

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.014

盐蚀与动水环境下沥青混合料的直接拉伸试验研究

姚云龙¹, 胡建¹, 展冰洋², 李浩², 刘鑫¹, 洪宝宁¹

(1. 河海大学精细爆破全国重点实验室; 2. 佛山市交通科技有限公司)

摘要: 为探究典型改性沥青混合料在盐蚀与动水环境下的抗裂性能,通过直接拉伸试验与数字图像相关法试验研究了 AH-70 沥青、SBS 沥青和橡胶沥青混合料的拉伸强度变化规律及主应变演化。结果表明:各类沥青混合料均表现出柔性破坏特征,裂纹多由胶结界面萌生并沿应变集中区扩展;动水循环作用显著诱发 AH-70 沥青混合料界面剥离与水损破坏,静水盐干湿循环则加剧孔隙扩展;AH-70 沥青混合料在 20% 盐溶液中干湿循环 20 d 后强度与应变能密度分别下降 41.6% 与 57.8%,动水循环后则下降 56.1% 与 69.4%,而 SBS 沥青与橡胶沥青混合料展现出更优的结构稳定性和耐久性;高浓度盐环境与干湿循环作用协同削弱沥青混合料韧性,而橡胶沥青凭借其优异黏弹性保持较高的残余强度与能量吸收能力,表现出显著的抗裂与抗剥离优势。

关键词: 沥青混合料;改性沥青;动水循环;干湿循环;直接拉伸试验;数字图像相关法

中图分类号: U414.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2026)05-0121-08

Experimental study on direct tensile properties of asphalt mixtures under salt erosion and dynamic water conditions

Yao Yunlong¹, Hu Jian¹, Zhan Bingyang², Li Hao², Liu Xin¹, Hong Baoning¹

(1. State Key Laboratory of Precision Blasting, Hohai University; 2. Foshan Transportation Science and Technology Co., Ltd.)

Abstract: To investigate the crack resistance of typical asphalt mixtures under salt erosion and dynamic water conditions, direct tensile tests combined with the digital image correlation (DIC) method were conducted to examine the tensile strength evolution and principal strain field development of AH-70, SBS-modified, and rubber-modified asphalt mixtures. The results show that all the mixtures exhibited ductile failure characteristics, with cracks mostly initiating at the binder-aggregate interface and propagating along the strain concentration zones. Dynamic water cycling markedly induced interfacial stripping and moisture damage in the AH-70 asphalt mixture, whereas static saline dry-wet cycling further exacerbated pore expansion. After 20 d of dry-wet cycling in a 20% salt solution, the tensile strength and strain energy density of the AH-70 asphalt mixture decreased by 41.6% and 57.8%, respectively, and these values decreased by 56.1% and 69.4% after dynamic water cycling. In contrast, the SBS- and rubber-modified asphalt mixtures showed superior structural stability and durability. High salinity and dry-wet cycling jointly weakened the toughness of the asphalt mixtures. However, owing to its excellent viscoelasticity, rubber-modified asphalt retained a higher residual strength and energy absorption capacity, exhibiting notable advantages in crack and stripping resistance.

Key words: asphalt mixture; modified asphalt; dynamic water cycling; dry-wet cycling; direct tensile test; digital image correlation

随着沿海地区公路建设的不断推进,道路工程面临的环境负荷日益严峻,尤其是在高盐度环境下,路面材料的耐久性问题愈加突出^[1-3]。盐蚀环境溶液中的氯离子、硫酸根离子可通过毛细作用渗入沥青混合料内部,诱发一系列物理-化学变化,导致其结构性能劣化,进而影响路面的整体服役性能^[4-5]。为提升沥青混合料在盐蚀环境中的抗损能力,橡胶颗粒和 SBS(苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物)被广泛用于沥青改性,其中橡胶粉可提高材料能量耗散能力,延缓裂缝扩展^[6],而 SBS 改性则有助于增强材料弹性和结构稳定性^[7]。

在干湿循环、温度变化等因素共同作用下,盐蚀对沥青混合料结构完整性和界面黏结性能的破坏更为显著^[8-9]。闫人伟等^[10]通过拉拔试验与微观结构分析,揭示了盐-冻融循环条件下“盐老化”与内膨胀压力共同作用导致沥青混合料水稳定性下降的机理,并指出氯盐破坏作用更为显著;李闯等^[11]基于动水冲刷试验系

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278400,51609071);河海大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(B200202087,B200204032)

作者简介: 姚云龙(1998—),男,博士研究生,主要从事路基加固与路面病害处治研究。E-mail:yaoyunlong6@hhu.edu.cn

通信作者: 刘鑫(1984—),男,副教授,博士,主要从事微细结构试验及岩土体多尺度研究。E-mail:liuxin100@hhu.edu.cn

统,量化了温度、水流与盐分耦合对沥青混合料劈裂强度的损伤作用,指出冲刷荷载是损伤加剧的关键因素;赵丽华等^[12]采用盐雾试验模拟滨海环境,发现高温下盐雾侵蚀显著削弱了沥青混合料的水稳定性与低温抗裂性;冯蕾等^[13]结合数字图像相关法(digital image correlation, DIC)与三点弯曲试验,从应变演化和蠕变能角度分析了温拌与热拌胶粉改性沥青混合料在冻融-盐浓度作用下的开裂特性。此外,王义忠^[14]通过 CT 技术得出盐蚀与干湿循环会促使沥青混合料平均孔径扩大、空隙体积增大,进一步验证了盐蚀对结构稳定性的破坏机制。现有研究已从宏观力学性能、微细观结构等多尺度对改性沥青和沥青混合料进行了较为系统的分析,盐蚀作用对沥青路面的损害作用不容忽视,但针对盐蚀和动水循环作用对沥青混合料直接拉伸性能影响的研究较少。

在评价沥青混合料抗拉性能测试方法中,与间接拉伸试验(劈裂试验)和弯拉试验相比,直接拉伸试验能较为真实地施加轴向拉应力,模拟路面沿行车方向产生的纵向拉应力作用,且应力分布相对均匀,在物理意义上更接近服役条件下路面的抗裂能力^[15-16]。然而,直接拉伸试验在试件黏接、装夹和加载等方面存在一定的技术难度。因此,本文通过盐蚀条件下不同沥青混合料的直接拉伸试验并辅以 DIC 来揭示不同沥青混合料的直接拉伸强度退化规律与破坏特征,以期为沿海及盐渍地区路用材料的选择与优化设计提供参考。

1 原材料与试件制备方法

1.1 原材料

试验采用的沥青分别为 AH-70 重交通道路石油沥青(以下简称“AH-70 沥青”)、SBS 改性沥青(以下简称“SBS 沥青”)和橡胶改性沥青(以下简称“橡胶沥青”),沥青基本性能依据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》测定,且各项基本技术指标以 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》等相关试验规程和技术要求作为判别标准。所选的沥青性能指标如表 1 所示,试验结果均符合判别标准。

试验使用的集料分为 5~10 mm(辉绿岩)、3~5 mm(辉绿岩)和 0~3 mm(石灰岩)3 档,矿粉为清洁、无杂质的石灰岩矿粉。依据 JTG 3432—2024《公路工程集料试验规程》对集料和矿粉进行筛分,结果见表 2。

表 1 沥青基本性能指标与试验结果

Table 1 Basic performance indicators and test results of asphalt

沥青	针入度/mm	软化点/℃	延度/cm
AH-70 沥青	6.7	47.3	27.5
SBS 沥青	5.3	77.0	20.2
橡胶沥青	5.0	78.0	21.5

表 2 集料与矿粉筛分试验结果

Table 2 Sieve analysis results of aggregates and mineral filler

材料	通过不同筛孔尺寸方孔筛的质量占比/%								
	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
5~10 mm 辉绿岩	100	97.16	2.87	1.72	1.68	1.64	1.61	1.55	1.48
3~5 mm 辉绿岩	100	100	44.53	0.67	0.56	0.54	0.52	0.51	0.49
石灰岩	100	100	100	89.20	57.70	36.50	20.20	11.40	6.10
矿粉	100	100	100	100	100	99.50	97.80	89.80	83.00

根据沙庆林^[17]的计算方法,选用变“K”法(临界筛孔 4.75 mm)确定最佳矿料级配。根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》对马歇尔试件进行相关性能指标检测,试验得出 AH-70 沥青和改性沥青混合料的最佳油石比分别为 5.1%和 5.5%。

1.2 试件制备方法

橡胶沥青加热温度控制在 180℃,集料、矿粉加热温度和混合料拌和温度均为 190℃。按配合比称量不同规格的粗集料、细集料和矿粉并放入电热鼓风干燥箱中,持续加热 5 h 左右;将加热到一定时间的集料倒入已加热好的自动混合料拌和机中进行初步混合,干拌 90 s;待集料混合均匀后,适时倒入预热好的沥青,拌和 90 s;拌和完成后,倒入矿粉,再拌和 90 s,从而完成沥青混合料的拌和。室内成型沥青混合料的试验方法选用旋转压实(superpave gyratory compactor, SGC)成型方法,在 SGC 试件成型冷却 12 h 后,先通过钻芯得到尺寸为 100 mm(直径)×185 mm(高度)的圆柱体芯样;然后采用沥青混合料切割锯在芯样两端分别切割 15 mm 左右,保证试件高度在 155 mm 左右,再使用双端面磨平机将试件打磨至(150±1.5) mm,确保试件上下两面的平整光滑,便于开展后续试验。

2 试验方法

2.1 试验方案

沿海地区常出现高浓度盐雾,尤其在夏季高温下,这些盐雾会随着大气或台风飘散,遇冷后凝结在高速公路沥青路面和浅层空隙中,随后在雨水冲刷下形成盐溶液侵蚀渗入沥青路面内部。潮汐作用同样也会对沿海高速公路路面构成侵蚀风险,形成的高氯盐溶液(海水中氯离子占溶解盐总质量的百分比可高达 55%)比普通水分更易渗入沥青及其与集料界面。此外,临海地区水产养殖作业或海鲜运输车辆洒落的盐水,因蒸发作用浓缩,也会导致沥青路面局部高盐溶液腐蚀^[18]。因此,室内试验主要以盐溶液形式来侵蚀沥青混合料内部结构。

2.1.1 静水盐干湿循环作用环境侵蚀试验

a. 盐溶液类型及浓度。结合已有研究可知,侵蚀沥青路面的海盐成分主要为氯盐(80%以上)和硫酸盐(10%左右),海岸线的盐水浓度(质量分数)一般在 3%~5%^[5]。因此,室内试验盐溶液以 NaCl 作为溶质,自来水作为溶剂,所用的 NaCl 分子量为 58.44,含量(质量分数)不小于 99.5%,符合 GB/T 1266—2006《化学试剂 氯化钠》要求。试验设置 5 种盐溶液浓度环境:0%(纯水)、5%、10%、15%、20%(按 NaCl 与自来水的质量配比来制备),并利用光学盐度计进行测试校准。高浓度盐溶液是为了加剧盐溶液对沥青混合料的侵蚀。

b. 盐溶液侵蚀时间。考虑到高低温耦合作用的影响,室内盐溶液侵蚀采用干湿循环模式,以模拟沿海地区夏季高温多雨、湿热同期的环境作用。在室温 15℃ 条件下将沥青混合料试件浸泡于目标浓度盐水中 12 h,随后置于烘箱中以 40℃ 干燥 12 h,构成一次干湿循环。为了研究盐蚀时间对沥青混合料的影响,循环次数分别设为 10 次和 20 次。

2.1.2 动水循环作用环境侵蚀试验

为了反映动水循环作用对不同沥青混合料的影响和模拟实际服役路面受交通荷载作用并在暴雨或地下水反复冲刷条件下的典型工况,采用水热敏感性试验(moisture induced stress test, MIST)对试件施加周期性动水压力。试验仪器为美国 InstronTek 公司生产的沥青混合料 MIST 测试仪,主要由活塞机、液压泵、密封舱、加压气囊和操作台组成,可控制循环水压力、循环时间和温度。水压驱动属于气动模式,通过气囊不断充放气形成正压和常压交替作用过程,从而实现对沥青混合料内部的动水冲刷并施加周期性变化的超孔隙水压力^[19]。

MIST 过程如下:将试件置于密封舱内,倒入 20~40℃ 纯水(或 5% 盐水)完全覆盖试件表面;在注水至距离上边缘 2~4 mm 后,盖上顶部密封舱盖并拧紧 6 个螺栓密封;为了使密封舱内的空气全部排出,在舱体上方且不位于盖子中心的溢水杯中注水,直至盖子中心的溢水杯中出水即可;试验设定温度为 60℃,施加循环压力 40 Psi(0.276 MPa),加载总次数为 3 500 次,运行时长约 6.4 h;循环结束后打开排水阀,排完内部水分后打开盖子并关闭排水阀;再向舱体内部注入自来水覆盖试件表面,降温 3~4 min 后,开启排水阀将水全部排出;取出试件并放入(25±1)℃ 恒温水浴 2~3 h 进行冷却。MIST 包括纯水和 5% NaCl 溶液两种介质(仅介质不同,其余参数一致),后文分别称为“动纯水循环”和“动盐水循环”。

2.2 直接拉伸强度测试方法

2.2.1 直接拉伸试件黏接

性能测试试验以直接拉伸试验为主,辅以 DIC,从而更直观地反映其拉伸强度及其开裂过程。然而,对于直接拉伸试验,现行试验规范并未对其试件尺寸及加载方法做出统一规定,而不同温度和加载速率对于沥青混合料的变形影响很大。因此,直接拉伸试验的试件直径、装夹方式等参考了 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 T0713—2000 单轴压缩试验(圆柱体)的相关内容,标准试验温度设为 15℃,加载速率控制在 2 mm/min,以避免温度变化和加载速率波动对试验结果的干扰。

为确保拉伸试验过程中试件与加载装置之间的有效连接,采用高强度柔性胶结剂对沥青混合料试件与金属底座进行黏接。先依次组装连接头、上下止挡与金属底座,并通过插销将沥青混合料安装在万能试验机的上下两端;黏接材料选用聚氨酯结构胶,使用胶枪挤出胶液并充分混合后,均匀涂抹于金属底座表面,然后将沥青混合料试件置于胶层上方,并轻压旋转以排除气泡,确保界面均匀饱满;然后在试件顶部及上部金属

底座重复上述操作,通过升降试验机横梁使其缓慢接触并挤出多余胶液,形成稳定胶结界面;待胶层自然固化 25~30 min 即完成直接拉伸试件的黏接。

2.2.2 试件侧面制斑及养护

为确保 DIC 的测量精度和图像质量,需对试件侧面进行散斑(喷漆)处理。喷漆前给试件的底座套上保鲜膜。在试件表面充分干燥的条件下,采用白色哑光丙烯酸喷漆在试件侧面均匀喷涂一层底漆,喷涂厚度应适中,以避免底漆过厚影响后续裂缝的识别。底漆喷涂后静置 3~5 min,待其自然干燥后将试件水平放置,使用黑色哑光喷漆在距试件表面水平距离约 50 cm、竖直距离约 30 cm 的位置喷涂随机散斑图案。喷涂过程中应保持喷嘴与试件表面平行,使漆雾自然落于试件表面,避免油漆直接冲击表面造成散斑堆积或形状异常。生成的散斑应满足分布随机、大小均匀、黑白对比明显等要求,且黑白区域比例尽可能接近 1:1。完成散斑处理后,将试件置于温度稳定控制在 15℃ 的 UTM-30 万能试验机中预养护 5 h,养护完成后便可进行直接拉伸试验。

2.2.3 直接拉伸试验与 DIC 图像采集

加载试验与图像采集系统主要由 ETM304C 微机控制电子万能试验机、Testpilot 加载控制软件、工业高速相机、补光灯、专用支架、计算机(加载控制)与 DIC 软件平台(3D-DIC 图像采集软件、Gom Correlate 数字图像后处理软件)组成,用于实现加载过程与图像采集的同步控制。试验步骤为:①将养护好的试件安装于万能试验机中;②调整固定拍摄设备和补光灯,启动 MVS 软件,对焦确认试件图像清晰;③加载前先施加入口力,使试件受力初始状态稳定,并将位移读数清零;④启动图像采集软件,设定参数后,同步启动图像采集和直接拉伸试验;拉伸过程完成后,保存图像和曲线数据;⑤将图像导入 Gom Correlate 软件,分析获取试件表面破坏后的主应变图。

通过直接拉伸试验的荷载-位移曲线数据,并结合力学指标(抗拉强度、拉伸应变和应变能密度)来评估沥青混合料试件的拉伸强度性能。为保证数据的重复性与可比性,每一处理组的原始试件数均为 3 个。拉伸试验记录各试件的峰值载荷、破坏位移等参数,并据此计算各组的平均值与标准差。此外,凡是在拉伸过程中出现端面裂缝的试件,均应视为因对中偏差引起的失效,予以剔除且不计入有效数据,以避免影响拉伸强度结果的代表性和稳定性。

3 结果与分析

3.1 沥青混合料试件表面变化及拉伸主应变分析

3.1.1 盐蚀作用后试件表面变化

图 1 为盐蚀作用后沥青混合料圆柱体试件侧面形貌变化情况,其中动盐水循环作用下 AH-70 沥青混合料发生明显劣化。在盐浓度 20%条件下干湿循环 20 d 后的 AH-70 沥青混合料试件表面亦出现较为明显的孔隙,改性沥青混合料的孔隙数量明显更少、深度明显更浅;而在 60℃ 动盐水循环作用下,孔隙发展更为显

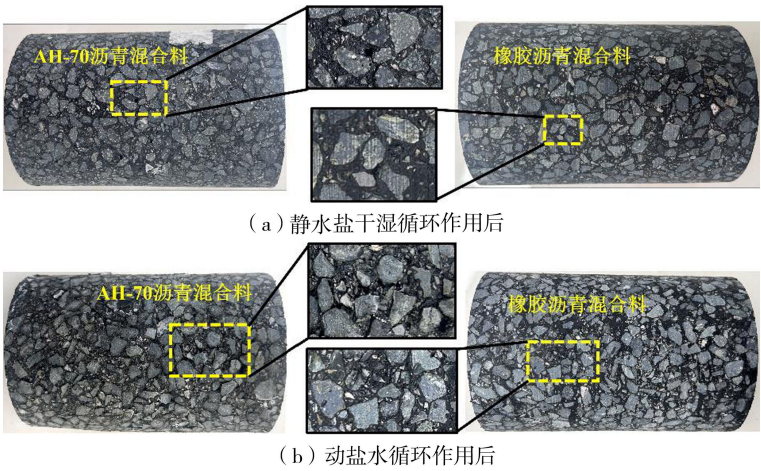


图 1 盐侵蚀作用后沥青混合料试件侧面形貌变化

Fig. 1 Morphological changes on the side surfaces of asphalt mixture specimens after salt erosion

著,AH-70 沥青混合料不仅数量更多,还出现部分集料剥落的现象,说明动水冲刷耦合热环境对 AH-70_s 沥青混合料的破坏作用更为剧烈。相比 AH-70 沥青混合料,橡胶沥青混合料在相同环境作用下整体结构保持较好,试件表面未出现显著裂缝,仅在动水循环作用下局部可见微小孔隙,其不同侵蚀环境作用后仍具备良好的结构稳定性和抗老化性能。

3.1.2 拉伸试验过程主应变云图及拉伸断面形态分析

通过统计各类沥青混合料试件的拉伸断面情况可知,拉伸断面并非完全是完整横断面,沥青混合料的破坏通常始于受力最不利的位置或材料结构中最薄弱的部位,而不会在其长度或高度方向上产生均匀变形。AH-70 沥青、SBS 沥青和橡胶沥青混合料拉伸破坏主要为柔性破坏,裂缝大都出现在沥青与集料的胶结界面处。胶结界面能协同变形并共同承担荷载,初期裂缝多从该界面萌生,随着裂缝缓慢扩展,材料承载能力逐渐降低,最终破坏面通常沿胶结界面延展形成。第二强度理论认为,材料断裂源于最大拉应变,即拉应变达到某一限值时发生断裂。图 2 给出了不同试件拉伸过程中裂纹萌生(峰值荷载 50%时刻)、裂纹扩展(峰值荷载 75%时刻)和开裂破坏(峰值荷载 100%时刻)3 个典型阶段的特征主应变云图。为进一步对比分析拉伸过程中集料和胶结界面主应变和竖向位移,在一个代表性试件的胶结界面和集料位置上分别随机选取 6 个点和 4 个点,数据点的数据分析结果如图 3 所示。

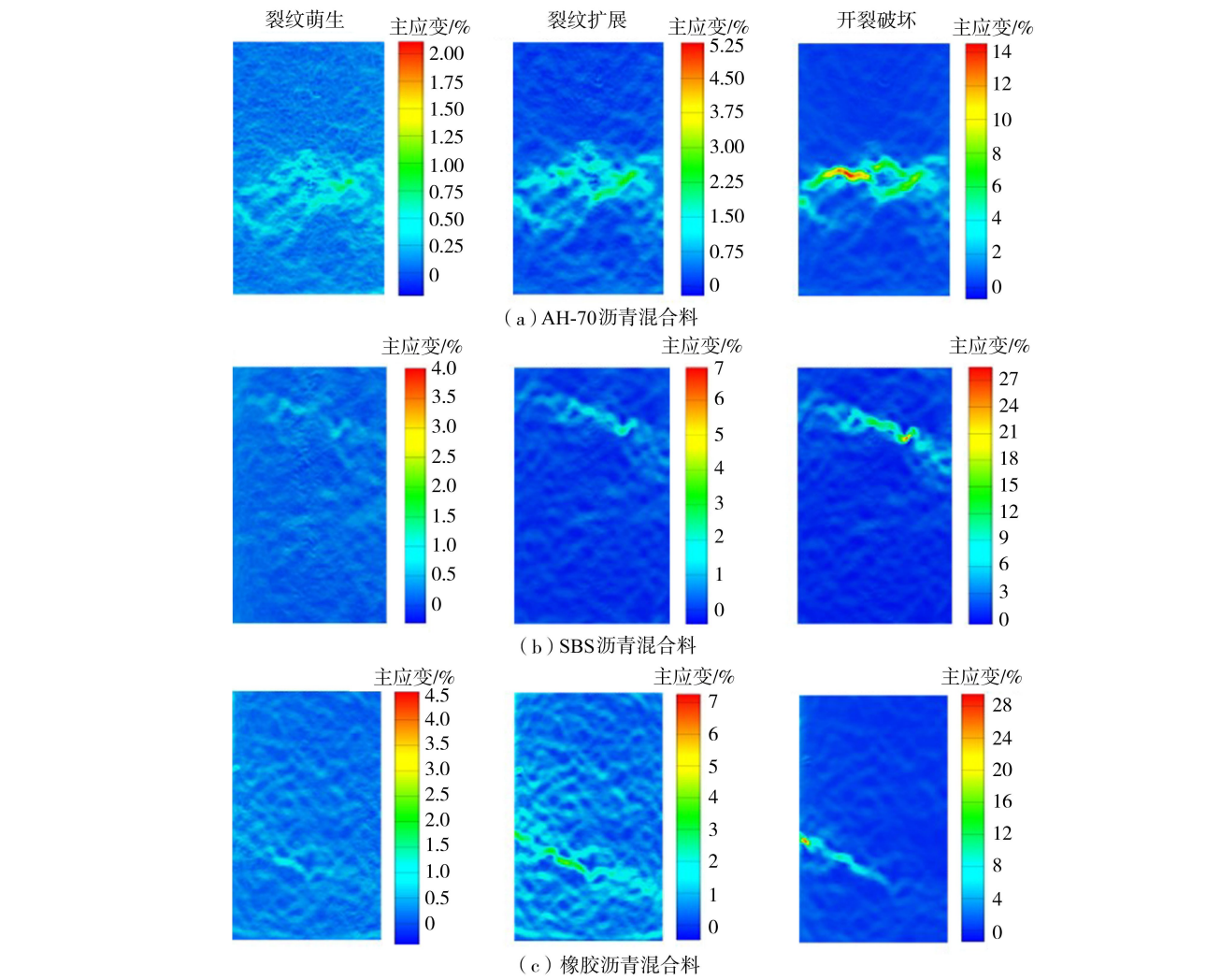


图 2 不同沥青混合料试件拉伸试验过程主应变云图

Fig. 2 Principal strain contour maps of various asphalt mixture specimens during the direct tensile test

由图 2 可见,AH-70 沥青、SBS 沥青和橡胶沥青混合料的拉应力作用过程表现为应变沿胶结界面逐步集中且集料应变相对较小的趋势,次生裂纹走向多变。由图 3 可见,沥青胶结界面的拉应变要远大于集料的拉应变,高应变区边界多分布于集料与砂浆界面处,并在其相对薄弱位置形成裂缝。裂缝路径与应变极值区域

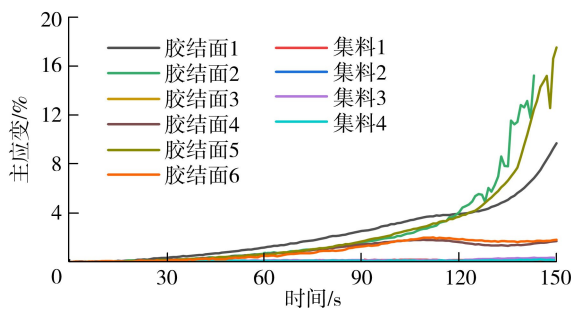


图3 胶结界面和集料的特征主应变变化

Fig.3 Variation of principal strain at characteristic points on the binder-aggregate interface and within aggregates

高度吻合,胶结界面的变形使其成为裂纹萌生和扩展的主控位置,且裂纹扩展具有一定的滞后性和路径可预测性。SBS 沥青和橡胶沥青的应变集中程度要高于 AH-70 沥青,说明其在受拉过程中吸能能力更强,裂纹扩展所需能量更高,有利于延缓破坏的发生;尤其在裂纹扩展阶段,橡胶沥青混合料试件中应变区范围较广,应变分布呈带状扩展,表明其界面黏结性与整体韧性要优于 AH-70 沥青和 SBS 沥青混合料。

3.2 静水盐干湿循环作用对强度性能的影响

不同静水盐干湿循环作用下沥青混合料的直接拉伸强度和应变能密度变化关系曲线如图 4 所示。由图 4 可知,在 20%盐溶液中干湿循环 20 d 后,不同沥青混合料的直接拉伸强度与韧性均同步下降。相比空白组(成型后未经任何盐溶液浸泡或动水循环,直接进行拉伸试验),AH-70 沥青混合料直接拉伸强度和应变能密度降幅分别为 41.6%和 57.8%;其界面结构在高浓度盐和干湿循环作用下出现劣化,表面孔隙增多。SBS 沥青混合料抗拉强度由 1.04 MPa 降至 0.84 MPa,应变能密度下降 35.7%;橡胶沥青混合料由 1.08 MPa 降至 0.87 MPa,应变能密度下降 32.5%。SBS 沥青与橡胶沥青混合料的改性结构有效延缓了盐侵蚀所致的孔隙增多与界面脱黏,但随循环次数增加仍呈稳定退化趋势。受多孔结构影响,盐溶液易沿孔隙渗入并在混合料内部迁移扩散侵蚀,同时高盐环境削弱了沥青的界面黏附性能。根据黏附理论,水分与集料界面的亲和力强于沥青,尤其是在循环过程中,Na⁺与 Cl⁻渗透可进一步加速沥青-集料界面的脱黏反应,降低黏结稳定性;此外,Cl⁻的腐蚀作用与 Na⁺在集料表面形成吸附层的不稳定性,也可能在干湿循环过程中加剧界面结构损伤。与冻融循环中的结晶膨胀力不同,干湿循环更多表现为离子迁移、界面剥离和应力累积效应^[20-21]。

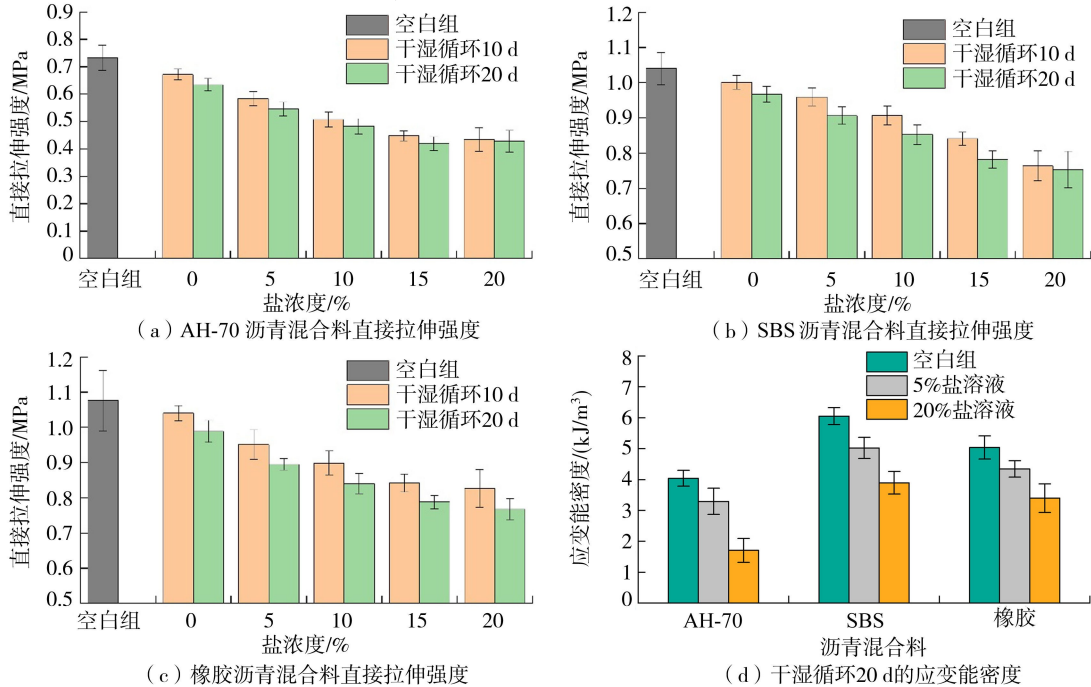


图4 静水盐干湿循环作用对沥青混合料直接拉伸强度与应变能密度的影响

Fig.4 Effect of static saline dry-wet cycling on the direct tensile strength and strain energy density of asphalt mixtures

因此,可以认为盐浓度与干湿循环过程共同影响沥青混合料的劣化程度,干湿循环过程中的离子作用机制虽不涉及相变,但同样会持续削弱界面强度,降低沥青混合料整体韧性与抗裂能力。

3.3 动水循环作用对强度性能的影响

高温动水循环作用对不同沥青混合料拉伸性能和应变能密度的影响如图 5 所示。由图 5 可知,动水循环加剧了各类沥青混合料的力学性能退化,尤其是在含盐环境中表现更为显著,具体反映在主轴荷载峰值下降与主轴位移减小,在动水循环作用下,沥青膜剥离和集料界面脱黏,从而导致沥青混合料拉伸性能衰退。AH-70 沥青混合料的应变能密度下降幅度最大,从 4 043. 30 J/m³ 降至 1 237. 83 J/m³,下降 69. 4%;SBS 沥青与橡胶沥青混合料分别下降 6. 68%与 13. 2%。AH-70 沥青混合料的拉伸强度由 0. 733 MPa 降至动纯水循环后的 0. 421 MPa,再降至动盐水循环后的 0. 322 MPa,下降达 56. 1%;相较而言,SBS 沥青和橡胶沥青混合料强度分别下降 15. 8%、12. 9%,说明改性沥青比 AH-70 沥青更能有效缓解水压压力侵蚀。橡胶沥青混合料受动水循环的影响较小,因掺有 SBS 与橡胶粉协同改性,在保持力学性能的同时,显著提升了抗水损能力。

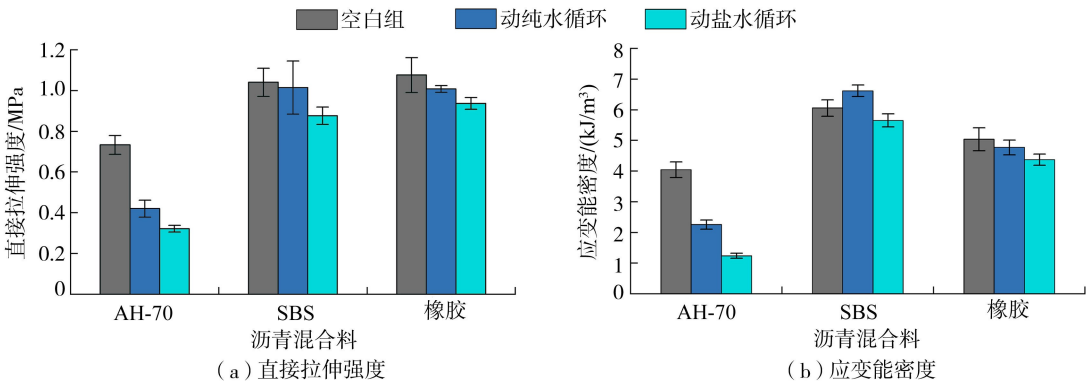


图 5 动水循环作用对沥青混合料直接拉伸强度与应变能密度的影响

Fig. 5 Effect of dynamic water cycling on the direct tensile strength and strain energy density of asphalt mixtures

4 结 论

- a. 动水循环和静水盐干湿循环均可诱发裂缝、空隙与集料界面剥离等破坏形态,其中 AH-70 沥青混合料表现出显著的热疲劳开裂与水损破坏,而 SBS 沥青和橡胶沥青混合料在动水循环和静水盐干湿循环作用下仍保持良好的结构完整性。
- b. AH-70 沥青、SBS 沥青和橡胶沥青混合料表现为柔性破坏特征;裂纹多自胶结界面萌生,其宏观扩展明显滞后于应变集中带的出现,应变区范围大,应变集中区与裂纹扩展路径高度吻合。沥青混合料的极限承载应变值(抗裂性能)橡胶沥青混合料最大、SBS 沥青混合料次之、AH-70 沥青混合料最小。
- c. 盐浓度与干湿循环过程共同削弱沥青混合料整体韧性与抗裂能力。在 20%盐溶液中干湿循环 20 d 后,AH-70 沥青混合料强度和应变能密度分别下降 41. 6%与 57. 8%,表面孔隙增多;SBS 沥青和橡胶沥青混合料应变能密度分别下降 35. 7%和 32. 5%,表现出更强的界面稳定性与耐久性。
- d. 动水循环作用下,显著削弱了 AH-70 沥青混合料界面结构完整性,诱发界面脱黏与结构剥落,表现出应变能密度与拉伸强度同步衰退趋势;AH-70 沥青混合料抗拉强度和应变能密度分别下降 56. 1%与 69. 4%,性能衰退最剧烈。而改性沥青混合料在动水循环作用下仍保持较高的残余强度性能,有效降低了沥青与集料剥离的可能。橡胶沥青因其优异的黏弹性表现出更强的能量吸收与应力释放能力,试验结果进一步印证其在抗裂性能与韧性方面的显著优势。

参考文献:

[1] Feng Baozhu, Wang Haoyu, Li Song, et al. The durability of asphalt mixture with the action of salt erosion; a review [J]. Construction and Building Materials, 2021, 315: 125749.

[2] Zhou Zhigang, Li Haojia, Liu Xin, et al. Investigation of sea salt erosion effect on the asphalt-aggregate interfacial system [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2020, 13: 145-153.

[3] 王柳江,薛晨阳,扎西顿珠,等. 低温条件下心墙沥青混凝土蠕变特性试验 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49

(5):419-424. (Wang Liujiang, Xue Chenyang, Tashi Dunzhu, et al. Experimental study on characteristics of creep deformation of asphalt concrete used in core dam under low temperature[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(5):419-424. (in Chinese))

[4] Xiong Rui, Chu Ci, Guan Bowen, et al. Performance damage characteristics of asphalt mixture suffered from the sulphate-water-temperature-load coupling action[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23(5):1368-1377.

[5] 郭乃胜, 褚召阳, 房辰泽, 等. 沥青及沥青混合料氯盐侵蚀损伤的多尺度研究进展[J]. 中国公路学报, 2023, 36(12):77-106. (Guo Naisheng, Chu Zhaoyang, Fang Chenze, et al. Progress of multi-scale research on chloride salt erosion damage of asphalt and asphalt mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(12):77-106. (in Chinese))

[6] 马涛, 陈葱琳, 张阳, 等. 胶粉应用于沥青改性技术的发展综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10):1-16. (Ma Tao, Chen Conglin, Zhang Yang, et al. Development of using crumb rubber in asphalt modification: a review[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10):1-16. (in Chinese))

[7] 赵爱军, 寇吟松, 李武伦, 等. 高掺量 SBS 改性沥青及其混合料老化行为[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2024, 49(4):751-763. (Zhao Aijun, Kou Yinsong, Li Wulun, et al. High content SBS modified asphalt and its mixtures aging behavior[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2024, 49(4):751-763. (in Chinese))

[8] 褚辞, 刘开平, 李科宏, 等. 盐蚀条件下沥青混合料路用性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(12):3906-3911. (Chu Ci, Liu Kaiping, Li Kehong, et al. Investigation on the road performance of asphalt mixture exposed to salt erosion[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(12):3906-3911. (in Chinese))

[9] Xiong Rui, Chu Ci, Qiao Ning, et al. Performance evaluation of asphalt mixture exposed to dynamic water and chlorine salt erosion [J]. Construction and Building Materials, 2019, 201:121-126.

[10] 闫人伟, 师长春, 彭林魏, 等. 盐-冻融循环条件下沥青混合料水稳定性评价[J]. 公路, 2025, 70(3):50-55. (Yan Renwei, Shi Changchun, Peng Linwei, et al. Evaluation of asphalt mixture water stability under the salt-freeze-thaw cycles[J]. Highway, 2025, 70(3):50-55. (in Chinese))

[11] 李闯, 熊锐, 李松, 等. 盐蚀-动水条件下沥青混合料性能损伤评价[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(2):300-305. (Li Chuang, Xiong Rui, Li Song, et al. Performance damage evaluation of asphalt mixture under the condition of salt attack and dynamic water[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2022, 40(2):300-305. (in Chinese))

[12] 赵丽华, 曾勇银, 朱绩超. 盐雾-温度耦合作用对沥青混合料性能影响规律研究[J]. 公路, 2018, 63(6):253-257. (Zhao Lihua, Zeng Yongyin, Zhu Jichao. Research on impact of salt mist-temperature coupling actions on performance of asphalt mixture [J]. Highway, 2018, 63(6):253-257. (in Chinese))

[13] 冯蕾, 陈征, 王岚, 等. 冻融循环作用下盐浓度对温拌胶粉改性沥青混合料开裂特性影响[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(5):1743-1750. (Feng Lei, Chen Zheng, Wang Lan, et al. Effect of salt concentration on CR-WMA cracking characteristics under freeze -thaw cycles[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(5):1743-1750. (in Chinese))

[14] 王义忠. 含盐高湿环境对沥青混合料的侵蚀机理研究[J]. 公路工程, 2015, 40(5):250-254. (Wang Yizhong. Study the erosion mechanism of the asphalt mixture on salty and humid environment[J]. Highway Engineering, 2015, 40(5):250-254. (in Chinese))

[15] 刘晋周. 中法沥青混凝土及半刚性基层材料设计指标与路用性能研究[D]. 北京:交通运输部公路科学研究所, 2019.

[16] 黄兰可. 沥青路面水膜效应及临界滑水速度研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3):118-124. (Huang Lanke. Research review on water film effect and critical hydroplaning velocity of asphalt pavement surface[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(3):118-124. (in Chinese))

[17] 沙庆林. 多碎石沥青混凝土 SAC 系列的设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社, 2005.

[18] 邓贤坤. 临海环境下沥青及沥青混合料盐蚀机理研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2023.

[19] Cui Peide, Wu Shaopeng, Xiao Yue, et al. 3D reconstruction of moisture damage resulted volumetric changes in porous asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2019, 228:116658.

[20] 姚华彦, 王旭洋, 拓明阳, 等. 盐冻融循环对玄武岩纤维沥青混合料抗裂性能及微观结构的影响[J]. 材料导报, 2024, 38(增刊2):640-645. (Yao Huayan, Wang Xuyang, Ta Mingyang, et al. Effect of salt freeze-thaw cycle on crack resistance and microstructure of basalt fiber asphalt mixture[J]. Materials Reports, 2024, 38(S2):640-645. (in Chinese))

[21] 褚辞. 多因素作用下沥青混合料盐蚀劣化特性研究[D]. 西安:长安大学, 2019.