

L415/N08825 双金属复合管热丝 TIG 焊工艺研究

杨柳青¹, 夏培培², 孟建涛³, 赵健涛³, 卢宏伟⁴, 杨佩青⁴

(1. 北华航天工业学院 材料工程学院, 河北 廊坊 065000; 2. 中国石油天然气管道科学研究院有限公司, 河北 廊坊 065000; 3. 河北汇中管道装备有限公司, 河北 沧州 061300; 4. 中国石油管道局工程有限公司第四分公司, 河北 廊坊 065000)

摘要:针对 L415/N08825 双金属复合管, 选用 AWS A5.14 ERNiCrMo-3 焊丝, 通过改变坡口角度进行热丝 TIG 自动焊工艺研究, 分析不同坡口角度下焊接的可操作性, 焊接接头金相组织、力学性能以及晶间腐蚀性。结果表明, 焊缝显微组织主要由粗大的树枝状、胞状或块状奥氏体和奥氏体之间的铁素体组成; 基层热影响区组织主要为珠光体和多边形铁素体, 在靠近熔合线位置, 晶粒较粗大, 不均匀; 不同坡口角度下焊接接头力学性能、晶间腐蚀结果均满足设计规范要求, 从工艺优化角度及焊接成本考虑, 可以选择 15° U 型坡口进行复合管的现场焊接施工。

关键词:双金属复合管; 热丝 TIG 焊; 力学性能; 晶间腐蚀

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20212154

中图分类号: TG444+.74

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2022)07-0036-04

Hot Wire TIG Welding Process of L415/N08825 Bimetallic Composite Pipe

YANG Liuqing¹, XIA Peipei², MENG Jiantao³, ZHAO Jiantao³, LU Hongwei⁴, YANG Peiqing⁴

(1. College of Materials Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China; 2. China Petroleum Pipeline Engineering Co. Ltd., Langfang 065000, China; 3. Hebei Huizhong pipeline Equipment Co. Ltd., Cangzhou 061300, China; 4. No.4 branch of China Petroleum Pipeline Research Institute Co. Ltd., Langfang 065000, China)

Abstract: For L415/N08825 bimetallic composite pipe, AWS A5.14 ERNiCrMo-3 welding wire was selected, and the hot wire TIG automatic welding process was studied by changing the bevel angle. The operating performance, microstructure, mechanical properties and intergranular corrosion of the welded joints under different bevel angles were compared and analyzed. The results show that the microstructure of the weld metal is mainly composed of coarse dendritic, cellular or massive austenite and ferrite between the austenite. The microstructure of the heat affected zone is mainly composed of pearlite and polygonal ferrite. The grains are coarse and uneven near the fusion line. The mechanical properties and intergranular corrosion results of the welded joints under different bevel angles all meet the requirements of the designed specifications. From the point of optimizing the welding process and welding cost, 15° U-shaped groove can be selected for on-site welding construction of composite pipes.

Key words: bimetallic composite pipe; hot wire TIG welding; mechanical properties; intergranular corrosion

双金属复合管是将两种不同金属材料通过一定工艺技术复合而成, 一般由基管、衬里钢管或覆层金属组成。复合管能最大限度地实现材料的优势互补, 降低工程施工费用, 在保证原基管各项性能的基础上, 提高管道的耐腐蚀性、耐磨性, 延长管道的使用寿命, 是纯不锈钢管或耐腐蚀合金管的替代产品^[1-2]。目前双金属复合管在腐蚀性较强的石油、化工、核工业以及医药等领域获得应用。

双金属复合管的环焊缝焊接是耐蚀管道工程施工的一个重要环节。如果焊接工艺选择不当, 环焊缝内外层金属同时接触腐蚀性流体, 将会出现更加严重的电化学腐蚀, 从而导致管道腐蚀、泄漏、穿孔等^[3-4]。目前, 双金属复合管连接时, 既要高效实现复合管的焊接, 又要保证焊接接头处耐蚀层的完整性和良好的耐蚀性, 对环焊缝焊接工艺的要求很高。热丝 TIG 焊是在传统 TIG 焊的基础上发展起来的一种优质、高效的焊接新工艺, 在焊丝送进熔池之前, 对焊丝进行加热使其达到一定的预热温度, 最终实现高效焊接的目的^[5]。对焊丝加热, 不仅可以提高焊接效率, 而且可以明显提高熔覆率, 加快填充焊丝的熔化速度, 降低了母材的稀释率^[6]。本文针对

收稿日期: 2021-08-13

基金项目: 河北省教育厅青年基金项目(QN2019221)

作者简介: 杨柳青(1981-), 男, 山西静乐人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事管线钢材材料和焊接方面的研究;

E-mail: 46211940@qq.com

L415/N08825 双金属复合管, 选用国内厂家生产的 ERNiCrMo-3 焊丝, 通过改变坡口角度进行热丝 TIG 自动焊接, 分析不同坡口角度下焊接工艺的操作性能, 焊接接头的外观特征、金相组织、力学性能以及晶间腐蚀性, 提出适合的焊接工艺, 为 L415/N08825 双金属复合管焊接施工相关技术人员提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验母材采用 L415/N08825 双金属爆炸焊接复合管, 规格为 $\phi 610\text{mm} \times (20+3)\text{mm}$, 管材基层材质为 L415MS, 覆层为镍铁铬合金 N08825, 化学成分如表 1 所示, 焊接材料选择时, 考虑到根焊层、填充层的耐腐蚀性以及过渡层合金元素的稀释问题, 因此选择焊缝金属在强度、耐蚀性和抗焊接热裂性等方面较优的 AWS A5.14 ERNiCrMo-3 焊丝, 焊丝直径 1.0mm。

表 1 L415/N08825 双金属复合管的化学成分(质量分数, %)
Tab.1 Chemical composition of L415/N08825 bimetallic composite pipe (wt%)

材料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	Ti	Nb	Fe
L415MS	0.04	0.32	1.51	0.008	0.002	0.02	0.18	0.01	0.05	0.02	0.012	0.045	余量
N08825	0.03	0.06	0.53	0.002	0.003	43.4	21.3	3.11	0.11	2.15	0.95	余量	30.14

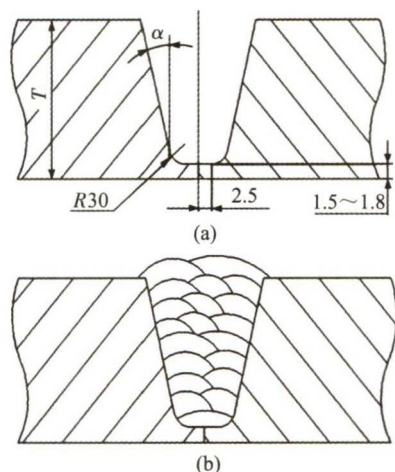


图 1 U 型坡口(a)和焊接层道示意图(b)

Fig.1 U-shaped groove (a) and schematic of welding pass (b)

流量为 7~10L/min, 背部氩气流量为 5~8L/min。

1.3 试验方法

焊接完成后, 从复合管焊接接头处切取金相、拉伸、弯曲及夏比冲击试样, 其中夏比冲击缺口开在焊缝中心和热影响区。焊缝金相试样经过研磨、抛光后, 基体材料选用 4%硝酸酒精溶液侵蚀, 覆层及焊

1.2 焊接工艺

焊接设备选用 D/T-HW350 全自动热丝氩弧焊系统, 焊接坡口为 U 型坡口, 上坡口角度 α 分别为 10° 、 15° 和 20° , 采用多层多道的方式进行焊接, 图 1 为 U 型坡口和焊接层道示意图。

根焊之前, 对管道内部进行密封并充氩气保护。待密封区处于饱和氩气状态后对复合管坡口预热处理, 预热温度为 50°C 左右, 主要去除水汽及油污, 然后进行根部焊道的焊接。过渡焊在根焊完成并冷却至 80°C 以下, 将根焊道清理干净后采用小热输入量进行。根焊道冷却和过渡焊焊接过程中保持复合管内处于饱和氩气状态, 防止背面焊道氧化, 氩气是否处于饱和状态主要通过测定氧气含量来判断。进行填充焊第一层时, 仍要保持管内充氩, 防止根焊背面氧化。后面焊道在前一层焊道清理干净后进行, 注意控制熔池的温度, 尽量减小热输入。焊接过程中保持短弧操作, 保留原始坡口的边缘。焊接过程照片如图 2 所示, 具体焊接工艺参数见表 2。焊接过程中氩气



图 2 焊接过程照片

Fig.2 Photograph of welding process

表 2 双金属复合管焊接工艺参数

Tab.2 Welding parameters of bimetallic composite pipe

焊道	电流 /A	电压 /V	焊接速度 / $(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	热输入 / $(\text{J} \cdot \text{mm}^{-1})$
根焊	190~195	9.5	122~127	875~890
过渡层	205~210	9.8	155~165	579~630
填充层	265~270	9.8	155~165	790~805
盖面层	265~270	9.8	116~122	1100~1201

缝材料使用硫酸铜-盐酸水溶液 (硫酸铜 2g, 盐酸 10mL, 蒸馏水 10mL) 进行腐蚀。采用 Axio Imager 型光学显微镜进行微观组织观察。拉伸试验参考

GB/T228—2010 在 WAW1000B 微机控制电液伺服万能试验机上进行。夏比冲击试验参考 GB/T229—2007 在 JB500 冲击试验机上进行,采用 10mm×10mm×55mm 标准 V 型缺口试样,试验温度为-30℃。

按照 GB/T4334—2020 标准,使用 50%的硫酸铁和 50%的硫酸混合溶液进行晶间腐蚀试验。首先切取尺寸为 30mm×20mm×3mm 的焊接接头试样,测量尺寸,计算总表面积,然后用清水冲洗干净,干燥后称重并记录,将试样放入盛有硫酸铁-硫酸溶液的锥形瓶中,加热锥形瓶并保持溶液沸腾,浸泡 120h。试验结束后取出试样,充分冲洗之后,再在丙酮中清洗并干燥、称重。最后计算试样的腐蚀速率。腐蚀速率: v_c 计算公式为:

$$v_c = \frac{W_{前} - W_{后}}{S \cdot t} \quad (1)$$

式中: $W_{前}$, $W_{后}$ 分别为试验前、后的试样质量,g; S 为试样总面积, m^2 ; t 为试验时间,h。

2 试验结果及分析

2.1 显微组织

图 3 为复合管焊接接头宏观及微观金相照片。从图 3(a)可以清楚看到,基层、覆层、焊缝和热影响区边界分明。由于选用的复合管基体和覆层属于冶金结合,在焊接工艺制定时与机械复合管不同,未考虑封焊层的焊接。图 3(b)为焊缝显微组织,主要由粗大的树枝状、胞状或块状奥氏体和奥氏体之间的铁素体组成,整体呈树枝状结构。奥氏体组织的形成是由于填充金属 Cr、Ni 等奥氏体形成元素的含量较高,在 C、Mn 元素固溶强化的作用下,焊缝凝固的奥氏体组织得以保留^[7]。多层多道焊接过程中,中间焊道经历了快速加热与冷却作用,同时后焊道对前

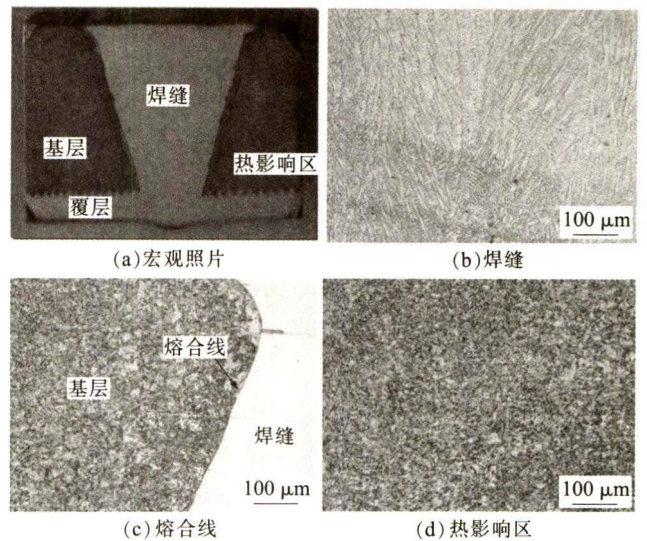


图 3 焊接接头宏观及微观组织

Fig.3 Macroscopic and microscopic structure of the welded joint

焊道有热循环的影响,使得粗大的树枝状奥氏体晶粒发生了溶解,并且冷却时来不及长大,因此,焊缝中有粗大树枝状奥氏体,也有胞状和块状奥氏体,同时铁素体呈颗粒状。图 3(c)为基层和焊缝之间的熔合线,熔合线界面分明,宽度只有几微米。图 3(d)为基层热影响区的显微组织,主要由黑色的珠光体和白色的多边形铁素体组成,在靠近熔合线位置,晶粒较粗大,不均匀。

2.2 力学性能

表 3 为不同坡口角度下接头的力学性能。可以看出,不同坡口形式下,焊接接头的抗拉强度为 585~650MPa,且断裂位置均在母材。弯曲结果表明,三种坡口角度下焊接接头处裂纹小于 1.0mm,焊接接头具有较好的延展性和均匀性;焊缝及热影响区-30℃夏比冲击韧性较好,均满足要求。

图 4 为弯曲试样照片。尽管三种坡口力学性能

表 3 不同焊接坡口角度下接头的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of the welded joints under different bevel angles

坡口角度/(°)	拉伸性能		弯曲结果(弯心直径:90 mm)				-30℃冲击功/J	
	抗拉强度/MPa	断裂位置	试样 A1	试样 A2	试样 A3	试样 A4	焊缝	热影响区
10	585	母材	未见裂纹	未见裂纹	未见裂纹	未见裂纹	152	74
15	587	母材	未见裂纹	未见裂纹	0.8 mm 裂纹	0.6 mm 裂纹	176	117
20	650	母材	未见裂纹	未见裂纹	未见裂纹	1.0 mm 裂纹	167	96

均满足要求,但是 10°坡口由于上开口较小,对焊接的操作要求高,全位置操作性相对较差;20°坡口焊材耗量大,焊接效率低;15°坡口在保证焊接质量的同时,提高了焊接速度,电弧稳定性也较好。从焊接工艺优化的角度考虑,可以将焊接坡口设计成 15°

的 U 型坡口。

2.3 晶间腐蚀

不同坡口角度下焊接接头的晶间腐蚀结果如表 4 所示。焊接接头最大腐蚀速率为 0.338g/(m²·h),远小于设计规定的 0.914g/(m²·h)。三种坡口角度下



图4 弯曲后试样照片

Fig.4 Photos of samples after bending test

表4 焊接接头晶间腐蚀结果对比

Tab.4 Comparison of intergranular corrosion results of welded joints

坡口角度 / (°)	试样总面积 / $10^{-3}m^2$	试验前质量 / g	试验后质量 / g	试验时间 / h	腐蚀速率 / $(g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1})$
10	1.503	14.326	14.265	120	0.338
15	1.501	13.985	13.925	120	0.333
20	1.504	14.064	14.011	120	0.296

焊接接头均能满足晶间腐蚀速率的要求,其中,20°坡口的腐蚀速率最小。晶间腐蚀后试样如图5所示。在使用ERNiCrMo-3焊丝进行焊接时,Nb和Mo元素会发生微偏析,导致在枝晶间区域内析出富Nb的Laves相和NbC型碳化物,降低了焊接接头的抗腐蚀能力^[8]。因此,焊接过程中在保证熔透的前提下有效地控制焊接热输入,可以降低元素的偏析,提高接头的抗腐蚀能力,更好地保证焊接质量。

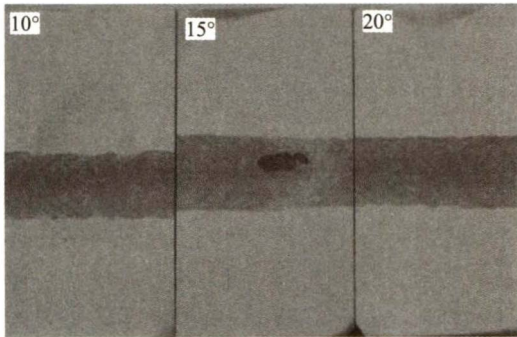


图5 晶间腐蚀后的试样照片

Fig.5 Photos of samples after intergranular corrosion

3 结论

(1) L415/N08825 双金属复合管焊缝显微组织

主要由粗大的树枝状、胞状或块状奥氏体和奥氏体之间的铁素体组成;基层热影响区组织主要为珠光体和多边形铁素体组织,在靠近熔合线位置,晶粒较粗大,不均匀。

(2) 不同坡口角度下,焊接接头的抗拉强度较高,断裂位置均在母材,弯曲结果表明,三种坡口角度焊接接头处裂纹小于1.0mm,具有较好延展性和均匀性;焊缝及热影响区-30℃夏比冲击韧性较好,均满足要求。

(3) 三种坡口角度焊接接头的晶间腐蚀速率均小于设计规范要求,15°U型坡口在保证焊接质量的同时,提高了焊接速度,电弧稳定性也较好,从焊接工艺优化角度以及现场焊接成本考虑,可以选择15°U型坡口来进行复合管的现场焊接施工。

参考文献:

- [1] 许爱华, 阮振刚, 杨光, 等. 双金属复合管的施工焊接技术[J]. 天然气与石油, 2010, 28(6): 22-28.
- [2] 李建波, 张俊生, 郭超, 等. 双金属复合管焊接方法选用[J]. 石油工程建设, 2018, 40(2): 80-82.
- [3] 何永明, 李星, 赵毅. N08825 双金属复合管焊接工艺[J]. 电焊机, 2015, 45(11): 89-92.
- [4] 张西雷, 马庆乐. 双金属复合管焊接工艺研究[J]. 焊管, 2016, 39(1): 45-48.
- [5] 杨帆, 曹军, 杨晓飞, 等. X70/316L 双金属复合海管全自动 TIP TIG 焊接工艺[J]. 电焊机, 2014, 44(11): 36-39.
- [6] Ming H, Zhang Z, Wang J, et al. Microstructural characterization of an SA508-309L/308L-316L domestic dissimilar metal welded safe-end joint [J]. Materials Characterization, 2014, 97: 101-115.
- [7] 侯娟, 彭群家, 庄子哲雄, 等. 镍基合金焊接过渡区微观结构及应力腐蚀行为研究[J]. 金属学报, 2010, 46(10): 1258-1266.
- [8] Xu L Y, Jing H Y, Han Y D. Effect of welding on the corrosion behavior of X65/Inconel 625 in simulated solution [J]. Welding in the World, 2018, 62(2): 363-375.

(上接第35页)

- [15] 霍望图, 郭明星, 侯晓刚, 等. 铝合金先进形变热处理研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2014, 32(2): 284-292.
- [16] 袁庆龙. Al-Li 合金中 δ' (Al_3Li) 颗粒尺寸对位错运动的影响[J]. 太原理工大学学报, 2001, 32(6): 604-607.
- [17] Deng Y, Bai J, Wu X, et al. Investigation on formation mechanism of T1 precipitate in an Al-Cu-Li alloy [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017, 723: 661-666.

- [18] Gable B M, Zhu A W, Csontos A A, et al. The role of plastic deformation on the competitive microstructural evolution and mechanical properties of a novel Al-Li-Cu-X alloy [J]. Journal of Light Metals, 2001, 1(1): 1-14.
- [19] Nayan N, Mishra S, Prakash A, et al. Effect of cross-rolling on microstructure and texture evolution and tensile behavior of aluminium-copper-lithium (AA2195) alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 740-741: 252-261.