

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20161220004

用于大型船舶螺旋桨再制造的冷喷涂Cu402F涂层

孙晓峰, 陈正涵, 李占明, 黄元林, 宋巍
(装甲兵工程学院 装备维修与再制造工程系, 北京 100072)

摘要: 针对大型船舶螺旋桨再制造的需求, 采用冷喷涂技术在9442镍铝青铜上制备厚度200~300 μm较为致密的Cu402F涂层。使用显微硬度测试仪、电化学工作站、磁致伸缩超声振动仪和摩擦磨损试验机观察并测试涂层的微观形貌、显微硬度、耐腐蚀性能、抗空泡性能及耐磨性能。结果表明: 涂层的显微硬度为289 HV_{0.2}, 较基体的显微硬度提高了17%。涂层的耐腐蚀性能略有降低, 但涂层表面可以形成更为稳定的Cu₂O钝化膜, 达到保护基体的目的。涂层的抗空蚀性能低于基体, 细小气泡持续在涂层表面瞬间溃灭会导致涂层孔隙率持续增加, 使得涂层在空泡腐蚀后期的抗空蚀能力减弱。涂层在大气与模拟海水中耐磨性能均优于基体, 涂层表面的孔隙收容了磨屑, 起到了一定减磨作用。

关键词: 螺旋桨; 冷喷涂; 电化学; 空泡腐蚀; 摩擦磨损

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)03-0159-08

Cold Sprayed Cu402F Coating for Large Marine Propeller Remanufacturing

SUN Xiao-feng, CHEN Zheng-han, LI Zhan-ming, HUANG Yuan-lin, SONG Wei

(Department of Equipment Maintenance and Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: Aiming at the demand of large marine propeller remanufacturing, compact Cu402F coating of thickness of 200–300 μm was deposited on 9442 nickel aluminum bronze by cold spray. Morphologies, microhardness, corrosion resistance, cavitation resistance and tribological properties of the coating were tested by microhardness tester, electrochemical work station, magnetostrictive ultrasonic vibration meter and friction wear machine. The results show that the average microhardness of the coating is 289 HV_{0.2}, which is higher than that of substrate by 17%. Corrosion resistance of the coated substrate degrades slightly while a stable Cu₂O passivation film is formed on the surface of the coating. Cavitation resistance of coating is worse than that of the substrate, and cavitation erosion rate of the coating continuously increase as the result of constant tiny bubbles collapsed and perished on the surface of the coating. Cavitation resistance of the coating weakens during the later period of cavitation erosion test. In the air and simulated seawater, corrosion resistance of the coating is better than that of the substrate. The friction coefficient of the coated sample is smaller than that of the substrate, possibly due to embedding of eroded dusts into the pores of the coating.

Keywords: propeller; cold spray; electrochemical; cavitation erosion; friction and wear

0 引言

镍铝青铜合金因强度高, 塑性、冲击韧性好, 抗腐蚀性、剥蚀性能强, 以及浇注工艺性好成为铸造大型船舶螺旋桨的主要材料之一^[1-3]。

但螺旋桨作为舰船等大型海洋装备的推进设备, 工作环境恶劣, 在航行中需承受巨大力矩及海水的冲击、腐蚀, 且因长年在海水中工作, 受海生物等介质影响, 常常产生腐蚀、腐蚀疲劳裂纹或应力腐蚀裂纹, 这可能导致桨叶断裂, 对船舶航

收稿日期: 2016-12-20; 修回日期: 2017-04-10

网络出版日期: 2017-05-08 10:52; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20170508.1052.002.html>

通讯作者: 孙晓峰(1977—), 男(汉), 副研究员, 博士; 研究方向: 材料加工工程; E-mail: sxfu9999@126.com

引文格式: 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 X F, CHEN Z H, LI Z M, et al. Cold sprayed Cu402F coating for large marine propeller remanufacturing[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(3): 159-166.

行造成巨大安全隐患^[4]。当发现螺旋桨有磨损、腐蚀或气蚀等表面损伤后应及时修复,否则不仅会使舰船水动力性能下降,更严重的是会加速螺旋桨的气蚀速度,一旦有了气蚀洞穴,该处将更容易产生和附着气泡,与光滑叶面相比,洞穴中的气泡将更加难以脱离叶面^[5]。对于铜质螺旋桨的损伤修复,一般使用与该螺旋桨材质相同的焊条或焊丝,通过气焊或氩弧焊方法进行修补。由于铜合金对应力腐蚀很敏感,焊前需预热,而焊后又必须进行消除应力的热处理,工艺难度大、条件艰苦^[6]。

冷喷涂是近年来发展起来的一种新兴的表面工程技术,以压缩气体(N_2 、He、混合气体或空气等)驱动金属粒子在完全固态下以极高的速度碰撞基板,使粒子发生强烈的塑性变形而沉积形成涂层的一种全新喷涂技术。它可以降低甚至完全消除传统热喷涂中氧化、相变、偏析、残余拉应力和晶粒长大等不利影响,适于制备Cu、Ti等氧化敏感材料涂层,涂层与基体结合强度高,且效率高^[7-9]。文中针对大型船舶铜质螺旋桨表面磨损、腐蚀损伤严重,常规修复方法尺寸恢复效率低、热变形大,缺少有效修复方法难题,采用冷喷涂技术在螺旋桨(用9442镍铝青铜)表面制备Cu402F冷喷涂涂层,观察并分析涂层的组织和性能,以期为实现螺旋桨表面损伤低应力、小变形、高性能修复再制造提供试验基础。

1 材料与方 法

1.1 冷喷涂涂层制备

基体选用9442镍铝青铜(Nickel aluminum bronze, NAB),表1所示为其化学成分,冷喷涂前使用砂粒为 $200\ \mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 颗粒对基体进行喷砂预处理。喷涂粉末采用Cu402F镍铝青铜,具体成分见表2。

表1 9442镍铝青铜的化学成分

Table 1	Chemical composition of NAB 9442					(w%)
Element	Cu	Al	Ni	Fe	Mn	
Content	85.17	6.01	4.64	2.86	1.32	

表2 Cu402F镍铝青铜粉末成分

Table 2	Composition of NAB Cu402F power					(w%)
Element	Cu	Al	Ni	Fe	Mn	
Content	80.71	8.67	3.80	4.04	2.78	

图1为镍铝青铜粉末微观形貌,粉末粒径分布在 $15\sim 40\ \mu\text{m}$,颗粒分布均匀,球型度良好。采用CGT-Kinetiks4000型冷喷涂设备,喷涂压力为 $3.5\ \text{MPa}$,加热温度为 $700\ ^\circ\text{C}$,喷涂距离为 $30\ \text{mm}$,送粉率为 $40\ \text{g}/\text{min}$ 。

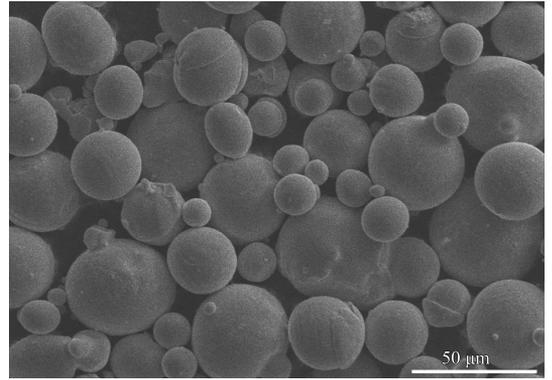


图1 镍铝青铜粉末形貌

Fig.1 Morphology of NAB powder

1.2 性能测试

按照国标GB9790-1984采用静态压痕法,使用MICROMET-6030自动显微硬度仪,测试间距 $25\ \mu\text{m}$,加载载荷 $200\ \text{g}$,保持载荷时间 $10\ \text{s}$ 。

使用Dmax-X射线衍射仪分析涂层与基体腐蚀产物中可能的物相。使用Cu靶,扫描范围 $3^\circ\sim 100^\circ$,电压 $40\ \text{kV}$,电流 $80\ \text{mA}$,扫描速度 $8^\circ/\text{min}$,步距 0.02° 。

在科斯特CS电化学工作站上测试涂层和基体的动电位极化曲线。试验前将试样切割成 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ 的正方体,非工作面焊接铜导线后用环氧树脂+聚酰胺树脂密封,室温环境下固化 $36\ \text{h}$ 后用砂纸将工作面打磨洁净。

采用MFT-4000型多功能材料表面性能试验机评价材料的摩擦学性能。摩擦对偶材料选用 $\Phi 6\ \text{mm}$ 的 Si_3N_4 陶瓷球。采用直线往复循环摩擦运动方式,直线位移为 $5\ \text{mm}$,载荷为 $20\ \text{N}$,运行时间为 $100\ \text{min}$ 。

采用X-350A型X射线应力测定仪,通过 $\sin^2\phi$ 法和腐蚀剥层法,在距涂层表面 $300\ \mu\text{m}$ 范围内取9个测试点,测试了镍铝青铜冷喷涂涂层残余应力沿纵向方向分布,测试条件:管电压 $28\ \text{kV}$,管电流 $8\ \text{mA}$,步进扫描步长 0.02° , $Cr\ K\alpha$ 辐射。

采用BILON-1000型磁致伸缩超声振动仪测试涂层与基体在模拟海水中的抗空泡腐蚀性能,图2为抗空蚀示意图。使用精度为 $0.1\ \text{mg}$ 的天平

测试涂层与基体在空蚀后的失重量,在空蚀后3、6、9和12 h后跟踪称量各状态试样的质量。

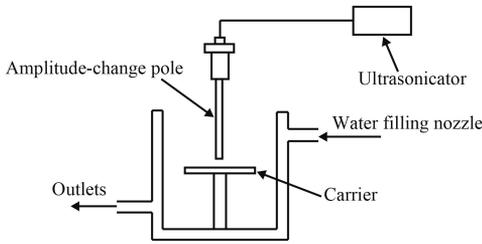


图2 抗空蚀试验示意图

Fig.2 Schematic diagram of cavitation erosion experiment

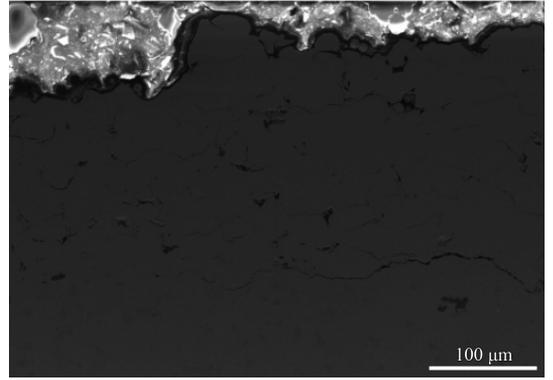


图3 涂层截面抛光态形貌

Fig.3 Cross section morphology of polished coating

2 结果与分析

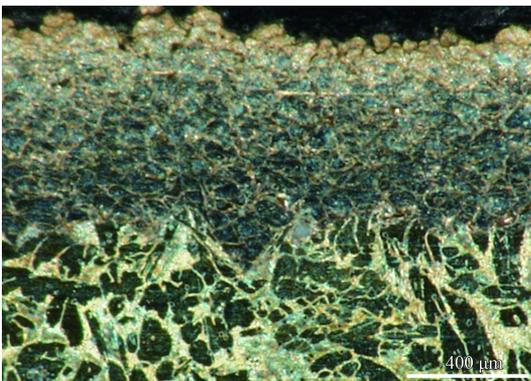
2.1 涂层微观形貌

为分析冷喷涂涂层组织结构对性能的影响,经切割、打磨、抛光后制备了镍铝青铜冷喷涂涂层截面试样,涂层截面抛光态形貌如图3所示。由图3可知,该冷喷涂工艺条件下在镍铝青铜表面制备厚度为200~300 μm的涂层,涂层与基体分界线明显,涂层上存在着孔隙。

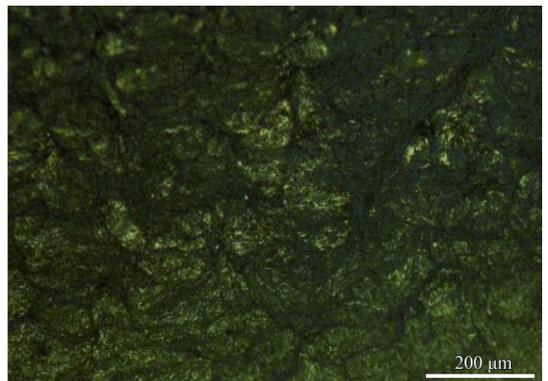
图4所示为刻蚀涂层截面在不同倍数下的微观形貌。由图4可知,基体与发生塑性变形的颗粒相互嵌合,连接紧密,主要是通过粒子塑性变形实现的物理结合。另外,从涂层截面金相中还可以看出,镍铝青铜合金冷喷涂涂层呈现为多层的致密组织,层间结合良好,次表层和表面层区别明显。次表层粒子发生了强烈的塑性变形,扁平化效果明显,涂层组织致密,无明显缺陷;而表面层粒子塑性变形程度较轻,扁平化程度明显降低,涂层组织也相对疏松,且存在一定数量的缝

隙。这是因为冷喷涂是一个高速运动粒子撞击基体表面,发生塑性变形后相互叠加的过程。首先高速粒子撞击基体发生塑性变形,形成前期的涂层,后续高速运动的铜合金粒子起到类似喷丸强化作用,对前期形成的涂层产生一定的夯实作用,使涂层更加的紧密,且使涂层中粒子变形加剧,形成了次表层;而后期形成的涂层,缺少高速铜合金粒子对其产生的持续冲击,因此涂层组织相对疏松,粒子变形相对较小。

图5为涂层在扫描电镜下的表面微观形貌。由图5可见,球型粒子主要依靠机械咬合和局部冶金结合方式沉积在基体上,大量粒子发生了塑性变形,露出新鲜的金属裙边而形成稳定的金属键,少数未发生塑性变形的粒子堆垛在前续粒子沉积的涂层上,发生塑性变形程度较小的球型粒子之间存在的间隙是造成了孔隙主要分布在涂层表面的原因之一^[10]。



(a) Low magnification



(b) High magnification

图4 刻蚀后涂层截面微观形貌

Fig.4 Cross section morphologies of coating after etched

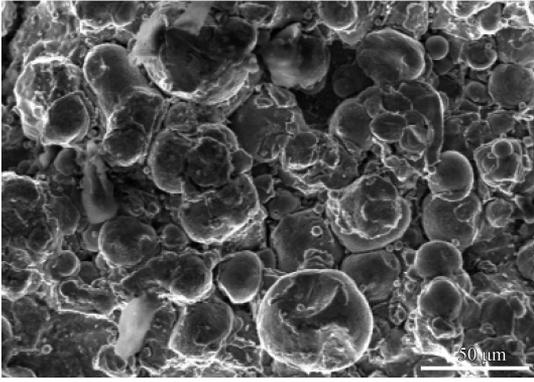


图5 镍铝青铜涂层表面形貌

Fig.5 Surface morphology of NAB coating

2.2 涂层显微硬度

通过利用显微硬度仪通过压痕法测试涂层截面显微硬度沿厚度方向的分布,结果如图6所示。图6整体来看,从基体至涂层硬度呈上升趋势,基体硬度较低,平均值为246 HV_{0.2};涂层硬度较高,平均值为289 HV_{0.2},提高了17%,基体与涂层交界处,硬度最高。

从涂层的硬度值分布曲线可以看出,涂层与基体交界处及涂层次表层显微硬度相对较高,而表面层硬度值逐渐降低。这说明冷喷涂过程中,后续粒子持续不断的撞击对前期形成涂层产生的夯实作用效果明显,使粒子变形加剧,产生了强烈的加工硬化效果,导致次表层显微硬度明显提高,分析可知涂层次表层的结合强度会比涂层表面处高。

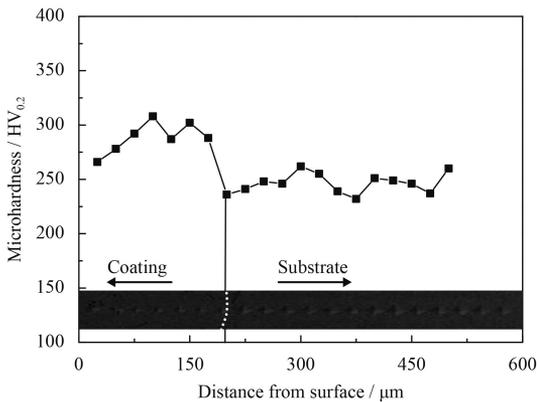


图6 镍铝青铜涂层与基体显微硬度分布

Fig.6 Distribution of microhardness of NAB coating and substrate

2.3 电化学腐蚀性能

涂层与基体在质量分数3.5%的NaCl溶液里的动电位极化曲线如图7所示。镍铝青铜涂层与基体

的阳极极化曲线均可见明显的钝化区,这说明镍铝青铜是钝化金属,因此需要用Cview软件进行Tafel拟合,求得自腐蚀电位 E_{corr} 、自腐蚀电流密度 I_{corr} 、击破电位 E_b 以及观察钝化区的阳极极化曲线特征来比较涂层与基体的耐腐蚀性能。如表3所示,镍铝青铜涂层的自腐蚀电位相较于基体降低了11%,自腐蚀电流密度比基体高一个数量级,击破电位较基体降低了26.6%,这说明涂层的耐腐蚀性能较基体略有下降。从钝化区阳极极化曲线来看,涂层出现了明显稳定钝化区,而基体没有稳定钝化区直接进入了过钝化区^[11-12]。镍铝青铜的钝化过程主要是通过反应(1)生成Cu₂O钝化膜,同时钝化膜也会在这个过程中通过反应(2)被不断溶解,当钝化膜生长速度与钝化膜的溶解速度相同时就会生成稳定钝化区,稳定钝化区的生成会使膜中含氧量增加,从吸附膜变成屏障膜,膜会不断变厚,从而阻止Cl⁻的入侵而腐蚀基体^[13]。因此镍铝青铜涂层可以形成更为稳定的Cu₂O钝化膜,达到保护基体的目的。

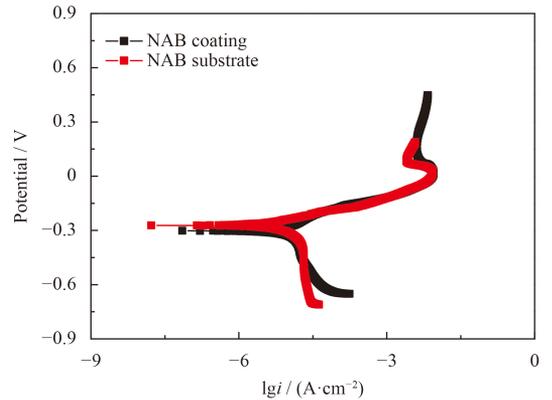
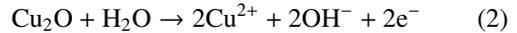
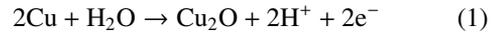


图7 镍铝青铜涂层与基体的动电位极化曲线

Fig.7 Polarization curves of NAB coating and substrate

表3 镍铝青铜涂层与基体的电化学性能

Table 3 Electrochemical properties of NAB coating and substrate

Properties	E_{corr} / mV	$I_{corr} / (10^{-6} \text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	E_b / mV
Coating	-302	27.3	16.3
Substrate	-272	5.11	22.2

基体与涂层电化学腐蚀后XRD物相分析结果如图8所示。由图8可知,涂层与基体经过电化学腐蚀后出现了很强的Cu₂O衍射峰,基体还有

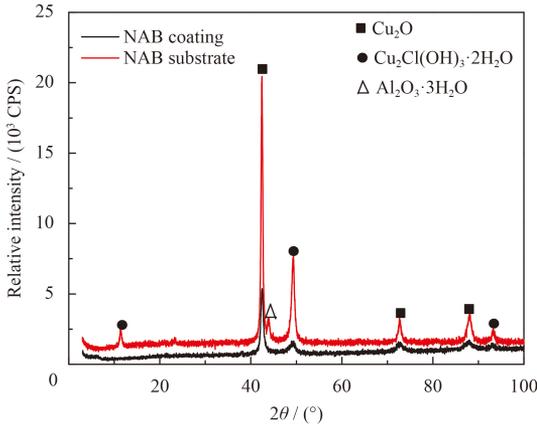
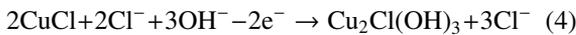
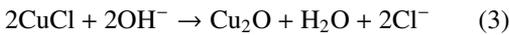


图8 镍铝青铜涂层与基体电化学腐蚀后的XRD图谱

Fig.8 XRD patterns of NAB coating and substrate after electrochemical corrosion

Cu₂Cl(OH)₃·H₂O的衍射峰。这说明, 电化学腐蚀过程中阳极发生了Cu失去电子变为Cu⁺的反应, Cu⁺和水中Cl⁻结合生成的CuCl通过反应(3)生成Cu₂O, Cu₂O不溶于水, 是表面钝化膜的主要成分^[13]。基体中CuCl的Cu⁺继续发生氧化反应, 通过反应(4)生成Cu₂Cl(OH)₃, 由于发生了这个反应, 基体中CuCl含量减少而造成Cu₂O含量减少, 这也是基体的动电位极化曲线未形成稳定钝化区而直接进入了过钝化区原因。



2.4 抗空蚀性能

涂层与基体经过12 h空泡腐蚀后的空蚀失重量如图9所示。由于镍铝青铜基体是铸造而成, 其孔隙率远远低于涂层, 所以基体的空蚀性能优于

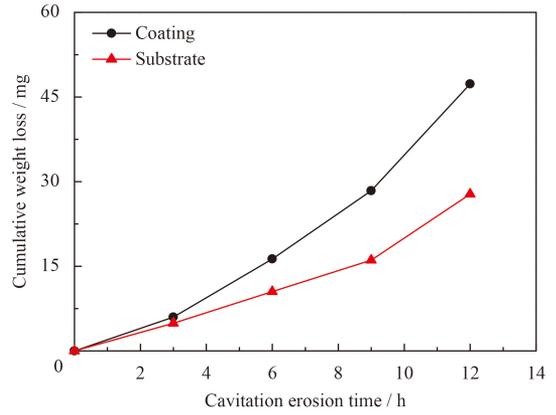
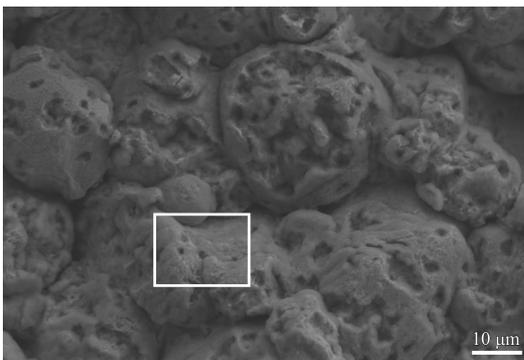


图9 镍铝青铜涂层与基体空蚀失重曲线

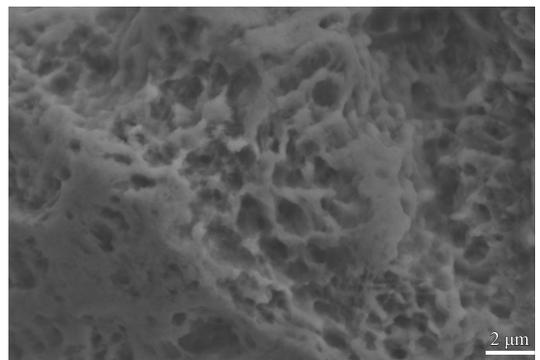
Fig.9 Weight loss curves of NAB coating and substrate after cavitation erosion

涂层, 基体总失重量为27.8 mg, 涂层的总失重量为47.3 mg。涂层与基体的空蚀失重曲线斜率均呈上升趋势, 这说明空泡腐蚀后期失重速度加快。分析其原因, 空泡腐蚀是一个细小空泡不断剧烈冲击金属表面的过程, 这会造成涂层和基体的孔隙率增加, 这一过程不断积累的结果会使得在空蚀后期涂层和基体抗空蚀性能减弱, 造成空泡腐蚀后期失重加速^[14-15]。

涂层经空泡腐蚀后的微观形貌如图10所示。由图10(a)可见, 涂层表面出现大小不一的空洞导致表面呈现出核桃状。图10(a)中局部方框区域放大后的微观形貌如图10(b)所示, 涂层经过空蚀后表面疏松多孔, 说明细小的空泡瞬间在局部爆裂, 该处的材料在瞬间巨大的冲击力作用下脱离母材, 造成空蚀失重。这证明了空泡腐蚀会导致涂层孔隙率不断增加, 使得涂层在空泡腐蚀后期的抗空蚀能力减弱。



(a) Morphology



(b) Magnification of marked area in (a)

图10 镍铝青铜涂层空蚀后微观形貌

Fig.10 Morphologies of NAB coating after cavitation erosion

2.5 摩擦磨损性能

由于镍铝青铜合金多用于海洋工程领域，因此研究镍铝青铜涂层在海水环境中摩擦磨损性能十分必要。涂层与基体在模拟海水中和大气中的摩擦磨损因数如图11所示。由图11可知，4种情况下都经历了摩擦因数先增加再趋于平稳的过程。涂层在空气中平均摩擦因数为0.155，模拟海水中平均摩擦因数为0.158；基体在空气中平均摩擦因

数为0.228，模拟海水中平均摩擦因数为0.226。在两种环境中，涂层的摩擦因数均低于基体，这说明涂层的减摩性能提高。这是因为涂层硬度高于基体，提高了涂层耐磨性。图12所示为涂层与基体在模拟海水与大气中的磨损率，涂层的磨损率均低于基体，涂层耐磨损性能优于基体。

图13所示为涂层与基体在模拟海水环境中磨损痕典型形貌。由图13(a)可知，涂层表面颗粒被压

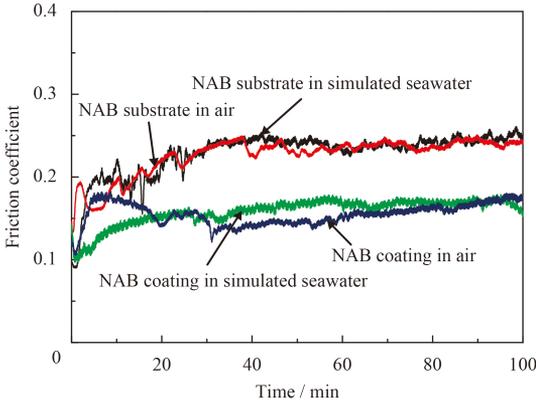


图 11 涂层与基体在模拟海水与空气中的摩擦因数

Fig.11 Friction coefficient curves of coating and substrate in simulated seawater and air

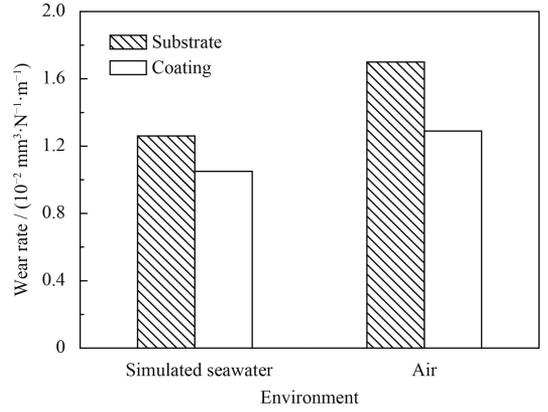
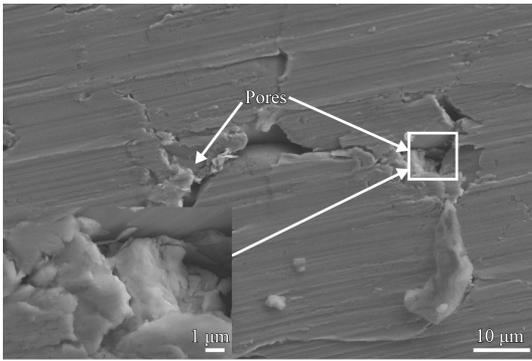
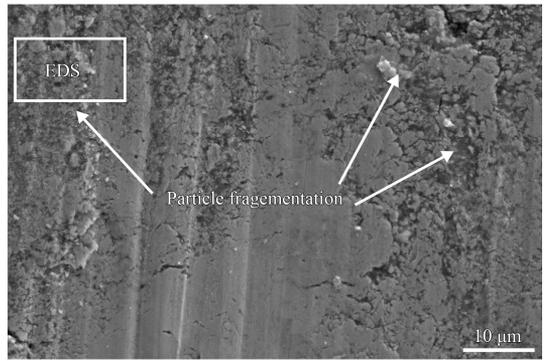


图 12 涂层与基体在模拟海水与空气中的磨损率

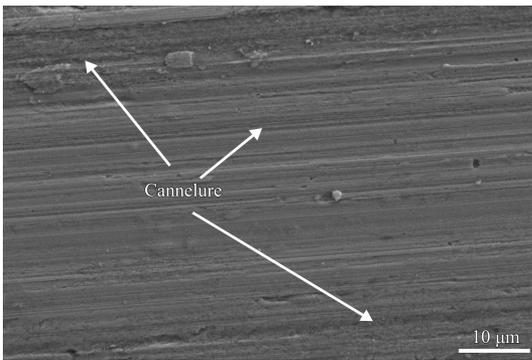
Fig.12 Wear rate of coating and substrate in simulated seawater and air



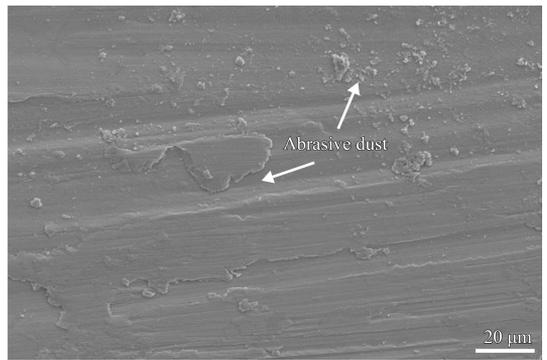
(a) Coating in air



(b) Coating in seawater



(c) Substrate in air



(d) Substrate in seawater

图 13 涂层与基体磨损痕典型形貌

Fig.13 Typical morphologies of wear track of coating and substrate

平并产生磨屑,涂层上的孔隙局部放大后可见,孔隙中收容了磨屑。涂层表面存在着较浅的犁削沟槽,这说明有一些磨屑随着摩擦副移动而发生磨粒磨损。在图13(c)中可见,基体在大气中摩擦后留下了较深的犁削沟槽,这说明基体的磨粒磨损更加剧烈,因此涂层中的孔隙收容了磨屑,可以有效地起到减磨作用。如图13(b)所示,涂层上的颗粒在摩擦副的挤压下破裂,破裂区域EDS分析结果如图14所示,O原子数分数达到35.41%,Cu原子数分数为30.10%。这是因为,涂层上的颗粒被挤压破裂后伴随着表面钝化膜的生成和粘着磨损,从而造成Cu被氧化。从图13(d)中可见,基体在海水中摩擦后磨痕表面留下了许多大小不一的磨屑,而在涂层表面未见明显磨屑,这说明涂层的抗磨损性能提高。另外,涂层和基体在模拟海水中的磨痕均未见明显的犁削沟槽,说明海水在摩擦过程中可以起到一定的润滑减磨作用。

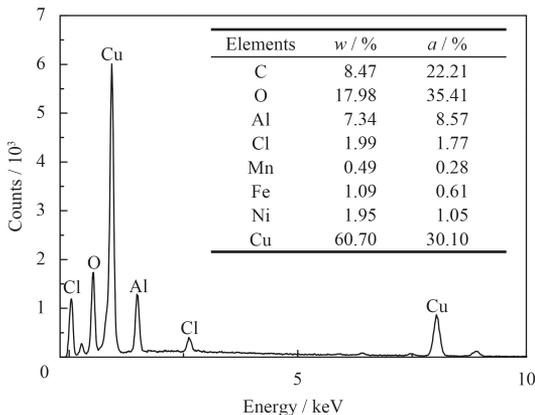


图14 涂层在模拟海水中磨痕的EDS结果

Fig.14 EDS results of wear track of coating in seawater

2.6 涂层表面的残余应力

残余应力是喷涂、堆焊、熔覆等涂层制备工艺中难以避免的缺陷,它对修复零件的抗疲劳性能、抗应力腐蚀性能、屈服强度以及尺寸稳定性都有很大影响。残余应力测试结果如图15所示。随着表面到基体距离的增加,镍铝青铜冷喷涂试样的残余应力从表面约为30 MPa的拉应力逐渐转为残余压应力,而后逐渐下降,在距离表面为250 μm 时,达到最大值约-208 MPa,此后基本保持在这一压应力水平。冷喷涂时,涂层中颗粒在高速撞击力的作用下会尽可能向周围扩展,但该扩展会受到底层及周围材料的限制,不能任意扩大,于是就在前期形成的涂层内产生了一定大小

的残余压应力。从残余应力角度分析可知,残余应力类型及大小对裂纹萌生、扩展具有很大影响,残余拉应力会促使疲劳裂纹的萌生与扩展,而残余压应力则会延缓裂纹的萌生与扩展。镍铝青铜冷喷涂涂层中残余压应力的形成,有利于改善其修复零件在后续使用过程中的抗疲劳性能。

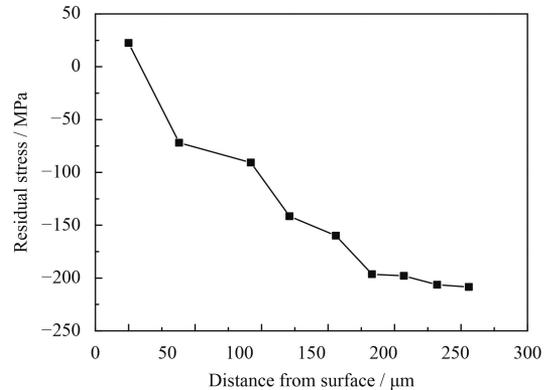


图15 镍铝青铜冷喷涂涂层的残余应力分布

Fig.15 Distribution of residual stress along depth of cold sprayed NAB coating

3 结论

(1) 针对大型船舶螺旋桨的再制造难题,利用冷喷涂技术在9442镍铝青铜基体上制备的Cu402F修复涂层较为致密,厚度为200~300 μm 。由于喷涂过程中产生了冷加工硬化,由基体至涂层硬度呈上升趋势,涂层硬度平均值为289 HV_{0.2},较基体提高了17%。

(2) 涂层的自腐蚀电位相较于基体降低了11%,自腐蚀电流密度比基体高一个数量级,击穿电位较基体降低了26.6%。涂层的动电位极化曲线出现了钝化区和稳定钝化区,虽然基体电化学腐蚀性能优于涂层,但是涂层可以生成稳定的钝化膜保护基体。涂层的抗空蚀性能不及基体,空泡腐蚀会导致涂层孔隙率不断增加,使得涂层在空泡腐蚀后期的抗空蚀能力减弱。

(3) 涂层在大气与模拟海水环境中的摩擦因数与磨损量均低于基体,涂层耐磨性能优于基体。涂层孔隙的磨屑收容作用,涂层硬度的提高是其耐磨性提高的主要原因。涂层在模拟海水环境中的摩擦存在着颗粒磨碎→钝化→粘着磨损的过程,海水可以起到润滑减磨的作用。镍铝青铜涂层产生了约-208 MPa的残余压应力,有利于改善其修复零件在后续使用过程中的抗疲劳性能。

参考文献

- [1] 罗芹, 吴忠, 秦真波, 等. 镍铝青铜的表面处理技术及研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(1): 15-21.
LUO Q, WU Z, QIN Z B, et al. Surface treatment technology and progress of nickel aluminum bronze[J]. Materials Review, 2015, 29(1): 15-21 (in Chinese).
- [2] 宋德军, 胡光远, 卢海, 等. 镍铝青铜合金的应用与研究现状[J]. 材料导报, 2007, 21(4): 450-459.
SONG D J, HU G Y, LU H, et al. Survey of progress on the research and practice of nickel-aluminum bronze[J]. Materials Review, 2007, 21(4): 450-459 (in Chinese).
- [3] 吕玉廷, 王立强, 毛建伟, 等. 镍铝青铜合金(NAB)的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(3): 815-820.
LV Y T, WANG L Q, MAO J W, et al. Recent advances of nickel-aluminum bronze (NAB)[J]. Rare Metal Material and Engineering, 2016, 45(3): 815-820 (in Chinese).
- [4] WHARTON J A, BARIK R C, KEAR G, et al. The corrosion of nickel-aluminum bronze in seawater[J]. Corrosion science, 2005, 47: 3336-3367.
- [5] 杜娟, 王洪仁, 杜敏. B10铜镍合金流动海水中冲刷腐蚀电化学行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2008, 20(1): 12-18.
DU J, WANG H R, DU M. Electrochemical corrosion behavior of 90/10 Cu-Ni alloy in flowing seawater[J]. Corrosion science and protection technology, 2008, 20(1): 12-18 (in Chinese).
- [6] 兰现卿, 韦玮, 谭洪武, 等. 船舶铜质螺旋桨的修复技术[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2011, 23(1): 24-29.
LAN J Q, WEI W, TAN H Y, et al. Repair Methods of Copper Ship Propeller[J]. Journal of Yellow River Conservancy Technical Insitute, 2011, 23(1): 24-29 (in Chinese).
- [7] 李长久. 中国冷喷涂研究进展[J]. 中国表面工程, 2009, 22(4): 5-14.
LI C J. The state-of-art of research and development on cold spraying in China[J]. China surface engineering, 2009, 22(4): 5-14 (in Chinese).
- [8] ASSADI H, KREYE H, GARTNER F. Cold spray-a materials perspective[J]. Acta Materialia, 2016, 116: 382-407.
- [9] 贾利, 杨素媛. AZ31镁合金冷喷涂纳米晶铝涂层腐蚀性能[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(10): 195-198.
JIA L, YANG S Y. Corrosion resistance of cold-sprayed nanocrystalline Al coating on AZ31 magnesium alloy[J]. Transactions of material and heat treatment, 2014, 35(10): 195-198 (in Chinese).
- [10] ASSADI H, GARTNER F, KREYE H. Boding mechanisim in cold gas spraying[J]. Acta material, 2003, 51: 4379-4394.
- [11] 火时中. 电化学保护[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988: 130-133.
HUO S Z. Electrochemical protection[M]. Beijing: Chemical industry press, 1988: 130-133 (in Chinese).
- [12] 刘永辉. 电化学测试技术[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1987: 164-176.
LIU Y H. Electrochemical measurement technology[M]. Beijing: Beijing aviation institute press, 1987: 164-176. (in Chinese)
- [13] NEODO S, CARUGO D, WHARTON J A, et al. Electrochemical behavior of nickel aluminum bronze in chloride media: Influence of PH and benzotriazole[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2013, 695: 38-46.
- [14] 都春燕. 镍铝青铜合金的耐蚀性及表面处理的研究[D]. 江苏: 江苏科技大学, 2014, 6.
DU C Y. Research on corrosion resistance of the nickel-aluminum bronze and the surface treatment on It[D]. Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2014, 6 (in Chinese).
- [15] KREBS S, GARTNER F, KLASSEN T, et al. Cold spraying of Cu-Al-Bronze for cavitation protection in marine environments[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2015, 24(1/2): 126-135.

(责任编辑: 常青)