

对磨材料对 TC11 合金高温磨损行为的影响

张秋阳, 王树奇, 李新星, 王 兰

(江苏大学, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 采用高温磨损试验机对 TC11 合金在 400、500、600 °C 进行磨损试验, 研究对磨材料 GCr15 和 M2 钢对 TC11 合金的磨损行为的影响。结果表明, TC11 合金无论与 GCr15 还是 M2 钢对磨, 磨损率均随温度的升高而降低, TC11 合金表现出优异的高温耐磨性。在大多数情况下, TC11 合金磨损率随载荷增加均处于较低值且波动较小, 但在 400 °C、超过 200 N (与 GCr15 钢对磨) 时和在 400、500 °C, 大于 200 N (与 M2 钢对磨) 时磨损率显著增加。与 M2 钢对磨比与 GCr15 钢对磨使 TC11 合金磨损率升高。TC11 合金的高耐磨性归因于摩擦氧化物层的保护作用。硬的对磨材料(M2 钢)比软的对磨材料(GCr15 钢)易于破坏 TC11 合金表面摩擦氧化物层而损害其保护作用。

关键词: 钛合金; 高温; 磨损行为; 摩擦氧化物

中图分类号: TH117.1; TG146.2*3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)09-2285-05

材料的磨损行为和耐磨性不仅取决于材料本身, 还与对磨材料、实验条件和摩擦材料与环境的交互作用相关^[1]。目前, 国内外有关钢铁材料、铝合金、镁合金的摩擦磨损研究较多, 对他们的磨损行为和耐磨性均具有较深入的了解。而对钛合金的摩擦磨损研究相对较少^[2-5]。普遍认为, 钛合金的耐磨性很差, 其原因是摩擦氧化物不具备保护作用, 故用于摩擦工况下钛合金必须通过表面处理来提高耐磨性^[2]。然而, 近期姚小飞等和本课题组对 TC4 合金的研究表明, 钛合金并不是在所有的工况下都具有差的耐磨性, 而且发现随着温度的升高, 磨损率显著降低^[6-8]。可见, 目前国内外对钛合金的磨损行为和耐磨性等还没有深入的了解, 急需对各类钛合金在不同工况下的磨损行为及磨损机制进行广泛的研究。

TC11 合金是工作在 500 °C 下的双相耐热钛合金, 对其高温耐磨性的研究尚未见报道, 特别是对磨材料对钛合金的磨损行为的影响尚不清楚。本工作的主要目的就是研究对磨材料对钛合金的磨损行为和磨损机制的影响, 进一步验证钛合金的高温耐磨性是否具有普遍性, 通过对磨面和剖面的物相和形貌的分析, 探讨对磨材料对耐磨性的影响机制。

1 实 验

采用 MG-2000 型销盘式高温磨损试验机进行磨

损试验。选用 TC11 钛合金并加工成直径 6 mm、高度 12 mm 的销轴, 其化学成分为 (质量分数, %): 5.84 Al、3.86 Mo、1.57 Zr、0.32 Si、余量 Ti。GCr15 和 M2 钢分别加工成直径 70 mm、厚度 10 mm 的对磨盘。TC11 合金在 955 °C 固溶水淬, 随后在 540 °C 时效 4 h, 空冷(36 HRC)。GCr15 钢 850 °C 奥氏体化油淬, 在 400 °C 回火 2 h 获得硬度 50~52 HRC。M2 钢 1180 °C 奥氏体化油淬, 进行 3 次 540 °C/2 h 回火, 获得硬度 62~64 HRC。

磨损试验参数如下: 试验温度为 400、500 和 600 °C; 载荷为 50、100、150、200 和 250 N; 滑动速度为 1 m/s; 滑动距离为 1.2×10^3 m。试验前采用 16 μm 碳化硅砂纸对销和盘表面磨光并用丙酮清洗。磨损后用精度为 0.01 mg 电子天平测量销轴的磨损失重, 然后利用钛合金密度 4.5 g/cm³ 转化为磨损体积并除以滑动距离, 得到磨损率。

采用 JSM-7001F 型扫描电镜观察磨损表面和亚表面截面形貌。采用 D/Max-2500/pc X 射线衍射仪(XRD)分析磨面物相。利用 HVS-1000 型显微硬度仪测量磨损后摩擦氧化物层的硬度(载荷 0.49 N、加载时间 15 s)。采用 HR-150A 洛氏硬度仪测量试验材料的硬度。

2 结果与讨论

收稿日期: 2014-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(51071078); 江苏省材料摩擦学重点实验室开放基金(Kjsmxcx2012004); 江苏省普通高校研究生科研创新项目(CXLX13-653)

作者简介: 张秋阳, 男, 1989 年生, 博士生, 江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013, 电话: 0511-88797618, E-mail: miracle8980@126.com

2.1 磨损率

图 1 为不同温度下 TC11 合金与 GCr15 和 M2 钢对磨时磨损率与载荷的关系。可以看出, 无论与 GCr15 还是 M2 钢对磨, TC11 合金的磨损率均随温度升高而降低。在大多数情况下, TC11 合金磨损率随载荷增加均处于较低值且波动较小, 然而在 400 °C、大于 200 N (与 GCr15 钢对磨) 时和在 400、500 °C, 大于 200 N (与 M2 钢对磨) 时磨损率显著增加。因此, 可以认为 TC11 合金具有出色的高温耐磨性。与 GCr15 对磨相比之下, 与 M2 钢对磨时 TC11 合金的磨损率随温度升高而下降幅度增加了, 且磨损率高于与 GCr15 对磨时的磨损率 (除了 400 °C、250 N 的情况下)。

2.2 磨面物相和形貌分析

图 2 给出了 TC11 合金与 GCr15 和 M2 钢对磨时磨损表面的 XRD 分析结果。可见, 在 400 °C 下, 与 GCr15 钢对磨时, 少量的 TiO₂ 和 Fe₂O₃ 出现, 但在 250 N 摩擦, 氧化物消失。同样与 M2 钢对磨时, 少量 TiO₂ 出现, 而在 250 N 下, 无摩擦氧化物。在 500 °C 下, 与 GCr15 钢对磨时, 出现大量的摩擦氧化物, 主要包

括 TiO₂ 和 Fe₂O₃, 此外还有 Fe₂TiO₅ 出现。而与 M2 钢对磨时, 和 400 °C 下的情况相同。当温度达到 600 °C 时, 无论哪种对磨材料, 大量的 TiO₂ 和 Fe₂O₃ 出现。可以发现, 与 GCr15 钢对磨比与 M2 钢对磨时, TC11 合金磨面产生更多的摩擦氧化物。但当载荷超过 200 N 时, 与 M2 钢对磨时摩擦氧化物数量大大减少, 而与 GCr15 钢对磨依然保持大量的摩擦氧化物存在。磨面摩擦氧化物的出现对摩擦系数的变化也会产生一定的影响。高温下, 摩擦系数能达到 0.4~0.6, 且波动幅度较大, 这可能是由于磨面发生严重氧化所致^[6]。

综上, TC11 合金与不同的材料对磨时导致磨面上摩擦氧化物数量不同, 而摩擦氧化物的存在对磨损行为的影响与摩擦氧化物的数量有关。从图 1 和图 2 对比, 似乎可以看出, 摩擦氧化物的数量与磨损行为为具有一定对应关系。

图 3 给出了 TC11 合金在不同温度下磨面的典型形貌。对于 GCr15 钢作为对磨件时, 在 400 °C 下磨面上出现塑性变形和撕裂痕迹以及沿滑动方向的犁沟, 同时还出现了致密的黑色光滑区和剥落区。后者应该是氧化磨损的典型形貌^[9,10]。而在 500、600 °C 下, 磨损表面均为致密的黑色光滑区和剥落区, 且 600 °C 时的剥落区小于 500 °C 时的。对于 M2 钢作为对磨件时, 在 400 °C 下, 磨面上以塑性变形和撕裂痕迹以及沿滑动方向出现的犁沟为主要特征。而在 500 °C 下, 磨面上出现沿滑动方向的犁沟, 同时出现致密的黑色光滑区和剥落区。600 °C 下, 磨损主要为致密的黑色光滑区和剥落区, 而且其剥落区略多于与 GCr15 钢对磨的情况。

2.3 亚表层截面形貌分析

图 4 示出了 TC11 合金在不同温度下剖面的典型形貌。很明显, TC11 合金在不同温度下磨损过程中均有摩擦氧化物层的形成。然而, 对于不同的对磨材料, 摩擦氧化物层形貌是不同的。当 GCr15 钢作为对磨材

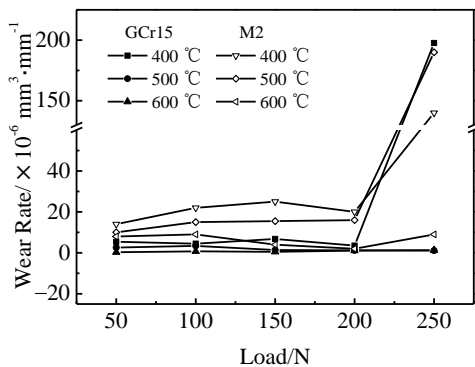


图 1 不同温度下 TC11 合金与 GCr15 和 M2 钢对磨时磨损率随载荷的变化

Fig.1 Wear rate of TC11 alloy as a function of load against GCr15 and M2 steels at different temperatures

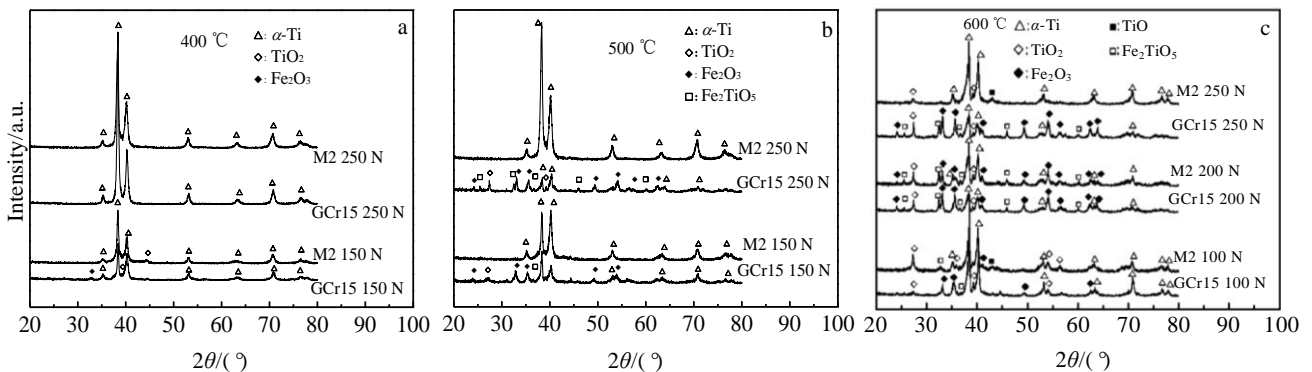


图 2 磨损表面的 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of worn surfaces: (a) 400 °C, (b) 500 °C, and (c) 600 °C

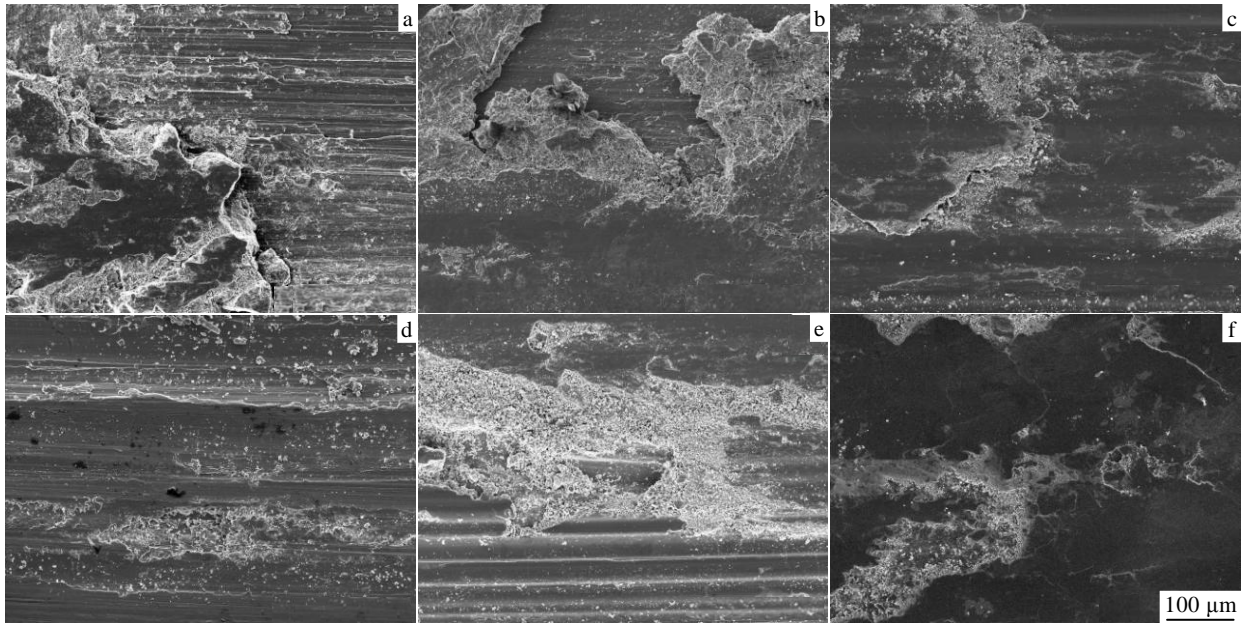


图 3 TC11 合金在不同温度下磨面的典型形貌

Fig.3 Typical morphologies of worn surfaces of TC11 alloy sliding against GCr15 and M2 steels at 400 °C (a, d), 500 °C (b, e), and 600 °C (c, f); (a, b, c) against GCr15 and (d, e, f) against M2

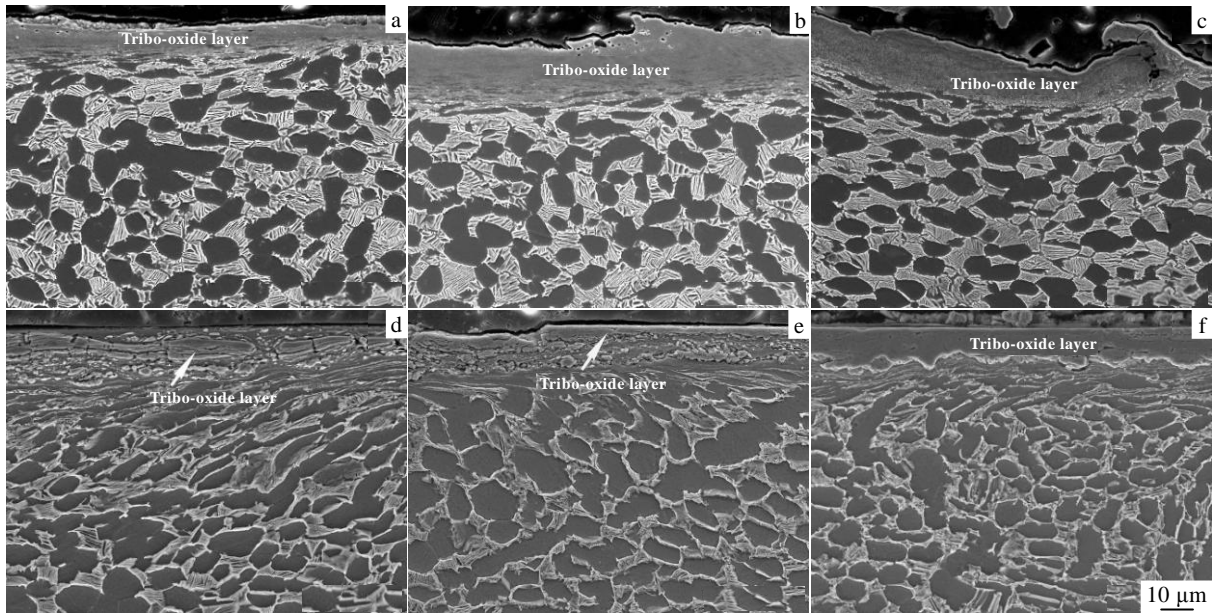


图 4 TC11 合金在不同温度下磨面剖面的典型形貌

Fig.4 Typical sectional morphologies of worn surfaces of TC11 alloy sliding against GCr15 and M2 steels at 400 °C (a, d), 500 °C (b, e), and 600 °C (c, f); (a, b, c) against GCr15 and (d, e, f) against M2

料时，在 400℃下摩擦氧化物层比较致密，厚度为 5~8 μm，而在 500、600 °C，摩擦氧化物层增加到 10~15 μm。而且发现，摩擦氧化物层的致密度随温度增加而提高。当 M2 钢作为对磨材料时，在 400、500 °C 下摩擦氧化物层很疏松，但厚度达到 10~15 μm。当温度达到 600 °C 时，

摩擦氧化物层才变致密，厚度为 10 μm 左右。由此可见，TC11 合金与 GCr15 钢和 M2 钢对磨时，摩擦氧化物层最大的区别是前者比后者的摩擦氧化物层更致密。

2.4 讨论

Rigney^[1] 认为，金属的磨损包含以下过程：磨面

和亚表面的塑性变形、磨屑的形成、材料的转移以及它们与环境的化学反应和机械混合。由于是在大气条件下,在磨面上会形成或多或少的摩擦氧化物层。而这种摩擦氧化物层就会直接影响金属的磨损行为和耐磨性^[11]。

TC11 合金在各温度下,磨面上或多或少会形成摩擦氧化物层,然而摩擦氧化物层所含氧化物数量、厚度及致密程度随着温度、载荷和对磨材料的不同而变化。在与 GCr15 钢对磨时,在 400 °C 下只形成少量摩擦氧化物,摩擦氧化物层厚度达到 5~8 μm 且较致密。这时磨面上出现塑性变形和撕裂痕迹以及沿滑动方向的犁沟,同时出现致密的黑色光滑区和剥落区。可见,磨损机制应该是粘着磨损、磨粒磨损和氧化磨损。但这时摩擦氧化物层的致密度仍较低且附着力差,在 250 N 时摩擦氧化物层完全剥落。当温度达到 500、600 °C 时,磨面上形成大量的摩擦氧化物,摩擦层厚度达到 15~20 μm,且更致密。这时的摩擦氧化物层应该具有完全的保护作用,磨损表面均为致密的黑色光滑区和剥落区^[9,10],这时磨损机制应该是氧化磨损。

相比之下,与 M2 钢对磨时,在 400、500 °C 下摩擦氧化物层厚度可以达到 10~15 μm,但其中所含的氧化物含量却较少。更重要的是摩擦氧化物层不致密。可以理解,不致密的氧化物层的附着力和承载能力较差,对磨面的保护作用就会降低。故在 250 N 载荷下摩擦氧化物层完全剥落。在 400 °C 下,磨面上以塑性变形和撕裂痕迹以及沿滑动方向出现的犁沟为主要特征,故磨损机制为粘着磨损和磨粒磨损。而在 500 °C 下,磨面上出现沿滑动方向的犁沟,同时出现致密的黑色光滑区和剥落区,这时磨损机制应为磨粒磨损和氧化磨损。随着温度增加到 600 °C,摩擦氧化物层变得致密且含有大量的氧化物,磨损形貌主要为致密的黑色光滑区和剥落区,这时磨损机制应该是氧化磨损。

摩擦氧化物层是否具有保护作用和其作用大小取决于它的状态。很明显,含氧化物多、致密和强度高的摩擦氧化物层具有高的承载能力和保护作用。摩擦氧化物层的强度可以采用摩擦层的显微硬度来评价。可以看出,随着温度升高,摩擦氧化物层硬度提高,而且对磨材料对摩擦氧化物层的硬度也有显著的影响。在 400 °C 时两种对磨材料下,销试样摩擦层 HV 硬度分别为 10.84 GPa (对磨 GCr15 钢)和 6.51 GPa (对磨 M2 钢),差别很大;而在 600 °C 时,2 种对磨材料下摩擦层硬度相近,分别为 11.45 GPa (对磨 GCr15 钢)和 11.29 GPa (对磨 M2 钢)。可见,这与磨面的 XRD 结果中氧化物数量是一致的。即摩擦氧

化物层中氧化物数量越多,其硬度越高。

不同对磨材料对摩擦层的摩擦氧化物数量和硬度的影响可以这样理解,当硬的对磨材料(M2 钢)与钛合金摩擦时,对磨面上摩擦氧化物层进行犁铧,当摩擦氧化物层不致密而附着力差时,导致摩擦层的大量剥落。在这种情况下,磨面上的氧化物少,且硬度低。故 400 °C 时,两种对磨材料下摩擦层硬度差别大。而在 600 °C 时,由于温度高,摩擦层的致密度明显提高,导致其附着力和承载能力大大提高,这时即使高硬度的对磨材料也不能使其剥落,故对磨材料对摩擦层的硬度和氧化物含量的影响就降低了。然而,相比于 M2 钢对磨材料,GCr15 钢对磨材料所形成的摩擦氧化物层的致密度和硬度都略高,故产生的摩擦氧化物层保护作用略强。因此,相比之下,与 GCr15 钢对磨时,TC11 合金的磨损率略低。

综上所述,TC11 合金的摩擦氧化物对磨损行为产生了决定性的影响,即钛合金的磨损行为和耐磨性取决于摩擦氧化物层及其保护作用。然而,对于钛合金而言,以往的研究者均认为钛合金的耐磨性差是由于其氧化物层不具保护性^[2-5]。例如,Straffelini 和 Molinari^[4]指出,Ti-6Al-4V 合金的摩擦氧化物层由于不能牢固地附着在磨面上,而无保护作用。Ohidul Alam 和 Haseeb^[5]也得到同样结论。必须指出的是,以往的研究均为室温下的磨损试验。从本研究中 TC11 合金在 400 °C 时仅出现少量的摩擦氧化物的结果,可以推测,在室温下所形成的摩擦层中不含或含微量的氧化物。如此,这样的摩擦层对磨损行为和耐磨性不会有明显的影响,故可以理解这时的摩擦层无保护作用。但传统观点认为钛合金摩擦氧化物层不具保护作用的结论是绝对错误的。

3 结 论

1) TC11 合金无论与 GCr15 还是 M2 钢对磨,磨损率均随温度的升高而降低。在大多数情况下,TC11 合金磨损率随载荷增加均处于较低值且波动较小,但在 400 °C、大于 200 N (与 GCr15 钢对磨)时和在 400 和 500 °C,大于 200 N (与 M2 钢对磨)时磨损率显著增加。

2) 对磨材料对 TC11 合金的磨损率有影响,与 M2 钢对磨比与 GCr15 钢对磨使 TC11 合金磨损率升高,且使磨损率随温度和载荷的变化波动范围增大。

3) TC11 合金在 500、600 °C 表现出优异的高温耐磨性,其原因是高温下所形成的致密、厚而硬的摩擦氧化物层对磨面的保护作用,显著降低磨损率。

4) 作为对磨材料,硬的 M2 钢比软的 GCr15 钢易

于破坏 TC11 合金表面摩擦氧化物层, 使其剥落, 而使磨面的氧化物数量减少, 故损坏其保护作用。

参考文献 References

- [1] Rigney D A. *Wear*[J], 1992, 152(1): 187
- [2] Yerramareddy S, Bahadur S. *Wear*[J], 1992, 157(2): 245
- [3] Budinski K G. *Wear*[J], 1991, 151(2): 203
- [4] Straffelini G, Molinari A. *Wear*[J], 1999, 236(1-2): 328
- [5] Alam M O, Haseeb A S M A. *Tribology International*[J], 2002, 35(6): 357
- [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(8): 1463
- [7] Cui X H, Mao Y S, Wei M X *et al. Tribology Transaction*[J], 2012, 55(2): 185
- [8] Mao Y S, Wang L, Chen K M *et al. Wear*[J], 2013, 297(1-2): 1032
- [9] Wang S Q, Wei M X, Zhao Y T. *Wear* [J], 2010, 269(5-6): 424
- [10] Wang S Q, Wei M X, Wang F *et al. Tribology International* [J], 2010, 43(3): 577
- [11] Pauschitz A, Roy M, Franek F. *Tribology International*[J], 2008, 41(7): 584

Effect of Counterface Materials on Elevated-Temperature Wear Behavior of TC11 Alloy

Zhang Qiuyang, Wang Shuqi, Li Xinxing, Wang Lan
(Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Dry sliding wear tests of TC11 alloy sliding against GCr15 and M2 steels were performed at 400, 500 and 600 °C using a high-temperature wear tester. The effect of counterface materials on elevated-temperature wear behavior of TC11 alloy was studied. Results show that irrespective of counterface materials, the wear rate of TC11 alloy decreases with the increase of temperature, and TC11 alloy presents excellent elevated-temperature wear resistance. In most cases, with the increase of the load, the wear rate keeps a lower value with a small fluctuation. However, the wear rate of the TC11 alloy noticeably increases under more than 200 N at 400 °C with GCr15 steel as counterface and under more than 200 N at 400, 500 °C with M2 steel as counterface. Compared with GCr15 steel, M2 steel results in slight increase of the wear rate for the TC11 alloy. The high wear resistance of TC11 alloy is attributed to the protective role of tribo-oxide layer. The hard M2 steel (compared with soft GCr15 steel) is liable to damage the protective role of tribo-oxide layer.

Key words: titanium alloy; elevated-temperature; wear behavior; tribo-oxides

Corresponding author: Wang Shuqi, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, P. R. China, Tel: 0086-511-88797618, E-mail: shuqi_wang@ujs.edu.cn