

# 表面织构参数对液压马达滑靴副的 摩擦学性能影响研究

张东亚<sup>1</sup>, 孙喜洲<sup>1</sup>, 高峰<sup>1</sup>, 钟善军<sup>2</sup>, 段继豪<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048;

2. 宁波中意液压马达有限公司, 浙江 宁波 315200)

**摘要:** **目的** 通过表面织构改善液压马达连杆滑靴副的摩擦学性能。**方法** 首先, 基于 Reynolds 方程研究表面织构参数 (直径  $d$ 、面密度  $s_p$ 、深度  $h_p$ ) 对滑靴副的无量纲压力 ( $P_{av}$ ) 的影响规律。其次, 设计正交试验研究表面织构参数对摩擦系数的影响, 分析表面织构的润滑机理。**结果**  $P_{av}$  随着  $d$  的增加而增大; 随着  $s_p$  的增大, 先增加后缓慢减小, 当  $s_p=10\%$  时,  $P_{av}$  达到最大值。此外, 随着  $h_p$  的增大,  $P_{av}$  先增加后快速减小, 在  $h_p=2\ \mu\text{m}$  时达到最大值。摩擦实验结果表明, 合适的织构参数能有效降低摩擦系数, 7# 织构表面 ( $d=700\ \mu\text{m}$ ,  $s_p=10\%$ ,  $h_p=5\ \mu\text{m}$ ) 的摩擦系数最小为 0.034, 比无织构表面的降低 66%。正交极差分析表明, 各因素对摩擦系数影响的主次顺序为: 直径 > 面密度 > 深度。摩擦系数随着直径的增大而减小, 随着面密度的增大而增大, 随着深度的增大而减小。**结论** 经过优选的表面织构参数有利于形成动压润滑, 从而降低摩擦系数和磨损。

**关键词:** 液压马达滑靴副; 正交试验; 表面织构; 承载力; 摩擦系数

**中图分类号:** TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)04-0230-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.04.033

## Effect of Texture Parameters on Tribological Performance of Slipper Surface in Hydraulic Motor

ZHANG Dong-ya<sup>1</sup>, SUN Xi-zhou<sup>1</sup>, GAO Feng<sup>1</sup>, ZHONG Shan-jun<sup>2</sup>, DUAN Ji-hao<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Ningbo Zhongyi Hydraulic Motor Co., Ltd, Ningbo 315200, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the tribological performance of the hydraulic motor slipper pair by surface texture. Firstly, the effect of surface texture parameters (diameter  $d$ , surface density  $s_p$ , depth  $h_p$ ) on the dimensionless bearing capacity ( $P_{av}$ ) of textured connecting rod surface was investigated based on Reynolds equation. Secondly, the friction coefficients of surface texture with different parameters were studied by orthogonal experiments, and the corresponding lubrication mechanism was analyzed.  $P_{av}$  increased linearly with the increase of  $d$ , while  $P_{av}$  first increased and then decreased with the increase of  $s_p$ , and the maximum  $P_{av}$  was obtained at  $s_p$  of 10%. As the  $h_p$  increased,  $P_{av}$  first increased and then decreased and reached the maximum at  $h_p$  of 2  $\mu\text{m}$ . The friction coefficient of the textured surface with suitable parameters was effectively reduced. The 7# surface ( $d=700\ \mu\text{m}$ ,  $s_p=10\%$ ,  $h_p=5\ \mu\text{m}$ ) had a minimum friction coefficient of 0.034, which was 66% lower than that of the

收稿日期: 2018-09-27; 修订日期: 2018-11-29

Received: 2018-09-27; Revised: 2018-11-29

基金项目: 国家自然科学基金 (51605381); 陕西省自然科学基金 (2017JQ5101); 中国博士后科学基金项目 (2017M613171); 陕西省教育厅自然科学专项 (17JK0544)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51605381), Natural Science Fund Plan of Shaanxi Province (2017JQ5101), Chinese Postdoctoral Project (2017M613171) and Natural Science Program of Shaanxi Education Department (17JK0544)

作者简介: 张东亚 (1984—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为表面工程及摩擦学。邮箱: dyzhang@xaut.edu.cn

Biography: ZHANG Dong-ya (1984—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: surface engineering and tribology. E-mail: dyzhang@xaut.edu.cn

non-textured surface. Range analysis showed that the influence order of factors on the friction coefficient was: diameter>area density>depth. The friction coefficient decreased with increase of diameter and depth, but increased with the increase of area density. The surface texture parameters through selection are beneficial to formation of dynamic pressure lubrication to reduce friction coefficient.

**KEY WORDS:** hydraulic motor slipper pair; orthogonal test; surface texture; bearing capacity; friction coefficient

曲柄连杆液压马达具有扭矩大、容积效率高、低速稳定性好等优点,在工程机械、矿山机械、船舶等行业得到广泛应用。但在低速重载条件下,液压马达的运动副表面的油膜难以建立或容易破裂,导致发生严重磨损,降低液压马达的机械效率和使用寿命<sup>[1-2]</sup>。其中滑靴副的摩擦磨损引起的机械效率损失占到 50% 以上,直接影响着液压马达的性能<sup>[3]</sup>。因此,合理设计提高滑靴副的表面性能,改善摩擦学性能,对提高低速大扭矩液压马达的性能和寿命具有重要意义。

表面织构在充分润滑或混合润滑时形成微流体动压,在乏油润滑的情况下储存润滑油,提供二次润滑<sup>[4-6]</sup>,显著改善了运动副的润滑性能,并成功应用于机械密封、滑动轴承等机械系统<sup>[7-8]</sup>。因此,将表面织构技术引入液压马达运动副是改善摩擦性能的可行方案之一。目前表面织构主要应用在配流盘表面<sup>[9-10]</sup>。高殿荣<sup>[11]</sup>在配流副表面设计了凹坑织构,CFD 仿真研究显示,表面织构产生了动压效应,改善了配流盘的润滑性能和配流性能。王兆强<sup>[12]</sup>在配流副表面设计了正方形、三角形、圆柱形、球冠形等表面织构,通过理论分析发现,正方形织构产生的油膜厚度和承载力最大。在改善磨损方面,邓海顺<sup>[13]</sup>在配流副的低压区引入表面织构,结果表明,表面织构能够减小摩擦系数和降低偏磨。李阳<sup>[14]</sup>采用光刻-电解工艺在配流副加工表面织构,磨损试验表明,无表面织构的配流副发生了严重的粘着磨损,织构化表面为轻微的磨粒磨损。大量研究表明,经过织构化处理的配流副能提高轴向柱塞液压泵的润滑性能,但对滑靴副研究较少。相对于轴向柱塞液压泵,曲柄连杆液压马达的负载更大、转速更低,因此引入表面织构技术改善滑靴副的摩擦学性能更具现实意义。

本文以曲柄连杆液压马达的滑靴副为研究对象,首先建立研究圆柱形表面织构的几何模型,并数值仿真表面织构参数对承载力的影响。最后采用正交试验,获取表面织构参数对摩擦系数的影响权重,为曲柄连杆液压马达的滑靴副表面织构化提供理论和实验依据。

## 1 表面织构润滑模型

图 1a 为曲柄连杆液压马达的滑靴副示意图,图 1b 为连杆表面的圆柱形织构模型,表面织构关于中心线对称分布。连杆面和曲轴具有相同曲率半径,因此展开后为两平行表面,如图 1c 所示。其织构面密度和油膜厚度分别如式(1)和(2)所示。

$$S_p = \frac{\pi r_p^2}{L^2} \quad (1)$$

$$h = \begin{cases} h_0 + h_p & (x, y) \in \Omega \\ h_0 & (x, y) \notin \Omega \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $S_p$  为织构的面密度,  $L$  为织构间距,  $r_p$  为织构半径,  $h_p$  为织构深度,  $h_0$  为初始油膜厚度,  $U$  为润滑油的流速,  $\Omega$  为织构区域。

建立流体动压润滑模型,需做如下假设: 1) 润滑油为牛顿流体,理化性能参数为常数且不随温度变化; 2) 油膜厚度  $h$  沿着油膜厚度方向压力不变; 3) 摩擦副为全油膜润滑,流体与壁面之间无相对滑移; 4) 润滑油不可压缩,忽略体积力和惯性力的影响。计算区域如图 1c 所示,沿  $X$  方向取 5 个织构,  $Y$  方向取 1 个织构,建立圆柱形织构化滑靴副的几何模型,如式(3)所示。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\mu \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3)$$

式中:  $\mu$  为润滑油的动力黏度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ),  $P$  为流体压力 ( $\text{Pa}$ ),  $u$  为相对运动速度 ( $\text{m/s}$ ),  $x$  和  $y$  分别为  $X$  方向和  $Y$  方向的长度。

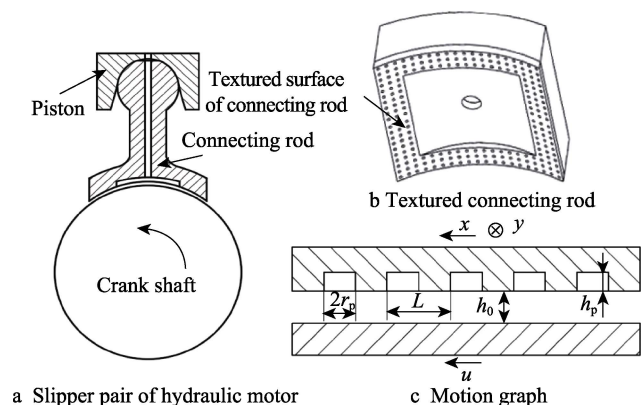


图 1 滑靴副织构化表面示意图

Fig.1 Schematic diagram of texture surface on sliding pair

为了简化计算和便于结果讨论,无量纲化处理式(3)。令  $X=x/r_p$ ,  $Y=y/r_p$ ,  $H=h/h_0$ ,  $P=p/p_0$ , 可得式(4):

$$\frac{\partial}{\partial X} \left( H^3 \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( H^3 \frac{\partial P}{\partial Y} \right) = \lambda \frac{\partial H}{\partial X} \quad (4)$$

式中:  $\lambda = \frac{6\mu u r_p}{h_0^2 p_0}$ ,  $p_0$  为标准大气压 ( $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ )。

在求解微分方程时需要设定合理的边界条件,本文取  $p_0$  为连杆油室压力,无量纲化后的边界条件如

式(5)所示:

$$\begin{cases} P(X=0, Y)=P\left(X=\frac{5L}{r_p}, Y\right)=1 \\ P(X, Y=0)=P\left(X, Y=\frac{L}{r_p}\right) \\ \frac{\partial P}{\partial Y}(X, Y=0)=\frac{\partial P}{\partial Y}\left(X, Y=\frac{L}{r_p}\right) \end{cases} \quad (5)$$

使用有限差分法对式(4)进行离散化处理,再使用超松弛迭代计算压力分布,采用 Reynolds 边界条件计算空化区域压力。通过求解式(5)可以获得计算区域内的无量纲压力  $P(x, y)$  的分布。为了描述不同区域的无量纲压力,引入平均无量纲压力,如式(6)所示。无量纲压力越大,表明表面织构所提供的承载力越大<sup>[15]</sup>。

$$\begin{cases} P_{av} = \frac{\iint P(X, Y) dx dy}{A} \\ A = X * Y \end{cases} \quad (6)$$

本文取相对运动速度  $u=0.6$  m/s, 润滑油动力黏度  $\mu=0.1$  Pa·s, 初始油膜厚度  $h_0=3$   $\mu\text{m}$ , 研究圆柱形表面织构参数(直径、面密度和深度)对无量纲压力的影响规律。

## 2 织构参数对油膜承载力的影响

图2为织构  $d=500$   $\mu\text{m}$ 、 $s_p=10\%$ 、 $h_p=10$   $\mu\text{m}$  的无量纲压力分布。从图中可以看出,圆坑的中间区域存在油膜压力峰值,此处最大无量纲压力为 7.88。油膜压力在织构出口处增加,这是由于织构边缘与上表面之间形成收敛楔造成的。相应地,油膜压力在织构的入口处发生下降,由于发散间隙会使油膜压力下降,整个织构区域内压力连续变化,其中织构的左右区域分别产生正压力和负压力,进而产生流体动压效应,这是表面织构形成油膜承载力的根源<sup>[16]</sup>,整个织构区域的平均无量纲压力为 2.03,表明表面织构可以提高油膜承载力。

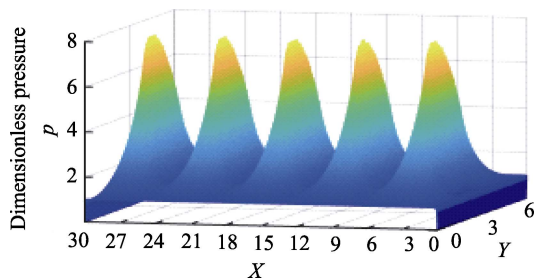


图2 表面织构( $d=500$   $\mu\text{m}$ 、 $s_p=10\%$ 、 $h_p=10$   $\mu\text{m}$ )的无量纲压力图

Fig.2 Dimensionless pressure distribution of the textured surface ( $d=500$   $\mu\text{m}$ ,  $s_p=10\%$ ,  $h_p=10$   $\mu\text{m}$ )

图3为  $s_p=10\%$ 时,5种织构深度的表面织构的无

量纲压力随直径的变化曲线。从图中可以看出,平均无量纲压力随着直径的增大而线性增加。其中,织构深度最小(3  $\mu\text{m}$ )的表面织构的承载力增幅最大。当织构深度较大时,随着直径的增加,表面织构的承载力的增幅变小。进一步发现相同直径时,深度为 25  $\mu\text{m}$  和 40  $\mu\text{m}$  的表面织构的无量纲压力的大小接近。这表明,织构深度的增加,不利于表面织构承载力的提高,当织构直径相同时,无量纲压力随着织构深度的增大而减小。

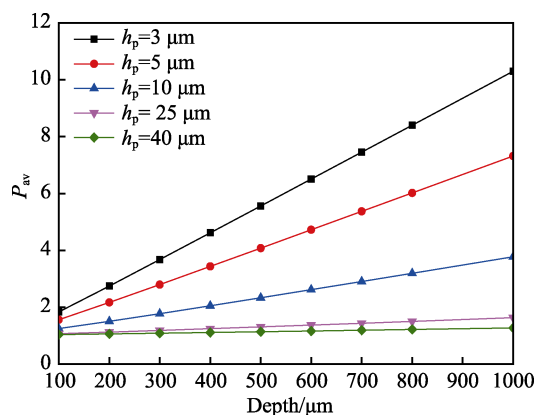


图3 织构直径对平均无量纲压力的影响  
Fig.3 Effect of texture diameter on the average dimensionless pressure

图4为织构深度  $h_p=3$   $\mu\text{m}$  时,5种织构直径的无量纲平均压力随面密度的变化曲线。从图中可以看出,随着面密度的增大,  $P_{av}$  先增加后减小,当面密度达到 10% 时,  $P_{av}$  达到最大值。织构直径越大,  $P_{av}$  的增幅越明显。这是因为随着面密度增大,单位面积上织构数量增加,动压效应区域也随之增大。同时随着面密度增大,使织构间距也减小,相邻织构的发散区域和收敛区域相互影响显著,即前一个圆坑的收敛区域与后一个凹坑的发散区部分消掉,从而减小了无量纲的平均压力<sup>[17]</sup>。

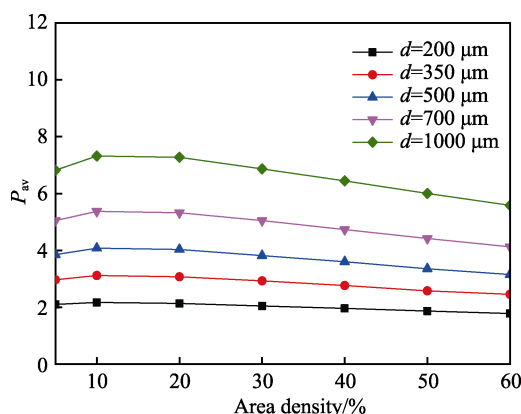


图4 织构面密度对平均无量纲压力的影响  
Fig.4 Effect of area density of textured surface on the dimensionless pressure

图5为  $s_p=10\%$  时,织构深度对5种直径的表面织构的平均无量纲压力。从图中可以看出,随着织构深度增加,表面织构的平均无量纲压力先增加后减

小。当织构深度为 2 μm 时，无量纲压力达到峰值；同时随着织构直径增大，平均无量纲压力值也随之增加。但是当织构深度增大到 30 μm 之后，表面织构的平均无量纲压力值趋于平稳。这是因为随着织构深度的变化，楔形效应和逆流所形成的漩涡影响了织构承载力<sup>[15]</sup>。当织构深度小于 2 μm 时，楔形效应占主导地位，此时无量纲压力随着深度的增加而增大。当织构深度过大时，逆流所形成的漩涡开始对承载力的削弱占主导地位，从而导致无量纲压力下降。

可见，在连杆表面引入参数合理的表面织构能提高摩擦副表面的动压承载力，从而改善润滑状态。根据上述仿真结果可得到下列结论：无量纲压力随着直径的增大而增加，随着面密度的增大先减小后增大，随着深度的增加先减后增大。

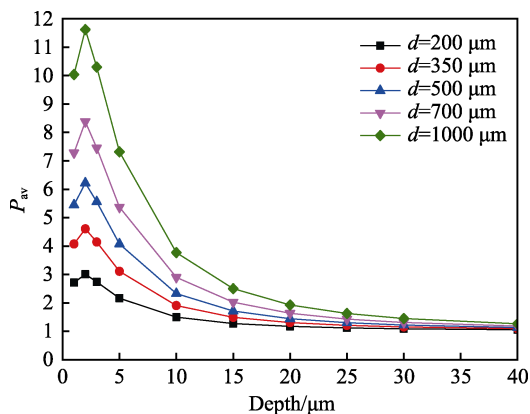


图 5 表面织构深度对平均无量纲压力的影响  
Fig.5 Effect of depth of textured surface on the dimensionless pressure

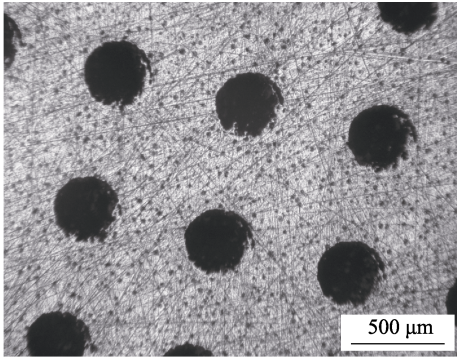
### 3 正交试验验证

#### 3.1 试样加工及摩擦学试验

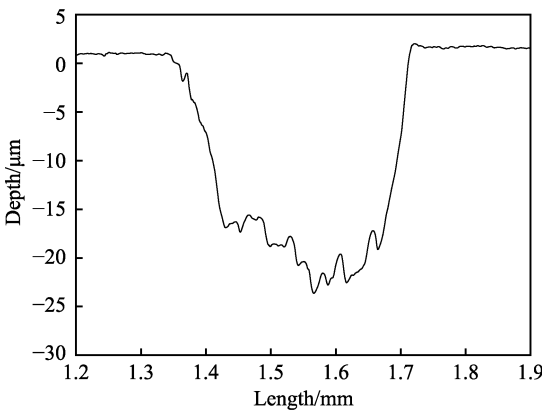
结合上述仿真结果，采用正交试验法设计表面织构参数，以直径、深度、面密度为影响因素，正交试验各因素水平如表 1 所示。使用激光打标机在 QT450 表面上加工织构，其中激光加工参数为：激光频率 30 kHz，电流 27.5 A，功率为 350 W。调节加工次数分别得到深度为 10、25、40 μm 的织构表面。加工完成后，依次使用 600#、800#、1000#、1200# 金相砂纸打磨去除表面毛刺，最后在丙酮溶液中超声波清洗 10 min，获得表面粗糙度 0.06 μm。图 6 所示为加工 3 次的织构形貌，织构直径为 350 μm，织构深度约为 20 μm。

表 1 正交试验因素水平  
Tab.1 Factors and levels of orthogonal experiment

Level	Factors		
	Diameter/μm	Area density/%	Depth/μm
1	350	10	10
2	500	20	25
3	700	30	40



a 织构光学照片



b 织构形貌

图 6 织构形貌图(直径 350 μm, 面密度 20%, 深度 25 μm)  
Fig.6 Diagram of textured surface morphology (diameter of 350 μm, area density of 20% and depth of 25 μm): a) optical image of texture; b) microstructure of texture

在旋转摩擦试验机上研究织构参数对表面织构的摩擦学性能的影响。上试样为 GCr15 销 (φ2 mm×5 mm，硬度 265 HV<sub>0.5</sub>)，下试样为 QT450 盘织构表面 (硬度为 192 HV<sub>0.5</sub>)，并选取未加工织构试样进行对比。试验前所有试样均在丙酮中进行超声清洗 10 min。试验条件：全油润滑，润滑油为昆仑 46# 抗磨液压油 (40 ℃ 时，运动黏度为 47.2 mm<sup>2</sup>/s)，转速为 200 r/min，摩擦半径为 10 mm，载荷为 3 MPa，摩擦时间设定为 30 min。

#### 3.2 试验结果

表 2 为摩擦系数的正交试验结果，其中 0# 试样为无织构表面。 $K_i$  表示任一列上水平号为  $i$  所对应的试验结果之和。 $t_i$  表示水平  $i$  所得试验结果的算术平均值。 $R$  表示极差， $R=t_{i(max)}-t_{i(min)}$ 。 $R$  值越大，表明该因素对摩擦系数的影响越显著。由表 2 结果分析： $R_{直径}>R_{面密度}>R_{深度}$ ，表明对摩擦系数影响的因素顺序为：直径>面密度>深度。摩擦系数最小的表面织构参数为： $d=700\text{ }\mu\text{m}$ 、 $s_p=10\%$ 、 $h_p=10\text{ }\mu\text{m}$ 。

图 7 为表面织构的平均摩擦系数曲线，进一步分析发现，摩擦系数随着直径的增大而减小，在直径  $d=700\text{ }\mu\text{m}$  时，摩擦系数达到最小，为 0.046，比无织构表面降低了 54%。同时，摩擦系数随着面密度的增大而增加，当面密度  $s_p=10\%$  时，摩擦系数最小，为 0.05，



表2 摩擦系数正交实验结果

Tab.2 Orthogonal experimental results of friction coefficient

Sample code	Factors			Friction coefficient
	Diameter/ $\mu\text{m}$	Area density/%	Depth/ $\mu\text{m}$	
0#	0	0	0	0.100
1#	350 (1)	10 (1)	10 (1)	0.057
2#	350 (1)	20 (2)	25 (2)	0.094
3#	350 (1)	30 (3)	40 (3)	0.137
4#	500 (2)	10 (1)	40 (3)	0.060
5#	500 (2)	20 (2)	10 (1)	0.071
6#	500 (2)	30 (3)	25 (2)	0.079
7#	700 (3)	10 (1)	25 (2)	0.034
8#	700 (3)	20 (2)	40 (3)	0.041
9#	700 (3)	30 (3)	10 (1)	0.064
$K_1$	0.288	0.151	0.192	
$K_2$	0.210	0.151	0.192	
$K_3$	0.139	0.280	0.238	
$t_1$	0.096	0.050	0.064	
$t_2$	0.07	0.069	0.069	
$t_3$	0.046	0.093	0.079	
$R$	0.05	0.043	0.015	
Primary and secondary factor				
Diameter > Area density > Depth				
Optimum				
$d=700\text{ }\mu\text{m}$ 、 $s_p=10\%$ 、 $h_p=10\text{ }\mu\text{m}$				

比无织构表面减小了 50%。随着深度的增加,摩擦系数逐渐增加,深度  $h_p=10\text{ }\mu\text{m}$  时,摩擦系数最小,为 0.064,比于无织构表面摩擦系数降低了 46%。摩擦系数随着直径的增大而减小,随着面密度的增大而增大,随着深度的增加而增大。在本文参数范围内,此试验结果与模拟仿真的结论一致。综上所述,通过选取适当的织构参数,可以提高织构表面的动压润滑效果。

图 8 为 0#、3#、7#表面的摩擦系数曲线。0#表面在运行 300 s 后稳定在 0.10。3#表面的摩擦系数比 0#试样大,随着滑动时间的延长而缓慢增大到 0.14。7#表面的摩擦系数最低,当运行 200 s 后,摩擦系数保持稳定在 0.034。3#表面的织构参数与正交试验所示最优织构参数相差较大,此时织构参数不合理。7#表面的织构参数与正交试验所示最优织构参数更为接近,所形成的流体动压润滑更为明显。可见,在全油润滑条件下,经过仿真优化的表面织构有利于形成流体动压润滑,并能提供额外的承载力,减小摩擦副表面的直接接触,从而起到润滑效果<sup>[18-19]</sup>。

图 9 所示为 0#、3#、7#表面磨损表面的光学显微照片。可以看出,0#磨损表面的犁沟较宽且连续分布,环形磨痕上的犁沟从内向外侧逐渐密集。这是因为,无织构表面的划痕外侧润滑油流失严重,磨损加剧。3#磨损表面上存在密集的犁沟,磨痕宽度为 1.532 mm,相比于无织构试样,增大了 48.1%,表面磨损最严重,

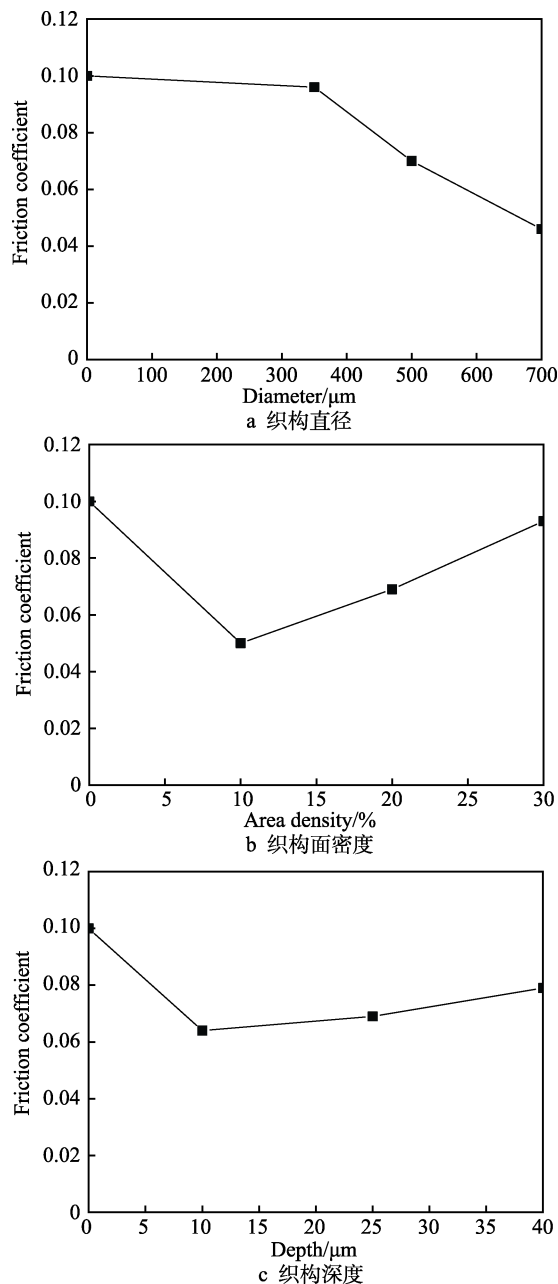


图7 织构参数对平均摩擦系数的影响

Fig.7 Effect of texture parameters: a) diameter; b) area density; c) depth on the friction coefficient

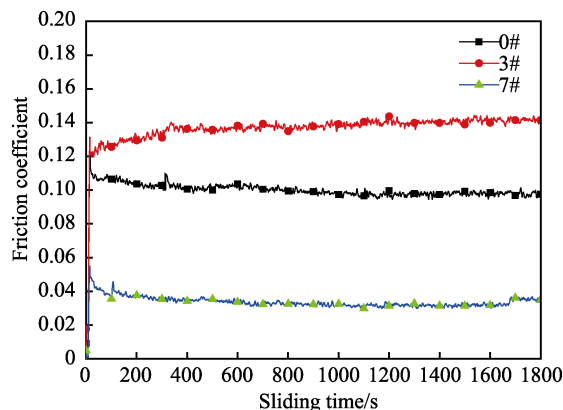


图8 0#、3#、7#表面的摩擦系数曲线

Fig.8 Friction coefficient curves of the surfaces of 0#, 3# and 7#

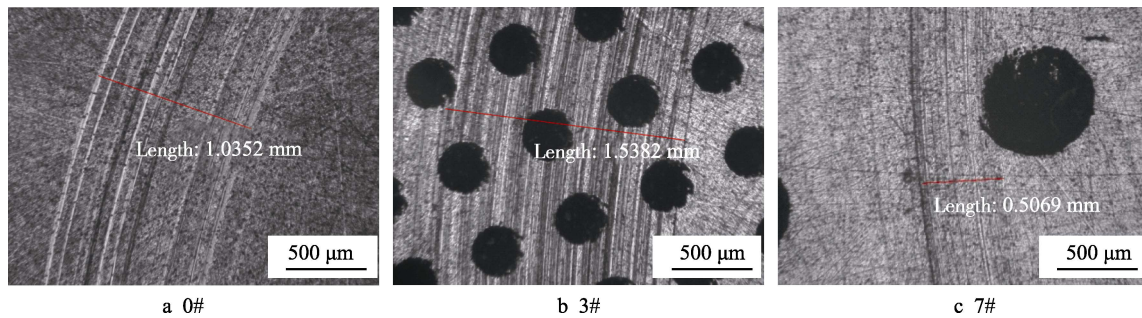


图 9 磨损表面形貌

Fig.9 Surface morphology of wear scars

这与其高摩擦系数相对应。7#磨损表面主要是表面擦伤,同时有稀疏的犁沟存在,磨痕宽度为 0.508 mm,相比于无织构表面,减小了 50.8%。参数合理的表面织构形成了流体动压润滑,油膜厚度增加,表面的磨损也轻微。

## 4 结论

本文在液压马达滑靴副表面建立了圆柱形表面织构模型,分析织构参数对油膜承载性能的影响,并对表面织构参数的摩擦学性能进行了正交试验验证。得到以下主要结论:

1) 连杆表面的圆柱形织构能提高连杆的承载力,无量纲压力随着直径的增加而线性增大;随着面密度的增大,先增加后缓慢减小,在  $s_p=10\%$  时,达到最大值。随着直径的增大先增加后减小,在  $h_p=2\ \mu\text{m}$  时达到最大值。

2) 正交试验表明,影响摩擦系数因素的主次顺序为:直径>面密度>深度。摩擦系数最小的因素最优组合为: $d=700\ \mu\text{m}$ 、 $s_p=10\%$ 、 $h_p=10\ \mu\text{m}$ 。在试验参数范围内,摩擦系数随着直径的增大而减小,随着面密度与深度的增加而增大。

3) 在织构参数合理时(如 7#试样),表面织构所形成的流体动压效应好,表面织构表现出优异的润滑性能和耐磨性能。当织构参数不合理时(如 3#试样),表面织构不具有减摩、抗磨性能。

## 参考文献:

- [1] 倪敬,冯国栋,王志强,等. 内曲线式端面配流水液压马达的优化设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(5): 946-953.  
NI Jing, FENG Guo-dong, WANG Zhi-qiang, et al. Optimization design of internal curve type water hydraulic motor with plain flow distribution[J]. Journal of Zhejiang University, 2017, 51(5): 946-953.
- [2] 杨国来,王伟健,王连波,等. 低噪声径向柱塞泵的设计与研究[J]. 液压与气动, 2007(2): 1-4.  
YANG Guo-lai, WANG Wei-jian, WANG Lian-bo, et al.

- Design and research on the lower noise radial piston pump[J]. Chinese hydraulics & pneumatics, 2007(2): 1-4.
- [3] 席景翠, 安高成, 王明智. 低速大扭矩液压马达启动特性探讨[J]. 中国机械工程, 2008, 19(24): 2929-2933.  
XI Jing-cui, AN Gao-cheng, WANG Ming-zhi. Study on starting performance for high-torque low-speed hydraulic motors[J]. China mechanical engineering, 2008. 19(24): 2929-2933.
- [4] FOWELL M T, OLVER A V, GOSMAN A D, et al. Entrainment and inlet suction: Two mechanisms of hydrodynamic lubrication in textured bearings[J]. Journal of tribology, 2007, 129(2): 151-159.
- [5] TØNDER K. Hydrodynamic effects of tailored inlet roughnesses: Extended theory[J]. Tribology international, 2004, 37(2): 137-142.
- [6] ZHANG Dong-ya, ZHAO Fei-fei, LI Yan, et al. Study on tribological properties of multi-layer surface texture on babbitt alloys surface[J]. Applied surface science, 2016, 390: 540-549.
- [7] 张东亚, 张辉, 秦立果, 等. 表面织构对巴氏合金轴承材料摩擦学性能影响[J]. 华中科技大学学报, 2014(12): 30-34.  
ZHANG Dong-ya, ZHANG Hui, QIN Li-guo, et al. Effect of surface texturing on tribological properties of babbitt alloy[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 2014(12): 30-34.
- [8] 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.
- [9] 毋少峰, 高殿荣, 范冬路. 仿生非光滑表面在高压海水轴向柱塞泵配流副中 CFD 研究[J]. 液压与气动, 2017(4): 28-32.  
WU Shao-feng, GAO Dian-rong, FAN Dong-lu. CFD research on the lubrication behaviours of the port plate with non-smooth surface in high pressure seawater axial piston pump[J]. Chinese hydraulics & pneumatics, 2017(4): 28-32.
- [10] 梁瑛娜, 高殿荣, 毋少峰. 凹坑形仿生非光滑表面滑靴副的动压润滑计算[J]. 机械工程学报, 2015, 51(24): 153-160.  
LIANG Ying-na, GAO Dian-rong, WU Shao-feng. Hy-

- drodynamic lubrication calculation for slipper/swash plate pair with bionic non-smooth concave surface[J]. Journal of mechanical engineering, 2015, 51(24): 153.
- [11] ETTERSSON U, JACOBSON S. Textured surfaces for improved lubrication at high pressure and low sliding speed of roller/piston in hydraulic motors[J]. Tribology international, 2007, 40(2): 355-359.
- [12] 王兆强, 杨俭, 张恒运, 等. 不同微观织构柱塞泵配流副润滑特性研究[J]. 液压与气动, 2016(8): 32-36.  
WANG Zhao-qiang, YANG Jian, ZHANG Heng-yun, et al. The lubrication characteristics of different micro textured piston pump valve plate friction pairs[J]. Chinese hydraulics & pneumatics, 2016(8): 32-36.
- [13] 邓海顺, 于海武, 王晓雷. 轴向柱塞泵配流副低压区织构化试验研究[J]. 华中科技大学学报, 2012, 40(6): 16-19.  
DENG Hai-shun, Yu Hai-wu, WANG Xiao-lei. Study on tribological performance of textured port plates of axial piston pumps[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 2012, 40(6): 16-19.
- [14] 李阳, 邓海顺, 王晓雷. 织构化配流副摩擦磨损性能试验[J]. 航空动力学报, 2014, 29(7): 1591-1597.  
LI Yang, DENG Hai-shun, WANG Xiao-lei. Experiment on friction and wear performance of textured port plate pair[J]. Journal of aerospace power, 2014, 29(7): 1591-1597.
- [15] 张东亚, 赵飞飞, 高峰, 等. 二层沟槽织构对机床导轨表面润滑特性的影响[J]. 中国机械工程, 2018(14): 1661-1665.  
ZHANG Dong-ya, ZHAO Fei-fei, GAO Feng, et al. Effects of double-layer groove texture on lubrication performance of machine tool slideway surfaces[J]. China mechanical engineering, 2018(14): 1661-1665
- [16] 曾亚维, 陈立宇, 杨夏明, 等. 表面微织构改善摩擦性能的研究进展[J]. 工具技术, 2016, 50(5): 3-7.  
ZENG Ya-wei, CHEN Li-yu, YANG Xia-ming, et al. State of surface texturing for improving tribology performance[J]. Tool engineering, 2016, 50(5): 3-7.
- [17] 陈平, 李俊玲, 邵天敏, 等. 考虑表面张力影响的表面织构最优参数分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(19): 123-131.  
CHEN Ping, LI Jun-ling, SHAO Tian-min, et al. Optimal analysis of geometric parameters of surface texture with surface tension considered[J]. Journal of mechanical engineering, 2016, 52(19): 123-131.
- [18] ETSION I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing[J]. Tribology letters, 2004, 17(4): 733-737.
- [19] ZHANG Hui, HUA Meng, DONG Guang-neng, et al. A mixed lubrication model for studying tribological behaviors of surface texturing[J]. Tribology international, 2016(93): 583-592.