt layer[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2016.(in Chinese))
- [5] 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. (ZHANG Dong, HOU Shu-guang, BIAN Jiang. Review of the effect influence of coarse aggregate morphology on asphalt mixture performances[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Editon), 2017,39 (6): 149-154.(in Chinese))
- [6] 龚湘兵.沥青路面材料多尺度域力学行为及统一模型[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.(GONG Xiang-bing. Mechanical behavior within multi scales and united models of asphalt pavement materials[D]. Harbin: Harbin

- Institute of Technology, 2017.(in Chinese))
- [7] 陈四来,延西利,李鹏,等. 沥青和沥青胶浆的黏弹性特性[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(3): 12-17.(CHEN Si-lai, YAN Xi-li, LI Peng, et al. Viscoelastic properties of bitumen and bituminous mastics[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35 (3): 12-17. (in Chinese))
- [8] Cominsky R, Leahy R B, Harrigan E T. Level one mix design: materials selection, compaction, and conditioning [J]. Transportation Research Board 101[#] Annual Meeting, 1994:121.
- [9] 陶敬林. 矿料性质及其对沥青混合料高低温粘弹性能的影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.(TAO Jing-lin. Research on characteristics of mineral aggregate and its effect on high and low temperature viscoelastic performance of asphalt mixture [D]. Changchun: Jilin University, 2017.(in Chinese))
- [10] 王志祥, 李建阁, 张争奇. 集料形态特征对集料-沥青黏附及水稳定性的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5): 1039-1047.(WANG Zhi-xiang, LI Jian-ge, ZHANG Zheng-qi. Effects of aggregate morphological characteristics on adhesion of aggregate-asphalt and its moisture stability [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5): 1039-1047.(in Chinese))
- [11] 岳宝峰. 基于骨架和凸包特征的粗集料棱角性评价方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.(YUE Bao-feng. Research on evaluation method of coarse aggregate angularity based on skeleton and convex hull characteristics [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese))
- [12] 林豪. 粗集料对沥青混凝土高低温性能的影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.(LIN Hao. Effect of coarse aggregate on high and low temperature performance of asphalt concrete [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.(in Chinese))
- [13] 李胜. 沥青混合料级配分形分析与路用性能研究[J]. 公路与汽运, 2021(1): 59-62, 86.(LI Sheng. Fractal analysis of asphalt mixture gradation and research on road performance [J]. Highway & Automobile Applications, 2021 (1): 59-62, 86.(in Chinese))
- [14] 刘振清, 杨永顺, 刘清泉, 等. 沥青路面粗集料棱角性表征方法及技术标准[J]. 中国公路学报, 2010, 23(4): 8-14.(LIU Zhen-qing, YANG Yong-shun, LIU Qing-quan, et al. Coarse aggregate angularity description method and technical standard of asphalt pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23 (4): 8-14. (in Chinese))
- [15] American Association of State Highway, Transportation Officials. AASHTO Guide for design of pavement structures 1993[M]. Washington D.C, 1993.
- [16] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20-2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standard test method of bitumen and bituminous mixture of highway engineering: JTG E20-2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.(in Chinese))
- [17] 郭寅川, 魏自玉, 申爱琴, 等. 砾石沥青混合料水稳定性复合改善技术研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(12): 41-48.(GUO Yin-chuan, WEI Zi-yu, SHEN Ai-qin, et al. Water stability compound improvement technology of gravel asphalt mixture [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2018, 37 (12): 41-48.(in Chinese))
- [18] 交通部公路科学研究所. 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, 2009. (Institute of highway science, Ministry of communications. Technical specification for highway asphalt pavement construction: JTG F40-2004[M]. Beijing: China Communications Press, 2009.(in Chinese))
- [19] Luo X, Luo R, Lytton R L. Energy-based mechanistic approach to characterize crack growth of asphalt mixtures [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(9): 1198-1208.
- [20] Yu X, Huang J B. Study on low-temperature performance of asphalt mixture impacted by modified asphalt and polyester fibers[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 204-208: 3886-3889.
- [21] 吴帮伟, 刘黎萍, 孙立军. 不同参数对沥青混合料抗剪性能的影响[J]. 公路交通科技, 2019, 36(9): 1-6, 24.(WU Bang-wei, LIU Li-ping, SUN Li-jun. Influence of different parameters on shear performance of asphalt mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36 (9): 1-6, 24.(in Chinese))
- [22] 胡超, 包惠明. 高岭土矿粉沥青混合料的灰色关联分析[J]. 公路交通科技, 2020, 37(7): 24-31.(Hu Chao, Bao Hui-ming. Grey correlation analysis of Kaolin mineral powder asphalt mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (7): 24-31.(in Chinese))