

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20181107002

含氮双相不锈钢激光成型试样的力学与腐蚀性能

张 聪¹, 张振远¹, 李 胜¹, 邱长军¹, 朱 胜²

(1. 南华大学 机械工程学院, 衡阳 421000; 2. 陆军装甲兵学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

摘 要: 针对大型装备现场增材修复与再制造的需要, 设计制备了一种集约化双相不锈钢粉末, 用于 Q345、Q460 以及 EQ56 等海工结构钢和 18-8 等奥氏体不锈钢大型承力部件现场修复。采用 99.999% 高纯氮气保护在 Q345 和 1Cr18Ni9Ti 基材上制备了激光成型试样, 采用试验方法研究了试样的组织结构、力学性能、电化学性能和氮含量的变化规律。结果表明: 采用高纯氮气保护, 可以制备出含氮的双相不锈钢成型层, 成型层中奥氏体和铁素体晶粒分布较均匀, 氮含量比粉末中氮含量下降了 45%。试样抗拉强度为 940~1040 MPa, 屈服强度为 800~910 MPa, 断后延伸率为 21%~25%, 显微硬度为 275~285 HV_{0.1}。在 20 Hz 交变载荷、试验应力范围 330~600 MPa 的试验条件下, 成型试样的平均断前循环次数大约为标准冷轧棒材 1Cr18Ni9Ti 的 7 倍。磨损量分别为基材 Q345 和 1Cr18Ni9Ti 的 0.3 和 0.5 倍。试样腐蚀电位比 1Cr18Ni9Ti 增加 0.364 V, 腐蚀电流密度减少 $4.34 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, 成型试样有良好的综合性能。

关键词: 集约化; 双相不锈钢; 激光成型; 综合性能

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)02-0163-07

Mechanical and Corrosion Properties of Nitrogen Bearing Duplex Stainless Steel Sample Prepared by Laser Forming

ZHANG Cong¹, ZHANG Zhenyuan¹, LI Sheng¹, QIU Changjun¹, ZHU Sheng²

(1. Mechanical Engineering School, University of South China, Hengyang 421000, China; 2. National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: To meet the needs of repairing and remanufacturing of large-scale equipment, intensive duplex stainless steel powder was designed. It can be used for repairing those large-scale bearing components of Q345, Q460, EQ56 and 18-8 austenitic stainless steel. The laser formed samples were prepared on Q345 and 1Cr18Ni9Ti substrates under the protection of 99.999% high-purity nitrogen. The microstructure, mechanical properties, electrochemical properties and the contents of nitrogen in the samples were carefully investigated. Results show that the laser formed layers of nitrogen-bearing duplex stainless steel is prepared under the protection of high-purity nitrogen. The austenite and ferrite distribute uniformly in the samples, and the nitrogen content in the formed layers is approximately 45% lower than that in the powder. The tensile strength, yield strength, elongation and microhardness of the samples is in the range of 940–1040 MPa, 800–910 MPa, 21%–25%, and 275–285 HV_{0.1}, respectively. Under the testing condition with an alternating load of 20 Hz, stress of 330–600 MPa, the average cycles of the formed samples are about 7 times that of the standard cold-rolled bar of 1Cr18Ni9Ti. The wear volume of the formed samples is 0.3 and 0.5 times of the substrate Q345 and 1Cr18Ni9Ti, respectively. The corrosion potential of the formed samples is 0.364 V higher compared to 1Cr18Ni9Ti. The corrosion current density is $4.34 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, lower than that of 1Cr18Ni9Ti. Generally, the formed sample has good comprehensive properties.

Keywords: intensification; duplex stainless steel; laser forming; comprehensive properties

收稿日期: 2018-11-07; 修回日期: 2019-03-10

通信作者: 邱长军 (1965—), 男 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 激光维修再制造; E-mail: qiuchangjun@hotmail.com

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1105800); 国家自然科学基金 (51474130)

Fund: Supported by National Key R & D Plan (2018YFB1105800) and National Natural Science Foundation of China (51474130)

引用格式: 张聪, 张振远, 李胜, 等. 含氮双相不锈钢激光成型试样的力学与腐蚀性能[J]. 中国表面工程, 2019, 32(2): 163-169.

ZHANG C, ZHANG Z Y, LI S, et al. Mechanical and corrosion properties of nitrogen bearing duplex stainless steel sample prepared by laser forming[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(2): 163-169.

0 引言

大型舰船、海工装备、能源装备、工程机械等所涉及的材料已经有上万种,涉及的钢类材料通常需要有 600 MPa 以上的屈服强度以及 700~1000 MPa 的抗拉强度,同时还需具备一定的耐腐蚀性和延伸率。

双相不锈钢就具备有上述特征,它是一种兼有铁素体和奥氏体组织的钢种,结合了两者的性能于一体。相较于纯铁素体不锈钢,双相不锈钢有着更好的耐腐蚀性和韧性;而其相对于纯奥氏体不锈钢,则又有着更高的强度^[1-4]。如此优越性能的结合,因而使得双相不锈钢广泛应用于化工、海上装备、石化装备等领域^[5-6]。

目前双相不锈钢的成形技术主要是轧制、铸造、焊接等传统加工技术,采用激光技术制备双相不锈钢层的研究报道较少。氮元素作为双相不锈钢中重要的合金元素,它的存在对双相不锈钢铁素体和奥氏体两相组织的调控以及其耐腐蚀性能的提升都具有重要作用^[7]。因此,含氮双相不锈钢激光成型制备的研究具有较高应用价值。杨吉春等^[8]使用传统冶炼技术制备 2205 双相不锈钢,研究了氮对其组织及力学性能的影响。朱红梅^[9]等采用激光熔覆技术制备出马氏体/铁素体双相不锈钢。然而,目前国内外对双相不锈钢的激光成型制备大多针对于单一基材,针对于多材质基材的激光成型报导鲜见。Florian 等^[10]通过选择性激光融化制备出双相不锈钢 UNSS31803,屈服强度达到 770 MPa,延伸率达到 28%。王程锦等^[11]则针对 15Cr21Ni7 双相不锈钢,在 Q235 基材上利用激光金属沉积技术研究了不同含量 Mo 对沉积成形双相不锈钢样品的影响。针对当下我国制造业废旧零部件存量较大以及大型钢类零件现场修复和战时应急抢修不便携带大量粉末材料的问题,研制少数广谱集约化材料对多种材质的废旧金属零部件进行激光再制造更具有实际意义^[12]。

文中针对 Q345、Q460 以及 EQ56 等海工结构钢和 18-8 等奥氏体不锈钢类零件表面进行激光再制造与修复需要,在前人研究的基础上(添加 Nb 有助于形成显微硬度均匀分布的成型层^[13],添加 Cr 有助于成型试样耐腐蚀性能的提高^[7],Ni 的添加有助于晶粒细化,提高强度^[14])设计制备了一种集约化双相不锈钢粉末,在 Q345 和 1Cr18Ni9Ti 上

制备含氮双相不锈钢激光成型层,并研究了其微观组织结构以及综合性能。

1 材料及方法

在大量前期研究探索基础上,设计并制备出一种集约化双相不锈钢粉末,其粒度为 73~100 μm ,检测成分(质量分数)为 0.064% C、0.18% N、1.12% Si、0.165% V、22.8% Cr、6.45% Ni、2.23% Cu、2.59% Mo、0.19% Nb 和 1.6% Mn,其余为铁,另两种对比粉末只是将氮的含量(质量分数,下同)分别调高为 0.35%、0.28%。试验前在 50℃ 的干燥箱中干燥 12h,以去除粉末中的水分。基材为 Q345 与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢,其尺寸为 100 mm×50 mm×15 mm。采用激光成型系统通过侧向送粉的方式在 99.999% 高纯氮气保护气氛下制备激光成型试样。激光工艺参数:功率密度 260~280 W/mm²、光斑直径 2 mm、扫描速度 480 mm/min、送粉速率 8 g/min 和搭接率 50%。

成型层用线切割机制备成非标拉伸试样和疲劳试样,如图 1(a)(b)所示。切样位置离基材与成型层结合界面 0.5 mm 以上,以保证切割试样为纯成型层。采用 XJP-3C 光学显微镜(OM)观察其截面显微组织,采用 JSM-6490LA 扫描电子显微镜(SEM)观察成型层及拉伸断口、疲劳断口微观组织形貌。利用 XRD-7000 X 射线衍射仪分析其物相结构,靶材选用 Cu 靶。采用 HXD-1000B 维氏

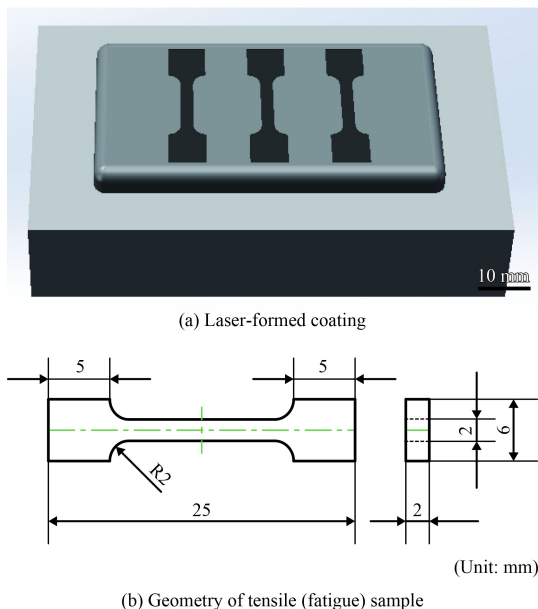


图1 拉伸(疲劳)试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of tensile and fatigue samples

显微硬度计测量其维氏显微硬度, 加载载荷 100 g, 加载时间 10 s。采用 WDW-20E 万能试验机测试其拉伸及疲劳性能。在 MMW-1 立式万能摩擦磨损试验机上进行干滑动摩擦磨损实验, 对磨方式: 销盘对磨, 上试样尺寸: Φ 4.7 mm×12.7 mm, 下试样为淬火 45 钢 (平均硬度为 54.4 HRC) 环形圆块。摩擦磨损实验参数: 载荷 15 N, 转速 60 r/min, 时间为 20 min。采用精度为 0.1 mg 的电子天平称量试样摩擦前后的质量, 计算磨损量 Δm 。

采用 CHI 660E 电化学工作站测量成型层的电化学腐蚀特性, 试验时采用三电极测量体系, 以饱和甘汞电极作为参比电极, 铂电极作为辅助电极, 试样作为工作电极, 电压范围电位扫描速度为 25 mV/min, 腐蚀液为质量分数 3.5% 的 NaCl 溶液。

2 结果分析

2.1 氮含量对激光成型试样的影响

图 2 为不同氮含量粉末制备的激光成型试

样表面形貌, 0.35% N、0.28% N 和 0.18% N 分别为粉末 1、粉末 2 和粉末 3 制备的激光成型试样。由图 2 中可知 0.35% N 的粉末 1 制备的成型试样表面气孔明显, 表面光洁度很差。0.28% N 的粉末 2 制备的试样表面气孔明显减少; 0.18% N 的粉末 3 制备的试样表面质量最佳, 整体平整光滑。这表明合金粉末中 N 含量超过 0.3% 时, 制备的双相不锈钢试样表面存在大量气孔。根据这一结果, 制备双相不锈钢成型试样的粉末 N 含量应控制在 0.3% 以下, 因此选用 N 含量 0.18% 的粉末 3 制备成型试样, 对其综合性能进行研究。表 1 反映了激光成型前后 N 含量的变化: 成型试样中 N 含量比粉末 3 中 N 含量下降了 45%。这是因为粉末中过多的 N 元素无法全部融入到成型层中, 待其在熔池中的溶解度达到最大值后, 剩下的以气态的形式逸出, 同时又由于激光成型快速熔融冷却的特点, 因而在成型层表面留下气孔。这一研究分析与 Hosseini^[15] 的报道分析相吻合。

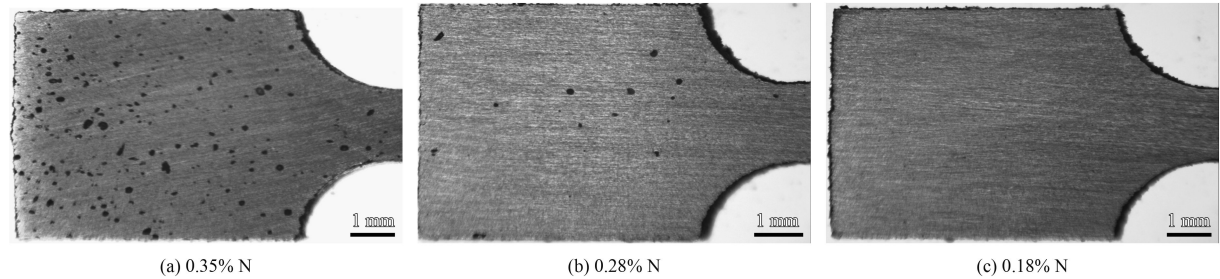


图 2 不同氮含量粉末制备的激光成型试样表面形貌
Fig.2 Surface morphologies of laser formed samples prepared by different N content

表 1 粉末和成型试样 (粉末 3) 的主要元素成分

Table 1 Chemical composition of powders and the sample (fabricated by powder 3) (w/%)

	C	N	Si	Cr	Ni
Powder 1	0.064	0.350	1.120	22.800	6.450
Powder 2	0.064	0.280	1.120	22.800	6.450
Powder 3	0.064	0.180	1.120	22.800	6.450
Sample	0.063	0.100	1.110	22.800	6.430

2.2 激光成型试样显微组织与结构

激光成型合金粉末和成型试样的 XRD 衍射结果如图 3 所示。图 4 为试样横截面的显微组织。对比粉末和试样的衍射图谱可知, 粉末中主要是铁素体和奥氏体。成型试样中, 奥氏体已经和铁素体作为双相基质存在, 奥氏体峰强度明显提

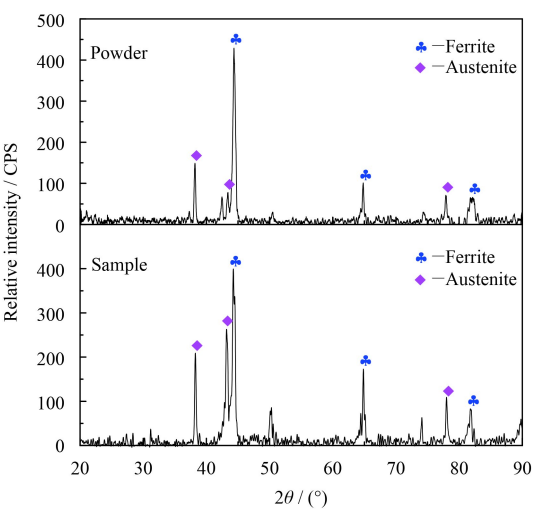


图 3 粉末与成型试样的 XRD 衍射图谱
Fig.3 XRD patterns of the powder and formed sample

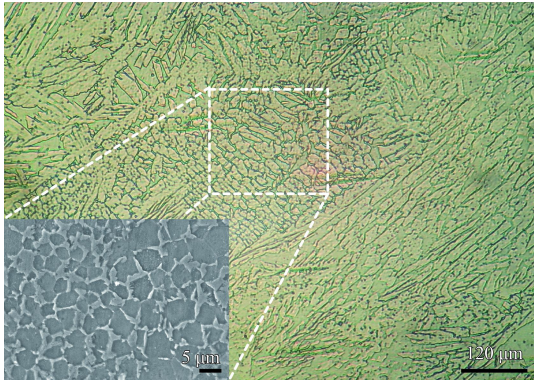


图 4 成型试样微观组织形态

Fig.4 Microstructure of the formed sample

高。这主要是因为设计粉末中所添加的 N、Ni 是强烈形成并稳定奥氏体且扩大奥氏体相区的元素。N 的加入可以降低钢中铁素体的含量，促进奥氏体的形成，对双相钢中奥氏体相和铁素体相起到调控作用^[16]。图 4 可直观观察到成型层试样内有明显的奥氏体相和铁素体相且奥氏体和铁素体晶粒分布较均匀，通过 Image J 软件对 SEM 金相组织进行分析，结合舍弗勒相图推断，铁素体占比约为 40%。

2.3 激光成型试样力学性能

2.3.1 显微硬度

图 5 反映了激光成型层和基材 Q345, 1Cr18Ni9Ti 的显微硬度分布。由图可知，由基材到成型层的显微硬度值不断提高，成型层显微硬度为 275~285 HV_{0.1}，大约是基材 (130~140 HV_{0.1}) 的 2 倍。造成这一现象是因为粉末中的 N 元素以间隙固溶的方式嵌入奥氏体晶格内部，引起固溶强化，从而促使显微硬度提高^[8]。

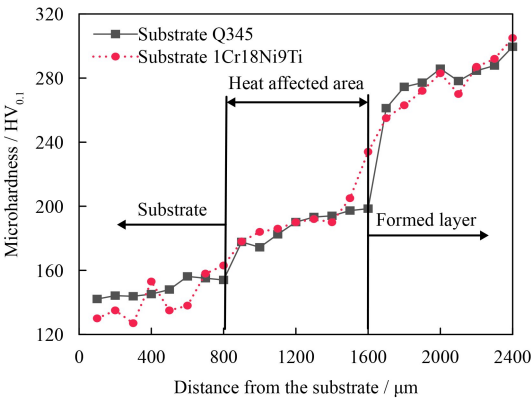


图 5 成型层和基材的显微硬度分布

Fig.5 Microhardness distribution of the formed layer and substrate

2.3.2 拉伸性能与疲劳强度

在成型层上切出试样 1、试样 2、试样 3 和试样 4，试样 1、2、3 为纯成型层，试样 4 则由 1 mm 的基材 Q345 以及 1 mm 的成型层组成。将各试样分别装夹在自制的拉伸夹具上，然后在室温下进行拉伸试验，拉伸速率为 0.5 mm/min，激光成型层试样抗拉强度，屈服强度以及断后延伸率如图 6 所示。由图 6 中可以看出成型层试样抗拉强度为 940~1040 MPa，屈服强度为 800~910 MPa，断后延伸率为 21%~25%，与 EQ56 等海工结构钢所要求的抗拉强度 700~800 MPa，屈服强度 600~700 MPa 相比，提高了近 30%。基材与成型层过渡区的试样 4 抗拉强度达到 877 MPa，屈服强度达到 700 MPa，与 Q345 相比，提高了近 1 倍，完全可以满足维修再制造要求。成型试样高强度的主要原因一方面是奥氏体与铁素体双相不锈钢的固有特性，另一方面因为激光成型过程的激冷作用，晶粒度达到 10 μm 左右，细晶强化使其屈服强度和抗拉强度得到进一步提高。

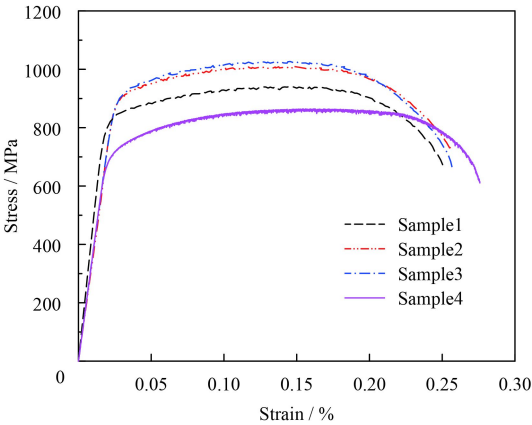


图 6 成型试样应力应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of formed samples

在扫描电子显微镜下对拉伸试样进行断口微观形貌观察，如图 7 所示。从图中可以看出成型层试样拉伸断口均有大量韧窝存在，分布均匀，断裂方式为韧性断裂，结合图 8 拉伸试样拉伸前后的宏观形貌对比，可以清晰地观察到试样拉伸过程中发生“缩颈”现象，表现出良好的韧性。

同时在成型层上切出 3 个疲劳试样，在 20 HZ 交变载荷，试验应力范围 330~600 MPa 的试验条件下进行疲劳试验，结果成型试样断前循环次数分别为 59 980、56 765 和 57 230 次，在同等条件

下, 标准冷轧棒材 1Cr18Ni9Ti 的断前循环次数分别为 9674、7859 和 8243 次。由此可知, 成型试样的平均断前循环次数大约为标准冷轧棒材 1Cr18Ni9Ti 的 7 倍。其在扫描显微镜下疲劳断口如图 9 所示, 可以观察到疲劳断口表面出现粗糙而又不规则的粒状表面, 疲劳裂纹的延伸方向明显存在着微细间隔的平行疲劳条纹, 这些疲劳条纹呈波浪形, 反映了成型试样良好的塑性。

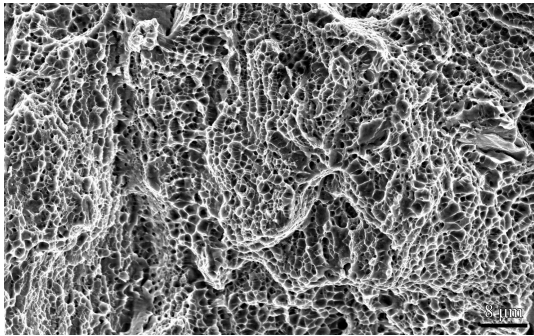


图 7 拉伸试样断口形貌

Fig.7 Fracture surface of the tensile sample

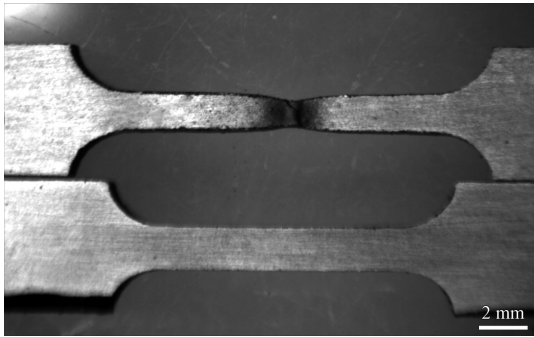


图 8 成型试样拉伸前后

Fig.8 Formed samples before and after stretching

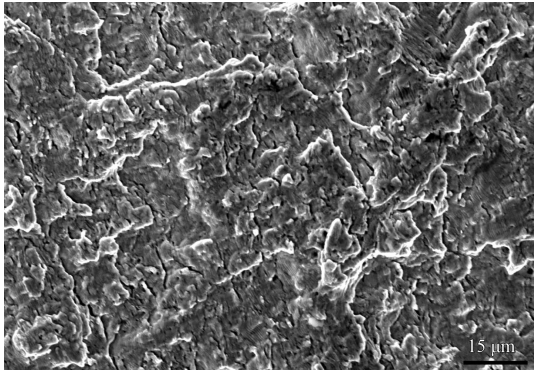


图 9 疲劳试样断口形貌

Fig.9 Fracture surface of the fatigue sample

2.3.3 耐磨性

图 10 反映了成型层试样和基材的摩擦因数随

着磨损时间的变化。由图 10 可知, 成型层摩擦因数呈现时高时低的特点, 计算磨损量 Δm 为 0.3 mg, 相比之下, 基材 Q345 和 1Cr18Ni9Ti 磨损量则分别为 0.9 和 0.7 mg。出现这种现象的原因是: 由于双相不锈钢成型层表面夹杂硬质氮化物, 在磨损过程中, 对磨件总是先将成型层软质相磨尽, 使得成型层显露出硬质氮化物, 接着对磨件与硬质氮化物发生刮削, 恶化了磨损接触面, 导致了表面粗糙度的提升, 造成了磨损初期高的摩擦因数; 之后随着磨损的继续进行, 硬质氮化物开始发生局部剥落从而产生磨屑, 磨屑被研磨成细小的磨粒渗入成型层表面, 从而改善了磨损条件, 使得摩擦因数下降^[17]。如此使得成型层摩擦因数呈现周期性时高时低的变化, 最终在成型层表面产生一些轻微的犁沟划痕, 并且伴有局部的剥落凹坑。

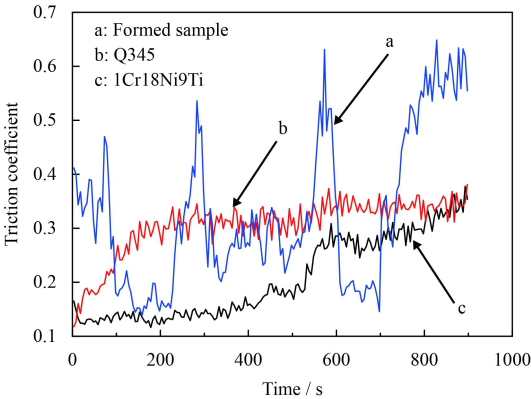


图 10 成型试样和基材的摩擦因数随着时间的变化曲线

Fig.10 Variations of friction coefficient for the formed sample and substrate varied with time

2.4 耐腐蚀性能

表 2 为成型试样和 1Cr18Ni9Ti 的电化学参数, 其在 3.5% NaCl 溶液中的电位极化曲线如图 11 所示。由表 2 可知, 双相成型层腐蚀电位为 0.574 V, 腐蚀电流密度为 $2.78 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, 相比于 1Cr18Ni9Ti 腐蚀电位提高了 0.364 V, 腐蚀电流密度下降了 $4.34 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, 这表明激光成型试样的耐腐蚀性能优于 1Cr18Ni9Ti。出现这种

表 2 成型试样和 1Cr18Ni9Ti 的电化学参数

Table 2 Electrochemical parameters of the formed sample and 1Cr18Ni9Ti

Material	Potential/V	Corrosion current density/($\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)
Sample	0.574	2.78×10^{-7}
1Cr18Ni9Ti	0.210	7.12×10^{-7}

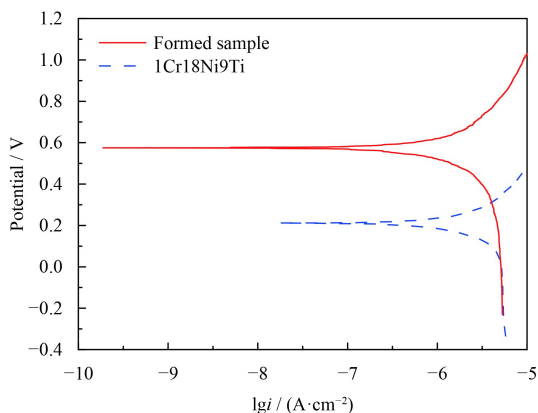


图 11 成型试样和 1Cr18Ni9Ti 的电位极化曲线

Fig.11 Potentiodynamic polarization curves of the formed sample and 1Cr18Ni9Ti

现象的原因主要是因为 N 的加入和 Cr 含量要高于 1Cr18Ni9Ti 的 Cr 含量,使得激光成型试样的电极电位得到提高,另一方面 Mo 的加入能够有效促进 Cr 在表面膜中的富集,进一步改善成型层试样耐腐蚀性。

3 结 论

(1) 采用自主设计的双相不锈钢粉末可以制备出含氮的双相不锈钢激光成型试样,其中奥氏体和铁素体两相分布较均匀,成型试样中 N 含量比粉末中 N 含量下降了 45%。合金粉末 N 含量应控制在 0.3% 以下,过多的 N 含量会导致成型层产生大量气孔。

(2) 含氮双相不锈钢激光成型试样显微硬度为 275~285 HV,大约是基材 Q345 和 1Cr18Ni9Ti 的 2 倍;抗拉强度 940~1040 MPa,屈服强度 800~910 MPa,断后延伸率 21%~25%;在 20 HZ 交变载荷,试验应力范围 330~600 MPa 的试验条件下,成型试样的平均断前循环次数大约为标准冷轧棒材 1Cr18Ni9Ti 的 7 倍,试样摩擦因数呈现时高时低的特点,磨损量分别为基材 Q345 和 1Cr18Ni9Ti 的 0.3 和 0.5 倍。

(3) 成型试样腐蚀电位比 1Cr18Ni9Ti 增加 0.364 V、腐蚀电流密度减少 $4.34 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$,成型试样具有比 1Cr18Ni9Ti 更好的耐腐蚀性能。

(4) 这种集约化双相粉末制备的含氮双相不锈钢激光成型试样除延伸率略低于 18-8 系列不锈钢以外,其它各项力学性能和耐腐蚀性能均超低合金高强度钢和 18-8 等奥氏体不锈钢,满足现场维修和再制造的要求。

参考文献

- [1] 闫志龙,李永胜,胡凯,等.双相不锈钢相分解研究发展[J].材料导报,2017,31(15):75-80.
YAN Z L, LI Y S, HU K, et al. Progress of study on phase decomposition of duplex stainless steel[J]. Materials Review, 2017, 31(15): 75-80 (in Chinese).
- [2] 张鹏,陈晓秋,尚峰,等.双相不锈钢成形技术研究进展[J].热加工工艺,2018,47(15):14-17.
ZHANG P, CHEN X Q, SHANG F, et al. Research progress of forming technology of duplex stainless steel[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(15): 14-17 (in Chinese).
- [3] PETTERSSON N, PETTERSSON R, WESSMAN S. Precipitation of chromium nitrides in the super duplex stainless steel 2507[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2015, 46(3): 1062-1072.
- [4] HE Y L, ZHU N Q, LU X G, et al. Experimental and computational study on microstructural evolution I 2205 duplex stainless steel during high temperature aging[J]. Materials Science & Engineering A, 2010, 528(2): 721-729.
- [5] 邓德伟,牛婷婷,田鑫,等.2205 双相不锈钢渗碳组织及性能研究[J].热加工工艺,2017,40(20):198-202.
DENG D W, NIU T T, TIAN X, ET AL. Research on carburized structure and properties of 2205 duplex stainless steel[J]. Hot Working Technology, 2017, 40(20): 198-202 (in Chinese).
- [6] 靳鸣,贺定勇,王曾洁,等.激光熔覆 2205 双相不锈钢/TiC 复合涂层组织与性能[J].激光与光电子学进展,2018,55(11):111403.
JIN M, HE D Y, WANG Z J, et al. Microstructure and properties of 2205 duplex stainless steel/TiC composite coatings by laser cladding[J]. Laser & Optoelectronic Progress, 2018, 55(11): 111403.
- [7] 赵勇.含氮双相不锈钢铸态组织演变及高温相变机理研究[D].北京科技大学,2018.
ZHAO Y. Evolutions of cast structures and mechanisms of high temperature phase transformations in nitrogen bearing duplex stainless steel[D]. University of Science & Technology Beijing, 2018 (in Chinese).
- [8] 杨吉春,杨文魁,唐庆余,等.氮对 SAF2205 双相不锈钢组织及力学性能的影响[J].中国冶金,2017,27(10):27-33.
YANG J C, YANG W K, TANG Q Y, et al. Influence of nitrogen on structure and mechanical property of saf2205 duplex stainless steel[J]. China Metallurgy, 2017, 27(10): 27-33 (in Chinese).
- [9] 朱红梅,李勇作,张振远,等.激光熔覆制备马氏体/铁素体双相不锈钢层的力学与腐蚀性能研究[J].中国激光,2018,45(12):148-153.
ZHU H M, LI Y Z, ZHANG Z Y, et al. A study on the mech-

- anical and corrosion properties of the martensitic/ferrite dual-phase stainless steel coating prepared by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 148-153 (in Chinese).
- [10] FLORIAN H, PETER K, KRISTINA D, et al. Duplex stainless steel fabricated by selective laser melting Microstructural and mechanical properties[J]. Materials and Design, 2017(133): 136-142.
- [11] 王程锦, 梁京, 陈岁元, 等. 激光直接沉积成型 15Cr21Ni7-xMo 不锈钢显微组织及性能研究[J]. 应用激光, 2017, 37(1): 11-16.
- WANG C J, LIANG J, CHEN S Y, et al. Microstructure and properties of 15Cr21Ni7-xMo stainless steel formed by laser direct deposition[J]. Applied Laser, 2017, 37(1): 11-16 (in Chinese).
- [12] 朱胜, 周超极. 面向“中国制造 2025”的增材再制造技术[J]. 热喷涂技术, 2016, 8(3): 1-4.
- ZHU S, ZHOU C J. Additive remanufacturing for “Made in China 2025”[J]. Thermal Spray Technology, 2016, 8(3): 1-4 (in Chinese).
- [13] 吴绮雯, 马明星, 朱天辉, 等. 铌、铬对激光熔覆原位合成颗粒增强铁基复合涂层的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 107-112.
- WU Q W, MA M X, ZHU T H, et al. Effect of Nb and Cr on in situ particle reinforced Fe-matrix composite coating by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(7): 107-112 (in Chinese).
- [14] 张净宜, 邱长军, 贺沅玮, 等. 不同 Ni 含量铁基激光熔覆层组织和性能的研究[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 221-225.
- ZHANG J Y, QIU C J, HE Y W, et al. Microstructure and properties of Fe-based laser cladding with different Ni content[J]. Surface Technology, 2017, 46(6): 221-225 (in Chinese).
- [15] HOSSEINI V A, WESSMAN S, HURTIG K, et al. Nitrogen loss and effects on microstructure in multipass TIG welding of a super duplex stainless steel[J]. Materials & Design, 2016, 98: 88-97.
- [16] 戴起勋. 金属材料学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 127-128.
- DAI Q X. Metal material science[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 127-128(in Chinese).
- [17] TELASANG G, MAJUMDAR J D, PADMANABHAM G, et al. Wear and corrosion behavior of laser surface engineered aisi h13 hot working tool steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 261: 69-78.