

冷喷涂 Cu402F 涂层激光重熔表面改性后 摩擦学行为

陈正涵, 孙晓峰, 李占明, 史玉鹏, 刘小桐

(装甲兵工程学院, 北京 100072)

摘要:目的 研究激光重熔后冷喷涂 Cu402F 涂层在腐蚀介质中的摩擦学行为。方法 采用冷喷涂技术在镍铝青铜 9442 合金上制备了厚度约为 882.11 μm 的 Cu402F 涂层, 并使用激光重熔技术对冷喷涂涂层进行表面改性。使用 OM、SEM 观察涂层截面与表面的微观形貌; 使用 XRD、X 射线残余应力测试仪、多功能表面性能测试仪、多频直线往复磨蚀实验机, 重点表征测试了涂层的组织、表面残余应力、摩擦学性能与磨蚀行为。结果 激光重熔后的涂层分为表面重熔层、多孔的重熔过渡层以及冷喷涂遗传层。激光重熔前后, 涂层的物相、残余应力均未发生较大变化。在 20、50、100 N 条件下, 激光重熔态涂层的平均摩擦系数呈递增趋势, 磨损率分别为 1.01×10^{-2} 、 1.17×10^{-2} 、 $1.34 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$; 由磨蚀实验可知, 磨蚀是涂层表面产生钝化膜与钝化膜被破坏的此消彼长的过程, 反映着摩擦与腐蚀的协同作用, 涂层在磨蚀过程中, 开路电位与摩擦系数呈正相关, 说明激光重熔态涂层表面钝化膜产生的速度快于钝化膜被破坏的速度。结论 激光重熔保留了冷喷涂技术制备的 Cu402F 涂层的优点, 同时激光重熔涂层上产生钝化膜的速度更快, 有利于提高涂层的耐磨蚀性能。

关键词: 激光重熔; 冷喷涂; Cu402F; 摩擦学; 螺旋桨; 再制造

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)10-0161-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.10.023

Tribological Behavior of Cold Sprayed Cu402F Coating after Laser Remelting

CHEN Zheng-han, SUN Xiao-feng, LI Zhan-ming, SHI Yu-peng, LIU Xiao-tong

(Armored Force Engineering College, Beijing 100072, China)

ABSTRACT: The work aims to study tribological behavior of cold sprayed Cu402F coating in corrosive medium after laser remelting. Laser remelting technology was applied to modify properties of a nearly 882.11 μm thick cold sprayed Cu402F coating, which was prepared on nickel-aluminum bronze by adopting cold spraying technology. Microstructure of coating section and surface was observed by using OM and SEM; structure, surface residual stress, tribological properties and corrosion behavior of the coating were mainly studied by using XRD, X-ray residual stress tester, multi-function surface property tester and

收稿日期: 2017-06-25; 修订日期: 2017-07-24

Received: 2017-06-25; Revised: 2017-07-24

基金项目: 军内科研基金

Fund: Supported by the Military Research Fund

作者简介: 陈正涵 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为材料加工工程。

Biography: CHEN Zheng-han (1993—), Male, Master, Research focus: material processing engineering.

通讯作者: 孙晓峰 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为材料加工工程。

Corresponding author: SUN Xiao-feng (1977—), Male, Doctor, Professor, Research focus: material processing engineering.

multi-frequency linear reciprocating abrasion tester. Laser remelted coating was divided into surface remelted layer, porous remelted transition layer and cold spray inherited layer. Phases and residual stress of the coating did not change greatly after laser remelting. Average friction coefficient of the laser remelted coating increased progressively under the load of 20, 50 and 100 N, the wear rate was 1.01×10^{-2} , 1.17×10^{-2} and $1.34 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, respectively. The abrasion test indicated that generation and breaking of passive film on surface of the coating appeared alternately, reflecting synergistic effect of wear and corrosion. OCP (open circuit potential) was positively correlated with friction coefficient, indicating that the generation of passive film was faster than destruction. Laser remelting reserve the advantages of cold sprayed Cu402F coating. Meanwhile, quicker generation of passive film on laser remelted coating contributes to abrasion resistance improvement of coating.

KEY WORDS: laser remelting; cold spray; Cu402F; tribology; propeller; remanufacturing

冷喷涂是热喷涂技术中的一种,该技术经过近三十年的发展,已经成为表面工程领域应用十分广泛的技术之一^[1-2]。相较于大多数热喷涂涂层,冷喷涂涂层具有热影响区小、孔隙率低等优势^[3-4]。孙晓峰课题组使用冷喷涂技术制备的 Cu402F 涂层,应用在大型船舶的螺旋桨修复再制造工程中,已有一定的实验数据积累和工程经验。但从已获得的实验结果来看,冷喷涂 Cu402F 涂层在结合强度、耐腐蚀性能等方面仍然存在一定缺陷^[5-6]。为提高冷喷涂 Cu402F 涂层的性能,需要制定合适的后加工工艺对涂层进行表面改性。现阶段,国内外在使用激光重熔技术作为后加工工艺来提高涂层性能方面已经取得了一定的成果。王东生在 TiAl 合金表面使用等离子喷涂制备了 MCrAlY 涂层,该涂层经过激光重熔处理后,片层状组织消失,致密性提高,同时大部分孔洞、夹杂等缺陷消失^[7]。A Astaritaa 等人使用激光重熔技术对冷喷涂 Ti 涂层进行表面改性,实验结果表明冷喷涂激光重熔涂层存在着重熔区(RZ)、热影响区(HAZ)以及冷喷涂基础区(BZ)^[8]。本研究使用激光重熔技术对冷喷涂 Cu402F 涂层进行表面改性,并利用先进的表征手段,对比观察了激光重熔前后涂层的微观形貌,重点研究了涂层的摩擦学行为,为大型船舶螺旋桨修复再制造提供更加可靠的实验数据与理论支撑。

1 试验

1.1 涂层制备

使用 CGT-Kinetics4000 型冷喷涂设备,载气压强 3.5 MPa,载气温度 600 ℃,载气气体为 N₂,喷涂距离 30 mm。冷喷涂的基体材料为镍铝青铜 9442 合金,基体尺寸为 60 mm×40 mm×4 mm。冷喷涂前,使用粒径 600 μm 的金刚砂对基体进行表面粗化。粉末为气雾法制备、真空包装的 Cu402F 粉末。图 1 所示为基体与粉末的微观形貌,粉末粒径分布在 30 μm 左右,球型度、流动性良好。表 1 所示为粉末与基体的化学成分。激光重熔使用 IPG 激光器,保护气体为

CO₂。激光功率 2.5 kW,扫描速度 200 mm/min,光斑直径 4 mm,搭接量 1 mm。

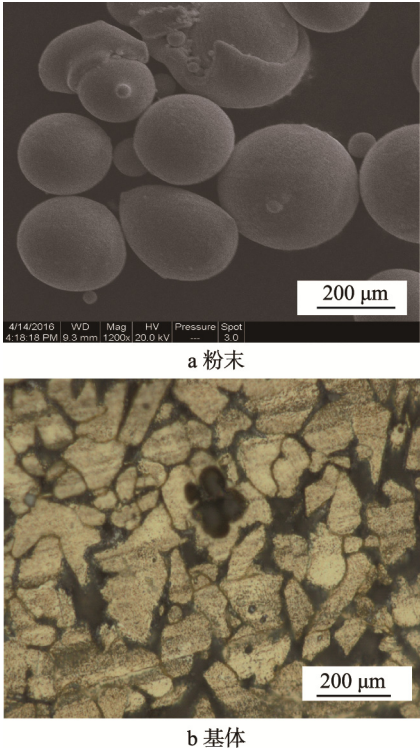


图 1 粉末与基体微观形貌
Fig.1 Morphology of: a) powder, b) substrate

表 1 冷喷涂粉末与基体成分
Tab.1 Elements of cold spraying powder and substrate

Elements	wt. %				
	Cu	Al	Ni	Fe	Mn
Powder	80.71	8.67	3.80	4.04	2.78
Substrate	85.17	6.01	4.64	2.86	1.32

1.2 性能表征

使用 Nova Nano 扫描电镜和 OLMPUSE DSX-110 数码光学显微镜观察冷喷涂态与激光重熔态涂层表面与截面形貌。采用 D/Max X 射线衍射仪表征涂层的物相组成,X 射线扫描范围 20°~100°,电压 80 kV,

电流 40 mA, 扫描速度 8 (°)/min, 步距 0.02 (°)/s。

取尺寸为 10 mm×10 mm×4 mm 的激光重熔态试样, 使用 X-350A 型 X 射线应力测定仪, 基于 $\sin^2\varphi$ 法在涂层表面测试残余应力分布。测试条件: 扫描范围 120.5°~128.5°, 管电压 28 kV, 管电流 8 mA, 步进扫描步长 0.02°, CrK α 辐射。使用 MFT-4000 多功能表面性能试验机测试涂层在 20、50、100 N 载荷下的摩擦学性能, 摩擦副为 ϕ 6 mm 的 Si₃N₄ 陶瓷球, 摩擦形式为直线往复摩擦, 摩擦速度 50 mm/min, 摩擦长度 5 mm, 摩擦时间 100 min。

磨蚀实验在 MCR 腐蚀磨损试验机上进行。此设备为三电极体系, 参比电极为饱和甘汞电极, 辅助电极为涂层待测面的背面基体材料。该设备可以测试涂层在磨蚀条件下的摩擦系数、开路电位动态变化, 其工作过程如图 2 所示。取尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的激光重熔试样, 将试样的待测面保持喷涂态并浸泡于 3.5%NaCl 溶液中, 辅助电极面保持基体原始状态并裸露出来, 其余四面用环氧树脂密封在 ϕ 52.4 mm 的 PVC 管中。磨蚀实验采用直线往复摩擦形式, 摩擦球为 ϕ 6 mm 的 Si₃N₄ 陶瓷球, 砝码加载恒定载荷 20 N, 摩擦距离为 5 mm, 移动频率 0.5 Hz。在 3.5%NaCl 溶液中, 进行开路电位条件下的磨蚀实验。磨蚀结束后, 使用扫描电镜观察电化学腐蚀后涂层的表面形貌以及磨痕的微观形貌, 使用 EDS 表征磨痕微区成分。

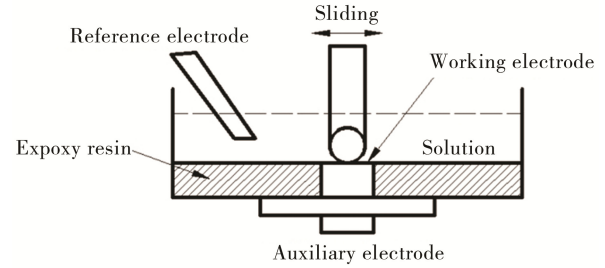


图 2 磨蚀实验示意图

Fig.2 Schematic diagram of tribocorrosion experiment

2 结果与讨论

2.1 涂层组织形貌

涂层截面试样经过镶样、打磨、抛光后, 使用 FeCl₃-HCl 溶液刻蚀, 使用光学显微镜观察涂层截面微观形貌; 取冷喷涂态涂层与激光重熔态涂层, 在扫描电镜下观察涂层表面形貌。图 3 所示为激光重熔前后涂层截面与表面微观形貌。由截面形貌可知, 冷喷涂态涂层厚度约为 882.11 μ m, 未见明显孔隙, 表面呈现凸凹不平状, 涂层与基体分界线明显; 激光重熔后涂层表面较为平整, 厚度约为 865.13 μ m, 激光重熔涂层分成了三个区域, 分别为表面的重熔层、中间的重熔过渡层以及底部的冷喷涂遗传层。从截面形貌来看, 重熔过渡层上出现了一定数量、尺寸较大的气孔, 气孔表面呈现金属光泽, 气孔的截面形状类似于

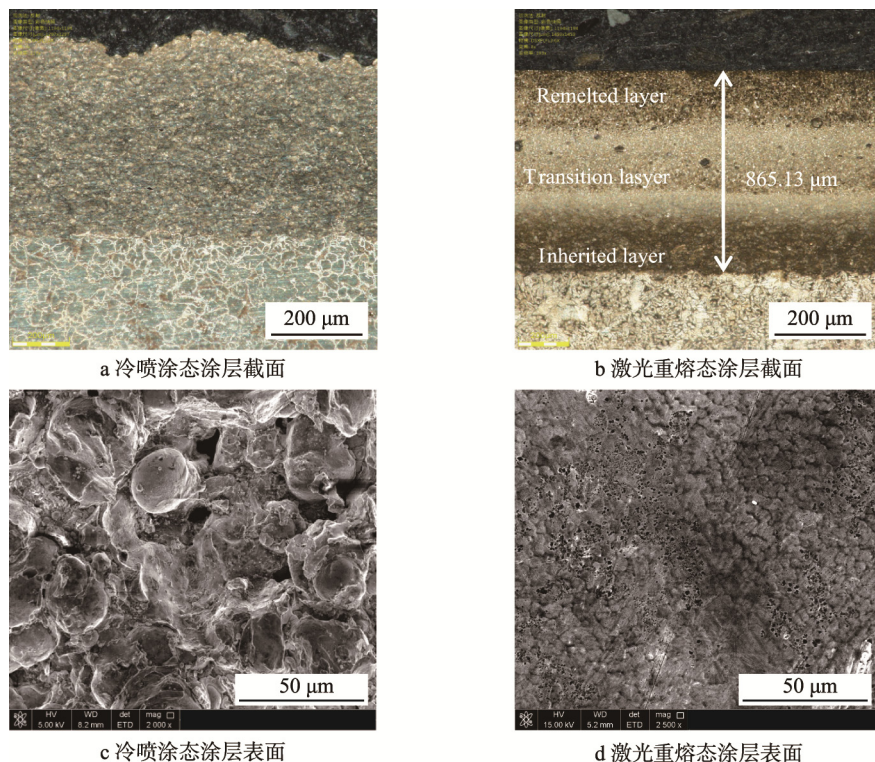


图 3 涂层微观形貌

Fig.3 Morphology of: a) cross-section of cold sprayed coating, b) cross-section of laser remelted coating, c) surface of cold sprayed coating, d) surface of laser remelted coating

圆形。形成气孔的原因主要是在激光重熔的过程中,熔池表面喷发出金属蒸气形成蒸气涡流,从而将 CO₂ 卷入熔池中,由于激光重熔冷却速度很快,气泡来不及逸出而留在涂层内,从而形成气孔^[9-10]。由图 3c 可知,Cu402F 粒子主要依靠着剧烈的塑性形变在机械咬合的作用下沉形成冷喷涂态涂层。如图 3d 所示,涂层表面粒子经过高能量的激光重熔后铺展开来,使得涂层表面比较平整致密,粒子的主要结合方式转变为冶金结合。激光重熔涂层表面存在着聚集态的细小气孔,这说明在重熔层同样存在着气孔,但是其尺寸小于重熔过渡层中存在的气孔。

图 4 所示为涂层激光重熔前后 XRD 物相表征,如图可知,冷喷涂涂层激光重熔前后物相未发生改变。这说明以下两个方面现象:首先,由于冷喷涂工艺中温度较低,镍铝青铜合金粉末中各相可以稳定存在;另外,激光重熔处理后,虽然涂层由机械结合转变为冶金结合,但是涂层在瞬时高温急速冷却的过程中,没有新相析出,遗传了镍铝青铜原始相结构。因此,使用冷喷涂加激光重熔复合工艺修复再制造镍铝青铜合金零部件时,具有不发生相变的优点,相对于传统的堆焊工艺有较大优势。

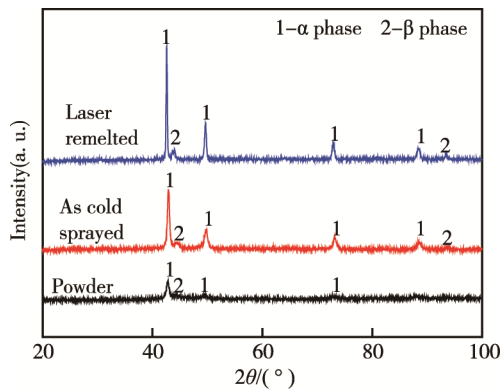


图 4 涂层 XRD 物相分析
Fig.4 XRD result of coating

2.2 残余应力测试

随机在冷喷涂态涂层与激光重熔态涂层表面取三个点,基于交相关法测试涂层表面的平均残余应力,测试结果如表 2 所示。从测试结果来看,激光重熔前后涂层表面平均残余应力相差很小,且均为残余压应力。涂层中存在的残余压应力有效地提高了涂层的抗疲劳性能,通过残余压应力场能够有效地阻止材料内裂纹的萌生,增加裂纹的闭合效应,减小疲劳裂纹的扩展^[11]。堆焊是修复失效铜质螺旋桨的常用工艺,从大量工程实践经验来看,堆焊焊缝中存在着较大的残余拉应力,焊缝极易在内部拉应力与外部载荷的交变作用下萌生裂纹,极大地威胁焊缝的稳定性与安全性。因此,冷喷涂加激光重熔复合工艺制备的修

复涂层可以有效避免这一缺陷。

表 2 涂层表面残余应力测试结果
Tab.2 Testing result of residual stress on the surface of coating

Sample	Sample1	Sample2	Sample3	Average
As cold sprayed	-104.0	-154.9	-115.5	-124.8
Laser re-melted	-121.5	-129.8	-121.5	-124.3

2.3 摩擦学性能

图 5 所示为激光重熔态涂层在不同载荷条件下的摩擦系数曲线。如图 5a 可知:在 20 N 载荷下,涂层摩擦系数一直保持较稳定的水平;在 50 N 载荷条件下,涂层摩擦系数在 15 min 之前处于一个陡增的状态,而后摩擦系数在较大幅度范围内振动,总体有升高的趋势;在 100 N 载荷条件下,涂层同样首先处于陡增的状态,在 20 min 左右时,涂层摩擦数开始下降,到约 30 min 时,涂层摩擦系数又进入了上升趋势,并且摩擦系数在一定范围内振动。图 5b 所示为激光重熔态涂层在不同载荷条件下磨损率,在 20、50、100 N 条件下激光重熔态涂层磨损率分别为 1.01×10^{-2} 、 1.17×10^{-2} 、 $1.34 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

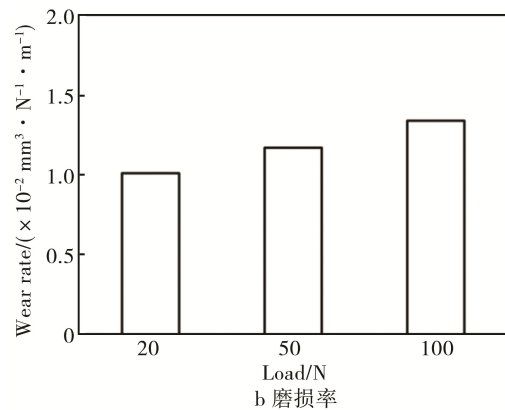
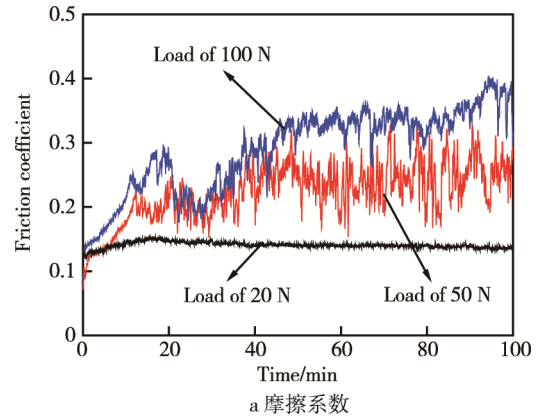


图 5 激光重熔涂层摩擦学性能
Fig.5 Tribology properties of laser remelted coating :a) friction coefficient, b) wear rate

摩擦失效很少是一种单一的磨损机制引起的，观察磨痕微观形貌是分析涂层摩擦磨损机制的主要方法之一，图 6—8 所示为激光重熔涂层在三种载荷条件下的磨痕形貌。如图 6 所示，20 N 载荷条件下，涂层磨痕上出现了白色的犁削沟槽，磨痕表面有大小、形状不一的黑色孔洞。由图 3b 激光重熔截面形貌可知，激光重熔的涂层中存在着多孔过渡层。由此可以推断，在 20 N 载荷条件下，摩擦副对偶件磨穿了表层，从而裸露出多孔过渡层。对偶件将表层磨穿的过程中会有磨屑剥落，磨屑随着摩擦副的相对滑动，发生磨粒磨损，从而在磨痕表面留下了犁削沟槽。如图 7 所示，50 N 载荷条件下，磨痕表面有材料脱落后留下来的片状坑，材料脱落从而发生了较为剧烈的三体摩擦，在磨痕表面留下了较深的犁削沟槽，这也解释了为何摩擦系数在摩擦后期发生剧烈振动。磨痕局部区域放大至 4000 倍只可见残留着少量的黑色气孔，这说明在 50 N 载荷条件下，摩擦副基本磨穿了多孔的重熔过渡层。从图 8 可知，100 N 载荷条件下，磨痕表面犁削沟槽更深，材料大块地从母材脱落，发生了十分剧烈的三体摩擦，磨合表面未见黑色气孔，放大后可见磨痕表面上有片状的磨屑，这说明摩擦副已经完全磨穿了多孔的重熔多孔层，并且在摩擦副重载条件下相对滑动使局部产生了瞬时高温，发生了粘着磨损^[12]。

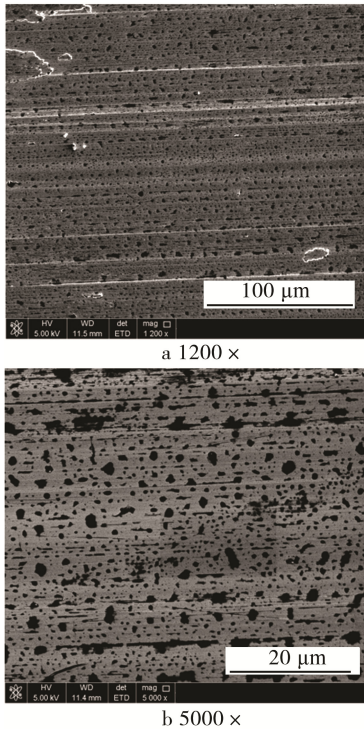


图 6 20 N 载荷下激光重熔涂层磨痕形貌
Fig.6 Morphology of wear trace of laser remelted coating under 20 N load

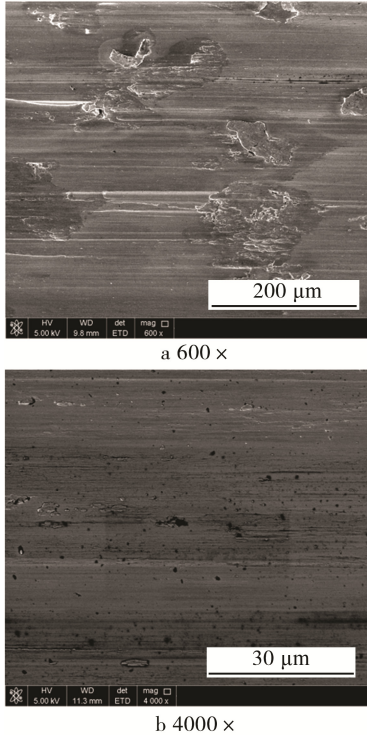


图 7 50 N 载荷下激光重熔涂层磨痕形貌
Fig.7 Morphology of wear trace of laser remelted coating under 50 N load

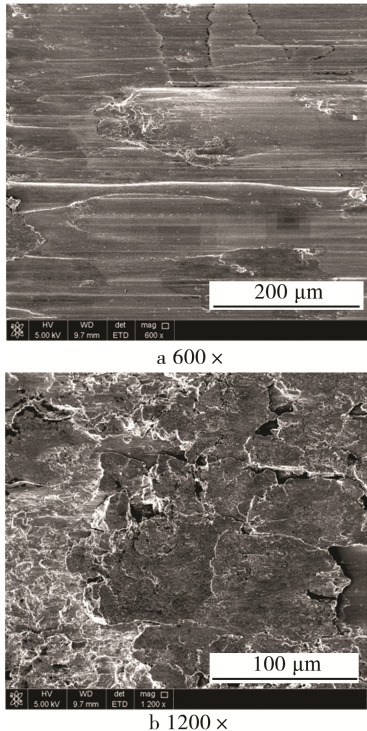


图 8 100 N 载荷下激光重熔涂层磨痕形貌
Fig.8 Morphology of wear trace of laser remelted coating under 100 N load

2.4 磨蚀行为

制备的 Cu402F 涂层主要应用于修复大型船舶铜质螺旋桨，因此涂层在实际复杂的海洋工况中，会承

受着摩擦与腐蚀的协同作用,因此使用多频直线往复磨蚀试验机研究涂层的磨蚀行为具有十分重要的实际意义。图9所示为激光重熔涂层磨蚀行为曲线,曲线反应了涂层在全浸与磨蚀阶段中摩擦系数与开路电位的相对关系。将试样全浸于NaCl溶液中5 min,待开路电位稳定后加载20 N砝码,此时开路电位突然降低,在10 min的磨蚀过程中,开路电位与摩擦系数呈正相关;卸载砝码结束磨蚀后,开路电位恢复原来水平。开路电位反映着涂层上钝化膜产生情况,开路电位升高说明涂层产生了钝化膜,耐腐蚀性能较好;开路电位降低说明涂层上的钝化膜被破坏,耐腐蚀性能降低^[13-14]。从20 min涂层磨蚀行为曲线来看,磨蚀是涂层表面产生钝化膜与钝化膜被破坏的此消彼长的过程,反映着摩擦与腐蚀的协同作用。从10 min的磨蚀过程来看,开路电位与摩擦系数呈正相关,因此激光重熔态涂层表面钝化膜产生的速度快于钝化膜被破坏的速度。

图10所示为激光重熔涂层经过磨蚀实验后表面磨痕微观形貌。如图可知,磨蚀磨痕表面有成片材料

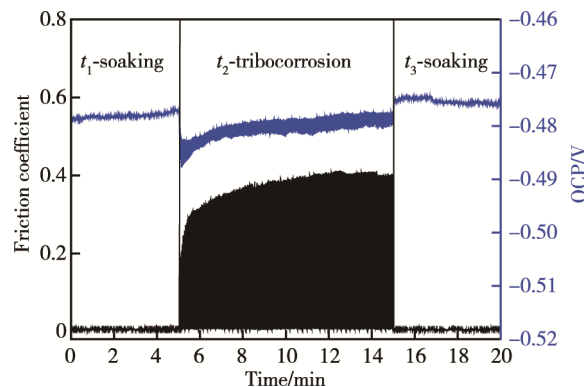
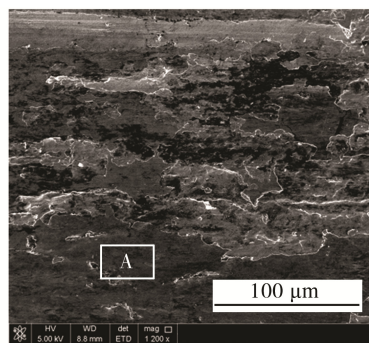


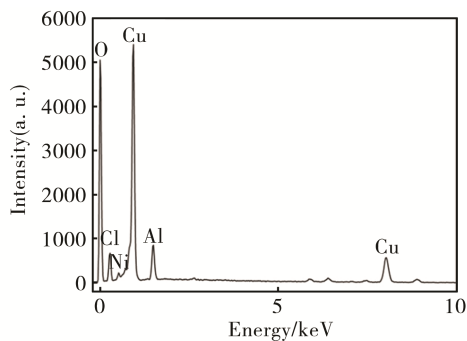
图9 激光重熔涂层磨蚀行为曲线

Fig.9 Tribocorrosion behavior curve of laser remelted coating

脱落,脱落处颜色较浅,未脱落处颜色较深。从EDS分析可知,深色区域内Cu的质量分数为43.22%,O的质量分数为37.60%。因此可分析得知,颜色较深的区域为Cu被氧化生成的钝化膜,而摩擦副在相对移动过程中,摩擦对偶件破坏了涂层表面的钝化膜,钝化膜从母材脱落,表面裸露出新鲜的母材,从而脱落处颜色较浅^[15]。



a 表面磨痕微观形貌



b 区域A能谱分析结果

图10 激光重熔涂层磨蚀实验后表面磨痕形貌及元素确定

Fig.10 a) morphology of wear trace of laser remelted coating after tribocorrosion experiment, b) EDS result of region A

3 结论

1) 冷喷涂Cu402F涂层厚度约为882.11 μm。使用激光重熔技术对涂层进行表面改性后,激光重熔涂层分成了三个区域,分别为表面的重熔层、中间的重熔过渡层以及底部的冷喷涂遗传层,涂层相结构与表面残余应力均未发生较大改变。

2) 激光重熔涂层摩擦系数、磨损率与载荷呈正相关。在20 N载荷条件下,摩擦副对偶件磨穿了表层,从而裸露出多孔过渡层,对偶件将表层磨穿的过程中会有磨屑剥落,磨屑随着摩擦副的相对滑动,发生磨粒磨损,从而在磨痕表面留下了犁削沟槽;50 N载荷条件下,摩擦副基本磨穿了多孔的重熔过渡层;100 N载荷条件下,摩擦副已经完全磨穿了多孔的重熔过渡层,并且在摩擦副重载条件下相对滑动使局部产生了瞬时高温,发生了粘着磨损。

3) 激光重熔涂层在磨蚀过程中,在摩擦副相对移动时,摩擦对偶件破坏了涂层表面的钝化膜,钝化膜从母材脱落,裸露出新鲜的母材。从开路电位与摩擦系数曲线可知,涂层钝化膜产生速度快于被摩擦副破坏速度,因此涂层耐磨蚀性能较好。

参考文献:

- [1] 李文亚,余敏.冷喷涂技术的最新研究现状[J].表面技术,2010,39(5):95-99.
LI Wen-Ya, YU Min. The Latest Development State of the Cold Spraying Technique[J]. Surface Technology, 2010, 39(5): 95-99.
- [2] ASSADI H, KREYE H, GARTNER F. Cold Spray—A Materials Perspective[J]. Acta Materialia, 2016, 116: 382-407.
- [3] KLINKOV S V, KOSAREV V F, SOVA A A, et al.

- Deposition of Multi-component Coatings by Cold Spray[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202(24): 5858-5862.
- [4] SCHMIDT T, GARTNER F, ASSADI H, et al. Development of a Generalized Parameter Window for Cold Spray Deposition[J]. *Acta Materialia*, 2006, 54(3): 729-742.
- [5] 孙晓峰, 陈正涵, 李占明, 等. 用于大型船舶螺旋桨再制造的冷喷涂 Cu402F 涂层[J]. *中国表面工程*, 2017, 30(3): 159-166.
SUN Xiao-feng, CHEN Zheng-han, LI Zhan-ming, et al. Cu402F Cold Sprayed Coating for Remanufacturing Large Marine Propeller[J]. *China Surface Engineering*, 2017, 30(3): 159-166.
- [6] CHEN Zheng-han, SUN Xiao-feng, HUANG Yuan-lin. A Brief Discussion about Nickel Aluminum Bronze Propeller Failure Modes and Its Repair Methods[J]. *Key Engineering Materials*, 2016, 723: 125-129.
- [7] 王东生, 田宗军, 陈志勇, 等. TiAl 合金表面激光重熔等离子喷涂 MCrAlY 涂层研究[J]. *材料工程*, 2009(7): 72-78.
WANG Dong-sheng, TIAN Zong-jun, CHEN Zhi-yong, et al. Study on Laser Remelting MCrAlY Coatings Prepared by Plasma Spraying on TiAl Alloy Surface[J]. *Material Engineering*, 2009(7): 72-78.
- [8] ASTARITAA A, GENNAB S, LEONE C, et al. Study of the Laser Remelting of a Cold Sprayed Titanium Layer[J]. *Procedia Cirp*, 2015, 33: 452-457.
- [9] 王理林, 林鑫, 王永辉, 等. 激光重熔熔池凝固组织的实时观察研究[J]. *金属学报*, 2015, 51(4): 492-498.
WANG Li-lin, LIN Xin, WANG Yong-hui, et al. Real-time Observation of Solidification Microstructure in Laser Remelting Pool[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 51(4): 492-498.
- [10] 查吉利, 龙思远, 吴星宇, 等. 压铸 AZ91D 镁合金激光重熔区氢气孔的形成机制[J]. *材料工程*, 2013(6): 29-34.
ZHA Ji-li, LONG Si-yuan, WU Xing-yu, et al. Formation Mechanism of Hydrogen Pore in Die Cast AZ91D Magnesium Alloy Laser-remelting Zone[J]. *Material Engineering*, 2013(6): 29-34.
- [11] 李媛, 何卫峰, 聂祥樊, 等. 激光冲击 TC17 钛合金疲劳裂纹扩展试验[J]. *中国表面工程*, 2017, 30(3): 40-47.
LI Yuan, HE Wei-feng, NIE Xiang-fan, et al. Fatigue Crack Growth Behavior of TC17 Titanium Alloy with Laser Shock Peening[J]. *China Surface Engineering*, 2017, 30(3): 40-47.
- [12] 侯文英, 高琳. 摩擦磨损与润滑[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 47-60.
HOU Wen-ying, GAO Lin. *Tribology and Lubrication*[M]. Beijing: China Machine Press, 2012: 47-60.
- [13] CHEN Qiang, XIE Zhi-wen, CHEN Tian, et al. Tribocorrosion Failure Mechanism of TiN/SiO_x Duplex Coating Deposited on AISI304 Stainless Steel[J]. *Materials*, 2016, 9(12): 963.
- [14] XIE Zhi-wen, CHEN Tian, CHEN Qiang, et al. Tribocorrosion Behaviors of AlN/MoS₂-Phenolic Resin Duplex Coating on Nitrogen Implanted Magnesium Alloys[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2015, 266: 64-69.
- [15] NEODO S, CARUGO D, WHARTON J A, et al. Electrochemical Behaviour of Nickel-Aluminium Bronze in Chloride Media: Influence of pH and Benzotriazole[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2013, 695(8): 38-46.