

# 载荷对金属/织构化三元乙丙 密封副摩擦学性能的影响

唐杰, 齐凯, 曾杰, 李玉帅, 曾祥瑞, 鲁鑫

(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

**摘 要:** **目的** 提高三元乙丙/金属动密封的抗磨性能, 揭示织构化橡胶在不同载荷下的磨损机理和损伤演变规律。**方法** 采用激光打标器在三元乙丙橡胶表面加工规则凹坑阵列, 与金属小钢球组成摩擦副, 并利用 UMT-2 摩擦磨损试验机进行摩擦实验, 研究不同载荷下织构化三元乙丙橡胶试样的摩擦学特性。通过分析摩擦系数和磨损率等获得实验过程的摩擦学信息, 再利用场发射扫描电子显微镜和白光干涉三维表面轮廓仪对磨痕和磨屑进行表面微观分析, 并对磨损区域进行三维形貌重组。**结果** 随着载荷的增加, 磨损量都有上升趋势, 无织构三元乙丙试件的摩擦系数呈下降趋势, 织构化表面摩擦系数先减小、后增大。在载荷为 35 N 时, 织构的摩擦学性能最好, 相较于无织构试样, 其磨损量下降了 33.4%, 摩擦系数下降了 24.2%, 表面粗糙度为 245 nm; 载荷为 80 N 时, 织构的引入会加剧磨损, 表面粗糙度达到了  $1.12 \times 10^4$  nm。通过观察磨损表面和磨屑形貌得出, 在中低载荷下, 表面织构可以有效减少腐蚀磨损和粘着磨损; 在高载荷下, 织构的磨损机理变为磨粒磨损。**结论** 总体而言, 在合适的载荷下, 织构化处理可以有效地改善三元乙丙的摩擦性能, 但高载荷下织构会增大磨损。

**关键词:** 表面织构; 三元乙丙; 摩擦性能; 磨损机理; 动密封; 磨屑形态; 法向载荷

**中图分类号:** TG115.5; TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)07-0243-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.07.025

## Effect of Load on the Tribological Properties of Metal/Textured EPDM Seal Pair

TANG Jie, QI Kai, ZENG Jie, LI Yu-shuai, ZENG Xiang-rui, LU Xin

(Aeronautical Engineering Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**ABSTRACT:** The purpose of this article is to improve the wear resistance of EPDM or metal dynamic seal pair, reveal the wear mechanism and damage evolution law of textured rubber under different loads. The experimental method is to use a laser marker to process a regular array of pits on the surface of EPDM rubber, which will form a friction pair with small metal steel balls,

收稿日期: 2020-09-30; 修订日期: 2020-12-23

Received: 2020-09-30; Revised: 2020-12-23

基金项目: 国家自然科学基金 (51705518); 中央高校基本科研业务费项目 (3122020035)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51705518); Fundamental Scientific Research Funds for the Central Universities (3122020035)

作者简介: 唐杰 (1983—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为流体传动与控制。

Biography: TANG Jie (1983—), Male, Master, Associate professor, Research focus: fluid power transmission and control.

通讯作者: 鲁鑫 (1990—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为转子动力学。

Corresponding author: LU Xin (1990—), Male, Ph. D., Lecturer, Research focus: rotor dynamics.

引文格式: 唐杰, 齐凯, 曾杰, 等. 载荷对金属/织构化三元乙丙密封副摩擦学性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 243-249.

TANG Jie, QI Kai, ZENG Jie, et al. Effect of load on the tribological properties of metal/textured EPDM seal pair[J]. Surface technology, 2021, 50(7): 243-249.

then the UMT-2 friction and wear testing machine are used to carry out friction tests to study the tribological properties of the textured EPDM samples under different loads. Finally, the tribological information of the test process is obtained by analyzing the friction coefficient and wear rate, then the field emission scanning electron microscope and white light interference three-dimensional surface profiler are used to conduct surface microscopic analysis of wear scars and wear debris, and three-dimensional reconfiguration of the wear area is performed. The test results show that as the load increases, the amount of wear shows an upward trend, the friction coefficient of the non-textured EPDM specimen shows a downward trend, the friction coefficient of the textured surface first decreases and then increases. The texture tribological performance is best when the load is 35 N, and the wear amount is reduced by 33.4% compared with the non-textured sample. The coefficient of friction dropped by 24.2% with surface roughness of 245 nm, when the load is 80 N, the introduction of texture will increase the wear, during which the surface roughness reached  $1.12 \times 10^4$  nm. Through the observation of wear surface morphology and wear debris morphology, it is found that the surface texture under medium and low loads can effectively reduce corrosion wear and adhesive wear, but under high load, the wear mechanism of the texture becomes abrasive wear. In general, under appropriate load, the texturing treatment can effectively improve the friction performance of EPDM, but the texture will increase wear under high load.

**KEY WORDS:** surface texture; EPDM; friction performance; wear mechanism; dynamic seal; wear debris form; normal load

往复动密封是一种关键的密封技术。三元乙丙 (EPDM) 密封件的作用机理是通过 O 形圈自身的弹性挤压和填充间隙达到密封效果<sup>[1-4]</sup>, 其在航空航天领域应用广泛<sup>[5-6]</sup>。动密封受杆的运动速度、液压油的压力和黏度等影响, 极易磨损失效, 从而发生泄漏, 影响设备的正常使用, 并可能造成事故的发生<sup>[7]</sup>。因此, 揭示橡胶与金属配偶件的摩擦磨损机理, 并同时采取新技术和方法改善橡胶-金属动密封副的摩擦学特性, 具有重要意义。

目前, 表面织构作为一种减少磨损的方法, 被广泛研究。表面织构的作用机制, 包括良好的流体动压润滑效应, 以及摩擦过程中容纳磨屑达到减磨作用<sup>[8-12]</sup>。Chen P. 等人<sup>[13]</sup>发现, 三角形表面织构可以有效降低涂锡模具钢基体表面的摩擦磨损。闫彩等人<sup>[14]</sup>发现, 当表面织构占比为 12% 时, 缸套的摩擦学性能达到最优。Xiao Yang<sup>[15]</sup>建立了机械密封热弹流体动力润滑模型, 通过数值模拟研究了三角形织构的减磨机理, 发现直角三角形织构排布的动压润滑性能优于等边三角形织构。王新宇等人<sup>[16]</sup>发现, 通过对织构表面占比和织构大小的优化, 可以提升管道内壁金刚石涂层的摩擦学性能。王国荣等人<sup>[17]</sup>研究了不同形状的凹槽织构对压裂泵柱塞的动压润滑性能和减磨性能的影响。上述研究主要集中在硬材质的摩擦副中, 相对于软材料/硬材料的织构化研究较少。Zhang 等人<sup>[18]</sup>发现, 表面织构应用在软材料上, 减磨效应更加明显。赵帅等人<sup>[19]</sup>发现, 织构对弹性模量较小的高分子材料会起到增磨作用, 对弹性模量较大的材料才有减磨效果。王焕杰等人<sup>[20]</sup>发现, 在软材料和硬材料的摩擦副中, 将织构布置在软材料上时, 摩擦性能最优。虽然这些研究都是关于表面织构在软材料/硬材料上的应用, 但对于织构化橡胶磨损机理的研究相对有限。

综上所述, 目前对于金属/软材料为对偶副的织构化研究, 主要集中在对金属表面进行织构处理, 对

橡胶材料表面织构化的磨损机理和摩擦特性的研究并不深入。特别是橡胶材料属于完全无定型聚合物<sup>[21]</sup>, 因其分子数量庞大, 且排列没有规律, 所以与金属和一般的聚合物相比, 其摩擦学特性比较复杂, 影响因素包括相对速度、载荷、润滑介质、温度场和力学性能等<sup>[22-25]</sup>。其中, 载荷是橡胶密封副中的关键影响因素之一, 目前对橡胶在不同载荷下的摩擦机理, 尤其是对织构化动密封中橡胶/金属密封副的磨损特性, 研究不够深入。为了提高航空液压动密封的使用寿命, 本研究对三元乙丙橡胶材料进行织构化制备, 并与金属材料组成摩擦副, 进行摩擦实验。运用表面形貌分析和三维形貌构建进行研究, 探讨织构化橡胶/金属摩擦副的磨损机理和损伤机制, 以及表面织构对三元乙丙材料在不同载荷下摩擦性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 试样制备

基于刘思思等人<sup>[26]</sup>研究织构化活塞减磨特性的实验方案, 本次实验采用球-面接触摩擦副, 上试样选用直径为 10 mm 的 GCr15 钢球, 下试样选用三元乙丙橡胶材料, 尺寸为  $\phi 20 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。两种材料的性能参数见表 1。

表 1 两种材料的性能参数  
Tab.1 Performance parameters of the two materials

Material	Density/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	Elasticity modulus/MPa	Poisson's ratio
EPDM rubber	1.2	7.8	0.47
Alloy steel	7.8	208.0	0.30

首先对橡胶块表面进行抛光和清洗, 测得其粗糙度低于 40 nm。利用台式 20 W 激光打标器在橡胶块

表面加工规则的凹坑阵列（如图 1a 所示）。设备参数：速度为 200 mm/s，功率为 75 W。织构参数为半

径 200  $\mu\text{m}$  的圆形织构，相邻织构间距为 600  $\mu\text{m}$ ，织构深度为 6  $\mu\text{m}$ ，如图 1b 所示。

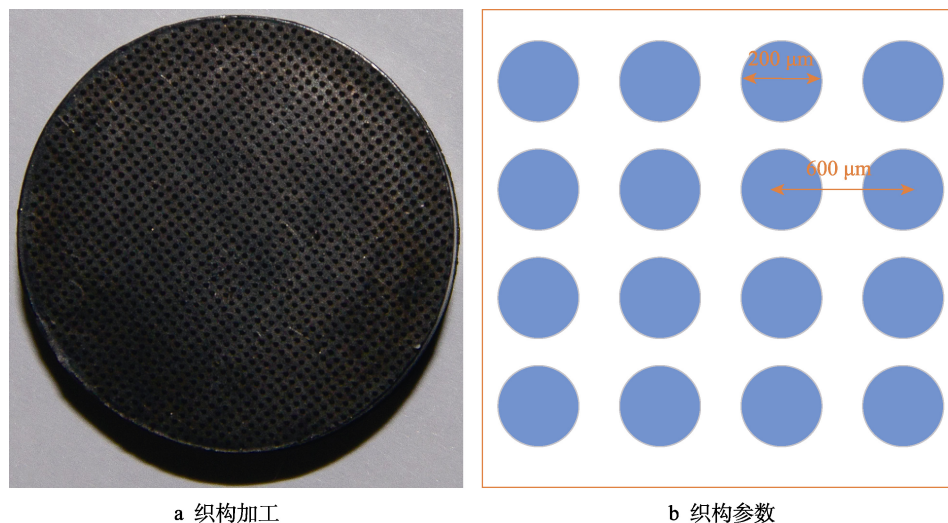


图 1 织构试块

Fig.1 Surface texture of test block: a) texture processing map; b) texture parameters

## 1.2 实验设计

本文采用 UMT-2 摩擦磨损试验机进行摩擦实验，该磨损机由电机驱动带动主轴进行往复摩擦。通常往复动密封的密封圈的压缩率为 10%~20%<sup>[27]</sup>，为研究在合理载荷和过载情况下织构对实验的影响，设置本文的实验参数：选取载荷为 20、35、50、80 N（对应的橡胶压缩率为 13.0%、17.5%、19.2%、25.1%）<sup>[28]</sup>，往复运动幅值  $D=4$  mm，频率为 50 Hz（0.3 m/s），室温  $t=(30\pm 2)$   $^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为 40%，10 号航空液压油润滑，实验时间为 40 min。为保证实验的准确性，每次实验重复 3 次。实验结束后，对 EPDM 试样进行清洗、烘干，并采用过滤法收集磨屑。利用天平测量实验前后橡胶试样的质量，计算磨损质量，天平精度为 0.1 mg。利用白光干涉三维表面轮廓仪对磨损表面进行粗糙度测量和三维形貌分析。对磨损试样和磨屑

试样进行喷金处理，利用场发射扫描电子显微镜对磨痕和磨屑的微观形貌进行观测。

## 2 结果和讨论

### 2.1 摩擦系数和磨损率分析

通过摩擦系数的对比（图 2）可以发现，随着载荷的增加，无织构试样的摩擦系数有缓慢下降的趋势，而织构化橡胶试样的摩擦系数呈现先减小、后增大的趋势。虽然随着载荷的增加，磨损量都有上升的趋势，但在载荷增大的过程中，织构的引入会导致磨损速率加快。从图 2 还可以发现，在低于 50 N 的载荷下，织构的引入有效地降低了橡胶试块的摩擦系数与磨损量。在载荷为 35 N 时，橡胶的减磨效果达到最佳，相比无织构表面，摩擦系数下降了 24.2%，磨

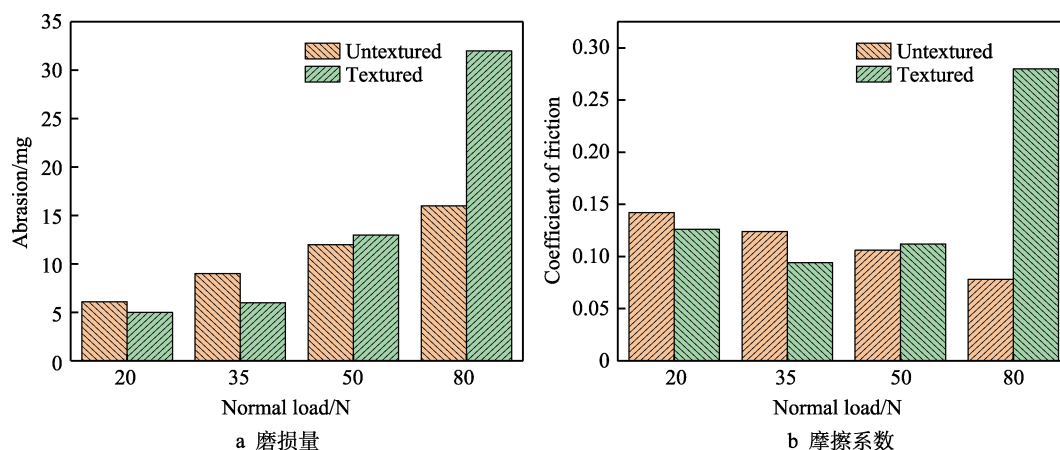


图 2 不同载荷下有无织构 EPDM/金属球摩擦性能对比

Fig.2 Comparison of friction performance of EPDM/metal ball with or without texture under different loads: a) wear comparison chart; b) friction coefficient comparison chart

损量下降了 33.4%。在橡胶压缩率接近 20%，甚至超过 20%之后，织构的引入会加剧磨损。载荷在 80 N 时，其摩擦系数超出无织构试样 3 倍。具体分析摩擦过程曲线（如图 3 所示）可知，在 80 N 载荷下，织构的摩擦过程中，摩擦系数呈现单调增加的状态，并在实验过程中波动极其不稳定，说明橡胶磨损过程中，试件表面粗糙度增加，进而导致摩擦系数持续升

高，试样表面已经受到了极大的磨损。反观其他试样的摩擦系数曲线，只有在实验开始时，由于静摩擦到动摩擦转变，摩擦系数有微小波动，整体较为稳定，直到实验结束。通过对摩擦系数的整体分析发现，在中低载荷下，织构的引入可以有效减小摩擦系数和磨损速率；但在高载荷下，织构的引入会使磨损量激增和摩擦系数持续增加。

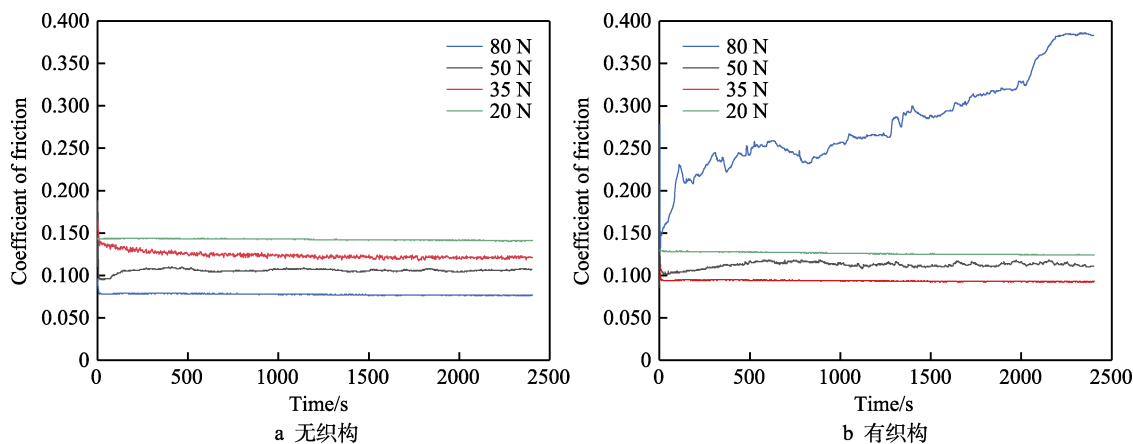


图3 不同载荷下有无织构 EPDM/金属球摩擦系数曲线

Fig.3 Friction coefficient curves of EPDM/metal ball with or without texture under different loads: a) untextured; b) textured

## 2.2 磨损形貌分析

磨损试样在电子显微镜下的表面微观形貌如图 4 所示。由图 4a 可知，在载荷为 20 N 的条件下，橡胶表面无典型的磨痕与磨损花纹出现。在无织构橡胶表面出现了少量磨痕以及摩擦过程中液压油对橡胶材料表面产生侵蚀而出现的局部腐蚀微坑，其磨损机理主要为腐蚀磨损。织构试样表面无明显磨痕，小凹坑明显小于无织构橡胶上的腐蚀坑，且可以明显看到织构里存在少量磨屑，降低了摩擦时的磨屑阻力，从而达到减磨效果。在载荷 35 N 下，有无织构的橡胶试样表面磨损形貌见图 4b，可以发现，载荷的加大，会导致橡胶表面的磨损加剧。在光滑试样的表面出现了垂直于摩擦方向的裂纹，小微坑的范围从局部上升到了整体，且出现了明显的点蚀和片状脱落，其磨损机理以粘着磨损为主，腐蚀磨损为辅。反观织构橡胶表面，依然无明显的磨痕，部分织构边缘有少量磨痕，出现局部的磨损小微坑，其主要磨损机理为腐蚀磨损和局部的粘着磨损。通过观察织构内的磨屑发现，其储量充满整个凹坑，达到最佳，大大减小了摩擦过程中的阻力，其减磨效果达到了最佳。

在 50 N 载荷下，无织构橡胶试样表面出现了橡胶特有的花纹状磨损痕迹，花纹整体比较平整且规则，如图 4c 所示。摩擦过程中，粘着的磨屑在摩擦副中充当了固体润滑层的作用，在随后摩擦过程中，排出实验区域，达到摩擦的动态平衡。在织构区域的表面出现了明显的磨损痕迹，发现了大范围的裂纹，部分织构磨损严重，已分不清织构形貌，并出现了少

量的条状切削磨屑，其磨损机理为粘着磨损为主，伴有少量磨粒磨损。80 N 载荷下，橡胶的表面形貌如图 4d 所示，可以明显看到，无织构橡胶表面的磨损相较于其他载荷条件下有了明显的改善。从微观的层面，可以看作载荷的增加使橡胶表面的微凸体与对偶副表面充分接触，从而减小了应力集中的现象，对磨损有了一定的改善。反观表面织构，其凹坑沿着垂直于滑动方向连成山脊状凹槽，出现了互相隆起的平行条纹，发生了典型的微观磨削现象，表面出现了大量的条状物磨屑，磨损区域已无织构痕迹。通过分析，其磨损机理为典型的磨粒磨损。可以发现，在过载条件下，织构的存在反而导致橡胶表面磨损速率加剧，原因是织构产生明显的应力集中，加快了表面裂纹的产生与扩展，从而加速了分层脱落与剥离。

磨损区域的三维形貌如图 5 所示。图 5a 为最优（压缩率为 13.0%）光滑表面的磨损三维形貌，其粗糙度为 627 nm，图 5b 为最优（压缩率为 17.5%）织构表面的磨损三维形貌，其粗糙度为 245 nm，图 5c 为最差（压缩率为 25.1%）织构表面的磨损三维形貌，其粗糙度为  $1.12 \times 10^4$  nm。通过对比正常工况下有无织构试样的表面粗糙度，可以发现，织构化橡胶在正常工况的载荷下，磨损表面的粗糙度有效降低，表面更加平稳，摩擦特性也达到最佳，有实际应用的价值。但随着载荷的增加，在过载工况下，织构化橡胶的摩擦性能逐渐变差。在 80 N 载荷下，试样出现了山脊状的连环条纹，与其他试样相比，出现了严重的切削磨损。因此，在过载工况下，织构化橡胶不适合实际应用。



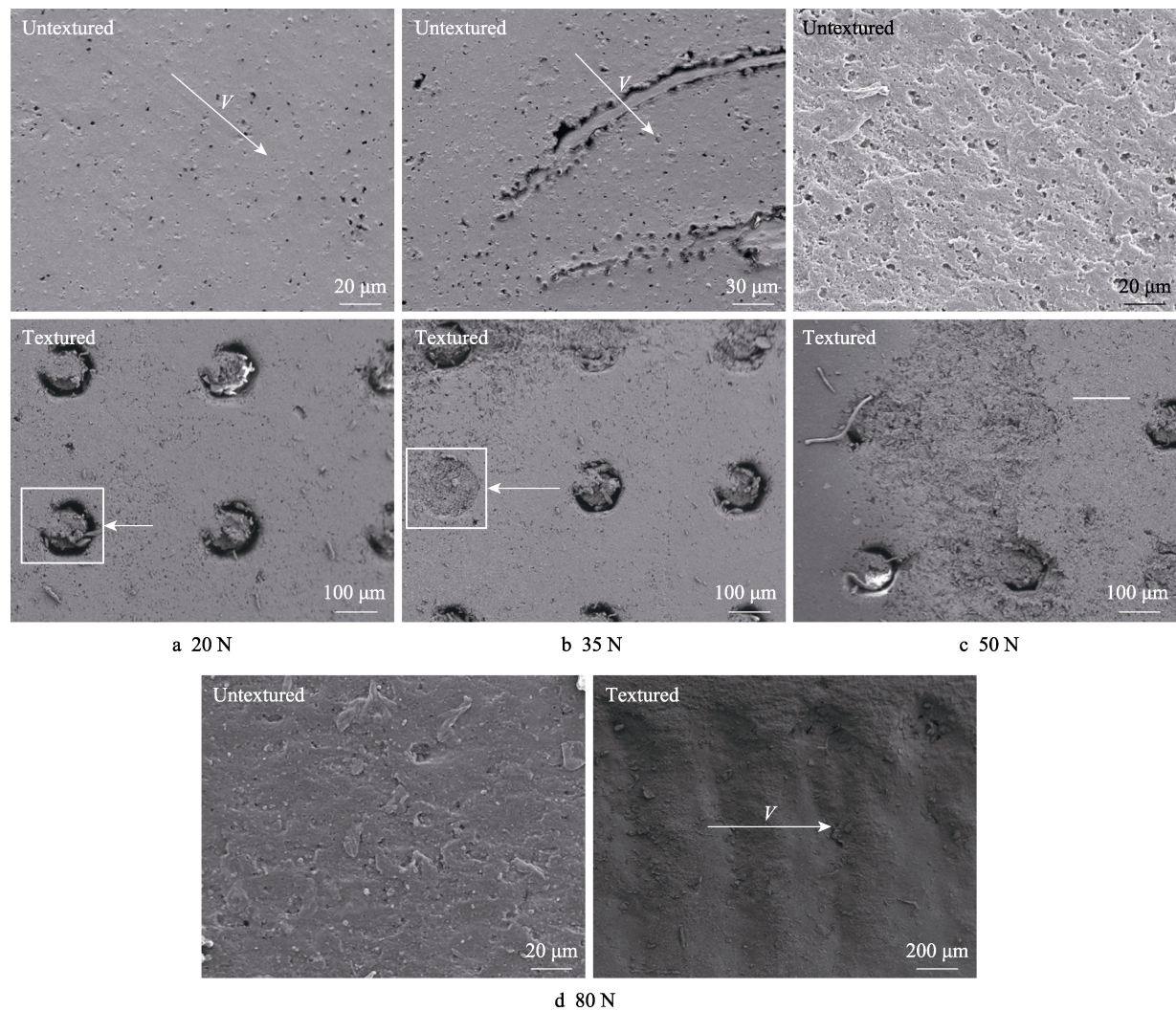


图 4 不同载荷下 EPDM 磨损表面微观形貌图  
Fig.4 Micro-morphologies of EPDM worn surface under different loads

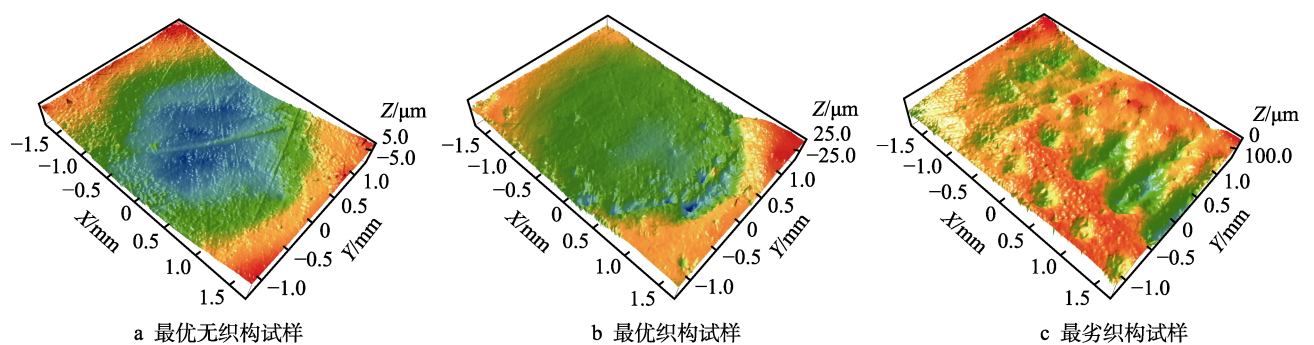


图 5 EPDM 试样表面三维形貌  
Fig.5 Three-dimensional surface morphology of EPDM samples: a) optimal non-textured sample; b) optimal texture sample; c) worst texture sample

### 2.3 磨屑形貌分析

磨损实验中，各种磨屑的表面形貌如图 6 所示。图 6a 中为低载荷下（20、35 N）无织构表面大量出现的磨屑，通过观察，其整体尺寸略小于其他磨屑，呈花生状，表面较为圆滑，为典型的腐蚀磨损磨屑。原因为，在较低载荷下，摩擦主要发生在橡胶和液压

油之间，橡胶表面发生了氧化降解和分子键断裂等化学反应，但磨损较为轻微。图 6b 为典型的片状磨屑，此类磨屑大多在中高载荷（50、80 N）无织构橡胶块的磨损表面收集得到的，说明出现了大范围表面擦伤，摩擦副之间的微凸体由于摩擦热而发生粘着现象，导致橡胶粘连被剥落。在压缩率 17.5% 的织构橡胶磨损表面（图 6c），大多数为块状的磨屑，说明在



合理的载荷下, 织构可以减小连续的接触面积, 从而有效减少摩擦热, 进而改善粘着现象的发生。在过载压缩率下 (压缩率为 25.1%), 织构化橡胶表面出现了大量的条状磨屑 (如图 6d 所示), 其为典型磨粒磨

损下的磨屑形貌。这说明在较大载荷下, 织构边缘出现的微峰与金属摩擦时被划伤, 并产生脱落, 导致橡胶表面产生了严重的磨损。

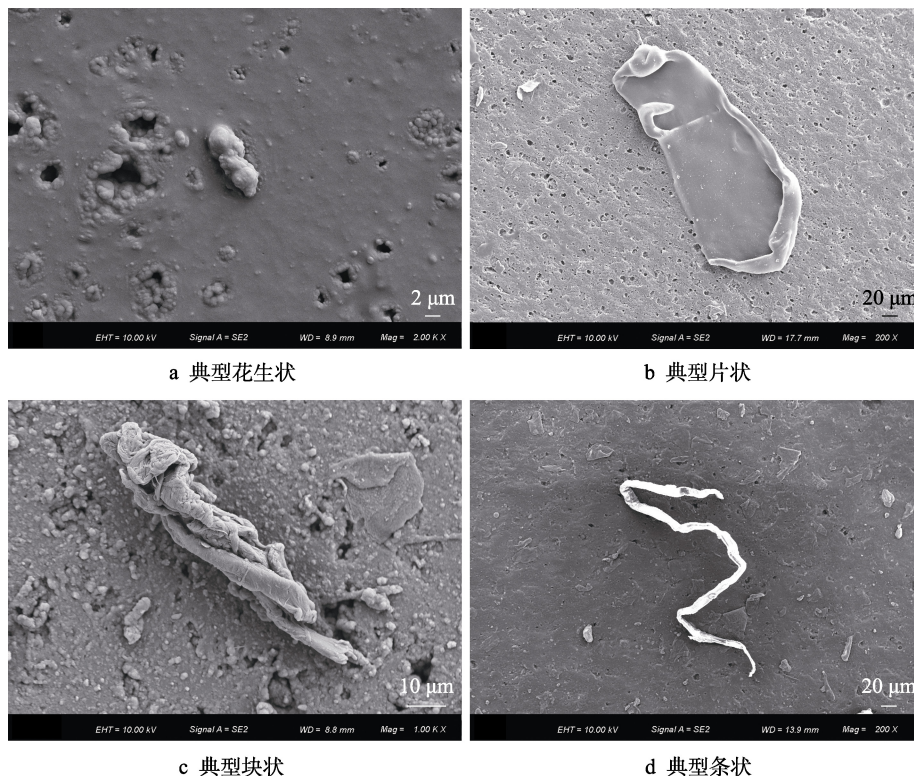


图 6 磨屑微观形貌

Fig.6 Microscopic image of wear debris: a) typical peanut shape; b) typical flake; c) typical block; d) typical strip

### 3 结论

1) 随着载荷的增加, 无织构 EPDM 的摩擦系数有微小的下降趋势, 织构化处理的 EPDM 的摩擦系数先减小、后增大。载荷的增加都会导致两种 EPDM 的磨损量增加, 但织构 EPDM 的增加速率较快。在压缩率为 17.5% 时, 织构试样与金属对偶副的摩擦性能达到最优; 在 25.1% 的压缩率下, 织构的引入导致 EPDM 的摩擦动力学特性大幅度下降。

2) 无织构试样在低载荷下主要以腐蚀磨损为主, 高载荷下以粘着磨损为主。低载荷下, 织构可以减小液压油带来的腐蚀磨损和大面积的粘着磨损, 并可以储存磨屑, 达到润滑减磨的效果。在压缩率为 17.5% 时, 储屑性能最好, 表面粗糙度最低。在高载荷下, EPDM 织构化后会产生应力集中, 导致磨损过程中表面粗糙度大幅度增加, 产生典型的磨粒磨损花纹, 对摩擦表面造成极大损伤。

3) 无织构试样的磨屑类型主要为腐蚀磨损和粘着磨损产生的花生状和片状磨屑。织构试样在低载荷下多为块状微小磨屑, 高载荷下主要为条状切削类磨屑, 说明织构已被严重破坏, 不能达到储屑减磨的效果。

### 参考文献:

- [1] TROUFFLARD J, LAURENT H, RIO G, et al. Temperature-dependent modelling of a HNBR O-ring seal above and below the glass transition temperature[J]. Materials & design, 2018, 156: 1-15.
- [2] IMIELA M, ANYSZKA R, BIELIŃSKI D M, et al. Effect of graphite and common rubber plasticizers on properties and performance of ceramizable styrene-butadiene rubber-based composites[J]. Journal of thermal analysis and calorimetry, 2019, 138(4): 2409-2417.
- [3] HAN Quan, CHEN Hai-yang, YANG Wen-cong, et al. Analysis of reciprocating O-ring seal in the pressure-balanced oil-filled wet-mate electrical connectors for underwater applications[J]. Lubrication science, 2019, 31(7): 335-345.
- [4] 赵亚磊. 金属橡胶密封件往复轴动密封性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
ZHAO Ya-lei. Metal rubber seal research on reciprocating shaft sealing performance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [5] 张宗华, 隋明丽, 杜少光, 等. 航空往复型密封件性能评价技术研究[J]. 液压气动与密封, 2016, 36(12): 27-29.  
ZHANG Zong-hua, SUI Ming-li, DU Shao-guang, et al. Research on performance evaluation technology of reciprocating seal for aviation[J]. Hydraulics pneumatics & seals, 2016, 36(12): 27-29.

- [6] 尹克里, 陈广志, 陈真炎, 等. 航空航天液压泵轴封的动态与静态密封故障研究[J]. 液压气动与密封, 2008, 28(6): 55-57.  
YIN Ke-li, CHEN Guang-zhi, CHEN Zhen-yan, et al. Study on sealing fails of rotary shaft seal under static and dynamic states for aviation & space hydraulic pumps[J]. Hydraulics pneumatics & seals, 2008, 28(6): 55-57.
- [7] 沈明学, 郑金鹏, 孟祥铠, 等. 往复轴封氟橡胶 O 型圈微动摩擦学特性[J]. 机械工程学报, 2015, 51(15): 39-45.  
SHEN Ming-xue, ZHENG Jin-peng, MENG Xiang-kai, et al. Fretting characteristics of fluorine rubber O-ring for reciprocating shaft seal[J]. Journal of mechanical engineering, 2015, 51(15): 39-45.
- [8] WANG Xiao-lei, ADACHI K, OTSUKA K, et al. Optimization of the surface texture for silicon carbide sliding in water[J]. Applied surface science, 2006, 253(3): 1282-1286.
- [9] SUH N P, MOSLEH M, HOWARD P S. Control of friction[J]. Wear, 1994, 175(1-2): 151-158.
- [10] PANG Ming-hua, NIE Yong-fang, MA Li-jie. Effect of symmetrical conical micro-grooved texture on tool-chip friction property of WC-TiC/Co cemented carbide tools [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2018, 99(1-4): 737-746.
- [11] XING You-qiang, DENG Jian-xin, WANG Xing-sheng, et al. Effect of laser surface textures combined with multi-solid lubricant coatings on the tribological properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$  ceramic[J]. Wear, 2015, 342-343: 1-12.
- [12] SONG Hui, JI Li, LI Hong-xuan, et al. Superlow friction behavior of surface-textured a-C: H film in water environments[J]. Tribology transactions, 2015, 58(5): 867-874.
- [13] CHEN Ping, LIU Xiao-jie, HUANG Ming-ji, et al. Numerical simulation and experimental study on tribological properties of stamping die with triangular texture[J]. Tribology international, 2019, 132: 244-252.
- [14] 闫彩, 王建青, 黎相孟, 等. 微凹坑分布密度对缸套摩擦润滑性能影响规律[J]. 机械设计与制造, 2019(2): 146-149.  
YAN Cai, WANG Jian-qing, LI Xiang-meng, et al. Influence of micro-dimple distribution density on friction lubrication performance of cylinder liner[J]. Machinery design & manufacture, 2019(2): 146-149.
- [15] YANG Xiao, PENG Xu-dong, MENG Xiang-kai, et al. Thermo-elasto-hydrodynamic analysis of triangular textured mechanical face seals[J]. Journal of Zhejiang University—Science A, 2019, 20(11): 864-881.
- [16] 王新宇, 张帅拓, 刘建, 等. 表面织构对管道内壁碳基涂层润湿性与摩擦学性能影响[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(1): 86-94.  
WANG Xin-yu, ZHANG Shuai-tuo, LIU Jian, et al. Effect of surface texture on wettability and tribological properties of carbon-based coatings on the inner surface of pipes [J]. Tribology, 2021, 41(1): 86-94.
- [17] 王国荣, 廖代胜, 钟林, 等. 沟槽形表面织构对柱塞密封副摩擦性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(12): 165-173.  
WANG Guo-rong, LIAO Dai-sheng, ZHONG Lin, et al. Effect of groove-like surface texture on friction performance of plunger seal pair[J]. Surface technology, 2019, 48(12): 165-173.
- [18] 赵帅, 王晓雷. 高分子材料机械密封磨损特性及表面织构的影响[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(6): 761-767.  
ZHAO Shuai, WANG Xiao-lei. The effects of surface texture on the wear properties of mechanical seals made of metal and polymers[J]. Tribology, 2015, 35(6): 761-767.
- [19] ZHANG Bo, HUANG Wei, WANG Jing-qiu, et al. Comparison of the effects of surface texture on the surfaces of steel and UHMWPE[J]. Tribology international, 2013, 65: 138-145.
- [20] 王焕杰, 刘正林, 邹力. 表面织构布置方式对高分子材料摩擦磨损的影响[J]. 润滑与密封, 2018, 43(2): 6-11.  
WANG Huan-jie, LIU Zheng-lin, ZOU Li. Influence of surface texture layout on friction and wear of polymer materials[J]. Lubrication engineering, 2018, 43(2): 6-11.
- [21] 何佳欢. AIM 核壳结构改性剂的结构设计及其增韧无定型聚合物增韧机理[D]. 长春: 长春工业大学, 2020.  
HE Jia-huan. Preparation of core-shell AIM and its mechanism in toughening amorphous polymer[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2020.
- [22] ZHANG S W. State-of-the-art of polymer tribology[J]. Tribology international, 1998, 31(1-3): 49-60.
- [23] 吕仁国, 李同生, 黄新武. 不同速度下丁腈橡胶摩擦特性[J]. 合成橡胶工业, 2002, 25(2): 101-103.  
LÜ Ren-guo, LI Tong-sheng, HUANG Xin-wu. Study on tribological behavior of NBR under variable velocity[J]. China synthetic rubber industry, 2002, 25(2): 101-103.
- [24] 孔亚彬, 沈明学, 张执南, 等. 橡胶 O 形圈/不锈钢配副往复摩擦生热特性[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(11): 1352-1358.  
KONG Ya-bin, SHEN Ming-xue, ZHANG Zhi-nan, et al. Thermal characteristics of reciprocating friction of rubber O-ring against stainless steel surface[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(11): 1352-1358.
- [25] 彭旭东, 阙刚, 沈明学, 等. 橡胶材料耐液体介质老化与摩擦学特性研究进展[J]. 润滑与密封, 2018, 43(3): 1-10.  
PENG Xu-dong, QUE Gang, SHEN Ming-xue, et al. State-of-the-arts on aging and tribological properties of rubber-like materials in liquid medium[J]. Lubrication engineering, 2018, 43(3): 1-10.
- [26] 刘思思, 刘强, 刘金刚, 等. 表面微织构化石墨涂层对铝合金表面的协同减摩机理研究[J]. 表面技术, 2019, 48(8): 29-38.  
LIU Si-si, LIU Qiang, LIU Jin-gang, et al. Synergistic antifriction mechanism of surface micro-textured graphite coating on aluminum alloy surface[J]. Surface technology, 2019, 48(8): 29-38.
- [27] 刘莹, 陈垚, 高志, 等. 三元乙丙密封材料不同工况下的摩擦性能[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(5): 461-465.  
LIU Ying, CHEN Yao, GAO Zhi, et al. Friction performance of EPDM used for seals in different working conditions[J]. Tribology, 2010, 30(5): 461-465.
- [28] 郑金鹏, 沈明学, 孟祥铠, 等. 机械密封用 O 形橡胶密封圈微动特性[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(6): 856-862.  
ZHENG Jin-peng, SHEN Ming-xue, MENG Xiang-kai, et al. Fretting characteristics of the rubber O-ring for a smechanical seal[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2014, 48(6): 856-862.