

文章编号:1671-1637(2020)01-0001-26

长寿命高性能耐候钢桥研究进展与工程应用

王春生, 张静雯, 段 兰, 谭晨欣

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:系统归纳与剖析了国内外耐候钢桥的研究新进展及工程应用情况,总结了稳定耐候锈层的形成机制、选材标准、腐蚀与疲劳损伤机理、耐候构造、耐候螺栓研发以及锈层检测与评价技术等方面的关键科技成果,梳理并完善了耐候钢桥的适用范围和腐蚀余量设计指标,提出了耐候钢桥锈层稳定化处理及施工技术要点;评析了耐候钢桥锈层损伤检测与评价技术、腐蚀损伤养管技术,结合美、日耐候钢桥工程事故经验教训和中国首批长寿命高性能耐候钢桥建设技术创新成果,探讨了该领域的技术创新方向。研究表明:耐候锈层由外层的 γ -FeOOH、 α -FeOOH 以及内层的非晶态 FeOOH 化合物与 Fe_3O_4 构成,稳定耐候锈层能否形成与保持,主要受氯离子、积水和积尘等因素的影响;建议编制中国高性能耐候钢桥选材区划图谱,完善稳定耐候锈层构造设计准则;现代耐候钢桥具有高性能和长寿命的技术特征,带锈层构造细节的面内应力疲劳、面外变形疲劳试验和数值断裂力学模拟,以及耐候高强螺栓长期耐损性能研究的推进,将为建立完善的耐腐蚀、抗疲劳设计准则奠定基础;人工智能技术的应用将推动长寿命高性能耐候钢桥智能运维技术的重大进步;应加大研发投入,建立具有中国自主知识产权的长寿命高性能耐候钢桥设计、建造和运维标准规范体系,培养高素质的工程技术人才,推进交通强国建设。

关键词:桥梁工程;长寿命;高性能耐候钢;耐候螺栓;耐候锈层;耐候构造;疲劳;设计准则;智能运维
中图分类号:U448.36 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.01.001

Research progress and engineering application of long lasting high performance weathering steel bridges

WANG Chun-sheng, ZHANG Jing-wen, DUAN Lan, TAN Chen-xin

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The new research progress and engineering application of weathering steel bridges at home and abroad were systematically generalized and analyzed. The key scientific and technological achievements in the fields of formation mechanism of stable corrosion-resistant patina, material selection standard, corrosion and fatigue damage mechanism, research and development of corrosion-resistant configuration and weathering bolt, and detection and evaluation technology of patina were summarized. The application scope and corrosion allowance design indexes of weathering steel bridges were combed and improved, and the key points of stabilization treatment and construction technology for the patina of weathering steel bridges were proposed. The damage detection and evaluation technology and corrosion damage maintenance and management technology of patina in weathering steel bridges were evaluated and analyzed. Combined with the experience and lessons of weathering steel bridge engineering accidents in the

收稿日期:2019-08-04

基金项目:国家“万人计划”科技创新领军人才支持项目(W03020659);交通运输部应用基础研究项目(2014319812080);陕西省创新人才推进计划科技创新团队项目(2019TD-022);中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102219309)

作者简介:王春生(1972-),男,黑龙江绥化人,长安大学教授,工学博士,从事钢与组合结构桥梁研究。

United States and Japan, as well as the construction technological innovation achievements of the first batch of long lasting high performance weathering steel bridges in China, the technological innovation direction in this field was discussed. Research result shows that the composition of corrosion-resistant patina contains the outer layer of γ -FeOOH and α -FeOOH, and the inner layer of amorphous FeOOH compound and Fe_3O_4 . The formation and durability of stable corrosion-resistant patina are mainly affected by the factors such as chloride ion, accumulated water and dust. The material selection zoning map of high performance weathering steel bridges in China is suggested to establish, and the configuration design criterion of stable corrosion-resistant patina should be improved. The modern weathering steel bridge has the technical characteristics of high performance and long lasting. The in-plane stress fatigue, out-of-plane deformation fatigue test, numerical fracture mechanics simulation of configuration details with patina and the research on the long-term damage resistance of weathering high-strength bolts should be promoted to lay the foundation for establishing a perfect design criterion of anti-corrosion and anti-fatigue. The application of artificial intelligence technology will promote the significant progress of intelligent management and maintenance technology of long lasting high performance weathering steel bridges. The investment for research and development should be increased, a specification system should be established for the design, construction and maintenance of long lasting high performance weathering steel bridges with independent intellectual property rights in China, the high-quality engineering and technical talents should be cultivated, thus to promot the development of Chinese strong transportation network. 10 tabs, 28 figs, 62 refs.

Key words: bridge engineering; long lasting; high performance weathering steel; weathering bolt; corrosion-resistant patina; corrosion-resistant configuration; fatigue; design criterion; intelligent operation and maintenance

Author resume: WANG Chun-sheng(1972-), male, professor, PhD, wcs2000wcs@163.com.

0 引 言

耐候钢桥在国内外的应用已超过了半个多世纪^[1-2],美、日等国家已积累了大量工程建设经验与科研成果^[2-5],形成了相关技术指南与标准^[6-7]。免涂装使用的耐候钢桥与传统涂装钢桥不同,耐候钢通过自身服役过程中产生的致密稳定锈层,阻止钢材锈蚀的持续发展,达到长期防腐的目的,大幅节省设计使用年限内的涂装维护费用。

在 21 世纪,中国和世界都面临着社会与科技的时代变革,中国的新基建以及传统的交通基础设施建设与运维也同样面临新技术革命。2016 年,国务院发布了《国务院关于钢铁行业化解过剩产能实现脱困发展的意见》(国发[2016]6 号),交通运输部同期发布了《关于推进公路钢结构桥梁建设的指导意见》(交公发[2016]115 号),明确指出:在环境条件适合的桥梁结构中推广使用耐候钢,能够提高结构抵抗自然环境腐蚀的能力,降低养护成本。可以预见,耐候钢桥将以其突出的技术经济优势,在川藏高速、川

藏铁路、青藏高速、城际高铁等重大工程和量大面广的常规跨径钢桥中得到广泛应用,必将产生显著的社会经济效益。

耐候钢桥在国内外虽有大量工程应用,但由于建设运营管理部门和工程技术人员对耐候钢桥认识不足,以及设计、施工和运营阶段一些技术环节的缺失,导致一些耐候钢桥出现严重腐蚀病害,甚至发生垮塌事故。分析造成耐候钢桥病害与失效的技术原因,主要是氯离子侵蚀导致耐候锈层破坏,以及构造细节设计不当或未及时维护导致稳定锈层无法形成,诱发持续锈蚀导致结构劣化失效。可见,在科技日新月异的 21 世纪,科技与工程技术人员对耐候钢桥的腐蚀机理、锈层稳定机制、腐蚀疲劳行为及其设计理论与方法等基础性研究还不够深入,耐候钢桥构造设计措施、锈层检测与评价技术、养护管理策略和技术标准的研发也不够完善,因此,本文在总结国内外耐候钢桥研究新进展和工程实践经验基础上,面向交通强国建设的重大技术需求,针对长寿命高性能耐候钢桥发展所面临的共性科学问题和关键技

术瓶颈,提出了技术创新努力方向。

1 耐候钢桥材料性能

耐候钢材的耐腐蚀性能和抗疲劳断裂性能是保障其安全使用的关键。本节主要从耐候钢材料研发、耐腐蚀机理、断裂韧性3个方面总结研究进展,分析存在的主要问题。

1.1 高性能耐候桥梁钢的研发

近年来,美国、日本等发达国家均致力于高性能耐候钢材的开发与应用推广^[1],并取得了可观的技术经济效益。美国最先开展对耐候钢的研发,早在1910年,美国钢铁公司的Buck等发现铜元素可以增加钢在大气中的耐蚀性能。1916年美国材料实验协会(American Society for Testing Materials, ASTM)进行了第一次大气金属暴露试验,发现铜、铬、磷等元素能有效提高钢材的耐候性。20世纪30年代,美国钢铁公司首次成功研制了耐腐蚀高强度含铜低合金钢(Corten钢)。美国现行桥梁用钢规范中,将耐候钢划分为50W、HPS50W、HPS70W和HPS100W等不同强度等级。1962年,美国公路协会与联邦公路调查管理局开展了国家高速公路研究计划,耐候钢桥是该计划的重要研究内容,经过多年科研攻关,编制了耐候钢桥技术指南^[6]。20世纪60年代,美国开始在桥梁上裸露使用耐候钢,并于1977年建成了世界上最大跨度的上承式耐候钢拱桥——新河峡大桥,1983年建成了耐候钢桁梁斜拉桥密西西比河大桥。1989年,美国联邦公路署(Federal Highway Administration, FHWA)制定了免涂装耐候钢设计指南^[7],促使美国耐候钢桥建造数量快速增长。

日本对耐候钢的研发也开始较早。1955年,日本开始试制耐候钢,日本工业标准委员会钢铁分会于1969年制订了《焊接结构用耐大气腐蚀热轧钢材的标准》(JIS G 3114—1969),其中包含SMA400、SMA490、SMA570这3个级别的耐候钢材。1981年起,日本建设省土木研究所、日本桥梁建设协会、钢材俱乐部等对桥梁用耐候钢进行了大量露天试验和调查研究,并基于调查和研究结果,于1985年制定了《塗装無し耐候性橋梁設計施工要領》,其中规定耐候钢桥应使用SMA41W、SMA50W、SM58W钢材。日本铁钢联盟会(Japan Iron and Steel Federation, JISF)与日本桥梁建设协会在2013年3月修订的《耐候性鋼の橋梁への適用》中要求耐候钢桥采用的钢材的耐候性合金指标

v 应为0.9~2.5。日本于1967年开始将耐候钢应用到桥梁工程中,建成了日本知多二号桥。现如今,日本钢桥中约有16%的桥梁为耐候钢桥,其中70%的耐候钢桥裸露使用,20%的耐候钢桥进行了锈层稳定化处理。

与发达国家相比,耐候钢桥虽在中国的研究与工程应用起步较晚,但已成为钢桥技术研发与应用的热点。中国自1960年开始耐候钢材的研发,并于1991年建造了第一座免涂装耐候钢桥——京广铁路武汉巡司河桥(采用NHq35耐候桥梁钢),但因环境腐蚀问题,投入使用2年后被迫进行了全桥涂装。随着冶金技术的发展,中国已生产出一系列品质稳定的桥梁用高性能耐候钢种,并在2010年后将耐候钢桥逐渐应用于公路、铁路钢桥建设。中国的科研院所、钢铁集团、桥梁设计与建造单位通力协作,致力于高性能耐候钢材研发以及免涂装耐候钢桥设计、建造与维护技术的研究和实践。目前,中国《桥梁用结构钢》(GB/T714—2015)标准中已经包含耐候桥梁结构用钢Q345qNH~Q550qNH这6个等级的耐候桥梁结构用钢。鞍山钢铁集团有限公司、舞阳钢铁有限责任公司等单位已可生产质量符合中国标准的耐候钢板,中铁宝桥集团有限公司、中铁山桥集团有限公司等单位已开展耐候钢桥焊接关键技术的研究,且多家单位开展了高强度耐候螺栓的研制与应用。近年来,中国已有多座应用耐候钢建造的高性能钢桥(表1)。长安大学王春生教授团队基于长寿命高性能钢桥结构体系与设计理论等系列研究成果^[1,8-10],联合中交第一公路勘察设计研究院有限公司、陕西省交通规划设计研究院、兰州市城市建设设计院等多家设计单位,以及中铁宝桥集团有限公司、陕西重型机械制造有限公司等多家单位,设计、建造了中国首批免涂装公路高性能耐候钢桥,如陕西眉县常兴二号桥、黄延高速跨线桥、G109线改建工程跨柳忠高速高架桥等,为后续类似工程建设积累了宝贵经验。经过多年的产学研用的协同攻关,形成了由王春生教授领衔的长寿命高性能钢桥智能设计、建造与管养创新团队,入选了陕西省科技创新团队,并在主编陕西省地方标准《高性能钢桥设计与制造技术规程》、中国公路学会标准《高性能管翼缘组合梁桥设计与施工技术指南》,致力于耐候钢桥设计、建造标准的编制和推广应用。

然而,目前中国采用的桥梁用耐候钢化学成分及性能设计指标多参考美国、日本等国家标准研发、

表 1 中国耐候钢桥

Tab. 1 Weathering steel bridges in China

桥名	桥梁用途	结构形式	跨径组成/m	涂装情况	主要构件材质	开通时间
京广铁路武汉巡司河桥	铁路桥	钢箱梁桥	3×19.3	钢梁免涂装	NHq35	1991
沈阳后丁香大桥	公路桥	钢箱梁桥	38+61+38, 38+61+61+48, 48+61+38	箱内免涂装	Q345qENH	2013
陕西眉县常兴二号桥	公路桥	管翼缘组合梁桥	54	全桥免涂装	下翼缘 Q500qDNH, 其余 Q345qDNH	2014
陕西黄延高速磨坊跨线桥 (K16+322.607)	公路桥	钢板梁桥	2×28	全桥免涂装	下翼缘 Q500qENH, 其余 Q345qENH	2015
陕西黄延高速磨坊跨线桥 (K18+496.141)	公路桥	管翼缘组合梁桥	2×28	全桥免涂装	下翼缘 Q500qENH, 其余 Q345qENH	2015
西藏墨脱达国大桥	公路桥	钢桁架悬索桥	81	主桁免涂装	Q345qDNH	2015
西藏墨脱西莫河大桥	公路桥	钢桁架悬索桥	126	主桁免涂装	Q345qDNH	2015
台州内环路立交桥	公路桥	钢箱梁桥	45~61	箱内免涂装	Q345qDNH	2017
拉林铁路藏木雅鲁藏布江大桥	铁路桥	中承式钢管混凝土提篮拱桥	430	桥面以上钢管拱免涂装	主钢管 Q420qENH, 其余 Q345qDNH	2019
官厅水库特大桥	公路桥	双塔单跨悬索桥	210+720+210	主桥加劲钢板梁免涂装	Q345qENH	2019
G109 线改建工程跨柳忠高速高架桥	市政桥	钢管翼缘斜弯组合梁桥	51+61+51	全桥免涂装	下翼板 Q500qENH, 其余 Q345qENH	2020

制定,由于环境气候特点、设计荷载和技术条件的差异,现有指标体系不能较好适应中国耐候钢桥建造的技术需求。考虑中国北方严寒地区、南方高湿热地区的气候特点,以及西北风沙区、沿海高氯离子侵蚀区、污染物扩散区等区域环境特点,须利用大数据技术编制中国气候、环境区划图,研发与之匹配的桥梁用高性能耐候钢种和性能技术指标,保证中国高性能耐候钢桥的健康、科学与可持续发展。

1.2 耐候钢的耐腐蚀性能

耐候钢材在大气中腐蚀的本质可以认为是金属表面溶解的铁离子通过阳极进行氧化反应,腐蚀过程受氧浓度、环境 pH 值、共存阴离子的种类及共存性、环境干湿交替情况等很多因素的影响^[11]。耐候桥梁钢较普通桥梁钢腐蚀速率低是因为材料中含有多种合金元素,使得钢材表面产生了致密稳定锈层,将内部基体与外界腐蚀介质分隔开,阻止了腐蚀进一步扩展^[12]。桥梁所在地区气候、大气成分、温度湿度等差异较大,对耐候钢桥腐蚀性能均有一定影响。大气腐蚀的典型环境有工业大气、海洋大气、农村大气 3 种。农村大气与工业大气不同,环境中所含污染物较少,只含有微量的 SO_x 、 CO_2 和 NH_3 ,通常来自于工业垃圾、燃烧产物、动物粪便或肥料的分

解,对钢基体的腐蚀也较轻。在工业大气中,工厂会排放大气污染物,如 SO_x 、 NO_x 和 H_2S 等工业气体杂质;根据腐蚀环境的不同,工业大气可分为微工业环境和严重工业环境,其对耐候钢稳定锈层的形成影响情况也不同。在海洋大气中,海浪或海风造成海岸大气环境中存在大量氯化物,与海岸线距离不同的地方,其氯离子沉淀量不同,对钢基体的腐蚀情况也不同;海洋环境的腐蚀性取决于海浪的活动形式、常年风向、海岸线的地势和相对湿度。对于 3 种大气环境来讲,海洋大气对钢的腐蚀性最大,工业大气次之,农村大气对耐候钢的腐蚀较小。

1.2.1 腐蚀行为

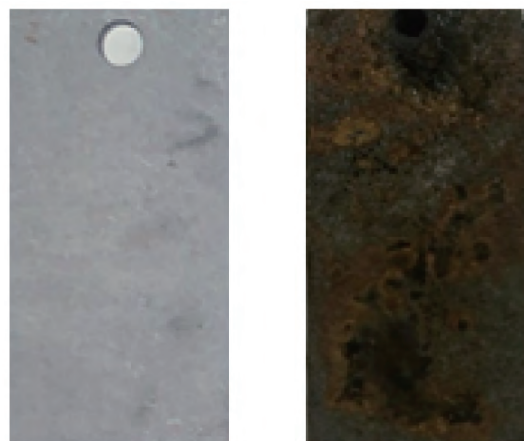
目前探究耐候钢在腐蚀环境下的腐蚀行为,常用的研究方法主要有室外暴露试验和室内加速腐蚀试验。室外暴露试验能够真实还原耐候钢在大气中的抗腐蚀性能,但试验周期长,目前已有的长期试验数据较少;室内加速腐蚀试验能够在较短时间内获得耐候钢的抗腐蚀性能试验数据,但是加速腐蚀时间与大气中腐蚀时间的对应关系、模拟腐蚀参数与外界大气环境之间的相关性缺乏较为完善的理论基础。国内外学者针对耐候钢腐蚀过程及影响因素,开展了大量腐蚀试验及耐腐蚀机理分析。Morcillo 等研究了锈层稳定时间、稳定后腐蚀速率、免涂装耐候

钢适用条件和暴露条件对 ASTM A242 耐候钢腐蚀性能的影响,探讨了考虑长期效应影响的耐候钢腐蚀速率预测模型的适用性,发现暴露角度和方向对耐候钢腐蚀性能影响不大;随着大气腐蚀作用的增加,锈层的稳定时间呈减少的趋势,在腐蚀作用较弱的环境中,遮挡条件对腐蚀性能影响不大,在大气腐蚀作用较强时,遮挡条件会增加耐候钢腐蚀速率;无涂装耐候钢推荐在腐蚀性较弱的环境(C2~C3)中使用,对于考虑长期效应影响的耐候钢腐蚀速率预测模型,常采用幂函数模型 $C = At^n$ 或对数函数模型 $\ln(C) = \ln(A) + n\ln(t)$,其中 C 为时间 t 后的腐蚀速率, A 、 n 均为系数, n 在海洋大气中取 0.5,在工业和农村中取 0.3^[13]。Yann 通过周期湿润试验研究了不同氯离子含量、pH 值、湿润时间等环境条件下耐候钢的腐蚀行为,发现与普通钢相比,当氯离子含量(质量分数,下同)超过 1%,耐候钢的腐蚀速率无明显降低,当 pH 值保持在中性范围内时,耐候钢能表现出良好的抗腐蚀性能;湿润时间对耐候钢稳定锈层的形成影响较大^[14]。Zhang 等利用回归分析、X 射线衍射、拉曼光谱、电化学阻抗谱等技术研究了耐候钢和碳钢在海洋大气中暴露 4 年的腐蚀行为,发现暴露初期耐候钢的腐蚀速率与普通碳钢相比无较大差别,但在随后的暴露时间中,耐候钢的腐蚀速率明显降低;暴露 4 年的碳钢锈层有较多孔洞和裂缝,但相同暴露时间下的耐候钢锈层更加致密^[15]。王春生等通过腐蚀挂片室外暴露试验方法,评价了 HPS485W 高性能耐候桥梁钢在大气、淡水全浸、盐水全浸、淡水半浸等 4 种条件下的腐蚀情况,试验采用的装置如图 1 所示,用 3 个装有不同腐蚀溶液的容器模拟环境工况,腐蚀挂片试验时间为 6 年,图 2 为 HPS485W 高性能耐候桥梁钢试样在淡水半浸环境中腐蚀前后的形貌,试验采用失重法计算挂片试验的腐蚀速率,试验结果表明,高性能耐候钢在淡水半浸环境下腐蚀速率最高,盐水全浸次之,在大气腐蚀中的腐蚀速率最低,高性能耐候钢在盐水全浸、淡水全浸、淡水半浸试验环境中的耐候性均优于 Q235 和 Q345 桥梁钢。



图 1 腐蚀挂片试验装置

Fig. 1 Corrosion coupon test device



(a) 腐蚀前试样

(b) 腐蚀 6 年后试样(酸洗后)

图 2 HPS485W 挂片试样腐蚀前后形貌对比

Fig. 2 Appearance comparison of HPS485W coupon specimen before and after corrosion

综上所述,与普通碳钢、合金钢相比,耐候钢具有更加优良的耐腐蚀性能,但使用耐候钢时,环境中氯离子浓度及 SO_2 浓度应小于一定限值。

1.2.2 锈层性能

耐候钢在大气腐蚀过程中,腐蚀初期阳极发生 Fe 的氧化反应产生 Fe^{2+} ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$),阴极发生还原反应生成 OH^- ($1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$);随后,在中性或弱酸性的腐蚀环境中,溶液中的阴离子会产生大量二价铁羟络合物,这些二价铁羟络合物与溶解于溶液中的氧气发生反应形成 $\gamma\text{-FeOOH}$,并且转化为 $\alpha\text{-FeOOH}$,具体的反应过程如图 3 所示。当溶液中含有穿过锈层外层进行扩散的 Cl^- 、 HSO_3^- 时, FeOOH 与钢基体溶解后产生的电子发生反应生成 Fe_3O_4 ($6\text{FeOOH} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{OH}^-$)^[16]。

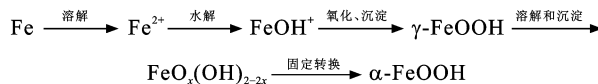


图 3 Fe 的氧化反应

Fig. 3 Oxidation reaction of Fe

耐候钢优良的抗大气腐蚀性得益于其含有的大量合金元素,合金元素的存在可产生如下效果:可降低锈层的导电性,促使阳极钝化;影响锈层结构及其生成速度,阻止锈层结晶,进而阻止锈层的生成;促进钢基体的均匀溶解,阻止裂纹和缺陷的萌生;促进 Fe^{2+} 转化成 Fe^{3+} ,有利于稳定锈层的形成。耐候钢表面锈层的形成机制直接影响其防腐蚀性能,因此,锈层的力学性能、致密程度及化学成分是耐候钢耐腐蚀性能研究的重点。目前锈层研究主要是采用耐候钢挂片试样进行表面锈层分析,研究锈层化学成

分、锈层内化学晶体组成形态及锈层与钢基体之间的粘附力等,以探明耐候钢锈层耐腐蚀机理。

(1) 锈层组成成分

对于锈层的组成成分,国内外学者普遍认为在大气中长期暴露后产生的锈层可分为内外2层,但对于各层的化学组成成分所持观点有所不同。Okada等通过反射偏光及正交偏光镜观察了暴露于大气中的Cu-P系和Cu-P-Ni-Cr系耐候钢锈层,认为耐候钢的耐腐蚀性是由于锈层中存在非晶态层,且Cu、Cr、P元素有利于非晶态层的形成^[17];Misawa等通过对锈层机理的研究,发现在Cu和P富集的耐候钢表面较容易生成 δ -FeOOH,促进了致密锈层的生成^[18-19];Yamashita等对耐候钢进行了26年的工业环境暴露试验,并通过拉曼光谱分析了耐候钢在工业环境下产生的锈层组成成分,认为锈层的外层主要由 γ -FeOOH组成,而内层主要由 α -FeOOH组成, γ -FeOOH在多年的暴露腐蚀过程中转化成非晶态羟基氧化铁,最后逐渐变成 α -FeOOH;Katayama等对在农村大气中暴露35年的耐候钢在氯离子溶液中进行电化学腐蚀,并分析了氯离子对耐候钢锈层劣化的影响,结果表明,锈层中既含有 α -FeOOH、 γ -FeOOH等晶态物质,也含有非晶态物质,Cr、P、Cu富集的耐候钢表面产生的锈层无法在高氯离子的浓度环境下抑制氯离子的渗透^[21];Townsend等通过对在工业和农村大气中暴露11年的耐候钢的锈层进行分析,发现耐候钢锈层可分为亮区和暗区,暗区由 α -FeOOH和 γ -FeOOH组成,亮区由 α -Fe₂O₃和Fe₃O₄组成^[19];Choi等采用浸泡失重试验、缝隙腐蚀试验、电化学测试和分析技术研究了耐候钢暴露于富含酸性氯化物溶液中的水腐蚀特性,结果表明,耐候钢在含氯化物的腐蚀性介质中腐蚀较为严重,腐蚀产物主要是Fe₂O₃和Fe₃O₄,但缝隙内外的电位差不大,认为耐候钢并不容易发​​生缝隙腐蚀^[22]。

综上所述,关于锈层的腐蚀产物成分,普遍认为主要包括 γ -FeOOH、 α -FeOOH、Fe₃O₄和一些非晶态物质(图4)^[23]。耐候钢形成锈层的外层较为疏松,呈光亮色,主要由 γ -FeOOH和 α -FeOOH组成,其中, α -FeOOH可以阻止Cl⁻、HSO₃⁻等腐蚀性离子穿过锈层腐蚀钢基体。内层较为紧密,呈暗黑色,其主要成分为非晶态FeOOH化合物和Fe₃O₄。早期耐候钢的锈层中 γ -FeOOH可能多于 α -FeOOH,但在后期通常 α -FeOOH最多,其次为 γ -FeOOH^[18]。

在含较高浓度Cl⁻或F⁻的腐蚀环境中,锈层中也常常观测到 β -FeOOH的存在。

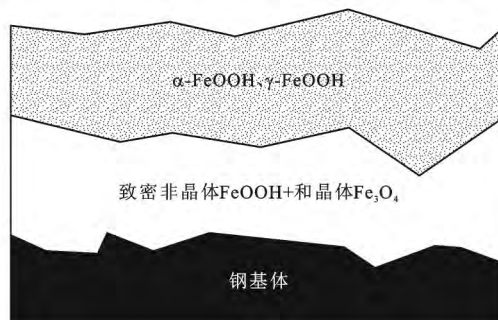


图4 耐候钢基体上的锈层结构

Fig. 4 Patina structure on weathering steel substrate

(2) 锈层保护机理

目前对于耐候钢稳定致密锈层的保护机理还未形成统一的认识,现主要有3种观点^[12]:第1种观点认为稳定锈层具有物理阻挡作用,由于耐候钢锈层的孔洞比普通钢小,锈层致密,且与钢基体之间的附着力强,形成的纳米网状结构能够有效隔绝水或空气,从而阻止钢的腐蚀,且致密锈层中夹杂的杂物较少,从而腐蚀源随之减少;第2种观点认为稳定锈层具有电化学作用,耐候钢锈层电阻高,基体的腐蚀电位高,使得钢阳极容易钝化;第3种观点认为稳定锈层具有离子选择性,由于耐候钢中添加了各种合金元素(铜、铬、镍等),这些合金元素可通过取代铁锈中的铁化合物而使得锈层具有阳离子选择性,从而抑制了Cl⁻和SO₄²⁻等腐蚀性阴离子的侵入。持第3种观点的学者们对母材化学元素对耐候钢稳定锈层的影响机制开展了深入研究,结果表明不同元素对锈层的影响作用各不相同^[24-25]。在腐蚀过程中,耐候钢中的铜元素在钢基体和锈层中间析出,由于其惰于铁,可减缓锈层的生长速率,抑制钢表面与氧气的反应,并有效降低锈层的导电性,在腐蚀初期减缓了锈层的晶体化进程,并在腐蚀过程中促进了致密锈层的形成^[26-27];磷元素可以促进 α -FeOOH的形成,但是磷元素含量较高会导致钢基体的可塑性、可焊性、低温韧性降低,因此,也要限制其含量,当耐候钢中磷的质量占比为0.08%~0.15%时,其耐腐蚀性最佳;铬元素的活性强于铁元素,因此,会先于铁元素发生氧化反应,会在锈层中快速消耗并在钢表面加速扩散,铬元素只在锈层内层被发现,说明铬元素促进了 α -FeOOH的形成,降低了锈层的导电性,提高了钢基体的耐蚀性,耐候钢中铬的质量分数常采用0.4%~1.0%,最高不超过1.3%^[20];镍是通常以二价氧化物的形式存在于锈层的尖晶石中,

镍的存在可以提高锈层的密度,根据 Nishimura 等的调查,在早期形成的锈层中镍元素含量较少,但随着锈层的形成,镍元素含量明显增加,镍对锈层的促进作用体现在锈层生长后期,大气暴露试验结果表明,当钢材中镍的质量占比为 1%~3% 时,能提高耐候钢在海洋环境下的耐腐蚀性^[28-29];通常铝元素和硅元素分别以 Al^{3+} 和 Si^{2+} 生成中间产物的形式存在于内锈层中,认为铝元素和硅元素可以通过促进铁元素在外锈层产生纳米复合氧化物延缓腐蚀进程^[30],但在盐溶液中这 2 种元素对腐蚀行为的影响还尚无定论^[31-32]。

由此可见,不同元素对锈层的影响作用各不相同,同时会对耐候钢桥的耐腐蚀行为及机理产生影响。在耐候钢桥设计选材时,应依据桥位环境条件决定选用适合的耐候钢化学成分,如在沿海地区可考虑添加适量镍元素以保证其耐腐蚀性。未来还应继续大量开展中国不同腐蚀和气候环境下耐候桥梁钢挂片暴露试验,研究耐候桥梁钢的不同合金成分在典型气候、环境下对腐蚀性能的影响规律,为耐候钢桥设计选材提供理论基础。

(3) 锈层性能试验

耐候钢稳定锈层通常致密连续,其与普通钢形成的锈层相比,具有防止钢基体进一步锈蚀的保护性作用。但锈层在形成过程中不仅受腐蚀环境的影响,还要承受循环荷载的作用,如车辆荷载、温度作用等。腐蚀与荷载耦合作用会造成锈层、锈层与钢基体结合作用的累积损伤,削弱锈层的稳定性和耐久性,从而导致锈层脱落、锈蚀持续发展,危及结构承载安全,因此,腐蚀、荷载耦合作用对锈层的影响必须在耐候钢桥设计阶段予以充分考虑。

国内外学者针对锈层性能开展试验研究,主要包括锈层承载能力、残余应力、结合强度及脱落机制等。张全成等通过对挂片试样进行连续加载超显微硬度压痕试验,测试了耐候钢表面保护性锈层的承载能力和锈层与钢基体表面的结合强度,试验测试结果表明,挂片暴露时间越长,锈层承载力越高,韧性越好,耐候钢锈层的结合强度随暴晒时间增长而增强,在 3 年后趋于稳定,暴晒 2 年后的锈层连续致密,暴晒 3 年的耐候钢锈层的结合强度为 7.45 N^[33-34];姜传海对锈层热残余应力进行了研究,并用 X 射线衍射技术测量了锈层的热残余应力,结果表明,锈层中的应力分布极不均匀,在腐蚀坑腰附近的应力集中较为明显,锈层容易在此破裂,耐候钢锈层的热残余应力高于普通碳钢,因此,耐候钢锈层具有较高强

度^[35];王树涛等对青岛暴晒 1 年后的低碳贝氏体钢进行了锈层相组成、形貌、力学性能和抗热震性能分析,结果表明锈层与钢基体的结合强度和抗震性能均高于锈层本身,锈层在温度变化中不易完全脱落,弹性模量和硬度随其与结合界面距离的增大而减小^[36];王雷对 MnCu 耐候钢采用循环加载及模拟加速腐蚀的试验方法,研究了耐候钢在循环荷载和 Cl^- 腐蚀环境耦合作用下的腐蚀行为特征及锈层形成情况,结果表明耐候钢的耐腐蚀能力较强,腐蚀速率较低时能够形成稳定锈层,随着循环荷载幅值的增大,锈层中会产生较多裂纹甚至脱落的现象,因而耐腐蚀性有所降低,耐候钢内锈层对耐候钢的耐腐蚀性贡献较大^[37];Gao 等研究了不同荷载水平作用下耐候钢在 3.5% 的盐溶液中的腐蚀行为,结果表明外荷载作用下的锈层呈多孔结构,使得锈层降低了对氯离子扩展的阻滞作用,导致耐候钢的腐蚀速率增大,且耐候钢的腐蚀速率随荷载的增大而增大^[38]。

上述锈层性能研究具有重要的理论与工程实用价值,但存在如下不足:研究未能覆盖耐候钢桥承受的极端气候与环境作用,以及承受动态疲劳荷载的耦合作用;已有研究中采用的耐候钢不能代表近年工程中使用的高性能耐候桥梁钢的耐候特性;相关研究与工程设计、建造、维护技术需求结合程度不够紧密,未能提出指导工程设计与维护的技术指标。未来研究与实践中,应当结合桥梁使用环境、气候和荷载特点,开展高性能耐候桥梁钢的锈层形成机制与稳定性研究,提出设计与运维技术指标体系,为高性能耐候钢桥建设提供技术支撑。

1.3 高性能耐候钢的断裂韧性

高性能耐候桥梁钢除了具有较好的耐腐蚀性外,其断裂韧性也有显著提高。研究确定高性能耐候桥梁钢的断裂韧性,提出设计准则,发挥材料性能优势,具有重要的工程实用价值。Kayser 等采用按 TCMP 工艺生产的 HPS485W 高性能耐候钢,开展了板厚 22、51 mm 的试样室温拉伸试验及夏比冲击试验,研究结果表明,高性能耐候钢强度高、韧性好,结构防断裂能力强,采用 TCMP 工艺制造的耐候钢满足 ASTM A709 规范要求,可用于大批量生产桥梁用钢^[39];Chen 等通过对板厚 6.4 mm 的 HPS485W 高性能耐候钢进行材性韧性和强度试验,发现其屈服强度均稍低于 ASTM A709 规范中的限值,6.4 mm 厚钢板的极限强度大于规范规定值,同时采用三点弯曲试样开展了 HPS485W 高性能耐候钢在 -1、0、0.5 这 3 种应力比下的裂纹扩展速率试

验,结果表明不同应力比下的裂纹扩展特征大致相同,扩展速率随应力比的增大而增大^[40-41];王春生等开展了不同温度下 HPS485W 高性能耐候钢的冲击韧性试验(图 5),并采用三点弯曲试样进行了裂纹尖端张开位移(Crack Tip Opening Displacement, CTOD)试验,结果表明,与传统桥梁钢相比,高性能耐候钢的冲击韧性更高,韧-脆转变温度更低, HPS485W 高性能耐候钢在缺口尖端区域有较大的塑性变形,大范围的屈服变形意味着更优良的韧性,基于失效评定曲线法对 HPS485W 耐候钢的评定结果均在合格范围内,图 6 为试样的塑性区形态^[9]。

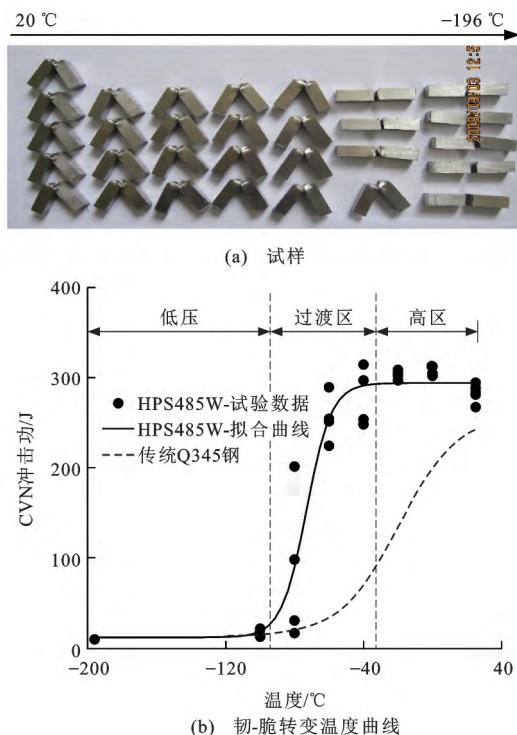


图 5 CVN 夏比冲击试样的破坏形态与韧-脆转变温度曲线

Fig. 5 Failure patterns of CVN Charpy impact specimens and ductile-brittle transition temperature curves

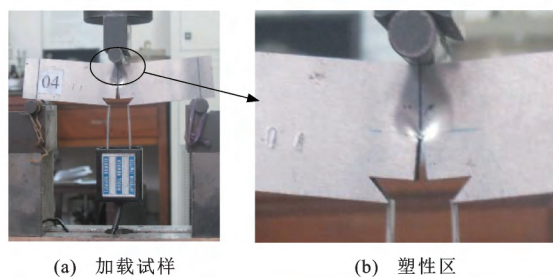


图 6 CTOD 试样的塑性区

Fig. 6 Plastic zone of CTOD specimen

国内外研究结果表明,高性能耐候钢韧性高,裂纹扩展速率低,低温脆断风险小,阻滞裂纹扩展能力强,可有效延长桥梁使用寿命,提高结构安全

性。随着中国系列高性能耐候桥梁钢广泛应用于实际工程,应开展各等级高性能耐候桥梁钢的裂纹扩展速率试验和腐蚀与疲劳耦合作用下的裂纹扩展特性研究。

2 高性能耐候钢桥构件性能

为进一步推广应用耐候钢桥,深入开展荷载与环境作用下耐候钢桥构件的承载性能与损伤机理研究十分必要,国内外学者在这一领域已取得了一定的研究成果,本节重点评述高性能高强耐候钢桥静力和疲劳性能研究新进展。

2.1 静力性能

目前国内外学者主要通过模型试验、数值模拟与理论分析等方式研究高强耐候钢梁的抗弯、抗剪性能,探明高强耐候钢梁弯曲、剪切失效特征,明确关键结构参数对钢梁弹塑性承载力的影响规律。Barth 等通过三维有限元分析,研究了 HPS485W 混合设计耐候钢梁的负弯矩区塑性行为,探讨了翼板宽厚比、腹板高厚比、腹板受压区高度、高跨比等对钢梁塑性承载性能的影响,并将结果与 AASHTO 规范中的强度公式计算结果进行了比较,结果表明,梁的极限弯曲破坏模式表现为整体失稳和构件局部屈曲的共同复杂行为,最大应变集中出现在受压翼缘局部^[42];Sause 等对 HPS100W 高强耐候钢梁开展了抗弯试验研究和数值模拟,结果表明,AASHTO LRFD 规范中关于厚实截面与非厚实截面工字型钢梁抗弯强度的计算规定适用于 HPS100W 耐候工字钢梁,但规范中的中支点负弯矩区塑性铰计算偏保守^[43-44];Yakel 等对 4 片 HPS70W 高性能耐候钢工字梁开展了抗弯试验研究,试验分为 2 组,第 1 组梁承载力达到了塑性极限弯矩,第 2 组中非厚实截面梁承载力超过截面屈服弯矩,但未达到塑性弯矩,将承载力试验结果与按 ASTM A752 50 级工字钢梁设计计算公式的计算值进行对比,确认该公式可以用于 HPS70W 工字梁承载力计算^[45];王春生等对舞阳钢铁有限责任公司生产的 12 根 HPS485W 混合设计高强耐候钢工字梁进行了抗弯性能试验(图 7),分析了加载方式、侧向约束、翼缘宽厚比、腹板高厚比、材料匹配等对钢梁受力性能的影响,试验结果表明 HPS485W 混合设计工字钢梁抗弯承载力高、延性好,结合研究结果提出了高强耐候钢工字梁的抗弯设计构造规定与设计准则^[8];郑丽以 HPS485W 高强耐候钢梁为研究对象,采用数值模型分析了其抗剪承载性能,研究了



(a) 设置2道侧向约束



(b) 设置5道侧向约束

图 7 混合设计高强耐候钢工字梁抗弯性能试验

Fig. 7 Bending performance test of high strength weathering steel I-beam with hybrid design

高强耐候钢梁抗剪承载力及破坏形态,分析了关键结构参数对钢梁抗剪承载力的影响规律,建议了抗剪承载力计算公式^[46]。

2.2 抗疲劳性能

免涂装耐候钢桥在裸露使用过程中,依靠表面的致密锈层来阻滞锈蚀的进一步发展,保持耐候钢桥的长期使用安全,这种防护机制与传统油漆涂装防腐有着显著区别,其中的重要技术差异是免涂装耐候钢桥各类疲劳细节中存在腐蚀锈坑,这会导致

在疲劳荷载、环境侵蚀介质作用下耐候钢桥疲劳细节的失效机理和疲劳强度等与传统钢桥不同。国内外学者对耐候钢桥典型疲劳构造细节开展了疲劳试验与数值分析,重点考察了环境条件、使用条件、疲劳驱动机制等对细节疲劳强度和使用寿命的影响规律,提出了抗疲劳设计与维护建议。

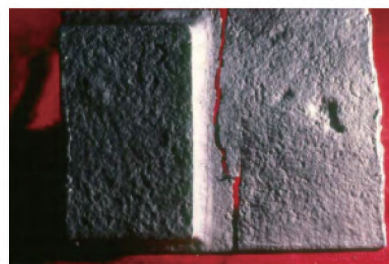
20 世纪 80 年代,美国马里兰大学 Albrecht 教授等对采用 ASTM A588 钢材制造的耐候钢梁和典型接头展开了系列疲劳、腐蚀-疲劳试验研究,研究腐蚀程度(时间)对此类构造细节疲劳性能的影响,结果表明,与无腐蚀相比,腐蚀 3 年的横向加劲焊接接头的疲劳强度降低了 42%,腐蚀 8 年的疲劳强度降低了 54%,表明腐蚀对耐候钢横向加劲焊接接头的疲劳强度影响十分显著^[3]。Albrecht 等对在大气中暴露 8 年的 36 个耐候钢横向加劲焊接接头,在大气或 3% NaCl 溶液中进行疲劳、腐蚀疲劳试验,试验结果表明,未涂装的耐候钢接头的疲劳强度明显低于传统钢桥中的相同涂装接头,与未腐蚀的耐候钢接头相比,大气腐蚀 8 年的耐候钢接头在 NaCl 溶液中的腐蚀疲劳强度等级由 C 降到了 D,研究者认为疲劳强度降低是由腐蚀造成的裂纹萌生和腐蚀疲劳造成的裂纹扩展寿命减小共同作用导致^[4]。Albrecht 等对 39 根采用 ASTM A588 钢材制造的耐候焊接工字钢梁和 12 根带焊接盖板的轧制工字钢梁进行了疲劳试验研究,试验分为 2 种工况,一组为大气暴露工况,另一组为用金属板遮挡钢梁,并在冬季用 3% 的盐溶液进行喷雾试验,试验结果表明,耐候焊接钢梁在遮蔽和喷雾盐溶液条件下的疲劳强度由 AASHTO LRFD 的 B 类降为 E 类,遮蔽条件下的所有焊接钢梁的疲劳裂纹都源于翼缘的锈坑,遮蔽条件下带焊接盖板的轧制钢梁的裂纹一半源于焊趾,一半源于离焊趾处较远的锈坑处,图 8 为焊接梁下翼缘下表面蚀坑处的疲劳裂纹^[5]。Takamori 对耐候钢板梁焊缝细节疲劳强度提升方法的有效性



(a) 裂纹形貌



(b) 下翼板裂纹萌生



(c) 裂纹扩展与蚀坑

图 8 遮蔽条件下焊接耐候钢梁下翼缘疲劳裂纹

Fig. 8 Fatigue cracks on bottom flange of welded weathering steel girder under sheltered condition

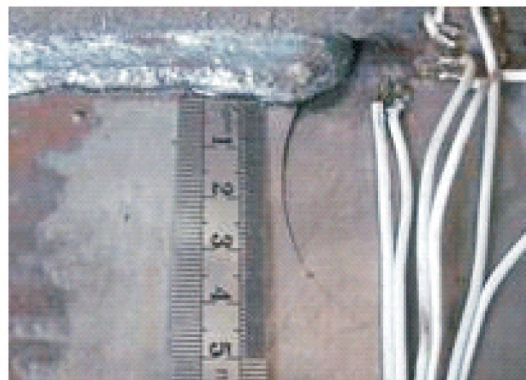
进行了研究,结果表明,采用空气冲击对盖板焊缝细节进行疲劳性能提升,可将细节疲劳强度由 E 级提高到 C 级,用超声冲击法对与翼缘或腹板连接的横向加劲肋焊趾细节(提升前细节疲劳等级为 AASHTO 规范中的 C 级)、盖板焊趾细节(提升前细节疲劳等级为 AASHTO 规范中的 E' 级)进行疲劳性能提升,可将两种细节的疲劳强度分别提高到 B、C 级,采用低匹配焊材焊接可降低氢对焊缝的影响,但焊接接头的疲劳性能无明显提高^[47]。

王春生等对 HPS485W 高性能耐候钢对接接头展开了疲劳试验研究,试验结果表明,未腐蚀耐候钢对接接头疲劳强度与 AASHTO 规范中 B 类细节相近,高于 Eurocode 规范中 125 细节的疲劳强度。王春生等率先开展了高性能耐候钢桥的面外变形疲劳机理试验研究,试验装置如图 9 所示,试验采用 600 mm 长的未腐蚀钢板梁节段模型,足尺模型腹板采用 Q345qDNH 钢材制造,腹板竖向加劲肋与翼板间隙尺寸分别取 40、60 mm。试验主要研究间

隙、应力比对腹板间隙细节面外变形疲劳性能的影响。试验中面外变形疲劳裂纹均在加劲肋与腹板连接焊缝端头焊趾处萌生,沿焊趾扩展 20 mm 后会向加劲肋两侧腹板继续扩展,形状似笑脸。图 10 为应力比和间隙尺寸对未腐蚀腹板竖向加劲肋与翼板间隙细节疲劳强度影响的试验结果^[48],参照美国 AASHTO 桥梁设计规范中对疲劳细节等级的分类,可知在应力比小于 0.3 时,腹板间隙为 40 mm 时该细节疲劳强度为 D 级,腹板间隙为 60 mm 时该细节疲劳强度为 C 级,而在应力比介于 0.3~0.5 时,40 mm 腹板间隙细节疲劳强度为 E' 级,60 mm 腹板间隙细节疲劳强度为 D 级。由试验结果可知,耐候钢桥腹板间隙面外变形疲劳受应力比和间隙尺寸影响显著,应力比增加时,细节疲劳强度降低明显,间隙尺寸增大时,细节疲劳强度有所提高,建议当应力比小于 0.3 时可选用 40~60 mm 宽的腹板间隙,当应力比为 0.3~0.5 时,建议采用 60~80 mm 宽的腹板间隙。



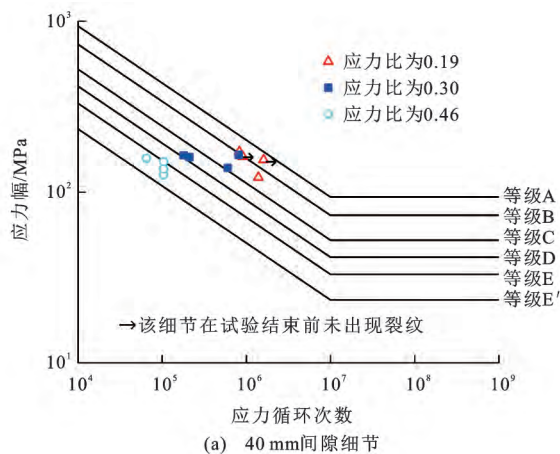
(a) 试验装置



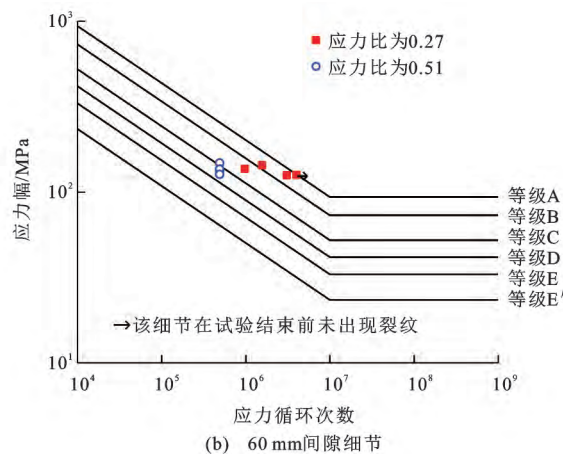
(b) 腹板间隙面外变形疲劳裂纹

图 9 面外变形疲劳试验装置与腹板间隙面外变形疲劳裂纹

Fig. 9 Test device for out-of-plane deformation fatigue test and out-of-plane deformation fatigue cracks at web gaps



(a) 40 mm 间隙细节



(b) 60 mm 间隙细节

图 10 应力比和间隙尺寸对腹板间隙面外变形细节疲劳强度的影响

Fig. 10 Influences of stress ratio and gap size on out-of-plane deformation fatigue strength of web gap details

由上述研究成果可知,构造细节表面客观存在的锈坑和面外变形等对耐候钢桥疲劳性能与使用寿命影响显著,但目前的研究未能覆盖耐候钢桥疲劳类型(面内应力或面外变形驱动)、细节类型、使用环境条件等。为确保免涂装耐候钢桥的使用安全,应针对上述问题开展深入研究,提出更加系统的免涂装高性能耐候钢桥抗疲劳设计准则。

3 耐候钢桥设计方法

在耐候钢桥的设计中,不仅要保证结构的承载能力和使用安全,而且要考虑耐候钢桥的适用性、经济性和耐腐蚀构造设计。美国、日本等国家已开展了大量耐候钢桥环境腐蚀因素调查,提出了腐蚀余量计算方法和合理构造设计建议,推动了耐候钢桥设计方法的建立与完善。

3.1 耐候钢桥的适用范围

耐候钢桥是否能形成稳定锈层,是否能免涂装使用,与桥位环境、气候条件密切相关,因此,在耐候钢桥的规划与设计阶段,应充分考虑桥址处的通风条件、干湿交替情况和环境腐蚀等级,合理确定耐候钢的适用范围。

3.1.1 日本

日本学者 Takabe 认为空气中的氯离子飘来量为 $5\text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 的桥址可以保证耐候钢的腐蚀速率低于 $6\text{ }\mu\text{m} \cdot \text{年}^{-1}$ (可接受的腐蚀速率)^[49],这与日本建设省土木研究所、日本桥梁建设协会等测试了日本 41 座桥梁,得出的氯离子飘来量的限值相同。日本建设省土木研究所编制的《塗装無し耐候性橋梁設計施工要領》中规定了可以不用氯离子飘来量判定是否为适用区域(表 2),以及适宜使用耐候钢的区域(图 11)。日本《耐候性鋼の橋梁への適用》中明确指出:在钢材首年腐蚀厚度大于 0.03 mm 的环境中不应采用耐候钢;若桥位区域有温泉,或局部硫化物、水蒸气较多时,也应慎重选用耐候钢。

表 2 日本可使用耐候钢的地区

Tab. 2 Areas of Japan where weathering steel can be used

地区		与海岸线距离/km
日本海的沿海地区	I	>20
	II	>5
太平洋海岸		>2
濑户内海沿岸		>1

3.1.2 英国

Design Manual for Roads and Bridges—



图 11 JISF 规范中规定的日本本土与冲绳地区适宜使用耐候钢的区域

Fig. 11 Areas of Japan and Okinawa where suitable for weathering steel specified in JISF code

Weathering Steel for Highway Structures (BD 7/01—1981)中规定了耐候钢的使用条件:环境中氯离子含量应小于 $100\text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, SO_2 含量不应超过 $168\text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,年平均湿度不应超过 60%,钢结构底缘离水面的净高应大于 2.5 m ^[50]。该标准的 2001 版认为氯离子含量高于 $300\text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, SO_2 含量超过 $200\text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 或 $250\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时不适合采用耐候钢。

3.1.3 美国

1989 年 FHWA 发布的技术指南中,按桥梁所处环境(包括氯离子漂移量、环境湿度以及 SO_2 含量等)和所处地理地形特征(如隧道效应)规定了免涂装耐候钢的适用范围^[7]。该报告规定不宜采用耐候钢的地区如下:沿海区域,降雨强度大、湿度大、持续大雾的地区,含有有害化学物质的工业环境,存在隧道效应(图 12),跨越的水位与结构过于接近,桥下积水深度超过 0.254 m 或流动水深超过 0.203 m。此外,报告建议在下列情况中应尽量避免使用耐候钢:氯离子沉淀量大于 $50\text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, SO_2 含量高于 $210\text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,平均湿润时间大于 60%(美国定义的平均湿润时间为相对湿度大于



图 12 隧道效应

Fig. 12 Tunnel like effect

80%及温度高于 0℃的时间)。

综上所述,在桥梁初步设计阶段选用材料时,应充分考虑桥位地理环境和地形特征等是否适宜耐候钢的使用。决定耐候钢适用与否的主要因素有 3 个:氯离子沉淀量、SO₂ 含量、湿润度。

3.2 耐候钢桥的腐蚀余量设计

虽然耐候钢的腐蚀速率低于普通钢材,但在其设计使用年限内应当考虑其腐蚀损失对结构可靠性带来的影响。在实际工程中,设计人员通常采用设置腐蚀余量的方法来抵消腐蚀损失对结构带来的影响。

欧盟标准 *Corrosion of Metals and Alloys—Corrosivity of Atmospheres—Classification, Determination and Estimation* (EN ISO 9223—2012)对环境等级的分类如表 3 所示。*Design Manual for Roads and Bridges—Weathering Steel for Highway Structures* (BD 7/01—1981)中规定了耐候钢的腐蚀余量,其建议的各环境等级下的腐蚀余量如表 4 所示^[50]。

表 3 EN ISO 9223—2012 中的环境等级分类

Tab. 3 Classification of environmental grades in EN ISO 9223—2012

环境等级	环境特征
C1	仅室内环境
C2	大气中含有少量污染物,多为农村地区
C3	含有中等 SO ₂ 含量污染物的城市和工业环境,含少量盐的海岸地区
C4	含有中等盐含量的工业和海岸地区
C5-I	湿度高、腐蚀较严重的工业地区
C5-M	盐含量较高的海岸及近海地区

表 4 BD 7/01—1981 中规定的各环境等级下的腐蚀余量

Tab. 4 Corrosion allowances under each environmental grade in BD 7/01—1981

环境等级	腐蚀等级	腐蚀余量/mm
C1、C2、C3	中级	1.0
C4、C5	严重	1.5
箱梁内部		0.5

英国 Corus Construction and Industrial 公司的 *Weathering Steel Bridges*^[51] 中对腐蚀余量设置的技术要求为:冬季使用除冰盐的耐候钢桥,应按严重环境腐蚀等级考虑;密封钢箱梁内部很难发生腐蚀,不需要设置腐蚀余量;腐蚀余量对角焊缝和对接焊缝同样适用;耐候高强螺栓不需要设置腐蚀余量;腐蚀余量适用于所有板件、构件,包括加劲肋和支撑等。德国、瑞典的相关技术标准也对腐蚀余量做出了规定,如表 5 所示^[52]。

表 5 德国、瑞典技术标准中建议的腐蚀余量

Tab. 5 Corrosion allowances recommended in Germany and Sweden technical standards mm

环境等级	C2	C3	C4
德国标准	0.8	1.2	1.5
瑞典标准	0.6	1.2	1.7

上述各国规范中对腐蚀余量的设计规定虽简单易行,但对实际情况的考虑略显粗糙。国内外学者对腐蚀余量的合理设置仍在开展深入研究。Albrecht 等提出,对于厚度小于 38 mm 的耐候钢板,其 100 年的设计腐蚀余量可取为 0.8 mm,对于厚度大于等于 38 mm 的耐候钢板,其轧制容差可补偿腐蚀损失,不用设置腐蚀余量^[6];Kriv 通过对耐候钢试件进行大气腐蚀试验,在环境因素调研的基础上得到了不同腐蚀环境下的腐蚀产物厚度,以此为基础提出了计算腐蚀余量的公式,该公式综合考虑了耐候钢种类型、桥位特征、腐蚀部位、暴露面位置、水的影响、设计使用年限内通风及管养情况,具体公式为^[52]

$$\Delta t = t_d + t_1 + t_2 - t_n - t_v \quad (1)$$

式中: Δt 为最小腐蚀余量; t_d 为极限状态下构件的最小厚度; t_1 、 t_2 为截面厚度损失设计值; t_n 为构件厚度; t_v 为关于热轧钢板类别和厚度的系数,取值见表 6。

表 6 t_v 的取值

Tab. 6 Values of t_v

钢板厚度/mm	EN 10029—1991 中厚度允许容差分类下 t_v 的取值/mm			
	类别 A	类别 B	类别 C	类别 D
(5,8]	0.05	0.15	0.45	-0.15
(8,15]	0.10	0.25	0.60	-0.25
(15,25]	0.15	0.45	0.75	-0.20
(25,40]	0.25	0.75	1.05	-0.10
>40	0.40	1.10	1.40	0.10

3.3 耐候钢桥的构造设计

免涂装耐候钢桥在使用过程中,保护性锈层的生长、形成过程和稳定性受环境条件影响较大。综合大量桥例资料和试验结果,耐候钢桥在下列环境和条件下适合稳定锈层的形成:直接接触雨水且通风良好的钢表面、通风和排水情况好的内侧垂直面和水平面、盐分影响小的地区。但在下列构造中,耐候锈层常处于不稳定状态:尘土堆积的部位,通风不好且潮湿的部位,桥面板、伸缩缝、排水管等破损造成漏水的部位。

基于以上认识和工程经验,一些国家的技术标

准、报告和学者们对耐候钢桥的不同构造提出了相应的技术要求和设计建议。

3.3.1 钢板梁

工程实践表明,水平构件和角落处常常由于排水不畅和尘土堆积,导致稳定锈层较难形成。在钢板梁中,这类部位存在于下翼缘、水平节点板、纵向加劲肋、水平和倾斜构件的螺栓接头等处。在设计中为避免积水和尘土堆积,工程师应遵循以下设计原则^[9]:尽量减小水平面的数量;尽量避免角落构造;排水须通畅;避免缝隙腐蚀。

大量耐候钢桥的调查结果表明,钢板梁的下翼缘板的腐蚀最为严重。这是由于桥面板或上翼缘的水流向下流淌时飞溅到下翼缘,导致下翼缘长期潮湿,从而不利于稳定锈层的形成。为了避免这种情况的发生,日本《塗装無し耐候性橋梁設計施工要領》中建议钢板梁在焊接腹板和下翼缘时应先做稍大的反变形以防积水,如图 13 所示。但是美国 NCHRP 314 报告^[6]中认为,轧制一个倾斜的下翼缘难度较高,而在梁纵向设置纵坡,即跨中向梁端呈一定角度的倾斜可达到同样技术效果。工程实践表明,在宽度改变的部位锈层形成不均匀,若要在梁段间的焊接连接处改变梁的截面尺寸,应尽量采用改变板件厚度而不改变宽度的做法。设计竖向加劲肋时,如果竖向加劲肋与梁的下翼缘未连接,可以切除 30 mm 左右加劲肋以便通风排水;如果焊接,应在拐角处的加劲肋上切一个至少 50 mm 的间隙,如图 14 所示。为了避免竖向加劲肋与下翼缘连接拐角处有灰尘堆积,Yamada 提出采用焊接倾斜板封闭角落的构造处理,如图 15 所示^[53]。

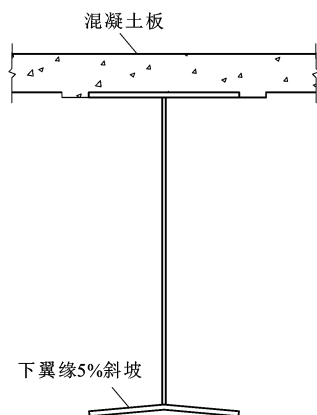


图 13 日本技术标准中建议的下翼缘构造

Fig. 13 Bottom flange configuration proposed by Japan technical standards

3.3.2 钢箱梁

钢箱梁或管形截面构件中通常会因为毛细渗

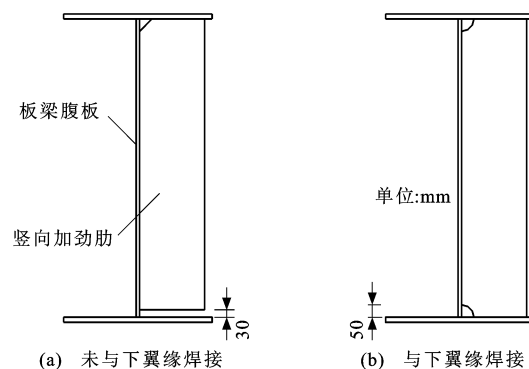


图 14 竖向加劲肋构造(单位:mm)

Fig. 14 Vertical stiffener configurations (unit: mm)

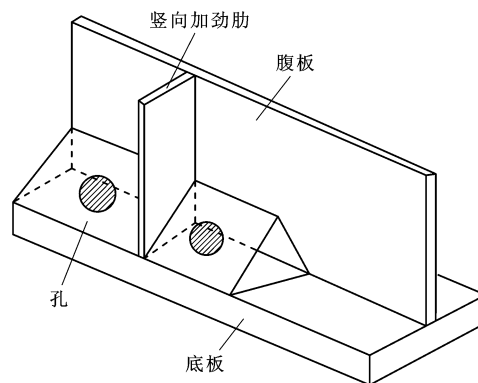


图 15 Yamada 建议的竖向加劲肋构造

Fig. 15 Vertical stiffener configuration suggested by Yamada

透、内外压差、冷凝等作用导致水渗入。设计时应注意构造细节,尽量避免这种现象的发生。毛细作用通常发生在部分封闭或密封不严的构件中,且易发生在开孔尺寸较小的情况下,例如在螺栓与螺栓孔之间的缝隙处。内外压差的产生主要是由于当大气中温度下降时,箱内的空气体积变小,使得内外产生压差,从而将缝隙附近的水吸入。为了避免这种情况,可以在箱梁上开孔以平衡气压,使得水在重力作用下无法进入箱梁内。冷凝一般不会发生在正常的日夜温差下,且对于密封特别好的箱梁,不用考虑冷凝问题。但对于有开口的箱形或管形截面,箱外温度的骤降会使箱内发生冷凝。在施工时,应尽量快速完成施工,否则,应采用开孔的方式产生气流防止冷凝,且箱梁内部应涂装,开孔处附近也应涂装。在实际工程中,管形截面、箱形截面很难做到完全密封,应保证箱内干燥并通风良好,以保证稳定锈层的形成。此外,钢箱梁箱室内不能布设水管。

3.3.3 钢桁梁

钢桁梁桥在制造安装过程中需要采用大量的螺栓连接。为了保证螺栓连接的有效性,耐候钢桁梁桥应采用耐候螺栓进行连接设计。国外已研制出耐

候螺栓并推广使用,但国内对于耐候螺栓的研制开发仍处于探索阶段。中国在耐候钢桁梁桥的设计施工过程中,需保证采用的耐候螺栓达到国外相关标准的要求。耐候钢桁梁主桁下弦杆顶面由于排水困难,不利于稳定锈层的形成,因此,为了避免主桁下弦杆的积水,可采用顶板在节点区域适当抬高或在节点区域采用挡水构造措施,也可采用下弦杆顶面涂装的方式。

3.3.4 梁端部及桥面连接处

桥面伸缩缝应尽量避免设置在梁端附近,且在梁端 1~2 倍梁高范围内进行适当的涂装,以避免伸缩缝漏水对梁端的锈液污染。桥面板伸缩缝漏水会导致相邻钢构件上的节点构造细节发生缝隙腐蚀和电偶腐蚀,为了避免这种情况的发生,欧洲规范中建议尽量避免使用伸缩装置,采用整体连续的结构;若设置伸缩装置时,尽量避免将其设置在梁端一定范围内,并用非金属材料将泄漏的水导流至结构以外。美国 NCHRP 314 报告^[6]中建议免涂装耐候钢桥上应尽量避免使用连接板栓接的连接方式,连接接头必须采用防水性接头,否则在节点附近必须进行涂装。

3.3.5 桥墩、桥台

若排水效果不良,耐候钢表面的氧化颗粒会随着桥上的水流滴落在桥墩和桥台上,尤其在暴露腐蚀初期更易发生。出于美观的考虑,在设计时应充分考虑采用能够有效防止桥墩、桥台污染着色的措施。在非封闭式接头下应设置喷头,且要注意对喷头进行适当的管养,避免堵塞。在支座下面装一块不锈钢板,或者玻璃纤维滴水板并伸出桥台边缘以避免着色;但在墩高较大时不宜采用此法,风会把滴水盘边缘的水吹向桥墩表面。所有墩台帽顶面须设置斜坡,挡土墙侧台帽应设置排水管,将水排到墙后的排水槽里,但要注意排水管的堵塞问题。在距桥台一距离主梁下翼缘板上设置滴水板,需要注意的是,焊接在受拉区下翼缘上的滴水板(排水板)在腹板-翼缘焊缝处应断开,以避免交叉焊缝的三向残余拉应力。滴水板能防止水流通过,但无法阻止毛细作用下灰尘通过滴水板。在墩台上围置挡水板并在混凝土内设置排水管,或在墩台表面做 V 型槽口以便于排水。

综上所述,西方发达国家在耐候钢桥设计与工程实践方面,积累了丰富的研究成果与实践经验。中国耐候钢桥的建设刚刚起步,工程设计可参考国外技术标准与经验,但也应重视中国与国外建设条件的差异,积极开展中国环境等级区划和与之配套的高性能耐候钢技术性能、设计指标的研发,建立具有自主知

识产权的长寿命高性能耐候钢桥设计规范标准体系。

4 耐候钢桥制造技术

4.1 焊 接

焊接由于其生产设备简单,可操作性较强且适合多种材料,广泛应用于耐候钢桥的制造。为了保证耐候钢焊接构件及焊缝的力学性能,在焊接过程中,应合理确定焊接技术参数,如耐候焊接材料、焊接工艺的选择等。选用焊材时不仅要考虑耐候焊接材料与耐候钢母材的匹配程度,还要考虑耐候焊接材料的强度、韧性和耐腐蚀性。

4.1.1 焊接材料

日本耐候钢桥制造通常根据耐候钢化学成分、冲击韧性来选取合理焊接材料。根据化学成分选择焊材时,焊接材料化学成分中的 Cu、Cr、Ni 的含量应不低于日本《焊接结构用耐大气腐蚀热轧钢材》(JIS G3114—2004)标准中的 W 类钢的下限值。

美国 *Bridge Welding Code* (AASHTO/AWS D1.5MD/1.5—2010)中要求:耐候钢在选用焊接材料时,焊接材料需与母材性能和成分匹配;焊接接头的最大填充金属扩散氢含量,每 100 g 熔敷焊缝金属不能超过 8 ml;对于 HPS485 级钢焊缝的镍含量必须大于等于 0.8%;在单道焊缝中,当焊缝尺寸小于 8 mm 时,可以使用传统焊材,但焊接尺寸大于 8 mm 时,必须采用耐候性焊材;在多道焊焊缝中,下层焊道所用焊材可以仅考虑强度匹配,但上层焊道焊材应为耐候性焊材。

目前,中国对于耐候钢焊接材料的选用尚未形成完善的技术标准体系。2015 年辽宁省高等级公路建设局编制了《公路桥梁耐候钢焊接施工技术指南》^[54],其中要求耐候钢焊接所用焊接材料的选择须与耐候钢母材性能和成分匹配,以保证焊接接头裸露使用的要求,焊材的耐大气腐蚀指数 I 必须大于 6.5。 I 为根据 *Standard Guide for Estimating the Atmospheric Corrosion Resistance of Low-Alloy Steels* (ASTM G101—2010)计算出的耐候性指数,但是这一指数对耐候性的指导作用有限,且目前中国耐候钢桥焊接配套焊材的研发尚不成熟,对耐候焊丝焊剂的技术性能尚未形成统一规范规定,这也成为影响耐候钢桥发展的技术因素之一。

4.1.2 焊接工艺

发达国家对耐候钢焊接工艺研究投入较多,美国、日本等国已形成了较为完善的焊接技术标准。美国 *Bridge Welding Code* (AASHTO/AWS D

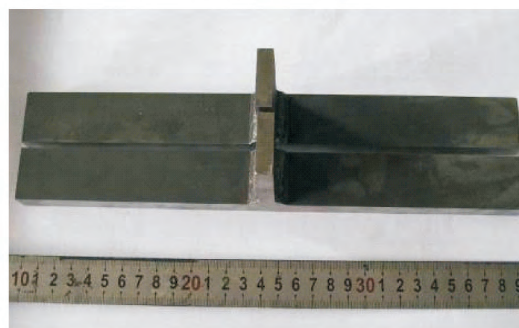
1. 5MD/1. 5—2010)中对高性能耐候钢焊接做出了相应规定:耐候钢桥构件焊接建议采用电弧焊或埋弧焊,采用药皮焊条电弧焊时,单道角焊缝的最大尺寸为 6 mm,焊条必须经 370 ℃~425 ℃烘干后使用;气体保护熔化极电弧焊、药芯焊丝电弧焊、埋弧焊的最大单道角焊缝的尺寸均为 8 mm,焊接材料应按标准规定选用;对于高性能耐候钢桥构件母材,在热切割过程中由于操作不当而导致的缺口和沟槽,不应进行焊接修补,高性能耐候钢不得采用加热的方法来释放制造残余应力;耐候钢桥构件在焊接操作前必须按照工艺规定进行预热,尤其是定位焊,防止出现焊接裂纹,690W 级高性能耐候钢焊接时,当厚度不大于 40 mm 时,最高预热和道间温度不得超过 205℃,厚度大于 40 mm 时,不得超过 230 ℃,HPS485W 钢焊接时的最高预热和道间温度都不得超过 230 ℃;低温预热必须采用低氢操作,无论是埋弧焊还是明弧焊,其扩散氢不得高于 $4 \text{ mL} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$;对于埋弧焊和药皮焊条电弧焊,焊缝厚度不大于 20 mm 时最低预热和道间温度为 10 ℃,厚度在 20~65 mm 时为 20 ℃,厚度大于 65 mm 时为 50 ℃;对于气体保护熔化极电弧焊和药芯焊丝电弧焊,焊缝厚度不大于 20 mm 时最低预热和道间温度为 10 ℃,厚度在 20~40 mm 时为 20 ℃,厚度在 40~65 mm 时为 65 ℃,厚度大于 65 mm 时为 110 ℃。为了避免焊缝腐蚀,McDad 等认为包括角焊缝在内的所有焊接接头都应连续焊接,焊接构件两侧 150~300 cm 内应进行涂装^[55]。

中国已有学者针对耐候钢板焊接工艺展开试验研究。图 16 为王春生等开展的 HPS485W 高性能耐候钢焊接工艺评定试验^[1],主要采用对接焊接头和 T 型焊接头试件,开展拉伸试验、侧弯试验和焊缝及热影响区冲击韧性试验等。评定结果表明,HPS485W 焊接接头弯曲性能良好,焊缝热影响区的冲击韧性和母材相当。

中铁宝桥集团有限公司近年来结合工程建设,系统开展了耐候钢桥焊接技术研发,编写了《拉林铁路藏木雅鲁藏布江大桥免涂装耐候钢桥制造、安装施工指南》,包括了 Q345qNH~Q500qNH 级别耐候钢的焊接,并在焊接材料、焊接工艺、焊接质量检验、安全施工与环境保护等方面做出了规定。该技术指南中要求在进行耐候钢焊接操作前要进行焊前预热,各强度等级的最低预热温度建议值如表 7 所示;焊接过程中道间温度应不低于预热温度,最大道间温度不宜超过 180 ℃;为了控制焊接变形,规定了



(a) 对接焊接接头



(b) T型焊接头

图 16 焊接工艺评定试样

Fig. 16 Specimens for evaluation of welding process

各类焊接接头的合理焊接顺序。该指南对推进中国耐候钢桥焊接技术体系的建立具有重要意义。

表 7 耐候钢最低预热温度建议值

Tab. 7 Recommended values of minimum preheating temperature for weathering steel

耐候钢 牌号	不同接头最大板厚(mm)的最低预热温度建议值/℃			
	[20,40]	(40,60]	(60,80]	>80
Q345qNH		50	80	100
Q420qNH		65	100	120
Q500qNH	80	100	120	150

4.2 螺栓连接

耐候钢桥的栓连接接头除了要保证传力明确、安全可靠、易于加工制造与维护,还应关注螺栓接头的耐腐蚀性,采取构造与工艺措施避免螺栓连接处的缝隙腐蚀。

4.2.1 国外耐候螺栓的技术要求

美国、日本根据耐候钢桥所处环境特点,对耐候螺栓的化学成分给出了规定。

日本《塗装無し耐候性橋梁設計施工要領》中规定当现场采用高强度摩擦型螺栓连接时,必须采用《摩擦夹紧连接用高强度六角螺栓、六角螺母及平垫圈系列》(JIS B1186—2007)中 F10T 或 F8T 级的耐候高强度螺栓;免涂装耐候钢桥摩擦型螺栓连接所采用的高强度六角螺栓、螺母、垫圈连接副应符合 JIS B1186 中规定的技术标准,且都必须具有耐候性。日本使用添加了 Cu、Cr、Ni 等元素的耐候高强度螺栓,其化学成分规定如表 8 所示。

表 8 日本耐候高强螺栓化学成分(F10TW 级)

Tab. 8 Chemical compositions of weathering high-strength bolts in Japan(F10TW grade)

螺栓 名称	C 含量/ %	Si 含量/ %	Mn 含量/ %	P 含量/ %	S 含量/ %	Cr 含量/ %	Ni 含量/ %	Cu 含量/ %	Mo 含量/ %	Ti 含量/ %	B 含量/ %	I 指数
KHB10W	0.20	0.30	0.80	0.010	0.010	0.80	0.55	0.43	0.10	≤0.05	≤0.003	6.97
NWB110	0.20~ 0.25	0.15~ 0.25	0.70~ 0.90	≤0.03	≤0.03	0.6~ 0.8	0.30~ 0.50	0.3~ 0.5			0.001~ 0.003	6.74
JFE	0.23	0.14	0.82	0.010	0.010	0.83	0.47	0.42		0.20		6.77
	0.20~ 0.30	0.15~ 0.35	0.60~ 0.90	≤0.03	≤0.035	0.7~ 0.9	0.35~ 0.55	0.3~ 0.5		0.005~ 0.04	0.001~ 0.003	6.97
SNC22BA	0.20~ 0.25	0.10~ 0.20	0.70~ 0.90	≤0.03	≤0.03	0.7~ 0.9	0.30~ 0.60	0.3~ 0.6			0.003	6.55

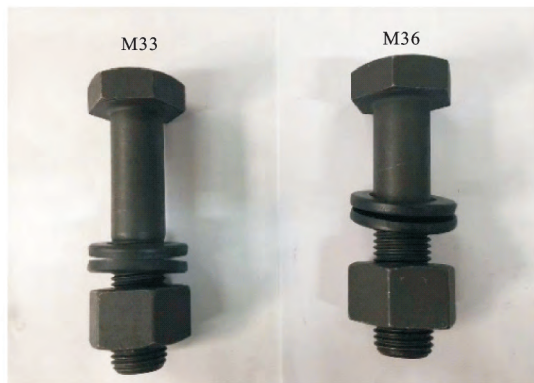
美国的耐候高强螺栓主要采用 ASTM F3125 A325/A325M 和 ASTM A490/A490M Type3, 在使用过程中, 为了避免螺栓上聚集水等污染物, 螺栓头或螺母应与水平线成一定的角度, 并且要求对螺栓头及螺母进行涂装。螺栓部件外孔的尺寸应根据标准尺寸选定, 且对螺栓应选用厚度至少为 8 mm 的板式垫圈完全包裹。

螺栓的施工质量是影响耐候钢桥螺栓连接件性能的重要因素。根据对耐候钢桥的大量调查发现, 螺栓孔处常常出现较为严重的腐蚀, 这是由于螺栓孔与螺栓间的空隙中产生了缝隙腐蚀, 在使用栓接时应当尤为注意。英国 Corus Construction and Industrial 公司在技术报告 *Weathering Steel Bridges* 中提出如下技术要求^[51]: 在进行螺栓设计时, 与板边相邻的螺栓的最大间距为 $14t$ (t 为较薄板的厚度) 且不大于 180 mm, 相邻螺栓中心线间的最大距离为 $8t$ 且不大于 130 mm; 如果采用的螺栓间距大于上述值, 水分吸入缝隙的风险客观存在, 此时应采用合适的密封剂进行密封处理; 为了避免由于板重

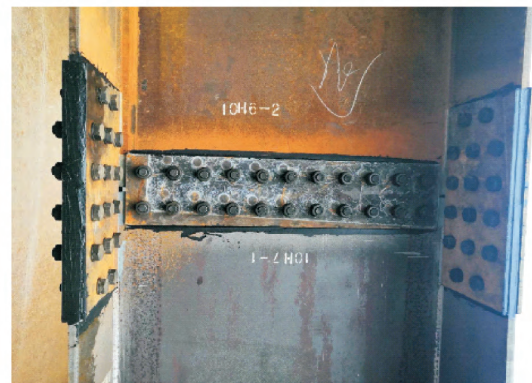
叠和缝隙的潜在问题而造成缝隙腐蚀, 螺栓连接应使用装配性好的柔性盖板。

4.2.2 中国耐候螺栓的研发

目前中国桥梁钢结构上采用的是 10.9S 和 8.8S 两种强度等级的高强螺栓, 但均为非耐候螺栓。为适应中国近年来免涂装耐候钢桥的快速发展, 中铁山桥集团有限公司等单位研制了耐候螺栓, 并应于实桥工程。陶晓燕等通过对中铁山桥集团有限公司生产的耐候高强螺栓进行连接性能试验与分析^[56], 提出了采用喷砂和钢丝刷相结合的表面处理工艺, 并对采用此工艺的钢板连接件进行了抗滑移试验、腐蚀和未腐蚀状态下的疲劳试验, 试验结果表明, 对试件进行喷砂和钢丝刷相结合的表面处理工艺可满足耐候钢桥的连接要求, 室外放置半年内的试件的抗滑移系数较为稳定, 但半年后随时间增长抗滑移系数下降明显; 耐候高强螺栓的抗疲劳设计曲线可采用《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB 10091—2017) 中的栓接疲劳强度曲线^[56]。图 17 为中铁山桥集团有限公司生产的 M33、M36 高强耐



(a) 耐候螺栓紧固件



(b) 耐候螺栓连接

图 17 高强耐候螺栓及连接

Fig. 17 High strength weathering bolts and connections

候螺栓和接头。

鉴于中国对耐候高强螺栓的研制和工程使用仍处于探索阶段,目前尚无完善的技术规范体系,因此,建议在设计选用耐候高强螺栓时,所用螺栓、螺母和垫圈的化学成分应符合 ASTM A235/A490 Type3 或相关标准的耐候性要求。对于免涂装耐候钢桥,可以使用经发黑处理的耐候高强螺栓;在气候温和干燥的地区可不采用表面处理,但在气候条件严酷地区建议采用表面处理。

4.3 锈层稳定化处理

为了促进耐候钢桥在裸露使用时稳定锈层的快速形成,防止早期锈液流挂问题,目前常采用表面稳定化处理技术,即在耐候钢使用前对其表面进行处理,形成一种透气透水的膜。随后的腐蚀过程在膜下进行,钢表面则能产生稳定致密锈层从而自我保护。目前国内外常采用的表面稳定化处理技术主要有 5 种^[57]。

4.3.1 耐候性涂膜处理

对钢基体进行底膜处理,使钢表面形成以复合磷酸盐为主要成分的无机复合盐膜,随后在盐膜上涂丙烯类涂料,形成透气透水性较好的多孔栅格涂层。稳定化锈层产生后,此有机涂层会逐渐消失,表面外观无明显变化。

4.3.2 氧化物涂层处理

在染色剂中添加氧化物颜料和添加剂以促进其锈化作用,将其涂在耐候钢表面形成有机膜。有机膜在早期对耐候钢表面具有保护作用,且涂层中的成分与耐候钢表面发生作用,能促进稳定锈层的形成,从而防止腐蚀介质对钢基体的侵蚀。

4.3.3 涂装氧化铁-磷酸盐系漆

在钢表面上涂含有磷酸(磷酸盐)和氧化铁等组成的底漆和面漆,组合形成的氧化铁-磷酸盐漆,使其产生的锈层趋于稳定化。磷酸使 Fe^{2+} 沉淀后通过涂膜被氧化成 Fe^{3+} ,从而促进了 $\alpha\text{-FeOOH}$ 的形成。

4.3.4 新型表面稳定化处理技术

这种方法是由日本学者研究出的一种新型表面稳定化处理技术,主要技术为在聚乙烯缩丁醛树脂中加少量的硫酸铬制成表面复合处理剂,并涂在钢表面上使其形成稳定化锈层。

4.3.5 环保型无铬锈层促生处理技术

这种技术由日本川崎制铁公司研发,其核心技术是运用微细铁氧化物腐蚀形成的锈核来促进保护性锈层的产生,抑制锈层中氯离子的穿透作用。

在环境恶劣地区也可采用上述锈层稳定化方法

以保证耐候钢不发生严重的腐蚀。选用具体方法时应根据材料、工艺、外观要求及经济性等多方面综合考虑选择。

4.4 安装要点

4.4.1 存放及运输

耐候钢材应尽量避免在运输车、敞篷车或卡车上长时间存放。另外,应避免在储存过程中耐候钢构件积水,以及构件间的接触及构件与地面之间的接触。杆件堆放高度应保证其不受从地面溅起的雨水影响^[7]。实际工程中应尽可能减少工厂制作和安装过程中耐候钢的暴露时间^[9]。

4.4.2 喷砂与清洁

耐候钢在出厂前应进行表面喷砂处理^[7]。美国目前喷砂处理时有 3 种等级:喷砂清洗至金属本色(SSPC-SP5)、喷砂清洗至近金属本色(SSPC-SP10)、商业喷砂清洗(SSPC-SP6)。在实际工程中,应当针对构件表面要求选用喷砂等级,例如在桥梁结构中梁内部可采用商业喷砂法处理^[9]。耐候钢在安装时会产生一些识别标记、可溶性沉积物、不溶性沉积物等,为了避免其对锈层稳定性的影响,在安装过程中,表面标识应采用易于清除的材料,且在安装后应及时清除。此外,为避免形成的锈层不均匀,应防止混凝土、砂浆、沥青、油漆、油脂等污染物附着在钢表面上,所有暴露的表面应在打磨后再次进行喷砂清理^[52]。

4.4.3 墩台混凝土表面防护

在施工过程中,当桥面板未安装完成时,桥墩桥台会受到上部结构滴水的影响,所以混凝土表面应采用重型聚乙烯薄膜覆盖包裹保护,桥面板安装后即可拆除。此外,在施工完成后所有混凝土表面可用液体硅酮密封剂或其他溶剂进行涂装^[51]。

5 耐候钢桥管养技术

5.1 耐候钢桥的日常管养

与涂装钢桥相近,耐候钢桥在使用过程中同样需要检查、监测和定期管养,以保证其使用功能和安全性。耐候钢桥日常管养一般通过定期检查、测定板厚的方式实施。耐候钢桥在投入使用前应测定其所处环境条件和特定部位的钢板板厚,之后每 6 年测定一次板厚,在环境严酷地区每 2 年检测一次。检查还应包括评价锈层致密或疏松情况,且在锈层形成初期允许表面存在浮锈。运营 18 年后评价钢板板厚的总损失量,如果总损失量超过了设计腐蚀余量,则应当考虑采用涂装措施。

日常养护过程中,如果桥上伸缩缝或排水管发生漏水现象,应找到泄漏源进行维修或更换,且应当保证表面无植被,排水系统也应定期清理。桥梁上附着的灰尘、杂物,以及冬季使用的除冰盐,都会影响耐候钢表面稳定锈层的形成,须及时清洗干净。低压水洗法可以在不影响耐候钢稳定锈层的情况下对污染物进行清洗^[51],在实际工程中得到了广泛应用。低压水洗可除去易夹带水分的污垢、松散的锈屑和表面氯化物,还能有效清除钢表面上黏附的泥土和氯化物,防止其阻碍稳定锈层的形成。尽管低压水洗法不能非常有效地去除锈层中嵌入的氯化物,但研究发现周期性水洗可以降低耐候钢板中氯离子的浓度,进而降低耐候钢的腐蚀速率,适宜用作对耐候钢的日常清洗。在水洗时,应先对水洗有效性进行初步研究,再根据耐候钢结构等级制定水洗方案。对于具体耐候钢桥,应权衡其所处的环境条件、桥龄、结构尺寸、经济性等因素决定水洗区域和间隔。当锈层评价等级较低,且存在盐溅、隧道效应时,应缩短水洗周期;对于锈层性能良好的构件,可以延长水洗周期。

5.2 耐候钢桥锈层检测与评价

5.2.1 锈层检测方法

耐候钢形成的锈层是否致密、稳定,关系到桥梁长期使用的耐久性能。在耐候钢桥管养阶段,需要进行耐候钢桥锈层均匀程度与锈层状态的检测识别,从而确定耐候钢桥的维护策略,因此,如何判断耐候钢锈层的均匀性,以及识别锈层早期损伤的是问题的关键。目前耐候钢桥锈层检测的方法主要有目测检查法、胶带黏附试验法、氯化物测试、超声波测试等^[58]。

目测检查法可以判定锈层的分级,其可操作性强。耐候钢的目测检查重点在于观察其外观特征,包括对耐候钢锈层的颜色、均匀性、纹理、黏附性,以及表面锈层尺寸和分布的观察。目测法要求检测人员熟悉各种环境和气候条件下耐候钢表面的外观特征。对锈层表面仅进行目测检查无法准确判断锈层的黏附情况,需采用锤击或钢丝刷清洗等方法来确定该锈层是否已剥离,还是以颗粒、薄片或层片片的形式黏附在钢材表面。

胶带黏附试验法是一种简便可靠的锈层评价方法,并且这种方法可以对目测法得出的结果进行检验。将胶带样品储存在样品袋中,可以在不影响锈层性能的情况下对其进行检查和测量,检测结果不仅便于保存,还能与未来的测试结果进行对比,评价结构

内不同表面锈层的性能,也可以将锈层的尺寸和密度等与环境参数对应起来。此外,通过比较不同胶带黏附试验样品的检测结果还可以辨别锈层是否稳定。

氯化物测试是通过测试锈层表面可溶性氯盐含量,判断锈层稳定性的测试方法。环境中存在氯离子会加速锈蚀的发生,增加锈层粒子的尺寸,且不利于形成耐腐蚀性锈层。研究表明,锈层中的氯化物与表面上是否存在松散锈层具有相关性。在实际应用时,可通过氯离子试剂盒对耐候钢板中相对氯化物含量进行测试。

超声波测试法通过测试锈层厚度,并结合结构运营年限近似估算腐蚀速率,以判断锈层稳定性。但即使是经过培训的设备操作人员,也会由于测量过程中的不确定因素影响测试结果,因此,通过厚度测量直接监测钢桥的腐蚀速度在短期内还无法实现。

5.2.2 锈层评价方法

耐候钢桥的锈层评价包括结构整体与处于不同暴露条件下的构件锈层评价,评价的部位包括梁的水平面与垂直面,评价指标包括锈层外观技术状态指标与耐腐蚀性指标等。

JISF 和日本桥梁钢结构协会通过对锈层外观分类,评定不同级别的锈层所处的技术阶段及耐腐蚀性的优劣情况,如表 9 所示^[59]。

表 9 日本耐候钢桥锈层外观评定分级

Tab. 9 Appearance classification of patina for weathering steel bridges in Japan

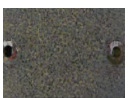
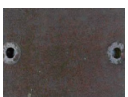
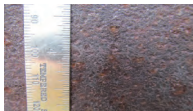
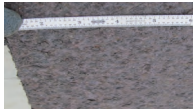
外观分级指标	试样外观	锈层外观形态描述	锈层在桥梁中的形态
1		大面积起皮,呈鳞片状易脱落;厚度大于 800 μm	
2		锈层尺寸为 5~25 mm 部分膨胀且呈薄片状;厚度大于 400 μm	
3		锈层尺寸为 1~5 mm; 未形成良好锈层,锈层不均匀;厚度小于 400 μm	
4		锈层形成较好,致密均匀,颜色呈深棕色;厚度小于 400 μm	
5		锈层形成良好,颜色呈亮棕色,锈层较薄;厚度小于 200 μm	

表 9 给出的 5 个等级指标中,1~4 级锈层所对应的锈层形态是基于暴露 3 年以上的数据,而 5 级锈层对应的锈层仅出现在锈蚀初期。研究发现,暴露 3 年内的锈层外观形态与腐蚀速率的关系无法用这种外观等级分类来表示,暴露 5 年后的锈层形态与腐蚀速率对应关系较为明显。1 级锈层对应实桥构件的腐蚀速率高于 $0.01\text{ mm}\cdot\text{年}^{-1}$,一般为 $0.02\sim 0.3\text{ mm}\cdot\text{年}^{-1}$ 。2、3、5 级锈层所对应的实桥腐蚀速率逐年降低,并在暴露 5 年后趋于稳定。2、3 级锈层

的腐蚀速率在暴露 5~9 年后约为 $0.01\text{ mm}\cdot\text{年}^{-1}$,4、5 级锈层的腐蚀速率一直低于 $0.01\text{ mm}\cdot\text{年}^{-1}$ 。对于 1 级锈层,应当进行修补或涂装;2 级锈层通常是因使用防冻剂导致的部分锈蚀,可通过定期清水冲洗表面降低可溶性盐分;对于 3~5 级锈层,如果环境条件随时间变化不大,可省去后续的锈层外观评价。
美国 Iowa 州交通厅研究报告中依据耐候钢桥锈层的颜色、外貌形态及锈蚀碎片尺寸等信息,提出了锈层量化分级标准,如表 10 所示^[58]。

表 10 Iowa 州交通厅建议的锈层量化分级标准

锈层等级	锈层技术状态说明	锈层形貌
8 (非常好)	锈层颜色均匀,通常为深棕色并带浅红褐金属色和紫褐色的斑点,锈层产物较小,通常难以肉眼看到;锈层可能有凹陷或者表面粗糙但很均匀,厚度较薄、致密且黏附性强;胶带测试法中很难发现较小($<1\text{ mm}$)的剥落碎片。	
7 (好)	锈层颜色均匀,通常为深棕色并带浅红褐金属色和紫褐色的斑点,能观测到个别锈层产物;锈层可能有凹陷或者表面粗糙但很均匀,厚度较薄、致密且黏附性较强;应用胶带测试法可以除去较小($<1\text{ mm}$)的剥落碎片。	
6 (满意)	锈层颜色呈深棕色,但会有轻微的变色;胶带测试中表面有 $1\sim 5\text{ mm}$ 的碎片松动,很容易被移除;底层黏附性强,且相对致密、较薄,保护性好;质地呈颗粒状且较为疏松的锈层保护性较差,容易聚集水和盐分;锈层表面可能会出现白色膏状层,但不影响锈层的性能。	
5 (良好)	锈层颜色呈深棕色,带有黑色和轻微变色,表面有盐分或者锈层着色产生的斑点;表面有碎片,中等尺寸($5\sim 25\text{ mm}$),且疏松无保护性,胶带测试中容易被除去;剥落层下的锈层更薄、更易渗透,且有部分点蚀发生;不具有保护性且污染物易渗透,表面呈膏状的构件有可能会产生剥落现象。	
4 (较差)	锈层颜色呈棕黑色但不均匀,表面遍布斑点和着色现象,无保护性;剥落碎片尺寸较大($>25\text{ mm}$),可能在某些区域开始出现分层现象;锈层的厚度增大,可穿透性增强,可能还伴随着点蚀和截面损失等;下层锈层仍存在部分具有黏附性的区域,膏状区域呈多层薄片状或表面碎片较大。	
3 (腐蚀严重)	锈层表面有黑色的斑点,出现分层现象且下层为凹陷较深的半黏附性层;块状和片状锈层可以用手除去;点蚀和截面损失率有大幅增加,最高可达到 50% ,锈层对钢基体完全失去保护性作用。	

报告中根据以上锈层等级量化分类评判结果,对耐候钢桥管养提出了如下建议:对于出现 7、8 级锈层的耐候钢桥,应继续进行周期性检查;出现 6 级锈层时,除了进行周期性检查外,还应考虑定期水洗;出现 5 级锈层时,要对未形成稳定锈层的部位找出发生有害腐蚀的原因,并定期水洗;出现 4 级锈层时,除了须找出有害腐蚀的原因和频繁定期水洗外,还要进行锈层检测,如果水洗作用不明显,需考虑涂装;出现 3 级锈层时,水洗对产生保护性锈层基本无效,应进行涂装。
上述评价方法操作简单,但评价过程主观性强,评价结果存在不确定性。近年来,已有日本学者提出采用锈层化学成分为技术指标,评价耐候钢桥锈层

的稳定性。Shuichi 等对大量耐候钢桥的锈层技术状况进行了观测,测试了不同外观对应的锈层成分和腐蚀速率,提出了保护性指数(Protective Ability Index, PAI),规定 PAI 值 α/γ^* 为锈层中 $\alpha\text{-FeOOH}$ 的质量分数 α 与 $\gamma\text{-FeOOH}$ 、 $\beta\text{-FeOOH}$ 和 Fe_3O_4 的质量分数 γ 、 β 、 s 总和 γ^* 的比值,认为当 PAI 值大于 1 时,耐候钢桥的腐蚀速率不超过 $0.01\text{ mm}\cdot\text{年}^{-1}$;当 PAI 值大于 1 且 $\beta+s/\gamma^* > 0.5$ 时,耐候钢桥的腐蚀速率不超过 $0.01\text{ mm}\cdot\text{年}^{-1}$;当 PAI 大于 1 且 $\beta+s/\gamma^* < 0.5$ 时,耐候钢桥的腐蚀速率超过 $0.01\text{ mm}\cdot\text{年}^{-1}$ ^[59]。耐候钢桥案例经验结果表明,采用 PAI 值识别的结果较为精确可靠,因此,推荐采用 PAI 值对形成的锈层是否具有保护性进行判别。

6 中国长寿命高性能耐候钢桥工程实践

6.1 沈阳后丁香大桥

2013年建成的沈阳绕城高速公路后丁香一、三、四号连续钢箱梁桥,跨径布置分别为 $(38+61+38)$ m、 $(38+61+61+48)$ m和 $(48+61+38)$ m,这3座桥是中国首批采用Q345qENH耐候钢建造的公路钢箱梁桥,耐候钢用量约5 500 t,采用顶推施工法安装。为了避免含除雪剂的雪水飞溅影响桥梁的防腐效果,设计采用钢箱梁外侧表面涂装,内表面免涂装使用,并对内表面采用表面加速腐蚀稳定措施(图18)。长安大学王春生教授领衔的科研团队负责了该桥的耐候钢焊接质量检验评定和施工期结构安全控制,有力支



(a) 钢箱梁外侧涂装



(b) 钢箱梁内部不涂装

图18 沈阳后丁香大桥

Fig. 18 Houdingxiang Bridge in Shenyang



图19 眉县常兴二号桥

Fig. 19 Changxiong No. 2 Bridge in Meixian County

该桥主梁采用6片焊接方钢管翼缘组合梁(图21),方钢管内填C50微膨胀混凝土;主梁中心间距2.8 m,梁高2.75 m,采用压型钢板新型组合桥面板;管翼缘主梁设计首次引入混合设计理念,主梁下翼板采用Q500qDNH高强耐候钢,其余部位采用Q345qDNH耐候钢制造,为中国首座全桥免涂装使用的公路高强耐候钢桥,开通营运至今结构状态良好。该桥是新材料、新结构有机结合的典范,

撑了首批公路耐候钢箱梁桥的高品质建造。辽宁省高等级公路建设局、中铁宝桥集团有限公司等单位依托后丁香耐候钢箱梁等辽宁耐候钢桥工程建设经验,编制了《公路桥梁耐候钢焊接施工技术指南》^[54],为中国推广应用耐候钢桥奠定了制造技术基础。

6.2 陕西眉县常兴二号桥

2014年建成投入运营的陕西眉县常兴二号桥,是中国首座免涂装高性能耐候钢管翼缘组合梁桥(图19)^[60],由中交第一公路勘察设计研究院有限公司与长安大学联合设计,系统应用了长安大学王春生科研团队的高性能耐候钢桥和创新型管翼缘组合梁桥研究成果。该桥跨越陕西省眉县常兴镇魏家堡水利工程的引水渠,跨径为54 m(图20)。



图20 钢梁整体吊装

Fig. 20 Integral hoisting of steel girder

充分发挥了高强高性能耐候钢与新型管翼缘组合梁的技术和经济优势,提升了桥梁的服役性能,延长了桥梁的安全使用寿命,体现了长寿命高性能桥梁设计与建造新理念。

6.3 黄延高速磨坊跨线桥

2015年建成通车的陕西黄延高速磨坊跨线桥,为 2×28 m的免涂装组合钢板梁桥,是中国首座免涂装高强高性能耐候钢连续组合板梁桥(图22),由

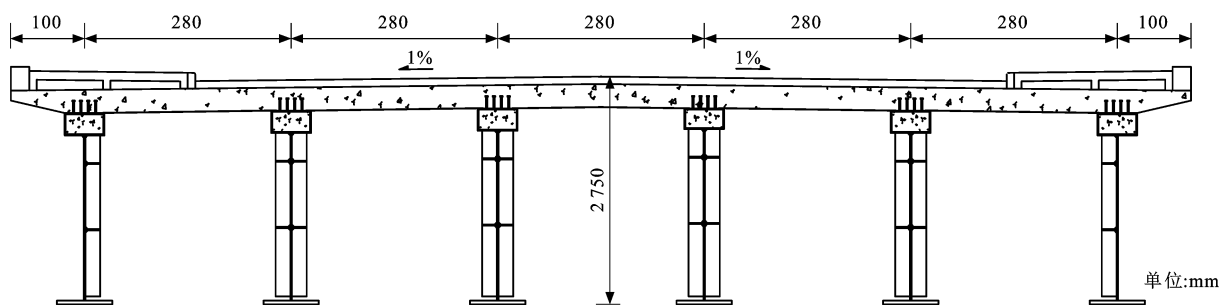


Fig. 21 Cross section of main girder



图 22 陕西黄延高速磨坊跨线桥

Fig. 22 Huangyan Freeway Mofang Viaduct in Shaanxi

长安大学王春生科研团队与陕西省交通规划设计研究院联合设计。该桥主梁采用3片焊接工字梁,钢梁高0.98 m,上下翼板均宽0.5 m,上翼板厚26 mm,下翼板厚36 mm,腹板厚14 mm,现浇C40混凝土桥面板厚0.25 m;主梁采用混合设计,下翼板采用Q500qENH 高强高性能耐候钢,其余板件均采用Q345qENH 高性能耐候钢,耐大气腐蚀指数 $I \geq 6.0$;钢梁整体免涂装使用,仅在邻近桥台伸缩装置的1.5倍梁高范围内对主梁、端横梁进行了涂装。耐候钢板梁工厂制造采用焊接连接,焊接材料采用与母材相匹配的耐候焊丝、焊剂。钢板梁工地接头采用非耐候高强摩擦型螺栓连接,螺栓接头及摩擦面均进行了局部涂装。该桥投入使用以来,技术状况良好,为中国内陆地区高速公路免涂装长寿命高性能耐候钢桥的建设储备了设计与建造技术经验。

7 推广长寿命高性能耐候钢桥尚需解决的问题

耐候钢桥在国内外的应用虽已超过了半个多世纪,但由于建设运营管理部门和工程技术人员对耐

候钢桥认识不足,以及设计、施工和运营阶段一些技术环节的缺失,导致一些耐候钢桥出现严重腐蚀病害,甚至发生垮塌事故。分析造成耐候钢桥病害与失效的技术原因,主要是氯离子侵蚀造成耐候锈层破坏,以及构造细节设计不当或未及时维护导致稳定锈层无法形成,诱发持续锈蚀致使结构劣化失效。为避免工程事故,推进耐候钢桥在中国的健康、持续应用,应加强长寿命高性能耐候钢桥的基础性研究、应用技术研发、规范体系建设和工程技术人员的教育、培训。

7.1 耐候钢桥工程病害与思考

在国内外耐候钢桥建设和使用的发展历程中,由于设计理论的匮乏、建设和维护经验不足和技术标准的缺失,耐候钢桥使用中存在一些突出病害。如由于设计构造措施不当,导致局部积水、漏水、排水不畅等,诱发局部腐蚀病害(图 23、24)^[61]。1991 年采用耐候钢建造的京广铁路武汉巡司河桥,将中间孔不涂装,作为裸露试验结构,其他两孔进行了防腐涂装。因武汉雨水较多且桥上排水措施考虑不周,同时钢梁底板受河流蒸发水气的直接侵蚀,出现了锈层凸起脱落的现象,最终对中跨钢梁也进行了涂装处理。



图 23 排水措施不合理导致钢梁与混凝土桥台结合处局部锈蚀

Fig. 23 Local corrosion at connection between steel girder and concrete abutment caused by unreasonable drainage facilities



图 24 未形成稳定锈层导致锈液流淌到墩台上

Fig. 24 Patina fluid in unstable patina flowing onto pier and abutment

这个不成功的工程案例制约了后续较长一段时间耐候钢桥在中国的推广应用。

冬季道路除雪、除冰盐溅落到耐候钢表面,破坏了稳定锈层,导致持续腐蚀病害出现,危及结构使用功能与安全。如戴胜勇在《美国耐候钢桥考察交流》报告中提到美国西弗吉尼亚州的一座采用耐候钢建造的跨线桥,由于公路管理部门冬季撒盐除雪,桥下通行的车辆将路面盐水飞溅到桥上,导致耐候钢梁产生严重腐蚀(图 25、26)。2001 年美国建成的新造纸厂免涂装耐候公路钢桥,投入使用后由于受到除冰盐、雾气的作用,钢结构表面出现了大面积严重腐蚀。2012 年由 AECOM 公司进行了桥梁检测、评估和维修,被迫将钢材表面全部进行了涂装,以保证桥梁继续安全使用。

暴露在近海高湿热环境中的耐候钢桥,由于空气中含有大量侵蚀性氯离子,不仅会导致耐候钢稳定锈层无法形成,而且会使锈蚀快速发展,最终可能会导致桥梁垮塌。日本冲绳县北部的无涂装耐候钢桥——边野喜桥(图 27)^[62],所处高湿热海洋环境,大气氯盐浓度很高,根据琉球大学学者用干燥纱布法所测定的主梁构件上漂来盐分含量

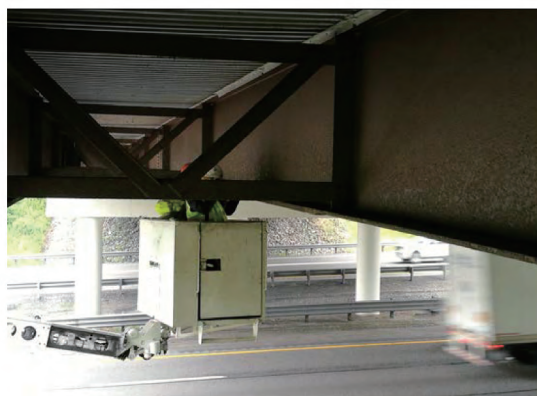


图 25 耐候钢跨线桥

Fig. 25 Weathering steel bridge crossing highway

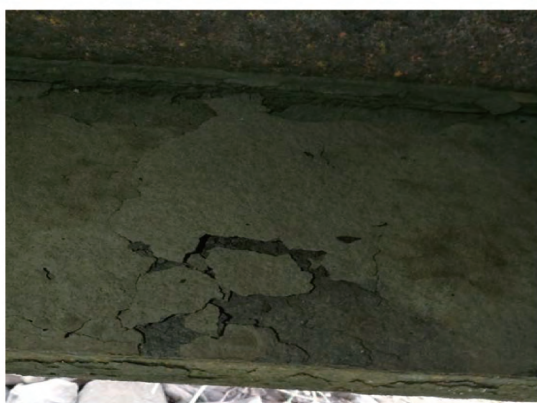


图 26 耐候钢表面锈层松散、片状脱落

Fig. 26 Loosening and flaking of patina on weathering steel surface



图 27 腐蚀劣化的日本耐候钢桥

Fig. 27 Corrosion and deterioration of weathering steel bridge in Japan

为 $250 \sim 460 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 远高于可使用无涂装耐候钢可用地区的限定值 ($5 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$); 由于风向及护岸形状原因, 护岸侧近桥台的主梁腐蚀最为严重(图 28), 2009 年 7 月最终导致结构断裂垮塌。

上述耐候钢桥工程病害和事故案例表明, 即便进入科技日新月异的 21 世纪, 在美、日等耐候钢桥技术较发达的国家, 仍出现了教训惨痛的耐候钢桥



图 28 耐候钢主梁内侧严重腐蚀

Fig. 28 Serious corrosion inside weathering steel main girder

工程事故,说明科技人员对耐候钢桥的腐蚀机理、锈层稳定机制、腐蚀疲劳行为及其设计理论与方法等基础性研究还不够深入,对耐候钢桥的设计构造措施、锈层检测与评价技术、养护管理技术和技术标准的研究也不够完善。为科学地设计、建造与维护耐候钢桥,确保耐候钢桥服役安全,提升耐候钢桥建设品质,服务世界桥梁强国建设,应加大对长寿命高性能耐候钢桥基础性和应用技术研发的投入,推进交通强国国家战略的实施。

7.2 长寿命高性能耐候钢桥技术研发要点

本文在总结分析国内外耐候钢桥研究新进展和工程实践经验基础上,面向建设交通强国的重大技术需求,针对长寿命高性能耐候钢桥发展所面临的共性科学问题和关键技术瓶颈,提炼了需要进一步深入研究解决的基础性科学问题和应用技术难题。

(1)针对中国北方严寒地区、南方高湿热地区的气候特点,以及西北风沙区、沿海高氯离子侵蚀区、污染物扩散区等区域环境特点,利用大数据技术,编制中国气候、环境区划图,研发与之匹配的桥梁用高性能耐候钢种和性能技术指标体系。

(2)结合桥梁使用环境、气候和荷载特点,开展高性能耐候桥梁钢的锈层形成物理化学机制与稳定性技术研究,提出稳定锈层设计与运维技术指标体系;推进带锈层构造细节的面内应力疲劳、面外变形疲劳试验及裂纹扩展数值断裂力学模拟,建立更为完善的耐腐蚀、抗疲劳设计准则,为长寿命高性能耐候钢桥建设提供技术支撑。

(3)鉴于耐候高强螺栓的研制和工程应用在中国仍处于探索阶段,目前尚未建立完善的设计技术标准,应开展耐候高强螺栓长期性能与抗疲劳断裂性能研究。

(4)在建立和完善耐候钢桥锈层稳定性、腐蚀状态、疲劳损伤的传统检测评价技术体系基础上,积极探索应用视觉传感器、计算机视觉、大数据云计算等人工智能技术,构建长寿命高性能耐候钢桥监测、评估和运维新技术平台,服务于智慧交通建设。

(5)积极借鉴国外耐候钢桥工程建设经验与技术标准,及时总结中国耐候钢桥技术研发与工程实践成果,建立具有自主知识产权的长寿命高性能耐候钢桥设计、建造和运维标准规范体系。

8 结论与建议

(1)目前中国耐候钢化学成分及设计技术指标多参考美国、日本等国家标准研发、制定,由于环境气候特点、设计荷载和技术条件的差异,现有指标体系不能较好适应中国长寿命高性能耐候钢桥建造的技术需求。应针对中国严寒地区、高湿热地区的气候特点,以及风沙区、高氯离子侵蚀区、污染物扩散区等区域环境特点,利用大数据技术,编制中国耐候钢选材区划图谱,研发与之匹配的桥梁用高性能耐候钢种和性能技术指标体系。

(2)耐候锈层组成、耐腐蚀机理及影响因素研究结果表明,耐候锈层由外层的 γ -FeOOH、 α -FeOOH 以及内层的非晶态 FeOOH 化合物与 Fe_3O_4 构成,耐候锈层可否形成、能否保持稳定防锈主要受氯离子、积水、积尘等因素的影响。未来应结合中国的耐候钢桥使用环境、气候和荷载特点,开展高性能耐候桥梁钢的锈层形成物理化学机制与稳定性技术研究,完善稳定耐候锈层构造设计准则与建造、运维技术体系。

(3)研究与工程实践结果表明,为实现耐候钢桥的长寿命、高性能的设计建造目标,需要从材料、构造、构件和结构体系等层面,深入探究腐蚀与疲劳对耐候钢桥长期性能的影响规律。需推进带锈层构造细节的面内应力疲劳、面外变形疲劳试验及数值断裂力学模拟,开展耐候高强螺栓长期耐损性能研究,建立更为完善的耐腐蚀、抗疲劳设计准则,为长寿命高性能耐候钢桥建设提供技术支撑。

(4)在分析总结现有耐候钢桥锈层检测与评价技术、养管技术基础上,初步建立和完善耐候钢桥锈层稳定性、腐蚀和疲劳损伤的检测评价技术体系;积极探索应用视觉传感器、计算机视觉、大数据云计算等人工智能技术,构建长寿命高性能耐候钢桥监测、评估和运维智慧技术平台。

(5)发生在 21 世纪的美、日耐候钢桥工程事故,说明对耐候钢桥的基础性和应用研究还不够深入,相关设计、建造、养管技术标准还不够完善。为科学地建造与安全使用耐候钢桥,服务世界桥梁强国建设,应加大研发投入,结合首批长寿命高性能耐候钢桥建设技术创新成果,建立具有中国自主知识产权

的长寿命高性能耐候钢桥设计、建造和运维标准规范体系,培养高素质的工程技术人才,推进交通强国国家战略的实施。

参考文献:

References:

- [1] 王春生,段 兰,朱经纬,等. 创新型高性能钢桥与管翼缘组合梁桥研究[C]//陈艾荣,阮 欣. 第一届全国桥梁维护与安全学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2013:157-176.
WANG Chun-sheng, DUAN Lan, ZHU Jing-wei, et al. Research on innovative high performance steel bridge and tubular flange composite girder bridge[C]//CHEN Ai-rong, RUAN Xin. The First National Conference on Bridge Maintenance and Safety. Beijing: China Communications Press, 2013: 157-176. (in Chinese)
- [2] 刘玉擎,陈艾荣. 耐候钢桥的发展及其设计要点[J]. 桥梁建设,2003(5):39-41,45.
LIU Yu-qing, CHEN Ai-rong. Development and design essentials of weathering steel bridges[J]. Bridge Construction, 2003(5): 39-41, 45. (in Chinese)
- [3] ALBRECHT P, CHENG J G. Fatigue tests of 8-yr weathered A588 steel weldment[J]. Journal of Structural Engineering, 1983, 109(9): 2048-2065.
- [4] ALBRECHT P, SIDANI M. Fatigue of eight-year weathered A588 steel stiffeners in salt water[J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(7): 1756-1767.
- [5] ALBRECHT P, LENWARI A. Fatigue strength of weathered A588 steel beams[J]. Journal of Bridge Engineering, 2009, 14(6): 436-443.
- [6] ALBRECHT P, COBURN S K, WATTAR F M, et al. Guidelines for the use of weathering steel in bridges (NCHRP 314)[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 1989.
- [7] Federal Highway Administration. Uncoated weathering steel in structures[R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 1989.
- [8] 王春生,段 兰,王继明,等. 基于混合设计的高性能钢梁抗弯性能及延性试验[J]. 中国公路学报,2012,25(2):81-89.
WANG Chun-sheng, DUAN Lan, WANG Ji-ming, et al. Bending behavior and ductility test of high performance steel beam based on hybrid design[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(2): 81-89. (in Chinese)
- [9] 王春生,段 兰,郑 丽,等. 桥梁高性能钢 HPS485W 疲劳裂纹扩展速率试验研究[J]. 工程力学,2013,30(6):212-216.
WANG Chun-sheng, DUAN Lan, ZHENG Li, et al. Fatigue crack growth rate tests of high performance steel HPS485W for bridges[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 212-216. (in Chinese)
- [10] 王春生,段 兰,胡景雨,等. 桥梁高性能钢 HPS485W 断裂韧性试验研究[J]. 工程力学,2013,30(8):54-59.
WANG Chun-sheng, DUAN Lan, HU Jing-yu, et al. Fracture and toughness tests study of high performance steel HPS485W for bridge engineering[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(8): 54-59. (in Chinese)
- [11] MISAWA T, ASAMI K, HASHIMOTO K, et al. The mechanism of atmospheric rusting and the protective amorphous rust on low alloy steel[J]. Corrosion Science, 1974, 5(20): 279-289.
- [12] 刘国超,董俊华,韩恩厚,等. 耐候钢锈层研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术,2006,18(4):268-272.
LIU Guo-chao, DONG Jun-hua, HAN En-hou, et al. Progress in research on rust layer of weathering steel[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2006, 18(4): 268-272. (in Chinese)
- [13] MORCILLO M, CHICO B, DÍAZ I, et al. Atmospheric corrosion data of weathering steels. A review[J]. Corrosion Science, 2013, 77: 6-24.
- [14] YANN H. Atmospheric corrosion study of weathering steel using sensor technology[D]. Boca Raton: Florida Atlantic University, 2007.
- [15] ZHANG Q C, WU J S, WANG J J, et al. Corrosion behavior of weathering steel in marine atmosphere[J]. Materials Chemistry and Physics, 2002, 77(2): 603-608.
- [16] CHEN Ai-hua, XU Jing-qiu, LI Ran, et al. Corrosion resistance of high performance weathering steel for bridge building applications[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2012, 19(6): 59-63.
- [17] OKADA H, HOSOI Y, YUKAWA K I, et al. Structure of the rust formed on low alloy steels in atmospheric corrosion[J]. Tetsu-to-Hagane, 2010, 55(5): 355-365.
- [18] MISAWA T, KYUNO T, SUËTAKA W, et al. The mechanism of atmospheric rusting and the effect of Cu and P on the rust formation of low alloy steels[J]. Corrosion Science, 1971, 11(1): 35-48.
- [19] TOWNSEND H E, SIMPSON T C, JOHONSON G L. Structure of rust on weathering steel in rural and industrial environments[J]. Corrosion Science, 1994, 50(7): 546-554.
- [20] YAMASHITA M, MIYUKI H, MATSUDA Y, et al. The long term growth of the protective rust layer formed on weathering steel by atmospheric corrosion during a quarter of a century[J]. Corrosion Science, 1994, 36(2): 283-299.
- [21] KATAYAMA H, YAMAMOTO M, KODAMA T. Degradation behavior of protective rust layer in chloride solution[J]. Corrosion Engineering, 2000, 49(1): 41-44.
- [22] CHOI Y S, KIM J G. Aqueous corrosion behavior of weathering steel and carbon steel in acid-chloride environments[J]. Corrosion, 2012, 56(12): 1202-1210.
- [23] DIAZ I, CANO H, CHICO B, et al. Some clarifications regarding literature on atmospheric corrosion of weathering steels[J]. International Journal of Corrosion, 2012, 2012: 1-9.
- [24] 张全成,吴建生,陈家光,等. 暴露 1 年的耐大气腐蚀用钢表面锈层分析[J]. 中国腐蚀与防护学报,2001,21(5):297-300.
ZHANG Quan-cheng, WU Jian-sheng, CHEN Jia-guang, et al. Analysis on the corrosion rust of weathering steel exposed in atmosphere[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and

- Protection, 2001, 21(5): 297-300. (in Chinese)
- [25] SUZUKI I, HISAMATSU Y, MASUKO N. Nature of atmospheric rust on iron[J]. Journal of Electrochemical Society, 1980, 127(10): 2210.
- [26] STRATMANN M, BOHNENKAMP K, RAMCHANDRAN T. The influence of copper upon the atmospheric corrosion of iron[J]. Corrosion Science, 1987, 27(9): 905-926.
- [27] ASAMI K, KIKUCHI M. In-depth distribution of rusts on a plain carbon steel and weathering steels exposed to coastal-industrial atmosphere for 17 years[J]. Corrosion Science, 2003, 45(11): 2671-2688.
- [28] NISHIMURA T, KATAYAMA H, NODA K, et al. Effect of Co and Ni on the corrosion behavior of low alloy steels in wet/dry environments[J]. Corrosion Science, 2000, 42(9): 1611-1621.
- [29] NISHIMURA T, KODAMA T. Clarification of chemical state for alloying elements in iron rust using a binary-phase potential-pH diagram and physical analyses[J]. Corrosion Science, 2003, 45(5): 1073-1084.
- [30] NISHIMURA T. Rust formation and corrosion performance of Si- and Al-bearing ultrafine grained weathering steel[J]. Corrosion Science, 2008, 50(5): 1306-1312.
- [31] KIM K Y, HWANG Y H, YOO J Y. Effect of silicon content on the corrosion properties of calcium-modified weathering steel in a chloride environment[J]. Corrosion, 2002, 58(7): 570-583.
- [32] ASAMI K, KIKUCHI M. Characterization of rust layers on weathering steels air-exposed for a long period[J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 2002, 66(6): 649-656.
- [33] 张全成, 马峰, 郑文龙. 耐候钢表面保护性锈层与基体结合强度的研究[J]. 机械工程材料, 2004, 28(6): 30-32.
ZHANG Quan-cheng, MA Feng, ZHENG Wen-long. Bonding strength between the substrate and protective rust layer of weathering-steel[J]. Mechanical Engineering Materials, 2004, 28(6): 30-32. (in Chinese)
- [34] 张全成, 吴建生. 耐候钢表面保护性锈层的力学性能[J]. 钢铁研究学报, 2006, 18(3): 42-45.
ZHANG Quan-cheng, WU Jian-sheng. Mechanical properties of protective rust layer formed on surface of weathering steel panels[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2006, 18(3): 42-45. (in Chinese)
- [35] 姜传海. 晶须增强铝复合材料残余应力及钢材锈层残余应力[D]. 上海: 上海交通大学, 2001.
JIANG Chuan-hai. Whisker reinforced aluminum composite residual stress and steel rust residual stress[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2001. (in Chinese)
- [36] 王树涛, 高克玮, 杨善武, 等. 低碳贝氏体钢在青岛曝晒一年的锈层力学性能和抗热震性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(1): 9-13.
WANG Shu-tao, GAO Ke-wei, YANG Shan-wu, et al. Mechanical properties and thermal shock resistance of rust layer formed on low carbon bainitic steel after being exposed in Qingdao atmosphere for one year[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22(1): 9-13. (in Chinese)
- [37] 王雷, 董俊华, 柯伟. 加载与循环干湿条件下 MnCu 耐候钢的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(4): 257-261.
WANG Lei, DONG Jun-hua, KE Wei. Corrosion behavior of MnCu cost-effective weathering steel under cyclic load in a wet/dry cyclic corrosion environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(4): 257-261. (in Chinese)
- [38] GAO K, LI D, PANG X, et al. Corrosion behaviour of low-carbon bainitic steel under a constant elastic load[J]. Corrosion Science, 2010, 52(10): 3428-3434.
- [39] KAYSER C R, SWANSON J A, LINZELL D G. Characterization of material properties of HPS-485W (70W) TMCP for bridge girder applications[J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(1): 99-108.
- [40] CHEN H T, GRONDIN G Y, DRIVER R G. Fatigue properties of high performance steel[C]// WIT Press. First International Conference on Fatigue Damage of Materials Experiment and Analysis, Fatigue Damage of Materials. Toronto: WIT Press, 2003: 181-191.
- [41] CHEN H T, GRONDIN G Y, DRIVER R G. Characterization of fatigue properties of ASTM A709 high performance steel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(6): 838-848.
- [42] BARTH K E, WHITE D W, BOBB B M. Negative bending resistance of HPS70W girders[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 53(1): 1-31.
- [43] SAUSE R, FAHNESTOCK L A. Strength and ductility of HPS-100W I-girders in negative flexure[J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(5): 316-323.
- [44] SALEM E S, SAUSE R. Flexural strength and ductility of highway bridge I-girders fabricated from HPS-100W steel[D]. Bethlehem: Lehigh University, 2004.
- [45] YAKEL A J, MANS P, AZIZINAMINI A. Flexural capacity and ductility of HPS-70W bridge girders[J]. Engineering Journal, 2002, 39: 38-51.
- [46] 郑丽. 混合设计高性能钢梁抗剪性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
ZHENG Li. Shear performance of hybrid girders fabricated using high performance steel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [47] TAKAMORI H. Improving fatigue strength of welded joints[D]. Bethlehem: Lehigh University, 2000.
- [48] 王春生, 王雨竹, 崔冰, 等. 应力比对钢桥腹板间隙面外变形疲劳性能的影响试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 72-81.
WANG Chun-sheng, WANG Yu-zhu, CUI Bing, et al. Experiment on effect of stress ratio on out-of-plane distortion-induced fatigue performance of web gaps in steel bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 72-81. (in Chinese)
- [49] TAKABE M, OHYA M, AJIKI S. Estimation of quantity of Cl^- from deicing salts on weathering steels used for bridges[J].

- Steel Structures, 2008, 8(2): 73-81.
- [50] BD 7/01—1981, design manual for roads and bridges—weathering steel for highway structures[S].
- [51] Corus Construction and Industrial. Weathering steel bridges[R]. London: Corus Construction and Industrial, 2010.
- [52] KRIV V. Design of corrosion allowances on structures from weathering steel[J]. Procedia Engineering, 2012, 40: 235-240.
- [53] YAMADA K. Japanese experience with weathering steel bridges[R]. Nagoya: Nagoya University, 1983.
- [54] 辽宁省高等级公路建设局, 中铁宝桥集团有限公司, 鞍钢集团钢铁研究院, 等. 公路桥梁耐候钢焊接施工技术指南[R]. 沈阳: 辽宁省高等级公路建设局, 2015.
- Liaoning Provincial Transportation Investment Group. China Railway Baoji Bridge Group Co., Ltd. Ansteel Research Institute of Iron and Steel, et al. Technology guide for construction of highway bridge weathering steel welding[R]. Shenyang: Liaoning Provincial Transportation Investment Group, 2015. (in Chinese)
- [55] MCDAD B, LAFFREY D C, DAMMANN M, et al. Performance of weathering steel in TxDOT bridges[R]. Austin: Texas Department of Transportation, 1999.
- [56] 陶晓燕, 史志强, 韩继跃, 等. 耐候钢桥的高强度螺栓连接试验研究[J]. 钢结构, 2018, 33(1): 105-108.
- TAO Xiao-yan, SHI Zhi-qiang, HAN Ji-yue, et al. Experimental research on high strength bolted connection of weathering steel bridge[J]. Steel Construction, 2018, 33(1): 105-108. (in Chinese)
- [57] 石振家, 王 雷, 陈 楠, 等. 耐候钢表面锈层及其稳定化处理现状与发展趋势[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(5): 503-508.
- SHI Zhen-jia, WANG Lei, CHEN Nan, et al. Current situation and development trend of weathering steel surface rust layer and its stabilization treatment, corrosion science and protection technology[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2015, 27(5): 503-508. (in Chinese)
- [58] CRAMPTON D D, HOLLOWAY K P, FRACZEK J. Assessment of weathering steel bridge performance in Iowa and development of inspection and maintenance techniques[R]. Iowa: Iowa Department of Transportation, 2012.
- [59] HARA S, KAMIMURA T, MIYUKI H, et al. Taxonomy for protective ability of rust layer using its composition formed on weathering steel bridge[J]. Corrosion Science, 2007, 49(3): 1131-1142.
- [60] 王春生, 常全禄, 翟晓亮, 等. 管翼缘组合梁桥设计与结构分析[J]. 钢结构, 2015, 30(6): 17-21.
- WANG Chun-sheng, CHANG Quan-lu, ZHAI Xiao-liang, et al. Design and structural analysis of tubular flange composite girder bridge[J]. Steel Construction, 2015, 30(6): 17-21. (in Chinese)
- [61] 朱劲松, 郭晓宇, 亢景付, 等. 耐候桥梁钢腐蚀力学行为研究及其应用进展[J]. 中国公路学报, 2019, 32(5): 1-16.
- ZHU Jin-song, GUO Xiao-yu, KANG Jing-fu, et al. Research on corrosion behavior, mechanical property and application of weathering steel in bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(5): 1-16. (in Chinese)
- [62] TAMAKI Y, SHIMOZATO T, ARIZUMI Y, et al. Evaluation of corrosion deterioration of weathering steel bridge under the environmental corrosiveness[C]// Taylor and Francis. Proceedings of the 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-cycle Optimization. London: Taylor and Francis, 2010: 3569-3575.