

混凝土氯离子含量现场检测方法与钢筋锈蚀风险分析

贺梦萍

泰州市天衡建设工程质量检测有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i12.5170

[摘要] 氯盐侵蚀是造成混凝土结构钢筋锈蚀、耐久性下降的核心诱因,现场精准检测氯离子含量,是把控结构内部腐蚀隐患的关键手段。现有三类主流现场检测技术各有优劣,适配的工程检测场景存在明显差异。本文结合氯离子在混凝土内部的迁移规律,分析钢筋锈蚀萌生条件与完整演化流程,依托离子含量指标完成锈蚀风险分级。研究结果可为现场混凝土耐久性检测、结构病害防控提供实用参考依据。

[关键词] 混凝土; 氯离子检测; 钢筋锈蚀

中图分类号: TU528.01 **文献标识码:** A

Field Detection Methods for Chloride Ion Content in Concrete and Risk Analysis of Reinforcement Corrosion

Mengping He

Taizhou Tianheng Construction Engineering Quality Testing Co., Ltd.

[Abstract] Chloride attack is a major cause of reinforcement corrosion and deterioration of the durability of concrete structures. Accurate field detection of chloride ion content is a key means of controlling potential internal corrosion risks in structures. The three major types of existing field detection technologies each have their own advantages and limitations, with significant differences in their applicability to specific engineering inspection scenarios. Based on the migration characteristics of chloride ions within concrete, this paper analyzes the initiation conditions and complete evolution process of reinforcement corrosion and conducts corrosion risk classification based on chloride ion content indicators. The research results can provide practical references for field concrete durability testing and structural defect prevention and control.

[Key words] concrete; chloride ion detection; reinforcement corrosion

引言

钢筋混凝土是当下土建工程应用最广泛的结构形式,长期暴露在自然环境中,介质侵蚀引发的结构老化问题愈发普遍。氯离子渗透破坏钢筋钝化膜,进而诱发钢筋锈蚀,是结构耐久性失效最常见的病害类型。现场检测能够直观掌握结构内部氯离子实际富集情况,理清离子侵蚀和钢筋锈蚀的内在关联,可针对性解决混凝土结构内部隐蔽腐蚀难以排查的行业痛点,助力现场检测工作规范化开展。

1 混凝土氯离子检测与钢筋锈蚀概述

自然环境下长期服役的钢筋混凝土构件,耐久性失效大多源于内部钢筋发生腐蚀劣化,这类隐蔽损伤会逐步削弱构件承载能力,降低结构整体使用年限。混凝土孔隙液相呈强碱性,pH值通常维持在12.5~13.5之间,碱性环境可以促使钢筋表面生成一层致密氧化钝化膜,隔绝外界腐蚀物质,对钢筋起到长效防护作用。氯离子作为侵蚀能力极强的有害介质,可顺着混凝土内部毛细孔隙不断向内扩散,当氯离子积聚到一定浓度后,会直接溶

解钢筋表面的钝化膜,破坏界面电化学平衡,进而启动钢筋锈蚀反应。混凝土结构中的氯离子主要分为两大来源,一部分来自外界环境不断侵入的腐蚀性离子,另一部分来自混凝土拌合骨料、外加剂等原料自带的杂质离子。离子在混凝土内部不断堆积,会持续加重钢筋所处界面的腐蚀风险。相比于实验室标准检测手段,现场检测更贴合结构真实服役工况,能够快速获取混凝土不同深度处氯离子真实浓度,客观反映离子渗透的实际程度。依靠现场实测得到的氯离子浓度指标,能够精准判断钢筋腐蚀所处的阶段,弥补表观检查只能发现表层病害、无法探查内部隐患的短板^[1]。理清氯离子富集程度和钢筋锈蚀风险之间的对应关系,能够提前预判结构耐久性病害发展趋势,为混凝土构件防护处理、耐久性提升工作提供真实有效的依据,从源头减缓钢筋腐蚀发展速度,维持钢筋混凝土结构长久的服役性能。

2 混凝土氯离子含量现场检测方法

2.1 化学滴定现场检测方法

化学滴定法依托液相离子沉淀反应开展定量检测,是工程

现场检测混凝土氯离子含量通用性较强的理化检测技术。开展现场检测工作时，需要在混凝土构件不同表层与纵深位置采集约20g粉末试样，粗加工后的试样还要经过细研磨与分级筛除处理，消除骨料颗粒对检测反应的干扰。再通过专用浸取溶剂处理试样，充分释放混凝土孔隙中游离氯离子以及部分固化结合氯离子，保证待测溶液中氯离子组分完整，保障后续检测基础条件达标。检测工作依靠试液颜色突变锁定化学反应终止节点，结合滴定液消耗体积，结合离子反应配比关系核算构件内部氯离子实际含量。整套检测配套器材体积小，便于现场搬运布设，不受固定试验室场地条件约束，检测数值波动幅度小，相对误差一般可控制在5%以内，可以契合工程现场常规耐久性检测的精度标准。这项检测技术也存在明显的使用缺陷，试样预处理步骤繁杂，单测点检测周期约需40-60分钟，难以满足现场大批量构件快速普查的工作需求。人工肉眼判别滴定终点存在不可避免的视觉误差，会小幅干扰检测结果的准确性，因此该方法更适用于单点精准检测，而非大面积现场快速筛查作业。

2.2 电化学原位检测方法

混凝土孔隙液中游离离子含量改变时，界面电位会随之发生规律性偏移，电化学原位检测技术依托这一电化学基础原理，实现构件氯离子含量无损实时检测。这类检测方式无需凿取混凝土试样，也不用对构件表层进行切割打磨处理，检测探头可直接贴合结构表面开展测试，最大程度保留混凝土构件原始受力状态与表层完整性。检测探头可以实时感应界面电位波动信号，仪器内部信号处理单元可自动完成信号解析与换算，单测点检测仅需2-3分钟即可完成。整套检测流程操作门槛低，设备便携轻巧，检测耗时短，能够在短时间内完成多个测点的连续检测，十分适合现场大范围结构耐久性筛查工作。现场复杂的环境条件会对检测结果产生明显干扰，混凝土内部含水程度以及其他共存阴离子，都会干扰探头感应的原始电信号^[2]。检测探头长期处于高碱性混凝土环境中，感应端面易发生氧化钝化，削弱信号捕捉能力，日常使用中需要每3-6个月定时校验探头性能，减少外界因素带来的检测误差。

2.3 光谱学快速检测方法

各类无机离子在专属光波频段中会形成独有的光谱吸收峰，光谱学快速检测借助这一光学响应特性，判定混凝土基体中氯离子的实际富集程度。整套检测流程脱离传统化学试剂反应体系，依靠光学传感元件完成信号采集，规避了人工调配试剂引发的检测偏差，检测过程更加简洁环保，也减少了化学耗材带来的作业限制。现场实地检测无需大量混凝土试样，仅需约0.5g微量表层粉末即可满足检测需求，仪器可自主识别光谱信号波动并完成浓度换算，大幅缩减单测点检测时长。整机结构小巧轻便，测点转移操作简单，能够适应户外多变的现场工况，可高效完成大范围混凝土构件的批量排查工作。混凝土内部细密骨料以及水化生成物会阻挡和折射入射光波，扰乱原始光谱信号，让检测结果出现小幅偏差。外界自然光强弱变化也会干扰仪器基线状态，户外强光环境会直接影响信号采集精度，

实际现场检测时，需要做好避光防护，降低外界光照对光学检测系统的干扰。

2.4 各类现场检测方法适用性对比

三种主流现场氯离子检测技术，在结构破坏程度、抗干扰能力以及现场实操难度上各有优劣，无法单一判定最优检测方案。化学滴定依靠化学计量反应完成离子含量核算，检测结果受外界环境干扰极小，数值可靠度处于三类方法首位。但该方式需要剥离构件表层混凝土粉末，会对结构表层造成不可逆损伤，整套检测流程耗时更长，仅适合小范围关键测点的精准核验。电化学原位检测无需破坏构件基体，可直接贴合结构表面完成测试，测点切换便捷，单日可完成约150-200个测点的快速摸排。混凝土内部复杂离子环境以及空气湿度变化，都会影响电极感应信号，检测结果波动相对明显，难以满足高精度检测要求。光谱检测依托光学传感完成测试，化学试剂消耗少，结构损伤程度较低，检测效率优于滴定法。但该技术对外部光照条件敏感度较高，混凝土内部固相颗粒也会折射光波干扰检测信号^[3]。实际现场作业可依据检测精度要求、结构保护需求以及现场工况，匹配适配的检测手段，让检测工作更贴合现场实际施工检测需求。

3 氯离子侵蚀下钢筋锈蚀风险分析

3.1 氯离子在混凝土中的迁移特征

混凝土成型后内部遍布大小不一的毛细孔道与微观细微裂缝，这些天然空隙形成连贯的传输通道，为外部侵入的氯离子向内渗透提供必要空间。氯离子进入混凝土基体后不会保持单一形态，一部分可以跟随孔隙自由液体随意移动，另一部分会和水水泥水化生成物产生物理吸附作用，被牢牢束缚在基体内部，两种形态的离子会随内部环境变化不断互相转换。结构内外离子浓度差值驱动氯离子持续向内渗透，离子始终顺着浓度差值方向完成自发迁移。钢筋与混凝土接触的界面区域密实度偏低，内部空隙更为发达，该区域的离子渗透阻力更小，氯离子可以更快穿过混凝土保护层，直接接触钢筋表面。水泥水化凝胶物质可以束缚约30%-50%的自由氯离子，能够在初期延缓腐蚀介质的渗透进程。长期侵蚀作用下凝胶吸附空间会逐步达到饱和状态，原本被固定的氯离子会再次释放重新具备迁移活性，持续抬高钢筋界面的离子浓度，让钢筋钝化膜遭到破坏的概率持续上升。

3.2 钢筋锈蚀萌生的关键条件

混凝土孔隙液相自带强碱性，能够让钢筋表层生成致密的氧化防护膜，阻隔外界腐蚀介质与钢筋基体接触。混凝土服役过程中会出现碱性组分消耗现象，内部碱度不断下降，防护膜的结构稳定性随之下降，膜层逐渐出现细微裂隙，钢筋失去稳定的表层防护，腐蚀隐患开始逐步显现。钢筋周边游离氯离子不断富集，达到约0.05%-0.1%的水泥基临界含量后便会直接破坏钝化防护体系。氯离子具备极强的穿透性，会集中作用于防护膜瑕疵部位，瓦解膜层内部分子结合结构，造成局部防护层脱落缺损。钢筋裸露基体和完好的钝化区域会产生约200-300mV的电位差异，进而形成闭合的电化学腐蚀环路。混凝土孔隙中存留的液态水分可以为电荷迁移提供传导载体，溶解氧则参与阴

极端电化学反应，二者缺一不可，是锈蚀反应持续进行的必备要素。钢筋加工过程残留的细微表面瑕疵，也会放大大局部腐蚀风险^[4]。只有各类环境条件与介质条件同时达标，钢筋锈蚀才会正式发生，单一条件改变无法直接引发钢筋基体腐蚀。

3.3 钢筋锈蚀发展的演化过程

钢筋表面防护膜出现局部破损点位后，腐蚀反应只会在缺陷位置率先启动，并不会瞬间覆盖钢筋全部表面。完好的钝化区域依旧可以阻隔孔隙内腐蚀介质，抑制腐蚀范围向外扩张。早期腐蚀只发生在极小的裸露界面，钢筋基体损伤程度极低，构件外部不会出现任何可视损伤，早期腐蚀隐患长期隐藏在结构内部，难以被及时发现。界面腐蚀反应持续运行过程中，钢筋表层缺陷会逐步向内加深，形成凹陷腐蚀坑，氯离子不断聚集进一步弱化剩余钝化膜防护能力。腐蚀区域沿着钢筋表面持续延展，界面电化学反应持续加剧，钢筋基体损耗速度逐步提升。钢筋有效承载截面不断变小，构件原本的力学承载性能开始出现持续性衰减。钢筋氧化锈蚀后生成的腐蚀产物体积约为原始钢筋基材的2-4倍，产物不断堆积会持续挤压外围混凝土，产生持续向内的挤压应力。应力长期积聚后会诱发混凝土保护层产生原生微裂隙，裂隙打通新的渗透通道，让腐蚀介质更快侵入结构内部。结构耐久性损伤持续加剧，最终保护层出现开裂脱落，钢筋和混凝土之间的黏结咬合作用完全失效。

3.4 基于氯离子含量的锈蚀风险分级

混凝土内部氯离子积聚水平，直接影响钢筋钝化膜完好状态以及腐蚀反应发生概率。依托现场实测得到的离子浓度水平开展锈蚀风险划分，能够精准识别结构内部隐蔽腐蚀隐患，让结构耐久性防护工作更有针对性。按照氯离子对钢筋防护体系的侵害程度，结合腐蚀发展的不同阶段，可对构件锈蚀风险进行梯度划分，贴合结构实际服役腐蚀状态。低风险状态下，基体内部氯离子含量低于0.03%的水泥基限值，不足以动摇钢筋表层钝化膜稳定性，防护层可以持续发挥阻隔腐蚀介质的作用，钢筋基体始终处于安全服役状态。潜伏风险阶段，氯离子不断向钢筋表层

迁移聚集，慢慢逼近脱钝临界浓度，钝化膜整体稳定性逐步衰减，结构腐蚀风险缓慢上升，但钢筋基体尚未出现任何腐蚀损伤。当氯离子浓度超过临界耐受水平，钢筋表层防护膜出现局部破损，局部腐蚀坑开始形成，构件进入高腐蚀风险状态。氯离子持续大量堆积后，防护膜会出现大范围脱落，腐蚀反应进入高速发展阶段，保护层逐步出现力学损伤^[5]。依据不同等级的腐蚀风险开展针对性防护处理，能够精准管控结构耐久病害，避免无效的养护作业。

4 结束语

未来，可以结合不同服役环境的现场工况，进一步优化三类氯离子检测技术的适配方案，弱化环境干扰对检测结果带来的负面影响。同时可细化多梯度锈蚀风险判定标准，适配不同强度、不同保护层厚度的混凝土构件。后续还可结合现场长期监测数据，完善氯离子侵蚀预测逻辑，让混凝土结构耐久性检测与风险评估体系更加完善，贴合一线工程检测的实际作业需求。

[参考文献]

- [1]连晖.氯盐侵蚀环境混凝土结构钢筋锈蚀特点分析[J].福建建设科技,2026(2):42-44.
 - [2]梁可,郭明磊,吕忠.混凝土抗氯离子渗透性能测试方法研究进展[J].中国材料进展,2026,45(4):340-350.
 - [3]欧阳星星,罗红,张应水,等.高效氯离子含量快速测定仪校准方法的创新与实践[J].仪器仪表标准化与计量,2025(2):32-33+40.
 - [4]王理杰.延缓氯离子对钢筋混凝土侵蚀的试验研究[J].中国港湾建设,2025,45(1):70-74.
 - [5]秦凯强.混凝土结构耐久性模拟与钢筋锈蚀概率特性分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(2):165-169.
- 作者简介：**
贺梦萍(1990--),女,汉族,江苏人,本科,工程师,研究方向：工程检测。