



超疏水钛合金表面的制备及其摩擦学性能

连 峰, 任洪梅, 管善堃, 张会臣

(大连海事大学 交通运输装备与海洋工程学院, 大连 116026)

摘 要: 为研究表面形貌和润湿性对表面摩擦学性能的影响, 采用激光加工技术在 Ti6Al4V 表面加工间距为 100 μm 的网格和点阵微结构, 将 SiO_2 纳米粒子涂覆在微结构上构建微纳结构。采用接触角测量仪测量试样的表面接触角和滚动角, 采用摩擦磨损试验机(UMT)测试摩擦学性能, 采用 LEXT OLS4000 型 3D 激光共聚焦显微镜进行表面形貌和磨痕表征。结果表明: 在具有微结构的表面涂覆 SiO_2 可制备出具有微纳结构的超疏水 Ti6Al4V 表面, 且网格表面比点阵表面更难以润湿。表面越难以润湿, 试样的比磨损率越低, 点阵和网格超疏水表面分别将比磨损率降低 32.3% 和 53.8%, 且摩擦因数曲线的波动幅度和数值均减小。且具有微纳结构的超疏水表面可显著提高 Ti6Al4V 的摩擦学性能。

关键词: 钛合金; 疏水; 超疏水; 摩擦学性能

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Preparation of super hydrophobic titanium alloy surface and its tribological performance

LIAN Feng, REN Hong-mei, GUAN Shan-kun, ZHANG Hui-chen

(College of Transportation Equipment and Ocean Engineering,
Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In order to study the impacts of the surface pattern and wettability on tribological performance, the laser processing was used to prepare grid and dot micro-structure with spacing of 100 μm on Ti6Al4V alloy surface. The SiO_2 nano particles were coated on the micro-structures to build micro-nano structures. The contact angles and roll angles were measured by contact angle measurement. The tribological performance was evaluated by universal micro-tribometer(UMT). The micrograph and wear tracks were investigated by LEXT OLS4000 3D laser scanning confocal microscopy. The results show that the super hydrophobic Ti6Al4V surfaces with the micro-nano structure can be prepared by coating the SiO_2 nano particles on the micro-structures. The grid surface is more difficult to be wet than dot surface. The harder the surface is wet, the lower the wear rate of sample is. The wear rates of super hydrophobic surface with dot and grid decrease by 32.3% and 53.8%, respectively, while the fluctuation and value of friction coefficient curve both decrease. The super hydrophobic Ti6Al4V surfaces with the micro-nano structure significantly improve the tribological properties of titanium alloy.

Key words: titanium alloy; hydrophobic; super hydrophobic; tribological performance

提高材料表面的减摩耐磨性始终是摩擦学追求的目标。摩擦副表面并非越光滑越好, 具有一定非光滑

形态的表面反而具有更好的减摩耐磨特性^[1]。在材料表面加工出微细形貌, 可以影响摩擦副表面的接触状

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975036); 辽宁省工业攻关计划项目(2012220006); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(3132014303)

收稿日期: 2014-01-12; 修订日期: 2015-05-27

通信作者: 连 峰, 教授, 博士; 电话: 0411-84723319; E-mail: lianfeng1357@163.com

态和润滑状态,达到改善表面摩擦学性能的目的。常见的表面微细加工方式有机械加工、等离子刻蚀、激光加工和化学法等,而激光加工以其高效、微结构尺寸精密可控、对环境无污染等优点被更多地应用^[2]。胡天昌等^[3]研究表明,激光微结构化形成的微坑能够存储摩擦过程中产生的磨屑而减小磨粒磨损。王斌等^[4]研究认为,激光微结构化使得45号钢表面形成可以改善摩擦性能的高硬度质点,从而明显降低磨损量。于海武等^[5]在硼铜合金铸铁表面激光加工圆形、正方形、椭圆形的微凹坑阵列,与光滑表面的摩擦因数相比微结构表面摩擦因数减小了26.3%,且椭圆形凹坑具有最好的减摩效果。韩志武等^[6]在球墨铸铁表面激光加工鳞片形、凸包形、凹坑形及波纹形4种仿生微结构表面,鳞片形仿生微结构表面的抗磨性能最佳。上述研究结果说明,激光表面微结构化在提高表面摩擦学性能方面具有优势,且不同微结构形貌的减摩耐磨效果不同。

近年来,受自然界中荷叶等植物叶片的启发^[7-8],表面接触角达到150°以上的超疏水表面在解决微纳米材料的黏着失效和摩擦磨损等问题方面展现出明显的优势和发展前景^[9-10]。万勇等^[11]利用溶胶-凝胶技术在金属铝表面构筑超疏水薄膜,超疏水薄膜以其极低的表面能,极大地减少了摩擦副之间的黏着,表现出较强的减摩耐磨性能。WANG等^[12]利用喷涂技术制备出具有不规则微结构的接触角最高达171°的铝基底超疏水表面,磨损寿命长达15 h。THIEME等^[13]利用阳极氧化法和化学蒸汽沉积法在铝合金基体上制备出耐磨性强的超疏水表面。MEHDI等^[14]以荷叶为模板采用复制法和电沉积法制备出接触角高达156°的镍纳米晶体超疏水薄膜,该超疏水薄膜具有显著的减摩作用。因此,通过将表面微结构化和低表面能处理相结合制备的超疏水表面,可以显著提高摩擦学性能。

但已有研究中所制备的超疏水表面均为无序不规则表面,难以定性定量地探讨微结构形貌对表面润湿性和摩擦学性能的影响。而用激光表面微结构化制备超疏水表面,并研究其摩擦学性能的研究尚未发现。为此,本研究作者将激光表面微结构化运用于制备具有规则形貌的超疏水表面。在Ti6Al4V合金表面激光加工出间距为100 μm的点阵和网格微结构,结合溶胶-凝胶法涂覆SiO₂纳米粒子,制备具有不同表面形貌和润湿性的Ti6Al4V合金表面。采用多功能摩擦磨损实验机探讨其摩擦学性能,为系统地研究表面形貌和润湿性对表面摩擦学性能的影响提供技术手段和理论支持。

1 实验

1.1 试样的制备工艺及设备

将厚度1.5 mm的Ti6Al4V板材切割成20 mm×20 mm的正方形试样,依次使用600、800和1000号砂纸打磨试样。采用HGL-LSY50F型激光打标机在试样表面加工出间距为100 μm的网格和点阵微结构。激光波长为1064 nm,最大激光输出功率为50 W,激光频率为3.14 kHz,电流密度为13 A/m²。将激光加工后的试样依次放入丙酮、乙醇和蒸馏水中超声清洗1 min,取出后用N₂吹干。

低表面能修饰的试样的制备过程如下:分别将光滑和激光加工后的试样浸涂低表面能溶液(将0.5 mL的1H,1H,2H,2H-全氟烷基三乙氧基硅烷(97%)溶于50 mL无水乙醇中并搅拌均匀),并置于温度为100 °C的干燥箱中5 h。

涂敷SiO₂涂层的试样的制备过程如下:将配制的环氧树脂溶液(向50 mL丙酮中分别滴加2.5 mL环氧树脂和0.5 mL聚酰胺树脂并搅拌均匀,随后滴加0.1 mL促进剂(2,4,6-三二甲氨基甲基苯酚,95%))分别旋涂于光滑和激光加工后的试样表面,并于室温下风干30 min。将涂有环氧树脂溶液的试样浸涂0.165 mol/L的SiO₂分散液(将0.25 g的纳米SiO₂溶解在50 mL的无水乙醇中,并滴加0.25 mL偶联剂α-氨基丙基甲基二乙氧基硅烷,97%),超声分散3 h,并置于干燥箱中5 h,干燥箱温度为100 °C。取出试样并浸涂低表面能溶液,再置于干燥箱中5 h,干燥箱温度为100 °C。

1.2 试样的分析及测试

采用Easy-Drop型接触角测量仪测定蒸馏水在试样表面的接触角和滚动角,以2 μL蒸馏水测量接触角,以5 μL蒸馏水测量滚动角。采用多功能摩擦磨损实验机(UMT)进行摩擦学性能的测试。实验温度为室温,环境相对湿度为40%~45%,载荷为5 N,速度为3 mm/s,配偶件为d4 mm的Si₃N₄小球,往复行程为5 mm,摩擦时间为2 h。采用LEXT OLS4000 3D型激光共聚焦显微镜表征表面形貌。采用Phillips XL30型扫描电子显微镜表征SiO₂涂层。

2 结果与讨论

2.1 表面形貌及润湿性

图1所示为涂覆SiO₂前后试样的三维形貌。由

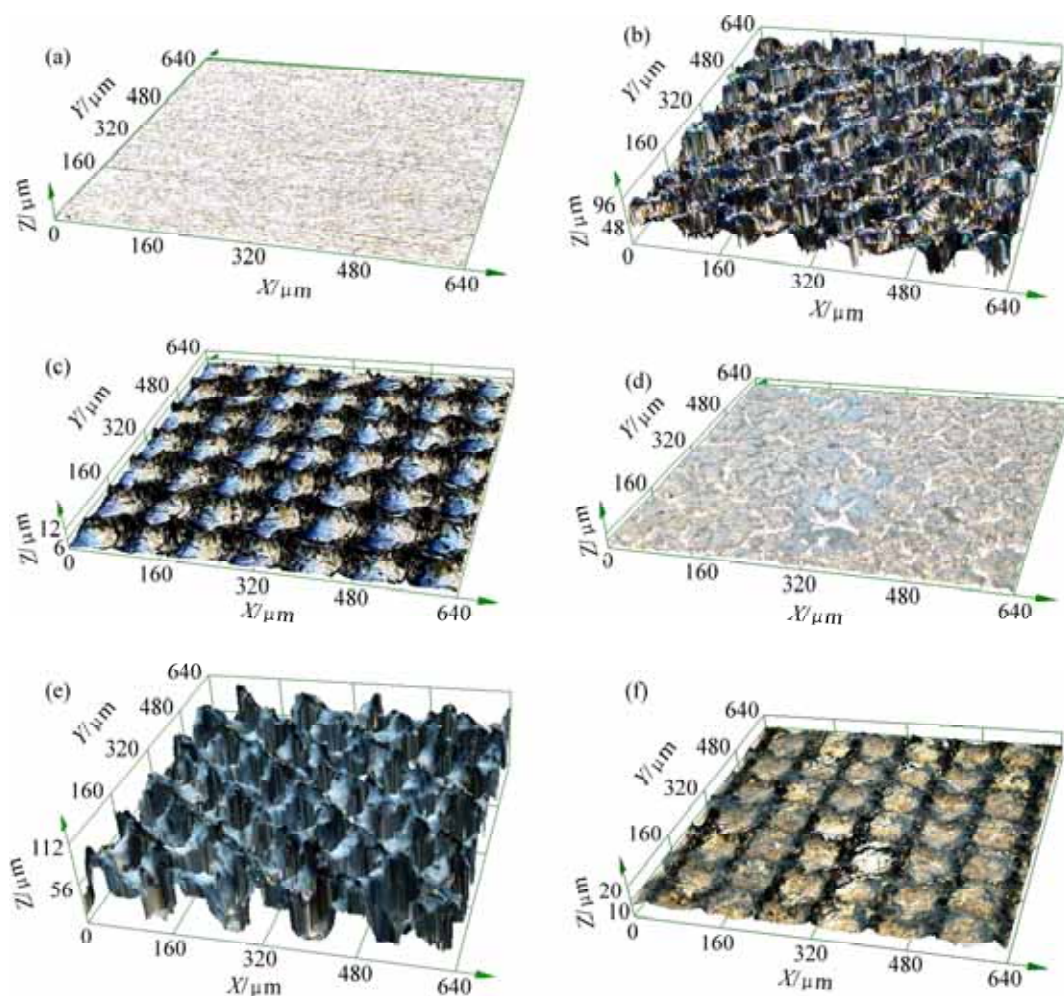


图 1 不同试样的三维形貌

Fig. 1 3D topographies of different specimens: (a) Smooth; (b) Grid; (c) Dot; (d) Smooth with SiO₂; (e) Grid with SiO₂; (f) Dot with SiO₂

图 1 可以看出, 激光加工表面形成了规则的微米级结构。图 2 所示为纳米 SiO₂ 涂层的 SEM 像。由图 2 可以看出, 试样表面呈疏松多孔的纳米级粗糙结构。

光滑 Ti6Al4V 表面的接触角为 56.8°, 经激光加工网格、点阵微结构后得到接触角小于 5° 的超亲水表面。低表面能修饰和涂覆 SiO₂ 的试样表面的接触角如图 3(a) 所示。由图 3(a) 可见, 低表面能修饰使得光滑表面的接触角显著增大并形成疏水表面。激光微结构化的表面具有更大的接触角, 且网格表面的接触角比点阵表面的大, 但接触角均小于 150°。这说明低表面能修饰只能制备出疏水表面, 且这类表面的滚动角很大, 表面竖直甚至倒置, 水滴都不滚落。分析认为: 经激光加工的表面只具有单一的微米级结构, 表面凹坑间的距离较大, 液体渗入到表面粗糙结构中, 符合 Wenzel 模型^[15] 的湿接触状态, 由于网格微结构的高差显著大于点阵微结构的高差(见图 1), 即网格微结构的

表面粗糙度因子更大, 因此, 网格表面的接触角比点阵表面的大。由于水滴以浸润模式接触表面, 就像是被“钉”在表面上, 因此即使将表面竖直放置, 液滴都

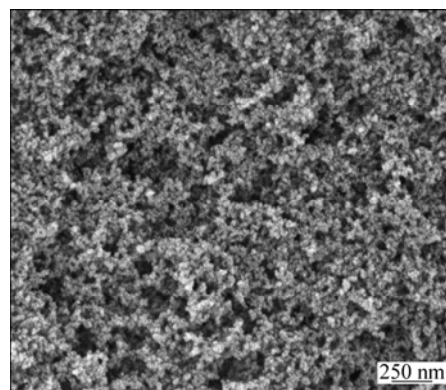


图 2 纳米 SiO₂ 涂层的 SEM 像

Fig. 2 SEM image of SiO₂ nanoparticle coating

不会滚落。

光滑表面涂覆 SiO_2 后接触角增大至 140.6° ，仍未达到 150° ，但滚动角为 56.5° (见图 3(b))。分析认为，纳米级粗糙结构(见图 2)减小了水滴与 Ti6Al4V 表面的接触面积，液滴不易侵入表面结构而截留空气产生气膜，符合 Cassie 模型^[15]。由于水滴与固体表面发生不连续接触导致粘滞力减小，因此产生较小的滚动角。激光微结构化的表面涂覆 SiO_2 后接触角均大于 150° ，且滚动角很小，点阵表面的滚动角为 5.2° ，网格表面的滚动角仅为 3.6° 。分析认为，涂覆 SiO_2 使得表面具有微纳结构，使水滴与 Ti6Al4V 表面的接触面积最小化。可见，在激光微结构化的表面涂覆 SiO_2 可以制备出超疏水表面。

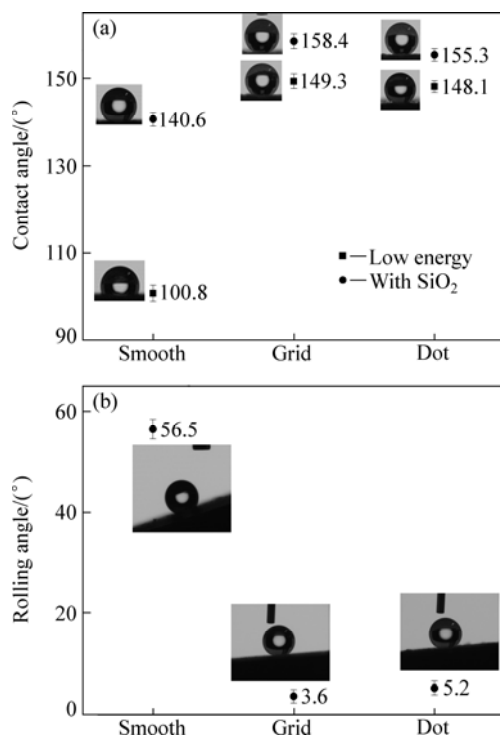


图 3 不同表面的接触角和滚动角

Fig. 3 Contact angle (a) and rolling angle (b) of different surfaces

2.2 摩擦学性能

2.2.1 耐磨性能

不同试样光滑表面的磨痕如图 4 所示。由图 4 可见，未做处理的空白样的磨痕呈灰黑色，低表面能修饰的试样的磨痕大部分呈银白色，而涂覆 SiO_2 的试样的磨痕中仍存留有未被磨掉的表面。图 5 所示为不同试样网格表面的磨痕。由图 5 可见，未做处理的空白样和低表面能修饰的网格试样的表面结构已几乎被磨平，而涂覆 SiO_2 的网格试样的磨痕中保留有明显的网格结构。图 6 所示为不同试样点阵表面的磨痕。由图

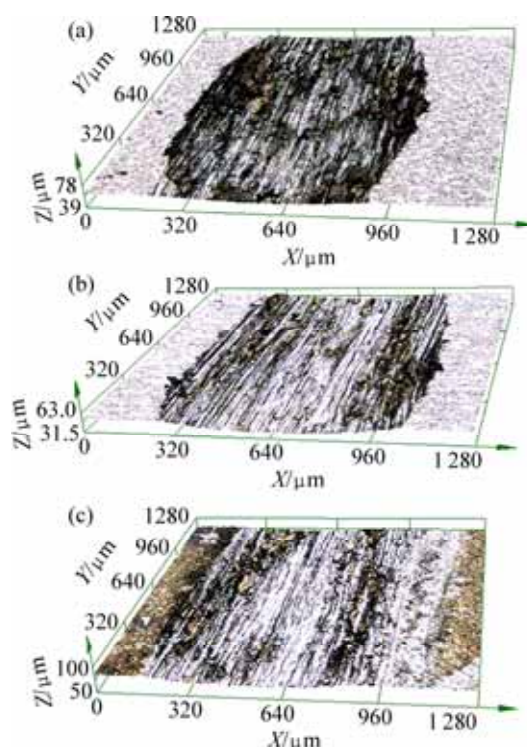


图 4 不同光滑表面的磨痕

Fig. 4 Grinding cracks of different smooth surfaces: (a) Vacancy; (b) Low energy; (c) Coated with SiO_2

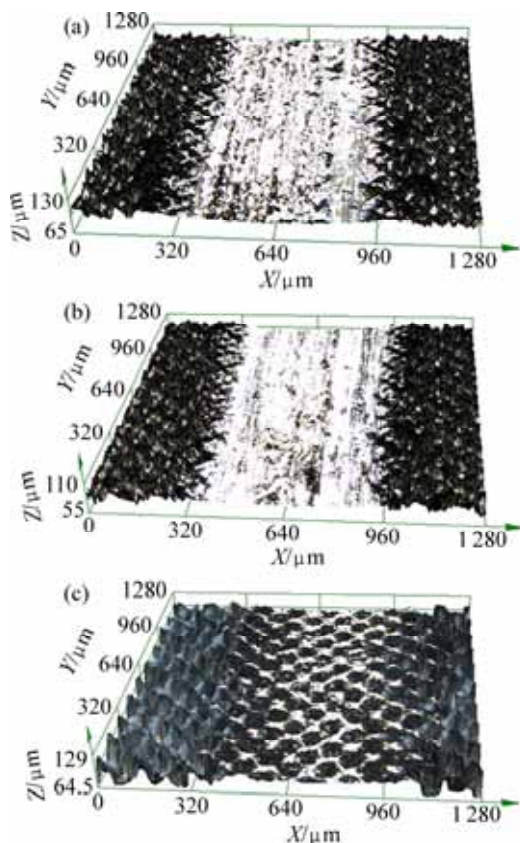


图 5 不同试样网格表面的磨痕

Fig. 5 Grinding cracks of grid surfaces of different samples: (a) Vacancy; (b) Low energy; (c) Coated with SiO_2

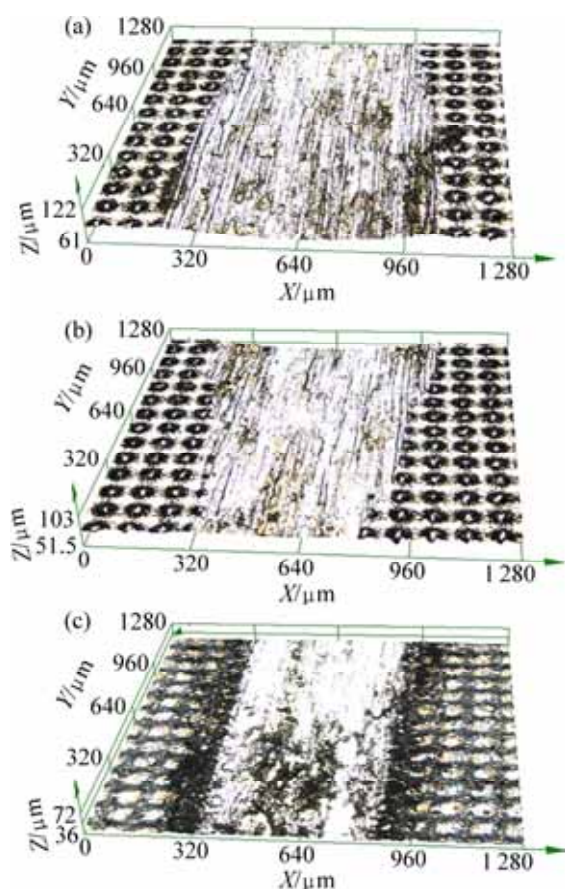


图 6 不同试样点阵表面的磨痕

Fig. 6 Grinding cracks of dot surfaces of different samples: (a) Vacancy; (b) Low energy; (c) Coated with SiO₂

6 可见, 点阵试样表面的微结构均已被磨平, 但是涂覆 SiO₂ 的点阵试样的磨痕最窄, 低表面能的次之, 空白样的最宽。这说明表面越难以被润湿, 表面的耐磨性越强。

为定量比较各种表面的耐磨性能, 计算材料的比磨损率。比磨损率 K 如式(1)所示^[16]:

$$K = \frac{\Delta V}{F_z L} \quad (1)$$

式中: K 为比磨损率, $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; ΔV 为磨损体积, mm^3 ; F_z 为法向载荷, N ; L 为摩擦距离 (18 m)。对于光滑表面的试样 ΔV 等于磨痕轮廓横截面积 S 与磨痕长度 l (5 mm) 的乘积, 即 $\Delta V = Sl$ 。磨痕轮廓横截面积如图 7 阴影部分所示, 可利用 OLS4000 LEXT 自带软件测得。具有微结构的试样的磨损体积 $\Delta V = Sl - V_a$ 。 V_a 为磨痕中凹坑所占体积。已知网格和点阵的间距均为 $100 \mu\text{m}$, 因此, 可计算出磨痕中凹坑的数目。凹坑的几何参数可利用 OLS4000 LEXT 软件测量。

计算出的比磨损率如图 8 所示。低表面能修饰和

涂覆 SiO₂ 都比磨损率减小, 但涂覆 SiO₂ 效果更显著。且光滑表面的比磨损率最大, 点阵表面次之, 网格表面的比磨损率最小, 这说明网格表面的耐磨性最强。根据图 8 可以计算出, 涂覆 SiO₂ 的点阵和网格表面的比磨损率比 Ti6Al4V 合金基体的分别减小了 32.3% 和 53.8%。

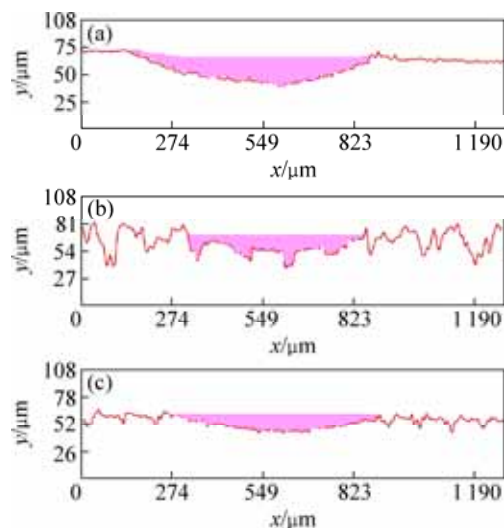


图 7 不同试样表面的磨痕横截面

Fig. 7 Grinding crack cross-section of different samples surfaces: (a) Smooth; (b) Grid; (c) Dot

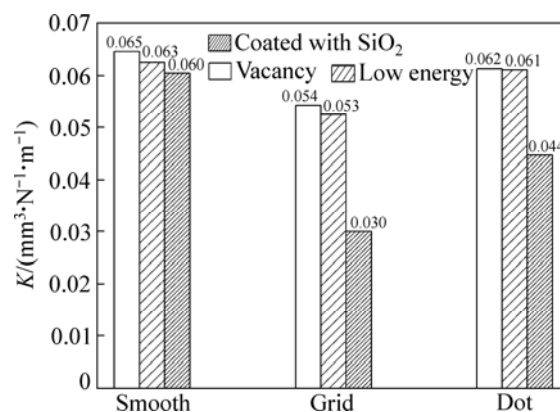


图 8 不同试样的比磨损率

Fig. 8 Specific wear rates of different samples

分析认为, 光滑表面的空白样的磨痕呈灰黑色 (见图 4(a)), 是因为在摩擦过程中产生的热量促使基底与空气氧化的结果。低表面能修饰降低了表面能, 减小了 Si₃N₄ 小球与表面的粘附力和摩擦力^[10], 减少了摩擦过程中产生的热量, 从而减轻了基底与空气的氧化程度, 提高了耐磨性。因此低表面能修饰试样的磨痕大部分呈银白色, 表面活性很高的 SiO₂ 微粒可通过羟基在金属摩擦表面发生强烈的化学吸附, 形成牢固的

SiO₂ 吸附膜,具有润滑作用,所以涂覆 SiO₂ 试样的磨损量更小。激光加工在构建微结构的同时,对试样表面进行了激光熔凝的强化处理(光滑 Ti6Al4V 表面的显微硬度为 337 HV,网格凸起处的显微硬度约为 600 HV,点阵凸起处的显微硬度约为 500 HV),因此,激光微结构化表面的比磨损率小于光滑表面的。由于网格是通过激光交叉扫描两次形成的,因此,其强化作用更强,表面硬度更高,所以,网格表面比点阵表面耐磨。

2.2.2 减摩性能

试样的摩擦因数曲线如图 9 所示。由图 9(a)可见,对于光滑表面,低表面能修饰后形成的疏水表面减小了摩擦因数。这是由于低表面能修饰降低了试样表面的自由能,使表面对 Si₃N₄ 小球的吸附作用减小,从

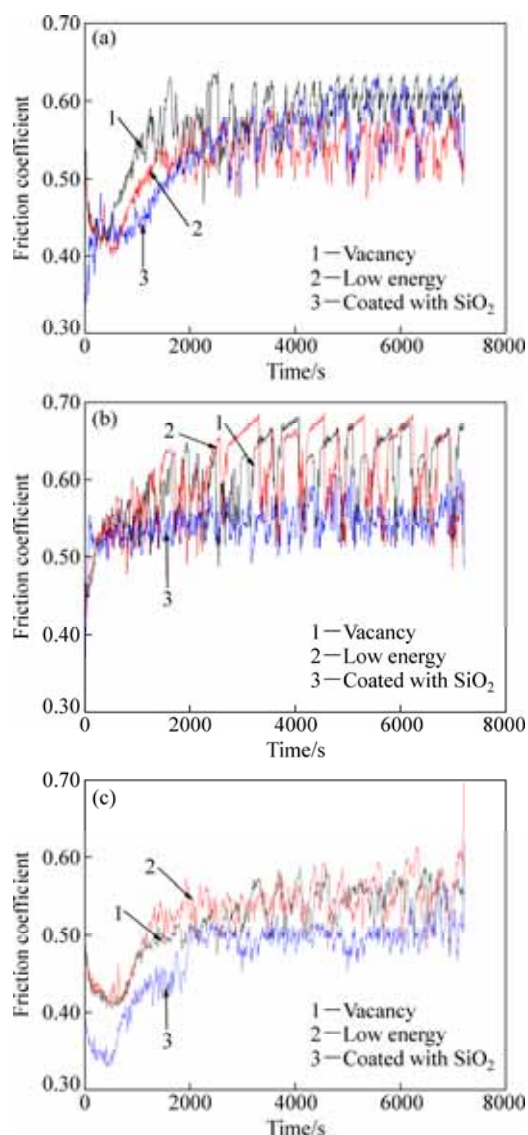


图 9 不同试样的摩擦因数

Fig. 9 Friction coefficients of different samples: (a) Smooth; (b) Grid; (c) Dot

而减小了摩擦力,降低了摩擦因数。涂覆 SiO₂ 的表面的摩擦因数在 2000 s 之前处于最低的状态,这是因为 SiO₂ 膜在摩擦开始阶段具有保护作用,由于 SiO₂ 膜具有一定的承载能力和润滑作用,所以摩擦因数最小。2000 s 之后,摩擦因数逐渐增大,在摩擦的最后阶段,涂覆 SiO₂ 试样的摩擦系数大于低表面能修饰的。这是由于被磨去的 SiO₂ 涂层粘附在试样表面,增大了摩擦阻力,使摩擦因数增大。

由图 9(b)和(c)可见,激光微结构化的表面经低表面能修饰后,其摩擦因数与不经低表面能修饰的试样相差无几。分析认为,具有微结构的表面在浸涂低表面能溶液及随后的干燥过程中,低表面能溶液容易渗入微结构的凹坑中,致使上表面的低表面能修饰层比光滑表面的要薄,摩擦过程中的 5 N 载荷可能直接穿透了低表面能修饰层,因此,低表面能修饰对摩擦因数影响不大。而涂覆 SiO₂ 显著减小摩擦因数曲线波动性和数值,这说明 SiO₂ 膜的承载和润滑能力发挥了作用。且微结构对磨屑具有存储作用,避免了磨屑粘附在试样表面从而增大摩擦力的现象发生。由于点阵是通过激光单点加工形成,能量较小,因此,凹坑深度很浅(约 9 μm)。在摩擦时间达到 6500 s 之后,点阵逐渐被磨平,磨屑参与到摩擦中,致使摩擦因数增大。而网格是通过激光在呈 90° 夹角的两个方向扫描加工两次形成的,能量大,因此凹坑深,且大量飞溅出的熔融物相互堆积还形成高于表面的凸起。从而使表面凸起处至凹坑底部距离很大,达 90 μm 左右。因此,网格的摩擦因数曲线的波动性和数值比点阵大。也因此使得网格微结构始终没被磨平,保留了对磨屑的存储作用。

取摩擦时间为 2000~6500 s 的摩擦因数较稳定的时间段,各个试样的摩擦因数的最大值和最小值如图 10 所示。由图 10 可以看出,对于光滑表面,进行低

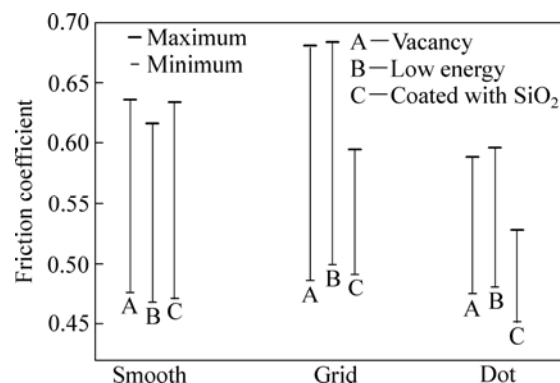


图 10 不同试样表面摩擦因数的极值

Fig. 10 Friction coefficient extremums of different samples surfaces

表面能修饰可明显减小摩擦因数,其效果优于涂覆 SiO_2 的。涂覆 SiO_2 的点阵表面的摩擦因数波动性和数值均小于网格的。而仅仅在激光微结构化的表面进行低表面能修饰对摩擦因数的影响并不大。

综上所述,微结构利用存储磨屑减小磨粒磨损,涂覆 SiO_2 利用吸附膜发挥润滑作用,低表面能修饰利用改变表面润湿性,降低表面自由能,发挥减小摩擦力的作用。因此,将表面形貌和润湿性相结合的超疏水表面显著提高了Ti6Al4V合金的摩擦学性能。

3 结论

1) 低表面能修饰光滑Ti6Al4V合金表面制备出符合Wenzel模型的疏水表面,涂覆 SiO_2 制备出符合Cassie模型的疏水表面。

2) 低表面能修饰激光微结构化的表面制备出Wenzel模型的疏水表面,涂覆 SiO_2 制备出符合Cassie模型的超疏水表面,且网格表面比点阵表面更难以润湿。

3) 表面越难以润湿,表面的耐磨性越强。涂覆 SiO_2 的超疏水表面效果更显著,点阵和网格表面的比磨损率分别降低了32.3%和53.8%。

4) 低表面能修饰可减小光滑表面的摩擦因数,但对激光微结构化表面的影响不大。涂覆 SiO_2 的光滑表面的摩擦因数先减小后增大。而涂覆 SiO_2 的激光微结构化表面的摩擦因数曲线的波动性和数值均显著减小,且点阵的摩擦因数小于网格的。

REFERENCES

- [1] WANG Jia-dao, CHEN Hao-sheng, HAN Zhong-ling. Investigation of the effect of milli-scale dimples on planar contact lubrication[J]. Tribology Transactions, 2010, 53(4): 564-572.
- [2] PODGORNİK B, VILHENA L M, SEDLACEK M, REK Z, ZUN L. Effectiveness and design of surface texturing for different lubrication regimes[J]. Meccanica, 2012, 47(7): 1613-1622.
- [3] 胡天昌, 胡丽天, 丁奇. 45°钢表面激光织构化及其干摩擦特性研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(1): 46-52.
HU Tian-chang, HU Li-tian, DING Qi. Tribological properties of laser textured surfaces of 45 steel under dry friction[J]. Tribology, 2010, 30(1): 46-52.
- [4] 王斌, 常秋英, 齐烨. 激光表面织构对不同材料干摩擦特性的影响[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(4): 408-413.
WANG Bin, CHANG Qiu-ying, QI Ye. Effect of laser surface texture on the tribological properties of different materials under dry friction[J]. Tribology, 2014, 34(4): 408-413.
- [5] 于海武, 袁思欢, 孙造, 王晓雷. 微凹坑形状对试件表面摩擦特性的影响[J]. 华南理工大学学报, 2011, 39(1): 106-110.
YU Hai-wu, YUAN Si-huan, SUN Zao, WANG Xiao-lei. Effect of micro-dimple shapes on tribological properties of specimen surfaces[J]. Journal of South China University of Technology, 2011, 39(1): 106-110.
- [6] 韩志武, 任露泉, 刘祖斌. 激光织构仿生非光滑表面抗磨性能研究[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(4): 289-293.
HAN Zhi-wu, REN Lu-quan, LIU Zu-xin. Investigation on antiwear ability of bionic-nonsmooth surfaces made by laser texturing[J]. Tribology, 2004, 24(4): 289-293.
- [7] LIU Ke-song, JIANG Lei. Metallic surfaces with special wettability[J]. Nanoscale, 2011, 3(3): 825-838.
- [8] LIU Lei, SONG Shi-yong, ZHANG Ping-yu. Preparation and micro-tribological study on dually mixed self-assembled monolayers[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2012, 28(2): 427-432.
- [9] 赖晓明, 康志新, 李元元. AZ31镁合金微弧氧化与有机镀膜的复合表面改性及功能特性[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(6): 1299-1307.
LAI Xiao-ming, KANG Zhi-bin, LI Yuan-yuan. Duplex surface modification combined with micro-arc oxidation and polymer plating on AZ31 magnesium alloy and their functional properties[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(6): 1299-1307.
- [10] FAN Xia, JIANG Lei. Bio-inspired, smart, multiscale interfacial materials[J]. Advanced Materials, 2008, 20(15): 2842-2858.
- [11] 万勇, 张泉, 李扬. 溶胶-凝胶法制备超疏水性薄膜摩擦学性能的研究[J]. 无机材料学报, 2015, 30(3): 299-304.
WAN Yong, ZHANG Quan, LI Yang. Tribological performance of sol-gel derived superhydrophobic film[J]. Journal of Inorganic Materials, 2015, 30(3): 299-304.
- [12] WANG Huai-yuan, ZHAO Jing-yan, ZHU You-zhuang, MENG Yang, ZHU Yan-ji. The fabrication, nano/micro-structure, heat-and wear-resistance of the superhydrophobic PPS/PTFE composite coatings[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, 402: 253-258.
- [13] THIEME M, STRELLER F, SIMON F, FRENZEL R, WHITE A J. Superhydrophobic aluminium-based surfaces: Wetting and wear properties of different CVD-generated coating types[J]. Applied Surface Science, 2013, 283: 1041-1050.
- [14] MEHDI S, AHMET T A. Nanocrystalline nickel films with lotus leaf texture for superhydrophobic and low friction surfaces[J]. Applied Surface Science, 2009, 256(3): 710-719.
- [15] LIU Yan, LI Liang, LU Guo-long, HAN Zhi-wu, LIU Jin-dan, YU Si-rong. Fractal characteristics and wettability of Nano- Al_2O_3 /Ni-Co composite coating prepared by electrodeposition[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(S2): s380-s383.
- [16] WANG Jian-zhang, YAN Feng-yuan, XUE Qun-ji. Friction and wear behavior of ultra-high molecular weight polyethylene sliding against GCr15 steel and electroless Ni-P alloy coating under the lubrication of seawater[J]. Tribology Letters, 2009, 35(2): 85-89.

(编辑 王超)