

文章编号:1671-8879(2017)03-0033-06

盐分侵蚀对沥青和混合料性能影响及作用机理

黄新颜^{1,2}, 沙爱民¹, 蒋 玮¹, 王亚宁³

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 广西交通投资集团有限公司, 广西 南宁 530022; 3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘 要:针对沿海地区降雨、海雾、大气中海盐粒子侵蚀路面材料的问题,开展海水中盐分对沥青及混合料性能的影响及作用机理研究。基于沥青主要技术指标和组分试验,分析了海水及其中各类盐分对沥青主要技术指标和组分的影响;设计了室内盐蚀循环加速模拟试验,评价了盐分和高温耦合作用下沥青混合料的高温稳定性、低温性能、水稳定性以及抗疲劳性能,并结合接触角试验和室内试验结果探讨了盐分和高温耦合作用下沥青混合料性能衰变机理。研究表明:经过不同盐分侵蚀后,沥青组分中芳香分和饱和分的含量减小,沥青质含量相对增大,在沥青技术指标上反映为软化点增大,针入度减小;各种侵蚀环境中,海水对沥青针入度和软化点的影响最大,其余依次为 NaCl 溶液、MgCl₂ 溶液、KCl 溶液、NaSO₄ 溶液、空气和纯水;海水较纯水更容易浸润集料,也更易侵入沥青和集料的界面,从而降低沥青/集料界面黏结强度;同时,可溶性盐结晶过程中会发生体积膨胀,产生结晶压;这些因素的综合作用使得沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性和疲劳特性均发生了不同程度的衰减。

关键词:道路工程;盐蚀;沥青混合料;性能;加速试验

中图分类号:U414.1 **文献标志码:**A

Effect and mechanism of salt erosion on performance of bitumen and asphalt mixtures

HUANG Xin-yan^{1,2}, SHA Ai-min¹, JIANG Wei¹, WANG Ya-ning³

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Guangxi Communications Investment Group Co., Ltd., Nanning 530022, Guangxi, China; 3. China Railway First Survey & Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China)

Abstract: It is possible that the sea salt particles existed in the rainfall, the sea fog and the atmosphere in coastal areas can erode the pavement materials. Therefore, this paper studied how the chemical salt in the seawater affected the performances of asphalt and mixtures as well as the mechanism. Based on the main technical indicators and component measurements of asphalt, the effects of seawater and its various types of salt on the main technical indicators and components of asphalt were analyzed. The high temperature stability, low temperature performance, moisture

收稿日期:2017-01-12

基金项目:交通运输部建设科技项目(2013 318 221 150);陕西省青年科技新星资助项目(2015KJXX-23);
陕西省建设科技计划项目(2015-K99);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821161016)

作者简介:黄新颜(1975-),男,广西梧州人,广西交通投资集团有限公司高级工程师,长安大学工学博士研究生,
E-mail:215574518@qq.com。

sensitivity and fatigue performance under salinity and high temperature coupling were investigated via the salt erosion and cycling acceleration simulation test. Additionally, the decay mechanism of asphalt mixtures under salinity and high temperature were also been discussed on the basis of the results of contact angle test and laboratory test. The results show that the content of aroma and saturated fraction in asphalt component is decreased and the asphaltic content is relatively increased after the erosion of different types of chemical salt, while the softening point is increased and the penetration is reduced on the generate indicators of asphalt. In all kinds of eroded environment, seawater has the greatest influence on the penetration and softening point of asphalt binders, followed by NaCl solution, MgCl₂ solution, KCl solution, NaSO₄ solution, air and pure water. Seawater is not only easier to infiltrate the aggregate than pure water, but also easier to penetrate the interface of asphalt and aggregate, thus reducing asphalt/aggregate interfacial bond strength. Meanwhile, the volume of expansion will happen in the crystallization process of the soluble salt, resulting in crystallization pressure. The high temperature stability, low temperature crack resistance, moisture sensitivity, and fatigue performance of asphalt mixtures will be degraded in different degrees because of these integrated factors. 7 tabs, 5 figs, 21 refs.

Key words: road engineering; salt erosion; asphalt mixture; performance; acceleration test

0 引言

沿海地区降雨、海雾、大气中都含有海盐粒子^[1-2],使得沥青路面易受盐分侵蚀,耐久性能降低^[3-4]。为此,开展海水中盐分对沥青和混合料性能的影响及其作用机理的试验研究。

国内外在盐分对水泥混凝土性能的影响和机理等领域开展了长期研究^[5-8]。Bassuoni 等设计了室内加速试验,研究了硫酸钠对水泥基材料外观、质量损失、渗透性能和微观结构的影响^[9];Niu 等通过对钢筋水泥混凝土分别在 3.5%(体积分数,下同)NaCl 溶液中和水溶液中进行冻融循环试验,发现材料在盐溶液中的质量损失和间接拉伸强度损失均显著高于水溶液中的损失^[10];Liu 等采用 X 射线衍射(XRD),扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪(EDS)对浸泡在 5%硫酸盐和 5%硫酸镁溶液中 8 个月的水泥混凝土材料的水泥/集料界面过渡区进行了研究,认为氯离子和硫酸盐对水泥混凝土的性能影响显著^[11]。

近年来,也开展了盐分对沥青混合料性能影响的相关研究。熊锐等采用干湿循环作用下 Na₂SO₄ 溶液加速劣化试验,评价了纤维沥青混合料经硫酸盐侵蚀后的疲劳特性和低温抗裂特性,认为在盐蚀环境中沥青混合料的低温抗裂性和疲劳特性劣化程度更加严重^[12-13];马芹永等采用冻融劈裂试验评价了沥青混合料在氯盐侵蚀下强度的变化规律,发现经过氯盐侵蚀冻融循环后,混合料的疲劳抗拉强度明显下降^[14-15];丛培良等研究了氯化钠、氯化镁、氯化钙和醋

酸钾 4 种常用的除冰盐配制成饱和溶液,在常温浸泡、冻融劈裂和高温浸泡下对沥青混合料性能的影响^[16];韩吉伟等采用氯化钙型除冰盐配制溶液,对经历不同盐冻循环的沥青砂浆试件进行单轴压缩蠕变试验并结合 SEM 分析,认为盐冻循环对沥青砂浆试件中骨料与沥青的结合面有巨大的破坏作用^[17];Liu 等基于室内试验研究了掺加融冰盐的沥青混合料性能,认为盐分会导致沥青混合料耐久性的降低^[18]。

综上,采用室内试验和微细观分析等手段对水泥混凝土的盐蚀机理与性能衰变所进行的研究较多^[19-20],但涉及盐分对沥青和沥青混合料性能的影响及其作用机理的研究较少,特别是海水中不同盐类对沥青性能的影响以及盐分和高温耦合作用下混合料性能衰变规律的研究相对缺乏。为此,本文基于室内试验,开展 NaCl、MgCl₂、Na₂SO₄、KCl 及海水等不同盐溶液对沥青主要技术指标和组分的影响。在此基础上,设计室内盐蚀循环加速模拟试验,评价盐分和高温耦合作用下沥青混合料的高温性能、低温性能、水稳定性以及疲劳特性,并从沥青组分和沥青/集料界面特性的角度对试验结果进行分析,以期对盐分和高温耦合作用下沥青混合料性能的研究以及高温沿海地区沥青混合料的设计提供参考。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

试验采用玄武岩粗集料、石灰岩细集料和矿粉,其主要技术指标如下页表 1 所示。考虑到沿海地区

的高温环境条件,选取偏粗的级配类型进行混合料试验,级配如表 2 所示。试验用 SBS 改性沥青主要技术指标如表 3 所示。

表 1 集料的主要技术指标

Tab. 1 Main technical parameters of aggregates

材料	性能指标	测试方法	试验值	规范要求	
集料组成/mm	[16, 9.5)	毛体积相对密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	T 0304—2005	2.764	≥ 2.6
		洛杉矶磨耗 损失/%	T 0317—2005	15.2	≤ 28
		针片状含量/%	T 0312—2005	6.3	≤ 15
	[9.5, 4.75)	毛体积相对密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	T 0304—2005	2.732	≥ 2.6
		洛杉矶磨耗 损失/%	T 0317—2005	15.2	≤ 28
		针片状含量/%	T 0312—2005	7.2	≤ 15
	[4.75, 0.075)	表观相对密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	T 0330—2005	2.701	≥ 2.6
		砂当量	T 0334—2005	66.000	≥ 60
	矿粉	相对密度	T 0352—2005	2.708	≥ 2.5

注:各测试方法见《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005);
《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004),简称规范,
下同。

表 2 试验采用的混合料级配

Tab. 2 Gradation for test of mixture

孔径/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100.0	96.9	68.8	39.5	26.1	21.0	15.2	11.0	9.0	7.8

表 3 SBS 改性沥青的主要技术指标

Tab. 3 Main technical parameters of SBS modified asphalt

指标	针入度(25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	软化 点/℃	延度(5℃, 5 cm·min ⁻¹)/cm
	SBS 改性沥青	52	78
规范要求	40~60	≥ 60	≥ 20

为了模拟盐分对沥青和混合料的影响,按照海水的主要组成配制了不同浓度的盐溶液,考虑到盐分影响的长期性,所配制的溶液浓度均为常规海水中各盐类浓度的 5 倍,包括 NaCl、MgCl₂、Na₂SO₄、KCl,盐溶液配比如表 4 所示。海水按表 4 中掺量同时加入上述 4 种试剂,配制的水溶液也是常规海水浓度的 5 倍。

表 4 盐溶液试样

Tab. 4 Salt solution samples g/L

盐溶液	NaCl	MgCl ₂	Na ₂ SO ₄	KCl	海水
体积浓度	122.65	26.0	20.45	3.475	172.575

1.2 试验装置与方案

为了研究不同盐分对沥青的影响,借助沥青旋转薄膜加热试验装置(图 1)使沥青在老化瓶中形成



(a) 旋转薄膜烘箱

(b) 均匀涂覆沥青薄膜的老化瓶

图 1 旋转薄膜烘箱和老化瓶

Fig. 1 Rolling thin film oven and sample bottles

均匀薄层,旋转薄膜烘箱的转动速度为 15 r/min,在 163℃±0.5℃下旋转 10 min。将瓶壁沾满沥青的老化瓶后从烘箱取出,在干燥器中冷却至常温,然后分别灌入不同盐溶液、纯水或直接封存,25℃室温下放置 30 d 后加热融出沥青,测定针入度、软化点、延度和组分。

采用溶剂沉淀及色谱柱法测定沥青组分。试验装置如图 2 所示。

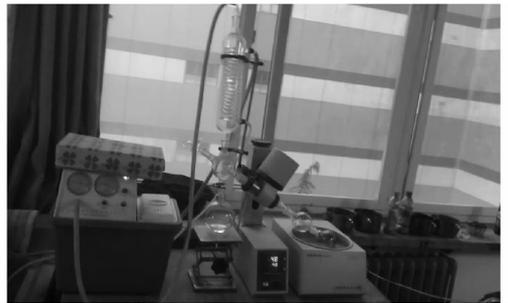


图 2 沥青组分试验

Fig. 2 Bitumen chemical constituents test

为了评价海盐和高温耦合作用对沥青混合料性能的影响,设计了室内盐蚀循环加速模拟试验。具体为:首先将混合料试件置于 3.7±0.3 kPa 的负压下保持 20 min;然后将试件放入浓缩 5 倍的海水(或纯水)中浸泡 12 h;最后将试件放入 60℃的烘箱中 12 h。按照上述过程进行不同循环次数下的加速侵蚀试验。

2 盐分对沥青的影响

2.1 沥青技术指标

下页表 5 为经不同盐溶液、纯水浸泡以及置于空气中沥青的针入度和软化点试验结果。可以看出,经过盐溶液浸泡后的沥青针入度显著降低,其中海水对沥青针入度的影响最大,其他溶液的影响程度从大到小依次为 NaCl、MgCl₂、KCl、Na₂SO₄、空气和纯水。

经过盐溶液浸泡后的沥青软化点有明显增大,其中经海水浸泡的沥青软化点升高最大;海水中

表5 不同侵蚀环境下沥青针入度和软化点试验结果

指标	海水	NaCl	MgCl ₂	KCl	Na ₂ SO ₄	空气	纯水	原样
针入度(25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	59.8	59.6	57.2	55.6	56.7	54.9	54.1	48.5
软化点/℃	27.8	28.1	28.9	33.7	34.0	35.7	43.3	71.0

NaCl对沥青高温性能影响最大,沥青薄膜在空气中的软化点大于纯水中,主要原因在于沥青以薄膜的形式存在时其表面积较大,在30℃的空气环境中沥青轻质成分的挥发较大,而置于纯水中对沥青有一定的保护和隔离作用。8种环境下30 d后沥青的25℃延度值均大于150 cm。

2.2 沥青组分

表6为经不同盐溶液、纯水浸泡以及置于空气中沥青组分的测试结果。

表6 不同侵蚀环境下的沥青组分测试结果

Tab.6 Bitumen constituent results under different solution environments %

沥青组分	不同侵蚀环境下沥青各组分所占比例							
	NaCl	MgCl ₂	海水	KCl	空气	Na ₂ SO ₄	纯水	原样
饱和分	11.04	9.87	11.37	11.77	9.12	8.68	8.36	14.07
芳香分	32.52	27.12	35.15	28.31	35.51	10.48	33.81	46.90
沥青质	42.61	54.39	39.60	51.13	37.12	54.67	39.87	12.31
胶质	13.83	8.62	13.88	8.79	18.25	26.17	17.96	26.72

从表6可以看出,不同盐侵蚀环境对沥青组分中沥青质、芳香分和饱和分的影响趋势相近,沥青薄膜经过不同盐溶液浸泡后,沥青质含量显著增大,增幅由大到小依次为Na₂SO₄、MgCl₂、KCl、NaCl、纯水、海水、空气。沥青中芳香分含量显著减少,减幅从大到小依次为NaSO₄、MgCl₂、KCl、NaCl、纯水、海水、空气。饱和分含量减少,减幅从大到小依次为纯水、NaSO₄、空气、MgCl₂、NaCl、海水、KCl。胶质组分也有不同程度的减少,影响程度由大至小依次为MgCl₂、KCl、NaCl、海水、纯水、空气、NaSO₄。

总体上看,沥青质含量增加,芳香分、饱和分含量呈显著的减少趋势。其原因在于沥青中羧酸类和酚类等轻质含氧化合物遇水会发生一定的溶解和电离。羧酸与Na⁺、K⁺等碱金属离子生成的低价高级有机酸钾盐和钠盐属于典型的皂类化合物,易溶于水^[21]。因此经过NaCl、KCl、Na₂SO₄浸泡过的沥青,轻质成分会有一定的溶解,表现为芳香分和饱和分含量减小,沥青质含量相对增大。

3 盐分对混合料的影响

对经10次海水循环侵蚀后的沥青混合料测定其空隙率和密度,未发现与循环侵蚀前有显著差异。进一步通过室内车辙试验、-10℃间接拉伸试验、冻融劈裂试验和四点疲劳试验,评价盐分与高温耦合作用对沥青混合料性能的影响。

3.1 高温性能

表7为不同侵蚀环境和循环次数时,AC-13改性沥青混合料的路用性能试验结果。可以看出:相对于未经循环侵蚀的试件,5次纯水循环侵蚀试件的动稳定度降低了13.5%,而5次海水循环侵蚀试件的动稳定度降低了25.6%;10次海水循环侵蚀试件则降低了27.2%。表明水中存在盐分会显著降低沥青混合料的高温稳定性。

表7 不同加速侵蚀循环条件下沥青混合料的路用性能

Tab.7 Pavement performances of asphalt mixture under different accelerate erosion circulation conditions

性能		未循环	纯水循环5次	海水循环5次	海水循环10次
		动稳定度/(次·mm ⁻¹)	平均值	8 850	7 609
	标准差	420	342	398	275
间接拉伸强度(-10℃)/MPa	平均值	37.12	36.34	31.83	31.06
	标准差	0.87	0.91	0.78	0.62
冻融劈裂强度比/%	平均值	86.18	77.24	75.91	73.52
	标准差	2.5	1.7	2.6	2.0

3.2 低温抗裂性

根据表7中AC-13改性沥青混合料在-10℃时的间接拉伸试验结果可知:相对于未经循环侵蚀的试件,5次纯水循环侵蚀试件的劈裂强度降低了2.85%,而5次海水循环侵蚀的劈裂强度降低了14.47%;10次海水循环侵蚀试件则降低了17.64%。表明纯水循环作用对改性沥青混合料的影响相对较小,当水中存在盐分时对混合料的低温抗裂性能影响显著,即盐分的侵蚀加快了沥青混合料低温抗裂性的衰减^[13]。

3.3 水稳定性

由表7中AC-13改性沥青混合料在冻融劈裂试验强度比测试结果可以看出:相对于未经循环侵蚀的试件,5次纯水循环侵蚀试件的冻融劈裂强度比降低了8.94%,而5次海水循环侵蚀试件的冻融劈裂强度比降低了10.27%;10次海水循环侵蚀试件降低了12.66%。表明水热循环作用显著降低了改性沥青混合料的水稳定性,当水中存在盐分时对混合料水稳定性的衰减作用更加明显。

3.4 疲劳特性

对不同盐分侵蚀加速循环的 AC-13 改性沥青混合料进行疲劳试验,评价其疲劳性能。测试试件尺寸为 $30\text{ mm} \times 35\text{ mm} \times 250\text{ mm}$,加载频率为 10 Hz 的正弦荷载,应力水平为 $0.2, 0.4, 0.6$ 这 3 个应力比,每个应力水平选取 3 个小梁试件进行疲劳试验,试验温度为 $15\text{ }^\circ\text{C}$,四点疲劳加载。根据威布尔分布理论计算 50% 保证率下的疲劳寿命,不同盐湿热环境下沥青混合料的应力 σ 和疲劳次数 N_f 的双对数关系如图 3 所示。

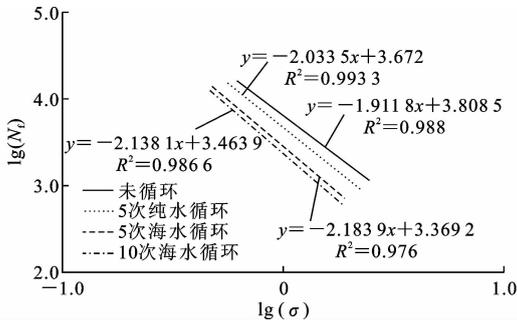


图3 不同加速循环侵蚀条件下的疲劳曲线

Fig. 3 Fatigue curves under different accelerate erosion circulation conditions

沥青混合料的抗疲劳性能通过应力与疲劳次数回归方程的 2 个参数 K, n 来反映。 K 值为疲劳曲线的截距, K 值越大表明混合料耐疲劳性能越好; n 为疲劳曲线斜率, n 值越大表明混合料的疲劳寿命对应力水平变化越敏感,即混合料耐疲劳性越差。由图 3 可知,水热和盐湿热循环侵蚀对沥青混合料的疲劳性能影响显著,随着水中盐分的增加和循环次数的增加,沥青混合料的耐疲劳性能呈衰减趋势,应力水平变化对疲劳寿命的影响总体上也变得更加敏感。

4 结果分析

盐分侵蚀作用使得沥青的三大技术指标发生明显变化,根本原因在于沥青组分发生变化。沥青组分中的饱和分含量减少,可使沥青稠度和黏性增大,进而使得沥青的针入度降低;沥青组分中的胶质具有良好的黏附力,胶质组分的减少,使得沥青的延展性和可塑性降低,延度减小,黏度也降低;沥青质是沥青中不溶于水的黑色或棕色无定形固体,其含量增加会导致沥青变硬,从而使其针入度减小,软化点和黏度增大;芳香分是沥青组分中分子量最低的物质,对沥青具有软化和润滑作用,芳香分含量的减少,也将导致沥青变硬,软化点增大,针入度减小。

盐环境除了改变沥青的组分和性质,还会进一步影响到沥青/集料的界面黏结,通过接触角测试可以进行间接分析,如图 4 所示。将集料打磨光滑后,采用接触角测量仪测定 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时海水、纯水与集料的接触角,结果分别为 70.3° 和 61.8° ,表明海水较纯水更易浸润集料,从而也更易进入沥青和集料的界面,导致沥青膜的剥落。

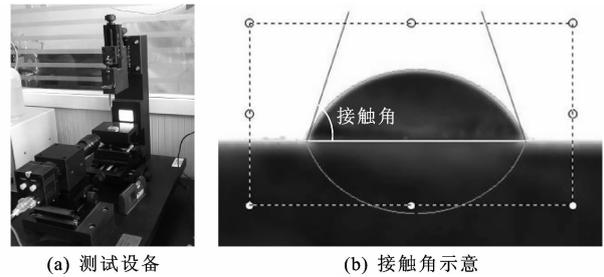


图4 接触角测试设备

Fig. 4 Test equipment of contact angle

盐分对沥青和沥青/集料界面的影响必然导致混合料的性能衰变。尽管海水中盐分的作用使沥青的软化点有所提高,但由于沥青组分中胶质含量的降低和沥青/集料界面的盐分渗入,使得混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性和疲劳特性均发生不同程度的衰减。图 5 为海水浸泡加速循环侵蚀试验前后混合料的外观。可以发现,试验结束后的试件表面空隙中有海盐结晶存在。这种可溶性盐结晶会发生体积膨胀,产生的结晶压会导致材料细观结构的破坏,从而影响材料的宏观性能。

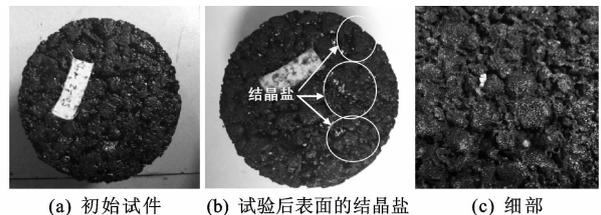


图5 加速循环后试件表面析出的结晶盐

Fig. 5 Crystalloid salt appeared in surface of specimen

5 结语

(1) 经过不同盐分侵蚀后,沥青的软化点增大,针入度减小。各种侵蚀环境中,海水对沥青针入度和软化点的影响最大,其余依次为 NaCl 溶液、 MgCl_2 溶液、 KCl 溶液、 NaSO_4 溶液、空气和纯水。

(2) 经过不同盐溶液浸泡后的沥青,其轻质成分会有一定的溶解,表现为沥青组分中芳香分和饱和分含量的减小,沥青质含量的相对增大。

(3) 海水较纯水更易浸润集料,从而也更易侵入

沥青和集料的界面,盐分存在的环境中沥青膜更容易剥落。

(4)经过室内盐蚀循环加速模拟试验后,沥青组分中胶质含量的降低和沥青/集料界面盐分的渗入会削弱沥青和集料的界面黏结。此外,这一过程中产生的可溶性盐结晶会发生体积膨胀。产生的结晶压导致材料细观结构的破坏,从而使得沥青混合料高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性和疲劳特性均发生不同程度的衰减。

(5)本文成果有助于指导沿海湿热地区沥青混合料材料选取和设计。后续可以进一步通过掺加改性剂以及对级配、空隙率等材料组成参数的调整,开展沥青混合料抗盐蚀措施的研究。

参考文献:

References:

- [1] 苏志,余纬东,黄理,等.北部湾海岸带的地理环境及其对气候的影响[J].气象研究与应用,2009,30(3):44-47.
SU Zhi, YU Wei-dong, HUANG Li, et al. Geographical environment of the Beibu Gulf Coast and its impact on the climate[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2009, 30(3): 44-47.
- [2] 王长征,刘毅.论中国海洋经济的可持续发展[J].资源科学,2003,25(4):73-78.
WANG Chang-zheng, LIU Yi. Sustainable development of marine economy in China[J]. Resources Science, 2003, 25(4): 73-78.
- [3] 江旭,柳伟,路民旭.钢铁海洋大气腐蚀试验方法的研究进展[J].腐蚀科学与防护技术,2007,19(4):282-286.
JIANG Xu, LIU Wei, LU Min-xu. Review of research on experimental methods for marine atmosphere corrosion of steel[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2007, 19(4): 282-286.
- [4] 侯保荣.海洋环境腐蚀规律及控制技术[J].科学与管理,2004,24(5):7-8.
HOU Bao-rong. Corrosion rule and control technology of marine environment[J]. Science and Management, 2004, 24(5): 7-8.
- [5] DANG Y, XIE N, KESSEL A, et al. Accelerated laboratory evaluation of surface treatments for protecting concrete bridge decks from salt scaling[J]. Construction and Building Materials, 2014, 55: 128-135.
- [6] 赵军,蔡高创,高丹盈.硫铝酸盐水泥混凝土抗氯离子侵蚀机理分析[J].建筑材料学报,2011,14(3):357-361.

ZHAO Jun, CAI Gao-chuang, GAO Dan-ying. Analysis of mechanism of resistance to chloride ion erosion of sulphoaluminate cement concrete[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(3): 357-361.

- [7] 彭建新,王华,张建仁,等.氯盐侵蚀下钢筋混凝土氯离子扩散系数试验及其概率分析[J].中国公路学报,2014,27(6):77-83.
PENG Jian-xin, WANG Hua, ZHANG Jian-ren, et al. Experimental study on chloride ion diffusion coefficient in concrete and probabilistic analysis of its influence on deterioration performance of RC structures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(6): 77-83.
- [8] YANG Ding-yi, LUO Jing-jing. The damage of concrete under flexural loading and salt solution[J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 129-134.
- [9] BASSUONI M T, RAHMAN M M. Response of concrete to accelerated physical salt attack exposure[J]. Cement and Concrete Research, 2016, 79: 395-408.
- [10] NIU Di-tao, JIANG Lei, BAI Min, et al. Study of the performance of steel fiber reinforced concrete to water and salt freezing condition[J]. Materials and Design, 2013, 44: 267-273.
- [11] LIU Z Q, DE SCHUTTER G, DENG D H, et al. Micro-analysis of the role of interfacial transition zone in "salt weathering" on concrete[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(11): 2052-2059.
- [12] 熊锐,关博文,盛燕萍.硫酸盐-干湿循环侵蚀环境下水镁石纤维沥青混合料抗疲劳性能[J].武汉理工大学学报,2014,36(10):45-51.
XIONG Rui, GUAN Bo-wen, SHENG Yan-ping. Anti-fatigue property of brucite fiber reinforced asphalt mixture under sulfate and dry-wet circle corrosion environment[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(10): 45-51.
- [13] 熊锐,陈拴发,关博文,等.硫酸盐-干湿循环侵蚀环境下纤维沥青混合料低温抗裂性研究[J].武汉理工大学学报,2014,36(3):47-52.
XIONG Rui, CHEN Shuan-fa, GUAN Bo-wen, et al. Low-temperature crack resistance of fiber reinforced asphalt mixture under sulfate and dry-wet circle corrosion environment[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(3): 47-52.
- [14] 马芹永,吴金荣,秦凯.氯盐对沥青混凝土冻融劈裂抗拉强度影响的试验与分析[J].冰川冻土,2013,35(5):1202-1208.