

Test and Research on Residual Stress of Rolled Tube and Hollow Ball of Cross Plate Welded Hollow Spherical Joints in Grid Structure Based on Blind Hole Method

Jingjian Han*, Honggang Lei#, Guoyun Lu, Yang Li

College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi
Email: 15536675818@163.com, #lhgang168@126.com

Received: Apr. 4th, 2020; accepted: Apr. 30th, 2020; published: May 7th, 2020

Abstract

Based on the blind hole method, the residual stress on the surface of three welded hollow spherical joint seamless steel tubes of the same specification was experimentally measured, and the strain relief coefficient of the strain gage selected in this experiment was calculated according to Kirsch's theoretical solution. According to the Scara-Mangas empirical formula, the calculated radial and hoop residual stresses of the spherical surface are plastically modified, and finally the residual stress distribution diagrams near the toe and away from the toe of the steel pipe are obtained. The effects of residual stresses near the welded toe of the steel pipe and away from the welded toe on the strength and fatigue of joints in the engineering field were discussed.

Keywords

Rolling, Residual Stress, Welded Hollow Ball Joint, Blind Hole Method

基于盲孔法的焊接空心球节点网架中无缝钢管表面残余应力的测试研究

韩敬鉴*, 雷宏刚#, 路国运, 李洋

太原理工大学土木工程学院, 山西 太原
Email: 15536675818@163.com, #lhgang168@126.com

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 韩敬鉴, 雷宏刚, 路国运, 李洋. 基于盲孔法的焊接空心球节点网架中无缝钢管表面残余应力的测试研究[J]. 土木工程, 2020, 9(5): 366-381. DOI: 10.12677/hjce.2020.95040

收稿日期：2020年4月4日；录用日期：2020年4月30日；发布日期：2020年5月7日

摘要

基于盲孔法对同种规格的三个焊接空心球节点无缝钢管表面残余应力进行了试验测量，根据Kirsch理论解计算了本次试验选取的应变片的应变释放系数。依据Scara-Mangas经验公式对计算得到的球面径向、环向残余应力进行塑性修正，最终得出钢管焊趾附近以及远离焊趾表面残余应力分布图。探讨了钢管焊趾附近以及远离焊趾表面残余应力对工程领域中节点强度、疲劳的影响。

关键词

轧制，残余应力，焊接空心球节点，盲孔法

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

空间网格结构因为跨度大、整体性好、自重轻，在工业建筑与公共建筑中得到普遍运用[1]。焊接空心球节点是网架结构常用的节点形式之一[2]，该节点中钢管通常采用热轧的无缝钢管，而钢材在冶炼、轧制过程中，由于不均匀的冷却过程和组织结构的变化，可能出现较大的残余应力[3]。

残余应力是轧件在轧制过程中产生的平衡于其内部的应力。实践证明，残余应力直接影响轧件的疲劳强度、抗应力腐蚀能力、尺寸稳定性和使用寿命[4]。同时有研究表明，钢在热轧和冷轧过程中因不均匀塑性变形产生的残余应力最高分别可达到屈服强度的 20%和 70% [5] [6]。目前，型钢等金属材料的残余应力已被大量学者深入研究，但对于焊接空心球节点残余应力测试尚无文献记载。

早在 20 世纪 30 年代人们就开始研究各种测试残余应力的方法[7]。1934 年，小孔释放法测量残余应力由德国学者 J. Mathar [8]提出，根据钻孔是否钻通，小孔释放法又可分为通孔法和盲孔法。目前半无损的盲孔测量法在工程领域应用较多。之后由 Soete 和 Vancromburgge [9]发展完善并形成一种应用电阻应变仪测量的基本方法。残余应力直接由理论推导式得出。本文主要通过盲孔法对焊接空心球节点热轧无缝钢管焊趾附近以及远离焊趾处表面的残余应力进行测量，得到应力分布规律。

2. 焊接空心球节点设计

焊接空心球节点通常会通过构造设计来避免节点的受压失稳破坏，将节点的破坏形式主要转变成更易控制的强度破坏。而构造设计主要涉及到管径、球径和壁厚等，我国《空间网格结构技术规程》中提出了焊接空心球截面规格尺寸的相关规定。网架和双层网壳的空心球外径和壁厚之比在 25~45 之间；单层网架取 20~35；空心球外径与钢管外径之比在 2.4~3.0 之间；空心球壁厚与主钢管壁厚之比在 1.5~2.0 之间；空心球壁厚不宜小于 4 mm。因此本文最终取钢管外径为 159 mm，壁厚为 8 mm，取空心球外径为 400 mm，壁厚为 10 mm。焊接空心球节点材料均为 Q235-B 钢材且管-球采用对接焊缝，具体参数见表 1，试件图详见图 1。

Table 1. The table of cross plate welded hollow spherical
表 1. 十字板焊接空心球节点试件表

试件编号	试件数量	焊接球规格/mm	管规格/mm	管与球连接方式
KQ6-3	1	Φ 400 × 10	Φ 160 × 10	坡口焊
KQ6-4	1	Φ 400 × 10	Φ 160 × 10	坡口焊
KQ6-5	1	Φ 400 × 10	Φ 160 × 10	坡口焊

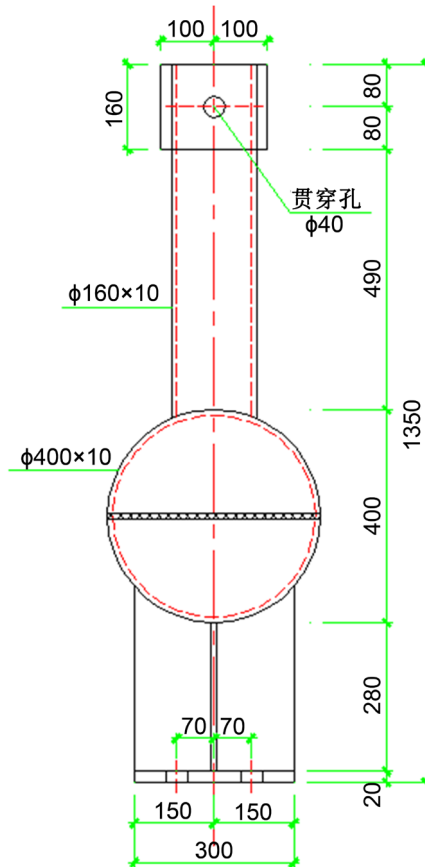


Figure 1. Welded hollow ball test piece (mm)
图 1. 焊接空心球试件(mm)

3. 焊接空心球节点残余应力测试

本次试验采用盲孔法测量残余应力，试验主要包括应变片的粘贴和钻孔测量两部分内容。试验用到的主要仪器 ZS- II A 型钻孔装置、CM-1L-10 型静态电阻应变仪、万用表等。

3.1. 测点的选择与布置

根据焊接空心球节点球面特性，并充分避免焊缝的影响，测量其残余应力时在钢管焊趾附近以及在焊趾上方 400 mm 处均匀布置测点，然后在残余应力较大处密布测点，即可得到较为精确的钢管表面残余应力分布曲线。当钻孔深度达到 1.2 倍孔径时(美国材料试验学会要求 1.2 D)，表面应力进一步释放是极小的，所测得的应变值将趋于稳定[10]。本次试验沿管面和球面均匀布置 8 个测点，每个测点盲孔直径为 1.5 mm，孔深 2 mm。打孔顺序为①→⑤→⑦→③→②→⑥→④→⑧，具体如图 2~4 所示。



Figure 2. Physical drawing of steel pipe measuring point arrangement
图 2. 钢管测点布置实物图

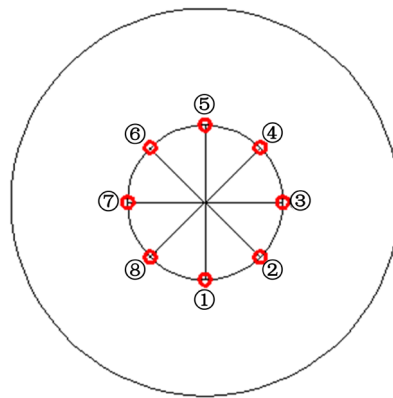


Figure 3. Top view of measuring point layout
图 3. 测点布置俯视图

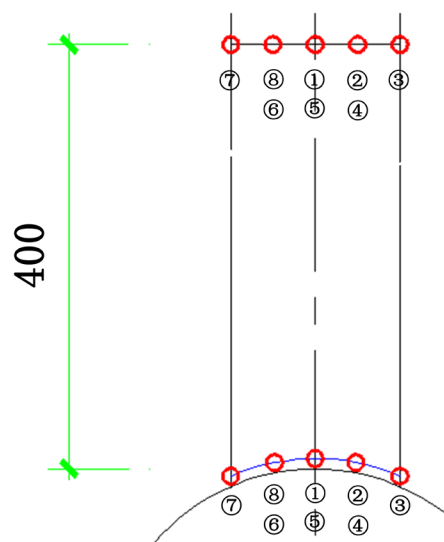


Figure 4. Front view of measuring point layout
图 4. 测点布置正视图

3.2. 应变片的选择和粘贴

3.2.1. 应变片的选择

本试验选用由宁波江东耀南机电设备有限公司生产的单向电阻应变计 BX120-2CA。应变片的相关参数见表 2。

Table 2. Strain gauge parameters

表 2. 应变片参数

应变片类型	电阻值/ Ω	灵敏系数	栅长 \times 栅宽/mm	精度等级
三向	119.8 ± 0.1	$2.08 \pm 1\%$	2.0×1.0	A

3.2.2. 应变片的粘贴

在本次试验中，测点处残余应力的主应力方向未知，所以应选用三向应变花并按照如图 5 粘贴。在粘贴时对试件表面进行打磨处理，保证应变花与试件表面接触良好。借助万用表监测应变花与试件表面绝缘后再连接静态电阻应变仪并调零。



Figure 5. Schematic diagram of three-way strain flower

图 5. 三向应变花示意图

3.3. 测量步骤

盲孔法测量步骤主要由安装钻具对中、钻孔、检测电阻应变仪读数。在测点处稳定固定好钻孔台座，在塞入 2 mm 厚垫片后打开电钻开始垂直钻孔。待 1~2 分钟后测读应变仪读数。图 6 为试验过程。



(a) 安装钻具



(b) 对中

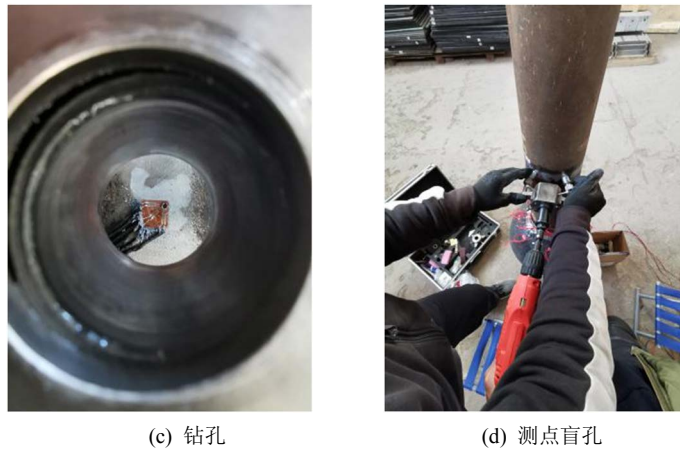


Figure 6. Specimen point drilling diagram
图 6. 试件测点钻孔图

4. 残余应力的计算、分布与结果分析

4.1. 盲孔法测定残余应力的原理

钻盲孔的目的是将构件内由于轧制、冷弯过程等因素产生的残余应力场和残余应变场释放，原来盲孔处处于平衡的应力场失去平衡，使盲孔附近产生释放应变。随即原应力场重新达到平衡，测量出前后应变的变化量，称之为释放应变，根据相关弹性力学原理[11]即可推算出盲孔处(测点)初始的残余应力。

通常结构表面残余应力是平面应力状态，两向主应力及主应力方向角均未知。所以需采用三向应变花进行测量。三向应变花测量得到钻孔前后的应变值 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 。

通过数学公式推导(将弹性模量 E 整合到应变释放系数 A 、 B 中)，以应变反推应力[12] [13]，得到：

$$\begin{cases} \sigma_{1,2} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} \mp \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \\ \tan 2\theta = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \end{cases} \quad (1)$$

式中： ε —应变花测量的应变值；

θ —主应力方向角；

A 、 B —应变释放系数；

$\sigma_{1,2}$ —残余主应力。

得到残余主应力 σ_1, σ_2 后，即可通过弹性力学坐标变换得到测点处径向和环向残余应力，如式(2)：

$$\begin{cases} \sigma_\rho = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\theta \\ \sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\theta \end{cases} \quad (2)$$

式中： σ_ρ —径向应力；

σ_θ —环向应力。

4.2. 应变释放系数 A 、 B 的计算

本次试验被测构件材料为 Q235B 钢材，其材料性质为：

弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa。

泊松比 $\mu = 0.33$ 。

三向应变花的计算图示[14]如图 7 所示。

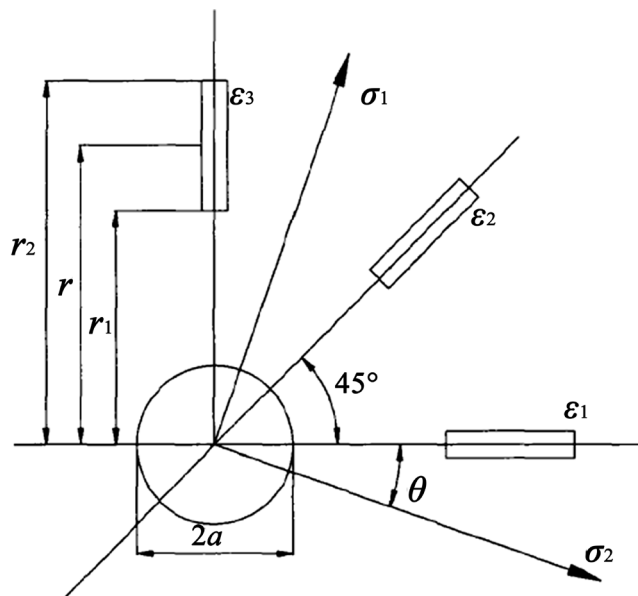


Figure 7. Blind-hole method strain flowers calculation diagram
图 7. 盲孔法应变花计算简图

d —小孔孔径, mm;

r —孔中心到应变片敏感栅轴线中心距离, mm;

r_1 —孔中心到应变片敏感栅近端距离, mm;

r_2 —孔中心到应变片敏感栅远端距离, mm;

本试验中, d 取 1.5 mm, r 取 4.0 mm, r_1 取 3.0 mm, r_2 取 5.0 mm。

本文的应变释放系数的计算方法[15] [16]主要用基于通孔应变释放系数的 Kirsch 理论解, 考虑了应变片尺寸。Kirsch 理论解适用于通孔情况下的应变释放系数的计算, 如式(3):

$$\begin{cases} A = -\frac{1+\mu}{2E} \cdot \left(\frac{d^2}{4r_1r_2} \right) \\ B = \frac{d^2}{2Er_1r_2} \left[-1 + \frac{1+\mu}{4} \cdot \frac{d^2(r_1^2 + r_1r_2 + r_2^2)}{4r_1^2r_2^2} \right] \end{cases} \quad (3)$$

对于盲孔法, 根据圣维南原理可知, 在孔径 d 一定的条件下, 孔深 h 增加, 当 h/d 介于 1.0~1.5 时, 释放应变基本保持不变, 应变释放系数与通孔的 Kirsch 理论解接近。本试验 h/d 等于 1.33, 所以可近似使用 Kirsch 理论解计算, 代入试验数据得:

$$\begin{cases} A = -0.121 \times 10^{-6} / \text{MPa} \\ B = -0.305 \times 10^{-6} / \text{MPa} \end{cases}$$

4.3. 残余应力计算结果及塑性修正

根据式(1)、(2)和(3)对三个焊接空心球节点轧制钢管处残余应力进行计算, 结果见表 3~8。在钻孔过程中, 孔周也会产生应力集中现象。规范规定[17], 当构件内部残余应力的数值超过材料屈服强度的 60%

以上,即进入塑性阶段。这时,由于钻孔而产生的释放应变就包含塑性应变,不能通过弹性理论计算,所以要对计算结果进行塑性修正。Scara-Mangas 等人研究总结了基于弹性理论下对计算应力进行修正的经验公式[18][19],式(4)。

$$\sigma_f = \frac{\sigma_f^*}{0.20 \cdot (\sigma_f^*/\sigma_s) + 0.87} \quad (4)$$

式中: σ_f —塑性修正后的应力大小;

σ_f^* —计算应力;

σ_s —钢材的屈服强度。

当 $\sigma_f^*/\sigma_s \geq 0.65$ 时,可采用式(4)对计算残余应力进行塑性修正。

本试验所采用的三个焊接空心球节点钢材为 Q235-B,实测屈服强度 $\sigma_s = 275$ MPa,对计算焊接残余应力超过材料屈服强度 65% 以上的结果进行塑形修正后,结果如下:

(1) 对构件 KQ6-3 远离焊趾处进行塑性修正后测量结果见下表 3 所示。

Table 3. KQ6-3 residual stress plastic correction calculation table far away from toe
表 3. KQ6-3 远离焊趾处残余应力塑性修正计算表

KQ6-3 远离焊趾处				
孔号	径向应力 σ_r /MPa	径向修正/MPa	环向应力 σ_θ /MPa	环向修正/MPa
①号	5.9	5.9	-10.1	-10.1
②号*	272.6	255.2	106.2	106.2
③号*	247.0	235.3	174.0	174.0
④号*	200.9	197.7	186.3	185.3
⑤号*	492.9	401.2	256.5	242.8
⑥号*	286.8	265.9	113.1	113.1
⑦号*	403.8	347.0	274.0	256.2
⑧号	127.9	127.9	116.2	116.2

注:加“*”的孔号为测量残余应力超过屈服强度的 65%,需要进行塑性修正。

对修正后的径向残余应力分析可知:最大径向拉应力为⑤号测点,达到 401.2 MPa,超过了钢材屈服强度的 45.9%;但此构件远离焊趾处并未检测到径向残余压应力。对修正后的环向残余应力分析可知:最大环向拉应力为⑤号测点,达到 242.8 MPa,达到了钢材屈服强度的 88.3%;最大环向压应力为①号测点,达到 10.1 MPa,达到了钢材屈服强度的 3.7%。

(2) 对构件 KQ6-3 焊趾处进行塑性修正后测量结果见下表 4 所示。

Table 4. KQ6-3 calculation table for plastic correction of residual stress at weld toe
表 4. KQ6-3 焊趾处残余应力塑性修正计算表

KQ6-3 焊趾处				
孔号	径向应力 σ_r /MPa	径向修正/MPa	环向应力 σ_θ /MPa	环向修正/MPa
①号*	-119.0	-119.0	-333.6	-299.8
②号*	-78.8	-78.8	-293.2	-270.7

Continued

③号	-10.8	-10.8	-216.0	-216.0
④号	-159.8	-159.8	-260.1	-260.1
⑤号	-61.9	-61.9	-218.0	-218.0
⑥号	-86.6	-86.6	-250.1	-250.1
⑦号*	-123.9	-123.9	-276.5	-258.1
⑧号	-49.0	-49.0	-196.8	-196.8

注：加“*”的孔号为测量残余应力超过屈服强度的 65%，需要进行塑性修正。

对修正后的径向残余应力分析可知：此构件焊趾处并未检测到径向残余拉应力；最大径向压应力为④号测点，达到 159.8 MPa，达到了钢材屈服强度的 58.1%。对修正后的环向残余应力分析可知：此构件焊趾处并未检测到环向残余拉应力；最大环向压应力为①号测点，达到 299.8 MPa，超过了钢材屈服强度的 9.0%。

(3) 对构件 KQ6-4 远离焊趾处进行塑性修正后测量结果见下表 5 所示。

Table 5. KQ6-4 residual stress plastic correction calculation table far away from toe
表 5. KQ6-4 远离焊趾处残余应力塑性修正计算表

KQ6-4 远离焊趾处				
孔号	径向应力 σ_r /MPa	径向修正/MPa	环向应力 σ_θ /MPa	环向修正/MPa
①号*	224.6	217.4	145.8	145.8
②号	104.8	104.8	55.1	55.1
③号	-10.5	-10.5	-44.1	-44.1
④号	114.1	114.1	87.9	87.9
⑤号	76.2	76.2	54.3	54.3
⑥号	-17.7	-17.7	-45.4	-45.4
⑦号	40.9	40.9	26.3	26.3
⑧号	87.1	87.1	81.2	81.2

注：加“*”的孔号为测量残余应力超过屈服强度的 65%，需要进行塑性修正。

对修正后的径向残余应力分析可知：最大径向拉应力为①号测点，达到 217.4 MPa，达到了钢材屈服强度的 79.1%；最大径向压应力为⑥号测点，达到 17.7 MPa，达到了钢材屈服强度的 6.4%。对修正后的环向残余应力分析可知：最大环向拉应力为①号测点，达到 145.8 MPa，达到了钢材屈服强度的 53.0%；最大环向压应力为⑥号测点，达到 45.4 MPa，达到了钢材屈服强度的 16.5%。

(4) 对构件 KQ6-4 焊趾处进行塑性修正后测量结果见下表 6 所示。

Table 6. KQ6-4 calculation table for plastic correction of residual stress at weld toe
表 6. KQ6-4 焊趾处残余应力塑性修正计算表

KQ6-3 焊趾处				
孔号	径向应力 σ_r /MPa	径向修正/MPa	环向应力 σ_θ /MPa	环向修正/MPa
①号	-40.5	-40.5	-195.2	-195.2
②号	18.2	18.2	-275.0	-275.0

Continued

③号*	-179.5	-179.5	-405.7	-348.2
④号	-34.1	-34.1	-231.1	-231.1
⑤号	-56.2	-56.2	-124.8	-124.8
⑥号	9.8	9.8	-140.4	-140.4
⑦号	15.5	15.5	-61.8	-61.8
⑧号	74.1	74.1	-64.5	-64.5

注：加“*”的孔号为测量残余应力超过屈服强度的 65%，需要进行塑性修正。

对修正后的径向残余应力分析可知：最大径向拉应力为⑧号测点，达到 74.1 MPa，达到了钢材屈服强度的 26.9%；最大径向压应力为③号测点，达到 179.5 MPa，达到了钢材屈服强度的 65.3%。对修正后的环向残余应力分析可知：此构件焊趾处并未检测到环向残余拉应力；最大环向压应力为③号测点，达到 348.2 MPa，超过了钢材屈服强度的 26.6%。

(5) 对构件 KQ6-5 远离焊趾处进行塑性修正后测量结果见下表 7 所示。

Table 7. KQ6-5 residual stress plastic correction calculation table far away from toe
表 7. KQ6-5 远离焊趾处残余应力塑性修正计算表

KQ6-5 远离焊趾处				
孔号	径向应力 σ_r /MPa	径向修正/MPa	环向应力 σ_θ /MPa	环向修正/MPa
①号	-29.4	-29.4	-105.3	-105.3
②号	109.9	109.9	83.7	83.7
③号	73.0	73.0	70.1	70.1
④号	-9.0	-9.0	-49.9	-49.9
⑤号	-35.7	-35.7	-145.2	-145.2
⑥号*	492.1	400.8	371.0	325.5
⑦号	170.7	170.7	124.0	124.0
⑧号	-14.7	-14.7	-48.3	-48.3

注：加“*”的孔号为测量残余应力超过屈服强度的 65%，需要进行塑性修正。

对修正后的径向残余应力分析可知：最大径向拉应力为⑥号测点，达到 400.8 MPa，超过了钢材屈服强度的 45.7%；最大径向压应力为⑤号测点，达到 35.7 MPa，达到了钢材屈服强度的 13.0%。对修正后的环向残余应力分析可知：最大环向拉应力为⑥号测点，达到 325.5 MPa，超过了钢材屈服强度的 18.4%；最大环向压应力为⑤号测点，达到 145.2 MPa，达到了钢材屈服强度的 52.8%。

(6) 对构件 KQ6-5 焊趾处进行塑性修正后测量结果见下表 8 所示。

Table 8. KQ6-5 calculation table for plastic correction of residual stress at weld toe
表 8. KQ6-5 焊趾处残余应力塑性修正计算表

KQ6-3 焊趾处				
孔号	径向应力 σ_r /MPa	径向修正/MPa	环向应力 σ_θ /MPa	环向修正/MPa
①号*	-86.4	-86.4	-334.5	-300.5
②号	245.0	245.0	-165.0	-165.0

Continued

③号*	-303.1	-278.0	-522.0	-417.7
④号*	-203.4	-203.4	-499.7	-405.1
⑤号*	49.3	49.3	-36.7	-36.7
⑥号*	-268.6	-268.6	-607.1	-462.9
⑦号*	-139.2	-139.2	-340.7	-304.8
⑧号*	426.9	361.6	-297.5	-273.8

注：加“*”的孔号为测量残余应力超过屈服强度的 65%，需要进行塑性修正。

对修正后的径向残余应力分析可知：最大径向拉应力为⑧号测点，达到 361.6 MPa，超过了钢材屈服强度的 31.5%；最大径向压应力为③号测点，达到 278.0 MPa，超过了钢材屈服强度的 1.1%。对修正后的环向残余应力分析可知：此构件焊趾处并未检测到环向残余拉应力；最大环向压应力为⑥号测点，达到 462.9 MPa，超过了钢材屈服强度的 68.3%。

4.4. 残余应力曲线及球面应力分布图

焊接空心球试件塑性修正后的残余应力曲线以及残余应力球面分布图如下。

(1) 构件 KQ6-3 远离焊趾处

KQ6-3 远离焊趾处残余应力曲线图及球面分布图见图 8、图 9。

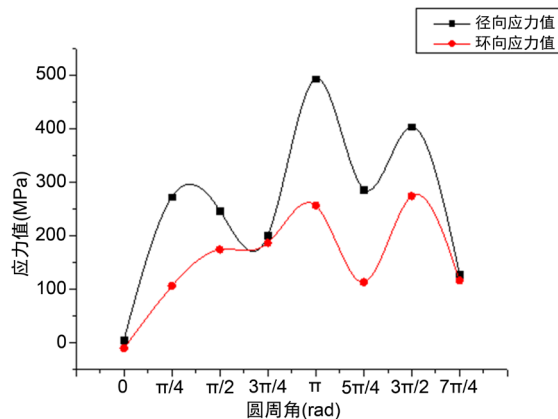


Figure 8. KQ6-3 residual stress curve away from weld toe
图 8. KQ6-3 远离焊趾处残余应力曲线图

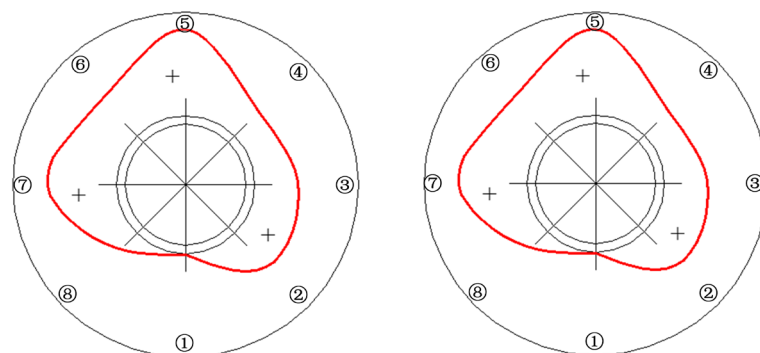


Figure 9. KQ6-3 radial and hoop residual stress spherical distribution diagram away from the welding toe
图 9. KQ6-3 远离焊趾处径向、环向残余应力球面分布图

(2) 构件 KQ6-3 焊趾处

KQ6-3 焊趾处残余应力曲线图及球面分布图见图 10、图 11。

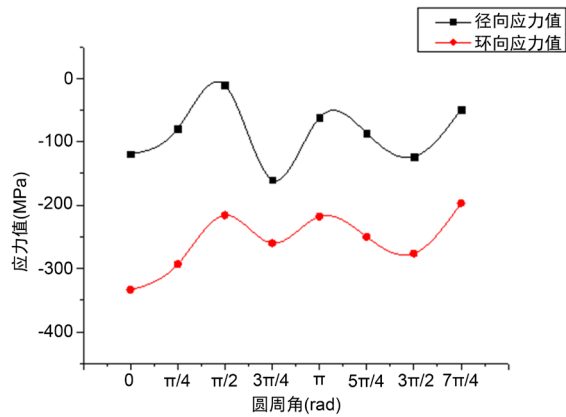


Figure 10. KQ6-3 curve of residual stress at weld toe
图 10. KQ6-3 焊趾处残余应力曲线图

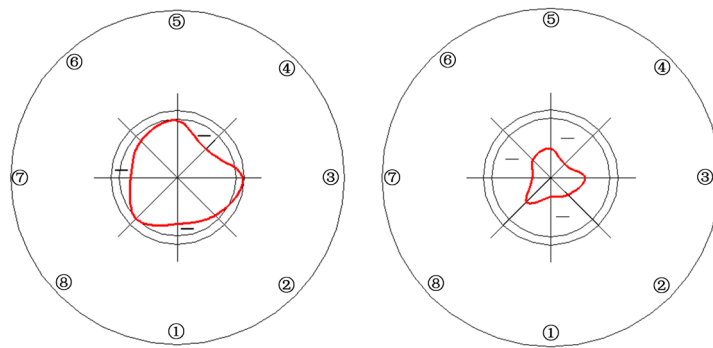


Figure 11. KQ6-3 radial and hoop residual stress spherical distribution at the welding toe
图 11. KQ6-3 焊趾处径向、环向残余应力球面分布图

(3) 构件 KQ6-4 远离焊趾处

KQ6-4 远离焊趾处残余应力曲线图及球面分布图见图 12、图 13。

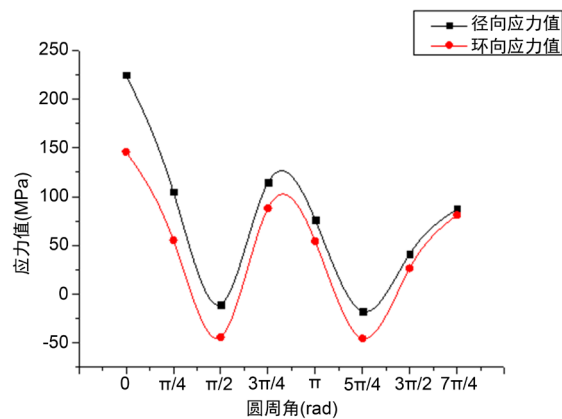


Figure 12. KQ6-4 residual stress curve away from weld toe
图 12. KQ6-4 远离焊趾处残余应力曲线图

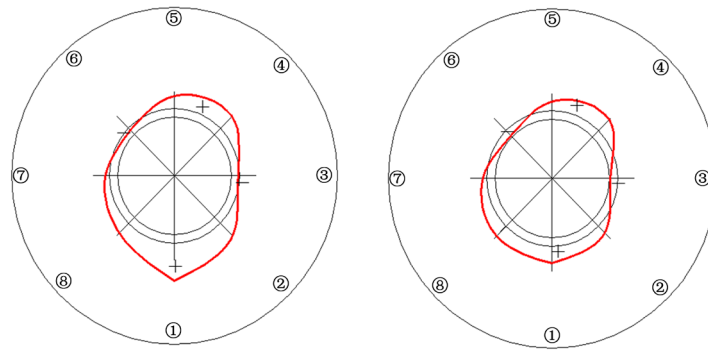


Figure 13. KQ6-4 spherical distribution of radial and hoop residual stress away from the welding toe
图 13. KQ6-4 远离焊趾处径向、环向残余应力球面分布图

(4) 构件 KQ6-4 焊趾处

KQ6-4 焊趾处残余应力曲线图及球面分布图见图 14、图 15。

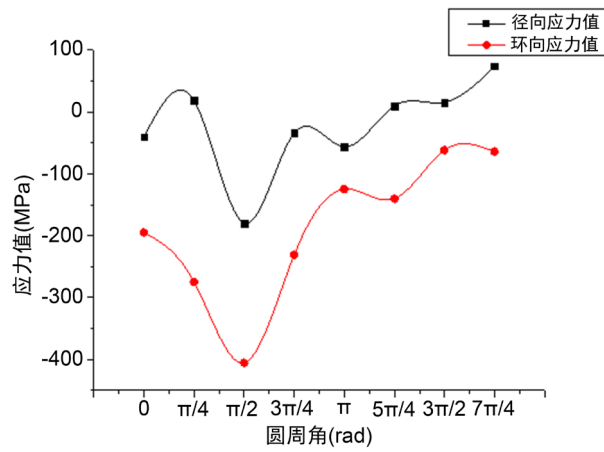


Figure 14. KQ6-4 curve of residual stress at weld toe
图 14. KQ6-4 焊趾处残余应力曲线图

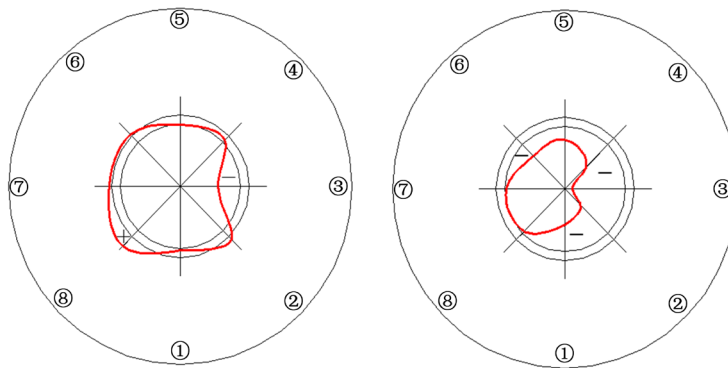


Figure 15. KQ6-4 radial and hoop residual stress spherical distribution at the welding toe
图 15. KQ6-4 焊趾处径向、环向残余应力球面分布图

(5) 构件 KQ6-5 远离焊趾处

KQ6-5 远离焊趾处残余应力曲线图及球面分布图见图 16、图 17。

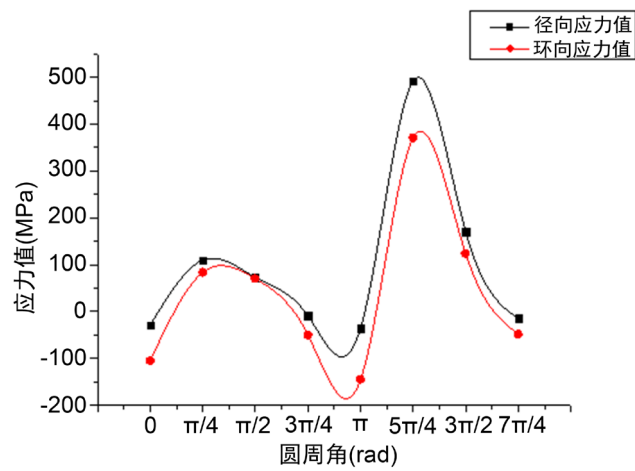


Figure 16. KQ6-5 residual stress curve away from weld toe

图 16. KQ6-5 远离焊趾处残余应力曲线图

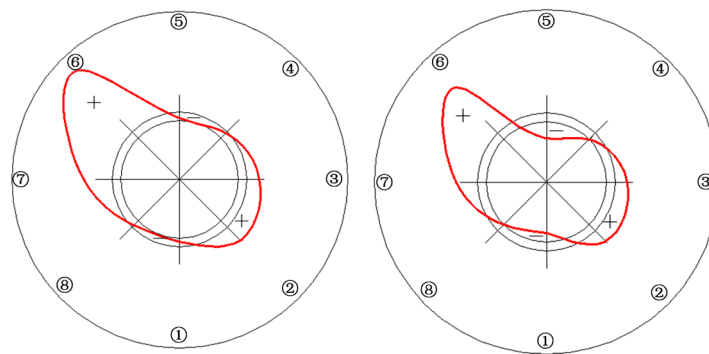


Figure 17. KQ6-5 radial and hoop residual stress spherical distribution away from the welding toe

图 17. KQ6-5 远离焊趾处径向、环向残余应力球面分布图

(6) 构件 KQ6-5 焊趾处

KQ6-5 焊趾处残余应力曲线图及球面分布图见图 18、图 19。

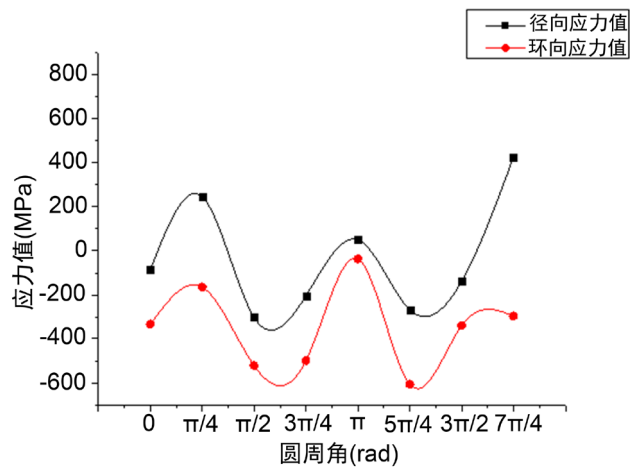


Figure 18. KQ6-5 curve of residual stress at weld toe

图 18. KQ6-5 焊趾处残余应力曲线图

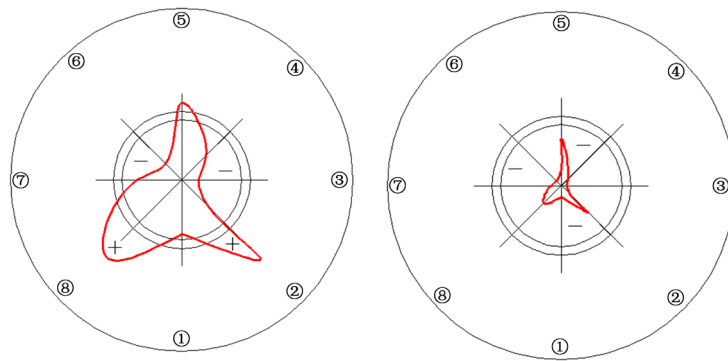


Figure 19. KQ6-5 radial and hoop residual stress spherical distribution at the welding toe
图 19. KQ6-5 焊趾处径向、环向残余应力球面分布图

通过图 8~19 可知:

- (1) 焊接空心球节点无缝钢管焊趾处和远离焊趾处的径向残余应力与环向残余应力的变化趋势大致相同, 但是对于远离焊趾处径向残余应力略大于环向残余应力, 对于焊趾处环向残余应力略大于径向残余应力;
- (2) 由应力球面分布图也可看出两个位置的径向残余应力与环向残余应力沿球面分布形状大致相同;
- (3) 由残余应力球面分布图可以看出, 对于焊接空心球节点无缝钢管, 远离焊趾处残余应力以拉应力为主, 而焊趾处残余应力以压应力为主, 数值均较大。

5. 结论

本文采用盲孔法对焊接空心球节点网架中热轧无缝钢管表面残余应力进行测试研究, 得到如下结论:

- (1) 焊接空心球节点远离焊趾处的残余拉应力值较大, 压应力值较小。试验结果中部分测点处残余拉应力达到甚至超过母材屈服强度, 最大残余拉应力可达到屈服强度的 145.9%, 而残余压应力最大才达到屈服强度的 52.8%。在残余拉应力较大部位疲劳强度和抗拉强度较低, 而焊接空心球节点常用于悬挂吊车的网架结构, 并且该结构由于疲劳问题和弦杆受拉破坏问题产生的事故已有大量记载, 因此, 本研究对焊接空心球节点网架的研究有重要意义。
- (2) 焊接空心球节点焊趾处的残余拉压应力值均较大, 压应力分布居多。试验结果中部分测点处残余压应力达到甚至超过母材屈服强度, 最大残余压应力可达到屈服强度的 168.3%, 而残余压应力最大可达到屈服强度的 131.5%。这也验证了焊缝处残余应力较大的说法, 并且较大的残余拉应力将对焊缝处的疲劳问题提供依据, 较大压应力有可能引起受剪破坏从而导致起壳和压陷, 因此, 焊趾处的研究将为焊接空心球节点设计提供重大的参考依据。
- (3) 采用盲孔法测量残余应力对工件的损伤较小, 并且操作简单, 结果较为可靠。

基金项目

国家自然科学基金(51578357)。

参考文献

- [1] 王飞, 田少杰, 雷宏刚. 残余应力对钢管-焊接空心球节点疲劳强度的影响分析[J]. 建筑结构, 2018(48): 456-460.
- [2] 秦冬祺. 网架结构空心球节点的有限元分析[J]. 工程力学, 1990, 7(1): 34-39.
- [3] 童乐为, 赵俊, 周锋, 等. Q460 高强度焊接 H 型钢残余应力试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(1): 51-55.

- [4] 杜秀丽, 肖湘, 李捷. 冷轧带钢残余应力的实验研究[J]. 机械工程与自动化, 2011(4): 97-101.
- [5] 廖洪彬, 李兴刚, 马鸣龙, 等. 残余应力研究现状及在镁合金中的应用前景[J]. 材料导报, 2012(23): 107-111.
- [6] Cruise, R.B. and Gardner, L. (2008) Residual Stress Analysis of Structural Stainless Steel Sections. *Journal of Constructional Steel Research*, **64**, 352-366.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.08.001>
- [7] 林丽华, 陈立功, 顾明元. 球面压痕测残余应力试验方法研究[J]. 机械强度, 1998(4): 303-306.
- [8] 张定铨. X 射线应力测定基本知识, 第一讲, 残余应力的基本概念[J]. 理化检验(物理分册), 2007(4): 211-213.
- [9] Soete, W. and Vancombrugge, R. (1950) An Industrial Method for the Determination of Residual Stresses. *Proceedings SESA*, **8**, 17-26.
- [10] 中华人民共和国工业和信息化部. CBT 3395-2013 残余应力测试方法, 钻孔应变释放法[S].北京: 中国船舶工业综合技术经济研究院, 2014.
- [11] 袁发荣. 残余应力测试与计算[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1987.
- [12] 杨俊芬, 李渊, 彭奕亮. 盲孔法测试 Q690 高强钢管镀锌前后残余应力[J]. 工程力学, 2015, 32(2): 114-119.
- [13] 杨俊芬, 李渊, 彭奕亮. 盲孔法测试 Q690 带端头钢管的纵向残余应力分布[C]//第 23 届全国结构工程学术会议论文集.北京: 工程力学, 2014: 284-288.
- [14] 刘海锋, 朱彬荣, 胡晓光. 输电塔高强钢管主材残余应力的测试与研究[J]. 电气时代, 2019(12): 68-71.
- [15] 毕征, 单颖春, 刘献栋, 等. 材料塑性应变对某钢制车轮残余应力测试的影响[J]. 计算机辅助工程, 2014, 23(3): 25-29.
- [16] 王元鸷, 张壮南, 张增增. 盲孔法中应变释放系数的数值模拟研究概况[C]//中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会. 北京: 钢结构, 2014: 342-347.
- [17] 陈勇, 高德平, 陈士煊, 等. 钛合金平板电子束焊接残余应力的小孔法测量[J]. 理化检验 - 物理分册, 2001, 37(10): 427-430.
- [18] 王江超, 周方明. 小孔法测量焊接残余应力[J]. 电焊机, 2008, 38(2): 64-66.
- [19] 陆才善. 残余应力测试:小孔释放法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.