

文章编号:1673-5005(2025)06-0234-07 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2025.06.024

30CrMo 钢表面堆焊 Inconel 625 合金 工艺及组织性能

韩涛¹, 朱丽娜², 韩来慧¹, 李宗民¹, 于法鑫¹

(1. 山东省智能能源材料重点实验室, 材料科学与工程学院, 中国石油大学(华东), 山东青岛 266580;
2. 山推工程机械股份有限公司, 山东济宁 272000)

摘要: 采用热丝 TIG 堆焊工艺在 30CrMo 钢基体上堆焊 Inconel 625 镍基合金, 分析对比不同预热温度对堆焊接头和堆焊层组织及性能的影响, 从而确定合理的热丝 TIG 堆焊工艺。结果表明: Inconel 625 镍基合金与 30CrMo 钢母材界面结合良好, 无焊接缺陷; 预热温度对堆焊层成型形貌、耐蚀性、接头弯曲性能影响很小, 各温度下接头弯曲性能良好, 均没有出现开裂现象, 但对热影响区的硬度以及堆焊层的熔合比影响显著; 各温度堆焊层显微组织均为树枝状奥氏体, 由内而外过渡为胞状晶、柱状晶、树枝晶、等轴晶; 堆焊后在母材、热影响区和堆焊层 3 个区域中, Fe、Ni、Cr、Mo、Nb 等主要元素呈规律性分布, 在枝晶间存在 Mo、Nb 元素的偏析; 从堆焊效率、稀释率、堆焊试样性能考虑, 焊前预热 200 °C 最佳。

关键词: 30CrMo 钢; 镍基合金; 热丝 TIG 堆焊; 显微组织; 硬度; 耐蚀性

中图分类号: TG 442 **文献标志码:** A

引用格式: 韩涛, 朱丽娜, 韩来慧, 等. 30CrMo 钢表面堆焊 Inconel 625 合金工艺及组织性能[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025, 49(6): 234-240.

HAN Tao, ZHU Lina, HAN Laihui, et al. Process and microstructure properties of 30CrMo steel surfacing with Inconel 625 alloy[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2025, 49(6): 234-240.

Process and microstructure properties of 30CrMo steel surfacing with Inconel 625 alloy

HAN Tao¹, ZHU Lina², HAN Laihui¹, LI Zongmin¹, YU Faxin¹

(1. Shandong Key Laboratory of Intelligent Energy Materials, School of Materials Science and Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. Shantui Construction Machinery Company Limited, Jining 272000, China)

Abstract: The Inconel 625 nickel based alloy was deposited on 30CrMo steel substrate using hot wire TIG welding process. The effects of different preheating temperatures on the microstructure and properties of deposited joint and layer were analyzed and compared, through which a reasonable hot wire TIG welding process was determined. It is found that Inconel 625 nickel based alloy presents good bonding with 30CrMo steel base material, and there are no welding defects. The preheating temperature has slight effect on the formation morphology, corrosion resistance, and joint bending performance of the overly layer. The bending performance of the base metal joint is good at all temperatures, and there is no cracking phenomenon. However it has a significant impact on the hardness of the heat affected zone and the fusion ratio of the overly layer. The microstructure of each temperature overly layer is dendritic austenite, transitioning from inside to outer into cellular, columnar, dendritic, and equiaxed crystals. After surfacing, the main elements such as Fe, Ni, Cr, Mo, and Nb are distributed regularly in the base metal, heat affected zone, and surfacing layer. There is segregation of Mo and Nb elements between dendrites. Considering the welding efficiency, dilution rate, and performance of the welding specimen, preheating 200 °C before welding is the best.

收稿日期: 2025-03-11

基金项目: 国防科技创新特区项目(22-05-CXZX-04-04-29)

第一作者及通信作者: 韩涛(1972-), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为油气管线的在役焊接及数值模拟与高效高精度焊接技术。

E-mail: hantao@upc.edu.cn.

Keywords: 30CrMo steel ; nickel based alloy ; hot wire TIG surfacing process ; microstructure ; hardness ; corrosion property

国内已探明的天然气资源中,酸性油气田也占了相当大的比例^[1-3],深层的油气中含有大量的腐蚀介质,如硫化氢、二氧化碳和高氯化物等,在酸性油气田的开采过程中,如果选材或防腐措施不当,会对开采设备、管线中的金属材料造成严重的腐蚀,威胁安全生产^[4-5]。其中 30CrMo 钢作为石油天然气开采和石油炼制等工业设备中普遍使用的材料,具备良好的综合力学性能,兼顾强度高、韧性好、可加工性良好等优点。Inconel 625 高温镍基合金作为航空航天、石油化工、工业生产等领域普遍使用的材料,具有良好的屈服强度,可加工性与焊接性等优点,同时其耐蚀性好,也常作为耐蚀性较差的碳钢管内保护层^[6-8]。为满足严苛腐蚀环境的作业要求,在 30CrMo 钢表面堆焊 Inconel 625 合金可以使 30CrMo 钢表面具备卓越的耐蚀性。传统的堆焊方法有熔化极气体保护焊(GMAW)、非熔化极惰性气体保护电弧焊(TIG)、埋弧焊(SAW)、焊条电弧焊(SMAW)等,这几种堆焊方法技术成熟稳定,目前在生产中应用十分普遍^[9]。随着堆焊技术的不断发展进步与创新,激光堆焊、电渣堆焊、高效电弧堆焊、粉末堆焊等多种新的更高效的堆焊技术出现^[10-11]。SMAW、GMAW 和 SAW 存在稀释率过高等问题,TIG 钨极载流能力有限,且焊缝成形对送丝位置与钨极高度较为敏感。近年来,在传统 TIG 基础上产生的热丝 TIG 焊接,送丝速度独立于焊接电流控制,主要依靠电阻热对焊丝进行加热,减小了焊接熔池从电弧中输入的热量,提高了熔覆效率,能够更好地控制焊缝成形^[12-15]。笔者以 30CrMo 钢为研究对象,采用热丝 TIG 堆焊工艺堆焊 Inconel 625 合金,通过对比分析不同预热温度下堆焊层成型形貌、性能与组织,获得热丝 TIG 堆焊最优工艺参数。

1 试验材料与方法

以调质态为基体,试验母材选用直径 200 mm、厚度 20 mm 的 30CrMo 钢,其化学成分 C、Si、Mn、Cr、Mo 的质量分数分别为 0.26%~0.34%、0.17%~0.37%、0.40%~0.70%、0.80%~1.10%、0.15%~0.25%;P、S、Ni、Cu 的质量分数分别不高于 0.035%、0.035%、0.030%、0.030%。调质态 30CrMo 钢机械性能方面,抗压强度不低于 913 MPa,屈服强度不低于 784 MPa,伸长率不低于 12,断面收缩率不低于 50,冲击功不低于 78.4,硬度(退火或高温回火状态)低于 229 HB。

堆焊选用焊材型号为 AWS 标号的 ERNiCrMo-3 焊丝,焊材规格为 $\Phi 1.2$ mm,其化学成分 C、Mn、Fe、P、Si、Cu、Ni、Al、Ti、Cr、Nb、Mo 的质量分数分别为 0.03%、0.30%、3%、0.01%、0.40%、0.03%、61.60%、0.10%、0.03%、22.0%、3.70%、8.70%,对应材料为 Inconel 625 镍基合金。采用 WSM-400HW 逆变式脉冲氩弧奥太焊机,配合 ABB 焊接机器人编制行走轨迹进行焊接,堆焊层平均厚度不低于 4.5 mm,有效堆焊区域为 140 mm(偏移方向) \times 120 mm(焊接方向)。焊道的成型质量用熔深(d)、熔宽(w)和余高(h)进行表征(图 1)。堆焊区域见图 2。选用数显控温恒温加热平台为母材进行预热。预热过程中,利用数字式温度计 VC6801 热电偶温度计进行实时测温。熔合比 θ 是指被熔化的基材金属在焊缝金属中所占的比例,通常用面积算法或元素测量法进行计算: $\theta = A_w / (A + A_w)$ 。其中 A 为堆焊层面积; A_w 为熔合区面积。热丝 TIG 堆焊分为堆焊层 1、堆焊层 2 和堆焊层 3,不同预热温度堆焊工艺参数如表 1 所示。

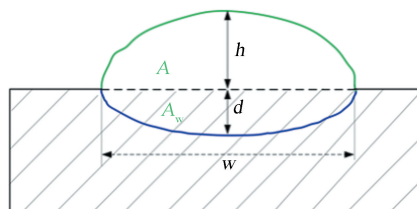


图 1 焊道成型质量表征

Fig. 1 Characterization of weld bead forming quality

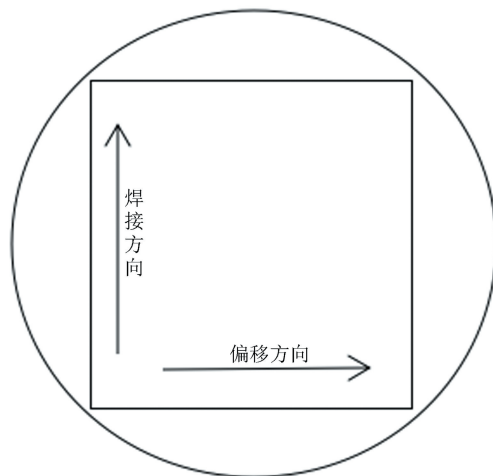


图 2 堆焊区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of overlay welding area

表1 不同预热温度堆焊试验工艺参数

Table 1 Process parameters for different preheating temperature surfacing tests

预热温度/℃	堆焊层数	电流/A	电压/V	送丝速度/m·min ⁻¹	热丝电流/A	侧向偏移量/mm	层间温度/℃
不预热	堆焊层1	180	12~16	1.7	50	4.5	20±10
	堆焊层2	190	13~16	1.7	50	4.5~5.5	100±10
	堆焊层3						
100	堆焊层1	180	12~16	1.7	50	4.5	100±10
	堆焊层2	190	13~16	1.7	50	4.5~5.5	100±10
	堆焊层3						
200	堆焊层1	180	12~16	1.7	50	4.5	200±10
	堆焊层2	190	13~16	1.7	50	4.5~5.5	100±10
	堆焊层3						

堆焊完成后,利用电火花切割技术截取堆焊层的横截面,制备尺寸为30 mm×20 mm×10 mm的金相试样,经砂纸逐级打磨,依次用W2.5和W1.5金刚石抛光膏抛光;然后母材用体积分数4%硝酸酒精混合溶液腐蚀约10 s,试样堆焊层1使用体积分数4%的草酸水溶液电解腐蚀约30 s,堆焊层2和堆焊层3使用体积分数4%的草酸水溶液电解腐蚀约38 s,电解腐蚀参数为电流1.6 A,电压6.0 V。采用DM2500M徕卡光学显微镜观察金相组织, JSM-7200F型扫描电镜和背散射电子衍射(EBSD)进行析出相和晶界分析,分析Fe、Ni、Cr、Mo、Nb五种主要元素的分布。

采用三点弯曲原理,根据GB/T 2653-2008《焊接接头弯曲试验方法》在万能材料试验机上分别对堆焊后的试样进行正弯和侧弯试验,加载速度为10 mm/min,辊筒半径为15 mm,弯心半径为30 mm,正弯试验支座间距离为72 mm,侧弯试验支座间距离为58 mm,弯曲角度为180°。

采用压入法测量材料的硬度,利用TIME 6610M半自动显微硬度计测试试样的硬度分布,绘制硬度分布曲线。试样尺寸为30 mm×20 mm×10 mm,测试从距离耐蚀层顶部0.2 mm开始,每隔0.4 mm测一个点,直至母材侧6点以上硬度测试值为止,并对热影响区内每隔0.2 mm测一个点,直至母材侧打点3点以上硬度测试值为止,进一步对比分析热影响区、母材、堆焊层各自区域硬度差异。测试加载载荷为1 kg,保荷时间为10 s。

参照GB/T 15260-2016《金属和合金的腐蚀镍基合金晶间腐蚀试验方法》选用方法A,按照标准要求比例配置硫酸铁(Ⅲ)-硫酸溶液,运用失重法计算分析不同预热温度下堆焊层的腐蚀速率。试验应连续进行,周期为24 h。试验完成后,计算试样的总暴露面积,测量试样尺寸精确到0.1 mm,称量试样精确到0.01 g。根据腐蚀速率计算公式 $\gamma_{\text{corr}} = K\Delta m/$

(Atp)计算不同预热温度下试件的腐蚀速率,其中 γ_{corr} 为腐蚀速率; K 为常数; Δm 表示失重,g; A 为暴露面积,cm²; t 为暴露时间,h; ρ 为密度,g/cm³。

2 结果分析

2.1 热丝TIG堆焊工艺

单道焊缝堆焊预试验焊缝成型见图3,焊接工艺参数与成型数据见表2。可以看出,随焊接电流增加,热输入增加,单道焊缝熔宽变宽,余高减小;保持焊接电流不变,改变焊接速度和送丝速度,但确保两者比值约为0.425(保证单位焊缝长度堆焊焊丝量不变)的前提下,随焊接速度增加,热输入减小,相应的熔池温度降低,导致其流动性变差,单道焊缝熔宽越窄,余高越小。因此堆焊层1选用焊接电流180 A,在保证堆焊效率较高的同时减小热输入,降低母材稀释作用对堆焊层的影响,堆焊层2和堆焊层3可以不考虑母材稀释作用的影响,选择焊接电流190~200 A,提高堆焊效率。



图3 预试验单道焊缝成型

Fig. 3 Pre-experimental single pass weld forming

不同预热温度下堆焊层的宏观形貌如图4所示,上面为堆焊层的宏观表面形貌,下面对应为堆焊层的横截面。可以看出不同预热温度下堆焊层成型良好,未发现宏观焊接表面缺陷,堆焊层表面光亮且具有金属光泽,说明预热温度对堆焊层成型影响

较小。

表 2 单道焊缝堆焊预试验工艺参数

Table 2 Pre-experimental process parameters for single weld overlay welding

标号	电流/ A	电压/ V	焊接 速度/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	送丝 速度/ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	熔宽/ mm	余高/ mm
1	160	14.3~14.4	4	1.6	6.5	1.6
2	170	14.3~14.5	4	1.6	7.0	1.5
3	180	14.1~14.4	4	1.7	7.0	1.6
4	190	14.2~14.3	4	1.7	7.6	1.5
5	200	14.6~15.1	4	1.7	8.0	1.4
6	180	13.8~14.3	3	1.3	8.2	1.3
7	180	13.8~14.4	4	1.7	7.0	1.5
8	180	14.2~14.8	5	2.1	6.8	1.7

根据熔合比计算公式得出不预热、预热 100 °C、预热 200 °C 的熔合比分别为 23.1%、24.6%、26.4%。可见预热温度越高,熔合比越大,母材稀释作用对堆焊层影响越大。

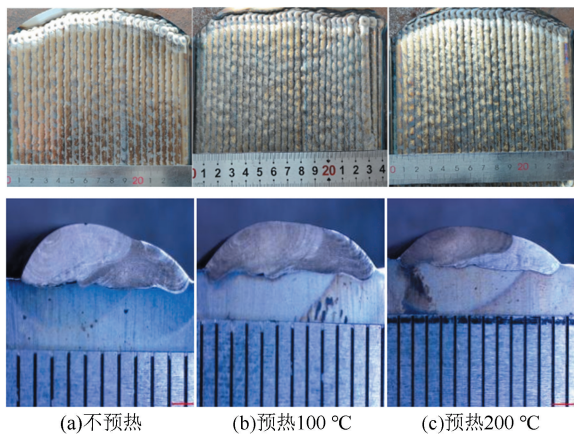


图 4 堆焊宏观形貌

Fig. 4 Macro morphology of overlay welding

2.2 显微组织

通过对比不同预热温度下堆焊试样的显微组织,发现它们的显微组织基本相同,因此仅选用最具有代表性的焊前预热 200 °C 的堆焊层显微组织进行分析。

预热 200 °C 堆焊试样显微组织见图 5。由图 5(a)、(b)看出,在母材与堆焊层的界面处有一平整的白亮熔合区,组织为马氏体,熔合区前沿出现大体上与该界面垂直定向生长的奥氏体树枝晶区。由图 5(c)、(d)看出,堆焊层 1(距离白亮带稍远区域)与堆焊层 2 晶粒仍为树枝状生长,但生长方向比较紊乱,这是由于多层多道焊间的能量分布不均匀,散热渠道多,使得晶粒生长方向也呈现多样性。由图 5(e)看出,堆焊层 3 晶粒转化为等轴晶,而且晶粒变得更加细小,这是由于耐蚀层不会受下一层堆焊层

的影响,再加上空气对流冷却等因素的影响,可以快速结晶为更加细小的组织。由图 5(f)看出,30CrMo 钢的微观组织大部分为回火索氏体,黑色为细珠光体,白色块状为铁素体,组织细小分布均匀。调质处理可以使网状铁素体固溶到奥氏体,淬火后得到马氏体组织,后经高温回火得到回火索氏体组织,珠光体层片状较细小。

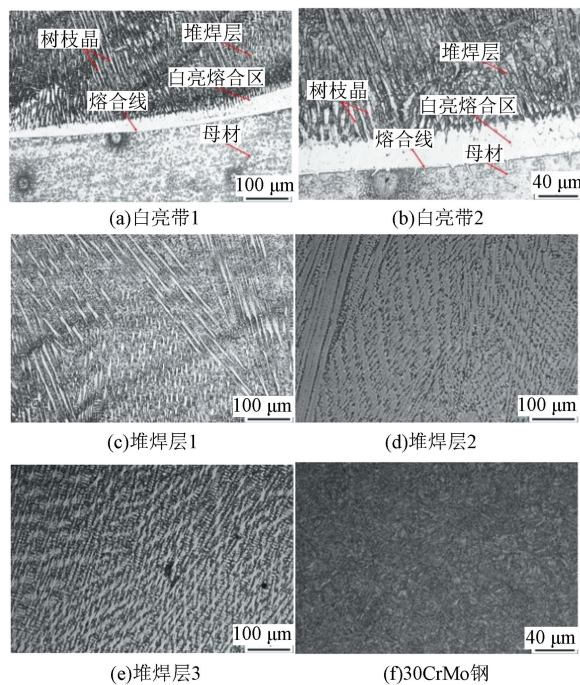


图 5 堆焊层组织形貌

Fig. 5 Microstructure of surfacing layer

2.3 化学组成

从堆焊层表面到母材 30CrMo 钢的化学成分变化见图 6。由图 6(b)、(c)看出 Fe、Ni、Cr、Mo、Nb 在堆焊层、熔合区(白亮带)和母材这 3 个区域规律分布,其中母材中 Fe 元素含量最高,而 Cr、Ni、Mo 元素在堆焊层中含量最高。热丝 TIG 堆焊层与 30CrMo 钢的过渡区宽度为 8.9 μm ,与白亮熔合区宽度基本一致。从堆焊层到 30CrMo 钢侧,Fe 元素含量急剧升高,Cr、Ni、Mo 元素含量急剧降低,这主要是由堆焊过程中母材的熔化和熔池的对流造成的。

图 7 为放大 500 倍堆焊层横断面电子探针面扫描成分分析,由图 7(b)看出,Fe 元素主要分布在母材侧,堆焊层中有少量的 Fe 元素分布。由图 7(c)、(d)看出,Cr 和 Ni 元素主要分布在堆焊层中。由图 7(e)、(f)看出,Mo、Nb 元素在晶间处存在明显富集,形成富含 Nb 的共晶 Laves 相^[16-17]。研究^[18-19]发现,堆焊层中 Fe 元素含量会对其耐蚀性产生较大影

响,Cr、Mo、Nb元素在堆焊层内部存在富集是由于 树枝晶偏析所造成的。

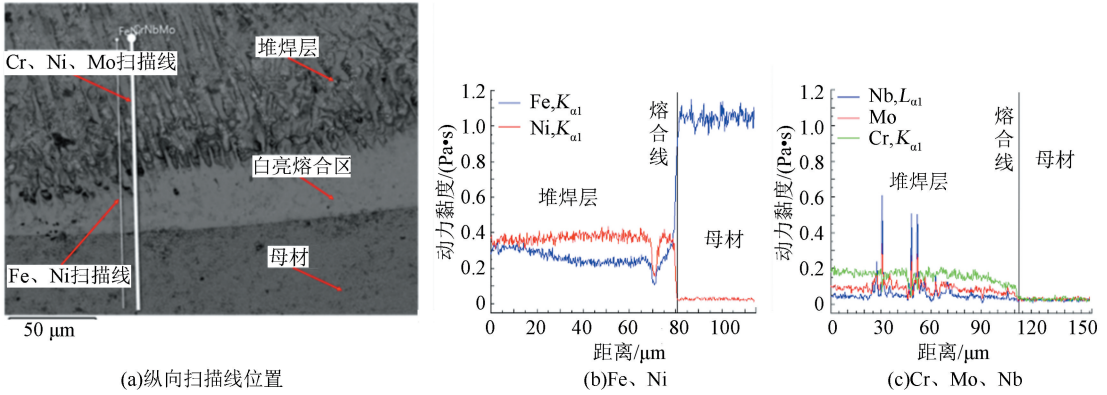


图6 堆焊层到30CrMo钢线扫描成分分布

Fig. 6 Composition distribution from surfacing layer to 30CrMo

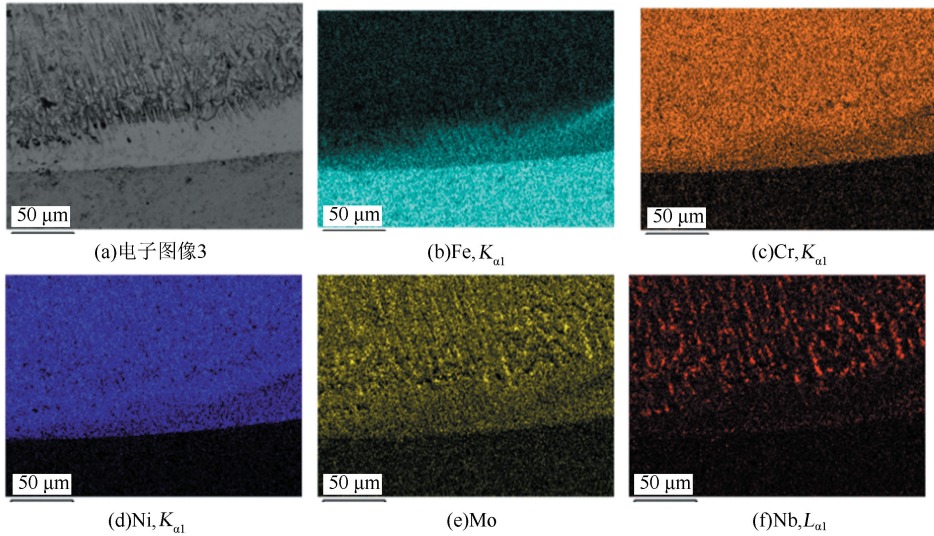


图7 堆焊层到30CrMo钢面扫描成分分布

Fig. 7 Scanning composition distribution of surfacing layer to 30CrMo steel

2.4 弯曲性能

不同预热温度下,30CrMo钢堆焊试件的弯曲试验结果见图8。可以看出,在正弯和侧弯试验中,母

材和堆焊层均没有产生裂纹,说明焊后延展性良好,预热温度对堆焊试件的弯曲性能影响不大。

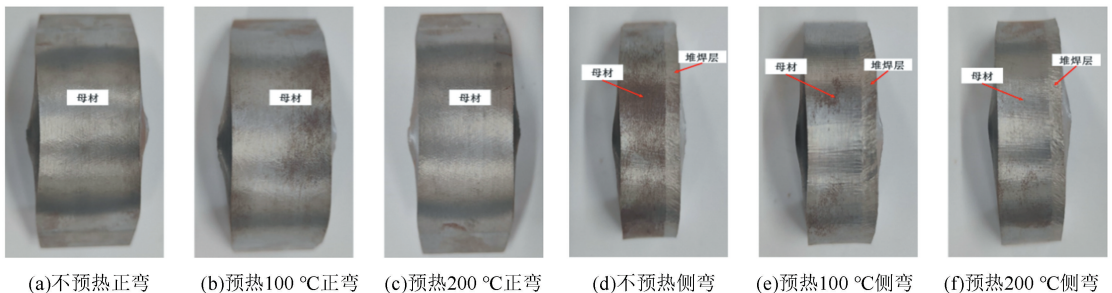


图8 不同预热温度弯曲试验部分试样结果

Fig. 8 Partial specimen results of bending tests at different preheating temperatures

2.5 硬 度

不同预热温度堆焊层硬度分布见图 9。由图 9 看出,热影响区硬度最高,母材硬度其次,堆焊层硬度最低,这主要是由于堆焊后的热影响区对母材的稀释影响引起碳偏移,在后续焊接过程中相当于对母材又进行了一次淬火处理。而且热影响区内硬度存在较大波动,在热影响区上部硬度逐渐上升至最高,随后在接近热影响区中部区域下降至低点,在靠近母材一侧的热影响区区域硬度又再次升高。结合热影响区显微组织分析结果,容易对应得出热影响

区上部马氏体组织粗大硬度最高,中部为回火索氏体组织,硬度最低,下部为较为细小的马氏体组织硬度相对较低。堆焊层硬度满足工程应用要求 340 HV₁ 以下,热影响区硬度不满足工程应用要求 290 HV₁ 以下。随预热温度增加,热影响区最高硬度降低,这是由于随预热温度降低,热影响区焊后冷却速度越快,容易产生更多淬硬组织。预热 200 ℃ 热影响区最高硬度最低,但仍高于标准要求,因此需要对焊后试件进行退火处理。

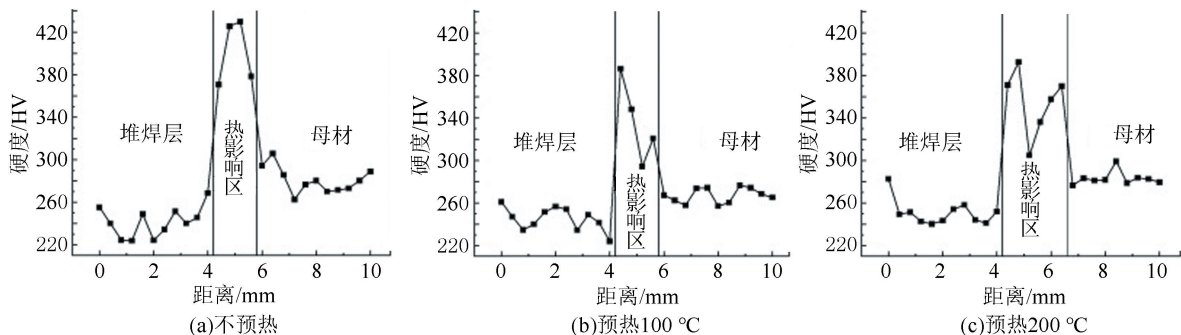


图 9 不同预热温度硬度分布

Fig. 9 Hardness distribution at different preheating temperatures

2.6 耐 蚀 性

不同预热温度试样腐蚀速率见表 3。对比结果可见,各试样腐蚀速率相差不大,说明预热温度对多

层耐蚀层的腐蚀性能影响很小。这是由于不同预热温度下母材的稀释率不同,运用多层多道堆焊极大减弱了母材稀释作用对堆焊层产生的影响。

表 3 腐蚀试验参数及结果

Table 3 Corrosion test parameters and results

预热温度/℃	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	暴露面积/cm ²	腐蚀时间/h	腐蚀速率/(g·cm ⁻² ·h ⁻¹)
不预热	29.7	10.0	3.0	8.322	24	5.64
100	29.5	9.8	3.7	8.690	24	5.65
200	29.6	9.9	3.0	8.231	24	5.70

3 结 论

(1) 随焊速增加,热丝 TIG 堆焊层焊道宽度变窄,余高降低;随焊接电流增加,热输入增加,单道焊缝熔宽变宽,余高减小;随预热温度升高,熔合比增大;从焊接效率考虑,选用预热温度 200 ℃,焊接速度 4 mm/s,第一层焊接电流 180 A,层间温度(200±10) ℃,后续层数焊接电流 190~200 A,层间温度(100±10) ℃,每道焊缝间偏移量 4.5~5 mm。

(2) 堆焊层组织由熔合区附近的奥氏体树枝晶过渡至堆焊层顶部的等轴晶;母材中 Fe 元素含量远远高于堆焊层,堆焊层中 Ni、Cr、Mo、Nb 含量高;Mo、Nb 元素在枝晶间富集,促使 Laves 相的形成,不利于堆焊层局部耐蚀性。

(3) 调质态母材焊后延展性良好;堆焊后热影响区硬度>母材硬度>堆焊层硬度;焊前预热 200 ℃ 热影响区硬度最小。

(4) 不同预热温度下各试样腐蚀速率结果相差不大,预热温度对多层堆焊层的腐蚀性能影响很小。

参 考 文 献:

[1] 古小红,李顺林,耿波,等. 普光气田高含硫气井带压更换采气树工艺技术[J]. 天然气工业,2015,35(1): 92-96.
 GU Xiaohong, LI Shunlin, GENG Bo, et al. Technology of replacing Christmas tree with pressure in high sulfur gas well in Puguang gas field[J]. Natural Gas Industry, 2015,35(1):92-96.
 [2] 刘元直,商剑峰,林宏卿,等. 高含硫净化厂硫磺成型

- 装置的湿气腐蚀机理[J]. 天然气工业, 2014, 34(4): 137-141.
- LIU Yuanzhi, SHANG Jianfeng, LIN Hongqing, et al. Moist atmosphere corrosion of sulfur forming unit in high-sulfur natural gas purification plants[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(4): 137-141.
- [3] 龚金海, 刘德绪, 高继峰, 等. 普光气田集输系统综合防腐技术[J]. 油气田地面工程, 2014, 33(3): 62-63.
- GONG Jinhai, LIU Dexu, GAO Jifeng, et al. Comprehensive anticorrosion technology of gathering and transportation system in Puguang gas field [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2014, 33(3): 62-63.
- [4] LI X, ZHANG D, LIU Z, et al. Share corrosion data [J]. Nature, 2015, 527: 441-442.
- [5] 郭龙龙. 脉冲 TIG 堆焊 Inconel625 工艺及堆焊层组织性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- GUO Longlong. Study on process, microstructure and performance of inconel 625 cladding layer deposited using pulsed tig[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [6] 杨洁. 30CrMo 钢表面堆焊 Inconel625 镍基合金性能的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
- YANG Jie. Property of arc surfacing inconel alloy 625 cladding on 30CrMo steel[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011.
- [7] 孙焕焕, 刘爱国, 孟凡玲. 堆焊 Inconel625 合金的锅炉膜式水冷壁组织和性能[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(增刊2): 96-99.
- SUN Huanhuan, LIU Aiguo, MENG Fanling. Microstructure and properties of the membrane water-walls of boiler with Inconel 625 alloy surfacing layer[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(S2): 96-99.
- [8] MOHAMMADI Z E, ALFANTAZI A M. Hot corrosion of inconel 625 overlay weld cladding in smelting off-gas environment[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(10): 4671-4699.
- [9] 李立英, 盛学臻, 戴国文, 等. X80/2205 双金属复合管 CMT/TIG 管端堆焊组织及性能[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(6): 156-162.
- LI Liying, SHENG Xuezheng, DAI Guowen, et al. Microstructure and properties of X80/2205 bimetallic composite pipe CMT/TIG end surfacing[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(6): 156-162.
- [10] 任艳艳, 张国赏, 魏世忠, 等. 我国堆焊技术的发展及展望[J]. 焊接技术, 2012, 41(6): 1-4.
- REN Yanyan, ZHANG Guoshang, WEI Shizhong, et al. Development and prospect of surfacing technology in China[J]. Welding Technology, 2012, 41(6): 1-4.
- [11] 白晓琳. 低合金钢 Q345R 表面堆焊 Monel400 工艺及组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- BAI Xiaolin. Reserch on process, microstructure and properties of overlaying Monel400 on the surface of Q345R low alloy stell [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [12] 李立英, 盛学臻, 高彦伟, 等. 陡坡 X70 管线钢热丝 TIG 焊接头组织和性能[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(6): 226-233.
- LI Liying, SHENG Xuezheng, GAO Yanwei, et al. Microstructure and properties of hot wire TIG welded joint of X70 pipeline steel with steep slope [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2024, 48(6): 226-233.
- [13] 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.
- ZHANG Min. Effect of welding process on the microstructure and properties of nickel-based welding overlay [J]. Pressure Vessel Technology, 2018, 35(12): 69-73.
- [14] 张忠海. 热丝 TIG 焊在核电设备制造中的应用[J]. 一重技术, 2021(1): 49-52.
- ZHANG Zhonghai. Application of hot wire TIG welding technique in manufacture of nuclear power equipment [J]. CFHI Technology, 2021(1): 49-52.
- [15] GHOSH P K, KUMAR R. Surface modification of micro-alloyed high-strength low-alloy steel by controlled TIG arcing process [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(2): 831-842.
- [16] 冯英超, 刘金平, 王世杰, 等. 固溶处理对 Inconel625 合金电弧增材组织的影响[J]. 焊接学报, 2018, 39(6): 81-85.
- FENG Yingchao, LIU Jinping, WANG Shijie, et al. Effect of solid solution treatment on microstructure of Inconel625 alloy by arc addition [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(6): 81-85.
- [17] SILVA C C, DE MIRANDA H C, MOTTA M F, et al. New insight on the solidification path of an alloy 625 weld overlay [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2013, 2(3): 228-237.
- [18] ABIOYE T E, MCCARTNEY D G, CLARE A T. Laser cladding of Inconel 625 wire for corrosion protection [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 217: 232-240.
- [19] ZAREIE R H R, AKBARI M S A A, MADANI S F. Comparison of corrosion behavior between fusion cladded and explosive cladded Inconel 625/plain carbon steel bi-metal plates [J]. Materials & Design, 2013, 43: 467-474.