

文章编号: 1673-2049(2010)02-0106-08

# 高颈法兰轴心受拉试验与有限元分析

薛伟辰<sup>1</sup>, 付 凯<sup>1</sup>, 张克宝<sup>2</sup>, 傅鹏程<sup>2</sup>

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 华东电力设计院, 上海 200063)

**摘要:**以练塘至泗泾 500 kV 送电线路钢管塔结构中采用的高颈法兰为试验对象, 开展了 4 类不同尺寸的 12 个高颈法兰的足尺模型静力试验和有限元参数分析; 在试验和有限元参数分析结果的基础上, 提出了相应的构造建议。结果表明: 高颈法兰的极限承载力均能达到设计荷载的 1.6 倍以上, 高颈法兰有较高的安全储备; 法兰板厚度和法兰颈高度对高颈法兰的承载能力影响较大, 增大法兰板的厚度和法兰颈的高度能提高法兰的整体刚度, 有利于减小法兰板与法兰颈的应力; 高颈法兰在试验过程中具有较高的承载能力, 结构在破坏前均有明显的预兆, 具有较高的安全储备, 可在工程中推广应用。

**关键词:**钢管塔; 高颈法兰; 轴心受拉; 静力试验; 有限元分析

**中图分类号:** TU317 **文献标志码:** A

## Axial Tensile Test and Finite Element Analysis on High-neck Flanges

XUE Wei-chen<sup>1</sup>, FU Kai<sup>1</sup>, ZHANG Ke-bao<sup>2</sup>, FU Peng-cheng<sup>2</sup>

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. East China Electric Power Design Institute, Shanghai 200063, China)

**Abstract:** The high-neck flanges used in steel tube structures which were from Liantang to Sijing 500 kV transmission line in the power transmission towers were taken as the test objects. The static load test and finite element parametric analysis of 12 full-scale models of high-neck flange which included 4 different sizes were carried out. Based on the test and finite element parametric analysis results, the corresponding construction proposals were put forward. The result shows that the ultimate carrying capacity of the high-neck flange is above 1.6 times of the design load and has an adequate safety reserve. The thickness of flange plate and the height of flange neck carry greater impact on the flange bearing capacity, the overall stiffness is increased by increasing the thickness of flange plate and the height of flange neck, which will reduce the stress of flange neck and flange plate. The high-neck flange during the test process has a higher carrying capacity and clear signs before damaging. The high-neck flange has high safety reserve, and can be widely applied in engineering.

**Key words:** steel tube tower; high-neck flange; axial tensile; static test; finite element analysis

## 0 引 言

近年来, 中国电网建设发展迅速, 特大高压输电

线路的建设增多, 输电塔结构日益大型化<sup>[1-2]</sup>, 对杆塔承载力的要求也越来越高, 因此具有承载能力优势的钢管塔在实际工程中越来越多地被采用<sup>[3-4]</sup>。

据统计资料显示,截至 2008 年 10 月,中国已有 47 项电网工程采用了钢管塔,其中大跨越塔 38 项<sup>[5]</sup>。

目前,钢管塔多采用法兰连接,常用的钢管连接方式有 2 种<sup>[6]</sup>,即刚性法兰连接和柔性法兰连接。为了增大法兰板的连接刚度及约束法兰板的变形,在法兰板与螺栓之间沿钢管方向设置加劲板,形成有加劲板的法兰,称为刚性法兰。刚性法兰具备足够的刚度和强度,遵循了强节点弱构件的设计原则。但是,大量的焊接作业形成的焊接应力,造成法兰板的变形难以控制,而加劲板的设置则妨碍了焊缝的检测,影响质量控制。为了使法兰制作与安装方便,避免大量的焊接作业,在法兰板与螺栓之间不设加劲板而直接由钢管与法兰板直接焊接而成的这种法兰,称为柔性法兰。柔性法兰具有外形简洁美观、制作与安装方便等优点,目前中国已有大量工程在采用。但柔性法兰直接由钢管与法兰板直接焊接而成,使其在受力时法兰板变形较大,连接螺栓受力不均匀,影响法兰的承载能力。

针对上述问题,各国提出了高颈法兰连接这种新型的法兰连接方式。高颈法兰可以通过控制法兰颈高的尺寸,使法兰与钢管对焊作业产生的焊接应力对法兰板的影响降低。高颈法兰由于采用整体加工,因此能避免大量人工作业效率低下的焊接,同时使焊接质量得到可靠的保证。

各国学者针对法兰(刚性法兰、柔性法兰)的受力性能和计算方法等进行了较多的研究,主要成果可总结为以下 3 个方面:①基于试验,研究法兰在钢管塔结构中的受力性能,提出法兰连接的计算方法,并制定出专门的设计规范<sup>[7]</sup>;②结合实际工程及模型试验,提出法兰板连接的计算方法,并对计算模型、设计参数的取值和结构构造给出了具体的建议<sup>[8-10]</sup>;③依据力学原理并结合实测数据,研究螺栓间距对法兰承载力影响的修正系数及法兰板的塑性发展系数<sup>[11]</sup>。

目前中国对于高颈法兰的研究几乎还是空白,在中国现行规范中也没有相应的规定。本文中笔者结合华东电网有限公司投资建设的练塘至泗泾 500 kV 送电线路工程,通过高颈法兰原型试验,对钢管塔采用高颈法兰的工程安全性进行验证,重点对法兰颈、法兰板和法兰连接螺栓的受力性能进行了研究,并且在有限元参数分析的基础上,提出了相应的构造建议。

## 1 试件设计

### 1.1 试件参数

该工程中采用的高颈法兰构造形式如图 1 所示。依据工程实际需要共设计了 4 类高颈法兰试件(编号 A、B、C、D),每类 3 个,共计 12 个试件。试件参数为:①试验钢管直径;②法兰板外径;③法兰尺寸。试件各部分参数见图 2 和表 1,材料力学性能见表 2。

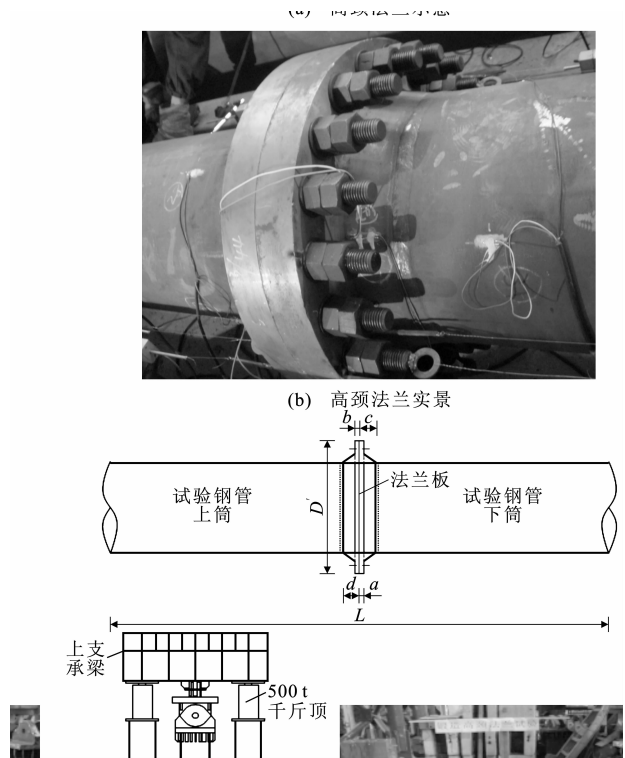


图 1 高颈法兰构造

Fig. 1 Configurations of High-neck Flange

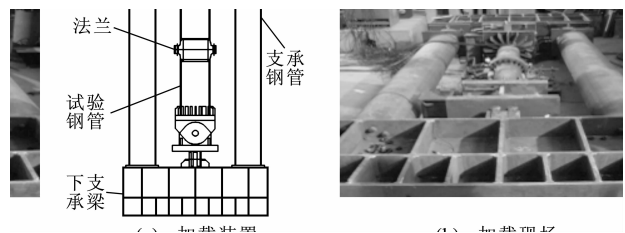


图 2 试件参数示意

Fig. 2 Sketch of Parameters of Specimens

### 1.2 加载方案与测点布置

根据实验室现有条件,对法兰试件采用卧位法加载<sup>[12]</sup>。用 2 个 500 t 级油压千斤顶同步加载,根据布置在支承钢管上的应变片数据来校核试件是否轴心受拉,如试件出现较大偏心受拉,应及时停止加载并开始卸载,调整加载装置,尽量使试件轴心受拉。试验加载如图 3 所示。

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of Specimens

| 试件类型 | 试验钢管上筒 |       | 试验钢管下筒 |       | 试件数量 | 法兰板外径<br>$D'$ /mm | 试件长度<br>$L$ /mm | 设计荷载/<br>kN | 法兰尺寸/mm |     |     |     |
|------|--------|-------|--------|-------|------|-------------------|-----------------|-------------|---------|-----|-----|-----|
|      | 直径/mm  | 厚度/mm | 直径/mm  | 厚度/mm |      |                   |                 |             | $a$     | $b$ | $c$ | $d$ |
| A    | 440    | 10    | 440    | 10    | 3    | 628               | 2 270           | 4 200       | 70      | 70  | 170 | 170 |
| B    | 380    | 10    | 380    | 10    | 3    | 580               | 2 310           | 3 200       | 60      | 60  | 150 | 150 |
| C    | 245    | 8     | 245    | 8     | 3    | 380               | 2 350           | 1 760       | 50      | 50  | 130 | 130 |
| D    | 245    | 8     | 320    | 8     | 3    | 442               | 2 350           | 1 760       | 50      | 45  | 140 | 110 |

注:A类试件采用 10.9 级的 M30 螺栓;B类试件采用 8.8 级的 M30 螺栓;C、D类试件均采用 8.8 级的 M20 螺栓; $a$  为下法兰板厚度; $b$  为上法兰板厚度; $c$  为下法兰颈高度; $d$  为上法兰颈高度。

表 2 材料力学性能

Tab. 2 Mechanical Properties of Materials

| 组 件           | 弹性模量/<br>$10^5$ MPa | 屈服强度/<br>MPa | 极限强度/<br>MPa | 延伸率/% | 备 注        |
|---------------|---------------------|--------------|--------------|-------|------------|
| 10 mm 厚试验钢管   | 2.09                | 528          | 620          | 19    | A、B类试件     |
| 8 mm 厚试验钢管    | 2.11                | 501          | 580          | 25    | C、D类试件     |
| 法兰板           | 2.01                | 350          | 532          | 21    | A、B、C、D类试件 |
| 8.8 级 M20 螺栓  | 2.03                | 782          | 901          | 18    | C、D类试件     |
| 8.8 级 M30 螺栓  | 1.96                | 866          | 1 019        | 16    | B类试件       |
| 10.9 级 M30 螺栓 | 2.09                | 993          | 1 082        | 15    | A类试件       |

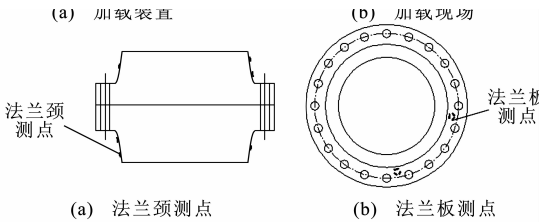


图 3 试验加载装置

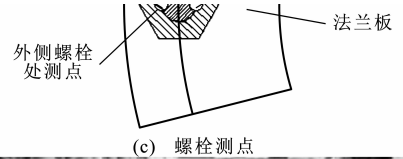
Fig. 3 Loading Equipments for Test

在法兰颈距法兰板 1/3、1/2、2/3 高度处、螺栓及法兰板两相邻螺栓中间位置处等关键部位布置应变片,由数据采集系统(英国产 Isolated Measurement Pods)实时连续采集。各个测点的布置如图 4 所示。

## 2 受力过程与破坏形态

对于 A 类试件,当施加荷载达到 1.3 倍设计荷载时,试验钢管先进入屈服状态,继续加载至设计荷载的 1.4 倍时,法兰颈部分屈服,当加载至 1.6 倍设计荷载时,试验装置在支座焊缝处被拉断,破坏形态见图 5。

对于 B 类试件,与 A 类试件类似,施加 1.4 倍设计荷载时,试验钢管先进入屈服状态,继续加载至



(c) 螺栓测点



(a) 试件加载

图 4 测点布置

Fig. 4 Layouts of Measuring Points

1.5 倍设计荷载时,法兰颈部分屈服,继续加载至 1.8 倍设计荷载时,试验钢管应变已经超过  $20 \times 10^{-3}$ ,停止加载。

对于 C 类试件,与 A、B 类试件类似,施加荷载达到 1.5 倍设计荷载时,试验钢管先进入屈服状态,继续加载至 1.6 倍设计荷载时,法兰颈部分屈服,继续加载至 2.2 倍设计荷载时,试验钢管应变已经超过  $20 \times 10^{-3}$ ,停止加载。

对于 D 类试件,与上面 3 类试件类似,施加 1.4 倍设计荷载时,试验钢管先进入屈服状态,继续加载至 1.5 倍设计荷载时,法兰颈部分屈服,当加载至 2.5 倍设计荷载时,试验钢管靠近焊缝处被拉断,破坏形态见图 6。

由试验结果可知,试件破坏一般发生在试验钢管处,其中以法兰焊缝和试验钢管中间这两处之间的筒体最容易发生屈服破坏。在整个试验过程中,法兰板的外缘被拉开,外缘处无撬力产生,并且随着拉力的增大,上下法兰板相对位移增大,高颈法兰受力表现出偏刚性的特点。

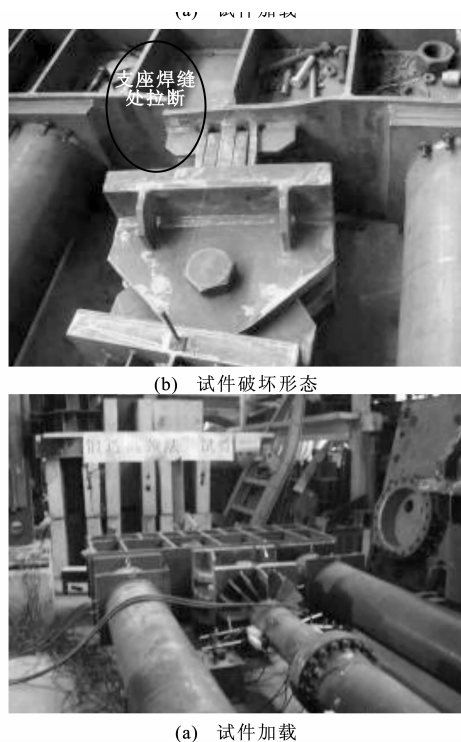
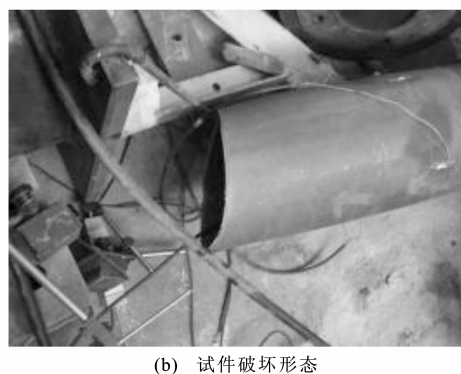


图 5 A 类试件破坏形态

Fig. 5 Failure Modes of Specimens in Series A



(b) 试件破坏形态

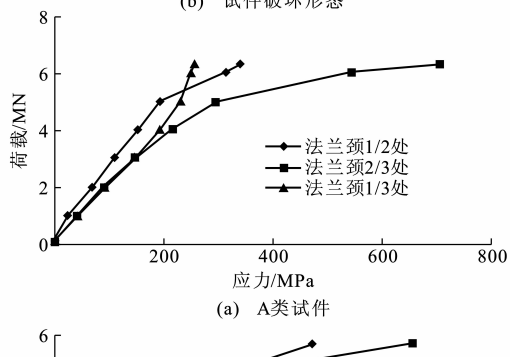


图 6 D 类试件破坏形态

Fig. 6 Failure Modes of Specimens in Series D

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 法兰颈应力

法兰颈距法兰板 1/3、1/2 及 2/3 高度处的荷

载-应力曲线如图 7 所示。

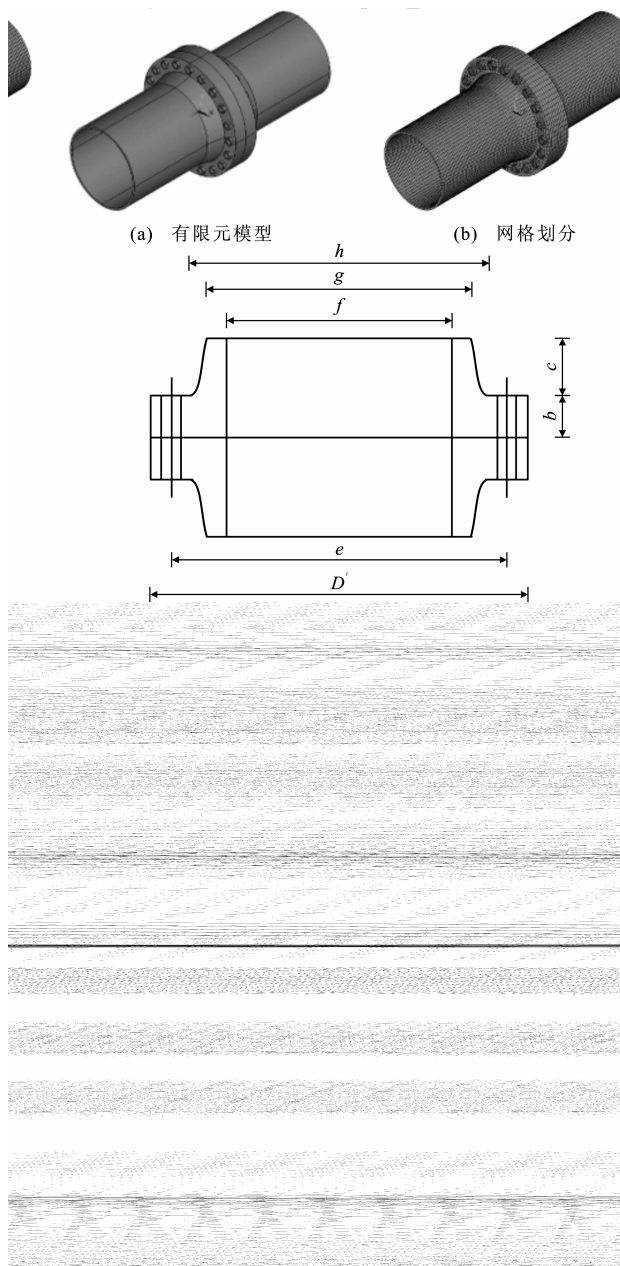


图 7 法兰颈的荷载-应力曲线

Fig. 7 Load-stress Curves of Flange Neck

由图 7 可知:①法兰颈应力与荷载呈线性关系,在 1.0 倍设计荷载下,各类试件的法兰颈部分都处于弹性阶段,施加 1.4 倍的设计荷载时,法兰颈应力随荷载增大迅速增大,法兰颈进入屈服阶段;②与法兰颈距法兰板 1/3 高度处应力相比,法兰颈两端应力相对较小;③增大法兰颈的高度,可增大法兰颈的整体受力刚度,有利于减小法兰颈的应力。

#### 3.2 法兰板应力

根据法兰板上的测点可得出各测点的 Mises 应力,如图 8 所示。由图 8 可知:在试验过程中,各试

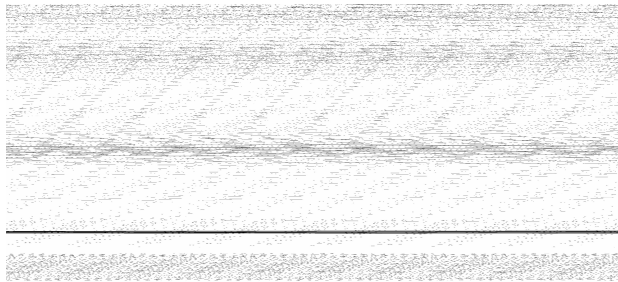


图 8 法兰板的 Mises 应力曲线

Fig. 8 Mises Stress Curves of Flange Plate

件的法兰板应力均小于屈服应力,法兰板一直处于弹性阶段,法兰板的 Mises 应力随荷载的增大呈线性增大。比较 4 类试件的法兰板应力可知,增大法兰板的厚度,能增大法兰板的刚度,有利于减小法兰板的 Mises 应力。

### 3.3 螺栓应力

螺栓荷载-应力曲线如图 9 所示。由图 9 可知,荷载-应力曲线在试验过程中较为平稳,呈线性发展。在 1.0 倍设计荷载时,各试件的螺栓应力均小于屈服应力,处于弹性阶段。螺栓外侧应力与内侧应力相比较小,可见法兰板对螺栓有附加偏心力的作用,并且该附加偏心力使螺杆产生了附加弯矩。在整个试验过程中螺栓受力正常,螺栓一直处于弹性阶段,螺栓的设计是满足要求的。

### 3.4 工程安全性评价

(1)在设计荷载作用下,法兰板、试验钢管、螺栓等部位所有测点基本处于弹性阶段,法兰设计安全可靠。

(2)A、B、C、D 类试件的极限荷载与屈服荷载的比值分别在 1.2、1.3、1.4、1.7 左右,结构在破坏前均有明显的预兆。

## 4 有限元分析

采用有限元软件 ANSYS 对原型试件的足尺模型进行有限元分析,建模所用材料、构造措施等均与试验模型一致。

按照试验模型的受力与约束情况,确定模型的边界条件,施加等效荷载。根据法兰特点,本文中采用 Solid45 实体单元模拟锻造高颈法兰中的钢管、法兰板以及螺栓,上下法兰板的接触以及螺栓与法兰板的接触分别采用 Target170 单元和 Conta174 单元模拟,接触单元的摩擦因数取 0.3。

### 4.1 有限元建模与试验验证

建立模型时,为了减少网格单元划分,节省计算

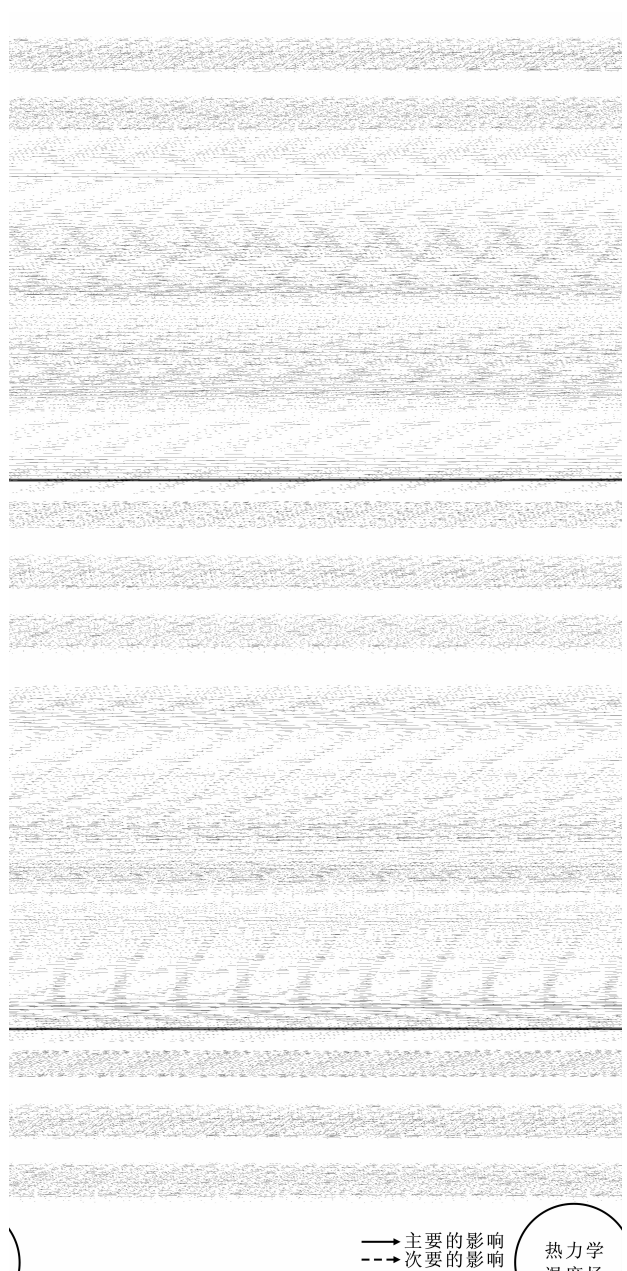


图 9 螺栓的荷载-应力曲线

Fig. 9 Load-stress Curves of Bolt

时间,同时也考虑避免钢管端部约束对节点的影响,法兰两端钢管长度取为 0.5 m。典型的有限元模型及网格划分如图 10 所示。在上部钢管顶端截面处施加轴向力来表征法兰受到的轴拉作用,下部钢管的底端截面处固支。

对在 1.0 倍设计荷载工况下的高颈法兰进行有限元计算,有限元计算值与现有的试验值比较如表 3 所示。

由表 3 可知:在 1.0 倍设计荷载工况下,试件各部分均处于弹性阶段;试验值与 ANSYS 计算值吻合较良好,二者偏差小于 15%,因此有限元软件

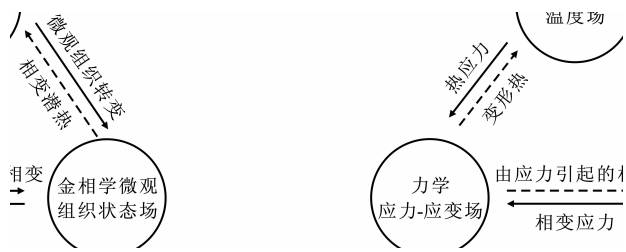


图 10 有限元模型及网格划分

Fig. 10 Finite Element Models and Grid Divisions

表 3 应力试验值与有限元计算值的比较

Tab. 3 Comparisons of Stresses Between Test Results and

Finite Element Calculation Results

| 试件类型                 | A     |       |       | B          |            |       |      |
|----------------------|-------|-------|-------|------------|------------|-------|------|
| 位置                   | 试验钢管  | 法兰颈   | 法兰板   | 试验钢管       | 法兰颈        | 法兰板   |      |
| $T_1/\text{MPa}$     | 351.2 | 189.5 | 134.5 | 279.4      | 169.7      | 117.6 |      |
| $T_2/\text{MPa}$     | 311.1 | 207.8 | 119.7 | 275.3      | 197.1      | 103.7 |      |
| $T_1 \cdot T_2^{-1}$ | 1.13  | 0.91  | 1.12  | 1.01       | 0.86       | 1.13  |      |
| 试件类型                 | C     |       |       | D          |            |       |      |
| 位置                   | 试验钢管  | 法兰颈   | 法兰板   | 试验钢管       |            | 法兰颈   | 法兰板  |
|                      |       |       |       | $\Phi 245$ | $\Phi 320$ |       |      |
| $T_1/\text{MPa}$     | 268.6 | 140.8 | 88.9  | 271.9      | 218.9      | 126.9 | 61.1 |
| $T_2/\text{MPa}$     | 250.2 | 164.9 | 100.1 | 297.8      | 224.7      | 143.4 | 70.9 |
| $T_1 \cdot T_2^{-1}$ | 1.07  | 0.85  | 0.89  | 0.91       | 0.97       | 0.88  | 0.86 |

注:  $T_1$  为试验值;  $T_2$  为 ANSYS 计算值。

ANSYS 能准确模拟结构的受力过程, 其计算结果可用于参数分析。

#### 4.2 有限元参数分析

由于试验数量限制, 拟采用 ANSYS 软件在试验模型的基础上, 对法兰外径、法兰板厚度、法兰颈高度、钢管直径、法兰颈外径以及法兰螺栓位置等参数(图 11)在原型参数的基础上调整 10%, 研究高颈法兰尺寸对法兰板受力性能的影响, 图 11 中的参数含义:  $e$  为法兰螺栓中心圆的直径;  $f$  为法兰的内直径;  $h$  为法兰颈的外直径, 法兰颈下端厚为  $(h-f)/2$ ;  $g$  为法兰颈的内直径, 法兰颈上端厚为  $(g-f)/2$ 。B、C 类试件有限元参数分析结果分别见图 12、13。

通过对法兰颈高度、上法兰颈厚度、下法兰颈厚度、法兰板厚度以及法兰螺栓位置等参数的有限元计算分析, 可以得出以下结论:

(1) 增大或减小法兰外径的 10%, 法兰颈和法兰板的应力大小变化不超过 5%, 因此, 调整法兰外径的大小对法兰颈和法兰板的 Mises 应力大小影响均较小。

(2) 调整法兰板厚度, 法兰颈和法兰板的应力分布情况基本不变, 但对法兰板的应力大小影响较大。

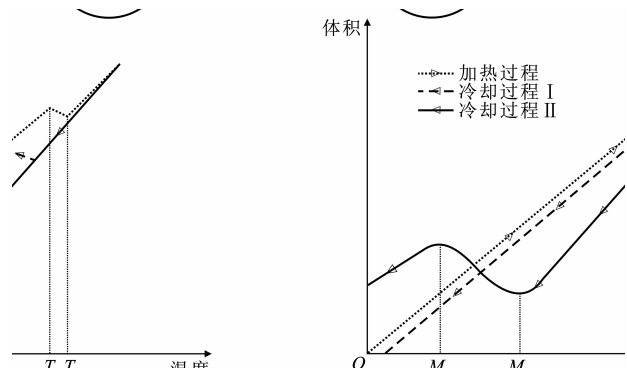


图 11 高颈法兰的几何参数

Fig. 11 Geometric Parameters of High-neck Flange

随着法兰板厚度增大或减小 10%, 法兰板应力减小或增大 15% 左右, 但仍小于屈服强度, 处于弹性阶段。增大法兰板的厚度, 可增大法兰板的刚度, 有利于减小法兰颈与法兰板的应力。在减小法兰板厚度 10% 的情况下, 1.0 倍设计荷载下试件的各部分应力均小于其屈服强度。建议可将法兰板厚度减小 10%, 此时高颈法兰的法兰板和法兰颈的屈服承载力均能达到设计荷载的 1.4 倍以上, 具有较高的安全储备。

(3) 法兰颈高度对法兰颈和法兰板的应力大小均有较大的影响。增大或减小 10% 的法兰颈高度, 法兰颈应力减小或增大 15% 左右, 法兰板应力减小或增大 20% 左右, 但仍均小于屈服强度, 处于弹性阶段。增大法兰颈的高度, 可增大法兰的整体受力刚度, 有利于减小法兰颈与法兰板的应力。在减小法兰颈高度 10% 的情况下, 试件在 1.0 倍设计荷载下的各部分应力仍小于其屈服强度, 因此, 建议将试件法兰颈高度减小 10%, 此时高颈法兰试件的法兰板和法兰颈的屈服承载力均能达到设计荷载的 1.4 倍以上, 具有较高的安全储备。

(4) 钢管直径大小对法兰颈和法兰板的应力大小的影响较小。增大或减小钢管直径的 10%, 法兰颈和法兰板的应力大小变化均不超过 5%。

(5) 法兰颈外径大小对法兰颈和法兰板的应力大小的影响较大。增大法兰颈有利于提高法兰整体刚度, 减小法兰颈和法兰板的应力。随着法兰颈外径增大或减小 10%, 法兰颈应力减小或增大 15% 左右, 法兰板应力减小或增大 18% 左右, 仍均小于屈服强度, 处于弹性阶段。因此, 增大法兰颈外径可增大法兰颈下端厚度, 有利于法兰颈与法兰板部位的整体受力, 可减小法兰颈与法兰板部位的应力。

(6) 法兰螺栓中心圆的直径对法兰颈和法兰板应力大小的影响较大。减小螺栓中心圆直径时, 由

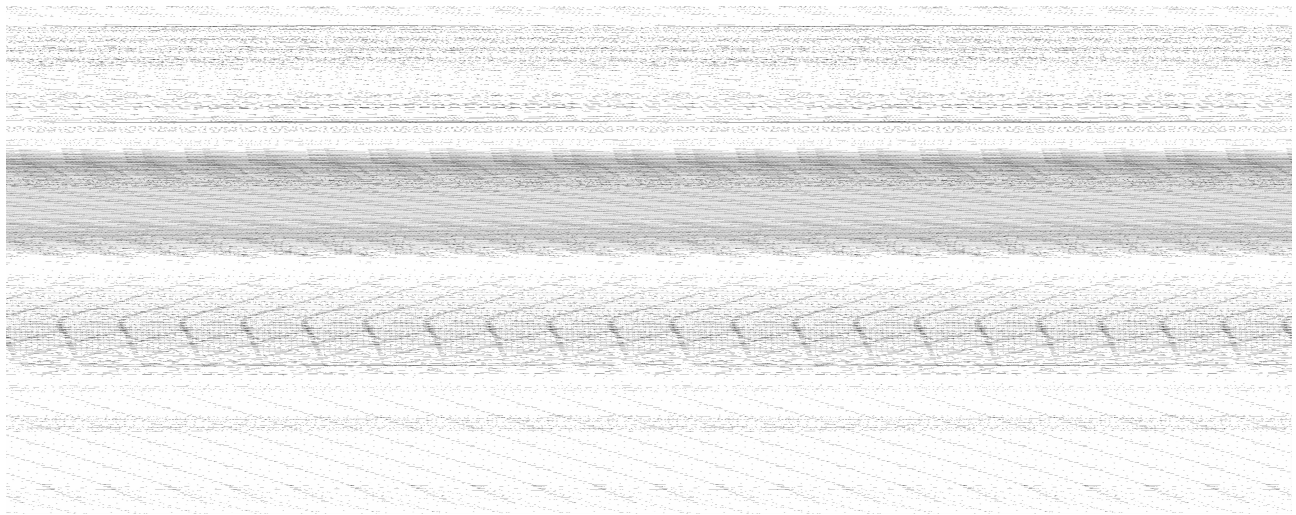


图 12 B 类试件各参数对法兰受力性能的影响

Fig. 12 Influences of Parameters of Specimens in Series B on Mechanical Properties of Flange

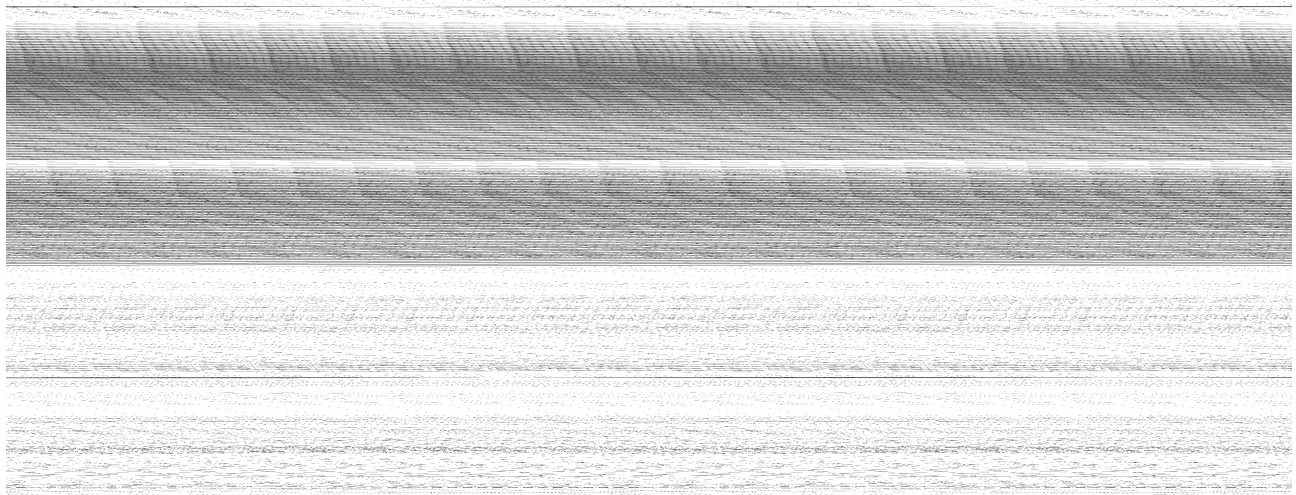


图 13 C 类试件各参数对法兰受力性能的影响

Fig. 13 Influences of Parameters of Specimens in Series C on Mechanical Properties of Flange

于螺栓位置靠近法兰板与法兰颈连接处,出现应力集中现象,法兰板的应力增加较大,可达到 50%。

## 5 结 语

(1)试件破坏一般发生在试验钢管处,其中以高颈法兰焊缝和试验钢管中间这段筒体最容易破坏。M20、M30 的螺栓在试验中均能满足要求,未发生破坏。

(2)在设计荷载下,高颈法兰试件各个部分均处于弹性阶段。试验钢管和法兰颈的屈服承载力均能达到设计荷载的 1.4 倍以上,具有较高的安全储备。

(3)针对高颈法兰典型试件,通过有限元参数分析,研究了法兰外径、法兰板厚度、法兰颈高度、钢管直径、法兰颈外径以及法兰螺栓位置等参数对法兰

颈和法兰板应力的影响。建议可将试件的法兰板厚度与法兰颈高度分别减小 10%,此时,法兰板和法兰颈的屈服承载力仍能达到设计荷载的 1.4 倍以上,具有较高的安全储备。

(4)高颈法兰在试验过程中具有较大的承载能力,结构在破坏前均有明显的预兆,具有较高的安全储备,完全满足设计荷载下的强度要求,安全可靠,可在工程中推广应用。

## 参考文献:

### References:

- [1] 冯德奎,包永忠. 新型法兰盘在输电塔中的研究[J]. 电网与清洁能源,2009,25(6):43-48.  
FENG De-kui,BAO Yong-zhong. Research on a New Type of Flanges in Transmission Towers[J]. Power

- System and Clean Energy, 2009, 25(6): 43-48.
- [2] 龚泉, 肖立群. 新型钢管塔的设计与应用研究[J]. 华东电力, 2009, 37(8): 1265-1269.  
GONG Quan, XIAO Li-qun. Review of the Design and Application of New Steel-pipe Tower[J]. East China Electric Power, 2009, 37(8): 1265-1269.
- [3] 邓洪洲, 司瑞娟. 特高压大跨越输电塔动力特性和风振响应分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(4): 23-30.  
DENG Hong-zhou, SI Rui-juan. Analysis of Dynamic Behavior and Wind-induced Response of UHV Long-span Transmission Towers[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(4): 23-30.
- [4] 王茜, 王春生, 俞欣, 等. 钢桥塔局部稳定试验与数值分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(5): 67-72.  
WANG Qian, WANG Chun-sheng, YU Xin, et al. Experimental Investigation and Numerical Analysis on Local Buckling Behavior of Steel Bridge Towers[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(5): 67-72.
- [5] 邓洪洲, 黄誉, 金晓华. 钢管塔新型内外法兰节点试验研究与有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 140-148.  
DENG Hong-zhou, HUANG Yu, JIN Xiao-hua. Experimental Research and Finite Element Analysis on a New-type Flange Joint Used in Steel Tube Towers[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 140-148.
- [6] DL/T 5154—2002, 架空送电线路杆塔结构设计技术规范[S].  
DL/T 5154—2002, Technical Regulation of Design for Tower and Pole Structures of Overhead Transmission Line[S].
- [7] GB 50135—2006, 高耸结构设计规范[S].  
GB 50135—2006, Code for Design of High-rising Structures[S].
- [8] 陈俊岭, 马人乐, 何敏娟. 塔桅结构中有加劲肋法兰连接的受力研究[J]. 结构工程师, 1999, 15(4): 16-20.  
CHEN Jun-ling, MA Ren-le, HE Min-juan. The Study of Flange Joint with Stiffening Rib Under Tension in Tower and Guy Mast Structures[J]. Structural Engineers, 1999, 15(4): 16-20.
- [9] 王笑峰, 何敏娟, 马人乐. 柔性法兰节点试验分析及简化计算方法研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(3): 56-58, 61.  
WANG Xiao-feng, HE Min-juan, MA Ren-le. Test Analysis and Study of Simplified Calculation of Flexible Flange Connection[J]. Industrial Construction, 2001, 31(3): 56-58, 61.
- [10] 薛伟辰, 黄永嘉, 王贵年. 500 kV 吴淞口大跨越塔柔性法兰原型试验研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(3): 68-70.  
XUE Wei-chen, HUANG Yong-jia, WANG Gui-nian. Prototype Experimental Studies on Flexible Flanges for Long-span Electric Transmission Tower in Wusongkou[J]. Industrial Construction, 2004, 34(3): 68-70.
- [11] 陈海波, 何长华, 李振福, 等. 钢管结构无加劲法兰计算方法的试验研究[J]. 电力建设, 2005, 26(7): 16-19.  
CHEN Hai-bo, HE Chang-hua, LI Zhen-fu, et al. Test and Study on Calculation Method of Steel Tube Non-stiffened Flange[J]. Electric Power Construction, 2005, 26(7): 16-19.
- [12] 马人乐, 刘恺, 黄冬平. 反向平衡法兰试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(10): 1333-1339.  
MA Ren-le, LIU Kai, HUANG Dong-ping. Experimental Research of Reverse Balance Flange[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(10): 1333-1339.