

DOI:10.20061/j.issn.1673-4807.2025.02.005

深海高抗腐蚀双金属油气管道 双钨极热丝 TIG 堆焊工艺研究

石苏桐¹, 浦娟^{1,2*}, 吴铭方¹, 魏宏兵³, 郭学文³

(1. 江苏科技大学 材料科学与工程学院, 镇江 212100)

(2. 上海第二工业大学 智能制造与控制工程, 上海 201209)

(3. 山东威尔汉姆海洋装备科技有限公司, 威海 264200)

摘要: 双钨极热丝 TIG 堆焊技术热输入量可控、沉积效率高和稀释率低, 在管道内壁堆焊时无刚性固定约束亦能有效保障管道直线度, 是一种很有前途的堆焊技术. 文中采用双钨极热丝 TIG 堆焊技术在输油管道高强钢内壁制备两层 Inconel 625 镍基合金堆焊层, 用金相显微镜和扫描电镜对镍/钢堆焊复合板进行微观组织分析, 对镍/钢复合板进行硬度测试, 并分别在距离镍/钢界面 0.5、1.0、1.5 mm 处的镍基合金堆焊层取样, 进行耐晶间腐蚀性能测试. 结果表明: 堆焊层的微观结构表现出细胞枝晶结构, 沿沉积方向外延生长, 枝晶间存在二次相(如 Laves 相和碳化物); 镍/钢堆焊复合板焊态下镍合金堆焊层硬度大于高强钢基板大于钢侧热影响区; 试验得出通过钨极热丝 TIG 堆焊技术得到的堆焊层晶间腐蚀敏感度(degree of sensitization, DOS)值小于 1, 具有优异的耐晶间腐蚀抗性; 随着堆焊层的位置靠近钢侧距离的增加, 堆焊层中 Fe 含量减少, 镍基合金堆焊层耐腐蚀性能增加.

关键词: 双钨极热丝 TIG 堆焊技术; 625 镍基合金; 微观组织; 耐晶间腐蚀性能

中图分类号: TG455

文献标志码: A

文章编号: 1673-4807(2025)02-033-06

Double tungsten electrode TIG technology with hot wire for deep-sea high corrosion resistance bimetal oil and gas pipelines

SHI Sutong¹, PU Juan^{1,2*}, WU Mingfang¹, WEI Hongbing³, GUO Xuewen³

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

(2. School of Intelligent Manufacturing and Control Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

(3. Weihai Wellham Marine Equipment Technology Co. Ltd., Weihai 264200, China)

Abstract: The double tungsten electrode TIG technology with hot wire has very low welding heat input and very narrow welding heat affected zone, so the welding stress is greatly reduced, and the internal wall welding can effectively guarantee the straightness of the pipeline without rigid fixed constraints, which greatly simplifies the production equipment. It is a promising welding technology. In this study, two layers of Inconel 625 nickel-based alloy surfacing were prepared on the inner wall of high-strength steel in oil pipelines by double tungsten hot wire TIG technology. The microstructure and composition of nickel/steel surfacing composite plate were observed by metallographic microscope and scanning electron microscope, and the hardness test was carried out. The intergranular corrosion resistance of Inconel 625 nickel-based alloy surfacing layers 0.5, 1.0 and 1.5 mm away from the nickel/steel interface was tested. The results show that the microstructure of the surfacing layer shows the cell dendrite structure, which grows epitaxially along the deposition direction, and there are secondary phases (such as Laves phase and carbide) between the dendrites. The hardness of nickel alloy surfacing layer of nickel/steel surfacing composite plate is greater than that of high strength steel substrate and than that of heat-affected zone of steel side. The results show that the degree of sensitization (DOS) value of the surfacing layer obtained by double tungsten electrode TIG technology is less than 1, and it has excellent intergranular corrosion resistance.

收稿日期: 2024-02-24

作者简介: 石苏桐(1999—), 男, 硕士研究生

* 通信作者: 浦娟(1984—), 女, 教授, 研究方向为高效智能焊接技术、表面工程及再造技术. E-mail: pu_juan84@163.com

引文格式: 石苏桐, 浦娟, 吴铭方, 等. 深海高抗腐蚀双金属油气管道双钨极热丝 TIG 堆焊工艺[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2025, 39(2): 33-38. DOI:10.20061/j.issn.1673-4807.2025.02.005.

With the increase of the distance between the surfacing layer and the steel side, the Fe content in the surfacing layer decreases, and the corrosion resistance of the nickel-based alloy surfacing layer increases.

Key words: double tungsten electrode TIG surfacing technology with hot wire, 625 Ni-based alloy, microstructure, resistance to intergranular corrosion

全球 70% 以上的油气资源在深海,在南海,东海等开采海底油气要求管道及设备材料拥有 30~35 年服役周期,针对深海富硫化氢油气工况,要求输送油气管道应具有极好的耐腐蚀性能. Inconel 625 镍基合金是一种 Ni-Cr-Mo-Nb 奥氏体合金,合金中 Cr 质量分数占比大于 20%,在苛刻工况下拥有较好的耐蚀性能^[1-2]. 为了降低输油气管道成本,考虑管道外层采用强度较高的 API5LB 级碳素钢管. 这种由 Inconel 625 镍基合金和 API5LB 级碳素钢管复合而成的输油气管道兼具了两者的性能优势.

目前制备镍基合金/高强钢复合材料的方法很多. 如埋弧焊^[3]、带极堆焊^[4]、熔化极气体保护焊^[5]、等离子弧焊^[6]等堆焊方法. 与它们相比,单钨极热丝 TIG 焊具有飞溅小,设备结构简单、重量轻等优点. 最重要的是它可以使钢丝绳起到导轨的作用而伸入管道内壁进行堆焊,同时电弧可通过改变电源的输出频率实现自动跟踪,单钨极热丝 TIG 焊堆焊更容易实行自动化. 但是单钨极热丝 TIG 堆焊方法沉积率较低,采用增加焊接电流、焊接速度去提高沉积率又容易出现管道变形严重、焊缝成型变差、未熔合倾向高等系列问题^[7-9]. 因此,文中拟采用两台独立电源分别对两根钨极进行供电的双钨极并联电弧耦合技术,通过两个电源输出不同波形的种类、大小、相位差等,在进行双钨极脉冲叠加后,形成多种组合波形,大幅增加熔池能量,使得高速堆焊

时母材熔深有一定保障. 这种方法通过脉冲叠加可形成多种焊接波形组合,能够保障高速焊时的熔池能量需求,并配合双丝搭桥可实现熔池扁平化,避免高速焊时窄而高的焊缝成型,使得焊缝成型更加美观并可增加焊枪步进,从而减少焊接行程,并且多枪分段同时焊接更有利于管道的整体均匀变形,避免较大的弯曲与扭转变形出现影响焊接正常生产而必须进行过程中矫正的问题,最终保证提高沉积率且具有较低稀释率.

众所周知,镍基合金液相流动性较差,熔覆时熔池流动性及润湿性难以保证,熔深较浅,容易出现小气孔和微小的热裂纹^[10-12]. 而双钨极热丝 TIG 的送丝角度、位置等对钨极与熔池都会产生较大的影响. 因此文中采用双钨极热丝 TIG 在 625 镍基合金/高强钢钢管内壁熔覆镍基合金,优化双钨极热丝 TIG 工艺,并对镍/钢堆焊层进行微观组织分析、硬度测试及耐腐蚀性能研究.

1 试验

1.1 试验材料

采用直径为 1.2 mm 的 ERNiCrMo-3 焊丝在外径为 323.9 mm,壁厚为 9.53 mm 的 API5LB 级钢上沉积 Inconel 625 镍基合金熔覆层. 焊丝及钢基材的化学成分如表 1. 双钨极热丝 TIG 堆焊原理见图 1. 独立控制的两台电源参数和热丝电源参数见表 2(表中 60%,100%为占空比).

表 1 Gr. B 级钢和 ERNiCrMo-3 焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Gr. B steel and ERNiCrMo-3 welding wire (mass fraction, %)

材料	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb	Al	Ti
Gr. B	0.19	0.25	0.40	0.04	0.01	0.003	98.77	0.004	-	0.002
ERNiCrMo-3	0.009 3	0.026	0.012	64.31	22.18	9.08	0.101	3.73	0.2	0.3

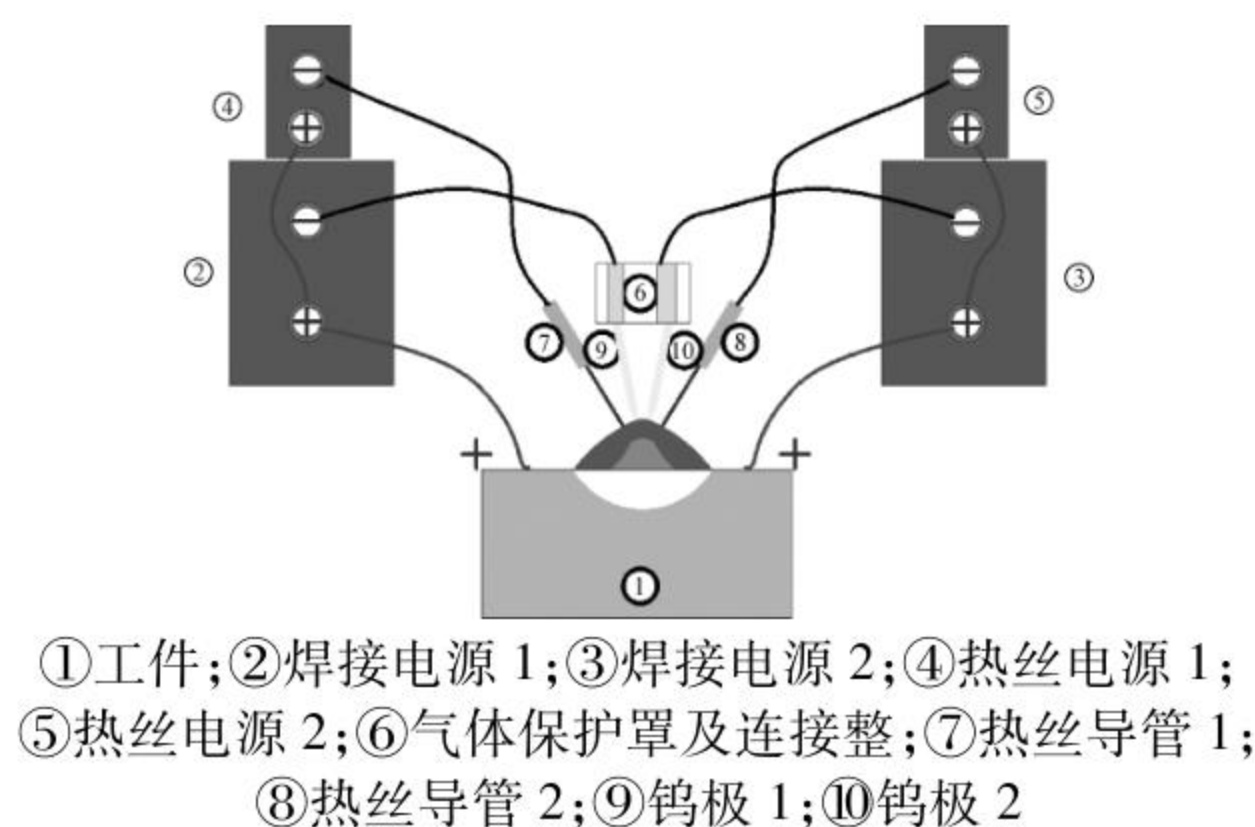


图 1 典型的双电源双钨极并联原理

Fig. 1 Typical dual power supply dual tungsten electrode parallel schematic diagram

表 2 焊接电源及热丝电源数据

Table 2 Data of welding power supply and hot wire power supply

电源名称	额定电压/V	空载电压/V	(电流/A)/(电压/V)	
			60%	100%
焊接电源 1	380	87	450/28	420/26.8
焊接电源 2	380	87	450/28	420/26.8
热丝电源 1	220	86	150/10	120/10
热丝电源 2	220	86	150/10	120/10

1.2 微观组织分析

采用线切割在管道上截取镍/钢样品,经过研磨、抛光后,分别使用 4% 的硝酸酒精溶液和 100

mLHCL+10 mLH₂SO₄+10 gCu₂SO₄ 溶液对基材和 Inconel 625 熔覆层进行腐蚀. 采用高温金相显微镜和 Zeiss Merlin Compact 电子显微镜对镍合金堆焊层进行微观组织分析和能谱点分析,对镍/钢界面进行线扫描,分析合金中主要元素在界面两侧分布状态.

1.3 性能测试

用 KB30S-FA 全自动维氏硬度计依据 GB/T 4340.1—2024《金属材料 维氏硬度试验 第1部分:试验方法》^[13]对标准镍/钢试样进行显微硬度测量,测量过程中载荷为 1 kg,保载时间为 15 s,以镍/钢界面为基准点向钢层及镍基合金层进行测试,每个点间隔 0.5 mm,每个试样测量 9 个点.

对镍/钢样品进行双环电化学试验(DL-EPR)以评估 Inconel 625 堆焊层的晶间腐蚀敏感度(DOS),沿着距离镍合金/钢界面层分别为 0.5、1.0 和 1.5 mm 处取样,试样尺寸分别为 10 mm×10 mm×0.5 mm、10 mm×10 mm×1.0 mm 和 10 mm×10 mm×1.5 mm. 试验采用三电极体系,铂与饱和甘汞电极分别为辅助电极和参比电极,待测试样为工作电极,试样远离熔合界面一侧的面(上表面)暴露于腐蚀液中. 待测试样需用 200~1 500 目砂纸打磨并机械抛光. DL-EPR 试验在室温(25 ℃)下进行,电解液成分为 2 mol/LH₂SO₄+2 mol/LHCl+0.001 mol/LKSCN. 从正向扫描曲线和反向扫描曲线分别获得最大活化电流(I_a)和最大再活化电流(I_r),通过敏感度(I_r/I_a)来评估耐晶间腐蚀抗性. 恒电位极化测试的电位设置为 0.2 V,时间为 1.5 h.

2 试验结果与讨论

2.1 镍/钢堆焊复合板微观组织形貌分析

图 2 为镍/钢复合板光学显微镜照片,图 2(a、b)分别为钢侧热影响区和钢侧母材金相图,对比发现钢侧组织严重不均匀,钢侧热影响区显微组织由魏氏组织组成,基材显微组织为铁素体和贝氏体. 图 2(c、e)是 Inconel 625 堆焊层显微组织照片,图中未发现气孔、开裂等缺陷,堆焊层的显微组织为典型的枝晶形态,枝晶臂平行于热流方向,如图 2(c). 在相邻焊道重叠区域,层间具有明显的熔合界面,后续焊道的组织更加粗大,如图 2(d). 堆焊层上端区域,在焊接过程中电弧热量分布不均匀和冷却时不仅可以通过基体散热,还能通过环境散热的共同作用下最终形成大量无序等轴晶粒,如图 2(e).

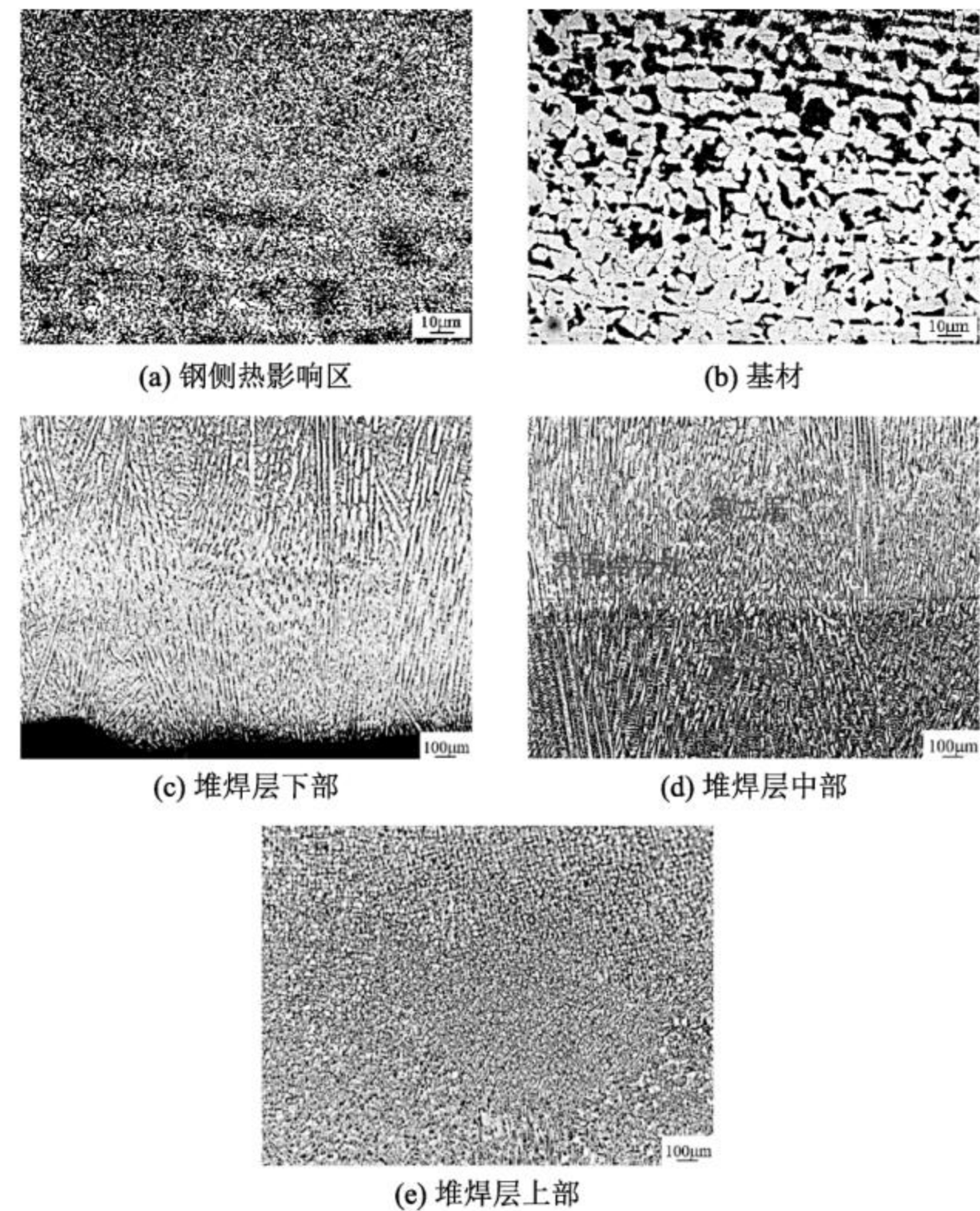


图 2 镍/钢堆焊板横截面微观形貌

Fig. 2 Microstructure of nickel/steel surfacing plate

图 3 是 Inconel 625 堆焊层微观结构中出现沉淀相的 SEM 图,如图 3(b)在树突间区域析出大量不规则形状的相(1#)和一些小块状颗粒(2#),对图中 1#、2#特征点进行能谱点分析结果列于表 3,各相对应的 EDS 结果如图 4. 根据表 3 和图 4 结果可以推测,点 1#符合 A₂B 型金属间化合物相即:A 可能为 Ni、Cr、Fe 元素,B 可能为 Nb、Mo、Ti 元素,为 Laves 相. 点 2#可能为碳化物沉淀相(如 NbC).

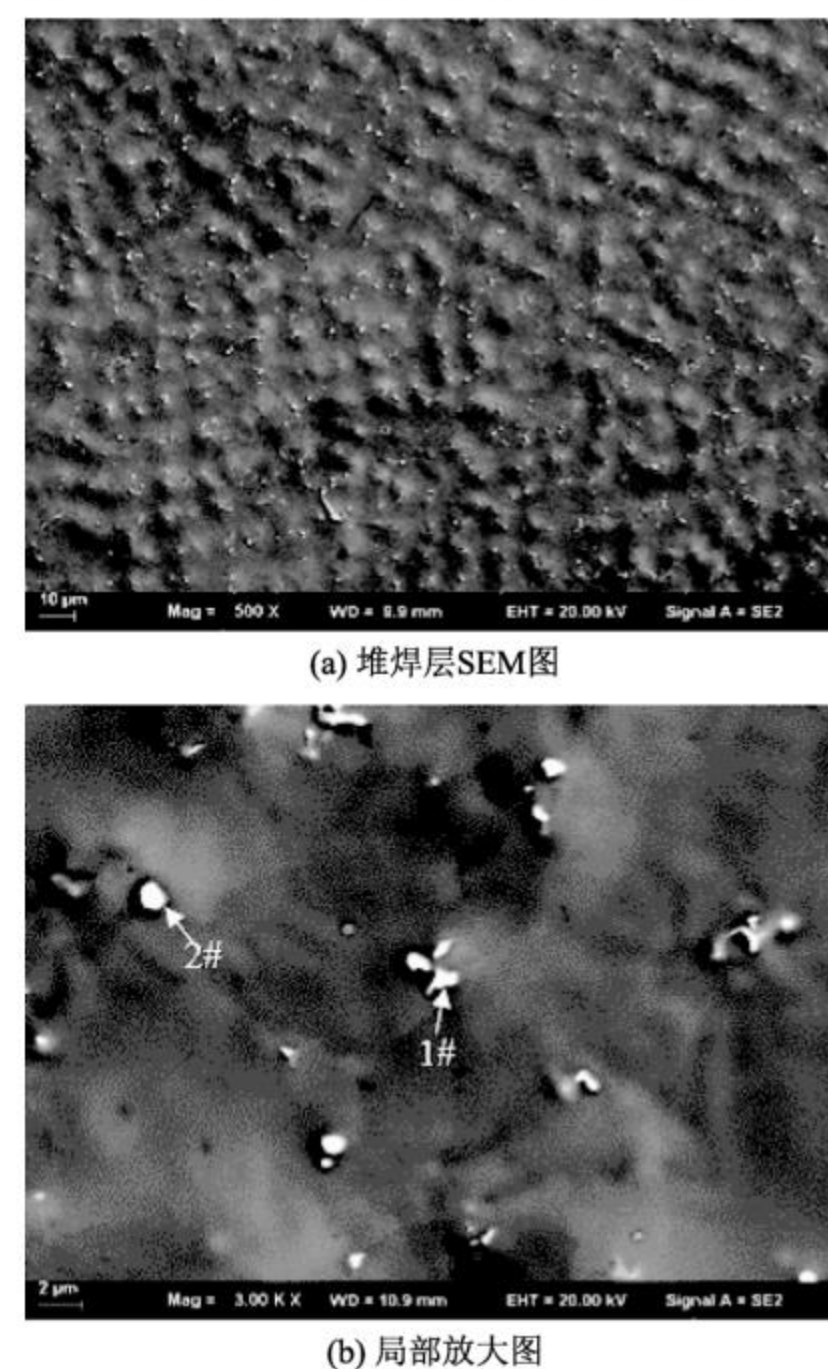


图 3 镍基合金堆焊层 SEM 图及局部放大图

Fig. 3 SEM image and local enlarged image of nickel-based alloy surfacing layer

表 3 镍基合金堆焊层中特征点能谱分析结果(质量分数,%)

Table 3 Energy spectrum analysis results of characteristic points in nickel-based alloy surfacing layer (mass fraction, %)

特征点	Ni	Cr	Nb	Fe	Mo	Ti	推测物相
1#	44.05	19.26	5.43	20.37	7.69	3.20	Laves
2#	12.65	1.59	79.66	5.84	-	0.26	NbC

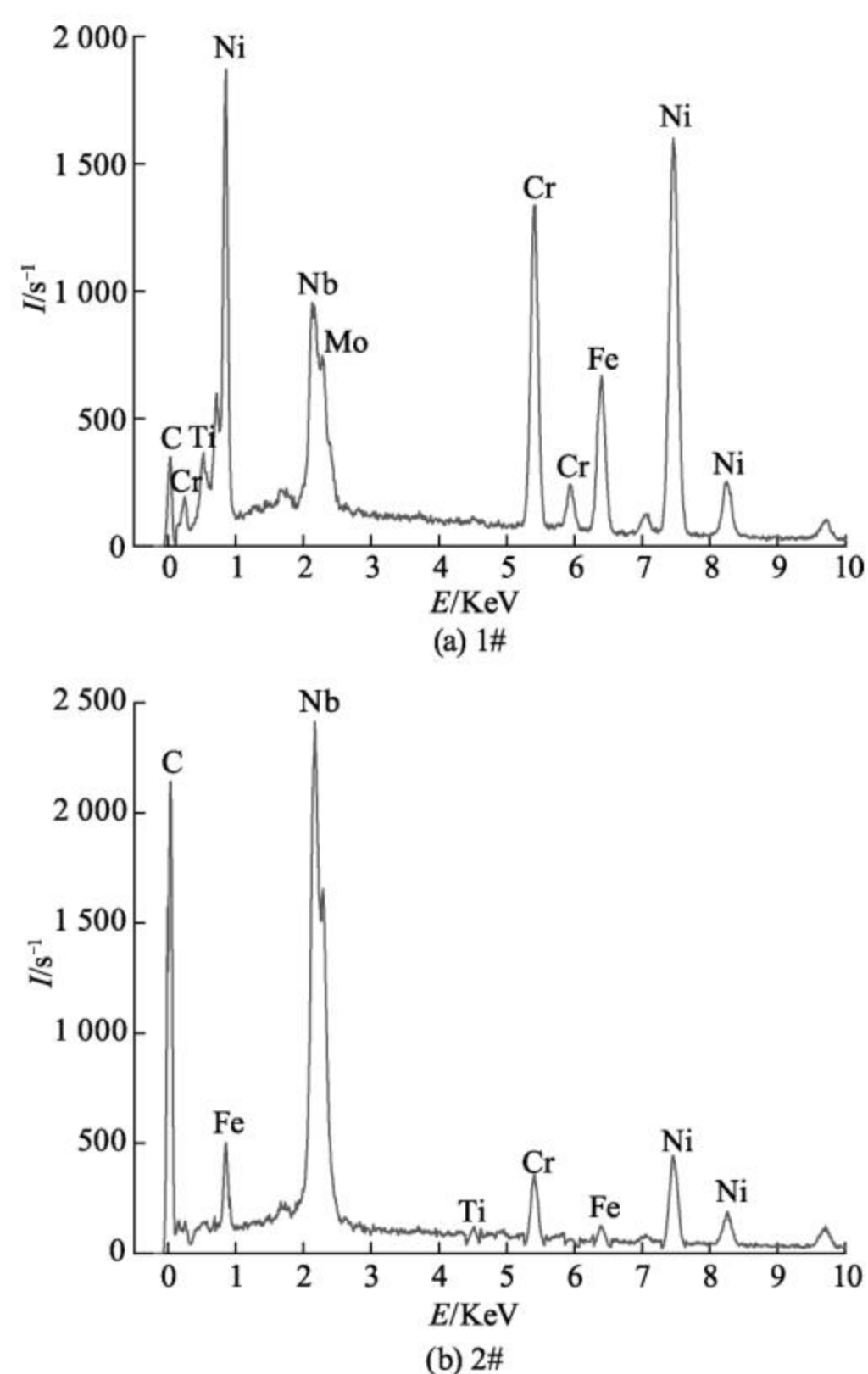


图 4 沉淀相 EDS 图

Fig. 4 EDS diagram of precipitated phase

K 值定义为 $K = C_s / C_l$ (C_s 为固体成分, C_l 为特定温度下的液体成分), 描述了凝固过程中合金元素在液相和固相中分配的强度. 假设平衡分配系数 K 为常数, 则枝晶内组成由 $K C_l$ 决定. 因此, 在本研究中, 枝晶内组成与枝晶间组成之比可以作为近似的分配系数. 如果 $K < 1$, 则主要元素在凝固过程中向枝晶间区分离. 相比之下, 如果 $K > 1$, 元素分离到枝晶内. 当系数 $K = 1$ 时, 不发生偏析现象^[14]. 在堆焊层枝晶内和枝晶间在扫描电子显微镜下各选取至少 12 个点的平均化学成分, 各主要元素的近似分配系数 K 如表 4. Ni、Cr 和 Fe 的 K 值大于 1 ($K_{Ni} = 1.01$, $K_{Cr} = 1.02$, $K_{Fe} = 1.13$), Mo 和 Nb ($K_{Mo} = 0.80$, $K_{Nb} = 0.63$). 因此, Mo 和 Nb 倾向于偏析到液体中, Nb 比 Mo 具有更强的偏析倾向. 当合金凝固时, 枝晶间区域会大量富集 Mo 和 Nb, 与 C 形成碳化物沉淀相. 当大部分的 C 被耗完后, 镍基合金中的元素及钢中稀释进入堆焊的 Fe, 即 Ni、Cr、Fe 和 Nb、Mo、Ti 元素形成 Laves 相 (A_2B 型化合物).

表 4 Inconel 625 堆焊层枝晶内和枝晶间的化学成分(质量分数,%)

Table 4 Chemical composition of the Inconel 625 surfacing layer (mass fraction, %)

参数	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb
C_s	74.88	14.25	5.51	3.20	2.16
C_l	73.84	13.89	4.87	3.98	3.42
K	1.01	1.02	1.13	0.80	0.63

2.2 硬度分析

图 5 为镍/钢堆焊复合板横截面平均硬度分布曲线. 如图所示硬度曲线在钢侧呈下降趋势, 硬度在钢侧热影响区最低, 而 Inconel 625 堆焊层硬度无明显变化, 钢侧热影响区由于焊接时基材中 Fe 元素的稀释以及焊后快速冷却过程中形成的魏氏体组织, 基材硬度随离镍/钢结合处距离的降低而降低.

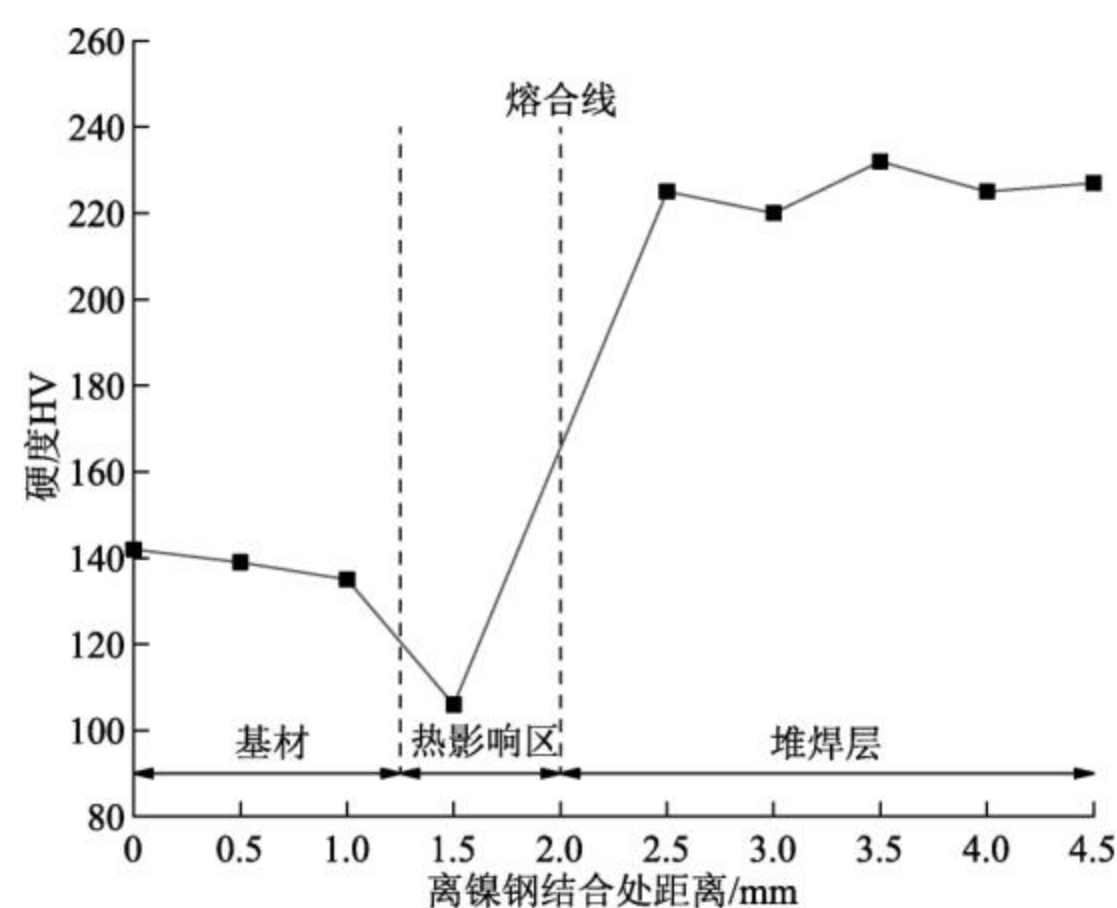


图 5 镍/钢复合板硬度分布

Fig. 5 Hardness distribution of nickel/steel composite plate

2.3 镍基合金堆焊层耐腐蚀性能分析

为了探讨镍基堆焊层合金的耐腐蚀性能, 在距离镍/钢界面 0.5、1.0、1.5 mm 处分别取样进行晶间腐蚀实验, 不同位置试样的 DL-EPR 曲线如图 6, 从正向扫描曲线和反向扫描曲线分别获得最大活化电流 (I_a) 和最大再活化电流 (I_r), 通过 DOS (I_r / I_a) 来判定耐晶间腐蚀能力, $DOS < 1\%$ 表示该材料未被敏化并且具有很强的耐晶间腐蚀抗性; $DOS \geq 1\%$ 意味着该材料易受晶间腐蚀的影响并且被强烈敏化^[15]. 图 6 中未观察到明显的再活化区域, 结合表 5 发现堆焊层越靠近熔合界面, DOS 值越大, 耐晶间腐蚀性能越低.

表 5 不同位置 Inconel 625 堆焊层 DOS 值
Table 5 DOS values of Inconel 625 surfacing layer at different positions

离镍钢界面距离/mm	DOS/%
0.5	0.956
1.0	0.735
1.5	0.195

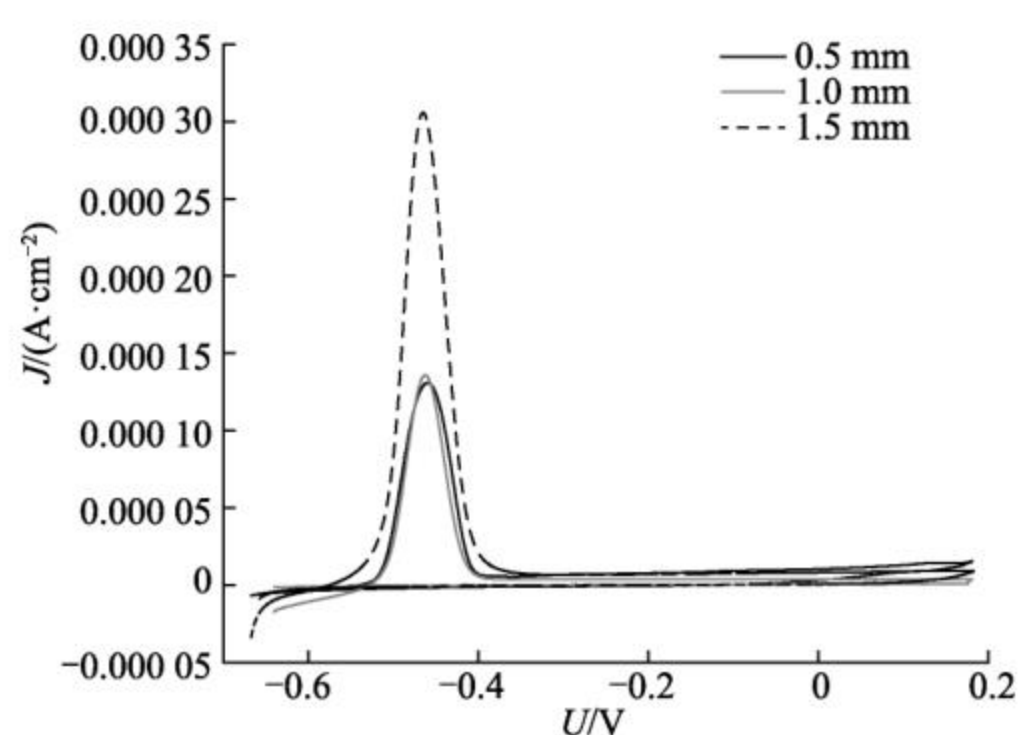


图 6 2 mol/L H₂SO₄+2 mol/L HCl+0.001 mol/L KSCN 溶液中 DL-EPR 曲线

Fig. 6 DL-EPR curve in 2 mol/L H₂SO₄+2 mol/L HCl+0.001 mol/L KSCN solution

在恒电位阳极极化过程中,电流和时间存在以下关系^[16]:

$$i = 10^{-(A+kt)} \quad (1)$$

恒电位阳极极化极化电流的对数和时间的对数呈线性关系,斜率为 k ,截距为 A . $k = -1$ 表明电子间的迁移控制着钝化膜的长大,工件表面钝化膜紧密; $k = -0.5$ 表明溶解-析出控制膜的长大,工件表面钝化膜疏松多孔.图 7 是在距离镍/钢界面 0.5、1.0、1.5 mm 处 Inconel 625 合金在 2 mol/L H₂SO₄+2 mol/L HCl+0.001 mol/L KSCN 溶液中的恒电位极化曲线.从图中可以看到,开始的时候钝化膜较为致密,远离镍/钢界面的 Inconel 625 合金 k 值更接近于-1,钝化膜更致密,随着时间的推移,Inconel 625 合金 k 值逐渐接近于-0.5,工件表面钝化膜逐渐疏松.

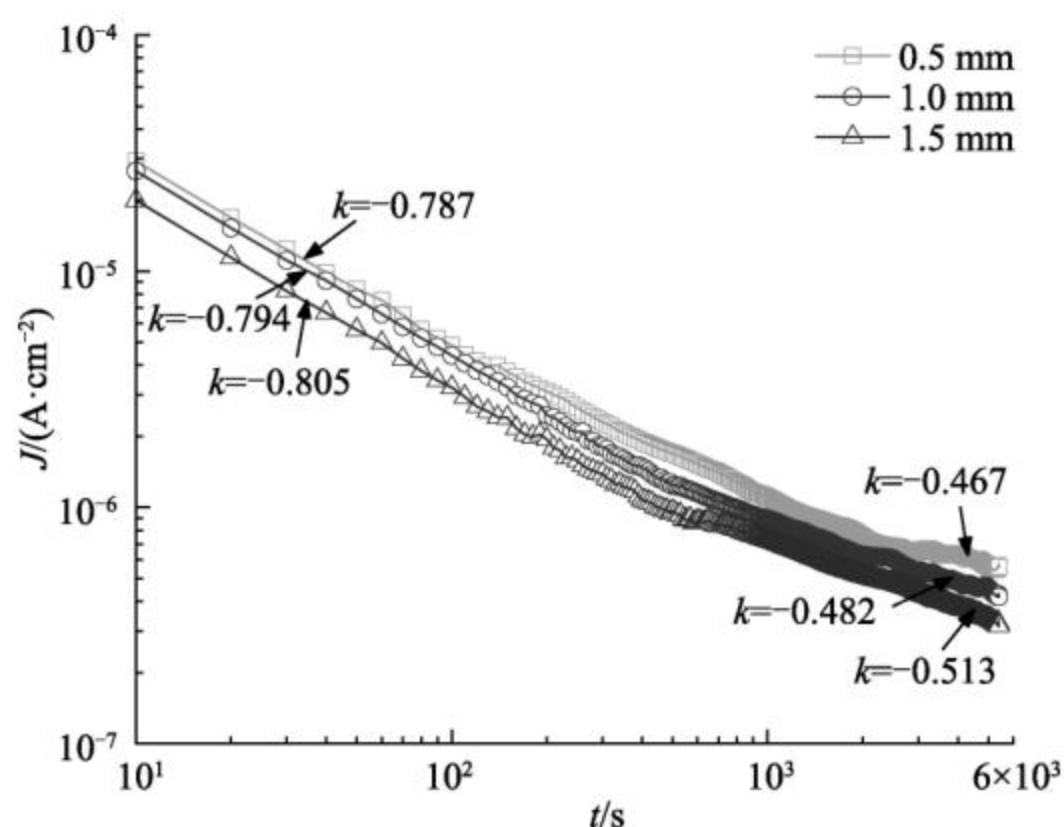


图 7 不同位置 Inconel 625 合金恒电位极化曲线

Fig. 7 Constant potential polarization curves of Inconel 625 alloy at different positions

图 8 为镍/钢复合板线扫描结果.从图 8 可以看到离基层 1.5 mm 左右堆焊层中 Fe 元素开始急剧下降后趋于稳定,而整个 625 合金中 Nb、Cr、Mo 元素含量并无明显变化.在镍基 625 合金中添加 Nb 和 Mo 最初是为了提高强度和耐腐蚀性.但是,由于这两个元素在焊接过程中容易富集在树枝状晶间区域中,且 Fe 元素的存在会降低 Mo、Cr 等元素在奥氏体中的溶解度,从而促进 Mo、Cr 向枝晶间隙偏析,促进 Laves 相和富 Cr 的碳化物等析出物的形成,最终导致 Inconel 625 贫 Mo、Cr 区加大,合金的耐蚀性显著下降^[17-19].

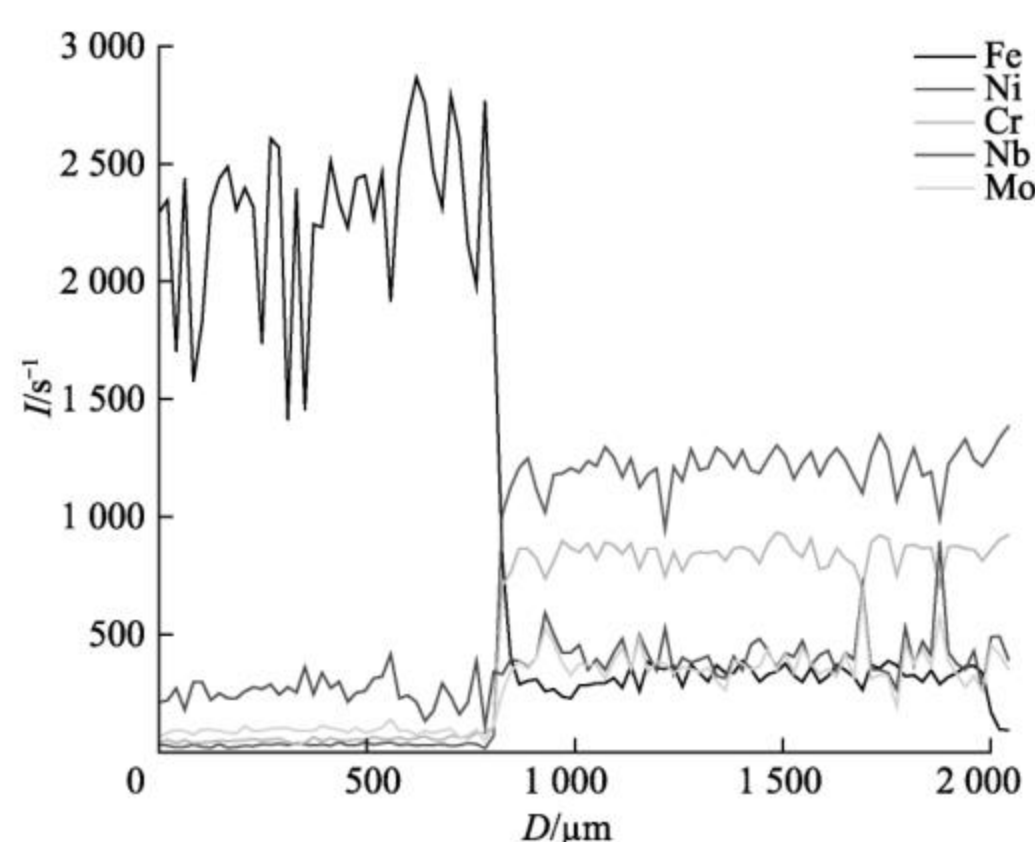


图 8 EDS 线扫描分析

Fig. 8 EDS line scan analysis

3 结论

(1) 采用双钨级热丝 TIG 工艺得到成型良好、无缺陷的 625 合金堆焊层.堆焊层微观组织呈现明显的枝晶形貌,在焊接过程 Mo 和 Nb 元素在枝晶内富集,Fe 元素往枝晶间偏析,Ni、Cr 元素几乎不偏析.

(2) 电化学测量表明,堆焊层具有良好的耐晶间腐蚀性能,在酸性溶液中能够产生较为致密的钝化膜.由于基材中 Fe 元素的稀释,随着堆焊层到熔合线距离的增加,625 合金 DOS 值从 0.956% 减小到 0.195%.

参考文献 (References)

[1] JAFARI H, DANAEE I, ESKANDARI H, et al. Combined computational and experimental study on the adsorption and inhibition effects of N₂O₂ schiff base on the corrosion of API 5L grade B steel in 1 mol/L HCl[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2014,30(3):239-252.

[2] STUART B, MITCHELL B, TED S, et al. Corrosion resistance of 625 nickel superalloy exposed to isothermal and thermal cycling conditions in a chloride/car-

- bonate salt[J]. *Solar Energy*, 2023,249:278-287.
- [3] PU J, YU S F, LI Y Y. Effects of Zr-Ti on the microstructure and properties of flux aided backing submerged arc weld metals [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017,692:351-358.
- [4] ALVARÃES C P, JORGE C F J, SOUZA L F G D, et al. Farneze, Microstructure and corrosion properties of single layer Inconel 625 weld cladding obtained by the electroslag welding process[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020,9(6): 16146-16158.
- [5] 浦娟,王杰,胡庆贤,等. 焊丝间距对双缆式十四丝 GMAW 电弧物理行为的影响[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2019,33(4):18-23.
- [6] PU J, SUN Y B, WU L, et al. Effect of CeO₂ content on microstructure and properties of Ni-based tungsten carbide layer by plasma arc cladding [J]. *Coatings*, 2022, 12(3):342.
- [7] SINGH M, BHAGI L K, ARORA H. Effects of shielded metal arc welding process parameters on dilution in hard facing of mild steel using factorial design[J]. *Advanced Materials*, 2020,23:207-220.
- [8] WANG J Y, CUI X F, JIN G, et al. Effect of in-situ Ni interlayer on the microstructure and corrosion resistance of underwater wet 316L stainless steel laser cladding layer[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023,458:129341.
- [9] SINGH A, SINGH V, SINGH A P, et al. Experiment analysis of A-TIG welding and comparison between TIG, Double-TIG, and A-TIG of Hastelloy C-276 [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2024,100:102-107.
- [10] 张翔,王宏,李日升,等. 双钨极氩弧焊焊接熔池流场及热场模拟[J]. *电焊机*, 2013,43(12):89-93.
- [11] MATHEW M D, PARAMESWARAN P, BHANU SANKARA RAO M A T E R K. Microstructural changes in alloy 625 during high temperature creep[J]. *Materials characterization*, 2008, 59:508-513.
- [12] WU B L, YU W Y, ZHU W Q, et al. A new strategy of Al_{0.1}CoCrFeNi high entropy alloys and Inconel 625 alloys joining technology[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, 324:118251.
- [13] 全国钢标准化技术委员会. 金属材料 维氏硬度试验 第 1 部分: 试验方法: GB/T 4340. 1-2024 [S]. 北京: 质检出版社, 2024.
- [14] XING X X, DI X J, WANG B S. The effect of post-weld heat treatment temperature on the microstructure of Inconel 625 deposited metal [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014,593:110-116.
- [15] 徐连勇,邵春盛,荆洪阳,等. 焊接方法对镍基合金耐晶间腐蚀性能的影响[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2023,56(1):11-17.
- [16] 张媛,张弦,陈思雨,等. 磷酸浓度对 316L 不锈钢耐蚀性及钝化膜特性的影响[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2022,42(5):819-825.
- [17] XIE Y, ZHANG J, YOUNG D J, et al. Effect of Fe on corrosion of Ni-20Cr and Ni-30Cr alloys in wet CO₂ gas at 650 and 700° C [J]. *Corrosion Science*, 2019, 154: 129-143.
- [18] GAO J, MA Q C, SUN Y, et al. Effect of Nb content on microstructure and corrosion resistance of Inconel 625 coating formed by laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023,458:129311.
- [19] HE K, DONG L J, WANG Q Y, et al. Comparison on the microstructure and corrosion behavior of Inconel 625 cladding deposited by tungsten inert gas and cold metal transfer process [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022,435:128245.

(责任编辑:顾琳)