

AISI 4130管线钢管焊接工艺研究

付国刚，杜高峰

南通振华重型装备制造有限公司 江苏南通 226000

摘要：为了AISI 4130管道钢管的安全运行，通过分析管材焊接性，评定焊接工艺试验，制定与之相匹配的焊接工艺，研究满足规范要求并符合现场工况的焊接工艺。试验结果显示，AISI 4130管材试样的各项力学性能均符合评定标准要求，表明制定的焊接工艺合理，能够满足严苛的标准和现场工况要求，保证了管线的顺利生产和安全运行。

关键词：AISI 4130；管线钢管；焊接工艺

Research on welding process of AISI 4130 steel pipe

FU Guogang, DU Gaofeng

Nantong Zhenhua Heavy Equipment Manufacturing Co., Ltd., Nantong 226000, Jiangsu, China

Abstract: In order to ensure safety operation of AISI 4130 pipeline steel pipes, the welding performance of pipes was analyzed, welding process tests were evaluated, and matched welding processes were developed to study welding processes. They met regulatory requirements and working conditions. Test results showed that the mechanical properties of the AISI 4130 pipe specimen met the requirements of the evaluation standards. Test results indicated that the developed welding process specification was reasonable and could meet strict standards and working conditions. Welding Process could ensure the production and operation of the pipeline.

Keywords: AISI 4130; pipeline steel pipe; welding process

1 序言

钻井平台高压泥浆系统是平台的核心系统，选材以AISI 4130厚壁管为主要材料。AISI 4130材料等级较高，壁厚较厚，是合金含量较多的中碳调质钢，具有较大的淬透性、较差的焊接性、较易淬硬和冷裂，以及焊接困难等特点。对焊接性进行分析，选择适当的预热和道间理温度，选用合适的焊接材料和焊接参数，焊接完成后进行焊后热处理，

确定合理的焊接工艺，通过焊接工艺试验来指导AISI 4130钢管焊接接头的焊接。

2 AISI 4130钢管焊接性分析

采用钢管规格为 $\phi 168\text{mm} \times 30\text{mm}$ ，管材经调质处理，钢中加入Al、Mo、Ni、Cr、Cu等合金元素，确保钢管在低温韧性较好的同时，屈服强度和抗拉强度满足设计图样的要求。该钢管化学成分分析和力学性能试验结果见表1。

表1 AISI 4130钢管化学成分和力学性能

化学成分（质量分数，%）										力学性能			
C	Si	Mn	P	S	Al	Ni	Cr	Mo	V	R_{ch}/MPa	R_{m}/MPa	A (%)	(-46℃) KV/J
0.310	0.290	0.580	0.012	0.003	0.033	0.23	1.08	0.22	0.01	530	720	25	88.2、96.3、102

IIW碳当量计算公式为

$$CE(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15}$$

根据钢管化学成分，计算出AISI 4130钢管碳当量^[1]为0.68%，可知焊接难度较大。

根据AWS D1.1附录H（查表1.1和表H.2），结合AISI 4130钢管焊接时拘束等级为中等，得出AISI 4130钢管预热温度为160℃。

AISI 4130钢管经调质处理，母材组织主要为珠光体+铁素体（见图1）。

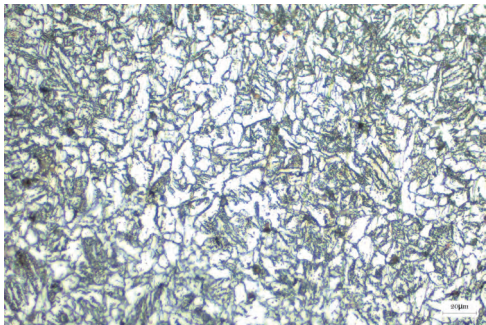


图1 AISI 4130钢管母材组织

3 焊接材料的选择

按照强度和韧性的搭配原则选择氩弧焊丝打底、焊条填充盖面^[2]。氩弧焊丝和焊条要求H、N、O、P、S等有害元素含量低，同时要求焊条的扩散氢含量均≤5mL/100g。

焊接材料熔敷金属化学成分和力学性能见表2。

4 焊接工艺评定试验

试验用的AISI 4130钢管可以覆盖现场产品厚度。参考了以往其他特种材料测试的经验，并参考焊接材料生产企业的内部试验数据，选用焊接工艺评定试验相关参数，见表3。AISI 4130钢管对焊接热输入有较强的敏感性，过大的热输入会造成焊接热影响区晶粒粗大，接头韧性降低，从而使其抗裂能力下降。因此，在焊接时，焊缝的性能也随之下降；若热输入过小，则降温快，易淬硬，焊缝质地较硬，其裂纹倾向变大。

由于AISI 4130钢管强度和碳当量均较高，在试管焊接过程中易产生裂纹，因此使用陶瓷电加热片

表2 熔敷金属的化学成分和力学性能

品名	型号	化学成分（质量分数，%）							力学性能				数据来源
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	R _{el} /MPa	R _m /MPa	A（%）	KV/J	
氩弧焊丝 CARBOROD Ni1	ASME SFA5.28 ER80S-Ni1	≤0.12	0.40 ~ 0.80	≤1.25	≤0.025	≤0.025	0.80 ~ 1.10	0.35	≥470	≥550	≥24	≥27 （-45℃）	标准
		0.09	0.71	1.09	0.012	0.010	0.88	0.010	500	610	24	68	复验
焊条 HOBALLOY 10018D2	AWS A5.5/ A5.5M E10018-D2	≤0.15	≤0.80	1.65 ~ 2.0	≤0.03	≤0.03	≤0.90	0.25 ~ 0.45	≥600	≥690	≥16	≥27 （-50℃）	标准
		0.04	0.14	1.74	0.02	0.01	0.45	0.34	665	731	25	60	复验

表3 AISI 4130钢管焊接工艺评定试验相关参数

序号	编号	板厚/mm	坡口形式与尺寸	焊接位置	焊接方法及材料	焊道	道间温度/℃	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/（cm/min）
1	HP01	30+30		复合位置 6G	GTAWW+SMAW (φ2.4mm) CARBOROD Ni1 + HOBALLOY 10018D2	打底	160	105~120	12~13	10~11
						填充	110~160	110~160	22~26	14~18
						盖面	100~190	110~150	20~25	14~16

将整个钢管均匀预热。管对接接头最低预热温度为160℃，道间温度控制在160~200℃。

焊缝组织除了受焊接材料化学成分的影响外，

焊后热处理对接头组织的影响也非常大。焊后热处理既能使接头组织得到改善，又能消除焊后残余应力，还能使接头组织稳定性得到提高，接头整体硬

度降低，对接接头综合性能得到提高。

热处理温度为 $(620 \pm 20)^\circ\text{C}$ ，保温时间 135min，加热和冷却速度 $\leq 150^\circ\text{C/h}$ 。使用 WCK-120kW 温度控制仪进行热处理过程控制，并记录热处理曲线。

5 试板无损检测和试验取样类型

试管焊接完成立即进行热处理，热处理完成

72h 后进行焊缝外观质量检查、MT 磁粉及 UT 超声波检测。

试管焊缝进行了整个 MT 和 UT 检测，质量等级均为合格，没有发现表面开裂和内部缺欠的现象。无损检测后的力学性能检测按表 4 要求进行。试验的项目及取样的数量按 ASME IX—2021《焊接和钎焊评定标准》规定执行（见表 4），试样取样位置及尺寸如图 2～图 5 所示。

表4 焊接接头力学性能测试内容、试样数

编号	试件形式	试验项目		试样数量/个	试验方法
HP01	对接接头试件	接头拉伸		2	QW-150
		接头弯曲		4	QW-160
		冲击 试验2	焊缝金属	3	QW-170
			熔合线	3	
			熔合线+2mm	3	
			熔合线+5mm	3	
		接头硬度		1	ASTM E92
		金相宏观		1	QW-194

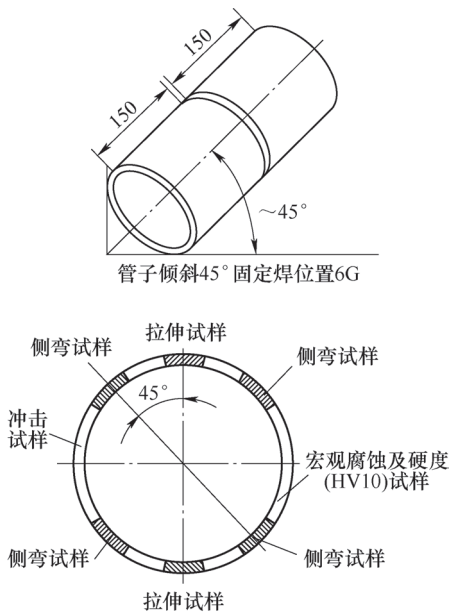
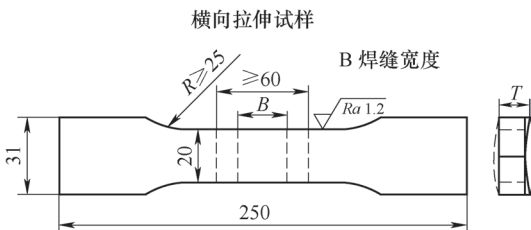


图2 试样取样位置



注：焊缝上下表面采用机加工与母材表面齐平

图4 接头拉伸试样尺寸

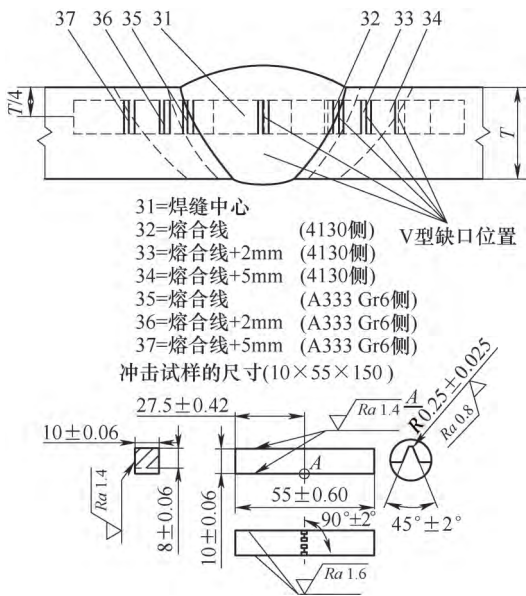


图3 接头低温冲击试样尺寸示意

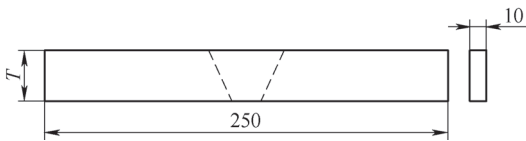


图5 接头弯曲试样尺寸

6 力学性能试验结果

6.1 拉伸试验结果

AISI 4130 钢管拉伸试验结果见表 5。由表 5 可

知，接头拉伸试样抗拉强度>655MPa（验收值），各试样断裂位置均在母材位置，焊缝强度高于母材强度，满足规范要求。

表5 AISI 4130钢管焊缝拉伸试验结果

编号	焊接热输入 / (kJ/cm)	样件编码	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断裂部位	验收值 /MPa	结果
HP01	15	01-1	706	—	母材	≥655	合格
		01-2	718	—	母材	≥655	合格

6.2 冲击试验结果

AISI 4130冲击试验结果见表6。由表6可看出，与41J的验收值相比，焊缝各部位的冲击吸收能量均满足标准要求。焊缝中心是接头韧性最低的部位，在靠近熔合线处的冲击吸收能量有很大的波动。HAZ + 2mm和HAZ + 5mm处的韧性均在200J以上。

表6 AISI 4130钢管焊缝冲击试验结果

编号	焊接热输入 / (kJ/cm)	试验温度 /℃	冲击吸收能量/J	冲击位置	验收值/J	结果
HP01	15	-46	45、70、56	焊缝中心	≥41	合格
		-46	69、108、73	熔合线	≥41	合格
		-46	237、215、208	熔合线+2mm	≥41	合格
		-46	234、257、212	熔合线+5mm	≥41	合格

6.3 硬度试验结果

AISI 4130钢管焊缝硬度试验结果见表7。由表7可看出，焊缝各区域硬度检测结果均≤250HV10，其中热影响区硬度最高，焊缝中央硬度最低。

表7 AISI 4130钢管焊缝硬度试验结果

编号	焊接热输入 / (kJ/cm)	试验位置	硬度HV10	验收硬度HV10	结果
HP01	15	焊缝中心（上部）	175、173、173	≤250	合格
		焊缝中心（下部）	174、163、170	≤250	合格
		热影响区上部	247、248、247、247、246	≤250	合格
		热影响区下部	245、243、247、248、248	≤250	合格
		母材上部	232、234、239	≤250	合格
		母材下部	239、240、237	≤250	合格

6.4 侧弯试验结果

采用绕弯芯贴弯的导向弯曲压模进行侧弯试

验。经侧弯试验，发现焊缝、熔合线、热影响区无裂纹、未熔合、夹渣及气孔等缺陷，满足ASME要求。

6.5 焊接接头金相组织

取金相试样，观察对接接头的母材、焊缝、HAZ显微组织，具体组织形态如图6～图11所示。

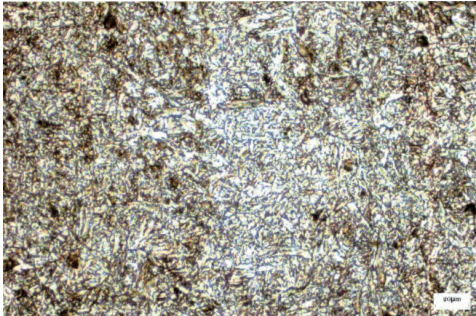


图6 焊缝中心组织（填充层）

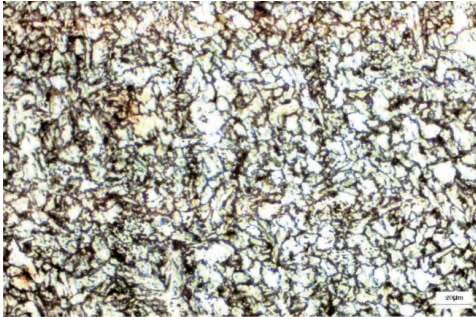


图7 焊缝中心组织（打底层）

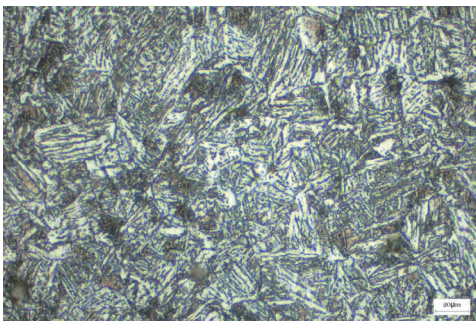


图8 熔合线组织（上部）

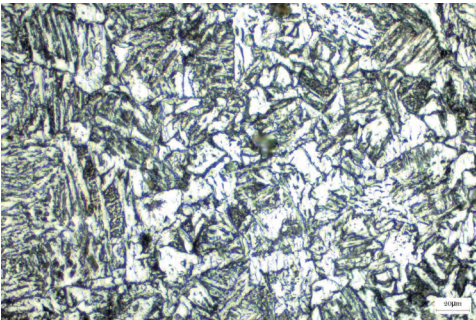


图9 熔合线组织（下部）

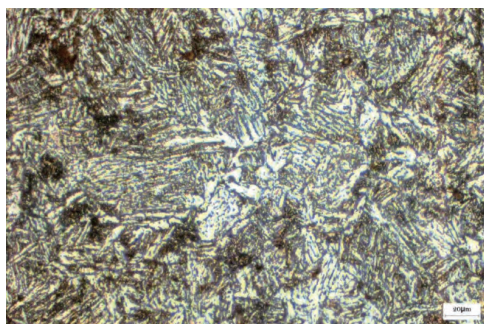


图10 热影响区组织（上部）

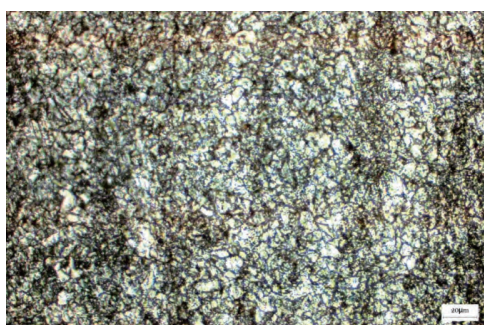


图11 热影响区组织（下部）

AISI 4130钢管焊缝热处理后填充焊缝组织为粒状贝氏体+铁素体，焊缝下部为珠光体+铁素体^[3]。热影响区的上半部分为板条马氏体+铁素体，下半部分为珠光体+铁素体。焊缝组织颗粒细小，这种组织结构有效地验证了工艺的合理性。

上述检测数据表明，所有检测结果均符合

ASME IX—2021和ABS船级社的规范要求，并获得ABS船级社的资格认可。

7 结束语

1) 通过选择合适的焊接材料，控制预热温度和道间温度，采用合理的焊接电流、电弧电压和焊接速度，进行焊后热处理，能有效避免AISI 4130钢管焊接的热裂纹、延迟裂纹、热影响区脆化及软化等问题，焊接接头各项力学性能及硬度值满足规范要求。

2) 试验中所采用的工艺参数，可作为编制AISI 4130钢焊接工艺的依据，用于海洋平台高压管道AISI 4130钢的焊接。

参考文献：

- [1] 钱旭瑞，薄国公. 海洋平台30CrMo调质钢管的焊接[J]. 金属加工（热加工），2011（6）：44-45.
- [2] 薄国公，王勇，韩涛，等. 焊后热处理对ASTM4130钢焊接接头组织与性能的影响[J]. 压力容器，2011，28（7）：11-16.
- [3] 张莉莉，张骁勇，郝瑞辉. 回火焊道热处理对X80管线钢热影响区组织性能的影响[J]. 热加工工艺，2008，37（21）：6-8.

MW 20240412

（上接第90页）

技术。焊接标准的应用，一方面推动焊接技术的工程应用，另一方面也促进了焊接技术本身的发展。

通过建立轨道交通装备行业焊接技术标准体系及标准数据库，焊接技术人员可更好地掌握和使用轨道交通装备焊接标准，在体系的实践和应用中又能推动体系自身的持续性建设，紧跟技术的发展和焊接生产的需要对标准进行制修订，从而促进整个焊接技术标准体系趋于完善，以帮助焊接技术人员全面提升水平，助力轨道车辆焊接企业提高焊接水平和产品质量，走向国际市场。

参考文献：

- [1] 蒋田芳，徐凯，张文斌. 轨道车辆及其零部件的焊接国家标准综述[J]. 铁道技术监督，2013，41

（5）：6-9.

- [2] 徐艳升，张勇，刘丙臣. EN15085焊接体系运行要素解析及常见问题[J]. 电焊机，2020，50（4）：132-135.
- [3] 任彭龙，葛佳棋，万升云，等. ISO 3834金属材料熔化焊质量体系的建立[J]. 金属加工（热加工），2023（10）：89-91.
- [4] 钱强，邵辉，杜娜. 焊接生产制造领域中的国际焊接标准体系及应用[J]. 焊接，2021（4）：45-51.
- [5] 国际标准化组织. 金属材料熔化焊的质量要求-第6部分：实施准则：ISO/TR 3834-6：2007[S]. 北京：中国标准出版社，2007.

MW 20240316