

文章编号: 1006-4710(2014)01-0108-05

# 基于子结构试验的高强角钢受力性能研究

宁致远<sup>1</sup>, 梅莎<sup>2</sup>, 党康宁<sup>1</sup>, 陶磊<sup>1</sup>, 刘云贺<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 三亚市住房和城乡建设局, 海南 三亚 572000)

**摘要:** 以哈密北 750 kV 特高压输电塔工程为依托, 将 Q420 单根角钢设计在输电塔架的塔腿中进行破坏性静力试验研究。根据试验结果分析子结构中高强等边角钢的受力性能、极限承载力、失稳形式及变形幅值等指标, 并与单根角钢试验结果进行对比。试验研究表明, 子结构中的高强等边角钢失稳破坏形态为弯扭屈曲, 变形集中在底跨跨中部分, 支撑杆件对高强角钢起到了约束作用, 降低了高强角钢的长细比, 提高了子结构的承载力。

**关键词:** 高强角钢; 输电塔架; 承载力; 子结构

**中图分类号:** TU391 **文献标志码:** A

## Substructure experimental study based on high strength angle steel mechanical behavior

NING Zhiyuan<sup>1</sup>, MEI Sha<sup>2</sup>, DANG Kangning<sup>1</sup>, TAO Lei<sup>1</sup>, LIU Yunhe<sup>1</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Sanya Bureau of Housing and Urban-Rural Development, Sanya 572000, China)

**Abstract:** Based on the 750 kV transmission tower in the north of Hami, the Q420 high-strength equal-leg angle steel is designed in the leg of the transmission tower. The failure static test of the substructures is conducted. According to the test results, mechanical behavior of the substructure, the ultimate bearing capacity, the buckling modes and deformation amplitude are investigated. The test results of the substructures are compared to the single angle steel. The test results indicate that flexural-torsional buckling has occurred in the high-strength equal-leg angle steel of the substructures and the deformation is concentrated in the middle part of the bottom of the truss. Support bars have had the constraint effect on the high-strength equal-leg angle steel, reducing the slenderness ratio and increasing the bearing capacity of the substructures.

**Key words:** high strength angle steel; transmission tower; bearing capacity; substructure

随着我国电力事业高速发展, 高强角钢在一些高压、特高压输电线路和大截面导线输电线路的输电塔等结构中逐渐被采用<sup>[1-3]</sup>。2005 年我国第一条 750 kV 超高压示范输电线路(青海官厅—兰州东)投入运营, 工程首次采用了 Q420 高强角钢, 工程研究表明: 与 Q345 钢材相比, 采用 Q420 高强钢, 其强度和承载力都有很大的提高, 从而节省钢材, 降低了工程造价<sup>[4]</sup>。近年来, 各大高校相继针对 Q420 高强角钢的整体稳定性进行了研究。文献[5]对不同型号的 Q420 等边角钢轴压柱的整体稳定性进行了

试验研究, 提出其失稳模式主要为弯扭失稳, 其试验平均值超过了《钢结构设计规范》<sup>[6]</sup>的计算值。而将 Q420 高强角钢作为主杆设计在空间三角形桁架中, 考察高强角钢在子结构中的失稳形式和承载力, 目前在这方面国内外研究成果较少。本文选用以截面尺寸为 125 mm×8 mm 的 Q420 高强等边角钢为主杆, Q235 角钢为支撑杆件形成输电铁塔的塔腿, 进行轴压试验研究。考察在符合工程边界条件下 Q420 高强等边角钢在子结构中的失稳形式和极限承载力, 并与同型号同等长度的单根高强等边角钢

收稿日期: 2013-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50921005/E0803)。

作者简介: 宁致远, 男, 硕士生, 研究方向为结构工程。E-mail: ningzhiyuan1108@163.com。

刘云贺, 男, 教授, 博导, 研究方向为结构抗震、防震减灾等。E-mail: liuyunhe1968@163.com。

对比,为输电塔架塔腿设计提供试验依据和建议。

### 1 试验概况

#### 1.1 子结构设计

为考察子结构的受力性能、承载力,设计主杆长度为 1 700 mm、2 075 mm 的子结构,其构造形式如图 1、表 1 所示,主杆选用 L125×8 规格的 Q420 高强角钢,腹杆选用 Q235 各型号角钢。试件编号中 Z 表示子结构,L125×8 表示角钢规格,500 和 625 为子结构主杆节点距离,L 为高强角钢试验段长度,B 为肢宽,T 为肢厚,A 为截面面积。连接螺栓为直径 M16 的镀锌粗制螺栓,螺栓等级 6.8 级,螺栓孔径为 18 mm。

试验角钢实测尺寸见表 2。材性试验测得钢材

的屈服强度平均值为 462.4 MPa,极限强度平均值为 601.5 MPa,强屈比为 1.30,弹性模量为  $2.01 \times 10^5$  MPa,计算时取屈服强度  $f_y = 460$  MPa。表中的数值为三组实际所测数值的平均值。

表 1 子结构主杆尺寸  
Tab. 1 The main bar size of substructure

试件编号	AB/mm	BC/mm	CD/mm
ZL125×8-625	625	625	625
ZL125×8-500	500	500	500

表 2 试验角钢实测尺寸  
Tab. 2 The measured size of the test angle

试件编号	L/mm	B/mm	T/mm	A/mm <sup>2</sup>
ZL125×8-625	2 075.62	124.92	7.94	1 942
ZL125×8-500	1 699.46	124.88	7.92	1 934

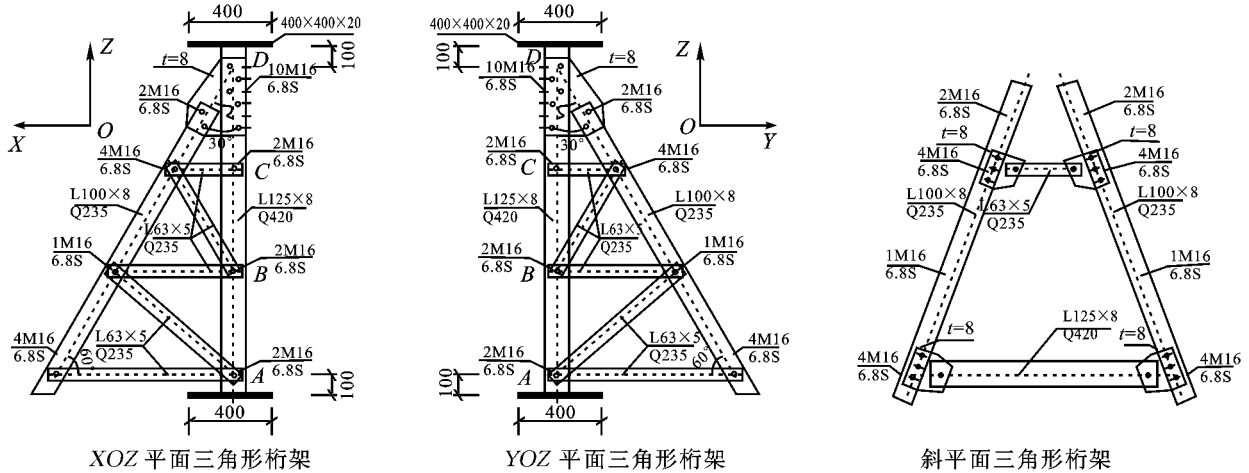


图 1 子结构构造形式

Fig. 1 Construction form of the substructure

#### 1.2 试验装置

子结构试验装置见图 2,竖向压力通过长柱试

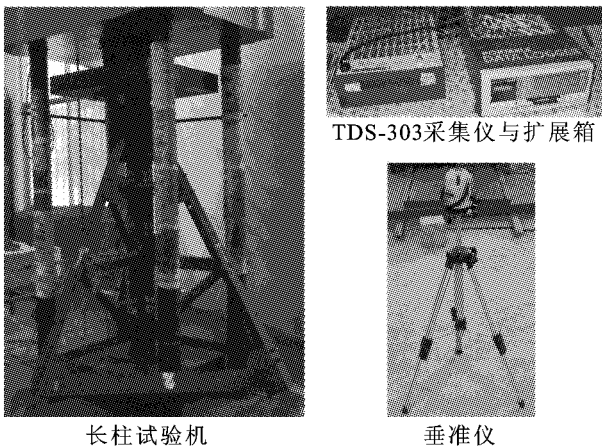


图 2 试验装置  
Fig. 2 Test unit

验机施加,数据经 TDS-303 数据采集仪与扩展箱采集。为实现结构轴心受压的效果,应将子结构主杆质心位置与试验机加载中心位置对应(即对中)。对中过程分两步:第一步是几何对中,用红外线水准仪

进行初步的光学对中,即将试验主杆轴线对准作用力的中心线;第二步是物理对中,对子结构施加 60 kN,观察加载过程中各个截面应变片的应变是否同步且均匀增加,并根据各个截面各个位置的应变大小,微调角钢的位置,如不满足要求,则重复以上步骤,直到各个应变的数值基本一致(各个应变差值不超过 5%)为止。

#### 1.3 测点分布及测试方案

在子结构主杆每跨跨中截面布置 10 个应变片,用于物理对中以及试件加载过程中破坏模式的监测;在每跨跨中各布置 2 个位移计,监测每跨跨中截面的变形。应变片、位移计的布置见图 3。

#### 1.4 加载制度

每次试验前,对试件预载 60 kN,检查仪表是否正常工作,并校核物理对中。然后分级施加荷载,当施加荷载在名义荷载的 80% 以内时,采用以 25 kN/min 的等速试验力控制;在施加荷载达到名义荷载的 80% 之后,采用以 0.2 mm/min 的等速位移控制。加载过程中每分钟采集一组数据,当加载到破

坏荷载后,继续采集数据观察子结构的延性,直至荷载降至峰值荷载的80%以下试验结束。

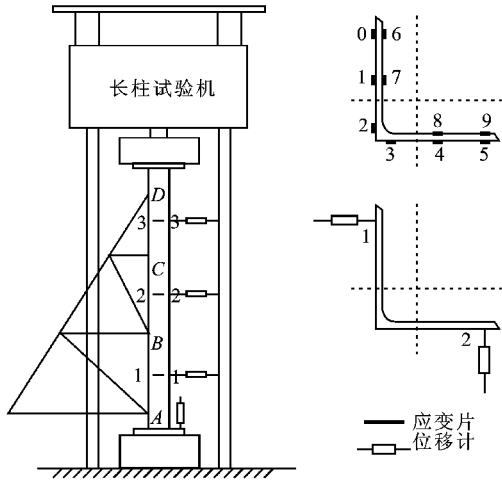


图3 测点布置图  
Fig. 3 Arrangement of measuring points

## 2 试验结果

### 2.1 加载破坏过程

ZL125×8-625 子结构:加载初期,构件无明显

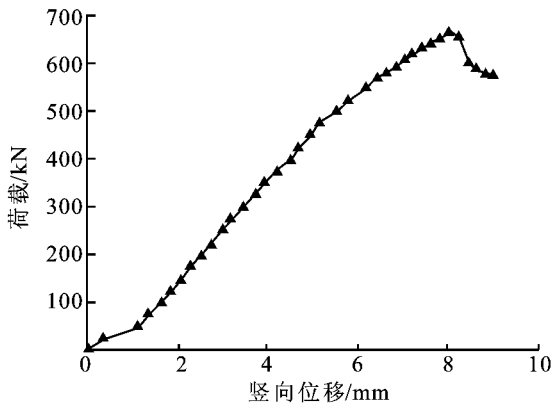


图4 ZL125×8-625 荷载-竖向位移曲线  
Fig. 4 ZL125×8-625 load and vertical displacement curve

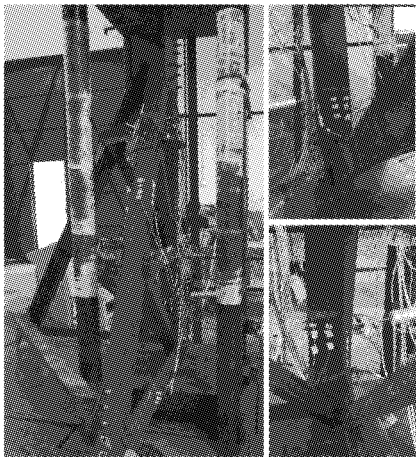


图6 ZL125×8-625 破坏图  
Fig. 6 The ZL125×8-625 destroyed figure

变形。竖向荷载逐级加载增加至 550 kN 时,竖向位移为 6.17 mm,结构无明显变形,荷载由 550 kN 逐级增加到 667 kN 的过程中,子结构不断发出轻微响声,AB 跨位移计度数持续增加。当荷载加至 667 kN 时,AB 跨位移计陡然增大,试验构件出现明显的弯扭变形,子结构达到最大承载力,此时竖向位移为 8.2 mm,高强角钢中 BC 跨、CD 跨以及子结构中的支撑杆件均无明显变形。荷载-竖向位移曲线见图 4,破坏变形见图 6。

ZL125×8-500 子结构:加载初期,构件无明显变形。竖向荷载逐级加载增加至 627 kN 时,竖向位移为 6.5 mm,结构无明显变形,荷载由 627 kN 逐级增加到 746 kN 的过程中,子结构不断的发出轻微响声,AB 跨位移计度数持续增加。当荷载加至 746 kN 时,AB 跨位移计陡然增大,试验构件出现明显的弯扭变形,子结构达到最大承载力,此时竖向位移为 8.5 mm,高强角钢中 BC 跨、CD 跨以及子结构中的支撑杆件均无明显变形。荷载-竖向位移曲线见图 5,破坏变形见图 7。

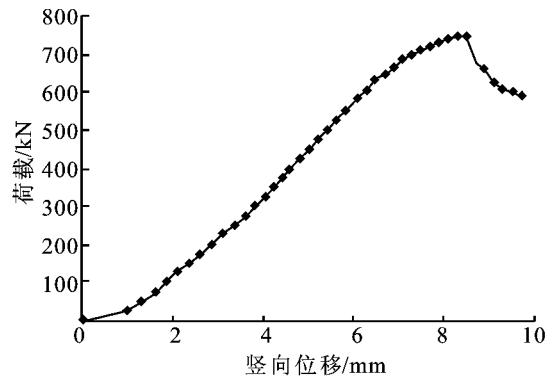


图5 ZL125×8-500 荷载-竖向位移曲线  
Fig. 5 ZL125×8-500 load and vertical displacement curve

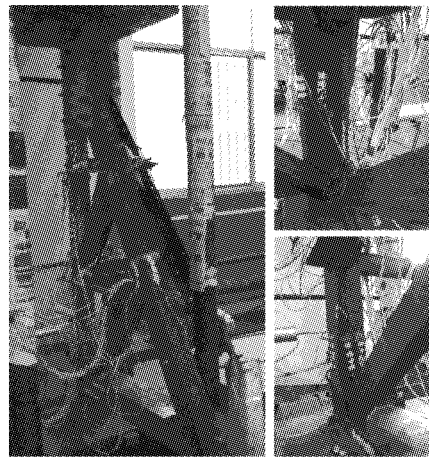


图7 ZL125×8-500 破坏图  
Fig. 7 The ZL125×8-500 destroyed figure

### 2.2 破坏特征分析

ZL125×8-625 子结构:在子结构主杆中,由于腹杆的约束作用,BC 跨和 CD 跨均无明显变形,AB 跨跨中(截面 1-1)的荷载-应变曲线如图 8 所示,其中截面测点位置见图 3。

当荷载加载至 592 kN 时,截面 1-1 肢尖处连接的位移计读数开始发生变化,随着荷载增加,挠度不断增大,当荷载达到极限荷载 667 kN 时,位移计的读数增大更快,AB 跨发生扭转,局部屈曲明显。截面 1-1 荷载-侧向位移如图 10 所示。加载初期,全截面均受压,当试验角钢达到极限荷载时,曲线达到峰值并开始迅速分岔,肢背处压应变持续增大,一枝尖处压应变持续增加,另

一枝尖的应变转为受拉,原因是角钢压杆绕非平行轴整体失稳表现为弯扭变形,与试验现象吻合。

ZL125×8-500 子结构:在子结构主杆中,由于腹杆的约束作用,BC 跨和 CD 跨均无明显变形,故将 AB 跨跨中(截面 1-1)的荷载-应变曲线列图 9 所示,其中截面测点位置见图 3。

当荷载加载至 682 kN 时,截面 1-1 肢尖处连接的位移计读数开始发生变化,随着荷载增加,挠度不断增大,当荷载达到极限荷载 746 kN 时,位移计的读数增大更快,AB 跨发生扭转,局部屈曲明显。截面 1-1 荷载-侧向位移如图 11 所示。对荷载-应变的分析同 ZL125×8-625。

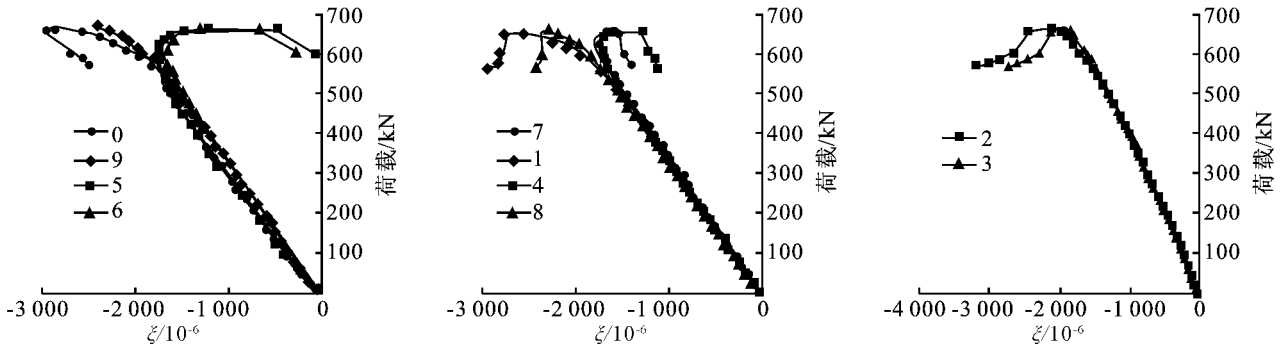


图 8 ZL125×8-625 截面 1-1 荷载-应变曲线

Fig. 8 The ZL125×8-625 section 1-1 load and strain curves

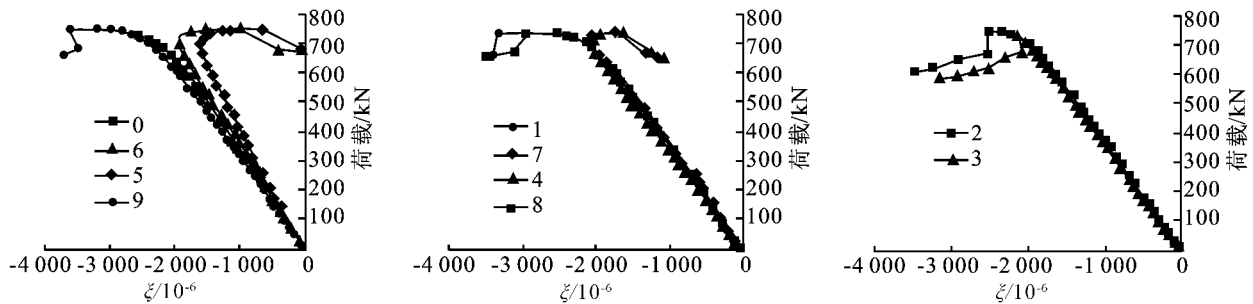


图 9 ZL125×8-500 截面 1-1 荷载-应变曲线

Fig. 9 The ZL125×8-500 section 1-1 load and strain curves

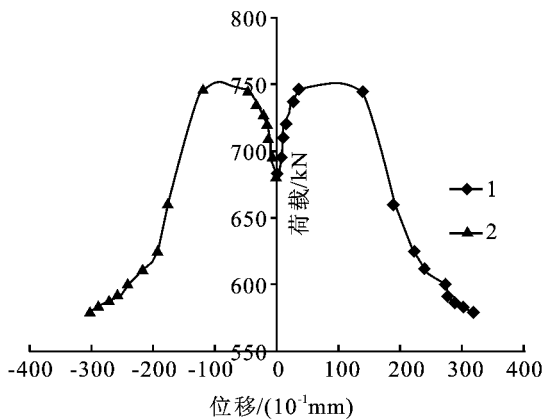


图 10 ZL125×8-625 截面 1-1 荷载-位移曲线  
Fig. 10 The ZL125×8-625 section 1-1 load-displacement curves

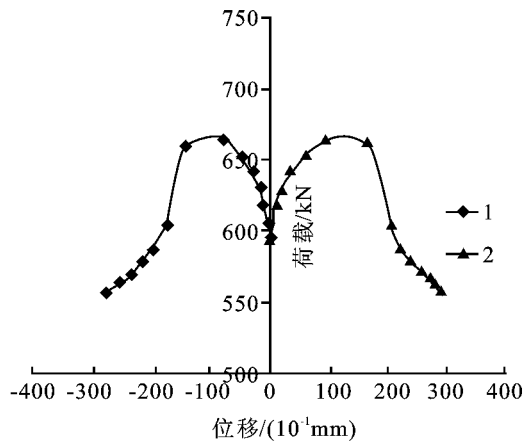


图 11 ZL125×8-500 截面 1-1 荷载-位移曲线  
Fig. 11 The ZL125×8-500 section 1-1 load-displacement curves

### 3 结果分析

#### 3.1 承载力

图4、图6表明:当子结构达到极限荷载后,承载力会迅速下降,当下降到80%后,荷载变化缓慢。说明子结构破坏后仍然具有一定的承载力。

#### 3.2 变形

在加载前期,由于不完全接触等因数的影响,竖向变形呈现出非线性,当荷载逐级增大时,竖向变形为线性变化;当子结构达到极限荷载后,底端截面的侧向变形会迅速扩大,导致局部屈曲,而中间跨和上跨截面的变形均无明显变化,表明支撑杆件对主杆起到了约束作用。

#### 3.3 子结构极限承载力与单根高强等边角钢极限承载力的比较

为增加对比性,在同样的端部约束边界条件下,进行单根角钢承载力试验,试验现象对比表明,单根高强等边角钢试验比子结构试验出现弯曲的时机要早,变形要大。并将单根高强等边角钢的极限承载力与子结构的极限荷载对比,如表3所示。由表3分析可得,子结构的极限荷载相对单根角钢极限荷载有很大提高。

表3 单根角钢与子结构承载力对比  
Tab.3 Contrast bearing capacity between single angle and substructure

子结构	极限承载力/kN	平均值/kN	单根角钢承载力/kN	对比结果
ZL125×8-625-1	667	661.5	514	28.70%
ZL125×8-625-2	656			
ZL125×8-500-1	728	737	605	21.80%
ZL125×8-500-2	746			

### 4 结论

1) 子结构中高强角钢的失稳形式为弯扭失稳,破坏位置在子结构的下端;

2) 与同等长度的单根角钢对比,子结构的承载力要提高20%以上,支撑杆件起到了减小主杆长细比、增加主杆侧向刚度的作用,从而提高了子结构的承载力;

3) 当子结构达到最大承载力时,变形陡然增加,承载力快速下降,当荷载降到极限荷载的80%后,荷载变化缓慢,变形趋于稳定,说明子结构延性较好;

4) 对于其它规格子结构的高强角钢以及端部的边界条件对子结构极限承载力的影响有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 李正良,刘红军,张东英,等. Q460 高强钢在 1 000 kV 杆塔的应用[J]. 电网技术,2008,32(24):1-5.  
Li Zhengliang, Liu Hongjun, Zhang Dongying, et al. Application of high-strength steel Q460 in 1 000 kV transmission towers [J]. Power System Technology, 2008, 32(24):1-5.
- [2] 郭日彩,何长华,李喜来,等. 输电线路铁塔采用高强钢的应用研究[J]. 电网技术,2006,30(23):21-26.  
Guo Ricai, He Changhua, Li Xilai, et al. Research on utilization of high-strength steel in transmission towers[J]. Power System Technology, 2006, 30(23):21-26.
- [3] 何长华. 输电线路铁塔用钢的发展趋势[J]. 电力建设, 2010, 31(1):45-48.  
He Changhua. Development trend of steel used for transmission towers[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(1):45-48.
- [4] 韩钰,徐德录,杨建平,等. Q420 高强钢在特高压输电工程中的应用研究[J]. 电力建设,2009,30(4):33-35.  
Han Yu, Xu Delu, Yang Jianping, et al. Research on applications of Q420 high strength steel in UHV transmission projects[J]. Electric Power Construction, 2009, 30(4):33-35.
- [5] 班慧勇,施刚,刘钊,等. Q420 等边角钢轴压杆整体稳定性试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(2):60-68.  
Ban Huiyong, Shi Gang, Liu Zhao, et al. Experimental study on overall buckling behavior of Q420 high strength equal angle members under axial compression[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2):60-68.
- [6] 中华人民共和国建设部. GB50017-2003 钢结构设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003.
- [7] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京:水利电力出版社,1991.
- [8] 刘佳,郝际平,张天光,等. 基于子结构试验的一端偏心受压高强角钢受力性能研究[J]. 工业建筑,2010,40(S1):488-494.  
Liu Jia, Hao Jiping, Zhang Tianguang, et al. Substructure experimental study on high strength angle compression member eccentrically at one end[J]. Industrial Construction, 2010, 40(S1):488-494.
- [9] ASCE 10-97, Design of Latticed Steel Transmission Structures [S]. American Society of Civil Engineers, 1997.
- [10] Rasmussen K J R. Design of angle columns with locally unstable legs [J]. Journal Structural Engineering-ASCE, 2005, 131(10):1553-1560.

(责任编辑 王卫勋)