

# 双钨极 TIG 奥氏体不锈钢堆焊层组织与性能

周彦林<sup>1</sup>, 谷文<sup>2</sup>, 朱兴华<sup>3</sup>, 马驰原<sup>3</sup>

**摘要:** 采用双钨极高效焊接技术, 在低合金高强钢 SA-516-70N 基材表面堆焊不锈钢过渡层和耐蚀层。对堆焊层及基体的显微组织和硬度进行分析, 并且对堆焊层的耐晶间腐蚀能力和化学成分进行测试。结果表明: 堆焊层的显微组织为树枝状奥氏体, 堆焊层与基体熔合良好, 无分离现象及裂纹、气孔等缺陷; 堆焊层的硬度高于基体; 堆焊层具有良好的抗晶间腐蚀能力; 堆焊层各元素含量均符合相关标准。通过公式计算表明母材稀释率较低, 仅为 7.6%。

**关键词:** 双钨极 TIG; 组织和性能; 堆焊

**中图分类号:** TG444\*.74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-3355 (2017) 02-00012-06

## Microstructure and Property of Austenitic Stainless Steel Cladded Layer Made with Twin-Tungsten Electrode TIG Welding Technique Zhou Yanlin, Gu Wen, Zhu Xinghua, Ma Chiyuan

**Abstract:** Austenitic stainless steel cladded layers were made on the SA-516-70N high-strength low-alloy base steel for corrosion resistance by means of twin-tungsten electrode TIG welding technique. The microstructure and hardness of the base steel and cladded layers were tested and the intergranular corrosion resistance and chemical composition of the cladded layers were tested. The test results reveals the cladded layers have the microstructure of dendritic austenite and have good fusion with the base steel without segregation, crack, gas cavity and other defects. The hardness of the cladded layers is higher than the base steel. The cladded layers have high intergranular corrosion resistance. The content of elements in the cladded layers complies with applicable standards. The calculation proves the dilution rate of the base steel is just 7.6%, a very low value.

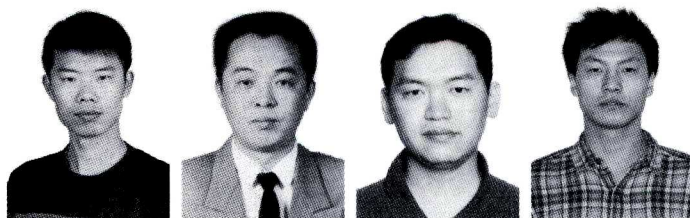
**Key words:** twin tungsten electrode TIG; microstructure and property; clad welding

加氢反应器是石油炼制的核心设备。加氢反应器内壁直接处于高温、高压和临氢介质的苛刻环境中, 这就要求加氢反应器的主体材料不仅要具有良好的常温性能和高温性能, 还要有足够的抗氢腐蚀的能力。通常加氢反应器的主体材料选用低合金高强钢, 为了提高加氢反应器的抗腐蚀性, 需要在加氢反应器内壁堆焊抗腐蚀性良好的材料。而奥氏体不锈钢具有良好的耐蚀性且无磁性, 所以对加氢反应器内壁堆焊的奥氏体不锈钢开展研究工作具有重要价值。针对低合金钢表面奥氏体不锈钢堆焊, 已经有研究人员做了一些研究, 例如: 手工电弧焊 (SMAW)、钨极氩弧焊 (GTAW 或 TIG)、熔化极气体保护焊 (FCAW)、带极电渣焊 (ESW) 等<sup>[1-3]</sup>。其中, 带极堆焊熔敷效率最高,

但是焊接质量较差; 普通钨极氩弧焊焊接质量最好, 但是堆焊效率较低。近年来, 热丝 TIG 焊、窄间隙 TIG 焊、双钨极 TIG 焊、小孔 TIG 焊等新型 TIG 焊接技术纷纷投入应用, 以及 TIG 焊接机器人的开发和应用, 弥补了 TIG 焊焊接效率低、电弧能量分散等缺点, 在焊接领域引起了高度重视, 具有良好的应用前景<sup>[4-6]</sup>。双钨极 TIG 焊由日本科研人员在 1998 年首先提出, 作为一种高效的焊接方法, 具有熔敷速度快、坡口适应性强和焊缝表面成形好等优点<sup>[7-9]</sup>, 并且双钨极 TIG 焊显著降低了电弧压力, 从而可以进一步提高钨极氩弧焊的焊缝质量和焊接效率。

本文在基材 SA-516-70N 表面堆焊首层堆焊奥氏体不锈钢 ER309LMO 过渡层, 随后堆焊 ER316L

1. 中国第一重型机械集团大连核电石化公司助理工程师, 辽宁 大连 116113; 2. 中国第一重型机械集团大连核电石化公司研究员级高级工程师, 辽宁 大连 116113; 3. 中国第一重型机械集团大连核电石化公司工程师, 辽宁 大连 116113



耐蚀层。然后通过测试堆焊试样的化学、弯曲、硬度、抗晶间腐蚀性能，观察分析金相组织的形貌。得到的结果可以为制定合理的堆焊工艺，获得综合性能良好的堆焊层提供关键的数据基础和依据，为堆焊同类产品提供技术支持。

## 1 试验材料、装置和方法

### 1.1 试验材料

在本文介绍的试验中使用的填充材料为直径  $\varnothing 1.2$  mm 的 ER309LMo 和 ER316L 焊丝（见表 1）。钢板（SA-516-70N）焊接试件的尺寸为 80 mm×300 mm×800 mm。保护气为纯度 99.999% 的纯氩，两根钨极均为  $\varnothing 4$  mm 的钨钨极。

表 1 焊丝化学成分 (wt, %)

| 焊接材料     | C     | Si   | Mn    | P     | S     |
|----------|-------|------|-------|-------|-------|
| ER309LMo | 0.017 | 0.51 | 1.68  | 0.018 | 0.001 |
| ER316L   | 0.016 | 0.50 | 2.04  | 0.015 | 0.013 |
| 焊接材料     | Cr    | Mo   | Ni    | Cu    |       |
| ER309LMo | 23.2  | 2.24 | 13.3  | 0.06  |       |
| ER316L   | 18.92 | 2.32 | 12.47 | 0.01  |       |

### 1.2 试验装置和方法

本文试验使用的设备为双钨极热丝 TIG 自动焊接系统，该系统主要包括控制柜、操作机、工件平台、焊接电源（2 台）、热丝电源、冷却水循环装置、摄像头、数据处理系统，以及双钨极焊枪等（见图 1）。

焊前采用铝基砂轮对试板进行打磨和抛光处理，去除表面的氧化膜和油污，直至露出金属光泽为止。两钨极干伸出长度 25~30 mm，钨极间距 1.2~2 mm，氩气流量 15~20 l/min。焊接前预热温度 120 ℃，层间温度  $\leq 177$  ℃。焊接试板时，在保证焊缝成形良好的情况下，尽可能提高送丝速度，试验中最高送丝速度达到了 9 000 mm/min（见表

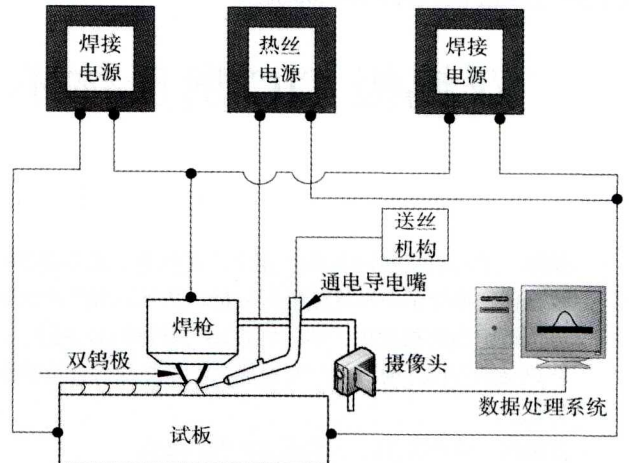


图 1 焊接装置示意图

2)。为了进一步提高焊接效率，在原有双钨极 TIG 设备的基础上增加焊枪摆动功能，即堆焊过程中通过摆动焊枪以获得较宽的焊道。摆动焊接的工艺参数包括摆动速度、摆动幅度和左/右停留时间等。

采用 CSS-WAW1000DL 电液伺服万能试验机测试堆焊层的抗弯强度。横向切取堆焊接头制作金相试件，由于碳素钢和不锈钢的耐腐蚀性差异较大，故对两端分别腐蚀，在碳钢侧用 4% 硝酸酒精腐蚀，在不锈钢侧用 10% 草酸电解腐蚀。然后用 OLYMPUS GX71 型金相显微镜对堆焊层和基体的显微组织进行观察和分析。用数显维氏硬度计（450 SVD）对堆焊接头横截面进行硬度测试，由堆焊层向基体方向每隔 1 mm 取一组测试点，载荷为 10 K。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 无损探伤

采用铝基无铁砂轮对堆焊层进行打磨，打磨抛光后分别按照标准 ASME QW195.2 及 ASME QW191.2 对堆焊层进行 PT 检测和 UT 检测。PT 检测显示堆焊层表面没有任何微小裂纹或气孔等缺陷，同时 UT 检测显示堆焊层内部不存在裂纹、未

表 2 焊接工艺参数

| 试验编号 | 前钨极电流 (A) | 后钨极电流 (A) | 相位差 (rad) | 热丝电流 (A) | 焊接速度 (mm/min) | 送丝速度 (mm/min) |
|------|-----------|-----------|-----------|----------|---------------|---------------|
| 1    | 240/200   | 240/200   | 180       | 30       | 240           | 4 000         |
| 2    | 250/210   | 250/210   | 180       | 30       | 265           | 4 500         |
| 3    | 260/210   | 260/210   | 180       | 40       | 310           | 5 000         |
| 4    | 270/220   | 270/220   | 180       | 40       | 330           | 6 000         |
| 5    | 280/230   | 280/230   | 180       | 60       | 365           | 7 000         |
| 6    | 290/250   | 290/250   | 180       | 70       | 385           | 9 000         |

熔合以及夹钨等缺陷。PT 和 UT 检测表明堆焊层堆焊质量优良，符合相关标准要求。

## 2.2 宏观形貌

观察堆焊层宏观形貌可知，此堆焊层第一层为 309LMo 过渡层，第二层及以上为 316L 耐蚀层，总厚度约为 7 mm（见图 2）。此堆焊层所采用的送丝速度为 4 000 mm/min，焊接速度为 250 mm/min。堆焊照片表明，堆焊层成形良好，堆焊层连续均匀，表面平整度 $\leq 0.5$  mm，且熔敷金属在基体上铺展较好，润湿角 $\theta < 45^\circ$ 。对堆焊试样取横截面，采用低倍方法观察，堆焊试样横截面无裂纹、气孔及未融合等缺陷（见图 3）。

## 2.3 微观组织

按照标准 ASTM E3 对堆焊层及基体进行微观金相观察。首先将试板入炉进行  $620\text{ }^\circ\text{C} \pm 14\text{ }^\circ\text{C} \times 12\text{ h} + 2\text{ h}$  热处理，然后横向切取  $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  试样，放大 200 倍后观察基体、热影响区、309Mo 及 316 堆焊层。结果表明，基体和热影响区主要为贝氏体回火组织（见图 4 (a)、(b)）；堆焊首层为奥氏体、铁素体和碳化物，铁素体和碳化物均匀分布在奥氏体中（见图 4 (c)）；堆焊面层为奥氏体和少量铁素体（见图 4 (d)），堆焊层组织为柱状晶并且向表层方向生长。堆焊层与基体界面熔合良好，没有产生分离现象，也没有产生裂纹、气孔和夹杂

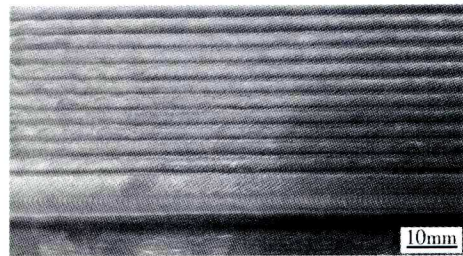


图 2 堆焊层宏观形貌

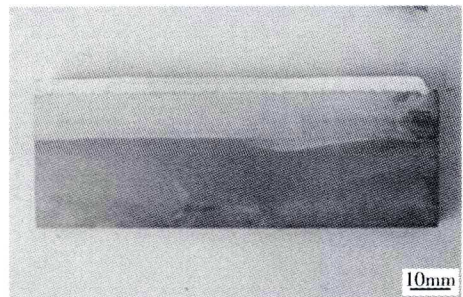


图 3 不锈钢堆焊层低倍照片

等显微缺陷。

在保证质量的前提下，堆焊过程中采取摆动焊枪的方式提高堆焊效率。除摆动参数外其余焊接工艺参数均与不摆动时的参数相同。堆焊后取试样进行金相组织观察，其金相试验条件与不摆动时的试验一致。试验结果表明，基体组织为分布均匀的白色块状铁素体和黑色块状珠光体（见图 5 (a)）。焊接过程中，热影响区受到焊接热源的影响，发生相变，生成粒状贝氏体（见图 5 (b)）。首层堆焊组织为奥氏体、铁素体和碳化物，由于堆焊过程中升温

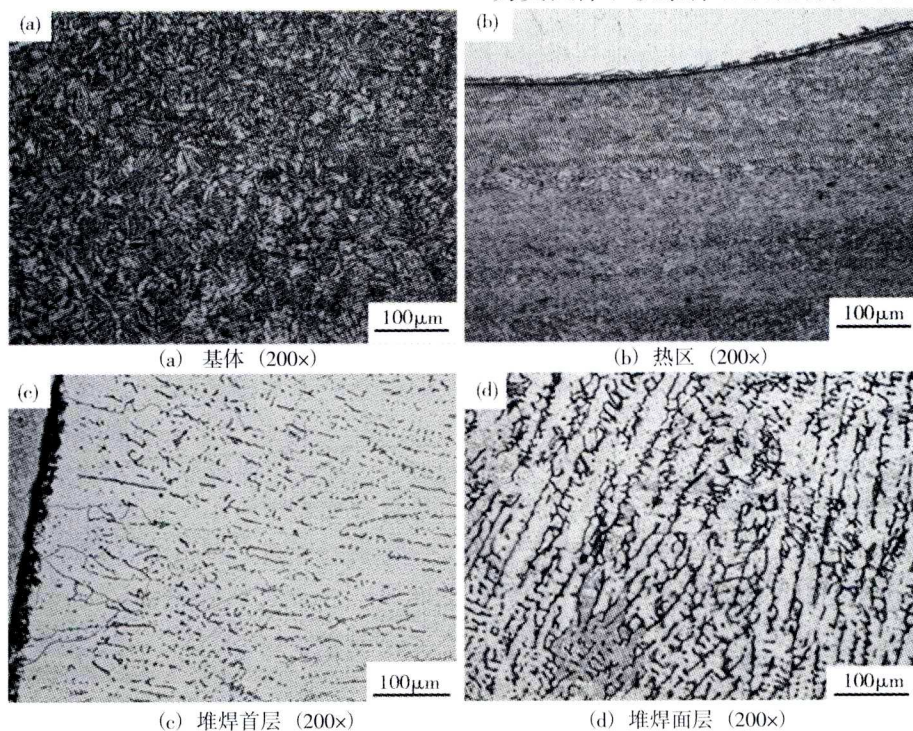


图 4 焊枪不摆动试验件截面金相图

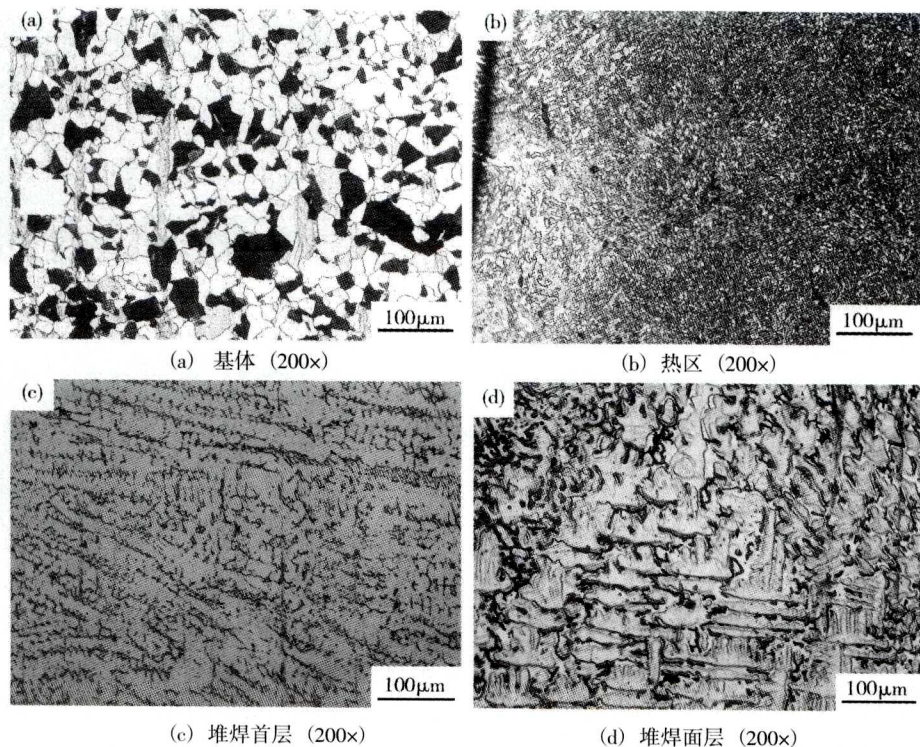


图5 焊枪摆动试验件截面金相图

速度快且在高温停留时间短,致使基体中的铁素体在溶解之后未能充分扩散形成残余奥氏体,铁素体呈细条状嵌于奥氏体中,在进行热处理时过饱和的碳化物将从堆焊首层组织的晶间析出(见图5(c))。堆焊面层组织为树枝状奥氏体,这主要是因为焊材含Cr、Ni量较高,且堆焊面层几乎不受基体的影响,因此树枝状奥氏体正是焊材本身组织的表现(见图5(d))。通过对比发现摆动焊枪与不摆动时得到的堆焊层组织不同,由于摆动焊枪起搅拌熔池的作用,因此会形成长不规则的树枝晶,并且晶粒较小。

采用普通热丝TIG焊机在低合金高强钢表面堆焊不锈钢,取堆焊试样进行微观组织观察,发现堆焊层的面层组织为奥氏体+少量铁素体+碳化物(见图6(a)),首层堆焊组织为奥氏体+少量铁素体(见图6(b));热影响区的组织为贝氏体,以及无显微裂纹的及淬火形成的异常组织(见图6(c));基体组织为贝氏体(见图6(d))。堆焊试样无显微裂纹和影响堆焊试样性能的沉淀物及其它焊接缺陷。普通热丝TIG焊接方法与双钨极TIG焊接方法所得到的堆焊试样组织相同,表明双钨极TIG与普通TIG一样都能获得性能良好的组织。

## 2.4 化学分析

按照标准ASTM A751要求,在熔合线上1.5

mm和堆焊层下0.5mm取化学分析试块,检测C、Si、Mn、Cr、Ni、Mo、Cu等主要化学元素含量(见表4)。从表4中可以看出,熔合线上1.5mm和堆焊层下0.5mm熔敷金属中主要元素的化学成分均满足产品技术条件的要求。

采用表面下0.5mm各元素的含量,按照WRC-1992图数字化程序计算得出铁素体数为5.69FN,满足产品技术条件要求的3~10FN。由于Cr元素在焊接过程中烧损严重,因此选择Ni元素含量的变化用来计算母材的稀释率,计算稀释率公式如下:

$$\text{熔敷金属 Ni 含量} = D \times \text{母材 Ni 含量} + (1-D) \times \text{焊丝 Ni 含量}$$

其中的D代表稀释率,由于母材中Ni含量较少,仅为0.12%~0.13%,因此计算时对稀释率的影响较小,可以忽略不计,其中焊丝的Ni含量为13.3%,熔合线上1.5mm的Ni含量为12.29%,通过公式计算得稀释率仅为7.6%,表明熔敷金属对母材稀释程度较小,对堆焊而言稀释率越小,堆焊效果越好<sup>[10]</sup>,因此双钨极高效焊接方法适合于堆焊。

## 2.5 弯曲试验

按照标准ASME IX QW-160对堆焊层及部分基体进行弯曲试验,切取试样时要求包含堆焊层、

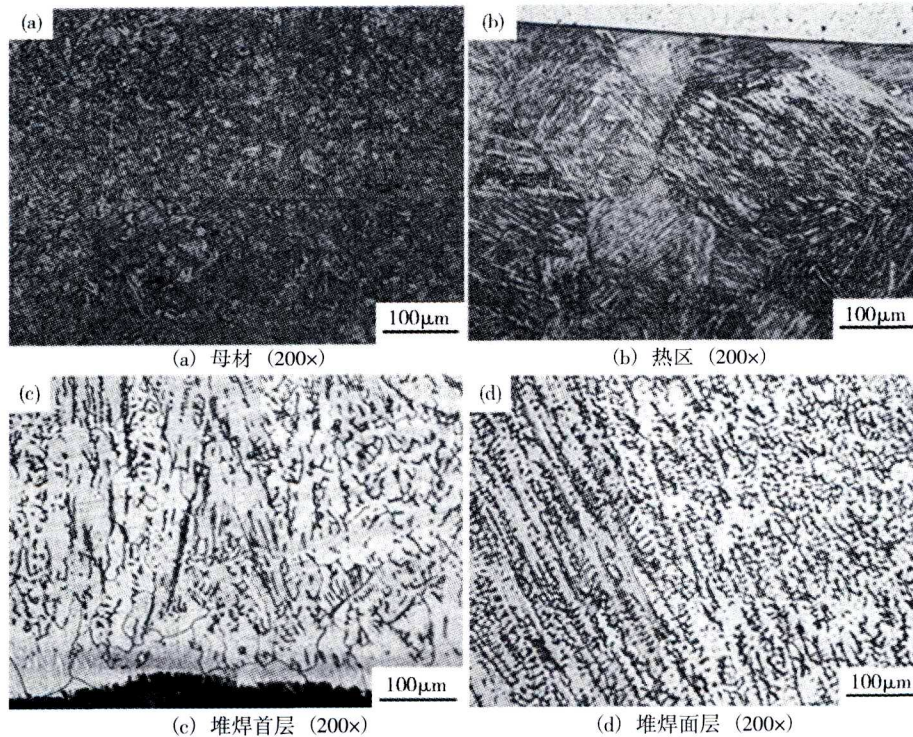


图6 普通热丝 TIG 试验件截面金相图

表4 主要元素成分

| 指标名称及取样位置   | C         | Si       | Mn      | Cr        |
|-------------|-----------|----------|---------|-----------|
| 验收值         | ≤0.03     | 0.3~0.65 | 1.0~2.5 | 18.0~20.0 |
| 熔合线上 1.5 mm | 0.03      | 0.48     | 1.64    | 19.49     |
| 堆焊层下 0.5 mm | 0.02      | 0.48     | 1.70    | 19.00     |
| 指标名称及取样位置   | Ni        | Mo       | Cu      |           |
| 验收值         | 11.0~14.0 | 2.0~3.0  | ≤0.75   |           |
| 熔合线上 1.5 mm | 12.29     | 2.33     | 0.03    |           |
| 堆焊层下 0.5 mm | 12.57     | 2.55     | 0.02    |           |

热影响区及部分基体。试样切取垂直于焊接方向，共计4件，试样尺寸为10 mm×38 mm×120 mm，试验条件为4a、180°。弯曲后的得到试样（见图7），从图中可以观察到拉伸面上的堆焊层和基体未出现分层、裂纹和未熔合等缺陷。并且拉伸面外侧的堆焊层和基体也未发现裂纹和分层等缺陷。弯曲试验结果表明堆焊试样抗弯曲性能良好。

### 2.6 显微硬度

按照标准ASTM E3 在试样横截面的各区进行硬度试验。堆焊合金的硬度是从堆焊合金表层向基体的方向开始测试，每隔1.0 mm取1组测试点，每1组测3个点取其平均值，得到硬度分布（见图8）。可以看出，从基体到熔合区，硬度一直在增大，而且增幅较大，到达第一层底部时硬度出现一

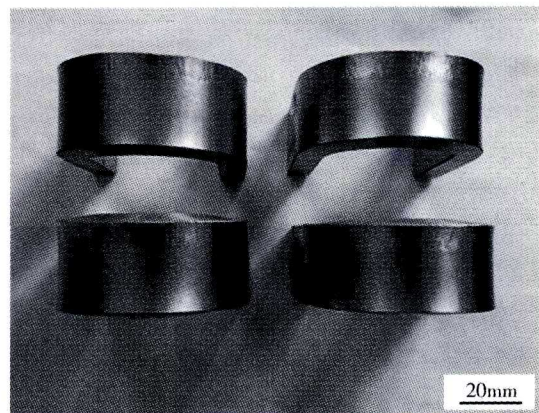


图7 弯曲后试样

个峰值198HV10。堆焊的首层和面层的硬度趋于稳定，且堆焊面层的硬度低于堆焊首层。结合显微

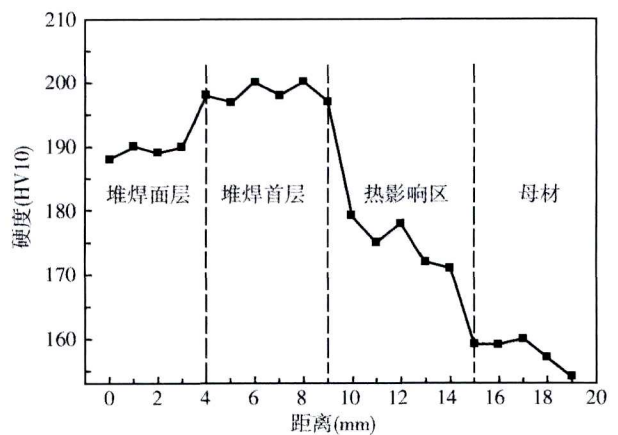


图8 堆焊合金的硬度分布图

组织分析可知,基体中的铁素体多,因此硬度相对较低;而熔合区由母材中的铁素体+奥氏体转变为粒状贝氏体,故硬度增加;堆焊首层受到基体对熔敷金属的稀释,使该层的硬度发生波动;堆焊首层受到第二层的正火作用,使首层组织更加细化,硬质相碳化物分布更加均匀,导致堆焊首层硬度增加;而堆焊面层由于无正火处理,微观组织为粗大的树枝晶,故硬度较堆焊首层低。

## 2.7 耐腐蚀性能

切取试样按照标准 ASTM A262E 法进行晶间腐蚀试验。试样共三件,焊态、热处理态(595~620℃×29 h+1 h)、敏化态(700℃±10℃×0.5 h)各1件,尺寸均为3 mm×20 mm×80 mm。试验后均未发现晶间腐蚀裂纹,表明耐蚀层抗晶间腐蚀的能力较强。

## 3 结语

(1) 采用双钨极堆焊工艺在低合金钢基体表面可以获得高性能的耐蚀层,基体和堆焊层结合良好,堆焊层上及层间无明显裂纹、气孔、夹渣和未熔合等缺陷。

(2) 堆焊耐蚀层具有良好的耐晶间腐蚀性能,堆焊层各元素含量均符合相关标准。

(3) 基体组织为铁素体+奥氏体,硬度较低;堆焊首层组织为铁素体+奥氏体+碳化物,堆焊面

(上接第10页)

## 3 结语

本文通过分析粗轧机压下装置的结构及工作原理,得出支承辊平衡力和工作辊平衡力过大是导致轴向载荷过大,从而加剧压下螺母螺纹表面磨损的主要原因之一;而上工作辊在操作侧和传动侧由于平衡力施加不当而导致压下螺丝的偏载,使螺纹表面局部受力过大,也是导致压下螺母严重磨损的原因;此外,HGC缸倾斜功能的不当使用,机架和轴承座间滑板的磨损,以及下阶梯垫的不均匀磨损等因素都会不同程度地造成压下螺丝的偏载,从而导致压下螺母局部受力过大,加剧了螺纹表面的磨损。因此,在生产过程中应根据实际情况控制好平衡缸的压力,合理制定轧制工艺,及时更换阶梯

层组织为奥氏体,堆焊层相比于基体具有较高的硬度。

(4) 在双钨极焊枪摆动条件下堆焊面层组织生长方向不一致,表明焊枪摆动具有搅拌熔池,细化晶粒的作用。

(5) 填充材料对母材的稀释仅为7.6%,表明双钨极高效焊接方法适用于在低合金钢表面堆焊奥氏体不锈钢。

### 参考文献

- [1] 董苏中.用高强度Cr-Mo钢制造石油精炼高压容器[J].大型铸锻件,1992,55(1):57-59.
- [2] 仇恩沧.国产2.25Cr-1Mo-0.25V钢加氢反应器的开发[J].石油化工设备技术,2000,21(4):36-44.
- [3] 张颖,段莉蕾.加氢反应器不锈钢单层堆焊剥离试验研究[J].一重技术,2015(2):41-45.
- [4] 姜焱中.电弧焊及电渣焊[M].2版.北京:机械工业出版社,1988.
- [5] 周矿先,徐绪炯,吴青松.自动热丝TIG焊工艺简介[J].焊管,1997,20(5):68-69.
- [6] 杨春利,林三宝.电弧焊基础[M].哈尔滨工业大学出版社,2003:26-30,85-113.
- [7] 林三宝,范成磊,杨春利.高效焊接方法[M].北京:机械工业出版社,2011:173-177.
- [8] 殷树言,卢振洋,黄鹏飞,陈树君.高效化焊接原理与特征[A].高效化焊接国际论坛论文集,2002:12-18.
- [9] 马驰原,谷文,朱兴华.双钨极TIG堆焊技术在压力容器制造中的应用[J].一重技术,2016(1):58-63.
- [10] 王芝玲,于跟喜.低合金表面奥氏体不锈钢堆焊层组织与性能研究[J].铸造技术,2016,37(4):771-773.

收稿日期:2017-03-23

垫、滑板等备件,一旦发现润滑油油温升高,或油中金属颗粒增多,应及时停车检修,保证润滑油及回油通畅,保证油温的稳定。

### 参考文献

- [1] 刘家浚.材料磨损原理及其耐磨性[M].北京:清华大学出版社,1993:92-164.
- [2] 邹家祥.轧钢机械[M].北京:冶金工业出版社,2009:117-146.
- [3] 蒋昭,徐肇源,李家楦,王景新.宝钢2050毫米带钢热连轧机装备研制技术[M].哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1998:144-148.
- [4] 谭庆昌,赵洪志.机械设计[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [5] 金伟.粗轧机压下装置磨损严重的原因分析及改进[D].北京科技大学,2003.

收稿日期:2017-03-10