

# TC4 合金微弧氧化层的耐磨性和耐蚀性

周鹏<sup>1</sup>, 林乃明<sup>1</sup>, 田伟<sup>1,2</sup>, 姚小飞<sup>3</sup>, 田林海<sup>1</sup>, 唐宾<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学, 太原 030024; 2. 中联西北工程设计研究院, 西安 710082;  
3. 西安工业大学, 西安 710032)

**摘要:** 目的 对比不同电解液体系中制备的陶瓷膜层的耐磨损和耐腐蚀性能, 判断实验条件下陶瓷膜性能最优的电解液体系。方法 在相同的电参数工艺下, 分别在  $\text{NaAlO}_2$ ,  $(\text{NaPO}_3)_6$  和  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  电解液体系中对 TC4 合金进行微弧氧化处理, 处理时间为 15 min。分析陶瓷层的表面形貌、成分和相结构。进行干摩擦条件下的摩擦磨损实验, 对比 TC4 合金及三种陶瓷膜的耐磨性。通过测试极化曲线, 对比 TC4 合金及三种陶瓷膜的耐蚀性。结果 在  $\text{NaAlO}_2$ ,  $(\text{NaPO}_3)_6$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  电解液体系中获得的陶瓷层表面呈现出多孔和局部凸起的相似表面特征, 但相组成存在差异, 主要相分别为  $\text{Al}_2\text{TiO}_5$ ,  $\text{AlPO}_4$  和  $\text{TiO}_2$ 。摩擦磨损实验表明, 在 10 N 载荷下, 以  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷球作为摩擦副, 陶瓷层的磨损失重相对基材均显著减小, 其中  $(\text{NaPO}_3)_6$ -陶瓷层失重约为基材的 1/22。极化曲线分析表明, 在模拟油田采出液作为腐蚀液的条件, 与 TC4 合金相比, 陶瓷层的  $E_{\text{corr}}$  显著正移,  $J_{\text{corr}}$  明显减小, 其中  $(\text{NaPO}_3)_6$ -陶瓷层的  $E_{\text{corr}}$  从 -0.311 V 正移至 0.777 V,  $J_{\text{corr}}$  从  $9.634 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$  减小到  $2.595 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 。结论 微弧氧化处理能够显著改善 TC4 合金的耐磨性和耐蚀性, 其中  $(\text{NaPO}_3)_6$ -陶瓷层的综合性能较好, 有望满足 TC4 合金服役于油田环境时的要求。

**关键词:** TC4 合金; 微弧氧化; 陶瓷层; 耐磨性; 耐蚀性; 模拟油田采出液

**中图分类号:** TG174.451 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)11-0014-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.11.003

## Wear and Corrosion Resistance of Microarc Oxidation Coatings on TC4 Alloy

ZHOU Peng<sup>1</sup>, LIN Nai-ming<sup>1</sup>, TIAN Wei<sup>1,2</sup>, YAO Xiao-fei<sup>3</sup>, TIAN Lin-hai<sup>1</sup>, TANG Bin<sup>1</sup>

(1. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. China United Northwest Institute for Engineering & Research, Xi'an 710082, China; 3. Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To compare the wear and corrosion resistance of coatings fabricated in different electrolytes, to obtain the

收稿日期: 2015-07-16; 修订日期: 2015-08-23

Received: 2015-07-16; Revised: 2015-08-23

**基金项目:** 国家自然科学基金(51501125); 陕西省科技新星基金(2013KJXX-08); 中国博士后科学基金(2012M520604); 山西省青年科技基金(2013021013-2); 太原理工大学青年基金(2013T011)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China(51501125), the Science and Technology Program for Research and Development of Shaanxi Province(2013KJXX-08), China Postdoctoral Science Foundation(2012M520604), the Natural Science Foundation for Young Scientists of Shanxi Province(2013021013-2), and the Foundation for Young Scientists of Taiyuan University of Technology(2013T011)

**作者简介:** 周鹏(1988—), 男, 河南人, 硕士研究生, 主要研究材料表面改性与防护。

**Biography:** ZHOU Peng(1988—), Male, from Henan, Master graduate student, Research focus: surface modification and protection of materials.

**通讯作者:** 林乃明(1981—), 男, 辽宁人, 博士, 讲师, 主要从事材料表面改性与防护的研究。

**Corresponding author:** LIN Nai-ming(1981—), Male, from Liaoning, Ph. D., Lecturer, Research focus: surface modification and protection of materials.

electrolyte system producing ceramic coatings with best properties under the experimental conditions. **Methods** Microarc oxidation (MAO) treatments were conducted on TC4 alloy samples in  $\text{NaAlO}_2$ ,  $(\text{NaPO}_3)_6$  and  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  electrolytes, respectively, with the same electrical parameters and the treatment time was 15 min. Besides, the surface morphology, chemical composition and phase constitutions of the ceramic coatings were analyzed. The wear resistance of the TC4 alloy and the ceramic coatings formed in different electrolytes was compared by friction and wear testing under dry friction condition. By testing polarization curve, the corrosion resistance of TC4 alloy and three ceramic coatings was comparatively analyzed. **Results** The results showed that the ceramic coatings fabricated in different electrolytes had similar surface morphology, with many small pores and local bulge on the surface, but they were built up by different phase constitutions. The main phases of the coatings fabricated in  $\text{NaAlO}_2$ ,  $(\text{NaPO}_3)_6$  and  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  electrolytes were  $\text{Al}_2\text{TiO}_5$ ,  $\text{AlPO}_4$ ,  $\text{TiO}_2$ , respectively. Compared with the substrate, tribological test revealed that under the load of 10 N against  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ball, the mass loss of all the coatings had a significant reduction, among which, the mass loss of coating formed in  $(\text{NaPO}_3)_6$  electrolyte was only 1/22 that of the substrate. In the simulated producing well solution, comparing ceramic coatings with TC4 alloy, the analysis results of polarization curves showed that the corrosion potential ( $E_{\text{corr}}$ ) was obviously changed to positive and the corrosion current ( $J_{\text{corr}}$ ) was significantly reduced. The  $E_{\text{corr}}$  and  $J_{\text{corr}}$  values of the coating formed in  $(\text{NaPO}_3)_6$  electrolyte were improved from -0.311 V to 0.777 V and reduced from  $9.634 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$  to  $2.595 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ , respectively. **Conclusion** MAO treatments could significantly improve the wear and corrosion resistance of TC4 alloy, and the coating prepared in  $(\text{NaPO}_3)_6$  electrolyte had relatively good comprehensive performance, with the potential of meeting the requirements for application of TC4 alloy in oilfield environment.

**KEY WORDS:** TC4 alloy; microarc oxidation; ceramic coating; wear resistance; corrosion resistance; the simulated producing well solution

腐蚀引起的油管失效事故时有发生<sup>[1-2]</sup>,耐蚀性也就成为油管选材的重要考量指标<sup>[3]</sup>。TC4 合金比强度高,热稳定性好,耐蚀性优异,生物相容性好,被誉为王牌钛合金,在诸多领域得到应用<sup>[4-7]</sup>,也已开始作为油管材料使用<sup>[3,8]</sup>。但是,TC4 合金表面承载能力低,耐磨性差<sup>[3,9-10]</sup>,磨损会破坏其表面的自生氧化膜,进而发生并促进腐蚀。若直接将 TC4 合金作为油管材料使用,将威胁结构的安全性和可靠性。采用适当的表面技术对 TC4 合金进行表面改性,可显著改善其耐磨性<sup>[4]</sup>。

微弧氧化(Microarc oxidation, MAO)是一种依靠弧光放电产生瞬时高温高压,使铝、镁、钛及其合金表面原位生长氧化物陶瓷层的表面处理技术<sup>[11]</sup>。该技术具有工艺简单、膜层厚度可控、生产效率高、环境污染小、仿形性好等优点,制备的陶瓷层具有很高的耐磨损和抗腐蚀性能<sup>[12-13]</sup>。有研究证明,陶瓷膜在处理液中对离子吸附有选择性,对于实验中常见的离子,其吸附强弱依次为: $\text{SiO}_3^{2-} > \text{PO}_4^{3-} > \text{VO}_4^{3-} > \text{MoO}_4^{2-} > \text{WO}_4^{2-} > \text{B}_4\text{O}_7^{2-} > \text{CrO}_4^{2-}$ ,而且采用不同电解液可以制备性能各异的陶瓷膜<sup>[14]</sup>。文中在较常见的  $\text{NaAlO}_2$ ,  $(\text{NaPO}_3)_6$  和  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  电解液体系中对 TC4 合金进行微弧氧化处理,对比研究了三种陶瓷层和 TC4 合金的耐磨性和耐蚀性,旨在为拓展 TC4 合金在油管方面的应用提供实验依据。

## 1 实验

基体材料取自退火态 TC4 合金棒材,经电火花线切割成尺寸为  $\phi 12 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  的试样。试样经 SiC 砂纸逐级打磨,再清洗、干燥后备用。

分别配制  $\text{NaAlO}_2$ ,  $(\text{NaPO}_3)_6$  和  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  体系电解液<sup>[15-16]</sup>,采用 MAO-10D 型微弧氧化电源,以恒流脉冲方式处理 15 min,电流密度为  $60 \text{ mA/cm}^2$ ,频率为 600 Hz,占空比为 8%。借助扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪(EDS)分析陶瓷层的表面形貌和成分,用 X 射线衍射仪(XRD)分析陶瓷层的相结构。

使用 MFT-R400 往复摩擦磨损试验机测试耐磨性,摩擦配副为  $\text{Si}_3\text{N}_4$  球,条件为:室温( $25 \pm 2$ ) °C,干摩擦,载荷 10 N,频率 2 Hz,往复距离 5 mm,测试时间 30 min。

利用 CS350 电化学工作站评价耐蚀性,介质采用模拟油田采出液,用去离子水和化学分析纯配制而成<sup>[2]</sup>。采用三电极体系:铂片为辅助电极,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,测试试样为研究电极。

## 2 结果与讨论

### 2.1 特征分析

由于陶瓷层不导电,因此先对微弧氧化试样表面

进行喷金处理,再进行 SEM 分析。图 1 为 TC4 合金及在三种电解液中获得的陶瓷层的表面形貌。如图 1a 所示,TC4 合金表面分布着机械打磨留下的划痕。如图 1b,c,d 所示,三种 MAO 陶瓷层的表面均较为粗糙,有不同孔径的微孔和尺寸不一的凸起物。此类表面特征的形成与微弧放电有关。微弧放电使得表面局部区域产生高温高压<sup>[15-16]</sup>,基材含有的元素和电解液中的元素发生一系列热化学反应或等离子化学

反应,生成氧化物。微孔既由微弧放电产生,又是放电的通道。在反应过程中,熔融态氧化物受到周围电解液的作用而快速冷却,并迅速凝结在微孔附近,从而形成存在微孔和凸起的表面形貌。不同电解液体系陶瓷层的表面形貌还存在一定差异:NaAlO<sub>2</sub>-陶瓷层表面以不同程度的凸起为主,微孔较少;(NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>-陶瓷层表面的微孔较多;Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>-陶瓷层表面也分布有微孔和凸起,局部区域还可观察到微裂纹。

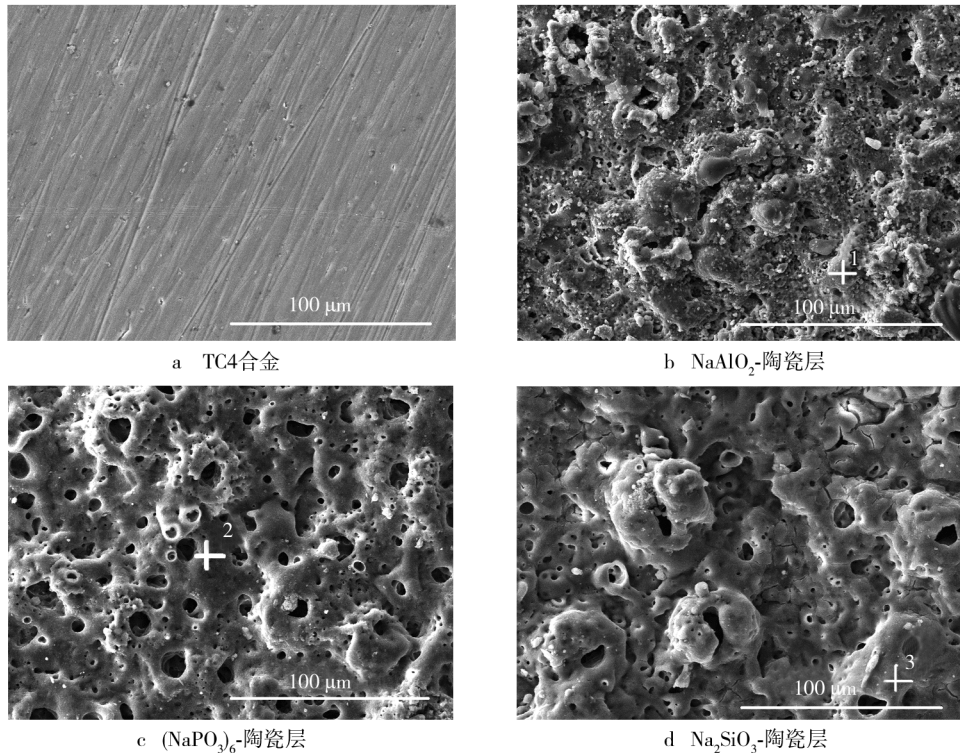


图 1 TC4 合金和陶瓷层的表面形貌

Fig. 1 Surface morphology of TC4 alloy (a) and ceramic coatings: NaAlO<sub>2</sub>(b); (NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>(c); Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>(d)

表 1 给出了图 1 中标示 1,2,3 处的 EDS 分析结果。由表 1 可见,陶瓷层中的元素主要来自于基材和电解液,说明电解液所含组元 Al,P,Si 均参与了微弧氧化反应,并进入到陶瓷层中<sup>[15]</sup>。

表 1 图 1 部分区域 EDS 成分分析结果

Tab.1 Results of EDS analysis in several regions of Fig. 1

位置	质量分数/%				
	O	Al	Ti	P	Si
1	48.57	23.58	37.03	—	—
2	68.18	23.53	15.67	8.65	—
3	60.83	9.51	23.69	5.30	16.93

图 2 为陶瓷层的 XRD 图谱。如前所述,电解液的组分会参与微弧氧化反应并进入陶瓷层,由图 2 可

见,电解液成分对陶瓷层的相组成影响显著,所生成的陶瓷层由电解液中主要无机盐组分的氧化物构成。

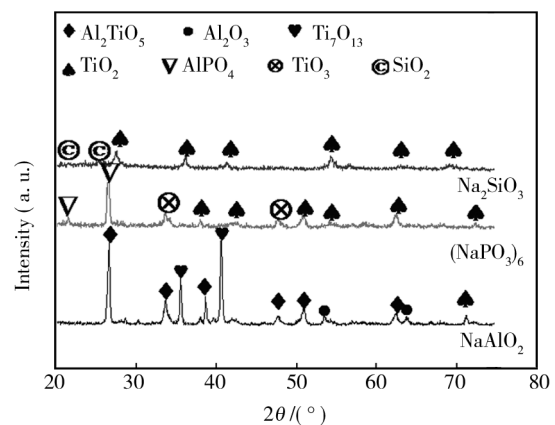


图 2 陶瓷层的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of ceramic coatings



$\text{NaAlO}_2$  体系中形成的陶瓷层主要相是  $\text{Al}_2\text{TiO}_5$ , 还有少量的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和钛的氧化物<sup>[16]</sup>。 $(\text{NaPO}_3)_6$  体系中形成的陶瓷层主要相是  $\text{AlPO}_4$  和钛的氧化物。形成原因可能是: $\text{NaAlO}_2$  和  $(\text{NaPO}_3)_6$  在高温高压下均发生分解反应,其中一部分氧化物在高温下反应生成了  $\text{AlPO}_4$ <sup>[15]</sup>。 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  体系中形成的陶瓷层主要由锐钛矿和金红石型  $\text{TiO}_2$  相组成,还含有少量的  $\text{SiO}_2$ <sup>[15]</sup>。

2.2 耐磨性

图 3 为 TC4 合金和三种陶瓷层与  $\text{Si}_3\text{N}_4$  配副摩

擦后的磨痕形貌,表 2 为图 3 中标示 1,2,3 处的 EDS 分析结果。由图 3a 可见,TC4 合金的磨痕最宽,在高倍视场下,TC4 合金的磨痕处可观察到宽而深的沟槽,表现出明显的磨粒磨损特征。尽管 TC4 合金- $\text{Si}_3\text{N}_4$  摩擦副的粘着磨损倾向较低,但 TC4 合金的硬度远低于  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,剪切抗力较低, $\text{Si}_3\text{N}_4$  表面的微凸体极易对 TC4 合金摩擦接触表面产生擦伤,犁削出沟槽。沟槽两边的金属会因发生塑性变形而形成堆积物,随着滑动的进行,堆积物又会被碾压,多次反复地塑性变形,导致疲劳裂纹形成而引起剥落或脱层。此

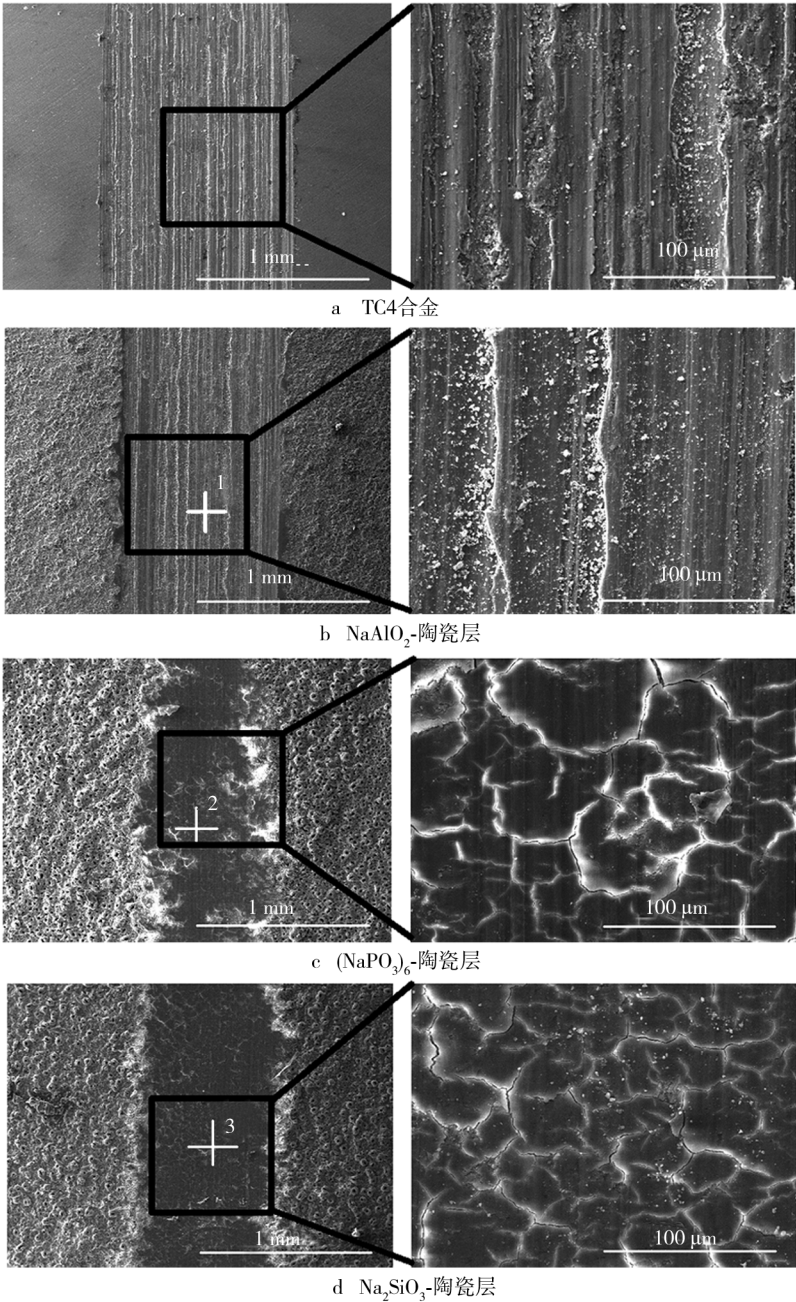


图 3 TC4 合金和陶瓷层的磨痕形貌

Fig. 3 Wear scars of TC4 alloy (a) and ceramic coatings:  $\text{NaAlO}_2$ (b);  $(\text{NaPO}_3)_6$ (c);  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (d)

外,在干摩擦条件下,产生的摩擦热只能通过摩擦副的传递或者以辐射形式向远离接触表面处耗散。TC4合金导热性能差,致使摩擦表面温升明显,且钛与氧具有很强的化学亲和力,TC4合金的磨痕处不可避免地生成氧化膜,但氧化膜得不到基体的有效支撑,破裂并被碾压成碎屑颗粒,碎屑作为磨粒参与到摩擦过程,进而加剧了TC4合金的磨损。因此,TC4合金的磨损程度最为严重。该实验条件下,TC4合金的磨损机制以磨粒磨损为主,并伴有氧化磨损。

由图3b,c,d可见,与TC4合金相比,三种陶瓷层的磨痕较窄,损伤均有不同程度的降低。在高倍视场下, $\text{NaAlO}_2$ -陶瓷层的磨痕特征与TC4合金较为接近,可观察到明显的磨粒磨损特征,但磨损程度没有TC4合金严重。同时,由图4a所示的TC4合金和 $\text{NaAlO}_2$ -陶瓷层的摩擦系数、图5所示的磨损失重、表2的EDS成分分析结果可知,测试结束时, $\text{NaAlO}_2$ -陶瓷层局部已被磨穿(摩擦系数和磨损失重与TC4合金较为接近,且磨痕处钛的含量异常大)。由图3c,d可

见,  $(\text{NaPO}_3)_6$ -陶瓷层和 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ -陶瓷层的磨痕特征、破坏程度均相近,磨痕处可观察到明显的开裂,但未见明显的犁削沟槽,说明这两种陶瓷层的磨损机制不同于TC4合金和 $\text{NaAlO}_2$ -陶瓷层。由图4b,c和图5可见,这两种陶瓷层的摩擦系数较为平稳,数值均高于TC4合金,同时磨损失重远低于TC4合金,磨痕处钛的含量均较少,说明两种陶瓷层没有被磨穿,具有很好的耐磨性。其中,  $(\text{NaPO}_3)_6$ -陶瓷层的磨痕最窄,磨损失重最少。

表2 图3部分区域EDS成分分析结果

Tab.2 Results of EDS analysis in several regions of Fig.3

位置	质量分数/%				
	O	Al	Ti	P	Si
1	11.18	5.63	81.75	—	0.23
2	58.44	22.47	20.09	6.92	1.22
3	56.15	8.83	22.19	5.08	16.63

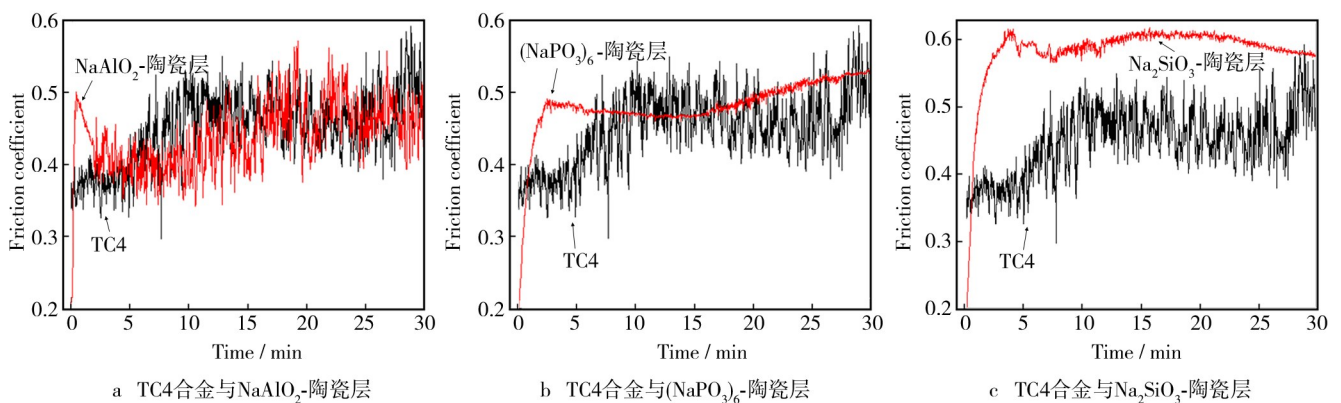


图4 TC4合金与陶瓷层的摩擦系数对比

Fig.4 Comparison of friction coefficients of TC4 alloy and ceramic coatings:  $\text{NaAlO}_2$ ,  $(\text{NaPO}_3)_6$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$

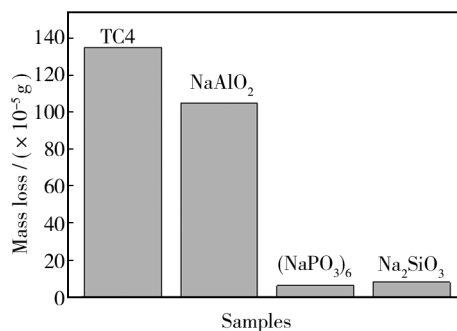


图5 TC4合金和陶瓷层的磨损失重

Fig.5 Weight loss of TC4 alloy and ceramic coatings

一般来说,MAO膜层硬度高,抗磨损性能优异,但是其韧性较低,抗接触疲劳性能较差,故在高硬度

$\text{Si}_3\text{N}_4$  配副的反复作用下,表面最外层的多孔疏松层易出现疲劳开裂和脱落。综上分析,三种陶瓷层中, $\text{NaAlO}_2$ -陶瓷层的磨损机制以磨粒磨损为主,疲劳磨损为辅,没有明显改善TC4合金的耐磨性; $(\text{NaPO}_3)_6$ -陶瓷层和 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ -陶瓷层的磨损机制以疲劳磨损为主,磨粒磨损为辅,显著提高了TC4合金的耐磨性。

## 2.3 耐蚀性

三种陶瓷层和TC4合金的极化曲线见图6。通过测试材料的极化曲线,可以研究电极反应过程中电子在腐蚀界面的得失与转移。由图6可见,三种陶瓷层中,  $(\text{NaPO}_3)_6$ -陶瓷层的腐蚀电位最高,腐蚀电流最低,另外两种陶瓷层的腐蚀电位和腐蚀电流接近。此

外在阳极支,TC4 合金和三种陶瓷层都表现出明显的钝化和破钝化特征,而且 TC4 合金还出现了二次钝化。

利用 Tafel 外推法获得试样的腐蚀电位 ( $E_{\text{corr}}$ )、腐蚀电流密度 ( $J_{\text{corr}}$ )、Tafel 区阳极和阴极斜率 ( $\beta_a$ ,  $\beta_c$ ) 等参数,见表 3。利用 Stern-Geary 公式计算出近似极化过程中的极化电阻 ( $R_p$ )<sup>[17]</sup>:

$$R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303 J_{\text{corr}} (\beta_a + \beta_c)} \quad (1)$$

从表 3 可以看出,陶瓷层电阻是基材的 5 ~ 20 倍,综合说明,MAO 处理提高了 TC4 合金的耐蚀性。对比相关参数, ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub>-陶瓷层的耐蚀性能最好。

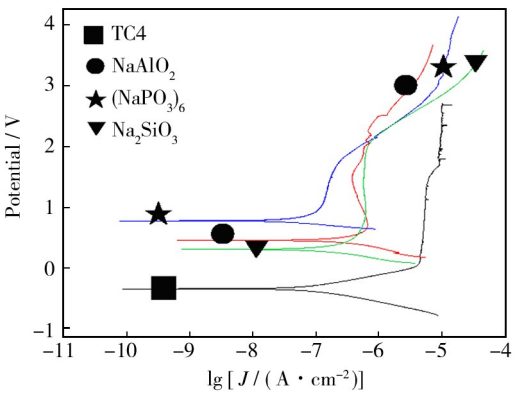


图 6 TC4 合金与三种陶瓷层的极化曲线

Fig. 6 Polarization curves of TC4 alloy and ceramic coatings

表 3 极化曲线测试结果

Tab.3 Results of polarization tests

试样	$E_{\text{corr}}/\text{V}$	$J_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	维钝电流/ $\text{A}$	击穿电压/ $\text{V}$	$\beta_a/\text{V}$	$\beta_c/\text{V}$	$R_p/(\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2)$
TC4 合金	-0.311	$9.634 \times 10^{-7}$	$5.223 \times 10^{-7}$	1.513	0.173	0.144	35.42
$\text{NaAlO}_2$ -陶瓷层	0.455	$4.558 \times 10^{-7}$	$3.826 \times 10^{-7}$	1.404	0.519	0.242	157.23
( $\text{NaPO}_3$ ) <sub>6</sub> -陶瓷层	0.777	$2.595 \times 10^{-8}$	$1.664 \times 10^{-7}$	1.767	0.131	0.071	770.45
$\text{Na}_2\text{SiO}_3$ -陶瓷层	0.306	$2.017 \times 10^{-7}$	$5.706 \times 10^{-7}$	1.835	0.328	0.135	205.89

3 结论

- 1) 采用 MAO 技术在  $\text{NaAlO}_2$ , ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub>,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  三种电解液体系中制备的陶瓷层具有相似的表面形貌,表面分布有微孔和凸起,但相组成存在差异。
- 2) 三种陶瓷层都提高了 TC4 合金的耐磨性,相比之下, ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub>-陶瓷层的耐磨性能最好。
- 3) 三种陶瓷层均表现出更高的腐蚀电位和极化电阻,更低的腐蚀电流,显著提高了 TC4 合金的耐蚀性。
- 4) ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub>-陶瓷层的综合性能较好。MAO 处理有望满足 TC4 合金服役于油田环境时兼具良好耐磨损性和耐腐蚀性的要求。

参考文献

[1] 林乃明,谢发勤,吴向清,等. 油套管表面防护技术的研究现状与展望[J]. 腐蚀与防护,2009,30(11):801—805.  
LIN Nai-ming, XIE Fa-qin, WU Xiang-qing, et al. Review on the Development and Prospect of Surface Protection Technology for Oil Casing Tubes[J]. Corrosion & Protec-

tion,2009,30(11):801—805.  
[2] 王峰,王立贤,刘智勇,等. TP110TS 油管钢在酸性气田环境中的应力腐蚀行为研究[J]. 表面技术,2015,44(3):57—62.  
WANG Feng, WANG Li-xian, LIU Zhi-yong, et al. Study on Stress Corrosion Behavior of TP110TS Oil Pipeline Steel in the Sour Gas Field Environment[J]. Surface Technology, 2015,44(3):57—62.  
[3] 姚小飞,谢发勤,韩勇,等. TC4 合金和 P110 油管钢摩擦磨损性能的比较[J]. 稀有金属材料与工程,2012,41(9):1539—1543.  
YAO Xiao-fei, XIE Fa-qin, HAN Yong, et al. Comparison of Friction Wear Properties between TC4 Titanium Alloy and P110 Tubing Steel[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2012,41(9):1539—1543.  
[4] 汤金钢,刘道新,唐长斌,等. Ti6Al4V 钛合金表面 Zr-N 合金化层的抗高温摩擦磨损性能[J]. 稀有金属材料与工程,2013,42(2):331—335.  
TANG Jin-gang, LIU Dao-xin, TANG Chang-bin, et al. Tribology Behavior of Zr-N Alloying Layer on Ti6Al4V Alloy Surface at Elevated Temperature[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2013,42(2):331—335.  
[5] 王梅改,宋延沛. SP700 钛合金的热处理/阳极氧化工艺研究[J]. 表面技术,2015,44(6):22—26.  
WANG Hui-gai, SONG Yan-pei. Heat Treatment and Anodic



- Oxidation Process of SP700 Titanium Alloy [J]. Surface Technology, 2015, 44(6): 22—26.
- [6] 秦林, 李哲, 马连军, 等. Ti6Al4V 合金渗镀 Cr-Mo 表面改性层组织结构及其耐磨特性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(12): 2226—2229.
- QIN Lin, LI Zhe, MA Lian-jun, et al. Study on Microstructure and Wear Resistance of Cr-Mo Surface Modified Layer on Ti6Al4V by Double-glow Plasma Technique [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(12): 2226—2229.
- [7] 谭思民, 王帅星, 赵晴, 等. 水热时间对钛合金微弧氧化膜合成羟基磷灰石的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(3): 20—24.
- TAN Si-min, WANG Shuai-xing, ZHAO Qing, et al. Effects of Hydrothermal Time on Hydroxyapatite Synthesis of Micro-arc Oxidized Titanium [J]. Surface Technology, 2014, 43(3): 20—24.
- [8] 吕祥鸿, 舒滢, 赵国仙, 等. 钛合金石油管材的研究和应用进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(6): 1518—1524.
- LV Xiang-hong, SHU Ying, ZHAO Guo-xian, et al. Research and Application Progress of Ti Alloy Oil Country Tubular Goods [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(6): 1518—1524.
- [9] 高霁, 宋德阳, 冯俊文. 工艺参数对钛合金激光熔覆 CBN 涂层几何形貌的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 77—80.
- GAO Ji, SONG De-yang, FENG Jun-wen. Influence of Processing Parameters on Geometrical Features of CBN Coatings by Laser Cladding on Titanium Alloy Surface [J]. Surface Technology, 2015, 44(1): 77—80.
- [10] 乔奇光, 乔正阳, 李时威, 等. 某产品钛合金性能及台阶轴磨削[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 108—109.
- QIAO Qi-guang, QIAO Zheng-yang, LI Shi-wei, et al. Performance and Stepped Shaft Grinding of Titanium Alloy of Guided Product [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 108—109.
- [11] 唐艳茹, 潘利华, 常宇, 等. 微弧氧化提高铝合金耐磨性能的研究[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 48—54.
- TANG Yan-ru, PAN Li-hua, CHANG Yu, et al. Improving the Wear Resistance of Aluminum Alloy through the Micro-arc Oxidation Technology [J]. Surface Technology, 2015, 44(2): 48—54.
- [12] 黄传辉, 王庆良, 史兴岭. 微弧氧化钛合金的电化学腐蚀行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(7): 1161—1165.
- HUANG Chuan-hui, WANG Qing-liang, SHI Xing-ling. Electrochemical Corrosion Behaviors of Micro-arc Oxidation Titanium Alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(7): 1161—1165.
- [13] 杨钊, 周隆先. 铝合金微弧氧化技术应用研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 131—135.
- YANG Tian, ZHOU Long-xian. Study on Application of Aluminum Alloy with Micro Arc Oxidation [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 131—135.
- [14] 吕宪义, 吴汉华, 汪剑波, 等. 处理液参数对钛合金微弧氧化膜相组成和微结构的影响[J]. 云南大学学报, 2005, 27(5A): 583—586.
- LV Xian-yi, WU Han-hua, WANG Jian-bo, et al. The Effects of Electrolytical Parameters on Phase Component and Microstructure of Titania Films by MAO [J]. Journal of Yunnan University, 2005, 27(5A): 583—586.
- [15] WANG Y M, GUO L X, OUYANG J H, et al. Interface Adhesion Properties of Functional Coatings on Titanium Alloy Formed by Microarc Oxidation Method [J]. Applied Surface Science, 2009, 255: 6875—6880.
- [16] WANG Y M, JIANG B L, LEI T Q, et al. Microarc Oxidation and Spraying Graphite Duplex Coating Formed on Titanium Alloy for Antifriction Purpose [J]. Applied Surface Science, 2005, 246: 214—221.
- [17] SHANG W, CHEN B Z, SHI X C, et al. Electrochemical Corrosion Behavior of Composite MAO/Sol-Gel Coatings on Magnesium Alloy AZ91D Using Combined Micro-arc Oxidation and Sol-Gel Technique [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 474: 541—545.