

热氧化 TC4 合金在模拟油田介质中的冲蚀磨损行为

林乃明¹, 邹娇娟¹, 田伟^{1,2}, 马永¹, 王振霞¹, 秦林¹, 王志华¹, 唐宾¹

(1. 太原理工大学, 山西 太原 030024)

(2. 中联西北工程设计研究院, 陕西 西安 710082)

摘要: 采用热氧化技术对 TC4 合金进行表面处理, 使用扫描电镜、能谱仪、光学显微镜、辉光光谱分析仪和 X 射线衍射仪分析热氧化 (TO) 层的特征, 研究了热氧化 TC4 合金在模拟油田介质中的冲蚀磨损行为。结果表明: 热氧化层主要由金红石相组成, 热氧化层具有更高的表面硬度, 更低的冲蚀磨损失重。热氧化处理显著提高了 TC4 合金在模拟油田介质中的抗冲蚀磨损性能。

关键词: 冲蚀磨损; 热氧化; TC4 合金; 油田介质; 油管

中图分类号: TG115.5⁺8; TG146.2⁺3; TG178

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)12-4000-06

世界范围内对油气资源的需求日益增长, 促使油气田的开发逐渐向纵深发展^[1]。为保障国家能源安全, 我国的油气开采力度逐年加大, 西部地区一些地质结构复杂、腐蚀环境严酷(高 H₂S、CO₂、Cl⁻含量)和高温、高压、超深等苛刻条件的油气田相继开发^[2]。腐蚀会引起油管的破损甚至失效^[3], 耐蚀性是重要的选材考量指标之一^[4]。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, 已在诸多领域得到应用^[5]。鉴于其所具有的诸多优点, TC4 合金是很有潜力的油管材料^[1,6]。但是, TC4 合金表面承载能力低、耐磨性差^[5], 磨损会破坏 TC4 合金表面的自氧化膜, 进而产生并促进腐蚀。直接将 TC4 合金作为油管使用将威胁结构的安全性和可靠性。由此可见, 改善 TC4 合金表面的耐磨性是保障其服役安全的关键^[7]。钛与氧的化学亲和性较高, 热氧化工艺已被认为是一种提高钛及钛合金耐磨性的有效方法^[8]。本研究对 TC4 合金进行热氧化处理, 提高其表面性能, 对比研究 TC4 合金和热氧化 (TO) TC4 合金在 CO₂ 饱和模拟某油田采出液中的冲蚀磨损行为, 旨在为拓展 TC4 合金在石油管材方面的应用提供试验依据。

1 实验

材料取自退火态 TC4 合金棒材, 由电火花线切割成尺寸为 $\Phi 12$ mm \times 4 mm 的试样, 其成分(质量分数, %): 6.70 Al、4.21 V、0.10 Fe、0.14 O、0.07 Si、

0.03 C、0.015 N、0.003 H, Ti 余量。试样经 SiC 砂纸逐级打磨至 800#, 丙酮中超声清洗, 蒸馏水洗, 冷风干燥后备用。利用电阻炉对 TC4 合金进行热氧化处理: 热氧化温度 973 K, 保温时间 30 h。分别采用扫描电子显微镜及其配备的能谱仪, X 射线分析仪分析热氧化层的表面形貌/成分和相结构。使用图象分析仪观察热氧化层的截面形貌, 使用维氏显微硬度计测取各试样的表面硬度。

采用自制的冲蚀实验装置, 测试条件如下: 液相介质为 CO₂ 饱和模拟油田采出液^[9], 实验温度 363 K; 冲蚀时间 120 h, 转轴的转速 200 r/min, 测试过程中始终以一定的流量向溶液内通入 CO₂ 气体, 每组试样分别取 3 件平行试样。相关研究表明: 在原油开采过程中, 采出液内的含砂率通常不超过 1%^[10], 本实验中将含砂率人为地提高至 10%, 用以加速实验进程。选用粒度为 ~ 200 μ m 的多棱角棕刚玉(Al₂O₃, 硬度 (HV)为 20 000 \sim 23 000 MPa), 用以模拟采出液中的砂粒(见图 1)。刚玉会随着转轴底部叶片的转动而悬浮于溶液中, 随着液体的流动而运动, 进而产生对试样表面的冲蚀作用。冲蚀磨损实验装置示意图见文献[11]。本实验通过对比冲蚀磨损实验前后测试试样的质量变化, 即失重法来评价各试样的抗冲蚀性能。全部试样均经丙酮超声波清洗, 干燥后, 使用电子分析天平(精度 0.01 mg)称重。使用扫描电镜观察试样的冲蚀形貌并分析破坏机理。

收稿日期: 2016-12-15

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

作者简介: 林乃明, 男, 1981 年生, 博士, 讲师, 太原理工大学表面工程研究所, 材料强度与结构冲击山西省重点实验室, 山西 太原 030024, 电话: 0351-6010540, E-mail: lnmlz33@126.com

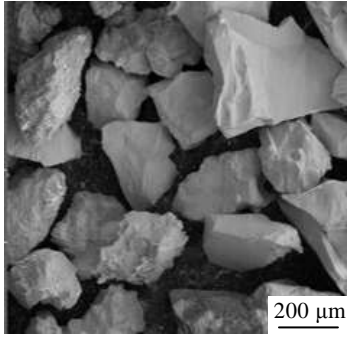


图 1 刚玉颗粒形貌

Fig.1 Morphology of corundum particle

2 结果与讨论

2.1 特征分析

图 2 为 TC4 合金及氧化层的表面形貌。从图 2a 和图 2b 可见，TC4 合金表面分布着深度不一，方向性明显的浅沟槽，这些沟槽是机械打磨留下的划痕。图 2c 和图 2d 为热氧化层的表面形貌。由图 2c 可见，热氧化处理后，TC4 合金表面的划痕变得模糊，有些划痕甚至被填平。观察图 2d 可以发现热氧化 TC4 合金表面分布有大量细小的白色颗粒，根据图中标尺可知，大部分氧化颗粒的尺寸在纳米级，局部表面有少量达到微米级的大颗粒。

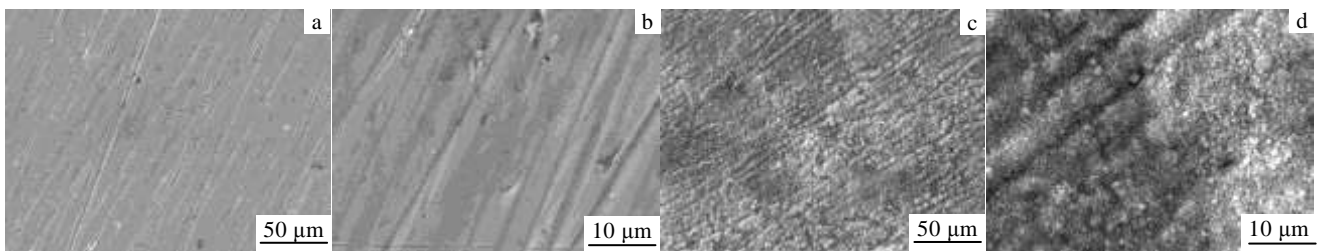


图 2 TC4 合金和热氧化层的表面形貌

Fig.2 Surface morphologies of TC4 alloy (a, b) and TO layer (c, d)

表 1 给出了 TC4 合金和热氧化 TC4 合金的表面成分分析结果。由于 TC4 合金具有一定的钝化能力，在空气中放置一定时间后表面会生成一层较薄的氧化膜，因此在进行表面成分测试时，可以发现表面除了 Ti、Al、V 3 种主要元素外，还检测出少量的 O。在一定条件下，Ti、Al、V 均可与 O 发生反应，热氧化 TC4 合金表面除了 Ti、Al、V 3 种主要元素外，O 含量显著提高，说明表面生成了氧化物层。

图 3 为 TC4 合金表面热氧化层的 XRD 图谱。由图 3 可以发现，金红石相的衍射特征峰最为显著，Ti(O) 和锐钛矿相的峰值强度较弱，说明热氧化层主要由金红石相组成。

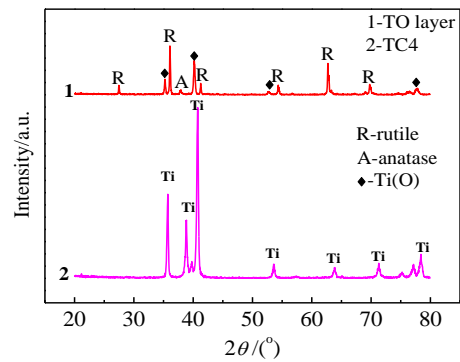


图 3 TC4 合金和热氧化层的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of TC4 alloy and TO layer

表 1 TC4 合金和热氧化层的表面成分

Table 1 Surface composition of TC4 alloy and TO layer (ω/%)

Element	TC4	TO layer
O	6.06	44.26
Al	5.67	10.94
Ti	84.90	41.99
V	3.37	2.81
Total	100.00	100.00

取热氧化 TC4 合金的截面，镶嵌、打磨、抛光后，采用 Kroll 侵蚀剂(1~3 vol% HF 和 2~6 vol% HNO₃ 的水溶液) 侵蚀。利用光学显微镜获取热氧化试样的截面形貌，如图 4 所示。图 4a 中最上方的黑色区域为镶嵌体，白色箭头和虚线标示的即为所获得的热氧化层，最下方为 TC4 合金基体。可见，热氧化层连续、致密，根据标尺计算出其厚度约为 12 μm。对比图 4b 给出的未处理 TC4 合金原始组织，可以看出图 4a 中热氧化

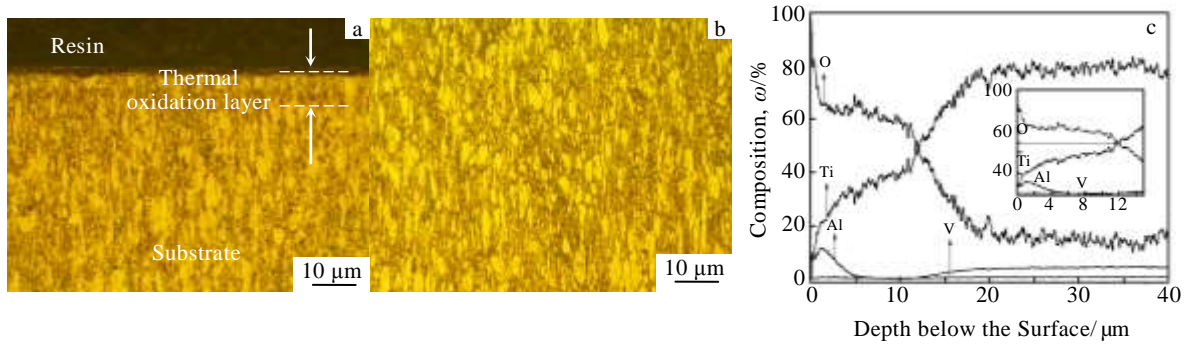


图 4 热氧化层的截面形貌、TC4 基体组织形貌和热氧化层的成分分布

Fig.4 Cross-sectional morphology of TO layer (a), microstructural morphology of TC4 alloy substrate (b), and elemental distribution profile of TO layer (c)

TC4 合金基体材料的晶粒未见明显长大，即在本工艺下进行热氧化不会弱化 TC4 合金的整体力学性能。

图 4c 给出了热氧化 TC4 合金的成分分布曲线。由图 4c 可以发现热氧化层的氧元素呈梯度分布，其含量随着距表面距离的增大而降低。Güler 和 Biswas 等人的研究表明^[12,13]，TC4 合金经热氧化处理后，其表面获得的氧化层由表层的氧化物层和次表层的氧扩散层组成，氧化物层中氧元素含量较高，主要为 TiO₂ 相，而氧扩散层则是氧在 α-Ti 中的固溶体，故氧含量较低。图 4c 中所示的氧化层成分曲线则明显地表现出氧化层由氧化物层和氧扩散层组成，而氧化物层+氧扩散层的分布特征可保证热氧化层与 TC4 基体之间的牢固结合^[14]。此外，由图 4c 还可发现热氧化层内有一段富铝区和一段贫铝区，说明在热氧化过程中铝元素向外迁移，与氧结合形成铝的氧化物，并阻碍氧元素的扩散，但生成的氧化铝层较薄，未能由 XRD 检测出来。

根据逐点的硬度测量结果绘制成热氧化层的显微硬度值-距表面距离变化曲线，如图 5 所示。由图 5 可以看出，热氧化层的表面硬度最高，由表及里逐渐降低，硬度值曲线呈现出梯度降低趋势。

对于热氧化层而言，其最外层为氧化物层，其中的金红石型 TiO₂ 含量较多，而金红石型 TiO₂ 又是 3 种 TiO₂ 中性能最好、最为稳定的，因此外表层的硬度较高。随着距离表面距离的增大，进入氧扩散层，金红石型 TiO₂ 含量逐渐降低，硬度也逐渐降低。图 4c 所示的成分分析结果表明，热氧化层内 Ti 和 O 2 种元素在热氧化层内均呈梯度分布特征，热氧化层成分由表及里的渐变使得其物相组织、结构亦呈现该非单一性特征，故其截面硬度没有出现陡降，也呈现梯度分布特征，这样的硬度分布有利于改善 TC4 合金表面的承载能力和抗磨损性能^[15]。

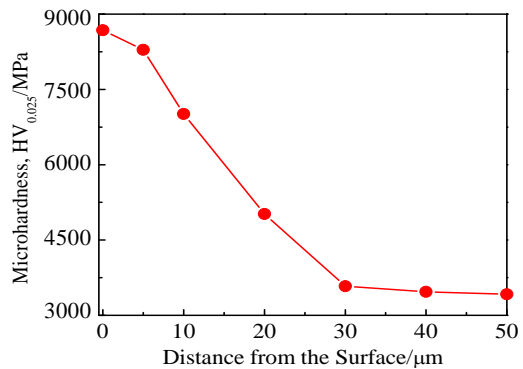


图 5 热氧化层的硬度分布曲线

Fig.5 Plot of hardness profile-distance from the surface of TO layer

2.2 冲蚀磨损行为

表 2 为测试试样的冲蚀磨损结果。可见，热氧化层由冲蚀磨损引起的失重远低于 TC4 合金(为 TC4 合金的 26%)，即热氧化层具有更好的抗冲蚀磨损性能，能够对其下方的 TC4 合金基材起到很好的保护作用。TC4 合金和热氧化层在冲蚀磨损过程中的失重量相差较大。由此可见，它们所受冲蚀的破坏程度不同。

图 6 给出了 TC4 合金的不同放大倍数下的冲蚀表面形貌。由图 6 可以看出，TC4 合金冲蚀表面较为粗糙，方向性明显的平行沟槽为砂纸打磨后留下的划痕，划痕中间分布有大小不等的凹坑和小沟槽。由凹坑和

表 2 测试试样的冲蚀磨损结果

Table 2 Erosive wear results of tested samples		
Sample	Average loss/g	Relative loss
TC4 alloy	0.144	1.00
TO layer	0.037	0.26

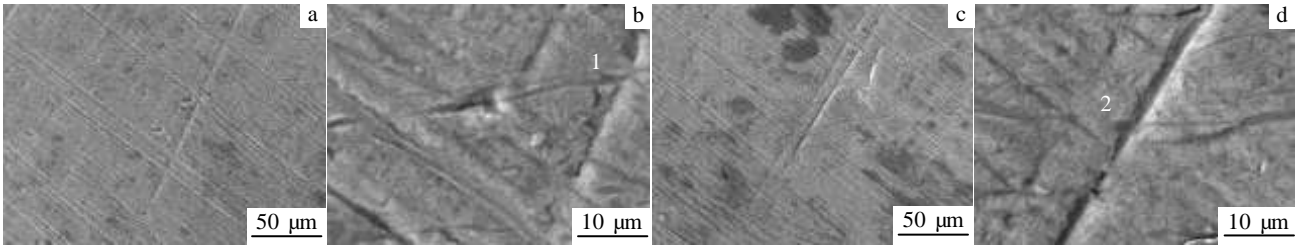


图 6 TC4 合金的冲蚀磨损表面形貌

Fig.6 Surface morphologies of erosive wear TC4 alloy

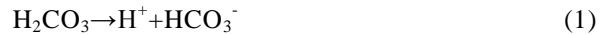
小沟的形状，再结合表 2 可知，这些凹坑和小沟槽为刚玉颗粒冲击 TC4 合金表面所致。冲蚀磨损实验开始后，搅拌叶片的转动使得液相介质以一定速度定向流动，随着液体流动而悬浮起来的刚玉颗粒便会测试试样的表面产生冲蚀(冲击与微切削)作用。固相刚玉颗粒首先将基材表面的氧化膜切削掉，露出下方的新鲜表面；而 TC4 合金的表面硬度远低于刚玉颗粒，刚玉颗粒在 TC4 合金表面上留下切削凹坑和小沟槽的同时，还会引起表面局部形变，形成微小的形变区原电池，加速其损伤。液相介质则会对 TC4 合金产生腐蚀作用，并生成腐蚀产物膜^[16,17]。TC4 合金表面在单一腐蚀工况下，TC4 合金表面致密的钝化膜及其较强的钝化能力使其表现出优异的耐蚀性，但在本实验过程中存在固体颗粒的冲蚀作用，TC4 合金表面较薄的自生型钝化膜极易被去除，暴露出新鲜基体表面。在冲蚀磨损作用下，固体颗粒冲蚀部位的钝化膜被破坏后，会导致该部位的电极电位降低、活性增加，局部破损区域与其它未破损的钝化膜会发生小阳极-大阴极的电化学腐蚀。随着测试的进行，冲蚀局部去钝化和电化学再钝化的交替亦或是竞争过程使得冲蚀部位的钝化膜不断破坏又不断生成，这种循环加剧了材料局部区域的损伤与消耗^[16,17]。

表 3 给出了图 6b 中位置 1 和图 6d 中位置 2 对应的能谱分析结果，结合图 6 显示的 TC4 合金基材冲蚀形貌，可以认为凹坑处为被刚玉颗粒的冲蚀作用去除了腐蚀产物膜而裸露出的 TC4 合金基材。

表 3 图 6 中不同位置的 TC4 合金冲蚀表面的能谱分析
Table 3 EDS spectrum analysis of erosion-corroded TC4 alloy surface in Fig.6 (ω/%)

Position	O	Ti	Al	V
1	6.31	84.86	5.67	3.16
2	4.24	87.69	5.96	2.11

为保持液相介质的腐蚀性，本实验周期内始终向溶液中通入 CO₂。一般地，干燥的 CO₂(相对湿度小于 60%)腐蚀性较弱，但是，当 CO₂ 溶于水后会形成电离度较低的弱酸，可产生大量 H⁺，并不断向金属表面迁移，可以满足阴极析氢反应所需的 H⁺，如式(1)和式(2)所示：



研究表明，在相同的 pH 值条件下，CO₂ 水溶液的腐蚀性比盐酸还要高^[18]。此外，模拟油田采出液中还含有较多的 Cl⁻，在腐蚀的初始阶段，Cl⁻ 会在 TC4 合金表面的划痕处富集，亦增加了该处的酸度，促进基体的腐蚀；Cl⁻ 半径小，具有很强的穿透力，能够破坏 TC4 合金表面腐蚀产物膜的致密性，造成腐蚀产物膜下的局部腐蚀继续存在，促进阳极溶解，从而加剧了材料损伤^[16]。

图 7 模拟了 TC4 合金在冲蚀实验中的破坏过程。由图 7 可见，在初始阶段，TC4 合金表面的腐蚀产物膜对其下方的基体具有一定的保护作用，随着时间的延长，固体颗粒的切削作用逐渐显现；腐蚀产物膜的致密性会降低，保护作用下降，局部腐蚀产物膜被去除，裸露出基体。TC4 合金表面硬度较低，难以抵抗固体粒子的冲击，在表面留下微小冲击坑或切屑槽。TC4 合金自钝化能力较强，钝化膜破坏后，裸露出的基体金属发生再钝化，从而加速了基材的破坏^[16,17,19,20]。

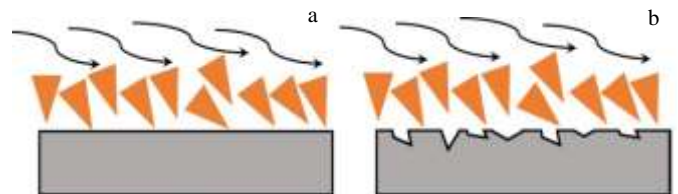


图 7 TC4 合金的冲蚀破坏过程示意图

Fig.7 Damage processing of TC4 alloy in erosive wear:
(a) initial stage and (b) after erosive wear

图 8 为热氧化层的冲蚀表面形貌。由图 8a 可见，热氧化层最表层局部被刚玉颗粒去除，而由高倍视场下的冲蚀形貌图 8b、图 8c 和图 8d 可知，热氧化层的冲蚀破坏不明显，未见到明显的冲蚀坑，刚玉颗粒仅对热氧化层表面产生了类似于机械研磨的破坏。热氧化处理显著提高了 TC4 合金的表面硬度，可以在一定程度上抵御刚玉颗粒的破坏作用；同时，热氧化层良好的化学稳定性和物理阻挡作用亦在一定程度上缓解了 CO₂ 饱和模拟油田采出液对热氧化层下方 TC4 合金基体的腐蚀^[16,17]。

选取热氧化层冲蚀表面的典型区域进行能谱分析，结果如表 4 所示。综合热氧化层的冲蚀表面形貌和能谱分析结果可知，热氧化层表面冲蚀损伤轻微，未暴露出下方的 TC4 基体，可见热氧化层可以抵御冲蚀磨损破坏，对 TC4 具有良好的保护作用。

图 9 显示了热氧化层的冲蚀破坏过程。当表层较疏松的氧化层被固体粒子冲蚀去除后，露出致密的氧化层，该致密氧化层不仅具有较高的硬度，同时其会在表面形成高的残余压应力，可以抵御刚玉颗粒的撞击对其

表面产生的犁削、切削和疲劳等损伤^[14]。此外，连续、致密的热氧化层在液相腐蚀介质中具有极高的化学稳定性，能够显著抑制液相介质的腐蚀作用^[12,13]。因此，热氧化层较 TC4 合金表现出更好的抗冲蚀磨损性能。

2.3 讨论

冲蚀磨损过程中，固体粒子的冲蚀与电解质的腐蚀具有协同的破坏作用。在固-液两相冲蚀磨损过程中，材料的破坏是以下 4 种因素共同作用的结果^[20]：材料表面的钝化性保护膜或腐蚀产物膜被固体粒子的持续冲蚀作用破坏，并被流动的液相介质带走，裸露出新鲜金属表面，形成大阴极小阳极的腐蚀原电池，加速材料的腐蚀，即冲蚀促进腐蚀破坏；对于表面低硬度材料，在固-液两相流的冲击作用下，材料表面会产生大量形变，形成不同应变区原电池，亦加速了材料的损失；局部的冲击损伤和点腐蚀均会增加表面粗糙度，增大了有效暴露表面积，进而使得冲蚀作用增强；流动的液相介质也能持续传递阴极反应物(如溶解氧)，从而加速材料损伤。

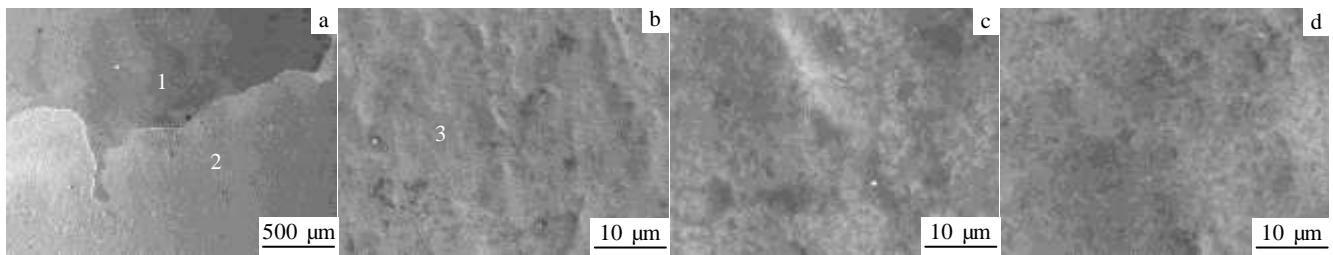


图 8 热氧化层的冲蚀表面形貌

Fig.8 Surface morphologies of erosion-corroded TO layer

表 4 图 8 中不同位置的热氧化层冲蚀表面的能谱分析结果

Table 4 EDS spectrum analysis of erosion-corroded TO layer surface in Fig.8 (wt%)

Position	O	Ti	Al	V
1	44.24	42.63	10.25	2.88
2	40.67	48.12	8.63	2.58
3	39.24	49.69	8.82	2.25

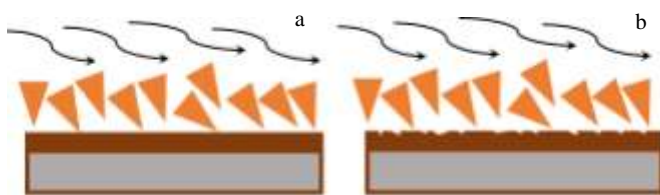


图 9 热氧化层的冲蚀破坏过程示意图

Fig.9 Damage processing of TO layer in erosive wear: (a) initial stage and (b) after erosive wear

微观层面研究表明，钛及其合金的电子排布和晶体结构使得其耐磨性差，宏观层面则是其表面的低硬度使得钛及其合金表现出较低的磨损抗力^[14,21]。因此，在本测试条件下，TC4 表面损伤严重，冲蚀磨损失重量较大。相关研究表明：钛的氧化物的生成是由其生成自由能决定的，在高温下 TiO₂ 的生成自由能仍然非常低，能够稳定地存在^[21]。TiO₂ 具有屏蔽效应，在腐蚀环境介质中减少了 TC4 基体与腐蚀介质的接触面积，且 TiO₂ 具有良好的化学稳定性，从而有效提高了 TC4 的耐蚀性^[8]。钛与氧的化学亲和力较高，通过控制氧化温度和加热时间，氧向 TC4 内扩散，氧能够以间隙原子的形式存在于晶体结构内，发挥固溶强化作用；随着热氧化反应的进一步进行，TC4 表面形成一层金红石型 TiO₂ 层，从而显著提高了 TC4 合金的表面性能^[21]。

3 结论

1) 对 TC4 合金进行热氧化处理, 在表面获得了连续、致密的氧化层, 热氧化层主要由金红石相 TiO_2 组成。

2) 热氧化处理后, TC4 合金表面的氧含量显著提高, 氧元素呈梯度分布, 由表及里逐渐降低。热氧化层具有较高的硬度, 其硬度值也呈梯度分布, 由表及里逐渐减小。

3) 固体粒子和液相介质的协同破坏作用促进了 TC4 合金表面的材料损失, TC4 合金的冲蚀磨损失重量明显高于热氧化层, TC4 合金的损伤程度比热氧化层严重。热氧化处理显著提高了 TC4 合金的抗冲蚀磨损性能, 有望满足 TC4 合金应用于油田环境时使役性能的需要。

参考文献 References

- [1] Lv Xianghong(吕祥鸿), Shu Ying(舒滢), Zhao Guoxian(赵国仙) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(6): 1518
- [2] Tian Wei(田伟), Xie Faqin(谢发勤), Zhao Xuehui(赵雪会). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(3): 482
- [3] Lin Naiming(林乃明), Xie Faqin(谢发勤), Wu Xiangqing(吴向清) *et al. Corrosion & Protection*(腐蚀与防护)[J], 2009, 30(11): 801
- [4] Yao Xiaofei(姚小飞), Xie Faqin(谢发勤), Han Yong(韩勇) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(8): 1463
- [5] Zhang Jianbin(张建斌), Yu Dongmei(余冬梅). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(1): 247
- [6] Yao Xiaofei(姚小飞), Xie Faqin(谢发勤), Han Yong(韩勇) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(9): 1539
- [7] Wang Zhenxia(王振霞), He Zhiyong(贺志勇), Wang Yingqin(王英芹) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(7): 1186
- [8] Wang Yan(王燕), Ni Jing(倪静), Liu Cheng(刘澄) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(S1): 434
- [9] Lin N M, Zhou P, Wang Y T *et al. Surface Review and Letters*[J], 2015, 22(3): 1 550 033
- [10] Li Pingquan(李平全). *Steel Pipe*(钢管)[J], 2006, 35(4): 57
- [11] Akinci A, Ercenk E, Yilmaz S *et al. Materials and Design*[J], 2011, 32(5): 3106
- [12] Güleriyüz H, Çimenoglu H. *Surface and Coatings Technology* [J], 2005, 192(2-3): 164
- [13] Biswas A, Majumdar J D. *Materials Characterization*[J], 2009, 60(6): 513
- [14] Dong H, Bell T. *Wear*[J], 2000, 238(2): 131
- [15] Qin Lin(秦林), Li Zhe(李哲), Ma Lianjun(马连军) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(12): 2226
- [16] Xu J, Zhuo C Z, Han D Z *et al. Corrosion Science*[J], 2009, 51: 1055
- [17] Xu J, Zhuo C Z. *Materials and Corrosion*[J], 2010, 61(1): 7
- [18] Jiang X, Zheng Y G, Qu D R *et al. Corrosion Science*[J], 2006, 48(10): 3091
- [19] Ahmad Z, Aleem A B J. *Tribology-Materials, Surface and Interface*[J], 2009, 3(1): 41
- [20] Wang Jihui(王吉会), Jiang Xiaoxia(姜晓霞), Li Shu(李曙) *et al. Chinese Journal of Materials Research*(材料研究学报)[J], 2003, 17(5): 449
- [21] Zhang Chunyan(张春艳), Li Chuntian(李春天), Zhang Jin(张津). *Surface Technology*(表面技术)[J], 2008, 37(6): 18

Erosive Wear Behavior of Thermal Oxidized TC4 Alloy in Simulated Oilfield Medium

Lin Naiming¹, Zou Jiaojuan¹, Tian Wei^{1,2}, Ma Yong¹, Wang Zhenxia¹, Qin Lin¹, Wang Zhihua¹, Tang Bin¹

(1. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. China United Northwest Institute for Engineering & Research, Xi'an 710082, China)

Abstract: Thermal oxidation (TO) process was applied to treat TC4 alloy. Microstructural characteristics of the TO layer were analyzed using scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), optical microscope (OM), glow discharge optical emission spectrometer analysis (GDOES) and X-ray diffraction (XRD). Erosive wear behaviors of the TO treated TC4 alloy in CO_2 -saturated simulated oilfield medium were investigated. The results show that the obtained TO layer is mainly composed of rutile TiO_2 phase. The TO layer possesses higher surface hardness and lower mass loss value. TO treatment has significantly improved the resistance to erosive wear of TC4 alloy.

Key words: erosive wear; thermal oxidation; TC4 alloy; oilfield medium; oil tube

Corresponding author: Lin Naiming, Ph. D., Lecturer, Research Institute of Surface Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, Tel: 0086-351-6010540, E-mail: lnmlz33@126.com