

水合羟乙基纤维素润滑时钛合金的摩擦学特性

盛德尊, 张会臣

(大连海事大学, 辽宁 大连 116026)

摘要: 以羟乙基纤维素(HEC)作为水基润滑添加剂, 研究点接触条件下 Ti-6Al-4V 的摩擦学特性。采用超景深显微镜测量钛合金表面粗糙度, 激光共聚焦显微镜测试氮化硅球三维形貌, 采用能谱分析和拉曼光谱分析磨痕的物质组成, 在 UMT-2 摩擦磨损试验机上分析线速度和润滑液浓度对 Ti-6Al-4V 摩擦学特性的影响。结果表明, 摩擦过程经不同的跑合阶段, 达到稳定的超低摩擦状态 ($\mu \approx 0.005$); 随线速度、浓度的增大, 氮化硅球和 Ti-6Al-4V 的摩擦系数先减小后增大; 低线速度以及低浓度时无法形成可靠润滑膜, 线速度过高时, 摩擦产热导致水分子蒸发, 润滑液浓度过高时, 黏度显著增大, 都不能实现超低摩擦; 实现超低摩擦需合适的线速度以及水合分子浓度, 此时钛合金表面形成微凸体磨平区域, 有利于水合分子层产生斥力, 形成稳定的润滑膜。通过微观分析, 提出了钛合金的水基润滑模型。

关键词: Ti-6Al-4V; 水基润滑; 超低摩擦; 羟乙基纤维素; 润滑模型

中图分类号: TG356.1⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)02-0509-08

近年来, 随着绿色摩擦学概念的提出^[1,2], 水基润滑得到了越来越广泛的关注。在水基润滑中, 水合分子的排斥作用可以分离摩擦表面, 达到减摩润滑的目的。然而, 纯水的排斥作用弱, 需加入适当的其它物质, 才能达到良好的润滑效果。Chai 等^[3]将聚环氧乙烷溶解于 Li^+ 、 Cs^+ 等的水溶液, 借助表面力平衡仪(SFB)进行摩擦学试验发现, 碱金属离子能够增强水合聚环氧乙烷的排斥作用。Kampf 等^[4]研究了水合壳聚糖的摩擦学特性, 利用阴离子交联剂增强壳聚糖的水合作用, SFB 的测试发现, 排斥力的作用距离由 15 nm 增加到 56 nm, 能够克服表面的范德华力。Goldberg 等^[5,6]将单层豆磷脂酰胆碱涂覆在云母上, 排斥力的作用距离达到 77 nm, 接触压强为 12 MPa 时获得超低摩擦系数(2×10^{-5})。Chen 等^[7,8]将聚 2-甲基丙烯酰氧乙基磷酸胆碱(pMPC)附着在云母表面, pMPC 形成“分子刷”, 接触压强为 7.5 MPa 时“分子刷”结构能够获得极低的摩擦系数(≈ 0.0004)。以上摩擦学实验均在 SFB 系统上完成, SFB 采用云母作摩擦副, 接触面积约为 $2.8 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$, 属于微尺度试验^[9]。Deng 等^[10]采用氮化硅球与玻璃作摩擦副, 研究了磷酸溶液(pH=1.5)的水基摩擦学特性, 摩擦系数稳定在 0.003。试验后氮化硅球发生磨损, 摩擦副接触面积约为 $3.1 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$, 比 SFB 系统的接触面积提高 2 个量级。

钛合金在生物医学、航空航天和舰船领域应用广泛^[11,12], 水基润滑条件下, 钛合金的摩擦学特性特别值得关注^[13]。本实验以水合羟乙基纤维素作为润滑剂, 研究不同试验条件下钛合金的摩擦学特性, 结合拉曼光谱分析等技术, 探究钛合金的水基润滑机理, 以为水合羟乙基纤维素在钛合金润滑中的应用提供技术支持。

1 实验

羟乙基纤维素(HEC)是一种非离子型表面活性剂, 具有良好的表面吸附能力, HEC 的糖单元含有多个羟基, 羟基与水分子形成氢键, 使得 HEC 易形成水合分子, HEC 与水分子形成网状层, 可以增强润滑液的成膜能力^[14]。试验证明, HEC 对兔子、白鼠均无害^[15], 具有良好的生物相容性, 排放到环境中不会造成污染。本实验采用超低黏度的 HEC 粉末作为水基润滑添加剂, 采购自阿拉丁生物有限公司(Aladdin Corp., China), 纯度大于 99%, 黏度为 80~125 mPa·s (25 °C, 2.00%)。用去离子水配置浓度(质量分数)为 0.25%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、3.0%、4.0%的润滑液进行实验。实验前将润滑液静置 12 h 以确保 HEC 的羟基与水分子完全结合。采用运动黏度仪(GB285, Beifang Corp., CHN)测试润滑液的运动黏度, 结果如图 1 所示。

收稿日期: 2018-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(51335005)

作者简介: 盛德尊, 男, 1990 年生, 博士生, 大连海事大学交通运输装备与海洋工程学院, 辽宁 大连 116026, 电话: 0411-84723319, E-mail: shengdezun@163.com

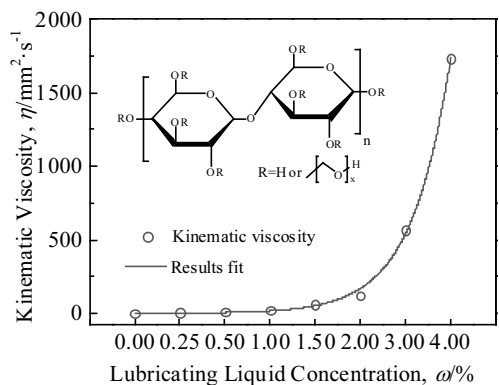


图 1 运动黏度随润滑液浓度的变化

Fig.1 Variation of kinematic viscosity with concentration of lubricating liquid

摩擦学试验在微摩擦磨损试验机(UMT-2, Bruker Corp., USA)上进行。采用球-盘接触形式,氮化硅球的直径为 4 mm, Ti-6Al-4V 试样的直径为 25 mm, 厚度为 3 mm, 摩擦副和试样的物理性能如表 1 所示。试验前将 Ti-6Al-4V 试样进行抛光处理,采用白光干涉显微镜(NewView 5022, Zygo Corp., USA)测试抛光试样的表面粗糙度, R_a 值为 $0.40 \pm 0.05 \mu\text{m}$ 。试验前将钛合金试样固定在试验机的旋转模块上,调节试样表面与水平面的夹角小于 0.01° , 以提高摩擦系数的测试精度^[16]。试验时将 0.5 mL 润滑液添加到球-盘接触点, 试验中施加载荷为 1 N, 对应的 Hertz 接触压强约为 750 MPa。试验中球-盘接触点的旋转半径为 5.5 mm, 转速范围为 80~850 r/min, 对应的线速度为 46.1~489.3 mm/s。试验在室温为 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 时进行, 空气相对湿度为 40%~50%。

采用激光共聚焦显微镜 (LEXT OLS4000, Olympus Corp., JPN)测量氮化硅球摩擦接触点的三维形貌。采用扫描电镜(SEM)(SUPRA 55 SAPHIRE, Carl Zeiss Corp., GER)表征钛合金的表面微结构,借助 EDS(Oxford Instruments)分析表面元素。借助拉曼光谱仪(DXR Raman, Thermo Corp., USA)测试未清洗磨痕与清洗磨痕的拉曼光谱以分析氧化物的成分。

2 结果与讨论

2.1 摩擦状态随时间的变化

线速度为 236.0 mm/s, 1.00% HEC 作润滑剂时,

表 1 摩擦副和试样的物理性能

Property	Si_3N_4	Ti-6Al-4V
Density/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	3.3	4.5
Vickers hardness, H_v/GPa	14.2	3.5
Young's modulus, E/GPa	310	115
Poisson's ratio, ν	0.26	0.34

摩擦系数随时间的变化如图 2 所示。

可以看到, 跑合阶段有 2 个不同的过程。初始摩擦系数大约为 0.04, 然后摩擦过程进入第 1 跑合阶段(Running-in stage I), 摩擦系数开始降低, 试验到 4 min 时摩擦系数突然降低到 0.006, 但是只能维持较短时间(约 15s, 100 转), 然后摩擦系数突然增大到 0.027, 此时摩擦过程进入第 2 跑合阶段(Running-in stage II), 摩擦系数升降交替, 摩擦状态在低摩擦与超低摩擦之间转换, 润滑液无法维持稳定的超低摩擦状态。第 2 跑合阶段持续 15 min 左右, 比第 1 跑合阶段的持续时间长。最后摩擦过程进入稳定阶段(Stability stage), 可以维持极低的摩擦系数(≈ 0.005)直到试验结束, 实现了稳定的超低摩擦。水合羟乙基纤维素作润滑液时, 摩擦过程经过 2 个摩擦状态不同的跑合阶段才能实现超低摩擦。第 2 跑合阶段可以实现短暂的超低摩擦, 尽管超低摩擦状态不稳定, 但是摩擦副具备了实现超低摩擦的条件。随着摩擦进行, 摩擦系数低于 0.01 的时间逐渐延长(≈ 60 s), 最终进入稳定的超低摩擦状态。

2.2 润滑液浓度对摩擦过程的影响

在摩擦过程中润滑液中的水分子会蒸发, 摩擦产热导致水分蒸发速度加快。从图 2 可以看到需要长时间跑合才能实现超低摩擦, 期间润滑液中羟乙基纤维素的浓度发生变化。用不同浓度羟乙基纤维素作润滑液进行摩擦试验, 以探究羟乙基纤维素的含量对实现超低摩擦的作用。图 3 是线速度为 236.0 mm/s 时 7 组润滑液的摩擦系数。可以看到, 只有浓度为 0.50%~2.00% 的润滑液可以实现超低摩擦, 润滑液浓度低于 0.50% 以及高于 2.00% 时摩擦系数均大于 0.01, 这表明润滑液中羟乙基纤维素的含量对于获得低摩擦系数具有重要作用。

羟乙基纤维素的浓度显著影响润滑液的黏度, 而润滑液黏度可以影响摩擦副界面的润滑膜厚度, 根据

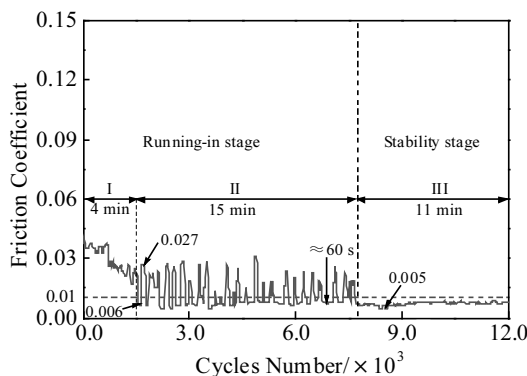


图 2 摩擦系数随时间的变化

Fig.2 Variation of friction coefficient with time

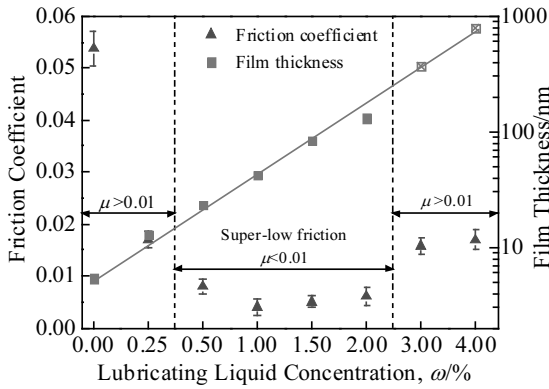


图 3 摩擦系数和润滑膜厚度随润滑液浓度的变化

Fig.3 Variation of friction coefficient and film thickness with Concentration of lubricating liquid

Hamrock-Dowson 理论^[17]通过以下公式计算不同浓度下的润滑膜厚度:

$$H_c^* = 2.69 \frac{G^{*0.53} U^{*0.67}}{W^{*0.067}} (1 - 0.61e^{-0.73k}) \quad (1)$$

其中, $H_c^* = h_c / R$, $G^* = \alpha E'$, $U^* = \eta_0 U / (E' R)$, $W^* = W / (E' R^2)$, h_c 是摩擦副中心润滑膜厚度, R 是氮化硅球的半径, α 是润滑液的压黏系数 (6.83 GPa^{-1}), η_0 是润滑液的黏度, U 是摩擦副的平均线速度, W 为施加载荷, k 是椭圆率 (≈ 1.19), E' 是摩擦副材料的当量弹性模量, 根据 Hertz 接触理论计算 E' :

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \quad (2)$$

其中 ν_i 是材料的泊松比, E_i 是材料的弹性模量。

由以上公式计算出润滑膜厚度与羟乙基纤维素浓度的变化曲线, 结果见图 3。随着羟乙基纤维素浓度升高, 润滑膜厚度增大, 浓度为 0.50%~2.00% 的润滑膜厚为 30~130 nm, 此时可以实现超低摩擦。浓度大于 2.00% 时, 润滑膜厚度大于 130 nm, 应具有良好的润滑效果, 但试验发现摩擦系数较大, 根据雷诺方程的假设^[18], H-D 理论适用于润滑液黏度变化范围小的情况, 当羟乙基纤维素浓度大于 2.00% 时, 润滑液的运动黏度相较于其他 4 组润滑液(图1)急剧增大, 黏度增大引起摩擦产热增加, 导致润滑膜中的水分子蒸发, 润滑膜变薄, 润滑作用减弱。从理论假设的适用条件以及试验结果可知, H-D 理论不适用羟乙基纤维素浓度超过 2.00% 的润滑膜厚度计算。

随羟乙基纤维素含量不同(图 3), 钛合金的摩擦状态在超低摩擦状态(0.50%~2.00%)与低摩擦状态(0.25%, 3.00%, 4.00%)之间转变。为分析润滑液在摩擦状态转变中的作用机理, 分别测试浓度为 0.25%、1.00% 以及 3.00% 的 3 组润滑液试验后的 Ti-6Al-4V 表面形貌, 结果如图 4 所示。浓度为 0.25% 时, 磨痕上出现长条状的犁沟(图 4a), 表面粗糙度 (R_a) 为 1.43 μm , 此时润滑膜厚度低于 30 nm, 润滑膜无法避免氮化硅球与钛合金发生固体接触, 因此摩擦系数大, 钛

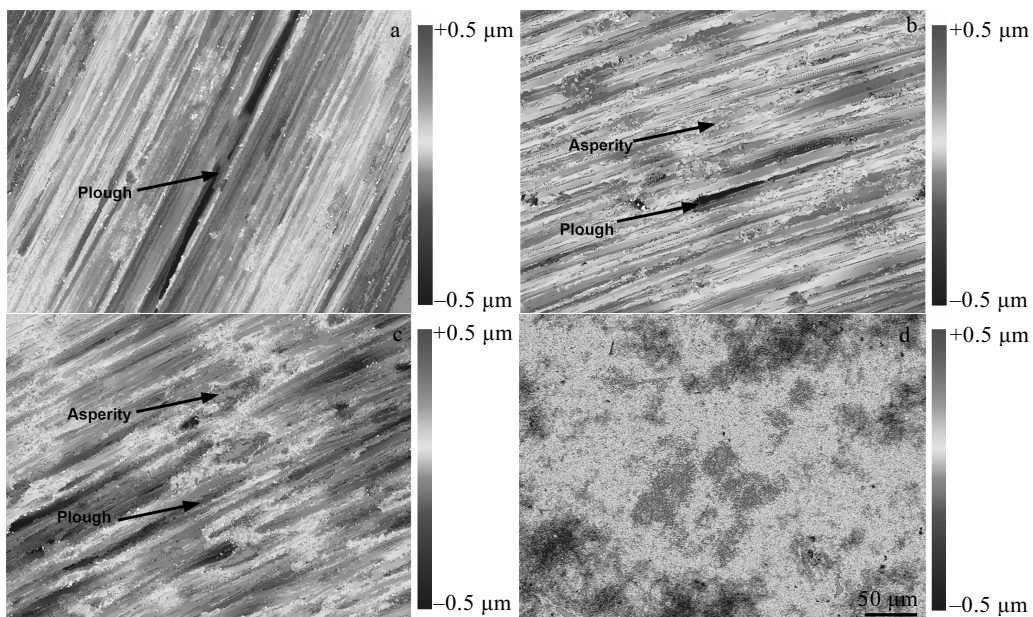


图 4 不同润滑液浓度下钛合金磨痕的表面形貌

Fig.4 Micrographs of scars on Ti-6Al-4V under different concentrations of lubricating liquid:

(a) 0.25%, (b) 1.00%, (c) 3.00%, and (d) before test

表 2 图 4 中试验前后钛合金的表面粗糙度
Table 2 Roughness of Ti-6Al-4V surfaces before and after the friction test in Fig.4

Parameter	Before test	0.25%		1.00%		3.00%	
		After test	Change/%	After test	Change/%	After test	Change/%
$R_{ms}/\mu\text{m}$	0.56 ± 0.20	1.79	+220	0.64	14	0.96	+71
$R_a/\mu\text{m}$	0.40 ± 0.05	1.43	+233	0.51	19	0.73	+70

合金表面磨损严重。浓度为 1.00% 时，磨痕上只出现少量深度较浅的犁沟，大量微凸体磨平区域(图 4b 红色区)，表面粗糙度为 0.51 μm 。浓度为 3.00% 时，磨痕表面出现较多犁沟，分布少量微凸体磨平区域，表面粗糙度为 0.73 μm 。将 3 组 Ti-6Al-4V 的粗糙度与试验前的粗糙度对比(表 2)，试验后表面粗糙度均增大。浓度为 0.25% 时表面粗糙度增幅最大，浓度为 1.00% 时表面粗糙度增幅最小。分析认为，其微凸体与犁沟分布较均匀，犁沟可以储存润滑液有助于形成润滑膜，润滑膜能够分离摩擦副，降低摩擦系数。浓度为 3.00% 时，表面微凸体磨平区域稀疏分布，分析认为，由于润滑液黏度较大，流动性差，不能及时补充到摩擦界面。根据以上分析，羟乙基纤维素的含量过低或者过高都不能起到良好的润滑作用，润滑液中羟乙基纤维素与水有合适的比例(0.50%~2.00%)才能形成可靠的润滑膜，获得极低的摩擦系数。

羟乙基纤维素润滑液能够获得超低摩擦系数，达到超低摩擦时润滑膜厚度为 30~130 nm，但是摩擦过程中产热增加，水分子会蒸发，润滑膜失水之后厚度变薄，不利于维持超低摩擦，导致超低摩擦状态的持续时间缩短。图 5 是 4 组润滑液(0.50%、1.00%、1.50%、2.00%) 超低摩擦状态的持续时间以及对应的摩擦系数。浓度为 1.00% 时摩擦系数最低，超低摩擦状态持续时间最长，浓度为 1.50%、2.00% 时摩擦系数依次变大，而它们的持续时间依次变短。浓度为 0.50% 时摩

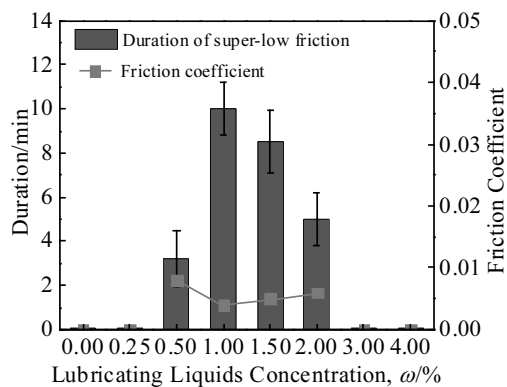


图 5 4 组润滑液的超低摩擦状态持续时间及摩擦系数
Fig.5 Duration of super-low friction and friction coefficients of four lubricating liquids

擦系数最大且超低摩擦状态持续时间最短。分析认为，摩擦系数越大，摩擦产热越高，水分子蒸发越快，因此超低摩擦状态的持续时间与摩擦系数负相关。

2.3 线速度对摩擦过程的影响

摩擦材料在跑合阶段即可实现短暂的超低摩擦，图 6a 是润滑液浓度为 1.00% 时，不同线速度下(46.1~489.3 mm/s)的第 1 跑合阶段的时长。提高线速度可以明显缩短跑合时间。图 6b 是不同线速度时的摩擦系数。结果发现，随线速度增大，摩擦系数先降低然后增大，可以达到稳定超低摩擦状态的线速度范围是 172.7~362.7 mm/s，其它线速度条件下稳态摩擦系数大于 0.01，属于低摩擦状态，无法实现超低摩擦。

根据 H-D 理论计算润滑膜厚度随线速度的变化(图 6b)，随着线速度增大，润滑膜变厚，当厚度大于 30 nm 时可以达到超低摩擦状态。线速度增大到 426.0 mm/s 时，润滑膜厚大于 60 nm，润滑液的润滑效果应比低线速度时更好，然而摩擦系数大于 0.01，不能实

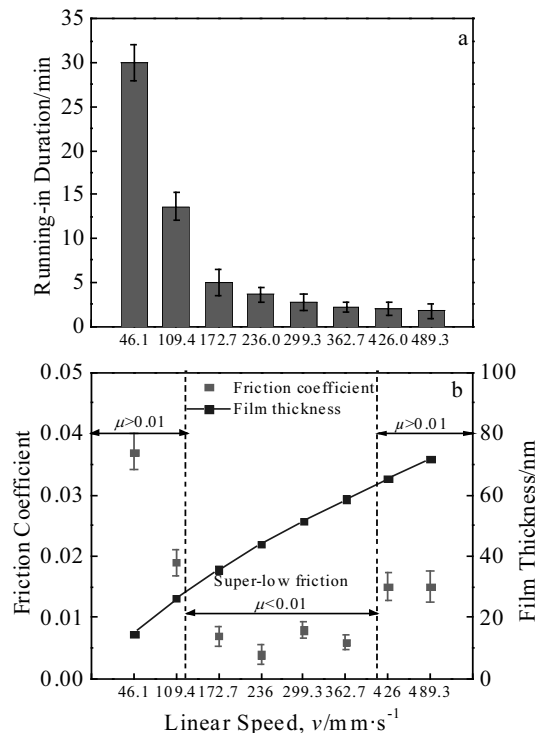


图 6 线速度对跑合时长、摩擦系数和膜厚的影响
Fig.6 Effect of linear speed on running-in duration (a), friction coefficient and film thickness (b)

现超低摩擦, 此时 H-D 理论不再适用。试验中, 线速度增大到 426.0 mm/s 时摩擦副产热激增, 产热增加导致水分子快速蒸发, 水合羟乙基纤维素形成的润滑膜被破坏, 因此 H-D 理论不适用于计算羟乙基纤维素润滑液在高线速度时的润滑膜厚度。线速度为 46.1 和 109.4 mm/s 时无法实现超低摩擦, 且线速度为 46.1 mm/s 时摩擦系数最大, 而线速度为 236.0 mm/s 时摩擦系数最小。

图 7 是氮化硅球的磨痕形貌。低摩擦(46.1 mm/s)中氮化硅球表面(图 7a)产生严重的椭圆形磨损, 并且沿摩擦方向有明显的条状磨痕, 磨损面积约为 $758 \mu\text{m} \times 630 \mu\text{m}$ (椭圆率 $k \approx 1.20$)。超低摩擦(236.0 mm/s)中氮化硅球的磨损表面(图 7d)有轻微的条状磨痕, 磨损面积约为 $540 \mu\text{m} \times 452 \mu\text{m}$ (椭圆率 $k \approx 1.19$), 远小于低摩擦(46.1 mm/s)的磨损面积。从低摩擦的截面图(图 7c)可以看到磨痕表面高低起伏, 表面粗糙度约为 $0.56 \mu\text{m}$, 而超低摩擦的截面(图 7f)变化平缓, 表面粗糙度约为 $0.16 \mu\text{m}$ 。图 8 是钛合金表面的磨痕形貌。低摩擦状态下(46.1 mm/s)的钛合金表面有明显磨损。在摩擦过程中, 与摩擦副发生固体接触, 润滑膜被破坏, 磨粒磨损在钛合金表面产生狭长的犁沟(图 8a 蓝色区 α), 导致摩擦系数过大。超低摩擦状态下(236.0 mm/s)的钛合金表面分布少量深度较浅的犁沟, 但是磨痕上出现大量微凸体磨平区域(图 8b 红色区 β), 微凸体直径约为 $65 \mu\text{m}$ 。图 8d 是微凸体的截面图, 微凸体的顶端近似于平面(β 处)。在图 8c 中没有发现相同的微结构。以上结果说明, 摩擦过程中微凸体与氮化硅球直接接触, 接触面积等于氮化硅球磨痕的面积。通过近似计算, 与氮化硅球发生接触的微凸体数量为 9~12 个。微凸体对实现超低摩擦具有重要意义, 随着

跑合进行, 钛合金与氮化硅球在润滑液中相互作用, 钛合金表面的微凸体被磨平, 有利于形成水合润滑膜, 并体现出斥力作用。形成的润滑膜阻止微凸体与氮化硅球直接接触, 获得超低摩擦系数。

2.4 超低摩擦状态时表面的物质组成

在跑合阶段, 摩擦副完全浸没在润滑液中, 摩擦系数较大。观察发现, 在跑合阶段润滑液从摩擦中心逐渐迁移到磨痕两侧, 磨痕上没有肉眼可见的润滑液。对比未清洗的磨痕、清洗后的磨痕以及钛合金基体的表面元素分布, 以探究羟乙基纤维素在超低摩擦中的作用。在摩擦过程达到超滑状态时停止试验, 磨痕不做任何处理, 测试结果如图 9a 所示。EDS 能谱中除 Ti、Al、V 3 种元素外还发现 C 元素和 O 元素。从 EDS 面扫描可以看到 C 和 O 在磨痕表面分布比较均匀。将磨痕三步清洗之后进行测试, 结果如图 9b 所示。从 EDS 能谱可以看到 C 元素和 O 元素依然分布比较均匀, 但是 2 种元素的分布量明显减少。分析认为, 摩擦过程中羟乙基纤维素附着在磨痕的表面, 清洗之后羟乙基纤维素从摩擦表面脱离。图 9c 是未进行试验的钛合金基体的测试结果。与清洗后的测试结果对比发现, EDS 能谱中碳元素的分布几乎相同, 但是能谱图中没有发现氧元素。说明经过摩擦, 磨痕表面与润滑液发生化学作用产生氧化物, 而未进行试验的钛合金表面不存在氧元素。根据以上结果分析认为, 在摩擦过程中羟乙基纤维素吸附在磨痕表面, 形成润滑膜将氮化硅球与钛合金隔离, 并且钛合金表面在摩擦过程中形成了氧化物。

未清洗磨痕与清洗磨痕上氧化物成分的拉曼光谱分析测试结果如图 10 所示。未清洗的磨痕在 2897 、 2446 、 1587 和 1450 cm^{-1} 出现特征峰, 分别对应 CHO、CH、杂环和 CH_2 4 种基团, 以上 4 种基团是羟乙基纤

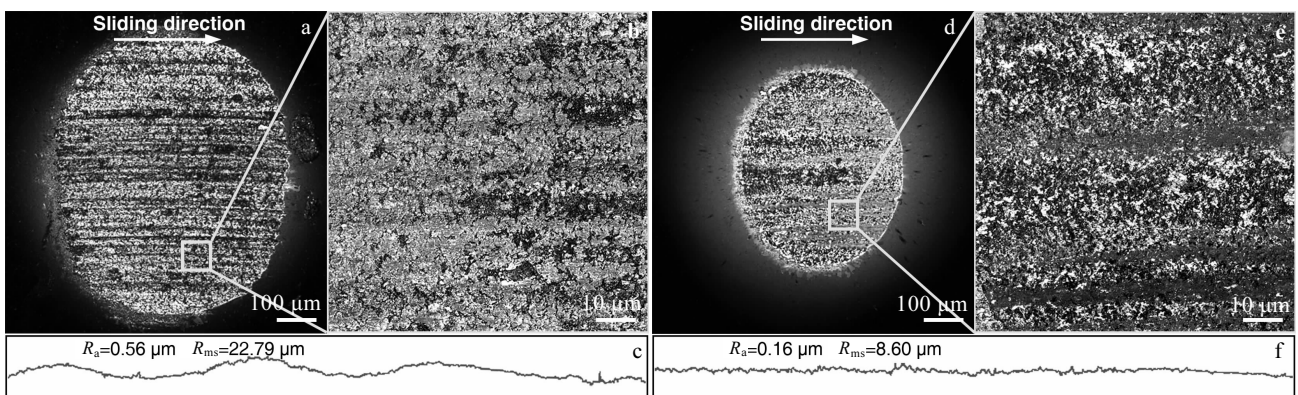


图 7 氮化硅球表面磨痕形貌

Fig.7 Micrographs of scars on Si_3N_4 balls at different linear speeds: (a, b) 46.1 mm/s, (d, e) 236.0 mm/s; (c, f) cross-sectional view (roughness)

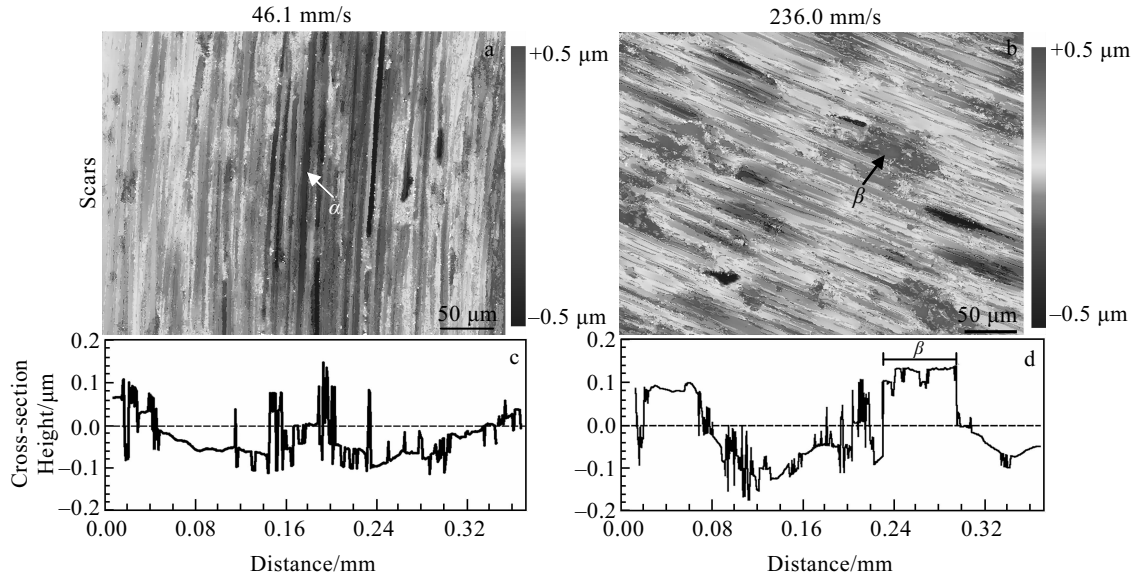


图 8 钛合金表面磨痕形貌

Fig.8 Micrographs of scars on Ti-6Al-4V plates at different linear speeds

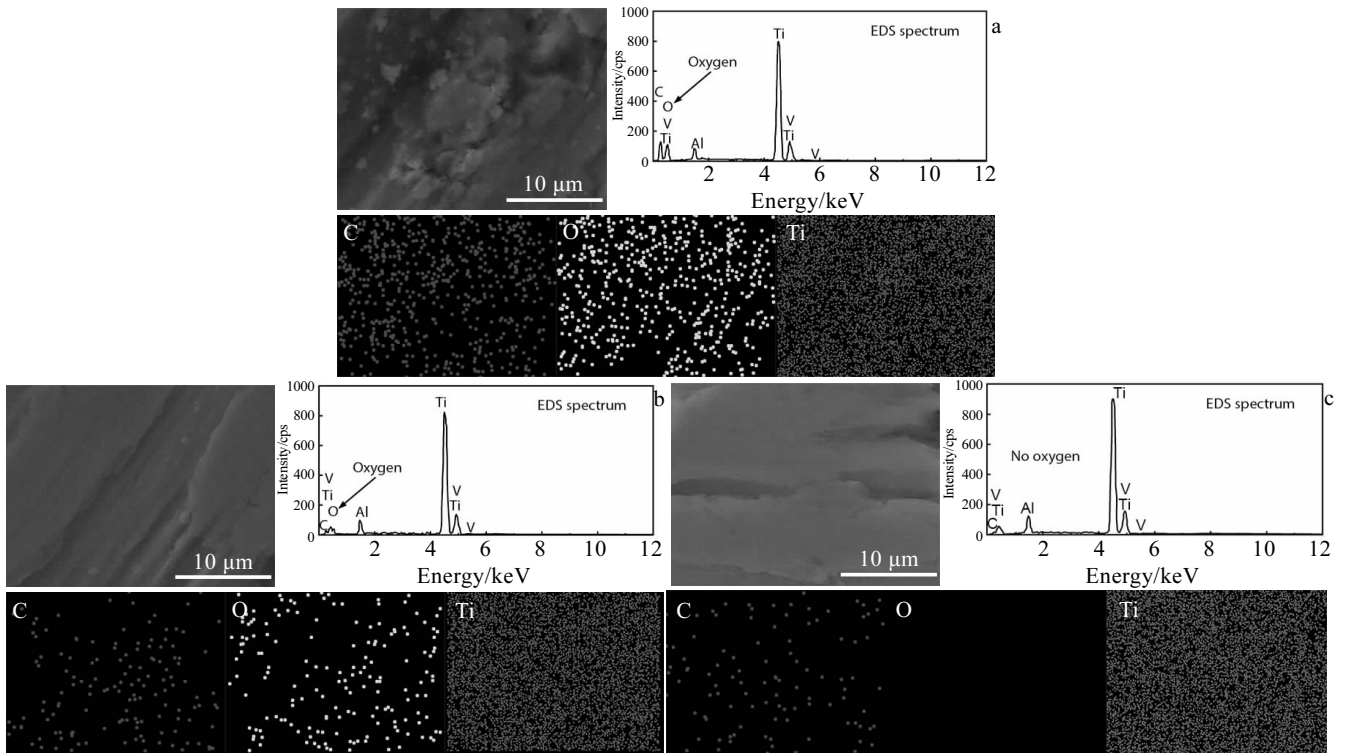


图 9 磨痕清洗前后及 Ti-6Al-4V 基体的 SEM 形貌和 EDS 能谱及面扫描

Fig.9 SEM micrographs and EDS spectra-EDS mapping of not cleaned scars (a), cleaned scars (b), and Ti-6Al-4V substrate (c)

纤维素的特征基团。将钛合金表面清洗后测试拉曼光谱，发现 CHO 的特征峰消失，说明羟乙基纤维素通过物理作用吸附在钛合金的表面。Qiu 等^[19]研究发现，在

摩擦过程中 Ti-6Al-4V 会形成 TiO₂，在拉曼光谱的 658 cm⁻¹ 处有 TiO₂ 特征峰^[20]，说明钛合金表面形成的氧化物应为 TiO₂。

3 钛合金的水基润滑机理分析

摩擦过程经过较长的跑合阶段达到超低摩擦状态。摩擦过程中水合羟乙基纤维素附着在摩擦副表面, 形成可靠的润滑膜分离摩擦副, 获得超低摩擦系数。根据以上试验结果与讨论, 提出超低摩擦状态时的水基润滑模型, 如图 11 所示。在跑合过程中钛合金表面的微凸体顶端被磨平, 形成平面, 微凸体与氮化硅球相互挤压, 并产生 TiO_2 。在润滑液中羟乙基纤维素发生完全水合, 被水分子包围, 水分子可以吸附在 TiO_2 上^[21], 钛合金表面的水分子与 Ti-O 相互作用, 使得钛合金表面成为双电层(Stern layer)。部分水分子与表面氧元素以氢键结合, 形成有序的水分子层(Water layer)。润滑液中羟乙基纤维素形成大量的长链水合分子, 水合分子链之间也可以形成氢键, 水合分子相互

作用可以提高水合分子层的稳定性, 形成第 2 层有序分子层(Shear layer), 2 种分子层共同起到润滑作用。

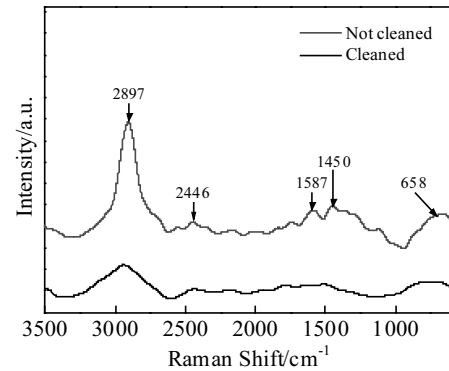


图 10 磨痕的拉曼光谱

Fig.10 Raman spectrum of scar

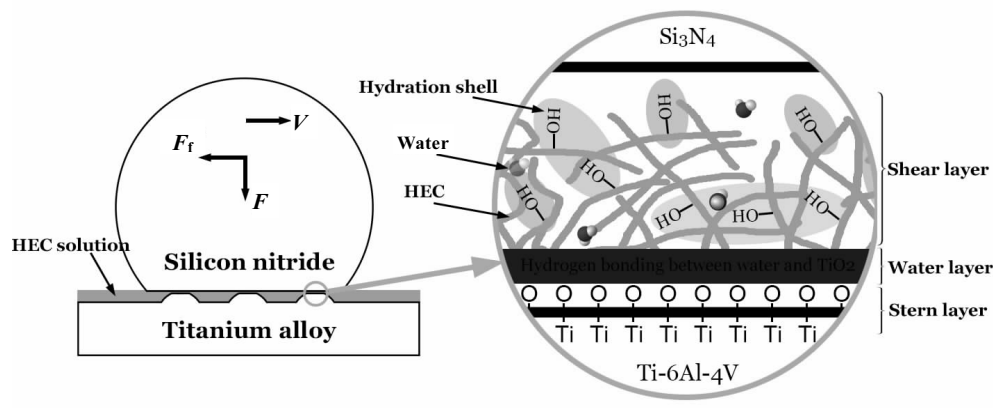


图 11 润滑模型示意图

Fig.11 Schematic illustration of the lubrication model

4 结论

1) 水合羟乙基纤维素作润滑剂时, 摩擦材料与润滑液相互作用, 最后进入稳定的超低摩擦状态。

2) 羟乙基纤维素浓度为 0.50%~2.00% 时可以获得超低摩擦系数, 浓度过低的润滑液无法形成可靠的润滑膜, 浓度过高的润滑液运动黏度过大, 润滑作用差。线速度过高(>362.7 mm/s), 产热增加, 破坏水合润滑膜, 线速度过低(<172.7 mm/s), 无法形成稳定润滑膜。采用合适的线速度可以获得超低摩擦系数。

3) 在摩擦过程中钛合金与润滑液作用产生二氧化钛, 有利于润滑膜吸附在摩擦表面。经过跑合, 形成微凸体磨平区域, 润滑液在微凸体磨平区域形成可靠的水合分子润滑膜, 达到超低摩擦状态。

参考文献 References

- [1] Zhang Siwei. *Friction*[J], 2013, 1(2): 186
- [2] Nosonovsky M, Bhushan B. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci* [J], 2010, 368(1929): 4677
- [3] Chai L, Goldberg R, Kampf N *et al. Langmuir*[J], 2008, 24(4): 1570
- [4] Kampf N, Raviv U, Klein J. *Macromolecules*[J], 2004, 37(3): 1134
- [5] Goldberg R, Schroeder A, Barenholz Y *et al. Biophysical Journal*[J], 2011, 100(10): 2403
- [6] Goldberg R, Schroeder A, Silbert G *et al. Advanced Materials* [J], 2011, 23(31): 3517
- [7] Chen M, Briscoe W H, Armes S P *et al. Science*[J], 2009, 323(5922): 1698

- [8] Chen Meng, Briscoe W H, Armes S P *et al. European Polymer Journal*[J], 2011, 47(4): 511
- [9] Raviv U, Klein J. *Science*[J], 2002, 297(5586): 1540
- [10] Deng Mingming, Zhang Chenhui, Li Jinjin *et al. Friction*[J], 2014, 2(2): 173
- [11] Oryshchenko A S, Kudryavtsev A S, Mikhailov V I *et al. Inorganic Materials: Applied Research*[J], 2012, 3(6): 497
- [12] Leonov V P, Mikhailov V I, Sakharov I Y *et al. Inorganic Materials: Applied Research*[J], 2016, 7(6): 877
- [13] Tammam R H, Fekry A M. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2014, 23(3): 715
- [14] Vieira M G A, da Silva M A, dos Santos L O *et al. European Polymer Journal*[J], 2011, 47(3): 254
- [15] Durand-Cavagna G, Delort P, Duprat P *et al. Toxicological Sciences*[J], 1989, 13(3): 500
- [16] Li Jinjin, Zhang Chenhui, Sun Liang *et al. Tribology Transactions*[J], 2013, 56 (1): 141
- [17] Hamrock B J, Dowson D. *Journal of Lubrication Technology* [J], 1977, 99(2): 264
- [18] Wen Shizhu, Huang Ping. *Principles of Tribology*[M]. Singapore: John Wiley & Sons, 2012:24
- [19] Qiu Ming, Zhang Yongzhen, Yang Jianheng *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 434(1-2): 71
- [20] Franck M, Celis J P, Roos J R. *Journal of Materials Research*[J], 1995, 10(1): 119
- [21] Benkoula S, Sublemontier O, Patanen M *et al. Scientific Reports*[J], 2015(5): 15088

Tribological Properties of Titanium Alloy in Water-based Lubricating Process of Hydroxyethyl Cellulose

Sheng Dezun, Zhang Huichen

(Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: HEC solutions with varying concentrations were used as lubricants, which were introduced into the friction pairs of Ti-6Al-4V plates and Si₃N₄ balls. Optical surface profiler and 3D measuring laser microscope were used to measure the surface of plates and balls, respectively. EDS and Raman spectroscopy were used to analyze the chemical composition of the resulting wear scars. The friction tests for the effect of linear speed and solution concentration on the tribology properties of Ti-6Al-4V were carried out on a UMT-2 friction and wear tester. The results show that a super-low friction state ($\mu \approx 0.005$) is achieved after a long running-in stage. The coefficient of friction (COF) decreases with the increasing linear speed (46.1~362.7 mm/s). The water will evaporate at high speed (>362.7 mm/s) owing to the heat generated by the friction. In addition, the COF decreases with the increasing concentration (0.25%~2.00%). However, the kinematic viscosity of the lubricant has a significantly negative effect on the COF when the concentration is larger than 2.00%. The surfaces of Ti-6Al-4V are worn with smoothed flats at appropriate speeds and concentrations, which is conducive for forming lubricating films. TiO₂ is detected on the scar by Raman spectrum. On the basis of these experimental results, a lubrication model was proposed.

Key words: Ti-6Al-4V; water-based lubrication; super-low friction; hydroxyethyl cellulose; lubrication model

Corresponding author: Zhang Huichen, Ph. D., Professor, Transportation Equipments and Ocean Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, P. R. China, Tel: 0086-411-84723319, E-mail: hc Zhang@dlnu.edu.cn