

L415/316L 复合管免充氩焊接接头组织与性能

李立英¹, 王成², 韩彬¹, 蒲江涛²

(1. 中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛 266580;

2. 新疆石油工程建设有限责任公司, 新疆 克拉玛依 834000)

摘 要:对 L415/316L 复合管进行了充氩和免充氩焊接,采用光学显微镜、电子探针对焊缝组织及主要合金元素分布进行了分析,并采用硬度计测定了接头硬度分布。结果表明,是否采用氩气保护对 L415/316L 复合管焊接接头组织、化学成分及硬度没有影响。不锈钢层组织为奥氏体和少量铁素体,过渡层为板条状马氏体和类固溶体奥氏体。过渡层焊缝硬度明显高于碳钢层和不锈钢层。背部采用保护剂焊接可以代替传统的充氩焊接,以提高焊接效率。

关键词:L415/316L 双金属复合管; 免充氩焊接; 显微组织; 硬度

中图分类号: TG444.74

文献标志码: A

文章编号: 1009-6264(2014)01-0125-06

Microstructure and mechanical properties of L415/316L clad pipe joint fabricated by free-argon welding

LI Li-ying¹, WANG Cheng², HAN Bin¹, PU Jiang-tao²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Xinjiang Petrochemical Engineering Construction Co Ltd, Kelamayi 834000, China)

Abstract: L415/316L bimetal lined pipes were welded under free- and argon atmosphere. Microstructure and the distribution of the main alloying elements of the welded joints were analyzed by optical microscope (OM) and electron probe microscope analysis (EPMA), the hardness was measured by sclerometer. The results show that the microstructure, chemical composition and hardness distribution are not affected by the size of bimetal lined pipe and gaseous atmosphere, namely free and argon welding. Microstructure of stainless layer of the welded joint is austenite and a small amount of ferrite, and transition layer of the welded joint consists of both lath martensite and austenite similar to solid solution. The transition layer, hardness is much higher than that of carbon steel layer and stainless layer. The welding efficiency of free-argon welding is more than traditional welding under Ar atmosphere.

Key words: L415/316L bimetal lined pipe; free-argon welding; microstructure; hardness

随世界能源需求日益增长,油气田开采逐渐向深井、高腐蚀环境方向发展,致使生产条件更为苛刻,碳钢和低合金钢油气管材的腐蚀更趋严重^[1-3],可能造成人员伤亡、油气泄漏、环境污染等诸多灾难性后果。因此,目前高腐蚀性油气田在开采作业和油气输送中普遍采用耐蚀合金管道。但由于耐蚀合金价格昂贵,其使用受到经济开采制约^[4]。国外获得的结果表明,双金属复合管是解决腐蚀问题的相对安全和经济的途径之一^[5-7]。复合管兼有内层耐蚀合金优良的耐

腐蚀性能,又有外层碳钢较高的刚度和强度,且价格比整体耐蚀钢管约低 50%,适用于高温、高压环境下输送各种介质,广泛应用于石油、石化等领域^[8-9]。

内衬不锈钢复合钢管的常规焊接采取背面充氩,以防止焊缝根部氧化,但管直径较大且长度较长时,充氩气比较耗时,这在现场安装施工或检修难以进行^[10-12]。背部免充气保护焊接工艺,即焊接前在复合管背部涂上保护焊剂,免去背部充氩过程,大幅度提高焊接生产效率。本文以 L415/316L 复合管为研究对象,比较免充氩保护焊接和传统充氩焊接对复合管焊接接头组织和性能的影响,为免充氩保护焊接复合管提供理论基础,这具有重大的实际应用价值。

1 实验材料与方法

实验材料为 L415/316L 双金属复合管,基层为

收稿日期: 2013-01-24; 修订日期: 2013-04-23

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2013EEQ027); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(14CX02066A)

作者简介: 李立英(1976—),女,副教授,从事管线钢焊接、石油工业材料腐蚀与防护研究,发表论文 10 余篇,电话:0532-86983310,E-mail: llying3456@163.com。

L415 常用管线钢,复层为 316L 奥氏体不锈钢。复合管规格分别为 $\phi 114.3 \times (10+2)$ 和 $\phi 508 \times (16+2)$ 两种,L415 层壁厚分别为 10 mm 和 16 mm,316L 层壁厚均为 2 mm。其化学成分如表 1 所示。

表 1 L415/316L 复合管化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of L415/316L clad pipe
(mass fraction, %)

Material	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Fe
L415	0.14	1.40	0.34	0.001	0.010	0.06	0.03	0.01	Bal.
316L	0.004	1.129	0.640	0.000	0.045	16.316	10.028	2.035	Bal.

复合管采用对接焊,V 型坡口(如图 1)。焊接顺序是封焊、根焊(不锈钢层)、过渡层焊、基层焊(碳钢层)。焊接方法和焊接材料如表 2,焊丝和焊条的化学成分如表 3。为了缩短焊接时高温停留时间,所用

热输入约为常规焊接的 80%。焊后,截取接头的横截面,用 FeCl_3 (10 g) + HCl (24 mL) + 蒸馏水 (96 mL) 进行侵蚀,采用光学显微镜和电子探针分析充氩焊接和免充氩焊接接头的组织以及化学成分变化,用维氏硬度计测定硬度,加载载荷为 10 kg。

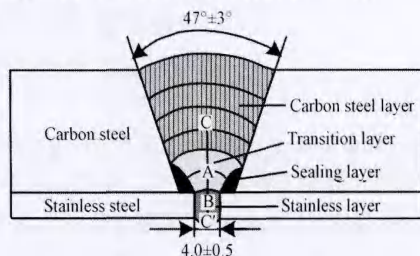


图 1 坡口形式

Fig. 1 Groove shape

表 2 焊接方法和焊接材料

Table 2 Welding process and welding materials

Lined pipe/mm	Welding materials			Welding process	Back protection way
	Sealing/transition	Root	Fill/cap		
$\phi 114.3$	ER309	ER316L	ER5015	GTAW + SMAW	100% Ar free-argon
$\phi 508$	CHM-309L	CHM-316L	E71T8-Ni1J	GMAW + FCAW	100% Ar free-argon

表 3 焊丝和焊条的化学成分(质量分数,%)

Table 3 Composition of welding wires and electrodes
(mass fraction, %)

Material	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	S	P	Fe
ER309	0.12	23.83	13.26	0.75	2.05	0.34	0.03	0.03	Bal.
ER316L	0.02	18.73	12.50	2.36	1.85	0.38	0.03	0.03	Bal.
ER5015	0.10	9.25	0.4	1.03	1.2	1.0	0.04	0.03	Bal.
CHM-309L	0.03	24.0	13.25	0.75	2.07	0.36	0.03	0.03	Bal.
CHM-316L	0.03	18.61	12.48	2.38	1.85	0.37	0.03	0.03	Bal.
E71T8-Ni1J	0.12	0.15	0.95	0.35	1.50	0.80	0.03	0.03	Bal.

2 结果及分析

2.1 接头组织分析

免充氩接头和充氩接头背部焊缝的宏观形貌如图 2 所示。由图 2 可知,充氩接头背部焊缝表面较干净,而免充氩接头背部焊缝覆盖着一层黑色的保护渣,未见氧化现象。图 3 和图 4 分别为规格为 $\phi 508 \times (16+2)$ 和 $\phi 114.3 \times (10+2)$ 充氩和免充氩接头的焊缝显微组织形貌。

由图 3 和图 4 可知,两种规格复合管焊缝的过渡层和不锈钢层的组织形貌相似。从图 3(a)~3(b)和图 4(a)~4(b)可知,过渡层的组织均为板条状马氏体和类固溶体的奥氏体。这归因于,在焊接高温作用

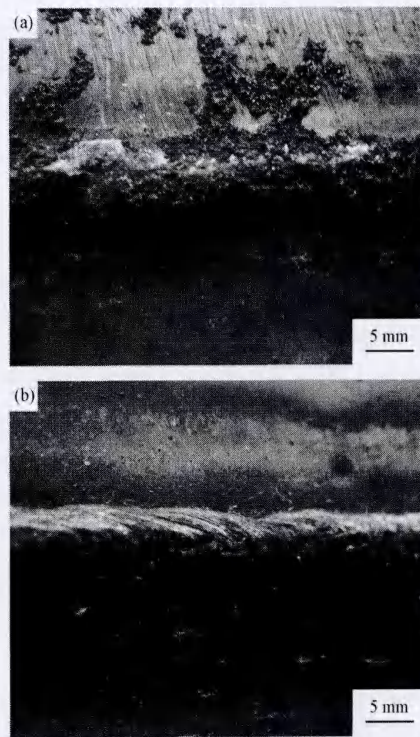


图 2 焊缝背面宏观照片 (a) 免充氩焊接; (b) 充氩焊接

Fig. 2 Macroscopic feature of the back welded joint

(a) free-argon welding; (b) argon welding

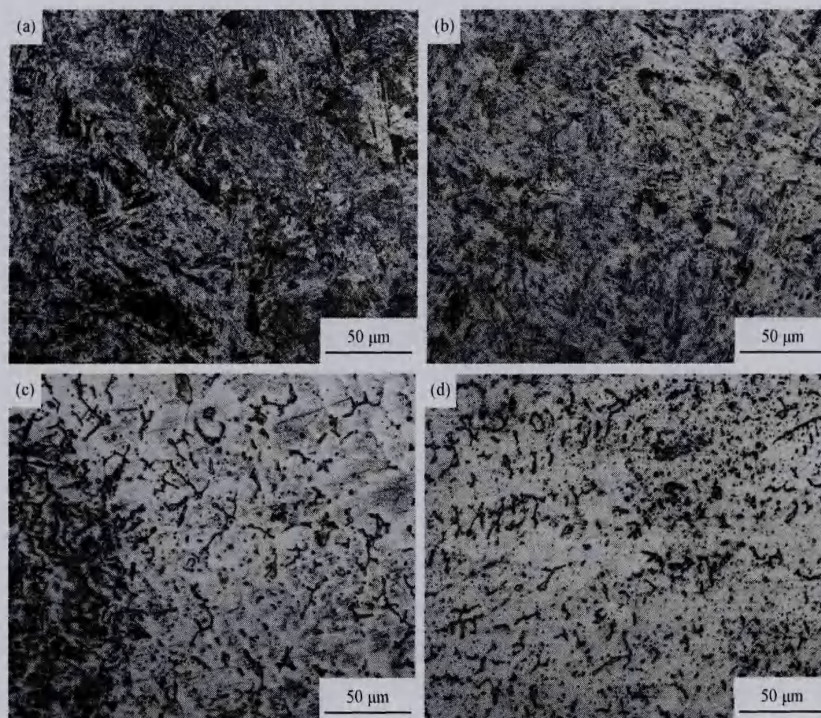


图 3 $\phi 508$ 接头焊缝组织形貌 (a) 免充氩过渡层; (b) 充氩过渡层; (c) 免充氩不锈钢层; (d) 充氩不锈钢层

Fig. 3 Microstructure of welded joint of $\phi 508$ (a) transition layer by free-argon welding; (b) transition layer by argon welding; (c) stainless layer by free-argon welding; (d) stainless layer by argon welding

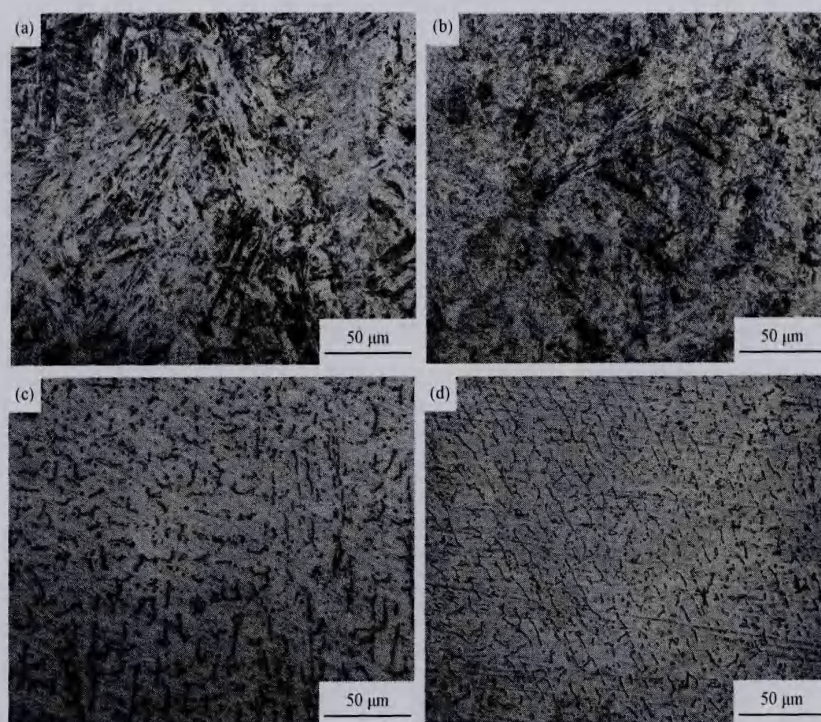


图 4 $\phi 114.3$ 接头焊缝组织形貌 (a) 免充氩过渡层; (b) 充氩过渡层; (c) 免充氩不锈钢层; (d) 充氩不锈钢层

Fig. 4 Microstructure of welded joint of $\phi 114.3$ (a) transition layer by free-argon welding; (b) transition layer by argon welding; (c) stainless layer by free-argon welding; (d) stainless layer by argon welding

下,碳元素从基体碳钢层向过渡层扩散,另外,过渡层的合金元素含量高,两者综合作用使得 C 曲线右移,因而,在焊接冷却过程中过冷奥氏体部分形成马氏体组织,剩余的过冷奥氏体保持不变,为元素含量高的类固溶体。

从图 3(c)~3(d)和图 4(c)~4(d)可知,焊缝不锈钢层主要为奥氏体和少量 δ -铁素体。这归因于焊材含 Cr、Ni 量高,并且通过 C、Mn 元素的固溶强化,焊缝凝固后保留了较多的奥氏体与少量 δ -铁素体。这些铁素体沿原奥氏体边界析出。不锈钢焊缝中 δ -铁素体的含量均小于 5%,这说明接头在高温条件下使用具有良好的耐蚀性。另外,未发现含铬碳化物的析出,这是由于采用了超低碳焊材,使可扩散的

C 元素较少,从而制约了 Cr_{23}C_6 的形成,防止焊缝在使用过程中发生晶间腐蚀现象。

2.2 化学成分分析

焊接接头焊缝的过渡层(图 1 中 A 点)和不锈钢层(图 1 中 B 点)主要合金元素的含量如表 4 所示。由表 4 可知,两种规格复合管接头焊缝各层的主要元素含量基本一致。与相应层所用焊接材料(表 3)相比,过渡层的合金元素含量明显降低,表明基体碳钢层对过渡层合金元素有明显的稀释作用;不锈钢层的合金元素含量没有发生明显变化,表明过渡层对复层不锈钢层焊缝起到了较好的隔离作用,保证了不锈钢焊缝的合金元素含量,从而使焊缝保持具有良好的耐蚀性能。

表 4 焊缝化学成分(质量分数,%)

Table 4 Composition of welded joints (mass fraction, %)

Element	Free-argon welding ($\phi 508$)		Argon welding ($\phi 508$)		Free-argon welding ($\phi 114.3$)		Argon welding ($\phi 114.3$)	
	Transition layer	Stainless layer	Transition layer	Stainless layer	Transition layer	Stainless layer	Transition layer	Stainless layer
Cr	6.398	21.337	9.359	12.729	2.515	17.749	4.490	19.298
Ni	4.613	13.726	6.268	7.703	1.481	11.531	1.890	11.768
Mn	1.616	2.515	1.849	1.733	1.859	2.020	1.416	2.095
Mo	0.020	0.247	0.090	1.198	0.126	2.101	0.019	2.238

对元素 C、Cr 及 Ni 沿焊缝中心从碳钢层到不锈钢层的分布进行了线扫描,扫描位置如图 1C-C'线所示,结果如图 5 所示。由图 5 可知,两种规格复合管焊缝中的 C 以及合金元素 Cr、Ni 分布规律相似。从碳钢基体到不锈钢层,C 含量基本不变,曲线上存在几个较高的碳含量峰,可能是 C 与碳化物形成元素 Cr 形成了金属化合物,此金属化合物降低了碳的活度,阻碍碳钢层中的碳元素向不锈钢层焊缝中的扩散,这进一步说明了过渡层对不锈钢焊缝起到了有效的隔离作用。合金元素 Cr、Ni 在碳钢层中含量较低,而在过渡层和不锈钢层中含量较高,且过渡层和不锈钢层中 Cr 元素含量变化较大,Ni 元素含量变化较小,表明过渡层 Cr、Ni 元素可有效弥补不锈钢 Cr、Ni 元素的烧损,从而保证不锈钢层主要合金元素 Cr、Ni 的含量。

2.3 接头硬度分析

沿水平方向测定了焊接接头碳钢层、过渡层和不锈钢层的硬度分布特征,如图 6 所示。由图 6 可知,4 种接头的硬度变化趋势基本相同。碳钢层的最高硬度值出现在热影响区,最大可达 270 HV,这是因为热影响区是组织和化学成分不均匀的区域。其焊缝硬度均高于母材,从而能够保证接头高强度。过渡层硬

度均高于相对应的热影响区和母材,且其焊缝硬度最大值接近 480 HV,明显高于碳钢层及不锈钢层的焊缝硬度。这归因于,一方面,与该层形成的板条状马氏体和含有大量合金元素的类固溶体的奥氏体密切相关。另一方面,可用“ σ 相脆化”解释,过渡层的铁素体含量明显高于不锈钢层,铁素体富含 Cr 且利于 Cr 的扩散,该层同时存在铁素体形成元素 Cr、Mo,加速了 σ 相沿晶界析出,而 σ 相硬度高达 940 HV 以上。与过渡层类似,不锈钢层焊缝的硬度均高于相对应的热影响区和母材,在热影响区内无淬硬现象,表明焊接工艺合理,焊缝组织与母材相似,过渡层起到了较好的隔离作用,未见碳含量明显增加。

3 讨论

免充氩焊接保护剂具有操作方便灵活、提高焊接生产效率等优点,在不锈钢、耐热钢等需要充氩气保护的金属焊接方面具有广阔的应用前景。就图 2 所示的宏观形貌而言,免充氩焊接保护剂焊后在根部焊缝背面形成一层均匀的黑色保护膜,去掉保护膜,发现焊缝干净且未有氧化痕迹,表面质量甚至比充氩焊缝好,这充分表明免充氩焊接保护剂能有效防止根部焊缝氧化。从图 3(c)~3(d)和图 4(c)~4(d)所示

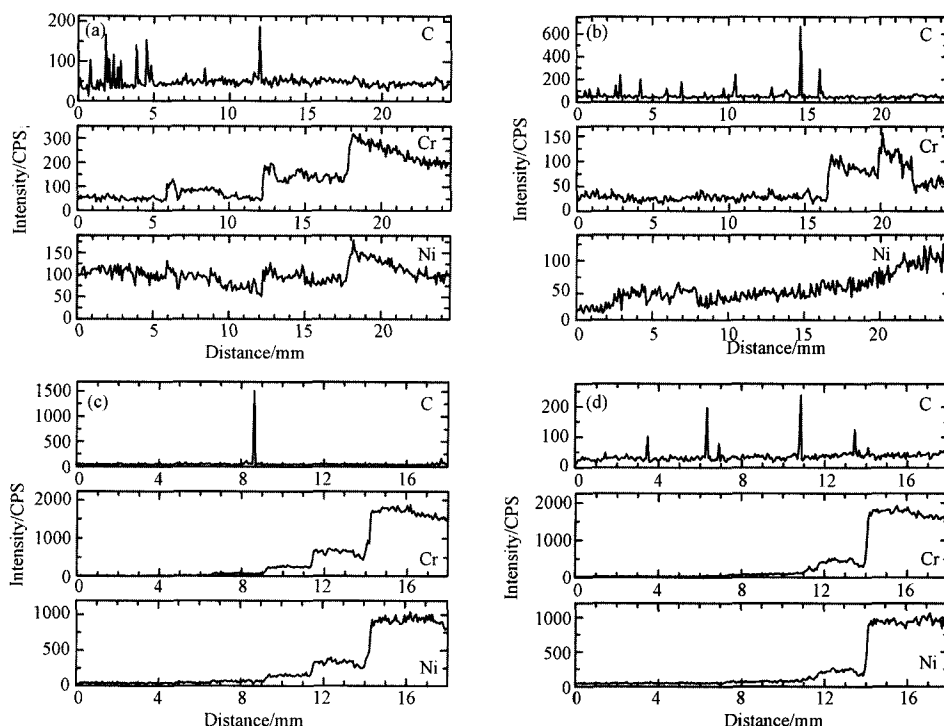


图5 焊缝化学成分分布 (a) 免充氩($\phi 508$); (b) 充氩($\phi 508$); (c) 免充氩($\phi 114.3$); (d) 充氩($\phi 114.3$)

Fig. 5 Composition distribution of weld joint (a) free-argon welding ($\phi 508$); (b) argon welding ($\phi 508$); (c) free-argon welding ($\phi 114.3$); (d) argon welding ($\phi 114.3$)

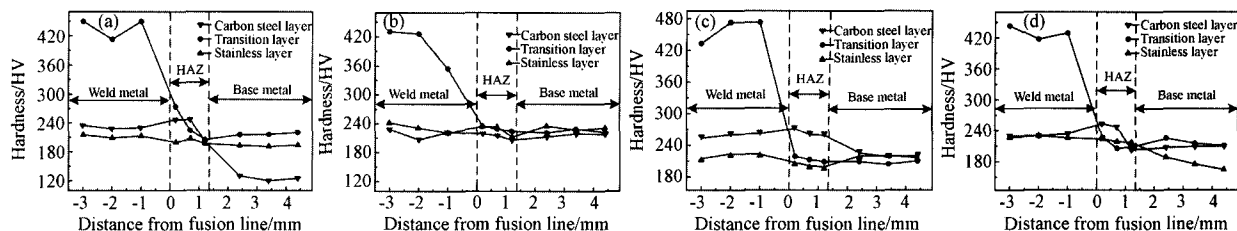


图6 接头硬度分布 (a) 免充氩($\phi 508$); (b) 充氩($\phi 508$); (c) 免充氩($\phi 114.3$); (d) 充氩($\phi 114.3$)

Fig. 6 Hardness distribution of the welded joint (a) free-argon welding ($\phi 508$); (b) argon welding ($\phi 508$); (c) free-argon welding ($\phi 114.3$); (d) argon welding ($\phi 114.3$)

的微观组织观察可知,免充氩和充氩焊接焊缝不锈钢层的组织相似,均为奥氏体和少量 δ -铁素体。由表4可知, $\phi 114.3$ 免充氩和充氩接头焊缝不锈钢层的Cr、Ni含量相差不大,而 $\phi 508$ 接头两种焊缝不锈钢层的Cr、Ni含量相差较大,这可能与焊工手工操作的工艺参数不稳定有关,但均能使根部不锈钢层焊缝保持良好的耐蚀性能。从硬度分析(图6)可知,免充氩焊接不锈钢层的硬度略低于充氩焊接的硬度,但相差不大。总之,免充氩焊接保护剂在提高焊接生产效率的同时,能有效防止根部焊缝氧化。

4 结论

1) 管径、背部是否采用氩气保护对L415/316L复合管焊接接头的组织和硬度没有影响,不锈钢层焊缝组织为奥氏体加铁素体,过渡层为板条状马氏体和类固溶体的奥氏体,焊缝过渡层的硬度明显高于碳钢层和不锈钢层硬度;

2) L415/316L复合管接头的过渡层对不锈钢层焊缝起到了较好的隔离作用,保证了不锈钢层焊缝的合金元素含量,因此,免充氩焊接工艺满足L415/316L复合管应用要求。

参考文献

- [1] Kermani M B, Morshed A. Carbon dioxide corrosion in oil and gas production-a compendium[J]. Corrosion, 2003, 59(8): 659-683.
- [2] 路民旭, 白真权, 赵新伟, 等. 油气采集储运中的腐蚀现状及典型案例[J]. 腐蚀与防护, 2002, 23(3): 105-113.
LU Min-xu, BAI Zhen-quan, ZHAO Xin-wei, et al. Actuality and typical cases for corrosion in the process of extraction, gathering, storage and transmission for oil and gas[J]. Corrosion & protection, 2002, 23(3): 105-113.
- [3] Song F M. A comprehensive model for predicting CO₂ corrosion rate in oil and gas production and transportation systems[J]. Electrochimica Acta, 2010, 55(3): 689-700.
- [4] 曾德智, 杜清松, 谷 坛, 等. 双金属复合管防腐技术研究进展[J]. 油气田地面工程, 2008, 27(12): 64-65.
ZENG De-zhi, DU Qing-song, GU Tan, et al. Advance in research on anti-corrosion technology of the butting bimetal pipe[J]. Oil-gas Field Surface Engineering, 2008, 27(12): 64-65.
- [5] Spence M A, Roscoe C V. Bi-metal CRA-lined pipe employed for north sea field development[J]. Oil & Gas Journal, 1999, 97(18): 80-88.
- [6] 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.
- [7] Torbati A M, Miranda R M, Quintino L, et al. Optimization procedures for GMAW of bimetal pipes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(6): 1112-1116.
- [8] 齐敬春, 王明鹏. 碳钢内衬不锈钢复合管材的特性及应用[J]. 中国建材科技, 2005, (3): 23-25.
QI Jing-chun, WANG Ming-peng. Characteristic and application of the pipe that carbon steel inside lining stainless steel compounds[J]. China Building Materials Science & Technology, 2005, (3): 23-25.
- [9] 钱乐中. 油气输送用耐腐蚀双金属复合管[J]. 特殊钢, 2007, 28(4): 42-44.
QIAN Le-zhong. Anti-corrosion bimetallic clad pipe for oil and gas transfer[J]. Special Steel, 2007, 28(4): 42-44.
- [10] 吕世雄, 王 廷, 冯吉才. 20G/316L 双金属复合管弧焊接头组织与性能[J]. 焊接学报, 2009, 30(4): 93-96.
LV Shi-xiong, WANG Ting, FENG Ji-cai. Microstructure and mechanical properties of TIG welded 20G/316L clad pipe joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(4): 93-96.
- [11] 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.
- [12] 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.
XU Ai-hua, YUAN Zhen-gang, YANG Guang, et al. Welding technology of bimetal clad pipe[J]. Natural Gas and Oil, 2010, 28(6): 22-28.