

激光熔覆 $\text{Al}_2\text{CrFeCoCuNi}_x\text{Ti}$ 高熵合金 涂层的组织及性能

邱星武¹, 刘春阁², 张云鹏³

¹四川建筑职业技术学院材料工程系, 四川 德阳 618000;

²四川建筑职业技术学院测绘工程系, 四川 德阳 618000;

³西安理工大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 采用激光熔覆工艺在 Q235 钢表面制备了 $\text{Al}_2\text{CrFeCoCuNi}_x\text{Ti}$ 高熵合金涂层, 分析了 $\text{Al}_2\text{CrFeCoCuNi}_x\text{Ti}$ 高熵合金微观结构, 测试了涂层的力学性能及耐蚀性能。结果表明, $\text{Al}_2\text{CrFeCoCuNi}_x\text{Ti}$ 高熵合金涂层熔覆区组织主要由等轴晶组成, 且等轴晶上分布着析出物; 涂层相结构主要由面心立方、体心立方结构及 Laves 相组成。随着 Ni 含量的增加, 涂层的相对耐磨性呈先增加后降低的趋势, 其值为 2.0~3.6, 耐磨性受涂层塑性与硬度的共同影响, 涂层在 0.5 mol/L H_2SO_4 溶液中表现出优异的耐蚀性, 耐蚀性的差异主要取决于涂层的结构组成。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 高熵合金; 微观结构; 耐磨性; 耐蚀性

中图分类号 TG135 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.051404

Microstructure and Property of $\text{Al}_2\text{CrFeCoCuNi}_x\text{Ti}$ High Entropy Alloy Coatings Prepared by Laser Cladding

Qiu Xingwu¹, Liu Chungu², Zhang Yunpeng³

¹Department of Materials Engineering, Sichuan College of Architectural Technology, Deyang, Sichuan 618000, China;

²Department of Surveying and Mapping Engineering, Sichuan College of Architectural Technology,
Deyang, Sichuan 618000, China;

³School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract The $\text{Al}_2\text{CrFeCoCuNi}_x\text{Ti}$ high entropy alloy coating on Q235 steel surface is prepared by laser cladding. Its microstructure is analyzed, and its mechanical property and corrosion resistance are tested. The results show that the microstructure of cladding zone in the $\text{Al}_2\text{CrFeCoCuNi}_x\text{Ti}$ high entropy alloy coating is mainly composed of equiaxed grains with distribution of precipitates. The phase structure of this coating is mainly composed of face-centered-cubic structure, body-centered-cubic structure and Laves phase. With the increase of Ni content, the relative wear resistance of this coating increases first and then decreases with a value of 2.0-3.6. The wear resistance of this coating is affected by both plasticity and hardness. The coatings have excellent corrosion resistance in the 0.5 mol/L H_2SO_4 solution, and the difference of corrosion resistance mainly depends on the structural components of coatings.

Key words laser technique; laser cladding; high entropy alloy; microstructure; wear resistance; corrosion resistance

OCIS codes 140.3460; 140.3390; 160.3900

1 引言

高熵合金是近年来发展起来的新型合金, 含有多种元素, 每种元素均发挥主要作用, 合金的熵值很高, 且

收稿日期: 2016-12-23; 收到修改稿日期: 2017-01-10

基金项目: 四川省教育厅科学研究项目(16ZB0512)

作者简介: 邱星武(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事新材料及材料表面激光改性方面的研究。

E-mail: fallenrain922@163.com

结构简单,具有优异的性能^[1-4],如高强度、高耐磨性、耐高温及优异的耐蚀性。目前,制备高熵合金的主要方法为真空电弧炉熔铸法^[5-7],该技术工艺复杂,在凝固过程中容易造成成分偏析,且制备成本较高。其他制备方法有粉末冶金法、激光熔覆法、机械合金化法和磁控溅射法等。粉末冶金法工艺相对复杂;磁控溅射法所制备的高熵合金涂层较薄,无法满足高强度的应用场合;激光熔覆法^[8-14]制备的高熵合金涂层厚度可调,与基体呈冶金结合,激光的快速加热及快速冷却作用使得涂层的组织细小均匀。激光熔覆法可实现自动控制且无污染,是制备高熵合金的新方法。郑必举等^[15]利用激光熔覆法在45钢表面制备了NiCoFeCrTi高熵合金涂层并研究了涂层的耐磨性能。黄元盛等^[16]在40Cr钢表面制备了Al₃CoCrCu_{1/2}FeMoNiTi高熵合金激光涂层,研究了退火处理对涂层组织及力学性能的影响,涂层具有明显的时效硬化效应。安旭龙等^[17]在Q235钢表面制备了SiFeCoCrTi高熵合金激光熔覆层,研究了碳化钨颗粒对熔覆层组织及力学性能的影响,添加碳化钨使得基体的稀释率降低,涂层的性能得到明显改善。为了改善Q235钢表面性能,获得成分均匀、性能优异的高熵合金涂层,拓展Q235钢及高熵合金的应用范围,探讨Ni元素对高熵合金涂层性能的影响,本文采用激光熔覆工艺,在低成本基体上制备了高性能的高熵合金激光熔覆层。

2 实验方法

2.1 实验材料

基体材料选择广泛使用的Q235钢,需对其进行表面处理或施加保护层,以提高其表面硬度、耐磨性及耐蚀性。

熔覆材料选择Al,Co,Cr,Cu,Fe,Ni,Ti元素粉末,各粉末粒度均为300目(48 μm)。其中Al元素可以改变合金的结构组成,对合金起到强化作用;Co基高温合金具有优异的耐热腐蚀性能和抗冷热疲劳性能,并具有良好的焊接性能;Cr元素可在高温合金中引起晶格畸变,产生弹性应力场变化,起固溶强化作用,还可形成Cr₂O₃氧化膜,使高温合金具有抗氧化和耐腐蚀性能;Cu元素可提高涂层对非氧化性酸的耐蚀性,同时降低合金熔点,增加液态流动性,对提高合金的抗裂性起到重要作用;Ni元素具有良好的耐高温性能,Ni合金具有抗氧化性能。考虑到Al元素的熔点低,在激光加工过程中有烧损,同时,Al元素有利于提高涂层及基体的浸润性,将其含量定为非变量元素物质的量的2倍。不同Ni含量的合金Al₂CrFeCoCuNi_xTi(*x*表示摩尔分数,其值分别为0.0,0.5,1.0,1.5,2.0)以下分别简记为Ni_{0.0},Ni_{0.5},Ni_{1.0},Ni_{1.5},Ni_{2.0},具体成分见表1。

表1 Al₂CoCrCuFeNi_xTi成分(摩尔分数,%)

Table 1 Compositions of Al₂CoCrCuFeNi_xTi (mole fraction, %)

Chemical formula	Al	Co	Cr	Cu	Fe	Ni	Ti
Al ₂ CoCrCuFeTi	28.6	14.3	14.3	14.3	14.3	—	14.3
Al ₂ CoCrCuFeNi _{0.5} Ti	26.6	13.3	13.3	13.3	13.3	6.7	13.3
Al ₂ CoCrCuFeNi _{1.0} Ti	25.0	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
Al ₂ CoCrCuFeNi _{1.5} Ti	23.5	11.8	11.8	11.8	11.8	17.6	11.8
Al ₂ CoCrCuFeNi _{2.0} Ti	22.2	11.1	11.1	11.1	11.1	22.2	11.1

2.2 实验过程

用磨床将Q235钢表面磨平,并用丙酮溶液进行清洗,除去油污。将熔覆粉末充分混合,预涂覆在Q235钢基材表面上,涂层厚度为1.0 mm。熔覆设备采用沈阳大陆激光成套设备有限公司的DL-HL-T5000B型横流CO₂激光器,参数如下:激光输出功率为2500 W;扫描速度为3 mm/s;单道扫描光斑直径为4 mm;耐蚀性能试样采用多道搭接方式扫描,搭接率为35%。

将经过激光熔覆处理后的块状试样利用线切割技术切成所需尺寸。选取熔覆试样的截面,经磨样、抛光后采用王水进行腐蚀,腐蚀时间为15 s;腐蚀后,立刻用酒精冲洗,经冷风吹干以避免试样表面生锈。利用日本电子株式会社的JSM-6700F型场发射扫描电子显微镜(SEM)分析高熵合金涂层的组织形貌。

利用日本岛津制作所的XRD-7000型X射线衍射仪(XRD)分析高熵合金涂层组成。测试条件如下:Cu靶Kα线辐射;电压为40 kV;电流为40 mA;扫描角度为30°~95°;扫描速度为4(°)/min;步长为0.02°。

利用张家口市宣化科华度验机制造有限公司的ML-10型磨料磨损试验机测定高熵合金涂层的磨损性

能。磨料采用 40 μm 水磨砂纸,磨损机转速为 38 r/min,加载载荷为 30 N。利用 SEM 观察试样磨损形貌。

利用英斯特朗(上海)试验设备贸易有限公司的 TUKON2100 型显微硬度计测试合金的硬度,实验中加载载荷为 0.98 N,保压 10 s,测 7 组数据,取平均值作为最后结果。测量范围从距熔覆层表面 0.05 mm 开始,直至基体区域。

利用上海辰华仪器有限公司的 CHI660 D 型电化学工作站在常温条件下测试试样的动电位极化曲线。辅助电极选用 Pt 电极,参比电极选用饱和甘汞电极,工作电极为高熵合金涂层及 Q235 钢,预留出待测面积 1 cm^2 ,其余部分用石蜡包覆。试样在 0.5 mol/L H_2SO_4 溶液中的极化曲线电位扫描范围为 $-1.0\sim 1.2$ V,循环极化曲线电位扫描范围为 $-0.5\sim 0.0$ V,扫描速度均为 1 mV/s。

3 实验结果

3.1 显微组织

$\text{Al}_2\text{CoCrCuFeNi}_x\text{Ti}$ 高熵合金涂层 XRD 测试结果如图 1 所示,其中 2θ 为衍射角。经标定可知, $\text{Ni}_{1.0}$ 合金涂层主要由体心立方 1(BCC_1)、体心立方 2(BCC_2)和面心立方(FCC)结构组成; $\text{Ni}_{0.0}$ 合金涂层和 $\text{Ni}_{2.0}$ 合金涂层由少量 Laves 相及 BCC_1 , BCC_2 , FCC 结构组成,但 $\text{Ni}_{0.0}$ 合金涂层中的 BCC_1 结构和 Laves 相含量较多; $\text{Ni}_{0.5}$ 合金涂层和 $\text{Ni}_{1.5}$ 合金涂层主要由 Laves 相及 BCC_1 , BCC_2 , FCC 结构组成,但 $\text{Ni}_{1.5}$ 合金涂层中 BCC_2 结构含量较多。

按照吉布斯相率, n 种元素组成的合金的平衡相数目为 $p = n + 1$,非平衡凝固时形成的相数 $p > n + 1$,高熵效应使得 7 元 $\text{Al}_2\text{CoCrCuFeNi}_x\text{Ti}$ 合金涂层的混合熵较高,抑制了大量复杂金属间化合物的出现,其相数远小于 8。

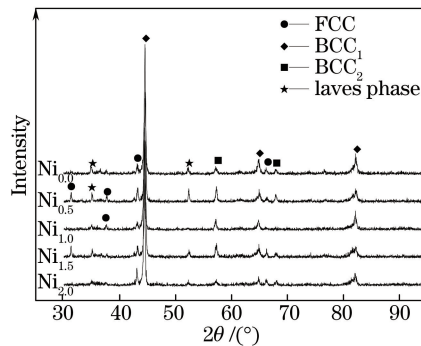


图 1 涂层的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of coatings

$\text{Ni}_{1.0}$ 高熵合金涂层的显微组织照片如图 2 所示,可见激光熔覆处理后该涂层无裂纹、气孔等缺陷。高熵合金熔覆层主要由熔覆区[图 2(b)]、结合区[图 2(c)]、热影响区及基体组成。熔覆层主要由细小的等轴晶(A)组成,等轴晶上分布着白色析出物(B),析出物的出现主要与晶格动力学有关。在七主元高熵合金快速凝固过程中,涂层组织极易出现过饱和现象,各元素的扩散速率不同,元素的扩散和重新分配相互制约,抑制相的形核与成长,有利于细小尺寸相的形成。结合区为熔覆层与基体的交界部分,如图 2(d)所示,激光能量的输入使得热影响区的显微组织细化。

由图 2(c)可见,熔覆层与基体结合良好,靠近结合区部位出现了大量的细小球状粒子(C)。合金粉末在 高能量激光束快速加热作用下瞬间熔化,基体表面熔化了一薄层,熔化的合金粉末与基体在激光快速冷却作用下瞬间凝固,使得熔池中晶体组织来不及长大,从而形成细小的显微组织。等轴晶、白色析出物及细小球状粒子的能谱分析(EDS)结果见表 2。

热影响区为基体靠近结合区的部分,受激光快速加热及快速冷却的作用,此部分组织也发生变化。热影响区又分为过热区、相变重结晶区及不完全重结晶区。由于激光能量注入,基体处于过热的状态,过热区的奥氏体晶粒发生严重粗化,冷却后得到粗大组织。相变重结晶区即基体中铁素体和珠光体发生重结晶,转变为奥氏体,形成的奥氏体晶粒尺寸小于原铁素体和珠光体的。不完全重结晶区即只有一部分组织发生了相

变重结晶过程,成为晶粒细小的铁素体和珠光体,而另一部分是始终未能溶入奥氏体的剩余铁素体,由于未经重结晶仍保留粗大晶粒。

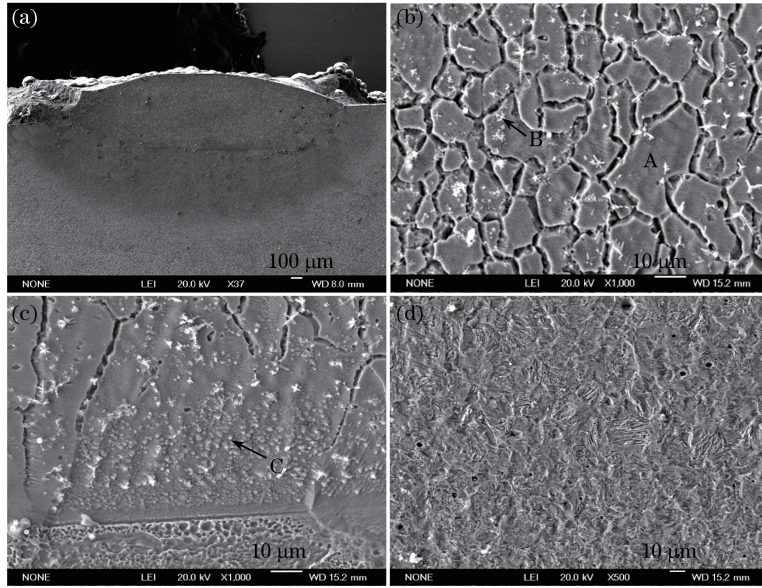


图 2 $Ni_{1.0}$ 涂层的 SEM 照片。(a)整体形貌;(b)熔覆区;(c)结合区;(d)热影响区

Fig. 2 SEM images of $Ni_{1.0}$ coating. (a) Overall morphology; (b) cladding zone; (c) bond zone; (d) heat affected zone

表 2 $Ni_{1.0}$ 涂层的 EDS 分析结果(原子数分数,%)

Table 2 EDS analysis results of $Ni_{1.0}$ coating(atom fraction, %)

Component	Al	Co	Cr	Cu	Fe	Ni	Ti
Nominal composition	25.00	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50
A	15.43	15.47	13.65	9.77	22.17	13.50	10.01
B	11.18	10.15	11.93	13.07	20.55	4.04	29.08
C	10.04	8.18	9.78	9.60	21.34	15.95	25.11

EDS 分析可知,在激光束作用下,Al 元素出现烧损,Q235 钢表面出现薄层熔化,而后在基体快速冷却作用下与熔覆粉末一起凝固,故 Fe 元素在不同区域的含量均比理论含量高。元素在等轴晶中分布较均匀;白色析出物中 Ti 元素含量较高,而 Ni 元素含量较低;细小球状粒子中 Ti 元素含量较高,其他元素含量与理论含量相差不大。

3.2 耐磨性

$Al_2CoCrCuFeNi_xTi$ 高熵合金涂层的相对耐磨性和显微硬度见表 3 和表 4。随着 Ni 含量的增加,高熵合金涂层相对耐磨性呈先增加后降低的趋势。这是因为合金的硬度对耐磨性有贡献;同时,合金表面和近表层在磨粒磨损过程中发生很大的塑性变形,合金的塑性也会影响耐磨性。 $Ni_{0.0}$ 、 $Ni_{0.5}$ 和 $Ni_{1.0}$ 合金具有一定的硬度,同时又具有一定的塑性,故耐磨性相对较大,而 $Ni_{1.5}$ 和 $Ni_{2.0}$ 合金脆性较大,与 $Ni_{1.0}$ 合金相比相对耐磨性有所降低。说明合金的硬度并不是影响耐磨性的唯一因素。

表 3 涂层的相对耐磨性

Table 3 Relative wear resistance of coatings

Sample	$Ni_{0.0}$	$Ni_{0.5}$	$Ni_{1.0}$	$Ni_{1.5}$	$Ni_{2.0}$
Relative wear resistance	2.0	2.3	3.6	3.2	3.1

表 4 涂层的显微硬度

Table 4 Microhardness of coatings

Sample	$Ni_{0.0}$	$Ni_{0.5}$	$Ni_{1.0}$	$Ni_{1.5}$	$Ni_{2.0}$
Microhardness /HV	556	602	585	682	703

Q235 钢及 $Al_2CoCrCuFeNi_xTi$ 高熵合金涂层的磨损形貌如图 3 所示。可见,基体 Q235 钢表面磨损严

重,出现了很深的犁沟,并有金属粒子的转移现象。 $\text{Al}_2\text{CoCrCuFeNi}_x\text{Ti}$ 高熵合金涂层的磨损相对较轻,虽有磨损划痕,但划痕深度较浅、宽度较窄。磨粒压入材料表面产生磨痕,移动时使表面发生严重塑性变形,压痕两侧材料受到损伤,因而极易从表面挤出或剥落。磨粒磨损严重时,磨粒压入金属表面产生裂缝,裂缝扩展到表面发生脆性断裂,形成磨屑。

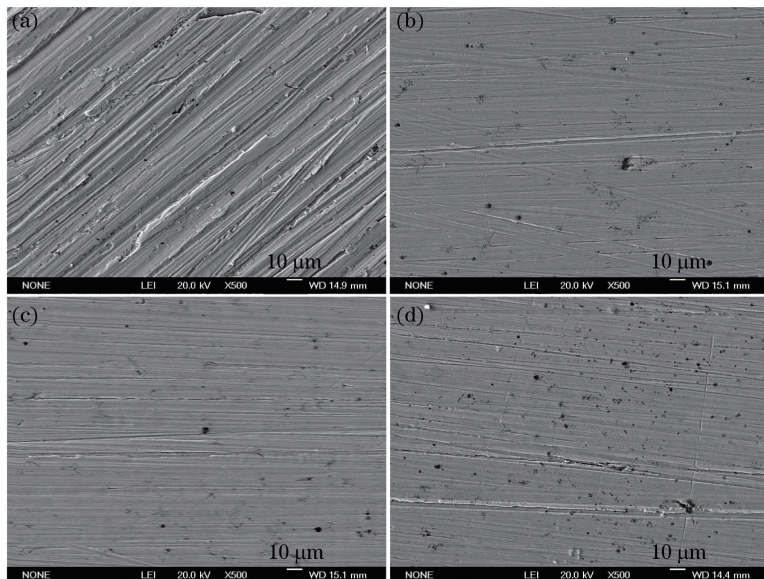


图3 Q235 钢和涂层的磨损形貌。(a) Q235 钢;(b) $\text{Ni}_{1.0}$;(c) $\text{Ni}_{1.5}$;(d) $\text{Ni}_{2.0}$

Fig. 3 Wear morphologies of Q235 steel and coatings. (a) Q235 steel; (b) $\text{Ni}_{1.0}$; (c) $\text{Ni}_{1.5}$; (d) $\text{Ni}_{2.0}$

3.3 耐蚀性能

$\text{Al}_2\text{CoCrCuFeNi}_x\text{Ti}$ 高熵合金涂层在 0.5 mol/L H_2SO_4 溶液中的自腐蚀电流密度 I_{corr} 和自腐蚀电压 E_{corr} 的关系如图 4 所示,线性拟合所得的腐蚀动力学参数见表 5。

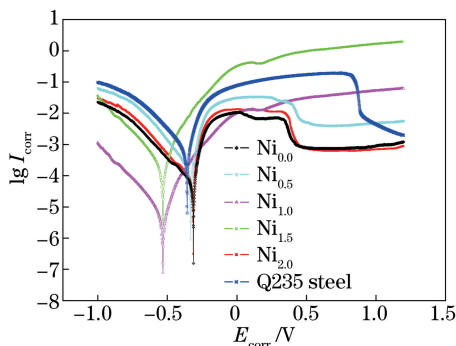


图4 涂层和 Q235 钢的动电位极化曲线

Fig. 4 Potentiodynamic polarization curves of coatings and Q235 steel

表5 涂层和 Q235 钢的腐蚀动力学参数

Table 5 Corrosion dynamics parameters of coatings and Q235 steel

Sample	$E_{\text{corr}} / \text{V}$	$I_{\text{corr}} / (\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$
Q235 steel	-0.38	3.6×10^{-2}
$\text{Ni}_{0.0}$	-0.37	2.9×10^{-3}
$\text{Ni}_{0.5}$	-0.37	3.8×10^{-3}
$\text{Ni}_{1.0}$	-0.52	2.3×10^{-5}
$\text{Ni}_{1.5}$	-0.52	5.4×10^{-3}
$\text{Ni}_{2.0}$	-0.37	2.7×10^{-3}

从图 4 及表 5 可以看出,与 Q235 钢相比, $\text{Al}_2\text{CoCrCuFeNi}_x\text{Ti}$ 高熵合金涂层在 0.5 mol/L H_2SO_4 溶液

中的 I_{corr} 至少降低了一个数量级。说明 $\text{Al}_2\text{CoCrCuFeNi}_x\text{Ti}$ 高熵合金涂层在 $0.5 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ 溶液中具有较好的耐蚀性能,这主要取决于合金表面形成的钝化膜。

结合图 4、表 5 及电化学原理可知, $\text{Al}_2\text{CoCrCuFeNi}_x\text{Ti}$ 高熵合金涂层在 $0.5 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ 溶液中的耐蚀性由强到弱的顺序依次为 $\text{Ni}_{1.0}, \text{Ni}_{0.0}, \text{Ni}_{2.0}, \text{Ni}_{0.5}, \text{Ni}_{1.5}$ 。原因是 x 取不同值时,高熵合金涂层的结构组成不同。不同的结构电位高低不同,容易形成腐蚀原电池,加速腐蚀。 $\text{Ni}_{1.0}$ 高熵合金涂层的结构相对简单,在 $0.5 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ 溶液中的耐蚀性最佳。

在电位极化曲线的基础上,在固定的电位区间内进行循环扫描得到循环极化曲线,根据曲线表现出的特征来判断材料表面是否发生点蚀。很多情况下,点蚀是引起这类局部腐蚀的原因。

循环极化曲线上正、反向极化曲线所包络的面积称为滞后面积,包络曲线称为滞后环。如果循环极化曲线中出现正滞后环时,表明材料表层出现点蚀,正滞后环的面积越大,说明点蚀的程度越严重。相反,如果循环极化曲线中出现负滞后环或不出现滞后环时,表明材料表层不会出现点蚀,负滞后环的面积越大,表示耐蚀性越好。

$\text{Ni}_{0.5}$ 高熵合金涂层在 $0.5 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ 溶液中的循环极化曲线如图 5 所示。曲线上出现了负滞后环,说明 $\text{Ni}_{0.5}$ 高熵合金涂层在 $0.5 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ 溶液中未出现点蚀。结合表 3 中腐蚀动力学参数可知, $\text{Ni}_{0.5}$ 高熵合金涂层自腐蚀电位比 Q235 钢的高 0.01 V ,自腐蚀电流密度比 Q235 钢的降低一个数量级,说明 $\text{Ni}_{0.5}$ 合金涂层在 $0.5 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ 溶液中的耐蚀性良好。

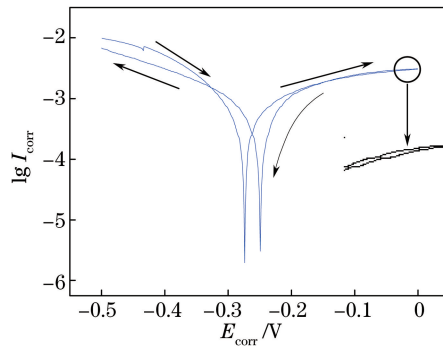


图 5 $\text{Ni}_{0.5}$ 涂层的循环极化曲线

Fig. 5 Circular polarization curves of $\text{Ni}_{0.5}$ coating

4 结 论

通过在 Q235 钢表面激光熔覆 $\text{Al}_2\text{CrFeCoCuNi}_x\text{Ti}$ 合金涂层,研究了涂层的组织结构及 Ni 含量对涂层性能的影响,得出以下结论:1) 涂层熔覆区组织主要由等轴晶组成,在快速凝固条件下,元素的扩散和重新分配相互制约,抑制相的形核与成长,使得等轴晶上分布有析出物;2) 随着 Ni 含量的增加,涂层的相对耐磨性呈先增加后降低的趋势,耐磨性受涂层塑性与硬度的共同影响;3) 涂层表面形成的钝化膜使得其在 $0.5 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ 溶液中表现出优异的耐蚀性,与 Q235 钢相比,自腐蚀电流密度至少降低一个数量级。耐蚀性的差异主要取决于涂层的结构组成,涂层在 $0.5 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ 溶液中的耐蚀性由强到弱的顺序依次为 $\text{Ni}_{1.0}, \text{Ni}_{0.0}, \text{Ni}_{2.0}, \text{Ni}_{0.5}, \text{Ni}_{1.5}$ 。

参 考 文 献

- [1] Chou Y L, Yeh J W, Shih H C. The effect of molybdenum on the corrosion behaviour of the high-entropy alloys $\text{Co}_{1.5}\text{CrFeNi}_{1.5}\text{Ti}_{0.5}\text{Mo}_x$ in aqueous environments[J]. Corrosion Science, 2010, 52(8): 2571-2581.
- [2] Chen S T, Tang W Y, Kuo Y F, *et al.* Microstructure and properties of age-hardenable $\text{Al}_x\text{CrFe}_{1.5}\text{MnNi}_{0.5}$ alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(21-22): 5818-5825.
- [3] Liu Ning, Zhu Zhixuan, Jin Yunxue, *et al.* Research progress of laser cladding technology to prepare high-entropy alloy coating[J]. Materials Review, 2014, 28(3): 133-134.

- 刘 宁, 朱智轩, 金云学, 等. 激光熔覆技术制备高熵合金涂层的研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(3): 133-134.
- [4] Cui Tianxiao, Shi Yan. Research progress and development trend of laser cladding for preparing high-entropy alloy coating[J]. Mechanical Engineer, 2015(2): 199-201.
崔天晓, 石 岩. 激光熔覆制备高熵合金的研究现状及发展趋势[J]. 机械工程师, 2015(2): 199-201.
- [5] Shun T T, Du Y C. Age hardening of the $Al_{0.3}CoCrFeNiC_{0.1}$ high entropy alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 478(1-2): 269-272.
- [6] Ren B, Liu Z X, Li D M, *et al.* Effect of elemental interaction on microstructure of CuCrFeNiMn high entropy alloy system[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 493(1-2): 148-153.
- [7] Chou Y L, Wang Y C, Yeh J W. Pitting corrosion of the high-entropy alloy $Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.5}Mo_{0.1}$ in chloride-containing sulphate solutions[J]. Corrosion Science, 2010, 52(10): 3481-3491.
- [8] Zan Shaoping, Jiao Junke, Zhang Wenwu. Study on laser cladding process of 316L stainless steel powder[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(6): 061406.
咎少平, 焦俊科, 张文武. 316L 不锈钢粉末激光熔覆工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 061406.
- [9] Fu Fuxing, Chang Gengrong, Zhao Xiaoxia, *et al.* Influence of laser spot diameter on cladding layer cracking[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 031401.
付福兴, 畅庚榕, 赵小侠, 等. 激光光斑直径对熔覆层裂纹的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 031401.
- [10] Xu Songhua, Xiao Yang, Li Jian. Organization property researches of the laser repair technology in the helicopter engine turbine oriented implement[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2311-2316.
徐松华, 肖 阳, 李 健. 直升机发动机涡轮导向器激光修复组织性能研究[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2311-2316.
- [11] Weng Ziqing, Dong Gang, Zhang Qunli, *et al.* Effects of annealing on microstructure and properties of FeCrNiCoMn high-entropy alloy coating prepared by laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0303002.
翁子清, 董 刚, 张群莉, 等. 退火对激光熔覆 FeCrNiCoMn 高熵合金涂层组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0303002.
- [12] Zhou Fang, Liu Qibin, Zheng Bo. Effect of silicon and aluminum addition on microstructure and properties of MoFeCrTiW high-entropy alloy coating[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0203002.
周 芳, 刘其斌, 郑 波. Si、Al 添加对 MoFeCrTiW 高熵合金涂层组织性能的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0203002.
- [13] Qiu X W, Zhang Y P, Liu C G. Effect of Ti content on structure and properties of $Al_2CrFeNiCoCuTi_x$ high-entropy alloy coatings[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 585: 282-286.
- [14] Qiu X W, Zhang Y P, He L, *et al.* Microstructure and corrosion resistance of AlCrFeCuCo high entropy alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 549: 195-199.
- [15] Zheng Bijun, Wei Jinyu, Jiang Yehua, *et al.* Wear property of NiCoFeCrTi high entropy alloy coating by laser cladding [J]. Laser Technology, 2016, 40(3): 432-435.
郑必举, 魏金宇, 蒋业华, 等. 激光熔覆 NiCoFeCrTi 高熵合金涂层及其耐磨性能研究[J]. 激光技术, 2016, 40(3): 432-435.
- [16] Huang Yuansheng, Wen Lizhe. Effect of annealing on the microstructure and property of $Al_3CoCrCu_{1/2}FeMoNiTi$ high-entropy alloy laser coating[J]. Surface Technology, 2016, 45(7): 162-166.
黄元盛, 温立哲. 退火处理对 $Al_3CoCrCu_{1/2}FeMoNiTi$ 高熵合金激光涂层组织和性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(7): 162-166.
- [17] An Xulong, Liu Qibin. Effect of WC particles on microstructure and properties of high entropy alloy SiFeCoCrTi coating synthesized by laser cladding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(9): 2424-2428.
安旭龙, 刘其斌. WC 颗粒对激光熔覆高熵合金 SiFeCoCrTi 涂层的组织及性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(9): 2424-2428.