

环境腐蚀对 Q345 角钢疲劳性能的影响研究

张誉, 张春涛

(西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010)

摘 要:目的 研究 Q345 角钢构件的疲劳性能随腐蚀损伤发展的变化规律, 为分析“腐蚀-疲劳”交替循环工况下试件疲劳性能变化情况奠定基础。方法 首先通过连续疲劳振动和间隔疲劳振动两种疲劳试验, 测试分析了疲劳荷载施加方式对试件疲劳性能的影响, 其中, 试件间隔振动分三次完成, 每次振动次数为连续疲劳振动次数的 1/3。然后, 根据不同“浸泡-晾晒”次数, 给出了三种腐蚀方式, 并在 pH 值为 2 的酸性溶液中对试件进行加速腐蚀损伤试验。采取“腐蚀-疲劳”交替循环加载方式对 3 组 39 根 Q345 角钢构件进行腐蚀疲劳试验, 由试件腐蚀疲劳破坏的试验现象及测试结果, 分析试件疲劳性能随腐蚀疲劳损伤的变化规律, 并研究 Q345 角钢试件的风致振动疲劳性能因大气环境中腐蚀损伤发生及发展的退化规律。结果 疲劳荷载为 221.43 MPa 时, 三种“腐蚀-疲劳”工况下, CF1、CF2 与 CF3 相比, 试件的疲劳寿命分别退化了 5.1%和 2.7%。疲劳荷载为 308 MPa 和 221.43 MPa 时, 单点试验结果未随腐蚀方式变化而发生明显变化, 但是当疲劳荷载减小到 156.22 MPa 时, CF1、CF2 与 CF3 相比, 试件的疲劳寿命分别退化了 6.3%和 4.5%。结论 腐蚀损伤试验中“浸泡-晾晒”交替循环次数越多, 损伤越大, 试件疲劳寿命退化, 反映 Q345 角钢构件的疲劳性能受大气环境干湿交替腐蚀损伤影响明显。同一腐蚀方式中, 疲劳荷载越小, 腐蚀的影响越显著, 脆性破坏特征越明显。

关键词: Q345 角钢; 大气腐蚀; 腐蚀方式; 疲劳性能; 酸雨模拟; 疲劳荷载

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)07-0036-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.07.006

Effect of Environmental Corrosion on Fatigue Properties of Q345 Equal Angles

ZHANG Yu, ZHANG Chun-tao

(School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the effect of corrosion on the fatigue properties of Q345 equilateral angle steel, which lays foundation for the analysis of fatigue performance variation of specimens under condition of alternating cycles of "corrosion-fatigue". **Methods** Firstly, based on the test results of continuous fatigue vibration and interval fatigue vibration, the effect of fatigue loading modes on the fatigue performance of the specimens was analyzed. The interval vibration of the specimens was completed in three steps, and the vibration times of each step was 1/3 of that of continuous fatigue vibration. Then, three kinds of etching methods were adopted according to the different times of "immersion-drying", and accelerated corrosion damage test

收稿日期: 2016-03-10; 修订日期: 2016-04-20

Received: 2016-03-10; Revised: 2016-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51508482, 50908243); 西南科技大学博士研究基金项目 (13zx7111)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51508482, 50908243) and the Research Fund for the Doctoral Program of Southwest University of Science and Technology of China (13zx7111)

作者简介: 张誉 (1972—), 男, 副教授, 主要研究方向为结构工程。

Biography: ZHANG Yu (1972—), Male, Associate professor, Research focus: structural engineering.

was conducted in acid solution with a pH value of 2. With different corrosion, 3 groups 39 Q345 equilateral angle steel was studied on by the fatigue cyclic loading test. Corrosion fatigue test was carried out on 3 groups of 39 Q345 angle steel parts using "corrosion-fatigue" alternate cycling loading. Based on the phenomena and results of the corrosion fatigue tests, the changing law of fatigue performance with corrosion fatigue damage was analyzed, and the degeneration law of wind-induced vibration fatigue properties of Q345 angle steel with the occurrence and development of corrosion damage in atmospheric environment was investigated. **Results** When S_{max} was 221.43 MPa, the average fatigue life in corrosion modes CF2 and CF2 of the 8 specimens was decreased by 5.1% and 2.7% as compared with CF3, whereas the fatigue life was not changed significantly when S_{max} was 308.39 MPa or 221.43 MPa, but when S_{max} decreased to 156.22 MPa, the fatigue life of CF1 and CF2 was decreased by 6.3% and 4.5% as compared with that of CF3, respectively. **Conclusion** With increasing times of "Immersion-drying" alternating cycles, the damage increased, and the fatigue life of specimens decreased, showing that the corrosion fatigue life of specimens was obviously affected by the atmospheric environmental dry-wet alternate corrosion. In the same type of corrosion, the smaller the fatigue load, the more significant the influence of corrosion, and the more obvious the brittle failure characteristics.

KEY WORDS: Q345 angle steel;atmospheric corrosion; corrosion mode; fatigue properties; simulated acid rain; fatigue load

20 世纪初 Haigh 首先发现了腐蚀疲劳现象。此后，Evans 研究了工程实践中构件的腐蚀疲劳机理^[1]。Kayser 通过研究发现构件几何尺寸的改变和疲劳性能的退化是腐蚀损伤的两大主要影响特征^[2]。大量研究表明^[3-6]，在环境腐蚀作用下，疲劳损伤累计到临界值后，疲劳裂纹随即开展，并且腐蚀裂纹会在大气腐蚀和风致振动耦合作用下继续开展。当腐蚀疲劳裂纹长度超过某一限值后，裂纹在振动荷载循环作用下将迅速开展。构件在大气环境腐蚀和风致疲劳振动循环作用下的裂纹孕育过程与直到断裂之前的开展过程的振动次数称为构件的安全寿命。

由于广泛的实际应用，大量的腐蚀疲劳研究主要是关于腐蚀较为严重的情况，诸如海洋工程结构和地下管道结构等^[4]。腐蚀疲劳现象具有无选择性，在任何条件下都可能发生，这与应力腐蚀现象显著不同。文献[7]表明，即使是轻微腐蚀性的介质，对钢材的疲劳寿命同样会有明显的影响，并且酸雨等强腐蚀性环境对钢结构性能的影响会更显著。比较而言，鲜有学者研究材料、构件等在大气环境腐蚀下疲劳性能的退化规律。因为影响因素众多，腐蚀疲劳问题需要利用随机数学、模糊数学等数学工具研究，但是这方面的理论相对较难，致使

相关研究开始较晚^[4]。

目前，高电压输电塔线结构中大量采用了 Q345 角钢构件，由于长期受风荷载振动及大气腐蚀作用，造成塔体中连接部位的构件力学性能受损，极易发生破坏致使塔体毁坏^[1,7]。为研究角钢构件疲劳性能在大气环境干湿交替腐蚀和风致疲劳耦合作用下的退化规律，本文通过“腐蚀-疲劳”干湿交替循环加载方式对 Q345 角钢构件展开腐蚀疲劳性能测试，以此考察腐蚀方式的变化造成角钢构件疲劳性能的退化规律。

1 试验

1.1 试件制备

本次试验依据规范^[8-10]的要求，对输电线塔体系采用的等边角钢构件进行加工，图 1 所示为试件详细尺寸，孔洞直径为 20 mm。为真实反映试件疲劳性能，试验中考虑了边界条件及其他因素的影响，以此来预防试验过程中试件失稳破坏。此外，对角钢试件两端进行了耐腐蚀处理，以保证试件两端与支座部位不受腐蚀损伤的影响，以期试验结果能更真实体现腐蚀环境中角钢试件中部的疲劳性能。

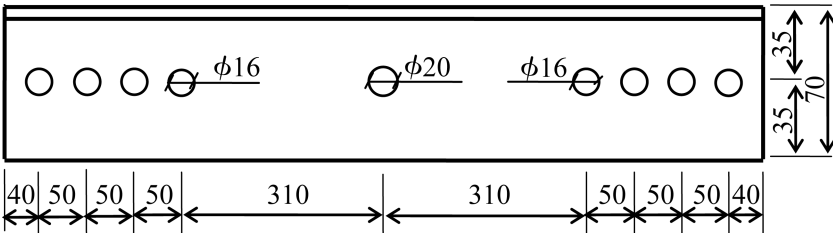


图 1 试件尺寸

Fig.1 The shape and dimension of specimens

1.2 试验设备

疲劳试验采用 MTS 电液伺服加载系统。构件疲劳振动加载频率为 4 Hz。同时将 6 个应变片对称布置于试件中部两肢,通过 DH5956 动态应变采集仪器观察两肢应变变化情况,安装和试验测试过程中角钢两肢相同位置的应变应相同,实时调整确保试件为轴心拉压受力,应变片布置情况如图 2 所示。

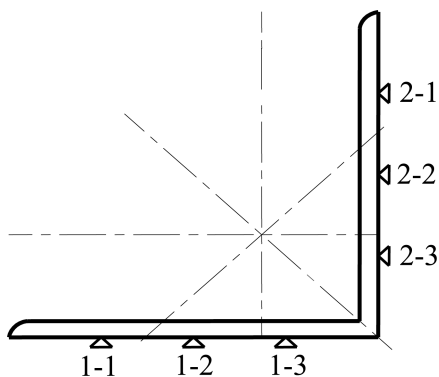


图 2 应变片布置示意图

Fig.2 Arrangement of strain gauge

1.3 腐蚀疲劳试验

无腐蚀纯疲劳试验,其结果反映未经腐蚀损伤

的试件真实的疲劳性能,可与经不同腐蚀方式作用后试件的疲劳性能做对比,以便更好地发现腐蚀模式对等边角钢材料疲劳性能退化规律的影响。无间隔振动 F 和间隔振动 DCF 两种试验工况,旨在研究风速变化对构件疲劳性能退化的影响,试验中模拟间隔疲劳的振动次数确定为纯疲劳试验所得试件疲劳寿命 N_{jf} 的 1/3。按照重庆市气象局提供重庆地区年降雨分布情况,统计得出三种典型腐蚀方式^[11],使试验中角钢试件承受“腐蚀-疲劳”循环荷载的作用^[12,13]。具体工况如表 1 所示。根据文献[14]推荐的重庆酸雨平均组成配制模拟酸雨溶液,采用加速腐蚀,溶液 pH 值为 2。

由表 1 可知,无腐蚀纯疲劳试验和腐蚀疲劳试验采用单组试验,而腐蚀方式变化的腐蚀疲劳试验分 3 组,共 39 根试件。按文献[12]的建议,每组疲劳试验的荷载水平相等,疲劳荷载取值为静强度 σ_b 的 0.573、0.485、0.413、0.374、0.328、0.294 倍,共计 6 个荷载级, S_j ($j=1, 2, \dots, 6$) 分别为 308.394、264.908、221.433、199.718、177.962、156.218 MPa。同时,根据文献[13]、[15]的建议,成组试验的 d 值取为 3,即当疲劳荷载 S_3 为 221.43 MPa 时,试验需要 8 个试件作为平行试件。

表 1 腐蚀疲劳试验分组

Tab.1 The groups of corrosion fatigue test

Test numbers	Corrosion and fatigue condition			Corrosion and fatigue cycles	Corrosion time/h	The number of specimens	
	Corrosion way		Vibration time interval				
	Soak time/h	Air buy time/h					Times
F				N_0		6	
DCF				$N_0/3$		6	
CF1	2.0	2.0	3	$N_0/3$	3	36.0	13
CF2	3.0	3.0	2	$N_0/3$	3	36.0	13
CF3	6.0	6.0	1	$N_0/3$	3	36.0	13

2 结果及分析

2.1 纯疲劳试验现象

试件角部最先出现疲劳裂纹,随着振动的持续施加,试件角部裂纹开展导致角钢两肢破坏。由各级荷载水平下试件断口的特征可见,荷载水平较大时,试件断口参差不齐,角钢试件断裂面可观察到拉伸断裂后的收缩,表现出一定的塑性破坏特征^[16]。

当荷载水平较小时,肉眼虽然未能观察到明显的疲劳裂纹产生和发展,但是随着疲劳振动荷载的减小,断口逐渐平整,断口破坏形式表现出一定的脆性破坏特征。

由试验结果可得,随疲劳荷载的增大,试验所得试件疲劳寿命延长。当荷载为 308.39 MPa 时,试件由加载到破坏所经历的振动次数最多;当荷载降低至 156.22 MPa 时,试件疲劳寿命与无腐蚀纯疲劳试验结果差距较小。

2.2 腐蚀试验现象

腐蚀损伤试验时，试件浸泡于酸性腐蚀溶液中，肉眼可观察到试件表面产生了相当数量的微小气泡，且有灰黑色的反应产物渐渐产生于试件表面和容器中，随浸泡时间的延长，气泡及反应产物持续不断地产生。将腐蚀后试件置于空气中，随即可观察到试件表面锈迹加重。试件承受间隔振动之后，观察到试件表面锈迹减轻，试件的金属色逐渐显露，反映间隔振动试验中 Q345 钢材的晶粒发生重组或裂纹逐渐开展。

对比试件承受腐蚀和疲劳交替作用后再次腐蚀后的表现可得，角钢构件在腐蚀损伤和疲劳损伤循环作用后再次经腐蚀损伤后的损伤状态与角钢构件未受疲劳荷载作用直接进行腐蚀损伤的状态显著不同，腐蚀溶液进入疲劳振动导致的裂纹中，扩大了材料与腐蚀溶液的接触面积，大大加快了腐蚀速率，试件表面的锈迹更明显。

2.3 “腐蚀-疲劳”试验现象

不同腐蚀模式所对应的疲劳荷载越低，不同腐蚀方式造成的疲劳性能损失越明显。疲劳荷载相同，因腐蚀方式不同造成的试件破坏形式差别不大。荷载越低，试件断口越平滑、整齐，显示出较明显的脆性破坏特征。

2.4 腐蚀疲劳试验结果

纯疲劳试验所得 Q345 角钢疲劳寿命见表 2。

为研究不同加载方式对试件疲劳寿命的影响，并进一步与不同腐蚀方式下试件的疲劳寿命做对比，在纯疲劳试验中保证加载方式相同，间隔振动次数不同进行一组试验 DCF，其结果如表 3 所示。试验中“腐蚀-疲劳”循环加载次数为 3 次。各组试件前两次振动次数相同，且在相同时间中分别采用三种腐蚀循环方式进行腐蚀模拟。三种腐蚀方式下各组试件部分疲劳试验结果如表 3 和图 3 所示。由纯疲劳试验与腐蚀疲劳试验结果分析可得，CF1 对应的试件受腐蚀影响最显著，其疲劳寿命显著减小，而 CF3 对应的试件的疲劳寿命几乎未受腐蚀的影响。例如，疲劳振动荷载 S_{\max} 为 221.43 MPa 时，CF1 和 CF2 两组试件的平均疲劳寿命比 CF3 依次减少 5.1%和 2.7%。荷载水平较大时，试件疲劳寿命受腐蚀方式的影响变弱，疲劳振动荷载 S_{\max} 为 308.39 MPa 时，试验中 Q345 角钢构件疲劳性能未观察到明显的退化规律，但是当 S_{\max} 减小到 156.22 MPa 时，CF1 比 CF3 试验所测得的疲劳寿命减小了 6.3%，而 CF2 的疲劳寿命减小了 4.5%。

表 2 无间隔振动的疲劳试验结果(N: cycle)

Tab.2 Fatigue test results of specimens under continuous vibration (N: cycle)

S_{\max} /MPa	N	$\ln N$
308.394	916	6.820 02
264.908	4537	8.420 02
221.433	10 996	9.305 38
199.718	18 734	9.838 10
177.962	50 727	10.834 21
156.218	97 951	11.492 22

表 3 腐蚀疲劳寿命试验结果(N: cycle)

Tab.3 Fatigue life under different corrosion modes (N: cycle)

Groups	S_{\max}	No.	N_1	N_2	N_3	N	$\ln N$
DCF	308.39	F2-1	305	305	1441	2051	7.6261
	221.43	F2-3	3666	3666	6457	13 789	9.5316
	156.22	F2-6	32 650	32 650	42 089	107 389	11.5842
CF1	308.39	CF1-1	305	305	666	1276	7.1515
	221.43	CF1-3-3	3666	3666	4132	11 464	9.3470
	156.22	CF1-6	32 650	32 650	18 464	83 764	11.3358
CF2	308.39	CF2-1	305	305	1350	1960	7.5807
	221.43	CF2-3-3	3666	3666	2104	9436	9.1523
	156.22	CF2-6	32 650	32 650	20 069	85 369	11.3547
CF3	308.39	CF3-1	305	305	969	1579	7.3645
	221.43	CF3-3-3	3666	3666	5521	12 853	9.4613
	156.22	CF3-6	32 650	32 650	24 076	89 376	11.4006

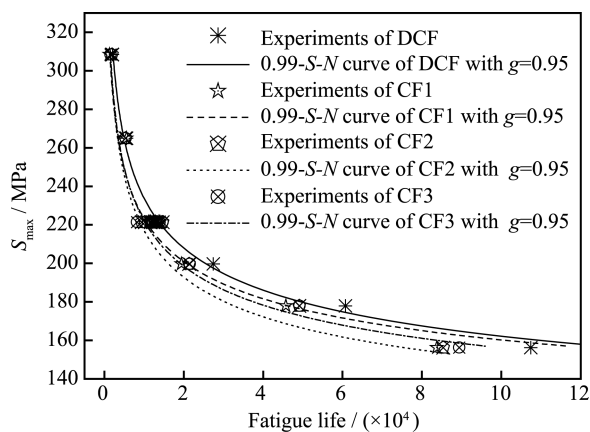


图3 不同腐蚀方式的疲劳试验 $S-N$ 曲线

Fig.3 $S-N$ curves of Q345 equilateral steel with three groups of corrosion modes

3 结论

通过腐蚀疲劳试验,研究分析了相同腐蚀时间内不同腐蚀方式作用下 Q345 等边角钢构件疲劳寿命的变化规律,由试验现象及测试数据对比分析可知:

1) Q345 角钢构件经溶液中浸泡腐蚀损伤后在空气中的“晾置”时间,是影响其腐蚀损伤发展的重要因素。构件疲劳振动次数随“浸泡-晾置”循环次数的增加而降低,并且几种腐蚀损伤方式中,CF1 方式对角钢构件造成的损伤最严重,相同疲劳荷载作用下角钢构件疲劳性能退化最明显,振动次数最少。

2) 腐蚀损伤方式相同的情况下,角钢构件承受的疲劳振动荷载越大,疲劳性能受腐蚀损伤的影响越不明显;角钢构件承受的疲劳荷载越小,腐蚀损伤的影响越显著,脆性破坏特征越明显。腐蚀方式对试件疲劳寿命的影响程度随疲劳荷载的减小而增加。

参考文献

- [1] EVANS U R, SIMNAD M T. The Mechanism of Corrosion Fatigue of Mild Steel[M]. London: Proc Royal Society, 1947: 372—392.
- [2] KAYSER J R. The Effects of Corrosion on the Reliability of Steel Girder Bridges[D]. Ann Arbor: University of Michigan, 1988.
- [3] WILSON I L M, ROBERTS B W. The Metallography of Corrosion Fatigue in Type 403 Stainless Steel[J]. Corrosion, 1972, 28(12): 469.
- [4] 王荣. 金属材料的腐蚀疲劳[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2001.
WANG Rong. Corrosion Fatigue of Metallic Materials[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2001.
- [5] BERETT S. An Investigation of the Effects of Corrosion on the Fatigue Strength of AIN Axle Steel[J]. Proc Mech E, 2008, 222: 129—143.
- [6] AKPAN U O. Risk Assessment of Aging Ship Hull Structures in the Presence of Corrosion and Fatigue[J]. Marine Structures, 2002, 15: 211—231.
- [7] 张春涛. 腐蚀环境和风振疲劳耦合作用下输电塔线体系疲劳性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
ZHANG Chun-tao. Study on Fatigue of Transmission Tower-line Coupled System with the Coupling Effect between Corrosion and Fatigue Vibration[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [8] GB 5009—2012, 建筑结构荷载规范[S].
GB 5009—2012, Load Cod for the Design of Building Structures[S].
- [9] GB 50545—2010, 110~750 kV 架空输电线路设计规范[S].
GB 50545—2010, Code of Design of 110~750 kV Overhead Transmission Line[S].
- [10] DLT 5154—2012, 架空输电线路杆塔结构设计技术规定[S].
DLT 5154—2012, Technical Code for the Design of Tower and Pole Structures of Overhead Transmission Line[S].
- [11] 梁仁杰. 模拟重庆酸雨对金属材料危害的研究[J]. 重庆环境保护, 1986, 8(2): 6—10.
LIANG Ren-jie. Simulated Acid Rain in Chongqing the Research on Metal Material Damage[J]. Chongqing Environmental Protection, 1986, 8(2): 6—10.
- [12] 高镇同. 疲劳性能测试[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
GAO Zhen-tong. Test of Fatigue Performance [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1980.
- [13] 熊俊江. 疲劳断裂可靠性工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
XIONG Jun-jiang. Fatigue and Fracture Reliability and Engineering[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008.
- [14] 臧启山, 刘慷, 马敏雅, 等. 频率、pH 值和温度对 A537 海洋用钢腐蚀疲劳性能的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1989, 1(2): 10—14.
ZANG Qi-shan, LIU Yong, MA Min-ya, et al. Frequency, pH and Temperature Affect the Performance of A537 Steel Corrosion Fatigue of Ocean[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1989, 1(2): 10—14.
- [15] 周春良, 梁枢果. 钢结构塔架的风振疲劳分析[J]. 建筑技术开发, 2005, 32(3): 1—3.
ZHOU Chun-liang, LIANG Shu-guo. Analysis of Wind Induce Vibration Fatigue of Steel Towers[J]. Building Technique Development, 2005, 32(3): 1—3.
- [16] 王荣. 腐蚀疲劳裂纹扩展的断裂模型[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1998, 18(2): 87—94.
WANG Rong. A Fracture Model for Corrosion Fatigue Crack Propagation Process[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1998, 18(2): 87—94.