

P元素对耐候高强钢铁塔力学性能和腐蚀性能的影响

罗义华¹, 黄耀², 杨雪峰³, 陈国宏¹, 滕越¹, 刘蔚宁⁴, 李峰⁴

(1. 国家电网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230022; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 3. 安徽华电工程咨询设计有限公司, 安徽 合肥 230022; 4. 国家电网公司, 北京 100031)

摘要: 采用扫描电镜(SEM)、万能试验机、冲击试验机、浸渍干湿复合循环试验机和衍射仪等对比分析了P含量(0.020%~0.39%)对耐候钢组织、力学性能和腐蚀性能的影响。研究表明:在一定含量范围内P含量对钢组织和力学性能影响较小,P含量增加会增加D类球状氧化物。P含量增加会降低钢的低温性能,特别是<-40℃,对冲击功影响更大。当钢中P含量为0.028%时,输电铁塔耐候钢具有最好的耐腐蚀性能,室内加速腐蚀试样的锈层厚度约10 μm。

关键词: 输电铁塔; 耐候钢; 腐蚀产物; 锈层厚度; 力学性能

中图分类号: TF76, TG456.7 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2019)01-0142-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.01.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effect of P Elements on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of High Strength Weathering Steel Used in Transmission Tower

Luo Yihua¹, Huang Yao², Yang Xuefeng³, Chen Guohong¹, Teng Yue¹, Liu Weining⁴, Li Feng⁴

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, Anhui, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. Anhui Huadian Engineering Consulting & Design Co., Ltd., Hefei 230022, Anhui, China; 4. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: The effects of P content (0.020%~0.39%) on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of the steel were analyzed by means of scanning electron microscopy (SEM), universal testing machine, impact testing machine, wet-dry composite testing machine and diffractometer. The results show that P content in this study has little effect on the microstructure and mechanical properties of steel, however, increase of P content will increase the D-type spherical oxide. The increase of P content will reduce the low temperature performance of steel, especially when the temperature is below -40℃. When the content of P in steel is 0.028%, the weathering steel of transmission tower has the best corrosion resistance. The rust layer thickness of indoor accelerated corrosion sample approximates 10 μm.

Key words: transmission tower, weathering steel, corrosion product, rust layer thickness, mechanical properties

0 引言

输电线路铁塔一般建设在野外,长期暴露在大

气之中,热浸镀锌防腐在杆塔结构钢中应用广泛,但是成本高且污染严重。近年来,杆塔使用耐候钢已经成为一种趋势。与国外相比,我国对于耐候钢的研

收稿日期: 2018-08-28

项目资助: 工信部绿色制造项目《环保型耐候杆塔绿色设计平台集成应用技术》; 国家电网基建依托项目《耐候冷弯角钢在110 kV输电线路应用技术研究》。

作者简介: 黄耀(1985—),男,高级工程师,博士,主要研究方向电网新材料应用技术及电网材料腐蚀与防护, E-mail: tao-hua-daozhu@163.com。

究起步较晚,但耐候钢已经引起国内有关部门的关注,特别是随着我国国民经济的迅速发展,国家“西电东输”和三峡水利等工程的相继建设,我国原有的热镀锌防腐 Q235B、Q345B 结构钢和普通耐候钢已不能满足塔桅用钢高耐蚀性、高寿命、低成本的要求,迫切需要开发新型节能、环保的高耐候性结构钢。

美国曾于 1961 年将无喷涂型耐候高强钢材用于马萨诸塞州 Pittsfield 近郊输电线路的钢管杆上。1962 年,在宾西法尼亚的 Brookville 建成 2 座输电铁塔,其后弗吉尼亚电力公司在一条 560 km 长的输电线路铁塔中全部使用了耐候高强钢^[1-3]。日本^[4] 1975 年在 77 kV 双回路角钢试验塔中应用 SMA 系列耐候高强钢,2000 年,在 33 kV 双回路钢管塔中应用 SMA 系列耐候高强钢。维蒙特工业有限公司在 1998~2013 期间给美国供应了 A871 耐候高强钢输电杆塔的输电线路工程共 100 多条,耐候高强钢输电线路在美国应用最为广泛^[5-10]。而我国耐候高强钢的应用领域主要集中在建筑、桥梁和铁路等领域,将耐候高强钢应用于我国输电铁塔的研究较少。中国电力科学研究院 2006~2007 采用济钢 JT 系列耐候高强钢完成了单片耐腐蚀性能和焊接性能试验^[5-6],试验表明存在耐候高强钢耐腐蚀性能不理想等问题。

2009 年,中国电力科学研究院完成了耐候冷弯角钢铁塔在厦门 220 kV 梧侣-内官线路的试点应用,但因耐候高强钢杆塔采用喷锌工艺进行防腐,未裸露使用,导致耐候高强钢表面锈层稳定化时间延长。2017 年,中国电科院联合安徽省电力公司、钢铁企业、铁塔加工厂和设计院等企业在安徽试点建设国内首条全裸露耐候高强钢杆塔示范线路。

众所周知,耐候高强钢主要依靠耐腐蚀元素 Cu、P、Cr 和 Ni 的添加实现防腐,但 P 元素的增加,对钢的韧性破坏较大,而输电线路杆塔的全寿命周期服役年限在 40~50 年左右,因此,需要研究 P 元素对耐候高强钢杆塔韧性和耐腐蚀性能的影响,为开发高韧高耐蚀的耐候高强钢杆塔提供成分设计思路。输电杆塔采用高韧高耐候钢可以去除传统的热浸镀锌工序,减少对大气、土壤环境的污染,实现输电线路免维护和降低工程造价,符合输电线路“两型三新”和“全寿命周期”建设理念^[11-19]。笔者进行实验室范围内钢中 P 含量对 345NH 钢组织、力学性能及耐腐蚀性能的影响规律研究。

1 试验材料及方法

试验用钢采用 25 kg 真空冶炼炉进行冶炼,冶炼后的不同 P 含量耐候高强钢输电杆塔铸坯的主要化学成分见表 1。

表 1 不同 P 含量的钢化学成分(质量分数)
Table 1 Main chemical compositions of the tested steels with different P contents %

炉号	P	C	Mn	S	Si	Cr	Cu	Al	Nb	Ni
1 [#]	0.020	0.060	1.24	0.005	0.21	0.41	0.29	<0.02	0.023	0.22
2 [#]	0.028	0.063	1.24	0.004	0.22	0.41	0.29	<0.02	0.021	0.22
3 [#]	0.039	0.064	1.21	0.004	0.22	0.41	0.29	<0.02	0.020	0.21

锻坯尺寸为 70 mm×60 mm×50 mm,将钢坯在加热炉内加热到 1 250 ℃保温 1.5 h,经过 6 道次热连轧轧制成 3 mm 厚薄板,终轧温度为 900 ℃,经水冷 650 ℃对热轧板进行等温卷取,等温时间为 1 h,之后随炉冷却。

对试制后的耐候高强钢,参照国家标准 GB/T228—2002 的要求,沿轧向在热轧板上切取 50 mm 标距的拉伸试样,在 CMT 510.5 微机控制万能试验机上以 2 mm/min 的夹头移动速度对试验钢进行室温拉伸试验,检测其力学性能。参照 GB/T 1591—2008 对热轧板进行夏比冲击(V 型)试验;按照 GB/T232—2010《金属材料弯曲试验方法》对耐候高

强钢板进行弯曲试验。

制备不同 P 含量合金的腐蚀试样,在 DW-UD-3 型浸渍干湿复合循环试验机内进行周期浸润腐蚀试验,试验时间为 72 h,试验温度为 45 ℃±2 ℃,试验湿度为 70%±5% RH,腐蚀溶液为 5% NaCl+0.2% Na₂S₂O₈,每一循环周期为 60 min±3 min,其中浸润时间 12 min±1.5 min。

锈层形貌分析(SEM):在挂片上切取金相试样,用 5% 体积分数的硝酸酒精进行超声波清洗,然后在 ZEISS ULTRA 55 热场发射扫描电镜下对观察外锈层、内锈层以及锈层截面的形貌。

锈层成分分析(XRD):用刻刀将锈层刮下来,利

用 X 射线衍射仪对锈层粉末做 XRD 半定量分析。 2θ 的范围是 $10^{\circ} \sim 60^{\circ}$, 扫描速度为 $2.0^{\circ}/\text{min}$, 靶材为铜靶 ZnO 作为内标物 ZnO 与腐蚀产物的质量比为 3 : 7, 以此测出腐蚀产物中物相种类及衍射强度。

2 试验结果及讨论

2.1 显微组织

图 1 为不同 P 含量合金的显微组织形貌。可以

看出, 不同 P 含量合金的微观组织由珠光体和铁素体组成, 随 P 含量增加, 珠光体含量略有增加, 铁素体晶粒度有所降低。经晶粒度统计分析, 1[#]、2[#]和 3[#]的平均铁素体晶粒尺寸分别为 16.7、15.5、16.2 μm , 珠光体的含量分别为 13.9%、19.8%、15.7%。通过组织分析可知, 输电铁塔用耐候高强钢中 P 含量从 0.020% 增加至 0.039%, 钢中晶粒尺寸、铁素体和珠光体百分比变化较小。

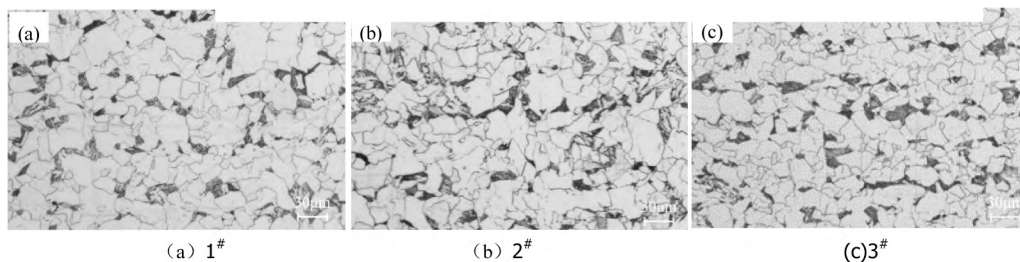


图 1 不同 P 含量钢的显微组织形貌

Fig.1 Microstructure of steels with different P contents

表 2 为不同 P 含量合金的夹杂物评级结果。可以看出, 钢中夹杂物较少, 粗系夹杂未发现, 只有球状氧化物类和单颗粒球状类夹杂级别比较高(达 1.0

~2.0) , 其余夹杂物均为 0.5 级左右。P 含量增加, 耐候高强钢中 D 类球状氧化物增加, 其它种类夹杂物变化较小。

表 2 不同 P 含量钢的夹杂物评级

Table 2 Rating of inclusions in steels with different P contents

材料	夹杂物种类	A 类硫化物	B 类氧化铝	C 类硅酸盐类	D 类球状氧化物类	级
1 [#]	细系	0.5	0.5	0.5	1.5	0.5
2 [#]	细系	0.5	0.5	0.5	1.5	1.0
3 [#]	细系	0.5	0.5	0.5	2.0	0.5

2.2 力学性能

2.2.1 拉伸力学和弯曲性能

不同 P 含量合金的拉伸性能见表 3。从表 3 可以看出, 不同 P 含量合金的屈服强度均高于标准要求的 345 MPa, 为 378~406 MPa, 抗拉强度为 493~520 MPa, 总伸长率达到 35% 左右。总的来看, 屈服强度随 P 含量增加先小幅增加, 后小幅减少。

表 3 不同 P 含量钢的力学性能

Table 3 Mechanic properties of steels with different P contents

编号	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	总伸长率 /%	断面收缩率 /%	弯曲性能 (d=a, 180°)
1 [#]	378	493	36.4	81.9	合格
2 [#]	406	520	34.5	79.2	合格
3 [#]	386	506	36.3	81.0	合格
标准要求值	≥ 345	490~630	≥ 22		合格

图 2 为拉伸断口微观形貌。可以看出不同 P 含量合金的拉伸断口全部为韧窝断裂, 韧窝深度和数量基本相当。一般而言, P 元素增加, 夹杂物增加, 从而恶化钢的韧性; 结合表 2、表 3 和图 2 的试验结果可知, 虽然 P 元素增加导致夹杂物增加, 但是增加的夹杂物主要为球状类夹杂物, 因此, P 元素增加对钢韧性降低的影响较小, 1[#]、2[#]和 3[#]钢的力学性能基本一致。

2.2.2 冲击性能

表 4 给出了不同 P 含量钢在 20、0、-20、-40、-50、-60 $^{\circ}\text{C}$ 六个温度的夏比冲击吸收功。可以看出, 不同 P 含量合金的冲击功值均较高, 在 -60 $^{\circ}\text{C}$ 仍可以达到 200 J 左右。当夏比冲击试验温度在 -50 $^{\circ}\text{C}$ ~ 20 $^{\circ}\text{C}$ 时, P 元素含量对钢的冲击功影响不大, 当夏比冲击试验温度为 -60 $^{\circ}\text{C}$ 时, 可以看出, 随着 P 含量

从 0.020% 增加至 0.039% ,输电铁塔用耐候高强钢平均吸收功从 367 J 降低至 245 J ,因此 P 含量对输电铁塔用耐候高强钢的低温韧性影响较大(温度低于-50 ℃) 。

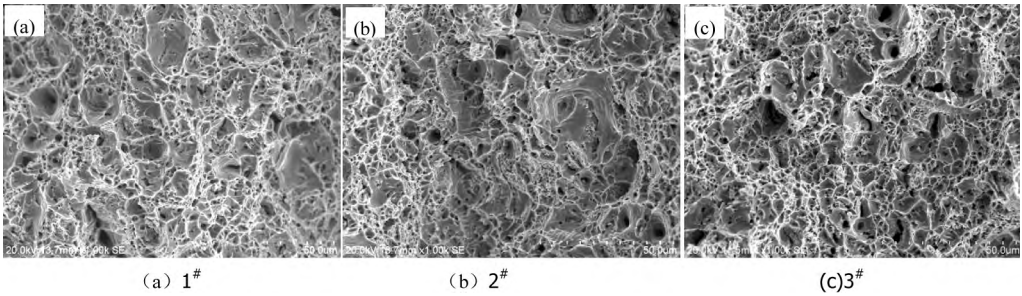


图 2 不同 P 含量钢板拉伸断口形貌
Fig.2 Tensile fracture morphology of steel plates with different P contents

表 4 不同 P 含量钢的冲击性能
Table 4 Impact properties of steels with different P contents

试样	编号	冲击功/J					
		20 ℃	0 ℃	-20 ℃	-40 ℃	-50 ℃	-60 ℃
1 [#]	1	350	352	366	272	359	382
	2	350	375	364	359	375	359
	3	349	390	379	355	249	359
	平均值	350	372	370	329	328	367
2 [#]	1	350	375	277	347	265	250
	2	350	343	359	339	244	248
	3	302	340	272	162	229	280
	平均值	334	353	303	283	246	259
3 [#]	1	353	376	309	354	255	231
	2	356	384	346	353	288	316
	3	354	364	286	242	274	188
	平均值	354	375	314	316	272	245

图 3 为 P 含量 0.020% 合金在不同温度下的冲击断口宏观形貌。由图 3 可知 随温度逐渐降低 ,断口放射区的面积逐渐增大 ,表现出解理断裂特征。

图 4 为 1[#] 钢在-40 ℃ 和-60 ℃ 时冲击断口微观形貌 ,可知在低温下 ,断口微观形貌分别为韧窝撕裂 (-40 ℃) 和解理断裂 (-60 ℃) 。

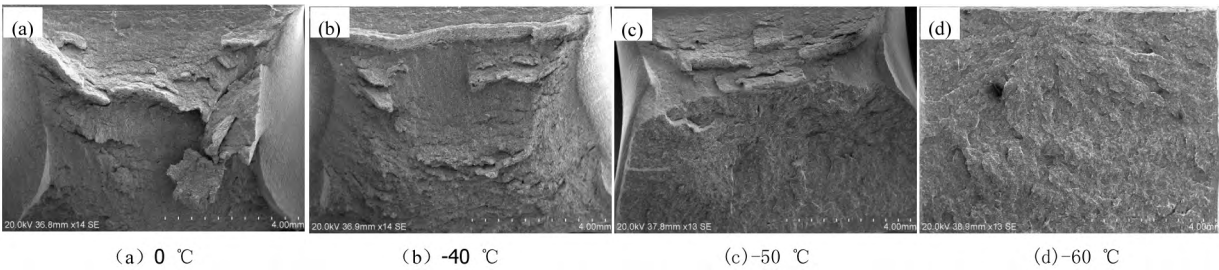


图 3 1[#] 钢不同温度下冲击断口宏观形貌
Fig.3 Macro-morphology of impact fracture of 1[#] steel at different temperatures

2.3 腐蚀性能

2.3.1 腐蚀失重分析

不同 P 含量合金的腐蚀失重及腐蚀速率如表 5 所示 由表 5 可知 ,不同 P 含量合金的腐蚀失重率均较

低 ,说明 1[#]~3[#] 输电铁塔耐候高强钢均具有较高的耐腐蚀性能; 随 P 含量增加 ,耐候高强钢的腐蚀腐蚀速率先减少后增加 ,由此说明当钢中 P 含量为 0.028% 时 ,输电铁塔耐候高强钢具有最好的耐腐蚀性能。

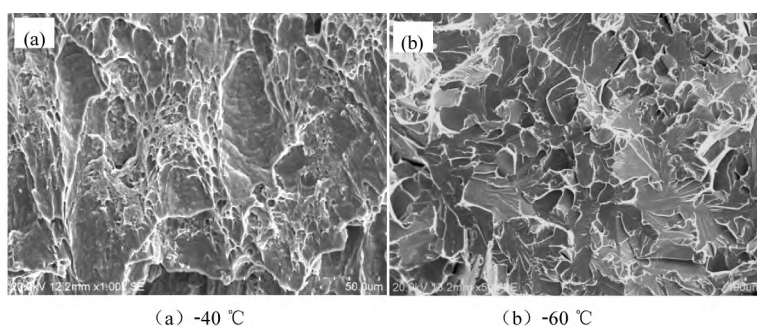


图 4 1# 钢不同温度下冲击断口微观形貌

Fig.4 Microscopic morphology of impact fracture of 1# steel at different temperatures

表 5 不同 P 含量钢腐蚀失重原始数据
Table 5 Original data of corrosion weight loss of steels with different P contents

试样编号	腐蚀平均失重/g	试验时间/h	腐蚀速率/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)
1#	0.946 6	72	1.314 7
2#	0.668 1	72	0.928 0
3#	0.822 8	72	1.142 7

2.3.2 腐蚀锈层形貌

采用扫描电镜分别对不同 P 含量的腐蚀锈层

表面及截面进行观察,结果如图 5 所示。图中(a)(b)为 1#和 2#表面形貌对比。可以看出,1#钢的腐蚀锈层表面比较致密,没有可见的裂纹,从锈层截面形貌来看,锈层厚度约为 30 μm ,且与基体结合牢固;而 2#钢的锈层表面更为光滑致密,且锈层厚度约 10 μm ,这与其较低的腐蚀失重率是一致的。

2.3.3 腐蚀锈层物相分析

本试验采用 X 射线衍射仪对不同 P 含量合金腐蚀后的锈层进行物相分析,结果如图 6 所示。

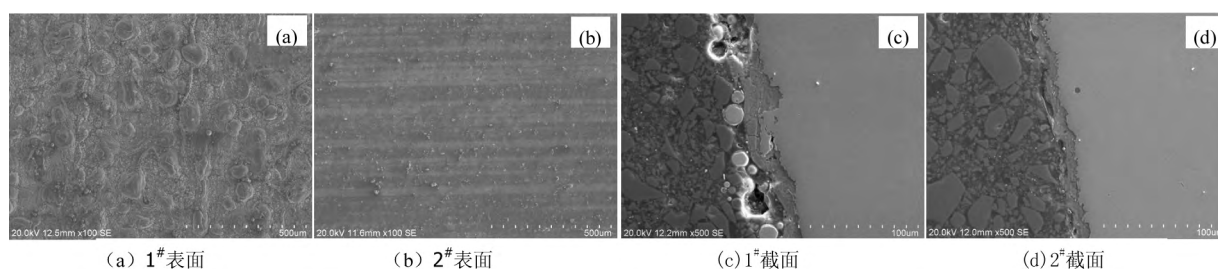


图 5 1#和 2#钢腐蚀锈层表面及截面形貌观察

Fig.5 Surface and section morphology of corroded rust layer of 1# and 2# steels

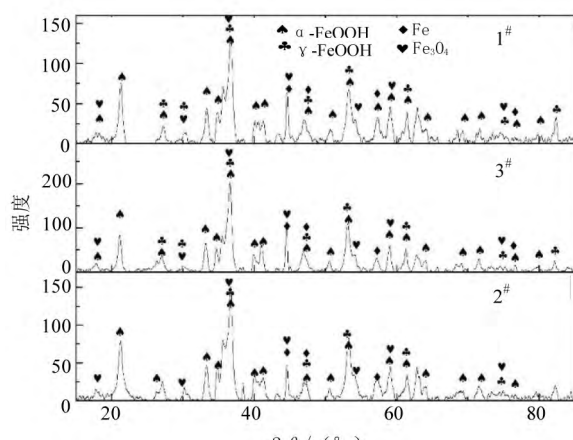


图 6 不同 P 含量钢的锈层物相分析

Fig.6 Phase analysis of rust layer of steels with different P contents

从图 6 可以看出,这三种合金腐蚀后的锈层物相基本相近,均为 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\gamma\text{-FeOOH}$ 和 Fe_3O_4 。XRD 衍射谱中还出现了基体 Fe 的特征衍射峰,说明锈层被 X 射线穿透,也表明试验钢经过周期浸润试验后的腐蚀锈层比较薄,说明材料具有良好的耐腐蚀性能。 $\alpha\text{-FeOOH}$ 衍射峰的强度随着 P 含量的增加而增加,说明 P 含量的增加,有利于保护性的稳定化锈层生成。

3 结论

1) 当输电杆塔用耐候高强钢中 P 含量从 0.020%增加至 0.039%时,钢中晶粒尺寸、铁素体和珠光体百分比变化较小,钢中 D 类球状氧化物增

加,其它种类夹杂物变化较小。

2) 当输电杆塔用耐候高强钢中 P 含量从 0.020% 增加至 0.039% 时,钢的屈服强度随 P 含量增加先小幅增加,后小幅减少。断面收缩率、总伸长率和抗拉强度随 P 含量变化较小。

3) P 含量从 0.020% 增加至 0.039%,输电铁塔

用耐候高强钢平均吸收功从 367 J 降低至 245 J, 1[#] 钢冲击断口在不同温度下的形貌特征为韧窝撕裂 (-40 ℃) 和解理断裂 (-60 ℃)。

4) 当钢中 P 含量为 0.028% 时,输电铁塔耐候高强钢具有最好的耐腐蚀性能,室内加速腐蚀试样的锈层厚度约 10 μm。

参考文献

- [1] Xie Zhen. Looking forward to the application of weatherproof steel in transmission tower [J]. *Special Structure* 2014 (4): 29–33. (in Chinese).
(谢震. 展望耐候钢在输电杆塔中的应用 [J]. *特种结构* 2014(4): 29–33.)
- [2] Li Maohua, Yang Jingbo, Liu Siyuan. Recent advances in materials for transmission tower structures [J]. *Journal of Wuhan University (Engineering Edition)* 2011 (S1): 191–195. (in Chinese).
(李茂华, 杨靖波, 刘思远. 输电杆塔结构用材料最新进展 [J]. *武汉大学学报(工学版)* 2011(S1): 191–195.)
- [3] Dolling C N, Hudson R M. Weathering steel bridges in the U.K. [J]. *Revue De Métallurgie* 2003, 100(11): 1125–1133.
- [4] Yang Fengli, Han Junke, Yang Jingbo *et al.* Experimental study on corrosion resistance of weather-resistant steel joints for transmission towers [J]. *Electric Power Construction* 2008 (9): 23–28. (in Chinese).
(杨风利, 韩军科, 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(9): 23–28.)
- [5] Yang Jingbo, Li Maohua, Yang Fengli *et al.* New progress in research on tower structure of transmission lines in China [J]. *Power Grid Technology* 2008 (22): 77–83. (in Chinese).
(杨靖波, 李茂华, 杨风利, 等. 我国输电线路杆塔结构研究新进展 [J]. *电网技术* 2008(22): 77–83.)
- [6] Morcillo M, Díaz I, Chico B *et al.* Weathering steels: From empirical development to scientific design. A review [J]. *Corrosion Science* 2014, 83: 6–31.
- [7] Liu Guochao, Dong Junhua, Han Enhou *et al.* Progress in research on rust layer of weatherproof steel [J]. *Corrosion Science and Protection Technology* 2006 (4): 268–272. (in Chinese).
(刘国超, 董俊华, 韩恩厚, 等. 耐候钢锈层研究进展 [J]. *腐蚀科学与防护技术* 2006(4): 268–272.)
- [8] Yamashita M, Konishi H, Kozakura T *et al.* In situ observation of initial rust formation process on carbon steel under Na₂SO₄ and NaCl solution films with wet/dry cycles using synchrotron radiation X-rays [J]. *Corrosion Science* 2005, 47(10): 2492–2498.
- [9] Dillmann P, Mazaudier F, Hœrlé S. Advances in understanding atmospheric corrosion of iron. I. Rust characterisation of ancient ferrous artefacts exposed to indoor atmospheric corrosion [J]. *Corrosion Science* 2004, 46(6): 1401–1429.
- [10] Yamashita M, Shimizu T, Konishi H *et al.* Structure and protective performance of atmospheric corrosion product of Fe-Cr alloy film analyzed by Mössbauer spectroscopy and with synchrotron radiation X-rays [J]. *Corrosion Science* 2003, 45(2): 381–394.
- [11] Asami K, Kikuchi M. In-depth distribution of rusts on a plain carbon steel and weathering steels exposed to coastal-industrial atmosphere for 17 years [J]. *Corrosion Science* 2003, 45(11): 2671–2688.
- [12] Yamashita M, Miyuki H, Matsuda Y *et al.* The long term growth of the protective rust layer formed on weathering steel by atmospheric corrosion during a quarter of a century [J]. *Corrosion Science* 1994, 36(2): 283–299.
- [13] Wang J, Wang Z Y, Ke W. A study of the evolution of rust on weathering steel submitted to the Qinghai salt lake atmospheric corrosion [J]. *Materials Chemistry and Physics* 2013, 139(1): 225–232.
- [14] Zhang Quancheng, Wang Jianjun, Wu Jiansheng *et al.* Effects of rust ion selectivity on the resistance of weathering steel to marine atmospheric corrosion [J]. *Acta Metallurgica Sinica* 2001(2): 193–196. (in Chinese).
(张全成, 王建军, 吴建生, 等. 锈层离子选择性对耐候钢抗海洋性大气腐蚀性能的影响 [J]. *金属学报* 2001(2): 193–196.)
- [15] Mizoguchi T, Ishii Y, Okada T *et al.* Magnetic property based characterization of rust on weathering steels [J]. *Corrosion Science* 2005, 47(10): 2477–2491.
- [16] Zhang X, Yang S, Zhang W *et al.* Influence of outer rust layers on corrosion of carbon steel and weathering steel during wet-dry cycles [J]. *Corrosion Science* 2014, 82: 165–172.
- [17] Diaz I, Cano H, de la Fuente D *et al.* Atmospheric corrosion of Ni-advanced weathering steels in marine atmospheres of moderate salinity [J]. *Corrosion Science* 2013, 76: 348–360.
- [18] Qian Y, Ma C, Niu D *et al.* Influence of alloyed chromium on the atmospheric corrosion resistance of weathering steels [J]. *Corrosion Science* 2013, 74: 424–429.
- [19] Zhou Y, Chen J, Liu Z. Corrosion behavior of rusted 550 MPa grade offshore platform steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research International* 2013, 20(3): 66–73.

编辑 杨冬梅