

文章编号:1673-5005(2021)04-0139-07 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2021.04.017

端部激光熔覆复合管焊接接头组织与性能分析

韩彬¹, 马光兴¹, 刘振洪², 韩浩³, 宋立新⁴, 李立英¹

(1. 中国石油大学(华东)材料科学与工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中油(新疆)石油工程有限公司, 新疆克拉玛依 834000;
3. 南京陇源汇能电力科技有限公司, 江苏南京 210000; 4. 海洋石油工程(青岛)有限公司, 山东青岛 266520)

摘要:分别采用激光熔覆和 GTAW 对 L415/316L 复合管管端进行堆焊,使复合管端部由机械结合转变为冶金结合,然后采用 GTAW 焊打底,手工电弧焊填充盖面进行对接焊,对比分析两种管端处理工艺对接头组织和性能的影响。采用光学显微镜、扫描电镜和电子探针对接头组织的微观组织和化学成分进行分析,并对焊接接头进行力学和耐腐蚀性能测试。结果表明:管端激光熔覆和 GTAW 堆焊两种焊接接头的力学性能和耐腐蚀性能均满足要求;L415/焊缝界面出现明显的脱碳层和增碳层,脱碳层位于 L415 一侧,而增碳层位于焊缝一侧,两者之间存在碳迁移过渡层。相对 GTAW 堆焊,L415/熔覆层界面元素扩散梯度较大,扩散区较窄,L415 稀释率低;激光熔覆工艺更能保证双金属复合管管端的耐蚀性能。

关键词:L415/316L 复合管; 激光熔覆; 焊接接头; 显微组织; 性能

中图分类号:TG 442 **文献标志码:**A

引用格式:韩彬,马光兴,刘振洪,等. 端部激光熔覆复合管焊接接头组织与性能分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021,45(4):139-145.

HAN Bin, MA Guangxing, LIU Zhenhong, et al. Microstructures and properties of welded joints of bimetal composite pipe with laser cladding at the end[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021,45(4): 139-145.

Microstructures and properties of welded joints of bimetal composite pipe with laser cladding at the end

HAN Bin¹, MA Guangxing¹, LIU Zhenhong², HAN Hao³, SONG Lixin⁴, LI Liying¹

(1. School of Materials Science and Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. PetroChina (Xinjiang) Petroleum Engineering Company Limited, Karamay 834000, China;
3. Nanjing Longyuan Gather Power Technology Company Limited, Nanjing 210000, China;
4. Offshore Oil Engineering (Qingdao) Company Limited, Qingdao 266520, China)

Abstract: The laser cladding and Tungsten inert gas (GTAW) surfacing were used to the beading weld, in order to realize the metallurgical combination of the ends of bimetal mechanical lined pipe L415/316L. Then the butt welding of L415/316L was performed by the GTAW welding for the root welding and shielded metal arc welding (SMAW) for the filler and capping welding. The effects of two kinds of pipe end treatments on the microstructure and properties of welded joints were analyzed. The microstructures and chemical composition of the welded joints were analyzed by using the optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and electron probe microscope analysis (EPMA). In addition, the mechanical and corrosion properties were measured. The results show that the mechanical and corrosion properties of the two weld joints can both meet the requirements. There is a decarburized layer and a recarburized layer on the L415/weld interface, and a carbon migration transition layer is located between the two layers. The decarburized layer is located on the L415 side, while the recarburized layer is located on the weld side. Compared with the GTAW surfacing, the element diffusion gradient on the L415/ cladding coating interface is bigger, the diffusion area is narrower, and the dilution rate of L415 is lower. This shows the laser cladding process can better ensure the corrosion resistance of the bimetal composite pipe end.

收稿日期:2020-09-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51771228);山东省自然科学基金项目(ZR2013EEQ027)

第一作者:韩彬(1973-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为金属失效及表面改性 with 新材料焊接技术。E-mail: hbbzhj@upc.edu.cn。

Keywords: bimetal composite pipe L415/316L; laser cladding; welded joints; microstructures; properties

随着世界能源需求的日益增长,油气田开采逐渐向深井、高腐蚀环境方向发展,碳钢和低合金钢管材的腐蚀更趋严重^[1]。为减弱管材腐蚀,常用的方法包括向腐蚀环境中添加缓蚀剂,管材内壁制备塑料涂层,以及采用耐蚀合金钢管。但是,缓蚀剂具有高度的选择性,不同的腐蚀体系需要不同的缓蚀剂,同一腐蚀体系由于温度和浓度变化,缓蚀剂的作用效果都会受到影响。塑料内涂层存在附着力差,涂层分布不均匀等问题^[2-3]。耐蚀合金的防护效果较好,但其价格昂贵。双金属复合管兼有碳钢基层优异的力学性能和耐蚀合金内衬层的耐蚀性能,且价格比整体耐蚀钢管低约 50%,具有优良的性价比,是解决上述腐蚀问题相对安全和经济的途径之一^[4-8]。双金属复合管按内外层结合方式不同,分为冶金复合管和机械复合管,后者相对前者,价格较低,应用前景更为广泛。近十年来,双金属复合管在国内油气输送管线领域迅速发展,并已从陆地管线逐步发展至海底管线,应用领域包含石油、天然气、化工和电力等行业^[9-10]。双金属机械复合管焊接属于异种钢焊接。基层与内衬层化学成分差别较大,且两者之间为机械结合,在焊接过程中往往会产生层间脱落、剥离等现象^[11-12]。另外,机械结合处容易产生裂纹,导致焊接接头失效^[13-16]。近年来,许多学者提出采用堆焊工艺将机械复合管端部由机械结合转变为冶金结合,并已证明可行。目前,常见的

管端堆焊方法是钨极惰性气体电弧焊(gas tungsten arc welding, GTAW),但存在稀释率大、焊接效率低及焊后管端变形大等缺点。因此高质量的管端冶金处理技术一直是双金属机械复合管大规模推广应用的障碍^[17-19]。激光熔覆技术是利用激光照射产生的瞬时高温,将基体材料表面及其上的涂层粉末同时熔化,待其迅速冷却凝固后,形成一层稀释率极低的表面熔覆层的工艺技术^[20],可用于改善基体材料的表面性能^[21-22]。笔者以 L415/316L 双金属机械复合管为研究对象,提出一种新的管端处理方法——端部激光熔覆工艺,并对比分析端部激光熔覆和 GTAW 堆焊两种焊接接头的组织与性能。

1 试验材料与方法

试验材料为 L415/316L 双金属复合管,规格为 $\Phi 355 \times (11+2)$,基层为 L415 管线钢,壁厚为 11 mm,内衬层为 316L 奥氏体不锈钢,壁厚为 2 mm,其化学成分和力学性能如表 1 所示。

去除 L415/316L 双金属复合管 316L 层一段距离,采用激光熔覆使管端由机械结合转变为冶金结合。熔覆粉末的成分组成为 C、Cr、Nb、Si、Mo、Mn、Fe 和 Ni,其质量分数分别为 0.02%、21.03%、3.23%、0.43%、8.99%、0.09%、2.61% 和余量。激光熔覆功率为 2 100 W,扫描速度为 500 mm/min,搭接率为 30%。

表 1 复合管化学成分及力学性能

Table 1 Chemical components and mechanical properties of composite pipe

材料	质量分数/%								
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Fe
L415	0.15	1.50	0.40	0.001	0.020	0.05	0.02	0.02	余量
316L	0.004	1.129	0.640	0.000	0.045	16.316	10.028	2.035	余量
材料	抗拉强度/MPa			屈服强度/MPa			延伸率/%		
L415	≥ 520			415~565			≥ 18		
316L	≥ 485			≥ 170			≥ 30		

L415/316L 双金属复合管管端 GTAW 堆焊采用的是 E309LT1-1 和 E316LT1-1 焊丝。对接焊采用的坡口形式及焊接顺序如图 1 所示,焊接材料为 ERNiCrMo-3 焊丝和 ENiCrMo-3 焊条。焊接工艺参数和焊接材料化学成分如表 2、3 所示。

焊后,采用 WDW-300E 万能试验机测试焊接接头的拉伸性能。采用华银 HV-1000A 显微维氏硬度测量硬度,试验力为 0.98 N,时间为 15 s。用 M2500M/S6D 光学显微镜和 JEOL7200F 扫描电镜进行组织观察。用 JXA-8230 电子探针分析化学成

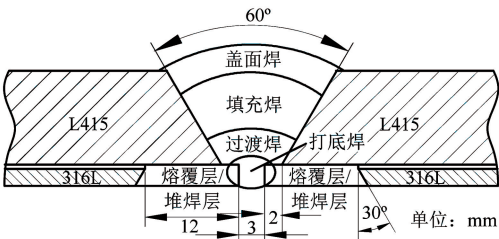


图 1 焊接坡口及焊接顺序

Fig. 1 Welding groove and welding sequence

分。按照 GB/T 15260-2016 方法做 B 铜-硫酸铜-16%硫酸试验,测定接头的耐晶间腐蚀能力,试验周

期为 24 h。

表 2 焊接工艺参数
Table 2 Welding parameters

焊层	焊接方法	直径/mm	极性	焊接电流/A	电压/V	焊接速度/(cm·min ⁻¹)
堆焊 1	GTAW	1.2	DC-	160~200	25~29	5~6
堆焊 2	GTAW	1.2	DC-	160~200	25~29	5~6
打底	GTAW	2.4	DC-	100	10	3.63
过渡	GTAW	2.4	DC-	100	10	5.48
填充、盖面	SMAW	3.2	DC-	57~60	19	7.3

表 3 焊接材料化学成分
Table 3 Chemical composition of welding materials

焊材	质量分数/%									
	C	Si	Mn	Cr	Fe	Ni	P	S	Mo	Nb(Ta)
ERNiCrMo-3、ENiCrMo-3	0.017	0.33	1.00	21.35	1.31	63.10	0.01	0.003	8.60	3.68
E309LT1-1	0.02	0.37	1.8	23.2	余量	13.72	0.02	0.004	0.30	—
E316LT1-1	0.018	0.35	1.78	23.6	余量	13.68	0.02	0.003	2.6	—

2 试验结果分析

2.1 焊接接头宏观形貌

图 2 为焊接接头的宏观形貌。由图 2 可以看出,焊接接头均无焊接裂纹、孔洞、未焊透等缺陷,焊接质量合格。

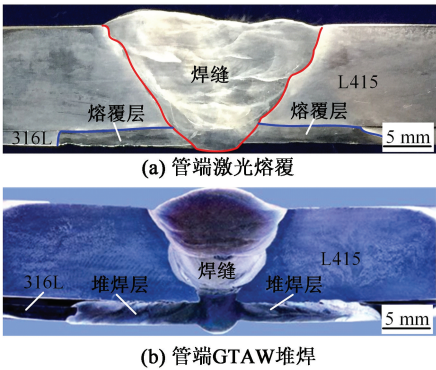


图 2 焊接接头宏观形貌

Fig. 2 Macro morphology of welded joints

2.2 焊接接头显微组织与成分

2.2.1 316L/熔覆层(堆焊层)界面显微组织与成分

图 3 为焊接接头 316L/熔覆层界面的组织及成分分布。从图 3(a)和(b)中可以看出,316L 与熔覆层组织形态明显不同,316L 主要由块状奥氏体组成;熔覆层为树枝晶形貌的奥氏体,垂直于界面方向生长。界面熔合区不明显,仅在局部区域可见。316L 侧 HAZ 显微组织未发生明显变化,仍为单相奥氏体组织,但晶粒尺寸较母材略有长大。

图 3(c)为界面 SEM 形貌。可见热影响区(heat

affected zone, HAZ)有黑色细小的蠕虫状物质析出,且不连续地分布在奥氏体基体上。对该析出物和奥氏体分别进行 EDS 分析,结果如表 4 所示。该析出物与奥氏体 Cr、Ni 含量有所差异,奥氏体中 Ni 元素含量较高,而析出物中 Cr 元素含量较高,与 Sharifitabar M^[23] 研究结果一致,该析出物为铁素体。其形成主要是因为高温冷却过程中发生 δ-Fe 向奥氏体转变,但由于冷却速度较快,少量的铁素体来不及转换而被保存下来^[24-25]。

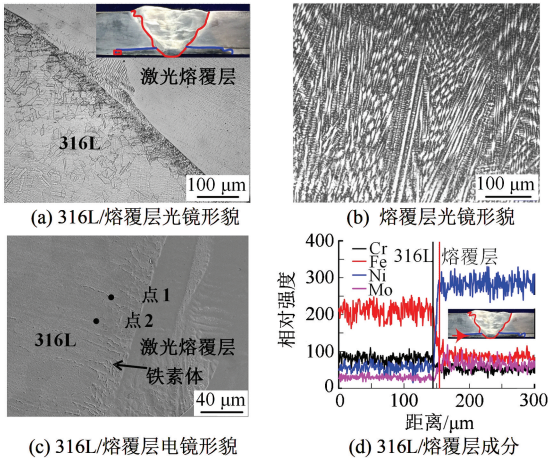


图 3 316L/熔覆层界面组织及成分

Fig. 3 Microstructure and composition of 316L/cladding layer interface

对 316L/熔覆层界面进行线扫描分析,结果见图 3(d)。可见,Cr、Fe、Ni、Mo 元素在 316L 和熔覆层均呈稳定波动变化,未发现明显的元素偏聚现象。熔合线附近由于元素浓度梯度存在,发生了元素扩散现象,316L 中 Cr、Fe 元素向熔覆层扩散,熔覆层

中 Ni、Mo 元素向 316L 扩散,其中 Fe、Ni 元素因浓度差异最大,扩散现象最为明显。因激光熔覆作用时间短、冷却速度快,故元素扩散距离较短,扩散区宽度约为 10 μm 。316L 和 Ni625 熔覆层中 Cr、Ni 含量较高,由舍弗勒图可知,即使发生一定的元素扩散,其室温冷却后的组织仍为奥氏体,未产生其他有害组织。

图 4 为焊接接头堆焊层组织及 316L/堆焊层界面成分分布。比较图 3(b)和图 4(a)可见,堆焊层的枝晶尺寸较熔覆层大,说明 GTAW 堆焊热输入比激光熔覆大。由图 4(b)可见,GTAW 堆焊与激光熔覆的化学成分变化趋势基本一致,扩散区宽度约为 11 μm ,与激光熔覆相近。激光熔覆的 Cr 元素含量更加稳定,耐蚀性应优于 GTAW 堆焊。

表 4 图 3(c)点 EDS 结果

Table 4 EDS results of points in figure 3(c)

位置	元素含量/%					
	Si	Cr	Fe	Ni	Mn	Mo
点 1	1.72	30.17	55.56	3.20	2.66	6.69
点 2	1.08	18.28	66.30	10.50	2.15	1.69

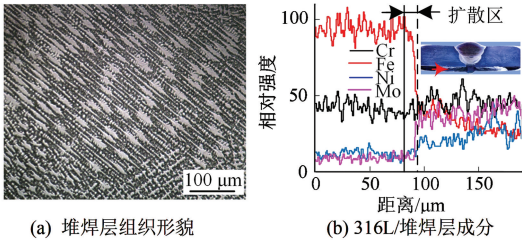


图 4 堆焊层组织及 316L/堆焊层界面成分

Fig. 4 Microstructure of surfacing layer and composition of 316L/surfacing layer interface

2.2.2 L415/熔覆层(堆焊层)界面显微组织与成分

图 5 为 L415/熔覆层(堆焊层)界面的组织与成分。激光熔覆层含有大量的柱状晶(图 5(a)),而 GTAW 堆焊层含有柱状晶和等轴晶(图 5(c))。激光熔覆界面元素扩散梯度较大,扩散区宽度约 18 μm (图 5(b)),而 GTAW 堆焊界面各元素的含量变化较缓,扩散区宽度约 56 μm (图 5(d))。这说明激光熔覆可降低 L415 的稀释率,保证熔覆层的耐蚀性。

2.2.3 焊缝/熔覆层界面显微组织与成分

焊缝/熔覆层界面的显微组织如图 6(a)所示。可见,焊缝与熔覆层之间界面清晰明显,两者均主要由柱状晶和等轴晶组成。焊缝组织垂直于熔合线方向生长,由于 GTAW 焊热输入较大,其晶粒尺寸略

大于熔覆层。图 6(b)为界面元素线扫描结果。可以看出,焊缝和熔覆层化学成分基本相似,元素分布为一条稳定波动的直线,界面处未发生元素扩散现象。焊缝和熔覆层中均有 Nb 元素的突变情况,且熔覆层中 Nb 元素偏析相对更为显著。这表明焊缝和熔覆层中均出现了 Nb 元素偏析现象,产生了富含 Mo、Nb 元素的 Laves 相。

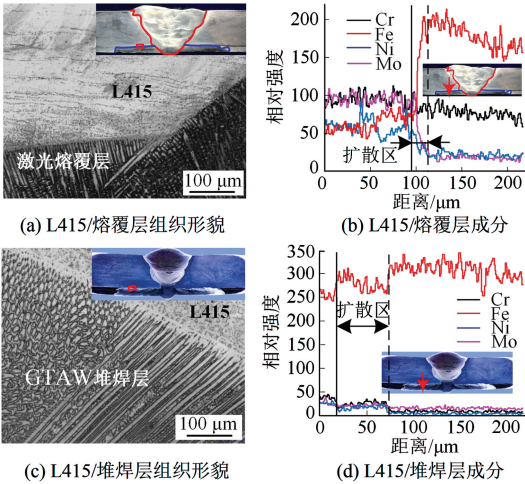


图 5 L415/熔覆层(堆焊层)界面显微组织与成分

Fig. 5 Microstructure and composition of L415/cladding layer (surfacing layer) interface

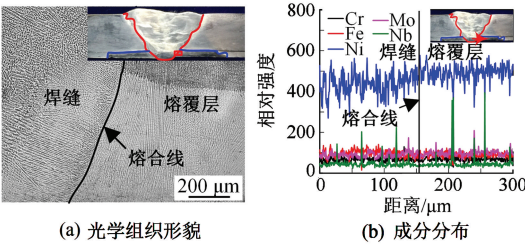


图 6 焊缝/熔覆层界面显微组织与成分

Fig. 6 Microstructure and composition of weld/cladding interface

2.2.4 L415/焊缝界面显微组织与成分

图 7 为 L415/焊缝界面的组织及元素分布。由图 7(a)可见,L415 与焊缝之间界面明显,L415 耐蚀性能较差,容易腐蚀,组织较清楚,焊缝耐蚀性能较好,不易腐蚀,组织不可见。熔合线处出现明显的脱碳层和增碳层,脱碳层位于 L415 一侧,而增碳层位于焊缝一侧,两者之间为碳迁移过渡层。脱碳即是珠光体分解为铁素体的过程,碳迁移过渡层基本为铁素体,几乎不含有珠光体。L415 和焊缝之间存在一条白亮带,为平面晶组织。L415 侧 HAZ 仍由铁素体和珠光体组成,但带状组织形态消失。由图 7(b)可见,由于 L415 与焊缝金属分别属于碳钢和镍基合金,其化学成分差异较大,在熔合线附近多种元

素均形成了较为明显的浓度梯度。在界面处,Fe 元素由 L415 向焊缝侧迁移,Ni、Cr、Mo 元素由焊缝向 L415 侧迁移。扩散区宽度约为 40 μm,较 L415/熔覆层的宽。结合图 7(a)SEM 形貌发现,扩散区主要位于焊缝与 L415 界面平面晶内。

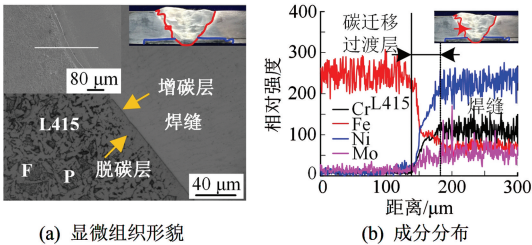


图 7 L415/焊缝界面显微组织与成分
Fig. 7 Microstructure and composition of L415/weld interface

2.3 焊接接头力学性能

2.3.1 拉伸性能

依据 NB/T 47014-2011 标准规定,复合材料焊接接头拉伸性能的合格指标是每个接头试样的抗拉强度 R_m 应满足:

$$R_m \geq \frac{R_{m1}T_1 + R_{m2}T_2}{T_1 + T_2} \tag{1}$$

式中, R_{m1} 和 R_{m2} 分别为覆层材料和基层材料规定的抗拉强度最低值,MPa; T_1 和 T_2 覆层和基层材料厚度,mm。

根据式(1)计算得出焊接接头抗拉强度 $R_m \geq 514$ MPa。焊接接头拉伸测试结果见表 5。抗拉强度分别为 530 和 550 MPa,均大于 514 MPa,焊接接头的强度合格。

表 5 焊接接头拉伸测试结果

Table 5 Tensile test results of welded joints

名称	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	断裂位置
激光熔覆-1	530	358	母材
激光熔覆-2	550	445	母材
GTAW 堆焊-1	575	453	母材
GTAW 堆焊-2	570	453	母材

2.3.2 显微硬度

图 8 为激光熔覆和 GTAW 堆焊接头的硬度分布,可见两种焊接接头的硬度分布相似。316L/熔覆层界面处的硬度变化梯度更为明显(图 8(a))。熔覆层平均硬度为 230 HV0.1,316L 平均硬度为 140 HV0.1,熔覆层硬度显著高于 316L 的。一方面是因为熔覆层由激光熔覆快速凝固产生,其晶粒组织较为细小、致密,产生了细晶强化作用。另一方面,熔覆粉末中 Cr、Mo 合金元素含量更高,产生了

固溶强化作用。另外,HAZ 硬度较 316L 母材略有降低,这是因为激光热作用使得 HAZ 组织有所长大。

由图 8(b)可见,焊缝和熔覆层(堆焊层)的硬度较为接近。但因熔覆层晶粒尺寸相对焊缝更为细小,其硬度略高一些。图 8(c)为 L415/焊缝界面处的硬度分布。硬度由大至小依次为焊缝、HAZ 和 L415。熔合线处出现硬度下降和上升现象,远离熔合线的 L415 硬度基本保持不变。L415 和焊缝由于 C 元素含量不同,在焊接热循环作用下,L415 熔合线附近发生了 C 元素迁移过程,在熔合线附近分别形成了增碳层和脱碳层,使其硬度发生了一定的改变。

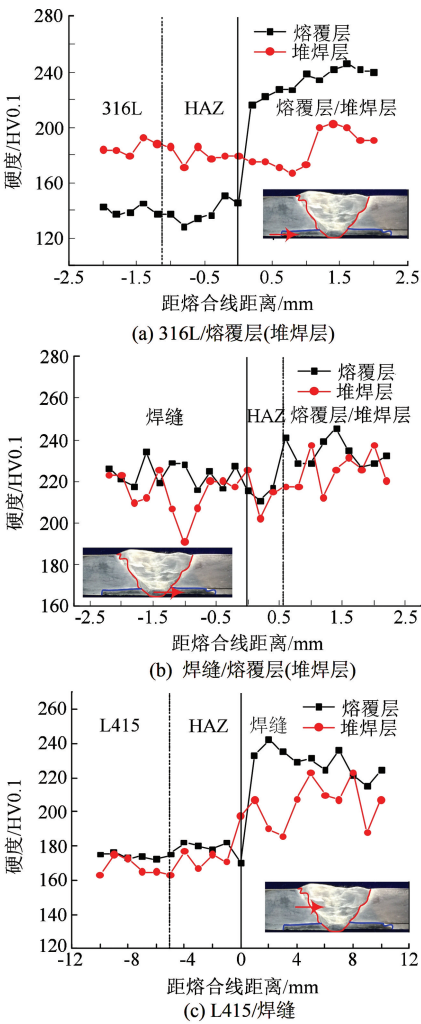


图 8 显微硬度分布

Fig. 8 Microhardness distribution

2.3.3 耐蚀性能

焊接接头晶间腐蚀试样弯曲后的形貌如图 9 所示。焊接接头各区域均未产生裂纹,表明焊接接头具有良好的抗晶间腐蚀能力,可以达到工程应用

要求。

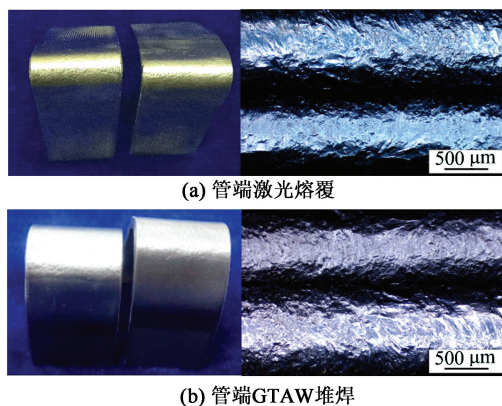


图9 晶间腐蚀试样形貌

Fig.9 Morphology of intergranular corrosion specimens

3 结 论

(1)管端激光熔覆和 GTAW 堆焊两种焊接接头的力学性能和耐腐蚀性能均满足要求,但熔覆层硬度比堆焊层高,接头抗拉强度略低于堆焊接头。

(2)L415/焊缝界面出现明显的脱碳层和增碳层,脱碳层位于 L415 一侧,而增碳层位于焊缝一侧,两者之间存在碳迁移过渡层。

(3)L415/GTAW 堆焊层界面各元素的含量变化较缓,扩散区宽度约 $56\ \mu\text{m}$,L415/熔覆层界面元素扩散梯度较大,扩散区宽度约 $18\ \mu\text{m}$ 。

(4)从稀释率角度考虑,激光熔覆工艺热量集中,L415 稀释率低,用于双金属复合管的管端堆焊,更能保证复合管焊接接头管端的耐蚀性能。

参考文献:

- [1] 李强,张玉瑜,刘刚,等. 纯铁在均匀液膜下的 CO_2 腐蚀机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(3):155-161.
LI Qiang, ZHANG Yuyu, LIU Gang, et al. CO_2 corrosion mechanism of pure Fe under action of uniform water film[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(3):155-161.
- [2] 魏斌,李鹤林,李发根. 海底油气输送用双金属复合管研发现状与展望[J]. 油气储运, 2016, 35(4):343-355.
WEI Bin, LI Helin, LI Fagen. Research status and prospects of bimetallic composite pipes for submarine oil and gas transmission[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(4):343-355.
- [3] 黄本生,王兆坤. 油气集输管道内涂层技术的现状及发展趋势[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2012, 24(4):345-348.

HUANG Bensheng, WANG Zhaokun. Status and development trend of internal coating technology for oil and gas gathering pipelines[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2012, 24(4):345-348.

- [4] SPENCE M A, ROSCOE C V. Bi-metal CRA-lined pipe employed for North Sea field development[J]. Oil and Gas Journal, 1999, 97(18):80-86.
- [5] CHEN W C, PETERSEN C W. Corrosion performance of welded CRA-lined pipes for flow lines[J]. SPE Production Engineering, 1992, 7(4):375-378.
- [6] SERIKOV O. Modern materials: bimetallic tube[J]. Metallurgist, 2005, 49(9/10):347-348.
- [7] ZHANG L J, PEI Q, ZHANG J X, et al. Study on the microstructure and mechanical properties of explosive welded 2205/X65 bimetallic sheet[J]. Materials and Design, 2014, 64:462-476.
- [8] 郭崇晓,张燕飞,吴泽. 双金属复合管在强腐蚀油气田环境下的应用分析及其在国内的发展[J]. 全面腐蚀控制, 2010, 24(2):13-17, 12.
GUO Chongxiao, ZHANG Yanfei, WU Ze. The application analysis of bimetal-pipe in oil and gas fields with high corrosion and its interior development[J]. Total Corrosion Control, 2010, 24(2):13-17, 12.
- [9] 韩浩,韩彬,李立英,等. 机械复合管焊接工艺进展[J]. 电焊机, 2017, 47(7):17-22, 29.
HAN Hao, HAN Bin, LI Liying, et al. Research on welding technology of mechanical bimetallic composite pipe[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(7):17-22, 29.
- [10] 王纯,毕宗岳,张万鹏,等. 国内外双金属复合管研究现状[J]. 焊管, 2015, 38(12):7-12.
WANG Chun, BI Zongyue, ZHANG Wanpeng, et al. Research status on double-metal composite pipe at home and abroad[J]. Welded Tube, 2015, 38(12):7-12.
- [11] LI Liying, XIAO Jun, HAN Bin, et al. Welding L415/316L bimetal composite pipe using post-internal-welding process[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2020, 73:675-689.
- [12] LI Liying, XIAO Jun, HAN Bin, et al. Microstructure and mechanical properties of welded joints of L415/316L bimetal composite pipe using post internal-welding process[J/OL]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2020, 179:104026[2019-12-09]. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp>.
- [13] WANG S G, MA Q H, LI Y. Characterization of microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of dissimilar welded joint between 2205 duplex stainless steel and 16MnR[J]. Materials and Design, 2011, 32

- (2):831-837.
- [14] JANG W, LEE J, KIM J S, et al. Mechanical property variation within Inconel 82/182 dissimilar metal weld between low alloy steel and 316 stainless steel[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008,85(9):635-646.
- [15] JIANG W, LUO Y, ZHANG G D, et al. Experimental to study the effect of multiple weld-repairs on microstructure, hardness and residual stress for a stainless steel clad plate [J]. Materials & Design, 2013, 51: 1052-1059.
- [16] 王勇,孙启平,韩涛,等. 基于等效缺陷尺寸在役焊接安全性评价研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(1):124-129.
WANG Yong, SUN Qiping, HAN Tao, et al. Safety evaluation of service welding based on equivalent defect size [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2017,41(1):124-129.
- [17] 韩彬,韩浩,李立英,等. 双金属机械复合管端部冶金焊接的方法:201710122858.9[P]. 2019-06-25.
- [18] 韩彬,王勇,韩浩,等. 双金属复合管的焊接方法:201710126833.6[P]. 2019-07-23.
- [19] 韩彬,王勇,赵卫民,等. 一种内衬涂层管道的对焊方法:201410082308.5[P]. 2016-03-09.
- [20] SHEPELEVA L, MEDRES B, KAPLAN W D, et al. Laser cladding of turbine blades[J]. Surface and Coatings Technology, 2000,125(1/2/3):45-48.
- [21] SUN S D, LIU Q C, BRANDT M, et al. Effect of laser clad repair on the fatigue behaviour of ultra-high strength AISI 4340 steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2014,606:46-57.
- [22] ZHANG S T, ZHOU J S, GUO B G, et al. Friction and wear behavior of laser cladding Ni/hBN self-lubricating composite coating[J]. Materials Science and Engineering A, 2008,491(1/2):47-54.
- [23] SHARIFITABAR M, HALVAEE A, KHORSHAHIAN S. Microstructure and mechanical properties of resistance upset butt welded 304 austenitic stainless steel joints [J]. Materials & Design, 2011, 32(7): 3854-3864.
- [24] 陈冰泉,潘春旭,张志慧. 奥氏体不锈钢焊接接头过渡区组织变化研究[J]. 武汉交通科技大学学报, 1995,19(1):1-6.
CHEN Bingquan, PAN Chunxu, ZHANG Zhihui. Microstructural variation of transition zone in austenitic stainless steel welded joints [J]. Journal of Wuhan Transportation University, 1995,19(1):1-6.
- [25] 卢东华. 316L 不锈钢/Q345 钢焊接接头组织与性能研究[D]. 成都:西南石油大学,2015.
LU Donghua. Study on microstructure and properties of welded joint of 316L stainless steel/Q345 steel [D]. Chengdu:Southwest Petroleum University,2015.

(编辑 沈玉英)