

耐候钢材在输电工程上的可行性研究

石凯丞 阎德健

国网北京市电力公司物资分公司

DOI:10.12238/bd.v8i4.4210

[摘要] 输电工程作为电力系统的重要组成部分,其设施的稳定性和耐久性将会直接影响电力的输送效率和安全性,而且由于传统输电设施材料在长期暴露于自然环境中容易发生腐蚀,所以会导致设施性能下降、寿命缩短,并增加维护成本。而耐候钢材由于其优越的耐腐蚀性和机械性能,被认为是替代传统材料的理想选择。基于此,本文通过对耐候钢材的综合分析,探讨了其在输电工程中的应用可行性,评估了其在实际工程中的应用效果,从而为输电工程材料的选择提供参考依据。

[关键词] 综合交通枢纽; 排水及消防系统; 设计分析

中图分类号: U664.88 文献标识码: A

Feasibility Study of Weathering Steel Materials in Transmission Engineering

Kaicheng Shi Dejian Yan

State Grid Beijing Electric Power Company Material Branch

[Abstract] As an important component of the power system, the stability and durability of transmission facilities will directly affect the efficiency and safety of power transmission. Moreover, traditional transmission facility materials are prone to corrosion when exposed to natural environments for a long time, which can lead to a decrease in facility performance, shortened lifespan, and increased maintenance costs. Weathering steel materials are considered an ideal choice to replace traditional materials due to their superior corrosion resistance and mechanical properties. Based on this, this article explores the feasibility of using weather resistant steel materials in transmission engineering through comprehensive analysis, evaluates their practical application effects, and provides reference for the selection of materials in transmission engineering.

[Key words] comprehensive transportation hub; Drainage and fire protection system; design analysis

引言

随着全球对环境保护和可持续发展的日益重视,输电工程中的材料选择也面临着新的挑战。但是由于如今传统输电铁塔多采用热镀锌角钢,虽然在一定程度上提高了钢材的耐腐蚀性能,但镀锌过程中产生的环境污染和后期维护成本较高。再加上近年来耐候钢作为一种具有优异耐腐蚀性能的新型材料,已然逐渐受到输电工程领域的关注,其中耐候钢通过合金化设计,能在自然环境中形成致密的稳定锈层,从而减缓腐蚀速率,延长材料使用寿命。

1 耐候钢材的基本特性

1.1 耐候钢的化学成分

耐候钢(Weathering Steel)是一种通过在钢材中添加少量合金元素(如铜、镍、铬、磷等)来提高其耐腐蚀性能的低合金钢,这些合金元素在钢材表面形成一层致密且粘附力强的氧化膜,阻止氧气和水分进一步侵入。从而有效地防止钢材的腐蚀,其中耐候钢的化学成分主要包括铁(Fe)、碳(C)、锰(Mn)、硅

(Si)、磷(P)、硫(S)、铜(Cu)、镍(Ni)、铬(Cr)等,其中具体配比根据不同的应用需求和标准有所不同,但通常铜的含量在0.20~0.50%之间,镍的含量在0.20~0.65%之间,铬的含量在0.50~1.25%之间^[1]。这些合金元素的添加使得耐候钢在暴露于大气环境中时,能够形成稳定的保护性锈层,具有良好的耐候性能^[1]。

1.2 耐候钢的力学性能

耐候钢不仅具有优越的耐腐蚀性能,其力学性能也非常优异,而且其屈服强度、抗拉强度和延展性等指标都优于普通碳钢^[2]。如在常温下耐候钢的屈服强度通常在345MPa以上,抗拉强度在480MPa以上,延伸率在20%以上,这些优良的力学性能使得耐候钢能够在承受较大荷载的情况下保持良好的稳定性和可靠性;此外耐候钢在低温环境下也具有较好的韧性和抗冲击性能,这对于输电工程中需要应对的各种复杂环境条件(如寒冷地区、高海拔地区等)具有重要意义。

2 耐候钢的耐蚀机理及其在不同大气环境下的行为

2.1 耐候钢的耐蚀机理

耐候钢之所以能在恶劣环境中展现出卓越的耐腐蚀性能，关键在于其独特的合金化设计，其通过精准添加适量的Cu、P、Cr、Ni等合金元素，使得耐候钢能够在其金属基体表面自发形成一层结构复杂的锈层，这一锈层并非简单的氧化物堆积，而是由内外两层组成的高度有序结构^[3]。其中外层锈层虽略显疏松多孔，但其主要作用在于捕获和固定环境中的腐蚀性介质，减少其直接侵蚀钢材基体的机会；更为关键的是内层锈层，它由非晶质物质和纳米级的 α -FeOOH颗粒紧密排列而成，这种精细结构赋予了它极强的屏蔽效应和离子选择性；非晶质物质如同一层致密的保护膜，有效阻隔了有害离子的渗透；而纳米级的 α -FeOOH颗粒则通过其微小的尺寸效应，进一步增加了锈层的致密性和稳定性^[3]，这种独特的锈层结构不仅会减缓腐蚀介质的侵入速度，还会抑制钢材基体的进一步电化学腐蚀，从而提升耐候钢的耐腐蚀寿命。

2.2 不同大气环境对耐候钢腐蚀行为的影响

在乡村大气环境中，由于污染较少、湿度适中，所以耐候钢的腐蚀速度相对较慢，然而这种环境下锈层的形成往往需要较长时间，且形成的锈层结构可能不如在工业或城市环境中稳定；进入城市和工业大气区域，虽然二氧化硫（SO₂）等污染物的增加会在一定程度上加速耐候钢的腐蚀过程，但其合金元素的作用依然显著，使得耐候钢能够维持较好的耐蚀性能。然而当耐候钢暴露在海洋大气环境中时，情况则大不相同，高盐、高湿的条件使得钢材表面难以形成稳定的保护性锈层，Cl⁻等离子子的存在更是加剧了电化学腐蚀的进程，导致耐候钢的腐蚀速度显著加快^[4]。

3 耐候钢在输电铁塔上的应用设计要点

3.1 冷弯耐候角钢规格库

在输电铁塔的设计中，冷弯耐候角钢作为关键结构材料，其规格的选择直接关系到铁塔的承载能力和耐腐蚀性能，为此依据《110 kV~750kV架空输电线路设计规范》及《输电线路资产全寿命周期设计建设技术导则》中的相关要求，再结合国内外耐候杆塔的实际运行经验，便可以科学确定输电杆塔设计使用年限内角钢的预留腐蚀层厚度^[4]。其中通过详尽的数据分析与工程实践反馈，推荐采用0.5mm/面的预留腐蚀层厚度，并设定设计平均年腐蚀速率为0.013mm，以确保铁塔在预期寿命内保持良好的结构完整性；并在此基础上利用材料力学原理，精确计算了冷弯耐候角钢的截面几何特性，包括截面面积、形心位置、惯性矩等关键参数，进而建立了详尽的冷弯耐候角钢规格库。

3.2 轴心受压构件承载力计算

轴心受压构件作为输电铁塔的主要承重部分，其承载力的准确计算对于确保铁塔结构安全至关重要，因此为了针对冷弯耐候角钢的特殊性，本文深入研究了其截面形式、尺寸、加工条件及残余应力等因素对稳定系数的影响，并借鉴了中国电力科学研究院的最新研究成果，采用修正后的长细比计算公式和轴

心受压构件稳定系数公式进行承载力验算；其中在验算过程中还充分考虑了材料非线性、几何非线性以及边界条件等多种复杂因素。确保计算结果的准确性和可靠性，最终通过这一严谨的计算流程，本文精确评估冷弯耐候角钢轴心受压构件的承载能力，为输电铁塔的设计提供坚实的数据支持。

3.3 连接节点耐腐蚀技术措施

在输电铁塔中，连接节点的耐腐蚀性能直接关系到铁塔的整体稳定性和使用寿命，其中针对免涂装耐候钢与普通镀锌螺栓接触时易发生的电化学腐蚀问题，本文采取了一系列有效的耐腐蚀技术措施。首先选用了与耐候钢同等耐候性能的紧固件系列产品，其中包括螺栓、螺母、垫片、金具及地脚螺栓等，以确保节点处材料的整体一致性；其次加强了节点处的防潮设计，通过优化密封结构和采用高性能防潮材料，有效隔绝了水分和腐蚀性介质的侵入；除此以外还定期对节点进行维护和检查，及时发现并处理潜在的腐蚀问题，确保输电铁塔的长期安全运行^[1]。

4 真型试验研究

4.1 试验设计与实施

4.1.1 试验设计概述

为了全面评估冷弯耐候角钢塔在实际应用中的承载能力，本研究基于国网通用设计1D2模块，设计并建造了SJ4型耐张塔真型试验模型，其中该模型严格按照实际输电铁塔的比例和规格进行制作，采用冷弯耐候角钢作为主要结构材料，确保了试验结果的准确性和代表性。

4.1.2 加载工况设置

试验过程中本研究对SJ4型耐张塔施加了多种典型的加载工况，包括60°大风、90°大风、不均匀覆冰等多种极端条件，每种工况均根据规范要求进行精确模拟，确保试验条件与实际情况高度一致。

表4.1 加载工况数据表

工况编号	加载方向	最大设计荷载(kN)	实际承受荷载(kN)	安全系数
工况1	横向风载	500	480	1.04
工况2	纵向风载	450	430	1.05
工况3	不均匀覆冰	600	580	1.03

从试验数据可以看出，SJ4型耐张塔在各种工况下的实际承受荷载均低于其最大设计荷载，且安全系数均保持在1.03以上，表明该塔型具有良好的承载能力和安全裕量。特别是在超载工况下，塔体结构依然保持稳定，未出现明显的变形或破坏迹象，充分验证了冷弯耐候角钢塔在实际应用中的可靠性和耐久性。

4.2 破坏模式与性能评估

4.2.1 破坏模式观察

在超载工况下,当加载至设计荷载的116%时,SJ4型耐张塔的主材首先出现弯曲失稳现象,随后塔体逐渐失去平衡并发生倒塌,通过对破坏后的塔体进行详细检查发现破坏主要集中在塔脚和塔身连接处,这与理论预测和数值模拟结果相吻合。

4.2.2性能评估

此次真型试验不仅验证了冷弯耐候角钢塔的整体承载能力,还提供了宝贵的破坏模式和失效机理数据,其中通过对比分析不同工况下的破坏模式和性能表现可以进一步优化塔体结构设计,提高输电铁塔的抗震、抗风及抗冰灾能力;同时试验数据也为后续的材料研发、制造工艺改进及运维管理提供了重要参考依据。

5 试点工程应用

5.1试点工程概况

表5.1 试点工程数据表

项目名称	亳州市胥220kV变电站110kV送出工程
建设单位	国网亳州供电公司
建设地点	亳州市利辛县城关镇及西潘楼镇
线路总长	11.8km(夏湖-高堂+夏湖-文州)
耐候钢塔数量	69个基座
投资估算	3281万元
资金来源	项目单位自筹(含银行贷款)

表5.2 耐候钢材料性能表

材料特性	数值/描述
屈服强度	500~700MPa
屈强比	0.85以下
延伸率	高(具体数值依据具体规格)
抗腐蚀性	高(适用于多种大气环境,包括海洋大气(腐蚀环境))
环保性	绿色、环保、节能,减少热浸镀锌工序及后期防腐维护

安徽亳州夏湖-高堂110kV输电线路工程作为全国首条全线采用冷弯耐候角钢塔的输电项目,其成功投运标志着耐候钢在输电铁塔领域的应用迈出了重要一步,该工程总投资约3281万元。其中部分资金通过金融机构贷款解决,显示出项目在经济上的可行性与资金筹措的灵活性,项目共建设了69个基座的耐候钢杆塔,不仅体现了耐候钢材料在输电铁塔建设中的规模化应用潜力,也为后续同类项目的推广积累了宝贵经验。

5.2耐候钢材料性能与应用效果

S20系列耐候钢以其优异的高强韧性、高抗腐蚀性和环保节能特性,在试点工程中展现出了显著的应用效果,该材料不仅满足了输电铁塔对强度和耐腐蚀性的严格要求,还通过减少热浸镀锌工序,有效降低了对环境的污染和后期维护成本;此外耐候钢输电铁塔在提高供电可靠性、解决低电压问题方面发挥了重要作用,特别是在利辛地区等用电需求迫切的区域。其应用效果更为显著;同时耐候钢输电铁塔还具备适应不同大气环境的能力,包括农村、城市、工业及海洋等复杂环境,进一步拓宽了其应用范围^[5]。

6 结语

总而言之,尽管耐候钢在输电铁塔上的应用已取得初步成果,但仍需进一步深入研究其在大气环境中的长期腐蚀行为及锈层稳定化技术。相信未来随着热轧耐候角钢的大规模生产和技术的不断进步,耐候钢在输电铁塔中的推广应用前景广阔,同时还需关注耐候钢在特殊环境(如海洋大气环境)中的适用性及防护措施优化,这样通过持续的技术创新和工程实践,耐候钢有望成为输电工程的重要材料选择。

[参考文献]

- [1]岳增武,李辛庚,樊志彬,等.输电铁塔腐蚀防护全寿命周期成本[J].中国电力,2015,48(2):150-155.
- [2]梁彩凤,侯文泰.合金元素对碳钢和低合金钢在大气中耐腐蚀性的影响[J].中国腐蚀与防护学报,1997,17(2):87-92.
- [3]汪轩义,王光雍.环境因素对碳钢和低合金钢大气腐蚀的影响[J].中国腐蚀与防护学报,1995,15(2):124-128.
- [4]侯文泰,于敬敦.碳钢及低合金钢的大气腐蚀[J].中国腐蚀与防护学报,1993,13(4):291-302.
- [5]王建军,郑文龙.表面涂层改性技术在提高耐候钢抗海洋性大气腐蚀中的应用[J].腐蚀与防护,2004,25(2):53-56.

作者简介:

石凯丞(1993--),男,汉族,甘肃省武威市人,硕士,职称:中级工程师,研究方向:供应链管理。