

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.04.017

Q460 高强钢管在输电工程中的应用研究

曾挺¹, 高晓明¹, 吴哲¹, 张亮亮², 谢斌²

(1. 广东电网有限责任公司汕头供电局, 汕头 515041; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 随着电力走廊日益狭窄, 导致塔型向多回路、大荷载发展, 高强钢的应用迫在眉睫。本文依托某 500 kV 工程, 针对高风速、多回路等条件, 从国内外应用、材质、结构布置、真型试验、工程措施等多方面, 进行塔型分析比较。结果表明: 采用 Q460 高强钢管, 能有效减轻塔重; 塔身刚度好、挠度小; 试验塔强度和构造措施均符合设计要求, 并有一定的安全储备。因此, 在大荷载条件下, 应用 Q460 高强钢管具有明显的经济效益和社会效益。

关键词: Q460 高强钢管; 挠度; 法兰; 真型试验

中图分类号: TM611

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)04-0088-07

Application Research on Q460 High-strength Steel Tube in Transmission Line Project

ZENG Ting¹, GAO Xiaoming¹, WU Zhe¹, ZHANG Liangliang², XIE Bin²

(1. Shantou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Shantou 515041, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: With the increasingly narrow power corridor, the tower type is developing to multi-loop and high load, and the application of high strength steel is imminent. Based on a 500 kV project, aimed at high wind speed, multi loop conditions, this paper analyzed and compared the tower type in many aspects, such as the domestic and foreign application type, material, structure arrangement, full-scale test, engineering measures. The results show that the weight of the steel tube can be reduced effectively by using Q460. The stiffness of the tower is good and the deflection is small. The test tower strength and construction measure meet the design requirements, and have certain safety reserves. Therefore, under the large load conditions, the application of Q460 high strength steel tube has obvious economic and social benefits.

Key words: Q460 high-strength steel tube; deflection; flange; full-scale test.

多年来, 我国输电铁塔钢材以 Q235、Q345 热轧角钢和钢管为主, 近年来 Q420 和 Q460 逐渐开始应用。但与先进国家相比, 我国输电铁塔材质单一、强度值偏低, 致使塔重偏大、经济效益和社会效益偏低^[1]。随着电力需求的不断增长, 社会的日益发展, 输电线路向高电压、大容量、多回路发展, 电力走廊也日趋狭窄, 导致塔型变大, 承受荷载也越来越大, 对输电塔的新材料、新工艺的推广和应用越来越迫在眉睫^[2-3]。使用 Q460 高强钢不但可以减轻塔重、减少加工和施工难度、降低造价、节约能

源、利于环保, 而且还可以提高我国杆塔结构设计水平、加工水平和在国际市场上的竞争力^[4]。

汕头 500 千伏海门电厂扩建 3-4 号机组送出工程, 长约 38.5 km。设计风速为 37 m/s 和 39 m/s, 导线为 4 × JL/LB1A - 630/45。工程设计风速高、导线截面大, 且含有较长公里数的 500/220 kV 混压四回, 因此采用 Q460 高强钢管能有效减轻塔重, 减少工程投资。

1 国内外高强钢的应用情况

国外的钢材标准与我国大体相同, 但对于 Q390 ~ Q460 强度级别的高强度钢材, 国外发达国家的已经非常普遍。日本在 20 世纪 90 年代相继建成的 1 000 kV 双回路线路中, 主材采用 SS55 或 STK55 钢管(屈服强度 415 MPa), 《日本架空送

收稿日期: 2017-06-05

基金项目: 中国能建广东院科标项目: 高压大容量柔性直流输电关键技术研究(EV03431W)

作者简介: 曾挺(1970), 男, 广东汕头人, 高级工程师, 学士, 主要从事输变电工程建设管理工作(e-mail)gdjgcb8324@sina.com。

电规程》(JEAC 6001—2000)又将钢材屈服强度提高到 520 MPa (JS690S 钢); 欧美国家大多采用 A36、G50、GR65 (屈服强度为 450 MPa), 《美国输电铁塔设计导则》的钢材强度已达到 686 MPa。

我国现行规范, 如《铁塔用热轧角钢》^[5]、《低合金高强度结构钢》^[6], 都明确规定了 Q420、Q460 牌号钢板/型钢/角钢的化学成分和力学性能。《钢结构设计规范》(2012 征求意见稿)中也增列了 Q460 钢种。这些规程规范都为高强钢的制造和工程应用提供了依据。目前 Q420 钢已经普遍应用于

输电杆塔中, 国内许多塔厂也有了一定的加工经验。Q460 钢材也在国内的少量工程中得到试点应用, 如 500 kV 平顶山至洛阳南输电线路工程, 首次应用了 Q460 高强角钢^[1]; 500 kV 练塘至泗泾紧缩型双回路首次采用了 Q460 高强钢管塔^[4]。

2 设计参数

2.1 力学性能

GB/T 1591 和 YB/T 4163 给出的 Q345、Q420、Q460 钢材的力学性能如表 1 和表 2 所示。

表 1 《铁塔用热轧角钢》(YB/T 4163) 规定的角钢类别和性能

Tab. 1 The type and performance of the angle steel specified in “YB/T 4163”

| 牌号 | 质量等级 | 屈服强度/ (N/mm ²) | | 抗拉强度/ (N/mm ²) | 断后 伸长率 | 冲击试验 (V 型缺口) AKV, J | | | | 180° 弯曲试验 d = 弯曲直径/mm a = 试样厚度/mm | |
|-------|------|-------------------------------|-----|-------------------------------|-----------|---------------------------|------|--------|--------|---|--------|
| | | ≤ 16 mm | | | | +20 °C | 0 °C | -20 °C | -40 °C | 厚度/mm | |
| | | 不小于 | | | | | | | | 不小于 | |
| Q345T | A | | | | 21 | | | | | | |
| | B | | | | 21 | 34 | | | | | |
| | C | 345 | 325 | 470 ~ 630 | 22 | | 34 | | | d = 2a | d = 3a |
| | D | | | | 22 | | | 34 | | | |
| Q420T | A | | | | 18 | | | | | | |
| | B | | | | 18 | 34 | | | | | |
| | C | 420 | 400 | 520 ~ 680 | 19 | | 34 | | | d = 2a | d = 3a |
| | D | | | | 19 | | | 34 | | | |
| | E | | | | 19 | | | | 27 | | |
| Q460T | A | | | | 17 | | | | | | |
| | B | | | | 17 | 34 | | | | | |
| | C | 460 | 440 | 550 ~ 720 | 17 | | 34 | | | d = 2a | d = 3a |
| | D | | | | 17 | | | 34 | | | |
| | E | | | | 17 | | | | 27 | | |

表 2 《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591) 规定的钢板、型钢的类别和性能

Tab. 2 The type and performance of steel plate, section steel specified in “GB/T 1591”

| 牌号 | 质量等级 | 屈服强度/(N/mm ²) | | 抗拉强度/ (N/mm ²) | 断后 伸长率 | 冲击试验 (V 型缺口) AKV, J(12 ~ 150 mm) | | | | 180° 弯曲试验 d = 弯曲直径/mm a = 试样厚度/mm | |
|------|------|---------------------------|----------------|-------------------------------|-----------|--|------|--------|--------|---|---------|
| | | ≤ 16 mm | >16 ~ 40 mm | | | +20 °C | 0 °C | -20 °C | -40 °C | 厚度/mm | |
| | | 不小于 | | | | | | | | ≤ 40 mm | ≤ 40 mm |
| Q345 | A | | | | | | | | | | |
| | B | | | | 20 | 34 | | | | | |
| | C | 345 | 335 | 470 ~ 630 | | | 34 | | | 2a | 3a |
| | D | | | | 21 | | | 34 | | | |
| | E | | | | | | | | 34 | | |
| Q420 | A | | | | | | | | | | |
| | B | | | | | 34 | | | | | |
| | C | 420 | 400 | 520 ~ 680 | 19 | | 34 | | | 2a | 3a |
| | D | | | | | | | 34 | | | |
| | E | | | | | | | | 34 | | |
| Q460 | C | | | | | | 34 | | | | |
| | D | 460 | 440 | 550 ~ 720 | 17 | | | 34 | | 2a | 3a |
| | E | | | | | | | | 34 | | |

2.2 强度设计值

根据《110~750 架空输电线路设计规范》和《钢结构设计规范》(2012 版, 征求意见稿), 给出钢材和螺栓的强度设计值如表 3 和表 4 所示。

表 3 钢材的强度设计值

Tab. 3 Strength design value of steel N/mm²

| 牌号 | 厚度或直径 | 抗拉、抗压和抗弯 | 抗剪 |
|------|-----------|----------|-----|
| Q345 | ≤16 mm | 310 | 180 |
| | >16~40 mm | 295 | 170 |
| Q420 | ≤16 mm | 380 | 220 |
| | >16~40 mm | 360 | 210 |
| Q460 | ≤16 mm | 410 | 235 |
| | >16~40 mm | 390 | 225 |

表 4 螺栓连接的强度设计值

Tab. 4 The strength design value of bolted N/mm²

| 类别 | 材料 | 抗拉 | 抗剪 |
|-----------------|------|-----|-----|
| 镀锌粗制螺栓 (C 级) | 4.8 | 200 | 170 |
| | 6.8 | 300 | 240 |
| | 8.8 | 400 | 300 |
| | 10.9 | 500 | 380 |

注: 标称直径 ≤39 mm。

3 技术方案比较和优化设计

以双回路直线塔和四回路混压耐张塔为例, 对主材采用 Q345 和 Q460 材质进行技术方案比较。

3.1 5F2W8-ZGV2 双回路直线塔

设计输入条件如表 5 所示, 单线图如图 1 和图 2 所示。

表 5 5F2W8-ZGV2 设计输入条件

Tab. 5 The design conditions for 5F2W8-ZGV2

| | |
|---------------------------|-----------------|
| 塔型 | 5F2W8-ZGV2-48 |
| 导线 | 4×JL/G1A-630/45 |
| 地线 | LBGJ-150-40AC |
| 设计风速/(m·s ⁻¹) | 37(10 m 高) |
| 水平档距/m | 509 |
| 垂直档距/m | 750 |

对主材采用 Q345 和 Q460 进行计算比较, 如表 6 所示。可以看出:

- 1) 采用 Q345 或 Q460, 塔身刚度都较好, 杆身的长期挠度和最大挠度均很小, 在规范要求限值以内。
- 2) 主管的最大直径和法兰盘直径较加工限值小

很多。

- 3) 采用 Q460 钢材, 塔重较 Q345 有明显的降低, 大约少 8.8%。

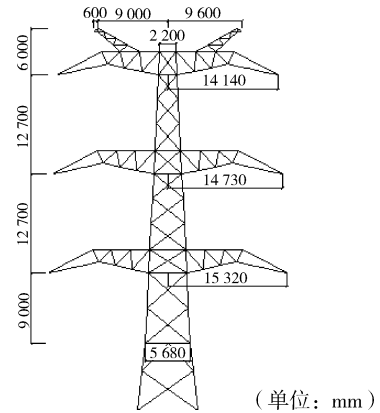


图 1 5F2W8-ZGV2 塔头单线图

Fig. 1 Single line chart of ZGV2

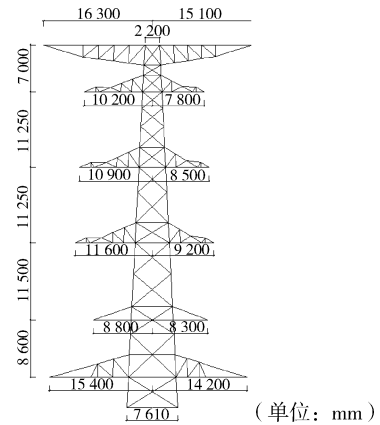


图 2 JS5732 塔头单线图

Fig. 2 Single line chart of JS5732

表 6 48 m 呼高 Q345、Q460 材质计算结果对比表

Tab. 6 Comparison of the results of Q345 and Q460 for 48 m

| 材质 | Q345 | Q460 |
|--------------|-------------|-------------|
| 塔腿主材管径×壁厚/mm | ∅457×10 | ∅356×10 |
| 法兰盘直径/mm | 820 | 640 |
| 利用率/% | 99 | 95 |
| 计算重/t | 50.3 | 46.2 |
| 根开/m | 15.04 | 15.04 |
| 长期挠度/mm | 35.6, 0.5‰ | 37.2, 0.5‰ |
| 最大挠度/mm | 709.2, 9.3‰ | 739.3, 9.7‰ |

注: 5F2W8-ZGV2-48

3.2 JS5732 混压四回路耐张塔

设计输入条件如表 7 所示。单线图如图 2 所示。

表7 JS5732 设计输入条件

Tab. 7 The design conditions for JS5732

| 塔型 | JS5732 |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| 导线 | 4 × JL/G2A -720/50/4 × JL/G1A -300/40 |
| 地线 | LBGJ -150 -40AC |
| 设计风速/(m · s ⁻¹) | 37(10 m 高) |
| 转角度数/(°) | 30 ~ 60 |
| 水平档距/m | 250/150 |
| 垂直档距/m | ±450/ ±250 |

对主材采用 Q345 和 Q460 进行计算比较, 如表 8 所示。可以看出:

1) 采用 Q345 或 Q460, 塔身刚度都较好, 杆身的长期挠度和最大挠度均很小, 在规范要求限值以内。

2) 主管的最大直径和法兰盘直径较加工限值小很多。

3) 采用 Q460 钢材, 塔重较 Q345 有明显的降低, 大约少 15.6%。

表8 30 m 呼高 Q345、Q460 材质计算结果对比表

Tab. 8 Comparison of the results of Q345 and Q460 for 30 m

| 牌号 | Q345 | Q460 |
|----------------|--------------|--------------|
| 塔腿主材管径 × 壁厚/mm | ∅914 × 18 | ∅762 × 16 |
| 法兰盘直径/mm | 1 500 | 1 250 |
| 利用率/% | 100% | 98% |
| 计算重/t | 130.0 | 112.4 |
| 根开/m | 14.75 | 14.75 |
| 长期挠度/mm | 44.2, 0.6‰ | 46.7, 0.6‰ |
| 最大挠度/mm | 883.8, 11.1‰ | 935.9, 11.8‰ |

注: 塔型采用 JS5732 -30。

3.3 优化设计

3.3.1 结构材料

双回路和四回路杆塔采用钢管塔方案(塔身采用钢管、横担采用角钢)。角钢采用 Q235B、Q345B、Q420B 三种钢材, 钢管采用 Q235B、Q345B、Q460C 三种钢材。

地脚螺栓采用 42CrMo 合金结构钢。

3.3.2 结构布置

1) 杆塔按全方位长短腿计算, 正面满足 30° 地形要求。

2) 塔腿主斜材夹角不宜小于 23°, 斜材与水平面夹角不宜小于 25°。

3) 塔腿辅助材采用合理的布置方式, 增强对主

斜材的支撑作用; 塔腿斜材刚度应与主材匹配。

4) 塔身斜材与水平面的夹角取 30° ~ 45° 为宜, 不得大于 50°。

5) 导线横担主材夹角不宜小于 18°, 耐张塔地线横担主材夹角不宜小于 15°。

3.3.3 杆件选材

1) 主材的长径比小于 12、斜材夹角小于 24° 时, 应结合所在的部位、约束情况、长细比(长径比)、径厚比以及应力利用情况, 综合考虑钢管端部弯矩的不利影响。

2) 钢管按照“同一规格采用同一材质”的原则应用。当受力材(钢管)之间的夹角 < 25° 时, 支撑该受力材的辅助材的承载力应适当提高或通过试验确定。

3) 铁塔的斜材设计应按不同的塔型布置, 参照 DL/T 5154—2012 的要求, 计算埃菲尔效应。

3.3.4 工程优化措施

1) 结合本工程荷载大的特点, 大直径钢管主材比例较高。根据测算结果和市场采购特点, 建议管径 300 mm 以上时采用 Q460 高强钢, 钢板卷制。

2) 针对 Q460 钢管焊接质量较难把控及切割打孔较难的特点^[7], 建议 Q460 钢管主材节点法兰仍采用 Q345 钢。由此法兰板及法兰肋板与 Q460 主管焊接仍采用 Q345 钢对应焊接要求, 大大降低焊接工艺难度。Q460 高强焊缝仅为卷管焊接焊缝, 采用卷管自动焊机焊接, 焊接质量有较高保证, 卷管焊缝为非主受力焊缝, 焊接质量对构件承载能力影响较小。同时由于法兰强度与材料强度的 1/2 次方成正比, 材料强度提升对法兰强度提升影响较小。因此采用 Q345 法兰较 Q460 法兰不仅焊接质量有较高保证, 且经济效益也无明显降低。

3) Q460 主材钢管径厚比控制在 45 以下以降低局部稳定对钢管承载力的影响。

4 真型试验

由于 Q460 高强钢管塔的设计、运行经验很少, 因此除了在设计上采用先进的理论和软件计算外, 还应进行试验验证, 以检验其在各种主要荷载工况下受力杆件理论计算值和实际受力值的符合性, 验证塔型设计方案的合理性以及塔型结构、节点构造和连接法兰的安全可靠性。为此, 于 2016 年 4 月

18日至20日在中国电力科学研究院良乡试验基地,对5F2W8-ZGV2-35钢管塔行了真型试验。

4.1 设计条件

试验塔的设计执行DL/T 5154—2012和DL/T 5254—2010,并参考了类似工程的设计、施工和运行经验。计算软件为“自立式铁塔内力分析软件”(TTA)和自编的一些计算程序。设计条件如表9所示。

表9 试验塔设计输入条件

Tab. 9 The design conditions for Test tower

| | |
|---------------------------|-----------------|
| 塔型 | 5F2W8-ZGV2-35 |
| 导线 | 4×JL/G1A-630/45 |
| 地线 | LBGJ-150-40AC |
| 设计风速/(m·s ⁻¹) | 37(10m高) |
| 覆冰/mm | 0 |
| 水平档距/m | 572 |
| 垂直档距/m | 750 |
| 腿部主材规格/mm | φ356×10 |
| 全高/m | 66.4 |
| 铁塔重量/t | 55.0 |

试验塔单线图如图3所示。

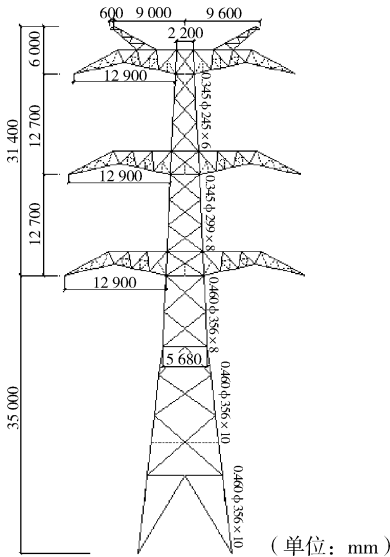


图3 5F2W8-ZGV2-35试验塔单线图

Fig. 3 single line diagram of Test tower ZGV2-35

4.2 试验概况

4.2.1 试验工况

试验塔设计工况共63个,选取了7个控制工况进行试验^[8],如表10所示。其中工况1-6的加

荷级别为:0-50%-75%-90%-95%-100%-0;工况7的加荷级别为:0-50%-75%-90%-95%-100%-105%-110%-115%-120%-0。

表10 试验工况表

Tab. 10 The test conditions

| 工况号 | 工况名 | 试验目的 |
|-----|----------------------|---------------------|
| 1 | 同时断右地线和右上导线 | 地线横担的承载力和变形情况 |
| 2 | 同时断右上、中导线 | 检验铁塔在事故工况下的承载力和变形情况 |
| 3 | 起吊右下导线、其它导线均已装(地线已装) | 导线横担的承载力和变形情况 |
| 4 | 锚右下导线、其它导线均已锚 | 检验铁塔在安装工况下的承载力和变形情况 |
| 5 | 90°大风计算 | 90°大风的承载力状况和变形情况 |
| 6 | 0°大风计算 | 0°大风的承载力状况和变形情况 |
| 7 | 60°大风计算(超载) | 60°大风的承载力状况和变形情况 |

4.2.2 测点布置

试验塔的变形测点和应变布置如图4和图5所示。位移测点共12个,以1、2、…、12编号;应变测点共20个,每个测点贴应变片3~4个不等,共计70个。

试验顺利通过表10中7个工况的测试,试验现场加载情况如图6所示,其中60°的大风超载120%。试验表明,该试验塔的强度和刚度均符合设计要求,并有一定的安全储备。

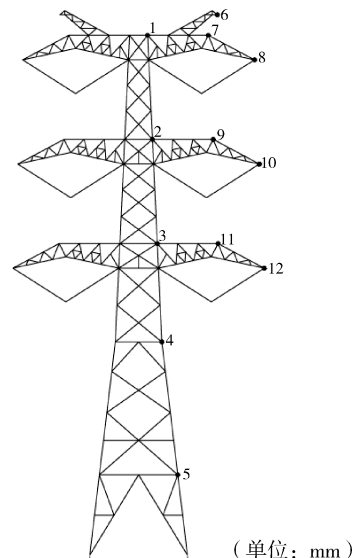


图4 位移观测点布置图

Fig. 4 Displacement observation point layout

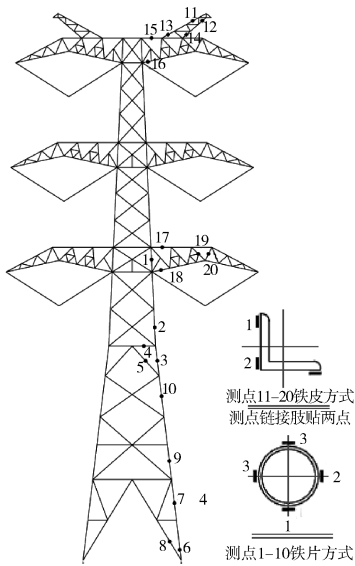


图5 应变测点布置图

Fig. 5 Strain observation point layout



图6 加载中的试验塔

Fig. 6 Test tower in loading

4.3 试验结论

通过对试验数据和现场情况分析, 得到以下结论和建议, 供工程设计参考:

1) 使用 Q460 高强度钢材, 能够满足输电线路钢管塔的设计要求, 同时可降低单基塔重, 建议在大风区、大导线、多回路输电线路工程中应用。

2) 大风工况下的最大挠度试验值为 733 mm, 9.7‰。与理论计算值相差无几, 说明钢管塔所采用法兰连接等构造方式有较好刚度。

3) 试验超载致 120%, 杆底主管并无明显的屈服

破坏。说明设计是安全可靠的, 并有一定的裕度。

5 经济效益和社会效益

5.1 技术经济分析

对于本工程而言, 双回路和四回路塔, 较大直径钢管的比例和规格都较多, 采用 Q460 高强度钢管后, 塔重降低的绝对值和相对比例都较大。

根据测算结果, 对本工程双回路塔, 采用 Q460 后, 较 Q345 减少塔重约 7% ~ 10%; 四回路塔, 减少塔重约 10% ~ 15%。本工程共有 83 基采用 Q460 高强度钢, 塔重共计 12 748 t。按平均减轻塔重 12.4% 计算, 本工程节约钢材共 1 804 t。按综合单价 Q345 钢材 9 800 元/t、Q460 钢材 10 200 元/t 来计算, 采用 Q460 钢材, 可以节省铁塔投资约 1 258 万, 经济效益明显。

除节省钢材外, 也有效降低了铁塔材料规格及其相应挡风面积, 从而降低基础作用力与基础造价。依据测算, 应用 Q460 高强度钢管, 能降低基础工程量约 3.1%, 节省基础工程造价约 300 万元。

5.2 社会效益分析

据调查, 每炼 1 t 钢材需要燃烧标准煤约 0.65 t, 每燃烧 1 t 标准煤, 产生 CO₂ 约 2.62 t, SO₂ 约 8.5 kg, 氮氧化物约 7.4 kg。

本工程共减少钢材约 1 804 t, 相应减少标准煤燃量 1 173 t, 减排 CO₂ 约 4 276 t、SO₂ 约 15 t, 氮氧化物 13 t。同时可降低基础材料水泥用量约 300 t, 减少砂石用量约 1 500 t, 节能减排与环保效益显著。

6 结论

1) 国内关于 Q460 高强度钢管塔的应用还很少, 缺乏设计、加工、运行经验。

2) 高风速、大导线、多回路条件下, 采用 Q460 高强度钢管, 较 Q345 能减轻塔重约 7% ~ 15%。且塔身刚度较好, 杆身的长期挠度和最大挠度均很小, 满足规范要求。

3) 根据目前材料的市场供应、质量和价格, 对于钢管组合塔, 主材管径大于 300 mm 规格时, 建议采用 Q460C 级材料。其中法兰仍然采用 Q345 钢材。

4) 试验塔在 7 个控制工况下, 实测的位移和应变值与理论值符合的较好, 证明设计推导符合杆塔实际受力。试验超载致 120%, 主管并无明显的屈服破坏, 钢管塔各部件未见异常, 说明设计是安全

可靠的。

5)本工程采用 Q460 高强钢管,具有明显的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 郭咏华,张天光,王经运. Q460 高强钢试验研究及电力工程应用 [M]. 北京:中国电力出版社,2010.
GUO Y H, ZHANG T G, WANG J Y. Experimental study and electrical engineering application of Q460 high-strength steel [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [2] 曹现雷,郝际平,张天光. 新型 Q460 高强度钢材在输电铁塔结构中的应用 [J]. 华北水利水电学院学报, 2011, 32(1): 79-82.
CAO X L, HAO J P, ZHANG T G. Engineering application of new high-strength steel Q460 in transmission tower [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2011, 32(1): 79-82.
- [3] 范金华,薛敏,傅鹏程. Q460 高强钢管在 500 kV 练塘—泗泾输电线路工程中的应用 [J]. 华东电力, 2010, 38(7): 1040-1042.
FAN J H XUE M, FU P C. Application of Q460 high-strength steel tube in the 500 kV Liantang-Sijing power transmission line project [J]. East China Electric Power, 2010, 38(7): 1040-1042.
- [4] 刘盼. 高强等边角钢极限承载力及稳定性试验与分析 [D]. 重庆:重庆大学,2009.

- LIU P. Experiments and analysis on the ultimate bearing capacity and stability of high-strength equilateral-angle steel member [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 铁塔用热轧角钢: YB/T 4163—2007 [S]. 北京:冶金工业出版社,2007.
The National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Hot rolled steel aangles for tower structure; YB/T 4163—2007 [S]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [6] 中国国家标准化管理委员会. 低合金高强度结构钢: GB/T 1591—2008 [S]. 北京:中国标准出版社,2008.
China National Standardization Administration Commission. High strength low alloy structural steels; GB/T 1591—2008 [S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
- [7] 中国国家标准化管理委员会. 输电线路铁塔制造技术条件: GB/T 2694—2010 [S]. 北京:中国电力出版社,2013.
China National Standardization Administration Commission. specificaton of manufacturing for transmission line tower: GB/T 2694—2010 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [8] 国家能源局. 架空线路杆塔结构荷载试验: DL/T 899—2012 [S]. 北京:中国电力出版社,2012.
National Energy Administration. Loading tests on tower and pole structures of overhead line: DL/T 899—2012 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.

(责任编辑 黄肇和)

(下接第 99 页 Continued from Page 99)

- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of People's Republic of China. Load code for the design of building structures; GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [7] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 架空送电线路杆塔结构设计技术规定: SDGJ94—90 [S]. 北京:中国电力出版社,1990.
State Economic and Trade Commission of the People's Republic of China. Technical regulation of design for tower and pole structures of overhead transmission line; SDGJ94—90 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 1990.
- [8] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 架空送电线路杆塔结构设计技术规定: DL/T 5154—2002 [S]. 北京:中国电力出版社,2002.
State Economic and Trade Commission of the People's Republic of China. Technical regulation of design for tower and pole structures of overhead transmission line: DL/T 5154—2002

- [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [9] 国家能源局. 架空输电线路杆塔结构设计技术规定: DL/T 5154—2012 [S]. 北京:中国计划出版社,2012.
National Energy Administration. Technical code of design for tower and pole structures of overhead transmission line: DL/T 5154—2012 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [10] 国家能源局. 架空输电线路基础设计技术规定: DL 5219—2014 [S]. 北京:中国计划出版社,2014.
National Energy Administration. Technical code for designing of foundation of overhead transmission line: DL 5219—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [11] 何运祥,徐力,聂卫平. 基于强度折减法的输电杆塔临坡基础边坡稳定性影响因素分析 [J]. 电力建设, 2012, 7(4): 30-33.
HE Y X, XU L, NIE W P. Slope stability influence factors analysis of slope-side foundations of transmission tower by strength reduction method [J]. Electric Power Construction, 2012, 7(4): 30-33.

(责任编辑 高春萌)