

DOI:10.16683/J.CNKI.ISSN1674-0971.2024.1009

2.25Cr1Mo0.25V耐热钢与304不锈钢AA-TIG焊接接头组织及性能研究

刘永玲 何赞 冯亚南 辛晓龙 张渊虎 冯宜文 马生骥 李金元 汪燕芳
(兰州兰石集团兰驼农业装备有限公司, 甘肃 兰州 730700)

摘要:采用电弧辅助活性AA-TIG焊对2.25Cr1Mo0.25V耐热钢和304不锈钢管进行异种钢材焊接,并对其焊接接头的组织、硬度及力学性能进行分析。结果表明,使用AA-TIG焊能够一次性焊透2.25Cr1Mo0.25V耐热钢和304不锈钢,得到成形良好的焊接接头。焊缝处无裂纹等焊接缺陷,焊缝处各元素在焊缝水平方向分布均匀。在靠近两侧母材的焊缝区, Cr、Fe、Ni元素有一定的梯度,但无明显偏聚。焊接接头两边的母材区硬度值较低,在焊缝区域硬度达到最大,焊缝区域的硬度波动范围在400~489 HV之间,最终拉伸试样都断在304母材上,得到的平均拉伸强度为406 MPa,最大的抗拉强度为542 MPa。

关键词:电弧辅助活性AA-TIG焊;组织;力学性能;2.25Cr1Mo0.25V耐热钢;304不锈钢
中图分类号:TF19 **文献标识码:**B **文章编号:**1674-0971(2024)-001-05

Study on the microstructures and properties of AA-TIG welding joint of 2.25Cr1Mo0.25V heat-resistant steel and 304 stainless steel

Liu Yongling, He Yun, Feng Yanan, Xin Xiaolong, Zhang Yuanhu, Feng Yiwen, Ma Shengji, Li Jinyuan, Wang Yanfang
(Lanzhou Lanshi Group Lantuo Agricultural Equipment Co., Ltd., Lanzhou 730700, Gansu, China)

Abstract: The dissimilar steels of 2.25Cr1Mo0.25V heat-resistant steel and 304 stainless steel pipe were welded by arc-assisted active AA-TIG welding, and the microstructure, hardness and mechanical properties of the welded joints were analyzed. The results show that the AA-TIG welding can weld through 2.25Cr1Mo0.25V heat-resistant steel and 304 stainless steel at one time, and get a well-formed welding joint. There are no welding defects such as cracks at the weld seam, and all elements at the weld seam are evenly distributed in the horizontal direction of the weld seam. In the weld zone near the base metal on both sides, there is a certain gradient of Cr, Fe, and Ni elements, but there is no obvious segregation. The hardness values of the base metal areas on both sides of the welded joint are relatively low, reaching their maximum in the weld area. The hardness fluctuation range in the weld area is between 400 and 489 HV, and the final tensile specimens are all broken on the 304 base metal. The average tensile strength obtained is 406 MPa, and the maximum tensile strength is 542 MPa.

Keywords: arc-assisted active AA-Tig welding, microstructure, mechanical properties, 2.25Cr1Mo0.25V heat resistant steel, 304 stainless steel

前言

异种钢焊接技术有着广泛需求,特别是在石油化工生产中,生产设备长期处在高温、高压和强腐蚀环境中运行^[1],这些高温、高压、临氢的设备大多

采用Cr-Mo钢材料制造^[2],最常采用2.25Cr1Mo0.25V钢,但任何一种金属材料都不可能完全满足整体设备的使用要求,即使可能有某种金属材料相对比较理想,也常常由于十分稀缺价格昂

收稿日期:2023-12-20

作者简介:刘永玲,(1989-),女,工程师,主要从事机械设计、材料热处理方面的研发设计。

贵,而不能在工程中得到实际应用^[3],因此,需要进行异种材料之间的连接,最大限度地发挥材料的各自优势来满足临氢设备的安全、可靠运维的要求。

当前,针对厚板异种钢焊接问题,众多学者采用 GMAW 窄间隙焊接方法、等离子束焊、电子束焊、激光深熔焊等焊接方法开展了大量的研究。但对于企业生产来说,通常所焊部件的焊缝不规则,因此很难采用这些方法来实现焊接;由于压力容器的焊接工艺需要严格的试验验证及相关标准的许可,应慎重选择坡口形式、填充焊材、焊接方法及工艺参数;同时,生产中还要考虑现场施工与安装等问题,往往需要与传统焊接方法相互结合。在很多情况下压力容器生产是单件小批量,成本控制更多关注现有焊接工艺规程的效率提升。

电弧辅助活性 TIG 焊(Arc assisted Activating TIG welding,即 AA-TIG 焊)是由樊丁等学者提出的一种新型焊接方法。结合该方法设计出双钨极 AA-TIG 焊枪,主电弧采用纯 Ar 气保护,辅助电弧采用(Ar+O₂)混合气体保护,两钨极间距可调,由于小电流活性气体的引入使熔池内液态金属向底部流动,使熔深成倍增加。该焊枪巧妙地将活性焊接法与双钨极 TIG 焊的优点结合,可在大电流和较高焊接速度下对 3~12 mm 厚的材料无需开坡口,实现高效的单面焊双面成形,不仅突破了普

通 TIG 焊熔深浅和生产效率低的缺点,又避免了常规活性焊涂抹活性剂的工序和针对不同材料需研发不同活性焊剂等问题^[4]。与常规 TIG 焊相比,AA-TIG 焊技术表现出焊接熔深大,生产率高、焊接领域广、成本低、焊接变形小等诸多优点。

为了研究 2.25Cr1Mo0.25V 耐热钢与 304 不锈钢焊接接头的组织及力学性能,对焊接接头进行力学性能测试、显微组织分析、元素扩散分析和硬度测试。本文采用电弧辅助活性 AA-TIG 焊方法对 2.25Cr1Mo0.25V 耐热钢和 304 不锈钢管进行异种钢材焊接,并对焊接接头组织及力学性能进行了深入分析。

1 试验条件及方法

试验材料采用 2.25Cr1Mo0.25V 耐热钢和 304 不锈钢,其化学成分如表 1 和表 2 所示。材料的规格为 Φ48 mm(外径)×6 mm(厚度)×150 mm(长度)的管。主电弧采用 OTC 可控硅控制高性能交直流两用的 TIG 脉冲焊机 ACCUTIG 300P,辅助电弧采用 OTC 全数字字 IGBT 逆变控制交直流脉冲 TIG 焊接 ADP400^[4],行走机构采用直流电动机 PWM 驱动来控制焊接速度^[5]。

焊前先对材料进行机械打磨去除表面氧化膜,然后用无水乙醇擦洗干净^[6]。焊接工艺参数如表 3 所示。

表 1 2.25Cr-1Mo-0.3V 化学成份(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 2.25Cr-1Mo-0.3V (mass fraction,%)

学成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Nb	Ni	Cu	Ti	B	Ca
(%)	0.11-0.15	≤0.10	0.30-0.6	≤0.015	≤0.010	2.00-2.5	0.90-1.1	0.25-0.35	≤0.07	≤0.25	≤0.20	≤0.03	≤0.002	≤0.015

表 2 304 不锈钢化学成份(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of 304 stainless steel(mass fraction,%)

化学成分	C	Mn	Si	S	P	Ni	Mo	Cr
%	0.02	1.69	0.33	0.001	0.02	11.1	2.4	18.33

表 3 焊接工艺参数

Table 3 Welding process parameters

最小预热温度 T _{min} /°C	道间温度 T°/°C	电源极性	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 v/(mm/min)	气体流量 q/(L/min)
15	15	直流正接	大钨极:200 小钨极:60	15 17	60 70	氧气:0.5 氩气:12 氩气:15

采用 VHX-600 光学显微镜观察试样的微观组织；采用 HITACHIS-3400N 扫描电镜对试样的微观组织及成分进行分析。腐蚀剂用王水(含浓盐酸 60 mL，浓硝酸 20 mL)，其中对 2.25Cr1Mo0.25V 试样腐蚀处理 4 s，对 304 试样及焊缝处试样腐蚀处理 20 s。采用 HXD-1000TMC 型显微硬度仪测量接头的显微硬度，测试点位置沿焊缝中心线，加载载荷为 1.96 N，保持时间为 15 s。拉伸试验采用 Zwick/RoellZ100 型电子万能材料试验机^[7]，拉伸标准为 GB/T2651-2008，拉伸速率为 5 mm/min。

2 试验结果及分析

2.1 焊接接头的组织

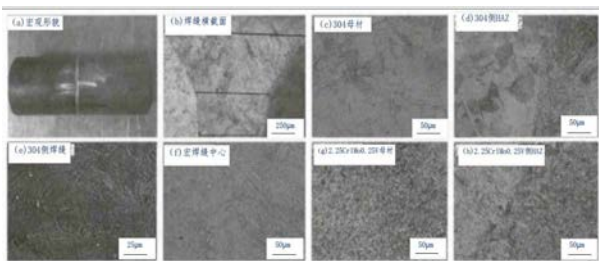


图1 焊接接头宏观形貌和显微组织

Fig.1 Macroscopic morphology and microstructure of welded joints

图 1 (a) 为焊接接头宏观形貌。由图可知，焊接接头焊缝完整、光滑并带有金属光泽，焊缝处无裂纹、焊瘤、未熔合等焊接缺陷。

图 1 (b) 为焊缝横截面宏观形貌，从上到下依次为焊缝上层、焊缝中层和焊缝下层。可以看出，由于焊接束流恰当，整个厚度熔透；焊缝内部和两边界处无裂纹产生，说明焊缝内未生成大量的脆性相。其次，焊缝宽度不一致，有三个区域，在焊缝横截面由上至下，焊缝宽度逐一减小，三个区域的焊缝宽度分别约为 2.6 mm、1.5 mm、1.3 mm。

将焊缝分成三个区域，即 2.25Cr1Mo0.25V 侧焊缝区、焊缝中心区及 304 侧焊缝区。

图 1 (c) 为 304 母材的显微组织，可见 304 母材的显微组织为类方块状的奥氏体。

图 1 (d) 为 304 侧的热影响区，可见热影响区比较窄，不是很明显。其热影响区的显微组织为相互成一定角度分布的板条回火马氏体。

图 1 (e) 为 304 侧焊缝在扫描电镜下的显微组织，从图可知 304 侧焊缝由奥氏体 + 少量铁素体组成，奥氏体中的亚结构为具有一定夹角的隐晶板条马氏体，在马氏体基体上存在有弥散分布的点

状析出物。

图 1 (f) 为焊缝中心的显微组织，可见在焊缝中心形成回火托氏体。

图 1 (g) 为 2.25Cr1Mo0.25V 母材的显微组织，其显微组织为颗粒状铁素体。

图 1 (h) 为 2.25Cr1Mo0.25V 侧的热影响区，其热影响区比较宽，比较明显，晶粒粗大^[8]。

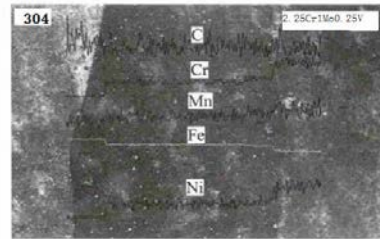


图2 焊缝附近的元素分布曲线

Fig.2 Element distribution curve near the weld seam

焊缝中反应相的种类和形态取决于两种被金属的各元素在焊缝中的分布情况，即与二者的熔化量有关。对焊缝横截面上各元素在水平方向的分布进行了线扫描分析，结果如图 2 所示。

由图可以看出，各元素在焊缝水平方向分布均匀，在靠近两侧母材的焊缝区，Cr、Fe、Ni 有一定的梯度。在靠近 304 焊缝侧的 Cr 含量较低并呈一定梯度，在焊缝中间 Cr 含量适中，而靠近 2.25Cr1Mo0.25V 焊缝侧的 Cr 含量较高并呈一定梯度，这说明两种金属熔化后在熔池内混合充分，没有出现明显的偏析，这为焊缝内反应相的均匀分布提供了条件。

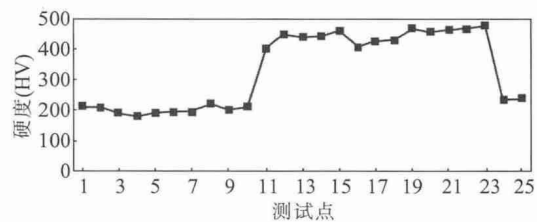


图3 焊缝上层硬度曲线

Fig.3 Upper layer hardness curve of weld seam

2.2 焊缝显微硬度分析

为了测试焊缝上层硬度，以 0.75 mm 的间距在焊缝上层打点。图 3 为焊缝上层硬度测试结果，在 304L 母材上硬度平均在 200 HV 左右 (1 ~ 10 点)，304 侧的焊缝热影响区硬度平均在 450 HV 左右 (11 ~ 15 点)，焊缝中心区硬度平均在 420 HV 左右 (16 ~ 18 点)，2.25Cr1Mo0.25V 侧的焊缝热影

响区硬度平均在 450 HV 左右(19~23点), 2.25Cr1Mo0.25V 材料硬度平均在 240 HV 左右(24、25两个点)。焊缝上层的最高硬度为 479.5 HV。

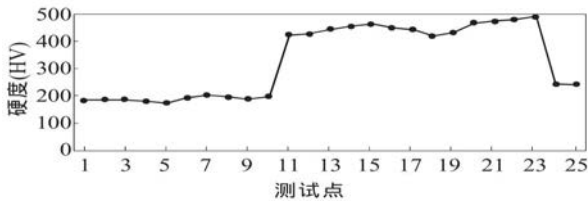


图4 焊缝中层硬度曲线

Fig.4 Hardness curve of the middle layer of the weld seam

为了测试焊缝中层硬度,以 0.5 mm 的间距在焊缝中层打点。焊缝中层硬度测试结果如图 4 所示。304 母材硬度值平均在 190 HV 左右(1~10点),304 侧的焊缝热影响区硬度平均在 440 HV 左右(11~15点),焊缝中心区硬度平均在 420 HV 左右(16~18点),2.25Cr1Mo0.25V 侧的焊缝热影响区硬度平均在 480 HV (19~23点),2.25Cr1Mo0.25V 材料上硬度值平均在 230 HV 左右(24、25两个点)。焊缝中层最高硬度为 489 HV。

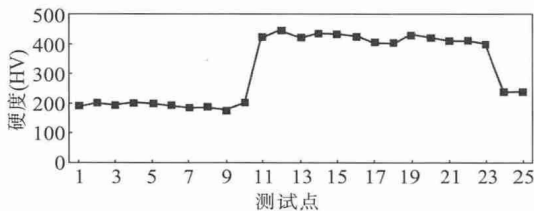


图5 焊缝下层硬度曲线

Fig.5 Hardness curve of the lower layer of the weld seam

为了测试焊缝下层硬度,以 0.5 mm 的间距在焊缝下层打点。焊缝下层硬度测试如图 5 所示。304L 母材上硬度值平均在 200 HV 左右(1~10点),304L 侧的焊缝热影响区硬度平均在 430 HV 左右(11~15点),焊缝中心区硬度平均在 400 HV 左右(16~18点),2.25Cr1Mo0.25V 侧的焊缝热影响区硬度平均在 420 HV (19~23点),2.25Cr1Mo0.25V 材料上硬度平均在 240 HV 左右(24、25两个点)。焊缝下层最高硬度为 445.4 HV。

从上述硬度测试结果可以得出,在焊缝上层、中层、下层,304 侧焊缝区和焊缝中心区的硬度明显优于 304 母材,2.25Cr1Mo0.25V 侧焊缝区和焊缝中心区的硬度也明显优于 2.25Cr1Mo0.25V 母材。

而焊缝中心区的硬度比 304 侧焊缝区和 2.25Cr1Mo0.25V 侧焊缝区的硬度稍微要低点。还可以看出,304 侧焊缝区、焊缝中心区和 2.25Cr1Mo0.25V 侧焊缝区的平均硬度从上层到下层呈波动性变化,波动范围在 400~489HV 之间。这与焊接接头焊后的组织不均性有关。

2.3 拉伸测试分析

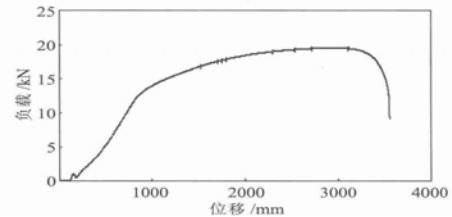


图6 拉伸试样强度曲线

Fig.6 Strength curve of tensile specimens

按 GB/T228-2002 标准加工成标准拉伸试样,进行拉伸试验^[9],拉伸强度曲线如图 6 所示。最终拉伸试样都断在 304 母材上,平均拉伸强度为 406 MPa,最大的抗拉强度为 542 MPa。可见,采用 AA-TIG 焊接 2.25Cr1Mo0.25V 和 304 钢管获得了较好的强度,且焊缝区的硬度明显大于母材的硬度。

3 结论

(1) 采用 AA-TIG 实现了 2.25Cr1Mo0.25V 耐热钢和 304 不锈钢异种钢大厚板的焊接,焊接接头成形良好,整个厚度熔透,焊缝处无焊瘤、未熔合等焊接缺陷,同时焊缝内部和两边界处均无裂纹产生,焊接接头焊缝完整、光滑并带有金属光泽。

(2) 各组元在焊缝水平方向分布均匀,在靠近两侧母材的焊缝区,Cr、Fe、Ni 元素有一定的梯度,C 含量没有明显变化,没有出现明显的偏聚。

(3) 焊接接头两侧的母材硬度较低,在焊缝区域硬度最大;从焊缝上层至下层焊缝区域硬度呈波动性变化,其波动范围在 400~489 HV 之间。最终拉伸试样都断在 304 母材上,平均拉伸强度为 406 MPa,最大的抗拉强度为 542 MPa。

参考文献

- [1] 赵晓冬.考虑材料力学性能分散性的韧性金属断裂预测模型研究[D].长安大学,2020.
- [2] 李芊芄.耐热钢与不锈钢PPCA-TIG焊接接头组织及性能研究[D].兰州理工大学,2023.

(下转第44页)

3.5 不同热处理对晶间腐蚀的影响

经过不同的热处理之后焊接接头耐晶间腐蚀能力是此次试验是否可以指导生产的重要因素。依据GB/T4334.5标准对不同热处理之后的试板进行硫酸-硫酸铜腐蚀试验,试验前对试样进行650℃×2h敏化处理,试验时溶液为微沸状态,试验时间16h;腐蚀完成之后试样在10倍放大镜下观察发现焊态、稳定化热处理、固溶热处理之后的试样均未观察到由晶间腐蚀造成的裂纹。

4 结论

(1) 347H不锈钢在稳定化及固溶化热处理时如果焊缝中存在铁素体较多,则容易产生裂纹等缺陷,选用镍基焊材ENiCrCoMo-1焊接,熔覆金属基本无铁素体,在高温保温阶段不会产生铁素体相的转变;该焊接材料在高温下具有较好的强度,抗应变能力较强,降低了裂纹等缺陷的产生;

(2) 采用该镍基焊材焊接347H后熔覆金属中的元素发生了扩散,但焊接接头抗拉强度、耐腐蚀性能、弯曲测试均、金相组织均符合相关要求。由

此可见,因采用镍基焊材产生的元素扩散对焊接接头的组织及性能并未造成实质性的影响;

(3) 347H高碳奥氏体不锈钢类产品需要进行固溶化和稳定化热处理时,选用适当的镍基焊材焊接是一种可行的方法。

参考文献

- [1] 王永兵,王丰超,单志亮,等.高温高压载荷作用下P91材料蠕变寿命预测研究[J].中国化工装备,2020,22(03): 45-48+44.
 - [2] 穆龙.已服役Manaurite900制氢炉管焊接性的研究[D].兰州理工大学,2009..
 - [3] 周仕远.薄壁铁素体不锈钢的焊接性研究[D].苏州大学, 2019.
 - [4] 周驰宇.表面双尺度结构对304不锈钢耐摩擦腐蚀性能的影响[D].华南理工大学,2019.
 - [5] 张兴璇.1Ni9钢热处理工艺及其匹配焊条的研究[D].西安理工大学,2014.
 - [6] 刘吉涛.焊接接头塑性弯曲试验特性研究[D].江苏科技大学,2018.
-
- (上接第39页)
- [3] 刘东宇.E36与304异种金属激光焊接接头组织与性能研究[D].上海工程技术大学,2015.
 - [4] 赵金龙.耐热钢与不锈钢电弧辅助活性TIG焊接接头组织及性能研究[D].兰州理工大学,2020.
 - [5] 卢刘杰.耦合电弧AA-TIG焊氧元素过渡行为研究[D].兰州理工大学,2013.
 - [6] 邓增辉,李东,童邵辉,等.60mm厚Q345钢板电子束焊接接头的显微组织及硬度分布[J].机械工程材料,2017,41(11):59-62.
 - [7] 陈倩倩.厚板不锈钢电子束焊接接头断裂力学性能研究[D].上海工程技术大学,2016.
 - [8] 王建军.TP347钢管焊接接头热处理和再热裂纹研究[D].兰州理工大学,2022.
 - [9] 冯帅.合金钢激光熔丝沉积工艺及回火处理研究[D].哈尔滨工程大学,2019.

·冶金知识·

4340M钢简介

4340M钢是将原来的4340钢(相当于JIS SNCM439)中的Si含量提高到1.6%,在努力实现高强度化和改善低温回火脆性的同时,为了改善强度、韧性,添加了少量V的钢种。尽可能将P、S等杂质降低,作为熔炼方法,采用真空感应熔炼或自耗电极真空电弧熔炼方法,一般可以实现气体成分、夹杂物的降低。4340M钢生产炉号的典型化学成分为C 0.42%, Si 1.52%, Mn 0.63%, P 0.009%, S 0.002%, Ni 1.90%, Cr 0.86%, Mo 0.41%, V 0.08%。高强高韧钢4340M主要用作飞机起落架材料。