

# 冬季除冰融雪剂对桥梁混凝土结构的腐蚀影响及防护对策

杨晓东 孙童童

郑州市路通公路建设有限公司 河南 郑州 450000

**摘要:** 本文系统梳理了常用除冰融雪剂的种类与成分,深入分析了氯离子侵入混凝土的机理及其对钢筋钝化膜的破坏过程;重点探讨了氯盐环境对混凝土微观结构劣化、钢筋锈蚀膨胀应力产生以及结构承载性能退化的多重腐蚀效应;在此基础上,从材料优化、结构设计、施工控制和后期维护四个维度,提出了包括高性能混凝土应用、防腐涂层技术、阴极保护系统、智能监测预警等在内的综合防护对策。最后,结合绿色低碳发展趋势,展望了环保型融雪剂的研发方向与全寿命周期管理理念在桥梁工程中的应用前景,旨在为提升寒区桥梁结构的耐久性与安全性提供理论支撑与实践指导。

**关键词:** 除冰融雪剂; 氯离子; 桥梁混凝土; 钢筋锈蚀; 腐蚀机理; 防护对策; 耐久性

## 引言

我国北方及高海拔地区冬季漫长严寒、降雪频繁,为确保高速公路、城市立交桥等安全畅通,清除桥面积雪结冰十分必要。自20世纪90年代起,氯盐类除冰融雪剂因成本低、效果好等优势,在我国桥梁工程中被大规模应用。但这种除冰方式存在结构安全隐患。氯盐融雪剂溶解产生的氯离子会渗入混凝土结构,破坏钢筋钝化膜,引发并加速钢筋腐蚀。钢筋锈蚀产物体积膨胀,产生应力致混凝土保护层开裂、剥落,影响桥梁外观,削弱构件有效截面,降低结构承载与抗震能力,缩短桥梁寿命。近年来,国内外多起因融雪剂腐蚀引发的桥梁病害及安全事故频发,引发工程界警觉。因此,深入研究融雪剂腐蚀机理并制定防护对策,对保障基础设施安全运营、延长寿命、节约成本意义重大。本文旨在系统阐述融雪剂腐蚀问题,构建完整认知与应对框架,为相关科研、设计、施工与管养提供参考。

## 1 常用除冰融雪剂的种类与腐蚀性分析

### 1.1 主流融雪剂类型及其腐蚀特性

目前市场上的除冰融雪剂主要有氯盐类、非氯盐类及混合型三类。氯盐类因经济性和高效融冰能力占主导,如氯化钠价格低廉,融冰温度约 $-9^{\circ}\text{C}$ ,是市政和公路管理部门首选;氯化钙吸湿放热,融冰快,有效作用温度低至 $-29^{\circ}\text{C}$ ,但成本高;氯化镁性能居中,融冰温度约 $-15^{\circ}\text{C}$ ,也常被使用。非氯盐类腐蚀性小,如醋酸钙镁对混凝土和金属几乎无腐蚀,但价格是氯化钠十倍以上,多用于机场跑道等特殊场合。甲酸钾等有机融雪剂及尿素,或成本高,或有环境副作用,难以在桥梁工程普及。实践中,为平衡成本、效果与腐蚀性,常采用氯盐与缓蚀剂等混合的复合型融雪剂。

### 1.2 腐蚀性核心——氯离子( $\text{Cl}^-$ )的作用机制

在上述各类融雪剂中,氯盐类因其主导地位而成为桥梁腐蚀问题的罪魁祸首。其危害的核心在于氯离子( $\text{Cl}^-$ )。氯离子具有以下几个关键特性,使其成为极具破坏性的侵蚀介质:(1)高迁移性: $\text{Cl}^-$ 半径小,活性高,极易通过混凝土的毛细孔道、微裂缝等渗透通道向内部扩散。(2)去钝化作用:钢筋在高碱性( $\text{pH} > 12.5$ )的混凝土孔隙液中会形成一层致密、稳定的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 钝化膜,使其处于热力学稳定状态。 $\text{Cl}^-$ 能够穿透这层钝化膜,并与其中的铁离子( $\text{Fe}^{2+}$ )结合生成可溶性的氯化亚铁( $\text{FeCl}_2$ ),从而局部破坏钝化膜的完整性<sup>[1]</sup>。(3)催化作用:在钢筋腐蚀的阳极反应( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ )中, $\text{Cl}^-$ 并不消耗,而是作为一种催化剂,持续促进腐蚀反应的进行,使得即使少量的 $\text{Cl}^-$ 也能引发并维持长期的腐蚀过程。相比之下,非氯盐类融雪剂虽然腐蚀性低,但高昂的成本使其难以在大范围的桥梁工程中普及。因此,在当前及未来相当长一段时间内,如何有效应对氯盐融雪剂带来的腐蚀挑战,仍是工程实践的核心课题。

## 2 氯离子侵蚀与钢筋锈蚀机理

### 2.1 氯离子在混凝土中的传输

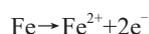
氯离子从桥面进入混凝土内部并非一蹴而就,而是一个复杂的物理化学传输过程,主要包括以下三种机制:(1)扩散:这是最主要的方式。由于桥面融雪剂溶液与混凝土内部存在浓度梯度, $\text{Cl}^-$ 会自发地从高浓度区域(表面)向低浓度区域(内部)迁移。Fick第二定律是描述此过程的经典模型。(2)渗透:在车辆荷载、温度变化等因素引起的动水压力作用下,含有 $\text{Cl}^-$ 的溶液会被强制压入混凝土的孔隙和裂缝中。(3)毛细吸附:混凝土是一种多孔材料,其内部的毛细孔道会对液体产生吸附作用,

将融雪剂溶液吸入内部。混凝土的密实度、水胶比、养护条件、裂缝状况等都会显著影响Cl<sup>-</sup>的传输速率。高水胶比、养护不良、存在裂缝的混凝土，其Cl<sup>-</sup>渗透速度会大大加快。

## 2.2 钢筋锈蚀的电化学过程

一旦Cl<sup>-</sup>突破混凝土保护层到达钢筋表面，并积累到足以破坏钝化膜的临界浓度（通常认为在0.2-0.4wt%水泥质量范围内），钢筋的锈蚀过程便被激活。这是一个典型的电化学腐蚀过程，需要阳极区、阴极区、电解质（混凝土孔隙液）和电子通路四个要素。

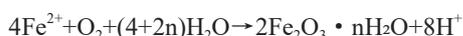
阳极反应（氧化）：在局部钝化膜被破坏的点（阳极区），铁原子失去电子被氧化成亚铁离子。



阴极反应（还原）：在钢筋表面其他完好的钝化区域（阴极区），氧气和水接受从阳极区流过来的电子，发生还原反应。



腐蚀产物的形成：阳极区产生的Fe<sup>2+</sup>与阴极区产生的OH<sup>-</sup>以及溶液中的Cl<sup>-</sup>、O<sub>2</sub>等进一步反应，生成复杂的铁锈（主要成分为FeOOH、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·nH<sub>2</sub>O、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>等）。



这个过程一旦开始，便会自我维持并加速，因为腐蚀产物疏松多孔，无法阻止氧气和水分的继续侵入，反而为腐蚀提供了更大的反应界面。

## 3 融雪剂腐蚀对桥梁结构的多重劣化效应

氯盐融雪剂对桥梁混凝土结构的损害是一个由表及里、由微观到宏观的渐进式劣化过程，其影响是全方位的。

### 3.1 对混凝土本体的劣化

一是盐结晶压力：融雪剂溶液渗入混凝土孔隙后，在昼夜温差或季节交替时反复冻融。水结冰时体积膨胀约9%，对孔壁产生巨大压力；同时，盐溶液在低温下析出结晶，其结晶压力远大于纯水的冻胀压力，共同作用下极易导致混凝土表层粉化、剥落。二是化学侵蚀：高浓度的Cl<sup>-</sup>会与水泥水化产物中的铝酸盐相（如C<sub>3</sub>A）反应，生成Friedel's盐（3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaCl<sub>2</sub>·10H<sub>2</sub>O）。虽然此反应能暂时固化一部分Cl<sup>-</sup>，但该产物不稳定，在特定条件下可能分解，重新释放Cl<sup>-</sup>。此外，Mg<sup>2+</sup>还能与C-S-H凝胶反应，导致混凝土强度下降。

### 3.2 对钢筋的直接损伤

如前所述，钢筋锈蚀是核心问题。锈蚀不仅造成钢筋有效截面积的减小，直接削弱其抗拉承载力，更重要的是，锈蚀产物的巨大体积膨胀会在钢筋周围产生环向拉应力。

### 3.3 结构层面的宏观破坏

一是顺筋裂缝：当钢筋周围的膨胀应力超过混凝土的抗拉强度时，首先会在钢筋正上方的混凝土保护层沿钢筋方向产生纵向裂缝，即“顺筋裂缝”。这是钢筋锈蚀最直观的外部征兆。二是保护层剥落：随着锈蚀的加剧，裂缝不断扩展、贯通，最终导致混凝土保护层成片状或块状剥落，使钢筋直接暴露于大气环境中，腐蚀速率急剧加快，形成恶性循环<sup>[2]</sup>。三是结构性能退化：钢筋截面损失和混凝土保护层失效，共同导致梁、板、墩柱等构件的刚度、延性和承载力显著下降。在极端情况下，可能诱发脆性破坏，对桥梁的整体安全构成致命威胁。

## 4 综合防护对策体系

面对氯盐融雪剂带来的严峻挑战，任何单一的防护手段都难以实现长效、可靠的保护。必须摒弃“头痛医头、脚痛医脚”的思维，建立起一个覆盖桥梁全寿命周期、融合多学科技术的综合防护体系。

### 4.1 源头控制与材料层面的根本性提升

防护工作的起点应放在源头控制和材料本身的性能优化上。长远来看，大力推广和研发低成本、高效的环保型融雪剂是治本之策。尽管目前醋酸钙镁（CMA）等产品成本高昂，但在关键性桥梁、历史文化遗产周边或生态脆弱区域，应优先考虑其应用，并通过政策引导和技术创新加速其产业化进程。在材料层面，应用高性能混凝土（HPC）是提升桥梁耐久性的基石。通过严格控制水胶比（通常低于0.35），并科学掺配硅灰、粉煤灰或矿渣粉等优质矿物掺合料，辅以高效减水剂，可以制备出孔隙率极低、孔径分布极细的致密混凝土。这种高密实度的微观结构能从根本上构筑起一道坚固的物理屏障，极大地延缓甚至阻断氯离子的侵入路径。此外，在混凝土拌合阶段掺入适量的钢筋阻锈剂，如亚硝酸钙或有机胺类化合物，可以在钢筋表面预先形成一层额外的保护膜，提高钝化膜的稳定性，有效提升氯离子引发锈蚀所需的临界浓度阈值，为结构安全增加一道化学防线。

### 4.2 屏障防御与精细化结构设计

在结构设计和构造细节上，应着力构建多层次的屏障防御体系。首要任务是完善桥面的防水与排水系统。高质量的柔性防水层，如SBS改性沥青卷材或聚氨酯涂料，是阻止融雪剂溶液下渗的第一道也是最关键的防线。同时，必须精心设计桥面横坡和泄水孔的布局与数量，确保融雪后的积水能够在最短时间内被迅速排离桥面，最大限度地减少融雪剂与混凝土结构的接触时间和接触面积<sup>[3]</sup>。在结构设计参数上，应根据桥梁所处的具体环境作用等级，适当增加钢筋的混凝土保护层厚度。虽然这会

略微增加结构自重和造价,但能显著延长氯离子从表面扩散至钢筋所需的时间,为桥梁赢得宝贵的“安全服役期”。对于腐蚀风险极高的区域,还可以考虑采用环氧涂层钢筋(ECR)或镀锌钢筋等经过表面处理的钢筋。这些涂层能在钢筋与混凝土之间形成一层物理隔离层,即便混凝土因其他原因出现微裂缝,也能在相当长的时间内阻止氯离子与钢筋基体的直接接触,提供双重保险。

#### 4.3 主动干预修复与智能化运维管理

对于已经建成并出现腐蚀迹象的既有桥梁,被动等待只会加速其劣化进程,必须采取主动干预措施。阴极保护(CP)技术是一种行之有效的电化学修复方法。通过在混凝土表面安装惰性辅助阳极,并施加一个微弱的直流电流,可以使整个钢筋网络强制转变为电化学体系中的阴极,从而彻底抑制其作为阳极发生氧化(即锈蚀)的倾向。该技术已在国内外众多海港工程和寒区桥梁的修复中得到成功应用,效果显著。另一种主动修复技术是电化学脱盐,它适用于那些氯离子含量已超标但钢筋尚未发生严重锈蚀的结构,通过施加电场将混凝土孔隙中的氯离子定向迁移到外部,从而降低其浓度,尝试恢复钢筋的钝化状态。

#### 4.4 智能监测与全寿命周期管理

面向未来,桥梁的管养模式必须向智能化、预防性转变。通过在桥梁的关键易损部位预埋氯离子浓度、湿度、钢筋电位等微型传感器,可以构建一个实时、在线的健康监测网络。这些数据可以无缝集成到基于建筑信息模型(BIM)的数字化运维平台中,利用大数据分析和人工智能算法,对桥梁的腐蚀状态进行精准评估、趋势预测和风险预警。这种“感知-分析-决策”的闭环管理模式,能够实现从传统的“坏了再修”向现代的“未坏先防”跨越<sup>[4]</sup>。在此基础上,全寿命周期成本(LCC)的

理念应贯穿于桥梁规划、设计、建造、运营和维护的每一个环节。决策者需要认识到,初期在高性能材料和先进防护技术上的适度投入,虽然会增加建造成本,但从长达百年的服役周期来看,能够极大地节省后期高昂的维修、加固乃至重建费用,并有效规避因结构失效带来的公共安全风险和社会经济损失。

#### 5 结语

冬季氯盐类除冰融雪剂虽保障了寒区交通,却给桥梁混凝土结构带来腐蚀隐患。其核心是氯离子破坏钢筋钝化膜,引发电化学腐蚀,钢筋锈胀致混凝土开裂剥落、结构性能退化。此问题复杂长期,解决需系统、协同、全链条的综合防护。本文防护策略强调源头削减腐蚀介质、提升材料抵抗力、构筑设计屏障、运维主动干预与智能预警全方位协同。未来,研究与实践应聚焦:推动环保融雪剂研发产业化以减轻腐蚀;深化新一代建材在极端环境下的性能研究;融合信息技术打造智能诊断系统;建立健全并推行全寿命周期桥梁耐久性标准体系。

#### 参考文献

- [1]张韬颖.融雪剂在水泥混凝土构造物表面侵蚀作用的长期效应分析[J].全面腐蚀控制,2025,39(09):227-229.
- [2]吴玉辉,蒋明伟.钢筋混凝土桥梁用融雪剂的探讨[C]//中国公路学会,世界交通运输大会执委会,西安市人民政府,陕西省科学技术协会.世界交通运输工程技术论坛(WTC2021)论文集(上).辽宁省交通科学研究院有限责任公司;辽宁省沈阳市第十中学;,2021:722-726.
- [3]贾坚.融雪剂对桥梁混凝土腐蚀的双向防治技术研究[D].山东交通学院,2019.
- [4]信翔宇,李超,潘红,等.融雪剂对混凝土侵蚀机制与性能提升研究进展[J].中国粉体技术,2023,29(06):50-60.