

# Stress Concentration Analysis of the X-Type Steel Pipe's Joints

Ying Zhang\*, Honggang Lei#, Yajie Yan, Bin Qiu

College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi  
Email: 632981830@qq.com, \*15536606806@163.com, #lhgang168@126.com

Received: Feb. 19<sup>th</sup>, 2018; accepted: Mar. 5<sup>th</sup>, 2018; published: Mar. 14<sup>th</sup>, 2018

## Abstract

At present, the X-type steel pipe is widely used in China and has broad development prospect. In this paper, ABAQUS is used to analyze the stress concentration of X-type steel pipe. We quantitatively discussed how five geometric parameters influence the stress concentration factor X-type steel tube node, and the results showed that as the head pipe's width  $B$  and branch pipe's thickness  $t$ , branch pipe's width  $b$ , and the intersection angle  $\theta$  of head pipe and branch pipe increase, the stress concentration factor also increases; and as the head pipe's thickness  $T$  increases, the stress concentration factor decreases, and the calculating formula of the stress concentration factor is obtained at the same time. The formula has a certain reference value to the future similar selection of geometric parameters in the design of the node, especially to the establishment of the hot fatigue stress amplitude method.

## Keywords

X-Type Joints, Finite Element Analysis, Stress Concentration Factor

# 大跨空间结构X型方钢管相贯节点应力集中分析

张颖\*, 雷宏刚#, 闫亚杰, 邱斌

太原理工大学, 建筑与土木工程学院, 山西 太原  
Email: 632981830@qq.com, \*15536606806@163.com, #lhgang168@126.com

收稿日期: 2018年2月19日; 录用日期: 2018年3月5日; 发布日期: 2018年3月14日

\*第一作者。  
#通讯作者。

## 摘要

目前X型方钢管在我国应用十分广泛,具有广阔的发展前景。本文借助ABAQUS对X型方钢管相贯节点的应力集中进行分析。我们定量探讨了5个几何参数对X型方钢管节点应力集中系数的影响,结果表明随着主管宽度 $B$ 和支管厚度 $t$ 、支管宽度 $b$ 、主管与支管间夹角 $\theta$ 的增大,应力集中系数也随之增大;随着主管厚度 $T$ 的增大,应力集中系数反而随之减小,同时得出了应力集中系数的计算公式,该公式对以后类似节点设计中几何参数的选取具有一定的参考价值,尤其是对建立热点应力幅疲劳方法。

## 关键词

X型相贯节点,有限元分析,应力集中系数

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来随着钢管结构生产技术的不断成熟,方钢管因具有平直切割和受力性能良好的优点而被广泛应用于工业厂房、体育馆、航站楼、海洋平台结构等大跨空间结构。方钢管中的相贯节点更是应用广泛,如太原南站屋架结构,见图1、图2所示。廖贤对X型相贯节点抗弯极限承载力进行研究,得出各影响因素对节点抗弯极限承载力的影响规律[1];方敏勇等通过“屈服线模型”方法对方管X型节点极限承载力进行研究,推导出考虑薄膜效应和未考虑薄膜效应影响的极限承载力计算公式[2];张婷婷等用有限元方法对X型方管相贯节点几何参数对刚度的影响进行分析,得出影响节点抗弯刚度的主要参数是支管与主管宽度比和主管宽厚比[3]。总结前人对焊接X型方钢管相贯节点的研究成果,我们发现其研究主要集中在管节点抗弯承载力和刚度等方面[4]。同时,我国《钢结构设计规范》(GB50017-2003)[5]中钢管结构部分只给出了管节点承载力的计算公式,并未给出有关热点应力或SCF的计算公式,因此了解管节点几何参数对应力集中系数的影响对于评价管节点的疲劳寿命具有深远的意义[6]。



Figure 1. Taiyuan south station

图1. 太原南站

## 2. X 型焊接方钢管节点的有限元分析

当方钢管主管两侧连有位于同一轴线的两根支管时, 则称为平面 X 型方钢管相贯节点, 其可分为正交( $\theta = 90^\circ$ )和斜交( $\theta < 90^\circ$ )两种形式, 如图 3 所示。

采用 ABAQUS 有限元建模对 X 型方钢管相贯节点进行分析, 屈服强度为 235 MPa, 弹性模量  $E = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ , 泊松比为 0.3,  $\sigma = 1 \text{ MPa}$ 。几何模型边界条件为主管两端固结, 支管两端施加大小相等的轴向拉力[7]。

几何参数模型如图 4 所示。其中  $T$  为主管壁厚,  $B$  为主管宽度,  $L$  为主管长度;  $t$  为支管壁厚,  $b$  为支管宽度,  $l$  为支管长度,  $\theta$  为主管与支管间夹角且各参数满足《钢管结构技术规程》(CECS280:2010) [8] 中矩形管节点几何参数的规定范围。



Figure 2. Application example

图 2. 应用实例

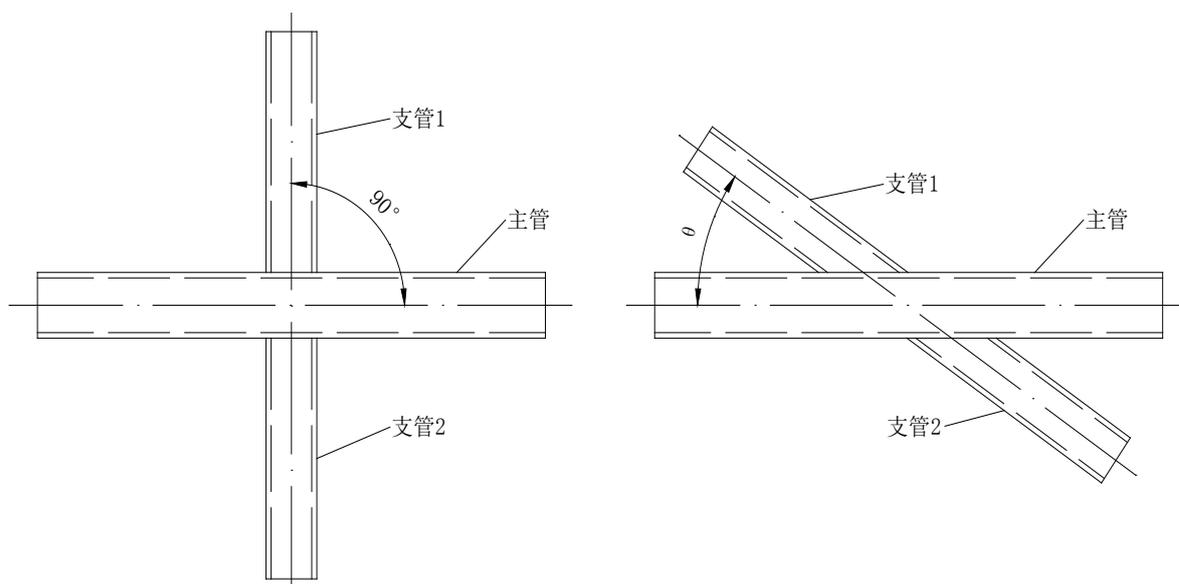


Figure 3. Square plane X-type-type-phase node

图 3. 方管平面 X 型相贯节点

在管节点应力集中分析中，壳单元跟空间实体单元都被用来模拟节点。Lee 和 Bowness 发现，由于弯曲应力的影响，管壁内外表面的应力大小不一致，壳单元并不能反映这种差异[9]，所以本文采用实体单元 C3D8R——八结点线性六面体进行模拟。

为使计算结果精确，本文采用分区法对模型进行网格划分，即主管和支管焊缝处应力较大的地方为精密网格区，在远离焊缝处应力较小的地方为稀疏网格区[10]。如图 5 所示。

### 3. 结果分析与处理

图 6 是在主管宽度  $B = 140$  mm，主管厚度  $T = 9$  mm，主管长度  $L = 2000$  mm；支管宽度  $b = 100$  mm，支管厚度  $t = 3$  mm，支管长度  $l = 800$  mm，轴向拉应力为 1 MPa 时，根据 ABAQUS 建立有限元模型得到的应力云图，明显看出最大应力出现在焊缝的焊趾处，数值为 2.698 MPa。

承受轴向荷载的 X 型方管节点的应力集中系数公式为：

$$SCF = \frac{\sigma_{HSS}}{\sigma_{NOM}}$$

(式中  $\sigma_{HSS}$  为支管热点应力， $\sigma_{NOM}$  为支管名义应力)。

一般在轴力作用下，名义应力定义为：支管承受的轴力与支管横截面积的比值。

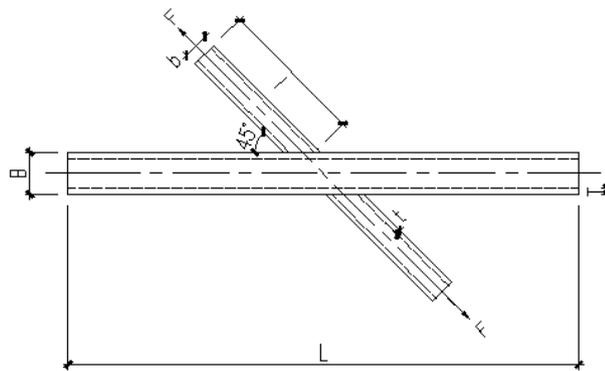


Figure 4. Geometric parameter model

图 4. 几何参数模型

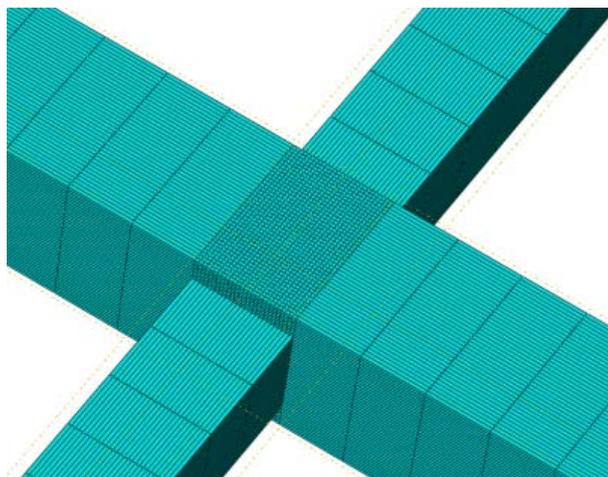


Figure 5. Weld at the precision grid area

图 5. 网格划分

### 3.1. 单因素分析

为了分析各个几何参数对 X 型相贯节点应力集中系数的影响, 本文根据《钢管结构技术规程》有关规定:  $b/B \geq 0.25$ ,  $0.5 \leq h/b \leq 2$ ,  $B/T, H/T \leq 35$  (其中  $b, h, t$  为支管宽、高、壁厚;  $B, H, T$  为主管宽、高、壁厚), 采用 25 组不同尺寸进行有限元分析, 分别得出应力集中系数 SCF 与 X 型方钢相贯节点尺寸参数  $B, b, T, t, \theta$  之间的关系, 通过回归分析进行曲线拟合, 如图 7~图 11 所示。

以上曲线图表明: 随着主管厚度  $T$  的增大, 应力集中系数  $SCF$  整体呈现逐渐减小的趋势。

随着主管宽度  $B$  和支管厚度  $t$ 、支管宽度  $b$  的增大, 应力集中系数  $SCF$  是大致上升的趋势, 总体特征接近线性分布规律。

当  $\theta = 45^\circ$  时, 对  $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$  时的影响因子分别是 0.83、1.24、1.30、1.36。

对以上曲线关系进行拟合, 分别得到应力集中系数计算公式为:

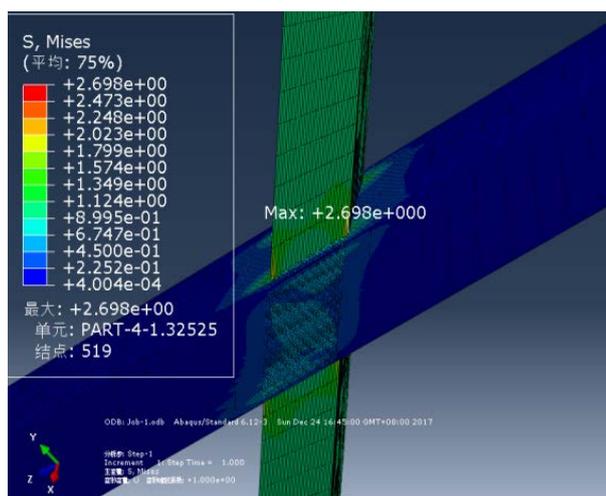


Figure 6. Joint deformation and stress distribution diagram under axial load

图 6. 轴向荷载作用下节点变形及应力分布图

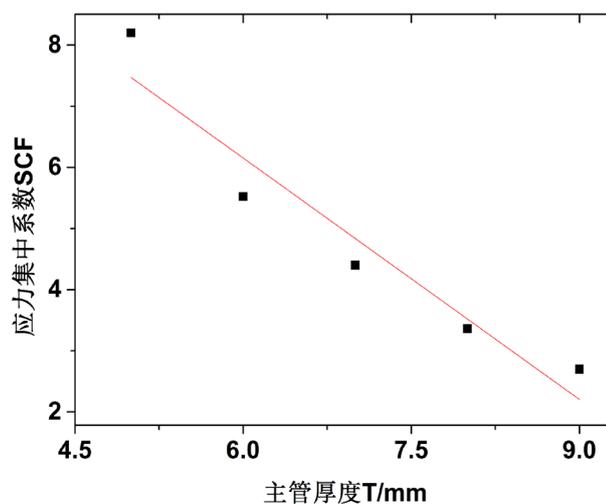


Figure 7. The thickness of the corresponding SCF curve

图 7. 主管厚度  $T$  对应的 SCF 曲线图

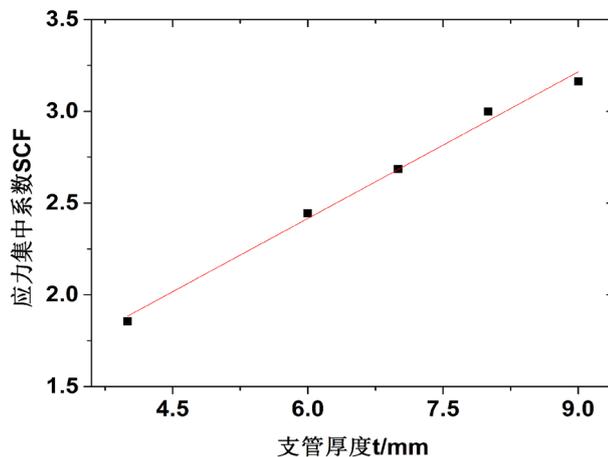


Figure 8. Branch pipe thickness corresponding to the SCF curve

图 8. 支管厚度  $t$  对应的 SCF 曲线图

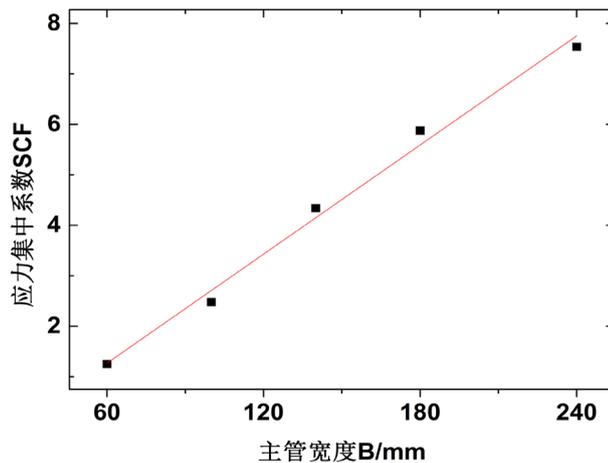


Figure 9. The width of the corresponding SCF curve

图 9. 主管宽度  $B$  对应的 SCF 曲线图

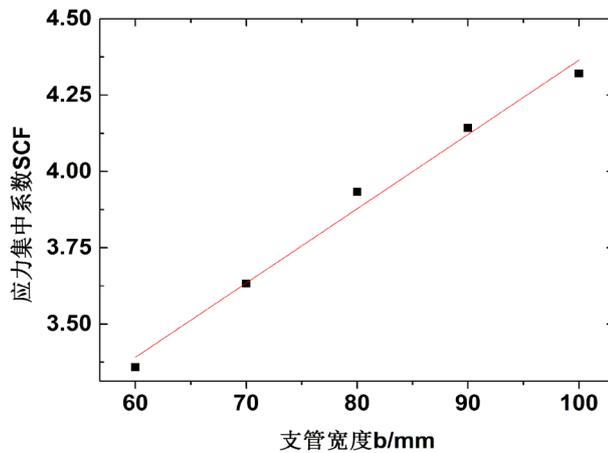


Figure 10. Pipe width corresponds to the SCF curve

图 10. 支管宽度  $b$  对应的 SCF 曲线图

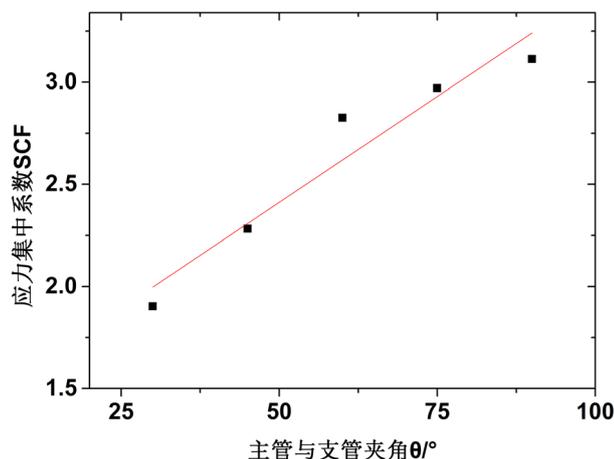


Figure 11. Pipe width corresponds to the SCF curve

图 11. 支管宽度  $b$  对应的 SCF 曲线图

1) SCF 与主管厚度  $T$

$$SCF = 14.0568T - 1.317 \quad R^2 = 0.90089$$

2) SCF 与支管厚度  $t$

$$SCF = 0.81895t + 0.26624 \quad R^2 = 0.99131$$

3) SCF 与主管宽度  $B$

$$SCF = -0.89233B + 0.00194 \quad R^2 = 0.98853$$

4) SCF 与支管宽度  $b$

$$SCF = 1.9306b + 0.00147 \quad R^2 = 0.98564$$

5) SCF 与主管与支管夹角  $\theta$

$$SCF = 1.3754\theta + 0.2073 \quad R^2 = 0.90945$$

### 3.2. 多因素分析

由于只通过上述四个单因素尺寸变化拟合的应力集中系数计算公式还不够精确，故有必要通过多因素变化分析得出更精准的应力集中系数计算公式。因此以  $\alpha = B/T$ ， $\beta = b/t$  为参数，得出不同情况下对应的 SCF 应力集中系数值。表 1 中 X 型方钢管相贯节点应力集中系数值最小为 1.252，最大值为 8.203，均值为 3.63。

图 12 为  $\beta = 33.33$  时不同  $\alpha$  值所对应的 SCF 系数，SCF 值随着  $\alpha$  的增大而增大。拟合的应力集中系数计算公式为：

$$SCF = -4.2642\alpha + 0.43597 \quad R^2 = 0.9821$$

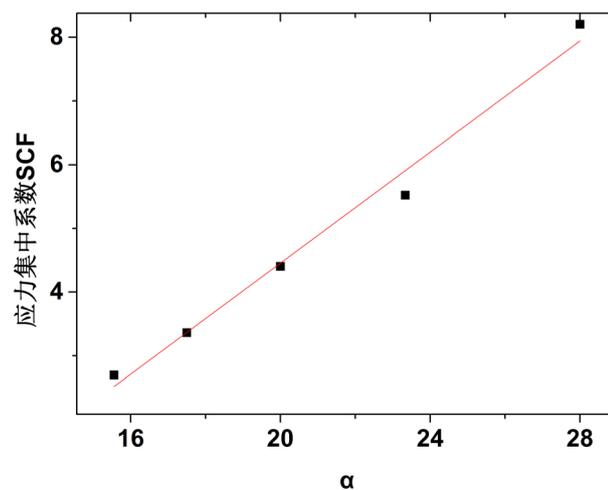
图 13 为  $\alpha = 20$  时不同  $\beta$  值所对应的 SCF 系数，曲线大致呈线性趋势，SCF 值随着  $\beta$  的增大而增大。拟合的应力集中系数计算公式为：

$$SCF = 1.9306\beta + 0.07302 \quad R^2 = 0.98564$$

根据以上  $\alpha$ 、 $\beta$  值跟 SCF 系数的关系，建立三维坐标系，对所有数据进行回归分析，得到图 14 曲面，结果表明：当  $\alpha$  增大、 $\beta$  减小时，SCF 系数随之增大；当  $\beta$  增大、 $\alpha$  减小时，SCF 系数也同样呈现增大趋

**Table 1.** The stress concentration coefficient table corresponding to  $\alpha$  and  $\beta$ ,  $\theta$   
**表 1.** 不同  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\theta$  对应的应力集中系数表

模型编号	$\alpha$	$\beta$	$\theta/^\circ$	SCF
1	0.75	0.71	45	9.62
2	0.5	0.71	45	5.523
3	0.3	0.71	45	2.38
4	0.25	0.71	45	1.758
5	0.214	0.71	45	1.501
6	0.333	0.667	45	1.856
7	0.5	0.667	45	2.444
8	0.583	0.667	45	2.686
9	0.667	0.667	45	2.999
10	0.75	0.667	45	3.162
11	0.67	1	45	1.252
12	0.67	0.6	45	2.476
13	0.67	0.429	45	4.338
14	0.67	0.333	45	5.876
15	0.67	0.25	45	7.532
16	0.25	0.25	45	3.359
17	0.25	0.29	45	3.633
18	0.25	0.333	45	3.933
19	0.25	0.375	45	4.143
20	0.25	0.417	45	4.321
21	0.417	0.667	30	1.903
22	0.417	0.667	45	2.282
23	0.417	0.667	60	2.826
24	0.417	0.667	75	2.971
25	0.417	0.667	90	3.113



**Figure 12.**  $\alpha$  corresponds to the SCF curve  
**图 12.**  $\alpha$  对应的 SCF 曲线图

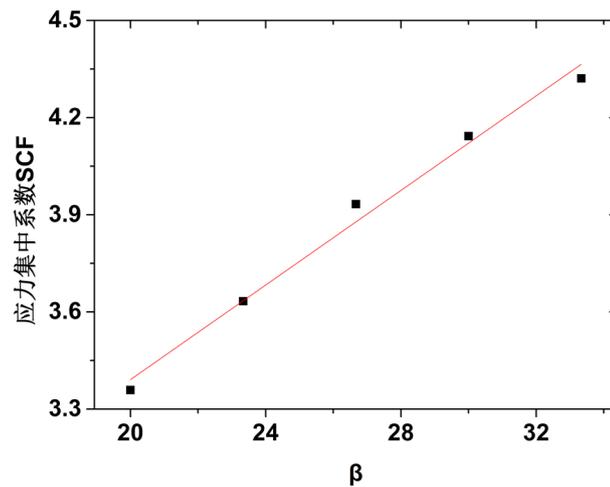


Figure 13.  $\beta$  corresponds to the SCF curve

图 13.  $\beta$  对应的 SCF 曲线图

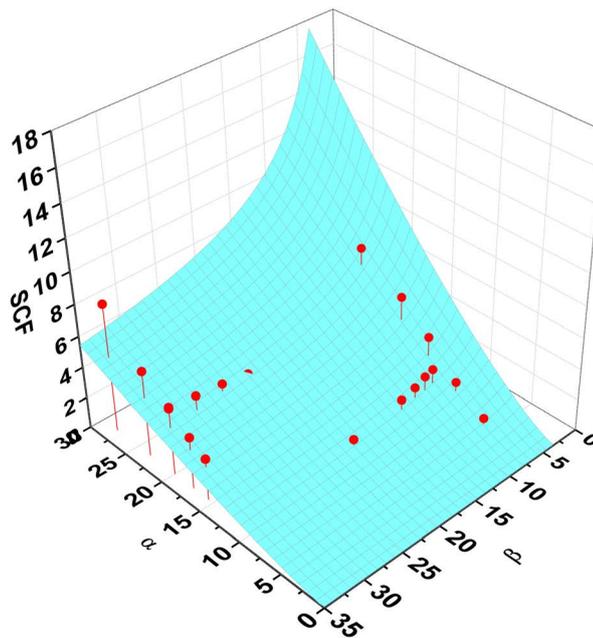


Figure 14.  $\alpha, \beta$  corresponds to the SCF surface diagram

图 14.  $\alpha, \beta$  对应的 SCF 曲面图

势。得出的数据大致均在曲面附近。所拟合的关系式为：

$$SCF = 0.38686\alpha^{1.32718}\beta^{-0.47305} \quad R^2 = 0.897096$$

为方便公式推广且结合工程实际，故将上式简化为：

$$SCF = 0.4\alpha^{1.3}\beta^{-0.5}$$

#### 4. 结论及展望

本文采用有限元分析方法研究在轴向荷载作用下 X 型方钢管节点应力集中系数的大小和分布情况。现得出如下结论：

1) 几何参数对轴向荷载作用下的 X 型方钢管节点焊缝处的热点应力位置均无影响, 热点应力位置始终位于焊缝处的焊趾处。

2) 随着参数主管宽度  $B$  跟支管厚度  $t$ 、支管宽度  $b$ 、主管与支管夹角  $\theta$  的增大, 应力集中系数  $SCF$  随之增大; 相反地, 随着主管厚度  $T$  的增大, 应力集中系数反而随之减小。即有效控制这 5 个参数范围对减小应力集中有积极意义。

3) 在  $\beta = B/T$  值不变,  $\alpha = b/t$  值增大时, 应力集中系数  $SCF$  随之增大; 在  $\alpha = b/t$  值不变,  $\beta = B/T$  增大时, 对应的应力集中系数  $SCF$  也随之增大。即这两个多因素变化对应力集中系数的影响呈现固定规律。

4) 本文的研究结论, 对建立的热点应力幅为参量的 X 型方钢管相贯节点的疲劳设计方法提供了主要依据。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(51578357)。

## 参考文献

- [1] 廖贤. X 型钢管相贯节点抗弯极限承载力的影响因素分析[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2011, 30(3): 226-228.
- [2] 方敏勇. 方管平面 X 型和空间 XX 型相贯节点理论和试验研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
- [3] 张婷婷, 张帅帅. X 型方钢管相贯节点抗弯刚度的影响因素[J]. 黑龙江科技学院学报, 2012(2): 202-206.
- [4] 杜之富. 焊接圆钢管 K 型节点焊缝周围热点应力分布规律研究[D]: [硕士学位论文]. 烟台: 烟台大学, 2008.
- [5] 中华人民共和国建设部. 中华人民共和国国家标准. GB50017-2003. 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [6] 邵永波. 轴力作用下 X 型焊接管节点热点应力的分布规律[J]. 船舶力学, 2010, 14(z1): 106-113.
- [7] 杨俊芬, 顾强. 方管平面 X 型相贯节点承载力的影响因素分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2006, 38(4): 491-494 + 513.
- [8] 中国工程建设协会. CECS 280-2010. 钢管结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [9] Zienkiewicz, O.C. and Pande, G.N. (1977) Time Dependent Multilaminate Model of Rocks—A Numerical Study of Deformation and Failure of Rock Masses. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1, 219-247. <https://doi.org/10.1002/nag.1610010302>
- [10] 张宝峰, 曲淑英, 邵永波, 张国栋. 轴向载荷下 X 型管节点应力集中系数研究[J]. 工程力学, 2007, 24(7): 161-166 + 183.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)