

内壁带有625合金复合层的API 5L X65钢管性能研究

徐光耀 朱汉超 牛天军 耿建成 何雷
海洋石油工程(青岛)有限公司

摘要: 海洋油气管道用于将油气从油井输送至平台。管道中的流体介质通常具有很强的腐蚀性,因此必须管道的材质必须选用耐腐蚀合金。625合金是一种知名的耐腐蚀合金,具有很好的耐腐蚀性。然而,与低合金钢相比,镍基合金的成本较高,因此完全由耐腐蚀合金制成的管道在经济上不可行。在管道内壁堆焊薄层的耐腐蚀合金层是一种成本较低且技术上可行的替代方案。本文的研究对象选取API 5L X65钢管并在内壁表面上堆焊了一层625合金层,该堆焊层采用钨极氩弧焊(GTAW)工艺,即通常称为热丝TIG的焊接方法。本文采用热丝TIG焊接工艺制备625合金内壁堆焊API 5L X65钢管的复合管,研究其化学成分、机械性能、微观结构和界面熔合情况等。结果表明,采用该种组合方案可以在API 5L X65碳钢基体获得合适的625镍基合金堆焊层。

关键词: 复合管; 堆焊层; API 5L X65钢管; 625合金

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.11.114

一、简介

低合金高强钢由于其优良的机械性能,可用于天然气和石油运输,管道在高压下工作,从而确保高生产操作率。然而,在恶劣的服役环境中,比如,含有CO₂和H₂S等腐蚀性油气液体需要通过管道输送的情况下,则需要考虑使用耐腐蚀合金才可以满足这一需求^[1]。因此,工程领域开发了复合管,将低合金高强钢和耐腐蚀合金

结合起来,生产出具有良好机械和耐腐蚀性能的管道,这种管道与全部采用耐腐蚀合金的管道相比,成本更低^[2]。复合管由外部碳钢管和内部耐腐蚀合金组成,其中碳钢管提供强度和韧性,而耐腐蚀合金层提供耐腐蚀性^[3]。625合金是一种镍基耐腐蚀合金,具有良好的焊接性,采用625镍基合金与低合金高强钢管组成复合管能够组合出性能十分优良的复合管。

复合管可以通过机械或冶金的方式来制造。采用堆焊来制作冶金复合层是一种广泛使用的焊接方法。热丝TIG通常用于水下管道关键部位的复合管制作,因为它具有高效率、低热输入和高质量等优点。在制造复合管的过程中,需要考虑使用Inconel 625控制低合金高强钢堆焊层的化学成分,以避免出现脆性相。DNVGL-ST-F101标准要求堆焊层中的最大铁含量为10%。API 6A标准分两个等级,堆焊层铁含量应满Fe 5和Fe 10,即,最高铁含量为5%和10%。因此,应使用低稀释的焊接工艺来满足这些要求。热丝TIG通过焦耳效应加热焊丝,这会增加熔覆速率,从而降低625合金堆焊层上的铁含量。

本文采用热丝TIG焊接工艺在API 5L X65钢管内壁堆焊625合金,研究了此种复合管的化学成分、机械性能、微观结构和界面熔合情况等。

二、实验材料和方法

实验选择的基材钢管尺寸为:外径为219.1 mm,厚度为18.3 mm的API 5L X65钢管;焊材选择ERNiCrMo-3(625合金)作为堆焊层的填充金属。API 5L X65钢管

表1 材料的化学成分(质量分数%)

材料	碳	锰	硅	磷	铝	铌	铜	铬	镍	钒	钛	铁
钢管 API 5L X65	0.013	1.3	0.3	0.004	0.02	0.001	0.19	0.11	0.07	0.06	0.003	剩余
焊材 ERNiCrMo-3	0.012	0.02	0.14	0.007	0.17	3.55	0.02	21.5	65.2	8.7	0.21	0.41

和ERNiCrMo-3合金（供应商提供的数据）的化学成分如表1所示。

通过热丝TIG堆焊设备，在钢管内壁使用ERNiCrMo-3焊丝（直径1.2mm）堆焊625合金，获得3mm厚的堆焊层。保护气体为氩气（Ar）99.998%，流速为15L/min。焊接参数条件为：平均电流为100A，平均电压12V，送丝速度为1.0m/min，焊接速度150mm/min。

在没有堆焊层的钢管上取样进行机械性能测试，参照ASTM A370标准，共取样三个拉伸试样，测试API 5L X65钢管基材本身的机械性能。为了评估母材和焊缝金属，通过放电加工（EDM）对每两个微拉伸试样进行加工，尺寸如图1所示。图2进一步显示了微拉伸试样和弯曲试样的取样位置。

使用显微硬度测量基层API 5L X65钢管和堆焊

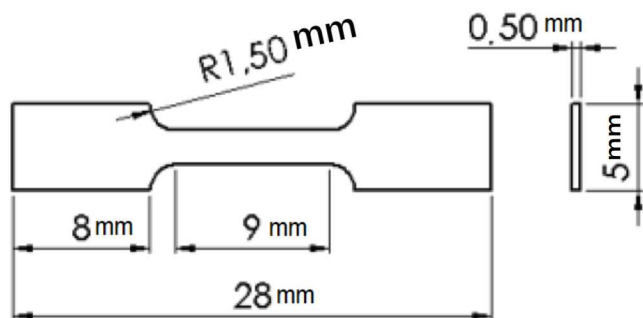


图1 微拉伸试样的尺寸

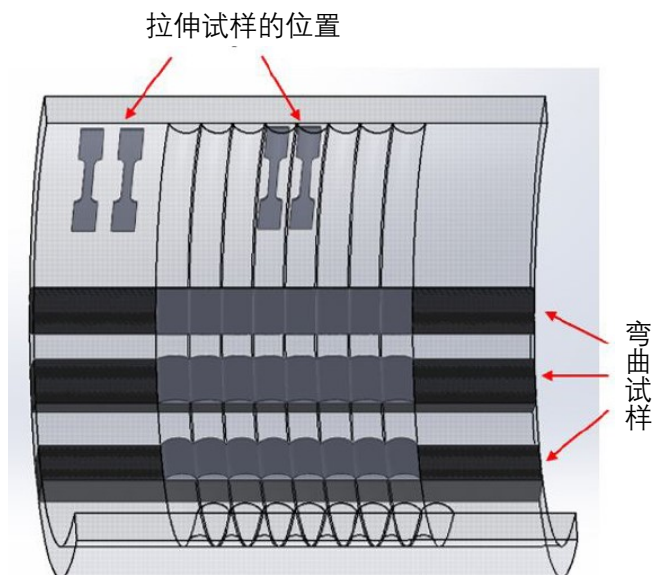


图2 拉伸试样和弯曲试样的取样位置

层625合金的局部机械性能。并且，使用光学显微镜（OM）通过彩色蚀刻（乙醇中37.5%磷酸，在6 V下电解75秒）来获取微观结构特征。使用差分干涉对比度的方式，来拍摄这些图像。接下来，使用扫描电镜来研究微观结构。

弯曲试验是根据DNVGL-ST-F101：2017标准进行的，该标准规定了垂直于覆层方向提取的矩形试样，以评估覆层质量。因此，弯曲样品应横向弯曲至180°，无裂纹或缺陷。随后，通过渗透检测对样品进行评估。

三、测试结果和探讨

（一）拉伸试验

拉伸试验的结果为575MPa，586MPa，580MPa，平均值为580MPa；微拉伸试验的结果为525MPa，537MPa。

（二）显微硬度

表2给出了所分析区域的显微硬度值（图4a）。硬度值均低于250 HV。由此说明了采用该种钢管和焊材以及焊接工艺所获得的堆焊复合管的硬度是合适的。此外，API 5L X65钢的显微硬度高于625合金。

表2 复合管不同位置的显微硬度测试值

测量位置	#1	# 2	# 3
625堆焊层表面	185HV10	190HV10	186HV10
堆焊层焊道交界处	210HV10	188HV10	177HV10
API 5L X65 钢	225HV10	219HV10	215HV10

（三）显微结构观察

本次试验还通过扫描电镜评估了API 5L X65和625合金的微观结构特征。因此，图3显示了API 5L X65钢的微观结构。可以注意到基于铁素体的微观结构，这是低合金高强钢的一个特征，从微观照片中可以看到不同尺寸的更细晶粒中的晶界和铁素体。

在图4中，在625合金的表面，扫描电镜图像显示了不同放大倍数下的堆焊层微观结构，可以观察到渗入枝晶臂的碳化物。

在图5中，可以看到在堆焊过程中，由二次受热促进的微观结构转变。因此，前一焊道的部分熔化并未导致缺陷（如未熔合）。当焊缝金属通过焊接熔敷时，观

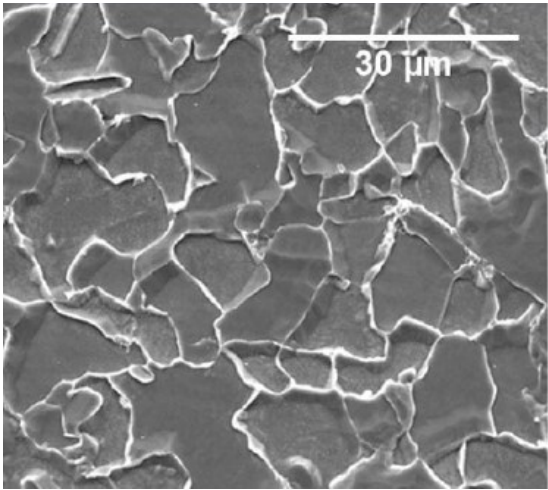


图3 API 5L X65 钢的微观结构

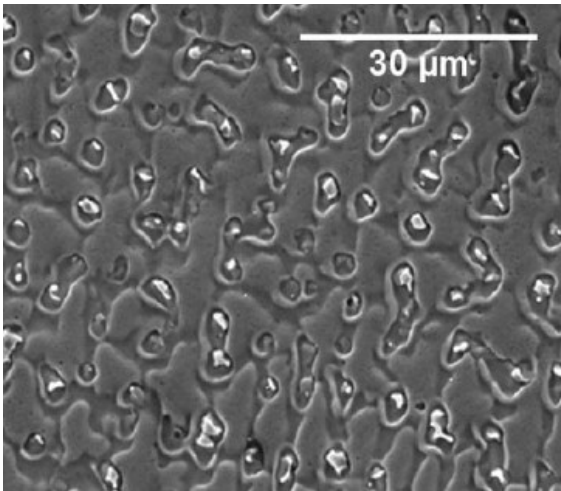


图4 625 合金堆焊层的微观结构

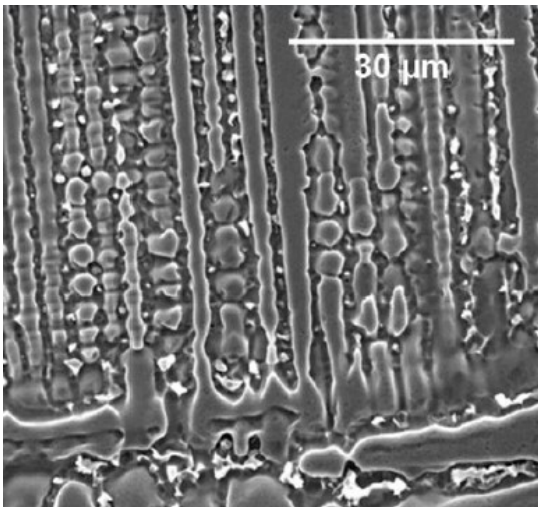


图5 625 合金堆焊层焊道交界处的微观结构

观察到枝晶特征。由于堆焊过程中熔融金属达到的温度会对之前的焊道会再次加热。因此，后续焊道对之前的焊道有退火作用，对之前一道625合金堆焊焊道的微观结构有影响。

(四) 弯曲试验

弯曲试验时，将堆焊焊道至于弯曲形变最大的一侧，弯曲180°之后对堆焊层和基材层的结合部位进行渗透检测。四个弯曲试样的渗透检测结果均表明其界面无裂纹或缺陷。

四、结论

本次研究工作评估了采用API 5L X65碳钢管作为基材，625合金作为堆焊层的复合管。根据复合管的制备条件和后续复合管的性能测试，可以得出以下结论：

- 1) 采用热丝TIG焊接工艺，在API 5L X65钢管基体上成功堆焊了625合金层；
- 2) 625合金堆焊层的显微硬度值略低于API 5L X65钢。因此，API X65 PSL2钢综合性能得到了改良；
- 3) 弯曲试验表明堆焊层界面无缺陷或裂纹。此外，渗透检测证明了堆焊层的质量是适宜的。

参考文献

- [1] 奥贝德 0, 阿法尼等. 内衬管道中单道堆焊和环缝焊接的热机械分析[N]. 材料工程与性能, 2017, 26: 61-76.
- [2] 麦党德KA. 复合环焊缝和管线管道材料的工程关键评估. 第八届国际管道大会论文集[C]. 加拿大阿尔伯塔省卡尔加里市, 2010, IPC2010-31627.
- [3] 穆尼聂. 镍合金堆焊层力学行为和X射线弹性常数的研究[J]. 材料研究, 2019, 22 (4): 20-39.

作者简介:

徐光耀 (1973-), 男, 汉族, 山东菏泽人, 工学学士, 焊接高级技师, 主要从事海洋石油平台和天然气模块的焊接技术和施工管理工作。