

基体材料对 Cr/CrN 多层涂层在海水环境中磨蚀性能的影响

张静^{1,2}, 单磊^{1,3}, 苏晓磊^{2,3}, 李金龙³, 董敏鹏³

(1.浙江纺织服装职业技术学院 机电与轨道交通学院, 浙江 宁波 315211; 2.西安工程大学 材料工程学院, 西安 710048; 3.中国科学院宁波材料技术与工程研究所 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室, 浙江省海洋材料与防护技术重点实验室, 浙江 宁波 315201)

摘要: **目的** 讨论海水环境下不同基体材料对 Cr/CrN 交替的多层复合涂层磨蚀性能的影响, 为海水环境下耐磨蚀材料基体的选择和应用提供参考。 **方法** 采用多弧离子镀技术在 316L 不锈钢和 TC4 钛合金基体上沉积 Cr/CrN 多层复合涂层, 通过 XRD、SEM 等技术对涂层材料的微观结构进行表征, 通过硬度测试、结合力测试、电化学分析、摩擦磨损试验等技术对涂层材料的力学性能、电化学性能以及摩擦学性能进行分析, 比较不同基体对 Cr/CrN 多层涂层在海水环境中磨蚀性能的影响。 **结果** 以 TC4 钛合金为基体的 Cr/CrN 多层涂层的硬度为 1727.2HV_{0.3}, 虽略小于以 316L 不锈钢为基体的涂层硬度 (2241.5HV_{0.3}), 但其在膜-基结合力、海水环境下电化学性能和摩擦学性能等方面均优于以 316L 不锈钢为基体的涂层。结合力测试中, 以 TC4 为基体的多层涂层初始裂纹出现在 31 N, 扩展裂纹出现在 42 N, 大于 316L 基体涂层的 22 N 和 35 N。电化学测试中 TC4 基体涂层的腐蚀电位为 -0.20 V, 大于 316L 基体涂层的腐蚀电位 (-0.21 V)。海水环境下 TC4 基体涂层的平均摩擦系数和磨损率分别为 0.35 和 $2.9950 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 均小于 316 L 基体涂层的平均摩擦系数 (0.36) 和磨损率 ($4.9895 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$)。 **结论** TC4 钛合金更适合作为海水环境用 Cr/CrN 多层涂层耐磨蚀材料的基体材料。

关键词: Cr/CrN 涂层; 基体; 海水环境; 耐磨蚀; 摩擦; 电化学

中图分类号: TG174.2; TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)12-0198-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.12.027

Effect of Substrate Material on Tribocorrosion Performance of Cr/CrN Multilayer Coatings in Seawater

ZHANG Jing^{1,2}, SHAN Lei^{1,3}, SU Xiao-lei^{2,3}, LI Jin-long³, DONG Min-peng³

(1.Mechanical and Electrical Engineering School, Zhejiang Textile and Fashion College, Ningbo 315211, China; 2.School of Materials Science & Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 3.Key Laboratory of Marine Materials and Related Technologies, Chinese Academy of Sciences, Zhejiang Key Laboratory of Marine Materials and Protective Technologies, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering of Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

收稿日期: 2018-04-25; 修订日期: 2018-06-13

Received: 2018-04-25; Revised: 2018-06-13

基金项目: 国家自然科学基金 (51605433)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51605433)

作者简介: 张静 (1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋功能防护材料。

Biography: ZHANG Jing (1992—), Female, Master, Research focus: marine functional protective materials.

通讯作者: 单磊 (1982—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为海洋材料与表面工程。邮箱: shanlei2@126.com

Corresponding author: SHAN Lei (1982—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: marine materials and surface engineering. E-mail: shanlei2@126.com

ABSTRACT: The work aims to discuss the effects of different substrate materials on the tribocorrosion performance of Cr/CrN alternating multilayer composite coatings in seawater, so as to provide references for the selection and application of anti-tribocorrosion material substrate in seawater. Cr/CrN multilayer composite coating was deposited on 316L stainless steel and TC4 titanium alloy substrate by multi-arc ion plating technique. The microstructure of coating materials was characterized by XRD and SEM and the mechanical properties, electrochemical properties and tribological properties of coating materials were analyzed by hardness test, adhesion test, electrochemical analysis, friction and wear test to compare the effects of different substrates on tribocorrosion performance of Cr/CrN multilayer coating in seawater. The hardness of the Cr/CrN multilayer coating with TC4 titanium alloy as the substrate was 1727.2HV_{0.3}, although slightly lower than the hardness of the coating with 316L stainless steel as the substrate (2241.5HV_{0.3}), but it was superior to the coating properties of 316L stainless steel in the membrane-base binding force, the electrochemical performance and the tribological properties of the seawater environment. The initial cracks appeared at 31 N and the extended cracks appeared at 42 N of multilayer coating with TC4 as substrate in the adhesion test, which was larger than 22 N and 35 N of 316L substrate coating. The corrosion potential of TC4 substrate coating was -0.20 V in electrochemical test, and the corrosion potential of the 316L substrate coating was -0.21 V. The average friction coefficient and wear rate of the TC4 substrate coating in seawater were 0.35 and $2.9950 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, respectively, which were less than average friction coefficient of 0.36 and wear rate of $4.9895 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ of 316L substrate coating. TC4 titanium alloy is more suitable to be used as the substrate material of Cr/CrN multilayer coating anti-tribological materials in seawater.

KEY WORDS: Cr/CrN coating; substrate; seawater; anti-tribocorrosion; friction; electrochemical

海洋资源是人类生存和社会进步的重要保障,推动海洋工程装备的发展是加快海洋开发的前提。随着我国远洋航运和深海勘探的快速发展以及海洋环境对润滑油技术的严格制约,各类海工装备均面临着亟需解决的摩擦学问题。因此,研究和开发海水环境下具有良好减摩抗磨功效的先进涂层材料,已成为提升现有海洋环境机械摩擦副零部件服役寿命最有效的技术突破口。近些年,过渡金属氮化物多层涂层因其优异的摩擦学性能和许多单一涂层无法比拟的优点,越来越广泛地应用于海水环境下耐磨蚀摩擦副材料表面,其中以 Cr/CrN 多层涂层的研究最为突出^[1]。

据资料表明^[2-3],在 Cr/CrN 多层涂层中,金属 Cr 层能够减少塑性变形和位错发生,硬质 CrN 层能够提高涂层的抗穿透性,因此其具有较高的硬度和耐磨损性能与较低的内应力和界面应力。此外,多层界面可通过防止柱状晶和粗大晶粒的生长以及阻碍裂纹扩展来提高涂层的强度和抗塑性变形能力^[4-5]。由于涂层在制备时不可能完全致密,必定存在一些针孔、裂纹等缺陷,在应用时,这些缺陷会导致腐蚀介质侵入涂层而到达基体,因此基体材料自身的性能对涂层存在一定的影响。目前,对于海水环境下 Cr/CrN 涂层的研究主要集中在其腐蚀机理和磨损机理等方面,鲜见基体材料对涂层磨蚀性能的影响研究。实验以海洋工程的迫切需求为导向,深入开展 Cr/CrN 多层涂层海水环境磨蚀行为的研究,探索海水环境高性能 Cr/CrN 抗磨蚀涂层的结构设计准则。采用 316L 不锈钢和 TC4 钛合金这两种海洋环境常用材料作为基体来沉积 Cr/CrN 多层涂层,并分别对其进行表征与

测试。通过对其微观结构、力学性能、电化学性能以及摩擦学性能进行对比分析,讨论不同基体材料对 Cr/CrN 多层涂层在海水环境中磨蚀性能的影响,以期海水环境中耐磨蚀材料基体的选择和应用提供参考。

1 试验

1.1 涂层制备

实验采用多弧离子镀设备沉积 Cr/CrN 多层复合涂层。因 316L 不锈钢和 TC4 钛合金具有良好的耐腐蚀性而在海洋领域广泛应用,实验采用粗糙度 R_a 为 40 nm 的 316L 不锈钢和 TC4 钛合金材料作为基体样片(30 mm×20 mm×3 mm)。样片分别用丙酮和无水乙醇各超声清洗 10 min,吹干后放入腔体内靶材前约 10 cm 处。沉积涂层前,将腔体抽真空至 5×10^{-3} Pa 以下。为了完全去除基体表面的氧化物及其他附着物,在通入纯 Ar(0.2 Pa)气氛下,分别在-900、-1100、-1200 V 偏压下进行轰击刻蚀各 2 min。沉积涂层时,由安装在样品夹台上的热电偶测量温度,控温在约 400 ℃,样品台旋转速度为 3 r/min。在纯氩气环境下沉积 10 min 获得 Cr 层,在纯氮气环境下沉积 10 min 获得 CrN 层,两者依次交替,获得多层结构。先沉积 Cr 层以提高涂层与基体间的结合力,总沉积时间为 3 h,工作电流为 65 A,气压为 0.3 Pa,偏压为-20 V。

1.2 涂层的表征与测试

采用 D8 Advance X 射线衍射仪(布鲁克(北京))

科技有限公司)对涂层的物相结构进行表征,在 40 kV 及 40 mA 参数下使用 Cu 靶以掠入射角 2° 以及 $4^\circ/\text{min}$ 的速度在 $20^\circ\sim 90^\circ$ 范围内进行扫描。采用配备有 EDS 的 FEI Quanta FEG 250 场发射扫描电子显微镜(日本日立公司)对涂层的表面及截面微观形貌进行表征。采用 HVS-1000A 型显微硬度计(上海集敏测试仪器有限公司)对涂层的表面硬度进行测定,试验载荷为 300 g,加载时间为 15 s。采用 CSM Revetest 划痕测试仪(瑞士 CSM 仪器股份有限公司)对涂层的结

合力进行测定,最大载荷为 80 N,压头滑动速率为 3 mm/min,划痕长度为 3 mm。

采用 CHI630E 电化学分析仪(上海辰华仪器有限公司)对基体以及涂层材料在海水环境下的电化学性能进行测试,并以饱和甘汞电极作为参比电极,铂片电极作为辅助电极,在 $-1\sim 0.5$ V 范围内以 1 mV/s 进行扫描。为获得稳定且准确的实验结果,每种试样测量 3 次,每次测试前试样在海水溶液中浸泡 1 h。模拟海水的配制参考 ASTM D 1141—98,具体成分见表 1。

表 1 模拟海水成分
Tab.1 Chemical composition of simulated seawater

Component	NaCl	Na ₂ SO ₄	MgCl ₂	CaCl ₂	SrCl ₂	KCl	NaHCO ₃	KBr	H ₃ BO ₃	NaF
Concentration/(g·L ⁻¹)	24.530	4.090	5.200	1.160	0.025	0.695	0.201	0.101	0.027	0.003

采用 UMT-3 多功能摩擦磨损试验机(美国 CETR 摩擦磨损试验机技术有限公司)探究涂层在空气中的摩擦学性能,选用 $\phi 6$ mm 的 Si₃N₄ 陶瓷对偶球进行往复滑动摩擦,恒定载荷为 10 N,滑动距离和滑动频率分别为 5 mm 和 2 Hz,测试时间为 2 h。采用 RTEC MFT5000 往复摩擦磨损试验机(美国 Rtec 仪器有限公司)和该试验机配备的 AutoLab PGSTAT302N 型电化学工作站(瑞士万通(中国)有限公司)对涂层在海水环境下的摩擦学性能和电化学能进行测试,各项实验参数与 UMT-3 摩擦磨损试验参数相同。磨痕剖面轮廓由 Alpha-Step IQ 表面轮廓仪(美国辛耘科技工程有限公司)测定,并通过 $\omega = V/(S \cdot L)$ 计算涂层的磨损率,其中 V 为磨损体积, S 为摩擦滑动长度, L 为法向载荷大小。实验时,在每个试样磨痕的不同位置选取 3 处进行测量,通过求其平均值以减小实验误差。

2 结果与讨论

2.1 微观结构

Cr/CrN 多层涂层的 X 射线衍射图谱如图 1 所示,由图 1 可知,Cr/CrN 多层涂层主要由 CrN 相和 Cr₂N 相组成,同时有少量的 Cr 相衍射峰。涂层以 CrN(200) 为择优取向,其晶面对应的衍射峰强度最高,结晶程度最高,这是由于涂层最外层为 CrN 层造成的。(300)、(311) 等晶面对应的衍射峰强度较弱,表明该衍射峰对应的相结构结晶程度低,单一晶向生长不明显,这是由于涂层中多层界面的存在和各种微晶的混合造成的^[6]。同时,在衍射范围内,金属 Cr 相的衍射峰始终较弱,无单一强峰和单一生长方向。

Cr/CrN 多层涂层的表面微观形貌如图 2 所示。可以看出,涂层表面粗糙,并分布着很多不规则形状的白色颗粒,这是由于在沉积过程中,阴极电弧靶材局部受热蒸发熔化,溅射在基体上。另外,涂层表面

存在少量凹坑,这是由于沉积温度过高或轰击粒子能量过高,引起涂层表面发生反溅射现象,使部分白色颗粒从涂层表面剥离造成的^[7-8]。无论是大颗粒,还是凹坑的存在,都是多弧离子镀技术的典型特征,这在涂层表面粗糙度方面也能得到相应体现^[1]。通过对涂层表面的 EDS 能谱分析可知,其主要成分为 Cr 和 N 元素,并含少量的 C 元素。计算 Cr/N 原子含量比,

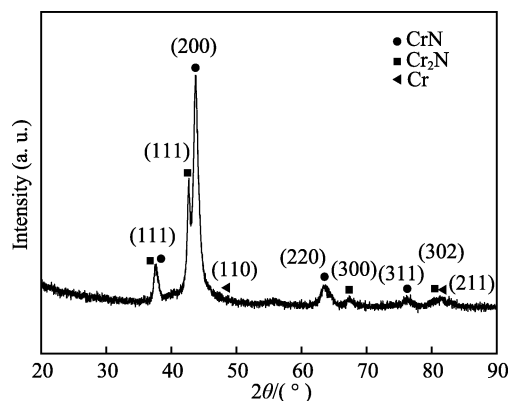


图 1 Cr/CrN 多层涂层的 X 射线衍射图谱
Fig.1 X-ray diffraction patterns of Cr/CrN multilayer coating

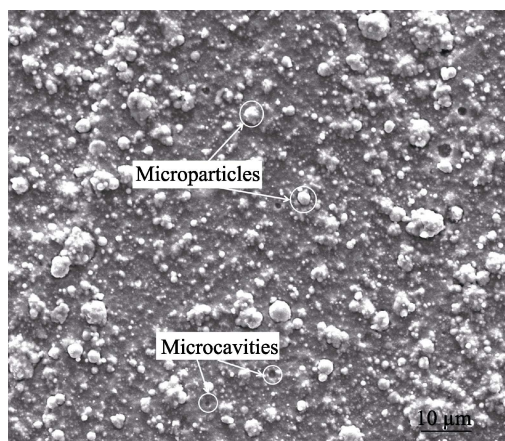


图 2 Cr/CrN 多层涂层的表面微观形貌
Fig.2 SEM image of surface morphology of Cr/CrN multilayer coating

表明涂层以 CrN 为主要相, 含有少量的 Cr₂N 相, 这与 XRD 的结果相一致。涂层表面少量 C 元素的存在为真空腔受导电胶污染所致。沉积过程中, 涂层内部为了减小其应力, 晶体会沿最低应变能的方向生长^[4,9], 且多层界面的存在对柱状晶的生长也具有一定的阻碍作用。因此 Cr/CrN 多层涂层的截面微观形貌图中无明显的柱状晶出现, 且晶界明显, 晶体排列整齐。

2.2 力学性能

涂层硬度是考察其力学性能的重要参数。据资料显示^[10-11]: 在 Cr-N 二元薄膜体系中, 多层界面具有一定的减压作用, 能够显著提高涂层的承载能力, Cr₂N 强化相的产生也有利于提高材料的硬度。不同基体材料的 Cr/CrN 多层涂层的显微硬度值见表 2, 为了避免涂层的表面缺陷, 保证测量结果的准确性, 每个试样测试 10 次并取其平均值, 且多次测试值的平均偏差均保持在 5% 范围内。从表 2 数据可得出, 以 316L 为基体的 Cr/CrN 多层涂层的平均硬度值为 2241.5HV_{0.3}, 以 TC4 为基体的平均硬度值为 1727.2HV_{0.3}。这表明相比于 TC4 基体, 以 316L 为基体的多层涂层抵抗外界压力的能力更强, 这是由于 316L 不锈钢基体硬度 (≤390HV) 本就高于 TC4 钛合金 (≤300HV)^[12]。涂层与基体间结合力的强弱在很大程度上决定

了涂层的质量, 对于提高涂层的耐磨损和耐腐蚀性能具有重要的意义。不同基体材料的 Cr/CrN 多层涂层结合力测试图如图 3 所示。通过观察涂层划痕形貌, 并结合声波信号分析可发现: 在加载过程中, 以 316L 为基体的 Cr/CrN 多层涂层的初始裂纹发生在约 22 N (L_{c1}), 在 35 N (L_{c2}) 附近声波信号产生较严重波动, 涂层开始出现分层和剥落; 而以 TC4 为基体的 Cr/CrN 多层涂层的初始裂纹发生在约 31 N (L_{c1}), 在 42 N (L_{c2}) 附近涂层开始出现分层。两种基体涂层在划痕内部均出现了明显垂直于压头滑移方向的径向裂纹, 但均未出现完全剥离现象, 表明这两种基体涂层均具有较好的膜-基结合力, 且以 TC4 为基体的 Cr/CrN 多层涂层更优。通过分析, 涂层与基体间内应力的不同是引起结合力存在差异的主要原因, 而内应力是由涂层与基体的热膨胀系数不同引起的, 相近的热膨胀系数有助于涂层结合力的提高。在 0~400 °C 温度范围内, Cr 层涂层、316L 基体和 TC4 基体的平均热膨胀系数分别约为 6.2×10⁻⁶、17.66×10⁻⁶、10.8×10⁻⁶/°C。316L 基体的热膨胀系数远高于 TC4 基体和 Cr 层涂层, 在沉积过程中表现为较大的张应力。这种张应力易引起涂层开裂、起皮甚至剥落, 从而降低涂层的结合力, 有时甚至还会增加涂层的孔隙率, 导致涂层的耐腐蚀性降低^[13]。

表 2 不同基体材料的 Cr/CrN 多层涂层的显微硬度值 (HV)
Tab.2 Microhardness values of Cr/CrN multilayer coatings on different substrate materials (HV)

Substrate materials	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
316L	2172	2307	2195	2249	2236	2278	2309	2193	2271	2205
TC4	1804	1762	1686	1648	1793	1679	1804	1673	1698	1725

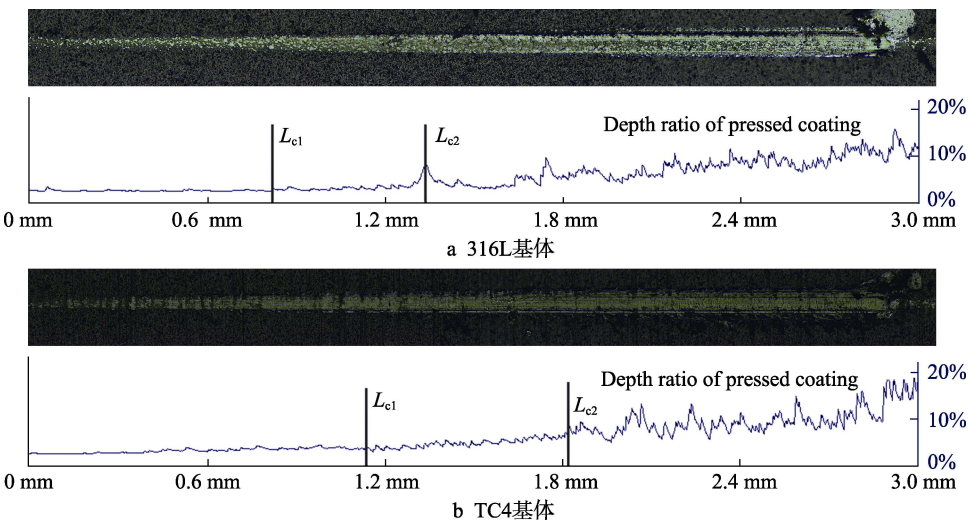


图 3 Cr/CrN 多层涂层结合力测试图
Fig.3 Adhesion test diagram of Cr/CrN multilayer coating: a) 316L matrix, b) TC4 matrix

2.3 电化学性能

为了评价不同基体材料对 Cr/CrN 多层涂层电化

学行为的影响, 在海水环境下对基体及涂层材料进行了开路电位 (OCP) 测试和极化 (Tafel) 测试。316L 和 TC4 基体以及两种基体上沉积 Cr/CrN 多层涂层后

在海水环境下的开路电位曲线和极化曲线如图4所示。由图4a可知,随着时间的推移,试样的开路电位总体呈下降趋势,且存在较小波动,表明试样表面钝化膜被逐渐破坏,且发生了溶解和吸附现象。另外可观察到,沉积有Cr/CrN多层涂层试样最初的路开电位高于无涂层试样,且下降幅度不明显,说明CrN作为钝化层(主要成分为 Cr_2O_3),具有良好的耐腐蚀性能。对于不同基体而言,无论是否沉积有涂层,TC4的开路电位均高于316L,且下降幅度较小。由图4b可知,无涂层和有涂层的316L试样在海水环境下的腐蚀电位分别为 -0.28 、 -0.21 V,而无涂层和有涂层的TC4试样在海水环境下的腐蚀电位分别为 -0.26 、 -0.20 V。这些数据表明,无论是否沉积有涂层,TC4材料的腐蚀电位均大于316L材料的腐蚀电位。另外,Cr/CrN多层涂层能够使基体材料的腐蚀电位上升,电阻系数增大。在此过程中,试样的阳极极化曲线斜率均大于阴极,表明电极在阳极溶解过程中已处于钝化状态^[14-15]。综上结果表明,相比于316L,以TC4钛合金为基体的Cr/CrN多层涂层表现出更优的电化学性能。其主要原因为涂层在制备过程中不可能做到完全致密,必定存在一些针孔、裂纹等缺陷,这些缺

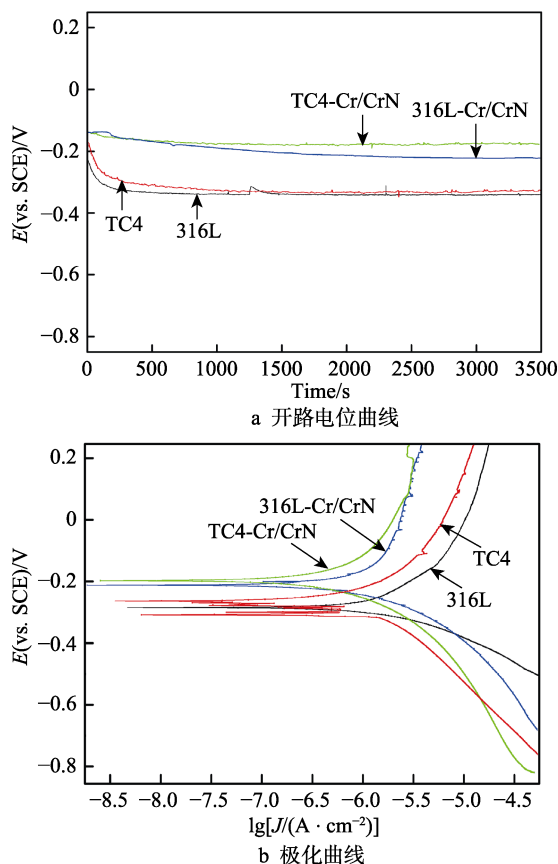


图4 316L和TC4基体及其Cr/CrN多层涂层在海水环境下的开路电位曲线和极化曲线

Fig.4 Open circuit potential curves and polarization curves of 316L and TC4 substrates and their Cr/CrN multilayer coatings in seawater: a. Open circuit potential curves; b. Polarization curves

陷会导致海水溶液侵入涂层而到达基底。又因含Cr、Ti成分的材料均具有较好的耐腐蚀性,TC4属于Ti类材料,而316L只是含有Cr成分,故316L基体的耐腐蚀性能比TC4基体略差,因此以TC4钛合金为基体的Cr/CrN多层涂层具有较好的电化学性能。通过以上结果可得出,海水环境下涂层的耐腐蚀性能受基体材料耐腐蚀性能的影响较大。

2.4 摩擦学性能

大气及海水环境下,Cr/CrN多层涂层与 Si_3N_4 小球对磨时的摩擦系数(COF)曲线如图5所示。由图5可知,随着时间的增长,摩擦系数呈现持续小幅上升的趋势。以316L为基体的涂层材料在大气和海水环境下的平均摩擦系数分别为0.48和0.36,以TC4为基体的涂层材料分别为0.46和0.35。摩擦曲线的波动现象是由于摩擦过程中磨屑不能尽快排出磨痕外,在摩擦副的碾压作用下,部分磨屑发生塑性变形而粘附在磨痕中所致^[16-17]。就摩擦介质而言,海水环境下的摩擦系数较小,且曲线更平滑。这是因为在海水环境下,水分子形成的转移膜可使摩擦表面的剪应力减小,加之海水中的NaCl、 CaCl_2 等物质也可起到一定的边界润滑作用,从而使其摩擦系数降低^[18-19]。在同种介质中,Cr/CrN多层涂层的摩擦系数相差不大,且均有缓慢增大的趋势。这是由于在摩擦时,高压易使海水进入晶界间,从而破坏涂层,导致摩擦过程中粗糙界面不断出现,使摩擦系数曲线平缓且持续上升^[20-22]。综上结论可得,无论在何种环境下,以TC4为基体的Cr/CrN多层涂层材料的摩擦系数均相对较低,表现出更优的摩擦学特性。

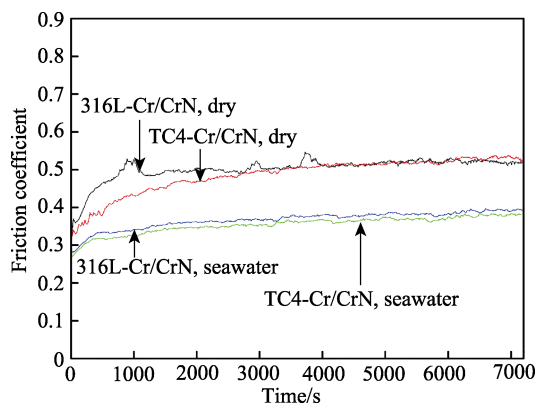


图5 大气及海水环境下Cr/CrN多层涂层的摩擦系数曲线
Fig.5 Friction coefficient curves of Cr/CrN multilayer coatings under atmospheric and seawater condition

为了更好地说明Cr/CrN多层涂层的摩擦学性能,特引入了磨损轨迹轮廓,大气及海水环境下Cr/CrN多层涂层磨痕的截面轮廓如图6所示。由图6可知,大气环境下,以316L和TC4为基体的涂层材料的磨痕宽度分别约为1.056、0.855 mm,深度分别约为1.831、1.697 μm 。海水环境下,以316L和TC4为

基体的涂层材料的磨痕宽度分别约为 0.779、0.765 mm, 深度分别约为 1.281、0.783 μm , 结合涂层厚度可知, 涂层均未被磨穿。通过计算, 得到大气及海水环境下 Cr/CrN 多层涂层的磨损率如图 7 所示。由图 7 可知, 大气环境下以 316L 和 TC4 为基体的涂层材料的磨损率分别为 9.6677×10^{-5} 、 $7.2547 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 海水环境下分别为 4.9895×10^{-5} 、 $2.9950 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。整体来说, 大气环境下的磨损率明显高于海水环境下的值, 以 316L 为基体的涂层的磨损率明显高于 TC4 基体涂层。对涂层磨损后的形貌进行观察, 可发现涂层磨痕表面光滑平整, 无剥落现象, 磨痕边缘有较多的摩擦碎屑, 说明 Cr/CrN 多层涂层结构致密, 且耐磨性良好。根据晶体学原理, 晶粒排列越紧密, 空隙越少, 其摩擦过程以及晶体缺陷对基体造成的影响就越小, 腐蚀介质在晶面的扩散速率也越低^[23]。TC4 钛合金属于双相合金, 晶体致密度 (hcp-Ti) 远大于 316L 不锈钢 (bcc-Cr), 且其比强度更高。当腐蚀介质通过磨痕进入晶体到达基体与涂层间的界面时, 较快的扩散速率也是引起以 316L 不锈钢为基体的 Cr/CrN 多层涂层出现较严重损伤甚至剥落的原因。在此过程中, 摩擦环境下针孔和裂纹等缺陷的存在也对涂层的破损具有一定的促进作用。由以上结论可得

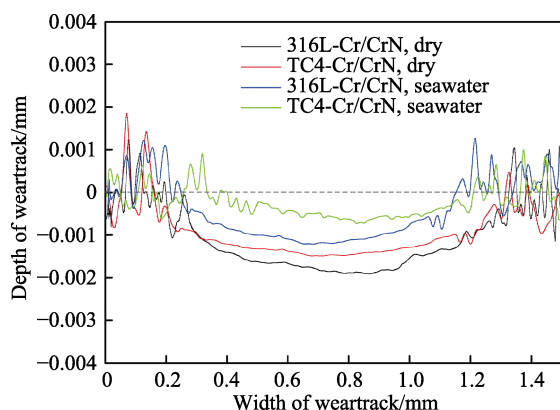


图 6 大气及海水环境下 Cr/CrN 多层涂层磨痕的截面轮廓
Fig.6 Sectional profiles of wear track on Cr/CrN multilayer coatings under atmospheric and seawater condition

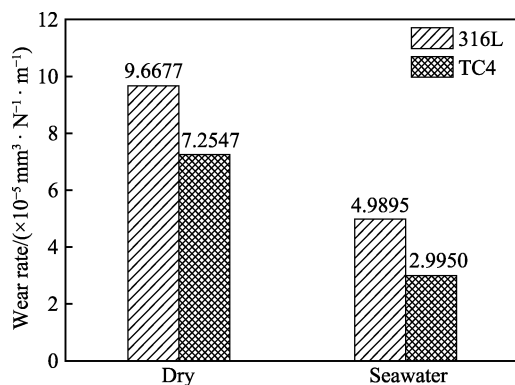


图 7 大气及海水环境下 Cr/CrN 多层涂层的磨损率
Fig.7 Wear rates of wear track on Cr/CrN multilayer coatings under atmospheric and seawater condition

出, 以 TC4 为基体的 Cr/CrN 多层涂层材料的摩擦学性能优于 316L 基体涂层材料。

3 结论

综合分析表明, 尽管以 TC4 为基体的 Cr/CrN 多层涂层的硬度略小于 316L 基体涂层的硬度, 但其在结合力、电化学性能、摩擦学性能等方面均优于 316L 基体涂层。说明 TC4 钛合金更适合作为海水环境用 Cr/CrN 多层涂层耐磨蚀材料的基体材料, 且简单地用硬度等单一指标来衡量涂层在海水环境下的磨蚀性能是不可取的, 还需综合考虑涂层材料的其他特性。

参考文献:

- [1] SONG G H, LUO Z, FENG L, et al. Microstructure and indentation toughness of Cr/CrN multilayer coatings by arc ion plating[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2015, 25(3): 811-816.
- [2] SHAN L, WANG Y X, LI J L, et al. Structure and mechanical properties of thick Cr/Cr₂N/CrN multilayer coating deposited by multi-arc ion plating[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2015, 25(4): 1135-1143.
- [3] SHAN L, ZHANG Y R, WANG Y X, et al. Corrosion and wear behaviors of PVD CrN and CrSiN coatings in seawater[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2016, 26(1): 175-184.
- [4] 蔡志海, 牛庆银, 底月兰, 等. 调制周期对 Cr/CrN 纳米多层膜的结构与性能的影响[J]. 金属热处理, 2011, 36(1): 29-32.
CAI Zhi-hai, NIU Qing-yin, DI Yue-lan, et al. Influence of modulation period on microstructure and properties of Cr/CrN nanoscale multilayer films[J]. Heat treatment of metals, 2011, 36(1): 29-32.
- [5] 谈淑咏, 吴湘君, 张旭海, 等. 层厚比对磁控溅射 Cr/CrN 多层涂层组织和性能的影响[J]. 材料工程, 2014(11): 28-33.
TAN Shu-yong, WU Xiang-jun, ZHANG Xu-hai, et al. Effect of layer thickness ratio on microstructure and properties of magnetron sputtered Cr/CrN multilayer coatings[J]. Journal of materials engineering, 2014(11): 28-33.
- [6] 钟彬, 徐小连, 陈义庆, 等. Cr/CrN 多层膜的结构及腐蚀性能研究[J]. 真空, 2009, 46(5): 22-25.
ZHONG Bin, XU Xiao-lian, CHEN Yi-qing, et al. Study on the microstructure and corrosion behavior of Cr/CrN multilayer thin films[J]. Vacuum, 2009, 46(5): 22-25.
- [7] ZHANG S H, WANG L, WANG Q M, et al. A superhard CrAlSiN superlattice coating deposited by multi-arc ion plating: I. Microstructure and mechanical properties[J]. Surface & coatings technology, 2013, 214: 160-167.
- [8] SHAN L, WANG Y X, ZHANG Y R, et al. Tribocorrosion behaviors of PVD CrN coated stainless steel in sea-

- water[J]. *Wear*, 2016, 362-363: 97-104.
- [9] 叶育伟, 陈颖, 王永欣, 等. 316L 不锈钢表面沉积 CrCN 薄膜的结构及性能研究[J]. *有色金属科学与工程*, 2014, 5(4): 49-54.
YE Yu-wei, CHEN Hao, WANG Yong-xin, et al. Micro-structure and properties of CrCN coating on 316L stainless steel[J]. *Nonferrous metals science and engineering*, 2014, 5(4): 49-54.
- [10] 叶育伟, 陈颖, 王永欣, 等. 不同过渡层对 CrCN 涂层性能的影响[J]. *有色金属科学与工程*, 2014(6): 61-66.
YE Yu-wei, CHEN Hao, WANG Yong-xin, et al. Effects of different interlayers on CrCN coatings properties[J]. *Nonferrous metals science and engineering*, 2014(6): 61-66.
- [11] 李立, 刘峰, 柴立全, 等. 射频磁控溅射 Cr/CrN 膜微结构和力学性能研究[J]. *中国民航大学学报*, 2006, 24(5): 56-59.
LI Li, LIU Feng, CHAI Li-quan, et al. Study on micro-structure and mechanical properties of Cr/CrN multilayered films prepared by RF magnetron sputtering[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2006, 24(5): 56-59.
- [12] 陈君, 阎逢元, 王建章. 海水环境下 TC4 钛合金腐蚀磨损性能的研究[J]. *摩擦学学报*, 2012, 32(1): 1-6.
CHEN Jun, YAN Feng-yuan, WANG Jian-zhang. Corrosion wear properties of TC4 titanium alloy in artificial seawater[J]. *Tribology*, 2012, 32(1): 1-6.
- [13] 金玉萍, 钟良. 影响刀具化学镀层结合力的因素分析[J]. *制造技术与机床*, 2008(12): 119-120.
JIN Yu-ping, ZHONG Liang. Study on the adhesion of chemical plating[J]. *Manufacturing technology & machine tool*, 2008(12): 119-120.
- [14] 汪陇亮, 孙润军, 单磊, 等. CrAlN 涂层海水环境腐蚀磨损行为研究[J]. *摩擦学学报*, 2017(5): 639-646.
WANG Long-liang, SUN Run-jun, SHAN Lei, et al. Tribocorrosion behaviors of CrAlN coating in seawater[J]. *Tribology*, 2017, 37(5): 639-646.
- [15] 陈颖, 叶育伟, 王永欣, 等. CrN 与 Cr-C-N 涂层在海水环境下的微观结构及摩擦学性能[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2015(3): 390-397.
CHEN Hao, YE Yu-wei, WANG Yong-xin, et al. Microstructures and tribological properties under seawater environment of CrN and Cr-C-N coatings[J]. *Materials science and engineering of powder metallurgy*, 2015(3): 390-397.
- [16] 陈君, 李全安, 张清, 等. 海水腐蚀对几种金属材料耐磨性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2014, 35(12): 166-171.
CHEN Jun, LI Quan-an, ZHANG Qing, et al. Effect of corrosion on wear resistance of several metals in seawater[J]. *Transactions of materials and heat treatment*, 2014, 35(12): 166-171.
- [17] 章杨荣, 王永欣, 单磊, 等. 基体偏压对 CrN 涂层结构和海水环境摩擦学性能的影响[J]. *润滑与密封*, 2016, 41(3): 42-47.
ZHANG Yang-rong, WANG Yong-xin, SHAN Lei, et al. Influence of bias voltage on CrN coating structure and tribological behaviors in seawater[J]. *Lubrication engineering*, 2016, 41(3): 42-47.
- [18] 郭峰, 王永欣, 薛群基, 等. 偏压对 CrN 涂层结构与海水环境摩擦学行为的影响[J]. *摩擦学学报*, 2014(6): 608-616.
GUO Feng, WANG Yong-xin, XUE Qun-ji, et al. Effect of bias on microstructure and tribological behavior in artificial seawater of CrN coatings[J]. *Tribology*, 2014(6): 608-616.
- [19] 单磊, 王永欣, 李金龙, 等. TiN, TiCN 和 CrN 涂层在海水环境下的摩擦学性能[J]. *中国表面工程*, 2013, 26(6): 86-92.
SHAN Lei, WANG Yong-xin, LI Jin-long, et al. Tribological property of TiN, TiCN and CrN coatings in seawater[J]. *China surface engineering*, 2013, 26(6): 86-92.
- [20] BAYON R, IGARTUA A, FERNANDEZ X, et al. Corrosion-wear behaviour of PVD Cr/CrN multilayer coatings for gear applications[J]. *Tribology international*, 2015, 42(4): 591-599.
- [21] 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 Jian-zhang, CHEN Bei-bei, YAN Feng-yuan. Influence of seawater constituents on the lubrication effect of seawater[J]. *Lubrication engineering*, 2011, 36(11): 1-5.
- [22] MARTINEZ E, ROMERO J, LOUSA A, et al. Wear behavior of nanometric CrN/Cr multilayers[J]. *Surface & coatings technology*, 2003, 163-164(2): 571-577.
- [23] 刘松, 王寅岗. 氢在钛晶体中扩散行为的第一性原理[J]. *中国有色金属学报*, 2015(11): 3100-3106.
LIU Song, WANG Yin-gang. First-principles of hydrogen diffusion mechanism in titanium crystals[J]. *The Chinese journal of nonferrous metals*, 2015(11): 3100-3106.