

# 316L/30Mn2 冶金复合油管的 开发与力学性能检测

刘世程<sup>1</sup>, 刘文红<sup>2</sup>, 林 凯<sup>2</sup>, 宋玉春<sup>3</sup>

- (1. 大连交通大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116028;
2. 中国石油集团工程材料研究院有限公司, 西安 710077;
3. 志杰科技开发(大连)有限公司, 辽宁 大连 116600)

**摘 要:** 为研究 316L/30Mn2 双金属冶金复合油管的制备工艺及力学性能, 采用钎焊复合+热处理强化方法, 试制了  $\Phi 88.9 \text{ mm} \times (6.45+2) \text{ mm}$  规格的双金属复合油管, 测定了复合油管不同部位的硬度、拉伸、冲击性能和界面剪切强度, 并对其技术可行性进行探讨。结果表明, 钎焊复合界面冶金结合牢固; 适当的热处理使基管、管端接环及对接焊缝的力学性能相近, 且在不同热处理工艺下, 双金属复合油管基管分别满足 80 ksi、95 ksi、110 ksi 钢级油管的力学性能要求。该研究进一步验证了开发高性能双金属冶金复合油管的技术可行性, 也为双金属复合油管的开发提供依据。

**关键词:** 双金属复合油管; 耐蚀合金复合管; 钎焊; 热处理; 界面剪切强度

中图分类号: TG454

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.05.005

## Development and Mechanical Properties Test of 316L/30Mn2 Metallurgical Composite Tubing

LIU Shicheng<sup>1</sup>, LIU Wenhong<sup>2</sup>, LIN Kai<sup>2</sup>, SONG Yuchun<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China;

2. CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, China;

3. Zhijie Technology Development (Dalian) Co., Ltd., Dalian 116600, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to study the preparation process and mechanical properties of 316L/30Mn2 bimetallic metallurgical composite tubing, the brazing composite+heat treatment strengthening method is adopted in trial-producing  $\Phi 88.9 \text{ mm} \times (6.45+2) \text{ mm}$  bimetallic composite tubing, the hardness, tensile, impact properties and interfacial shear strength of different parts of the composite tubing were measured, and its technical feasibility was discussed. The results show that the bonding interface of brazing is firm. Proper heat treatment makes the mechanical properties of the base pipe, coupling and butt weld similar. Under different heat treatment processes, the base pipe of bimetallic composite tubing meets the mechanical property requirements of 80 ksi, 95 ksi and 110 ksi steel tubing respectively. The study further verifies the technical feasibility of developing high-performance bimetallic metallurgical composite tubing, and also provides a basis for the development of bimetallic composite tubing.

**Key words:** bimetallic composite tubing; corrosion resistant alloy composite pipe; brazing; heat treatment; interfacial shear strength

## 0 前 言

随着石油天然气勘探力度的不断加大, 高温、高压、高含 H<sub>2</sub>S 和 CO<sub>2</sub>、高含 Cl<sup>-</sup>和高含有

机硫等恶劣腐蚀环境的油气井开发力度也在逐渐加大, 油管在含有 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、Cl<sup>-</sup>等腐蚀介质环境中服役时会发生腐蚀, 造成一定的经济损失, 同时还会导致人员伤亡、停工停产和环境污染等

灾难性后果<sup>[1-2]</sup>, 进而对油管的耐蚀性提出较高要求。由于双金属复合管兼具良好的耐蚀性和经济性<sup>[3-4]</sup>, 近年来得到了广泛应用<sup>[2-4]</sup>。早期复合管为机械复合管, 主要应用于油气输送管道<sup>[5-8]</sup>, 近几年, 复合油管的相关概念开始出现, 如管端结构<sup>[2,9]</sup>及制备技术<sup>[10-12]</sup>等, 但复合油管技术要求更高, 需要进一步深入研究。

本试验以双金属复合油管替代常用的 S13Cr 油管, 分析了双金属复合油管的结构设计和技术要求, 通过相关工艺试验测定其力学性能, 进一步验证和讨论复合油管的优势与技术可行性, 为双金属复合油管的开发提供依据。

## 1 双金属复合油管的结构与技术要求

### 1.1 双金属复合油管的结构

由于油钢管端采用螺纹连接, 因此要求双金属复合油管管端既要具备基管的高强度, 又要有耐蚀合金覆层的耐蚀性能。复合油管管端结构如图 1 所示, 由图 1 可知, 管端主要由基管、对接焊缝、管端接环、耐蚀合金 (CRA) 覆层、复合界面、螺纹等六部分组成, 这种特殊结构也增加了材料选择和制造工艺的复杂性。

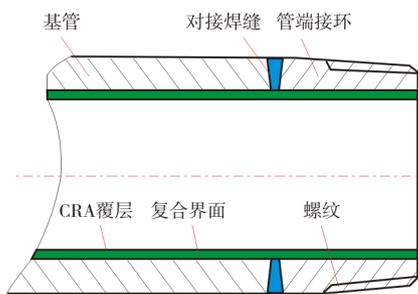


图 1 复合油钢管端结构示意图

### 1.2 S13Cr 不锈钢油管的性能及其应用

在 S13Cr 马氏体不锈钢中添加 Ni、Mo 等合金元素, 研制出超低碳马氏体不锈钢, 即 S13Cr 不锈钢。S13Cr 不锈钢的耐蚀性略低于双相不锈

钢, 但高于传统 13Cr 不锈钢<sup>[13]</sup>, 其强度高、低温韧性好、焊接性好, 价格优势明显, 以抗硫酸碳钢价格为基数 1 计算, 传统 13Cr、S13Cr 及双相不锈钢油管的价格比约为 3: 5: 12<sup>[14]</sup>。S13Cr 油管在 1993 年开始得到应用, 已替代双相不锈钢, 成为 CO<sub>2</sub> 腐蚀环境首选耐蚀材料<sup>[1]</sup>, 但其价格仍旧较高。本研究旨在开发与 S13Cr 不锈钢油管性能相当的双金属复合油管, 从而为油管的制造提供更多选择。

### 1.3 双金属复合油管的主要技术要求

双金属复合油管管体与一般复合管相同, 内覆层耐蚀性强, 基管力学性能高, 但管端须兼有高强度力学性能和防腐性能, 界面则应采用冶金复合的方式以满足油管上卸扣及服役要求。双金属复合油管基管通常采用钢级为 80 ksi、95 ksi 和 110 ksi 的钢材, 根据 API SPEC 5CT 要求, 双金属复合油管基管力学性能见表 1。同时, 耐蚀合金层的耐蚀性应当与 S13Cr 相同; 管端接环及螺纹的力学性能与基管相同, 其耐蚀性与 S13Cr 相同; 对接焊缝的力学性能与基管相同, 根据 API SPEC 5LD 的标准要求, 复合界面的剪切强度  $\geq 137.8$  MPa。

表 1 双金属复合油管基管的性能要求

钢级 类型	屈服 强度/MPa	总伸长 率/%	抗拉 强度/MPa	断裂伸 长率/%	0 °C C <sub>v</sub> /J (1/2尺寸试样)
N80Q	552~758	0.5	$\geq 689$	$\geq 14$	$\geq 15$
C95、T95	655~758	0.5	$\geq 724$	$\geq 14$	$\geq 15$
P110	758~965	0.6	$\geq 862$	$\geq 12$	$\geq 23$

## 2 双金属复合油管管段试制及力学性能检测

### 2.1 材料化学成分及管材规格

试制双金属复合油管规格为  $\Phi 88.9$  mm  $\times$  (6.45+2) mm, 其不同部位化学成分及规格见表 2。

表 2 不同部位材料成分及管材规格

管段部位	材质	规格/(mm $\times$ mm)	类型	化学成分/%							
				w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Cr)	w(Ni)	w(Mo)
基管	30Mn2	$\Phi 88.9 \times 6.45$	无缝管	0.280	0.240	1.680	0.012	0.002	0.070	0.022	0.026
CRA覆层	316L	$\Phi 74.0 \times 2.00$	直焊管	0.028	0.691	1.442	0.029	0.004	16.520	9.790	2.040
管端接环	S13Cr	$\Phi 88.9 \times 6.45$	无缝管	0.013	0.205	0.195	0.012	0.002	12.530	5.346	2.016

## 2.2 试制工艺

为试制双金属复合油管管段，采用钎焊复合+热处理强化新技术，工艺流程如图2所示。基管与管端接环对接焊采用超低碳马氏体不锈钢

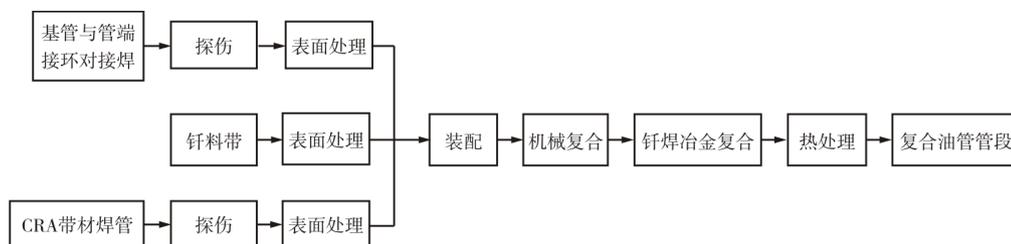


图2 双金属复合油管管段试制工艺

冶金复合采用镍基钎料，通过钎焊复合的方法，将机械复合管加热至1 050~1 150 ℃，使钎料熔化、填充钎缝，钎料凝固后，即可实现内、外管间冶金复合。

根据 API SPEC 5CT 的规定，N80Q、C95、T95、P110 钢级油管热处理工艺为淬火+回火，因此，需对复合油管基管进行淬火、回火热处理。加热后快速冷却可完成基管淬火处理，但由于钎焊温度远高于正常淬火温度，因此必须重新进行淬火热处理，然后回火。热处理试验过程：在 850~980 ℃温度区间内对油管基管进行加热淬火处理，在 400~650 ℃温度区间内进行回火处理。

## 2.3 试制管段的力学性能检测

### 2.3.1 硬度、拉伸与冲击试验

不同部位的硬度主要取决于回火温度，30Mn2 基管、S13Cr 管端接环及对接焊焊缝的硬度随回火温度的变化曲线如图3所示。由图3可知，30Mn2 淬火硬度高，但随回火温度升高降低较快；S13Cr 管端接环及对接焊焊缝淬火硬度较低，但在回火过程中降低较慢；在 450~650 ℃温度区间内进行回火处理时，三者硬度接近，这表明在相同热处理工艺条件下三者硬度接近。这一结果主要是钢中元素种类与含量不同对淬火硬度及抗回火性作用不同造成的结果。30Mn2 基管、S13Cr 管端接环及对接焊焊缝在淬火后均形成马氏体，马氏体的硬度主要取决于碳含量，30Mn2 含碳约 0.3%，远高于后两者，因此淬火硬度较高；另一方面，

焊丝，采用 TIG 焊焊接。装配后，在基管、钎料层和内管间存在宏观间隙和气体，可通过机械复合的方式进行内管扩径，从而消除间隙，排出气体，为冶金复合作好准备。

30Mn2 除碳外只含少量 Mn，回火抗力低，回火温度较低时，硬度迅速降低，回火温度升高，降低趋势变缓。S13Cr 管端接环及对接焊焊缝虽然淬火硬度低，但钢中含有大量 Cr、Mo 等抗回火性元素，致使回火时硬度缓慢降低。因此，在一定回火温度范围内，三者硬度比较接近。

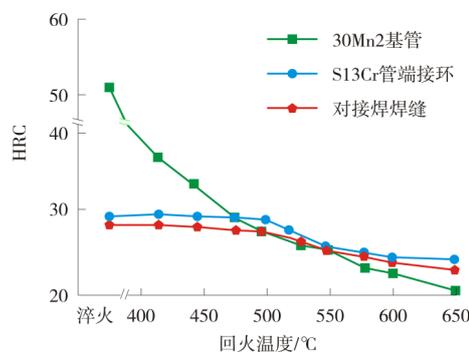


图3 硬度-回火温度关系曲线

在硬度试验的基础上，优化出3组热处理工艺，对试制管段分别进行热处理，去除覆层，拉伸试样与冲击试样制备方法见表3，按表3制备管段不同部位的拉伸试样与冲击试样。测定拉伸性能和在 0 ℃下的冲击性能，结果见表4，由表4可知，拉伸性能与冲击性能分别满足 80 ksi、95 ksi 和 110 ksi 钢级的要求。抗拉强度和屈服强度结果与硬度结果相似，即在一定温度范围内回火时，30Mn2 基管、S13Cr 管端接环及对接焊焊缝三者强度指标相近，可分别满足三个钢级的要求。

表3 拉伸试样与冲击试样制备方法

试样类型	取样部位	试样取向	缺口位置	缺口方向
板状拉伸试样 (横截面 4 mm×6 mm)	30Mn2 基管	纵向		
	S13Cr 管端接环	纵向		
	对接焊接头	焊缝轴线垂直于试样轴向且位于试样平行长度部分中间		
V形缺口 1/2 尺寸 冲击试样	30Mn2 基管	纵向		缺口面垂直于管壁
	S13Cr 管端接环	纵向		缺口面垂直于管壁
	对接焊接头	焊缝轴线垂直于试样轴向且位于试样平行长度部分中间	30Mn2 侧熔合线, S13Cr 侧熔合线	缺口面垂直于焊缝表面

表4 拉伸与冲击试验结果

组别	取样部位	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%	冲击功/J	综合判定	
1	30Mn2 基管	653	769	18.0	66	达到 80 ksi 钢级 力学性能要求	
	S13Cr 管端接环	718	850	17.3	68		
	对接焊接头	焊缝	687	823	-		50
		30Mn2 侧熔合线	-	-	-		34
		S13Cr 侧熔合线	-	-	-		51
2	30Mn2 基管	714	837	16.8	63	达到 95 ksi 钢级 力学性能要求	
	S13Cr 管端接环	746	813	16.3	60		
	对接焊接头	焊缝	694	785	-		58
		30Mn2 侧熔合线	-	-	-		46
		S13Cr 侧熔合线	-	-	-		52
3	30Mn2 基管	863	940	14.3	58	达到 110 ksi 钢级 力学性能要求	
	S13Cr 管端接环	826	914	15.2	54		
	对接焊接头	焊缝	810	902	-		53
		30Mn2 侧熔合线	-	-	-		51
		S13Cr 侧熔合线	-	-	-		58

2.3.2 界面剪切强度试验

根据 API SPEC 5LD 的要求，对于冶金复合管，以界面剪切强度表征界面结合强度，其值不应小于 137.8 MPa。本试验从管体、管端接环及对接焊接头切取界面剪切试样进行剪切试验，剪切强度试样与试验示意图如图 4 所示，结果测得 3 组试样的剪切强度均在 210~240 MPa 范围内。

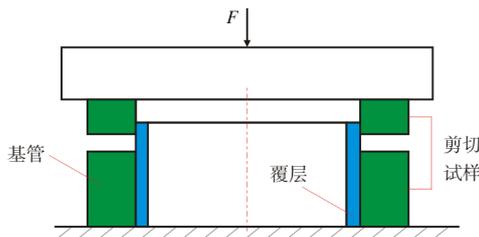


图4 剪切强度试样与试验示意图

此外，根据 API SPEC 5LD 的规定，进行了压扁试验。从管体及管端接环切取环状试样，压扁至管壁接近贴合，覆层无剥离，压扁试验后宏观形貌如图 5 所示，由图 5 可知，复合油管的冶金复合良好。

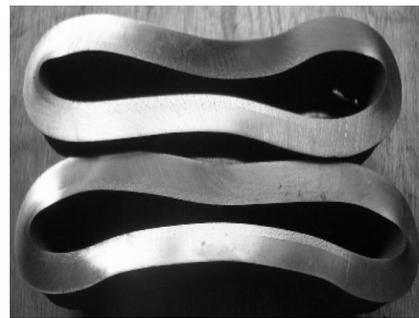


图5 复合油管试样压扁试验后宏观形貌

### 3 双金属复合油管的优势及技术可行性

#### 3.1 双金属复合油管的优势

双金属复合油管除了具有一般耐蚀合金复合管耐蚀性好、性价比高的优点外,同时,由于其采用界面冶金复合的方式,可承受弯、扭等塑性变形及应力、温度的影响,应用范围更广。因此,双金属复合油管是一种用途更广、附加值更高的耐蚀复合管材,并且价格优势明显,可替代耐蚀合金油管。

#### 3.2 双金属复合油管的技术可行性

与技术成熟、应用广泛的机械复合管相比,冶金复合管技术尚不成熟,应用较少,特别对于结构复杂的复合油管,不同部位经相同热处理后很难获得相近的力学性能。本研究通过试制高性能冶金复合油管管段,合理选材、优化工艺,提高了冶金复合质量和管体的力学性能。试验证明,高性能双金属复合油管制造技术是可行的。另外,采用钎焊成型的方法进行双金属复合管冶金复合,最大限度地利用了传统成熟的管材生产技术,减小了冶金复合的技术难度,简化了后续工序,是一种快速高效、质量可靠、经济性好的双金属复合钢管生产方法。

## 4 结 论

(1) 采用钎焊成形的焊接方法进行双金属管冶金复合,得到的双金属复合油管管体界面剪切强度为 210~240 MPa。

(2) 在相同热处理工艺下,双金属复合油管的 30Mn2 基管、S13Cr 管端接环及对接焊缝的硬度相近,而在不同热处理工艺下,基管的力学性能分别满足 80 ksi、95 ksi 和 110 ksi 钢级油管的力学性能要求。

(3) 本研究管段试制及力学性能检测结果

表明,高性能双金属冶金复合油管制备技术是可行的。

#### 参考文献:

- [1] 王少兰,费敬银,林西华,等. 高性能耐蚀管材及超级 13Cr 研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术,2013,25(4): 322-326.
- [2] 李为卫,秦长毅,贾君君,等. 一种油气田开发用新型双金属复合管[J]. 钢管,2009,38(4):22-24.
- [3] 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):10-13.
- [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.
- [5] 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.
- [6] 王永芳,袁江龙,张燕飞,等. 双金属复合管的技术现状和发展方向[J]. 焊管,2013,36(2):5-9.
- [7] 陈丽娟,尚峰,樊兴华,等. 海外油田用 X52NS/825 冶金复合钢管的开发及性能研究[J]. 钢管,2020,49(1): 33-37.
- [8] 杨专钊,王扬,李安强,等. 双金属复合管分类及其特性分析[J]. 石油管材与仪器,2019,5(1):1-6.
- [9] 魏斌,白真权,尹成先,等. 双金属复合管螺纹连接接头:CN201218372[P]. 2009-04-08.
- [10] 志杰科技开发(大连)有限公司. 可端部螺纹连接的高强度不锈钢复合钢管及其制造方法:CN20171048 8281.3[P]. 2017-09-22.
- [11] 王小艳,王斌,杜卫峰,等. 一种冶金式复合油井管及其制造方法:CN107313724A[P]. 2017-11-03.
- [12] 路彩虹,韩礼红,杨尚谕,等. 一种双金属冶金复合管及其制备方法:CN110181230B[P]. 2022-01-04.
- [13] 李鹤林,韩礼红,张文利. 高性能油井管的需求与发展[J]. 钢管,2009,38(1):1-9.
- [14] 李琼玮,奚运涛,董晓焕,等. 超级 13Cr 油套管在含 H<sub>2</sub>S 气井环境下的腐蚀试验[J]. 天然气工业,2012,32(12):106-109.

作者简介:刘世程(1948—),男,工学博士,大连交通大学材料学院教授,现主要从事双金属复合材料研究与开发。

收稿日期:2022-01-05

编辑:董超