

钢桥梁耐久性设计及腐蚀防护措施研究

郭仔翔

中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430050

[摘要] 钢桥是交通运输的重要设施之一, 而耐久性和防腐措施的好坏将直接影响到桥梁的安全和使用年限, 文章详细介绍了关于钢桥梁耐久性的基本概念以及耐久性设计的基本原则, 在此基础上对在不同环境条件下钢材发生腐蚀的原因进行了探讨, 针对不同的环境条件给出了相应的耐久性设计的技术要点和具体措施, 同时提出了一套包括涂装防腐, 电镀防腐, 阴极保护在内的综合性的防腐技术措施。通过研究发现, 在整个生命周期中实施耐久性的设计理念与采取多种防护措施相结合的方式能够大大提高钢桥的抗腐蚀能力以及使用寿命, 从而给钢桥梁的设计、施工与保养提供了参考依据和借鉴经验。

[关键词] 钢桥梁; 耐久性设计; 腐蚀机理; 涂层防护; 阴极保护

DOI: 10.33142/ec.v9i4.19457

中图分类号: U448.36

文献标识码: A

Research on Durability Design and Corrosion Protection Measures of Steel Bridges

GUO Zixiang

Zhongnan Engineering Corporation Limited, Wuhan, Hubei, 430050, China

Abstract: Steel bridges are one of the important transportation facilities, and the durability and anti-corrosion measures directly affect the safety and service life of bridges. This article introduces in detail the basic concepts of durability of steel bridges and the basic principles of durability design. Based on this, the reasons for steel corrosion under different environmental conditions are discussed, and corresponding technical points and specific measures for durability design are proposed for different environmental conditions. At the same time, a comprehensive anti-corrosion technology measure including coating anti-corrosion, electroplating anti-corrosion, and cathodic protection is proposed. Through research, it has been found that the combination of durability design concepts and various protective measures throughout the entire lifecycle can greatly improve the corrosion resistance and service life of steel bridges, providing reference and experience for the design, construction, and maintenance of steel bridges.

Keywords: steel bridge; durability design; corrosion mechanism; coating protection; cathodic protection

引言

伴随着我国交通运输基础设施工程的蓬勃发展, 钢结构桥梁由于其承载能力好、重量轻、跨距大等特点而被广泛应用于公路、铁路以及城市桥梁之上, 但是由于钢桥梁在服役期间长期处于大气、水气及地层等环境中, 很难避免对金属材料发生侵蚀损害。工业先进国家的数据表明, 每年由钢材锈蚀导致的损失占到 GDP 的 2%~4%, 全世界的钢材腐蚀所造成的损失更是达到了上千万亿。近年来我国由于钢结构腐蚀而导致的安全事故占桥梁安全事件的 25%~30%。腐蚀使钢桥钢结构截面减小、力学性能下降, 同时又同疲劳荷载协同作用促进结构损坏演进, 严重影响着钢桥结构的安全可靠性。所以进行钢桥结构耐久性设计以及防腐措施的研究有着重大的理论意义和应用价值。文章以耐久性设计理论为基础, 对钢桥结构腐蚀的

原因及其影响因素进行了详细的讨论并且提出了相应的耐久性设计关键技术并建立了系统的钢结构腐蚀防护体系, 希望可以为钢桥结构的长期可靠运行起到一定的参考作用。

1 钢桥梁耐久性设计理论基础

1.1 钢桥梁耐久性内涵与评价指标

钢桥耐久性即为结构在其整个设计使用期内, 在经受自然环境以及荷载的影响之后还能够维持原有的性能水平并继续执行原来预定的任务。同济大学葛耀君教授认为构件耐久性是桥梁可持续发展的重要方面之一, 它同结构的安全性、功能适用性以及跨越能力的延展性一起构成了桥梁工程可持续发展的综合评判标准。钢桥耐久性的评估指标分为材料、构件、结构三个级别。材料级别包括了钢材抗锈蚀能力、脆断韧度、抗疲劳强度等特性参数; 构件

级别包括了截面损耗比例、涂层老化程度、点蚀深浅等检测结果；结构级别则包括整体刚度损耗程度、承重力下降幅度和剩余使用寿命等。据研究报道，提出高韧度桥梁钢、耐候桥梁钢的断裂韧度、耐候性、强韧性设计准则，丰富了相关标准的技术内容，解决了钢桥长寿命强韧性设计以及建造的材料技术问题。

1.2 结构耐久性设计基本原则

钢桥结构防腐设计的基本思路是：一是在设计初期进行有效的预防，避免不必要的腐蚀发生，在结构选型以及构造处理方面做好防腐措施；二是在结构表面施加涂层的同时使用阴极保护等防腐方式互相配合，达到多重防护的目的；三是在钢桥的设计过程中要考虑到后期的检修工作，对重要的部位易于检查维修和拆卸；四是综合考虑钢桥结构的整个寿命周期内各个阶段的成本，使总费用最低。课题成果证明，在我国桥梁建设强调质量与耐久性的背景下，经过近二十载自主研发及联合研发，以钢桥强化耐久性技术为切入点，提出“物理试验、数字试验、原位试验”三位一体的研究方法，极大地提高了研究速度。

1.3 使用环境对耐久性的影响分析

钢结构桥梁服役环境条件复杂，不同的服役环境会引起不同的腐蚀现象。对于不同的腐蚀介质可分为大气环境、水溶液环境和土壤环境三种类型。大气环境是最重要的腐蚀环境要素，包括工业大气含有 SO_2 ，海水大气含有 Cl^- ，还有湿润环境中水分子。环境因素对钢桥使用寿命影响主要有以下几点：温度上升加快腐蚀反应速度，相对湿度大于一定数值（60%~70%）会急剧增大腐蚀速度，氯离子及其他有害物质会破坏保护层，导致点蚀产生，酸雾等酸性降水直接作用到桥梁钢材表面。相关研究表明对钢结构桥梁所处的大气腐蚀环境、水介质腐蚀环境及土壤腐蚀环境进行系统的腐蚀机理研究，从而得知造成腐蚀的主要因素是大气腐蚀。

2 钢桥梁腐蚀机理及影响因素分析

2.1 钢材腐蚀类型与特征

钢材的腐蚀主要有以下几种：①均匀腐蚀；②点蚀；③缝隙腐蚀；④晶间腐蚀；⑤应力腐蚀。均匀腐蚀是钢材的整个表面上均一发生的腐蚀现象，并随之导致材料厚度逐步减少，可以由材料的厚度减小来衡量；点蚀是在某一局部地方发生的腐蚀，在应力集中或者防护膜破损的地方，它的破坏隐蔽而且严重；缝隙腐蚀往往在金属接合点上出现，例如焊接处或者螺栓等紧固接合部位，缝隙内电解液渗透形成局部腐蚀电池。晶间腐蚀是由于金属内部的晶界引起的，应力腐蚀是因为受外力的作用而造成的。都会引发材料的脆性断裂。腐蚀是桥梁结构最严重的破坏方式，带来严重安全隐患。耐候桥梁钢采用“以锈止锈”的方式提高其耐候性，是普通碳素钢的2~8倍，在此基础上还具有环保、低碳、低成本等优点，是目前发展桥梁结构用钢的趋势方向之一。

2.2 大气与海洋环境腐蚀机理

大气环境中发生的腐蚀是钢桥遭受最多的一种腐蚀类型。空气中的氧在金属表面形成一层很薄的电解液膜，在氧气的作用下，产生了电化学反应。海洋空气中氯离子渗透力很强，它会破坏钢铁表面形成的钝化层，从而引起点蚀的产生和发展，工业空气中的二氧化硫与水作用生成亚硫酸，加强了阳极腐蚀的过程。中国科学院金属研究所在杭州湾跨海大桥建设中运用了熔结环氧三层复合结构以及阴极保护复合防护方法，实现了国内首座百年钢桥工程，同时在港珠澳大桥应用新型涂料层及阴极保护复合防护方案，符合了大桥120年的耐久性设计寿命。

2.3 温湿度及污染物影响分析

温度、湿度是造成钢材锈蚀的重要环境因素。在相对湿度小于等于60%情况下，钢材表面不易出现连续的水膜，因而其腐蚀速度很慢；相对湿度大于80%的情况下，则钢材表面会出现连续的水膜，使腐蚀的速度大大加快。温度每提高10℃，电化反应速度大约会增大一到两倍之多。而温湿度共同作用可通过“润湿时间”的综合指标加以衡量，润湿时间越长，则产生的腐蚀累积损害就越严重。

表1 不同环境条件下钢材腐蚀特征对比

环境类型	主要腐蚀介质	典型腐蚀速率(mm/年)	主要腐蚀形态	防护重点
工业大气	SO_2 、 NO_x 、粉尘	0.05~0.15	均匀腐蚀、酸蚀	涂层隔离、耐候钢
海洋大气	Cl^- 、盐雾	0.10~0.30	点蚀、缝隙腐蚀	金属喷涂、阴极保护
海水浸没	Cl^- 、微生物	0.08~0.20	点蚀、电偶腐蚀	阴极保护、重防腐涂层
海泥区	硫酸盐还原菌	0.03~0.10	微生物腐蚀	阴极保护为主
淡水环境	溶解氧、污染物	0.03~0.10	均匀腐蚀	涂层防护
土壤环境	水分、盐类、微生物	0.02~0.08	局部腐蚀	涂层+阴极保护

大气污染物的加剧腐蚀现象主要体现在如下几个方面： SO_2 溶解放入水中成为酸性无机盐溶液，促使 Fe 被溶解以及 Fe^{2+} 被氧化；Cl⁻使钝化膜遭到破坏，导致点蚀电位降低；固体颗粒吸附腐蚀性物质在钢材表面上产生局部腐蚀电池。目前，我国耐候桥梁钢化学组分主要是模仿美国、日本，但是我国的自然环境又与美日有所区别，尤其在气候、湿度、紫外线等这些环境条件方面，怎样设计一个适合我国不同特殊环境下的适宜合金元素是目前急需解决的问题之一。

3 钢桥梁耐久性设计关键技术

3.1 结构选型与构造优化设计

钢桥梁耐久性设计应在结构选型阶段便加以重视。不同结构形式对腐蚀的影响各有差异：桁架桥连接点多，构造复杂，防锈难度较高；箱形梁较密闭，内部不易通风透气，但是外部结构连续较好；钢板梁构造简单，易于检查检修。结构选型要兼顾结构强度、经济以及耐久等三个方面综合因素来考虑。构造的优化设计具体措施有：用闭合截面代替开口截面，以避开积水位置；设置一定的排水斜度使水排出通畅；封闭箱体内部开设通气孔；防止出现狭窄缝隙及锐角弯角；焊接采取整体焊接方式而不能间歇焊接；螺栓接头处加设防水橡胶圈。研究成果揭示了高强钢梁、管翼缘组合梁的承载特性，提出了多种混杂设计原则、以及计算分析手段，能节约钢材使用 10%~15%。

3.2 防腐设计与排水构造优化

防腐设计与排水分不开。桥面排水沟应该及时将雨水排除干净，不能有雨水漏到钢结构上；伸缩缝要加装有效的防水装置，防止桥面雨水通过伸缩缝流到下部结构中去，在容易积水的位置也要增加排水孔洞，例如：加劲肋的两端头、横隔板下面等；钢结构和混凝土连接处需要加入防水层，切断毛细吸水途径。对于正交异性板状钢桥面板来说，U 肋与顶板间的焊接是容易发生腐蚀的地方，需要运用熔化焊或是打密封胶来保护。相关科研工作已经探索出腐蚀效应对正交异性板状钢桥面板疲劳寿命的影响规律，通过用元胞自动机腐蚀模型来得到各种质量损耗水平下的典型正交异性板状钢桥面板构件的三维腐蚀形状。

3.3 材料选用与耐候钢应用

材料选择决定了桥梁结构的耐久性设计水平，对于不同的工作环境应该有针对性的选择相符合的钢材品种：一般的大气环境选择 Q355qD 及以上的桥梁用钢；海洋环境或者是工业环境可以选择耐大气腐蚀的钢材；寒冷的环境应该选择低温韧性好的钢材。耐大气腐蚀用钢就是在钢材

中适量地加入了 Cu、Cr、Ni、P 等合金元素，在钢材表面形成了非常致密稳定的腐蚀氧化层，从而可以起到隔离外界腐蚀介质的作用，达到所谓的“以锈止锈”。耐大气腐蚀用钢又分为涂装使用以及非涂装使用两种方式。非涂装类耐大气腐蚀用钢可以大幅度减少全寿命的维护费，但是要求一定的适用环境。有关研究面向我国不同特殊服役环境下耐候桥梁钢开发与制造所面临耐蚀机理，成分优化、制造工艺以及应用成套关键技术不足的问题，深入系统的研究和解析了合金元素和加工工艺对于耐候桥梁钢微观组织结构、机械性能以及腐蚀性能方面的内在影响规律。

4 钢桥梁腐蚀防护技术体系

4.1 涂层防护与金属喷涂技术

涂层防护是目前最广泛使用也是最基本的钢桥梁防腐方法。高性能防腐涂料体系一般为三重结构，从下至上的顺序分别是：底漆—中间漆—面漆。其中底漆选用富锌涂料，依靠锌粒子的阳极效应；中间漆起到隔离以及增厚的作用；而面漆则具有抗紫外光以及抵御各类化学物质侵蚀以及机械打击的能力。中国科学院金属研究所自主研发的 SEBF 熔融共混环氧粉末涂料及 SLF 高分子复合涂料，在港珠澳大桥的应用上采用了新型涂层及阴极保护联合防护措施，达到了 120 年耐久性的设计标准；金属喷涂技术即对钢结构表面进行锌、铝或者锌铝合金的喷涂处理，从而构成一层金属保护膜。金属喷涂层除了可以作为物理上的遮挡外，还可以产生阴极保护的效果。热喷锌铝合金涂层具有锌的牺牲阳极性能以及铝良好的抗腐蚀性，在海水中的效果非常好。而桥跨建筑跨越江河湖海、河谷海峡，连接陆地岛屿，地形地貌复杂多样，各地气象万千，日晒雨淋，持续长期的暴露在外大气下，必然会腐蚀损坏，极大的影响桥梁的安全可靠性。

4.2 阴极保护技术

阴极保护技术是给需要防护的金属施加阴极电流，使它电位降低到热力学稳定范围内，阻止腐蚀反应的发生。阴极保护主要包括牺牲阳极法与外加电流法。牺牲阳极法使用铝、锌等较活泼金属作阳极，适用于海水环境；外加电流法则用的是外部电源提供防护电流，适合大型构筑物。中国科学院金属研究所在港珠澳大桥钢管复合桩阴极保护问题上创新性地放弃了传统的思路，采取了在海水中设置保护泥下区的方式，即用海水中的牺牲阳极产生阴极保护电流从界面流进海泥内的钢管，避免了海泥内更换牺牲阳极不易的操作。这个改进思路对同类工程具有很大的参考价值。阴极保护一般同涂层防护相结合，涂层起到主导作用，阴极保护对涂层损坏部位进行补充保护，两者结合

能取得最佳防护性能。

5 结语

钢桥耐久性设计跨越了材料学、电化学、结构力学等多个学科范畴。本文围绕耐久性设计理论、腐蚀机理、关键技术以及防护体系四个方面进行了全方位的研究。得出的结论为：第一，耐久性设计应当坚持预防为主、多道防线、易到易修、全寿命经济的原则，形成材料、部件、结构三级评价指标集；第二，在不同的服役环境中钢筋腐蚀机制差异很大，大气环境的影响是最为主要的因素，结构细部构造对钢筋腐蚀行为的影响也十分明显；第三，耐候钢的应用使得钢桥向长寿化方向发展成为了可能，而基于环境适应性的合金成分设计便是耐候钢的研发难点所在。四、涂层和阴极保护相结合是最有效的对钢结构海洋环境桥梁进行腐蚀防护措施，多层防护系统相互作用可大幅度提高其耐久能力。今后的研究方向应该集中在以下几个方

面：大数据、人工智能技术为基础的腐蚀预报模型开发；智能型自修复型防腐涂料的应用；服役桥梁腐蚀病害精确诊断及评价技术；面向 200 年使用寿命的超长寿命防腐钢材桥设计理论。

[参考文献]

- [1]徐梦,熊尧.钢结构桥梁的化学腐蚀环境及防护建议[J].张江科技评论,2025(2):93-95.
- [2]王春生,王一伟,张静雯,等.长寿命耐候钢桥锈层稳定性原位测试与评价[J].交通运输工程学报,2025,25(4):161-178.
- [3]苑鑫.桥梁钢结构腐蚀特点及防腐措施研究[J].石油和化工设备,2025,28(5):234-236.

作者简介：郭仔翔（1996.2—）男，汉族，贵州江口人，工程师，路桥中级，2020年毕业于贵州大学，硕士研究生，研究方向：高速公路桥梁结构设计。