

不同摩擦副材料对 TC4 合金摩擦磨损性能的影响

宋 伟, 李万佳, 俞树荣, 李凯氏, 马荣荣

(兰州理工大学 石油化工学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 利用 TRB³ 摩擦试验机采用球/平面接触形式探究 TC4 合金摩擦磨损性能, 使用 TC4 合金球、GCr15 钢球以及 Si₃N₄ 陶瓷球作为对摩副探究 TC4 合金在不同法向载荷作用下摩擦划痕和磨损特性; 通过 3D 激光共聚焦显微镜测量摩擦划痕形貌, 建立能量磨损模型探究磨损过程中接触状态的变化机制, 预测磨损进程。结果表明: 随着上试样硬度的逐渐降低, 球/平面的接触状态向微平面/平面的接触状态转变, 摩擦划痕状态受到钛合金在压头前端位错墙和压头后端黏着颗粒的影响, 划痕长度和宽度随载荷的增加线性增长, 划痕深度出现“锯齿”状波动; “切削与塑性比” f_{cp} 分布于 $f_{cp}=0.5$ 两侧说明压头对 TC4 合金的损伤以微犁耕和微切削 2 种机制交互作用, 说明划痕表面加工硬化现象对表面的保护作用, 划痕硬度和表面粗糙度的关系可以预测材料变形过程中的损伤情况。

关键词: TC4 合金; 法向载荷; 磨损机制; 能量耗散; 摩擦划痕

中图分类号: TG146.23; TH117.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)05-1791-09

金属材料磨损是由多种因素共同作用的结果, 包括载荷、位移幅值、环境介质、材料属性和对摩副材料等影响因素决定摩擦过程中材料损伤程度^[1]。TC4 合金作为 $\alpha+\beta$ 双相钛合金 (α : hcp 结构、 β : bcc 结构), 是比强度高, 密度小, 弹性模量小和耐腐蚀的轻量金属^[2-3], 广泛用于航空航天, 海洋设备和化工领域^[4-5], 但较差的摩擦学性能和加工硬化能力使 TC4 合金对磨损现象较为敏感^[6-7]。Long 等^[8]研究钛合金 $\alpha+\beta$ 相和 β 相的摩擦磨损性能时发现摩擦磨损过程是以局部接触点(微凸体)的黏着变形和断裂、磨屑颗粒的微切削以及接触体之间材料的转移为主, 相对于稳态的 $\alpha+\beta$ 相, 亚稳态的 β 相表面变形和材料转移更严重。孙建芳等^[9]研究了钛合金表面 DLC 薄膜与陶瓷球和金属球的摩擦性能, 结果表明陶瓷球/DLC 对摩时易于在球面形成稳定的碳质转移膜, 摩擦系数较小, 金属球/DLC 对摩时球面无法覆盖碳质转移膜, 摩擦系数较大。王兰等^[10]研究了 TC4/GCr15 和 TC4/W6Mo5Cr4V2 摩擦体系中的高温摩擦磨损性能, 结果表明对摩材料对 TC4 合金的摩擦磨损性能有较大的影响, 硬度大的上试样对基体金属的犁削严重、黏着轻微, 同时指出磨损率与表面氧化物覆盖程度有关。宋伟等^[11]研究了蒸馏水中 TC4 合金分别与 GCr15 和 Si₃N₄ 的磨损特性, 发现蒸馏水只起到润滑作用, TC4 合金的材料流失量主要由机械磨损导致, Si₃N₄

作为对摩副材料时耐磨性较强, GCr15/TC4 对摩的磨损体积和磨损率均比 Si₃N₄/TC4 大, 耐磨性相较于 Si₃N₄/TC4 合金较差。以往研究中多采用不同硬度对摩副来探究 TC4 合金的摩擦磨损性能, 但是探索同种和异种对摩副材料对 TC4 合金摩擦磨损性能和磨损过程中摩擦划痕性能的研究尚有欠缺。

材料的塑性去除机制可以分为微犁耕和微切削^[12], 滑移过程中伴随着材料的塑性变形, 压头的滑移导致划痕两侧材料堆积, 则以微犁耕机制为主导; 微切削机制是压头在划痕内剥削材料形成磨屑^[13]。为了克服 TC4 合金耐摩擦性能较差, 探究 TC4 合金与不同对摩副材料配对的摩擦学性能至关重要, 采用硬-软(Si₃N₄、GCr15、TC4) 的对摩副在 TC4 合金表面进行往复摩擦磨损试验, 现阶段主要通过摩擦系数、磨损体积、三维形貌以及 SEM 形貌等探究 TC4 合金在摩擦过程中的损伤情况; 此外, 研究中引用能量法和摩擦划痕性能评价 TC4 合金在不同法向载荷和不同摩擦体系中的抗摩擦磨损能力, 为提高 TC4 合金在工业实践应用中的表面完整性和抗摩擦磨损性能提供理论依据。

1 实 验

利用 Anton Paar (TRB³) 摩擦试验机完成摩擦磨损试验, 采用球/平面的切向接触形式, 上试样选择 Si₃N₄

收稿日期: 2022-07-07

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB2010001)

作者简介: 宋 伟, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 兰州理工大学石油化工学院, 甘肃 兰州 730050, 电话: 0931-2973728, E-mail: songwei@lut.edu.cn

陶瓷球 (HV≈1500 MPa)、GCr15 钢球 (HV≈680 MPa) 和 TC4 球 (HV≈300 MPa)，试样尺寸为 $\Phi=6$ mm，表面粗糙度 $R_a\approx 0.04$ μm ，下试样为 $\Phi 24$ mm $\times\Phi 8$ mm 的圆柱形 TC4 钛合金试样，使用不同目数 (80#~7000#) 金相水磨砂纸打磨表面，使用粒度为 0.02 μm 的 SiO₂ 抛光液抛光至镜面，置于丙酮溶液以及无水乙醇溶液中超声清洗去除表面杂质颗粒，干燥备用。

摩擦磨损试验在室温环境中进行，法向载荷为 2、5、10、15 N，位移幅值为 2 mm，接触频率为 2 Hz，循环次数为 5000 次，试验重复 3 次，试验过程中系统自动记录摩擦系数，试验结束后使用无水乙醇溶液超

声清洗试样表面，去除表面磨屑颗粒；利用激光共聚焦显微镜 (OLYMPUS OLS 5000) 测量划痕三维形貌以及磨损体积，分析磨损机理。

2 结果与分析

2.1 磨损形貌分析

金属摩擦磨损过程中主要以表层金属和亚表层金属的弹性变形、磨屑颗粒的产生和犁耕、对偶件之间的黏着和黏着断裂之间材料的转移以及环境介质中化学原子和机械混合 4 大过程^[14]。图 1 是 TC4 合金与 3 种对磨副形成接触区域的三维形貌和二维划痕形貌

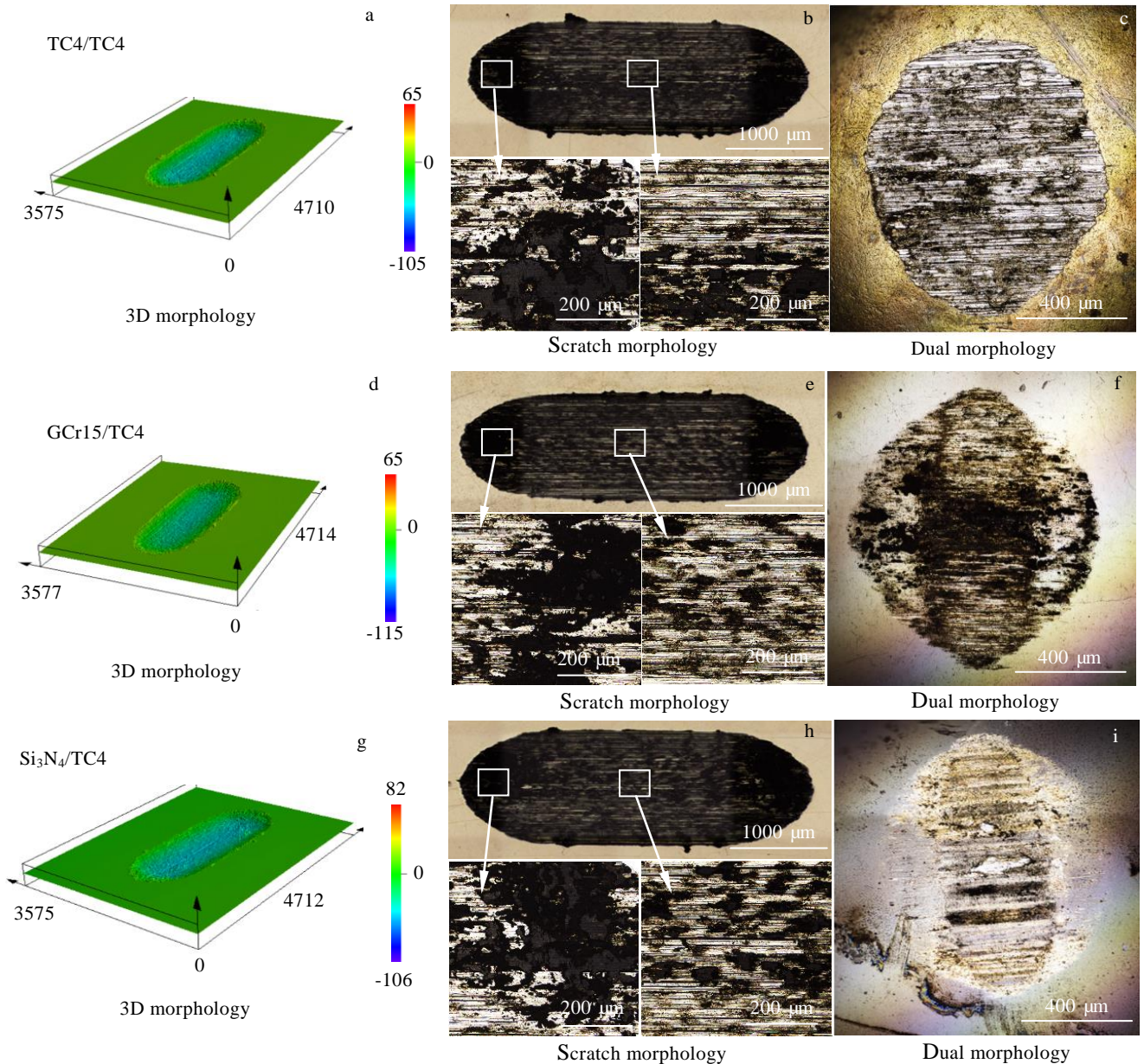


图 1 不同对偶球摩擦磨损划痕形貌分析

Fig.1 Analysis of friction and wear scratch morphologies of different dual balls: (a-c) TC4/TC4; (d-f) GCr15/TC4; (g-i) Si₃N₄/TC4

以及对偶球的磨损形貌;法向载荷作用下压头正下方材料受到压应力作用,压头两侧材料受到拉应力作用,在滑移过程中压头前端材料受到压应力的作用,后端材料受到拉应力作用,导致材料表层和亚表层塑性应变能积聚^[15]。3种对摩副形成接触区域的三维形貌椭圆处均有材料堆积,垫高压头,形成严重的塑性应变能积聚层,如图1a、1d、1g所示。

TC4合金与TC4合金球摩擦过程中,摩擦接触区域磨屑堆积严重,摩擦初期是以球/平面的接触状态,摩擦中后期以微平面/平面的接触过程,摩擦面结构复杂,接触体之间黏着最严重,滑动过程中黏着断裂形成磨屑,在压应力作用下沿着滑移方向犁耕基体,并且在接触区域两端堆积,如图1b所示;TC4合金球面发生严重的磨损,有明显的剥落和黏着痕迹,如图1c所示。TC4合金和GCr15轴承钢球摩擦时,硬度较大的GCr15球与TC4合金基体黏着严重,对偶件之间材料的转移,滑动过程中上试样犁耕基体金属,在接触区域形成沿着滑动方向的犁沟,材料流失严重,磨痕较深,磨损最严重,如图1e所示;GCr15钢球有明显的黏着痕迹,发生轻微的磨损,如图1f所示。TC4合金与Si₃N₄陶瓷球摩擦时, Si₃N₄陶瓷球硬度远大于TC4合金,在法向载荷作用下形成压痕最深,但是黏着最轻,滑动过程中以切削为主,磨屑颗粒不容易黏附,进而一部分滞留在接触区域,在压应力作用下碾

碎,压实在接触区域, Si₃N₄陶瓷球形成划痕形貌中黑色磨屑覆盖度最广,如图1h所示。Si₃N₄球面有轻微的犁耕损失,几乎没有黏着痕迹,可以认为几乎没有发生磨损,如图1i所示。

2.2 摩擦系数分析

摩擦系数反映摩擦接触表面微凸体瞬时接触状态的动态演化过程^[16];图2为TC4合金与3种对偶球在不同法向载荷作用下摩擦系数随时间的变化曲线,摩擦系数曲线均呈现上升-下降-稳定波动的变化阶段;起始阶段,接触表面光滑,表面粗糙度小,极短时间的循环,镜面被破坏,裸露的基体金属凹凸不平,摩擦系数迅速增加,随着循环次数的增加,磨屑颗粒平铺在接触区域,滚动的磨屑颗粒有助于减缓摩擦系数,摩擦出现短暂的稳定期,磨屑颗粒持续剥落在接触区域堆积,使磨屑颗粒的产生和溢出不平衡,摩擦系数进入剧烈波动的变化阶段。

TC4合金与Si₃N₄陶瓷球和GCr15钢球摩擦中,小载荷($F_n=2, 5\text{ N}$)时摩擦系数曲线前期波动平缓,中后期波动剧烈,说明后期磨屑颗粒在接触区域长时间积聚,载荷较小时磨屑颗粒不易被碾碎压实,摩擦系数出现剧烈的波动,如图2a、2b所示;大载荷($F_n=10, 15\text{ N}$)时摩擦系数曲线在整个摩擦过程中波动程度近似相同,波动平缓,如图2c、2d所示。结合图1e、1h所示的划痕形貌说明磨屑颗粒容易在法向载

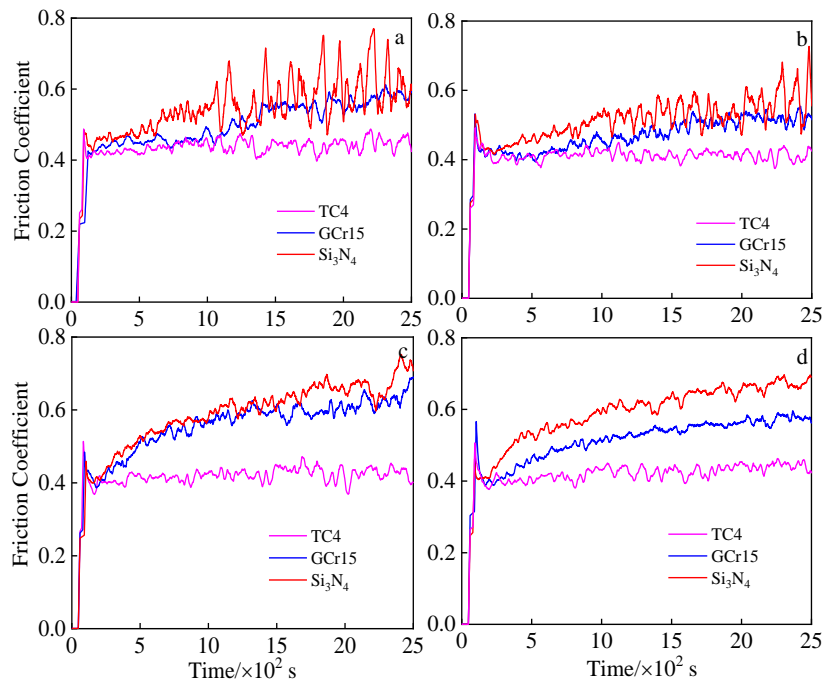


图2 法向载荷作用下不同摩擦副摩擦系数随时间的变化关系

Fig.2 Relationship between friction coefficient of different friction pairs and time under normal load: (a) 2 N, (b) 5 N, (c) 10 N, and (d) 15 N

荷的作用下，碾碎-压实在接触区域，起固体润滑剂和磨屑保护层的作用^[17-18]。TC4 平面与 TC4 合金球摩擦过程中，摩擦系数在任意载荷作用下变化曲线近似一致，波动程度较小；结合图 1b、1c 所示的磨损形貌，硬度相同时上下试样双向磨损，TC4 合金球有明显的黏着和磨损痕迹，磨损在微动初期以球/平面接触，摩擦中后期上试样磨损严重，磨损以微平面/平面的接触状态，接触面积增大导致黏着加剧，磨屑颗粒在接触中心产生，边缘溢出，上下试样同时磨损，对摩擦系数影响较小，摩擦系数波动平缓。

对 3 组平行试验中测量的摩擦系数求其平均值，标准差作为 y 误差来源，建立 TC4 合金与 3 种对偶球对摩时平均摩擦系数随法向载荷的变化曲线，如图 3 所示。结果表明硬对软（Si₃N₄/TC4、GCr15/TC4）的摩擦磨损，平均摩擦系数随法向载荷的增加呈上升的变化趋势，TC4 合金与 Si₃N₄ 陶瓷球对摩时平均摩擦系数大于 TC4 合金与 GCr15 钢球，说明上试样硬度对 TC4 合金的摩擦系数的影响较大。TC4 合金平面与 TC4 合金球对摩时，平均摩擦系数随法向载荷的增加变化趋势不明显，说明同种金属的平面和球面摩擦时，在法向载荷的作用下，黏着作用较大，上下试样同时磨损，摩擦系数变化稳定。

2.3 磨损特性分析

磨损体积和磨损率是反映 TC4 合金与不同材料配对对其磨损性能影响的直观要素，磨损体积可由 LOYMPUS OLS5000 3D 激光共聚焦显微镜测量获得，磨损率可由公式（1）计算获得^[19]。

$$K = \frac{V}{NDF} \tag{1}$$

式中，V 是磨损体积（μm³），由 3D 显微镜测得，N 为循环次数，D 为位移幅值（mm），F 为法向载荷（N），K 为磨损率（μm³·(μm·N)⁻¹），由公式（1）计算得出。

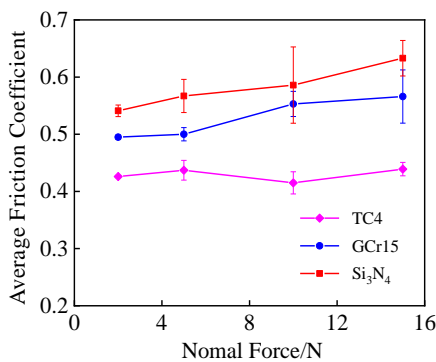


图 3 不同摩擦副平均摩擦系数随载荷的变化关系

Fig.3 Relationship between average friction coefficient and normal force of different friction pairs

图 4 为 TC4 合金与 3 种对偶球在不同法向载荷作用下磨损体积和磨损率变化曲线，磨损体积为 3 组平行试验测得磨损体积的平均值，标准差作为 y 误差来源。

由图 4a 可知，3 种对偶球与 TC4 合金摩擦时磨损体积随着法向载荷的增加而增加，原因是压头压入基体的深度增加，对偶件之间的黏着加剧，磨屑颗粒沿运行方向犁耕下层金属，加剧了材料的流失，磨损严重。结合图 1 中的磨损形貌，TC4 合金和 Si₃N₄ 陶瓷球与 GCr15 钢球摩擦时，小载荷时由于压头压入基体材料的深度较浅，Si₃N₄ 的硬度大于 GCr15，微犁耕机制占据主导，Si₃N₄ 陶瓷球与 TC4 合金对摩时的磨损率大于 GCr15 钢球与 TC4 对摩时的磨损率。大载荷时压头压入表面的深度更深，对偶件之间的黏着作用增加，损伤以黏着和犁耕共同作用，硬度较大的 Si₃N₄ 陶瓷球，容易克服黏着力在金属表面滑动，减少黏着断裂后材料剥落和流失，使 GCr15 钢球与 TC4 合金对摩时的磨损率大于 Si₃N₄ 陶瓷球与 TC4 合金对摩时的磨损率。TC4 合金与 TC4 合金球摩擦时，黏着断裂造成表层金属和对偶球之间的双向磨损，磨损接触表面以球-平面的接触演化为微平面-平面的磨损状态，载荷作用越大时，微平面接触面积越大黏着越严重，磨损率随着载荷的增加呈微小上升的趋势，如图 4b 所示。

图 5 为 TC4 合金与 Si₃N₄ 陶瓷球、GCr15 钢球以及 TC4 合金球在不同法向载荷作用下摩擦划痕的纵向

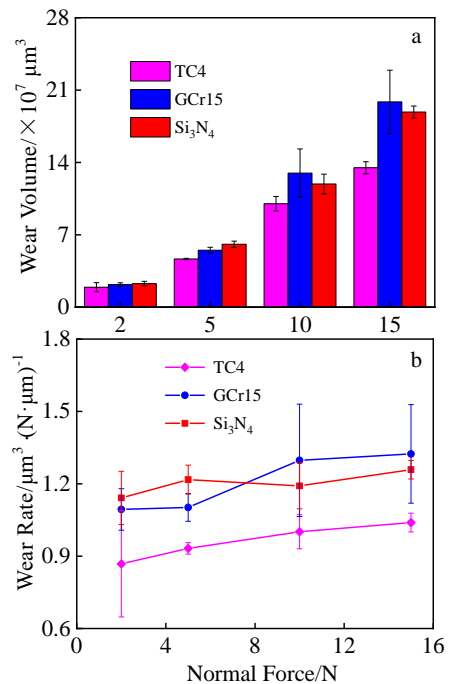


图 4 不同载荷作用下磨损体积和磨损率随载荷的变化关系

Fig.4 Relationship of wear volume (a) and wear rate (b) with normal force

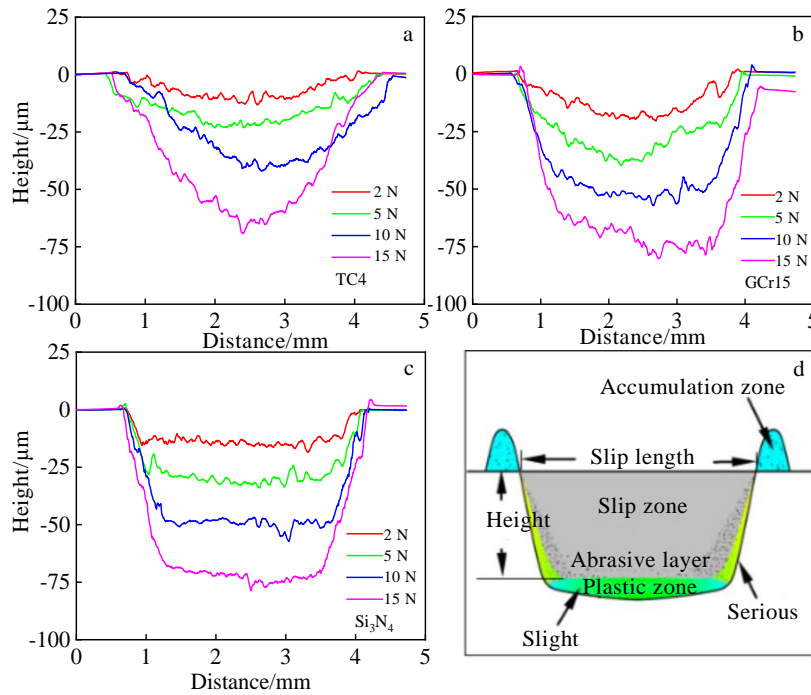


图5 不同接触副在法向载荷作用摩擦划痕纵向剖面轮廓曲线和磨痕剖面示意图

Fig.5 Longitudinal profile curves (a-c) and outline diagram (d) of friction scratches under normal load of different contact pairs: (a) TC4/TC4, (b) GCr15/TC4, and (c) Si₃N₄/TC4

二维轮廓和磨痕剖面示意图。在球/平面的接触过程中，TC4 合金平面和球面对磨时，二维轮廓呈现“V”形，原因是硬度相同对偶件在法向载荷的作用下容易使表面微凸体黏附，接触区发生双向磨损，形成磨痕宽度较大、深度较小的“V”形轮廓，如图 5a 所示。TC4 合金平面与 Si₃N₄ 和 GCr15 对磨时，二维轮廓为“U”形，原因是硬度较大的对偶球在法向载荷的作用下压入基体的深度较深，滑移过程犁耕下层基体，形成“U”形轮廓，如图 5b、5c 所示。

任意配对的摩擦划痕宽度和深度随着法向载荷的增大而增大，随着对偶球硬度的增加，划痕底部轮廓周期性波动逐渐平缓，其原因是循环过程中，压头前端积聚磨屑以及形成位错墙，在滑移中位错墙内位错密度大于位错墙两侧，容易在划痕底部形成加工硬化，压头划过位错墙时，磨损轻微，在位错墙两侧磨损严重，划痕底部形成波浪状轮廓^[20]，随着划痕宽度的增加，磨粒容易在划痕前端积聚，“垫高”压头，压头在切向力的作用下形成“爬坡”的运行方式，形成划痕深度随位移的逐步增加而减小的“U、V”形磨痕轮廓，如图 5d 所示。

图 6 为 TC4 合金与 Si₃N₄ 陶瓷球、GCr15 钢球以及 TC4 合金球在不同法向载荷作用下摩擦划痕的横向二维轮廓图和磨痕截面示意图，TC4 合金平面与 TC4 合金球对磨时，划痕界面轮廓复杂，TC4 合金平面受

到上试样球形压头和压头硬度的影响，接触区域的材料塑性变形不同，TC4 合金球硬度较小，在循环中划痕两侧磨屑堆积，接触区域面积与法向载荷是正相关的趋势，TC4/TC4 的双向磨损后期是以微平面-平面的摩擦过程，阻碍塑性流动，划痕平面轮廓复杂，破坏了摩擦面的平整程度，如图 6a 所示。TC4 平面与 GCr15 和 Si₃N₄ 的摩擦过程中，上试样硬度较大，压头以圆弧部位接触，点-平面的运行方式可以改善摩擦条件，促进接触区域塑性流动，划痕两侧磨屑堆积均匀，磨屑容易溢出，划痕面平整，如图 6b、6c 所示；磨损表面以犁沟和塑性变形层构成，如图 6d 所示。

2.4 摩擦耗散能分析

摩擦耗散能模型^[21]和 Archard 模型^[22]是探究摩擦磨损的重要工具，解释摩擦过程中能量的传递和损失，摩擦耗散能模型改进了 Archard 模型中忽略了摩擦系数的问题，图 7 为 TC4 合金与 3 种试样摩擦过程中摩擦耗散能量曲线，摩擦耗散能有公式 (2) 计算获得。

$$E_d = \sum_{i=1}^{i=n} 4\mu P_i D_i \quad (2)$$

式中， E_d 为摩擦耗散能 (J)， μ 为摩擦系数， D 为位移幅值 (mm)， P 为法向载荷 (N)， i 为摩擦循环次数。

由图 7a 可知，TC4 合金与 3 种接触体摩擦时，摩擦耗散能随着循环次数的增加呈线性增长趋势，说明

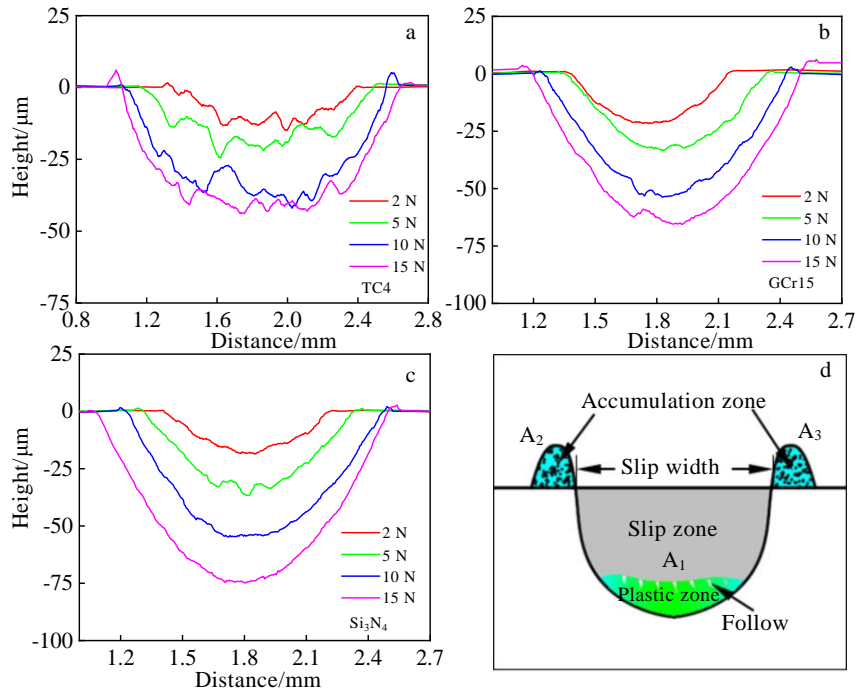


图 6 不同接触副在法向载荷作用摩擦划痕横向剖面轮廓曲线和磨痕截面示意图

Fig.6 Contour curves (a-c) and outline diagram (d) of transverse profile of friction scratches under normal load of contact pairs: (a) TC4/TC4, (b) GCr15/TC4, (c) Si₃N₄/TC4

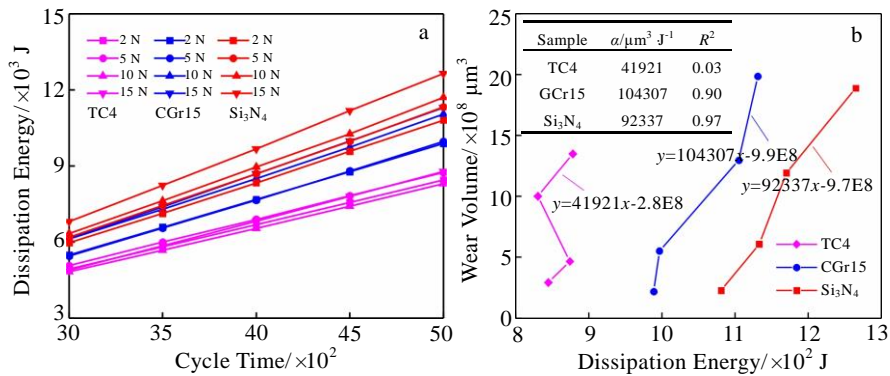


图 7 摩擦耗散能变化关系

Fig.7 Relationship between friction dissipation energy and cycle number (a); relationship between wear volume and dissipated energy (b)

在摩擦过程中以二体作用接触为主，损伤形式为材料的直接损失。摩擦耗散能随着法向载荷的增加呈现上升趋势，TC4 合金与 TC4 球摩擦时能量耗散最小，Si₃N₄的耗散能最大，GCr15 介于两者之间。能量耗散的概念可以描述和比较基体转化层之间的摩擦磨损特性，能量磨损模型^[23]是磨损体积 V 和摩擦耗散能 E_d 之间的变化关系用能量磨损系数 α 来标识，能量磨损模型为公式 (3) 所示。

$$\alpha = \frac{V}{E_d} \quad (3)$$

建立 TC4 合金与 3 种接触体在摩擦过程中能量磨损系数的变化关系如图 7b 所示，散点按最小二乘法线

性拟合，斜率为能量磨损系数 α ，残差（回归系数）为 R^2 ，磨损体积和磨损率可以定量分析接触过程中磨损损失，能量磨损系数可以从理论上预测 TC4 合金的磨损进程；由图 7b 可知，TC4 合金与 TC4 合金球摩擦过程中的 α 和 R^2 分别为 41921 和 0.03，说明同种金属摩擦过程中载荷对摩擦副的影响较大；GCr15 钢球和 Si₃N₄ 陶瓷球摩擦时的 α 分别为 104307 和 92337， R^2 分别为 0.90 和 0.97，说明在硬对软的摩擦损耗中，与 Si₃N₄ 陶瓷球配对时整个循环过程中更具有稳定性。摩擦配对的材料对整个摩擦进程有较大的影响，摩擦接触区域黏着和滑移条件的改变会导致材料的耐磨性显著降低。

2.5 摩擦划痕分析

循环过程中材料的损失为微切削和微犁耕 2 种机制, 是分析表层金属变形机制的主要方式, “切削与塑性比” 是摩擦过程经过上试样的挤压, 在截面边缘形成挤压, 切削与塑性比的测量方法如图 6d 所示, 用划痕的横截面积 A_3 减去划痕两侧材料堆积横截面积 A_1+A_2 来表示压头往复过程中切削量, 与划痕的横截面积 A_3 的比值称为切削与塑性比 (f_{cp})^[24]。

$$f_{cp} = \frac{A_3 - (A_1 + A_2)}{A_3} \quad (4)$$

Franco 等^[25]的研究中说明 f_{cp} 的变化与施载的大小无关, 与对摩材料表面粗糙度和划痕粗糙度以及滑动过程中接触区域的加工硬化现象有关, $f_{cp} \in (0, 1)$ 说明基体材料在往复过程中微切削 ($f_{cp} \in (0.5, 1)$) 和微犁耕 ($f_{cp} \in (0, 0.5)$) 机制相互作用, TC4 合金与 3 种不同硬度的摩擦副形成摩擦划痕的 f_{cp} 值, 如图 8 所示, 分布于 $f_{cp}=0.5$ 两侧, 说明微切削和微犁耕在整个摩擦过程中相互作用, 接触区域受到加工硬化的作用, 改善强度和硬度^[26]。滑动过程中压头前端在微犁耕机制的调节下材料向两侧堆积, 压头后端受微切削调节机制容易在接触表面滞留磨屑。

法向载荷和设备实际的自身的刚度小于试验需要, 实际位移略小于设定值, 加剧了接触区域的弹塑性变形, 黏着作用加剧^[27]。图 9a、9b 为上下接触体接触区域长度和宽度随载荷的变化关系, 划痕长度按图 5d 所示测量, 划痕宽度的测量按图 6d 所示。结果表明, TC4 合金与 3 种试样接触划痕长度和宽度随载荷的变化大致呈线性增长的过程, 上试样的划痕区域也随着载荷的增加呈现线性增加的趋势, TC4 球接触中磨损严重, 循环后期以微平面接触使黏着加剧, 相同机械参量作用下划痕的长度和宽度最大; GCr15 钢球和 Si_3N_4 陶瓷球硬度大于 TC4 合金, 在接触过程中黏着减弱, 磨屑在划痕两端堆积严重, 在两侧堆积轻微,

在压头经过两端塑性积聚区时, 形成“爬坡”的运动状态, 导致划痕的长度和宽度较小。

划痕硬度和划痕内表面粗糙度是探究材料抵抗摩擦损伤性能的重要指标, 划痕硬度可以说明基体材料在受到外力作用下抗磨损性能, 一般由接触体形状, 材料自身硬度以及加工硬化能力共同作用。大划痕硬度小划痕内粗糙度可以提高基体材料抗摩擦刻划能力, 从而降低磨损率和划痕深度, 降低划痕的可见性^[28]。通过划痕形貌和激光共聚焦显微镜可以计算和测量划痕硬度和划痕内表面粗糙度。

$$H = \frac{8F_n}{\pi D_H^2} \quad (5)$$

式中, H 为划痕硬度 (Pa); F_n 为法向载荷 (N), D_H 为名义划痕宽度 (m)。

图 10a 为 TC4 合金表面划痕硬度 H 随载荷的变化关系, 结果表明, TC4 合金的 H 随着法向载荷的增加呈线性增长, 3 种接触体形成的划痕硬度 TC4 球最小, GCr15 最大, Si_3N_4 介于两者之间, 说明 TC4 合金与 GCr15 的接触中能形成较好的划痕硬度来保护下层金属, 但是在 $f_{cp}=0.5$ 的微犁耕和微切削交互作用下, 上

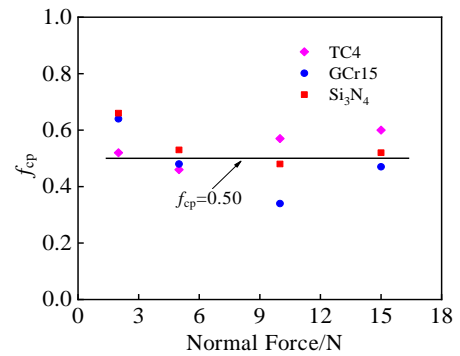


图 8 法向载荷作用下不同接触副形成划痕的切削与塑性比 f_{cp}
Fig.8 Cutting and plastic ratio f_{cp} of scratch formed by different contact pairs under normal load

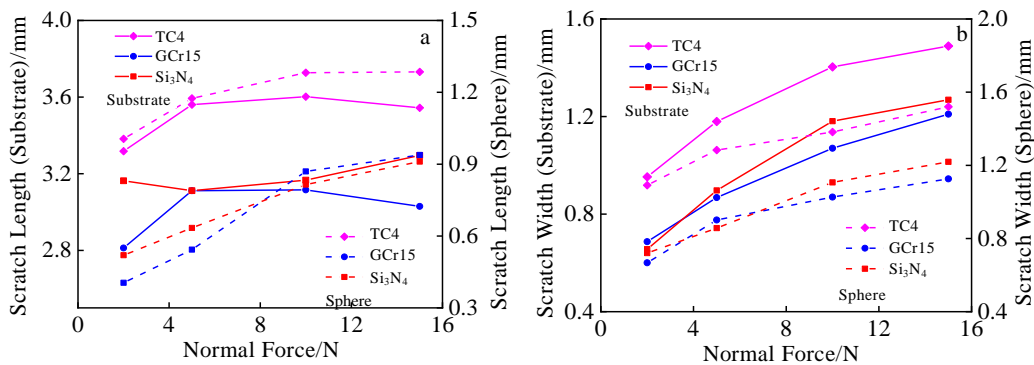


图 9 接触副作用下摩擦划痕长度和宽度随法向载荷的变化

Fig.9 Changes of friction scratch length (a) and width (b) with normal load under contact side effects

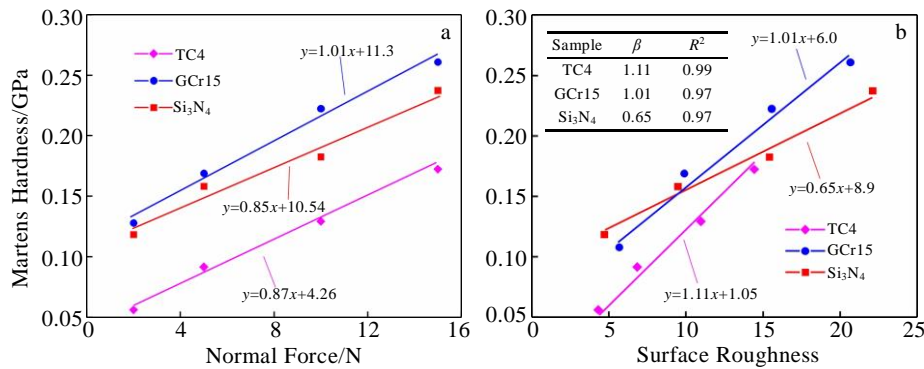


图 10 摩擦划痕硬度随载荷的变化关系以及表面粗糙度和划痕硬度之间的变化关系

Fig.10 Relationship between hardness and normal force (a); relationship between hardness and surface roughness (b)

下试样的黏着对材料的剥落和基体的犁耕对其磨损的影响较大,证实了图 4 中划痕硬度较大的 GCr15 摩擦的磨损体积大于 Si₃N₄ 的原因,黏着和犁耕直接影响划痕内表面粗糙度;建立表面粗糙度 R_s 和划痕硬度 H 之间的变化关系,如图 10b 所示,用最小二乘法拟合,发现划痕硬度和表面粗糙度的变化关系呈线性关系,斜率为 β ,残差(回归系数)为 R^2 ,TC4 合金平面与 TC4 球的 β 为 1.11, R^2 为 0.99,而与 GCr15 球和 Si₃N₄ 球的 β 分别为 1.01、0.65, R^2 均为 0.97,说明同种材料组成的对摩副形成最优划痕,但是结合图 9 发现划痕长度和宽度达到了最大;对于异种材料组成的对摩副形成的划痕中上试样的性能对划痕的影响较大。

3 结 论

1) 法向载荷的增加和接触体的改变,压头与基体材料接触状态和滑移条件的改变,摩擦系数随着载荷的增加波动程度变缓,压头的黏着和滑动改变了划痕内部的接触状态,TC4 合金与 GCr15 钢球摩擦时,黏着严重,磨屑滞留在接触区域充当滚体,降低了摩擦系数,磨屑沿着滑移方向的犁耕加剧材料的二次损伤;TC4 合金与 Si₃N₄ 陶瓷球摩擦时,黏着轻微,磨屑颗粒在划痕两端溢出,对材料的二次损伤轻微,两接触体的直接接触导致摩擦系数较大。

2) TC4 合金和 3 种接触体的摩擦划痕形貌中,与 TC4 合金球摩擦时,前期以球/平面的接触,中后期以微平面/平面的接触状态,接触状态的改变导致磨面平整度破坏,磨屑颗粒在划痕两端堆积严重,“垫高”接触区域,压头处于“爬坡”的运动状态,同时磨屑堆积导致划痕两端塑性应变能积聚严重,磨损轮廓呈“V”形。与 GCr15 钢球和 Si₃N₄ 陶瓷球摩擦时,硬度较大的上接触体在滑移过程中压头前端形成位错墙,压头后端有黏着断裂形成剥落坑,使划痕深度出

现周期性的波动,轮廓呈“U”形,GCr15 与 TC4 合金的黏着比 Si₃N₄ 严重,波动程度更明显。

3) TC4 合金和 3 种接触体的切削与塑性比分布于 $f_{cp}=0.5$ 两侧,TC4 合金摩擦过程中受到微犁耕和微切削 2 种变形机制的交互作用,上下试样的划痕宽度和划痕长度随着载荷的变化呈线性变化的趋势,TC4 合金与 TC4 球的微平面/平面的接触间接增加了接触面积使划痕长度和宽度大于 Si₃N₄ 和 GCr15 的球/平面接触。随着载荷的增加划痕硬度呈线性增长的趋势,载荷越大,持续的往复滑移过程中,加工硬化现象越严重。

参考文献 References

[1] Rigney D A. *Wear*[J], 1992, 152(1): 187

[2] Boyer R R. *Advanced Performance Materials*[J], 1995, 2(4): 349

[3] Wang Z X, Wu H R, Lin N M *et al. Surface Review & Letters*[J], 2017, 24(3): 60

[4] Zhang Wenguang(张文光), Wang Chengtao(王成焘), Liu Weimin(刘维民). *Tribology*(摩擦学学报)[J], 2003, 23(2): 91

[5] Zhou G H, Ding H, Zhang Y *et al. Tribology Letters*[J], 2010, 40(3): 319

[6] Rios J M, Quintero D, Castano J G *et al. Tribology International* [J], 2018, 128: 1

[7] Niu R, Li J, Wang Y *et al. Diamond & Related Materials*[J], 2016, 64: 70

[8] Long M, Rack H J. *Wear*[J], 2011, 249(1-2): 157

[9] Sun Jianfang(孙建芳), Tang Yongtao(唐邕涛), Su Fenghua(苏峰华) *et al. Tribology*(摩擦学学报)[J], 2021, 41(6): 953

[10] Wang Lan(王 兰), Ding Hongyan(丁红燕), Liu Aihui(刘爱辉) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(9): 2449

[11] Song Wei(宋 伟), Sun Lu(孙 璐), Jing Pengfei(景鹏飞)

- et al. Journal of Central South University, Science and Technology*(中南大学学报, 自然科学版)[J], 2019, 50(2): 328
- [12] Öpöz T T, Chen X. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*[J], 2015, 229(5): 713
- [13] Yang Chao(杨超), Liu Xiaojun(刘小军), Yang Haidong(杨海东) *et al. Tribology*(摩擦学学报)[J], 2015, 35(2): 228
- [14] Song Wei(宋伟), Li Wanjia(李万佳), Yu Shurong(俞树荣) *et al. CIESC Journal*(化工学报)[J], 2022, 73(3): 1324
- [15] Sakamoto T, Tsukizoe T. *Wear*[J], 1977, 44(2): 393
- [16] Pearson S R, Shipway P H. *Wear*[J], 2015, 330-331: 93
- [17] Wang J F, Xue W H, Gao S Y *et al. Wear*[J], 2021, 486-487: 204 079
- [18] Kirk A M, Shipway P H, Sun W *et al. Tribology International*[J], 2020, 149: 105 592
- [19] Lindroos M, Valtonen K, Kemppainen A *et al. Wear*[J], 2015, 322-323: 32
- [20] Yu Qiancheng(余前程), He Yongyong(何永勇). *Journal of Vibration and Shock*(振动与冲击)[J], 2014, 33(2): 89
- [21] Lesnevskiy L N, Lyakhovetskiy M A, Savushkina S V. *Journal of Friction and Wear*[J], 2016, 37(3): 268
- [22] Archard J F, Hirst W. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*[J], 1956, 236: 397
- [23] Fouvry S, Kapsa P, Vincent L. *Wear*[J], 2001, 247(1): 41
- [24] Gahr K H Z. *Tribology Series, Microstructure and Wear of Materials*[M]. Amsterdam: Elsevier, 1987: v
- [25] Franco L A, Sinatora A. *Wear*[J], 2017, 382-383: 51
- [26] Bellemare S, Dao M, Suresh S. *International Journal of Solids and Structures*[J], 2007, 44(6): 1970
- [27] Fan Na, Wang Y X, Wang Q F *et al. Lubrication Science*[J], 2018, 30(3): 116
- [28] Kurkcu P, Andena L, Pavan A. *Wear*[J], 2014, 317(1-2): 277

Effect of Friction Pair Materials on Friction and Wear Properties of TC4 Alloy

Song Wei, Li Wanjia, Yu Shurong, Li Kaimin, Ma Rongrong

(College of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The friction and wear properties of TC4 alloy surface were investigated by ball/plane contact form of TRB³ friction testing machine. TC4 ball, GCr15 steel ball and Si₃N₄ ceramic ball were used as the upper samples to study the friction scratches and wear characteristics of TC4 alloy under different normal forces. The friction scratch morphology was measured by 3D laser confocal microscope, and the energy wear models which could effectively predict the wear process were established to explore the change mechanism of contact state. The results indicate that the contact state of ball/plane changes to micro-plane/plane contact state with the decrease in the hardness of the upper sample. The length and width of friction scratches of TC4 alloy increase linearly with the increase in the load and the depth fluctuates like a “sawtooth” due to the effect of the dislocation wall of indenter front and the adhesion particles of indenter offside. The cutting to plasticity ratio (f_{cp}) is distributed around both sides of $f_{cp}=0.5$, indicating micro-ploughing and micro-cutting interact on the damage of TC4 alloy by indenter and the protective effect of process hardening phenomenon on the surface is verified. The linear relationship between scratch hardness and surface roughness could predict the damage during material deformation.

Key words: TC4 alloy; normal load; wear mechanism; energy dissipation; friction scratch

Corresponding author: Yu Shurong, Ph. D., Professor, College of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, Tel: 0086-931-2973728, E-mail: yusr@lut.cn