

热丝脉冲 TIG 堆焊 Inconel 625 的组织及性能^{*}

郭龙龙, 郑华林, 李悦钦, 徐小东, 符运豪, 冯春宇

(西南石油大学 机电工程学院, 成都 610500)

摘 要: 采用热丝脉冲 TIG 工艺在 AISI 4130 基体表面堆焊 Inconel 625 合金, 获得了平坦、连续、无缺陷的堆焊层。借助光学显微镜、XRD、SEM、EDS 对堆焊层的微观组织、相组成、成分进行了分析。堆焊层主要由 γ -Ni 基体、分布在晶间不规则的 Laves 以及颗粒状的 MC 组成; 晶体形态对 Laves 相的分布特征有着重要的影响, 不同的晶体形态对应着 Laves 相的不同分布特征。堆焊层与基体、层间融合界面附近合金元素含量变化显著, 层内部元素分布比较均匀, 堆焊层表面 Fe 元素质量分数为 1.81%。同时, 采用动态极化曲线法对堆焊层与基体的耐腐蚀性能进行了研究。结果表明: 其耐腐蚀性能与铸态 Inconel 625 基本相当, 能够满足耐腐蚀要求。

关键词: Inconel 625; 堆焊; 腐蚀性能

中图分类号: TG174.44; TG455

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2016)02-0077-08

Microstructure and Performance of Inconel 625 Cladding Deposited by Hot Wire Pulsed TIG

GUO Long-long, ZHENG Hua-lin, LI Yue-qin, XU Xiao-dong, FU Yun-hao, FENG Chun-yu

(School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500)

Abstract: Overlapped beads of Inconel 625 were successfully deposited on the substrate of AISI 4130 by hot wire pulsed TIG processing. The cladding was rather flat, smooth, and free from porosity and cracking. The microstructure, chemical compositions and phases of the cladding were measured by optimal microscope, EDS, SEM and XRD. The results show that the cladding is composed mainly of γ -Ni matrix and some precipitates, which distributes in interdendrites, such as Laves and MC. Additionally, the morphologies of laves are determined by the morphologies of the γ -Ni matrix. The transition of alloy elements is obvious in the fusion zone and overlap regions of adjacent tracks. However, the distribution of all elements in the cladding layer is very uniform, and the content of Fe at the surface of the cladding is 1.81%. The corrosion resistance of the cladding and substrate is evaluated by potentiodynamic polarization testing. The outcomes reveal that the corrosion resistance of the cladding is close to that of wrought Inconel 625. Therefore, the cladding of Inconel 625 by hot wire pulsed TIG can be used to protect the components made of AISI 4130 steel from corrosion.

Keywords: Inconel 625; cladding; corrosion performance

0 引 言

Inconel 625 合金诞生于 20 世纪 60 年代, 属于 Ni-Cr 固溶强化合金^[1]。其中合金元素 Cr 主要抗氧化腐蚀, 在腐蚀环境中 Cr 元素持续钝化, 形成 Cr_2O_3 膜阻止腐蚀的进一步发生^[2]。Mo、Ni 主要

抗还原腐蚀, 并且 Mo 元素的存在使得合金具有良好的抗点蚀与抗缝隙腐蚀性能^[3-4]。由于 Inconel 625 良好的屈服强度、高温强度、疲劳强度、耐腐蚀性能以及较好的可加工性与焊接性, 其被广泛地应用于航空航天、石油化工、海洋工程等领域^[5-7]。

收稿日期: 2015-10-20; **修回日期:** 2016-03-06; **基金项目:** * 西南石油大学研究生创新基金(CX2014BY05); 石油天然气装备教育部重点实验室开放基金(OGE201401-01)

通讯作者: 郑华林(1965—), 男(汉), 教授, 博士; **研究方向:** 先进制造技术; **Tel:** (028) 8303 3205; **E-mail:** zhl@swpu.edu.cn

网络出版日期: 2016-04-13 11:40; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20160413.1140.030.html>

引文格式: 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 performance of Inconel 625 cladding deposited by hot wire pulsed TIG [J]. China Surface Engineering, 2016, 29(2): 77-84.

在高温高压强酸性气田的开采过程中,井口装备,如采气树、节流阀等必须具有良好的耐腐蚀性能,应满足 HH 级 (API 6A) 要求^[8];制造此类设备最合适的材料是 Inconel 625 合金^[2]。然而,高昂的材料成本极大地限制了该合金的大量使用。堆焊表面改性是解决这一问题经济、有效的方法,即以低碳钢或低合金钢制作设备基体,将 Inconel 625 堆焊在基体与腐蚀介质接触的表面,可使设备既满足使用要求又显著降低成本。

国外学者对 Inconel 625 堆焊研究相对较早,但主要集中在激光堆焊方面^[2, 9-11]。而目前,国内仅个别学者对 Inconel 625 的耐腐蚀堆焊进行了探索。兰州大学王晓军等^[12]采用传统 TIG 在 30 CrMo 钢基体表面堆焊 Inconel 625 合金,用全浸蚀均匀腐蚀试验测定了堆焊层的腐蚀速率。结果表明,堆焊层的耐点蚀与氯离子腐蚀能力优于母材,且堆焊层的腐蚀速率远小于 30 CrMo 钢。辽宁石油化工大学秦华等^[13]用传统 TIG 在 2.25 Cr1Mo 基体上堆焊 Inconel 625,并对堆焊层进行了金相观察、显微硬度和腐蚀失重测量。结果表明,基体热影响区的显微硬度最高,堆焊层的硬度高于基体的硬度。堆焊层在 50 ℃ 的 10% FeCl₃ 溶液中浸渍 24 h,腐蚀前后试样的质量没有发生变化。尽管以上学者对 Inconel 625 堆焊进行了一定的探索,但

是对堆焊层微观组织演变和析出相的研究却很少。且采用的是传统 TIG 工艺,该工艺存在焊接速度低、母材稀释率高、熔敷效率低等缺点^[14]。

热丝脉冲 TIG 是在传统 TIG 基础上发展起来的更为先进的工艺,具有母材稀释率低、热影响区小、焊缝组织致密、残余应力与变形小、电弧稳定、焊接缺陷少等优点^[15-16]。特别是焊枪结构简单、可达性好,适合细长孔表面以及复杂曲面的堆焊。然而,关于热丝脉冲 TIG 堆焊 Inconel 625 的公开报道也较少。为此,文中借助 Fronius 的热丝脉冲 TIG 全自动堆焊系统,以石油天然气工业常用材料 AISI 4130 为基体,在其表面堆焊 Inconel 625 合金。重点对堆焊层的组织演变、物相组成、元素的分布以及电化学性能进行了研究。

1 试 验

1.1 堆焊层制备

所用基体为 AISI 4130 平板,尺寸 150 mm×120 mm×25 mm,热锻后调质处理,化学成分见表 1。待堆焊表面精铣处理,粗糙度 Ra 为 0.8 μm,焊前用丙酮清洗以去除油污,于工业加热炉中预热至 300 ℃。所用焊丝牌号为 ERNi-CrMo-3 (Inconel 625),直径 1.2 mm,化学成分如表 2 示。

表 1 基体 AISI 4130 的化学成分

Table 1 Chemical composition of the AISI 4130 substrate (w/%)

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	Fe	Mo	Al
Content	0.29	0.2	0.51	0.021	0.016	0.99	0.02	0.02	0.006	Bal.	0.175	0.006

表 2 Inconel 625 焊丝的化学成分

Table 2 Chemical composition of the Inconel 625 wire (w/%)

Element	Ni	Cr	Mo	Nb	Al	Fe	Ti	C	Cu	Others
Content	64.24	22.65	8.73	3.53	0.16	0.32	0.2	0.01	<0.01	0.16

试验所用设备为 Fronius 自动热丝脉冲 TIG 焊接系统。该系统主要由机械系统、控制系统 FPA 9000、焊丝预热电源 TT 2200、焊接电源 TT 5000 等组成。堆焊试验所用参数如表 3 示,保护气体为氩气。

焊道长 125 mm,焊道间重合率为 40%,共堆焊两层,厚度约为 6.2 mm。焊后空冷至室温,所得堆焊层如图 1 所示。堆焊层表面平坦连续、且经渗透探伤未发现可见缺陷。

表 3 热丝脉冲 TIG 堆焊试验所用参数

Table 3 Process parameters of hot wire plused TIG experiment

Parameters	Value
Wire feed speed / (m · min ⁻¹)	2
Welding speed / (cm · min ⁻¹)	18
Preheating current / A	70
Peak current / A	240
Background current / A	90
Pulsed frequency / Hz	5
Duty cycle	0.3

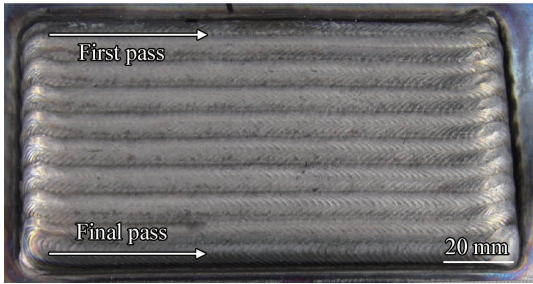


图 1 Inconel 625 堆焊层宏观形貌

Fig. 1 Macroscopic morphology of Inconel 625 cladding

1.2 微观组织与电化学试验

采用线切割将焊缝沿垂直焊接方向平面加工成 25 mm×12 mm×10 mm 的试块。然后,依次用 400、600、800、1 000、2 000 和 5 000 号砂纸对样品进行打磨。最后采用碟式金相抛光机对试样进行抛光处理。用电解法浸蚀试样,浸蚀液为 12 mL H₃PO₄ + 40 mL HNO₃ + 48 mL H₂SO₄ 混合液,浸蚀时间约 15 s,所用电压 6 V,试样接正极。

采用 RX50M 金相显微镜观察堆焊层的微观

组织;X Pert PRO MPD 型 X 衍射仪分析堆焊层相组成,用 Cu 靶的 K α 射线($\lambda=0.154\ 060\ \text{nm}$),加速电压 40 kV,电流 40 mA,步长 0.02°,扫描速度 2°/min,扫描范围 5°~120°;利用 JSM-6490LV 扫描电镜观察堆焊层的析出相,并用其配带的能谱仪进行成分分析。

按金相试样制备方法对电化学测试样表面进行处理,待测表面尺寸 10 mm×10 mm,距离基体 5 mm。采用 Autolab PGSTAT302N 型电化学工作站,在 3.5 % NaCl 溶液中对试样的动态极化曲线进行测定。参比电极为 Ag/AgCl 电极,辅助电极为铂电极,试样为工作电极。扫描速率 20 mV/min,电压为-200~1 500 mV。

2 结果与分析

2.1 微观组织

堆焊层横截面微观组织如图 2 所示,可以看出堆焊层组织致密,无气孔、夹渣、裂纹等焊接缺

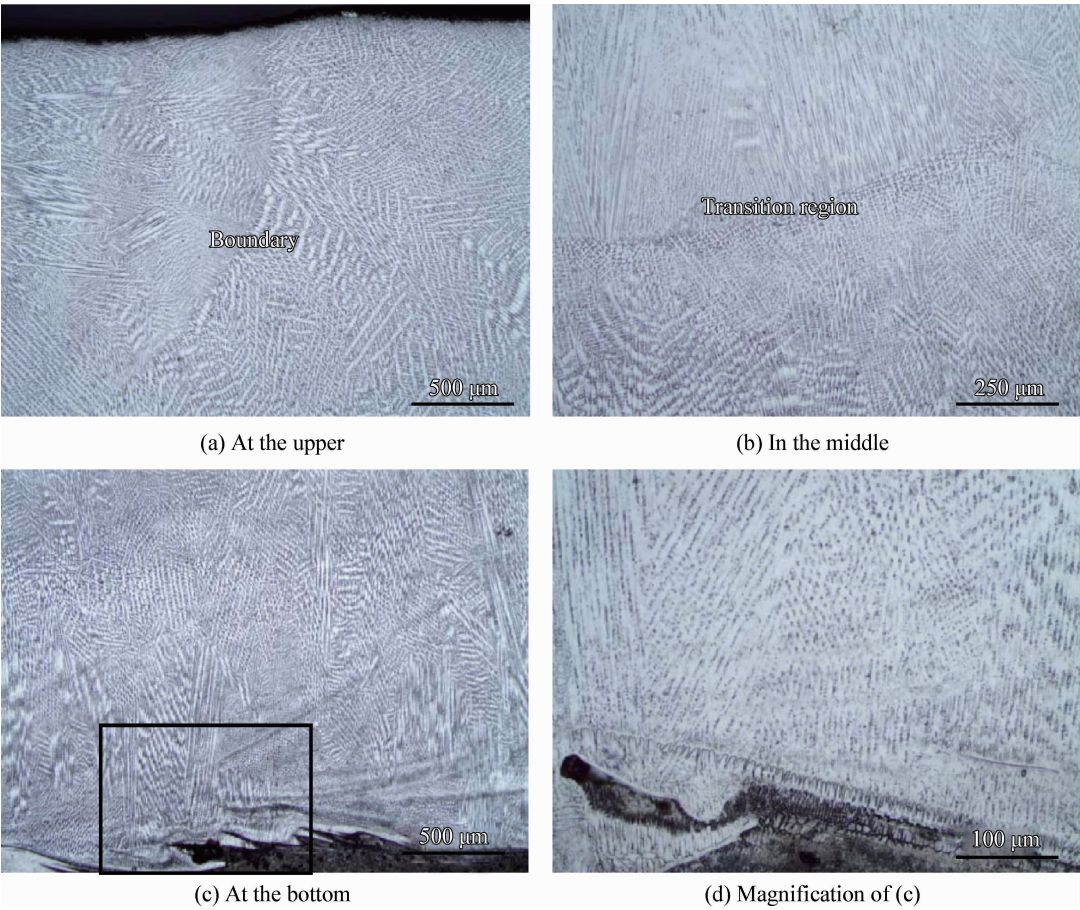


图 2 堆焊层的截面微观组织

Fig. 2 Cross-section microstructure of the overlay cladding

陷;堆焊层与基体之间形成了良好的冶金结合,相邻焊道之间具有清晰的搭接边界。在靠近堆焊层顶部,晶粒形态以树枝晶为主;同时还可以发现,在相邻焊道重叠区域,后续焊道的组织更加细密;且具有方向性,近似垂直于焊道轮廓生长,如图 2(a)所示。图 2(b)为层间重合区域微观组织,层间具有明显的熔合界面,柱状晶近似垂直于前一层焊缝的轮廓定向生长。在堆焊层与基体熔合面附近区域分布有少量的平面晶与胞晶;底部组织主要为一次柱状晶,且垂直于基体或先前形成的堆焊层外延生长,如图 2(c)(d)。所以,可以得出,堆焊层微观组织自底部至表面依次为:平面晶、胞晶、柱状晶、树枝晶。

2.2 相组成

堆焊层的 XRD 图谱如图 3 所示,峰位 $2\theta = 44.52^\circ, 51.66^\circ, 75.37^\circ, 91.17^\circ, 96.43^\circ$, 与 ICDD 数据库中纯 γ -Ni 的峰位 $2\theta = 44.5^\circ, 51.9^\circ, 76.4^\circ, 92.9^\circ$ 和 98.5° 以及化学成分最匹配^[2]。故堆焊层的主要相为 γ -Ni 的固溶体。同时发现堆焊层的峰位比纯 γ -Ni 的峰位略小,根据 Bragg 方程: $2d\sin\theta = n\lambda$, 堆焊层的晶面间距相对较大,这主要是因为固溶强化效应导致晶格畸变。事实上,堆焊层中可能还存在其它相, XRD 对于含量低于 5% 的少量相无法探测^[17]。所以,借助 SEM 与 EDS 对堆焊层的相组成做进一步分析。

图 4 为堆焊层不同区域组织的 SEM 形貌。可以看到,晶间主要分布有两种形态的沉淀相,一种为含量较多的白色不规则相,另一种为含量

较少的块状相,各相对应的 EDS 结果如图 5 所示。白色的不规则相合金元素满足 $(\text{Fe Ni Cr})_2(\text{Nb, Mo, Ti})$, 符合 A_2B ($A: \text{Ni, Fe, Cr}; B: \text{Nb, Mo, Ti}$) 型金属间化合物 Laves 相的特征^[18-19], 故推断其应为 Laves 相。块状析出物富含 Nb 与 C 元素, 结合其块状形态, 推断其为 MC (M 为 Nb 或 Ti)^[20]。析出相形成的根本原因是在凝固过程中, 发生 $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow L + \gamma + MC \rightarrow \gamma + MC + \text{Laves}$ 反应。即在凝固初始阶段, 发生 $L \rightarrow L + \gamma$ 反应, 率先形成溶质元素较少的 γ -Ni。随着凝固的进行, Nb、Mo、C 等元素在晶界处偏析, 促使发生 $L \rightarrow L + \gamma + MC$ 反应, 使得大量的 MC 析出。随着凝固反应的进一步继续, 晶间溶质偏析更加严重, 导致发生 $\gamma + MC + \text{Laves}$ 反应, 合金元素被完全消耗, Inconel 625 合金的结晶凝固过程完成^[21]。能谱分析结果图 5(a)(b)进一步证实了 γ -Ni 基体富含 Fe 与 Cr, laves 相富含 Nb 与 Mo。元素分布不均匀对于堆焊层的耐腐蚀性能是很不利的。同时, Laves 属于脆硬相, 延展性差, 对堆焊层的力学性能也是有害的。然而, 通过合适的热处理可以使该有害相溶于 γ -Ni 基体中, 消除合金元素的偏析^[19, 22]。

由堆焊层 SEM 形貌还可以看出, 不同区域析出相的分布特征不相同。在堆焊层底部与中部不规则形状的 Laves 与颗粒状的 MC 沿胞状或柱状晶间隙连续析出。与堆焊层底部相比, 中部析出物的数量相对较多, 尺寸明显增大, MC 含量相对较少, 如图 4(b)(c)(d)所示。图 4(a)显示了堆焊层表面附近析出物的分布情况, 可以看出 Laves、MC 均呈现弥散分布。Laves 相的形成主要是由凝固过程中合金元素的严重偏析引起^[22]。由于基体的传热作用, 靠近基体附近的堆焊层温度梯度(G)较大、生长速率(R)较小, 该处的组织形态为胞状晶, 其间隙内合金元素偏析少, 所以 Laves 相含量少, 且尺寸较小。随着 G 降低、 R 增大, 成分过冷度加剧, 组织由胞晶转变为柱状晶, 更多的溶质元素在晶间聚集, 促使在柱状晶之间形成数量较多、尺寸较大的 Laves 相。同时, 胞状晶、柱状晶的晶界平行于生长方向, 溶质元素在晶界与液相接触的凹槽处富集, 所以 Laves 相沿晶体的生长方向分布。堆焊层上部由于成分过冷程度严重, 冷却速率快, 组织为等轴晶, 溶质元素扩散不充分; 此外, 等轴晶的晶粒相对生长,

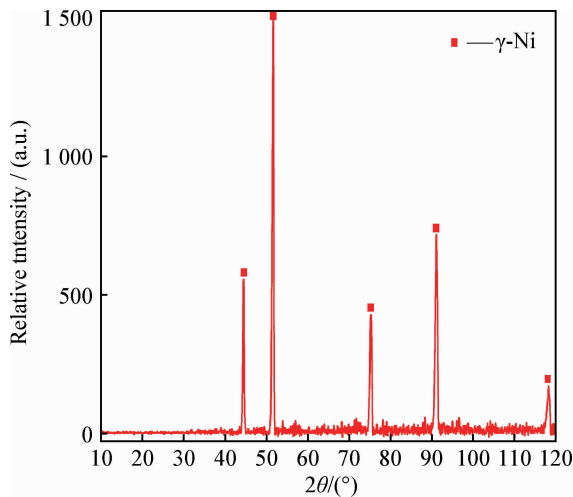


图 3 堆焊层的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of the overlay cladding

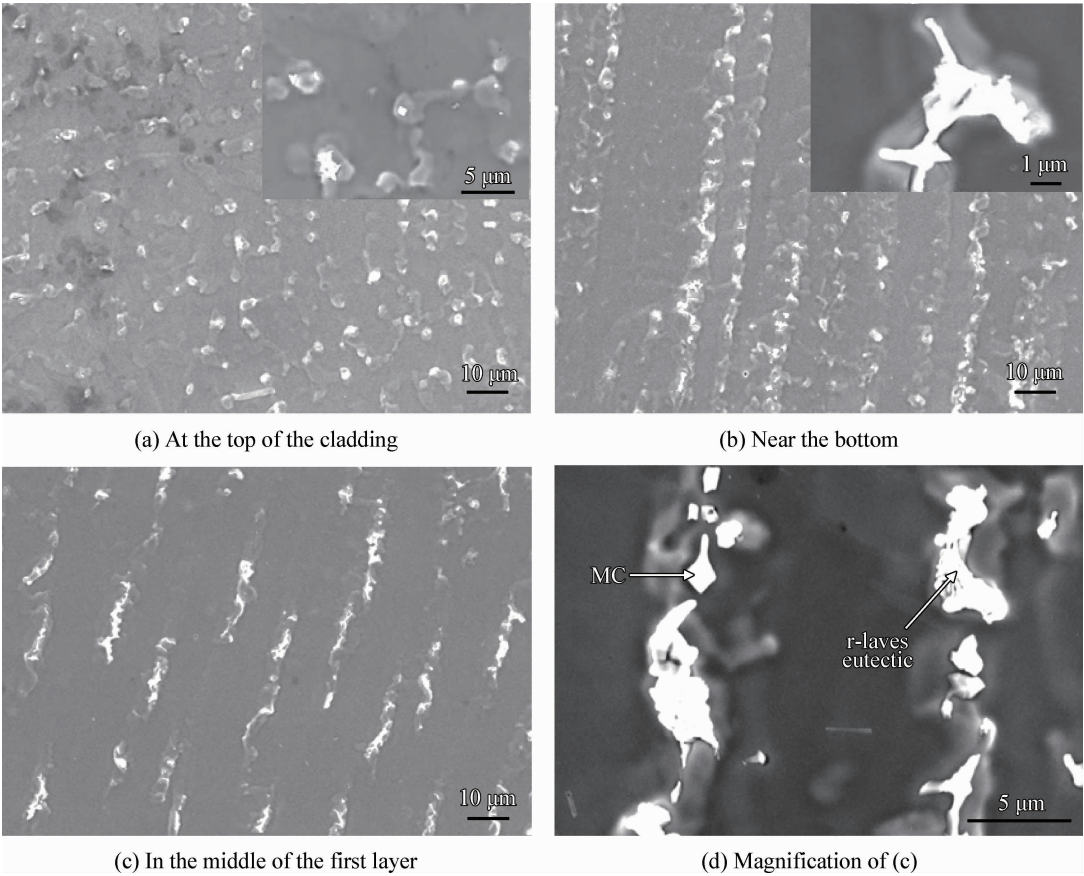


图 4 堆焊层不同区域的表面形貌

Fig. 4 Surface morphologies of the cladding in different part

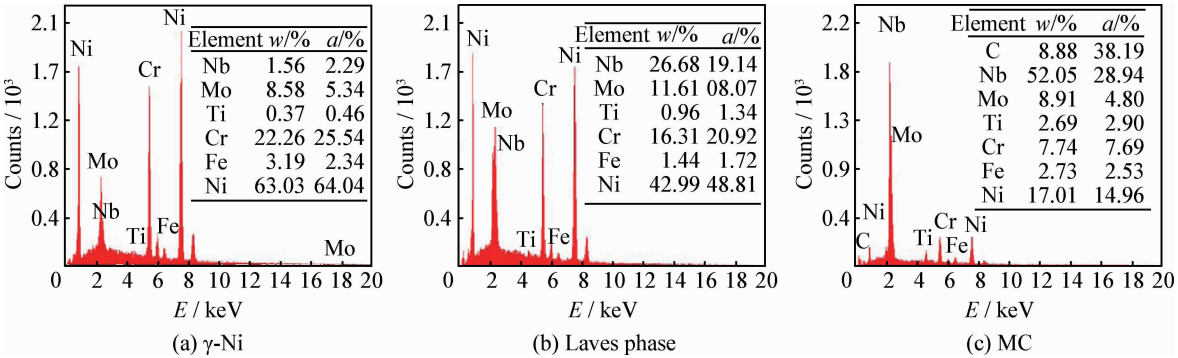


图 5 不同物相的能谱分析结果

Fig. 5 EDS results of the different phases

结晶时排出的溶质元素在固液界面前沿富集,所以析出物 Laves 尺寸很小,呈弥散分布,但数量较多。

2.3 耐腐蚀性能

堆焊的本质是异种材料的连接,在基体与焊丝熔化、结晶及凝固过程中,由于材料成分的差异,会发生基体材料向堆焊层的迁移,即稀释。通常,母材的稀释对堆焊层的影响是不利的。因此,在形成良好冶金结合及焊缝的前提下,尽可

能地降低堆焊层中的母材成分。堆焊层内元素线扫描分析结果如图 6(a) 示,可以看出,堆焊层与母材结合处主要合金元素 Ni、Cr、Fe、Nb、Mo 含量发生了突变,即 Fe 元素含量急剧下降, Ni、Cr、Nb、Mo 元素含量明显增加。堆焊层间元素含量变化较小,在堆焊层内部合金元素含量变化不明显,分布比较均匀。其中,Fe 是耐腐蚀性能 的表征元素,含量过高会引起耐腐蚀性严重退

化^[23]。Fe 元素含量的具体变化,见图 6(b)。可以看出,其含量在堆焊层与基体交界处发生了剧变,初始堆焊层中 Fe 元素约为 7%;堆焊层间 Fe 元素含量变化比较明显,堆焊层表面 Fe 元素含量仅为 1.81%。

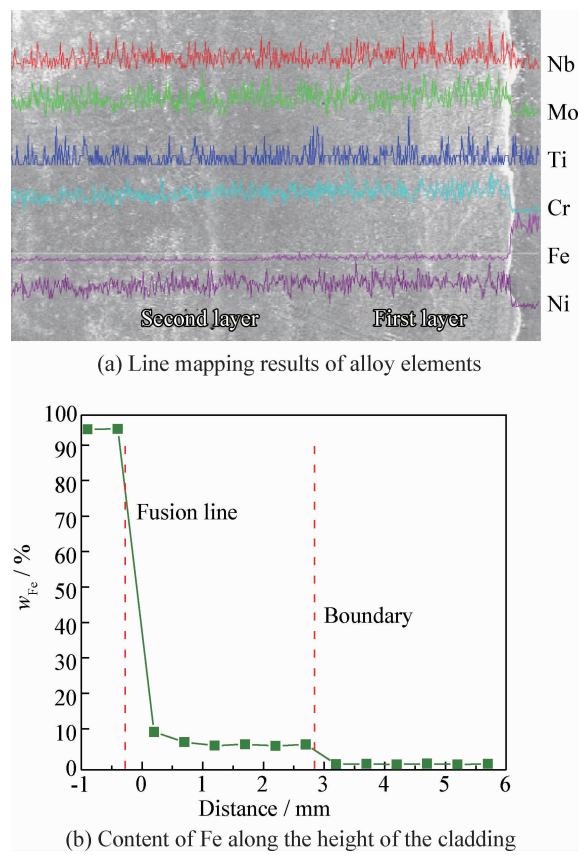


图 6 沿堆焊高度元素分布

Fig. 6 Chemical element distribution along the direction of the cladding height

采用动态极化曲线法对堆焊层的耐腐蚀性能做进一步分析,在测试前先对待测表面进行能谱分析,面扫描结果如表 4 所示。与表 1 中焊丝成分相比,堆焊层中 Fe 含量还是偏高。堆焊层与基体试样的动态极化曲线,如图 7 所示;对应的参数,腐蚀电位 E_{corr} 、钝化电流 I_p 、击穿电位 E_b ,见表 5,表中还列出了相同试验条件下铸态 Inconel 625 的腐蚀性能参数^[2]。其中, E_{corr} 的高低反映材料热力学腐蚀倾向的大小,值越高腐蚀倾向相对越小; I_p 表征材料钝化时单位面积的电流,值越小越易发生钝化,以防止材料的进一步腐蚀; E_b 反映了耐腐蚀材料表面钝化膜被破坏的难易程度,值越正发生点蚀的可能性越小^[24-25]。

由图 7 可以看出,基体试样呈现典型的阳极

表 4 试样待测表面化学成分					
Table 4 Chemical composition of the testing surface					
(w/%)					
Element	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb
Content	62.82	21.89	1.81	9.22	3.52

溶解行为,堆焊层试样发生了明显钝化。在堆焊层试样钝化区内,随极化电位的升高,维钝电流密度波动非常小,且钝化区电位范围较宽。这是因为堆焊层中 Ni 和 Cr 元素含量较高,促进堆焊层钝化,有效阻碍了吸附在试样表面的 Cl^- 进入电极基体内部参加活化反应;同时,堆焊层中含量较高的 Cr 增加了钝化膜的稳定性^[25-26]。堆焊层试样具有更高的自腐蚀电位,表明堆焊层腐蚀倾向较小,较难发生腐蚀。与铸态 Inconel 625 相比,堆焊层的自腐蚀电位略高、击穿电压稍低,但两者钝化电流密度差异较小,见表 5。这表明,堆焊层发生腐蚀的倾向较小,抗腐蚀能力与铸态 Inconel 625 相当^[27]。所以堆焊层可以用来保护基体材料,使其免受腐蚀。

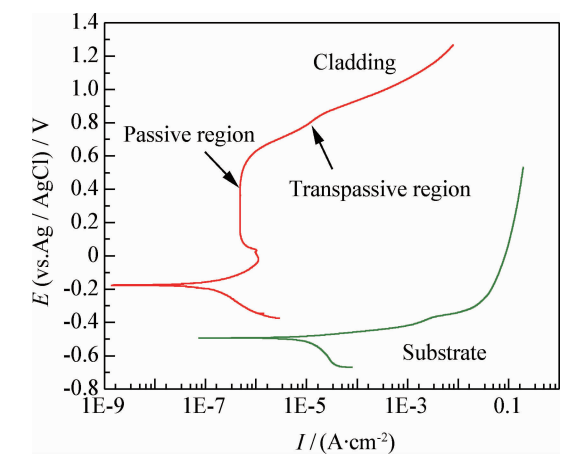


图 7 堆焊层与基体试样动态极化曲线

Fig. 7 Dynamic polarization curves of the cladding and the substrate

表 5 基体、堆焊层及铸态 Inconel 625 腐蚀性能参数			
Table 5 Corrosion parameters of the substrate, cladding and the wrought Inconel 625			
	$E_{\text{corr}} / \text{mV}$	$I_p / (\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	E_b / mV
Substrate	-492		
Cladding	-174	4.85×10^{-4}	542
Wrought Inconel 625	-264	4.7×10^{-4}	600

3 结 论

采用热丝脉冲 TIG 工艺在 AISI 4130 基体上获得了平坦、连续的堆焊层,通过对堆焊层组织、相组成以及耐腐蚀性的分析,得出以下结论:

(1) 堆焊层与基体之间形成了良好的冶金结合;在堆焊层与基体结合处分布有少量的平面晶与胞晶;堆焊层底部组织主要为一次柱状晶,且垂直于基体或先前形成的堆焊层定向生长。在靠近堆焊顶部,晶粒形态以树枝晶与等轴晶为主。

(2) 堆焊层主要由 γ -Ni 固溶体、分布在晶间不规则的 Laves 以及颗粒状的 MC 组成。枝晶形态对 Laves 相的分布特征有着重要的影响,不同的枝晶形态对应着 Laves 相的不同分布特征。

(3) 堆焊层与基体、以及层间融合界面处合金元素含量变化比较明显,层内部元素含量比较均匀,变化不明显。堆焊层试样表面 Fe 元素含量为 1.81%,其耐腐蚀性能与铸态 Inconel 625 基本相当,能够满足耐腐蚀要求。

参考文献

- [1] 张谦,王基维,史玉升,等. 固溶处理对热等静压 Inconel 625 合金组织与拉伸性能的影响[J]. 金属热处理, 2013, 38(3): 65-69.
ZHANG Q, WANG J W, SHI Y S, et al. Effects of solution treatment on microstructure and tensile properties of hot isostatic pressed Inconel 625 alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(3): 65-69 (in Chinese).
- [2] 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.
- [3] PAUL C P, GANESH P, MISHRA S K, et al. Investigating laser rapid manufacturing for Inconel-625 components [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(4): 800-805.
- [4] SATEESH N H, KUMAR G C M, PRASAD K, et al. Microstructure and mechanical characterization of laser sintered Inconel-625 superalloy[J]. Procedia Materials Science, 2014 (5): 772-779.
- [5] ZAHRANI E M, ALFANTAZI A M. High temperature corrosion and electrochemical behavior of INCONEL 625 weld overlay in PbSO_4 - Pb_3O_4 - PbCl_2 -Cdo-ZnO molten salt medium[J]. Corrosion Science, 2014, 85(1): 60-76.
- [6] 邸新杰,邢希学,王宝森. Inconel 625 熔敷金属中 δ 相的形核与粗化机理[J]. 金属学报, 2014, 38(3): 323-328.
DI X J, XING X X, WANG B S. Nucleation and coarsening mechanism of δ phase in inconel 625 deposited metal [J]. Acta Metallurgical Sinica, 2014, 38(3): 323-328 (in

Chinese).

- [7] FU J X, YAO H L, YU X L, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 625 alloy during pulsed plasma arc deposition process[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2013, 29(5): 480-488.
- [8] 孙晓迎,易先中,邓金先. 抗 H_2S 腐蚀的 HH-PSL3G-PR2 级气密封闸阀研制[J]. 石油矿场机械, 2013, 42(6): 35-39.
SUN X Y, YI X Z, DENG J X. Design and manufacture of anti- H_2S corrosion gate valve of level HH-PSL3G-PR2 with gas seal[J]. Oil Field Equipment, 2013, 42(6): 35-39 (in Chinese).
- [9] DUPONT J N. Solidification of an alloy 625 weld overlay [J]. Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 1996 (27A): 3612-3620.
- [10] ABIOYE T E, FOLKES J, CLARE A T. A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(12): 2145-2151.
- [11] NÈME EK S, FIDLER L, FI EROVÁ P. Corrosion resistance of laser clads of Inconel 625 and metco 41C[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 294-300.
- [12] 王晓军,杨洁. 30CrMo 合金表面堆焊 Inconel 625 镍基合金的耐腐蚀性能[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(8): 655-657.
WANG X J, YANG J. Corrosion resistance of 30 CrMo alloy with surfacing welding of Inconel 625 nickel alloy in hydrogen sulfide saturated solution[J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(8): 655-657 (in Chinese).
- [13] 秦华,胡传顺,肖峰. Inconel 625 合金堆焊层组织和性能的研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(17): 171-172.
QIN H, HU C S, XIAO F. Research on microstructure and performance of Inconel 625 alloy surfacing layer on 2.25 Cr1Mo matrix [J]. Casting Forging Welding, 2010, 39 (17): 171-172 (in Chinese).
- [14] 赵福海,华学明,叶欣,等. 热丝 TIG 焊热丝准稳态温度场的解析模型[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(7): 1063-1068.
ZHAO F H, HUA X M, YE X, et al. Mathematical model of quasi-state temperature distribution of hot wire during hot wire TIG welding process[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2012, 46(7): 1063-1068 (in Chinese).
- [15] MADADI F, ASHRAFIZADEH F, SHAMANIAN M. Optimization of pulsed TIG cladding process of stellite alloy on carbon steel using RSM[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 510(1): 71-77.
- [16] QI B J, YANG M X, CONG B Q, et al. The effect of arc behavior on weld geometry by high-frequency pulse GTAW process with 0Cr18Ni9Ti stainless steel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9-12): 1545-1553.
- [17] MIRSHEKARI G R, TAVAKOLI E, ATAPOUR M, et

- al. Microstructure and corrosion behavior of multipass gas tungsten arc welded 304L stainless steel[J]. *Materials & Design*, 2014, 55: 905-911.
- [18] OLA O T, DOERN F E. A study of cold metal transfer clads in nickel-base Inconel 718 superalloy[J]. *Materials & Design*, 2014, 57: 51-59.
- [19] PARIMI L L, A. R G, CLARK D, et al. Microstructural and texture development in direct laser fabricated IN718[J]. *Materials Characterization*, 2014, 89: 102-111.
- [20] 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 J F, LV Y H, LIU Y X, et al. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 components deposited by pulsed plasma arc rapid prototyping[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2012(11): 6-11 (in Chinese).
- [21] 郭建亭, 周兰章, 秦学智. 铁基和镍基高温合金的相变规律与机理[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(3): 476-486.
GUO J T, ZHOU L Z, QIN X Z. Phase transformations and their mechanisms in Fe- and Ni-base superalloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(3): 476-486 (in Chinese).
- [22] XU F J, LV Y H, XU B S, et al. Effect of deposition strategy on the microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by pulsed plasma arc deposition[J]. *Materials & Design*, 2013, 45: 446-455.
- [23] 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(S2): 96-99.
SUN H H, LIU A G, MENG F L. 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 (in Chinese).
- [24] 赵卫民, 俞蓉蓉, 王勇, 等. 带堆焊层钢管焊接接头耐蚀性的电化学评定[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 1997, 21(5): 61-63.
ZHAO W M, YU R R, WANG Y, et al. Electrochemical evaluation of the corrosion resistance of welded joints with layers in steel[J]. *Journal of the University of Petroleum*, 1997, 21(5): 61-63 (in Chinese).
- [25] MORTEZAIE A, SHAMANIAN M. An assessment of microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of dissimilar welds between Inconel 718 and 310S austenitic stainless steel[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2014, 116: 37-46.
- [26] KIM J S, PARK 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.
- [27] RAJANI H R Z, MOUSAVI S A A A, SANI F M. Comparison of corrosion behavior between fusion cladded and explosive cladded Inconel 625/plain carbon steel bimetal plates[J]. *Materials & Design*, 2013, 43: 467-474.

(责任编辑: 陈茜)