DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260614

广东沿海高速盐蚀路面耐久性及养护对策研究

古传威
(广东交通实业投资有限公司西部沿海分公司,广东 台山 529231)

摘 要: 针对广东沿海高温、高湿、高盐雾环境下沥青路面盐蚀病害频发、耐久性下降的问题,依托典型高速路段开展现场病害调研与氯离子分层检测,并设计室内干湿循环加速侵蚀试验,测试沥青混合料的马歇尔稳定度、劈裂抗拉强度及冻融劈裂残留强度比;同时对比普通沥青、SBS改性沥青热再生、防水防渗封层、SMA密实结构热再生4类养护技术的抗盐蚀性能与经济性。结果表明:氯离子在路面表层0~1 cm处富集最高,临海路段盐蚀损伤显著高于内陆;30次干湿循环后冻融劈裂残留强度比降幅超40%;4类养护技术中,SMA密实结构热再生面层抗盐蚀最优(耐久12~15年),SBS改性沥青热再生性价比突出。据此构建的分区差异化全寿命盐蚀防控与绿色养护体系,可为华南沿海高速公路耐久提升及低碳养护提供参考。

关键词: 广东沿海高速;氯盐侵蚀;路面养护;耐久性衰减;预防性养护
中图分类号: U418.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2026)11-0339-05

Research on Durability and Maintenance Countermeasures of Salt-Attacked Pavement on Guangdong Coastal Expressway

GU Chuanwei
(Guangdong Transportation Industrial Investment Co., Ltd., Western Coastal Branch, Taishan 529231, China)

Abstract: To address the problems of frequent salt erosion distresses and durability degradation of asphalt pavements under the high-temperature, high-humidity and high-salt-spray environment along the Guangdong coast, field distress investigations and chloride ion layered detection are carried out on typical expressway sections, and the indoor dry-wet cycle accelerated erosion tests are designed to evaluate Marshall stability, splitting tensile strength and freeze-thaw splitting strength ratio of asphalt mixture. The salt erosion resistance and cost-effectiveness of four maintenance techniques such as ordinary asphalt, SBS modified asphalt hot recycling, waterproof and anti-seepage seal coat, and hot-recycled SMA dense structure are compared. The results show that chloride ions accumulate most heavily in the 0~1 cm surface layer of pavement, and salt erosion damage on seaside sections is significantly higher than that on inland sections. After 30 dry-wet cycles, the freeze-thaw splitting strength ratio decreases by more than 40%. Among the four techniques, the hot-recycled SMA dense structure exhibits the best salt erosion resistance (durability of 12~15 years), while SBS modified asphalt hot recycling offers outstanding cost-effectiveness. Based on these findings, a differentiated whole-life-cycle salt erosion prevention and green maintenance system is developed, providing a reference for durability improvement and low-carbon maintenance of coastal expressways in South China.

Keywords: Guangdong coastal expressway; chloride salt erosion; pavement maintenance; durability degradation; preventive maintenance

0 引 言

广东省作为东南沿海交通枢纽省份,沿海干线高速承担区域城际通勤、港口集散物流重任。路面结构长期服役稳定性直接关乎区域路网行车安全、通行效率与社会经济效益。该地区属于典型亚热带海洋季风气候,区域年均气温22~26 ℃,空气相对湿度78%~85%,近海区域常年漂浮海盐气溶胶,近海路段大气氯离子浓度可达0.08~0.22 mg/m^3,跨海桥梁、临海迎风岸线路段盐蚀侵蚀强度为内陆衔接路段4~6倍[1-3]。高温高湿会加速沥青老化流变、促进水分渗透滞留,高盐雾则持续供给侵蚀离子。在多因素长期耦合叠加作用下,氯离子将不断沉降附着路面,并随降水渗入混合料内部孔隙,依次发生孔隙结晶膨胀、界面离子置换、骨架结构破损连锁反应,持续劣化沥青与集料界面黏附性能[4-5]。

沿海沥青路面氯盐病害具备隐蔽潜伏期长、病

收稿日期:2026-06-02
作者简介:古传威(1986—),男,本科,工程师,从事交通基础设施养护管理(营运高速公路养护管理)工作。

害扩展速度快、后期修复难度高、重复复发率高等特点[6-7],传统内陆常规养护工艺无法有效阻隔氯离子纵向渗透,极易诱发早期表层破损、结构性松散、大面积坑槽病害,迫使道路频繁开展养护施工,大幅增加交通管制频次与全周期养护成本[8-9]。

当前国内外道路盐蚀相关研究,大多聚焦于北方冬季道路除冰盐冻融耦合损伤,而南北地区侵蚀环境差异导致既有研究成果无法直接套用至广东沿海高速工程[10-11]。因此,本文结合现场长期监测数据与室内加速模拟试验,全面分析沿海高速路面盐蚀发育现状、内在损伤机理、材料耐久差异,并据此建立分区分级长效养护管控体系,完善华南湿热沿海地区沥青路面抗盐蚀设计与养护技术方案。

1　广东沿海高速路面盐蚀现状调研

1.1　现场病害发育程度统计

本文选取广东临近沿海高速公路典型运营路段,连续3年开展全域路况普查、破损尺寸测量、病害等级评定与现场归档统计。按照病害出现时间、影响范围、破损严重程度,量化统计不同类型盐蚀病害所占路段里程比例、平均破损周期以及区域分布规律,如表1所示。

表1　沥青路面盐蚀病害统计

病害类型	路段里程占比/%	平均出现年限/年	主要病害高发区域
表层盐蚀剥落	42.3	3~4	临海迎风路段、跨海桥梁桥面
集料-沥青界面脱黏	31.6	4~5	低洼积水路段、高氯潮湿路段
水稳劣化坑槽破损	18.7	5~6	路面横向缝隙、长期积水区域
荷载耦合疲劳网裂	7.4	6~8	重载密集路段、长纵坡路段

结合多年现场监测数据对比分析,广东沿海高速早期病害以表层盐蚀剥落为主,中后期逐步发展为界面脱黏与结构性坑槽;不同距离海岸线路段病害严重程度存在显著梯度差异,临海路段病害等级、破损速率、病害扩散范围均显著高于内陆路段。

各路段病害综合等级分布规律如图1所示。

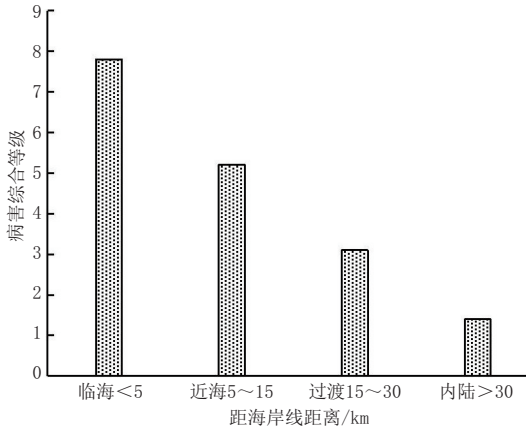


图1　不同距离路段路面盐蚀病害综合等级分布

1.2　路面氯离子竖向分布规律

采用钻芯取样,分别对迎风临海高盐路段、背风内陆低盐路段进行竖向分层取样,再通过离子色谱法检测不同深度沥青混合料氯离子含量,精准探明氯盐在路面结构内部迁移、扩散、富集规律,结果见表2。

表2　不同深度路面混合料氯离子含量检测

路面深度/cm	氯离子含量/(mg·kg^{-1})	
	迎风临海段	背风内陆段
0~1	826	312
1~2	513	185
2~3	274	76
3~5	98	29

由表2可知,沿海高速路面氯离子呈现显著表层富集、逐层衰减分布特征:路面表层0~1 cm区域氯离子浓度最高,侵蚀破坏作用最强;伴随着结构深度增加,氯离子渗透阻力增大,含量快速下降。同等深度位置下,临海路段氯离子含量远高于内陆路段,结构长期累积盐蚀损伤风险差距明显。

2　氯盐环境沥青路面劣化机理

在高温高湿海洋盐雾长期耦合作用下,氯盐通过物理结晶膨胀与界面化学置换双重方式持续损伤沥青路面结构,不断破坏混合料骨架密实状态与沥青-集料界面黏结性能,进而造成沥青混合料各项路用性能随侵蚀周期持续劣化[12-14]。

本文通过室内模拟广东沿海高温高湿盐雾干湿循环环境,依次设置0、10、20、30次梯度侵蚀循环,严格依照《公路工程沥青混合料试验规范》(JTG 3410—2025),测试不同循环阶段沥青混合料马歇尔稳定度、劈裂抗拉强度、冻融劈裂残留强度比3项核心路用性能指标,结果见表3。

表3　盐蚀干湿循环下沥青混合料力学与水稳性能变化

循环次数/次	马歇尔稳定度/kN	劈裂抗拉强度/MPa	冻融劈裂残留强度比/%
0	9.8	0.92	87.6
10	8.3	0.71	72.3
20	7.1	0.55	60.1
30	6.2	0.43	51.7

由表3可知,随着氯盐干湿循环次数持续增加,沥青混合料整体承载力学性能、抗水损害性能均呈持续衰减趋势,侵蚀循环时长越久,内部累积损伤越严重。经过30次干湿循环后,混合料冻融劈裂残留强度比降幅超过40%,路面结构整体性、水稳定性大幅下降,在行车动荷载反复作用下极易快速出现结构性破损。这表明广东区域长期高温环境加速了沥青热氧老化,沥青由柔性黏结状态转变为脆性状态,自身延展性、包裹黏结能力持续下降。高湿滞留环境不断弱化界面分子吸附作用力,降低界面黏结稳定性。叠加氯离子化学置换侵蚀,多重环境耦合共同造成沥青-集料界面不可逆损伤脱黏。界面缝隙形成后,水分与氯离子持续深入路面中下层结构,进一步软化基层混合料,诱发沉陷、推移等复合型病害,大幅缩减沥青路面正常服役使用寿命。

3　不同抗盐蚀养护技术性能对比

结合广东沿海高速养护工程实际工况,统一原材料指标、试验温度、干湿循环次数、加载条件等试验参数,选取普通基质沥青面层、SBS改性沥青热再生面层、防水防渗黏结封层、SMA密实结构热再生面层4类区域主流养护处置技术。需要说明的是,SBS与SMA分属不同技术范畴,SBS作为沥青改性剂,主要通过改善胶结料黏结力与抗老化性能来抵御盐蚀破坏。而SMA即沥青玛蹄脂碎石混合料,是一种骨架密实型级配,依靠降低混合料孔隙率、切断氯离子渗透路径来提升抗盐蚀效果。2种技术可根据工程需求独立或组合应用。本次选取的4类养护方案中,普通沥青面层采用AC结构;SBS改性沥青热再生面层在AC级配基础上使用SBS改性沥青;防水防渗黏结封层包含碎石同步封层、稀浆微表处等工艺;SMA密实结构热再生面层采用SMA级配,且统一选用SBS改性沥青。上述2种热再生面层均依托就地、厂拌热再生技术完成旧料循环利用,契合广东绿色低碳养护发展方向,可满足沿海高温、高湿、高盐雾路段的使用要求。

在室内开展30次标准盐雾干湿循环加速侵蚀试验,系统检测各组试件界面抗剥落系数、盐蚀后水稳残留比、预估耐久服役年限,同步结合广东地区工程市场行情来核算单位施工成本,从技术耐久性、工程实用性、经济合理性多维度开展综合对比分析,得到4类养护工艺关键性能与工程经济指标参数,见表4。

表4　不同养护方案盐蚀耐久性能与工程经济指标对比

养护类型	界面抗剥落系数	盐蚀后水稳残留比/%	预估耐久年限/年	单位施工成本/(元·m^{-2})
普通沥青面层	0.58	52.1	3~4	86
SBS改性沥青热再生面层	0.79	70.5	6~7	112
防水防渗黏结封层	0.85	78.3	8~9	135
SMA密实结构热再生面层	0.93	86.7	12~15	178

由表4可知,4类养护技术的抗氯盐侵蚀能力、长期耐久年限与施工造价呈明显正向相关关系。SBS改性沥青与SMA密实结构面层均采用热再生绿色施工模式,但结构与耐久性能存在层级差异。其中SMA密实结构热再生面层骨架嵌挤效应强、内部孔隙率低,氯离子阻隔性能、界面抗剥离性能、高温抗老化性能最为突出,可长期阻断盐雾与水分渗透,适配沿海高盐雾、高湿度恶劣服役环境,但其单位施工成本相对较高。普通沥青面层自身抗盐蚀能力薄弱,界面黏结性能易受氯离子侵蚀破坏,仅能满足内陆低盐蚀路段养护需求。SBS改性沥青热再生面层依托热再生技术实现旧料再生提质,沥青胶浆黏结力、抗老化及抗盐蚀性能显著优于普通沥青,造价处于中等水平,综合性价比适中。防水防渗黏结封层以阻盐防水为核心功能,可有效封堵路面表层微裂缝,延缓氯离子侵入速率,适合路面无明显病害时的预防性养护施工。

综合路段盐蚀等级、交通荷载、工程预算等因素,4类养护技术适用场景差异显著。实际工程中应遵循因地制宜、按需选型、绿色低碳原则,针对强、中、弱不同盐蚀路段匹配对应养护工艺。强盐蚀临海路段优先采用SMA密实结构热再生面层;中盐蚀路段选用SBS改性沥青热再生面层配合防水封层;弱盐蚀内陆路段以常规防渗封层预防性养护为主。如此既可避免因养护不足导致病害频发,又可杜绝因过度养护造成资金浪费。

4　广东沿海高速路面长效盐蚀养护体系构建

结合广东沿海高速盐蚀病害分布规律、氯离子侵蚀特征及不同养护技术适用性,立足区域高温、高湿、高盐雾的特殊气候条件,构建分区差异化防控、全寿命周期管控、精细化施工落地、常态化监测优化的一体化长效盐蚀养护体系,实现路面盐蚀病害从源头防控、中期养护到后期修复的全周期闭环管理,

最大程度地延缓路面盐蚀劣化进程，提升路面服役耐久性。

4.1　分区差异化防控原则

依据现场大气氯离子实时监测浓度、路面病害发育等级、与海岸线距离、交通荷载等级及路面结构状态，将广东沿海高速全域路段科学划分为强盐蚀、中盐蚀、弱盐蚀3个等级区域，针对不同等级区域制定专属防控策略。强盐蚀路段为距海岸线5 km以内、大气氯离子浓度大于0.15 mg/m³的临海迎风路段、跨海桥梁及潮汐影响路段，采用SMA密实结构热再生面层+双层防水阻隔封层复合防护方案，利用SMA低孔隙密实结构阻盐防渗优势，结合热再生绿色施工形成双层长效阻盐防护体系；中盐蚀路段为距海岸线5~15 km、大气氯离子浓度0.08~0.15 mg/m³的一般沿海路段，以SBS改性沥青热再生面层为主体结构，每3年实施一次防水防渗封层，同步修复路面微裂缝，兼顾抗盐蚀性能、工程经济性与再生低碳效益；弱盐蚀路段为距海岸线15 km以上、大气氯离子浓度小于0.08 mg/m³的内陆衔接路段，以常规预防性封层为主，每年开展一次氯离子含量监测，及时处置早期微小病害，实现低成本长效防控。

4.2　全寿命周期闭环养护流程

按照路面建设期、运营初期、中期、后期及病害高发期全生命周期制定分级管控措施。建设期优先选用碱性集料与高黏度抗盐蚀沥青，优化混合料配合比并提高压实密实度，从源头提升路面自身抗盐蚀能力。同时立足广东省绿色低碳养护发展导向，在路面大中修阶段统一推行热再生施工工艺，依据路段盐蚀等级差异化选用方案。中盐蚀路段采用SBS改性沥青热再生恢复路面服役性能，强盐蚀路段则升级重构为SMA骨架密实热再生结构，既实现废旧沥青材料循环再生利用，又从沥青材料与路面结构层面同步提升路段的抗盐蚀耐久性能。

（1）运营初期：通车1~3年，以预防性养护为主，每年路况检测，封堵微裂缝、施作超薄阻盐封层。

（2）运营中期：通车4~8年，盐蚀缓慢发展期，每2~3年全面养护，优先采用SBS、SMA两类热再生工艺开展病害铣刨修复与防水封层更新。

（3）运营后期：通车9年以上，加大养护频次，局部坑槽网裂采用改性沥青修补，性能衰减严重路段采用SMA或SBS热再生罩面修复，抑制病害大面积扩散。

重度盐蚀破损路段需彻底铣刨破损面层，采用热再生工艺重新铺筑SBS或SMA抗盐蚀面层+防水封层，恢复结构耐久性能。

4.3　养护施工质量管控要点

针对不同养护工艺制定专项施工标准，强化关键环节质量把控，确保养护技术效果落地。

（1）SMA与SBS热再生面层施工时，需严格把控就地或厂拌热再生拌合温度、再生剂掺量、旧料掺配比例，优化摊铺、碾压施工工艺，提高混合料整体压实度，减小内部空隙率，降低氯离子渗透通道。同时做好施工接缝精细化处理，防止水分与盐雾沿接缝渗入路面结构内部。

（2）环氧复合防腐罩面施工时，需先对原路面进行精细化铣刨、清理，保证基层表面干燥、洁净，严格控制环氧材料拌合比例、摊铺温度与压实度，避免施工过程中混入水分，影响固化效果。

（3）防水防渗封层施工需选择晴好天气，控制封层材料喷洒量均匀性，避免出现漏洒、堆积现象，施工后做好交通管制，保证材料充分固化成型。

（4）施工全过程需建立质量监督机制，安排专人负责原材料抽检、热再生及各类养护工序全过程管控、成品质量检测，全程把控施工质量，充分发挥SBS、SMA热再生结构及各类养护工艺的抗盐蚀防护效果。

5　结　语

（1）广东沿海高速盐蚀病害以表层剥落、集料-沥青界面脱黏为主要类型，氯离子在路面表层高度富集，临海路段病害发育速度、破损严重程度均显著高于内陆路段，病害呈现明显梯度分布特征。临海迎风路段受海盐雾长期侵袭影响，表层盐蚀剥落病害高发，低洼积水区域更容易出现界面黏结失效与水损害坑槽，重载路段进一步加剧疲劳网裂病害发育。病害空间分布与距海距离、环境湿度、交通荷载高度相关。

（2）氯盐孔隙结晶物理膨胀、界面化学黏附剥离共同造成路面结构劣化。干湿循环次数越多，混合料力学强度、水稳定性能衰减越显著，路面累积损伤持续加重。高温环境加速盐分结晶膨胀、挤压混合料骨架，氯离子持续破坏沥青-集料界面吸附结构。在多重环境耦合作用下，路面内部微裂缝不断扩展贯通，水稳定性与整体承载性能持续下降，形成恶性循环式结构损伤。

（3）4类常用养护技术耐久抗蚀差异显著，其中

SBS 改性沥青（材料改性）与 SMA 密实结构（级配优化）均可采用热再生绿色施工技术。其中 SMA 密实结构热再生面层抗盐侵蚀、抗渗抗老化性能最优，适配沿海强盐蚀路段。SBS 改性沥青热再生面层造价适中、综合性价比突出，适合中盐蚀路段推广。可按照路段盐蚀等级分区匹配选用，兼顾路面耐久性、工程经济性与低碳养护需求。

（4）构建的分区分级全寿命闭环养护体系，从源头防控、分阶段养护、施工管控到监测优化形成完整闭环，能够有效延缓路面盐蚀劣化进程，降低长期养护资金投入，延长路面使用寿命，显著减少病害复发频次与交通管控影响，具备广泛工程推广应用价值。同时契合广东省公路绿色低碳养护发展理念，倡导推广热再生循环利用工艺，工程实践中可结合再生技术实现沥青材料改性升级与路面结构优化改造，兼顾盐蚀防控、低碳环保与长期服役效益，可为华南沿海同类高速路面养护工程提供借鉴与推广价值。

参考文献：

[1] 尹海佳，范洪源．浅谈西部沿海高速公路新会段沥青路面典型病害调查与分析[J]．科技资讯，2016，14（5）：154-156.

[2] 张于平，曾思清，王端宜，等．超长服役期沥青路面内部损伤规律研究[J]．武汉理工大学学报（交通科学与工程版），2022，46（5）：907-911.

[3] 刘宏．广东省高速公路沥青路面结构使用性能调查与分析[D]．广州：华南理工大学，2016.

[4] 谢杰辉．滨海软基高速公路沉降变形机制及病害防治对策[D]．广州：华南理工大学，2022.

[5] 周志刚，李浩嘉，刘鑫，等．湿热环境下海盐侵蚀对沥青-集料界面体系的损伤效应分析[J]．建筑材料学报，2020，23（6）：1430-1439.

[6] 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.

[7] 熊锐，蒋汶玉，李科宏，等．氯盐侵蚀条件下沥青混合料性能损伤评价[J]．应用化工，2020，49（3）：545-549；554.

[8] Wang R, Luo L, Zhao Y, et al. Effect of chloride salt migration at interfaces on asphalt-aggregate adhesion: A molecular dynamics study [J].Construction and Building Materials, 2024, 428136310-136310..

[9] 陆伟铭．沿海湿热多雨地区沥青路面抗氯盐侵蚀研究[J]．西部交通科技，2025（5）：55-58；209.

[10] 徐霈，吴强，李婵婵，等．盐蚀作用下沥青混合料路用性能劣化规律研究[J]．公路交通技术，2022，38（6）：1-6.

[11] 王欣宇，惠迎新，李博文，等．盐蚀-干湿-冻融耦合作用下钢渣-SBS/胶粉复合改性沥青的界面黏附损伤特性[J]．材料科学与工程学报，2025，43（5）：833-843.

[12] Zhengwu L, Nanning G, Yue X, et al. Nanomechanical experiments and molecular dynamics explorations for the deterioration evolution of asphalt driven by chloride salt erosion[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35（11）: 16100.

[13] 褚召阳，郭乃胜，房辰泽，等．氯盐环境下沥青与沥青混合料性能及劣化机理研究进展[J]．材料导报，2023，37（15）：81-89.

[14] 陈华梁，沙爱民，蒋玮，等．盐-湿-热循环条件下沥青混合料的力学行为特性[J]．公路交通科技，2016，33（12）：42-47.