

多弧离子镀制备 TiSiN 涂层的结构及其摩擦学行为^{*}

姚懿容^{1,2}, 李金龙², 朱丽慧¹, 王永欣², 叶育伟², 牛瑞丽¹

(1. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200072; 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: 为了研究 Si 含量对 TiSiN 涂层性能的影响, 采用多弧离子镀技术在 Ti6Al4V 表面制备了不同 Si 含量(质量分数)的 TiSiN 涂层。利用扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、电子能谱仪(EDS)、X 射线光电子能谱仪(XPS)纳米压痕仪、摩擦磨损试验机表征其表面形貌、成分、力学性能及摩擦学性能。结果表明:随着靶材中 Si 含量的增加, 涂层硬度从 35 GPa 增加到 42 GPa。在 TiSiN 涂层中 Si 元素主要以 Si_3N_4 非晶态存在, 形成了非晶 Si_3N_4 包裹 TiN 纳米晶结构。当靶材中 Si 含量为 8% 时, 涂层在海水中的磨损率约为 $2.1 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 此时涂层的摩擦性能最好。

关键词: TiSiN 涂层; 多弧离子镀; 海水; 摩擦学性能

中图分类号: TG174.444; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)06-0020-08

Structure and Tribological Properties of TiSiN Coatings Prepared by Arc Ion Plating

YAO Yi-rong^{1,2}, LI Jin-long², ZHU Li-hui¹, WANG Yong-xin², YE Yu-wei², NIU Rui-li¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072; 2a. Key Laboratory of Marine Materials and Related Technology, 2b. Zhejiang Key Laboratory of Marine Materials and Protection Technology, Ningbo Institute of Material Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, Zhejiang)

Abstract: To study the effects of the Si content on the properties of TiSiN coatings. TiSiN coatings were prepared on Ti6Al4V by arc ion plating. Surface morphology, microstructures, phase compositions and mechanical properties of the TiSiN coatings with different Si content were characterized by SEM, TEM, EDS, XPS, nanoindentation and tribometer. The results show that the increase of the Si content causes a more fine-grained densification microstructure. At the same time, the hardness increases from about 35 GPa to 42 GPa. The Si element in the TiSiN coatings exist as amorphous Si_3N_4 and the TiN is wrapped by amorphous Si_3N_4 in the TiSiN coatings. When the Si content being 8%, the wear rate of the TiSiN coatings is $2.1 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, exhibiting the best tribological properties.

Keywords: TiSiN coating; arc ion plating; seawater; tribological properties

0 引 言

海洋工程装备及舰船等关键零部件承受摩擦、腐蚀和生物污损交互作用, 在海洋工程装备及舰船关键零部件表面进行镀膜处理是完善其耐磨和耐蚀性能的有效手段。氮基涂层由于硬度高, 摩擦因数低等优势被广泛的应用在减摩和

抗腐蚀环境中^[1]。例如, TiN 涂层由于较好的硬度而广泛应用在切削刀具、抗磨损部件等工业领域^[2-3]。然而纯 TiN 由于高温抗氧化性能较差, 当处于高温环境时容易脱落, 使其应用受限^[4]。

为了进一步提高 TiN 的抗高温氧化性能和力学性能, 1992 年, 李世直等人最早通过添加 Si 元

收稿日期: 2015-06-25; **修回日期:** 2015-11-04; **基金项目:** * 国家自然科学基金(51575510)

通讯作者: 李金龙(1974—), 男(汉), 副研究员, 博士; **研究方向:** 表界面化学与物理; **Tel:** (0574) 8668 5175; **E-mail:** lj@nimte.ac.cn

网络出版日期: 2015-12-08 16:06; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20151208.1606.004.html>

引文格式: 姚懿容, 李金龙, 朱丽慧, 等. 多弧离子镀制备 TiSiN 涂层的结构及其摩擦学行为 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 20-27.
Yao Y R, Li J L, Zhu L H, et al. Structure and tribological properties of TiSiN coatings prepared by arc ion plating [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 20-27.

素利用化学气相沉积(CVD)方法制备了 TiSiN 纳米复合涂层,使其硬度从 28 GPa 提高到 50 GPa 左右^[5]。但 CVD 制备工艺由于较高的沉积温度和沉积过程中毒性气体(SiCl_4)对环境的污染,限制了其工业化应用^[6]。而物理气相沉积由于直接气化镀料,因此具有镀料原子、离子迁移率较高,沉积过程简单、无污染、耗材少、成膜致密、结合力好等优点。此外,磁控溅射的沉积温度较(350 °C) CVD 的沉积温度(600 °C)低^[7-8],使得其在制备 TiSiN 涂层时更有优势。Chio^[9]等人采用离子镀物理气相沉积技术成功制备了硬度高达 46 GPa 的 TiSiN 涂层。TiSiN 涂层作为硬质耐高温涂层,目前研究主要集中于致硬机理和耐高温性能上^[7,10],而对该涂层在海水环境下的耐磨损性能和耐腐蚀性能研究较少。

文中采用多弧离子镀技术,通过控制靶材中的 Si 含量来沉积 TiSiN 涂层,研究了不同 Si 含量对 TiSiN 涂层结构以及摩擦磨损性能的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用 15 mm×15 mm×4 mm 的 Ti6Al4V 片作为基底。在镀膜之前,先对基体进行抛光处理,并分别在乙醇和丙酮中进行超声清洗 10 min。采用多弧离子镀设备(Hauzer Flexicoat 850)制备涂层,涂层沉积过程中通过溅射 3 种不同 Si 含量(质量分数:5%,8%和10%)TiSi 靶来控制涂层中的 Si 含量。在沉积前,保持腔体温度为 450 °C,压力为 3×10^{-2} Pa,对于每一种硅含量靶材制备的涂层,用 Ar (99.99%)离子在 3 种负偏压下(−900,−1 100 和 −1 200 V)依次对基体进行清洗,时间各为 2 min。之后在基体负偏压为 −40 V、温度 450 °C、纯 N_2 气压 3×10^{-2} Pa 条件下沉积 10 min 形成该偏压下一定厚度的 TiSiN 过渡层。最后在其他沉积条件不变,基体偏压为 −30 V 条件下沉积 1 h。

1.2 表征与分析

分别用场发射扫描电镜(EV018)和蔡司大腔体扫描电镜(Zeiss)观察涂层的表面、截面和磨痕形貌。用 XRD(Bruker D8 X-ray facility),使用 Cu 靶($\lambda = 0.154 2 \text{ nm}$),扫描角度 $20^\circ \sim 90^\circ$ 对涂层的相结构进行表征。

涂层的化学成分用 XPS (AXIS-ULTRA,

Kratos)进行表征。采用纳米压痕仪(MTS Nano G200),通过连续压入法测试涂层的硬度。同时,采用多功能摩擦磨损试验机(Rtec)进行摩擦试验,用 $\Phi 3 \text{ mm}$,硬度约为 28 GPa 的 SiC 球作为摩擦副,分别在大气、人工海水(根据 ASTM D 1141-98 标准配备)条件下进行球-盘往复滑动摩擦。摩擦磨损试验条件如下:载荷 10 N、频率 2 Hz、时间 90 min、单向行程 5 mm,磨痕深度由 Alpha-Step IQ 轮廓仪测试获得。磨损率 K ($\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$)则是根据经典公式计算:

$$K = \frac{V}{F \times S} \quad (1)$$

其中, F 是加载力,N; S 是滑动行程,m; V 是磨损体积(根据划痕面积积分计算), mm^3 。

2 结果与讨论

2.1 涂层的组织及形貌

TiSiN 涂层形貌见图 1。由图 1 可知:用多弧离子镀技术制备的涂层表面存在一些颗粒较大的液滴,研究结果和陈颢^[11]等人报道的结果相一致,而这种大液滴形成原因主要是:由于在真空条件下金属阴极和触发电极在高压下触发放电,在阴极表面形成产生金属等离子体的阴极斑点,放电产生的高能量使金属靶材局部融化,电离,形成高密度的金属等离子体。正离子,负离子,液滴和中性金属蒸汽原子组成等离子体。离化局域的空间电荷,是导致加速区强电场的主要原因,该电场一方面使电子加速离开阴极表面;另一方面也使得离子回归阴极表面,该回归的粒子流在一定程度上可能促使阴极表面温度上升。此外,回归的粒子流对熔池表面的冲击作用是液滴喷溅的另一个原因。因此,在基片上只能接收到离子和液滴^[12]。

同时由图 1 可知:随着靶材中 Si 含量的变化,涂层表面的形貌变化不大。当靶材中 Si 含量为 5%时,涂层呈现明显的柱状结构,当靶材中 Si 含量继续增加时(8%和 10%),涂层逐渐致密,柱状结构逐渐弱化。

图 2(a)~(c)分别是当靶材中 Si 含量为 8%时涂层的 Ti2p, Si2p, N1s 峰的 XPS 结果。从图的结果中可以看出:Ti2p 峰在 455.1, 462.7 和 464.3 eV 分别和 TiN , Ti_2O_3 和 TiO_2 ^[13-15] 对应。Si2p 峰在 101.7 eV 和 102.2 eV 分别对应于 Si_3N_4

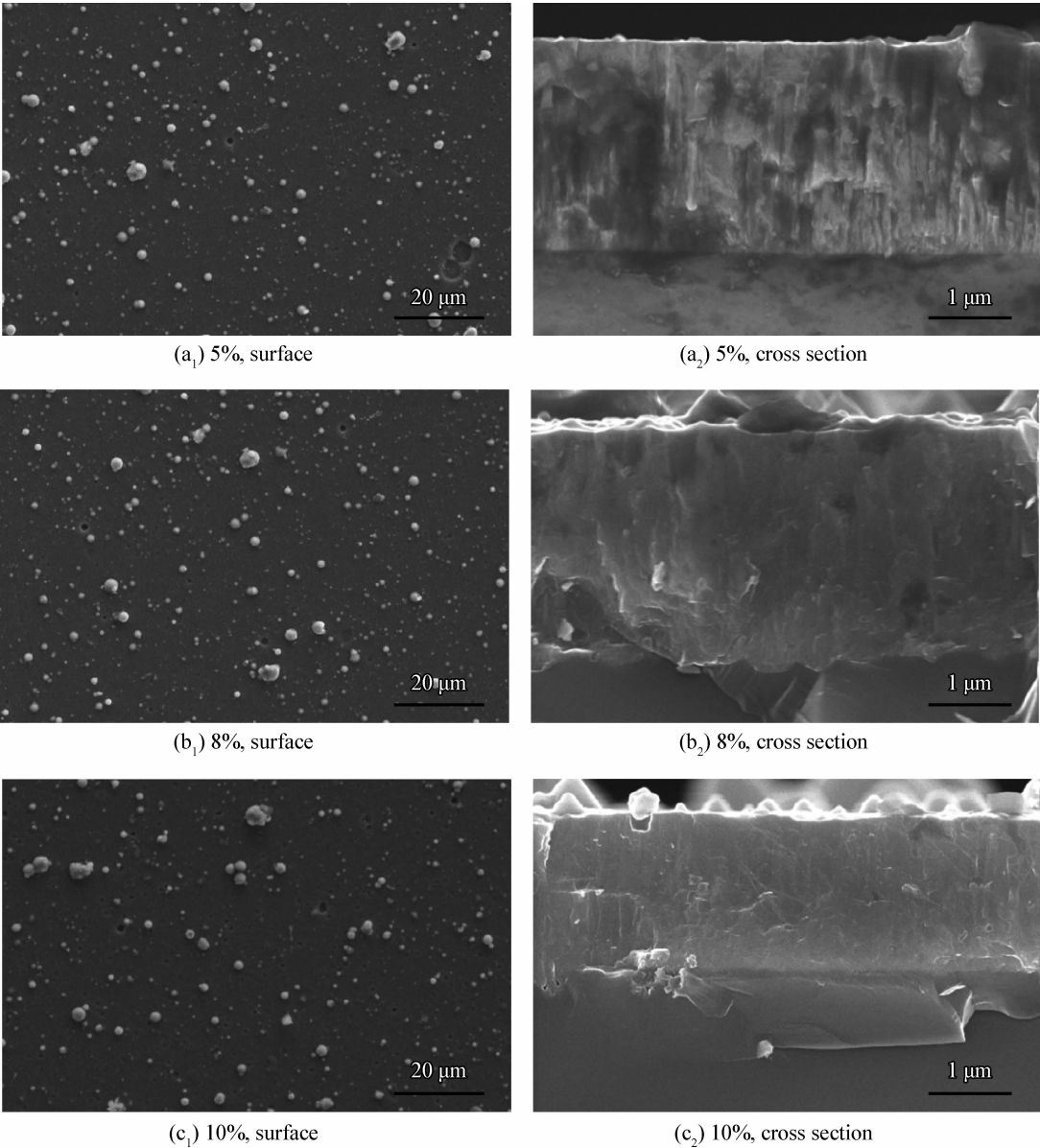


图 1 不同 Si 含量靶材制备 TiSiN 涂层的表面和截面形貌

Fig. 1 Surface and cross section morphologies of the TiSiN coatings with different Si content in target

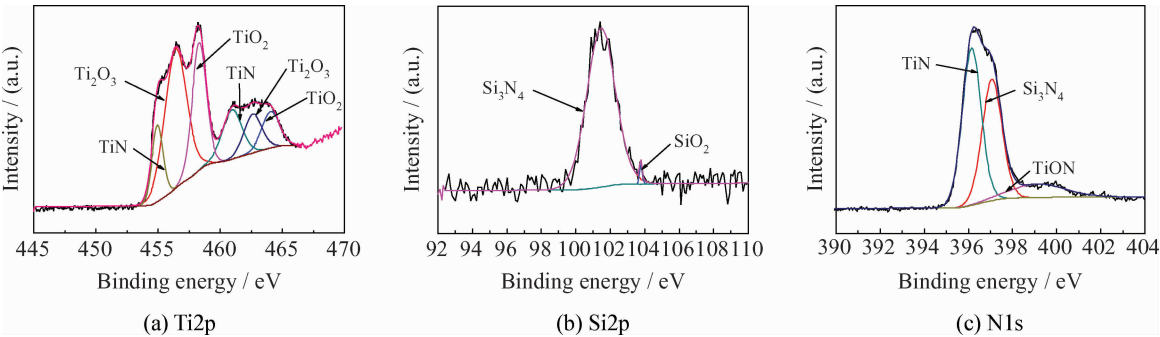


图 2 靶材中 Si 含量为 8% 时 TiSiN 涂层的 XPS 图谱

Fig. 2 XPS spectra of the TiSiN coating with Si content of 8% in target

和 SiO_2 ^[16-17]。而 N1s 峰在 396.3, 397.0 和 398.5 eV 分别对应于 TiON , TiN 和 Si_3N_4 ^[18-19,8]。这表明涂层的主要成分为 TiN , Ti_2O_3 , TiO_2 , Si_3N_4 , SiO_2 和 TiON 。

不同 Si 含量靶材制备涂层的成分见表 1。由表中可以看出:涂层中的 Si 含量随着靶材中的 Si 含量增加而增加,在涂层中 Si 元素主要以 Si_3N_4 非晶形式存在,因此 Si_3N_4 非晶含量的增加使得涂层逐渐致密,这和涂层截面形貌是一致的。

表 1 不同 Si 含量靶材制备 TiSiN 涂层的成分
Table 1 Composition of the TiSiN coatings with different Si content in target (w/%)

Si content in target	Ti	Si	N	O	C
5	38.12	7.35	14.04	18.60	21.89
8	35.71	10.40	20.84	17.04	18.07
10	32.04	11.08	14.92	14.50	27.46

图 3 是不同 Si 含量靶材制备涂层的 XRD 结果。由图可知:不同 Si 含量靶材的 TiSiN 涂层主要都呈(111)和(002)混合取向的多晶 TiN 结构,当靶材中 Si 含量为 5% 时,涂层呈较强的(002)和(111)取向;8% 时涂层的(111)晶面衍射强度

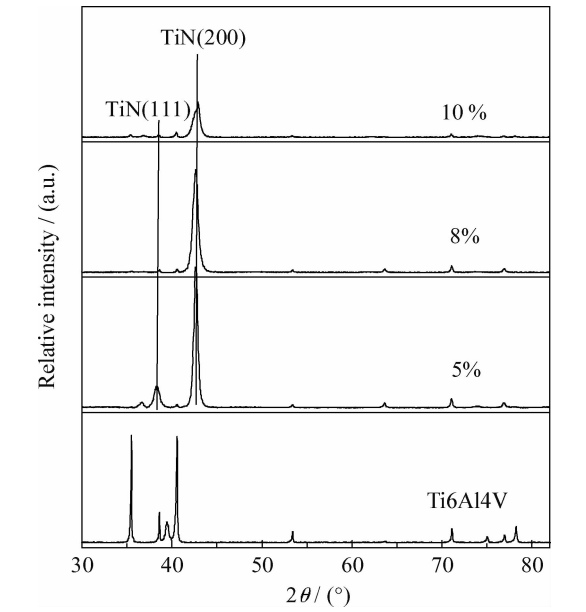


图 3 不同 Si 含量靶材制备 TiSiN 涂层和 Ti6Al4V 基体的 XRD 图谱
Fig. 3 XRD patterns of the TiSiN coatings with different Si content in target and the Ti6Al4V substrate

减弱;10% 时涂层的(002)和(111)取向均比 5% 时弱。根据 XPS 结果可以看出:涂层中的 Si 主要以 Si_3N_4 形式存在,而在 XRD 衍射峰中并没有发现 Si_3N_4 峰,因此 Si_3N_4 在 TiSiN 涂层中是以非晶形式存在的。从 XRD 结果中也可以看出:随着 Si 含量增加涂层的衍射峰强度逐渐减弱,说明涂层中非晶含量随着 Si 含量的增加逐渐增加,另外,随 Si 含量增加, TiN 衍射峰逐渐宽化,表明 TiN 晶粒逐渐细化。

图 4 为靶材中 Si 含量为 8% 时 TiSiN 涂层的 HRTEM 图和衍射花样。从图中可以观察到:TiSiN 涂层是一种典型的非晶包裹纳米晶结构,其中纳米晶主要由 TiN 的(220)晶向组成,而非晶 Si_3N_4 相包裹在 TiN 晶界。

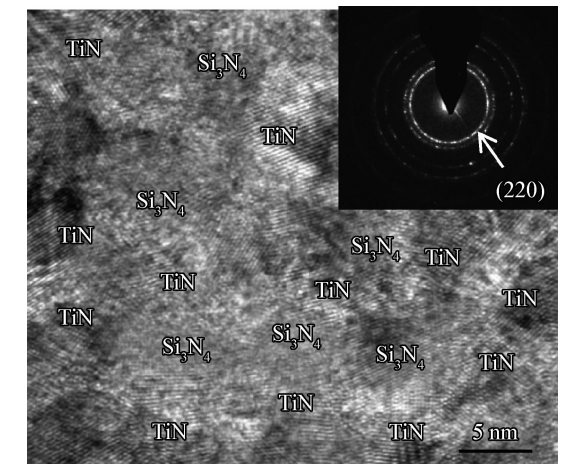


图 4 靶材中 Si 含量为 8% 的 TiSiN 涂层的 HREM 图谱和衍射花样
Fig. 4 HREM images and diffraction pattern of the Ti-SiN coating with Si content of 8% in target

2.2 涂层的硬度和摩擦性能

图 5 是不同 Si 含量靶材制备涂层的硬度。随着 Si 含量增加,涂层硬度呈递增趋势,从 35 GPa 增加到 42 GPa, Si_3N_4 沿着 TiN 晶体包覆生长,形成了非晶包裹纳米晶结构, Veprek 简称这种结构为 nc- $\text{TiN}/\text{a-Si}_3\text{N}_4$ (nc 指纳米晶, a 指非晶),沿 TiN 晶界形成的非晶 Si_3N_4 使 TiN 晶粒细化,从而有效的阻碍了 TiN 晶体中的位错滑移,细化了晶粒,这是 TiSiN 硬度高于 TiN 最直接的原因^[20]。

因此靶材中 Si 含量的增加导致涂层中的 Si_3N_4 非晶含量增加,由 XRD 可知:随着 Si 含量增加,衍射峰变宽,晶粒逐渐细化,也说明 TiN 晶粒随

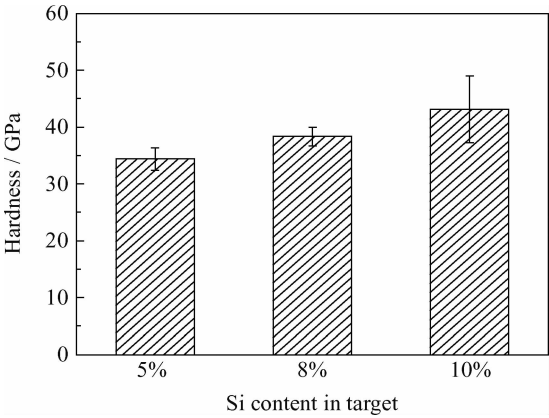


图 5 不同 Si 含量靶材制备的 TiSiN 涂层的硬度
Fig. 5 Hardness of the TiSiN coatings with different Si content in target

着靶材中 Si 含量增加逐渐细化,涂层硬度增加。
用三极电化学工作站测试了 3 种不同 Si 含量涂层在人工海水中的腐蚀性能,结果见图 6。三者的腐蚀电位相差不大。但随着靶材中 Si 含量的增加,涂层的腐蚀电流不断减小。说明涂层的耐腐蚀性能随着靶材中 Si 含量的增加而增加,这与其致密的截面结构密不可分。一般来说,腐蚀的产生通常由结构缺陷引起,并逐渐扩展,最终导致涂层失效。

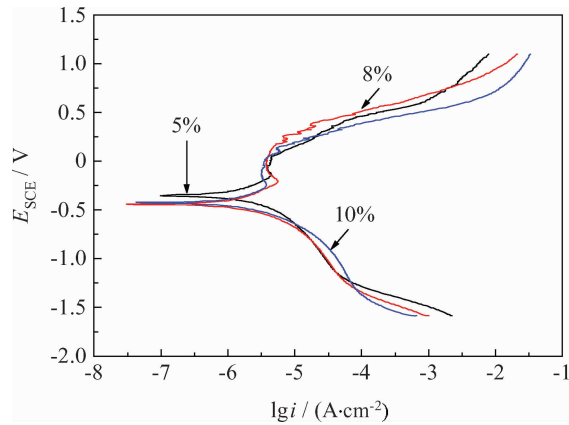


图 6 不同 Si 含量靶材制备 TiSiN 涂层的电化学腐蚀曲线
Fig. 6 Polarization curves of the TiSiN coatings with different Si content in target

图 7 是不同 Si 含量靶材制备涂层在大气和海水环境下的摩擦因数。图 7(a)是大气中的摩擦因数,从图中可以看出在摩擦初期,3 种涂层的摩擦因数差别较大,其中靶材中 Si 含量为 10% 的涂层摩擦因数最高而在摩擦后期,3 种涂层的

摩擦因数基本接近。
图 7(b)是在海水条件下 3 种涂层的摩擦因数,和在大气中相比,海水中的摩擦因数明显低于大气中的摩擦因数,这主要是海水在摩擦过程中起到了润滑作用,此外,3 种涂层在摩擦初期都有明显的磨合期(0~800 s),这主要是和涂层表面的大颗粒有关,这些大颗粒使得摩擦副和涂层在交变载荷作用下有一定波动,从而使得摩擦因数增大^[21],而随着摩擦试验的进行,表面的大颗粒或随着摩擦挤压变形,或发生剥落,涂层表面逐渐趋于平整,摩擦因数有降低趋势。

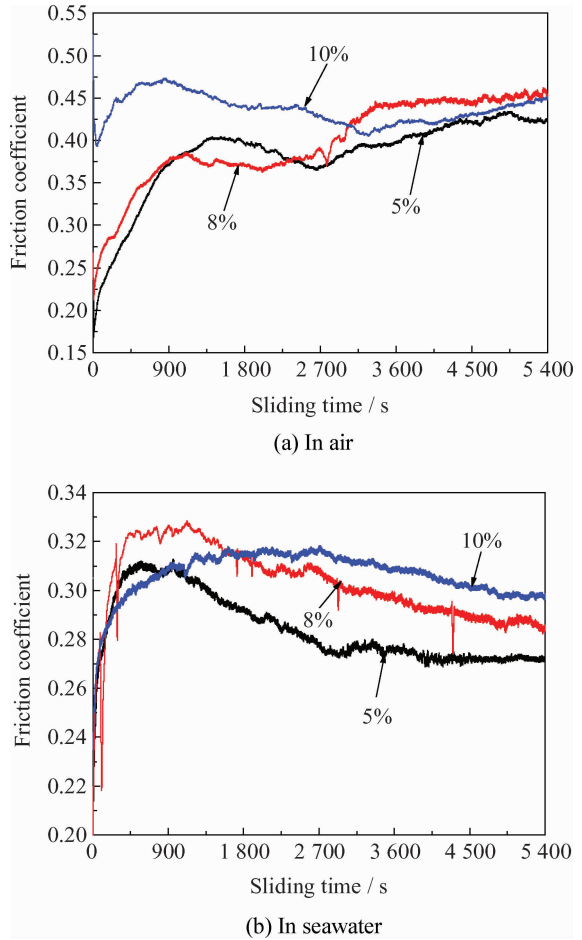


图 7 不同 Si 含量靶材制备 TiSiN 涂层在大气和海水环境下的摩擦因数
Fig. 7 Friction coefficient of the TiSiN coatings in air and seawater with different Si content in target

就 3 种不同 Si 含量靶材的涂层而言,摩擦趋于稳定后,随着靶材中 Si 含量增加,涂层的摩擦因数有增加趋势。这和涂层的硬度变化有直接关系。当靶材中 Si 含量为 5% 时,涂层的硬度为 35 GPa,而摩擦副 SiC 的硬度约为 28 GPa,此时

摩擦机制主要是粘着磨损;另外,从磨痕形貌上看,涂层主要是小范围剥落,也印证了这一现象。当靶材中 Si 含量为 10% 时,涂层硬度为 42 GPa,此时摩擦机制主要是磨粒磨损,磨痕形貌呈现一定的犁沟形貌。

图 8 是不同 Si 含量靶材制备涂层在海水和大气环境中的磨损率,由图可知:涂层在海水条件下涂层的磨损率要高于在大气环境下的,这主要由于海水渗入到交变载荷作用形成的裂纹中加速了涂层的剥落^[21],使得其磨损率较高。

就 3 种不同 Si 含量的涂层而言,在大气条件下 3 种涂层的磨损率几乎保持一致。而在海水条件下,随着靶材中 Si 含量的增加,3 种涂层的磨损率先减小后增大。当靶材中 Si 含量为 5% 时,如图 9 所示,涂层出现了一定程度的剥落,这

也可以从 EDS 结果得到很好的印证,剥落部分出现了 V 和 Al 这些基体的元素成分。

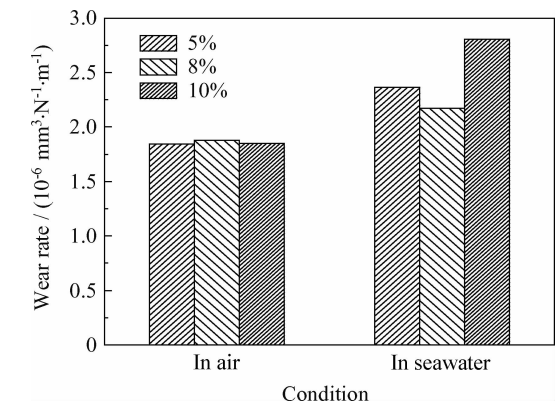


图 8 不同 Si 含量靶材制备 TiSiN 涂层的磨损率
Fig.8 Wear rates of the TiSiN coatings with different Si content in target

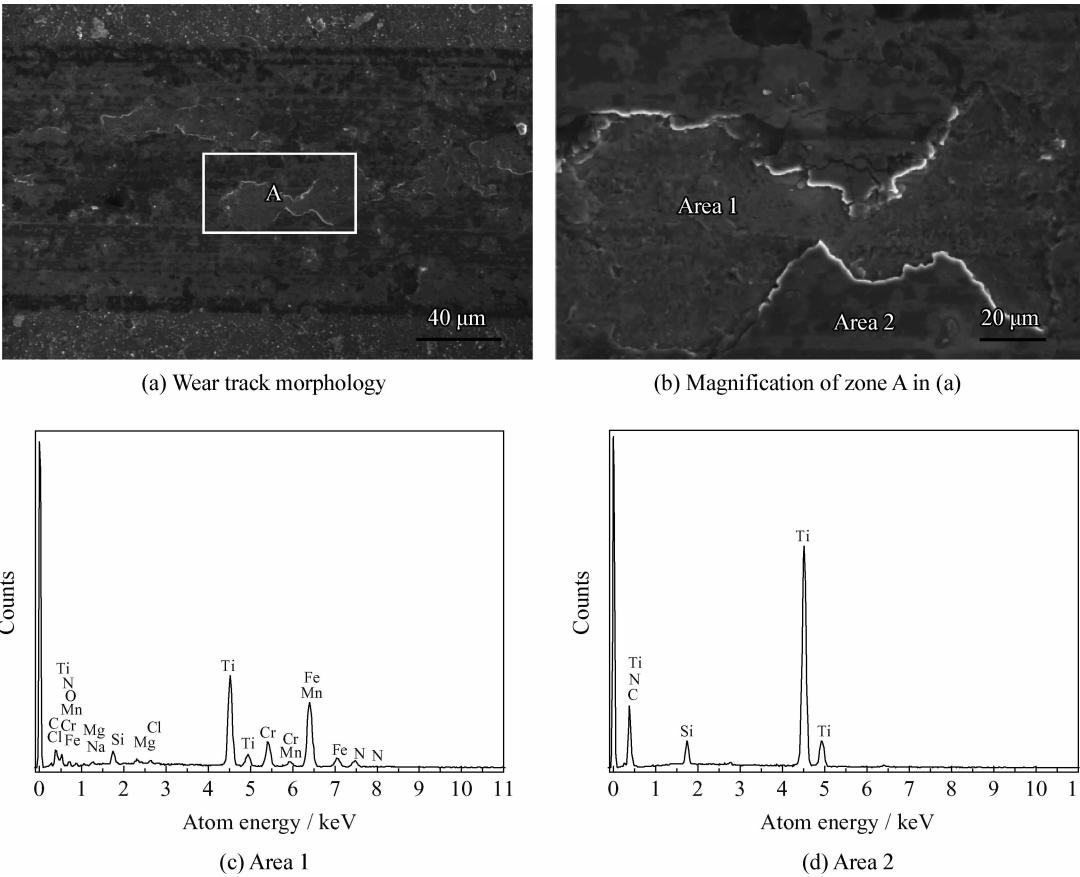


图 9 靶材中 Si 含量为 5% 时 TiSiN 涂层在海水条件下的磨损形貌及 EDS 分析

Fig.9 Wear track morphologies and EDS analysis of the TiSiN coating in seawater with Si content of 5% in target

当靶材中 Si 含量为 8% 时,从图 10 可以看出:涂层的剥落明显减少,涂层表面主要是一些磨屑。从磨屑的 EDS 成分来看:主要是在摩擦过程中涂层和海水发生反应所形成的一些产物,这

些磨屑主要来自涂层沉积过程中表面的大液滴,这些大颗粒在摩擦交变载荷作用下,大致可以分为两类:一类在摩擦过程中剥离涂层表面,一类在摩擦过程中发生变形但并未剥离,在这类变形

颗粒的周围形成了一定数量的裂纹。

当靶材中 Si 含量增加到 10% 时,由图 11 观察涂层的磨痕形貌可知,涂层在摩擦过程中出现了明

显的剥落迹象,且剥落程度比靶材中 Si 含量为 5% 时严重。综上可以看出,当靶材中 Si 含量为 8% 时涂层在海水条件下表现出最佳的耐磨损性能。

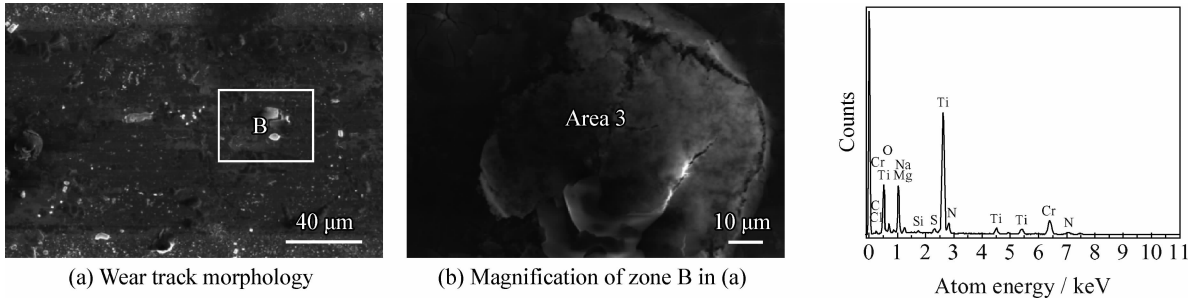


图 10 靶材中 Si 含量为 8% 时 TiSiN 涂层在海水条件下的磨痕形貌
Fig. 10 Wear track morphologies of the TiSiN coating in seawater with Si content of 8% in target

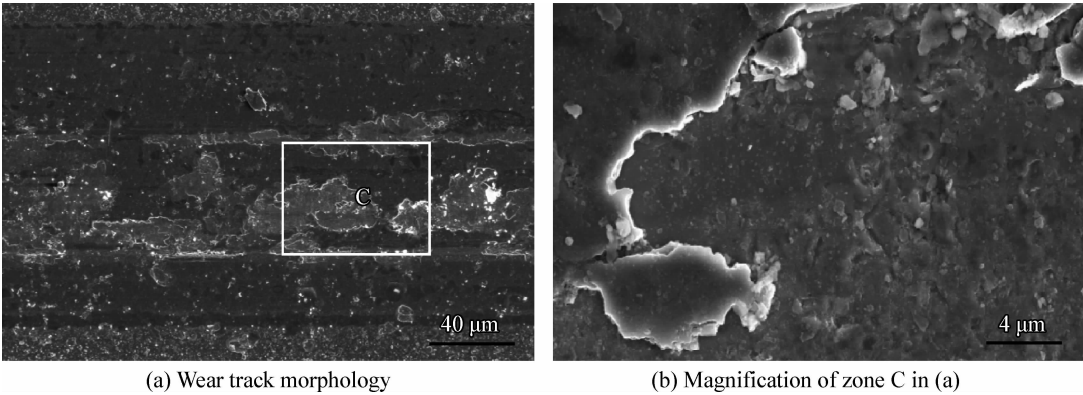


图 11 靶材中 Si 含量为 10% 时 TiSiN 涂层在海水条件下的磨痕形貌
Fig. 11 Morphologies of wear track of the TiSiN coatings in seawater with Si content of 10% in target

3 讨论

TiN 晶粒生长是典型的柱状晶生长,其生成自由能大约为 $\Delta G_{298}^0 = -309.2 \text{ kJ/mol}$,而 Si_3N_4 的生成自由能约为 $\Delta G_{298}^0 = -665.40 \text{ kJ/mol}$ ^[22],因此在 TiSiN 涂层沉积过程中, Si_3N_4 相比 TiN 相更容易形成,但由于涂层在高纯 N_2 条件下沉积,因此仍然会有足够量的 N 与 Ti 形成反应生成 TiN。而在沉积过程中由于 Si_3N_4 的活性比 TiN 低,因此 Si_3N_4 容易附着在 TiN 晶界,阻碍 TiN 晶粒生长,逐渐细化晶粒^[20],提高涂层的硬度,增加其耐蚀性和耐磨性。

随着靶材中 Si 含量的增加,在一定范围内这种细化作用逐渐增强,涂层性能逐渐得到改善,然而靶材中 Si 含量超出一定范围,由于 Si_3N_4 含量逐渐增加,使得 TiN 晶粒可能趋于非晶化,这会导致涂层的力学性能下降^[20],而在文中,从摩

擦学性能来看,当靶材中 Si 含量为 8% 时,涂层在海水下展现出最低的磨损率,这表明在该 Si 含量条件下涂层的 Si_3N_4 含量使得粗大的 TiN 柱状结构得到良好的改善,更加趋于致密化。同时,柱状晶粒在海水中容易发生晶界腐蚀而失效,而当 Si 元素的加入改善这种结构之后,涂层的耐腐蚀性能增加,因此在海水条件下更耐磨。

4 结论

- (1) 在 TiSiN 涂层中 Si 元素主要以 Si_3N_4 非晶态存在,形成了非晶 Si_3N_4 包裹 TiN 纳米晶结构,且这种非晶结构对 TiN 柱状晶的生长有阻碍作用,其结果使得 TiN 晶粒细化,提高了涂层的结构致密性,随着靶材中 Si 含量从 5% 增加到 10%,涂层硬度相应的从 35 GPa 上升到 42 GPa。
- (2) 随着靶材中 Si 含量的增加,涂层的硬度逐渐提高,这主要是由于 Si_3N_4 非晶含量增加对

TiN 晶粒细化作用增强造成的。

(3) 当靶材中 Si 含量为 8% 时,涂层在海水环境中表现出最优的摩擦学性能,这主要和该 Si 含量下涂层中适量的非晶相 Si_3N_4 有关。当靶材中 Si 含量为 5% 时,涂层中 TiN 晶粒粗大,容易在海水中发生腐蚀而剥落。靶材中 Si 含量为 10% 时,涂层内部容易形成过多的非晶相,使得涂层摩擦学性能下降。

参考文献

- [1] 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 L, Wang Y X, Li J L, et. al. Tribological behaviours of TiN, TiCN and CrN coatings in seawater [J]. China Surface Engineering, 2013, 26(6): 86-92 (in Chinese).
- [2] Shieu F S, Sung Y C, Cheng L C, et al. Control of the corrosion resistance of TiN-coated AISI 304 stainless steel [J]. Corrosion Science, 1997, 39 (5): 893-899.
- [3] 王振玉,徐胜,张栋,等. N_2 流量对 HIPIMS 制备 TiSiN 涂层结构和力学性能的影响 [J]. 金属学报, 2014, 50(5): 540-546.
Wang Z Y, Xu S, Zhang D, et. al. Influence of N_2 flow rate on structures and mechanical poperties of TiSiN coatings prepared by HIPIMS method [J]. Acet Metallurgica Sinica, 2014, 50 (5): 540-546 (in Chinese).
- [4] 王建鹏,李伟,刘平,等. Si 含量对 CrN/TiSiN 纳米多层膜显微结构和力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(3): 739-744.
Wang J P, Li W, Liu P, et. al. Influence of Si content on microstructure and mechanical property of CrN/TiSiN nanomultilayered films [J]. The Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 2014, 24(3): 739-744 (in Chinese).
- [5] Li S, Shi Y, Peng H. Ti-Si-N films prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1992, 12(3): 287-297.
- [6] Li Z, Mori M, Miyake S, et al. Structure and properties of Ti-Si-N films prepared by ICP assisted magnetron sputtering [J]. Surface & Coating Technology, 2005, 193: 345-349.
- [7] Stan V, Maritz G J. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites [J]. Thin Solid Films, 2005, 476: 1-29.
- [8] Wang Z, Zhang D, Ke P, et al. Influence of substrate negative bias on structure and properties of TiN coatings prepared by a hybrid HIPIMS method [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2015, 31: 37-42.
- [9] Choi S R, Park I W, Kim S H, et al. Influence of substrate bias voltage on deposition behavior and micro-indentation hardness of Ti-Si-N coatings by a hybrid coating

- system of arc ion plating and sputtering techniques [J]. Thin Solid Films, 2004, 447: 371-376.
- [10] Hultman L. Thermal stability of nitride thin films [J]. Vacuum, 2000, 57: 1-30.
- [11] 陈颖,叶育伟,王永欣,等. 多弧离子镀制备的 CrCN 涂层组织及摩擦磨损性能 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 423-429.
Chen H, Ye Y W, Wang Y X, et. al. Microstructure and tribological properties of CrCN coating prepared by arc ion plating [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metal, 2015, 25(2): 423-429 (in Chinese).
- [12] 时婧,裴志亮,宫骏,等. Si 含量对电弧离子镀 TiAlSiN 薄膜组织结构和力学性能的影响 [J]. 金属学报, 2012, 48(11): 1349-1356.
Shi J, Pei Z L, Gong J, et. al. Effect of Si content on the microstructure properties of TiAlSiN films deposited by cathodic vacuum arc ion plating. [J] Acet Metallurgica Sinica, 2012, 48(11): 1349-1356 (in Chinese).
- [13] Mi Y. A thesis submitted for the degeree of doctor of philosophy department of physics national university of singapore [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2007:1-183.
- [14] Werfel F, Brümmer O. Corundum structure oxides studied by XPS [J]. Physica Scripta, 1983, 28(1): 92-96.
- [15] Chang C L, Lee J W, Tseng M D. Microstructure, corrosion and tribological behaviors of Ti-Al-Si-N coatings deposited by cathodic arc plasma deposition [J]. Thin Solid Films, 2009, 517(17): 5231-5236.
- [16] Wagner C D, Riggs W M, Davis L E, et al. Handbook of X-Ray photoelectron spectroscopy [M]. Eden Prairie: Perkin Elmer Corporation, 1979: 34-40.
- [17] Kim B, Chung W, Rhee M, et al. Studies on the application of laser surface texturing to improve the tribological performance of AlCrSiN-coated surfaces [J]. Metals & Materials International, 2012, 18(6): 1023-1027.
- [18] Zhu H L, Han F D, Bi J Q, et al. Facile synthesis of Si_3N_4 nanocrystals via an organic-inorganic reaction route [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2009, 92(2): 538.
- [19] Xu J, Wang G, Lu X, et al. Mechanical and corrosion-resistant properties of Ti-Nb-Si-N nanocomposite films prepared by a double glow discharge plasma technique [J]. Ceramics International, 2014, 40: 8621-8630.
- [20] Veprek S, Reiprich S. A concept for the design of novel superhard coatings [J]. Thin Solid Films, 1995, 268: 64-71.
- [21] Shan L, Wang Y, Li J, et al. Effect of N_2 flow rate on microstructure and mechanical properties of PVD CrN_x coatings for tribological application in seawater [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 242(4): 74-82.
- [22] Marten T, Alling B, Isaev E, et al. First-principles study of the SiN_x/TiN(001) interface [J]. Physical Review B, 2012, 85(10): 1041061-1041067.