

引文格式: 杜彦斌, 雷鑫, 张文平, 等. 航空用17-4PH表面激光熔覆15-5PH涂层组织与性能分析[J]. 航空制造技术, 2024, 67(19): 135-142.

DU Yanbin, LEI Xin, ZHANG Wenping, et al. Microstructure and properties of 15-5PH coatings by laser cladding on 17-4PH surfaces for aviation applications[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(19): 135-142.

航空用 17-4PH 表面激光熔覆 15-5PH 涂层组织与性能分析*

杜彦斌¹, 雷鑫^{1,2}, 张文平^{1,2}, 陈泓西^{1,2}, 李志强^{1,2}

(1. 重庆工商大学智能装备绿色设计与制造重庆市重点实验室, 重庆 400067;

2. 重庆工商大学机械工程学院, 重庆 400067)

[摘要] 17-4PH 不锈钢广泛应用于航空航天领域涡轮机叶片等关键零部件。为实现航空用 17-4PH 零部件损伤后的修复与再制造, 利用激光熔覆技术在 17-4PH 表面制备 15-5PH 涂层, 并对涂层的物相、显微组织、显微硬度、耐磨性能及耐腐蚀性能进行分析。结果表明, 涂层主要由 Fe-Cr、马氏体及 α -Fe 组成; 涂层与基体的结合区为平面晶, 底部及中部以柱状晶为主, 顶部由柱状晶和少量等轴晶组成。涂层与基材的平均显微硬度分别为 408.7HV_{0.5} 和 347.5HV_{0.5}, 涂层硬度较基材提高 17.6%; 涂层与基材的平均摩擦系数分别为 0.3051 和 0.3754, 磨损截面面积分别为 813.74 μm^2 和 2058.12 μm^2 , 涂层的耐磨性能明显优于基材。涂层与基材的自腐蚀电位 (E_{corr}) 分别为 -1.0780 V 和 -1.0975 V, 自腐蚀电流密度 (I_{corr}) 分别 1.229 $\times 10^{-3}$ mA/cm² 和 0.907 $\times 10^{-3}$ mA/cm², 涂层的耐腐蚀性能与基材相当。涂层的组织及表面性能结果表明, 激光熔覆 15-5PH 涂层可用于航空用 17-4PH 零部件的修复与再制造。

关键词: 激光熔覆; 再制造; 17-4PH; 15-5PH; 耐腐蚀

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.19.135



杜彦斌

教授, 博士, 研究方向为绿色制造与再制造。

17-4PH 不锈钢因优异的机械性能、耐腐蚀性及耐磨损性, 常被用于制造关键的航空零部件, 包括飞机起落架、航空发动机部件和涡轮机叶片等。该类零部件在实际应用中需承受极端工作环境, 如在高温高压条件下连续运行、高速摩擦及暴露在腐蚀介质中, 这些严苛条件容易导致零部件的磨损、腐蚀和疲劳失效, 不满足长期服役的要求^[1-3]。因此, 针对航空用 17-4PH 损伤零部件的修复与再制造手段为延长其服役寿命及提高资源利用率提供了切实可行的途径^[4]。作为一种先进的表面修复与再制造技术, 激光熔覆技术利用高

能激光束将粉末材料和损伤表面快速熔化, 冷却凝固后形成组织结构致密、性能优良的涂层^[5-7]。相较于热喷涂、电弧熔覆技术和等离子喷涂等传统修复与再制造技术, 激光熔覆技术具有能量密度高、能耗低、热影响区域小等优势^[8], 可对任意区域、形状复杂的损伤零部件进行修复与再制造^[9]。

目前, 国内外大量学者采用激光熔覆技术在诸多领域展开了修复与再制造技术的研究。李胜等^[10]利用激光熔覆技术在 Inconel 718 合金表面制备了一种 Inconel 718 改进型的镍基高温耐磨合金涂层, 对超临界机

* 基金项目: 重庆市教委科学技术研究重大项目 (KJZD-M202400801); 重庆市高校创新研究群体资助项目 (CXQT21024); 重庆英才计划 (CQYC20210302226)。

组镍基合金阀门的密封面进行修复与再制造。Chen 等^[11]采用激光熔覆技术在受损碳钢表面制备碳化钛和二氧化钛增强复合涂层,对碳钢零件进行修复与再制造。Zhang 等^[12]以钴基和镍基合金为原料,在 1Cr12 马氏体不锈钢表面进行激光熔覆,对核反应堆中的泵轴和阀杆进行修复与再制造。李允东等^[13]利用激光熔覆技术在 28CrMoNiV 钢基板上熔覆自制铁基合金粉末,对汽轮机转子进行修复与再制造。其中,有部分学者利用激光熔覆技术对航天航空领域的零部件进行修复与再制造。任维彬等^[14]以损伤转子叶片为修复与再制造对象,在 TC4 合金表面激光熔覆自制合金粉末,结果表明,修复后叶片的耐磨损性能得到提升。高雪松等^[15]为实现飞机发动机零部件的修复与再制造,利用激光熔覆技术在钛合金表面制备 $Al_2O_3+13\% TiO_2$ (质量分数) 涂层,大幅提升了修复后零部件的耐腐蚀性能。王箫杨等^[16]针对 2A50-T6 航空铝合金展开修复与再制造研究,采用激光熔覆技术在 2A50-T6 铝合金表面制备 AISi10Mg 涂层;结果显示,熔覆层仅有极少的气孔,致密性达 99.96%,激光熔覆修复铝合金的抗拉强度达到基体的 93.18%。Zhang 等^[17]对航空航天用 Inconel 718 高温部件进行修复与再制造研究,在带有预制梯形凹槽的 Inconel 718 合金上激光熔覆 Inconel 718 合金粉末以制备涂层,修复后试件的抗拉强度和伸长率分别为 736.6 MPa 和 12.5%,抗拉强度显著提高。采用激光熔覆技术对航空航天领域的零部件开展修复与再制造的应用已较为广泛,

但大多研究是针对钛合金、铝合金及高温合金(如 Inconel 718、Inconel 625)等材料^[18],对同样广泛应用的 17-4PH 不锈钢的研究还较少。

熔覆粉末材料对再制造涂层的组织及性能具有重要的影响。激光熔覆常用的熔覆材料分为钴基、镍基和铁基,与钴基、镍基相比较,铁基材料润湿性较好,工程造价也相对较低^[19-20]。15-5PH 是一种典型的铁基粉末,是在 17-4PH 的基础上降低了铬和铜含量、提高了镍含量改进而来;不仅具有较高的强度和硬度,更有研究表明低铬/镍比使得 15-5PH 拥有高韧性和较好的变形性能^[21-22],这些特性使 15-5PH 在摩擦、拉压等工况中更具优势,能有效缓解 17-4PH 航空零部件在服役过程中开裂的风险。

本研究拟在 17-4PH 基材上熔覆 15-5PH 粉末,并对熔覆涂层的物相、显微组织及耐腐蚀性能等进行对比与分析,验证利用激光熔覆 15-5PH 粉末来修复 17-4PH 零部件的可行性,为航空用 17-4PH 零部件的修复与再制造提供试验基础。

1 试验及方法

1.1 试验材料

基材选用 17-4PH 不锈钢(太钢集团);熔覆粉末采用 15-5PH 不锈钢(中航迈特),粒径为 53~150 μm 。在试验前,用砂纸打磨基材表面去除氧化层,将熔覆粉末置于 200 $^{\circ}C$ 的烘箱中干燥 120 min,以确保粉末的流动性。基材和熔覆粉末的主要成分如表 1 所示。

1.2 试验设备及方案

激光熔覆系统如图 1 所示,由

OFM-TS-0601 激光熔覆头(岗春科技公司)、RFL-C3000 光纤输出半导体激光器(瑞科智能科技有限公司)、FANUC M-20iD/25 机械手臂、TFLW-3000 水冷装置(三河同飞制冷公司)、ECPF2-2LC 多功能送粉器(上海派里米德机械科技公司)、工作平台和保护气体装置组成。激光器最大输出功率为 3000 W,激光波长为 $(915 \pm 10) nm$,频率为 50 Hz,采用同轴送粉的方式进行熔覆,为防止涂层氧化,全过程采用纯度 99.999% 的高纯氩气来保护熔池,激光熔覆过程如图 2 所示。根据前期试验结果,本研究选用的工艺参数为激光输出功率 1700 W、激光扫描速度 13 mm/s、

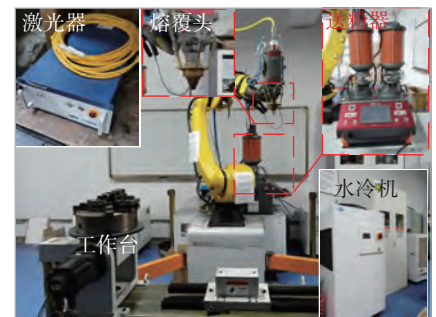


图 1 激光熔覆系统
Fig.1 Laser cladding system

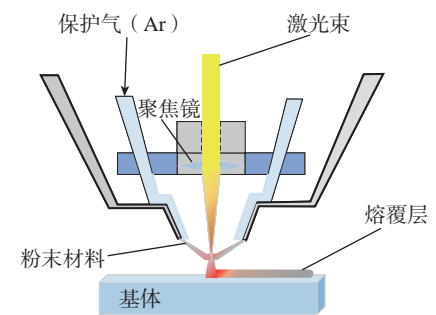


图 2 激光熔覆过程示意图
Fig.2 Schematic diagram of laser cladding process

表 1 17-4PH 与 15-5PH 化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 17-4PH and 15-5PH (mass fraction)

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Nb	Fe
17-4PH	0.04	0.44	0.66	0.03	0.01	15.82	4.04	3.63	0.28	Bal
15-5PH	0.03	0.38	0.84	0.01	0.01	15.41	4.66	3.21	0.30	Bal

粉末输送速度 1.1 r/min、搭接率 40%。

试样熔覆后,使用 DK-7735 高速线切割设备(泰州市爱尔数控机床公司)将选取的试样中段切割成 10 mm × 10 mm × 12 mm 的块状样品并镶嵌,再依次使用 400#~2000# 砂纸打磨块状样品并进行抛光处理。采用体积比 $\text{FeCl}_3:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=5:50:100$ 的混合溶液腐蚀抛光样品表面,随后清洗并干燥。将腐蚀后的试样放置于 Leica DMILM 金相显微镜工作台(德国徕卡公司)表面进行涂层微观组织的观察,研究涂层组织的演变机理。采用 DX-2700B 型 X 射线衍射仪(丹东浩元)检测涂层物相组成,设定测试的扫描角度范围(2θ)为 $30^\circ\sim 100^\circ$,步进角度为 $0.02^\circ/\text{s}$;随后用 MDI Jade 6 软件对涂层物相进行分析。使用 HV-1000B 型维氏硬度计(莱州华银试验仪器公司)测量涂层到基材的显微硬度变化,设置测试载荷为 500 g,保压时间为 10 s;测试点位置及间隔如图 3 所示^[23]。采用 LK98BII 型电化学工作站(兰力科化学电子公司)测试试样表面的耐腐蚀性能,设定初始电位 -2 V、终止电位 2 V、扫描速度 0.02 V/s、等待时间 10 s。采用 MS-T3001 摩擦磨损试验机(兰州华汇仪器)进行耐磨损性能测试,施加载荷为 500 g 砝码,设置转速 200 r/min、摩擦时间

10 min、摩擦半径 3 mm,摩擦副选用 GCr15 钢球(HRC63),通过球-盘摩擦原理及微机自控技术获取摩擦力信号。磨损结束后使用 Zate 白光干涉仪(KLA 公司)测量试样的磨损形貌,并使用扫描电镜(TESCAN VEGA)对试样的磨损形式进行分析。

2 结果与讨论

2.1 物相分析

15-5PH 涂层的 X 射线衍射(XRD)图谱如图 4 所示。分析表明,15-5PH 涂层相结构主要由 Fe-Cr、马氏体及 $\alpha\text{-Fe}$ 组成。 $\alpha\text{-Fe}$ 相的存在表明涂层中还含有一定量的铁素体,铁素体可以改善涂层的韧性,但也会影响涂层硬度。另有研究表明,镍元素对铁素体向奥氏体转变具有积极效应^[24],15-5PH 在 17-4PH 的基础上提升了镍含量,使得铁素体较大程度上向奥氏体转变,有利于提高涂层硬度。从图 4 可以看出,15-5PH 涂层的 XRD 图谱以马氏体衍射峰为主,未发现明显的奥氏体衍射峰,由于激光熔覆过程所具有的速冷速热特性,在熔覆过程中,奥氏体绝大部分转化成马氏体。作为一种硬质相,马氏体通常具有较高的强度和硬度^[25-26]。此外,由表 1 可知,15-5PH 合金成分中的铁和铬含量较高,因此

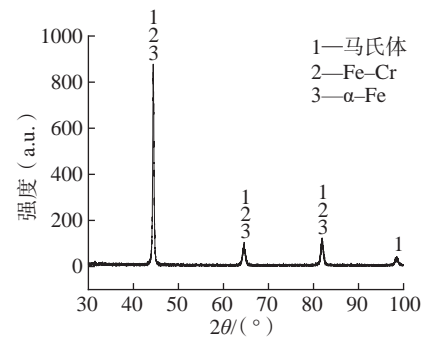


图 4 15-5PH 涂层的 XRD 图谱

Fig.4 XRD pattern of 15-5PH cladding layer

形成了 Fe-Cr 相,Fe-Cr 相可以提高材料的强度和耐腐蚀性^[27]。

2.2 显微组织

涂层不同区域显微组织如图 5 所示。激光熔覆过程中熔池温度高、冷却速度快,熔覆层组织形貌同时受热流流失方向及结晶参数 G/R (G 为温度梯度; R 为凝固速率)影响^[28-29]。结合区组织形态如图 5(d)所示,熔化的粉末材料与温度较低的基材表面直接接触,热量全部向基材界面传递,温度梯度最大而凝固速度小,界面处形核速度小于晶粒生长速度,从而形成一层较薄的平面晶组织^[30]。涂层底部热量沿着基材扩散的过程中存在较大的正温度梯度,正温度梯度下熔池迅速冷却形成的柱状晶垂直于熔凝线并沿着热流扩散的反方向生长^[31],在涂层底部形成了一条垂直于熔凝线的柱状晶带(图 5(c))。随着底部柱状晶粒成长到一定程度,热流通过基材散热已不占主导地位,涂层中部剩余的液态金属内部温差减小,散热方向不明显,趋近于均匀冷却状态,导致中部晶粒生长方向较为杂乱(图 5(b));由于涂层中部温度梯度最小,凝固速度仅次于底部,同样可为晶粒生长提供良好的条件,因此形成柱状晶粒^[32]。涂层顶部显微组织如图 5(a)所示,以柱状晶为主,掺杂少量等轴晶,晶粒尺寸比较小;这是因为涂层顶部远离熔池,并且受到环境和补充粉末的冲击和强烈冷却作用,导致温度梯度较大而凝

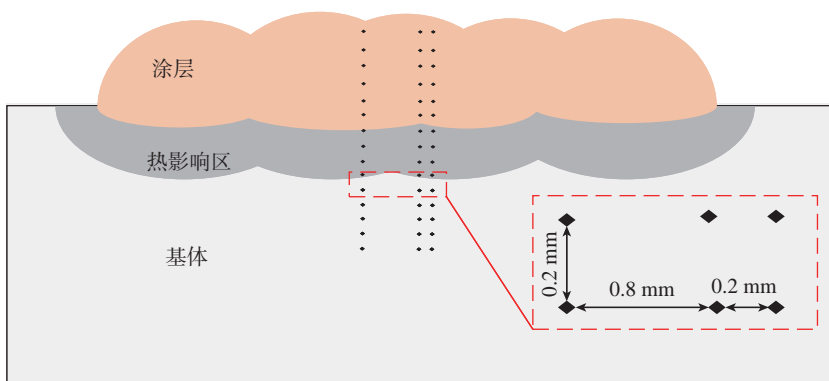


图 3 熔覆试样纵截面形貌及显微硬度测量点示意图^[23]

Fig.3 Longitudinal section morphology and microhardness measurement point diagram of the cladding sample^[23]

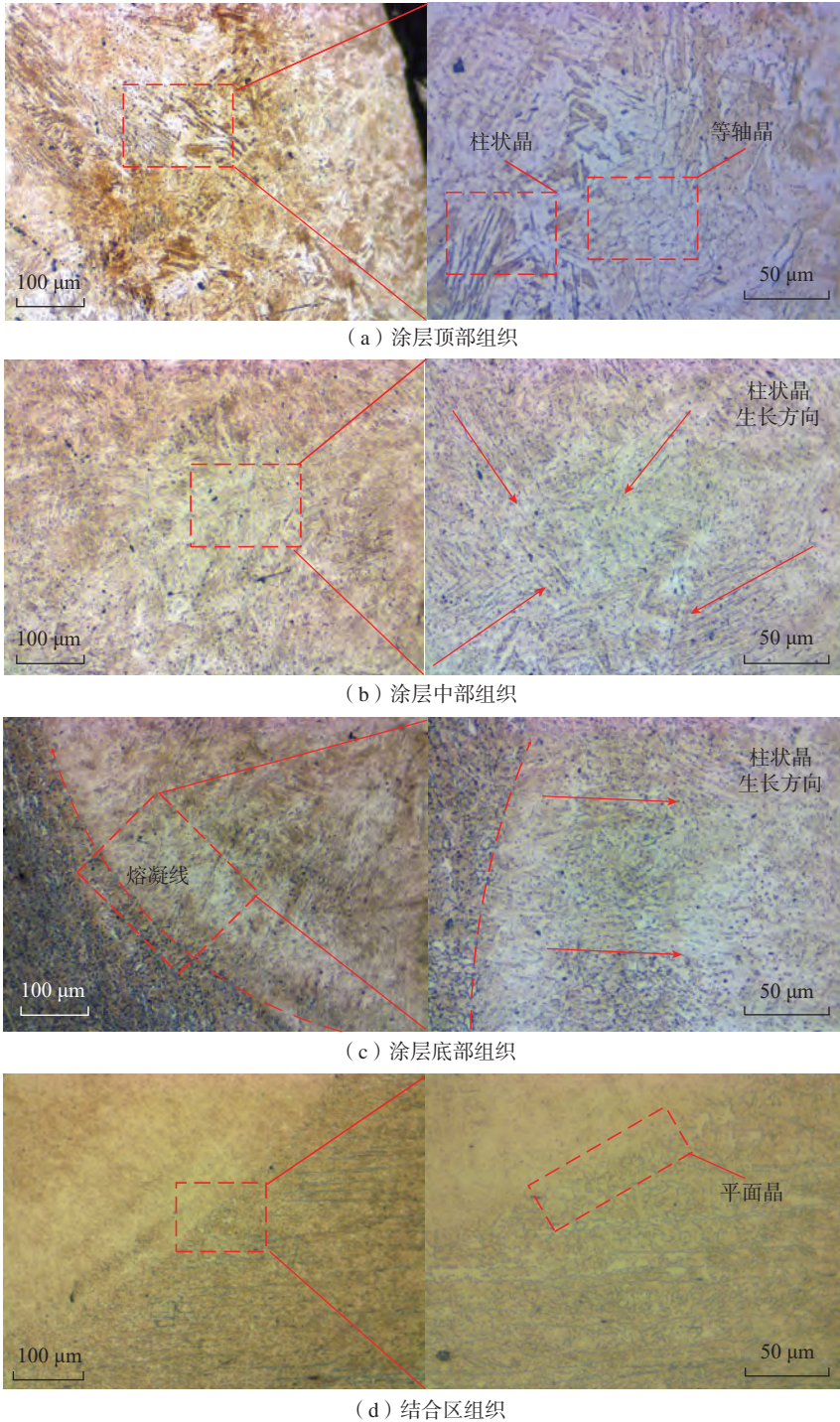


图5 15-5PH 涂层不同区域的显微组织

Fig.5 Microstructure of different regions in the 15-5PH cladding layer

固速度小,柱状晶生长受到限制,形成少量的等轴晶^[33-34]。

2.3 显微硬度

由图6熔覆试样的显微硬度变化曲线可知,涂层与基材的显微硬度都较为稳定,并且涂层的显微硬度明

显优于基材。涂层的显微硬度平均值为408.7HV_{0.5};随着测试点位置逐渐远离涂层,基材的显微硬度趋于稳定,平均值为347.5HV_{0.5},涂层显微硬度较基材提高了17.6%。

结合涂层物相及显微组织可知,

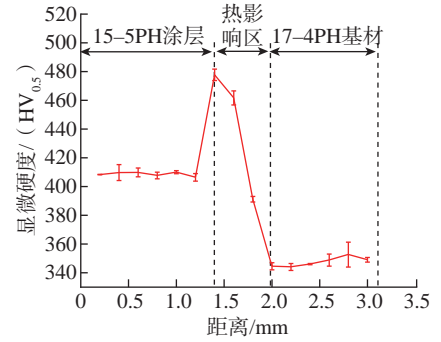


图6 熔覆试样截面不同区域的显微硬度
Fig.6 Microhardness of different regions of the cross-section of the cladding sample

涂层物相中存在马氏体,其本身硬度较高,涂层内部晶粒细小,晶界面数量增多,阻碍了位错和滑移运动,从而抑制晶粒的塑性变形;并且由于激光熔覆具有快速熔凝的特性,涂层中固溶体的固溶度极限得以提升,从而增强了涂层的固溶强化效果,使得涂层硬度提高^[34]。热影响区显微硬度呈线性降低趋势,靠近涂层的一侧具有最大的显微硬度,达到477.7HV_{0.5}。这是由于在快速移动的激光热源影响下,热影响区受到了类似淬火的热影响,使得热影响区组织相及晶粒尺寸发生改变;随着与涂层的距离越远,激光热源的影响程度降低,显微硬度迅速下降^[35]。

2.4 磨损性能

图7为15-5PH涂层与17-4PH基材的摩擦系数曲线。摩擦磨损试验初期,摩擦副与测试表面处于跑合阶段,涂层和基材的摩擦系数都出现一个大幅提高的趋势;当试验进行到3 min左右,磨损进入稳定阶段,涂层和基材的摩擦系数逐渐稳定在某个区间内。这是由于在摩擦初期,摩擦副与接触表面为点接触,硬度极高的GCr15钢球在压应力作用下容易压入测试件,脱落下来的材料残留在摩擦轨道中,应力较大,因此摩擦系数变化波动较大,随着摩擦副与材料表面接触面积增大,应力逐渐减小,摩擦随即进入稳定状态。涂层的平均摩擦系数为0.3051,低于基材的

平均摩擦系数(0.3754);这主要是由于激光熔覆的工艺特性使得涂层致密性提高、微观结构得到优化,因此显著提升了涂层的耐磨损性能,降低了摩擦系数^[36-37]。

为进一步探究涂层与基材的磨损形式,本研究采用TESCAN VEGA扫描电镜对涂层和基材的磨损形貌进行观察,结果如图8所示。可以看出,涂层与基材中都有较为明显的沟壑和分层的磨损形貌,沟壑来源于摩擦初期残留在摩擦轨道中的脱落材料与摩擦副的相对运动而产生的“犁沟状”划痕;同时,接触区较大的循环应力超过了材料的疲劳强度,摩擦轨道中不断产生新的裂纹,裂纹逐步扩展,最后开裂和剥落,形成层次分明的分层。如图8(b)所示,在17-4PH基材的磨损形貌中还观测到了一定数量的“凹坑”,这是因为材

料表面黏着的微小颗粒因应力作用而脱落^[38]。结合以上分析可知,涂层与基材的磨损形式都以黏着磨损和疲劳磨损为主。

利用Zate白光干涉仪对磨损后的试样磨槽进行测量,并使用Vision64软件对测量结果进行分析,图9为涂层与基材的磨痕二维轮廓。其中,涂层与基材的表面磨痕平均深度分别为1.443 μm、3.054 μm,对磨痕轮廓进行积分,求得磨损截面面积分别为813.74 μm²、2058.12 μm²。综合以上数据可知,涂层的耐磨损性能明显优于基材。

2.5 耐腐蚀性能

涂层与基材的动态极化曲线如图10所示,随着电位的变化,涂层和基材的自腐蚀电流密度变化曲线基本一致(图10(a),其中, E_{corr1} 与 E_{corr2} 分别为基材与涂层的自腐蚀电

位; E_{pit1} 与 E_{pit2} 分别为基材与涂层的点蚀电位。其局部放大图如图10(b)所示,在该电位下,金属表面的腐蚀和防腐蚀过程达到平衡状态,材料自腐蚀电位越负,其抗腐蚀能力越弱。自腐蚀电流密度(I_{corr})的增加表明涂层的腐蚀速率增大,因此自腐蚀电流密度越大,涂层的腐蚀速率越快,

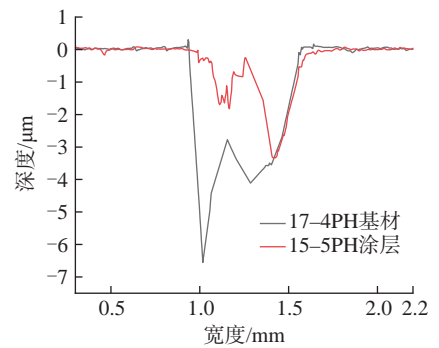


图9 15-5PH涂层和17-4PH基材的磨痕二维轮廓

Fig.9 Two-dimensional profile of wear track for 15-5PH cladding layer and 17-4PH substrate

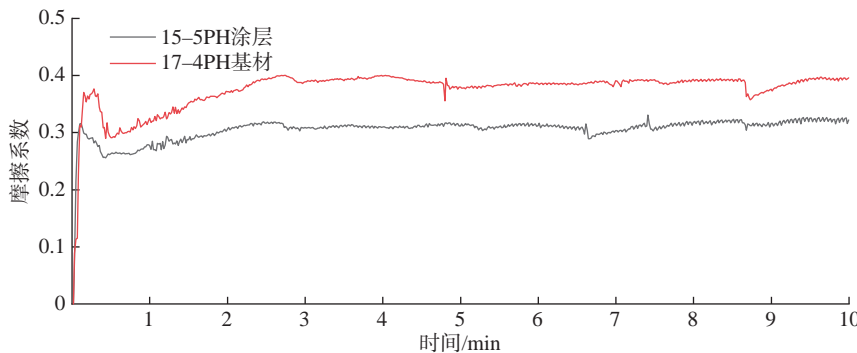
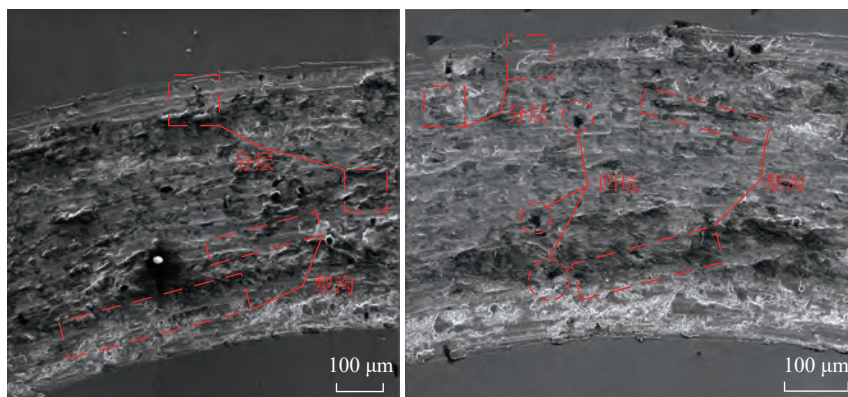


图7 15-5PH涂层与17-4PH基材的摩擦系数曲线

Fig.7 Friction coefficient curves of 15-5PH cladding layer and 17-4PH substrate

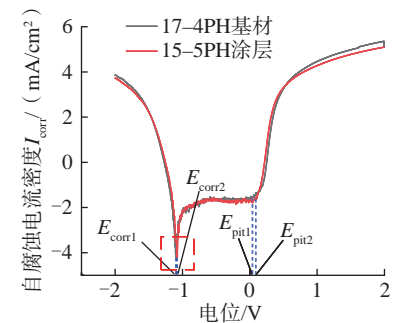


(a) 15-5PH涂层

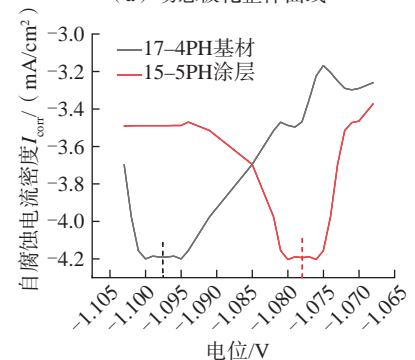
(b) 17-4PH基材

图8 15-5PH涂层与17-4PH基材的磨损形貌图

Fig.8 Wear morphology of the 15-5PH cladding layer and 17-4PH substrate



(a) 动态极化整体曲线



(b) 自腐蚀电位区域局部放大

图10 15-5PH涂层和17-4PH基材的动态极化曲线

Fig.10 Dynamic polarization curves of 15-5PH cladding layer and 17-4PH substrate

其耐腐蚀性也相应较低^[39]。在该电位下,金属表面开始发生点蚀^[40]。

由图 10 (a)可知,涂层与基材中都形成了明显的钝化区域,金属表面会形成一层稳定的钝化膜,这种钝化膜能够防止进一步腐蚀的发生^[41]。通过 Tafel 直线外推法求得涂层与基材的自腐蚀电位和自腐蚀电流密度,如表 2 所示。对比分析可知,涂层与基材的自腐蚀电流密度与自腐蚀电压差距很小,由此反映出涂层与基体的抗腐蚀能力相近,可以满足基材耐腐蚀性能的要求。

3 结论

本研究利用激光熔覆技术在 17-4PH 表面制备 15-5PH 涂层,通过对涂层的相组成、微观组织的观察,以及对涂层和基材的显微硬度、耐磨损性能及耐腐蚀性能的测试,分析了激光熔覆前后材料的性能差异。

(1) 15-5PH 涂层由 Fe-Cr、马氏体及 α -Fe 等相组成。涂层与基材结合区为一层较薄的平面晶组织,涂层的底部和中部以柱状晶为主,顶部由柱状晶和少量等轴晶组成,晶粒尺寸较为细小。15-5PH 涂层与 17-4PH 基材的平均显微硬度分别为 408.7HV_{0.5} 和 347.5HV_{0.5},涂层硬度明显高于基材。

(2) 涂层与基材的平均摩擦系数分别为 0.3051 和 0.3754;涂层与基材的平均磨损深度分别为 1.443 μm 和 3.054 μm ,磨损截面面积分别为 813.7 μm^2 和 2058.12 μm^2 。涂层耐磨损性能明显优于基材,二者都以黏着磨损与疲劳磨损为主。

表 2 17-4PH 基材和 15-5PH 涂层的电化学参数

Table 2 Electrochemical parameters of 17-4PH substrate and 15-5PH cladding layer

材料	E_{corr}/V	$I_{\text{corr}}/(\text{mA}/\text{cm}^2)$
17-4PH	-1.0975	0.907×10^{-3}
15-5PH	-1.0780	1.229×10^{-3}

(3) 15-5PH 涂层的自腐蚀电位为 -1.0780 V,自腐蚀电流密度为 $1.229 \times 10^{-3} \text{ mA}/\text{cm}^2$;17-4PH 基材的自腐蚀电位为 -1.0975 V,自腐蚀电流密度为 $0.907 \times 10^{-3} \text{ mA}/\text{cm}^2$;涂层与基材的电化学参数差距非常小,耐腐蚀性能相当。

本研究对 17-4PH 零部件激光熔覆 15-5PH 涂层的组织与性能进行了分析,侧重于从涂层的硬度、耐磨性及耐腐蚀性等方面出发,但在实际应用中,该类零部件还可能存在剧烈的冲击及拉压等其他工况。在后续研究中,将继续开展激光熔覆涂层的冲击、拉伸等试验,进一步探讨再制造零部件的抗冲击性能及抗拉强度。此外,为提高修复层的稳定性和可靠性,后续研究将重点关注界面结合状态和物理化学相容性,以满足修复零部件的长期服役要求。

参考文献

[1] GARCÍA-HERNÁNDEZ C, NARANJO J A, CASTRO-SASTRE M Á, et al. Enhancing wear performance: A comparative study of traditional vs. additive manufacturing techniques for 17-4PH SS[J]. *Wear*, 2024, 540: 205258.

[2] 唐为鹏. 直升机旋翼弹性轴承隔片热成形工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

TANG Weipeng. Research on Thermoforming process of elastic bearing spacer for helicopter rotor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

[3] 刘世锋,魏钢,王岩,等. 增材制造 17-4PH 马氏体不锈钢研究进展[J]. *中国冶金*, 2022, 32(6): 15-25.

LIU Shifeng, WEI Gang, WANG Yan, et al. Research progress on additive manufacturing of 17-4PH martensitic stainless steels[J]. *China Metallurgy*, 2022, 32(6): 15-25.

[4] 陈军,李伟,郝胜智. 高能束表面改性技术在航空领域的应用[J]. *航空制造技术*, 2024, 67(4): 32-43.

CHEN Jun, LI Wei, HAO Shengzhi. Application of high energy beam surface modification technology in aviation field[J].

Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(4): 32-43.

[5] 王明明,刘伟,伏利,等. 激光熔覆技术研究进展[J]. *冶金与材料*, 2024, 44(1): 73-75.

WANG Mingming, LIU Wei, FU Li, et al. Research progress of laser cladding technology[J]. *Metallurgy and Materials*, 2024, 44(1): 73-75.

[6] 田宪华,杨晓东,刘亚,等. 激光熔覆涂层材料的研究现状[J]. *热加工工艺*, 2024, 53(6): 1-5, 9.

TIAN Xianhua, YANG Xiaodong, LIU Ya, et al. Research status of laser cladding coating materials[J]. *Hot Working Technology*, 2024, 53(6): 1-5, 9.

[7] 董世运,马运哲,徐滨士,等. 激光熔覆材料研究现状[J]. *材料导报*, 2006, 20(6): 5-9, 13.

DONG Shiyun, MA Yunzhe, XU Binshi, et al. Current status of material for laser cladding[J]. *Materials Reports*, 2006, 20(6): 5-9, 13.

[8] 谢志颖,刘常升,吴琼,等. 激光熔覆制备高硬耐磨涂层的研究综述[J]. *表面技术*, 2023, 52(7): 25-40.

XIE Zhiying, LIU Changsheng, WU Qiong, et al. High hardness and wear-resistant coatings fabricated by laser cladding[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(7): 25-40.

[9] SEXTON L, LAVIN S, BYRNE G, et al. Laser cladding of aerospace materials[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 122(1): 63-68.

[10] 李胜,雷远涛,伍文星,等. 激光熔覆镍基高温耐磨合金的组织及性能[J]. *中国表面工程*, 2023, 36(5): 213-221.

LI Sheng, LEI Yuantao, WU Wenxing, et al. Microstructure and properties of laser cladding Ni-based high-temperature wear-resistant alloy[J]. *China Surface Engineering*, 2023, 36(5): 213-221.

[11] CHEN L Y, YU T B, GUAN C, et al. Microstructure and properties of metal parts remanufactured by laser cladding TiC and TiB₂ reinforced Fe-based coatings[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(10): 14127-14140.

[12] ZHANG W, SHANG X H, HU M L, et al. Microstructure and corrosion-wear behaviors for laser cladding repaired martensitic stainless steels using Co-based and Ni-based Powders[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 35: 106287.

- [13] 李允东, 董刚, 姚建华. 激光修复 28CrMoNiV 钢热影响区的组织演变 [J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0802009.
- LI Yundong, DONG Gang, YAO Jianhua. Microstructure evolution of heat-affected zones of 28CrMoNiV steel repaired by lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0802009.
- [14] 任维彬, 薛亚平, 周金宇, 等. 激光再制造边部减薄 Ti-6Al-4V 叶片覆层与界面性能控制 [J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(7): 2400-2406.
- REN Weibin, XUE Yaping, ZHOU Jinyu, et al. Coating and interface performance control of Ti-6Al-4V blade with thinned edge for laser remanufacture[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(7): 2400-2406.
- [15] 高雪松, 黄因慧, 田宗军, 等. 钛合金表面激光熔覆等离子体喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3+13\%\text{TiO}_2$ 涂层冲蚀磨损性能 [J]. 中国激光, 2010, 37(3): 858-862.
- GAO Xuesong, HUANG Yinhui, TIAN Zongjun, et al. Erosive wear resistance behavior of laser cladding $\text{Al}_2\text{O}_3+13\%\text{TiO}_2$ coating prepared by plasma spraying on titanium alloy surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(3): 858-862.
- [16] 王箫扬, 董照鹏, 任旭东. 激光熔覆修复 2A50-T6 航空铝合金的组织与力学性能研究 [J]. 中国激光, 2024, 51(16): 1602205.
- WANG Xiaoyang, TONG Zhaopeng, REN Xudong. Study on microstructure and mechanical properties of 2A50-T6 aluminum alloy landing gear repaired by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(16): 1602205.
- [17] ZHANG Q L, ZHANG J, ZHUANG Y F, et al. Hot corrosion and mechanical performance of repaired Inconel718 components via laser additive manufacturing[J]. Materials, 2020, 13(9): 2128.
- [18] 田宗军, 顾冬冬, 沈理达, 等. 激光增材制造技术在航空航天领域的应用与发展 [J]. 航空制造技术, 2015, 58(11): 41-45.
- TIAN Zongjun, GU Dongdong, SHEN Lida, et al. Application and development of laser additive manufacturing technology in aeronautics and astronautics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(11): 41-45.
- [19] 吴轲源. 15-5PH 不锈钢逆变奥氏体形成机理及对性能的影响 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.
- WU Keyuan. Mechanism of austenite formation in 15-5PH stainless steel and its impact on performance[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023.
- [20] 程军, 吴巍, 胡志明, 等. 加工工艺对高强度 15-5PH 钢力学性能与侵蚀性能的影响 [J]. 北京理工大学学报, 2024, 44(3): 251-259.
- CHENG Jun, WU Wei, HU Zhiming, et al. Influence of processing technology on the mechanical and penetration properties of high strength 15-5PH steel[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2024, 44(3): 251-259.
- [21] CHEN B, LI J N, HUANG Z H, et al. Dependences of the defect, microstructure and properties of 15-5PH martensitic stainless steel on the laser powder bed fusion process parameters[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 901: 146589.
- [22] ZHANG B, WANG H M, RAN X Z, et al. Microstructure and mechanical properties of high-efficiency laser-directed energy deposited 15-5PH stainless steel[J]. Materials Characterization, 2022, 190: 112080.
- [23] 张文平, 杜彦斌, 何国华, 等. 20Cr13 不锈钢表面激光熔覆 M2 涂层性能分析 [J/OL]. 热加工工艺, 2024(18): 148-154. [2024-07-16]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20222707>.
- ZHANG Wenping, DU Yanbin, HE Guohua, et al. Performance analysis of laser cladding M2 coating on 20Cr13 stainless steel[J/OL]. Hot Working Technology, 2024(18): 148-154. [2024-07-16]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20222707>.
- [24] FANG Q, LIU Y, HU D W, et al. Effect of Ni on the microstructure and properties of laser cladding 316 L + 410 composite stainless steel coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 478: 130465.
- [25] WANG X L, HUANG A R, SHANG C J, et al. Characterization of the cladding layer by laser cladding of 9Cr18Mo powder on 3Cr14 martensitic stainless steel and the impact of martensite obtained through post heat treatment on hardness[J]. Materials Today Communications, 2022, 32: 104057.
- [26] WEN P, FENG Z H, ZHENG S Q. Formation quality optimization of laser hot wire cladding for repairing martensite precipitation hardening stainless steel[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 65: 180-188.
- [27] YANG Y, WANG A H, XIONG D H, et al. Effect of Cr content on microstructure and oxidation resistance of laser-clad Cu-Ni-Fe-Mo-xCr alloy coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 384: 125316.
- [28] 张安琪, 王彦芳, 牛德文, 等. 热丝激光熔覆 17-4PH 涂层组织与腐蚀磨损性能 [J]. 表面技术, 2022, 51(9): 379-386.
- ZHANG Anqi, WANG Yanfang, NIU Dewen, et al. Microstructure and tribocorrosion properties of hot-wire laser cladding 17-4PH coating[J]. Surface Technology, 2022, 51(9): 379-386.
- [29] 尹燕, 吴怡霖, 李辉, 等. 熔覆方式对马氏体不锈钢表面激光熔覆温度场及组织、硬度的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(21): 2114008.
- YIN Yan, WU Yilin, LI Hui, et al. Effect of laser cladding method on temperature field, microstructure and hardness of laser cladding on martensitic stainless steel surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(21): 2114008.
- [30] SONG J L, DENG Q L, CHEN C Y, et al. Rebuilding of metal components with laser cladding forming[J]. Applied Surface Science, 2006, 252(22): 7934-7940.
- [31] 徐一飞, 孙耀宁, 王国建, 等. 高速激光熔覆铁基合金涂层的组织及性能研究 [J]. 中国激光, 2021, 48(10): 1002122.
- XU Yifei, SUN Yaoning, WANG Guojian, et al. Microstructure and properties of iron-based alloys coatings prepared by high-speed laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10): 1002122.
- [32] 郭卫, 李凯凯, 柴蓉霞, 等. 扫描顺序对激光熔覆 304 钢组织和性能的影响 [J]. 激光与红外, 2018, 48(9): 1087-1093.
- GUO Wei, LI Kaikai, CHAI Rongxia, et al. Influence of the scanning sequence on microstructure and mechanical property of 304 steel by laser cladding[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(9): 1087-1093.
- [33] ZHANG B, WANG H M, ZHANG S Q, et al. Optimization of the dilution parameters to improve wear resistance of laser cladding 15-5PH steel coating on U75V pearlitic steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 465: 129571.
- [34] 杜彦斌, 何国华, 周志杰, 等. 20Cr13 表面激光熔覆 15-5PH 涂层组织和性能研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 292-301.
- DU Yanbin, HE Guohua, ZHOU Zhijie, et al. Microstructure and properties of 15-5PH

coating by laser cladding on 20Cr13 surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(9): 292–301.

[35] 方金祥, 王玉江, 董世运, 等. 激光熔覆 Inconel 718 合金涂层与基体界面的组织及力学性能[J]. 中国机械工程, 2019, 30(17): 2108–2113.

FANG Jinxiang, WANG Yujiang, DONG Shiyun, et al. Microstructure and mechanics properties of interfaces between laser clad Inconel 718 coating and substrate[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(17): 2108–2113.

[36] SEO J W, KIM J, KWON S J, et al. Effects of laser cladding for repairing and improving wear of rails[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2019, 20(7): 1207–1217.

[37] LI J, GU J L, ZHANG Y X, et al. Study on laser cladding process and friction characteristics of friction pairs of copper-based

powder metallurgy materials[J]. Tribology International, 2023, 177: 107953.

[38] 秦明军, 孙文磊, 管文虎, 等. 304 不锈钢表面激光熔覆 Inconel 625 涂层组织与性能分析[J/OL]. 表面技术, 2023: 1–14. [2024–07–16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1083.tg.20231108.0910.002.html>.

QIN Mingjun, SUN Wenlei, GUAN Wenhui, et al. Analysis of the organization and properties of laser clad Inconel 625 coating on 304 stainless steel[J/OL]. Surface Technology, 2023: 1–14. [2024–07–16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1083.tg.20231108.0910.002.html>.

[39] QI X, SONG R G, WANG C, et al. Influence of interfacial stress produced by MAO on electrochemical corrosion and stress corrosion cracking behavior in 7075 aluminum alloy[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2022, 169(2): 020559.

[40] 赵鹏, 王守仁, 王高琦, 等. 铝质刹车盘表面激光熔覆 Al–Si–Ni–WC 涂层的微

观组织与抗磨性能研究[J]. 中国激光, 2023, 50(20): 92–103.

ZHAO Peng, WANG Shouren, WANG Gaoqi, et al. Microstructure and wear resistance of laser cladding Al–Si–Ni–WC coating on aluminum brake disc surfaces[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(20): 92–103.

[41] 杨文迪, 赵连红, 沈明禄, 等. A100 超高强度钢激光熔覆 CoCrNiNb0.1+B4C 高熵合金涂层在模拟海洋环境下腐蚀行为研究[J/OL]. 表面技术, 2024: 1–13. [2024–04–29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1083.TG.20240402.1806.022.html>.

YANG Wendi, ZHAO Lianhong, SHEN Minglu, et al. Study on corrosion behavior of CoCrNiNb0.1+B4C high entropy alloy coating on A100 ultra-high strength steel by laser cladding under simulated marine environment[J/OL]. Surface Technology, 2024: 1–13. [2024–04–29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1083.TG.20240402.1806.022.html>.

Microstructure and Properties of 15–5PH Coatings by Laser Cladding on 17–4PH Surfaces for Aviation Applications

DU Yanbin¹, LEI Xin^{1,2}, ZHANG Wenping^{1,2}, CHEN Hongxi^{1,2}, LI Zhiqiang^{1,2}

(1. Chongqing Key Laboratory of Green Design and Manufacturing of Intelligent Equipment, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;

2. College of Mechanical Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

[ABSTRACT] The 17–4PH stainless steel is widely used in critical components such as turbine blades in the aerospace industry. To realize the repair and remanufacturing of damaged aerospace components made of 17–4PH, 15–5PH coating was prepared on the surface of 17–4PH using laser cladding technology. The phases, microstructure, microhardness, wear resistance, and corrosion resistance of the coating were analyzed. The results show that the coating is mainly composed of Fe–Cr, martensite, and α -Fe phases. The bonding area between the coating and substrate is a planar crystal structure, with columnar grains predominating at the bottom and middle, and a mixture of columnar and a small amount of equiaxed grains at the top. The average microhardness of the coating and substrate is 408.7HV_{0.5} and 347.5HV_{0.5}, respectively, with an increase in coating hardness of 17.6%. The average friction coefficients of the coating and substrate are 0.3051 and 0.3754, and the wear cross-sectional areas are 813.74 μm^2 and 2058.12 μm^2 , respectively, indicating a significantly improved wear resistance of coating compared to the substrate. The corrosion potentials (E_{corr}) of the coating and substrate are –1.0780 V and –1.0975 V, and the corrosion current densities (I_{corr}) are 1.229×10^{-3} mA/cm² and 0.907×10^{-3} mA/cm², respectively, demonstrating comparable corrosion resistance. The microstructure and surface properties of the coating suggest that laser cladding with 15–5PH coating can be applied to the repair and remanufacturing of aerospace components made of 17–4PH.

Keywords: Laser cladding; Remanufacturing; 17–4PH; 15–5PH; Corrosion resistance

(责编 向阳)