

极端环境下温拌沥青混合料的水稳定性研究

史经春

湖南大学设计研究院有限公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年3月2日; 录用日期: 2026年3月21日; 发布日期: 2026年3月31日

摘要

为解决高海拔、沿海、高寒等特殊区域极端环境下温拌沥青路面水稳定性不足、易早期损坏的问题, 本文以强降雨、反复冻融循环(>10次)、海水侵蚀及盐冻耦合为研究背景, 选取普通温拌、橡胶粉改性及纤维改性沥青混合料为研究对象, 通过室内试验模拟极端工况, 测试冻融劈裂强度比(TSR)、残留稳定度及动态稳定度等指标, 分析水稳定性衰减规律并对比不同改性方式的提升效果。结果表明: 在各类极端环境作用下, 三种混合料水稳定性均呈持续下降趋势, 其中盐冻耦合工况劣化作用最为突出; 30次冻融循环后, 普通温拌混合料TSR值降至62.3%, 未满足规范要求; 橡胶粉及纤维改性均可改善抗水损害能力, 其中橡胶粉改性提升效果更为明显, 在30次冻融循环与海水侵蚀耦合工况下, 各项指标较普通温拌提升34.3%~45.8%。研究结果可为极端环境地区温拌沥青路面结构设计与材料选型提供技术参考。

关键词

极端环境, 温拌沥青混合料, 水稳定性, 改性温拌沥青, 冻融循环, 海水侵蚀, 盐冻耦合

Study on the Water Stability of Warm-Mix Asphalt Mixtures under Extreme Conditions

Jingchun Shi

Hunan University Design and Research Institute Co., Ltd., Changsha Hunan

Received: March 2, 2026; accepted: March 21, 2026; published: March 31, 2026

Abstract

To address the insufficient water stability and early deterioration of warm-mix asphalt pavements in extreme environments such as high-altitude and cold regions and coastal areas, this study investigated heavy rainfall, repeated freeze-thaw cycles (>10 times), seawater erosion, and salt-freeze coupling conditions. Ordinary warm-mix, rubber powder modified, and fiber modified asphalt

mixtures were evaluated through laboratory simulations. Key indicators including TSR, residual stability, and dynamic stability were tested to reveal the deterioration patterns and quantify the improvement effects of different modification methods. Results indicate that water stability continuously decreases under extreme conditions, with salt-freeze coupling exhibiting the most severe deterioration. After 30 freeze-thaw cycles, the TSR value of ordinary warm-mix mixtures decreased to 62.3%, failing to meet specification requirements. Both rubber powder and fiber modifications improved water resistance, among which rubber powder modification showed superior enhancement, increasing performance indices by 34.3%~45.8% under combined freeze-thaw and seawater conditions. The findings provide technical support for material selection and structural design of warm-mix asphalt pavements in extreme environments.

Keywords

Extreme Environment, Warm-Mix Asphalt Mixture, Water Stability, Modified Warm-Mix Asphalt, Freeze-Thaw Cycle, Seawater Erosion, Salt-Freeze Coupling

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国公路建设快速发展,路面工程逐步向高海拔、沿海、高寒等特殊区域延伸,强降雨、反复冻融、海水侵蚀、盐冻耦合等极端环境,对沥青路面耐久性提出严苛挑战[1]-[3]。水稳定性作为影响沥青路面使用寿命的核心指标,决定了混合料在水分作用下抵抗强度降低、剥落等劣化的能力,极端环境下水分与其他恶劣条件的耦合作用,会加速路面早期损坏,增加养护成本并影响行车安全。

温拌沥青技术作为节能环保的绿色施工技术[4]-[8],可降低混合料拌和及压实温度 20℃~30℃,减少能源消耗与有害气体排放,已广泛应用于公路工程。但温拌混合料内部结构与热拌混合料存在差异,胶结料与集料界面粘结较弱,在极端环境下易受水分、冻融等因素影响,水稳定性显著衰减,制约了其在特殊区域的推广应用。

目前行业内对温拌混合料水稳定性的研究多聚焦常规环境,侧重单一水分作用或少量冻融循环(≤10次),未充分考虑极端环境下“水分 + 其他恶劣条件”的耦合效应,无法真实反映其水稳定性演化规律;同时,现有研究对改性温拌混合料的关注多集中于单一改性方式,缺乏橡胶粉、纤维等不同改性方式的对比分析,难以给特殊区域改性方案选择提供有效技术支撑。

极端环境下各类恶劣条件的耦合作用,会进一步加剧混合料劣化[9] [10]。针对现有研究不足,结合特殊区域工程实际需求,本研究聚焦极端工况,以普通温拌、橡胶粉改性、纤维改性沥青混合料为对象,通过模拟极端工况测试水稳定性指标,对比抗水损害性能差异,揭示衰减规律及影响机制,量化改性提升效果,填补现有研究空白,为特殊区域温拌沥青路面设计、施工及养护提供技术依据,推动温拌绿色技术的广泛应用。

2. 实验材料及方法

2.1. 实验材料

本实验所用材料均符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG/T F40-2004)及相关行业标准要求,主要包括基质沥青、温拌剂、改性剂(橡胶粉、纤维)、集料、填料等,具体性能指标如下。

2.1.1. 基质沥青

实验采用 70 号石油沥青作为基质沥青，其主要性能指标测试结果见表 1。测试结果表明，该基质沥青的针入度、软化点、延度等核心性能指标均符合规范要求，可用于温拌沥青混合料的制备。

Table 1. Main performance indicators of No. 70 base asphalt

表 1. 70 号基质沥青主要性能指标

测试指标	实测值	技术要求
针入度(25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	68.5	60~80
软化点(环球法)/℃	47.8	≥46
延度(15℃, 5 cm/min)/cm	108.6	≥100
密度(25℃)/g/cm ³	1.036	-

2.1.2. 温拌剂

实验采用泡沫型温拌剂，该温拌剂具有良好的降粘、发泡效果，可有效降低沥青混合料的拌和与压实温度，同时能改善沥青与集料的界面粘结性能，其主要性能指标见表 2。

Table 2. Basic parameters of warm-mix agent

表 2. 温拌剂基本参数

性能指标	测试方法	测试结果	要求	是否合格
外观	目测	淡黄色透明液体	无杂质、透明均匀	合格
密度(25℃)/g/cm ³	比重瓶法	1.052	1.04~1.06	合格
降粘率(135℃)/%	T0619-2011	28.3	≥25	合格
发泡倍数	室内发泡试验	12.5	≥10	合格
半衰期/s	室内发泡试验	18.6	≥15	合格
低温稳定性(-10℃, 24 h)	低温储存试验	无分层、无结晶	无分层、无结晶	合格

2.1.3. 改性剂

实验采用两种改性剂：橡胶粉(废旧轮胎粉碎制成)和聚酯纤维，均符合相关行业标准要求，具体性能指标如下。

(1) 橡胶粉：采用 40 目废旧轮胎橡胶粉，其主要性能指标见表 3。该橡胶粉具有良好的弹性和耐磨性，可改善沥青混合料的抗裂、抗水损害性能。

Table 3. Main performance indicators of waste tire rubber powder

表 3. 废旧轮胎橡胶粉主要性能指标

性能指标	测试方法	测试结果	规范要求(JT/T 797-2011)	是否合格
粒径/目	标准筛法	40	30~60	合格
灰分/%	灼烧法	8.6	≤10	合格
水分/%	烘干法	0.8	≤1	合格
丙酮抽出物/%	索氏提取法	22.5	≥20	合格
拉伸强度/MPa	拉伸试验	18.7	≥15	合格
扯断伸长率/%	拉伸试验	480	≥400	合格

(2) 聚酯纤维: 采用短切聚酯纤维, 长度 6 mm, 具有良好的抗拉强度和分散性, 可增强沥青混合料的内部结构稳定性, 改善其抗水损害、抗裂性能, 主要性能指标见表 4。

Table 4. Main performance indicators of chopped polyester fibers

表 4. 短切聚酯纤维主要性能指标

性能指标	测试方法	测试结果	规范要求(JT/T 525-2020)	是否合格
长度/mm	直尺测量法	6.0 ± 0.5	3~12	合格
直径/ μm	显微镜法	25 ± 3	20~30	合格
密度/ g/cm^3	比重瓶法	1.38	1.35~1.40	合格
抗拉强度/MPa	单丝拉伸试验	580	≥ 500	合格
弹性模量/GPa	拉伸试验	18.5	15~25	合格
分散性	沥青混合料分散试验	均匀分散, 无结团	均匀分散, 无结团	合格

2.1.4. 集料与填料

(1) 集料: 实验采用玄武岩集料。集料分为粗集料(粒径 2.36~19 mm)和细集料(粒径 0.075~2.36 mm), 主要性能指标见表 5、表 6。

Table 5. Main performance indicators of coarse aggregates

表 5. 粗集料主要性能指标

性能指标	测试方法	测试结果	规范要求(JTG/T F40-2004)	是否合格
压碎值/%	T0316-2011	18.3	≤ 26	合格
磨耗值(洛杉矶法)/%	T0317-2011	22.5	≤ 30	合格
吸水率/%	T0304-2011	0.58	≤ 2	合格
针片状颗粒含量/%	T0311-2011	8.6	≤ 15	合格
与沥青的粘附性等级	水煮法	5 级	≥ 4 级	合格
表观相对密度	T0304-2011	2.785	≥ 2.60	合格

Table 6. Key performance indicators of fine aggregates

表 6. 细集料主要性能指标

性能指标	测试方法	测试结果	规范要求(JTG/T F40-2004)	是否合格
表观相对密度	T0328-2011	2.768	≥ 2.60	合格
含泥量/%	T0333-2011	0.6	≤ 3	合格
泥块含量/%	T0334-2011	0	≤ 1	合格
细度模数	T0327-2011	2.68	2.3~3.0	合格
吸水率/%	T0328-2011	0.72	≤ 2	合格

(2) 填料: 实验采用石灰石矿粉作为填料, 其主要成分为碳酸钙, 细度符合规范要求, 可改善沥青混合料的密实度和界面粘结性能, 主要性能指标见表 7。

Table 7. Main performance indicators of limestone powder
表 7. 石灰石矿粉主要性能指标

性能指标	测试方法	测试结果	规范要求(JTG/T F40-2004)	是否合格
密度/g/cm ³	比重瓶法	2.715	≥2.60	合格
含水量/%	烘干法	0.3	≤1	合格
细度(0.075 mm 筛通过率)/%	标准筛法	92.8	≥80	合格
亲水系数	亲水系数试验	0.85	≤1	合格
塑性指数	塑性指数试验	4.2	≤4	合格

2.2. 实验方案设计

2.2.1. 混合料配合比设计

本实验采用 AC-13 型密级配沥青混合料, 根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG/T F40-2004)进行配合比设计, 目标空隙率为 $4\% \pm 0.5\%$, 沥青饱和度为 70%~80%。分别设计普通温拌沥青混合料(CK)、橡胶粉改性温拌沥青混合料(XR)、纤维改性温拌沥青混合料(XW)三种配合比, 其中温拌剂掺量为基质沥青质量的 3% (厂家推荐掺量), 橡胶粉掺量为基质沥青质量的 15%, 聚酯纤维掺量为混合料总质量的 0.3%。

通过马歇尔试验确定三种混合料的最佳沥青用量, 试验结果见表 8。由表 8 可知, 普通温拌沥青混合料的最佳沥青用量为 4.8%, 橡胶粉改性温拌沥青混合料的最佳沥青用量为 5.2% (橡胶粉吸油导致沥青用量增加), 纤维改性温拌沥青混合料的最佳沥青用量为 4.9% (纤维分散需要少量增加沥青用量)。三种混合料的马歇尔试验指标均符合规范要求, 配合比设计合理。

Table 8. Three types of asphalt mixture ratios and Marshall test indicators
表 8. 三种沥青混合料配合比及马歇尔试验指标

混合料类型	最佳沥青用量/%	马歇尔稳定度/kN	流值/0.1 mm	空隙率/%	沥青饱和度/%
普通温拌(CK)	4.8	11.2	32.5	4.2	75.3
橡胶粉改性(XR)	5.2	14.8	28.6	3.9	77.8
纤维改性(XW)	4.9	13.5	30.2	4.1	76.5
规范要求	-	≥8	20~40	3~5	70~80

2.2.2. 极端工况模拟设计

结合高海拔、沿海、高寒等特殊区域的极端环境特点, 本实验模拟 4 类极端工况, 分别为: 强降雨工况、反复冻融循环工况(>10 次)、海水侵蚀工况、盐冻耦合工况, 具体模拟方案如下。

(1) 强降雨工况模拟: 采用浸水浸泡方式模拟强降雨导致的长期水分侵蚀, 将马歇尔试件和冻融劈裂试件完全浸泡在 25℃ 的清水中, 浸泡时间分别设置为 24 h、48 h、72 h、96 h、120 h, 模拟不同降雨持续时间对混合料水稳定性的影响。

(2) 反复冻融循环工况模拟: 采用冻融循环试验箱模拟反复冻融环境, 冻融循环次数设置为 10 次、15 次、20 次、25 次、30 次(均>10 次), 符合极端冻融环境要求。冻融循环参数: 冻结温度为 -18℃, 冻结时间为 12 h; 融化温度为 25℃, 融化时间为 12 h; 每次冻融循环周期为 24 h, 冻融过程中试件完全浸泡在清水中。

(3) 海水侵蚀工况模拟: 配置模拟海水溶液(按照沿海海水成分, NaCl 含量为 3.5%、MgCl₂ 含量为

0.5%、CaCl₂含量为0.1%)，将试件完全浸泡在25℃的模拟海水溶液中，浸泡时间分别设置为24 h、48 h、72 h、96 h、120 h，模拟海水长期侵蚀对混合料水稳定性的影响。

(4) 盐冻耦合工况模拟：结合海水侵蚀与反复冻融循环，将试件完全浸泡在3.5%的NaCl溶液中，进行冻融循环试验，冻融循环次数设置为10次、15次、20次、25次、30次，冻融参数与反复冻融循环工况一致，模拟沿海高寒地区盐冻耦合极端环境对混合料水稳定性的影响。

2.3. 测试指标与方法

本实验主要测试三种温拌沥青混合料在不同极端工况下的水稳定性及高温抗车辙相关指标，核心测试指标包括冻融劈裂强度比(TSR)、残留稳定度(MS₀)、动态稳定度(DS)，同时辅助测试沥青胶结料的流变性能(DSR、BBR)，具体测试方法如下。

(1) 冻融劈裂强度比(TSR)：按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)中 T0729-2011 方法进行测试。分别制备标准冻融劈裂试件(直径101.6 mm，高度63.5 mm)，一组试件进行冻融循环处理，另一组试件不进行冻融处理(标准养护)，测试两组试件的劈裂强度，TSR值计算公式为：

$$TSR = \frac{R_f}{R_u} \times 100\%$$

式中：TSR——冻融劈裂强度比，%；R_f——冻融循环后试件的劈裂强度，MPa；R_u——未冻融试件的劈裂强度，MPa。TSR值越大，表明混合料的抗冻融水损害性能越好，规范要求高等级公路沥青混合料TSR值≥80%。

(2) 残留稳定度(MS₀)：按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)中 T0709-2011 方法进行测试。制备标准马歇尔试件(直径101.6 mm，高度63.5 mm)，将试件完全浸泡在60℃的水中，浸泡48 h后，测试其马歇尔稳定度，残留稳定度计算公式为：

$$MS_0 = \frac{MS_1}{MS_0} \times 100\%$$

式中：MS₀——残留稳定度，%；MS₁——浸水48 h后试件的马歇尔稳定度，kN；MS₀——未浸水试件的马歇尔稳定度，kN。残留稳定度越大，表明混合料的抗水浸泡能力越好，规范要求高等级公路沥青混合料残留稳定度≥85%。

(3) 动态稳定度(DS)：按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)中 T0719-2011 方法进行测试。制备标准车辙试件(300 mm×300 mm×50 mm)，采用车辙试验仪，测试温度为60℃，轮压为0.7 MPa，轮速为42次/min，测试试件在45~60 min内的变形量，动态稳定度计算公式为：

$$DS = \frac{(t_2 - t_1) \times N}{d_2 - d_1}$$

式中：DS——动态稳定度，次/mm；t₁——测试初始时间，min(取45 min)；t₂——测试结束时间，min(取60 min)；N——轮速，次/min；d₁——t₁时刻试件的变形量，mm；d₂——t₂时刻试件的变形量，mm。动态稳定度越大，表明混合料的高温抗车辙性能越好，间接反映其结构稳定性和抗水损害能力，规范要求高等级公路沥青混合料DS值≥2800次/mm。

(4) 沥青胶结料流变性能测试：采用动态剪切流变仪(DSR)测试沥青胶结料的高温流变性能，测试温度为60℃，频率为10 rad/s，获取复数剪切模量(G*)和相位角(δ)，评价沥青胶结料的高温稳定性和抗老化性能；采用弯曲梁流变仪(BBR)测试沥青胶结料的低温流变性能，测试温度为-10℃，获取劲度模量(S)和蠕变率(m)，评价沥青胶结料的低温抗裂性能，辅助分析极端环境下混合料的水稳定性劣化机制。

3. 结果及分析

3.1. 强降雨工况下水稳定性分析

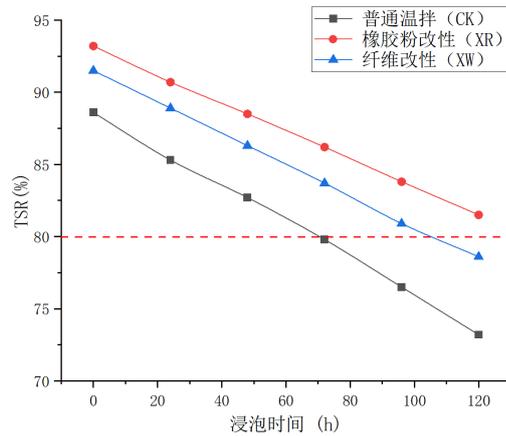


Figure 1. Test results of TSR values for the three mixtures under heavy rainfall conditions (%)
图 1. 强降雨工况下三种混合料 TSR 值测试结果(%)

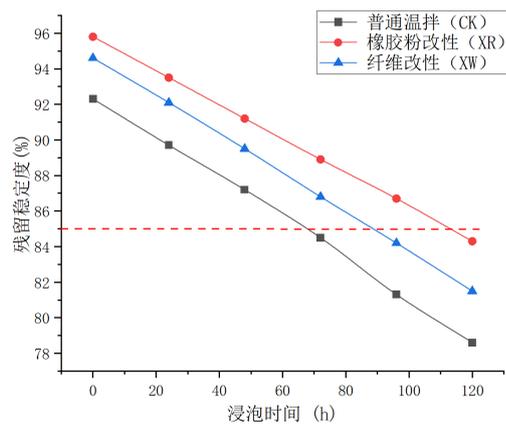


Figure 2. Test results of residual stability of three mixtures under heavy rainfall conditions (%)
图 2. 强降雨工况下三种混合料残留稳定度测试结果(%)

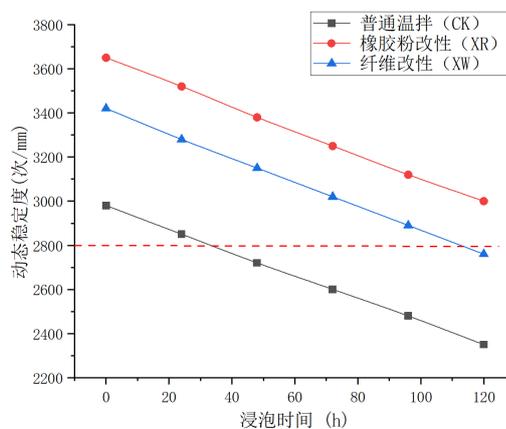


Figure 3. Test results of dynamic stability of three mixtures under heavy rainfall conditions (cycles/mm)
图 3. 强降雨工况下三种混合料动态稳定度测试结果(次/mm)

强降雨工况模拟高降雨地区长期水分浸泡对温拌沥青混合料水稳定性的影响,测试三种混合料在清水浸泡不同时间(24 h, 48 h, 72 h, 96 h, 120 h)后的 TSR 值、残留稳定度、动态稳定度,测试结果见图 1~3。

3.1.1. TSR 值变化规律分析

由图 1 可知,三种温拌沥青混合料 TSR 值均随清水浸泡时长显著下降,三组数据差异明显,混合料间衰减速率及最终性能差异较为突出。未浸泡时,三者均满足 $\geq 80\%$ 规范要求(XR 93.2%, XW 91.5%, CK 88.6%),表明改性剂可有效提升初始抗冻融水损害能力;TSR 值呈前期(0~72 h)快、后期(72~120 h)缓的衰减特征,源于前期水分快速侵入、后期水分趋于饱和。衰减特性上,CK 衰减最快(72 h 首次不合格,120 h 降至 73.2%,总衰减 17.4%),难以适配强降雨地区长期服役;XR 衰减最慢(120 h 达 81.5%,总衰减 12.6%),抗水分侵蚀能力最优;XW 总衰减 14.1% (120 h 降至 78.6%),性能介于二者之间且优于 CK。机制上,水分通过界面剥离和冻融膨胀应力影响 TSR 值;XR 凭借弹性和吸水性减少水分破坏、增强粘结强度,纤维改性仅能强化结构稳定性,对界面粘结改善有限,抗水分侵蚀能力弱于 XR。

3.1.2. 残留稳定度变化规律分析

残留稳定度是评价沥青混合料抗水浸泡性能的核心指标,其数值直接反映混合料长期水浸下的强度衰减抵抗能力。由图 2 可知,三种温拌沥青混合料残留稳定度演化规律与 TSR 值一致,均随浸泡时长下降,但衰减幅度及不合格节点差异显著。未浸泡时,三者残留稳定度均高于 85% 的规范标准,橡胶粉改性(XR, 95.8%)最优,纤维改性(XW, 94.6%)次之,普通温拌(CK, 92.3%)最低,表明改性剂可提升初始抗水浸泡性能。随着浸泡延长,水分渗透破坏界面粘结并软化胶结料,使残留稳定度呈现前期(0~72 h)快、后期(72~120 h)缓的衰减特征,与水分侵入速率相关。衰减特性上,CK 衰减最快(总衰减 14.8%),96 h 后首次不合格;XR 衰减最慢(总衰减 12.0%),120 h 后仍接近规范标准;XW 性能介于二者之间。衰减机制为水分的双重劣化作用,XR 通过强化结构、改善胶结料性能及吸附水分抑制衰减,XW 仅能增强结构整体性,对胶结料及界面粘结改善有限,故衰减幅度更大。

3.1.3. 动态稳定度变化规律分析

动态稳定度是评价沥青混合料高温抗车辙性能的关键指标,可间接表征其内部结构稳定性及抗水损害能力。由图 3 可知,三种温拌沥青混合料动态稳定度随清水浸泡时长显著衰减,且衰减程度高于 TSR 值与残留稳定度。未浸泡时,三者均满足 ≥ 2800 次/mm 的规范要求,橡胶粉改性(XR, 3650 次/mm)最优,纤维改性(XW, 3420 次/mm)次之,普通温拌(CK, 2980 次/mm)最低,表明改性可强化初始结构稳定性与高温抗车辙能力。随着浸泡延长,水分侵入破坏界面粘结、软化胶结料,使动态稳定度均匀衰减(无明显快慢差异),源于水分劣化作用的持续累积。衰减特征上,CK 衰减最显著(21.1%),120 h 后远低于合格标准;XR 衰减最小(17.8%),120 h 后仍达标;XW 介于二者之间。机制上,水分通过软化胶结料、破坏界面粘结导致指标下降,XR 借助弹性、耐磨性及改善胶结料性能减缓衰减,XW 仅能增强结构整体性,无法优化胶结料性能,故衰减幅度更大。

3.1.4. 强降雨工况综合分析

综合三种指标的测试结果可知,强降雨工况下,长期水分浸泡会显著劣化温拌沥青混合料的水稳定性,且不同改性方式对混合料水稳定性的提升效果存在明显差异。

(1) 水分浸泡时间对温拌沥青混合料水稳定性的影响显著,随着浸泡时间延长,TSR 值、残留稳定度、动态稳定度均持续下降,且浸泡 72 h 后,普通温拌混合料的 TSR 值首次低于合格标准,浸泡 96 h 后,普通温拌和纤维改性混合料的残留稳定度低于合格标准,浸泡 120 h 后,仅橡胶粉改性混合料的 TSR 值和动态稳定度仍基本满足规范要求(TSR = 81.5%略高于 80%, DS = 3000 次/mm 满足要求),表明强降

雨地区长期水分浸泡对温拌沥青混合料的水稳定性挑战严峻。

(2) 三种混合料的抗水损害性能排序为：橡胶粉改性温拌混合料(XR) > 纤维改性温拌混合料(XW) > 普通温拌混合料(CK)，其中橡胶粉改性混合料在长期水分浸泡下表现出最优的抗水损害能力，总衰减幅度均显著低于其他两种混合料，这与其改性机制密切相关；普通温拌混合料的抗水损害性能最差，长期浸泡后各项指标均大幅低于合格标准，难以满足强降雨地区的工程要求。

(3) 强降雨工况下，温拌沥青混合料水稳定性的劣化机制主要表现为：水分侵入→软化沥青胶结料→破坏沥青与集料界面粘结→混合料内部结构松散→各项性能指标衰减，其中界面粘结破坏和沥青胶结料软化是核心劣化因素，改性剂的添加主要通过改善界面粘结性能、增强沥青胶结料性能或提升内部结构稳定性，减缓水稳定性衰减。

3.2. 反复冻融循环工况下水稳定性分析

反复冻融循环工况模拟高海拔、高寒地区的极端冻融环境，测试三种温拌沥青混合料在不同冻融循环次数(10次、15次、20次、25次、30次)后的 TSR 值、残留稳定度、动态稳定度，冻融循环参数严格按照实验方案控制，测试数据均为 3 个平行样的平均值，标准差 ≤ 2.8 ，数据可靠性良好。测试结果见图 4~6。

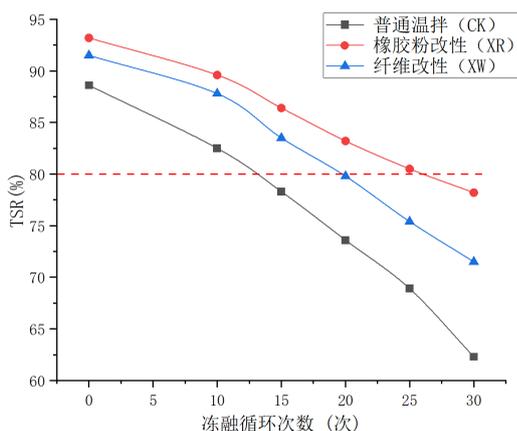


Figure 4. Test results of TSR values for three mixtures under repeated freeze-thaw cycling conditions (%)
图 4. 反复冻融循环工况下三种混合料 TSR 值测试结果(%)

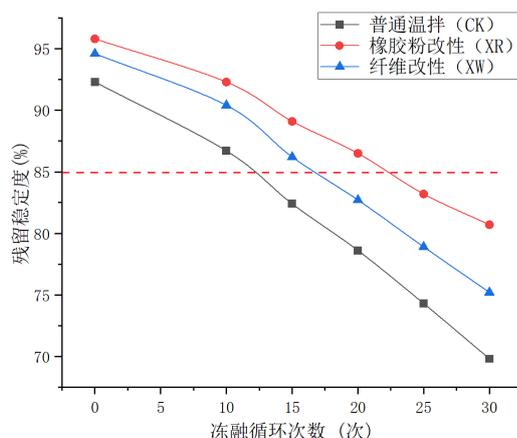


Figure 5. Test results of residual stability of three mixtures under repeated freeze-thaw cycles (%)
图 5. 反复冻融循环工况下三种混合料残留稳定度测试结果(%)

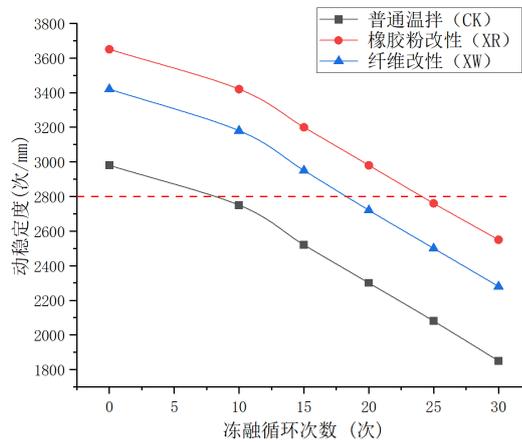


Figure 6. Test results of dynamic stability of three mixtures under repeated freeze-thaw cycles (cycles/mm)
图 6. 反复冻融循环工况下三种混合料动态稳定度测试结果(次/mm)

3.2.1. TSR 值变化规律分析

由图 4 可见,反复冻融循环对三种温拌沥青混合料 TSR 值劣化作用显著,三种混合料间差异明显。其均随冻融循环次数增加持续快速下降,衰减幅度远大于强降雨工况,混合料间差异突出。未冻融时,三者 TSR 值均满足 $\geq 80\%$ 规范要求,与强降雨工况未浸泡状态一致,初始抗冻融能力不受工况模拟顺序影响;TSR 值随循环次数均匀衰减、无明显放缓趋势,与强降雨工况差异显著,源于冻融循环中水分“冻结-融化”产生的累积损伤无饱和放缓现象。衰减特性上,CK 衰减最显著(30 次循环后降至 62.3%,总衰减 29.7%,15 次循环后首次不合格),难以满足高海拔、高寒地区长期服役要求;XR 衰减最慢(总衰减 16.1%,30 次循环后达 78.2%),抗冻融能力最优;XW 总衰减 21.9%,性能介于二者之间(20 次循环后不合格,30 次后降至 71.5%)。机制上,TSR 值衰减是水分侵蚀与冻融损伤的协同作用,核心为冻融膨胀应力致裂缝产生扩展、水分侵入加剧界面剥离及胶结料软化;XR 凭借弹性吸收应力、吸附水分减缓衰减,纤维改性仅能抑制裂缝扩展、对应力吸收有限,故抗冻融能力较弱。

3.2.2. 残留稳定度变化规律分析

由图 5 可知,三种温拌沥青混合料残留稳定度随冻融循环次数的变化规律与 TSR 值趋同,均持续下降,衰减幅度显著大于强降雨工况,混合料间抗冻融浸泡能力差异明显。未冻融时,三者残留稳定度均远超规范要求,与强降雨工况未浸泡状态一致;随循环次数增加,残留稳定度均匀衰减无放缓趋势,源于冻融循环带来的水分侵入、冻融损伤及结构松散的累积效应。衰减特性上,CK 衰减最快(总衰减 24.4%,20 次循环后首次不合格,30 次后降至 69.8%),抗水浸泡能力急剧下降;XR 衰减最慢(总衰减 15.8%,30 次后达 80.7%),抗冻融浸泡能力最优;XW 总衰减 20.5% (30 次后降至 75.2%),性能介于二者之间。机制上,衰减是冻融损伤与水分侵蚀的协同作用,XR 凭借弹性吸收应力、改善胶结料性能及吸附水分减缓衰减,纤维改性仅能抑制裂缝扩展、对胶结料性能改善有限,故衰减幅度更大。

3.2.3. 动态稳定度变化规律分析

由图 6 可知,反复冻融循环对三种温拌沥青混合料动态稳定度影响最显著,其均随循环次数快速下降,衰减幅度超 25%且远大于强降雨工况。未冻融时,三者动态稳定度均满足规范要求,与强降雨工况未浸泡状态一致;随循环次数增加,动态稳定度均匀快速衰减,源于冻融应力致裂缝扩展、水分侵入软化胶结料,共同导致结构完整性破坏、抗变形能力下降。衰减特性上,CK 衰减幅度最大(37.9%,20 次循环后首次不合格,30 次后降至 1850 次/mm);XR 衰减最小(29.9%,30 次后达 2550 次/mm),结构稳定性

最优；XW 总衰减 33.3% (30 次后降至 2280 次/mm)，性能介于二者之间。机制上，衰减是冻融对结构与胶结料的双重损伤，XR 凭借弹性应力吸收、改善胶结料性能减缓衰减，纤维改性仅能增强颗粒联结、对应力吸收和胶结料改善有限，故衰减更明显。

3.2.4. 反复冻融循环工况综合分析

综合三种指标的测试结果可知，反复冻融循环工况(>10 次)对温拌沥青混合料水稳定性的劣化作用显著强于强降雨工况，冻融循环次数的增加会导致混合料水稳定性持续、快速衰减，不同改性方式的提升效果差异明显，核心结论如下：

(1) 冻融循环次数是影响温拌沥青混合料水稳定性的关键因素，随着冻融循环次数增加，TSR 值、残留稳定度、动态稳定度均持续下降，且衰减幅度远大于强降雨工况，30 次冻融后，三种混合料的各项指标均低于合格标准，其中普通温拌混合料的劣化最为严重，表明高海拔、高寒地区的反复冻融环境对温拌沥青混合料的水稳定性挑战极为严峻。

(2) 三种混合料的抗冻融水损害性能排序与强降雨工况一致，仍为：橡胶粉改性温拌混合料(XR) > 纤维改性温拌混合料(XW) > 普通温拌混合料(CK)，其中橡胶粉改性混合料在反复冻融循环作用下表现出最优的抗冻融能力，总衰减幅度均显著低于其他两种混合料，是三种混合料中最适合高海拔、高寒地区应用的类型；普通温拌混合料的抗冻融能力最差，难以满足反复冻融环境的工程要求。

(3) 反复冻融循环工况下，温拌沥青混合料水稳定性的劣化机制为：冻融循环→水分冻结膨胀产生应力→内部裂缝产生与扩展→水分沿裂缝侵入→软化沥青胶结料 + 破坏界面粘结→结构松散→性能指标衰减，其中冻融膨胀应力导致的裂缝损伤是核心劣化因素，改性剂的添加主要通过吸收膨胀应力、抑制裂缝扩展、改善界面粘结性能，减缓水稳定性衰减。

3.3. 海水侵蚀工况下水稳定性分析

海水侵蚀工况模拟沿海地区的极端海水侵蚀环境，测试三种温拌沥青混合料在模拟海水(NaCl 含量 3.5%、MgCl₂ 含量 0.5%、CaCl₂ 含量 0.1%)浸泡不同时间(24 h、48 h、72 h、96 h、120 h)后的 TSR 值、残留稳定度、动态稳定度，浸泡温度控制为 25℃，测试数据均为 3 个平行样的平均值，标准差 ≤2.6，数据可靠性良好。

3.3.1. TSR 值变化规律分析

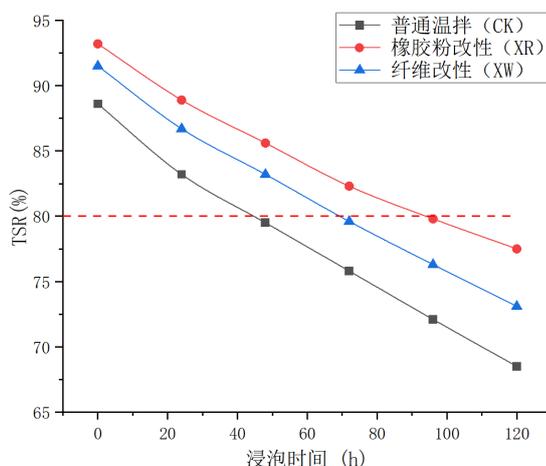


Figure 7. Test results of TSR values for three mixtures under seawater erosion conditions (%)

图 7. 海水侵蚀工况下三种混合料 TSR 值测试结果(%)

由图7可知,海水侵蚀工况下三种温拌沥青混合料 TSR 值随海水浸泡时长持续下降。三组数据差异明显,三种温拌沥青混合料 TSR 值随海水浸泡时长持续下降,变化趋势与清水浸泡一致,但衰减幅度更大、混合料间差异更突出。未浸泡时,三者 TSR 值与清水浸泡工况一致(XR 93.2%, XW 91.5%, CK 88.6%),均满足 $\geq 80\%$ 规范要求,初始抗冻融能力不受浸泡介质影响。TSR 值随海水浸泡呈现前期(0~72 h)快、后期(72~120 h)缓的衰减特征,且相同时长下数值均低于清水浸泡,体现海水劣化作用更强。衰减特性上,CK 衰减最快(48 h 首次不合格,120 h 总衰减 22.7%),XR 衰减最慢(120 h 总衰减 16.8%),XW 性能介于二者之间。机制上,TSR 值衰减是水分侵蚀与盐分腐蚀的协同作用,劣化机制较清水浸泡更复杂;XR 可通过吸附海水盐分、增强胶结料抗腐蚀性减缓衰减,XW 仅能强化结构整体性,对盐分腐蚀改善有限,抗海水侵蚀能力较弱。

3.3.2. 残留稳定度规律分析

海水侵蚀工况下,三种温拌沥青混合料残留稳定度变化规律与 TSR 值一致,随海水浸泡时长下降,且衰减幅度显著大于清水浸泡,如图8所示。未浸泡时,三者残留稳定度均高于 85% 规范要求,数值与清水浸泡工况一致;相同时长下海水浸泡数值更低,海水劣化作用更显著。衰减特性上,CK 衰减最快(72 h 首次不合格,120 h 总衰减 21.3%),较清水浸泡提前 24 h、衰减幅度提升 6.5 个百分点;XR 衰减最慢(120 h 总衰减 16.7%),抗海水浸泡能力最优;XW (总衰减 19.9%)性能介于二者之间,72 h 后不合格,较清水浸泡提前 24 h。机制上,衰减为水分软化与盐分腐蚀协同作用,XR 通过增强结构稳定性、改善胶结料抗腐蚀性及吸附海水盐分减缓衰减,XW 仅能强化结构整体性,对胶结料抗腐蚀、抗软化改善有限,衰减幅度更大。

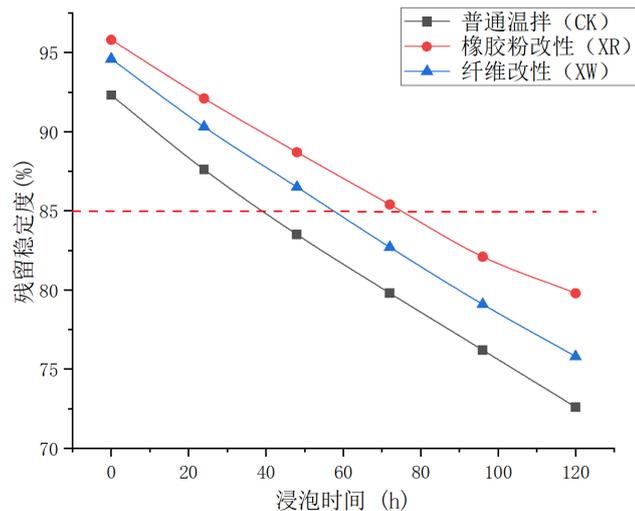


Figure 8. Test results of residual stability of three mixtures under seawater erosion conditions (%)

图8. 海水侵蚀工况下三种混合料残留稳定度测试结果(%)

3.3.3. 动态稳定度变化规律分析

三种温拌沥青混合料动态稳定度随海水浸泡时长显著下降,衰减幅度大于清水浸泡且速率均匀,如图9所示。未浸泡时,三者均满足 ≥ 2800 次/mm 规范要求(XR 3650 次/mm、XW 3420 次/mm、CK 2980 次/mm),与清水浸泡工况一致。其衰减速率均匀(无快慢差异),不同于清水浸泡后期放缓,源于盐分腐蚀的持续性,且相同时长下海水浸泡数值更低,劣化作用更强。衰减特性上,CK 衰减幅度最大(37.9%),72 h 首次不合格,120 h 后降至 1850 次/mm;XR 衰减最小(33.7%),120 h 后达 2420 次/mm,抗海水侵蚀性

能最优；XW(衰减 35.1%)性能介于二者之间，72h 后不合格。机制上，衰减为水分软化、盐分腐蚀与结构损伤协同作用，XR 凭借弹性、耐磨性及改善胶结料抗腐蚀性减缓衰减，XW 仅能抑制裂缝扩展，对胶结料抗腐蚀及盐分结晶应力吸收不足，衰减幅度更大。

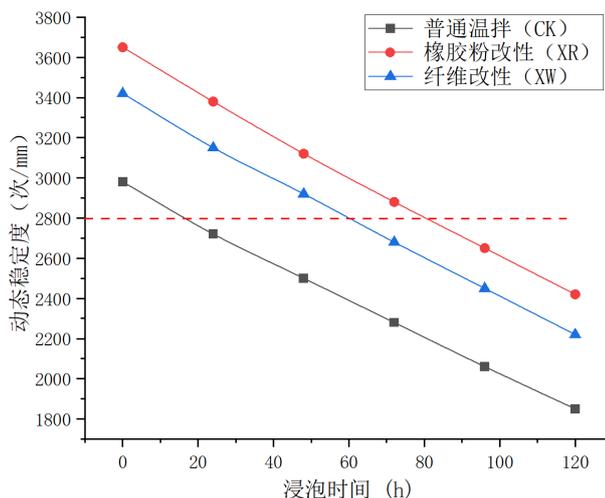


Figure 9. Test results of dynamic stability of three mixtures under seawater erosion conditions (cycles/mm)
图 9. 海水侵蚀工况下三种混合料动态稳定度测试结果(次/mm)

3.3.4. 海水侵蚀工况综合分析

综合三种指标测试结果及与清水浸泡对比可知，海水侵蚀对温拌沥青混合料水稳定性的劣化作用显著强于强降雨工况，海水浸泡时间和盐分腐蚀是核心影响因素，不同改性方式提升效果差异明显。随着海水浸泡时长延长，三种混合料的 TSR 值、残留稳定度、动态稳定度均持续衰减，且幅度大于清水浸泡，120h 后各项指标均低于合格标准，普通温拌混合料劣化最严重。抗海水侵蚀能力排序为 XR > XW > CK，其中 XR 表现最优，是最适合沿海地区应用的类型，CK 抗蚀能力最差，难以满足工程要求。海水侵蚀劣化机制核心为水分与盐分协同作用，盐分腐蚀是区别于清水浸泡的关键因素，改性剂主要通过改善胶结料抗腐蚀性、增强界面粘结等减缓衰减。相较于清水浸泡，海水会加剧劣化、缩短服役时间，因此沿海地区应用温拌沥青路面时，应优先选用 XR，并配套采取防腐、防水措施提升抗海水侵蚀能力。

3.4. 盐冻耦合工况下水稳定性分析

盐冻耦合工况模拟沿海高寒地区的极端环境，该地区同时存在海水侵蚀和反复冻融循环的双重作用，形成“盐分 + 冻融”的耦合劣化效应，其对温拌沥青混合料水稳定性的劣化作用远强于单一工况。测试三种温拌沥青混合料在盐冻耦合(3.5% NaCl 溶液浸泡 + 反复冻融循环)不同次数(10 次、15 次、20 次、25 次、30 次，均 > 10 次)后的 TSR 值、残留稳定度、动态稳定度，冻融循环参数与反复冻融循环工况一致(冻结温度 -18°C 、冻结时间 12 h，融化温度 25°C 、融化时间 12 h)，测试数据均为 3 个平行样的平均值，标准差 ≤ 3.0 ，数据可靠性良好。

3.4.1. TSR 值变化规律分析

由图 10 可知，盐冻耦合工况对三种温拌沥青混合料 TSR 值的劣化作用显著。三种混合料间性能差异进一步扩大，其均随盐冻耦合循环次数增加快速持续下降，衰减幅度远大于单一冻融循环和海水侵蚀工况，混合料间差异更突出。未处理时，三者 TSR 值与其他工况一致，均满足 $\geq 80\%$ 规范要求；TSR 值随循环次数均匀衰减(无放缓趋势)，与冻融循环趋势一致，但劣化更严重，30 次耦合循环后 CK 的 TSR

值(53.2%)远低于同期单一工况数值,体现显著协同劣化效应。衰减特性上,CK 衰减最显著(总衰减 39.9%), 10 次循环后首次不合格,较单一工况提前,难以满足沿海高寒地区长期服役要求;XR 衰减最慢(总衰减 25.4%), 30 次后达 69.5%,抗盐冻耦合能力最优;XW(总衰减 33.6%)性能介于二者之间,15 次循环后不合格。机制上,衰减是冻融损伤、盐分腐蚀与水分侵蚀的协同作用,呈 1+1>2 效应,XR 凭借弹性吸收应力、吸附盐水及改善胶结料抗腐蚀性减缓衰减,XW 仅能抑制裂缝扩展,对应力吸收和盐分腐蚀改善有限,抗耦合劣化能力较弱。

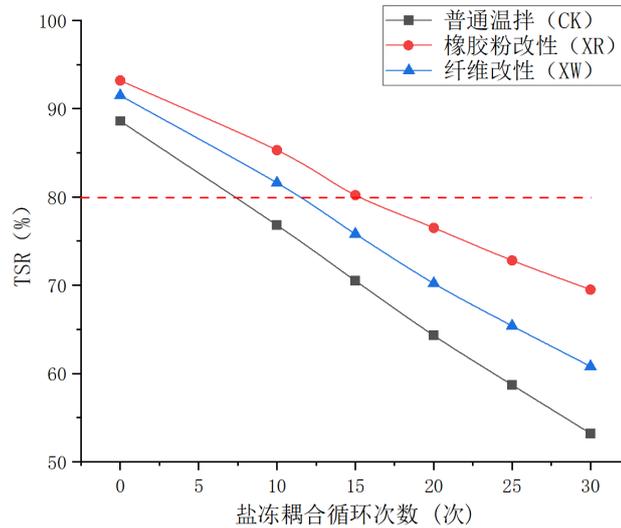


Figure 10. Test results of TSR values for three mixtures under salt-freeze coupling conditions (%)
 图 10. 盐冻耦合工况下三种混合料 TSR 值测试结果(%)

3.4.2. 残留稳定度变化规律分析

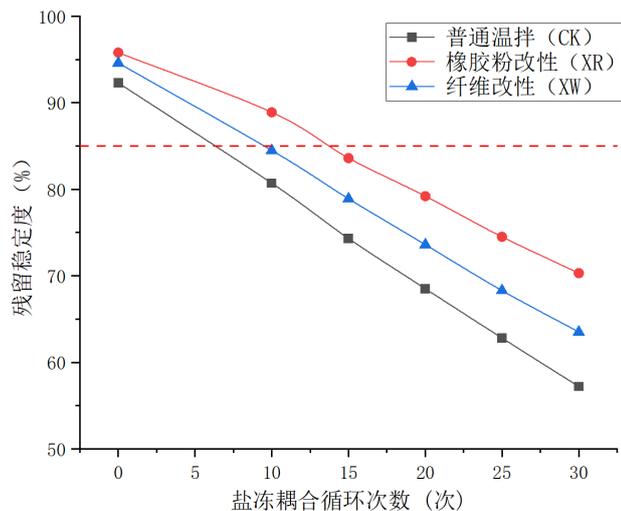


Figure 11. Test results of residual stability of three mixtures under salt-freeze coupling conditions (%)
 图 11. 盐冻耦合工况下三种混合料残留稳定度测试结果(%)

由图 11 分析可知,盐冻耦合工况下,三种温拌沥青混合料残留稳定度随耦合循环次数的变化规律与 TSR 值趋同,均呈持续快速下降态势,衰减幅度远超单一冻融循环及海水侵蚀工况,且不同混合料的抗

盐冻耦合性能差异显著。未处理状态下,三者残留稳定度均远超 85% 的规范要求,与其他工况数值一致;随循环次数增加,残留稳定度均匀衰减且无放缓趋势,与冻融循环趋势一致,但相同循环次数下数值显著低于单一冻融工况,协同劣化效应突出,30 次耦合循环后三者残留稳定度均大幅低于规范要求,远不及同期单一工况水平。从衰减特性来看,普通温拌混合料(CK)衰减最为迅猛,总衰减达 38.0%,10 次循环后即首次不合格,较单一工况明显提前,难以适配沿海高寒极端环境;橡胶粉改性温拌混合料(XR)衰减最慢,总衰减仅 26.6%,15 次循环后才首次不合格,30 次后残留稳定度仍达 70.3%,抗盐冻耦合能力最优;纤维改性温拌混合料(XW)总衰减 32.9%,性能介于二者之间,15 次循环后不合格,改性对协同劣化的改善效果有限。机制层面,残留稳定度衰减是冻融损伤、盐分腐蚀与水分软化的协同叠加作用,盐水的冰点特性、盐分离子腐蚀及渗透压作用,共同加剧混合料内部裂缝扩展、沥青老化脆化及界面剥离;XR 凭借弹性应力吸收、胶结料抗腐蚀改善及盐水吸附作用减缓衰减,而 XW 仅能轻微抑制裂缝扩展,对应力吸收和盐分腐蚀的改善作用不足,故衰减幅度较大。

3.4.3. 动态稳定度变化规律分析

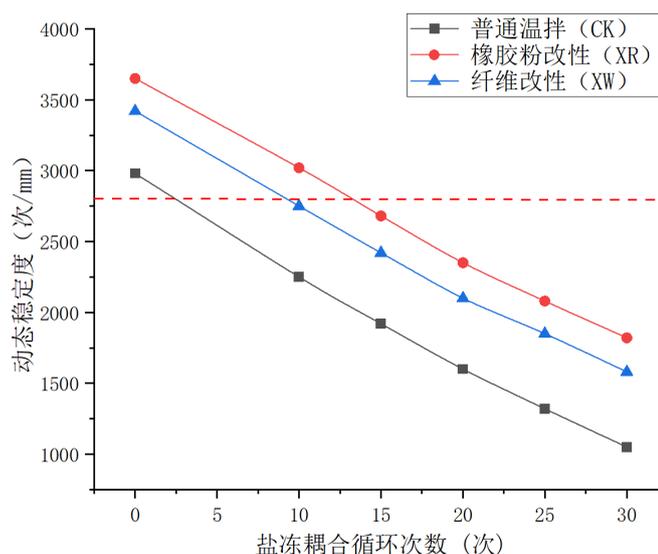


Figure 12. Test results of dynamic stability of three mixtures under salt-freeze coupling conditions (cycles/mm)

图 12. 盐冻耦合工况下三种混合料动态稳定度测试结果(次/mm)

结合图 12 数据可知,盐冻耦合工况下,三种温拌沥青混合料动态稳定度随耦合循环次数快速下降,衰减幅度显著大于单一冻融、海水侵蚀工况,且衰减速率均匀,混合料间结构稳定性差异突出。未处理时,三者均满足 ≥ 2800 次/mm 的规范要求(XR 3650 次/mm、XW 3420 次/mm、CK 2980 次/mm),与其他工况保持一致;随循环次数增加,动态稳定度持续快速均匀衰减,无明显快慢分化,相同循环次数下数值远低于单一冻融工况,协同劣化效应显著,30 次耦合循环后三者总衰减均超 50%,均远低于规范要求。衰减特性上,CK 衰减幅度最大(64.8%),10 次循环后首次不合格,30 次后仅 1050 次/mm,结构稳定性明显下降。CK 在 10 次循环后即低于规范要求,难以满足极端环境长期服役需求;XR 衰减最小(50.1%),15 次循环后首次不合格,30 次后达 1820 次/mm,抗盐冻耦合、抗变形能力最优;XW 总衰减 53.8%,性能介于二者之间,10 次循环后不合格,改性对结构破坏的改善作用有限。机制上,动态稳定度衰减是冻融损伤、盐分腐蚀与结构松散的协同作用,劣化机制更为复杂;XR 通过弹性应力吸收、胶结料性能改善及盐水吸附,有效维持结构完整性和抗变形能力,而 XW 仅能增强颗粒联结、轻微抑制裂缝扩展,无法

抵御多重协同劣化作用，故衰减显著。

3.4.4. 盐冻耦合工况综合分析

综合三项指标测试结果及与单一工况对比可知，盐冻耦合工况对温拌沥青混合料水稳定性的劣化作用远强于单一冻融、海水侵蚀工况，协同劣化效应显著，盐冻耦合循环次数是核心影响因素，不同改性方式提升效果差异明显。随耦合循环次数增加，三种混合料三项指标均持续快速均匀衰减，无放缓趋势，30次循环后各项指标均远低于规范要求，CK劣化程度最高，动态稳定度衰减达64.8%。抗盐冻耦合能力排序仍为XR > XW > CK，其中XR表现最优，30次循环后三项指标仍保持一定水平，适合沿海高寒地区应用；CK在10次循环后即低于规范要求，难以满足极端环境长期服役需求；XW改善作用有限，难以满足长期服役要求。协同劣化机制核心为交替应力致裂缝损伤与盐分离离子腐蚀的协同作用，叠加水分、盐分的多重影响加剧劣化。改性效果方面，XR通过应力吸收、抗腐蚀、界面增强三重作用减缓劣化，而纤维改性仅能轻微抑制裂缝扩展，无法应对应力损伤与盐分腐蚀，改善效果有限。

4. 结语

本章通过模拟极端环境工况，对三种温拌沥青混合料的水稳定性进行了系统测试与分析，明确了各工况下混合料水稳定性的变化规律、劣化机制，对比了不同改性方式的提升效果，得出以下结论：

(1) 极端环境工况对温拌沥青混合料水稳定性的劣化程度差异显著，综合排序为：盐冻耦合工况 > 反复冻融循环工况 > 海水侵蚀工况 > 强降雨工况，其中盐冻耦合工况的协同劣化效应最为显著，是对混合料水稳定性影响最强的极端环境类型。

(2) 改性剂的添加可有效提升温拌沥青混合料的水稳定性，但不同改性方式的提升效果差异明显，橡胶粉改性的提升效果远优于纤维改性，其核心原因是橡胶粉可同时改善混合料的抗应力损伤、抗盐分腐蚀、抗水分侵蚀能力，而纤维改性仅能增强内部结构整体性，无法应对化学腐蚀和应力损伤。

(3) 三种温拌沥青混合料的水稳定性综合排序为：橡胶粉改性温拌混合料(XR) > 纤维改性温拌混合料(XW) > 普通温拌混合料(CK)，其中橡胶粉改性混合料更适用于极端环境地区，纤维改性混合料仅适合强降雨等劣化较轻的极端环境，普通温拌混合料在极端环境地区的长期服役适应性较差。

(4) 不同极端工况的劣化机制存在差异：强降雨工况以水分物理侵蚀为主；反复冻融循环工况以冻融应力损伤 + 水分侵蚀为主；海水侵蚀工况以盐分化学腐蚀 + 水分侵蚀为主；盐冻耦合工况以冻融应力损伤 + 盐分化学腐蚀 + 水分侵蚀的协同作用为主，其中应力损伤和化学腐蚀是导致混合料快速劣化的核心因素。

参考文献

- [1] 李闯玉. 高寒高海拔地区沥青路面病害机理与防治技术探微[J]. 房地产导刊, 2025(2): 18-20.
- [2] 杜顺成, 杨妍, 王锐. 山区强降雨环境下沥青路面结构性能预测[J]. 西安工业大学学报, 2022, 42(2): 139-146.
- [3] 胡健. 高寒地区沥青路面低温开裂机理及防治措施研究[J]. 运输经理世界, 2025(3): 125-127.
- [4] 梁波, 张海涛, 梁缘, 等. 温拌沥青技术研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(2): 24-46.
- [5] 卜宗. 温拌沥青技术在沥青路面施工中的应用研究[J]. 工程建设与设计, 2025(2): 95-97.
- [6] 赵梓霖. 公路路面施工中温拌沥青技术的应用[J]. 人民交通, 2025(21): 71-73.
- [7] 白永厚, 安炬峰, 刘斌. 温拌沥青技术及混合料路用性能研究综述[J]. 青海交通科技, 2025, 37(1): 49-53.
- [8] 张振刚. 市政道路施工中温拌沥青技术的应用研究[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2025(5): 130-133.
- [9] 潘勤学, 姜舜君, 吕松涛, 等. 多因素耦合下沥青混合料拉压差异力学特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(9): 1341-1352.
- [10] 雷笑秋, 张小毛. 基于荷载与环境因素的沥青路面力学响应研究进展[J]. 四川水泥, 2025(4): 194-198.