

DOI: 10.3901/JME.2022.11.200

盘式摩擦副沟槽织构摩擦磨损特性研究*

窦振华 王翔宇 郝惠敏 兰媛 黄家海
(太原理工大学机械与运载工程学院 太原 030024)

摘要: 轴向柱塞泵配流副是一种典型盘式摩擦副, 其对柱塞泵性能有重要影响; 摩擦副表面织构具有良好的减摩抗磨功能, 与通常研究的凹坑状织构相比, 沟槽状织构具有明显的贯通性, 润滑、冷却和排屑效果好等优点。为改善配流副摩擦磨损性能, 根据前期研究结果设计并制作了 16 槽及 32 槽两种类型盘式摩擦副, 探讨沟槽状织构化配流副的摩擦磨损特性, 分析织构基体硬度、织构角度, 以及载荷等对其性能影响。研究结果表明: 盘式摩擦副表面沟槽状织构可有效改善摩擦特性, 基体材料硬度、织构角度与实验压力均会对织构化摩擦副的摩擦磨损特性产生影响; 在 3 MPa 压力下, 与无织构试样对比, 32 槽、60° 织构角的软材料与未处理硬材料组成配对副时, 表现出最优的摩擦磨损特性, 摩擦因数仅为 0.038, 磨损量降低了 57.48%, 磨损表面也未出现严重磨损现象。上述研究结果将为轴向柱塞泵配流副的优化设计提供参考依据。

关键词: 轴向柱塞泵; 盘式摩擦副; 配流副; 沟槽织构; 摩擦性能

中图分类号: TH137

Friction and Wear Characteristics of Disc Friction Pair with Groove-shaped Texture

DOU Zhenhua WANG Xiangyu HAO Huimin LAN Yuan HUANG Jiahai
(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024)

Abstract: The valve plate / cylinder block within the axial piston pump is a typical disc friction pair, which has an important impact on the performance of the piston pump. The surface texture can improve the anti-friction and anti-wear performance of the friction pair. Compared with the pit-shaped surface texture, the groove-shaped surface texture is better in terms of lubrication and cooling. To improve the friction and wear performance of the current valve pair / cylinder block pair, two types of disk friction pairs with 16 grooves and 32 grooves were designed and manufactured on the basis of the previous research, then the effects of the matrix hardness, texture angle and experimental pressure and on the performance of the friction pair were analyzed and discussed. The results show that: the groove-shaped texture on the surface of the disc friction pair can effectively improve the friction characteristics; the hardness of textured matrix material, textured angle and experimental pressure play influences on the friction and wear characteristics of the textured friction pair. Compared with the non-textured sample at 3 MPa, it shows the best friction and wear characteristics when the pair formed by the untreated hard material and the soft material which textured angle is 60° and the textured number is 32, the friction coefficient was only 0.038, and the wear decreased by 57.48%, and there was no serious wear on the worn surface. These results are useful for the optimization design of the valve plate / cylinder block in the axial piston pump.

Key words: axial piston pump; disc friction pair; port plates; grooved texture; tribological performance

0 前言

盘式摩擦副广泛应用于制动系统^[1]、液压传动^[2]

等邻域。轴向柱塞泵配流副是一种典型盘式摩擦副, 其对液压泵寿命^[3]、可靠性^[4], 及生产安全^[5]都有重要影响。因此, 提高配流副摩擦学性能对提升轴向柱塞泵综合性能有重要意义。

提高配流副摩擦学性能常见手段包括零件材料热处理^[6-8]、摩擦副表面加工涂层^[9-11]、表面织构等,

* 国家重点研发计划(2021YFB2011903)和山西省应用基础研究计划自然科学基金(201901D111054)资助项目。20210818 收到初稿, 20220129 收到修改稿

其中表面织构是当前国内外界面摩擦学领域研究热点。LIN 等^[12]使用电化学腐蚀和等离子氮化对 AISI316 钢进行双相处理,并分别在干摩擦和脂润滑摩擦环境下对试样进行摩擦磨损实验,结果表明干摩擦及脂润滑条件下,织构槽发挥储存磨屑及二次润滑的作用。ZHANG 等^[13]利用激光表面织构技术在涂有氮化层的 38CrMoAlA 配流盘上加工出矩形织构槽,结果表明织构化的配流盘提高了柱塞泵的机械效率。ZHANG 等^[14]在不同硬度 316 不锈钢和 UHMWPE 材料表面制备了凹痕,并进行摩擦学实验,发现在高负载工况下,UHMWPE 材料表面织构技术可有效降低磨损量,从而验证织构技术对高分子化合物的降磨减阻也有效果。王国荣等^[15]构建了槽形表面织构化柱塞摩擦副的动压润滑模型,讨论了表面织构槽的深度、宽度和角度等参数对柱塞摩擦副摩擦性能的影响;发现表面织构技术可有效改善柱塞副的摩擦学性能,其减摩抗磨性能与织构加工方式、织构凹痕形貌、织构基体硬度等因素有关。就柱塞泵配流副表面织构形状而言,目前主要流织构图案是凹坑状^[16-17],特点为结构封闭,凹坑之间独立存在;与凹坑织构相比,沟槽状织构具有明显的贯通性,磨屑收纳效率较高,且对其摩擦磨损性能的相关报道较少。因此,本文拟对沟槽织构配流副的摩擦磨损特性开展研究,从而为配流副乃至盘式摩擦副的优化设计提供依据。

在研究过程中,将使用摩擦磨损试验机环-盘摩擦副模拟配流副工作过程,通过在摩擦副表面进行沟槽状织构加工,分析基体硬度、织构槽宽度、分布角度及压力载荷在高速工况下对盘式摩擦副摩擦学性能的影响,以期优化织构化配流副的设计参数。

1 试验方案

1.1 试件制备

轴向柱塞泵配流副一般为软硬材料搭配使用,因此采用 CuPb15Sn5(学成分为 Sn: 4.6%; Pb: 15.36%; Ni: 1.37%; Zn≤0.03%; 余量为 Cu)作为软材料模拟柱塞泵缸体,调质渗氮后的 42CrMo(化学成分为 C: 0.38~0.45%; Si: 0.17~0.37%; Mn: 0.5~0.8%; S≤0.035%; P≤0.035%; Cr: 0.9~1.2%; 余量为 Fe)作为硬材料模拟柱塞泵配流盘。42CrMo 热处理工艺如下:钢材胚料 940 ℃高温淬火后进行 640 ℃高温回火,保温 180 min 后冷却,随后采用等温渗氮法进行渗氮处理,在 520 ℃的环境中通入

氮气并保温 8~12 h,随后提高温度至 600 ℃并保温 6~10 h 进行渗氮处理;渗氮后,利用精磨工艺去除 42CrMo 表面薄而脆的渗氮层,粗糙度达到 0.4 μm,材料表面硬度 HV 可达到 462。

将 CuPb15Sn5 及调质渗氮后的 42CrMo 胚料按图 1 加工成试样。利用激光打标机在表面加工出规则沟槽,激光加工参数如表 1 所示,加工后利用 600 目、1200 目砂纸依次打磨,去除凹槽边缘毛刺,并利用三维形貌仪观察沟槽形貌(图 2),对凹槽中点处进行轮廓测量(测量位置图 2 方框部位),可得织构槽轮廓曲线,凹槽横截面为圆弧形,最大深度约为 300 μm。

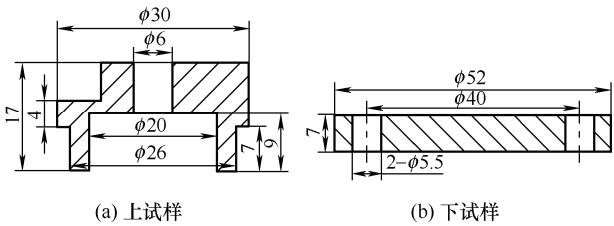


图 1 试样结构图

表 1 激光加工参数

参数	CuPb15Sn5	42CrMo
线间距/mm	0.01	0.01
加工速度/(mm/s)	100	100
功率占比(%)	90	60
频率/kHz	50	20
加工次数	10	10

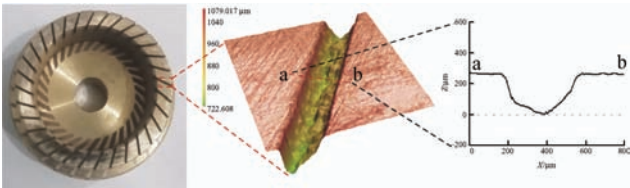


图 2 织构槽三维形貌图

1.2 实验方案

柱塞泵配流盘与缸体之间为滑动摩擦,主要为边界润滑和流体润滑,采用 MMU-10 摩擦磨损试验机环-盘摩擦副模拟配流盘-缸体摩擦副工作环境,试验机原理如图 3 所示,利用螺丝将上试样固定于伺服电机转轴上,转速范围为 0~2 000 r/min,下试样由销钉固定于润滑油池中,测试过程中保持静止状态,由液压缸对摩擦副施加实验力,选用常用 L-HM 46 作为润滑油,其密度为 870 kg/m³,40 ℃条件下的流体运动粘度为 46 mm²/s。摩擦副承受载荷与实验加载力的关系如下

$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中, P 为摩擦副承受载荷, MPa; F 为实验加载力, N; A 为摩擦环接触面面积, mm^2 。

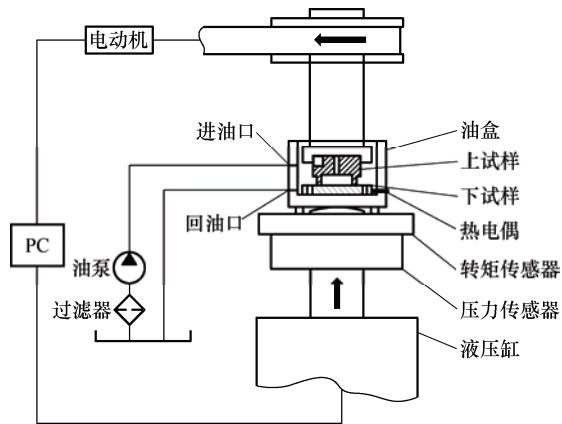


图 3 摩擦磨损试验机

实验主要对高速工况下的织构化配流副进行研究, 转速为 1 800 r/min, 实验分组如表 2 所示, 其中 NT 代表试样表面无处理, TA-B 代表摩擦片表面织构槽数为 A、织构槽角度为 B 度。每个测试周期, 上试样相对于下试样滑动距离为 2 000 m(主轴转动 27 430 转)。由于温度对摩擦副磨损结果影响较大, 保证实验初始时的温度为 $(15 \pm 2)^\circ\text{C}$, 每组实验至少重复两次以上, 若重复性较差时, 则进行补测, 从而保证结果的可靠性。实验前后使用丙酮及酒精在超声波清洗仪中去除试样表面氧化物及杂质, 清洗后烘干试样, 并使用精度为 0.000 1 g 的分析天平对试样称重, 以确定磨损质量。实验后利用 VHX-600 超景深三维显微系统对试样表面形貌观察。

表 2 织构实验分组

试样	上试样	下试样
参考组	CuPb15Sn5(NT)	42CrMo(NT)
对照 1	CuPb15Sn5(NT)	42CrMo(T16-60°)
对照 2	CuPb15Sn5(NT)	42CrMo(T32-60°)
实验 1	CuPb15Sn5(T16-60°)	42CrMo(NT)
实验 2	CuPb15Sn5(T32-60°)	42CrMo(NT)
实验 3	CuPb15Sn5(T32-90°)	42CrMo(NT)
实验 4	CuPb15Sn5(T32-45°)	42CrMo(NT)

2 实验结果分析

2.1 织构基体对摩擦特性影响

对 42CrMo 和 CuPb15Sn5 试样表面分别进行织构加工, 继而开展摩擦试验, 载荷为 3 MPa, 探究

基体材料硬度对织构化试样摩擦特性的影响; 为排除织构密度影响, 选择织构密度为 16 槽及 32 槽的两种试样进行研究。

2.1.1 不同织构基体摩擦副的摩擦特性分析

图 4 为参考组、对照 1、对照 2、实验 1 和实验 2 的摩擦因数及润滑介质温度。可发现参考组试样摩擦因数波动较为明显, 试验结束时摩擦因数由开始时的 0.08 上升至 0.1, 并且摩擦副在实验的中后期持续发出刺耳噪声; 与原始试样相比, 对照 1 在实验过程中摩擦因数较低且平稳, 对照 2 摩擦因数接近原始试样且初期波动明显, 但两组实验进行到中后期均保持稳定且有一定程度下降。实验 1 及实验 2 均表现出长时间的磨合过程, 摩擦因数相比于原始试样均有明显下降, 其中实验 2 的摩擦因数仅为 0.038, 为五组实验最低。实验中参考组的温升最高, 为 50.3°C , 实验 2 的温升最低, 为 17.6°C 。

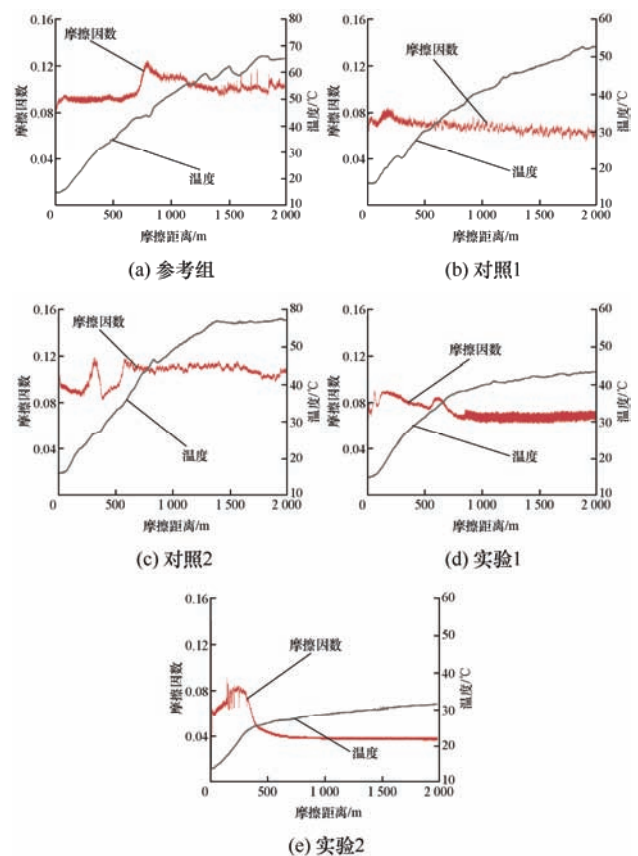


图 4 不同基体和织构槽密度试样的实验曲线

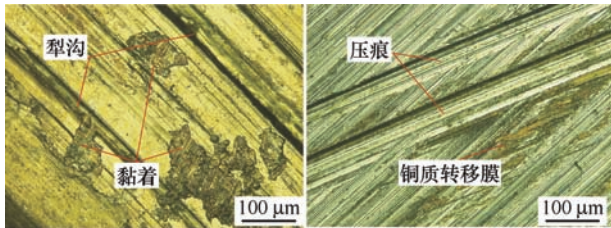
通过对前 5 组实验结果进行分析, 发现织构后的样品摩擦因数及实验温升均有显著下降, 织构上试样与织构下试样相比, 虽然磨合阶段历程更长、摩擦更加剧烈, 但进入稳定摩擦期后, 摩擦因数下降明显, 曲线十分稳定, 滑摩过程变得十分温和, 同时温升更低, 滑摩进入稳定阶段后就不再有大幅变化, 这将有助于摩擦副的长时间

运行。其中 32 槽试样相比于 16 槽试样表现出更低的摩擦因数和温度, 表明织构 32 槽可以更有效的改善摩擦工况。

2.1.2 不同织构基体摩擦副的磨损特性分析

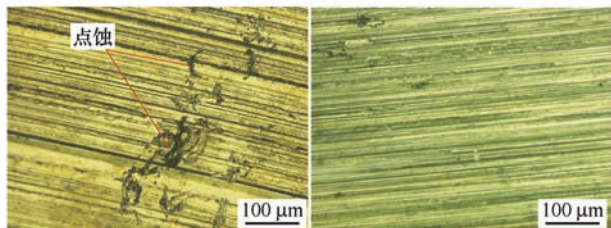
图 5 为上述 5 组试样磨损后的表面微观形貌。滑摩后参考组的上、下试样表面微观形貌如图 5a、5b 所示, 上试样表层金属被大量剥落且部分转移至下试样, 上试样表面形成最大直径超过 $100\ \mu\text{m}$ 的凹坑, 摩擦带中存在多处压痕和犁沟, 表面严重擦伤; 下试样摩擦带压痕明显, 最大宽度为 $50\ \mu\text{m}$, 表面

则有成片转移膜, 经 SEM 放大及 EDS 测量(如图 6 和图 7)可知, 转移膜成片层状, 主要成分与上试样材料组成一致, 故判断该铜质转移膜是由上试样磨损下的铜合金组成。滑摩后对照组 1 的上、下试样表面形貌如图 5c、5d 所示, 其中上试样擦伤严重, 发生表层金属完全剥落现象, 并在金属剥落处形成大量点蚀, 下试样表面基本没有擦伤痕迹, 粗糙峰完整; 因此对照组 1 摩擦因数尽管较高, 但并没有出现显著波动。



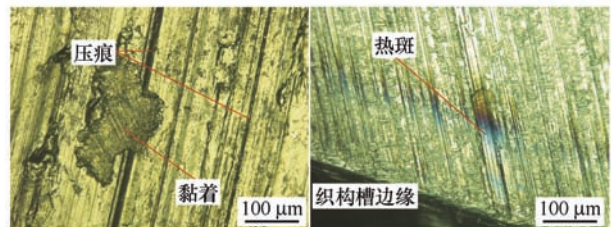
(a) 参考组上试样

(b) 参考组下试样



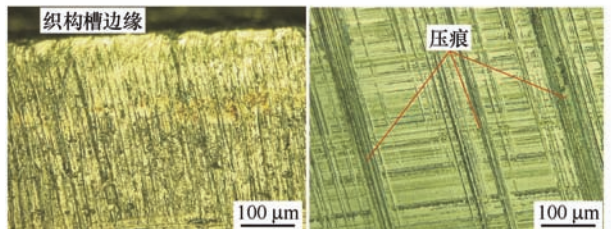
(c) 对照1上试样

(d) 对照1下试样



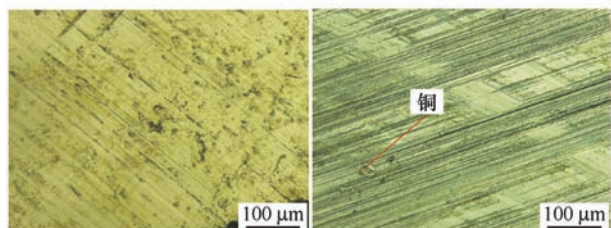
(e) 对照2上试样

(f) 对照2下试样



(g) 实验1上试样

(h) 实验1下试样



(i) 实验2上试样

(j) 实验2下试样

图 5 不同基体和织构槽密度试样的磨损表面形貌

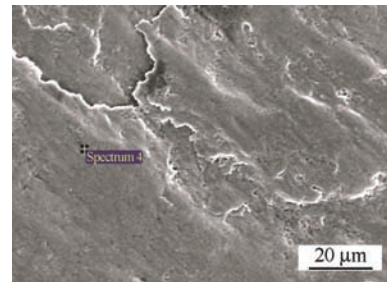


图 6 SEM 观察下的转移膜形貌

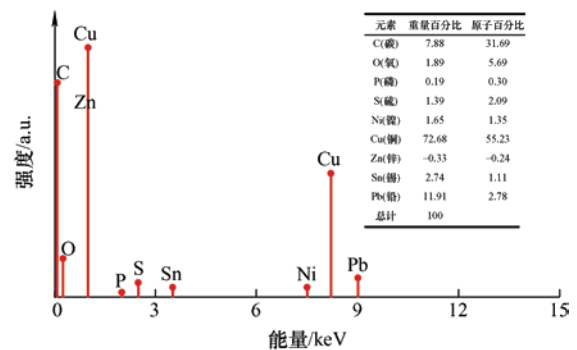


图 7 转移膜能谱分析

当下试样表面织构槽由 16 增加至 32 后, 上、下试样滑摩后的表面微观形貌分别如图 5e、5f 所示, 可以看出上试样表面发生了严重的粘着磨损, 撕裂下的铜颗粒在横向剪切力和纵向载荷作用下, 在摩擦副表面产生了切削和挤压效应, 从而在上试样表面产生了大量的压痕和犁沟, 下试样凹槽边缘处则有轻微擦伤痕迹, 边缘部分区域形成了藏青色热斑, 利用 SEM 对热斑区进行放大, 可得到如图 8 所示的表面微观形貌, 可见基体材料上附着一层薄膜状物质, 使用 EDS 对该物质进行能谱分析, 得到如图 9 所示结果, 可发现铁元素(Fe)和氧元素(O)含量非常高, 从而说明该物质为 Fe 元素的氧化物质, 即下试样表面局部区域出现了氧化迹象。

图 5g、5h 分别为实验 1 上、下试样滑摩后的表面微观形貌, 可见上试样凹槽边缘处有抛光迹象, 表面加工痕迹保存完整, 下试样表面存在较多压痕及犁沟; 当上试样织构槽数量为 32 时, 滑摩后上、

下试样表面微观形貌如图 5i、5j 所示,可发现上试样表面十分平整,仅部分区域存在较浅压痕和犁沟,表面原始加工痕迹被完全磨平,未发现其他磨损形式,下试样部分区域存在磨损痕迹,但整体粗糙峰保存完整,仅有少量铜颗粒被黏附在摩擦带中。

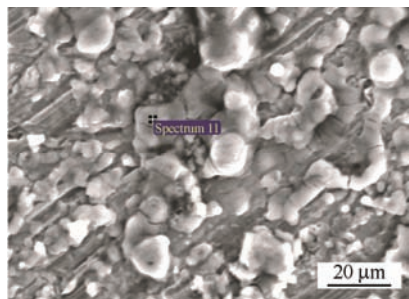


图 8 SEM 观察下的热斑区形貌

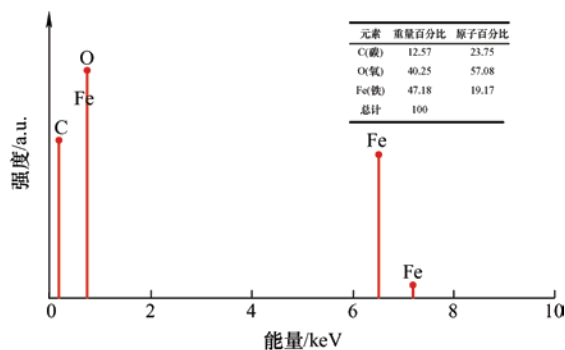


图 9 热斑区物质的能谱分析

图 10 为摩擦副实验后磨损量对比图,由于 42CrMo 磨损量较低,因此仅对 CuPb15Sn5 磨损量进行对比,由图可以看出:所有下试样织构试样均发生了严重的磨损,对照 1、2 的磨损质量分别为参考组磨损量的 73 倍和 41 倍;上试样织构有效降低了磨损,实验 1、2 的磨损量比参考组磨损量分别降低了 37.45% 和 57.48%;对照 1 和 2 的磨损量大幅上升,主要原因是织构材料 42CrMo 硬度较高,沟槽旁的金属熔融物虽然经过砂纸打磨,但很难完全去除,从而形成了锋利的棱边,较软的 CuPb15Sn5 摩擦过程中嵌入织构槽中,造成刮擦。

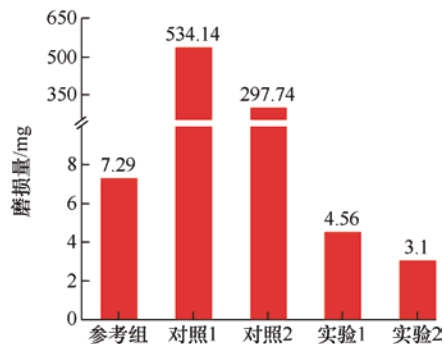


图 10 不同基体和织构槽密度上试样磨损量

通过以上分析可以发现在硬度较高的 42CrMo 上加工织构槽,不仅没有减摩效果,而且还增大了磨损量;而在硬度较低的 CuPb15Sn5 上加工织构槽时,可明显改善摩擦磨损特性。因此,将实验 2 的摩擦副将作为后续内容的主要研究对象。

2.2 织构角度对摩擦特性的影响

由于软材料 CuPb15Sn5 摩擦面形状为圆环,对于织构角度有限制,织构角度过小将会导致织构槽之间发生干涉现象,因此对织构槽数目为 32 槽、织构角度为 45°、60°及 90°的盘式摩擦副进行实验研究,上试样加工后织构槽分布样式如图 11 所示,其中原始试样及织构角度为 60°的摩擦副的摩擦学行为已在上节进行讨论,在此不再详细分析。

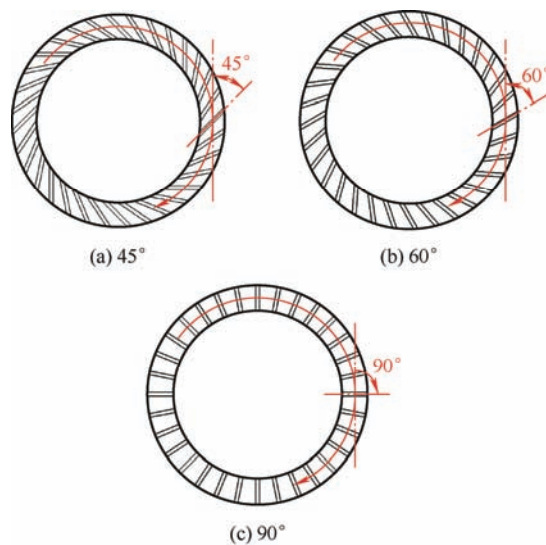


图 11 不同织构角度试样织构槽分布示意图

2.2.1 具有不同织构角度摩擦副的摩擦特性分析

图 12 为实验 3、4 摩擦副的摩擦因数、润滑介质温度及磨损量对比,实验 3 试样在稳定阶段的摩擦因数仅为 0.03,且在实验初期未发生明显的磨合阶段,从而说明织构槽油膜可提供足够的油膜支撑力,使两接触面分离,但摩擦因数在实验过程中出现了两次较大波动,特别是主动摩擦片滑动 1 500 m 后发生的波动,表明实验过程并不平稳,实验后期油膜已失效,因此 90°织构槽难以保证配流副的稳定运行;实验 4 的摩擦因数虽有明显降低,且没有出现大幅度波动,但实验过程中仍存在轻微噪声和震动,摩擦因数也全程保持小幅震荡,上述现象表明油膜没有提供足够支撑力,摩擦副部分区域处于边界润滑状态。实验 3、4 的润滑介质温升低于参考组的油液温升,但高于实验 2 的温升。

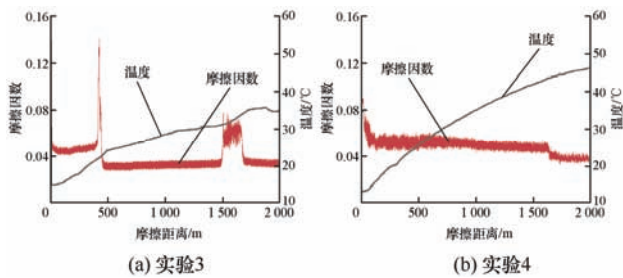


图 12 实验 3、4 条件下的试样摩擦因数和温度

2.2.2 具有不同织构角度摩擦副的磨损特性分析

图 13 为实验 3、4 摩擦试样的表面微观形貌。

由图 13a 可以看出实验 3 的上试样部分区域出现了由于点蚀造成的不规则浅坑, 剥离后的铜材料形成磨粒, 并嵌入到上试样表面, 在滑摩过程使材料产生塑性流动, 形成大量犁沟; 图 13b 所示下试样表面大部分粗糙峰消失, 形成了明亮的摩擦带, 沿摩擦副运动方向, 磨粒挤压导致试样表面塑性变形, 产生多条明显压痕。结合实验中摩擦因数变化趋势, 可推测其先发生了轻微的粘着磨损, 被剥离的铜颗粒形成磨屑, 在载荷作用下嵌入上、下试样表面, 随着上试样旋转运动对试样表面进行切削和挤压剥落, 造成三体磨粒磨损。

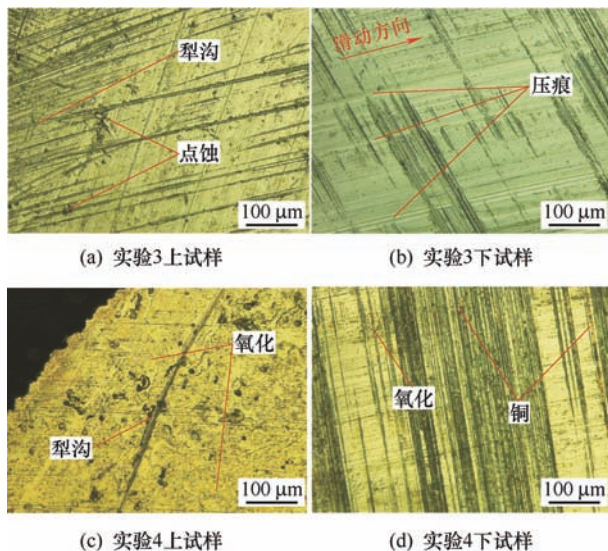


图 13 实验 3、4 的上、下试样磨损表面形貌

图 13c 所示上试样表面已被严重破坏, 原始加工痕迹被完全磨掉, 表面分布着点蚀后形成的凹坑以及较深的犁沟, 局部区域铜材料被氧化变色; 图 13d 所示下试样表面被研磨出多条明亮摩擦带, 局部区域也出现了氧化痕迹, 下试样粗糙峰间可见铜颗粒, 但未形成大面积铜质转移膜。由图 13c、13d 可以看出实验 4 的主要磨损机制是轻微的粘着磨损和磨粒磨损, 部分区域金属被氧化, 由粘着磨损产生的铜颗粒一部分被嵌入上试样表面和下试样粗糙

峰中, 另一部分形成磨粒在摩擦副之间滚动, 形成“三体摩擦”, 从而导致摩擦因数出现小幅震荡。

图 14 为四组实验 CuPb15Sn5 试样磨损量对比, 其中实验 3 的 CuPb15Sn5 试样磨损量为参考组的 68.9%, 实验 2 的磨损量依旧为最低; 总之, 四组实验的磨损量与摩擦因数变化关系基本相同, 从而说明织构槽可有效改善摩擦副磨损状况; 但织构槽角度对摩擦副摩擦特性影响较为复杂, 例如实验 4 的磨损量较高, 为参考组的 250.8%, 表明 45° 织构槽的实际润滑状况较差。

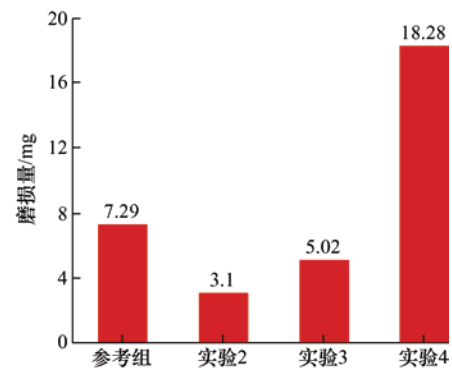


图 14 不同织构角度上试样磨损量

上述现象和结果可以从流体动压润滑和织构槽容纳磨粒能力的角度予以解释。由文献[11]可知, 当沟槽织构角度为 90° 时, 油膜提供的承载力较大, 且分布更为平均, 因此在实验过程中表现出极低的摩擦因数; 织构槽角度为 60° 时, 织构槽和运动方向的尖角处会形成油膜厚度的收敛区, 有助于产生更高的局部油膜支撑力, 表现出更优异的动压润滑性能, 因此摩擦因数较为稳定; 织构槽角度为 45° 时, 摩擦副油膜承载力小, 织构槽提供的流体动压力分布较为分散, 因此试样磨损量较大; 另外, 磨粒对摩擦副的磨损特性影响也很大, 因此还需考虑织构槽容纳磨粒的能力, 由试样表面微观形貌可知, 45° 织构槽容纳磨粒的能力最差, 90° 织构槽次之, 60° 织构槽则表现出较好的抗磨粒磨损能力。

2.3 载荷对摩擦性能的影响

依据前文结果, 仅对 CuPb15Sn5 (T32-60°) 及 42CrMo (NT) 组成的盘式摩擦副进行测试, 载荷选定为 1 MPa、2 MPa、3 MPa、4 MPa、5 MPa, 其中 3 MPa 摩擦磨损特性已在前文介绍。

2.3.1 不同载荷下的摩擦特性分析

图 15 为不同载荷下的摩擦因数和润滑介质升温情况。当载荷为 1 MPa 时, 摩擦因数十分平稳, 无明显磨合过程, 实验结束时摩擦因数由初始时的 0.1 缓慢降至 0.06; 当载荷为 2 MPa 时, 实验存在

明显磨合过程,摩擦副滑动距离达 1 000 m 时,磨合过程结束,此时接触面间已形成稳定润滑油膜,摩擦因数由 0.11 快速下降至 0.048,并保持该数值至实验结束。3 MPa 下的摩擦因数如图 4c 所示。当载荷上升至 4 MPa 时,摩擦因数波动十分剧烈,在 500~1 000 m 的滑磨距离内存在短暂的摩擦稳定期,摩擦因数约为 0.06,但随后润滑状态极度恶化,摩擦因数最高上升至 0.16,并伴随着极大的噪音,上述现象表明实验后期润滑油膜已失效。

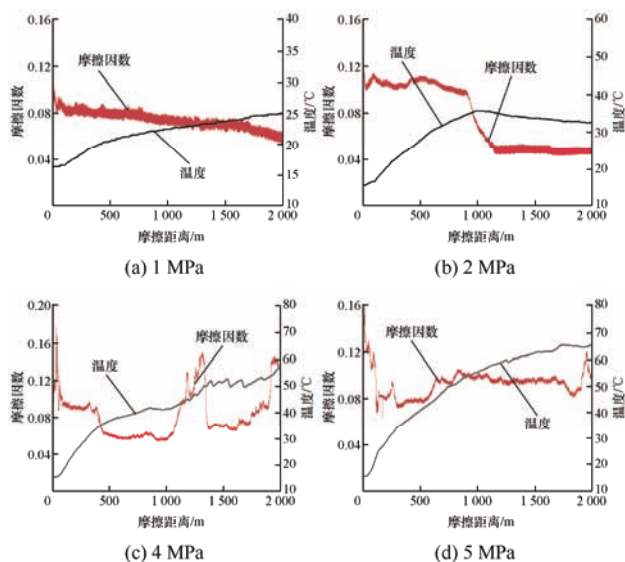


图 15 不同载荷作用下的试样摩擦因数和温度

当载荷为 5 MPa 时,摩擦因数有明显上升,基本保持为 0.1,摩擦副在实验全程均有噪声和小幅振动现象,表明此时润滑方式由流体润滑转变为混合润滑。总之,4 MPa 和 5 MPa 测试条件下,摩擦因数随着载荷的升高而增大,该特征明显不同于低载荷测试条件下的摩擦因数;此外,润滑介质升温曲线也是随载荷的增加而增大。

2.3.2 不同载荷下的磨损特性分析

图 16 为试样在不同载荷下的表面微观形貌。当载荷为 1 MPa 时,摩擦因数较为稳定,尽管图 16a 局部区域出现了犁沟,但上试样表面仍较为光整,磨损产生的部分铜屑在载荷及扭矩作用下对接触面形成挤压,形成较多的条纹状挤压带;下试样表面粗糙峰保存完整,仅存在少量的点蚀凹坑(如图 16b 所示)。载荷为 2 MPa 时,上试样磨损方式与 1 MPa 工况下的测试结果相同,但由于存在磨合过程,因此犁沟深度及挤压带宽度均有所增大,并在局部区域发现了氧化迹象;图 16c 所示的下试样表面被犁出了几条明显沟槽,并有少量铜颗粒嵌入粗糙峰中形成了转移膜,但未发生氧化现象。

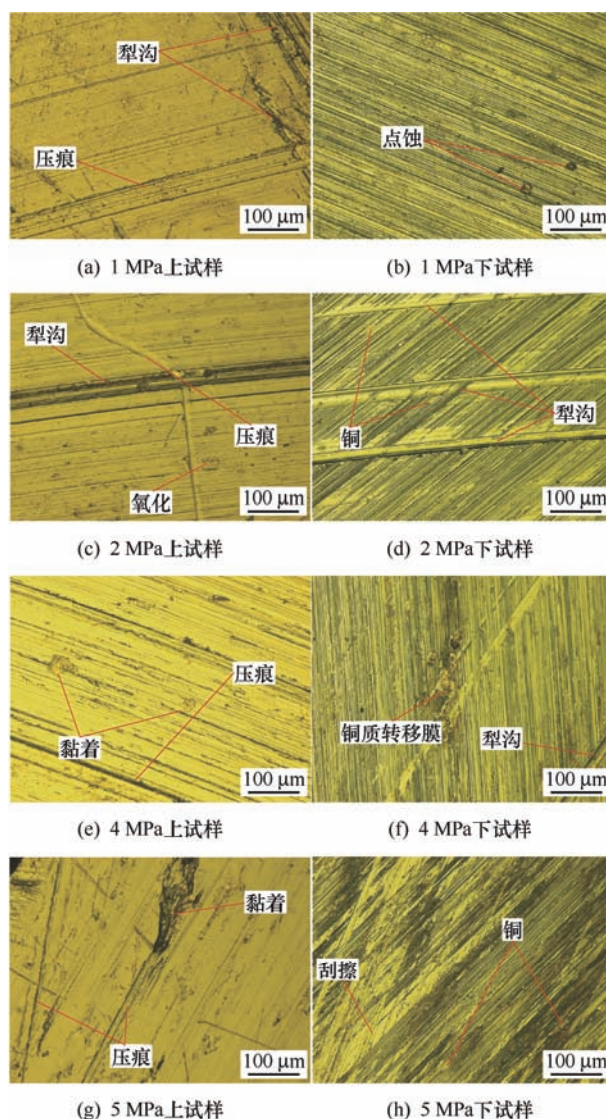


图 16 不同载荷工况下的上、下试样磨损表面形貌

当载荷为 4 MPa 时,上试样表面出现了轻微粘着磨损,铜合金脱落后形成最大直径约为 50 μm 的凹坑;下试样表面则出现了犁沟及大量压痕,部分区域粗糙峰被磨平形成了明亮的摩擦带,从上试样脱落的铜合金材料形成铜质转移膜粘附在下试样摩擦环表面,且存在局部氧化现象。载荷为 5 MPa 时,上试样原始加工痕迹被完全磨平,局部区域发生了严重的粘着磨损,摩擦面受剥离的铜颗粒挤压作用,形成了较多的压痕;下试样表面氧化严重,整个摩擦带区域的金属几乎被氧化为黑色,同时伴随有严重的刮擦,形成多条宽度约为 50 μm 的摩擦带。

由上述结果可知,载荷在 1~3 MPa 以内,摩擦因数随载荷增大而降低,原因是油膜刚度随载荷升高而增大,但油膜厚度随之降低,从而导致试样磨损程度随载荷增大而加剧。当载荷上升至 4 MPa 时,油膜支撑力无法使接触面处于流体润滑状态,金属直接接触产生了大量的摩擦热,使得润滑介质

温升严重，润滑油粘度下降，引起油膜的局部破坏，导致摩擦副运动状态极不稳定；摩擦副在 5 MPa 测试条件下则发生了严重的氧化。

图 17 为不同载荷条件下 CuPb5Sn5 上试样磨损量对比图。当载荷小于 3 MPa 时，磨损量随载荷增大而轻微上升；当载荷上升至 4 MPa 后，磨损量发生了突变，4 MPa 条件下的磨损量为 3 MPa 条件下磨损量的 12.8 倍，5 MPa 条件下的磨损量则为 3 MPa 时的 24.5 倍；上述数据表明载荷大于 4 MPa 后，润滑油膜被压溃，测试载荷已超过极限压力。

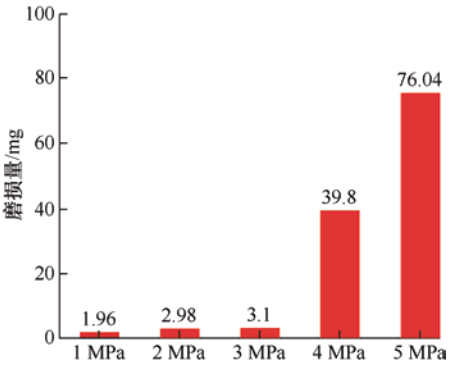
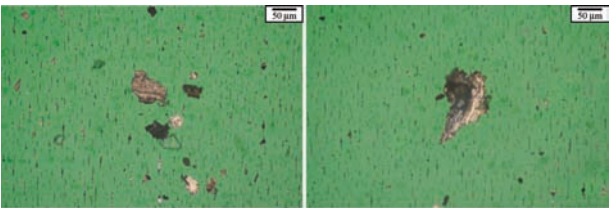


图 17 不同载荷下 CuPb15Sn5 的上试样磨损量

2.4 极限工况下的油液质量分析

在实验中发现，当实验现象不稳定并伴随严重噪声时，摩擦副润滑油液将变浑浊并有大量黑色沉淀物，为分析极限工况下润滑油污染程度，收集了 5 MPa 测试条件下的润滑油液进行分析检测，检测结果如表 3，元素分析如表 4，该表显示润滑油液粘度和酸值没有超出参考值，即油液未发生明显氧化变质，但油液颗粒总量较多，污染等级较高，其中 5~15 μm 颗粒占主导地位，油液中金属元素 Cu 含量偏高，表明上试样磨损异常。铁谱图表明油液中存在少量长轴尺寸大于 50 μm 的铜质磨粒，主要产生方式为黏着磨损(图 18 a)及磨粒磨损(图 18 b)，其中磨粒磨损产生的磨粒是由于测试载荷和转速过高，磨损表面切应力较大，使得表层金属被剥离^[18]；粘着磨损的磨粒则是由于接触面局部温度过高，产生焊点，金属产生黏着，在滑动过程中被撕裂下来；同时在上述磨粒表层发现了少量黑色油泥沉积。



(a) 黏着磨损磨粒 (b) 磨粒磨损磨粒

图 18 磨粒铁谱图像

表 3 润滑油检测结果

理化指标	检测结果	参考值
运动黏度 40 ℃/(mm ² /s)	43.20	39.1~52.9
酸值/(mg/g)	0.32	--
污染指标	检测结果	参考值
污染度 NAS 1638 等级	>12	≤8
5~15 μm	2 282 950	≤64 000
15~25 μm	1 650	≤11 400
25~50 μm	175	≤2 025
50~100 μm	25	≤3 60
>100 μm	50	≤64

注：污染指标单位为 counts/100 μm。

表 4 润滑油元素分析结果

元素分析	检测结果	参考值
Fe(铁) mg/kg	4	≤10
Cu(铜) mg/kg	32	≤10
Pb(铅) mg/kg	3	≤3
Cr(铬) mg/kg	<1	≤4
Sn(锡) mg/kg	<1	≤3
Al(铝) mg/kg	<1	≤3

由上述现象可以推测出摩擦副在 5 MPa 测试条件下出现了严重的疲劳剥落及黏着磨损，并且由于上试样 CuPb15Sn5 硬度较低，因此更多的异常磨损发生在上试样；润滑油液及试样表面存在的大量黑色沉积物表明实验载荷过大，油液温度过高导致其被氧化为胶质或积碳状物体。

3 磨损机理分析

在实验初期，摩擦副通常会经历磨合期，此时由于上、下摩擦片刚开始接触、摩擦，零件间还未适应、定形，摩擦因数存在波动，磨损较为剧烈，有较多的金属颗粒脱落，加剧摩擦副磨损，因此温升较快，润滑油膜也难以形成，摩擦副处于边界润滑或混合润滑；磨合阶段之后，摩擦副间冲突阻力减小，同时形成了良好的润滑油膜，摩擦因数逐渐趋于稳定，部分试样温度上升变缓并趋于平衡。经过一段时间磨损，随着油液中磨屑积累和粘度变化，导致润滑油膜失效，使得摩擦副间隙及表面形貌发生改变，此时配对材料会急剧磨损，因此摩擦特性较差的配对副在实验后期会发出刺耳噪声，摩擦因数也随之发生波动。

当在 CuPb15Sn5 试样上织构凹槽时，摩擦副具

有极好的摩擦特性,与未织构试样相比,摩擦因数和温度均有大幅下降,磨损率也减小,主要原因是 CuPb15Sn5 试样经过激光加工后热影响区较小,应力集中现象也不明显^[19];织构密度由 16 槽上升为 32 槽后,摩擦副则表现出更低的磨损程度,表明增加织构槽数目可有效提升收纳磨屑效率,从而降低磨粒磨损发生概率,并可提供更均匀的流体动压力。

对不同织构角度下盘式摩擦副磨损特性分析可知,其主要磨损机制为粘着磨损和磨粒磨损。粘着磨损导致上试样表面铜材料被剥离并形成磨粒;磨粒磨损导致试样表面形貌的进一步改变,同时伴随摩擦学行为变化,当磨粒磨损较为严重时,试样表面温升明显,使得金属被氧化。织构槽与滑动方向角度的改变使得织构槽提供的流体动压力被改变,从而影响到油膜厚度、油膜刚度的变化,同时织构槽角度还会影响磨粒的收纳效率和排出效率,从而影响接触面间磨粒的数量。测试载荷主要对油膜强度及油膜刚度产生影响,在压力较低时,摩擦因数及磨损程度均随之增大而减小,当载荷超出极限值后,摩擦副接触表面会严重氧化,且液压油液会被污染产生变质。

4 结 论

(1) 盘式摩擦副织构后摩擦因数及温升均有显著下降,其中 42CrMo 试样织构后的摩擦学性能较差, CuPb15Sn5 试样织构后磨合期较长,但进入稳定摩擦阶段后,摩擦温升和摩擦因数均会下降。对比分析试样磨损后的表面形貌发现, CuPb15Sn5 试样的大部分磨损发生在磨合阶段,进入稳定摩擦阶段后,摩擦副就由边界润滑转为流体动压润滑,摩擦接触面没有 42CrMo 试样表面破坏的严重。

(2) 不同织构角度下盘式摩擦副的摩擦机制没有太大差别,主要表现为粘着磨损、磨粒磨损和金属氧化,但织构角度不同会导致织构槽提供的流体动压支撑力不同,以及磨屑收纳效率的不同,因而表现出不同摩擦学行为。通过实验可以发现,织构角度为 60°时能提供最大的流体动压支撑力,织构数目为 32 槽时能提供最高的磨屑收纳效率;需要指出的是,由于受检测和观察技术手段的限制,本文主要通过磨损表面磨粒磨损程度对磨屑收纳效率进行了间接评价。

(3) 当前实验条件下,3 MPa 为织构化摩擦副的极限压力,当超过极限压力时,未织构区的润滑油膜会被破坏,造成严重的磨粒磨损及粘着磨损,液

压油温升增大,摩擦接触面会被氧化。

(4) 研究结果表明沟槽状织构对盘式摩擦副的摩擦学性能影响较为显著,但试验中所采用的环-盘摩擦副与轴向柱塞泵中的真实配流盘存在一定差距,因此后续研究中需要对沟槽状织构化配流副的容积效率和液压力矩稳定性等指标进行测试和评价。

参 考 文 献

- [1] 张森,肖林京,刘强,等. 汽车通风盘式制动器的摩擦学性能测试和流固热耦合仿真[J]. 汽车工程, 2017, 39(6): 675-682.
ZHANG Sen, XIAO Linjing, LIU Qiang, et al. Tribology performance testing and fluid-solid-heat coupling simulation of automotive ventilated disc brake[J]. Automotive Engineering, 2017, 39(6): 675-682.
- [2] 胡志栋,姜继海. 液压滑环端面油膜密封的摩擦转矩[J]. 吉林大学学报, 2009, 39(3): 657-661.
HU Zhidong, JIANG Jihai. Friction torque of oil film face seal in hydraulic slipring[J]. Journal of Jilin University, 2009, 39(3): 657-661.
- [3] LI T, WANG S, SHI J, et al. An adaptive-order particle filter for remaining useful life prediction of aviation piston pumps[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(05): 941-948.
- [4] YIN F, NIE S, JI H, et al. Non-probabilistic reliability analysis and design optimization for valve-port plate pair of seawater hydraulic pump for underwater apparatus[J]. Ocean Engineering, 2018, 163(9): 337-347.
- [5] 张海平. 国外近 40 年来对轴向柱塞泵马达研究的综述[J]. 液压气动与密封, 2015, 35(10): 1-6.
ZHANG Haiping. A Summarize of the research on axial piston machines overseas in last 40 years[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2015, 35(10): 1-6.
- [6] 陈旭斌. 轴向柱塞泵配流副低速下摩擦磨损特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
CHEN Xubin. A Study on the low-speed tribological performance of port plates in axial piston pumps[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [7] CHEN Y, SONG L, ZHANG C, et al. Plasma nitriding without formation of compound layer for 38CrMoAl hydraulic plunger[J]. Vacuum, 2017, 143(9): 98-101.
- [8] 王显彬,王耀华. 轴向柱塞泵摩擦副材料匹配性能的磨损实验研究[J]. 机电产品开发与创新, 2016, 29(6): 124-126.
WANG Xianbin, WANG Yaohua. Emulate research on

- adaptability of important frictional pairs in axial piston pump[J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2016, 29(6): 124-126.
- [9] RIZZO G, BONANNO A, MASSAROTTI G, et al. Energy efficiency improvement by the application of nano structured coatings on axial piston pump slippers[C]//*Proceedings of the 10th International Fluid Power Conference Dresden*. Dresden: Dresden University of Technology, 2016, (2): 313-328.
- [10] 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.
- [11] D'ANDREA D, EPASTO G, BONANNO A, et al. Failure analysis of anti-friction coating for cylinder blocks in axial piston pumps[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 104: 126-138.
- [12] LIN N, LIU Q, ZOU J, et al. Surface texturing-plasma nitriding duplex treatment for improving tribological performance of AISI 316 stainless steel[J]. *Materials*, 2016, 9(11): 1-26.
- [13] 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: 68-78.
- [14] ZHANG B, HUANG W, WANG J, et al. Comparison of the effects of surface texture on the surfaces of steel and UHMWPE[J]. *Tribology International*, 2013, 65: 138-145.
- [15] 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 Guorong, LIAO Daisheng, 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.
- [16] 邓海顺, 祁胜, 于海武, 等. 轴向柱塞泵配流副低压区织构化数值分析[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(6): 203-207.
- DENG Haishun, QI Sheng, YU Haiwu, et al. Numerical analysis for textured port plate of axial piston pump[J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2011, 42(6): 203-207.
- [17] 邓海顺. 织构化配流副摩擦润滑特性的理论与试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- DENG Haishun. Theoretical and experimental research on friction and lubrication characteristic of textured port plate pair[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [18] 张建华. 基于油液分析的陶瓷压砖机液压系统的状态监测[D]. 广东: 华南理工大学, 2007.
- ZHANG Jianhua. Condition monitoring of hydraulic system of ceramic press based on oil analysis[D]. Guangdong: South China University of Technology, 2007.
- [19] 王静秋, 王晓雷. 表面织构创新设计的研究回顾及展望[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(23): 84-95.
- WANG Jingqiu, WANG Xiaolei. State of the art in innovative design of surface texture[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(23): 84-95.

作者简介: 窦振华, 男, 1995 年出生。主要研究方向为液压元件。

E-mail: douzhenhua0018@163.com

黄家海(通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。

主要研究方向为流体传动与控制。

E-mail: huangjiahai@tyut.edu.cn