

激光功率对 42CrMo 熔覆 Stellite-6 涂层耐腐蚀性能的影响

崔宸, 武美萍*, 程伟

江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122

摘要 为提高 42CrMo 合金的耐腐蚀性能, 采用激光熔覆工艺在不同的激光功率下于其表面制备 Stellite-6 涂层, 然后采用浸泡实验、电化学方法研究 Stellite-6 涂层在 3.5% NaCl 溶液中的平均腐蚀速率与电化学特性, 结合扫描电子显微镜对浸泡后试样的微观形貌进行分析。结果表明: 不同激光功率下熔覆的 Stellite-6 涂层的平均腐蚀速率均远低于 42CrMo 基体材料的平均腐蚀速率, 且涂层在 NaCl 溶液中的腐蚀行为以点蚀为主; 激光功率对熔覆层质量有较大影响, 当激光功率为 2500 W 时, 开路电位为 -0.15 V, 自腐蚀电流为 3.294×10^{-3} A/cm², 阻抗为 $6742.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 此时熔池的形核率以及晶粒生长速率较大, 晶粒细化, 熔池区域的组织主要为细小的等轴晶, 组织致密均匀, Stellite-6 涂层的耐腐蚀性能最佳。腐蚀表面产生的 Cr₃C₂ 钝化膜层使阳极活性受到抑制, 钝化膜的保护作用明显, 从而提高了涂层的耐腐蚀性能。

关键词 激光技术; 激光熔覆; Stellite-6 涂层; 电化学特性; 腐蚀行为; 抗腐蚀性

中图分类号 TG174.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.241403

Effect of Laser Power on Corrosion Resistance of 42CrMo Cladding Stellite-6 Coating

Cui Chen¹, Wu Meiping^{1*}, Cheng Wei¹

Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract To improve the corrosion resistance of the 42CrMo alloy, a Stellite-6 coating was prepared on the surface of the 42CrMo alloy by laser cladding. The average corrosion rate and electrochemical characteristics of the Stellite-6 coating in a 3.5% NaCl solution were studied through an immersion experiment and electrochemical workstation. After the immersion experiment, the samples were analyzed via scanning electron microscopy (SEM). The test results show that the average corrosion rate of the laser cladding Stellite-6 coating is considerably lower than that of the matrix. In addition, the corrosion behavior of the coating in a NaCl solution is mainly pitting corrosion. Laser power considerably affects the quality of the cladding layer. When the laser power is 2500 W, the open circuit potential is -0.15 V, self-corrosion current is 3.294×10^{-3} A/cm², and impedance is $6742.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Furthermore, the nucleation and grain growth rates of the molten pool increase, the grain is refined, the microstructure of the molten pool primarily contains fine equiaxed crystals, and the structure is more dense and uniform. The Cr₃C₂ passivation film formed on the corrosion surface inhibits the anode activity. In addition, the passivation film is clearly protective, which improves the corrosion resistance of the coating.

Key words laser technique; laser cladding; Stellite-6 coating; electrochemical properties; corrosion behavior; corrosion resistance

OCIS codes 140.6810; 350.1820; 350.3850; 350.2660

收稿日期: 2019-04-18; 修回日期: 2019-05-28; 录用日期: 2019-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(51575237)

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

1 引言

42CrMo 合金钢作为一种超高强度钢,已广泛应用于油气钻采行业。随着油气钻井深度的不断增加,钻井液盐水会不断注入,井下钻具被严重腐蚀^[1-5]。由于此类零部件加工困难,精度要求高,部件替换成本高,因此常利用激光熔覆技术进行修复^[6-8]。Stellite-6 合金具有较好的耐腐蚀性,且其热膨胀系数及熔点与基材 42CrMo 合金钢相近,因此工业中多采用激光熔覆技术在基材表面制备 Stellite-6 涂层来提高其耐腐蚀性能,延长其工作寿命^[9-11]。Benea 等^[12]通过间歇摩擦实验探究了 Stellite-6 合金在硫酸中的耐腐蚀性能。Hall 等^[13]采用直流和交流电化学技术探究了 Stellite-6 合金在静态 NaCl 溶液中的耐腐蚀性能。Hocking 等^[14]研究了 Stellite-6 钴基合金在高温(300 °C)、高压(H₂ 气氛)锂化水和硼酸化水中的耐腐蚀性能。因

表 1 基材 42CrMo 的化学成分

Table 1 Chemical composition of 42CrMo substrate

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
Mass fraction /%	0.38-0.45	0.17-0.37	0.5-0.8	0.9-1.2	0.15-0.25	≤0.035	≤0.035

表 2 Stellite-6 粉末的化学成分

Table 2 Chemical composition of Stellite-6 powder

Element	C	Cr	Si	W	Fe	Mo	Ni	Mn	Co
Mass fraction /%	1.15	29.00	1.10	4.50	3.00	1.00	3.00	1.0	Bal.

熔覆设备采用万瓦级激光复合加工公共平台(TRUMPF DISK12003,南京先进激光研究所,中国)。送粉方式为同轴连续式送粉,实验在氩气气氛下进行。加工工艺参数如下:送粉速率为14 g/min,光斑直径为4 mm,扫描速度为8 mm/s,搭接率为30%。1号试样为42CrMo 基材,2#、3#、4#、5#试样分别为1500,2000,2500,3000 W 激光功率下在42CrMo 合金基材上熔覆的 Stellite-6 涂层。用线切割机将试样切割成12 mm×7 mm×5 mm 的方块。用400#、800#、1200#、2000# 砂纸逐层打磨试样,然后用丙酮清洗干净,干燥后用绝缘胶对其余未熔覆的5个面进行保护,再放置于干燥皿中。用蒸馏水和纯的 NaCl 配制质量分数为3.5%的 NaCl 溶液,并将其作为腐蚀介质,模拟 Stellite-6 涂层在井下的腐蚀行为。

2.2 实验方法

将试样浸泡在3.5% NaCl 溶液中静置24 h,根据试样的失重情况计算其在 NaCl 溶液中的平均腐蚀速率。采用由100 mL HCl、100 mL 去离子水和

激光工艺参数的改变对熔覆层质量有较大影响,故本文主要研究了不同激光功率下在42CrMo 合金上熔覆得到的 Stellite-6 涂层的耐腐蚀行为,并将其与基体试样进行对比,深化研究了激光熔覆再修复技术在工艺上的改善。

采用浸泡法、电化学方法探究了利用激光熔覆技术制备的 Stellite-6 涂层在3.5%(质量分数,下同)NaCl 溶液中的耐腐蚀性能,采用扫描电子显微镜(SEM)研究了涂层的显微组织。本实验不仅能够预测井下钻具的腐蚀速率,还能够深化氯离子腐蚀理论的基础。

2 实验材料及方法

2.1 实验材料

基材选用42CrMo 合金钢(尺寸为100 mm×50 mm×12 mm),基材化学成分如表1所示。熔覆材料为 Stellite-6 合金粉末,其化学成分如表2所示。

0.7 g 六次甲基四胺配制而成的除膜液去除试样表面的腐蚀产物膜,之后对试样进行清洗、干燥等处理,然后采用精度为0.001 g 的 AR323CN 型电子天平称量试样的质量;最后采用扫描电子显微镜(EVO18,蔡司,美国)对浸泡后的试样进行腐蚀形貌观察。

电化学测试采用 CHR6601 电化学工作站的经典三电极体系,参比电极为中性 Ag/AgCl,辅助电极为铂,工作电极为试样,试样的工作面积为1 cm²,控制溶液温度为20 °C。在测试极化曲线和阻抗前,先将试样浸泡在电解池中24 h。电化学测试中,动极化电位范围设定为-0.8-0.4 V,扫描速度设定为0.01 V/s。

3 实验结果与分析

3.1 浸泡实验

图1所示为42CrMo 基材、不同功率下制备的 Stellite-6 涂层在3.5% NaCl 溶液中浸泡24 h后的平均腐蚀速率。在5件试样中,42CrMo 基材的腐

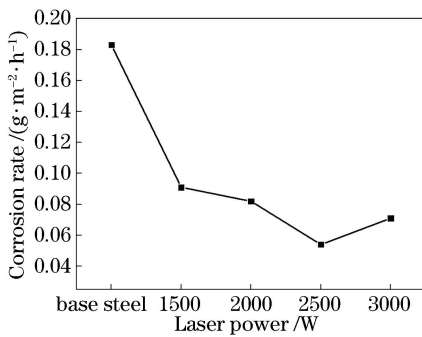


图1 基材和不同激光功率下制备的 Stellite-6 涂层在 NaCl 溶液中的腐蚀速率

Fig. 1 Corrosion rate of substrate and Stellite-6 coating prepared at different laser powers in NaCl solution

蚀速率最快,为 $0.184 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,说明在基材表面熔覆 Stellite-6 涂层后,能够明显改善试样的耐腐蚀性能。随着激光功率由 1500 W 增大到 3000 W,Stellite-6 涂层的腐蚀速率先减小后增大,且当激光功率为 2500 W 时,腐蚀速率最慢,为 $0.052 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

Stellite-6 粉末中 Cr 的质量分数高达 29%。Cr 具有稳定性好、易钝化、抗氧化等优点,在激光熔覆过程中,既能起到固溶强化的作用,又能对熔覆层起到氧化钝化作用,因此,高含量的 Cr 是提高钝化膜稳定性的重要因素^[15]。依据吸附理论,活性金属 Cr 与 C 因吸附而结合,在涂层表面形成了难溶于水的 Cr_3C_2 钝化膜层^[16]。该膜层的热力学稳定性高,致使涂层表面的 Fe、Ni、Mo 等元素的阳离子浓度降低,阳极活性受到抑制,使得钝化膜的保护作用明显,从而提高了涂层的耐腐蚀性能。

3.2 电化学测试

图2所示为 42CrMo 基材和不同激光功率下制

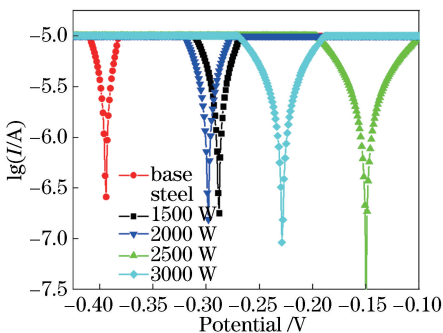


图2 基材和不同激光功率下制备的 Stellite-6 涂层试样在 NaCl 溶液中的动极化曲线

Fig. 2 Dynamic polarization in NaCl solution of base steel and Stellite-6 coating samples prepared at different laser powers

备的 Stellite-6 涂层在 NaCl 溶液中浸泡 24 h 后的动电位极化曲线图。腐蚀电流密度和自腐蚀电位是评价材料耐腐蚀性能的重要参数,腐蚀电流密度越小,材料的腐蚀速率越慢;自腐蚀电位的移动反映了涂层的腐蚀趋势,电位值越大,材料的耐腐蚀性能越好^[17]。从图2可以看出:42CrMo 基材的自腐蚀电位在所有试样中最低;当熔覆 Stellite-6 涂层后,试样的自腐蚀电位大幅正移;随着激光功率增大,自腐蚀电位呈现出先正移后负移的趋势;当激光功率为 2500 W 时,自腐蚀电位值最大。采用极化曲线外推法可分别获得 42CrMo 基材与不同激光功率下制备的 Stellite-6 涂层的腐蚀电流密度,其变化趋势与自腐蚀电位的变化趋势相同。与 42CrMo 基材相比,Stellite-6 涂层的腐蚀电流密度有较大程度的减小。随着激光功率增大,腐蚀电流密度呈现先减小后增大的趋势,在激光功率为 2500 W 时,腐蚀电流密度最小,为 $3.294 \times 10^{-3} \text{ A}/\text{cm}^2$,在该激光功率下制备的试样的耐腐蚀性能最好。利用(1)式计算腐蚀效率 P_E ,结果如表3所示,计算结果与动极化电位、自腐蚀电流分析结果一致。这是因为在激光熔覆过程中,随着激光功率逐渐增大,粉末熔化得更加充分,显微组织更加均匀,晶粒尺寸更加细小,熔覆层表面形成了稳定致密的氧化膜,弱化了电解液的腐蚀,增强了材料的耐腐蚀性能^[18]。当激光功率增大到一定程度时,熔覆粉末会出现过烧现象,基材受热严重,基材中的多元素被稀释到涂层,减弱了涂层的耐腐蚀性能^[19]。

$$P_E = \frac{I_{\text{corr}}^0 - I_{\text{corr}}^i}{I_{\text{corr}}^0}, \quad (1)$$

式中: I_{corr}^0 为基体的自腐蚀电流密度; I_{corr}^i 为涂层的自腐蚀电流密度。

极化电阻 R_p 是反映材料耐腐蚀性能的重要指标之一。如图3所示,随着激光功率增大,Stellite-6 涂层试样的极化电阻呈先增大后减小的趋势,表明涂层试样的耐腐蚀性能先增强后减弱。这是因为当激光功率较小时,激光能量密度较低,粉末无法充分熔化,导致熔覆层组织晶粒粗大,存在气孔、裂纹等缺陷,电解液进入涂层中,使涂层的耐腐蚀性能减弱。由表3可知,激光熔覆 Stellite-6 涂层大幅提高了 42CrMo 基材的耐腐蚀性,且在激光功率为 2500 W 时,阻抗值为 $6742.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$,约为基材的 10 倍。不仅如此,在激光熔覆过程中,不同激光功率获得的涂层的性能也相差较大,因此选取合适的激光工艺参数极其重要,激光功率过大或过小都会影响涂层的结构及性能。

表3 基材和不同激光功率下制备的 Stellite-6 涂层试样在 NaCl 溶液中的电化学参数

Table 3 Electrochemical parameters of base steel and Stellite-6 coating samples prepared at different powers in NaCl solution

Sample	Electrochemical parameter			$P_E/\%$
	E_{corr}/V	$I_{\text{corr}}/(10^{-3} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_p/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	
Base steel	-0.394	36.990	666.8	
Sample 2 (1500 W)	-0.298	12.750	2275.7	65.54
Sample 3 (2000 W)	-0.288	9.663	2863.6	73.88
Sample 4 (2500 W)	-0.150	3.294	6742.5	91.09
Sample 5 (3000 W)	-0.232	6.849	4071.9	81.42

Note: E_{corr} represents corrosion voltage; I_{corr} represents corrosion current.

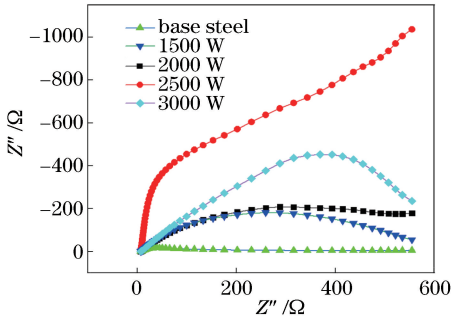


图3 基材和不同激光功率下制备的 Stellite-6 涂层试样在 NaCl 溶液中的极化阻抗曲线

Fig. 3 Polarization resistance curves of base steel and Stellite-6 coating prepared at different laser powers in NaCl solution

为了从微观角度验证由极化曲线和极化阻抗分析得出的试样腐蚀过程及激光功率对涂层耐腐蚀性能的影响规律,采用电镜观察浸泡 24 h 后电化学试样涂层的表面形貌,并与未浸泡腐蚀的 42CrMo 基

材的表面形貌进行对比。由图 4 可以看出,42CrMo 基材表面呈现出了针状交错形貌,而不同功率下熔覆的涂层试样表面被腐蚀产物覆盖,且腐蚀产物比例明显不同:当激光功率为 1500 W 时,基材表面基本被腐蚀产物覆盖;随着激光功率逐渐增大,涂层试样内部的基体开始逐渐显露出来,且腐蚀层的厚度不断减小,表明涂层内部的基体的腐蚀程度逐渐减小,即涂层试样的耐腐蚀性能不断增强;当激光功率增大到 2500 W 时,涂层-基体结合处的腐蚀产物较少,大部分区域为基体,这表明涂层试样的耐腐蚀性大大提高;当激光功率继续增至 3000 W 时,腐蚀产物增多,腐蚀层厚度增大,表明涂层的耐腐蚀性又开始降低。通过观察腐蚀形貌可知,其呈现的结果与极化曲线法、交流阻抗测得的涂层的耐腐蚀性的变化规律吻合,从而验证了电解质溶液是通过 Stellite-6 涂层中的腐蚀通道渗透进入与基体并与之发生反应生成腐蚀产物的。

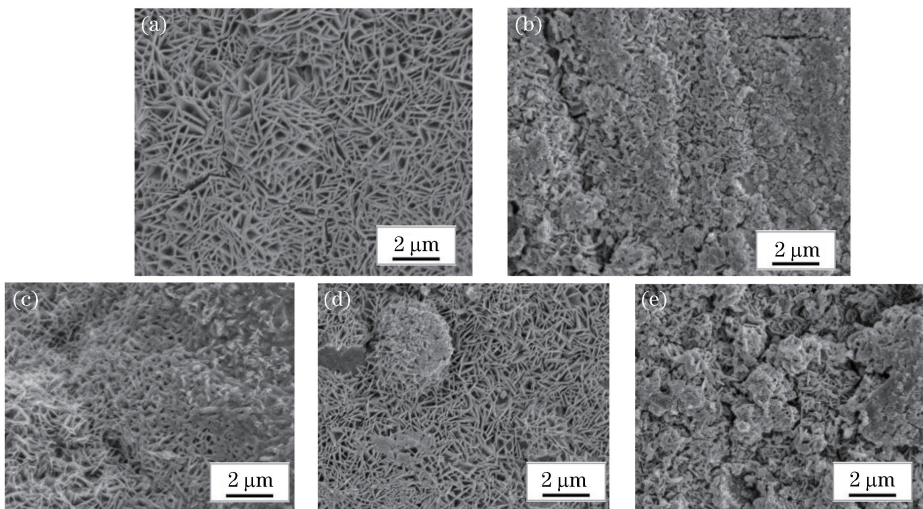


图4 基材和不同激光功率下制备的 Stellite-6 涂层在 NaCl 溶液中浸泡 24 h 后的腐蚀形貌。(a) 基材; (b) 1500 W; (c) 2000 W; (d) 2500 W; (e) 3000 W

Fig. 4 Corrosion morphologies of base steel and Stellite-6 coating prepared at different powers after soaking in NaCl solution for 24 h. (a) Base steel; (b) 1500 W; (c) 2000 W; (d) 2500 W; (e) 3000 W

在不同的激光功率下制备的熔覆层的显微组织呈现出不同的形貌,如图5所示。当激光功率为1500 W时,熔池区域出现了细小的颗粒状未完全成形的胞状晶,晶粒的生长速率低;当激光功率为2000 W时,熔池区域主要为扁圆胞状晶和少量柱状晶;当激光功率增大到2500 W时,温度梯度减小,过冷度增大,熔池的形核率以及晶粒生长速率均增

大,晶粒细化,熔池区组织主要为细小的等轴晶,组织更为致密均匀,使得试样的耐腐蚀性大大提高;当功率继续增大到3000 W时,过冷度持续增大,形核率增加,但是晶粒生长速率随着过冷度的增大在达到顶峰后会不断减小,因而组织由细小等轴晶逐渐转为扁圆胞状晶,晶粒更为粗大,且排列无序,使得试样的耐腐蚀性能有所降低。

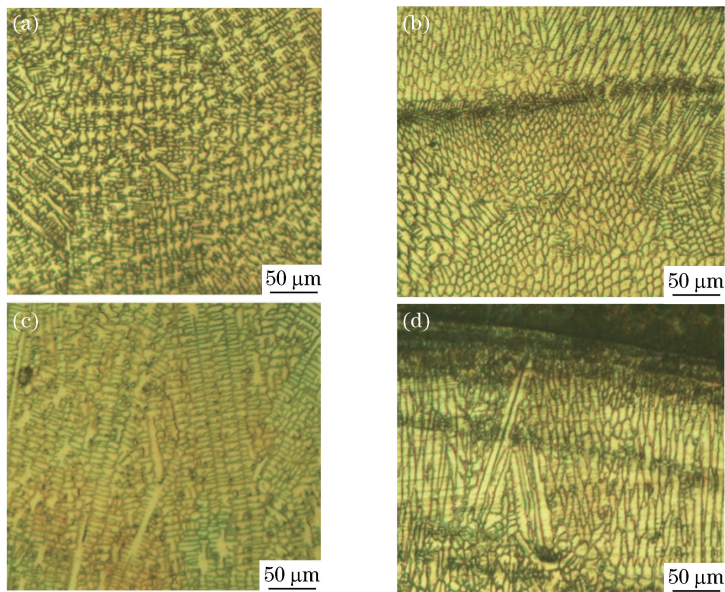


图5 不同激光功率下制备的熔覆层熔池区域的金相组织。(a) 1500 W;(b) 2000 W;(c) 2500 W;(d) 3000 W
Fig. 5 Metallographic structures of the molten pool in cladding layer prepared at different laser powers. (a) 1500 W; (b) 2000 W; (c) 2500 W; (d) 3000 W

4 结 论

Stellite-6 合金涂层具有优异的性能,能大幅提升42CrMo基材的耐腐蚀性能。激光功率对熔覆层质量有显著影响,当激光功率为2500 W时,涂层试样的阻抗可达到 $6742.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$,约为基体阻抗的10倍,腐蚀速率仅为 $0.052 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,熔池的形核率以及晶粒的生长速率较大,晶粒细化,熔池区域的组织主要为细小的等轴晶,组织致密均匀。

激光熔覆参数对熔覆层的组织、性能有很大影响,在未来的激光增材制造中,要选取适当的工艺参数。

参 考 文 献

- [1] Liu J, Li J D, Lü L, *et al.* Evaluation on application of corrosion protection downhole tool in oil-wells[J]. Surface Technology, 2016, 45(8): 92-97.
刘杰, 李建东, 吕雷, 等. 油井井下防腐工具的应用评价[J]. 表面技术, 2016, 45(8): 92-97.
- [2] Zhi Z, Zhou X Y, Zeng D Z, *et al.* Evaluation on

chloride cracking of S135 high-strength drill pipe[J]. Advanced Materials Research, 2012, 430/431/432: 636-639.

- [3] Zhou Y Z. Corrosion and protection of steel G105 for drill tools in saline slurries[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2008, 20(6): 424-428.
周永璋. 盐井钻井的盐水泥浆液中钻具的腐蚀与防护研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2008, 20(6): 424-428.
- [4] Cui X Y, Wang C B, Kang J J, *et al.* Influence of the corrosion of saturated saltwater drilling fluid on the tribological behavior of HVOF WC-10Co4Cr coatings [J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 71: 195-203.
- [5] González J M, Quintero F, Arellano J E, *et al.* Effects of interactions between solids and surfactants on the tribological properties of water-based drilling fluids[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2011, 391(1/2/3): 216-223.
- [6] Chen J, Liu Y L. The engineering application of laser

- remanufacturing technology [J]. *China Surface Engineering*, 2006, 19(S1): 50-55.
- 陈江, 刘玉兰. 激光再制造技术工程化应用[J]. *中国表面工程*, 2006, 19(S1): 50-55.
- [7] Deng Z Q, Shi S H, Zhou B, *et al.* Laser cladding forming of unequal-height curved arc-shaped thin-wall structures[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0902005.
- 邓志强, 石世宏, 周斌, 等. 不等高弯曲弧形薄壁结构激光熔覆成形[J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0902005.
- [8] Zhai J H, Liu Z J, Zhang Y, *et al.* Laser cladding repair of inner cylinder piston rods[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 111411.
- 翟建华, 刘志杰, 张勇, 等. 内缸活塞杆的激光熔覆修复[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 111411.
- [9] Xu G J, Li C G, Guo Y Q, *et al.* Organization of clad layer using mixed powder of Stellite 6 and VC [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(6): 73-78, 132.
- 徐国建, 李春光, 郭云强, 等. 激光熔覆 Stellite-6 + VC 混合粉末的熔覆层组织[J]. *焊接学报*, 2017, 38(6): 73-78, 132.
- [10] Cheng W, Wu M P, Tang Y H, *et al.* Laser cladding process of 42CrMo surface with single-pass [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 041402.
- 程伟, 武美萍, 唐又红, 等. 42CrMo 合金表面单道轨迹激光熔覆工艺研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 041402.
- [11] Zhong X K, Wang X F, Han F S. Electrochemical corrosion behavior of stellite-F laser cladding layer on surface of 316L stainless steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2019, 44(1): 176-179.
- 钟晓康, 王幸福, 韩福生. 316L 不锈钢表面激光熔覆 Stellite-F 合金层的电化学腐蚀行为[J]. *金属热处理*, 2019, 44(1): 176-179.
- [12] Benea L, Mitoseriu O, Galland J, *et al.* Corrosion study of copper composite coating by impedance spectroscopy method [J]. *Materials and Corrosion*, 2000, 51(7): 491-495.
- [13] Hall D S, Standish T E, Behazin M, *et al.* Corrosion of copper-coated used nuclear fuel containers due to oxygen trapped in a Canadian deep geological repository [J]. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 2018, 53(4): 309-315.
- [14] Hocking W H, Lister D H. Corrosion of stellite-6 in lithiated and borated high-temperature water [J]. *Surface and Interface Analysis*, 1988, 11(1/2): 45-59.
- [15] Xue M P, Han B, Wang Y, *et al.* Microstructures and corrosion resistance properties of Ni-based WC/Cr₃C₂ coating prepared by laser cladding [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(9): 091403.
- 薛敏鹏, 韩彬, 王勇, 等. 激光熔覆 Ni 基 WC/Cr₃C₂ 涂层显微组织和耐蚀性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(9): 091403.
- [16] Xu L N, Zhu J Y, Wang B. Influence of Cr content and pH value on the semi-passivation behavior of low Cr pipeline steels [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 53(6): 677-683.
- 许立宁, 朱金阳, 王贝. Cr 含量和 pH 值对低铬管线钢半钝化行为的影响[J]. *金属学报*, 2017, 53(6): 677-683.
- [17] Feng X T, Gu H, Zhou S F, *et al.* Microstructure and electrochemical corrosion behavior of TC4 titanium alloy cladding layer prepared with powder feeding laser additive manufacturing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0302003.
- 冯晓甜, 顾宏, 周圣丰, 等. 送粉式激光增材制造 TC4 钛合金熔覆层组织及电化学腐蚀行为的研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0302003.
- [18] Ren C, Li Z G, Shu D, *et al.* Microstructure and water erosion resistance property of Stellite 6 coating by laser cladding on 17-4 PH stainless steel surface [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0402010.
- 任超, 李铸国, 疏达, 等. 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite 6 涂层组织及耐水蚀性能[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0402010.
- [19] He X, Kong D J, Song R G. Effect of scanning speed on microstructures and properties of laser cladding Al-Ni-TiC-CeO₂ composite coatings [J]. *Surface Technology*, 2019, 48(3): 155-162.
- 贺星, 孔德军, 宋仁国. 扫描速度对激光熔覆 Al-Ni-TiC-CeO₂ 复合涂层组织与性能的影响[J]. *表面技术*, 2019, 48(3): 155-162.