

TC4 合金和 P110 油管钢摩擦磨损性能的比较

姚小飞¹, 谢发勤¹, 韩 勇², 赵国仙², 吴向清¹

(1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

(2. 西安摩尔石油工程实验室, 陕西 西安 710065)

摘 要: 对 TC4 合金和 P110 油管钢在不同温度下的摩擦磨损性能进行对比研究, 分析其摩擦系数、磨损率和磨痕形貌随温度的变化规律, 探讨磨损机制。结果表明: P110 油管钢的耐磨性明显优于 TC4 合金, TC4 合金的耐磨性随温度的升高无显著变化, 磨痕呈犁沟形貌, 在较低温度时的磨损机制为剥层磨损、黏着磨损和疲劳磨损, 在较高温度时为剥层磨损、黏着磨损和氧化磨损; P110 油管钢耐磨性随温度的升高而降低, 在较低温度时磨痕呈磨坑形貌, 磨损机制为剥层磨损和磨粒磨损, 在较高温度时磨痕形貌呈犁沟形貌, 主要为剥层磨损、黏着磨损和氧化磨损。

关键词: 高强耐腐蚀; 油管; TC4 合金; P110 油管钢; 磨损

中图分类号: TG 146.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2012)09-1539-05

材料的腐蚀问题和强度问题是导致油管失效的两大根本问题, 随着石油和天然气需求量的急剧增大, 促使其开采的大力扩张, 这 2 个根本问题越显突出, 比如含 CO₂、H₂S 和 Cl⁻ 介质环境的腐蚀最为严重, 超深井油管承载增大的问题, 并且井下温度高达 200 °C, 由这些问题引发的油管失效而造成了严重的事故和经济损失。针对超深井复杂腐蚀环境, 开发高强耐腐蚀油管已成为石油管工业迫切解决的技术难题之一^[1]。针对此使用要求, 钛合金是较好的选材^[2]。

TC4 合金的耐热性、耐蚀性和强度等综合性能较好^[3], 目前, TC4 合金主要应用于航空、航天等领域, 石油管工业领域应用较少, 这主要是由于钛合金低的塑性剪切抗力和表面氧化物的微弱保护作用而导致的冲击韧性和耐磨性较差^[4,5]。材料应用的领域不同, 对材料的性能要求不同, 比如: 航空航天领域注重材料的强度、抗疲劳性能和抗蠕变性能; 而石油管工业领域则注重材料的强度、抗冲击韧性和耐磨性。近些年来, 由于腐蚀破坏严重, 造成了重大的经济损失, 耐腐蚀性也成为石油管材料重要的性能评价指标。至今, 有关钛合金在石油管工业领域的研究和应用较少, 虽然钛合金具有良好的耐蚀性和高强度, 但是由于 TC4 合金的抗冲击韧性和耐磨性相对较差^[6], 加之油管是以螺纹进行连接的, 所以油管材料的耐磨性至关重要。本研究通过对 TC4 合金和 P110 油管钢的摩擦磨损性能进行对比研究, 揭示 TC4 合金的磨损机制, 为评定 TC4 合金的摩擦磨损性能及提高钛合金石油管耐磨性提供依据, 探讨

TC4 合金在石油管材方面的应用。

1 实 验

实验材料 TC4 合金的化学成分为(质量分数, %): C 0.01、Al 6.0、V 4.2、Fe 0.04、O 0.09、N 0.01, 900 °C 退火处理, 硬度为 HRC27; P110 油管钢的化学成分为(质量分数, %): C 0.31、Al 0.01、V 0.06、Si 0.22、Mn 0.52、Cr 0.98、Ni 0.16、Cu 0.17、Mo 0.21、S 0.007、P 0.008, 硬度为 HRC32; 对磨材料为 GCr15 钢, 硬度为 HRC62。实验设备为 HT-1000 型高温摩擦磨损试验机。

试样尺寸为 25 mm×20 mm×6 mm, 磨损面分别用 280#、400#、600#、800#、1200# 氧化铝耐水砂纸依次打磨, 用乙醇清洗, 然后用丙酮超声波清洗, 热吹风烘干, 然后用分析天平(精度为 0.1 mg)称重。进行球盘磨损试验后, 用乙醇清洗, 然后用超丙酮超声波清洗, 热吹风烘干, 然后用分析天平对试样称重。实验温度 21~300 °C, 实验时间 2 h, 实验载荷 5194 N, 磨损半径 5 mm, 转速 280 r/min。采用 M9-CSPM4000 扫描探针显微镜 (STM) 对磨痕的轮廓体积进行测量, 利用 SEM 对磨痕的宏观和微观形貌进行观察, 利用 EDS 对磨痕的化学成分进行分析。

2 结果与讨论

2.1 磨损率

采用体积法计算了磨损率。图 1 为 TC4 和 P110

收稿日期: 2011-09-15

作者简介: 姚小飞, 男, 1978 年生, 博士, 西北工业大学航空学院, 陕西 西安 710072, 电话: 029-82374843, E-mail: yxf933@126.com

的磨损率随温度的变化关系。从图 1 可知，在相同温度下 TC4 合金的磨损率明显高于 P110 油管钢。从磨损率随温度的变化关系可以看出，在温度小于 200 °C 时，TC4 和 P110 的磨损率均随温度的升高而减小，这是因为一方面随温度的升高，材料软化，加之磨屑对磨损接触面的润滑作用使得摩擦力减小，从而磨损率减小，另一方面对磨材料 GCr15 随温度的升高耐磨性降低^[7]，从而导致磨损率减小。当温度大于 200 °C 时，TC4 和 P110 的磨损率随温度的升高均没有显著变化。

2.2 摩擦系数

图 2 为不同温度的摩擦系数随磨损时间变化的关系。可见，P110 油管钢的摩擦系数很快呈稳定趋势，磨损进入稳定阶段，TC4 合金存在一段预磨期，摩擦系数呈上升趋势，在磨损经过预磨期之后，摩擦系数呈稳定趋势，这是由于磨损接触面粗糙度的变化所引起的^[8,9]，在摩擦初始阶段，对磨面的粗糙度较小，摩擦力较小，因而摩擦系数较小，随着磨损的进行，对磨面的粗糙度逐渐增大，摩擦力也逐渐增大，摩擦系数随之增大。经过预磨期后，对磨面的粗糙度趋于稳定，磨损进入稳定阶段。

由图 3 可知，在相同温度下 P110 油管钢的摩擦系数明显高于 TC4 合金，这是由于 TC4 合金易塑性变形^[10]，磨屑较软^[11]，容易被挤压在磨痕的表面，磨屑在对磨表面塞积，进入磨痕的凹坑或者犁沟，起到了润滑的作用，从而使得摩擦系数较小；而 P110 油管钢的磨屑较硬^[12]，磨痕表面的摩擦阻力较大，从而使得摩擦系数较大。从摩擦系数随温度的变化关系可以看出，当温度低于 100 °C 时，TC4 和 P110 的摩擦系数随温度的升高均无显著变化，当温度高于 100 °C 时，TC4 和 P110 的摩擦系数均随温度的升高而减小，这是因为随着温度的升高，金属的材料软化，黏性增大，同时磨屑在对磨表面塞积，进入磨痕的凹坑或者犁沟，起到了润滑的作用，从而使得摩擦系数减小。

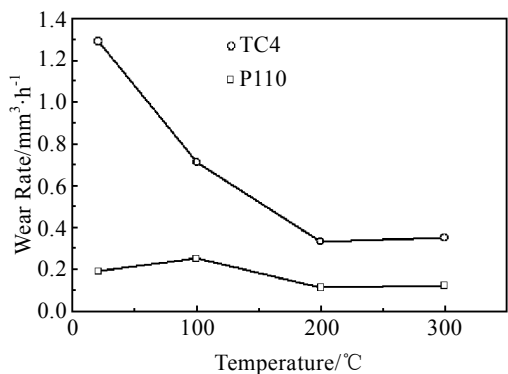


图 1 磨损率和温度的关系

Fig.1 Relation between wear rate and temperature

2.3 磨痕形貌

图 4 为 TC4 和 P110 试样磨痕的宏观形貌。从图 4 可以看出，TC4 合金试样的磨痕宽度随温度的升高依次减小，而 P110 油管钢试样的磨痕宽度随温度的升高依次增大，这说明在试验温度范围内，TC4 合金的耐磨性随温度的升高无显著变化，而 P110 油管钢的耐磨性随温度的升高而降低。当温度低于 100 °C 时，在相同的温度下 TC4 合金试样的磨痕宽度明显大于 P110 油管钢试样，当温度高于 100 °C 时，在相同的温度下 TC4 合金试样的磨痕宽度明显小于 P110 油管钢试样，这说明在较低温度时 P110 油管钢的耐磨性优于 TC4 合金，而在较高温度时，TC4 合金的耐磨性优于 P110 油管钢。

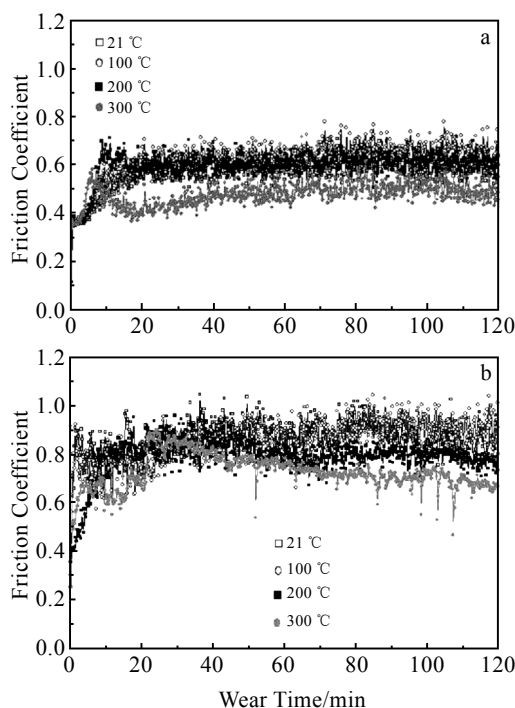


图 2 摩擦系数随磨损时间的变化关系

Fig.2 Relation between friction coefficient and wear time:

(a) TC4 and (b) P110

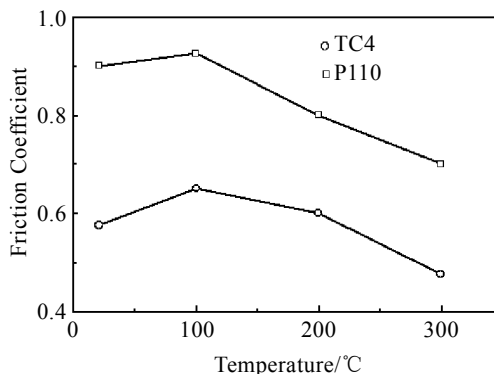


图 3 摩擦系数和温度的关系

Fig.3 Relation between friction coefficient and temperature

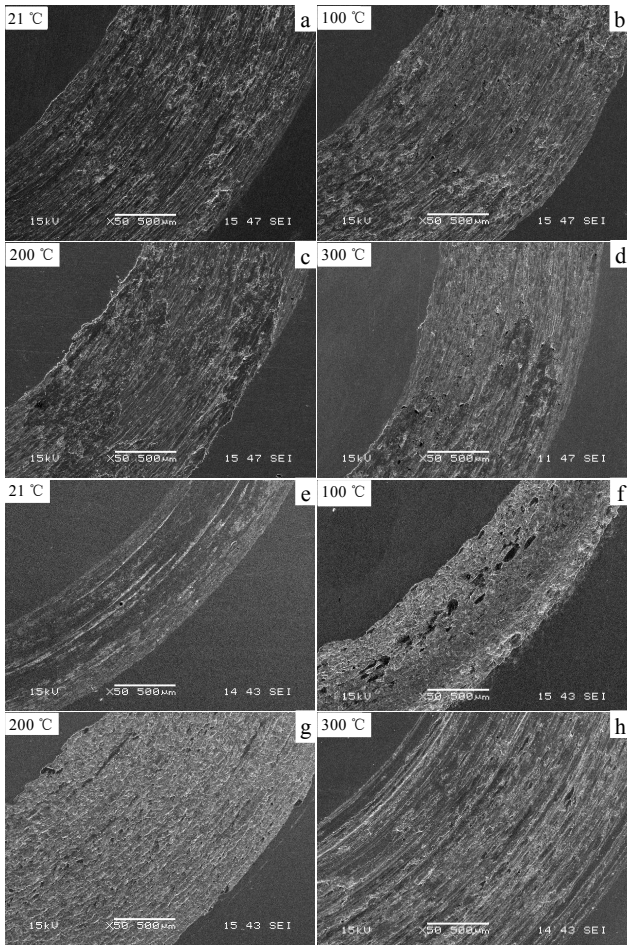


图 4 不同温度下磨痕的宏观形貌

Fig.4 Macro morphologies of wear marks at different temperatures: (a, b, c, d) TC4 and (e, f, g, h) P110

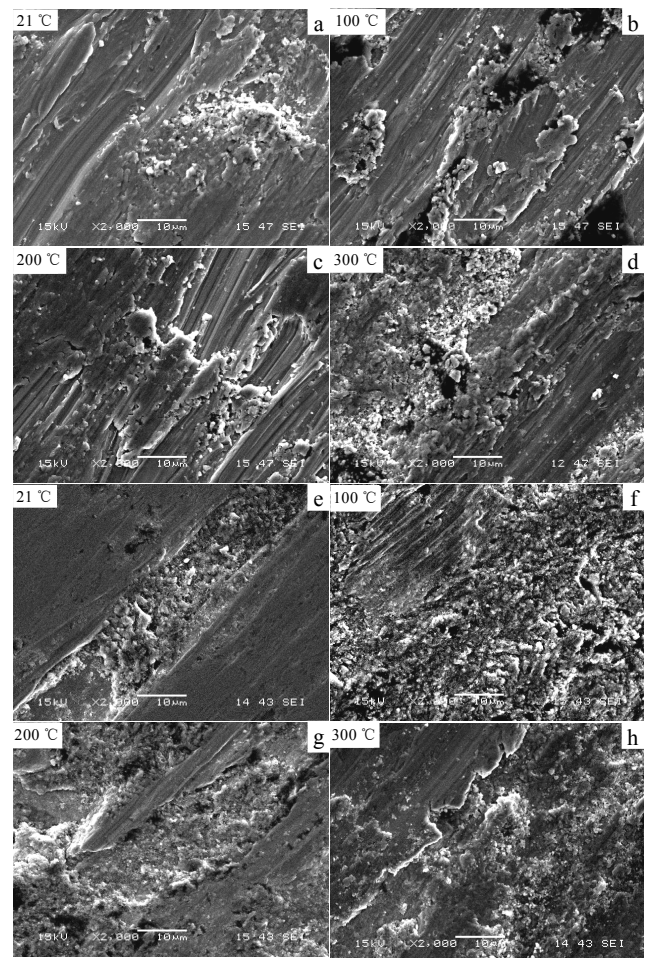


图 5 不同温度下磨痕的微观形貌

Fig.5 Micro morphologies of wear marks at different temperatures: (a, b, c, d) TC4 and (e, f, g, h) P110

图 5 为 TC4 合金和 P110 油管钢磨痕微观形貌。从图可以看出，两者磨痕微观形貌截然不同，TC4 合金磨痕呈现犁沟形貌，在磨痕表面残留被挤压的磨屑，并且随温度的升高，残留磨屑的数量明显增多；而 P110 油管钢磨痕在温度低于 100 °C 时呈现磨坑和撕裂形貌，伴有被挤压和刮擦的痕迹，当温度高于 200 °C 时开始呈现犁沟形貌，在磨痕表面残留被挤压的磨屑，并且随温度的升高，残留磨屑的数量增多。这主要是因为 TC4 合金的材料黏性较大，磨屑较软，易产生塑性变形被挤压在磨痕的表面，使得磨痕表面呈现犁沟形貌，而 P110 油管钢的磨屑较硬，不容易被挤压变形，磨痕表面呈现磨坑和撕裂形貌，随着温度的升高，材料软化，因而高温时，磨痕出现犁沟形貌。

2.4 磨损机制

采用 EDS 对磨痕表面化学成分进行分析，其结果如图 6 所示。表明在较低温度下，TC4 合金和 P110 油管钢的磨痕表面化学成分和原材料都没有明显的变

化，这说明 TC4 合金和 P110 油管钢磨损表面均未发生氧化，因此均未发生氧化磨损；在较高温度时，TC4 合金和 P110 油管钢的磨痕表面存在明显的氧化产物，因此发生了氧化磨损。

在较低温度时，TC4 合金和 P110 油管钢的磨损形貌截然不同，这说明在滑动摩擦过程中表面接触时，载荷通过接触点向法向和切向传递，由于载荷的反复作用，TC4 合金硬度相对较低，表面的微凸体易于变形并断裂，形成磨屑；而 P110 油管钢的硬度相对较高，表面的微凸体则以较慢速度变形，在反复循环的加载过程中，表面微凸体的塑性变形不断增加，并且塑性变形不断积聚，导致次表面层的变形，产生裂纹，裂纹在次表面层集聚，并且扩展，当次表层的裂纹达到临界长度时，将延伸至表面，产生磨损碎片而剥离，即发生剥层磨损。同时，P110 油管钢的磨屑较硬，参加了磨损的进行，加速了磨损的程度。载荷在磨损过程中产生的表面应力低于试验材料 TC4 合金的破坏强

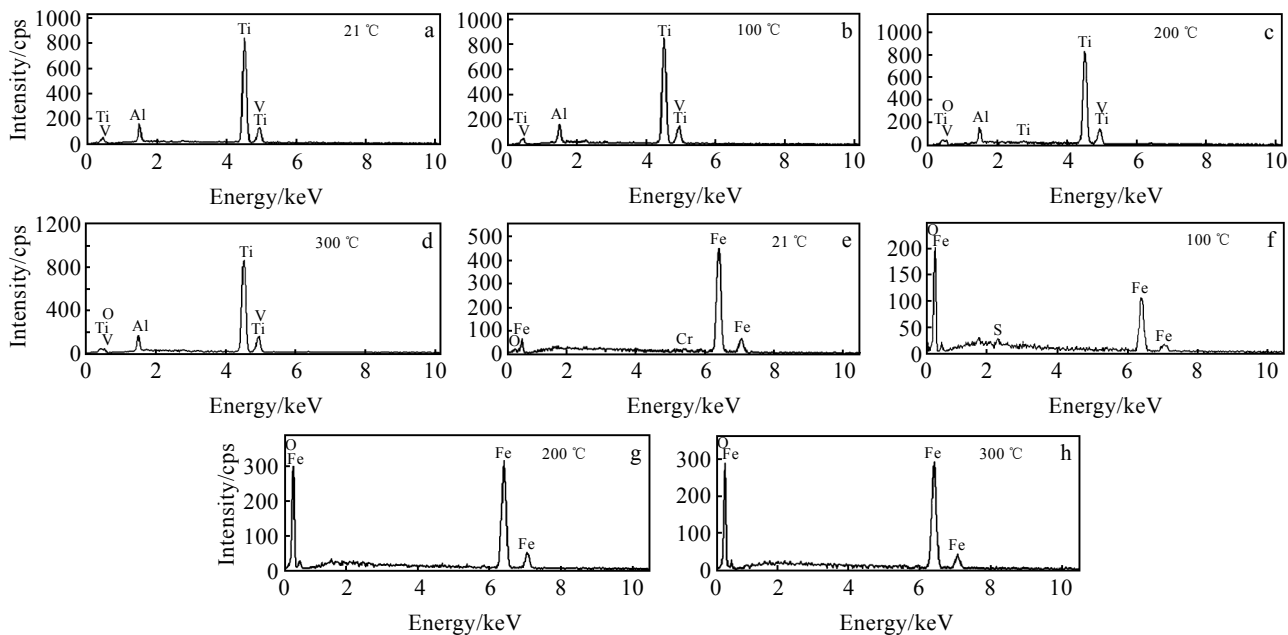


图 6 磨痕表面的 EDS 分析

Fig.6 EDS analysis of wear mark surface: (a, b, c, d) TC4 and (e, f, g, h) P110

度,在此低应力的作用下 TC4 合金摩擦接触表面滑动摩擦后产生擦伤,犁出沟槽,犁沟两侧的金属发生塑性变形而堆积,在随后的摩擦过程中,这些被堆积的部分又被压平,如此多次反复地塑性变形,导致裂纹形成而引起剥落,这种磨损实质是疲劳破坏过程。TC4 合金的硬度相对较低^[13],因而剪切抗力较低,加之 TC4 合金材料黏性较大的本性,磨损面易产生黏着力,在外力的作用下产生黏着撕裂。

在温度较高时,TC4 合金和 P110 油管钢的磨损形貌基本相同,这说明 P110 油管钢随着温度的升高材料软化,硬度降低,容易发生塑性变形,由于金属材料对应变速率的不同反应,随着滑动速度的提高,表面层的应变速率提高,造成位错滑移速率低于变形速率,材料的连续性被破坏,引起显微裂纹的形成,当显微裂纹扩展到表面时发生了断裂,形成了剥层磨损。金属材料在滑动摩擦磨损后的表面层中有大量的位错和滑移带^[14,15],磨损主要由氧化磨损控制。氧化磨损率与磨损试样的接触时间间隔成正比^[16],随着滑动速度的提高,接触时间的间隔减小,氧化磨损率降低,剥层磨损提高。由此可见,在较低的温度时,TC4 合金磨损机制主要为剥层磨损、黏着磨损、疲劳磨损;P110 油管钢的磨损机制为剥层磨损和磨粒磨损;在较高温度时,TC4 合金磨损机制主要为剥层磨损、黏着磨损和氧化磨损,P110 油管钢的磨损机制为剥层磨损、黏着磨损和氧化磨损。

3 结 论

1) 在相同磨损条件下, P110 油管钢的摩擦系数大于 TC4 合金,TC4 合金的磨损率高于 P110 油管钢,TC4 合金和 P110 油管钢的摩擦系数均随温度的升高而减小,磨损率均随温度的升高而减小;P110 油管钢的耐磨性明显优于 TC4 合金,在室温到 300 °C 的范围内,TC4 合金的耐磨性无显著地变化,而 P110 油管钢的耐磨性随温度的升高而降低。

2) TC4 合金和 P110 油管钢的磨损形貌截然不同,TC4 合金的磨痕呈犁沟形貌,而 P110 油管钢的磨痕在较低温度时呈磨坑和撕裂形貌,而在较高温度时呈犁沟形貌。

3) 在较低的温度时,TC4 合金磨损机制主要为剥层磨损、黏着磨损和疲劳磨损;P110 油管钢的磨损机制为剥层磨损和磨粒磨损。在较高温度时,TC4 合金磨损机制主要为剥层磨损、黏着磨损和氧化磨损;P110 油管钢的磨损机制为剥层磨损、黏着磨损和氧化磨损。

4) TC4 合金用作高强耐腐蚀油管材料需进行适当的表面改性,以提高其表面耐磨性。

参考文献 References

[1] Li Helin(李鹤林), Han Lihong(韩礼红), Zhang Wenli(张文利). *Stell Pipe(钢管)*[J], 2009, 38(1): 1
 [2] Schutz R W, Watkins H B. *Materials Science and Engineering*

- [J], 1998, A243: 305
- [3] Huang Boyun(黄伯云), Li Chenggong(李成功), Shi Likai(石力开) *et al.* *China Materials Engineering Canon Vol 4*(中国材料工程大典第四卷)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 585
- [4] Straffelini G, Molinari A. *Wear*[J], 1999, 236: 328
- [5] Xu Xipeng, Yu Yiqing, Huang Hui. *Wear*[J], 2003, 255: 1421
- [6] Bahadur S, Yang Chien-Nan. *Wear*[J], 1996, 196: 156
- [7] Liu Yong(刘勇), Yang Dezhuang(杨德庄), He Shiyu(何世禹) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(1): 1281
- [8] Cai G Q, Feng B F, T Jin *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2002, 129: 25
- [9] Meng Qingwu(孟庆武), Geng Lin(耿林), Wang Chunhua(王春华) *et al.* *Transaction of Daqing Petroleum Institute*(大庆石油学院学报)[J], 2006, 30(4): 46
- [10] Magaziner R S, Jain V K, Mall S. *Wear*[J], 2008, 264: 1002
- [11] Sun Jiashu(孙家枢). *Wear of Metal*(金属的磨损)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992: 118
- [12] Cui X H, Wang S Q, Wang F *et al.* *Wear*[J], 2008, 265: 468
- [13] Shi Changxu(师昌绪), Zhong Qunpeng(钟群鹏), Li Chenggong(李成功). *China Materials Engineering Canon Vol 1*(中国材料工程大典第一卷)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 194
- [14] Doris Kuhlmann Wilsdorf. *Wear*[J], 1996, 200: 8
- [15] Straffelini G, Molinari A. *Wear*[J], 1999, 236: 328
- [16] So H, Yu D S, Chuang C Y. *Wear*[J], 2002, 253: 1004

Comparison of Friction Wear Properties between TC4 Titanium Alloy and P110 Tubing Steel

Yao Xiaofei¹, Xie Faqin¹, Han Yong², Zhao Guoxian², Wu Xiangqing¹

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Xi'an Maurer Petroleum Engineering Laboratory, Xi'an 710065, China)

Abstract: The friction wear properties of TC4 alloy and P110 tubing steel were comparatively studied at different temperatures. The changing rules of the wear rate, friction coefficient and topography of wear mark with the temperature were analyzed and the wear mechanism was also discussed. The results show that the wear resistance of P110 tubing steel excels obviously that of TC4 alloy. The wear resistance of TC4 changes a little with temperature rising and the wear mark is furrow morphology. The wear mechanism of TC4 alloy is delamination abrasion, adhesive abrasion and fatigue abrasion at lower temperature and delamination abrasion, adhesive abrasion and oxidation abrasion at higher temperature. The wear resistance of P110 tubing steel is decreased with temperature rising. The wear mark of P110 tubing steel is wear pit morphology and the wear mechanism is delamination abrasion and abrasive grain abrasion at lower temperature, while the wear mark is furrow morphology and the wear mechanism is delamination abrasion, adhesive abrasion and oxidation abrasion at higher temperature.

Key words: high strength and corrosion resistance; tubing; TC4 alloy; P110 tubing steel; wear

Corresponding author: Yao Xiaofei, Ph. D., School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-82374843, E-mail: yxf933@126.com