

热丝TIG堆焊Inconel 601镍基合金工艺及其堆焊层性能研究

高佑亮^{1,2} 孙波^{1,2} 陶彦文^{1,2} 王丛元^{1,2} 张伟^{1,2} 张建晓^{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 G36腐蚀试验和力学、金相等测试方法, 对热丝TIG堆焊Inconel 601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Inconel 601镍基合金的有效方法, 堆焊层平整度较好, 金相组织未观察到粗大晶粒; 堆焊层力学及硬度均符合相关要求, 同时也满足在Cl⁻应力腐蚀环境中使用。

关键词: 焊接 热丝TIG Inconel 601 金相组织 腐蚀试验

0 前言

Inconel 601是一种添加了金属铝的耐高温、耐腐蚀的镍-铬-铁固溶强化合金, 具有良好的耐高温腐蚀和抗氧化性能、优良的冷热加工和焊接性能, 在700℃以下具有满意的热强性和高的塑性, ASME标准中牌号为Alloy UNS N06601。由于铬含量较高, 适用于多种腐蚀性介质和抗高温环境, 铝元素的添加进一步加强了抗氧化性能, 即使在温度高达1180℃时, 仍能够表现出良好的抗氧化性能。这种材料广泛应用于各种热工过程、化工过程、环保及发电等领域, 如钛白粉生产中的氧气预热器的辐射炉管、氨水改性中用的绝缘罐、硝酸生产设备中的催化格栅支架、高密度聚乙烯生产中的催化再生器以及空气预热器等。

某合成氨优化节能技改工程项目甲二换热器, 管程设计温度250/475℃, 设计压力

3.48MPa, 换热管材质15CrMo, 规格 $\phi 19 \times 2$;

介质特性: 易爆; 管板材质为15CrMo堆焊Inconel 601, 结构简图如图1。

本文针对换热器管板要求堆焊镍基堆焊层, 研究了在15CrMoR材料上采用热丝TIG焊堆焊ERNiCrFe-11焊丝, 焊后经690℃ $\times$ 8h消除应力处理对堆焊层组织和性能影响。

1 试验材料及方法

堆焊试验母材为15CrMoR, 供货态为正火+回火, 规格 $\delta 40 \times 300 \times 300$ 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 ℃。焊接材料选用某公司制造的ERNiCrFe-11, 焊丝规格 $\phi 1.2$ mm, 焊接材料化学成分如表1所示:



图1 甲二换热器简图

在15CrMo母材上堆焊ERNiCrFe-11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，熔覆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，因此也就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覆效率有了很大的提升^[5]；目前热丝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，具有成熟的工艺及焊接经验。

镍基合金焊接的主要工艺难点是由于Ni与其他元素容易形成低熔点共晶物，容易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，Inconel 601合金堆焊层的化学成分应符合表1或ASME II 卷C篇A5.14 中的要求，堆焊层耐腐蚀性测试需通过ASTM G36方法测试、弯曲试验及熔合面剪切强度等力学性能应符合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：

在严格按照表2的规范，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≤1.8mm，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，根据产品制造需要对堆焊完成之后的筒体、管板需要进行消应力热处理^[7]，热处理参数主要根据母材材料制定，如表3所示：

表 1 ERNiCrFe-11化分(wt%)

元素	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Fe	Al
标准值	≤0.10	≤1.0	≤0.020	≤0.015	≤0.50	21.0－25.0	58.0－63.0	≤1.0	≤20	1.0－1.7
实测值	0.023	0.39	0.001	0.001	0.19	23.60	61.31	0.02	14.55	1.31

表 2 热丝TIG堆焊ERNiCrFe-11规范表

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)	电源极性	道间温度 ℃
1	ERNiCrFe-11	1.2	240－260	9.5－10.5	90	DCEN	100－250
2	ERNiCrFe-11	1.2	240－260	9.5－10.5	90	DCEN	5－100
3	ERNiCrFe-11	1.2	240－260	9.5－10.5	90	DCEN	5－100
4	ERNiCrFe-11	1.2	240－260	9.5－10.5	90	DCEN	5－100

表 3 焊后热处理工艺参数

项目	装炉温度 (℃)	升温速率 (℃/h)	保温温度 (℃)	保温时间 (h)	降温速率 (℃/h)	冷却方式
PWHT	≤400	≤55	690±10	4	≤55	≤400℃后出炉空冷

焊后热处理完成之后再次进行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。

2 试验结果与讨论

2.1 堆焊层熔覆金属化学成分

焊接及热处理完成之后，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》标准对堆焊层熔覆金属进行化学成分分析，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及3.75mm－4.25mm深度内，化学成分测试如表4所示：

从表4可以看出与焊丝化学成分相差不大，熔覆层化学成分符合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，15CrMoR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4.25mm之内的化分满足要求，从而保证其耐腐蚀性。

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：

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形良好；熔合面剪切强度达到了521 MPa、533 MPa，大于GB/T 6396-2008《复合钢板力学及工艺性能试验方法》及制造技术条件中规定的值200MPa－210MPa，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，硬度数值为：237、230、245、228；表层、过渡层、母材部位各测试2点，测试硬度数值分别为：232、235；198、204；189、183，四个区域硬度值均符合相关标准，最高值为245；堆焊层表面>表层>过渡层>母材。

堆焊之后的试板切取横截面之后进行打磨、腐蚀之后进行显微组织分析，焊缝为典型的柱状晶组织，为γ相，热影响区组织为贝氏体回火组织+少量铁素体，母材微观金相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℃×8h退火热处理，在该温度区间是镍基合金的敏化温度区间^[9]，经

表 4 堆焊层熔覆金属化学成分（wt%）

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe	Al
0.027	0.43	0.002	0.001	0.22	23.11	58.89	14.47	0.03	16.12	1.10

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	弯曲角度	取样位置	S0（mm）	剪切强度τ（MPa）
32mm+堆焊层×10	40mm	α=180°	垂直于焊缝		
32mm+堆焊层×10	40mm	α=180°	平行于焊缝	113.36 110.63	521 533
32mm+堆焊层×3	40mm	α=180°	垂直于焊缝		
32mm+堆焊层×3	40mm	α=180°	平行于焊缝		

该热处理之后耐腐蚀性能是否满足要求产品制造试验中最为关心的问题；在腐蚀试验中，选择ASTM G36法方法对其耐腐蚀性能进行了测试。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210MPa，每个周期为96h。经第一周期之后10倍放大镜观察未发现裂纹，之后进行第二周期试验，经10倍放大镜检查无裂纹。

3 结论

3.1热丝TIG是堆焊Inconel 601合金的一种有效方法，该堆焊方法热输入小、保护较好，堆焊面不平度≤1.8mm，后续制造加工量小；

3.2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；

3.3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Cl⁻等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(02):86-89.
- [2] 陆金权,童明涓.羰化反应器制造工艺[J].中氮肥,2011(01):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(03):151-155.
- [4] 吕世雄,孙清浩,范阳阳,等.电弧热丝TIG焊工艺特点分析[J].焊接,2007(10):41-43+63.
- [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310不锈钢的组织与性能[J].焊接,2017(01):64-67+71.
- [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.

Research on Hot-wire TIG Surfacing Nickel-based Inconel 601 Process and Its Surfacing Properties

Gao Youliang^{1,2}, Sun Bo^{1,2}, Tao Yanwen^{1,2}, Wang Congyuan^{1,2}, Zhang Wei^{1,2}, Zhang Jianxiao^{1,2}

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

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

Abstract: In this paper, the process of hot-wire TIG surfacing Inconel 601 the effect of different and Performance of surfacing layer were investigated by some corrosion tests including the ASTM G36 and Mechanical test, metallographic structure research. The result efforts of the present study are shows that hot-wire TIG is an effective method for surfacing nickel-based Inconel 601, the surfacing layer has better flatness, metallographic structure of coarse grains was not observed; Surfacing layer hardness and mechanics are in line with the relevant requirements, have better resistance to intergranular corrosion and pitting, exhibit good resistance to Cl⁻-stressed corrosive environments.

Keywords: weld; hot-wire TIG; Inconel 601; metallographic structure; corrosion test