

## 摩擦磨损与润滑

织构协同磁流体对 30CrMo3A 合金  
摩擦性能的影响赵涛<sup>a</sup>, 王优强<sup>a,b</sup>, 莫君<sup>a</sup>, 朱玉玲<sup>a</sup>, 何彦<sup>a</sup>, 李梦杰<sup>a</sup>(青岛理工大学 a.机械与汽车工程学院 b.工业流体节能与污染控制教育部重点实验室,  
山东 青岛 266520)

**摘要:** **目的** 探究不同工况下织构与磁流体对齿轮合金摩擦学性能的影响,并分析其协同作用机理。**方法** 采用纳秒激光器在 30CrMo3A 合金表面构造圆形微织构图案。利用 UMT-3 摩擦磨损试验机分别测试了二酯基磁流体 (MF) 及其基载液 (DOS) 在润滑条件下光滑齿轮合金表面 (UT) 和织构齿轮合金表面 (TS) 的摩擦学性能。利用激光共聚焦显微镜、扫描电镜和能谱仪观察并分析了不同磨损表面的表面形貌。**结果** 与 UT-DOS 相比, TS-DOS、UT-MF 和 TS-MF 均能表现出良好的减摩性能,其中, TS-DOS 在低载条件下的减摩效果相对最好,摩擦因数降低了约 26.2%,随着载荷的增大,织构磨损严重,减摩效果减弱; TS-MF 在不同载荷下的摩擦因数均能降低 17%左右。TS-DOS 的抗磨效果最好,在低载荷下基本无磨损,在重载下的磨损率最大降低了约 60.6%,在高载荷下织构表面无法避免黏着磨损。二酯基磁流体会使磨损率增大,但能避免黏着磨损,在与织构的协同作用下,磨损率大幅下降。**结论** 织构能够有效存储润滑油和磨屑,磁流体有“滚珠”效应,且能够有效处理磨屑,两者的结合提升了合金的摩擦学性能,但是高浓度磁流体中的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性纳米颗粒在较高载荷下易发生团聚,会加剧微磨削作用。

**关键词:** 30CrMo3A 齿轮合金; 表面织构; 二酯基磁流体; 摩擦磨损; 协同作用机理

**中图分类号:** TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)11-0196-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.11.017

Effect of Textures and Magnetofluid Interaction on  
Tribological Properties of 30CrMo3A AlloyZHAO Tao<sup>a</sup>, WANG You-qiang<sup>a,b</sup>, MO Jun<sup>a</sup>, ZHU Yu-ling<sup>a</sup>, HE Yan<sup>a</sup>, LI Meng-jie<sup>a</sup>

(a. School of Mechanical and Automotive Engineering b. Key Lab of Industrial Fluid Energy Conservation and Pollution Control, Ministry of Education, Qingdao University of Technology, Shandong Qingdao 266520, China)

**ABSTRACT:** The coupling effect of magnetic fluid technology and texture technology has attracted extensive attention, but in

收稿日期: 2021-11-25; 修订日期: 2022-01-11

Received: 2021-11-25; Revised: 2022-01-11

基金项目: 国家自然科学基金 (51575289); 山东省自然科学基金 (ZR2021ME063)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51575289); Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2021ME063)

作者简介: 赵涛 (1996—), 男, 硕士, 主要研究方向为工程摩擦学应用。

Biography: ZHAO Tao (1996-), Male, Master, Research focus: application of engineering tribology.

通讯作者: 王优强 (1970—), 男, 博导, 教授, 主要研究方向为摩擦学与表界面工程。

Corresponding author: WANG You-qiang (1970-), Male, Doctoral supervisor, Professor, Research focus: tribology and surface interface engineering.

引文格式: 赵涛, 王优强, 莫君, 等. 织构协同磁流体对 30CrMo3A 合金摩擦性能的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(11): 196-204.

ZHAO Tao, WANG You-qiang, MO Jun, et al. Effect of Textures and Magnetofluid Interaction on Tribological Properties of 30CrMo3A Alloy[J]. Surface Technology, 2022, 51(11): 196-204.

the tribology of gear materials, scholars mainly explore the single effect of texture or magnetic fluid through experimental and theoretical analysis. This work aims to investigate the tribological properties of 30CrMo3A alloy affected by the interaction between texture and magnetic fluid, and analyze the coupling mechanism.

A circular microtexture pattern was formed on the surface of 30CrMo3A alloy by nanosecond laser. The diameter of the circular texture is about 466  $\mu\text{m}$ , the maximum depth is about 50  $\mu\text{m}$ , and the center distance is about 670  $\mu\text{m}$ . The tribological properties of untextured surfaces (UT) and textured surfaces (TS) under the condition of diester based magnetic fluid (MF) and its base carrier fluid (DOS) lubrication were tested with UMT-3 friction and wear testing machine. The test frequency was 1 Hz, and the load was 10 N, 20 N, 40 N, 60 N and 100 N, respectively. LSCM was used to observe the wear scars and calculate the wear rate. SEM-EDS was used to observe and analyze the surface morphology of different wear marks, and the wear mechanism was obtained.

The results showed that compared with UT-DOS, TS-DOS, UT-MF and TS-MF all showed good antifriction performance. Among them, the average friction coefficient of TS-DOS decreased by 26.2% at low speed and low load. With the increase of load, the ability of the texture to store lubricating oil and abrasive chips decreased, and its average friction coefficient increased. The frictional coefficients of UT-MF and TS-MF were basically unchanged. Under the loading of 20 N, the average frictional coefficients of UT-MF were reduced by 17.5% at most, while under different loads, the average frictional coefficients of TS-MF can be reduced by 17.5%.

TS-DOS had the best anti-wear effect. There was almost no wear under low speed and low load conditions. With the increase of load, the texture was worn, and its anti-wear effect was weakened. The maximum wear rate of TS-DOS decreased by 60.6% under heavy load conditions. TS-MF had good wear resistance at low speed and low load as well as low speed and heavy load, with wear rate reduced by 58.6% and 14.2% respectively, while UT-MF only had wear resistance at low speed and low load.

The wear surface of UT-DOS has serious adhesive wear, oxidation wear and abrasive wear. The texture can effectively store lubricating oil and wear debris, so as to reduce the adhesion wear and oxidation wear of the wear surface. Therefore, the wear form of TS-DOS is mainly abrasive wear, accompanied by slight adhesion wear and oxidation wear. Under the condition of magnetic fluid lubrication, the magnetic fluid can cover and transfer the wear debris, and the wear surface of UT-MF and TS-MF has almost no adhesion wear and oxidation wear. The wear form of UT-MF and TS-MF is mainly abrasive wear. In addition,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles in the magnetic fluid can polish the worn surface more smoothly. However,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles in the magnetic fluid with high mass fraction tend to agglomerate under high load, which will aggravate the micro-grinding effect of the magnetic fluid.

**KEY WORDS:** 30CrMo3A gear alloy; the surface texture; diester based magnetic fluid; friction and wear; coupling mechanism

齿轮作为航空传动系统中的关键部件之一,其在运行过程中的可靠性、稳定性对机械系统的运行性能至关重要。在以往的研究中,为了提高航空用齿轮的摩擦磨损性能,专家学者们主要通过 2 种方式实现,一是对齿轮材料进行优化,比如采用新材料<sup>[1-2]</sup>、优化热处理工艺<sup>[3-4]</sup>和使用表面涂层<sup>[5-6]</sup>等;二是优化齿轮的供油方式<sup>[7-8]</sup>、齿轮结构<sup>[9]</sup>等。随着这些技术的广泛应用,进一步提高齿轮材料的摩擦磨损性能变得较困难,且这些方法通常存在成本高昂、耗时、耗力等缺点。

表面织构化技术被认为是提高摩擦副表面摩擦学性能的有效手段之一。Xu 等<sup>[10]</sup>研究了在不同润滑状态下椭圆形织构表面的润滑膜成形机理,并提出织构化表面形成的摩擦膜对摩擦磨损性能有着显著影响。Zhang 等<sup>[11]</sup>通过实验研究认为,织构的减磨效应不仅是因为其润滑剂储存和碎片捕捉能力,还取决于

织构的亚表层结构。在织构化齿轮表面的摩擦学性能研究中,苏永生等<sup>[12]</sup>对齿面沟槽织构进行了有限元仿真,探究了不同沟槽织构参数对齿面最大应力的影响规律。朱佩元<sup>[13]</sup>采用了仿真与实验的方法,研究结果表明,沟槽型织构能有效提高齿轮的抗胶合能力,提升其摩擦学性能。李浩<sup>[14]</sup>提出了基于分形理论的齿面构形设计,将数值分析、仿真与实验相结合,为织构化齿轮设计提供了理论借鉴和方案参考。Petare 等<sup>[15]</sup>比较了 2 种不同加工方式下齿轮的表面性能,结果表明,采用激光织构化处理齿轮表面,再辅以磨料抛光后,可以大幅提高齿轮的表面性能。

随着磁流体技术的发展,越来越多学者开始关注磁流体在润滑方面的应用。恭飞等<sup>[16]</sup>研究了不同配比的磁流体在不同条件下的摩擦学性能,验证了磁流体代替传统液压介质的可行性。Gao 等<sup>[17-18]</sup>对不同形貌的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米颗粒进行了摩擦学性能研究,结果表明,

片状的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米颗粒表现出更好的摩擦学性能。Yang 等<sup>[19]</sup>采用脉冲磁场处理硬质合金,对比了材料在不同润滑介质下的摩擦磨损性能,结果表明,脉冲磁场可以提高合金的摩擦磨损性能,且在磁流体润滑下,其性能可以得到进一步提升。在轴承磁流体润滑方面,Hu 等<sup>[20-21]</sup>探究了磁流体轴承的支撑和摩擦学性能,结果表明,在磁场条件下,磁流体空气密封圈可以提供良好的支撑性,减小摩擦磨损。在此基础上,Xu 等<sup>[22]</sup>进一步探究了在乏油工况下磁流体空气密封圈的性能,结果表明,在适当的磁场条件下磁流体可以延迟乏油状况的出现时间。

磁流体与织构的协同作用也引起了人们的广泛关注。Chen 等<sup>[23]</sup>制备的磁性阵列薄膜表面在高速条件下具有良好的摩擦学性能。Zhou 等<sup>[24]</sup>在刀具表面加工微织构,并辅以磁流体润滑,探究了织构与磁流体的协同作用机理。Zhang 等<sup>[25]</sup>在 Zhou 的基础上,进一步探究了磁场作用下刀具的切削和抗磨损性能。

由以上研究可知,磁流体技术和织构技术均引起了人们的广泛关注。在不同领域的学者们已经开始注

重将织构技术与磁流体润滑相结合,旨在进一步提高摩擦副的摩擦学性能。在齿轮润滑领域,学者们目前主要通过实验和理论分析<sup>[26-27]</sup>的方法探究织构或磁流体的单一作用影响,并未将二者结合并探究其协同作用。笔者通过纳秒激光器在航空齿轮材料表面加工微织构,并将磁流体应用于摩擦副表面,探究不同载荷下织构与磁流体的协同作用对航空齿轮材料 30CrMo3A 摩擦学性能的影响,并进一步分析其影响规律。

## 1 实验

### 1.1 材料及润滑剂

试样采用航空用齿轮材料 30CrMo3A,并经表面渗碳处理。试样规格为 30 mm×20 mm,表面粗糙度  $R_a$  为 0.02  $\mu\text{m}$ ,硬度约为 750HV。将商用二酯基磁流体(简称 MF)及其基载液癸二酸二异辛酯(简称 DOS)作为润滑剂,润滑剂的物理化学性质如表 1 所示。

表 1 润滑剂的物理化学性质  
Tab.1 Physiochemical properties of lubricating oil

Name	Magnetic particles	Particle size/nm	Saturation magnetization (GS)	Density (25 °C)/ ( $10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Viscosity (25 °C)/ (mPa·s)	Mass fraction/%
Diester based magnetic fluid	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	10	440±20	1.33	50	53
DOS				0.918	25	

### 1.2 表面织构的制备

激光表面技术具有加工速度快,精度高,无污染,可控制微织构的尺寸和形状等优点。采用纳秒激光器加工圆形织构,织构加工参数如表 2 所示。经激光加工织构后,把试样放在无水乙醇中超声震荡清洗 10 min,再用氮气吹干其表面,以去除加工过程中的杂质,最后用激光共聚焦显微镜观察织构化表面(Texture Surface,简称 TS)的形貌及尺寸,如图 1 所示,织构直径约为 466  $\mu\text{m}$ ,最大深度约为 50  $\mu\text{m}$ ,中心间距约为 670  $\mu\text{m}$ ,在凹坑边缘及内部存在激光熔融物形成的凸起结构。采用 EDS 检测图 1 中 A、B 点的元素含量,发现 A 点的氧元素略有增加。这是因为在激光高温加工织构过程中,材料表面与空气发生了氧化反应。

表 2 纳秒激光加工的激光参数  
Tab.2 Laser parameters about nanosecond laser processing

Laser velocity/ ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Repetition frequency/kHz	Laser power/W	Number of scanning
500	200	60	10

### 1.3 方法和表面分析

采用 UMT-3 摩擦磨损实验机进行往复摩擦磨损实验,上试样采用直径为 9.525 mm 的氮化硅陶瓷球,下试样为 30CrMo3A 合金试块。往复行程距离为 12 mm,频率为 1 Hz(速度为 12 mm/s)。实验施加的载荷分别为 10、20、40、60、100 N,探究了低速低载、低速中载和低速重载等条件下,磁流体和织构对 30CrMo3A 齿轮硬质合金摩擦学性能的影响。在实验前后均将试样置于无水乙醇中超声震荡清洗 10 min,并用氮气吹干。每组实验均重复进行 3 次实验,取 3 次实验稳定阶段的平均值,并计算平均摩擦因数(ACOF)。

采用激光共聚焦显微镜观察磨痕,并计算磨痕的截面面积,采用式(1)计算磨损率。采用扫描电子显微镜(SEM)观察磨痕的微观形貌,并通过 EDS 观测其化学元素的含量。

$$W = V / (FS) \quad (1)$$

式中:  $W$  为磨损率,  $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ ;  $V$  为磨损体积,  $\text{mm}^3$ ;  $F$  为加载力, N;  $S$  为滑动距离, m。

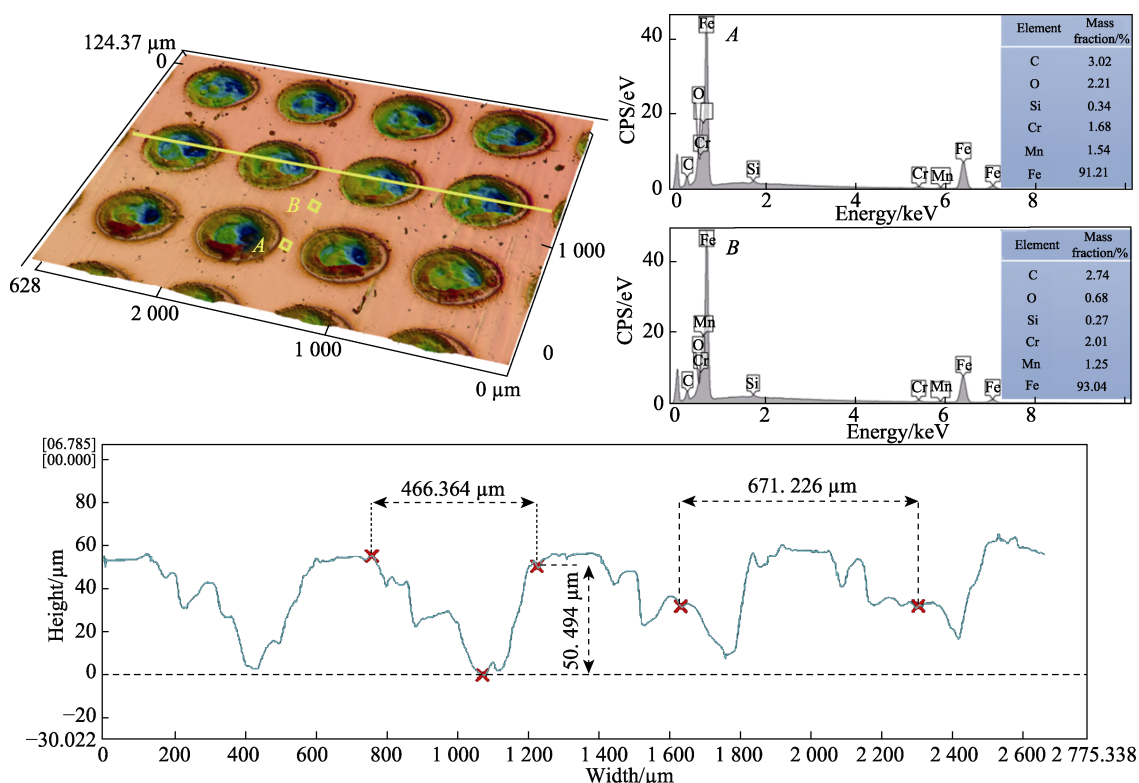


图 1 激光表面织构形貌、参数及元素分布

Fig.1 Texture morphology, parameters and element distribution of laser surface

## 2 结果与讨论

### 2.1 对摩擦因数的影响

在不同载荷下,不同润滑剂对 30CrMo3A 合金非织构表面 (Untextured Surface, UT) 摩擦因数的影响如图 2 所示。如图 2a 所示,在低载荷下,UT-MF 的摩擦因数先缓慢震荡上升,然后趋于稳定,其最大摩擦因数为 0.14 左右;UT-DOS 的摩擦因数在前 800 s 时间内不断上升,最后趋于稳定,其最大摩擦因数超过了 0.16。如图 2b、c 所示,在中高载荷下,UT-MF 的摩擦因数先缓慢下降,然后缓慢上升,其摩擦因数的震荡区间为 0.12~0.14,UT-DOS 的摩擦因数的震荡区间为 0.14~0.16。由摩擦因数曲线可知,UT-MF 在摩擦过程中的摩擦因数更低,且更稳定,这意味着在 MF 润滑下合金表面的减摩性能更优。摩擦因数出现波动的原因可能是不同润滑剂对摩擦接触区之间磨屑的处理方式不同,DOS 无法转移磨屑,导致磨屑在摩擦副表面不断黏结撕裂;MF 能够包覆转移磨屑,随着载荷的增大,摩擦接触面的磨屑增多,导致其摩擦因数缓慢上升。

对比了不同载荷下,光滑合金表面在 MF 润滑和 DOS 润滑条件下的平均摩擦因数变化情况,如图 2d 所示。由图 2d 可知,在 DOS 润滑条件下,合金表面的平均摩擦因数随着载荷的增大,呈现先上升后下降的变化趋势,而在 MF 润滑条件下摩擦因数相对稳定,

呈缓慢上升趋势,其平均摩擦因数在载荷为 20 N 时最大降低了约 17.5%。

在 DOS 润滑条件下,织构表面 (Textured Surface, TS) 和非织构表面在不同载荷下的摩擦因数对比情况如图 3 所示。可以看出,在低载荷 (图 3a) 和重载荷 (图 3c) 条件下,TS 的摩擦因数更加稳定,但在重载下,TS 的摩擦因数会突然上升。这是由于载荷较大导致织构在短时间内的磨损较严重,使得织构效应减弱。在中载荷下,TS 的摩擦因数 (图 3b) 也体现出摩擦因数突然上升的特点,前期摩擦因数的上升是因为激光织构化产生的熔融峰不断参与摩擦,而后期摩擦因数的上升是因为织构磨损严重。总体而言,TS 在不同载荷下的摩擦因数均低于 UT 的摩擦因数,这说明织构表面在减摩方面优于非织构表面。

TS-DOS 和 UT-DOS 的平均摩擦因数变化情况如图 3d 所示,随着载荷的增大,织构表面的平均摩擦因数明显上升。在低载荷条件下,织构效应最为明显,与非织构表面相比,其平均摩擦因数最高降低了约 26.2%。

DOS 润滑的非织构表面和 MF 润滑的织构表面的摩擦因数对比情况如图 4 所示。由图 4 可知,在不同载荷下,经磁流体和织构协同作用后合金表面的摩擦因数均低于 DOS 润滑下的非织构表面的摩擦因数。与 UT-MF 的摩擦因数曲线 (图 2a、b) 相比,TS-MF 的摩擦因数曲线 (图 4a、b) 更加平稳;在高载荷下 (图 4c),减轻了织构磨损,消除了摩擦因数

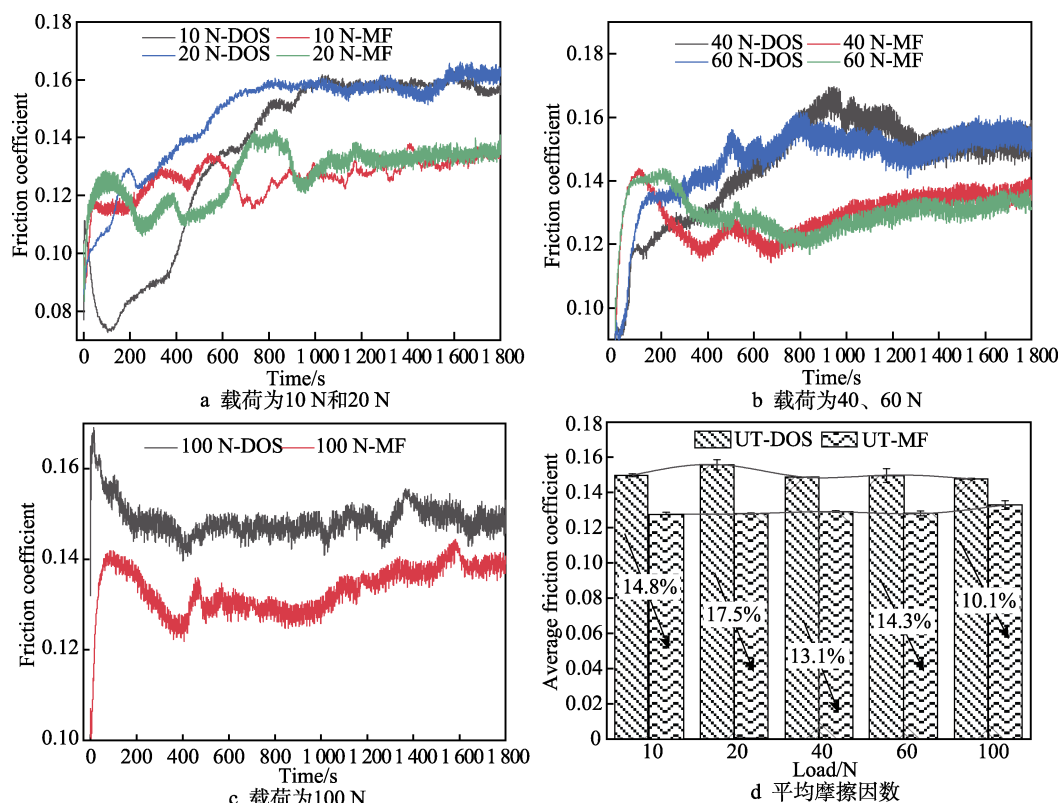


图2 DOS和MF润滑条件下,光滑表面在不同载荷下的摩擦因数对比

Fig.2 Comparison of friction coefficients of smooth surfaces under different loads under DOS and MF lubrication conditions: a) the loads are 10 N and 20 N; b) the loads are 40 N and 60 N; c) the loads are 100 N; d) average friction coefficient

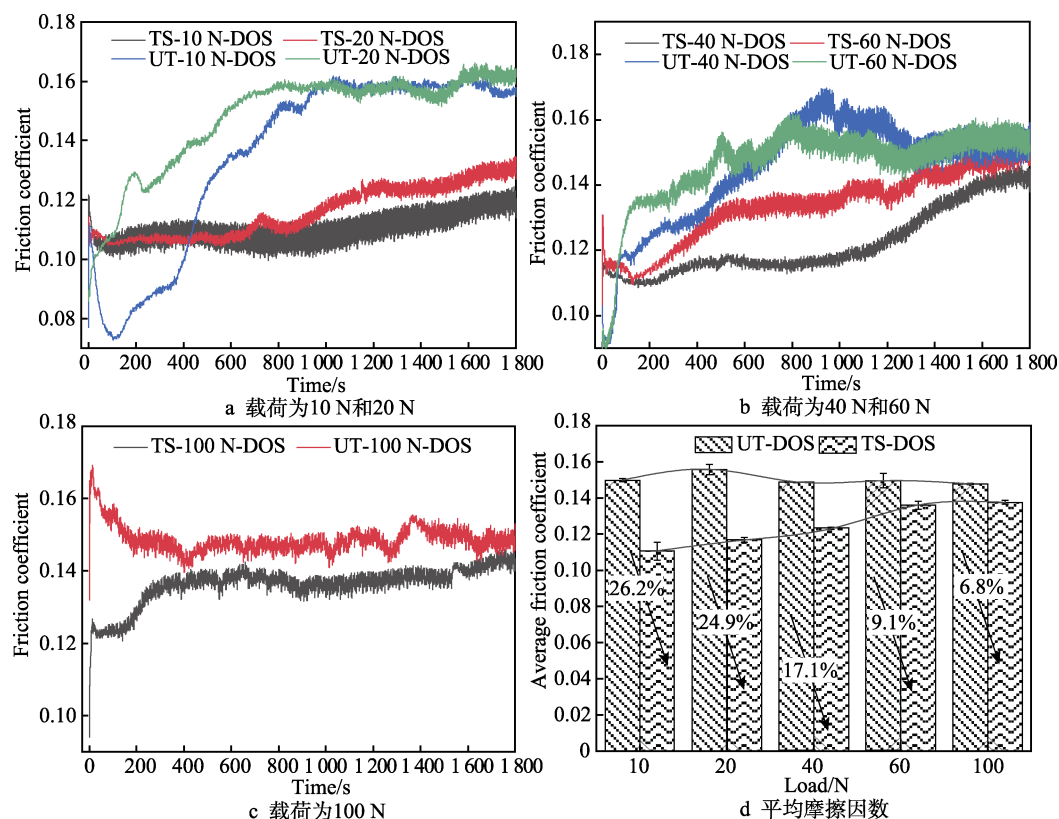


图3 DOS润滑条件下织构表面和光滑表面在不同载荷下的摩擦因数对比

Fig.3 Comparison of friction coefficients of textured and smooth surfaces under different loads under DOS lubrication condition: a) the loads are 10 N and 20 N; b) the loads are 40 N and 60 N; c) the loads are 100 N; d) average friction coefficient



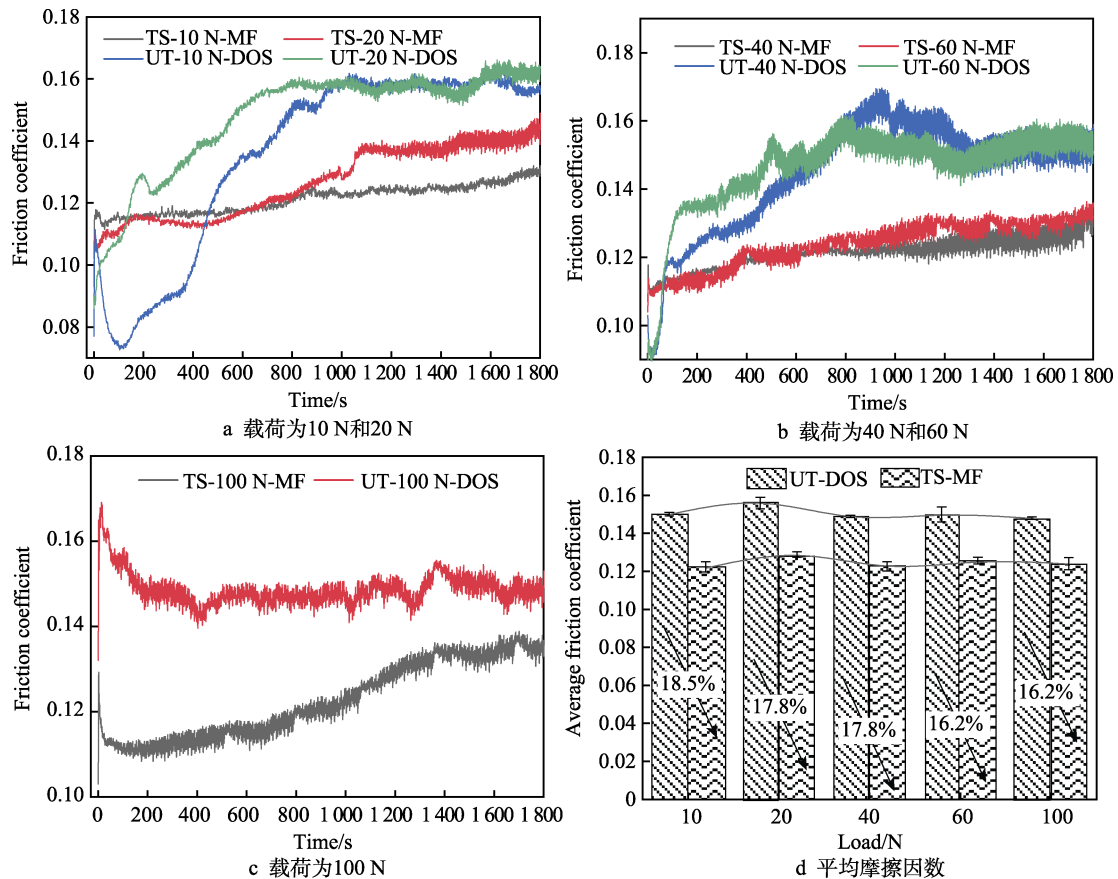


图 4 DOS 润滑的光滑表面和 MF 润滑的织构表面在不同载荷下的摩擦因数对比

Fig.4 Comparison of friction coefficients for DOS lubricated smooth surface and MF lubricated textured surface under different loads: a) the loads are 10 N and 20 N; b) the loads are 40 N and 60 N; c) the loads are 100 N; d) average friction coefficient

突变 (图 3c)。对比 UT-MF (图 2d)、TS-DOS (图 3d) 和 TS-MF (图 4d) 的平均摩擦因数可知, 在低载荷下, TS-MF 的平均摩擦因数介于 UT-MF 和 TS-DOS 的平均摩擦因数之间。随着载荷的增大, TS-MF 的平均摩擦因数基本不变, 减摩效果优于 UT-MF 和 TS-DOS。这得益于磁流体和织构的协同作用, 大幅减少了参与摩擦的磨屑, 提高了减摩效果。在磁流体和织构的协同作用下, 不同载荷下合金表面的平均摩擦因数均能降低 17.5% 左右。

## 2.2 对磨损量和磨损率的影响

UT-DOS、UT-MF、TS-DOS 和 TS-MF 的磨损量和磨损率随载荷的变化情况如图 5a、b 所示。由图 5a 可知, UT-DOS、UT-MF、TS-DOS 和 TS-MF 的磨损量均随着载荷的增大而增大, 其中 UT-DOS 的磨损量在载荷 10~60 N 下增长得较为稳定, 但在载荷 100 N 下, 其磨损量突增。由此可见, 在 DOS 润滑下的光滑表面无法在高载荷下具有明显的抗磨效果。TS-DOS 在不同载荷下的磨损量相较于 UT-DOS、UT-MF 和 TS-MF, 表现为最低, 其在载荷 10 N 下基本无磨损, 随着载荷的增大, 织构被磨损, 且摩擦

副之间的磨屑增多, 从而使磨损量增大, 但其磨损量始终低于 UT-DOS 的磨损量。UT-MF 和 TS-MF 在低载下的磨损量比 UT-DOS 的磨损量低, 随着载荷的增大, 高浓度的 MF 更易发生团聚, 无法发挥  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米粒子的滚动轴承作用<sup>[19]</sup>, 且其磨削作用增强, 因此 UT-MF 的磨损量急剧增大。虽然 TS-MF 的磨损量比 UT-DOS 的磨损量高, 但远低于 UT-MF 的磨损量, 这主要取决于织构的抗磨作用。

由图 5b 可知, 随着载荷的增大, TS-DOS 一直保持低磨损率。这是因为在摩擦过程中, 织构可以存储磨屑, 减小磨屑与基体之间的摩擦, 从“三体磨损”变为“二体磨损”。在高载荷下, UT-DOS 的磨损率会大幅增加, 而 UT-MF 和 TS-MF 在中高载荷下一直保持着高磨损率。相较于 UT-DOS, TS-DOS 的抗磨效果更好, 在低载荷下的磨损率可降低约 96.9%, 在高载荷下的磨损率最大可降低约 60.6%; UT-MF 在低载荷下的磨损率降低了约 6.2%, 在中高载荷下高浓度的 MF 会大幅加剧磨屑; TS-MF 在低载荷下的磨损率最大可降低约 58.6%, 在中载荷下磨损率会增加 1 倍左右, 在高载荷下磨损率降低了约 14.2%, 表明磁流体会削弱织构的抗磨作用。

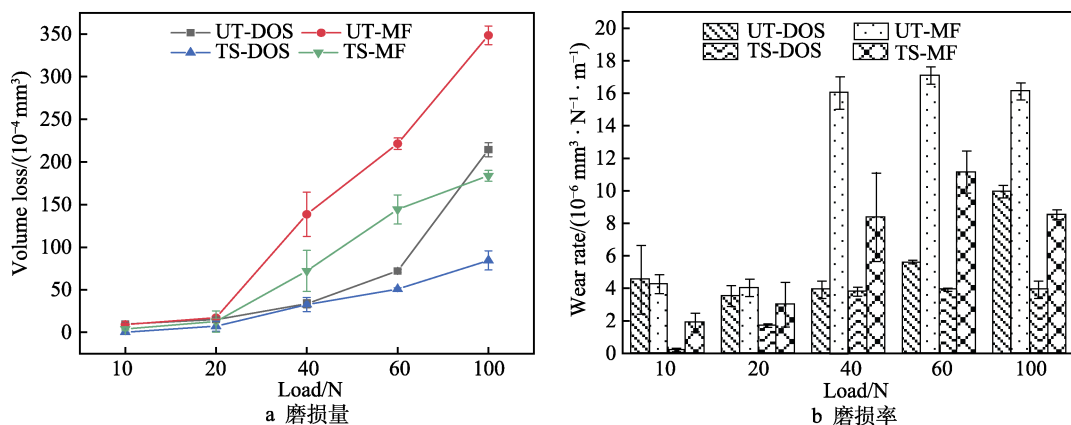


图5 磨损量和磨损率随载荷的变化情况

Fig.5 Variation of wear volume and wear rate with loads: a) wear volume; b) wear rate

### 2.3 磨损形貌与磨损机理

在载荷 100 N 下, 30CrMo3A 合金表面磨痕的整体形貌如图 6 所示。由图 6a 可知, 在 DOS 润滑下, 摩擦区域存在大量黏附物, 在摩擦过程中接触区的润滑剂被挤压到两侧, 从而使润滑油膜变薄<sup>[11]</sup>, 易导致材料间的直接接触, 使得摩擦因数和磨损量上升。由图 6b 可知, 摩擦表面的黏附物明显比光滑表面少, 且基本集中在非织构区域, 这说明织构具有抗黏结作用<sup>[28]</sup>和存储磨屑的能力。在高载荷摩擦过程中, 织构中的润滑油还能持续供给摩擦副表面, 减小摩擦磨损。相较于 DOS 润滑 (图 6c、d), 以 MF 润滑的磨损表面没有出现大面积的黏附物, 这说明 MF 比 DOS 具有更明显的磨屑处理能力, MF 可以将磨屑包覆, 而其中的纳米颗粒可将磨屑从摩擦接触区去除<sup>[24]</sup>, 从而减少黏着磨损。在较大载荷下, 摩擦副表面更易产生瞬时高温, 在摩擦副的极压和瞬时高温作用下, 高浓度的磁流体易丧失稳定性, 导致  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米粒子

发生团聚, 而大颗粒的团聚物反复参与摩擦, 加剧了合金表面的磨损。由图 6d 可知, 由于织构的存在, 提高了摩擦表面的散热能力<sup>[28]</sup>, 减少了纳米粒子间的团聚, 且在摩擦副表面的部分大颗粒团聚物会进入织构内, 不再参与摩擦, 故 TS-MF 的磨损量远低于 UT-MF 的磨损量。

在载荷 100 N 下 30CrMo3A 齿轮合金表面的局部磨痕形貌如图 7 所示。由图 7a 可知, 在 DOS 润滑下的光滑表面存在大量无法处理的磨屑黏附在合金表面, 且表面有较深的犁沟, A 点的 EDS 检测结果如图 8a 所示, 其氧元素的含量大幅增加, 这说明磨屑反复参与了摩擦, 发生了强烈的氧化反应, 并最终形成黏附物, 附着在磨损表面。事实上, 磨屑在反复附着-撕裂的过程中会导致摩擦因数的上升, 但磨屑黏附在材料表面能减少合金表面与陶瓷球之间的接触, 减小磨损。综上所述, 在 DOS 润滑下光滑表面的磨损形式主要为氧化磨损、黏着磨损和磨粒磨损。图 7b 中的犁沟明显浅于图 7a 中的犁沟, 这也印证了前文

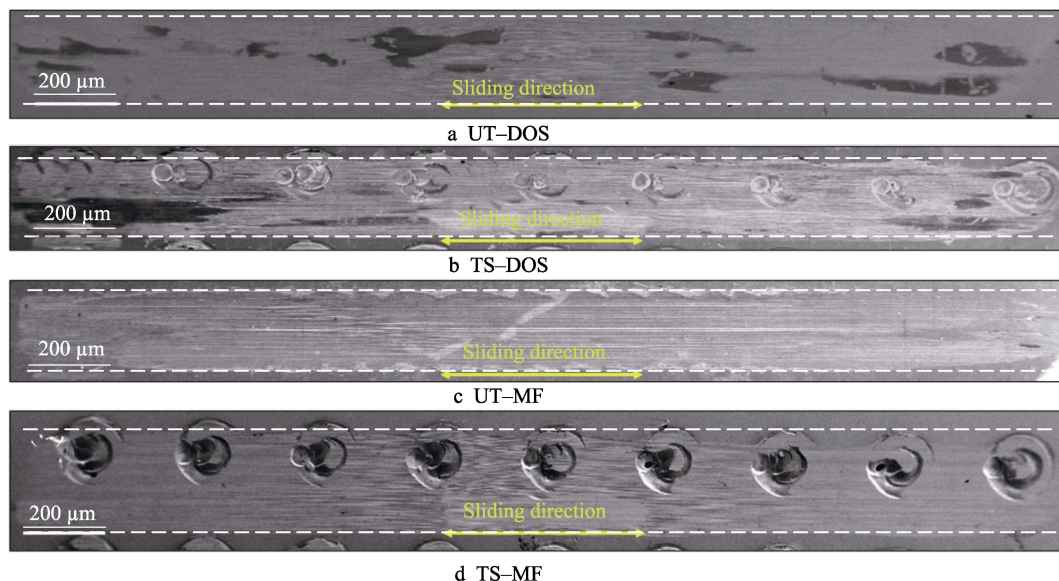


图6 在载荷 100 N 下 30CrMo3A 齿轮合金表面磨痕的整体形貌

Fig.6 Overall morphology of surface wear marks of 30CrMo3A gear alloy under 100 N load

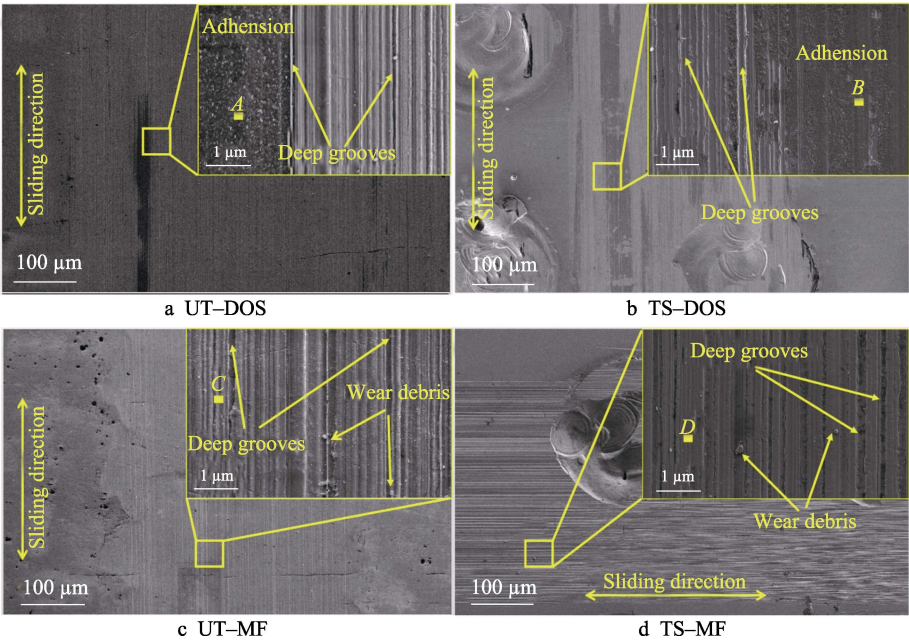


图 7 在载荷 100 N 下 30CrMo3A 齿轮合金表面的局部磨痕形貌  
Fig.7 Morphology of local wear marks on 30CrMo3A gear alloy under 100 N load

所述织构具有磨屑存储能力, 减少了“三体磨损”, 但其处理磨屑能力有限, 在合金表面仍会发生黏着磨损。*B* 点的 EDS 检测结果如图 8b 所示, 其氧元素的含量明显高于未摩擦的合金表面, 但低于图 7a 中的 *A* 点, 说明在 DOS 润滑下虽然织构表面也发生了氧化磨损, 但其剧烈程度明显低于 DOS 润滑下的光滑表面; 在 DOS 润滑下织构表面的磨损形式与在 DOS 润滑下光滑表面的磨损形式一致, 但磨粒磨损、氧化

磨损和黏着磨损明显减弱。  
在 MF 润滑下光滑表面和织构表面的局部磨痕形貌如图 7c、d 所示。整体而言, 2 种摩擦表面相对于 DOS 润滑下的光滑表面, 其犁沟明显减少。这是由于磁流体能产生微滚珠效应, 并吸附在材料表面, 起到了减摩抗磨作用<sup>[29]</sup>。*C*、*D* 点的 EDS 检测结果如图 8c、d 所示, 其元素含量与合金表面元素含量相差不大, 说明在摩擦表面没有发生强烈的氧化磨

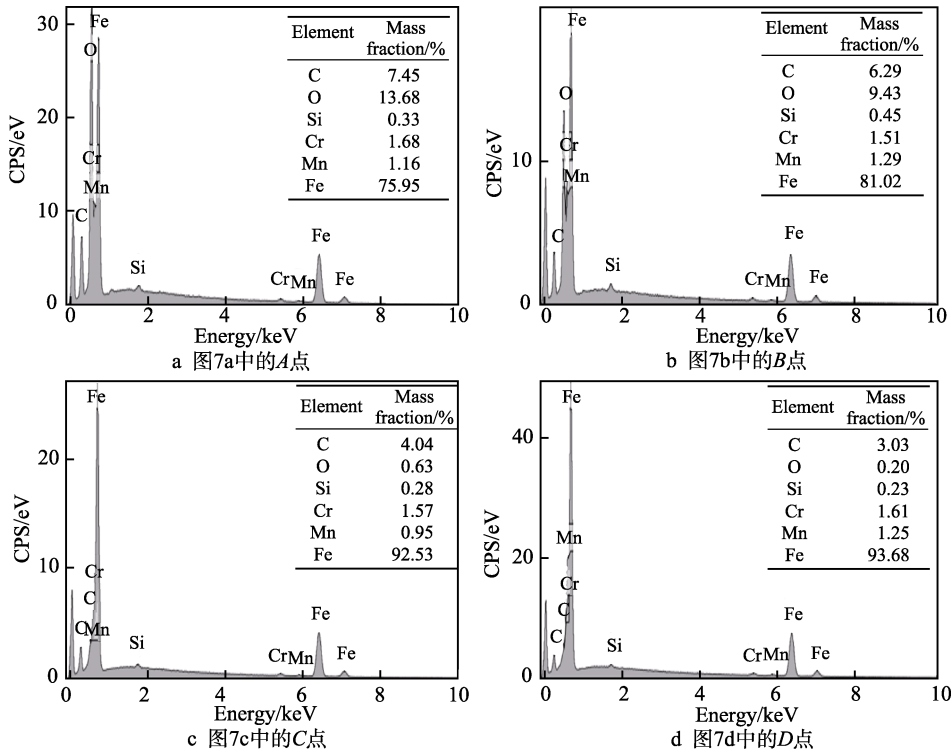


图 8 30CrMo3A 齿轮合金表面 EDS 分析  
Fig.8 EDS analysis of 30CrMo3A gear alloy surface: a) point A in Fig.7a; b) point B in Fig.7b; c) point C in Fig.7c; d) point D in Fig.7d



损, 在 MF 润滑下合金表面的磨损形式以磨粒磨损为主。

### 3 结论

通过以上实验研究可知, 在 30CrMo3A 航空齿轮合金表面, 织构和磁流体的协同作用能显著影响其摩擦学性能, 具体结论如下。

1) 与 UT-DOS 相比, TS-DOS、UT-MF 和 TS-MF 均能有效提高 30CrMo3A 航空齿轮合金材料的减摩性能。其中, 在中低载荷条件下, 织构作用效果更显著, TS-DOS 的摩擦因数最大降低了约 26.2%。

2) 在不同载荷下, 经磁流体作用后齿轮合金光滑表面的平均摩擦因数变化平稳, 经磁流体与织构协同作用后, 能进一步提高齿轮合金表面的减摩性能。与 UT-DOS 相比, TS-MF 的摩擦因数降低了 17% 左右, 且在中高载荷条件下, TS-MF 的减摩效果优于 TS-DOS。

3) 织构能够有效减小磨损, 与 UT-DOS 相比, TS-DOS 在不同的载荷下的抗磨效果更好, 在低载荷下其磨损率可降低约 96.9%, 在高载荷下其磨损率最大可降低约 60.6%。磁流体润滑会加剧磨损, UT-MF 在中高载荷下一直保持着高磨损率; 在附加织构作用后, 齿轮合金的磨损率有所下降, 其在重载荷条件下的磨损率与 UT-DOS 相比, 降低了约 14.2%。

4) UT-DOS 和 TS-DOS 的磨损形式主要为磨粒磨损、氧化磨损和黏着磨损, 而 UT-MF 和 TS-MF 的磨损形式以磨粒磨损为主, 说明磁流体能够有效减少氧化磨损和黏着磨损。

#### 参考文献:

- [1] TROB N, BRIMMERS J, BERGS T. Tool Wear in Dry Gear Hobbing of 20MnCr5 Case-Hardening Steel, 42CrMo4 Tempered Steel and EN-GJS-700-2 Cast Iron[J]. Wear, 2021, 476: 203737.
- [2] 滕佰秋, 常春江. 航空发动机用新材料——16Cr3NiW-MoVNbE 齿轮钢[J]. 航空发动机, 2003, 29(2): 34-37.  
TENG Bai-qiu, CHANG Chun-jiang. New Material for Aeroengine—16Cr3NiW-MoVNbE Gear Steel[J]. Aeroengine, 2003, 29(2): 34-37.
- [3] 邱荣春, 陈葵, 文毅, 等. 航空齿轮材料 16Cr3NiW-MoVNbE 二次叠加渗碳热处理工艺研究[J]. 机械传动, 2020, 44(8): 165-170.  
QIU Rong-chun, CHEN Kui, WEN Yi, et al. Research of Superimposed Carburizing Heat Treatment Process for Aviation Gear Material 16Cr3NiW-MoVNbE[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(8): 165-170.
- [4] HU Xuan, HUA Lin, HAN Xing-hui, et al. Effect of Heat Treatment Process on Microstructure and Crystallography of 20CrMnTiH Spur Bevel Gear[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(10): 6468-6483.
- [5] BOBZIN K, BRÖGELMANN T, KALSCHUEER C, et al. DLC Coated Spur Gears - Part II: Coating Properties and Potential for Industrial Use[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2021, 73(4): 621-634.
- [6] LIU Huai-ju, ZHU Cai-chao, WANG Zhan-jiang, et al. Investigation on the Effect of Coating Properties on Lubrication of a Coated Spur Gear Pair[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2018, 232(3): 277-290.
- [7] 魏松. 齿轮喷油润滑试验台研制及测试研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2016.  
WEI Song. Gear Injector Lubricating Test Bench Development and Testing Research[D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2016.
- [8] 张瑞强, 刘少军, 胡小舟. 供油压力和滑油温度对某航空齿轮润滑喷嘴射流特性的影响[J]. 航空动力学报, 2016, 31(7): 1777-1784.  
ZHANG Rui-qiang, LIU Shao-jun, HU Xiao-zhou. Effects of Supply Pressure and Temperature of Oil on Jet Characteristics of Lubricating Nozzles for an Aviation Gears[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(7): 1777-1784.
- [9] SHI Yan-yan, YANG Rong, KONG Xiang-feng, et al. Study on Optimization Design Technique of Aviation Gear Body[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 376: 371-376.
- [10] XU Yu-fu, ZHENG Quan, ABUFLAHA R, et al. Influence of Dimple Shape on Tribofilm Formation and Tribological Properties of Textured Surfaces under Full and Starved Lubrication[J]. Tribology International, 2019, 136: 267-275.
- [11] ZHANG Zhi-hui, SHAO Fei-xian, LIANG Yun-hong, et al. Wear Behavior of Medium Carbon Steel with Biomimetic Surface under Starved Lubricated Conditions[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(7): 3420-3430.
- [12] 苏永生, 齐国良, 李亮, 等. 齿轮仿生织构特征设计及有限元分析[J]. 润滑与密封, 2021, 46(6): 65-70.  
SU Yong-sheng, QI Guo-liang, LI Liang, et al. Design of Bionic Texture Features of Gear and Its Finite Element Analysis[J]. Lubrication Engineering, 2021, 46(6): 65-70.
- [13] 朱佩元. 圆柱直齿轮沟槽微织构摩擦性能研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2021: 34-72.  
ZHU Pei-yuan. Research on Friction Performance of Cylindrical Spur Gear with Grooved Micro-Texture[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2021: 34-72.
- [14] 李浩. 基于分形理论的齿面微织构设计及承载特性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019: 40-84.  
LI Hao. Research on Micro Texture and Bearing Properties of Gear Surface Based on Fractal Theory[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019: 40-84.

(下转第 225 页)