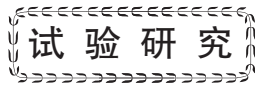


doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2024.11.003



焊后热处理对 Alloy33 堆焊层耐蚀性的影响

张 蕾¹, 刘宝剑¹, 王军杰¹, 类成龙¹, 杨 斌¹, 王天先¹, 武靖伟², 邵光娟¹, 孔凡红¹, 张 雪¹

(1. 青岛兰石重型机械设备有限公司, 山东青岛 266426;

2. 中国科学院 兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000)

摘 要:为了研究焊后热处理对 Alloy33 堆焊层耐蚀性的影响, 采用自动钨极氩弧焊堆焊 (TIG) 实现 2.25Cr-1Mo 母材上 Alloy33 耐蚀层的堆焊, 堆焊后研究了堆焊层的微观组织、力学性能, 其耐蚀层微观组织为奥氏体 + 少量碳化物, 热处理态 Alloy33 堆焊层碳化物较焊态多, 并采用 ASTM G28—2024 A 法、ASTM A262—2015 C 法、ASTM A262—2015 E 法及 GB/T 15260—2016 C 法 4 种腐蚀方法研究了耐蚀层的腐蚀性能。结果表明: Alloy33 耐蚀层焊态和热处理态条件下在弱氧化性介质中均表现出良好的耐腐蚀性, 在强氧化性介质中根据实际工况选择 Alloy33 堆焊层经历的热处理状态, 在强还原性类介质的容器中, 应避免选择 Alloy33 材料。该研究为后续耐热合金钢堆焊 Alloy33 堆焊工艺和晶间腐蚀提供参考。

关键词: 2.25Cr-1Mo 母材; Alloy33 耐蚀层; 焊后热处理; 腐蚀性能

中图分类号: TH49; TQ174.21; TG156

文献标志码: A

Influence on corrosion resistance of Alloy33 corrosion-resistant layer by PWHT

ZHANG Lei¹, LIU Baojian¹, WANG Junjie¹, LEI Chenglong¹, YANG Bin¹, WANG Tianxian¹,
WU Jingwei², SHAO Guangjuan¹, KONG Fanhong¹, ZHANG Xue¹

(1. Qingdao LS Heavy Machinery Equipment Co., Ltd., Qingdao 266426, China; 2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To investigate the effect of post-weld heat treatment (PWHT) on the corrosion resistance of the Alloy33 overlay, automatic tungsten inert gas welding (TIG) was used to weld the corrosion-resistant layer of Alloy33 onto a 2.25Cr-1Mo base material. The microstructure and mechanical properties of the weld layer were analyzed, revealing that the microstructure of the corrosion-resistant layer in the as-welded state is austenite with a small amount of carbides, while the heat-treated state contains more carbides. The corrosion performance of the corrosion-resistant layer was evaluated using four corrosion standards: ASTM G28—2024 A, ASTM A262—2015 C, ASTM A262—2015 E and GB/T 15260—2016 C. The results indicate that Alloy33 exhibits excellent corrosion resistance in weakly oxidizing media under both as-welded and heat-treated conditions. However, when used in containers with strong oxidizing media, the heat treatment state of the Alloy33 corrosion-resistant layer should be carefully selected according to specific operating conditions. For containers in strongly reducing media, Alloy33 should be avoided. This study provides strong references for improving the design of Alloy33 welding processes and mitigating intergranular corrosion on the inner walls of containers.

Key words: 2.25Cr-1Mo base metal; Alloy33 corrosion-resistant layer; post-weld heat treatment; corrosion properties

收稿日期: 2024-04-10 修稿日期: 2024-07-20

基金项目: 国家重点研发计划“严苛环境下典型承压类特种设备结构安全性评价及失效预防技术”(2018YFC0808800); 泰山学者建设工程“基于结构完整性的高效能源装备制造”(ts201511018)

0 引言

随着化工行业生产规模的扩大和技术的进步,对化工设备的介质和耐腐蚀性的要求越来越高,传统的不锈钢材料已难以满足设备的使用要求。Alloy33 凭借其均衡的组分和极高的铬含量,在氧化介质中表现出优异的耐腐蚀性,对硝酸/氢氟酸混合物、所有碱介质都具有很强的耐腐蚀性,并在含氯的环境中具有良好的耐点蚀性。该材料具有较高的强度和良好的加工性,在许多化工领域得到应用,例如硫酸生产设备,硝酸/氢氟酸混合物的运输和储存容器,氢氧化钠、氢氧化钾和尿素的反应容器,海水的导管,冷凝器,冷却器,苯二甲酸(PTA)精制单元装置中的容器和管道^[1-10]。

Alloy33 是一种高铬奥氏体合金,目前,国内对 Alloy33 材料的焊接研究较少,ASME II—2023 *Materials* 规定采用 Alloy33 的压力容器的工作温度范围为 -196~450 °C。由于 Alloy33 材料价格昂贵,为降低制造成本,可将 Alloy33 作为耐蚀层堆焊于碳钢或低合金钢设备内壁,根据 ASME VIII—2023 *Rules for construction of Pressure Vessels* 和

GB/T 30583—2014《承压设备焊后热处理规程》要求,碳钢或低合金钢设备等在制造过程中焊后热处理温度通常在 600~800 °C 之间^[6-10],与 ASME 关于 Alloy33 的压力容器的工作温度范围为 -196~450 °C 的要求不符,且奥氏体合金产生晶间腐蚀的加热温度一般是在 450~850 °C,因此,研究碳钢或低合金钢焊后热处理温度对 Alloy33 堆焊层耐蚀性的影响十分必要。

本文针对某压力容器管板堆焊,进行 Alloy33 耐蚀层堆焊试验并作相关研究,该研究可促进 Alloy33 耐蚀层堆焊在焊接领域的推广应用,并为容器内壁 Alloy33 堆焊工艺和晶间腐蚀提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验选用 2.25Cr-1Mo 低合金耐热钢作为母材,其供货状态为回火态,组织为珠光体+贝氏体的混合组织,堆焊试板规格为 300 mm × 350 mm × 53 mm,选用 FM33 焊丝作为堆焊材料,规格为 ϕ 1.2 mm。试验母材及焊丝的化学成分如表 1 所示。

表 1 母材及焊丝化学成分

Tab.1 Chemical composition of base material and welding wires

| 材料 | C | S | P | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | Cu | N | Fe |
|--------------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|----|
| 2.25Cr-1Mo 钢 | 0.13 | 0.003 | 0.005 | 0.05 | 0.51 | 2.43 | 0.12 | 1.02 | — | — | 余量 |
| FM33 焊丝 | 0.014 | 0.005 | 0.004 | 0.24 | 0.49 | 31.51 | 30.46 | 1.39 | 0.62 | 0.388 | 余量 |

1.2 2.25Cr-1Mo 钢的焊接性

由于 2.25Cr-1Mo 钢具有一定的淬硬性,其淬硬性取决于合金中的 Cr 和 Mo,其中,Mo 的作用远大于 Cr 在堆焊过程中,若冷却速度较大时,焊缝和热影响区易形成淬硬组织,硬度增高,从而使焊接接头的脆性增大。同时,钢中 Cr 和 Mo 含量高,在焊接过程中易形成热裂纹。为减少淬硬组织和热裂纹的产生,因此在焊接过程中应严格控制焊接工艺参数,焊前控制预热温度,焊接过程中控制层间温度、焊后控制热处理^[11-15]。

(1) 预热。

焊接前对母材进行加热,首层堆焊前预热温度 ≥ 120 °C,为避免淬硬组织的出现,采用减小焊接热影响区的冷却速度和延长焊缝区在高温时的停留时间的方法,从而有利于焊缝金属中氢的

逸出。

(2) 后热。

首层堆焊完成后立即进行后热,后热温度和时间:(300~350) °C × 2 h。

(3) 焊后热处理。

根据 API 934 - A — 2019《高温高压临氢条件下 2.5Cr-1Mo, 2.25Cr-1Mo-0.25V, 3Cr-1Mo 及 3Cr-1Mo-0.25V 钢材料和制造技术规范》,2.25Cr-1Mo 钢焊后热处理规范为保温温度 690 °C、保温时间 8 h,因此,采用 TIG 堆焊进行堆焊后应进行焊后热处理。

1.3 工艺制定

Alloy33 堆焊采用自动 TIG 堆焊焊机,堆焊层厚度约 3.5 mm,其堆焊工艺规范按表 2 执行,TIG 堆焊焊机及堆焊焊道如图 1 所示。

表2 堆焊工艺规范

Tab.2 Specification of surfacing welding process

| 项目 | 焊接电流 I/A | 焊接电压 U/V | 焊接速度 v/(mm·min ⁻¹) | 道间温度/ ℃ | 干伸长度/ mm | 焊道搭接量/ mm | 氩气流量/ (L·min ⁻¹) | 电源种类 及极性 |
|----|-------------|-------------|-----------------------------------|----------------------------|-------------|--------------|---------------------------------|-------------|
| 参数 | 220~240 | 11~17 | ≥ 100 | 120~250(首层) 15~100(其余层) | 25~35 | 4~6 | 8~12 | 直流正接 |

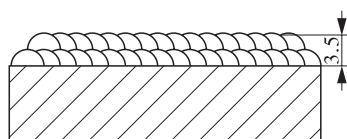


图1 TIG堆焊机及堆焊焊道示意

Fig.1 Schematic diagram of TIG machine and weld bead

为减少2.25Cr-1Mo钢堆焊后焊缝区域的残余应力,提高焊接接头的性能及组织的稳定性,以及降低焊缝区域的硬度,根据API 934-A堆焊后进行焊后热处理。热处理工艺参数如下:起始温度 ≤ 400 ℃,升温速度 ≤ 55 ℃/h,保温温度为 (690 ± 14) ℃,保温时间为8h,降温速度 ≤ 55 ℃/h,冷却方式为随炉冷至400℃以下空冷。

2 试验结果与分析

2.1 无损检测

在堆焊过程中,堆焊完第1层和其余层都需要

分别进行100%PT检测,按照NB/T 47013.5—2015《承压设备无损检测 第5部分:渗透检测》中I级合格,结合面进行100%UT检测,按照NB/T 47013.3—2015《承压设备无损检测 第3部分:超声检测》中I级合格,检测结果显示,堆焊层表面未出现气孔、裂纹等缺陷;结合面未出现气孔、夹渣及裂纹等内部缺陷。

2.2 腐蚀试验

2.25Cr-1Mo钢的焊后热处理的温度 (690 ± 14) ℃为镍基合金和奥氏体不锈钢的敏化温度区间,因此,该腐蚀试验为验证耐蚀层能否满足产品环境要求的关键性依据。分别采用ASTM G28—2024 A法、ASTM A262—2015 C法、ASTM A262—2015 E法及GB/T 15260—2016《金属和合金的腐蚀 镍合金晶间腐蚀试验方法》C法对焊态和焊后热处理态下耐蚀层进行腐蚀试验,取样如图2所示,试验结果见表3。

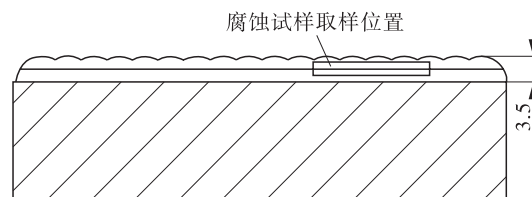


图2 晶间腐蚀取样示意

Fig.2 Schematic diagram of sampling for intergranular corrosion

表3 腐蚀试验结果

Tab.3 Corrosion test results

| 试验方法 | 试剂 | 试验时间 | 试样状态 | 试验结果 |
|--------------------|----------------------------|----------------------|--------|---------------------------|
| ASTM G28—2024 A法 | 采用硫酸铁和50%硫酸试验 | 120 h | 焊态 | 腐蚀率:0.308 mm/a,0.481 mm/a |
| | | | 焊后热处理态 | 腐蚀率:1.044 mm/a,0.665 mm/a |
| ASTM A262—2015 C法 | 65%±2%硝酸溶液 | 240 h(5个周期,每个周期48 h) | 焊态 | 腐蚀率:0.013 mm/a,0.013 mm/a |
| | | | 焊后热处理态 | 腐蚀率:1.015 mm/a,1.036 mm/a |
| ASTM A262—2015 E法 | 铜-硫酸铜-16%硫酸 | 24 h | 焊态 | 180°弯曲,2件合格 |
| | | | 焊后热处理态 | 180°弯曲,2件合格 |
| GB/T 15260—2016 C法 | 采用36%~38%分析纯盐酸溶液配制20%的盐酸溶液 | 168 h | 焊态 | 溶解,2件 |
| | | | 焊后热处理态 | 溶解,2件 |

以下是对表3中依据4种标准方法进行试验得到的数据进行分析。

(1) ASTM G28—2024 A法。Alloy33堆焊层经焊后热处理(690 °C ×8 h), 腐蚀速率较焊态下会略有增加, 在焊态和焊后热处理态下的腐蚀速率均远优于哈氏合金 H276在该方法下(试验时间24 h)的合格标准 ≤ 12 mm/a, 通过其他学者研究可知, 哈氏合金 H276在焊态和焊后热处理态下的腐蚀速率均超过3 mm/a^[16-17]。说明 Alloy33堆焊层, 无论在焊态还是在焊后热处理态时, 在弱氧化性类介质中都具有良好的耐蚀性。

(2) ASTM A262—2015 C法。Alloy33堆焊层经焊后热处理(690 °C ×8 h), 腐蚀速率较焊态下有较高增加, 在焊态的腐蚀速率远优于部分镍基合金(如 Alloy20)在该方法下的合格标准 ≤ 0.6 mm/a, 在焊后热处理态下的腐蚀速率略超过该合格标准。说明 Alloy33堆焊层, 焊态时在强氧化性类介质中具有良好的耐蚀性, 在经过焊后热处理(690 °C ×8 h)后应根据具体介质情况进行试验分析, 或遵循 ASME 标准中的规定(即在强氧化性介质中, Alloy33不得进行超过450 °C的

热处理)。

(3) ASTM A262—2015 E法。Alloy33堆焊层在焊态和经焊后热处理(690 °C ×8 h)后, 试样经180°弯曲, 均未出现晶间腐蚀导致的裂纹。同样说明 Alloy33堆焊层, 无论在焊态还是焊后热处理态, 在弱氧化性类介质中具有良好的耐晶间腐蚀的性能。

(4) GB/T 15260—2016 C法。Alloy33堆焊层焊态试样在试验过程中溶解, 说明 Alloy33堆焊层在焊态时强还原性类介质中其耐腐蚀性较差; 经焊后热处理(690 °C ×8 h)后, 试样在试验过程中溶解, 说明 Alloy33堆焊层在此热处理状态下, 在强还原性类介质中其耐腐蚀性同样较差, 因此, 在该类介质中应避免选择该材料。

2.3 堆焊层熔敷金属化学成分检测

根据产品制造技术条件及标准要求, 按照 GB/T 11170—2008《不锈钢 多元素含量的测定 火花放电原子发射光谱法(常规法)》在试板堆焊层表面以下3 mm 部位取样进行熔敷金属化学成分分析, 其熔敷金属化学成分如表4所示, 结果符合技术要求。

表4 堆焊层熔敷金属化学成分

Tab.4 Chemical composition of overlaying metal

| 元素 | C | S | P | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | Cu | N | Fe |
|----|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|----|
| 含量 | 0.017 | 0.002 | 0.009 | 0.22 | 0.56 | 30.36 | 30.24 | 1.59 | 0.78 | 0.316 | 余量 |

2.4 显微硬度分析

按照 GB/T 4340.1—2024《金属材料 维氏硬度试验》标准, 在检测合格的焊态及热处理态堆焊试件横截面上分别取样, 进行显微硬度试验, 显微硬度结果如图3所示。可以看出, 在焊态下试件堆焊层的显微硬度高于热影响区和2.25Cr-1Mo 母材, 表层硬度略低于第一层, 热影响区硬度高于母材, 而热处理态下第一层的硬度最高, 表层硬度略低于第一层, 但远高于热影响区和2.25Cr-1Mo 母材。分析原因为在堆焊的过程中, 受外侧焊接热输入和母材回火态的影响, 造成表层硬度略低于第一层, 且2.25Cr-1Mo 母材具有一定的淬硬倾向, 在堆焊过程中易在热影响区形成淬硬组织, 故热影响区的硬度高于母材。通过焊后热处理(690 °C ×8 h)改善了2.25Cr-1Mo 钢热影响区的组织性能, 降低了2.25Cr-1Mo 钢的硬度, 从而降低2.25Cr-1Mo 钢堆焊后热影响区的残余应力。

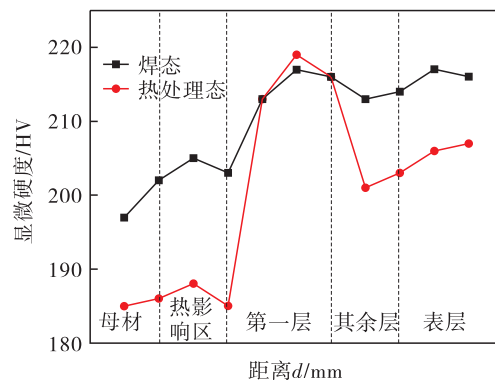


图3 堆焊试件横截面显微硬度

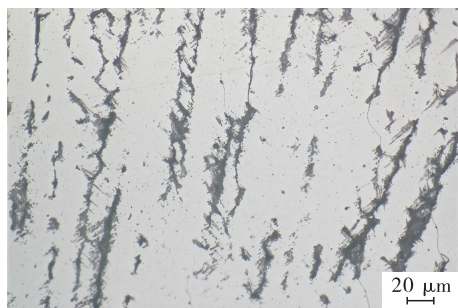
Fig.3 Microhardness of cross sectional welding test specimen

2.5 微观组织

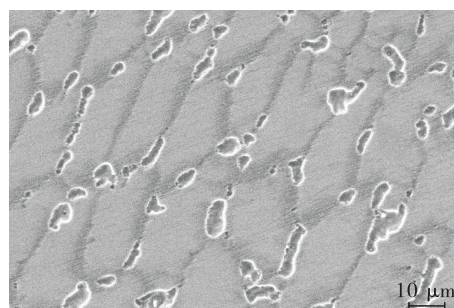
Alloy33堆焊层的耐腐蚀性能与堆焊层的纯净度和组织结构有关。采用光学显微镜、扫描电镜等分析测试手段, 通过对焊态和经焊后热处理态下的堆焊层试样进行对比, 分析焊后热处理对 Alloy33堆焊层耐腐蚀性能的影响。采用光学显

显微镜和扫描电镜对 Alloy33堆焊层金相组织进行分析,如图4所示。可以看出,焊态和经焊后热处理态下的 Alloy33堆焊层金相组织均为奥氏体 +

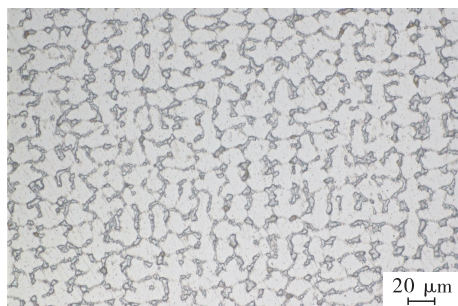
少量碳化物,均未发现有害相析出;经焊后热处理的 Alloy33堆焊层试样晶界处碳化物比焊态下的 Alloy33堆焊层的多。



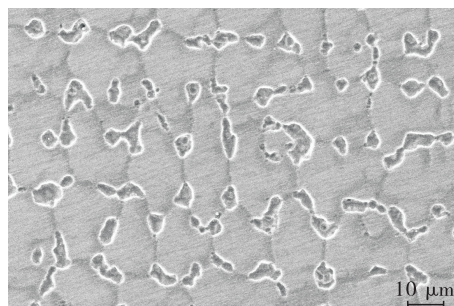
(a) 堆焊层焊态光学显微镜



(b) 堆焊层焊态扫描电镜



(c) 堆焊层焊后热处理态光学显微镜



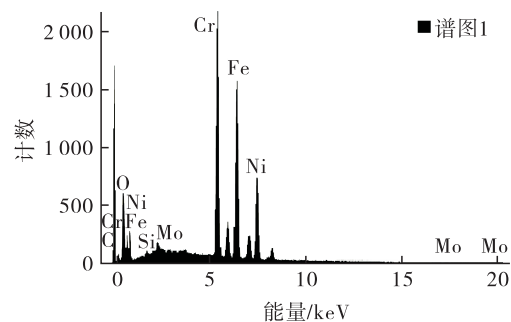
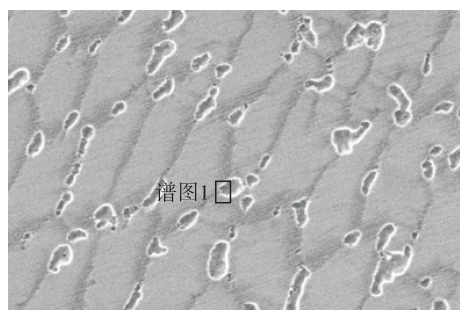
(d) 堆焊层焊后热处理态扫描电镜

图4 光学显微镜和扫描电镜对 Alloy33堆焊层金相组织对比分析

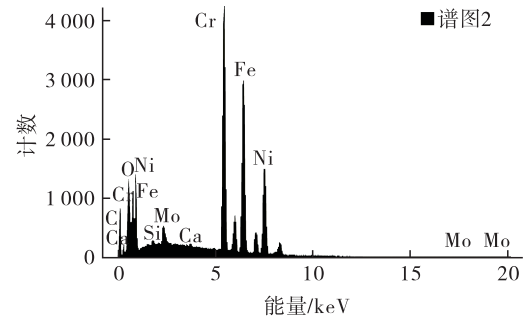
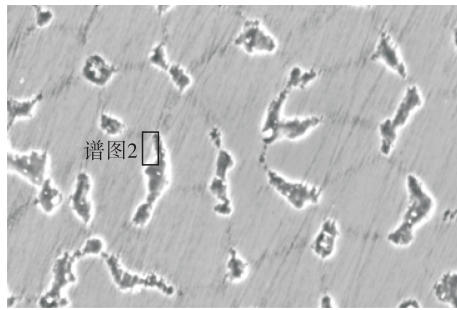
Fig.4 Comparative analysis of microstructure

对 Alloy33堆焊层晶界处进行能谱分析,结果如图5和表5所示。通过对比晶界处焊态和焊后热处理态时 Alloy33堆焊层的化学元素分析结果可知,经焊后热处理(690 °C ×8 h)堆焊层晶界处 Cr 元素降低,C 元素升高,说明在晶界及附近析

出高 Cr 碳化物的析出,但在晶粒内部的 Cr 元素向晶界扩散较少,导致晶界发生贫在晶界及附近发生贫 Cr 现象。且能谱分析结果与图4堆焊层金相结果相一致。



(a) 焊态能谱分析



(b) 焊后热处理态能谱分析

图5 堆焊层的能谱分析图谱

Fig.5 Energy spectrum analysis of surfacing layers

表5 能谱分析堆焊层中化学成分

Tab.5 Energy spectrum analysis of chemical composition of surfacing layers

| 元素 | 焊态 | | 焊后热处理态 | |
|----|-------|-----------|--------|-----------|
| | wt% | wt% Sigma | wt% | wt% Sigma |
| C | 3.06 | 0.45 | 6.00 | 0.38 |
| Si | 0.29 | 0.06 | 0.26 | 0.05 |
| Cr | 31.92 | 0.31 | 30.34 | 0.23 |
| Fe | 36.64 | 0.35 | 35.67 | 0.30 |
| Ni | 27.01 | 0.35 | 26.33 | 0.25 |
| Mo | 1.08 | 0.20 | 1.41 | 0.16 |

“贫 Cr 理论”是晶间腐蚀普遍认同的理论。Cr 是提高奥氏体合金耐腐蚀性的主要元素,在有氧存在的情况下,它会促进钝化膜的生成,这层钝化膜能阻止腐蚀的进程。在 450~850 °C 热处理时,C 在奥氏体中的溶解度逐渐下降,而超出溶解度的 C 会向晶界扩散,且速度较快,沿奥氏体晶界形成 $Cr_{23}C_6$ 沉淀,由于 Cr 原子的半径较大,在晶粒内部的扩散速度较慢,来不及向晶界扩散,会在晶界及附近析出 M_6C , M_2C , $M_{23}C$ 等碳化物,这些高 Cr 碳化物的析出,导致晶界发生贫 Cr 现象。

因此,焊后热处理 (690 °C × 8 h) 后 Alloy33 堆焊层中碳化物的析出,并在晶界处聚集。由于 Alloy33 堆焊层中 C 含量较低,属于超低碳级别 ($C \leq 0.03\%$),析出碳化物在晶界处未形成连续网状结构。在铜 - 硫酸铜 - 16% 硫酸的弱氧化介质中未发生晶间腐蚀;在硫酸铁 - 硫酸腐蚀介质中,焊后热处理析出的碳化物在 Alloy33 堆焊层形成了晶界与晶粒构成活化 - 钝化微电池,导致堆焊层腐蚀速率在此类弱氧化性腐蚀介质下略有增加,但影响不明显;在 65% 硝酸溶液等强氧化介质中,焊后热处理析出的碳化物形成的晶界与晶粒构成活化 - 钝化微电池引起堆焊层腐

蚀速率较明显增加,但仍满足哈氏合金 H276 在硫酸铁 - 硫酸腐这类弱氧化介质中的合格标准 ($\leq 12 \text{ mm/a}$)。

4 结论

(1) 采用 TIG 堆焊可实现 Alloy33 耐蚀层的堆焊,堆焊层表面未出现明显裂纹、气孔及夹渣等表面缺陷,耐蚀层的化学成分及力学性能均满足技术要求。

(2) 通过对焊态和焊后热处理态 Alloy33 堆焊层对比分析,焊后热处理未导致 Alloy33 堆焊层出现有害相,但会导致堆焊层中碳化物的析出增加,在强氧化性介质环境下其堆焊层耐蚀性降低。

(3) 在弱氧化性类介质的容器中,可以采用焊态或焊后热处理态的 Alloy33 堆焊层;在强氧化性类介质的容器中,应控制 Alloy33 堆焊层的热处理温度,优先选择 Alloy33 堆焊层不经过 450 °C 以上的热处理,例如通过在基层和 Alloy33 中间增加过渡层,过渡层进行焊后热处理,堆焊 Alloy33 后不再进行焊后热处理,以保证其耐蚀性;在强还原性介质的容器中,应避免选择 Alloy33 材料。

参考文献:

- [1] KÖHLER M, HEUBNER U, EICHENHOFER K W, et al. Alloy33: a new chromium-based corrosion resistant austenitic material [J]. Chemical and Petroleum Engineering, 1996, 32 (6): 615 - 621
- [2] PAUL D L, ALVES H. Alloy33: a versatile alloy for concentrated mineral acid and other applications [C]//Conference Papers on CD-ROM/CORROSION NACE expo, 2004: 1 - 13.
- [3] HOFFMEISTER H, SCHEIDACKER G. Effect of chloride contents, pH and temperature on crevice corrosion of alloy33 as determined by remote crevice

- assembly (RCA) -testing [C]//Conference Papers on CD-ROM/CORROSION NACE_{Expo}, 2004: 1 - 10.
- [4] MUNOZ A I, ANTON J G, GUINON J L, et al. Galvanic studies of copper coupled to alloy 33 and titanium in lithium bromide solutions [J]. Corrosion: The Journal of Science and Engineering, 2002, 58 (12): 995 - 1003.
- [5] RENNER M H, VOIEMER D M. Corrosion behaviour of alloy 33 in concentrated sulphuric acid [J]. Stainless Steel World, 2000, 12 (3): 53 - 56.
- [6] WERNER H, KOHLER M. The influence of chloride on the corrosion behaviour of alloy 33 in medium concentrated hot sulfuric acid [J]. Materials and Corrosion, 1999, 50 (6): 339 - 343.
- [7] SPADOTTO J C, DILLE J, WATANABE M, et al. Grain boundary precipitation phenomena in an alloy 33 (Cr-Fe-Ni-N) subjected to direct-aging treatments (700 °C and 900 °C) [J]. Materials Characterization, 2018, 140: 113 - 121.
- [8] LATHA G, RAJENDRAN N, RAJESWARI S. Influence of alloying elements on the corrosion performance of alloy 33 and alloy 24 in seawater [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1997, 6 (6): 743 - 748.
- [9] MAHBOUBI S, BOTTON G A, KISH J R. Technical note: corrosion resistance of alloy 33 (Fe-33Cr-32Ni) in supercritical water [J]. Corrosion: The Journal of Science and Engineering, 2015, 71 (9): 1064 - 1070.
- [10] PAUL L, CLARK G, OSSENBERG-ENGELS A, et al. Alloy 33 weld overlay extends boiler tube life and saves money [J]. Power Engineering: The Magazine of Power Generation, 2007, 111 (9): 64 - 69.
- [11] 王欢, 张树. 14Cr1MoR 焊缝堆焊隔离层工艺的研究 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (9): 217 - 218.
WANG H, ZHANG S. Study on welding surfacing isolation layer process for 14Cr1MoR [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (9): 217 - 218.
- [12] 郭城湘, 王朗, 白林, 等. 焊后热处理温度对 15CrMoR 钢对接接头性能的影响 [J]. 压力容器, 2023, 40 (4): 15 - 20.
GUO C X, WANG L, BAI L, et al. Effects of post-weld heat treatment temperature on the properties of 15CrMoR butt welded joint [J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40 (4): 15 - 20.
- [13] 胡昕明, 张海明, 隋松言, 等. 模拟焊后热处理对 316H 钢组织和性能的影响 [J]. 压力容器, 2022, 39 (3): 34 - 39.
HU X M, ZHANG H M, SUI S Y, et al. Effect of simulated post-weld heat treatment on microstructure and properties of 316H steel [J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39 (3): 34 - 39.
- [14] 王有银, 武靖伟, 王志刚, 等. 基于 ERNiCrMo - 17 焊丝熔敷金属微观组织及性能研究 [J]. 中国化工装备, 2023, 25 (6): 42 - 46.
WANG Y Y, WU J W, WANG Z G, et al. Research on micro structure and properties of ERNiCrMo - 17 wire overlaying metal [J]. China Chemical Industry Equipment, 2023, 25 (6): 42 - 46.
- [15] 倪昱, 王顺花. 我国高压换热器管板 (12Cr2Mo1R) 堆焊技术发展现状 [J]. 装备制造技术, 2014 (12): 17 - 21.
NI X, WANG S H. The current development situation of buildup welding technique in high pressure heat exchanger tube-sheet (12Cr2Mo1R) of China [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014 (12): 17 - 21.
- [16] 冯伟, 邹力维, 韩宇, 等. 堆焊工艺对镍基 276 带极堆焊晶间腐蚀的影响规律 [J]. 压力容器, 2021, 38 (3): 25 - 30.
FENG W, ZOU L W, HAN Y, et al. Influence rules of surfacing process on intergranular corrosion of nickel-based 276 strip surfacing [J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38 (3): 25 - 30.
- [17] 吕秀乾, 齐丽璟, 张瑞萍, 等. 12Cr2Mo1R 钢带极堆焊镍基 276 的工艺性能 [J]. 理化检验 - 物理分册, 2022, 58 (9): 20 - 22.
LYU X Q, QI L J, ZHANG R P, et al. Process performance of nickel based 276 overlay welding on 12Cr2Mo1R steel strip [J]. Physical and Chemical Inspection Physical Volume, 2022, 58 (9): 20 - 22.

作者简介:张蕾(1984),女,高级工程师,主要从事压力容器制造工作,通信地址:266426 山东省青岛市经济技术开发区红石崖镇昆仑山北路601号青岛兰石重型机械设备有限公司, E-mail: zhanglei@lshec.com.

通信作者:刘宝剑(1988),男,高级工程师,主要从事压力容器焊接热处理工作,通信地址:266426 山东省青岛市经济技术开发区红石崖镇昆仑山北路601号青岛兰石重型机械设备有限公司, E-mail: liubaojian@lshec.com.

本文引用格式:

张蕾,刘宝剑,王军杰,等. 焊后热处理对 Alloy33堆焊层耐蚀性的影响 [J]. 压力容器, 2024, 41 (11): 19 - 25.
ZHANG L, LIU B J, WANG J J, et al. Influence on corrosion resistance of Alloy33 corrosion-resistant layer by PWHT [J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41 (11): 19 - 25.