

DOI:10.3969/j.issn.1674-0696.2024.10.03

引文格式:张倩,王鹏涛,常开朗,等.融雪剂离子在沥青中的渗透行为分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(10):19-27.

Citation:ZHANG Qian, WANG Pengtao, CHANG Kailang, et al. Penetration behavior of snow-melting agent ions in asphalt[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2024, 43(10): 19-27.

融雪剂离子在沥青中的渗透行为分析

张倩^{1,2},王鹏涛^{1,2},常开朗^{1,2,3},冯伟⁴,裴晓梅⁴

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055;2. 西安建筑科技大学 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室,陕西 西安 710055;3. 西安鑫龙企业控股有限公司,陕西 西安 710065;4. 西安市公路局,陕西 西安 710003)

摘要:为研究融雪剂离子在沥青中的渗透扩散行为,采用 A_3N (由醋酸盐、 $NaNO_2$ 和尿素配制而成)、 $Ca(CH_3COO)_2$ 、 $Mg(CH_3COO)_2$ 、 KCH_3COO 、 $NaCl$ 和 $NaNO_2$ 共 6 种融雪剂对沥青进行渗透实验,通过三大指标的变化分析融雪剂对沥青稠度、塑性和高温稳定性的影响。利用离子色谱仪检测融雪剂溶液中离子浓度的变化,分析融雪剂阳、阴离子的渗透扩散规律。基于各浸泡周期融雪剂阳、阴离子浓度的变化,运用 Fick 定律分析各融雪剂离子在沥青中的渗透扩散行为。结果表明:经融雪剂浸泡后,基质沥青和 SBS 改性沥青的稠度和塑性增大,且 $NaCl$ 对稠度和塑性的影响最大,而醋酸盐和 A_3N 使沥青的高温稳定性降低, $NaNO_2$ 和 $NaCl$ 会提高沥青的高温稳定性;融雪剂离子在基质沥青中的渗透性强于 SBS 改性沥青,阳、阴离子扩散强度最大分别为 KCH_3COO 中的 K^+ 和 $Mg(CH_3COO)_2$ 中 CH_3COO^- ,经过 5 周期的渗透,基质沥青和 SBS 改性沥青上方融雪剂溶液中 K^+ 浓度降幅分别为 27.59% 和 16.89%, CH_3COO^- 的浓度降幅分别为 35.16% 和 19.38%;Fick 定律扩散模型可较好描述沥青对各离子吸附量的变化,其中阳离子吸附量的非线性拟合优度高于阴离子,更易被量化分析。

关键词:道路工程;离子渗透行为;Fick 定律;融雪剂

中图分类号:U414

文献标志码:A

文章编号:1674-0696(2024)10-019-09

Penetration Behavior of Snow-Melting Agent Ions in Asphalt

ZHANG Qian^{1,2}, WANG Pengtao^{1,2}, CHANG Kailang^{1,2,3}, FENG Wei⁴, PEI Xiaomei⁴

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;
2. Shaanxi Key Lab of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 3. Xi'an Xinlong Enterprise Holding Co., Ltd., Xi'an 710065, Shaanxi, China;
4. Xi'an Highway Bureau, Xi'an 710003, Shaanxi, China)

Abstract: To study the permeation and diffusion behavior of snow-melting agent ions in asphalt, six kinds of snow-melting agents, including A_3N (prepared from acetate, $NaNO_2$ and urea), $Ca(CH_3COO)_2$, $Mg(CH_3COO)_2$, KCH_3COO , $NaCl$, and $NaNO_2$, were employed to conduct penetration experiments on asphalt. The influence of snow-melting agents on viscosity, plasticity and high-temperature stability of asphalt were investigated through changes of three major indicators. An ion chromatograph was used to detect changes of ion concentration in snow-melting agent solution and analyze the permeation and diffusion patterns of cation and anion of snow-melting agents. Based on the changes of the concentration of cations and anions of snow-melting agents during each soaking cycle, Fick's law was introduced to analyze the permeation and diffusion behavior of snow-melting agent ions in asphalt. The results show that the viscosity and plasticity of the base asphalt and SBS-modified asphalt increase after soaking

收稿日期:2023-12-16;修订日期:2024-04-07

基金项目:陕西省交通运输厅交通运输科研项目(23-25R);陕西省交通运输厅交通科技项目(16-14K);衢州市科技计划项目(2019K39)

第一作者:张倩(1971—),女,陕西泾阳人,副教授,博士,主要从事道路材料方面的研究。E-mail:zhangqdq@xauat.edu.cn

通信作者:王鹏涛(1998—),男,山西忻州人,硕士,主要从事道路材料方面的研究。E-mail:wpt980604@163.com

with the snow-melting agent, and NaCl has the greatest impact on viscosity and plasticity. Acetate and A_3N can reduce the high-temperature stability of asphalt, while $NaNO_2$ and NaCl can improve the high-temperature stability of asphalt. The permeability of snow-melting agent ions in the base asphalt is stronger than that of the SBS-modified asphalt. The maximum diffusion intensities of cations and anions are K^+ in KCH_3COO and CH_3COO^- in $Mg(CH_3COO)_2$. After 5 cycles of permeation, the concentration of K^+ in the snow-melting agent solution above the base asphalt and SBS-modified asphalt is decreased by 27.59% and 16.89%, respectively, while the concentration of CH_3COO^- is decreased by 35.16% and 19.38%, respectively. The Fick's law diffusion model can better describe the changes in the adsorption capacity of various ions by asphalt, among which the non-linear fitting goodness of cation adsorption capacity is higher than that of anion, making it easier to be quantified and analyzed.

Key words: highway engineering; ionic permeation behavior; Fick's law; snow melting agent

0 引言

寒冷地区占我国国土面积的 53.5%, 在冬季会伴随降雪和冻雨现象, 造成道路表面结冰, 影响交通日常运行^[1]。撒布融雪剂作为清除道路冰雪的主要方法被广泛采纳, 但融雪剂的使用会对道路及其附属设施造成侵蚀, 削弱路面材料的使用性能^[2-3]。

为研究融雪剂对道路材料性能的影响, 王东等^[4]在自主研发环保型融雪剂的基础上, 确定了融雪剂添加到沥青混合料的配合比, 并对融雪沥青混合料的融雪性能进行了检测; 张争奇等^[5]针对不同掺量的 MFL 沥青混合料和 ZRX 沥青混合料进行路用性能检测试验, 分析添加融雪剂对沥青混合料性能的影响, 提出合理评价水稳定性的方法; 张旭景^[6]采用试验探究有机融雪剂对沥青宏观结构及组分的影响, 发现融雪剂中有机组分会与沥青发生相似相溶现象, 影响沥青的表面特征和微观结构; 张倩等^[7]使用融雪剂浸泡沥青, 发现离子结晶膨胀和乳化等现象会改变沥青内部的微观孔隙, 促使融雪剂溶液渗透到沥青内部; 宗赵男^[8]对除冰盐侵蚀后的沥青进行接触角试验, 发现经过除冰盐溶液侵蚀的沥青更易发生水损害。

目前, 针对融雪剂在沥青材料中渗透行为的研究较少, 虽普遍认为融雪剂会对沥青产生渗透腐蚀, 但尚不明确离子渗透的程度和规律。因此, 笔者采用 6 种融雪剂溶液, 分析融雪剂对沥青性能的影响和融雪剂对沥青的渗透扩散规律, 采用 Fick 定律对试验数据进行拟合验证, 加深对融雪剂离子在沥青中渗透扩散行为的微观理解。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

1.1.1 沥青

试验选用 70# 基质沥青和 SBS 改性沥青, 其性

能指标如表 1。

表 1 沥青性能指标

Table 1 Performance indexes of asphalt

性能指标	基质沥青	SBS 改性沥青
针入度 (25 ℃) / 0.1 mm	67.6	71.2
软化点 / ℃	50.3	81.7
延度 / cm (SBS 改性沥青 5 ℃、基质沥青 10 ℃)	53.4	37.8

1.1.2 融雪剂

采用的融雪剂为 A_3N (由醋酸钙、醋酸镁、醋酸钾、 $NaNO_2$ 和尿素配制而成)、 $Ca(CH_3COO)_2$ (缩写为 $CaAC_2$)、 $Mg(CH_3COO)_2$ (缩写为 $MgAC_2$)、 KCH_3COO (缩写为 KAC)、NaCl 和 $NaNO_2$, 各融雪剂均易溶于水。在实际道路融雪作业中, 融雪剂溶液常采用 25% 左右的浓度, 因此选用融雪剂溶液的质量浓度为 25%, 6 种融雪剂主要的物理指标如表 2。

表 2 融雪剂主要物理指标

Table 2 Main physical indicators of snow-melting agents

融雪剂	外观	溶解度 (25 ℃) / (g/100 g 水)
NaCl	白色固体颗粒	36.0
$CaAC_2$	白色粉末	34.7
$MgAC_2$	白色固体颗粒	53.4
KAC	白色粉末	256.0
$NaNO_2$	白色粉末	84.5
A_3N	白色粉末及白色固体颗粒	34.7

1.2 试验方法

融雪剂溶液渗透沥青试验在恒温密闭条件下进行, 考虑到低温浸泡作用下融雪剂对沥青的渗透速度较慢, 因此试验选用室温 25 ℃ 来加快融雪剂对沥青的渗透过程, 具体操作步骤如下:

1) 为避免水中各种离子对试验数据的影响,试验采用超纯水配置各盐溶液,分别配制质量分数为 25% 的 A_3N 、 $CaAC_2$ 、 $MgAC_2$ 、 KAC 、 $NaCl$ 和 $NaNO_2$ 融雪剂溶液待用。准备内径为 8.6 cm,深度为 1.85 cm 的玻璃皿若干。

2) 将玻璃皿的内壁涂抹隔离剂以便于脱模,分别加热基质沥青和 SBS 改性沥青到 135 ℃ 和 165 ℃,称取 18 g 基质沥青和 SBS 改性沥青加入到玻璃皿,试样厚度为 3 mm。等沥青试样冷却后进行脱模,待风干后装入含有融雪剂的泡沫箱,然后封盖密闭浸泡 60 d 后取出试样,风干后标记存放。测试融雪剂浸泡前后基质沥青和 SBS 改性沥青的针入度、延度和软化点。

3) 分别加热基质沥青和 SBS 改性沥青到 135 ℃ 和 165 ℃,称取 18 g 基质沥青和 SBS 改性沥青加入到玻璃皿,等沥青冷却后,用量筒称取 40 mL 的融雪剂溶液,分别加入到玻璃皿中,并用保鲜膜将玻璃皿封闭,以防止融雪剂溶液的蒸发。采用离子色谱仪对浸泡后溶液离子浓度进行检测,考虑到使用离子色谱仪时,待测溶液浓度要求为 100 ppm 以下,所以检测前需对玻璃皿上方溶液进行稀释,每个玻璃皿仅供一次取样检测,试验设置 12 d 为一个周期,共 5 个周期。使用移液枪吸取玻璃皿中溶液,使用容量瓶进行稀释,待稀释后吸取 15 mL 加入离心管中保存。

2 融雪剂对沥青基本性能的影响

通过检测融雪剂浸泡 60 d 前后沥青针入度、延度和软化点的变化,探究融雪剂溶液对沥青基本性能的影响。

2.1 针入度

沥青针入度可间接表征沥青的稠度。基质沥青和 SBS 改性沥青在融雪剂浸泡 60 d 前后的针入度变化情况如图 1(a)。

融雪剂溶液浸泡后沥青的针入度下降,即融雪剂溶液增大了沥青稠度。融雪剂对基质沥青和 SBS 改性沥青的针入度影响大小均为 $NaCl > CaAC_2 > KAC > A_3N > MgAC_2 > NaNO_2$ 。以现有理论分析可能原因为:融雪剂溶液在浸泡沥青的过程中逐渐渗透到沥青内部并在其中形成结晶,从而阻止测定针的进入,使沥青针入度减小。基质沥青针入度的减小量小于 SBS 改性沥青针入度的减小量,表明融雪剂溶液对基质沥青稠度的影响较大。

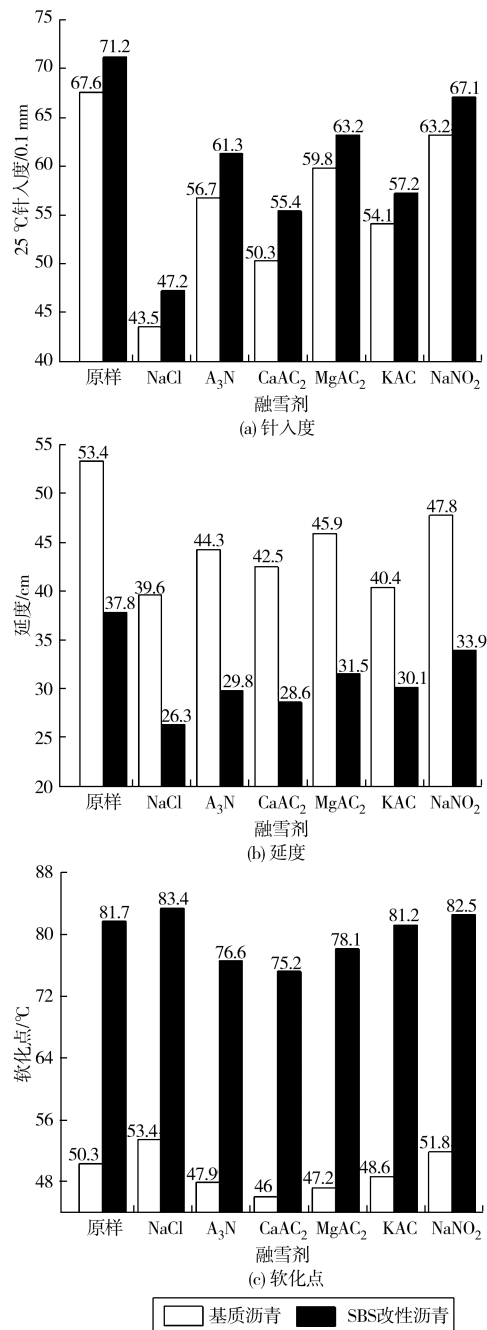


图 1 沥青三大指标变化

Fig. 1 Changes in the three major indicators of asphalt

2.2 延度

沥青延度可用来表征沥青的塑性。考虑到基质沥青经过融雪剂浸泡后,延度在 5 ℃ 的试验条件下基质沥青容易断裂,所以将基质沥青的试验温度定为 10 ℃,SBS 改性沥青仍采用 5 ℃ 进行试验。基质沥青和 SBS 改性沥青在融雪剂浸泡 60 d 前后的延度变化情况如图 1(b)。由图 1(b) 可知,经过融雪剂的浸泡后,沥青延度呈下降趋势。对比沥青在融雪剂浸泡 60 天后的延度变化,可以发现 NaCl 对沥

青的塑性影响最为显著,其次是 A_3N 和各种醋酸盐,而 $NaNO_2$ 的影响最小。根据现有理论分析其原因:在浸泡过程中,融雪剂离子会渗透到沥青中,阻断沥青内部分子间的链接,导致沥青易于断裂。相对于其它融雪剂,醋酸盐在渗透过程中会伴随乳化现象的发生,从而对沥青的塑性造成一定影响。

2.3 软化点

沥青软化点可用来表征沥青的高温稳定性。基质沥青和 SBS 改性沥青在融雪剂浸泡 60 d 前后的软化点变化情况如图 1(c)。从图 1(c) 可以发现,醋酸盐和有机融雪剂 A_3N 会降低基质沥青和 SBS 改性沥青的软化点,而 $NaCl$ 和 $NaNO_2$ 会提高基质

沥青和 SBS 改性沥青的软化点,其原因为:醋酸盐和 A_3N 均为有机盐,在渗透过程中会与沥青发生相似相溶,从而软化沥青中的沥青质,导致高温性能的减小。而 $NaCl$ 和 $NaNO_2$ 的相变温度大于沥青,因此在渗透过程中会加热沥青,吸收沥青内部热量,引起沥青软化点的增大。

3 融雪剂离子浓度变化分析

3.1 融雪剂阳离子浓度变化分析

融雪剂阳离子浓度变化如图 2,根据图 2 可计算出阳离子的浓度降幅如图 3。

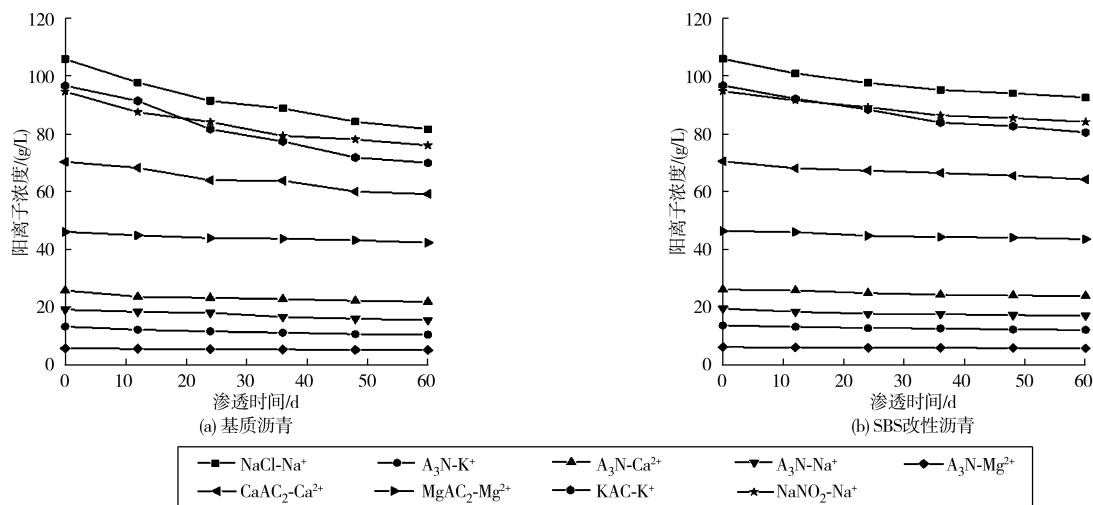


图 2 融雪剂阳离子浓度变化

Fig. 2 Changes in cation concentration of snow-melting agent

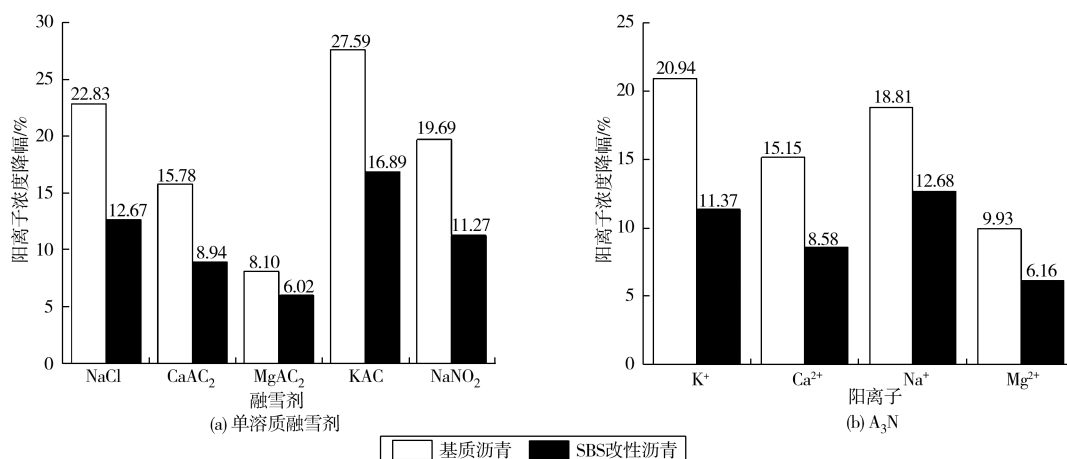


图 3 融雪剂阳离子浓度降幅

Fig. 3 Cation concentration reduction of snow melting agent

对比图 3 中各融雪剂浓度降幅,发现各阳离子渗透 5 周期后,基质沥青中阳离子浓度降幅大于 SBS 改性沥青,因此阳离子对基质沥青的渗透性更

强。通过基质沥青浸泡溶液阳离子浓度变化分析,发现各阳离子浓度降幅排序为 $K^+ > Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ 。而对于 SBS 改性沥青渗透试验, $NaCl$ 、

CaAC_2 、 MgAC_2 、 KAC 和 NaNO_2 浸泡溶液中各阳离子浓度降幅排序为 $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 。 A_3N 浸泡溶液中各阳离子浓度降幅排序为 $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 。综合阳离子浓度降幅,发现 KAC 溶液中的 K^+ 扩散能力最强,在浸泡 60 d 后基质沥青和 SBS 改性沥青试样融雪剂浸泡溶液中 K^+ 浓度降幅分别为 27.59% 和 16.89%, Na^+ 和 Ca^{2+} 次之, Mg^{2+} 的扩散能力最弱。

阳离子浓度降幅的不同说明各阳离子在沥青内的扩散并非单一的浓度扩散。融雪剂阳离子属于无机物,阳离子在渗透到沥青内部后不会和沥青发生化学反应,因此阳离子会以游离形式存在于沥青中。

游离状态的阳离子会随着电荷吸引的作用吸附于沥青孔隙,促使阳离子进一步的扩散。

根据融雪剂离子质量守恒定律,游离态阳离子并不会引起融雪剂中离子浓度的降低,引起浓度降低的原因主要是沥青的离子吸附和结合。而沥青所能容纳的吸附结合离子量有限,且继续游离在沥青内的离子溶液使沥青与融雪剂浸泡溶液浓度基本保持一致,从而使各离子后期渗透扩散速度逐渐平缓。

3.2 融雪剂阴离子浓度变化分析

融雪剂阴离子浓度变化如图 4,根据图 4 可计算出阴离子的浓度降幅如图 5。

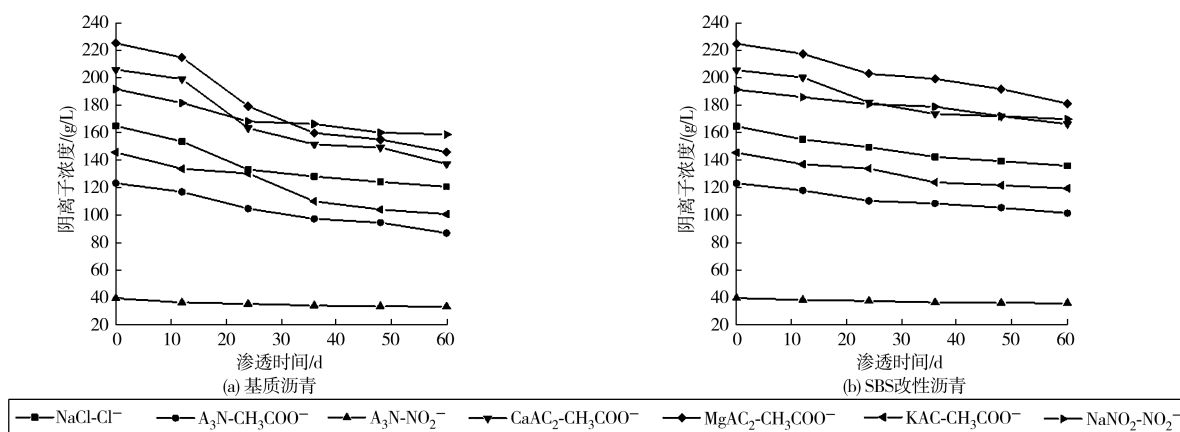


图 4 融雪剂阴离子浓度变化

Fig. 4 Changes in anion concentration of snow-melting agent

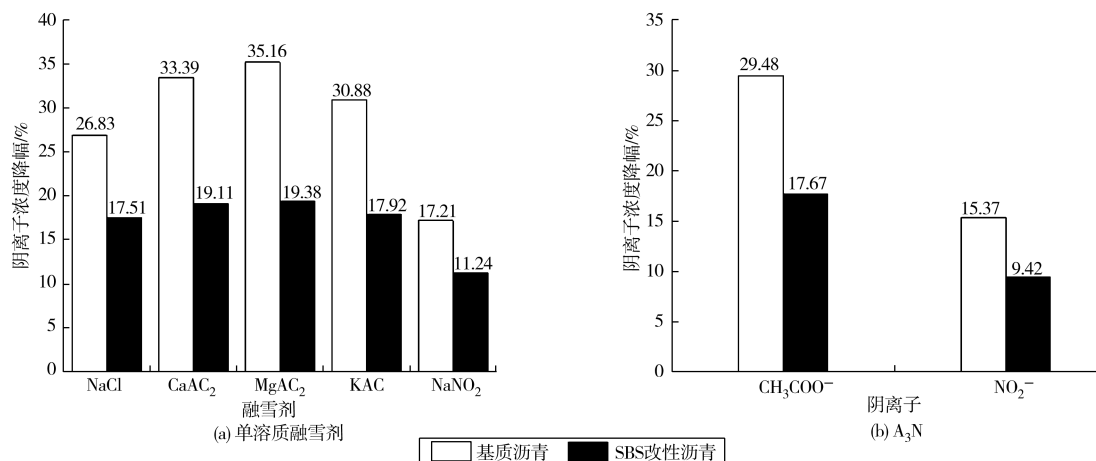


图 5 融雪剂阴离子浓度降幅

Fig. 5 Anion concentration reduction of snow-melting agent

对比图 5 中各融雪剂浓度降幅,发现各阴离子渗透 5 周期后,基质沥青中阴离子浓度降幅大于 SBS 改性沥青,因此阳、阴离子对基质沥青的渗透性均强于 SBS 改性沥青。通过对比各阴离子浓度变化

发现各阴离子的扩散能力不同,其扩散强度的排序为 $\text{CH}_3\text{COO}^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_2^-$,浸泡 60 d 后基质沥青和 SBS 改性沥青试样融雪剂浸泡液中 CH_3COO^- 浓度降幅分别为 35.16% 和 19.38%。

综合图 3 和图 5 中阳、阴离子浓度降幅,发现 CH_3COO^- 的扩散性最强,这是因为 CH_3COO^- 中含有一 CH_3 和一 COO ,具有乳化作用,当 CH_3COO^- 接触沥青表面时,有机链— CH_3 在范德华力的作用下与沥青分子链— CH_3-CH_2 紧密结合,极性端— COO 将 CH_3COO^- 分散到水相中结合水分子形成氢键。这种分散作用与沥青界面的表现就是黏附,当黏附力超过沥青中分子间作用力,就会乳化沥青,而由于布朗运动和 CH_3COO^- 间的排斥作用,乳化可以持续进行^[9]。同时,沥青组分中的饱和分属于非极性油分,而 CH_3COO^- 具有亲油性,所以 CH_3COO^- 在渗透过程中更易被沥青分子内组分所吸附,从而导致 CH_3COO^- 的扩散能力最强。

借助融雪剂浸泡过程中各阴离子浓度变化对阴离子渗透过程进行分析,发现阴离子在沥青中的扩散过程与阳离子基本一致,均是初始浓度差而推动离子前期的扩散,部分离子在浓度梯度的推动下渗入沥青并以游离形式存在,部分吸附于沥青。

综合阳、阴离子浓度降幅,可以计算出离子浓度总降幅,有机融雪剂 A_3N 由多溶质组合而成且各离子浓度降幅均存在,因此 A_3N 对沥青的渗透性最强。单溶质融雪剂浓度总降幅如表 3,由表 3 可知, KAC 的扩散能力最强,其次为 NaCl 、 CaAC_2 、 MgAC_2 , NaNO_2 对沥青的扩散能力最弱。基于融雪剂总浓度降幅变化,结合课题组前期融冰雪试验和融雪剂环境效应评测,建议可将 CaAC_2 、 MgAC_2 和 NaNO_2 复配后作为道路融雪剂。

表 3 融雪剂浸泡液离子浓度总降幅

Table 3 Total decrease in ion concentration of snow-melting agent soaking solution %

沥青类型	NaCl	CaAC ₂	MgAC ₂	KAC	NaNO ₂
基质沥青	49.66	49.17	43.26	58.47	36.90
SBS 改性沥青	30.18	28.05	25.40	34.81	22.51

4 基于 Fick 定律的融雪剂在沥青中的渗透扩散分析

基于融雪剂浸泡沥青过程中各周期离子浓度的变化,利用 Fick 定律对阳、阴离子的渗透扩散规律进行分析。在融雪剂渗透沥青的 5 周期中,渗入沥青内的融雪剂溶液与未渗入其中的融雪剂溶液属于

同一溶液体系,因此渗入沥青的溶液仍包含在溶液总体积量 40 mL 之内。根据渗透试验中 5 周期离子浓度的变化,可计算吸附于沥青的结合离子量^[10]:

$$m_n = \frac{(C - C_n) \times 40}{1\,000} \quad (1)$$

式中: m_n 为 n 周期后沥青内部各离子的吸附量, n 取值 0~5; C 为融雪剂溶液中离子初始浓度; C_n 为 n 周期后,融雪剂溶液中离子的浓度。

以吸附于沥青的离子为研究对象,采用微元法计算吸附于沥青的离子量^[10],当渗透时间 t 确定时 m_n 为:

$$m_n = \int_0^L \left[A \sin\left(\frac{\pi}{2L}x\right) \cdot e^{-\frac{\pi^2}{4L^2}Dt} + C_0 \right] \pi r^2 dx = \pi r^2 LC_0 + 2Ar^2 Le^{-\frac{\pi^2}{4L^2}Dt} \quad (2)$$

式中: r 为玻璃皿半径,mm; L 为沥青试样厚度,mm; A 为常数; D 为扩散系数; t 为渗透时间,d。

阳、阴离子向沥青扩散的动力是离子浓度梯度,离子的非稳态扩散导致浓度梯度发生变化。在扩散过程中,离子之间可能发生相互作用,因此扩散系数 D 不是恒定不变的。为简化研究过程,笔者将渗透过程中的扩散系数 D 等效为常数。利用 Origin 对阳、阴离子的吸附量进行非线性拟合,吸附量变化和拟合结果如图 6 和图 7。

由图 6 和图 7 可知,沥青对阳、阴离子吸附量的非线性拟合参数 R^2 均超过了 0.9,表明式(2)相对准确地描述了沥青中各离子的吸附量变化。此外,阳、阴离子的扩散系数均为正数,说明各离子在沥青中扩散时与浓度梯度方向保持一致,即各离子在浓度差等因素的作用下向沥青中扩散。

笔者对阳、阴离子吸附量的拟合是在给定初始参数值的基础上进行参数调整,采用最小二乘法原理进行多次迭代直至收敛完成的,方程中各参数值是软件根据最佳拟合优度优选的结果。因此,离子的拟合结果与其在沥青中的实际吸附情况可能会有一些差异。因为离子向沥青中的扩散会受离子半径、所带电荷等多种因素的影响,扩散系数并非常数,因此将拟合方程简化为扩散系数能够说明各离子在扩散时的移动方向,但无法通过比较扩散系数来确定离子的扩散强度。离子扩散强度可通过 5 周期离子浓度降幅来表征。

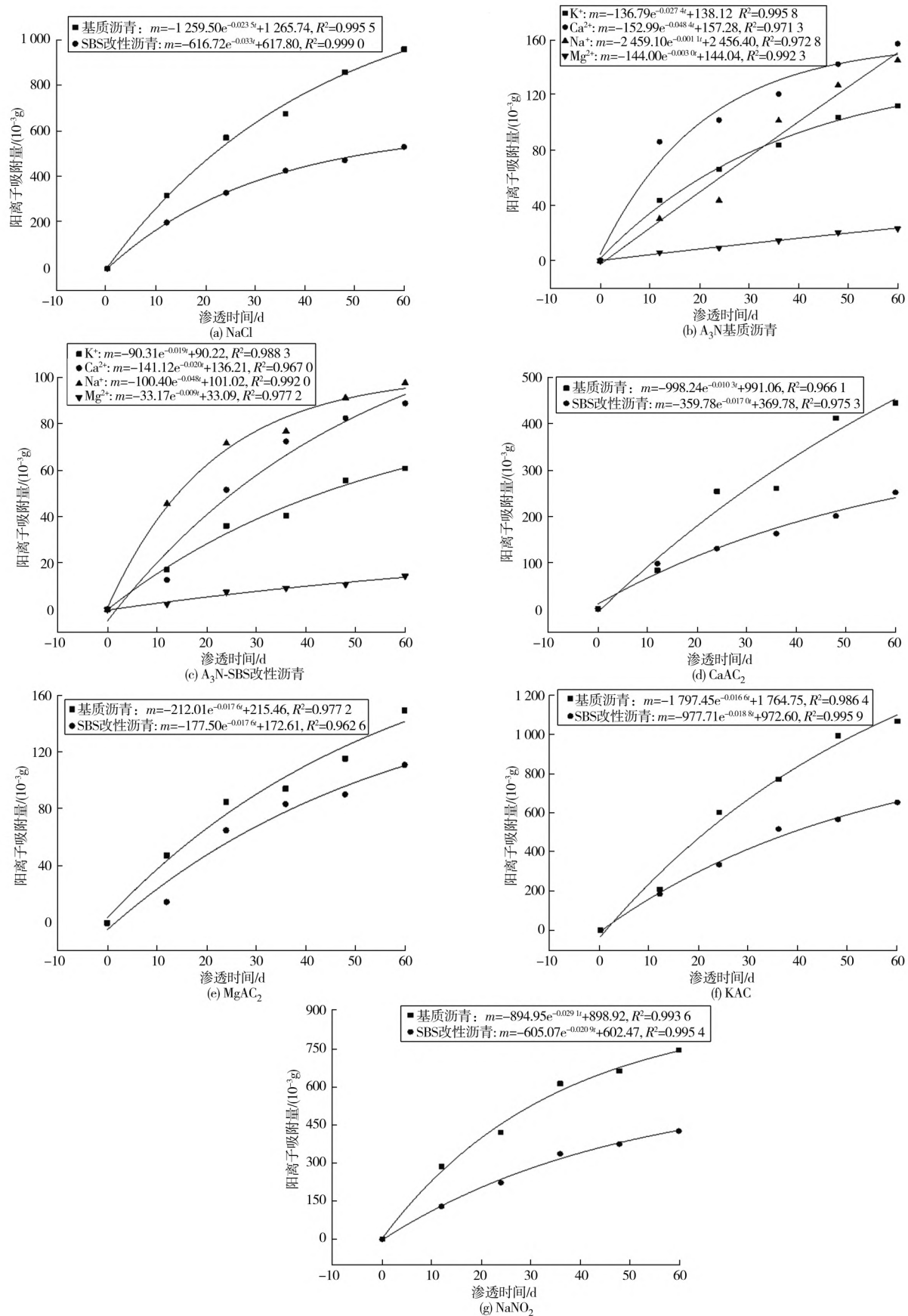


图 6 阳离子吸附量拟合结果

Fig. 6 Fitting results of cation adsorption quantity

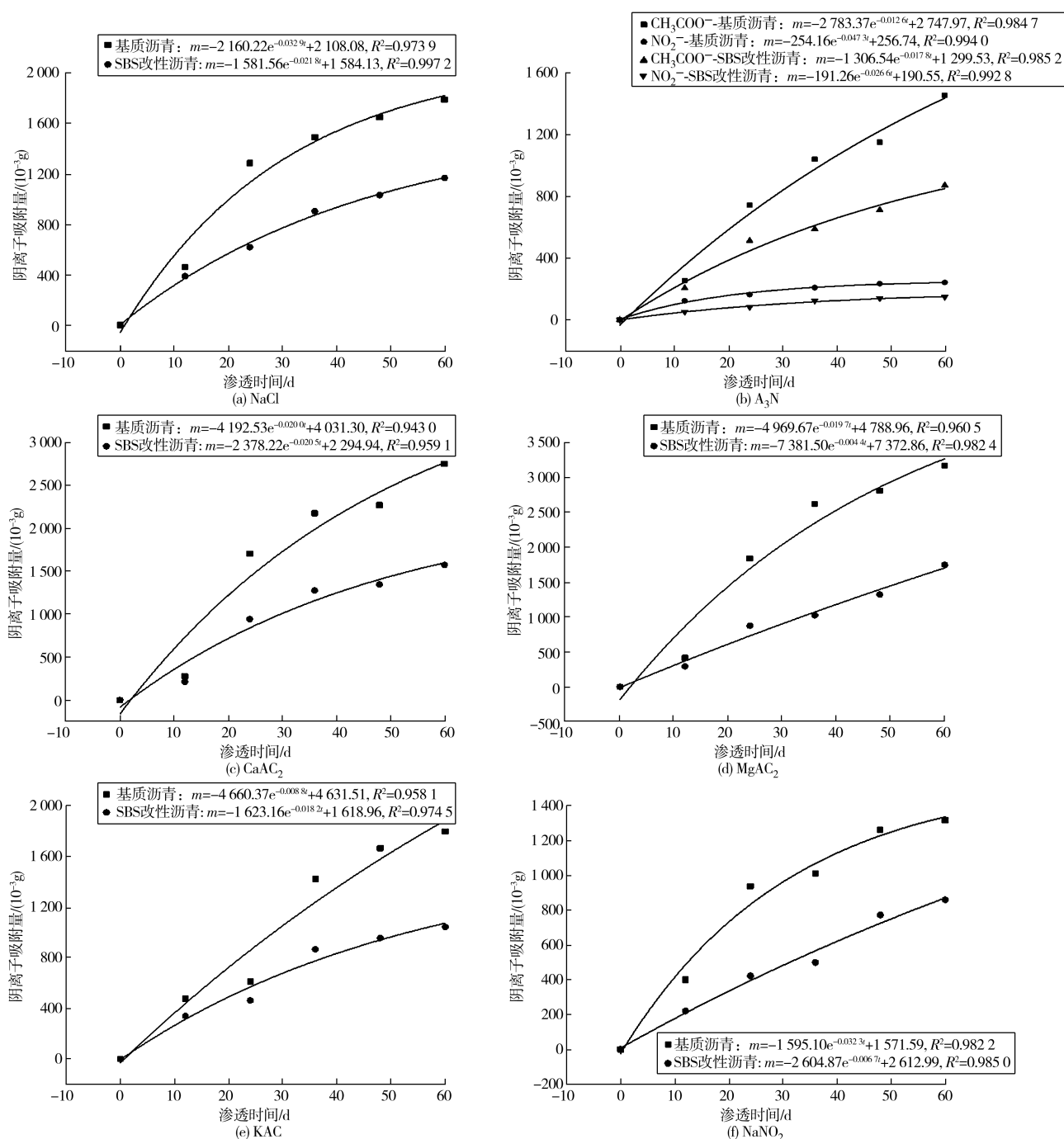


图 7 阴离子吸附量拟合结果

Fig. 7 Fitting results of anion adsorption quantity

对比图 6 和图 7 中阳离子和阴离子吸附量非线性拟合结果可发现,各阳离子拟合优度较高,表明各阳离子在沥青中的扩散更容易用数学方程表达。基于 Fick 定律的基本假设,即离子与沥青组分之间不存在相互作用,该定律认为物质的浓度梯度是渗透扩散的驱动力。因此,通过对阴离子在沥青中吸附量拟合优度较低的分析可推断:相对于阳离子,阴离子在沥青中的扩散过程更为复杂。阴离子在沥青中

不仅是物理渗透扩散,还可能与沥青中的某些组分发生化学反应。 CH_3COO^- 在拟合过程中表现出的较低优度可能是由于其易于引发沥青乳化并与沥青发生类似相溶的特性所致。相比之下, Cl^- 和 NO_2^- 作为无机物不会导致沥青乳化。因此, CH_3COO^- 的拟合优度较低,即 CH_3COO^- 在 Fick 定律分析中相对较难进行量化分析。

5 结 论

以融雪剂渗透沥青为研究对象,分析融雪剂对沥青性能的影响以及渗透过程中离子浓度的周期性变化,并采用 Fick 定律对离子浓度的试验结果进行拟合验证,可以得到以下结论:

1) 对比融雪剂浸泡前后沥青三大指标的变化,发现融雪剂浸泡后沥青的稠度和塑性增大,醋酸盐和 A_3N 会降低沥青的高温稳定性,NaCl 和 $NaNO_2$ 会提高沥青的高温稳定性。

2) 浓度差的存在是融雪剂溶液渗透沥青的初始动力。对比 5 周期渗透实验后离子浓度降幅,可知融雪剂离子对基质沥青的渗透性强于 SBS 改性沥青, CH_3COO^- 的扩散强度最强。

3) 融雪剂渗透沥青后的离子吸附量变化可用 Fick 定律扩散模型进行拟合,相应非线性方程拟合优度 R^2 可达 0.9 以上,离子吸附量的非线性方程可为盐离子在沥青中的扩散提供理论分析方法。

4) 融雪剂阳离子吸附量拟合优度高于阴离子,在沥青中的扩散吸附更易被量化分析。阴离子在沥青中除物理渗透扩散外,还会与沥青中的部分组分发生化学反应,因此其拟合优度低于阳离子。

参考文献 (References):

- [1] 常颖. 季节性冰冻区 PPA/SBS 复合改性沥青工厂化参数与性能评价[J]. 公路工程, 2017, 42(2): 302-308.
CHANG Ying. Analysis of industrialized parameters and evaluation of performance of PPA/SBS composite modified asphalt in seasonal freezing region[J]. *Highway Engineering*, 2017, 42(2): 302-308.
- [2] 贺皓皓. 融雪剂选择及其对沥青混凝土性能影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.
HE Haohao. *Study on the Selection of Snow Melting Agent and Its Influence on the Performance of Asphalt Concrete* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020.
- [3] 钟喆. 冻融作用及融雪剂对土壤中 PFASs 环境行为的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
ZHONG Zhe. *Effect of Freeze-Thaw Action and Snowmelt Agent on*

Environmental Behavior of PFASs in Soil [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.

- [4] 王东, 赵富强, 田中男, 等. 环保型路用融雪剂制备及其功效研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(6): 92-98.
WANG Dong, ZHAO Fuqiang, TIAN Zhongnan, et al. Preparation and effect of an environment-friendly snow-melting agent [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2020, 39(6): 92-98.
- [5] 张争奇, 唐周鸣, 李杨, 等. 自融雪剂对沥青混合料性能影响研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(7): 92-99.
ZHANG Zhengqi, TANG Zhouming, LI Yang, et al. Effect of self-melting snow agent on performance of asphalt mixture[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2020, 39(7): 92-99.
- [6] 张旭景. 道路融雪剂对沥青的影响及作用机理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
ZHANG Xujing. *Study on the Influence of Road Snow Melting Agent on Asphalt and Its Mechanism* [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [7] 张倩, 张旭景, 梁纪, 等. 有机融雪剂对沥青的影响及作用机理[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4): 820-827.
ZHANG Qian, ZHANG Xujing, LIANG Ji, et al. Effect of organic snow melting agent on asphalt performance and its mechanism [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(4): 820-827.
- [8] 宗赵男. 除冰盐对改性沥青及其混合料性能影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
ZONG Zhaonan. *Study on the Influence of Deicing Salt on the Properties of Modified Asphalt and Its Mixture* [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.
- [9] 彭子馨, 郝培文. 醋酸盐融雪剂对机场沥青混凝土道面损坏机理研究[J]. 中外公路, 2012, 32(5): 75-78.
PENG Zixin, HAO Peiwen. Research on the damage mechanism of acetate snow-melting agent on airport asphalt concrete pavement [J]. *Journal of China and Foreign Highway*, 2012, 32(5): 75-78.
- [10] ZHANG Q, WU D, ZHANG X, et al. Effect of organic deicing agents on asphalt rheology and analysis of the mechanism [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 284(5): 122649.

(责任编辑:朱汉容)