

文章编号 1004-924X(2011)07-1515-09

不锈钢表面多道激光熔覆 Ni 基涂层的组织与性能

刘洪喜*, 曾维华, 张晓伟, 王传琦, 蒋业华

(昆明理工大学 材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要:为提高不锈钢的硬度和耐蚀性能,利用 6 kW 横流 CO₂ 激光器在 1Cr18Ni9Ti 表面进行了单道和多道 Ni₂₅WC₃₅ 合金粉末熔覆。X 射线能量色散分析(EDAX)和 X 射线衍射(XRD)分析表明,熔覆层主要由(Fe, Ni)固溶体和 WC 原位自生成的 W₂C 组成,同时含有 CrNiFeC, Cu_{3.8}Ni 化合物和 FeW₃C, Ni₂Si, Fe₃Ni₃B 等硬质相。光学显微形貌观察显示熔覆层组织均匀、致密,与基体结合良好。显微硬度测试得出熔覆层硬度为基体的 2 倍,最高出现在双道试样第二道熔覆层 CZ 区中部,其值达到 650 HV。熔覆层在 5.0%NaCl 饱和溶液中的最高自腐蚀电位为 -488.70 mV,较基体上升了 630.9 mV;最低腐蚀电流密度为 0.55 μA·cm⁻²,较基体降低了 75.11%。综合比较显示单道试样耐腐蚀性能最好。

关键词:激光熔覆;多道涂层;不锈钢;显微硬度;腐蚀性能

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111907.1515

Microstructures and properties of multiple-pass laser cladding Ni-based coatings on stainless steel surface

LIU Hong-xi*, ZENG Wei-hua, ZHANG Xiao-wei, WANG Chuan-qi, JIANG Ye-hua

(Faculty of Material Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

* Corresponding author, E-mail: vipliuhx@yahoo.com.cn

Abstract: In order to improve the surface hardness and corrosion resistance of stainless steel, single-pass and multi-pass lap laser cladding coatings of Ni₂₅WC₃₅ alloy powders were fabricated on a 1Cr18Ni9Ti substrate by a 6 kW transverse-flow CO₂ laser. The coatings were examined and tested for chemical compositions, microstructure features, phase structures, microhardness, corrosion behaviors and metallographies by the X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electronic Microscopy (SEM), X-ray Energy Dispersive Analysis (EDAX), microhardness tester, electrochemistry workstation and optical microscopy (OM), respectively. The results show that some new harden phases are formed in the coating which consists of (Fe, Ni) solid solution and some compounds such as WC, W₂C, CrNiFeC, FeW₃C, Ni₂Si, Fe₃Ni₃B, and these harden phases improve the hardness and corrosion resistance of the substrate effectively. OM observation displays that the microstructure of clad coating is homogeneous, compactness and forms a good metallurgical bonding layer with the substrate. Micro-hardness measurement exhibits that the surface hardness of treated sample is twice as

收稿日期:2010-09-13;修订日期:2010-11-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50671045);云南省自然科学基金资助项目(No. 2008ZC021M);昆明理工大学分析测试基金资助项目(2009-022)

large as that of substrate, and the highest hardness lies in the second pass cladding zone center of a double-pass coating sample and reaches 650HV. The electrochemical corrosion test in 5.0% NaCl saturated solution indicates that the maximum self-corrosion potential (E_{corr}) of clad coating sample changes from 630.90 mV to positive direction, and the lowest corrosion current density (I_{corr}) changes from $2.21 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ to $0.55 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ and decreases by 75.11%. Compared with the substrate, the corrosion resistance of laser cladding sample has been improved significantly, and the single pass cladding sample shows the best corrosion behavior.

Key words: laser cladding; multi-pass lap coating; stainless steel; microhardness; corrosion behavior

1 引言

激光熔覆是当今发展较快的一种表面改性技术,它通过高能激光束使熔覆粉末与基体发生冶金化学反应从而形成性能良好的结合层,以改善基体硬度、耐磨耐蚀和高温抗氧化性能^[1-3]。1Cr18Ni9Ti 不锈钢因具有优良的耐腐蚀性能而普遍应用于航天航空、汽车、采矿、电力等领域,但由于其硬度较低,通常很难满足许多实际应用需要^[4-7]。因此,寻求一种既具有较高表面硬度,又能保持甚至提高其原有耐腐蚀性能的表面改性方法一直受到国内外学者的极大关注^[8-9]。基于此,本文利用大功率横流多模 CO₂ 激光器在 1Cr18Ni9Ti 不锈钢表面熔覆了单道和多道 Ni25WC35 合金粉末,分析比较了所形成熔覆层的物相组成、微观组织、显微硬度和耐腐蚀性能,以期激光熔覆多道涂层在不锈钢表面改性的应用提供新的途径。

2 实验

2.1 实验材料和工艺

试验用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢经高温固溶和淬火处理,其化学成分见表 1。基材尺寸为 100 mm × 30 mm × 3 mm,表面经金相砂纸打磨后用无水乙醇清洗并置于烤箱烘干,100℃ 预热 2 h。涂层材料为 Ni25WC35 合金粉末,粒度大小为 150 目,松装密度为 $5.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,其化学成分见表 2。激光熔覆采用 GS-TFL6000 型多模横流 CO₂ 激光器,光斑直径为 6 mm,同步送粉,氮气作保护气体。单道和多道工艺参数相同,功率为 3.8 kW,扫描速率为 $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,送粉量为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$,离焦量为 55 mm,保护气流量为 $8 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,多道搭接率为 50%。为方便起见,基材试样用 S₀ 表示,单道、双道和三道激光熔覆试样分别用 S₁, S₂, S₃ 表示。

表 1 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的化学成分(%, 质量分数)

Tab. 1 Chemical composition of 1Cr18Ni9Ti stainless steel(%, mass fraction)

成份	1Cr18Ni9Ti							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti
质量分数	≤0.12	≤1.00	≤2.00	0.035	≤0.030	≤8.00~11.00	17.00~19.00	5(C-0.2)~0.80

表 2 实验用镍基合金粉末的化学成份(%, 质量分数)

Tab. 2 Chemical composition of nickel-based alloy powder

成份	镍基合金粉末								
	C	O	Si	B	Cu	Fe	Cr	WC	Ni
质量分数	<0.25	<0.8	2.2	1.13	20.5	8.8	1.3	34.8	Bal

2.2 性能表征

使用线切割沿熔覆层横截面截取试样,不同

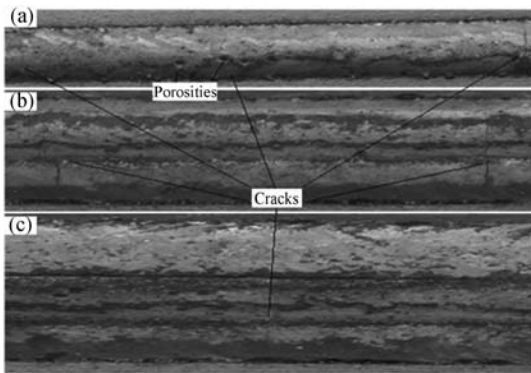
粒度的金相砂纸由粗到细研磨后抛光腐蚀,腐蚀剂为王水(HCl : HNO₃ = 3 : 1 配置)。利用

LEICA DFC280 光学图像分析系统观察熔覆层组织;采用日本 D/MAX-3BX 射线衍射仪分析熔覆层物相组成,扫描区为 $10\sim 100^\circ$,Cu 靶 K_α 线波长为 1.5406 nm ,管电压为 40 kV ,管电流为 30 mA ,扫描速度为 $10^\circ/\text{min}$;用荷兰飞利浦 XL30ESEM-TM 型扫描电镜观察表面形貌,分辨率为 3.5 nm ;通过扫描电镜自带的美国 EDAX-Phoneix 一体化能谱仪对试样进行 EDAX 能谱分析;利用华银 HVS-1000A 数显显微硬度计测量激光熔覆层硬度,载荷为 1000 g ,加载持续时间为 15 s 。电化学腐蚀采用 PS-268A 型电化学工作站,腐蚀介质为 5.0% NaCl 饱和溶液。熔覆层试样为工作电极,工作面积 1 cm^2 。铂为辅助电极,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极。电位测试于 $-1500\sim 0\text{ mV}$,延时为 600 s ,采样周期为 1 s ,扫描速度为 $1\text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

3 结果与分析

3.1 激光熔覆层宏观形貌

相同工艺参数下激光熔覆 Ni25WC35 合金粉末所形成的单道和多道熔覆层形貌特征如图 1。可以看出,不同熔覆层表面存在着少量宏观裂纹和气孔,见图 1(a),且裂纹方向与光束扫描方向垂直,多道涂层的裂纹多产生于搭接区,并随熔覆道数增加而减少,见图 1(b)、(c)。其主要原因一方面是因为基材奥氏体钢的热物理性能,如导热系数、线膨胀系数与熔覆材料差别较大,易导致热裂纹;另一方面是因固态相变时发生体积变化,



(a) 试样 S_1 ; (b) 试样 S_2 ; (c) 试样 S_3

(a) Sample 1, (b) Sample 2, (c) Sample 3

图 1 熔覆层宏观形貌特征

Fig. 1 Macroscopic morphologies of cladding coatings

产生应力。两部分的综合作用致使在气孔、夹杂物尖端处形成应力集中而导致裂纹^[10-12]。另外,在熔覆第一道涂层前,由于基材表面温度较低,熔化和凝固过程中产生较大温度梯度致使裂纹倾向大。随着熔覆层道数的增加,前道对后道涂层起到预热作用,温度梯度相对减少,第一道涂层产生的裂纹在足够大拉伸应力作用下向第二道扩展,第三道涂层温度梯度逐渐减小,拉应力作用不充分,致使裂纹减弱甚至终止。

3.2 熔覆层 XRD 物相分析

图 2 是 S_3 试样激光熔覆层表面的 X 射线衍射图谱。由图可见,熔覆层除 (Fe, Ni) 固溶体外,还含有 CrNiFeC, $\text{Cu}_{3.8}\text{Ni}$ 化合物和 W_2C , WC, FeW_3C , Ni_2Si , $\text{Fe}_3\text{Ni}_3\text{B}$ 等硬质相。(Fe, Ni) 固溶体, CrNiFeC 和 $\text{Cu}_{3.8}\text{Ni}$ 的峰值较高,且重叠于主峰, WC 峰值较弱且不明显,这说明在 高能密度激光束情况下, WC 大部分原位自生,生成 W_2C , 同时析出 C 元素。C 与 Cr, Ni 和 Fe 发生反应, 生成了 CrNiFeC。另外从衍射图谱分析还可看出, Cr, Cu, B, Si 等元素也分别与 Ni, Fe 发生一系列化学反应, 生成 CrNiFeC, $\text{Cu}_{3.8}\text{Ni}$ 化合物和 FeW_3C , Ni_2Si , $\text{Fe}_3\text{Ni}_3\text{B}$ 等硬质相。这些硬质相对熔覆层硬度提高和耐腐蚀性能的改善起到了重要作用。

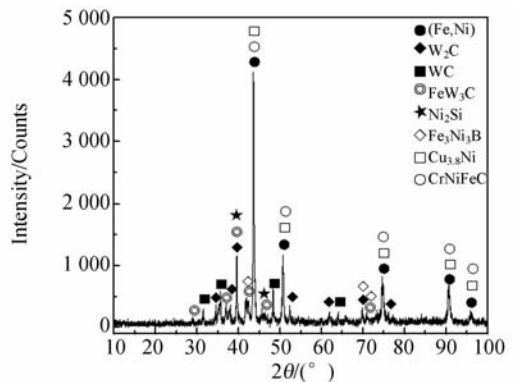


图 2 S_3 试样熔覆层表面 XRD 图谱

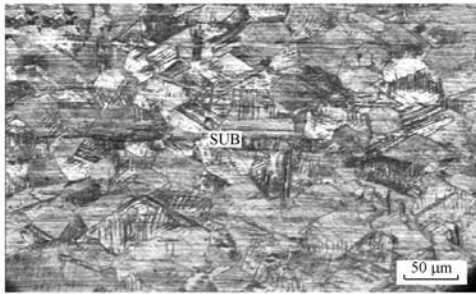
Fig. 2 XRD patterns of S_3 cladding coating

3.3 熔覆层微观组织及 EDAX 分析

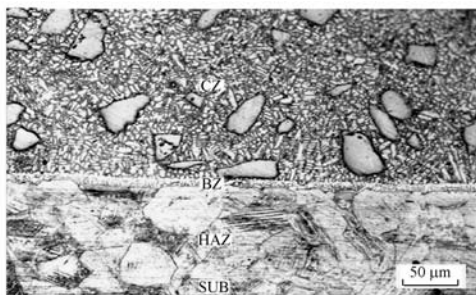
图 3 是 S_0, S_1 试样放大 200 倍后横截面的金相组织。从上到下依次分为熔覆区(CZ)、结合区(BZ)、热影响区(HAZ)和基体(SUB),如图 3(b)。CZ 区组织均匀致密,与基体成良好冶金结合,无微观裂纹,但存在少量孔洞缺陷。BZ 区是一条非常狭窄的白亮带。HAZ 区由于受热传导作用,该区域相当于进行了热处理,发生了相变,

与图 3(a) 基体比较, 组织变大。随着 HAZ 区向基体底部方向距离的增加, 热传导作用减弱, 温度不断降低, 由相变区, 部分相变区, 最后过渡到基体奥氏体组织。图 3(c) 为 S_2 试样横截面放大 200 倍后的 CZ 区中上部金相组织, 可以看到结晶形态由平面晶向胞状晶和树枝晶发展。主要原因是高能激光束使粉末熔化、凝固并与基体产生冶金反应, 属于快热快冷动态过程。根据快速凝固理论, 开始时基材表面温度低, 温度梯度较大, 结晶速度小, 成分过冷接近零, 非均匀形核主要依附基材表面形成一层平面晶。随着凝固过程的进行, 液-固界面的推进, 结晶区前沿溶质变化程度也逐渐加强, 温度梯度逐渐变小, 结晶速度变大, 成分过冷增加, 从而平面晶向胞状晶和树枝晶发展^[13]。在熔覆层顶部, 由于熔池中存在对流、冷却, 使传热作用减弱, 冷却速度减慢, 枝晶生长方向变得紊乱^[14]。

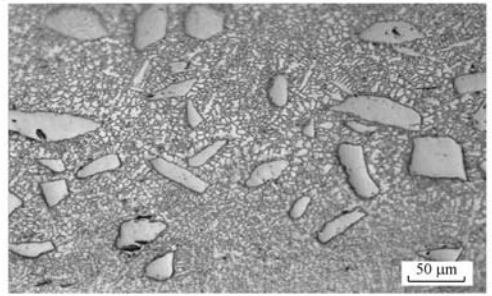
图 3(d) 为 S_2 试样横截面放大 500 倍后的 CZ 区边缘, 枝晶相对明显, 垂直于结合区向表面发展, 且产生二次生长, 构成二次枝晶。主要原因是涂层边缘热扩散, 对流速度较大, 利于枝晶生长。图 3(e) 为 S_3 横截面放大 500 倍后的 CZ 区中部。W₂C 和 WC 以片状、短棒状、块状等大小不一的形貌出现, 且均匀分布。另外, 区内存在许



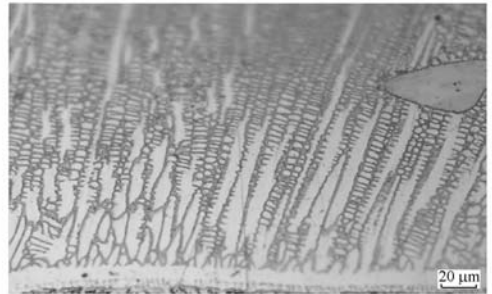
(a) 试样 S_0
(a) Sample S_0



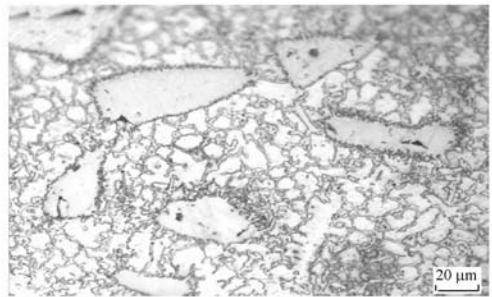
(b) 试样 S_1
(b) Sample S_1



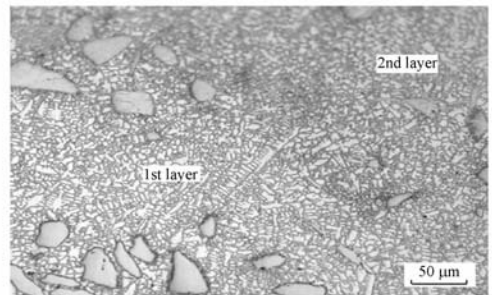
(c) 试样 S_2 熔覆层中上部
(c) Upper and middle parts of sample S_2



(d) 试样 S_2 熔覆层边缘
(d) Edge of cladding coating for S_2



(e) 试样 S_3 熔覆层中部
(e) Middle part of cladding coating for S_3



(f) 试样 S_3 熔覆层搭接区
(f) Lapping region of cladding coating for S_3

图 3 熔覆层截面不同位置的显微组织

Fig. 3 Cross-sectional microstructures of cladding coating at different positions

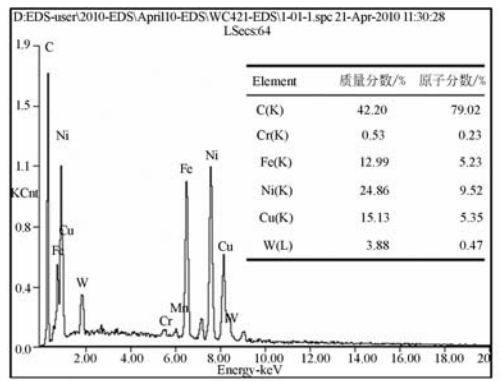
多形状不一呈辐射状的 WC 颗粒, (Fe, Ni) 固溶体沿着其颗粒型壁生长, 构成网状结构^[15]。图 3 (f) 为试样 S₃ 横截面放大 200 倍后搭接区的金相组织, 当第二道熔覆时, 使第一道再次受热, 熔覆层少量枝晶重新熔化、凝固结晶, 组织在一定程度上长大。搭接区组织形态是枝晶垂直于搭接区的等温面向熔池中生长, 而部分晶粒沿袭前道熔覆层晶粒生长方向, 由此产生枝晶熔断, 方向交错。



图 4 S₂ 试样熔覆层 SEM 微观组织形貌

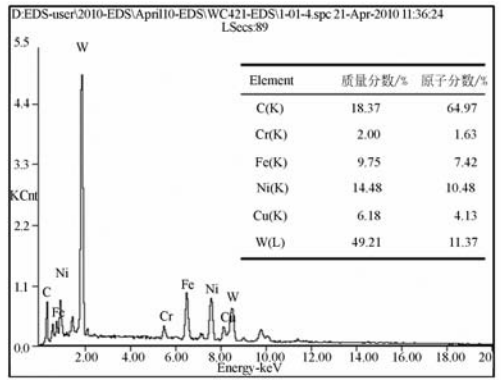
Fig. 4 SEM microstructure of S₂ cladding coating

图 4 是 S₂ 试样熔覆层在放大 2000 倍下的 SEM 微观组织形貌。图 5 是其 EDAX 分析, 共打了 4 个点, 分别对应图 5(a), (b), (c), (d)。由图可见, 白色块状组织为高熔点未熔 WC 颗粒, 成分分析主要含有 W 和 C, 质量分数分别为 87.20% 和 12.80%, 见图 5(a)。网状结构组织主要为 (Fe, Ni) 固溶体, 含有 C, Cr, Fe, Ni, Cu, W, 其中 C 含量增大, 质量分数为 42.20%, 见图 5 (b)。观察分析表明, WC 原位自生成 W₂C, 以环状、片状等大小、形状不一的颗粒富集于 (Fe, Ni) 固溶体边界, 同时析出大量 C 元素。其中 Cr,



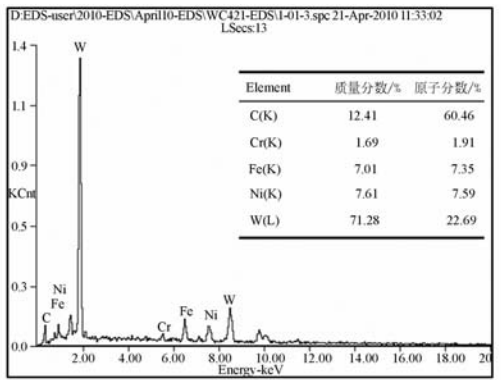
(b) 点 2

(b) In point 2



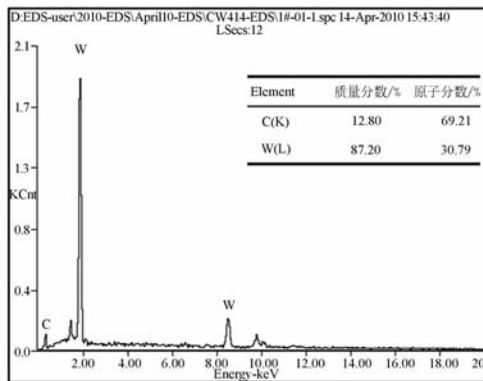
(c) 点 3

(c) In point 3



(d) 点 4

(d) In point 4



(a) 点 1

(a) In point 1

图 5 试样 S₂ 表面熔覆层的 EDAX 图谱

Fig. 5 EDAX patterns of cladding coating of S₂

Cu, W 分别与 Fe, Ni 和 C 发生化学反应, 生成 Cr-NiFeC, Cu_{3.8}Ni 化合物和 FeW₃C 等硬质相, 起到固溶强化作用, 从而提高熔覆层表面硬度和耐腐蚀性。环状 W₂C 颗粒内组织成分分析表明, W 和 C 含量恰与图 5(b) 相反。主要原因是 EDAX 探针微区面积小于 1 μm², 测试分析值受到 W₂C 成分影

响, W 质量分数增加为 49.21% 见图 5(c), 其中 Cr, Cu, W 产生作用同上。白色块状 WC 颗粒呈辐射状, 其边缘组织成分分析主要含 W 和 C 元素, 质量分数为 71.28% 和 12.41%, 见图 5(d), 分析表明辐射状组织仍为未熔 WC 颗粒。

3.4 熔覆层显微硬度

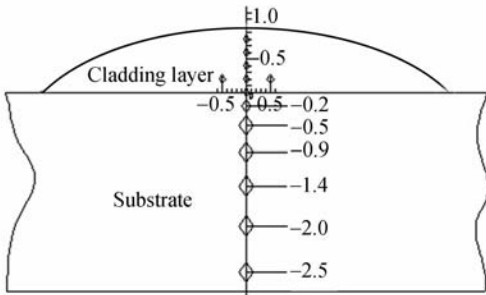
图 6 是单道和多道熔覆层横截面上不同区域的显微硬度测试结果。以结合面为起始点(0 点), 自上而下不同距离打点, 熔覆层之上距离为正值, 之下为负值, 同一层面上打 3 点取平均值, 硬度点分布如图 6(a) 所示。从图 6(b) 可知, 不同熔覆层显微硬度均明显高于基体(基体硬度 ≤ 180 HV)。双道熔覆层中第二道 CZ 区硬度最高, 达到 650 HV, 为基体(180 HV) 的 3.6 倍。CZ 区上部稍低于其中部。BZ 区显微硬度为 280 ~ 440 HV。HAZ 区比基体硬度高, 最高达到 324 HV。熔覆层硬度提高的主要原因是因为其表面存在着硬质相 W_2C 和 WC, 且比重较大, 在熔凝

过程中, 其大部分弥散分布在 CZ 区中部, 组织均匀细小, 且 Cr, Cu, B, Si 元素对涂层起到固溶强化作用。CZ 区上部相对中部含硬质相 W_2C 和 WC 较少。部分未熔 W_2C 和 WC 颗粒沉积于结合层, 使得 BZ 区硬度也得到相应提高。基材在熔覆过程中, 由于快速加热和冷却作用, 相当于淬火, 奥氏体转变为马氏体组织, 硬度得到一定提高, 在 HAZ 区 $-0.2 \sim -0.5$ mm 较为明显。

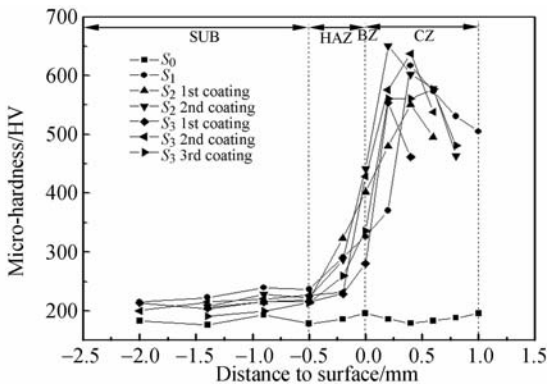
另外, 从多道熔覆层的硬度分布还可看出, 前道比后道硬度略有提高。其中熔覆三道试样 S_3 中第二道的硬度最高, 第一道与第三道硬度值相差不大。其原因在于前后两道熔覆时间间隔短, 第一道熔覆完后, 基材表面温度还很高, 相当于对后一道熔覆层进行高温预热, 使落到基体表面的粉末得到加热, 从而有效降低了温度梯度和过冷度的影响。另外, 后道对前道有重新加热延缓冷却的作用, 使其组织长大, 以至第二道熔覆层比第一道熔覆层硬度略有提高; 第三道对第一道温度和组织的影响, 随着距离的增加, 热传导作用减弱, 效果不显著, 所以两道硬度相差不大。

3.5 腐蚀性能测试

图 7 是基材和激光熔覆试样在 5.0% NaCl 饱和溶液中的电化学腐蚀阳极极化曲线, 表 3 是相应的电化学腐蚀拟合参数。可以看出, S_1, S_2, S_3 试样极化曲线走向极为相似, 约在 -230 mV 电位(E) 阳极区出现钝化现象, 而 S_0 在阳极区没有产生钝化。自腐蚀电位 S_1 最高为 -488.70 mV, S_2 次之, S_3 相对最小为 -602.80 mV, 但三者远远高于 S_0 。基体试样腐蚀电流密度(I) 为 $2.21 \mu A \cdot cm^{-2}$, S_1, S_2, S_3 腐蚀电流密度分别为



(a) 显微硬度分布图
(a) Micro-hardness distribution



(b) 显微硬度曲线
(b) Micro-hardness curves

图 6 熔覆层横截面显微硬度分布

Fig. 6 Micro-hardness distribution along depth of laser cladding sample

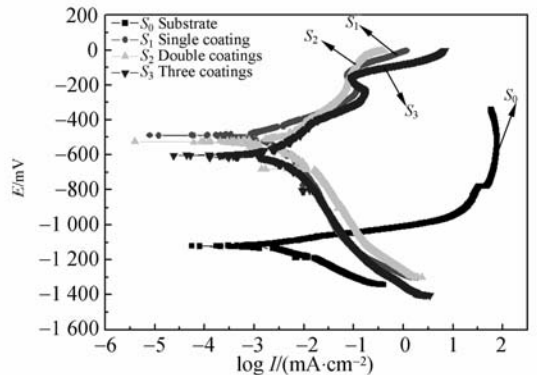


图 7 基体及熔覆层腐蚀极化曲线

Fig. 7 Polarization curves of substrate and laser cladding samples

0.55, 0.75, 0.57 $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 较基体分别降低了 75.11%, 66.06% 和 74.21%。另外, 熔覆试样的极化电阻均比基体大, 这是因为熔覆层腐蚀动力学阻力增大, 产生钝化区间较大, 易钝化, 使得熔覆层耐腐蚀性能增加^[16]。由此可见, 熔覆层耐腐蚀性能均优于基体, S_1 试样耐腐蚀性能最好。

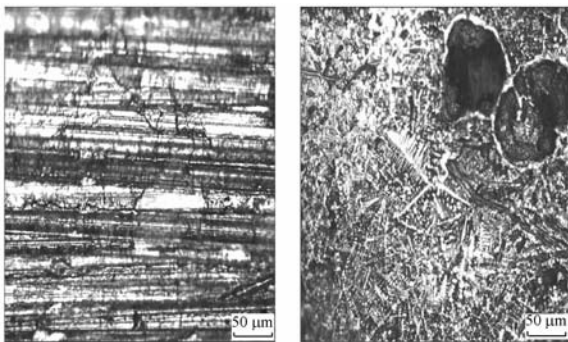
表 3 基材与涂层的电化学腐蚀拟合参数

Tab. 3 Electrochemical corrosion fitting parameters of different samples

Simple	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	R_p $/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	I_{corr} $/(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
S_0	-1 119.6	7 618.29	2.21
S_1	-488.7	12 788.38	0.55
S_2	-526.2	17 097.07	0.75
S_3	-602.8	16 890.96	0.57

E_{corr} —Corrosive potential; R_p —Polarization resistance;
 I_{corr} —Corrosion current density

图 8 分别是试样 S_0, S_1, S_2 和 S_3 腐蚀后放大 200 倍的金相组织照片。由图可见, 基体、单道和多道腐蚀均沿着晶界展开, 属于晶间腐蚀, 基体晶间腐蚀严重见图 8(a); 试样 S_1 存在明显的点蚀现象, 如图 8(b); 试样 S_2 和 S_3 伴随着应力腐蚀, 有明显的应力腐蚀开裂(SCC)见图 8(c), (d)。其主要原因一方面在于腐蚀常发生在枝晶排列比较疏松而紊乱的区域, S_1 试样表面存在微小气孔, 腐蚀溶液中存在侵蚀性的 Cl^- 阴离子, 使得钝化金属产生点蚀。另一方面在于内应力的存在, 及不规则的未熔 WC 周围会产生不均匀分布的残余应力, 容易形成应力腐蚀, 点蚀和晶界成为 SCC 扩展的有利通道。两者综合作用的结果导致腐蚀加快, 耐腐蚀性能下降。但由于涂层表面

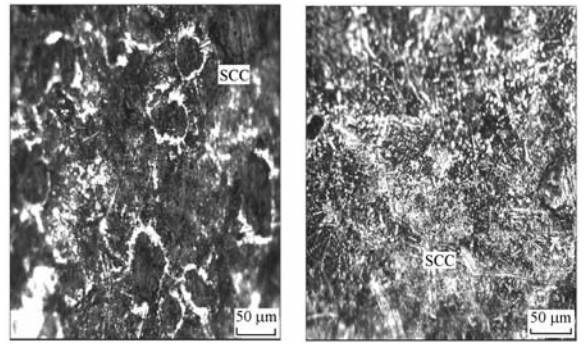


(a) 试样 S_0

(b) 试样 S_1

(a) Sample S_0

(b) Sample S_1



(c) 试样 S_2

(d) 试样 S_3

(c) Sample S_2

(d) Sample S_3

图 8 基体和不同熔覆层试样的腐蚀形貌

Fig. 8 Surface corrosion morphologies of different samples

组织均匀、细小, 减小了成分偏析, 以至于减小原电池效应对腐蚀的影响, 且熔覆层(Fe, Ni)固溶体中含有 Cr, Cu, B, Si 元素与 Fe, Ni 生成的化合物, 对熔覆层起到固溶强化作用, 从而提高耐腐蚀性能^[17]。

4 结 论

本文在 1Cr18Ni9Ti 不锈钢表面激光熔覆了单道和多道 Ni25WC35 合金粉末。熔覆层组织均匀、致密, 与基体形成了良好的冶金结合, 无微观裂纹, 但有少量孔洞缺陷。CZ 区中部存在少量树枝晶, 出现二次枝晶。W₂C 和 WC 以片状、短棒状、块状等大小不一的形貌出现, 且均匀分布熔覆层中。熔覆层中存在许多辐射状 WC 颗粒, (Fe, Ni)固溶体沿着其颗粒型壁生长, 构成网状组织构形貌。BZ 区组织为垂直于界面的平面晶, 熔覆层边缘为多方向性生长的树枝晶。多道搭接重熔区的组织具有沿袭性, 枝晶熔断, 方向交错。EDAX 和 XRD 物相分析表明熔覆层中组织元素主要包括 W, C, Ni, Fe, Cu 和 Cr, 熔覆层除(Fe, Ni)固溶体外, 还含有 CrNiFeC, Cu_{3.8}Ni 化合物和 W₂C, WC, FeW₃C, Ni₂Si, Fe₃Ni₃B 等硬质相。熔覆层显微硬度均高于基体, 最高出现在双道试样第二道熔覆层 CZ 区中部, 其值达到 650 HV, 为基体的 3.6 倍。熔覆层最高自腐蚀电位为 -488.70 mV, 最低腐蚀电流密度为 0.55 $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 分别较基体提高了 630.9 mV 和降低了 75.11%, 其中单道熔覆试样的耐腐蚀性能最好。

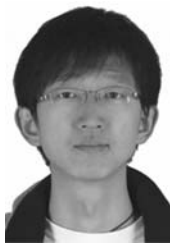
参考文献:

- [1] SMUROV I. Laser cladding and laser assisted direct manufacturing[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008,202(18):4496-4502.
- [2] CHENG F J, WANG Y S, YANG T G. Microstructure and wear properties of Fe-VC-Cr₇C₃ composite coating on surface of cast steel [J]. *Materials Characterization*, 2008,59(4):488-492.
- [3] 宋杰, 张庆茂, 林晓聪, 等. 40Cr 钢表面激光熔覆层的磨损性能[J]. *强激光与粒子束*, 2008,20(1):21-25.
- SONG J, ZHANG Q M, LIN X C, *et al.*. Wear performance of Fe-based alloy coating on the 40Cr steel treated by laser cladding [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008,20(1):21-25. (in Chinese)
- [4] VISWANATHAN A, SASTIKUMAR D, KUMAR H, *et al.*. Formation of WC-iron silicide (Fe₅Si₃) composite clad layer on AISI 316L stainless steel by high power (CO₂) laser [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2009,203(12):1618-1623.
- [5] TOBAR M J, ÁLVAREZ C, AMADO J M, *et al.*. Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi-WC coatings on stainless steel [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 200(22-23):6313-6317.
- [6] AMADO J M, TOBAR M J, ALVAREZ J C, *et al.*. Laser cladding of tungsten carbides hardfacing alloys for the mining and mineral industry [J]. *Applied Surface Science*, 2009,255(10):5553-5556.
- [7] BADDOO N R. Stainless steel in construction: a review of research, applications, challenges and opportunities [J]. *Constructional Steel Research*, 2008,64(11):1199-1206.
- [8] PAUL C P, KHAJEPOUR A. Automated laser fabrication of cemented carbide components [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008,40(5):735-741.
- [9] XIE G ZH, LU Y J, HE Z Y, *et al.*. Microstructure and corrosion properties of plasma-sprayed NiCr-Cr₃C₂ coatings comparison with different post treatment [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008,202(13):2885-2890.
- [10] 蒋振平, 田乃良. 激光熔覆含碳化钨的镍基合金 [J]. *激光与红外*, 2004,34(3):189-191.
- JIANG ZH P, TIAN N L. Laser cladding Ni-based alloy with WC [J]. *Laser & Infrared*, 2004,34(3):189-191. (in Chinese)
- [11] RADZIEJEWSKA J, SKRZYPEK S J. Microstructure and residual stresses in surface layer of simultaneously laser alloyed and burnished steel [J]. *Materials Processing Technology*, 2009,209(4):2047-2056.
- [12] 查莹, 周昌焱, 唐西南, 等. 激光熔覆镍基合金和陶瓷硬质相复合涂层性能的研究[J]. *中国激光*, 1999,26(10):947-950.
- CHA Y, ZHOU CH C, TANG X N, *et al.*. Study of improvement of properties of laser cladding Ni super-alloy and WC composite layers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, 26(10):947-950. (in Chinese)
- [13] 涂义, 张永忠, 席明哲. 不锈钢表面激光熔覆镍基合金层研究[J]. *稀有金属*, 2008,32(5):598-604.
- TU Y, ZHANG Y ZH, XI M ZH. Investigation of nickel-based alloys coating on stainless steel by laser cladding [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2008,32(5):598-604. (in Chinese)
- [14] CHEN H CH, XUA C Y, CHEN J, *et al.*. Microstructure and phase transformation of WC/Ni60B laser cladding coatings during dry sliding wear [J]. *Wear*, 2008,264(7-8):487-493.
- [15] ZHOU SH F, HUANG Y J, ZENG X Y. A study of Ni-based WC composite coatings by laser induction hybrid rapid cladding with elliptical spot [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(10):3110-3119.
- [16] 李强, 张永忠, 李劲风, 等. 激光熔覆 316L 不锈钢涂层的结构与腐蚀性能[J]. *激光技术*, 2004,28(3):237-240.
- LI Q, ZHANG Y ZH, LI J F, *et al.*. Microstructure and corrosion performance of laser clad 316L stainless steel coating [J]. *Laser Technology*, 2004,28(3):237-240.
- [17] 樊丁, 李强, 张建斌. 激光熔覆 FeNiCrAl 合金涂层的组织与腐蚀性能[J]. *兰州理工大学学报*, 2009, 35(2):13-16.
- FAN D, LI Q, ZHANG J B. Microstructure and corrosion performance of laser melt-clad FeNiCrAl alloying coating [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2009,35(2):13-16. (in Chinese)

作者简介:



刘洪喜(1972—),男,湖北黄冈人,博士,教授,1994年于北京航空航天大学获得工学学士学位,2003年、2007年于哈尔滨工业大学分别获得工学硕士和工学博士学位,主要从事离子束和激光束表面改性的研究。E-mail: vipliuhx@yahoo.com.cn



王传琦(1984—),男,黑龙江牡丹江人,博士研究生,主要从事激光束表面改性的研究。E-mail: vipliuhx@yahoo.com.cn



曾维华(1981—),男,广西柳州人,硕士研究生,主要从事激光束表面改性的研究。E-mail: vipliuhx@yahoo.com.cn



蒋业华(1968—),男,安徽巢湖人,博士,教授,1991年、1994年于昆明理工大学分别获得工学学士和工学硕士学位,2001年于西安交通大学获得工学博士学位,主要从事离子束和激光束表面改性的研究。E-mail: piiliuhx@sina.com



张晓伟(1984—),男,山西汉中人,硕士研究生,主要从事激光束表面改性的研究。E-mail: vipliuhx@yahoo.com.cn

●下期预告

凸面光栅成像光谱仪的干涉法装调原理及应用

刘玉娟^{1,2},巴音贺希格¹,崔继承^{1,2},唐玉国¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

Offner 凸面光栅成像光谱仪分光系统的三个球面反射镜拥有共同的球心,这种同心特性能够使光谱仪具有无像散、谱线弯曲小、色畸变小、数值孔径大、结构简单等优点,而高精度的同心装调技术则是实现这些优点的关键。将双光束干涉基本原理与同心光学系统基本特点相结合,提出了适用于 Offner 凸面光栅成像光谱仪的干涉装调法。利用此方法对凸面光栅成像光谱仪同心光学系统的两个凹面反射镜进行同心装调,采用谱图直读法确定光栅位置,实现了 Offner 凸面光栅成像光谱仪的高精度同心装调。实验结果表明,经干涉法装调后,分光系统主镜和三镜的球心距离精度可以达到几个纳米甚至更高。