DOI:10.11973/fsyfh240386

海上风机螺栓用钢的腐蚀及疲劳行为

吴重仲¹,刘大勇¹,闫文吉¹,丁彦超¹,张 鹏¹,朴俊凯²,曲明贵³

(1.中广核(福建)风力发电有限公司,福州 350001;2.燕山大学机械工程学院,秦皇岛 066004;3.燕山大学深圳研究院,深圳 518057)

摘 要:通过干湿交替循环盐雾模拟海上风机螺栓所处浪花飞溅区和大气区服役环境,对螺栓用钢 42CrMoA进行腐蚀试验。采用扫描电子显微镜(SEM)观察腐蚀产物并用能谱仪(EDS)检测其元 素,采用光学轮廓仪表征腐蚀坑形貌,用原位疲劳试验机研究腐蚀后的疲劳裂纹扩展。结果表明:在 干湿交替的循环盐雾环境中,42CrMoA钢单位面积腐蚀质量损失与腐蚀时间呈现幂函数规律; 42CrMoA钢表面粗糙度与腐蚀时间之间呈线性关系;腐蚀坑促进了疲劳裂纹的萌生和扩展,多个裂 纹的扩展与融合加速了试样的断裂,从而降低了疲劳寿命。

关键词:螺栓;42CrMoA钢;盐雾试验;腐蚀;疲劳

中图分类号:TG174 文献标志码:A 文章编号:1005-748X(2024)11-0061-08

风能是清洁的可再生能源,大力发展风电,是实 现碳达峰与碳中和目标、改善全球气候目标的有效 途径^[1-2]。相对于陆上风能,海上风能储存量更大、 分布更广;而且,开发海上风能对人们的居住和生产 环境的影响较小^[3-4]。然而,海上气候较为恶劣,高 湿度和高氯含量给风电机组带来很大的安全隐 患^[5]。螺栓是影响风电机组安全和寿命的关键零 件。通常情况下,一台风力发电机机组有数百个螺 栓用以连接叶片、机架、塔筒、主轴、轮毂这些关键零 部件^[6-7]。海上高湿度和高浓度氯离子的环境对螺 栓有很强的腐蚀作用。螺栓腐蚀会直接影响风电机 组的安全和寿命。

42CrMoA 是一种中碳低合金钢,具有很高的强度和优异的韧性^[8•9]。它是制造大规格海洋风电机组用高强度螺栓的典型材料。在海洋环境中, 42CrMoA 钢的耐蚀性很差^[10]。虽然,大多数螺栓都通过表面处理或防护涂层等方法进行了防腐蚀处理,但如果防护层消耗完,或者在螺栓安装及检修过程中防护层磕碰损伤,螺栓基体就会与腐蚀环境接触而发生腐蚀。腐蚀会减少螺栓的截面积,导致表面粗糙度增加,显著影响结构的疲劳寿命^[11]。海洋风电机组中螺栓主要处在浪花飞溅区和大气区,目

收稿日期:2024-06-11

前关于 10.9 级螺栓在该环境中的腐蚀行为,以及腐 蚀之后疲劳开裂行为的研究鲜见报道。

因此,作者通过干湿交替的循环盐雾试验模拟 海上浪花飞溅和雾气缭绕的恶劣环境,对 42CrMoA 钢进行腐蚀试验,用扫描电子显微镜观察腐蚀产物 并用能谱仪检测其元素组成,用光学轮廓仪表征腐 蚀坑形貌,并用原位疲劳试验机研究腐蚀后的疲劳 裂纹扩展,分析腐蚀坑对疲劳开裂的影响。研究结 果对评估海上风电螺栓寿命和提高风电机组安全具 有实际意义。

1 试 验

1.1 试验材料

试验材料为 42CrMoA 钢,从 10.9 级海上风力 发电机用螺栓上切下尺寸为 15 mm×10 mm× 3 mm 的试样。使用 800~2000 号砂纸逐级打磨试 样表面,之后进行机械抛光,使试样表面粗糙度低于 0.025 μm。最后,用无水乙醇对抛光后的试样进行 清洁和脱脂处理,并充分干燥。

1.2 盐雾试验

根据 GB/T 24195-2009《金属和合金的腐蚀 酸性盐雾、"干燥"和"湿润"条件下的循环加速腐蚀 试验》标准中的方法 B,采用 Q-FOG CCT 型循环盐 雾腐蚀试验箱进行盐雾腐蚀试验。一个循环周期的 试验参数为:盐雾阶段1h,温度 35 ℃,pH 2.5,盐溶 液沉降率(80 cm² 试样表面)为(1.5±0.2) mL/h; 干燥阶段 4 h,温度 60 ℃,相对湿度(RH)小于30%;

通信作者:朴俊凯(1998-),硕士,研究方向为金属材料的腐 蚀与疲劳行为、中间合金的研发与冶炼,13731432356, 17803262660@163.com

湿润阶段 3 h,温度 40 ℃、相对湿度(85±5)%。在试验箱中一次放入多个试样,每隔一段时间取出一个试样,取样周期为 8、16、24、48、72、96、168、240 h。

1.3 腐蚀产物和形貌观察

用扫描电子显微镜(SEM)观察不同盐雾时间 段的腐蚀产物,并用其配备的能谱仪(EDS)对腐蚀 产物进行元素分析。

根据 GB/T 16545-2015《金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除》清除腐蚀产物:取 50 mL 盐酸,0.35 g 六次甲基四胺,加蒸馏水配制成 100 mL 溶液,在 25 ℃水浴环境中振荡 10 min 去除 试样表面的腐蚀产物。对除锈后试样进行清洗、干 燥、称量,采用失重法计算腐蚀速率,如式(1)所示。

$$v = \frac{8.76 \times (m_0 - m_1)}{\rho \times S \times t} \times 10^3 \tag{1}$$

式中:v 为腐蚀速率,mm/a; m_0 为腐蚀前试样质量, mg; m_1 为腐蚀除锈后试样质量,mg; ρ 为材料密度, g/cm³;S 为试样腐蚀暴露的表面积,mm²;t 为腐蚀 时间,h。

在清除试样表面腐蚀产物后,使用 MicroXAM 3D 型三维共聚焦表面形貌仪表征腐蚀坑形貌,扫描 视场范围为 3.5 mm×2.5 mm。

1.4 原位疲劳试验

为了研究腐蚀坑对疲劳开裂的影响,用扫描电

镜与伺服液压疲劳装置相结合的原位观察疲劳试验 机,在室温下对盐雾腐蚀 240 h后 42CrMoA 钢试样 进行原位疲劳试验。疲劳试样的尺寸如图 1 所示, 两端夹持部位用防锈胶带缠绕保护,露出标距段。 盐雾腐蚀和除锈方法同 1.2 节。在疲劳试验中,应 力控制方案为:最大应力 σ_{max} 为 910 MPa,应力比 r为 0.3,正弦波加载,工作频率为 8 Hz,动态观察频 率为 0.01 Hz。为有效追踪裂纹的萌生与扩展过 程,在 500~1 000 倍放大倍数下原位观察试样表面 裂纹形貌。



图 1 疲劳试样尺寸 Fig. 1 Dimensions of fatigue specimen

2 结果与讨论

2.1 腐蚀产物

图 2 为 42CrMoA 钢在循环盐雾腐蚀初期阶段的 产物形貌。结果表明:盐雾腐蚀 8 h 后,42CrMoA 钢





Fig. 2 Surface morphology of 42CrMoA steel after salt spray testing for 8-48 hours: (a) 8 h, macro morphology; (b) 24 h, macro morphology; (c) 48 h, macro morphology; (d) 8 h, micro morphology; (e) 24 h, micro morphology; (f) 48 h, micro morphology

表面已全部被褐色腐蚀物覆盖,但分布并不均匀,如 图 2(a) 所示, 在扫描电子显微镜下, 可以看到很多 大小不一的疏松颗粒,如图 2(d) 所示: 当盐雾腐蚀 时间延长至 24 h 时,42CrMoA 钢的腐蚀更严重一 些,不规则颗粒状腐蚀产物增多,颗粒尺寸也更大, 如图 2(b),(e)所示;当盐雾腐蚀 48 h 后,腐蚀颗粒 的堆集逐渐致密,有发展为层片状的趋势,但仍然存 在间隙。

图 3 为 42CrMoA 钢盐雾腐蚀较长时间(96~

240 h)后的形貌。结果表明:盐雾腐蚀 96 h 后, 42CrMoA钢表面颗粒状腐蚀产物逐渐堆积成片,但 腐蚀产物层在基体表面附着不牢固,很容易脱落;在 盐雾腐蚀 168 h 后,42CrMoA 钢腐蚀非常严重,产 物已形成厚实的片状,局部腐蚀产物与基体分离,表 面起伏不平,锈层上存在着裂纹,如图 3(e)中的箭 头所示;当盐雾腐蚀 240 h 后,锈层变得更厚,裂纹 变得更宽、更深,在局部剥落的锈层下可观察到紧密 排列的颗粒状腐蚀产物。



(d) 96 h, 微观形貌



(f) 240 h, 微观形貌



Fig.3 Surface morphology of 42Cr/MoA steel after salt spray testing for 96-240 hours: (a) 96 h, macro morphology; (b) 168 h, macro morphology; (c) 240 h, macro morphology; (d) 96 h, micro morphology; (e) 168 h, micro morphology; (f) 240 h, micro morphology

图 4 和 5 为盐雾腐蚀 24 h 和 240 h 后 42CrMoA 钢表面腐蚀产物 EDS 分析结果。可以看到,Fe、O 元 素在盐雾腐蚀 24 h 和 240 h 的腐蚀产物中存在明显 富集现象:Cl元素在盐雾腐蚀 24 h 后的腐蚀产物中 只存在少量,而在盐雾腐蚀 240 h 后试样的整个视场 均有体现,这说明盐雾腐蚀时间越长,Cl元素的沉积 越明显。研究表明,Cl-由于具有较高的电导率和较 强的穿透力而诱发、活化并促进 42CrMoA 钢表面发 生点蚀^[12-13]。同时,从衬度上看到,腐蚀产物中 Fe、 Mo 元素含量随着盐雾时间的延长而减少。

2.2 腐蚀速率

图 6 为 42CrMoA 钢在盐雾腐蚀期间的质量损 失和腐蚀速率。根据式(2)对腐蚀数据进行拟合。

50 um

50 µm

 cm^2 ; A 为常数; n 为反映金属腐蚀趋势的常数。

拟合后方程如式(3)所示,回归系数 R^2 为 0.996 8,符合幂函数规律^[14-15]。

$$M = 0.88t^{0.59} \tag{3}$$

50 um

由图 6 可见,42CrMoA 钢的盐雾腐蚀可分为两 个阶段。第一阶段(0~48 h)为腐蚀前期,此阶段腐 蚀较快,随着盐雾腐蚀的进行,腐蚀速率逐渐降低; 当盐雾腐蚀持续到 48 h 时,42CrMoA 钢的质量损 失为 8.9 mg/cm²,腐蚀速率为 2.07 mm/a。第二阶 段(48~240 h)为腐蚀的中后期,此阶段腐蚀速率趋 于平缓,特别是盐雾腐蚀 96 h 后;这是因为在盐雾 腐蚀前期,表面产生的腐蚀产物疏松且分散,不能 有效阻止腐蚀性离子对试样的腐蚀,而随着盐雾 腐蚀时间的增长,腐蚀产物堆集成层,减缓了腐蚀 速率[16]。



(d) Cl

图 4 盐雾腐蚀 24 h 后 42CrMoA 钢表面腐蚀产物 EDS 分析结果







Fig. 5 EDS analysis results of corrosion products on 42CrMoA steel surface after salt spray testing for 240 h



Fig. 6 Mass loss curve (a) and corrosion rate curve (b) of 42CrMoA steel in salt spray testing

2.3 腐蚀坑形貌

图 7 为 42CrMoA 钢盐雾腐蚀不同时间后表面

3D形貌和深度曲线。盐雾腐蚀 24 h 后,试样表面 存在较明显的腐蚀坑,而其四周则较为平整,为未腐



Fig. 7 3D morphology (a, c, e, g, i) and depth curves (b, d, f, h, j) of 42CrMoA steel surface after salt spray corrosion for different periods of time

蚀的基体。图 7(b)是图 7(a)中箭头所指路径的深 度曲线,可以看到腐蚀坑的最深处有 13.6 μ m。盐 雾腐蚀 48 h后,表面粗糙区域增大,腐蚀坑加深变 宽,最深处为 24.2 μ m。盐雾腐蚀 96 h后,腐蚀坑最 深处已经有 37.2 μ m,试样表面全部被腐蚀。随着腐 蚀时间的延长,腐蚀坑深度加深,盐雾腐蚀 240 h后, 凹坑最大深度为 90.4 μ m。这说明,在干湿交替的 盐雾腐蚀环境中,42CrMoA 钢的腐蚀并不是均匀的,而是形成许多点蚀坑。

对图 7 中表面粗糙度(R_a)和腐蚀坑最大深度 (D)数据进行统计,结果如图 8 所示,并且拟合得到 它们与腐蚀时间之间的关系,如式(4)和式(5)所示。

 $R_{a} = 0.042t + 1.42$

D = 0.34t + 5.63

(4)

(5)





Fig. 8 Surface roughness (a) and maximum corrosion pit depth (b) of 42CrMoA steel after salt spray corrosion for different periods of time

2.4 疲劳裂纹形貌

表面粗糙度/um

对盐雾腐蚀 240 h 的疲劳试样进行原位观察疲 劳试验,观察疲劳微裂纹的萌生和扩展。42CrMoA 钢表面裂纹的萌生扩展情况如图 9 所示。加载前,试 样表面存在大量由盐雾腐蚀产生的腐蚀坑,试样表面 并不平整。在疲劳试验中,当循环加载 24 267 周次 时,多条微裂纹自腐蚀坑缺口处成核,如图 9(a)所示;随后,这些初生的微裂纹在交变载荷的作用下不断扩展与合并,形成了两条尺寸较长的新裂纹,如图 9(b)所示。当循环加载 35 840 周次时,这两条裂纹 相互合并成为一条长裂纹,且沿着裂纹尖端向前扩展,如图 9(c)所示。



(a) 24 267周次

(b) 30 498周次

(c) 35 840周次



2.5 讨 论

众多研究表明^[17-18],在含有 Cl⁻的环境中,碳钢的腐蚀包括不同阶段的多反应步骤。而 42CrMoA 钢 在海洋盐雾环境中的腐蚀产物主要为 γ -FeOOH、 β -FeOOH、Fe₃O₄、Fe₂O₃、 α -FeOOH。

在盐雾环境中,由于存在较多的 Cl⁻,金属基体 和腐蚀产物界面会生成部分 FeOCl,其水解则会生 成黄 褐 色 球 形 团 簇 状 的 腐 蚀 产 物 β-FeOOH。 β-FeOOH 的形成需要 Cl⁻ 为其提供结构支撑,其晶 体结构可容纳 Cl⁻,这也是 β-FeOOH 通常在湿度 较大且富含 Cl⁻的环境中才容易形成的原因^[19]。 因此,β-FeOOH 是盐雾环境中腐蚀产物演化的关键 物质^[20]。

高含 Cl⁻环境也会促使 γ-FeOOH、β-FeOOH 向红褐色层片状的 α-FeOOH 转化,从而使锈层的 密度提高。α-FeOOH 是室温下稳定性最好的羟基 氧化铁,通常作为铁氧化物转化的最终形态,其在 42CrMoA 钢表面逐渐形成连续、均匀的锈层,对腐 蚀具有一定的减缓作用[21]。

盐雾环境中 Cl⁻的存在使试样表面产生点蚀, 从而导致零件横截面积减小且产生应力集中,这将 大幅度缩短裂纹萌生的启动时间。在交变载荷的工 况下,疲劳裂纹率先从表面缺陷处萌生。由于工件 表面的缺陷较多,多裂纹的扩展融合也会导致工件 疲劳寿命大幅度缩减。

3 结 论

通过干湿循环的盐雾试验模拟海洋浪花飞溅区 和大气区盐雾环境,研究了 42CrMoA 钢螺栓在该 环境中的腐蚀行为,并利用原位观察疲劳试验研究 了腐蚀对疲劳裂纹的萌生与扩展的影响。主要结论 如下:

(1)单位面积腐蚀质量损失与腐蚀时间呈现幂 函数规律,拟合方程为 *M*=0.88*t*^{0.59};腐蚀速率呈现 初期快,后期慢的特性。

(2) 42CrMoA 钢的盐雾腐蚀是不均匀的,表面 粗糙度与腐蚀时间之间呈线性关系,拟合方程为 $R_a=0.042t+1.42$ 。

(3) 42CrMoA 钢表面的腐蚀坑促进了疲劳裂 纹的萌生和扩展,从而降低了疲劳寿命。

参考文献:

- [1] QIN L G, KIRIKKALELI D, HOU Y, et al. Carbon neutrality target for G7 economies: examining the role of environmental policy, green innovation and composite risk index [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 295:113119.
- [2] LOTH E. Wind energy value and deep decarbonization design, what's next? [J]. Next Energy, 2023, 1(4): 100059.
- [3] 郑崇伟,李崇银.海上风能等级区划研究:瓶颈与对策
 [J].中国科学院院刊,2023,38(4):654-665.
 ZHEN C W, LI C Y. Research on offshore wind energy classification: bottlenecks and countermeasures
 [J]. Bulletin of Chinese Academic of Sciences, 2023, 38(4):654-665.
- [4] 赵仕林,杨金龙,童颜,等.海上风电变流器 IGBT 模 块腐蚀与防护研究进展[J].材料导报,2023,37(增 2):407-413.

ZHAO S L, YANG J L, TONG Y, et al. Progress on corrosion and protection of IGBT modules used in offshore wind power converter [J]. Materials Reports, 2023, 37(S2):407-413.

- [5] 李美明,徐群杰,韩杰.海上风电的防腐蚀研究与应用现状[J].腐蚀与防护,2014,35(6):584-589,622.
 LI M M, XU Q J, HAN J. Progress of corrosion and protection for offshore wind power [J]. Corrosion and Protection, 2014,35(6):584-589,622.
- [6] 蒲珉,何建军,揭军,等.风机叶片根部 42Cr 螺栓材料 扭转失效研究[J]. 兵器材料科学与工程,2022,45(3): 119-124.
 PU M,HE J J,JIE J, et al. Research on torsion failure of 42Cr bolt material at fan blade root[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2022, 45(3): 119-124.
- [7] 罗雁飞,肖长远,雷春宇,等.海上风电机组叶片螺
 栓疲劳强度影响研究[J].船舶工程,2023,45(增2): 83-88.

LUO Y F, XIAO C Y, LEI C Y, et al. Research on the influence of fatigue strength of offshore wind turbine blade bolts[J]. Ship Engineering, 2023, 45 (S2):83-88.

[8] 居龙,冯超,赵劲彪,等. 42CrMo 高强度螺栓在海洋大 气环境中的应力腐蚀开裂风险评估[J]. 腐蚀与防护, 2019,40(9):644-649.

JU L, FENG C, ZHAO J B, et al. Risk assessment of stress corrosion cracking of 42CrMo high strength steel bolts in seacoast environment [J]. Corrosion &. Protection, 2019, 40(9):644-649.

- [9] OZTURK M, HUSEM F, KARADEMIR I, et al. Fatigue crack growth rate of AISI 4140 low alloy steel treated via shot peening and plasma nitriding [J]. Vacuum, 2023, 207:111552.
- [10] 周文,兰伟,赵帅,等. 42CrMo 钢在氯离子溶液中的 腐蚀行为研究[J].表面技术,2017,46(8):216-220.
 ZHOU W, LAN W, ZHAO S, et al. Corrosion behavior of 42CrMo steel in chloride solution[J].
 Surface Technology,2017,46(8):216-220.
- [11] WU H Y, LEI H G, FRANK C Y. Comparison on mechanisms of high-cycle fatigue performance of structural steel exposed to urban industrial atmosphere and laboratory simulated corrosive environment based on infrared thermography [J]. International Journal of Fatigue, 2021, 145: 106098.
- [12] WAN Y, TAN J, ZHU S T, et al. Insight into atmospheric pitting corrosion of carbon steel via a dual-beam FIB/SEM system associated with highresolution TEM [J]. Corrosion Science, 2019, 152: 226-233.
- [13] 李宗强,韦素欣,王艳丽,等.550NH 耐候钢在 3 种典 型大气环境中的初期腐蚀行为[J].材料保护,2024,

57(3):104-111,117.

LI Z Q, WEI S X, WANG Y L, et al. Initial corrosion behavior of 550NH weathering steel in three typical atmospheric environments [J]. Materials Protection, 2024,57(3):104-111,117.

[14] 王睿谦,韩宇龙,郭丽雅,等.稀土镧铈对 Q355NHq 钢在模拟海洋大气环境中腐蚀行为的影响[J].腐蚀 与防护,2024,45(3):37-46.

> WANG R Q, HAN Y L, GUO L Y, et al. Effect of rare earth lanthanum and cerium on corrosion behavior of Q355NHq steel in simulated marine almosphere environment[J]. Corrosion & Protection, 2024,45(3):37-46.

- [15] NIU J W, ZHANG B, DING G Q, et al. Study of short-term corrosion behavior of Q345 steel in marine atmospheric environment[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2023, 18(12):100374.
- [16] FAN Y M, LIU W, LI S M, et al. Evolution of rust layers on carbon steel and weathering steel in high humidity and heat marine atmospheric corrosion[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 39:

190-199.

- [17] ALCÁNTARA J, DE LA FUENTE D, CHICO B, et al. Marine atmospheric corrosion of carbon steel: a review[J]. Materials, 2017, 10(4): 406.
- [18] DATTA T, PATHAK A D, BASAK S, et al. Fractal behavior of surface oxide crack patterns on AISI 4140 high-strength low-alloy steel exposed to the simulated offshore environment [J]. Applied Surface Science Advances, 2021, 5:100110.
- [19] LI C, MU X, WANG C G, et al. Insight to atmosphere corrosion behavior of Q345NH steel in Wenchang tropical marine environment[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24:5755-5768.
- [20] MA Y T, LI Y, WANG F H. Corrosion of low carbon steel in atmospheric environments of different chloride content[J]. Corrosion Science, 2009, 51(5): 997-1006.
- [21] WANG Y, MU X, DONG J H, et al. Insight into atmospheric corrosion evolution of mild steel in a simulated coastal atmosphere[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 76:41-50.

Corrosion and Fatigue Behavior of Steel for Offshore Wind Turbine Bolts

WU Zhongzhong¹, LIU Dayong¹, YAN Wenji¹, DING Yanchao¹, ZHANG Peng¹, PIAO Junkai², QU Minggui³

(1. China Guangdong Nuclear (FuJian) Wind Power Generation Co., Ltd., Fuzhou 350001, China;

2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

3. Shenzhen Research Institute, Yanshan University, Shenzhen 518057, China)

Abstract: Corrosion tests were conducted on bolt steel 42CrMoA in the simulated service environment of offshore wind turbine bolts in the splash zone and atmospheric zone through alternating wet dry cycles of salt spray. The corrosion products were observed by scanning electron microscopy (SEM) and their elements were detected by energy dispersive spectroscopy (EDS). The morphology of corrosion pits was characterized by optical profilometer, and the fatigue crack growth after corrosion was studied by in-situ fatigue testing machine. The results show that in the cyclic salt spray environment with alternating dry and wet conditions, the corrosion mass loss per unit area of 42CrMoA steel and corrosion time exhibited a power function. There was a linear relationship between the surface roughness and corrosion time of 42CrMoA steel. The initiation and propagation of fatigue cracks were promoted by corrosion pits, and the expansion and merging of multiple cracks accelerated the fracture of the specimen, thereby reducing the fatigue life.

Key words: bolt; 42CrMoA steel; salt spray test; corrosion; fatigue