

考虑接触影响时钢管结构套管插接 节点承载力的数值分析

张凤杰¹ 刘旭² 朱胡华³ 张丽莉³ 蒋秀根¹ 剧锦三¹

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 海淀区房屋土地经营管理中心, 北京 100037;
3. 北京市房山区税务局, 北京 102488)

摘要 为了得到可靠的套管插接节点设计参数,采用 ANSYS 有限元程序建立了非线性有限元模型,对考虑接触影响时套管插接节点承载力进行了数值分析,分析了相关结构参数对节点承载力的影响。结果表明:管节点承载力及刚度均随套管长径比和主、套管长度比的增大而增大;主管与套管厚度相等时管节点承载力最大;管间间隙 0.5~2.0 mm 范围内改变主、套管直径配合对管节点承载力影响不大。

关键词 套管节点;非线性分析;承载力;接触

中图分类号 TU 317.1

文章编号 1007-4333(2007)05-0091-06

文献标识码 A

Numerical analysis of the load on casing plug joint of steel tube structure with consideration of contact effect

Zhang Fengjie¹, Liu Xu², Zhu Huhua³, Zhang Lili³, Jiang Xiugen¹, Ju Jinsan¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. House & Land Management Center of Haidian District, Beijing 100037, China;
3. Beijing Local Taxation Bureau, Beijing 102488, China)

Abstract A nonlinear finite element model was established and numerical analysis of casing plug joints of steel tubular was performed by the ANSYS software. The law of load capability was investigated by changing the ratio of diameter and length (l/d) and the ratio of the casing length and the main tube length (l/L), respectively. The influences of the casing thickness and the gap between main tube and casing for the load capability were also analyzed. The results indicated that the load capability and stiffness of the joint were both increased with the increases of both ratios of the l/d and the l/L . When the main tube thickness is equal to casing thickness, the load capability of joints will be the best. In terms of the gap between the main tube and casing, the results indicated the effect of the gap of 0.5 - 2.0 mm on the load capability is not prominent.

Key words casing plug joint; nonlinear analysis; load-carrying capability; contact

套管节点是指不借助焊接或螺栓等传统连接方式,采用长度较短、截面形状与受弯主管截面形状相同的辅管通过套插连接多个主管,或将主管固定于固支辅管支座的一种节点型式。

套管节点可以有 2 种形式:外包套管节点和内插套管节点。外包套管节点是指辅管内径大于主管外径、套插于主管之外的套插连接方式;内插套管节点是指辅管外径小于主管外径、套插于主管之内的

套插连接方式。

套管节点通常用于受弯构件的连接或固定,受弯构件即主管的弯矩和剪力通过与辅管对角接触部位的接触力传递给辅管,从而达到传递荷载的目的。主管承受的轴压力由主管之间或主管与支座之间的直接接触面传递。

辅管的套插长度和辅管的刚度是决定套管节点承载力的主要因素,辅管壁厚和主辅管之间的间歇

收稿日期: 2006-11-17

基金项目: “十一五”科技支撑计划课题(2006BAK04A03)

作者简介: 张凤杰,硕士研究生;蒋秀根,教授,通讯作者,主要从事结构工程研究, E-mail: jiangxg@cau.edu.cn

对节点承载力也有一定的影响。工程中可以节点承载力不低于与主管长度相同的固支单管作为设计依据。节点的主要设计参数是辅管长径比和辅管与主管的长度比。

套管插接节点是一种最直接也最古老的杆件结构节点形式,不需要附加的螺栓、销钉或焊接,连接非常方便,常被用于受力不大的日常生活结构之中;然而,由于节点的承载力和刚度完全依赖于杆管之间的接触力(管间挤压力和摩擦力),节点附近的杆件截面存在很大的应力集中现象,容易造成薄壁管件的局部屈曲,再加上杆管之间的摩擦力大小受许多因素的影响,因此节点的受力性能分析非常复杂,使这种最为简单的节点型式一直未能在工程结构中得到广泛应用。

随着薄壁轻钢结构的广泛使用,套管插接节点这种节点型式已经越来越多地出现在诸如轻钢钢管温室结构中,该型式节点通常用来作为温室结构的钢管柱脚和钢管的连接。在结构荷载较小的门式刚架民用建筑结构中,这种节点也偶尔见到。

钢结构节点型式众多,学术界和工程界一直将研究重点放在使用或不借助辅助板件、通过螺栓或焊缝连接的各类节点的性能和设计方法上^[1-10]。节点性能的研究方法以实验方法和以有限元为代表的数值方法为主,也有基于各类力学模型的简化分析法。尽管在温室工程中套管插接节点已被广泛运用,但对其性能的研究尚未见报导,各类结构设计规范^[11]也未对套管插接节点的设计要求作出明确的规定或建议。

本文中非线性有限元为研究方法^[12-14],考虑结构材料非线性、几何非线性和边界非线性^[15-18],对主管固定于固支辅管支座的外套管节点性能及设计参数的确定方法进行研究。

1 有限元模型

1)材料。材料为各向同性,采用理想弹塑性本构模型。材料参数:屈服强度 235 MPa,弹性模量 206 GPa,泊松比 0.3。

2)单元模型。选取薄板 8 节点单元 shell93。该单元适合于曲面壳结构的分析,每个节点有 6 个自由度——沿 x 、 y 、 z 方向的平动和绕 x 、 y 、 z 轴的转动。模型可以考虑平面方向的二次变形,具有材料塑性、应力刚化、大变形和大应变的特性。

3)结构模型与加载方式。节点模型简化为:套

管固支于支座,主管直接内插于外套管内。为保证结构的约束效应,主管 A 点与套管单点简单连接(图 1)。为了防止集中加载可能导致的杆端局部变形较大,甚至导致杆件局部屈曲的现象,经过多方案的分析对比,采用了在主管自由端截面两侧施加一对集中荷载的加载方式(图 2)。

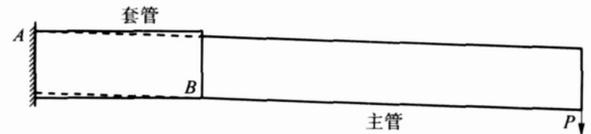


图 1 节点结构模型简图

Fig. 1 Simplified model of the joint

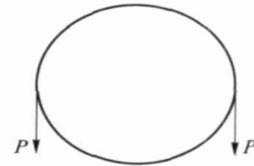


图 2 杆端加载方式

Fig. 2 Loads on end cross sections of main tube

4)接触方式。选择柔体对柔体的面对面接触单元(图 3),目标面采用 target170 单元,接触面采用 contact174 单元。

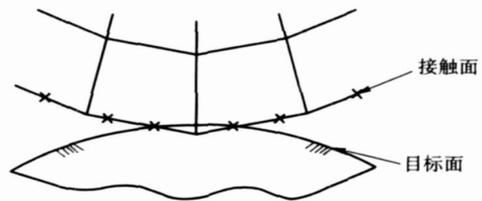


图 3 模型面对面接触单元

Fig. 3 Surface-to-surface contact pair

应用接触向导建立套管节点接触模型,设置套管与主管上半圆柱面和下半圆柱面 2 个接触对(图 4)。



图 4 套管节点接触对

Fig. 4 Contact pair of tube joints

2 模型验证

为了验算本套管插接节点有限元分析模型的适用性,利用 ANSYS 程序对其进行了验证,结果见图 5 和 6。主管长 3 000 mm,外径 200 mm,壁厚 5 mm,固支,右端加载。

从图 5(a)可以看出,采用线弹性模型时,结构挠度随荷载的增大线性增大;而考虑材料非线性时,弹性阶段结构挠度与线弹性模型的结果相差不大,但进入屈服状态后其刚度迅速降低。

从图 5(b)可以看出,荷载作用过程中,加载初期是否考虑几何非线性对套管插接节点的受力情况影响不大,但进入屈服阶段时,不考虑几何非线性时结构挠度明显大于考虑几何非线性时。这说明考虑几何非线性时结构因为局部发生大变形或屈曲而停止了迭代。

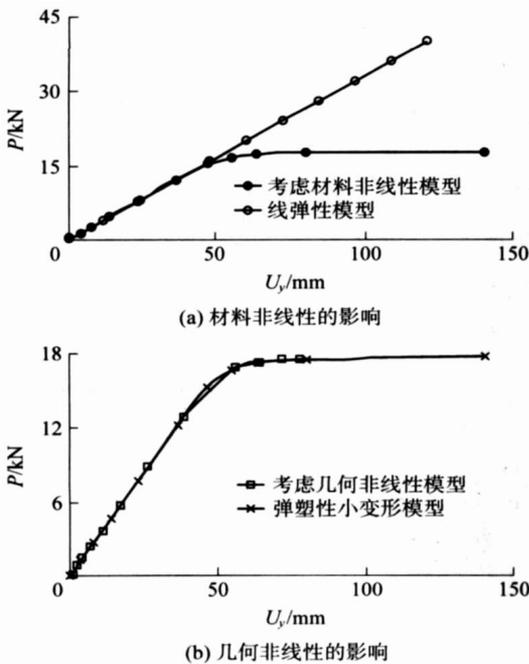


图 5 单管荷载-杆端挠度 ($P-U_y$) 曲线

Fig. 5 Load-deflection curve of single tube: (a) in influence of material nonlinearities, (b) in influence of geometric nonlinearity

从图 6 可以看出,考虑接触效应时,与单管相比套管承载力显著提高,而采用耦合方法时结构承载力明显降低。这是因为考虑接触问题时建模时加入了接触单元,避免了耦合点的设置,减少了应力集中点的出现,这种情况更接近变形结构的实际工况。考虑接触效应时,套管接触节点刚度与单管相比明显降低。

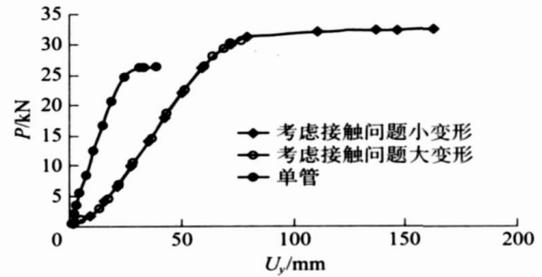


图 6 考虑接触问题时的套管节点承载力与单管承载力
Fig. 6 Comparison of load capabilities between single tube and tube structure with consideration of contact effect

由于接触力中的摩擦力也是接触效应的一部分,理论上主辅管间滑动摩擦系数的取值对套管节点的性能也存在一定的影响,因此本研究除了将钢与钢之间的摩擦系数取值为通常的 0.12 以外,还考虑工程中钢管表面可能由于锈蚀或油渍污染、潮湿等原因导致钢材之间摩擦系数发生变化,分析了摩擦系数从 0~0.30 之间的不同取值对节点性能的影响。分析结果表明,摩擦系数的取值对于受弯结构套管节点的性能影响不大,因而在实际分析中,将钢-钢之间的滑动摩擦系数取为 0.12。

综上,验证结果反映了结构的实际工作性能和特点,模型可用于实际分析。

3 套管节点参数对结构承载力的影响

3.1 结构模型

边界条件:套管一端完全固支,主管 A、B 2 点附近区域与套管接触,主管 A 点固定。结构计算简图见图 1。不同分析模型主管长度分别为 2 000、3 000、4 000 和 5 000 mm。

3.2 套管长径比对节点性能的影响

设套管长 l , 外径 d , 长径比 l/d , 模型套管参数见表 1, 管节点计算结果见图 7(a)。

考虑结构几何非线性、材料非线性和接触非线性的影响,计算套管长径比对节点结构刚度和承载力的影响规律,结果见图 7。可以看出:

1) 随着套管长径比的增大,节点结构刚度增大,且越来越接近单管刚度。模型 11 ($l/L = 5.66$) 结构刚度与单管最接近(图 7(a))。

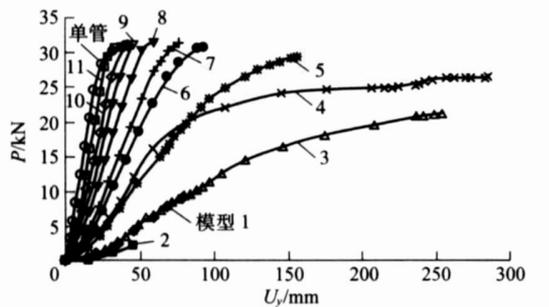
2) 随着套管长径比的增大,节点结构承载力逐渐变大。当套管长径比为 1.32 时,结构承载力与单管承载力最接近;套管长径比大于 2.00 时,结构承载力趋于水平(图 7(b)),这说明当套管长径比达到

表1 套管参数

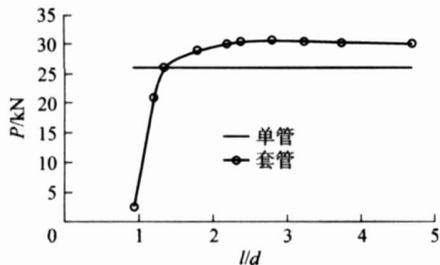
Table 1 Parameters of casing (main tube length $L = 2\,000\text{ mm}$)

模型	套管长 l/mm	长径比 l/d
1	200	0.94
2	250	1.18
3	280	1.32
4	350	1.65
5	450	2.12
6	500	2.36
7	600	2.83
8	700	3.30
9	800	3.77
10	1 000	4.72
11	1 200	5.66

注:主管长 2 000 mm, 外径 200 mm, 壁厚 5 mm; 套管外径 212 mm, 壁厚 5 mm; 下表同。



(a) 不同套管长径比条件下节点 $P-U_y$ 曲线 (主管长 $L=2\,000\text{ mm}$)



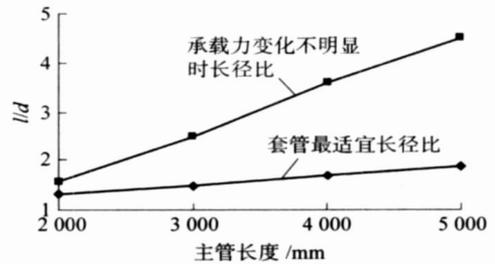
(b) 节点结构承载力与套管长径比 l/d 的关系

图7 不同套管长径比对节点结构刚度和承载力的影响
Fig. 7 Influence of different ratios of casing length and casing diameter (l/d) ($L = 2\,000\text{ mm}$) on stiffness and load capability: (a) load-displacement curves of tube structure under different l/d , (b) relation of load capability l/d

一定值时,再增加套管长度已经没有必要。

主管长度分别为 3 000、4 000、5 000 mm 时套管长径比对结构性能的影响规律与主管长 2 000 mm

时相同。套管最适宜长径比和承载力变化不明显时长径比与主管长度的关系见图 8。



套管最适宜长径比指保证主管屈服且充分发挥其承载力性能时的套管最小长径比;承载力变化不明显时的长径比指增加套管长度对提高整体结构的承载力作用不大时的套管最小长径比。

图8 套管长径比与主管长度的关系

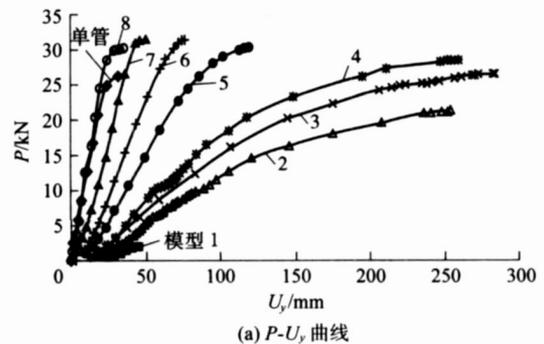
Fig. 8 Relation of l/d and length of main tube

3.3 套管与主管长度比对节点性能的影响

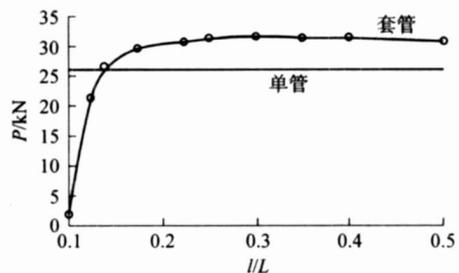
为获得与单管相当的节点结构承载力,改变套管与主管长度比 l/L , 计算套管插接节点结构承载力和刚度,计算参数见表 2,结果见图 9。

可以看出:

- 1) 结构刚度随着套管与主管长度比 l/L 的增大而增大,且越来越接近单管刚度(图 9(a))。
- 2) 套管节点结构承载力低于单管时,随 l/L 的增大而增大,且变化较快;当其超过单管承载力后增大幅度变缓,且当 l/L 达到一定值(约 0.25,见图 9



(a) $P-U_y$ 曲线



(b) 结构承载力的变化

图9 套管与主管长度比 l/L 与结构承载力的关系
Fig. 9 Relationship of load capability and ratio of casing length and main tube length (l/L) ($L = 2\,000\text{ mm}$)

(b))时,节点结构承载力趋于水平,说明此时再增加套管长度已经没有必要。

主管长度分别为 3 000、4 000、5 000 mm 时 l/L 对节点结构性能的影响规律与此相同,此时与单管承载力相当的适宜 l/L 见图 10。

表 2 管节点计算参数

Table 2 Parameters of tube ($L = 2\ 000\text{ mm}$)

模型	套管长度 l/mm	套管与主管长度比 l/L
1(单管)		
2	200	0.100
3	250	0.125
4	280	0.140
5	300	0.150
6	400	0.200
7	500	0.250
8	700	0.350
9	1 200	0.600

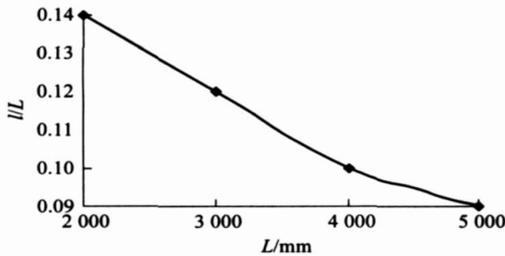


图 10 套管与主管长度比 l/L 与主管长度的关系

Fig. 10 Relationship of l/L and length of main tube

3.4 套管壁厚对节点性能的影响

套管壁厚对套管刚度有很大影响,采用不同壁厚的套管自然影响到套管插接节点的性能。为了分析套管壁厚对节点性能的影响,选择与单管结构承载力接近的模型,改变套管壁厚(表 3),对套管插接

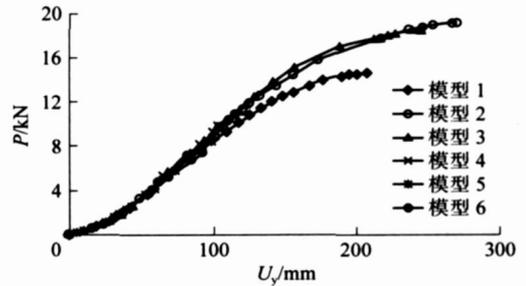
表 3 套管参数

Table 3 Parameters of casing

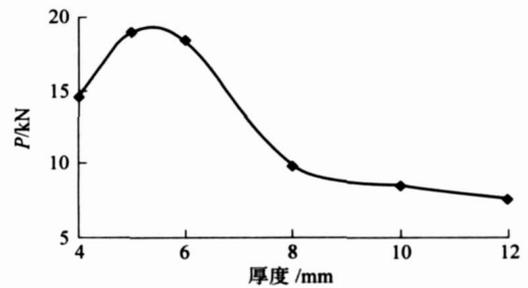
模型	外径/mm	壁厚/mm	模型	外径/mm	壁厚/mm
1	210	4	4	218	8
2	212	5	5	222	10
3	214	6	6	226	12

节点结构承载力和刚度进行有限元分析。主管长 3 000 mm,壁厚 5 mm,外径 200 mm;套管长 350 mm。不同壁厚结构的荷载-挠度曲线见图 11(a),结构承载力随套管壁厚的变化见图 11(b)。

由图 11(a)可以看出,加载初期,当结构处于弹性阶段时,套管壁厚对节点刚度影响不大,套管壁厚的增加并不能提高结构的承载力;当套管壁厚大于主管时结构承载力反而下降(图 11(b)),原因可能是:当套管壁厚增加时,主管与其接触部位的挤压力增加,导致主管出现应力集中,增加了主管发生局部屈曲的机会;套管壁厚与主管壁厚相同时,结构承载力最大(图 11(b))。



(a) $P-U_y$ 曲线



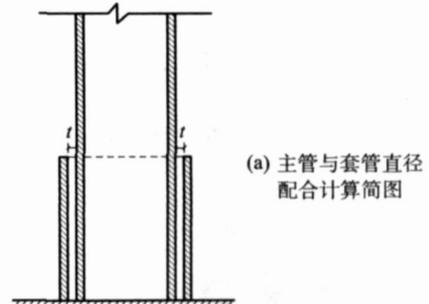
(b) 承载力与套管壁厚的关系

图 11 不同套管壁厚条件下承载力的变化规律

Fig. 11 Change of load capability with different thickness of casing: (a) load-deformation curves of $P-U_y$, (b) relation of load capability and thickness of tube

3.5 管间间隙对节点性能的影响

模型参数:主管长 3 000 mm,外径 200 mm,壁厚 5 mm;套管长 350 mm,外径 212 mm,壁厚 5 mm。模型 1、2、3 主管与套管管间间隙分别为 0.5、1.0、2.0 mm。计算简图及结果见图 12。可以看出,管间间隙 0~2 mm 时,改变直径配合对节点结构承载力和刚度影响并不明显,随着配合间隙的增大,承载力略呈下降趋势。在实际工程中,可以根据钢管管材



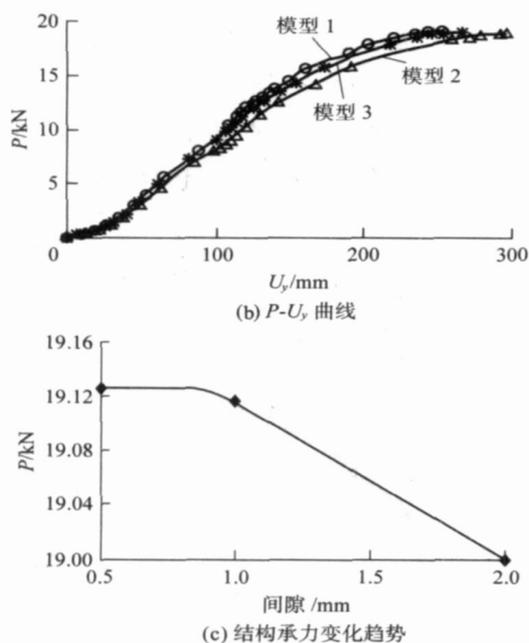


图 12 管间间隙对节点性能的影响

Fig. 12 Influence of capability of tube: (a) simplified model of the joint, (b) curve of $P-U_y$, (c) change of load capability of tube

的供应情况适当改变配合。

4 结论

1) 采用考虑材料非线性、几何非线性和边界非线性的有限元模型可以较好地分析套管插接节点的受力性能。

2) 在套管长度满足一定条件的情况下, 套管插接节点可以用于受力不大的受弯钢管结构。

3) 为了保证节点的性能满足结构受力要求, 套管的长径比宜在 1.5~2.0 之间, 套管长度不宜小于主管长度的 0.15, 套管壁厚宜与主管壁厚相同, 套管内径以能将主管插入为宜。

参 考 文 献

[1] 朱庆科. K型圆钢管相贯节点极限承载力有限元分析[D]. 广州:华南理工大学, 2002

[2] 朱庆科, 舒宣武. 平面 K型钢管相贯节点极限承载力有限元分析[J]. 华南理工大学学报, 2002, 30(12): 62-66

[3] 舒宣武, 朱庆科. 空间 KK型钢管相贯节点极限承载

力有限元分析[J]. 华南理工大学学报, 2002, 30(10): 102-107

- [4] 朱邵宁, 舒兴平. 空间 KK型圆钢管相贯节点极限承载力非线性有限元分析[J]. 湖南大学学报, 2003, 30(6): 109-111
- [5] 武振宇, 谭慧光, 张耀春. 不等宽 T型方管节点的精力工作性能的研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(6): 14-19
- [6] 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): 38-43
- [7] 武胜, 武振宇. 等宽 K型间隙方管节点静力工作性能的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(13): 269-276
- [8] 武振宇, 张耀春. 直接焊接 T型钢管节点性能的试验研究[J]. 钢结构, 1999, 14(2): 36-40
- [9] 王元清, 曾文平, 贺东哲. 圆管与工字钢混合空间管节点非线性承载分析[J]. 清华大学学报, 2002, 42(S1): 101-105
- [10] 王元清, 石永久, 祝磊, 等. 方管圆管混合空间钢管节点承载性能的非线性分析[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(4): 72-77
- [11] GB17-88 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1989
- [12] 王勳成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 545-702
- [13] Zienkiewicz O C, Taylor R L. The Finite Element Method Volume 2[M]. 5th Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000: 345-589
- [14] Ted Belytschko, Wing kam liu, Brian Moran. 连续体和结构的非线性有限元[M]. 庄茁, 译. 北京: 清华大学出版社, 2003: 230-340
- [15] 蔡中义, 李明哲, 陈庆敏. 大变形中摩擦接触问题的数值模拟及应用[J]. 应用力学学报, 2002, 19(2): 1-5
- [16] 崔海涛, 马海全, 温卫东. 弹性接触问题的形状优化设计方法[J]. 应用力学学报, 2004, 21(6): 83-86
- [17] 刘恭忍, 胡坤, 章继光. 二维弹性大变形接触问题的实用有限元分析[J]. 西安理工大学学报, 1995, 11(2): 122-129
- [18] 温卫东, 高德平. 接触问题数值分析方法的研究现状与发展[J]. 南京航空航天大学学报, 1994, 26(5): 664-675