

FeCrNiMo 激光熔覆层组织与电化学腐蚀行为研究

黄杰¹, 贺定勇¹, 杜开平², 杨延格³, 郭星晔¹, 吴旭¹, 于月光², 周正¹

(1.北京工业大学 材料与制造学部, 北京 100124;

2.矿冶科技集团有限公司, 北京 100160; 3.中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

摘要: **目的** 研究所设计 FeCrNiMo 激光熔覆层的组织结构及电化学腐蚀行为, 用于解决液压支架表面防护与修复问题。**方法** 采用激光熔覆技术在 27SiMn 钢表面制备 FeCrNiMo 合金熔覆层, 通过 XRD、光学显微镜和 SEM 表征其微观组织结构, 利用动电位极化与交流阻抗谱技术研究熔覆层电化学腐蚀行为。**结果** 在适宜工艺条件下实现了单道熔覆层厚度达 2 mm 以上, 且无明显气孔、裂纹等缺陷。熔覆层具有胞状枝晶组织特征, 枝晶内为马氏体, 晶间富 Cr、Mo 的铁素体有效缓解了马氏体相变的高应力, 达到了较好的强韧化匹配。熔覆层在 3.5%NaCl 和 0.5 mol/L H₂SO₄ 溶液中均呈现出明显的钝化行为, 钝化区间宽度分别为 300 mV 和 1310 mV, 自腐蚀电位分别为 -140.2 mV 和 2.3 mV, 自腐蚀电流密度分别为 5.0×10^{-8} A/cm² 和 1.3×10^{-3} A/cm², 极化电阻分别为 $3.5 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 和 $6261.4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 具有较为优异的耐腐蚀性能, 且显著优于基体材料, 但其双相组织特征易导致微区发生选择性腐蚀。**结论** 所设计的 FeCrNiMo 合金及相应激光熔覆工艺, 满足实际工程对于熔覆层高效制备、成形质量及耐蚀性的要求, 可用于液压支架表面防护与修复。

关键词: 激光熔覆; FeCrNiMo 合金; 微观组织; 动电位极化; 交流阻抗谱

中图分类号: TG172 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2020)12-0228-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.12.026

Microstructure and Electrochemical Corrosion Behavior of FeCrNiMo Layer Fabricated by Laser Cladding

HUANG Jie¹, HE Ding-yong¹, DU Kai-ping², YANG Yan-ge³,
GUO Xing-ye¹, WU Xu¹, YU Yue-guang², ZHOU Zheng¹

(1.Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2.BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China; 3.Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

ABSTRACT: The work aims to study the microstructure and electrochemical corrosion behavior of FeCrNiMo laser cladding layer, so as to solve the problems of hydraulic support surface protection and repair. FeNiCrMo alloy layer was prepared on 27SiMn steel substrate by laser cladding, and the microstructure and electrochemical corrosion behavior of this layer were investigated by XRD, optical microscope, SEM, potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy.

收稿日期: 2020-05-25; 修订日期: 2020-07-20

Received: 2020-05-25; Revised: 2020-07-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFB0306100)

Fund: National Key R&D Program (2017YFB0306100)

作者简介: 黄杰 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光熔覆。

Biography: HUANG Jie(1995—), Male, Master, Research focus: laser cladding.

通讯作者: 周正 (1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为表面工程。邮箱: zhouzhengbjut@bjut.edu.cn

Corresponding author: ZHOU Zheng(1982—), Male, Doctor, Associate researcher, Research focus: surface engineering. E-mail: zhouzhengbjut@bjut.edu.cn

引文格式: 黄杰, 贺定勇, 杜开平, 等. FeCrNiMo 激光熔覆层组织与电化学腐蚀行为研究[J]. 表面技术, 2020, 49(12): 228-234.

HUANG Jie, HE Ding-yong, DU Kai-ping, et al. Microstructure and electrochemical corrosion behavior of FeCrNiMo layer fabricated by laser cladding[J]. Surface technology, 2020, 49(12): 228-234.

Under optimized processing parameters, the layer had a single-cladding thickness of over 2 mm, without obvious defects like pores, cracks. The cladding layer presented a cellular dendritic structure involving martensite in dendrite and intergranular Cr/Mo-rich ferrite, thus achieving a good balance of strengthening and toughening. The cladding layer exhibited obvious passivation behavior in both 3.5wt% NaCl and 0.5 mol/L H₂SO₄ solutions. The passive region had a width of 300 mV and 1310 mV, the corrosion potential was detected to be -140.2 mV and 2.3 mV, the corrosion current density was measured as 5.0×10⁻⁸ A/cm² and 1.3×10⁻³ A/cm², and the polarization resistance was calculated to be 3.5×10⁵ Ω·cm² and 6261.4 Ω·cm², respectively. This cladding layer depicted excellent corrosion resistance that was superior to the substrate, although selective corrosion occurred in micro-area due to duplex phase structure. Therefore, the designed FeNiCrMo alloy and related laser cladding parameters satisfy the engineering demands for processing efficiency and performance and can be used for protecting and repairing hydraulic supports.

KEY WORDS: laser cladding; FeCrNiMo alloy; microstructure; potentiodynamic polarization; electrochemical impedance spectroscopy

液压支架与矿井整体结构的稳定和安全息息相关,是煤矿支护设备中的关键部件之一^[1]。由于井下空气潮湿,且含有酸性气体及乳化液等腐蚀介质,支架立柱时常发生腐蚀失效^[2-3]。同时,矿渣会沿立柱与缸体间的缝隙进入到乳化液中,并随其运动产生表面磨损,进一步加速立柱的失效^[4-5]。据统计,我国每年有约 50 万吨立柱因此而报废,这在给煤矿企业带来经济损失的同时更严重威胁到人员的生命安全^[6]。采用适宜的表面防护技术是延长立柱服役寿命较为合理且经济的措施,其中电镀铬是最常用的方法之一。然而,由于电镀铬所带来的环境污染等问题,开发环境友好型的替代技术是该领域研究和应用的重要方向^[7]。近年来,包括堆焊、喷焊、热喷涂、激光熔覆等用于替代电镀铬的技术获得了较为广泛的关注^[8-9]。其中,激光熔覆凭借其绿色高效的加工特点以及优异的涂层质量,成为液压支架表面防护方面最具前景的应用技术^[10]。

除了工艺方面的优势,熔覆材料的选择及设计也是保证涂层服役性能的核心要素。当前,时常能看到针对立柱防护问题的熔覆材料及解决方案报道,包括在 27SiMn 钢表面熔覆 Ni60A^[11]、TiC/2205 不锈钢^[12]、20%WC/Ni60A^[13]等。但由于实际工程中对于总体施工成本的苛刻限制,通常采用成熟度高、成本较为低廉的不锈钢粉末作为熔覆材料,如 316L 奥氏体不锈钢^[14]、2205 双相不锈钢^[15]、420 或 431 马氏体不锈钢等^[16-17]。奥氏体不锈钢与双相不锈钢的耐腐蚀性能与塑韧性良好,但其硬度低,耐磨性差^[18],难以同时满足立柱表面耐蚀抗磨的综合需求。因此,马氏体不锈

钢逐渐成为立柱表面熔覆材料关注的焦点。然而,马氏体不锈钢在激光熔覆极高冷却速率的影响下裂纹敏感性较高,尤其在制备大厚度熔覆层作为立柱修复再制造时易发生开裂。此外,较高的含碳量也对其耐蚀性有不利的影响。针对现有熔覆材料存在的问题,本文在马氏体不锈钢基础上微调成分得到 FeCrNiMo 合金粉末。考虑到液压支架立柱在修复后需要预留足够的机加余量,因而选择了铺粉式激光熔覆的加工方式以一次熔覆获得厚度足够的涂层,在优化的工艺条件下制备了单层厚度达 2 mm 的激光熔覆层,重点研究了涂层的组织结构特征和耐腐蚀特性,为立柱表面的高效防护与修复提供有力的技术支撑。

1 试验材料及方法

熔覆材料为设计的 FeCrNiMo 合金粉末,采用气雾化法制得,其名义成分(质量分数)为: 15.0%~17.0%Cr, 1.0%~2.0%Ni, 1.0%~2.0%Mo, 0.5%~1.0%Si, 0.5%~1.0%Mn, 0.1%~0.2%C, 余量 Fe。筛分出粒径分布在 75~95 μm 范围内的粉末用于激光熔覆。基体选用液压支架立柱常用的 27SiMn 钢,其名义成分(质量分数)为: 0.24%~0.32%C, 1.10%~1.40%Si, 1.10%~1.40%Mn, 0.07%~0.12%V, P≤0.04%, S≤0.04%, 余量 Fe。基体尺寸为 150 mm×100 mm×10 mm。本文采用预置粉末式激光熔覆方式,加工设备为 YLS-6000 型光纤激光器,激光波长为(1075±5) nm,工艺参数如表 1 所示。

表 1 工艺参数
Tab.1 Processing parameters

Laser power/W	Scan speed/(mm·s ⁻¹)	Ar flow rate/(L·min ⁻¹)	Facula diameter/mm	Powder-bed depth/mm	Overlapping ratio/%
2500	5	12	5×5	2.5	50

熔覆层相结构分析采用 D8ADVANCE 型 X-ray 衍射仪,衍射参数为: Cu 靶 X 射线,扫描角度范围 20°~90°,扫描速度 2 (°)/min。熔覆层的显微组织通过奥林巴斯 GX-51 型光学显微镜和 Quanta 450 型电子

显微镜观察。动电位极化和交流阻抗谱测试在 Chi660e 型电化学工作站上进行,考虑到井下典型的腐蚀环境条件,选取 3.5%NaCl 和 0.5 mol/L H_2SO_4 作为近似的腐蚀液进行模拟,参比电极为饱和甘汞,辅助电极为铂片,试样作为工作电极,测试之前将试样逐级打磨至 1500#砂纸后抛光,有效测试面积为 1 cm^2 。阻抗谱测试前先测 15 min 的开路电位,频率范围为 100 kHz~0.01 Hz,振幅为 10 mV。随后进行动电位极化测试,扫描速度为 0.5 mV/s,各个样品均在腐蚀电流密度到达 0.01 A/cm^2 时终止测试。

2 结果与分析

2.1 熔覆层微观组织结构

图1为原始合金粉末与熔覆层表面的XRD图谱。可以看到,原始粉末由明显的两相构成,包括 bcc 结构的 $\alpha\text{-Fe}$ 相和 fcc 结构的 $\gamma\text{-Fe}$ 相。而熔覆层则几乎呈现为单一的 $\alpha\text{-Fe}$ 结构,未见明显的 $\gamma\text{-Fe}$ 相残留。这主要是由激光熔覆过程中极高的冷却速率所致(冷却速率可达 $10^4\sim 10^6\text{ }^\circ\text{C/s}$),在如此高的冷却速率下形成大量的过饱和固溶体,促进了残余奥氏体向马氏体转变^[19-20]。此外,熔覆层中 $\alpha\text{-Fe}$ 相的衍射峰位相对

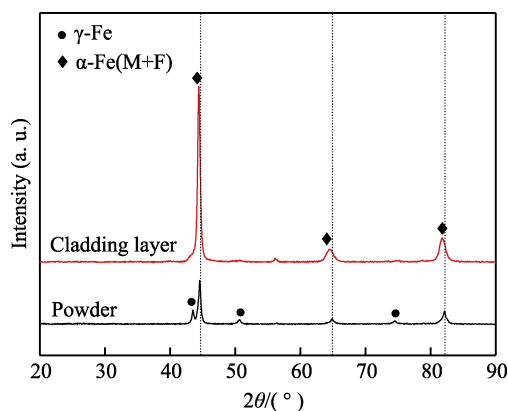


图1 熔覆层与原始粉末的 XRD 谱图
Fig.1 XRD patterns of cladding layer and raw powders

原始粉末向低角度有所偏移,说明熔覆层中 $\alpha\text{-Fe}$ 相的晶面间距略有增加,这也是高度过饱和固溶体形成的体现。

图2为熔覆层截面的整体形貌特征,熔覆层厚度约为 2 mm,无气孔、裂纹等缺陷。同时,其与基体结合良好并保持了极低的稀释率,这主要得益于铺粉式的加工方法,使得绝大部分激光能量作用于粉末形成熔池,而通过径向热传导不断衰减的热量到达基体表面时仅能够引起微区熔化,从而有效降低了熔覆层稀释率。这种形貌特征对于实际工程中立柱的高效修复,以及充分发挥所设计熔覆合金的性能具有重要意义。

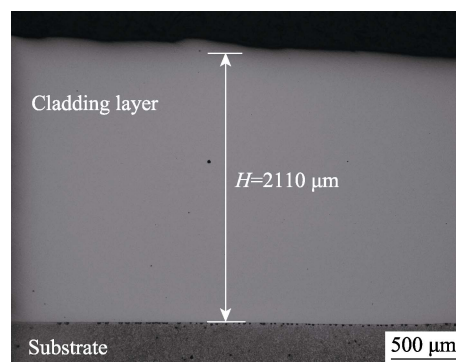


图2 熔覆层的截面形貌
Fig.2 Cross-sectional morphology of cladding layer

熔覆层显微组织如图3所示,发现其具有典型的胞状枝晶组织特征,枝晶内与枝晶间区域存在明显的衍射衬度差异,说明元素分布有较大的区别。通过能谱面扫描进行分辨,得出枝晶间主要富集了大量的Cr元素,同时Mo元素也有一定富集现象,其形成则是受凝固过程的晶型转变控制。在冷却过程中,富Cr的 δ -铁素体率先形核,随着温度的下降,液相(L)和 δ -铁素体向奥氏体($\gamma\text{-Fe}$)转变,Cr在奥氏体中为有限固溶,此时 δ -铁素体中多余的Cr元素被向外排出^[21]。随凝固过程的继续,奥氏体向马氏体转变,从而形成了枝晶内马氏体(M)和晶间铁素体(F)双相组织。马氏体转变会导致体积膨胀,从而引发较为

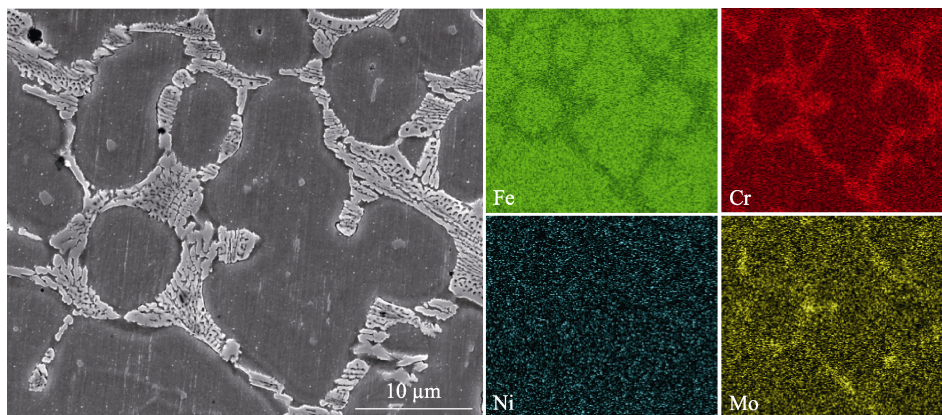


图3 微观组织及 EDS 分析结果
Fig.3 Typical microstructure and related EDS results of cladding layer

严重的应力应变,此时晶间铁素体作为软相可有效缓解马氏体相变带来的高应力,实现了较好的强韧化匹配,因而在优化的工艺条件下,熔覆层并没有产生裂纹^[19]。

2.2 熔覆层电化学腐蚀行为

图 4 为熔覆层与基体的动电位极化曲线,可见 27SiMn 钢基体在两种溶液中阳极均表现为活性溶解的特征,而 FeCrNiMo 熔覆层则具有明显的钝化行为。根据极化曲线得到自腐蚀电位 (E_{corr})、临界点蚀电位 (E_{pit})和维钝电流密度 (J_{pass})等几个腐蚀特征参数,如表 2 所示。在 3.5%NaCl 溶液中,熔覆层的阳极极化曲线表现出明显的自钝化行为^[22],自腐蚀电位为 -140.2 mV,较基体的-720.1 mV 正移了 580 mV,同时该熔覆层的自腐蚀电流密度相比基体 27SiMn 的

$4.4\times10^{-6}\text{ A/cm}^2$ 降低了两个数量级,仅为 $5.0\times10^{-8}\text{ A/cm}^2$,由此可见该 FeCrNiMo 激光熔覆层在中性盐溶液中的耐蚀性大幅优于基体。在 0.5 mol/L H_2SO_4 溶液中,熔覆层也出现了明显的钝化行为,其极化曲线包括典型的活性溶解区、活化-钝化转变区和钝化区^[23]。在钝化区间,钝化电流密度出现了随电压升高而下降的现象,且在 $E=490\text{ mV}$ 处出现了二次钝化,致使其钝化区宽度 (ΔE) 高达 1310 mV,远大于在 NaCl 溶液中的钝化区宽度 ($\Delta E=300\text{ mV}$)。同样,在 H_2SO_4 溶液中,熔覆层的自腐蚀电位为 2.3 mV,比基体正移了近 500 mV,其自腐蚀电流密度也大幅低于基体 27SiMn 的 $9.1\times10^{-3}\text{ A/cm}^2$,仅为 $1.3\times10^{-3}\text{ A/cm}^2$ 。综合来看,FeCrNiMo 激光熔覆层无论在中性的 NaCl 溶液中,还是在酸性的硫酸溶液中,均表现出优异的耐腐蚀性能,能够对基体起到有效的防护作用。

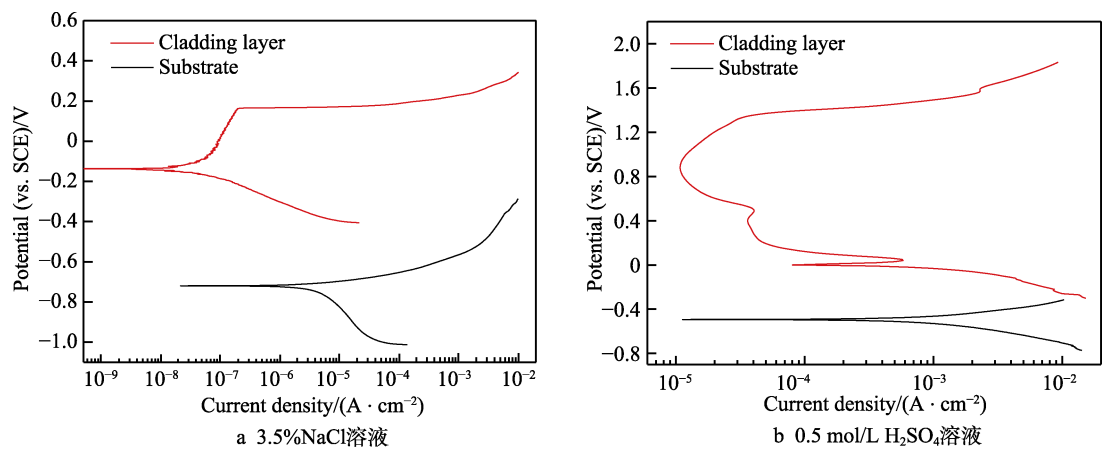


图 4 熔覆层与基体的极化曲线
Fig.4 Potentiodynamic polarization curves of cladding layer and substrate in (a) 3.5wt.% NaCl solution and (b) 0.5 mol/L H_2SO_4 solution

表 2 熔覆层与基体的极化参数
Tab.2 Polarization parameters of cladding layer and substrate

Sample	Electrolyte	$E_{\text{corr}}(\text{vs. SCE})/\text{mV}$	$J_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$E_{\text{pit}}(\text{vs. SCE})/\text{mV}$	$J_{\text{pass}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
Substrate	NaCl	-720.1	4.4×10^{-6}		
	H_2SO_4	-495.9	9.1×10^{-3}		
Cladding layer	NaCl	-140.2	5.0×10^{-8}	165.1	1.1×10^{-5}
	H_2SO_4	2.3	1.3×10^{-3}	1344.5	2.1×10^{-5}

通过对极化曲线测试后样品的表面形貌分析发现,如图 5 所示,熔覆层微区在两种条件下均发生了不同程度的选择性腐蚀。显然,这种选择性腐蚀与熔覆层组织的双相特征直接相关。在同等腐蚀条件下,枝晶内马氏体被优先腐蚀,而晶间铁素体则腐蚀相对较为缓慢,从而形成了类“蜂窝状”的腐蚀形貌特征,尤其在以 Cl^- 诱发点蚀为主的 NaCl 溶液中更为明显。晶间铁素体一方面具有相对较低的 C 含量,另一方面富集了大量的 Cr 元素和较多的 Mo 元素,Mo 能增强钝化膜的稳定性,而 Cr 是决定合金钝化能力的主要元素^[24],两方面综合因素使得晶间铁素体的耐蚀性明显

优于枝晶内马氏体组织,从而造成选择性腐蚀的发生。为进一步分析熔覆层表面的电化学动力学过程,对其进行了阻抗谱(EIS)测试。图 6a、b 分别为试样在中性 NaCl 溶液中的 Nyquist 图和 Bode 图。从 Nyquist 图中可以看出,激光熔覆层和基体均表现出了容抗弧的特征,但激光熔覆层容抗弧的半径要明显大于基体;从 Bode 图上看,熔覆层阻抗谱的低频模值较基体提高了两个数量级,预示着耐腐蚀性能得到了极大提高。熔覆层在中低频段出现了较高的相位角,且其阻抗模值(Z)与频率几乎呈线性关系,结合 Nyquist 曲线来看,这充分表明了其电容特性^[25]。

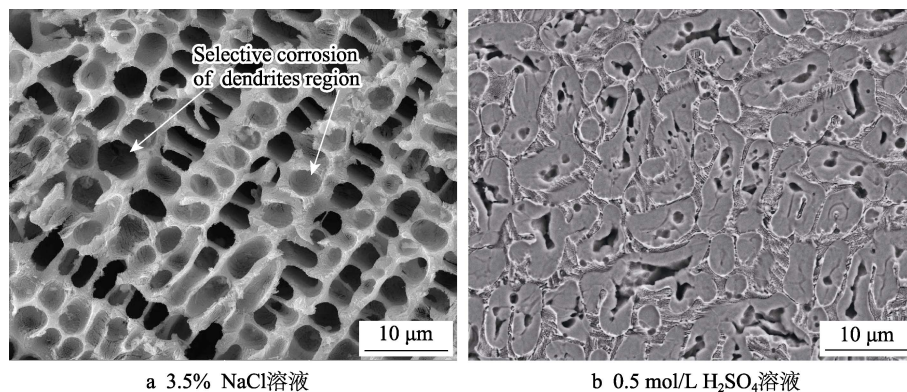


图5 熔覆层极化后的表面形貌

Fig.5 Surface morphologies of cladding layer after potentiodynamic polarization in (a) 3.5wt.% NaCl solution and (b) 0.5 mol/L H_2SO_4 solution

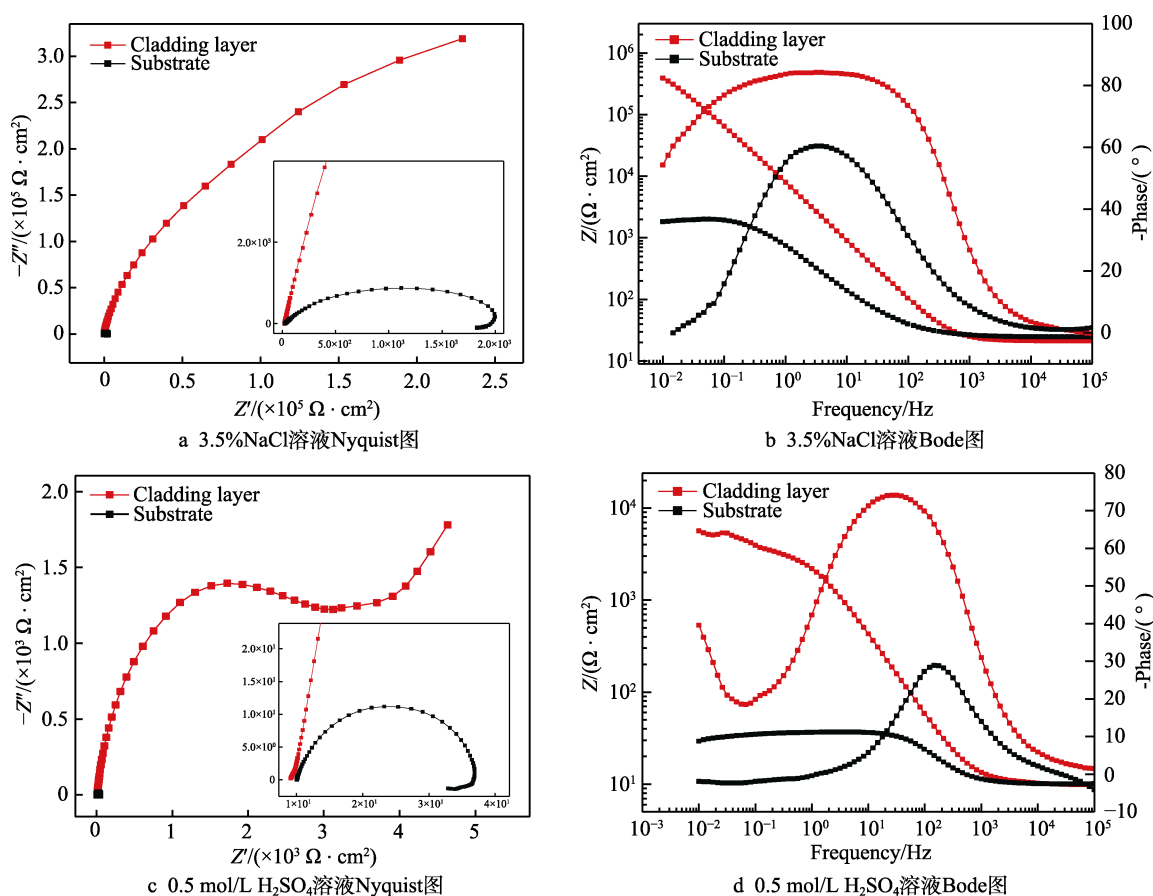


图6 不同介质中的 Nyquist 和 Bode 图

Fig.6 Nyquist and Bode plots of cladding layer and substrate in (a), (b) 3.5wt.% NaCl solution and (c), (d) 0.5 mol/L H_2SO_4 solution

同时,基体的相位角曲线表现出一个峰的特征,结合极化曲线阳极溶解的表现,用图 7a 的等效电路来表征其电化学过程,电路中的 R_s 代表溶液电阻, R_{ct} 代表电荷转移电阻, C_{dl} 代表双电层电容^[26]。

相比而言,激光熔覆层的相位角随频率的变化则呈现出一个宽化峰的特征,结合其阳极极化曲线有明显的自钝化行为,可以用图 7b 的等效电路对其电化学过程进行拟合,其中 R_{pass} 代表熔覆层表面钝化膜电阻, C_{pass} 代表钝化膜电容, R_s 、 R_{ct} 和 C_{dl} 的物理意义

同基体等效电路中的一致。此外,电路中全部的电容均用恒相位角元件(CPE)来替换,以补偿试样表面不均匀性造成的影响^[27]。图 6c、d 分别对应熔覆层和基体样品在 0.5 mol/L H_2SO_4 溶液中的 Nyquist 图和 Bode 图。与电解质为中性的 NaCl 溶液相比,熔覆层在酸性溶液中表现出明显两个容抗弧的特征,低频阻抗模值同样较基体提高了两个数量级,可以说明 FeCrNiMo 激光熔覆层在酸性溶液中同样能对基体提供有效的保护,根据熔覆层极化曲线的特征,同样选

择图 7b 的等效电路对其电化学过程进行了拟合。

表 3 为采用 ZsimpWin 软件拟合得到的相关电化学参数,熔覆层在两种溶液中的钝化膜电阻 R_{pass} 均超过了 10^4 数量级,其电荷转移电阻 R_{ct} 均显著大于基体,这与交流阻抗曲线结果相符。进一步在拟合参数的基础上计算得到熔覆层与基体在两种溶液中的极化电阻 (R_p),列于表 4 中。结果显示,在 NaCl 溶液中熔覆层的 R_p 达到了 $3.5 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$,远高于基体的

2148 $\Omega \cdot \text{cm}^2$,说明熔覆层表面金属离子向电解质溶液中溶解的阻力明显大于基体,这与动电位极化测试所得出的结果相一致。在 H_2SO_4 溶液中,熔覆层的 R_p 为 6261.4 $\Omega \cdot \text{cm}^2$,而基体则仅有 52.5 $\Omega \cdot \text{cm}^2$,说明熔覆层在硫酸中的耐蚀性依然远优于基体。其中,熔覆层中常相位角元件 (CPE) 的 n 值均接近于 1,说明钝化膜及金属/溶液界面十分均匀,该体系接近于纯电容^[28]。

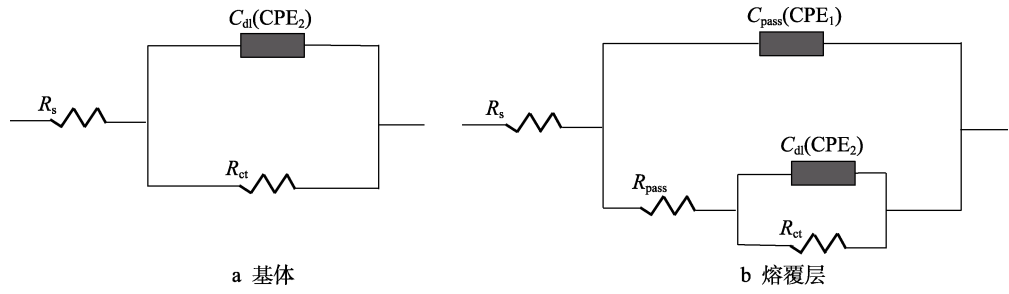


图 7 等效电路
Fig.7 Equivalent circuits of substrate (a) and cladding layer (b)

表 3 熔覆层与基体的电化学阻抗参数
Tab.3 Equivalent circuit parameters for impedance spectra of the cladding layer and substrate

Sample	Model	Electrolyte	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_{\text{pass}}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	C_{pass}		$R_{\text{ct}}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	C_{dl}	
					$Y_0/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	n		$Y_0/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	n
Substrate	$R(QR)$	NaCl	22.32				2148	2.65×10^{-4}	0.8011
		H_2SO_4	9.76				52.5	2.15×10^{-4}	0.8745
Cladding layer	$R(Q(R(QR)))$	NaCl	20.98	7.82×10^5	2.84×10^{-5}	0.9495	6.44×10^5	4.13×10^{-5}	0.9215
		H_2SO_4	10.16	1.42×10^4	2.84×10^{-5}	0.9011	1.12×10^4	4.13×10^{-5}	0.9142

表 4 熔覆层与基体的极化电阻
Tab.4 Polarization resistance of the cladding layer and substrate

Sample	Substrate	Cladding layer
3.5wt% NaCl	2148.0	3.5×10^5
0.5 mol/L H_2SO_4	52.5	6261.4

总之,所设计的 FeCrNiMo 马氏体不锈钢材料在优化后的工艺条件下可以制备出大厚度且无宏观裂纹的激光熔覆层,并具有较为优异的耐腐蚀性能,初步满足了实际工程需求,具有作为液压支架表面防护与高效修复材料进行推广应用的潜力。

3 结论

- 1) 利用激光熔覆技术在 27SiMn 钢表面成功制备了单层厚度达 2 mm 的 FeCrNiMo 熔覆层,所得熔覆层组织致密且无裂纹、气孔等缺陷。熔覆层具有胞状枝晶组织特征,由枝晶内马氏体及晶间富 Cr、Mo 元素的铁素体构成,实现了较好的强韧化匹配。
- 2) 相比于基体的单一活性溶解,熔覆层在 3.5%NaCl 和 0.5 mol/L H_2SO_4 溶液中均钝化明显,且

其自腐蚀电位比基体更高,自腐蚀电流密度相对基体更小。熔覆层双相组织特征导致其微区发生选择性腐蚀,相对贫 Cr 的枝晶内马氏体被优先腐蚀。

3) 熔覆层在 3.5%NaCl 和 0.5 mol/L H_2SO_4 溶液中的 Nyquist 曲线均表现为容抗弧特征,角频率曲线叠加特征证实表面有钝化膜生成。熔覆层在两种溶液中的极化电阻分别为 $3.5 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 和 6261.4 $\Omega \cdot \text{cm}^2$,均显著高于基体,说明其具有较为优异的耐蚀性能。

参考文献:

[1] 王志华. 液压支架立柱的腐蚀机理及其防护[J]. 矿山机械, 2011, 39(9): 16-19.
WANG Zhi-hua. Corrosion mechanism and protection techniques of columns of hydraulic supports[J]. Mining & processing equipment, 2011, 39(9): 16-19.

[2] 卜美兰, 李圣文, 杨荣雪, 等. 耐腐蚀煤矿用液压支架立柱[J]. 煤矿机械, 2012, 33(8): 151-152.
BU Mei-lan, LI Sheng-wen, YANG Rong-xue, et al. Corrosion-resistant hydraulic support column for coal mine[J]. Coal mine machinery, 2012, 33(8): 151-152.

[3] SHAO Q, LI S, LIU LZ, et al. The influence on the corrosion of hydraulic support system of chloride ions in the transmission medium and preventive measures[J]. Procedia

- engineering, 2011, 26: 1214-1219.
- [4] 周克崧. 热喷涂技术替代电镀硬铬的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2004(S1): 182-191.
ZHOU Ke-song. Progress of thermal spray coating of hard Cr instead of plating[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2004(S1): 182-191.
- [5] PICAS J A, PUNSET M, TERESABAILE M, et al. Tribological evaluation of HVOF thermal-spray coatings as a hard chrome replacement[J]. Surface and interface analysis, 2011, 43(10): 1346-1353.
- [6] 刘翔宇. 液压支架立柱的维修及再造技术分析[J]. 机电工程技术, 2019, 48(12): 236-238.
LIU Xiang-yu. Analysis on the maintenance and reconstruction technology of the column of hydraulic support[J]. Mechanical & electrical engineering technology, 2019, 48(12): 236-238.
- [7] 田洪芳, 杜学芸, 郎坤, 等. 激光熔覆 FeNiCrBSi 系列多组元合金粉末的液压支架立柱[J]. 热喷涂技术, 2019, 11(4): 66-71.
TIAN Hong-fang, DU Xue-yun, LANG Kun, et al. Hydraulic support column coated with multi-component alloy powder of FeNiCrBSi series by laser cladding[J]. Thermal spray technology, 2019, 11(4): 66-71.
- [8] 邵延凡, 王泽华, 李潇, 等. 双相不锈钢表面激光熔覆钴基合金组织和性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 299-305.
SHAO Yan-fan, WANG Ze-hua, LI Xiao, et al. Microstructure and properties of laser cladding Co-based alloys on duplex stainless steel[J]. Surface technology, 2020, 49(4): 299-305.
- [9] GUILMANY, ESPALLARGAS N, SUEGAMA P H, et al. Comparative study of Cr_3C_2 -NiCr coatings obtained by HVOF and hard chromium coatings[J]. Corrosion science, 2006, 48(10): 2998-3013.
- [10] 谢恩雨, 赵耀, 姜力鹏, 等. FeNiCoTiNb 低膨胀激光熔覆涂层的组织特征及摩擦学行为[J]. 表面技术, 2019, 48(8): 206-211.
XIE En-yu, ZHAO Yao, JIANG Li-peng, et al. Microstructure characteristics and tribological behaviour of low thermal expansion FeNiCoTiNb coating by laser cladding [J]. Surface technology, 2019, 48(8): 206-211.
- [11] 解文正, 李春强, 杨志伟, 等. 激光熔覆技术在液压支架上的应用研究[J]. 煤矿机械, 2010, 31(10): 106-108.
XIE Wen-zheng, LI Cun-qiang, YANG Zhi-wei, et al. Application of laser cladding technology in hydraulic supports[J]. Coal mine machinery, 2010, 31(10): 106-108.
- [12] 靳鸣, 贺定勇, 王曾洁, 等. 激光熔覆 2205 双相不锈钢/TiC 复合涂层的显微组织与性能[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 291-296.
JIN Ming, HE Ding-yong, WANG Zeng-jie, et al. Microstructure and properties of laser clad 2205 dual-phase stainless steel/TiC composite coatings[J]. Laser and optoelectronics progress, 2018, 55(11): 291-296.
- [13] 韩文静, 张培训, 汤其建, 等. 单体液压支柱缸体激光熔覆 Ni60A+20%WC 性能[J]. 煤炭学报, 2012, 37(2): 340-343.
HAN Wen-jing, ZHANG Pei-xun, TANG Qi-jian, et al. Performance of laser cladding Ni60A+20% WC on cylinder block of single hydraulic support[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2): 340-343.
- [14] MAJUMDAR J D, PINKERTON, LIU Z, et al. Mechanical and electrochemical properties of multiple-layer diode laser cladding of 316L stainless steel[J]. Applied surface science, 2005, 247(1): 373-377.
- [15] ROOYEN C V. Microstructural development during laser cladding of low-C martensitic stainless steel[J]. Welding in the world, 2008, 52(3-4): 22-29.
- [16] ZHANG Z, FARAHMAND P, KOVACEVIC R. Laser cladding of 420 stainless steel with molybdenum on mild steel A36 by a high power direct diode laser[J]. Materials & design, 2016, 109(5): 686-699.
- [17] HEMMATI I, OCELIK V, De HOSSONJ T M, et al. The effect of cladding speed on phase constitution and properties of AISI431 martensite stainless steel laser deposited coatings[J]. Surface & coatings technology, 2011, 205(21-22): 5235-5239.
- [18] KHOBRAGADE N N, KHAN M I, PATIL A P. Corrosion behaviour of chrome-manganese austenitic stainless steels and AISI 304 stainless steel in chloride environment[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2014, 67(2): 263-273.
- [19] SANDVIK B P J, MARTIKAINEN N H O, LINDROOS V K. The crystallography and microstructure of lath martensite formed in type 301 stainless steel[J]. Scripta metallurgica, 1984, 18(1): 81-86.
- [20] GHOSH S K, MALLICK P, CHATTOPADHYAY P P. Effect of reversion of strain induced martensite on microstructure and mechanical properties in austenitic stainless steel[J]. Journal of materials science, 2011, 46(10): 3480-3487.
- [21] LIU Y, LI A, CHENG X, et al. Effects of heat treatment on microstructure and tensile properties of laser melting deposited AISI431 stainless steel[J]. Materials science & engineering: A, 2016, 666: 27-33.
- [22] CHEN Y Y, DUVAL T, HUNG U D, et al. Microstructure and electrochemical properties of high entropy alloys—A comparison with type-304 stainless steel[J]. Corrosion science, 2005, 47(9): 2257-2279.
- [23] STOYCHE V D, STEFANO V P, NICOLOV A D, et al. Chemical composition and corrosion resistance of passive chromate films formed on stainless steels 316L and 1.4301 [J]. Materials chemistry & physics, 2002, 73(2-3): 252-258.
- [24] HERMAS A A, MORAD M. A comparative study on the corrosion behaviour of 304 austenitic stainless steel in sulfamic and sulfuric acid solutions[J]. Corrosion science, 2008, 50(9): 2710-2717.
- [25] ROVERE C A D, ALANO J H, SILVA R, et al. Characterization of passive films on shape memory stainless steels[J]. Corrosion science, 2012, 57(4): 154-161.
- [26] SHI Y Z, COLLINS L, BALKE N, et al. In-situ electrochemical-AFM study of localized corrosion of $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ high-entropy alloys in chloride solution[J]. Applied surface science, 2018, 439(5): 533-544.
- [27] OLASEINDEO A. Comparative study of the effect of temperature on the corrosion behaviour of 2205 duplex stainless steel and 316 austenitic stainless steel in acidic chloride environment[J]. Advances in materials physics and chemistry, 2015, 5(5): 185-190.
- [28] PISTORIUS P C, BURSTEING T. Metastable pitting corrosion of stainless steel and the transition to stability[J]. Transactions of the Royal Society of London. Series A: Physical and engineering sciences, 1992, 341(1662): 531-559.