

逐层钻孔法测量钢管残余应力的试验研究*

赵卫平¹, 胡 锐¹, 赵欣杰², 鹿洪香¹, 徐 旻³

(1. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院 北京, 100083)

(2. 中铁投资集团有限公司 北京, 100070)

(3. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所 北京, 100081)

摘要 针对传统盲孔法仅能够测量钻孔深度范围内残余应力均值的缺陷问题,采用逐层钻孔法对 14 根不同焊接方式和径厚比的 Q520 高强焊接圆钢管进行纵向残余应力测试。基于实测数据,得到了高强焊接圆钢管截面纵向拉、压残余应力的数值大小、纵向残余应力分布模式以及在钻孔深度范围内的变化规律,研究了埋弧焊(submerged arc welding, 简称 SAW)、高频焊(high-frequency welding, 简称 HFW)以及不同径厚比对截面纵向残余应力分布的影响。试验结果表明:纵向残余应力在钻孔深度范围内逐层减小,尤其在焊缝影响区内变化更加明显,远离焊缝影响区,变化逐渐减小;相较于高频焊,埋弧焊对圆钢管截面最大纵向残余应力影响较大,埋弧焊接钢管最大纵向残余应力接近钢材屈服强度;改变径厚比,对圆钢管截面最大纵向残余应力的影响有限。

关键词 逐层钻孔法;非均匀残余应力;径厚比;焊接方式;焊接钢管

中图分类号 TH162;TG115

引 言

随着我国基础建设的快速发展,高强焊接圆钢管以其自重轻、强度高、性能卓越以及外观优美而被广泛应用^[1]。焊接圆钢管时,由于施焊时焊缝附近不均匀的加热与冷却,会导致焊接残余应力产生,显著影响构件的刚度、疲劳强度、应力腐蚀开裂性能以及稳定性^[2],因此深入研究焊接残余应力对高强焊接圆钢管性能的影响,以及提升结构的安全性和耐久性具有重要意义。

目前,测量焊接残余应力主要分为无损检测和有损检测。无损检测主要有 X 射线法、中子衍射法、超声法以及磁测法等^[3]。有损检测主要有分割法、剥层法以及盲孔法等^[4]。Hu 等^[5]对 5 个 S35657 不锈钢箱形截面试件和 5 个工字形截面试件开展试验研究,通过分割法研究了 S35657 不锈钢焊接箱形截面和工字钢的残余应力大小和分布。然而,分割法对试件的破坏性较大,盲孔法作为目前试验中最常用的残余应力测量方法之一^[6],以其对试件损伤小、测量方便以及结果准确等优势被广泛应用,被纳入美国材料与试验协会标准^[7]中。Qiang 等^[8]通过钻孔法研究了高性能钢材焊接残余应力的空间分布规

律,并测量了母材和焊接接头的初试残余应力。文献^[9]研究了高强焊接圆钢管残余应力分布模式,提出的分布模型与实测数据吻合度较高。传统盲孔法通常假设试件在深度方向上的残余应力分布均匀或变化梯度较小,然而在实际情况下,试件沿深度方向的残余应力分布不均匀,导致传统盲孔法在测量时存在较大误差,无法准确反映真实的残余应力分布水平。使用逐层钻孔法能够逐层测量出钻孔深度方向非均匀的残余应力。Schajer^[10]提出的积分法使得逐层钻孔过程中数据处理更加方便精确。Puym-broeck 等^[11]通过逐层钻孔法测定了 T 型接头的焊缝残余应力,并研究了 T 型接头的疲劳裂纹行为和疲劳寿命。Alinaghian 等^[12]基于逐层钻孔法研究了刀具直径,下压量以及转速等工艺参数对测量残余应力精度的影响。综上可知,逐层钻孔法在测量非均匀残余应力方面具有重要的应用价值。

笔者采用逐层钻孔法,针对不同焊接方式和不同径厚比的 Q520 高强度焊接圆钢管进行纵向残余应力的测试,通过实测数据得到了圆钢管截面纵向残余应力的数值大小、分布形式以及在钻孔深度范围内纵向残余应力的变化趋势。研究了埋弧焊、高频焊以及不同径厚比对纵向残余应力的影响规律,并分析了焊缝

* 国家自然科学基金联合基金重点资助项目(U22A20244);国家自然科学基金资助项目(52278467)

收稿日期:2023-07-04;修回日期:2024-06-25

影响区对钻孔深度内纵向残余应力变化规律的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

本研究试验采用与文献[9]同批次、同规格的 7 组 14 根高强度焊接圆钢管进行测试,试件的焊接方式分为高频焊接和埋弧焊接,分别研究焊接方式和径厚比对纵向残余应力的影响。表 1 为试件参数。其中: L 为钢管外径; k 为钢管厚度。

表 1 试件参数				
Tab.1 Specimen parameters				
试件 组号	钢管尺寸/mm ($L\times k$)	钢管数量		L/k
		埋弧焊	高频焊	
S_1	325×8	2	—	40.6
S_2	325×8	—	2	40.6
S_3	356×10	2	—	35.6
S_4	426×10	2	—	42.6
S_5	426×10	—	2	42.6
S_6	406×8	2	—	50.8
S_7	457×10	2	—	45.7

1.2 材料性能试验

钢材的材料性能试验依据现行的规范^[13]设计,采用单向拉伸试验测量钢材在单向受力下的屈服强度与极限强度。拉伸试验速率由横梁位移速率控制,拉伸速率设为 0.4 mm/s,试验应变通过试件上绑定的引伸计测量得到。每组试件分别取 3 个试样,共 21 个试样。材料性能试验通过万能试验机 MTS 完成,参数设置为试样实际截面尺寸。表 2 为材料性能试验结果。

1.3 试验原理及设计

1.3.1 测试方法及原理

图 1 为逐层钻孔法测量非均匀残余应力示意图。其中: D 为应变片中心圆直径; D_0 为孔径;1 号和 3 号敏感栅分别与 x 轴和 y 轴重合;2 号敏感栅与 x 轴的夹角为 45° 。

应变片尺寸以及钻孔装置如图 2 所示。应变采集采用中心圆直径为 9.6 mm 的 B 型应变片,其中: R_m 为应变片中心圆半径; R_1 、 R_2 分别为敏感栅近端和远端距钻孔中心的距离。

对于各向同性的线弹性材料,在逐层钻孔的过程中,第 i 步钻孔后测得的表面释放应变为

表 2 材料性能试验结果					
Tab.2 Results of material test					
试件	$f_{\text{yield}}/\text{MPa}$	f_u/MPa	$\bar{f}_{\text{yield}}/\text{MPa}$	$\bar{f}_u/\text{MPa}$	$\bar{f}_{\text{yield}}/\bar{f}_u$
A- S_1	513	583	536	588	0.912
B- S_1	559	593			
A- S_2	564	611	570	614	0.928
B- S_2	575	616			
A- S_3	604	628	616	633	0.973
B- S_3	627	638			
A- S_4	597	619	592	614	0.964
B- S_4	586	609			
A- S_5	575	585	584	599	0.975
B- S_5	593	612			
A- S_6	578	610	550	608	0.905
B- S_6	521	605			
A- S_7	592	619	609	634	0.961
B- S_7	625	648			

A 表示同组试件中的第 1 个试件;B 表示同组试件中的第 2 个试件; f_u 为极限强度; f_{yield} 为实测屈服强度; $\bar{f}_{\text{yield}}$ 、 $\bar{f}_u$ 分别为 f_{yield} 、 f_u 的平均值; $\bar{f}_{\text{yield}}/\bar{f}_u$ 为屈强比

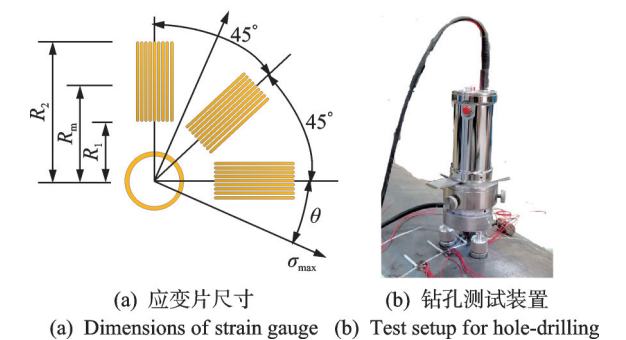
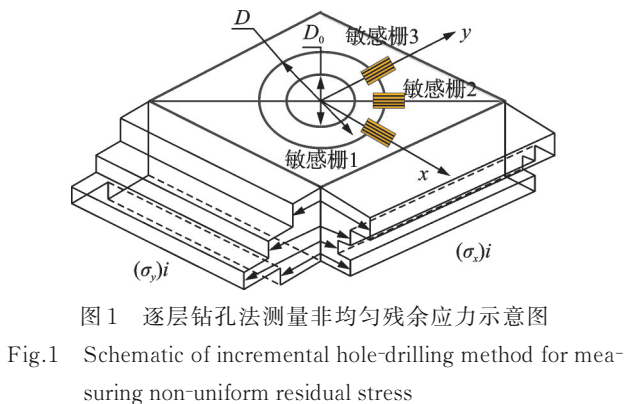


图 2 应变片尺寸以及钻孔装置

Fig.2 The dimension diagram of strain gauge and drilling device

$$\epsilon_i = \frac{1+\nu}{E} \sum_{j=1}^i a_{ij} \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right)_j + \frac{1}{E} \sum_{j=1}^i b_{ij} \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)_j \cos 2\theta + \frac{1}{E} \sum_{j=1}^i b_{ij} (\tau_{xy})_j \sin 2\theta \quad (1)$$

其中: $(\sigma_x)_j$ 、 $(\sigma_y)_j$ 分别为第 j 层深度在 x 、 y 方向的正应力; $(\tau_{xy})_j$ 为第 j 层深度的切应力; a_{ij} 、 b_{ij} 为应变释放系数矩阵, 表示钻到第 i 层深度时, 受第 j 层孔深处的单位应力影响所引起的单位释放应变; θ 为 1 号敏感栅与 x 轴的夹角; E 为弹性模量; ν 为泊松比。

完成第 i 步钻孔后, 测得 3 个方向的应变分别用 ϵ_{i1} 、 ϵ_{i2} 和 ϵ_{i3} 表示, 即

$$\begin{cases} \epsilon_{i1} = \frac{1+\nu}{E} \sum_{j=1}^i a_{ij} \frac{(\sigma_x)_j + (\sigma_y)_j}{2} + \frac{1}{E} \sum_{j=1}^i b_{ij} \frac{(\sigma_x)_j + (\sigma_y)_j}{2} \\ \epsilon_{i2} = \frac{1+\nu}{E} \sum_{j=1}^i a_{ij} \frac{(\sigma_x)_j + (\sigma_y)_j}{2} + \frac{1}{E} \sum_{j=1}^i b_{ij} (\tau_{xy})_j \\ \epsilon_{i3} = \frac{1+\nu}{E} \sum_{j=1}^i a_{ij} \frac{(\sigma_x)_j + (\sigma_y)_j}{2} - \frac{1}{E} \sum_{j=1}^i b_{ij} \frac{(\sigma_x)_j + (\sigma_y)_j}{2} \end{cases} \quad (2)$$

计算过程中引入组合应力和组合应变的概念^[14], 令组合应力为

$$\begin{cases} P_j = (\sigma_y + \sigma_x)_j / 2 \\ Q_j = (\sigma_y - \sigma_x)_j / 2 \\ T_j = (\tau_{xy})_j \end{cases} \quad (3)$$

组合应变为

$$\begin{cases} p_i = (\epsilon_{i3} + \epsilon_{i1}) / 2 \\ q_i = (\epsilon_{i3} - \epsilon_{i1}) / 2 \\ t_i = (\epsilon_{i3} + \epsilon_{i1} - 2\epsilon_{i2}) / 2 \end{cases} \quad (4)$$

矩阵形式表示组合应力与组合应变的关系为

$$\begin{cases} a_{ij} P = E / (1 + \nu) p \\ b_{ij} Q = E q \\ b_{ij} T = E t \end{cases} \quad (5)$$

其中: P 、 Q 和 T 分别为各层 P_j 、 Q_j 和 T_j 组成的组合应力矩阵; p 、 q 和 t 分别为各步 p_i 、 q_i 和 t_i 组成的组合应变矩阵。

鉴于课题组前期文献^[15]已对孔径和孔深进行了优化, 本试验中孔径 D_0 取 $0.4D$, 孔深 H 取 $0.45D$, 钻孔过程分 5 步完成, 步进深度为 $0.09D$, 通过有限元标定, 得到的应变释放系数矩阵 a_{ij} 和 b_{ij} 分别为

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0.051\ 93 & & & & \\ 0.070\ 62 & 0.040\ 44 & & & \\ 0.078\ 48 & 0.050\ 98 & 0.022\ 78 & & \\ 0.081\ 82 & 0.054\ 49 & 0.028\ 54 & 0.009\ 57 & \\ 0.083\ 25 & 0.055\ 85 & 0.030\ 15 & 0.012\ 51 & 0.001\ 89 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$b_{ij} =$

$$= \begin{bmatrix} 0.091\ 61 & & & & \\ 0.118\ 43 & 0.077\ 87 & & & \\ 0.123\ 65 & 0.091\ 91 & 0.046\ 45 & & \\ 0.124\ 64 & 0.093\ 89 & 0.053\ 15 & 0.023\ 08 & \\ 0.124\ 79 & 0.094\ 21 & 0.053\ 92 & 0.026\ 02 & 0.005\ 86 \end{bmatrix} \quad (7)$$

最终通过式(5)得到各层的纵向残余应力。

1.3.2 试验过程

本试验中残余应力测试设备采用 JHMK 多点残余应力测量系统, 由钻孔设备、静态应变仪以及静态应力测量系统软件组成。图 3 为钻孔应变采集系统。钻头采用材质为 M35 含钴高速钢的麻花钻头。

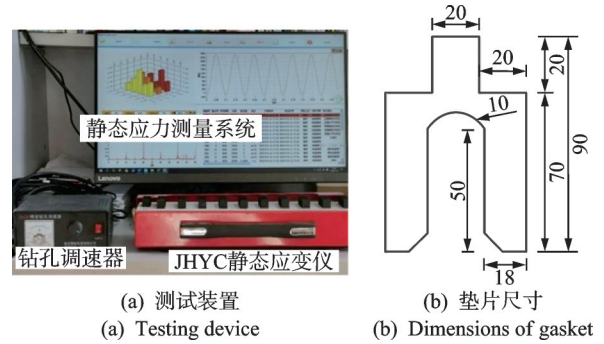


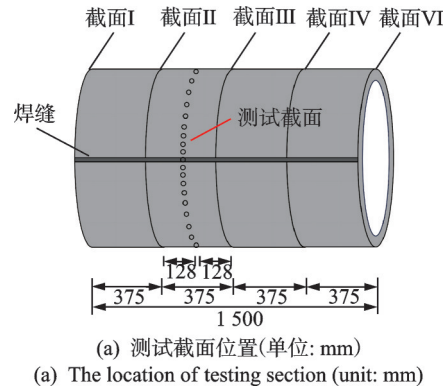
图 3 钻孔应变采集系统(单位:mm)

Fig.3 Drilling strain acquisition system (unit: mm)

试验步骤如下: ①在粘贴应变片之前, 先对测点进行表面处理, 去除氧化层, 在氧化严重位置用砂纸打磨; ②连接试验装置, 对待测试截面钻孔, 钻孔的步进深度由钻头与定位套筒之间的垫片控制, 垫片尺寸如图 3(b)所示, 通过依次抽离垫片实现对钻孔深度的控制。

1.3.3 钻孔测点布置

图 4 为测点示意图。将钢管沿焊缝起始处等分为 5 个截面, 每个截面的间距为 375 mm, 钻孔测试截面取截面 II 与截面 III 的中间位置, 测试截面位置如图 4(a)所示。截面上的测点沿钢管环向布置, 由于焊缝处应力分布梯度较大, 因此离焊缝位置较远处测点布置密集。随着距焊缝距离的增加, 测点间



(a) 测试截面位置(单位:mm)
(a) The location of testing section (unit: mm)

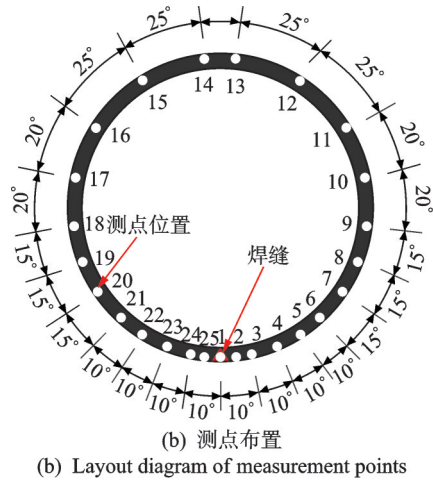


图4 测点示意图

Fig.4 The schematic diagram of measuring points

距逐渐稀疏,测点布置如图4(b)所示。

2 试验结果及其分析

2.1 焊接方式对纵向残余应力分布的影响

选取2组试件进行纵向残余应力测试,分析焊接方式对纵向残余应力的影响,试件包括A-S₁、A-S₂和A-S₄、A-S₅。其中:A-S₁和A-S₄为埋弧焊接圆钢管;A-S₂和A-S₅为高频焊接圆钢管。每组试件除焊接方式不同,其他条件均相同。在埋弧焊接过程中由于输入热量相对较高,因此焊缝处出现明显的凸起痕迹。高频焊接是通过高度集中的感应电流加热后,再由挤压辊挤压形成焊缝,因此焊缝处的形变相对埋弧焊接并不明显。

不同焊接方式下试件纵向残余应力分布如图5所示。图中:纵坐标为实测点纵向残余应力 f_r 与平均屈服应力 $\bar{f}_{yield}$ 的比值;横坐标为测点与焊缝所形成的夹角 θ 与 π 的比值。可以看出:在不同焊接方式下,圆钢管沿焊缝两侧测点的5层纵向残余应力分

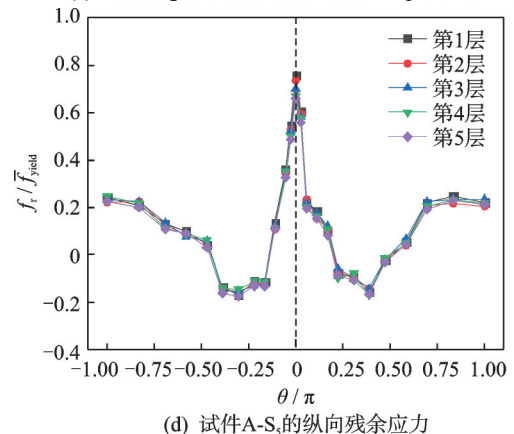
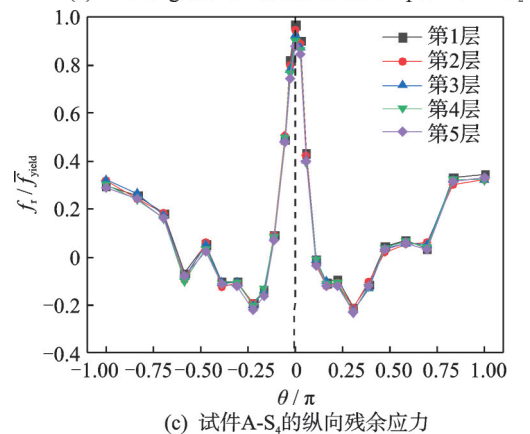
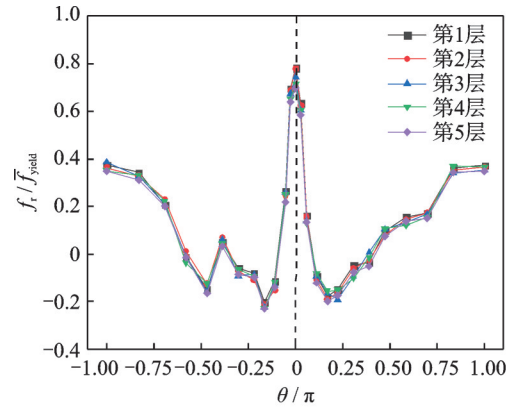
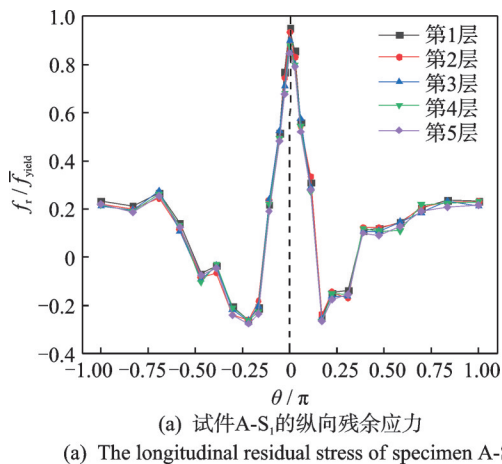


图5 不同焊接方式下试件纵向残余应力分布

Fig.5 The residual stress of specimens under different welding methods

布基本对称,在焊缝附近处出现最大残余拉应力;随着与焊缝距离的增加,残余拉应力逐渐减小并转变为残余压应力;当距离焊缝较远时达到最大残余压应力并逐渐减小,最终转变为残余拉应力。该变化趋势主要是由焊接过程中不均匀加热冷却引起。

表3为不同焊接方式下截面关键点处纵向残余应力。其中: $\sigma_{l,max}$ 为最大纵向残余拉应力; $\sigma_{y,max}$ 为最大纵向残余压应力; $\bar{f}_{yield}$ 为平均屈服应力。通过对比2组试件可知:第1组试件中埋弧焊接钢管最大纵向残余拉

表 3 不同焊接方式下截面关键点处纵向残余应力
Tab.3 Longitudinal residual stress at key points of the cross-section under different welding methods

试验组别	试件	$\sigma_{1, \max} / \bar{f}_{\text{yield}}$	$\sigma_{y, \max} / \bar{f}_{\text{yield}}$
1	A-S ₁ (SAW)	0.956	-0.271
	A-S ₂ (HFW)	0.806	-0.237
2	A-S ₄ (SAW)	0.968	-0.251
	A-S ₅ (HFW)	0.808	-0.221

应力和最大纵向残余压应力分别为 $0.956\bar{f}_{\text{yield}}$ 和 $-0.271\bar{f}_{\text{yield}}$; 高频焊接钢管的最大纵向残余拉应力为 $0.806\bar{f}_{\text{yield}}$, 下降了 15.6%; 最大纵向残余压应力为 $-0.237\bar{f}_{\text{yield}}$, 下降了 12.5%; 第 2 组试件中埋弧焊接钢管最大纵向残余拉应力和最大纵向残余压应力分别为 $0.968\bar{f}_{\text{yield}}$ 和 $-0.251\bar{f}_{\text{yield}}$; 相对于埋弧焊, 高频焊接钢管最大纵向残余拉应力为 $0.808\bar{f}_{\text{yield}}$, 下降了 16.5%; 最大纵向残余压应力为 $-0.221\bar{f}_{\text{yield}}$, 下降了 12.0%。由于埋弧焊接与高频焊接相比热输入量相对较高, 因此焊接方式对钢管截面纵向残余应力具有较大影响。

2.2 径厚比对纵向残余应力分布的影响

选用径厚比在 35.6~50.8 范围内的不同试件进行测试, 试件分别为 A-S₁、A-S₃、AQ-S₄、A-S₆ 和 A-S₇。不同径厚比下试件纵向残余应力如图 6 所示。可以看

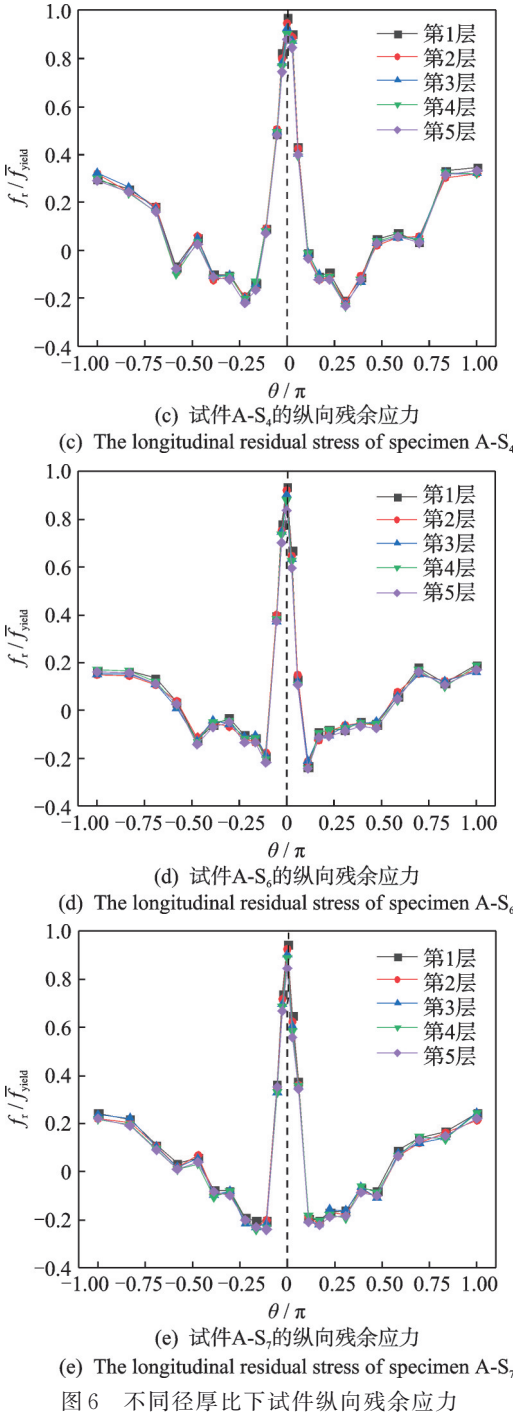
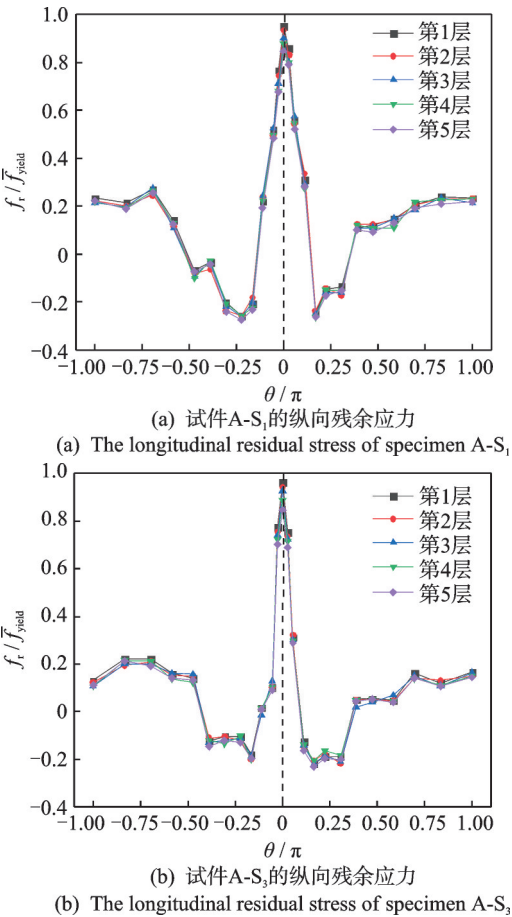


图 6 不同径厚比下试件纵向残余应力

Fig.6 Residual stress under different radius-thickness ratio

出, 不同径厚比下钢管截面上测点的纵向残余应力沿焊缝两侧分布基本对称, 在焊缝处出现最大拉应力, 随着与焊缝距离的增大, 拉应力逐渐转变为压应力, 最终又变为拉应力。应力分布规律与不同焊接方式下钢管截面纵向残余应力的分布相似。

表 4 为不同径厚比下截面关键点处纵向残余应力。由表 4 可知, 各钢管截面最大纵向残余拉应力与屈服应力 $\bar{f}_{\text{yield}}$ 的比值在 0.948~0.968 之间, 最大纵向残余压应力与屈服应力 $\bar{f}_{\text{yield}}$ 的比值在 $-0.251\sim$

−0.266 之间。对比焊接方式对截面纵向残余应力的影响可知,改变径厚比对各试件最大纵向残余应力和最大纵向残余压应力的影响并不显著。因此,径厚比对钢管截面纵向残余应力影响较小。

表 4 不同径厚比下截面关键点处纵向残余应力
Tab.4 Longitudinal residual stress at key points of the cross-section under different radius-thickness ratios

截面尺寸/(mm×mm)	试件	$\sigma_{l, \max}/\bar{\sigma}_{\text{yield}}$	$\sigma_{y, \max}/\bar{\sigma}_{\text{yield}}$
325×8	A-S ₁ (SAW)	0.956	−0.269
356×10	A-S ₃ (SAW)	0.963	−0.257
426×10	A-S ₄ (SAW)	0.968	−0.259
406×8	A-S ₆ (SAW)	0.948	−0.264
457×10	A-S ₇ (SAW)	0.954	−0.261

2.3 纵向残余应力在钻孔深度内的变化

为深入研究纵向残余应力在钻孔深度范围内的变化趋势,笔者针对不同焊接方式及不同径厚比条件下的各测点进行分析。图 7、8 分别为不同焊接方式下和不同径厚比下各测点第 1 层与第 5 层残余应力的差值。可以看到,纵向残余应力在钻孔深度范围内呈逐渐减小的趋势,在焊缝影响区域内第 1 层与第 5 层纵向残余应力差值尤为显著。随着逐渐远离焊接产生的高温区域,纵向残余应力的差值逐渐减小。

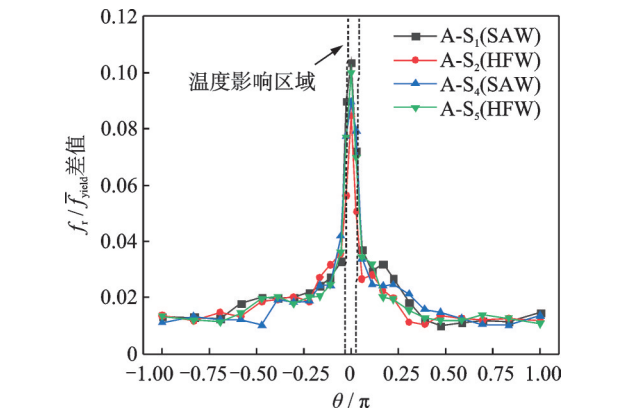


图 7 不同焊接方式下各测点第 1 层与第 5 层残余应力的差值
Fig.7 The difference of residual stress between the first layer and the fifth layer at each measuring point under different welding methods

图 9、10 分别为不同焊接方式下和不同径厚比下各测点深度内残余应力特征曲线。可以看出,焊缝附近误差棒较长,表明该区域钻孔深度范围内纵向残余应力具有较大的波动性。随着与焊缝的距离增加,误差棒的长度逐渐缩短,表明该区域内的纵向残余应力离散性较低,其变化相对不显著。上述现

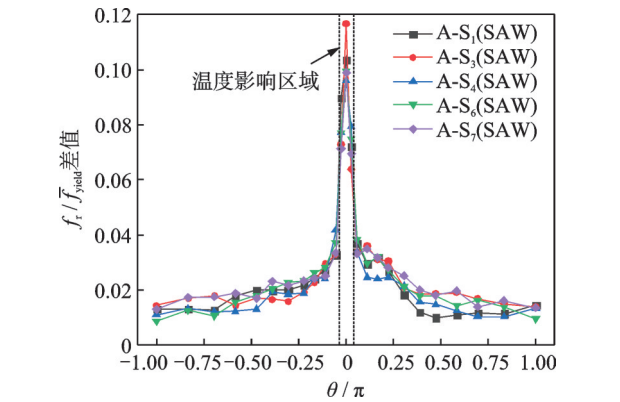


图 8 不同径厚比下各测点第 1 层与第 5 层残余应力的差值
Fig.8 The difference of residual stress between the first layer and the fifth layer at each measuring point under different radius-thickness ratios

象说明在焊缝影响区内,由于焊接产生的高热量作用,导致钢管截面在钻孔深度范围内呈现出较大的纵向残余应力梯度变化。

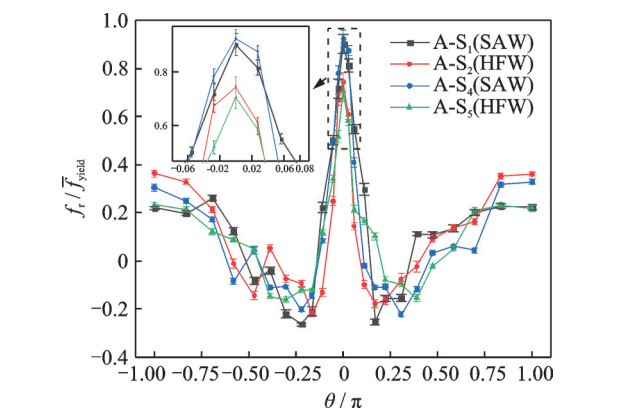


图 9 不同焊接方式下各测点深度内残余应力特征曲线
Fig.9 The characteristics analysis of residual stress at various measuring points within different welding methods

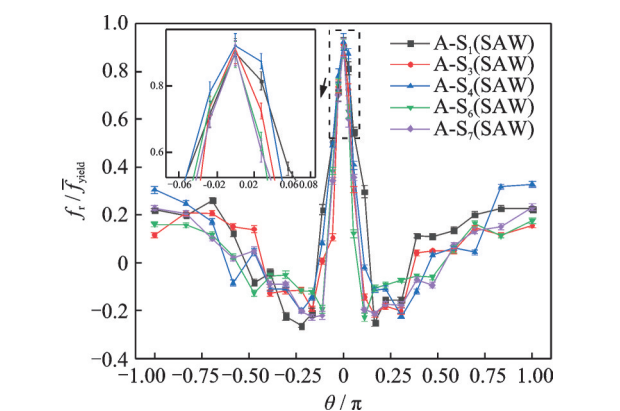


图 10 不同径厚比下各测点深度内残余应力特征曲线
Fig.10 The characteristics analysis of residual stress at various measuring points within different radius-thickness ratios

3 结 论

1) 通过逐层钻孔法,分别得到了埋弧焊接圆钢管和低频焊接圆钢管截面上的纵向残余应力数值大小、分布形式以及在钻孔深度范围内纵向残余应力的变化规律。

2) 焊接圆钢管纵向残余应力在钻孔深度范围内呈逐层减小的趋势,施焊过程在焊缝附近形成的热影响区对深度方向上的应力梯度有明显影响。远离热影响区,钻孔深度方向上应力梯度变化并不显著。

3) 埋弧焊接因其较高的热输入量,导致埋弧焊接钢管的测量数据波动显著。相较于埋弧焊接圆钢管,2组高频焊接圆钢管的最大纵向残余拉、压应力分别减小了 15.6%、12.5% 和 16.5%、12.0%。可见,焊接方式对圆钢管截面纵向残余应力影响显著,而高频焊接在控制残余应力方面展现出优越性。

4) 通过改变径厚比,焊接钢管最大纵向残余拉应力和压应力之间的变化分别不超过 2.06% 和 3.72%。这表明改变径厚比对截面纵向残余应力的影响有限。

参 考 文 献

- [1] ZHAO X Z, LYU J F, YAN S, et al. Performance evaluation of axial-loaded circular steel tubes strengthened by welding under service load[J]. Engineering Structures, 2022, 271(15): 114948.
- [2] ZHAO W P, HU R, JIANG K L, et al. Experimental study and numerical analysis on axial compressive performance of Q550 welded short steel tubes in transmission towers[J]. Structures, 2025, 76: 109009.
- [3] AO S S, LI C J, HUANG Y F, et al. Determination of residual stress in resistance spot-welded joint by a novel X-ray diffraction[J]. Measurement, 2020, 161: 107892.
- [4] YAN X F, YANG C. Experimental research and analysis on residual stress distribution of circular steel tubes with different processing techniques[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 144: 106268.
- [5] HU L Z, FAN S G, DUAN S G, et al. Residual stress of S35657 austenitic stainless steel welded box sections and I-sections[J]. Structures, 2024, 64: 106614.
- [6] LI C X, JI B H, YAO Y. Stress biaxiality-based residual stress assessment in welded T-joints using the blind-hole method [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 216: 108610.
- [7] ASTM E837-13a Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method

[S]. Pennsylvania: ASTM, 2013.

- [8] QIANG B, XIE Q, LEI D, et al. Investigation into welding residual stress of high-performance-steel Q500qE welded-joint[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2025, 224: 109171.
- [9] 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.
ZHAO Weiping, WANG Zhenxing, CHEN Jialin, et al. Experimental research on surface residual stress of high strength welded circular steel tube based on hole-drilling strain-gage method[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(10): 332-342. (in Chinese)
- [10] SCHAJER G S. Measurement of non-uniform residual stresses using the hole-drilling method. part I-stress calculation procedures[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1988, 110(4): 338-343.
- [11] Puymbroeck E V, NAGY W, FANG H, et al. Determination of residual weld stresses with the incremental hole-drilling method in tubular steel bridge joints[J]. Procedia Engineering, 2018, 213: 651-661.
- [12] ALINAGHIAN M, ALINAGHIAN I, HONAR-PISHEH M. Residual stress measurement of single point incremental formed Al/Cu bimetal using incremental hole-drilling method[J]. International Journal of Light-weight Materials and Manufacture, 2019, 2(2): 131-139.
- [13] 国家市场监督管理总局,国家标准化委员会. GB/T 228.1—2021 金属材料-拉伸试验,第1部分:室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [14] SCHAJER G S. Hole-drilling residual stress profiling with automated smoothing [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2007, 129(3): 440-445.
- [15] 赵卫平,胡锐,赵欣杰,等. 逐层钻孔法测量钢管残余应力的钻孔参数优化[J]. 振动、测试与诊断, 2025, 45(6): 1239-1246.
ZHAO Weiping, HU Rui, ZHAO Xinjie, et al. Optimization of drilling parameters for measuring residual stress of steel tubes using incremental hole-drilling method [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2025, 45(6): 1239-1246. (in Chinese)



第一作者简介:赵卫平,男,1981年10月生,博士、副教授、博士生导师。主要研究方向为结构工程。曾发表《基于盲孔法的高强焊接圆钢管表面残余应力试验研究》(《建筑结构学报》2022年第43卷第10期)等论文。

E-mail: zhaowp@cumtb.edu.cn