

TiO₂/CeO₂ 对 Ni 基激光熔覆层组织和性能的影响

任仲贺¹, 武美萍^{1*}, 李广阳², 夏思海¹, 唐又红³

¹江南大学江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;

²德纳(无锡)技术有限公司, 江苏 无锡 214112;

³苏州出入境检验检疫局, 江苏 苏州 215021

摘要 通过同步送粉方式在 Q235 钢基材表面制备了添加不同质量分数纳米 TiO₂ 和 CeO₂ 的 Ni 基激光熔覆层, 分析了熔覆层的表面形貌、显微组织和物相组成, 并测定了熔覆层的硬度和耐腐蚀性。结果表明, 在 Ni 基合金粉末中同时加入 TiO₂ 和 CeO₂, 可以充分发挥二者的性能, 得到组织均匀细密、无裂纹、耐腐蚀性较高的熔覆层, 也可改善 Ni 基激光熔覆层的组织结构并提高其性能。

关键词 激光光学; 激光熔覆; Ni 基合金; 显微组织; 显微硬度; 耐腐蚀性

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.071402

Effect of TiO₂/CeO₂ on Microstructures and Properties of Ni-Based Laser Cladding Layers

Ren Zhonghe¹, Wu Meiping^{1*}, Li Guangyang², Xia Sihai¹, Tang Youhong³

¹Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

²Dana Wuxi Technology Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214112, China;

³Suzhou Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract To improve the microstructures and properties of Ni-based laser cladding layers, the Ni-based laser cladding layers with different mass fractions of nano TiO₂ and CeO₂ are prepared on the Q235 steel substrate surfaces by the synchronous feeding of laser cladding powder. The surface morphologies, microstructures and phase compositions of laser cladding layers are analyzed and the microhardness and corrosion resistance of laser cladding layers are measured as well. The research results show that the simultaneous addition of TiO₂ and CeO₂ in the Ni-based alloy powder can fully integrate the properties of both and make well-distributed, fine, crack-free and corrosion-resistant laser cladding layers obtained.

Key words laser optics; laser cladding; Ni-based alloy; microstructure; microhardness; corrosion resistance

OCIS codes 140.3390; 140.3460; 350.3390

1 引言

激光熔覆技术常用于机械零部件再制造修复^[1-2], 具有热影响区小、冶金结合良好、熔覆层组织致密等优点。选用不同的粉末材料, 可改变熔覆层的耐腐蚀、抗氧化、耐磨损和耐高温等性能, 其中 Ni 基合金粉末具有良好的耐磨性、润湿性和高温自润

滑性^[3]。在合金粉末中加入适量的氧化物、稀土元素, 能够改善熔覆层的组织和性能, 从而为再制造修复提供技术支撑^[4-8]。

关于氧化物、稀土元素对 Ni 基激光熔覆层组织和性能的影响研究已取得了一定的成果。van Acker 等^[9]研究了碳化物分布和颗粒大小对 WC/W₂C 增强 Ni 基熔覆层耐磨损性能的影响规律。

收稿日期: 2018-09-03; 修回日期: 2018-09-21; 录用日期: 2018-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(51575237)、江苏出入境检验检疫局科技计划(2018KJ04)

* E-mail: wmp169@jiangnan.edu.cn

Weng 等^[10]研究表明, CeO_2 对钛合金表面制备的多相增强 Co 基熔覆层的相组成没有显著影响, 但对其显微组织、显微硬度和抗磨损性能改善明显。张光耀等^[11]研究发现, 添加质量分数为 5% 的 CeO_2 可有效减少 Ni 基熔覆层的孔隙和裂纹, 并改善了熔覆层的组织形态。吴东江等^[12]采用同轴激光熔覆技术在 Ti-6Al-4V 合金基体上制备了 Al_2O_3 -13% TiO_2 涂层, 通过工艺参数优化获得了低稀释率、无明显裂纹的涂层。王开明等^[13]研究表明, 随着 WC 颗粒质量分数含量的增大, Q235 钢表面 Ni 基激光熔覆层的稀释率和硬度先减小后增大。由此可见, TiO_2 可以提高激光熔覆层的耐磨性和韧性, CeO_2 可以起到显著的细化、净化作用; 纳米氧化物、稀土元素及其添加的质量分数以及激光熔覆的工艺参数都对熔覆层的组织和性能存在不同程度的影响。然而, 在熔覆粉末中使用 TiO_2 与 CeO_2 双纳米颗粒改善激光熔覆 Ni 基合金涂层的组织与性能的研究鲜有报道。

本文通过同步送粉方式在 Q235 钢基材表面制备了添加不同质量分数纳米 TiO_2 和 CeO_2 的 Ni 基激光熔覆层, 分析了熔覆层的表面形貌、显微组织和物相组成, 讨论了纳米 TiO_2 和 CeO_2 在熔覆层凝固过程中的作用机理, 并测试了熔覆层的显微硬度和耐腐蚀性能。

2 试验材料与方法

选用尺寸为 250 mm × 60 mm × 15 mm 的 Q235 钢板作为激光熔覆的基材。试验前, 采用砂纸打磨基材的待熔覆表面, 并用丙酮清洗干净。选用 Ni60A 高硬度镍铬硼硅合金粉末作为激光熔覆粉末材料, 其粒径为 45~106 μm 。Ni60A 合金粉末的化学成分见表 1。

表 1 Ni60A 合金粉末的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of Ni60A alloy powder (mass fraction, %)

Element	Cr	B	Si	C	Fe	Ni
Content	14-19	3.0-4.5	3.5-5.0	0.5-1.0	≤2.5	Bal.

在 Ni60A 合金粉末中, 添加不同质量分数的纳米 TiO_2 和 CeO_2 , 得到 4 组不同配比的双颗粒复合粉末材料, 合金粉末制备组成见表 2。其中, TiO_2 和 CeO_2 的粒径约为 50 nm。

使用南京南大仪器有限公司的 QM-3SP4 行星球磨机将 4 组合金粉末球磨 2 h, 球磨频率为 25 Hz, 每隔 0.5 h 正反向交替运行一次; 球磨结束

放置 8 h 后, 在 80 °C 条件下干燥 2 h 待用。

表 2 合金粉末制备组成(质量分数, %)

Table 2 Preparation of alloy powder (mass fraction, %)

Cladding layer	Ni60A	TiO_2	CeO_2
1#	100.00	0	0
2#	99.50	0.50	0
3#	99.50	0	0.50
4#	99.00	0.50	0.50

采用 TruDisk 12003 激光器进行激光熔覆试验, 激光功率为 1 kW, 光斑直径为 3 mm, 扫描速率为 7 mm·s⁻¹, 送粉速率为 15 g·min⁻¹, 采用 Ar 气作为保护气氛。

激光熔覆后, 将样件沿垂直于激光的扫描方向进行线切割。样件的横截面需进行研磨、抛光和清洗处理, 并用王水均匀腐蚀 3~5 min 后烘干。采用德国卡尔蔡司公司的 Axio Observer A1m 光学显微镜观察样件的金相组织。采用美国力可公司的 LECO-AMH43 全自动显微硬度计测量熔覆层横截面的表面硬度, 载荷为 4.9 N, 持续时间为 13 s。采用德国布鲁克 AXS 有限公司的 D8 型 X 射线衍射仪(XRD)分析熔覆层的物相组成, 扫描速度为 2 (°)·min⁻¹, 扫描角度为 20°~90°。使用电化学工作站测量熔覆层的耐腐蚀性, 腐蚀液是质量分数为 30% 的 H_2SO_4 溶液。

3 结果及分析

3.1 熔覆层稀释率

在激光熔覆加工中采用稀释率定量评估基材熔化使得熔覆层成分发生变化的程度^[14-15]。激光熔覆层横截面如图 1 所示, 其中 B 和 H 分别为熔覆区的宽度和高度, h 和 b 分别为基体熔化区的深度和宽度。结合激光熔覆的物理性质和熔覆层横截面的几何特性, 将熔覆层横截面划分为熔覆区(CZ)、基体熔化区(MZ)、热影响区(HAZ)和基体(SZ)^[16-17]。

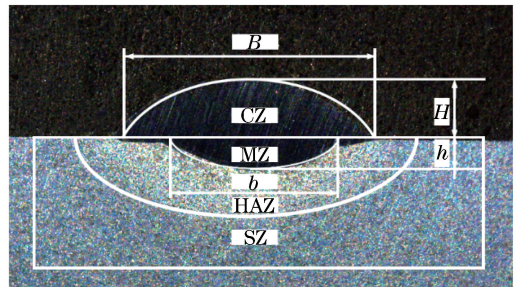


图 1 激光熔覆层横截面的示意图

Fig. 1 Cross-sectional diagram of laser cladding layer

在激光熔覆过程中, 由于熔池内存在溶液浓度

和温度梯度共同作用产生的表面张力梯度,因此,熔覆层的表面凹凸不平。为了便于计算,将熔覆区和基体熔化区的表面形状均视为抛物柱面^[17],则稀释率的计算公式为

$$\eta = \frac{A_2}{A_1 + A_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中 η 为稀释率, A_1 、 A_2 分别为熔覆区和基体熔化区的横截面面积。

熔覆层的横截面如图 2 所示,其稀释率的计算结果见表 3。从表 3 可以看出,添加一定质量分数的 TiO_2 和 CeO_2 可增大熔覆层的稀释率,其中, TiO_2 可显著增大熔覆区高度和基体熔化区深度;同等质量分数的 CeO_2 可显著增大熔覆区宽度和基体熔化区宽度;同时加入 TiO_2 和 CeO_2 , 4 # 熔覆层的稀释率增至 25.01%,比未加纳米颗粒时增大 6.39%。

表 3 熔覆层稀释率的计算结果

Table 3 Calculation of dilution rate of cladding layers

Cladding layer	H /mm	B /mm	h /mm	b /mm	η /%
1 #	0.7039	2.9493	0.3301	1.4394	18.62
2 #	0.8232	3.0900	0.4622	1.5626	22.11
3 #	0.7351	3.3983	0.3742	2.1099	24.02
4 #	0.7507	3.1926	0.3962	2.0177	25.01

当激光工艺参数相同时,辐照到合金粉末上的激光能量是不变的,加入一定质量分数的纳米颗粒可以减小合金粉末颗粒的平均粒径,从而增大粉末的比表面积,进而增大合金粉末接受激光辐照的有效表面积。因此,有相对更多的合金粉完成熔化、凝固和成形;同时,纳米颗粒的弥散填充作用使激光辐照的热量沿着合金粉末介质连续传递到基体材料,从而基体材料获得更多的能量,促进了基体材料的熔化。

此外,激光束透过粉末云的量是影响基体吸收能量的主要因素,颗粒从进入激光束到落在基体表面后移出激光束的这段时间内能够被激光直接加热,粉末粒径的大小不仅能够直接影响自身的加热熔化量,还间接影响下方基体表面的受热熔化程度。在一般情况下,粒径较小的熔覆材料在激光束内更容易被完全加热熔化并达到较高的温度,而当粒径较大的熔覆材料经过激光束一定时间的扫描之后,可能未完全熔化,未完全熔化颗粒的黏附现象如图 3 所示。因此,添加一定质量分数的纳米颗粒有利于基体材料获取更多能量,增大基体熔化区的面积,从而增大熔覆层的稀释率。

通过在熔覆粉末中添加一定质量分数的氧化

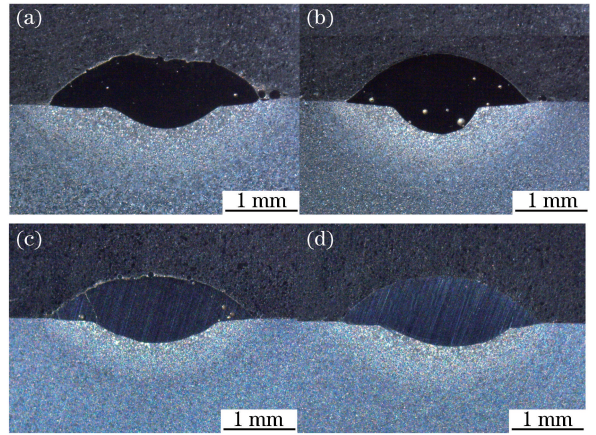


图 2 熔覆层横截面的形貌。

(a) 1 #; (b) 2 #; (c) 3 #; (d) 4 #

Fig. 2 Cross-sectional morphologies of cladding layers.

(a) 1 #; (b) 2 #; (c) 3 #; (d) 4 #

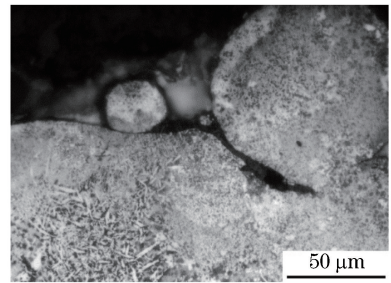


图 3 未完全熔化颗粒的黏附现象

Fig. 3 Adhesion phenomenon of incomplete cladding particles

物、稀土元素颗粒,可以有效控制熔覆层的稀释率,改变熔覆层冶金结合的物理属性,从而既避免了稀释率过小导致的熔覆层剥落和开裂问题,保证熔覆层与基体的良好冶金结合,又能充分发挥熔覆材料的优异性能。

3.2 熔覆层显微组织

熔覆层熔覆区的显微组织如图 4 所示。可以看出,1 # 熔覆层的组织较为疏松,主要由粗大的树枝晶、柱状晶以及枝晶间的共晶组织组成。2 # 熔覆层中粗大的白色树枝晶全部消失,转变为均匀分布在灰色残余奥氏体之间的白色细小颗粒状二次渗碳体,并且增加了一些黑色条状组织。3 # 熔覆层中的

柱状晶消失,树枝晶组织得到明显细化且排列比较紧密,组织生长的方向性减弱,组织趋于均匀,主要是细小的枝状碳、硼化物多元共晶体和细小的颗粒

相以及韧性基体相。4#熔覆层中细小的白色树枝晶转变为弥散分布的网状组织,黑色条状组织也显著减少且细化,整个组织更加致密。

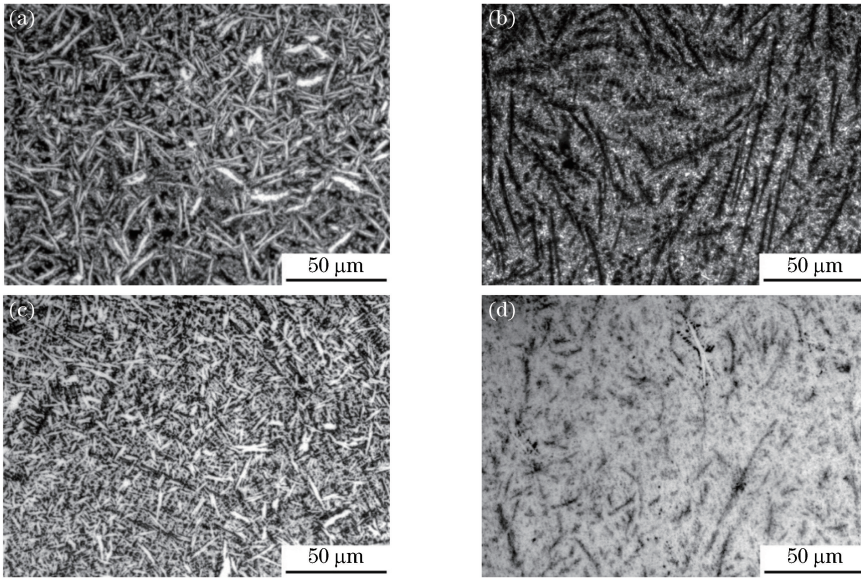


图4 熔覆层的显微组织。(a) 1#;(b) 2#;(c) 3#;(d) 4#

Fig. 4 Microstructures of cladding layers. (a) 1#; (b) 2#; (c) 3#; (d) 4#

由此可见,加入 TiO_2 和 CeO_2 纳米颗粒对熔覆层能起到细化组织的作用。其中, TiO_2 的加入,可作为第二相粒子阻碍晶粒长大;在熔池中, TiO_2 粒子弥散分布,可以作为形核核心,减小体系的吉布斯自由能,增大形核率,减小晶粒长大的驱动力,从而阻止晶体的生长^[18]。在添加了 CeO_2 的熔覆层中, Ce 元素具有相对较大的原子半径和较小的电负性^[19],非常容易结合某些元素发生反应转变为稳定化合物,增加了熔池中的形核质点,从而增大形核率;晶核表面上还会吸附少量 Ce 离子,使得晶粒长大受到阻碍,从而细化组织。此外,纳米氧化物、稀土元素颗粒的加入还能减小熔体的表面张力,减小临界形核半径,有效增大形核速率;在熔池的凝固过程中,纳米氧化物、稀土元素颗粒的加入可以增强熔体流动性^[20],减少成分过冷,降低成分偏析,让枝晶生长方向性得到一定程度的减弱,从而使组织更加均匀。

3.3 熔覆层的物相分析

熔覆层的 XRD 图谱如图 5 所示。可以看出, 1#熔覆层主要有 $\gamma\text{-Ni}$ 、 Cr_{23}C_6 、 CrB 和 Ni_3Si 等物相。2#熔覆层中出现了新相 TiC 、 TiB_2 及 TiO_2 残余颗粒^[21],表明在激光熔覆过程中部分 TiO_2 在熔池中与 Cr、Fe 等发生了置换反应,释放出具有较强细化晶粒作用且与 C、B 等非金属元素有极大亲和

力的 Ti 离子,从而生成 TiC 、 TiB_2 等在溶液凝固时容易弥散析出的细小颗粒,可以提高形核率、细化组织,减少了 CrB 、 Cr_{23}C_6 、 Cr 等粗大块状脆性相。由此可知,图 4(b)中的黑色条状组织即为 TiC 和 TiB_2 等碳化物和硼化物。

3#和 4#熔覆层中出现了新相 CeNi_5 、 CeNi_2 和 $\text{Ce}_3\text{Ni}_6\text{Si}_2$ 等, $\gamma\text{-Ni}$ 的其中一个衍射峰强度明显减弱,表明 CeO_2 在高能激光束辐照所形成的高温熔池中发生了分解,释放出活性 Ce 离子;Ce 离子不仅可以吸附在晶核原子表面阻止晶核在较大过冷度下的快速生长,还可以与 Ni 等元素形成高熔点的金属化合物,作为结晶核心提高形核率,使组织得到显著细化。由此可知,图 4(b)中的黑色条状组织 TiC 和 TiB_2 等碳化物和硼化物也在 Ce 离子的作用下得到进一步细化,得到如图 4(d)所示的黑色弥散组织。

3.4 显微硬度

熔覆层的显微硬度如图 6 所示,显微硬度测量的压痕形貌如图 7 所示。可以看出,熔覆层的显微硬度明显大于基体的,硬度分布曲线整体上表现为阶梯状走势。其中,2#熔覆层的硬度比 1#熔覆层的有所降低,但硬度分布趋于均匀,这是因为加入 TiO_2 之后熔覆组织中的韧性相增加,硬质相得到均匀细化,粗大脆性相消失,从而导致熔覆层显微硬度减小^[22],同时,显著降低了裂纹敏感性,使熔覆层中

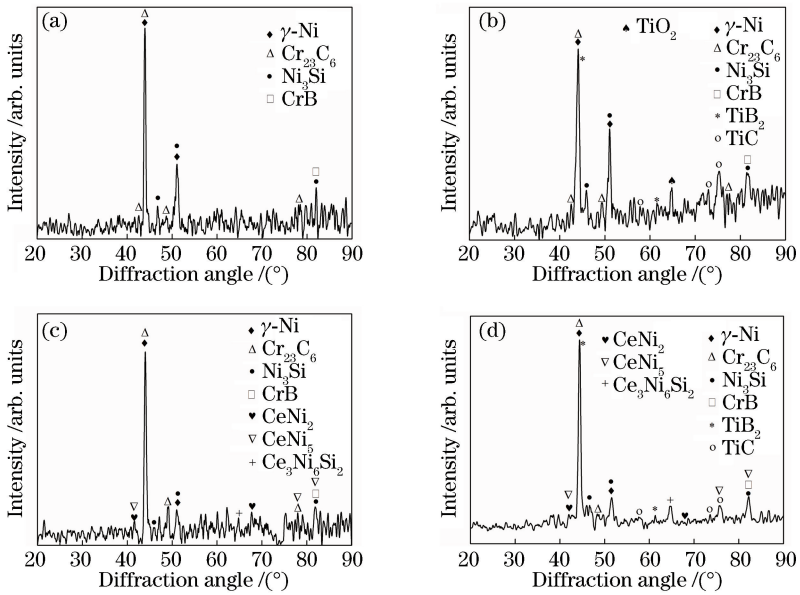


图 5 熔覆层的 XRD 图谱。(a) 1# ;(b) 2# ;(c) 3# ;(d) 4#

Fig. 5 XRD spectrums of cladding layers. (a) 1# ;(b) 2# ;(c) 3# ;(d) 4#

的裂纹得到明显抑制。3# 熔覆层的平均显微硬度比 2# 熔覆层增大约 60 HV, 比 4# 熔覆层增大约 30 HV。这是因为 Ce 离子与氧、氢、硫等杂质元素有较强的亲和力^[10], 可以提高溶体流动性, 抑制组织疏松, 减少成分偏析与孔隙, 从而增强组织均匀性。

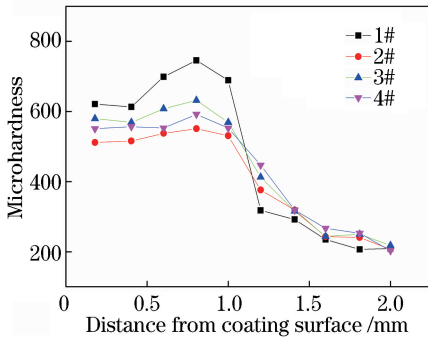


图 6 熔覆层的显微硬度分布

Fig. 6 Microhardness distribution of cladding layers

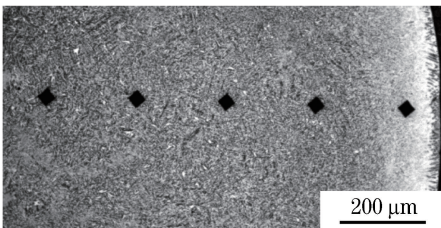


图 7 显微硬度测量的压痕形貌

Fig. 7 Indentation morphology of microhardness measurement

3.5 耐腐蚀性

接触角在一定程度上可以反应熔覆层的耐腐蚀性能, 通常接触角越大, 表面的疏水性越好, 从而其耐腐蚀性能越好^[23]。熔覆层表面的接触角如图 8 所示。可以看出, 加入纳米 TiO₂ 和 CeO₂ 能够改变材料表面的化学组成和微观结构, 从而提高熔覆组织的表面质量, 改变表面润湿性, 提高材料的耐腐蚀性能。

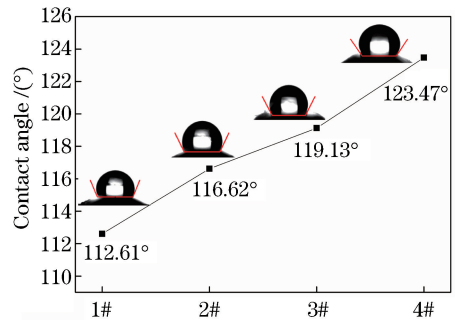


图 8 熔覆层表面的接触角

Fig. 8 Surface contact angle of cladding layer

熔覆层的电化学参数见表 4, 熔覆层的阳极极化曲线如图 9 所示。可以看出, 添加 TiO₂ 或 CeO₂ 后, 熔覆层的自腐蚀电位 E_{corr} 略微增大, 腐蚀电流 J_{corr} 减小, 大约在 -90 mV 左右处于钝化状态, 此后腐蚀电流随着电位的升高而增大, 反应进入过钝化阶段; 同时加入 TiO₂ 和 CeO₂ 后, 熔覆层的腐蚀电流显著减小, 且自腐蚀电位增至 -85 mV, 熔覆层的耐腐蚀性能得到进一步提高^[24]。

表4 熔覆层的电化学参数

Table 4 Electrochemical parameters of cladding layers

Cladding layer	E_{corr}/V	$J_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$
1#	-0.093	1.82×10^{-6}
2#	-0.090	6.56×10^{-7}
3#	-0.091	9.64×10^{-7}
4#	-0.085	1.97×10^{-7}

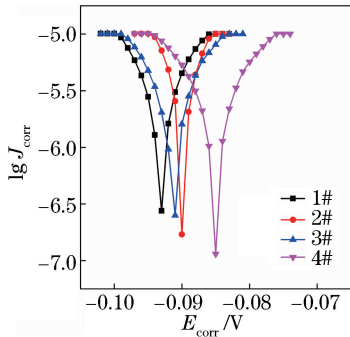


图9 熔覆层的阳极极化曲线

Fig. 9 Anodic polarization curves of cladding layers

在激光熔覆过程中,熔池中 TiO_2 释放的 Ti 离子可以与 C 结合生成具有良好耐腐蚀性能的 TiC , 细小的 TiC 晶粒可以增大晶界的弯曲程度和晶界面积,有效防止晶体滑移,具有良好的细晶强化效果。同时, TiC 分布均匀、颗粒细小,具有弥散强化作用,从而可以增大熔覆层的致密性,改善表面质量,提高耐腐蚀性能。在 H_2SO_4 溶液中, Ni 基熔覆层的腐蚀主要是析氢极化反应,其中,阳极发生氧化反应,阴极发生还原反应。 CeO_2 可以通过细化组织、改善晶界等提高耐腐蚀性能;此外, Ce 原子还具有对氢的陷阱作用^[25],使氢的自由度受到限制,活度降低,在熔覆层中的渗透受到阻碍,导致阴极的电化学反应变慢,从而提高熔覆层的耐腐蚀性能。同时加入 TiO_2 和 CeO_2 后, TiC 的耐腐蚀性和细晶强化作用与 Ce 原子对氢的陷阱作用共同影响,使熔覆层的耐腐蚀性能得到进一步提高。

4 结 论

以 Q235 钢作为基材,通过激光熔覆试验得到 4 组分别含不同质量分数的纳米 TiO_2 和 CeO_2 的 Ni 基熔覆层,分析了熔覆层的稀释率、显微组织、物相组成、显微硬度和耐腐蚀性。 TiO_2 可抑制粗大树枝状脆性硬质相,提高韧性相成分, CeO_2 能够提高组织均匀性,细化、净化组织,改善晶界结构,两种纳米颗粒共同作用可综合发挥两者的性能,增强熔覆层的耐腐蚀性,得到均匀细密、无裂纹的熔覆层。本文主要研究了 TiO_2 和 CeO_2 纳米颗粒的影响机理和

作用效果,进一步地,可通过改变激光熔覆的工艺参数和 TiO_2/CeO_2 纳米颗粒的质量分数比例,研究其对熔覆质量的影响规律,以充分发挥其优良性能。

参 考 文 献

- [1] Xu B S. Remanufacture engineering and its development in China [J]. China Surface Engineering, 2010, 23(2): 1-6.
徐滨士. 中国再制造工程及其进展[J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 1-6.
- [2] Wei S G, Cheng D B, Sundin E, *et al.* Motives and barriers of the remanufacturing industry in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 94: 340-351.
- [3] Sun L, Wei C Q, Sui X M, *et al.* Effects of SiC particle size on microstructures and properties of TiNi based cladding layers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0502002.
孙琳, 位超群, 隋欣梦, 等. SiC 颗粒尺寸对 TiNi 基熔覆层组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0502002.
- [4] Yang H B, Liu Z H, Ding Y D, *et al.* Preparation of Al_2O_3 -13% TiO_2 ceramic coating in the method of thermo-chemical reaction and its properties [J]. Surface Technology, 2017, 46(9): 215-222.
杨宏波, 刘朝辉, 丁逸栋, 等. 热化学反应法制备 Al_2O_3 -13% TiO_2 陶瓷涂层及其性能研究[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 215-222.
- [5] Xiao Y, Gu J F, Zhang J X, *et al.* Effects of nano- CeO_2 doping on microstructure and wear performance of laser-clad Fe/Cr_3C_2 alloy composite coating [J]. Materials Review, 2017, 31(22): 65-69, 84.
肖轶, 顾剑锋, 张俊喜, 等. 纳米 CeO_2 对激光熔覆 Fe/Cr_3C_2 复合涂层组织与磨损性能的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(22): 65-69, 84.
- [6] Xu B S, Zhu S H, Liu S C. Materials surface engineering [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005.
徐滨士, 朱绍华, 刘世参. 材料表面工程[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [7] Zhang Q M, He J J, Liu W J, *et al.* Microstructure characteristics of ZrC-reinforced composite coating produced by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 162(2/3): 140-146.
- [8] Paul C P, Gandhi B K, Bhargava P, *et al.* Cobalt-free laser cladding on AISI type 316L stainless steel for improved cavitation and slurry erosion wear behavior[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(12): 4463-4471.

- [9] van Acker K, Vanhoyweghen D, Persoons R, *et al.*. Influence of tungsten carbide particle size and distribution on the wear resistance of laser clad WC/Ni coatings [J]. *Wear*, 2005, 258(1/2/3/4): 194-202.
- [10] Weng F, Yu H J, Chen C Z, *et al.*. Fabrication of Co-based coatings on titanium alloy by laser cladding with CeO₂ addition [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, 31(11): 1461-1467.
- [11] Zhang G Y, Wang C L, Gao Y. Mechanism of rare earth CeO₂ on the Ni-based laser cladding layer of 6063 Al surface [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(4): 1003-1007.
张光耀, 王成磊, 高原. 稀土 CeO₂ 在 6063Al 表面 Ni 基激光熔覆中的作用机制 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(4): 1003-1007.
- [12] Wu D J, Chen Y X, Lu W F, *et al.*. Dilution characters of Al₂O₃-13wt% TiO₂ coating by direct laser cladding on titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(12): 2105-2108.
吴东江, 陈云啸, 卢卫锋, 等. 钛合金表面直接激光熔覆 Al₂O₃-13%TiO₂ 涂层互熔稀释特性 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(12): 2105-2108.
- [13] Wang K M, Lei Y P, Wei S Z, *et al.*. Effect of WC content on microstructure and properties of laser cladding Ni-based WC composite coating [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2016, 37(7): 172-179.
王开明, 雷永平, 魏世忠, 等. WC 含量对激光熔覆 Ni 基 WC 复合涂层组织和性能的影响 [J]. *材料热处理学报*, 2016, 37(7): 172-179.
- [14] Tan C W, Lu Q S, Chen B, *et al.*. Influence of laser power on microstructure and mechanical properties of laser welded-brazed Mg to Ni coated Ti alloys [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 89: 156-167.
- [15] Zhang Y, Song B H, Xue F. Influence of dilution on microstructure and properties in Ni based laser clad coating [J]. *Applied Laser*, 2016, 36(3): 259-264.
张洋, 宋博瀚, 薛峰. 稀释率对镍基合金激光熔覆层组织和性能的影响 [J]. *应用激光*, 2016, 36(3): 259-264.
- [16] Pan H, Zhao J F, Liu Y L, *et al.*. Controllability research on dilution ratio of nickel-based superalloy by laser cladding reparation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(4): 0403007.
潘浒, 赵剑峰, 刘云雷, 等. 激光熔覆修复镍基高温合金稀释率的可控性研究 [J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0403007.
- [17] Chen J F, Chen G Y, Sun L Y, *et al.*. Investigation of dilution ratio and strengthening effect of laser clad coating on H13 steel [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(4): 596-601.
陈菊芳, 陈国炎, 孙凌燕, 等. H13 钢表面激光熔覆层稀释率及强化效果研究 [J]. *激光技术*, 2017, 41(4): 596-601.
- [18] Adebisi D I, Popoola A P I. Mitigation of abrasive wear damage of Ti-6Al-4V by laser surface alloying [J]. *Materials & Design*, 2015, 74: 67-75.
- [19] Yu X X, Yin D F, Yu Z M, *et al.*. Effects of cerium addition on solidification behaviour and intermetallic structure of novel Al-Cu-Li alloys [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(6): 1423-1429.
- [20] Chen R, Xu Q Y, Liu B C. Cellular automaton simulation of three-dimensional dendrite growth in Al-7Si-Mg ternary aluminum alloys [J]. *Computational Materials Science*, 2015, 105: 90-100.
- [21] Shu X Y, Hu L L, Li G F, *et al.*. High-temperature oxidation resistance of the Ni60Ti alloy: An experimental and first-principles study [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 706: 297-304.
- [22] Chao M J, Liang E J, Zhao D. Effect of TiO₂ on the laser cladding layers of Ni-based alloy on 45 # steel [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(10): 947-952.
晁明举, 梁二军, 赵栋. TiO₂ 对 45# 钢表面激光熔覆镍基合金的影响 [J]. *中国激光*, 2003, 30(10): 947-952.
- [23] Li J, Li H, Yu H D, *et al.*. Research on preparation and corrosion resistance of superhydrophobic surfaces on carbon steels [J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(23): 3241-3246.
李晶, 李红, 于化东, 等. 碳钢超疏水表面制备及其耐腐蚀性研究 [J]. *中国机械工程*, 2016, 27(23): 3241-3246.
- [24] Liu Y X, Bian D, Zhao Y W, *et al.*. Anti-corrosion performance of chemically bonded phosphate ceramic coatings reinforced by nano-TiO₂ [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, 86: 208-214.
- [25] Lü X Q, Chen Y X. Effect of hydrogen traps on diffusion of hydrogen in SM490B clean steel [J]. *Shanghai Metals*, 2013, 35(5): 14-18.
吕学奇, 陈业新. 氢陷阱对纯净钢 SM490B 中氢扩散行为的作用 [J]. *上海金属*, 2013, 35(5): 14-18.