

桥梁防腐蚀技术及长寿命维护策略研究

王博

(湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙 410000)

【摘要】本文深入研究了桥梁防腐蚀技术及长寿命维护策略,通过对大气环境腐蚀、水下环境腐蚀、化学腐蚀等环境因素与腐蚀类型的分析,揭示了桥梁腐蚀机理的多样性。随后,详细探讨了防腐蚀技术的应用,包括有机涂层、金属涂层、电化学防腐蚀技术以及高新材料应用。在此基础上,针对桥梁长寿命维护,提出了定期检测与监测、预防性维护措施以及应急修复与恢复等多层次、多方面的维护策略。

【关键词】桥梁;防腐蚀技术;长寿命;维护策略

在我国,社会经济的发展离不开交通事业的发展,交通促动了经济的交流与贸易的往来,促使人与人、地域与地域之间的关系越来越密切,因此,交通事业对于社会的发展有着重要的价值,对于社会的稳定也有着重要的意义。桥梁是交通运输系统的重要组成部分,但在使用过程中,由于桥梁的应用环境为露天场所,长期暴露于各种恶劣环境中,腐蚀严重已经成为影响其结构安全和使用寿命的主要问题。因此,深入研究桥梁防腐蚀技术和长寿命维护策略对于确保桥梁的安全、可靠、长寿命运行至关重要。

一、我国桥梁防腐蚀技术现状

我国桥梁规范规定特大桥、大桥、重要中桥的设计寿命为100年。基于社会发展的需要以及经济学的基本原则,很多学者提出应提高设计桥梁的使用寿命,如港珠澳大桥为120年,美国旧金山新海湾大桥为150年,意大利墨西拿海峡大桥为200年。事实上,伴随着技术的不断发展,在本世纪,我国桥梁防腐蚀技术得到迅速发展,而且,通过结构耐久性系统研究和技术对策,国内也累积了宝贵经验。

混凝土结构方面,采用高性能混凝土是提高耐久性的基本措施,通过掺入多种掺料来提高其性能。另外,增加混凝土中钢筋的保护层厚度、掺加钢筋阻锈剂以及使用不锈钢钢筋也是有效手段。在钢结构方面,涂料保护、阴极保护技术和特种钢材的使用都发挥了关键作用。而且,金属喷涂技术在底材防锈处理方面得到广泛应用,而热浸镀锌则常用于较小部件,也是在应用中发挥了作用的。此外,在钢结构内部采用除湿系统也是一项有效的防腐措施。这些技术措施在我国跨江海桥建设中得到应用,如金塘大桥、厦漳跨海大桥、港珠澳大桥等工程。总体而言,这些措施为我国桥梁防腐蚀技术提供了可靠的基础,确保了桥梁结构的耐久性和长期稳定运行。

二、桥梁腐蚀机理分析

(一) 环境因素与腐蚀类型

1. 大气环境腐蚀。大气环境中存在的氧气、水汽和污染物是导致桥梁大气腐蚀的主要因素。金属结构暴露在大气中,容易与氧气发生氧化反应,形成金属氧化物。同时,大气中的湿度和酸雨等因素也加速了金属结构的腐蚀。特别是在潮湿的海洋环境中,氯离子的存在会引发更为严重的腐蚀,这些必然对桥梁造成了不可逆的影响。

2. 水下环境腐蚀。桥梁的部分结构位于水下,水中的化学成分和溶解氧都会对金属结构产生腐蚀作用。特别是在盐水中,氧和氯离子的作用使金属更容易发生腐蚀。此外,水下微生物的存在也可能引发生物腐蚀,加速金属结构的破坏。

3. 化学腐蚀。一些化学因素,如工业废气、酸性雨水、化学物质的泄漏等,都可能导致桥梁结构的化学腐蚀。化学腐蚀通常表现为金属表面的腐蚀、溶解或化学变化,对桥梁结构的完整性构成威胁。

(二) 材料性能与腐蚀敏感性

1. 金属材料。桥梁常用的金属材料包括钢铁和铝合金。不同金属在腐蚀环境中表现出不同的耐蚀性。例如,不锈钢在一定条件下表现出较好的耐蚀性,而铁则容易被大气中的氧气氧化形成锈。因此,在桥梁设计中选择合适的金属材料并采取防腐措施至关重要。

2. 涂层材料。在桥梁结构中使用涂层是一种常见的防腐手段。涂层可以形成一层保护膜,阻隔大气、水分和化学物质的侵蚀,提高金属结构的耐腐蚀性能。然而,不同涂层的质量和耐久性也存在差异,需要在选择和应用时谨慎考虑。

3. 混凝土结构。除金属结构外,桥梁中还包括大量混凝土结构。混凝土在大气中相对较为稳定,但在含有氯离子的水中容易发生腐蚀。因此,在混凝土桥梁中,控制混凝土质量、采用防水措施和定期维护

检查都是防范腐蚀的重要手段。

三、桥梁防腐蚀技术研究

(一) 防腐蚀涂层技术

1. 有机涂层。有机涂层作为桥梁防腐蚀的重要技术，包括环氧树脂、聚氨酯、丙烯酸等涂料，其广泛应用得益于其卓越的性能。例如环氧树脂涂层，具有极强的粘附性，其粘结力可高达 15 兆帕，有效附着于桥梁表面，形成坚固的保护膜。聚氨酯涂层在耐磨性方面表现卓越，其硬度可达 60 ~ 70 岸度，显著提高了桥梁结构的耐久性。丙烯酸涂层则以其出色的耐候性而著称，可以在极端气候条件下保持稳定。这些涂料在形成保护膜的过程中，能够有效隔绝大气中的氧气、水汽和化学物质，防止其对金属表面的侵蚀。在实际应用中，有机涂层还经常受到具体环境条件的挑战，因此其设计和选择需要考虑到各种因素，包括温度、湿度、大气污染物等。

2. 金属涂层。金属涂层是一种通过将金属颗粒以喷涂、热浸镀等方式附着在桥梁表面的技术，为防腐蚀提供了可靠的保护层。锌涂层和铝涂层是常见的金属涂层，它们在桥梁工程中广泛应用。锌涂层是一种常见的防腐蚀涂层，其热浸镀锌工艺能够在桥梁表面形成一层坚固的锌膜。这种膜具有出色的电化学性能，可作为阳极，通过电化学反应形成保护电流，降低金属结构的氧化还原反应速率，从而延缓腐蚀过程，其保护寿命通常可达 20 年或更长。此外，锌本身对大气中的氧气和水分有较强的阻隔作用，有效隔绝外界侵蚀。铝涂层同样在防腐蚀领域表现卓越。铝具有良好的电化学稳定性，能够形成致密的氧化膜，起到防腐蚀的作用。铝涂层的轻质特性也有助于减轻桥梁结构的自重，提高其抗风荷载和地震荷载的能力，其保护寿命也可在 15 年以上。

(二) 电化学防腐蚀技术

1. 阴极保护。阴极保护是一种有效的防止金属结构氧化腐蚀的技术，通过在金属表面设置阴极，使其成为电化学反应中的阴极，以减缓腐蚀过程。在实际应用中，常见的阴极保护方法包括在结构表面铺设阳极材料、使用外部电源施加电流等手段。具体而言，通过在金属表面布置阳极材料，如锌或铝，可以提供额外的阴极保护，形成一个保护性的氧化层，有效降低金属的腐蚀速度。同时，使用外部电源施加电流也是一种常见的阴极保护手段，通过使金属结构成为电池中的阴极，进一步抑制氧化反应的进行。在桥梁的地下结构和水下部分，阴极保护尤为重要。根据实验和实际应用的数据，阴极保护能够显著延长金属结构的使用寿命，降低维护成本。研究表明，正确实施阴极保护措施可以使金属结构的腐蚀速率降低至每年仅为几微米，从而大大提高结构的耐久性

和可靠性。

2. 阳极保护。阳极保护是通过在金属结构周围设置阳极，使其成为电化学反应中的阳极，实现有效减缓金属的腐蚀速度。这一技术主要应用于桥梁的地上结构，尤其是桥梁的主体框架，以保障结构的安全和耐久性。阳极保护系统可分为主动系统和被动系统两大类。主动系统需要外部电源以施加电流，通过电流的引导，金属结构成为电池中的阳极，抑制腐蚀反应。相对而言，被动系统则依赖于环境中的自然电流，不需要外部电源的支持。具体而言，实际应用中采用阳极保护的桥梁结构，数据表明其腐蚀速率明显降低。阳极保护还能够显著降低维护成本，提高结构的整体经济性。

(三) 高新材料应用

1. 纳米材料。纳米材料的引入为桥梁防腐蚀领域带来了创新性的解决方案。纳米涂层作为一项新兴技术，在微观尺度上展现了独特的优势，为金属表面提供了更为全面和均匀的保护。纳米涂层的关键优势之一是其能够填充金属表面微孔，形成均匀且致密的保护膜。通过纳米颗粒在微观层面的作用，涂层得以更好地贴附并覆盖金属表面的细小缺陷，从而有效防止腐蚀介质侵入。此外，纳米颗粒由于具有较大的比表面积，能够提供更多的有效隔离层，有效阻隔外界环境对金属的侵蚀。与传统防腐涂层相比，纳米涂层在抵抗腐蚀方面表现更为卓越，使金属结构的腐蚀速率大幅降低。这种改善对桥梁结构的使用寿命有显著的积极影响，延长了其在恶劣环境条件下的稳定运行时间。

2. 耐腐蚀合金。通过调整合金成分来提高其抗腐蚀性能，为桥梁结构提供可靠的防护。主要包括不锈钢、镍基合金等多种合金，这些材料通过巧妙的合金设计和制备工艺，使其在不同环境下都能表现出卓越的抗腐蚀性能。不锈钢是一种常见的耐腐蚀合金，其主要成分包括铁、铬、镍等。316 不锈钢在含有盐和腐蚀性物质的海水环境中，其腐蚀速率仅为每年约 0.5 毫米，表现出卓越的抗腐蚀性。镍基合金如 Inconel 625 在高温、强酸强碱环境下表现出色，其抗腐蚀性能在硫酸和氯化物环境中的腐蚀速率远低于普通合金。实际应用中，耐腐蚀合金被广泛应用于桥梁的大气、水下和化学环境中，有效提高了桥梁结构的抗腐蚀能力。

四、桥梁长寿命维护策略

(一) 定期检测与监测

1. 腐蚀监测技术。采用先进的腐蚀监测技术，如无损检测、电化学腐蚀监测和超声波检测等，可在微观层面全面、准确地评估桥梁结构中的腐蚀情况，为及时采取有效的防腐措施提供科学依据。无损检测技术如磁粉探伤和超声波检测，能够非破坏性地检测

金属结构中的腐蚀、裂纹等隐患，对于发现微小腐蚀缺陷具有极高的敏感性，甚至可以检测到毫米级的腐蚀深度，使得及早发现和处理潜在问题成为可能。电化学腐蚀监测则通过在金属表面设置腐蚀电极，测量电流和电位的变化，实时监测腐蚀过程，能够提供详尽的腐蚀速率数据。对于暴露在盐雾、酸雨等恶劣环境的桥梁，电化学监测能够准确追踪腐蚀的动态过程，帮助制定有针对性的维护计划。定期的腐蚀监测对于暴露在恶劣环境中的桥梁至关重要。科学的监测数据不仅能够及时发现潜在问题，降低维护成本，而且有助于延长桥梁的使用寿命。综合运用多种监测技术，可建立全面的腐蚀监测体系，为桥梁结构的可靠运行提供坚实的支持。

2. 结构健康监测系统。结构健康监测系统通过安装传感器和监测设备，实时监测桥梁结构的状态和性能，包括振动、位移、温度等多个参数。这种系统在桥梁工程中的应用，一是能够提高结构的安全性，二是可以有效延长其使用寿命。具体而言，通过振动传感器监测桥梁结构的振动频率和幅度，获取结构的自然频率和模态形态，可以有效地判断结构的健康状况。位移传感器则能够实时监测结构的变位情况，提供关键的变形信息。同时，温度传感器可以监测结构的温度变化，帮助评估材料的热应力和疲劳状况。实践表明，结构健康监测系统的应用在事故预警和结构性能评估方面取得显著成效。通过实时监测，系统能够及时发现结构的异常变化，提前预警潜在问题，为采取预防性维护和应急修复提供重要信息支持。因此，投资于这些先进监测技术是确保桥梁长寿命和可靠性的明智选择。

（二）预防性维护措施

1. 环境管理。环境管理是预防性维护的基础。科学合理的设计和建造能够有效减少桥梁暴露在恶劣环境中的可能性，降低腐蚀和损坏的风险。在设计阶段，考虑避免潮湿和高氯离子含量的地方，选择具有优良耐腐蚀性能的材料，是提高桥梁耐候性的重要策略。此外，采用防腐涂层、定期维护检查等手段也是保护桥梁免受恶劣环境侵害的关键，有助于延长桥梁寿命，确保其在不同气候和环境条件下能够安全可靠地运行。

2. 定期维护计划。制定合理的定期维护计划是确保桥梁长寿命的关键。维护计划应涵盖多个方面，包括防腐涂层的定期检查和修复、结构的定期检测和健康监测、设备的维护和更新等内容。定期检查涂层的耐腐蚀性能并进行及时修复，对于防止腐蚀引起的结构损伤效果显著。同时，定期检测和健康监测有助于发现潜在的结构问题，及时采取措施进行修复和加固。设备的维护和更新保证了桥梁各个组成部分的正常运行，进一步延长了桥梁的使用寿命。

（三）应急修复与恢复

1. 急救修复技术。急救修复技术是在发现桥梁结构紧急问题时迅速采取的有效手段，确保桥梁安全，包括迅速处理腐蚀、设置临时支撑结构、进行急救性涂层修复等措施，可在问题进一步恶化之前修复桥梁，维护其结构稳定。急救修复技术的快速实施对于确保桥梁的可靠性至关重要，保障公共交通运输的安全，同时最大程度减轻紧急情况可能带来的风险。不仅能够应对突发状况，还能延长桥梁的使用寿命，为持久的结构健康和公共安全提供了坚实的支持。

2. 紧急恢复计划。制定紧急恢复计划是在桥梁发生严重事故或损坏时采取的一项重要措施。尤其是在面临严重事故或损坏的情况下。这一计划的制定需要全面考虑各种可能的事故场景，涵盖火灾、地震、冲击等多种紧急情况。在制定紧急恢复计划时，必须明确各种紧急修复措施的详细步骤和相应责任人，以确保在紧急情况下能够迅速、有序地进行修复和恢复工作。该计划应该包括但不限于事故诊断、危险排除、人员疏散、通信保障等方面的细节。责任人需要清晰了解其在紧急情况下的任务和职责，确保各项措施能够协同推进。定期的紧急演练也是计划有效性的关键组成部分，通过模拟各类紧急情况，检验计划的可行性和实用性，以便在真实事件中能够更加迅速、有效地应对紧急状况，最大程度地减轻损失。这一系统而周密的计划为桥梁管理提供强大的保障，确保在面对突发事件时能够迅速、有序地展开应对和修复工作。

结束语

综上所述，通过本文对桥梁防腐蚀技术及长寿命维护策略的研究，我们深刻认识到桥梁的安全与长寿命维护密不可分。选择适当的防腐蚀技术和维护策略，不仅能够延长桥梁的使用寿命，而且有助于降低维护成本，提高交通运输系统的可靠性。随着科技的不断进步，我们有信心通过更加先进的技术手段，确保桥梁在各种环境条件下安全稳定运行，为社会发展和人们生活提供更为可靠的基础设施支持。

参考文献：

- [1] 何平根, 姜文英, 宋建平. 结构钢在我国桥梁工程中的应用及防腐蚀技术研究进展 [J]. 材料开发与应用, 2022, 37(02): 96-100.
- [2] 王素梅. 新型钢筋混凝土结构桥梁防腐蚀技术分析 [J]. 全面腐蚀控制, 2020, 34(10): 97-98.
- [3] 张雷, 王彦成, 刘吉春. 大气腐蚀环境下的钢桥梁防腐蚀技术 [J]. 全面腐蚀控制, 2018, 32(11): 96-97.

作者简介：姓名：王博，性别：男，出生年月：1993.3，民族：汉，籍贯：湖南岳阳，学历：大学本科，研究方向：公路桥梁与隧道。