

# 轴向柱塞泵滑靴副服役损伤与防护的研究进展

王强<sup>1</sup>, 王焕焕<sup>1</sup>, 袁烁<sup>1</sup>, 王杰<sup>1</sup>, 林乃明<sup>1</sup>, 刘志奇<sup>2</sup>, 曾群锋<sup>3</sup>, 吴玉程<sup>4</sup>

(1.太原理工大学 材料科学与工程学院, 太原 030024; 2.太原科技大学 机械工程学院, 太原 030024; 3.西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049; 4.合肥工业大学 有色金属与加工技术国家地方联合工程研究中心, 合肥 230009)

**摘要:** 轴向柱塞泵是液压传动系统的核心动力元件, 广泛应用于诸多工程领域。滑靴副是轴向柱塞泵中 3 对关键摩擦副 (滑靴副、配流副和柱塞副) 之一, 显著影响柱塞泵的服役安全。滑靴副的磨损是引起柱塞泵失效的主要原因, 开展滑靴副的服役损伤与防护措施研究对柱塞泵向高速、高压化技术发展有着重要意义。概述了轴向柱塞泵的基本工作原理; 介绍了滑靴副间隙润滑油膜的形成和 3 大作用 (润滑、密封和承载), 以及油膜特性测量方法和影响因素; 阐述了滑靴副的磨损机理、磨损影响因素及磨损状态评估方法; 基于滑靴副的油膜特性及磨损机理, 着重讨论了滑靴副延寿设计方法和失效防护措施, 如优化滑靴副材料匹配、结构的延寿设计方法, 以及利用表面织构化、固体润滑涂层改善滑靴副表面摩擦学性能的表面改性方法。表面织构化的原理是利用微纳米加工手段在滑靴副材料表面加工出具有一定形状、尺寸且排列规则的几何阵列来收集磨屑、储存润滑介质或通过产生流体动压效应来增强润滑进而减小磨损, 固体润滑涂层则是通过改变基体表面的组织结构来提高滑靴副表面的承载力和增强滑靴副的自润滑性能。最后对轴向柱塞泵滑靴副未来的研究方向提出了展望。

**关键词:** 轴向柱塞泵; 滑靴副; 油膜; 磨损; 表面织构; 固体润滑涂层

**中图分类号:** TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)06-0126-14

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.06.012

## Research Progress on Service Damage and Protection of Slipper-swashplate Pairs of Axial Piston Pump

WANG Qiang<sup>1</sup>, WANG Huan-huan<sup>1</sup>, YUAN Shuo<sup>1</sup>, WANG Jie<sup>1</sup>, LIN Nai-ming<sup>1</sup>,  
LIU Zhi-qi<sup>2</sup>, ZENG Qun-feng<sup>3</sup>, WU Yu-cheng<sup>4</sup>

(1. College of Material Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

收稿日期: 2022-04-11; 修订日期: 2022-06-05

Received: 2022-04-11; Revised: 2022-06-05

基金项目: 国家自然科学基金 (51501125, 51975396); 山西省应用基础研究计划 (201901D111063); 山西省回国留学人员科研资助项目 (2020-035)

Fund: the National Natural Science Foundation of China (51501125, 51975396); Natural Science Foundation of Shanxi Province (201901D111063); Research Project Supported by Shanxi Scholarship Council of China (2020-035)

作者简介: 王强 (1996—), 男, 硕士生, 主要研究方向为金属材料表面改性。

Biography: WANG Qiang (1997-), Male, Postgraduate, Research focus: surface modification of the metallic materials.

通讯作者: 林乃明 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为金属材料表面改性。

Corresponding author: LIN Nai-ming (1981-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: surface modification of the metallic materials.

通讯作者: 吴玉程 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为金属材料。

Corresponding author: WU Yu-cheng (1962-), Male, Doctor, Professor, Research focus: metallic materials.

引文格式: 王强, 王焕焕, 袁烁, 等. 轴向柱塞泵滑靴副服役损伤与防护的研究进展[J]. 表面技术, 2023, 52(6): 126-139.

WANG Qiang, WANG Huan-huan, YUAN Shuo, et al. Research Progress on Service Damage and Protection of Slipper-swashplate Pairs of Axial Piston Pump[J]. Surface Technology, 2023, 52(6): 126-139.

2. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;  
3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. National-Local Joint Engineering  
Research Centre of Nonferrous Metals and Processing Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**ABSTRACT:** As a pivotal power unit in the hydraulic transmission system, the axial piston pump plays an important role in numerous engineering fields. Slipper-swashplate pairs are one of the three key friction pairs (slipper-swashplate pairs, cylinder-valve plate pairs, and piston-cylinder pairs) in axial piston pump, which significantly affects the service safety of piston pump. The wear of slipper-swashplate pairs is the main reason for the failure of piston pump. It is of great significance to study the service damage and protection measures of slipper-swashplate pairs for the development of piston pump to high speed and high pressure technology. In this review, the basic working principle of axial piston pump was firstly presented in brief. Secondly, the formation and three functions (lubrication, sealing and bearing) of the lubricating oil film in the clearance of slipper-swashplate pairs as well as the measurement method and affecting factors of oil film characteristics were systematically elaborated. Then, the wear mechanism, wear affecting factors and wear state evaluation method of slipper-swashplate pairs were expounded. Based on the oil film characteristics and wear mechanism of slipper-swashplate pairs, the design method for life extension and failure protection measures of the slipper-swashplate pairs were emphatically explored, such as the design method of optimizing the material matching and prolonging the life of the slipper-swashplate pairs, and the surface modification method of improving the tribological properties of the slipper-swashplate pairs surface by surface texturing and solid lubrication coating. Surface texturing was to process a geometric array with a certain shape, size and regular arrangement on the surface of the slipper-swashplate pairs material by micro-nano machining means to collect wear debris, store lubricating medium or produce hydrodynamic effect to enhance lubrication and reduce wear, while solid lubrication coating improved the bearing capacity of the slipper-swashplate pairs surface and enhanced the self-lubricating performance of the slipper-swashplate pairs by changing the organizational structure of the substrate surface. Finally, the future research direction of slipper-swashplate pairs in axial piston pump was prospected.

**KEY WORDS:** axial piston pump; slipper-swashplate pairs; oil film; wear; surface texture; solid lubrication coating

动力传送方式有液压传动、电力传动、气动传动、机械传动等, 液压传动依靠密封容器内受静压力的液体传送动力, 也是进行能量控制和传递的一种重要传动方式<sup>[1-3]</sup>。液压传动的动力源是液压泵, 其性能与可靠性在很大程度上决定了液压传动系统的能量转换效率<sup>[4-5]</sup>。轴向柱塞泵是液压泵的一种, 其工作原理如下: 当输入轴转动时, 泵缸体与柱塞做周向转动, 柱塞一端连接滑靴始终与斜盘接触, 柱塞沿轴向做往复运动, 当缸体有效容积逐渐增大时, 从配流盘低压进液口吸入液压介质, 完成吸液过程的标准是吸液容积最大; 当缸体有效容积逐渐减小时, 通过配流盘高压出液口排出液压介质, 当达到设计排液容积最大时排液完成; 吸液和排液的交替过程实现了机械能和压力能之间的相互转换<sup>[6]</sup>。轴向柱塞泵因具有体积小、惯性小、传动平稳、易于实现过载保护等优点, 广泛应用于农机建筑和重型机械中, 其主要结构由斜盘、滑靴、柱塞、缸体、配流盘、主轴等组成, 图 1 为轴向柱塞泵结构示意图<sup>[7-11]</sup>。

轴向柱塞泵在运转过程中通过柱塞的往复运动引起柱塞腔容积变化从而实现高低压转换, 保持高水平的容积效率对摩擦副的密封性和润滑性有极高的要求, 然而轴向柱塞泵中摩擦副的密封与润滑通常又是自相矛盾的, 这就需要对其摩擦磨损性能进行研

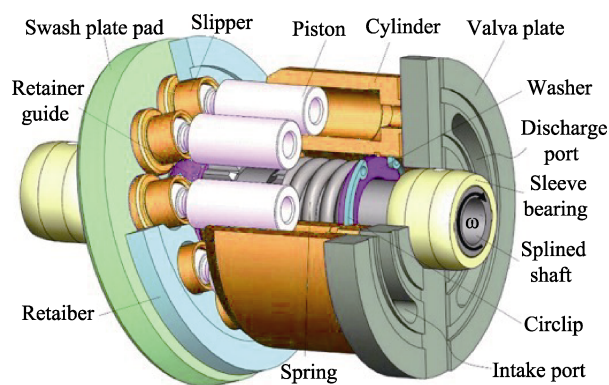


图 1 轴向柱塞泵结构示意图<sup>[11]</sup>

Fig.1 Schematic diagram for structure of axial piston pump<sup>[11]</sup>

究。泵的性能与寿命取决于关键摩擦副的耐磨性, 磨损会增加液压介质泄漏量, 缩短泵的使用寿命, 降低工作效率, 甚至造成重大人员伤亡<sup>[12]</sup>。研究表明, 磨损约占设备故障与失效的 80%<sup>[9]</sup>。柱塞泵中主要有 3 对关键摩擦副: 斜盘与滑靴组成的滑靴副<sup>[13]</sup>; 柱塞与缸体组成的柱塞副<sup>[14]</sup>; 缸体与配流盘组成的配流副<sup>[15]</sup>。滑靴副是柱塞泵中主要的传力部件, 其工况恶劣、苛刻, 长期工作在高速、高压、重载的状态下, 运动和受力复杂。润滑油膜破坏失效导致滑靴副磨损是造成柱塞泵故障的主要原因之一<sup>[16]</sup>。当前, 滑靴副的磨损

是限制柱塞泵向高压高速化、低噪声、长寿命和大容量发展的核心因素。因此,研究滑靴副油膜分布、厚度和润滑等特性,分析损伤机理及诱因,并基于滑靴副的磨损失效机理对其进行防护、优化及延寿设计,是研制高性能泵的重要技术手段<sup>[17-19]</sup>。轴向柱塞泵服役损伤与防护方法如表 1 所示。

表 1 轴向柱塞泵滑靴副服役损伤与防护方法  
Tab.1 Service damage and protection method of slipper-swashplate pairs of axial piston pump

Damage	Protection measures
The main form of damage failure: wear	Optimizing material pairing of slipper-swashplate pairs
The conditions of occurrence: dry friction, boundary lubrication and mixed lubrication	Improving the structural design of slipper-swashplate pairs
Influencing factors: temperature, rotation speed, outlet pressure, load, hydraulic medium, etc	Using of surface texture technology and solid lubricating coating technology
Evaluation methods: wear debris information, returning oil flow, surface vibration signals, etc	

本文主要针对制约滑靴副性能提升的润滑、密封与延寿设计等问题进行研究。介绍了柱塞泵的基本工作原理、滑靴副的油膜润滑特性、磨损分析及预测方法。着重总结了针对滑靴副的延寿设计方法与表面改性技术,并结合国内外相关技术的研究进展,展望了提升滑靴副性能的技术的发展趋势。旨在为轴向柱塞泵高速高压化发展提供设计优化和理论指导。

## 1 滑靴副油膜特性

当以液压油为液压介质的柱塞泵工作时,斜盘和滑靴之间会形成一层间隙油膜,可根据该油膜厚度与两运动表面粗糙度的不同将间隙油膜润滑分为厚膜润滑与薄膜润滑。厚膜润滑即润滑油膜的厚度大于两运动表面粗糙度之和,流体产生承载力承受全部的载荷,将运动表面完全隔离开,也称为完全润滑状态。薄膜润滑即润滑油膜厚度小于两运动表面粗糙度之和,膜厚介于完全润滑和干摩擦之间,油膜承载能力不足以完全隔离开两运动表面,通常也称为混合润滑状态或边界润滑状态。润滑油膜不能太厚也不能太薄,太厚的润滑油膜会破坏柱塞泵的密封性,增加泄漏量,降低容积效率;当润滑油膜太薄时,滑靴副容易发生过度磨损甚至出现“烧靴”现象,使泵的使用寿命缩短<sup>[20-21]</sup>。工作时,在不产生泄漏的情况下,厚膜润滑是一种理想的滑靴副润滑状态。

适宜厚度的间隙油膜具有 3 大主要作用:(1) 润滑,根据流体静压和动压原理,在滑靴副配对偶件相对运动和密封带内外压差的共同作用下,一定黏度的油液进入滑靴副间隙形成润滑油膜,将配对偶件隔离

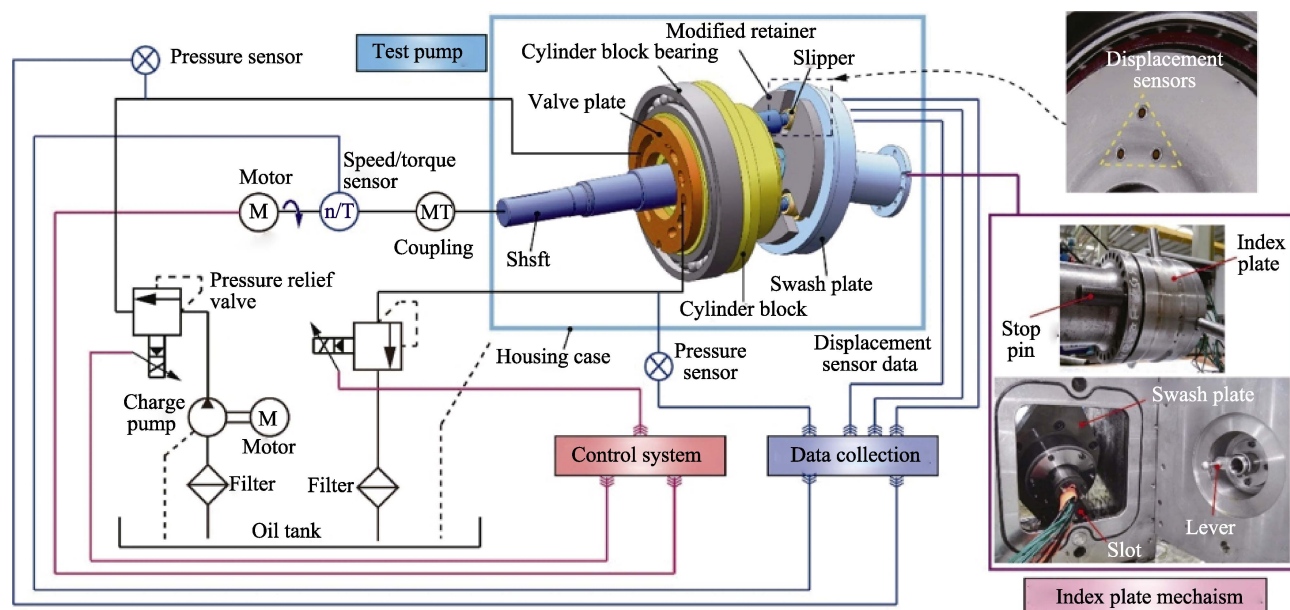
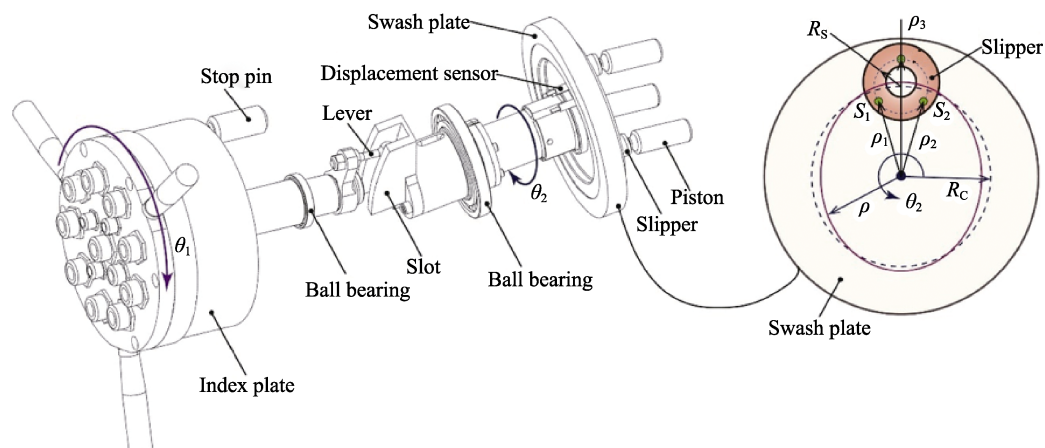
开;(2) 密封,利用间隙油膜的降压节流作用阻止柱塞腔内的油液向壳体泄漏,合理设计密封带可以大大降低摩擦副的泄漏量;(3) 承载,间隙油膜由动压效应、挤压效应和静压效应产生的支承力平衡外负载力<sup>[22]</sup>。

为了设计出更加合理的滑靴副,得到适宜厚度的间隙油膜,让其兼具优良的承载能力与润滑性能,同时还能有效阻止泄漏的发生,需要研究开发准确的油膜特性分析测试方法、平台及模型,利用动静压相结合的方法准确表述滑靴副间隙油膜运转周期内的瞬时特征及周期性特征;除此之外,还需验证哪些结构有助于油膜性能的提升,也需要开发先进、精准的性能预测方法。

间隙油膜的厚度场、温度场及压力场的分布与油膜形貌、流量及形变等是研究者重点关注的滑靴副油膜参数,对滑靴副的性能有重要影响,研究人员常采用实验、解析和数值分析 3 种方法进行研究<sup>[23]</sup>。

对间隙油膜进行研究的首要问题就是测试间隙油膜的性能参数。徐兵等<sup>[24-25]</sup>为了得到滑靴倾覆状态,基于三点确定一个平面的基本原理,巧妙通过三点处油膜厚度值实现了精准测量,利用 Matlab 搭建滑靴倾覆模型,采用 Newton 迭代法求解,提出了一种理想状态下的滑靴副油膜动态特性研究方法。李焕军等<sup>[21]</sup>提出油膜厚度双面六点测量法,该方法弥补了三测量精度不足的问题,将油膜厚度误差控制在 1  $\mu\text{m}$  以内。尽管类似对滑靴副油膜特性参数的测试方法研究不少,但大多数研究在测量结果的连续性方面都具有较大的局限性:(1) 一部分研究将传感器安装在斜盘上(斜盘固定,滑靴及缸体转动),该方案只能实现油膜特征参数的定点测量,很难获得运转全周期内的油膜特性参数;(2) 另一部分实验研究将传感器安装在滑靴上(斜盘转动,滑靴及缸体固定),虽实现了滑靴副油膜特性的连续测量,但滑靴的自转及公转受到限制,偏离了实际工况,很难获得拟实工况的真实数据<sup>[22]</sup>。

为了更加真实有效地连续测量滑靴副全周期内的油膜特性数据,Chao 等<sup>[26-28]</sup>设计了新的滑靴测量试验台,如图 2 所示。试验台的组成主要包括新型三活塞测试泵、驱动电机、分度盘、控制系统和数据记录系统。驱动电机通过联轴器带动测试泵转动,当测试泵运转达到稳定状态后,通过旋转分度盘基于 NI DAQ 模块采集信号,利用 Labview 程序监控和记录数据,依次获得每个位置的膜厚信息,实现实际工况下滑靴油膜厚度多位置的实时测量。同理,也可安装压力传感器用以获得滑靴副油膜多位置压力场数据,结合压力传感器数据、位移传感器数据及滑靴的位置坐标变化还可测得滑靴的自旋转速信息<sup>[22]</sup>。分度盘结构示意图如图 3 所示( $R_s$  为传感器螺距半径; $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 、 $\rho_3$  为传感器的径向距离; $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  为传感器的位置; $R_c$  为传感器中心螺距半径; $\theta_1$  和  $\theta_2$  为旋转角; $\rho$  为滑

图 2 滑靴测量试验台<sup>[28]</sup>Fig.2 Test rig for measurement of slipper-swashplate pairs<sup>[28]</sup>图 3 分度盘结构示意图<sup>[28]</sup>Fig.3 Schematic diagram for structure of index plate<sup>[28]</sup>

靴中心点与斜盘中心的距离)。滚动轴承同时支承旋转斜盘和分度盘,使它们围绕各自并不重合的轴线旋转,斜盘的旋转轴线垂直于倾斜的斜盘表面,而分度盘轴线是水平的,当分度盘的旋转传递到旋转斜盘时,传感器位置实现可变调节。

在运转过程中油膜厚度不再是定值,而是随着转速、压紧力、油液温度、工作时间等而变化,滑靴副复杂的受力形式和运动方式产生的动压及挤压效应使滑靴副油膜微观特性更为复杂。胡纪滨等<sup>[29]</sup>利用仿真与试验研究发现,滑靴副油膜厚度受工作压力及转速的影响,随工作压力的增大而减小,随转速的增大而增加,增速趋势逐渐变缓,在低速高压时滑靴副处于混合润滑状态。Tang 等<sup>[30]</sup>利用集中参数法搭建了轴向柱塞泵滑靴副参数模型,发现挤压力和热楔轴承力是影响油膜厚度和承载力的主要因素。在高油温和高负载压力下,挤压力和热楔轴承力共同作用,油膜厚度随着压紧力的增加而减小,但承载能力增加。

但值得注意的是,在高转速下油膜厚度的迅速增加十分危险,因为会使油膜波动幅度增大,降低了滑靴副间隙油膜的承载能力。

适宜厚度的间隙润滑油膜是确保滑靴副平稳运转的重要保障之一。但是,尽管旋转滑靴副之间的界面被润滑,也同样面临损坏和失效问题<sup>[13]</sup>。当滑靴副油膜受到破坏,油膜厚度减小承载能力不足时,摩擦界面转变为混合润滑状态甚至干摩擦;当温度、压力及载荷等作用使滑靴副出现变形等情况时,滑靴副的运动及受力状态将更加复杂,摩擦磨损加剧,甚至出现失效故障。

## 2 滑靴副的磨损研究

### 2.1 磨损机理

在运转过程中,受倾覆力矩及载荷波动等因素的影响,当滑靴副间隙油膜承载能力不足以将斜盘与滑



靴完全隔离开时, 滑靴与斜盘部分接触而发生摩擦, 随着摩擦的加剧, 滑靴副材料表面出现损失, 造成磨损。严重的磨损会加剧滑靴副的泄漏, 导致容积效率下降, 使用寿命缩短, 是滑靴副破坏失效最常见、最主要的原因<sup>[23,31]</sup>。

不同润滑条件下滑靴副磨损示意图如图 4 所示。在干摩擦条件下, 滑靴材料与斜盘材料直接接触发生剧烈磨损, 产生的磨粒在滑靴副间隙产生二次破坏, 极易造成“烧靴”现象, 如图 4a 所示; 在边界润滑条件和混合润滑条件下, 润滑介质起到了一定的减摩作用, 此时滑靴副产生磨损主要是由于润滑介质不能完全把斜盘和滑靴分隔开, 工作中两材料表面仍有部分直接接触, 如图 4b 所示; 在流体润滑条件下, 润滑介质完全将斜盘与滑靴分隔开, 实现完全润滑, 此时滑靴副产生磨损主要是由于润滑介质中夹杂的其他摩擦副产生的磨粒对滑靴副材料表面碰撞冲击从而造成了轻微磨损, 如图 4c 所示。在工况条件下, 偏磨(内边缘磨损及外边缘磨损)是滑靴副最主要的磨损形式。滑靴外边缘磨损是由于倾覆力矩的作用使滑靴与斜盘存在微小夹角时发生了磨损; 内边缘磨损是由于滑靴底面产生了蝶形变形从而使内边缘微小凸起时发生了磨损<sup>[32]</sup>。

## 2.2 影响因素

滑靴副磨损受多种因素影响, 是典型的多因素、多场耦合作用的结果。由于目前无法实现滑靴副磨损量的实时测量, 导致预测磨损状态、探究磨损影响因素的难度较大。针对滑靴副磨损问题, 研究者多基于弹性流体动力润滑(Elasto-Hydrodynamic Lubrication, EHL)理论, 采用磨损理论分析<sup>[33]</sup>、仿真<sup>[34]</sup>和试验<sup>[35]</sup>的方法对滑靴副磨损影响因素展开研究<sup>[23]</sup>。

Ma 等<sup>[31]</sup>提出了一种基于 EHL 模型分析滑靴副磨损行为的方法, 分别研究了滑靴副转速、液压介质、出口压力及温度对磨损质量的影响。研究发现, 当转速从 1 000 r/min 上升至 5 000 r/min 时, 磨损率下降了 90%; 当出口压力从 21 MPa 变化至 30 MPa 时, 磨损率增加了 45%; 当温度从 30 °C 上升到 130 °C 时, 磨损率增加了 320%。究其原因发现, 磨损率的

变化主要是因为油膜厚度变化。当温度和出口压力增加时, 油膜厚度减小, 磨损加剧, 磨损率增大; 当转速升高时, 油膜厚度变大, 润滑效果增强, 磨损率降低。

刘思远等<sup>[36]</sup>在考虑滑靴副倾覆的基础上, 利用数值分析方法对润滑油膜承载特性方程进行了求解, 研究了强冲击载荷对滑靴副磨损的影响。研究发现, 滑靴副具有一定的抗冲击载荷磨损能力, 但当滑靴副所承受的冲击载荷和次数超过自身抗冲击载荷能力时, 强冲击载荷会加剧滑靴副的磨损。滑靴副底面磨损轮廓随强冲击载荷和冲击次数的增加而逐渐增大, 滑靴副磨损处油膜厚度及压力随磨损轮廓的增大而逐渐减小。

寇保福等<sup>[37]</sup>在高温干摩擦条件下基于 Rtec 摩擦磨损试验机研究了不同温度、载荷和转速对由 304 钢和陶瓷球组成滑靴副的摩擦学性能的影响规律, 并对滑靴副磨损体积、摩擦因数、磨痕截面曲线和表面形貌等实验参数进行了研究分析。结果发现, 在高温干摩擦条件下, 滑靴副的磨损体积随温度的升高先增后减, 随载荷的增大而逐渐增大, 随转速的增大先减后增; 在高温条件下, 滑靴副摩擦因数随载荷的增加而增加, 随温度及转速的增大而逐渐减小; 在高温条件下, 磨痕宽度、深度受转速影响, 且温度、载荷对磨痕深度影响显著。研究表明, 在温度、载荷、转速分别为 300 °C、50 N、75 r/min 时, 滑靴副减摩抗磨效果最好。

为了找到滑靴副减摩抗磨的最优工艺参数, 寇保福等<sup>[38]</sup>将工具钢球与 304 钢配副组成新的滑靴副, 通过设计正交试验研究了滑靴副的摩擦学行为。研究发现, 载荷、转速和磨痕半径对摩擦因数的影响相对显著, 且在载荷、转速、半径分别为 100 N、50 r/min、20 mm 时, 摩擦因数达到最小值。随后, 基于最优的正交试验结果, 又开展了控制变量实验, 研究表明, 磨损体积随载荷的增大先增后减, 在载荷为 50 N 时磨损体积最小, 为  $91.468 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ ; 磨损体积随转速的增大而逐渐增大, 在转速为 50 r/min 时最小, 为  $926.613 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ ; 载荷及转速对滑靴副磨痕的宽度和深度影响显著。

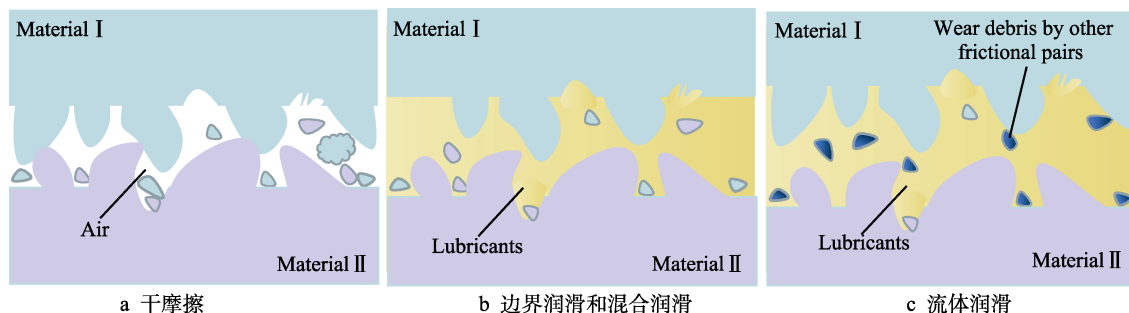


图 4 不同润滑条件下滑靴副磨损示意图

Fig.4 Schematic diagram for the wear of slipper-swashplate pairs under different lubrication conditions: a) dry friction; b) boundary lubrication and mixed lubrication; c) fluid lubrication

Haidak 等<sup>[13]</sup>基于滑靴材料的力学特性演变及摩擦学行为并结合实验测试提出了滑靴副损伤与失效模型, 利用仿真与试验相结合的方法对滑靴副界面摩擦磨损行为与载荷、润滑油膜(厚度、压力)和温度的关系进行了研究。研究发现, 滑靴副的磨损主要发生在铜合金滑靴材料的底面, 外部载荷与流体润滑介质承载能力的平衡对获得最小能量损失和最佳油膜厚度非常必要; 当转速不高时, 滑靴损伤对载荷敏感, 滑靴比斜盘更容易发生变形和破坏。

滑靴副磨损受多种因素影响, 这些影响因素可根据作用机理为 2 类: 一类(如温度、出口压力、转速等)是通过改变滑靴副油膜的承载能力, 进而影响滑靴副的磨损; 另一类(如冲击载荷等)是通过破坏滑靴副油膜的密封性以减小润滑效果, 从而增加滑靴副的泄漏, 造成滑靴副的磨损。滑靴副的磨损与滑靴副润滑介质有着密切的关系, 因此液压介质本身的性能对滑靴副的磨损也有着重要的影响。但由于滑靴副间隙与液压油室相通, 滑靴副间隙的润滑介质为液压油, 而液压油的选择要综合考虑影响泵性能的多种因素, 因此不能单单只考虑滑靴副的润滑性能而选择液压介质。现阶段轴向柱塞泵液压用油为 46 号液压油, 针对滑靴副润滑油种类的研究较少, 综合滑靴副的运动特征, 未来可在不损失泵的其他性能的情况下选择具有较好承载能力、抗温升和抗腐蚀的液压油<sup>[39]</sup>。

目前针对滑靴副磨损影响因素的研究大多都集中在单个或几个因素的定性分析中, 缺少有关滑靴副磨损寿命与影响因素的定量关系模型。仿真方法可以提高滑靴副磨损影响因素研究的效率和可靠性, 但复杂系统的仿真精度低, 进行斜盘与滑靴两体磨损研究时难以实现引入污染颗粒三体磨损的精准仿真分析。试验方法对滑靴副磨损影响因素的研究较为直观, 但对滑靴副的实际磨损工况模拟是一大难点<sup>[23]</sup>。

## 2.3 评估方法

除了上述对滑靴副磨损影响因素的研究, 也有学者探究了滑靴副磨损状态的预测方法。磨粒信息<sup>[40]</sup>、回流油量<sup>[41]</sup>、壳体振动<sup>[42]</sup>等特征信息常用于滑靴副磨损状态的预测及诊断。磨粒作为磨损的直接产物, 可通过几种检测方法实时测量<sup>[43-44]</sup>, 并精准估算磨粒数量及大小, 实现滑靴副磨损状态的判别。Li 等<sup>[40]</sup>开发了基于监测液压油中磨屑颗粒信息以预测滑靴副磨损剩余寿命的数值方法, 他们开发了一个磨粒生成模型, 通过将滑靴副整个接触区域划分为小区域, 基于蒙特卡罗方法(Monte Carlo, MC)模拟获得宏观压力分布下各个小区域的磨粒信息, 建立粗糙表面与磨粒特征之间的微观关系, 提出了一个基于 MC 采样的分区积分剩余寿命预测框架, 整合部分模型以获得用于整个系统的预测概率模型。该模型被证明是预测轴向柱塞泵极端工况下剩余使用寿命的一种可行

方法, 且与现有基于有限元仿真模拟磨损状态的方法和利用回油量评估磨损状态的建模方法相比, 其试验结果的准确性更优。但该数值模拟的方法需要大量准确的计算, 还需要对其进行简化, 如引入人工智能的办法来降低计算成本。

刘思远等<sup>[19]</sup>基于滑靴副的磨损破坏机理, 通过最小二乘法同时将泵回油流量、压力和壳体振动与滑靴副不同的磨损程度进行量化对应, 搭建了滑靴副磨损状态评估模型。通过试验研究发现, 该模型对滑靴副重度、中度、轻度和未磨损状态的评估准确率分别为 92.45%、95.72%、90.75%和 91.45%, 运用特征信息(回油流量、大小和壳体振动)对滑靴副磨损状态评估的结果具有很高的准确性。

滑靴副之间的磨损是性能退化的主要原因, 这一点已经得到了相关研究的证实<sup>[31,45]</sup>。在实际工况中, 轴向柱塞泵滑靴副的性能退化机理极其复杂, 尚且还没有确定的模型用以描述滑靴副性能退化路径。还有一些研究工作试图从油膜和接触原理的角度对模型进行改进设计<sup>[46-47]</sup>, 但模型和结果很少用于寿命预测。滑靴副真实磨损状态只能通过透射电子显微镜和原子力显微镜进行观察研究, 而不能用于组装好的产品上<sup>[40]</sup>, 这给滑靴副的磨损研究增加了困难。为了提高滑靴副耐摩擦磨损特性, 学者们主要从滑靴副材料选择与配对、优化滑靴结构和滑靴副材料表面改性等方面进行了大量研究。

## 3 延寿设计与表面改性

### 3.1 滑靴副材料的选择与配对

目前, 轴向柱塞泵中摩擦副主要有 3 种类型的材料配对方案: (1) 硬基材与硬基材配对; (2) 硬基材与软基材配对; (3) 硬基材与(硬+软)基材配对<sup>[48]</sup>。在实际工业生产应用中, 滑靴副目前多采用软-硬材料配对方案, 斜盘常采用球墨铸铁, 滑靴采用铜合金类软材料。在这种配对方案下, 滑靴副材料的导热性良好, 易于磨合, 抗黏着磨损, 但磨粒容易嵌入软材料, 从而加剧硬基材磨损, 使滑靴副耐磨粒磨损能力降低。

倪斯亮等<sup>[49]</sup>基于有限元分析法, 研究了 6 种不同配对材料(20CrMnTi 与 ZQAl10-4-4、20CrMnTi 与 ZQSn10-1、20CrMnTi 与 HMn58-3、38CrMoAlA 与 ZQSn10-1、38CrMoAlA 与 ZQAl10-4-4、38CrMoAlA 与 HMn58-3)组成的滑靴副在相同工况下的温度及应力变化, 并比对了不同材料的部分物理参数。研究发现, 不同的滑靴副材料配对组合对摩擦界面的温度、应力有显著影响; 选择弹性模量大且泊松比小的斜盘材料同泊松比小、密度及弹性模量合适的滑靴材料配对可以获得良好的接触应力分布, 从而减小滑靴副的形变, 使接触面的磨损降低; 选择导热率、比热和密度较大的斜盘材料能够显著改善滑靴底部温升,

及时将滑靴副累积的热量传递给外部介质,减少胶合磨损的发生。

肖朝昂等<sup>[48]</sup>利用 250 kW 综合液压试验台对由斜盘常用材料碳素结构钢( #45 )、球墨铸铁( QT500-7 )与滑靴常用材料多元复杂黄铜( ZY331608 )、铸造锡青铜( ZCuSn10Pb11Ni3 )相互配副组成的滑靴副在室温条件下进行了压力冲击试验研究。根据磨损失重结果,得出当滑靴副配对材料为 ZY331608 与 QT500-7 时磨损失重最小,ZY331608 的压缩强度、压溃强度及硬度没有出现断崖式下降的趋势,且摩擦表面更加光滑。

Wu 等<sup>[50]</sup>基于正交试验方法利用其开发的 FALAX6 型摩擦磨损试验机研究了 6 对滑靴副材料配对方案( 38CrMoAlA 与 1Cr18Ni9Ti、#45 与 1Cr18Ni9Ti、38CrMoAlA 与 ZQAl10-4-4、#45 与 ZQAl10-4-4、38CrMoAlA 与 ZQSn10-1、#45 与 ZQSn10-1 )的干摩擦学性能,并分析了材料物理性能对干摩擦界面温升的影响。结果表明,材料密度对摩擦因数的影响大于对泊松比和弹性模量的影响,滑靴应选择导热率高、密度低和比热容低的材料,斜盘材料应选择比热容高、密度高和导热率高的材料,且斜盘材料的硬度应大于滑靴材料的硬度。

苟佩佩等<sup>[51]</sup>从合金成分设计角度出发,基于团簇加连接原子模型对现役滑靴材料耐磨黄铜( C67300 )添加微量元素,对铸锭材料进行固溶、热轧、时效热处理,与 GCr15 材料进行配副,对其性能、微观组织及耐磨性进行研究。研究发现,耐磨铜合金主要由  $\alpha$ -Cu (FCC)、 $\beta$ -CuZn ( $B_2$ ) 和 3 种尺寸硬质颗粒  $\omega$ - $M_5Si_3$  ( $D_{8_8}$ ) 组成。固溶处理和热轧处理均提高了合金强度,时效处理有效改善了材料塑性,使其能够满足滑靴的强塑匹配要求,可以作为滑靴备选材料。冷轧态 C67300 与 GCr15 配副摩擦学性能良好,表现出较好的耐磨性。因此,可以通过合金成分设计并结合热处理工艺来提高材料的硬弹比及力学性能以实现与配副材料配合来提高滑靴副的摩擦学性能。

在连续长时间高速高压的苛刻工况下,滑靴副是柱塞泵中容易磨损的部件,需要研究者研究开发耐磨性配对良好的材料。值得注意的是,滑靴副的摩擦学性能指的是滑靴及斜盘材料配副的综合摩擦学性能,单单提升滑靴或斜盘材料的耐磨性未必会使滑靴副的耐磨性提升。滑靴副的性能不仅与材料选择及配对有关,与其结构也有着非常重要的关系。

### 3.2 滑靴副结构设计优化

合理的结构设计是确保滑靴副性能的重要保障之一,在轴向柱塞泵中,关键摩擦副的设计主要有剩余压紧力法、油膜挤压效应法和油膜压力反馈法<sup>[52-53]</sup>。而滑靴副的设计方法主要有静压支承法和剩余压紧力法等,目前,多采用静压支承法<sup>[54]</sup>。滑靴副的静压

支承设计方法即在柱塞腔与滑靴底部之间设有阻尼孔,其具有调节油膜厚度的作用,用以防止滑靴与斜盘直接接触而产生磨损,静压支承的设计方法对压力反馈起调节作用,能够有效保证滑靴副润滑油膜的连续性与可靠性;滑靴副的剩余压紧力设计方法即将柱塞腔内的高压液体介质引入到滑靴副的间隙之中,形成油膜润滑,滑靴受到的大部分压紧力与高压油液提供的反向支承力相抵消,剩余压紧力保持滑靴副不滑脱且间隙油膜保持一定厚度,由于剩余夹紧力的存在,在高速高压实际工况下,滑靴副容易发生磨损现象。有学者从滑靴的微结构、阻尼孔尺寸等方面出发对滑靴副进行改形设计及优化研究。

汤何胜等<sup>[55]</sup>在对滑靴副功率损失特性研究时发现,滑靴半径比尺寸与过流面积相关,伴随着滑靴半径比的增加,其密封带面积变大,黏性摩擦功率损失及液压介质泄漏量也随之增加。当滑靴半径比为 1.5~2.0 时,取较小值对黏性摩擦功率损失减小和滑靴泄漏量降低有利。滑靴副的阻尼孔长径比与其泄漏流量负相关,阻尼孔长径比增大能够有效抑制对压差流的泄漏功率损失,但油膜厚度减小会使黏性摩擦功率损失增加。当滑靴副阻尼孔长径比为 3.50~8.75 时,阻尼孔直径取值不能太小,否则将导致液体介质内能增加,温度升高,对滑靴副的功率损失降低产生不利影响。Tang 等<sup>[30]</sup>做了进一步优化,将滑靴半径比与阻尼孔的长径比分别缩小确定在 1.4~1.8、4~5 的范围内。

刘洪等<sup>[56]</sup>综合考虑了 EHL 效应与滑靴的倾斜问题,通过引入不同回程装置并兼顾其与滑靴间的相互作用,针对滑靴副油膜瞬态动态变化规律进行建模,探究了固定间隙回程机构与中心弹簧回程装置对滑靴副动态油膜特性的影响规律。研究发现,当滑靴高速运转时,在低压区会出现严重的倾斜,此时若采用中心弹簧回程装置以减缓倾斜程度,将会导致滑靴副在高低压区的油膜厚度减小。此时若采用固定间隙回程机构,滑靴副在高低压区的油膜厚度将不受影响,且能够使滑靴副在低压工作区的最小油膜厚度增加,滑靴倾斜程度得到显著改善。

王海吉等<sup>[57]</sup>分析了滑靴副内压降系数与阻尼孔类型和尺寸的关系,发现阻尼长孔有助于滑靴副内的压降,且压降系数主要受阻尼长孔的直径影响,当滑靴副阻尼孔直径小于 1 mm 时,具有显著压降效应。由于阻尼细长孔加工难度大,又提出了多段阻尼孔的结构,同时建立了流体力学模型和分段阻尼孔内的流态,并利用仿真验证了此类多段阻尼长孔及设计尺寸满足降压要求。

姜继海等<sup>[58]</sup>针对滑靴副倾覆和偏磨问题,建立了一种滑靴副润滑模型和耦合求解器,并基于动压效应原理,模拟了一种改善滑靴副润滑性能的微台阶结构,对不同参数的微台阶结构进行仿真对比研究,发

现这种微台阶的深度对滑靴副油膜压力、油膜厚度和微运动姿态的影响比宽度的大。因为微台阶有助于间隙油膜的形成, 改善滑靴副油膜的润滑性能, 能够有效防止滑靴副磨损, 柱塞泵的寿命和可靠性进一步提升。

经过多年的发展, 轴向柱塞泵的基本结构变化不大, 针对滑靴副的设计研究也都基本集中在滑靴、斜盘微结构改形及阻尼孔长径比的研究上。除此之外, 表面改性技术在改善材料表面摩擦性能方面独具优势。例如, 由于近年来仿生技术的发展, 表面织构技术和在材料表面制备固体润滑涂层的方法逐渐进入人们视野, 下面将详细介绍 2 种表面改性技术在滑靴副上的应用。

### 3.3 表面改性

#### 3.3.1 表面织构化处理

仿生学研究发现, 一些动、植物的非光滑表面具有良好的减阻抗磨作用。如表面并不光滑的鲨鱼皮肤能减小水对其的流动阻力; 凹凸不平的荷叶表面表现出超疏水、减阻及自清洁作用等<sup>[59]</sup>。受此启发, 材料学研究人员对生物的特殊表面进行研究, 从而材料表面织构技术被用于改善材料的表面性能<sup>[60]</sup>。表面织构化即在材料表面加工出具有特定排列规则的微、纳米尺寸的几何阵列, 并对表面织构参数进行优化, 优化后的织构表面能够使材料表面表现出减摩、减阻、减震、抗黏附和超疏水等性能<sup>[61]</sup>。常用的表面织构加工方法有激光加工、表面喷丸处理、压刻、3D 打印、纳米压痕和 LGD 技术等<sup>[62]</sup>。激光加工表面织构因效率高、适用范围广、环保等优点而被广泛使用<sup>[63]</sup>。针对表面织构改善材料表面摩擦学性能的研究主要集中在织构几何参数的研究和织构对运行工况的影响研究, 表面织构提高摩擦学性能的优化方法如图 5 所示。

研究者多使用数值、仿真和试验相结合的方法对表面织构化进行理论分析和试验研究。数值和仿真方法对表面织构化的研究一般是利用 Reynolds 方程和

N-S 方程建立理论模型来分析表面织构几何参数对材料摩擦学性能的影响。而试验方法则是通过对磨损量、摩擦因数、磨损体积等分析表面织构对材料摩擦学性能的影响。目前, 研究表明, 表面织构的减摩作用受运行工况和几何参数的影响。不同工况环境下摩擦副的最优表面织构参数往往也存在一些差别<sup>[65]</sup>。

当滑靴副的润滑状态不同时, 表面织构表现出的减摩作用原理一般也不同<sup>[66]</sup>。在贫油条件下滑靴副发生干摩擦, 摩擦磨损加剧, 表面织构能及时有效储存滑靴副摩擦脱落的磨粒, 延迟磨损, 同时还能减小摩擦副材料接触面积, 降低摩擦并减小磨损, 如图 6a 所示; 在混合润滑条件下, 由于滑靴副复杂的受力, 表面织构存储的润滑介质因其发生一定挤压变形而被排出, 实现“二次润滑”, 摩擦减轻, 如图 6b 所示; 在完全润滑条件下, 流体产生动压效应, 并常伴有“空化”现象, 在“挤压”<sup>[67]</sup>与“空化”<sup>[68]</sup>的共同作用下, 间隙油膜承载力进一步提升, 润滑充分, 是一种理想的润滑状态, 如图 6c 所示<sup>[64]</sup>。

Wang 等<sup>[69-70]</sup>利用沟槽形表面织构改善滑靴副间隙油膜润滑性能, 提出了基于遗传算法和序列二次规划的混合算法并对沟槽形表面织构底部轮廓及端面形状进行数值优化研究。结果发现, 在低转速情况下优化得到的表面织构底部轮廓由圆弧和直线段组成; 在高转速情况下优化得到的底部轮廓由空化区域、主要区域及附加区域组成; 优化得到的端面形状均为 V 形, 滑靴副间隙油膜的润滑性能较好。

Tang 等<sup>[71]</sup>建立了一个表面织构化滑靴副摩擦因数、摩擦温度和摩擦应力预测的热力学模型, 并基于滑动速度及材料刚度对滑靴副摩擦因数、温度及应力进行了研究, 以探讨表面织构参数、摩擦因数和温度之间的关系。研究发现, 由于热传导和热对流的耦合作用, 表面织构化滑靴副密封区域接触面温度高于中心油室温度。在织构的直径、面密度、间距分别为 30  $\mu\text{m}$ 、16.8%、600  $\mu\text{m}$  和 700  $\mu\text{m}$  时摩擦因数最小, 比没有织构的滑靴副的低 31.7%。

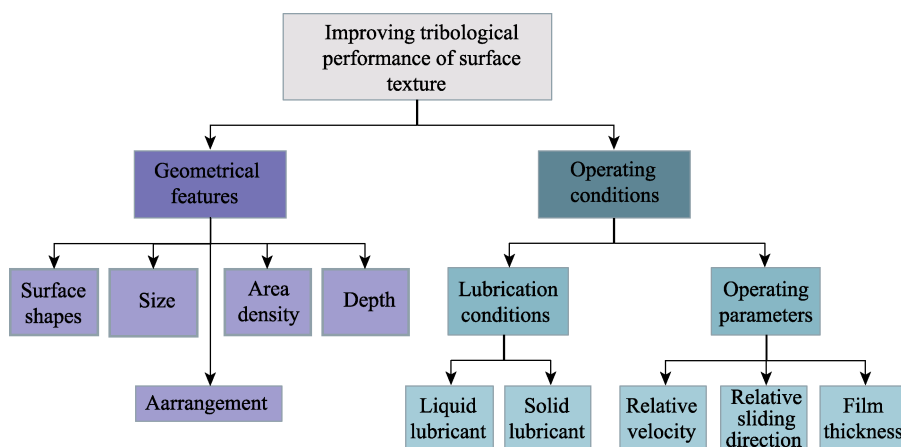


图 5 表面织构提高摩擦学性能的优化方法<sup>[64]</sup>

Fig.5 Optimization method of improving tribological properties by surface texturing<sup>[64]</sup>



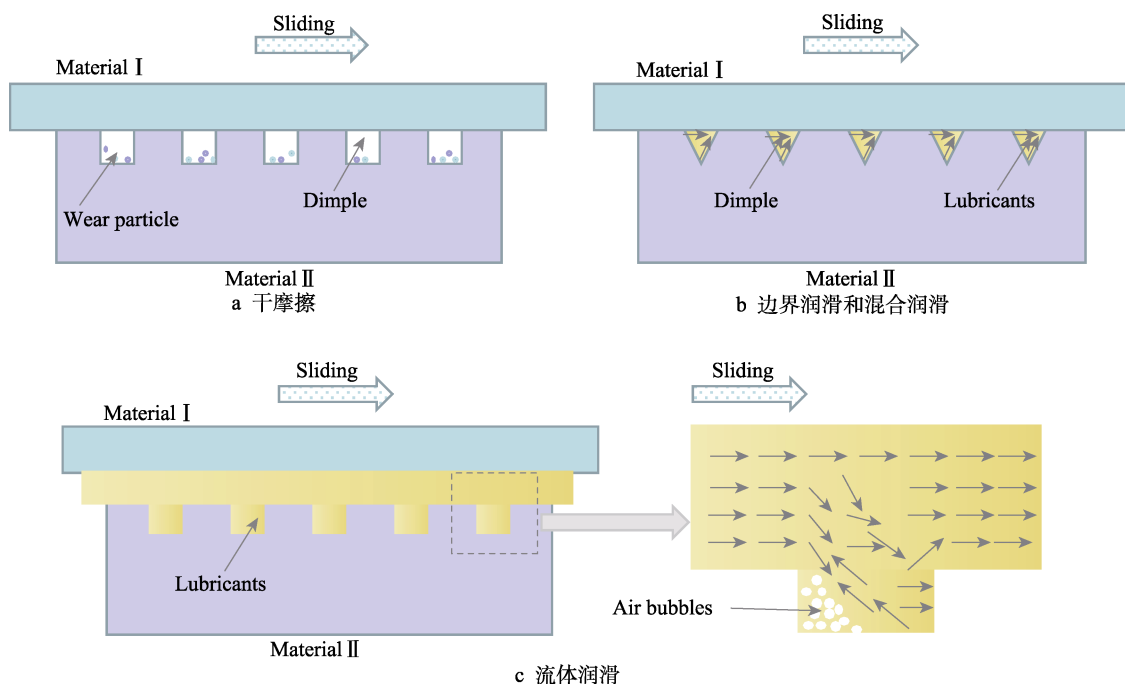


图6 不同润滑条件下表面织构的减摩机理示意图<sup>[64]</sup>

Fig.6 Schematic diagram for antifriction mechanism of surface texturing under different lubrication conditions<sup>[64]</sup>: a) dry friction; b) boundary lubrication and mixed lubrication; c) fluid lubrication

赵波等<sup>[72]</sup>基于流体力学方法在斜盘上构建了倾斜椭圆形凹坑表面织构(短轴  $a=0.2\text{ mm}$ , 长轴  $b=0.8\text{ mm}$ , 倾斜转角  $\alpha$ , 深度  $h=10\text{ }\mu\text{m}$ ), 进行了滑靴副的建模与润滑性能研究, 并探索了不同润滑介质黏度及不同转速下滑靴副承载能力、泄漏量及摩擦因数随表面凹坑织构倾斜角度的变化规律。研究发现, 当斜盘表面存在无倾斜椭圆织构时承载能力显著加强, 摩擦因数降低, 泄漏量增加; 当表面椭圆织构沿滑靴运动方向倾斜一定角度后, 在高转速及润滑介质黏度低的条件下, 滑靴副承载能力增大, 摩擦因数减小, 泄漏量大幅减小, 在低转速或液压介质黏度较高条件下, 承载能力减小, 泄漏量大幅降低。

Ye 等<sup>[73]</sup>针对滑靴副表面织构仿真模型并忽略其倾斜运动、空化、弹性变形等物理相互作用及仿真模型精度不足等问题, 开发了 EHD 模型, 分析了不同转速和不同载荷下滑靴副的承载能力, 并研究了滑靴副弹性流体润滑性能与半球形表面织构倾斜角、面密度、深径比的关系。研究发现, 滑靴副间隙油膜的厚度随滑靴转速的变化而变化, 对于一个给定的转速和负载力, 都存在一个最佳油膜厚度值使其润滑效果最好; 负载和转速增加, 加工表面织构的滑靴表面产生动压润滑效应, 油膜厚度增加, 当超过一定值后将会导致滑靴副泄漏量增加; 滑靴副的性能与表面织构的深径比及面密度有重要关系, 在流体动力润滑条件下, 当滑靴副表现出较高的承载力时对应的表面织构面密度、深径比分别为 24% 和 0.3。

Tang 等<sup>[10]</sup>利用多目标优化算法和基于代理的多

目标算法对滑靴副表面织构的流体动力润滑问题进行了研究, 发现半球形表面织构对滑靴副的泄漏量和承载能力的影响在很大程度上取决于表面织构半径和深度的共同作用, 当织构深度及半径分别从  $0.4\text{ }\mu\text{m}$  和  $15\text{ }\mu\text{m}$  变化到  $0.8\text{ }\mu\text{m}$  和  $18\text{ }\mu\text{m}$  时, 泄漏量减小, 承载能力增加。与多目标优化模型相比, 基于代理的多目标算法模型对承载能力及泄漏量的提升分别为 3.67% 和 16.12%, 结果表明, 基于代理的多目标算法模型增强流体动力润滑的效果优于多目标优化模型的。

目前阶段, 尽管对表面织构技术的研究较多, 但有关滑靴副的表面织构化研究较少。针对滑靴副表面织构化的现有研究集中在一些特定的表面织构参数, 如形状、尺寸、深度和面密度等参量仅只在一个相对较小的参数范围内进行了一些探索研究。

根据上述研究发现, 在滑靴副材料表面加工适当的表面织构, 在完全润滑条件下, 能够产生流体动压效应, 使滑靴副间隙油膜的承载能力增加, 摩擦因数降低, 润滑性能提升<sup>[74]</sup>; 在其他润滑条件下, 也能有效减弱或减缓滑靴副磨损破坏情况, 改善表面的摩擦学性能。因此, 轴向柱塞泵滑靴副表面织构化是提升摩擦学性能的一种有效方法, 除此之外, 固体润滑涂层改善滑靴副的摩擦学性能也受到了一些研究人员的重视<sup>[75]</sup>。

### 3.3.2 固体润滑涂层

$\text{MoS}_2$  涂层属于固体润滑剂的一种, 因其具有良

好的化学稳定性、热稳定性和力学性能, 常被应用于材料表面改性, 用以增强自润滑性能及提升摩擦表面的承载力, 降低摩擦因数<sup>[76-79]</sup>。近年来, 有学者基于等离子喷涂技术在滑靴副表面制备  $\text{MoS}_2$  涂层, 用以研究  $\text{MoS}_2$  涂层对滑靴副表面性能的影响规律。从摩擦学角度来看, 当滑靴副油膜破坏时, 完全润滑状态被打破,  $\text{MoS}_2$  涂层的自润滑性能能够有效提升滑靴副摩擦学性能。斜盘材料表面的等离子喷涂  $\text{MoS}_2$  涂层往往孔隙率大、容易氧化, 脱落会影响涂层整体结构和耐磨性; 目前, 涉及等离子喷涂  $\text{MoS}_2$  涂层的研究以面向铜合金材质的滑靴为主<sup>[80]</sup>。

肖朝昂等<sup>[48]</sup>在滑靴材料多元复杂黄铜表面基于等离子喷涂技术制备了  $\text{MoS}_2$  固体润滑涂层, 并对表面改性后的滑靴副进行了摩擦磨损试验, 研究了  $\text{MoS}_2$  涂层对多元复杂黄铜摩擦力矩、摩擦因数及表面磨损形貌特征的影响。结果表明,  $\text{MoS}_2$  涂层具有良好的自吸附性能和润滑性能, 在油润滑条件下, 多元复杂黄铜表面等离子喷涂  $\text{MoS}_2$  涂层使其自润滑性能提升, 黏着磨损减轻, 摩擦因数减小, 摩擦力矩稳定性得到改善; 在与球墨铸铁配副的摩擦磨损过程中, 涂层中的 S 原子对 Cu、Fe 等元素具有很高的活性, 在材料表面反应生成  $\text{FeS}$  和  $\text{Cu}_2\text{S}$  润滑转移膜, 使材料接触表面剪切应力和垂直应力减小, 磨损率及摩擦因素降低。

Tang 等<sup>[80]</sup>采用等离子喷涂技术在滑靴材料 (ZY331608 和 ZCuSn10Pb11Ni3) 表面制备了  $\text{MoS}_2$  涂层, 与斜盘材料球墨铸铁 (QT500-7) 配副, 基于摩擦磨损试验并结合 EDS、SEM、XRD 等分析方法研究了滑靴副摩擦学性能及涂层的元素组成、表面形貌及物相结构, 并论述了  $\text{MoS}_2$  涂层的摩擦机理。研究发现, 含  $\text{MoS}_2$  涂层的铜基材料在外载荷为 800 N 时表面摩擦因数降低了 0.05; 表面制备  $\text{MoS}_2$  涂层的铜基材料 ZY331608 磨损率降低了 16.4%, 表现出更优良的抗磨损性能;  $\text{MoS}_2$  粒子以机械结合的方式存在于涂层中, 使涂层表面孔隙率较大, 结构相对粗糙, 在摩擦过程中, 摩擦表面  $\text{MoS}_2$  颗粒逐渐富集, 在摩擦热与挤压变形的共同作用下, 不连续的  $\text{MoS}_2$  固体润滑膜在滑靴材料表面逐渐形成, 伴随工作时间的延长, 富集在滑靴表面的  $\text{MoS}_2$  颗粒越来越多, 在反复摩擦的过程中,  $\text{MoS}_2$  固体润滑膜不断完善和补充, 最后在滑靴材料表面生成完整连续的  $\text{MoS}_2$  固体润滑膜; 同时还发现, 铜基材料表面  $\text{MoS}_2$  涂层后的磨损方式主要表现为磨粒磨损、氧化磨损和黏着磨损。

现有研究已经表明,  $\text{MoS}_2$  涂层对改善滑靴副摩擦学性能具有显著作用, 铜基材料表面等离子喷涂  $\text{MoS}_2$  涂层性能与喷涂粉末质量和喷涂工艺参数 (氩气流量、进粉量、喷涂距离、等离子弧功率等) 有关, 而目前关于滑靴副  $\text{MoS}_2$  涂层及混合涂层的研究还比较少, 因此该技术具有很大的研究潜力<sup>[48,80-81]</sup>。除此

之外, Hong 等<sup>[82]</sup>和 Schuhler 等<sup>[83]</sup>证实, 在滑靴副材料表面制备氮化物纳米复合涂层以及类金刚石复合涂层能够显著提升滑靴副的摩擦学性能, 且应重视上述涂层的设计、制备与应用。

## 4 结语及展望

滑靴副作为影响轴向柱塞泵高速高压化的关键摩擦副, 在实际工况下的受力及运动都很复杂, 当润滑不充分时, 滑靴副很容易发生磨损失效, 影响泵的性能及寿命。其磨损失效主要是因为间隙油膜润滑不充分, 滑靴副处于边界润滑状态或干摩擦状态, 摩擦力增大, 磨损加剧。而在实际工况下, 滑靴副间隙油膜的状态是动态变化的, 受多种因素影响, 包括滑靴副结构、转速、压力、温度、流量、润滑介质等, 而且因素之间可能还存在复杂的关系。泵的运行信号 (如壳体的振动、磨屑信息、回流油量、运行噪音的变化等) 在一定程度上能有效反映泵的运行状态, 通过信号采集, 可以推测泵的运行状态, 预测泵的使用寿命。选择摩擦学性能更好的滑靴副配对材料和结构更有助于形成厚度合适的润滑油膜进而使滑靴副寿命延长。表面织构能够产生流体动压效应, 减摩效果显著。除此之外, 在滑靴表面制备厚度适宜、结合良好、孔隙率低的固体润滑改性涂层, 也可以改善滑靴副表面的摩擦学性能。但就目前的研究现状而言, 还有很多方面值得探索。

1) 虽然已有很多学者提出了滑靴副润滑动态仿真模型, 但由于滑靴副动态润滑涉及学科众多, 影响因素多且还可能存在相互作用, 因此目前还没有一种理论模型能够完美解释滑靴副动态变化过程, 还需要进行深入研究。

2) 目前滑靴副试验台需要配备若干传感器, 而这些传感器大多是嵌入泵体之中, 会破坏泵的结构完整性, 因此未来的滑靴副试验台需要更少的传感器来解决多位置测量的问题, 同时传感器本身的尺寸限制了测量点的密度, 开发无创测试平台是滑靴副测试平台研制的目标, 利用透明泵壳和高速相机相结合为捕捉滑靴副的运动特点提供了一种可能。

3) 对滑靴副表面织构化研究, 尤其是激光加工表面织构, 具有成本低、效率高、应用范围广等优点, 有很好的应用前景, 现阶段研究人员虽然已经对滑靴副表面织构化进行了大量研究, 但距离建立普适性系统理论模型还有一些差距, 现在提出的表面织构化优化参数也未必是理想最优参数, 还有一定的优化空间, 需要进一步探索和完善。

4) 针对轴向柱塞泵滑靴副的防护延寿研究, 目前阶段大多集中在表面织构化或固体润滑涂层的研究, 有关多技术复合作用的研究还比较少, 研究者可以尝试探索综合考虑液压油与固体润滑涂层及表面

织结构综合作用以改善滑靴副摩擦学性能的多技术结合的方法是否可以达到“1+1>2”的效果。

#### 参考文献:

- [1] YU Jin, SONG Yu-run, ZHANG Hua-sen, et al. Novel Design of Compound Coupled Hydro-Mechanical Transmission on Heavy-Duty Vehicle for Energy Recycling[J]. Energy, 2022, 239: 122291.
- [2] XU Yong-hong, ZHANG Hong-guang, YANG Fu-bin, et al. Experimental Investigation of Pneumatic Motor for Transport Application[J]. Renewable Energy, 2021, 179: 517-527.
- [3] 高殿荣. 液压与气压传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.  
GAO Dian-rong. Hydraulic and Pneumatic Transmission[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [4] 倪斯亮, 吴怀超, 赵丽梅, 等. 表面微坑对高压轴向柱塞泵滑靴副油膜性能的影响[J]. 润滑与密封, 2018, 43(6): 30-34.  
NI Si-liang, WU Huai-chao, ZHAO Li-mei, et al. Effect of Surface Micro-Pit on Oil Film Performance of Slipper Pair in Axial Piston Pump under High Pressure[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(6): 30-34.
- [5] 江菡. 微小型二维活塞泵的动力学分析及凸轮-锥轮阻力特性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
JIANG Han. Dynamic Analysis of Miniature Two-Dimensional Piston Pump and the Resistance Characteristics of Cam-Bevel Wheel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [6] 葛曜文, 朱威霖, 刘家辉, 等. 电静液作动器精细化建模和特性分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(24): 66-73.  
GE Yao-wen, ZHU Wei-lin, LIU Jia-hui, et al. Refined Modeling and Characteristic Analysis of Electro-Hydrostatic Actuator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(24): 66-73.
- [7] 汤何胜, 阎耀保, 李晶. 弹性变形对轴向柱塞泵滑靴副功率损失的影响[J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 1038-1044.  
TANG He-sheng, YIN Yao-bao, LI Jing. Influence of Elastic Deformation on Power Loss of Axial Piston Pump Slipper/Swash Plate Pair[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(4): 1038-1044.
- [8] 刘昕晖, 李春爽, 陈琳, 等. 游梁式抽油机节能技术综述[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(1): 1-26.  
LIU Xin-hui, LI Chun-shuang, CHEN Lin, et al. Review of Energy Saving Technologies for Beam Pumping Units[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(1): 1-26.
- [9] LUO Jian-bin, LIU Min, MA Li-ran. Origin of Friction and the New Frictionless Technology-Superlubricity: Advancements and Future Outlook[J]. Nano Energy, 2021, 86: 106092.
- [10] TANG He-sheng, REN Yan, KUMAR A. Optimization Tool Based on Multi-Objective Adaptive Surrogate Modeling for Surface Texture Design of Slipper Bearing in Axial Piston pump[J]. Alexandria Engineering Journal, 2021, 60(5): 4483-4503.
- [11] CHEN Yuan, ZHANG Jun-hui, XU Bing, et al. Multi-Objective Optimization of Micron-Scale Surface Textures for the Cylinder/Valve Plate Interface in Axial Piston Pumps[J]. Tribology International, 2019, 138: 316-329.
- [12] WANG Shu-hui, XIANG Jia-wei, TANG He-sheng, et al. Minimum Entropy Deconvolution Based on Simulation-Determined Band Pass Filter to Detect Faults in Axial Piston Pump Bearings[J]. ISA Transactions, 2019, 88: 186-198.
- [13] HAIDAK G, WANG Dong-yun. Analysis of Damage and Failure Mechanism under a Lubricated Slipper/Swashplate Interface in Axial Piston Machines[J]. Procedia Structural Integrity, 2022, 35: 124-131.
- [14] ZHANG Jun-hui, LYU Fei, XU Bing, et al. Simulation and Experimental Investigation on Low Wear Rate Surface Contour of Piston/Cylinder Pair in an Axial Piston Pump[J]. Tribology International, 2021, 162: 107127.
- [15] CHAO Qun, ZHANG Jun-hui, XU Bing, et al. Discussion on the Reynolds Equation for the Slipper Bearing Modeling in Axial Piston Pumps[J]. Tribology International, 2018, 118: 140-147.
- [16] 孙莹辉. 高速高压轴向柱塞泵滑靴副油膜特性参数测试系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.  
SUN Ying-hui. Testing System Research for Investigating the Properties of Slipper Pair in High-Speed and High-Pressure Axial Piston Pump[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [17] TANG He-sheng, REN Yan, XIANG Jia-wei. A Novel Model for Predicting Thermoelastohydrodynamic Lubrication Characteristics of Slipper Pair in Axial Piston Pump[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 124: 109-121.
- [18] 刘思远, 王广达, 孙红梅, 等. 基于润滑机理的智能液压元件本体性能预测方法[J]. 中国机械工程, 2020, 31(8): 952-959.  
LIU Si-yuan, WANG Guang-da, SUN Hong-mei, et al. Prediction Method of Performance of Intelligent Hydraulic Components Based on Lubrication Mechanism[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(8): 952-959.
- [19] 刘思远, 何跃, 李晓明, 等. 基于故障机理的液压泵多信息烈度特征状态评估方法[J]. 中国机械工程, 2019, 30(12): 1460-1465.  
LIU Si-yuan, HE Yue, LI Xiao-ming, et al. Multi-Information Intensity Characteristic State Assessment Method of Hydraulic Pumps Based on Fault Mechanism[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(12): 1460-1465.
- [20] 王月鹏, 陈先勇, 曹华威, 等. 基于动压效应的柱塞泵滑靴副润滑特性仿真分析[J]. 液压与气动, 2020, 44(12): 132-142.

- WANG Yue-peng, CHEN Xian-yong, CAO Hua-wei, et al. Simulation on Lubrication Characteristic for a Piston Pump Based on Dynamic Pressure Effect[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, 44(12): 132-142.
- [21] 李焕军, 张义民. 柱塞泵滑靴副的流体润滑特性试验系统及原理[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(8): 9-17.
- LI Huan-jun, ZHANG Yi-min. Fluid Lubrication Test System and Principle of Piston Pump Slipper Pair[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(8): 9-17.
- [22] 王倩因. 轴向柱塞泵滑靴副油膜特性的基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- WANG Qian-nan. Research on Oil Film Characteristics of Slipper Pair in Axial Piston Pump[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [23] 马纪明, 黄怡鸿, 郭健, 等. 液压柱塞泵运动副磨损特性研究综述[J]. 液压与气动, 2017, 40(8): 84-94.
- MA Ji-ming, HUANG Yi-hong, GUO Jian, et al. Review of Wear Analyses Research for Main Moving Pairs in Hydraulic Axial Piston Pump[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2017, 40(8): 84-94.
- [24] 李迎兵. 轴向柱塞泵滑靴副油膜特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- LI Ying-bing. Study on Characteristics of Oil Film for Slipper Pair of Axial Piston Pumps[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [25] 徐兵, 李迎兵, 张斌, 等. 轴向柱塞泵滑靴副倾覆现象数值分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(20): 161-168.
- XU Bing, LI Ying-bin, ZHANG Bin, et al. Numerical Simulation of Overturning Phenomenon of Axial Piston Pump Slipper Pair[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(20): 161-168.
- [26] CHAO Qun, ZHANG Jun-hui, XU Bing, et al. Multi-Position Measurement of Oil Film Thickness within the Slipper Bearing in Axial Piston Pumps[J]. Measurement, 2018, 122: 66-72.
- [27] ZHANG Jun-hui, CHAO Qun, XU Bing, et al. Novel Three-Piston Pump Design for a Slipper Test Rig[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 52: 65-81.
- [28] 潮群. EHA 轴向柱塞泵高速化若干关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- CHAO Qun. Research on Some Key Technologies of High-Speed Rotation for Axial Piston Pumps Used in EHAs[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [29] 胡纪滨, 周虎城, 魏超, 等. 滑靴副润滑油膜成膜特性的理论与试验研究[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(3): 231-235.
- HU Ji-bin, ZHOU Hu-cheng, WEI Chao, et al. Theoretical and Experimental Research on the Formation of Lubrication Film for Slipper Bearings of Axial Piston Pumps[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(3): 231-235.
- [30] TANG He-sheng, YIN Yao-bao, REN Yan, et al. Impact of the Thermal Effect on the Load-Carrying Capacity of a Slipper Pair for an Aviation Axial-Piston Pump[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(2): 395-409.
- [31] MA Ji-ming, CHEN Juan, LI Jia, et al. Wear Analysis of Swash Plate/Slipper Pair of Axis Piston Hydraulic Pump[J]. Tribology International, 2015, 90: 467-472.
- [32] 刘思远, 王闯, 杨梦雪, 等. 斜盘泵滑靴副剧烈磨损过程的动态特性分析[J]. 液压与气动, 2017, 40(1): 1-5.
- LIU Si-yuan, WANG Chuang, YANG Meng-xue, et al. Analysis of Dynamic Characteristics for Severe Wear Process of Swash Plate Axial Piston Pump Slipper Pair[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2017, 40(1): 1-5.
- [33] 葛薇, 王少萍. 航空液压泵磨损状况预测[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(11): 1410-1414.
- GE Wei, WANG Shao-ping. Wear Condition Prediction of Hydraulic Pump[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(11): 1410-1414.
- [34] ANDERSSON J, ALMQVIST A, LARSSON R. Numerical Simulation of a Wear Experiment[J]. Wear, 2011, 271(11/12): 2947-2952.
- [35] MUCCHI E, AGAZZI A, D'ELIA G, et al. On the Wear and Lubrication Regime in Variable Displacement Vane Pumps[J]. Wear, 2013, 306(1/2): 36-46.
- [36] 刘思远, 刘建勋, 李晓明, 等. 强冲击载荷对滑靴副磨损过程承载特性的影响[J]. 润滑与密封, 2018, 43(11): 12-18.
- LIU Si-yuan, LIU Jian-xun, LI Xiao-ming, et al. Effects of Strong Impact Load on Load-Bearing Characteristics of Slipper Pair in Wear Process[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(11): 12-18.
- [37] 寇保福, 李振顺, 张涨, 等. 高温下轴向柱塞泵滑靴副干滑动摩擦磨损性能[J]. 润滑与密封, 2021, 46(11): 115-121.
- KOU Bao-fu, LI Zhen-shun, ZHANG Zhang, et al. Dry sliding Friction and Wear Performance of Slipper Pair of Axial Piston Pump at High Temperature[J]. Lubrication Engineering, 2021, 46(11): 115-121.
- [38] 寇保福, 李振顺, 张涨, 等. 轴向柱塞泵中滑靴副的摩擦磨损性能研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(1): 7-12.
- KOU Bao-fu, LI Zhen-shun, ZHANG Zhang, et al. Study on Friction and Wear Performance of Slipper Pair in Axial Piston Pump[J]. Machine tool & Hydraulics, 2022, 50(1): 7-12.
- [39] 张燃. 35ML/r 十一柱塞泵的特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- ZHANG Ran. Study on Dynamic Characteristics of 35ML/r Pump with 11 Pistons[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [40] LI Tong-yang, WANG Shao-ping, ZIO E, et al. A numerical Approach for Predicting the Remaining Useful Life of an Aviation Hydraulic Pump Based on Monitoring Abrasive Debris Generation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 136: 106519.
- [41] WANG Xing-jian, LIN Si-ru, WANG Shao-ping, et al. Remaining Useful Life Prediction Based on the Wiener Process for an Aviation Axial Piston Pump[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(3): 779-788.
- [42] LI Hong-ru, SUN Jian, MA Hui, et al. A Novel Method



- Based upon Modified Composite Spectrum and Relative Entropy for Degradation Feature Extraction of Hydraulic Pump[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 114: 399-412.
- [43] DU Li, ZHU Xiao-liang, HAN Yu, et al. Improving Sensitivity of an Inductive Pulse Sensor for Detection of Metallic Wear Debris in Lubricants Using Parallel LC Resonance Method[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(7): 075106.
- [44] ZHU Xiao-liang, DU Li, ZHE Jiang. A 3×3 Wear Debris Sensor Array for Real Time Lubricant Oil Conditioning Monitoring Using Synchronized Sampling[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 83: 296-304.
- [45] HAN Lei, WANG Shao-ping, ZHANG Chao. A Partial Lubrication Model Between Valve Plate and Cylinder Block in Axial Piston Pumps[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 229(17): 3201-3217.
- [46] BERGADA J M, KUMAR S, DAVIES D L, et al. A Complete Analysis of Axial Piston Pump Leakage and Output Flow Ripples[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(4): 1731-1751.
- [47] GUO Sheng-rong, CHEN Jin-hua, LU Yue-liang, et al. Hydraulic Piston Pump in Civil Aircraft: Current Status, Future Directions and Critical Technologies[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(1): 16-30.
- [48] 肖朝昂, 汤何胜, 任燕, 等. 等离子喷涂  $\text{MoS}_2$  处理改善液压泵滑靴副摩擦学性能[J]. 机床与液压, 2020, 48(1): 9-14.
- XIAO Chao-ang, TANG He-sheng, REN Yan, et al. Plasma-Sprayed  $\text{MoS}_2$  Coatings Improve Tribological Behavior of Slipper/Swash Plate Pair in Hydraulic Pump[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(1): 9-14.
- [49] 倪斯亮, 吴怀超, 赵丽梅, 等. 材料匹配对高压轴向柱塞泵滑靴副干摩擦性能影响的研究[J]. 机械设计与制造, 2019, 40(3): 12-15.
- NI Si-liang, WU Huai-chao, ZHAO Li-mei, et al. Study on the Effect of Material Matching to the Performance of Dry Friction of the Slipper Pair in Axial Piston Pump under High Pressure[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019, 40(3): 12-15.
- [50] WU Huai-chao, ZHAO Li-mei, NI Si-liang, et al. Study on Friction Performance and Mechanism of Slipper Pair under Different Paired Materials in High-Pressure Axial Piston Pump[J]. Friction, 2020, 8(5): 957-969.
- [51] 苟佩佩. 耐磨黄铜组织与摩擦磨损性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- GOU Pei-pei. Study of the Microstructure and Frictional Wear Properties of Wear-Resistant Brass[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [52] 李玉龙, 何永勇, 雒建斌. 航空柱塞泵关键摩擦副表面改性与性能增强[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(12): 1405-1422.
- LI Yu-long, HE Yong-yong, LUO Jian-bin. Surface Modifications and Performance Enhancements of Key Friction Pairs in Aviation Hydraulic Piston Pumps[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2021, 61(12): 1405-1422.
- [53] 许耀铭. 轴向柱塞泵滑靴和配流盘摩擦副的设计方法[J]. 液压与气动, 1977, 1(2): 3-12.
- XU Yao-ming. Design Method of Slipper/Swash Plate and Cylinder Block/Valve Plate Friction Pairs of Axial Piston Pump[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 1977, 1(2): 3-12.
- [54] 于思淼. 轴向柱塞泵用滑靴流体静动压支撑的特性分析及结构优选[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- YU Si-miao. Characteristics Analysis and Structure Optimization of Slipper with Static and Dynamic Pressure Support Used in the Axial Piston Pump [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [55] 汤何胜, 李晶, 阎耀保. 轴向柱塞泵滑靴副功率损失特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(2): 361-369.
- TANG He-sheng, LI Jing, YIN Yao-bao. Power Loss Characteristics of Slipper/Swash Plate Pair in Axial Piston Pump[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2017, 48(2): 361-369.
- [56] 刘洪, 胡纪滨, 彭增雄, 等. 轴向柱塞泵回程装置对滑靴动态特性的影响研究[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(3): 233-238.
- LIU Hong, HU Ji-bing, PENG Zeng-xiong, et al. Effects of Hold Down Device on the Slipper's Dynamic Characteristics[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(3): 233-238.
- [57] 王海吉, 施光林. 滑靴副阻尼孔的研究与设计[J]. 液压与气动, 2021, 45(3): 148-152.
- WANG Hai-ji, SHI Guang-lin. Study and Design of Damping Orifice of Slipper/Swash Plate Pair[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021, 45(3): 148-152.
- [58] 姜继海, 汪泽波, 王克龙, 等. 微台阶对滑靴副微运动姿态及油膜润滑的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(8): 1-7.
- JIANG Ji-hai, WANG Ze-bo, WANG Ke-long, et al. Influence of Micro-Stepping to Micro Motion Posture and Oil Film Lubrication of Slipper-Swashplate Interface[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural science Edition), 2021, 49(8): 1-7.
- [59] STRATAKIS E, BONSE J, HEITZ J, et al. Laser Engineering of Biomimetic Surfaces[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2020, 141: 100562.
- [60] ROSENKRANZ A, GRÜTZMACHER P G, GACHOT C, et al. Surface Texturing in Machine Elements-a Critical Discussion for Rolling and Sliding Contacts[J]. Advanced Engineering Materials, 2019, 21(8): 1900194.
- [61] 吕延军, 方重阳, 邢志国, 等. 仿生织构图案的设计、加工及应用的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(2): 112-122.
- LYU Yan-jun, FANG Chong-yang, XING Zhi-guo, et al. Research Progress in Design, Processing and Application

- of Bionic Texture Patterns[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(2): 112-122.
- [62] 邓建新, 孟莹, 张志慧, 等. 结构化表面涂层的研究进展[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(7): 22-35.
- DENG Jian-xin, MENG Ying, ZHANG Zhi-hui, et al. Research Progress of Textured Surface Coatings[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(7): 22-35.
- [63] KHAEMBA D N, AZAM A, SEE T L, et al. Understanding the Role of Surface Textures in Improving the Performance of Boundary Additives, Part I: Experimental[J]. *Tribology International*, 2020, 146: 106243.
- [64] 赵立新, 章宝玲, 刘洋, 等. 基于表面织构技术改善摩擦学性能的研究进展[J]. *摩擦学学报*, 2022, 42(1): 202-224.
- ZHAO Li-xin, ZHANG Bao-ling, LIU Yang, et al. State of the Art for Improving Tribological Performance Based on of Surface Texturing Technology[J]. *Tribology*, 2022, 42(1): 202-224.
- [65] 黄云磊, 钟林, 王国荣, 等. 表面织构润滑减摩的国内外研究现状及进展[J]. *表面技术*, 2021, 50(12): 217-232.
- HUANG Yun-lei, ZHONG Lin, WANG Guo-rong, et al. Research Status and Progress of Surface Texture Lubrication and Friction Reduction[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(12): 217-232.
- [66] 刘强, 林乃明, 邹娟娟, 等. 改善钢铁材料摩擦学行为的表面织构研究现状[J]. *表面技术*, 2016, 45(5): 41-50.
- LIU Qiang, LIN Nai-ming, ZOU Jiao-juan, et al. Recent Developments in Improving Tribological Behaviors of Iron and Steel via Surface Texturing[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(5): 41-50.
- [67] ENGMANN J, SERVAIS C, BURBIDGE A S. Squeeze Flow Theory and Applications to Rheometry: A Review[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2005, 132(1/2/3): 1-27.
- [68] ZHANG Jin-yu, MENG Yong-gang. Direct Observation of Cavitation Phenomenon and Hydrodynamic Lubrication Analysis of Textured Surfaces[J]. *Tribology Letters*, 2012, 46(2): 147-158.
- [69] WANG Wei, HE Yong-yong, ZHAO Jun, et al. Numerical Optimization of the Groove Texture Bottom Profile for Thrust Bearings[J]. *Tribology International*, 2017, 109: 69-77.
- [70] WANG Wei, HE Yong-yong, ZHAO Jun, et al. Optimization of Groove Texture Profile to Improve Hydrodynamic Lubrication Performance: Theory and Experiments[J]. *Friction*, 2020, 8(1): 83-94.
- [71] TANG He-sheng, REN Yan, XIANG Jia-wei. Fully-Coupled Thermomechanical Analysis for Sliding Contact between Textured Slipper and Swashplate in Axial Piston Pump[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 163: 120521.
- [72] 赵波, 王志超, 杨理华, 等. 考虑上游泵送效应的滑靴副动压润滑特性[J]. *摩擦学学报*, 2020, 40(4): 531-537.
- ZHAO Bo, WANG Zhi-chao, YANG Li-hua, et al. Dynamic Pressure Lubrication Characteristics of Slipper/Swash Plate Pair Considering Upstream Pumping Effect[J]. *Tribology*, 2020, 40(4): 531-537.
- [73] YE Shao-gan, TANG He-sheng, REN Yan, et al. Study on the Load-Carrying Capacity of Surface Textured Slipper Bearing of Axial Piston Pump[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2020, 77: 554-584.
- [74] ZHAO Jiang-ao, FU Yong-ling, MA Ji-ming, et al. Review of Cylinder Block/Valve Plate Interface in Axial Piston Pumps: Theoretical Models, Experimental Investigations, and Optimal Design[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(1): 111-134.
- [75] ZHANG Dong-ya, LI Zhong-wei, WANG Li-ping, et al. Study on Tribological Properties of Boronized and Textured Composite Surface and its Application on Camshaft Connecting-Rod Type Hydraulic Motor[J]. *Wear*, 2021: 203964.
- [76] 李佳佳, 王燕, 王福会. 不同球磨时间下制备的铜基自润滑复合材料力学与摩擦磨损性能研究[J]. *表面技术*, 2021, 50(9): 236-243.
- LI Jia-jia, WANG Yan, WANG Fu-hui. Study on Mechanical and Tribological Behavior of Copper-Based Self-Lubricating Composites Prepared at Different Ball Mill Time[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(9): 236-243.
- [77] VADIRAJ A, KAMARAJ M, SREENIVASAN V S. Effect of Sliding Speed on Wear Behaviour of Nitrided Martensitic Stainless Steel under Boric Acid and MoS<sub>2</sub> Lubrication[J]. *Surface Engineering*, 2012, 28(3): 192-194.
- [78] MESGARNEJAD A, KHONSARI M M. On the Tribological Behavior of MoS<sub>2</sub>-Coated Thrust Ball Bearings Operating under Oscillating Motion[J]. *Wear*, 2010, 269(7/8): 547-556.
- [79] HU Tian-chang, ZHANG Yong-sheng, HU Li-tian. Tribological Investigation of MoS<sub>2</sub> Coatings Deposited on the Laser Textured Surface[J]. *Wear*, 2012, 278: 77-82.
- [80] TANG He-sheng, REN Yan, ZHANG Xiang-lei. Tribological Performance of MoS<sub>2</sub> Coating on Slipper Pair in Axial Piston Pump[J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(5): 1515-1529.
- [81] AYYAGARI A V, MUTYALA K C, SUMANT A V. Towards Developing Robust Solid Lubricant Operable in Multifarious Environments[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1-12.
- [82] HONG Y S, LEE S R, KIM J H, et al. Application of a DLC-Coating for Improving Hydrostatic Piston Shoe Bearing Performance under Mixed Friction Conditions[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, 16(2): 335-341.
- [83] SCHUHLER G, JOURANI A, BOUVIER S, et al. Efficacy of Coatings and Thermochemical Treatments to Improve Wear Resistance of Axial Piston Pumps[J]. *Tribology International*, 2018, 126: 376-385.