

融雪盐冻融耦合环境下混凝土护栏劣化特性及柔性协同防护涂料的研究

张展¹, 吴磊², 李玉龙³, 余秋伯³

¹安徽省交通控股集团有限公司宁宣杭高速公路管理中心, 安徽 宣城

²安徽交控工程集团有限公司, 安徽 合肥

³重庆交通大学材料科学与工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年7月11日; 录用日期: 2026年9月7日; 发布日期: 2026年9月16日

摘要

混凝土护栏作为道路交通基础设施的重要安全构件, 长期暴露于融雪盐、冻融循环、干湿交替、碳化、硫酸盐侵蚀和微生物腐蚀等复杂环境中, 易发生开裂、剥落、钢筋锈蚀及承载性能下降等耐久性问题。本文围绕混凝土护栏劣化特性与柔性协同防护涂料研究现状进行综述, 系统归纳氯离子侵蚀、碳化、硫酸盐侵蚀、碱-骨料反应、生物劣化、冻融循环、干湿循环和风化等主要劣化机制, 总结成膜型、孔隙封闭型和渗透型防护涂料的研究进展及防护机理, 并分析当前研究中涂层-基体柔性协调性不足、多因素耦合作用研究薄弱和工程长期验证不足等问题。研究表明, 未来混凝土护栏防护材料应向高耐久、柔性协同、绿色环保方向发展。

关键词

混凝土护栏, 劣化机制, 防护涂料, 氯离子侵蚀, 冻融循环, 耐久性, 柔性协同

Study on Deterioration Characteristics of Concrete Guardrails under Coupled Environment of Deicing Salt and Freeze-Thaw and Flexible Coordinated Protective Coatings

Zhan Zhang¹, Lei Wu², Yulong Li³, Qiubo Yu³

文章引用: 张展, 吴磊, 李玉龙, 余秋伯. 融雪盐冻融耦合环境下混凝土护栏劣化特性及柔性协同防护涂料的研究[J]. 交通技术, 2026, 15(5): 603-613. DOI: 10.12677/ojtt.2026.155052

¹Ningxuanhang Expressway Management Center, Anhui Provincial Transportation Holding Group Co., Ltd., Xuancheng Anhui

²Anhui Traffic Control Engineering Group Co., Ltd., Hefei Anhui

³School of Materials Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

Received: July 11, 2026; accepted: September 7, 2026; published: September 16, 2026

Abstract

As critical safety components of road transportation infrastructure, concrete guardrails are continuously exposed to complex environments involving deicing salts, freeze-thaw cycles, wetting-drying alternation, carbonation, sulfate attack, and microbial corrosion. Consequently, they are prone to durability-related deterioration such as cracking, spalling, reinforcement corrosion, and degradation of load-bearing capacity. This paper reviews the deterioration characteristics of concrete guardrails and the current research status of protective coatings. The major deterioration mechanisms are systematically summarized, including chloride ingress, carbonation, sulfate attack, alkali-aggregate reaction, biodeterioration, freeze-thaw cycling, wetting-drying cycling, and weathering. Research progress and protection mechanisms of film-forming, pore-blocking, and penetrating protective coatings are also discussed. In addition, existing challenges are analyzed, including insufficient coating-substrate compatibility, limited understanding of multi-factor coupling effects, and inadequate long-term engineering validation. Studies indicate that protective materials for concrete guardrails in the future should evolve toward high durability, flexible coordination and eco-friendliness.

Keywords

Concrete Guardrail, Deterioration Mechanism, Protective Coating, Chloride Ingress, Freeze-Thaw Cycle, Durability, Flexible Coordination

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

混凝土护栏广泛应用于高速公路、城市道路、桥梁和山区道路等工程中,承担车辆防撞、导向和安全防护功能。与一般混凝土构件相比,护栏长期处于开放服役环境,直接承受雨水、紫外辐射、车辆尾气,及干湿交替等作用,耐久性问题严重,尤其在融雪盐、冻融循环耦合作用下问题更加突出。其劣化过程通常由表层或孔隙网络开始,并逐渐向内部扩展,最终导致材料密实性降低、力学性能衰退和结构服役寿命缩短。

从作用机制看,混凝土护栏劣化主要包括化学劣化和物理劣化两类。前者由侵蚀介质与水泥水化产物或钢筋发生反应引起,后者则主要源于温度、湿度和环境荷载的周期性作用。为延缓劣化,表面防护涂料已成为混凝土护栏耐久性提升的重要技术途径。依据作用方式,防护涂料可分为成膜型、孔隙封闭型和渗透型[1]。本文对上述劣化机制、防护材料及其发展趋势进行综述,以期为混凝土护栏长期安全服役提供参考。

2. 混凝土护栏劣化特性

2.1. 化学劣化

2.1.1. 氯离子侵蚀

氯离子侵蚀是混凝土护栏最具破坏性的化学劣化形式之一。融雪剂或盐雾中的氯离子可通过扩散、毛细吸附和对流作用进入混凝土内部[2]。当氯离子穿透保护层并在钢筋表面积累至临界浓度时,会破坏钢筋钝化膜,引发电化学腐蚀,同时氯离子浓度差还可能诱发宏观电池腐蚀[3]。钢筋腐蚀产物体积可达原钢筋消耗体积的 2~6 倍,其膨胀应力会导致保护层开裂、剥落,并进一步加速氯离子、水分和氧气侵入,形成恶性循环,最终造成结构承载力下降。

2.1.2. 碳化

碳化是混凝土中普遍存在的缓慢劣化过程,其本质是大气中 CO_2 与水泥水化产物发生酸碱中和反应[4]。 CO_2 沿孔隙向内部扩散,并消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C-S-H 等碱性组分。虽然碳化产物 CaCO_3 可在一定程度上填充孔隙,但其主要危害在于降低混凝土孔隙液 pH 值,使其由 12.5 以上降至 9.0 以下[5],从而破坏钢筋钝化膜稳定性,诱发钢筋锈蚀并削弱结构耐久性。

2.1.3. 硫酸盐侵蚀

硫酸盐侵蚀主要由土壤、地下水、海水或混凝土内部含硫组分中的 SO_4^{2-} 引起[6]。 SO_4^{2-} 进入混凝土后,可与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、C-A-H 和 C-S-H 等水化产物反应。初期 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 SO_4^{2-} 反应生成石膏,消耗碱性储备并削弱 C-S-H 稳定性[5][6];随后石膏与 C-A-H 反应生成钙矾石。钙矾石和石膏的体积膨胀会在孔隙中产生结晶压力,超过混凝土抗拉强度时引发开裂、剥落甚至崩解。在低温、高湿且存在碳酸根离子时,还可能发生托贝莫来石型硫酸盐侵蚀,使 C-S-H 凝胶分解为无胶凝能力产物,破坏更为严重[7]。

2.1.4. 碱-骨料反应

碱-骨料反应是影响混凝土长期耐久性的重要问题。该反应由水泥中的 Na^+ 、 K^+ 与骨料中活性组分反应生成吸水性凝胶[8]。凝胶吸水膨胀后在混凝土内部产生持续膨胀应力,诱发开裂和力学性能退化。由于该反应具有隐蔽性、长期性和不可逆性,一旦启动难以抑制,常被称为“混凝土的癌症”。其发生通常需同时满足高碱含量、活性骨料和充足水分三个条件,其中碱-硅酸反应是最常见且危害最大的形式。

2.1.5. 生物劣化

生物劣化是微生物代谢活动导致混凝土性能下降的过程,多见于潮湿、海洋及污水环境[9]。相关微生物包括硫酸盐还原菌、硫氧化细菌、硝化细菌、异养细菌和真菌等。其核心机制是微生物代谢产物,尤其酸性物质,与混凝土水化产物反应。其中生物硫酸腐蚀最具代表性:厌氧条件下硫酸盐还原菌将硫酸盐还原为 H_2S , H_2S 扩散至混凝土表面后被硫氧化细菌氧化为硫酸,从而加速表层腐蚀和强度损失。

2.2. 物理劣化

2.2.1. 冻融循环破坏

冻融循环是寒冷地区混凝土护栏常见的物理劣化形式。孔隙水在温度波动下反复冻结和融化,结冰体积约膨胀 9%,由此产生冰胀压力和静水压力[10]。当压力超过混凝土抗拉强度时,孔壁周围产生微裂纹,并随冻融次数增加而扩展。若护栏表面存在除冰盐溶液,离子浓度差还会促进水分迁移,进一步加

刷表层剥落。冻融循环具有损伤累积特征,会导致孔隙率增大、连通性增强和强度降低。

2.2.2. 干湿循环破坏

干湿循环指混凝土周期性经历浸润饱和与干燥失水过程,常见于海洋潮汐带、水位变动区、盐渍土地区及季节性冻融区[11]。盐溶液进入孔隙后,随水分蒸发达到过饱和并结晶析出。盐晶体形成伴随体积膨胀,对孔壁产生结晶压力。反复干湿循环使盐分不断溶解-再结晶,促使微裂纹萌生、扩展并连通,最终导致表层剥落甚至块状崩解。

2.2.3. 风化作用

混凝土护栏长期暴露于自然环境中,会在气候、温湿度、雨水、紫外线和污染物作用下发生风化[12]。风化是材料颜色、纹理、强度、化学组成及内部结构逐渐变化和劣变的过程,常与碳化、冻融和干湿循环共同作用,加剧混凝土表层粉化、剥落和耐久性下降。

3. 混凝土护栏应用场景

现行混凝土结构防腐涂装相关标准,为桥梁混凝土构件表面防护材料的选用、性能检测和工程验收提供了重要依据。JT/T 695、JT/T 821 等标准对混凝土桥梁结构表面防腐涂装体系、成膜型防腐涂料及相关性能指标作出了规定,能够覆盖一般桥梁混凝土构件在常规腐蚀环境下的防护需求。

然而,混凝土护栏作为直接暴露于路域环境中的交通安全设施,其服役位置、受侵蚀方式、施工条件和病害演化特征均具有一定特殊性,规范中却没有单独为混凝土护栏特殊环境下的使用提出特殊规定。尤其在融雪盐冻融耦合环境下,护栏表面防护层不仅需要具备常规防腐涂层的介质阻隔能力,还需兼顾低温柔韧性、裂缝追随性、界面变形协调能力以及长期耐候稳定性。

因此,现行规范可作为建立混凝土护栏技术指标体系的重要参考,但不宜简单、完整地套用于防护涂装材料。针对混凝土护栏的特殊服役条件,有必要在现行规范的基础上补充施工适应性、变形协调性和盐冻耦合耐久性等指标,形成更加符合工程实际的综合评价体系。应用场景分析如下:

桥梁混凝土护栏与桥墩、盖梁、箱梁等主体混凝土构件相比,虽同属于桥梁混凝土结构或附属设施范畴,但其服役环境和防护需求存在显著差异。护栏通常位于桥面边部和路侧开放空间,长期直接暴露于降雨、日照、温湿交替、车辆溅水、融雪盐喷溅及积雪堆积等作用,受环境侵蚀的频率和强度较高,表层防护材料更容易发生老化、开裂、剥落和界面脱粘等问题。

1) 混凝土本身为多孔非均质材料,内部毛细孔、微裂缝和界面过渡区为水分、氯离子、二氧化碳及酸碱介质的迁移提供了通道。护栏表面一旦发生防护层破损,外界侵蚀介质可迅速进入混凝土表层,并诱发碳化、氯盐侵蚀、冻融损伤和钢筋锈蚀等耐久性问题。由于护栏截面相对较薄、迎风迎水面暴露充分,其表层病害往往更易由局部缺陷发展为连续剥蚀或片状脱落。

2) 护栏所处路域环境具有明显的干湿交替和温度波动特征。夏季高温、太阳辐射和紫外老化会加速有机涂层分子链老化,使涂层逐渐硬化、粉化或失去弹性;冬季低温和昼夜温差则会引发混凝土与涂层之间的热变形不协调,增加界面剪切应力和拉应力。当涂层柔韧性不足或低温状态下发生脆化时,易在护栏棱角、根部、裂缝端部等应力集中部位形成开裂和剥离。

3) 融雪盐环境是混凝土护栏耐久性劣化的重要诱因。冬季除雪融冰过程中,含氯盐水通过车辆溅水、雾化喷溅、积雪融化和毛细吸附等方式反复作用于护栏表面及根部区域。与一般大气腐蚀环境相比,护栏局部区域可能在短时间内承受较高浓度氯盐溶液作用,并伴随反复冻融循环。冻融循环产生的微裂缝会加快氯离子迁移,而氯盐结晶、渗透压力及化学侵蚀又会进一步放大冻融损伤,二者形成相互促进的耦合劣化过程。

4) 此外, 护栏施工和养护条件也会影响防护涂装的长期服役效果。新建护栏多采用现场浇筑成型, 根部、转角和模板拼缝附近容易出现振捣不充分、表面不密实、蜂窝麻面或细微裂缝等缺陷, 这些部位也是后期盐水积聚和病害发展的薄弱区。进入养护期后, 护栏修补往往受交通组织、作业空间、基面潮湿程度和原有病害状态限制, 修补材料与既有混凝土之间的界面粘结及变形协调问题更加突出。若涂装材料仅强调初始强度或刚性屏蔽, 而缺乏对基面缺陷、微裂缝发展和冻融变形的适应能力, 其长期防护效果将受到限制。

下图 1, 聚焦于未经涂装处理的混凝土护栏。常见表观病害包括裂缝、表面剥蚀、露筋、溶蚀坑洞、表面起砂及混凝土碳化等。



Figure 1. Concrete guardrail without protective coating

图 1. 未经过防护涂装处理的混凝土护栏

裂缝最为普遍, 多呈纵向、横向分布或交织形成网状, 具体形式见图 2。



Figure 2. Cracks and reticular cracks

图 2. 裂缝、网状裂缝

表面剥蚀按诱因主要分为冻融剥蚀与盐蚀剥落, 表现为表层混凝土呈片状或碎屑状脱落, 伴局部骨料外露; 露筋为保护层脱落致使内部钢筋暴露, 其锈胀产物会进一步加剧周边混凝土的崩裂与剥落, 病害形式见图 3。



Figure 3. Surface spalling and exposed reinforcement

图 3. 表面剥蚀、露筋

如图 4 所示，溶蚀坑洞由化学侵蚀或流水冲刷形成局部凹陷；表面起砂表现为表层水泥浆体流失，呈现斑驳的砂粒裸露；碳化虽无明显的宏观物理表征，但该过程会显著降低基体碱性，是诱发钢筋锈蚀与加剧表层劣化的核心因素。



Figure 4. Dissolution pits and surface sanding

图 4. 溶蚀坑洞、表面起砂

综上所述，混凝土护栏的防护涂装应充分响应其路段暴露、融雪盐侵蚀、冻融循环、紫外老化、干湿交替及局部施工条件复杂等特点。现行混凝土结构防腐涂装规范可为指标设定提供基础框架，但针对护栏长期服役中的盐冻耦合损伤、界面变形协调和裂缝追随需求，仍需建立更具针对性的性能评价指标。

4. 混凝土护栏防护涂料现状

4.1. 成膜型涂料

成膜型涂料通过在混凝土表面形成连续保护膜，阻隔水分、氯离子、 CO_2 和氧气等侵蚀介质进入。常见材料包括环氧树脂、聚氨酯和丙烯酸树脂。

环氧树脂涂层具有高黏结强度、耐磨损和耐化学腐蚀性能。纳米 SiO_2 、氧化石墨烯、碳纳米管和 Fe_2O_3 等填料可提升其力学、耐蚀和抗老化性能。但纳米材料成本高、分散难，且环氧树脂脆性较大、抗冲击性能不足，限制了工程应用[13]。自修复环氧涂层虽可通过微胶囊释放修复剂恢复局部防护功能，但仍存

在修复尺度有限、经济性和服役稳定性不足等问题。

水性聚氨酯兼具力学稳定性、化学惰性和低污染优势。通过纳米粒子、有机硅、植物油基和有机氟改性,可提高其耐候、耐蚀、疏水和防污性能。自修复水性聚氨酯也受到关注,如锌离子配位型体系可提升力学性能和自修复效率。但其耐水性、耐溶剂性和户外耐候性仍需改善。

丙烯酸酯涂料具有耐候性好、疏水性强和施工方便等特点,可缓解冻融损伤并阻隔污染物侵蚀。有机氟、有机硅和纳米填料改性可提升其疏水、防污、耐蚀和力学性能。水性丙烯酸酯涂料符合低 VOC 发展趋势,但其裂缝追随能力、长期性能保持和极端环境适应性仍需优化[14]。

4.2. 孔隙封闭型涂料

孔隙封闭型涂料通过渗入混凝土表层孔隙并形成致密结构,封闭通道、阻隔介质进入,同时降低涂层剥落风险。硅酸盐水溶液涂料与水泥基体相容性好,其可与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 C-S-H 凝胶,填充孔隙并降低渗透性。通过聚合物、有机硅烷、纳米 SiO_2 等改性,可进一步改善耐水、疏水和抗冻融性能,但其极端环境下长期稳定性仍需验证[15]。

水泥基渗透结晶型涂料可通过晶体生长填充孔隙和微裂缝,具有“内防水”特征。相关研究通过优化添加剂、引入纳米 SiO_2 和聚合物改性提升其防水、渗透和力学性能。但其氯离子屏障能力、长期耐久性、自修复效果及施工经济性仍需进一步研究。

4.3. 渗透型涂料

渗透型涂料可进入混凝土表层孔隙并降低表面能,减少水和腐蚀介质渗入。硅烷分子量小、渗透性强,可在碱性环境中水解并与水化产物羟基结合,形成疏水硅氧网络,阻止液态水和氯离子进入,同时保持透气性。硅烷/纳米复合材料可进一步提升屏障性能,但复杂环境下长期效果仍需研究[16]。

硅氧烷可在混凝土表面形成疏水层,阻隔水分和污染物。通过微纳结构设计,其静态接触角可达 150.3° ,毛细吸水率可降低 92.91% [17]。纳米黏土、碳纤维、石墨烯和氟化物等复合改性可提高其抗冻融、耐磨、防冰和隔热等性能。未来应重点发展室温固化、低污染和多功能复合型硅氧烷涂料。

4.4. 传统涂装破坏案例

针对已涂装的护栏,重点评估不同防护涂层的工程应用成效。列举常用防护体系(如环氧涂料、水泥基涂料、丙烯酸聚氨酯涂料及氟碳涂料等)的服役现状(图 5~7)。



Figure 5. Concrete guardrail with protective coating

图 5. 经过防护涂装处理的混凝土护栏



Figure 6. Cement-based coating (left), epoxy coating system (right)
图 6. 水泥基涂料(左)、环氧体系涂料(右)



Figure 7. Acrylic polyurethane coating (left), fluorocarbon coating system (right)
图 7. 丙烯酸聚氨酯涂料(左)、氟碳体系涂料(右)

涂层典型劣化形式主要包括开裂、剥落、起泡与粉化。涂层开裂多表现为纵横交错的网状龟裂，或随基体结构变形而扩展的贯穿性宽缝(图 8)；剥落直观呈现涂层从基面成片或碎块状脱离，致使底层涂层或混凝土暴露(图 9)；鼓泡起泡表现为涂层局部丧失附着力，表面隆起形成囊状空鼓；粉化则是涂层表面光泽消退生成松散易脱落的粉末层(图 10)。

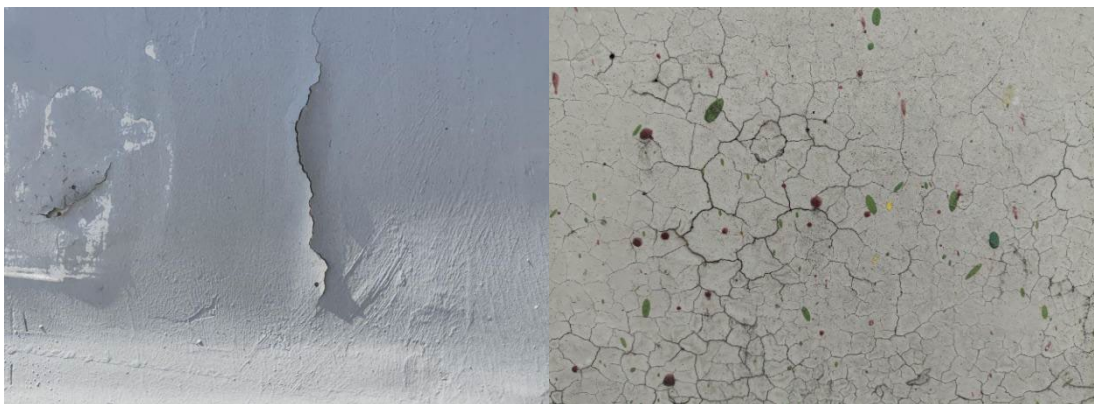


Figure 8. Coating cracking
图 8. 涂层开裂



Figure 9. Coating spalling
图 9. 涂层剥落



Figure 10. Coating blistering
图 10. 涂层鼓包、起泡

5. 防护机理发展趋势及柔性协同理念

5.1. 防护机理发展趋势

混凝土护栏涂层防护主要依赖物理屏障、疏水/超疏水、化学抑制和自修复四类机制。物理屏障通过致密膜层或孔隙填充阻止水、氯离子、氧气和 CO_2 渗入；疏水/超疏水机制通过低表面能材料和粗糙结构减少水分滞留及侵入；化学抑制则依靠缓蚀剂释放或钝化膜形成抑制钢筋腐蚀；自修复功能可通过释放修复剂或材料响应性修复微裂纹，延长涂层寿命。

目前，混凝土护栏防护研究仍存在三方面不足：一是涂层与混凝土基体变形协调性差，水泥基涂料刚性大，环氧-氟碳体系易因模量失配鼓包剥离，丙烯酸聚氨酯体系在紫外、酸雨和冻融耦合作用下易龟裂；二是多数研究集中于单一因素评价，缺少氯盐-冻融-干湿-紫外-酸雨等多因素耦合研究；三是部分新型涂料实验室性能优异，但现场长期防护效果、维护周期和经济性缺乏验证。

未来应重点发展高柔韧、高黏结、高耐候的复合涂层，建立多因素耦合加速劣化评价方法，推进水性、低 VOC 和可再生材料体系应用，并开发自修复、防冰、防污、智能监测等多功能防护材料，以提升混凝土护栏在严酷环境下的长期服役可靠性。

5.2. 柔性协同防护涂料

现有混凝土防腐涂装体系多以成膜屏蔽、界面封闭或渗透疏水为主要防护思路，相关标准指标也主

要围绕涂层外观、干燥时间、附着力、耐水性、耐酸性、耐盐雾性和人工老化性能等方面展开。这类指标能够较好地评价常规薄涂型防腐涂料的基本性能。

在上述混凝土涂装材料的基础上,本文提出的“柔性协同”防护理念,强调涂层不应仅作为刚性隔离层被动阻隔侵蚀介质,还应能够在混凝土发生温度变形、冻胀变形和微裂缝张开时,与基体保持协同变形。其核心在于通过弹塑性涂层吸收和分散局部应变,降低界面应力集中,同时依靠致密连续的成膜结构阻断水分、氯离子和酸碱介质进入混凝土内部,从而实现“介质屏蔽-变形协调-界面稳定”的复合防护。

6. 结论

混凝土护栏有其特殊的严苛的应用场景,其性能劣化根源是化学侵蚀与物理作用共同驱动的复杂过程,而其特殊的应用加速了混凝土护栏的劣化。氯离子侵蚀、碳化、硫酸盐侵蚀、碱-骨料反应、生物劣化、冻融循环、干湿循环和风化均会破坏混凝土微结构并降低结构耐久性,防护涂料是延缓劣化的重要措施,传统的成膜型涂料、孔隙封闭型涂料、渗透型涂料各有其优缺点,但是在融雪盐冻融耦合环境的混凝土护栏涂装中的应用则有明显的劣势。

未来研究应更加关注涂层柔性协同性能、高耐久性能-基体柔性协同、多因素耦合耐久性及其工程长期验证不足。

参考文献

- [1] 刘旭文,王明洲,裴彦明,等. 水利工程混凝土结构环氧防护材料开发与研究[J]. 全面腐蚀控制, 2026, 40(5): 39-43.
- [2] Álava, H.E., Tsangouri, E., De Belie, N. and De Schutter, G. (2016) Chloride Interaction with Concretes Subjected to a Permanent Splitting Tensile Stress Level of 65%. *Construction and Building Materials*, **127**, 527-538. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.009>
- [3] Ren, M., Wang, Z., Aoki, H., Takahashi, H. and Maekawa, K. (2024) Numerical Investigation on Chloride-Induced Macro-Cell Corrosion of Steel Fiber Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, **455**, Article 139194. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139194>
- [4] 龚明子, 饶先鹏, 潘阿馨, 等. 潮汐区干湿循环下基于碳化与氯离子侵蚀的钢筋混凝土寿命预测[J]. 硅酸盐学报, 2026, 54(2): 590-601.
- [5] Paul, S.C., Panda, B., Huang, Y., Garg, A. and Peng, X. (2018) An Empirical Model Design for Evaluation and Estimation of Carbonation Depth in Concrete. *Measurement*, **124**, 205-210. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.033>
- [6] Zhang, C., Li, J., Yu, M., Lu, Y. and Liu, S. (2024) Mechanism and Performance Control Methods of Sulfate Attack on Concrete: A Review. *Materials*, **17**, Article 4836. <https://doi.org/10.3390/ma17194836>
- [7] 郭正发, 朱红兵, 余志武, 等. 硫酸盐环境下轻骨料混凝土-普通混凝土界面性能劣化规律[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(14): 6137-6144.
- [8] 肖强, 陈艳丽, 王小勇, 等. 滨海枢纽工程碱骨料反应抑制高性能混凝土配制技术[J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39(2): 1-5.
- [9] Gaylarde, C.C. and Ortega-Morales, B.O. (2023) Biodeterioration and Chemical Corrosion of Concrete in the Marine Environment: Too Complex for Prediction. *Microorganisms*, **11**, Article 2438. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11102438>
- [10] Yang, Y., Liu, J., Zhang, S., Jiang, C., Liu, L., Chen, Z., et al. (2025) Characterizing the Moisture Migration and Phase Transition in Cement-Based Materials during *In-Situ* Freeze-Thaw Cycles by Hydrogen Nuclear Magnetic Resonance (1H NMR). *Cement and Concrete Composites*, **163**, Article 106204. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.106204>
- [11] 田振海, 罗斌, 李明明, 等. 干湿循环条件下疏水改性泡沫混凝土的耐久性研究[J]. 材料导报, 2026, 40(9): 159-166.
- [12] Ting, M.Z.Y., Wong, K.S., Rahman, M.E. and Meheron, S.J. (2021) Deterioration of Marine Concrete Exposed to Wetting-Drying Action. *Journal of Cleaner Production*, **278**, Article 123383. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123383>
- [13] Pramanik, S.K., Bhuiyan, M., Robert, D., Roychand, R., Gao, L. and Pramanik, B.K. (2025) MIL-101(Cr)/Epoxy Composite

-
- Coating for Enhanced Corrosion Resistance in Concrete Sewer Infrastructure. *Process Safety and Environmental Protection*, **199**, Article 107360. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107360>
- [14] Cui, Y., Tan, Z. and An, C. (2022) Research and Application of Multi-Functional Acrylic Resin Grouting Material. *Construction and Building Materials*, **359**, Article 129381. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129381>
- [15] Zhuo, X., Sun, X., Wu, J., Dong, H., Shen, P., Zhang, X., *et al.* (2024) Molten CMAS Resistance Strategy for PS-PVD TBCs Based on Laser Textured and Al-Modified Bionic Structure. *npj Materials Degradation*, **8**, Article No. 85. <https://doi.org/10.1038/s41529-024-00505-2>
- [16] Li, M., Zheng, H., Duan, Y., Hou, D., Wang, P., Pang, B., *et al.* (2023) The Wetting Behavior of Water Droplets on Silane and Silane/Go-Modified Ettringite Surfaces: Insights into Molecular Dynamics Simulations. *Coatings*, **13**, Article 1299. <https://doi.org/10.3390/coatings13071299>
- [17] Ding, X., Xu, X., Wang, Y., Bao, J. and Zhang, P. (2024) Design of Functional Coating with Superior Liquid Repellency, Self-Cleaning, Photodegradation and Thermal Insulation Properties for Building Protection. *Progress in Organic Coatings*, **188**, Article 108159. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.108159>