

文章编号:1673-2049(2007)03-0025-06

# K型间隙方钢管桁架静力工作性能的有限元分析

武振宇,王渊阳

(哈尔滨工业大学 土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:**为了研究直接焊接K型间隙方钢管平面桁架静力工作性能,对4榀直接焊接K型间隙方钢管桁架进行了非线性有限元分析。采用有限元分析软件ANSYS程序中的4节点板壳单元对桁架进行弹塑性、大挠度有限元分析;不仅跟踪了桁架荷载-位移曲线的全过程,而且分析了桁架节点部分的变形和塑性发展情况;建立了铰接桁架模型、刚接桁架模型、壳单元桁架模型及考虑焊缝的壳单元桁架模型4个桁架模型;比较了设计荷载作用下4个不同桁架模型的腹杆和弦杆的轴向力,以及标准荷载作用下这4个不同桁架模型的整体刚度。

**关键词:**K型间隙节点;方钢管桁架;有限元分析;静力工作性能

**中图分类号:**TU392.3

**文献标志码:**A

## Finite Element Analysis of Static Work Behavior of SHS Truss with Gapped K-joints

WU Zhen-yu, WANG Yuan-yang

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

**Abstract:** In order to investigate the static work behavior of square hollow section (SHS) truss with gapped K-joints, nonlinear finite element analysis of four trusses which directly welded K-joints was carried out. Making use of finite element analysis software ANSYS, in which four nodes shell element was employed, elastic-plastic large deflection finite element analysis of truss was conducted. Not only the upward and downward phases of the load and displacement curve were traced, but also deformation and plastic development situation of joints were studied. The four truss models of pin-jointed link elements, rigid-jointed beam elements, shell elements as well as shell elements which took weld into account were developed. Axial forces of web bars and chord bars of these four truss models bearing designed load were compared. Besides, the whole stiffness of four different truss models bearing standard load was compared.

**Key words:** gapped K-type joint; SHS truss; finite element analysis; static work behavior

## 0 引言

科技的进步与时代的发展使得桁架结构作为一种简明的受力结构而被广泛应用在建筑、桥梁、船

舶、机械等工程领域,同时管结构由于其安全、经济、美观的性能也越来越多地被使用。管桁架结构集中了管和桁架的优点,在各国工程领域中受到了越来越多的青睐。中国在管节点方面开展了大量的研究

收稿日期:2007-05-15

基金项目:国家自然科学基金项目(50578055)

作者简介:武振宇(1968-),男,黑龙江海林人,教授,博士生导师,工学博士,博士后,E-mail:wuzhenyu@hit.edu.cn。

工作<sup>[1-12]</sup>,而在管桁架方面的研究工作还较少,本文中  
使用有限元分析软件 ANSYS 对方钢管桁架的受  
力、变形、破坏特点进行了分析。

1 有限元模型的建立

本文中研究的桁架尺寸见表 1,桁架形式及选  
用的杆件截面尺寸见图 1,施加载荷为节点荷载,跨  
中节点荷载为  $P$ ,支座节点荷载为  $P/2$ 。

表 1 桁架尺寸

Tab. 1 Dimensions of Trusses

桁架编号	高度/ mm	跨度/ mm	高跨比	支弦杆 夹角/(°)	间隙/ mm	是否模拟 角焊缝
1A	500	5 000	1/10.0	45.42	30/20	否
1B	500	5 000	1/10.0	45.42	30/20	是
2A	400	5 000	1/12.5	38.28	30/20	否
2B	400	5 000	1/12.5	38.28	30/20	是

注:如图 1 所示桁架中节点 A、B、C、D 间隙为 30 mm,节点 E 间  
隙为 20 mm。桁架中采用焊脚尺寸为 3 mm 的角焊缝来模拟  
焊缝。

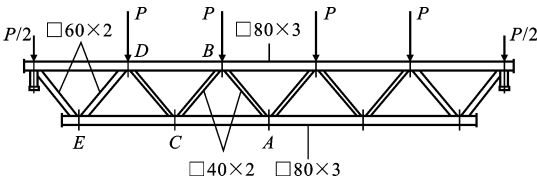


图 1 桁架形式及杆件截面尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Form of Truss and Section Dimension  
of Member(Unit:mm)

本文中使用的有限元分析软件 ANSYS 中的 4 节  
点弹塑性壳单元 Shell43 来模拟桁架,同时考虑材  
料非线性及几何非线性。网格划分时,在节点部位  
较密,单元长度约为 10 mm,杆件中部较粗,单元长  
度为 20~30 mm,连接处采用粗细过渡,施加节点  
荷载于弦杆腹板上(图 2),支座约束为一端固定铰  
接和一端滑动铰接的线约束。求解采用基于弧长控  
制的牛顿-拉弗森方法。材料力学特性是:钢材为  
Q235 型钢;屈服强度为 235 MPa;弹性模量为  
 $2.06\times10^5$  MPa;强化模量为  $2.06\times10^3$  MPa;泊松  
比为 0.3。不计残余应力的影响,材料服从 Mises 屈  
服准则。

桁架 1A 和桁架 2A 不考虑焊缝的影响,而桁架  
1B 和桁架 2B 考虑焊缝的影响,采用 Shell43 单元  
来模拟焊缝,焊缝处腹杆的壁厚为腹杆实际壁厚加  
上焊缝焊脚尺寸的有效值之和。

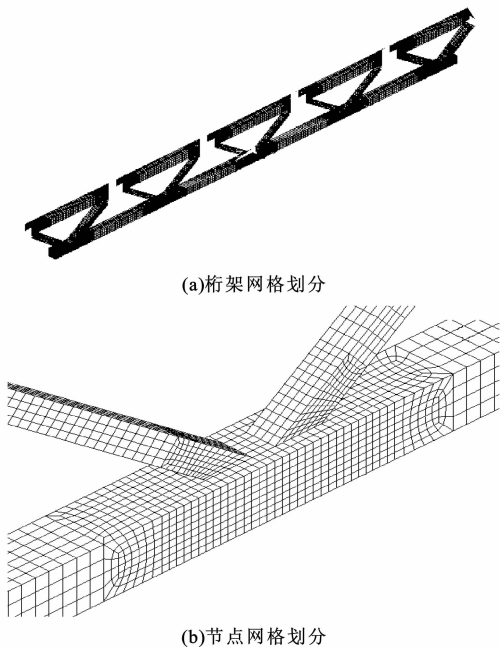


图 2 网格划分

Fig. 2 Mesh Division

2 典型桁架

本文中选用桁架 2A 作为典型桁架进行研究,  
桁架尺寸及杆件截面尺寸参照表 1 和图 1。该桁架  
为简支桁架,共将模型划分为 33 908 个单元,且未考  
虑初始缺陷、节点焊缝及残余应力的影响。

2.1 桁架的变形

该桁架在节点荷载作用下,发生桁架平面内的  
弯曲变形。当施加的节点荷载  $P=23.03$  kN(过极  
值点)时,桁架的变形见图 3,节点 B、C、D、E 的变  
形见图 4。

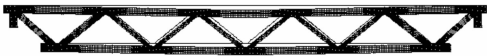


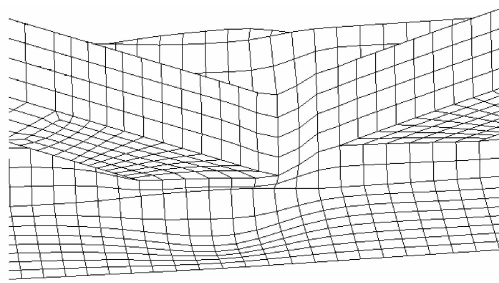
图 3 桁架的变形

Fig. 3 Deformation of Truss

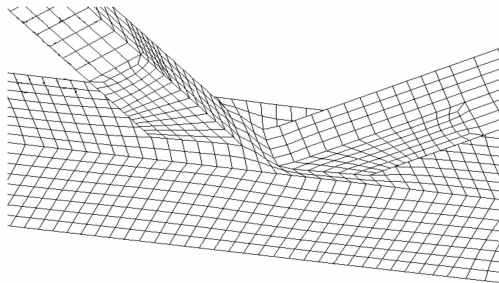
由图 4 可以看出,当该荷载作用下在节点处时,  
与压杆相交的弦杆翼缘表面凹陷,腹板表面凸出,与  
拉杆相交的弦杆翼缘表面凸出。该桁架中 K 型间  
隙节点主要发生弦杆表面的塑性屈服。

2.2 桁架的荷载-挠度曲线

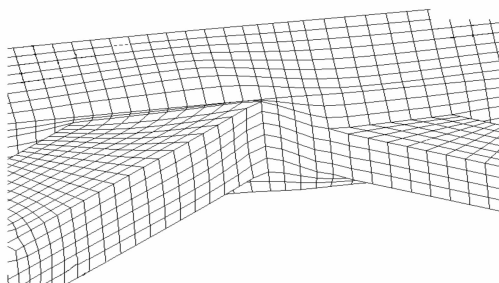
图 5 为桁架下弦跨中下表面节点 A 处荷载-挠  
度曲线,由图 5 可以看出,桁架的节点极限荷载  $P=$   
23.1 kN。在弹性阶段时,桁架的刚度非常大,进入  
弹塑性阶段后,桁架的刚度下降较快,随后出现水平  
段和下降段,即该桁架当荷载达到极限值后承载力



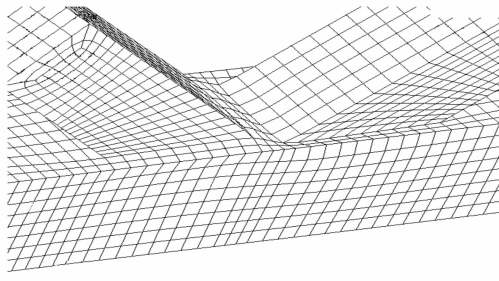
(a)节点B



(b)节点C



(c)节点D



(d)节点E

图 4 节点的变形

Fig. 4 Deformation of Joints

降低的过程,且桁架进入弹塑性时的挠度约为 12.5 mm,达到极限承载力时挠度约为 34 mm,桁架破坏呈现出明显的塑性性质。

### 2.3 桁架的塑性发展分析

由有限元分析软件 ANSYS 可知,在节点荷载  $P$  很小的情况下,桁架的大部分杆件应力均较小,但是节点处的某些部位的应力有可能已经达到屈服应力,现以节点  $B$  为例进行研究。

当节点荷载  $P=6.5$  kN 时,压支杆(左侧支杆)轴向应力为 29.8 MPa,而节点  $B$  处支杆与弦杆相交

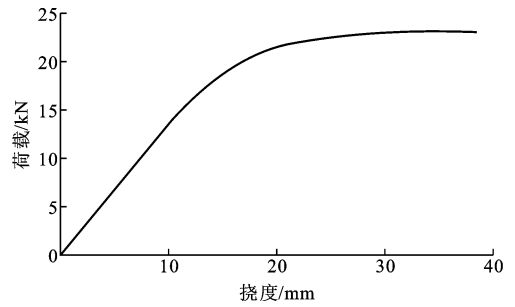


图 5 节点荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load and Deflection Curve of Joint

的 4 个角点处应力达到 240 MPa,已经进入塑性状态,如图 6(a)所示。随着荷载的逐渐增加,塑性区逐渐向支杆周边发展。当节点荷载  $P=12.0$  kN 时,压支杆与弦杆相交处达到屈服强度,有一定的塑性变形,同时,塑性区向弦杆腹板扩展,如图 6(b)所示;当节点荷载  $P=23.1$  kN(极限荷载)时,塑性区已经布满弦杆翼缘和腹板的大部分面积,如图 6(c)所示,此时支杆轴向应力为 82.5 MPa;当节点荷载  $P=23.0$  kN(超过了极限荷载)时,塑性区已经布满弦杆翼缘和腹板,此时为桁架荷载-位移曲线的下降段,如图 6(d)所示。由上述桁架的塑性发展全过程可知:桁架节点发生局部的塑性变形到桁架的整体破坏,荷载还可以增加很多,仍有一定的强度储备,桁架最后的破坏是由节点的塑性变形过大导致的。本文中所得结论与文献[13]中的结论相符。

### 3 考虑焊缝与不考虑焊缝的比较

图 7(a)为桁架 2A 和桁架 2B 的下弦跨中底面中点处的荷载-挠度曲线。由图 7(a)可以看出,桁架 2A 的极限荷载(施加于节点的荷载)为 23.1 kN,此时桁架的最大挠度为 34.02 mm;桁架 2B 的极限荷载为 23.25 kN,此时桁架的最大挠度为 32.90 mm,两桁架极限承载力相差 0.5%。桁架 2A 和桁架 2B 在节点荷载为 12.0 kN 时,桁架的最大挠度分别为 8.89、8.77 mm,相差 1.3%;桁架 2A 和桁架 2B 在节点荷载为 23.1 kN 时,桁架的最大挠度分别为 34.02、28.20 mm,相差 17.1%。

图 7(b)为桁架 1A 和桁架 1B 下弦跨中底面中点处的荷载-挠度曲线。从图 7(b)中可以看出,桁架 1A 的极限荷载(施加于节点的荷载)为 24.0 kN,此时桁架的最大挠度为 25.20 mm;桁架 1B 的极限荷载为 24.3 kN,此时桁架的最大挠度为 23.40 mm,两桁架的极限承载力相差 1.25%。桁架

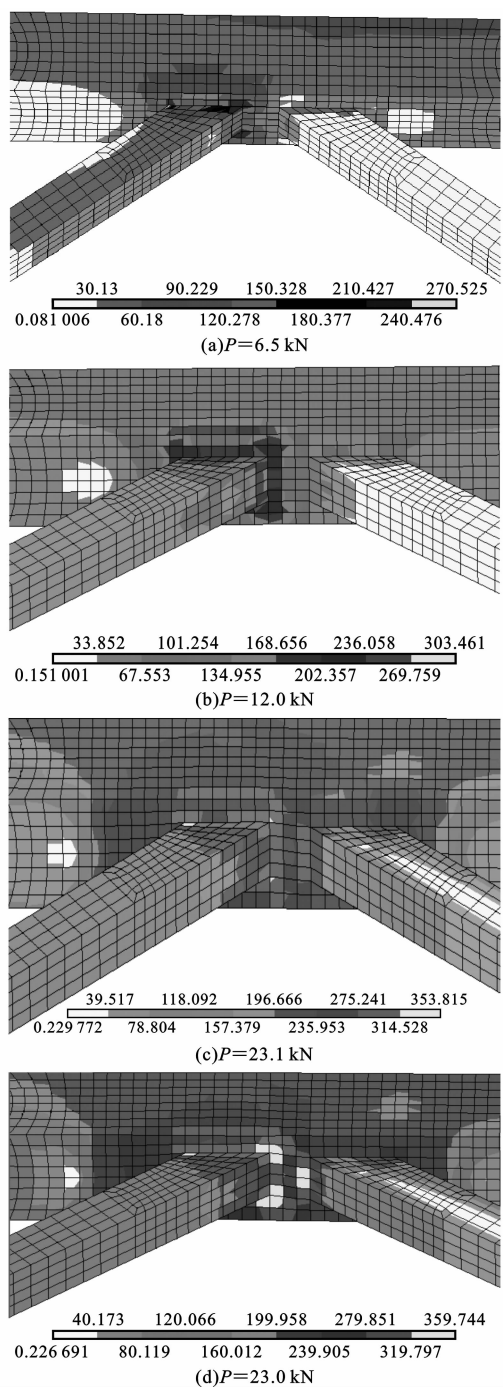


图 6 B 节点应力(单位:MPa)

Fig. 6 Stresses of Joint B (Unit: MPa)

1A 和桁架 1B 在节点荷载为 12.0 kN 时,桁架的最大挠度分别为 6.72、6.56 mm,相差 2.38%;桁架 1A 和桁架 1B 在节点荷载为 24.0 kN 时,桁架的最大挠度分别为 25.23、23.39 mm,相差 7.8%。

由上面桁架的比较可知:焊缝对桁架极限承载力的影响不大;在弹性阶段时,考虑焊缝影响的桁架和不考虑焊缝的桁架刚度相差不大,但在弹塑性阶段其刚度相差较大。

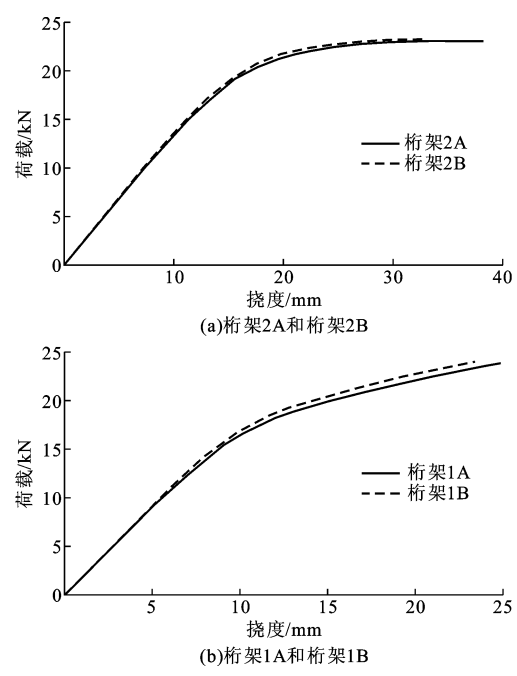


图 7 桁架荷载-挠度曲线 1

Fig. 7 Load and Deflection Curves 1 of Truss

### 4 不同桁架计算模型的比较

在设计荷载作用下,比较铰接(Link1)、刚接(Beam3)、壳单元考虑焊缝[Shell(h)]、壳单元不考虑焊缝(Shell)4 种计算模型。桁架 1 为高跨比为 1/10 的桁架,桁架 2 为高跨比为 1/12 的桁架。

#### 4.1 内力的比较

图 8 为桁架杆件的编号。表 2 为设计荷载 ( $P=12.0\text{ kN}$ ) 作用下,桁架 1 中各杆件的内力。表 3 为设计荷载 ( $P=12.0\text{ kN}$ ) 作用下,桁架 2 中各杆件的内力。

从表 2、3 可以看出:上下弦杆越靠近跨中杆件轴力越大,而对于腹杆,杆件越靠近跨中杆件轴力越小;在设计荷载作用下,各模型计算的杆件内力大小顺序为 Link1、Beam3、Shell、Shell(h),其轴力最大值(Link1)和最小值[Shell(h)]相差 4.15%。由此可得:用这 4 种模型计算的桁架杆件轴力相差较小。

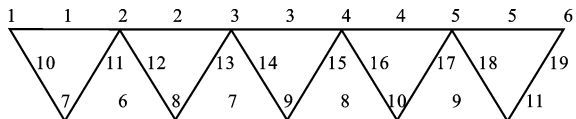


图 8 桁架杆件和节点的编号

Fig. 8 Number of Members and Joints of Truss

#### 4.2 变形的比较

以桁架 2 为例,用理想铰接模型(Link1)计算时,在标准荷载(9.0 kN)作用下,桁架的最大挠度

表 2 桁架 1 的杆件轴力

Tab. 2 Members Axial Force of Truss 1

杆件编号	1	2	3	6	7	10	11	12	13	14
Shell	−22.8	−58.5	−69.6	47.3	69.8	33.2	−33.7	15.6	−15.8	−0.49
Shell(h)	−22.9	−58.5	−69.6	47.3	69.8	33.1	−33.6	15.6	−15.8	−0.46
Link1	−23.9	−60.0	−72.0	48.0	72.0	33.9	−34.0	16.9	−17.1	−0.10
Beam3	−23.7	−58.6	−70.4	47.3	70.4	33.6	−32.9	16.0	−16.7	−0.13

表 3 桁架 2 的杆件轴力

Tab. 3 Members Axial Force of Truss 2

杆件编号	1	2	3	6	7	10	11	12	13	14
Shell	−28.5	−72.5	−86.3	58.9	86.7	37.0	−37.8	17.1	−17.9	−0.71
Shell(h)	−28.5	−72.5	−86.3	58.9	86.8	37.0	−37.8	17.1	−18.0	−0.69
Link1	−29.9	−74.9	−89.9	60.0	90.0	38.4	−38.5	19.1	−19.4	−0.22
Beam3	−29.5	−72.5	−87.1	58.5	87.2	37.8	−36.9	17.9	−18.8	−0.24

约为5.81 mm,变形与跨度比为 1/860;用 Beam3 单元建立的桁架刚接模型在标准荷载作用下的最大变形为5.60 mm,变形与跨度比为 1/892;用不考虑焊缝的壳元模型计算时,标准荷载作用下的最大挠度约为6.61 mm,变形与跨度比为 1/756;用考虑焊缝的壳元模型计算时,在标准荷载作用下的最大挠度约为6.50 mm,变形与跨度比为 1/769。

综上所述,4 种桁架计算模型刚度的大小顺序为 Beam3、Link1、Shell(h)、Shell,在标准荷载作用下,最大刚度(Beam3)与最小刚度(Shell)相差 15.2%,相差较大;桁架刚度(Link1)与桁架刚度(Shell)相差13.7%。文献[14]中指出:对采用间隙节点的管桁架,由于节点处的柔度较大,用铰接模型分析会低估整体桁架的变形,在标准荷载作用下,间隙节点的管桁架变形被低估了 12%~15%。本文中的结论与之相符。

4.3 荷载-挠度曲线的比较

本文中选取桁架下弦跨中节点 9,研究该节点的荷载-挠度曲线。图 9 为桁架 1 和桁架 2 的荷载-挠度曲线。

由图 9 可以看出:刚接桁架模型(Beam3)和铰接桁架模型(Link1)在设计荷载以前整体刚度基本相等;Shell 模型和 Shell(h)模型在设计荷载以前桁架整体刚度基本相等;而刚接模型、铰接模型与 Shell 模型、Shell(h)模型的刚度相差较大。

5 结 语

(1)本文中所研究的桁架发生了平面内弯曲变形,破坏模式为 K 型间隙节点处弦杆表面的塑性屈服破坏。从桁架节点局部变形的发生至整个桁架破坏仍有一定的承载力储备。

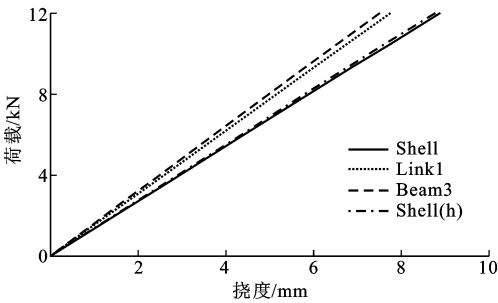
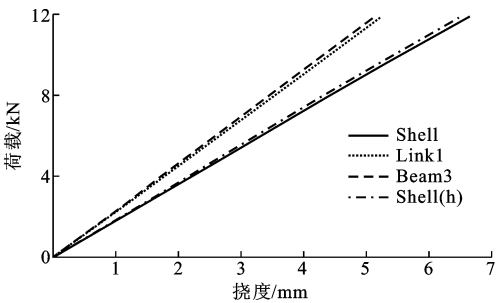


图 9 桁架荷载-挠度曲线 2

Fig. 9 Load and Deflection Curve 2 of Truss

(2)焊缝对桁架极限承载力的影响不大。在弹性阶段时,考虑焊缝影响的桁架刚度和不考虑焊缝影响的桁架刚度相差不大,但是在弹塑性阶段时,考虑焊缝的桁架刚度较不考虑焊缝桁架的刚度大。

(3)用 Link1、Beam3、Shell、Shell(h)建立的 4 种桁架模型求得的杆件内力相差不大,但是 4 种模型求得的桁架挠度相差较大。在标准荷载作用下,用铰接桁架模型模拟管桁架的变形时,桁架变形被低估了13.7%左右。

参考文献:

References:

[1] 丁玉坤,武振宇,张状南. K 型、KK 型搭接方管节点

- 的试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(4): 25-31.
- DING Yu-kun, WU Zhen-yu, ZHANG Zhuang-nan. An Experimental Study on Partially Overlapped SHS K-and KK-joints[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(4): 25-31.
- [2] 王素芳, 陈以一, 陈友泉, 等. 端板连接高强度螺栓群中和轴位置研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 45-54.
- WANG Su-fang, CHEN Yi-yi, CHEN You-quan, et al. Research on Neutral Axis Location of High-strength Bolts of End-plate Connections[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 45-54.
- [3] 武振宇, 武胜, 张耀春. 不等宽 K 型间隙方管节点承载力计算的塑性铰线法[J]. 土木工程学报, 2004, 37(5): 1-6.
- WU Zhen-yu, WU Sheng, ZHANG Yao-chun. Yield Line Method for Calculation of the Load-carrying Capacity of Stepped K-type Gapped RHS-joints[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(5): 1-6.
- [4] 王元清, 张勇, 石永久, 等. 吊索与钢管混凝土拱桥新型节点承载性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 55-58.
- WANG Yuan-qing, ZHANG Yong, SHI Yong-jiu, et al. Analysis of Load Capacity of New-style Joints Between Cable and Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 55-58.
- [5] 曹宝珠, 周绪红, 刘永健. 钢管混凝土桁架新型节点试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1): 45-48.
- CAO Bao-zhu, ZHOU Xu-hong, LIU Yong-jian. Experimental Research on New Joints of Concrete-filled Steel Tube Truss[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1): 45-48.
- [6] 武振宇, 张壮南, 丁玉坤, 等. K 型、KK 型间隙方钢管节点静力工作性能的研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(2): 32-38.
- WU Zhen-yu, ZHANG Zhuang-nan, DING Yu-kun, et al. Experimental Research on the Static Behavior of Square Hollow Section Gapped K- and KK-joints[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(2): 32-38.
- [7] 武振宇, 张耀春. 不等宽 T 型 CR 节点静力工作性能的研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(2): 53-55.
- WU Zhen-yu, ZHANG Yao-chun. Static Behavior of Stepped T-type CR Joints[J]. Industrial Construction, 2004, 34(2): 53-55.
- [8] 武振宇, 丁玉坤. KK 型搭接方管节点极限承载力的非线性有限元分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(2): 30-35.
- WU Zhen-yu, DING Yu-kun. Nonlinear Finite Element Analysis of Ultimate Bearing Capacity of Partially Overlapped SHS KK-joints[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(2): 30-35.
- [9] 武胜, 武振宇. 弦杆轴力作用下 K 型间隙方管节点静力性能的研究[J]. 钢结构, 2003, 18(2): 38-42.
- WU Sheng, WU Zhen-yu. Static Behavior of Gapped K-type RHS-joints Under Chord Axial Loading[J]. Steel Construction, 2003, 18(2): 38-42.
- [10] 刘永健, 周绪红, 刘君平. 矩形钢管混凝土 K 型节点受力性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(2): 36-42.
- LIU Yong-jian, ZHOU Xu-hong, LIU Jun-ping. Experiment on Force Performance of Concrete-filled Rectangular Steel Tube K-joints[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(2): 36-42.
- [11] 张壮南, 武振宇, 丁玉坤, 等. 弦杆轴向压力作用下 K 型、KK 型间隙方管节点静力工作性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(4): 32-37.
- ZHANG Zhuang-nan, WU Zhen-yu, DING Yu-kun, et al. An Experimental Study on the Static Behavior of Gapped SHS K- and KK-joints Under Axial Load[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(4): 32-37.
- [12] 武振宇, 张耀春. 直接焊接钢管节点静力工作性能的研究现状[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1996, 29(6): 102-107.
- WU Zhen-yu, ZHANG Yao-chun. Research Condition of Directly Welded Steel Tube About Static Behavior[J]. Journal of Harbin University of Architecture and Engineering, 1996, 29(6): 102-107.
- [13] 沈祖炎, 罗永峰, 陈扬骥. 矩形钢管屋架的试验研究[J]. 钢结构, 1995, 10(1): 58-61.
- SHEN Zu-yan, LUO Yong-feng, CHEN Yang-ji. Experimental Study of Rectangular Tubular Steel Roof Truss[J]. Steel Construction, 1995, 10(1): 58-61.
- [14] PACKER J A, HENDERSON J E. 空心管结构连接设计指南[M]. 曹俊杰, 译. 北京: 科学出版社, 1997: 69.
- PACKER J A, HENDERSON J E. Design Guide for Connection of Hollow Tube Structure[M]. Translated by CAO Jun-jie. Beijing: Science Press, 1997: 69.