

风电场塔筒螺栓腐蚀分析

李岩¹, 房海峰², 孙作峰², 何梓洋¹, 陈有为¹, 王玉飞¹

(1.深圳国能宸泰科技有限公司, 广东 深圳 518000;
2.中广核射阳风力发电有限公司, 江苏 盐城 224000)

摘要: **目的** 分析风电场塔筒螺栓的腐蚀现状。**方法** 采用化学成分分析、金相分析、冲击性能测试、拉伸性能测试、硬度测试等方法对螺栓进行分析。**结果** 使用前后螺栓螺母垫圈的成分均符合标准。对使用前后的螺栓进行冲击、拉伸、硬度性能测试均符合安全要求。使用前后, 螺栓金相为 1~4 级, 符合国家标准。晶粒度测试显示, 使用前为 7.5~8.0 级, 使用后为 8 级。通过螺栓截面成分分析, 锈层内渗入的氯离子促进了腐蚀的发生。**结论** 在役的螺栓满足安全使用要求; 在恶劣的自然环境的综合作用下, 螺栓发生了电化学腐蚀和缝隙腐蚀; 最后对螺栓的使用及维护提出建议。

关键词: 风电塔筒; 腐蚀; 螺栓; 电化学腐蚀; 缝隙腐蚀

中图分类号: TG172 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)12-0079-010

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.12.013

Analysis of Corrosion of Bolts in Wind Power Tower Tube

LI Yan¹, FANG Hai-feng², SUN Zuo-feng², HE Zi-yang¹, CHEN You-wei¹, WANG Yu-fei¹

(1. Shenzhen Guoneng Chentai Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;

2. China Guangdong Nuclear Power Sheyang Wind Power Co., Ltd., Yancheng 224000, China)

ABSTRACT: In view of the corrosion status of bolts in wind power towers, chemical composition analysis, metallographic analysis, impact property test, tensile property test, hardness test and other methods were used to analyze the bolts. The results show that the composition of bolts, nuts, washers before and after use meets the standard. The impact, tensile, and hardness performance tests on the bolts before and after use all meet the safety requirements. The metallography of the bolts before and after use is 1~4, in line with national standards, and the grain size test shows that it is 7.5~8.0 before use and is 8 after use. Therefore, it is concluded that the bolts in service meet the requirements for safe use; under the combined action of the harsh natural environment, the bolts have undergone electrochemical corrosion and crevice corrosion. Finally, suggestions are made for the use and maintenance of bolts.

KEY WORDS: wind power tower barrel; corrosion; bolt; electrochemical corrosion; crevice corrosion

某沿海风电场塔筒运行 6 年零 4 个月, 其风机组螺栓锈蚀严重, 基础混凝土开裂, 有渗水的风险, 长

此下去势必会降低风机的寿命, 对风机的安全运行造成威胁。塔筒的螺栓型号为 EN14399-4, 性能等级为

收稿日期: 2021-04-28; 修订日期: 2021-06-25

Received: 2021-04-28; Revised: 2021-06-25

作者简介: 李岩 (1979—), 女, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为金属腐蚀与防护。

Biography: LI Yan (1979—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: metal corrosion and protection.

引文格式: 李岩, 房海峰, 孙作峰, 等. 风电场塔筒螺栓腐蚀分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(12): 079-088.

LI Yan, FANG Hai-feng, SUN Zuo-feng, et al. Analysis of corrosion of bolts in wind power tower tube[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(12): 079-088.

10.9级,产品规格为M36-155和M39-160。42CrNiMo中碳钢经调质处理后,具有较好的耐热性、弹性、强韧性和淬透性,被广泛应用于重要机械零部件的制造中,也成为用于螺栓的钢材。海上作业环境恶劣,为了保证螺栓的耐蚀性能,需要对螺栓进行镀铬膜涂层处理,即达克罗处理。

为避免螺栓表面大面积腐蚀,寻找风机螺栓在海上作业的腐蚀原因,文中对送检螺栓进行了取样、实验分析。通过宏观分析、化学成分分析、金相分析和冲击性能测试、拉伸性能测试、硬度测试等方法对螺栓腐蚀进行了分析。

1 取样螺栓腐蚀形貌

共取25套螺栓副用于实验室检测,其中包括腐蚀较严重的M36-155螺栓副8套,编号依次为M36-1—M36-8;腐蚀较严重的M39-160螺栓副8套,编号依次为M39-1—M39-8;腐蚀较轻的M36-155螺栓副3套,编号依次为M36-9—M36-11;新采购的M36-155螺栓副3套,编号依次为M36-I—M36-III;新采购的M39-160螺栓副3套,编号依次为M39-I—M39-III;

样品如图1所示。

风机现场取样的高强螺栓宏观腐蚀形貌如图2所示,前期的螺栓、螺母、垫圈上均有涂层,经过现场使用后,螺母表面涂层大面积起皮、脱落,裸露金属受到腐蚀,表现为红褐色和黄色,严重的会出现金属腐蚀疏松,氧化皮层层脱落;垫片同样发生较严重的腐蚀,且垫片边缘的腐蚀程度较中部严重,部分垫圈边缘腐蚀脱落;相比螺母和垫圈,螺栓的螺杆部位腐蚀程度较轻,个别螺栓在靠近上螺母部位的螺纹存在较轻的腐蚀情况。

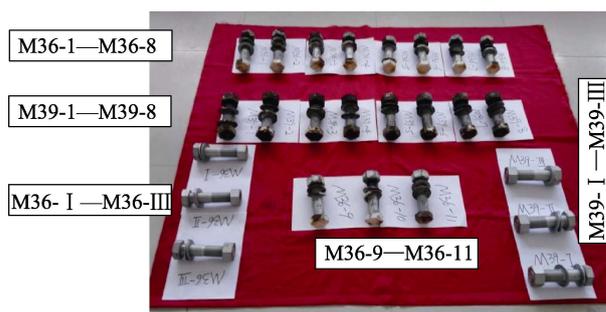


图1 样品编号

Fig.1 Sample number chart



a 螺栓上部腐蚀形貌



b 螺栓下部腐蚀形貌



c 螺栓宏观腐蚀形貌 1



d 螺栓宏观腐蚀形貌 2

图2 高强螺栓宏观腐蚀形貌

Fig.2 Macroscopic corrosion morphology of high-strength bolts: a) corrosion morphology of the upper part of the bolt; b) corrosion morphology of the bottom part of the bolt; c) the first macroscopic corrosion morphology of the bolts; d) the second macroscopic corrosion morphology of the bolts

2 实验结果与分析

2.1 螺栓成分分析

分别在每组样品的螺杆、螺母和垫圈上取样,用

全谱直读光谱仪对其化学成分进行分析。检测位置为样品的中间部位,每个样品检测三点并取平均值,以保证成分的准确性,实验结果见表1。检测结果表明,M39螺栓使用后,Mn元素含量稍高于标准值,通过后续性能检测结果来看,稍高的锰含量并未影

表 1 螺栓的化学成分和标准要求
Tab.1 The chemical composition and standard requirements of the bolts

部位		元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
		标准值	0.38~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.025	≤0.025	0.90~1.20	0.15~0.25
螺栓	实测值	M36-1	0.40	0.26	0.71	0.013	0.0062	0.94	0.22
		M39-1	0.40	0.26	0.87	0.011	0.0032	0.97	0.20
		M36-III	0.43	0.21	0.67	0.016	0.0041	0.99	0.19
		M39-III	0.40	0.21	0.68	0.012	0.0041	0.95	0.19
		标准值	0.42~0.50	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	—	—
螺母	实测值	M36-1	0.46	0.19	0.59	0.018	0.027	—	—
		M39-1	0.44	0.20	0.63	0.023	0.019	—	—
		M36-III	0.45	0.21	0.58	0.016	0.0083	—	—
		M39-III	0.46	0.21	0.54	0.016	0.0074	—	—
		标准值	0.42~0.50	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	—	—
垫圈	实测值	M36-1	0.47	0.24	0.56	0.012	0.010	—	—
		M39-1	0.48	0.21	0.57	0.013	0.0086	—	—
		M36-III	0.46	0.18	0.56	0.023	0.022	—	—
		M39-III	0.45	0.18	0.58	0.022	0.0046	—	—

响其基本力学性能，可能是由于成分偏析、取样等其他外部因素导致的。其余试样使用前后的螺栓、螺母、垫圈材料的成分符合 GB/T 3098.1—2010《紧固件机械性能螺栓、螺钉和螺柱》和 GB/T 3098.2—2000《紧固件机械性能螺母、粗牙螺纹》规定，成分合格。

2.2 拉伸性能试验

在各试样螺栓螺杆的杆部，选取 5 mm 的纵向圆棒试样 3 根，在室温下使用万能实验机进行拉伸实验，结果见表 2。螺栓的抗拉强度、屈服强度、断后伸长率和断面收缩率都满足 GB/T 3098.1—2010《紧固件机械性能螺栓、螺钉和螺柱》规定，螺栓的拉伸性能合格。

表 2 螺栓拉伸性能试验结果
Tab.2 Bolt tensile performance test results

项目	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长 率 A/%	断面收缩 率 Z/%	
标准值	≥1040	≥940	≥9	≥48	
实测值	M36-1	1140	1030	15.5	60
	M36-2	1196	1103	14.0	58
	M36-3	1122	1016	14.5	62
	M39-1	1149	1021	15.0	56
	M39-2	1134	996	16.0	60
	M39-3	1121	975	15.0	59

2.3 冲击性能试验

从送检的螺栓杆部取 10 mm×10 mm×10 mm 的 V 型缺口试样 3 根，螺栓低温冲击性能试验结果见表 3。

根据 GB/T 3098.1—2010《紧固件机械性能螺栓、螺钉和螺柱》规定，试验温度为-20℃。考虑到国内类似风电法兰紧固件螺栓的通行检测标准和使用，本实验选择实验温度为-40℃，且合格标准的冲击功不变（≥27 J）。从测试结果来看，M39-4 螺栓使用过后的实测冲击韧性较低，但考虑到螺栓的已使用年限以及冲击试验结果具有一定的离散性，并且 M39-4 螺栓冲击功的平均值大于标准规定值，可以认为螺栓的冲击韧性合格。整体上来说，各螺栓副满足 GB/T 3098.1—2010《紧固件机械性能螺栓、螺钉和螺柱》的要求。

表 3 螺栓冲击性能试验结果
Tab.3 Bolt impact performance test results

项目	冲击功/J			
标准值	≥27			
实测值	M36-4	39.3	38.5	44.4
	M36-III	39.5	41.5	41.2
	M39-4	35.3	27.1	24.4
	M39-III	41.2	44.1	45.9

2.4 硬度试验

取螺栓、螺母、垫圈样品分别进行硬度检验，在每个试样表面随机选取三个点进行硬度测试。螺栓副的硬度试验结果见表 4，其中螺栓的洛氏硬度 HCR 符合标准 GB/T 3098.1—2010《紧固件机械性能螺栓、螺钉和螺柱》的要求，硬度合格。螺母的维氏硬度 HV30 较标 GB/T 3098.2—2000《紧固件机械性能螺母、粗牙螺纹》偏低。垫圈的洛氏硬度 HRC 符合 GB/T 1231—2006《钢结构用高强度大六角头螺栓、

大六角头螺母、垫圈技术条件》要求。

表4 螺栓副硬度试验结果
Tab.4 Bolt pair hardness test results

部位	编号	测量值			平均值	标准值
螺栓 (HRC)	M36-4	35.5	35.7	35.4	35.5	32~39
	M39-4	36.1	36.5	36.3	36.3	
	M36-III	33.6	33.1	33.5	33.4	
	M39-III	32.7	32.9	32.8	32.8	
螺母 (HV30)	M36-4	265.1	259.7	264.8	263.2	272~353
	M39-4	273.2	269.2	268.4	270.3	
	M36-III	262.7	260.0	269.1	263.9	
	M39-III	273.2	269.2	268.4	270.3	
垫圈 (HRC)	M36-4	41.7	41.4	41.4	41.5	35~45
	M39-4	36.8	36.5	36.9	36.7	
	M36-III	35.9	36.5	36.2	36.2	
	M39-III	41.9	42.9	41.2	42.0	

2.5 金相组织分析

按照取样方案,分别对使用前后的 M36 和 M39 两种规格的螺栓、螺母、垫圈进行微观组织分析。

使用前, M36 和 M39 螺栓经研磨抛光后,用硝酸酒精溶液腐蚀,其金相组织如图 3—5 所示,参照 GB/T 13320《钢质模锻件金相组织评级图及评定方法》评定金相组织的等级。对比图 3 a—c 可以得出,未使用螺栓的金相组织为回火索氏体组织,金相组织为 1 级;对比图 3b、3d 可以得出,使用后螺栓的金相组织为回火索氏体+铁素体,金相组织评级为 3 级;对比图 4、图 5 可以看出,使用前后螺母、垫圈的金相组织为回火索氏体+条块状铁素体,金相评级为 4 级。

根据 GB/T 13320 规定,1~4 级金相组织为合格。

2.6 晶粒度检测

试样研磨抛光后,用过饱和苦味酸+酒精+洗涤液腐蚀, M36 和 M39 螺栓使用前后的金相组织如图 6 所示。根据 GB/T 66394—2017《金属平均晶粒度测定方法》对金相组织进行晶粒度评级,使用前 M36 螺栓的平均晶粒度为 7.0~7.5 级;使用后 M36 螺栓的平均晶粒度为 7.5~8.0 级;使用前 M39 螺栓的平均晶粒度为 7.5~8.0 级;使用后 M39 螺栓的平均晶粒度为 8.0 级。

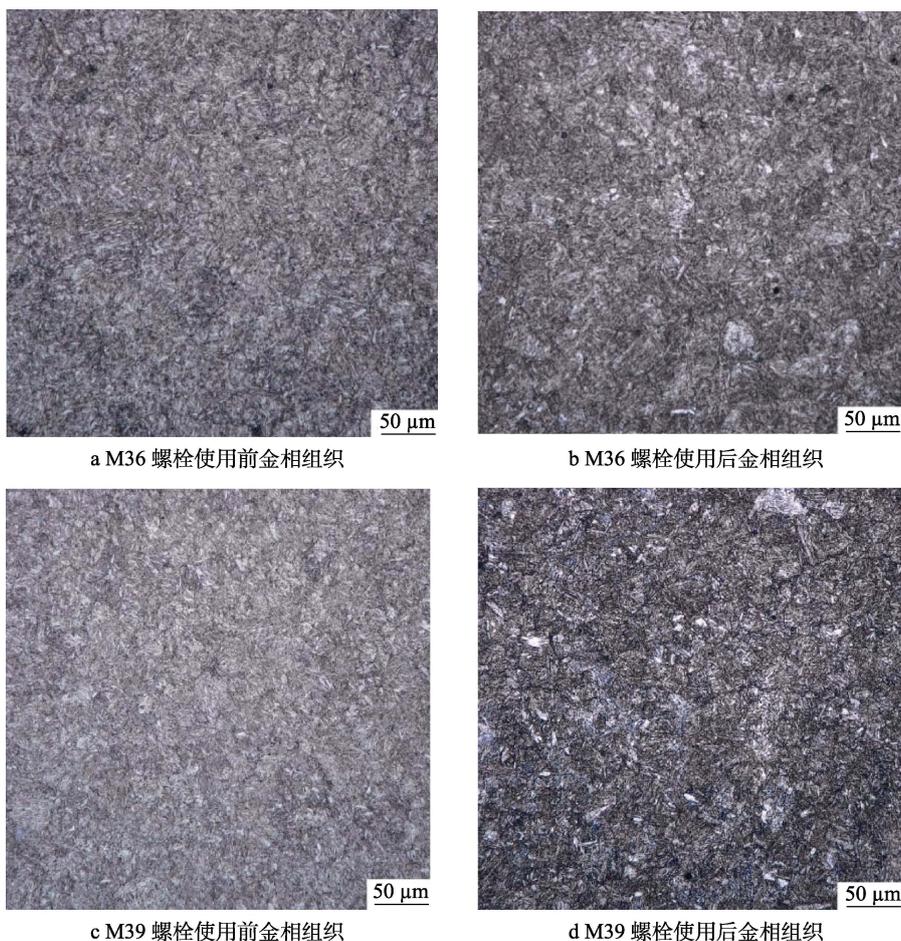


图3 螺栓使用前后金相组织

Fig.3 Metallographic organization of bolts before and after use: a) metallographic organization of M36 bolts before use; b) metallographic organization of M36 bolts after use; c) metallographic organization of M39 bolts before use; d) metallographic organization of M39 bolts after use

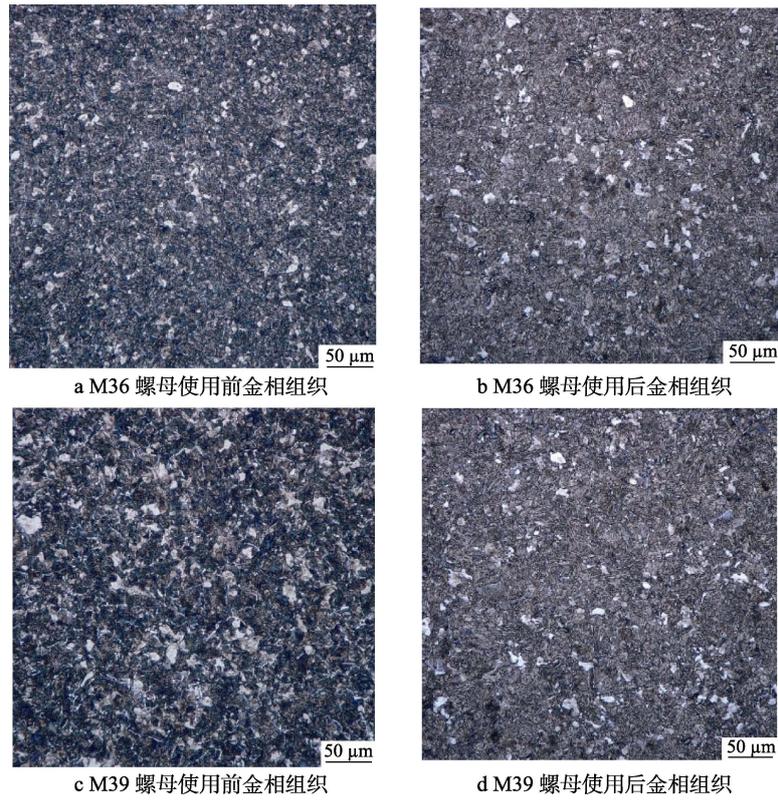


图 4 螺母使用前后金相组织

Fig.4 Metallographic organization of nuts before and after use: a) metallographic organization of M36 nuts before use; b) metallographic organization of M36 nuts after use; c) metallographic organization of M39 nuts before use; d) metallographic organization of M39 nuts after use

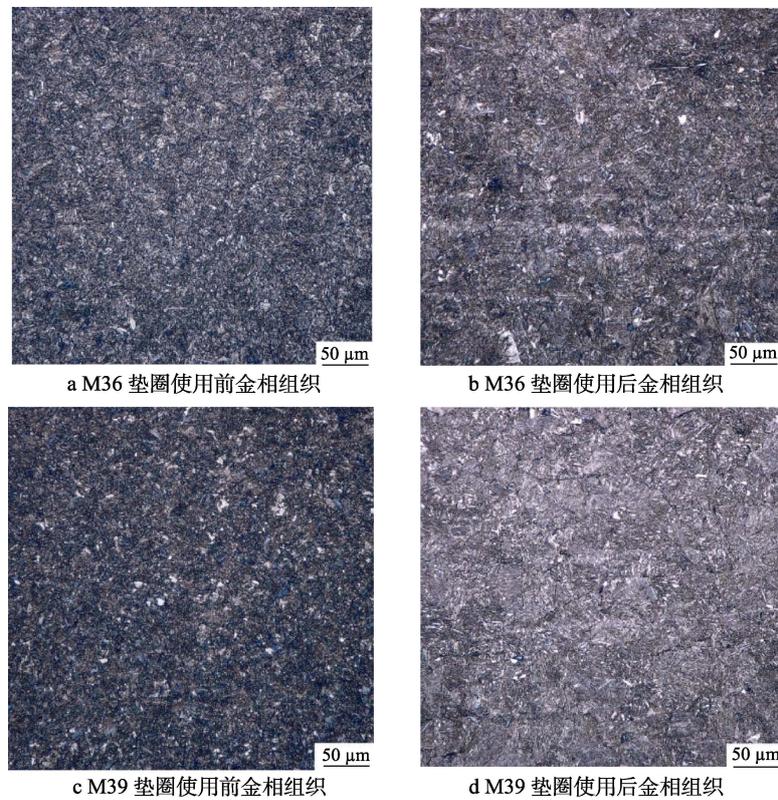


图 5 垫圈使用前后金相组织

Fig.5 Metallographic organization of gaskets before and after use: a) metallographic organization of M36 gaskets before use; b) metallographic organization of M36 gaskets after use; c) metallographic organization of M39 gaskets before use; d) metallographic organization of M39 gaskets after use

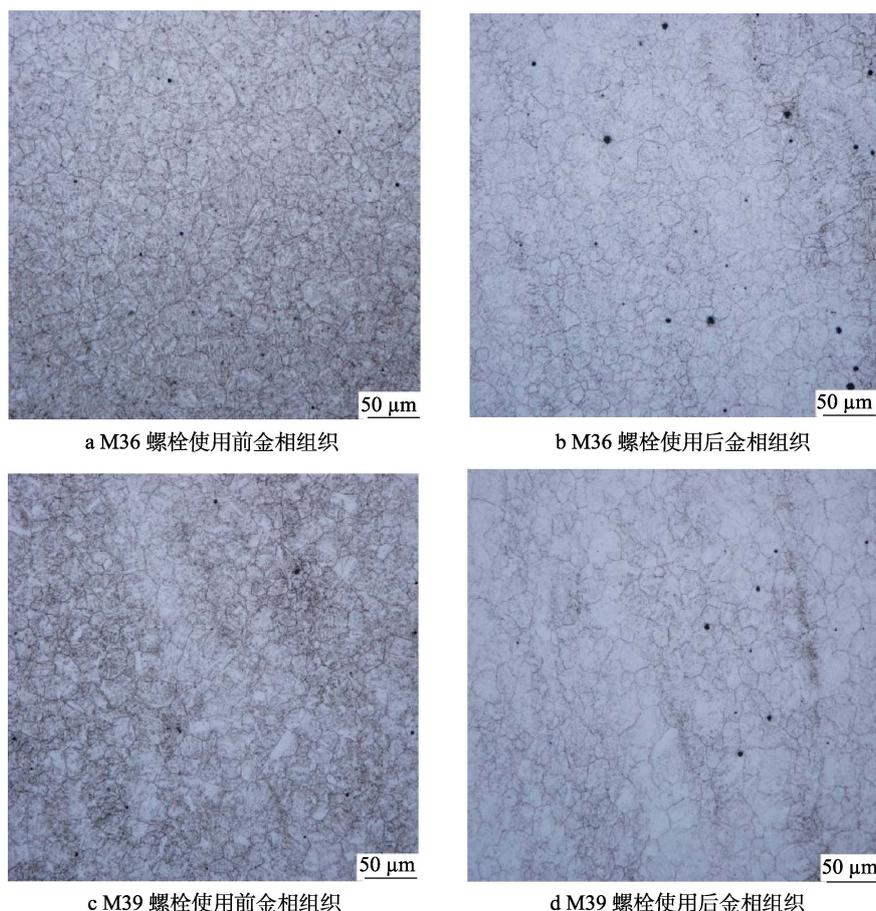


图6 螺栓副使用前金相组织

Fig.6 Metallographic organization of bolts before and after use: a) metallographic organization of M36 bolts before use; b) metallographic organization of M36 bolts after use; c) metallographic organization of M39 bolts before use; d) metallographic organization of M39 bolts after use

2.7 非金属夹杂物分析

螺栓使用前，纵截面的金相组织如图7、图8所示，可见基体中分布着点状和线状的非金属夹杂物。根据GB/T 10561《钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法》规定，对使用前M36和M39螺栓组织中的非金属夹杂物进行评级，发现M39螺栓的夹杂物含量普遍多于M36螺栓的夹杂物含量，具体评级结果如下。

1) 使用前螺栓。

M36: D类(球状氧化物)细系3级;

M39: D类(球状氧化物)细系1.5级,粗系2.5级; DS类(单颗粒球状物)2.5级。

2) 使用后螺栓。

M36: D类(球状氧化物)细系3级。

M39: A类(硫化物)细系1.5级; D类(球状氧化物)细系2级; DS类(单颗粒球状物)1.5~2.0级。

2.8 锈蚀产物分析

为了更好地探究螺栓表面影响腐蚀发生的因素，对螺栓截面进行了腐蚀产物分析。如图9所示，铬元

素集中分布在腐蚀产物中，有利于形成稳定结构的锈层。该螺栓组应用于海洋环境，空气潮湿且富含大量的氯离子，因此，在锈蚀产物中可以检测到大量的氯元素，氯元素分布在整个基体表面甚至临近的基体内。可以认为，氯离子的出现增加了向基体内部发生大量腐蚀的风险，进而促进了腐蚀的发生，是螺栓副大面积腐蚀的主要原因。在P点处，螺栓截面的氯质量分数为1.88%，铬质量分数为0.19%。

3 综合分析

通过对比分析使用前螺栓的化学成分、力学性能(抗拉强度、屈服强度、断后伸长率、断面收缩率)、低温冲击性能、硬度、微观组织(金相、夹杂物、晶粒度)等，可以判定使用后已发生腐蚀的螺栓副是否安全，能否继续满足使用需求。

通过对使用前螺栓副的化学成分测试结果进行分析，发现使用前M36和M39两种螺栓、螺母、垫圈的成分均符合标准要求;使用后M36的螺栓、螺母、垫圈成分符合标准要求;使用后M39的螺母、垫圈成分符合标准要求，但螺栓中的Mn元素质量分

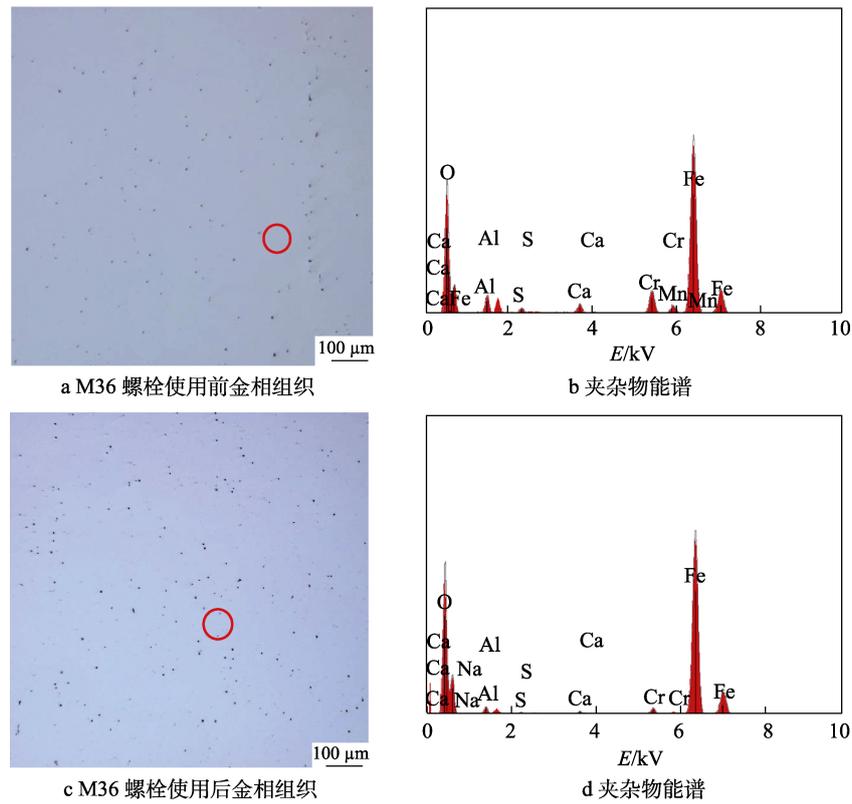


图 7 M36 螺栓使用前金相组织

Fig.7 Metallographic organization of M36 bolts before use: a) metallographic organization of M36 bolts before use; b) energy spectrum of impurities in M36 bolt; c) metallographic organization of M36 bolts after use; d) energy spectrum of impurities in M36 bolt

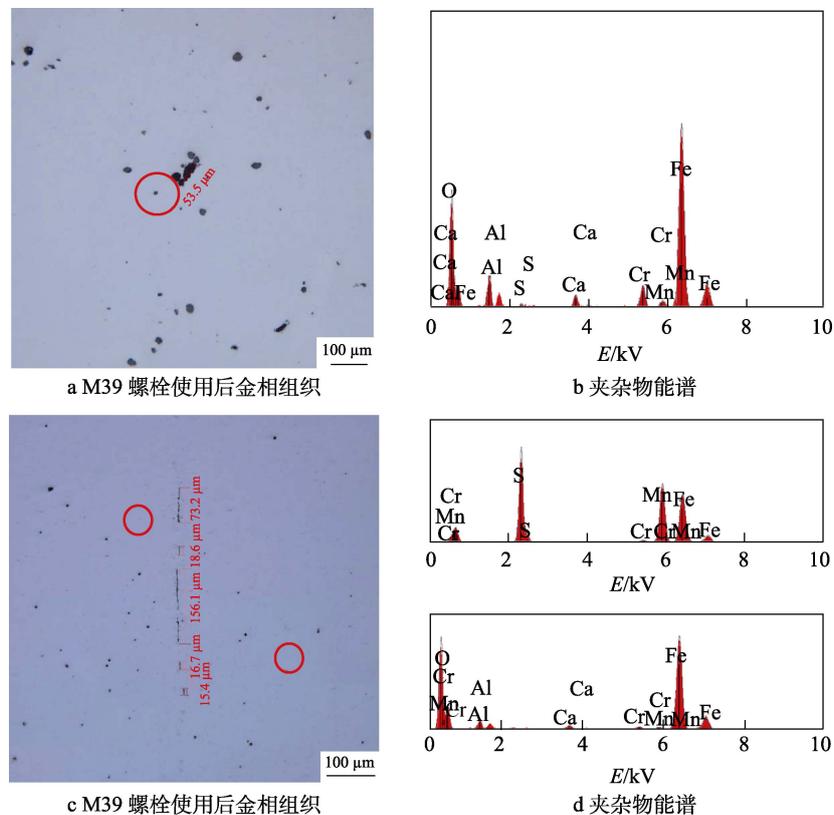


图 8 螺栓使用后金相组织

Fig.8 Metallographic organization of M39 bolts after use: a) metallographic organization of M39 bolts before use; b) energy spectrum of impurities in M39 bolt; c) metallographic organization of M39 bolts after use; d) energy spectrum of impurities in M39 bolt

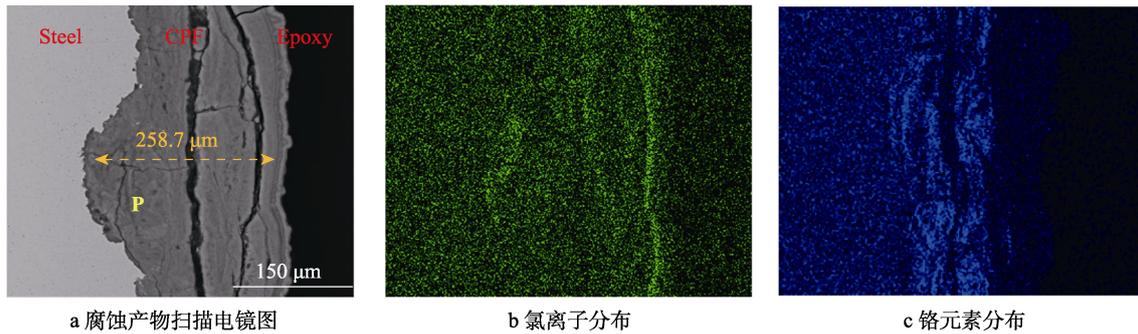


图9 螺栓截面成分分析

Fig.9 Analysis of bolt cross-section composition: a) SEM image of corrosion products; b) chloride distribution; c) chromium distribution

数(0.87%)稍高于标准值(0.5%~0.8%)。锰元素在钢材中的作用主要表现为:可以有效提高材料的强度、淬透性,并通过和夹杂的硫元素结合,减少硫元素对钢材产生的热脆性。但锰含量增加到一定程度后,会促使晶粒长大,降低材料的塑性和韧性,并增加第二类回火脆性的倾向。综合考虑锰元素的优缺点,我国把42CrMo的锰元素含量定在0.5%~0.8%;美国ASTM A193/A193M-15a中把锰元素含量定为0.65%~1.1%,因为锰含量的增加对提高淬透性有积极作用。此外,从力学性能和金相组织的测试结果来看,并没有因为锰元素含量的偏高而出现异常。因此,即使锰元素质量分数为0.87%,超过了我国的标准,但仍在可接受范围内。

使用前螺栓副的力学性能测试结果表明,使用前后的M36和M39两种螺栓的抗拉强度、屈服强度、断后伸长率、断面收缩率、低温冲击韧性均符合标准要求。硬度试验结果表明,螺栓、垫圈硬度符合标准要求,但螺母硬度较标准值偏低。因为在设计紧固件螺栓副时,螺栓的硬度一般都略高于螺母硬度。大多数情况下,螺栓的加工、更换难度和成本大于螺母,所以适当降低螺母的强度,让损坏尽量发生在螺母部分。如:GB150.2《压力容器第2部分:材料》中规定“调质状态使用的螺母用钢,其回火温度应高于组合使用的螺柱用钢的回火温度”。材料在淬火后回火温度越高,其硬度和强度应越低。因此,本测试结果螺母硬度稍低于标准值对螺栓副的性能影响不大,可以接受。

使用前螺栓副的金相组织测试结果表明,使用前螺栓的金相组织为1级回火索氏体组织,使用后螺栓的金相组织为3级回火索氏体+铁素体组织;使用前,螺母、垫圈的金相组织为回火索氏体+条块状铁素体,金相评级为4级^[1]。根据GB/T 13320规定:除非供需双方特殊约定,1~4级金相组织为合格。对使用前后的M36和M39螺栓组织中的非金属夹杂物进行评级,结果如下:使用前M36螺栓中D类(球状氧化物)夹杂物为细系3级;使用前M39螺栓中D类(球状氧化物)夹杂物为细系1.5级,粗系2.5级,

DS类(单颗粒球状物)夹杂物2.5级;使用后M36螺栓中D类(球状氧化物)夹杂物为细系3级;使用后M39螺栓中A类(硫化物)夹杂物为细系1.5级,D类(球状氧化物)夹杂物为细系2级,DS类(单颗粒球状物)夹杂物为1.5-2.0级^[2]。通常来说,对于高强度紧固件材料,一般要求球状氧化物夹杂物(D类)控制在2级以内。实际使用的螺栓中,D类球状氧化物夹杂偏高,会影响螺栓基体本身的耐腐蚀性能^[3]。通过对螺栓截面锈层的成分分析,认为在海洋环境下,氯离子渗入整个锈层和表层基体,是造成腐蚀发生的原因^[4]。

综上分析,虽然使用后的螺母、垫圈和螺栓端部发生了不同程度的腐蚀,但通过相关测试分析发现,尽管螺栓副腐蚀较严重,但各项性能指标合格,不影响使用的安全性^[5-6]。

通过分析使用后螺栓副的腐蚀状态,并结合风电的自然环境状况,找出导致腐蚀发生的主要原因。分析如下。

达克罗(dacrotized)又称锌铬膜涂层,将水基锌铬涂料进行刷涂、浸涂或喷涂于零件或构件表面,通过烘烤,在钢铁表面形成鳞片状锌和锌的铬酸盐,形成均匀的无机涂层,以达到防腐耐蚀的效果^[7]。达克罗涂层的制作作为一种高新技术和生产工艺,在国际上被誉为是具有划时代意义的表面处理行业新工艺,在国内仍处于起步阶段。达克罗涂层保护基体的原理为:电化学牺牲阳极保护,即将存在两种电极电位差的金属视为阴阳极,形成内部电池。镀锌涂层作为阳极,在反应中逐渐被消耗,进而保护作为阴极的结构金属^[7]。达克罗涂层由Zn/Al粉末和铬酸盐复合而成,厚度为200nm左右,直径小于20μm,由数十层超细鳞片状结构组成,通过这种片状超细金属粉末的相互重叠来隔绝腐蚀介质,以减少腐蚀的发生^[8-9]。

同样,通过电化学方法起到牺牲阳极保护作用的传统镀锌层中,电镀锌作为单层金属锌,腐蚀路线很短。而达克罗涂层重叠叠加的极薄鳞片锌、铝和铬酸盐层,大大提高了腐蚀线路的复杂性^[10]。有研究表明,

铬酸在腐蚀过程中要对每片鳞片锌进行钝化包裹, 因此, 同样厚度的达克罗涂层比传统镀锌层的腐蚀路线曲折延长很多^[11]。达克罗涂层和电镀锌钝化层的极化曲线如图 10 所示, 相比较电镀锌, 达克罗涂层的自然腐蚀电位升高, 说明其真实极化曲线高于镀锌层的真实极化曲线^[12-13]。曲线越陡, 极化度越大, 电极过程中受阻滞的程度越大。综上, 达克罗涂层的抗腐蚀性明显大于镀锌钝化膜的抗腐蚀性能^[14]。

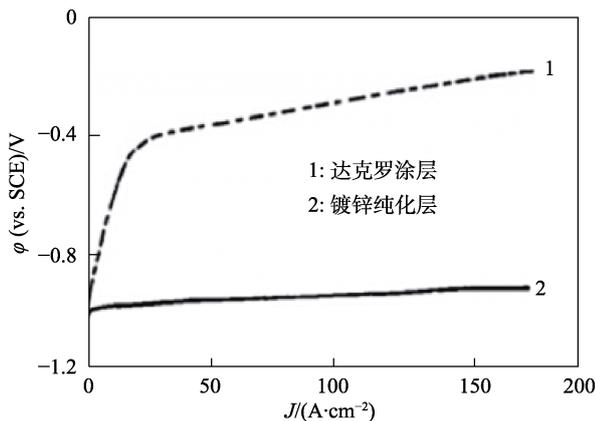


图 10 达克罗涂层与电镀锌钝化涂层的阳极极化曲线
Fig.10 Anode polarization curve of Dacromet coating and electro-galvanized passivation coating

达克罗作为一种新型的表面处理方法, 具有如下优点: 1) 极高的耐腐蚀性能。经达克罗工艺处理的标准件和管接件可在耐盐雾试验中保持 1200 h 以上, 不出现红锈。2) 无氢脆性。适合在结构件表面的涂覆^[15]。3) 高耐热性。耐热温度可达 300 °C 以上^[16]。4) 表面良好的结合性及再涂性能。处理后的零件易于进行喷涂着色, 与有机涂层的结合能力甚至超过磷化膜。5) 良好的渗透性。

达克罗涂层也有一定的局限性: 1) 达克罗中含有对环境和人体有害的铬离子, 六价铬离子具有致癌作用, 不利于环保。2) 达克罗的烧结温度高、时间长、能耗大, 制作成本高。3) 达克罗表面非常容易出现划痕和磕痕, 耐磨性较差。4) 导电性能不佳, 不适合用于导电连接的部件, 如接地螺栓等。与此同时, 达克罗涂层的产品不适合与铜、镁、镍和不锈钢的零部件接触与连接, 因为会产生接触性腐蚀, 影响产品的表面质量及防腐性能。因此, 达克罗涂层的使用具有局限性^[17]。

带有盐分的腐蚀介质在法兰及螺栓上聚集, 防腐涂层很容易由于外力(运输、安装、维护等)的作用发生局部破损, 腐蚀性介质穿过防腐涂层直接与法兰金属的基体接触, 发生电化学腐蚀^[18]。此外, 法兰处设备结构比较复杂, 很容易在法兰、螺母、螺栓、垫圈等位置形成缝隙; 在含有溶解氧、带盐分的溶液小环境中, 形成良好的缝隙腐蚀条件; 腐蚀产物的聚集及局部缝隙内外的环境差异(缝隙内外存在氧浓度差,

金属离子水解, 溶液酸化, 溶液 pH 值下降等)^[19,20], 进一步加快了腐蚀速度, 促进了腐蚀的进一步发展。

4 结论和建议

1) 在役的螺栓满足现阶段的安全使用要求, 但螺栓在实际包装、运输、安装、校核过程中会对表层达克罗涂层产生不同程度地损坏, 降低涂层防腐效果; 在恶劣的自然环境综合作用下, 螺栓会发生电化学腐蚀和缝隙腐蚀。

2) 采购新螺栓时, 要严格控制产品质量, 向螺栓生产厂家索取螺栓热处理状态及各项相关性能测试报告, 并委托第三方复验其基本性能, 全面检验螺栓性能是否满足标准要求; 在螺栓服役过程中, 要使用润滑剂, 对螺栓提供防腐防锈蚀保护。

3) 螺栓副经受海风、日晒、积水、海盐等综合作用, 很容易产生腐蚀问题, 需要对螺栓副的腐蚀问题重点关注; 仅仅依靠涂漆很难满足风机设计寿命内的安全服役, 需要对其进行特殊保护(如防锈剂+螺栓帽保护等)。

参考文献:

- [1] 李炯辉. 金属材料金相图谱[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
LI Jiong-hui. Metallographic atlas of metallic materials[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [2] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
CUI Zhong-qi, QIN Yao-chun. Metal science and heat treatment[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [3] 赵海川, 黄海江. 风电行业高强度螺栓的润滑问题分析[J]. 风能, 2010(4): 64-66.
ZHAO Hai-chuan, HUANG Hai-jiang. Analysis of the lubrication of high-strength bolts in the wind power industry[J]. Wind energy, 2010(4): 64-66.
- [4] 王月香, 赵英杰. 风电行业及风电塔架用钢的现状与发展趋势[J]. 莱钢科技, 2015(2): 1-4.
WANG Yue-xiang, ZHAO Ying-jie. Current situation and development trend of wind power industry and steels for wind power[J]. Laigang science & technology, 2015(2): 1-4.
- [5] 玄晓阳, 白润昊. 腐蚀监测系统海上风电场的实例应用分析[J]. 全面腐蚀控制, 2020, 34(9): 81-86.
XUAN Xiao-yang, BAI Run-hao. Application analysis of corrosion monitoring system in offshore wind farm[J]. Total corrosion control, 2020, 34(9): 81-86.
- [6] 吴智泉, 陈亮, 张新, 等. 风电塔筒高强度螺栓大面积腐蚀分析[J]. 热加工工艺, 2019, 48(10): 253-259.
WU Zhi-quan, CHEN Liang, ZHANG Xin, et al. Analysis on large area corrosion of high strength bolts in wind power tower tube[J]. Hot working technology, 2019,

- 48(10): 253-259.
- [7] 王青, 裴政, 童鹤, 等. 达克罗涂层技术进展研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(2): 138-142.
WANG Qing, PEI Zheng, TONG He, et al. Research progress in dacromet coating technique[J]. Ordnance material science and engineering, 2013, 36(2): 138-142.
- [8] 巴彬彬, 谭勇, 安成强. 达克罗技术的现状及发展[J]. 辽宁化工, 2020, 49(1): 83-85.
BA Bin-bin, TAN Yong, AN Cheng-qiang. Development and present situation of dacromet technology[J]. Liaoning chemical industry, 2020, 49(1): 83-85.
- [9] 余剑, 曹歆昕, 李吉丹, 等. 紧固件达克罗耐蚀性能研究[J]. 现代涂料与涂装, 2017, 20(03): 36-38.
YU Jian, CAO Xin-xin, LI Ji-dan, et al. Research on dacromet anti-corrosion for fasteners[J]. Modern paint & finishing, 2017, 20(03): 36-38.
- [10] 刘鹏, 江社明, 李远鹏, 等. 高强度紧固件用涂层的耐腐蚀性[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(12): 886-892+897.
LIU Peng, JIANG She-ming, LI Yuan-peng, et al. Corrosion resistance of coatings for high-strength fastening parts [J]. Corrosion & protection, 2019, 40(12): 886-892+897.
- [11] 王春净, 李召华, 杨后川. 高强螺栓质量影响因素的分析[J]. 机械制造, 2017, 55(5): 109-110.
WANG Chun-jing, LI Zhao-hua, YANG Hou-chuan. Analysis of the factors affecting the quality of high strength bolt[J]. Machinery, 2017, 55(5): 109-110.
- [12] JTJ 275—2000, 海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范[S].
JTJ 275—2000, Technical code for anti-corrosion of concrete structures in seaport engineering[S].
- [13] JTS 153—3—2007, 海港工程钢结构防腐蚀技术规范[S].
JTS153—3—2007, Technical code for anti-corrosion of steel structure in seaport engineering[S].
- [14] 王旭. 混凝土防腐措施及评价方法分析[J]. 全面腐蚀控制, 2019, 33(7): 69-70.
WANG Xu. Analysis of concrete anti-corrosion measures and evaluation methods[J]. Total corrosion control, 2019, 33(7): 69-70.
- [15] 廉发军. 钢筋混凝土结构防腐蚀问题及处理措施[J]. 全面腐蚀控制, 2019, 33(5): 94-95.
LIAN Fa-jun. Corrosion prevention of reinforced concrete structure and its treatment measures[J]. Total corrosion control, 2019, 33(5): 94-95.
- [16] 詹耀. 海上风电钢筋混凝土基础的防腐涂装及应用[J]. 上海涂料, 2013, 51(1): 38-43.
ZHAN Yao. Anticorrosion coating and application for offshore wind power reinforced concrete foundation[J]. Shanghai coatings, 2013, 51(1): 38-43.
- [17] 冯宝平, 刘碧燕, 陈昌坤. 浅谈国内外海上、陆上风电场防腐设计现状[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(4): 343-346.
FENG Bao-ping, LIU Bi-yan, CHEN Chang-kun. Talking about the current situation of anti-corrosion design of offshore and onshore wind farms at home and abroad[J]. Corrosion science and protection technology, 2013, 25(4): 343-346.
- [18] 时士峰, 徐群杰, 云虹, 等. 海上风电塔架腐蚀与防护现状[J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(11): 875-877, 885.
SHI Shi-feng, XU Qun-jie, YUN Hong, et al. Status of corrosion and protection for offshore wind towers[J]. Corrosion & protection, 2010, 31(11): 875-877.
- [19] 单晓宇. 海上风电发展不能忽视防腐技术[N]. 中国海洋报, 2009-07-31(2).
SHAN Xiao-yu. Anti-corrosion technology cannot be ignored in the development of offshore wind power[N]. China Ocean News, 2009-07-31(2).
- [20] 李晓刚, 肖葵, 董超芳, 等. 我国海洋大气腐蚀分级分类与机理[C]// 2014 海洋材料腐蚀与防护大会论文集. 北京: 中国腐蚀与防护学会, 2014.
LI Xiao-gang, XIAO Kui, DONG Chao-fang, et al. Classification and mechanism of marine atmospheric corrosion in China[C]// 2014 marine material corrosion and protection conference proceedings. Beijing: Chinese Society for Corrosion and Protection, 2014.