

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2015.06.003

# HIPIMS 制备 Cr-B 涂层及摩擦学性能<sup>\*</sup>

张树参<sup>1,2</sup>, 柯培玲<sup>2</sup>, 李晓伟<sup>2</sup>, 李志勇<sup>1</sup>, 汪爱英<sup>2</sup>

(1. 中北大学 材料科学与工程学院, 太原 030051; 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:** 为研究 Cr-B 涂层在多测试环境(干摩擦、蒸馏水和海水环境)下摩擦磨损行为, 采用高功率脉冲磁控溅射沉积技术制备 Cr-B 涂层, 分析涂层成分、结构、微观形貌和力学性能, 重点考察涂层在不同环境下的摩擦磨损性能。结果表明: 制备的 Cr-B 涂层, B/Cr 的原子比为 1.8, 结构主要由 CrB<sub>2</sub> 和自由 Cr 相组成, 硬度和弹性模量分别为 (26.9 ± 1.0) GPa 和 (306.7 ± 6.0) GPa。摩擦测试结果显示: 涂层在干摩擦时具有较高的摩擦因数为 0.75, 发生严重磨损失效, 归因于摩擦过程中涂层剥落而导致严重的磨粒磨损; 与干摩擦相比, 涂层在蒸馏水和海水环境中的摩擦因数均显著降低, 分别为 0.26 和 0.22, 这主要由于蒸馏水和海水的边界润滑作用所导致, 在蒸馏水中摩擦的磨损机制为磨粒磨损, 而在海水中的磨损机制为磨粒磨损和腐蚀磨损的协同作用。

**关键词:** 高功率脉冲磁控溅射; Cr-B 涂层; 微结构; 摩擦性能

**中图分类号:** TG 174.444; TG 115.58 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2015)06-0013-07

## Tribological Property of Cr-B Coatings Prepared by HIPIMS Technique

ZHANG Shu-can<sup>1,2</sup>, KE Pei-ling<sup>2</sup>, LI Xiao-wei<sup>2</sup>, LI Zhi-yong<sup>1</sup>, WANG Ai-ying<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051; 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 Sciences, Ningbo 315201, Zhejiang)

**Abstract:** To investigate the tribological behavior of Cr-B coatings under different environments (dry, distilled water and sea water conditions), the Cr-B coatings were deposited by high power impulsed magnetron sputtering technique. The composition, morphology, microstructure and mechanical properties were analyzed, and the tribological behavior of Cr-B coatings under different environments was mainly investigated. The results show that the deposited binary Cr-B coating exhibits a preferred (101)-texture with boron deficiency (B/Cr atom ratio is about 1.8), the hardness and elastic modulus were (26.9 ± 1.0) GPa and (306.7 ± 6.0) GPa, respectively. The coating under the dry environment displays a high coefficient of friction of 0.75 and wear rate due to the wear debris in the wear track that lead to serious abrasive wear. However, under the distilled water and sea water environments, the coating shows a relatively low friction coefficient of 0.26 in distilled water and 0.22 in sea water because of the formed boundary lubrication. Meanwhile, the wear mechanism under the distilled water environment is abrasive wear, while under the sea water condition, it attributes to the synergistic effect of abrasive wear and corrosion wear.

**Keywords:** high power impulsed magnetron sputtering(HIPIMS); Cr-B coating; microstructure; tribological property

**收稿日期:** 2015-06-24; **修回日期:** 2015-09-11; **基金项目:** \* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB632302); 宁波市重点科技项目(2014B10032); 宁波市国际合作项目(2014D10014)

**通讯作者:** 李志勇(1972-), 男(汉), 教授, 博士; **研究方向:** 焊接电弧物理以及焊接过程控制自动化; **Tel:** (0351) 3921 809; **E-mail:** lizhiyong@nuc.edu.cn

**网络出版日期:** 2015-12-08 16:37; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20151208.1637.006.html>

**引文格式:** 张树参, 柯培玲, 李晓伟, 等. HIPIMS 制备 Cr-B 涂层及摩擦学性能 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 13-19. Zhang S C, Ke P L, Li X W, et al. Tribological property of Cr-B coatings prepared by HIPIMS technique [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 13-19.

## 0 引言

随着海洋事业的飞速发展,海洋装备关键部件长期在海水介质中服役,同时承受着摩擦腐蚀损伤,严重影响其高效、稳定、长寿命运行。采用表面涂层强化技术是延长其使用寿命、实现可靠运行的最有效方法之一。硼基涂层,尤其是基于Cr的Cr-B涂层具有高硬度、高熔点、高温稳定性和耐腐蚀性等综合性能,从而作为海洋装备关键部件的防护涂层显示出良好应用前景<sup>[1-3]</sup>。

Dahm<sup>[3]</sup>等最早于1998年采用CrB<sub>2</sub>陶瓷靶材,通过非平衡直流磁控溅射沉积技术制备了Cr-B涂层,并研究了涂层的结构、力学、摩擦学和腐蚀性能,发现涂层硬度为42~49 GPa,达到超硬涂层水平,涂层在10%的FeCl<sub>3</sub>溶液中表现出比316L不锈钢更好的耐腐蚀性,同时发现具有(001)晶面取向的Cr-B涂层比(101)晶面取向的Cr-B涂层具有更高的耐腐蚀性和耐磨性。Jordan<sup>[4]</sup>等通过同样的方法制备了Cr-B涂层,研究了涂层的腐蚀和钝化机制,研究表明涂层的耐蚀机理源于Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>钝化膜的形成阻碍了涂层的活化腐蚀。Audronis<sup>[5-6]</sup>等分别用脉冲磁控溅射沉积技术和直流磁控溅射技术制备了Cr-B涂层,并对比了它们的结构和性能差异,研究发现,与直流磁控溅射技术相比,脉冲磁控溅射技术较高的离化率,使吸附在涂层表面的原子获得更高的扩散迁移能,因此所制备的涂层更加光滑致密,同时具有更高抗磨损性能。

与直流和脉冲磁控溅射沉积技术相比,高功率脉冲磁控溅射(HIPIMS)技术通过在一个脉冲周期内短时间(100~500 μs)施加一个高的脉冲峰值功率密度(1~3 kW/cm<sup>3</sup>)可以获得更高的等离子体密度和离化率<sup>[7-8]</sup>,因此可以进一步促进吸附原子在涂层表面的扩散迁移,从而使涂层结构更加致密、表面更加光滑。

目前,Cr-B涂层在多环境(干摩擦、蒸馏水和海水环境)下摩擦性能的系统研究还未给予足够的重视<sup>[5,9-10]</sup>。因此,文中采用HIPIMS技术制备Cr-B涂层,分析涂层的化学组成、结构和性能,重点研究不同测试环境对所制备的Cr-B涂层摩擦学性能的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 涂层制备

采用高功率脉冲复合直流磁控溅射技术制

备Cr-B涂层。阴极靶材为CrB<sub>2</sub>(99.9%)化合物靶材。涂层沉积前,基片分别在丙酮、酒精中超声清洗15 min,然后置于真空腔室。通过支架的公转系统将基片移动到正对HIPIMS磁控靶材的位置,腔室气压达到 $5.0 \times 10^{-2}$  Pa时开始加热,温度设定200 ℃,待腔体内真空气压为 $3.0 \times 10^{-3}$  Pa开始沉积。涂层沉积时,首先向腔内通入Ar气(纯度为99.99%),使气压达到1.064 Pa,同时基体上施加300 V负偏压,利用辉光放电对基体刻蚀30 min;然后调整Ar流量为50 L/min,使腔内气压为0.3 Pa,开启高功率脉冲电源,脉宽和频率分别为200 μs和100 Hz,脉冲电压为700 V,复合直流电源电流为1.5 A,沉积Cr-B涂层,沉积过程中,基体偏压固定为-50 V,沉积时间为90 min。

### 1.2 涂层的结构及性能表征

涂层表面元素成分和价态信息借助AXIS UTILITY DLD X射线光电子能谱仪(XPS)分析,测试前对涂层表面进行5 min刻蚀,去除样品表面杂质。表面与截面微观形貌通过日立公司S-4800场发射扫描电镜(FESEM)分析。涂层硬度及弹性模量采用美国MTS公司NANO G200纳米压痕仪测试,它利用动态连续加载卸载模式,为了减小基片对测量结果的影响,取压入深度为涂层厚度1/10处(250 nm)的4个测点的平均值。涂层的物相组成采用德国布鲁克公司D8 Advance X射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)测试K<sub>α</sub>、Cu(40 kV和40 mA),测试的扫描角度范围为10°~100°,步长0.01°。

涂层摩擦磨损性能通过多功能摩擦磨损试验机(Center for Tribology UMT-3)研究,摩擦磨损试验均在温度15 ℃,湿度为75%的条件下进行,采用往复模式进行测试,滑动频率为1 Hz,恒定负载为5 N,滑移往复行程为5 mm,大气环境中干摩擦时间为20 min,蒸馏水和海水环境中摩擦时间为60 min,摩擦副采用Φ6 mm的GCr15钢球。磨痕深度剖面通过Alpha Step IQ轮廓仪测试获得,涂层的磨损率计算公式为:

$$W = V / (S \times F) \quad (1)$$

式中,S是滑动距离,m;F为恒定负载,N;V为磨损的体积,mm<sup>3</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 涂层成分和微观结构

通过 XPS 对涂层表面的成分分析,得到涂层中 B/Cr 的原子比约为 1.8, 偏离靶材化学计量比。Nedfors<sup>[2]</sup> 和 Zhou<sup>[11]</sup> 等采用射频和直流磁控溅射技术所制备的 Cr-B 涂层中均观察到相类似的试验现象。这是由于溅射化合物靶材时,不同元素溅射产额、气体散射方向和自由程不同,导致所制备出的涂层偏离化合物靶材成分。根据西格蒙德的连锁级联理论<sup>[11-12]</sup>,元素 Cr 与 B 相比具有更高的溅射产额,因此制备出的涂层中 B/Cr 原子比小于 2。

图 1 分别给出了 Cr-B 涂层的 XPS 测试结果,其中 Cr2p 的曲线经 Gaussian 拟合后可分为两对

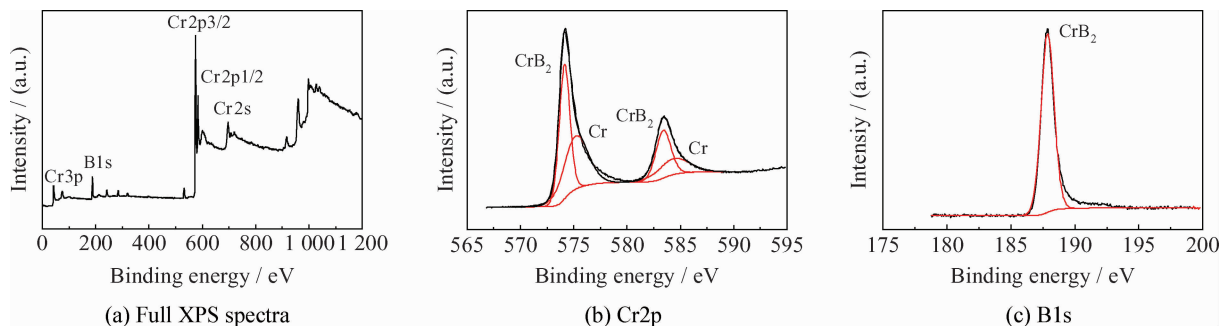


图 1 Cr-B 涂层的 XPS 能谱

Fig. 1 XPS spectra of the Cr-B coating

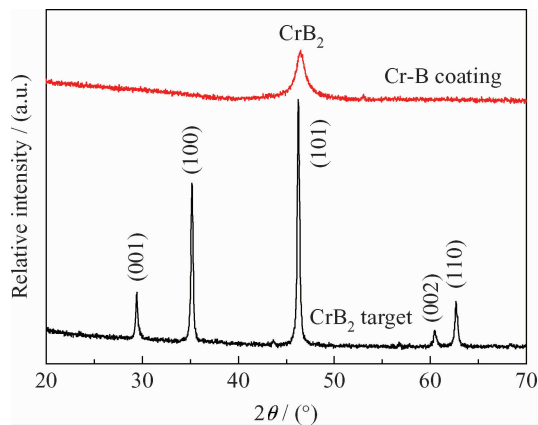


图 2 Cr-B 涂层和 CrB<sub>2</sub> 靶材的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of the Cr-B coating and CrB<sub>2</sub> target

### 2.2 涂层微观形貌

图 3 为 Cr-B 涂层的 SEM 表面和截面形貌。由图可见,涂层的表面和截面均呈现出极致密的

峰,位于 Cr2p<sub>3/2</sub> 574.1 eV 和 Cr2p<sub>1/2</sub> 583.4 eV, Cr2p<sub>3/2</sub> 575.2 eV 和 Cr2p<sub>1/2</sub> 584.3 eV,分别对应 CrB<sub>2</sub> 和自由 Cr<sup>[12]</sup>。B1s 的曲线经 Gaussian 拟合后只有一个峰,位置在 187.9 eV,对应于 CrB<sub>2</sub><sup>[13]</sup>。因此涂层的结构组成主要为 CrB<sub>2</sub> 和少量的自由 Cr。根据涂层中 B/Cr 的原子比约为 1.8,可以推算得到涂层中 CrB<sub>2</sub> 相与单质 Cr 相的相对含量(摩尔比)近似为 9:1。

图 2 为二元 Cr-B 涂层和 CrB<sub>2</sub> 靶材的 XRD 图谱。由图可见,靶材的所有衍射峰均为 CrB<sub>2</sub> 相,无其它杂质相存在。对于所制备的涂层,尽管 B/Cr 原子比为 1.8,但 XRD 显示仍为具有(101)晶面取向的 CrB<sub>2</sub>,这是由于涂层中还含有少量的自由 Cr。但 XRD 并未检测到 Cr 的衍射峰,这是由于自由 Cr 含量较少,小于 XRD 检测下限。

结构,与前期 Audronis 和 Choi 等的实验现象相吻合<sup>[6,14]</sup>。这是由于高功率脉冲磁控溅射技术具有高的离化率,在偏压的作用下,沉积离子到达基片时总的动能增加,破坏了柱状晶结构;同时,涂层表面的吸附原子具有高的扩散迁移能,促使涂层生长过程中的原子扩散运动加剧,填补了生长过程中的空穴等缺陷,从而使涂层生长趋向致密化。此外,由图 3(b)观察到,涂层厚度约为 2.4 μm,对应的沉积速率为 26 nm/min,这一沉积速率与直流磁控溅射技术相当,说明了采用高功率脉冲复合直流磁控溅射技术解决了目前高功率磁控溅射普遍存在的沉积速率低的问题。

### 2.3 涂层力学性能

涂层力学性能的测试结果如图 4 所示。在图 4(a)中,纳米压痕 4 次测量的加载卸载曲线基本吻合,说明涂层对压力的响应具有很高的重复性,测试结果稳定可靠。由图 4(b)可见,在较小

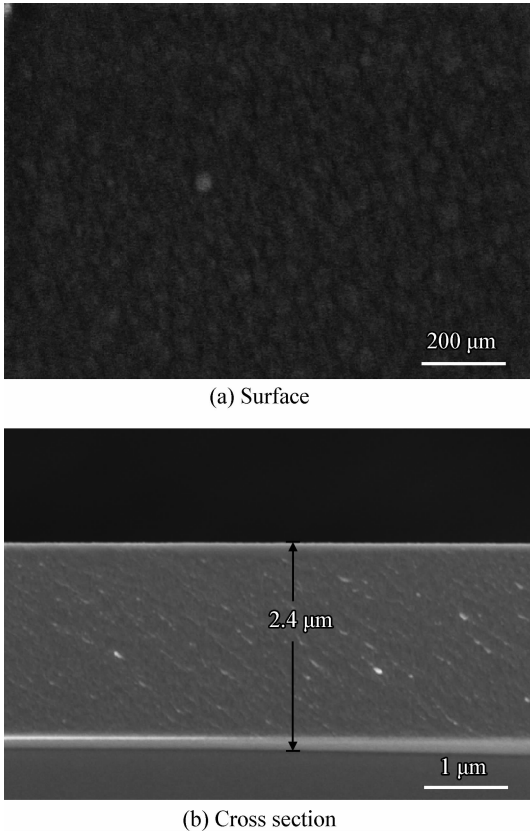


图3 Cr-B涂层的表面和截面形貌

Fig. 3 Surface and cross section morphologies of the Cr-B coating

的压痕深度(0~50 nm)范围内,硬度随着压痕深度的增加而增加,这是由于随着涂层被压实,增加了变形区的缺陷密度,对晶粒内原有的统计位错的运动产生阻碍,增加了涂层变形的阻力,使涂层硬度提高;随着压痕深度的进一步增加,硬度开始快速降低,这一现象是典型的压痕尺寸效应,可以通过应变梯度理论来解释<sup>[15]</sup>:涂层变形量超过一定值时,几何位错开始减小,因此对统计位错的阻碍作用降低,硬化效应削减;在150~250 nm深度范围内出现一个较大的平台,该区域深度小于膜厚的1/10,测得的硬度不受基片的影响,可以表示涂层的本征硬度<sup>[16]</sup>。弹性模量随压头压入深度变化具有相似的变化规律。因此,HIPIMS制备的涂层平均硬度为(26.9±1.0) GPa,弹性模量为(306.7±6.0) GPa。此外,Cr-B涂层的 $H/E^*$ 和弹性恢复能 $W_e$ 值分别为0.09和59.35%。Musil J等研究表明,当涂层的 $H/E^* > 0.1$ 和 $W_e > 60\%$ 时,显示出较好的韧性<sup>[17-19]</sup>。而采用HIPIMS制备的Cr-B涂层其 $H/E^*$ 、 $W_e$ 非常接近文献中所提

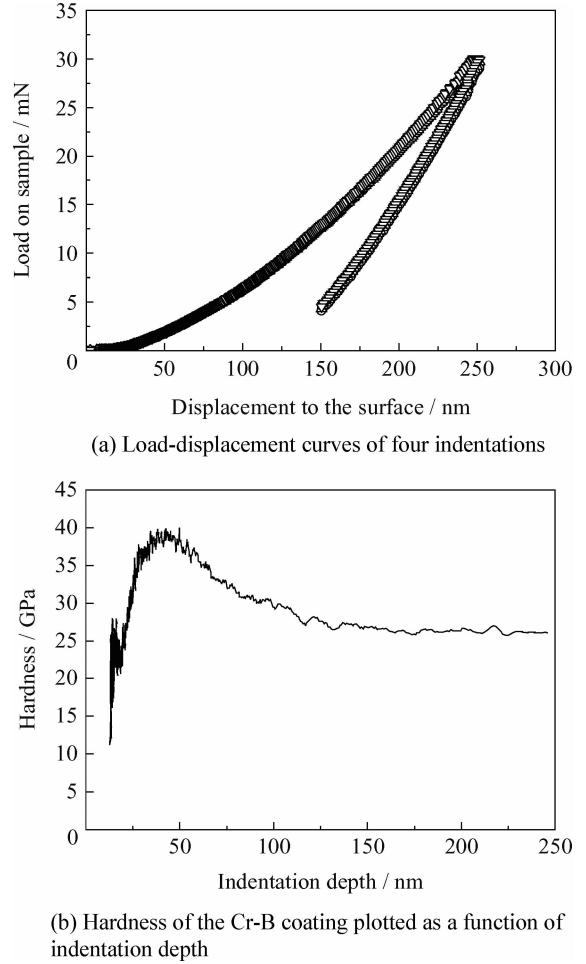


图4 纳米压痕测试结果

Fig. 4 Results of the nano-indentations test

出的标准,说明涂层韧性较好。

## 2.4 涂层的摩擦学性能

图5为涂层在干摩擦、蒸馏水和海水环境下摩擦测试结果。结果表明:所有环境中的摩擦均分为两个阶段,磨合阶段和稳定阶段。干摩擦磨合阶段摩擦因数逐渐升高,这是由于摩擦磨损过程中,涂层和摩擦副上的微凸体互相咬合,在剪切应力的作用下剥落,形成游离的第三体颗粒,这些硬质颗粒在摩擦过程中不断地压入涂层表面,在摩擦副相对运动过程中,在涂层表面形成大量的犁沟(如图7(a)),增加了涂层表面粗糙度,导致摩擦因数升高。而蒸馏水和海水环境下磨合阶段摩擦因数逐渐降低,这是由于摩擦起始阶段涂层和摩擦副上的微凸体发生机械咬合,相对滑动须克服一定的剪切应力,所以摩擦因数较高,当这些微凸体在剪切应力的作用下剥落后,形成的颗粒部分可能与水发生水解反应<sup>[20-21]</sup>,降

低了涂层和摩擦副之间的机械互锁几率,同时水能在涂层和摩擦副之间形成吸附膜或转移膜,避免了涂层与摩擦副的直接接触,极大地降低了摩擦过程的剪切应力,因此表现出较低的摩擦因数。此外,海水中含有  $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{NaCl}$  和  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  等润滑相,进一步起到了润滑的作用,因此与蒸馏水中的摩擦相比,表现出更低的摩擦因数。

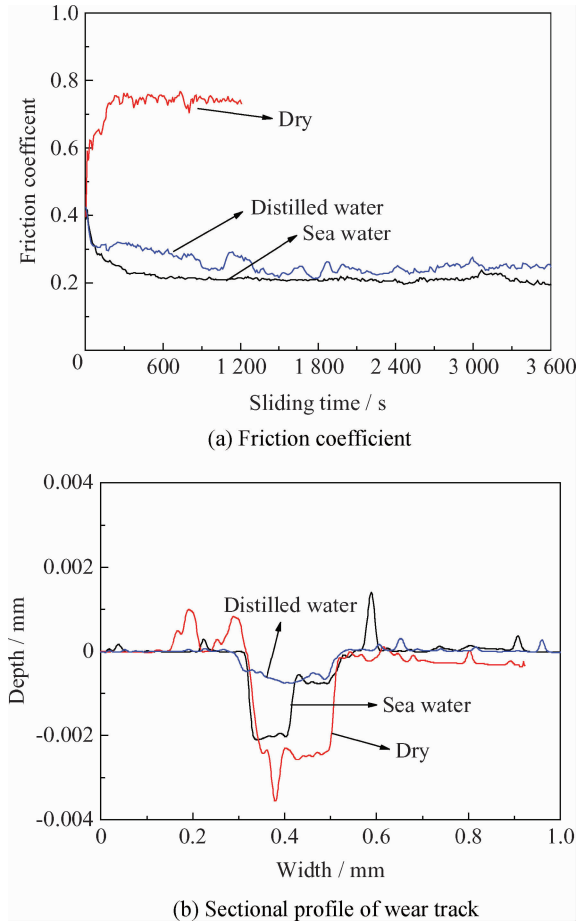


图 5 Cr-B 涂层在干摩擦、海水和蒸馏水环境下的摩擦曲线和摩擦后的磨痕轮廓

Fig. 5 Friction behavior and sectional profile of the wear track on Cr-B coating in dry, distilled water and sea water conditions

图 5(b)为 Cr-B 涂层在蒸馏水和海水中摩擦 60 min、干摩擦 20 min 后的磨痕截面轮廓。结果显示,干摩擦局部区域已经磨穿,海水中摩擦的磨痕轮廓比蒸馏水中的更深。主要原因是由于在海水环境中摩擦时,海水中具有浓度很高的  $\text{Cl}^-$ ,对钝化层有很强的破坏性,导致其在对磨时容易分解,产生新鲜表面暴露在腐蚀环境中;再者,涂层上的活性物质在腐蚀介质中发生阳极溶

解,加速了磨损,而磨损的加剧又导致缺陷增加,加快腐蚀速度。因此,在海水中 Cr-B 涂层腐蚀和磨损的协同作用导致高的磨损率。

图 6 为计算后得到的不同环境下 Cr-B 涂层的摩擦因数和磨损率,其中将涂层在稳定阶段的摩擦因数平均值作为平均摩擦因数,干摩擦时,稳定阶段为 300~1 200 s,平均摩擦因数为 0.75;水环境和海水环境下的摩擦稳定阶段为 600~3 600 s,平均摩擦因数分别为 0.26 和 0.22。其中在水环境中摩擦具有最小的磨损率为  $4.25 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 。

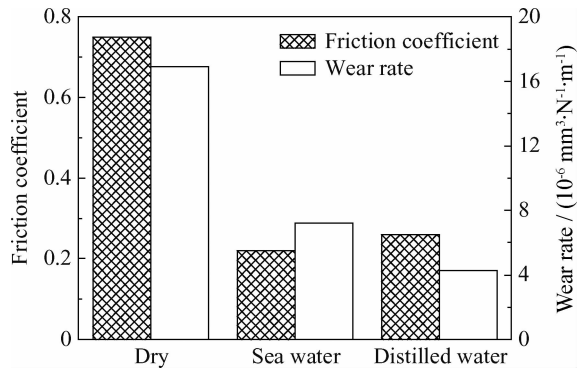


图 6 Cr-B 涂层在干摩擦、海水摩擦和蒸馏水摩擦中的摩擦因数和磨损率

Fig. 6 Friction coefficient and wear rate of the Cr-B coating in dry, distilled water and sea water conditions

图 7 为不同测试环境下涂层的磨痕形貌,从干摩擦到海水环境和蒸馏水环境中的摩擦,磨痕宽度逐渐减小,说明磨损程度逐渐减小。图 7(a)中干摩擦磨痕中出现大量的犁沟,且局部区域涂层出现剥落,这归因于摩擦涂层和对偶球之间直接接触,摩擦过程中产生游离的第三体颗粒,发生严重的磨粒磨损,同时摩擦过程中较大的剪切应力使脆性较大的 Cr-B 陶瓷涂层破裂剥落。所以干摩擦条件下, Cr-B 涂层的摩擦磨损机制为磨粒磨损。图 7(b)海水环境下摩擦后磨痕的放大形貌中观测到磨痕处很多麻坑,这归因于海水具有一定的腐蚀性,虽然 Cr-B 涂层能在表面形成  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  致密的钝化膜而具有一定的耐蚀性能,但海水中  $\text{Cl}^-$  对钝化层具有很强的破坏作用,导致涂层上的活性物质在腐蚀介质中发生阳极溶解,形成点蚀坑,同时摩擦过程中产生的硬质磨粒在循环应力的作用下不断地对点蚀坑进行微切削,使之不断变大,最后形成麻坑<sup>[21]</sup>。图 7(c)中,蒸馏水环境中磨痕形貌并没有出现剥落或麻



坑,表现出较好的摩擦磨损特性。蒸馏水环境和海水环境中的摩擦,磨痕形貌中同样出现大量细的犁沟,这是由于蒸馏水和海水并没有将两摩擦表面

完全分开,润滑的形式为边界润滑。蒸馏水环境中的摩擦磨损机理为磨粒磨损,海水中的摩擦磨损机制为腐蚀磨损、磨粒磨损的综合作用。

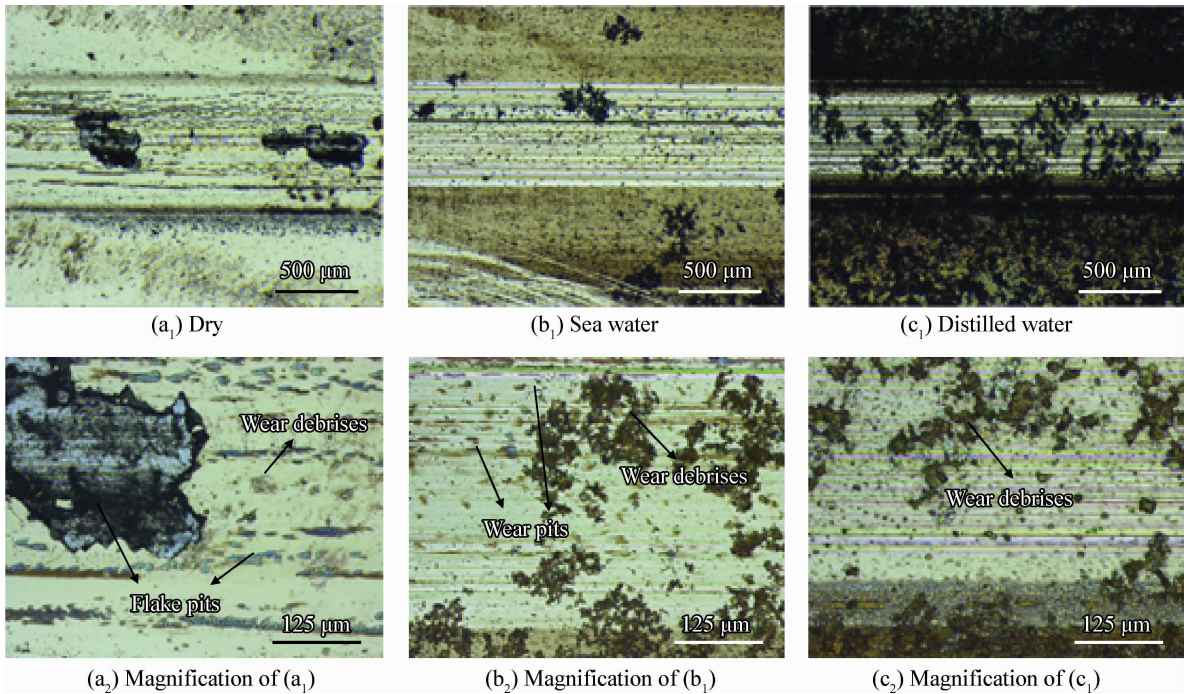


图7 Cr-B涂层在干摩擦、海水和蒸馏水环境下摩擦后的磨痕形貌

Fig. 7 Morphologies of wear track on the Cr-B coating in dry, sea water and distilled water conditions

### 3 结论

(1) 通过高功率脉冲磁控溅射制备了表面光滑结构致密的Cr-B涂层。涂层硬度和弹性模量分别为 $(26.9 \pm 1.0)$  GPa和 $(306.7 \pm 6.0)$  GPa,且具有良好的韧性(接近 $H/E^* > 0.1, W_c > 60\%$ )。

(2) 相同溅射条件下,元素Cr与B相比具有更高的溅射产额,因此制备出的涂层中成分B/Cr的原子比为1.8,表现为B缺失,XRD分析涂层为具有(101)晶面取向的 $\text{CrB}_2$ ,经XPS分析,涂层中还含有少量的自由Cr。

(3) Cr-B涂层的摩擦磨损行为与测试环境有很大关系,涂层在干摩擦时具有较高的摩擦因数和磨损率,分别为0.75和 $1.69 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,发生严重磨损失效,归因于摩擦过程中涂层剥落而导致严重的磨粒磨损;与干摩擦相比,涂层在蒸馏水和海水环境中的摩擦因数和磨损率均显著降低,水摩擦分别为0.26和 $4.25 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,海水中摩擦分别为0.22和 $7.2 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,这主要由于海水和蒸馏水的边界润滑作用所导致,在蒸馏水中摩擦的磨损机制为磨粒磨损,而

在海水中的磨损机制为磨粒磨损和腐蚀磨损的协同作用。

### 参考文献

- [1] Duan Y H, Sun Y, Guo Z Z, et al. Elastic constants of  $\text{AlB}_2$ -type compounds from first-principles calculations [J]. Computational Materials Science, 2012, 51(1): 112-116.
- [2] Nedfors N, Primetzhofner D, Wang L P, et al. Characterization of magnetron sputtered Cr-B and Cr-B-C thin films for electrical contact applications [J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 266: 167-176.
- [3] Dahm K L, Jordan L R, Haase J, et al. Magnetron sputter deposition of chromium diboride coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 1998, 108(98): 413-418.
- [4] Jordan L R, Betts A J, Dahm K L, et al. Corrosion and passivation mechanism of chromium diboride coatings on stainless steel [J]. Corrosion Science, 2005, 47(5): 1085-1096.
- [5] Audronis M, Rosli Z M, Leyland A, et al. Tribological behaviour of pulsed magnetron sputtered  $\text{CrB}_2$  coatings examined by reciprocating sliding wear testing against aluminium alloy and steel [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(8): 1470-1478.
- [6] Audronis M, Kelly P J, Leyland A, et al. Microstructure of direct current and pulse magnetron sputtered Cr-B coat-

- ings [J]. *Thin Solid Films*, 2006, 515(4): 1511-1516.
- [7] Sarakinos K, Alami J, Konstantinidis S, et al. High power pulsed magnetron sputtering: A review on scientific and engineering state of the art [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2010, 204(11): 1661-1684.
- [8] 李小婵, 柯培玲, 刘新才, 等. 复合高功率脉冲磁控溅射Ti的放电特性及薄膜制备 [J]. *金属学报*, 2014, 50(7): 879-885.
- Li X C, Ke P L, Liu X C, et al. Discharge characteristics of Ti and film preparation using hybrid high power impulse magnetron sputtering [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 50(7): 879-885 (in Chinese).
- [9] Cheng C H, Lee J W, Ho L W, et al. Microstructure and mechanical property evaluation of pulsed DC magnetron sputtered Cr-B and Cr-B-N films [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2011, 206(7): 1711-1719.
- [10] Mallia B, Stüber M, Dearnley P A, et al. Character and chemical-wear response of high alloy austenitic stainless steel (Ortron 90) surface engineered with magnetron sputtered Cr-B-N ternary alloy coatings [J]. *Thin Solid Films*, 2013, 549(52): 216-223.
- [11] Zhou M, Nose M, Makino Y, et al. New Cr-B hard coatings by r. f. -plasma assisted magnetron sputtering method [J]. *Thin Solid Films*, 1999, 343-344: 234-237.
- [12] Japan Society for the Promotion of Science 131st Committee (Thin Film). *Thin Film Handbook* [M]. Tokyo: Ohmsha, 1983.
- [13] Moulder J F, Stickle M F, Sobol P E, et al. *Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy* [M]. 3rd ed. Eden Prairie: Perkin-Elmer Corporation, 1992.
- [14] Choi H S, Park B, Lee J J, et al. CrB<sub>2</sub> coatings deposited by inductively coupled plasma assisted DC magnetron sputtering [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2007, 202(4/5/6/7): 982-986.
- [15] Gao H, Huang Y, Nix W D, et al. Modeling plasticity at the micrometer scale [J]. *Die Naturwissenschaften*, 1999, 86(11): 507-515.
- [16] Liu Y M, Jiang C L, Pei Z L, et al. Microstructure and properties of AlB<sub>2</sub>-type WB<sub>2</sub> thin films deposited by direct-current magnetron sputtering [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2014, 245(5): 108-116.
- [17] Musil J. Hard nanocomposite coatings: Thermal stability, oxidation resistance and toughness [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2012, 207(9): 50-65.
- [18] Musil J, Sklenka J, Cerstvy R, et al. Two-phase single layer Al-O-N nanocomposite films with enhanced resistance to cracking [J]. *Surface & Coatings Technology*, 206(19/20): 4230-4234.
- [19] Musil J, Sklenka J, Cerstvy R, et al. Transparent Zr-Al-O oxide coatings with enhanced resistance to cracking [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2012, 206(8): 2105-2109.
- [20] 谢红梅, 聂朝胤. TiN, CrN 的环境摩擦磨损对比研究 [J]. *新技术新工艺*, 2010(6): 63-66.
- Xie H M, Nie C Y, et al. Study on abrasion comparison between TiN and CrN films under different abrasion conditions [J]. *New Technology and New Process*, 2010(6): 63-66 (in Chinese).
- [21] 付英英, 李红轩, 吉利, 等. CrN 和 CrAlN 薄膜的微观结构及在不同介质中的摩擦学性能 [J]. *中国表面工程*, 2012, 25(6): 34-41.
- Fu Y Y, Li H X, Ji L, et al. Microstructure and tribological properties of CrN and CrAlN films under different contact conditions [J]. *China Surface Engineering*, 2012, 25(6): 34-41 (in Chinese).

(责任编辑: 常青)