复合板基层厚度对激光焊接头腐蚀性能的影响

张小凡,杨寿康,张建勋

(西安交通大学,西安 710049)

摘要:目的 通过探索基层金属厚度对复合板激光穿透焊接的影响规律,分析其影响度与焊接速度、激 光功率的差别,为双金属复合材料激光穿透焊接提供更多的技术支撑。方法 以焊接速度、激光功率和 基层金属厚度为变量,设计了三因素三水平的正交实验,对X65/DSS2205 层状双金属复合材料进行激 光穿透焊接实验,对不同焊接条件下接头的显微组织进行观察分析,采用 EDS 面扫方法对焊缝复层区 进行成分扫描,测量接头复层侧动电位极化曲线,并比较了基层金属厚度的影响度较焊接速度与激光 功率的大小。结果 双金属复合板激光穿透焊接接头显微组织在厚度方向存在明显的分层;基层金属厚 度为 1.2 mm 时,复层贵金属元素保留量最大;随着基层金属厚度的减小,接头综合耐腐蚀性能提高; 基层金属厚度对接头耐腐蚀性能的影响小于焊接速度和激光功率 2 个变量;焊接速度为 2.5 m/min,激 光功率为 3500 W,基层金属厚度为 0.8 mm 时,接头耐腐蚀性能最优。结论 基层金属厚度对于复合板 激光穿透焊接接头的焊缝复层元素含量、以及接头复层一侧耐腐蚀性能都有较为明显的影响,但相比 于焊接速度与激光功率,其影响度相对较小,因此在进行复合板激光穿透焊接时,在选定基层金属厚 度后,仍要对焊接速度和激光功率进行优化工艺设计。

关键词:双金属复合板;激光穿透焊接;基层金属厚度;耐腐蚀性能 **DOI**: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.01.008

中图分类号:TG404 文献标识码:A 文章编号:1674-6457(2020)01-0052-08

Effect of Base Thickness of Composite Plate on Corrosion Performance of Laser Welding Joint

ZHANG Xiao-fan, YANG Shou-kang, ZHANG Jian-xun

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the influence rule of base metal thickness on laser penetration welding of composite plates, analyze the difference of the influence degree between base metal thickness, welding speed and laser power, to provide more technical support for laser penetration welding of bimetal composite materials. With the welding speed, laser power and base metal thickness as variables, the orthogonal experiment with three factors and three levels was designed to conduct laser penetration welding of bimetallic composite X65/DSS2205. The microstructure of the joints under different welding conditions was observed and analyzed; the composition of the weld composite layer was scanned by EDS surface scanning method; the dynamic potential polarization curve of the joint composite side was measured; and the influence of base metal thickness, welding speed and laser power was compared. The results showed that the microstructure of the welded joint was hierarchical along thickness direction of the welded joint. When the thickness of base metal was 1.2 mm, the maximum amount of precious metal

收稿日期: 2019-11-29

基金项目:国家自然科学基金(51875442)

作者简介:张小凡(1995—),男,硕士生,主要研究方向为激光焊接与增材制造。

通讯作者:张建勋(1958—),男,博士,二级教授,主要研究方向为材料接合与焊接、智能焊接与再制造、焊接结构 可靠性等。

elements was retained. With the decrease of base metal thickness, the comprehensive corrosion resistance of joints was improved. The influence of base metal thickness on the corrosion resistance of the joint was less than that of welding speed and laser power by two variables. In this study, the joint had the best corrosion resistance when the welding speed was 2.5 m/min, the laser power was 3500 W, and the base metal thickness was 0.8 mm. The base metal thickness has a significant influence on the element content of weld composite layer and the corrosion resistance of the composite side of laser penetration joint. However, when compared with welding speed and laser power, its influence is relatively small. Therefore, in laser penetration welding of bimetal composite plate, the welding speed and laser power should be optimized after the thickness of base metal is selected. **KEY WORDS:** bimetal composite plate; laser penetration welding; base metal thickness; corrosion resistance

随着世界能源需求的不断增长,油气田开发逐渐 向深井、高腐蚀环境方向发展。目前,高腐蚀性油气 田开采作业和油气输送普遍采用价格较为昂贵的耐 蚀合金甚至镍基合金管道。但其中只有 1/3 左右的管 道材料起到抗蚀作用,其余部分仅起结构支撑的作 用,造成了资源和成本的极大浪费。以碳钢或合金钢 为基管,内表面覆衬不锈钢等耐蚀合金,通过各种变 形和连接技术将管层中间紧密结合,制成新型双金属 复合管,以基材满足管道设计的许用应力,复层耐腐 蚀或者耐磨。相比于整体合金管,双金属复合管在 兼得基层和复层优良性能的同时,可以有效降低管 道成本^[1-2]。

双相不锈钢具有铁素体 + 奥氏体的双相组织结构,两相比例接近 1:1,性能上结合了奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢的特点,具有优于铁素体不锈钢的韧性和优于奥氏体不锈钢的耐晶间腐蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳性能。双相不锈钢 DSS2205 在中性氯化物和 H₂S 溶液中具有优于 304L 和 306L 奥氏体不锈钢 以及 18-5Mo 型不锈钢的耐腐蚀性能。DSS2205 的屈服强度约为标准奥氏体不锈钢的 2 倍,线性膨胀系数低于奥氏体不锈钢,与碳钢相近。因其具有诸多优异性能,DSS2205 可用于油气输送管道中所使用的纯金属管道或双金属复合管道^[3—5]。X65/DSS2205 双金属复合板基层的 X65 管线钢与 DSS2205 在化学成分、线膨胀系数、热导率、熔点和力学性能等方面都有较大差异,在焊接中存在复层合金元素稀释、碳元素迁移、裂纹、HAZ 两相比例失衡、腐蚀等问题。

目前对于层状复合板焊接,国内外一般通过分别 对其基层和复层选取适宜的焊接方法进行,并在基 层焊缝和复层焊缝之间添加一层过渡层,防止焊缝 基层金属对复层金属产生稀释和破坏^[3,6—8],但其工 艺的复杂性导致焊接效率较低,以至于工业制造效 率较低。

激光穿透焊接时,在金属蒸汽和温度梯度作用下,熔池的上下表面附近形成两个相对独立的 Marangoni对流区,而熔池上部和下部的液态金属之 间发生相对较少的对流交换^[9—12]。基于这种熔池流动 行为特点,荀宁年等^[13—14]通过激光穿透焊对 X65/ DSS2205 复合板进行单道焊接,实现了双金属复合材 料的一次对接成形,其原理如图1所示。研究表明, 沿焊缝厚度方向,组织出现了明显的分层特征,表明 熔池上下两个部分的流动具有独立性 ,焊缝复层表面 与母材有相当的抗均匀腐蚀能力,但焊接过程中的热 循环以及基层与复层间的少量对流交换和激光焊接过 快的冷却速度破坏了复层 DSS2205 原来具有的大量 合金元素和平衡组织的成分组织特点,使其抗点蚀能 力明显低于母材。进一步地,苟宁年[15]等通过焊接速 度单变量实验,发现在较大的焊接速度下,熔池基层 与复层的液态金属发生相对更少的对流交换,且冷却 凝固后的焊缝复层奥氏体、铁素体比例更加平衡,从 而提升焊接接头的抗点蚀能力。张建勋等[16]进一步削 减了 X65/DSS2205 中的基层金属厚度,使得在进行激 光熔透焊接时,熔池中基层液态金属含量降低,并通 过以激光功率、焊接速度、离焦量、背保护气 N₂ 含 量为变量的正交实验,对复合板激光穿透焊接进行了 工艺优化,使复层焊缝金属的稀释率降低到3%以下。



图 1 双金属复合材料激光穿透焊接原理 Fig.1 Schematic diagram of laser penetration welding of bimetallic composites materials

文中在前人研究的基础上,在对不同厚度的试板 进行焊接时,通过调节离焦量使激光束焦点均会聚于 双金属板界面处,去除了影响较小的背保护气 N₂, 引入基层厚度变量,设计了基层厚度、激光功率、焊 接速度为变量的三变量三水平的正交实验,分析了接 头显微组织与焊缝复层贵金属含量保留情况,测量了 接头复层区动电位极化曲线,对双金属激光穿透焊接

%

做进一步研究和优化 ,得到了综合耐腐蚀性能优异的 基层金属厚度和焊接工艺组合 ,为复合板激光焊接时 的基层厚度选择提供了技术支持。

1 材料与实验

实验材料为爆炸焊接成形的 X65/DSS2205 层状 双金属复合板,其基层 X65 与复层 DSS2205 的化学 成分如表1所示,实验过程如图2所示。正交实验中 各实验组所采用的参数如表2所示。激光焊接及金相 试样、电化学试样取样如图3所示。

焊接设备采用型号为 IPG YLS-4000 的光纤激光器,其标称功率为 4000 W。焊接过程中采用正、侧、

背三路 Ar 气保护, 气流量为 25 L/min, 避免焊接过 程中熔池被氧化。焊接完成后切取接头横截面试样, 进行镶嵌、打磨、抛光处理,使用 Curran 试剂(10 g 氯化铁+30 mL 盐酸+120 mL 水)对接头复层进行腐 蚀,时间约为 15 s。通过 Nikon MA200 金相显微镜 对焊缝显微组织进行观察分析。通过牛津能谱仪对焊 缝复层进行了 EDS 面扫。采用 Photoshop 软件对复层 侧焊缝奥氏体含量进行测算。以质量分数为 3.5%的 NaCl 溶液作为腐蚀介质,使用 CS350 型电化学工作 站进行常温下的极化曲线测试,电位扫描范围为-2~2 V,扫描速率为 3 mV/s。因为激光焊缝很窄,很难将 热影响区区分出来,试样电极的工作面取为 5 mm× 5 mm,包括整个焊缝、热影响区和一部分母材。



Fig.2 Experimental process

表 1 X65/DSS2205 化学成分(质量分数) Tab.1 Chemical composition of X65/DSS2205 (mass fraction)

材料	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Ni	Mo	Ν	Fe	Cr
2205	0.029	0.42	1.53	0.03	0.02	22.60	5.84	3.14	0.16	余量	22.60
X65	0.046	0.24	1.6	0.099	0.017	0.004	0.016	0.16	0.15	余量	0.004

表 2 激光焊接 L。正交实验表 Tab.2 L9 orthogonal experiment table of laser welding

实验组号	焊接速度	焊接功率	基层金属厚度
	$v/(m \cdot min^{-1})$	P/W	<i>D</i> /mm
1#	2.0	3000	1.6
2#	2.0	3500	1.2
3#	2.0	4000	0.8
4#	2.5	3000	1.2
5#	2.5	3500	0.8
6#	2.5	4000	1.6
7#	3.0	3000	0.8
8#	3.0	3500	1.6
9#	3.0	4000	1.2



图 3 焊接及取样示意图 Fig.3 Schematic diagram of welding and sampling

2 结果与讨论

2.1 金相组织分析

图 4 为 6[#]试验所得到的焊接接头宏观形貌及显 微组织照片,为本研究中的典型形貌和显微组织。由 图 4a 可见,焊缝整体上呈两头宽,中间窄的上下对 称的双"丁"字型形貌,上下两个部分组织形态差异 明显且彼此之间存在明显的界限。图 4b 为靠近母材 基层焊缝上部焊缝基层区的显微组织,表现为典型的 X65 焊缝组织特征,主要由大量针状铁素体、以及少 量粒状贝氏体与马氏体的混合形态构成;图 4d 为靠 近母材复层的焊缝下部显微组织,主要由垂直于焊缝 中心线生长的粗大的铁素体柱状晶、在铁素体晶界上 析出的羽毛状和条块状的晶间奥氏体、以及部分铁素 体晶粒内部存在的极少的些点状和小岛状的晶内奥 氏体组织组成:图 4c 为靠近母材基层与复层间界面 位置的过渡区组织,表现为基层、复层2种组织交错 混合的状态,其中存在明显的界线,左侧呈奥氏体、 铁素体双相分布的复层特征,右侧则以大量针状铁 素体为主要组成部分,与基层组织形貌特征一致。 焊缝所呈现的这两种截然不同且界限分明的显微组 织特征,印证了在激光穿透焊接的过程中,熔池上 部和下部的液态金属各自进行独立的 Marangoni 对 流,彼此间对流交换较少的流动行为特征,验证了 通过激光穿透焊接实现双金属复合板一次对接成形

的设想。

铁素体 F 和奥氏体 A 两相比例对双相不锈钢的 耐腐蚀性能影响很大, A/F 相比例越接近于 1:1, 即 奥氏体含量越接近于 50%, 耐点蚀性能就越好。在进 行极化曲线测试前, 使用 Curran 试剂对电化学试样 的工作面腐蚀 15 s 左右, 拍摄金相组织照片后, 通过 Photoshop 软件提取焊缝中的奥氏体, 测算 9 个接头 的奥氏体含量, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, 不同 的焊接条件下, 复层区奥氏体含量变化很大, 其中 5[#]和 6[#]两组接头奥氏体含量接近于 50%, 可能具有相 对更好的耐点蚀性能。

2.2 复层合金元素与熔池流动行为分析

采用 EDS 面扫技术对图 4a 中所示的焊缝复层区 进行成分扫描,以复层 DSS2205 中含有的 Fe 和 Cr 两种元素作为标记元素进行统计,根据统计结果绘制 基层厚度对焊缝复层区元素含量变化影响如图 6 所 示。由图 6 可得,随着基层金属厚度由 1.6 mm 下降 至 1.2 mm,复层金属 DSS2205 中的 Cr 元素获得了最 大的保留量,当基层金属厚度继续减小至 0.8 mm 时, Cr 元素含量反而下降,Fe 元素变化趋势与之相反。 结合激光穿透焊接时熔池流动行为特征分析推测,在 进行激光穿透焊接时,熔池顶部的基层液态金属与 底部的复层液态金属分别进行相对独立的 Marangoni 对流,在基层金属与复层金属相互接触的熔池



a 宏观形貌



b 焊缝基层 (500×)







Fig.6 Influence of base metal thickness on Fe and Cr elements in the weld composite layer

中部发生少量对流交换,随着基层金属厚度减小, 熔池中部基层液态金属占比减小,其对复层金属的 稀释作用随之减弱,焊缝复层区因此可以保留更多 的贵金属元素;但当基层金属厚度过小,部分复层 金属将接近顶部液态金属流动速度较快的 Marangoni 对流区甚至包含在其中,与基层金属发生较多 的对流交换,从而导致焊缝复层区贵金属元素保留 量下降。

2.3 基层厚度对接头耐腐蚀性能的影响

图 7 为测得的极化曲线中特征参数示意图,正交 实验中各试验组的测量结果如表 3 所示。通过表 3, 从 9 组复合板焊接接头极化曲线特征参数的平均值 来看,接头自腐蚀电位的平均值为-0.92 V,低于母 材 DSS2205 的-0.77 V,点蚀电位与钝化区宽度分别 为 0.28 V和 1.20 V 均明显低于母材 DSS2205 的 1.41 V和 2.19 V,由此可见,复合板接头抗均匀腐蚀能力 略低于母材 DSS2205,抗点蚀能力和钝化膜稳定性相 比母材均下降明显。其中第 5*和 6*两组实验中的接头 点蚀电位最高,与前面复层侧奥氏体含量测算结果相 符,但即使其奥氏体含量十分接近 50%,其点蚀电位 与母材相比仍有较大差距,分析认为,在焊接冷却过 程中,热作用的变化导致元素分布发生变化,生成了 部分 Cr 和 N 含量低于一次奥氏体,点蚀敏感性高的 二次奥氏体,从而导致 5[#]和 6[#]两组试样耐点蚀性能与 母材差别较大。



图 7 DSS2205 及焊接接头复层侧在 3.5%的 NaCl 溶液中 的极化曲线特征参数示意图

Fig.7 Characteristic parameters of polarization curves of DSS2205 and welded joint composite side in 3.5% NaCl solution

表 3	母材 DSS2205 与焊接接头极化曲线测量结果
Tab.3	Polarization curve measurement results of base
	material DSS2205 and welded joint

实验	自腐蚀电位	点蚀电位	钝化区
组号	$E_{ m cor}/{ m V}$	$E_{ m p}/{ m V}$	宽度/V
母材	-0.77	1.41	2.19
1#	-1.10	0.04	1.13
2#	-0.95	0.35	1.30
3#	-0.92	0.22	1.13
4#	-0.87	0.30	1.17
5#	-0.87	0.62	1.49
6#	-0.91	0.55	1.46
7#	-0.84	0.11	0.96
8#	-0.94	0.15	1.08
9#	-0.86	0.18	1.04
平均值	-0.92	0.28	1.20
极差	0.26	0.58	0.53

基层金属厚度对接头复层耐腐蚀性能的影响如 图 8 所示。图 8a—图 8c 分别展示了基层金属厚度对 自腐蚀电位、点蚀电位以及钝化区宽度的影响。由图 8a 和 8b 可知,随着基层金属厚度的减小,接头复层 的自腐蚀电位与点蚀电位均有所上升,即接头复层的 耐均匀腐蚀性能与耐点蚀性能随基层金属厚度的减 小逐渐升高。由图 8c 可见,接头复层钝化区宽度在 基层金属厚度为 1.6 mm 时取得最大值,在基层厚度





为 0.8 mm 时次之,在基层厚度为 1.2 mm 时最小,即 不同基层厚度下,接头复层钝化膜的稳定性为 1.6 mm> 0.8 mm>1.2 mm。

综上所述,随着基层厚度的减小,复合板激光穿 透焊接接头的综合耐腐蚀性能逐渐提高。在基层金属 厚度为 0.8 mm 时,接头具有最优的耐均匀腐蚀和耐 点蚀性能,并拥有较为稳定的钝化膜。

2.4 正交变量影响对比与工艺优化

表 4 是分别以自腐蚀电位、点蚀电位与钝化区宽 度为评价指标对正交实验进行的直观分析结果。由表 4 可得,从自腐蚀电位 *E*cor来看,基层金属厚度与焊 接速度对于复合板激光焊接接头耐均匀腐蚀能力的 影响相当,均明显大于激光功率;从点蚀电位 *E*_p 与 钝化区宽度 *E*_{cor}-*E*_p 来看,焊接速度的影响最大,激 光功率次之,基层金属厚度最小。由表4中各指标的 极差来看,自腐蚀电位受各变量的影响明显低于点蚀 电位和钝化区宽度,综合来看,对于复合板激光焊接 接头的综合耐腐蚀性能,焊接速度与激光功率的影响 要大于基层厚度的影响,因此在复合板激光穿透焊接 工艺中,在选定合适的基层厚度后,还应该对激光功 率和焊接速度进行优化设计,以得到性能优异的焊接 接头。

表 4 正交实验直观分析结果

Tab.4	Results	of intui	tive ana	lvsis of	orthogonal	experiment
				•/		

		-	_	-			
指标		v	Р	D			
	K_1	-0.99	-0.94	-0.98			
	K_2	-0.88	-0.92	-0.89			
	K_3	-0.88	-0.90	-0.88			
$E_{\rm cor}/V$	极差 R	0.11	0.04	0.11			
	主→次		vDP				
	优化案	v_2 .	P_3D_3 或 v_3P_3	$_{3}D_{3}$			
	K_1	0.20	0.15	0.24			
	K_2	0.49	0.37	0.28			
	K_3	0.15	0.31	0.32			
$E_{\rm p}/V$	极差R	0.34	0.22	0.08			
	主→次		vPD				
	优化案		$v_2 P_2 D_3$				
	K_1	1.19	1.09	1.23			
	K_2	1.38	1.29	1.17			
	K_3	1.03	1.21	1.19			
$E_{\rm cor} - E_{\rm p}/{\rm V}$	极差 R	0.35	0.20	0.06			
	主→次		vPD				
	优化案		$v_2 P_2 D_1$				

根据表 4 中的优化案分析结果,对于焊接速度, 以自腐蚀电位作为指标时,最优的选取方案为水平 2 或水平 3,即 2.5 m/min 或 3.0 m/min,以点蚀电位和 钝化区宽度作为指标时,最优的选取方案都为水平 2, 即 2.5 m/min,对比 3 个指标中的水平 2 与水平 3 的 *K* 值差别发现,水平 2 的点蚀电位和钝化区宽度分别比 水平 3 高 0.35 V 与 0.34 V,因此,综合来看最优案中 焊接速度应选择水平 2,即 2.5 m/min;对于激光功率, 以自腐蚀电位作为指标时,最优的选取方案为水平 3, 即 4000 W,以点蚀电位和钝化区宽度作为指标时, 最优的选取方案都为水平 2,即 3500 W,对比 3 个指 标中的水平 2 与水平 3 的 *K* 值差别发现,水平 3 自腐 蚀电位比水平 2 高 0.02 V,其差值明显小于点蚀电位 和钝化区宽度指标中水平 2 高于水平 3 的 0.06 V 与 0.08 V,因此,综合来看最优案中焊接速度应选择水 平 2,即 3500 W;对于基层厚度,以自腐蚀电位和点 蚀电位作为指标时,最优的选取方案都为水平 3,即 0.8 mm,以钝化区宽度作为指标时,最优的选取方案 为水平 1,即 1.6 mm,对比 3 个指标中的水平 1 与水 平 3 的 K 值差别发现,水平 1 钝化区宽度比水平 3 高 0.03 V,其差值明显小于自腐蚀电位和点蚀电位指 标中水平 3 比水平 1 高的 0.11 V 与 0.07 V,因此,综 合来看最优案中基层厚度应选择 0.8 mm。

综上所述,正交优化的最优方案应为焊接速度 2.5 m/min,激光功率 3500 W,基层厚度 0.8 mm,该 方案恰为正交试验中 5[#]实验组所选用的变量水平组 合,其接头点蚀电位和钝化区宽度分别为 0.62 V 与 1.49 V,均为 9[#]组实验中的最优结果,自腐蚀电位为 -0.87 V,为 9[#]组实验中第 3 高,且与最大值-0.84 V 差值仅为 0.03 V,因此,在焊接速度为 2.5 m/min, 激光功率为 3500 W,基层厚度为 0.8 mm 时,复合板 激光穿透焊接接头有着最优的耐点蚀能力和钝化区 宽度,以及较为良好的耐均匀腐蚀能力,综合耐腐蚀 性能最优。

3 结论

1)对 X65/DSS2205 进行激光穿透焊接,焊缝在 厚度方向出现明显的分层特征,其上部和下部分别为 典型的 X65 和 DSS2205 焊后组织,中部为两种组织 的交错混合状态。

2)随着基层金属厚度由 1.6 mm 下降至 1.2 mm, 复层金属 DSS2205 中的 Cr 元素获得了最大的保留 量,当基层金属厚度继续减小至 0.8 mm 时, Cr 元素 含量反而下降。

3)随着基层厚度的减小,复合板激光穿透焊接 接头的综合耐腐蚀性能逐渐提高。在基层厚度为0.8 mm 时,接头具有最优的耐均匀腐蚀和耐点蚀性能,并拥 有较为稳定的钝化膜。

4) 与基层金属厚度相比,焊接速度与激光功率 对于复合板激光穿透焊接接头耐腐蚀性能影响更大, 在选定基层金属厚度后,应对焊接速度和激光功率进 行优化工艺设计。在焊接速度为 2.5 m/min,激光功 率为 3500 W,基层厚度为 0.8 mm 时,复合板激光穿 透焊接接头具有最优的综合耐腐蚀性能。

参考文献:

- [1] 李发根,魏斌,邵晓东,等. 高腐蚀性油气田用双金属复合管[J]. 油气储运, 2010, 29(5): 359—361.
 LI Fa-gen, WEI Bin, SHAO Xiao-dong, et al. Double Compound Metal Pipe Used in High Corrosion Oil and Gas Fields[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29(5): 359—361.
- [2] 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 Zong-yue, ZHANG Wan-peng, et al. Research Status on Double-metal Composite Pipe at Home and Abroad[J]. Welded Pipe and Tube, 2015, 38(12): 7—12.

- [3] 代儒巧,付现桥,刘阳,等. X65/2205 双金属复合管 焊接研究现状与展望[J]. 焊接技术, 2019, 48(6):1—4.
 DAI Ru-qiao, FU Xian-qiao, LIU Yang, et al. The Research and Development of X65/2205 Bimetal Composite Pipes' Welding[J]. Welding Technology, 2019, 48(6): 1—4.
- [4] 刘海璋,毕宗岳,杨军,等.油气集输用 2205/X65 双 金属冶金复合管材及焊接工艺[J].焊管,2018,41(3): 23—29.
 LIU Hai-zhang, BI Zong-yue, YANG Jun, et al. 2205/X65 Bimetal Metallurgy Composite Pipe and Welding Process for Oil and Gas Gathering and Transferring[J]. Welded Pipe and Tube, 2018, 41(3):
- [5] 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 & Design, 2014, 64: 462–476.

23-29.

- [6] 杨昕,张友星,肖景安,等.双金属复合板设备焊接 技术[J]. 电焊机, 2015, 45(5): 155—159.
 YANG Xin, ZHANG You-xing, XIAO Jing-an, et al. Discussion of Welding Technology of Bimetallic Composite Plate Equipment[J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(5): 155—159.
- [7] CHU Q, MIN Z, LI J, et al. Joining of CP-Ti/Q345 Sheets by Cu-based Filler Metal and Effect on Interface[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 67-76.
- [8] NING J, ZHANG L J, JIANG G C, et al. Narrow Gap Multi-pass Laser Butt Welding of Explosion Welded CP-Ti/Q235B Bimetallic Sheet by Using a Copper Interlayer[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 701: 587—602.
- [9] ZHANG L J, ZHANG J X, GUMENYUK A, et al. Numerical Simulation of Full Penetration Laser Welding of Thick Steel Plate with High Power High Brightness Laser[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(8): 1710—1720.
- [10] ZHANG M J, CHEN G Y, ZHOU Y, et al. Observation of Spatter Formation Mechanisms in High-power Fiber Laser Welding of Thick Plate[J]. Applied Surface Science, 2013, 280: 868–875.
- [11] BACHMANN M, AVILOV V, GUMENYUK A, et al. Numerical Simulation of Full-penetration Laser Beam Welding of Thick Aluminium Plates with Inductive Support[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012, 45(3): 035201.
- [12] YE X H, CHEN X. Three-dimensional Modelling of

Heat Transfer and Fluid Flow in Laser Full-penetration Welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2002, 35(10): 1049—1056.

[13] 苟宁年,张建勋,李振岗.双金属复合板光纤激光焊 接及其接头腐蚀性能分析[J].稀有金属材料与工程, 2016,45(7):1760—1764.
GOU Ning-nian, ZHANG Jian-xun, LI Zhen-gang. Fiber Laser Welding of Bimetallic Plates and Corrosion Property of the Joints[J]. Rare Metal Materials and Engi-

neering, 2016, 45(7): 1760—1764

[14] GOU N N, ZHANG J X, ZHANG L J, et al. Single Pass Fiber Laser Butt Welding of Explosively Welded 2205/X65 Bimetallic Sheets and Study on the Properties of the Welded Joint[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(9/10/11/12): 2539-2549.

[15] 苟宁年,张建勋,李振岗,等.焊接速度对复合板激
 光对接接头腐蚀性能的影响[J].焊接学报,2017,38(7):
 17—20.

GOU Ning-nian, ZHANG Jian-xun, LI Zhen-gang, et al. Effects of Weld Speed on the Corrosion Performance of Bimetallic Sheet Butt Joint Welded by Fiber Laser[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(7): 17–20.

[16] 张建勋, 苟宁年. 层状金属复合材料激光穿透共熔池 焊接研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(17): 16—22. ZHANG Jian-xun, GOU Ning-nian. Dissimilar Metals Co-Pool Laser Penetration Butt Welding of Layered Bimetallic Sheet[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(17): 16—22.