

文章编号:1007-9629(2021)04-0820-08

有机融雪剂对沥青的影响及作用机理

张 倩^{1,2}, 张旭景^{1,2}, 梁 纪³, 严 钊³, 穆荣芳³

(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. 陕西省高速公路建设集团公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 为分析有机融雪剂对沥青性能的影响及其作用机理, 测定腐蚀后沥青三大指标和黏度, 对比腐蚀前后沥青宏观表面特征和微观相态参数的变化, 并基于 Verhulst 模型量化沥青腐蚀周期内针入度的变化。结果表明: 有机融雪剂与沥青发生相似相溶, 削弱了沥青的高、低温性能和抗老化性能; 有机融雪剂腐蚀后基质沥青表面出现腐蚀孔和溶解坑, 荧光显微试验表明 SBS 分子经浸泡腐蚀后出现明显“线性”和“块状”团聚, 导致沥青微观结构参数(孔隙面积和直径)发生不同程度的改变; 腐蚀后沥青针入度变化符合 Verhulst 模型。

关键词: 有机融雪剂; 沥青性能; 腐蚀; 荧光显微; Verhulst 模型

中图分类号: U414

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.04.020

Effect of Organic Snow Melting Agent on Asphalt Performance and Its Mechanism

ZHANG Qian^{1,2}, ZHANG Xujing^{1,2}, LIANG Ji³, YAN Zhao³, MU Rongfang³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Lab of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China; 3. Shaanxi Expressway Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: To analyze the effect of organic snow-melting agent on the asphalt performance and its mechanism, three indexes and viscosity of the soaked asphalt were measured. Changes and microphase parameters of the soaked asphalt in macroscopic representation were observed. Change of penetration during the corrosion cycles was quantified based on the Verhulst model. The results show that the organic snow melting agent is similar to asphalt, which weakens the high, low and anti-aging properties of asphalt. Surface characteristics of the base asphalt showed visible changes such as corrosive holes and dissolution sunken. Fluorescence phases of the SBS molecules was “reunited” in linear or bulk pattern. The calculation results show that the micro pore area and diameter of the asphalt changed in varying degrees. The change of penetration conforms to the Verhulst model.

Key words: organic snow melting agent; asphalt performance; corrosion; fluorescence microscopy; Verhulst model

融雪剂的使用可改善冬季冰雪地区道路行车安全^[1], 但也对道路及其附属结构造成了严重侵蚀^[2-3], 削弱了沥青路面材料的使用性能^[4], 传统氯

盐融雪剂对环境和混凝土结构物的影响国内外已有大量研究报告^[5-6]。张营^[7]和朱汉祥^[8]研究了融雪剂对植物的影响及生态效应; 陈杰^[9]研究了盐化物融

收稿日期: 2020-02-08; 修订日期: 2020-04-12

基金项目: 陕西省交通运输厅交通科技项目(16-14k); 浙江省公路与运输管理中心科技计划项目(2019H01); 陕西省高性能混凝土工程实验室 2017 年开放基金资助项目(SHPC201704); 衢州市科技计划项目(2019K39)

第一作者: 张 倩(1971—), 女, 陕西泾阳人, 西安建筑科技大学副教授, 硕士生导师, 博士。主要从事路面材料、路面病害机理及防治等方面的教学和研究。E-mail: zhangqdq@xauat.edu.cn

雪沥青路面的耐久性及其融雪的持久性;陈元素^[10]从试验研究和数值模拟两方面对受腐蚀混凝土的力学特性进行了分析;张伟勤等^[11]研究了水泥混凝土腐蚀和冻融循环作用下的强度及质量损失规律;Özgan 等^[12]、Starck 等^[13]证实氯化钠和氯化钙融雪剂对混凝土有不良影响,并提出一些预防措施;Young 等^[14]认为氯盐类物质造成的物理剥蚀是混凝土破坏的重要原因;Cody 等^[15]对比了受不同氯盐类物质侵蚀后混凝土路面的剥蚀和开裂变化。

目前,涉及有机融雪剂腐蚀沥青材料的研究较少,虽然普遍认为有机融雪剂对沥青路面材料的腐蚀要小于氯盐类融雪剂,但对其具体程度尚未见更多量化认知。因此,本研究以自主研发的3种有机融雪剂为依托,探究其对沥青宏观性能和表面特征的影响及其微观作用机理,研究结果除了作为这3种有机融雪剂的推广使用及腐蚀性评价以外,更有助于完善沥青材料的盐离子侵蚀理论。

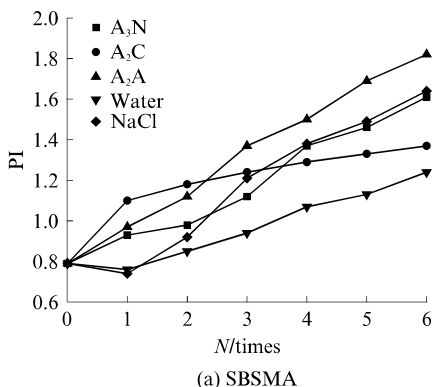
1 试验

1.1 原材料

沥青为 70# 基质沥青(BA)和 SBS 改性沥青(SBSMA),其性能指标见表1(本文 BA、SBSMA 的延度测试温度分别为 5、10℃);自制有机融雪剂(各

表1 沥青性能指标
Table 1 Performance indexes of asphalts

Index	BA	SBSMA
Penetration(25℃)/(0.1 mm)	72.4	70.0
Softening point/℃	47.4	82.5
Ductility/cm	42.51	36.30



组分均易溶于水),其中 A₃N 为亚硝酸型、A₂C 为卤水复盐型、A₂A 为甘醇型融雪剂;对照组为氯盐融雪剂(NaCl)和清水(water)。

1.2 沥青试样的制备

制备若干 20 g 沥青薄膜(厚度约 2 mm),置于质量分数为 20% 的融雪剂溶液中,常温密闭静态腐蚀浸泡 1~6 周后待用。

1.3 试验方法

将沥青薄膜在融雪剂溶液中浸泡 1 周定义为 1 个腐蚀周期(N)。根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》测定沥青薄膜在腐蚀周期内针入度、延度及软化点三大指标的变化,计算针入度指数(PI),并采用 Verhulst 模型对腐蚀前后沥青的针入度变化进行非线性拟合;分析 6 个腐蚀周期后沥青在旋转薄膜烘箱(RTFOT)老化 85 min 前后针入度、延度及软化点三大指标及黏度的变化,计算残留针入度比(RPR),即腐蚀老化后沥青针入度与原样沥青老化后针入度的差值和原样沥青针入度之比;探究浸泡 6 个腐蚀周期后沥青的表面特征和荧光相态变化,借助 Image-pro plus 软件计算相关微观结构参数。

2 有机融雪剂对沥青性能的影响

2.1 有机融雪剂对沥青高温及低温性能的影响

图 1 为不同融雪剂作用下沥青针入度指数(PI)随腐蚀周期的变化。由图 1 可见:随着腐蚀周期的增大,经融雪剂腐蚀后沥青针入度指数增加,温度敏感性降低。这是因为沥青经融雪剂腐蚀后,盐离子的渗入会分担温度变化产生的影响。

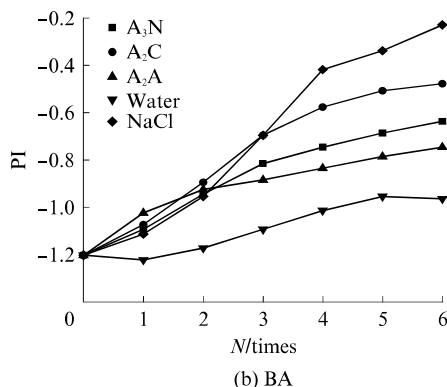


图1 不同融雪剂作用下沥青的针入度指数随腐蚀周期的变化

Fig. 1 Variation of penetration index of asphalts with corrosion cycles under different snow melting agents

相对于原样沥青,测试并计算了不同融雪剂作用下 6 个腐蚀周期后沥青延度的降低值,结果见图 2。由图 2 可见:融雪剂浸泡腐蚀后沥青的延度出现了不同

程度降低;氯盐融雪剂浸泡沥青的延度降低值最大,这是因为融雪剂中盐离子渗入沥青分子中,会阻断沥青分子间的链接,使沥青更容易发生断裂。

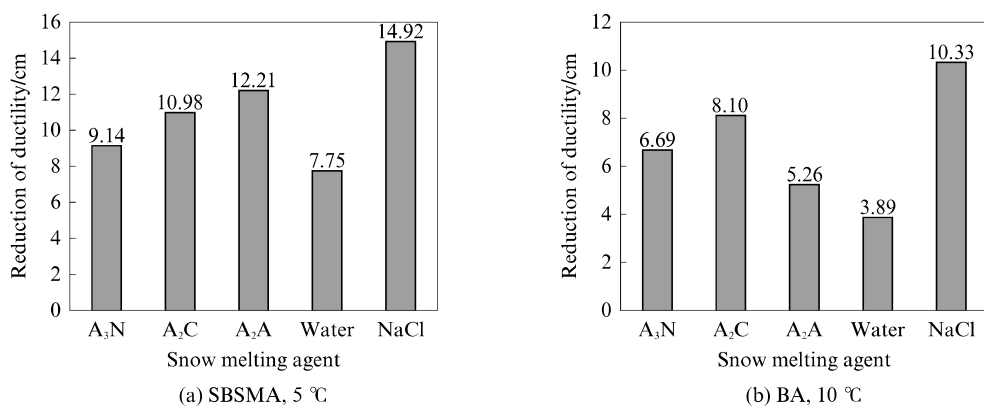


图2 不同融雪剂作用下6个腐蚀周期后沥青延度的降低值

Fig. 2 Reduction of asphalt ductility after six corrosion cycles under different snow melting agents

图3为不同融雪剂作用下沥青软化点随腐蚀周期的变化。由图3可见:经A₃N和A₂A腐蚀后,沥青软化点降低,这是因为A₃N和A₂A中有机组分会与沥青发生乳化和相似相溶,软化沥青质地,弱化其高温性能;经A₂C腐蚀后,沥青软化点随腐蚀周期的延长而增大,这是因为A₂C中含有少量氯盐,

氯盐离子扩散到沥青分子间后,对沥青高温性能的提高作用大于有机盐离子造成沥青乳化带来的对沥青高温性能的降低作用;氯盐融冰雪剂以氯盐为主要成分,虽很难与沥青发生化学反应,但是少量氯盐离子分散到沥青分子间,可吸收更多热量(氯盐的相变温度远大于沥青),因此提高了沥青软化点。

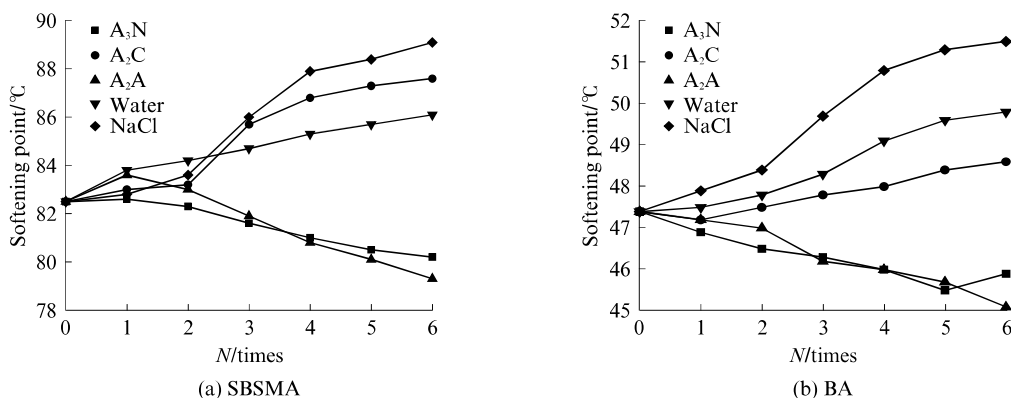


图3 不同融雪剂作用下沥青软化点随腐蚀周期的变化

Fig. 3 Variation of asphalt softening point with corrosion cycles under different snow melting agents

2.2 有机融雪剂对沥青抗老化性能的影响

图4为经融雪剂腐蚀后沥青的老化试验结果,图中AOS为未经融雪剂腐蚀而直接老化后的沥青。图4(a)可见:与AOS相比,SBS改性沥青经A₂A腐蚀后,残留针入度比(RPR)增大7.86%;经A₃N、A₂C、清水和氯盐腐蚀后,残留针入度比减小,抗老化性能减弱,氯盐的腐蚀影响最为明显;腐蚀后基质沥青的残留针入度比均降低,经氯盐腐蚀后残留针入度比减小25.00%,降幅最大。分析其原因:A₂A中的有机组分促进SBS的老化降解,导致老化后针入度增大;渗入沥青中的氯盐除了阻碍针的刺入,在老化过程中吸热能力大于原样沥青,会加剧沥青相的氧化硬化,降低针入度;此外,A₃N和A₂C中含有

有机组分和低分子盐,前者促进了SBS的降解,后者则会加剧沥青相的硬化,导致针入度降低,说明沥青相的氧化硬化在此过程中占据主导。由图4(b)可见,融雪剂腐蚀后沥青的延度均降低,表明沥青经各融雪剂溶液浸泡后低温变形能力均降低,抗老化性能减弱,其中氯盐融雪剂的影响最为明显。由图4(c)、(d)可见:经3种有机融雪剂腐蚀后,沥青的软化点和黏度均降低,说明有机组分可能导致SBS分子降解,还与沥青相发生相似相溶,降低了其软化点和黏度,而氯盐在高温氧化作用下会破坏SBS的三维网状结构,因此氯盐腐蚀后SBS改性沥青的软化点和黏度降低。此外,2.1的研究结果表明,渗入沥青中的氯盐离子使得沥青针入度增加,因此会增大

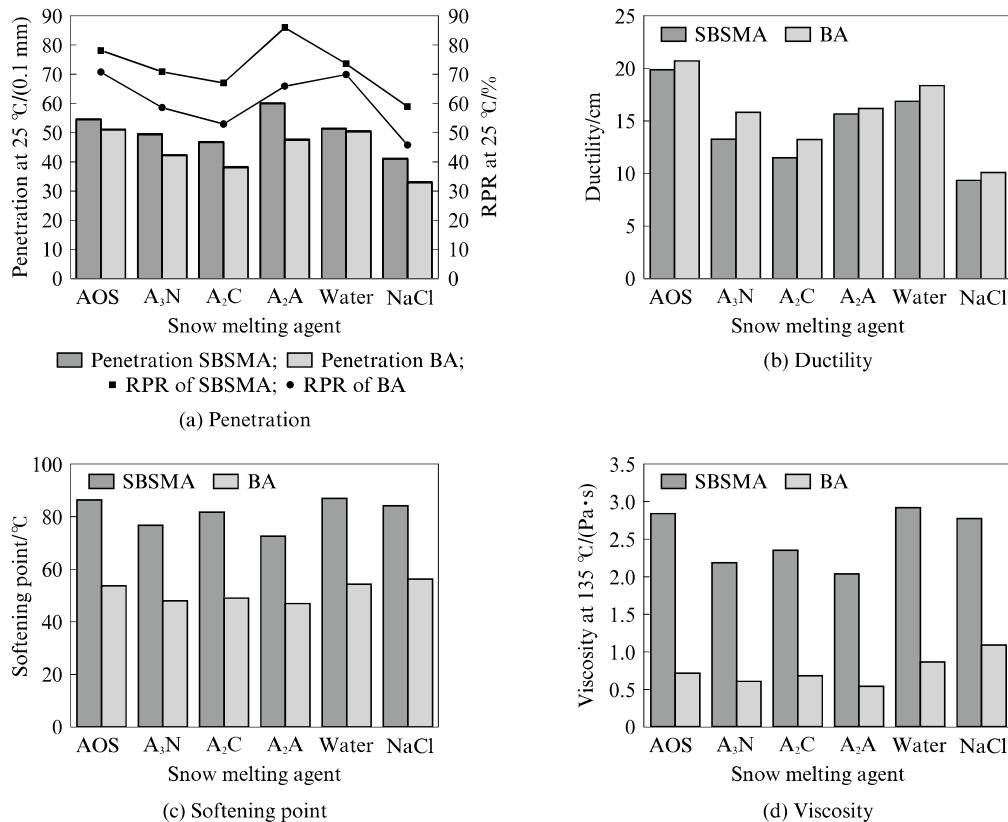


图4 融雪剂腐蚀后沥青的老化试验结果

Fig. 4 Aging test results of asphalt after corrosion by snow melting agents

其黏度试验的扭矩,导致盐蚀沥青老化残留物黏度增大。

3 有机融雪剂腐蚀后沥青表面特征的变化和机理

3.1 沥青表面特征的变化

不同融雪剂作用下6个腐蚀周期后沥青的表面

形貌如图5所示,BA+A₃N-1为基质沥青BA在融雪剂A₃N作用下6个腐蚀周期后典型的沥青表面形貌图之一,其他类推。由图5可见:基质沥青在有机融雪剂作用6个腐蚀周期后,沥青外露面出现不同程度气泡凸起和坑洼,与有机融雪剂溶液接触面形成了贯穿的腐蚀孔和溶解坑;A₃N和A₂A腐蚀后基质沥青试样表面气泡戳破后有液体流出(见图

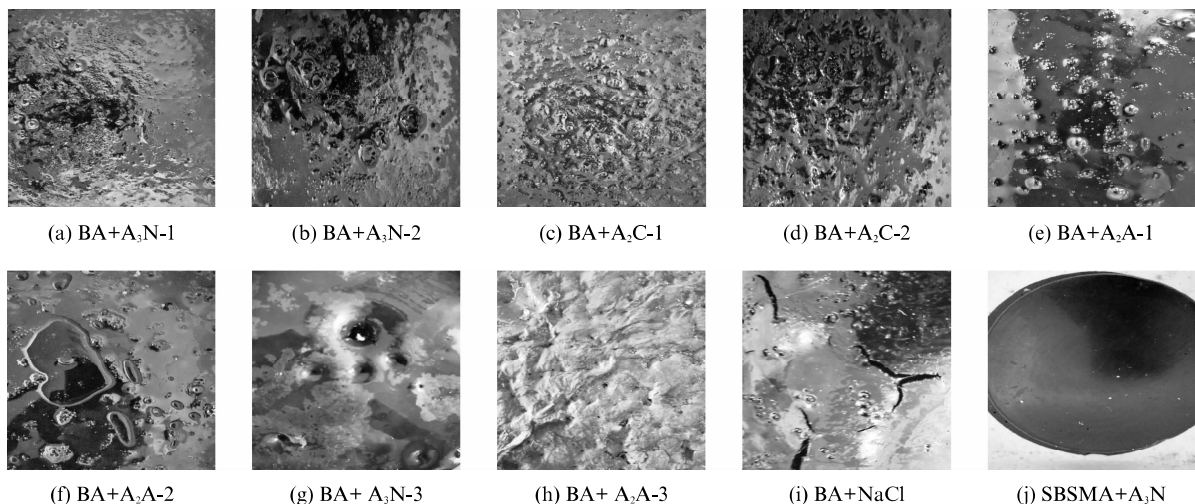


图5 不同融雪剂作用下6个腐蚀周期后沥青的表面形貌

Fig. 5 Surface morphology of asphalts after six corrosion cycles under different snow melting agents

5(b)、(f)), 而 AC_2 腐蚀后基质沥青试样表面气泡戳破后无液体流出(见图 5(d)); 基质沥青被氯盐腐蚀后, 质脆易开裂(见图 5(i)); 而 SBS 改性沥青被有机融雪剂 A_3N 腐蚀后外观变化不大(见图 5(j)).

3.2 沥青表面特征变化机理分析

无机盐离子的渗入降低了沥青变形能力, 有机组分会与沥青发生乳化和相似相溶, 浸泡后的基质沥青出现腐蚀孔和溶解坑. 因 SBS 对基质沥青分子的约束, SBS 改性沥青的乳化和溶解未形成可见的表观变化. 有机融雪剂溶液中的醋酸根离子含有亲油性有机非极性链 CH_3 —和亲水性极性端 COO —, 具有乳化作用. A_2A 中含有醇类有机组分, 亲油性较强; A_2C 中含有较多无机盐, 亲油性较弱; A_3N 的亲油亲水性居中. 因此在对沥青乳化作用方面 $A_2A > A_3N > A_2C$. 依据极性相似相溶规律, 有机融雪剂中的非极性基团具有亲油性, 而沥青中饱和分是非极性油分, 因此沥青会部分溶于有机融雪剂.

参照 3.1 中基质沥青表面形貌图, 建立腐蚀模型示意图见图 6. 由图 6 可见: 浸泡初期, 沥青试样浮于有机融雪剂溶液中, 其下表面与有机融雪剂溶液接触(见图 6(a)); 乳化和溶解作用使下沥青表面出现几乎真空的溶解坑洞(见图 6(b)); 因气压的作用, 融雪剂溶液会沿着坑洞自动上升, 乳化和溶解在沥青内部沿着腐蚀孔道逐渐深入直至外表面; 而沥青孔隙中残存气体同样会沿微孔隙自动进入溶解坑洞, 因此气体会在腐蚀孔道上部逐渐积聚, 且随着沥青的乳化和溶解逐渐深入; 沥青外露面表层在空气中氧化老化, 分子量增加, 分子间范德华力增大, 不易乳化溶解; 当腐蚀孔道延伸至外表面时, 表层氧化的沥青膜不易发生乳化和溶解, 在孔道上层气体挤压下, 形成宏观气泡或凸起(见图 6(c)). A_2A 亲油性较大, 乳化和溶解作用较强, 腐蚀孔道上部可汇聚更多的气体, 且内部易挥发的甘醇组分也会以气体形式存在于孔道上部(见图 5(e)、(f)).

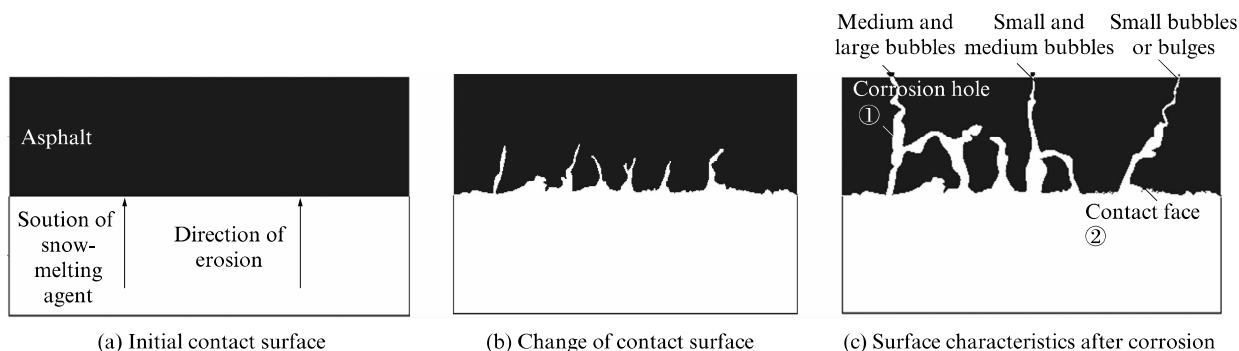


图 6 腐蚀模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of corrosion model

4 有机融雪剂对沥青微观结构的影响和机理

4.1 沥青荧光显微试验结果

基质沥青的荧光谱图中, 胶质和沥青质荧光颜色以褐色和橙色为主, 不同融雪剂腐蚀后基质沥青荧光结果区别不大, 因此本节结合 SBS 改性沥青腐蚀前后相态分布的变化, 分析融雪剂对沥青的作用机理.

SBS 改性沥青荧光谱图见图 7. 由图 7 可见: 融雪剂腐蚀后改性沥青出现了“线性”和“块状”团聚, 这是因为融雪剂腐蚀会对 SBS 改性沥青的三维网状结构造成侵蚀, 使内部相容性变差, 这解释了 2.1 和 2.2 中 SBS 改性沥青各性能的变化, 结合 3.1 中

沥青表面形貌的变化, 说明团聚后的 SBS 对沥青相仍具备约束作用, 在一定程度上可以抵制融雪剂的乳化和溶解作用.

4.2 微观结构计算及定量分析

采用 Image-pro plus 软件对荧光谱图进行处理和计算^[16], 得到沥青孔隙直径(d)、面积(S)等微观结构参数, 结果见表 2. 表 2 中: d_{\min} 、 d_{\max} 、 d_{ave} 分别为沥青孔隙直径的最小值、最大值和平均值; S_{\min} 、 S_{\max} 、 S_{ave} 分别为沥青孔隙面积的最小值、最大值和平均值.

由表 2 可知: 氯盐腐蚀后沥青孔隙平均面积和平均直径增加最显著, 这是因为渗入沥青中的离子在孔隙中结晶膨胀, 且氯盐离子的膨胀最为明显; 离子结晶膨胀会造成孔隙间的嵌挤变形, 部分未渗入

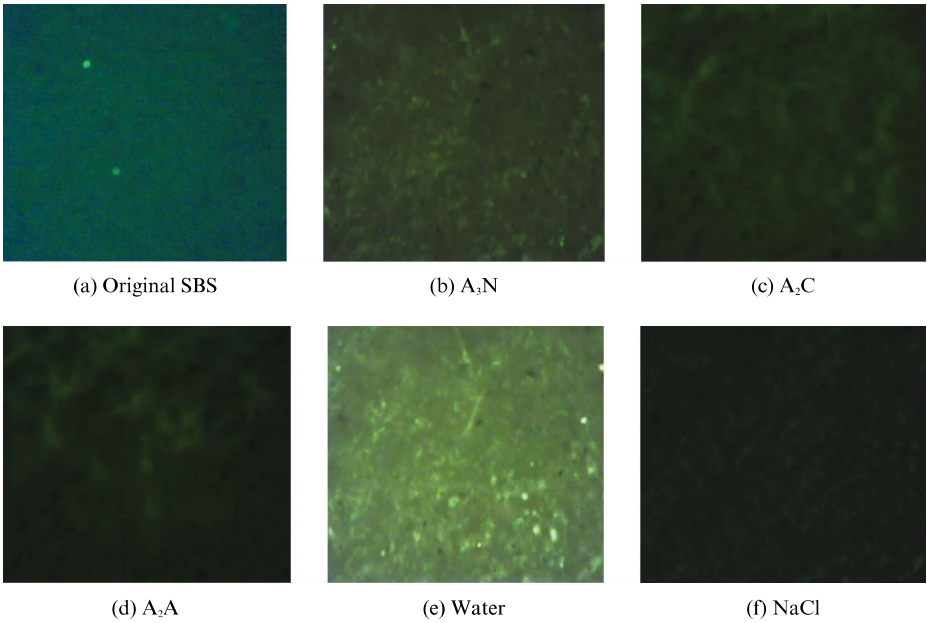


图 7 SBS 改性沥青荧光谱图
Fig. 7 Fluorescence results of SBSMA

表 2 沥青微观结构参数计算结果 Table 2 Microscopic parameters of asphalt pore							
Asphalt	Snow melting agent	$S/\mu\text{m}^2$			$d/\mu\text{m}$		
		S_{\min}	S_{\max}	S_{ave}	d_{\min}	d_{\max}	d_{ave}
SBSMA	Original	0.110	0.294	0.196	0.152	0.632	0.308
	A ₃ N	0.105	0.315	0.168	0.386	0.768	0.424
	A ₂ C	0.112	0.369	0.237	0.574	0.752	0.541
	A ₂ A	0.110	0.330	0.136	0.374	0.667	0.446
	Water	0.110	0.690	0.152	0.141	1.200	0.495
	NaCl	0.130	0.781	0.382	0.681	1.156	0.841
BA	Original	0.110	0.160	0.122	0.375	0.566	0.448
	A ₃ N	0.110	0.180	0.124	0.374	0.546	0.440
	A ₂ C	0.052	0.198	0.121	0.392	0.768	0.492
	A ₂ A	0.113	0.169	0.120	0.327	0.549	0.426
	Water	0.099	0.171	0.119	0.368	0.551	0.459
	NaCl	0.115	0.197	0.126	0.321	0.810	0.508

离子或渗入离子较少孔隙的面积缩小,而直径却增加,该现象在基质沥青经 A₂C 腐蚀后尤为明显; A₃N 和 A₂A 中有机组分与沥青发生乳化和相似相溶,破坏了 SBS 改性沥青的三维网状结构;SBS 网状结构塌陷变形后,孔隙面积减小、直径增加,这符合 2.1 中 SBS 改性沥青高低温性能的试验结果;与基质沥青相比,SBS 改性沥青中因含有 SBS,腐蚀后微观结构参数变化较大;经清水浸泡 6 个周期后,

SBS 改性沥青和基质沥青孔隙的面积和直径变化明显,说明水的影响较大,其作用不可忽略. 沥青孔隙微观参数变化是腐蚀过程中物理化学作用不同程度共同影响的结果,离散性较大.

5 基于 Verhulst 模型针入度变化的非线性分析

基于 Verhulst 模型^[17],利用分离变量法,得到 Verhulst 模型转换通解:

$$P(t) = \frac{a}{1 - e^{bx} \left(1 - \frac{a}{P(0)}\right)}$$

(1)

式中: $P(t)$ 为浸泡 t 时间后沥青 25 ℃ 下的针入度; a 和 b 均为常数;当 $t=0$ 时,SBS 改性沥青的 $P(0)=70.0$,基质沥青的 $P(0)=72.4$.

将融雪剂腐蚀不同时间后沥青 25 ℃ 针入度代入式(1),其非线性拟合结果见图 8. 由图 8 可见:除氯盐腐蚀后的基质沥青外,其他非线性方程拟合优度 R^2 均达到 0.95 以上,说明 Verhulst 模型可以较准确地表征沥青腐蚀后的针入度变化;氯盐中的离子渗入沥青中,会阻碍针入度针的刺入,对针入度测试结果造成干扰;相比于基质沥青,氯盐腐蚀后 SBS 改性沥青针入度的非线性方程拟合优度为 0.985 6,间接说明氯盐对基质沥青的腐蚀为渗透介入,对 SBS 改性沥青的腐蚀为渗透破坏三维网络结构,与 2.1 结论一致.

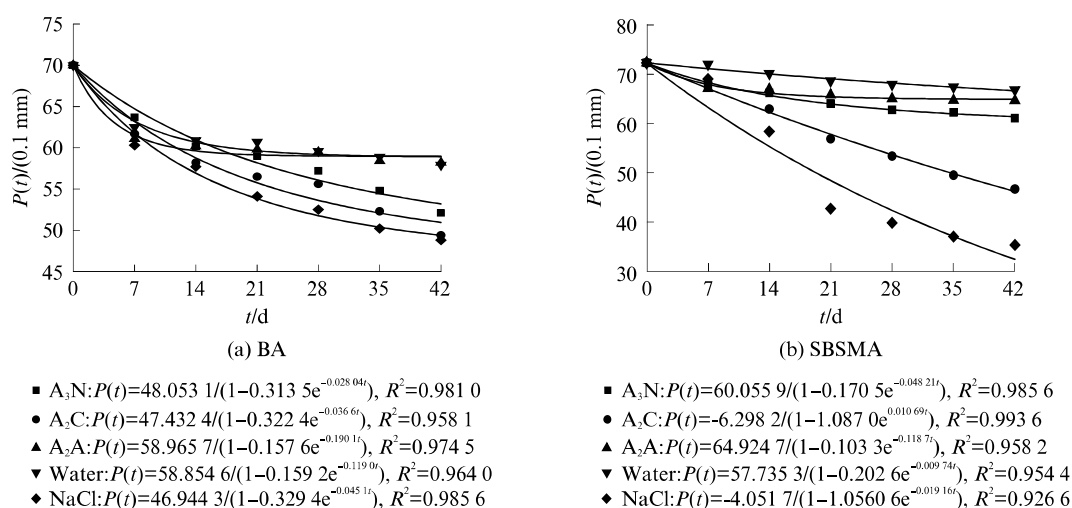


图8 沥青针入度非线性拟合结果

Fig. 8 Nonlinear fitting results of penetration of asphalt

6 结论

(1)有机融雪剂与沥青发生相似相溶,会弱化沥青的高温表现,而无机盐离子的渗入可以改善其高温性能和感温性能;有机融雪剂浸泡会阻断沥青的分子链接,削弱其低温变形能力;有机融雪剂对沥青抗老化性能存在不利影响,但与氯盐融雪剂相比作用较弱。

(2)有机融雪剂中非极性基团 CH_3 —和极性基团 COO —在浸泡中充当了乳化型溶剂,浸泡后基质沥青的表面出现腐蚀孔和溶解坑,证实了有机融雪剂的乳化和溶解作用;荧光观测表明 SBS 分子腐蚀后出现明显“线性”和“块状”团聚,且渗入离子的结晶和 SBS 网络的破坏,导致沥青微观孔隙面积和直径发生不同程度改变。

(3)有机融雪剂腐蚀后沥青的针入度变化可用 Verhulst 模型进行拟合,相应非线性方程拟合优度 R^2 达 0.95 以上,沥青性能指标的非线性方程可为沥青材料研究提供理论分析方法。

(4)与氯盐融雪剂相比,3 种有机融雪剂对以针入度、延度、软化点为代表的沥青宏观性能指标和以沥青孔隙直径和面积为代表的微观结构参数影响较小, A_3N 和 A_2A 的乳化溶解会软化沥青,高温区冬季融雪建议使用 A_2C ,低温区推荐 A_3N 和 A_2A 。

参考文献:

- [1] 刘毅豪.城市道路沥青路面融雪剂损害研究[D].郑州:河南大学,2019.
LIU Yihao. Study on the damage of deicing agent for urban asphalt pavement [D]. Zhengzhou: Henan University, 2019.

(in Chinese)

- [2] 张勇,凌云志.融雪剂对混凝土桥涵的路面的危害[J].全面腐蚀控制,2019,33(3):30-31.
ZHANG Yong, LING Yunzhi. Damage analysis of snow melting agent to concrete bridge culvert and pavement [J]. Total Corrosion Control, 2019, 33(3): 30-31. (in Chinese)
- [3] 王超.公路用融雪剂对沥青混凝土性能的影响研究[J].北方交通,2015,(1):79-82.
WANG Chao. Study on the effect of highway snow melting agent on performance of asphalt concrete [J]. North Traffic, 2015, (1): 79-82. (in Chinese)
- [4] 马晨.氯盐融雪剂浓度对沥青及沥青混合料性能影响研究[D].长春:吉林大学,2017.
MA Chen. Study on the effect of chloride snow melting agent concentration on the performance of asphalt and asphalt mixtures [D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [5] 陈晓冬,张羽,单丽岩.氯盐类融雪剂对公路交通基础设施及环境影响的综合评价方法[J].公路,2016,61(6):260-262.
CHEN Xiaodong, ZHANG Yu, SHAN Liyan. Comprehensive evaluation method of chloride salt snowmelting agent on highway transportation infrastructure and environment [J]. Highway, 2016, 61(6): 260-262. (in Chinese)
- [6] 杨全兵,朱蓓蓉.混凝土盐结晶破坏的研究[J].建筑材料学报,2007,10(4):392-396.
YANG Quanbing, ZHU Beirong. Study on crystal salt destruction of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(4): 392-396. (in Chinese)
- [7] 张营.城市土壤—植物系统中融雪剂的污染行为及其生态学效应[D].长沙:湖南农业大学,2013.
ZHANG Ying. Pollution behavior of snowmelting agent in urban soil-plant system and its ecological effect [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [8] 朱汉祥.新型有机融雪剂对绿化带植物生长的影响[D].长春:吉林农业大学,2016.

- ZHU Hanxiang. Effect of new organic snow melting agent on plant growth in green belt[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [9] 陈杰. 盐化物融雪沥青路面耐久性及其融雪持久性研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- CHEN Jie. Study on the durability of snow-melted asphalt pavement and its snow melting durability[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [10] 陈元素. 受腐蚀混凝土力学性能试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- CHEN Yuansu. Experimental study on mechanical properties of corroded concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [11] 张伟勤, 刘连新, 代大虎. 混凝土在卤水、淡水中的干湿循环腐蚀试验研究[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2006, 24(4): 25-29.
- ZHANG Weiqin, LIU Lianxin, DAI Dahu. Experimental study on wet and dry cyclic corrosion of concrete in brine and fresh water[J]. Journal of Qinghai University (Natural Science), 2006, 24(4): 25-29. (in Chinese)
- [12] ÖZGAN E, SERIN S. Investigation of certain engineering characteristics of asphalt concrete exposed to freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 85: 131-136.
- [13] STARCK P, LOFGREN B. Influence of de-icing agents on the viscoelastic properties of asphalt mastics[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(2): 676-685.
- [14] YOUNG J F, MINDESS S, GRAYR J, et al. The science and technology of civil engineering materials[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2005: 161-164.
- [15] CODY R D, CODY A M, SPRY P G, et al. Experimental deterioration of highway concrete by chloride deicing salts[J]. Environmental and Engineering Geoscience, 1996, II (4): 575-588.
- [16] 张银宣. 泡沫沥青胶浆的流变特性、微观结构及热特性研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
- ZHANG Yinxuan. Rheological properties, microstructure and thermal properties of foamed asphalt mortar[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018. (in Chinese)
- [17] 童申家, 谢祥兵, 赵大勇, 等. 紫外光老化后沥青混合料路用性能非线性预测[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 105-110.
- TONG Shenjia, XIE Xiangbing, ZHAO Dayong, et al. Nonlinear prediction of road performance of asphalt mixture after ultraviolet aging[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1): 105-110. (in Chinese)