

316L/X65 复合管弧焊工艺研究*

黄本生, 陈 鹏, 张荣副, 龚成龙, 苑 评, 代 丽, 胡梦笛

(西南石油大学材料科学与工程学院, 成都 610500)

摘要 采用手工钨极氩弧焊和电弧焊实现了 316L/X65 双合金复合管的对接焊接。为了研究复合管的焊接工艺, 对焊接接头进行了硬度、拉伸和冲击测试, 利用光学显微镜、扫描电镜和能谱仪分析了接头的微观结构和成分特点, 并对接头进行了电化学实验。结果表明: 复合管焊缝由碳钢层、扩散层、过渡层和不锈钢层组成, 碳钢层主要为针状铁素体, 扩散层出现了马氏体组织, 过渡层和不锈钢层焊缝中铁素体呈骨架或蠕虫状分布在奥氏体晶界; 本实验焊接工艺下, 覆层未受到碳钢层的稀释, 化学成分与母材基本一致, 但耐蚀性略有降低; 焊接接头各项力学性能良好。

关键词 316L/X65 复合管 焊接工艺 显微组织 性能

中图分类号: TG457.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11896/j.issn.1005-023X.2016.06.024

Study on Arc Welding Technology of 316L/X65 Clad Pipe

HUANG Bensheng, CHEN Peng, ZHANG Rongfu, GONG Chenglong,
YUAN Ping, DAI Li, HU Mengdi

(School of Materials Science and Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500)

Abstract 316L/X65 clad pipe was welded by GTAW and SMAW. In order to analyze the welding technology of clad pipe, hardness, tensile strength and impact toughness test of 316L/X65 weld joints were carried out. Microstructure and chemical composition of weld joints were investigated by microscope, SEM, EDS. The corrosion resistance of weld joints was also researched by electrochemical experiment. The results show that the welding seam of clad pipe consists of carbon steel layer, diffusion layer, transition layer and stainless steel layer. The carbon steel layer is characterized by Acicular Ferrite, and diffusion layer is mainly consisted by Martensite. Ferrite is distributed on Austenite boundary like worm or skeleton in transition layer and stainless steel layer. Under the experiment parameters, the stainless steel layer welding seam is influenced little by carbon steel layer, and it has the same chemical composition with base material, but the corrosion resistance of weld seam decrease slightly. Weld joints show fine mechanical properties.

Key words 316L/X65 clad pipe, welding technology, microstructure, properties

0 引言

随着我国大多数油田进入了中后期开采阶段, 油气管道的服役环境中往往含有大量 H_2S 、 CO_2 、 Cl^- 等腐蚀介质, 因此所用管材除了要求较高的强度和刚度外, 还需要具有良好的抗腐蚀性能^[1,2]。因此, 碳钢内衬不锈钢的双合金复合管应运而生, 其同时具有碳钢的高强度和不锈钢优异的耐蚀性, 并且成本相对较低而备受青睐, 具有广阔的应用前景^[3-6]。国外研究结果表明, 复合管是解决油气田管道腐蚀问题最安全和经济的途径之一^[7-10]。国内的复合管技术起步较晚, 由于复合管结构特殊, 现场焊接时易出现跑边、无法焊透、开裂和焊后易被腐蚀等缺陷, 严重限制了复合管的推广^[11-13]。虽然随着国内学者们的不断研究, 取得了一些重大的技术突破, 并且双合金复合管也已经逐渐在我国部分油田上得到了

应用, 但其焊接技术仍不成熟, 实际使用时很难达到预期效果^[6,11,14]。因此, 本课题组在前人工作的基础上^[15-20], 研究了 316L/X65 双合金复合管的焊接问题, 制定了焊接工艺, 通过对复合管焊接接头组织与性能的研究评定了实验焊接工艺的可行性, 为复合管焊接工艺的不断突破和复合管的应用提供理论和实验指导。

1 实验

1.1 实验材料

实验材料为 316L/X65 双合金复合管, 其中基层为 X65 钢(0.08C、0.03Cr、0.03Ni、1.56Mn、0.03Mo、0.01Si、0.018P、0.01S, 其他), 覆层采用 316L 不锈钢(0.03C、18Cr、15Ni、2Mn、0.75Si、0.04P、0.03S, 其他)。双合金管的规格为 $\Phi 219\text{ mm} \times 12\text{ mm}$, 覆层 3 mm, 基层 9 mm。复合管基层和

* 西南石油大学大学生课外开放性重点实验项目(KSZ14119); 四川省大学生创新创业训练项目(201510615061)

黄本生: 男, 1969 年生, 博士, 教授, 主要从事材料加工、材料表面工程的教学与科研工作 E-mail: hbslxp@163.com 陈鹏: 男, 1990 年生, 硕士生, 主要从事材料加工方面的研究 E-mail: 867674533@qq.com

覆层材料的成分差异较大,因此焊接材料的选择尤为重要,应从母材的力学性能出发,选择合适的焊材以保证焊缝金属足够高的强度、硬度、塑性、韧性和耐蚀性能;此外,由于过渡层是元素扩散迁移的主要通道,为了避免基层对覆层的稀释,需严格控制过渡层的焊接,选择适宜的焊材。因此,过渡层焊接采用镍铬含量比覆层更高的 ER309 焊丝;覆层焊接选用与母材成分相近的 ER316L 焊丝;而根据等强匹配的原则,基层选用 E8018-C3 焊条进行焊接,焊材的成分如表 1 所示。

表 1 焊材化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of welding material
(mass fraction, %)

焊材	C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	S	余量
ER316L	0.02	18.37	12.50	1.85	2.36	0.38	0.03	其他
ER309	0.06	23.83	13.13	1.63	0.75	0.42	0.03	其他
E8018-C3	0.12	0.15	0.95	1.25	0.35	0.60	0.03	其他

1.2 焊接工艺

由于实验用双合金管为机械复合产品,对焊接质量要求较高,应选择较小的焊接电流以避免高热输入下焊接热应力引起复合管结合面开裂,实验焊接工艺参数见表 2。为了防止碳钢 X65 对 316L 不锈钢的稀释,引起焊缝耐蚀性降低,实验采用了如图 1 所示的改进的钝边 V 形坡口。

1.3 测试方法

分别用王水、4% 的硝酸酒精作为不锈钢和碳钢的金相浸蚀剂,利用 XTL-500 光学显微镜观察显微组织;利用 IN-CA Energy350 能谱仪进行成分分析;利用 HVS-1000 显微硬度计进行硬度测试;利用 ZBC2302-D 型冲击试验机

WDW-1000 万能试验机分别进行冲击测试和拉伸测试;利用 EV016 扫描电镜(SEM)进行形貌观察;常温常压下,在 PG-STAT 302N 电化学工作站上进行电化学试验,腐蚀介质为 3%NaCl 溶液。

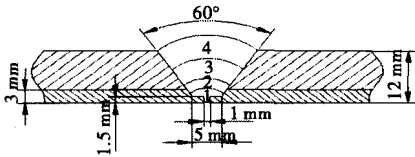


图 1 坡口设计

Fig. 1 Schematic figures of groove design

2 结果与分析

2.1 成分测试

不锈钢层焊缝和母材的 EDS 测试结果如表 3(质量分数/%)所示,EDS 图谱见图 2。由表 3 可知,不锈钢层焊缝中各主要合金元素的含量与母材基本一致,元素含量的差异较小,证明焊接过程中覆层受到基层的稀释较小,过渡层焊缝起到了很好的隔离作用,从化学成分上保证了焊缝与母材一致的抗腐蚀性能。此外,不锈钢层母材和焊缝的 Cr 含量在 19%左右,即 Cr 含量在 12.5%~25%之间,根据 Tomman 理论的 n/8 定律,已达 18-8 不锈钢同一电极电位区,因此焊缝和母材具有优异的抗腐蚀性能。由于焊接冶金的特点焊缝中各点化学成分分布的不均匀性较大,因此,为了减小 EDS 点测试的局限所带来的误差,实验在不锈钢层熔合线附近进行了 EDS 线扫描,以表征不锈钢层焊接接头的化学成分分布情况,EDS 线扫描测试图谱如图 3 所示,图中竖线代表熔合线位置。

表 2 焊接参数

Table 2 Welding parameters

焊接层次	焊接方法	焊材	焊材直径/mm	焊接电压/V	焊接电流/A	焊接速度/(cm·min ⁻¹)	极性
打底	GTAW	ER316L	Φ1.2	12~15	120~140	6~7	DC-
过渡层	GTAW	ER309	Φ2.0	12~15	110~130	6~7	DC-
填充	SMAW	E8018-C3	Φ3.2	24~27	120~150	8~10	DC-
盖面	SMAW	E8018-C3	Φ3.2	24~27	120~150	7~9	DC-

由图 3 可知,不锈钢层熔合线两侧的 Cr、Ni、Mn 等重要合金元素的含量变化较小,即不锈钢层母材与焊缝合金元素的平均含量基本一致,证明本实验焊接工艺下,在化学成分方面不锈钢焊缝具有与母材相同的良好抗腐蚀性能。

表 3 化学成分分析

Table 3 Analysis of chemical component

位置	Ni K	Cr K	Mn K	Si K	Fe K	S K
焊缝	10.91	19.43	1.78	0.58	65.11	0.1
母材	12.33	18.59	1.87	0.67	65.79	0.12

2.2 显微组织

碳钢层显微组织如图 4 所示。由图 4 可知,图 4(a)盖面焊的焊缝组织主要为针状铁素体,组织均匀细小,保证了焊缝较高的强度和韧性;图 4(b)中焊缝与热影响区之间的熔合区可清楚分辨,熔合区由较粗大的等轴晶组成;图 4(c)中热

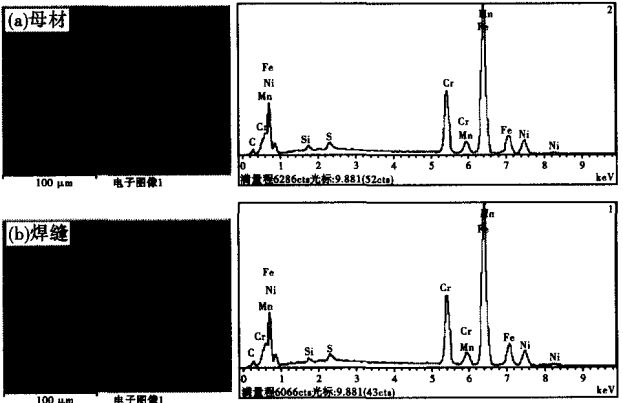


图 2 不锈钢层的 EDS 图谱

Fig. 2 The EDS images of stainless steel layer

影响区组织主要为铁素体+珠光体,图 4(d)中碳钢母材主要

由铁素体和少量粒状贝氏体组成;在焊接热循环作用下,碳钢热影响区组织分布不均匀,组织相对粗大。与盖面层焊缝组织相似,图 4(e)中填充层焊缝组织主要为针状铁素体,但是其组织更为细小、均匀,这是由于在多层焊焊接过程中,后续焊接过程相当于对之前的焊接进行了热处理,利于焊缝组织趋于均匀、细小。

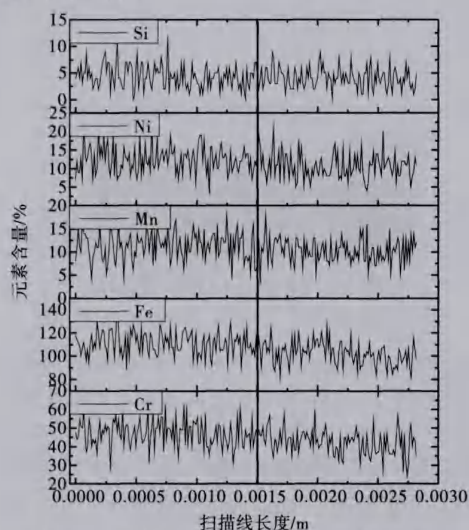


图 3 不锈钢层焊接接头的 EDS 线扫描

Fig. 3 EDS line scanning of stainless steel layer welding joints

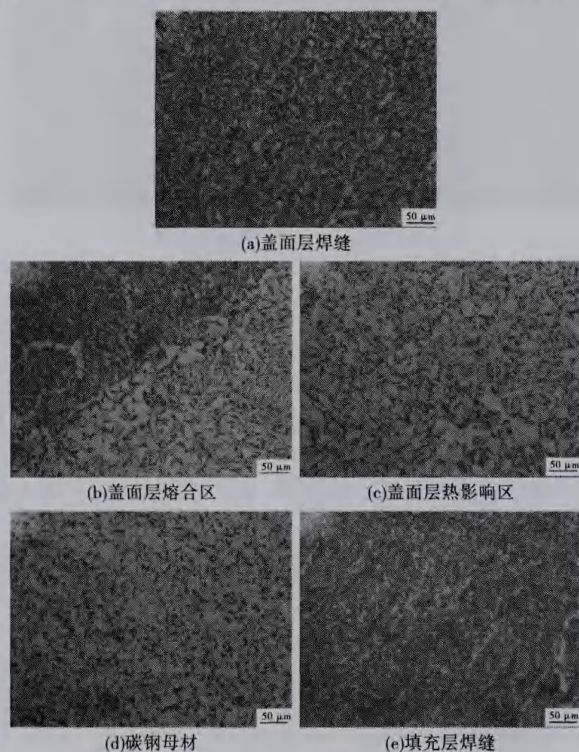


图 4 碳钢层显微组织

Fig. 4 Microstructure of carbon steel layer

扩散层显微组织如图 5 所示。图 5 中上部深色区域为扩散层,下部为过渡层,扩散层是过渡层之上介于过渡层和填充层之间很小的区域。由于过渡层和填充层的合金元素

含量相差较大,一方面,由于在进行填充焊时过渡层焊缝顶部发生重熔,并与填充层焊缝底部元素发生混合,导致这一区域的合金元素含量高于填充层而低于过渡层;另一方面,在焊接热作用下过渡层和填充层的元素均会向该区域发生扩散,故导致扩散层合金元素含量较高而易出现马氏体组织。

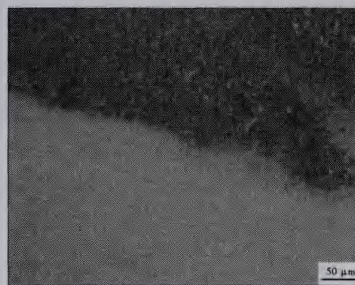


图 5 扩散层焊缝显微组织

Fig. 5 Microstructure of fusion layer welding seam

过渡层显微组织如图 6 所示。图 6(a)中过渡层焊缝组织主要为奥氏体+铁素体,且铁素体呈骨架或蠕虫状分布在奥氏体上。图 6(b)中过渡层焊缝与热影响区的交界线不明显,不能清晰地观察到熔合区,这是由于手工钨极氩弧焊接电流小,热输入小,热影响区晶粒变化不明显;同时由于过渡层焊缝 Cr、Ni 含量较高,而热影响区基体 X65 碳钢合金元素含量较低,两者元素浓度差异大,多层焊接过程中易发生元素扩散和迁移,熔合区附近的 Cr、Ni 等合金元素含量相对母材升高,因此采用硝酸酒精进行金相腐蚀后碳钢基体组织清晰可见,过渡层受到腐蚀较小,组织不可分辨,而发生元素迁移的区域由于耐蚀性增强受到的腐蚀略低于母材,因而组织模糊不清,过渡层热影响区与焊缝的界限不明显。

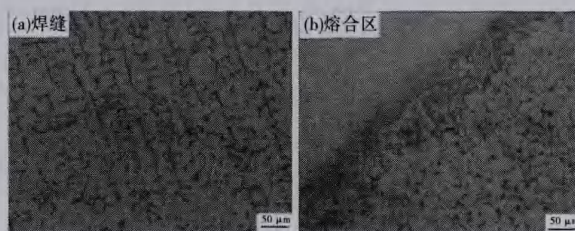


图 6 过渡层显微组织

Fig. 6 Microstructure of transition layer

不锈钢层显微组织如图 7 所示。图 7(a)中不锈钢层焊缝为奥氏体+铁素体,铁素体以蠕虫状的形式分布在奥氏体晶界,由于焊接热输入小、焊缝合金元素含量高且含碳量低等,焊缝组织细小、分布均匀,保证了其良好的力学性能和抗腐蚀能力。图 7(b)中不锈钢层母材为典型的奥氏体组织,其受到的焊接热影响较小。焊缝在凝固过程中,随温度的下降液态熔池中首先析出富 Cr、贫 Ni 的铁素体晶核并快速长大;当温度进入 γ 相区后发生 $\delta \rightarrow \gamma$ 转变,铁素体晶粒中成分接近平均合金成分的部分通过固态相变转变为 γ ,而原来富 Cr、贫 Ni 的铁素体晶核则不发生转变形成骨架或蠕虫状铁素体,这种 δ 铁素体非常稳定,能打乱粗大奥氏体晶粒的方向

性,从而降低晶间偏析,有效提高焊缝抗裂和抗晶间腐蚀能力,因此不锈钢层和过渡层焊缝中 $\gamma+\delta$ 双相组织可保证复合管覆层和过渡层焊缝良好的抗腐蚀性能。

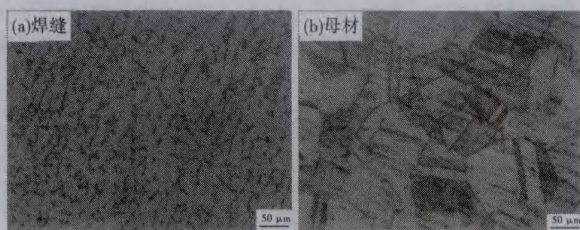


图 7 不锈钢层显微组织

Fig. 7 Microstructure of stainless steel layer

2.3 力学性能

2.3.1 硬度

焊接接头的硬度分布如图 8 所示。由图 8 可知,盖面层和填充层焊接头的硬度变化情况基本一致,焊缝硬度大于母材,这是由于焊缝组织更加均匀细小,基体强度、硬度更高,而碳钢层硬度的峰值出现在熔合线附近,可能是由于在这一区域形成了渗碳层。填充层焊缝硬度大于盖面层,这是由于进行盖面焊时,相当于对填充焊焊缝进行了焊后热处理,使得填充层焊缝组织比盖面层焊缝更为均匀、细小,故填充层焊缝的硬度更高。

焊接接头的最大硬度在扩散层焊缝获得,硬度最高约 480HV,相比其他区域显著增大,这是由于在扩散层焊缝形成了马氏体。

过渡层和不锈钢层焊缝、热影响区、母材的硬度变化较小,硬度值相对稳定,一方面由于钨极氩弧焊接热输入小,组织受到影响较小,硬度变化小;另一方面,覆层焊材的化学成分与母材相近,焊接过程可看作无丝自熔焊,故焊接热循环下接头的组织与性能变化较小,保证了焊接接头足够高的强度和硬度。

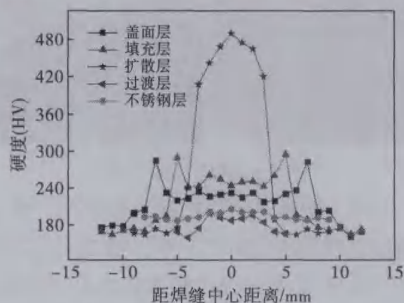


图 8 焊接接头的硬度分布

Fig. 8 The hardness distribution of welding joints

2.3.2 抗拉强度

对复合管焊接接头进行了拉伸试验,拉伸断裂试样见图 9,拉伸测试结果见表 4。由图 9 可知,拉伸断口均发生在热影响区且远离焊缝,证明复合管焊缝具有足够高的抗拉伸断裂能力,断裂发生在热影响区是由于热影响区组织和成分分布复杂、不均匀,晶粒粗大等造成;而焊缝组织更为均匀细小,含缺陷也少,故不易被拉断。由表 4 可知,焊接接头的最

大抗拉强度达 518 MPa,平均抗拉强度为 511 MPa;最大屈服强度达 223 MPa,平均屈服强度为 216.7 MPa,证明复合管焊接接头具有较高的强度和韧性,抗拉伸断裂能力良好。

表 4 抗拉强度

Table 4 Tensile strength

试样编号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断口位置
1#	510	219	热影响区
2#	505	223	
3#	518	208	



图 9 焊接接头拉伸断裂试样

Fig. 9 The specimen of tensile fracture of welding joints

对拉伸断口进行扫描电镜形貌分析,断口形貌如图 10 所示。通常情况下拉伸断口中韧窝越多,深度越深,则塑性越好。由图 10 可知,拉伸断口分布有大量的韧窝和少量的孔坑,这是典型微孔聚集型断裂的特征;并且拉伸断口中韧窝和孔坑的深度较深,证明焊缝的韧性较好。故在本实验焊接工艺下,复合管焊接接头具有良好的抗冲击断裂能力。

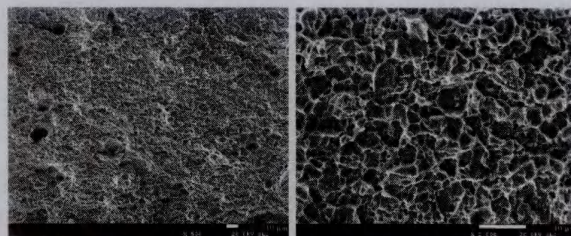


图 10 焊接接头拉伸断口微观形貌

Fig. 10 Tensile fracture micro-morphology of welding joints

2.3.3 冲击韧性

冲击测试结果见表 5。由表 5 可知,焊缝和热影响区的冲击功均较大,常温下平均冲击功分别达到了 155.12 J 和 116.72 J,证明复合管接头的冲击韧性较好。焊缝的冲击功大于热影响区,这主要是由焊缝和热影响区的微观结构决定,热影响区组织形态分布复杂、不均匀、晶粒粗大、含缺陷较多,故冲击韧性更低。与 HAZ 相比,焊缝冲击功数值更加稳定、变化幅度较小,这是因为焊缝组织形态稳定,晶粒细小,分布均匀。

表 5 冲击测试结果

Table 5 Results of impact test

试样编号	取样位置	冲击功单值/J	冲击功平均值/J
1#	焊缝	150.13	155.12
2#		156.01	
3#		159.22	
4#	热影响区	130.54	116.72
5#		110.38	
6#		109.23	

2.4 电化学性能

不锈钢层焊缝和母材的极化曲线如图 11 所示。由图 11 可知,焊缝和母材的阴极极化曲线的形状相似,说明阴极反应机理基本一致;焊缝和母材均有明显的 Tafel 区,说明阴极反应受活化控制。阳极极化曲线均出现了明显的钝化现象,且母材的维钝电流密度和维钝电位均较焊缝更小,说明母材更容易发生钝化,表面更容易形成致密的钝化膜保护阳极不受腐蚀,受腐蚀倾向更小,因此,母材的抗腐蚀性能更好,但相差较小。由于在进行覆层焊接时,选用了与不锈钢母材成分相近的焊丝,焊接热输入较小,同时在上述实验结果中证明覆层焊缝与母材的化学成分基本一致,焊缝的显微组织良好、焊接缺陷少,故耐蚀性极好。

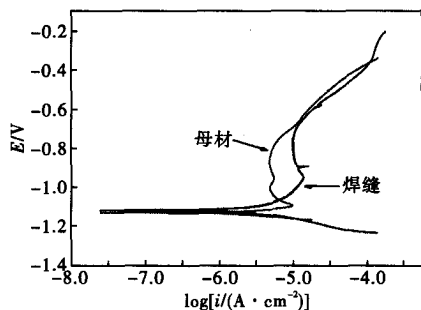


图 11 不锈钢层极化曲线

Fig. 11 Polarization curve in stainless steel layer

3 结论

(1) 在本实验焊接工艺下,获得了组织和力学性能良好的复合管焊接接头;覆层焊缝合金元素含量与母材基本一致,而不锈钢层焊缝的抗腐蚀性能略有降低。

(2) 碳钢层焊缝组织为针状铁素体,扩散层出现了马氏体组织,过渡层和不锈钢层焊缝中铁素体以骨架或蠕虫状分布在奥氏体晶界。

(3) 扩散层硬度值最高,达到了 480HV,其余各层焊缝的硬度均较母材略有增大;焊接接头的强度和冲击功均较高,拉伸断裂表现出塑性断裂特征。

参考文献

- Gu Jianzhong. Use and production method of bimetallic clad steel tubes overseas[J]. Shanghai Metals, 2000, 22(4): 16(in Chinese)
顾建忠. 国外双层金属复合钢管的用途及生产方法[J]. 上海金属, 2000, 22(4): 16
- Sun Yulu, Bai Zhenquan, Zhang Guochao, et al. Research status on anticorrosion properties of bimetallic composite tubes in oil and gas field[J]. Total Corrosion Control, 2011, 25(5): 10(in Chinese)
孙育禄, 白真权, 张国超, 等. 油气田防腐双金属复合管研究现状[J]. 全面腐蚀控制, 2011, 25(5): 10
- Wei Shicheng, Han Qing, Wei Xujun. Current status of compound pipes research[J]. Mater Rev, 2003, 17(9): 64(in Chinese)
魏世丞, 韩庆, 魏绪钧. 复合材料管研究现状[J]. 材料导报, 2003, 17(9): 64
- Grishabar R B, Sergueeva A V, Mishra R S, et al. Lami-nated metal composites-high temperature deformation behavior[J]. Mater Sci

- Eng A, 2005, 403(1-2): 17
- Liu Xiaotao, Zhang Yan'an, Cui Jianzhong. Technology of clad metal production and its latest progress[J]. Mater Rev, 2002, 16(7): 41(in Chinese)
刘晓涛, 张延安, 崔建忠. 层状金属复合材料生产工艺及其新进展[J]. 材料导报, 2002, 16(7): 41
- Zeng Dezhi, Du Qingsong, Gu Tan, et al. Research progress of double metal composite pipe anticorrosion technology[J]. Oil Gas field Surf Eng, 2008, 27(12): 64(in Chinese)
曾得智, 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
- Spence M A, Roscoe C V. Bi-metal CRA-lined pipe employed for north sea field development[J]. Oil Gas J, 1999, 97(17): 20
- Chen W C, Petersen C W. Corrosion performance of welded CRA-lined pipe employed for north sea field development[J]. SPE Production Eng, 1992, 7(4): 375
- Torbati A M, Miranda R M, Quintio L, et al. Optimization procedures for GMAW of bimetal pepis[J]. J Mater Processing Technol, 2011, 211(6): 1112
- Qian Lezhong. Anti-corrosion bimetallic clad pipe for oil and gas transfer[J]. Special Steel, 2007, 28(4): 42(in Chinese)
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
- Li Fagen, Wei Bin, Hao Xiaodong, et al. Double metal composite pipe for high corrosive oil and gas field[J]. Oil Gas Storage Transportation, 2010, 29(5): 359(in Chinese)
李发根, 魏斌, 郝晓东, 等. 高腐蚀性油气田用双金属复合管[J]. 油气储运, 2010, 29(5): 359
- Duan Hongwei. Control of welding defects in stainless steel composite pipe[J]. Low Temperature Construction Technol, 2003, 95(5): 81(in Chinese)
段红伟. 浅述不锈钢复合焊管焊接缺陷的控制[J]. 低温建筑技术, 2003, 95(5): 81
- Yang Shengjin, Xiao Guohao. 316L+20Gstainless steel clad pipe welding technology[J]. Welding, 2006(1): 58(in Chinese)
杨胜金, 肖国豪. 316L+20G 不锈钢复合管焊接技术[J]. 焊接, 2006(1): 58
- Guo Chongxiao, Zhang Yanfei, Wu Ze. The application analysis of bimetal-pipe in oil and gas fiels with high corrosion and its interior development[J]. Total Corrosion Control, 2010, 20(2): 13(in Chinese)
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, 20(2): 13
- Lv Shixiong, Wang Ting, Feng Jicai. Microstructure and mechanical properties of TIG welded 20G/316L clad pipe joint[J]. Trans China Welding Institution, 2009, 30(4): 93(in Chinese)
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
- Li Liying, Wang Cheng, et al. Microstructure and mechanical properties of L415/316L clad pipe joint fabricated by free-argon welding [J]. Trans Mater Heat Treatment, 2014, 35(1): 125(in Chinese)
李立英, 王成, 等. L415/316L 复合管免冲氩焊接接头组织性能研究[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(1): 125

参考文献

- Niu Shengli, Han Kuihua, Lu Chunmei, et al. Thermogravimetric analysis of the relationship among calcium magnesium acetate, calcium acetate and magnesium acetate[J]. Appl Energy, 2010, 87(7): 2237
- Patsias A A, Nimmo W, Gibbs B M, et al. Calcium-based sorbents for simultaneous NO_x/SO_x reduction in a down-fired furnace[J]. Fuel, 2005, 84(14): 1864
- Xiao Haiping, Zhou Junhu, Liu Jianzhong, et al. Pore structure and desulfurization characteristics of organic calcium[J]. Environ Sci, 2007, 28(8): 1861(in Chinese)
肖海平, 周俊虎, 刘建忠, 等. 有机钙高温脱硫特性[J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1862
- Renedo M J, Fernández J. Influence of different lignosulphonates on the properties of desulfurant sorbents prepared by hydration of Ca(OH)₂ and fly ash[J]. Ind Eng Chem Res, 2008, 47(4): 1331
- Lu Chunmei, Tian Yuan, Yu Yongzheng, et al. The optimal desulfuration temperature and the microstructure characteristics of shell and limestone[J]. J Eng Thermodynamics, 2004, 25(S1): 197(in Chinese)
路春美, 田园, 于永征, 等. 贝壳和石灰石的最佳固硫反应温度与微观结构特性[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(S1): 197
- Hu Yongqi, Zhao Fengyun, Liu Hongjie, et al. Sulfidation of limestone under calcination conditions[J]. Chem React Eng Technol, 2005, 21(6): 527(in Chinese)
胡永琪, 赵风云, 刘洪杰, 等. 煅烧条件下石灰石脱除煤气中 H₂S 的研究[J]. 化学反应工程与工艺, 2005, 21(6): 527
- Chen Hongwei, Zhao Zhenghui, Wang Weili. Factors influencing simultaneous CO₂/SO₂ capture by ca-based sorbent and evolution of the limestone surface structure[J]. J Chin Soc Power Eng, 2013, 33(3): 210(in Chinese)
陈鸿伟, 赵争辉, 王为力. 石灰石联合脱碳脱硫影响因素及表面结构的分析[J]. 动力工程学报, 2013, 33(3): 210
- Yan Xiaoyu, Li Ying, Zhang Heng, et al. Pyrolysis analysis of calcium carbonate/copper residue compound desulfurization agent[J]. Mater Rev, 2015, 29(6): 93(in Chinese)
颜小禹, 李瑛, 张恒, 等. 碳酸钙/铜渣复合固硫剂热解性能分析研究[J]. 材料导报: 研究篇, 2015, 29(6): 93
- Li Hui, Han Kuihua, Liu Hongtao, et al. Experimental study on desulfurization of limestone modified by iron-based additives during O₂/CO₂ coal combustion[J]. Boiler Technol, 2013, 44(1): 76(in Chinese)
李辉, 韩奎华, 刘洪涛, 等. 铁基添加剂调质石灰石用于 O₂/CO₂ 燃煤脱硫的实验研究[J]. 锅炉技术, 2013, 44(1): 76
- Liu Hongtao, Han Kuihua, Lu Chunmei. Inference of the thermal decomposition parameters of limestone modified by wood vinegar based on model-free method[J]. Proc CSEE, 2012, 32(26): 31(in Chinese)
刘洪涛, 韩奎华, 路春美. 基于无模式法推断木醋调质石灰石热解动力学参数[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(26): 31
- Wang Chunbo, Li Yonghua, Wei Riguan. A study of the decomposition reaction rate of a modified limestone[J]. J Eng Therm Energy Power, 2006, 21(5): 496(in Chinese)
王春波, 李永华, 危日光, 等. 调质石灰石分解反应速率的研究[J]. 热能动力工程, 2006, 21(5): 496
- Qian Feng, Qiu Xiaopeng, Li Xiaoyan. Performance of fly ash/lime sorbents for simultaneous removing SO₂ and NO_x from flue gas[J]. Environ Sci Technol, 2009, 3(2): 56(in Chinese)
钱枫, 裘晓鹏, 李晓岩. 飞灰/石灰吸着剂制备及其脱硫脱硝性能的研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 3(2): 56
- Ahmaruzzaman M, Gupta V K. Application of coal fly ash in air quality management[J]. Ind Eng Chem Res, 2012, 51(47): 15299
- Tsuchiai H, Ishizuka T, Nakamura H, et al. Study of flue gas desulfurization absorbent prepared from coal fly ash; Effects of the composition of the absorbent on the activity[J]. Ind Eng Chem Res, 1996, 35(7): 2322
- Shi Xiaojun, Li Ying. Thermodynamic analysis on the reaction to the desulfurization and denitrification via the urea/fly ash mix-solution[J]. J Safety Environ, 2014, 14(4): 196(in Chinese)
史晓君, 李瑛. 尿素/飞灰混合浆液同时脱硫脱氮反应热力学分析[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(4): 196
- Ahmaruzzaman M, Gupta V K. Application of coal fly ash in air quality management[J]. Ind Eng Chem Res, 2012, 51(47): 15299
- Tsuchiai H, Ishizuka T, Ueno T, et al. Highly active absorbent for SO₂ removal prepared from coal fly ash[J]. Ind Eng Chem Res, 1995, 34(4): 1404
- Mahuli S K, Agnihotri R, Chauk S, et al. Pore-structure optimization of calcium carbonate for enhanced sulfation[J]. AIChE J, 1997, 43(9): 2323

(责任编辑 房 威)

(上接第 105 页)

- Wu Xingdong, Xie Shujun. Research on mechanical properties and corrosion behavior of welded joints of X65/316L and AISI4310/Inconel625 clad pipe[J]. Welded Pipe Tube, 2014, 37(4): 14(in Chinese)
吴星东, 谢树军. X65/316L 与 AISI4310/Inconel625 复合管焊接接头力学性能及腐蚀行为研究[J]. 焊管, 2014, 37(4): 14
- Zhang Niantao, Xu Lianrong, Han Yongdian, et al. Study on the CO₂ corrosion behavior of X65/316L corrosion resistance alloy liner pipe welded joint[J]. Welded Pipe Tube, 2012, 35(1): 8(in Chinese)

张念涛, 徐连勇, 韩永典, 等. X65/316L 耐蚀合金内衬管焊接接头 CO₂ 腐蚀行为研究[J]. 焊管, 2012, 35(1): 8

- Tian Mingjie, Chen Xing, Zhang Yukun, et al. Welding process of composite plate for construction and its welded microstructure and properties[J]. Heat Treatment Metals, 2015(6): 110(in Chinese)
田明杰, 陈行, 张予坤, 等. 建筑用复合钢板的焊接工艺及焊后组织与性能[J]. 金属热处理, 2015(6): 110
- Niaga J. Use of A-TIG method for welding of titanium, nickel, their alloys and austenitic steels[J]. Welding Int, 2006, 20(7): 516

(责任编辑 杨 霞)