

海洋大气环境下桥梁钢构件连接螺栓防腐技术研究

何晓宇¹ 夏宏杰² 徐小梅³ 李宇芊¹

(1. 浙江数智交院科技股份有限公司 杭州 310030; 2. 浙江省舟山市岱山县疏港公路工程
建设管理中心 舟山 316000; 3. 杭州本创科技有限公司 杭州 310030)

[摘要] 海洋大气环境具有高温、高盐、高湿的特点,使得桥梁面临极其严峻的腐蚀问题。连接螺栓存在于桥梁钢构件连接的多个区域,其与底板连接处在后期运营中容易发生电偶腐蚀和机械应力腐蚀等问题,对螺栓的强度和抗震性能造成较大影响,并降低钢构件的耐久性、使用性能和使用寿命,从而引发重大安全隐患。文章介绍了桥梁连接螺栓腐蚀成因、腐蚀防护常用方案,并对常用的包覆防腐方案、涂层防腐方案、涂层与密封胶联合防腐方案进行了对比分析,得出使用氧化聚合型包覆防腐技术的包覆防腐方案具有适用的结构和环境复杂、防腐蚀材料先进、施工工艺简单、施工环境要求宽松、防腐效果好、使用年限长等优点的结论。由于部分区域的螺栓螺母更换难度非常大,基于桥梁全寿命周期考虑,包覆防腐方案是桥梁钢构件连接螺栓的最优防腐防护方案。

[关键词] 海洋大气环境;桥梁钢构件;连接螺栓;氧化聚合型包覆防腐技术

0 引言

21世纪是海洋的世纪,发达的海洋经济是海洋强国建设的重要支撑。习近平提出浙江要“争取发展成为海洋经济强省”。随着交通强省海洋强省建设深入推进,舟山跨海大桥、杭州湾跨海大桥等一座座海上桥梁鱼跃而起,架起一道道海洋经济大通道,从“桥梁大省”迈向了“桥梁强省”,实现陆海贯通区域协调发展。

浙江省沿海地区属北亚热带南缘季风海洋性气候,具有高温、高盐、高湿的腐蚀环境,跨海大桥钢结构及附属设施长期处于海洋严酷腐蚀环境中,相应带来了较高养护成本,连接螺栓受高强度摩擦和承压影响,其性能质量直接关联桥梁钢结构全生命周期。按桥梁设计使用年限100年推算,在不考虑经济指标利率影响及成本上浮影响因素前提下,全生命周期内养护成本将达到建设成本的80%,养护投入巨大。

据世界范围内的腐蚀调研结果估算,采用先进的腐蚀防护措施,可避免17%—35%的腐蚀损失,经济效益显著^[1]。因此,采用合适的

防腐技术,做好连接螺栓的腐蚀防护措施工作,使其充分发挥设计强度和抗震性能,对提升桥梁关键基础构件的耐久性能从而延长跨海大桥使用寿命至关重要。

1 连接螺栓腐蚀成因

跨海大桥尤以桥梁钢构件连接螺栓处最易腐蚀。主桥和引桥桥面防撞护栏及检修通道护栏等钢构件均采用高强螺栓连接立柱与底板,连接螺栓是桥梁护栏金属构件与基础面连接、紧固的重要组件,需具备强度高、抗震性能优良等特点。尽管出厂的螺栓几乎都进行了电镀、热浸镀或化学表面处理等常规防腐措施,但螺栓连接及底板连接处,仍是后期运营过程中最易出现腐蚀的部位。一旦出现腐蚀问题,会降低构件的耐久性及使用性能,不仅影响美观,更会降低构件使用寿命,甚至在运营中引发重大安全隐患。分析跨海大桥连接螺栓腐蚀原因,主要有以下几个方面:

1.1 潮湿环境诱发化学反应

连接螺栓大多处于基础部位,连接位置存在连接缝隙,在海洋大气环境中,容易积存雨

收稿日期:2021-12-02

作者简介:何晓宇(1981—),女,正高级工程师,主要从事水运及海洋工程结构优化、防腐及智慧应用研究等。

水、露水、污水等，在水的作用下，金属发生阳极溶解，金属离子与空气中的氧结合，生成腐蚀产物，体积膨胀，使涂层开裂，失去保护效果。

1.2 安装过程中的碰撞降低初始出厂时的构件防腐层

螺栓在安装过程中的碰撞、拧紧过程，本身就很容易对其防腐层造成破坏，且难以修补，因此安装到位的螺栓构件达不到初始出厂时的防腐寿命，导致耐腐蚀性能严重下降。

1.3 连接螺栓在拉应力作用下易腐蚀

连接螺栓主要是用于设备与基础之间的连接，地脚螺栓在紧固后受到振动等动拉应力的作用，加剧了螺栓的腐蚀。

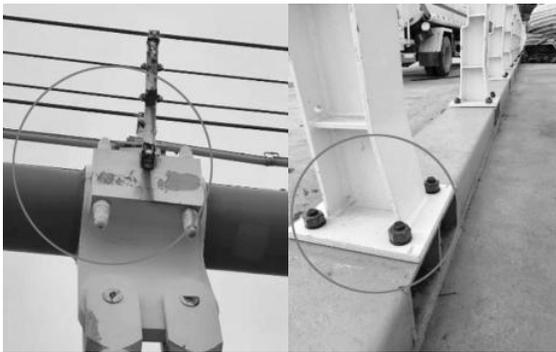


图1 跨海大桥连接螺栓腐蚀案例

2 螺栓腐蚀防护常用方案

2.1 包覆防腐方案

包覆防腐属于包覆有机复合层方案，主要有氧化聚合包覆防腐技术（OTC）和复层矿脂包覆防腐技术（PTC）^[2]，其中氧化聚合包覆防腐技术适用于大气区的钢结构包覆，而复层矿脂包覆防腐技术适用于水位变化区和浪溅区严峻腐蚀环境的钢结构包覆。本文重点介绍适用于桥梁钢构件连接螺栓的氧化聚合型包覆防腐技术。

氧化聚合型包覆防腐技术（OTC）由三种紧密相连的保护层组成，由内到外依次为防蚀膏、防蚀带和外防护剂^[3]，此外根据异型钢构件部位的实际需要，还包括塑型的防蚀胶泥。防蚀膏、防蚀带的缓蚀剂中含有锈转化成分，表面处理要求相对传统涂层方案低，无明显显

泡和浮锈即可。施工后，最外层的防护剂与空气接触，会氧化聚合形成坚韧皮膜，具有良好的耐老化性能；防蚀膏和防蚀带粘贴在金属结构表面，在外防护剂的保护下则永久保持非固化、柔软的状态，从而达到最佳的防腐蚀性能。防蚀带材料柔软易贴合，可以广泛适用于各种复杂形状的结构、设备^[4-5]，因此 OTC 技术属于长效型防腐技术。通过对桥梁钢构件连接螺栓做表面处理，再涂抹防蚀膏、缠绕防蚀带、涂刷外防护剂，以达到长效防腐目的。



图2 螺栓包覆防腐方案

2.2 涂层防腐方案

涂层防腐方案是一种钢结构外表面采用涂层体系以达到腐蚀防护效果的常用防腐措施。根据《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件规范》^[6]要求，涂层体系保护年内，要求涂层 95% 以上区域的锈蚀等级不大于 ISO4628 规定的 Ri2 级，无气泡、剥落和开裂现象。按照保护年限可将涂层体系分为普通型（10~15 年）和长效型（15~25 年）。桥梁钢结构按照涂装的部位可分为六类：外表面、非封闭环境内表面、封闭环境内表面、钢桥面、干湿交替区和水下区、防滑摩擦面、附属钢构件（如护栏、扶手等）。按照涂装阶段可分为初始涂装、维修涂装、重新涂装。常规情况下，桥梁钢构件连接螺栓通常按相邻钢构件的涂装体系进行普通的防腐方案设计，施工时按照相应设计要求和材料工艺进行底漆、中涂和面漆施工。海洋大气环境下，对螺栓表面进行涂装是应用最广泛的一种推荐

方案^[7]。



图3 螺栓常规涂层防腐方案

2.3 涂层与密封胶联合防腐方案

密封胶按照聚合物种类可分为硅酮、改性硅酮、聚氨酯、聚硫等。其中，聚硫密封胶^[8]是以液态聚硫橡胶为主体，配合硫化剂、促进剂和补强剂等助剂反应而合成的密封胶。聚硫密封胶与大多数的材料都有良好的粘结效果，被广泛的应用于金属、玻璃的密封，水池、大坝、桥梁隧道^[9]等的混凝土嵌缝。密封胶主要以防水功能为主，目前部分桥梁钢构件连接螺栓采用了涂层与密封胶组合方案进行防水防腐处理，通过密封隔离作用，间接起到辅助性防腐效果。

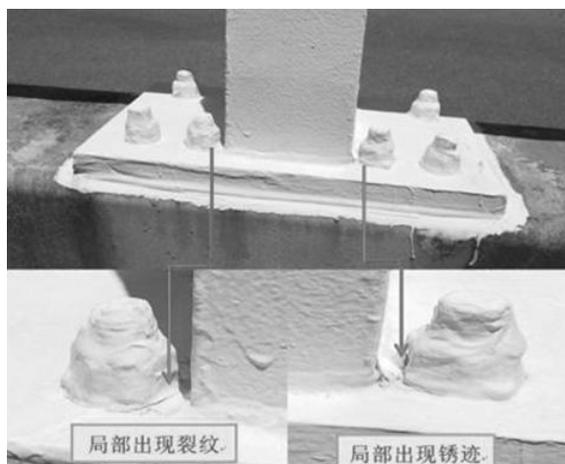


图4 螺栓涂层与密封胶联合防腐方案

2.4 其他防腐方案

油性材料方案、防护盖方案以及油性材料与防护盖组合方案。



图5 螺栓油性材料和防护盖防腐方案

3 主要方案比选

3.1 防腐原理比较

包覆防腐方案（OTC）采用三层防腐保护层，其中，防蚀膏具有锈转化功能转化成黑色的氧化亚铁膜，形成保护性封闭层；防蚀带和外防护剂均可通过氧化聚合作用形成保护膜。该方案柔软易贴合，抗震性能强，适用于各种复杂形状的结构。

涂层防腐方案涂抹多道涂层，底漆起到钝化缓蚀和阴极保护作用；中间层漆增加涂层厚度增大屏蔽效应；面漆起到保护涂装层作用。

密封胶与涂层联合防腐方案，利用密封胶具有较好粘结性，通过在金属涂层表面涂抹密封胶起到密封防水防腐效果。

3.2 防腐材料比较

包覆防腐方案（OTC）用到三种材料，分别为：氧化聚合型防锈防腐胶黏膏、氧化聚合型防锈防腐胶黏带和氧化聚合型胶黏剂氧化聚合型胶黏剂。防蚀膏具有耐中性盐雾性（168h，35℃），达到锈蚀度A级标准。防蚀带拉伸强度高，难剥离，具有耐中性盐雾性和耐老化性。外防护剂粘度较高，具备耐火性和易干性。

涂层防腐方案底漆附着力强，具有耐热性和抗滑移性，类型主要有环氧富锌底漆、无机富锌底漆、冷喷锌等，中间层漆具有弯曲性和耐冲击性，附着力较强，类型主要有环氧云铁中间漆和环氧厚浆漆，面漆具有耐磨性、弯曲性和耐冲击性，硬度和附着力较强，类型主要有脂肪族丙烯酸聚氨酯面漆、氟碳面漆和聚硅氧烷面漆。

密封胶与涂层联合防腐方案所用密封胶质

地较为细腻、均匀膏状物或粘稠体，不应有气泡、结块、结皮或凝胶，无不易分散的析出物。密封胶具备有弹性、易干、粘结性强、难剥离的特性，按照聚合物种类可分为硅酮、改性硅酮、聚氨酯、聚硫等，按照位移能力可分为 12.5、20、25 级别^[10]。

对于螺栓防腐，大黄油和二硫化钼是常用的油性防腐材料，油性防腐材料价格相对实惠。防护盖采用聚偏氟乙烯（PVDF）材料，港珠澳大桥对局部区域的 M30 内六角螺栓采用了防护盖方案进行螺栓的加强防腐。

3.3 施工工艺比较

包覆防腐方案（OTC）共有四道施工工艺，分别是表面处理、涂抹防锈膏、缠绕防蚀带和涂刷外防护剂。表面处理以达到无明显鼓泡和浮锈即可，无需进行喷砂除锈，工艺简单；涂抹防锈膏用手均匀涂抹，谨防漏涂；缠绕防蚀带从下往上依次粘贴，每层依次搭接 55%，将里面空气压出确保紧密贴合；外防护剂涂刷 2 次。

涂层防腐方案共有四道施工工艺，分别为表面处理、涂抹底漆、涂抹中间层漆、涂抹面漆。其中，表面处理要对结构进行表面预处理、除油、除盐分、喷砂除锈等，涂抹涂层需要确保均匀一致，不允许有漏涂、气泡、裂纹、气孔和返锈现象，允许轻微橘皮和局部轻微流挂，并随时检查湿膜厚度以保证干膜厚度满足设计要求。

密封胶与涂层联合防腐方案中涂层方案施工工艺与常规涂层方案一致，密封胶防水共有两道施工工艺，分别为表面处理和涂抹密封胶。

油性防腐施工方便，可直接在被保护螺栓表面涂抹，整体美观性较差，另外油性材料属于可燃材料，存在一定安全隐患。防护盖可批量预制，施工便捷，整体美观性更好，但防护盖的密封牢固性对其防腐效果影响显著，仅适用于尺寸规格相对单一的构件。实际工程中螺栓螺母规格繁多，螺杆超出螺帽的尺寸千差万别，防护盖尺寸的匹配直接影响其密封性。横跨杭州湾某大桥护栏支座采用了油性材料加防护盖防腐方案，台风过后曾发生大量防护盖被吹掉的情况。

3.4 防腐效果比较

包覆防腐方案（OTC）属于长效型防腐技术，正常使用情况下防腐年限在 20 年以上。日本某桥梁拉索采用 OTC 连续防腐时间已超过 30 年。氧化聚合型包覆防腐技术从 2012 年开始在国内市场进行了试点应用，至今，已经应用在不同领域的 30 余个项目中，经过后期的腐蚀防护效果验证，得到了各个项目业主肯定。2012 年大连国际会议中心钢结构防腐工程，针对焊接缝、螺栓节点等常规防腐技术防护薄弱的部位，对不同防腐技术进行了反复论证和验证，最终还是采用了可以带锈施工的 OTC 包覆技术。该方案在大连国际会议中心钢结构包覆防腐工程（2012 年）、青岛海湾大桥吊杆防水套包覆防腐工程、天津 LNG 管廊地脚螺栓包覆防腐工程^[11]得到了良好的应用。2015 年，文昌卫星发射基地就针对包覆防腐技术进行了现场挂片试验、局部试点应用，经过 3 年的验证，最终这项技术获得业主的认可，2018 年和 2019 年文昌基地陆续开展了两期工程共计 8 个避雷塔的包覆施工。温州东欧大桥和舟山官山大桥吊杆防水套包覆防腐工程效果参见图 6 和图 7。杭州湾跨海大桥是目前世界第五长跨海大桥（36km），于 2008 年 5 月 1 日通车，通车不到 1 年时，2009 年，现场调研发现：水中平台下部的剪刀撑部位已出现轻微锈蚀，2012 年，通车 4 年，再次调研时，剪刀撑腐蚀已较为明显，几乎所有的剪刀撑上均发生较为严重的锈蚀。平台建成仅使用不到 5 年，剪刀撑连接区、变径桩焊接区、螺栓连接区锈蚀严重，锈层厚度达 1cm。2013 年，针对上述锈蚀区域采用了涂层防护维修方案，维护后的涂层使用不到 5 年又全部失效，2018 年针对剪刀撑连接部位，改变了涂层方案，采用了包覆防腐方案。

涂层防腐方案在国内外桥梁中得到大量应用，根据涂层厚度，该方案防腐年限可分为普通型（10-15 年）和长效型（15-20 年）。舟山的两座跨海桥梁钢结构外表面采用了防腐涂装体系，建成 5 年后，出现了多处防腐涂装劣化、钢材腐蚀、螺栓松动等腐蚀问题。港珠澳大桥

钢护栏及其小型钢构件采用氟碳面涂的防腐方案，其表面抗老化寿命也不超过15年^[12]。

涂层与密封胶联合防腐方案设计使用年限通常取决于涂层防腐年限，通常为5-10年^[13]。由于密封胶抗老化性能较差，尤其是构件棱角位置，通常使用3-5年左右会发生开裂。因此，该方案需定期（5-10年）进行再次维护，以达到长效的密封效果，间接起到隔离环境降低腐蚀的防护需求。

油性材料防腐方案在夏季会出现融化流淌现象，一年左右油性材料会变干，需要定期维护，后期维护工作量大。由于防护盖的密封牢固性不足，防护盖方案的时效存在不确定性。

桥梁连接螺栓腐蚀防护常用方案比较详见表1。



图6 温州东瓯大桥吊杆防水套包覆防腐方案效果图



图7 舟山官山大桥吊杆防水套包覆防腐方案效果图



图8 舟山跨海大桥涂装防腐方案腐蚀病害图



图9 某大桥护栏基座螺栓密封胶防腐方案病害图

表1 桥梁连接螺栓腐蚀防护常用方案比较

项目	防腐方案			
	包覆防腐方案 (OTC)	涂层防腐方案	密封胶与涂层联合防腐方案	
防腐方案	三层防腐保护层：防蚀膏、防蚀带和外防护剂	涂抹多道涂层，涂层总干膜厚度在 250 μm -350 μm 之间	常规涂层方案加涂抹密封胶	
方案概述	防蚀膏具有锈转化功能形成保护性封闭层；防蚀带和外防护剂均可通过氧化聚合作用形成保护膜	底漆起到钝化缓蚀和阴极保护作用；中间层漆增加涂层厚度增大屏蔽效应；面漆保护涂装层	具有较好粘结效果，用于金属表面起到密封作用，从而形成保护层	
防腐材料设计决策	OTC 材料	需设计涂层配套体系	选择不同聚合物种类的密封胶	
防腐方案技术比较	抗震性	柔软易贴合，结构位移追随性好	容易开裂	拉伸性较好，具备结构位移追随性
	防腐设计年限	>20 年	<15 年（普通型）	5-10 年
	粘结情况	剥离强度 $\geq 400\text{N/m}$	附着力 $\geq 5\text{MPa}$	剥离强度 $\geq 1000\text{N/m}$
	人工加速老化 (h)	抗老化性能好	3000	抗老化性能较差

项目	防腐方案			
	包覆防腐方案 (OTC)	涂层防腐方案	密封胶与涂层联合防腐方案	
方案施工 难度比较	施工环境要求	5℃以上, 空气相对湿度不大于 95%	5℃~38℃, 空气相对湿度不大于 85%	0℃~50℃
	表面处理	除浮锈和鼓泡, 无需喷砂除锈, 除锈等级达 St2	需对结构进行表面预处理、除油、除盐分、喷砂除锈等, 对于环氧富锌底漆和环氧磷酸锌底漆, 除锈等级需达到 Sa21/2, 对于无机富锌底漆需达到 Sa3	清除表面油、水、铁锈和灰尘
	施工难点	1、防蚀带粘贴时需将空气完全排除, 紧密贴合; 2、谨防腐蚀膏、外防护剂漏涂	1、表面处理易返锈; 2、缝隙处需填补密封胶; 3、涂层易出现漏涂、气泡、裂纹、气孔、剥落和返锈现象	1、棱角位置密封胶厚度难控制; 2、需定期 (5~10 年) 维护, 以达到长效的密封效果
综合经济 比对	实际防腐时效	超长使用寿命, 15-30 年甚至更长	普通型涂层实际使用寿命 3-5 年	实际使用寿命 5-10 年左右
其他性能	防火性能	符合消防难燃标准		
	绿色环保性能	无毒无污染		

4 结论

本文分析了桥梁螺栓等异型钢构件的常用防腐方案, 通过对不同方案的防腐材料、施工工艺和防腐时效等进行了综合经济比对, 分析结果表明: 氧化聚合包覆防腐新技术 (OTC) 优势明显, 施工便捷、防护效果优良。综合考虑腐蚀防护效果及全寿命角度腐蚀防护费用最小的原则, 大气区桥梁钢构件连接螺栓推荐使用氧化聚合型包覆防腐技术 (OTC) 方案。

参考文献

[1] 侯保荣. 中国腐蚀成本 [M]. 北京: 科学出版社, 2017, 1-258.
 [2] 侯保荣. 海洋钢结构浪花飞溅区腐蚀控制技术 [J]. 北京: 科学出版社, 2011: 240-310.
 [3] 侯保荣. 大气区钢结构氧化聚合型包覆防腐技术 [J]. 中国材料进展, 2014, (2): 101-105, 113.
 [4] 洪斌. 氧化聚合型包覆防腐技术 (OTC) 在钢板仓底座的应用 [J]. 中国水运, 2015, 3 (15): 318-319.
 [5] 钱洲亥, 王静, 侯保荣等. 应用在异型钢结构上的氧化聚

合型包覆防腐技术 [J]. 电镀与涂饰, 2017, 36 (2): 110-113.
 [6] JT/T 722-2008, 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
 [7] 易桂虎, 孔琦, 季文翔, 李本爱, 曼得拉·查汗. 推荐一种螺栓防腐的做法 [J]. 涂层与防护, 2019, 40 (11): 7-9.
 [8] 张敏. 桥梁防腐用聚硫密封胶的研制 [D]. 郑州: 郑州大学, 2013.
 [9] 刘军成. 胶粘剂在钢桥梁中的应用 [J]. 粘接, 2021, 46 (5): 27-30.
 [10] JC/T 884-2016, 金属板用建筑密封胶 [S]. 北京: 建材工业出版社, 2016.
 [11] 冯庆斌. XG 包覆防腐方案在天津 LNG 项目螺栓上的应用 [J]. 石油和化工设备, 2014, 17 (1): 57-59.
 [12] 徐军, 刘磊, 刘晓东. 港珠澳大桥设计技术标准研究——设计寿命的确定及对策 [J]. 混凝土, 2011, (12): 24-27.
 [13] 邹铭, 师华, 吕化工. 杭州湾大桥钢护栏地脚螺栓防腐新工艺 [J]. 涂料技术与文摘, 2015, 36 (01): 23-26, 43.