

L245NCS/316L 复合输气管道的焊接技术

周培山¹ 杨笠²

1. 西南石油大学南充校区 2. 四川建筑职业技术学院

周培山等. L245NCS/316L 复合输气管道的焊接技术. 天然气工业, 2016, 36(11): 96-101.

摘要 双金属复合管因其结构的特殊性以及对力学性能和耐腐蚀性能的双重要求, 使得其现场焊接施工遭遇诸多困难。为了保证高酸性气田开发集输过程中所用 L245NCS/316L 双金属复合管的焊接质量, 针对其对接焊, 采用了钨极氩弧焊打底、手工电弧焊填充盖面的方式, 通过反复试验, 优选了 TGFA-309L (直径为 2.2 mm)、ATS-F316L (直径为 2.0 mm)、TGS-309MoL (直径为 2.4 mm) 和 CHE427 (直径为 3.2 mm) 为焊接材料, 确定了焊接工艺参数, 对焊接接头进行了 X 射线探伤、力学性能试验、微观组织分析及晶间腐蚀倾向测试、失重腐蚀性能测试和抗 Cl⁻ 应力腐蚀性能测试, 对抗 Cl⁻ 应力腐蚀试样腐蚀产物进行了 XRD 和 SEM 分析。结果表明: ①焊接接头 X 射线探伤检测结果为 II 级; ②焊接接头各项力学性能指标均合格; ③焊缝区微观组织主体为针状铁素体 + 粒状奥氏体 + 珠光体; ④抗晶间腐蚀倾向测试与抗 Cl⁻ 应力腐蚀性能测试均未见裂纹, 失重腐蚀测试气相和液相平均腐蚀速率分别为 0.022 3 mm/a 和 0.068 1 mm/a; ⑤ Cl⁻ 应力腐蚀试样 XRD、SEM 分析结果显示腐蚀产物膜的主要成分为 FeS, 是四方晶系晶体, 呈堆砌状态, 易穿透基体金属表面腐蚀产物膜, 对基体金属会产生进一步的腐蚀。焊接接头各项性能指标表明, 所拟定的焊接工艺方案对 L245NCS/316L 双金属复合管对接焊是可行的。

关键词 输气管道 双金属复合管 L245NCS/316L 管对接 焊接工艺 X 射线探伤 XRD 分析 SEM 分析

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2016.11.013

Welding technology for L245NCS/316L bimetal gas line pipes

Zhou Peishan¹, Yang Li²

(1. Nanchong Campus of Southwest Petroleum University, Nanchong, Sichuan 637000, China; 2. Sichuan College of Architectural Technology, Deyang, Sichuan 610213, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 36, ISSUE 11, pp.96-101, 11/25/2016. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Bimetal pipes are structurally special with dual requirements on mechanical property and corrosion resistance, so their field welding is faced with multiple difficulties. For guaranteeing the welding quality of L245NCS/316L bimetal pipes which is used for the development, gathering and transportation of high sour gas, its butt welding is carried out by performing tungsten argon-arc welding for scratch coat and manual arc welding for screen. Based on trial and error, TGFA-309L (Ø2.2 mm), ATS-F316L (Ø2.0 mm), TGS-309MoL (Ø2.4 mm) and CHE427 (Ø3.2 mm) were selected as welding materials, and welding parameters were determined. Then, the welding joints were tested by means of X-ray flaw detection, mechanical performance test, microstructure analysis, intercrystalline corrosion tendency test, weight-loss corrosion performance test and Cl⁻ resistant stress corrosion performance test, and the corrosion product of Cl⁻ resistant stress corrosion specimen was analyzed by using XRD and SEM. The X-ray flaw detection result shows that the welding joints are of level II; that mechanical performance indicators of welding joints are all qualified; that the microstructure of weld zone is mainly acicular ferrite, granular austenite and pearlite; that no cracking is observed on the specimens of intercrystalline corrosion tendency test and Cl⁻ resistant stress corrosion test. The average corrosion rate of gas phase and liquid phase in weight-loss corrosion test is 0.022 3 mm/a and 0.068 1 mm/a, respectively; and that the XRD and SEM test results of Cl⁻ resistant stress corrosion specimen indicate that the main component of corrosion product film is FeS, which is the crystal of tetragonal system in the pattern of stacking and which can penetrate easily the corrosion product film on the surface of base metal to corrode the base metal. All performance indicators of the welding joints indicate that the proposed welding scheme is feasible for the butt welding of L245NB/316L bimetal pipe.

Keywords: Gas pipeline; Bimetal pipe; L245NCS/316L; Butt joint; Welding process; X-ray flaw detection; XRD analysis; SEM analysis

基金项目: 西南石油大学自然科学基金项目“微合金管线钢焊接接头抗 H₂S 应力腐蚀性能研究”(编号: 2012XJZ039); 南充市科技支撑项目“酸性介质条件下微合金管线钢焊接工艺研究”(编号: NC2015C045)。

作者简介: 周培山, 1984 年生, 焊接工程师, 讲师, 硕士; 主要从事焊接技术与工程方面的教学与研究工作。地址: (637000) 四川省南充市西南石油大学。电话: (0817) 2642345。ORCID: 0000-0001-7652-4108。E-mail: swpulm@163.com

双金属复合管是由两种不同金属(基层和覆层)采用各种加工技术紧密结合而成,又称双层管或包覆管^[1],其常用加工方法有冷加工成型法、热加工成型法、离心成型法和电磁脉冲成型法等^[2-4]。近年来,以碳钢管为基层、以耐腐蚀不锈钢合金材料为防腐覆盖层的双金属复合管,因其具有优良的耐蚀性和力学性能,在油气田开发中的使用量逐步增大^[5-8]。

双金属复合管因其结构的特殊性及对力学性能和耐腐蚀性能的双重要求,使得其现场焊接施工具有诸多困难^[9]。双金属复合管焊接施工不能像普通管道那样进行,焊接工艺很大程度上制约了其大规模的应用。在施工过程中发现,双金属复合钢管焊接易出现焊接缺陷,如跑边、无法焊透、易出现裂纹和焊后易被腐蚀等^[10-13],进而影响其使用。国内外现有双金属复合管相关标准30余项^[14],但仍在抗HIC和SSCC性能评价等方面存在缺失^[15-16]。随着高酸性气田的不断开发,为了满足高酸性气田集输用钢管的特殊要求,新型双金属复合管得到广泛应用,要求相应的焊接技术也应适应其发展^[17]。笔者对输气管道用L245NCS/316L机械型复合管进行了焊接技术

研究,对L245NCS/316L复合管在高酸性气田开发集输过程中的应用具有重要意义。

1 试验

1.1 试验材料及焊接方法

试验用复合钢管L245NCS(150 mm×10 mm)热轧输气钢管内衬316L冷轧不锈钢管复合而成,其化学成分及力学性能见表1、2。焊接试件下件采用机械切割,保证管端面与管轴线垂直,切割后采用刮刀修整管口,严禁采用气割等高温切割工具切割双金属复合管。

试验采用钨极氩弧焊进行封焊、根焊和过渡层焊,采用手工电弧焊进行填充和盖面,通过多次工艺性试验,封焊、根焊和过渡层焊分别优选天泰公司生产的不锈钢焊丝TGFA-309L(直径为2.2 mm)、ATS-F316L(直径为2.0 mm)和TGS-309MoL(直径为2.4 mm),填充和盖面层采用大西洋公司生产的焊条CHE427(直径为3.2 mm),焊材化学成分见表1。

表1 L245NCS/316L复合管及焊材化学组分表

型号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
L245NCS	0.130%	0.260%	1.110%	0.007%	0.001%	0.110%	0.120%	0.030%	0.010%	0.008%
316L	0.021%	0.463%	1.173%	0.021%	0.002%	/	10.230%	16.829%	2.075%	/
TGFA-309L	0.018%	0.410%	1.280%	0.025%	0.008%	0.190%	13.590%	23.620%	0.120%	/
TGS-316L	0.020%	0.590%	1.740%	0.024%	0.001%	0.230%	11.500%	18.600%	2.210%	/
TGS-309MoL	0.018%	0.430%	1.730%	0.024%	0.009%	0.060%	13.100%	24.100%	2.240%	/
CHE427	0.072%	0.540%	0.920%	0.019%	0.008%	0.072%	0.0310%	0.034%	0.001%	0.010%

注:各组分的含量均以质量分数计

表2 L245NCS/316L复合管力学性能表

钢号	屈服点/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率	平均冲击功/J
L245NCS	320	470	/	235
316L	320	590	56%	/

1.2 坡口加工及试验要求

焊接坡口应严格按照规定尺寸和形式,采用机加工方法进行加工,如使用等离子切割,须用机加工方法去除切割热影响,严禁采用火焰切割。接头及坡口形式如图1所示,对口间隙为2.0~3.0 mm,坡口角度为55°~65°。

采用手工组对方式,将试件水平固定在焊接工

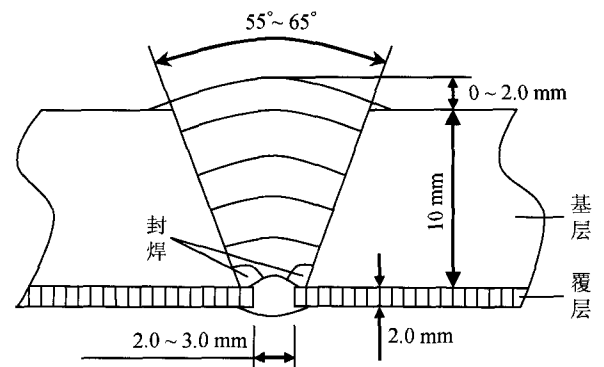


图1 坡口示意图

作台上,采用上向焊。焊接过程中,环境相对湿度为58%~61%,封焊、根焊和过渡层焊的环境风速

小于 2 m/s, 填充层和盖面层焊的环境风速小于 5 m/s, 要求错边: 覆层不大于 0.5 mm、基层不大于 1.6 mm, 余高不大于 2.0 mm, 局部不超过 2.5 mm 且长度不大于 50 mm, 焊缝层数为 5~6 层, 盖面焊缝宽度比坡口每侧增加 0.5~2.0 mm。

1.3 焊接工艺参数

焊前清理坡口两侧 50 mm 内可能影响焊接接头

质量的油污和杂质, 清理工具用动力角向砂轮机或钢丝刷; 层间温度均控制在 150 °C 以下, 当层间温度超标时, 应让其自然冷却至规定值; 焊接过程应先对基衬间隙进行封焊, 后进行打底焊, 根焊层不得高于复合管封焊; 背面保护气体在施焊前 10 min 通入, 且钢管内部氧含量小于 200 mg/m³, 当多层焊不引起衬层氧化时方能去除保护装置。焊接工艺参数见表 3。

表 3 焊接工艺参数表

序号	焊道名称	电压 /V	电流 /A	气体流量 / (L · min ⁻¹)		平均焊接速度 / (cm · min ⁻¹)
				正面	背面	
1	封焊	10~12	77~84	8~9	14~15	8.5
2	根焊	9~10	90~100	7~8	13~14	7.6
3	过渡焊	11~12	95~110	9~10	15~16	4.1
4	填充焊	22~25	90~100	/	/	6.0
5	盖面焊	25~31	100~105	/	/	5.0

2 X 射线探伤及力学性能检测

2.1 外观检测及 X 射线探伤

依据 SY/T 4109—2005 标准, 对焊接接头进行了外观检测和 X 射线探伤, 焊缝余高为 1.6~2.0 mm, 焊缝宽度为 20.0~22.0 mm, 错边量小于 0.4 mm, 背面余高为 0.5~1.0 mm, 无表面气孔、裂纹、咬边和表面夹渣等缺陷。X 射线探伤检测结果为 II 级, 检测结果合格 (图 2)。

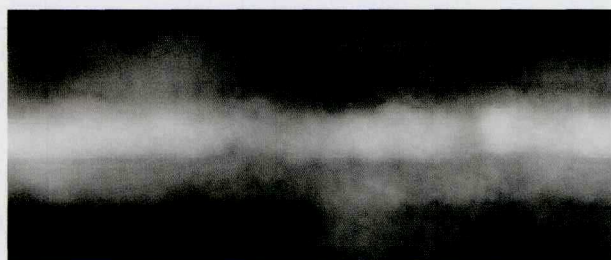


图 2 X 射线探伤图

2.2 力学性能检测

依据石油天然气行业标准 SY/T 4103—2006, 对焊接接头进行了拉伸、弯曲、刻槽锤断及低温冲击韧性测试。试验结果表明: 焊接接头屈服强度为 370 MPa, 抗拉强度为 500 MPa, 距焊缝表面熔合线 316L 侧 33 mm, L245NCS 侧 43 mm 处拉断; 弯曲试验采用 180° 弯曲角度, 面弯和背弯试验结果均合格; 低温冲击试验采用“V”形试样, 试样尺寸为 5

mm×10 mm×55 mm, 试验温度为 -20 °C, 焊缝处平均冲击功值为 33.3 J, 熔合线处平均冲击功值为 83 J, 未见断口缺陷; 刻槽锤断试验检测结果合格。

依据标准 ISO 15156-2 2003 对焊接接头进行了显微硬度检测, 实验设备采用 HVS-1000 数显显微硬度计, 加载力为 1 000 g, 载荷保持时间为 10 s, 测点位置如图 3 所示。

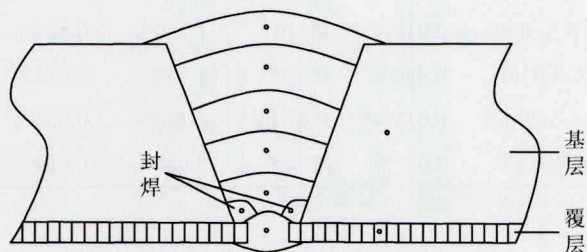


图 3 硬度试验测点位置示意图

测试结果如图 4 所示, 焊缝的硬度值比母材稍高, 过渡层硬度值略高于封焊层硬度值。这是由于过渡层焊所用焊丝为 ATS-309MoL, 钼的存在会促进 σ 相和碳化物等脆性相的形成, 使其硬度高于封焊层; 近盖面层硬度较高, 结合微观组织分析结果, 近盖面层逐渐产生粒状贝氏体组织, 故硬度较高。

3 微观组织分析

试验依据 GB/T 13298—1991、GB/T 13299—1991 对焊接试件进行微观组织分析 (图 5)。焊缝:

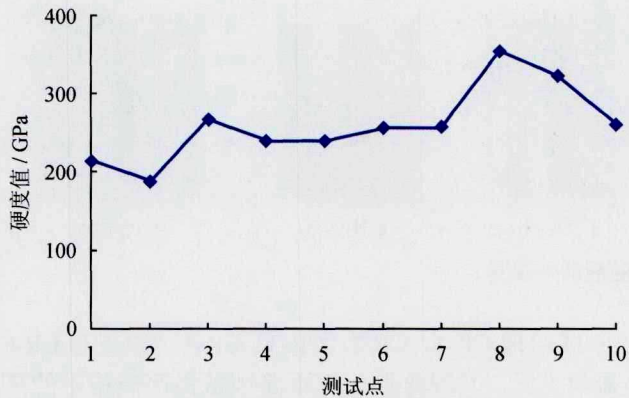


图 4 硬度试验测试结果图

打底层为焊缝边缘向晶内生长的枝晶奥氏体中心部位渐变为粒状, 填充层底部和封焊层变化不大, 中部为铁素体+珠光体, 铁素体呈细丝状分布, 至上层盖面层时为胞状晶, 先共析铁素体呈小块状沿原奥氏体晶界分布, 晶内为针状铁素体+珠光体+粒状贝氏体。热影响区: 基层近焊缝为细小的等轴珠光体+铁素体, 晶粒度逐渐增大, 趋于带状分布, 至母材覆层近焊缝由枝晶迅速过渡到母材奥氏体晶。母材: 覆层为 7 级左右奥氏体+少量趋带状分布的铁素体, 基层为 5 级带状分布的珠光体+铁素体, 铁素体晶粒度 8 级。

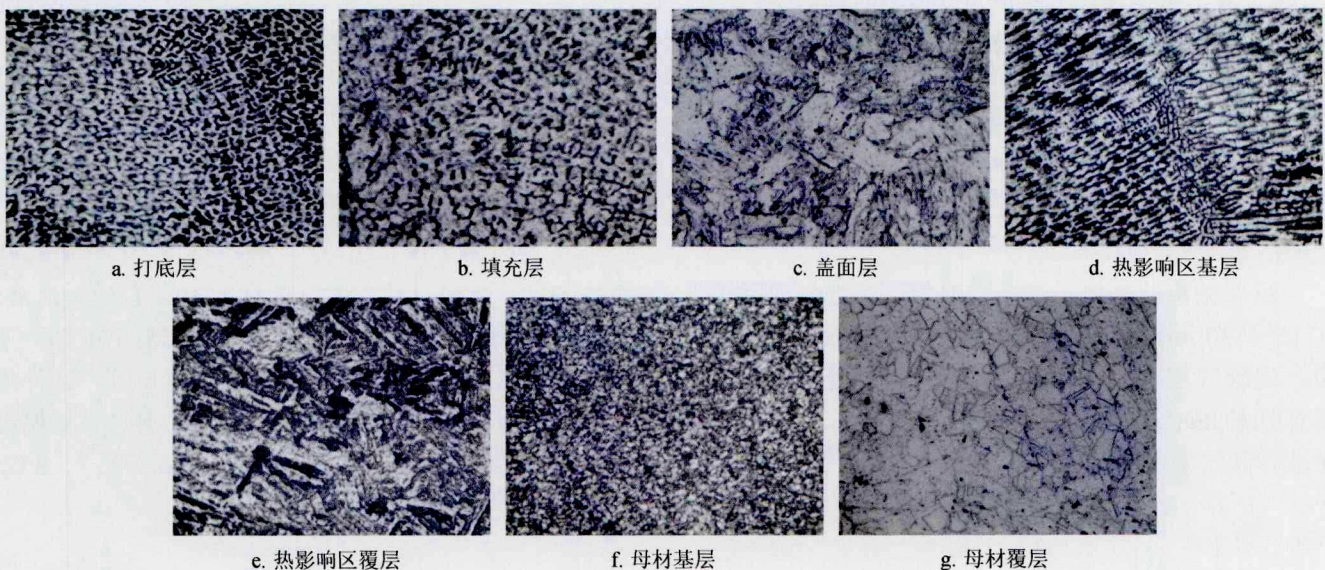


图 5 焊接接头微观组织图

4 抗腐蚀性能测试

4.1 晶间腐蚀倾向测试

4.1.1 实验溶液及装置

将 100 mL 符合 GB/T 665 (化学试剂硫酸铜) 的分析纯硫酸铜 ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 溶解于 700 mL 去离子水中, 再加入 100 mL 符合 GB/T 625 (化学试剂硫酸) 的优级纯硫酸, 用去离子水稀释至 1 000 mL, 配成 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{—CuSO}_4$ 溶液。试验采用容量为 1 L 的带回流冷凝器的磨口锥形瓶及加热装置。

4.1.2 实验步骤及结果

每组按标准尺寸加工 2 个平行试样, 经打磨、清洗和除油后, 将其置于底部铺有一层铜屑的锥形瓶中。倒入溶液, 保持试样间不接触。将锥形瓶置于加热装置上并通以冷凝水, 加热溶液并保持微沸,

实验持续 24 h。试验结束后, 让其自然冷却。取出试样, 用蒸馏水及酒精清洗后, 用直径为 5 mm 的压头分别将试样沿焊缝弯曲 180° (内壁焊缝位于外侧), 并在放大镜及显微镜下进行观察及拍照。

采用内覆或衬里耐蚀合金复合管规范 (SY/T 6623—2005) 中的晶间腐蚀试验标准对 IGC-1、IGC-2、IGC-3、IGC-4、IGC-5 和 IGC-6 这 6 组焊接接头晶间腐蚀试样进行耐晶间腐蚀性能检测, 结果如图 6 所示。检测结果显示: 试件弯曲处 (焊缝) 完好, 均未见裂纹。

4.2 失重腐蚀性能测试

4.2.1 试验参数

失重腐蚀试验依据 GB 10124—1998 进行。溶液介质 Cl^- 含量为 59 g/L, 气体介质 CO_2 摩尔分数为 0.35%, 试验压力为 15 MPa, 试验温度为 60°C , 试



图 6 晶间腐蚀试样试验后的外观图

验周期为 120 h。

4.2.2 试验过程及结果

每组加工 6 个挂片试样，经打磨、清洗和除油后，测量并记录试样尺寸和质量。试验时向静态高温、高压釜中倒入腐蚀介质。每组将 3 个平行试样置于液面以上，3 个平行试样置于液面以下，分别进行液相和气相试验。然后将高温、高压釜密封，通 N₂ 除氧 4 h 后，通入纯度为 99.9% 的 CO₂ 至 0.05 MPa。达到压力后开始缓慢升温至试验温度 60 °C，试验时间为 120 h。

试验结束待釜体冷却至室温后，缓慢匀速降压，在 15 ~ 30 min 内降至常压。取出试样，经酒精清洗后，用除膜液去膜，再经清洗干燥后进行称重。根据试样前后的质量变化及表面积，分别计算出试样在液相和气相中的腐蚀速率。

试验取 CR-1、CR-2、CR-3、CR-4、CR-5 和 CR-6 这 6 组试样，其焊接接头失重腐蚀试样在液相中的平均腐蚀速率分别为 0.046 6 mm/a、0.063 5 mm/a、0.062 3 mm/a、0.066 7 mm/a、0.068 1 mm/a 和 0.038 4 mm/a；在气相中的平均腐蚀速率分别为 0.025 2 mm/a、0.027 8 mm/a、0.022 7 mm/a、0.028 6 mm/a、0.022 9 mm/a 和 0.019 4 mm/a。试验结果表明：气相平均腐蚀速率为 0.022 4 mm/a，液相平均腐蚀速率为 0.068 3 mm/a。

4.3 抗 Cl⁻ 应力腐蚀性能测试

依据标准 GB/T 10126—2002 采用“U”形环法进行测试，试验试样在 Cl⁻ 浓度为 59 g/L 的水溶液、试验温度为 60 °C、试验总压力为 15 MPa 和 CO₂ 压力为 0.05 MPa 的试验环境中，经 720 h 后，试件均完好，无裂纹产生。试验对抗 Cl⁻ 应力腐蚀试样腐蚀产物进行了 XRD 分析及 SEM 观察分析（图 7、8）。

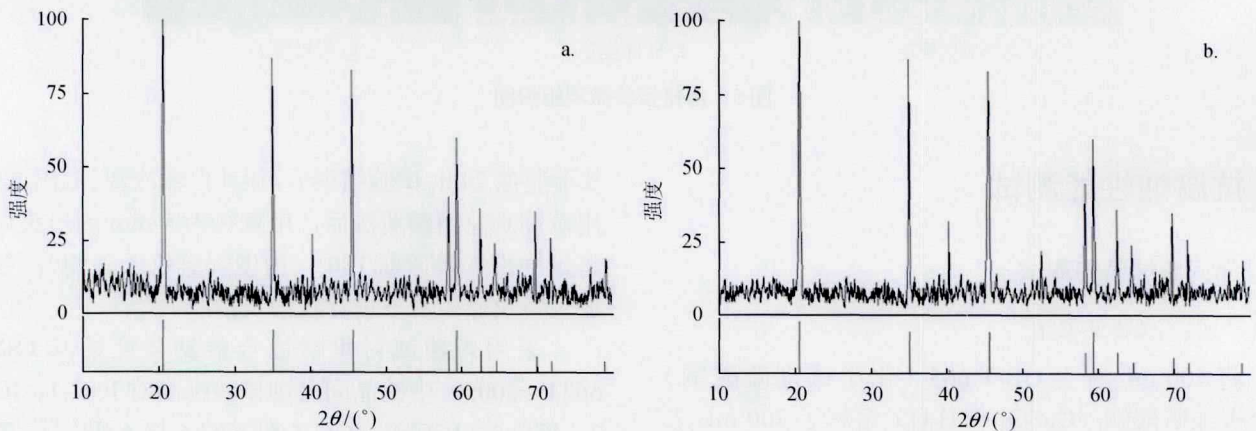


图 7 腐蚀产物的 XRD 分析图



图 8 焊接接头的 SEM 分析图

从2个抗Cl⁻应力腐蚀试样腐蚀产物的XRD分析结果可以得出,抗Cl⁻应力腐蚀试样腐蚀产物膜的主要成分为FeS,属于四方晶系晶体。四方晶系FeS晶体,晶格点阵不完整,阳离子扩散速率高,易穿透基体金属表面腐蚀产物膜,对基体金属产生腐蚀,所以该腐蚀产物膜对基体金属的保护作用很弱。

从图8可以看到,表面出现均匀分布的腐蚀产物,产物表面有凹坑;图8-b为图8-a的局部放大图,图8-b中腐蚀产物凹凸不平,分布不均匀;从图8-c中看到腐蚀产物膜中出现了四方晶体,并且呈现堆砌状态;从图8-d中看到局部区域呈现较小空洞,并有继续扩大的趋势。

这表明试验得到的腐蚀产物膜易碎且易脱落,同时有裂纹和微孔的地方最先遭受腐蚀,腐蚀产物膜主要为四方晶系FeS,其与低合金钢基体构成一个活性微电池,对钢基体有继续进行腐蚀的作用。

5 结束语

上述各项试验数据充分说明,试验在严格按照焊接技术要求进行下,试样各项指标合格,所选择的焊接工艺参数合理。试验适用于气质条件为:总压力不大于15 MPa、CO₂摩尔分数不大于0.35%,Cl⁻含量为60 g/L的工作环境下。

参 考 文 献

- [1] 李立英,孙健,孙冲,曹宁. L415/316L复合管免充氩焊接接头耐蚀性能[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(S2): 149-152.
Li Liying, Sun Jian, Sun Chong, Cao Ning. Corrosion resistance of welded joints of L415/316L bimetal lined pipe fabricated by free-argon welding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(S2): 149-152.
- [2] 朱世东,王栋,李广山,魏斌,赵雪会,李发根. 油气田用双金属复合管研究现状[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(6): 529-534.
Zhu Shidong, Wang Dong, Li Guangshan, Wei Bin, Zhao Xuehui, Li Fagen. Research progress of bimetal clad pipe in oil and gas fields[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2011, 23(6): 529-534.
- [3] Kane RD, Wilhelm SM, Yoshida T, Matsui S, Iwase T. Analysis of bimetallic pipe for sour service[J]. SPE Production Engineering, 1991, 6(3): 291-296.
- [4] Mazel AG, Lopatin EV, Romanova IA. Technology of welding industrial pipelines of X-65 steel for acid gas and oil[J]. Welding International, 1994, 8(3): 232-235.
- [5] Morozov YD, Zikeev VN, Filatov NV. Development of coiled steels for electric-welded (HFC) oil and gas line pipe, casing, and pump-compressor tubing with high strength and good resistance to cold and corrosion[J]. Metallurgist, 2009, 53(9/10): 633-636.
- [6] 徐爱华,阮振刚,杨光,张靖,张鲲鹏,朱力挥. 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.
Xu Aihua, Ruan Zhengang, Yang Guang, Zhang Jing, Zhang Kunpeng, Zhu Lihui. Welding technology of bimetal clad pipe[J]. Natural Gas and Oil, 2010, 28(6): 22-28.
- [7] Wang Bin, Lei Bobo, Wang Liang, Xu Ming. Analysis on fracture toughness of the L415MS/N08825 bimetallic composite pipe welded joint[J]. Materials Science Forum, 2016, 850: 1010-1015.
- [8] Chen Hao, Ma Huizhen, Chen Xiaomin, Jiang Shengfei, Wang Huaijie. Failure analysis of butt weld of bimetal composite pipes[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2015, 15(4): 563-570.
- [9] 冉国伟,宋永伦,闫思博,林江波. 2219铝合金复合热源焊接工艺及接头性能[J]. 焊接学报, 2011, 32(9): 25-29.
Ran Guowei, Song Yonglun, Yan Sibao, Lin Jiangbo. Welding process and joint properties of hybrid welding on 2219 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(9): 25-29.
- [10] 羊东明,朱原原,蔡锐,葛鹏莉. 825合金/20钢双金属复合管焊接工艺[J]. 焊接技术, 2015, 44(11): 33-36.
Yang Dongming, Zhu Yuanyuan, Cai Rui, Ge Pengli. Welding process of 825 alloy/20 steel bimetal pipe[J]. Welding Technology, 2015, 44(11): 33-36.
- [11] Torbati AM, Miranda RM, Quintino L, Williams S. Welding bimetal pipes in duplex stainless steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 53(9/12): 1039-1047.
- [12] Leibzon VM, Pavlov AA, Pavlova EK. Influence of the area of the sections of an unremelted production joint on the properties of weld joints of a bimetal[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 1986, 22(5): 236-238.
- [13] 吴轩,胡建华,高歌. 离心铸造双金属管复合界面的研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(23): 95-97.
Wu Xuan, Hu Jianhua, Gao Ge. Study on interface about centrifugal casting composite bimetallic pipe[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(23): 95-97.
- [14] Pinaev VG, Kiryushov VV, Ryabtsev IA, Vasil' ev VG, Dzykovich IY. Structure and heat treatment of steel 45-R6M5 bimetal prepared by explosive welding[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1989, 31(10): 794-797.
- [15] 王新. 双金属复合管焊接工艺研究与应用[J]. 电焊机, 2011, 41(7): 71-73.
Wang Xin. Study on welding technology of double metal composite pipe[J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(7): 71-73.
- [16] Torbati AM, Miranda RM, Quintino L, Williams S, Yapp D. Optimization procedures for GMAW of bimetal pipes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(6): 1112-1116.
- [17] Li Fagen, Wei Bin, Zhao Xuehui, Shao Xiaodong, Cai Rui. Analysis on bimetallic lined pipe for sour service in oil and gas field[C]//International Conference on Pipelines & Trenchless Technology, 16-18 October 2013, Xi'an, China. DOI: http://dx.doi.org/10.1061/9780784413142.099.