脂润滑条件下 PTFE/GCr15 激光织构表面滑动摩擦性能研究

解玄[1a]，尹必峰[1a]，华希俊[1b]，王皓[1b]，朱翊航[1b]，许晟[1a]，朱伟[2]

（1.江苏大学 a.汽车与交通工程学院 b.机械工程学院，江苏 镇江 212013；
2.江苏希西维轴承有限公司，江苏 镇江 212013）

摘 要：目的 研究 PTFE 薄膜与激光织构化 GCr15 轴承钢配副在脂润滑条件下的摩擦学性能，探究微织构面积占有率和工况参数对摩擦学行为的影响规律。**方法** 采用二极管泵浦声光调 Q Nd：YAG 激光器对下试样进行表面织构加工，在 Rtec MFT-5000 多功能摩擦磨损试验机上进行往复摩擦学试验，其中上试样为粘结 PTFE 薄膜的圆柱销，下试样为进行激光织构化的 GCr15 轴承钢滑块。**结果** 脂润滑介质下，PTFE 与微织构表面耦合摩擦系数最低。在前期磨合阶段，不同微织构面积占有率的表面摩擦系数均有小幅度上升；试验中期，不同微织构面积占有率的表面摩擦系数区分度逐渐变大。当微织构面积占有率由 10%上升为 40%时，摩擦系数先减小后增大，且微织构面积占有率为 20%时，表面摩擦系数最小，仅为 0.032。脂润滑条件下，三种不同微织构面积占有率的试样随着载荷由 20 N 增加至 100 N 时，摩擦系数均出现下降趋势，且趋势逐渐趋缓。在低频率阶段的摩擦系数较大，高频率阶段摩擦系数较小。**结论** 脂润滑条件下，PTFE 与微织构耦合是一种有效的复合减摩手段。随着织构面积占有率的提升，表面摩擦系数先减小后增大，随着载荷的增大，表面摩擦系数迅速下降；随着往复运动频率的增大，表面摩擦系数先上升再缓慢下降。当面积占有率为 20%时，能获得较好的摩擦润滑性能。

关键词： PTFE；表面织构；脂润滑；摩擦学性能；面积占有率；工况

中图分类号： TH117 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3660(2019)08-0077-06

DOI： 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.08.011

Research on Sliding Friction Properties of PTFE/GCr15 Laser Textured Surface under Grease Lubrication

***XIE Xuan*[1a], *YIN Bi-feng*[1a], *HUA Xi-jun*[1b], *WANG Hao*[1b], *ZHU Yi-hang*[1b], *XU Sheng*[1a], *ZHU Wei*[2]**

(1.a.School of Automotive and Traffic Engineering, b.School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2.Jiangsu CCTY Bearing Co. Ltd, Zhenjiang 212013, China)

ABSTRACT: The work aims to study the tribological properties of PTFE film and laser-textured GCr15 bearing steel under

收稿日期： 2019-05-19；**修订日期：** 2019-08-20

Received: 2019-05-19; **Revised:** 2019-08-20

基金项目： 镇江市重大科技专项（ZD2018001）；镇江市高技术研究重点实验室（SS2018007）；扬州市科技成果转化项目（YZ2018125）；无锡市产业前瞻性与共性关键技术研发项目（WX18IIAG405）

Fund: Supported by Major Scientific and Technology Project of the Zhenjiang City (ZD2018001), High-technology Research Key Laboratory Project of the Zhenjiang City (SS2018007), Commercialization Project of Research Findings of the Yangzhou City (YZ2018125), Industry Foresight and Generality Research Project of the Wuxi City (WX18IIAG405)

作者简介： 解玄（1993—），男，博士研究生，主要研究方向为激光微加工与摩擦学设计。

Biography: XIE Xuan (1993—), Male, Doctor, Research focus: laser micromachining and tribology design.

通讯作者： 华希俊（1966—），男，博士，教授，主要研究方向为激光表面改性、摩擦学设计与固体润滑等。邮箱：xjhua@ujs.edu.cn

Corresponding author: HUA Xi-jun (1966—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: laser surface modification, tribology design and solid lubrication. E-mail: xjhua@ujs.edu.cn

grease lubrication conditions, and the influence of micro-texturing density and working condition on tribological behavior. Surface texture processing of lower sample using diode-pumped acousto-optic Q-switched Nd: YAG laser, and reciprocating tribological tests were carried out on a Rtec MFT-5000 multifunctional friction and wear tester. The upper sample is a cylindrical pin bonded with PTFE film, and the lower sample is a GCr15 bearing steel slider textured by laser. It is found that in grease lubrication medium, the friction coefficient for PTFE coupling with micro-textured surface is lowest; The surface friction coefficient of different micro-texture area occupancy increased slightly in the early running-in stage; In the middle stage of the experiment, the difference of surface friction coefficient between different micro-texture area occupancy gradually increased; When the area occupancy of micro-texture increases from 10% to 40%, the friction coefficient first decreases and then increases, and when the area occupancy of micro-texture is 20%, the surface friction coefficient is the smallest (only 0.032). With the increase of load from 20 N to 100 N, the friction coefficient of three samples with different micro-texture area occupancy in grease lubrication medium decreases and the trend slows down gradually. The friction coefficient is larger in the low frequency stage and smaller in the high frequency stage. It is concluded that PTFE coupling with micro-texturing is an effective anti-friction method under grease lubrication. The surface friction coefficient first decreases and then increases with the increase of texture area occupancy, the surface friction coefficient decreases rapidly with the increase of load, and the surface friction coefficient first increases and then decreases slowly with the increase of reciprocating motion frequency. When the area occupancy is 20%, better friction and lubrication properties can be obtained.

KEY WORDS: PTFE; surface texture; grease lubrication; tribological properties; micro-texture density; working condition

聚四氟乙烯（polytetrafluoroethylene，PTFE）具有摩擦系数较低、耐高低温及化学惰性等优良性能，被广泛用于关节轴承、矿山设备等机械工程领域[1]。以关节轴承为例，由于 PTFE 材料机械强度较低，耐负荷性差，在与钢制基体配副对磨过程中，会出现较严重的摩擦磨损情况，进而导致关节轴承失去自润滑性能，出现卡死、咬合等不利情况，这严重影响关节轴承的实际使用性能，缩短了关节轴承的使用寿命[2]。因此，有必要针对 PTFE/钢制基体摩擦副开展新型润滑技术研究。

近年来，激光表面织构（Laser surface texturing，LST）作为一种有效提高接触表面摩擦学性能的技术，受到了广泛关注[3—5]。经过聚焦后的高能量激光束照射材料表面，继而烧蚀出具有一定形状的规则微织构形貌，如微凹坑或微凹槽等[6—7]。这些织构形貌的形成会影响接触表面的流体动压润滑和承载能力，微凹坑可以作为流体的储集器，增强流体动压作用，有助于减少摩擦，同时也能截留磨损颗粒，从而减少磨损[8—9]。表面织构技术方面已经成功应用于机械密封[10]、缸套-活塞环系统[11]、推力轴承[12]等运动副表面，有效提高了产品性能。

目前，国内外学者在 PTFE 自润滑和微织构表面润滑技术方面开展了诸多相关研究。李迎春等[13]研究了物理/化学改性方法对聚四氟乙烯 PTFE 编织材料摩擦性能的影响。邱明等[14]将碳纤维、聚四氟乙烯 PTFE 作为尼龙薄膜的改性材料，研究了衬垫与自润滑材料结合对关节轴承摩擦性能的影响。Tripathi[15]等利用激光加工工艺在铸铁材料表面进行微织构造型，研究在干摩擦和油润滑两种介质条件下，铸铁材料的摩擦性能。Houdková 等[16]使用连续扫描的激光加工方式在滑动轴承外表面加工出圆形阵列，在油润滑介质中考察滑动轴承的摩擦系数与磨损情况。

然而现有研究中，表面织构技术大多应用于金属-金属摩擦副，在 PTFE 等非金属材料与金属配副中应用较少，相关研究也较少。因此，有必要针对表面微织构技术在 PTFE/金属配副中的应用开展系统研究。本文选用销-块滑动摩擦副，上试样为粘结 PTFE 薄膜表面圆柱销，下试样为进行激光织构加工的 GCr15 轴承钢滑块试样。在脂润滑条件下，系统研究了不同微织构面积占有率和工况参数对 PTFE/GCr15 轴承钢摩擦副表面摩擦学性能的影响，为激光表面织构技术在关节轴承等 PTFE 材料上的应用提供技术支持。

1 试验

1.1 试验准备

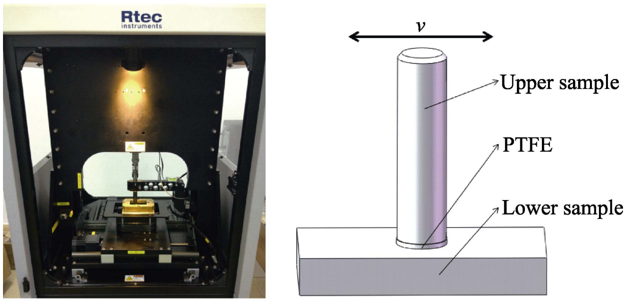
选择 GCr15 轴承钢作为试样材料，并将轴承钢材料加工成 30 mm×15 mm×4 mm 的矩形块。进行实际激光微织构加工前，经过粗磨、细磨、抛光处理后的试样表面粗糙度达到 0.05。使用无水酒精擦拭已经打磨好的试样表面，采用二极管泵浦声光调 Q Nd：YAG 激光器，运用“单脉冲同点间隔多次”工艺对下试样进行表面微织构加工，激光功率 10 W，脉冲宽度 45 ns。加工结束后，对表面进行研磨，去除表面熔渣，并将试样放入超声波清洗机中清洗 25 min。本试验选取的润滑脂是瑞典 SKF 斯凯孚有限公司生产的矿物油基增稠润滑脂 LGMT2/0.4，相关的技术参数如表 1 所示。

表 1　润滑脂参数
Tab.1 Parameters of grease

Lubricating grease	Temperature range/℃	Base oil	Soap base	Viscosity of base oil/($mm^2 \cdot s^{-1}$)
LGMT2/0.4	−30 ~ +120	Mineral oil	Lithium based	110

1.2　摩擦磨损试验

在 RTEC MFT-5000 多功能摩擦磨损试验机上，选用接触方式为面接触的销-块往复滑动摩擦副，如图 1 所示。上试样选择轴承钢 GCr15 材料的圆柱销（直径ϕ6 mm，高度 20 mm），运用环氧树脂结构胶黏剂并结合薄膜粘结工艺，将 PTFE 薄膜粘结在圆柱销下表面，下试样选择材料为轴承钢 GCr15 的长方体滑块（长度 30 mm，宽度 15 mm，高度 4 mm）。控制往复运动的行程为 15 mm。



a 摩擦磨损试验机　　b 摩擦副示意图

图 1　摩擦磨损试验示意图
Fig.1 Schematic diagram of friction and wear test: a) friction and wear testing machine, b) schematic diagram of friction pair

1.3　试验方案

1.3.1　不同表面处理方式下的摩擦学性能试验

为研究不同表面处理方式对试样表面摩擦特性的影响，在下试样表面涂抹润滑脂，对上下试样进行不同的表面处理（如表 2 所示）。在 Rtec 万能摩擦磨损试验机上进行摩擦性能试验，试验的载荷为 60 N，往复运动频率为 2 Hz，时间为 10 min，相对湿度为 40%，温度为 22.5 ℃。

表 2　不同表面处理试验方案
Tab.2 Scheme of different surface treatment

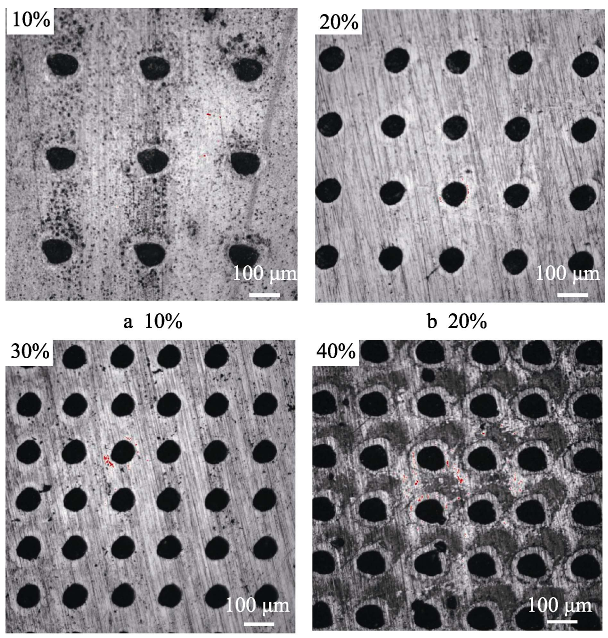
Sample Number	Upper sample	Lower sample	Lubricating medium
CD1	Smooth steel	Smooth steel	Grease
CD2	Smooth steel	Micro-textured surface	Grease
CD3	PTFE liner	Smooth steel	Grease
CD4	PTFE liner	Micro-textured surface	Grease

1.3.2　不同织构密度表面摩擦学性能试验

根据已知微凹坑的直径参数，通过改变微凹坑之间的间距，达到改变微织构表面面积占有率的目的。设置微织构面积占有率（织构密度）分别为 10%、20%、30%、40%，详细参数如表 3 所示，相应的形貌图见图 2。在 Rtec 摩擦磨损试验机上进行试验，选择销-块摩擦副，在脂润滑条件下，保持载荷为 60 N，试验时间为 15 min，往复运动频率为 2 Hz，相对湿度为 40%，温度为 22.5 ℃。

表 3　表面不同织构密度参数方案
Tab.3 Scheme of different texture density parameters on surface

Sample Number	Texture density/%	Pit diameter /μm	Pit depth /μm
C1	10	90	13
C2	20	90	13
C3	30	90	13
C4	40	90	13



a 10%　　b 20%
c 30%　　d 40%

图 2　不同织构密度试样形貌图
Fig.2 Morphology of different texture density samples

1.3.3　不同工况条件下的摩擦学性能试验

准备编号为 CT1、CT2、CT3 轴承钢试样（如表 4 所示），在脂润滑介质中分别研究载荷和往复运动频率对轴承钢 GCr15 材料表面摩擦性能的影响。针对载荷变化的试验如下：在单一因素变量法的原则下，选择润滑脂作为润滑介质，在室温（22.5 ℃）、

相对湿度 40%时，控制摩擦磨损试验机的往复运动频率为 2 Hz，进行载荷分别为 20、40、60、80、100 N 的 5 组摩擦磨损试验，每组试验时长为 3 min。

为了探究往复运动频率对试样表面摩擦性能的影响，保持载荷为 60 N，同样以润滑脂为润滑介质，改变往复运动频率分别为 1.33、2、2.67、3.33、4 Hz 进行摩擦试验，控制每组试验的时间为 3 min。

表 4 不同工况试样方案

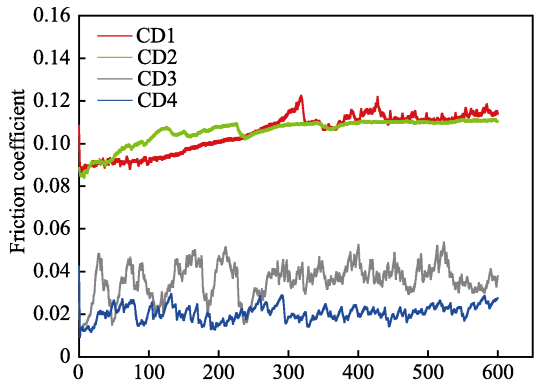
Tab.4 Testing samples under different working conditions

Sample Number	Texture density/%	Pit diameter/μm	Pit depth/μm
CT1	10	90	10
CT2	20	90	10
CT3	30	90	10

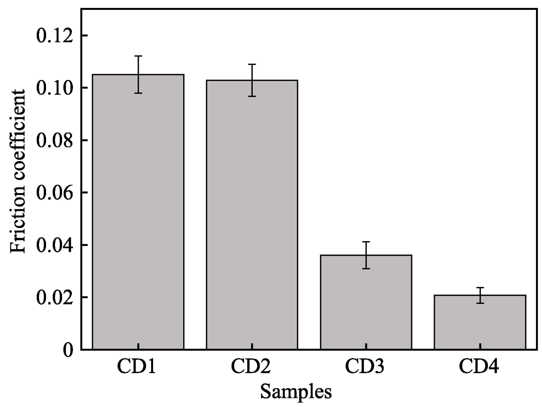
2 结果及分析

2.1 脂润滑条件下不同表面处理方式对摩擦性能的影响

图 3 是不同表面处理方式下的摩擦系数变化图。由图 3 可知，上试样为光滑 GCr15 轴承钢（CD1、CD2）时的摩擦系数较高，且有小幅上升趋势，而采用 PTFE 自润滑衬垫材料作为上试样（CD3、CD4），其摩擦系数整体表现比较平稳，无较大波动。这是因为 PTFE 作为一种自润滑材料，与轴承钢相比，有较小的摩擦系数。当摩擦系数曲线相对稳定后时，CD2 试样表面的摩擦系数较 CD1 组略低。这一方面是因为微织构凹坑可以起到存储润滑脂的作用，并可以适时地释放润滑脂到试样表面，有助于润滑薄膜的形成，提高摩擦副之间的润滑环境，摩擦系数随之减小；另一方面，微凹坑的存在可以收集润滑过程中产生的磨粒，减小了磨粒对接触表面的磨粒磨损等副作用。而 CD1 和 CD2 组试样的摩擦系数差值并不明显，原因是微织构表面一方面有利于形成稳定、持续的润滑膜，另一方面微织构凹坑的存在增加了试样表面的粗糙度，较大的粗糙度不利于摩擦系数的减小。微织构的减摩效果与大粗糙度的增摩效应相互中和，故 CD2 组试样的摩擦系数改变并不明显。CD4 的摩擦系数明显低于 CD3 试样，且两者差值要大于 CD1 与 CD2 摩擦系数的差值，说明在上试样为 PTFE 材料的条件下，微织构的减摩效果更佳。这是因为 PTFE 与轴承钢相比，硬度很低，且自身作为自润滑材料，使得织构面能够在相互运动过程中形成持续稳定的润滑膜，从而起到长效润滑作用。由此可以得出：PTFE 自润滑材料、表面微织构、脂润滑三者结合是一种有效的复合减摩润滑手段。



a 摩擦系数曲线



b 平均摩擦系数值

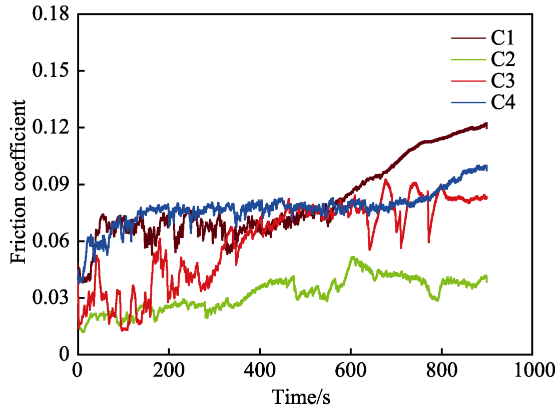
图 3 不同表面处理试样的摩擦系数变化曲线

Fig.3 The variation curves of surface friction coefficient of samples with different surface treatment: a) the friction coefficient curves, b) the average friction coefficient values

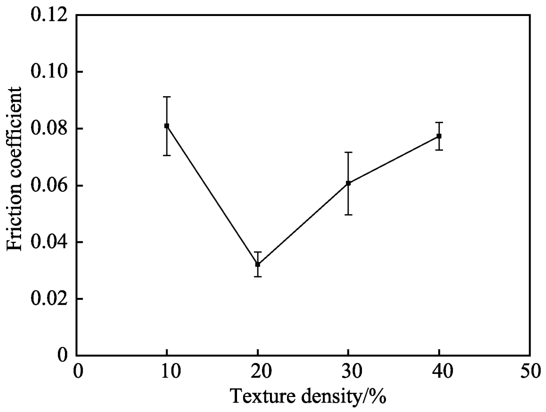
2.2 脂润滑条件下微织构面积占有率对摩擦性能的影响

图 4 是不同微织构面积占有率的试样表面摩擦系数曲线。从图 4 中可以看出，开始跑合阶段，试样的摩擦系数有较大幅度的上升，这是由于涂抹的润滑脂在接触表面上分布不均匀，且在初始阶段，润滑脂的黏度较高，润滑脂的润滑作用并不稳定。试验过程中，4 组试样的摩擦系数之间的区分度逐渐变大。对比 C1 组和 C2 组可以发现，较大的微织构面积占有率可以在宏观角度上提升润滑脂的存储总量，意味着会有更多的润滑脂参与到试样的往复运动中，较大的微织构面积占有率同样表示试样表面存在更多的微织构凹坑，这些凹坑结构不仅能够及时捕获来自试样实际接触表面上的润滑脂以及脱落的 PTFE 自润滑材料颗粒，始终保持对摩擦副之间润滑脂的动态平衡，继而有效隔离上下试样，还可以有效收集摩擦过程中出现的微小磨粒，降低磨粒对摩擦副的副作用。C2 组试样的摩擦系数显示，在特定工况条件下，存在较优的织构密度使得试样表面的润滑性能最佳。当微织构面积占有率进一步变大时（C3 和 C4 组），试样表

面的摩擦系数均比 C2 组大，这表明过大的面积占有率会给试样表面的润滑状况带来一定的负面效应，其原因在于较大的织构密度导致试样表面粗糙度变大，且下试样凹坑边缘存在挤压剪切效应，增加了摩擦阻力。试样表面存在过多的凹坑结构有时还会消耗一定的润滑脂，继而无法形成稳定的润滑膜。此外，过大的面积占有率还会导致上下试样实际接触面积锐减，加大了作用于润滑脂上的压应力，减小了润滑脂的有效厚度，降低了自润滑薄膜的承载能力，使润滑膜在上下试样相对运动过程中易遭到破坏，不利于表面摩擦学性能的改善。



a 摩擦系数曲线



b 平均摩擦系数值

图 4　不同微织构面积占有率下试样表面摩擦系数曲线

Fig.4 The variation curves of surface friction coefficient of samples under different micro-texture densities: a) the friction coefficient curves, b) the average friction coefficient values

2.3　工况参数对试样表面摩擦性能的影响

2.3.1　脂润滑条件下载荷对摩擦性能的影响

图 5 为不同组试样的摩擦系数在载荷作用下的变化规律。在低载荷区域，CT1、CT2、CT3 组试样的摩擦系数较高，随着载荷的增加，三种试样的摩擦系数均出现下降的趋势，原因是低载荷不能有效地将微凹坑内的润滑脂带到试样表面，脂润滑膜未充分形成，试样表面的摩擦系数较大。在高载荷阶段，存储在微织构凹坑内部的润滑脂被挤压到试样表面，形成润滑膜，并附着在接触表面上，有效隔离上下摩擦副，起到降低摩擦的作用。润滑脂会在挤压的作用下透析出基础油，在接触面上形成润滑油膜，较高的载荷有利于 PTFE 自润滑膜的形成，在载荷作用下，PTFE 自润滑薄膜牢牢吸附在下试样表面，进而共同改善润滑状况。同时在高载荷试验条件下，上下摩擦副摩擦生热，接触表面的润滑脂发生软化，导致润滑脂的黏度变小，进一步加大了润滑脂的流动性，改善接触面之间的润滑状态。

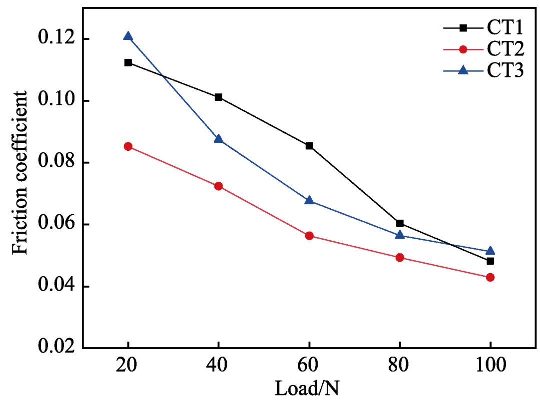


图 5　摩擦系数随载荷的变化曲线

Fig.5 The curve of friction coefficient with load

2.3.2　脂润滑条件下往复运动频率对微织构摩擦性能的影响

图 6 为不同组试样的摩擦系数在往复运动频率作用下的变化规律。在高频率阶段，摩擦系数较小且变化率较为平缓；在低频率阶段，摩擦系数较大。原因在于，低频阶段，润滑脂的流动性较弱，微织构凹坑内部只有少量的润滑脂被带到试样表面，导致润滑膜的质量较差，且较低的往复运动频率不利于 PTFE 衬垫在下试样表面形成一层 PTFE 自润滑转移膜。随着往复运动频率的加快，润滑脂的流动性得到小幅增强，同时接触表面上的润滑脂及其内部稠化剂的流失

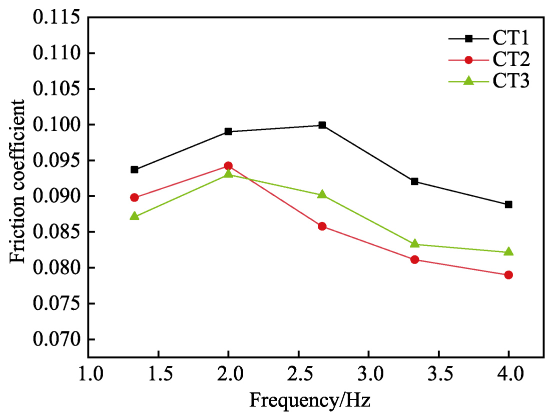


图 6　摩擦系数随往复运动频率的变化曲线

Fig.6 The curve of friction coefficient changing with reciprocating motion frequency

速度加快，导致试样的摩擦系数出现小幅度上升。当往复运动频率继续增加后，在上下摩擦副的带动下，施加在润滑脂上的剪切力逐渐突破润滑剂固有的屈服剪切力，润滑脂的流变特性充分发挥出来，润滑脂在剪切稀化的作用下渗透出基础油，基础油与稠化剂共同组成沉积转移膜，起到隔离上下试样的作用；此外，速度的加快也有利于增强基础油形成动压润滑效果，同时存储在微织构凹坑内部的润滑脂被充分释放到试样表面，与 PTFE 自润滑衬垫材料相耦合，有效提升了润滑性能。

3 结论

1）脂润滑介质下，PTFE 材料与表面微织构技术耦合是一种有效的复合减摩润滑手段。

2）随着织构密度的提升，表面摩擦系数先减小后增大。当织构密度为 20%时，表面摩擦系数最小。

3）脂润滑介质下，三种不同微织构面积占有率的试样随着载荷的增加，摩擦系数均出现下降的趋势，且趋势逐渐变缓。

4）脂润滑介质下，三种不同微织构面积占有率的试样在低往复频率阶段，摩擦系数较大；在高频率阶段，摩擦系数较小，且随着往复频率的增加，摩擦系数呈平缓下降趋势。

参考文献：

[1] 杨志新. 聚四氟乙烯改性材料及其应用[J]. 机械工程材料, 1991(2): 57-59.
YANG Zhi-xin. Polytetrafluoroethylene modified material and its application[J]. Mechanical engineering materials, 1991(2): 57-59.

[2] 李迎春, 邱明, 吕桂森. 编织衬垫自润滑关节轴承摩擦磨损性能的模糊综合评价与优化[J]. 现代制造工程, 2012(12): 62-65.
LI Ying-chun, QIU Ming, LYU Gui-sen. Fuzzy comprehensive evaluation and optimization for tribological properties of self-lubricating spherical plain bearings with woven liners[J]. Modern manufacturing engineering, 2012(12): 62-65.

[3] PETTERSSON U, JACOBSON S. Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts[J]. Tribology international, 2003, 36(11): 857-864.

[4] HUA X, XIE X, YIN B, et al. Tribological performance and self-lubricating mechanism of the laser-textured surface filled with solid lubricant in rolling friction pair[J]. Industrial lubrication and tribology, 2018, 70(2): 371-384.

[5] PODGORNIK B, BABNIK A, VILHENA L M, et al. Surface texturing by pulsed Nd: YAG laser[J]. Tribology international, 2009, 42(10): 1496-1504.

[6] 华希俊, 王成, 郝静文, 等. TC11 钛合金表面微凹坑织构皮秒激光加工工艺[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 42-47.
HUA Xi-jun, WANG Cheng, HAO Jing-wen, et al. Picosecond laser processing technology of micro-dimple texture on surface of TC11 titanium alloy[J]. Surface technology, 2018, 47(3): 42-47.

[7] MORAVČÍKOVÁ J, MORAVČÍK R, KUSÝ M, et al. Influence of laser surface texturing on tribological performance of tool steels[J]. Journal of materials engineering and performance, 2018, 27(6): 5417-5426.

[8] SCHRECK S, GAHR K H Z. Laser-assisted structuring of ceramic and steel surfaces for improving tribological properties[J]. Applied surface science, 2005, 247(1-4): 616-622.

[9] ETSION I, HALPERIN G. A laser surface textured hydrostatic mechanical seal[J]. Tribology transactions, 2002, 45(3): 430-434.

[10] XIE Y, LI Y, WANG Y. Hydrostatic effect of rectangle micro-texture on liquid-lubricated mechanical seal[J]. International journal of nanomanufacturing, 2013, 9(1): 29-42.

[11] 刘一静, 袁明超, 王晓雷. 表面织构对发动机活塞/缸套摩擦性能的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(6): 866-871.
LIU Yi-jing, YUAN Ming-chao, WANG Xiao-lei. Influence of the surface texture on the tribological performances of piston skirt/liner[J]. Journal of China university of mining & technology, 2009, 38(6): 866-871.

[12] 张金煜, 孟永钢. 推力滑动轴承表面织构的优化设计[J]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 91-99.
ZHANG Jin-yu, MENG Yong-gang. Optimal design of surface texture in parallel thrust bearings[J]. Journal of mechanical engineering, 2012, 48(17): 91-99.

[13] 李迎春, 邱明, 苗艳伟. PTFE/芳纶纤维编织衬垫自润滑关节轴承的黏接性能及摩擦学性能[J]. 中国机械工程, 2016, 27(2): 222-229.
LI Ying-Chun, QIU Ming, MIAO Yan-wei. Bonding behavior and tribological property for self-lubricating spherical plain bearings with PTFE/kevlar woven liner[J]. China mechanical engineering, 2016, 27(2): 222-229.

[14] 邱明, 梁霞, 李迎春. 注塑改性尼龙杆端关节轴承的摩擦学性能[J]. 兵工学报, 2017(10): 206-211.
QIU Ming, LIANG Xia, LI Ying-chun. Tribological properties of rod end spherical plain bearings with modified injection molding nylon[J]. Acta armamentarii, 2017(10): 206-211.

[15] TRIPATHI K, GYAWALI G, AMANOV A, et al. Synergy effect of ultrasonic nanocrystalline surface modification and laser surface texturing on friction and wear behavior of graphite cast iron[J]. ASLE transactions, 2017, 60(2): 226-237.

[16] HOUDKOVÁ Š, ŠPERKA P, REPKA M, et al. Shifted laser surface texturing for bearings applications[C]//6th international conference on fracture fatigue and wear. England: Journal of physics conference series, 2017: 1-10.