

[输电塔]

输电塔高强钢管主材残余应力的测试与分析

文/中国电力科学研究院有限公司 刘海锋 朱彬荣 胡晓光

输电塔的残余应力对它的承载力有重要的影响，有必要测试它的残余应力，并确定它的分布模式。为此，采用盲孔法对截面规格为 $\phi 273 \times 6$ 、 $\phi 273 \times 8$ 、 $\phi 273 \times 10$ 和 $\phi 273 \times 12$ 的Q460、Q345和Q235圆钢管的残余应力进行实测分析，得到截面上残余应力的分布及数值大小，并进行分析。

目前，特高压交流同塔多回线路普遍采用Q345及以下强度级别的钢管塔。特高压交流同塔多回线路杆塔更高，荷载更大，采用该强度级别钢材将使特高压交流同塔多回钢管塔的塔重较大，铁塔的经济性较差。同时，该材料组成输电铁塔在低温环境下，由于钢材低温冷脆效应，可能发生低应力脆性断裂现象。因此，国家电网公司于2016年5月提出了“特高压交流工程优化设计指导意见”，指导意见中明确提出了加快推进高强钢在特高压交流同塔多回线路中的应用。特高压交流同塔多回线路采用Q460及以上的高强钢管塔，可显著降低铁塔重量，有效节约资源，同时可以满足低温地区输电杆塔用钢要求，具有较好的经济效益和社会效益。

输电塔主材钢管的受压承载力计算方法是进行输电塔设计的重要依据。受压钢管的稳定承载力与构件的整体稳定系数 ϕ 有关，构件的整体稳定系数和构件的材料、力学和几何缺陷有关，并受到构件两端约束情况的影响。其中，构件端部约束情况可以通过计算长度系数来考虑，几何缺陷（初弯曲和初偏心）按照GB 50205—2001《钢结构工程施工质量验收规范》取值，这两个影响

因素对于高强钢和普通钢并无差异，但力学缺陷—残余应力的影响却差别较大。已有研究表明，残余应力对构件的受压稳定性、疲劳断裂、脆性破坏和应力腐蚀开裂等都有影响。

同时，长期以来，国内外输电塔主要采用Q345及以下强度等级的钢材，Q460钢管的使用量极少，关于该类型钢管的残余应力研究一直处于空白状态。因此，研究Q460高强圆钢管截面残余应力分布具有重要意义，可以为高强钢输电塔的设计工作提供重要依据。

国外有关盲孔法测定钢结构焊接残余应力的文献很多，同时针对塑性应变进行了大量的研究。塑性应变的组成主要有钻孔引起的附加应变和孔边应力集中引起的塑性应变。合适的钻孔方法，可有效地减少由钻孔引起的附加应变。钻孔附加应变可通过试验测得，取一块和试件材料相同的无初始应力的材料，采用钻孔方法在上面钻孔试验，其测定的应变即为由钻孔产生的附加应变。孔边应力集中所引起的塑性应变无法直接测出。

钻孔偏心和应变片位置布置不当时释放应变和残余应力之间存在相互关系。孔深对测量结果

基金项目：国家电网公司科技项目《特高压交流同塔多回Q460高强钢管塔成套设计及加工技术研究》（GCB17201700021）

有影响,释放应变随着孔深的增加逐渐增大,达到一个极值后,会反向变化。

对压杆稳定性影响较大的是截面的纵向残余应力,因此本文采用盲孔法对Q460高强圆钢管及Q235和Q345普通圆钢管的纵向残余应力进行了测试,以考查钢材强度及壁厚对残余应力的影响,为高强圆钢管的稳定性研究及实际工程应用提供所需的基础试验数据。

盲孔法测试钢管残余应力

根据多个拟建双回1 000 kV特高压交流输电工程的实际需要,本节采用盲孔法对截面规格为 $\phi 273 \times 6$ 、 $\phi 273 \times 8$ 、 $\phi 273 \times 10$ 和 $\phi 273 \times 12$ 的Q460、Q345和Q235圆钢管的残余应力进行实测分析,得到截面上残余应力的分布及数值大小。

1. 测试原理

在具有残余应力场 σ_r 的构件上钻盲孔,使孔周围金属的残余应力释放,原来的应力场失去了平衡,为了使其达到新的平衡,而产生相应的位移和应变,由电阻应变片感应得到其释放的应变。

假设本试验所用的材料为各向同性材料,构件某局部残余应力处于均匀的平面状态,分别为 σ_1 、 σ_2 ,如图1所示。

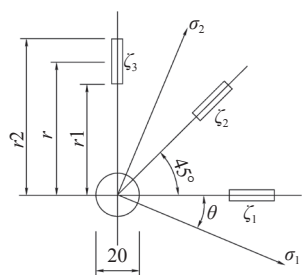


图1 盲孔法测试残余应力应变片示意图

根据弹性力学平面应力理论得到主应力和方向角为

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \\ \sigma_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \\ \tan 2\theta = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \end{cases} \quad (1)$$

式中, ε_1 、 ε_2 和 ε_3 分别表示相应编号的各应变片在钻孔后所测得的释放应变,单位为 $\mu\varepsilon$;A、B表示应变释放系数,其大小与应变花的几何尺寸、孔深、孔径和被测材料的弹性模量等有关,通过标定实验或理论计算求出该值; θ 表示最大主应力(代数值)与1#应变片参考轴之间的

夹角,规定顺时针方向为正; σ_1 、 σ_2 代表主应力,单位为MPa。

根据材料力学原理,可以得到水平截面上纵向残余应力为

$$\sigma_r = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos(2\theta) \quad (2)$$

2. 盲孔法测试残余应力试验步骤

盲孔法测试角钢残余应力主要包括两大部分,即试件测点的布置和钻孔测量两个部分。

(1) 试件测点布置

根据试件的形状和特点,选择测试部位以及测点数目。测点均布置在试件的跨中截面上。以 $\phi 273 \times 6$ 试件为例,试件长度为1 500 mm,为了便于说明测点所处位置,假设将试件沿焊缝纵向切开后展开,给出测点布置图,如图2所示。

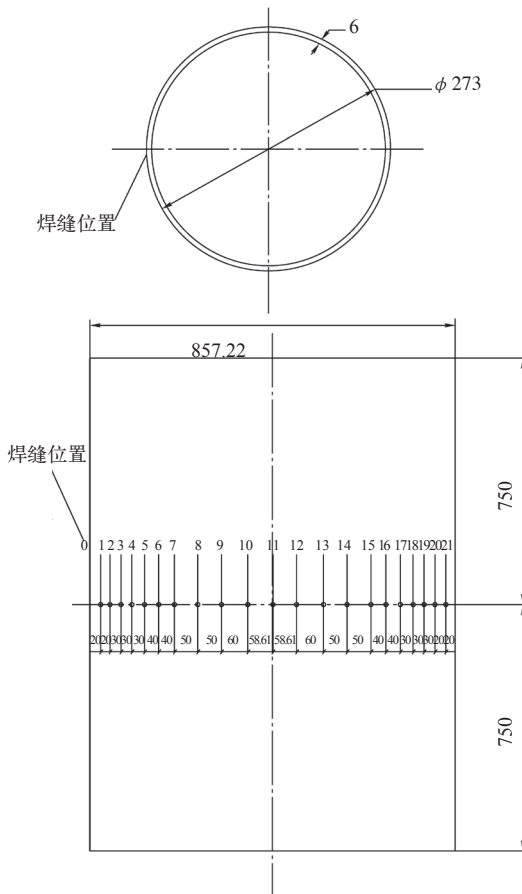


图2 测点布置图

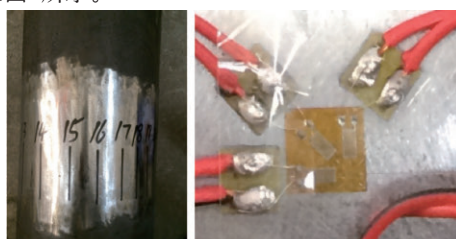
3. 应变花粘贴及钻孔技术

盲孔法测试残余应力的试验操作主要包括贴花、钻孔和测试计算等。

(1) 应变花的粘贴

盲孔法测试残余应力对试件表面粘贴应变花处的要求较高。贴花过程包括应变花的选择、测

试表面清洗和贴花。本次试验选用的应变花是 BX120-3CA 三向 45° 应变花。贴花之前应先用打磨机对试件表面进行打磨,然后再分别用粗细砂纸对测点处进行磨平和磨光,这样做的目的是为了去除试件表面的氧化层,使应变片与试件接触良好,最后在测点处画十字线,以表明钻孔中心和应变片纵、横轴的位置。再用丙酮反复清洗贴花处表面直至无油污,清洗过的表面不允许用手指接触,且在清洗后应立即贴花,贴花采用的胶水是山东禹王 502 胶水。应变花的粘贴如图 3 所示。



(a) 打磨好的试件 (b) 单个应变花的粘贴



(c) 贴花完成

图3 应变花的粘贴

(2) 导线焊接与连接引线

待胶水充分凝固之后,将应变花三个方向的应变片引线用电烙铁 ($\leq 35\text{ W}$) 焊接在端子上。然后将端子的导线与 HK21B 型残余应力检测仪的引线连接,连接时要特别注意 0° 、 45° 和 90° 三个方向的导线应分别与检测仪接口 (A_1 , A_2), (B_1 , B_2), (C_1 , C_2) 的引线相连接,并安装好固定装置,如图 4 和 5 所示。



图4 引线连接完成

(3) HK21B 型残余应力检测仪重新调零

在每次钻孔前,应将检测仪重新调零,这样最终显示的应变值即为该测点的应变值。

(4) 钻孔

首先进行钻头的对中,然后再进行钻孔;将配置 1.5 mm 钻头的钻杆擦干净,连接好手电钻,保持合适的压力,钻至孔深 1.8 mm,拔出钻杆。钻孔后的应变花如图 5 所示。



图5 钻孔后的应变花

(5) 测试

钻孔这一重要工序结束后,稍等 3~5 min,待钻孔区域温度下降后,静态电阻应变仪指示稳定时,便可直接测出应变值 ε_1 、 ε_2 和 ε_3 以及残余应力主应力 σ_1 、 σ_2 和方向角的数值。

4. 试件设计

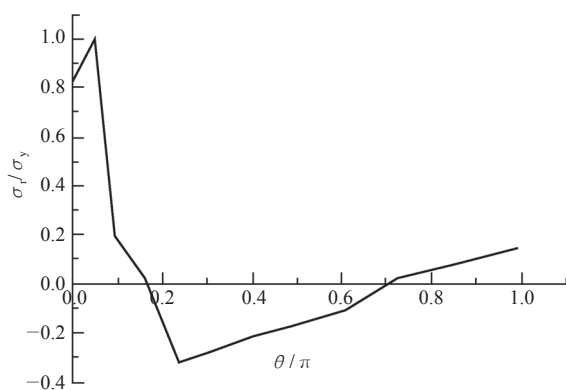
采用盲孔法分别对不同强度的 Q345 和 Q460 焊接圆钢管进行残余应力测试。为了使测试结果更准确,试验采用了多次测量求平均值的方法,试验所需要的试件如表 1 所示。

表1 盲孔法测试 Q460 焊接圆钢管残余应力试件明细表

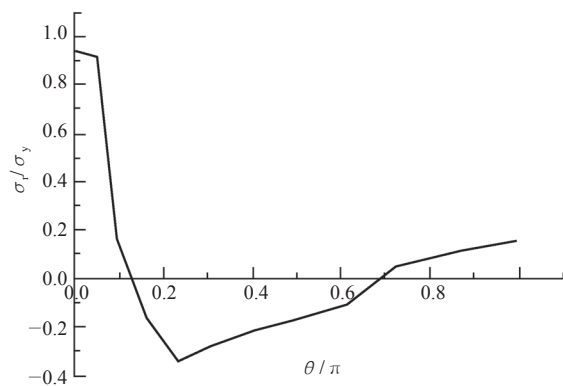
试件编号	截面规格	径厚比 /(b/t)	长度 /mm	测试方法
I-1	$\phi 273 \times 6$	45.5	1 500	盲孔法
I-2				
I-3				
J-1	$\phi 273 \times 8$	34.13	1 500	
J-2				
J-3				
K-1	$\phi 273 \times 10$	27.3	1 500	
K-2				
K-3				
L-1	$\phi 273 \times 12$	22.75	1 500	
L-2				
L-3				

5. 测试结果

为了使试验结果更准确,本次试验采用了多次测量求平均值的方法,将得到的数据绘制成曲线,如图 6、图 7、表 2 和表 3 所示。



(a) $\phi 273 \times 6$

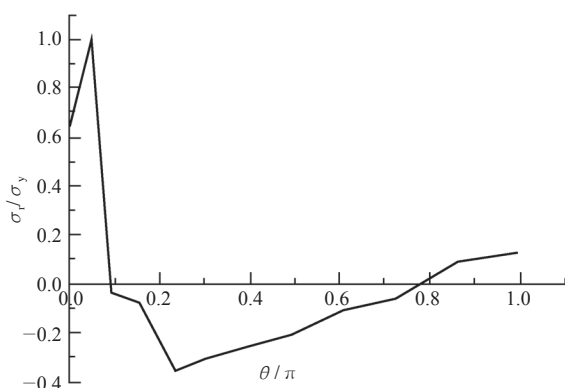


(b) $\phi 273 \times 8$

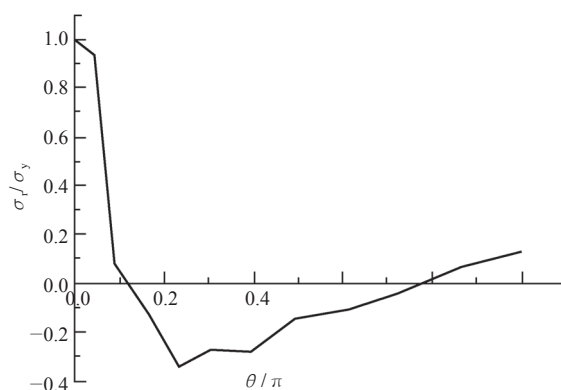
图6 Q345钢管截面残余应力分布图

表2 Q345钢管残余应力峰值与屈服强度的比例

截面规格	最大残余拉应力 钢材屈服强度	最大残余压应力 钢材屈服强度	截面规格	最大残余拉应力 钢材屈服强度	最大残余压应力 钢材屈服强度
$\phi 273 \times 6$	1.000	0.329	$\phi 273 \times 8$	0.947	0.337



(a) $\phi 273 \times 6$



(b) $\phi 273 \times 8$

图7 Q345钢管截面残余应力分布图

表3 Q345钢管残余应力峰值与屈服强度的比例

截面规格	最大残余拉应力 钢材屈服强度	最大残余压应力 钢材屈服强度	截面规格	最大残余拉应力 钢材屈服强度	最大残余压应力 钢材屈服强度
$\phi 273 \times 10$	0.998	0.347	$\phi 273 \times 12$	0.999	0.340

从测试结果可以看出：①钢管的残余应力对称分布，残余拉应力峰值出现在焊缝处，残余压应力峰值出现在距离焊缝45°的地方；②钢管残余拉应力峰值与屈服强度的比例约为1，且与钢材的屈服强度、壁厚直径无关；③钢管残余压应力峰值与屈服强度的比例约为0.34，且与钢材的屈服强度、壁厚直径无关。

结束语

为了落实国家电网公司“特高压交流工程优化设计指导意见”关于加快推进高强钢在特高压交流同塔多回线路中的应用的文件精神，为高强钢输电塔的承载力设计工作提供依据，本文采用盲孔法对截面规格为 $\phi 273 \times 6$ 、 $\phi 273 \times 8$ 、 $\phi 273 \times 10$ 和 $\phi 273 \times 12$ 的Q460和Q345输电塔钢管主材的残余应力进行实测分析，得到截面上残余应力的分布及数值大小。分析表明：①钢管的残余应力对称分布，残余拉应力峰值出现在焊缝处，残余压应力峰值出现在距离焊缝45度的地方；②钢管残余拉应力峰值与屈服强度的比例约为1，且与钢材的屈服强度、壁厚直径无关；③钢管残余压应力峰值与屈服强度的比例约为0.34，且与钢材的屈服强度、壁厚直径无关。本文的研究成果对高强钢输电塔主材的承载力设计提供了重要依据。EA

(收稿日期：2019.10.19)

(编辑：朱金凤)