

文章编号:1007-9629(2021)05-1039-09

集料形态特征对集料-沥青黏附及水稳定性的影响

王志祥^{1,2}, 李建阁¹, 张争奇¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064; 2. 广东华路交通科技有限公司, 广东广州 510420)

摘要:为评价集料形态特征对集料-沥青黏附性及其体系水稳定性的影响,提出了一种定量测试集料-沥青黏附性的新方法.借助集料图像测量系统(AIMS)测试了5种集料的形态特征,并对不同形态集料沥青混合料的水稳定性进行评价,建立了集料形态特征与集料-沥青黏附性及水稳定性的关系,同时基于灰色关联法分析了集料形态特征对集料-沥青黏附性及水稳定性的影响排序.结果表明:提出的集料-沥青黏附性定量测试方法简单、可靠;沥青混合料水稳定性最佳的棱角性为2 500~3 000,球度为0.65~0.75;随着集料表面纹理的增大,沥青混合料的水稳定性增强;集料表面纹理对集料-沥青黏附性的影响最大,棱角性对沥青混合料浸水飞散损失指标的影响最大,球度对沥青混合料冻融劈裂强度比、浸水车辙变形拐点指标的影响最大.

关键词:集料形态特征;黏附性;水稳定性;棱角性;球度;表面纹理

中图分类号:U416

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.019

Effects of Aggregate Morphological Characteristics on Adhesion of Aggregate-Asphalt and Its Moisture Stability

WANG Zhixiang^{1,2}, LI Jiange¹, ZHANG Zhengqi¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Guangdong Hualu Transportation Technology Co., Ltd., Guangzhou 510420, China)

Abstract: To evaluate the influence of aggregate morphological characteristic on aggregate-asphalt adhesion and its moisture stability, a new method of quantitative aggregate-asphalt adhesion test was proposed. The morphological characteristics of aggregates from five sources were tested by aggregate image measurement system (AIMS), and the moisture stability of asphalt mixture with different aggregate morphological characteristics was evaluated. The relation of aggregate morphological characteristics to adhesion of aggregate-asphalt and its moisture stability was established. The influence of aggregate morphological characteristics on the adhesion and moisture stability was analyzed based on the grey correlation method. The results show that the proposed quantitative test method of aggregate-asphalt adhesion is simple and reliable. The moisture stability of asphalt mixture is best when the aggregates morphological characteristics have best angularity in the range of 2 500-3 000 and the best sphericity in the range of 0.65-0.75. With the increase of surface texture, the moisture stability of asphalt mixture is enhanced. The surface texture, angularity and sphericity have the greatest influence on aggregate-asphalt adhesion, water immersion flying loss, freeze-thaw splitting strength ratio and stripping inflection point, respectively.

Key words: aggregate morphological characteristic; adhesion; moisture stability; angularity; sphericity; surface texture

收稿日期:2020-06-14; 修订日期:2020-07-14

基金项目:广东省交通运输厅科技项目(科技-2016-02-004)

第一作者:王志祥(1988—),男,河南周口人,长安大学博士生.E-mail:dgxiang2012@163.com

通讯作者:张争奇(1967—),男,陕西扶风人,长安大学教授,博士生导师,博士.E-mail:z-zhengqi@126.com

水损害是沥青路面早期病害最主要的表现形式之一^[1]。沥青混合料水损害的主要原因在于沥青与集料的黏附性不足。因此,对于集料-沥青体系的黏附性及其体系水稳定性的试验及评价方法被广泛研究,归纳起来可分为3类:(1)以未经压实的松散沥青混合料(宏观材料本身)为对象进行定性的研究,如水煮法、浸水法、拉拔试验以及示踪盐法等,通过主观评价裹在集料表面的沥青膜的剥离程度,据此判定沥青和集料的黏附性及混合料的水稳定性^[2-3]。(2)以沥青混合料试件为对象进行定量研究,如马歇尔试验、劈裂试验、改进的洛特曼试验、浸水车辙试验等,这种方法反映了沥青混合料在路面使用过程中所处的真实状态^[4-5]。(3)采用微观手段对沥青-集料的界面性能进行研究。李晓燕等^[6]开发了形态特征研究系统来定量表征集料的特征;Guo等^[7]采用集料图像采集系统(AIMS),对集料的棱角性、球度(或二维形状)以及表面纹理等进行研究,发现集料形态与沥青混合料的路用性能关系密切;Valdés等^[8]研究发现,集料的几何特性对沥青混合料的黏结强度具有

一定程度的影响。但是,缺少沥青混合料宏观性能与微观表现联系的研究,

因此,本文借助AIMS研究集料的微观形态,并建立其与沥青宏观黏度的关系,为沥青与集料黏附性及抗水损害性能的合理评价提供借鉴。

1 材料和试验方法

1.1 原材料

沥青选用70[#]基质沥青和SBS改性沥青,主要性能指标见表1。集料采用粒径为10~15 mm的石灰岩、花岗岩、玄武岩、辉绿岩和辉长岩等5种常用的石料,主要技术指标如表2所示。

表1 沥青的性能
Table 1 Properties of asphalts

Index	70 [#] asphalt	SBS modified asphalt
Penetration(25 °C, 5 s, 100 g)/ (0.1 mm)	64	53
Ductility(5 cm·min ⁻¹)/cm	28(10 °C)	32(5 °C)
Softening point/°C	48.5	82.0
Viscosity(135 °C)/(Pa·s)	0.398	2.835

表2 粗集料的技术指标
Table 2 Technical specifications of coarse aggregates

Specification	Limestone	Granite	Basalt	Dolerite	Gabbro
Crushed stone value(by mass)/%	15.6	11.8	8.8	9.6	5.6
Los Angeles abrasion loss(by mass)/%	15.2	5.9	11.5	12.3	10.8
Apparent density/(g·cm ⁻³)	2.785	2.882	2.782	2.766	2.756
SiO ₂ content(by mass)/%		83	50	48	47

1.2 配合比设计

根据JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,采用马歇尔设计方法设计AC-16级配(见

表3),油石比(质量分数)为4.7%,沥青混合料中粒径为10~15 mm的集料分别选择石灰岩、花岗岩、玄武岩、辉绿岩和辉长岩,其余粒径的石料均采用石灰岩矿粉。

表3 AC-16级配
Table 3 Gradation of AC-16

Sieve size/mm	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Passing ratio(by mass)/%	100.0	97.6	77.3	57.4	34.5	25.5	17.9	14.3	10.1	7.5	5.9

1.3 试验方法及评价指标

1.3.1 集料-沥青黏附性定量测试

本研究提出一种新的方法来定量测试集料-沥青间的黏附性能,主要步骤如下:

(1)集料洗净后分为2组,每组至少5颗,1组在室温下水泡24 h,另外1组在105 °C的烘箱中烘24 h,分别称量其质量,记为 m_{w0} 、 m_{d0} 。

(2)2组集料分别在热沥青中浸泡60 s,冷却后称量其质量,记为 m_{w1} 、 m_{d1} 。

(3)黏附沥青的2组集料分别在100 °C的开水中

煮30 min,冷却后称量其剩余质量 m_{w2} 、 m_{d2} 。

(4)按照式(1)、(2)分别计算浸水和干燥环境下集料的沥青黏附率 BR_w 和 BR_d ,采用式(3)计算集料的水敏感系数 M_s ,以此评价集料与集料的黏附性。

$$BR_w = \frac{m_{w2} - m_{w0}}{m_{w1} - m_{w0}} \times 100\% \quad (1)$$

$$BR_d = \frac{m_{d2} - m_{d0}}{m_{d1} - m_{d0}} \times 100\% \quad (2)$$

$$M_s = \frac{BR_d - BR_w}{BR_d} \quad (3)$$

1.3.2 集料形态特征测试

集料的物理形态可以由棱角性、球度和表面纹理3个指标来评价^[9-10].采用AIMS对粒径为10~15 mm,表面洁净、干燥的粗集料的形态特征进行测试^[11].

采用梯度棱角性 G_A 来评价集料的棱角性.依据Socel mask算法,通过计算集料二维图像轮廓边界各个点的梯度来获得 G_A (见式(4)).采用球度指标 S_P 来评价粗集料的三维形状特征(见式(5)).采用纹理指标 T_x 来表征粗集料的纹理结构(见式(6)).

$$G_A = \frac{1}{\frac{n}{3} - 1} \sum_{i=1}^{n-3} |\theta_i - \theta_{i+3}| \quad (4)$$

$$S_P = \sqrt{\frac{d_s d_l}{d_L^2}} \quad (5)$$

$$T_x = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N (D_{i,j}(x, y))^2 \quad (6)$$

式中: θ 为集料图像边缘点的梯度向量; n 为集料图像边缘点的总数量,个; i 为集料图像边缘的第 i 个点; d_s 为集料短轴长(高度),mm; d_l 为集料次轴长(宽度),mm; d_L

为集料长轴长(长度),mm; D 为分解函数; N 为一张图像中细节系数的总数量,个; i 为第 i 张高精度图像; j 为小波指数; x, y 为在转换域中细节系数的横、纵坐标.

1.3.3 沥青混合料水稳定性试验

进行冻融劈裂、肯塔堡浸水飞散、浸水汉堡车辙试验,分别采用劈裂强度比(TSR)、浸水飞散损失(ΔS)、剥落变形拐点(SIP)^[12]指标来评价沥青混合料的水稳定性.

2 结果与分析

2.1 沥青与集料黏附性定量测试

试验采用具有常规形态特征的5种集料和2种沥青进行黏附性定量测试与评价.为了排除形态特征对集料黏附性的影响,将5种集料均加工成球形,然后分别测试常规形态集料、球形集料的黏附率和水敏感系数,以此验证黏附性定量测试的适用性,结果见图1、2.由图1、2可见:(1)在沥青相同的条件下,具有常规形态特征的石灰岩黏附率最大,其次是玄武岩、辉绿岩和辉长岩,花岗岩最小;在集料相同的

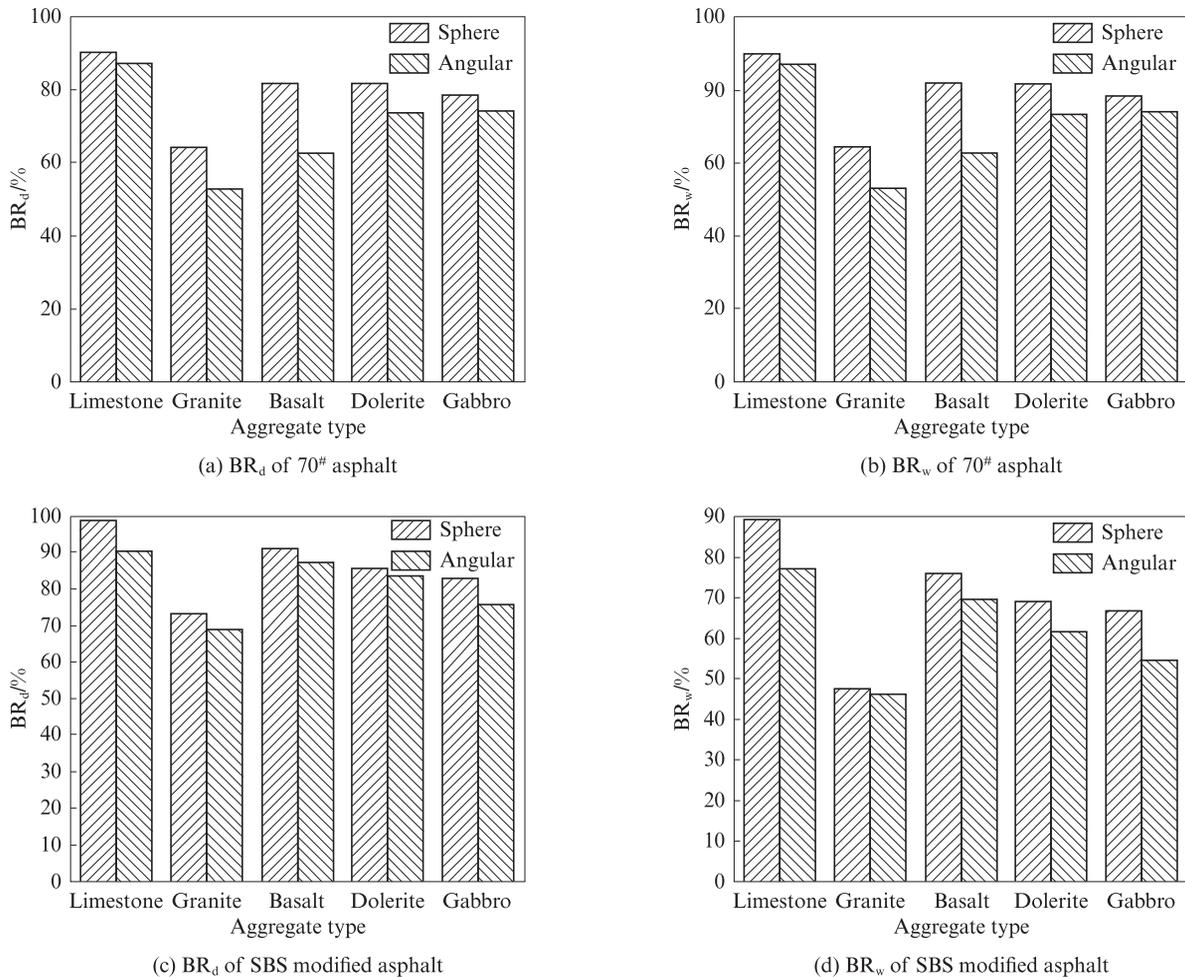


图1 集料-沥青的黏附率
Fig. 1 Bonding ratios of aggregate-asphalt

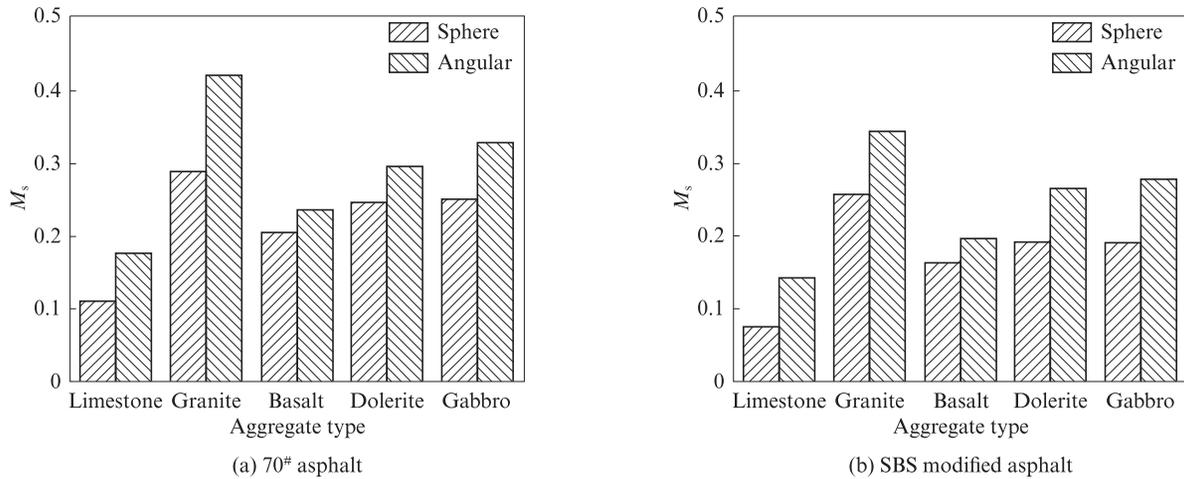


图2 集料-沥青的水敏感系数
Fig. 2 M_s of aggregate-asphalt

条件下, SBS改性沥青与集料的黏附比大于基质沥青;且 BR_d 值总是大于 BR_w ,表明水的存在会导致集料-沥青结合料之间的黏附力降低。(2)在沥青相同的条件下,石灰岩的水敏感性指标 M_s 最小,其次是玄武岩、辉绿岩和辉长岩,花岗岩最大,也就是说石灰岩集料在水的影响下,仍然与沥青具有较好的黏附力,而花岗岩与沥青的黏附力最小,水敏感性指标 M_s 对不同岩性的集料具有适用性。(3)球形集料的黏附率及水敏感性指标比常规集料高,说明颗粒形状对沥青与集料之间的黏附性有一定的影响;球形集料-沥青的黏结性能与常用的非球形集料相似,这说明该方法同样能够有效区分不同沥青、集料之间的黏

结性能,这为工程上提供了一种简单、可靠、有效的判别沥青与集料黏附性的试验方法。

2.2 集料形态特征及其对沥青-集料黏附性的影响

为获得集料形态特征,按照AIMS分类规则将不同来源的粒径为10~15 mm的5种集料各分为5组(G1、G2、G3、G4、G5),如图3所示。通过AIMS获得不同集料的数字化形态特征,如图4所示。由图4可见:(1)同一来源的5组粗集料形态特征之间存在明显的差异。G1组骨料棱角性较小,G5组棱角性最大。从G1到G5, G_A 增加的同时, S_p 下降,这种规律性的单调变化,为集料的棱角性和球度作为控制变量与其他性能对比提供了依据,同时也证实

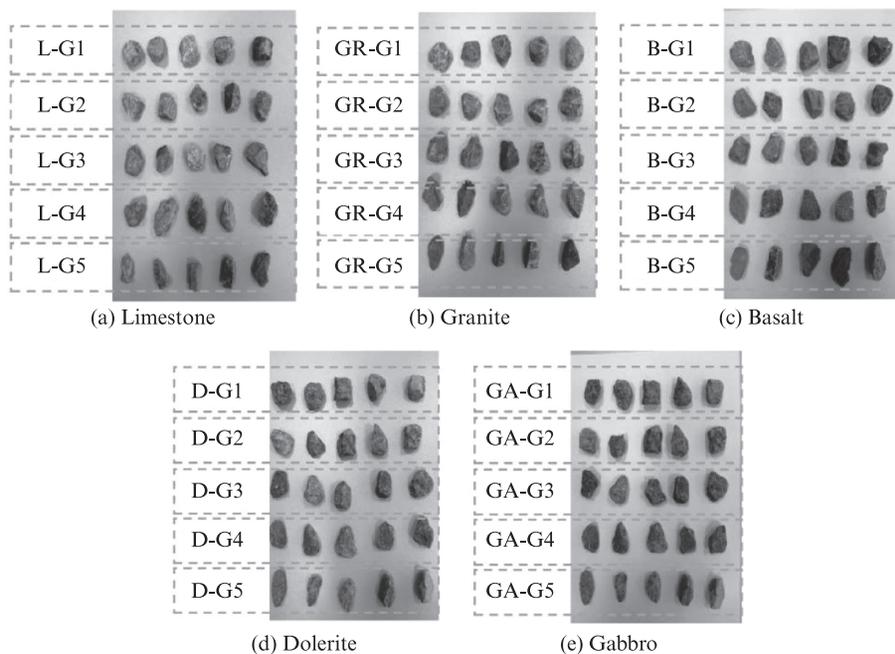


图3 不同来源的典型集料形态
Fig. 3 Typical aggregates characteristic of different sources

了根据棱角性划分粗集料是有效的。(2)对于相同来源的石料,纹理值略有不同,不同来源集料的纹

理存在显著差异,花岗岩的纹理值最大,石灰岩的纹理值最小。

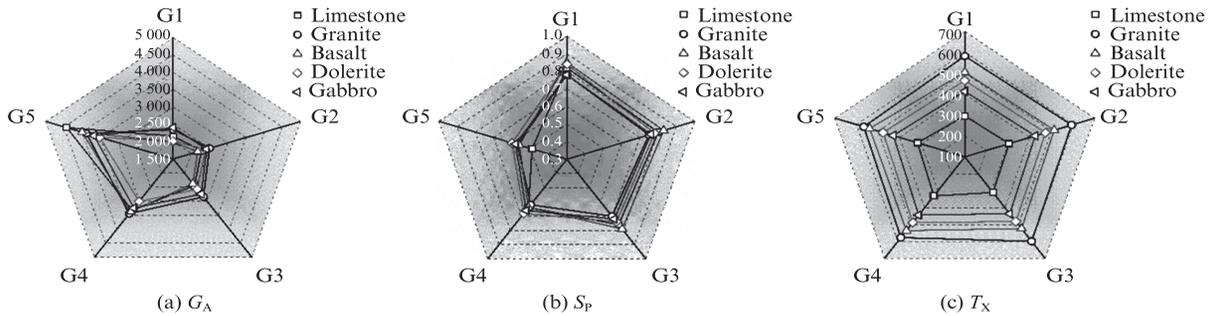


图4 粗集料的形态特征

Fig. 4 Morphological characteristics of coarse aggregates

2.3 集料形态特征对集料-沥青黏附性及水稳定性的影响

2.3.1 集料的棱角性对集料-沥青黏附性及水稳定性的影响

图5为 M_s 、 ΔS 、TSR、SIP与 G_A 的拟合关系,其相关系数见表4.由图5可见:(1) G_A 与 M_s 存在线性正相关关系;随着 G_A 的增加, M_s 增加,表明 G_A 值越大,沥青越容易从集料表面脱落,沥青的存在对集料-沥青的黏附不利。(2)对于相同来源的集料,沥青混合料的

抗水损害指标 ΔS 、TSR、SIP随着集料 G_A 的变化呈规律性变化;随着集料 G_A 的增大,沥青混合料的 ΔS 先减小后增大,TSR和SIP先增大后减小,并且 G_A 与 ΔS 、TSR、SIP分别呈二次函数关系,相关系数 R^2 均大于0.90。(3)集料存在最佳 G_A ,使得 ΔS 最小,TSR和SIP最大,此时沥青混合料的抗水损害性能最好;除了辉绿岩的最佳 G_A 为2500~3000,石灰岩、花岗岩、玄武岩、辉长岩的最佳 G_A 均为3000~3500。

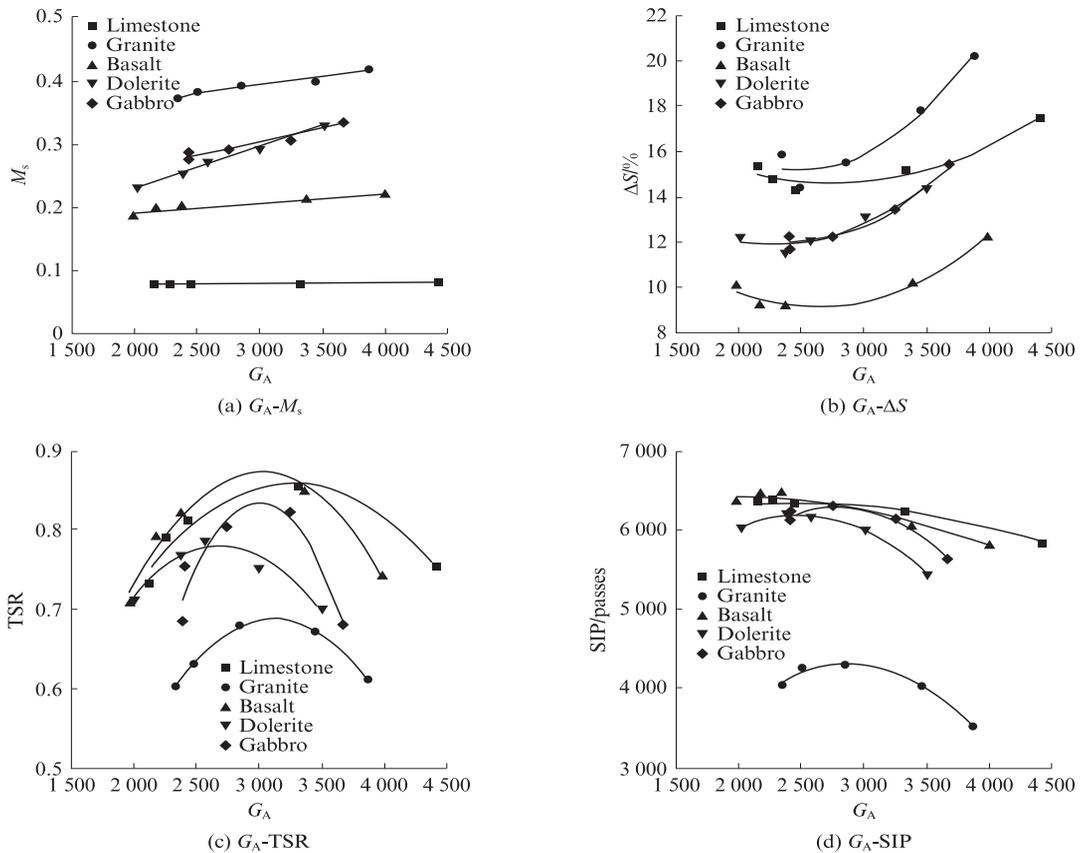


图5 M_s 、 ΔS 、TSR、SIP与 G_A 的关系

Fig. 5 Relationships between M_s , ΔS , TSR, SIP and G_A

2.3.2 集料的球度对集料-沥青黏附性及水稳定性影响

图6为 ΔS 、TSR、SIP、 M_s 与 S_p 的拟合关系(采用SBS改性沥青),其相关系数见表5.由图6可见:(1) S_p 与 M_s 存在线性负相关关系;随着 S_p 的增大, M_s 减小,表明集料越圆润,沥青与集料的黏附性越强.(2)对于相同来源的集料,沥青混合料的 ΔS 、TSR、SIP随着集料 S_p 的变化呈规律性变化;随着集料 S_p 的增大,沥青混合料的 ΔS 先减小后增大,TSR和SIP先增大后减小,并且 S_p 与 ΔS 、TSR、SIP分别呈二次函数关系,并且相关系数 R^2 均大于0.90,如表4所示.(3)集料存在最佳球度,使得 ΔS 最小,TSR和SIP最大,沥青混合料的水稳定性最好; S_p 在0.75左右时,不同来源集料的 ΔS 出现最小值;石灰岩、花岗岩的 S_p 在0.65左右时,TSR出现最大值,辉长岩的 S_p 在0.70左右时,TSR出现最大值,玄武岩、辉绿岩的 S_p 在0.75左右时,TSR出现最大值;花岗岩、辉长岩的 S_p 在0.70左右时,SIP出现最大值,石灰岩、辉绿岩、玄武岩的 S_p 在0.75左右时,SIP出现最大值.分析可知,随着集料 S_p 的增大,集料更加圆润,集料与沥青间的黏附性增强,集料间的嵌挤作用先增强后减弱,所以集料的 S_p 在0.65~0.75时,沥青混合料的水稳定性最佳.

表4 M_s 、 ΔS 、TSR、SIP与 G_A 的回归关系

Table 4 Regression relation between M_s , ΔS , TSR, SIP and G_A

Index	Aggregate source	Regression relation	R^2
G_A-M_s	Limestone	$y=2 \times 10^{-6}x+0.08$	0.973
	Granite	$y=3 \times 10^{-5}x+0.31$	0.936
	Basalt	$y=2 \times 10^{-5}x+0.16$	0.884
	Dolerite	$y=7 \times 10^{-5}x+0.10$	0.980
	Gabbro	$y=4 \times 10^{-5}x+0.18$	0.938
$G_A-\Delta S$	Limestone	$y=10^{-6}x^2+0.006x+22.74$	0.917
	Granite	$y=3 \times 10^{-6}x^2+0.014x+33.06$	0.938
	Basalt	$y=2 \times 10^{-6}x^2+0.009x+20.99$	0.959
	Dolerite	$y=2 \times 10^{-6}x^2+0.007x+20.20$	0.937
	Gabbro	$y=2 \times 10^{-6}x^2+0.011x+26.16$	0.963
G_A-TSR	Limestone	$y=6 \times 10^{-4}x^2-8 \times 10^{-8}x-0.052$	0.902
	Granite	$y=0.001x^2-1.6 \times 10^{-7}x-0.87$	0.944
	Basalt	$y=8.6 \times 10^{-4}x^2-1.4 \times 10^{-7}x-0.43$	0.945
	Dolerite	$y=7.1 \times 10^{-4}x^2-1.3 \times 10^{-7}x-0.19$	0.913
	Gabbro	$y=0.002x^2-3.4 \times 10^{-7}x-2.21$	0.963
G_A-SIP	Limestone	$y=-0.0001x^2+0.613x+5.612$	0.989
	Granite	$y=-0.0008x^2+4.43x-2.061$	0.963
	Basalt	$y=-0.0001x^2+0.339x+6.159$	0.932
	Dolerite	$y=-0.0007x^2+3.64x+1.645$	0.995
	Gabbro	$y=-0.0009x^2+4.84x-466$	0.986

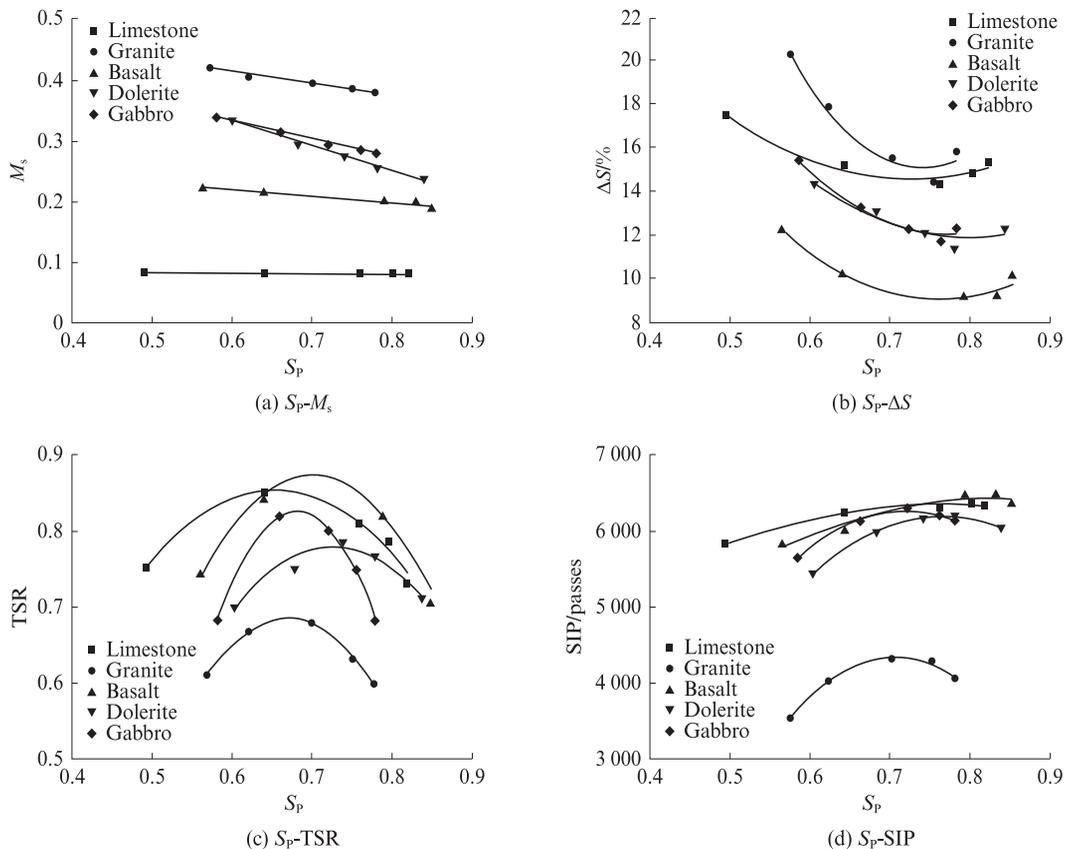


图6 M_s 、 ΔS 、TSR、SIP与 S_p 的关系

Fig. 6 Relationships between M_s , ΔS , TSR, SIP and S_p

表5 M_s 、 ΔS 、TSR、SIP与 S_p 的回归关系
Table 5 Regression relation between M_s , ΔS , TSR, SIP and S_p

Index	Aggregate source	Regression relation	R^2
S_p - M_s	Limestone	$y = -0.02x + 0.09$	0.978
	Granite	$y = -0.20x + 0.53$	0.930
	Basalt	$y = -0.11x + 0.28$	0.882
	Dolerite	$y = -0.42x + 0.58$	0.985
	Gabbro	$y = -0.30x + 0.51$	0.979
S_p - ΔS	Limestone	$y = 56.63x^2 - 81.75x + 44.05$	0.937
	Granite	$y = 193.67x^2 - 284.93x + 119.88$	0.953
	Basalt	$y = 86.18x^2 - 129.97x + 58.046$	0.954
	Dolerite	$y = 63.56x^2 - 100.97x + 52.16$	0.935
	Gabbro	$y = 95.43x^2 - 146.66x + 68.38$	0.960
S_p -TSR	Limestone	$y = 5.17x^2 - 3.95x - 0.83$	0.923
	Granite	$y = 9.90x^2 - 7.39x - 2.63$	0.981
	Basalt	$y = 9.68x^2 - 6.90x - 2.52$	0.891
	Dolerite	$y = 7.46x^2 - 5.12x - 1.94$	0.915
	Gabbro	$y = 19.49x^2 - 14.31x - 5.81$	0.987
S_p -SIP	Limestone	$y = -6440.4x^2 + 9991.1x + 2477.6$	0.988
	Granite	$y = -45998x^2 + 64642x - 18380$	0.985
	Basalt	$y = -6129.6x^2 + 10730x + 1712.2$	0.944
	Dolerite	$y = -28741x^2 + 43845x - 10530$	0.997
	Gabbro	$y = -33636x^2 + 48365x - 11121$	0.991

2.3.3 集料表面纹理对集料-沥青黏附性及水稳定性的影响

为了排除棱角性、球度的影响,采用5组集料(GA-G1、GA-G2、D-G2、D-G3、B-G3)来研究集料表面纹理对SBS改性沥青与集料黏附性的影响,其 G_A 值分别为2405、2418、2388、2578、2378, S_p 值分别为0.78、0.76、0.78、0.74、0.79.

图7为 M_s 、 ΔS 、TSR、SIP与 T_x 的关系.由图7可见:(1) T_x 与 M_s 之间存在非线性正相关关系;随着集料 T_x 的增加, M_s 减小,这说明粗糙的表面纹理有利于提高沥青与集料的黏附力.(2) ΔS 、TSR、SIP指标随着集料纹理 T_x 的变化出现规律性的变化, ΔS 、TSR、SIP与 T_x 呈二次函数关系,相关系数 R^2 分别为0.810、0.885、0.862;在保证集料 G_A 、 S_p 基本一致的情况下,随着 T_x 的增大,集料的比表面积增大,沥青与集料之间的黏附面积增大,所以沥青与集料之间的黏附性增强,沥青混合料的抗水损害性能增强.

2.4 集料形态特征与集料-沥青黏附性及水稳定性灰色关联分析

灰色关联度分析法是根据因素之间发展态势的相似或相异程度来衡量因素之间关联程度的,其核心是首先对原始数据进行处理,然后计算关联系数^[13-14].

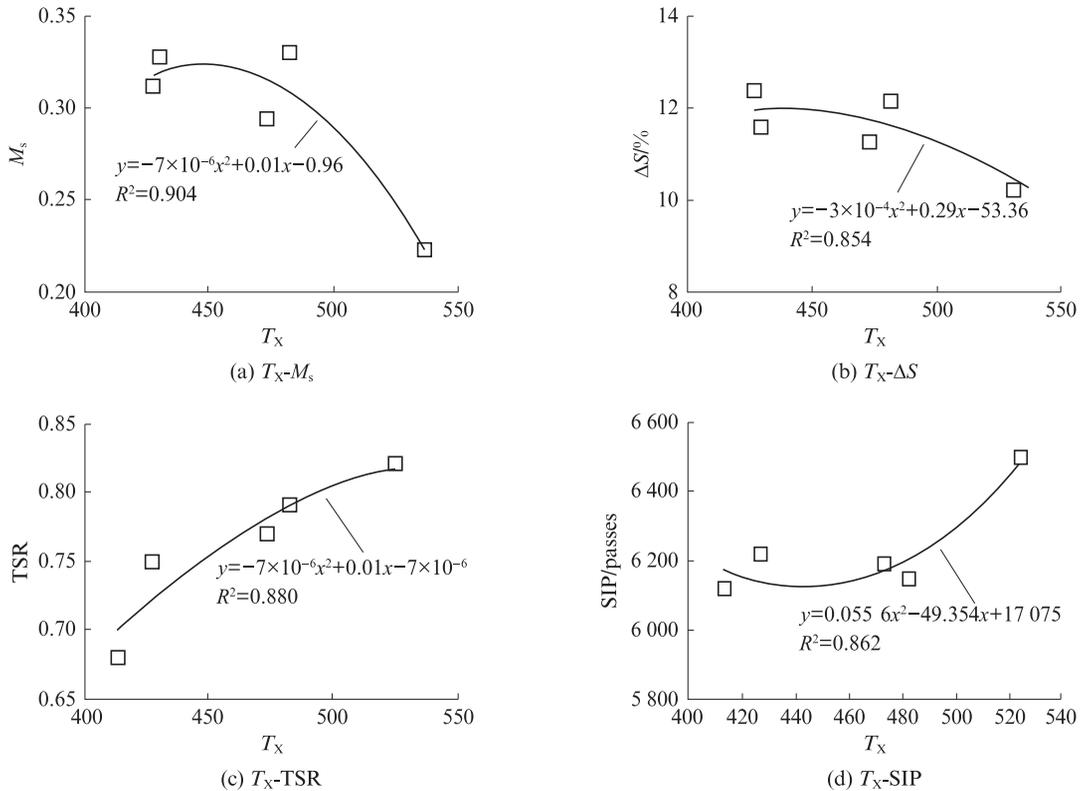


图7 M_s 、 ΔS 、TSR、SIP和 T_x 的关系

Fig. 7 Correlation of parameters between M_s , ΔS , TSR, SIP and T_x

将集料-沥青的黏附性指标 M_s 及水稳定性指标 ΔS 、TSR、SIP 作为参考数列, 将 25 组集料 (5 种集料、各 5 组) 的形态特征 G_A 、 S_p 、 T_x 作为比较数列, 不同集

料的形态特征及黏附性指标如表 6 所示. 分析不同的集料-沥青黏附性及水稳定指标与集料形态特征的关联性, 结果如表 7 所示.

表 6 不同集料形态特征及黏附性指标
Table 6 Morphological characteristics and adhesion index of different aggregates

Aggregate	G_A	S_p	T_x	M_s	$\Delta S/\%$	TSR	SIP
L-G1	2 155	296	0.82	0.079	15.44	0.73	6 332
L-G2	2 280	305	0.80	0.080	14.75	0.79	6 380
L-G3	2 448	310	0.76	0.080	14.21	0.81	6 317
L-G4	3 321	331	0.64	0.082	15.21	0.85	6 247
L-G5	4 425	318	0.49	0.084	17.52	0.75	5 824
GR-G1	2 345	582	0.78	0.374	15.94	0.60	4 022
GR-G2	2 501	593	0.75	0.384	14.31	0.63	4 290
GR-G3	2 847	599	0.70	0.394	15.62	0.68	4 297
GR-G4	3 444	577	0.62	0.400	17.84	0.67	4 017
GR-G5	3 887	566	0.57	0.423	20.27	0.61	3 524
B-G1	1 986	504	0.85	0.182	10.15	0.70	6 322
B-G2	2 175	513	0.83	0.198	9.12	0.79	6 470
B-G3	2 378	524	0.79	0.200	9.23	0.82	6 497
B-G4	3 379	536	0.64	0.214	10.24	0.84	6 017
B-G5	4 000	539	0.56	0.220	12.25	0.74	5 824
D-G1	2 015	465	0.84	0.235	12.35	0.71	6 022
D-G2	2 388	473	0.78	0.252	11.27	0.77	6 190
D-G3	2 578	482	0.74	0.275	12.14	0.79	6 150
D-G4	3 012	488	0.68	0.291	13.25	0.75	6 017
D-G5	3 514	477	0.60	0.336	14.33	0.70	5 424
GA-G1	2 405	413	0.78	0.277	12.38	0.68	6 122
GA-G2	2 418	427	0.76	0.288	11.59	0.75	6 217
GA-G3	2 748	430	0.72	0.296	12.24	0.80	6 297
GA-G4	3 245	444	0.66	0.309	13.33	0.82	6 117
GA-G5	3 677	430	0.58	0.341	15.36	0.68	5 624

表 7 集料-沥青的黏附性及水稳定性与集料形态特性的关联系数
Table 7 Correlation coefficient between aggregate asphalt adhesion, moisture stability and aggregate morphological characteristics

Index	G_A	T_x	S_p
M_s	0.783	0.806	0.760
$\Delta S/\%$	0.813	0.761	0.770
TSR	0.734	0.756	0.807
SIP	0.731	0.772	0.854

由表 7 可见: (1) 集料形态特征对集料-沥青黏附性及水稳定性的影响程度不同; 关联系数集中分布在 0.73~0.86, 变化幅度不大, 这说明 3 个形态指标对集料-沥青黏附性及水稳性都有较大的影响. (2) 集料形态特征与集料-沥青黏附性指标 M_s 的关联度排序为 $T_x > G_A > S_p$, 在水、温耦合且无外界作用力环境下, 集料表面纹理对集料-沥青黏附性影响最大, 棱角性次之, 球度影响相对较小, 集料通过粗糙纹理结构在与沥青产生黏附作用时发挥了最大的作用. (3) 集料

形态特征与浸水飞散损失指标 ΔS 的关联度排序为: $G_A > S_p > T_x$, 在水、温、多向力耦合作用下, 集料的表面纹理对沥青混合料抗水损害性能的影响相对较小, 棱角性和球度影响较大, 这可能因为集料通过棱角的嵌挤比集料仅通过粗糙纹理对沥青黏附作用和混合料中集料-沥青-集料结构的黏附特征影响更大. (4) 集料形态特征与冻融劈裂强度比 TSR、车辙剥落变形拐点 SIP 的关联度排序均为: $S_p > T_x > G_A$, 在水、温、竖向力耦合作用下, 沥青混合料良好的水稳定性主要依赖集料的形状 (球度) 和表面纹理结构.

3 结论

(1) 本文提出的集料-沥青黏结性能定量测试方法可靠、实用, 能够有效区分并评价不同沥青与集料的黏附性及抗水损坏性能.

(2) 随着集料球度 S_p 的增大, 棱角性 G_A 减小, 沥青混合料的水稳定性先提升后降低. 沥青混合料的

水稳定性最佳的 G_A 值为 2 500~3 000, S_p 值为 0.65~0.75。随着集料纹理 T_x 值的增大, 沥青混合料的水稳定性增强。

(3) 集料的形态特征指标对集料-沥青黏附性的影响排序由大到小依次为: $T_x > G_A > S_p$; 对浸水飞散损失指标的影响排序由大到小依次为: $G_A > S_p > T_x$; 对冻融劈裂强度比、浸水车辙指标的影响排序由大到小依次为: $S_p > T_x > G_A$ 。

参考文献:

- [1] 冯俊领, 郭忠印, 陈崇驹, 等. 高温多雨条件下沥青混合料水损害模拟研究[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(5): 48-52.
FENG Junling, GUO Zhongyin, CHEN Chongju, et al. Simulation study on water damage of asphalt mixture under high temperature and rainy conditions[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(5): 48-52. (in Chinese)
- [2] 韩森, 刘亚敏, 徐鸥明, 等. 材料特性对沥青-集料界面黏附性的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, 30(3): 10-13, 74.
HAN Sen, LIU Yamin, XU Ouming, et al. Influence of material properties on adhesion of asphalt aggregate interface[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science), 2010, 30(3): 10-13, 74. (in Chinese)
- [3] SINGH D, HABAL A, ASHISH P K, et al. Evaluating suitability of energy efficient and anti-stripping additives for polymer and polyphosphoric acid modified asphalt binder using surface free energy approach[J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 949-960.
- [4] VEYTSKIN Y, BOBKO C, CASTORENA C, et al. Nanoindentation investigation of asphalt binder and mastic cohesion [J]. Construction and Building Materials, 2015, 100: 163-171.
- [5] LI J, LI P, SU J, et al. Effect of aggregate contact characteristics on densification properties of asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 691-702.
- [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, 2018, 21(3): 524-530.
LI Xiaoyan, BU Yin, WANG Hainian, et al. Study on quantitative evaluation index of coarse aggregate morphological characteristics [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(3): 524-530. (in Chinese)
- [7] GUO Y, MARKIN V, ZHANG X, et al. Image analysis for morphology, rheology and degradation study of railway ballast: A review [J]. Transportation Geotechnics, 2019, 18: 173-211.
- [8] VALDÉS G, MIRO R, MARTINEZ A, et al. Effect of the physical properties of aggregates on aggregate-asphalt bond measured using the UCL method[J]. Construction and Building Materials, 2014, 73: 399-406.
- [9] VANOSS C J, CHAUDHURY M K, GOOD R J. Interfacial Lifshitz-Van Der Waals and polar interactions in macroscopic systems[J]. Chemical Reviews, 1988, 88(6): 927-941.
- [10] 王彦喆. 粗集料微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 micro structure characteristics of coarse aggregate on the performance of asphalt mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [11] BHASIN A, LITTLE-DALLAS N. Characterization of aggregate surface energy using the universal sorption device[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(8): 634-641.
- [12] 张争奇, 罗要飞, 张苛. 沥青混合料汉堡车辙试验评价研究综述[J]. 材料导报, 2017, 31(3): 96-105.
ZHANG Zhengqi, LUO Yaofei, ZHANG Ke. Review on the evaluation of Hamburg rut test of asphalt mixture[J]. Materials Reports, 2017, 31(3): 96-105. (in Chinese)
- [13] 王鹏, 曾凡奇, 黄晓明. 沥青高温性能指标的灰色关联度分析[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 32-36.
WANG Peng, ZENG Fanqi, HUANG Xiaoming. Grey correlation analysis of asphalt high temperature performance index [J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 6(3): 32-36. (in Chinese)
- [14] 鲍学英, 王起才, 张磊, 等. 基于灰色关联分析的再生混凝土粗骨料质量优选研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(4): 39-43.
BAO Xueying, WANG Qicai, ZHANG Lei, et al. Quality optimization of recycled concrete coarse aggregate based on grey relational analysis[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(4): 39-43. (in Chinese)