

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.113

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



耐候钢和高性能钢腐蚀后疲劳性能 2019 年度研究进展

张宇, 郑凯锋, 衡俊霖, 冯霄暘, 王亚伟

(西南交通大学土木工程学院, 成都 610031)

摘要:免涂装耐候钢桥梁在使用过程中长期受到腐蚀作用,影响其性能的主要有均匀腐蚀和坑蚀。坑蚀能够直接导致钢材疲劳强度降低,并且疲劳细节等级越高,坑蚀对疲劳强度的削减越严重。在钢桥设计中,疲劳设计常为控制指标,需要对耐候钢和高性能钢腐蚀后的疲劳性能进行研究。针对中国耐候钢和高性能钢开展共计20个试件的腐蚀后疲劳试验,根据ISO规范对两种钢材进行中性盐雾干/湿循环腐蚀试验,盐雾采用5%的NaCl作为腐蚀溶液,其pH值为6.5,温度控制为35℃,腐蚀120个周期;针对腐蚀后的试件进行疲劳试验,并与未腐蚀试件的疲劳试验结果对比。试验结果表明,腐蚀后耐候钢和高性能钢的疲劳强度均大幅降低;不考虑保证率时,腐蚀后HPS 485W和Q345CNH钢 2×10^6 次荷载循环的疲劳强度与未腐蚀试件相比分别降低了27.8%和26.6%;考虑95%保证率,采用 $m=3$ 时,分别降低了34.7%和50.1%,并且低于FAT 125要求。腐蚀作用下,两种钢材表面形成稳定锈蚀层和蚀坑,其锈蚀层具有一定强度,疲劳裂纹均萌生于表面蚀坑部位。

关键词:耐候钢;高性能钢;坑蚀;腐蚀试验;疲劳强度

中图分类号:U444;U448.36 **文献标志码:**R **文章编号:**2096-6717(2020)05-0089-09

State-of-the-art review of the fatigue performance of corroded weathering steel and high performance steel in 2019

Zhang Yu, Zheng Kaifeng, Heng Junlin, Feng Xiaoyang, Wang Yawei

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: Uncoated weathering steel bridges expose to the long-term effect of corrosion during the service, and the main corrosion types that influence its performance are uniform corrosion and pitting corrosion. Pitting corrosion can directly reduce the fatigue strength of steels, and the higher the level of fatigue detail, the more serious the reduction of fatigue strength. Fatigue verification is usually the control index in the design of bridge structure. Thus, the post-corrosion fatigue performance of weathering steel (WS) and high performance steel (HPS) need to be investigated. This study carries out fatigue test on corroded Chinese WS Q345CNH and HPS 70W with a total of 20 specimens. Firstly, the neutral salty spraying dry/wet cyclic corrosion test is carried out for 120 cycles in 35 °C according to the ISO code, in which the 5% NaCl solution with pH = 6.5 is utilized. Then, the fatigue test results of corroded specimens were compared with those of uncorroded specimens. The result indicates a notable drop in the fatigue strength of corroded WS and HPS. When the guarantee rate is not considered, the fatigue strength of HPS 485W and

收稿日期:2020-04-07

基金项目:国家自然科学基金(51778536)

作者简介:张宇(1988-),男,博士生,主要从事钢结构桥梁研究,E-mail:zhangyu2006@my.swjtu.edu.cn.

Received:2020-04-07

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 51778536)

Author brief:Zhang Yu (1988-), PhD candidate, main interest: steel bridge, E-mail: zhangyu2006@my.swjtu.edu.cn.

Q345CNH steel under 2×10^6 load cycles after corrosion is 27.8% and 26.6% lower than that of the uncorroded specimens, respectively. Considering 95% guarantee rate, when $m=3$ is adopted, it reduces 34.7% and 50.1%, respectively, and is lower than the FAT 125 requirement. The test also suggests that, the stable rust layers with a certain strength are formed on the surface of both kinds of steel. In addition, the whole fatigue cracks are initiated from the pitting flaws.

Keywords: weathering steel; high performance steel; pitting corrosion; corrosion test; fatigue strength

钢材的腐蚀会削弱钢结构的截面,降低结构承载能力。为了防止钢材的腐蚀,需要定期进行维护和维修工作;因腐蚀而失效的钢结构会直接导致大量的经济损失。据统计,全球每年因腐蚀而损失的钢铁约为 1.3 亿 t^[1];中国每年金属腐蚀导致的损失约占 GDP 的 4%^[2]。桥梁分布于各种气候环境中,面对着各种腐蚀环境和腐蚀性的污染物。对于钢桥,涂装可以在一定期限内保护钢材不腐蚀,中国公路行业规范^[3]规定,长效型涂装的期限上限为 25 a,因此,钢桥全寿命周期内至少需要涂装 4 次。涂装材料中包含大量有机物,对环境有较强的污染,特别是在后期的涂装过程中。免涂装耐候钢桥梁在一定程度上解决了钢桥涂装问题,不仅节省了建造过程的工期和成本,还节省了后期维护成本。在不使用涂装或者局部使用涂装的基础上,能够较大地保护桥址处的环境。

耐候钢出现于 20 世纪 30 年代,通过在钢材中增加 Cu 等元素的含量提高其抗腐蚀性能。耐候钢与普通结构钢的区别在于,耐候钢腐蚀后会在其表面形成一层致密稳定的锈层,阻止了钢材的进一步腐蚀。1964 年,美国建成了第一座免涂装耐候钢桥,随后,日本、欧洲各国也开始陆续使用免涂装耐候钢桥。截止目前,发达国家耐候钢桥在钢桥中占有不小的比重,成为了钢桥发展的重要标志。耐候钢桥梁在中国起步较晚,中国第一座耐候钢桥建成于 1992 年。到目前为止,中国耐候钢桥仍然处于萌芽阶段,具有较大的发展前景^[4]。1992 年,美国开始研制高性能钢,在耐候钢的基础上提高了钢材屈服强度、焊接性能和抗腐蚀性能,第一座高性能钢桥于 1997 年在美国建成^[5-6]。

钢材疲劳是由于初始缺陷的存在,在低于钢材屈服强度的循环应力(包含拉应力)作用下发生断裂。因此,钢桥在长期循环荷载作用下,部分构件受到包含拉应力的循环应力,在设计基准期内可能发生疲劳开裂甚至失效。钢材腐蚀过程中不仅截面厚

度会削减,还会在其表面产生蚀坑,增加其粗糙度,且粗糙度大于钢材轧制表面。Jones^[7]的研究表明,钢材表面的不连续(蚀坑)会导致疲劳性能削减,坑蚀往往是疲劳裂纹萌生的位置。Kunz 等^[8]对自然腐蚀的 Atmofix 52 耐候钢进行疲劳试验,结果表明,腐蚀后的耐候钢疲劳强度大幅度降低。Albrecht 等^[9]对加速腐蚀后的 A588 钢梁进行疲劳试验,结果表明,腐蚀后的钢梁疲劳性能大幅降低,腐蚀可以导致钢材疲劳强度降低到与焊缝细节相当。大量试验表明,腐蚀后钢材表面粗糙度增加,局部应力水平增加,导致其疲劳强度降低,从而严重降低免涂装耐候钢桥的疲劳寿命。

通过介绍免涂装耐候钢的腐蚀种类,阐述均匀腐蚀和坑蚀对免涂装耐候钢桥梁结构的影响。通过总结前人对耐候钢的腐蚀疲劳试验结果,分析腐蚀环境中影响疲劳强度的因素。笔者对在中性盐雾干/湿循环腐蚀后的 HPS 485W 和 Q345CNH 钢(下文简称两种钢材)进行疲劳试验,分析和研究腐蚀环境对两种钢材疲劳强度的削减程度。

1 耐候钢的腐蚀疲劳性能

1.1 耐候钢的均匀腐蚀和坑蚀

均匀腐蚀是在腐蚀环境中钢材表面受到均匀侵蚀的现象,会导致钢材等效厚度减小,从而影响构件整体应力水平。坑蚀是一种自催化过程,在钢材腐蚀过程中与均匀腐蚀同时进行。Zaya^[10]的研究表明,由于锈层的破裂,腐蚀性物质通过锈层裂缝到达钢材表面,导致锈层下钢材局部锈蚀。Bhandari 等^[11]模拟研究了结构坑蚀,研究表明,坑蚀过程分为 4 个阶段:锈层形成、锈层破裂、蚀坑萌生和蚀坑发展,坑蚀的影响因素包括物理因素(温度、pH 值、盐份、水深、周期水流等)、化学因素(Cl 离子、含氧量、CO₂ 等)、生物因素(细菌、污染、植物等)、冶金因素(合金含量、钢材种类、表面粗糙度、制造工艺等)。与均匀腐蚀相比,坑蚀增加了钢材表面粗糙

度,导致表面局部应力增大,是最具危害性的一种腐蚀类型。

坑蚀不仅会导致平面方向的腐蚀,还会导致深度方向的腐蚀,其中,深度方向的腐蚀对于钢材的危害更大。Kondo^[12]通过试验研究得到了钢材的坑蚀深度增长与腐蚀时间的指数关系,表明腐蚀作用会降低钢材疲劳性能。类似的指数关系也由 Ishihara 等^[13]通过对铝合金的研究得到。通过对电化学腐蚀的研究,Huang 等^[14]将法拉第定理用于坑蚀过程的评估,该方法不仅考虑了材料本身的特性,还考虑了腐蚀环境的影响,能够更全面地对坑蚀过程进行评估。考虑到坑蚀深度为影响疲劳性能的关键因素,实验中通过深度来描述其程度。

综上所述,坑蚀的程度受材料特性和腐蚀环境影响,坑蚀对于金属材料疲劳强度有影响,疲劳因素常为桥梁设计的控制因素,因此,坑蚀过程评估非常关键。

1.2 腐蚀作用降低耐候钢疲劳强度

20 世纪 80 年代,桥梁领域逐步开始研究腐蚀对疲劳强度的影响。Albrecht 等^[15-17]采用大量长期腐蚀后的耐候钢和普通结构钢进行疲劳试验,结果表明,疲劳构造细节等级越高,腐蚀作用对疲劳强度的削减越大,且腐蚀作用对耐候钢和普通结构钢疲劳强度的削减效果类似。Novak^[18]对 A36、A588 和 A517 钢的缺口试件进行盐水腐蚀疲劳试验,结果表明,几种钢材均无明显的疲劳门槛值,几种钢材缺口部位 300 万次循环的名义疲劳强度均为 68 MPa,与无腐蚀状态相比,腐蚀状态下 A36、A588 和 A517 钢疲劳强度的削减分别为 54%、62% 和 72%。对于免涂装耐候钢桥梁,桥梁建成前已经开始锈蚀,建成后荷载和腐蚀同时作用于桥梁,因此,腐蚀疲劳试验能够更真实地反应实际情况。Albrecht 等^[17,19]对腐蚀数年后的 A588 钢梁进行腐蚀过程中的疲劳试验,结果表明,与未腐蚀的钢梁相比,疲劳细节 A 的疲劳强度削减了 71%,疲劳细节 B 的疲劳强度削减了 56%,疲劳细节 C 的疲劳强度削减了 33%。

以上研究结果证明了腐蚀作用对于耐候钢疲劳性能的削减,疲劳细节等级越高,疲劳作用对疲劳强度的削减越严重,这为耐候钢腐蚀疲劳性能评估奠定了基础。

1.3 规范对耐候钢疲劳性能的规定

疲劳验算常为钢桥设计的控制指标,钢材的疲劳强度直接影响桥梁的疲劳性能。笔者研究的两种钢材均为桥梁用钢,当用于耐候钢桥梁时,需要考虑其在腐蚀环境中的疲劳性能。

针对免涂装耐候钢桥的疲劳设计,《耐候钢桥梁设计应用指南》^[20]推荐在 ISO 9223^[21]规定的 C3 和 C4 腐蚀环境等级中削减疲劳强度百分比,如表 1 所示,并且指出,确定耐候钢疲劳强度的数据包括腐蚀后的疲劳寿命。

表 1 指南推荐的免涂装耐候钢疲劳强度降低百分比
Table 1 Recommended reduction percentage in fatigue strength for uncoated weathering steel by guideline

腐蚀等级	疲劳强度降低百分比/%					
	A	B	C	D	E	E'
C3	34	24	13	10	10	10
C4	44	34	23	20	20	20

现行桥梁规范考虑了腐蚀对耐候钢疲劳强度的折减,各规范中考虑的折减程度有一定差别。欧洲规范疲劳细节表中规定:采用 1~5 疲劳细节的耐候钢疲劳细节降低一级, 2×10^6 次循环荷载的疲劳强度削减幅度为 10.7%~20%^[22]。美国 AASHTO 规范规定:与普通涂装钢桥不同,免涂装耐候钢母材疲劳细节为细节 B,与涂装钢材母材相比,免涂装耐候钢疲劳门槛值降低了 33.3%^[23]。中国铁路钢桥规范^[24]未对耐候钢的疲劳性能进行特殊规定。中国公路钢桥规范^[25]仅在附录 C 疲劳细节中规定:如果采用耐候钢制造,1~5 疲劳细节降低一个等级,免涂装耐候钢疲劳强度削减与欧洲规范相同。与耐候钢腐蚀疲劳试验结果相比,现行规范对免涂装耐候钢疲劳强度的削减较小,需要进一步研究和验证。

2 两种钢材试件及其加速腐蚀试验

2.1 材料和试件

试验采用 Q345CNH 和 HPS 485W 耐候钢进行腐蚀后/未腐蚀的疲劳试验,其元素含量如表 2 所示。Q345CNH 的屈服强度为 345 MPa,极限拉伸强度为 490 MPa; HPS 485W 的屈服强度为 485 MPa,极限拉伸强度为 730 MPa。试件钢板厚度为 12 mm,采用线切割进行加工,试件表面抛光打磨处

理,试件加工尺寸如图 2 所示,试件腐蚀前如图 3 所示。Q345CNH 试件共计 10 个,记为“W-SPE1-X”,

其中“X”为试件序号, HPS 485W 试件共计 10 个,记为“SPE1-X”。

表 2 HPS 485W 和 Q345CNH 钢元素含量

Table 2 Element component of HPS 485W and Q345CNH steel

%

钢材种类	C	Si	Mn	Cr	Nb	V	Ni	Mo	Ti	Cu	P	S	Al
Q345CNH	0.17	0.32	1.45	0.40	0.10	0.10	0.30	0.15	0.015	0.30			
HPS 485W	0.11	0.4	1.3					0.08		0.35	0.020	0.006	0.04

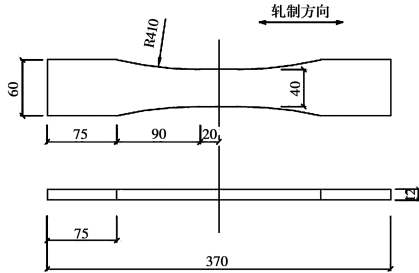


图 2 试件加工尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Geometry of specimen (units:mm)

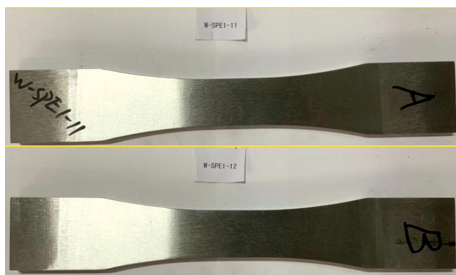


图 3 腐蚀前试件

Fig. 3 Uncorroded specimen

2.2 加速腐蚀试验

根据 ISO 14993^[26], 腐蚀试验采用中性盐雾干/湿交替加速方式进行腐蚀。试验采用盐雾腐蚀箱型号为 YWX-750, 容积 750 L, 喷雾压力设置为 110 kPa, 环境温度为 35 °C, 如图 4 所示。试验采用的腐蚀溶液为质量百分数 5% 的 NaCl 溶液, pH 值为 6.5。腐蚀溶液采用蒸馏水和高纯度 NaCl 进行配制; 通过电子 pH 测试仪进行溶液 pH 值测定; 当溶液 pH 值不为 6.5 时, 采用 NaOH 颗粒和 HCl 溶液控制 pH 值。

参考 ISO 14993^[26], 腐蚀试验中一个腐蚀周期包括 4 h 腐蚀溶液喷雾状态和 4 h 停喷状态, 一个周期合计 8 h; 为保证腐蚀效果, 试验共腐蚀 120 个周期(40 d)。为保证试件夹持段不会因腐蚀而破坏, 并方便疲劳试验安装, 腐蚀试验前用保鲜膜和透明



图 4 盐雾腐蚀箱

Fig. 4 Salt spraying corrosion box

胶对试件夹持段进行密封。试件在腐蚀箱中并排放置, 试件之间保留一定间隙, 并与水平方向呈 30°。其中, Q345CNH 和 HPS 485W 均包含腐蚀试件 10 个, 共计 20 个腐蚀试件。腐蚀前后的试件如图 5 所示。



(a) 腐蚀前 (b) 腐蚀后

图 5 腐蚀试件

Fig. 5 Specimens for corrosion

3 两种钢材腐蚀后的疲劳试验

3.1 疲劳试验

疲劳试验采用 QBG-350 高频疲劳试验机, 该疲劳试验机最高吨位为 350 kN, 加载频率为 100 Hz, 且试验频率受试件刚度影响, 动荷载为正弦加载, 如图 6 所示。

对于腐蚀后的试件, 试验前将两端用于密封的保鲜膜去除, 并打磨夹持段局部锈蚀部位, 如图 7 所示。试验加载应力比 $R = 0.09$, 荷载幅范围为



图 6 高频疲劳试验机

Fig. 6 High frequency fatigue tester

85.3~128.0 kN,各试件加载荷载幅及其应力幅如表 3 所示。试验发现,当加载频率降低 0.7 Hz 时,裂纹萌生约 5 mm,裂纹继续扩展至贯穿 1/3 横截面所需加载循环次数在 10^4 次以内,并以裂纹贯穿至 1/3 横截面作为试件疲劳寿命。此外,若荷载循环次数超过 10^7 次仍未破坏停止试验。

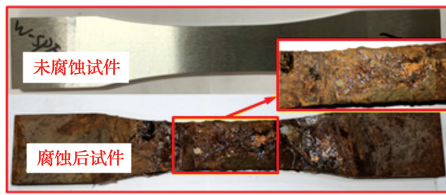


图 7 腐蚀前后的试件

Fig. 7 Uncorroded/corroded specimen

表 3 两种钢材加载荷载幅及其应力幅

Table 3 Load range and its stress range of the two kinds of steel

试件编号	荷载幅/kN	应力幅/MPa	腐蚀周期数
SPE1-3	128.0	266.7	120
SPE1-4	106.7	222.2	120
SPE1-5	128.0	266.7	120
SPE1-6	85.3	177.8	120
SPE1-7	106.7	222.2	120
SPE1-8	96.0	200.0	120
SPE1-10	96.0	200.0	120
SPE1-11	117.3	244.4	120
SPE1-12	117.3	244.4	120
SPE1-13	85.3	177.8	120
W-SPE1-3	128.0	266.7	120
W-SPE1-4	106.7	222.2	120
W-SPE1-5	85.3	177.8	120
W-SPE1-6	96.0	200.0	120
W-SPE1-7	96.0	200.0	120

续表 3

试件编号	荷载幅/kN	应力幅/MPa	腐蚀周期数
W-SPE1-8	117.3	244.4	120
W-SPE1-9	106.7	222.2	120
W-SPE1-10	117.3	244.4	120
W-SPE1-11	128.0	266.7	120
W-SPE1-12	85.3	177.8	120

3.2 疲劳试验结果汇总

经过 120 个周期(40 d)干/湿加速腐蚀试验后,两种钢材试件的名义应力幅($\Delta\sigma$)和疲劳寿命(N)结果如图 8 和图 9 所示,其中,疲劳寿命取以 10 为底的对数坐标。文献[27]中抛光打磨后未腐蚀的两种钢材疲劳试验结果也加入到图 8 和图 9 进行对比。

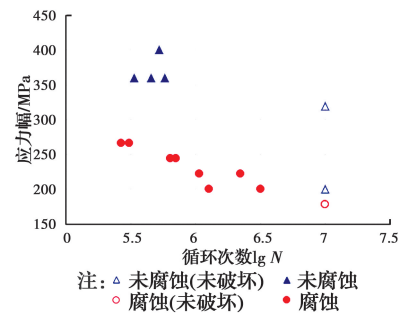


图 8 HPS 485W 试件疲劳试验结果

Fig. 8 Fatigue result of HPS 485W specimens

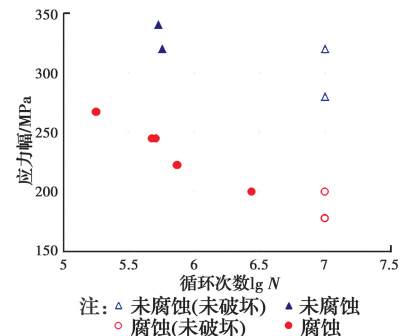


图 9 Q345CNH 钢试件疲劳试验结果

Fig. 9 Fatigue result of Q345CNH specimens

试验结果表明,抛光打磨后未腐蚀的试件具有很高的疲劳强度,两种钢材在 300 MPa 应力幅作用下没有发生疲劳破坏,两种钢材各有两个试件未破坏;腐蚀后的两种钢材试件疲劳强度显著降低,在 10^7 次 177.8 MPa 应力幅作用下均未发生疲劳破坏,其中,2 个 HPS 485W 试件未破坏,3 个 Q345CNH 试件未破坏;此外,与未腐蚀的试件相比,经过腐蚀后钢材疲劳性能大幅降低,但其试验数据离散性更小。

4 两种钢材腐蚀后的疲劳 S-N 线分析

4.1 腐蚀后的 S-N 线分析

根据腐蚀后试件的疲劳试验数据, HPS 485W 和 Q345CNH 钢腐蚀后的 S-N 线可分别表示为式(1)和式(2), 两种钢材腐蚀后的 S-N 线如图 10 所示, HPS 485W 和 Q345CNH 钢 S-N 线斜率分别为 $m=8.4531$ 和 $m=9.0744$ 。

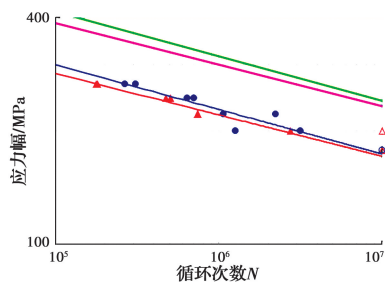
$$\lg N = 25.9408 - 8.4531 \lg \Delta\sigma \quad (1)$$

$$\lg N = 27.2713 - 9.0744 \lg \Delta\sigma \quad (2)$$

对于同种钢材, 未腐蚀试件的 S-N 线斜率值与腐蚀后试件相同, 结合前期疲劳试验结果^[27], 采用其最低点作为未腐蚀试件的 S-N 线, 即未腐蚀的 HPS 485W 和 Q345CNH 钢 S-N 线分别为

$$\lg N = 27.1350 - 8.4531 \lg \Delta\sigma \quad (3)$$

$$\lg N = 28.4880 - 9.0744 \lg \Delta\sigma \quad (4)$$



注: \blacktriangle Q345CNH-腐蚀后 \triangle Q345CNH-腐蚀后(未破坏)
 \bullet HPS485W-腐蚀后 \circ HPS485W-腐蚀后(未破坏)
 — S-N线(Q345CNH-未腐蚀) — S-N线(HPS485W-未腐蚀)
 — S-N线(Q345CNH-腐蚀后) — S-N线(HPS485W-腐蚀后)

图 10 两种钢材腐蚀后的 S-N 线

Fig. 10 S-N curve of two kinds of corroded steel

分析结果表明, 腐蚀对耐候钢和高性能钢疲劳强度的降低效果显著; 未腐蚀的 HPS 485W 和 Q345CNH 钢 2×10^6 循环荷载的疲劳强度分别为 291.5、278.6 MPa, 两种钢材的疲劳性能基本相同; 经过 120 个周期干/湿循环盐雾腐蚀后, HPS 485W 和 Q345CNH 钢 2×10^6 循环荷载的疲劳强度分别为 210.6、204.6 MPa, 与未腐蚀试件相比, 降低了 27.8% 和 26.6%; 腐蚀前后, HPS 485W 钢 2×10^6 循环荷载的疲劳强度均略高于 Q345CNH 钢, 腐蚀作用对两种钢材疲劳强度削减效果接近。

4.2 考虑 95% 保证率的 S-N 线分析

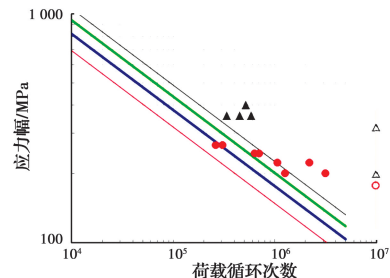
根据 Hobbacher^[28] 的推荐, 采用考虑 95% 保证率的 S-N 线确定方法, 对两种钢材腐蚀后的 S-N 线进行分析。其中, 两种钢材破坏的试件数量小于 10, 取 $m=3$; 根据各组应力幅及其对应疲劳寿命计算 $\lg C$, 且计算其平均值 (x_m) 和标准差 (stdv); 通过

式(5)得到 HPS 485W 和 Q345CNH 钢的 k 值分别为 2.227 和 2.267, 其值与试件数量有关 (n)。根据式(6)得到两种钢材概论化后的 $\lg C$ 值。

$$k = 1.645 \cdot (1 + 1/\sqrt{n}) \quad (5)$$

$$\lg C = x_m - k \cdot \text{stdv} \quad (6)$$

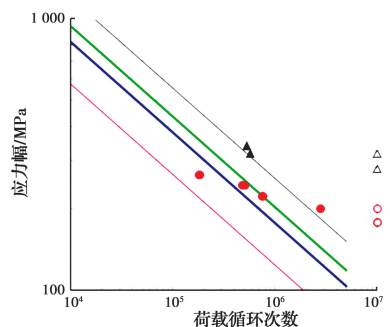
腐蚀后 HPS 485W 设计的 S-N 线如图 11 所示; 未腐蚀和腐蚀后 Q345CNH 钢试件的 S-N 线如图 12 所示。对前期研究得到的未腐蚀的疲劳数据进行以上处理, 分析未腐蚀两种钢材的 S-N 线, 分别添加到图 11 和图 12 作为对比; 其中, 未腐蚀 HPS 485W 和 Q345CNH 钢 2×10^6 循环荷载的疲劳强度分别为 180.0、204.0 MPa, 均高于 FAT 160 疲劳细节^[27]。



注: \blacktriangle 未腐蚀HPS 485W \circ 腐蚀后HPS 485W(未破坏)
 \triangle 未腐蚀HPS 485W(未破坏) — 腐蚀后HPS 485W S-N线
 — 未腐蚀后HPS 485W S-N线 — FAT140
 \bullet 腐蚀后HPS 485W — FAT160

图 11 腐蚀前后 HPS 485W 的 S-N 线 (95% 保证率)

Fig. 11 S-N curve of HPS 485 (survival probability of 95%)



注: \blacktriangle 未腐蚀Q345CNH \circ 腐蚀后Q345CNH(未破坏)
 \triangle 未腐蚀Q345CNH(未破坏) — 腐蚀后Q345CNH S-N线
 — 未腐蚀q345cnh S-N线 — FAT140
 \bullet 腐蚀后Q345CNH — FAT160

图 12 腐蚀前后 Q345CNH 钢腐蚀后的 S-N 线 (95% 保证率)

Fig. 12 S-N curve of Q345CNH steel

(survival probability of 95%)

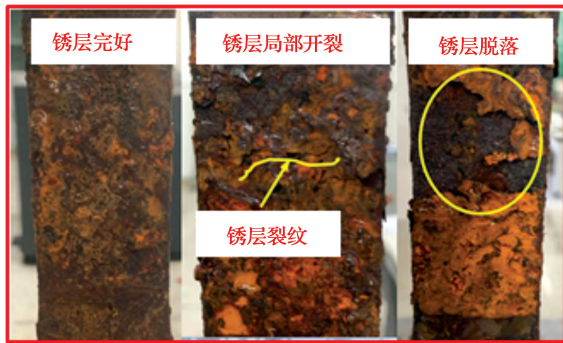
分析结果表明, 腐蚀后 HPS 485W 和 Q345CNH 钢 2×10^6 循环荷载的疲劳强度分别为 117.6、97.6 MPa, 均低于 FAT 140 疲劳细节。与未腐蚀状态相比, 腐蚀后 HPS 485W 和 Q345CNH 钢疲劳强度分别降低了 34.7% 和 50.1%, HPS 485W

的降低百分比大于指南^[20]对 A 类细节 C3 环境中的要求 (34%), 低于 A 类细节 C4 环境中的要求 (44%); Q345CNH 的降低率高于指南^[20]对 A 类细节 C3 和 C4 环境中的要求 (34% 和 44%)。根据 Zhang 等^[29]对腐蚀-疲劳的研究, 上述结果表明, HPS 485W 的抗蚀程度小于 Q345CNH 钢, 导致 Q345CNH 钢初始缺陷较大, 同时, 高性能钢具有更好的抗腐蚀-疲劳性能。

5 两种钢材腐蚀后疲劳试验中的锈层脱落和裂纹萌生

5.1 两种钢材腐蚀后疲劳试验中的锈层脱落

疲劳试验中, 加载腐蚀后试件的表面锈蚀层在 222.2 MPa 以及更低应力幅作用下未发生破裂; 高性能钢试件疲劳裂纹萌生时, 锈蚀层发生局部破裂, 如图 13(a)、(b) 所示, 耐候钢试件如图 14(a) 所示。当加载应力幅高于 222.2 MPa 时, 表面锈层在短时间内 (10^4 次荷载循环内) 发生大面积破损和脱落, 直至完全脱落, 高性能钢如图 13(c) 所示, 耐候钢如图 14(b) 所示。



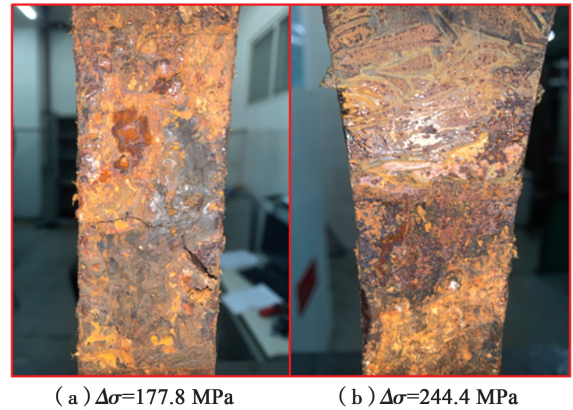
(a) $\Delta\sigma=200$ MPa (b) $\Delta\sigma=222.2$ MPa (c) $\Delta\sigma=244.4$ MPa
图 13 HPS 485W 钢锈蚀层破损情况

Fig. 13 Broken condition of rust layer of HPS 485W

该现象表明, 两种钢材在 Cl 离子环境中形成的锈蚀层具有一定的强度; 在高于 222.2 MPa 应力幅 (最大应力 244.4 MPa) 作用下锈蚀层不会破裂。Bhandaril 等^[11]在对坑蚀的研究中发现, 锈层破裂是导致坑蚀形成的重要因素, 蚀坑的尺寸影响疲劳寿命。EL may 等^[30]在腐蚀疲劳分析中考虑了锈层破裂的寿命, 同样表明锈层对腐蚀疲劳寿命有很大的影响。因此, 锈层发生破裂, 不仅会加速坑蚀过程, 锈蚀层脱落后会增大钢材应力水平, 导致未考虑保证率的情况下 S-N 线 m 值大于 3。

5.2 两种钢材腐蚀后疲劳试验中裂纹萌生

所有腐蚀后试件的疲劳裂纹均萌生于表面坑蚀

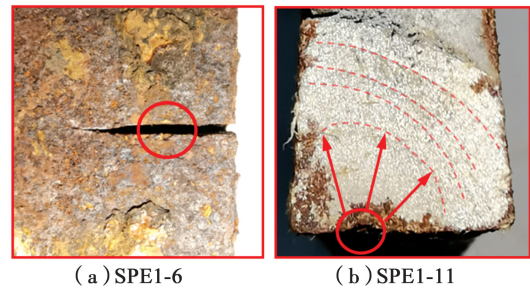


(a) $\Delta\sigma=177.8$ MPa (b) $\Delta\sigma=244.4$ MPa

图 14 Q345CNH 钢锈蚀层破损情况

Fig. 14 Broken condition of rust layer of Q345CNH

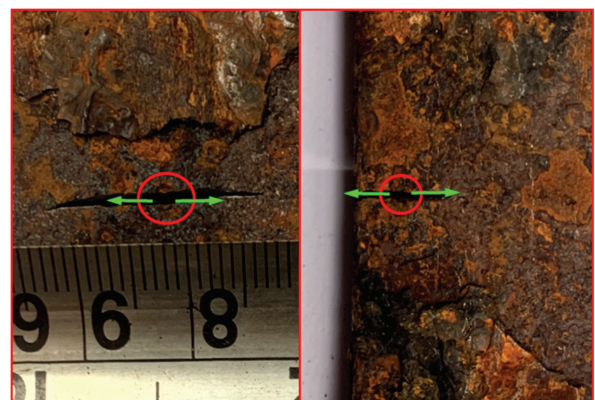
缺陷, 如图 15 所示。图 15 (a) 为 HPS 485W 试件正面, 试验过程中发现疲劳裂纹萌生于图中标记部位蚀坑处, 并沿箭头方向扩展; 图 15 (b) 为 HPS 485W 试件断面, 疲劳裂纹萌生于试件侧面蚀坑处, 且蚀坑尺寸均大于周围蚀坑尺寸。图 16 (a)、(b) 为 Q345CNH 耐候钢试验过程中发现疲劳裂纹萌生于图中标记蚀坑处, 并沿箭头方向扩展。



(a) SPE1-6 (b) SPE1-11

图 15 不同腐蚀试件疲劳裂纹萌生

Fig. 15 Initiation of fatigue crack of different corroded specimen



(a) W-SPE1-4 (b) W-SPE1-8

图 16 不同腐蚀试件疲劳裂纹萌生

Fig. 16 Initiation of fatigue crack of different corroded specimen

该现象表明, 腐蚀后耐候钢的疲劳裂纹均萌生于蚀坑, 且萌生裂纹蚀坑的尺寸均大于附近蚀坑尺

寸,与 Kunz 等^[8]的研究结论相同。

6 结论

在总结腐蚀疲劳试验成果的基础上,对钢材的腐蚀疲劳性能及腐蚀后的 HPS 485W 和 Q345CNH 钢试件进行疲劳试验,研究盐雾环境对两种钢材疲劳强度的影响,得到以下结论:

1) 腐蚀对钢材的疲劳强度有削减作用,且疲劳细节等级越高,腐蚀作用对疲劳强度削减越严重;腐蚀环境、腐蚀时间和应力状态会影响疲劳强度的削减程度;与试验研究相比,现行规范对免涂装耐候钢疲劳强度的削减较小,需要进一步研究和验证。

2) 经过 120 周期干/湿循环盐雾腐蚀,试件表面形成了稳定的锈蚀层,并且两种钢材均具有较好的抗腐蚀性能;与前期研究相比^[27],腐蚀后的两种钢材数据离散性明显降低,表明腐蚀作用对耐候钢疲劳性能削减的规律性更强。

3) 与前期研究相比^[27],在不考虑保证率的情况下,腐蚀后 HPS 485W 和 Q345CNH 钢试件 2×10^6 循环荷载的疲劳强度分别降低了 27.8% 和 26.6%,两种钢材疲劳性能基本类似;其降低百分比与《耐候钢桥梁设计应用指南》^[20]中推荐 C3 环境中的 B 类细节和 C4 环境中的 C 类细节类似。

4) 与前期研究相比^[27],考虑 95% 保证率时,腐蚀后耐候钢和高性能钢 2×10^6 次荷载循环的疲劳强度分别为 117.6、97.6 MPa,分别降低了 34.7% 和 50.1%,大于中国公路规范^[25]的规定,并且低于 FAT 125 要求;HPS 485W 疲劳强度降低率低于 Q345CNH 钢,具有更好的抗腐蚀疲劳性能。

5) 在盐雾环境中,无应力状态耐候钢表面能够形成致密锈和稳定锈蚀层,应力幅小于 222.2 MPa (最大应力 244.4 MPa) 时,锈蚀层只在开裂前发生局部开裂和脱落;当试件应力高于 244.4 MPa 时,锈蚀层在 10^4 次循环荷载内全部脱落,表明锈蚀层具有一定强度,在较低应力作用时能够一定程度降低试件母材部分的应力。两种钢材试件腐蚀后的疲劳裂纹均萌生于蚀坑部位,表明坑蚀是降低疲劳强度的重要因素。

需要针对更多腐蚀环境开展各疲劳细节耐候钢腐蚀后的疲劳试验,此外,加速腐蚀试验需要与自然腐蚀试验结果进行对比。与未腐蚀状态相比,腐蚀后构件的疲劳强度会大幅降低;在实际免涂装耐候

钢桥疲劳验算中,需基于目前钢桥设计规范,降低各构件对应疲劳细节的疲劳强度。

参考文献:

- [1] 中国防腐蚀工作概况[J]. 表面工程资讯, 2005, 5(4): 3-4.
General situation of national defense corrosion work in China [J]. Information of Surface Engineering, 2005, 5(4): 3-4. (in Chinese)
- [2] 葛秋辰. 高湿热海洋大气环境下耐候钢耐蚀性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
GE Q C. Research on corrosion performance of weathering steel in high humid and hot marine atmospheric environment [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [3] 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件: JT/T 722-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Specifications of protective coating for highway bridge steel structure: JT/T 722-2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [4] 张宇, 郑凯锋, 衡俊霖. 免涂装耐候钢桥梁腐蚀设计方法现状及展望[J]. 钢结构, 2018, 33(9): 116-121.
ZHANG Y, ZHENG K F, HENG J L. Summary and enlightenment on corrosion design method of uncoated weathering steel bridges [J]. Steel Construction, 2018, 33(9): 116-121. (in Chinese)
- [5] BJORHOVDE R. Development and use of high performance steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(3/4/5): 393-400.
- [6] LWIN M M. High performance steel designers' guide [M]. 2nd Edition. San Francisco: Federal Highway Administration, 2002.
- [7] JONES R. Fatigue crack growth and damage tolerance [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2014, 37(5): 463-483
- [8] KUNZ L, LUKÁŠP, KLUSÁK J. Fatigue strength of weathering steel [J]. Materials Science, 2012, 18(1): 18-22.
- [9] ALBRECHT P, LENWARI A. Fatigue strength of weathered A588 steel beams [J]. Journal of Bridge Engineering, 2009, 14(6): 436-443.
- [10] ZAYA P G R. Evaluation of theories for the initial stage of pitting corrosion [D]. Hamilton, Ontario: McMaster University, 1984.
- [11] BHANDARI J, KHAN F, ABBASSI R, et al.

- Modelling of pitting corrosion in marine and offshore steel structures - A technical review [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 37: 39-62.
- [12] KONDO Y. Prediction of fatigue crack initiation life based on pit growth [J]. *Corrosion*, 1989, 45(1): 7-11.
- [13] ISHIHARA S, NAN Z Y, MCEVILY A J, et al. On the initiation and growth behavior of corrosion pits during corrosion fatigue process of industrial pure aluminum [J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(9): 1659-1668.
- [14] HUANG X G, XU J Q. Pit morphology characterization and corrosion fatigue crack nucleation analysis based on energy principle [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2012, 35(7): 606-613.
- [15] ALBRECHT P. Fatigue behavior of 4-year weathered A588 steel specimens with stiffeners and attachments; FHWA/MD-81/02 [R]. College Park, Maryland: University of Maryland, 1982.
- [16] ALBRECHT P, NAEEMI A H. Performance of weathering steel in bridges; NCHRP Report 272 [R]. Washington D. C. : Transportation Research Board, National Research Council, 1984.
- [17] ALBRECHT P, SIDANI M. Fatigue strength of 8-year weathered stiffeners in air and salt water; NCHRP Project 10-22/1 [R]. College Park, Maryland: University of Maryland, 1987.
- [18] NOVAK S R. Corrosion-fatigue crack initiation behavior of four structural steels [M]//*Corrosion Fatigue: Mechanics, Metallurgy, Electrochemistry, and Engineering*. West Conshohocken: ASTM International, 1983: 26-63.
- [19] ALBRECHT P. Fatigue strength of A588 steel beams [R]. College Park, Maryland: University of Maryland, 1988.
- [20] ALBRECHT P, COBURN S K, WATTAR F M, et al. Guidelines for the use of weathering steel in bridges [M]. 1989.
- [21] Corrosion of metals and alloys-Corrosivity of atmospheres-Classification, determination and estimation; ISO 9223; 2012 [S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2012.
- [22] Eurocode 3: design of steel structures-Part1-9: Fatigue: BS EN 1993-1: 2005 [S]. European Committee for Standardization, 2005.
- [23] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [S]. 6th Edition. Washington, DC, 2012.
- [24] 铁路桥梁钢结构设计规范: TB 10091—2017 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
Code for Design on Steel Structure of Railway Bridge: TB 10091-2017 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. (in Chinese)
- [25] 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D 64—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Specifications for Design of Highway Steel Bridge: JTG D 64-2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [26] Corrosion of metals and alloys - Accelerated testing involving cyclic exposure to salt mist, dry and wet conditions; ISO 14993:2018 [S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2018.
- [27] 郑凯锋, 张宇, 衡俊霖, 等. 高强度耐候钢及其在桥梁中的应用与前景[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(3): 1-10.
ZHENG K F, ZHANG Y, HENG J L, et al. High strength weathering steel and its application and prospect in bridge engineering [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(3): 1-10. (in Chinese)
- [28] HOBACHER A F. Recommendations for fatigue design of welded joints and components [M]. Welding Research Council, New York, 2009. .
- [29] ZHANG Y, ZHENG K F, HENG J L, et al. Corrosion-fatigue evaluation of uncoated weathering steel bridges [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(17): 3461.
- [30] EL MAY M, SAINTIER N, PALIN-LUC T, et al. Modelling of corrosion fatigue crack initiation on martensitic stainless steel in high cycle fatigue regime [J]. *Corrosion Science*, 2018, 133: 397-405.