

堆焊层数对热丝脉冲 TIG 堆焊 Inconel 625 的腐蚀性能研究

欧阳志英¹, 朱威¹, 任飙²

(1. 上海海隆石油管材研究所, 上海 200949; 2. 上海海隆石油化工研究所, 上海 200949)

[摘要] 为了研究热丝脉冲 TIG(惰性气体钨极保护焊)堆焊不同层数 Inconel 625 后堆焊层的腐蚀性能差异, 在 20 钢基体表面分别堆焊单层和双层 Inconel 625, 通过电化学试验、晶间腐蚀试验和 EDS 成分分析, 对不同层数堆焊层的腐蚀性能进行了对比分析。结果表明: 其 bode 谱中双层堆焊的相位角为 80° , 单层堆焊和基材的相位角分别下降 5° 和 20° , 双层堆焊的阻抗模量与频率的斜率最大, 其次是单层堆焊的, 基材的最小; 基材的容抗弧最小且存在 Warbug 扩散, 双层堆焊的容抗弧最大, 单层和双层堆焊较基材的自腐蚀电位分别提高了 374.0 mV 和 392.0 mV, 腐蚀电流密度分别下降约 99.3% 和 99.8%, 双层堆焊的点蚀电位较单层的提高了 430 mV。晶间腐蚀试验后, 堆焊层均未出现明显晶间腐蚀而表现为点蚀, 双层堆焊的腐蚀失重约为单层的 1/5, 腐蚀沿柱状晶间贯穿。堆焊层间融合区以及与基体交界处的合金元素变化显著, 层内分布均匀, 双层堆焊的 Fe 元素含量低于单层堆焊的, 具有更好的耐腐蚀性能。

[关键词] Inconel 625; 热丝脉冲 TIG 堆焊; 堆焊层数; 电化学试验; 晶间腐蚀

[中图分类号] TG179 **[文献标识码]** A **doi:** 10.16577/j.issn.1001-1560.2022.0125

[文章编号] 1001-1560(2022)05-0057-06

Study on the Corrosion Performance of Hot Wire Pulsed TIG Surfacing Inconel 625 with Different Surfacing Layers

OUYANG Zhi-ying¹, ZHU Wei¹, REN Biao²

(1. Shanghai Hilong Petroleum Tubular Goods Research Institute, Shanghai 200949, China;

2. Shanghai Hilong Petrochemical Research Institute, Shanghai 200949, China)

Abstract: For studying the difference of corrosion performance of Inconel 625 surfacing layers obtained through hot wire pulse TIG (Tungsten Inert Gas Welding) surfacing, single-layer and double-layer coatings of Inconel 625 were applied on the surface of 20 steel through surfacing. The corrosion performance of surfacing layers with varying number was analyzed by electrochemical test, intergranular corrosion test and EDS component analysis. Results showed that in Bode diagram, the phase angle of double-layer surfacing was 80° , and that of the single-layer surfacing and substrate decreased by 5° and 20° respectively. The slope of impedance modulus and frequency of double-layer surfacing was the largest, followed by single-layer surfacing, and the minimum was the that of substrate. Additionally, the base material had Warbug diffusion and the smallest capacitance arc, while the double-layer surfacing had the largest capacitance arc. Self-corrosion potentials in single-layer and double-layer surfacing were 374.0 mV and 392.0 mV higher than that of the base material respectively, the corrosion current density decreased by about 99.3% and 99.8%, and the double-layer surfacing spot corrosion potential was 430 mV higher than that of the single-layer. After the intergranular corrosion test, no obvious intergranular corrosion appeared in the surfacing layer, but pitting corrosion was observed. Moreover, the weight loss of the double-layer surfacing corrosion was about 1/5 of the single-layer, and the corrosion penetrated along the columnar intergranular. The alloy elements in the fusion zone between layers and the interface with substrate changed significantly and distributed evenly within each layer. The Fe content of double-layer surfacing was lower than that of the single-layer surfacing, and thus the former had a better corrosion resistance.

Key words: Inconel 625; hot wire pulsed TIG surfacing; surfacing layer; electrochemical test; intergranular corrosion

[收稿日期] 2021-12-25

[基金项目] 上海市优秀技术带头人计划资助项目(19XD1430400)

[通信作者] 欧阳志英(1977-), 博士, 高级工程师, 研究方向为适用于复杂环境新型钻具研发, E-mail: ouyangzsh@163.com

0 前言

随着全球工业化加速发展和能源需求量的增加,油气勘探开采区域逐渐由浅海转向深海和超深海^[1]。深海油气田中原油和天然气含有大量的硫化氢、二氧化碳和氯化物,构成一种苛刻的腐蚀环境,对管道造成严重的腐蚀^[2]。双金属复合材料可以解决这一问题,由碳钢(外层)和耐蚀合金(内层)组成的碳钢/镍基合金复合材料既能满足耐蚀性又能保证经济效益最大化。堆焊是冶金制备双金属层复合管材料的手段之一,堆焊表面改性以碳钢或低碳合金钢作为基体,将耐蚀合金材料堆焊在基体与腐蚀介质接触的表面,可提高设备的耐蚀性能,同时显著降低成本^[3]。而 Inconel 625 高温镍基合金由于具有良好的屈服强度、耐腐蚀性能以及可加工性与焊接性等优点,被广泛应用于航空航天、石油化工等领域,也常作为耐蚀性较差的碳钢管内保护层^[4,5]。

国内外学者对 Inconel 625 堆焊的腐蚀性能都有大量的研究。郭龙龙等^[6]采用热丝脉冲 TIG(惰性气体钨极保护焊)工艺在 AISI 4130 表面堆焊 Inconel 625,并对堆焊层的组织性能进行了研究,结果表明,堆焊层主要由 γ -Ni 固溶体、分布在晶间不规则的 Laves 相和颗粒状的 MC 碳化物组成,堆焊层表面的 Fe 元素含量为 1.81%,且其腐蚀性能与铸态 Inconel 625 的相当。Kim 等^[7]采用 ESW(Electroslag welding)工艺研究了焊接电流引起的热输入变化对 Inconel 625 堆焊层晶间腐蚀敏感性的影响,结果表明,随着热输入增加,Fe 元素稀释率增加,腐蚀速率增加,但晶间腐蚀敏感性无法确定。Jung^[8]研究对比了 GMAW(Gas metal arc welding)工艺堆焊 Inconel 600 和 Inconel 625 的腐蚀性能,结果表明 Inconel 625 堆焊层的耐蚀性更优。Adamiec^[9]对 Inconel 625 堆焊层在高温腐蚀气体中的腐蚀行为进行了研究,结果表明堆焊层的高耐蚀性是由于不断形成的 Cr_2O_3 钝化膜的保护作用,但堆焊层中的 Fe 含量过高会降低其耐腐蚀性能。尽管以上学者对 Inconel 625 堆焊层的腐蚀性能进行了深入研究,但有关堆焊层数对于其腐蚀行为和腐蚀性能的影响研究较少。

热丝脉冲 TIG 工艺是在传统的 TIG 工艺基础上发展起来的。一般情况下,填充焊丝都是在冷却状态下送进,热丝脉冲 TIG 工艺采用预热焊丝,具有提高焊接效率、降低母材稀释率等优点^[10,11]。本工作采用热丝脉冲 TIG 工艺在 20 钢表面堆焊 Inconel 625 合金,重点对不同堆焊层数时的电化学腐蚀性能和晶间腐蚀性能

进行了研究。

1 试验

1.1 材料与堆焊

选用基体为 20 钢板,尺寸为 250 mm×250 mm×30 mm,其化学成分见表 1。待堆焊表面需打磨至粗糙度 R_a 为 0.8 μm ,焊前用丙酮清洗焊接区域油污。焊丝选用牌号为 ERNi-CrMo-3(Inconel 625),直径为 1.2 mm,其化学成分见表 2 所示。

表 1 基体 20 钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of matrix 20 steel (mass fraction)

元素	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni
w/%	0.180	1.240	0.011	0.002	0.310	0.020	0.010
元素	Al	Ti	Cr	Nb	Mo	Fe	
w/%	0.030	0.004	0.020	0.001	0.010	余量	

表 2 Inconel 625 焊丝的化学成分(质量分数)

Table 2 Chemical composition of Inconel 625 welding wire (mass fraction)

元素	C	Fe	P	S	Si	Cu	Ni
w/%	0.009	0.180	0.003	-	0.050	0.004	65.000
元素	Al	Ti	Cr	Nb	Mo	其他	
w/%	0.170	0.210	22.600	3.450	8.700	<0.500	

试验选用焊接设备为 Fronius 自动热丝脉冲 TIG 焊接系统,堆焊参数见表 3 所示,保护气体为纯氩气。焊道长 180 mm,分别堆焊 1 层和 2 层,1 层厚度约为 3.0 mm,2 层厚度约为 5.5 mm。焊接后空冷至室温,堆焊层表面平坦并带有均匀波纹,经渗透探伤未发现明显缺陷。

表 3 热丝脉冲 TIG 堆焊参数

Table 3 Parameters of hot wire pulsed TIG surfacing

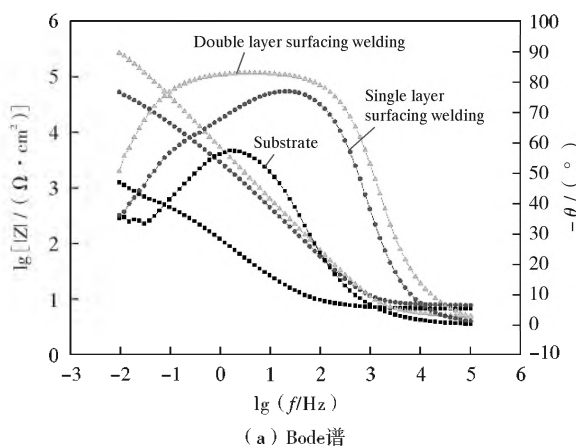
焊层	热丝电 流/A	脉冲频 率/Hz	焊接电流/A		电弧电 压/V	焊接速率/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	气体流量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)
			峰值	基值			
第 1 层	40~60	2.5	225~235	125~135	12~15	1.8	10~15
第 2 层	40~60	2.5	230~240	130~140	12~15	1.9	10~15

1.2 腐蚀试验

电化学测试选用 Gamry reference 600 电化学工作站,试样切割成待测表面尺寸为 10 mm×10 mm 方块,用导线焊在试样背面制作引线并用镶嵌粉封装,待测表面用砂纸依次打磨至 1 000 目,并用丙酮清洗风干,测试溶液为 3.5%(质量分数) NaCl。电化学测试采用

三电极体系,参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为铂电极,试样为工作电极。动电位极化曲线测试扫描速率为 0.167 mV/s ,相对于开路电位 -0.15 V 扫描至 1.50 V 。交流阻抗选用频率范围为 $1.0\times(10^{-2}\sim 10^5)\text{ Hz}$,交流扰动振幅为 10 mV 。

按照 ASTM G28 A 进行晶间腐蚀试验,将堆焊层截取成 $30\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的试样,其各面逐渐打磨至 $1\ 000$ 目并用丙酮清洗干净。腐蚀溶液为 $25\text{ g Fe}_2(\text{SO}_4)_3+236\text{ mL }95\%\sim 98\%$ (质量分数) $\text{H}_2\text{SO}_4+400\text{ mL H}_2\text{O}$,试验过程中保持溶液处于沸腾状态,试验时间为 120 h 。试验后,采用 VEGA II XMH 型扫描电镜观察试样的表面及截面腐蚀形貌。



1.3 元素分布表征

沿垂直堆焊方向机械加工为 $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的试样,然后将试样水磨至 $1\ 000$ 目,用氧化铝抛光粉抛光至镜面效果,并用丙酮清洗干净,用王水金相腐蚀溶液侵蚀 50 s 后采用带有 EDS 功能的 VEGA II XMH 型扫描电镜进行线扫描,Fe 元素定量分析采用 0.5 mm 间隔的点扫描进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 电化学试验

图1为 Inconel 625 焊丝单层、双层堆焊和基体 20 钢在 $3.5\%\text{NaCl}$ 溶液中静置 2 h 后的 Bode 谱和 Nyquist 谱。

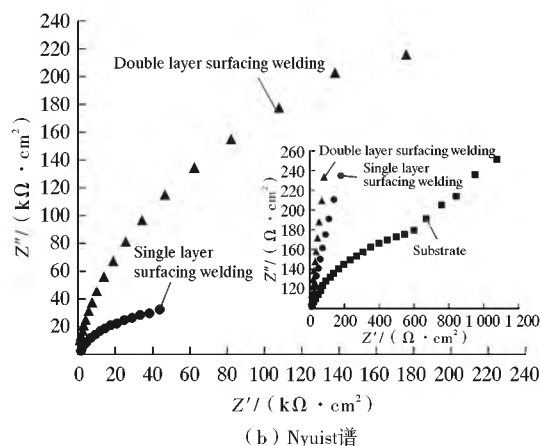


图1 Inconel 625 单层、双层堆焊及基材在 $3.5\%\text{NaCl}$ 溶液中的 bode 谱和 Nyquist 谱

Fig. 1 Bode and Nyquist diagrams of single-layer and double-layer surfacing of Inconel 625 and substrate in $3.5\%\text{NaCl}$ solution

从图 1a 可以看出,双层堆焊在更宽频率范围内出现的相位角在 80° 左右,而单层堆焊在频率范围内出现的相位角约 75° ,且宽度明显变窄,基材相位角的频率范围最窄约为 60° 。相位角出现的频率范围越宽角度越大,表明其耐蚀性能越好,因此,双层堆焊的耐蚀性能要优于单层堆焊的,基体的耐蚀性能最差。而阻抗模量和频率曲线的斜率与电荷转移存在一定的关系,斜率越大,电荷转移电阻也越大。双层堆焊的斜率最大,表明其阻碍腐蚀发生的能力最高,而基材斜率最小,最易发生腐蚀。从图 1b 可以看出,双层堆焊试样呈现的容抗弧最大,堆焊单层较小,进一步说明双层堆焊的耐腐蚀性能要优于单层堆焊的。而基材高频部分表现为容抗弧,低频出现了 Warburg 扩散,此时界面反应由扩散控制。此外,单、双层堆焊的容抗弧要远大于基材的,这表明堆焊层可明显提高基材的耐腐蚀能力,对基材起保护作用。

图 2 为 Inconel 625 焊丝单层堆焊、双层堆焊和基体 20 钢在 $3.5\%\text{NaCl}$ 溶液中静置 2 h 后的极化曲线,其数据拟合结果见表 4。

由图 2 可知,基材呈现出典型的阳极溶解行为,而堆焊层材料发生了明显的钝化,且存在点蚀电位。结合图 2 和表 4 可知,单层堆焊的击穿电位 E_b 为 650 mV ,双层堆焊的击穿电位 E_b 提高了 430 mV ,点击击穿电位是钝化的金属表面引起点蚀的最低电位,点蚀电位越低,越易发生点蚀,这表明单层堆焊相对于双层堆

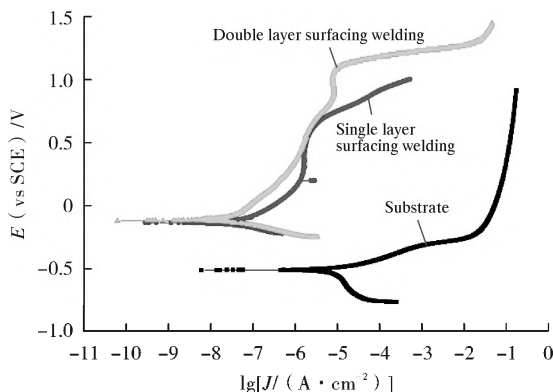


图2 Inconel 625 单层、双层堆焊层及基材在 $3.5\%\text{NaCl}$ 溶液中的动电位极化曲线

Fig. 2 Electrokinetic polarization curves of Inconel 625 single-layer and double-layer surfacing layers and substrate in $3.5\%\text{NaCl}$ solution

表 4 Inconel 625 单层、双层堆焊层及基材在 3.5%NaCl 溶液中的电化学性能

Table 4 Electrochemical properties of Inconel 625 single-layer and double-layer surfacing layers and substrates in 3.5%NaCl solution

试样	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	E_b/mV
20 钢	-513.0	10.40	-
单层堆焊	-139.0	0.08	650
双层堆焊	-121.0	0.03	1 080

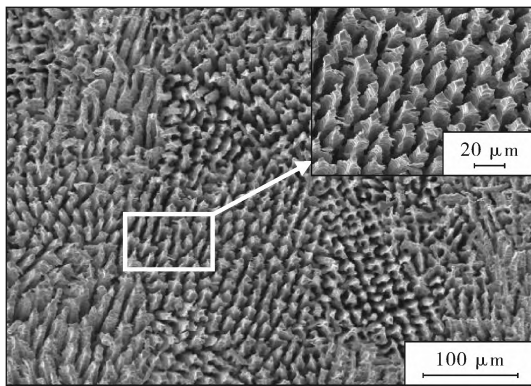
焊更易发生点蚀。单层堆焊的自腐蚀电位 E_{corr} 为 -139.0 mV, 双层堆焊的 E_{corr} 为 -121.0 mV, 相比基体, 自腐蚀电位分别提高了 374.0 mV 和 392.0 mV, 表明 Inconel 625 堆焊层可显著降低 20 钢基体的腐蚀倾向, 双层堆焊的腐蚀倾向较单层堆焊的更低。基体 20 钢的自腐蚀电流密度 J_{corr} 为 $10.40 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 单层堆焊和双层堆焊的自腐蚀电流密度分别下降至 $0.08 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 和 $0.03 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 分别下降了约 99.3% 和 99.8%。从动力学角度分析, 经过 Inconel 625 堆焊后, 其腐蚀速率跳跃

式下降, 并且双层堆焊的腐蚀速率要小于单层堆焊的。

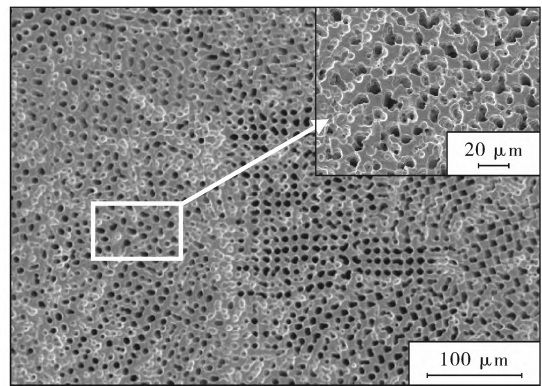
因此, 结合阻抗谱和极化曲线, 从动力学和热力学角度分析, Inconel 625 堆焊后, 其耐均匀腐蚀能力明显提高, 双层堆焊较单层堆焊更优; 并且双层堆焊的耐点蚀能力要高于单层堆焊的。

2.2 晶间腐蚀试验

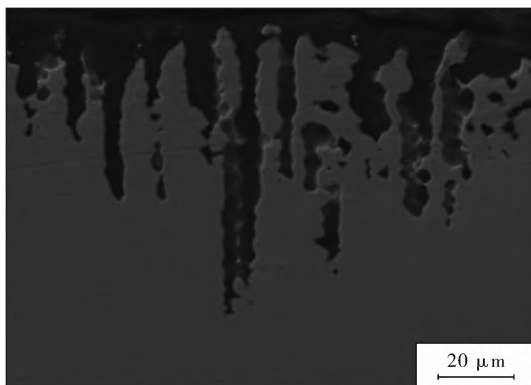
图 3 为 Inconel 625 单层和双层堆焊在晶间腐蚀试验后的表面和截面 SEM 形貌。从图 3 可以看出, 单层堆焊表面为笋尖状的腐蚀形貌, 腐蚀表面为典型的柱状晶核(图 3a); 双层堆焊表面形成了密集的点蚀坑和腐蚀沟, 且有少量的腐蚀坑边缘已相互连接(图 3b)。表面腐蚀形貌均未观察到明显的晶间腐蚀裂纹。单层堆焊的截面腐蚀深度约 $80 \mu\text{m}$ (图 3c), 而双层堆焊的腐蚀深度约 $40 \mu\text{m}$ (图 3d)。单层堆焊的腐蚀失重为 $268.30 \text{ g}/\text{m}^2$, 双层堆焊的腐蚀失重为 $55.93 \text{ g}/\text{m}^2$, 双层堆焊的失重量约为单层堆焊的 1/5, 结合表面和截面腐蚀形貌, 其重量损失可能是由于晶间的腐蚀溶解导致柱状树枝晶掉落造成, 留下柱状的腐蚀坑形貌。



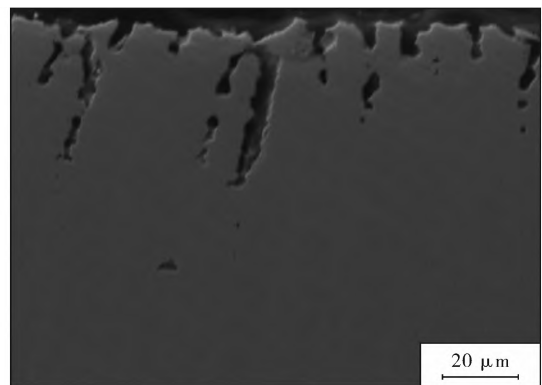
(a) 单层堆焊, 表面腐蚀形貌



(b) 双层堆焊, 表面腐蚀形貌



(c) 单层堆焊, 截面腐蚀形貌



(d) 双层堆焊, 截面腐蚀形貌

图 3 晶间腐蚀 120 h 后 Inconel 625 单层、双层堆焊试样的表面和截面 SEM 形貌

Fig. 3 SEM micrographs of surface and section of single-layer and double-layer surfacing specimens after intergranular corrosion for 120 h

2.3 讨论与分析

堆焊的本质是异种金属材料的连接, 在基体表面与焊丝熔化、结晶和凝固的过程。由于基材和焊丝成

分的差异性, 基体材料会向堆焊层发生迁移, 即稀释。通常来说, 稀释对堆焊层的影响是不利的, 尤其是 Fe 元素的增多^[12,13]。Fe 元素的增加会导致堆焊层材料

消耗的增加而提高成本,同时也会降低堆焊层的耐蚀性能。图4为 Inconel 625 单层堆焊和双层堆焊元素线扫描分析结果。从图4可以看出,在融合线区域主要的合金元素均发生了明显的改变,从堆焊层到基体,Ni、Cr元素急剧下降,Mo、Nb的含量出现明显的下降,Ti的变化不明显,而Fe元素含量明显升高;且在单层堆焊内部合金元素含量变化较小,分布较为均匀;双层堆焊中第2层堆焊层Cr、Ni元素的含量较第1层的明显变高,Fe含

量下降,Mo、Nb和Ti元素的变化不明显,在堆焊层间的合金元素变化不明显。而对于镍基合金而言,Fe元素的含量对其腐蚀性能影响极大,Fe元素含量过高会导致耐腐蚀能力严重下降。可以看出,在堆焊层与基体的交界处,Fe元素含量变化剧烈。在双层堆焊中,第2层堆焊中的Fe含量要明显低于第1层的。双层堆焊的Fe含量要始终低于单层堆焊的。在堆焊层表面,单层堆焊的Fe含量为26.5%,而双层堆焊的Fe含量仅为3.1%。

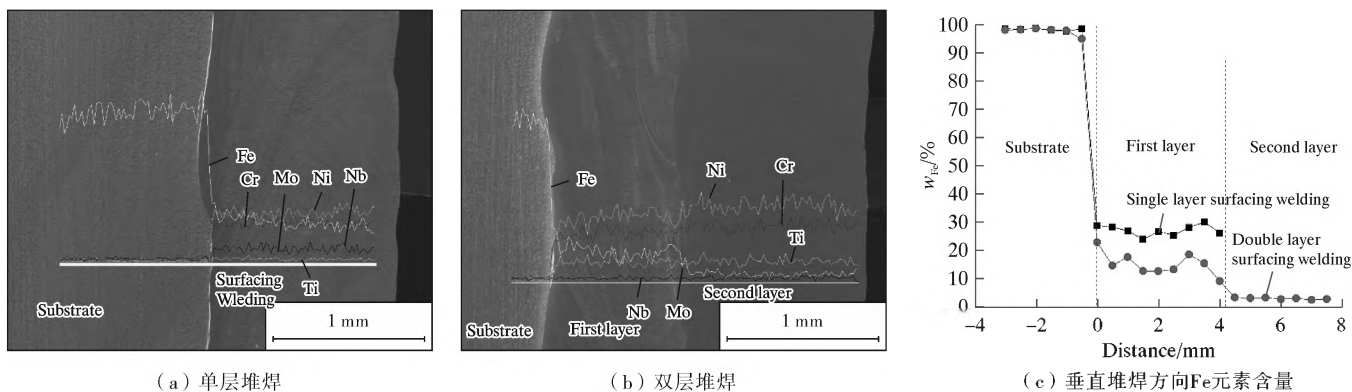


图4 堆焊层断面元素分布

Fig. 4 Element distribution in section of surfacing layer

从图2可知,基体试样呈典型的阳极溶解行为,而堆焊层试样发生了明显的钝化现象。这是因为在堆焊层中较高含量的Ni和Cr元素,促进了堆焊层的钝化,能有效地阻碍表面的Cl⁻进入金属基体进行活化反应,而高含量的Cr易形成Cr₂O₃,增加钝化膜的稳定性^[14,15]。双层堆焊中由于Fe元素稀释的量较少,相比单层堆焊的Ni和Cr元素含量要高,所以具有更大的容抗弧、更高的自腐蚀电位和击穿电位,其抗腐蚀能力要优于单层堆焊。

从图3可知,堆焊层均没有发生晶间腐蚀,而是在柱状晶间区域发生腐蚀导致柱状晶脱落留下柱状的腐蚀坑。在Inconel 625堆焊过程中,易在晶间出现连续偏析,弥散分布着Laves相(Ni, Fe, Cr)₂(Nb, Ti, Mo)^[16,17]。其腐蚀电位要低于基体的,与基体形成腐蚀微电池,优先在晶间发生腐蚀,形成柱状腐蚀坑。而单层堆焊中Fe元素的含量要明显高于双层堆焊的,更易在晶间析出Laves相且弥散的数量更多,晶间的腐蚀溶解导致柱状晶的进一步脱落,留下更深更多的腐蚀坑。

3 结论

采用热丝脉冲TIG工艺在20钢表面进行Inconel 625单层和双层堆焊,获得均匀波纹的堆焊层,通过对

不同堆焊层的耐腐蚀性能进行分析,得到如下结论:

(1)单层堆焊的容抗弧要小于双层堆焊的,基材的容抗弧最小,且出现Warbug扩散;单层和双层堆焊的自腐蚀电位分别较基材的提高374.0 mV和392.0 mV,腐蚀电流密度分别下降约99.3%和99.8%;双层堆焊的点蚀电位较单层的提高了430 mV。结合热力学及动力学分析,Inconel 625能明显提高20钢基材的全面耐腐蚀能力,双层堆焊的耐均匀腐蚀能力和抗点蚀能力要优于单层堆焊的。

(2)单层和双层堆焊层均未发现明显的晶间腐蚀,表现出良好的耐晶间腐蚀性能;单、双层堆焊表现的腐蚀类型均为点蚀,沿着柱状晶间贯穿腐蚀,单层堆焊的腐蚀深度明显高于双层堆焊的。

(3)堆焊层间的过渡区、堆焊层与基体的融合区元素含量变化较为明显,堆焊层内元素含量较为均匀;双层堆焊层内部的Fe含量要低于单层堆焊层的,具有更加良好的耐腐蚀性能。

[参 考 文 献]

- [1] LI X, ZHANG D, LIU Z, et al. Share corrosion data[J]. Nature, 2015, 527: 441-442.
- [2] 吴希革. 抗硫化氢及二氧化碳无溶剂环氧涂层防腐技术探究;2014北京国际腐蚀技术大会论文集[C]. 北京:中国腐蚀与防护学会,2014:177-182.

- WU X G. Study on anti-corrosion technology of solvent-free epoxy coating of hydrogen sulfide and carbon dioxide; Proceedings of 2014 Beijing International Conference on corrosion technology [C]. Beijing: Chinese Society of Corrosion and Protection, 2014; 177-182.
- [3] 黄俊. 双辉等离子表面冶金 Ni-Cr 耐蚀钢板若干应用基础问题的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- HUANG J. Study on some basic problems of Application of Dual-hui Plasma surface metallurgy Ni-Cr corrosion resistant steel plate [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [4] 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 H H, LIU A G, MENG F L. Microstructure and Properties of Inconel625 Alloy For Boiler Membrane Water Wall Welding [J]. Journal of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(S2): 96-99.
- [5] ZAHIRANI E M, ALFANTAZI A M. Hot corrosion of Inconel 625 overlay weld cladding in smelting off-gas environment [J]. Metall Mater Trans, 2013, A44: 4 671-4 699.
- [6] 郭龙龙, 郑华林, 李悦钦, 等. 热丝脉冲 TIG 堆焊 Inconel 625 的组织及性能 [J]. 中国表面工程, 2016, 29(2): 77-84.
- GUO L L, ZHENG H L, LI Y Q, et al. Microstructure and Properties of Inconel 625 by Hot-wire Pulse TIG Surfacing [J]. China Surface Engineering, 2016, 29(2): 77-84.
- [7] KIM J S, LEE H. A study on effect of intergranular corrosion by heat input on Inconel 625 overlay weld metal [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2015, 10(8): 6 454-6 464.
- [8] JUNG E. Comparison of corrosion resistance and corroded surfaces of welding metal in overlay-welded Inconel 600 and Inconel 625 by gas metal arc welding [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2016, 11(7): 7 125-7 138.
- [9] ADAMIEC J. High temperature corrosion of power boiler components clad with nickel alloys [J]. Materials Characterization, 2009, 60(10): 1 093-1 099.
- [10] SAENGER J F, MANZ A F. High Deposition-gas Tungsten-arc Welding [J]. Welding Journal, 1968, 47(5): 386.
- [11] 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-Physical Metallurgy and Materials Science, 2015, 46(2): 831-842.
- [12] 田春英, 王军, 李慕勤, 等. 耦合电弧热丝 GTAW 堆焊 Inconel 625 组织和耐蚀性 [J]. 焊接, 2019(11): 20-23.
- TIAN C Y, WANG J, LI M Q, et al. Microstructure and Corrosion Resistance of Inconel 625 Welded by Coupled Arc Hot Wire GTAW [J]. Welding, 2019(11): 20-23.
- [13] 谢建昌. 焊后热处理工艺对堆焊层 Fe 含量稀释率的研究 [J]. 电焊机, 2019, 49(9): 116-118.
- XIE J C. Effect of post weld heat treatment process on Fe content dilution rate of surfacing layer [J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(9): 116-118.
- [14] 袁蕾, 王华明. 镍基固溶体增韧 CrNiSi 合金在含 Cl 溶液中的腐蚀行为 [J]. 金属学报, 2009, 45(11): 1 384-1 389.
- YUAN L, WANG H M. Corrosion behavior of nickel based solid solution toughened CrNiSi alloy in Cl containing solution [J]. Journal of Metals, 2009, 45(11): 1 384-1 389.
- [15] KIM J S, PAK Y I, LEE H W. Effects of heat input on the pitting resistance of Inconel 625 welds by overlay welding [J]. Metals and Materials International, 2015, 21(2): 350-355.
- [16] 冯英超, 刘金平, 王世杰, 等. 固溶处理对 Inconel 625 合金电弧增材组织的影响 [J]. 焊接学报, 2018, 39(6): 81-85.
- FENG Y C, LIU J P, WANG S J, et al. Effect of solution treatment on Microstructure of arc additive of Inconel 625 alloy [J]. Journal of Welding, 2018, 39(6): 81-85.
- [17] 徐富家, 吕耀辉, 刘玉欣, 等. 脉冲等离子弧快速成形 Inconel 625 组织性能研究 [J]. 材料工程, 2012(11): 6-11.
- XU F J, LV Y H, LIU Y X, et al. Study on Microstructure and properties of Inconel 625 by pulsed plasma arc rapid prototyping [J]. Materials Engineering, 2012(11): 6-11.

[编校: 范宏义]

科研人员研发出太阳能 电池板防雪涂层

密歇根大学材料科学与工程教授 Anish Tuteja 表示, 寒冷多雪气候下, 太阳能电池板发电量会减少 80%~90%, 这也成为普及太阳能发电的不利条件。该团队在研究除冰涂层过程中发现, 低界面韧性和低粘附强度两项特性是除冰技术的关键, 在此基础上, 通过 PVC 材料中加入植物油, 从而在低表面附着力和低界面韧性之间精确地取得平衡, 实现较好的除冰除雪效果。经在阿拉斯加费尔班克斯的太阳能场上测试, 涂层电池板在整个冬季的平均冰雪覆盖率约为 28%, 而未涂层电池板的平均冰雪覆盖率约为 59%。该涂层可在寒冷的天气中喷洒或刷涂, 有效期长达一年。