

# Test Study on Corrosion Resistance of Weathering Steel with Weight Loss Method in Simulated Ocean Circumstance

Ge Gao<sup>1</sup> Bo Ning<sup>2</sup> Dachang Zhang<sup>3</sup> Ye Lu<sup>1</sup> Qian Chen<sup>3</sup>

1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Xuzhou Power Supply Subsidiary Company, Xuzhou, Jiangsu, 221000, China

2. China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu, 221008, China

3. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu, 211816, China

## Abstract

Three groups of test specimens of weathering steel GR 65, low alloy steel Q345 and weathering steel GR 65 anchored with bolt were designed for corrosion, and its immersion corrosion tests were carried out indoor. The weight loss method was adopted to study their corrosion resistances in laboratory simulated ocean circumstance (3.5%NaCl). And the comparing immersion corrosion tests in the reference environment (3.5%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) were conducted too, and their corrosion resistances were analyzed. It could be concluded that the corrosion rate of steel Q345 was 1.97 times of that of weathering steel GR65, and corrosion rate of steel GR65 was 1.05 times of that of steel anchored with bolt in laboratory simulated ocean circumstance (3.5%NaCl). In comparing circumstance (3.5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), the corrosion rate of steel Q345 was 1.98 times of that of weathering steel GR65, and corrosion rate of steel GR65 was 1.03 times of that of steel anchored with bolt. Besides, the rust layer of weathering steel was compactness, good continuity and strong adhesion, and could slow down the developing speed of the rust layer. Comparatively, the rust layer of steel Q345 was loose and porous, bad continuity and flaky, and the developing speed of the rust layer was more quickly.

## Keywords

weathering steel GR65; low alloy steel Q345; corrosion resistance; weight loss method

# 高压输电杆塔用耐候钢 GR65 耐腐蚀性能的失重法试验研究

高歌<sup>1</sup> 宁波<sup>2</sup> 张大长<sup>3</sup> 陆焯<sup>1</sup> 陈前<sup>3</sup>

1. 国网江苏省电力有限公司徐州供电分公司, 中国·江苏 徐州 221000

2. 中国矿业大学, 中国·江苏 徐州 221008

3. 南京工业大学土木工程学院, 中国·江苏 南京 211816

## 摘要

本文设计了耐候钢 GR65、低合金钢 Q345 以及锚螺栓耐候钢的 3 组腐蚀试件, 开展耐候钢 GR65 和普通 Q345 低合金钢的室内浸泡腐蚀试验, 采用失重法研究模拟海洋环境中 (3.5%NaCl 溶液) GR65 耐候钢的耐腐蚀性能, 并与对比环境中 (3.5%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液) 的耐腐蚀性能进行试验对比分析。试验研究表明, 在模拟海洋环境 (3.5%NaCl 溶液) 中, Q345 钢的腐蚀速率为耐候钢 GR65 的 1.97 倍, 锚螺栓耐候钢为未锚螺栓耐候钢的 1.05 倍; 在对比环境 (3.5%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液) 中, Q345 钢的腐蚀速率为耐候钢 GR65 的 1.98 倍, 锚螺栓耐候钢为未锚螺栓耐候钢的 1.03 倍; 耐候钢 GR65 的表面锈层致密性、连续性好且附着力强, 有助于减缓锈层的深入; 但是, Q345 钢表面锈层疏松多孔、连续性差且易剥落, 阻止锈层向内开展能力相对较弱。

## 关键词

耐候钢 GR65; 低合金钢 Q345; 耐腐蚀性能; 失重法

## 1 引言

作为一种长期暴露在大气环境下的钢结构建筑, 海洋大气对输电塔的腐蚀影响很大<sup>[1][2]</sup>。而目前中国输电塔主要用酸洗、热镀锌防腐工艺以提高铁塔的耐腐蚀性能。传统的热镀锌工艺造成的环境污染较大且后期维护成本较高。因此, 在保证钢材力学性能的基础上防止或减缓钢材的腐蚀具有重要

的意义<sup>[3]</sup>。

耐候钢又称耐大气腐蚀钢, 通过在普通低合金钢中添加少量的合金元素如 Cu、P、Cr、Ni、Co、V 等, 使其表面形成致密且黏附良好的锈层, 拥有优良的耐大气腐蚀能力, 并且具有较好的力学性能, 属于低合金高强度钢。海外最先对耐候钢进行了研究, 20 世纪初, 欧美等国就已经对耐候钢进行了研究, 研究发现, Cu 可以改善钢材在大气中的耐腐蚀性<sup>[4]</sup>。

Copson 基于不同的环境条件,开展了不同化学成分的大气暴晒试验<sup>[5]</sup>。

M.Morcillo 等人<sup>[6]</sup>通过耐候钢的暴露试验分析大气中的SO<sub>2</sub>、Cl<sup>-</sup>对耐候钢腐蚀速率的影响,研究锈层稳定时间和钢的稳态腐蚀速率。Shim Jae-Too、Choi Yoon-Seok 等<sup>[7][8]</sup>研究发现 Co、Ni 等元素可以提高低合金钢在含氯离子环境中的耐腐蚀性能。

相比于其他国家,中国对耐候钢的研究相对较晚,20世纪60年代,中国开始进行耐候钢的大气暴露试验研究。1965年,中国首次试制出了耐候钢 09MnCuPTi;1983年起,国家科委和自然科学基金委员会组织开展了长达20年的数据累计工作。20世纪后国网公司开始对耐候钢在输电线路中的应用进行研究,包括耐候及冷弯型钢在输电线路的应用研究、新型耐候钢在特高压输电铁塔中的应用技术研究等,并形成了耐候钢腐蚀性能评价体系及耐候钢铁塔全寿命周期经济性评价等成果<sup>[9]</sup>。2008年,杨风利、杨靖波教授<sup>[10]</sup>通过失重法研究输电铁塔用耐候钢节点耐腐蚀性能试验,结果表明节耐候钢的耐腐蚀性能优于普碳钢。

以上研究主要都是基于单一种类的耐候钢,并未对不同种类的耐候钢在不同腐蚀环境下的腐蚀性速率及腐蚀机理进行深入的研究。因此,本文以低合金高强度钼钒结构钢 GR65 为试验钢种,3.5%NaCl 溶液为模拟海水,用失重法开展室内浸泡腐蚀试验<sup>[11][12]</sup>,研究模拟海洋环境<sup>[13]</sup>中耐候钢 GR65 和 Q345 钢的耐腐蚀性能,并与对比环境 3.5%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中耐候钢 GR65 和 Q345 钢的耐腐蚀性能进行对比分析,探讨耐候钢 GR65 和普通低合金钢的腐蚀行为。

## 2 试验概况

### 2.1 试验材料及试件

试验用耐候钢 GR65 为低合金钼钒结构钢,符合标准 A572/A572M-06《高强度低合金钼钒结构钢技术规范》,由某钢铁集团轧制而成且力学性能优良。耐候钢 GR65 和 Q345 钢中添加的合金元素含量及其他化学元素含量如表 1 所示。

表 1 耐候钢 GR65 及低合金钢 Q345 的化学成分 (w%)

钢种	碳 (C)	锰 (Mn)	磷 (P)	硫 (S)	硅 (Si)	钼 (Co)	钒 (V)
耐候钢 GR65	0.26	1.35	0.04	0.05	0.4	0.005~0.05	0.01~0.15
低合金钢 Q345	0.2	1.7	0.04	0.04	0.55	/	0.02~0.15

试验所用钢壁厚均为 8mm,失重法腐蚀试件中考虑腐蚀过程中镀锌螺栓与耐候钢相互作用,在部分耐候钢试件上开孔,锚上 M12 镀锌螺栓,腐蚀试件具体尺寸如表 2 所示。

表 2 失重法腐蚀试验的耐候钢 GR65 及低合金钢 Q345 试件

编号	长度	宽度	壁厚	腐蚀面积	质量	备注
	/cm	/cm	/cm	/cm <sup>2</sup>	/g	
NHG-1	15	3	0.8	118.8	299.46	不开孔
NHG-2	15	3	0.8	118.8	312.44	不开孔
NHG-3	15	3	0.8	135.8	315.63	开孔,锚螺栓
NHG-4	15	3	0.8	135.8	316.22	开孔,锚螺栓
Q345-1	15	3.5	0.8	134.6	315.23	不开孔
Q345-2	15	3.5	0.8	134.6	315.66	不开孔

### 2.2 试件设计及处理

选取实际输电线路钢管杆工程中常用钢材壁厚 8mm,设计腐蚀试验试件,试件为长方形条状钢板。试件尺寸均为 15.0cm × 3.5cm × 0.8cm,腐蚀面积均为 71.2cm<sup>2</sup>。试验前通过机械方法去除试验构件表面氧化皮,经去离子水冲洗之后,试件 6 个面依次经 400~800 号砂纸逐级打磨,清洗、烘干后放在干燥的环境中 24h,利用精度为 0.1mg 的天平称重。



(a) 耐候钢 GR65



(b) 合金钢 Q345



(c) 耐候钢锚螺栓

图1 GR65 耐候钢和低合金钢 Q345 的腐蚀试件

### 2.3 试验工况

本次腐蚀试验为模拟海洋环境中耐候钢 GR65 和 Q345 钢的耐腐蚀性能, 试验周期为 600h。模拟海洋环境质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液, 对比环境质量分数为 3.5% 的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液。

### 2.4 失重法方式试验

失重法又称质量损失法, 根据一定试验周期前后测得的腐蚀试件质量损失, 通过式(1)计算试件的腐蚀速率。该实验方法简洁快速且容易操作, 是一种常用的腐蚀试验方法之一。

$$V_w = \frac{m_0 - m_1}{St} \quad (1)$$

式中  $S$  是试样暴露在腐蚀环境中的表面积 (m<sup>2</sup>),  $t$  是试样进行腐蚀试验的时间 (h)。

## 3 试验结果及分析

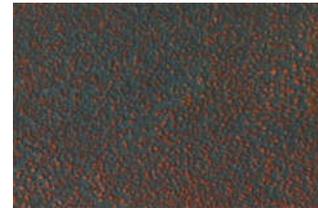
### 3.1 腐蚀现象

#### 3.1.1 3.5%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中腐蚀试验

试验过程中, 每隔 10 天观察试验构件表面腐蚀及锈层发展情况, 并拍照记录。耐候钢和普通钢在 3.5%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中的腐蚀外貌如图 2 (a)~(d) 所示。浸泡 10 天后, 耐候钢和 Q345 钢表面未被锈层完全覆盖, 仍有部分基体裸露, 腐蚀产物呈颗粒状分布, 且颗粒大小不均匀。耐候钢表面锈层颗粒明显少于 Q345 钢, 颜色较深。浸泡 30 天后, 耐候钢和 Q345 钢表面腐蚀痕迹加深, 表面颗粒状腐蚀产物较 10 天明显增多、变大。Q345 钢表面锈层颗粒较大且松散; 耐候钢表面锈层颗粒较小且致密。

锚螺栓耐候钢在 3.5%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中的腐蚀外貌如图 2(e)

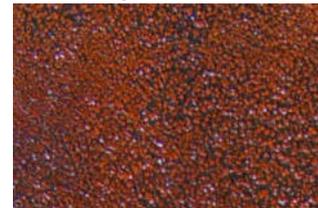
~(f) 所示。浸泡 10 天后, 耐候钢和镀锌螺栓表面均出现轻微腐蚀现象, 锈层分布与锚螺栓一致。浸泡 30 天后, 耐候钢和螺栓表面出现深棕色锈层, 螺栓与耐候钢相连部分腐蚀情况较其他部分严重, 可能是由于两种不同材料相连处形成了一个原电池, 加速连接处的腐蚀。



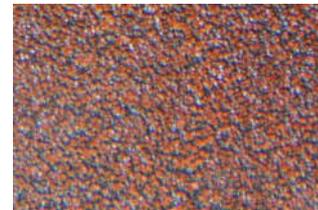
(a) 耐候钢 GR65 试件 -10d



(b) Q345 钢试件 -10d



(c) 耐候钢 GR65 试件 -30d



(d) Q345 钢试件 -30d



(e) 耐候钢 GR65 试件 -10d



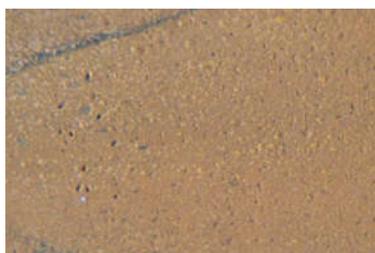
(f) 耐候钢 GR65 试件 -30d

图2 3.5%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中试件腐蚀外貌

### 3.1.2 3.5%NaCl 溶液中腐蚀试验

耐候钢和普通钢在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀外貌如图 3 (a)~(d) 所示。浸泡 10 天后, 耐候钢和 Q345 钢表面均被锈层完全覆盖, 且无明显点蚀痕迹, 腐蚀情况比 3.5%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液严重。Q345 钢表面锈层呈棕黄色, 锈层表面有明显的鼓起; 耐候钢表面锈层较为致密平滑, 空隙较少。浸泡 30 天后, Q345 钢表面锈层鼓起更多, 遇水呈流动状, 锈层较为松散且易剥落; 耐候钢表面锈层颜色较深, 锈层连续、致密。

锚螺栓耐候钢在 3.5%NaCl 中的腐蚀外貌如图 3 (e)~(f) 所示。浸泡 10 天后, 耐候钢和镀锌螺栓表面均出现锈蚀痕迹, 腐蚀情况比 3.5%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中严重, 螺栓与耐候钢相连部分腐蚀情况较其他部分严重。浸泡 30 天后, 耐候钢和螺栓表面出现棕色锈层, 锈层表面有颗粒状夹杂。



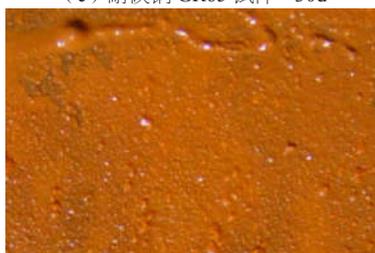
(a) 耐候钢 GR65 试件 -10d



(b) Q345 钢试件 -10d



(c) 耐候钢 GR65 试件 -30d



(d) Q345 钢试件 -30d



(e) 耐候钢 GR65 试件 -10d



(f) 耐候钢 GR65 试件 -30d

图 3 3.5%NaCl 溶液中试件腐蚀外貌

试验结束后, 对腐蚀后试件进行烘干处理, 轻微敲击时 Q345 钢试件出现锈层剥落现象, 耐候钢表面锈层附着情况较好。因此, 结合宏观外貌分析可知 Q345 钢表面锈层连续性差、疏松多孔, 锈层与钢基体表面结合度不高、易剥落, 不具有阻止锈层继续向内开展的作用; 耐候钢表面锈层致密性、连续性好且较为平滑, 有助于提高锈层对钢材的附着力, 抑制水及空气与钢材的接触, 减缓锈层的继续深入开展。

### 3.2 腐蚀速率及耐腐蚀性能分析

浸泡 30 天后, 配置除锈剂 (500mlHCl+ 20gC<sub>6</sub>H<sub>12</sub>N<sub>4</sub>+500ml 去离子水), 去除试件表面腐蚀产物, 用去离子水清洗吹干后称重, 得出试验前后腐蚀试件质量变化如表 3 所示。耐候钢和 Q345 钢试件在模拟海洋环境 (3.5%NaCl 溶液) 中的腐蚀速率: Q345 钢为耐候钢 GR65 的 1.97 倍, 锚螺栓耐候钢为未锚螺栓耐候钢的 1.05 倍。在对比环境 (3.5%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液) 中的腐蚀速率: Q345 钢为耐候钢 GR65 的 1.98 倍, 锚螺栓耐候钢为未锚螺栓耐候钢的 1.03 倍。两种腐蚀环境中, 耐候钢的腐蚀速率均小于 Q345 钢的腐蚀速率, 表现出优秀的耐腐蚀性能, 同时锚螺栓比未锚螺栓腐蚀情况严重。这主要是因为钢中加入少量合金元素, 如 Cu、P、Cr、Ni 等可以在金属基体表面形成保护层, 减缓腐蚀向材料纵深发展, 从而提高钢材的耐腐蚀性能。

表3 耐候钢 GR65 及低合金钢 Q345 的腐蚀失重

试样编号	腐蚀溶液	试验前质量 /g	除锈后质量 /g	腐蚀速率( mm/a )
GR65-1	3.5%NaCl	299.46	298.98	0.062
GR65-2	3.5%Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	312.44	311.98	0.060
GR65-3	3.5%NaCl	315.63	315.06	0.065
GR65-4	3.5%Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	316.22	315.68	0.063
Q345-1	3.5%NaCl	315.23	314.17	0.122
Q345-2	3.5%Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	315.66	314.63	0.119

## 4 结语

基于本文耐候钢 GR65 及低合金钢 Q345 的腐蚀试验及失重法测试,可以得到如下结论:

(1) 失重法腐蚀试验得出在模拟海洋环境(3.5%NaCl 溶液)中, Q345 钢的腐蚀速率为耐候钢 GR65 的 1.97 倍, 锚螺栓耐候钢为不错的 1.05 倍; 在对比环境(3.5%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液)中, Q345 钢的腐蚀速率为耐候钢 GR65 的 1.98 倍, 锚螺栓耐候钢为不错的 1.03 倍;

(2) 在钢中加入少量合金元素, 如 Cu、P、Cr、Ni 等得到的耐候钢, 可以在金属基体表面形成保护层, 减缓腐蚀向材料纵深发展, 提高钢材的耐腐蚀性能。

(3) 耐候钢 GR65 的表面锈层致密性、连续性好且附着力强, 有助于减缓锈层的深入; 低合金钢 Q345 钢表面锈层连续性差、疏松多孔且易剥落, 不具有阻止锈层继续向内开展的作用。

## 参考文献

[1] 孙浩, 夏茂森, 蔡漳平等. 高强度耐大气腐蚀塔桅结构用钢板的研制开发 [J]. 钢铁, 2005, 40(2): 72-74.

- [2] 默增禄, 程志云. 输电线路杆塔的腐蚀与防治对策 [J]. 电力建设, 2004, 25(1): 22-26.
- [3] 谢震. 展望耐候钢在输电杆塔中的应用 [J]. 特种结构, 2014, 31(4): 29-33.
- [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(09): 116-121+52.
- [5] COPSON HR. Long-Time Atmospheric Corrosion Tests on Low-Alloy Steels [J]. ASTM 60, 1960: 650-667.
- [6] M. Morcillo. Atmospheric corrosion data of weathering steels [J]. Corrosion Science, 2013.
- [7] Shim Jae-Too. Effects of Cr, Cu, Ni and Ca on the Noda K, et al. Effect of Co and Ni on the corrosion behavior of low carbon steel in synthetic tap water [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2005, 391(1-2): 162-169.
- [8] Choi Yoon-Seok. Corrosion behavior of low alloys steels containing Cr, Co and W in synthetic potable water [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 385(1-2): 148-156.
- [9] 于千. 耐候钢发展现状及展望 [J]. 钢铁研究学报, 2007(11): 1-4.
- [10] 杨风利, 杨靖波等. 输电铁塔用耐候钢节点耐腐蚀性能试验研究 [J]. 电力建设, 2008, 29(9): 23-28.
- [11] 李久青, 杜翠薇. 腐蚀试验方法及监测技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2007.2.
- [12] 王吉会, 于金库. 腐蚀科学与工程试验教程 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2013.
- [13] 林臻, 李国璋. 金属材料海洋环境腐蚀试验方法研究进展 [J]. 新技术新工艺, 2013, (8): 68-74.