

文章编号: 1000-4750(2007)07-0161-06

轴向载荷下 X 型管节点应力集中系数研究

张宝峰, *曲淑英, 邵永波, 张国栋

(烟台大学土木工程学院, 烟台 264005)

摘 要: 用有限元方法分析了 X 管节点承受轴向拉力作用时沿焊缝应力集中系数的分布, 发现 X 型管节点最大应力集中系数出现在鞍点处。同时探讨了 X 节点几何参数对应力集中系数的影响, 提出了用于计算 X 节点最大应力集中系数的参数公式, 通过与国际疲劳指导委员会(Fatigue Guidance Review Panel)提出的评价标准比较, 证明了所提公式的正确性。

关键词: 应力集中系数; S-N 曲线; 热点应力幅; X 节点; 轴向荷载; 参数公式

中图分类号: TU398; O342 **文献标识码:** A

STUDY OF STRESS CONCENTRATION FACTOR (SCF) FOR X-JOINTS UNDER AXIAL LOADS

ZHANG Bao-feng, *QU Shu-ying, SHAO Yong-bo, ZHANG Guo-dong

(School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: The stress concentration factor distribution along the weld toe for tubular X-joints subjected to axial loads have been analyzed using finite element method. Through numerical analysis, it has been found that the peak stress concentration factor for the analyzed model is located at the saddle position. The effect of the geometric parameters of a tubular X-joint on the stress concentration factor has been investigated. Based on the numerical results, a parametric equation used to calculate the stress concentration factor of tubular X-joints has been proposed. The accuracy of this equation has been verified against the requirement of the Fatigue Guidance Review Panel, and it has been found that the proposed equation can produce reasonably accurate stress concentration factor values for tubular X-joints subjected to axial loads.

Key words: stress concentration factor (SCF); S-N curves; hot spot stress range (HSSR); tubular X-joints; axial loads; parametric equation

X 型管节点作为支承结构广泛地应用于海洋工程中, 疲劳破坏是其主要破坏形式。由于刚度沿焊缝的不均匀及焊缝处曲率的不连续, 管节点在循环载荷作用下将会在焊缝处产生应力集中, 经过一定的循环在焊缝处产生表面裂纹, 裂纹的萌生和发展将造成结构强度的减弱, 一旦裂纹穿透管道壁,

结构就会随之失效。管节点的疲劳寿命通常由 S-N 曲线估算得到, S-N 曲线即热点应力幅(S)与荷载循环次数(N)之间的关系曲线。在管节点的疲劳分析中, 热点应力是一个非常重要的参数, 它关系到节点的疲劳寿命。表面裂纹通常在热点应力区产生, 热点应力通常由应力集中系数(SCF)计算得到^[1~3],

收稿日期: 2005-11-23; 修改日期: 2006-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(10142001); 山东省自然科学基金(Y2006F46)资助项目

作者简介: 张宝峰(1981), 男, 山东人, 硕士生, 从事结构工程方面的研究;

*曲淑英(1963), 女, 烟台市人, 教授, 硕士, 主要从事结构动力学的教学与研究(E-mail: qsy_qu@163.com);

邵永波(1973), 男, 山东人, 副教授, 博士, 主要从事结构的强度和疲劳的教学与研究(E-mail: cybshao@ytu.edu.cn);

张国栋(1982), 男, 山东人, 硕士, 从事结构工程方面的研究。

因此,对 X 节点应力集中系数的分析对于确定其热点应力,进而估算节点的疲劳寿命是非常有意义的。基于此,本文对 X 节点在轴向载荷作用下沿焊缝的应力分布及各几何参数对应力集中系数的影响进行了探讨,提出了应力集中系数参数公式。

1 X 管节点的焊缝模拟

焊缝的存在将大大降低不同管道相交处的应力集中程度,对焊缝模拟的精确与否将影响到数值结果的准确性。文中模型的焊缝尺寸按规范(AWS)的要求^[4]。焊接路径见图 1,实线为支管与主管的内部和外部交线,虚线为考虑焊缝后沿着焊缝的迹线。图 2 则描述了主管与支管相交处内二面角(γ_i)和外二面角(γ_o)。为估算焊缝的厚度,对焊缝模型的内外交线作了修正。

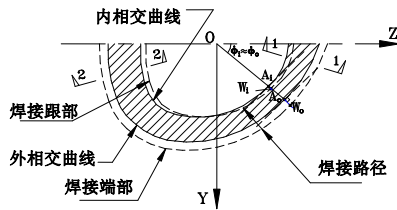


图 1 内外交线和焊接路径平面图

Fig.1 Inner and outer intersecting curves with the joint path at the plan view

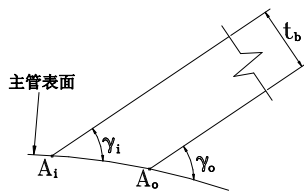


图 2 内外二面角的定义

Fig.2 Inner and outer dihedral angles

1.1 初始接触厚度 T_1

图 3 为已焊接节点和未焊接节点支管与主管的接触厚度。 T_w 为焊接厚度,未焊接节点的厚度 T_1 为管节点上垂直于交线的有效表面连接厚度,它随 γ 的变化而变化, T_1 可近似表示为

$$T_1 = t_b / \sin \gamma \quad (1)$$

其中 t_b 为支管的壁厚。

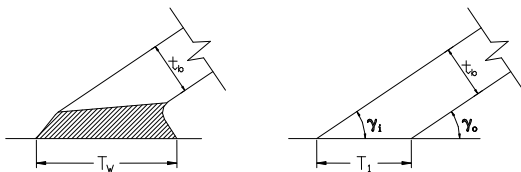


图 3 焊接节点和未焊接节点

Fig.3 A welded joint and a non-welded joint

由图 3 可看出,实际焊缝厚度 T_w 比 T_1 要大,这样避免了焊缝形状的突然改变,降低了应力集中的程度。为获得安全的焊缝厚度和比较平滑的焊接曲线假定:

- (1) 支管和主管间的夹角不小于 30° 。
- (2) 焊接材料与节点材料材料特性相同。
- (3) 主管外半径 R 明显大于支管厚度 t_b 。

1.2 焊趾和焊跟部位的模拟

如图 4,图 5 所示,相交曲线上一点 A_0 到焊趾 W_0 的距离为 T_2 ,沿着相交曲线, T_2 随二面角 γ_o 的变化而变化,角度 γ_o 的范围从假定最小角度 30° 到 180° 。当 $\gamma_o = 30^\circ$ 时, T_2 为一有限值,当 γ_o 增加到 180° 时, T_2 变为 0,其变化规律可表示如下:

$$T_2 = k_2 \times t_b \quad (2)$$

$$k_2 = F_{OS_{\gamma}} \left[1 - \left(\frac{\gamma_o - \theta_s}{180^\circ - \theta_s} \right)^m \right] \quad (3)$$

其中, k_2 为外侧相交曲线的修正系数, $F_{OS_{\gamma}}$ 是比例因子, m 是一个常数, θ_s 是所假定的最小夹角。

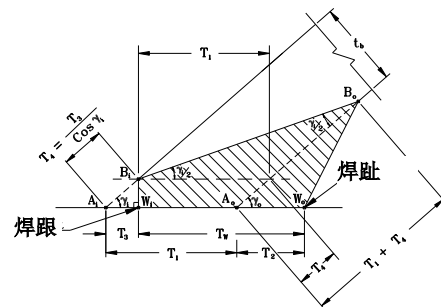


图 4 焊接节点模型 ($30^\circ \leq \gamma < 90^\circ$)

Fig.4 Model of weld joint

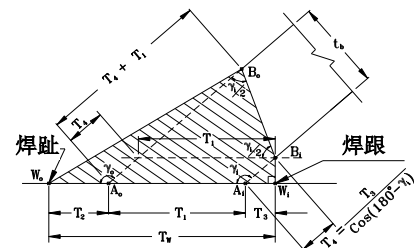


图 5 焊接节点模型 ($90^\circ \leq \gamma < 180^\circ$)

Fig.5 Model of weld joint

经修正,焊趾处的外相交曲线方程如下:

$$\begin{cases} Z_{W_0} = Z_{A_0} + T_2 \cos \beta_0 \\ Y_{W_0} = Y_{A_0} + T_2 \sin \beta_0 \\ X_{W_0} = \sqrt{R_0^2 - Y_{W_0}^2} \end{cases} \quad (4)$$

同理可确定相交曲线上一点 A_1 到焊跟 W_1 的距离 T_3 见图 4。二面角 γ_i 的范围是从 30° 到 90° , 相应

的, $\gamma_i = 90^\circ$ 时 $T_3 = 0$, $\gamma_i = 30^\circ$ 时, T_3 可表示为:

$$T_3 = k_3 \times t_b \quad (5)$$

$$k_3 = F_{OS_{\beta_i}} \left[1 - \left(\frac{\gamma_i - \theta_s}{90^\circ - \theta_s} \right)^n \right] \quad (6)$$

其中: k_3 —内部相交曲线修正系数,

$F_{OS_{\beta_i}}$ —比例因子,

θ_s —最小夹角

修正后焊跟处的内相交曲线方程为:

$$\begin{cases} Z_{W_i} = Z_A + T_2 \cos \beta_i \\ Y_{W_i} = Y_A + T_1 \sin \beta_i \\ X_{W_i} = \sqrt{R_1^2 - Y_{W_i}^2} \end{cases} \quad (7)$$

1.3 焊接厚度 T_w

AWS 规定的最小焊缝厚度 T_{AWS} 为:

$$T_{AWS} = k_{AWS} \times t_b \quad (8)$$

式中 k_{AWS} 为 AWS^[4] 规定的焊缝厚度参数。

实际的节点焊缝厚度应大于或等于 T_{AWS} , 由 T_1 , T_2 , T_3 决定:

$$T_w = T_1 + T_2 - T_3 \quad (9)$$

2 X 节点的有限元分析

2.1 X 节点有限元网格

在管节点应力集中系数分析中, 壳单元和空间实体单元都曾被用来模拟整个节点结构。Lee 和 Bowness^[5]发现, 由于弯曲应力的影响, 管壁内外表面的应力大小不相等, 壳单元不能反映这种差异。Herion^[6]提出了三维二次实体单元模拟带焊缝的节点。本文采用图 6 所示的 20 结点二次实体单元。

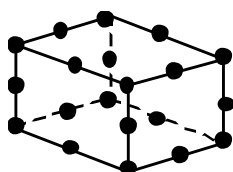


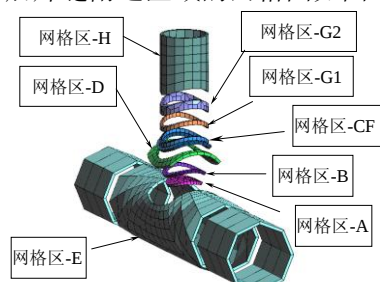
图 6 20 结点二次实体单元

Fig.6 A 20-node quadratic solid element

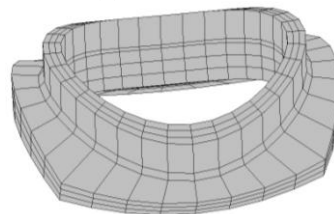
采用分区法对模型进行网格划分, 即应力梯度高的地方网格精密、单元形状规则; 低应力梯度处网格稀疏一些, 单元形状要求也适当低一些以节约存储空间。图 7(a)描述了一个支管的分区网格图, 图 7(b)为焊缝区域的网格图。采用分区法产生网格使得 X 节点不同部位的网格数量得到了合理的控制, 由图 7(b)可看出, 焊缝区域沿管壁厚度方向划分了三层单元, 沿焊缝的周向则划分了 32 个单元。

为验证结果的收敛性, 对节点网格进行了加

密, 加密后焊缝附近区域的网格图如图 8 所示。



(a) 分区网格图



(b) 焊缝区域网格图

图 7 X 管节点分区网格图

Fig. 7 Mesh of different zones of a typical X-joint

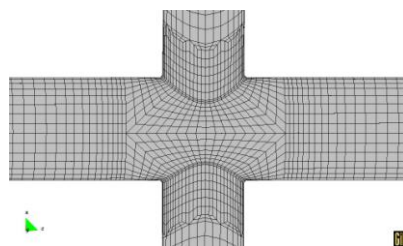


图 8 焊缝附近区域加密网格图

Fig.8 Doubling mesh of the weld zone

2.2 名义应力与热点应力

当支管端部承受轴向荷载作用时, 远离焊缝区域均匀分布的应力, 称为名义应力, 不均匀应力称为热点应力, 如图 9 所示。由于 X 节点的两个支管对称于主管, 所以图 9 只表示了一个支管的应力分布。应力集中系数(SCF)即热点应力与名义应力之比。对于承受轴力 F 的 X 管节点, 其名义应力 $\sigma_{名义}$ 可表示为:

$$\sigma_{名义} = \frac{4F}{(\pi[d^2 - (d-2t)^2])} l \quad (10)$$

式中, d 和 t 分别为支管的直径和壁厚。

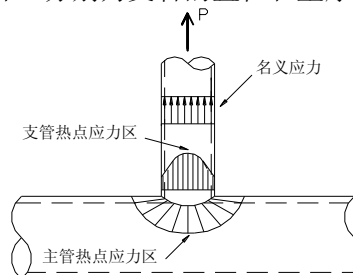


图 9 轴向力作用下的应力分布

Fig.9 Stress distribution of the joint under axial loads

热点应力由应力插值区域内的应力线性外推插值获得，外推插值区的定义见图 10，其范围见表 1^[7]。其中 r_0 和 t_0 分别为主管的半径和壁厚， r_1 和 t_1 则分别为支管的半径和壁厚。

表 1 圆管节点(CHS)的外推插值区域范围
Table 1 Boundaries of extrapolation region

	主管		支管	
	鞍点	冠点	鞍点	冠点
$L_{r,min}^*$		$0.4t_0$		$0.4t_1$
$L_{r,max}^{**}$	$0.09r_0$	$0.4(r_0t_0r_1t_1)^{1/4}$		$0.65(r_1t_1)^{1/2}$

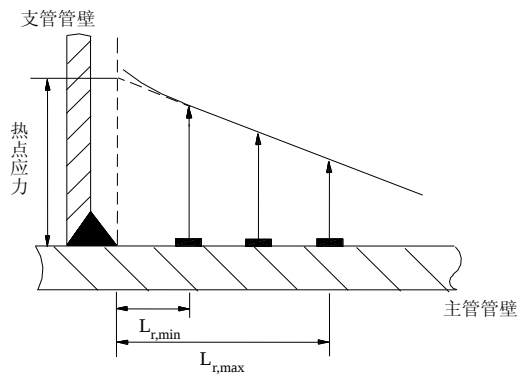


图 10 外推插值区域的定义
Fig.10 Definition of the extrapolation region

2.3 X 管节点应力集中系数分布

图 11 为 X 节点的受力情况和边界条件，支管端部轴向应力为 1.0MPa，节点几何尺寸见表 2，材料特性见表 3。表 2 中 R 为主管半径， r 为支管半径， T 为主管壁厚度， t 为支管壁厚度， L 为主管长度， l 为支管长度，表 3 中 σ_y 为材料的屈服强度， σ_u 为材料的极限强度， ρ 为材料到达极限强度时的伸长率。用于分析 X 节点应力集中系数分布的各参数为： $\alpha = L/2D = 15$ ， $\beta = r/R = 0.6$ ， $\gamma = D/2T = 10$ ， $\tau = t/T = 0.6$ 。利用 ABAQUS^[8] 计算得到节点模型的应力集中系数。节点在轴向拉力作用下的变形及应力分布见图 12。

表 2 X 节点几何尺寸

Table 2 Geometrical dimensions of the analyzed X-joint					
R/mm	r/mm	T/mm	t/mm	L/mm	l/mm
200	120	20	12	6000	1500

表 3 X 节点材料特性

Table 3 Material properties of the analyzed X-joint		
σ_y/MPa	σ_u/MPa	$\rho/\%$
352	493	32.3

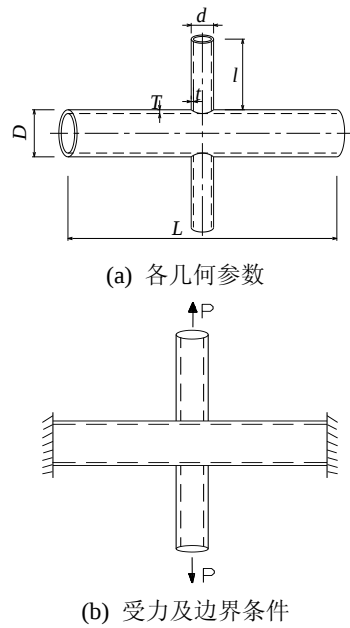


图 11 X 管节点尺寸符号和受荷边界条件示意图
Fig.11 Notations of geometry parameters and loading conditions of the analyzed X-joint

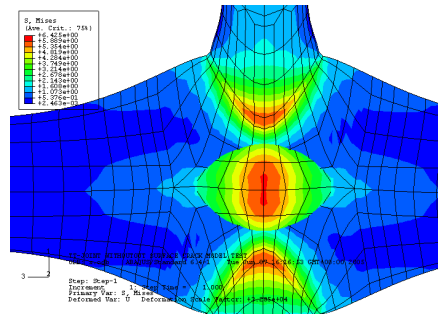


图 12 轴向荷载作用下 X 管节点变形及应力分布
Fig.12 Deformation and the stress distributions of the tubular X-joint

图 13 所示为应力集中系数(SCF)沿着焊缝的分布，由图 13 可见，SCF 最大值位于鞍点处(90°)，且 SCF 相对于鞍点和冠点是对称分布的，冠点处的 SCF 值远小于鞍点处，由此可知，当节点承受轴向疲劳荷载时，裂纹会在鞍点处首先产生。

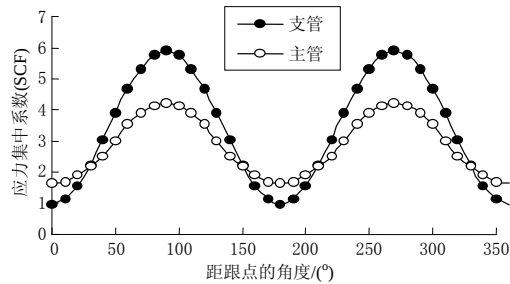


图 13 应力集中系数(SCF)沿着焊缝的分布
Fig.13 SCF distribution along the weld toe

3 多参数的影响

3.1 各参数对应力集中系数的影响

本文分析了 80 个具有不同几何参数的 X 节点在承受轴向拉力作用时焊缝处的最大应力集中系数。其中 X 节点的几何参数取值范围见表 4。主管两端固定，支管两端施加相同大小的拉力。主管和支管的长度参数($\alpha_c = 2L/D$, $\alpha_T = 2l/d$)均定为 15。在支管端部施加拉力的大小不会导致焊缝处最大应力超过屈服应力，应力和应变之间呈线性关系，因而弹性模量(E)和泊松比(ν)对 SCF 值不会有影响，由此可假定材料的弹性模量和泊松比分别为 210 kN/mm^2 和 0.3。

表 4 几何参数表

Table 4 Geometrical parameters in parametric study

β	γ	τ
0.5, 0.6, 0.7, 0.8	6, 7, 8, 9, 10	0.4, 0.6, 0.8, 1.0

几何参数对 SCF 大小的影响为：

图 14 表示参数 τ 对 SCF 的影响，说明主管和支管的 SCF 值随 τ 的增大而增大，主管中的 SCF 值与 τ 值接近于线性关系，而在支管中这种关系则是非线性的。

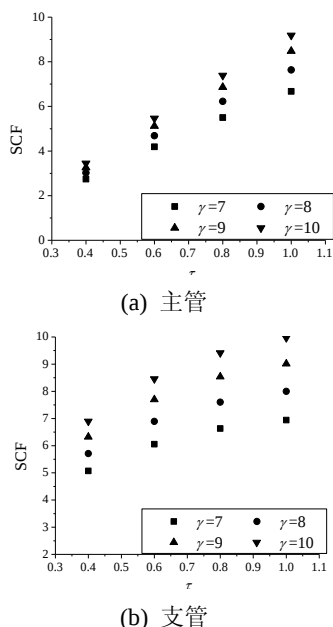


图 14 参数 τ 对 SCF 的影响 ($\beta=0.5$)

Fig.14 Effect of parameter τ on SCF

图 15 则表示参数 γ 对 SCF 的影响，SCF 值随着 γ 的增大而增大，SCF 值与 γ 值在主管和支管中都接近于线性关系。

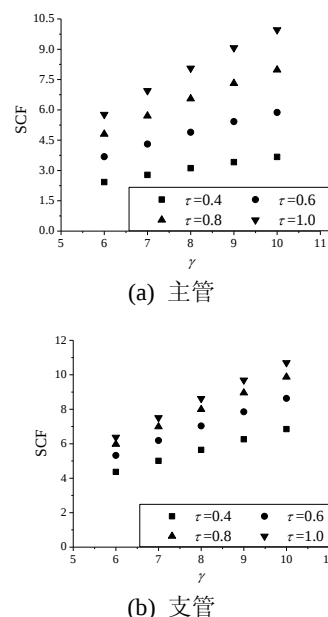


图 15 参数 γ 对 SCF 的影响 ($\beta=0.5$)

Fig.15 Effect of parameter γ on SCF

图 16 说明 SCF 值与参数 β 的关系相当复杂，当 β 较小时，SCF 值随 β 的增大而增大，而当 β 达到一定值后，SCF 值又随 β 的增大而减小。

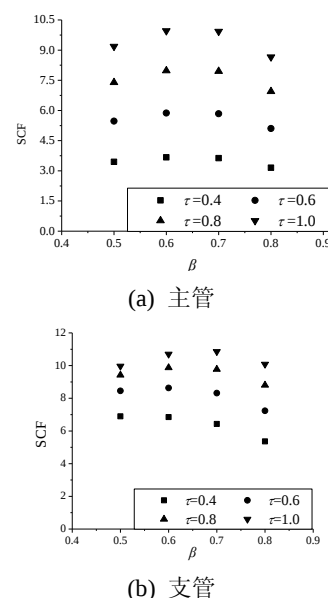


图 16 参数 β 对 SCF 的影响 ($\gamma=30$)

Fig.16 Effect of parameter β on SCF

3.2 应力集中系数参数公式

通过对轴向拉力作用下的 X 管节点模型的数值分析，并借助于分析软件 DataFit^[9]，得估算轴向拉力作用下 X 节点应力集中系数的参数公式为：

$$SCF_C = \gamma^{1.06} \left[\frac{-4.56\beta^2 + 5.56\beta - 0.81}{\tau} \right]^{1.02} \quad (11)$$

$$SCF_B = \gamma^{0.98} \left[\frac{-4.32\beta^2 +}{5.27\beta - 0.46} \right] \tau^{0.51} \quad (12)$$

式中, SCF_C 和 SCF_B 分别表示主管和支管应力集中系数。由于节点的疲劳寿命只与最大热点应力处的应力范围有关, 这里仅估算应力集中系数的最大值。

3.3 参数公式的评价

根据文献[10]的要求验证了所提参数公式的可靠性, 依据估算的 SCF 值(P)与实测得到的 SCF 值(R)的比值, 如果比值 P/R 小于 0.8, 表示参数公式低估了 SCF 值, 反之若 P/R 大于 1.5, 则表示参数公式过高的估算了 SCF 值。

表 5 列出了所分析的 80 个模型的验证结果, 从表中可以看到, 所有的 P/R 比值都在 0.8 到 1.2 的范围内, 这表明上述所提参数公式的计算结果与有限元分析数据吻合较好, 说明所提参数公式满足疲劳研究指导委员会 (Fatigue Guidance Review Panel) 的要求。

表 5 应力集中系数(SCF) P/R 值数据统计列表

Table 5 Frequency of occurrence of SCF

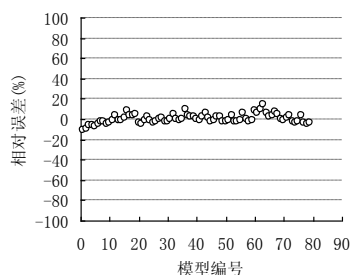
位置	SCF P/R 的统计范围				
	<0.8	0.8~1.0	1.0~1.2	1.2~1.5	>1.5
主管	0	45	35	0	0
支管	0	47	33	0	0

同时对所提参数公式进行了误差分析, 即将参数公式预测的应力集中系数大小与数值分析得到的应力集中系数的大小进行比较, 得出各个模型应力集中系数的相对误差, 误差由下式计算:

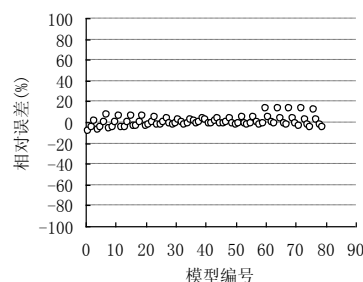
$$E_r(SCF) = \frac{SCF_E - SCF_N}{SCF_N} \times 100\% \quad (13)$$

式中, $E_r(SCF)$ 表示 SCF_E 的相对误差, SCF_E 是由参数公式计算得的 SCF 值, SCF_N 是 SCF 的数值结果。

由式(13)计算的应力集中系数的相对误差如图 17 所示。从中可看出, 模型的相对误差均位于 $\pm 20\%$ 范围内。



(a) 主管



(b) 支管

图 17 相对误差统计数据曲线

Fig.17 Statistics of relative errors for analyzed joints

4 结论

(1) 20 节点空间实体单元可很好地用于节点的模拟, 特别是焊缝的模拟。

(2) 通过 80 组节点模型的参数分析, 探讨了参数(γ 、 β 和 τ)对 X 型管节点在轴向力作用下应力集中系数的影响。

(3) 提出的 X 节点在轴向力作用下最大应力集中系数公式, 符合国际疲劳研究指导委员会的标准, 且在分析的参数范围内具有较好的精度, 满足工程要求。

(4) 超出所分析的参数范围有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Smedley P, Fisher P. Stress concentration factors for simple tubular joints [C]. Proceedings of 1st International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE. Edinburgh, UK, 1991. 475~483.
- [2] Morgan M R, Lee M M K. Prediction of stress concentration factors in K-joints under balanced axial loading [C]. Proceedings of the 7th International Symposium on Tubular Structures, Hungary, 1996. 301~308.
- [3] Van Wingerde A M, Packer J A, Wardenier J. Simplified SCF formulae and graphs for CHS and RHS K and KK-connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(3): 221~252.
- [4] American Welding Society. Structural welding code-steel [S]. ANSI/AWS D1.1-2000, Miami, USA, 2000.
- [5] Lee M M K, Bowness D. Prediction of stress intensity factors in semi-elliptical weld toe cracks in offshore tubular joints [C]. Proceedings of the 9th International Symposium and Euroconference on Tubular Structures, Dusseldorf, Germany, 2001. 299~308.

(参考文献[6]~[10]转第 183 页)