

文章编号:1007-9629(2021)06-1248-07

沥青混合料高温性能评价指标区分度研究

张怀志, 王迪, 杨彦海

(沈阳建筑大学 交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要:针对中国沥青路面结构设计规范中的车辙试验和单轴贯入试验,实测得到9种沥青混合料的永久变形量、动稳定度、贯入强度和贯入位移4项指标,并进行4项指标的高温性能区分能力研究.首先利用箱型图定性比较同一指标对不同沥青混合料高温性能的区分能力;然后引入2种区分度计算方法——熵值赋权法和高低分组法,计算得到4项指标的区分度.结果表明:4项指标对应的沥青混合料高温性能区分能力存在显著差别;采用2种区分度计算方法得到的4项指标区分度排序一致,从高到低依次为永久变形量、贯入强度、贯入位移和动稳定度.建议沥青路面结构抗车辙设计时考虑不同指标的区分度,而车辙试验采用永久变形量代替动稳定度.

关键词:道路工程;沥青混合料;高温性能试验;区分度;熵值赋权法;高低分组法

中图分类号:U416.03

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.06.017

High Temperature Performance Evaluation Indices of Asphalt Mixtures

ZHANG Huaizhi, WANG Di, YANG Yanhai

(School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: Aiming to the rutting test and uniaxial penetration test in the specifications for design of highway asphalt pavement in China, the distinguishing ability of high temperature performance of the corresponding test indexes was studied. The permanent deformation, dynamic stability, penetration strength and penetration displacement of 9 kinds of asphalt mixtures were measured in laboratory. The distinguishing ability of each index on the high temperature performance of different asphalt mixtures was qualitatively compared by the box diagram method. Then, two kinds of discrimination calculation methods, namely the entropy weighting method and the high-low grouping method, were introduced to calculate the discrimination of the four indices. The results show that: the four indices have significantly different distinguishing ability on the high temperature performance of asphalt mixtures; the four indices obtained by the two methods are in the same order, and the sequence from high to low is permanent deformation, penetration strength, penetration displacement and dynamic stability. It is suggested that the testing index differentiation should be considered for pavement anti-rutting design, and permanent deformation should be introduced instead of dynamic stability in the rutting test.

Key words: road engineering; asphalt mixture; high temperature performance test; differentiation; entropy value weighting method; high-low grouping method

保证抗车辙能力是沥青路面结构设计的核心内容之一.依赖于合理的沥青混合料高温性能评价方法,准确合理地评价沥青混合料的高温性能是有效

控制沥青路面抗车辙性能的前提条件.

中国沥青路面结构设计规范中评价沥青混合料高温性能的试验方法有2种:一是车辙试验;二是单

收稿日期:2020-08-07; 修订日期:2020-09-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778482);辽宁省博士启动基金资助项目(20172520212)

第一作者:张怀志(1982—),男,山东诸城人,沈阳建筑大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail:huaizhi.zhang@163.com

通讯作者:杨彦海(1972—),男,黑龙江兰西人,沈阳建筑大学教授,硕士生导师,博士.E-mail:yangyanhai168@126.com

轴贯入试验.对于车辙试验,研究表明动稳定度能勉强区分不同粒径、相同级配类型和沥青的混合料抗车辙能力,但对于改性沥青混合料及SMA类沥青混合料等混合料的区分能力欠佳^[1-4].一些学者认为,动稳定度指标计算方法过度考虑压实稳定期的剪切流动变形,忽略了试验前期压实过渡期的变形^[5-8],建议对动稳定度指标进行优化^[9-10].对于贯入试验,研究表明贯入强度指标受沥青混合料中针片状含量、结合料性质、粉胶比等诸多因素影响^[11],其与汉堡车辙、普通车辙试验结果也存在不一致的情况^[12].

由上可知,研究人员已普遍认识到在评价沥青混合料高温性能时,采取不同室内试验方法和指标体系会形成较大差异,并采取了一系列改进措施.主要技术思路包括开发或改进试验方法和建立新的评价指标,但考虑的沥青混合料类型总体较少,且大都采用比较分析,对不同指标的评估能力缺少绝对意义上的判定.

沥青混合料的高温性能试验指标是联系结构性能和材料性能的桥梁之一,其准确性关系到路面结构设计的合理性.因此,有必要基于中国现行路面设计规范中采用的沥青混合料高温性能评价方法,对相关试验指标的评估能力进行系统研究,从而为在路面结构设计中合理选择沥青混合料类型和确定高温性能要求提供支持.本研究基于9种沥青混合料共

291组试验数据,采用多种统计分析手段计算得到了车辙试验和单轴贯入试验对应指标的区分度,定量比较了不同试验方法和指标评估多种沥青混合料高温性能的能力.

1 试验设计及材料参数

研究涉及9种沥青混合料:AC13、SBS改性沥青AC13(SBSAC13)、SBS改性沥青SMA13、AC16、SBS改性沥青AC16(SBSAC16)、AC20、SBS改性沥青AC20(SBSAC20)、高模量AC20(GMLAC20)、AC25.其中GMLAC20的设计依据为DB21/T 1754—2009《高模量沥青混合料施工技术规范》,其他沥青混合料设计均依据JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》进行.同种混合料试件对应的沥青和矿料均为同一批次,级配相同.所采用的沥青为辽河90#道路沥青和辽河成品SBS改性沥青;高模量外掺剂为国产“路宝”高模量外掺剂,掺量为混合料总质量的0.4%.SMA集料为玄武岩,矿粉和其他混合料集料均选用石灰岩,原材料各项指标均满足相应规范要求.混合料设计结果如表1所示.表1中:VV为空隙率(体积分数);VMA为矿料间隙率(体积分数);VFA为沥青饱和度(体积分数);MS为马歇尔稳定度;FL为马歇尔试验流值;OAC为最佳沥青用量(质量分数).

表1 沥青混合料设计结果
Table 1 Asphalt mixture design results

Item	AC13	SBSAC13	SMA13	AC16	SBSAC16	AC20	SBSAC20	GMLAC20	AC25
VV(by volume)/%	4.1	4.2	3.9	4.1	4.2	4.2	4.1	4.0	4.2
VMA(by volume)/%	15.1	15.3	19.8	14.7	15.2	14.1	14.3	14.7	13.5
VFA(by volume)/%	67.5	70.6	81.1	68.3	71.2	70.1	72.6	73.4	67.3
MS/kN	8.6	9.1	6.3	8.9	9.6	10.1	10.3	10.8	8.5
FL/(0.1 mm)	2.5	2.7		2.4	2.6	2.4	3.1	2.3	2.2
OAC(by mass)/%	4.8	5.0	6.8	4.6	4.7	4.2	4.6	4.4	4.0

对上述沥青混合料按照标准试验方法分别进行车辙试验和单轴贯入试验,得到车辙试验动稳定度DS、永久变形量PD、单轴贯入试验的贯入强度 R_f 和贯入位移 D 共4项指标.其中贯入位移为试验达到荷载峰值时压头的有效位移.

2 不同指标评估效果对比

最终试验数据包括车辙试验103组、单轴贯入试验188组.每种沥青混合料同类试验对应的样本数不少于10个.初步分析表明,上述4项指标更符合对数正态分布.在此基础上,首先对4种指标的高温性能

评价能力进行定性比较.以所有混合料为对象,绘制每一指标取对数后对应的箱型图.为直观展示不同指标评估效果的差异,箱型图根据各指标的平均值判断沥青混合料高温性能的优劣,并按高温性能从高到低排序,如图1所示.图中矩形盒上下两端边的位置分别对应数据批的上下四分位数;IQR(interquartile range)为数据集合中四分位数的间距.

由图1可知,不同沥青混合料的试验指标均存在显著的差异,由不同指标得到的混合料高温性能排序总体并不一致,同一沥青混合料在不同评估指标下的高温性能优劣明显不同,甚至相反.如

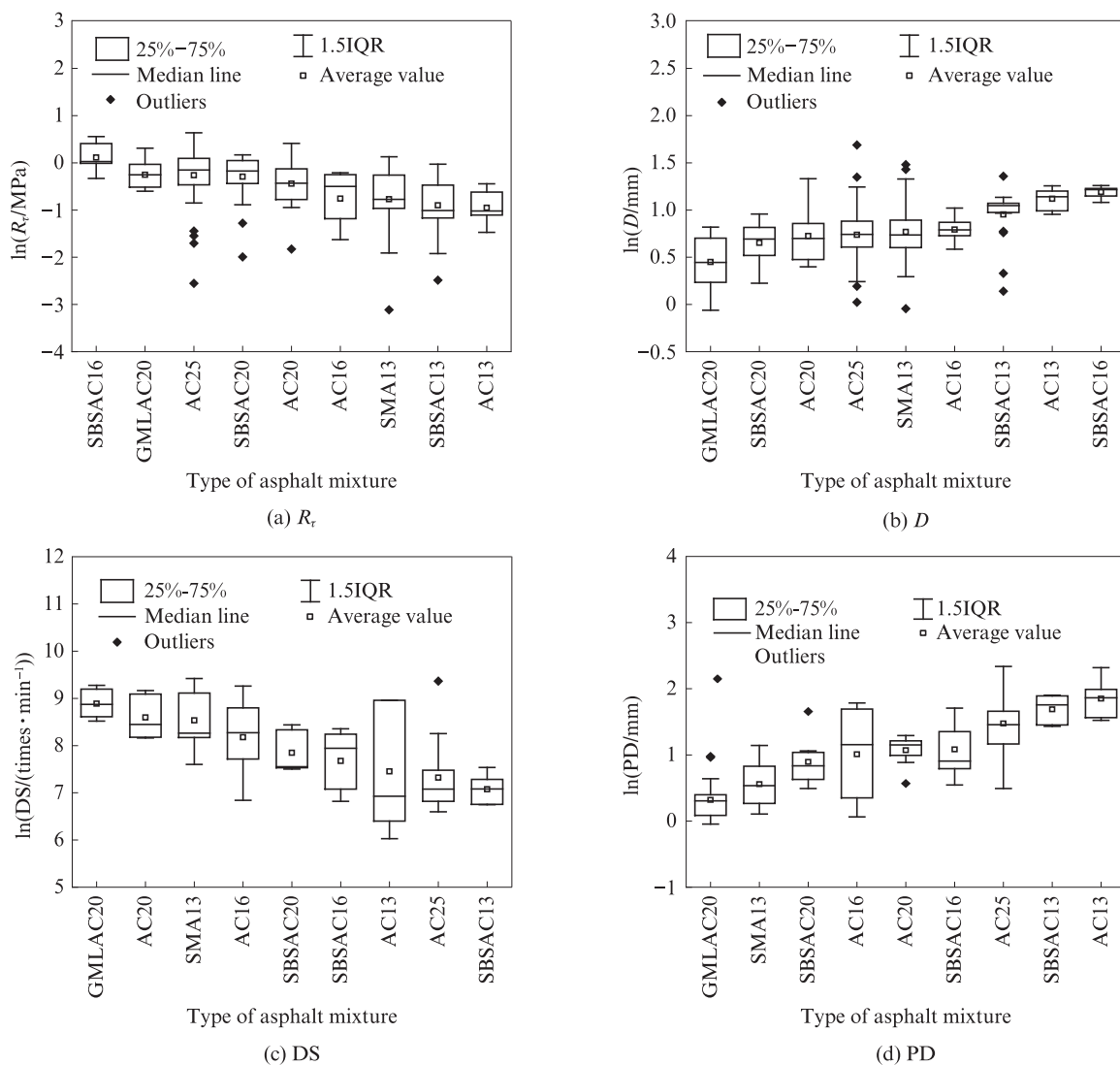


图1 4项试验指标箱型图
Fig. 1 Box-plots of four indexes

SBSAC16的高温性能基于贯入强度 R_f 评价时排序最高,基于贯入位移 D 评价时则排序最低;AC25的高温性能基于贯入强度 R_f 评价时排序为第3,而基于动稳定度 DS 评价时的排序为第8.在贯入位移 D 、动稳定度 DS 和永久变形量 PD 排序中,高模量沥青混合料均处于最高水平,但在贯入强度 R_f 排序中则为第2.此外,基质沥青和改性沥青混合料的位置明显不同,如在动稳定度 DS 排名中, $AC20 > SBSAC20$ 、 $AC13 > SBSAC13$,然而在永久变形量 PD 排序中, $AC20 < SBSAC20$ 、 $AC13 < SBSAC13$.限于篇幅,对于其他排名不一致情况不再赘述.事实上,由于沥青混合料天然的变异性,对于同种沥青混合料而言,同一指标分布范围较大且不同指标的评价能力存在一定程度重叠是客观合理的.但是,若假设指标评价能力相同,则由不同指标得到的不同类型混合料高温性能排序应保持一致.而本文的研究成果表明,不同

指标下9种沥青混合料的高温性能排序明显不同,从而证明2种试验方法和4项指标的区分能力存在不可忽略的差别.

3 不同指标区分度计算分析

进一步引入区分度的概念,对不同指标的区分能力进行定量研究.指标区分度越大,表示该指标提供的有效信息越多,越能有效地区分指标差异^[13-14].在区分度计算过程中,依据对数正态分布剔除了异常值.分别采用熵值赋权法和高低分组法分别计算了4项指标的区分度.

3.1 熵值赋权法

熵值赋权法是一种广泛应用的赋权法,计算得到的区分度具有客观性、鲁棒性等特点^[15].设 n 个评价对象各有 m 个指标,则可得到初始信息化矩阵

$X' = (x'_{ij})_{n \times m}$, 其中 x'_{ij} 为第 i 个评价对象的第 j 个指标的数值. 由于永久变形量和贯入位移为逆指标, 首先根据式(1)进行指标同向化, 得到数据矩阵 $X = (x_{ij})_{n \times m}$; 其次根据式(2)进行无量纲化, 得到标准化矩阵 $Y = (y_{ij})_{n \times m}$; 再次按式(3)、(4)进行熵值法赋权, 定义第 j 个评价指标的熵为 H_j , 第 j 个评价指标的熵权为 ω_j ; 最后根据式(5)进行区分度 DI_j 的计算.

$$x_{ij} = 1/x'_{ij}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

$$y_{ij} = x_{ij} / \sum_{k=1}^n x_{kj}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$H_j = -k \sum_{i=1}^n y_{ij} \ln y_{ij}, j = 1, 2, \dots, m, \text{ 其中 } k = \frac{1}{\ln n} \quad (3)$$

$$\omega_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^m (1 - H_j)} = \frac{1 - H_j}{m - \sum_{j=1}^m H_j}, j =$$

$$1, 2, \dots, m; \text{ 其中, } \omega_j \in [0, 1] \text{ 且 } \sum_{j=1}^m \omega_j = 1 \quad (4)$$

$$DI_j = \left(\max_{i=1}^n y_{ij} - \min_{i=1}^n y_{ij} \right) \omega_j \quad (5)$$

表2给出了不同指标的熵值、熵权和区分度计算结果. 由表2可知, 4项指标区分度从高到低依次为: 永久变形量 $PD >$ 贯入强度 $R_t >$ 贯入位移 $D >$ 动稳定度 DS . 其中: 永久变形量区分度处于最高水平; 贯入强度和贯入位移区分度处于中间水平; 动稳定度指标的区分度最小, 接近于零, 说明动稳定度指标对沥青混合料高温性能的评估能力最差.

表2 熵值赋权法区分度计算结果

Table 2 Differentiation results of entropy method weighting

Item of calculation	R_t	D	DS	PD
Entropy(H)	0.924 0	0.980 0	0.998 0	0.884 0
Entropy weight(ω)	0.357 0	0.093 3	0.008 0	0.542 0
Differentiation(DI)	0.063 0	0.011 0	0.000 1	0.167 0

3.2 高低分组法

由于熵值赋权法是以数据变异程度为基础的分析方法, 忽略了不同类型沥青混合料实际工程性能的真实表征, 在描述4项指标的区分效果上存在一定缺陷, 因此进一步引入区分度分析方法中的高低分组法进行分析^[16].

高低分组法是试卷分析中的常用方法, 用于确定试题的区分度. 将学生在测验中高分组和低分组看作2个极端效标组(效标为衡量题目有效性的外在标准, 一般以测验总分为效标), 则2个极端效标组在特定题目上反映的差别程度可刻画题目的区分能力.

用高分组在特定题目上的得分率和低分组在同一题目上的得分率之差作为区分度指标. 本研究借鉴该方法, 将性能差距显著的沥青混合料作为极端效标组, 将某具体指标视为特定题目, 在此基础上根据先验知识对某个指标区分度最终计算结果的合理性进行评判, 进而判断不同指标对各混合料高温性能的区分能力.

高低分组法具体计算步骤为: 首先, 将数据无量纲化, 本研究将单一指标所得数据最优者评为满分100分, 将同一指标所得数据最差者评为最低分60分, 并根据式(6)由点差法将该指标其他数据得分逐一算出; 然后, 将抗车辙能力相对强的混合料与抗车辙能力相对弱的混合料分别作为高分组和低分组; 最后, 根据式(7)两两计算2种性能差异已知的混合料之间的区分度, 计算结果刻画了每2种混合料高温性能在特定指标上反映的差别程度, 进而结合已知知识, 就可以评价不同指标的区分能力.

$$y - y_0 = \frac{(y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)} \times (x - x_0) \quad (6)$$

$$DI_j = \frac{\bar{X}_H - \bar{X}_L}{F} \quad (7)$$

式中: $\bar{X}_H$ 为高分组在特定指标、特定混合料类型中的平均得分; $\bar{X}_L$ 为低分组在同一指标、同一混合料类型中的平均得分; F 为满分值与最低分之差.

为了避免粒径大小对分析结果产生影响, 选取相同粒径的混合料进行计算分析. 当粒径相同时, 不同混合料之间的高温性能差异更具普遍性和可靠性, 且筛选出的混合料类型还须能够进行对比分析. 将筛选出的混合料进行分组, 最终用于计算的混合料类型包括:

第1组: AC13、SBSAC13和SMA13; 第2组: AC16、SBSAC16; 第3组: AC20、SBSAC20和GMLAC20.

根据工程经验, 将上述各组混合料的高温性能由低到高排序. 计算结果如表3~5所示.

由表3~5可知, 对于第1组, 4种指标区分度按组内平均值排序从高到低依次为: 永久变形量 $PD >$ 贯入位移 $D >$ 动稳定度 $DS >$ 贯入强度 R_t . 其中永久变形量和贯入位移指标的区分度指数较高, 分别为0.390和0.270; 其次为动稳定度, 其区分度指数为0.212; 最后为贯入强度, 其区分度指数小于0.1. 但动稳定度指标对AC13和SBSAC13的区分度为负值, 与经验认识矛盾. 第2组最大公称粒径为16 mm, 仅有2种混合料类型. 该组4种评价指标区分度的组内

表 3 第 1 组高低分组法区分度计算结果
Table 3 Differentiation results of first group by high-low grouping method

Index	Type	AC13	SBSAC13	SMA13	Average value	Intra-class average value
R_r	AC13		0.064	0.121	0.092	
	SBSAC13	0.064		0.057	0.061	0.081
	SMA13	0.121	0.057		0.089	
D	AC13		0.082	0.406	0.244	
	SBSAC13	0.082		0.324	0.203	0.270
	SMA13	0.406	0.324		0.365	
DS	AC13		-0.112	0.318	0.103	
	SBSAC13	-0.112		0.430	0.159	0.212
	SMA13	0.318	0.430		0.374	
PD	AC13		0.074	0.585	0.329	
	SBSAC13	0.074		0.511	0.292	0.390
	SMA13	0.585	0.511		0.548	

表 4 第 2 组高低分组法区分度计算结果
Table 4 Differentiation results of second group by high-low grouping method

Index	Type	AC16	SBSAC16
R_r	AC16		0.399
	SBSAC16	0.399	
D	AC16		-0.271
	SBSAC16	-0.271	
DS	AC16		-0.206
	SBSAC16	-0.206	
PD	AC16		-0.043
	SBSAC16	-0.043	

平均值排序从高到低依次为:贯入强度 R_r >永久变形量PD>动稳定度DS>贯入位移 D 。其中贯入强度的区分度指数为0.399,处于较高水平;而永久变形量、动稳定度、贯入位移这3项指标对AC16和SBSAC16的区分度指数均为负值,与经验认识相矛

盾。对于第3组,当最大公称粒径为20 mm时,4种评价指标区分度的组内平均值排序从高到低依次为:永久变形量PD>贯入位移 D >动稳定度DS>贯入强度 R_r 。其中永久变形量区分度指数为0.472,区分能力最强;贯入位移和动稳定度的区分能力也处于较高水平,区分度指数均大于0.1;贯入强度的区分能力最小,对应的区分度指数为0.035;此外,该组动稳定度对SBSAC20和AC20的区分度指数为-0.422,产生矛盾结果。

4项指标PD、 R_r 、 D 、DS的区分度总平均值分别为0.273,0.172,0.044和0.039。按照总平均值得到的区分能力排序由高到低为:永久变形量>贯入强度>贯入位移>动稳定度,与熵值赋权法得到的结果一致。此外,高低分组法得到的结果表明,4项指标均存在区分结果与经验认识相矛盾的情况,其中动稳定度出现矛盾的情况最为严重,其余指标均存在一次矛

表 5 第 3 组高低分组法区分度计算结果
Table 5 Differentiation results of third group by high-low grouping method

Index	Type	AC20	SBSAC20	GMLAC20	Average value	Intra-class average value
R_r	AC20		0.100	0.053	0.076	
	SBSAC20	0.100		-0.047	0.026	0.035
	GMLAC20	0.053	-0.047		0.003	
D	AC20		0.052	0.198	0.125	
	SBSAC20	0.052		0.146	0.099	0.132
	GMLAC20	0.198	0.146		0.172	
DS	AC20		-0.422	0.165	-0.128	
	SBSAC20	-0.422		0.588	0.083	0.110
	GMLAC20	0.165	0.588		0.376	
PD	AC20		0.300	0.708	0.504	
	SBSAC20	0.300		0.408	0.354	0.472
	GMLAC20	0.708	0.408		0.558	

盾情况,且矛盾程度与总体排序结果一致,由此也说明了不同指标最终区分度排序结果的合理性。

永久变形量和贯入强度作为现行沥青路面结构设计规范中车辙预估模型的材料参数,其区分度处于较高水平,说明目前中国规范中采用的沥青混合料高温性能指标相对合理。然而对于沥青混合料设计方法中评价沥青混合料高温性能最为常用的动稳定度指标而言,其区分能力处于最低水平,且出现与经验认识严重矛盾的情况,说明动稳定度指标在沥青混合料类型差异较大时基本丧失了区分能力。此外,虽然动稳定度和永久变形量均由车辙试验得到,但二者的区分度显著不同,也说明动稳定度与永久变形量在反映不同类型沥青混合料高温性能方面并不等价。对于车辙试验,永久变形量相对动稳定度更能真实体现沥青混合料的高温性能,且能实现材料设计与结构设计的统一,应是表征沥青混合料高温性能的首选指标;对于单轴贯入试验,本研究引入的贯入位移区分能力显著低于贯入强度,应开展进一步研究来确定其适用范围。

4 结论

(1)基于9种沥青混合料车辙试验和单轴贯入试验的实测数据,利用统计分析方法,对不同类型沥青混合料的高温性能评估能力进行了可靠计算,定量分析了不同试验指标的区分度。

(2)车辙试验和单轴贯入试验对沥青混合料高温性能的区分能力存在显著差异,其中永久变形量的区分能力最强,其次为贯入强度指标,而最为常用的动稳定度指标区分能力最差。

(3)在沥青路面抗车辙设计中,为正确比选不同类型沥青混合料,考虑不同高温性能指标的区分度是必要的。对于车辙试验,建议采用永久变形量来代替动稳定度作为沥青混合料高温性能评价指标。

(4)下一步研究中应扩大沥青混合料考察范围,如考虑工程上常用的橡胶沥青混合料、热再生沥青混合料和冷再生沥青混合料等。

参考文献:

- [1] 安丰伟,李小燕. 沥青混合料动稳定度指标与车辙深度发展相关性研究[J]. 现代交通技术, 2017, 14(3): 5-7.
AN Fengwei, LI Xiaoyan. Research on relationship between dynamic stability index and rutting depth of asphalt mixture [J]. Modern Transportation Technology, 2017, 14(3): 5-7. (in Chinese)
- [2] 方昊, BARUGAHARE J, 磨炼同. 基于车辙试验的沥青混合料车辙评价指标分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(1): 17-20.
FANG Hao, BARUGAHARE J, MO Liantong. Evaluation index analysis of asphalt mixture rutting based on rutting test press [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2018, 42(1): 17-20. (in Chinese)
- [3] 陈凯. 我国车辙试验与汉堡车辙试验对比研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
CHEN Kai. Study on domestic rutting test and hamburg wheel tracking test [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [4] 张业茂, 陈拴发, 胡光伟, 等. 沥青混合料车辙影响因素研究[J]. 公路, 2012(3): 112-117.
ZHANG Yemao, CHEN Shuanfa, HU Guangwei, et al. Study on the influence factors of rutting of asphalt mixture press [J]. Highway, 2012(3): 112-117. (in Chinese)
- [5] 杜顺成, 戴经梁. 沥青混合料永久变形评价指标[J]. 中国公路学报, 2006, 19(5): 18-22.
DU Shuncheng, DAI Jingliang. Permanent deformation evaluation index of asphalt mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 18-22. (in Chinese)
- [6] LU K, WANG J S, ZHANG Z H, et al. Research on evaluating index of indoor rutting test of asphalt mixture [C]//Science and Engineering Research Center. Science and Engineering Research Center. Proceedings of 2016 International Conference on Mathematical, Computational and Statistical Sciences and Engineering (MCSSE 2016). Lancaster: DESTech Publications, 2016: 79-82.
- [7] 关永胜, 谈至明, 张志祥. 间断级配橡胶沥青混合料抗车辙性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 705-709.
GUAN Yongsheng, TAN Zhiming, ZHANG Zhixiang. Rutting performance of gap graded asphalt rubber mixture [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(5): 705-709. (in Chinese)
- [8] 王国忠, 张岩, 冯晓波, 等. 橡胶颗粒沥青混合料修正的动稳定度研究[J]. 中外公路, 2019, 39(2): 244-248.
WANG Guozhong, ZHANG Yan, FENG Xiaobo, et al. Study on the dynamic stability of modified rubber particle asphalt mixture press [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(2): 244-248.
- [9] 朱伟, 夏松, 姜守亮. 沥青混合料动稳定度指标的确定方法[J]. 中外公路, 2017, 37(5): 268-271.
ZHU Wei, XIA Song, JIANG Shouliang. Determination method of dynamic stability index of asphalt mixture press [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(5): 268-271. (in Chinese)
- [10] 田卫群, 周彬, 丛菱, 等. 改性沥青混合料高温性能及其评价方法[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3): 285-287, 291.
TIAN Weiqun, ZHOU Bin, CONG Ling, et al. High temperature stability of modified asphalt mixture and its evaluation method [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(3): 285-287, 291. (in Chinese)

- [11] 彭勇,孙立军,石永久,等. 沥青混合料抗剪强度的影响因素[J]. 东南大学学报(自然科学版),2007,37(2):330-333.
PENG Yong, SUN Lijun, SHI Yongjiu, et al. Influence factors of shear resistance of asphalt mixture[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2007, 37(2): 330-333. (in Chinese)
- [12] 栗威,黄美燕,魏建国. 沥青道面高温抗车辙性能评价指标[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2013,10(4):9-16, 48.
LI Wei, HUANG Meiyan, WEI Jianguo. Temperature anti-rutting performance evaluation index for asphalt pavement [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2013, 10(4): 9-16, 48. (in Chinese)
- [13] 刘斌清,吕大春,张争奇,等. 高黏改性沥青高温黏弹特性指标区分度分析[J/OL]. 建筑材料学报,1-11[2020-02-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20190515.1345.006.html>.
LIU Binqing, LÜ Dachun, ZHANG Zhengqi, et al. Differentiation analysis of viscoelastic properties of high-viscosity modified asphalt at high temperature[J/OL]. Journal of Building Materials: 1-11 [2020-02-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20190515.1345.006.html>. (in Chinese)
- [14] 张天云,杨瑞成,陈奎. 基于区分度定量分析工程材料评价指标[J]. 材料科学与工艺,2009,17(4):512-515.
ZHANG Tianyun, YANG Ruicheng, CHEN Kui. Quantitative analysis of comprehensive evaluation indices for engineering materials based on distinction degree[J]. Materials Science and Technology, 2009, 17(4): 512-515. (in Chinese)
- [15] 朱梅红,李爱华. 基于熵权的中国西部各省份科技实力综合评价[J]. 数学的实践与认识,2006(12):120-125.
ZHU Meihong, LI Aihua. Entropy-weight-based integrative evaluation on the science and technology capability for western provinces[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2006(12): 120-125. (in Chinese)
- [16] 廖云霞. 区分度在考试试卷分析中的应用[D]. 武汉:华中师范大学,2008.
LIAO Yunxia. The application of s-p chart in teaching evaluation and a related computer program[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2008. (in Chinese)