

TC4 合金在不同摩擦体系中磨损性能的研究

王 兰¹, 丁红燕², 刘爱辉², 王树奇¹

(1. 江苏大学, 江苏 镇江 212013)

(2. 淮阴工学院 江苏省介入医疗器械研究重点实验室, 江苏 淮安 223003)

摘 要: 对 TC4 合金在 TC4/GCr15 和 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中的磨损行为及磨损特征进行了研究。利用 SEM、EDS 以及 XRD 等对合金磨面和剖面形貌、成分及结构进行了观察与分析。结果表明: 两种摩擦体系中, 在 25 °C, TC4 合金的磨损率均较高, 磨损性能很差; 在 400 °C, 合金在 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中的磨损率远大于 TC4/GCr15 摩擦体系中的; 在 600 °C, TC4 合金的磨损率均较低, 且在 TC4/GCr15 摩擦体系中的磨损率低于 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中的。在 400 和 600 °C, 磨盘材料对合金的磨损率具有不同的影响。磨损率的降低与磨损表面的氧化物数量有关, 当磨损表面形成大量氧化物且能稳定存在时, 磨损率极低, 具有优异的耐磨性。

关键词: TC4 合金; 摩擦体系; 摩擦层; 磨损性能

中图分类号: TG115.5⁺8

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)09-2449-06

材料的磨损是一个由很多因素相互影响的过程, 包括载荷、环境温度、滑动速度、磨面状态以及摩擦副材料等, 其中每个因素的变化都会对材料的磨损性能产生影响^[1]。目前, 上述因素对钢、铝合金以及镁合金磨损行为的影响研究者们已经进行了大量的研究^[2-5], 而这些因素对钛合金磨损行为及磨损性能的影响则研究得较少, 这在很大程度上使得人们对钛合金的磨损行为及磨损机理缺乏全面而系统的认知, 对钛合金的磨损性能一直固守着传统的观点即钛合金具有较差的耐磨性^[6-10]。

为了对钛合金的磨损机理和磨损性能有更加全面的认识, 本实验以应用最为广泛的双相 ($\alpha+\beta$) 钛合金 TC4 (Ti-6Al-4V) 作为研究对象, 研究 TC4 合金在不同摩擦体系中的磨损行为及特征, 探讨摩擦体系中对磨材料对 TC4 合金磨损性能的影响, 以期对 TC4 合金在摩擦磨损工况条件下的广泛应用提供理论依据, 并进一步完善钛合金的摩擦磨损理论。

1 实 验

实验材料分为销和盘两类材料, 销材料为 TC4 合金, 尺寸为 $\Phi 6$ mm \times 12 mm, 对其进行 955 °C 固溶 540 °C 时效处理, HV 硬度为 3300~3500 MPa; 盘材料分别为轴承钢 GCr15 和高速钢 W6Mo5Cr4V2, 尺寸为 $\Phi 70$ mm \times 10 mm, 对 GCr15 进行淬火加高温回火处

理, HV 硬度为 3700~3900 MPa, 对 W6Mo5Cr4V2 进行淬火加 3 次高温回火处理, HV 硬度为 7200 MPa。实验前销的端面分别用 280[#]、400[#]、500[#]和 600[#]碳化硅砂纸依次磨平, 盘的表面用磨床磨平, 销和盘的表面粗糙度分别为 0.38 和 0.3 μ m。磨损实验前后, 销和盘试样均用丙酮超声波清洗, 吹干后用精度为 0.01 mg 的分析天平称重。

采用 MG-2000 销盘式高温高速摩擦磨损试验机进行磨损实验, 实验在大气环境中进行, 环境温度为 25, 400 和 600 °C, 载荷为 50~250 N, 转速和滑动距离分别固定于 1 m/s 和 1.2×10^3 m。磨损率 W_s 根据公式 $W_s=\Delta m/\rho L$ 计算求得, 其中 Δm 为磨损失重, ρ 为销的密度 (钛合金密度 4.5 g/cm³), L 为滑动距离, 磨损率为 3 次实验数据的平均值。

采用 D/Max-2500/pc X 射线衍射仪(XRD)对磨损表面的结构进行分析; 采用 JSM-7001F 型的扫描电镜 (SEM)及附带的 Inca Energy 350 能谱仪 (EDS) 对磨损表面和剖面形貌、成分进行观察与测试; 采用 HVS-1000 型显微硬度计测试合金热处理后的硬度以及磨损后截面的硬度梯度 (载荷 0.49 N、加载时间 15 s)。采用 VK/200 型 3D 激光扫描显微镜测试磨损表面的粗糙度。

2 结果与讨论

收稿日期: 2016-09-15

基金项目: 江苏省医疗器械重点实验室开放基金 (jr1506); 江苏大学高层次人才启动基金 (15JDG076)

作者简介: 王 兰, 女, 1974 年生, 博士, 江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013, 电话: 0511-88722165, E-mail: cshcwj@mail.ujs.edu.cn

2.1 TC4 合金在不同摩擦体系中的磨损率

图 1 为 TC4 合金在不同摩擦体系中磨损率随温度变化的规律。在 TC4/GCr15 摩擦体系中，当环境温度为 25 °C 时，磨损率随着载荷的增加而大幅增加；在 400 °C，磨损率较 25 °C 有较大幅度地降低；在 600 °C，磨损率较 400 °C 又有了大幅度降低，在 400 和 600 °C，250 N，磨损率大致相等。在 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中，当环境温度为 25 和 400 °C 时，磨损率随着载荷的增加而增加，且 400 °C 的磨损率远远高于 25 °C 的；在 600 °C，当载荷为 50~200 N 时，磨损率较 400 °C 有了大幅度地降低，而当载荷为 250 N 时，磨损率又有一定程度地上升，高于 25 °C。

为了更好地比较 TC4 合金在不同摩擦体系中的磨损性能，图 2 示出了 TC4 合金在相同工况条件不同摩擦体系中的磨损率。25 °C 时，在两种摩擦体系中，合金的磨损率均随着载荷的增加而增加；在 50~150 N，合金的磨损率相差不大；在 200~250 N，TC4/GCr15 摩擦体系中合金的磨损率高于 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中的；在 400 °C，TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中合金的磨损率随着载荷的增加而大幅增加，而 TC4/GCr15 摩擦体系中合金的磨损率随着载荷的增加波动较小，平均磨损率为 $8.62 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ ，且前者摩擦体系中合金的磨损率远远高于后者摩擦体系中的；在 600 °C，TC4/GCr15 摩擦体系中合金的磨损率较 400 °C 更低，平均磨损率仅为 $2.06 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ ，而在 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中，在 50~200 N，磨损率较 400 °C 也有大幅度的降低，平均磨损率为 $12 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ ，在 250 N，磨损率又大幅增加。可以看出，在 400 和 600 °C，磨盘材料对钛合金的磨损率产生了不同的影响。

2.2 TC4 合金在不同摩擦体系中的磨面结构分析

表 1 列出了 TC4 合金在相同工况条件不同摩擦体系中的 X 衍射分析结果。在 TC4/GCr15 摩擦体系中，在 25 °C，磨损表面的结构为 $\alpha\text{-Ti}$ ；在 400 °C，磨损表

面的结构除了 $\alpha\text{-Ti}$ ，还形成了少量的 TiO_2 ， Fe_2O_3 ；在 600 °C，磨损表面除了 $\alpha\text{-Ti}$ ， TiO_2 ， Fe_2O_3 外，开始出现另一种新相 Fe_2TiO_5 ，随着载荷的增加，氧化物的数量也逐渐增加。在 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中，在 25 °C，磨损表面结构多为 $\alpha\text{-Ti}$ ，在 50 N 时出现了微量的 TiO ；在 400 °C，磨损表面也多为 $\alpha\text{-Ti}$ ，在 250 N 时形成了微量的 TiO_2 氧化物；在 600 °C，50 N，磨损表面结构为 $\alpha\text{-Ti}$ 和微量的 TiO 氧化物；在 150 N 时，磨损表面结构为 $\alpha\text{-Ti}$ 和少量的 TiO 和 TiO_2 氧化物；在 250 N 时，磨损表面结构仅为 $\alpha\text{-Ti}$ ，氧化物消失。

从不同摩擦体系中合金磨损表面的结构来看，存在两点显著差异：一为在 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体

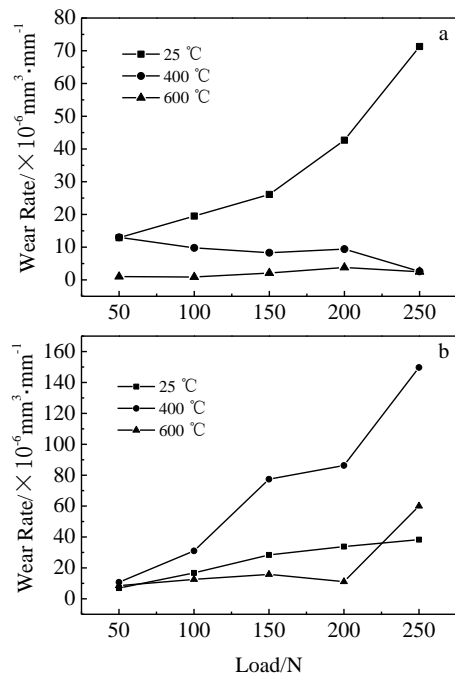


图 1 TC4 合金在不同摩擦体系中的磨损率

Fig.1 Wear rates of TC4 alloy in different tribo-systems:

(a) TC4/GCr15 and (b) TC4/W6Mo5Cr4V2

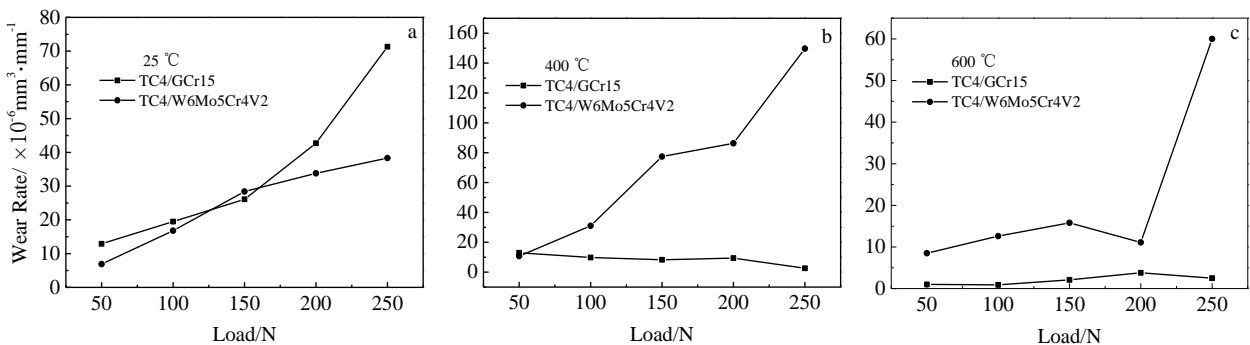


图 2 TC4 合金在不同摩擦体系中的磨损率

Fig.2 Wear rates of TC4 alloy in different tribo-systems: (a) 25 °C, (b) 400 °C, and (c) 600 °C

表 1 TC4 合金在相同工况条件不同摩擦体系中的 X 射线分析

Table 1 X-ray analyses of TC4 alloy under the same test condition in different tribo-systems

Temperature/°C	Load/N	XRD results of TC4 alloy in TC4/GCr15	Amount of oxides in TC4/GCr15	XRD results of TC4 alloy in TC4/W6Mo5Cr4V2	Amount of oxides in TC4/W6Mo5Cr4V2
25	50	α -Ti	-	α -Ti, TiO	Trace
	150	α -Ti	-	α -Ti	-
	250	α -Ti	-	α -Ti	-
400	50	α -Ti, TiO ₂ , Fe ₂ O ₃	A small amount	α -Ti	-
	150	α -Ti, TiO ₂ , Fe ₂ O ₃	A small amount	α -Ti	-
	250	α -Ti, TiO ₂ , Fe ₂ O ₃	A large amount	α -Ti, TiO ₂	Trace
600	50	α -Ti, TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , Fe ₂ TiO ₅	A small amount	α -Ti, TiO	Trace
	150	α -Ti, TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , Fe ₂ TiO ₅	A large amount	α -Ti, TiO ₂ , TiO	A small amount
	250	α -Ti, TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , Fe ₂ TiO ₅	A large amount	α -Ti	-

系中, 磨损表面没有检测到 Fe₂O₃; 二为在 TC4/GCr15 摩擦体系中磨损表面形成的氧化物明显多于 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中的, 分析认为, 一方面由于 W6Mo5Cr4V2 的硬度高于 GCr15, 其向 TC4 合金发生材料转移和粘着的现象比较轻微, 另一方面高硬度的 W6Mo5Cr4V2 会对已形成的氧化物产生微切削运动, 从而使得已形成的氧化物不能稳定存在于合金的磨损表面。结合上述的磨损率曲线, 可以发现, 当磨损表面存在少量氧化物时, 磨损率有一定程度地降低, 当磨损表面存在大量氧化物时, 磨损率保持最低的水平, 说明一定量的氧化物可以起到保护钛合金磨面的作用。

2.3 TC4 合金在不同摩擦体系中的磨面及剖面形貌

图 3 为 TC4 合金在不同摩擦体系中的磨面形貌。在 25 °C, 无论在哪种摩擦体系中, 磨损表面都呈现为犁沟, 粘着的痕迹(图 3a, 3d); 在 400 °C, 在 TC4/GCr15 摩擦体系中, 磨损表面除了犁沟特征外, 开始出现黑色光滑区域(图 3b), 而在 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中, 磨损表面依然为犁沟和粘着特征(图 3e); 在 600 °C, 两种摩擦体系中, 磨损表面均出现了黑色光滑区域(图 3c, 3f), 黑色光滑区域的覆盖率分别约为 85%和 75%, 此光滑区域经 EDS 分析(图 4)可知含有大量的 O(42.63%, 35.75%, 质量分数), 结合上述的 XRD 分析, 可以推测在 400 和 600 °C, 磨损表面的黑色光滑区域即为摩擦氧化物。

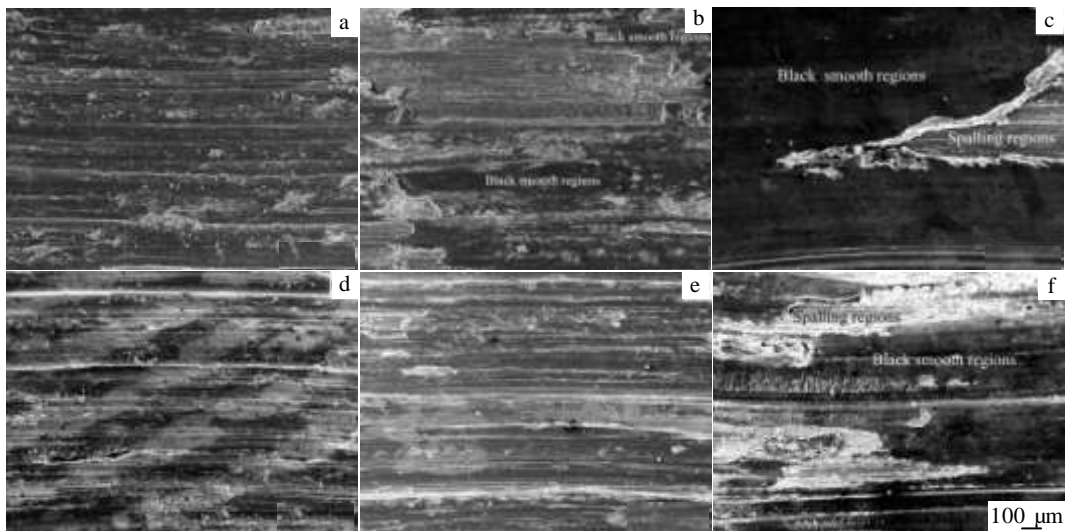


图 3 TC4 合金在不同摩擦体系中的磨面形貌

Fig.3 Morphologies of worn surfaces of TC4 alloy in different tribo-systems: (a) TC4/GCr15, 25 °C, 150 N; (b) TC4/GCr15, 400 °C,

150 N; (c) TC4/GCr15, 600 °C, 150 N; (d) TC4/W6Mo5Cr4V2, 25 °C, 150 N; (e) TC4/W6Mo5Cr4V2, 400 °C, 150 N; and (f) TC4/W6Mo5Cr4V2, 600 °C, 150 N

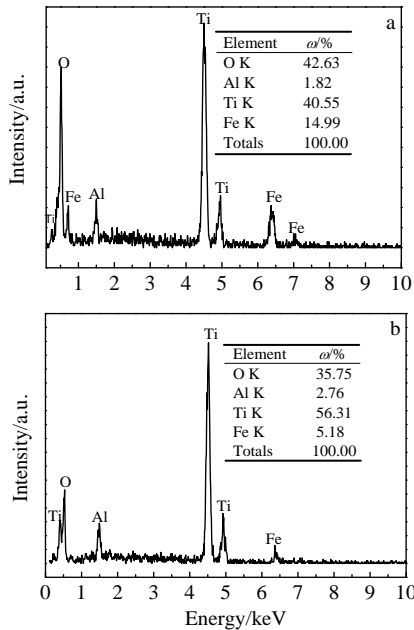


图 4 不同摩擦体系中黑色光滑区域的 EDS 分析

Fig.4 EDS analyses of black smooth regions in different tribo-systems: (a) TC4/GCr15, 600 °C, 150 N and (b) TC4/W6Mo5Cr4V2, 600 °C, 150 N

图 5 为 TC4 合金在不同摩擦体系中的磨损剖面形貌。在两种摩擦体系中，磨损表面均存在一层不同于基材的凸起层，这一层即为所谓的摩擦层^[11]。TC4 合金在不同的摩擦体系中，摩擦层的厚度、分布形态有所差异。在 TC4/GCr15 摩擦体系中，当温度为 25 和

400 °C，摩擦层分布不均匀，且很疏松，厚度 20~30 μm (图 5a, 5b)；在 600 °C，摩擦层的厚度大幅增加，约为 80 μm，但大部分摩擦层已开始碎化，并存在一些孔洞，在摩擦层的下方可观察到厚度约为 50 μm 的塑性变形层(图 5c)。在 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中，在 25 和 400 °C，摩擦层分布也不均匀，厚度 5~10 μm (图 5d, 5e)；当温度为 600 °C 时，摩擦层厚度略有上升，约为 15 μm，在摩擦层的下方，发现存在一层厚度约为 20 μm 的等轴晶粒，且这层组织与基材的原始组织具有明显的界限(图 5f)，图 5f 中左下方嵌入图片即为放大的等轴晶粒。这是由于在高的环境温度及摩擦热的共同作用下，摩擦层下方的塑性变形层发生了动态回复与动态再结晶。

2.4 TC4 合金在不同摩擦体系中磨面的性能

图 6 为 TC4 合金在相同工况条件不同摩擦体系中磨面至心部的硬度分布。在 TC4/GCr15 摩擦体系中，在 25 °C，磨损表面第一点 HV 硬度约为 4080 MPa，较基材原始硬度有所增加，此硬度来源于基材的塑性变形层，往里硬度略微下降，此后硬度变化不大，为基材的原始硬度；在 400 和 600 °C，磨损表面一定深度内的硬度较基材均有大幅度地提高，约为 8550~10010 MPa，此为表层摩擦层的硬度，且在 600 °C 时，高硬度层的深度约为 80 μm，这和上述的磨损剖面形貌是相吻合的 (图 5c)。在 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中，在 25 和 400 °C，磨损表面的硬度大致

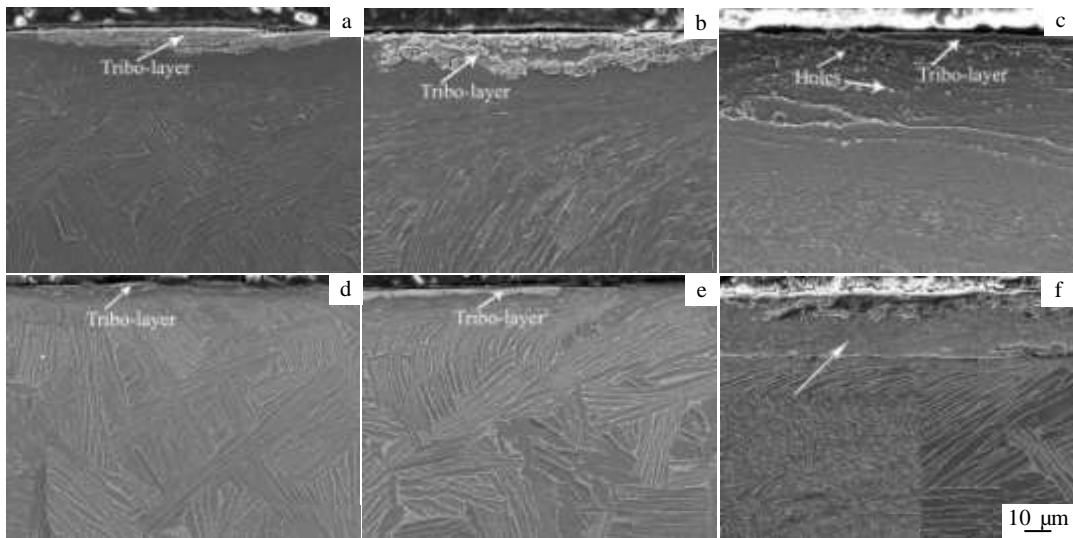


图 5 TC4 合金在不同摩擦体系中的剖面形貌

Fig.5 Cross-section morphologies of worn surfaces of TC4 alloy in different tribo-systems: (a) TC4/GCr15, 25 °C, 150 N; (b) TC4/GCr15, 400 °C, 150 N; (c) TC4/GCr15, 600 °C, 150 N; (d) TC4/W6Mo5Cr4V2, 25 °C, 150 N; (e) TC4/W6Mo5Cr4V2, 400 °C, 150 N; and (f) TC4/W6Mo5Cr4V2, 600 °C, 150 N

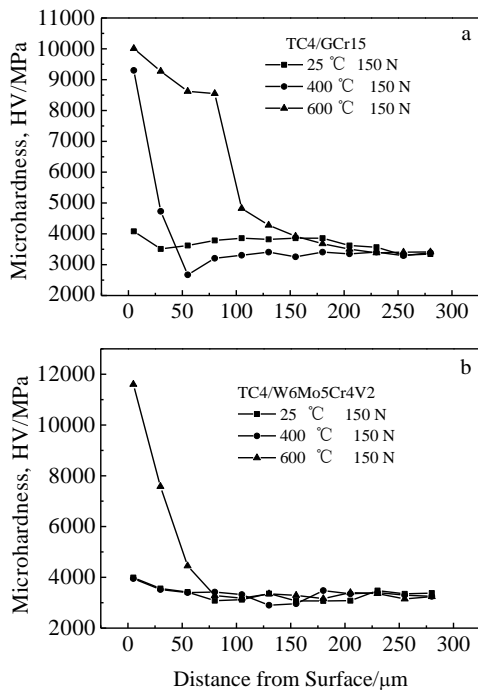


图 6 TC4 合金在不同摩擦体系中磨损表面的硬度分布

Fig.6 Microhardness distribution away from worn surface of TC4 alloy in different tribo-systems: (a) TC4/GCr15 and (b) TC4/W6Mo5Cr4V2

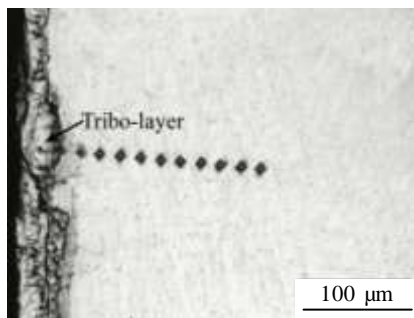


图 7 TC4 合金在 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中, 在 600 °C, 150 N 磨损表面的硬度压痕

Fig.7 Microhardness indentation on worn surface of TC4 alloy at 600 °C, 150 N in TC4/W6Mo5Cr4V2

相当, 约为 4050 MPa, 略高于基材的原始硬度, 也为基材塑性变形层的硬度; 在 600 °C, 磨损表面硬度变化趋势同 TC4/GCr15 摩擦体系 400 °C 的, 表层第一点的硬度极高, 约为 11600 MPa, 往里, 硬度逐渐下降, 分别为 7580、4450 MPa, 再往里, 硬度变化很小, 为

基材的原始硬度, 表层 11600、7580 MPa 为摩擦层的硬度, 4450 MPa 为塑性变形层的硬度, 这一点可以从硬度压痕示意图上得到证实 (图 7)。综上所述, 当磨损表面存在含有大量氧化物的摩擦层时, 摩擦层的硬度极高, 这样的摩擦层对磨损表面能够起到良好的保护作用。

图 8 为 TC4 合金在不同摩擦体系中磨损表面的粗糙度曲线。25 °C 时, 在两种摩擦体系中, 磨损表面的粗糙度均随载荷的增加而增加; 400 °C 时, 在 TC4/GCr15 摩擦体系中, 磨损表面粗糙度较 25 °C 有了大幅降低, 且随载荷增加缓慢降低, 平均粗糙度为 1.66 μm; 在 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中, 在 50 和 150 N, 表面粗糙度较 25 °C 时大幅提高, 在 250 N, 表面粗糙度低于 25 °C 的, 但在此温度下, 磨损表面粗糙度随载荷的增加波动较小, 平均粗糙度值为 5.79 μm。在 600 °C, 在 TC4/GCr15 摩擦体系中, 磨损表面粗糙度较 400 °C 又有所降低, 平均粗糙度为 0.86 μm; 在 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中, 在 50 N, 表面粗糙度仍然保持较高的水平, 约为 5.11 μm; 在 150 和 250 N, 表面粗糙度显著下降, 且数值大致相当, 约为 1.05 μm。可以发现, 在两种摩擦体系中, 当磨损表面无氧化物或仅有微量氧化物时, 磨损表面粗糙度较大, 当磨损表面存在一定量的氧化物时, 磨损表面的粗糙度较小。

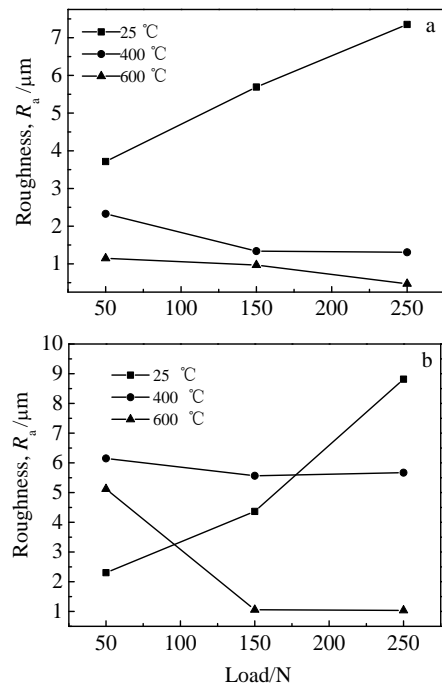


图 8 TC4 合金在不同摩擦体系中磨损表面的粗糙度

Fig.8 Roughness of worn surface for TC4 alloy in different tribo-systems: (a) TC4/GCr15 and (b) TC4/W6Mo5Cr4V2

3 结 论

1) 在 TC4/GCr15 摩擦体系中, 在 25 °C, 合金的磨损率很高, 磨损性能差; 在 400 和 600 °C, 合金的磨损率较低, 磨损性能优异, 且 600 °C 的磨损性能优于 400 °C 的。

2) 在 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中, 在 25 和 400 °C, 合金的磨损率很高, 磨损性能差; 在 600 °C, 50~200 N, 磨损率较低, 磨损性能优异。

3) 两种摩擦体系中, 合金在 600 °C 时的磨损率均较低, 具有良好的高温磨损性能。但合金在 TC4/GCr15 摩擦体系中的高温磨损性能明显优于在 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中的。

4) 两种摩擦体系中, 当磨损表面形成少量氧化物时, 对合金具有一定的保护作用, 磨损率较低; 当磨损表面形成大量氧化物时, 对合金具有良好的保护作用, 磨损率极低。

5) 摩擦体系中, 对磨材料对合金的磨损性能有一定的影响。高硬度的 W6Mo5Cr4V2 发生材料转移和粘着的现象较轻, 且对磨损过程中形成的氧化物具有微

切削运动, 氧化物不能稳定地存在于磨损表面, 在 400 和 600 °C, 合金在 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中的磨损性能较 TC4/GCr15 对磨的差。

参考文献 References

- [1] Wang Xuehao(王学浩). *Introduction to Tribology*(摩擦学概论)[M]. Beijing: China Waterpower Press, 1990: 28
- [2] Marui E, Hasegawa N, Endo H *et al. Wear*[J], 1997, 205: 186
- [3] Ghazali M J, Rainforth W M, Jones H. *Tribology International*[J], 2007, 40: 160
- [4] Yang Z R, Wei M X, Zhao Y T *et al. Trans Nonferrous Met Soc China*[J], 2011, 21: 2584
- [5] Abdel-Wahab E M. *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 473(1-2): 330
- [6] Straffelini G, Molinari A. *Wear*[J], 1999, 236: 328
- [7] Molinari A, Straffelini G, Tesi B *et al. Wear*[J], 1997, 208: 105
- [8] Ohidul Alam Md, Haseeb ASMA. *Tribology International*[J], 2002, 35: 357
- [9] Borgioli F, Galvanetto E, Iozzelli F *et al. Material Letters*[J], 2005, 59: 2159
- [10] Qiu M, Zhang Y Z, Yang J H *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 434: 71
- [11] Lu D H, Gu M Y, Shi Z L. *Tribology Letter*[J], 1999, 6: 57

Wear Performance of TC4 Alloys in Different Tribo-systems

Wang Lan¹, Ding Hongyan², Liu Aihui², Wang Shuqi¹

(1. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(2. Jiangsu Provincial Key Laboratory for Interventional Medical Devices, Huanyin Institute of Technology, Huaian 223003, China)

Abstract: Wear behavior and wear characteristic of TC4 alloy in TC4/GCr15 and TC4/W6Mo5Cr4V2 tribo-systems were studied. The morphologies, element and structure of worn surface and cross-section were analyzed with SEM, EDS and XRD. The results show that in these tribo-systems, wear rate of TC4 alloy at 25 °C is high and wear performance is poor; at 400 °C, wear rate in TC4/W6Mo5Cr4V2 is much higher than that in TC4/GCr15; wear rate of TC4 alloy at 600 °C is very low and wear rate in TC4/GCr15 is lower than that in TC4/W6Mo5Cr4V2. At 400 and 600 °C, counterface materials have different influence on wear rate of the alloy. The decrease of wear rate is related to the amount of oxides. The titanium alloy presents extremely low wear rate and excellent wear performance when worn surface contains a large amount of oxides which can exist stably.

Key words: TC4 alloy; tribo-system; tribo-layer; wear performance

Corresponding author: Wang Shuqi, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, P. R. China, Tel: 0086-511-88780192, E-mail: shuqi_wang@ujs.edu.cn