

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20160810001

微织构自润滑表面在油介质中的摩擦学性能

华希俊¹, 解 玄¹, 张培耘¹, 孙建国¹, 王 浩², 符永宏¹

(1. 江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏大学 知识产权中心, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 为探究不同表面处理方式对试样表面摩擦学性能的影响, 分别对GCr15试样表面进行激光微织构加工, 光滑表面涂抹润滑油, 微织构表面填充固体润滑剂, 微织构表面涂抹润滑油, 微织构表面填充固体润滑剂并涂抹润滑油等不同表面处理方式, 在MMW-1A摩擦磨损机上进行摩擦磨损试验。同时改变试验的载荷及转速, 探究在不同转速和载荷工况下, 不同表面处理方式对试样摩擦因数的影响。结果表明, 在干摩擦条件下, 试样表面采用微织构处理并填充固体润滑剂可使摩擦因数较光滑表面降低47.6%; 在油介质中, 采用微织构处理可使摩擦因数较光滑表面降低4.8%, 采用微织构处理并填充固体润滑剂可使摩擦因数较光滑表面降低17.7%。且在油介质中, 采用织构化处理和固体润滑结合的表面处理方法, 试样摩擦因数随载荷增大而减少且逐渐趋于稳定, 但随转速增大而增大。

关键词: 油介质; 表面处理; 微织构; 固体润滑

中图分类号: TG174.44; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)02-0035-06

Tribological Properties of Micro-textured Self-lubricating Surface in Oil Medium

HUA Xi-jun¹, XIE Xuan¹, ZHANG Pei-yun¹, SUN Jian-guo¹, WANG Hao², FU Yong-hong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu; 2. Intellectual Property Research Center, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu)

Abstract: The effect of different surface treatments on the tribological properties of GCr15 bearing material was investigated. Friction and wear tests by using MMW-1A friction and wear machine were conducted on the smooth surfaces, which are smooth surface lubricated with oil, micro textured surface filled with solid lubricant, micro textured surface lubricated with oil, micro textured surface filled with solid lubricant and lubricated with oil. The influence in variation of rotational speed and load on the tribological properties of the different surface treatment was also studied. Results show that the micro textured surface filled solid lubricant reduces the friction coefficient by 47.6% compared with that of the smooth surface under dry friction condition. In the oil medium, compared with the smooth surface, the micro textured surface reduces the friction coefficient by 4.8%, while the micro textured surface filled with solid lubricant reduces the friction coefficient by 17.7%. In the oil medium, the friction coefficient of the sample decreases first with the increase of the load and then gradually stabilizes with the surface treatment method, which is combined with micro texturing and solid lubrication. Moreover, the friction coefficient increases with the increase of the rotational speed.

Keywords: oil medium; surface treatment; micro-texturing; solid lubrication

收稿日期: 2016-08-10; 修回日期: 2016-11-16

网络出版日期: 2017-03-10 08:26; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170310.0826.012.html>

通讯作者: 华希俊(1966—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 激光表面改性与摩擦学设计, 固体润滑; **E-mail:** xjhua@ujs.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51375211); 江苏省科技计划(SBE2015001035); 江苏省普通高校专业学位研究生实践创新计划(SJZZ16_0197)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51375211), Science and Technology Project of Jiangsu Province (SBE2015001035), Program for Practical Innovation Research of Professional Degree Postgraduate Students in Jiangsu Province (SJZZ16_0197)

引文格式: 华希俊, 解玄, 张培耘, 等. 微织构自润滑表面在油介质中的摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2017, 30(2): 35-40.

HUA X J, XIE X, ZHANG P G, et al. Tribological properties of micro-textured self-lubricating surface in oil medium[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(2): 35-40.

0 引言

采用单一的润滑方式,如固体润滑或液体润滑,难以满足机械零部件在特殊工况下长期稳定使用的要求^[1]。由此,将固体润滑和液体润滑相结合有望满足日益增长的实用要求。

近来,在摩擦副表面采用固体润滑和液体润滑复合的新型润滑技术,即双重润滑系统,对于某些要求日益增长的领域极具应用潜力。研究表明:相比单一的润滑剂,将固体润滑剂和液体润滑剂相结合的摩擦性能得到显著提高^[2]。Erdemir等的部分研究结果表明由银和聚酯合成油组成的固/液复合润滑系统使得陶瓷和金属摩擦副具有很好的摩擦磨损性能^[3-4]。刘秀芳等^[5-8]系统研究了DLC基固/液复合润滑系统的摩擦特性。结果表明DLC薄膜具有很强的承载能力,液体润滑剂具有很好的润滑能力。

与传统固体状态润滑剂相比,纳米颗粒添加剂不仅使稳定悬浮液生产更加便利。尤其是对于粗糙度低的摩擦副在相对运动时,可以确保颗粒可以很快地进入到表面接触区域并形成保护层。层状结构颗粒的层与层之间结合力低而同一层间结合力强,因而其被认为具有很好的润滑性能。对于液体润滑剂而言,类石墨(富勒烯C60和碳纳米管)、类富勒烯(MoS₂或WS₂)和纳米管状体可作为很好的添加剂^[9-12],尤其在边界润滑情况下。

表面织构化技术与固体润滑或液体润滑相结合的技术得到的众多学者的青睐。Shum等^[13]在磁控溅射的DLC涂层上进行激光微织构加工,在油润滑条件下研究了不同织构密度(同一凹坑直径)和不同凹坑直径(同一织构密度)对DLC涂层的摩擦磨损性能的影响。结果表明:织构密度为10%和凹坑直径为100 μm的织构DLC涂层相比无织构DLC涂层在摩擦因数和磨损率方面的性能均有显著的提高,摩擦因数和磨损率分别降低了20%和52%。Arslan等^[14]采用皮秒激光器在测控溅射的DLC涂层表面进行微织构加工,在油介质中研究了表面织构参数对DLC涂层的摩擦性能的影响。结果表明:相比无织构DLC涂层,较大的凹坑直径和深度的微织构DLC涂层的摩擦性能较差,而凹坑直径和深度分别为100 μm和6 μm的织构参数显著提高了DLC涂层的摩擦磨损性能。有研究者^[15]

将复合固体润滑剂填充至45钢表面微凹坑中,在销盘线接触的摩擦磨损试验机上进行摩擦磨损试验,试验表明,采用激光微织构与固体润滑相结合的方法可在一定程度上减小试样表面摩擦因数。

以往学者所做工作主要针对表面织构化技术与固体润滑或液体润滑相结合方面相关研究,对油介质中织构化技术与固体润滑相结合的研究较少,而在工程实际中,比如机床导轨工作表面,发动机缸体表面常常处于油润滑的状态,因此有必要进一步探究油介质中织构表面固体润滑技术对试样表面摩擦学性能的影响。

1 试验

1.1 试样材料及摩擦副选取

选用上下试样材料均为GCr15轴承钢,上试样外径和内径分别为54和38 mm,厚度为10 mm;下试样外径和内径分别为50和42 mm,厚度为5 mm。上下试样经淬火、低温回火后其硬度为60~65 HRC,摩擦副接触方式为环-环接触,其示意图如图1所示。

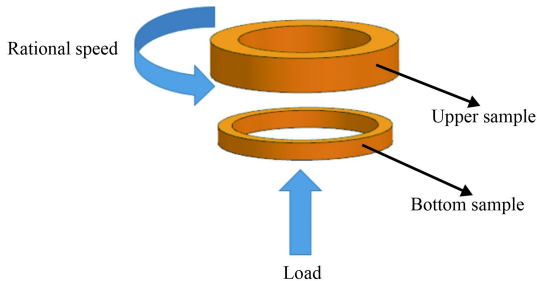


图1 摩擦副工作方式的示意图

Fig.1 Working mode diagram of the friction pair

1.2 固体润滑剂与润滑油的选取

根据前期试验研究结果,选取减摩效果最佳的配方:Gr: MoS₂: PI: CNTs=4: 1: 0.5: 0.4的纳米复合润滑剂。试验所选用的纳米石墨(Gr),纯度为99.9%,粒径为1.2 μm (15 000目);选取的纳米MoS₂,纯度是99.5%,平均粒径是40 nm;选取的聚酰亚胺(PI)型号为SM003,呈黄色,粒径小于1.88 μm (6 000目),纯度为99%;选用多壁碳纳米管(CNTs)外径为(12.9±3.5) nm,长度为3~12 μm。润滑油为HL-46型抗磨液压油。

1.3 试验方法

测量设备为VHX-1000型超景深三维显微镜。填充设备为FLS-30T型液压机及SX2-4-10型电阻

炉。摩擦磨损试验机型号为MMW-1A万能摩擦磨损试验机。

滑动摩擦磨损试验测试条件：转速100 r/min，载荷100 N，上下摩擦副接触时间为25 min。试验共设计6组不同的表面处理方式探究不同方式对试样表面摩擦因数的影响。不同的试样表面处理方式如表1所示，采用极管泵浦声光调Q Nd:YAG激光器，运用“单脉冲同点间隔多次”工艺进行表面微织构加工，单个凹坑直径为90 μm，深度为25 μm，织构密度为20%。固体润滑剂运用保压热压固化填充法进行填充，所有表面处理方式均只对下试样进行处理。

表 1 6组试样表面处理及润滑方式		
Table 1 Surface treatment and lubrication methods of six samples		
Samples number	Surfaces treatment	Oil lubrication
S	Smooth	No
T	Textured	No
TL	Textured and filled with solid lubricant	No
SO	Smooth	Yes
TO	Textured	Yes
TLO	Textured and filled with solid lubricant	Yes

2 试验结果与分析

2.1 不同表面处理方式对摩擦性能的影响

图2为经不同表面处理的试样表面摩擦因数，由图可知，TO和SO试样表面摩擦因数分别相比T和S试样摩擦因数均有显著地减小，其中，T试样相比S试样具有更大的摩擦因数，而TO试样相比SO试样具有略小摩擦因数，表明润滑油可以显著地提高其表面摩擦性能。6种不同试样表面摩擦

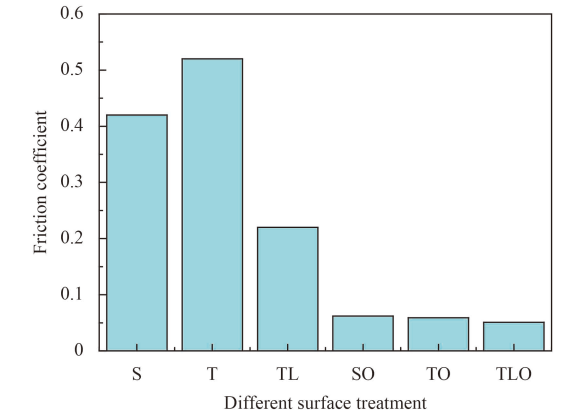


图2 不同表面处理方式的试样表面摩擦因数
Fig.2 Friction coefficient of samples treated by different methods

因数由小到大顺序为：TLO(0.051)、TO(0.059)、SO(0.062)、TL(0.22)、T(0.52)、S(0.42)。TL试样摩擦因数相对于S试样和T试样分别减少47.6%和57.7%，表明在干摩擦条件下，织构加固体润滑的处理方式可显著减小摩擦；TO试样相对于SO试样摩擦因数减少4.8%，TLO试样相对于SO试样，摩擦因数减少17.7%，表明在油介质中，表面织构化处理方式和固体润滑剂均能减少摩擦，且表面织构处理与固体润滑复合的处理方式减摩效果最好。

2.2 摩擦磨损机理分析

图3和图4分别为经不同表面处理的下试样及其对偶件上试样表面磨损形貌。S试样表面出现了较宽犁沟，表明其表面发生了严重的磨粒磨损及黏着磨损；T试样表面沿滑动方向上出现了较宽的犁沟，且在凹坑中出现磨粒，说明其表面发生了磨粒磨损；而相比S和T试样，TL和TLO试样表面磨损情况较轻。其中，TL试样表面的磨痕较浅，TLO试样几乎没有磨损。下试样对应的对偶件上试样也出现了不同程度的磨损，其中S上试样表面磨最为严重，出现了较深的犁沟；T上试样表面出现了较浅的犁沟，TL上试样表面出现了较微的磨痕，LO上试样表面几乎无磨痕。

图5为TLO下试样表面微观形貌图，从图中可以看出采用固-液复合润滑方式能在试样表面形成一层致密的润滑膜。

以上试验结果表明，在GCr15轴承钢表面进行不同的润滑(固体润滑剂和润滑油)处理或织构化处理均可以显著地减少其表面的摩擦磨损，从而提高其滑动摩擦性能。且TLO试样减磨效果最明显，在表面几乎看不到磨痕。说明在油介质中采用表面织构化技术并填充固体润滑剂减磨效果较佳。这是因为在摩擦副表面形成了一层剪切强度较低的润滑膜，该润滑膜可以有效地将两摩擦副基体分开，使得随着摩擦副相对运动，摩擦发生在膜内，避免了两基体表面的粗糙峰直接接触。复合固体润滑剂中MoS₂和Gr与基体具有很强的结合力。

Gr具有很强的吸油能力，从而有利于润滑油吸附在试样表面上，并弥散开来形成润滑油膜，在挤压力及热作用下，从凹坑中转移出来的固体润滑剂与润滑油形成具有更好润滑效果的固-油复合润滑膜(如图5所示)，从而使得表面具有更好的

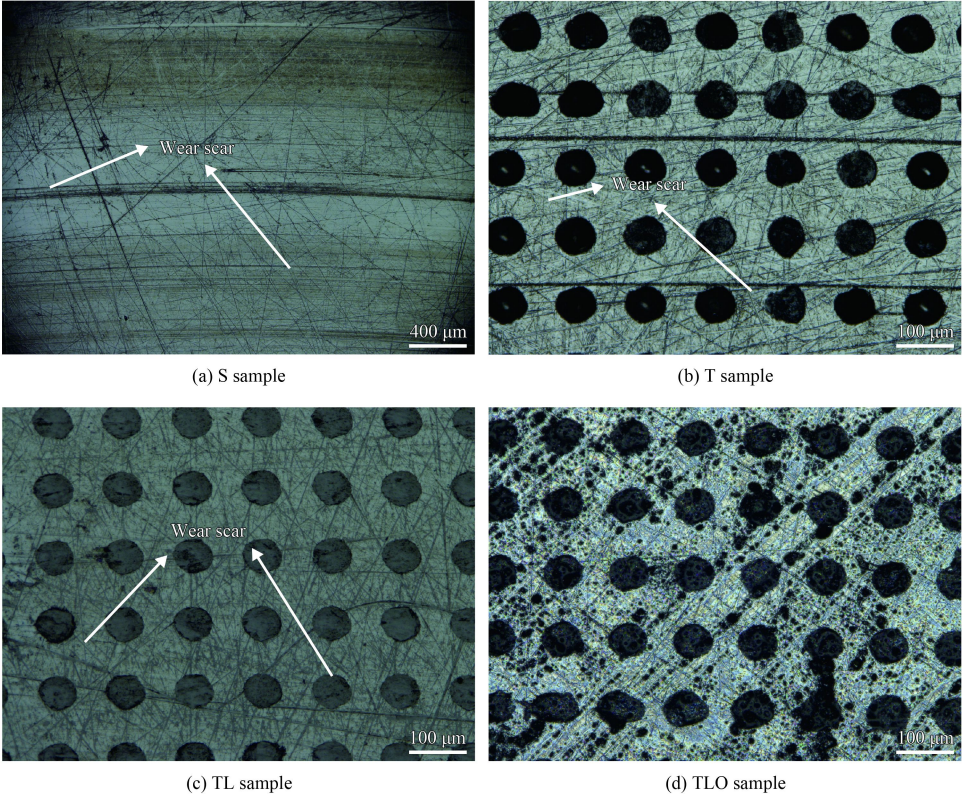


图 3 不同处理方式后下试样表面磨损形貌

Fig.3 Topographies of worn scars on the bottom specimen surfaces treated by different method

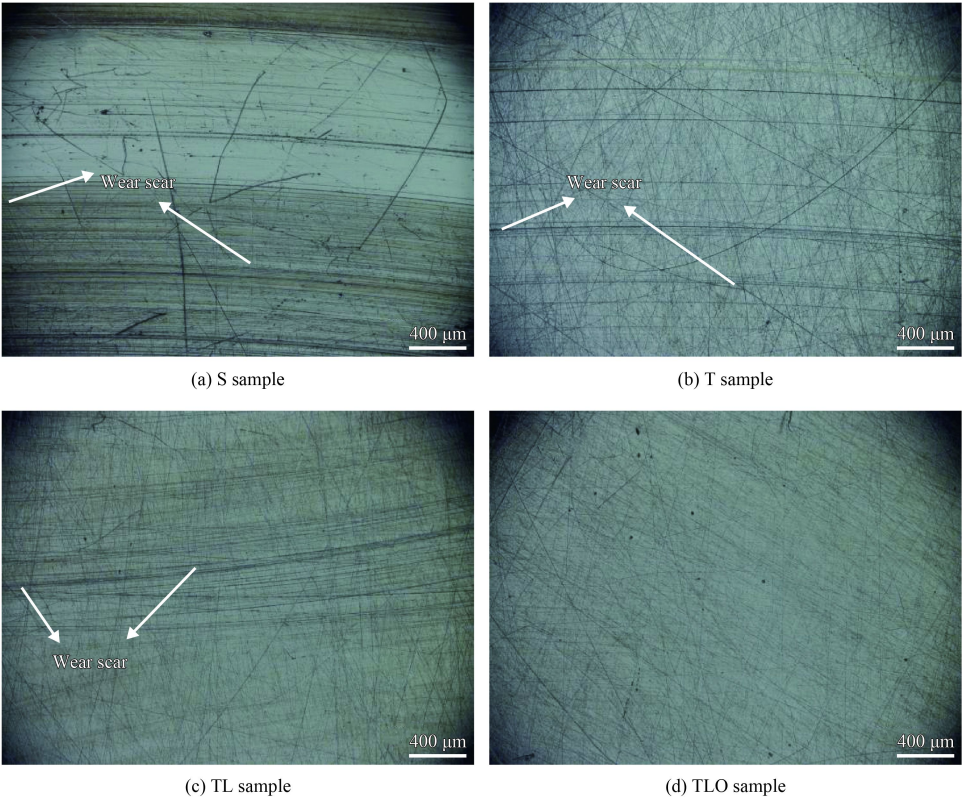


图 4 不同处理方式后上试样表面磨损形貌

Fig.4 Topographies of worn scars on the upper specimen surfaces treated by different method

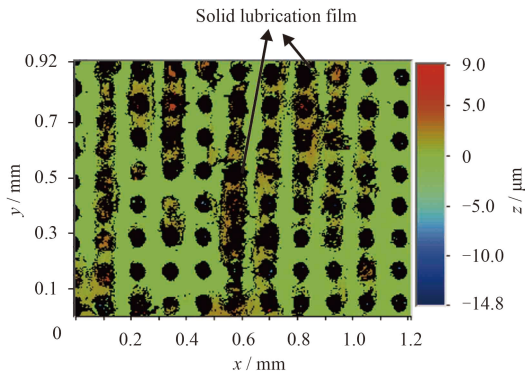


图5 TLO试样表面润滑膜微观形貌

Fig.5 Morphology of surface lubrication film of TLO specimen

润滑性能和减摩性能。TLO试样表面凹坑中的固体润滑剂在摩擦热及挤压力的作用下从凹坑中转移至表面。复合润滑剂中的 MoS_2 和Gr均为层状结构，其层与层之间结合力较低，与润滑油混合后，增加了润滑油的粘度，有利于动压润滑的形成。Gr进入润滑油后，将变为高效能的胶体Gr润滑剂，此外，复合润滑剂中的组成成分均具有很强的承载能力和很好的润滑性能，从而使得复合润滑剂和润滑油混合后所形成的固-油复合润滑膜具有较好的摩擦性能。复合润滑剂中CNTs为管状结构，在试样表面进行滚动或滑动，可以有效地对磨损或破坏润滑膜进行修复，同时因其具有很强的承载能力，从而提高润滑膜的承载能力，使得润滑膜不易被破坏，此外，CNTs具有很强的耐热性能和散热性能，有利于摩擦副在摩擦过程中产生的摩擦热的散热。因而，复合固体润滑剂与润滑油形成的固-油复合润滑剂具有更好的摩擦性能。

2.3 载荷对摩擦因数的影响

为了研究不同载荷下油介质中微织构自润滑表面的摩擦性能，采用控制变量法，在滑动速度为100 r/min时，分别对TLO、SO、TO试样依次在载荷为100、200、300、400和500 N时进行滑动摩擦性能研究。

图6为不同试样表面(TLO、SO、TO)摩擦因数随载荷变化曲线图。由图可知各个试样表面摩擦因数及降幅均随载荷的增大而减小。当载荷超过400 N时，摩擦因数趋于稳定。随着载荷的增加，试样表面润滑油膜厚度减小，从而使得试样表面形成的润滑油膜更加致密，且载荷增加，表面动压润滑效果增强，从而使得试样表面具有更好地摩擦性能。TLO试样较TO和SO试样在不同载荷下均

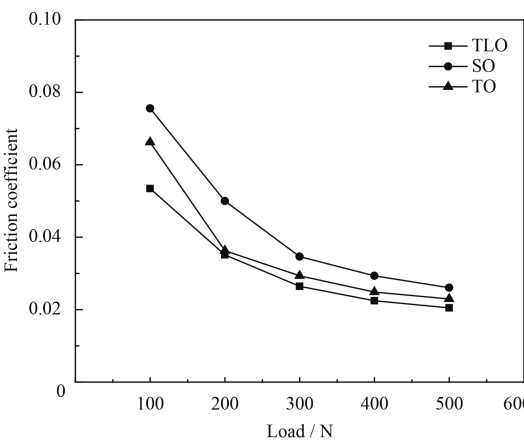


图6 TLO、SO和TO表面摩擦因数随载荷的变化

Fig.6 Friction coefficient of TLO, SO and TO samples varied with load

呈现出更小的摩擦因数，说明在不同载荷状态下，油介质表面采用微织构处理和固体润滑相结合的复合技术均能提供良好的润滑减摩效果。

2.4 转速对摩擦因数的影响

图7为不同表面处理方式(TLO、SO、TO)摩擦因数随转速的变化曲线图。由图可知，随着转速的增加，各试样表面的摩擦因数呈现不断增大的变化趋势。随着转速的不断增加，一方面，更多的润滑剂被甩出试样表面，尤其是润滑油；另一方面因摩擦热使得薄的润滑油膜更易氧化和破坏，从而使得试样表面摩擦因数随着转速的增加而增加。在高转速状态下(500 r/min)TO试样较SO试样具有更低的摩擦因数，这是因为SO为光滑表面，转速较高时，表面润滑油更易甩出，而TO表面织构可存储一定量的润滑油和磨粒，形成动压润滑效果，因此高转速状态下TO表面具有更好

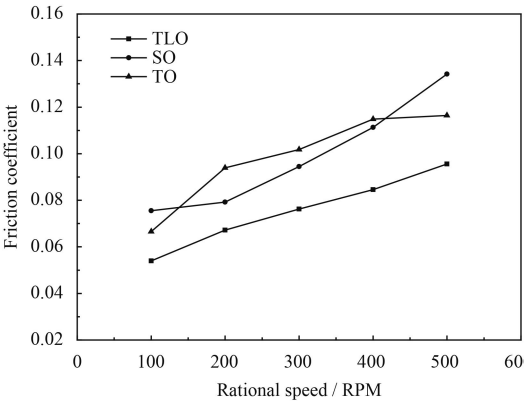


图7 TLO、SO、TO表面摩擦因数随转速的变化

Fig.7 Friction coefficient of TLO, SO and samples varied with rotational speed

的润滑减摩效果。在各个转速下, TLO表面较TO和SO表面均具有更小的摩擦因数, 说明油介质表面微织构技术与固体润滑相结合的复合技术在不同转速下均具有良好的润滑减摩效果。

3 结 论

研究了表面微织构固体润滑试样油介质中的滑动摩擦性能, 对比不同表面处理方式对摩擦性能的影响及分析了摩擦磨损机理, 同时分析了不同载荷和不同转速对表面摩擦因数的影响。

(1) 相比织构化表面固体润滑(TL)、织构化表面油润滑(TO)、织构化表面无润滑(T)、光滑无润滑(S)、光滑表面油润滑(SO)试样, 表面涂沫润滑油的微织构自润滑试样(TLO)均具有更好的摩擦磨损性能; 相对于光滑无润滑(S)试样和光滑表面油润滑(SO)试样, 微织构自润滑(TLO)试样摩擦因数可减少87.9%和17.7%。

(2) 随着载荷增加, TLO试样表面摩擦因数逐渐减小并趋于稳定; 随着转速增加, TLO试样表面摩擦因数逐渐增大。在不同的载荷和转速条件下, TLO试样均具有良好的润滑减摩效果。

(3) 在油介质表面采用微织构处理和固体润滑相结合的复合技术, 可有效减小摩擦磨损, 提高表面摩擦性能, 具有很好的应用前景。

参考文献

- [1] 王燕, 伏彦龙, 权鑫, 等. MoS₂/SiCH固液复合润滑体系摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(1): 98-103.
WANG Y, FU Y L, QUAN X, et al. Tribological behaviors of MoS₂/SiCH film composite lubrication system[J]. Tribology, 2016, 36(1): 98-103 (in Chinese).
- [2] ERDEMIR A. Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication[J]. Tribology International, 2005, 38(3): 249-256.
- [3] ERDEMIR A, AJAVI O O, FENSKE G R, et al. The synergistic effects of solid and liquid lubrication on the tribological behavior of transformation-toughened ZrO₂ ceramics[J]. Tribology Transactions, 1992, 35(2): 287-297.
- [4] ERDEMIR A, ERCK R A, FENSKE G R, et al. Solid/liquid lubrication of ceramics at elevated temperatures[J]. Wear, 1997, 203: 588-595.
- [5] LIU X, WANG L, PU J, et al. Surface composition variation and high-vacuum performance of DLC/ILs solid-liquid lubricating coatings: Influence of space irradiation[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(20): 8289-8297.
- [6] LIU X, WANG L, XUE Q. DLC-based solid-liquid synergistic lubricating coatings for improving tribological behavior of boundary lubricated surfaces under high vacuum condition[J]. Wear, 2011, 271(5): 889-898.
- [7] LIU X, WANG L, XUE Q. High vacuum tribological performance of DLC-based solid-liquid lubricating coatings: influence of atomic oxygen and ultraviolet irradiation[J]. Tribology International, 2013, 60: 36-44.
- [8] LIU X, WANG L, LU Z, et al. Vacuum tribological performance of DLC-based solid-liquid lubricating coatings: Influence of sliding mating materials[J]. Wear, 2012, 292: 124-134.
- [9] POTTUZ L J, MA N, KINOSHITA H, et al. Diamond-derived carbon onions as lubricant additives[J]. Tribology International, 2008, 41(2): 69-78.
- [10] TANNOUS J, DASSENNOY F, BRUHACS A, et al. synthesis and tribological performance of novel mo_x W_{1-x}S₂ (0≤x≤1) inorganic fullerenes[J]. Tribology Letters, 2010, 37(1): 83-92.
- [11] RAPAPORT L, LESHCHINSKY V, VOLOVIK Y, et al. Modification of contact surfaces by fullerene-like solid lubricant nanoparticles[J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 163: 405-412.
- [12] PENG D X, KANG Y, HWANG R M, et al. Tribological properties of diamond and SiO₂ nanoparticles added in paraffin[J]. Tribology International, 2009, 42(6): 911-917.
- [13] SHUM P W, ZHOU Z F, LI K Y. Investigation of the tribological properties of the different textured DLC coatings under reciprocating lubricated conditions[J]. Tribology International, 2013, 65: 259-264.
- [14] ARSLAN A, MASJUKI H H, VARMAN M, et al. Effects of texture diameter and depth on the tribological performance of DLC coating under lubricated sliding condition[J]. Applied Surface Science, 2015, 356: 1135-1149.
- [15] 华希俊, 王蓉, 周万, 等. 45钢的黏结型激光微织构表面摩擦学性能及固体润滑机理分析[J]. 材料工程, 2015, 43(9): 39-45.
HUA X J, WANG R, ZHOU W, et al. Analysis of tribological property and mechanism of solid lubrication on 45 steel bond-type laser micro-textured surface[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(9): 39-45 (in Chinese).