

X80 管线钢环焊缝 气体保护焊焊丝的研制

毕宗岳^{1,2}, 刘海璋^{1,2}, 牛 辉^{1,2}, 黄晓辉^{1,2}, 张万鹏^{1,2}

(1. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721008;

2. 宝鸡石油钢管有限责任公司 钢管研究院, 陕西 宝鸡 721008)

摘 要: 针对 X80 管线钢的组织与性能特点, 研究设计了适用于管线钢现场焊接用 Mn-Ni-Mo-Ti 合金系气体保护焊焊丝; 测试了焊缝金属的化学成分、金相组织、冲击韧性、抗拉强度和硬度。该焊丝的熔敷金属屈服强度 600 MPa, 抗拉强度 645 MPa, -30 °C 夏比冲击功 105 J。该焊丝用于 X80 管线钢现场焊接结果表明, 焊缝抗拉强度 645 MPa, -10 °C 夏比冲击功平均值 145 J, 焊缝具有很好的强韧性匹配。采用金相显微镜和 SEM 对该焊丝焊缝微观组织和断口形貌分析表明, 焊缝金相组织主要为针状铁素体、少量的先共析铁素体和粒状贝氏体的组织, 断口为韧窝状, 呈现典型的塑性断裂特征。

关键词: X80 管线钢; 环焊缝; 气体保护焊; 焊丝; 焊接工艺

中图分类号: TG422.3 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-3938(2012)10-0005-05

Research on Gas-shielded Welding Wire of Circumferential Weld for X80 Pipeline Steel

BI Zongyue^{1,2}, LIU Haizhang^{1,2}, NIU Hui^{1,2}, HUANG Xiaohui^{1,2}, ZHANG Wanpeng^{1,2}

(1. National Petroleum and Gas Tubular Goods Engineering Technology Research Center, Baoji 721008, Shaanxi, China;

2. Steel Pipe Research Institute of Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China)

Abstract: According to the characteristics of the microstructure and properties of X80 pipeline steel, the Mn-Ni-Mo-Ti alloy gas-shielded welding wire was successfully designed and developed for site welding. The chemical composition, metallurgical structure, impact toughness, tensile strength and hardness of the weld metal were tested. The yield strength of deposited metal of the welding wire was 600 MPa, tensile strength was 645 MPa, and Charpy impact energy(-30 °C) was 105 J. The site welding result of X80 pipeline steel showed that the weld was with perfect strength and toughness matching, when the tensile strength of weld was 645 MPa, the average value of Charpy impact energy (-10 °C) was 145 J. The microstructure and fracture appearance of weld were analyzed by using metallographic microscope and scanning electron microscope(SEM), the analysis results indicated that the microstructure of weld mainly are acicular ferrite, a few proeutectoid ferrite and granular bainite, and the fracture is dimple which presents a typical ductile fracture characteristics.

Key words: X80 pipeline steel; circumferential weld; gas-shielded welding; welding wire; welding process

0 前 言

西气东输二线和三线工程主体采用 X80 管线

钢管, 环焊缝用气体保护实芯焊丝不仅要求具备良好的强度和韧性匹配, 还应具有优良的焊接工艺性能。X80 管线钢的强韧化可通过微合金化和控轧

控冷工艺实现,但对于焊缝的强韧性匹配,在焊接工艺基本不变的情况下只有通过微合金化来实现^[1]。一般来说,具有高强韧性的高强度低合金钢焊缝组织主要有针状铁素体、粒状贝氏体等组织形态^[2-3]。因为,焊缝中大量针状铁素体和细小的贝氏体可显著提高微裂纹扩展抗力,增强焊缝金属的强韧性。本研究针对 X80 管线钢的组织与性能特点,通过焊丝成分的合理设计,实现焊缝以针状铁素体为主的组织控制。制备出适合 X80 高钢级大壁厚管线环焊缝要求的气体保护焊焊丝,保证了焊丝强韧匹配性能,焊丝的工艺性能(飞溅、电弧稳定性、焊缝成形)优良,焊缝成形良好,确保获得高强度和优良低温韧性的焊接接头,满足 X80 钢环焊缝焊丝管道现场全位置焊接工艺要求。

1 焊丝成分设计

焊丝合金设计采用了 Mn-Ni-Mo-Ti 合金系,通过低 C 高 Mn 及 Ni 和 Mo 等微合金元素的固溶强化、沉淀强化、细晶强化的原理得到高强度、高韧性的焊缝金属。通过确定 C, Mn 和 Si 等元素的合理成分范围,添加适当的置换固溶合金元素提高焊缝的强度,促进针状铁素体的形核及其相组成比例,满足焊缝金属具有高强度的同时,具有较高的低温冲击韧性,焊丝具有优良的工艺性能和良好的适应性。

C 是保证焊缝金属强度的主要元素,必须保证焊丝中有一定的 C 含量, C 会促进高碳马氏体的形成,从而影响焊缝金属的抗裂性能和冲击韧性,因此将焊丝中的 $w(\text{C})$ 控制在 0.05%~0.08%。

Mn 是强化元素,又是脱氧元素,能够提高焊缝金属的强度和低温冲击韧性。Mn 含量的增加,使焊缝金属中针状铁素体含量显著增加,先共析铁素体含量减少,同时针状铁素体细化,因此将焊丝中的 $w(\text{Mn})$ 控制在 1.5%~1.9%。

Si 元素能够改善焊接工艺性能,提高焊缝熔

敷金属强度, Si 和 Mn 的含量对熔敷金属的韧性起到重要的作用,含量过多或过少都可使韧性下降。Si 和 Mn 对焊缝金属韧性影响的实质是其改变了焊缝金属的微观组织。Si 含量增加,使晶界铁素体增加。Mn 是扩大奥氏体相区的元素,有推迟奥氏体向铁素体相变的功能,所以增加 Mn 在焊缝金属中的含量,可减少晶界铁素体的比例。因此 Mn 和 Si 含量应在一个适当的范围内,这样既有利于减少非金属夹杂物的产生,又对韧性的改善有利,本焊丝中 $w(\text{Si})$ 控制在 0.6%~0.8%。

Ni 与 Fe 化学性质相同,原子半径接近,对基体点阵造成的畸变最小,对韧性的危害也最小,同时能细化组织,促使针状铁素体形成,提高韧性。焊缝金属中 Ni 对冲击韧性的影响与 Mn 含量之间存在着交互作用,当两种元素位于最佳的配合范围时,相应的焊缝金属具有优异的强韧性匹配,因此,根据上述 Mn 的加入量,确定焊丝中 Ni 的加入量。

加入 Mo 会降低 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变温度,并使相变温度区间缩短,但会产生置换固溶强化,引起基体点阵的晶格畸变, Mo 可抑制先共析铁素体的生成,促进针状铁素体的转变,增加针状铁素体的比例,能提高碳氮化合物的沉淀强化效果^[4-5]。

由于 Ti 和焊缝中的 N, O 结合成 TiN 和 TiO, 这些细小的 O, N 化物成为形核质点,促进了在奥氏体晶粒内形核,增加了焊缝中针状铁素体数量,并细化了晶粒,有利于韧性和强度的同步提高。另外,随着 Ti 的加入,钢中的 $\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$ 化合物取代了 MnS 夹杂,形成了可改善韧性和成形性的球状夹杂物,可提高焊缝冲击韧性, $w(\text{Ti})$ 为 0.04%~0.08% 时,效果最佳。

通过合金元素的调整,同时配合混合气体保护,改善熔滴过渡,实现喷射过渡形态,调整焊接熔池液态金属的表面张力,保证焊丝焊接工艺性能,最终确定两种 X80 钢环焊缝气保焊焊丝的主要化学成分设计如表 1 所示。

表 1 化学成份

%

试样编号	$w(\text{C})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{S})$	$w(\text{P})$	$w(\text{Ni}+\text{Mo})$	$w(\text{Ti})$	$w(\text{Al})$
1 [#]	0.05~0.08	1.5~1.7	0.6~0.8	≤ 0.005	≤ 0.01	0.9~1.4	0.04~0.08	≤ 0.01
2 [#]	0.05~0.08	1.7~1.9	0.6~0.8	≤ 0.005	≤ 0.01	0.7~1.0	0.04~0.08	≤ 0.01

2 试验材料及方法

2.1 焊丝制备工艺方法

采用真空炉进行试验焊丝铸锭的熔炼,经锻造、热轧、退火、冷拔和镀铜等工艺过程,最终加工成直径为 1.0 mm 的气保焊焊丝。在真空感应炉中进行冶炼时,要保证焊丝原料中 S, P, O, N 和 H 的含量尽可能低,焊接材料的选择上严格控制杂质元素的含量,尽量避免 Sn, Sb, Pb 和 As 等有害元素的加入。焊缝的纯净度是保证焊接接头力学性能的主要因素之一,在焊丝的生产制造环节,严格控制生产工艺流程和工艺参数,保证焊丝在焊接过程中的稳定性。

2.2 焊丝熔敷金属试验工艺方法

焊丝熔敷金属试验按照 GB/T 8110—2008 进行,采用脉冲焊进行焊接。焊接工艺选择 MIG 焊接,采用林肯 Power Wave 455M 焊接电源,Power Feeder 10M 送丝机,共焊接 8 层,层间温度在 140 ℃左右,第 1 层到第 7 层每层均 6 道,第 8 层盖面焊为 8 道。

2.3 平板对接试验工艺方法

实验室平板对接试验采用 ZF-500 纵缝自动对接机。焊接试板为 15.3 mm 厚 X80 热轧卷板, X 形坡口,采用 MIG 焊工艺进行焊接,保护气体为 97%Ar+3%O₂,气体流量为 20 L/min。

2.4 管体对接试验工艺方法

全位置焊接设备采用 PAW3000 管道全位置自动焊机,钢管规格为 X80 级 $\phi 1\ 219\ \text{mm} \times 15.3\ \text{mm}$,焊接坡口为双 V 形复合坡口,采用 80%Ar+20%CO₂ 混合气体保护,预热温度 100~150 ℃,层间温度 50~150 ℃施焊。

3 试验结果及分析

3.1 焊丝熔敷金属性能

对两种焊丝熔敷金属试样进行拉伸和冲击测试,结果如表 2 所示。其中,1#焊丝强度和韧性均达到较好匹配;2#焊丝强度偏低,但韧性较高。两种焊丝焊接工艺性能良好,焊接电弧稳定,熔池流动性良好,飞溅小,焊道成形美观。1#焊丝熔敷金属强度比 2#焊丝高,2#焊丝熔池流动性较 1#焊丝稍好,2#焊丝较 1#焊丝的韧性

表 2 熔敷金属拉伸和冲击试验结果

试样编号	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	延伸率/ %	-30 ℃ 冲击功/J
1#	600	645	23	106,90,108, 138,84
2#	530	585	24	204,200,186, 174,172

好。焊后经 X 射线拍片,焊缝未出现气孔和夹渣缺陷。由于 2#焊丝的熔敷金属抗拉强度稍低,因此平板对接试验和环焊对接试验采用 1#焊丝进行测试。

3.2 平板对接试验

3.2.1 焊接接头的力学性能

通过 1#焊丝的平板对接试样焊缝力学性能试验,焊缝的平均抗拉强度为 760 MPa,焊缝的冲击韧性结果如图 1 所示,焊缝金属的抗拉强度和冲击韧性指标满足要求。

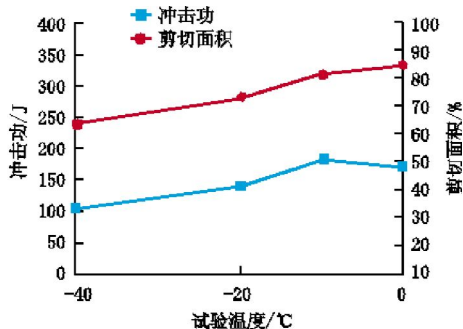


图 1 焊缝冲击试验冲击功和剪切面积

3.2.2 焊接接头显微组织

影响焊接接头力学性能的根本原因在于材料的显微组织结构。图 2 为 1#焊丝在实验室进行平板对接试验后焊缝和 HAZ 的金相组织,焊缝主要组织是针状铁素体和少量先共析铁素体(图 2(a)),焊缝 HAZ 主要组织是粒 B+F(图 2(b))。针状铁素体是晶内形核的贝氏体,以大角度分布,取向自由度大,并具有很高的位错密度,裂纹不易扩展,并具有较高的强度和优良的抗断裂性能^[6-7],因此,保证了焊缝具有良好的强韧匹配。从 HAZ 的粒 B 组织性能来看,虽然其韧性不如针状铁素体,但强度较高,保证了焊接接头良好的强度。X80 钢焊接接头母材、焊缝及其热影响区维氏硬度值(HV₁₀)如表 4 所示,维氏硬度值都在 300HV₁₀ 以下。

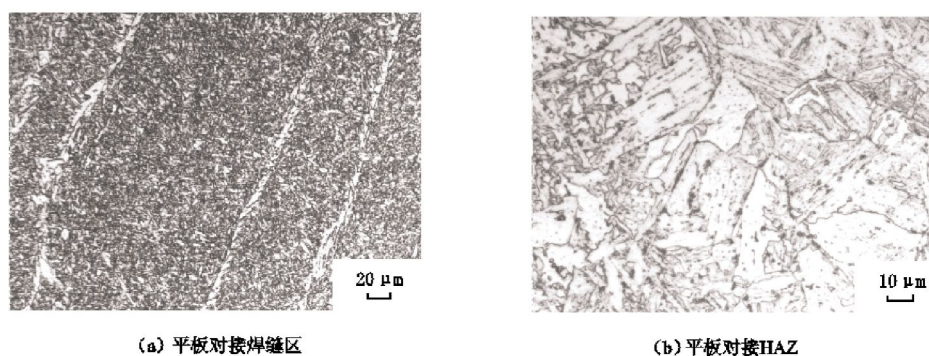


图 2 平板对接试验焊缝和 HAZ 金相组织

表 4 平板对接接头硬度(HV₁₀)

母材	焊缝	HAZ
269, 273, 276, 276	244, 248, 233, 238	292, 262, 268, 255, 256, 286

3.3 环焊缝对接试验

中油管道焊接技术中心对于 X80 管线钢全自动焊的气体保护实芯焊丝进行了焊接工艺性能和环焊接头力学性能的检验。焊接工艺性能试验在 PAW3000 管道全位置自动焊机上进行, 总体评价结果达到要求, 如表 5 所示。

表 5 焊接工艺性能评价结果

焊接工艺性能	评价结果	焊接工艺性能	评价结果
引弧性能	好	焊接发尘量	一般
电弧稳定性	好	填充盖面气孔倾向	较小
全位置操作性能	好	熔敷效率	一般
焊缝成型	良好	熔合性能	较好
飞溅率	一般		

3.3.1 环焊缝焊接接头力学性能

环焊缝焊接接头的拉伸试验采用 WAW-1000B 微机控制电液伺服万能试验机, 冲击试验采用 JBN-300B 冲击试验机, 试验结果如表 6 所示。抗拉强度及冲击性能都符合 Q/SY-GJX 0110《西气东输二线管道工程线路焊接技术规范》的要求。拉伸试样均断于母材, 焊缝中心和熔合线的冲击值与标准要求的最低值 60 J 相比, 富裕量较大, 具有很高的强度和优良的低温韧性。采

表 6 环焊对接焊缝拉伸和冲击试验结果

抗拉强度/MPa	焊缝中心 A _{KV} /J(-10℃)	熔合线 A _{KV} /J(-10℃)
640, 645, 655	140, 139, 150	295, 252, 249

用 WE-300 万能试验机对焊缝做正反弯试验, 弯曲半径 45 mm, 弯曲角度 180°, 正反面焊缝均未出现裂纹。采用 HBV-30A 硬度仪对母材、焊缝及热影响区进行硬度检测, 维氏硬度值(HV₁₀)如表 7 所示。

表 7 环焊对接接头硬度(HV₁₀)

母材	焊缝	HAZ
224, 210, 213, 221	240, 243, 253, 253	225, 224, 230, 218, 209, 212, 222, 222

3.3.2 环焊缝焊接接头组织

图 3(a)为环焊缝焊接接头宏观照片, 由照片可见, 焊缝层间熔合良好。分别采用德国徕卡 DMI5000M 金相显微镜和日立 S-3700N 扫描电镜进行检测分析, 图 3(b)和图 3(c)为环焊缝焊接接头金相照片和扫描电镜照片, 由照片可见, 焊缝以 AF 为主, 含有少量先共析铁素体和少量粒 B 的复合组织, AF 呈篮筐编织形态, 晶态大小不等, 相互之间的位向关系不定, 为混杂分布形式, AF 间析出的白色小颗粒岛状相为粒 B 以及少量的块状先共析铁素体组织, 这种岛状物为 M-A 组元, 粒 B 就是由 M-A 组元和 AF 组成, 这种复合组织是焊缝获得强韧性的主要原因。

由此说明, 合金系的选择是合适的, 合金成分的设计达到了预期效果。图 3(d)为环焊缝焊接接头冲击 SEM 断口图, 密布着大小不同的圆形或椭圆形韧窝, 可以看到由韧窝组成的延性脊, 其存在有助于试样冲击韧性的提高, 韧窝有部分金属夹杂物, 进一步增加了 AF 形核核心, 从而为获得较多的 AF 组织提供了条件。

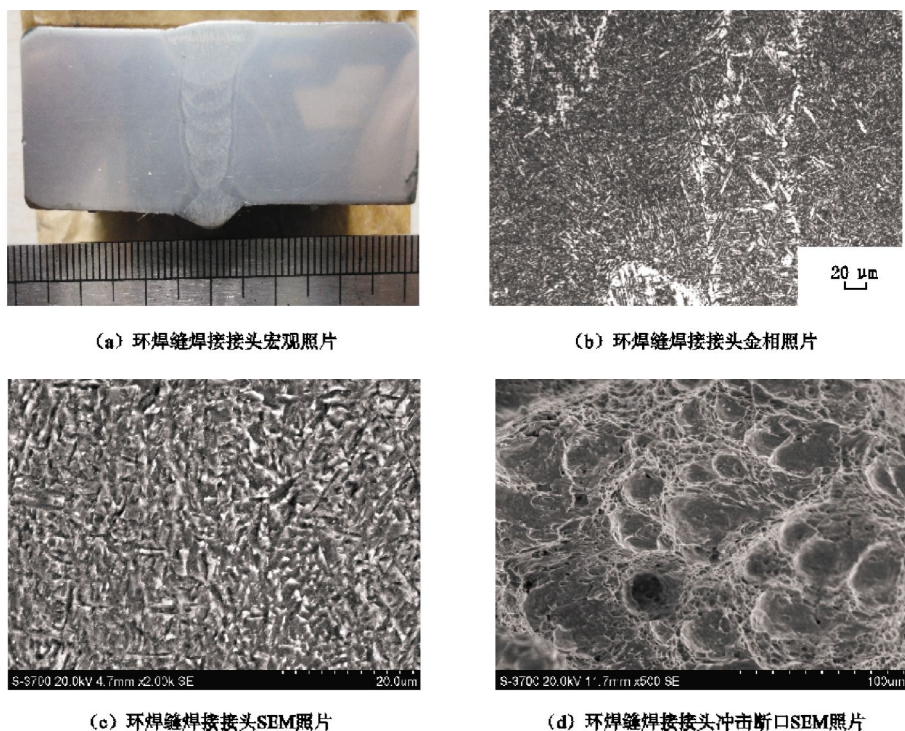


图3 环焊缝焊接接头金相照片和扫描电镜照片

4 结 论

(1) 采用微合金化设计的 X80 级管线钢专用焊丝, 其熔敷金属屈服强度 600 MPa, 抗拉强度 645 MPa, -30°C 夏比冲击功为 105 J, 实现了焊缝较好的强韧匹配。

(2) 该焊丝用于 X80 管线钢焊接, 焊缝金属是以 AF 为主和少量粒 B 的复合组织, 是焊缝获得强韧性的主要原因, 不但具有较高的强度, 而且具有优良的低温韧性, 焊缝抗拉强度 645 MPa, -10°C 夏比冲击功平均值 185 J, 完全满足 X80 管线钢管焊缝性能要求。

(3) 平板对接试验及环焊缝对接试验结果表明, 其强度达到了 X80 级管线钢水平, 焊接工艺性能良好, 焊接电弧稳定, 熔池流动性良好, 飞溅小, 焊道成形美观, 钢管焊接接头性能符合 Q/SY-GJX 0110 《西气东输二线管道工程线路焊接技术规范》的要求。

参考文献:

- [1] 张敏, 姚成武. 我国油气管道高强度钢用埋弧焊接材料研制的思考[J]. 焊管, 2005, 28(01): 38-41.
- [2] 张敏, 姚成武, 付翀, 等. X80 管线钢埋弧焊匹配焊丝研制[J]. 焊接学报, 2006, 27(04): 64-68.
- [3] 吕德林. 焊接金相分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [4] 李冉, 施哲, 魏金山. X80 管线钢气体保护焊用焊丝熔敷金属组织与性能研究[J]. 焊接, 2006(12): 34-38.
- [5] KONG J H, ZHEN L, GUO B, et al. Influence of Mo Content on Microstructure and Mechanical Properties of High Strength Pipeline Steel [J]. Materials and Design, 2004, 25(08): 723-728.
- [6] SUGDEN A B B, BHADESHIA H K D H. Lower Acicular Ferrite[J]. Metallurgical Transactions A, 1989, 20(09): 1811-1818.
- [7] YANG J R, BHADESHIA H K D H. The Dislocation Density of Acicular Ferrite in Steel Welds[J]. Welding Research Supplement, 1990, 69(08): 305-307.

作者简介: 毕宗岳(1962—), 男, 博士, 高级工程师, 长期从事油气输送及油田钻采用焊接钢管的开发研究工作。

收稿日期: 2012-03-21

编辑: 刘志军