

# Analysis of the Influence of Undercut Defect on the Stress Concentration at the Weld of the Steel Tube of the Welded Hollow Ball Joint

Chenbo Zhao, Honggang Lei, Yajie Yan

Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi  
Email: 7317048292@qq.com

Received: Feb. 25<sup>th</sup>, 2019; accepted: Mar. 12<sup>th</sup>, 2019; published: Mar. 19<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

In view of the welding defects of welded hollow ball joints in steel structure design and construction, this paper intends to use finite element analysis soft ABAQUS to simulate and analyze the effect of the wall thickness of hollow spheres and the diameter of steel pipe diameter without defects on welded hollow ball joints, and the effect of stress concentration at the toe and the influence of the undercut on the stress concentration of the welded hollow ball joints. The results show that with the increase of the undercut and sharpness of the steel pipe, the stress concentration factor at the weld toe of the steel pipe increases remarkably, which leads to the fatigue damage at the weld toe of the steel pipe. Therefore, the undercut at the weld toe of the steel pipe should be paid enough attention. A general formula for the stress concentration factor of the undercut at the weld toe of the steel tube is fitted.

## Keywords

Welded Hollow Ball Joint, Finite Element Analysis, Undercut, Stress Concentration Factor SCF

---

# 咬边缺陷对网架焊接空心球节点钢管焊趾处应力集中的影响分析

赵晨波, 雷宏刚, 闫亚杰

太原理工大学, 山西 太原  
Email: 7317048292@qq.com

收稿日期: 2019年2月25日; 录用日期: 2019年3月12日; 发布日期: 2019年3月19日

文章引用: 赵晨波, 雷宏刚, 闫亚杰. 咬边缺陷对网架焊接空心球节点钢管焊趾处应力集中的影响分析[J]. 土木工程, 2019, 8(2): 337-348. DOI: 10.12677/hjce.2019.82041

## 摘要

针对钢结构设计施工中存在的焊接空心球节点焊接缺陷问题, 本文拟采用有限元分析软件ABAQUS, 模拟分析研究无缺陷时空心球直径壁厚和钢管直径壁厚对焊接空心球节点钢管焊趾处应力集中的影响, 以及钢管焊趾存在咬边时对焊接空心球节点应力集中的影响。结果表明, 随着钢管咬边深度及锐度的增大, 钢管焊趾处应力集中系数显著增大, 导致钢管焊趾处的疲劳破坏, 所以钢管焊趾处咬边应引起足够重视。拟合出关于钢管焊趾处咬边的应力集中系数的通用公式。

## 关键词

焊接空心球节点, 有限元分析, 咬边, 应力集中系数SCF

Copyright © 2019 by author(s) 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

空间网格结构具有自重轻、跨度大、施工快、造型美观等优点, 在我国各类建筑中应用广泛[1]。焊接空心球节点作为网架结构中的主要节点形式, 被大量应用[2]。然而在其焊接过程中, 焊接缺陷普遍存在。焊接缺陷对节点应力集中的影响特别大。在交变荷载的作用下, 焊接缺陷导致的应力集中很容易产生疲劳裂纹。存在焊接缺陷的构件疲劳强度相比无焊接缺陷的构件要低很多。疲劳问题一直以来都是制约网架结构推广应用的重要原因[3]。

咬边是指在焊接过程中, 由于焊条的运速过快、焊接电流过大、焊条角度不合理等原因, 最终导致母材的一部分被熔化, 而填充金属未能及时填补形成的, 是焊接空心球节点中常见的焊接缺陷。由于焊接空心球节点中无缝钢管壁厚较薄, 钢管焊趾处咬边会使钢管截面显著减小, 在咬边处也会产生应力集中, 加速焊接空心球节点的疲劳破坏。因此研究焊接空心球节点钢管焊趾处咬边的意义重大。

众多学者对焊接空心球节点进行了一系列理论和试验研究。1990年, 文献[4]对50余种不同构造细节的焊接空心球节点进行有限元分析。结果表明了焊接空心球节点的应力分布规律, 应力最大值位于焊接空心球和无缝钢管的连接处, 此处最大应力为径向应力; 焊缝处应力集中的程度随节点相应构造尺寸呈规律变化, 绘制出了相应变化规律曲线。文献[5][6]研究了采用坡口焊的焊接空心球节点在弹性阶段下, 单向受拉时球面应力的分布规律, 并基于薄壳理论求出了应力集中系数的数值解。文献[7][8][9][10]定量分析了焊接空心球直径壁厚、无缝钢管直径壁厚以及焊脚尺寸对应力集中的影响并拟合公式, 除考虑单个因素对应力集中的影响外, 还分析了构造尺寸对应力集中的综合影响, 求解出焊接空心球节点的应力集中公式。文献[11]提出了当管-球采用角焊缝的连接形式时的应力集中计算公式。

以上研究主要集中在球面焊趾处, 对钢管焊趾处应力集中分布以及存在焊接缺陷时的应力分布规律研究较少。本文首先研究了无焊接缺陷钢管焊趾处的应力集中情况, 再对钢管焊趾处存在咬边的情况进行研究, 通过控制咬边宽度、深度、长度以及锐度, 得出了钢管焊趾处的应力集中变化规律, 并拟合出计算咬边情况下钢管焊趾处的应力集中系数的通用公式, 为工程实际减小焊接空心球节点应力集中系数提供了参考依据。

## 2. 有限元模型建立

依据《空间网格结构技术规程》有关规定：空心球外径  $D$  与壁厚  $T$  之比宜取 25~45；空心球外径  $D$  与主钢管外径  $d$  之比宜取 2.4~3.0；空心球壁厚  $T$  与主钢管的壁厚  $t$  之比宜取 1.5~2.0。选用试件参数如表 1 所示。

**Table 1.** Non-defective steel pipe weld toe stress concentration analysis table

**表 1.** 无缺陷钢管焊趾应力集中分析表

序号	空心球规格		钢管规格		d/t	D/T	SCF
	D/mm	T/mm	d/mm	t/mm			
1	350	10	152	5.5	27.6364	35	1.70665
2	380	10	152	5.5	27.6364	38	1.74942
3	400	10	152	5.5	27.6364	40	1.78048
4	420	10	152	5.5	27.6364	42	1.81366
5	450	10	152	5.5	27.6364	45	1.86294
6	400	8	152	5.5	27.6364	50	1.91307
7	400	9	152	5.5	27.6364	44.4444	1.84225
8	400	11	152	5.5	27.6364	36.3636	1.7277
9	400	13	152	5.5	27.6364	30.7692	1.6421
10	400	14	152	5.5	27.6364	28.5714	1.60775
11	400	10	135	5.5	24.5455	40	1.81022
12	400	10	145	5.5	26.3636	40	1.79037
13	400	10	160	5.5	29.091	40	1.7735
14	400	10	170	5.5	30.9091	40	1.76921
15	400	10	152	5	30.4	40	1.76247
16	400	10	152	6	25.3333	40	1.79598
17	400	10	152	7	21.7143	40	1.8568
18	400	10	152	8	19	40	1.91198

咬边情况下管球连接节点示意图如图 1 所示。本文利用有限元分析软件 ABAQUS 对焊接空心球节点建模。为简化计算并与静力或疲劳试验所采用的试件保持一致，利用模型几何形状、边界条件和外部荷载的对称性，只取一半球体建模，半球边界设为固定边界。焊接空心球与无缝钢管连接采用剖口焊，焊缝与母材视为各向同性的同种材料。假定材料在线弹性范围内工作，其弹性模量取  $E = 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ，泊松比取 0.3。模型单元定义为实体单元，单元类型为 C3D8R。本模型在进行有限元网格划分的时候，在远离焊缝区域的地方网格划分适当放宽，以减小计算成本，在焊缝处细化网格，网格大小取 0.5 mm (图 2)。荷载为  $1 \text{ N/mm}^2$  的轴拉力，施加在钢管端部的横截面上。

## 3. 计算结果分析

### 3.1. 应力集中系数及咬边锐度

热点应力集中系数  $SCF$  的计算公式：

$$SCF = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \quad (1)$$

式中： $\sigma_{\max}$  为钢管焊趾处的最大等效应力值； $\sigma_0$  (不含咬边缺陷)名义应力值。

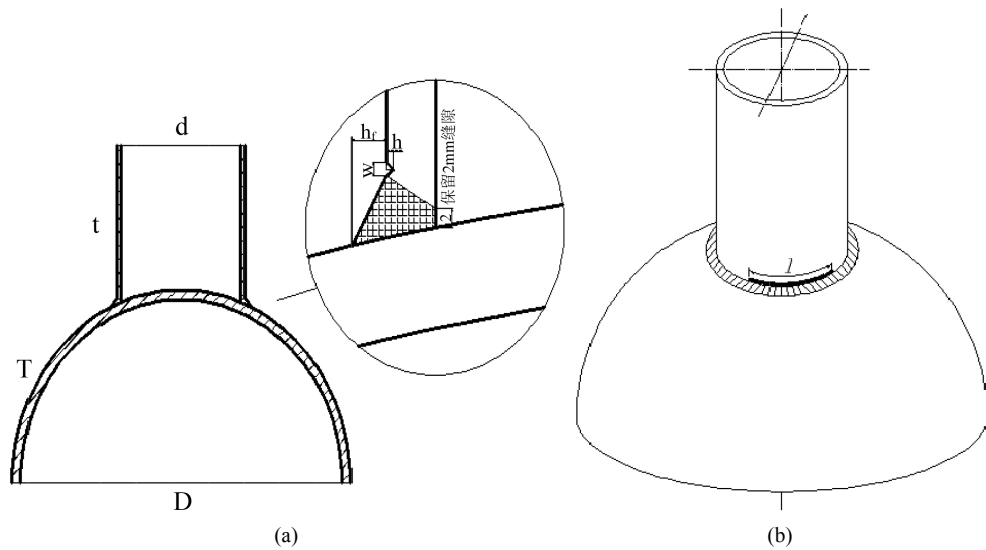


Figure 1. (a) Pipe connection node; (b) Undercut defect diagram  
图 1. (a) 管球连接节点; (b) 咬边缺陷示意图

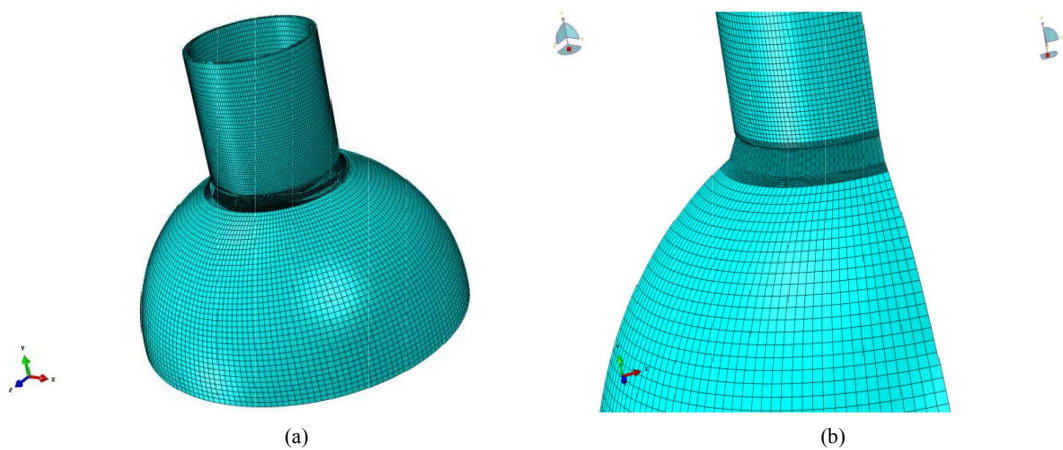


Figure 2. (a) Local mesh encryption diagram; (b) Local mesh encryption diagram  
图 2. (a) 局部网格加密示意图; (b) 局部网格加密示意图

定义焊缝咬边缺陷的深度  $h$  与宽度  $w$  之比为咬边缺陷锐度  $\mu$  :

$$\mu = \frac{h}{w} \quad (2)$$

### 3.2. 无缺陷焊接空心球节点应力集中系数的计算分析

在研究无缺陷焊接空心球节点钢管焊趾处应力集中时，先分别考虑单个因素的作用，保证其他参量不变。按照《空间网格结构技术规程》不断的、有规律的分别改变  $D$ 、 $T$ 、 $d$  及  $t$ ，并对模型进行有限元分析和计算，可以得到大量的计算结果。由于单因素回归分析不能体现构造细节尺寸的综合影响，本文还以  $d/t$  和  $D/T$  为基本参量，对模拟数据进行多因素回归分析，对模拟结果整理如表 1。

#### 1) 单因素回归分析(图 3~图 6)

以上结果表明：随着空心球直径或钢管壁厚的增大，钢管焊趾处应力集中系数逐渐增大。 $SCF$  值与空心球直径及钢管壁厚呈线性趋势。随着空心球壁厚及钢管直径的增大，钢管焊趾处应力集中呈减小趋

势。 $SCF$  值与空心球壁厚线性相关，与钢管直径呈非线性关系。对以上关系分别进行拟合，得到单因素下钢管焊趾处应力集中系数公式如下：

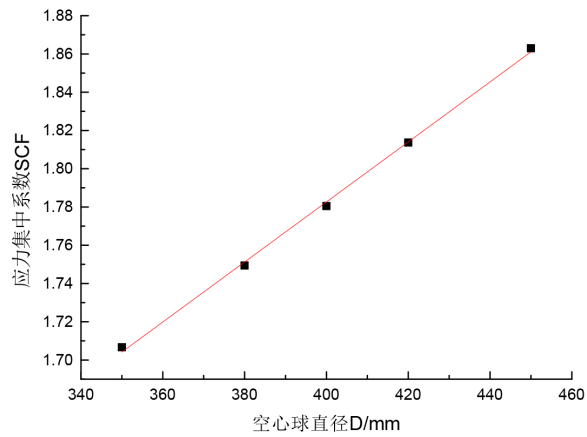


Figure 3.  $D$  influence curve on SCF

图 3.  $D$  对 SCF 的影响曲线

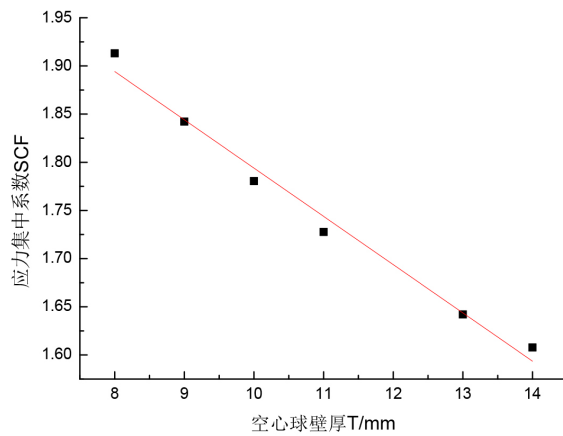


Figure 4. Effect curve of  $T$  on SCF

图 4.  $T$  对 SCF 的影响曲线

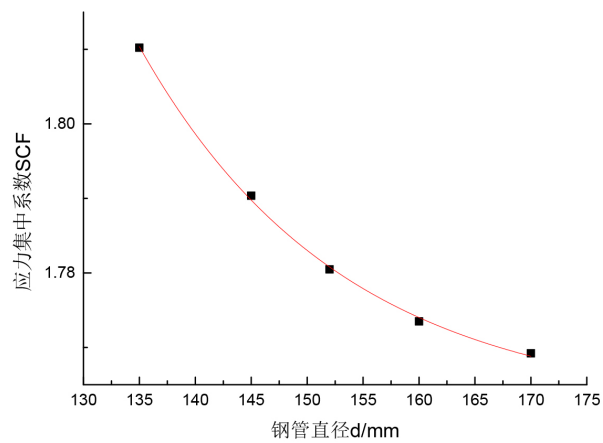


Figure 5.  $d$  influence curve on SCF

图 5.  $d$  对 SCF 的影响曲线

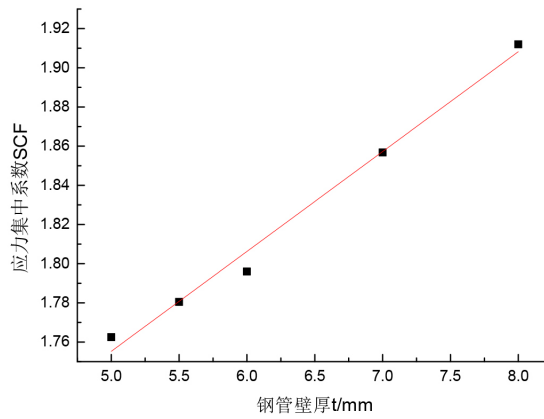


Figure 6.  $t$  influence curve on SCF  
图 6.  $t$  对 SCF 的影响曲线

SCF 与  $D$  关系:

$$SCF = 0.0016D + 1.1551 \quad (3)$$

$$R^2 = 0.9988$$

SCF 与  $T$  关系:

$$SCF = -0.0501T + 2.295 \quad (4)$$

$$R^2 = 0.9853$$

SCF 与  $d$  关系:

$$SCF = 2.9435d^{-0.1} \quad (5)$$

$$R^2 = 0.9372$$

SCF 与  $t$  关系:

$$SCF = 0.051t + 1.5003 \quad (6)$$

$$R^2 = 0.9887$$

## 2) 多因素回归分析

根据表 1 数据分别分析当  $d/t$  一定时,  $D/T$  对钢管焊趾处应力集中系数的影响; 当  $D/T$  一定时  $d/t$  对钢管焊趾处应力集中的影响。对表 1 数据进行回归分析可得 SCF 与  $d/t$ 、 $D/T$  之间的关系, 如下图 7 和图 8 所示。

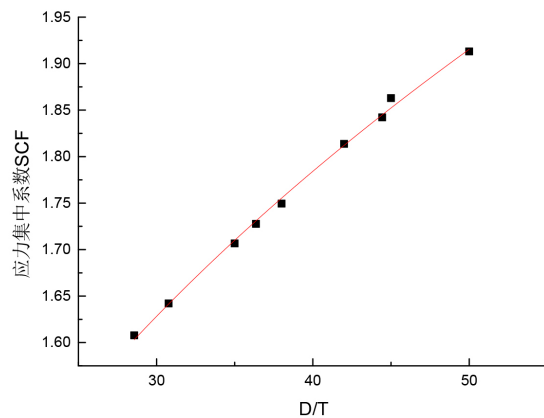


Figure 7. Influence curve of  $D/T$  on SCF  
图 7.  $D/T$  对 SCF 的影响曲线

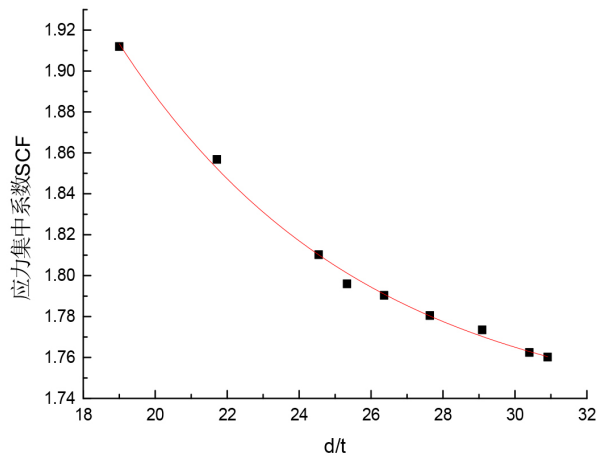


Figure 8.  $d/t$  effect curve on SCF

图 8.  $d/t$  对 SCF 的影响曲线

如图 7 所示, 结果表明: 当  $d/t$  保持不变时, 随着  $D/T$  的增大, 应力集中系数  $SCF$  也逐渐增大。通过回归分析得出  $D/T$  与应力集中系数  $SCF$  的关系式为:

$SCF$  与  $D/T$  关系:

$$SCF = 0.55213 \left( \frac{D}{T} \right)^{0.31797} \quad (7)$$

$$R^2 = 0.9972$$

如图 8 所示, 结果表明: 当  $D/T$  保持不变时, 应力集中系数  $SCF$  随着  $d/t$  的增大而减小。

通过回归分析得到  $d/t$  与应力集中系数  $SCF$  的关系式为:

$SCF$  与  $d/t$  关系:

$$SCF = 3.102 \left( \frac{d}{t} \right)^{-0.167} \quad (8)$$

$$R^2 = 0.9653$$

将所有数据进行多元回归分析, 得到  $SCF$  有关  $D/T$ 、 $d/t$  的函数关系式, 此关系式相关系数为 0.99155。

$$SCF = 0.96181 \left( \frac{d}{t} \right)^{-0.16643} \left( \frac{D}{T} \right)^{0.31723} \quad (9)$$

为了方便在工程中推广应用, 将公式(9)进行简化如下:

$$SCF = 0.96 \left( \frac{d}{t} \right)^{-0.17} \left( \frac{D}{T} \right)^{0.32} \quad (10)$$

### 3.3. 钢管焊趾处咬边情况下应力集中系数的计算分析

研究钢管焊趾处咬边对焊接空心球节点钢管焊趾处应力集中的影响时, 先分别考虑单个因素的做用, 保证其他参量不变。选取模型 3, 空心球规格为  $D400 \times 10$ , 无缝钢管规格为  $\Phi 152 \times 5.5$ , 不断的、有规律的分别改变咬边长度  $l$ 、宽度  $w$ 、深度  $h$  以及咬边锐度  $\mu$ , 并对模型进行有限元分析和计算, 得到大量的计算结果。对模拟结果整理如表 2。

#### 1) 咬边长度对应力集中的影响

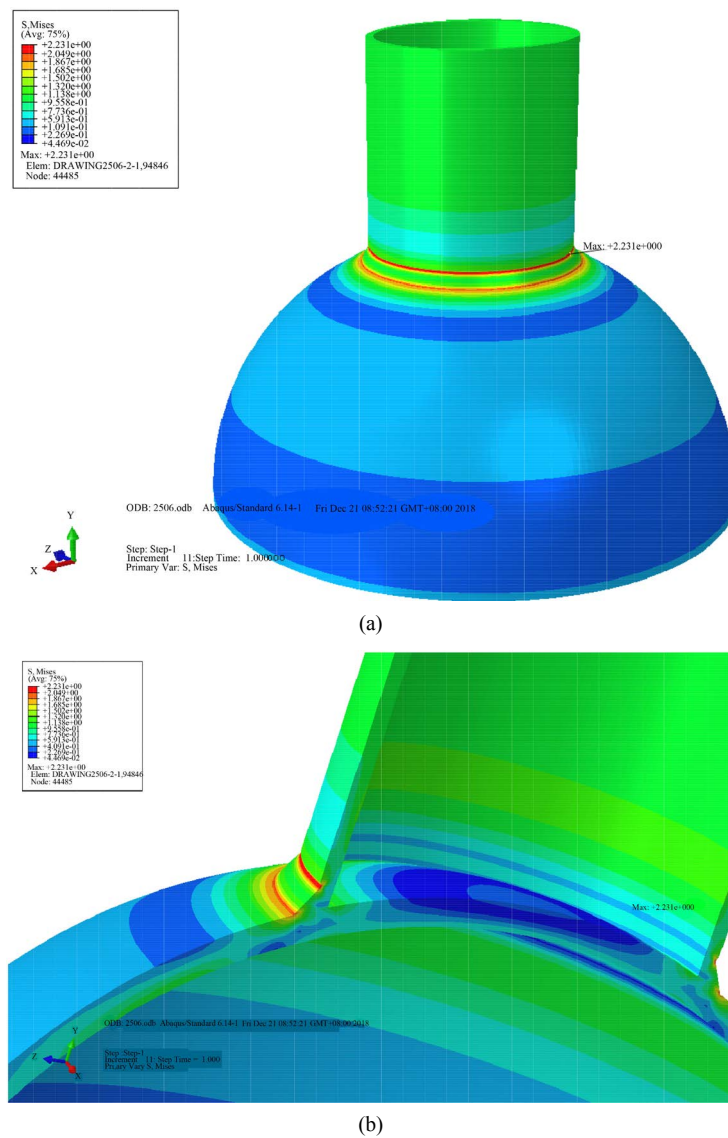
从表 2 可知, 当咬边长度  $l$  由 100 mm 增大至 477.28 mm 时, 钢管焊趾处的应力集中系数  $SCF$  从 2.234



减小至 2.231。随着咬边长度  $l$  的增大, 应力集中系数  $SCF$  呈减小的趋势。由于  $SCF$  减小的幅度非常小, 所以忽略咬边长度  $l$  对应力集中系数的影响。图 9 为 YB-5 号节点应力云图, 由于管球连接处的不连续, 焊接空心球节点在钢管焊趾处及球面焊趾处应力较大, 在钢管焊趾咬边处应力最大, 导致应力集中现象。

**Table 2.** Analysis of the influence of the length of undercut on the stress concentration of steel pipe weld toe  
**表 2.** 咬边长度对钢管焊趾应力集中影响分析表

序号	咬边深度 $h/mm$	咬边宽度 $w/mm$	咬边长度 $l/mm$	SCF
YB-1	0.6	2.5	100	2.234
YB-2	0.6	2.5	200	2.2334
YB-3	0.6	2.5	300	2.233
YB-4	0.6	2.5	400	2.2323
YB-5	0.6	2.5	477.28	2.231



**Figure 9.** (a) YB-5 overall stress cloud; (b) YB-5 detail stress cloud map  
**图 9.** (a) YB-5 整体应力云图; (b) YB-5 细节应力云图



## 2) 咬边宽度对应力集中的影响

如图 10 所示, 对表 3 中数据回归分析得出, 随着咬边宽度  $w$  的增大, 咬边处应力集中系数  $SCF$  逐渐减小, 通过回归分析得出  $w$  与应力集中系数  $SCF$  的关系式为:

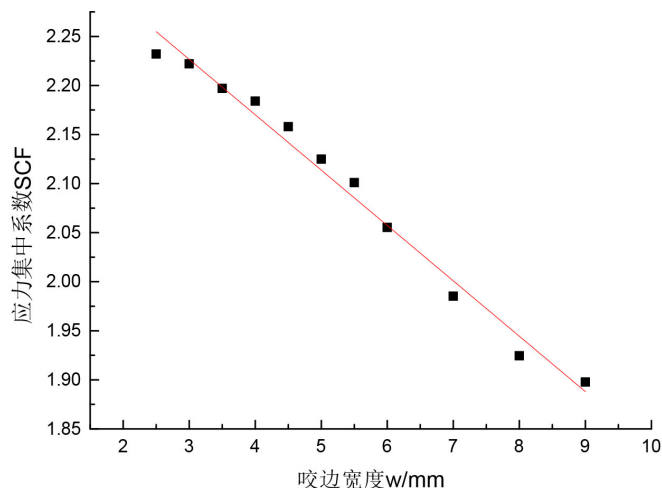


Figure 10.  $w$  influence curve on SCF

图 10.  $w$  对 SCF 的影响曲线

Table 3. Analysis of the influence of undercut width on stress concentration of steel pipe weld toe  
表 3. 咬边宽度对钢管焊趾应力集中影响分析表

序号	咬边深度 $h/mm$	咬边宽度 $w/mm$	咬边长度 $l/mm$	SCF
YB-5	0.6	2.5	477.28	2.231
YB-6	0.6	3	477.28	2.222
YB-7	0.6	3.5	477.28	2.197
YB-8	0.6	4	477.28	2.184
YB-9	0.6	4.5	477.28	2.158
YB-10	0.6	5	477.28	2.125
YB-11	0.6	5.5	477.28	2.101
YB-12	0.6	6	477.28	2.0554
YB-13	0.6	7	477.28	1.9852
YB-14	0.6	8	477.28	1.9245
YB-15	0.6	9	477.28	1.8977

$$SCF = -0.0564w + 2.3959 \quad (11)$$

$$R^2 = 0.985$$

## 3) 咬边深度及锐度对应力集中的影响

根据表 4 数据, 分析当咬边宽度  $w$  及咬边长度  $l$  一定时, 咬边深度  $h$  和咬边锐度  $\mu$  对应力集中系数的影响。对表 2 数据进行回归分析可得  $SCF$  与  $h$ 、 $\mu$  之间的关系, 如下图 11 和图 12 所示。

由图 11、12 可知: 随着咬边深度的增加, 钢管焊趾处应力集中系数逐渐增大,  $SCF$  与  $h$  呈非线性关系;  $SCF$  随着  $\mu$  的增大而增大,  $SCF$  与  $\mu$  呈非线性关系。分别对以上数据进行回归分析, 可得  $SCF$  与  $h$ 、 $\mu$  的关系式, 如下:

$SCF$  与  $h$  关系:

$$SCF = -0.52581e^{-\frac{h}{0.42658}} + 2.35941 \quad (12)$$

$$R^2 = 0.9655$$

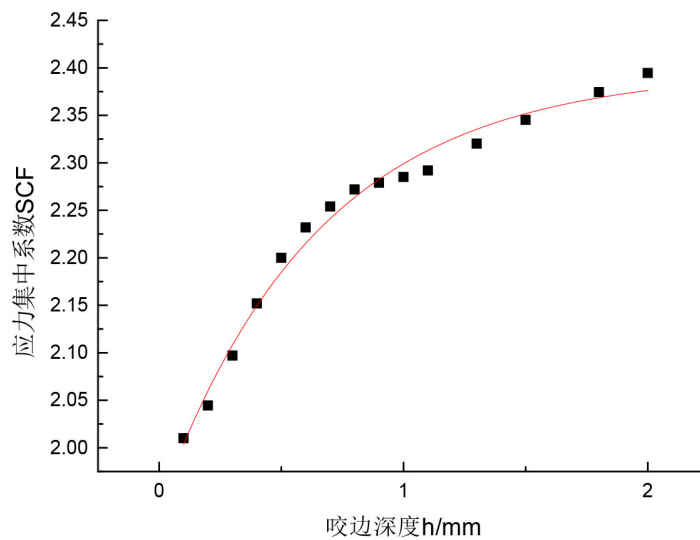
SCF 与  $\mu$  关系:

$$SCF = -0.52581e^{-\frac{h}{0.17063}} + 2.35941 \quad (13)$$

$$R^2 = 0.9655$$

**Table 4.** Analysis of the influence of undercut depth and sharpness on stress concentration of steel pipe weld toe  
**表 4.** 咬边深度及锐度对钢管焊趾应力集中影响分析表

序号	咬边深度 $h/mm$	咬边宽度 $w/mm$	咬边长度 $l/mm$	咬边锐度 $\mu$	SCF
YB-5	0.6	2.5	477.28	0.24	2.231
YB-16	0.1	2.5	477.28	0.04	2.01
YB-17	0.2	2.5	477.28	0.08	2.0445
YB-18	0.3	2.5	477.28	0.12	2.097
YB-19	0.4	2.5	477.28	0.16	2.152
YB-20	0.5	2.5	477.28	0.2	2.2
YB-21	0.7	2.5	477.28	0.28	2.254
YB-22	0.8	2.5	477.28	0.32	2.272
YB-23	0.9	2.5	477.28	0.36	2.279
YB-24	1	2.5	477.28	0.4	2.285
YB-25	1.1	2.5	477.28	0.44	2.292
YB-26	1.3	2.5	477.28	0.52	2.3202
YB-27	1.5	2.5	477.28	0.6	2.3452
YB-28	1.8	2.5	477.28	0.72	2.3744
YB-29	2	2.5	477.28	0.8	2.3945



**Figure 11.**  $h$  influence curve of SCF  
**图 11.**  $h$  对 SCF 的影响曲线

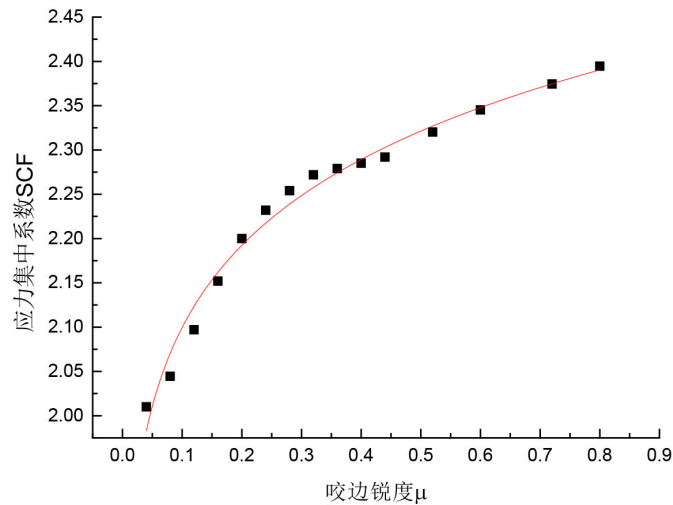


Figure 12.  $\mu$  Influence curve on SCF  
图 12.  $\mu$  对 SCF 的影响曲线

### 3.4. 考虑咬边缺陷的 SCF 数值解

空心球规格  $D400 \times 10$ ，钢管规格为  $\Phi 152 \times 5.5$ ，当焊趾处无缺陷时，应力集中系数为 1.78048。表 2 列出了不同咬边深度、宽度以及锐度所对应钢管焊趾处的应力集中系数，其均值为 2.18394，相比无缺陷时应力集中系数可知咬边对钢管焊趾处应力集中系数影响较大。因此，为了考虑咬边对钢管焊趾处应力集中系数的影响，引入焊接缺陷咬边修正系数  $\theta$ ，得出钢管焊趾处存在咬边时的应力集中系数数值解为：

$$SCF = \theta \left[ 0.96 \left( \frac{d}{t} \right)^{-0.17} \left( \frac{D}{T} \right)^{0.32} \right] \quad (14)$$

其中  $\theta$  取  $2.18394/1.78048 = 1.2266$  带入上式并简化求得钢管焊趾处有焊接缺陷咬边存在时的应力集中求解公式：

$$SCF = 1.2 \left( \frac{d}{t} \right)^{-0.17} \left( \frac{D}{T} \right)^{0.32} \quad (15)$$

## 4. 结论

1) 通过 ABAQUS 有限元分析，研究了不同焊接空心球节点的直径与壁厚和无缝钢管直径与壁厚对焊接空心球节点钢管焊趾处应力集中系数的影响。分别进行单因素和多因素回归分析，得出无缺陷时钢管焊趾处应力集中系数的计算公式。

2) 研究了钢管焊趾处存在咬边缺陷对应力集中系数的影响，分别拟合了咬边深度、宽度及锐度对应力集中系数的影响公式。

3) 求得焊接缺陷咬边修正系数  $\theta$ ，得出钢管焊趾处存在咬边时的应力集中系数数值解，为实际工程提供了参考依据。

## 参考文献

- [1] 闰翔宇, 齐国材, 马青. 空间网格结构焊接空心球节点刚度研究综述[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(S1): 84-94.
- [2] Zhao, Z., Zhu, H. and Chen, Z. (2016) Mechanical Behavior of Single-Layer Reticulated Shell Connected by Welded

Hollow Spherical Joints with Considering Welding Residual Stress. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **60**, 61-69.

- [3] 薛少清, 焦晋峰. 十字形板-焊接空心球节点热点应力集中的有限元分析及试验研究[J]. 钢结构, 2017, 32(6): 46-51.
- [4] 秦冬祺. 网架结构空心球节点的有限元研究[J]. 工程力学, 1990, 7(1): 34-39.
- [5] 雷宏刚. 网架焊接空心球节点静力及疲劳性能研究[J]. 建筑结构学报, 1993, 14(1): 2-7.
- [6] 雷宏刚. 焊接空心球节点的球面应力分析[J]. 太原工业大学学报, 1994(1): 10-17.
- [7] 赵志伟, 雷宏刚. 网架结构中“焊接空心球-钢管”节点的热点应力集中分析[C]. 2008.
- [8] 赵志伟. 网架结构钢管-焊接空心球连接节点的应力集中分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2008.
- [9] 杨雪. 平板网架中焊接空心球节点不同连接型式的应力集中分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2009.
- [10] 闫亚杰. 空间网格结构中钢管-焊接空心球连接节点疲劳性能的理论及试验研究[D]: [博士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [11] 戎操. 焊接空心球节点应力集中系数公式和空心球表面应力公式回归分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2011.

**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)