

等离子喷涂 Al_2O_3 -13% TiO_2 涂层的海水腐蚀磨损性能^{*}

朱禄发^{1,2}, 龙剑平¹, 刘二勇², 王 祥², 曾志翔², 乌学东²

(1. 成都理工大学 材料与化学化工学院, 成都 610059; 2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 a. 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室, b. 浙江省海洋材料与防护技术重点实验室, 浙江 宁波 315201)

摘 要: 基于等离子喷涂技术构筑了高耐磨、耐蚀的 Al_2O_3 -13% TiO_2 涂层(AT13 涂层), 利用 Rtec 磨蚀试验机研究 AT13 涂层在干摩擦、去离子水和人工海水介质中的摩擦磨损性能, 并利用电化学工作站分析了涂层在静态腐蚀和滑动磨损中的开路电位和极化曲线的变化, 探讨了 AT13 涂层的腐蚀磨损机理。结果表明: 热喷涂 AT13 涂层由 α - Al_2O_3 、 γ - Al_2O_3 、金红石型 TiO_2 和 Al_2TiO_5 相组成, 其中富 Ti 相呈条带状分布于富 Al 基体中; AT13 涂层在海水工况具有较好的润滑性, 与干摩擦相比, 其摩擦因数减小了 0.15, 且具有较好的稳定性; 在 3 种工况下, AT13 涂层都具有优异的耐磨损性能, 海水润滑条件下, AT13 涂层具有最小的磨损率, 且随载荷的增加而减小; 磨损过程加重了海水对涂层的腐蚀, 但影响较小。

关键词: 等离子喷涂; Al_2O_3 -13% TiO_2 涂层; 腐蚀磨损行为; 微观结构

中图分类号: TG174.442; TG178.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)06-0096-08

Tribocorrosion Behavior of Plasma Sprayed Al_2O_3 -13% TiO_2 Coatings in Seawater

ZHU Lu-fa^{1,2}, LONG Jian-ping¹, LIU Er-yong², WANG Xiang², ZENG Zhi-Xiang², WU Xue-dong²

(1. College of Materials and Chemistry & Chemical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059; 2a. Key Laboratory of Marine Materials and Related Technologies, 2b. Zhejiang Key Laboratory of Marine Materials and Protective Technologies, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Science, Ningbo 315201, Zhejiang)

Abstract: Al_2O_3 -13% TiO_2 (AT13) coatings with high tribocorrosion resistance were prepared by plasma spraying method. The tribological properties of Al_2O_3 -13% TiO_2 coatings under dry sliding, deionized water and artificial seawater conditions were carried out using an Rtec tribometer. The open circuit voltage and polarization curve of the coatings were investigated with electrochemical workstation under static corrosion state and sliding wear condition, and the tribocorrosion mechanism of AT13 coating was also discussed. The results show that the thermal spraying AT13 coatings consists of α - Al_2O_3 , γ - Al_2O_3 , rutile- TiO_2 and Al_2TiO_5 , and the rich-Ti phases are distributed in the rich-Al phases. AT13 coatings have good lubrication under artificial seawater conditions, and its friction coefficient decreases 0.15 compared with those under dry sliding and has a good stability. The AT13 coatings have excellent wear resistant under different conditions. AT13 coating has minimal wear rate which decreases with increasing loads under seawater conditions. The wear process enhanced the corrosion behavior of AT13 coatings.

Keywords: plasma spraying; Al_2O_3 -13% TiO_2 coatings; tribocorrosion behavior; microstructure

收稿日期: 2015-08-15; 修回日期: 2015-11-16; 基金项目: * 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2014CB643302); 中国博士后科学基金(2014M551784); 浙江省重点科技创新团队(2011R50006)

通讯作者: 龙剑平(1974-), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 复合材料、薄膜材料; Tel: (028) 8407 9490; E-mail: longjianping@cdut.cn

网络出版日期: 2015-12-09 08:34; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20151209.0834.006.html>

引文格式: 朱禄发, 龙剑平, 刘二勇, 等. 等离子喷涂 Al_2O_3 -13% TiO_2 涂层的海水腐蚀磨损性能[J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 96-103. Zhu L F, Long J P, Liu E Y, et al. Tribocorrosion behavior of plasma sprayed Al_2O_3 -13% TiO_2 coatings in seawater[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 96-103.

0 引 言

随着陆地资源和生存空间日益减少,人们的步伐开始迈入资源丰富的海洋。众所周知,海洋资源的开发和利用离不开先进的海洋装备。然而,海洋工况下服役的装备不可避免存在腐蚀问题,尤其是海洋工程装备中的一些关键运动部件,如深潜器的浮力调节系统、潜艇艉轴及其滑动支撑轴承、海水液压传动系统、水下作业机器人、深海勘探和开采装备等还存在严重的腐蚀磨损问题。这是由于海水介质中的运动部件无法使用油脂润滑剂,同时低粘度海水介质又难以提供有效润滑,因此海水环境摩擦磨损现象所带来的摩擦功耗和材料损伤非常严重^[1-2],同时伴生的振动与噪音更是影响海洋装备系统机动和隐身性能的核心问题。综上,海水介质中的关键运转部件的磨蚀机理研究及表面抗磨减磨材料开发已成为发展高端先进海洋工程装备的迫切需求,因此海水介质中运动部件的腐蚀磨损问题引起众多研究人员的关注^[3]。

等离子喷涂作为材料表面强化与改性的技术,通过喷涂不同材质的涂层来提高被保护基体材料的耐磨、耐蚀等性能,可在不改变整体材料性能的前提下实现对关键部件的防护^[4-5]。等离子喷涂技术可用于金属、陶瓷及复合材料涂层的制备,其中陶瓷涂层因具有高硬度、高耐腐蚀、耐磨等优点而广泛应用于海洋运动部件的表面防护,尤其是海洋装备中钻井套管、作业泵和管件等运动部件的强化^[6-8]。在多种陶瓷涂层中, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}13\%\text{TiO}_2$ (AT13 涂层)复合氧化物陶瓷涂层在军舰、潜艇、和航空母舰设备上的近百种零部件获得了广泛应用^[9-11](如潜艇进气和排气阀件、舱门支杆、气体透平机的螺旋泵转子和燃料泵部件等)。然而,目前研究工作对海水介质中 AT13 涂层的腐蚀磨损行为及机理研究报道较少。因此,文中选择等离子喷涂技术构筑具有高耐磨、耐蚀特性的 AT13 涂层,随后利用 Rtec 磨蚀试验机研究 AT13 涂层在干摩擦、去离子水和海水介质中中的摩擦磨损性能,并利用电化学工作站分析涂层在静态腐蚀和滑动磨损中的开路电位和极化曲线的变化,阐明 AT13 涂层在海水介质中的腐蚀磨损行为及其机理。

1 试验部分

1.1 AT13 涂层的制备

选择海洋工况中常用的低碳钢 Q235(尺寸:40 mm×25 mm×5 mm)作为基体材料。喷涂前,首先对基体进行预处理,具体操作为:将基体分别在丙酮和乙醇中超声波清洗 10 min,以除去基体表面油污;利用喷砂设备进行喷砂活化处理,选择 1.18 mm(16 目)刚玉砂为喷砂介质;喷砂后表面粗糙度为 0.7~0.8 μm;随后将处理好的基体样品安装于喷涂工装台待用。

选用上海休玛喷涂机械有限公司生产的 XM-80SK(配有 F4 喷枪)等离子喷涂设备,选择粒度为-37~50 μm 的 Ni 包 Al 粉末制备粘结层,选择粒径为-25~50 μm 的 AT13 涂层粉末制备陶瓷涂层,其中主要的喷涂参数如表 1 所示。

表 1 主要的等离子喷涂技术参数
Table 1 Main parameters of the plasma spray technology

Parameters	NiAl	AT13
Current/A	500	600
Voltage/V	50	65
Primary gas flow (Ar)/(L·h ⁻¹)	1 800	1 900
Secondary gas flow (H ₂)/(L·h ⁻¹)	32.5	302.9
Powder feed rate/(L·h ⁻¹)	400	400
Spray distance/mm	100	85

1.2 AT13 涂层粉体和涂层表征

采用 D8 Advance X 射线衍射仪对 AT13 涂层粉体和涂层的物相进行分析,测试条件为:Cu 靶(λ=0.154 nm)、工作电压 40 kV、管电流 40 mA、扫描速度 7°/min、步长 0.02°、扫描角度为 10°~80°;在 FEI Quanta 250 FEG 场发射扫描电镜下观察涂层截面的微观形貌,分析陶瓷涂层截面特征。

1.3 腐蚀磨损性能测试

利用配有三电极体系 Modulab 电化学工作站的 Rtec 磨蚀试验机(如图 1 所示)对 AT13 涂层的磨蚀性能进行测试。腐蚀磨损性能具体测试条件为:测试工况为干摩擦、去离子水及海水介质(按照 ASTM 1148-98 标准配置人工海水,如表 2),接触方式为球-盘式往复运动,球样品为

Φ 6 mm 氮化硅球,盘样品为 25 mm×20 mm×5 mm 的 AT13 涂层,载荷分别为 10、20 和 30 N,滑动速度为 20 mm/s,测试时间为 30 min。测试前,AT13 涂层经切割、打磨、抛光处理后备用,表面粗糙度为 1.5 nm。腐蚀磨损性能测试过程为:首先将待测样品固定在样品台,利用防水胶密封至仅有试样表面暴露于腐蚀介质中,随后利用 Rtec 磨蚀试验机研究涂层材料在不同的载荷下的腐蚀磨损性能,并通过 Modulab 电化学工作站获得不同滑动条件下的电信号(电流和电位变化)。

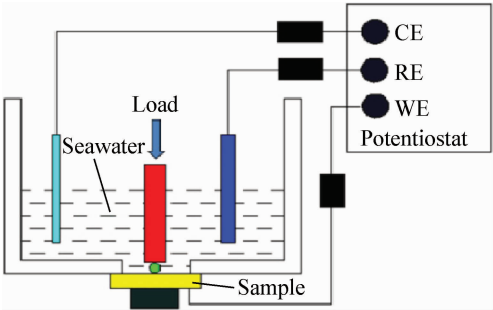


图 1 磨蚀试验机原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the tribocorrosion apparatus

表 2 人工海水化学成分

Table 2 Chemical composition of the artificial seawater (g · L⁻¹)

Compound	NaCl	MgCl ₂	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	KCl	NaHCO ₃	KBr	H ₃ BO ₃	SrCl ₂	NaF
Concentration	24.53	5.2	4.09	1.16	0.695	0.201	0.101	0.027	0.025	0.003

利用 Alpha-Step 轮廓仪对样品的磨损体积进行测试,根据公式:

$$\omega = V / (F \cdot S)$$
 (1)

其中 V 为涂层的磨损体积,m³;F 为所加载荷,N;S 为滑动的总位移,m;计算涂层的磨损率。

利用 FEI Quanta 250 FEG 场发射扫描电镜研究 AT13 涂层的磨损形貌,确定涂层材料的腐蚀磨损机理。

1.4 静态腐蚀及滑动过程的电化学测试

利用三电极体系 Modulab ECS 电化学工作站研究 AT13 涂层在静态腐蚀条件下的开路电位和极化曲线,其中,铂丝为辅助电极,Ag/AgCl 为参比电极,待测样品(25 mm×20 mm×5 mm)为工作电极,样品与海水的接触面积为 3 cm²。测试过程为:先将样品在人工海水中浸泡 15 min,待测试环境稳定后再测试样品的开路电位,测试时间为 15 min;随后,对涂层材料的动电位极化曲线进行测试,电压扫描范围为-1~0.8 V,扫描速度为 1 mV/s。

采用球-盘式往复运动、载荷为 10 N 和滑动速度 20 mm/s 的摩擦条件对滑动过程中开路电位和动态极化曲线进行测试。测试过程为:首先将待测样品在海水中浸泡 15 min,待开路电位稳定后再启动 Rtec 摩擦试验机,同时利用 Modulab ECS 电化学工作站测试 AT13 涂层在海水下的开路电位,测试时间为 15 min;随后更换海水,并

以同样的摩擦条件在样品另一区域测试 AT13 涂层在海水中的动电位极化曲线,电压扫描范围为-1~0.8 V,扫描速度为 1 mV/s^[12]。

2 结果与讨论

2.1 物相分析

利用 X 射线衍射仪对 AT13 涂层喷涂粉末和涂层的物相进行分析,如图 2 所示。AT13 涂层粉末主要由 α-Al₂O₃ 和金红石型 TiO₂ 相组成;喷涂后,AT13 涂层主要由 α-Al₂O₃、γ-Al₂O₃、金红石型 TiO₂ 和 Al₂TiO₅ 组成。对比粉末与涂层材料的 XRD 结果,喷涂后 AT13 涂层中出现了 γ-Al₂O₃ 和 Al₂TiO₅ 两种新相,其原因是喷涂过程

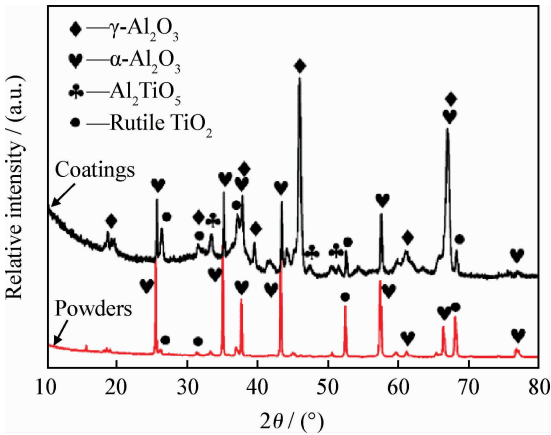


图 2 AT13 涂层粉末和涂层的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of the AT13 powders and AT13 coatings

中熔融的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 粉末熔滴快速凝固有利于低界面能 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的生成, 而未熔或半熔融的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 粉末则仍保持为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相, 因此喷涂涂层中存在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 两相; 其次, Al_2O_3 和 TiO_2 在喷涂过程中会发生部分化学反应从而生成 Al_2TiO_5 化合物^[13-15]。但热喷涂过程中生成的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 力学性能如硬度等较 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 低, 因此在制备过程中需尽量避免该相的生成^[16-17]。

2.2 微观形貌

热喷涂涂层的性能与粉末的结构、粒径等密切相关, 因此只有高质量的粉末才能确保涂层材料的优异性能^[18-19]。因此, 首先对试验所使用的粉末的微观形貌进行研究, 如 AT13 涂层, 从图 3 可以看出 AT13 涂层粉末大部分呈棱角状, 粒径均匀(尺寸为 $25\sim 50\text{ }\mu\text{m}$), 且有利于形成结构致密的陶瓷涂层材料。

利用扫描电子显微镜对 AT13 涂层截面微观形貌和元素分布进行表征, 如图 4 所示。结果表明, AT13 涂层由基体、粘结层(厚度约 $60\text{ }\mu\text{m}$)

和陶瓷层(厚度约 $180\text{ }\mu\text{m}$)3 部分组成(图 4(a))。进一步对陶瓷层进行分析, 图 4(b)看出陶瓷层由灰色相和条状的深灰色相所组成, EDS 结果表明灰色相为富 Ti 相, 而深灰色相则为富 Al 相, 且两相之间呈现出良好的结合性。图 5 为对应图 4(b)区域的元素分布图, 结果同样证实 AT13 涂层由灰色的富 Ti 相与深色的富 Al 相所组成^[20-21]。条带

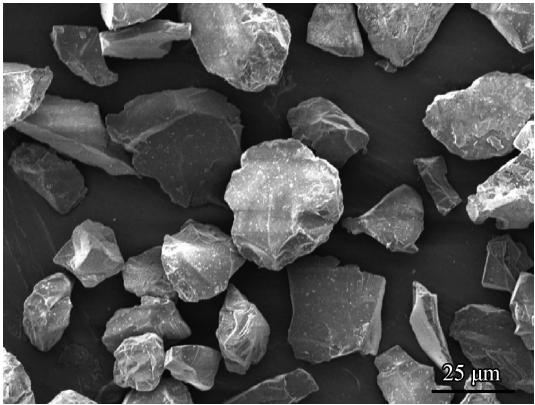
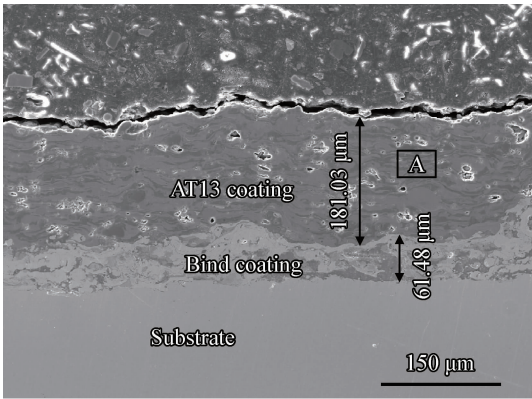
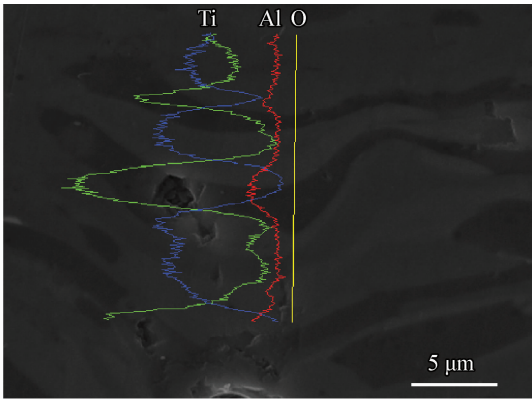


图 3 AT13 涂层粉末的微观形貌
Fig. 3 Morphology of the AT13 powders



(a) AT13 coatings



(b) Magnification of area A in (a)

图 4 AT13 涂层的截面形貌

Fig. 4 Cross section morphologies of the AT13 coatings

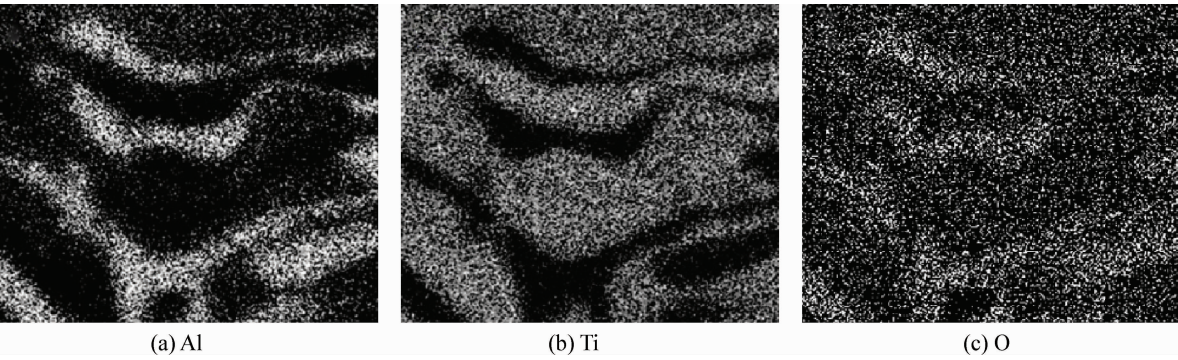


图 5 AT13 涂层局部 EDS 面扫描结果

Fig. 5 EDS analysis of map scanning of the AT13 coatings

状的富 Al 相的存在表明喷涂过程中 Al_2O_3 粉末发生了明显的扁平化过程,从而获得层状交替结构的 AT13 涂层。对于耐腐蚀磨损材料而言,致密的层状结构防护涂层可有效起到防腐、耐磨作用。

2.3 摩擦磨损性能

利用 Rtec 摩擦试验机研究了 AT13 涂层的不同载荷条件下摩擦磨损性能,测试工况为干摩擦、去离子水、海水介质。图 6(a)摩擦因数测试结果可以看出:海水介质中 AT13 涂层具有较低的摩擦因数,且摩擦因数随载荷的升高稍有增大,这一结果显示 AT13 涂层在海水介质中具有良好的润滑作用且随载荷变化具有较好的稳定性;从图 6(b)磨损率测试结果可以看出:在干摩

擦条件下,AT13 涂层的磨损率随载荷增大而显著增加,且在 20 N 和 30 N 条件下的磨损率明显高于水介质中磨损率,其中载荷为 30 N 时 AT13 涂层干摩擦磨损率较海水介质磨损率高出近 7 倍。而在水介质、尤其是海水介质中,AT13 涂层的磨损率随载荷增大而保持稳定。因此,不同工况下 AT13 涂层的摩擦磨损性能测试结果表明:AT13 涂层适用于海水介质中耐磨蚀运转部件的防护,尤其是高载荷条件下运转部件。

2.4 静态腐蚀及磨损过程中的电化学测试

为了研究 AT13 涂层腐蚀磨损过程中的电化学变化,利用三电极体系 Modulab ECS 电化学工作站对 AT13 涂层静态腐蚀及磨损过程中的电化学信息进行测试,结果如图 7 所示。开路电

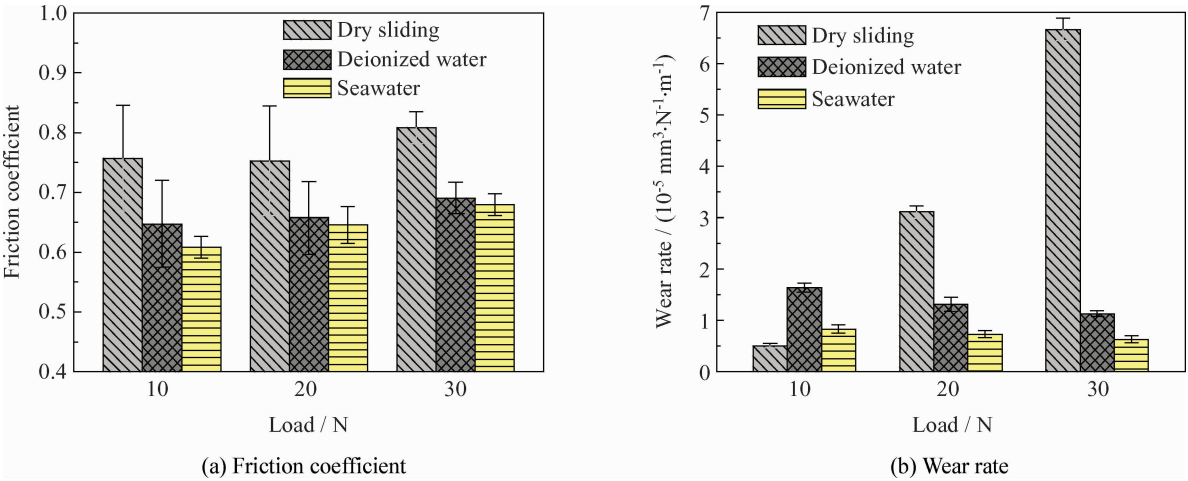


图 6 AT13 涂层在不同条件下的摩擦因数和磨损率
Fig. 6 Friction coefficient and wear rate of the AT13 coating in different conditions

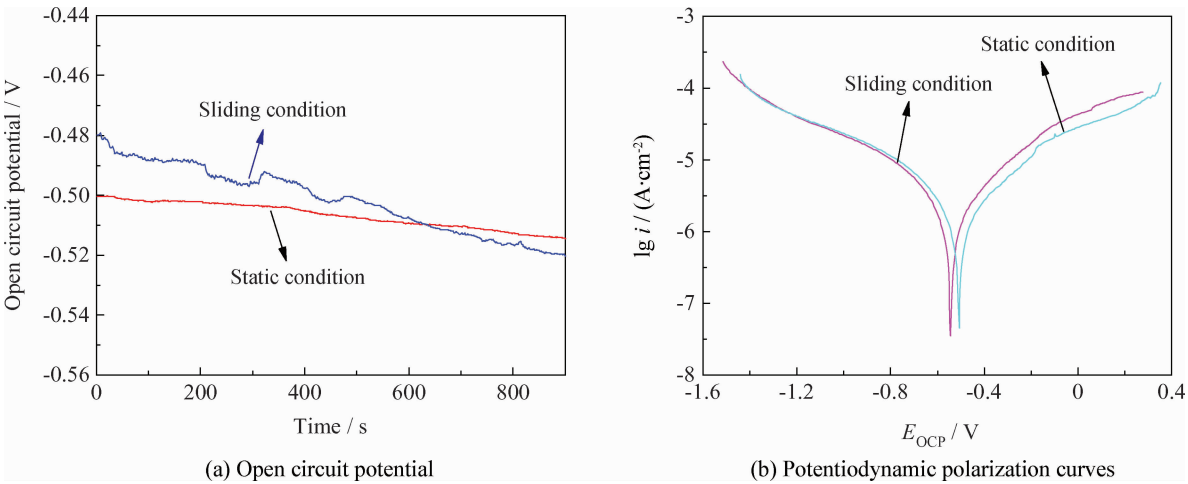


图 7 AT13 涂层在静止和滑动条件下的开路电位和动电位极化曲线
Fig. 7 Open circuit potential and potentiodynamic polarization curves of AT13 coating under static and sliding conditions

位测试结果表明在静态腐蚀过程中,AT13 涂层的开路电位基本保持平稳,而在摩擦副的滑动过程中,开路电位随时间延长而减小,且在 600 s 后则小于静态腐蚀的开路电位,因此,磨损过程破坏了涂层的耐腐蚀的稳定性,并减弱了 AT13 涂层在海水中的腐蚀抗力,从而使涂层的耐海水腐蚀性能降低;从图 7(b)动电位极化曲线测试和表 3 电化学参数的结果表明:腐蚀磨损过程使 AT13 涂层的自腐蚀电位降低,其腐蚀电流密度是静态腐蚀电流密度的两倍,这结果证实磨损过程加重了涂层在海水中的腐蚀,进而降低了 AT13 涂层在海水中的腐蚀抗力,加剧了材料的腐蚀^[22]。

海水工况下 AT13 涂层的磨损测试及电化学测试结果表明:AT13 涂层具有优异的耐腐蚀性能,即使是腐蚀磨损过程中,AT13 涂层的磨损表面在磨损-腐蚀联合作用下仍表现良好的耐腐蚀性能;而摩擦磨损性能测试结果表明海水具有

明显的润滑、减磨作用,且较去离子水效果更为明显。因此,腐蚀磨损测试结果表明 AT13 涂层可为腐蚀工况下运转部件提供优异的防护作用。

表 3 AT13 涂层在静态和动态腐蚀下的自腐蚀电位和腐蚀电流密度

Table 3 Corrosion potential and corrosion current density of the AT13 coating under static and sliding conditions

Testing parameters	Static condition	Sliding condition
Corrosion potential/V	-0.538 6	-0.559 4
Corrosion current density/(10^{-7} A · cm ⁻²)	4.152	8.098

2.5 磨损形貌分析

利用扫描电子显微镜对干摩擦、海水介质中 AT13 涂层的磨损形貌进行分析。由图 8 可以看

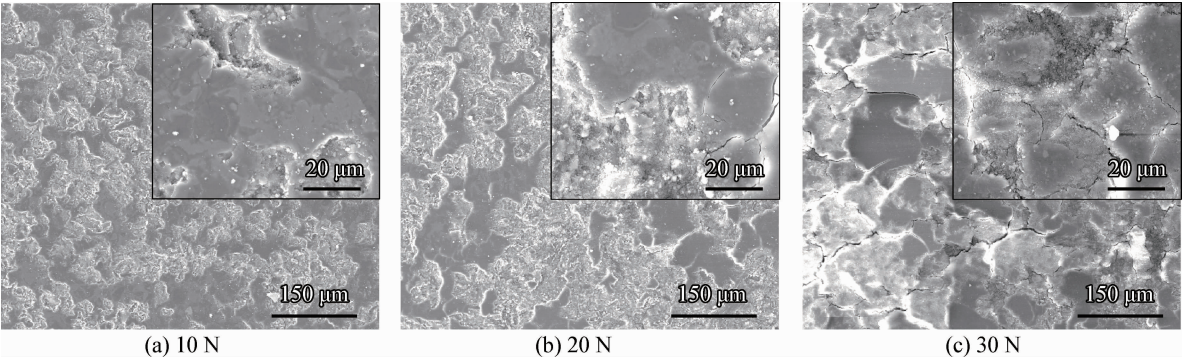


图 8 AT13 涂层在干摩擦下的磨损表面形貌
Fig. 8 Worn surface morphologies of the AT13 coatings under dry sliding conditions

出:干摩擦条件下,当载荷为 10 N 时,AT13 涂层的磨损表面存在大量的剥落坑,此时涂层的磨损机理以脆性断裂、微切削为主,高倍 SEM 形貌显示剥落坑呈现明显的脆性剥落特性,同时大量剥落坑的出现与热喷涂涂层存在气孔等缺陷有着密切的关系;当载荷增大至 20 N,磨损表面的剥落面积显著增大,表明高的接触应力下更能引起涂层材料的脆性断裂,导致磨损表面出现大面积的剥落坑,而剥落坑的增加,导致了磨损过程中应力分布的不均匀性,进而引起磨损率的显著增大,此时磨损机理仍以脆性断裂、微切削为主,高倍 SEM 形貌进一步显示磨损表面出现大量的微裂纹,其存在加剧了材料的脆性剥落特性;当载荷为 30 N,AT13 涂层的磨损表面形貌出现明显

的变化,从 SEM 形貌看出磨损表面存在细小颗粒因挤压而形成的支撑层,且支撑层之间存在大量的微裂纹。与 10 N 和 20 N 的磨损表面相比,30 N 的高载荷导致了 AT13 涂层大面积剥落,而剥落的磨屑仍留在磨损表面形成支撑层,此时,涂层的磨损机理以脆性断裂和疲劳剥落为主。

当磨损过程发生于水介质时,AT13 涂层的摩擦磨损性能发生明显的改变,从图 6 可以看出其摩擦因数减小,磨损率降低,尤其是海水介质具有较去离子水更加优异的润滑、减磨作用。文献表明海水主要通过如下 3 种形式起到润滑、减磨作用:①海水介质可以隔绝磨损面的直接接触,从而起到边界润滑作用^[23-25];②海水中 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等二价离子可在磨损面生成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等淤泥状物

质而起到润滑作用^[26];③海水中 Cl^- 离子易于与磨屑中的 Si、Ti 等元素生成低摩擦因数的润滑相,从而起到润滑作用^[27]。

用场发射扫描电镜对海水介质中不同载荷下 AT13 涂层的磨损形貌进行表征,如图 9 所示。当载荷为 10 N 时,AT13 涂层磨损表面的剥落坑较干摩擦条件下显著减少,表明海水介质具有较好的润滑性,使涂层材料的磨损率显著降低。高

倍 SEM 形貌显示剥落区域较为平滑,这与海水介质在摩擦过程中所起到的“抛光”作用有关,此时磨损机理以微切削为主;当载荷为 20 N 和 30 N 时,磨损表面形貌与 10 N 时接近,结合磨损率测试结果可发现海水介质中 AT13 涂层磨损率与磨损形貌受载荷影响较小。高倍 SEM 形貌显示磨损表面更加光滑、平整,表明海水存在明显的“抛光”作用,此时磨损机理仍以微切削为主。

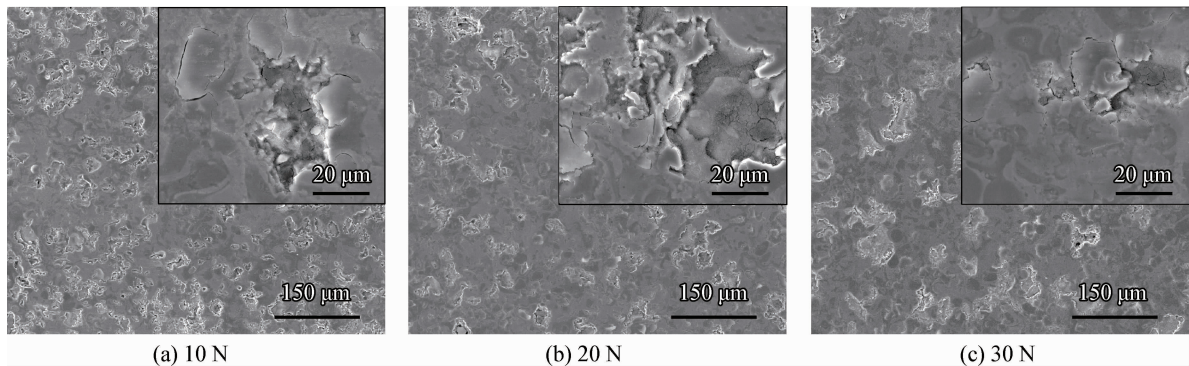


图 9 AT13 涂层在海水下的磨损表面形貌

Fig. 9 Worn surface morphologies of the AT13 coatings under seawater conditions

3 总 结

(1) 等离子喷涂 AT13 涂层由 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、金红石型 TiO_2 和 Al_2TiO_5 组成,其中富 Ti 相呈条带状分布于富 Al 基体。

(2) 不同工况下热喷涂 AT13 涂层的摩擦磨损性能测试表明:干摩擦下,AT13 涂层的摩擦因数和磨损率随载荷升高而增大;而在海水介质中,AT13 涂层的摩擦因数和磨损率均较干摩擦工况显著降低,证实该涂层具有较好的海水润滑和海水耐磨效果,可用于腐蚀介质中运转部件的防护。

(3) 海水介质中,热喷涂 AT13 涂层表现出优异的耐腐蚀磨损性能。电化学分析表明磨损过程加重了涂层在海水中的腐蚀,但其影响作用较小;磨损形貌分析表明海水介质存在明显的润滑、减磨作用。

参考文献

[1] 周婷婷,牟明磊,白秀. 海洋结构物摩擦学问题的研究进展 [J]. 摩擦学学报, 2013, 33(4): 420-427.
Zhou T T, Mou M L, Bai X. Research progress in tribological problems of ocean structure [J]. Tribology, 2013, 33(4): 420-427 (in Chinese).
[2] 严新平,白秀琴,袁成清. 试论海洋摩擦学的内涵、研究范

畴及其研究进展 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(19): 95-103.
Yan X P, Bai X Q, Yuan C Q. Discussion on connotation and research scopes of ocean tribology and its research progress [J]. Journal Mechanical Engineering, 2013, 49(19): 95-103 (in Chinese).
[3] 董从林,白秀琴,严新,等. 海洋环境下的材料摩擦学研究进展与展望 [J]. 摩擦学学报, 2013, 33(3): 312-318.
Dong C L, Bai X Q, Yan X, et al. Research status and advances on tribological study of materials under ocean environment [J]. Tribology, 2013, 33(3): 312-318 (in Chinese).
[4] 赵运才,葛世荣. $\text{Ni60A}/\text{MoS}_2$ 复合涂层润滑膜的形成及自修复机理 [J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(3): 357-361.
Zhao Y C, Ge S R. Formation and self-repairing action of $\text{Ni60A}/\text{MoS}_2$ composite lubricating film [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(3): 357-361 (in Chinese).
[5] Zhe L, Zhen H C, Yan C D. The effect of metallic bonding layer on the corrosion behavior of plasma sprayed Al_2O_3 ceramic coatings in simulated seawater [J]. Vacuum, 2014, 101: 6-9.
[6] Bolleddu V, Racherla V, Bandyopadhyay P P. Microstructural and tribological characterization of air plasma sprayed nanostructured alumina-titania coatings deposited with nitrogen and argon as primary plasma gases [J]. Materials & Design, 2014, 59(6): 252-263.
[7] Kai Y, Jie C, Fei H. Stress-induced phase transformation

- and amorphous to nanocrystalline transition in plasma-sprayed Al_2O_3 coating with relative low temperature heat treatment [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2014, 253(25): 277-283.
- [8] Long H E, Tan Y F, Tan H, et al. Tribological properties of nanostructured Al_2O_3 -40% TiO_2 multiphase ceramic particles reinforced Ni-based alloy composite coatings [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(9): 2618-2627.
- [9] Guessasma S, Bounazef M, Nardin P, et al. Wear behavior of alumina-titania coatings: analysis of process and parameters [J]. *Ceramics International*, 2006, 32(1): 13-19.
- [10] DiGirolamo G, Brentari A, Blasi C, et al. Microstructure and mechanical properties of plasmas sprayed alumina-based coatings [J]. *Ceramics International*, 2014, 40(8): 12861-12867.
- [11] Bannier E, Vicent M, Rayon E, et al. Effect of TiO_2 addition on the microstructure and nanomechanical properties of Al_2O_3 suspension plasma sprayed coatings [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 316: 141-146.
- [12] Pileggi R, Tului M, Stocchi D, et al. Tribo-corrosion behaviour of chromium carbide based coatings deposited by HVOF [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2014, 268: 247-251.
- [13] Palanivelu R, Ruban Kumar A. Scratch and wear behaviour of plasma sprayed nano ceramics bilayer Al_2O_3 -13wt% TiO_2 /hydroxyapatite coated on medical grade titanium substrates in SBF environment [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 315(4): 372-379.
- [14] Kusoglua I M, Celika E, Cetinel H, et al. Wear behavior of flame-sprayed Al_2O_3 - TiO_2 coatings on plain carbon steel substrates [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2005, 200(1): 1173-1177.
- [15] Liu Z, Dong Y, Chu Z, et al. Corrosion behavior of plasma sprayed ceramic and metallic coatings on carbon steel in simulated seawater [J]. *Materials & Design*, 2013, 52(24): 630-637.
- [16] 邓春明, 周克崧, 刘敏, 等. 大气等离子喷涂 Al_2O_3 -3% TiO_2 涂层的性能 [J]. *中国表面工程*, 2010, 23(1): 19-23.
- Deng C M, Zhou K S, Liu M, et al. Properties of air plasma sprayed Al_2O_3 -3% TiO_2 coatings [J]. *China Surface Engineering*, 2010, 23(1): 19-23 (in Chinese).
- [17] Mishra N K, Mishra S B, Kumar R. Oxidation resistance of low velocity Oxy fuel sprayed Al_2O_3 -13% TiO_2 coating on Nickel based superalloys at 800 °C [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2014, 260: 23-27.
- [18] 朱晖朝, 邓春明, 周克崧, 等. 不同氧化铝粉末等离子喷涂氧化铝涂层的性能 [J]. *材料研究与应用*, 2009, 3(3): 153-157.
- Zhu H C, Deng C M, Zhou K S, et al. The performance of plasma spraying aluminum oxide coating with different alumina powder [J]. *Materials Research and Application*, 2009, 3(3): 153-157 (in Chinese).
- [19] Sure J, Rao C J, Venkatesh P, et al. Evaluation of plasma sprayed alumina-40wt% titania and partially stabilized zirconia coatings on high density graphite for uranium melting application [J]. *Ceramics International*, 2014, 40(5): 6509-6523.
- [20] Nie X, Meletis E I, Jiang J C, et al. Abrasive wear/corrosion properties and TEM analysis of Al_2O_3 coatings fabricated using plasma electrolysis [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2002, 149(2): 245-251.
- [21] 成志芳, 马壮, 卢林. 等离子喷涂 Al_2O_3 -13% TiO_2 涂层微观组织形貌分析 [J]. *表面技术*, 2012, 41(3): 9-11.
- Cheng Z F, Ma Z, Lu L. The micrographs analysis of plasma sprayed Al_2O_3 -13% TiO_2 coatings [J]. *Surface Technology*, 2012, 41(3): 9-11 (in Chinese).
- [22] Monticelli C, Balbo A, Zucchi F. Corrosion and tribocorrosion behaviour of thermally sprayed ceramic coatings on steel [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2011, 205(12): 3683-3691.
- [23] 范磊, 陈华辉, 宫学源, 等. 不同润滑条件下氧化铝陶瓷衬板的磨损机制 [J]. *润滑与密封*, 2012, 37(1): 62-66.
- Fan L, Chen H H, Gong X Y, et al. Wear mechanism of Al_2O_3 ceramic liner under different lubrication situation [J]. *Lubrication Engineering*, 2012, 37(1): 62-66 (in Chinese).
- [24] 刘宁, 王建章, 陈贝贝, 等. 氧化铝陶瓷在海水润滑下的摩擦学行为研究 [J]. *润滑与密封*, 2013, 38(5): 55-59.
- Liu N, Wang J Z, Chen B B, et al. Tribological behavior of alumina ceramic under lubrication of seawater [J]. *Lubrication Engineering*, 2013, 38(5): 55-59 (in Chinese).
- [25] 焦素娟, 周华, 龚国芳, 等. 水润滑下 Al_2O_3 、 Al_2O_3 -13% TiO_2 的等离子喷涂层的摩擦磨损特性 [J]. *润滑与密封*, 2002, 27(3): 28-31.
- Jiao S J, Zhou H, Gong G F, et al. Tribological properties of plasma sprayed coating Al_2O_3 and Al_2O_3 -13% TiO_2 under water lubricated condition [J]. *Lubrication Engineering*, 2002, 27(3): 28-31 (in Chinese).
- [26] 王建章, 陈贝贝, 阎逢元. 海水组分对海水润滑性能的影响 [J]. *润滑与密封*, 2011, 36(11): 1-5.
- Wang J Z, Chen B B, Yan F Y. Influence of seawater constituents on the lubrication effect of seawater [J]. *Lubrication Engineering*, 2011, 36(11): 1-5 (in Chinese).
- [27] Roy R S, Basu D, Cha A, et al. Distinct wear characteristics of submicrometer-grained alumina in air and distilled water: a brief analysis on experimental observation [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, 90(9): 2987-2991.