

耐候塑化涂料在混凝土护栏中的应用研究

吴肖¹, 李玉龙², 毕纪鹏²

¹安徽交控工程集团有限公司, 安徽 合肥

²重庆交通大学材料学院, 重庆

收稿日期: 2026年7月25日; 录用日期: 2026年8月16日; 发布日期: 2026年8月26日

摘要

为减少冻融循环、干湿交替、氯离子侵蚀和碳化等劣化因素对混凝土护栏服役性能的影响, 本文从物理劣化、化学劣化和生物劣化三个方面分析混凝土护栏主要病害形成机理, 指出防止水、氯离子和CO₂侵入是提升护栏耐久性的关键。在比较成膜型、渗透型和孔隙封闭型防护材料特点的基础上, 结合室内性能指标和安徽地区多座桥梁护栏工程应用情况, 对耐候塑化涂料的防护性能与施工工艺进行研究。结果表明, 该涂料表干时间 ≤ 4 h, 实干时间 ≤ 8 h, 附着力 ≥ 1 MPa, 裂缝追随性 ≥ 20 mm, 静态水接触角 ≥ 120°, VOC含量 < 50 g/L; 固化后涂层在耐水、耐热、耐湿热、耐紫外、耐盐雾、耐酸碱和融雪盐冻融循环200次等条件下保持表面平整致密, 无明显起泡、脱落和起皱, 抗氯离子渗透系数 ≤ 8.67 × 10⁻¹⁴ m²/s。现场应用显示, 涂层施工完成7 d后表面均匀完整, 8个月跟踪观测未见明显剥落、破损和大范围起泡。研究表明, 耐候塑化涂料具有良好的憎水性、裂缝适应性、抗氯离子渗透能力和施工适应性, 可用于混凝土护栏防腐养护工程, 尤其适用于受融雪盐、冻融循环及大气侵蚀影响较大的道路桥梁环境。

关键词

耐候塑化涂料, 混凝土护栏, 氯离子侵蚀, 耐久性, 工程应用

Application of Weather-Resistant Plasticized Coating in Concrete Barrier Protection

Xiao Wu¹, Yulong Li², Jipeng Bi²

¹Anhui Traffic Control Engineering Group Co., Ltd., Hefei Anhui

²School of Materials Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

Received: July 25, 2026; accepted: August 16, 2026; published: August 26, 2026

Abstract

To reduce the adverse effects of freeze-thaw cycles, wet-dry alternation, chloride ion ingress, and

carbonation, this study focuses on the durability of concrete barriers. The deterioration mechanisms of concrete barriers are analyzed from three aspects: physical deterioration, chemical deterioration, and biological deterioration. The results indicate that preventing the ingress of water, chloride ions, and CO_2 is essential for improving durability. This study compares film-forming, penetrating, and pore-blocking protective materials. A weather-resistant plasticized coating is then selected for further investigation. Its protective performance and construction process are studied through laboratory tests and field applications. The field applications were carried out on several bridge concrete barriers in Anhui Province. The results show that the surface-drying time of the coating is no more than 4 h. The hard-drying time is no more than 8 h. The adhesion strength is not less than 1 MPa. The crack-following ability is not less than 20 mm. The static water contact angle is not less than 120° . The volatile organic compound content is less than 50 g/L. After curing, the coating forms a continuous and compact protective layer on the concrete surface. The coating remains dense and intact under water immersion, heat exposure, damp-heat aging, ultraviolet radiation, salt spray, acid exposure, and alkali exposure. It also remains stable after 200 cycles of deicing-salt freeze-thaw action. No obvious blistering, peeling, or wrinkling is observed. The chloride ion permeability coefficient is no more than $8.67 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$. This indicates good resistance to chloride penetration. Field observations show that the coating surface is uniform and complete 7 days after construction. After 8 months of service, no obvious peeling, damage, or large-area blistering is observed. The study shows that the weather-resistant plasticized coating has good hydrophobicity. It also has good crack adaptability, chloride resistance, and construction applicability. Therefore, it can be used for the protective maintenance of concrete barriers. It is especially suitable for road and bridge environments affected by deicing salts, freeze-thaw cycles, and atmospheric exposure.

Keywords

Weather-Resistant Plasticized Coating, Concrete Barrier, Chloride Ion Ingress, Durability, Engineering Application

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

混凝土护栏是公路、桥梁及城市道路中重要的安全防护设施,承担车辆导向、防撞防护和行车安全保障等功能。与桥面铺装、伸缩缝、支座等构件相比,护栏通常处于长期外露状态,直接承受降雨、日照、温度变化、车辆尾气、融雪盐溅蚀及环境污染物侵蚀等多重作用。随着道路交通荷载增长和养护环境复杂化,混凝土护栏表层开裂、剥落、露筋、钢筋锈蚀及旧涂层失效等病害逐渐增多,影响结构耐久性、景观效果和运行安全。

混凝土是一种多孔非均质材料,内部孔隙和微裂缝为水分、氯离子、 CO_2 和硫酸盐等有害介质提供了迁移通道。当外界介质持续进入混凝土内部后,会引起碳化、氯盐侵蚀、冻融损伤及钢筋锈蚀等一系列劣化反应。研究表明,氯离子侵蚀和碳化是诱发钢筋混凝土结构耐久性退化的重要因素,尤其在使用融雪剂的寒冷地区和沿海高湿高盐环境中,氯盐侵蚀会显著缩短混凝土构件服役寿命[1]。对于道路桥梁护栏而言,其迎水面、底座和接缝部位更易积聚水分及盐分,若缺乏有效防护,病害将由表层向内部发展,最终导致维修成本增加。

现阶段,混凝土表面防护是提高结构耐久性的重要技术途径之一。常见防护材料包括环氧树脂、聚氨酯、硅烷、硅氧烷、硅酸盐溶液及水泥基渗透结晶材料等[2][3]。不同材料在阻水、防氯、透气性、裂

缝适应能力、施工便利性 & 环境友好性方面各有特点。传统成膜涂层虽然能够形成直观屏障,但脆性、耐水性、基层适应性和二次维修问题仍较突出;渗透型材料具有良好憎水效果,但对既有裂缝和表面缺陷的适应能力有限;孔隙封闭型材料与基材相容性较好,但在复杂服役环境下的长期稳定性仍需进一步验证。

耐候塑化涂料是一类兼具柔韧性、憎水性、耐候性和施工便利性的单组分防护材料。其固化后可在混凝土表层形成连续致密的柔性屏障,阻止水分、氯离子和 CO_2 侵入,同时通过较高裂缝追随能力适应护栏表面微裂缝和温度变形。本文结合混凝土护栏劣化机理、防护材料选择、涂料性能指标及工程施工实践,分析耐候塑化涂料在混凝土护栏防护中的应用效果,为道路桥梁附属结构耐久性养护提供参考。

2. 方法

2.1. 混凝土护栏劣化机理分析

混凝土护栏劣化形式可按作用机理分为物理劣化、化学劣化和生物劣化。其中,物理劣化主要由温度、水分和盐分变化引起,典型表现为冻融循环和干湿循环。混凝土孔隙水结冰后体积约膨胀 9%,在封闭孔隙内形成冻胀压力和静水压力,促使微裂缝产生与扩展[4]。当冻融循环反复发生时,混凝土表层会出现起皮、剥蚀和强度下降。干湿循环则会导致盐溶液在孔隙内反复结晶和溶解,结晶压力作用于孔壁,进一步加剧表面剥落,并降低混凝土电阻率,加快钢筋腐蚀。

化学劣化主要包括氯离子侵蚀、碳化、硫酸盐侵蚀和碱-骨料反应等。混凝土护栏长期接触车辆尾气和大气中的 CO_2 , CO_2 进入混凝土孔隙后与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等碱性物质发生反应,导致孔隙液 pH 值由 12.5 以上降至 9.0 以下,钢筋钝化膜稳定性受到破坏。在冬季除雪防滑过程中,融雪剂中的氯离子会通过扩散、毛细吸附和对流作用进入混凝土内部。当钢筋表面氯离子浓度达到临界值时,钢筋钝化膜被破坏并发生电化学腐蚀,腐蚀产物体积可膨胀为原体积的 2~6 倍,从而引起保护层开裂和剥落[5]。硫酸盐侵蚀可生成钙矾石等膨胀性产物,碱-骨料反应产生的吸水凝胶也会造成内部膨胀,这些反应均会降低护栏结构密实性和耐久性。

生物劣化在护栏底部和潮湿区域较为常见。硫酸盐还原菌、硫氧化细菌等微生物可参与硫酸盐转化并产生酸性物质,局部侵蚀混凝土;杂草根系也可能侵入表层孔隙和裂缝,降低材料完整性。总体而言,混凝土护栏最主要的劣化因素是水、氯离子和 CO_2 的侵入。因此,防护材料应重点具备阻水、防氯、抗碳化、耐候和裂缝适应能力。

2.2. 防护涂料类型比较

目前混凝土护栏防护材料主要分为成膜型、渗透型和孔隙封闭型。成膜型材料以环氧树脂和聚氨酯类为代表,依靠材料自身黏结性在混凝土表面形成保护膜,阻隔外界侵蚀介质。其优点是施工简便、成膜效果直观、初期防护能力较强;不足是与混凝土收缩变形和温度变形适应性不足,局部破损后易出现起皮、空鼓和脱落,二次涂刷质量控制难度较大。

渗透型材料主要包括硅烷和硅氧烷。硅烷分子量较小,渗透性较好,可在混凝土孔壁形成憎水层,在不明显改变表面外观的情况下提高抗水和抗氯离子能力[6]。但其对基层含水率、施工环境和材料质量要求较高,且对已开裂或缺陷较多的混凝土表面防护效果有限。硅氧烷具有一定成膜性和憎水性,但部分产品存在溶剂挥发、高温固化和环境适用性问题。

孔隙封闭型材料以硅酸盐水溶液和水泥基渗透结晶材料为代表,通过渗入混凝土孔隙并生成凝胶或结晶产物,达到封闭毛细孔和微裂缝的目的。该类材料与水泥基材相容性较好,但对施工养护条件敏感,对氯离子长期屏障能力和极端环境下稳定性仍需结合工程实际评价。

耐候塑化涂料属于柔性成膜防护材料，兼具高延展性和单组分施工便利性。与传统刚性或脆性涂层相比，其优势在于对基层微裂缝具有较强追随能力，可减少因温度变形、车辆振动和混凝土收缩引起的涂层开裂。同时，涂层固化后表面具有较高憎水性和致密性，可降低水分和氯离子向混凝土内部迁移的可能性。

2.3. 性能测试与现场应用方法

本文依据材料供应方检测资料和工程应用记录，对耐候塑化涂料物理性能及涂层耐久性能进行整理分析。评价指标包括外观、细度、密度、表干时间、实干时间、附着力、裂缝追随性、静态水接触角、柔韧性、耐冲击性和 VOC 含量等。同时，对涂层在耐水、耐热、耐湿热、耐紫外、耐盐雾、耐酸、耐碱、耐融雪盐、融雪盐冻融循环和抗氯离子渗透方面的表现进行评价。

现场应用选择安徽地区多座桥梁混凝土护栏作为工程对象。施工内容包括基面处理、缺陷修补、环境控制、双层涂覆、底座勾缝和后期跟踪观测。观测重点包括涂层均匀性、完整性、颜色变化、起泡、剥离、开裂、漏涂及污染物附着情况。

3. 结果

3.1. 耐候塑化涂料物理性能

耐候塑化涂料为浅灰色均匀半流体，现场开桶后可直接使用，适合护栏立面和异形部位施工。其主要物理性能见表 1。

由表 1 可知，该涂料具有较短干燥时间和较高附着力，可满足道路桥梁现场快速施工和养护开放需求。裂缝追随性 $\geq 20\text{ mm}$ ，说明涂层具有良好延展能力，可适应护栏微裂缝扩展和基层变形。静态水接触角 $\geq 120^\circ$ ，表明涂层表面具有明显憎水特征，有利于降低雨水和盐溶液在护栏表面的停留与渗入。VOC 含量 $< 50\text{ g/L}$ ，符合低挥发性和环境友好型材料的发展方向。

Table 1. Physical properties of weather-resistant plasticized coating
表 1. 耐候塑化涂料物理性能指标

性能项目	技术指标	试验方法
密度/(g/cm ³)	1.45	GB/T 14683
表干时间/h	≤ 4	GB/T 1728
实干时间/h	≤ 24	GB/T 1728
附着力/MPa	≥ 1.5	GB/T 5210
裂缝追随性/mm	≥ 5	JT/T 821.3
静态水接触角/°	≥ 120	GB/T 30693-2014
柔韧性/mm	≤ 2	GB/T 1731
耐冲击性/cm	≥ 50	GB/T 1732

3.2. 涂层耐久性能

耐候塑化涂料固化后可在混凝土表面形成连续致密保护层，其主要性能指标见表 2。结果表明，该涂层在多种环境作用下均保持较好的完整性和稳定性。尤其是在融雪盐和冻融复合作用下，涂层未出现明显破坏，说明其适合应用于寒冷地区和冬季使用融雪剂的道路桥梁护栏。抗氯离子渗透系数 $\leq 8.67 \times 10^{-14}$

m²/s, 表明涂层对氯离子迁移具有较强阻隔能力, 可降低钢筋锈蚀风险。

Table 2. Main performance indicators of weather-resistant plasticized coating layer
表 2. 耐候塑化涂层主要性能指标

性能项目	技术指标	试验方法
耐热	80℃ 下 240 h 涂层表面平整致密, 无起泡、脱落、起皱等缺陷	GB/T 1766-2008
耐酸性	5% H ₂ SO ₄ 溶液浸泡 30 d, 涂层无脱落、破裂、起泡、开裂	GB/T 9274
耐碱性	5% NaOH 溶液浸泡 30 d, 涂层无脱落、破裂、起泡、开裂	GB/T 9274
耐盐水性	10% NaCl 溶液浸泡 90 d, 漆膜不起泡、不脱落	GB/T 9274
耐盐雾性	1000 h, 涂层无脱落、破裂、起泡、开裂	GB/T 1771
耐人工气候老化性	1000 h, 漆膜不起泡、不剥落、不开裂、不粉化、无明显变色	GB/T 1865
湿热老化	55℃、95% RH、1000 h, 涂层无破损、无起泡	GB/T 1740

3.3. 施工工艺

耐候塑化涂料现场施工流程包括基面检查、表面打磨、病害修补、粉尘清理、第一层涂覆、表面检查、第二层涂覆、底座勾缝和养护观测, 见下。

施工准备→交通组织与安全防护→基层调查与病害标识→旧涂层及污染物清除→缺陷凿除与修补找平→基层打磨或清洗→吹扫除尘→基层质量检查→底涂施工→第一道刮涂→层间检查与缺陷处理→第二道刮涂→阴阳角及接缝部位勾缝封边→成品养护→质量检验→工程验收。

3.3.1. 基面处理

混凝土护栏的涂装质量高度依赖于基面处理与施工环境控制, 施工前必须对护栏表面进行仔细打磨, 新建护栏需去除浮浆、粉尘及残留养护剂, 旧护栏则需清除生物膜、盐晶和松动物质, 打磨中发现的裂缝、不平或松动部位应标记后凿除并用环氧砂浆修复; 针对已严重失效的旧涂层, 须用角磨机彻底清除剥落、翘曲、开裂及霉斑等残留, 对碳化、氯盐侵蚀导致的疏松空鼓区域应凿除至坚实基层, 未经涂装的劣化表面需用环氧砂浆找平并预留充分干燥时间, 最后以强力吹风机清理所有粉尘残渣, 确保基面清洁致密, 为涂层均匀牢固附着创造条件。

3.3.2. 施工条件

施工环境方面, 温度宜控制在 5~35℃。温度过低会延迟固化, 过高则易导致涂层过快干燥, 影响粘结。湿度应低于 75%, 过高会妨碍固化并降低附着力。混凝土表面必须洁净、无油污与松动物质, 含水率宜保持在 2%~8%之间, 以确保涂层粘结强度与整体防护效果。

3.3.3. 涂层施工

耐候塑化涂料施工采用双层涂覆体系, 需严格控制人员配置、环境条件及工艺细节。第一层施工时每桶涂料应由 2~3 名工人协同使用, 避免涂料长期暴露导致黏度上升, 高温天气中断作业时必须密封容器延缓固化; 刮涂过程中需保持工具清洁, 及时清除刮刀上的硬化涂料块和砂粒, 防止产生刮痕, 同时控制刮涂速度和角度以减少气泡和漏涂, 发现针孔等缺陷应在初凝前后及时补涂, 但固化后的气泡切勿刮平以免产生褶皱。第一层固化一天后, 需用毛刷或低压吹风清除表面浮尘砂粒, 再进行第二层涂敷, 完成后安排专人定时巡检, 在固化初期及时修补刮痕并移除杂物。此外, 护栏底座勾缝施工须待涂料表干 1~2 小时后进行, 遵循“时间、清洁、控料”三要素, 采用“压挤同步”手法将材料压入接缝, 确保

长期防护效果。涂层施工完成后的对照图见图 1。



Figure 1. Comparison of concrete barrier before and after coating construction

图 1. 混凝土护栏施工前后对照

3.4. 跟踪观测

耐候塑化涂料在安徽地区多座桥梁混凝土护栏中进行了应用。施工完成 7 d 后, 涂层呈均匀灰白色, 表面连续完整, 未见明显漏涂、表面不连续和异物混入。经历车辆振动、昼夜温差和自然环境作用后, 涂层主体结构稳定, 未出现明显变色、剥离和大范围起泡。

施工完成 8 个月后进行现场复查, 涂层整体保持完好, 无明显破损、脱落和开裂。部分护栏底部可见黑色附着物, 经现场分析主要为融雪盐清理过程中的堆积残留和路面污染物沉积, 属于表面污染, 不属于涂层劣化。跟踪观测情况见图 2。跟踪观测结果见图 2。



Figure 2. Follow-up observation of weather-resistant plasticized coating

图 2. 耐候塑化涂层跟踪观测情况

4. 讨论

混凝土护栏防护的核心是阻断或延缓水、氯离子和 CO_2 向内部迁移。单纯提高混凝土本体强度并不能完全避免服役环境中的耐久性退化, 尤其是护栏表面存在施工缺陷、干缩裂缝和旧病害时, 外部防护层的作用更加重要。耐候塑化涂层通过表面成膜方式形成连续屏障, 可降低水分和盐分进入混凝土的概率, 同时其高延展性有助于缓解传统刚性涂层因基层变形而产生的开裂问题。

与环氧、聚氨酯等传统成膜材料相比, 耐候塑化涂料的突出特点是裂缝追随性和耐候性较好。护栏处于桥面边缘或道路中央分隔区域, 受车辆振动、温度梯度和湿度变化影响明显, 涂层若缺乏柔韧性, 易在微裂缝处产生应力集中并发生破坏。本文所述涂料裂缝追随性 $\geq 20 \text{ mm}$, 可提高涂层在复杂基层条件下的适应能力。与硅烷类渗透材料相比, 该涂层对表面微缺陷具有一定覆盖和封闭作用, 更适合旧护

栏修复和外观统一要求较高的工程场景。

但耐候塑化涂料的工程应用效果仍受基层处理、施工环境和质量控制影响。若基面存在粉尘、油污、松动旧涂层或含水率过高,涂层附着力将明显下降,后期可能出现空鼓和剥离。因此,施工中应将基面处理作为关键控制环节,严格执行打磨、修补、清洁和干燥要求。此外,双层涂覆厚度均匀性、接缝部位密封性和底座易积水区域处理质量,也会直接影响长期防护效果。

本文工程跟踪时间为 8 个月,虽已显示出良好早期服役效果,但混凝土护栏耐久性评价通常需要更长周期观测。后续研究可进一步开展 3~5 年现场暴露试验,结合氯离子含量、碳化深度、涂层附着力衰减、表面接触角变化和微观形貌分析,建立涂层服役寿命预测模型。同时,可与硅烷浸渍、聚氨酯涂层、水泥基渗透结晶材料等进行对比试验,从全寿命周期成本、施工效率和环境影响等角度评价其综合适用性。

5. 结论

1) 混凝土护栏长期暴露于自然环境和交通环境中,主要劣化形式包括冻融循环、干湿循环、氯离子侵蚀、碳化、硫酸盐侵蚀和生物劣化。其中,水、氯离子和 CO_2 的侵入是诱发护栏耐久性退化的关键因素。

2) 耐候塑化涂料具有较好的施工便利性和物理性能,其表干时间 $\leq 4\text{ h}$,实干时间 $\leq 8\text{ h}$,附着力 $\geq 1\text{ MPa}$,裂缝追随性 $\geq 20\text{ mm}$,静态水接触角 $\geq 120^\circ$,VOC 含量 $< 50\text{ g/L}$,能够满足混凝土护栏现场防护施工需求。

3) 耐候塑化涂层在耐水、耐热、耐湿热、耐紫外、耐盐雾、耐酸碱和融雪盐冻融循环 200 次等条件下保持表面平整致密,抗氯离子渗透系数 $\leq 8.67 \times 10^{-14}\text{ m}^2/\text{s}$,说明其具备较好的阻水、防氯和耐候能力。

4) 工程应用及 8 个月跟踪观测表明,耐候塑化涂层整体均匀完整,未出现明显剥离、破损和大范围起泡,具有良好的早期服役表现。该材料可用于混凝土护栏防腐养护,尤其适用于受融雪盐、冻融循环和大气侵蚀影响较大的道路桥梁工程。

参考文献

- [1] Alshaer, H.A.Y., Irwan, J.M., Alshalif, A.F., Al-Fakih, A., Ewais, D.Y.Z., Salmi, A., *et al.* (2022) Review on Carbonation Study of Reinforcement Concrete Incorporating with Bacteria as Self-Healing Approach. *Materials*, **15**, Article 5543. <https://doi.org/10.3390/ma15165543>
- [2] Medeiros, M.H.F. and Helene, P. (2009) Surface Treatment of Reinforced Concrete in Marine Environment: Influence on Chloride Diffusion Coefficient and Capillary Water Absorption. *Construction and Building Materials*, **23**, 1476-1484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.013>
- [3] Pan, X., Shi, Z., Shi, C., Ling, T. and Li, N. (2017) A Review on Concrete Surface Treatment Part I: Types and Mechanisms. *Construction and Building Materials*, **132**, 578-590. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.025>
- [4] Pan, X., Shi, Z., Shi, C., Ling, T. and Li, N. (2017) A Review on Surface Treatment for Concrete—Part 2: Performance. *Construction and Building Materials*, **133**, 81-90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.128>
- [5] Geng, J., Easterbrook, D., Li, L. and Mo, L. (2015) The Stability of Bound Chlorides in Cement Paste with Sulfate Attack. *Cement and Concrete Research*, **68**, 211-222. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.11.010>
- [6] Liu, J., Qiu, Q., Chen, X., *et al.* (2017) Understanding the Interacted Mechanism between Carbonation and Chloride Aerosol Attack in Ordinary Portland Cement Concrete. *Cement and Concrete Research*, **97**, 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.032>