

特高压钢管塔主材长细比及径厚比的取值

韩军科, 杨靖波, 杨风利, 李峰, 李茂华

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Value Selection of Slenderness Ratio and Diameter-Thickness Ratio of Steel Tube for 1 000 kV Transmission Steel Tubular Tower Legs

HAN Jun-ke, YANG Jing-bo, YANG Feng-li, LI Feng, LI Mao-hua

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: Taking typical steel tubular tower for 1 000 kV power transmission and transformation project from South Anhui to Shanghai, which adopts the form of double circuit on the same tower, as research object, a finite-element model for beam-rod mixed unit of the tower is established, then the stress of the main material for tower body is calculated. Calculation results show that the impacting extent of bending moment at rod end on the stress of main material is closely related with the diameter-thickness ratio of steel material; by means of statistics and analysis, the correspondence between slenderness ratio and stress is given. Based on the results of calculation and analysis and comparing design standards applied in China and other countries, the suggestion on value selection of cross-sectional diameter-thickness ratio of circular tube used as the main press bending material of the tubular tower is proposed. The results of this research are available for reference to the structural optimization of tubular tower used in 1 000 kV power transmission projects in China.

KEY WORDS: steel tubular tower for 1 000 kV power transmission project; slenderness ratio; diameter-thickness ratio; local buckling

摘要: 文章选取 1 000 kV 淮南—上海(皖电东送)输变电工程的典型同塔双回钢管塔为研究对象, 建立其梁杆混合单元的有限元模型, 对塔身主材的应力进行了计算。结果表明杆端弯矩对主材应力的影响程度与其长细比密切相关。通过统计分析, 给出了长细比与应力的对应关系。通过分析计算结果及对比国内外设计标准, 提出了钢管塔压弯主材圆管截面的径厚比取值建议。研究结果可为我国特高压钢管塔的结构优化提供参考。

关键词: 特高压钢管塔; 长细比; 径厚比; 局部屈曲

0 引言

淮南—上海(皖电东送)输电工程是我国第一条

1 000 kV 电压等级的同塔双回输电线路。工程全线采用钢管塔, 平均塔高超过 100 m。与超高压线路的钢管塔相比, 特高压钢管塔所受荷载更大、结构更为复杂。

我国第一基特高压同塔双回钢管塔, 采用整体空间桁架法进行内力计算^[1], 主要参照 Q/GDW 178—2008《1 000 kV 交流架空输电线路设计暂行技术规范》^[2]和 DL/T 5154—2002《架空送电线路杆塔结构设计技术规范》^[3]进行设计。真型试验结果表明: 塔身主材试验分析所得的实测内力与理论计算值有一定的差别, 并且受压腿塔身主材发生了明显的局部屈曲^[4]。

为了进一步分析特高压钢管塔真型试验中出现的问题, 确保皖电东送工程的安全可靠, 本文选取工程中的 8 基典型塔型, 按照梁杆混合单元模型, 对其受力性能进行了设计校核计算, 分析钢管塔主材长细比与主材应力的对应关系; 结合国内外钢结构设计规范及相关标准的对比, 探讨控制钢管塔主材局部屈曲失稳的截面径厚比的限值, 研究结果可为特高压钢管塔的结构优化提供参考。

1 计算模型及方法

有限元分析软件 ANSYS 在输电铁塔的静、动力性能研究上被广泛采用^[5-7]。本文采用 ANSYS, 建立 8 基特高压钢管塔梁杆混合单元的有限元计算模型。各钢管塔的设计条件见表 1。钢管塔主材承受轴力和弯矩的共同作用, 采用 BEAM4 单元模拟, 局部坐标及其应力状态如图 1 所示, 规定 x 、 y 、 z 为梁单元局部坐标系, 钢管塔整体坐标系为 X 、 Y 、 Z 。斜材及其它采用 LINK8 单元模拟。

拉弯或压弯主材的强度应力计算公式为

表 1 特高压钢管塔的设计条件

Tab. 1 Design conditions of steel tubular tower for 1 000 kV power transmission project

编号	气象条件		塔型	设计条件		
	风速/ (m·s ⁻¹)	覆冰厚度/ mm		水平 档距/m	垂直 档距/m	转角 度数/(°)
1	30	10	SZ301P	510	430~650	
2	30	10	SJ301	500	800	0~20
3	30	15	SZ3022	460	365~700	
4	30	15	SJ3021	500	800	0~20
5	30	10	FJ3	450	250~600	40~60
6	27	10	SZ272P	510	430~650	
7	32	10	SZ322P	480	380~600	
8	30	10	SZJ301P	450	335~600	3~10

表 2 主材长细比与应力比

Tab. 2 Slenderness ratio and stress ratio of legs

杆件信息 规格	长 细比	ANSYS 计算结果				应力比	
		轴力/ kN	M _y / (kN·m ⁻¹)	M _z / (kN·m ⁻¹)	强度 应力/MPa	稳定 应力/MPa	强度 稳定
660×14	23	-6 536.16	-424.52	-51.95	-322.25	-297.28	1.304 1.203
660×14	22	-7 061.16	-427.57	-49.54	-340.85	-344.93	1.280 1.295
711×14	25	-7 196.49	381.82	-111.64	-316.66	-289.20	1.258 1.149
711×16	25	-8 050.71	-338.64	-177.23	-306.02	-277.62	1.215 1.103
711×16	20	-8 088.67	-338.64	-131.97	-300.48	-269.28	1.222 1.095
660×14	26	-6 410.20	-211.76	-157.41	-297.05	-278.95	1.221 1.147
559×14	17	-5 773.39	209.52	-166.21	-343.40	-292.62	1.339 1.141
610×14	22	-6 621.49	-377.25	-39.91	-347.60	-356.62	1.286 1.319
610×14	27	-6 046.96	-367.37	-45.47	-324.70	-300.94	1.283 1.189

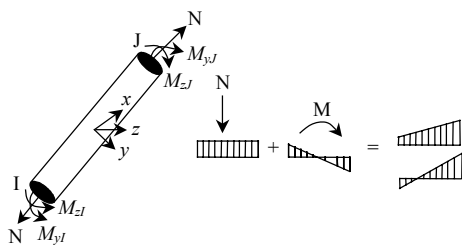


图 1 梁单元局部坐标系及其应力状态

Fig. 1 Local coordinate system and stress state of beam element

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \pm \frac{M_z}{\gamma_z W_{nz}} \quad (1)$$

式中： N 为主材所受轴心压力； A 为圆管截面积； γ_y 、 γ_z 为与截面模量相应的截面塑性发展系数，对于圆管截面 γ_y 、 γ_z 取值均为 1.15； M_y 、 M_z 为同一截面处绕 y 轴和绕 z 轴的弯矩； W_{ny} 、 W_{nz} 为对 y 轴和对 z 轴的净截面模量。

压弯主材的稳定应力计算公式为

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} + \frac{\beta_m M}{\gamma W_1 (1 - 0.8N/N'_E)} \quad (2)$$

式中： $N'_E = \pi^2 EA / (1.1\lambda^2)$ ，为常量； φ 为弯矩作用平面内的轴心受压构件稳定系数； M 为所计算主材段范围内的最大弯矩； W_1 为在弯矩作用平面内对较大受压纤维的毛截面模量； β_m 为等效弯矩系数， $\beta_m = 0.65 + 0.35(M_2/M_1)$ ， M_1 和 M_2 为端弯矩，使构件产生同向曲率(无反弯点)时其比值同号，使构件产生反向曲率(有反弯点)时其比值异号， $|M_1| \geq |M_2|$ [8]。

2 主材应力与长细比的关系

根据式(1)(2)计算 8 基钢管塔主材的应力，计算结果如表 2 所示。其中强度应力比、稳定应力比是指在相同的外荷载作用下，主材采用梁单元计算的强度应力、稳定应力，与主材采用杆单元计算的控

制应力的比值。

考虑杆端弯矩对杆件应力的影响，主材采用梁单元计算，其强度应力比采用杆单元的大 8.8%~33.9%，其稳定应力比采用杆单元的大 3.5%~31.9%，并且应力的增大值与主材的长细比密切相关 [8-12]。

文献[13]指出：钢管结构杆件的长径比不小于 12(主管)和 24(支管)时，可将节点视为铰接。钢管构件长径比不小于 12，相当于钢管构件长细比不小于 35。从表 2 可以看出，强度应力比或稳定应力比在 1.22 以上的主材，其长细比为 17~27，不满足钢结构设计规范对管截面长径比的要求。这说明，对于小长细比杆件，仍采用铰接模型不合理；杆端弯矩产生的应力导致主材应力增大，结构设计时应适当考虑弯矩的不利影响。

8 基钢管塔主材的稳定应力比与长细比的对应关系如图 2 所示，考虑杆端弯矩的应力比随着长细比的增加而减小。将所有样本点进行曲线拟合，得到如下关系式：

$$y = 1.045 58 + 0.008 67x - 2.083 64 \times 10^{-4} x^2 \quad (3)$$

其中： x 为主材长细比； y 为稳定应力比。当主材长细比为 35 时，可得稳定应力比为 1.1，表明当主材长细比大于 35 时，弯矩对主材应力的贡献会小于

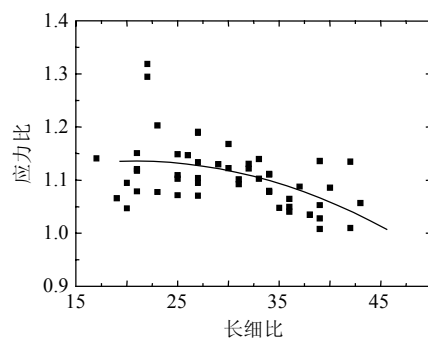


图 2 应力比与长细比的对应关系

Fig. 2 The relation of stress ratio and slenderness ratio

轴力产生应力的 10%。

3 控制钢管构件局部屈曲的径厚比选取

3.1 受压构件的径厚比

当圆管截面的径厚比超过一定限值时, 钢管构件就会出现局部屈曲现象。局部屈曲可能出现在整个截面屈服前, 使其不能达到最大截面屈服承载力, 导致钢管塔实际承载能力达不到设计要求。

对于轴心受压的情况, 世界主要国家的钢结构设计规范对局部屈曲失稳构件的截面给出了不同的宽厚比限值。为了便于各规范比较, 所有的限值均转换为径厚比(d_0/t), 并统一径厚比限制的表达式, 如表 3 所示。

表 3 各国钢构件设计规范关于受压构件径厚比限值
Tab. 3 Limited value of diameter-thickness ratio on compression members from serial standards for steel struts

设计规范	径厚比限值计算公式	径厚比限值		
		$f_y=235$	$f_y=345$	$f_y=420$
AISC LRFD ^[9]	$97(235/f_y)$	97	66	54
AS 4100 ^[10]	$87(235/f_y)$	87	59	49
BS 5950 ^[11]	$94(235/f_y)$	94	64	53
Eurocode 3 ^[12]	$90(235/f_y)$	90	61	50
GB 50017-2003 ^[13]	$100(235/f_y)$	100	68	56

由表 3 可得: 对于轴心受压钢管构件的局部屈曲径厚比限值, AS 4100 的限值最小, 而我国钢结构规范的限值最大。对 8 基特高压钢管塔的 50 个塔身主材径厚比进行统计, 结果见图 3。特高压钢管塔主材的径厚比为 30~55, 满足我国钢结构设计规范的规定, 而超过 50% 的主材径厚比集中在 41~45。

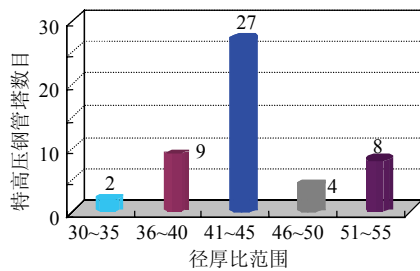


图 3 主材径厚比统计图

Fig. 3 Statistical chart of diameter-thickness ratio of legs

3.2 受弯构件的径厚比

通过试验、理论分析和数值模拟技术, 各国主要钢结构设计规范 and 标准中关于圆管截面构件受弯局部屈曲下的径厚比限值, 如表 4 所示。

表 4 中: 第 1 类截面是指能够达到塑性弯矩, 并具有足够的塑性转动能力满足塑性设计要求的截面; 第 2 类截面是指能够达到塑性弯矩, 但其塑

表 4 各国钢结构设计规范关于受弯构件径厚比限值
Tab. 4 Limited value of diameter-thickness ratio on flexural members from serial standards for steel struts

设计规范	径厚比限值		
	第 1 类截面	第 2 类截面	第 3 类截面
AISC LRFD	$61(235/f_y)$	—	$263(235/f_y)$
AS 4100	$53(235/f_y)$	—	$128(235/f_y)$
BS 5950	$47(235/f_y)$	$59(235/f_y)$	$164(235/f_y)$
Eurocode 3	$50(235/f_y)$	$70(235/f_y)$	$90(235/f_y)$

性转动能力有限, 不足以满足塑性设计要求的截面; 第 3 类截面是指够达到屈服弯矩, 但由于局部失稳不能达到塑性弯矩的截面。

3.3 压弯构件的径厚比

特高压钢管塔采用梁杆混合单元进行计算分析, 其主材为拉弯或压弯构件。圆管截面在弯矩和轴向压力共同作用的局部屈曲较为复杂, 国内外的研究较少^[14-17], 目前没有相关的设计建议。

特高压钢管塔主材处于压力和弯矩的共同作用时, 其圆管截面类型接近于第 2 类截面; 压弯构件的轴压力增大管截面局部屈曲的可能性; 因此控制压弯构件局部屈曲的宽厚比限值应小于受压构件和受压弯构件的宽厚比限值。考虑特高压钢管塔杆端弯矩对其应力的影响时, 建议主材圆管截面径厚比限值为 $68(235/f_y)$, 对于 Q345 钢材其径厚比不大于 46。

4 SZT2 同塔双回钢管塔试验结果分析

皖电东送输电线路 SZT2 钢管塔设计条件为: 风速 32 m/s, 导线覆冰厚度 10 mm, 地线覆冰厚度 15 mm, 导线分别按照 20 mm 和 25 mm 验算覆冰; 水平档距 480 m, 垂直档距 380~600 m; 导线为 8×LGJ-630/45 钢芯铝绞线, 地线一根采用 OPGW-240, 另一根采用铝包钢绞线 LBGJ-240-20AC。

SZT2 钢管塔的真型试验发现: 最大受压腿(东南腿)的塔身主材钢管内侧出现了局部屈曲现象, 如图 4 所示。该钢管主材直径 660 mm, 壁厚 12 mm, 钢材 Q345, 径厚比 55, 长细比 22。钢管设计内力 6869 kN, 稳定系数 0.947, 截面面积 24429 mm², 则稳定应力为 296.92 Mpa; 按超载 110% 计算, 得到理论应力为 326.6 Mpa, 没有达到屈服强度, 理论上不应发生局部屈曲。

该钢管主材径厚比 55, 小于钢结构设计规范规定的受压构件径厚比限值 68, 满足要求。如果考虑杆端弯矩对钢管塔主材应力的影响, 则钢管主材为压弯构件, 局部屈曲径厚比限值应适当降低, 综合



图4 钢管局部屈曲

Fig. 4 Local buckling of steel tube

国外规范和标准的有关规定建议的主材圆管截面径厚比限值46, 则该钢管主材圆管截面径厚比偏大。

由式(3)可得: 当长细比为22时, 稳定应力比为1.135, 也就是说如果考虑杆端弯矩对钢管塔主材应力的影响, 则主材应力的理论计算值为370.7 Mpa, 超过钢材的屈服强度345 Mpa, 可能发生局部屈曲。

5 结论

1) 钢管塔杆端弯矩的大小与主材长细比密切相关, 当钢管主材长细比小于35时, 弯矩使主材产生的应力将超过轴力使主材产生应力的10%。特高压钢管塔设计时, 当主材长细比小于35时, 建议采用梁杆混合单元进行设计校核; 当主材长细比大于35时, 应适当考虑杆端弯矩的不利作用, 主材留有一定的安全裕度。

2) 当特高压钢管塔考虑弯矩和轴力共同作用对主材应力的影响时, 参考国外有关规范和标准, 建议特高压钢管塔主材圆管截面径厚比限值取为 $68(235/f_y)$, 对于Q345钢材其径厚比不大于46。

3) 塔身变坡处杆端弯矩使主材产生了同向曲率, 加剧了杆端弯矩对主材受力的不利影响, 设计时应给予充分的考虑。

参考文献

- [1] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [2] Q/GDW 178—2008, 1 000 kV 交流架空输电线路设计暂行技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [3] DL/T5154—2002, 架空送电线路杆塔结构设计技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [4] 中国电力科学研究院. 1 000 kV 特高压同塔双回路杆塔结构设计研究报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2008.
- [5] 李清华, 杨靖波. 特高压输电杆塔动力特性分析快速建模研究[J]. 电力建设, 2006, 27(5): 5-7.
- Li Qinghua, Yang Jingbo. Study on rapid modeling of dynamic characteristic analysis for EHV transmission towers[J]. Electric Power Construction, 2006, 27(5): 5-7(in Chinese).

- [6] 杨风利, 杨靖波, 韩军科, 等. 煤矿采空区基础变形特高压输电塔的承载力计算[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1): 100-106.
- Yang Fengli, Yang Jingbo, Han Junke, et al. Bearing capacity computation of UHV transmission tower with foundation deformation above coal mine[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(1): 100-106(in Chinese).
- [7] 夏开全, 李茂华, 李峰. 特高压输电线路直线塔结构分析与试验[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 50-60.
- Xia Kaiquan, Li Maohua, Li Feng. Structural analysis and testing research for Chinese 1 000 kV UHV AC transmission tower[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 56-60(in Chinese).
- [8] 中国电力科学研究院. 1 000 kV 淮南—上海(皖电东送)工程真型试验钢管塔设计校核报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.
- [9] American Institute of Steel Construction. Load and resistance factor design specification for steel hollow structural sections[S]. Chicago: AISC, 1999.
- [10] British Standard Institution. BS5950 Structural use of steelwork in building(Part 1)[S]. London: BSI, 2000.
- [11] Standards Australia. Australian standard AS 4100 Steel structures[S]. Sydney: Standards Australia, 1998.
- [12] European Committee for Standardization. Design of steel structures[S]. Brussels: EC3, 2003.
- [13] GB 50017—2003, 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [14] 杨靖波, 李正, 王景朝. 特高压输电线路钢管塔微风振动的防治[J]. 电力建设, 2008, 29(9): 10-13.
- Yang Jingbo, Li Zheng, Wang Jingchao. Prevention of steel tube UHV transmission tower aeolian vibration[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(9): 10-13(in Chinese).
- [15] Sully R M. The behavior of cold-formed RHS and SHS beam-columns[D]. Sydney: The University of Sydney, 1996.
- [16] Dean M, Wilkinson T, Hancock G J. Bending and compression tests of rectangular hollow sections[C]. Proceedings of 9th International Symposium and Euroconference on Tubular Structures, Dusseldorf, Germany, 2001, 4: 349-358.
- [17] 杨靖波, 代泽兵, 李清华. 典型节点构造钢管构件的杆端约束与起振临界风速的确定[J]. 电力建设, 2006, 27(4): 37-40.
- Yang Jingbo, Dai Zebing, Li Qinghua. Determination of end restraint and vibration critical wind speed for steel tube members of typical node structure[J]. Electric Power Construction, 2006, 27(4): 37-40 (in Chinese).



韩军科

收稿日期: 2009-05-18。

作者简介:

韩军科(1979—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为输电线路杆塔结构分析与振动控制, E-mail: hjk@epri.ac.cn;

杨靖波(1973—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为输电线路杆塔结构分析与振动控制, E-mail: yjb@epri.ac.cn。

(编辑 蒋毅恒)