

直缝埋弧焊管焊缝性能不合格及点状缺陷产生原因

王 燕

(中石化石油机械股份有限公司沙市钢管分公司, 湖北 荆州 434001)

摘要: 针对直缝埋弧焊管焊缝出现低温冲击韧性不合格、导向弯曲不合格及内焊缝近表层点状缺陷, 分析了钢板原料成分及缺陷发生处的宏观形貌和金相组织。分析认为: 为降低成本, 调整了 L485M 母材化学成分, 使后来批次的母材合金元素中不含 Mo 元素, 为保证焊缝的冲击韧性, 制管厂应当选择合适的焊丝进行匹配, 以调整焊缝化学成分的含量; 在保证焊缝熔透量的情况下, 尽量使用小的焊接热输入量, 使焊接后冷却凝固的熔池金属得到理想的组织成分和晶粒组织。

关键词: 直缝埋弧焊管; 力学性能; 点状缺陷; 焊接热输入量

中图分类号: TG113.12 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-2311(2020)04-0039-04

Causes for Weld Seam Performance Nonconformance and Spot Defect of SAWL Pipe

WANG Yan

(Shashi Steel Pipe Company, SINOPEC Oilfield Equipment Corporation, Jingzhou 434001, China)

Abstract: Addressing the nonconformance concerning low temperature impact toughness and guided bending, and the near surface spot defects as developed in the weld seam of the SAWL pipe, the blank steel plate chemical composition, and the macro-morphology and metallographic structure of the metal where the said defects present are analyzed. Based on the analysis, actions as follows should be taken: adjusting the chemical composition of the L485M base metal to get the base metal of the batches as following free of the alloy element Mo, so as to reduce the cost; determining well-matched weld wire by the pipe maker to adjust the chemical element contents of the weld seam so as to ensure the impact toughness thereof; and under the condition that the weld seam penetration is assured, trying as far as possible to use small welding-heat input amount to make the cooled down and solidified weld pool metal have ideal after-welding microstructure and grain structure as well.

Key words: SAWL pipe; mechanical property of the weld seam; spot defect; welding-heat input amount

随着世界石油天然气工业的不断发展, 油气输送管线设计输送压力的不断提高, 钢管向着高钢级、大管径、厚壁厚方向发展, 对焊接质量也提出了更高的要求, 其中包括钢管的力学性能和焊接缺陷的控制。提高焊管的焊接质量, 对提高产品质量和生产效率具有重要意义^[1-2]。中石化石油机械股份有限公司沙市钢管分公司(简称沙市钢管)在生产壁厚为 16 mm、材质 L485M 的直缝埋弧焊管中,

焊缝同时出现低温冲击韧性不合格、导向弯曲不合格及点状缺陷等多个质量问题, 造成多根钢管降级。针对上述质量问题, 笔者进行了原因分析, 通过一系列的工艺调整试验, 最终解决了该质量问题。本文就产生以上工艺质量问题的原因进行分析论述。

1 试样分析

焊缝低温冲击韧性数值见表 1。从表 1 中可以看出焊缝冲击功单值为 74, 74, 78 J, 平均值为 75 J, 焊缝冲击功单值符合 ≥ 60 J 的客户技术要求,

王 燕(1986-), 女, 工程师, 长期从事油气输送用焊接钢管焊接技术研究工作。

但是冲击功平均值不符合 ≥ 80 J的客户技术要求。焊缝导向弯曲不合格如图1所示,且均为导向弯曲不合格,分析弯曲试样宏观形貌,在试样受拉面上沿焊缝中心线开裂,并贯穿了整个试样宽度方向。为排除钢管因存在内在焊缝质量缺陷而影响力学性能不合格的情况,随即在力学试样不合格钢管上,用缺陷评定灵敏度为 $\Phi 1.6$ mm竖通孔反射波高100%的超声波进行全管焊缝探伤,发现存在多处点状缺陷(每根钢管多达十几处),随后对此不合格钢管前后生产的钢管也进行全管超声波探伤均发现此类缺陷。对直缝埋弧焊管有缺陷的部分取样,通过超声波手动探伤仪确认缺陷所在焊缝中的位置,用机械加工方法加工出缺陷所在的焊缝横截面,经磨削、抛光、腐蚀后制成金相试样,发现点状缺陷水平位置位于焊缝正中间,距内焊缝表面深度0.5~2.0 mm,裂纹存在位置如图2所示,缺陷为垂直于焊缝柱状晶方向长度约为0.4 mm微裂纹,缺陷位置处于内焊缝余高中间正下方2 mm左右,故怀疑反弯不合格可能是受到内焊缝点状缺陷的影响。

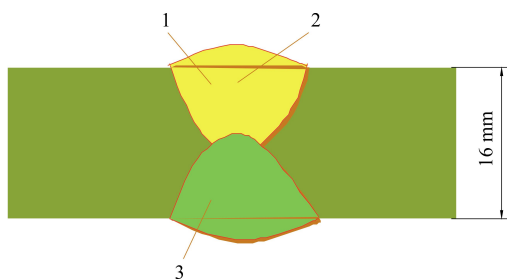
表1 焊缝低温冲击韧性数值

内焊焊丝	外焊焊丝	冲击功/J			
		1	2	3	平均值
A(1丝)+B(2, 3, 4丝)	B	74	74	78	75

注:低温冲击韧性要求试验温度 -5 °C,焊缝冲击功单值 ≥ 60 J,3个值的平均值 ≥ 80 J。



图1 焊缝导向弯曲不合格试样示意



1—内焊缝 2—微裂纹 3—外焊缝

图2 裂纹存在位置示意

2 原因分析

从存在的问题来看,焊缝冲击值低反映的是焊缝韧性不达标,焊缝反弯不合格说明塑性不达标,使得焊缝经扩径后产生微裂,导致出现超声波手动探伤返单个超标缺陷问题。在焊接工作中用于改善焊缝金属性能途径很多,但归纳起来主要是焊缝的固溶强化、变质处理(微合金元)和调整焊接工艺参数^[3-4]。

2.1 焊缝金属的固溶强化和变质处理

改善焊缝金属凝固组织,影响熔池结晶形态的主要是焊缝中的元素含量。一方面是焊缝中S、P、H、O、N等有害元素的含量,S、P等有害元素含量超标时容易产生FeS、FeP,并与铁发生作用形成低熔点共晶,在焊缝金属凝固结晶后期,低熔点共晶被排挤在柱状晶体相遇的中心部位,形成“液态薄膜”,使焊缝产生热裂纹,造成焊缝的韧性、塑性下降,同时S、P在焊缝中还能引起偏析等问题;另一方面是Mo、Mn、V、Nb、Ti等合金元素的含量,通过焊接材料向熔池中加入细化晶粒的合金元素,使焊缝金属晶粒细化,既可提高焊缝的强度和韧性,又可改善抗裂性能^[5-6]。

2.2 调整焊接工艺参数

焊接工艺参数主要包括焊接电流、焊接电压、焊接速度等;而焊接热输入是焊接工艺参数的集中反映,是影响焊接热循环的重要因素。当母材、焊材及焊接方法一定,焊接接头显微组织与力学性能主要取决于焊接热输入。随着焊接热输入量的降低,焊缝组织逐渐细化,焊缝韧性逐渐提高,但焊接热输入量过大或过小都会影响钢管的焊接质量。

根据影响焊缝塑性、韧性力学性能的因素分析,首先将沙市钢管使用的钢材原料化学成分与其他两家钢厂的原料化学成分进行对比,钢板原料化学成分见表2。从化学成分上看,沙市钢管使用的钢板原料中无Mo元素,而当焊缝中的Mo含量在0.20%~0.35%,焊缝中有利于形成均一的细晶铁素体,不仅提高强度,同时也能改善韧性^[7-9]。

其次,观察焊缝的显微组织形貌,发现焊缝熔池柱状晶成长方向欠佳,基本垂直于中心轴。理想的焊缝宏观形貌如图3所示,柱状晶成长方向与中心轴之间的角度越小越好,这样就要求焊缝熔池中的杂质尽量往上浮,而不是残留在焊缝中心区域。如果熔池杂质残留在焊缝中心区域,就会使焊缝最后凝固处产生偏析,造成焊缝塑性不够,从而在扩

表 2 钢板原料化学成分(质量分数)

钢厂	化学成分																%	
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Nb	V	Ti	Mo	Al	B	N	C _{eq}	P _{cm}	
沙市钢管	0.06	1.60	0.30	0.002	0.007	0.240	0.023	0.010	0.057	0.001	0.012	0	0.035	0.000 4	0.004	0.38	0.17	
A 厂	0.08	1.54	0.20	0.004	0.015	0.161	0.011	0.006	0.060	0.041	0.010	0.17	0.035	0.000 4	0.004	0.41	0.19	
B 厂	0.07	1.56	0.22	0.001	0.008	0.190	0.109	0.029	0.042	0.001	0.012	0.08	0.026	0.000 2	0.004	0.39	0.17	

径之后产生开裂。焊缝熔池中柱状晶成长的形态主要受焊接热输入的影响。

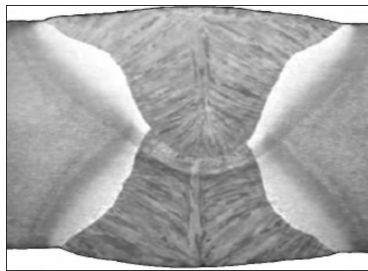


图 3 理想的焊缝宏观形貌

3 试验方案

3.1 调整焊缝化学成分

首先为了增加焊缝中 Mo 的含量, 选用了 4 种 Mo 含量较高的 A、B、C、D 焊丝进行焊材匹配试验, 多种焊丝匹配试验结果见表 3。

表 3 多种焊丝匹配试验结果

试样编号	焊丝	焊缝冲击值/J			反弯情况
		最大	最小	平均值	
1	内外焊 B	175	144	160	合格
2	内外焊 A(1, 2 丝) +B(3, 4 丝)	139	93	113	不合格
3	内外焊 C(1, 2 丝) +B(3, 4 丝)	114	91	106	合格
4	内外焊 C	170	136	157	不合格
5	内外焊 D	136	110	120	不合格

从表 3 试验结果看出, 1 号和 4 号焊缝冲击数值较高, 但是 4 号试验结果反弯不合格, 故初步将内外焊焊丝全部用 B 焊丝。为了验证 B 焊丝试验结果的稳定性, 故新增两组试样, 内外焊 B 焊丝试验结果见表 4。

综合以上试验结果, 即使采用 B 焊丝焊缝的反

表 4 内外焊 B 焊丝试验结果

试样编号	焊缝冲击值/J			反弯情况
	最大	最小	平均值	
6	153	122	135	合格
7	165	120	137	不合格

注: 为了节约试验调整时间, 试样均在扩径前取样。

弯不合格的, 但焊缝冲击数值较高且较稳定, 所以内外焊均用 B 焊丝, 焊丝直径为 4 mm。

3.2 调整焊接热输入量

制定焊接规范, 初始焊接规范见表 5。

表 5 初始焊接规范

方式	焊接速度/ (m·min ⁻¹)	焊接热输入/ (kJ·cm ⁻¹ ·mm ⁻¹)	焊接电流/ A	焊接电压/ V
内焊	1.60	2.42	820, 700, 600, 550	36, 38,
外焊	1.60	2.49	900, 700, 600, 550	40, 42

从改变焊缝晶粒大小和显微组织上考虑, 应当降低焊接热输入量, 因此进行了第一次的焊接参数调整, 将焊接热输入量由 2.42 kJ/(cm·mm) 减小至 2.3 kJ/(cm·mm), 第一次调整后的焊接规范见表 6, 试验结果见表 7。

表 6 第一次调整后的焊接规范

方式	焊接速度/ (m·min ⁻¹)	焊接热输入/ (kJ·cm ⁻¹ ·mm ⁻¹)	焊接电流/ A	焊接电压/ V
内焊	1.65	2.30	850, 700, 600, 500	35, 38,
外焊	1.65	2.35	900, 700, 600, 500	40, 42

表 7 第一次调整焊接规范后的试验结果

试样编号	焊缝冲击值/J			反弯情况
	最大	最小	平均值	
8	145	100	125	合格

从以上试验结果来看, 减小焊接热输入量后, 焊缝低温冲击值和导向弯曲都达标, 且点状缺陷由之前每根钢管十几处减少到 5 处。虽然整体情况大

有好转,但仍不能完全消除点状缺陷,为此沙市钢管根据以上思路,第二次设计焊接规范,将焊接热输入量由 $2.3 \text{ kJ}/(\text{cm}\cdot\text{mm})$ 减小为 $2.2 \text{ kJ}/(\text{cm}\cdot\text{mm})$,第二次调整后的焊接规范见表 8,试验结果见表 9。

表 8 第二次调整后的焊接规范

方式	焊接速度/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	焊接热输入/ ($\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$)	焊接电流/ A	焊接电压/ V
内焊	1.65	2.20	850, 700, 600, 500	34, 38,
外焊	1.65	2.31	900, 700, 600, 500	40, 41

表 9 第二次调整焊接规范后的试验结果

试样编号	焊缝冲击值(平均值)/J	反弯情况	手探结果
9号	123, 146, 150, 129, 127, 132(135)	合格	扩前、扩后 手探均合格

为了验证试验结果的稳定性,采用优化后的工艺参数焊接 10 根钢管,焊后焊缝表面成型良好,100%全管手动超声波检查无点状缺陷,焊缝、热影响区低温冲击功平均值 $\geq 150 \text{ J}$,焊接接头弯曲均合格,焊缝宏观形貌良好,如图 4 所示。



图 4 焊缝宏观形貌

沙市钢管通过焊接试验构建管线钢埋弧焊工艺参数优化设计数学模型^[10-13],确定了管线钢管能量应控制在 $220 \text{ J}/\text{mm}^2$ 以内。

4 结 论

(1) 沙市钢管为降低成本,调整了 L485M 母材化学成分,使母材合金元素中不含 Mo 元素,为

保证焊缝的冲击韧性,制管厂需要选择合适合金元素含量的焊丝进行匹配,以调整焊缝化学成分的含量。

(2) 在保证焊缝熔透量的情况下,尽量使用小的焊接热输入量,使焊接后熔池金属冷却凝固后得到理想的组织成分和晶粒组织。

5 参考文献

- [1] 张毅. 浅析合金元素对焊缝性能的影响[J]. 内蒙古石油化工, 2000, 26(3): 80-81.
- [2] 左兰兰. HFW 与 SAWL 焊管的焊缝性能比较[J]. 钢管, 2015, 44(1): 69-72.
- [3] 王立柱, 高振宇, 耿亮, 等. 小直径薄壁直缝埋弧焊管焊接缺陷探讨[J]. 钢管, 2017, 46(4): 44-47.
- [4] 韩保材, 李钢, 汤圣先. 一种直缝埋弧焊管内焊缝检查新方法[J]. 钢管, 2017, 46(4): 44-47.
- [5] 赵波, 王能干, 孙奇, 等. 多丝埋弧焊低线能量化高效焊接工艺探讨[J]. 钢管, 2014, 43(4): 47-52.
- [6] 刘世泽, 董春明, 鲁科明, 等. 埋弧焊焊丝 MK65HGX-III 的开发和应用[J]. 钢管, 2013, 42(2): 42-47.
- [7] 侯帅, 张海军, 兰兴昌. 大口径直缝埋弧焊管生产技术与装备的新进展[J]. 钢管, 2009, 38(1): 46-52.
- [8] 刘鉴卫, 曹华勇, 王亚彬, 等. 直缝埋弧焊管常见缺陷产生原因及预防措施[J]. 钢管, 2018, 47(3): 35-42.
- [9] 黎剑峰. 钢管直缝埋弧焊焊接规范对焊缝形状的影响[J]. 钢管, 2002, 31(4): 33-36.
- [10] 苗濛, 谢平. 钢板化学成分对 L485M/L555M 焊管热影响区性能的影响[J]. 钢管, 2018, 47(6): 25-29.
- [11] 王钢, 边城, 姚华, 等. X80 钢级大直径直缝埋弧焊管裂纹研究与工艺改进[J]. 钢管, 2012, 41(6): 9-13.
- [12] 李延丰, 郑磊, 陈小伟. X90 和 X100 钢级 $\Phi 813 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 直缝埋弧焊管制造技术的研究[J]. 钢管, 2008, 37(5): 30-34.
- [13] 唐子金, 曾德胜, 张晓强, 等. 优化设计管线钢埋弧焊工艺参数的方法: 中国, 201510320075. 2[P]. 2017-05-10.

(收稿日期: 2019-12-30)

● 简 讯

天津钢管制造有限公司 $\Phi 610 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$ X60QS 高钢级抗腐蚀管线管海外项目实现投产 [发布日期: 2020-08-03] 日前,天津钢管制造有限公司(简称天津钢管)出口的 $\Phi 610 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$ 规格 X60QS 酸性环境用高钢级抗腐蚀管线管项目顺利完成全部现场施工,实现投产正常运行,标志着天津钢管圆满完成首个 $\Phi 610 \text{ mm}$ 大直径酸性环境用高钢级无缝管线管项目应用。天津钢管不仅首次实现 $\Phi 610 \text{ mm}$ 外径管线管批量化生产,还拓宽了 $\Phi 610 \text{ mm}$ 外径壁厚范围,实现 17.48, 23.80, 28.60 mm 等壁厚产品的生产。(摘自:TPCO 天管在线)