

引文格式:翟翔,程欣,李海旺,等. Q460C 高强焊接圆钢管外表面残余应力试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2026, 57(4): 800-807.

ZHAI Xiang, CHENG Xin, LI Haiwang, et al. Experimental study of residual stress on the external surface of Q460C high strength welded circular steel tube [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(4): 800-807.

Q460C 高强焊接圆钢管外表面 残余应力试验研究

翟翔¹, 程欣¹, 李海旺¹, 武海全², 彭辉², 闫月勤²

(1. 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原; 2. 山西五建集团有限公司, 山西 太原)

摘 要:【目的】为研究高强焊接圆钢管残余应力分布模式。【方法】采用盲孔法对2个不同截面尺寸的Q460C圆钢管试件的表面残余应力进行测量,并基于形状改变比能理论对实测结果进行塑性修正。考察了焊接对试件残余应力分布模式的影响规律,并分析了截面尺寸对圆钢管残余应力的影响。【结果】试验结果表明:对于相同焊接条件下直径为650 mm和380 mm的圆钢管,焊缝热影响区范围均为100 mm,焊接对大直径钢管影响较小。对于非热影响区,表面纵向残余应力均为拉应力,且表面横向残余应力明显大于表面纵向残余应力。基于试验结果提出了考虑圆管直径和焊缝热影响区的三折线直管残余应力分布模型,经与试验结果对比表明,提出的表面残余应力分布模型与试验结果吻合良好,可为焊接圆钢管的稳定分析和承载力计算提供参考资料。

关键词:盲孔法;表面残余应力;焊接圆钢管;冷弯成型;高强度钢材

中图分类号:TU391 **文献标识码:**A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20240260

文章编号:1007-9432(2026)04-0800-08

Experimental Study of Residual Stress on the External Surface of Q460C High Strength Welded Circular Steel Tube

ZHAI Xiang¹, CHENG Xin¹, LI Haiwang¹, WU Haiquan², PENG Hui², YAN Yueqin²

(1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China;

2. Shanxi Fifth Construction Group Co., Ltd, Taiyuan, Shanxi, China)

Abstract: 【Purposes】To investigate the residual stress distribution patterns in high-strength welded circular steel tubes, the hole-drilling strain-gage method is used to measure the surface residual stresses of two Q460C circular steel tube specimens with different cross-sectional sizes. 【Methods】Plastic corrections based on the shape change ratio theory were applied to the measured results. The influence of welding on the residual stress distribution pattern of the specimens was examined, and the effect of cross-sectional size on the residual stress of circular steel tubes was analyzed. 【Results】The experimental results show that, for circular steel tubes with diameters of 650 and 380 mm with the same welding conditions, the range of heat-affected zone of weld seam is 100 mm, and welding has a

收稿日期:2024-04-13;修回日期:2024-05-31

基金项目:山西省基础研究计划优秀青年培育项目(202103021222007);中国博士后科学基金项目(2021M692862)

第一作者:翟翔,硕士研究生, (E-mail)zx348291042@163.com

通信作者:程欣,博士,教授,主要从事钢结构方面研究, (E-mail)xchengtyut@126.com

minor effect on larger diameter steel tubes. In the non-heat-affected zone, both the transverse and longitudinal residual stresses on the surface are tensile stresses, with the transverse residual stress being significantly greater than the longitudinal residual stress. According to the experimental results, a three-segment linear residual stress distribution model for straight tubes considering the tube diameter and the heat-affected zone of the weld seam is proposed. Comparison with the experimental results shows that the proposed surface residual stress distribution model aligns well with the experimental results, providing valuable reference for stability analysis and load-bearing capacity calculation of welded circular steel tubes.

Keywords: hole-drilling strain-gage method; surface residual stress; welded circular tube; cold forming; high strength steel

近年来,大跨度空间结构体系在建筑领域迅速发展,钢管结构由于受力性能良好,构件重量轻等特点,在大跨度空间结构中被广泛应用^[1]。焊接圆钢管具有良好的材料利用率和承载性能,是承受风载、波浪荷载构件的最佳截面形式之一^[2]。与普通钢相比,高强焊接圆钢管更适用于大跨度空间结构,能有效减小结构自重^[3]。然而高强焊接圆钢管在冷弯和焊接成型过程中均会不可避免地产生残余应力,而这些残余应力会对结构的刚度、稳定承载力以及疲劳强度等性能产生不利影响^[4-7]。目前,尚未有可直接适用于大直径焊接圆钢管的残余应力分布模型,导致对其组成结构体系的受力分析准确性不足,因此有必要对该类构件的残余应力进行研究。

目前国内外学者针对冷弯成型圆钢管直管状态下残余应力的研究较为广泛。施刚等^[8]通过分割法对 Q345 和 Q420 钢材在不同径厚比下的圆形钢管的内外表面残余应力进行了测量。研究结果显示,与普通钢材相比,高强钢的残余应力分布较均匀;残余应力的分布模式与径厚比之间并没有明显的规律。杨俊芬等^[9]均采用盲孔法对圆钢管试件进行残余应力测量,最终提出了残余应力双折线分布模型。研究结果显示,最大残余拉应力在 $0.95f_y \sim 1.00f_y$ 之间,而最大残余压应力在 $-0.35f_y \sim -0.21f_y$ 之间。赵卫平等^[10]采用盲孔法对不同径厚比 Q460 圆钢管试件进行了残余应力的测量,提出了双折线形残余应力分布模型,埋弧焊最大残余拉应力为 $0.95f_y$,最大残余压应力为 $-0.27f_y$ 。Yan 等^[11]采用盲孔法和分割法分别测量了 Q345、Q420 与 Q690 钢在不同径厚比下圆钢管的残余应力,最终结果表明,径厚比对圆钢管残余应力分布无显著影响,钢材屈服强度会影响圆钢管的残余应力分布。Hu 等^[12]采用分割法测量了 S690 圆管的内外表面残余

应力,并对冷弯后未焊接试件进行了测量。研究结果显示,未焊接钢管的残余应力在自由边缘 15° 以内呈线性分布,而在 15° 以外,残余应力值为 $0.29f_y$ 。相比之下,焊接后的钢管在焊缝处的残余应力接近 f_y ,随着远离焊缝,残余应力逐渐减小至 $0.14f_y$,之后稳步增加至 $0.27f_y$ 并保持稳定。从上述研究可以发现,钢材等级、焊接方式等均对圆钢管残余应力产生重要影响。目前对于直径超过 350 mm 的焊接圆钢管残余应力研究较少,对于高强度大直径焊接圆钢管残余应力的研究则更为有限。

为此,本文基于盲孔法对强度等级为 Q460C 的 $\phi 650 \times 20$ 和 $\phi 380 \times 14$ 两种不同尺寸的焊接圆钢管的表面纵向残余应力进行测量,并提出表面残余应力的分布模型,为此类构件的设计提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

为考虑截面尺寸对残余应力分布的影响,设计并制作了 2 根不同尺寸的 Q460C 高强焊接圆钢管试件,试件具体信息如图 1 所示,试件 R1 为 $\phi 380 \times 14$ mm、R2 尺寸为 $\phi 650 \times 20$ mm,钢管管长均为 2 400 mm。

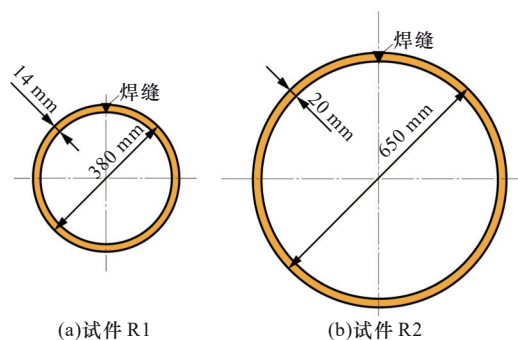


图1 试件信息(mm)

Fig. 1 Specimen information (mm)

1.2 材性试验

采用单向拉伸试验测定钢材在单向受力状态下的屈服强度和极限抗拉强度。钢材材性试验根据《金属材料 拉伸试验:第1部分 室温试验方法》^[13]进行设计,以R2试件为例,标准材性试样尺寸见图2(a)。为避开焊缝对材料性能的影响,试件段布置位置如图2(b)所示;从每个焊接圆钢管试件取3个材性试样,共6个标准材性试样。如图2(c)所示。

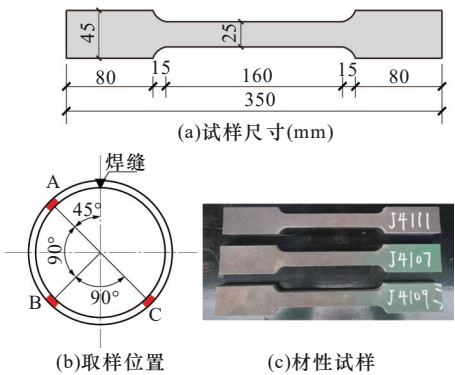


图2 测试布置与材性试样
Fig. 2 Test layout and material properties

拉伸试件的工程应力-应变曲线如图3所示,不同测点位置的应力-应变曲线较为重合,且没有明显的屈服平台。将各试件的屈服强度 f_y 和极限强度 f_u 实测结果按测点位置列于表1中,屈服强度取0.2%的塑性应变所对应的应力值^[14]。可知试件R1屈服强度平均值为650.7 MPa,极限抗拉强度平均值为737.7 MPa;R2试件屈服强度平均值为463.3 MPa,极限抗拉强度平均值为608.6 MPa。

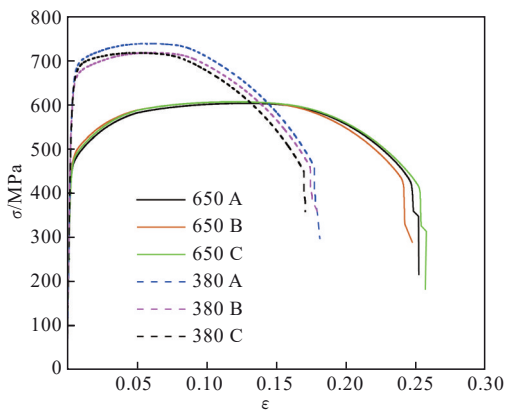


图3 钢材的单轴应力-应变曲线
Fig. 3 Uniaxial stress-strain curves of steels

1.3 残余应力试验测试方案

盲孔法是目前普遍采用的残余应力测试方法之一,其对工件的损伤较小,且所得测量结果较为可靠。因此,本文选择采用盲孔法来测定表面残余应力。

表 1 材性试验结果
Table 1 Material test results

试件编号	f_y /MPa	f_u /MPa	f_y 平均值/ MPa	f_u 平均值/ MPa
380A	660.3	738.9		
380B	640.9	717.9	650.7	727.7
380C	650.8	717.4		
650A	465.2	613.0		
650B	460.3	610.1	463.3	608.6
650C	464.3	602.6		

各试件在测试截面上沿环向设置盲孔测点。直管R1和R2的测试截面测点布置方案分别如图4(a)和图4(b)所示,由于焊缝附近应力分布复杂,对焊缝区进行加密处理。对于R1试件,在焊缝加密区,从焊缝起每隔5°(17 mm)布置一个测点,每侧布置3个;再隔15°(50 mm)布置一个测点,每侧布置一个,共布置9个测点;在远离焊缝区,每隔30°(100 mm)对称布置一个测点共布置9个测点,每个测试截面共有18个测点。对于R2试件,在焊缝加密区,从焊缝起每隔3°(17 mm)布置一个测点,每侧布置3个;再隔9°(50 mm)布置一个测点,每侧布置一个,共布置9个测点;在远离焊缝区,每隔18°(100 mm)对称布置一个测点共布置17个测点,每个测试截面共有26个测点。

为保证残余应力测试的准确性,各试件均在管段的4等分点位置设置测试截面S1—S3,以实现三次重复试验,两根试件的测试截面位置如图4(c)所示。R1试件三个测试截面共设置54个测点;R2试件三个测试截面共设置78个测点。

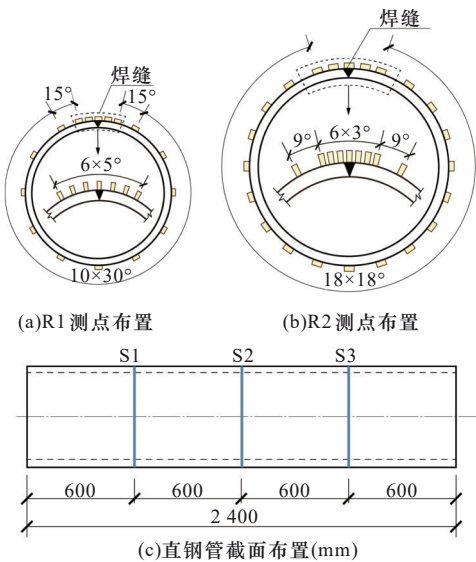


图4 测点截面布置
Fig. 4 Layout of measuring point sections

本试验使用盲孔法流程如下:先将钢管测点打磨至光滑、测点处粘贴三向应变片、连接DH3800静态应变仪,安装ZDL-Ⅲ型钻孔装置以及连接静态应力测量系统软件,钻孔,测量读数。

2 盲孔法残余应力计算原理

采用盲孔法测量残余应力,其基本原理为通过钻孔破坏盲孔处原有的应力状态后,对盲孔附近释放应变进行测量,换算后得到钻孔处原有的应力即为残余应力^[15]。

2.1 标定试验

盲孔法测试最主要的误差来源于孔边塑性变形,在盲孔法的基本计算中,应变释放系数基于弹性假设,但在高应力水平下,盲孔附件会产生塑性应变,同时加工应变也随着应力水平的升高而相应增加^[16],使得测量结果产生较大的误差。因此,应进行标定试验对应变释放系数进行塑性修正以减小钻孔附加应变带来的误差^[17]。

根据GB/T31310—2014《金属材料残余应力测量钻孔应变法》^[18]的相关要求,设计标定试样,其具体尺寸如图5所示。在标定试件中心处粘贴三向应变片,使应变片敏感栅1平行于加载方向。对标定试件施加并维持固定的单向拉力 F ,在持荷状态下钻孔,即可求得在已知应力水平 σ 下的应变释放系数 A 和 B ,其与孔径、孔深、敏感栅尺寸、试件材性等有关。代入参考文献[10]的式(1)中则有:

$$\begin{cases} A = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2\sigma} \\ B = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{2\sigma} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϵ_1 和 ϵ_3 分别为应变片1和3上的释放应变。通过计算形状改变比能可将单向应力状态的计算结果推广至复杂应力状态。形状改变比能 S 可反映不同应力状态下的塑性变形程度,在相应的应力状态下, S 如式(2)所示:

$$S = (1 + \nu^2 - \nu)(\epsilon_1^2 + \epsilon_3^2) - (1 + \nu^2 - 4\nu) \times \epsilon_1 \epsilon_3 \quad (2)$$

式中: ν 为钢材泊松比,取0.3; ϵ_1 和 ϵ_3 分别对应钻孔应变敏感栅1和3的释放应变。

为了得到不同应力水平下的 A 和 B ,选择将标定应力 σ 取为 $0.1f_y$ 、 $0.2f_y$ 、 $\dots$ 、 $0.8f_y$,共划分为8个应力水平,其中 f_y 表示实测屈服强度。对试件R2在各个应力水平下进行3次重复的标定试验,并将3次试验结果的平均值作为最终结果汇总于图6中。由

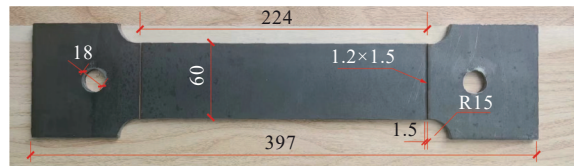


图5 标定试样(mm)

Fig. 5 Calibrations of specimen (mm)

图6知,当标定应力 $\sigma \leq 0.5f_y$ 时, A 、 B 基本不变;当 $\sigma > 0.5f_y$ 时, A 、 B 值出现减小趋势。并拟合出 A 、 B 与 S 相关的修正公式,分别如式(3)、式(4)所示,对比结果显示,拟合公式与试验结果吻合良好,可用于进行盲孔法残余应力的计算。

$$A = \begin{cases} -0.228 & (S \leq 9\,226.7) \\ -0.175 - 5.6S/10^6 & (S > 9\,226.7) \end{cases} \quad (3)$$

$$B = \begin{cases} -0.321 & (S \leq 9\,226.7) \\ -0.264 - 6.8S/10^6 & (S > 9\,226.7) \end{cases} \quad (4)$$

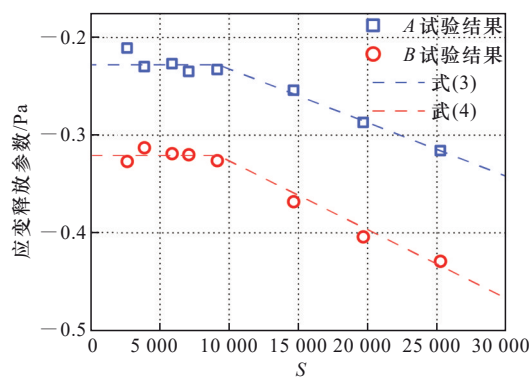


图6 应变释放系数 A 、 B 与 S 相关关系

Fig. 6 Relationships between A , B , and S

2.2 残余应力计算原理

在测点 O 处以半径为 r 的圆周上布置3个应变敏感栅,并钻取半径为 a 、深度为 h 的盲孔后,钻孔位置附近区域会因部分应力的释放而产生相应的应变,通过测量钻孔释放的应变(ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3),经换算可得到钻孔处原有的应力,见图7。各测量释放应变与测点 O 处主应力关系如式(5)所示:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3)^2} \\ \sigma_2 = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3)^2} \\ \tan 2\alpha = \frac{2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3}{\epsilon_3 - \epsilon_1} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ϵ_1 、 ϵ_2 和 ϵ_3 分别为应变片1、2和3上的释放应变; σ_1 和 σ_2 分别为测点 O 处的最大和最小主应力; α 为 σ_1 与 0° 方向敏感栅顺时针方向的夹角; A 和 B 为应变释放系数(式(3)、式(4))。

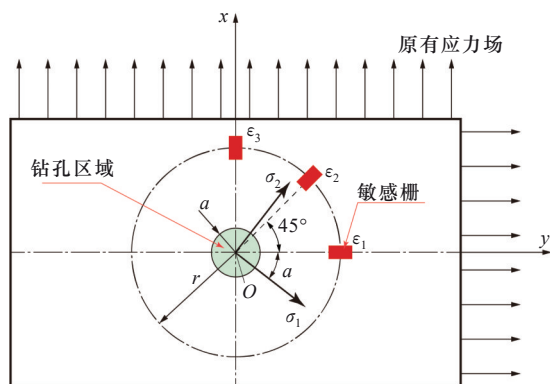


图7 盲孔法基本原理

Fig. 7 Hole-drilling strain-gage method

将应变片敏感栅1平行于管长方向布置,沿管长方向的纵向残余应力 σ_{ry} 、沿管径方向的横向残余应力 σ_{rx} 表达式如式(6)所示:

$$\begin{cases} \sigma_{rx} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha \\ \sigma_{ry} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha \end{cases} \quad (6)$$

3 残余应力实测结果

3.1 R1试件残余应力分布

直管试件R1外表面3个测试截面S1—S3残余应力 σ_r 的实测结果以及平均残余应力以极坐标的方式汇总于图8中,其中截面正上方为焊缝位置, θ 表示在圆周上与焊缝位置的相对夹角, $\theta=0^\circ$ 为焊缝位置。

对于纵向残余应力而言,在焊缝处, σ_{ry} 平均值为185.6 MPa,约为 $0.29f_y$,为外表面最大残余拉应力。随着 θ 的增大,残余应力急剧减小,在 $\theta=5^\circ$ 的测点位置, σ_{ry} 平均值为-27.4 MPa,为外表面最大残余压应力。随着远离焊缝区域,残余应力值逐渐增加,在 $\theta=15^\circ$ 的测点位置以外几乎保持一致,其平均值为93.6 MPa,约为 $0.13f_y$ 。

对于横向残余应力而言,在焊缝处, σ_{rx} 平均值为200.0 MPa,约为 $0.31f_y$ 。随着 θ 的增大,残余应力急剧减小,在 $\theta=5^\circ$ 的测点位置, σ_{rx} 平均值为-42.5 MPa,为外表面最大残余压应力。随着远离焊缝区域,残余应力值逐渐增加,在 $\theta=15^\circ$ 的测点位置以外几乎保持一致,其平均值为220.5 MPa,约为 $0.34f_y$,为外表面最大残余拉应力。

根据外表面残余应力的分布形式,可近似沿圆周将圆管分为热影响区和非热影响区。其中焊缝热影响区集中在焊缝两侧 $\pm 15^\circ$ 之间,约为焊缝两侧50 mm区域内。在热影响区以内横纵向残余应力

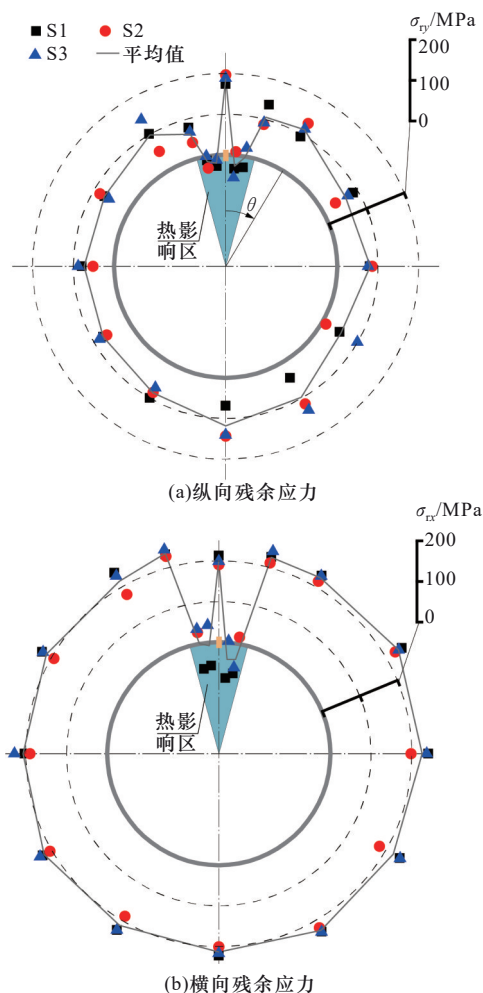


图8 试件R1外表面残余应力试验结果

Fig. 8 Test results of residual stress on external surface of specimen R1

沿焊缝两侧均呈现出先减后增的明显趋势,焊缝处平均纵向残余应力为 $0.29f_y$,平均横向残余应力为 $0.31f_y$,二者较为接近。

而在热影响区以外残余应力分布较为均匀,说明直管冷弯成型过程中,钢板各部分变形均匀,没有明显的应力集中。非热影响区平均纵向残余应力为 $0.13f_y$,平均横向残余应力为 $0.34f_y$,横向残余应力明显大于纵向残余应力。

3.2 R2试件残余应力分布

直管试件R2外表面3个测试截面S1—S3残余应力 σ_r 的实测结果以及平均残余应力以极坐标的方式汇总于图9中。

对于纵向残余应力而言,在焊缝处, σ_{ry} 平均值为152.4 MPa,约为 $0.33f_y$,为外表面最大残余拉应力。随着 θ 的增大,残余应力急剧减小,在 $\theta=3^\circ$ 的测点位置, σ_{ry} 平均值为1.5 MPa,为外表面最小残余拉应力。随着远离焊缝区域,残余应力值逐渐增

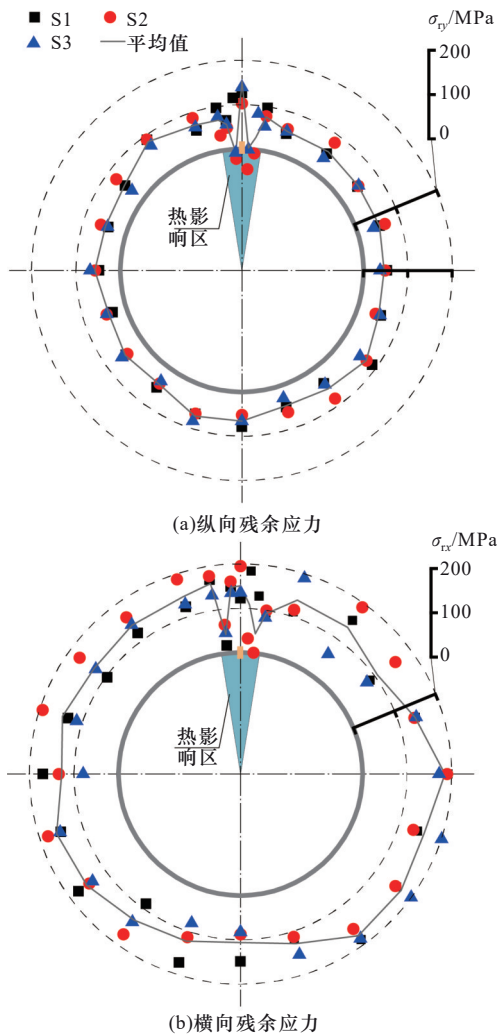


图9 试件R2外表面残余应力试验结果

Fig. 9 Test results of residual stress on external surface of specimen R2

加,在 $\theta=9^\circ$ 的测点位置以外几乎保持一致,其平均值为56.3 MPa,约为 $0.12f_y$ 。

对于横向残余应力而言,在焊缝处, σ_{rx} 平均值为150.0 MPa,约为 $0.32f_y$,为外表面最大残余拉应力。随着 θ 的增大,残余应力急剧减小,在 $\theta=6^\circ$ 的测点位置, σ_{rx} 平均值为43.1 MPa,为外表面最大残余压应力。随着远离焊缝区域,残余应力值逐渐增加,在 $\theta=9^\circ$ 的测点位置以外几乎保持一致,其平均值为138.8 MPa,约为 $0.30f_y$ 。

R2试件与R1试件残余应力在焊缝热影响区和非热影响区分布规律相似,在热影响区以内残余应力沿焊缝两侧均呈现出先减后增的明显趋势。焊缝热影响区集中在焊缝两侧 $\pm 9^\circ$ 之间,同样约为焊缝两侧50 mm区域内。

而在热影响区以外残余应力分布较为均匀,平

均纵向残余应力为 $0.12f_y$,平均横向残余应力为 $0.30f_y$,横向残余应力明显大于纵向残余应力。

3.3 管径对残余应力的影响

根据图8及图9所示的各试件残余应力测试结果,R1与R2试件横、纵向残余应力均呈现出相同的规律,即从焊缝中心先减后增,随后保持不变。

对于直管外表面残余应力,R1与R2试件由于加工过程中冷弯程度不同,材料的屈服强度会产生一定差别,两者横、纵向残余应力大小绝对值存在较大差异,但其与屈服强度的相对值较为接近。

在相同焊接条件下,R1与R2试件焊缝热影响区均分布在焊缝两侧50 mm区域内,说明管径对热影响区范围绝对值影响较小。但由于管径的不同,热影响区所占比值不同,对大直径钢管影响范围较小。

4 残余应力分布模型建立

基于3.3节不同管径下实测外表面残余应力分布规律,提出适用于不同直径Q460C焊接圆钢管的外表面横、纵向残余应力三折线模型,如图10所示,图中 θ 为圆周上任意一点与焊缝位置的相对夹角, $\theta=0^\circ$ 为焊缝位置。其中 S_1-S_3 为热影响区, S_3-S_4 为非热影响区。外表面横、纵向残余应力表达式如式(7)所示:

$$\frac{\sigma_r}{f_y} = \begin{cases} \sigma_{wt} - \frac{\sigma_{wt} - \sigma_{wc}}{\theta_w} \theta & 0 \leq \theta < \theta_w \\ \sigma_{wc} - \frac{\sigma_{wc} - \sigma_c}{\theta_c - \theta_w} (\theta - \theta_w) & \theta_w \leq \theta < \theta_c \\ \sigma_c & \theta_c \leq \theta \leq 180 \end{cases} \quad (7)$$

式中, σ_{wt} 代表焊缝热影响区内残余应力最大值; σ_{wc} 代表焊缝热影响区内残余应力最小值; σ_c 代表非热影响区残余应力值; θ_w 代表焊缝热影响区内残余应力最小位置; θ_c 代表热影响区与非热影响区分界点。

根据试验结果分别拟合确定横、纵向残余应力待定参数。式(8)为纵向残余应力待定参数:

$$\begin{cases} \sigma_{wt,y} = 0.31f_y \\ \sigma_{wc,y} = 0.01f_y \\ \sigma_{c,y} = 0.13f_y \\ \theta_{w,y} = 8.76 - 0.009D \\ \theta_{c,y} = 29.26 - 0.035D \end{cases} \quad (8)$$

式(9)为横向残余应力待定参数:

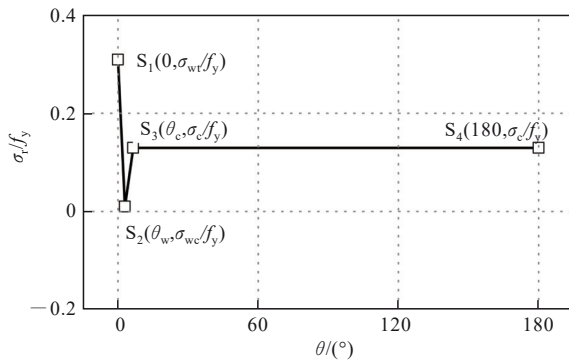


图 10 直圆钢管残余应力分布模型

Fig. 10 Residual stress distribution model for straight circular steel tube

$$\begin{cases} \sigma_{wt,x} = 0.36f_y \\ \sigma_{wc,x} = 0.02f_y \\ \sigma_{c,x} = 0.32f_y \\ \theta_{w,x} = 15.08 - 0.013D \\ \theta_{c,x} = 22.30 - 0.02D \end{cases} \quad (9)$$

式中: D 为圆管的外径; f_y 代表钢材的屈服强度。

分布模型与实测结果的对比图如图 11 所示。图中分布模型与试验值比值的均值分别为 1.02、0.96、1.05、0.96, 变异系数分别为 0.37、0.28、0.08、0.26, 分布模型与试验结果走势相同, 数据吻合良好。本模型可考虑不同直径下圆钢管外表面任意位置的冷弯残余应力, 可体现各个区域数值大小, 同时可体现钢管直径对残余应力分布的影响。

5 结论

采用盲孔法对 2 个不同截面尺寸的 Q460C 焊接圆钢管试件的表面残余应力进行了实测, 得到了各试件的残余应力分布结果; 并依据试验结果提出了不同直径下直管任意位置的残余应力简化模型, 主要结论如下:

1) 对于相同焊接条件下不同尺寸的圆钢管, 焊

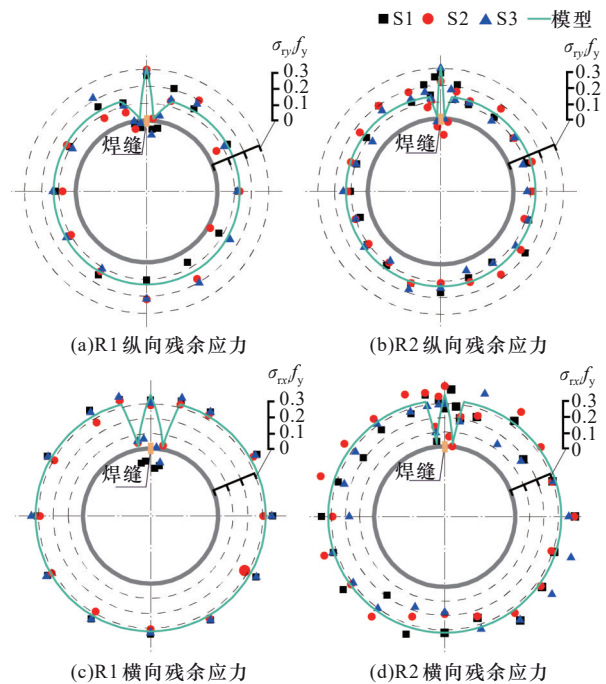


图 11 分布模型与试验结果对比

Fig. 11 Comparison of simplified models and experimental results

缝热影响区均分布在焊缝两侧 50 mm 区域内, 焊接对大直径钢管影响较小。

2) 在焊缝热影响区内, 焊缝中心残余拉应力最大, 且沿焊缝两侧有先减后增的趋势; 其中焊缝横向残余应力值约为 $0.36f_y$, 焊缝纵向残余应力值约为 $0.31f_y$ 。

3) 对于非热影响区, 表面横纵向残余应力均为残余拉应力, 其中焊缝横向残余应力值约为 $0.32f_y$, 焊缝纵向残余应力值约为 $0.13f_y$, 横向残余应力明显大于纵向残余应力。

4) 根据盲孔法实测结果, 提出了考虑焊缝热影响区以及截面尺寸的焊接圆钢管表面横纵向残余应力分布模型, 与试验结果吻合良好。

参考文献:

- [1] 施刚, 姜雪, 周文静, 等. 高强焊接圆钢管轴心受压整体稳定性能设计方法研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(21): 1-8.
- [2] Chen J, Chan T M. Material properties and residual stresses of cold-formed high-strength-steel circular hollow sections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 170: 106099.
- [3] 郭咏华, 李晓彦, 张斌, 等. 高强钢轴心受压钢管整体稳定性承载力试验研究及数值分析[J]. 工程力学, 2013, 30(8): 111-118, 132.
- [4] Ravn-jensen K, Tvergaard V. Effect of residual stresses on plastic buckling of cylindrical shell structures [J]. International journal of solids and structures, 1990, 26(9/10): 993-1004.
- [5] Díaz A, Cuesta I I, Alegre J M, et al. Residual stresses in cold-formed steel members: Review of measurement methods and numerical modelling [J]. Thin-Walled Structures, 2021, 159: 107335.
- [6] Rossini N S, Dassisti M, Benyounis K Y, et al. Methods of measuring residual stresses in components [J]. Materials & Design, 2012, 35: 572-588.

- [7] 施刚,班慧勇,石永久,等.高强度钢材钢结构研究进展综述[J].工程力学,2013,30(1):1-13.
- [8] 施刚,姜雪,周文静,等.焊接圆钢管残余应力试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(11):125-133.
- [9] 杨俊芬,李渊,彭奕亮.Q690 高强钢管焊接残余应力数值模拟[J].工程力学,2014,31(10):108-115.
- [10] 赵卫平,王振兴,陈佳麟,等.基于盲孔法的高强焊接圆钢管表面残余应力试验研究[J].建筑结构学报,2022,43(10):332-342.
- [11] Yan X F, Yabg C. Experimental research and analysis on residual stress distribution of circular steel tubes with different processing techniques[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 144: 106268.
- [12] Hu Y F, Chung K F, Ban H, et al. Investigations into residual stresses in S690 cold-formed circular hollow sections due to transverse bending and longitudinal welding [J]. Engineering Structures, 2020, 219: 110911.
- [13] GB/T 228.1—2010 金属材料拉伸试验第1部分:室温拉伸方法[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [14] Gardner L, Yun X. Description of stress-strain curves for cold-formed steels [J]. Construction and Building Materials, 2018, 189: 527-538.
- [15] Tong L, Hou G, Chen Y, et al. Experimental investigation on longitudinal residual stresses for cold-formed thick-walled square hollow sections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 73: 105-116.
- [16] 陈惠南.盲孔法测量残余应力 A, B 系数计算公式讨论[J].机械强度,1989,11(2):31-36.
- [17] 马小明,欧清扬.盲孔法测曲面残余应力时释放系数的数值模拟[J].华南理工大学学报(自然科学版),2019,47(12):25-31.
- [18] GB/T 31310—2014 金属材料 残余应力测定 钻孔应变法[S].北京:中国标准出版社,2014.

(编辑:万 佳)