

## 熔覆层厚度对激光熔覆 316L 涂层组织及性能的影响

陈刚<sup>1</sup>, 范才河<sup>2†</sup>, 曾广胜<sup>2</sup>, 刘彬<sup>3</sup>

(1.湖南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410082;

2.湖南工业大学 冶金与材料工程学院, 湖南 株洲 412007;

3.中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 湖南 长沙 410083)

**摘要:**利用 YLS-6000 型掺镱光纤激光器在 27SiMn 液压支架立柱表面进行不同厚度单道次 316L 合金粉末熔覆, 采用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、能谱(EDS)、显微硬度计及电化学分析等手段, 研究了熔覆层厚度对涂层组织、力学性能及耐腐蚀性能的影响。结果表明:随着熔覆层厚度的增加, 熔覆层组织由单一的柱状晶结构演变为平面晶、柱状晶和树枝状晶组成的层状结构, 熔覆表层的显微硬度不断降低, 熔覆层的自腐蚀电位和极化电阻率不断增大, 自腐蚀电流密度不断减小;与 0.3 mm、0.5 mm 厚熔覆试样比较, 1.0 mm 厚熔覆层试样的自腐蚀电位和极化电阻率值均最大, 分别达 0.053 V 和 22.881  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ , 自腐蚀电流密度最小, 为 1.018  $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。综合得出, 1.0 mm 厚熔覆层试样的耐腐蚀性最佳。

**关键词:**激光熔覆; 316 L; 微观组织; 显微硬度; 耐腐蚀性

**中图分类号:** TG665

**文献标志码:** A

## Influence of Cladding Layer Thickness on Structure and Properties of Laser Cladding 316L Coating

CHEN Gang<sup>1</sup>, FAN Caihe<sup>2†</sup>, ZENG Guangsheng<sup>2</sup>, LIU Bin<sup>3</sup>

(1.College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2.College of Metallurgy and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;

3.State Key Laboratory for Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Single pass 316L alloy powder cladding with different thickness has been carried on the surface of 27SiMn hydraulic support column by using YLS-6000 type ytterbium doped fiber laser. The effect of cladding layer thickness on the coating structure, mechanical properties and corrosion resistance was studied by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), energy spectrum (EDS) microhardness meter and electrochemical analysis methods. The results show that, with the increase of cladding layer thickness, the cladding layer structure changes from a single columnar crystal to a layer structure including planar crystal, columnar crystal and dendritic crystal, the surface microhardness of the cladding layer decreases, the corrosion potential and polarization resistance

\* 收稿日期: 2018-02-18

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2016JJ2025), Natural Science Foundation of Hunan Province(2016JJ2025); 国家自然科学基金-钢铁联合基金资助项目(U1560105), Natural Science Foundation of China -Iron and Steel Joint Fund(U1560105)

作者简介: 陈刚(1965—), 男, 湖南长沙人, 湖南大学教授, 博士

† 通讯联系人, E-mail: 369581813@qq.com

rate increase and the corrosion current density decreases; Compared with 0.3 mm and 0.5 mm thick cladding specimens, both the corrosion potential and polarization resistance rate of 1.0 mm thick cladding layer samples show the largest values of 0.053 V and  $22.881\Omega \cdot \text{cm}^2$ , respectively, while the smallest corrosion current density of  $1.018 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$  occurs. It is concluded that 1.0 mm thick cladding layer exhibits the best corrosion resistance.

**Key words:** laser cladding; 316L; microstructure; microhardness; corrosion resistance

液压缸立柱是煤矿机械设备的关键部件,恶劣的工作环境(环境温度高、空气湿度大且含酸性气体)导致液压缸立柱极易出现腐蚀破损,严重影响其使用寿命<sup>[1-2]</sup>。目前,国内生产企业主要采用表面镀铬层来提高支柱的耐腐蚀性和耐磨性,但由于镀铬层与基体只能形成物理结合,界面结合力弱;同时镀铬层的多孔结构造成腐蚀性介质易于进入结合界面,导致基体腐蚀而形成鼓包、起泡现象,从而造成镀铬层失效<sup>[3-4]</sup>。

激光熔覆是一种先进的表面改性技术,相比传统表面强化技术,具有组织细化、稀释率低、变形小等优势<sup>[5-7]</sup>。近年来,国内外学者对激光熔覆 316L 不锈钢工艺及熔覆层的组织和性能进行了大量研究与探索。PARTES 等人<sup>[8]</sup>研究了激光功率、扫描速度、送粉率对覆层厚度与稀释率的影响,发现扫描速度对覆层厚度起决定性作用。ZHANG 等人<sup>[9]</sup>研究了液压支架管激光熔覆 316L 不锈钢涂层组织与性能,发现界面结合良好、覆层耐磨性和耐蚀性显著提高,得出 316L 是一种良好的覆层材料的结论。宋建丽等人<sup>[10]</sup>研究了多层激光熔覆 316L 涂层结构,揭示了激光熔覆 316L 不锈钢组织形成的规律和机理,发现涂层内部主要由垂直于界面外延生长的柱状树枝晶和平行于扫描方向的转向枝晶组成。李强等人<sup>[11]</sup>研究了 45 钢表面激光熔覆 316L 不锈钢涂层的阳极极化腐蚀行为,发现单覆层受基材稀释的影响,组织由马氏体和奥氏体组成,与 316L 不锈钢相比较抗腐蚀能力略有下降。可见,影响激光熔覆层性能的工艺参数除涉及光源方面的(如激光功率、光斑直径、扫描速度等)外,还取决于与送粉速率(预制层厚度)、扫描速率、功率密度相关的熔覆层厚度,而送粉速率、扫描速率参数在实际过程中相对可调,因此研究单道次熔覆层厚度对涂层组织和性能的影响具有较强的实际意义,同时目前有关报道甚少。

本文针对目前采用传统表面强化技术制备的

液压缸立柱存在组织不致密、界面结合力弱、抗蚀性能差等问题,采用激光熔覆技术和自制的 316L 合金粉末,对基体材质为 27SiMn 的液压支架立柱进行表面熔覆,主要研究涂层厚度对熔覆层微观组织、显微硬度和耐腐蚀性能的影响,为其实际应用提供参考依据。

## 1 实验

### 1.1 试样的制备

基体材质为 27SiMn, 熔覆层材料为自制的 316L 合金粉末, 粉末粒径为  $30 \sim 100 \mu\text{m}$ , 316L 合金粉末的成分如表 1 所示。将粉末充分混合后,在 YLS-6000 型掺镱光纤激光器上制备熔覆层厚度分别为 0.3 mm、0.5 mm 和 1.0 mm 试样, 3 种不同厚度熔覆层试样的制备工艺参数如表 2 所示。

表 1 316L 合金粉末成分

Tab. 1 Composition of the 316L alloy powder %

$w_{\text{C}}$	$w_{\text{Mn}}$	$w_{\text{Si}}$	$w_{\text{Cr}}$	$w_{\text{Ni}}$	$w_{\text{Mo}}$	$w_{\text{W}}$	$w_{\text{Fe}}$
$\leq 0.3$	1.90	0.45	19.50	12.40	2.50	$\leq 0.75$	Bal

表 2 三种不同厚度熔覆层试样的工艺参数

Tab. 2 The technological parameters of cladding layers with different thickness

厚度/mm	激光功率/kW	光斑直径/mm	扫描速率/ $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	送粉速率/ $(\text{g} \cdot \text{min}^{-1})$	重叠率/%	送粉气体
0.3	2.0	5	0.6	30	30	Ar <sub>2</sub>
0.5	2.5	5	0.4	40	30	Ar <sub>2</sub>
1.0	4.0	5	0.2	50	30	Ar <sub>2</sub>

### 1.2 组织及性能测试

在线切割机上沿试样熔覆区截面取样, 尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 试样经研磨、抛光后, 用腐蚀液(浓  $\text{HNO}_3$  与浓  $\text{HCl}$  体积比为 1:3 配制)进行腐

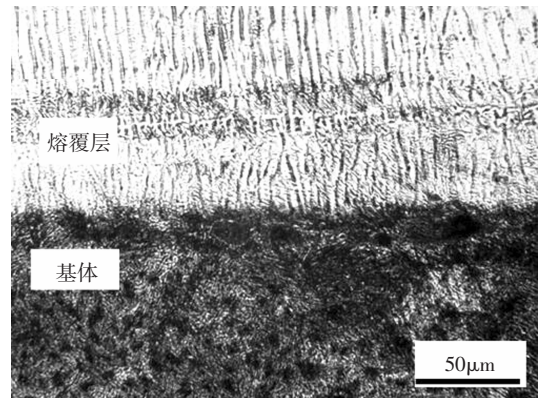
蚀, 烘干后在 MN6 型金相显微镜、JSM-6700F 型扫描电子显微镜上观察熔覆层、结合面及基体的微观组织并进行能谱(EDS)分析. 在型号为 CHI660C 的化学工作站上测试试样的动电位极化曲线, 测试溶液体系 pH 值为 3 的 3.5%NaCl 溶液, 电化学极化曲线采用 CView 软件进行拟合. 采用 DHV-1000 型维氏数显显微硬度计对熔覆层硬度进行测试, 在涂层的横截面上, 测试从基体垂直向上到涂层表层间不同位置的硬度, 同一水平线上取 3 点进行测试, 取平均值. 加载时间 15 s, 载荷 4.9 N.

## 2 结果与分析

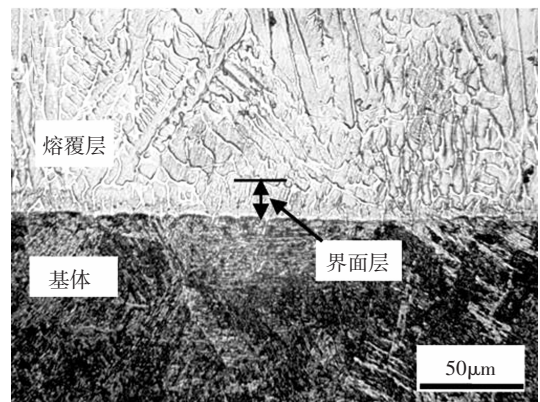
### 2.1 熔覆层厚度对涂层显微组织的影响

图 1 所示为不同厚度 316L 熔覆层截面形貌图. 由图可见, 熔覆层与基体之间的界面平整, 两者的结合处没有观察到气孔、裂纹及夹渣现象, 白亮的界面层清晰可见, 且随着熔覆层厚度增加界面层的厚度不断增大, 这说明熔覆层与基体间形成了良好的冶金结合, 且随着涂层厚度的增加冶金结合的程度更好<sup>[10]</sup>. 由图 1(a)可见, 靠近基体熔覆层的组织为垂直于界面生长的柱状晶结构, 没有发现较粗的树枝晶组织; 由图 1(b)可见, 靠近基体熔覆层的组织既有垂直于界面生长的柱状结构, 又有沿一定方向生长的柱状树枝晶结构, 且柱状晶的尺寸明显大于厚度为 0.3 mm 熔覆层中的柱状晶; 随着熔覆层厚度的增加, 界面层呈明显的平面晶结构, 从界面层开始逐渐向上的初晶相依次为平面晶、柱状晶和树枝状晶, 且树枝晶呈无方向性生长, 如图 1(c)所示. 这是因为熔覆层越薄, 散热速度越快, 既可以依靠基体的激冷作用散热, 又可通过表面与外界进行热交换, 温度梯度/结晶速率趋于零, 此时结晶速度最大, 故其柱状晶窄而长; 随着熔覆层厚度的增大, 需降低激光器的扫描速率和提高送粉速率, 熔覆层散发的热量显著增多, 熔覆层中部区域主要依靠基体散热, 所以其组织呈现为柱状晶与柱状树枝晶共存的混合组织状态; 当进一步增大熔覆层厚度时, 由于基体的激冷作用, 使得熔池底部与基体结合处温度梯度较大, 结晶速率较小, 此时垂直于界面方向散热最快, 因此熔覆层底部组织表现为垂直于界面生长的柱状晶, 然后由柱状晶过渡到树枝晶和胞状晶混合组织. 平面晶的形成主要是因为熔池的基材界面处, 结晶速度  $R$  较低, 而此处的温度梯度  $G$  相对较大,  $G/R$  值大, 不产生成分过冷, 此时凝固所释

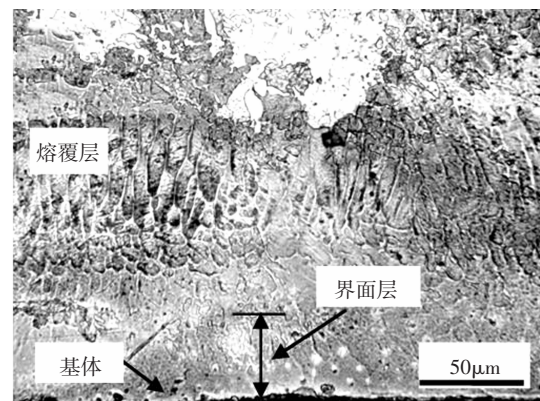
放的热量全部向界面表层的固体散去, 使结晶面缓慢向前推移, 故结晶呈平面状态.



(a) 0.3 mm



(b) 0.5 mm



(c) 1.0 mm

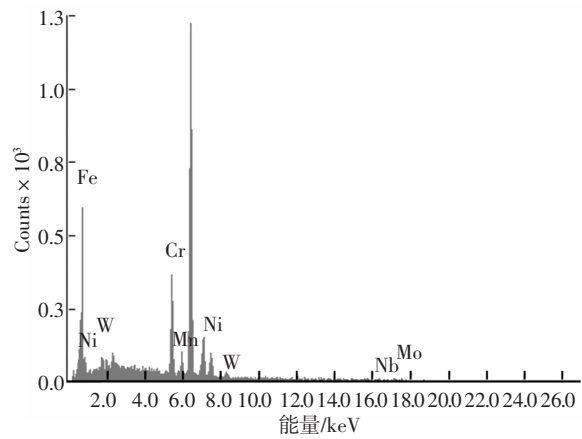
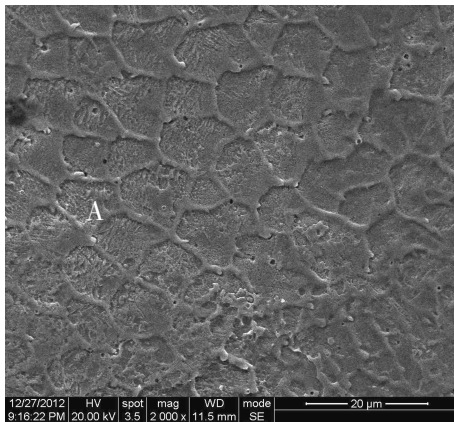
图 1 不同厚度 316L 熔覆层截面的金相组织

Fig.1 Cross-section metallographs of 316L cladding layers with different thickness

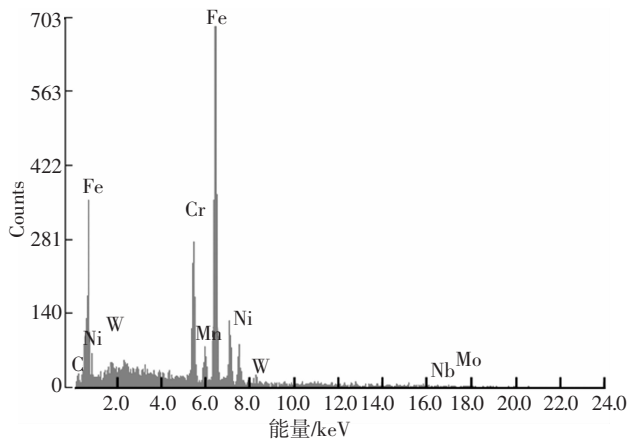
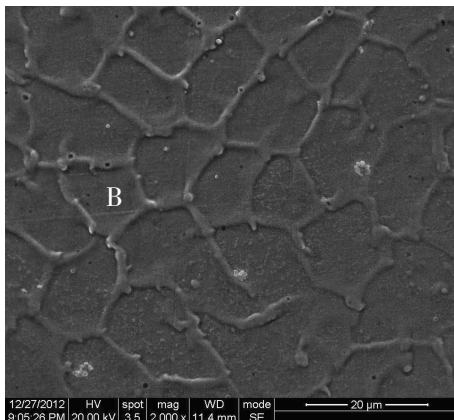
图 2 所示为不同厚度 316L 熔覆层表面 SEM 形貌及图中所示区域的能谱分析曲线. 由图 2 可见, 随着熔覆层厚度的增加, 涂层表面的晶粒尺寸显著增大, 气孔的数量不断增多, 但气孔的大小基本一致; 涂层表面没有观察到裂纹及夹渣现象. 涂层较厚时晶粒尺寸较大, 主要是由于激光器的扫描速率变

慢、熔覆层储存的热量相对增多、热量沿基体方向的散热效率显著降低等因素造成的。激光熔覆 316L 涂层气孔的主要来源是 C 与 O 反应生成的 CO 和 CO<sub>2</sub> 气体<sup>[8-9]</sup>,其中 O 的来源可能是熔覆粉末从空气中吸取的水分,也可能是熔池发生剧烈的物理化学变化,周围气流剧烈扰动,保护气体没有始终笼罩熔池周围,使少量空气卷入并接触熔池,致使 O 进

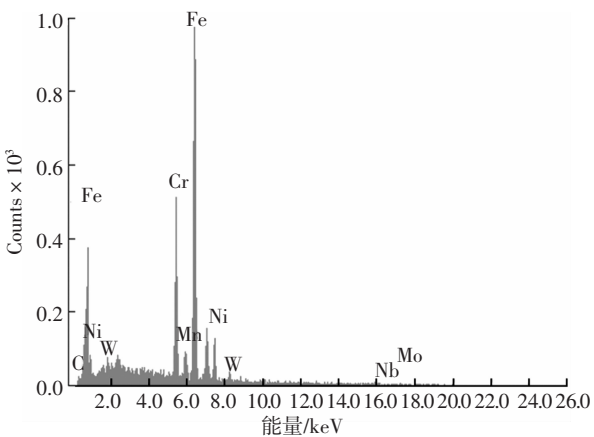
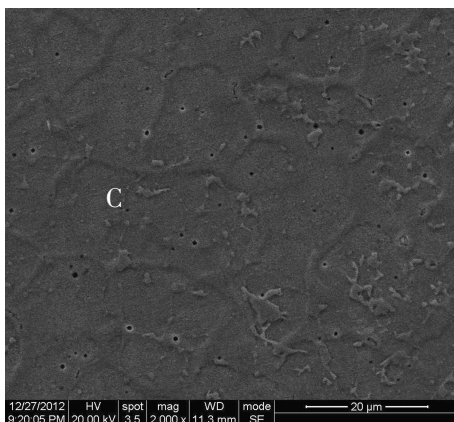
入熔池;而 C 主要来源于 316L 合金粉末,在激光高温作用下游离的 C 会与 O 结合生成 CO 和 CO<sub>2</sub> 气体,气体在熔池极快的冷却速度下,来不及逸出便形成了气孔<sup>[12]</sup>。因此,熔覆层越厚,整个熔覆层的总含 C 量增多,生成的 CO 和 CO<sub>2</sub> 气体量也增多,同时涂层越厚气体就越难逸出,故涂层表面的气孔数量就越多。



(a) 0.3 mm



(b) 0.5 mm



(c) 1.0 mm

图2 不同厚度 316L 熔覆层表面形貌及能谱分析

Fig.2 Surface morphology and EDS curves of 316L cladding layers with different thickness

图 2 中 A、B、C 区域的 EDS 分析结果如表 3 所示.由表 3 可见,随着熔覆层厚度的增加,涂层表面 Si、Mn 元素含量显著降低,Cr、Ni、Mo 等元素的含量显著提高,涂层厚度为 1.0 mm 试样表面成分除 C 含量显著降低外,其它元素含量与 316L 合金粉末基本一致.这说明熔覆层越薄,熔覆层的稀释度越大,基体中的 Si、Mn 等元素越容易扩散到涂层表面,涂层表面的 Cr、Ni、Mo 等元素也越容易扩散到基体中;涂层表面 C 含量显著降低主要是因为 C 与 O 反应生成了 CO 和 CO<sub>2</sub> 气体,且大部分逸出涂层.因此适当增加涂层厚度有利于保证涂层表面的成分稳定性,以提高涂层表面的综合性能.

表 3 不同厚度 316L 熔覆层表面的 EDS 分析结果

Tab.3 EDS analysis results of surface of 316L cladding layers with different thickness

区域	质量分数 /%							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	Fe
A	0.02	2.16	0.75	18.16	10.95	2.14	0.42	65.40
B	0.02	2.03	0.60	18.77	11.41	2.30	0.43	64.44
C	0.02	1.92	0.49	19.15	11.75	2.47	0.45	63.75

## 2.2 涂层厚度对熔覆层显微硬度的影响

图 3 所示为不同厚度 316L 涂层截面显微硬度对比曲线.由图 3 可见,不同厚度涂层硬度分布规律明显,均呈阶梯状分布,涂层硬度远高于基体硬度;距结合面等距离涂层的硬度随涂层厚度的增加不断降低,而结合面附近基体的硬度变化规律则正好与涂层硬度变化相反;0.3 mm 和 0.5 mm 厚涂层的硬度最大值均在涂层的表面区,1.0 mm 厚涂层的硬度最大值不在涂层的表面区,而是距结合面一定距离的亚表层.不同厚度 316L 涂层截面显微硬度相差较大的原因是涂层越厚,散热能力越差,导致涂层晶粒粗大,故显微硬度降低;熔池温度越高,越有利于涂层中的 Cr、Ni、Mo 等元素扩散到基体中,从而改变结合面附近基体成分,提高结合面附近基体显微硬度.较厚涂层显微硬度最大值位于亚表层主要是因为该区域具有最高的冷却速率<sup>[13]</sup>,熔覆层的组织形态受熔体中成分过冷度的影响<sup>[14]</sup>,该区域组织温度梯度  $G$  较小,凝固速率  $R$  大,导致  $G/R$  值小,故过冷度大,晶粒尺寸相对较小,具有最高的显微硬度.随着涂层厚度的增加,温度梯度  $G$  增大,凝固速率  $R$  降低,导致  $G/R$  增大,过冷度降低,晶粒尺寸逐渐变大,显微硬度随之降低<sup>[11]</sup>.再者,由于熔覆层厚度越大,相对来说熔覆过程中的温度越高,散热能力越弱,涂层表面脱 C 也越严重,这是 1.0 mm 厚涂层的硬度最大值在亚表层的另一原因.

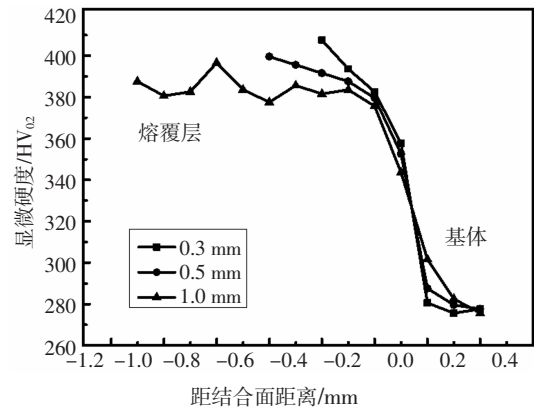


图 3 不同厚度 316L 熔覆层显微硬度对比

Fig.3 Microhardness comparison of 316L cladding layers with different thickness

## 2.3 熔覆层厚度对涂层耐腐蚀性能的影响

图 4 所示为不同厚度 316L 熔覆试样在 3.5% NaCl 溶液中测得的电化学腐蚀极化曲线.表 4 是相应的电化学腐蚀参数拟合结果,其中  $E_{\text{corr}}$  为自腐蚀电位 (self-corrosive potential),  $R_p$  为极化电阻率 (polarization resistivity),  $I_{\text{corr}}$  为腐蚀电流密度 (corrosion current density).

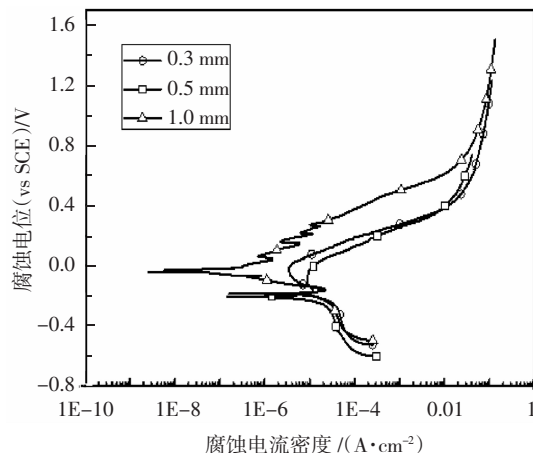


图 4 不同厚度 316L 熔覆层的极化曲线

Fig.4 Polarization curves of 316L cladding layers with different thickness

可以看出,1.0 mm 厚熔覆层试样的自腐蚀电位  $E_{\text{corr}}$  和极化电阻率  $R_p$  分别为 0.053 V 和 22.881  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ,远高于 0.3 mm 和 0.5 mm 厚熔覆层试样的自腐蚀电位和极化电阻率.从腐蚀热力学角度分析,自腐蚀电位和极化电阻率越高,腐蚀动力学阻力越大,涂层越易于钝化,其耐腐蚀性越好<sup>[15]</sup>.从自腐蚀电流密度来看,1.0 mm 厚熔覆层试样的自腐蚀电流密度  $I_{\text{corr}}$  为 1.018  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ,低于 0.3 mm 和 0.5 mm 厚熔覆层试样的自腐蚀电流密度,自腐蚀电流密度越低,其耐腐蚀性越强.由此可见,与 0.3 mm、0.5 mm 厚熔

覆试样比较,1.0 mm 厚熔覆层试样的耐腐蚀性最好。造成这一结果的主要原因是熔覆层厚度越小,涂层受基底 27SiMn 钢稀释的程度越大,Cr、Ni、Mo 等合金化元素含量减少,而 Si、Mn 等元素含量增多,316L 奥氏体不锈钢组织向马氏体不锈钢组织转变,从而导致涂层耐腐蚀性降低。

表 4 不同厚度 316L 熔覆层的电化学腐蚀参数

Tab.4 Electrochemical corrosion parameters of 316L cladding layers with different thickness

厚度/mm	$E_{\text{cat}}/V$	$R_p/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$I_{\text{cat}}/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$
0.3	-0.032	12.406	2.127
0.5	-0.116	20.065	1.560
1.0	0.053	22.881	1.018

### 3 结论

1)采用激光熔覆技术和自制的自溶性 316L 合金粉末,对基体材质为 27SiMn 的液压支架立柱进行表面熔覆,熔覆层与基体形成了良好的冶金结合,无明显气孔、裂纹及夹渣等缺陷。随着熔覆层厚度的增加,熔覆层组织由单一的柱状晶结构演变为平面晶、柱状晶和树枝状晶组成的层状结构。

2)不同厚度熔覆层硬度呈阶梯状分布,且随着熔覆层厚度的增加,熔覆层的显微硬度不断降低;0.3 mm 和 0.5 mm 厚涂层的硬度最大值均在涂层的表面区,1.0 mm 厚涂层的硬度最大值在距结合面一定距离的亚表层。

3)随着熔覆层厚度的增加,熔覆层的自腐蚀电位和极化电阻率不断增大,自腐蚀电流密度不断减小,熔覆层的耐腐蚀性更好。

### 参考文献

[1] 彭雪峰. 基于复合电镀工艺修复液压支架立柱的腐蚀破损[J]. 电镀与环保, 2013, 33(4):9-11.  
PENG X F. Repairing corrosion damage of hydraulic support column based on composite electroplating process [J]. Electroplating & Pollution Control, 2013, 33(4):9-11. (In Chinese)

[2] 王晶晨, 贾国平, 白冰, 等. 液压支架零部件防腐及再制造工艺研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(11):112-117.  
WANG J C, JIA G P, BAI B, et al. Research progress on antiseptic and remanufacturing process of hydraulic support components [J]. Materials Review, 2015, 29(11):112-117. (In Chinese)

[3] 纪正君, 张海英. 煤矿液压支架立柱(活塞杆)表面耐腐蚀处理工艺研究[J]. 煤矿机械, 2016, 37(4):89-90.  
JI Z J, ZHANG H Y. Research about technology of corrosion treatment process of coal mine hydraulic support column (Piston

Rod) [J]. Coal Mine Machinery, 2016, 37(4):89-90. (In Chinese)

[4] WANG S L, CHENG J C, YI S H, et al. Corrosion resistance of Fe-based amorphous metallic matrix coating fabricated by HVOF thermal spraying [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(1):146-151.

[5] SCALFANI V F, SAHIB J. A model for managing 3D printing services in academic libraries [J]. Issues in Science & Technology Librarianship, 2013, 72(10):1-8.

[6] 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[J]. 煤矿机械, 2010, 31(10):106-108.  
XIE W Z, LI C Q, YANG Z W, et al. Study on application of laser cladding technology in hydraulic supports [J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(10):106-108. (In Chinese)

[7] 王璐, 胡树兵, 单炜涛. 激光熔覆 NiCrMn-WC 复合涂层的组织与耐磨性[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(1):145-151.  
WANG L, HU S B, SHAN W T. Microstructure and wear resistance of laser cladding NiCrMn-WC composite coatings [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(1):145-151. (In Chinese)

[8] PARTES K, SEPOLD G. Modulation of power density distribution in time and space for high speed laser cladding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 195(1/3):27-33.

[9] ZHANG M M, LIU B, BAI P K. Microstructure and properties of laser cladding of 316L stainless steel on hydraulic support tube [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2017, 8(2):154-161.

[10] 宋建丽, 邓琦林, 胡德金, 等. 激光熔覆成形 316L 不锈钢组织的特征与性能[J]. 中国激光, 2005, 32(10):1441-1444.  
SONG J L, DENG Q L, HU D J, et al. Microstructure characterization and properties of laser cladding forming 316L stainless steel [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(10):1441-1444. (In Chinese)

[11] 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):237-270.  
LI Q, ZHANG Y Z, LI J F, et al. Microstructure and corrosion performance of laser clad 316L stainless steel coating [J]. Laser Technology, 2004, 28(3):237-270. (In Chinese)

[12] 刘发兰, 赵树森, 高文焱, 等. 基材属性对 Ni60A-WC 激光熔覆涂层性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(5):1319-1326.  
LIU F L, ZHAO S S, GAO W Y, et al. Effect of substrate on Ni60A-WC laser cladding coatings [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(5):1319-1326. (In Chinese)

[13] LUO F, YAO J H, HU X X, et al. Effect of laser power on the cladding temperature field and the heat affected zone [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 18(1):73-78.

[14] 周野飞, 高士友, 王京京. 激光熔覆高碳铁基合金组织性能研究 [J]. 中国激光, 2013, 40(12):120-130.  
ZHOU Y F, GAO S Y, WANG J J. Microstructure-property of laser cladding high carbon Fe-based alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(12):120-130. (In Chinese)

[15] 蔺绍江, 王赛玉, 熊惟皓. Mo 对 TiC/316L 复合材料耐蚀性的影响及作用机制 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2014, 19(1):54-59.  
LIN S J, WANG S Y, XIONG W H. Effect and mechanism of Mo addition on corrosion resistance of TiC/316L composites [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2014, 19(1):54-59. (In Chinese)