

文章编号:1000-582X(2012)11-099-05

## 316L-20G 双金属复合管焊缝组织元素扩散分析

范兆廷<sup>1</sup>, 张胜涛<sup>1</sup>, 殷林亮<sup>1</sup>, 刘佳<sup>2</sup>, 戴志向<sup>3</sup>

(1. 重庆大学 化学与化工学院, 重庆 400044; 2. 重庆科技学院 石油工程学院 重庆 401331;

3. 西南油气田分公司蜀南气矿, 四川 泸州 646001)

**摘要:**通过对 20G 钢内衬 316L 金属复合管的焊缝区、316L 基体以及 20G 钢进行 EDS 元素扫描, 再采用扫描电镜对 316L-焊缝区、20G 钢-焊缝区进行线扫描分析, 对焊缝组织主要合金元素的扩散进行了研究。结果表明:焊缝过渡层中合金元素被碳钢稀释, 碳原子向 316L 和焊缝扩散, 同时 316L 和焊丝中的合金元素 Cr、Ni 也向碳钢中渗透, 但过渡层起到了良好的隔离作用, 致使 316L 不锈钢金属中合金元素含量没有明显降低, 保持了 316L 母材耐腐蚀性能。

**关键词:**316L-20G 复合管; 焊缝; 显微组织; 元素扩散

**中图分类号:**TG 406

**文献标志码:**A

## Analysis on weld metal and element migration of 316L-20G clad pipe

FAN Zhaoting<sup>1</sup>, ZHANG Shengtao<sup>1</sup>, YIN Linliang<sup>1</sup>, LIU Jia<sup>2</sup>, DAI Zhixiang<sup>3</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. School of Oil and Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331,

China; 3. Southwest Oil and Gas Field Branch, Luzhou, Sichuan 646001, China)

**Abstract:** The proliferation of weld and major alloying elements are studied and analyzed by scanning the EDS element of 316L/20G clad pipe weld joint, 316L substrate and 20G steel, and by scanning the electron microscopy and the energy spectrum analysis of 316L-weld zone and 20G steel-weld zone. The results show that the alloying elements in the weld transition layer are diluted by carbon steel, and the carbon atoms spread to the 316L and weld, while alloying elements in the 316L and wire, such as Cr, Ni, penetrate to the carbon steel, but the transition layer plays a good role in isolation, resulting in 316L stainless steel alloy element content is not significantly reduced, maintaining the 316L base metal resistant to corrosion.

**Key words:** 316L-20G clad pipe; welds; microstructure; element migration

随着强腐蚀性油气田的开采, 添加缓蚀剂、采用塑料内涂层及耐蚀合金等传统单一的防腐技术及材料, 在耐蚀可靠性、经济性指标上都难以平衡, 难以满足油气田发展的需要<sup>[1]</sup>。为了提高油气管道防腐性能和降低耐蚀合金成本, 双金属复合管应运而生, 并以优异的机械力学性能和耐腐蚀性能展现出广泛的应用前景<sup>[2]</sup>。国内对于双金属复合管的应用

起步较晚, 应用范围有限, 且应用研究主要局限在管材的成型和耐腐蚀性, 对焊缝接头性能还需进行深入的研究<sup>[3]</sup>。国外对双金属复合管的研究和应用比较多<sup>[3-6]</sup>, 美国和俄罗斯早在 20 世纪 80 年代就开始了相关研究, 日本 NKK 公司也研制成功了 UOE 工艺制造合金复合管, 但绝大多数研究也局限于工艺制造以及表面腐蚀防护<sup>[5]</sup>, 或仅涉及到单个元素的

收稿日期: 2012-06-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51102288); 重庆市教委自然科学基金项目(KJ111420)

作者简介: 范兆廷(1981-), 男, 重庆大学博士研究生, 主要从事石油与天然气管道腐蚀与防护。

张胜涛(联系人), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (E-mail)stzhang@cqu.edu.cn。

扩散分析<sup>[6]</sup>。因此开展双金属复合管焊缝组织元素扩散的研究,能够补充上面所述的不足,使得双金属复合管得到更好的应用<sup>[7]</sup>。

通过对 316L-20G 双金属复合管焊缝区域面扫描,定性描述了焊缝区域的元素组成,再对焊缝区进行线扫描,分析双金属复合管焊缝组织的合金元素迁移扩散,进而分析焊缝区域的组织结构,提出 316L 不锈钢合金元素的扩散有利于形成焊缝过渡区,对合金元素扩散起到很好的隔离作用,保持焊缝中不锈钢层的合金元素含量,提高焊缝的耐腐蚀性能。

## 1 试样焊接工艺

316L-20G 双金属复合管采用 20G 碳钢为基层,316L 不锈钢为衬层。试样焊接选用林肯 DC-400 直流 TIG 焊机高频引弧法,采用 HS316L 不锈钢焊条作为焊接材料,焊接完成后用 ZX7-315 型直流手工弧焊机,采用 E4315 焊条进行一层盖面,其化学成分见表 1。

表 1 焊接材料的化学成分(质量分数,%)

| 焊条     | w(C)  | w(Si) | w(Mn) | w(P)  | w(S)  | w(Ni) | w(Cr) | w(Mo) | 其他 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| HS316L | 0.024 | 0.65  | 1.57  | 0.015 | 0.001 | 11.36 | 18.37 | 2.10  | 余量 |
| E4315  | 0     | 0.90  | 1.25  | 0.040 | 0.035 | 0.30  | 0.20  | 0.30  | 余量 |

说明:其他为 Fe 组分。

复合管焊接试样的尺寸为: $D=200\text{ mm}$ ,厚度为 $(6.0+1.5)\text{ mm}$ 。焊接接头坡口为 V 型坡口,间隙 $3.5\sim 4\text{ mm}$ ,坡口角度为 $60^\circ\sim 65^\circ$ ,焊接工艺参数见表 2。

表 2 焊接工艺参数

| 焊条     | 直径/<br>mm | 电流/<br>A | 电压/<br>V | 氩气/<br>( $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) | 电源<br>极性 |
|--------|-----------|----------|----------|-------------------------------------------|----------|
| HS316L | 1.5       | 90~95    | 17~20    | 5~8                                       | 直流正接     |
| E4315  | 3.2       | 90~110   | 23~28    | 0                                         | 直流反接     |

用线切割方法切取焊缝组织,并采用蒸馏水清洗吹干后,应用能谱分析仪(EDS)和 JSM-840 型扫描电镜(SEM)对复合管焊接接头组织进行分析。

## 2 316L-20G 复合管焊缝区域成分分析

对于采用 HS316L 焊丝焊接的 316L-20G 复合

管焊缝,为了弄清焊缝和热影响区的材料组分,对焊缝区、316L 以及 20G 母材三者相结合的区域进行 EDS 元素扫描,图 1 为复合管焊缝区域示意图。由于 E4315 焊条仅对焊接完成后的焊口进行了厚度为 $0.5\sim 0.8\text{ mm}$ 盖面,对整个焊接组织影响很小,在试样打磨中将其去掉。

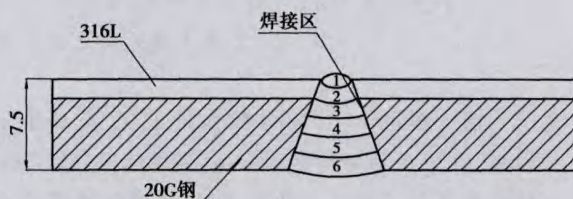


图 1 复合管焊缝区域示意图

在做 EDS 元素扫描前,通过 SEM 扫描初步确定 EDS 元素扫描区域,图 2 是双金属管焊缝在 65X 电镜扫描下的“焊缝区-316L-20G 钢”三者结合区域图像。

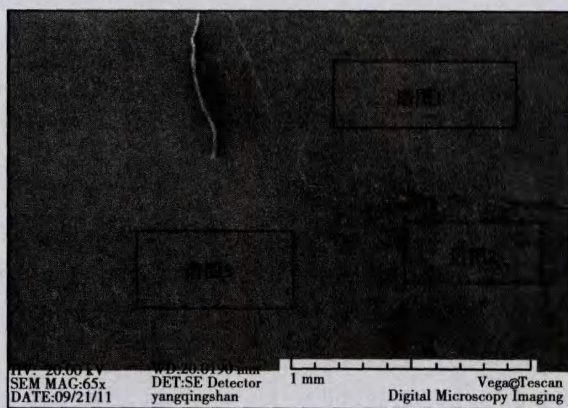


图 2 焊缝区-316L-20G 钢三者结合区域

通过对 3 个扫描区域进行 EDS 元素扫描,分析结果如图 3 所示。谱图 2 所对应范围只检测出 Fe 和 C 元素,所在区域应为 20G 钢基体。谱图 1 和 3 对应范围检测出的元素基本相同,是由于所用焊丝 HS316L 成分与 316L 母材成分相近所致。但谱图 3 中检测出来的 Fe 元素明显比谱图 1 要多,这是由于焊接过程中,20G 钢中的 Fe 元素向焊接区扩散所致,由此推断谱图 1 对应区域为 316L 基材,谱图 3 对应区域为焊接区,实验分析与实际情况一致。

从宏观图片看来,在金属管线内部焊区与金属基体(316L、20G 钢)结合良好。而 316L 与 20G 钢彼此结合并不好,这是机械复合双金属管的本身属性所限制。

为进一步研究双金属复合管焊缝组织的合金元



素迁移扩散,需要对 316L-焊缝区、20G 钢-焊缝区进行线扫描,以期得到区域之间的元素迁移扩散对比图像。

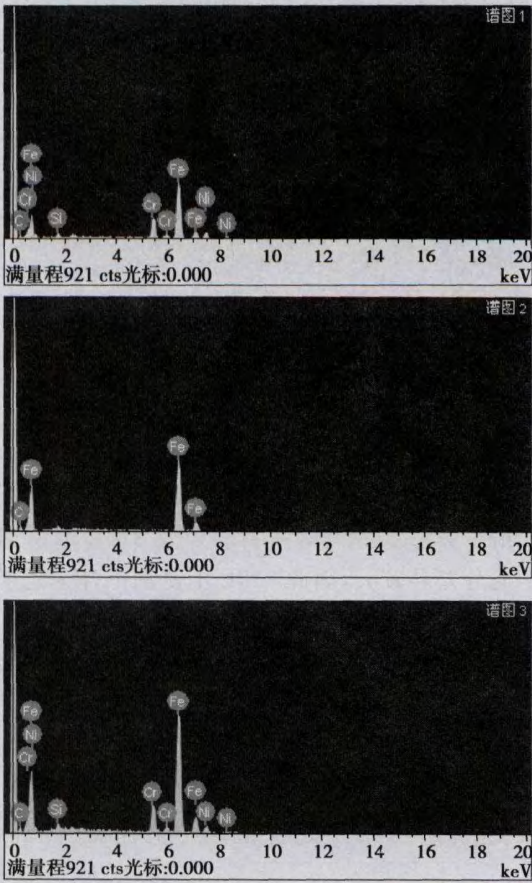


图 3 焊缝区、316L 基材及 20G 钢对应 EDS 图

3 焊缝组织线扫描

下面对 316L-焊缝区(见图 4~6)、20G 钢-焊缝区(见图 7~9)进行线扫描。

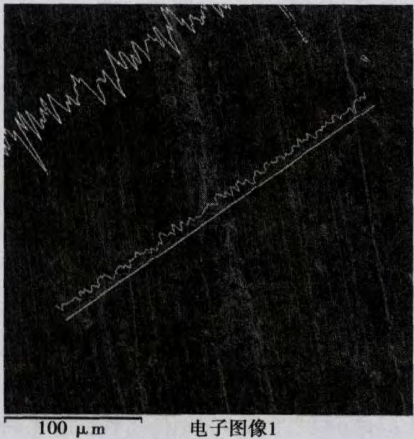


图 4 焊缝-316L 交界处线扫描元素示意图

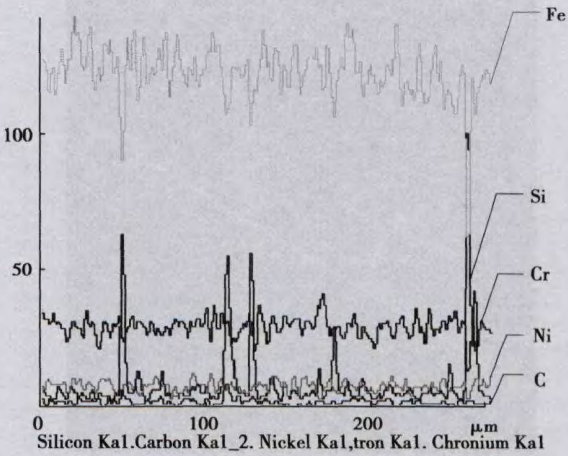


图 5 焊缝-316L 交界处线扫描元素(Cr、Fe、Ni、Si、C)分布对比图

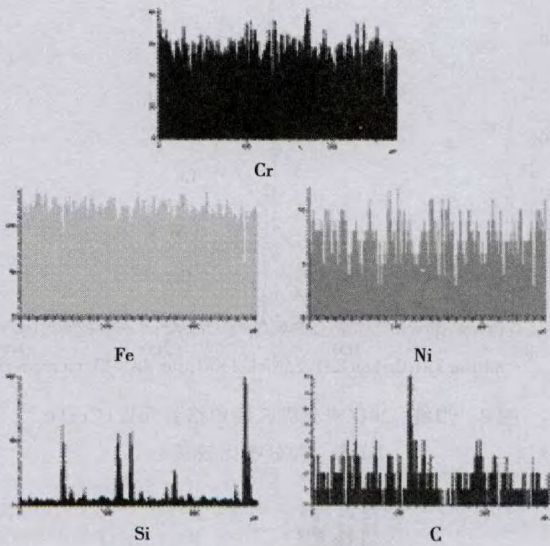


图 6 焊缝-316L 交界处线扫描各元素(Cr、Fe、Ni、Si、C)分布对比图

从图 4~6 可以看出,由于焊丝和 316L 金属元素差异不大,除了受 20G 元素扩展影响, Si、C 元素质量分数在焊缝交界处发生突变外,其余合金元素的质量分数变化不大。

从图 7~9 可以看出,在焊缝-20G 钢交界区 Si、C 元素的质量分数发生了增加,造成 Fe 的质量分数明显减小,发生了明显的元素扩散熔合。

4 合金元素的扩散

经研究表明<sup>[8-10]</sup>,采用 HS316L 焊丝焊接 316L-20G 复合管材,在焊接区与母材之间存在狭长的过渡层,图 10 为焊缝的宏观形貌,由图可看出,焊缝可以明显地分为焊接区、过渡层和母材 3 个区域。



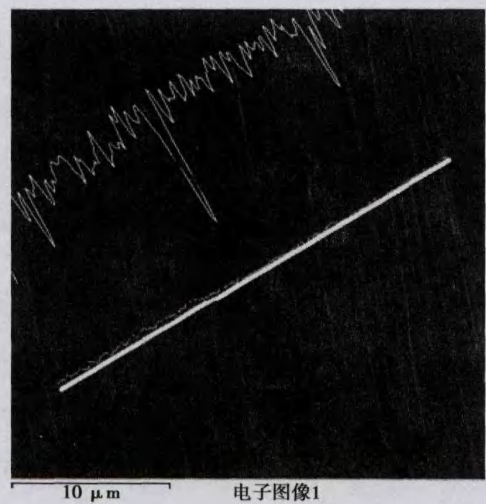


图 7 焊缝-20G 钢交界区线扫描示意图

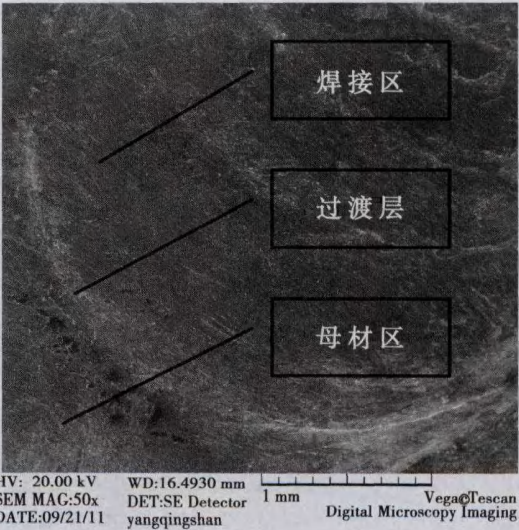


图 10 316L-20G 复合管焊缝的宏观形貌

由于 20G 碳钢与焊接材料以及 316L 不锈钢层化学成分差异较大,因此 316L 不锈钢中合金元素向 20G 碳钢扩散,碳钢中碳元素向不锈钢层迁移。对图 10 中 3 个区域进行能谱分析,表 3 为主要合金元素在 3 个区域以及对应焊接材料中含量的比较。

表 3 焊缝各区域中合金元素含量(质量分数,%)

| 组分         | w(C)  | w(Mn) | w(Ni) | w(Cr) | w(Mo) |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 316L 母材区   | 0.025 | 2.30  | 13.70 | 17.33 | 2.4   |
| 20G 母材区    | 0.190 | 0.44  | 0.21  | 0.25  | 0.20  |
| 焊缝区        | 0.060 | 1.43  | 10.53 | 17.30 | 2.00  |
| 316L 层过渡区  | 0.068 | 1.92  | 10.18 | 17.58 | 2.13  |
| 20G 层过渡区   | 0.087 | 1.07  | 9.30  | 16.76 | 0.89  |
| HS316L(焊丝) | 0.024 | 1.56  | 11.30 | 18.39 | 2.10  |

通过对接头显微组织分析,在焊缝过渡层 Cr、Ni 元素增加,组织基本为马氏体和部门残余的奥氏体,组织结构细小,316L 接头和焊缝组织由于含碳量低,主要为奥氏体和铁素体。

通过表 3 可以看出,HS316L 焊丝中合金元素含量较 20G 层过渡区有所降低,而在 316L 层过渡区中没有发生明显变化,说明 20G 碳钢对过渡层合金元素有明显的稀释作用,而过渡层对 316L 不锈钢合金元素扩散起到了很好的隔离作用,保持了不锈钢层焊缝中的合金元素含量,提高了焊缝的耐腐蚀性能<sup>[1]</sup>,同时从表中还可以看出,20G 母材中碳元

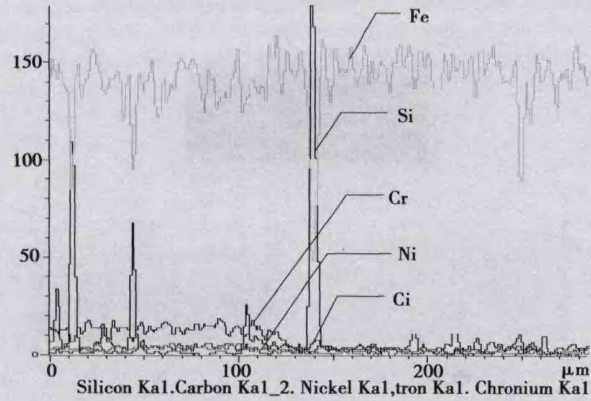


图 8 焊缝-20G 钢交界区线扫描各元素(Cr、Fe、Ni、Si、C)分布比较图

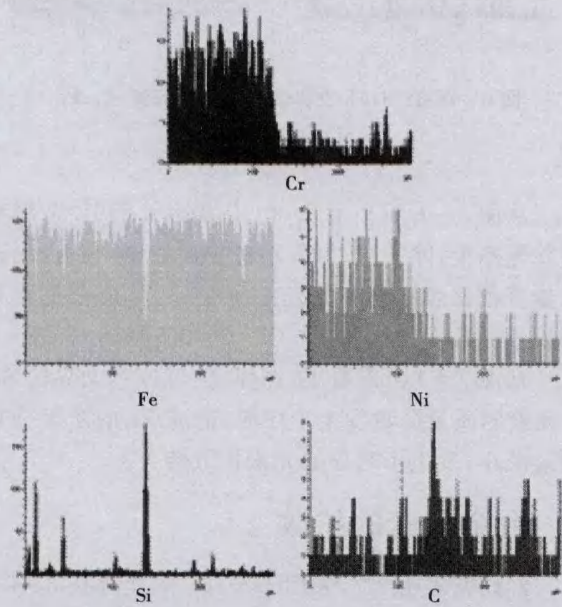


图 9 焊缝-20G 钢交界区线扫描各元素(Cr、Fe、Ni、Si、C)分布图

素含量高于不锈钢层和过渡层,主要因为过渡层中合金元素含量高,降低了碳的活度,从而阻碍了碳向不锈钢层和焊缝区域扩散。

## 5 结 论

1)通过 EDS 元素扫描和线扫描可以得出,焊缝过渡层中合金元素被碳钢稀释,碳原子向 316L 不锈钢层和焊缝区域扩散,同时 316L 和焊丝中的合金元素 Cr、Ni 也向碳钢迁移。

2)过渡层中合金元素被碳钢稀释,而不锈钢层合金元素含量没有明显降低,过渡层对合金元素的迁移起到了良好的隔离作用,保持了 316L 母材耐腐蚀性能。

3)过渡层中合金元素降低了碳的活度,阻碍了碳的扩散,保证了焊缝具有较好的机械性能。

### 参考文献:

- [1] 杨武,顾潜祥,黎樵桑,等. 金属的局部腐蚀[M]. 北京:化学工业出版社,1995.
- [2] 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 Dezhi, DU Qingsong, GU Tan, et al. The anti-corrosion technology research of dual metal pipe[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2008, 27(12):64-65.
- [3] Kong J H, Zhen L, Guo B, et al. Influence of mo content on microstructure and mechanical properties of high strength pipeline steel[J]. Materials and Design, 2004,25(8): 723-728.
- [4] Rommerskirchen I. New progress caps 10 years of work with bubi pipes[J]. World Oil, 2005, 226(7): 69-70.
- [5] Penttilä S, Betova I, Bojinov M, et al. Estimation of kinetic parameters of the corrosion layer constituents on steels in supercritical water coolant conditions [J]. Corrosion Science, 2011, 53(12):4193-4203.
- [6] Gómez X, Echeberria J. Microstructure and mechanical properties of carbon steel A210-superalloy Sanicro 28 bimetallic tubes[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 348(1/2):180-191.
- [7] 孙育禄,白真权,张国超,等. 油气田防腐用双金属复合管研究现状[J]. 全面腐蚀控制, 2011,25(5):10-12,16.  
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):10-12,16.
- [8] 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):93-95.  
Lü Shixiong, WANG Ting, FENG Jicai. Microstructure and mechanical properties of TIG welded 20G/316L clad pipe joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009,30(4):93-95.
- [9] 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, 2009(3): 23-25.  
QI Jingchun, WANG Mingpeng. Characteristic and application of the pipe that carbon steel inside lining stainless steel compounds[J]. China Building Materials Science & Technology, 2009(3): 23-25.
- [10] 於方,秦建平. 双金属管在管道输送中的应用[J]. 钢管, 2010, 29(1): 34-36.  
YU Fang, QIN Jianping. Application of dual metal pipe in pipe line service[J]. Steel Pipe, 2010, 29(1): 34-36.
- [11] 王能利,潘希德,薛锦,等. 20/0Cr18Ni9 复合管焊接工艺和接头的抗腐蚀性能[J]. 焊接,2003(5): 23-26.  
WANG Nengli, PAN Xide, XUE Jin, et al. Welding procedure and resistant to corrosion properties for welded joint of 20/0Cr18Ni9 clad pipe [J]. Welding&Joining, 2003(5): 23-26.

(编辑 张 革)