

doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2020.05.003



热丝 TIG 堆焊 Alloy 59 镍基合金工艺及其堆焊层性能研究

张 伟^{1,2}, 朵元才^{1,2}, 张建晓^{1,2}, 武正彬^{1,2}, 杨 洋^{1,2}, 吕 龙^{1,2}, 李树龙^{1,2}

(1. 兰州兰石重型装备股份有限公司, 兰州 730314;

2. 甘肃省压力容器特种材料焊接重点实验室, 兰州 730314)

摘 要:采用 ASTM A262. E 法、ASTM G48A 法、ASTM G36 及 NACE TM0177 腐蚀试验和力学性能、金相等测试方法, 对热丝 TIG 堆焊 Alloy 59 进行了焊接工艺的研究, 对堆焊层各项性能进行了研究。研究表明, 热丝 TIG 是堆焊 Alloy 59 镍基合金的有效方法, 堆焊层平整度较好, 未观察到金相组织粗大晶粒; 堆焊层力学性能及硬度均符合相关要求, 抗晶间腐蚀及点蚀能力好, 显示出良好的耐饱和湿 H₂S 环境腐蚀能力, 同时也满足在 Cl⁻ 应力腐蚀环境中的使用。

关键词:焊接; 热丝 TIG; Alloy 59; 金相组织; 腐蚀试验

中图分类号: TH140.7; TG115.6 **文献标志码:** A

Research on Hot-wire TIG Surfacing Nickel-based Alloy 59 Process and Its Surfacing Properties

Zhang Wei^{1,2}, Duo Yuancai^{1,2}, Zhang Jianxiao^{1,2}, Wu Zhengbin^{1,2}, Yang Yang^{1,2}, Lü long^{1,2}, Li Shulong^{1,2}

(1. Lanzhou LS Heavy Equipment Co., Ltd., Lanzhou 730314, China;

2. Pressure Vessel Special Material Welding Key Lab of Gansu Province, Lanzhou 730314, China)

Abstract: The welding process of hot-wire TIG surfacing Alloy 59 and properties of the surfacing layer were investigated by testing methods such as ASTM A262E, ASTM G48A, ASTM G36, NACE TM0177 and mechanical test, and microstructure research. The present study shows that hot-wire TIG is an effective method for surfacing nickel-based Alloy 59, the surfacing layer has better smoothness, and no microstructure of coarse grains was observed; Both the mechanical properties and hardness of the surfacing layer meet relevant requirements. The surfacing layer has better resistance to intergranular corrosion and pitting, exhibits good resistance to corrosion in saturated wet H₂S environment and can satisfy use in chloride-induced stress corrosion environment.

Key words: welding; hot-wire TIG; Alloy 59; microstructure; corrosion test

0 引言

随着石油化工行业生产规模的逐步扩大及受原油品质的影响, 石化设备用户对于产品的耐腐蚀性要求越来越高, 以延长设备的正常运行周期。用于制造设备的材料也在不断地改进发展, 其中镍基合金材料在第二代 N10276、N06022 的基础上, 开发出了 N06059、N10675 等第三代材料^[1],

其中, N06059 也称为 Alloy 59。由于该镍基合金价格昂贵, 为节约制造成本, 一般将其应用于堆焊耐腐蚀层。

国内相关厂家对于 Alloy 59 合金的应用, 仅限于成品进口 Alloy 59 板材或者 Q345R + N06059 复合板^[1-2]。目前尚未有利用热丝 TIG 等技术堆焊 Alloy 59 的研究报告, 本文以某重点换热器管板堆焊制造为背景, 进行前期的焊接工艺试验并对堆焊层进行测试, 为后续产品生产提供技术

支持。

1 试验材料及方法

堆焊试验母材为舞钢生产的 14Cr1MoR, 供货态为正火 + 回火, 规格为 300 mm × 300 mm ×

32 mm; 焊接前对堆焊面进行打磨, 清除表面油污, 为防止在第一层堆焊过程中母材受热区域降温过快形成淬硬组织, 第一层堆焊前对母材试板进行预热, 预热温度 ≥ 150 °C。焊接材料选用某公司制造的 ERNiCrMo - 13, 焊丝规格 $\varnothing 1.2$ mm, 焊接材料化学成分如表 1 所示。

表 1 ERNiCrMo - 13 化学成分

元素	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Co	Mo	Cu	Fe	Al
含量	0.004	0.21	0.003	0.001	0.05	22.9	60	0.01	15.82	0.204	0.09	0.3

在 14Cr1Mo 母材上堆焊 Alloy 59 合金时, 经综合考虑, 焊接方法采用热丝 TIG, 该焊接方法是在传统 TIG 基础上, 当填充焊丝在进入熔池前一定距离处时, 开始由加热电源通过导电块对其通电, 但不产生电弧, 依靠电阻热将焊丝加热至预定温度, 减小了焊接熔池从电弧中输入的热量, 熔敷效率有了较大的提高^[3-4]。热丝 TIG 焊的送丝速度独立于焊接电流控制, 因此能够更好地控制焊缝成形。该焊接方法是一种较为优良的焊接方法, 在具备传统 TIG 高质量焊缝的基础上熔敷效率有了很大的提升^[5]; 在一些企业, 热丝 TIG 堆焊已大规模应用于法兰密封面堆焊、小直径管板堆焊中, 具有成熟的焊接工艺及经验。

镍基合金焊接的主要工艺难点是由于 Ni 易

与其他元素形成低熔点共晶物, 而在焊接过程中形成热裂纹, 另外在焊接过程中, 焊缝、热影响区如长时间处于高温状态会造成其他相析出, 从而影响腐蚀性能^[6], 这些都是在进行焊接试验时需要考虑的因素。根据产品制造技术条件要求, Alloy 59 合金的堆焊层的化学成分符合表 1 或 ASME II 卷 C 篇 A5.14 中的要求, 耐腐蚀性测试需通过 ASTM G48A 法、ASTM A262E 法、NACE TM0177 及 ASTM G36 等 4 种方法测试、弯曲试验及熔合面剪切强度等力学性能符合 NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》中的要求。在试板上经过多次焊接规范试验之后选取最佳参数如表 2 所示。

表 2 热丝 TIG 堆焊 ERNiCrMo - 13 焊接规范参数

层数	焊接材料	焊材规格/ mm	焊接电流/ A	焊接电压/ V	焊接速度/ (mm · min ⁻¹)	电源极性	道间温度/ °C
1	ERNiCrMo - 13	1.2	240 ~ 260	9.5 ~ 10.5	90	DCEN	100 ~ 250
2	ERNiCrMo - 13	1.2	240 ~ 260	9.5 ~ 10.5	90	DCEN	5 ~ 100
3	ERNiCrMo - 13	1.2	240 ~ 260	9.5 ~ 10.5	90	DCEN	5 ~ 100
4	ERNiCrMo - 13	1.2	240 ~ 260	9.5 ~ 10.5	90	DCEN	5 ~ 100

表 3 退火热处理工艺参数

项目	起始温度/ °C	升温速度/ (°C · h ⁻¹)	恒温温度/ °C	恒温时间/ h	降温速度/ (°C · h ⁻¹)	冷却方式
参数	≤ 400	≤ 75	690 ± 10	8	≤ 75	≤ 400 °C 后空冷

在严格按照表 2 的参数, 并根据经验控制堆

焊过程中的搭接量、焊枪角度焊接之后, 进行外观

及平整度检查,平整度 ≤ 1.8 mm,飞溅极小;对堆焊完成的试板根据 NB/T 47013.3—2015《承压设备无损检测 第3部分:超声检测》及 NB/T 47013.5—2015《承压设备无损检测 第5部分:渗透检测》进行检测,合格。一般来讲,根据产品制造要求,需要对堆焊完成之后的筒体、管板进行消应力退火热处理^[7],退火参数主要根据母材材料制定,如表3所示。

退火完成之后再次进行 UT,PT 无损检测,合格之后进行堆焊层化学成分、力学性能、金相组织及耐腐蚀性能的测试。

表4 堆焊层熔敷金属化学成分

元素	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Co	Mo	Cu	Fe	Al	Nb	%
含量	0.01	0.23	0.001	0.001	0.02	23.45	57.86	0.02	15.46	0.01	1.21	0.25	0.01	

从表4可以看出,熔敷金属化学成分与焊丝化学成分相差不大,符合 ASME II 卷 C 篇 A5.14 中的规定;说明在严格遵守该焊接规范的情况下,14Cr1MoR 材质母材对堆焊层的稀释率可以控制在较低范围之内,最低可以保证堆焊层表面 4.25 mm 之内的化学成分满足要求,从而保证其

2 试验结果与讨论

2.1 堆焊层熔敷金属化学成分

焊接及热处理完成后,根据 GB/T 4336—2016《碳素钢和中低合金钢多元素含量的测定 火花放电原子发射光谱法》对堆焊层熔敷金属进行化学成分分析,见表4,合格的化学成分是保证堆焊层耐腐蚀性的充分条件。化学成分检测位置在堆焊层表面以下 3.75~4.25 mm。

耐腐蚀性。

2.2 力学性能试验

根据 GB/T 232—2010《金属材料弯曲试验方法》对堆焊层进行大小侧弯检测、依据 GB/T 6396—2008《复合钢板力学及工艺性能试验方法》对熔合面剪切强度进行试验,结果如表5所示。

表5 堆焊层力学性能

侧弯试验			剪切试验		
侧弯试样尺寸/mm	弯曲直径/mm	弯曲角度	取样位置	S_0 /mm	剪切强度 τ /MPa
32 + 堆焊层 \times 10	40	$\alpha = 180^\circ$	垂直于焊缝		
32 + 堆焊层 \times 10	40	$\alpha = 180^\circ$	平行于焊缝	113.36	515
32 + 堆焊层 \times 3	40	$\alpha = 180^\circ$	垂直于焊缝	110.63	535
32 + 堆焊层 \times 3	40	$\alpha = 180^\circ$	平行于焊缝		

从表5可以看出,8件侧弯全部合格无任何缺陷,说明堆焊层及母材塑性良好;熔合面剪切强度达到了 515,535 MPa,大于 GB/T 6396—2008《复合钢板力学及工艺性能试验方法》及制造技术条件中的规定值 200~210 MPa,堆焊层与母材结合紧密,第一层堆焊层与母材之间熔深适当,具有良好的抗剪切能力^[8]。

2.3 硬度及三区金相组织

制取一块试样,分别对试样的堆焊层表面、过渡层、热影响区及母材依据 GB/T 4340.1—2009《金属材料维氏硬度试验》进行维氏硬度测试(HV10),其中堆焊层表面测试4点,其余部位各

测试2点,测试结果如图1所示。

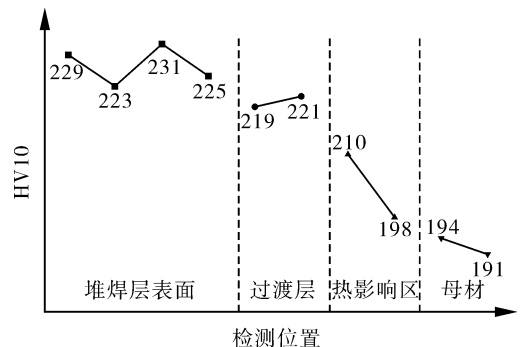


图1 堆焊层各区域硬度对比

由图1可看出,4个区域硬度值均符合相关标准,最高值为231,硬度值为堆焊层表面>过渡层>热影响区>母材;在堆焊的过程中,过渡层冷却速度较慢,受到外层的回火作用,所以过渡层的硬度略小于堆焊层表面;热影响区硬度值高于母材,是在焊接的过程中由于热循环产生了淬硬组织,但经堆焊层剩余3道焊缝的回火作用,热影响区最高硬度值仅为210。

将堆焊后的试板切取横截面进行打磨、腐蚀,然后进行显微组织分析,金相照片见图2,3。

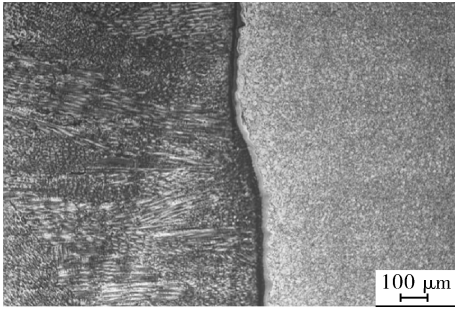


图2 焊缝及热影响区金相组织

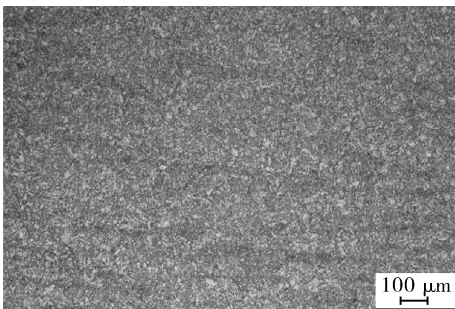


图3 母材金相组织

可以看出焊缝为典型的柱状晶组织,为 γ 相,第一层焊缝晶粒较为细小,一方面是因为热丝TIG热输入较小;另一方面是受到后续堆焊时的影响,相关研究认为,多层堆焊时后续焊道的影响

会使前面工序焊道形成一定程度的再结晶^[9];热影响区组织为贝氏体回火组织+少量铁素体,母材微观组织为典型的贝氏体回火组织,贝氏体为粒状。

2.4 腐蚀试验

堆焊试板需要经过 $690\text{ }^{\circ}\text{C} \times 8\text{ h}$ 退火热处理,该温度区间是镍基合金的敏化温度区间^[7],经热处理之后耐腐蚀性能是否满足要求是产品制造试验中最为关心的问题。在腐蚀试验中,选择ASTM A262. E法、ASTM G48A法、ASTM G36法、NACE TM0177法等4种方法对其耐腐蚀性能进行了测试。

(1)依据ASTM A262. E法试验标准,在进行硫酸-硫酸铜晶间腐蚀试验时,对试样进行 $650\text{ }^{\circ}\text{C} \times 1\text{ h}$ 敏化处理,弯曲后无晶间腐蚀裂纹倾向。

(2)依据ASTM G48A法进行三氯化铁麻点腐蚀试验,试验温度 $22 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,试验周期72 h,FeCl₃浓度6%,试验数据如表6所示。

表6 G48A法腐蚀试验数据

试验原重量/ g	腐蚀后重量/ g	腐蚀率/ [$\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]
29.911 9	29.911 3	0.002 9
30.273 6	30.273 0	0.002 9

从表6可以看出,堆焊层抗点蚀能力优良,腐蚀速率为 $0.0029\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,小于一般技术规定中 $4.17\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的要求。

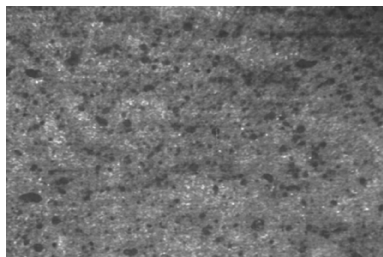
(3)为进一步验证焊接熔敷金属的抗腐蚀能力,按照NACE TM0177《H₂S环境中抗特殊形式的环境开裂材料的实验室试验方法规定》进行了硫化物应力腐蚀试验。试验溶液为质量分数5%氯化钠及0.50%冰乙酸的蒸馏水溶液,加载方式为四点弯曲法,从堆焊的焊材熔敷金属表面向下2.5 mm处取试样,试验结果表明,该堆焊层具备在饱和H₂S环境下服役的能力,具体试验结果如表7所示。

表7 NACE TM0177A试验结果

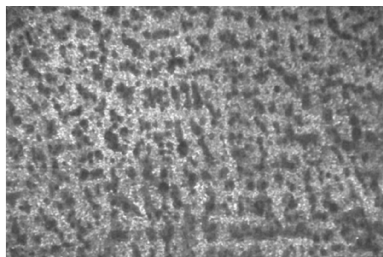
试样编号	加载应力/MPa	测试周期/h	溶液 pH 值		失效检查
			初始溶液	试验结束	
试样 1	210	720	2.72	3.81	无裂纹
试样 2	210	720	2.72	3.81	无裂纹
试样 3	210	720	2.72	3.81	无裂纹

(4)为了验证堆焊层在应力条件下的腐蚀开裂倾向,依据 ASTM G36 试验标准进行了堆焊层金属在沸腾氯化镁应力腐蚀开裂试验;试验温度为 155 ℃,溶液为 45% MgCl₂;试样 3 件,加载应

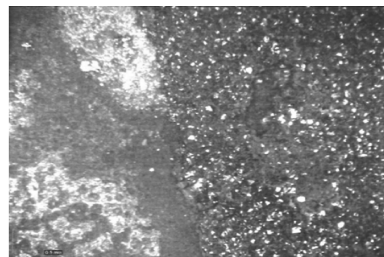
力为 210 MPa,每个周期为 96 h。经第 1 周期之后,经 10 倍放大镜观察未发现裂纹;进行第 2 周期试验,经 10 倍放大镜检查无裂纹,试验之后检测试样的微观组织金相如图 4 所示。



(a) 试样 1



(b) 试样 2



(c) 试样 3

图 4 ASTM G36 腐蚀试样表面微观金相照片 10 ×

3 结论

(1)热丝 TIG 是堆焊 Alloy 59 合金的一种有效方法,该堆焊方法热输入小、保护较好,堆焊面不平整度 ≤ 1.8 mm,后续制造加工量小。

(2)采取合理的规范,堆焊层化学成分及各项力学性能优异,微观金相未发现晶粒粗大现象,符合相关技术标准及技术条件的要求。

(3)堆焊层随母材进行热处理之后,所测试各项耐腐蚀性能均符合要求,该镍基合金可以用于含有饱和 H₂S 及 Cl⁻ 的苛刻环境下服役产品的制造。

参考文献:

- [1] 刘飞,邓宁嘉,芮天安. 镍基合金 N06059 爆炸复合板开发应用[J]. 石油化工设备,2013,42(2): 86-89.
- [2] 陆金权,童明涓. 羰化反应器制造工艺[J]. 中氮肥,2011(1):43-46.

- [3] 赵福海,华学明,叶欣,等. 热丝 TIG 焊方法最新研究进展[J]. 热加工工艺,2011,40(3):151-155.
- [4] 吕世雄,孙清洁,范阳阳,等. 电弧热丝 TIG 焊工艺特点分析[J]. 焊接,2007(10):41-43.
- [5] 张敏. 焊接工艺对镍基堆焊层组织及性能的影响[J]. 压力容器,2018,35(12):69-73.
- [6] 李双燕. 核电设备中的镍基合金带极电渣堆焊[J]. 压力容器,2011,28(03):33-37.
- [7] 王顺花,陈宜,张建晓,等. Inconel 625 合金堆焊管板退火过程中的组织和耐蚀性变化[J]. 金属热处理,2015,40(12):22-27.
- [8] 刘阳,刘爱国. Q235 钢表面 CMT 堆焊 316 不锈钢的组织与性能[J]. 焊接,2017(1):64-67.
- [9] 张淑雁,任旭升,徐成,等. Inconel 625 镍基合金带极电渣堆焊试验研究[J]. 焊管,2016,39(11):9-13.

作者简介:张伟(1990),男,工程师,主要从事压力容器类产品焊接研究、新材料开发及焊接性研究工作,通信地址:730314 甘肃省兰州市兰州新区兰石高端装备产业园 2 号门,E-mail:zhangwei@lshec.com。

本文引用格式:

张伟,朵元才,张建晓,等. 热丝 TIG 堆焊 Alloy 59 镍基合金工艺及其堆焊层性能研究[J]. 压力容器,2020,37(5):13-17.

Zhang Wei, Duo Yuancai, Zhang Jianxiao, et al. Research on hot-wire TIG surfacing nickel-based Alloy 59 process and its surfacing properties[J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(5): 13-17.