

Progress of Friction Reduction and Wear Resistance of Textured Surface

Jianwen Li

BYD Auto Industry Company Limited, Shenzhen, Guangdong, 518122, China

Abstract

Reducing the power consumption losses in friction pairs is crucial for energy-efficient power equipment. The design and manufacturing capabilities of high-efficiency friction pairs are key factors in determining their performance under extreme conditions. Surface texturing has been proven effective in reducing resistance, improving sealing, and enhancing wear resistance in friction pair components, making it a valuable technical means for increasing equipment's added value and extending its service life. This paper introduces the concept and classification principles of surface texturing, outlines key research progress and technological innovations in the field, provides texture design guidelines for various application scenarios, and reveals the friction reduction and wear resistance mechanisms of textured friction pair surfaces. It offers valuable fundamental theories for evaluating the performance of friction pairs in service and opens up new research perspectives for improving the efficiency of power equipment.

Keywords

surface texture; friction and wear; lubrication; bionic structure

结构化表面减摩抗磨的研究进展

黎健文

比亚迪汽车工业有限公司, 中国 · 广东 深圳 518122

摘要

减小摩擦副的功耗损失对节能型动力装备具有重要意义, 高效摩擦副的设计与制造水平是决定其在极端工况下服役性能的关键。表面织构已被证实可实现摩擦副零部件的减阻、密封、抗磨等功能, 是提高装备附加价值和延长设备寿命的有效技术手段。论文通过介绍表面织构的概念和原理分类, 概述该领域的关键研究进展和新技术创新, 提供不同使用场景的织构设计准则, 揭示结构化摩擦副表面的减摩抗磨机理, 为摩擦副服役性能评估提供有价值的基础理论, 开拓动力装备效率提升的研究新思路。

关键词

表面织构; 摩擦磨损; 润滑; 仿生结构

1 引言

随着科技的不断发展, 汽车、航空航天、能源电力等领域对设备性能的要求越来越高, 导致摩擦磨损带来的能量损失和器件失效问题愈发显著。在机械设备运转中, 约 1/3 的一次性能源被用于克服各类摩擦, 造成巨大的能耗浪费。因此降低摩擦能耗是发展绿色新质生产力的必要条件。以表面织构为代表的新型摩擦副表面是应对未来高效设备挑战的技术路线之一。对表面织构开展深入研究具有重要意义, 该类表面通过对油膜和磨屑的控制实现摩擦配合副的非直接接触, 可改善摩擦界面易形成边界润滑或者干摩擦等不足。论文综述了表面织构的概念与作用机理及其在典型摩擦副零件中的实际应用。

2 表面织构的概念

传统的摩擦学领域认为光滑表面具有更小的摩擦系数, 从而具有比粗糙表面更优的摩擦学性能。然而, 近年来的研究表明, 在材料表面设计加工特定规律的结构能够改善摩擦副的界面磨损和润滑行为。特别地, 研究人员对于这类结构的设计灵感大多来自大自然, 即开发基于仿生学的结构, 如鲨鱼表面肋条结构和树蛙的脚底。鲨鱼皮表面的肋条结构能为其在水中提供较低的运动阻力, 使微生物难以附着在其表面, 因此在材料表面设计类鲨鱼皮肋条结构能够实现减阻和防污功能。树蛙脚底具有多边形微细结构, 能使其分泌的黏液在足底传递, 从而增强其与植物或者墙壁的附着力。在研究初期阶段, 这种特定功能的微细特征结构被称为微小不规则体。在后续技术发展过程中, 学术界逐渐将这种材料表面具有一定形状、尺寸和分布规律的表面特征结构称为表面织构, 典型的为凹坑点阵和沟槽阵列等, 如图 1 所示^[1,2]。

【作者简介】黎健文 (1982-), 男, 中国广东江门人, 本科, 工程师, 从事热能与动力工程研究。

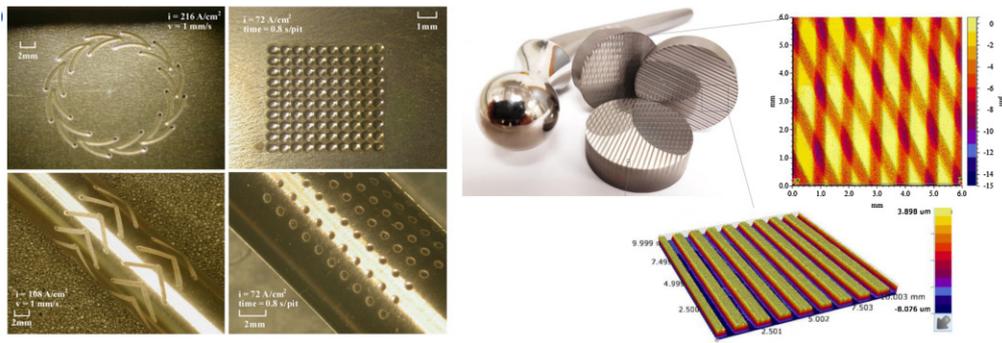
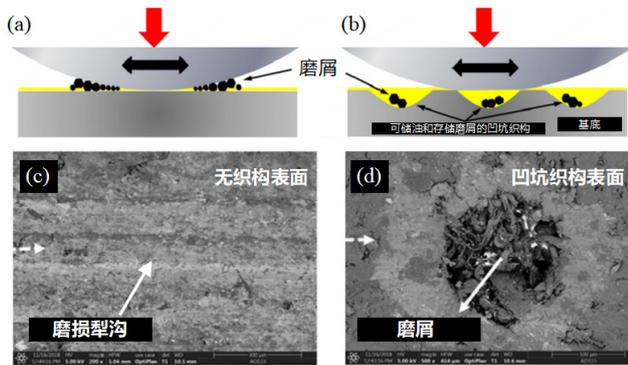


图 1 多样化的表面织构

3 表面织构的减摩抗磨原理

如图 2 所示，表面织构减摩润滑的原理主要在于 [3,4]：

①空腔位置区域可以在线捕获由于磨损产生的磨屑，从而减少刮伤和磨粒磨损。②织构内部可以实现储油功能，在油膜被破坏时能充当二次油源，有利于连续油膜的保持与形成，从而避免摩擦副间的边界润滑状态转变成干摩擦。③在油润滑工况下，有利于织构内液体润滑剂的微循环，产生局部流体动压效果，形成具有一定刚度的油膜，提高摩擦界面的油膜承载力，同时也能延长油膜寿命。形成的全流体密封带能避免配合副的固-固接触，相同条件下具有比直接接触的配合副更低的摩擦力矩，从而减小界面磨损。此外，与平坦无织构表面相比，织构化表面能减小与对磨配合副的接触面积，减小了界面的相互作用，降低接触面间的粘附力，从而提高表面耐久度。同时，微织构的存在允许更多空气进入摩擦副界面，从而增强工件与空气间的热传导效应，有利于摩擦副之间由于持续滑动而产生的摩擦热的散热。



(a-b) 织构对摩擦副界面的影响

(c-d) 织构实现储存磨屑的扫描电子显微图像

图 2 表面织构改善摩擦性能机理示意图

4 表面织构的几何学设计

织构的形状会对油膜的状态，如油膜的连续性、油膜厚度和油膜局部承载力等造成影响，从而影响配合副界面的摩擦性能。圆形凹坑由于具有加工相对简易的特点，被广泛应用于各类织构化表面。然而，从性能提升的角度分析，

圆形凹坑有时并不能满足工程需求。为此，学术界对异形的凹坑织构也展开了研究。例如在工件表面加工出长轴垂直于滑动方向的椭圆形凹坑，其具有比圆形凹坑更强的流体动压力，但椭圆形凹坑的长轴和短轴的尺寸比例过大时则会造成更大的接触应力，导致油膜完整性被破坏，形成更多磨屑。Zhang 等 [5] 提出遗传算法来模拟生物进化过程，用以优化织构形状，相比圆形凹坑，具有较大周长的子弹头和鱼形凹坑具有较优的油膜承载力和摩擦系数，但不利于接触应力的均匀分布，因此不适用于往复摩擦。需要指出的是，不恰当的表面织构设计会对使用性能造成不利影响。例如，凹坑的深度过大会降低基底的承载能力，使其更易失效；凹坑的密度过大会破坏基底材料的连续性，导致耐磨性降低。此外，开发不同形状凹坑组合的复合织构阵列也是提升摩擦学性能的途径，利用优选的形状可以实现复合收敛楔的作用，能够最大限度发挥流体动压效应。

微沟槽及其阵列也是常见的织构类型。黄仲等 [6] 在 40Cr 材料表面上加工出类蚯蚓体表结构的沟槽阵列织构，仿真结果表明特定范围内的织构宽度和深度能够在织构内产生明显的流体动压效应，从而形成更大的油膜承载力，而当织构深度和宽度过大时，由于流体流动距离增加，会弱化流体动压效应。进一步对沟槽阵列织构进行摩擦磨损试验，在最优织构参数条件下其摩擦系数约为无织构时的 57%。Wang 等 [7] 研究了不同取向的直线沟槽阵列织构对微动磨损的影响，结果表明，相比于平行和 45° 夹角，垂直于摩擦方向的沟槽织构可以避免磨屑从界面接触区域溢出。需要指出的是，相比于凹坑织构，沟槽织构中由于润滑油更易在内部流动，从而影响摩擦配合副在接近织构特征时累积的流体压力，此类现象在沟槽方向与滑动摩擦方向一致时更明显，因此通常与滑动摩擦方向一致的沟槽织构其摩擦性能的提升不明显。

5 表面织构的应用实例

目前表面织构多用于高接触应力和高转速的摩擦副中，特别是易面临乏油情况的配合副，如轴承。谢自奇等 [8] 在滚动轴承内圈的沟道中心两侧制备了梳齿状织构阵列，利用织构储存油液的积极作用，改善了润滑油在工作过程中的侧

泄,提升了轴承表面接触时的润滑性能,降低了系统启动时轴承表面的摩擦力矩,例如在转速 2856 r/min、80N 载荷的工况下,结构化表面的摩擦力矩比无结构表面降低约 50%。同时,结构表面的润滑油液能够降低接触界面由于摩擦热导致的轴承温升,最优时实现了 9% 温度降低率,有利于提高其服役寿命。此外,以斜盘式柱塞泵中的配流副/缸体摩擦副为代表的液压元件也是典型的表面结构化应用案例,能解决其摩擦大、响应慢和服役寿命短等问题。特别地,在配流盘表面构建微细结构,能够提升低压吸油区油膜的承载能力,形成补偿高压区的偏载力矩,减小高压区的压紧力矩,从而平衡整体受力。Zhang 等^[9]将微结构引入电动静液压执行器中的轴向柱塞泵中的配流盘,如图 3 所示,结构具有减磨作用,并且结构所产生的水动压效应可以减小缸体的倾斜角度,这种协同效应提高了能量利用率,在 10000r/min 最大转速和 28MPa 最大出口压力条件下,结构化配流盘/缸体摩擦副的机械效率和容积效率分别提高了 2.6% 和 1.4%,减少了轴向柱塞泵的能耗损失。同时,表面结构还能改善润滑介质的输送转运能力,将其应用于采油液力马达等液力驱动装置时能有效降低启动时的摩擦阻力矩。

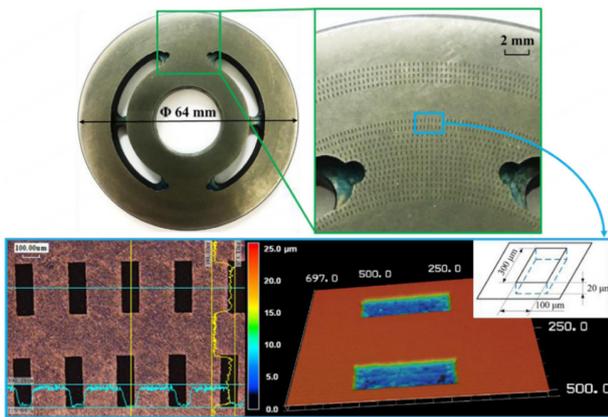


图 3 应用于轴向柱塞泵中的结构化配流盘及其微观结构

6 结语

表面结构的形式多样、多原理协同效应显著,在摩擦传动、润滑、密封等具有高品质、高性能要求的动力装备领

域中得到了愈发广泛的应用。因此,深入研究结构化表面在高转速、高载荷等工况下的极端性能、开发基于摩擦副结构化表面的机械系统、推进结构化表面设计与制造的产业化应用,将是未来该领域科学和工程主导的发展方向。未来,表面结构化将进一步优化数学建模、结构模型仿真等以理论设计为主导、减少试错成本的加工方法。同时,为了低成本地实现更高精度结构的设计与制造,如纳米尺寸的结构单元,需要在明确摩擦过程中界面机理的基础上建立更精准的摩擦磨损结果预测仿真模型。

参考文献

- [1] Natsu W, Ikeda T, Kunieda M. Generating complicated surface with electrolyte jet machining[J]. Precision Engineering, 2007, 31: 33-39.
- [2] Melentiev R, Fang F. Fabrication of micro-channels on Co-Cr-Mo joints by micro-abrasive jet direct writing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 667-677.
- [3] Amanov A, Sasaki S. A study on the tribological characteristics of duplex-treated Ti-6Al-4V alloy under oil-lubricated sliding conditions[J]. Tribology International, 2013, 64: 155-163.
- [4] Li S, Zhang N, Yang Z, et al. Tailoring friction interface with surface texture for high-performance ultrasonic motor friction materials[J]. Tribology International, 2019, 136: 412-420.
- [5] Zhang H, Hua M, Dong G, et al. Optimization of texture shape based on genetic algorithm under unidirectional sliding[J]. Tribology International, 2017, 115: 222-232.
- [6] 黄仲,林秉敬,李孝钦.高副接触下沟槽形结构对40Cr表面摩擦性能的影响[J].机床与液压,2023,51:132-138.
- [7] Wang J, Xue W, Gao S, et al. Effect of groove surface texture on the fretting wear of Ti-6Al-4V alloy[J]. Wear, 2021, 486-487: 204079.
- [8] 谢自奇,刘成龙,郭峰,等.激光诱导梳齿沟槽阵列表面的润滑增效[J].轴承,2024(5):92-99.
- [9] Zhang J, Chen Y, Xu B, et al. Effect of surface texture on wear reduction of the tilting cylinder and the valve plate for a high-speed electro-hydrostatic actuator pump[J]. Wear, 2018, 414-415: 68-78.