

文章编号:1007-9629(2025)03-0283-08

盐冻融条件下环氧沥青混凝土多尺度 疲劳开裂特性

闫景晨*, 马苗苗, 张威, 高宏彬

(内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:为获得积雪冰冻地区环氧沥青混凝土(EAC)疲劳开裂特性,以EAC及对照组——SBS改性沥青混凝土(SBSMAC)为试验对象,采用小梁三点弯曲重复加载试验、数字图像相关技术(DIC)及扫描电镜(SEM),从宏观、细观、微观3个尺度,对冻融循环和盐冻融循环条件下,EAC和SBSMAC试件疲劳加载全寿命周期内裂纹的萌生、扩展和加速破坏进行分析.结果表明:基于EAC和SBSMAC损伤因子拟合函数的导数曲线,得到疲劳损伤的关键分界点,据此划分沥青混凝土的疲劳损伤阶段,是一种正确可行的新方法;EAC的宏观裂纹起裂点及微裂纹扩展点出现时间均晚于SBSMAC,EAC具有更好的抵抗材料损伤的能力;在积雪冰冻地区使用乙酸钾(CH_3COOK)替代常用的氯盐类融雪剂,可减轻路面疲劳损伤程度;EAC断裂面处的微观形貌优于SBSMAC.

关键词:环氧沥青混凝土;冻融循环;盐冻融循环;三点弯曲重复加载试验;数字图像相关技术

中图分类号:TU528.42

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.03.012

Multi-scale Fatigue Cracking Characteristics of Epoxy Asphalt Concrete under Salt Freeze-Thaw Conditions

YAN Jingchen*, MA Miaomiao, ZHANG Wei, GAO Hongbin

(School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: To investigate the fatigue cracking characteristics of epoxy asphalt concrete (EAC) in snowy and frozen regions, EAC and a control group, SBS modified asphalt concrete (SBSMAC), were subjected to testing. Using the small beam three-point bending repeated loading test, digital image correlation (DIC), and scanning electron microscopy (SEM), the initiation, propagation, and accelerated failure of cracks in EAC and SBSMAC specimens were analyzed during their entire fatigue life cycles under freeze-thaw cycles and salt-freeze-thaw cycles from macro, meso, and micro scales. The results indicate that determining the fatigue damage stages of asphalt concrete based on the cut-off points obtained from the derivative curves of the fitting functions for the damage factors of EAC and SBSMAC is a correct and feasible new method. Both the macroscopic crack initiation point and the microcrack propagation point of EAC are superior to those of SBSMAC, suggesting that EAC has better resistance to material damage compared to SBSMAC. The use of potassium acetate (CH_3COOK) as an alternative to commonly used chloride-based deicing agents in snowy and frozen regions can reduce the degree of pavement fatigue damage. Additionally, the microscopic morphology at the fracture surface of EAC is better than that of SBSMAC.

Key words: epoxy asphalt concrete (EAC); freeze-thaw cycle; salt freeze-thaw cycle; three-point bending repeated load test; digital image correlation

收稿日期:2024-03-22; 修订日期:2024-05-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52168063)

第一作者(通讯作者):闫景晨(1974—),男,内蒙古包头人,内蒙古工业大学副教授,硕士生导师,硕士.E-mail:yjc@imut.edu.cn

近年来,随着国产化研究的推进,环氧沥青混凝土(EAC)的成本实现了大幅下降,这一变化不仅巩固了其在传统桥面铺装领域的地位,还推动了其应用范围向非桥面路段的路面结构层拓展^[1-3].众多学者通过试验研究验证了环氧沥青材料的优异性能,如Apostolidis等^[4-5]通过四点弯曲试验,证明了EAC具有良好的抗疲劳性能;Zhang等^[6]通过三点弯曲试验,分析了EAC在冻融循环条件下的弯曲劲度模量和断裂能变化;闫景晨等^[7]通过小梁三点弯曲试验对4种EAC在盐冻融荷载作用下的疲劳开裂阶段进行了相关研究;此外,如Jamshidi等^[8-10]针对EAC进行的宏观试验及张婧丽^[11]在微观层面上对EAC常规路用性能的研究,均显示出环氧沥青材料的优越性能.

当前,关于EAC在积雪冰冻区域的全寿命周期疲劳开裂特性的研究,在国内外学术界尚显匮乏.不仅如此,对于EAC裂纹特性的阶段性划分,其研究深度亦有待加强.鉴于此,本研究选定积雪冰冻环境作为材料服役背景,实施了结合数字图像相关技术(DIC)观测的小梁三点弯曲重复加载疲劳试验.同时在试验前后,对试件进行扫描电子显微镜(SEM)分析.本研究采用理论分析与试验验证相结合的方法,从宏观、细观及微观3个尺度,对EAC在冻融循环及盐冻融循环条件下的疲劳开裂特性进行系统对比分

析.通过求导方法,获取了EAC裂纹萌生、扩展直至加速破坏的全过程数据,并求解了相应的分界点.另外,本研究还探讨了盐冻融循环次数、盐的种类及盐的质量分数对EAC开裂特性的影响,为EAC这类长寿命路面材料在积雪冰冻地区的实际应用提供了科学数据与理论支撑.

1 原材料及试件制备

1.1 原材料

沥青为环氧沥青及对照组——SBS改性沥青(SBS含量(质量分数,文中涉及的含量或油石比等均为质量分数或质量比)为4.5%),两者的基本性能指标见表1;集料为玄武岩碎石;矿粉为石灰岩矿粉,矿粉掺量为6%.通过筛分试验和马歇尔稳定度等试验进行AC-13沥青混凝土级配设计和最佳油石比确定.环氧沥青混凝土(EAC)和SBS改性沥青混凝土(SBSMAC)的最佳油石比分别为6.5%和5.6%.AC-13沥青混凝土集料级配见表2.

依据JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,将成型试件切割成尺寸为30 mm×35 mm×250 mm的小梁试件.将其置于具有一定刚度的平面上,以防变形.存放温度不高于35℃,存放时间不超过30 d.

表1 2种沥青的基本性能指标

Table 1 Basic performance indexes of two kinds of asphalts

Epoxy asphalt				SBS modified asphalt			
Technical indicator	Test value	Standardized	Appraisal	Technical indicator	Test value	Standardized	Appraisal
Thermosetting	No melting	No melting at 150℃	Pass	Penetration(25℃)/(0.1 mm)	78.5	60-80	Pass
Water absorption	0	≤0.3	Pass	Softening point/℃	72.4	≥75	Pass
Saturated brine resistance	0.1	≤1	Pass	Ductility/cm	40(5℃)	≥30	Pass

表2 AC-13沥青混凝土集料级配

Table 2 Aggregate gradation of AC-13 asphalt concrete

Sieve size/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Passing rate(by mass)/%	100.0	92.0	81.8	47.6	33.4	28.3	21.7	15.5	11.7	7.2

1.2 试验条件

选用水溶液(water)及中国最常用的3种融雪剂——氯化钠(NaCl)、乙酸钾(CH₃COOK)和无水氯化钙(CaCl₂)进行冻融循环和盐冻融循环试验.3种融雪剂的基本指标见表3.

冻融条件下,试件采用常温浸水96 h的饱水处理方式来代替真空条件下的饱水处理方式^[12],以-25℃下冰冻16 h+60℃下快速解冻8 h为1个循环,冻融循环次数设置为5、10、15、20次;盐冻融条件下,试件处理依据DB 65/T 4330—2021《公路融雪剂使用技术规范》进行,融雪剂质量分数选择4%、8%

和12%.

以“溶液种类-融雪剂质量分数-冻融循环次数-沥青混凝土种类”对试件进行编号.如编号Water-0-5-EAC表示在融雪剂质量分数0%的水溶液中冻融循环5次的EAC试件.其他试件编号以此类推.冻融循环、盐冻融循环及其对照组施加环境汇总见表4.

1.3 试验方案

采用多功能材料试验系统,对冻融循环和盐冻融循环作用下的小梁试件进行三点弯曲重复加载试验,同时采用DIC进行同步实时观测;采用SEM对

表3 3种融雪剂的基本指标
Table 3 Basic indicators of three kinds of snow-melting agents

Type	Appearance	Purity specification	Relative molecular mass	pH value(25 ℃)	Freezing point/℃	Solubility (20 ℃)/%
NaCl	White crystal	Analytical pure	58.44	5.0-8.0	-21	23.0
CH ₃ COOK	White crystal	Analytical pure	110.99	8.0-10.0	-11	30.1
CaCl ₂	White pellet	Analytical pure	98.14	7.0	≤-27	52.9

表4 冻融循环、盐冻融循环及其对照组施加环境汇总
Table 4 Summary of environmental conditions imposed by freeze-thaw cycles, salt freeze-thaw cycles and their control groups

Environment	Type of snow-melting agent	w(snow-melting agent)/%	Number of freeze-thaw cycle/times
Non freeze-thaw		0	0
Freeze-thaw	Water	0	5/10/15/20
	NaCl	4/8/12	
Salt freeze-thaw	CH ₃ COOK	4/8/12	5/10/15/20
	CaCl ₂	4/8/12	

加载后的EAC及SBSMAC试件疲劳开裂处进行微观形貌分析.详细试验方案如下.

(1)三点弯曲重复加载试验 选用UTM-100型多功能材料试验系统并采用跨径为200 mm的中心加载方式.应力比为0.3(EAC试件最大加载应力0.36 kN,SBSMAC试件最大加载应力0.24 kN),加载波形为无间隔的半正弦波,频率为10 Hz,环境箱温度为15 ℃.

(2)DIC同步实时观测 利用VIC-3D软件进行.具体步骤为试件刷涂散斑→标定板标定→CCD高速相机图像采集→VIC-3D软件图像分析与数据处理.

(3)SEM微观形貌分析 对各试件进行切割,得到尺寸为10 mm×10 mm×10 mm的试样,采用Quanta 650FEG型场发射扫描电子显微镜,观察其断裂面的微观形貌.

2 开裂分界点的宏观理论分析与细观试验验证

2.1 宏观理论分析

基于损伤力学理论,采用劲度模量(E)分析沥青混凝土小梁试件的疲劳寿命^[13-16].以第 N 次累积劲度模量衰减量相对变化率($\delta_{E,N}$)与疲劳破坏时累积劲度模量衰减量相对变化率($\delta_{E,f}$)的比值来表征第 N 次重复荷载作用后的损伤因子(D_1),其表达式为:

$$D_1 = \frac{\delta_{E,N}}{\delta_{E,f}} \quad (1)$$

基于劲度模量衰减量相对变化率计算结果,绘制未冻融条件下小梁试件的 E - N 和 D_1 - N 曲线,如图1所示.由图1可见:在重复荷载次数相同时,相比SBSMAC,EAC具有更小的损伤程度; D_1 - N 曲线宏

观上呈现3个阶段的变化趋势,但无法明确划分出小梁试件疲劳损伤的3个阶段及对应的分界点.

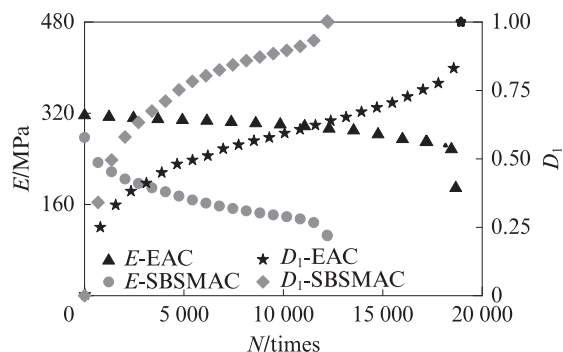


图1 2种沥青混凝土小梁试件的 E - N 和 D_1 - N 曲线
Fig.1 E - N and D_1 - N curves of two kinds of asphalt concrete beam specimens

为此,本文对未冻融条件下沥青混凝土小梁试件的 D_1 - N 曲线拟合函数进行求导处理,发现 D_1 - N 曲线的二阶导数具有明显分界点,由此可得到小梁试件的疲劳损伤阶段.基于2种沥青混合料小梁试件 D_1 - N 曲线多项式拟合函数的一阶、二阶导数曲线如图2所示.

由图2可见:(1)小梁试件 D_1 - N 曲线拟合函数二阶导数曲线上的关键分界点(点A和点C)对应二阶导数曲线的2个拐点.(2)通过点A和点C将沥青混凝土的损伤精确划分为3个阶段——第1阶段为由起始点至点A阶段,该阶段小梁试件损伤因子的二阶导数由负值快速向正值转变,表明EAC和SBSMAC的疲劳裂纹开始萌生;第2阶段为由点A至点C阶段,该阶段小梁试件损伤因子的二阶导数在0附近平缓波动,表明EAC和SBSMAC进入疲劳裂纹扩展阶段;第3阶段为点C至损伤破坏阶段,该阶段小梁试件损伤因子的二阶导数由0附近快速增大,

表明EAC和SBSMAC在疲劳荷载作用下进入加速破坏阶段. 以上表明, 利用沥青混凝土小梁试件损伤因子二阶导数曲线上的2个拐点(点A和点C), 能够准确划分沥青混凝土的疲劳损伤阶段.

为进一步明确沥青混凝土疲劳裂纹扩展阶段的变化趋势, 对小梁试件损伤因子进行一阶求导处理. 图2中AC阶段所对应的一阶导数曲线显示该阶段存在波动点, 波动点的峰值点B能够反映裂纹扩展阶段中微裂纹的大量出现, 因此点B为微裂纹扩展点.

2.2 细观试验验证

为进一步验证与分析沥青混凝土小梁试件疲劳损伤的分界点(点A、B、C), 采用DIC观测未冻融条件下小梁试件3个分界点处的水平应变特征云图, 如图3所示. 在图像数据提取过程中, 分界点A、B、C呈现独特的特征, 这些特征在其他点的应变云图中未

曾出现.

由图3可见: (1) 2种沥青混凝土小梁试件点A处均表现为受拉区域向试件中下部集中, 水平应变开始稳定增大, 损伤进入发展阶段并出现了肉眼不可见的微裂纹, 验证了点A为微裂纹的萌生点, 此时EAC和SBSMAC的循环加载次数 N_A 分别为2 729、2 230次; (2) 2种沥青混凝土小梁试件自点B处开始, 水平应变集中程度逐渐增大, 试件中下部产生大量微裂缝, 验证了点B为微裂纹的扩展点, 此时EAC和SBSMAC的循环加载次数 N_B 分别为9 627、7 538次; (3) 2种沥青混凝土小梁试件在点C处表现为水平应变受拉区域继续集中, 试件的中下部有可见宏观裂纹产生, 试件过点C后加速破坏, 验证了点C为宏观裂纹的起裂点, 此时EAC和SBSMAC的循环加载次数 N_C 分别为16 942、11 018次.

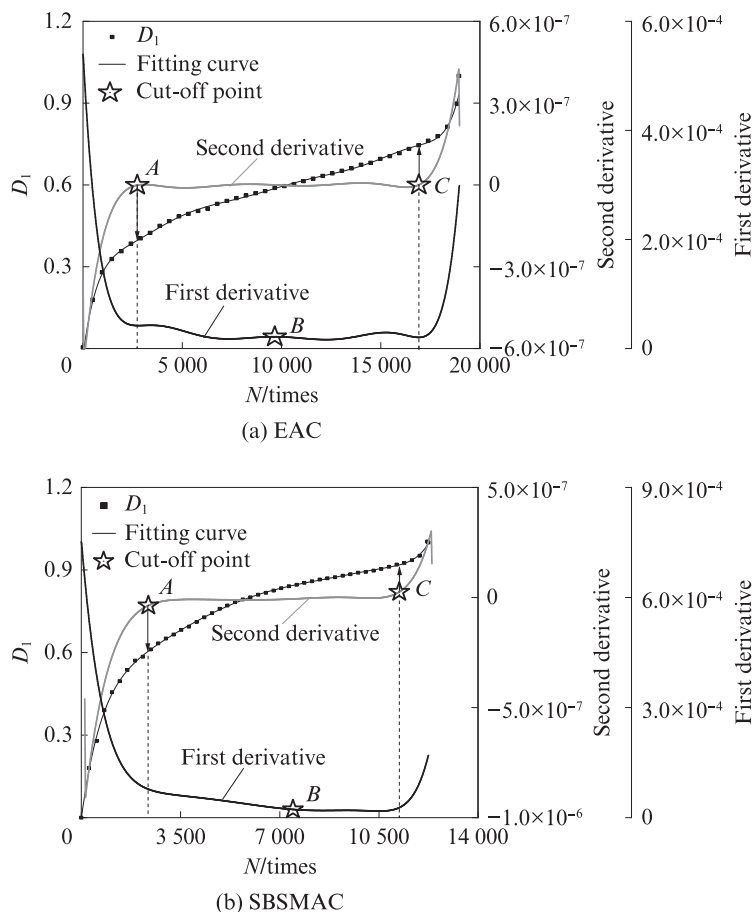


图2 基于2种沥青混凝土小梁试件 D_1 - N 曲线拟合函数的一阶、二阶导数曲线

Fig. 2 First and second derivative curves of polynomial fitting function based on D_1 - N curves of two kinds of asphalt concrete beam specimens

以上分析表明, 基于沥青混凝土小梁试件宏观试验损伤因子拟合函数导数曲线所得分界点, 来确定其疲劳损伤阶段的方法, 与DIC特征云图具有良

好的对应性. 说明该方法是一种正确可行的新方法, 为在条件受限情况下精确划分沥青混凝土损伤阶段提供了理论基础.

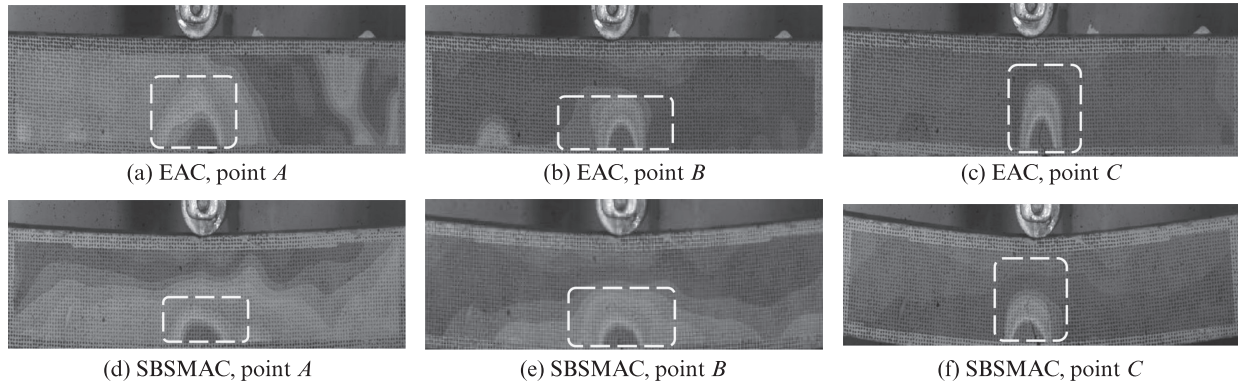


图3 未冻融条件下2种沥青混凝土小梁试件分界点处的水平应变特征云图

Fig. 3 Horizontal strain characteristic cloud diagrams of two kinds of asphalt concrete beam specimens' demarcation points under non freeze-thaw conditions

3 结果与分析

3.1 宏观尺度下疲劳开裂特性分析

冻融循环和盐冻融循环作用下,2种沥青混凝土小梁试件分界点处的循环加载次数如图4所示。

由图4可见:

(1)EAC和SBSMAC的 N_A 、 N_B 、 N_C 与疲劳寿命(N_f)的比值 $N_A/N_f=(17\pm1)\%$ 、 $N_B/N_f=(51\pm2)\%$ 、 $N_C/N_f=(81\pm3)\%$,说明2种材料在不同阶段的疲劳寿命占比基本一致,两者疲劳演化规律具有一定相似性;在不同循环条件下,EAC的 N_A 、 N_B 、 N_C 较同条件下SBSMAC约有100%的增长,表明EAC比SBSMAC拥有更好的抵抗材料损伤的能力。

(2)EAC和SBSMAC的 N_A 、 N_B 、 N_C 随着冻融循环作用次数的增加而减少,依次呈现加速衰减、减速衰减和匀速衰减;两者的抗疲劳性能显著衰减阶段均发生于冻融循环10~15次之间,当冻融循环作用次数超过15次后衰减速率趋于稳定。

(3)3种融雪剂中 CH_3COOK 对EAC和SBSMAC性能的影响最小。因此,在积雪冰冻地区建议使用 CH_3COOK 替代传统氯盐类融雪剂(NaCl 和 CaCl_2),以减轻对路面疲劳损伤的影响。

(4)当冻融循环次数低于15次、融雪剂为 CaCl_2 或 NaCl 时,EAC和SBSMAC的 N_A 、 N_B 、 N_C 在融雪剂质量分数小于等于8%时快速下降,8%~12%时小幅上升。表明融雪剂 CaCl_2 或 NaCl 质量分数为8%时,对EAC和SBSMAC性能的影响显著。

为精确评价EAC和SBSMAC抵抗疲劳开裂的能力,分析冻融循环作用下2种沥青混凝土小梁试件在不同开裂阶段的疲劳寿命占比,结果见图5。

由图5可见:(1) $N_A\sim N_B$ 区间,不同冻融循环次数下EAC抵抗疲劳作用次数的能力优于SBSMAC,

且冻融循环15次后,EAC的疲劳寿命占比衰减速率比SBSMAC慢,说明EAC具有更优异的耐久性。(2) $N_B\sim N_C$ 区间,EAC相较SBSMAC疲劳寿命衰减速率的变化幅值小,表明其疲劳性能衰减较慢,但EAC在不同冻融循环次数下的疲劳寿命区间占比均小于SBSMAC,说明EAC微裂纹扩展速率大于SBSMAC,因此其加载次数达到 N_B 之后具有明显加速开裂形成宏观裂纹的特点。(3) $N_C\sim N_f$ 区间,不同冻融循环次数下EAC的疲劳寿命占比均大于SBSMAC,说明其宏观裂纹产生后材料抵抗破坏的能力明显优于SBSMAC。

(4)冻融循环次数在10~15次时,EAC的疲劳寿命下降幅度大于SBSMAC,此时应注意EAC的养护干预;当冻融循环次数超过15次后,EAC的疲劳寿命衰减速率趋于稳定,表现出更好的抗冻融能力。

3.2 微观尺度下疲劳开裂特征分析

为分析融雪剂质量分数对EAC和SBSMAC疲劳开裂性能的影响,选择在最不利条件(冻融循环次数为20次且融雪剂为 NaCl)下,SEM观测沥青和集料的表观形貌及沥青混凝土断裂面的微观形貌,SEM照片见图6。

由图6(a)、(b)可见:(1)环氧沥青微观表面存在致密细纹,SBS改性沥青微观表面较光滑;2种沥青中均未观测到明显的颗粒物质,质地较均匀,呈现亚均相结构。(2)未冻融时,EAC断裂面较SBSMAC断裂面紧密,且集料裸露现象更少。说明EAC断裂多发生在沥青胶浆或薄弱集料处,沥青胶浆与集料的黏附性较SBSMAC高,EAC具有比SBSMAC更优异的抗疲劳性能。

由图6(c)可见:(1)未冻融时,沥青混凝土断裂面集料表面齐整没有裂纹;冻融循环20次时,沥青混

凝土断裂面集料表面坑洼且有多处较明显的裂纹;盐冻融循环20次时,沥青混凝土断裂面表面有盐结晶产生。(2)在融雪剂NaCl质量分数为8%时,沥青混凝土断裂面集料破碎情况最严重,这与宏观试验结论——氯盐类融雪剂质量分数为8%时沥青混凝土疲劳损伤性能最差具有一定关联性。(3)随着融雪剂质量分数的增加,沥青混凝土断裂面集料表面开裂情况比经历冻融循环的沥青混凝土有所缓解;

当融雪剂质量分数增至12%时,沥青混凝土断裂面集料表面上的裂缝已基本消失。

由图6(d)、(e)可见:随着融雪剂质量分数的增加,沥青混凝土断裂面出现的开裂或空洞得到缓解;当融雪剂质量分数达到12%时,沥青混凝土断裂面除了表面产生的盐结晶外,表现形貌与未冻融的沥青混凝土基本一致;EAC断裂面的开裂、空洞及表面光滑度均优于同条件下的SBSMAC。

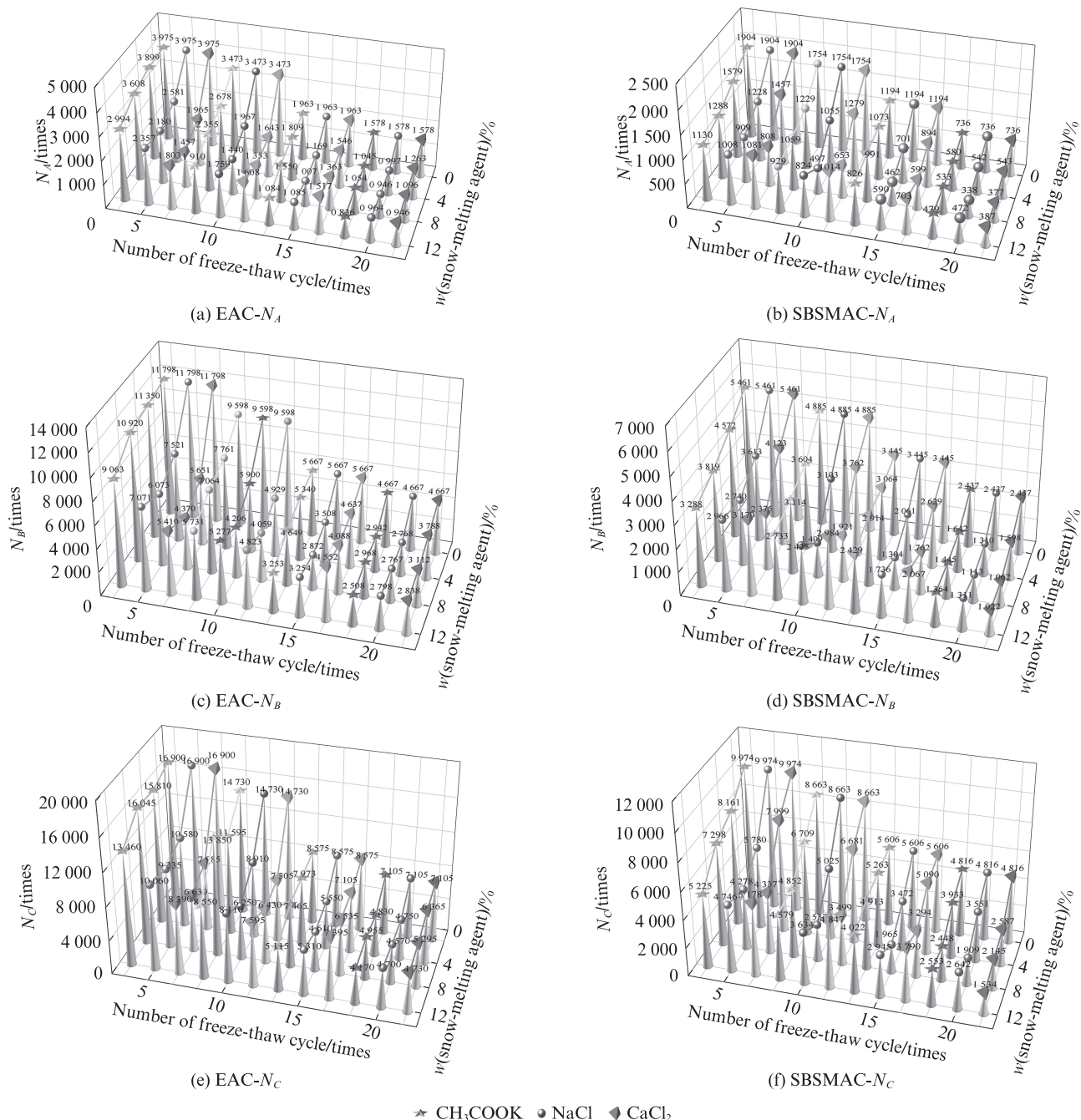


图4 冻融循环和盐冻融循环作用下2种沥青混凝土小梁试件分界点的循环加载次数

Fig. 4 Number of cyclic loading times at the demarcation points of two asphalt concrete beam specimens under the conditions of freeze-thaw cycles and salt freeze-thaw cycles

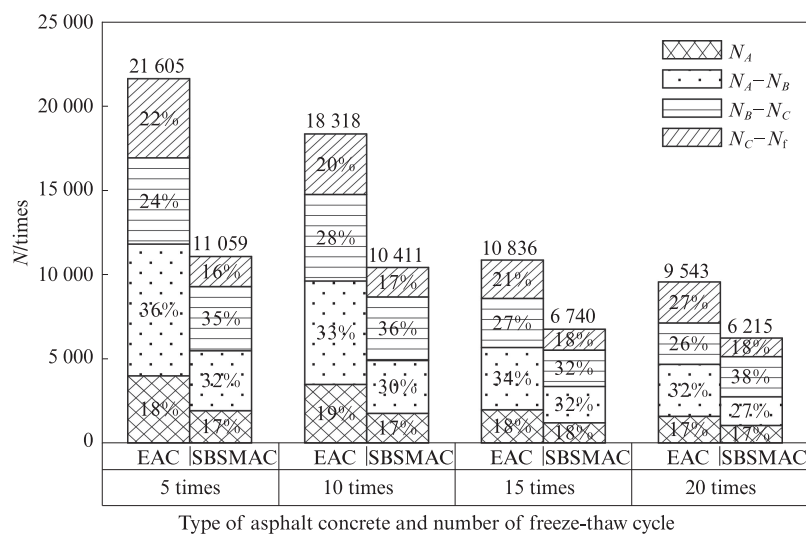


图5 冻融循环作用下2种沥青混凝土小梁试件在不同开裂阶段的疲劳寿命占比

Fig. 5 Proportion of fatigue life span of two kinds of asphalt concrete beam specimens at different cracking stages under freeze-thaw cycle conditions

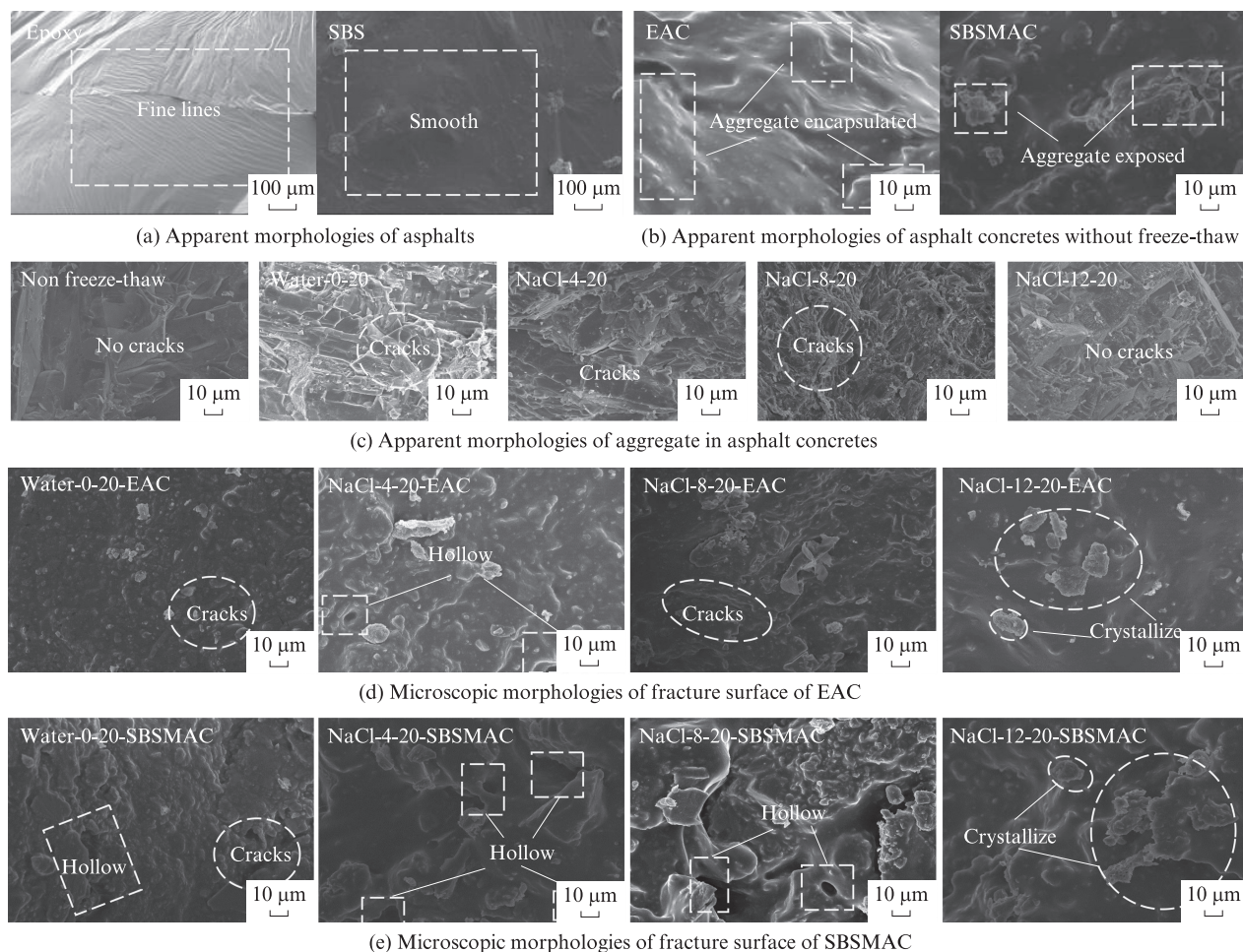


图6 沥青和集料的表观形貌及沥青混凝土断裂面的微观形貌

Fig. 6 Apparent morphology of asphalt and aggregate, as well as the microscopic morphology of fracture surface of asphalt concrete

4 结论

(1)在相同路用环境下,相比SBS改性沥青混凝土

土(SBSMAC),环氧沥青混凝土(EAC)具有更强的抵抗疲劳开裂的能力。

(2)在宏观层面上,由EAC和SBSMAC小梁试

件损伤因子一阶、二阶导数得到3个损伤分界点(A、B、C),由此划分的疲劳损伤阶段与在细观层面上的DIC特征云图具有良好的对应性.因此,DIC特征云图为在条件受限情况下精确评价沥青混凝土损伤特性提供了理论基础.

(3)EAC小梁试件的宏观裂纹起裂点及微裂纹扩展点所反应出的抗疲劳性能均优于SBSMAC小梁试件,表明前者比后者拥有更好的抵抗材料损伤的能力.

(4)在积雪冰冻地区传统氯盐类融雪剂(NaCl 和 CaCl_2)对道路影响最显著,而乙酸钾(CH_3COOK)影响最小,因此在沥青路面的融冰除雪作业中可以考虑使用 CH_3COOK 替代氯盐类融雪剂,以减轻路面的疲劳损伤.

(5)EAC断裂面处的微观形貌优于SBSMAC.当在融雪剂 CaCl_2 或 NaCl 质量分数为8%时,试件断裂面集料破碎程度最为严重,与其宏细观疲劳损伤特性规律一致.

参考文献:

- [1] JIANG W, YUAN D D, XING C W, et al. Experimental study of epoxy asphalt binder and porous epoxy asphalt concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 420:138373.
- [2] VYROZHEMSKIY I V, KOPYNETS I, KISCHYNSKIY S, et al. Epoxy asphalt concrete is a perspective material for the construction of roads[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 236(1):012022.
- [3] 黄红明,曾国东,徐伟,等.环氧沥青固化反应机理及施工控制性能研究[J].建筑材料学报,2020,23(4):941-947.
HUANG Hongming, ZENG Guodong, XU Wei, et al. Study of curing reaction mechanism and construction control performance of epoxy asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4): 941-947. (in Chinese)
- [4] APOSTOLIDIS P, LIU X Y, ERKENS S, et al. Use of epoxy asphalt as surfacing and tack coat material for roadway pavements[J]. Construction and Building Materials, 2020, 250:118936.
- [5] 李浩,王选仓,曾国东,等.再生沥青混合料拉压疲劳特性及黏弹表征[J].建筑材料学报,2024,27(8):711-719.
LI Hao, WANG Xuancang, ZENG Guodong, et al. Tensile and compressive fatigue characteristics and viscoelastic characterization of reclaimed asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(8):711-719. (in Chinese)
- [6] ZHANG M, QIAN Z D. Effects of freeze-thaw cycles on fracture behavior of epoxy asphalt concrete[J]. Journal of Southeast University(English Edition), 2017, 33(1):96-100.
- [7] 闫景晨,李瀚翔.盐冻融和重复荷载作用下沥青混凝土开裂的细观分析[J].建筑材料学报,2021,24(4):774-780.
YAN Jingchen, LI Hanxiang. Mesoscopic analysis on cracking of asphalt concrete under repeated load and salt freeze-thaw action[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):774-780. (in Chinese)
- [8] JAMSHIDI A, WHITE G, KURUMISAWA K. Rheological characteristics of epoxy asphalt binders and engineering properties of epoxy asphalt mixtures-state-of-the-art[J]. Road Materials and Pavement Design, 2022, 23(9):1957-1980.
- [9] 崔亚楠,张强,张翔.沥青混合料复合小梁宏观与细观疲劳特性分析[J].建筑材料学报,2023,26(1):85-90.
CUI Yanan, ZHANG Qiang, ZHANG Xiang. Analysis of macroscopic and mesoscopic fatigue characteristics of asphalt mixture composite small beam[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(1):85-90. (in Chinese)
- [10] 闫景晨,陈秀楠,马炎沛.基于多种路用环境下对布敦岩沥青混凝土低温开裂特性的分析[J].材料科学与工程学报,2023,41(3):514-521.
YAN Jingchen, CHEN Xiunan, MA Yanpei. Analysis on low temperature cracking characteristics of Buton rock asphalt concrete under various road conditions[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2023, 41(3):514-521. (in Chinese)
- [11] 张婧丽.玄武岩短切纤维对环氧沥青及其混合料性能的影响[J].硅酸盐通报,2020,39(9):3032-3039.
ZHANG Jingli. Effect of basalt chopped fiber on performance of epoxy asphalt and its mixture[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(9):3032-3039. (in Chinese)
- [12] 康诚.水-温-盐冻融条件下不同级配沥青混凝土疲劳性能试验研究[D].淮南:安徽理工大学,2014.
KANG Cheng. Study on fatigue performance experiment of different gradations asphalt concrete under water-temperature-salt freeze-thaw condition[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [13] 房辰泽,郭乃胜,孙雅珍,等.基于劲度模量分析的橡胶沥青混合料疲劳寿命研究[J].工程力学,2020,37(4):196-204.
FANG Chenze, GUO Naisheng, SUN Yazhen, et al. Research on fatigue life of rubber asphalt mixture based on stiffness modulus[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(4):196-204. (in Chinese)
- [14] GUO Z X, WANG L, FENG L, et al. Research on fatigue performance of composite crumb rubber modified asphalt mixture under freeze thaw cycles[J]. Construction and Building Materials, 2022, 323:126603.
- [15] 王永宁,李晓民,杨涛,等.活化胶粉复合改性沥青混合料的路用性能评价[J].建筑材料学报,2024,27(2):114-120.
WANG Yongning, LI Xiaomin, YANG Tao, et al. Evaluation of road performance of activated rubber powder composite modified asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(2):114-120. (in Chinese)
- [16] 房辰泽,郭乃胜,尤占平,等.基于能量耗散历史的沥青混合料疲劳损伤特性研究[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(6):1018-1024.
FANG Chenze, GUO Naisheng, YOU Zhanping et al. Fatigue damage characteristics for asphalt mixture based on energy dissipation history[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(6):1018-1024. (in Chinese)