

文章编号:1672-9331(2020)04-0009-07

# 盐-雾耦合作用对沥青混合料路用性能的影响

王 庆<sup>1</sup>, 李文凯<sup>2</sup>

(1. 郑州市交通基本建设质量检测站, 河南 郑州 450005; 2. 河南交院工程技术有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘 要:** 为研究融雪剂中可溶性盐与大雾的耦合作用对沥青路面路用性能的影响, 选用工程中常用的普通 AC-13C、改性 AC-13C、改性 SMA-13 三种沥青混合料展开研究。采用盐雾试验方法, 分析在盐-雾环境下不同类型的沥青混合料的低温抗开裂能力、抗水损害能力及耐久性的变化规律。研究结果表明: 改性沥青混合料较普通沥青混合料在盐-雾环境下具有更好的低温抗开裂能力、抗水损害能力及耐久性; 改性 SMA-13 沥青混合料低温抗开裂能力、抗水损害能力最优; 当冻融循环次数大于 15 次时, 改性 SMA-13 沥青混合料冻融劈裂强度及冻融劈裂残留强度比降幅最小, 表明其后期耐久性最好。

**关键词:** 融雪剂; 盐-雾环境; 矿料级配; 马歇尔试验; 油石比; 路用性能

**中图分类号:** U416.217

**文献标志码:** A

## Influence of salt-fog coupling on pavement performance of asphalt mixture

WANG Qing<sup>1</sup>, LI Wen-kai<sup>2</sup>

(1. Zhengzhou Traffic Infrastructure Quality Inspection Station, Zhengzhou 450005, China;

2. Henan Jiaoyuan Engineering Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** In order to study the coupling influence of soluble salt in snow-melting agent and fog on the performance of asphalt pavement, three kinds of asphalt mixtures often used in engineering, namely common AC-13C, modified AC-13C and modified SMA-13, were selected to research. The salt pray test was used to analyze the change rules of the low-temperature cracking resistance ability, water damage resistance ability and durability of different types of asphalt mixtures in salt-fog environment. The research results show that modified asphalt mixtures behave better than common asphalt mixtures at the pavement performance mentioned above in salt-fog environment. The modified SMA-13 asphalt mixture has the best low-temperature cracking resistance ability and water damage resistance ability. When the number of freeze-thaw cycle is more than 15, the decrease magnitude of the freeze-thaw splitting strength and the freeze-thaw splitting residual strength ratio of the modified SMA-13 asphalt mixture is the smallest in the three asphalt mixtures, which indicates that its durability is the best in the later stage.

**Key words:** snow-melting agent; salt-fog environment; mineral aggregate gradation; Marshall test; oil-stone ratio; pavement performance

**收稿日期:** 2020-06-12

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41771566); 河南省重点科技攻关计划项目(152102210033)

**通讯作者:** 王 庆(1975-), 男, 河南郑州人, 郑州市交通基本建设质量检测站高级工程师, 主要从事公路桥梁检测方面的研究。E-mail: 1182114622@qq.com

随着我国交通事业的快速发展,沥青路面已成为现阶段高等级公路的主要路面结构类型。在我国北方季节性冰冻区,冬季为防止沥青路面出现积雪结冰的现象,往往会在路面上撒布融雪剂,这些融雪剂的主要成分为可溶性氯盐。同时,在这些区域冬季也会经常出现大雾天气<sup>[1-3]</sup>。在盐、雾的共同作用下,沥青路面的湿度会发生周期性变化,可溶性盐会渗入到沥青混合料的内部空隙,侵蚀路面结构层<sup>[3-7]</sup>。目前,很多道路工作者就融雪剂及含盐类物质对沥青路面性能的影响做了大量研究<sup>[8-11]</sup>。丛培良等<sup>[12]</sup>对沥青混合料在除冰盐溶液及在水中浸泡后的性能进行了对比研究,发现除冰盐溶液浸泡后的沥青混合料拉伸破坏能力增强,断裂性能下降,但在冻融循环作用下沥青混合料的劈裂强度显著降低;肖庆一等<sup>[13]</sup>进行了新型除冰盐对沥青混合料的侵蚀研究,结果表明:在除冰盐溶液中浸泡后,沥青与矿料之间的黏附性降低,沥青混合料劈裂强度下降,在相同条件下改性沥青混合料的劈裂强度优于普通沥青混合料;孙国红<sup>[14]</sup>进行了盐渍土对沥青路面性能的影响研究,结果表明:盐渍土的盐胀效应会导致路面盐胀、沉陷、出现溶洞等,同时沥青类型及盐溶液浓度对沥青与矿料之间的黏附性影响显著;张光海<sup>[15]</sup>采用 NaCl 溶液浸泡方法模拟了北方滨海地区沥青路面氯离子侵蚀-冻融的耦合工况。本研究对工程中常用的普通 AC-13C、改性 AC-13C、改性 SMA-13 三种沥青混合料展开研究。采用盐雾试验方法,在不同温度(5,15,25,35 ℃)及不同盐雾养护时间(5,10,15,20,25 d)的情况下,对三种沥青混合料进行低温弯曲、抗水损害及耐久性试验,分析盐-雾环境对沥青混合料路用性能的影响,为选择适宜的公路养护措施提供一定的理论依据。

## 1 原材料及配合比设计

### 1.1 沥青

沥青种类对沥青路面的路用性能起着决定性的作用。本研究选用 SBS(I-D 类)改性沥青、70<sup>#</sup> 道路石油沥青,并参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)的相关规定对这两种沥青的主要技术指标进行检测,试验结果见表 1 和表 2。

表 1 SBS(I-D 类)改性沥青主要技术指标试验结果

Table 1 Test results of main technical indexes of SBS (I-D type) modified asphalt				
检测项目	技术要求	实测值	试验结果	
针入度(25 ℃)/(0.1 mm)	40~60	52	合格	
软化点/℃	≥60	73	合格	
延度(5 cm/min,5 ℃)/cm	≥20	38	合格	
闪点/℃	≥230	282	合格	
弹性恢复(25 ℃)/%	≥75	81	合格	
135 ℃动力黏度/(Pa·s)	≤3.0	2.2	合格	
质量变化/%	±1.00	-0.23	合格	
RTFOT 后残留物	针入度比(25 ℃)/%	≥65	74	合格
	残留延度(5 ℃)/cm	≥15	26	合格

表 2 70<sup>#</sup> 道路石油沥青主要技术指标试验结果

Table 2 Test results of main technical indexes of 70 <sup>#</sup> pavement petroleum asphalt				
检测项目	技术要求	实测值	试验结果	
针入度(25 ℃)/(0.1 mm)	60~80	72	合格	
软化点/℃	≥46	53	合格	
延度(15 cm/min,5 ℃)/cm	≥100	127	合格	
闪点/℃	≥260	269	合格	
蜡含量(蒸馏法)/%	≤2.2	1.3	合格	
60 ℃动力黏度/(Pa·s)	≥180	197	合格	
质量变化/%	±0.80	-0.23	合格	
RTFOT 后残留物	针入度比(25 ℃)/%	≥61	66	合格
	残留延度(5 ℃)/cm	≥15	32	合格

### 1.2 木质素纤维

为防止沥青混合料中的沥青发生析漏及改善沥青路面的路用性能,一般在 SMA-13 沥青混合料中掺入纤维材料。常见的纤维材料主要有木质素纤维、玄武岩纤维、聚酯纤维等,本研究选用木质素纤维,其主要技术指标的试验结果见表 3。

表 3 木质素纤维主要技术指标试验结果

Table 3 Test results of main technical indexes of lignocellulosic fiber					
项目	纤维长度/mm	含水率/%	灰分含量/%	吸油率/倍	pH 值
技术要求	≤6.0	≤5.0	13.0~23.0	≥5.0	6.5~8.5
实测值	4.7	2.3	18.7	7.4	7.1
试验结果	合格	合格	合格	合格	合格

1.3 配合比设计及马歇尔试验结果

本研究沥青混合料选用的类型为 AC-13C 和 SMA-13,粗集料为 3~5,5~10,10~15 mm 玄武岩碎石,细集料为 0~3 mm 石灰岩机制砂,填料

为石灰岩磨细的矿粉,其中 SMA-13 沥青混合料木质素纤维掺量为 0.4%。AC-13C 和 SMA-13 的矿料级配设计结果见表 4,不同级配类型沥青混合料的最佳油石比及马歇尔试验结果见表 5。

表 4 矿料级配设计结果  
Table 4 Design results of mineral aggregate gradation %

沥青混合料类型	级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率								
		13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-13C	上限	100.0	85.0	68.0	50.0	38.0	28.0	20.0	15.0	8.0
	下限	90.0	68.0	38.0	24.0	15.0	10.0	7.0	5.0	4.0
	目标级配	94.1	74.6	56.8	36.9	28.5	19.8	13.6	10.7	6.2
SMA-13	上限	100.0	75.0	34.0	26.0	24.0	20.0	16.0	15.0	12.0
	下限	90.0	50.0	20.0	15.0	14.0	12.0	10.0	9.0	8.0
	目标级配	95.6	64.3	25.8	19.6	18.7	14.3	12.4	11.9	9.2

表 5 最佳油石比及马歇尔试验结果  
Table 5 Test results of the best oil-stone ratio and Marshall

沥青混合料类型	最佳油石比/%	毛体积相对密度	空隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	马歇尔稳定度/kN	流值/mm
普通 AC-13C	4.6	2.458	4.8	15.1	68.7	10.48	3.1
改性 AC-13C	4.9	2.449	4.6	14.9	69.5	12.54	3.3
改性 SMA-13	6.2	2.463	3.6	17.5	79.3	9.96	4.1

2 路用性能研究

本研究在室内利用恒温恒湿试验箱模拟盐—雾环境,用 pH 值 7.0、浓度 5%的 NaCl 溶液进行盐雾喷洒。在喷洒过程中,保持速率稳定、适中,设定盐雾湿度为 95%。在进行沥青混合料低温抗开裂、抗水损害能力试验时,为分析在盐—雾环境下温度及养护时间对沥青混合料性能的影响,设定盐—雾环境为:① 盐雾养护时间为 15 d,温度分别为 5,15,25,35 ℃;② 盐雾养护温度为 5 ℃,养护时间分别为 5,10,15,20,25 d。

2.1 低温抗裂性

低温开裂是沥青路面在低温时表现出的力学性能。沥青路面结构层在低温时会发生收缩,当结构层内部的极限抗拉能力低于温缩应力时,沥青路面就会开裂,这些轻微裂缝如不及时处理就会恶化成块裂、龟裂以及坑槽等严重病害<sup>[16-20]</sup>。

本研究采用低温小梁弯曲试验来评定三种沥青混合料的低温抗裂性,三种沥青混合料未经盐雾处理的低温弯曲试验结果见表 6。

表 6 未经盐雾处理的低温弯曲试验结果  
Table 6 Results of low temperature bending test without salts pray treatment

沥青混合料类型	抗弯拉强度/MPa	弯曲破坏应变/ $\mu\epsilon$
普通 AC-13C	14.4	3 574
改性 AC-13C	16.3	3 724
改性 SMA-13	17.5	3 893

盐雾养护时间为 15 d,养护温度分别为 5,15,25,35 ℃的试件低温弯曲试验结果见图 1 和图 2;盐雾养护温度为 5 ℃,养护时间分别为 5,10,15,20,25 d 的试件低温弯曲试验结果,分别见图 3 和图 4。

由图 1~4 可以看出:当盐雾养护时间为 15 d 时,随着盐雾养护温度的升高,三种沥青混合料抗

弯拉强度及弯曲破坏应变均逐渐减小,其中普通 AC-13C 沥青混合料减小幅度最大,SMA-13 沥青混合料减小幅度最小;当盐雾养护温度为 5℃时,随着盐雾养护时间增长,三种沥青混合料抗弯拉强度及弯曲破坏应变均逐渐减小,表明在盐一雾环境下三种沥青混合料的低温抗裂性均有所降低,且随着时间的增长、温度的升高,降低趋势也更加明显。盐一雾环境对 SMA-13 沥青混合料低温抗裂性的影响最小,这主要是在低温环境下改性沥青的韧性比道路石油沥青的更好,且在 SMA-13 沥青混合料中掺入的木质素纤维也起到了吸附沥青、增韧的作用。

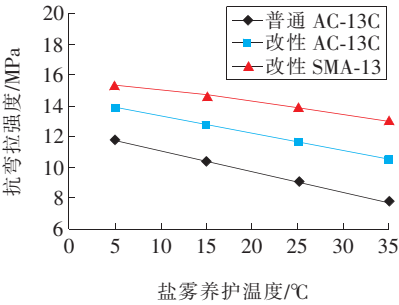


图 1 抗弯拉强度随温度的变化

Fig. 1 Bending tensile strength changing with temperature

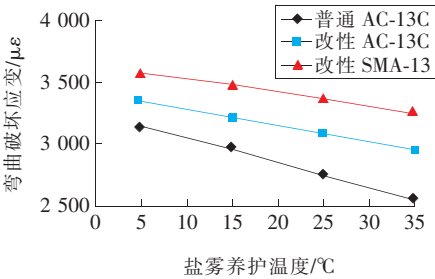


图 2 弯曲破坏应变随温度的变化

Fig. 2 Bending failure strain changing with temperature

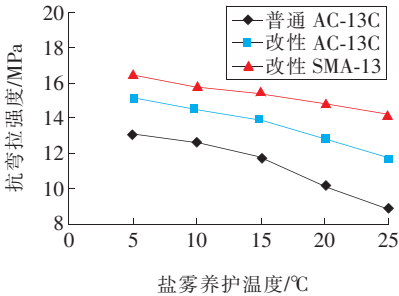


图 3 抗弯拉强度随时间的变化

Fig. 3 Bending tensile strength changing with time

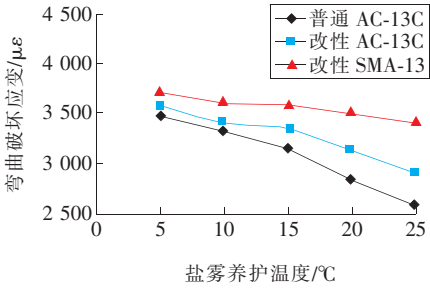


图 4 弯曲破坏应变随时间的变化

Fig. 4 Bending failure strain changing with time

2.2 水稳定性

松散、坑槽等病害是沥青路面水稳定性差的主要表现形式。车辆轴载及雨水会对沥青与矿料之间的黏附性造成损害。在雨季雨水与车辆轴载的长期的共同作用,尤其是在冬季雨雪天气里长期的冻融循环作用均会降低沥青路面沥青与矿料之间的黏附性,最终导致表层沥青从矿料表面脱落<sup>[21-23]</sup>。本研究选用浸水马歇尔残留稳定度、冻融劈裂残留强度比试验来研究三种沥青混合料的抗水损害能力。三种沥青混合料未经盐雾处理的浸水马歇尔残留稳定度、冻融劈裂残留强度比试验结果见表 7。

表 7 未经盐雾处理的水稳定性试验结果		
Table 7 Test results of water stability without salt spray treatment		
沥青混合料类型	浸水马歇尔残留	冻融劈裂残留
	稳定度	强度比
普通 AC-13C	87	85
改性 AC-13C	93	89
改性 SMA-13	94	91

盐雾养护时间为 15 d,养护温度分别为 5,15,25,35℃的试件浸水马歇尔残留稳定度、冻融劈裂残留强度比试验结果见图 5 和图 6;盐雾养护温度为 5℃,养护时间分别为 5,10,15,20,25 d 的试件浸水马歇尔残留稳定度、冻融劈裂残留强度比的试验结果见图 7 和图 8。

由图 5~8 可以看出:当盐雾养护时间为 15 d 时,随着养护温度的升高,三种沥青混合料浸水马歇尔残留稳定度、冻融劈裂残留强度比均逐渐减小,其中普通 AC-13C 沥青混合料减小幅度最大,SMA-13 沥青混合料减小幅度最小;当盐雾养护温度为 5℃时,随着养护时间的增长,三种沥青混合

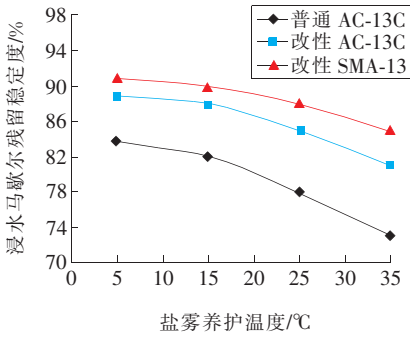


图 5 浸水马歇尔残留稳定度随温度的变化

Fig. 5 Immersion Marshall residual stability changing with temperature

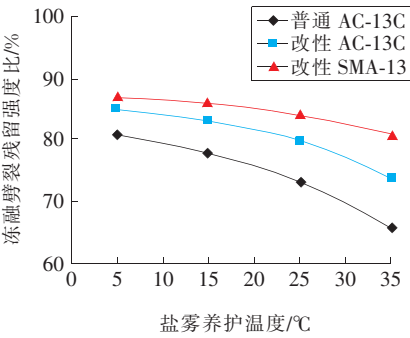


图 6 冻融劈裂残留强度比随温度的变化

Fig. 6 Freeze-thaw splitting residual strength ratio changing with temperature

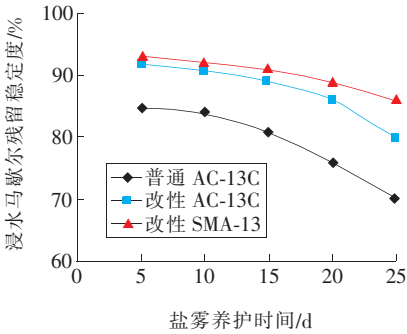


图 7 浸水马歇尔残留稳定度随时间的变化

Fig. 7 Immersion Marshall residual stability changing with time

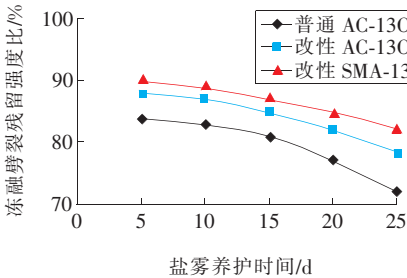


图 8 冻融劈裂残留强度比随时间的变化

Fig. 8 Freeze-thaw splitting residual strength ratio changing with time

料浸水马歇尔残留稳定度、冻融劈裂残留强度比变化趋势相同,表明三种沥青混合料在盐-雾环境下抗水损害能力均有所降低,且随着时间的增长、温度的升高,降低趋势也更加明显。盐-雾环境对 SMA-13 沥青混合料抗水损害能力的影响最小,对普通 AC-13C 沥青混合料的影响最大,这主要是因为改性沥青相比道路石油沥青在低温环境下韧性更好,在高温环境下黏性更好,使改性沥青混合料表现出更好的抗水损害能力。且在 SMA-13 沥青混合料中掺入的木质素纤维,乱相地分布在沥青混合料内部,在沥青混合料受到水损害时能够起到吸附沥青、增韧的作用。

### 2.3 耐久性

三种沥青混合料在盐雾养护温度 25 °C 的情况下保温 12 h,然后放入 -18 °C 的低温试验箱中放置 12 h,以此为一个冻融循环。在冻融循环次数分别为 0,5,10,15,20,25 次的情况下,参照试验规程进行冻融劈裂试验来评价三种沥青混合料受盐雾侵蚀后的耐久性。三种沥青混合料冻融劈裂强度及冻融劈裂残留强度比的试验结果见图 9 和图 10。

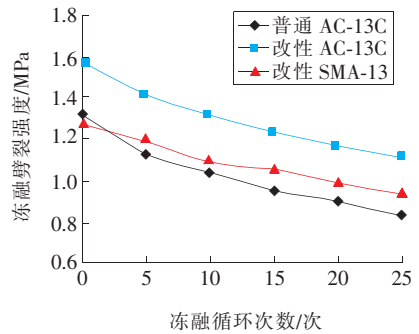


图 9 冻融劈裂强度随冻融次数的变化

Fig. 9 Freeze-thaw splitting strength changing with freeze-thaw frequency

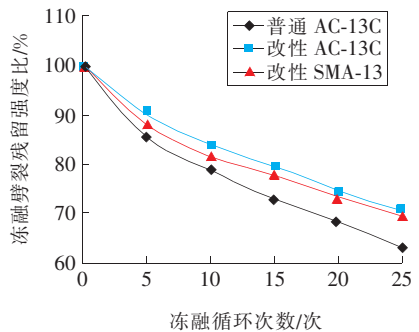


图 10 冻融劈裂残留强度比随冻融次数的变化

Fig. 10 Freeze-thaw splitting residual strength ratio changing with freeze-thaw frequency



由图9和图10可以看出:随着冻融循环次数的增加,三种沥青混合料冻融劈裂强度及冻融劈裂残留强度比均呈现减小趋势。当冻融循环次数相同时,改性AC-13C沥青混合料的冻融劈裂强度及冻融劈裂残留强度比均最大。表明在冻融循环次数小于25次时,改性AC-13C沥青混合料耐久性较好。当冻融循环次数大于15次时,改性SMA-13沥青混合料的冻融劈裂强度及冻融劈裂残留强度比降幅均最小。这主要是因为改性沥青混合料最佳油石比较大,导致沥青混合料空隙率降低,在冻融循环过程中进入沥青混合料空隙内的NaCl晶体减少,这在一定程度上增强了沥青混合料的抗劈裂破坏能力。

### 3 结论

本研究通过对普通AC-13C、改性AC-13C、改性SMA-13沥青混合料进行配合比设计及低温抗开裂、抗水损害及耐久性的研究,得出以下结论:

1) 随着盐雾养护时间的增长及养护温度的升高,三种沥青混合料的低温抗开裂、抗水损害能力均逐渐降低。其中普通AC-13C沥青混合料降低幅度最大,SMA-13沥青混合料降低幅度最小,表明SMA-13沥青混合料在盐雾作用时低温抗开裂、抗水损害能力最优。

2) 随着冻融循环次数的增加,三种沥青混合料的耐久性均逐渐降低。当冻融循环次数小于25次时,改性AC-13C沥青混合料耐久性较好;当冻融循环次数大于15次时,改性SMA-13沥青混合料冻融劈裂强度及冻融劈裂残留强度比降幅均最小。

本研究试验是在pH值为7.0的中性盐—雾环境下开展的,但现实沥青路面所处环境较为复杂,如何更好地模拟酸性、碱性、汽车轴载长期作用等复杂条件,还需进一步的研究。

#### 〔参考文献〕

[1] 张苛,张争奇.含盐高湿环境对沥青混合料性能及内部形态的影响[J].武汉理工大学学报,2014,36(9):49-53.  
ZHANG Ke, ZHANG Zheng-qi. The influence of high humidity environment with salt on the performance and internal morphology of asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014,

36(9):49-53.

- [2] 郑慧慧.掺加纤维与青川岩沥青的热再生混合料配合比设计与路用性能[J].新型建筑材料,2018,45(7):121-125.  
ZHENG Hui-hui. Mix proportion design and road performance of hot recycled mixture with fiber and Qingchuan rock asphalt[J]. New Building Materials, 2018,45(7):121-125.
- [3] 李海莲,林梦凯,王起才.基于IFA-SVM的高速公路沥青路面使用性能预测[J].公路交通科技,2019,36(12):8-14.  
LI Hai-lian, LIN Meng-kai, WANG Qi-cai. Performance prediction of expressway asphalt pavement based on IFA-SVM[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(12):8-14.
- [4] 张光海.北方滨海地区沥青路面损伤机理及使用寿命研究[D].大连:大连理工大学,2013.  
ZHANG Guang-hai. Study on damage mechanism and service life of asphalt pavement in north coastal area[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [5] 马长李,马瑞萍,白云辉.我国沿海地区大气环境特征及典型沿海地区大气腐蚀性研究[J].装备环境工程,2017,14(8):65-69.  
MA Chang-li, MA Rui-ping, BAI Yun-hui. Characteristics of atmospheric environment in coastal areas of China and atmospheric corrosivity in typical coastal areas[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017,14(8):65-69.
- [6] 刘军,邢锋,丁铸.沿海大气氯离子在混凝土结构的累计沉积量研究[J].建筑科学,2009,25(3):32-34.  
LIU Jun, XING Feng, DING Zhu. Study on accumulative deposition of chloride ions in concrete structure in coastal atmosphere[J]. Architectural Science, 2009,25(3):32-34.
- [7] 周育名,李金明,李平,等.考虑公路等级的沥青路面性能衰变预测方法[J].中外公路,2019,39(1):34-39.  
ZHOU Yu-ming, LI Jin-ming, LI Ping, et al. Prediction method of asphalt pavement performance decay considering highway grade[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019,39(1):34-39.
- [8] Airey G D, Collop A C, Zoorob S E, et al. The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage[J]. Construction and Building Materials, 2008,22(9):2 015-2 024.
- [9] 余四新,徐飞萍,刘甲荣,等.基于新版沥青路面设计

- 规范的路面结构设计分析[J]. 中外公路, 2019, 39(2):37-41.
- YU Si-xin, XU Fei-ping, LIU Jia-rong, et al. Analysis of pavement structure design based on new asphalt pavement design code[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(2):37-41.
- [10] 钟彪. 沥青混凝土路面预防性养护措施决策与应用[J]. 中外公路, 2018, 38(6):58-61.
- ZHONG Biao. Decision and application of preventive maintenance measures for asphalt concrete pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(6):58-61.
- [11] 蔡旭, 祝凤丹, 吴旷怀. 沥青混合料骨架稳态参数及模型[J]. 中国公路学报, 2019, 32(2):39-46, 96.
- CAI Xu, ZHU Feng-dan, WU Kuang-huai. Steady state parameters and model of asphalt mixture skeleton[J]. Journal of China Highway, 2019, 32(2):39-46, 96.
- [12] 丛培良, 陈拴发, 陈华鑫. 除冰盐对沥青混凝土性能的影响[J]. 公路, 2011(6):180-184.
- CONG Pei-liang, CHEN Shuan-fa, CHEN Hua-xin. Effect of deicing salt on performance of asphalt concrete[J]. Highway, 2011(6):180-184.
- [13] 肖庆一, 白锡庆, 胡海学, 等. 新型除冰盐对沥青及沥青混合料的侵蚀试验研究[J]. 中国港湾建设, 2012(4):54-56.
- XIAO Qing-yi, BAI Xi-qing, HU Hai-xue, et al. Experimental study on erosion of asphalt and asphalt mixture by new deicing salt[J]. China Harbour Engineering, 2012(4):54-56.
- [14] 孙国红. 盐渍土地区沥青混凝土路面病害试验及研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2013.
- SUN Guo-hong. Test and research on the diseases of asphalt concrete pavement in salt broken soil area [D]. Jilin: Jilin University, 2013.
- [15] 张光海. 北方滨海地区沥青路面损伤机理及使用寿命研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- ZHANG Guang-hai. Study on damage mechanism and service life of asphalt pavement in north coastal area [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [16] 周金枝, 郑建华. 氯盐侵蚀下沥青混凝土的低温性能试验研究[J]. 中外公路, 2011, 31(5):215-217.
- ZHOU Jin-zhi, ZHENG Jian-hua. Experimental study on low temperature performance of asphalt concrete under chloride attack[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31(5):215-217.
- [17] 吴泽媚, 高培伟, 陈东丰. 氯盐融雪剂对沥青混合料低温抗裂性的影响[J]. 公路工程, 2012, 37(4):26-29.
- WU Ze-mei, GAO Pei-wei, CHEN Dong-feng. The effect of chloride deicing agent on the low temperature crack resistance of asphalt mixture[J]. Highway Engineering, 2012, 37(4):26-29.
- [18] 王安. 玄武岩纤维 SMA-13 的路用性能研究与应用[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
- WANG An. Study and application of road performance of basalt fiber SMA-13[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2013.
- [19] 张楠, 郑南翔, 高志敏. 中空聚酯纤维沥青混合料的热阻及路用性能研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(10):19-25.
- ZHANG Nan, ZHENG Nan-xiang, GAO Zhi-min. Study on thermal resistance and road performance of hollow polyester fiber asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(10):19-25.
- [20] 郑立宝, 郭利扬, 薛晓飞. 基于不同沥青胶结料的抗滑防水超薄罩面性能评价[J]. 中外公路, 2018, 38(3):48-50.
- ZHENG Li-bao, GUO Li-yang, XUE Xiao-fei. Performance evaluation of anti sliding and waterproof super thin cover based on different asphalt cement [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(3):48-50.
- [21] 杨瑞华, 许志鸿, 李宇峙. 沥青混合料水稳定性评价方法研究[J]. 同济大学学报, 2007, 35(11):1 486-1 491.
- YANG Rui-hua, XU Zhi-hong, LI Yu-zhi. Study on evaluation method of water stability of asphalt mixture [J]. Journal of Tongji University, 2007, 35(11):1 486-1 491.
- [22] 齐小飞, 邹晓翎, 阮鹿鸣, 等. 高 RAP 掺量下热再生混合料水稳定性影响因素研究[J]. 中外公路, 2018, 38(2):248-252.
- QI Xiao-fei, ZOU Xiao-ling, RUAN Lu-ming, et al. Study on influencing factors of moisture stability of hot recycled mixtures with high RAP content [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(2):248-252.
- [23] 徐明非, 郭平, 李俊. 蒙脱土/SBS 复合改性沥青混合料路用性能研究[J]. 公路交通科技, 2019, 36(1):4-7.
- XU Ming-fei, GUO Ping, LI Jun. Study on road performance of montmorillonite/SBS composite modified asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(1):4-7.