

TiC-Ti(CN)颗粒增强铁基熔覆层组织及性能研究

刘兴亚¹ 廉洁¹ 王登峰¹ 张锁¹ 王超俊¹ 黎文强^{2,3} 王坦²

(1. 河南开放大学机电工程与智能制造学院, 郑州 450008; 2. 郑州大学材料科学与工程学院, 郑州 450001; 3. 河南省煤科院耐磨技术有限公司, 郑州 450001)

摘要 以TiC和铁基合金粉为熔覆材料, N₂作为保护气体和反应气体, 采用等离子熔覆技术在Q235合金表面成功制备出TiC-Ti(CN)颗粒增强的铁基复合熔覆层。通过X射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、显微硬度计、摩擦磨损试验机及电化学工作站等手段系统研究了TiC对铁基熔覆层的相组成、微观结构、硬度、耐磨性和耐腐蚀性能的影响。结果表明, 复合熔覆层主要由 α -Fe(Cr)、Fe₃C、Cr₂₃C₆、TiC及Ti(CN)等相组成。随着TiC含量增加, 熔覆层中TiC、Cr₂₃C₆及Ti(CN)的相对含量也逐渐增加, 且颗粒尺寸逐渐增大。熔覆层截面形貌显示, 复合熔覆层与基体之间存在熔合区, 表明形成了良好的冶金结合, TiC和Ti(CN)以颗粒形式弥散分布于熔覆层中。随着TiC含量增加, 复合熔覆层的硬度、耐磨性和耐腐蚀性能均显著提升。

关键词 等离子熔覆层; 颗粒增强; 碳化钛; 耐腐蚀性能; 耐磨性

中图分类号 TG292; TB331

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240399

Structure and Properties of TiC-Ti(CN) Particle Reinforced Fe-based Cladding Layer

LIU Xingya¹, LIAN Jie¹, WANG Dengfeng¹, ZHANG Suo¹, WANG Chaojun¹, LI Wenqiang^{2,3}, WANG Tan²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering & Intelligent Manufacturing, Henan Open University, Zhengzhou 450008; 2. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001; 3. Henan Coal Science Academy Wear-resistant Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450001)

Abstract: Plasma cladding technology was employed to successfully fabricate TiC-Ti(CN) particle-reinforced Fe-based compound cladding layer on the surface of Q235 alloy with TiC and Fe-based powders as cladding materials and nitrogen gas as protective and reactive atmosphere. The influence of TiC on phase composition, microstructure, hardness, wear resistance, and corrosion resistance of Fe-based cladding layer was systematically investigated using X-ray diffraction, scanning electron microscopy, microhardness testing, friction and wear testing, and electrochemical analysis. The results demonstrate that the compound cladding layer consists of α -Fe(Cr), Fe₃C, Cr₂₃C₆, TiC, and Ti(CN) phases. With TiC content increasing, the relative proportions of TiC, Cr₂₃C₆, and Ti(CN) in the cladding layer are significantly enhanced, along with a gradual enlargement of particle size. Cross-sectional images reveal a fusion zone between cladding layer and substrate, indicating robust metallurgical bonding, and TiC and Ti(CN) particles are dispersively distributed throughout the matrix. The hardness, wear resistance, and corrosion resistance of cladding layer are significantly enhanced with TiC content increasing.

Key Words: Plasma Cladding, Particle-reinforce, TiC, Corrosion Resistance, Wear Resistance

收稿日期: 2024-09-29; 修订日期: 2024-12-27

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52101203); 河南开放大学博士科研启动基金资助项目(BSJH-2024-08); 河南省科技攻关资助项目(242102110333); 河南省科技攻关资助项目(252102210040)

第一作者简介: 刘兴亚, 男, 1991年出生, 讲师, E-mail: liuxingya@haou.edu.cn

通信作者: 张锁, 男, 1987年出生, 博士, E-mail: zhangsuo@haou.edu.cn

引用格式: 刘兴亚, 廉洁, 王登峰, 等. TiC-Ti(CN)颗粒增强铁基熔覆层组织及性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(10): 1586-1591.

LIU X Y, LIAN J, WANG D F, et al. Structure and properties of TiC-Ti(CN) particle reinforced Fe-based cladding layer[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(10): 1586-1591.

- [15] LIU Y, ZHAO H Y, PENG Y, et al. Microstructure characterization and mechanical properties of the continuous-drive axial friction welded aluminum/stainless steel joint[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(9-12): 4399-4408.
- [16] 张丽娜, 赵衍华, 张田仓, 等. 2219铝合金与不锈钢惯性摩擦焊接接头组织与力学性能[J]. 电焊机, 2017, 47(11): 100-105.
- [17] 潘春旭, 胡伦骥. 铝基复合材料-不锈钢摩擦焊焊接接头显微组织的电镜研究[J]. 中国机械工程, 1996, 7(6): 98-100.

- [18] 张昌青, 崔国胜, 陈波阳, 等. Zn中间层对大直径铝/钢连续驱动摩擦焊摩擦扭矩及接头界面微观组织的影响[J]. 材料导报, 2023, 37(20): 151-155.
- [19] 李镇, 石岩, 刘佳, 等. 镀镍层对铝/钢异种金属激光焊接质量的影响[J]. 应用激光, 2016, 36(3): 316-320.
- [20] 张昌青, 王维杰, 刘雄波, 等. 铝/钢连续驱动摩擦焊接头力学性能及金属间化合物形态特征[J]. 材料导报, 2019, 33(16): 2740-2745.

(编辑: 彭瑾)

等离子熔覆技术能够赋予金属零部件表面特殊的理化和力学性能,显著延长其使用寿命,并且能够对废旧零部件进行修复及再制造,展现出广阔的应用前景^[1-3]。陶瓷相增强的复合熔覆层不仅继承熔覆层基体的塑韧性,还表现出陶瓷相的高硬度和高耐磨性^[4-5]。陶瓷增强相在熔覆层中的引入方式主要有外加法和原位生成法。外加法是通过在熔覆材料中加入陶瓷相或将陶瓷相直接注入等离子弧形成的熔池中^[6];原位生成法是利用熔覆材料中元素或化合物在等离子弧高温下进行化学、冶金反应,原位生成陶瓷增强相^[7]。在众多陶瓷增强相(如氧化物、碳化物、氮化物或硼化物等)中,TiC和TiN因其优异特性而受广泛关注。TiC具有良好的高温润湿性、易合成和高硬度等特点,通常以颗粒形式弥散分布于熔覆层中,提高涂层的力学性能^[8-13]。TiN则以其化学稳定性好、熔点高、硬度高、良好的耐蚀性和低摩擦因数等特点,被广泛用作保护性膜层及复合材料中的增强相^[14-15]。Ti(CN)是通过将TiC点阵中的部分C原子替换为N原子而形成的TiC和TiN的固溶体,兼具良好的韧性、抗氧化性、耐磨性、化学稳定性和自润滑性能,因此受到广泛关注^[16-21]。王志新等^[9]采用外加法在Q235合金表面制备出TiC/Fe基等离子熔覆层,发现由于TiC的细晶强化和弥散强化作用,当TiC的添加量为15%时,复合熔覆层的最高显微硬度值(HV_{0.5})达到了692,远高于Q235合金和不含TiC的熔覆层。JIANG W H等^[11]利用激光熔覆技术,在AISI4140钢基体上制备出TiC增强的铁基复合熔覆层,显著提高了熔覆层的耐蚀性能。在304不锈钢表面改性过程中,通过在熔覆时添加Cr₃C₂和Ti粉末,能够使熔覆层在枝晶内部原位生成TiC颗粒^[21]。LIU Z C等^[22]研究不同含量的TiC在CoCrFeNiMo涂层中的形态,发现添加5%~20%的TiC粉末时,涂层中形成的TiC颗粒形状逐渐从小尺寸块状逐渐向大尺寸枝晶与块状混合的形状转变。该熔覆层中的TiC颗粒主要分布在晶界处,随着TiC含量增加,颗粒逐渐粘附、长大并扩展,最终发生粘连。通常,TiC颗粒尺寸随其质量分数增加而显著增大,这是由于TiC含量的增加会导致更多Ti和C参与放热反应,释放热量增加,促进颗粒尺寸增大^[17]。此外,熔覆粉末中添加TiC颗粒可以有效细化涂层中的晶粒,促进晶粒由柱状向等轴状转变,抑制涂层中裂纹的产生^[16]。

Q235合金因其卓越的力学性能、优良的焊接性以及低成本,已作为工程材料被广泛应用。然而,Q235合金成分中缺少足量的合金元素来增强其耐腐蚀和耐磨损性能,制作的工程构件易发生腐蚀和磨损,使其在实际应用中存在一些局限性。作为一种高效的金属表面

改性方法,等离子熔覆技术已在多个工业领域得到了广泛应用。经过等离子熔覆后的Q235合金,其耐腐蚀性能和耐磨性能得到显著提升,可以满足煤炭开采和海洋开发等高腐蚀性环境中的长期服役要求。然而,目前关于采用等离子熔覆方法在Q235合金熔覆层原位形成的Ti(CN)过程尚未明晰,特别是和其对涂层性能的影响机理待进一步研究。本研究以TiC和铁基合金粉末为熔覆材料,N₂为保护和反应气体,在Q235合金上制备TiC和Ti(CN)颗粒增强的铁基复合熔覆层。采用XRD、SEM、硬度计、摩擦磨损试验机 and 电化学工作站等设备,系统研究TiC含量对熔覆层相组成、微观结构、硬度、耐磨性和耐腐蚀性能的影响,旨在为合金耐磨性能的提高提供参考。

1 试验材料与方法

熔覆基体为Q235合金,尺寸为200 mm×50 mm×10 mm。熔覆前对Q235合金表面进行除油和除锈预处理。熔覆粉末由Fe基自熔合金粉末(化学成分见表1)与不同质量分数的TiC粉末混合而成,其中TiC粉末质量分数为0、3%、6%和10%,分别标记为1~4号。所用Fe基自熔合金牌号为Fe310,粒度范围为140~320目。TiC粉末纯度为99.5%(质量分数),平均粒径为2~3 μm。

表1 铁基合金粉Fe310的化学成分

Tab.1 Chemical composition of Fe310 alloy power %				
w_B				
Cr	C	B	Si	Fe
15	0.1	1	1	余量

熔覆前使用水玻璃作为黏结剂,将混合均匀的合金粉末涂抹至Q235合金表面形成预置层,涂抹厚度为2~3 mm。预置层自然晾干24 h后,在100 ℃下烘烤1 h,然后在150 ℃下烘烤1 h。采用IGS600等离子熔覆设备将预置于表面的合金粉末与Q235合金同时熔化,制备铁基复合熔覆层。工艺参数:电压为80 V,电流为250 A,氮气流量为6 L/min。采用D8 Advance X射线衍射仪(XRD)分析熔覆层的相结构,X射线波长为0.154 nm,工作电压为45 kV,工作电流为40 mA,扫描模式为连续扫描,扫描范围为20°~100°,步长为0.013°,扫描速率为6 (°)/min。使用配备能谱仪(EDS, LINK ISIS)的扫描电镜(SEM, Quanta 2000)表征熔覆层的微观组织和成分。SEM试样经过多道次砂纸打磨处理后进行机械抛光,直至表面无明显划痕,然后进行抛光。采用MVD-1000JMT2显微硬度计测试熔覆层的硬度,载荷为5 N,加载时间为10 s,从涂层表面到基体间隔

400 μm 连续取点,每个位置平行于熔覆层测量5次并取平均值。在M-2000摩擦磨损试验机上进行耐磨性测试,采用环块接触法,对磨环件为YG8硬质合金,载荷为600 N,转速为400 r/min。使用CHI660E电化学工作站,在质量分数为3.5%的NaCl溶液中测试试样的电化学性能。试样表面经抛光处理,确保无划痕,并使用导电胶、铜片和速溶胶封装,采用三电极体系进行测量,工作电极为熔覆层表面,暴露面积为1 cm^2 ,其余部分采用硅橡胶密封,辅助电极为铂电极,参比电极为饱和甘汞电极。

2 试验结果与分析

2.1 增强相的形成

图1为不同TiC含量的熔覆层的X射线衍射图谱。可以看出,1号熔覆层主要由 α -Fe和Cr相组成,加入不同含量的TiC后形成的熔覆层主要组成相为: α -Fe、Cr、 Fe_3C 、 Cr_{23}C_6 、TiC和Ti(CN)。 Q235 合金和

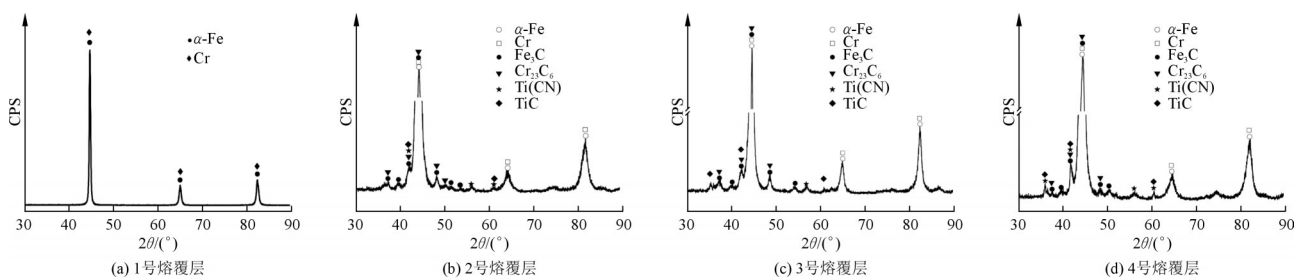


图1 添加不同含量TiC的熔覆层的XRD图谱

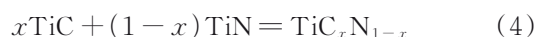
Fig.1 XRD patterns of cladding layers with different TiC contents

2.2 增强相的分布

图2为1号和2号的熔覆层与Q235合金熔合区的SEM图像。熔覆层与Q235合金熔合区的组织特征是由凝固过程中较大的过冷度和快速变化的温度场共同作用^[25]。试样熔覆层均存在3个区域:熔覆层、熔合区和基体。熔合区的存在说明熔覆层与基体达到良好的冶金结合。熔覆层中未呈现出明显的孔洞和裂纹,熔池和Q235合金的结合界面处可观察到清晰的白亮带,这是由于在熔覆过程中表层基体发生熔化,等离子弧扫过之后,熔池凝固时此区域的过冷最大,温度梯度(G)最大,凝固速度(R)最小,趋近于0, G/R 的值最大,瞬间有大量的晶核形成,并且向熔池内部不同方向生长。由于晶核数量多,彼此快速接触,生长受到抑制,形成一层由细小等轴晶区组成的区域^[25]。随着凝固结晶过程的进行,细晶区散热的同时也有结晶潜热产生,熔池内的温度梯度变得平缓(G 减小, R 增大, G/R 逐渐减小),开始形成柱状晶和树枝晶。

图3为3号熔覆层的SEM图像和EDS图谱。从图

熔覆材料在高温形成熔池,原有化合物的结构遭到破坏,各组成元素间发生了新的反应,形成新的化合物。与1号熔覆层相比,2~4号熔覆层中除TiC的衍射峰,还有 Fe_3C 、 Cr_{23}C_6 以及Ti(CN)的衍射峰。这是由于熔覆过程中一部分TiC在等离子弧的高温作用下分解为Ti和C,C分别和铁基粉末中的Fe、Cr发生反应生成 Fe_3C 、 Cr_{23}C_6 ^[23]。合金熔体中大量的过饱和TiC会发生分解,氮气和Cr发生反应,最终生成Ti(CN)和 Cr_{23}C_6 等物相。熔覆层中Ti(CN)和 Cr_{23}C_6 原位形成过程如下:



在高温熔池环境中,最新的研究结果证明反应(1)的存在,同时证实了反应(2)和反应(3)也能顺利进行^[10,23-24]。此外,由于TiC和TiN具有相似的晶体结构,熔池中的TiC和TiN也易发生固溶反应(4),形成Ti(CN)。

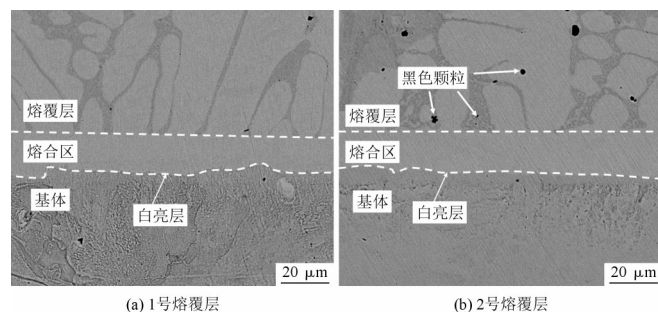


图2 1号和2号熔覆层熔合区的SEM图像

Fig.2 SEM images of fusion zone in cladding layer 1 and 2

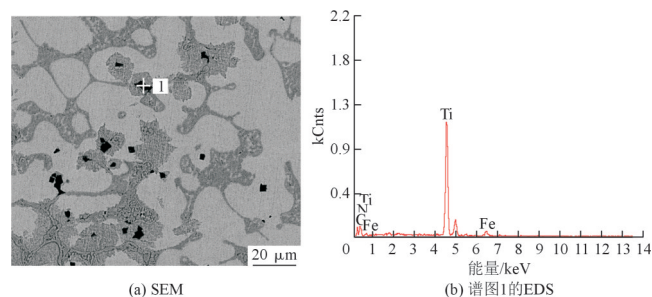


图3 3号熔覆层的SEM图像和EDS图谱

Fig.3 SEM images and EDS results of cladding layer 3

3a可以看出,熔覆层内部呈现出组织均匀且致密的树枝晶结构。此外,在熔覆层中观察到离散分布的黑色颗粒,其粒径范围为 $1\sim 4\ \mu\text{m}$ 。在图2b中观察到一些黑色颗粒,EDS分析表明其主要成分为Ti、C和N。结合图2和图3b可知,TiC颗粒在熔覆过程中与保护气体 N_2 发生反应,原位形成了Ti(CN)颗粒相,并弥散分布在熔覆层中。

图4为不同TiC含量熔覆层内部显微组织的

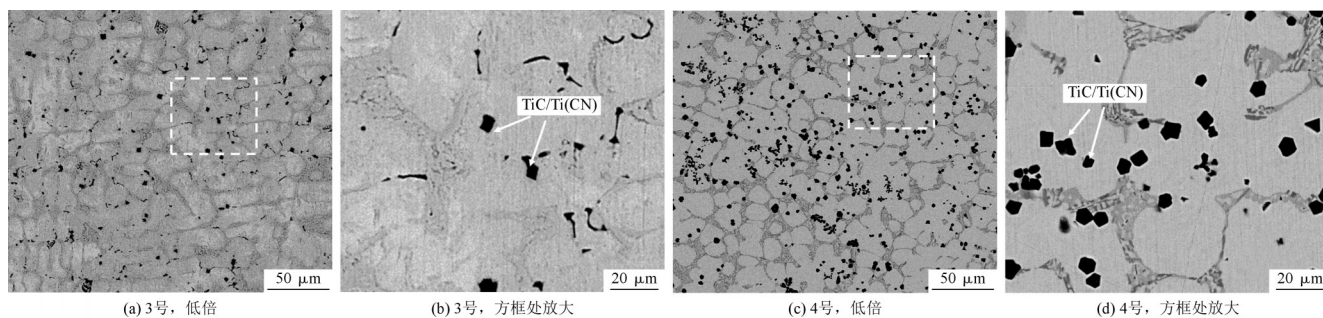


图4 3号和4号熔覆层内部显微组织的SEM图像

Fig.4 SEM images of internal structure of cladding layer 3 and 4

2.3 增强相对熔覆层性能的影响

2.3.1 显微硬度

图5为不同熔覆层截面由外向内的显微硬度值。可以看出,1号熔覆层的最高硬度($\text{HV}_{0.5}$)约为340,4号熔覆层的最高硬度($\text{HV}_{0.5}$)为1603。这说明随着TiC加入量的增加,熔覆层中TiC、Ti(CN)、 Cr_{23}C_6 和 Fe_3C 等硬质相的含量增加,熔覆层通过硬质相的弥散强化和细晶强化机制的共同作用增加其硬度。同时,由于TiC的增加,熔覆过程中TiC分解产生的C在熔池中的浓度也相应增加,熔覆层中的部分铁素体开始向低碳马氏体甚至高碳马氏体转变,这也导致复合熔覆层的硬度进一步升高。此外,熔覆层层由于部分灼烧的原因,导致硬质相的生成量减少,表层硬度略低于熔覆层内部。熔覆结束后,熔池快速冷却,先形成的高熔点TiC-Ti(CN)颗粒起到形核质点的作用,增加液相中形

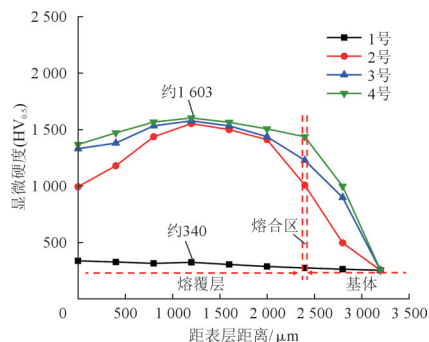


图5 不同TiC含量熔覆层的显微硬度

Fig.5 Microhardness of cladding layers with different TiC contents

SEM图像。可以看出,3号和4号熔覆层存在大量弥散分布的TiC-Ti(CN)颗粒(图4中黑色物相),随着熔覆层中TiC含量增加,TiC-Ti(CN)颗粒的数量和尺寸均增加。3号熔覆层中TiC-Ti(CN)颗粒粒径约为 $6\ \mu\text{m}$,4号涂覆层中的TiC-Ti(CN)颗粒粒径可达 $10\ \mu\text{m}$ 。这说明随着TiC添加量增加,熔覆层内的TiC和Ti(CN)颗粒数量增多,且尺寸逐渐增大。

核率的同时阻碍枝晶的长大,从而起到细化晶粒的作用。熔覆层晶粒尺寸减小能够增加熔覆层的强度,使熔覆层呈现出良好的综合力学性能。因此,随着合金粉末中TiC含量的增加,熔覆层的硬度也相应增加。

2.3.2 耐磨性

图6为不同熔覆层的磨损质量损失。可以看出,随摩擦转数增加,熔覆的质量损失均相应增加,尤其是1号熔覆层的质量损失随着转速的增加最明显。而添加不同含量TiC的熔覆层耐磨性都得到很大的改善。采用相对耐磨性 ϵ 评价:

$$\epsilon = \frac{\Delta W_s}{\Delta W_c} \quad (5)$$

式中, ΔW_s 为熔覆层的磨损质量损失; ΔW_c 为复合熔覆层的磨损质量损失。2~4号熔覆层的耐磨性相对1号熔覆层分别为3.8、4.7和5.6,说明4号熔覆层的耐磨性最好。熔覆层的耐磨性与其相组成和组织有关,随着TiC含量增加,熔覆层的硬度提高。通常,随着摩擦面表面硬度的增加,耐磨性会提高。磨损时熔覆层中的TiC、Ti(CN)、 Fe_3C 和 Cr_{23}C_6 等硬质增强相起到耐磨骨架的作用,避免了熔覆层与YG8对磨环的直接接触,对熔覆层起到一定的保护作用,从而使磨损质量损失减小^[26]。另外,熔覆层中原位产生的Ti(CN)不仅硬度高,而且具有良好的减磨、自润滑作用,起到进一步降低磨损质量损失的作用。随着熔覆材料中TiC含量的增加,熔覆层中硬质相作为耐磨骨架的支撑作用也相应增强,从而使复合熔覆层的耐磨性提高,因此4号熔

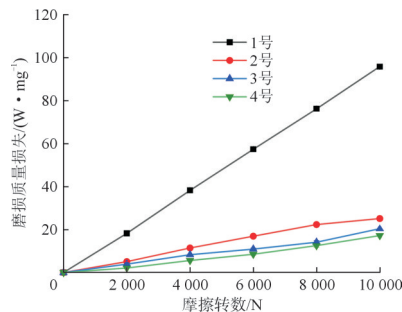


图6 不同TiC含量熔覆层的磨损质量损失随转数的变化
Fig.6 Weight loss variation of cladding layers with different TiC contents

覆层的耐磨性最佳。

2.3.3 耐腐蚀性

图7为不同熔覆层在NaCl溶液中的Tafel曲线,表2为对应曲线的腐蚀电流密度和腐蚀电位。由表2可知,1号熔覆层的腐蚀电位(E)和电流密度(J)分别为 -0.848 V 和 $1.89\times 10^{-5}\text{ A/cm}^2$ 。随TiC添加量增加,4号熔覆层的腐蚀电位增加至 -0.601 V ,腐蚀电流降低至 $9.35\times 10^{-7}\text{ A/cm}^2$ 。高腐蚀电位和低腐蚀电流预示着在腐蚀过程中,涂层呈现出高的耐腐蚀性能^[28],即随TiC含量增多,熔覆层的耐蚀性提高,4号熔覆层具有更好的耐腐蚀性。这是由于TiC、Ti(CN)、 Fe_3C 和 Cr_{23}C_6 等化合物具有良好的耐腐蚀性能,能够作为熔覆层的保护层^[28-30]。并且熔覆层中TiC、Ti(CN)等化合物含量的增加使 $\alpha\text{-Fe}$ 阳极区的相对面积减小,在腐蚀机制不发生改变的同时使腐蚀电流减小、电位增加,让熔覆层具有更好的耐腐蚀性^[30-31]。因此,含有TiC的熔覆层具有优异的耐腐蚀性能。

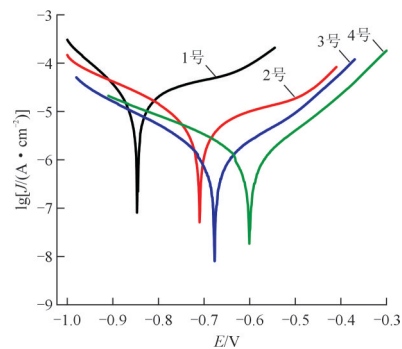


图7 不同TiC含量的熔覆层的Tafel曲线
Fig.7 Tafel curves of cladding layers with different TiC contents

表2 图7中的Tafel曲线的特征值

熔层	E/V	$J/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
1	-0.848	1.89×10^{-5}
2	-0.710	5.27×10^{-6}
3	-0.677	1.07×10^{-6}
4	-0.601	9.35×10^{-7}

3 结 论

(1)采用等离子熔覆技术,通过高温下TiC分解产生的Ti、C与N之间的化学反应,成功制备出由 $\alpha\text{-Fe}$ 、Cr、TiC、Ti(CN)、 Fe_3C 和 Cr_{23}C_6 等相组成的熔覆层。该熔覆层组织均匀致密,无气孔及其他明显缺陷,并且与Q235合金表现出良好的冶金结合性能。

(2)在熔覆过程中,TiC和原位生成的Ti(CN)颗粒均匀弥散于熔覆层中。增加熔覆材料中TiC的含量能够显著提升熔覆层中TiC、Ti(CN)、 Fe_3C 和 Cr_{23}C_6 相的含量。由于析出相具有高硬度和高耐磨性,添加有TiC的熔覆层呈现出优良的力学性能。当TiC添加量达到10%时,熔覆层的最高硬度($\text{HV}_{0.5}$)为1 603,是未添加TiC熔覆层硬度的4.7倍;同时,其相对耐磨性也达到未添加TiC熔覆层的5.6倍。

(3)TiC的添加能够提高熔覆层的耐腐蚀性能,特别是在TiC添加量为10%时,熔覆层的耐腐蚀性能显著增加。

参 考 文 献

[1] LIANG Y, LIAO Z Y, ZHANG L L, et al. A review on coatings deposited by extreme high-speed laser cladding: Processes, materials, and properties[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 164: 109 472.

[2] ZHOU L, MA G Z, ZHAO H C, et al. Research status and prospect of extreme high-speed laser cladding technology[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 168: 109 800.

[3] LIAN G F, GAO W B, CHEN C R, et al. Review on hard particle reinforced laser cladding high-entropy alloy coatings[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 1 366-1 405.

[4] 王智慧,赵雪飞,贺定勇,等. 等离子熔覆超细碳化钨颗粒增强铁基复合材料中碳化物尺寸的控制[J]. 焊接学报, 2014, 35(4): 29-32.

[5] 宗琳,郭宁,张小玲. 原位合成(Ti,V)C增强铁基耐磨复合材料的研制[J]. 焊接学报, 2017, 38(8): 10-14.

[6] 严大考,张洁溪,唐明奇,等. 等离子熔覆技术的研究进展[J]. 热加工工艺, 2015, 44(4): 19-24.

[7] MENG Q J, WANG C M, LIU T T, et al. Microstructure and performance optimization of laser cladding nano-TiC modified nickel-based alloy coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 479: 130 583.

[8] LIU Y Z, CHAI L J, YANG T, et al. Pulsed laser cladding on IN718 alloy using pre-coated CrCoNi-TiC/SiC powders for enhancing wear resistance[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 476: 130 253.

[9] 王志新,杨卫铁,方伟,等. Q235钢表面熔覆Fe基金属+TiC复合涂层组织和性能的研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(2): 50-52.

[10] LI J C, CHEN Y, GUAN C, et al. Microstructure and wear resistance of in situ synthesized Ti(C, N) ceramic-reinforced nickel-based coatings by laser cladding[J]. Materials, 2024, 17(15): 3 878.

- [11] JIANG W H, KOVACEVIC R. Laser deposited TiC/H13 tool steel composite coating sand their erosion resistance[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 186(1):331-338.
- [12] 王伟志,马国政,韩珩,等. 激光熔覆陶瓷涂层研究现状与展望[J]. 机械工程学报, 2023, 59(7): 92-109.
- [13] WANG X H, PAN X N, DU B S, et al. Production of in situ TiB₂+TiC/Fe composite coating from precursor containing B₄C-TiO₂-Al powders by laser cladding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(6):1 689-1 693.
- [14] LI M, HUANG J, ZHU Y Y, et al. Effect of heat input on the microstructure of in-situ synthesized TiN-TiB/Ti based composite coating by laser cladding [J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(19/20):4 021-4 026.
- [15] FENG Z Q, TANG M Q, LIU Y Q, et al. In situ synthesis of TiC-TiN-reinforced Fe-base plasma cladding coatings[J]. Surface Engineering, 2018, 34(4): 309-315.
- [16] YUAN Q, CHAI L J, YANG T, et al. Laser-clad FeCrAl/TiC composite coating on ferrite/martensitic steel: Significant grain refinement and wear resistance enhancement induced by adding TiC [J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 456: 129 272.
- [17] MI P B, HE J N, QIN Y F, et al. Nanostructure reactive plasma sprayed TiCN coating[J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 309: 1-5.
- [18] QIN Y F, ZHENG G F, ZHU L Y, et al. Structure and wear characteristics of TiCN nanocomposite coatings fabricated by reactive plasma spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 342: 137-145.
- [19] LI Y T, FU H G, MA T J, et al. Microstructure and wear resistance of AlCoCrFeNi-WC/TiC composite coating by laser cladding [J]. Materials Characterization, 2022, 194: 112 479.
- [20] 项燕雄,王泽松,刘贵昂,等. 304 不锈钢表面单层/多层 TiN 基涂层制备及耐磨蚀性能研究[J]. 表面技术, 2022, 51(5): 121-128.
- [21] ZHANG H F, WANG L, ZHANG S, et al. Design, fabrication, microstructure and properties of in-situ synthesized TiC reinforced stainless steel matrix composite coating by laser cladding[J]. Materials Characterization, 2023, 204: 113 177.
- [22] LIU Z C, KONG D J. Effects of TiC mass fraction on microstructure, corrosive-wear and electrochemical properties of laser clad CoCrFeNiMo high-entropy alloy coatings [J]. Tribology International, 2023, 186: 108 640.
- [23] ZHAI W G, ZHOU W, YU Y, et al. Direct evidence of melting and decomposition of TiC particles in laser powder bed fusion processed 316L-TiC composite [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 198: 166-175.
- [24] KISHIDA K, ITO M, INUI H, et al. On the inherent strength of Cr₂₃C₆ with the complex face-centered cubic D84 structure[J]. Acta Materialia, 2024, 263: 119 518.
- [25] 胡汉起. 金属凝固原理[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [26] 王永东,刘兴,郑光海,等. 氩弧熔覆原位自生 TiC-TiB 增强铁基复合涂层组织与性能[J]. 焊接学报, 2015, 36(8): 67-70.
- [27] ZHANG M D, SHI X L, LI Z Y, et al., Corrosion behaviors and mechanism of CrFeNi₂ based high-entropy alloys[J]. Corrosion Science, 2022 207: 110 562.
- [28] LI Y T, WANG K M, FU H G, et al. Microstructure and wear resistance of in-situ TiC reinforced AlCoCrFeNi-based coatings by laser cladding[J]. Applied Surface Science, 2022, 585: 152 703.
- [29] LI J L, XU Z L, LI Y J, et al. Intergranular passivation of the TiC coating for enhancing corrosion resistance and surface conductivity in stainless-steel bipolar plates [J]. Journal of Materials Science, 2021, 56: 8 689-8 703.
- [30] WU H K, WANG L, ZHANG S, et al. Tribological properties and sulfuric acid corrosion resistance of laser clad CoCrFeNi high entropy alloy coatings with different types of TiC reinforcement[J]. Tribology International, 2023, 188: 108 870.
- [31] WANG C S, LI R F, BI X L, et al. Microstructure and wear resistance property of laser clad CrCoNi coatings assisted by ultrasonic impact treatment[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 22: 853-864.

(编辑:彭瑾)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16开,邮发代号38-109。邮发订价每期20元,全年240元。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦10楼

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

