

套筒对接焊工艺及后热消除残余应力研究

徐和林^{1*}, 王江华²

(1.西南交通大学 希望学院, 成都 610400; 2.四川大学 机械工程学院, 成都 610065)

摘要: 目的 在采用单面V形锁底坡口的条件下, 探索自动环缝焊接机器人批量焊接27SiMn套筒时的工艺参数及焊后接头性能; 研究接头的残余应力分布情况并探究适合批量生产的后热措施以消除残余应力。方法 设计一种单面V形锁底坡口作为27SiMn套筒焊缝对接坡口, 利用环焊缝自动焊接设备、CO₂气体保护焊对该类套筒坡口进行27SiMn套筒焊接试验, 对不同工艺参数下的接头性能进行测试; 采用粘贴应变片的方法测得接头的残余应力, 并利用电磁感应加热+岩棉包覆保温缓冷的后热处理方式消除残余应力。结果 当焊接电流为240 A时, 接头抗拉强度为783.38 MPa, 屈强比为0.76; 组织为铁素体+贝氏体, 随着焊接电流的增大, 微观组织中出现马氏体, 表面硬度增大。焊态下最大残余应力出现在焊缝中心, 轴向残余应力较大而环向残余应力较小, 最大轴向残余应力为453.6 MPa压应力, 在距离焊缝60 mm处, 残余应力降至50 MPa左右; 环向应力在焊缝中心处为拉应力而在热影响区为压应力; 采用电磁感应加热+岩棉包覆保温2 h的后热方式消除了接头残余应力, 接头最大轴向残余应力下降约72.2%。结论 当采用本文设计的V形锁底坡口作为27SiMn套管焊缝坡口时, 能够实现接头自动化、高效率的批量焊接, 同时焊接最适宜电流为240 A; 27SiMn套管焊接后的残余应力较大, 需进行进一步消除处理, 轴向残余应力较大, 以压应力为主, 环向残余应力较小, 本文采用的电磁感应加热+岩棉包覆保温的方式能够适应批量生产, 同时具有较高的经济性。
关键词: 套筒; 单面V形锁底坡口; 批量焊接; 焊缝接头; 焊接工艺参数; 残余应力

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2025.05.021

中图分类号: TG404 文献标志码: A 文章编号: 1674-6457(2025)05-0188-09

Butt Welding Process and Post Heat Measures to Relieve Residual Stress of Sleeves

XU Helin^{1*}, WANG Jianghua²

(1. Hope College, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610400, China;
2. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the process parameters and post weld joint performance of batch welding with an automatic circumferential welding robot under a single-sided V-shaped locking groove for 27SiMn sleeves and study the residual stress distribution of the joint and investigate the use of post heat measures suitable for mass production to eliminate residual stress. A single-sided V-shaped locking groove was designed as the butt welding groove for 27SiMn sleeve welds. The 27SiMn sleeve welding test was conducted on this type of groove through automatic circumferential welding equipment and CO₂ gas

收稿日期: 2024-12-09

Received: 2024-12-09

基金项目: 四川省重点研发计划(2023YFG0166); 国家自然科学基金青年基金(61603238)

Fund: Sichuan Provincial Key Research and Development Program (2023YFG0166); National Natural Science Foundation of China (NSFC) Young Scientists Fund (61603238)

引文格式: 徐和林, 王江华. 套筒对接焊工艺及后热消除残余应力研究[J]. 精密成形工程, 2025, 17(5): 188-196.

XU Helin, WANG Jianghua. Butt Welding Process and Post Heat Measures to Relieve Residual Stress of Sleeves[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2025, 17(5): 188-196.

*通信作者 (Corresponding author)

shielded welding, and the joint performance was tested under different process parameters. The residual stress distribution of the joint was measured by pasting strain gauges, and the post heat treatment method of electromagnetic induction heating+rock wool coating insulation and slow cooling was explored to eliminate residual stress. When the welding current was 240 A, the joint had a tensile strength of 783.38 MPa and a yield strength ratio of 0.76. The microstructure consisted of ferrite and bainite and as the welding current increased, martensite appeared in the microstructure and the surface hardness increased. The maximum residual stress in the welded state occurred at the center of the weld, with larger axial residual stress and smaller circumferential residual stress. The maximum axial residual stress was 453.6 MPa compressive stress, and the residual stress dropped to about 50 MPa at a distance of 60 mm from the weld. The circumferential stress was tensile stress at the center of the weld and compressive stress in the heat affected zone. The post heat method of electromagnetic induction heating and rock wool insulation for 2 h was used to eliminate residual stress in the joint, and the maximum axial residual stress in the joint decreased by about 72.2%. The V-shaped locking groove designed can achieve automatic and efficient batch welding of 27SiMn sleeve welds, and the most suitable welding current is 240 A. After welding, the residual stress of 27SiMn sleeve is relatively high and needs further elimination treatment. The axial residual stress is mainly compressive stress, while the circumferential residual stress is relatively small. The method of electromagnetic induction heating+rock wool coating insulation adopted can adapt to mass production and has high economy.

KEY WORDS: sleeve; single-sided V-shaped locking groove; batch welding; weld joint; welding parameter; residual stress

在工程结构中, 套筒或套管被大量使用, 其中, 套筒较多选用 27SiMn 钢管作为原材料。同时, 通常采用焊接方式连接套筒。27SiMn 钢属于低碳低合金钢, 焊接性能较差; 但目前, 从理论研究到工程实际应用, 27SiMn 管件的焊接技术都较为成熟且能够获得满足使用要求的焊接接头, 应用较多的焊接方案是采用焊前预热、焊后保温的措施^[1-3]。随着套筒的批量使用, 生产企业逐渐采用自动化焊接机器人进行规模化生产, 其焊接接头的坡口设计、焊接工艺参数、接头性能以及批量高效率焊后后热方式都是当前亟待探索的工程问题。

关于 27SiMn 钢, 现有文献最早的报道是 1976 年咸阳拖拉机配件厂等单位在拖拉机履带板中采用该材料替代高锰钢, 进行了 27SiMn 钢的力学性能测试、微观金相组织及回火后的性能观察等工作^[4]。1987 年, 黄淑秋^[5]对所在单位生产的 27SiMn 钢管进行了化学成分分析, 并对不同热处理后的力学性能进行了对比。现有报道更侧重于焊接工艺及焊接性能, 包括 27SiMn 与异种材料的焊接性能。印波等^[6]采用 4 种不同的焊接工艺对 27SiMn 钢管进行了焊接对接头进行了试验, 通过抗拉强度、弯曲和冲击试验确定了最优的焊接工艺参数。朱为仓等^[7]则从工程实际的角度, 研究了 27SiMn 钢管焊接缺陷的控制措施, 其

结论具有较好的工程应用价值。文献[8-14]从不同角度对 27SiMn 钢的焊接工艺、焊后组织展开了研究。

从总体上看, 现有研究基本围绕 V 形坡口试验样件、多层多道人工焊接的焊前预热、焊接工艺参数进行试验; 较少文献从工程实际角度对坡口进行锁底设计并采用自动环缝焊接机器人进行批量焊接, 同时未见对这种焊接方式下焊后残余应力对 27SiMn 管接头影响的报道。为此, 本文以某套管制造企业新投产的自动化套筒环缝焊接机器人生产线为研究背景, 在现有研究基础上对坡口结构、焊接工艺、焊后处理展开设计和研究。

1 接头坡口

在 27SiMn 管材的焊接研究中, 现有研究文献较多采用双侧 V 形坡口进行试验^[8-14], 各文献中仅 V 形坡口的部分参数略有差异。但从工程实际应用角度来看, 套筒对焊还需要保证两被焊件的同轴度、管料的对接强度以及批量加工的效率。为此, 综合各方面因素, 本文设计单面 V 形锁底坡口作为 27SiMn 套管焊缝, 同时增加根部倒角以避免导杆动作时与对接处产生干涉。所设计的结构示意图如图 1 所示, 结构图及对接焊接示意图如图 2 所示。



图 1 弹簧套筒管料对接单面 V 形锁底坡口形式

Fig.1 Single-sided V-shaped locking groove for butt joint of spring sleeve tube material

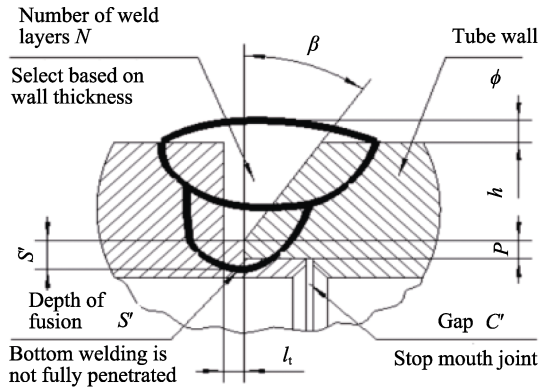


图2 管料对接焊的接头设计
Fig.2 Joint design for tube butt welding

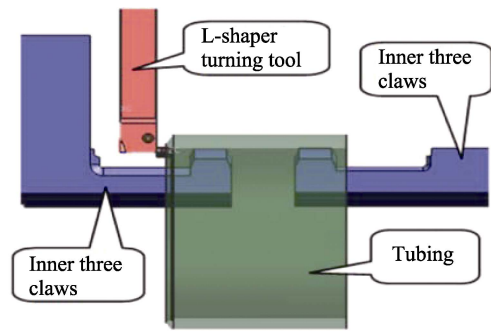


图4 L型车刀加工内止口装夹示意图
Fig.4 Schematic diagram of internal rabbet machining with an L-shaped turning tool

2 试验

2.1 试验样件准备

试验样件采用 $\phi 127 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 的 27SiMn 管材，坡口加工采用数控车 HTC40200N，如图 3 所示。在机床主轴、尾座安装内三爪，以实现管料径向中心的精确找正。加工时，以两端内三爪找正管料内孔进行定位、夹紧，先车架位，再以架位进行找正，坡口、止口及端面一次加工完成，保证管料对接的同轴度要求。内止口加工选用端面切槽 L 型车刀进行加工，如图 4 所示。

根据对接坡口参数进行焊接工艺评定，第一道焊



图3 坡口加工实物图
Fig.3 Physical view of groove machining

缝熔透钝边、焊底不焊透，避免焊缝底部烧穿，未熔止口厚度小于 1 mm。根据管料壁厚确定焊缝层数 N 并结合企标规定确定 2 层焊缝：一层打底保证焊缝熔深，一层盖面保证焊缝成形。设计坡口面角度为 45° ，对接坡口顶缘宽度为 7 mm，试样坡口钝边为 3 mm，止口厚度为 1 mm，根部间隙为 0~1 mm，止口径向配合尺寸 $\phi 111 \left(\frac{H10}{d10} \right) \text{ mm}$ ，27SiMn 化学成分和力学性能如表 1 所示。

2.2 方案

采用 CO_2 气体保护自动环缝焊机对试件进行焊接试验，焊丝选用 ER50-3 ($\phi 1.6 \text{ mm}$)，同时 CO_2 保护气体纯度 $\geq 97\%$ 。试验前需清理试件坡口及周边 20 mm 范围，以确保无水分、油污、锈蚀及其他污物。管料组对通过自动环缝焊机一夹一顶找正，钝边自然靠紧，根部间隙为 0~1 mm。

针对单面 V 形锁底的坡口形式、环缝自动焊接机器人设备，试验需要选择合适的焊接工艺参数，既要获得一定的焊缝熔深，又要避免止口烧穿，因此在现有研究成果的基础上结合实际应用，选取 4 组不同焊接电流及匹配的焊接工艺参数进行焊接测试，以确定合适的接头焊接电流。试验管料焊接工艺参数见表 2。

表 1 27SiMn 化学成分和力学性能

Tab.1 Chemical composition and mechanical properties of 27SiMn

| w(C)/wt. % | w(Si)/wt. % | w(Mn)/wt. % | w(Cr)/wt. % | Tensile strength/MPa | Yield strength/MPa | Surface hardness(HV) |
|------------|-------------|-------------|-------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| 0.26 | 1.2 | 1.2 | ≤ 0.3 | 980 | 835 | 302 |

表 2 试验管料对接焊的工艺参数

Tab.2 Process parameters for butt welding of test tube materials

| Welding current/A | Arc voltage/V | Dry extension of electrode/mm | Shield gas flow rate/(L·min ⁻¹) | Welding current/A | Arc voltage/V | Dry extension of electrode/mm | Shield gas flow rate/(L·min ⁻¹) |
|-------------------|---------------|-------------------------------|---------------------------------------------|-------------------|---------------|-------------------------------|---------------------------------------------|
| 240±10 | 26±1 | 16 | 18-22 | 260±10 | 28±1 | 16 | 18-22 |
| 250±10 | 27±1 | 16 | 18-22 | 270±10 | 30±1 | 16 | 18-22 |

3 试验结果

3.1 焊缝焊底和熔深检测

对焊接试样进行铣加工后, 在焊缝剖面可见清晰的熔合区边界线, 试样焊缝接头的焊底如图 5 所示, 熔深检测结果如表 3 所示。

焊接分析结果如下: 1) 当焊接电流为 240 A 时, 熔池稳定、焊缝两侧熔合状况良好, 焊底线颜色较浅并与母材的接近, 焊缝径向热影响区较小, 止口未烧穿, 焊缝熔深 S' 为 2.5~3.5 mm, 如图 4a 所示; 2) 当焊接电流为 250 A 时, 焊缝径向热影响区透过止口厚度, 焊底线颜色比 240 A 时的更深并呈暗色, 止口临近烧穿状态, 焊缝熔深 $S' \geq 3.5$ mm, 如图 4b 所示; 3) 当焊接电流为 260 A 时, 在焊底可见熔池凝固前透过止口的亮红色, 焊缝径向热影响区透过止口厚度, 焊底线颜色明显加深, 圆周有一处明显 5 mm×1 mm×0.4 mm 凸起, 止口临近烧穿状态, 焊缝熔深 $S' \approx 4.0$ mm, 如图 4c 所示; 4) 当焊接电流为 270 A 时, 熔池强烈扰动, 在焊底可见熔敷金属飞溅、火光, 止口被烧穿。

从试验结果看, 当焊接电流为 240 A 时, 焊缝熔

深为 3.0~3.5 mm, 能够满足套筒产品设计对接头焊缝熔深的要求。在实际生产中, 管料一端以外圆定位装夹于焊机中, 另一端垫平板以尾座顶紧, 受管料直线度、止口尺寸及装夹精度等影响, 焊机回转中心与管料旋转中心不重合, 减小了止口底部与焊枪之间的相对距离, 增大了止口临近烧穿的趋势。因此, 从接头宏观形貌来看, 止口厚度熔透临界焊接电流为 240 A。

3.2 焊缝接头力学性能测试及分析

进一步考察各焊接电流下自动环缝焊接接头性能并为焊接工艺提供支撑, 对其进行力学性能测试并结合微观金相组织进行分析; 试样按照中国船级社《材料与焊接规范 2018》相关要求加工制样。

1) 侧弯试验。侧弯试验主要考察焊缝与母材之间的结合程度以及接头的脆性^[15-17], 在焊接电流为 240、250、260 A 条件下, 切割焊接套筒并加工成 4 块试样, 试样受压面厚度为 10 mm, 其余尺寸要求及试验条件按焊接规范要求完成, 试验弯心直径为 60 mm、弯心角为 180°; 试验后观察试样表面并按标准进行判定。侧弯试验结果如图 6 所示, 可知, 侧弯试验合格。

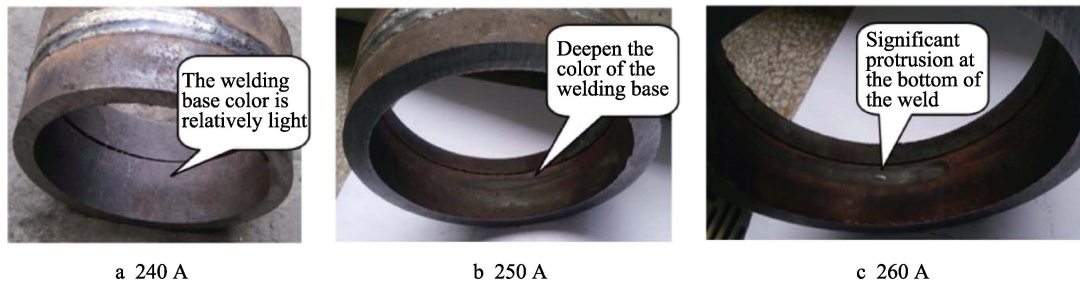
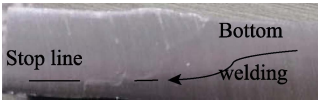
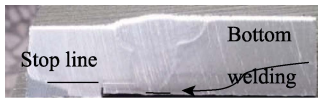
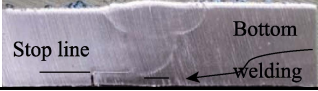


图 5 不同焊接电流条件下对接焊接头的焊底状态

Fig.5 Weld root appearance of butt joints under different welding current conditions

表 3 不同工艺参数条件下对接焊接头的焊缝熔深

Tab.3 Weld penetration depth of butt joints under different process parameter conditions

| Welding current/A | Weld section diagram | Weld penetration S' /mm | Welding current/A | Weld section diagram | Weld penetration S' /mm |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 240±5 |  | 2.5-3.5 | 260±5 |  | ≈ 4.0 |
| 250±5 |  | ≥ 3.5 | 270±5 | Arc burn | Arc burn |

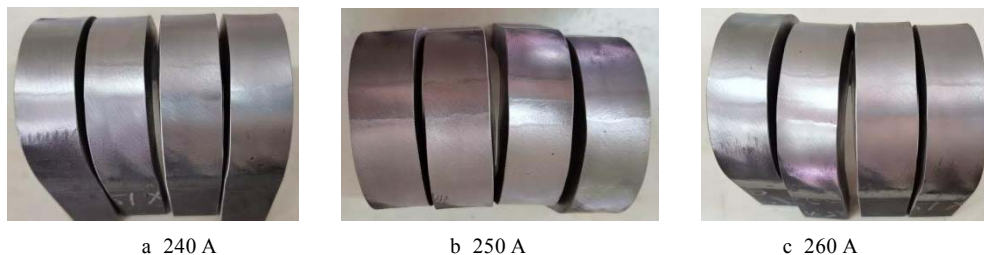


图 6 对不同焊接电流的接头进行加工后侧弯试验结果

Fig.6 Bending test results after processing of joints with different welding currents

2) 硬度测试。为评定自动环焊缝接头表面性能, 采用 LX-A 型硬度仪对焊缝接头进行硬度测试^[18-21], 分别取各焊接电流下试件 4 件, 测试后取均值; 测试前对试件焊缝及两侧 20 mm 内区域手工轻微打磨去毛刺, 由于试件为套筒轴类零件, 因此测试时需确保水平放置且测试点的连线与轴线平行, 检测设备如图 7 所示, 检测结果如图 8 所示。



图 7 LX-A 型硬度测试仪
Fig.7 LX-A hardness tester

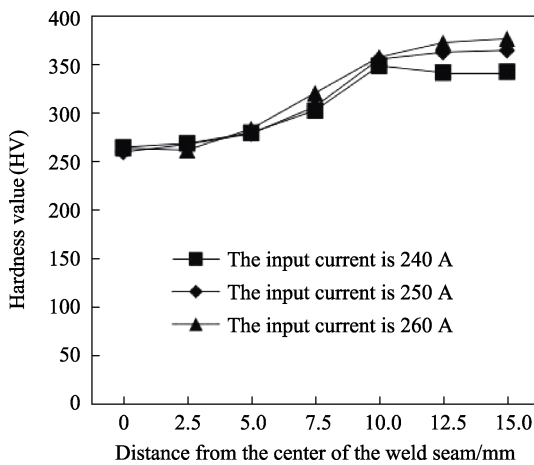


图 8 不同输入电流下试件表面硬度检测结果
Fig.8 Surface hardness test results of specimens under different input currents

硬度检测分析结果如下: 在距离焊缝中心 6 mm 内, 3 种输入电流试件的表面硬度差异较小, 在 260HV 左右, 低于母材表面硬度, 这是由于焊条材料熔化对母材性能的影响以及多道焊对接头起到类似回火的作用, 降低了试件表面硬度; 在距离焊缝 15 mm 左右的焊缝热影响区, 硬度显著增加, 当输入电流为 240 A 时, 表面硬度最大值约 338HV; 而当输入电流为 250 A 和 260 A 时, 表面硬度最大值为 365HV 和 372HV。测试结果与文献[11]研究结果较为接近, 结合微观组织进一步分析, 接头热影响区的金相显微组织如图 9 所示。

当输入电流为 240 A 时, 接头热影响区的显微组织主要为铁素体和贝氏体, 组织较为细小; 当输入电流为 250 A 和 260 A 时, 两者显微组织较为接近, 组织中出现少量马氏体组织, 且组织进一步细化, 这会导致硬度上升, 与硬度测试结果一致。

3) 拉伸试验。将套筒切割, 并按中国船级社《材料与焊接规范 2018》要求加工试样并进行拉伸试验, 试验结果如表 4 所示。

拉伸试验分析结果如下: 试件断口均发生在焊缝中心; 在 240 A 焊接电流下抗拉强度最大, 为 783.38 MPa, 同时屈强比最小, 这表明接头的塑性较好; 随着焊接电流的增加, 抗拉强度进一步下降, 同时屈强比上升, 表明接头脆性增加。综合焊后性能来看, 焊接电流 240 A 为 27SiMn 套筒适宜电流。

3.3 焊缝接头残余应力测试

过大的残余应力对焊接接头的承载和性能都有较大的影响^[21-26], 文献[12]对环向焊接的残余应力进行了计算和试验, 并指出 25Cr2Ni4MoV 焊后未经热处理外层残余应力高达 840 MPa。根据试件力学性能测试结果, 特别是硬度测试, 需进一步掌握 27SiMn 管材在单面 V 形锁底坡口及本文焊接设备和条件下接头的残余应力, 因此对焊接电流 240 A 的试件进行残余应力测试。

文献[13]研究表明, 环向焊接外表层应力大于内表面应力, 同时外表面残余应力更易于监测。因此本文采用盲孔法进行外表面残余应力测试, 测试实物图

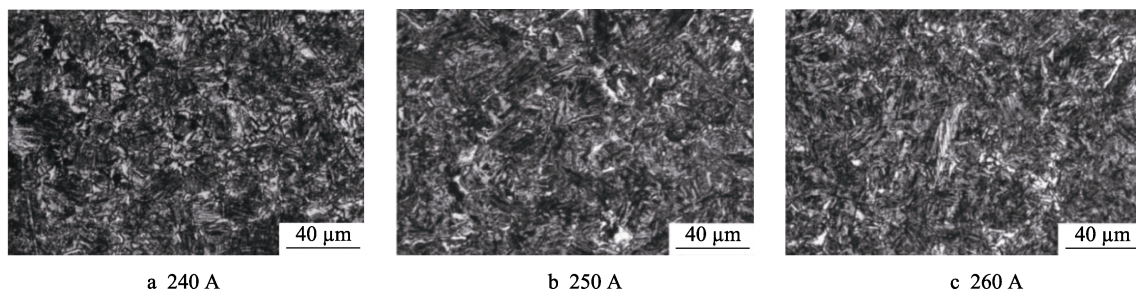


图 9 不同输入电流下试件热影响区显微组织
Fig.9 Microstructure of the heat affected zone of the specimen under different input currents

表 4 拉伸试验结果
Tab.4 Tensile test results

| Welding current/A | Number | Tensile strength/MPa | Mean tensile strength/MPa | Mean value of yield strength to tensile strength ratio | Fracture position | Result judgment |
|-------------------|--------|----------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|
| 240 | LS4-1 | 782.01 | 783.38 | 0.76 | Weld seam center | Qualified |
| | LS4-2 | 784.74 | | | Weld seam center | Qualified |
| 250 | LS5-1 | 752.07 | 752.65 | 0.81 | Weld seam center | Qualified |
| | LS5-2 | 753.23 | | | Weld seam center | Qualified |
| 260 | LS6-1 | 747.72 | 742.29 | 0.83 | Weld seam center | Qualified |
| | LS6-2 | 736.86 | | | Weld seam center | Qualified |

如图 10 所示。对焊缝表面进行轻微手工打磨, 去掉焊渣或污物, 使整个圆筒表面清洁的同时, 应变片能够有效粘贴在焊缝检测点。应变片选择 TJ120-1.5- $\phi 1.5$ 应变花, 在粘贴之前采用丙酮擦拭焊缝粘贴区域, 用 502 胶水粘贴应变片; 并采用绝缘电阻表测试并确保每个应变片连接成功且绝缘电阻大于 50 M Ω 。

虽然套筒结构为轴对称结构, 且经测量, 焊后试件仍保持了焊前的圆度和直线度, 但面向工程时套筒转动速度的差异、起止点温度差异等客观条件仍会引起残余应力的差异, 因此本文首先分析环向自动焊接套筒焊缝沿环向的分布情况。环向应变片检测布置如图 11 所示。在焊缝中心沿焊缝周向布置应变片, 每 45° 布置 1 个应变片, 将焊接起点位置的应变片的测点记为 H_1 , 顺时针方向对测点应变片编号, 共计 8 个测点, 分别表示为 $H_1 \sim H_8$ 。



图 10 残余应力测试准备实物图

Fig.10 Physical picture of residual stress test preparation

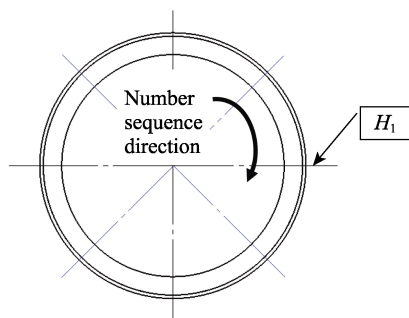


图 11 环向应变片布置图

Fig.11 Layout of circumferential strain gauges

焊态下 27SiMn 钢管在环焊缝机器人焊接下的焊接残余应力检测结果如表 5 所示, 每个测点应力分为轴向应力和环向应力。

表 5 试件焊态下的沿环向残余应力检测结果
Tab.5 Results of residual stress test along the circumferential direction in the welded state of the specimen

| Strain gauge number | Hoop stress/MPa | Axial stress/MPa |
|---------------------|-----------------|------------------|
| H_1 | 161.2 | -413.8 |
| H_2 | 177.7 | -439.3 |
| H_3 | 181.5 | -456.1 |
| H_4 | 179.8 | -453.6 |
| H_5 | 173.1 | -458.8 |
| H_6 | 177.3 | -462.2 |
| H_7 | 179.4 | -452.7 |
| H_8 | 172.6 | -448.3 |

由测试结果可以看出, 在焊态下, 焊缝中心沿环向一周的残余应力的轴向应力较大且呈压应力, 而焊缝中心环向应力则为拉应力且应力值较小。进一步对轴向应力分析可知, 除第一个应变片的测点 H_1 外, 其余应力差异较小, 其中轴向应力最大值和最小值之差为 22.9 MPa, 为平均值的 5.1%; H_1 的残余应力偏小可能是由于圆筒焊缝在收尾时的焊接温度对起始焊缝起到了一定的后热和回火作用。

由测试数据可知, 除焊接起点的第一和第二处应变片外, 沿环向套筒焊缝的其余各处残余应力差异均较小, 本文选择 H_4 处的应变片, 进一步沿轴线方向测定其残余应力的分布情况。轴向应变片沿焊缝两侧布置, 焊缝中心为 H_4 , 两侧各 5 个应变片, 合计 11 个, 间距设置如图 12 所示, 左侧测点编号为 $Z_1 \sim Z_5$, 右侧测点编号为 $Z_6 \sim Z_{10}$, 检测测试结果如表 6 所示。

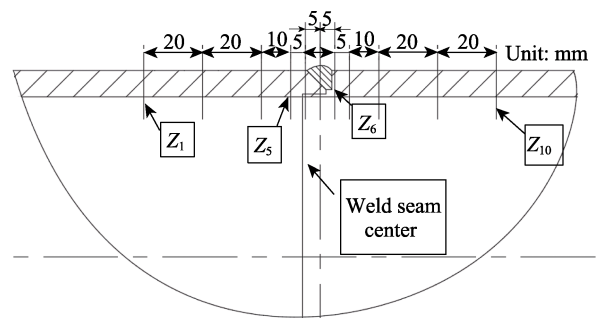


图 12 轴向应变片布置图

Fig.12 Layout of axial strain gauges

表6 试件焊态下的沿轴向残余应力检测结果
Tab.6 Results of residual stress detection along the axial direction in the welded state of the specimen

| Strain gauge number | Hoop stress/MPa | Axial stress/MPa |
|---------------------|-----------------|------------------|
| Z ₁ | -22.5 | 62.7 |
| Z ₂ | -83.2 | 86.8 |
| Z ₃ | -144.6 | -40.2 |
| Z ₄ | -122.7 | -267.5 |
| Z ₅ | 37.3 | -383.3 |
| H ₄ | 179.8 | -453.6 |
| Z ₆ | 33.4 | -375.9 |
| Z ₇ | -143.6 | -284.6 |
| Z ₈ | -137.1 | -55.4 |
| Z ₉ | -90.4 | 90.7 |
| Z ₁₀ | 0 | 53.4 |

焊态下套筒焊缝沿轴线方向的残余应力分析结果如下: 轴向应力焊缝中心向外由压应力逐渐变为拉应力, 且离焊缝 60 mm 外轴向应力基本为 0, 焊缝中心轴向应力值最大, 为压应力 453.6 MPa。由文献[14]的试验结果可知, 27SiMn 在埋弧焊焊态下焊接接头抗拉强度均值最大, 为 545 MPa, 因此轴向残余应力较高。环向应力分析结果如下: 焊缝中心为拉应力, 但在热影响区为压应力并随与焊缝距离的增大而减小, 在离焊缝 60 mm 时基本为 0, 在焊缝中心处取得最大值, 为 179.8 MPa。

需要指出的是, 在焊接试验过程中, 套筒两端为自由状态, 但在实际工况下, 两端会因工况需要而被固定再进行焊接, 这是否对轴向残余应力存在影响仍需进一步试验。

3.4 焊缝接头后热处理及残余应力测试

文献[6]研究了 27SiMn 钢管的焊接后热处理接头性能, 对比了焊态和焊接后热处理接头的力学性能, 包括拉伸性能、冲击功等, 试验热处理方式均为回火处理。但在大批量套筒生产中, 产品尺寸和结构完全与试验试样的不同, 通常长度尺寸较大, 批次生产数量较多, 与试验件的生产工艺也完全不同。为此本文采用电磁感应加热+岩棉包覆保温缓冷的方式降低残余应力。具体方法如下: 后热温度为 350 °C, 用岩棉包覆缓冷保温 2 h。再进一步测试后热试件的残余应力, 应变片的布置、其余测试条件与焊态的相同, 测试结果如表 7 所示。

可以看出, 经后热处理后, 接头残余应力显著下降, 其中环向应力在离焊缝 20 mm 处较小, 基本接近 0 MPa, 同时最大应力由最初的 453.6 MPa 下降至 126.3 MPa, 下降约 72.2%; 在轴向应力测试中, 测点的真实应力可能不为 0 MPa, 但由于测量过程中的设定, 当应力较小时, 则显示为 0 MPa, 因此 Z₅ 和 Z₇ 处应力为 0 MPa, 同时整体轴向应力也得到显著下降。

表7 试件后热处理下的残余应力检测结果
Tab.7 Residual stress test results under post heat treatment of specimens

| Strain gauge number | Hoop stress/MPa | Axial stress/MPa |
|---------------------|-----------------|------------------|
| Z ₁ | 0 | 0 |
| Z ₂ | 0 | 11.7 |
| Z ₃ | -39.2 | -20.4 |
| Z ₄ | -30.6 | -68.8 |
| Z ₅ | 0 | -91.8 |
| H ₄ | 64.9 | -126.3 |
| Z ₆ | 0 | -97.4 |
| Z ₇ | -35.9 | -74.2 |
| Z ₈ | -35.3 | -13.9 |
| Z ₉ | 0 | 22.6 |
| Z ₁₀ | 0 | 0 |

4 结论

1) 针对 $\phi 127 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 管件, 采用本文设计的 V 形锁底坡口作为 27SiMn 套管焊缝坡口能够实现接头自动化焊接, 同时具有高效率、适合批量生产的特点; 对环焊缝自动焊接机器人的焊接工艺参数进行对比并对接头性能进行测试, 结果表明, 焊接电流 240 A 为最适宜焊接工艺。

2) 接头在焊态下的残余应力较大, 最大值出现在焊缝中心, 距离焊缝 60 mm 处, 残余应力基本消失; 轴向残余应力以压应力为主, 随着离焊缝距离的增加, 逐步变为拉应力, 最大值为 453.6 MPa; 环向残余应力较小, 最大值为 179.8 MPa, 在焊缝中心处为拉应力而在热影响区则为压应力。

3) 从残余应力的分布和应力值来看, 27SiMn 钢焊接后需进一步通过后热处理以降低残余应力。采用电磁感应加热+岩棉包覆保温 2 h 的方式, 最大轴向应力下降约 72.2%, 同时该后热处理方式能够适应批量生产。

参考文献:

- [1] 刘晟, 常云峰, 兰志宇, 等. 27SiMn 钢窄间隙 GMAW 环焊缝开裂原因分析[J]. 精密成形工程, 2023, 15(9): 117-124.
LIU S, CHANG Y F, LAN Z Y, et al. Cracking Causes of 27SiMn Girth Weld by Narrow Gap GMAW[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(9): 117-124.
- [2] SHU L S, HENG Z, LI P Y, et al. Effect of Laser Powers on the Mechanical Properties 27SiMn Steel with Inconel 718 Cladding Coatings[J]. Materials Research Express, 2022, 9(9): 096511.
- [3] LI C Z, NI Y J, WANG M D, et al. Analysis of Micro-

- structure and Performance of Laser Cladding WC-Fe316L Alloy on the Surface of 27SiMn Steel[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2185(1): 012083.
- [4] 佚名. 西安交通大学金相专业,低合金铸钢代高锰钢制造拖拉机履带板的初步试验[J]. 西安交通大学学报, 1976(4): 53-68.
Anonymous. Conducted Preliminary Experiments on Manufacturing Tractor Track Plates Using Low-alloy Cast Steel Instead of High Manganese Steel[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1976(4): 53-68.
- [5] 黄淑秋. 27SiMn 钢管的机械性能研究[J]. 钢管技术, 1987, 16(3): 29-34.
HUANG S Q. Study on Mechanical Properties of 27SiMn Steel Pipe[J]. Steel Pipe, 1987, 16(3): 29-34.
- [6] 印波, 邱望标. 27SiMn 焊接工艺的研究[J]. 机械, 2010, 37(11): 72-75.
YIN B, QIU W B. Research on the Welding Process for 27SiMn[J]. Machinery, 2010, 37(11): 72-75.
- [7] 朱为仓, 吴志学, 张文学. 27SiMn 钢筒体的焊接及缺陷控制[J]. 焊接技术, 2013, 42(8): 74-75.
ZHU W C, WU Z X, ZHANG W X. Welding and Defect Control of 27SiMn Steel Cylinder[J]. Welding Technology, 2013, 42(8): 74-75.
- [8] 史鹏飞, 黄坚, 澹台凡亮, 等. 27SiMn 高强钢激光-MAG 复合焊接头组织和性能[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1002001.
SHI P F, HUANG J, TANTAI F L, et al. Microstructures and Properties of 27SiMn High-Strength Steel Joints by Laser-MAG Hybrid Welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1002001.
- [9] 李争, 凡乃峰, 白海明, 等. 常见油缸材料焊接预热温度研究[J]. 煤矿机械, 2019, 40(9): 40-42.
LI Z, FAN N F, BAI H M, et al. Research on Welding Preheating Temperature of Common Hydraulic Cylinder Materials[J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(9): 40-42.
- [10] 高鹏, 吴海丽, 李晓波, 等. 27SiMn 钢活塞杆焊接微小气孔产生原因分析及控制[J]. 金属加工(热加工), 2021(1): 54-56.
GAO P, WU H L, LI X B, et al. Cause Analysis and Control of Micro-Porosity in 27SiMn Steel Piston Rod Welding[J]. MW Metal Forming, 2021(1): 54-56.
- [11] 李聪玮. 27SiMn 钢表面激光熔覆铁基合金组织和性能研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.
LI C W. Study on Microstructure and Properties of Laser Cladding Fe-based Alloy on the Surface of 27SiMn Steel[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [12] 雷陈, 熊建坤, 冷进明. 大型汽轮机焊接转子残余应力及变形分析[J]. 电焊机, 2018, 48(9): 66-70.
LEI C, XIONG J K, LENG J M. Residual Stress and Deformation Analysis of Welding Rotor of Large Steam Turbine[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(9): 66-70.
- [13] 迟露鑫, 麻永林, 邢淑清, 等. 核电 SA508-3 钢厚壁圆筒纵向焊接残余应力分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(6): 59-62.
CHI L X, MA Y L, XING S Q, et al. Numerical Simulation and Experiments Test of Residual Stress of Longitudinal Weld of Thick SA508-3 Steel Pipe for Nuclear Power[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(6): 59-62.
- [14] 王颖. 27SiMn 液压油缸环缝窄间隙脉冲埋弧焊工艺研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
WANG Y. Study on Pulse Submerged Arc Welding Technology of Narrow Gap in Circumferential Seam of 27SiMn Hydraulic Cylinder[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [15] 张国滨, 姜梦, 陈曦, 等. 常压/真空环境激光焊接焊缝成形特性及残余应力与变形对比[J]. 焊接学报, 2022, 43(8): 34-41.
ZHANG G B, JIANG M, CHEN X, et al. A Comparison Study of Characteristics of Weld Formation, residual Stress and Distortion of Laser Welding under Atmospheric Pressure and Vacuum[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(8): 34-41.
- [16] 孙琦, 李大江, 李巍, 等. 焊接热循环峰值温度对 1 000 MPa 级超高强钢热影响区组织性能的影响[J]. 热力发电, 2024, 53(4): 165-173.
SUN Q, LI T J, LI W, et al. Effect of Peak Temperature of Welding Thermal Cycle on Microstructure Property of Heat Affected Zone of 1 000 MPa Grade Ultra-High Strength Steel[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(4): 165-173.
- [17] 何小东, 李为卫, 吉玲康, 等. 环焊接头强度对高应变海洋管道轴向承载能力的影响[J]. 焊接, 2022(6): 1-7.
HE X D, LI W W, JI L K, et al. Influence of Strength of Girth Welded Joints on Axial Bearing Capacity of High Strain Submarine Pipeline[J]. Welding & Joining, 2022(6): 1-7.
- [18] 石建德, 田仙林, 殷吕, 等. 双吊环型减振器焊接质量控制策略研究[J]. 电焊机, 2023, 53(12): 119-125.
SHI J D, TIAN X L, YIN L, et al. Research on Welding Quality Control Strategy of Double Ring Damper[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(12): 119-125.
- [19] 彭惠明. 液压式翻转机构油缸环缝自动焊接设备的研制[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
PENG H M. Development of Automatic Welding Equipment for Circumferential Seam of Hydraulic Turnover Mechanism Cylinder[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [20] 骆文泽, 成慧梅, 刘红艳, 等. 高强钢 Q960E 对接接头残余应力与焊接变形的数值模拟[J]. 中国机械工程, 2023, 34(17): 2095-2105.
LUO W Z, CHENG H M, LIU H Y, et al. Numerical Simulation of Residual Stress and Welding Deformation for High Strength Steel Q960E Butt-Welded Joints[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(17): 2095-2105.
- [21] 李良碧, 张井喜, 万正权, 等. 高强度钢锥柱耐压结构焊接残余应力及其对疲劳强度影响的研究[J]. 船舶

- 力学, 2023, 27(3): 427-436.
- LI L B, ZHANG J X, WAN Z Q, et al. Welding Residual Stress and Its Effects on Fatigue Strength of High-Strength Steel Cone-Cylinder Pressure Structures[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2023, 27(3): 427-436.
- [22] 王浩博, 陈小康, 李建军, 等. 焊接顺序及焊接方向对 X80 管线钢残余应力的影响[J]. *制造技术与机床*, 2023(5): 124-128.
- WANG H B, CHEN X K, LI J J, et al. Effect of Welding Sequences and Welding Direction on the Residual Stress in X80 Pipeline Steel[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2023(5): 124-128.
- [23] 霍进风, 单鲁维. 管道在役焊接修复残余应力分析及应用[J]. *石油机械*, 2023, 51(2): 130-137.
- HUO J F, SHAN L W. Analysis of Pipeline Residual Stress for In-Service Welding Repair and Applications[J]. *China Petroleum Machinery*, 2023, 51(2): 130-137.
- [24] 韩玉, 严仁章, 陈西洋, 等. 持荷状态下大尺度钢管拱肋拼接焊缝焊接残余应力分析[J]. *桥梁建设*, 2022, 52(4): 74-81.
- HAN Y, YAN R Z, CHEN X Y, et al. Analysis of Residual Stress in Welding Joints of Large-Scale Steel Tube Arch Rib under Sustained Load Condition[J]. *Bridge Construction*, 2022, 52(4): 74-81.
- [25] 戴玉芬, 尹孝辉, 刘良和, 等. 坡口角度对 P91 钢多层多道焊接残余应力的影响[J]. *金属加工(热加工)*, 2024(11): 64-71.
- DAI Y F, YIN X H, LIU L H, et al. Influence of Groove Angle on Residual Stress in Multilayer and Multipass Welding of P91 Steel[J]. *MW Metal Forming*, 2024(11): 64-71.
- [26] 丁鹏龙, 陈雷, 何亮, 等. 对接试板焊接残余应力实测与数值模拟[J]. *材料开发与应用*, 2023, 38(2): 16-22.
- DING P L, CHEN L, HE L, et al. Experimental Measurement and Numerical Simulation of Residual Stress on Butt Welding Steel Plates[J]. *Development and Application of Materials*, 2023, 38(2): 16-22.