

输电铁塔主材角钢的低温拉伸和冲击试验*

江文强¹, 安利强¹, 王焯迪¹, 石强²

(1. 华北电力大学机械工程系 保定, 071003) (2. 国网内蒙古东部电力有限公司经济技术研究院 呼和浩特, 010020)

摘要 低温会影响输电铁塔钢材的力学性能, 容易导致塔材的脆性断裂事故, 危及铁塔乃至整个电力系统的安全。笔者针对 Q345B 和 Q420C 高强度钢材角钢及其焊接接头, 通过低温拉伸试验和夏比冲击试验, 研究了不同材质、不同厚度角钢及其焊接接头的低温力学性能。结果发现, Q345B 角钢和焊接接头、Q420C 角钢和焊接接头的韧脆转变温度分别为 -2.59 , -15.28 , -32.33 和 -6.76 °C, 低温会使 4 种钢材的抗拉强度和屈服强度均有所提高, 在 -45 °C 的高寒地区的输电铁塔, 选择 Q420C 角钢可以满足设计要求, 但是应该尽量避免对 Q420C 进行焊接处理。

关键词 输电铁塔; 主材角钢; 低温; 拉伸试验; 冲击试验

中图分类号 TH142

引言

随着我国电网建设的不断完善, 越来越多的超特高压输电线路必须通过寒冷地区, 尤其是在东北地区, 冬季气温低, 持续时间长, 部分地区的年极端最低气温可达 -45 °C, 甚至更低^[1]。由于输电线路铁塔暴露在大气环境之中, 容易受到覆冰、大风、导线脱冰等静态、动态和冲击载荷的影响^[2-4], 一旦设计和施工不当, 在寒冷地区运行的超特高压输电线路, 就容易出现角钢低温冷脆破坏事故。据不完全统计, 自 1988~2013 年, 国内由低温环境引起的累计倒塔事故多达数十余次^[5]。

为了加工运输方便, 输电铁塔主材通常由多段角钢通过螺栓连接而成, 在螺栓孔加工过程中大多采用的是冲孔加工工艺。螺栓孔冲孔加工时, 容易在孔壁周围产生微裂纹形成裂纹源。一旦温度低于角钢的韧脆转变温度, 在外载荷作用下, 微裂纹容易不断扩展, 从而导致螺栓连接节点破坏和输电线路倒塔事故的发生。主材是输电铁塔的关键部件, 一旦发生低温冷脆破坏, 就会不可避免的导致整塔倒塌事故的发生, 从而危及整个电力系统的安全稳定运行。因此研究输电线路铁塔主材角钢的低温力学性能, 防止铁塔结构发生低温冷脆破坏, 给出铁塔材料的选材依据, 这对于超特高输电线路工程具有重

要意义。

钢材在常温下有良好的塑性和韧性, 但随着温度的降低, 钢材的塑性和韧性会不断变差, 并且钢材的低温力学性能与其材质、截面形状及厚度等因素有关。王元清等^[6-10]对 4 种不同厚度的高强钢板 Q345B 进行了低温力学性能试验研究, 结果发现随温度的降低, 钢材的屈服强度和抗拉强度增大而断面收缩率减小。随钢板厚度的增加, z 向试样的断面收缩率逐渐减小, 且小于横向试样的断面收缩率。另外, 还针对 Q460C 高强钢板进行了低温拉伸、冲击韧性和 3 点弯曲试验, 研究了 Q460C 钢板的低温力学性能。Liu 等^[11-12]在以上试验的基础上增加了焊接接头的对比试验研究。学者们针对钢材的低温力学性能进行了大量研究, 然而针对输电铁塔主材用角钢, 特别是高强度钢材角钢的研究还不完善, 从而影响了高强钢在低温地区的推广和应用。笔者主要针对 Q345B、Q420C 高强度主材角钢及其焊接接头, 通过低温拉伸和冲击试验, 研究不同材质、不同规格厚度角钢的低温力学性能, 分析低温对输电铁塔主材角钢力学性能的影响规律, 为低温地区输电铁塔的合理选材提供依据。

1 试验概述

本试验主要研究 Q345B 和 Q420C 主材角钢及

* 国家自然科学基金资助项目(51408221); 河北省自然科学基金资助项目(E2015502016); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014ZD36); 国网内蒙古东部电力有限公司科技资助项目(SGMJDY00JSJS1500027)

收稿日期: 2016-12-10; 修回日期: 2017-03-15

其焊接接头的低温力学性能,低温拉伸试验参考的标准为《GB/T 228-2002 金属材料室温拉伸试验方法》^[13]和《GB/T 13239-2006 金属材料低温拉伸试验方法》^[14],低温冲击试验采用的试验标准为《GB/T 2009-2007 金属材料夏比摆锤冲击试验方法》^[15],试样的加工及取样参考标准为《GB/T 2975-1998 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》^[16]。试样的几何尺寸如图 1 所示,试验完成后结果如图 2 所示。

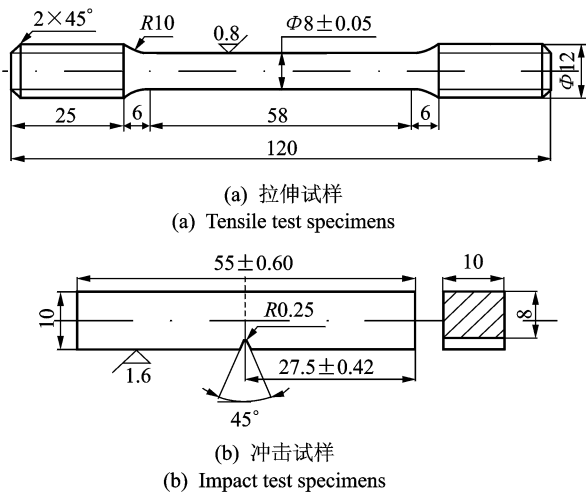


图 1 试样几何尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Geometric parameters of specimens(unit: mm)

低温拉伸试验的材质类型包括 Q345B 角钢、Q345B 焊接接头、Q420C 角钢和 Q420C 焊接接头。选用的主材角钢规格分别为 L125×12, L140×14, L160×16(分别记为 12, 14 和 16 mm), 选用的焊接板材厚度分别为 12, 14, 16 mm。试验温度包括室温(20 ℃), -10, -20, -45 ℃, 共计完成了 144 个试样的拉伸试验。低温冲击试验的钢材类型、角钢型号和焊接板材厚度与拉伸试验相同, 试验时采用的温度分别为室温(20 ℃), -10 ℃(Q345B 角钢), -20, -45, -60 ℃(Q345B 焊接接头、Q420C 角钢及其焊接接头), 共计完成了 144 个试样的冲击试验。具体试验清单如表 1 所示。

表 1 冲击试验和拉伸试验清单

Tab. 1 Tensile and impact tests list

材质	拉伸试验 温度/℃	冲击试验 温度/℃	样本数量/ (厚度/mm×温度/ ℃×试样数)
Q345B 角钢	室温, -10, -20, -45	室温, -10, -20, -45	3×4×3
Q345B 焊接	室温, -10, -20, -45	室温, -20, -45, -60	3×4×3
Q420C 角钢	室温, -10, -20, -45	室温, -20, -45, -60	3×4×3
Q420C 焊接	室温, -10, -20, -45	室温, -20, -45, -60	3×4×3

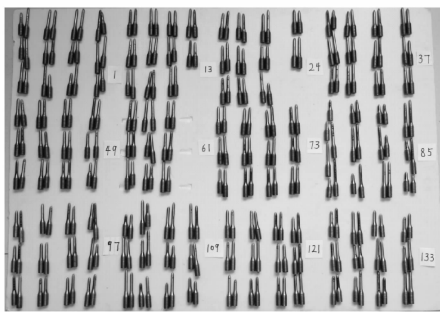
2 拉伸试验结果分析

2.1 强度指标

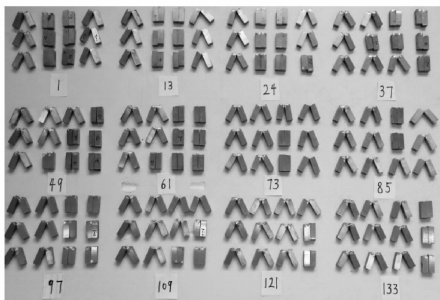
如图 3 所示分别为 Q345B 角钢、Q345B 焊接、Q420C 角钢和 Q420C 焊接 4 种材质, 在 20, -10, -20 和 -45 ℃ 4 种不同温度下, 抗拉强度随温度的变化曲线, 图中抗拉强度为同一钢材, 在相同试验条件下 3 个试样试验结果的平均值。

从图 3(a) 可以看出, 12 mm Q345B 角钢, 在 20 ℃(常温)时, 抗拉强度为 566.67 MPa, 在 -10, -20, -45 ℃时, 抗拉强度分别为 574.50, 588.33, 609.67 MPa, 可见在低温环境下, Q345B 角钢的抗拉强度是有所提高的。14 和 16 mm 的 Q345B 角钢也有相同的规律。

从图 3(b)~(d) 中可以看出, Q345B 焊接、Q420C 角钢和 Q420C 焊接在低温环境下的抗拉强度也略有提高。但是随温度的降低, 抗拉强度并非单调增加, 如 12 mm Q420C 焊接, 在 20 ℃(常温)时, 抗拉强度为 555.67 MPa, 在 -10, -20, -45 ℃时, 抗拉强度分别为 547.67, 580.33, 573.00 MPa;



(a) 拉伸试样
(a) Tensile test specimens



(b) 冲击试样
(b) Impact test specimens

图 2 试样试验结果

Fig. 2 Specimens after test

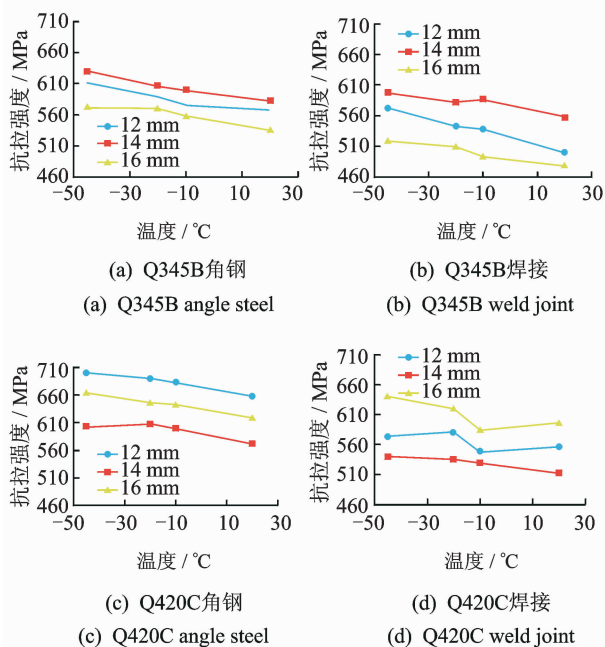


图3 抗拉强度

Fig. 3 Tensile strength

16 mm Q420C 焊接, 在 20 °C (常温) 时, 抗拉强度为 595.33 MPa, 在 -10, -20, -45 °C 时, 抗拉强度分别为 583.33, 619.33, 639.67 MPa。可见以上两种厚度的 Q420C 焊接试样, 在 -10 °C 时的抗拉强度略低于常温环境, 但在 -20 和 -45 °C 的抗拉强度仍高于常温。总的来说, 在 -45 °C 的高寒地区上述四种钢材的抗拉强度都会略有提高。

从图 3 还可以看出, 钢材的厚度不同, 其抗拉强度值也差异明显, 以 Q345B 角钢为例, 12, 14, 16 mm 3 种不同厚度的 Q345B 角钢, 抗拉强度变化范围分别为 555.67 ~ 609.67 MPa, 582.33 ~ 629.00 MPa 和 535.67 ~ 572.00 MPa, 其中厚度为 14 mm 的 Q345B 角钢抗拉强度最高, 厚度为 16 mm 最低, 不同厚度 Q345B 角钢的抗拉强度最大差值在 50 MPa 左右。可见虽然厚度对钢材抗拉强度影响比较显著, 但在 12 ~ 16 mm 这 3 个厚度规格中, 并非厚度越薄钢材的抗拉强度越高, 厚度与抗拉强度的大小没有确定性的关系。同样的, 可以看出 Q345B 焊接接头、Q420C 角钢和焊接接头也有相同的规律。

为了研究焊接对钢材低温拉伸力学性能的影响, 将图 3(a) ~ (c) 和图 3(b) (d) 进行对比可以发现, Q345B 和 Q420C 的母材都比焊接接头抗拉强度高, 差值在 50 ~ 100 MPa 之间, 说明焊接会降低钢材的抗拉强度。

为了更好地研究低温对屈服强度和屈强比的影响

规律, 将同一类钢材在相同温度下, 对 9 个试样试验结果取平均值。Q345B 角钢、Q345B 焊接、Q420C 角钢和 Q420C 焊接 4 种钢材, 在 20, -10, -20 和 -45 °C 4 种不同温度下的屈服强度和屈强比随温度变化的曲线, 如图 4 所示。

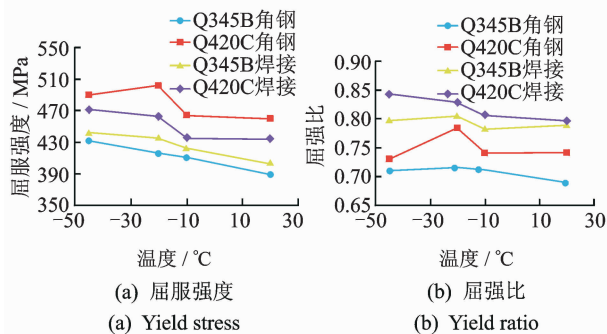


图4 强度指标

Fig. 4 Strength index

从图 4(a) 可以看出, 在 -45 °C 的高寒地区, 上述 4 种钢材的屈服强度都会有所提高, 但屈服强度并非随着温度降低单调增加, 这与抗拉强度的变化规律类似。从图中还可以看出, Q420C 焊接的屈服强度均低于其母材的屈服强度, 而 Q345B 焊接的屈服强度则均高于其母材的屈服强度, 可见在低温条件下 Q345B 的焊接性能优于 Q420C。

从图 4(b) 可看出, Q345B 角钢和焊接在 20 °C (常温) 时, 屈强比分别为 0.69 和 0.79, 在 -10, -20, -45 °C 时, 屈强比分别为 0.71, 0.72, 0.71 和 0.78, 0.81, 0.80。Q420C 角钢和焊接在 20 °C (常温) 时, 屈强比分别为 0.75 和 0.80, 在 -10, -20, -45 °C 时, 屈强比分别为 0.75, 0.78, 0.75 和 0.81, 0.83, 0.84。可见在低温条件下, 钢材的屈强比略有提高, 材料抵抗变形的能力变弱。同时从图中还可以看出, Q345B 和 Q420C 焊接接头的屈强比都高于母材, 说明焊接接头抵抗变形能力更弱, 低温下更容易发生冷脆破坏。

2.2 塑性指标

图 5 所示为 Q345B 角钢、Q345B 焊接、Q420C 角钢和 Q420C 焊接 4 种钢材, 在室温 (20 °C), -10, -20 和 -45 °C 4 种不同温度下的断后延伸率随温度变化曲线。图中断后延伸率为同一类钢材, 在相同条件下 3 个试样试验结果的平均值。

从图 5(a) 看出, 室温 (20 °C) 时厚度为 12 mm 厚的 Q345B 角钢断后延伸率为 31.67%, 温度降低到 -45 °C 后断后延伸率降至 29.37%。同样的室温

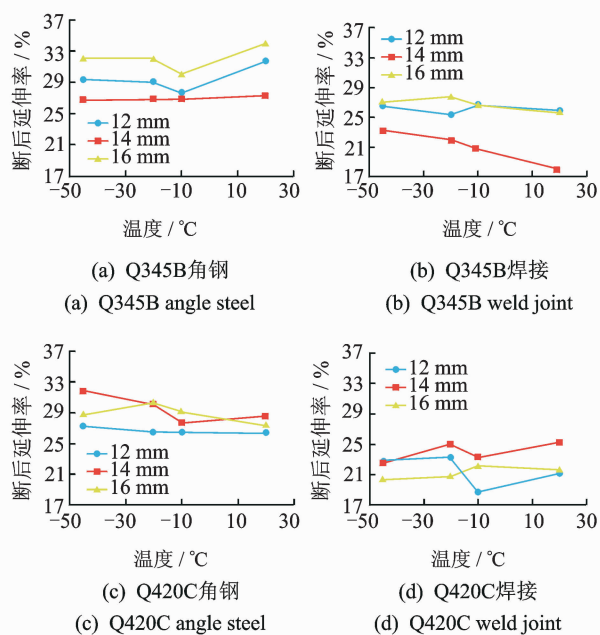


图5 断后延伸率

Fig. 5 Specimens elongation

(20 °C)时厚度为 14 和 16 mm 的 Q345B 角钢的断后延伸率分别为 27.23% 和 34.00%, 温度降低到 -45 °C 后断后延伸率分别降至 26.67% 和 32.00%。可见在低温条件下, Q345B 角钢的断后延伸率略有降低, 塑性变差。

然而, 从图 5 (b) 可以看出, 在低温条件下 Q345B 焊接接头的断后延伸率却略有升高, 塑性变好。室温 (20 °C) 时厚度为 12, 14 和 16 mm 的 Q345B 焊接接头断后延伸率分别为 25.87%, 18.10% 和 25.63%, 当温度降低到 -45 °C 时其断后延伸率分别增加至 26.53%, 23.30% 和 27.13%。

同理, 从图 5 (c)(d) 可以看出, 低温使 Q420C 角钢的断后延伸率略有升高, 塑性变好, 12 mm Q420C 焊接接头的断后延伸率略有升高, 14 和 16 mm Q420C 焊接接头的断后延伸率略有降低。

综上, Q420C 角钢在低温条件下的塑性变形能力优于 Q345B 角钢, 而 Q345B 材质在低温下的焊接性能优于 Q420C。

3 冲击试验结果分析

本研究采用形如式 (1) 的 Boltzmann 函数对冲击功和温度的关系进行回归分析。大量的试验与实践表明^[17-19], 该方法具有较好的相关性和较小的残差, 而且函数各参数的物理意义明确, 可以很好地描述冲击功与温度之间的关系。

Boltzmann 函数的表达式为

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{-(T-t_0)/\Delta t}} + A_2 \quad (1)$$

其中: 函数 y 为冲击功 (J); A_1, A_2 分别为上下平台能 (J); t_0 和 Δt 表征了材料的温度特性, t_0 为韧脆转变温度 (°C), Δt 为韧脆转变速率 (°C), Δt 越小, 转变温度区的跨越温度范围越窄, 材料就越容易由塑性向脆性转变。

如图 6 (a) 所示为 12, 14, 16 mm 厚度 Q345B 角钢, 在 20, -10, -20, -45 °C 时对应的冲击功结果。将相同厚度的 Q345B 角钢, 在 4 种不同温度下的 12 个冲击试验结果用 Boltzmann 函数进行拟合, 其结果如图 6 (a)(c) 所示。

同样道理, 分别对 Q420C 角钢、Q345B 焊接接头、Q420C 焊接接头的冲击试验结果进行拟合, 其结果分别如图 6 (b)~(d) 所示。

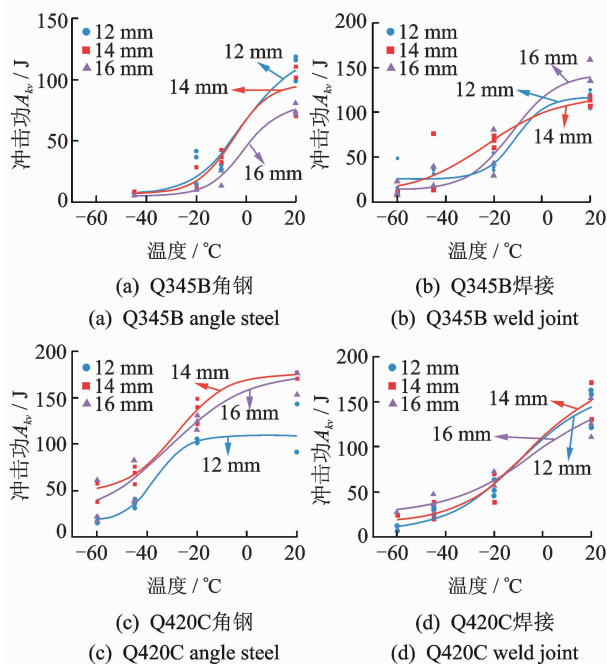


图6 低温冲击试验结果

Fig. 6 Low temperature impact test results

从图 6 中看出, 两种材质的角钢和焊接接头, 其冲击功都随着温度的降低而降低, 并且达到某个温度点后, 随着温度的降低其冲击功迅速下降。

将 12 个 Boltzmann 函数拟合曲线结果进行整理, 从而得到如: 下平台值 A_1 、上平台值 A_2 、脆脆转变温度 t_0 、转变温度区 Δt , 汇总结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出, 对于 Q345B 角钢, 在厚度分别为 12, 14 和 16 mm 时, 其韧脆转变温度分别为 -1.51, -5.04 和 -1.22 °C, 这与文献 [6] 中得到 Q345B 角钢的韧脆转变温度 -3.94 °C 基本一致。

表 2 Boltzmann 函数拟合结果

Tab. 2 Fitting results of Boltzmann function

材质	厚度/ mm	下平台 A_1/J	上平台 A_2/J	脆韧转变 温度 $t_0/^\circ\text{C}$	$\Delta t/^\circ\text{C}$
Q345B 角钢	12	6.66	118.25	-1.51	9.65
	14	7.65	97.37	-5.04	-2.59 7.21
	16	5.52	79.14	-1.22	7.06
Q345B 焊接	12	25.30	116.95	-10.86	6.18
	14	10.00	117.00	-22.81	-15.28 14.37
	16	12.67	142.67	-12.17	9.28
Q420C 角钢	12	17.02	108.68	-36.64	6.12
	14	46.80	175.65	-28.44	-32.33 9.96
	16	18.00	176.00	-31.09	15.45
Q420C 焊接	12	7.00	163.00	-9.43	14.91
	14	16.00	172.00	-6.29	-6.76 14.26
	16	27.00	154.00	-4.55	16.65

通过对比在同一材质下,不同厚度的 t_0 和 Δt ,可以发现厚度对 Q345B 角钢、Q345B 焊接、Q420C 角钢和 Q420C 焊接的韧脆转变温度和韧脆转变速率的有一定影响,但没有明显规律。从韧脆转变温度来看, Q345B 角钢及其焊接接头,在厚度为 14 mm 厚时的低温冲击韧性最好,而 Q420C 角钢及其焊接接头,在厚度为 12 mm 时低温冲击韧性略优。

为了比较不同材质对冲击韧性的影响,对同一材质下 3 种不同厚度的韧脆转变温度取平均值,从表 2 可以看出, Q345B 角钢、Q345B 焊接、Q420C 角钢和 Q420C 焊接接头的韧脆转变温度分别为 -2.59, -15.28, -32.33 和 -6.76 $^\circ\text{C}$ 。显然, Q420C 角钢抵抗低温冷脆破坏的能力要远优于 Q345B 角钢。同时,通过对比 Q345B 角钢和 Q345B 焊接的韧脆转变温度可以发现, Q345B 焊接接头的耐低温脆断能力强于母材。相反, Q420C 焊接接头的耐低温冷脆能力要远低于其母材,甚至 Q420C 焊接接头耐低温脆断的能力还不如 Q345B 焊接接头。

在最不利的情况下,根据拟合曲线求得 16 mm 厚的 Q345B 角钢在 0 $^\circ\text{C}$ 的冲击功吸收值为 45 J,因此 Q345B 和 Q420C 母材和焊材都满足规范^[20]中 20 和 0 $^\circ\text{C}$ 时冲击功 ≥ 34 J 的规定。但是当温度达到 -45 $^\circ\text{C}$ 时,只有 Q420C 角钢满足冲击功 ≥ 34 J 的要求。

4 结 论

1) 在 -45 $^\circ\text{C}$ 的高寒地区,低温会使 4 种钢材的

抗拉强度和屈服强度均有所提高。低温条件下不同厚度钢材的抗拉强度有差异,但并非厚度越薄钢材的抗拉强度越高。

2) Q345B 角钢、Q345B 焊接、Q420C 角钢和 Q420C 焊接的韧脆转变温度分别为 -2.59, -15.28, -32.33 和 -6.76 $^\circ\text{C}$, Q420C 角钢抵抗低温冷脆破坏的能力要远优于 Q345B 角钢,在 -45 $^\circ\text{C}$ 的高寒地区的输电铁塔,使用 Q345B 角钢是不安全的,而 Q420C 角钢可以满足设计要求。

3) 焊接会降低 Q420C 角钢的抗拉强度和屈服强度,使屈服比增大。在低温条件下,焊接会极大地降低 Q420C 角钢抵抗低温脆断的能力,因此在 -45 $^\circ\text{C}$ 的高寒地区的输电铁塔,尽量避免对 Q420C 进行焊接。

参 考 文 献

- [1] 聂建波,潘峰,应建国. 低温环境下 ± 800 kV 直流输电铁塔的强度设计[J]. 电力建设, 2012, 33(11): 41-45.
Lie Jianbo, Pan Feng, Ying Jianguo. Strength design of ± 800 kV transmission towers under low-temperature environment [J]. Electric Power Construction, 2012, 33(11): 41-45. (in Chinese)
- [2] 杨晓辉,楼文娟,陈贵宝,等. 导线舞动对输电杆塔作用的试验技术[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(5): 973-976.
Yang Xiaohui, Lou Wenjuan, Chen Guibao, et al. Galloping test technology on transmission tower effect [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(5): 973-976. (in Chinese)
- [3] 杨靖波. 输电线路钢管塔微风振动及其对结构安全性的影响[J]. 振动、测试与诊断, 2007, 27(3): 208-211.
Yang Jingbo. Aeolian vibration of steel tube tower of transmission line and its influence on structural safety [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2007, 27(3): 208-211. (in Chinese)
- [4] 杨文刚,苏士斌,王璋奇. 导线脱冰振动的模拟实验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(5): 892-896.
Yang Wengang, Su Shibing, Wang Zhangqi. Simulation experimental study on ice free vibration of conductor [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(5): 892-896. (in Chinese)
- [5] 杨富尧,李现兵,陈新,等. 输电铁塔用角钢的应用及低温服役性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 117-122.
Yang Fuyao, Li Xianbing, Chen Xin, et al. Study on

- low temperature service capabilities and application of power transmission tower steel[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(1):117-122. (in Chinese)
- [6] 王元清,廖小伟,张子富,等. 输电线铁塔钢材的低温力学和冲击韧性试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(12):70-74.
Wang Yuanqing, Liao Xiaowei, Zhang Zifu, et al. Experimental study on mechanical properties and impact toughness of steel for transmission line towers at low temperatures[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015,47(12):70-74. (in Chinese)
- [7] 王元清,林云,张延年,等. 高强度钢材 Q460C 低温力学性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2011,27(4):646-652.
Wang Yuanqing, Lin Yun, Zhang Yannian, et al. Experimental study on the mechanical properties of Q460C the high strength construction steel at low temperature[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2011,27(4):646-652. (in Chinese)
- [8] 王元清,周晖,胡宗文,等. 钢结构厚板力学性能的低温试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2011,33(5):7-12.
Wang Yuanqing, Zhou Hui, Hu Zongwen, et al. Experimental analysis of mechanical properties of thick plate in steel structure at low temperature[J]. Architectural and Environmental Engineering, 2011,33(5):7-12. (in Chinese)
- [9] 王元清,林云,张延年,等. 高强度结构钢材 Q460-C 低温冲击韧性试验研究[J]. 工业建筑, 2012,42(1):8-12.
Wang Yuanqing, Lin Yun, Zhang Yannian, et al. Experimental study on the impact toughness of Q460-C high-strength construction steel at low temperature [J]. Industrial Construction, 2012,42(1):8-12. (in Chinese)
- [10] 王元清,林云,张延年,等. 高强度钢材 Q460C 断裂韧性低温试验[J]. 吉林大学学报:工学版, 2012,42(3):639-644.
Wang Yuanqing, Lin Yun, Zhang Yannian, et al. Test on the fracture toughness of high-strength steel Q460C at low temperature[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2012,42(3):639-644. (in Chinese)
- [11] Liu Xiyue, Wang Yuanqing, Zong Liang, et al. Experimental study on mechanical properties and toughness of Q460C high-strength steel and its butt welded joint at low temperature[J]. International Journal of Steel Structures, 2014,14(3):457-469.
- [12] Wang Yuanqing, Liu Xiyue, Hu Zongwen, et al. Experimental study on mechanical properties and fracture toughness of structural thick plate and its butt weld along thickness and at low temperatures[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2013,36(12):1258-1273.
- [13] 全国钢标准化技术委员会. GB/T228-2002 金属材料室温拉伸试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [14] 全国钢标准化技术委员会. GB/T 13239-2006 金属材料低温拉伸试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. GB/T2009-2007 金属材料夏比摆锤冲击试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [16] 全国钢标准化技术委员会. GB/T2975-1998 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备[S]. 北京:中国标准出版社,1999.
- [17] Zhao Jianping, Zhang Xiumin, Shen Shiming. On the method of data processing for ductile-brittle transition temperature[J]. Petro-Chemical Equipment, 2004,33(4):429-438.
- [18] Wu Yongshou, Liu Yongjun. Study on ductile brittle transition temperature of Q345C steel MAG welded joints[J]. Key Engineering Materials, 2016,7(3):155-159.
- [19] 寇金凤,聂义宏,白亚冠,等. 汽轮机转子镍合金锻件韧脆转变温度研究[J]. 一重技术, 2016,14(1):64-67.
Kou Jinfeng, Nie Yihong, Bai Yaguan, et al. Study on ductile-brittle transition temperature of nickel-based alloy forging used for ultra-supercritical steam turbine rotors [J]. CFHI Technology, 2016,14(1):64-79. (in Chinese)
- [20] 全国钢标准化技术委员会. GB/T 1591-2008 低合金高强度结构钢[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.



第一作者简介:江文强,男,1980年5月生,博士、讲师、硕士生导师。主要研究方向为电力设备强度与安全、输电线路防灾及抗灾等。曾发表《Accurate modeling of joint effects in lattice transmission towers》(《Engineering Structures》2011, Vol. 33, No. 5)等论文。

E-mail:jwq1980@hotmail.com

