

耐候钢在输电线路杆塔中的应用与研究进展

曾尚武¹, 黄耀², 郭晓宏³, 陈红卫⁴,
万晓⁵, 张旭⁶, 李光⁵

- (1. 冶金工业信息标准研究院, 北京 100730)
(2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)
(3. 鞍钢集团钢铁研究院, 辽宁 鞍山 114009)
(4. 河钢集团钢研总院, 河北 石家庄 050023)
(5. 山东电工电气集团有限公司, 山东 济南 250002)
(6. 首钢技术研究院, 北京 100043)

摘要: 输电杆塔是输电线路工程中重要的基础设施。长期以来, 钢基杆塔主要采用热浸镀锌工艺来进行防腐, 但间歇式热浸镀锌工艺具有污染环境、能源消耗大、成本高等特点, 且热镀锌杆塔使用后期需进行维护。因此, 亟需寻找新型防腐材料替代热镀锌钢。在大气环境中, 耐候钢表面会形成致密且粘附良好的稳定锈层, 具有比普通碳钢更好的耐蚀性能, 将耐候钢应用于输电杆塔是输电杆塔防腐技术未来的重要发展方向之一。使用耐候钢制造输电杆塔可从原材料上解决它在应用过程中的防腐问题, 采用“以锈防锈”的思路实现输电杆塔的免涂装、免维护。主要介绍了耐候钢在我国输电杆塔中的应用研究进展和工程应用取得的重要成果, 包括杆塔用耐候钢板/卷、热轧耐候角钢和耐候钢螺栓等主要原材料的成分设计和性能研究, 耐候钢耐大气腐蚀行为研究, 以及冷弯耐候角钢塔、热轧耐候角钢塔和耐候钢管杆的工程应用情况。

关键词: 输电杆塔; 耐候钢; 耐候角钢; 耐候钢螺栓; 免涂装

中图分类号: TG142; TM75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2023)06-0464-11

引用格式: 曾尚武, 黄耀, 郭晓宏, 等. 耐候钢在输电线路杆塔中的应用与研究进展[J]. 中国材料进展, 2023, 42(6): 464-474.

ZENG S W, HUANG Y, GUO X H, *et al.* Application and Research Progress of Weathering Steels for Transmission Line Pole and Tower [J]. Materials China, 2023, 42(6): 464-474.

Application and Research Progress of Weathering Steels for Transmission Line Pole and Tower

ZENG Shangwu¹, HUANG Yao², GUO Xiaohong³, CHEN Hongwei⁴,
WAN Xiao⁵, ZHANG Xu⁶, LI Guang⁵

- (1. China Metallurgical Information & Standardization Institute, Beijing 100730, China)
(2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)
(3. Ansteel Iron and Steel Research Institute, Anshan 114009, China)
(4. Hesteel Group Central Iron and Steel Research Institute, Shijiazhuang 050023, China)
(5. Shandong Electrical Engineering and Equipment Group Co., Ltd., Jinan 250002, China)
(6. Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100043, China)

Abstract: Transmission pole and tower is one of the most important infrastructures in transmission line engineering projects. Hot-dip galvanising has long been the primary anti-corrosion solution for transmission pole and tower. However, the

intermittent hot-dip galvanising industry has been identified as one of the industries that consume large amounts of raw materials and energy and produces numerous pollutants. In addition, transmission pole and tower with hot-dip galvanising corrosion protection need maintenance. Therefore, the development and application of novel anti-corrosion materials are important goals for power industries. In the atmos-

收稿日期: 2021-09-20 修回日期: 2021-11-24

基金项目: 北京市优秀人才培养资助项目(2018000062586G438)

第一作者: 曾尚武, 男, 1983年生, 高级工程师,

Email: kittyzengshangwu@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202109022

pheric environment, the surface of weathering steel will form a dense and stable rust layer with good adhesion, which has better corrosion resistance than ordinary carbon steel. The application of weathering steels in transmission pole and tower is an important development direction of corrosion protection. Using weathering steel to manufacture transmission pole and tower can solve the anticorrosion problem in the application process from raw materials, and the idea of "rust to prevent rust" can realize coating and maintenance free for its lifetime. The paper mainly introduces the applications and important research achievements of weathering steel for transmission pole and tower in China, including the composition design and performance research of the main raw materials (such as weathering steel plate, hot roll weathering angle steel and weathering steel bolts), corrosion behaviors of weathering steel in different regional climate, and the engineering application of weathering steel in transmission pole and tower.

Key words: transmission pole and tower; weathering steel; weathering angle steel; weathering steel bolts; no coating

1 前言

输电线路杆塔是电网建设过程中的主要设备, 钢制杆塔分为铁塔(角钢塔和钢管塔)和钢管杆, 杆塔材料主要采用碳素结构钢和低合金高强度结构钢^[1-3]。由于输电杆塔长期服役于野外, 使用环境复杂, 极易受到各类腐蚀, 造成杆塔构件锈蚀, 从而降低构件性能, 影响杆塔结构的承载能力, 威胁输电线路的安全稳定运行^[4-6]。

热浸镀锌(也称热镀锌)是输电杆塔构件防腐最主要的技术^[7-10], 也是输电杆塔长期采用的防腐技术。目前, 钢制输电杆塔结构的热镀锌方式为间歇式批量热镀锌, 受其工艺所限存在以下问题: 一是生产过程会产生酸雾、SO₂、NO_x、锌烟等废气(图1), 碱液、废酸、废水等废液, 污泥、锌渣等固废, 给环境带来巨大压力^[11, 12]。根据对国内10家较先进大中型杆塔制造企业的调研结果, 2019年各类污染物的产生量、排放量以及去向如表1所示。二是生产过程中会消耗大量的水、电、气等能源, 主要能源消耗量如表2所示。三是热镀锌工作环境差带来的健康隐患和设备带来的安全隐患都影响着工作人员的安全。此外, 热镀锌杆塔还存在耐蚀性能不理想、需经常维护的问题^[13, 14]。调查结果表明^[15], 山东电网输电杆塔的平均首次维护时间为13.2年, 平均维护间隔为6.6年, 要实现铁塔40年的服役寿命, 平均需要进行5次防腐维护。

近年来, 受环保政策的严格限制, 大批热镀锌生产企业因污染问题而面临限产或关停。开发替代热镀锌防腐件的新型杆塔材料及配套技术成为输变电工程钢构件生产的紧迫需求之一。



图1 热镀锌杆塔构件加工过程产生废气: (a)酸洗, (b)热镀锌

Fig.1 Waste gas generated during the hot-dip galvanising process for transmission pole and tower: (a)derusting, (b)hot-dip galvanising

表1 万吨杆塔构件热镀锌过程产生的污染物情况

Table 1 Pollutants from hot-dip galvanizing process of ten thousand tons tower

Category	Contaminant	Average yield/t	Average emission/t	Discharge direction
Waste gas	Acid fog	1.04	0.38	Atmosphere
	SO ₂	0.81	0.37	Atmosphere
	NO _x	0.25	0.24	Atmosphere
	Zinc smoke	1.85	0.30	Atmosphere
Waste fluid	Waste water	2145.24	0.00	Treatment
	Waste acid	168.09	0.00	Entrusted disposal
Solid waste	Sludge	5.19	0.00	Entrusted disposal
	Zinc slag	83.84	0.00	Sale

表2 万吨杆塔构件热镀锌过程的主要能源消耗量

Table 2 Main energy consumption of hot dip galvanizing process of ten thousand tons tower

Energy	Consumption
Water	4129.71 t
Electricity	390933.58 kWh
Natural gas	154631.84 m ³
Acid	216.31 t
Zinc	418.85 t

2 耐候钢

耐候钢即耐大气腐蚀钢, 是介于普碳钢和不锈钢之间的低合金钢, 是通过向钢中加入Cr, Ni, Cu, P等元素, 使它们在钢基体表面形成保护膜, 阻碍锈蚀向内扩散和发展, 保护锈层下面的基体^[16, 17]。耐候钢研究、开发和应用均始于美国, 日本、德国、英国等国家对耐候钢的研究和应用也较早。20世纪初, 美国钢铁公司研究人员发现铜元素可以改善钢在大气中的耐蚀性能, 随后该研究得到美国试验和材料协会(ASTM)暴露试验的验证。20世纪30年代, 美国钢铁公司成功研制出了含铜低

合金钢(Corten 钢)。1955 年,日本开始试制耐候钢。中国于 20 世纪 60 年代开始开展耐候钢的研究工作,并于 1965 年首次试制出 09MnCuPTi 耐候钢板。

1964 年,美国首次将免涂装耐候钢应用到新泽西高速公路桥梁上,1977 年建设新河谷大桥时采用了 Corten 钢。1968 年,日本建成第一座免涂装耐候钢桥(知多 2 号桥)。德国和英国分别于 1969 和 1972 年开始使用裸露耐候钢。1991 年,中国采用 NH35q 建造了国内第一座免涂装耐候钢桥梁(京广铁路武汉巡司河桥)。耐候钢由于具有优良的耐蚀性和综合力学性能,现已广泛用于桥梁^[18, 19]、集装箱^[20]、铁道车辆^[21]、建筑^[22, 23]、景观^[24]等长期暴露在大气中使用的钢结构。

3 耐候钢在国外输电杆塔中的应用

国外较早将耐候钢应用于输电杆塔中,其中欧美、日本等国家应用较为广泛。根据文献报道^[25],最早是美国于 1960 年将耐候钢应用到 2 条输电线路杆塔中,1 条是在密歇根湖南岸 Gary 钢铁厂的 69 kV 双回线路中建立了 17 座裸露耐候钢角钢塔,另 1 条是在马萨诸塞州皮茨菲尔德(Pittsfield Massachusetts)近郊(半农村地区)的超高压工程中建设了 1 基(第 18 号铁塔)免涂装耐候钢铁塔。1962 年 1 月,美国宾夕法尼亚州布鲁克维尔

(Brookville 8 Pennsylvania)2 基 138 kV 的 H 型输电杆塔使用了未喷涂的耐候钢,其后弗吉尼亚电力公司在一条 350 英里长 500 kV 的输电线路铁塔建设中全部采用耐候钢^[25]。截至 2000 年,上述线路运行状况良好^[26]。近年来,耐候钢在美国 120 kV 输电线路钢管杆和 345 kV 输电线路 H 型杆塔(钢管)中得到应用,如图 2。1998~2013 年,美国维蒙特工业有限公司为 100 多条输电线路工程供应耐候钢(ASTM A871)杆塔^[27]。1972 年,捷克共和国使用 Atmofix 52 A 耐候钢建设铁塔^[28]。

根据文献[29]可知耐候钢在日本输电杆塔中的应用情况。日本于 1975 年在 77 kV 双回路输电线路中采用 SMA41A 和 SMA50A 耐候钢建设了 2 基角钢试验塔,将钢板冷弯加工成角钢,最小和最大角钢规格分别为 $\angle 50 \times 50 \times 6$ 和 $\angle 150 \times 150 \times 15$,采用热镀锌螺栓(材质 SS41 和 SS50)连接,该塔于 10 年后拆除并进行了耐腐蚀性能和力学性能测试,结果发现,使用 10 年后耐候钢的锈层厚度约为 0.1 mm,强度略有上升。1990 年,日本在关西(Kansai)电力公司的实验中心建造了试验耐候钢管塔。2000 年,日本在 33 kV 双回路钢管塔中应用了 SMA400 和 SMA490 耐候钢,应用的最小和最大钢管规格分别为 $\Phi 48.6 \times 2.4$ 和 $\Phi 139.8 \times 3.5$,最小和最大角钢规格分别为 $\angle 50 \times 50 \times 4$ 和 $\angle 130 \times 130 \times 10$,连接螺栓均采用热镀锌螺栓。

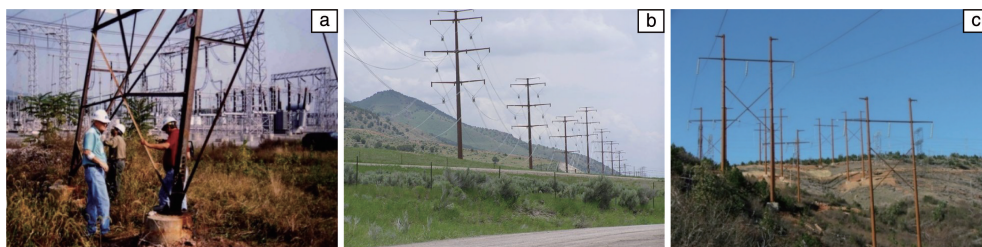


图 2 美国耐候钢输电杆塔:(a)角钢塔,(b)钢管杆,(c)H 型杆塔

Fig. 2 Photos of American uncoated weathering steel transmission pole and tower: (a)angle steel tower, (b)steel pipe pole, (c)H type tower

4 耐候钢在国内输电杆塔中的研究与应用

耐候钢在我国输电杆塔中的应用研究起步较晚,始于 1999 年济南钢铁股份有限公司(简称济钢)的研究。进入 21 世纪以来,国家电网有限公司(简称国网,含中国电力科学研究院有限公司(简称中国电科院)和国网安徽省电力有限公司(简称安徽省公司)二级单位)、山东电工电气集团有限公司(简称山东电工)、中国南方电网有限责任公司(简称南网)、鞍山钢铁集团有限公司(简称鞍钢)、河钢集团有限公司(简称河钢)、首钢集团有限公司(简称首钢)等企业开始重视耐候钢在输电杆塔中的应用,并逐步开展了相关研究与工程试点应用,表 3 为上述各企业开展的主要研究项目。目前相关研究与应用

主要集中在耐候角钢塔,其一是采用热轧耐候钢卷或带钢或钢板冷弯成角钢作为原材料,其二是直接采用热轧耐候角钢作为原材料;耐候钢管塔暂无相关研究,但少部分企业开展了耐候钢管杆研究。

4.1 冷弯耐候角钢塔

角钢塔是输电杆塔中使用最广泛的杆塔类型,在钢制杆塔中占比超过 80%(质量占比)。角钢是建设角钢塔的必要关键原材料。在市场无热轧耐候角钢供应的情况下,采用冷弯耐候角钢是建设耐候钢角钢塔的最佳选择。冷弯角钢是采用钢卷或带钢或钢板冷弯成型制成的,可采用强度更高、耐蚀性更好的耐候钢,从而节约钢材、提高寿命。关于冷弯耐候角钢塔的研究内容较为全面,主要包括耐候钢板和耐候钢螺栓制造技术、耐候钢耐大

气腐蚀行为、冷弯耐候角钢加工、构件及节点承载力计算与仿真、耐候钢杆塔设计技术、耐候钢杆塔全寿命周期经济性评价等方面的研究。

表 3 21 世纪以来国内相关企业开展的耐候钢杆塔研究项目明细
Table 3 Domestic research projects of weathering steel transmission pole and tower from 2000

序号	项目名称	承担单位	时间
1	耐候钢及冷弯型钢在输电线路的应用研究	中国电科院	2006~2007
2	耐候冷弯型钢在厦门 220 kV 输电线路工程中的应用研究	中国电科院	2009~2010
3	输电线路杆塔应用耐候钢和渗铝钢的可行性研究	中国电科院	2014~2015
4	输电铁塔用热轧耐候角钢研制与加工技术研究	山东电工	2016~2017
5	新型耐候钢在特高压输电铁塔中的应用技术研究	中国电科院	2016~2017
6	耐候钢在 110 kV 输电线路杆塔中的应用研究	中国电科院	2017~2018
7	耐候输电钢管杆工程试点应用研究	鞍钢	2017~2018
8	环保型耐候钢杆塔绿色设计平台集成应用技术	中国电科院	2017~2019
9	耐候钢输电铁塔综合性能研究	贵州电力科学研究院	2019~2020
10	输电耐候角钢试验塔耐候性研究	河钢	2019~2020

注：第 8 个项目为国家工信部绿色制造项目，其它为企业项目。

在耐候钢板方面，中国电科院较早开展了杆塔用耐候钢的研究，1999 年联合济钢研制出了 JT245（仿美国 Corten A 钢）和 JT345（GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》以 Q355 钢级替代 Q345 钢级，因此文中有 345 和 355 两种表述）耐大气腐蚀塔桅结构钢板（仿美国 Corten B 钢），进行了系统试验验证，并将它们用于建设烟台港务局航标灯塔^[30]。但这两种钢板的耐蚀性能有待提高，最终并未实现量产和推广应用。近年来，中国电科院与首钢合作开发了 SQNH 系列低 P 耐候钢卷，采用微合金化设计路线，在 C-Si-Mn 系钢的基础上添加 Nb，V，Ti 等微合金元素，充分利用热连轧线的控轧控冷技术使 Nb，V 和 Ti 发挥细化晶粒和析出强化作用，加入 Cu，Cr，Ni 使之具有较好的耐蚀性（相对腐蚀速率较美国 ASTM 耐候钢提高 8% 以上），较低的 C 含量使之具有较好的冷加工成型性和耐蚀性，低 P 含量使之具有高韧的特点（-40 ℃ 下冲击功达到 100 J 以上）。SQNH 系列耐候钢可满足我国大部分地区的使用需求，解决了不同温度和腐蚀环境条件下输电线路杆塔材料的腐蚀与防护问题。表 4^[27, 31, 32]和表 5^[27]分别是 SQNH420 耐候钢板的化学成分和力学性能，其耐腐蚀指数 (*I*) 达到 6.743，且具有优异的力学性能。经 12 d 的室内加速腐蚀，SQNH420 的耐腐蚀性能和传统 09CuPCrNi 相当，优于 ASTM A871（见图 3）。经表面处理后的耐候钢，在腐蚀初期的腐蚀速率均比裸露的耐候钢大，但随着腐蚀时间的延长，其腐蚀速率有所降低。此外，中国电科院开发了低成本耐候钢^[33, 34]，并研究了 C，Si，Cr，Cu，Nb，S，P 的元素含量对 355 MPa 级

表 4 输电铁塔用耐候钢板的化学成分

Table 4 Chemical compositions of weathering steel used for transmission towers (ω/%)

Grade	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Nb	V	Ti
SQNH420 ^[27]	≤0.06	0.29	0.61	≤0.01	≤0.002	≤0.38	≤0.40	≤0.50	0.034	—	—
SQNH420 ^[31]	0.05~0.1	0.30~0.45	0.8~1.2	≤0.02	≤0.002	0.4~0.6	0.4~0.6	0.5~0.7	0.03~0.06	0.02~0.06	0.01~0.02
SQNH420 ^[32]	0.059	0.299	0.579	0.006	0.008	0.654	0.393	0.562	—	—	—

表 5 SQNH420 耐候钢板不同位置的力学性能^[27]

Table 5 Mechanical properties of the SQNH420 weathering steel at different positions^[27]

Thickness /mm	Distance to tail/m	Direction	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	AKV(-40 ℃)/J			Bend test ($D=2a$, 180°)
						1	2	3	
5.9	3	Horizontal	500	563	27.5	96	89	109	Pass
		Longitudinal	486	544	31.5	119	117	109	Pass
	5	Horizontal	513	568	19	167	176	173	Pass
		Longitudinal	510	563	31.0	104	112	98	Pass
	8	Horizontal	510	563	31.0	104	112	98	Pass
		Longitudinal	475	552	31.5	102	120	115	Pass

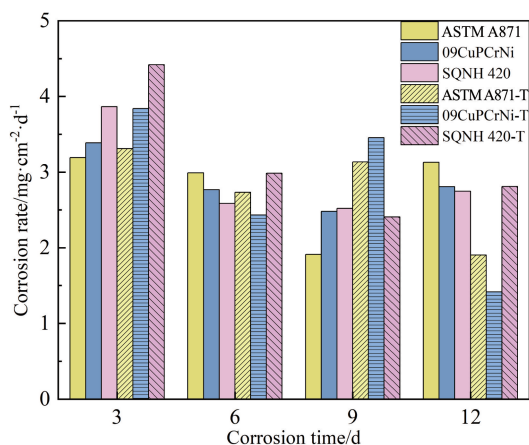


图 3 耐候钢板在周期浸润环境下的腐蚀速率(T-经表面处理)

Fig. 3 Corrosion rate of weathering steel under cyclic immersion corrosion(T-by surface treatment)

耐候钢板力学性能和耐腐蚀性能的影响。如 P 含量增加会降低耐候钢的低温性能, P 含量(质量分数)为 0.028% 时耐候钢具有最好的耐腐蚀性能^[35]。

在耐大气腐蚀行为方面, 中国电科院等单位针对输电杆塔用耐候钢在乡村、沿海等不同大气环境下的腐蚀行为开展了研究^[27, 36, 37], 为选材提供了参考。如将研发的 SQNH 系列耐候钢板冷弯成角钢并组装成模拟塔, 分别放置于河北曹妃甸、北京良乡、福建平潭和福建永泰 4 处暴晒^[27]。结果表明, 耐候钢锈层电阻随暴晒时间增加而逐渐增大, 锈层腐蚀产物主要由 α -FeOOH、 γ -FeOOH、 Fe_3O_4 及一些非晶态腐蚀产物组成。经 15 个月大气暴晒后发现, 曹妃甸、良乡和永泰地区的 α -FeOOH+ γ -FeOOH 含量均在 9.86% 以上, 而平潭地区的 α -FeOOH+ γ -FeOOH 平均含量下降至 6.4%。因此, 该型耐候钢适合在曹妃甸、良乡和永泰地区建设杆塔使用, 不适合在平潭地区使用。

工程试点应用方面, 2009 年中国电科院首次将 2 基耐候冷弯角钢输电铁塔应用在 220 kV 福建厦门梧槽-内官线路中^[38]。该塔采用 Q450NQR1 耐候钢板经冷弯机加工成角钢, 共 17 种规格, 最大规格 $\angle 180 \times 180 \times 12$; 构件连接使用普通热镀锌螺栓和 MK. TH550NQ-II 型焊接材料; 考虑整条线路外观的协调, 采用 H06-1-2 环氧锌粉作为底漆和 919 封闭涂料进行表面处理。2018 年 11 月, 中国电科院、安徽省公司等单位首次将全裸露、免涂装耐候钢输电铁塔应用于安徽亳州夏湖-高堂 110 kV 输电线路工程中^[39]。随后, 在安徽阜阳等地又建设了 6 条耐候钢杆塔绿色示范线路。7 条线路累计使用耐候钢 6508 t, 各条线路工程情况见表 6, 图 4 和图 5 为现场照片。上述工程采用 SQNH355、SQNH420 耐候钢板及其冷弯成型的角钢为主要原材料, 使用耐候钢螺栓连接。

表 6 安徽省耐候钢输电杆塔示范工程

Table 6 Demonstration projects of weathering steel transmission tower in Anhui province

序号	工程名称	杆塔基数	质量/t
1	阜阳吕蒙-阜阳西牵引站 220 kV 线路	62	690
2	阜阳沙河-东庄 220 kV 线路工程	77	1438
3	阜阳沙河-乔庄牵引站、东庄-乔庄牵引站 220 kV 线路工程	38	424
4	薛桥-颍上北牵引站 220 kV 线路工程	33	614
5	阜阳阜三-薛桥 220 kV 线路工程	96	1623
6	阜阳阜三-白果 220 kV 线路工程	68	1130
7	亳州夏湖-高堂(孙庙) 110 kV 线路	62	589
合计		436	6508

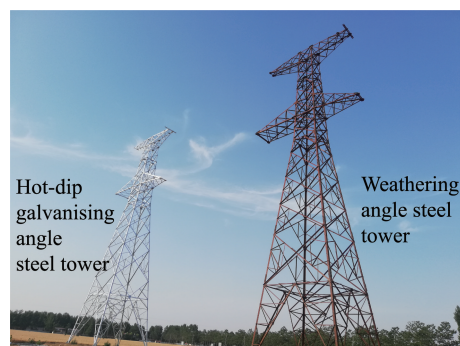


图 4 安徽阜阳阜三-薛桥 220 kV 线路冷弯耐候角钢塔

Fig. 4 Fusan-Xueqiao 220 kV line transmission angel tower with cold-formed weathering steel



图 5 安徽阜阳沙河-东庄 220 kV 线路冷弯耐候角钢塔

Fig. 5 Shahe-Dongzhuang 220 kV line transmission angel tower with cold-formed weathering steel

4.2 热轧耐候角钢塔

热轧耐候角钢是在角钢或型钢生产线中轧制出具有耐腐蚀性的角钢,采用热轧耐候角钢建设角钢塔可沿用原始成熟的设计规范、构件加工技术及设备,为原材料采购、角钢塔加工及安装等带来众多便捷。

热轧角钢与热轧带钢的生产工艺差异较大,热轧带钢的组织 and 性能可通过控轧控冷或调整化学成分进行有效控制,但热轧角钢生产线无法实现控轧控冷,其强度主要通过调整化学成分来实现。两者生产工艺不同,微合金元素强化设计思路也不同。与 V 元素相比, Nb 析出物要求相对较高的加热温度才能溶入奥氏体中,这不利于含 Cu 耐候钢的生产; Nb 元素的作用是 Nb 的碳氮化物对再结晶的阻滞,以此来实现非再结晶轧制(需通过控轧控冷工艺实现)。非再结晶轧制在传统热轧角钢生产线上较难实现,尤其是生产降温速率较低的大规格角钢; Nb

能在奥氏体中析出以阻止较低终轧温度时的再结晶,然而角钢终轧温度一般比带钢或扁平材高,因此通过添加 Nb 来控制晶粒尺寸并不十分有效。V 的碳化物和氮化物在奥氏体中的固溶度比 Nb 或者 Ti 要高,且加热时可充分溶解到钢材中,可以在冷却时得到细小弥散的析出物; V 不仅可以促进珠光体的形成,还能细化铁素体。当 V 和 Nb 复合添加时,易于形成贝氏体组织,而 V 在贝氏体内沉淀析出,降低了其韧性。由于 V 和 Ti 复合添加能形成非常稳定的 TiN,在加热和均热过程中均可以阻止奥氏体晶粒长大,细化奥氏体晶粒,并且 Ti 不参与低温析出强化。因此,热轧耐候角钢强化元素以 V 元素为主、Ti 元素为辅,能够解决 Nb 元素对于控轧控冷技术依赖性过强而目前角钢生产设备和生产工艺难以满足的问题。表 7 是设计与工业生产的输电铁塔用 355 MPa 级别热轧耐候角钢的化学成分^[40, 41]。

表 7 输电铁塔用 355 MPa 级别热轧耐候角钢的化学成分

Table 7 Chemical compositions of 355 MPa grade hot rolled weathering angle steel used for transmission towers($\omega/\%$)

Category	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	V	I index
Design	≤ 0.12	≤ 0.50	≤ 1.50	≤ 0.025	≤ 0.015	0.40~0.80	0.15~0.65	0.25~0.55	≤ 0.15	≥ 6.0
Industrial production ^[40]	0.08	0.30	0.62	0.015	0.010	0.45	0.27	0.26	0.06	6.25
Industrial production ^[41]	0.11	0.20	0.81	0.018	0.011	0.49	0.162	0.30	0.062	6.24

2014 年,中国电科院联合太原钢铁集团有限公司和唐山粤丰钢铁有限公司,试制了 Q345 和 Q420 两种强度级别的热轧耐候角钢 A871,力学性能和无损检测结果合格。系统研究了不同焊接工艺对热轧耐候角钢组织和力学性能的影响,提出了热轧耐候角钢焊接工艺。

山东电工开展了输电铁塔用热轧耐候角钢制造技术和配套连接材料的研究。2017 年,山东电工与鞍钢、河钢、天津达亿钢铁有限公司等企业合作试制出 Q235NHT、Q355NHT、Q420NHT 系列输电铁塔用热轧耐候角钢,实现了批量化生产,力学性能稳定且符合输电铁塔用钢要求(表 8),耐腐蚀性优异(图 6)。此外,山东电工还开展了热轧耐候角钢的切割、冲孔、钻孔、制弯、开合角等

构件加工工艺研究,热轧耐候角钢加工性能达到同级别普通热轧角钢标准,满足构件加工要求。南网针对耐候钢自保护氧化层对钢材强度和稳定性的影响、耐候钢连接措施、耐候钢输电铁塔加工制造工艺要求和耐候钢输电铁塔真型试验开展了研究。

2020 年,全国首个采用热轧耐候角钢的 2 基耐候角钢塔在贵州开阳 110 kV 永温-干河线正式投入使用,如图 7 所示。河钢与山东电工针对铁塔耐候钢之间的匹配、耐候钢加工焊接工艺等进行了试验塔研究,并于 2021 年在江苏镇江采用热轧耐候角钢及与之电位差较低的耐候螺栓连接副完成了试验塔组立。

表 8 Q235NHT、Q355NHT、Q420NHT 系列输电铁塔用热轧耐候角钢的力学性能

Table 8 Mechanical properties of hot rolled weathering angle steel for Q235NHT, Q355NHT, Q420NHT series transmission towers

Grade	Specification/mm	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	$AKV(0^\circ\text{C})/\text{J}$	Bend test($D=2a, 180^\circ$)
Q235BNHT	$\angle 90\times 90\times 7$	276~314	458~463	32.5~37.0	46~53	Pass
Q355BNHT	$\angle 180\times 180\times 16$	360~373	495~503	32.5~34.5	205~231	Pass
	$\angle 160\times 160\times 12$	380~415	499~542	29~31	108~198	Pass
Q420BNHT	$\angle 125\times 125\times 12$	432~459	647~678	25.0~27.0	45~56	Pass
	$\angle 160\times 160\times 12$	470	605	31.0	142	Pass

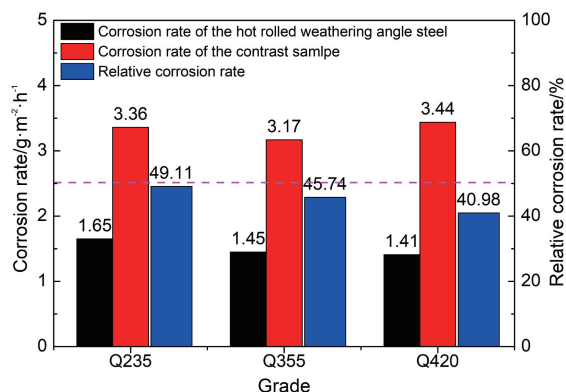


图 6 热轧耐候角钢与普通角钢腐蚀速率比较 (72 h 周期浸润)

Fig. 6 Comparison of periodic infiltration corrosion between hot rolled weathering angle steel and ordinary angle steel (72 h)



图 7 110 kV 永温-干线热轧耐候角钢塔

Fig. 7 Hot rolled weathering angle steel tower in Yongwen-Ganhe 110 kV line

表 9 Q355DT 热轧耐候钢板力学性能

Table 9 Mechanical properties of Q355DT weathering steel

Grade	Thickness/mm	R_{eL} /MPa	R_m /MPa	A /%	AKV(0 °C)/J	Bend test($D=2a$, 180°)
Q355DT	3~50	390~420	520~570	23~30	>150	Pass

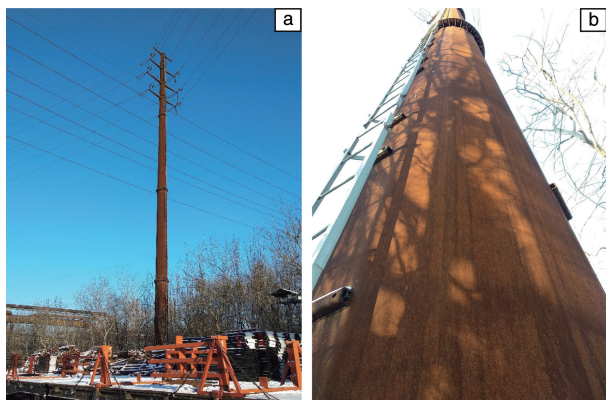


图 8 鞍钢厂区耐候钢管杆: (a) 运行的耐候钢管杆, (b) 表面锈层

Fig. 8 Weathering steel pipe pole in Ansteel factory: (a) the scene photo, (b) photo of the surface rust layer

4.4 耐候钢螺栓

两种不同材质接触时将发生接触腐蚀。螺栓连接是

4.3 耐候钢管杆

钢管杆是高压架空输电线路常用杆塔之一, 主要应用于 10~220 kV 线路中, 约占钢制杆塔的 12% (质量占比), 因具有结构简单、刚度大、占地面积小、运输安装方便等特点得到广泛应用, 尤其是在城区和近郊。

2018 年, 鞍钢研制并生产了输电杆塔用 Q355DT 耐候钢板, 力学性能见表 9。鞍钢采用生产的 Q355DT 热轧耐候钢板, 在鞍钢厂区 66 kV 电硅一二线工程中建立了国内首基输电耐候钢管杆, 见图 8。该耐候钢管杆塔型号为 GJ55-40, 双回路、转角 50°、高 40 m、钢管杆梢径和底径分别为 680 和 1780 mm。耐候钢管杆焊接方式为埋弧焊和气保焊, 焊丝为 TH550-NQ-II, 杆段连接方式为法兰连接。针对耐候钢锈层形成时间长、使用初期存在锈液流淌问题, 鞍钢开发了锈层快速稳定化处理技术, 并在上述耐候钢管杆中的不同杆段进行了对比试验研究。结果表明, 锈层稳定化处理技术可有效促进内锈层中 α -FeOOH 的生成, 使耐候钢管杆表面快速生成致密且与钢基体附着良好的锈层。

2020 年, 鞍钢在北京鞍钢未来研究院建立 1 基通讯耐候钢管杆。同年, 耐候钢管杆在河南安钢周口钢铁有限责任公司厂区内 220 kV 线路中应用, 合计用量 191.6 t。

杆塔构件重要的连接方式, 如果耐候钢杆塔采用常规的热镀锌螺栓, 锌层与耐候钢之间存在电位差, 导致低电位的锌层被腐蚀; 如果采用无热镀锌的普通螺栓, 电位差减小, 但其耐腐蚀性差。因此, 需开发与耐候钢相匹配的耐候钢螺栓。中国电科院、山东电工、河钢、首钢等单位开展了耐候钢输电杆塔配套紧固件制造技术研究^[42~45], 开发了 6.8, 8.8 和 10.9 级耐候钢紧固件, 包括耐候钢的螺栓、螺母、垫片、地脚螺栓和金具。此外, 杆塔构件连接还开展了耐候钢焊条及其耐蚀性的研究^[46]。

输电杆塔用螺栓是在野外环境下使用的, 考虑 P 对钢的低温韧性不利, 故 P 含量应控制在低水平, 因而耐蚀性元素选择 Cu, Cr 和 Ni。Cu 增加耐候性作用显著, 但导致连铸坯表面缺陷增加, 影响轧材表面质量, 进而影响材料的冷镦性能, 故 Cu 的含量不宜太高, 不应超过 0.60% (质量分数, 下同); Ni 的加入不仅可以减轻/避免 Cu 对耐候螺栓钢表面质量的负面影响, 而且可以提高材料的低温韧性和断裂韧性, 含量应控制在 0.15% ~

0.80%；钢中加 Cr 不仅可以提高其强度、硬度、淬透性，而且有利于提高耐蚀性。Ni 和 Cu 合金化成本比 Cr 高得多，所以通过向螺栓钢中加 Cr 提高耐蚀性是比较经济的方法，Cr 含量可控制在 1% 左右甚至更高，但不宜过高，过高会降低塑性和韧性；对于 6.8 和 8.8 级耐候螺栓钢，C 含量不应超过 0.25%。同时为避免 C 对钢耐蚀性的影响，可通过适当降低 C 含量、添加 V 等微合金元素以提高强度。6.8 和 8.8 级耐候钢螺栓成分如表 10

所示，图 9a 是腐蚀试验结果。经 240 h 周期浸润腐蚀，全尺寸耐候钢螺栓 (Full-size WSB)、圆柱形耐候钢螺栓 (Cylinder WSB)、全尺寸 20MnBTi 螺栓 (Full-size MSB)、圆柱形 20MnBTi 螺栓 (Cylinder MSB) 和圆柱形 Q355 耐候角钢 (Cylinder WAS，由角钢加工成圆柱形) 的腐蚀速率分别为 1.55，1.45，2.49，2.34 和 1.81 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，可以看出耐候钢螺栓和热轧耐候角钢的耐蚀性明显优于普通螺栓。

表 10 6.8 和 8.8 级耐候钢螺栓的化学成分

Table 10 Chemical compositions of the 6.8 and 8.8 grade weathering steel bolts used for transmission towers ($\omega/\%$)

Grade	C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	Ni	V	I index
8.8 ^a	0.13~0.25	0.50~1.30	0.15~0.40	≤0.030	≤0.010	0.80~1.25	≤0.60	Ni/Cu≥1/3	—	≥6.5
6.8 ^b and 8.8 ^b	≤0.15	≤1.00	≤0.50	≤0.030	≤0.030	Moderation	Moderation	Moderation	Moderation	≥6.5

注：a 山东电工，b 河钢。

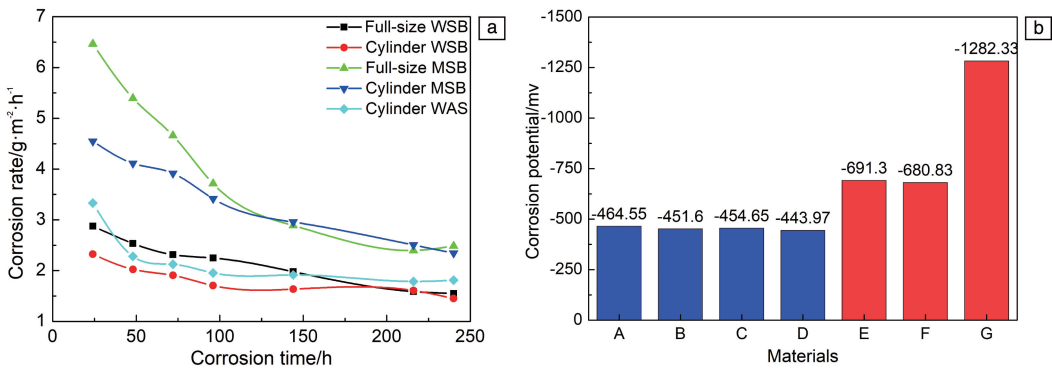


图 9 耐候钢螺栓的耐蚀性：(a) 腐蚀速率 (山东电工)，(b) 自腐蚀电位 (河钢)

Fig. 9 Corrosion properties of weathering steel bolts: (a) corrosion rate, (b) corrosion potential

河钢通过转炉-精炼炉-真空精炼炉-连铸工艺，采用低碳 V 微合金化并添加 Cr，Ni，Cu 耐蚀元素 (见表 10)，可满足热轧耐候角钢 Q355NHT 和 Q420NHT 的力学性能要求，同时也可满足冷加工工艺的 6.8 级螺栓的强度要求。通过研究 Q420NHT 淬火工艺，V 在高温下可以有效提高奥氏体固溶 V 的含量，形成奥氏体晶界偏聚从而降低奥氏体晶界能，提高淬透性，满足热处理工艺 8.8 级

螺栓的性能要求。因此，所开发材料制备的 6.8 和 8.8 级耐候钢螺栓及塔材用热轧耐候角钢之间的电位差远远低于 50 mV (图 9b，其中 A 为热轧耐候钢圆钢，B 为 6.8 级耐候钢螺栓，C 为 8.8 级耐候钢螺栓，D 为热轧耐候角钢，E 为 40Cr 圆钢，F 为 6.8 级 25K 螺栓，G 为 42CrMo 镀锌圆钢)，可最大程度地保证耐候钢杆塔运行的安全性，螺栓相应级别的力学性能要求见表 11。

表 11 耐候钢螺栓的力学性能要求

Table 11 Mechanical properties requirements of weathering steel bolts

Grade	Specification	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	$Z/\%$	$AKV(-20\text{ }^\circ\text{C})/\text{J}$
6.8	M16 ^a	549~566	655~667	23.5~26	74~75	108~112
	M20 ^b	—	700	0.37	—	—
8.8	M20 ^a	795~831	855~885	14~17	72	162~170
	M20 ^b	833~846	915~930	16.5~18	63~65	163~167

注：a 山东电工，b 河钢。

5 结 语

耐候钢输电杆塔不仅可以实现免涂装,而且可以实现终身免维护,是输电线路中热镀锌杆塔的理想替代品。耐候钢输电杆塔在铁塔厂加工制造过程中可省去传统热镀锌杆塔构件的酸洗、助镀、热镀锌、钝化等工序(图 10),不仅避免了酸雾、锌烟/锌尘、 SO_2 、 NO_x 等污染物排向大气以及生产废水、废酸、锌灰、锌渣、含重金属的污泥等废弃物的产生,而且节约了大量的水、电、天然气、酸和锌等资源,同时还可降低制造成本。耐候钢输电杆塔采用“以锈防锈”的思路,从原材料上解决了杆塔应用过程中的防腐问题,有效解决了热镀锌杆塔在服役过程中的多次维护问题,节省了维护成本。

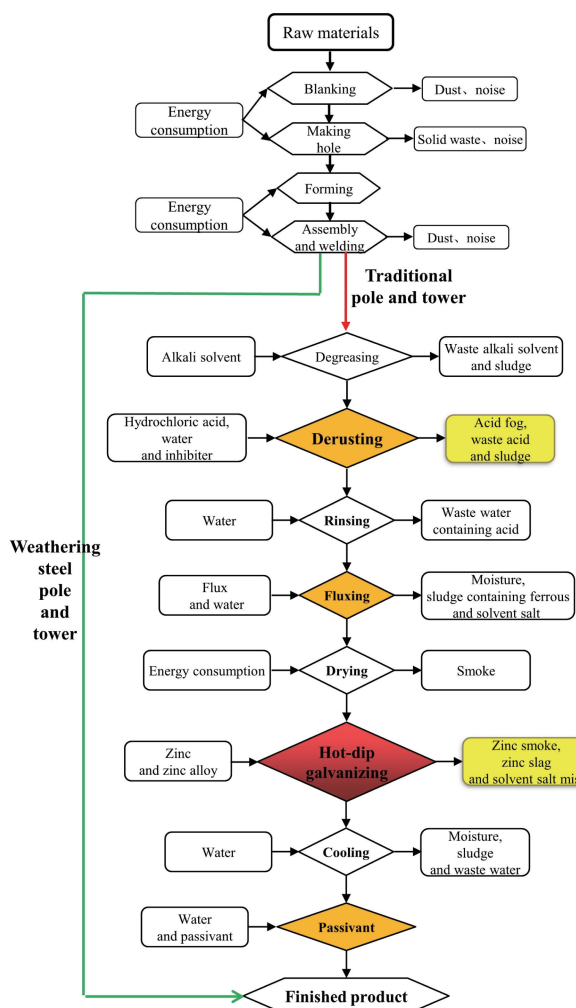


图 10 传统铁塔和耐候钢铁塔加工制造工序对比

Fig. 10 Process comparison between hot-dip galvanizing tower and weathering steel tower

在我国二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值、努力争取 2060 年前实现碳中和的背景下,耐候钢杆塔可实

现输电线路建设过程的绿色化制造,促进我国输电线路建设向低碳环保转型。随着国家对节能减碳和环境保护的日益重视,为实现输电线路建设绿色化,耐候钢杆塔研究仍需开展以下工作:一方面,积极推动耐候钢杆塔在低、高压输电线路中的应用,逐步积累经验、掌握各地域腐蚀状态等基础数据,然后逐步向超高压线路中推广应用;另一方面,亟需开展耐海洋气候的耐候钢杆塔用钢及其配套材料的试验研究、工业生产和试点应用等工作。

参考文献 References

- [1] 夏晓健,金焱,乔汉文,等. 腐蚀科学与防护技术[J], 2019, 31(2): 121-127.
XIA X J, JIN Y, QIAO H W, *et al.* Corrosion Science and Protection Technology[J], 2019, 31(2): 121-127.
- [2] 李文翰,尹学涛,周学杰,等. 材料保护[J], 2018, 51(10): 114-118.
LI W H, YIN X T, ZHOU X J, *et al.* Materials Protection[J], 2018, 51(10): 114-118.
- [3] 常建伟,王兴安. 焊接技术[J], 2019, 48(S1): 10-15.
CHANG J W, WANG X A. Welding Technology[J], 2019, 48(S1): 10-15.
- [4] 胡家元,李延伟,刘栓,等. 中国材料进展[J], 2019, 38(7): 705-709.
HU J Y, LI Y W, LIU S, *et al.* Materials China[J], 2019, 38(7): 705-709.
- [5] 李杰,巫世晶,吴利霞,等. 水电能源科学[J], 2016, 34(1): 176-178.
LI J, WU S J, WU L X, *et al.* Water Resources and Power[J], 2016, 34(1): 176-178.
- [6] 滕越,元弘,缪春辉,等. 安徽电气工程职业技术学院学报[J], 2020, 25(1): 47-52.
TENG Y, YUAN H, MIAO C H, *et al.* Journal of Anhui Electrical Engineering Professional Technique College[J], 2020, 25(1): 47-52.
- [7] 刘栓,周开河,方云辉,等. 中国材料进展[J], 2017, 36(6): 442-447.
LIU S, ZHOU K H, FANG Y H, *et al.* Materials China[J], 2017, 36(6): 442-447.
- [8] JOSE A Á, ROBERTO L, BORJA A, *et al.* Metals[J], 2016, 6(7): 163-176.
- [9] HAN Y, XIA Y Q, CHEN X, *et al.* Anti-Corrosion Methods and Materials[J], 2018, 65(2): 131-137.
- [10] 郝负洪,李洁,刘永利. 材料导报[J], 2019, 33(8): 1389-1394.
HAO Y H, LI J, LIU Y L. Materials Reports[J], 2019, 33(8): 1389-1394.
- [11] DONG M G, XUE X X, KUMAR A, *et al.* Journal of Hazardous

- Materials[J], 2018, 344: 602-614.
- [12] YUAN X H, ZHANG Q F. Applied Mechanics and Materials[J], 2017, 873: 71-79.
- [13] RODGER J, BARTLETT S, ATRENS A. Materials and Corrosion[J], 2017, 68(8): 902-910.
- [14] 宁亮, 陈云, 杨凯, 等. 腐蚀科学与防护技术[J], 2019, 31(2): 149-154.
- NING L, CHEN Y, YANG K, *et al.* Corrosion Science and Protection Technology[J], 2019, 31(2): 149-154.
- [15] 岳增武, 李辛庚, 樊志彬, 等. 中国电力[J], 2015, 48(2): 150-155.
- YUE Z W, LI X G, FAN Z B, *et al.* Electric Power[J], 2015, 48(2): 150-155.
- [16] MORCILLO M, DÍAZ I, CHICO B, *et al.* Corrosion Science[J], 2014, 83: 6-31.
- [17] 王春生, 张静雯, 段兰, 等. 交通运输工程学报[J], 2020, 20(1): 1-26.
- WANG C S, ZHANG J W, DUAN L, *et al.* Journal of Traffic and Transportation Engineering[J], 2020, 20(1): 1-26.
- [18] 郑凯锋, 张宇, 衡俊霖, 等. 哈尔滨工业大学学报[J], 2020, 52(3): 1-10.
- ZHENG K F, ZHANG Y, HENG J L, *et al.* Journal of Harbin Institute of Technology[J], 2020, 52(3): 1-10.
- [19] 李军平. 钢结构(中英文)[J], 2019, 34(6): 107-111.
- LI J P. Steel Construction(Chinese & English)[J], 2019, 34(6): 107-111.
- [20] 田鹏, 康永林, 刘宏博, 等. 轧钢[J], 2020, 37(5): 16-20.
- TIAN P, KANG Y L, LIU H B, *et al.* Steel Rolling[J], 2020, 37(5): 16-20.
- [21] 陈付红, 高真凤, 黄维, 等. 上海金属[J], 2017, 39(1): 70-74.
- CHEN F H, GAO Z F, HUANG W, *et al.* Shanghai Metals[J], 2017, 39(1): 70-74.
- [22] 刘锬, 张旭东, 田志红, 等. 建筑科学[J], 2020, 36(S2): 450-454.
- LIU K, ZHANG X D, TIAN Z H, *et al.* Building Science[J], 2020, 36(S2): 450-454.
- [23] GUO X H, ZHANG Y D, JIN S B, *et al.* Materials Chemistry and Physics[J], 2019, 236: 121783.
- [24] 许多. 耐候钢在景观设计中的应用研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2017.
- XU D. Study on the Application of Weathering Steel in Landscape Design[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2017.
- [25] COBURN S K, GILLILAND G W, POHLMAN J C. Electrical Engineering[J], 1963, 82(11): 666-672.
- [26] LAFFREY D C, DAMMANN M, MEDLOCK R D. Performance of Weathering Steel in TxDOT Bridges[R]. Texas: Texas Department of Transportation (TxDOT), 2000: 3.
- [27] 葛兆军, 张强, 黄耀, 等. 中国电力[J], 2016, 49(12): 8-14.
- GE Z J, ZHANG Q, HUANG Y, *et al.* Electric Power[J], 2016, 49(12): 8-14.
- [28] Proceedings on Workshop on Atmospheric Corrosion and Weathering Steels[C]. Colombia: University of Antioquia, 2004: 1-27.
- [29] Proceedings of Asia Pacific Transmission and Distribution Conference and Exhibition[C]. Korea: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002: 2154-2157.
- [30] 中国钢结构协会房屋建筑钢结构分会 2011 年学术年会论文集[C]. 广州: 中国钢结构协会, 2011: 132-138.
- Proceedings of 2011 Annual Conference of China Steel Construction Society of Building Steel Structure Branch[C]. Guangzhou: China Steel Construction Society, 2011: 132-138.
- [31] 张旭, 刘锬, 崔阳, 等. 一种电力塔架用耐候钢及其制备方法: CN110055461A[P], 2019-07-26.
- ZHANG X, LIU K, CUI Y, *et al.* Weather-Resistant Steel for Electric Tower and Preparation Method Thereof: CN110055461A[P], 2019-07-26.
- [32] 孟晓波, 陈日, 高岩, 等. 热加工工艺[J], 2019, 48(14): 49-53.
- MENG X B, CHEN R, GAO Y, *et al.* Hot Working Technology[J], 2019, 48(14): 49-53.
- [33] 黄耀, 韩军科, 邢海军, 等. 一种 800 MPa 输电杆塔用高强耐候钢的制备方法: CN106756468A[P], 2017-05-31.
- HUANG Y, HAN J K, XING H J, *et al.* Preparation Method for High-Strength Weather-Resistant Steel for 800 MPa Power Transmission Tower: CN106756468A[P], 2017-05-31.
- [34] 黄耀, 韩军科, 王旭明, 等. 一种乡村大气环境下输电杆塔用耐候钢的制备方法: CN106756470A[P], 2017-05-31.
- HUANG Y, HAN J K, WANG X M, *et al.* Preparation Method of Weathering Resistant Steel of Transmission Tower in Rural Atmospheric Environment: CN106756470A[P], 2017-05-31.
- [35] 罗义华, 黄耀, 杨雪锋, 等. 钢铁钒钛[J], 2019, 40(1): 142-147.
- LUO Y H, HUANG Y, YANG X F, *et al.* Iron Steel Vanadium Titanium[J], 2019, 40(1): 142-147.
- [36] 潘雪新, 姜海昌, 付鸿, 等. 腐蚀科学与防护技术[J], 2017, 29(4): 356-362.
- PAN X X, JIANG H C, FU H, *et al.* Corrosion Science and Protection Technology[J], 2017, 29(4): 356-362.
- [37] 潘雪新, 姜海昌, 胡小锋, 等. 材料保护[J], 2020, 53(5): 1-9.
- PAN X X, JIANG H C, HU X F, *et al.* Materials Protection[J], 2020, 53(5): 1-9.
- [38] YANG F L, HAN J K, YANG J B, *et al.* Journal of Electromagnetic Analysis and Applications[J], 2009, 1(1): 24-30.
- [39] 罗义华, 罗正帮, 黄耀, 等. 工程与建设[J], 2019, 33(6): 925-928.
- LUO Y H, LUO Z B, HUANG Y, *et al.* Engineering and Construction[J], 2019, 33(6): 925-928.

- [40] ZENG S W, XU D L, CHANG J W, *et al.* Engineering Research Express[J], 2019, 1(2): 25002.
- [41] 沈俊杰. 河北冶金[J], 2017(12): 9-13.
SHEN J J. Hebei Metallurgy[J], 2017(12): 9-13.
- [42] ZENG S W, XU D L, LI D J, *et al.* Journal of Constructional Steel Research[J], 2020, 174: 106295.
- [43] 第12届中国钢铁年会论文集-先进钢铁材料[C]. 北京: 中国金属学会, 2019: 309-315.
Proceedings of the 12th Session of the Annual Conference of China Iron and Steel-Advanced steel material[C]. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2019: 309-315.
- [44] 罗志俊, 李舒筋, 孙齐松, 等. 免涂装钢结构用耐工业大气腐蚀高强螺栓钢及制造方法: CN107177787B[P], 2019-01-18.
LUO Z J, LI S J, SUN Q S, *et al.* The Coating-Free Steel Structure for Industrial Atmospheric Corrosion-Resistant High-Strength Breaking Performance and Manufacturing Method: CN107177787B[P], 2019-01-18.
- [45] 罗志俊, 徐士新, 孙齐松, 等. 输电铁塔用 600 MPa 级耐候螺栓钢自腐蚀匹配方法: CN109234509A[P], 2019-01-18.
LUO Z J, XU S X, SUN Q S, *et al.* 600 MPa Level Weather-Proof Bolting Steel Self-Corrosion Matching Method for Transmission Tower: CN109234509A[P], 2019-01-18.
- [46] 徐德录, 曾尚武, 常建伟, 等. 焊接技术[J], 2019, 48(9): 100-103.
XU D L, ZENG S W, CHANG J W, *et al.* Welding Technology [J], 2019, 48(9): 100-103.

(编辑 吴 锐)