

炮钢表面激光熔覆 Hastelloy C-276 涂层的组织及性能

王晓明^{1,2}, 罗耕星¹, 胡浩³, 任世伟², 马震^{1,2}, 李正阳^{1*}

¹ 中国科学院力学研究所, 先进制造工艺力学重点实验室, 北京 100190;

² 河北科技大学 理学院, 河北 石家庄 050080; ³ 中国人民解放军 92942 部队, 北京 100161)

摘要 研究 Hastelloy C-276 激光熔覆层的组织与性能, 为炮管激光修复做好基础研究工作。利用激光熔覆系统在炮管表面制备 Hastelloy C-276 熔覆层, 采用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、显微硬度计和电化学工作站, 研究其显微组织形貌、显微硬度及耐蚀性。在炮钢表面制备的 Hastelloy C-276 熔覆层质量良好, 无明显气孔、裂纹等缺陷, 厚度约为 1.2 mm, 组织均匀, 晶粒细小, 与基体结合良好。从熔覆层表面到基体的硬度分布呈先升后降趋势, 熔覆层平均硬度在 280 HV 左右, 相变区硬度最高达到 500 HV, 基体平均硬度在 350 HV 左右。炮管原始镀铬层的自腐蚀电位为 -0.734 V, 自腐蚀电流密度为 2.39×10^{-6} A/cm², 熔覆层试样的自腐蚀电位为 -0.326 V, 自腐蚀电流密度为 3.59×10^{-6} A/cm², 与原始镀铬层相比, 熔覆层的自腐蚀电位值正移, 腐蚀电流密度值稍微偏大, 但仍在同一级量。采用激光熔覆技术, 能够在炮钢表面制备综合质量良好的 Hastelloy C-276 熔覆层, 且其具有优良的耐蚀性, 与基体结合良好, 可以部分补足身管强度。

关键词 激光熔覆; Hastelloy C-276; 炮钢; 显微组织; 显微硬度; 耐蚀性

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

doi: 10.14128/j.cnki.al.20183803.321

Microstructure and Properties of Laser Cladding Hastelloy C-276 Coating on Gun Steel Surface

Wang Xiaoming^{1,2}, Luo Gengxing¹, Hu Hao³, Ren Shiwei², Ma Zhen^{1,2}, Li Zhengyang¹

¹ Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100190, China; ² School of Science, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang,

Hebei 050018, China; ³ 92942 Troops of the PLA, Beijing 100161, China)

Abstract To study the microstructure and properties of the Hastelloy C-276 laser cladding layer, and to do basic research work for laser repairing gun barrel. The cladding layer of Hastelloy C-276 was prepared on the surface of the gun steel by using a laser cladding system. The microstructure morphology, microhardness and corrosion resistance of the layer were investigated with optical microscope(OM), scanning electron microscope(SEM), microhardness tester and electrochemical workstation. The Hastelloy C-276 cladding layer prepared on the surface of the gun steel was of good quality and had no obvious pores, cracks, and other defects. The thickness was about 1.2 mm, uniform structure, fine grain, and good combination with the substrate. The microhardness distribution from the surface of the cladding layer to the substrate showed a trend of rising first and then decreasing. The average microhardness of the cladding layer was about 280 HV, the highest microhardness in the phase change zone was 500 HV, and the average hardness of the substrate was about 350 HV. The self-corrosion potential of original chrome plated gun barrel was -0.734 V, the self-corrosion current density was 2.39×10^{-6} A/cm². The self-corrosion potential of the cladding layer sample was -0.326 V, and self-corrosion current density was 3.59×10^{-6} A/cm². Compared with the original chrome plated gun barrel, the corrosion potential of the cladding layer shifts positively and the corrosion current density value was slightly larger, but it was still in the same level. Using laser cladding technology, a Hastelloy C-276

收稿日期:2018-03-22; 收到修改稿日期:2018-05-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(项目编号:51275510)

作者简介:王晓明(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光熔覆及相关材料技术。E-mail:1049352872@qq.com

* 通信作者:李正阳(1963-),男,博士,副研究员,主要研究方向为激光增材制造、激光表面改性。E-mail:zhengyang.li@gmail.com

cladding layer with good overall quality could be prepared on the surface of the gun steel, and it had excellent corrosion resistance, and was well combined with the substrate, and could partially compensate for the strength of the tube.

Key words laser cladding; Hastelloy C-276; gun steel; microstructure; microhardness; corrosion resistance

0 引言

腐蚀是海上装备及设施面临的主要问题。在海洋环境中,通常有全面腐蚀、局部腐蚀、应力腐蚀及磨损腐蚀等多种腐蚀形式,甚至与不同的海域有关。海水对金属材料的腐蚀是多种机制联合作用的结果,但是,从本质上看,是化学原电池效应。由于海水盐度高,受海水冲刷或暴露在潮湿的大气中,金属基体都会受到不同程度的氯离子的侵蚀,使金属结构的力学性能降低,使用寿命缩短,带来潜在的安全隐患^[1-3]。因此,提高耐蚀性的根本途径是阻隔化学原电池效应。传统的金属表面防腐措施之一是采用电镀技术,利用致密的铬层及其表面钝化膜阻隔海水与金属的直接接触。但是,铬的热膨胀系数与金属基体热膨胀系数存在一定的差异,某些热工部件在高温高压循环载荷作用下,表面铬层会产生微裂纹,为海水侵蚀基体提供了通道,从而破坏了铬层的阻隔作用。

近年来,为了加强环境保护,防止六价铬离子的危害,传统的电镀技术逐渐被其他表面技术所取代。激光熔覆技术利用高能激光束在金属基体表面形成熔池,将送粉装置输送到熔池的金属粉末或事先预置于基体上的涂层熔化,然后快速凝固与基体形成冶金结合,具有涂层致密,可熔覆材料种类广泛,热变形和热影响区小效率高等优点^[4]。已经在许多领域成为替代传统电镀技术的首选。

Hastelloy C-276 合金是一种“万能”抗腐蚀合金,具有较好的高温强度、韧性及优异的抗腐蚀性,在航空航天、石油化工和核工业等领域得到了广泛应用^[5]。作为一种 Ni-Cr-Mo 系镍基合金,它不仅具有优异的耐盐酸腐蚀性能^[6],也是少有的对氯离子具有良好抗蚀能力的合金,并且其抗蚀性对 NaCl 等盐浓度的增加并不敏感^[7]。因此, Hastelloy C-276 合金很适合作为海洋防腐涂层材料。然而目前国内外学者对于 Hastelloy C-276 合金的研究主要以焊接方面为主^[8-10],在制备涂层方面,黄科等^[11]采用超音速火焰喷涂工艺在 316L 不锈钢表面制备了 Hastelloy C-276 涂层,并对涂层的显微结构、显微硬度及耐磨性进行了研究,发现喷涂过程中产生的氧化物与气孔影响了涂层的硬度与耐磨性,喷涂技术的主要缺点是涂层与基体的结合力有时很

难达到冶金结合。李正秋等^[12]分别用半导体激光器和超音速火焰喷涂设备在 45 钢表面制备了 Ni60 合金涂层,研究发现,激光熔覆层比火焰喷涂层的结合力要强;由于激光熔覆层 C 化物与 Cr 化物的析出,使其硬度与耐磨性要高于火焰喷涂层。

本文针对某热工部件既要具有较好的耐蚀性,又要有一定的韧性的要求,采用激光熔覆技术直接在炮钢表面制备 Hastelloy C-276 熔覆层,研究了其显微组织、显微硬度及耐蚀性,开展激光熔覆技术替代电镀技术在某热工部件表面形成耐蚀涂层的可行性研究。

1 实验

基体材料为 PCrNi3MoVP 钢,其化学成分如表 1 所示。基材形状为空心正八棱柱,正八边形边长 33 mm,高度 200 mm,壁厚 19~23 mm,如图 1 所示。在进行激光熔覆前,用砂纸打磨,去除表面氧化膜及杂质,再用无水乙醇清洗,清除表面油污。

熔覆材料为 Hastelloy C-276 合金粉末,粒度为 100~250 目,化学成分如表 2 所示,合金粉末存放于真空干燥箱内,使用前进行烘干除湿。

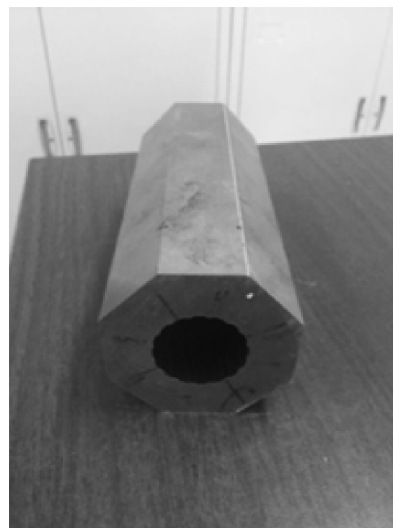


图 1 用于激光熔覆的基材
Fig. 1 Substrate for laser cladding

实验采用同轴送粉式激光熔覆实验设备,包括最大输出功率为 4 000 W 的 IPG 光纤激光器、熔覆头、机器人和送粉器,使用氩气作为保护气。通过多次试验,确定多道激光熔覆优化工艺参数为光斑直径 3.5 mm,激光功率 2 000 W,扫描速度 10 mm/s。

表 1 PCrNi3MoVP 钢的化学成分 (wt%)

Tab. 1 Chemical composition of PCrNi3MoVP steel (wt%)

Element	Cr	Mo	Mn	C	Si	Ni	V	P	S	Cu
Content	0.600~0.900	0.200~0.300	0.300~0.600	0.270~0.340	0.170~0.370	2.000~2.400	0.150~0.300	≤0.025	≤0.025	≤0.200

表 2 Hastelloy C-276 合金粉末的化学成分 (wt%)

Tab. 2 Chemical composition of Hastelloy C-276 alloy powder (wt%)

Element	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	Mo	W	Co	V	P	S
Min	Bal.	15.0	4.0				15.0	3.0		0.1		
Max		16.5	7.0	0.01	1.0	0.08	17.0	4.5	2.5	0.3	0.015	0.01

采用常规金相制样方法制备可进行熔覆层分析的试样。用 4% HNO₃ 酒精溶液进行浅腐蚀, 测量从熔覆层至基体内部的硬度变化曲线, 测量方法: 从距熔覆层表面 100 μm 处开始, 沿垂直基体方向每隔 100 μm 测量一个点, 每个点在同一水平深度测量 3 次, 求得算术平均值作为该点的硬度值, 载荷 150 g, 保压时间 10 s, 硬度计型号为 MH-7。对试样作抛光处理, 用王水进行二次腐蚀(深腐蚀), 用于进行扫描电镜显微组织观察, 电镜型号为 ZEISS EVO-18。用 CHI600E 电化学工作站在室温下测试熔覆层的耐蚀性, 用硅橡胶密封试样, 电化学测试溶液为 3.5 wt% 的 NaCl 溶液, 阳极为测试试样, 阴极为铂电极, 参比电极为饱和甘汞电极, 开路电位测试时间为 400 s, 动电位极化测试时间为 40 s。

2 结果与讨论

2.1 熔覆层形貌与组织分析

图 2 为优化后的单道激光熔覆层截面形貌, 可以看出, 熔覆层致密, 无明显气孔裂纹等缺陷, 与基体形成良好的冶金结合, 图中细小的银亮斑点为制样时残留的杂质; 其次可以发现, 激光熔覆层主要由熔覆区、合金化区和热影响区三部分组成, 其中合金化区与热影响区结合部分呈现一条很细白亮带, 是由于在快速传热激冷作用下^[13], 形成的一层很薄的平面状晶体^[14-15]。图 3(a) 为利用优化参数制备的多道熔覆层的表面形貌, 熔覆层表面平整, 无明显气孔、裂纹等缺陷, 具有金属光泽, 厚度约为 1.2 mm, 表明熔覆质量良好。图 3(b) 为多道熔覆层的截面形貌, 其内部组织致密, 未发现孔洞、裂纹等缺陷, 说明对于 Hastelloy C-276 合金, 可以利用激光熔覆技术在炮钢表面制备出质量良好的涂层。图 3(b) 中很明显地呈现出浅灰色的致密层、亮色的蜂窝状层和深暗色的不平整层三种形态, 其分别对应的区域是熔覆层、热影响区和基体, 这是由于在侵

蚀熔覆层观察金相组织时, 使用的王水侵蚀液腐蚀性太强, 导致热影响区和基体遭受严重腐蚀。

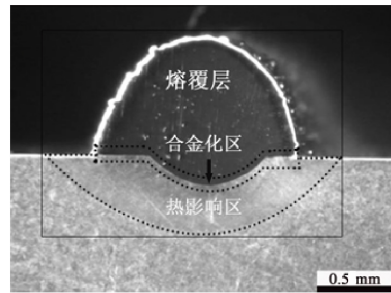


图 2 单道熔覆层的横截面形貌

Fig. 2 Cross-section morphology of single-clad cladding

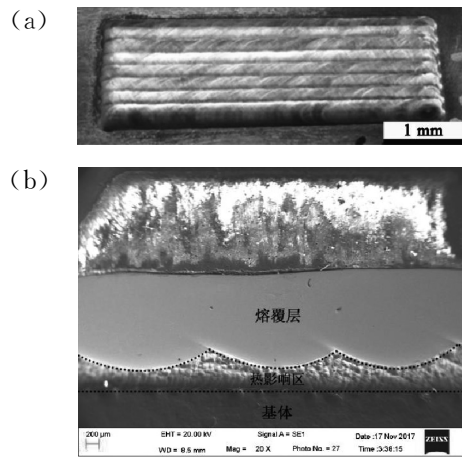


图 3 多道熔覆层的形貌

(a) 表面形貌 (b) 横截面形貌

Fig. 3 Morphology of multiple-clad cladding

图 4 是 Hastelloy C-276 合金激光熔覆层的显微组织, 组织均匀细化, 由于激光熔覆过程中, 熔覆层底部、中部和顶部的温度场分布不同, 受热流因素影响, 使各部分的组织形成差异。图 4(a) 是接近熔覆层底部的显微组织, 主要由柱状枝晶组成, 枝晶组织的生长方向与固液界面法向呈一定角度生长, 这是由于受熔池扰动, 结晶各项异性等因素的影

响^[16]。随着距交界面的距离增加,界面处的温度梯度与结晶速率的比值减小,交界面失稳,熔体对流作用减弱导致晶粒的生长方向发生改变,柱状晶沿着熔体最易散热的方向生长明显。同时熔池底部前沿区域受过冷区影响,冷却速率很快,因此熔体迅速凝固形成直径较小的细晶组织。图 4(b)为熔覆层中部显微组织,枝晶和等轴晶无规则分布,随着固液界面继续向前推移,温度梯度继续减小,结晶速率继续增大,大量晶粒自由生长,在熔覆层中部形成了自由分布的枝晶和等轴晶组织^[11,17]。

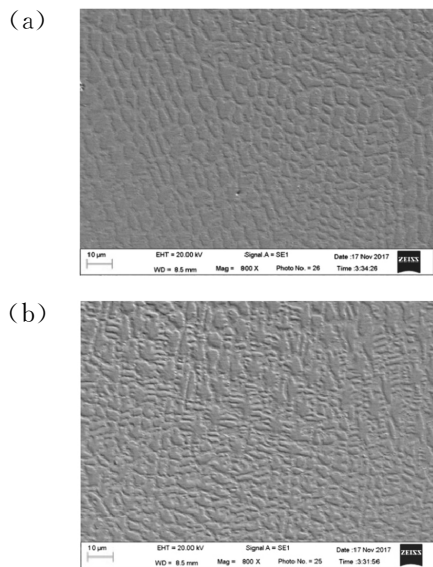


图 4 熔覆层的显微组织
(a)底部 (b)中部

Fig. 4 Microstructure of cladding layer

2.2 显微硬度

图 5 是从熔覆层到基体不同区域的显微组织,图 6 是 Hateslloy C-276 激光熔覆层的显微硬度分布测试结果。0~1 200 μm 为熔覆层,如图 5(a)所示,平均显微硬度在 280 HV 左右;1 200~1 400 μm 为合金化区,由图 5(b)可以看出在此区域出现相互扩散现象,硬度值有下降趋势,最低达到 230 HV,这可能是由于基体对熔覆层的稀释造成的,如图 7 EDS 分析显示,相较于熔覆层这一区域 Ni 元素增加;1 400~2 000 μm 为热影响区,此区域硬度值发生突变,最高达到 530 HV,由图 5(c)分析可知,这是由于基体发生相变硬化所致;2 000~2 500 μm ,硬度又突然下降,最后趋于平稳,说明到达基体,如图 5(d)所示,基体平均硬度在 350 HV 左右。根据上述分析可以简单判定,Hateslloy C-276 熔覆层与基体结合形成良好过渡,熔覆层硬度与基体相近,韧性较好,

材料匹配性高,有利于部分补足身管强度,使身管内腔剩余寿命得以发挥。

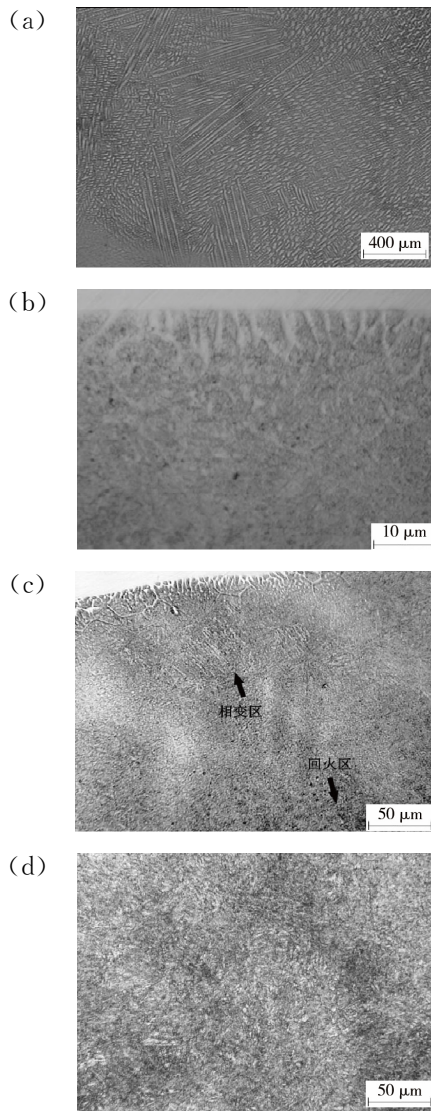


图 5 各个区域的显微组织
(a)熔覆层 (b)合金化区
(c)热影响区 (d)基体

Fig. 5 The microstructure of each area

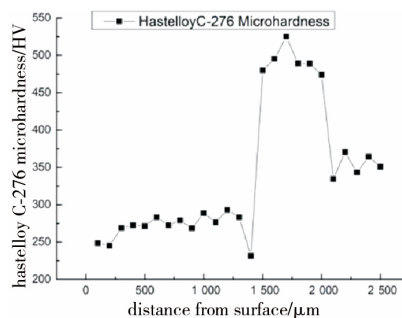


图 6 熔覆层的显微硬度分布图
Fig. 6 Microhardness distribution diagram
of cladding layer

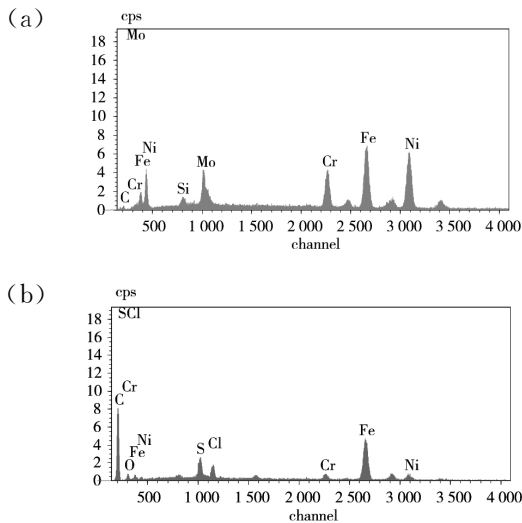


图7 EDS分析结果

(a)熔覆层 (b)合金化区

Fig. 7 The results of EDS analysis

2.3 耐蚀性

2.3.1 开路电位-时间($E_{ocp}-t$)测试

在实验开始一段时间后,镀铬层、Hastelloy C-276 熔覆层在自然未脱气的室温下 3.5 wt% NaCl 溶液中的 $E_{ocp}-t$ 曲线中,如图 8 所示,两种试样的 E_{ocp} 值随时间的增加逐渐减小,直至一个静态稳定值。根据两种试样 E_{ocp} 值的变化可以推测,在试样表面都自主形成了钝化膜,钝化膜的形成对试样在腐蚀液中的化学溶解起到了阻抗作用^[18]。通过比较稳态 E_{ocp} 值,可以明显看出 Hastelloy C-276 熔覆层表现出较高值,而镀铬层 E_{ocp} 值较低,这表明了 Hastelloy C-276 熔覆层表面所形成的钝化膜在室温的 3.5 wt% NaCl 溶液中的热力学稳定性比镀铬层高,腐蚀的倾向性更小。而且,通过对比可以发现 Hastelloy C-276 熔覆层获得静态稳定的 E_{ocp} 值的时间比镀铬层更短,表明了,在腐蚀溶液中 Hastelloy C-276 熔覆层表面钝化膜的形成速度要更快,耐蚀性能更加优异。

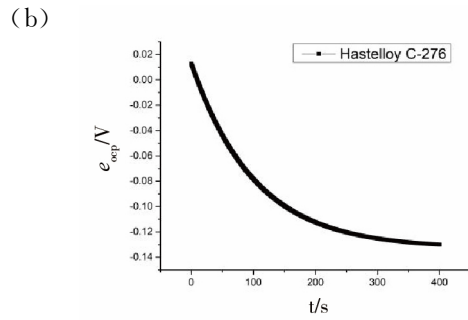
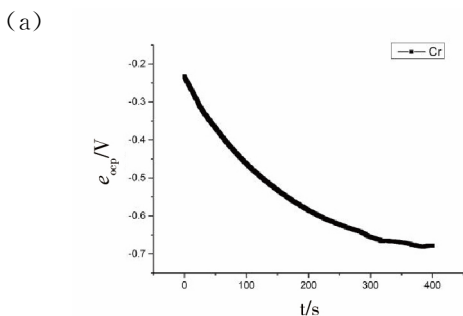


图8 开路电位测试

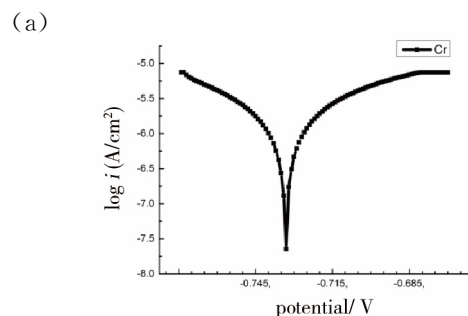
(a)原始镀铬层 (b)Hastelloy C-276 熔覆层

Fig. 8 Open circuit potential test

2.3.2 动电位极化测试

Hastelloy C-276 熔覆层和镀铬层在室温下 3.5 wt% NaCl 溶液中的动电位极化曲线如图 9 所示,通过数据处理,得到熔覆层和镀铬层的自腐蚀电位(E_{corr})与自腐蚀电流密度(I_{corr}),数据列于表 3。动电位极化曲线的变化直接反映着材料在腐蚀反应的动力学参数的变化。就阴极极化部分而言,当电压值变得更低时电流密度则持续变大,而且熔覆层和基体的阴极斜率都处于 $-131 \sim -125$ mV/decade 的范围内,证明了阴极反应过程主要为氧气的溶解以及水还原反应中氢的转换过程。阳极极化分支在很宽的电压范围内都表现出了很明显的自钝化的行为,其线形特征为很长的电流密度平台。通常的情况下, E_{corr} 数值的下降代表了腐蚀发生的热力学倾向更强,在 3.5 wt% NaCl 溶液中,具有更正 E_{corr} 的熔覆层比镀铬层覆盖的样品在热力学方面要表现得更加稳定。镀铬层的 I_{corr} 数值比熔覆层附着的基体试样的 I_{corr} 略低,但仍在同一量级,这证实了在 3.5 wt% NaCl 溶液当中镀铬层比熔覆层附着的样品具有稳定的动力学性质,因为铬可以在表面形成一层非常致密的氧化膜来提高耐腐蚀性能^[19]。

总体来看,与镀铬层相比,Hastelloy C-276 熔覆层具有同样优异耐腐蚀性能,在耐蚀性方面可以作为防护涂层发挥作用。



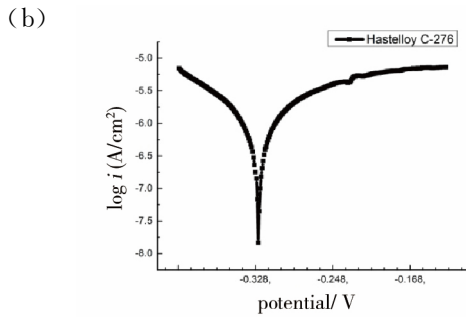


图9 动电位极化曲线

(a)原始镀铬层 (b)Hastelloy C-276 熔覆层

Fig. 9 Dynamic potential polarization curve

表3 两种涂层在3.5 wt% NaCl溶液中的动电位极化参数

Tab. 3 Dynamic potential polarization parameters of two coatings in 3.5 wt% NaCl solution

Samples	Cr	Hastelloy C-276
E_{corr}/V_{SCE}	-0.734	-0.326
$I_{corr}/(A/cm^2)$	2.39×10^{-6}	3.59×10^{-6}

3 结论

(1)采用激光熔覆技术成功地在炮钢表面制备了形貌与组织质量良好的 Hastelloy C-276 熔覆层。熔覆层组织均匀细化,从熔覆层底部到中上部,晶粒由柱状晶逐渐转变为细小的枝晶和等轴晶,与基体形成良好的冶金结合。

(2)Hateslloy C-276 激光熔覆层的平均显微硬度在 280 HV 左右,基体硬度约为 350 HV,二者匹配性较好,可以部分补足身管强度。

(3)Hastelloy C-276 熔覆层的自腐蚀电位为 0.326 V,腐蚀电流密度为 $3.59 \times 10^{-6} A/cm^2$,与镀铬层相比,具有同样优异耐腐蚀性能,可以代替铬层作为腐蚀防护涂层。

参考文献

[1] XIA LANTING. Marine corrosion and protection of metal[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003: 2-4.
夏兰廷. 金属材料的海洋腐蚀与防护[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003: 2-4.

[2] CHEN GUANGZHANG, WU JIANHUA, XU LIKUN, et al. Corrosion and protection of ship[J]. Ship Science and Technology, 2001(2): 38-43.
陈光章, 吴建华, 许立坤, 等. 舰船腐蚀与防护[J]. 舰船科学技术, 2001(2): 38-43.

[3] HOU BAORONG, ZHANG DUN, WANG PENG. The status and future of marine corrosion protection[J]. Bul-

letin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(12): 1326-1331.

侯保荣, 张盾, 王鹏. 海洋腐蚀防护的现状与未来[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(12): 1326-1331.

[4] YUE CANFU, WU SHIDONG. Laser cladding and its applications to repairing underwater weapons[J]. Torpedo Technology, 2007, 15(1): 1-5.

岳灿甫, 吴始栋. 激光熔覆及其在水中兵器修复上的应用[J]. 鱼雷技术, 2007, 15(1): 1-5.

[5] AHMAD M, AKHTER J I, AKHTAR M, et al. Microstructure and hardness studies of the electron beam welded zone of Hastelloy C-276[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2005, 309(1-2): 88-93.

[6] KHALID S E, MALAHY A L, HODGKIESSB T. Comparative studies of the seawater corrosion behavior of a range of materials[J]. Desalination, 2003, 158(1-3): 35-42.

[7] ZHANG QIANG, TANG RUI, YIN KAIJU, et al. Corrosion behavior of Hastelloy C-276 in supercritical water[J]. Corrosion Science, 2009, 51(9): 2092-2097.

[8] REN GUANPENG, GUO XIAOHUI, LIU ZHIYING, et al. Effect of different welding process on weld microstructure and intergranular corrosion resistance for Hastelloy C-276[J]. Development and Application of Materials, 2016, 31(5): 40-44.

任冠鹏, 郭小辉, 刘志颖, 等. 不同焊接方法对哈氏合金 C-276 焊缝组织和耐晶间腐蚀性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2016, 31(5): 40-44.

[9] PAN JIEJUN, PAN MIN. Radiographic testing of butt weld of Hastelloy C-276 connected with 16Mn[J]. Non-destructive Testing, 2013, 35(8): 36-43.

潘杰军, 潘敏. 哈氏合金 C-276 与 16Mn 异种合金对接焊缝射线检测[J]. 无损检测, 2013, 35(8): 36-43.

[10] BAGCHI A, SARAVANAN S, KUMAR G S, et al. Numerical simulation and optimization in pulsed Nd: YAG laser welding of Hastelloy C-276 through Taguchi method and artificial neural network[J]. Optik, 2017(146): 80-89.

[11] HUANG KE, DENG YUNLAI, LIU MIN, et al. Microstructure and properties of HVOF sprayed Hastelloy C-276 coating[J]. Materials Research and Application, 2010, 4(3): 207-210.

黄科, 邓运来, 刘敏, 等. 超音速火焰喷涂哈氏合金 C-276 涂层的显微结构与性能[J]. 材料研究与应用, 2010, 4(3): 207-210.

[12] LI ZHENGQIU, ZHANG ZHIJIAN, SHI YU, et al. Study on microstructure and properties of Ni60 pow-

- der by diode laser cladding and high velocity oxy-fuel [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(20):149-151.
- 李正秋, 张志坚, 石玢, 等. 半导体激光熔覆与超音速火焰喷涂 Ni60 粉末组织与性能的研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(20):149-151.
- [13] HU HANQI. Metal solidification principle [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2000:177-190.
- 胡汉起. 金属凝固原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000:177-190.
- [14] ZHANG SONG, ZHOU LEI, HAO YUXI, et al. Microstructure and friction and wear behavior of laser cladding nickel-base alloy on Monel alloy surface [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2013, 34(1):9-12.
- 张松, 周磊, 郝玉喜, 等. Monel 合金表面激光熔覆镍基合金的组织及摩擦磨损性能 [J]. 焊接学报, 2013, 34(1):9-12.
- [15] BASU A, SAMANT A N, HARIMKAR S P, et al. Laser surface coating of Fe-Cr-Mo-Y-B-C bulk metallic glass composition on AISI 4140 steel [J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(12):2623-2631.
- [16] HU ZHAOWEI, LI WENGE. Process research of in-situ synthesis of Mo₂NiB₂ coating by laser cladding [J]. Surface Technology, 2017, 46(8):1-6.
- 胡肇炜, 李文戈. 激光熔覆原位合成 Mo₂NiB₂ 涂层工艺研究 [J]. 表面技术, 2017, 46(8):1-6.
- [17] ZHANG DEQIANG, ZHANG JIQING, GUO ZHONGJUAN. Laser cladding of self-fluxing Ni-based WC powder on 45 # steel surface [J]. Surface Technology, 2015, 44(11):66-70.
- 张德强, 张吉庆, 郭忠娟. 45 # 钢表面激光熔覆自熔性镍基碳化钨粉末 [J]. 表面技术, 2015, 44(11):66-70.
- [18] CAO CHUNAN. Principles of electrochemistry of corrosion [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008:99-110.
- 曹楚南. 腐蚀电化学原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008:99-110.
- [19] ZHANG YAN, LI QIAN, WANG SHENGGANG. Corrosion resistance of 2507 duplex stainless steel in NaClO solution [J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(1):108-114.
- 张艳, 李倩, 王胜刚. 2507 双相不锈钢在 NaClO 溶液中的腐蚀性能 [J]. 材料工程, 2016, 44(1):108-114.