

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2022.03.04

30CrMnSiNi2A 表面激光熔敷不同粉末涂层 组织与性能对比研究

程宗辉, 张志强, 范 朝, 段本方

国营芜湖机械厂, 安徽 芜湖 241007

摘 要: 超高强度低合金钢 30CrMnSiNi2A 被广泛应用于航空装备领域, 在长期服役过程中经常面临因损伤和磨损导致的性能退化问题, 严重影响航空装备的安全服役。为达到或超过原服役性能要求, 提高服役寿命, 采用激光熔覆技术在 30CrMnSiNi2A 基体表面分别制备 0.3 mm 厚超高强度高合金钢 AF1410 与不锈钢 1Cr15Ni4Mo3N 熔覆层, 表征和分析对比研究两种不同熔覆层的微观组织形貌、弹性模量、显微硬度和摩擦磨损性能。两种粉末制备的熔覆层与基体之间均为冶金结合, AF1410 熔覆层组织更致密, 无明显气孔; 相对于熔覆层 1Cr15Ni4Mo3N 与基体 30CrMnSiNi2A, 熔覆层 AF1410 有着更高的显微硬度与弹性模量, 更好的摩擦磨损性能; 三者磨损机理均以磨粒磨损和氧化磨损为主。该研究将为在超高强度低合金钢 30CrMnSiNi2A 上激光制备耐磨涂层应用提供理论指导。

关键词: 激光熔覆; AF1410; 1Cr15Ni4Mo3N; 摩擦磨损

中图分类号: TG457.11 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2022)03-0029-07

Comparative Study on the Organization and Properties of Different Powder Coatings by Laser Melting on the Surface of 30CrMnSiNi2A

CHENG Zonghui, ZHANG Ziqiang, FAN Zhao, DUAN Benfang

State-owned Wuhu Machinery Factory, Wuhu 241007, China

Abstract: Ultra high strength low alloy steel 30CrMnSiNi2A is widely used in the field of aviation equipment. In the process of long-term service, it often faces the problem of performance degradation caused by damage and wear, which seriously affects the safe service of aviation equipment. In order to meet or exceed the original service performance requirements and improve service life, laser cladding technology was used to prepare 0.3 mm thick ultra-high strength high alloy steel AF1410 and stainless steel 1Cr15Ni4Mo3N cladding layers on the surface of 30CrMnSiNi2A substrate respectively. The microstructure, elastic modulus, microhardness and friction and wear properties of the two different cladding layers were characterized and analyzed. The metallurgical bond between the clad layer and the substrate was observed for both powders, with the AF1410 clad layer being more dense and free of significant porosity. Compared to the clad layer 1Cr15Ni4Mo3N and the matrix 30CrMnSiNi2A, the clad layer AF1410 has higher microhardness and elastic modulus, and better frictional wear properties; the wear mechanisms of all three are mainly abrasive and oxidative wear. The research work will provide theoretical guidance for the application of laser preparation of wear-resistant coating on ultra-high strength low alloy steel 30CrMnSiNi2A.

Keywords: laser cladding; AF1410; 1Cr15Ni4Mo3N; frictional wear

引用格式:程宗辉, 张志强, 范朝, 等. 30CrMnSiNi2A 表面激光熔敷不同粉末涂层组织与性能对比研究[J]. 电焊机, 2022, 52(3): 29-35.

Citation: CHENG Zonghui, ZHANG Ziqiang, FAN Zhao, et al. Comparative Study on the Organization and Properties of Different Powder Coatings by Laser Melting on the Surface of 30CrMnSiNi2A[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(3): 29-35.

* 收稿日期: 2021-03-02 修回日期: 2021-12-08

基金项目: 国家重点研发计划资助(移动式增材修复与再制造技术与装备 2018YFB1105800)

作者简介: 程宗辉(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事激光熔覆、激光 3D 打印、雾化制粉领域的研究。E-mail: 13625535177@139.com。

0 前言

随着新型航空装备向着智能化、长效化、轻量化方向发展,大量先进复合材料及特种合金被应用于高端航空零部件制造领域^[1-2]。30CrMnSiNi2A 是一种超高强度低合金钢,拥有极佳的静力强度、冲击韧性和抗疲劳性能,被广泛用于关键航空零部件如轴类、连接件和起落架等的制造^[3]。然而,在长期使用过程中因飞行环境恶劣、机械负荷复杂及工作强度高,30CrMnSiNi2A 钢极易产生损伤或失效,导致性能退化,严重威胁航空装备的飞行安全。

近年来激光熔覆修复航空零件发展迅速。激光能量密度高,加热速度快,对基材的热影响较小,引起工件的变形小,是一种高效的表面强化、快速修复及再制造手段,在高强钢构件表面熔覆同种成分或近似成分的铁基涂层材料,可获得晶粒细化、高位错密度的修复层,从而实现修复层高强度、高韧性的力学性能,因此在高强钢构件表面修复上具有潜在的优势^[4-7]。30CrMnSiNi2A 钢对缺口和氢脆(包括环境氢脆)较敏感,在激光热循环作用下极易产生裂纹,学者们对此进行了大量的研究。孙兵兵等^[8]采用激光熔覆技术对 30CrMnSiNi2A 钢工艺件进行再制造,结果表明熔覆试样的室温拉伸性能达到母材的 92%,冲击韧性超过了母材,耐磨性能与母材相关,耐蚀性优于母材;周潇等^[9]采用激光送丝堆焊技术对预置缺陷的 30CrMnSiNi2A 超高强度钢进行修复,结果显示在最佳工艺参数下,修复件的抗拉强度达到原件设计标准,断口出现在堆焊层,预置缺陷临界修复尺寸为板厚的 30%。徐采星^[10]

开展了基于 30CrMnSiNi2A 钢的飞机起落架激光熔覆再制造工艺研究,结果表明在 30CrMnSiNi2A 钢表面制备 20% WC-Ni 复合涂层组织致密,与基体结合良好,其硬度为基体材料的 1.24 倍,耐磨减磨性能优异,可以达到修复工件的目的。

本文采用激光熔覆技术在 30CrMnSiNi2A 钢基体表面分别制备 AF1410 与 1Cr15Ni4Mo3N 熔覆层,对比研究两种不同熔覆层的微观组织、显微硬度、弹性模量和摩擦磨损性能,以期对 30CrMnSiNi2A 熔覆材料的选择提供参考。

1 试验材料及设备

1.1 试验材料

试验用基体材料为调制态 30CrMnSiNi2A,热处理工艺为 900 °C 淬火+200 °C 回火,其组织为马氏体组织,形貌如图 1a 所示。熔覆层材料分别为 AF1410 和 1Cr15Ni4Mo3N 合金粉末,其化学成分如表 1 所示。两种熔覆粉末的表面形貌如图 1b、1c 所示,可以看出,两种合金粉末均为球形颗粒且相对均匀,AF1410 粉末粒径约为 200~300 μm,1Cr15Ni4Mo3N 粉末粒径约为 50~100 μm。AF1410 为二次硬化超高强度钢,具有高强度、高断裂韧性以及良好的抗应力腐蚀性能;1Cr15Ni4Mo3N 为半奥氏体沉淀硬化型不锈钢,具有高强度、高韧性、优良的纵横向性能和耐腐蚀性能,可在 300 °C 长期工作,工艺性能良好。这两种材料与基体 30CrMnSiNi2A 都具有良好的冶金结合性能,但是其组织与性能存在一定的差别^[11-12]。

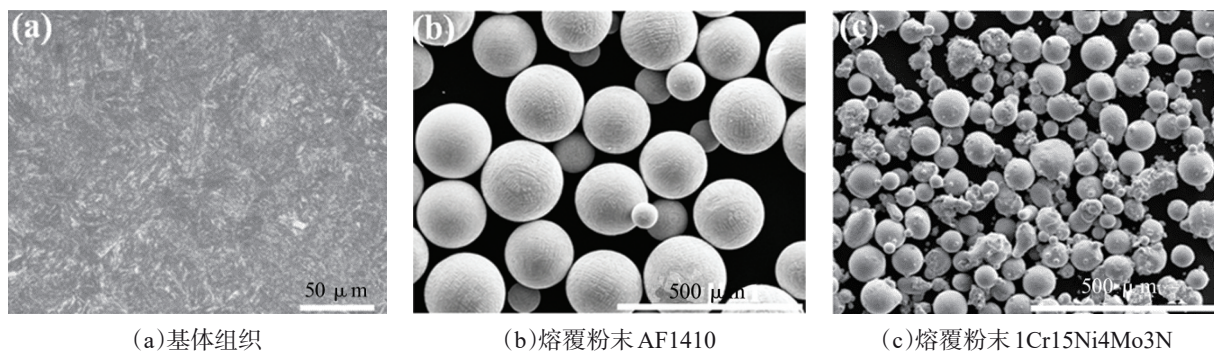


图1 试验材料形貌

Fig. 1 Morphology of experimental materials

表 1 基体与熔覆材料的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of the matrix and cladding materials(wt. %)

牌号	C	Si	P	Mo	N	Cr	Ni	Mn	Co
30CrMnSiNi2A	0.11~0.16	≤0.7	≤0.03	2.3~2.8	0.05~0.10	14~15.5	4.0~5.0	—	—
1Cr15Ni4Mo3N	0.09~0.14	0.10~0.93	—	2.2~2.7	0.03~0.08	13.2~15.2	4.1~5.3	0.47~0.98	—
AF1410	0.13~0.17	0.15~0.2	—	0.9~1.1	0.05~0.10	1.8~2.2	9.5~10.5	—	13.5~14.5

试验用激光熔覆设备型号为 LFR-M-II, 如图 2 所示。熔覆时粉末由送粉器送出, 经过同轴送粉喷嘴送进激光熔池, 熔覆过程中采用氩气保护, 以减少熔覆层缺陷的形成。激光熔覆参数如表 2 所示, 采用多道搭接熔覆, 搭接率 40%~50%, 单道熔覆层高度不大于 0.5 mm。熔覆前需对熔覆粉末进行烘干并在真空干燥箱中保存待用, 同时清理基材待熔覆区域的表面, 以减少表面缺陷对激光熔覆工艺造成的影响^[14]。

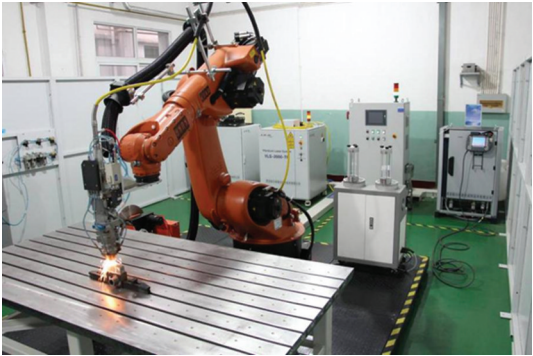


图 2 激光熔覆设备

Fig. 2 Laser cladding equipment

表 2 激光熔覆主要工艺参数

Table 2 Main process parameters of laser cladding

激光功率	扫描速度	光斑直径	送粉速率	保护气流量
P/W	$v/(m \cdot s^{-1})$	Φ/mm	$v/(g \cdot min^{-1})$	$Q/(L \cdot h^{-1})$
1 200	0.01	2	8	400

1.2 摩擦磨损试验机

摩擦磨损试验采用球盘线性往复运动模式, 摩擦磨损试验机型号为美国 RTEC 公司的 MFT-5000, 上试样是 WC(碳化钨)、SiN(氮化硅)或钢球(直径 $\Phi 12.7$ mm), 下试样为处理好的熔覆层试样和基体试样。磨损试样以及摩擦磨损试验机原理如图 3 所示。实验在室温环境下进行, 过程为基体和熔覆层的干摩擦, 实验载荷和速度分别为 100 N 和 20 mm/s, 钢球往复运动距离 1 mm, 摩擦时间 30 min。摩擦实验完成后, 试样无需清洗, 直接保存。

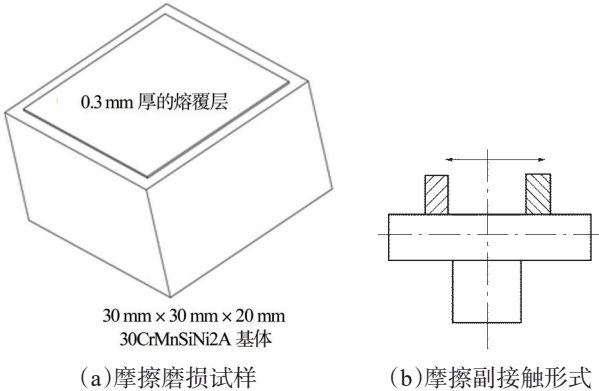


图 3 磨损试样以及摩擦磨损试验机原理

Fig. 3 Wear specimen and principle of friction wear tester

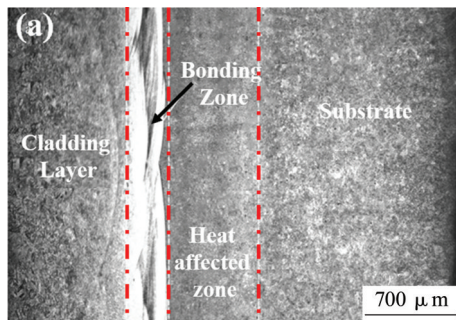
2 试验结果与分析

2.1 微观组织形貌

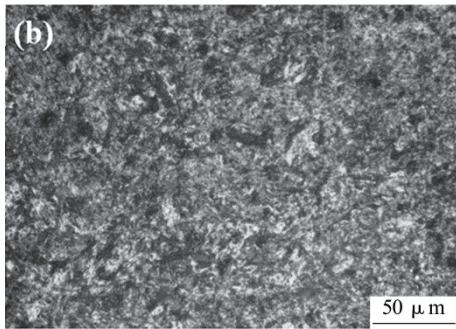
采用 Olympus GX41 金相显微镜观察微观组织形貌(金相腐蚀剂为 4% 的硝酸酒精溶液), 图 4a、4c 分别为熔覆 AF1410 和 1Cr15Ni4Mo3N 试样的横截面形貌, 图 4b、4d 分别为其熔覆层显微组织金相。由图 4a、4c 可知, AF1410 熔覆层组织致密, 为回火马氏体+回火索氏体组织, 没有组织偏析, 与基体冶金结合良好, 未出现气孔、裂纹等缺陷。由图 4d 可知, 1Cr15Ni4Mo3N 熔覆层组织由柱状晶构成, 熔覆层搭接区域明显, 在搭接区有较大的重熔比, 使柱状晶由下一层向上一层持续生长。此外, 熔覆层出现少量气孔, 可能对其力学性能产生一定的影响。

2.2 熔覆层的晶体结构

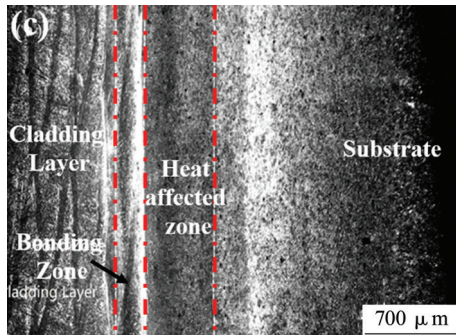
使用 BmkerD8X 射线衍射仪进行 X 射线衍射分析, Cu 靶, $K \alpha$ 射线, X 射线衍射角度分别为 $30^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 。熔覆层 AF1410 和 1Cr15Ni4Mo3N 的 XRD 图谱如图 5 所示。可以看出, 熔覆层 AF1410 和 1Cr15Ni4Mo3N 都有 4 个明显的特征峰。通过 Made Jade6.0 软件中与 PDF-06-0696 对比, 熔覆层在 2θ 分别为 44.6° 、 65.02° 、 82.3° 时为 Fe 的特征峰, AF1410 熔覆



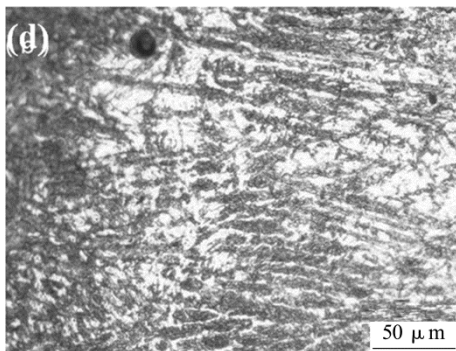
(a) AF1410 熔覆层与基体



(b) AF1410 熔覆层



(c) 1Cr15Ni4Mo3N 熔覆层与基体



(d) 1Cr15Ni4Mo3N 熔覆层

图4 基体和熔覆层金相组织

Fig. 4 Metallographic structure of matrix and cladding layer

层在 2θ 为 50.07° 时为Co的特征峰,1Cr15Ni4Mo3N熔覆层在 2θ 为 43.47° 时为FeNi的特征峰。对于其

他出现的特征峰峰值不明显,且难以比较出合适的 2θ 。通过对比还发现,熔覆层AF1410的半高宽明显小于熔覆层1Cr15Ni4Mo3N,说明AF1410的结晶性能更好。此外,从其组织结构也可以看出,相对于1Cr15Ni4Mo3N熔覆层,AF1410熔覆层组织更致密,缺陷更少,这不仅有利于提高其结晶性能,同时可提高其耐磨性。在后续研究中,对其耐磨性也进行了研究,实验结果与分析一致。

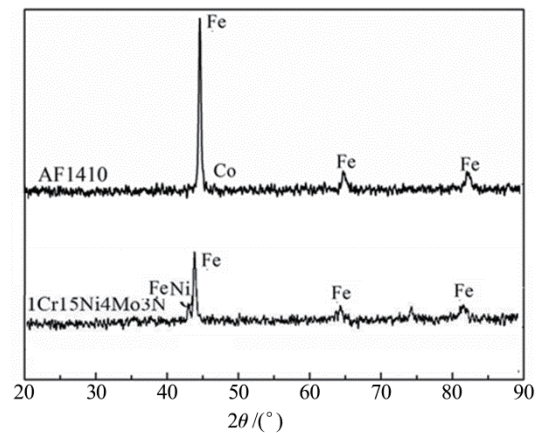


图5 熔覆层AF1410和1Cr15Ni4Mo3N的XRD图谱

Fig. 5 XRD patterns of cladding layers AF1410 and 1Cr15Ni4Mo3N

2.3 基体及熔覆层的纳米压痕

基体及熔覆层的纳米压痕载荷-位移曲线如图6所示。可以看出,熔覆层AF1410的最大压痕深度和面积最小,基体30CrMnSiNi2A次之,熔覆层1Cr15Ni4Mo3N最大。由此可见熔覆层AF1410硬度最大,基体次之,熔覆层1Cr15Ni4Mo3N硬度最低。原因在于AF1410碳当量最大,其通过激光急冷急热循环形成的马氏体含量最多,叠加激光热加工硬化,其熔覆层硬度最高;30CrMnSiNi2A碳当量次之,马氏体含量次之,同时未经过激光热急冷急热循环加工硬化,故其硬度次之;1Cr15Ni4Mo3N碳当量最低,且其激光急冷急热循环过程中存在残余奥氏体组织,马氏体含量最低,故其硬度最低。此外,分别从曲线中取5个点并作出材料各区域的弹性模量及显微硬度的平均值,结果如表3所示。由表可知,熔覆层AF1410的显微硬度和弹性模量最高,熔覆层1Cr15Ni4Mo3N的显微硬度和弹性模量最差。根据 H/E 的值可初步判断熔覆层及基体材料的耐磨性, H/E 值越大其耐磨性越好,故熔覆层AF1410的

耐磨性远大于熔覆层 1Cr15Ni4Mo3N 的耐磨性。

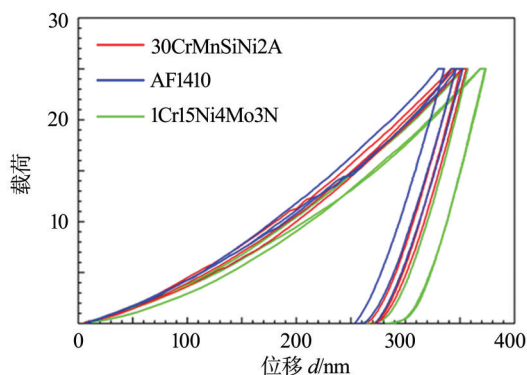


图6 熔覆层及基体的纳米压痕载荷-位移曲线

Fig. 6 Nanoindentation load displacement curve of cladding layer and substrate

表3 基体及熔覆层的弹性模量和显微硬度

Table 3 Elastic modulus and micro-hardness of matrix and cladding layer

基体及熔覆层	弹性模量 E/GPa	显微硬度 H/GPa	H/E
30CrMnSiNi2A	260	7.5	0.028 8
AF1410	277	8.3	0.029 9
1Cr15Ni4Mo3N	254	6.3	0.024 8

2.4 基体及熔覆层的摩擦磨损性能

基体与熔覆层的摩擦系数曲线如图7所示,基体和熔覆层摩擦曲线变化基本一致。在起始阶段(即磨合期),基体与熔覆层的摩擦系数在短时间内迅速增加。这是由于摩擦面的保护膜与不锈钢开始接触时起到润滑作用,因此摩擦系数低。随着摩擦运动的进行,基材与摩擦表面直接接触使摩擦系数快速上升,并且这一阶段中,摩擦系数波动幅度较大,可能与摩擦过程中的磨屑、硬质物的剥落及材料粘着等因素有关。经过一段不稳定时期后,摩擦系数基本趋于稳定,这是由于摩擦过程中随着材料表面温度不断升高,材料表面出现了氧化磨损,磨屑产生和溢出的基本平衡导致摩擦系数稳定。由图7可知,熔覆层 AF1410 的摩擦性能最好,基材 30CrMnSiNi2A 次之,熔覆层 1Cr15Ni4Mo3N 最差,这也与其纳米压痕的测试结果一致。对于熔覆层 AF1410,最大摩擦系数为 0.48,平均摩擦系数为 0.32;对于熔覆层 1Cr15Ni4Mo3N,最大摩擦系数为 0.59,平均摩擦系数为 0.47;对于基材 30CrMnSiNi2A,最大摩擦系数 0.47,平均摩擦系数 0.4。

为研究基体及熔覆层的磨损机制,对其磨损形

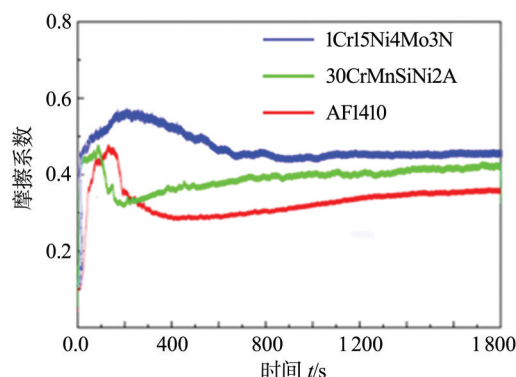


图7 基体与熔覆层的摩擦系数

Fig. 7 Friction coefficient between matrix and cladding layer

貌进行表征分析。图8为基材 30CrMnSiNi2A、熔覆层 AF1410、熔覆层 1Cr15Ni4Mo3N 经过 1 800 s 的磨损扫描电镜形貌。可以看出,在相同摩擦时间内,熔覆层 AF1410 摩擦磨损面积最小,熔覆层 1Cr15Ni4Mo3N 摩擦磨损面积最大。所有磨损区域都伴有氧化膜层的开裂及剥落,氧化层剥落区域中可以看到一些磨屑颗粒,并且磨痕表面有大量密集而较深的犁沟,熔覆层 1Cr15Ni4Mo3N 及基材 30CrMnSiNi2A 的这种现象更为明显^[15-16]。且摩擦磨损过程中,基体和熔覆层以磨粒磨损和氧化磨损为主。这是因为随着磨损时间的增加,摩擦热增加,氧化膜层不断产生,其膜层开始开裂、剥落,促使磨粒、磨屑增加,进而导致表面粗糙度增加,使得氧化磨损机制占主要地位。

2.5 熔覆层的塑韧性

将 AF1410 与 1Cr15Ni4Mo3N 合金粉体经激光成形为长方形实体,经机械加工制备成标准拉伸试样与冲击试样并进行测试,其结果如表4所示。由表可知,熔覆态的 AF1410 抗拉强度高于熔覆态的 1Cr15Ni4Mo3N,但其塑韧性低于 1Cr15Ni4Mo3N,原因是 AF1410 碳当量以及合金含量较高,合金元素对熔覆层结构有着非常强烈的固溶强化作用,故其抗拉强度较高;1Cr15Ni4Mo3N 材料中含有的 Ni 能够大幅提高 1Cr15Ni4Mo3N 材料的塑韧性,故 1Cr15Ni4Mo3N 熔覆层塑韧性较高。

3 结论

(1)激光熔覆制备的 AF1410 熔覆层与 1Cr15Ni

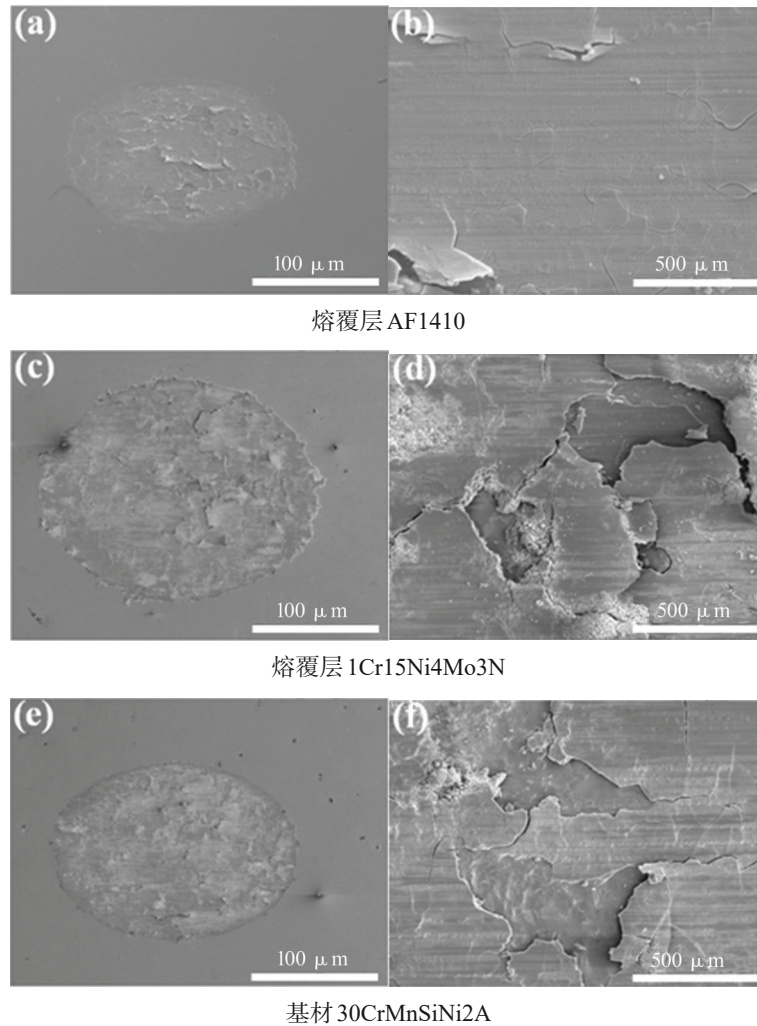


图8 熔覆层和基材摩擦磨损形貌

Fig. 8 Friction and wear morphology of cladding layer and substrate

表4 熔覆层力学性能

Table 4 Mechanical properties of cladding layer

材质	抗拉强度 R_m/MPa	延伸率 $\delta/\%$	冲击韧性 $Akv/(\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$
AF1410	1 650	12.5	48.9
1Cr15Ni4Mo3N	1 490	17.3	53.8

4Mo3N 熔覆层与基体之间结合均为冶金结合, AF1410熔覆层组织更致密,无明显气孔。

(2)AF1410熔覆层弹性模量和显微硬度均优于 1Cr15Ni4Mo3N 熔覆层,但 AF1410熔覆层的塑韧性低于 1Cr15Ni4Mo3N。

(3)AF1410 熔覆层抗磨损性能优于 1Cr15Ni4Mo3N 熔覆层,三者磨损机理均以磨粒磨损和氧化磨损为主。

(4)该研究工作将为在超高强度低合金钢 30CrMnSiNi2A 上激光制备耐磨涂层应用提供理论指导,下一步将开展激光制备耐磨涂层组织机理研究。

参考文献:

- [1] 苏亚东,吴斌,王向明. 增材制造技术在航空装备深化应用中的研究[J]. 航空制造技术,2016(12):42-48.
Su Yadong, Wu Bin, Wang Xiangming. Research on additive manufacturing technology in deepening application of aviation equipment[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2016(12):42-48.
- [2] HEJRANI E, SEBOLD D, NOWAK W J, et al. Isothermal and cyclic oxidation behavior of free standing MCrAlY coatings manufactured by high-velocity atmo-

- spheric plasma spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2017(313): 191–201.
- [3] 袁书强, 沈正祥, 周春华, 等. 不同热处理条件下 30CrMnSiNi2A 钢的组织性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2015, 23(02): 125–128.
- Yuan Shuqiang, Shen Zhengxiang, Zhou Chunhua, et al. Microstructure and Properties of 30CrMnSiNi2A steel under different heat treatment conditions[J]. Materials Science and Technology, 2015, 23(02): 125–128.
- [4] 张凯, 陈小明, 张磊, 等. 激光熔覆制备耐磨耐蚀涂层技术研究进展[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2019, 24(4): 308–314.
- Zhang Kai, Chen Xiaoming, Zhang Lei, et al. Research progress of wear and corrosion resistant coatings prepared by laser cladding[J]. Powder metallurgy Materials Science and Engineering, 2019, 24(4): 308–314.
- [5] 徐滨士, 谭俊, 陈建敏. 表面工程领域科学技术发展[J]. 中国表面工程, 2011, 24(02): 1–12.
- Xu Binshi, Tan Jun, Chen Jianmin. Development of science and technology in surface engineering [J]. China Surface Engineering, 2011, 24(02): 1–12.
- [6] 陈希章, 胡科, 袁其兵. 激光熔敷原位合成 WC 增强铁基复合涂层的组织和性能[J]. 中国表面工程, 2016, 29(04): 118–124.
- Chen Xizhang, Hu Ke, Yuan Qibing. Microstructure and properties of WC reinforced Iron matrix composite coatings prepared by laser cladding in situ [J]. China Surface Engineering, 2016, 29(04): 118–124.
- [7] 路世盛, 周健松, 王凌倩, 等. 钛合金表面激光熔覆陶瓷涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(11): 82–90.
- Lu Shisheng, Zhou Jiansong, Wang Lingqian, et al. Research progress of laser cladding ceramic coatings on titanium alloy [J]. Surface technology, 2019, 48(11): 82–90.
- [8] 孙兵兵, 张学军, 李能, 等. 30CrMnSiNi2A 超高强度激光熔覆工艺及性能研究[J]. 焊接技术, 2016, 45(3): 23–25.
- Sun B B, Zhang X J, Li N, et al. Study on laser cladding process and properties of 30CrMnSiNi2A ultra-high-strength steel [J]. Welding Technology, 2016, 45(3): 23–25.
- [9] 周潇, 陈卓, 陈怡, 等. 30CrMnSiNi2A 钢激光再制造技术研究[J]. 应用激光, 2018, 38(3): 358–366.
- Zhou Xiao, Chen Zhuo, Chen Yi, et al. Study on laser Remanufacturing technology of 30CrMnSiNi2A steel [J]. Application of laser, 2016, 45(3): 23–25.
- [10] 徐采星. 基于激光熔覆的 30CrMnSiNi2A 钢起落架部件再制造试验研究[D]. 湖南: 湘潭大学, 2020.
- XU Caixing. Reseach on Remanufacturing of 30CrMn-SiNi2A Steel Landing Gear Components Based on Laser Cladding[D]. Hunan: Xiangtan University, 2020.
- [11] 周可欣, 秦仁耀, 曹强, 等. 30CrMnSiNi2A 钢激光熔覆 1Cr15Ni4Mo3 粉末工艺[J]. 激光与光电子学进展, 2018, (55): 071404.
- Zhou Kexin, Qin Renyao, Cao Qiang, et al. Laser Cladding 1Cr15Ni4Mo3 powder process of 30CrMnSiNi2A steel [J]. Progress in laser and optoelectronics, 2018, (55): 071404.
- [12] 张志强, 程宗辉, 曹强, 等. 30CrMnSiNi2A 超强钢激光熔覆修复试验研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 62–67.
- Zhang Zhiqiang, Cheng Zonghui, Cao Qiang, et al. Experimental study on laser Cladding repair of 30CrMn-SiNi2A Super Steel [J]. Equipment environmental Engineering, 2016, 13(1): 62–67.
- [13] 谭金花, 孙荣禄, 牛伟, 等. 激光扫描速度对 TC4 合金表面激光熔覆复合涂层组织及性能的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(12): 12094–12100.
- Tan Jinhua, Sun Ronglu, Niu Wei, et al. Effect of laser scanning speed on microstructure and properties of laser cladding composite coating on TC4 alloy [J]. Material review, 2020, 34(12): 12094–12100.
- [14] HEJRANI E, SEBOLD D, NOWAK W J, et al. Isothermal and cyclic oxidation behavior of free standing MCrAlY coatings manufactured by high-velocity atmospheric plasma spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2017(313): 191–201.
- [15] 古立新, 靳建军. 回火温度对 1Cr15Ni4Mo3N 钢组织和性能的影响[J]. 材料工程, 2007(1): 7–10.
- Gu Lixin, Jin Jianjun. Effect of tempering temperature on microstructure and properties of 1Cr15Ni4Mo3N steel [J]. Materials engineering, 2007(1): 7–10.
- [16] 付志凯, 王文健, 丁昊昊, 等. 激光熔覆铁基合金对轮轨材料磨损与损伤性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(8): 217–222.
- Fu Zhikai, Wang Wenjian, Ding Haohao, et al. Effect of laser cladding iron base alloy on wear and damage properties of wheel/rail materials [J]. Journal of Materials Heat Treatment, 2015, 36(8): 217–222.