

焊前预热对防喷器用 ANSI4130 材料接头组织及性能的影响

王庆禄¹, 桑德利^{2,3}, 王玉梅¹, 胡连海^{2,3}

(1. 河北博路天宝石油井控设备有限公司, 河北 邢台 054000;

2. 石家庄铁道大学 材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050043;

3. 河北省交通工程与环境协同发展新材料重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要: ANSI4130 钢因其优异的强度与冲击韧性, 广泛应用于石油防喷器制造。系统研究了不同焊前预热温度(100、200、300 °C)对 ANSI4130 钢 MAG 焊接接头组织与力学性能的影响。结果表明, 接头物相组成主要为 α 相, 焊接接头熔合区组织主要为珠光体和铁素体, 热影响区组织主要为马氏体和贝氏体。预热温度为 200 °C 时, 焊接接头综合性能最优, 硬度值为 245.4 HV, 接近母材水平; 拉伸性能表现突出, 伸长率达 18.2%, 抗拉强度为 679.7 MPa, 断裂形式为微孔聚集型韧性断裂; 焊缝区冲击功达 133.3 J, 冲击断裂形式为解理断裂, 显示出较好的韧性。该预热工艺有效缓解了热影响区的硬化与软化问题, 为防喷器的安全服役提供了工艺保障。

关键词: ANSI4130; 保护气氛; 焊前预热; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG156.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2026)02-0114-05

海洋具有丰富的石油资源, 随着石油开采逐步迈入深海领域, 恶劣的海洋工作环境对石油钻井平台的安全提出挑战。防喷器用于试油、修井、完压等工作中平衡井内压力, 预防发生危险事故, 其作为防止井喷事故的最后一道关, 对钻井作业的安全运行与环境保护起到举足轻重的作用^[1-2]。

ANSI4130 钢因其优异的强度与冲击韧性, 被广泛用于制造防喷器等高压关键部件^[3]。然而, 该材料属于中碳调质钢, 碳当量较高, 焊接性能较差。若采用常规大热输入焊接工艺, 母材热影响区易受过热影响, 虽然减缓了冷却速度, 但对抑制马氏体形成效果有限, 反而提升奥氏体稳定性, 导致形成粗大马氏体, 使过热区脆化加剧^[4]。此外, 焊接过程中产生的淬硬组织和残余应力易引发冷裂纹和热裂纹, 严重影响接头的服役性能^[5-7]。

焊前预热是改善中碳调质钢焊接性的有效手段之一。通过合理控制预热温度, 可显著降低焊接接头的冷却速率, 抑制淬硬组织形成, 缓解焊接应力, 从而减少裂纹倾向, 提高接头韧性^[8-9]。然而, 预热温度的选择对焊接接头最终的组织与性能具有决定性影响, 温度过低无法有效抑制硬化, 过高则可能导致组织粗化与性能下降。因此, 本文研究了不同焊前预热温度对 ANSI4130 钢焊接接头微观组织和力学性能的影响, 明确最佳预热工艺参数, 旨在为防喷器用高强钢焊接工艺的优化提供理论依据与技术支撑, 提升装备运行安全性并提高经济效益。

1 试验材料与方法

实验所用母材为 100 mm × 20 mm × 10 mm 的 ANSI4130 板材, 状态为调制态, 化学成分如表 1 所示。

收稿日期: 2025-09-23 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxxbzrb.20250250

作者简介: 王庆禄(1988—), 男, 工程师, 研究方向为金属材料工程。E-mail: wql@blbop.com

王庆禄, 桑德利, 王玉梅, 等. 焊前预热对防喷器用 ANSI4130 材料接头组织及性能的影响[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2026, 39(2): 114-118.

表1 ANSI4130 钢的化学成分(质量分数)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Fe
0.28~0.33	0.40~0.80	≤0.025	≤0.025	0.15~0.35	0.80~1.20	0.20~0.35	≤0.50	≤0.18	≤0.50	bal.

试验使用型号为 NB-500IGBT 的逆变式气体保护焊机进行 MAG 焊接,采用 100、200、300 °C 3 种不同预热温度进行试验。试板的预热方式为整体进热处理炉加热,热处理炉为节能型电阻炉,型号 RT-90-10。温度测量选择的是经第三方检测校准后的手持式测温仪。焊材为 AWS ER100S-G, $\Phi 1.2$ mm 焊条,焊接速度为 200~220 mm/min,焊接电流为 180~210 A,电压为 25~28 V,保护气氛选用 CO₂,焊后在 630 °C 条件下保温 2 h。试板焊接参数的确定是在厂家推荐的基础上,根据焊工和焊接工程师的经验和实际焊接效果进行微调的结果,并按照 ASME IX 进行了焊接工艺评定。图 1 为接头组织及力学性能分析取样示意图,取样后进行微观组织、物相及力学性能分析,并对拉伸与低温冲击试样进行断口形貌分析。

2 试验结果与分析

2.1 焊前预热对接头组织的影响

图 2 为不同预热温度下接头各位置的 XRD 图谱。由图 2 可知,防喷器用 ANSI4130 材料不仅相同预热温度下的接头各区域物相组成大致相同,不同预热温度下接头相同区域的物相也基本一致,晶面指数皆为(110)、(200)、(211)、(220)的 4 个 α 峰组成,即主要物相为 α 相。

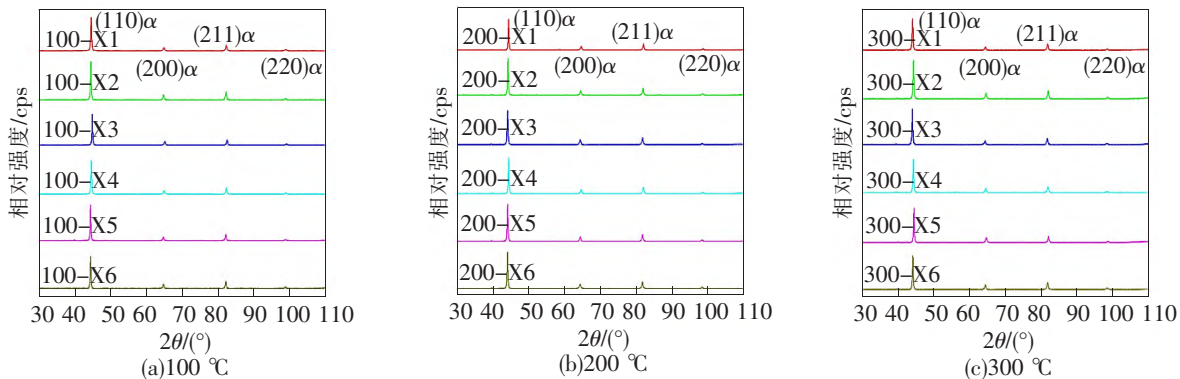


图2 ANSI4130 不同预热温度下的 XRD 图谱

图 3 为不同预热温度显微组织,母材为调质态,组织主要为回火索氏体。随着预热温度升高,组织基本不变。焊接接头采用多层多道焊连接,焊接热量对焊接接头不同区域热输入不同。在焊接过程中,热影响区中靠近熔合线位置附近的热量输入最高,微观组织变化较大,导致性能发生改变,而在远离熔合线位置附近热量输入依次减小,形成细晶区和两相区。因此将焊接接头组织分为熔合区和热影响区的粗晶区、细晶区和两相区。

将区域进行放大,在 500 倍光学显微镜下观察其组织。由图 3 可以明显观察到,接头各区存在大量的

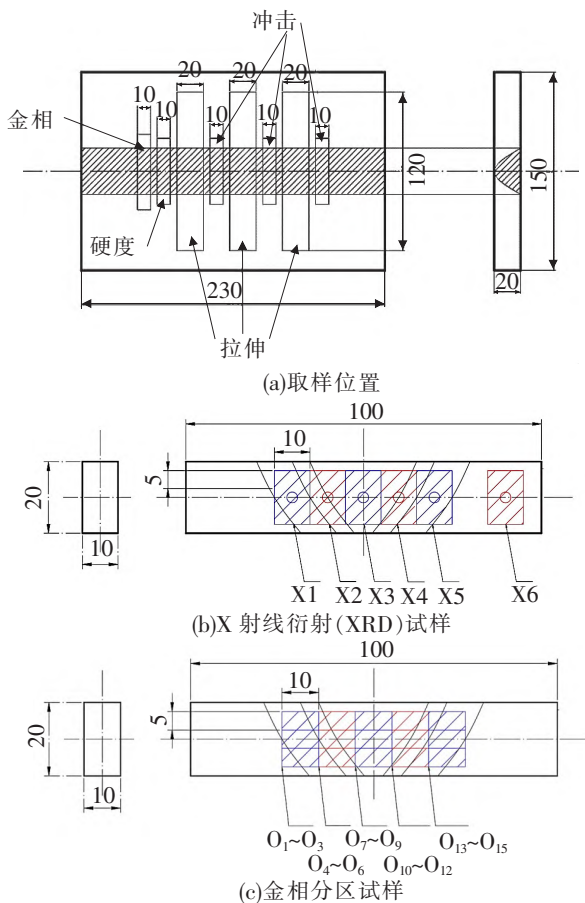


图1 接头组织及力学性能分析取样示意图(单位:mm)

珠光体和铁素体,但其成分占比不同。预热 100 ℃ 时,熔合区珠光体含量较多,含量随预热温度升高而降低。相应的,铁素体含量随着预热温度的升高而增加。在 3 种预热条件下,热影响区的粗晶区组织以马氏体和贝氏体为主,随着预热温度的提高,贝氏体占比明显上升,板条马氏体宽度变宽,长度增加;热影响区的细晶区显微组织由等轴状铁素体和细粒状碳化物组成的复相组织构成;而热影响区两相区组织为细小的马氏体和粗大铁素体。

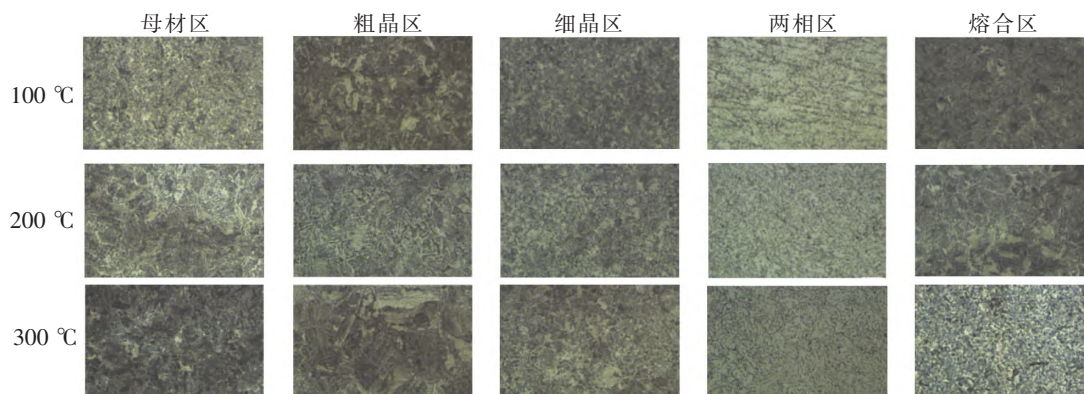


图 3 不同预热温度显微组织

综上所述,焊接接头主要物相为 α 相,通过试验发现物相组成无明显变化。3 种预热温度都未达到 A_{C1} ,不发生相变反应。因此防喷器用 ANSI4130 材料在相同焊前预热温度不同位置、相同位置不同焊前预热温度区域物相组成基本一致,焊前预热对焊接接头物相组成基本没有影响。

2.2 焊前预热对接头性能的影响

图 4 为不同预热温度焊接接头硬度分布及硬度测量示意图。由图 4 可知,母材区平均硬度均在 240 HV 左右,接头硬度分布近似不明显的“W”型,焊前预热 100、200、300 ℃ 时的焊接接头平均硬度分别为 253.9、245.4、232.2 HV。热影响区的宽度在 10 mm 左右(如图 4 虚线所示),热影响区受热影响大,但焊前预热工艺能够有效减少金属过热造成的影响,因此热影响区硬度基本与母材持平。结合图 3 可知,随着预热温度增加,贝氏体转变量增加,板条马氏体变宽变长,靠近熔合区的细晶区和两相区硬度增加。根据硬度数据可知,预热 200 ℃ 焊接接头硬度分布最佳,且平均硬度最接近母材硬度。

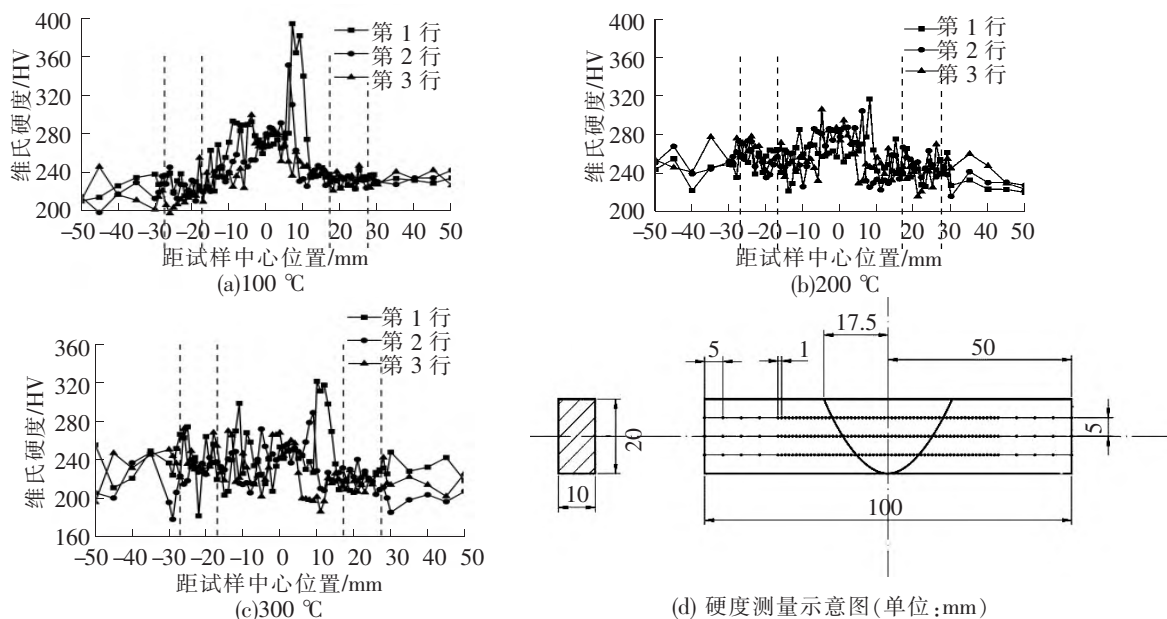


图 4 不同预热温度焊接接头硬度分布及硬度测量示意图

图5是不同预热温度焊接接头拉伸性能曲线。由图5(a)可知,拉伸曲线均呈现先上升后下降的趋势;由图5(b)、图5(c)分析可知,随着预热温度的升高,断面收缩率呈上升趋势,伸长长的先上升后降低,屈服强度和抗拉强度呈先降低后上升趋势,但预热200℃和300℃试样强度差别不大。根据曲线数据分析可知,预热温度为200℃时,拉伸性能较优异,伸长长的达18.2%,屈服强度为519 MPa,抗拉强度为679.7 MPa。

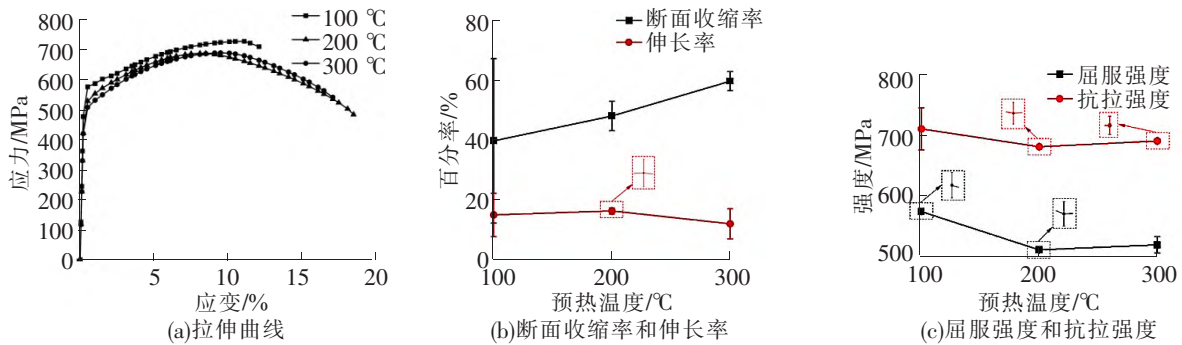


图5 不同预热温度焊接接头拉伸性能曲线

图6是不同焊前预热温度焊接接头不同位置的冲击能量。由图6可知,低温冲击韧性随焊前预热温度增加而下降,随着焊前预热温度提高,焊接接头在高温保温时间延长,对焊件整体加热均匀,从而减小焊接应力。3种焊前预热温度焊接接头的焊缝区冲击能量均大于热影响区冲击能量,说明焊缝区冲击韧性好、抗冲击性能强。可能是由于热影响区发生脆化和软化导致。焊缝和热影响区冲击能量变化一致,随着预热温度升高,冲击韧性降低。当预热温度为200℃时,接头冲击能量焊缝区平均达到133.3 J,热影响区平均达到36.4 J。

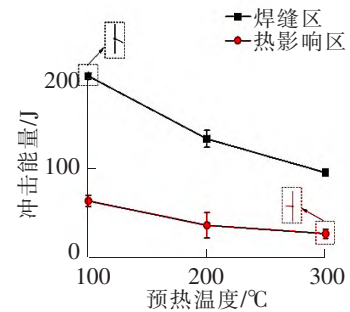


图6 不同预热温度焊接接头不同位置冲击能量

图7为焊前预热200℃拉伸与断口形貌。由焊前预热200℃断口形貌看,在预热200℃条件下,接头拉伸断裂是典型的微孔聚集型韧性断裂(如图7(a)、图7(b)所示),冲击断裂为典型的解理断裂(如图7(c)、图7(d)所示)。

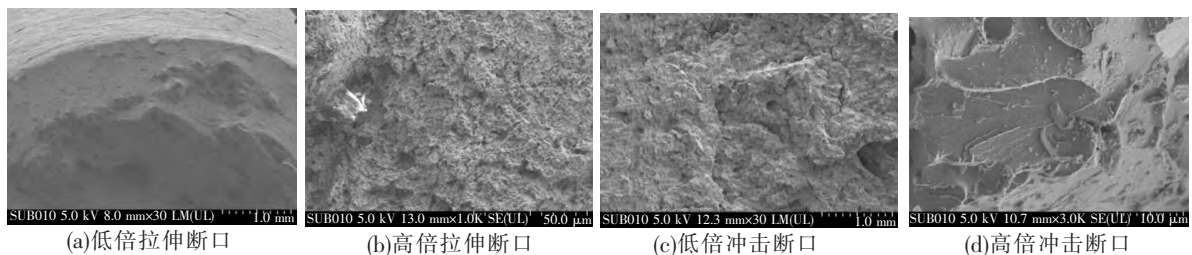


图7 焊前预热200℃断口形貌

综合以上力学性能分析可知,在预热200℃条件下,焊接接头的力学性能更优异。

3 结论

(1) 接头物相组成主要为 α 相,预热温度均未达到 A_{C1} ,物相组成并未随预热温度提高而发生变化。焊接接头熔合区组织主要为珠光体和铁素体,热影响区组织主要为马氏体和贝氏体。随着预热温度的提升,高温停留时间延长,组织逐渐细化。

(2) 母材区平均硬度均在240 HV左右。热影响区组织最为粗大,硬度值达到最高,但焊前预热200℃焊接接头硬度分布最佳,且硬度最接近母材硬度,为245.4 HV。拉伸结果表明,伸长长的随预热温度升高呈先上升后降低趋势,屈服强度和抗拉强度随预热温度升高呈先降低后上升趋势。焊前预热

200 ℃焊接接头拉伸性能最佳,其伸长率、屈服强度和抗拉强度分别为 18.2%、519 MPa 和 679.7 MPa;随着预热温度的提高,接头韧性逐渐降低。焊前预热 200 ℃时冲击能量焊缝区平均达到 133.3 J,热影响区平均达到 36.4 J。

(3) 焊接接头拉伸过程中的断裂主要为韧性断裂,断口呈深灰色,剪切唇、放射区、纤维区 3 区分界清晰。低温冲击试验表明焊缝部位冲击韧性较热影响区大,断裂形式主要为解理断裂。

(4) 综上表明,焊前预热 200 ℃时焊接接头综合性能最佳,在确保焊接接头强度达到应用要求的基础上减弱热影响区硬化及软化现象,提高成品低温冲击韧性,提高经济效益,保证海上石油钻井平台防喷器运行安全性,保障生命财产安全。

参 考 文 献

- [1] 周四祥. 闸板防喷器密封失效原因及对策分析[J]. 化工管理, 2014(14): 208.
- [2] 李三平. 国产防喷器生产技术现状及发展趋势[J]. 石油科技论坛, 2006(4): 54.
- [3] 李立英. ASTM4130 钢焊接热影响区组织与性能研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011: 1-12.
- [4] 郭慧英, 张宇, 何玉春, 等. CrMo 耐热钢气体保护焊接接头焊缝金属的组织与性能[J]. 金属热处理, 2015, 40(2): 60-64.
- [5] 史献营. 中碳调质钢焊接中的问题及工艺措施[J]. 新技术新工艺, 2015(7): 134-136.
- [6] 李红, 闫维嘉, 张禹, 等. 先进航空材料焊接过程热裂纹研究进展[J]. 材料工程, 2022, 50(2): 50-61.
- [7] 裘建华, 俞海涛, 高玲丽. 钢结构高强钢焊接冷裂纹的产生机理及防止措施[J]. 电焊机, 2021, 51(7): 104-107.
- [8] Hu Lianhai, Huang Jian, Li Zhuguo, et al. Effects of preheating temperature on cold cracks, microstructures and properties of high power laser hybrid welded 10Ni3CrMoV steel[J]. Materials & Design, 2011, 32(4): 1931-1939.
- [9] 冯勇. 焊前预热的作用及冷高压设备焊前预热温度的确定[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2022, 39(1): 28-31.

Influence of Preheating Before Welding on the Microstructure and Properties of ANSI4130 Material Joints for Blowout Preventers

WANG Qinglu¹, SANG Deli^{2,3}, WANG Yumei¹, HU Lianhai^{2,3}

(1. Hebei Bolu Tianbao Petroleum Equipment Manufacturing Co. Ltd., Xingtai 054000, China;

2. School of Materials and Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. Hebei Provincial Key Laboratory of Traffic Engineering Materials, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: ANSI4130 steel is widely utilized in the manufacture of petroleum blowout preventers due to its excellent strength and impact toughness. This study systematically investigated the effects of different preheating temperatures (100, 200, and 300 ℃) on the microstructure and mechanical properties of MAG-welded joints of ANSI4130 steel. The results indicate that the phase composition of the joint is primarily α -phase. The microstructure of the fusion zone in the welded joint mainly consists of pearlite and ferrite, while the heat-affected zone is predominantly composed of martensite and bainite. At a preheating temperature of 200 ℃, the welded joint exhibits optimal comprehensive performance, with a hardness value of 245.4 HV, approaching that of the base material. The tensile property is outstanding, with an elongation of 18.2% and a tensile strength of 679.7 MPa. The fracture mode is microvoid coalescence-induced ductile fracture. The impact energy in the weld zone reaches 133.3 J, and the impact fracture mode is cleavage fracture, demonstrating good toughness. This optimized preheating process effectively mitigates hardening and softening in the heat-affected zone, providing process guarantees for the safety of blowout preventers.

Key words: ANSI4130; protective atmosphere; weld preheating; microstructure; mechanical property