

公路桥梁钢结构腐蚀防护及耐久性提升养护技术研究

邓建德

新疆生产建设兵团建筑科学研究院 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 随着我国基础设施建设的飞速发展,大跨径、高荷载的公路桥梁日益增多,其中钢结构因其优异的力学性能和施工便捷性被广泛应用。然而,钢结构在服役过程中长期暴露于复杂多变的环境中,极易遭受腐蚀破坏,这不仅严重威胁桥梁结构的安全性和服役寿命,更带来巨大的经济损失和潜在的公共安全风险。本文系统梳理了公路桥梁钢结构腐蚀的主要机理与影响因素,全面评述了当前主流的腐蚀防护技术体系,包括重防腐涂层、金属热喷涂、阴极保护及其复合应用,并深入探讨了基于全寿命周期理念的耐久性提升策略。在此基础上,重点聚焦于智能化、绿色化养护技术的前沿进展,如基于物联网(IoT)与数字孪生的腐蚀状态智能监测、自修复涂层、石墨烯等纳米材料改性涂层以及环保型水性涂料的应用。旨在为提升我国桥梁基础设施的长寿命、高可靠性和智能化管养水平提供理论参考与技术支持。

关键词: 公路桥梁; 钢结构; 腐蚀防护; 耐久性; 养护技术; 智能监测; 绿色材料

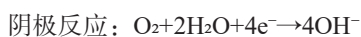
引言

桥梁是国家交通要冲,其安全耐久关乎国计民生。21世纪,我国建成世界最大公路桥梁网络,诸多超级工程大量采用高强度钢材实现大跨度、轻量化。但“重建设、轻养护”观念及严酷服役环境,让钢结构腐蚀问题突出。传统桥梁养护多“事后维修”或“定期检修”,响应滞后、效率低、成本高,难防突发性腐蚀失效。当下,从被动应对转为主动预防,构建全寿命周期耐久性保障体系,集“高效防护-精准监测-智能决策-绿色养护”于一体,是桥梁工程领域迫切需求与研究热点。本研究整合多学科成果,剖析公路桥梁钢结构腐蚀防护技术路径,探索智能化与绿色化养护新范式,为桥梁高质量发展提供技术支持。

1 公路桥梁钢结构腐蚀机理与影响因素分析

1.1 腐蚀基本机理

公路桥梁钢结构的腐蚀本质上是电化学过程。在潮湿环境中,钢材表面会形成一层电解质水膜。钢材中的铁(Fe)作为阳极失去电子被氧化,生成亚铁离子(Fe^{2+});而溶解在水膜中的氧气(O_2)在阴极区域得到电子被还原,生成氢氧根离子(OH^-)。两者结合最终形成疏松多孔的铁锈(主要成分为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$),该产物不仅不能阻止内部金属继续腐蚀,反而因其吸湿性加速了腐蚀进程。其核心反应可简化为:



1.2 主要腐蚀类型

根据腐蚀形态和环境特点,公路桥梁钢结构常见的腐蚀类型呈现出多样化特征。均匀腐蚀在整个暴露表面上以相对一致的速率发生,导致构件截面整体减薄,这是最普遍但也最容易预测和防护的腐蚀形式。相比之下,点蚀(孔蚀)则在局部区域形成深度远大于宽度的蚀坑,具有隐蔽性强、发展迅速的特点,极易成为疲劳裂纹的起源,对结构安全构成极大威胁。缝隙腐蚀通常发生在螺栓连接、铆接、垫片下方等存在微小缝隙的区域,由于缝隙内氧浓度低形成氧浓差电池,导致缝隙内部加速腐蚀^[1]。在特定条件下,如拉应力和含氯离子环境的共同作用下,钢材还可能发生应力腐蚀开裂(SCC),虽然在普通碳钢中不常见,但在高强度钢中需保持警惕。此外,交变应力与腐蚀环境的协同作用会引发腐蚀疲劳,显著降低钢材的疲劳寿命,这也是桥梁在动态荷载下需要重点防范的问题。

1.3 关键影响因素

钢结构腐蚀速率受多重因素耦合影响,形成了一个复杂的动态系统。环境因素是最直接的外部驱动力,大气中的湿度、温度、盐分(尤其在沿海地区)、二氧化硫(SO_2 ,在工业区)、氮氧化物(NO_x)以及干湿交替的频率等,均会显著加速腐蚀进程,国际标准ISO9223正是基于这些因素将大气腐蚀性划分为不同等级,为防护设计提供了重要依据。结构设计本身也扮演着关键角色,不良的设计会无意中形成积水区、通风死角,甚至引入电偶腐蚀对(例如钢与铝的直接接触),从而加剧局部腐蚀;因此,合理的排水设计、避免形成缝隙、以及使用相同或电化学相容的金属材料是设计阶段必须考

量的原则。材料的内在属性同样不可忽视,钢材本身的化学成分、微观组织、表面状态(如粗糙度、残余应力)等决定了其固有的耐蚀能力,例如耐候钢通过添加铜、磷、铬、镍等合金元素,能够在表面形成一层致密且稳定的“保护性锈层”,从而有效减缓后续的腐蚀速率。最后,施工与维护的质量是决定防护体系成败的最后一环,无论是表面处理(如喷砂除锈)的彻底程度,还是涂层施工的工艺控制(包括厚度均匀性和充分固化),乃至后期维护干预的及时性,都直接决定了整个防护体系的有效寿命。

2 主流腐蚀防护技术体系评述

为抵御上述腐蚀威胁,工程界已发展出一套成熟且不断演进的防护技术体系。

2.1 重防腐涂层系统

重防腐涂层系统是目前应用最广泛、经济性最佳的防护手段。一个完整的涂层系统通常由底漆、中间漆和面漆三层协同工作。底漆直接与钢材接触,要求具有极强的附着力和提供阴极保护或钝化功能,其中富锌底漆因其含有大量锌粉作为牺牲阳极而被广泛采用,它能优先腐蚀从而保护钢铁基体。中间漆的主要作用是提供屏蔽效应,通过增加涂层的整体厚度来延长腐蚀介质(如水汽和氧气)向内渗透的路径,环氧云铁中间漆凭借其内部的云母氧化铁鳞片结构,能有效阻隔这些介质的侵入。面漆则负责提供装饰效果并抵抗紫外线辐射、化学品侵蚀等外部环境因素,聚氨酯面漆因其卓越的保光保色性和耐候性而成为首选。然而,整个涂层系统的成功高度依赖于前期严格的表面处理(通常要求达到Sa2.5级的清洁度)和规范的施工工艺控制。其固有的局限性在于一旦涂层因机械损伤或老化而出现破损,局部腐蚀便会迅速在缺陷处发生和发展。

2.2 金属热喷涂技术

金属热喷涂技术通过电弧、火焰或等离子体等热源将金属丝或粉末(常用锌、铝及其合金)加热至熔融或半熔融状态,并高速喷射到经喷砂处理的钢材表面,从而形成一层致密的金属覆盖层。热喷锌或铝涂层兼具屏障保护和阴极保护的双重功效,其中铝涂层在大气环境中能自发形成一层致密的 Al_2O_3 钝化膜,使其在海洋等严酷环境下的耐蚀性通常优于锌涂层。在实际工程中,这种金属喷涂层常与一层封闭涂层(如环氧树脂)结合,构成“金属喷涂+封闭漆”的复合防护体系,能够为桥梁钢结构提供长达二十年以上的长效防护^[2]。尽管该技术对现场施工条件要求较高且初期投资较大,但其卓越的耐久性和在服役期间良好的可修复性,使其在港珠澳大桥

等众多重要桥梁的关键部位得到了广泛应用。

2.3 阴极保护技术(CP)

阴极保护技术通过向被保护的金属结构施加阴极电流,使其整个表面转变为阴极,从而从根本上抑制阳极溶解反应的发生。对于公路桥梁钢结构,主要采用牺牲阳极法和外加电流法两种形式。牺牲阳极法是将电位更负的金属(如锌、镁合金)直接电连接到钢结构上,牺牲阳极自身发生腐蚀并释放电子,从而保护钢基体,这种方法无需外部电源,安装简单可靠,常用于桥梁水下或浪溅区的钢桩、承台等部位。外加电流法则通过一个直流电源和辅助阳极(如MMO/Ti混合金属氧化物阳极)向钢结构持续提供可调节的保护电流,其优势在于输出电流可控、保护范围大,适用于大型或结构复杂的桥梁,但系统相对复杂,需要持续供电和专业的监控维护。在实践中,阴极保护极少单独使用,而是与高性能涂层联合构成“联合保护”体系,涂层承担主要的物理屏障作用,而阴极保护则专门针对涂层不可避免的针孔、划伤等缺陷处提供“兜底”式的电化学保护,二者协同作用,极大地提升了整体防护效能。

3 基于全寿命周期的耐久性提升策略

现代桥梁工程强调从规划、设计、施工到运营维护的全寿命周期管理(LCCM)。在此框架下,提升钢结构耐久性不仅是技术问题,更是贯穿始终的系统工程。

3.1 耐久性设计理念的融入

在设计阶段就应将耐久性作为核心考量因素予以充分融入。这意味着需要根据桥梁不同部位所处的具体微环境(如大气区、浪溅区、水下区等)进行精细化的环境分区设计,并据此采用差异化的、针对性的防护方案。同时,结构细节设计应遵循冗余和易检易维的原则,例如在关键承重部位设置合理的腐蚀裕量以应对未来的材料损失,并优化构造细节,确保未来检测人员能够安全、便捷地接近所有需要检查的区域,为高效的预防性养护奠定基础^[3]。此外,在腐蚀环境极为严酷的区域,可以前瞻性地选用更高性能的材料,如耐候钢、不锈钢复合板或特定的耐蚀合金,虽然初始成本有所增加,但从全寿命周期成本的角度看,往往能带来更大的综合效益。

3.2 预防性养护与精准维护

提升耐久性的关键在于养护模式的根本性转变,即摒弃传统的“坏了再修”的被动响应模式,全面推行基于结构实际状态的预防性养护。这种模式依赖于定期的、系统的检测与评估,通过科学手段全面掌握桥梁钢结构的健康状况,并在其腐蚀损伤尚处于萌芽或可控阶

段时就进行精准干预。这种“治未病”的策略能够以最小的维护成本获得最大的结构安全保障和经济效益。然而，实现这一目标的前提是建立一个完善、高效的桥梁健康监测与评估体系，该体系能够持续、准确地提供结构状态信息，为养护决策提供坚实的数据支撑。

4 智能化与绿色化养护技术前沿

科技的进步正深刻变革着桥梁养护的面貌，智能化与绿色化已成为引领未来发展的两大核心趋势。

4.1 腐蚀状态智能监测技术

腐蚀状态的智能监测技术正在重塑我们对桥梁健康的认知方式。基于物联网（IoT）的无线传感网络允许在桥梁的关键易腐部位布设微型、低功耗的腐蚀传感器，如电化学噪声传感器、电阻探针或光纤光栅传感器，它们能够实时采集腐蚀电流、腐蚀速率、温湿度、氯离子浓度等关键参数，并通过无线网络将数据传输至云端管理平台。在此基础上，数字孪生（DigitalTwin）技术的应用则更进一步，它通过构建桥梁的高保真虚拟数字模型，将实时监测数据、历史维护记录、环境气象预报等多源异构信息进行深度融合，利用大数据分析和机器学习算法，不仅能对钢结构的腐蚀状态进行直观的可视化呈现和动态演化模拟，还能对其剩余使用寿命进行科学预测^[4]。管理者可以在虚拟空间中“预演”不同养护方案的长期效果，从而实现养护决策的最优化。与此同时，无人机与爬壁机器人等智能装备的引入，极大地提升了巡检的效率和安全性，前者可搭载高清摄像头和红外设备高效完成高空普查，后者则能携带超声波测厚仪等精密仪器，对人工作业难以触及的区域进行精确的腐蚀深度测量。

4.2 新型绿色防护材料

在材料层面，新型绿色防护材料的研发与应用正为桥梁防腐开辟新的路径。自修复涂层作为一种智能材料，其内部嵌入了微胶囊或含有可逆化学键，当涂层因外力或老化产生微裂纹时，微胶囊会破裂释放出修复剂（如单体或缓蚀剂），或者可逆键会自发重组，从而自

动愈合损伤，恢复涂层的完整性和防护功能，这无疑能极大地延长防护体系的服役寿命。纳米材料改性涂层则是通过将石墨烯、纳米SiO₂、纳米TiO₂等先进纳米粒子添加到传统涂料基体中，显著提升涂层的致密性、机械强度、耐候性和对腐蚀介质的阻隔性能；特别是石墨烯，其独特的二维片层结构能在涂层内部形成“迷宫”效应，极大地延长了水汽和氧气等腐蚀介质的渗透路径。此外，为响应全球环保趋势，环保型水性工业涂料正逐步替代传统的高VOCs（挥发性有机化合物）溶剂型涂料，它以水为主要分散介质，对环境和施工人员健康更为友好，随着技术的不断进步，其综合防护性能已逐步接近甚至在某些方面超越了溶剂型产品，符合绿色施工和可持续发展的时代要求。

5 结语

公路桥梁钢结构腐蚀防护与耐久性提升是复杂系统工程。本文指出，单一防护技术难满足现代桥梁长寿命、高可靠性需求，未来需构建多维度综合保障体系。其一，深化基础研究，揭示多物理场、化学场耦合下的腐蚀失效机理，为开发智能长效防护材料与方法提供理论支撑。其二，推动跨学科融合创新，将腐蚀科学与人工智能等前沿领域结合，研发“智能涂层”，利用AI算法挖掘腐蚀规律，实现闭环管理。其三，完善标准规范体系，针对智能化监测设备、新型材料等环节制定统一标准，扫清工程应用障碍。其四，强化全寿命周期成本意识，全面核算成本，鼓励采用长效防护与智能养护方案。

参考文献

- [1]曹建锋,范文秀,丁亚东.钢结构桥梁腐蚀原因及保护措施研究[J].特钢技术,2025,31(02):63-66.
- [2]任娟.公路桥梁钢结构的腐蚀监测与防护技术研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(14):91-93.
- [3]何润,周世康,张琦超,等.桥梁钢结构的腐蚀与防护技术研究进展[J].钢铁研究学报,2025,37(05):539-556.
- [4]安小军.钢结构桥梁中防腐技术的创新与应用[J].工程与建设,2024,38(01):211-212+248.