



新型同步润滑高水基柱塞泵及其系统建模与特性研究

姜浩 余浪 李永康

引用本文:

姜浩, 余浪, 李永康. 新型同步润滑高水基柱塞泵及其系统建模与特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 381–389.
JIANG Hao, YU Lang, LI Yongkang. System modelling and characteristic research of novel high water-based synchronous lubrication piston pump[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 381–389.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0135>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超大采高工作面乳化液泵关键技术研究及工程应用

Research on key technology and engineering application of emulsion pump in super-high mining face
煤炭科学技术. 2024, 52(11): 153–162 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1019>

煤矿抽水蓄能电站水下巡检机器人姿态调节系统建模与分析

Modeling and analysis of attitude regulation system of underwater inspection robot for coal mine pumped-storage power station
煤炭科学技术. 2022, 50(3): 239–247 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/809005db-8295-43af-bd7c-49fc48a7e49a>

基于Creaform3D扫描系统的三维建模研究

Research on 3D modeling based on Creaform3D scanning system
煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2561bc04-115b-4796-8da2-f02eab0e18b3>

煤矿井下智能压裂泵系统研究

Research on intelligent fracturing pump system in coal mine
煤炭科学技术. 2022, 50(4): 264–269 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/fd2ba286-8975-44b9-8add-42676b678d41>

CPAM离子度对高泥化煤泥水沉降特性的影响研究

Research on influence of CPAM ionic degree on settling characteristics of high muddied coal slime water
煤炭科学技术. 2023, 51(3): 251–260 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0731>

深部煤炭流态化开采装备自主行走机构多缸推进同步控制

Synchronization control of multi-cylinder propulsion for autonomous walking of deep underground fluidized coal mining equipments
煤炭科学技术. 2024, 52(2): 264–278 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1513>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

姜浩,余浪,李永康. 新型同步润滑高水基柱塞泵及其系统建模与特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 381-389.

JIANG Hao, YU Lang, LI Yongkang. System modelling and characteristic research of novel high water-based synchronous lubrication piston pump[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 381-389.

新型同步润滑高水基柱塞泵及其系统建模与特性研究

姜浩¹, 余浪¹, 李永康^{1,2}

(1. 太原理工大学机械与运载工程学院, 山西太原, 030024; 2. 煤矿综采装备山西省重点实验室, 山西太原, 030024)

摘要: 扩大高水基柱塞泵转速范围利于煤矿综采工作面供液系统的宽幅智能化调控。针对传统低压润滑条件下由关键摩擦副润滑不足导致的高水基柱塞泵转速受限问题, 开发了一种基于阶梯形柱塞、满足高转速运行的高水基柱塞泵结构及其同步润滑方法。为深入了解其系统特性与摩擦副同步润滑效果, 构建基于 AMESim/Simulink 的系统联合仿真模型, 对润滑腔与工作腔压力动态耦合、阀芯启闭特性, 以及反映同步润滑条件下摩擦副润滑效果的滑靴副油膜特性开展研究。进一步, 讨论泵转速对其影响。最后, 通过样机试验测试高水基柱塞泵在高转速工况下的流量特性。结果表明: 所提出的新型同步润滑方法可使柱塞泵润滑腔在柱塞排液阶段同步产生随转速升高而压力增大的润滑油。随着泵转速的增大, 滑靴副膜厚下降, 但静压作用时间延长会引起泄漏量增大。在 500~2 000 r/min 转速范围内滑靴的油膜厚度介于 8.1~17.5 μm , 满足流体润滑需求; 试验结果表明: 当转速为 500 r/min 和 1 500 r/min 时, 实测流量脉动小于数值计算结果, 柱塞泵的模拟与试验平均输出流量偏差分别约为 7.8% 和 8.1%, 流量脉动随着转速增大而增大, 新型高水基柱塞泵可满足高速工况运转需求; 同时, 相对于柱塞运动, 柱塞工作腔与润滑腔压力的建立, 以及吸、排液阀的启闭均会产生滞后, 且随着泵转速的增加更为明显, 从而影响系统容积效率与流量脉动率。研究结果验证了新型同步润滑高水基柱塞泵应用于高转速工况的可行性, 同时指出了部分不足及其产生原因, 为新型同步润滑柱塞泵的后改进和优化奠定理论基础与试验依据。

关键词: 高水基介质; 径向柱塞泵; 同步润滑; 阶梯柱塞; 滑靴副

中图分类号: TH322 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2025)05-0381-09

System modelling and characteristic research of novel high water-based synchronous lubrication piston pump

JIANG Hao¹, YU Lang¹, LI Yongkang^{1,2}

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Fully Mechanized Coal Mining Equipment, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Expanding the speed range of high water-based piston pump is beneficial to the wide intelligent control of liquid supply system in fully mechanized coal mine. Aiming at the speed limitation of high water-based piston pumps caused by insufficient lubrication of key friction pairs under traditional low-pressure lubrication conditions, the group developed a high water-based piston pump structure and its synchronous lubrication method based on a stepped plunger to meet the high-speed operation. In order to deeply understand the system characteristics and synchronous lubrication effect of the friction pair, a system co-simulation model based on the software AMESim/Simulink is built to study the dynamic coupling characteristics between the lubrication and the working cavity, as well as the oil film characteristics of the slipper pair, which can reflect the lubrication effect of the friction pair under synchronous lubrication conditions. Further, the influence of pump speed on it is discussed. Finally, the flow characteristics of high water-based piston pump at high speed were tested by

收稿日期: 2024-01-23 策划编辑: 常琛 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.12438/cst.2024-0135

基金项目: 山西省重点研发计划资助项目(201903D121050); 山西省基础研究计划资助项目(202303021221004)

作者简介: 姜浩(1996—), 男, 辽宁朝阳人, 硕士。E-mail: sagittarius_sy@163.com

通讯作者: 李永康(1985—), 男, 山西定襄人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: buaalyk@qq.com

prototype test. The results show that the proposed synchronous lubrication method can produce lubricating oil in the lubrication chamber with increasing speed. With the increase of pump speed, the thickness of slipper auxiliary film decreases, and the extension of static pressure action time causes the increase of leakage. The oil film thickness of slipper boots ranges from 8.1 to 17.5 μm at the speed range of 500 to 2 000 r/min, meeting the needs of fluid lubrication. The experimental results show that when the speed is 500 r/min and 1 500 r/min, the deviation of the simulated and experimental average output flow of the piston pump is about 7.8% and 8.1%, respectively. The flow pulsation increases with the increase of the speed, and the measured flow pulsation is smaller than the numerical calculation result. The novel high water-based piston pump meets the demands of high-speed operation. Meanwhile, the establishment of pressure in the piston working chamber and lubrication chamber, as well as the opening and closing of the suction and discharge valves will have a hysteresis relative to the plunger movement, and become manifest with the increased pump speed, thus affecting the system volumetric efficiency and flow rate of pulsation. The research results verify the feasibility of the new synchronous lubrication high water-based piston pump applied to the high-speed conditions, and the causes of existing problems are analyzed, which will lay a theoretical and experimental basis for subsequent improvement and optimization.

Key words: high water-based liquid; radial piston pump; synchronous lubrication; stepped piston; slipper pair

0 引言

高水基液压传动具有安全、绿色环保等优点,广泛应用于煤矿综采工作面液压支架供液系统^[1]。作为煤矿综采工作面液压支架的动力源,高水基柱塞泵的流量和压力随支架移架、升柱和降柱等动作变化幅度大、频次高,且随机性强,采用传统卸荷阀调节时,卸荷阀频繁开启,压力冲击明显,能量损失严重^[2-3]。现有高水基柱塞泵主要采用外置低压油泵对其关键摩擦副润滑,受低速时摩擦副动压不足,高速时磨损加剧的影响,现有转速约为 400 ~ 600 r/min^[4]。为此改进摩擦副润滑方法,开发与电机转速范围相匹配的高水基柱塞泵,是实现综采工作面供液系统智能化调控的关键。

宽速域条件下摩擦副可靠润滑对扩大高水基柱塞泵转速范围尤为关键^[5-6]。现阶段高水基柱塞泵关键摩擦副的润滑方法有纯水润滑与油润滑 2 种,但油润滑仍然是高压重载工况下摩擦副的主要润滑方式^[7-8]。柱塞泵系统建模对分析其特性至关重要。GUO 等^[9]运用 AMESim 软件搭建新型五柱塞径向柱塞泵的液压模型,得到柱塞泵整体输出流量特性。任中永等^[10]基于支撑力平衡在 Fluent 中搭建柱塞泵系统模型,求解不同转速下柱塞泵输出流量及滑靴副油膜厚度。瑞士 HYDROWATT 公司开发出油液分离的静力平衡型径向柱塞泵,采用五星轮取代传统连杆具有较高的机械效率与低速稳定性,且关键摩擦副均采用油润滑实现静力平衡。但该泵关键技术油水分离的密封管采用进口高弹性、高强度材料,对进口材料的依赖较强^[11]。但其提出的静力平衡传动结构,润滑与工作介质相分离的油润滑方法为高转速高水基柱塞泵的研究提供一种思路。

笔者所在课题组在对柱塞副组合密封的密封性

能预研基础上,提出了一种应用于高水基柱塞泵的新型油液分离的同步润滑结构^[12-13]。使柱塞泵在吸、排高水基介质的同时吸、排润滑油,对摩擦副强制润滑,从而满足宽转速范围的润滑需求。为分析新型同步润滑柱塞泵高转速性能,以及同步润滑条件下摩擦副的润滑效果,基于 AMESim/Simulink 联合仿真平台,构建了联合仿真模型,研究润滑油与工作介质的动态耦合特性,对反映摩擦副润滑效果的滑靴副液膜特性进行研究,并讨论泵转速对其影响。最后,对高转速工况下的流量特性进行测试,验证其高转速性能。

1 同步润滑高水基柱塞泵结构

传统高水基柱塞泵如图 1 所示。传动系统采用曲轴连杆机构,惯量大、响应差。同时采用外部低压油泵对关键摩擦副润滑,在极限转速时存在润滑不足问题。特别是在高速重载时,受柱塞腔高压介质作用,曲轴与连杆摩擦副极易出现边界润滑,磨损严重。无法满足高转速运转需求。

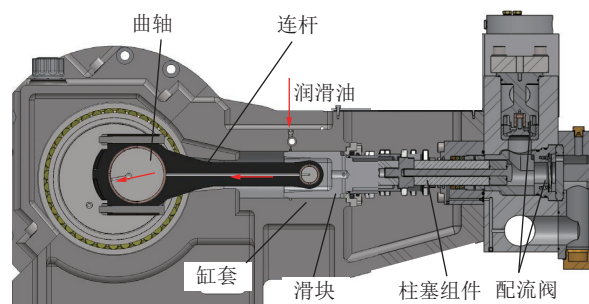


图 1 传统柱塞泵结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of traditional piston pump

课题组开发的新型同步润滑径向柱塞泵,如图 2 所示。由惯量小、缸体不随传动轴旋转的五星

轮代替连杆机构,具有良好的高低速稳定性,可满足宽速域传动需求。高水基工作液和润滑油均采用模块化结构的单向阀配流,具有密封性能好、结构紧凑,易于安装等优点^[14]。5个不等径梯形柱塞径向分布于泵壳内,正五边形的五星轮安装在偏心曲轴上。每个柱塞和缸体可形成2个变体积的容积腔,即工作腔和润滑腔,分别用于储存高水基工作液和润滑油,二者通过多级串联的组合密封实现油液分离。在柱塞泵排液阶段,柱塞与滑靴在工作腔和润滑腔高压介质压紧力作用下紧压在五星轮外缘;在吸液阶段,采用回程弹簧保证滑靴与正五边形的接触。滑靴则采用了静压支撑设计,保证油膜厚度稳定。

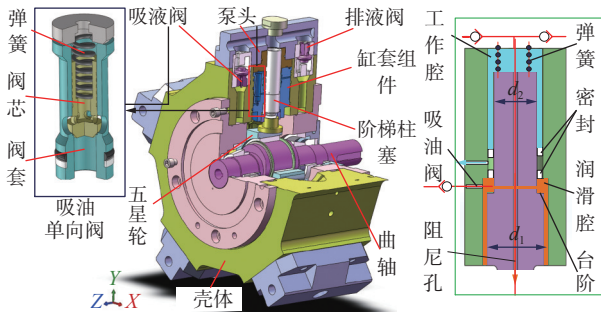


图2 新型同步润滑高水基柱塞泵结构示意图

Fig.2 Structure diagram of new synchronous lubrication radial piston pump

1.1 同步润滑原理

五星轮在电机驱动的偏心轴作用下实现平面运动,柱塞则在五星轮和内部回程弹簧作用下在缸套内往复运动,使工作腔容积周期性变化,经吸、排液阀进行高水基介质的吸排。与此同时,润滑腔的容积周期性同步变化,通过吸油单向阀吸油,产生的高压润滑油经阻尼孔进入滑靴,可与排液行程中柱塞工作腔的高压压紧力相平衡,克服低速时由动压不足与高速时磨损加剧导致的滑靴润滑问题。同时,仅在排液行程时润滑腔产生高压润滑油,可克服传统恒压供油在吸液阶段过度供油导致的泄漏损失,提高了容积效率。

1.2 样机参数

高水基柱塞泵与静压滑靴基本参数见表1^[15]。

2 系统联合仿真模型

新型同步润滑结构存在工作介质与润滑介质耦合问题,模型较为复杂。针对复杂液压系统建模问题,部分学者采用单一平台如AMESim建立液压系统模型,但大多模型只关注输入、输出变量,忽略了

表1 径向柱塞泵与滑靴副基本参数
Table 1 Basic parameters of pump and slipper pair

参数	数值
设计转速/(r·min ⁻¹)	1 500
额定压力P/MPa	37.5
柱塞直径/mm	32
柱塞数	5
辅助泵供油压力/MPa	0.25
滑靴副外径R ₀ 与内径r ₀ /mm	18.6, 14.3
阻尼管直径d与长度l/mm	0.6, 7
油液的动力黏度μ/(Pa·s)	0.06
油液密度/(kg·m ⁻³)	850

中间状态,存在一定局限性^[16]。为真实反映同步润滑柱塞泵的润滑、工作介质与滑靴副油膜的动态耦合特性以及曲轴转速对其影响,基于AMESim/Simulink联合仿真平台,通过设计交互接口,实现液压系统模型与静压滑靴模型之间数据的实时通讯,其数据交互如图3所示。

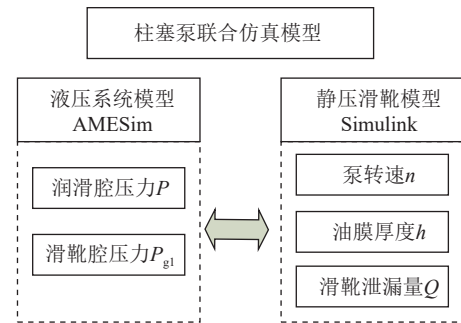


图3 联合仿真模型数据交互示意

Fig.3 Schematic of data interaction in the co-simulation model

联合仿真系统主要包含以下2种模型:①静压支撑滑靴的数学模型;②柱塞泵的液压系统仿真模型。

由于同步润滑柱塞泵工作过程中存在工作介质与润滑介质的动态耦合,在液压系统模型中将工作腔与润滑腔压力为输出反馈作用于滑靴模型,可得到滑靴副液膜特性,主要以膜厚与泄漏量来量化表达。而滑靴液膜又反作用于滑靴与润滑腔,对柱塞滑靴与润滑腔的压力产生影响^[17]。为此,将AMESim中仿真得到的柱塞润滑腔与滑靴腔的压力 P 、 P_{g1} 通过接口模型输入到Simulink中,同时将Simulink中计算的油膜厚度 h 输入到液压系统模型^[18]。

2.1 静压滑靴数学模型

在柱塞泵运行过程中,滑靴副的油膜厚度和泄漏量是影响其油膜润滑承载特性的重要指标^[19]。由

阻尼型静压支撑滑靴的工作特性, 可得静压支撑滑靴处支承特性方程为

$$P_{g1} = \frac{P}{1 + Kh^3} \quad (1)$$

$$K = D_f K_q \quad (2)$$

阻尼管的液阻为

$$D_f = 128\mu l / Pd^4 \quad (3)$$

泄漏量的系数为

$$K_q = \frac{P}{6\mu \ln(R_0/r_0)} \quad (4)$$

式中: P 为润滑腔压力, MPa; P_{g1} 为滑靴腔压力, MPa; h 为油膜厚度, μm ; μ 为油动力黏度; l 为阻尼孔长度,

mm; d 为阻尼孔直径, mm; R_0 为滑靴外径, mm; r_0 为滑靴内径, mm。

将式(1)求解可得油膜厚度 h 的计算式为

$$h = \sqrt[3]{\frac{P - P_{g1}}{K P_{g1}}} \quad (5)$$

单柱塞滑靴副泄漏流量为

$$Q = \frac{Ph^3}{6\mu \ln(R_0/r_0)} P_{g1} \quad (6)$$

根据上述计算式, 在仿真平台 Simulink 中建立静压支撑滑靴的数学模型, 将相应的油液数据及滑靴副的结构参数添加给 Simulink 模块, 得出油膜厚度和滑靴副泄漏计算模块^[20], 所建模型如图 4 所示。

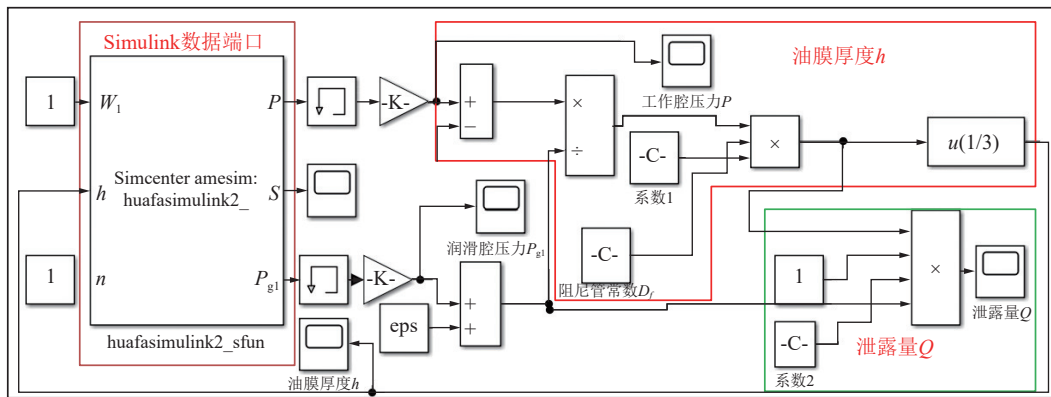


图 4 静压滑靴 Simulink 仿真模型

Fig.4 Simulink simulation model of slipper pair

2.2 柱塞泵液压系统模型

根据柱塞泵工作原理及表 1 中基本结构参数, 建立基于 AMESim 的液压系统仿真模型, 该模型所得的工作腔压力与润滑油腔压力为 Simulink 调用模块, 如图 5 所示。

模型主要分为 4 部分:

1) 工作腔配流模块: 模拟柱塞运动过程中柱塞工作腔体积变化的同时, 通过吸液阀与排液阀实现高水基工作介质的吸排动作;

2) 润滑腔吸油模块: 模拟经单向阀给阶梯柱塞与缸套所形成的可变容积润滑腔供油;

3) 静压滑靴模块: 该模块主要将润滑腔的压力经阻尼孔传递给滑靴;

4) 数据传输模块: 该模块实现滑靴腔油膜厚度的变化的数据传输, 是 AMESim 液压系统与 Simulink 联合仿真的接口。

3 结果与讨论

工作腔吸、排工作介质的同时, 润滑腔能否及时

有效地建立压力, 是实现静压支撑滑靴副同步润滑的进重要前提, 同时也为后续滑靴润滑特性分析提供压力边界。本节主要对反映同步润滑响应性能的柱塞工作腔与润滑腔的压力建立, 以及阀芯运动随着柱塞的运动关系, 以及反映同步润滑效果的滑靴副液膜特性进行分析。

3.1 工作腔与润滑腔压力分布

新型高水基柱塞泵的最高设计转速为 1 500 r/min, 为研究其在不同转速下的系统特性, 分别选取转速为 500、1 000、1 500、2 000 r/min 对柱塞工作腔和润滑腔的压力分布进行研究, 如图 6 所示。

从图 6a 中发现工作腔内压力呈周期性的高低交替的方波分布, 符合柱塞泵的压力变化规律。柱塞向下运动开始吸液行程, 工作腔压力迅速下降; 柱塞开始向上运动开始排液行程时, 柱塞腔压力的建立滞后于柱塞运动 $\Delta\alpha$, 并且随转速的增加滞后时间更加明显。这是由于工作腔内存在一定的余隙容积, 液体的体积模量会随着压力的变化而变化, 从而影响压力的建立。此外, 受配流阀阀芯惯性影响, 随着

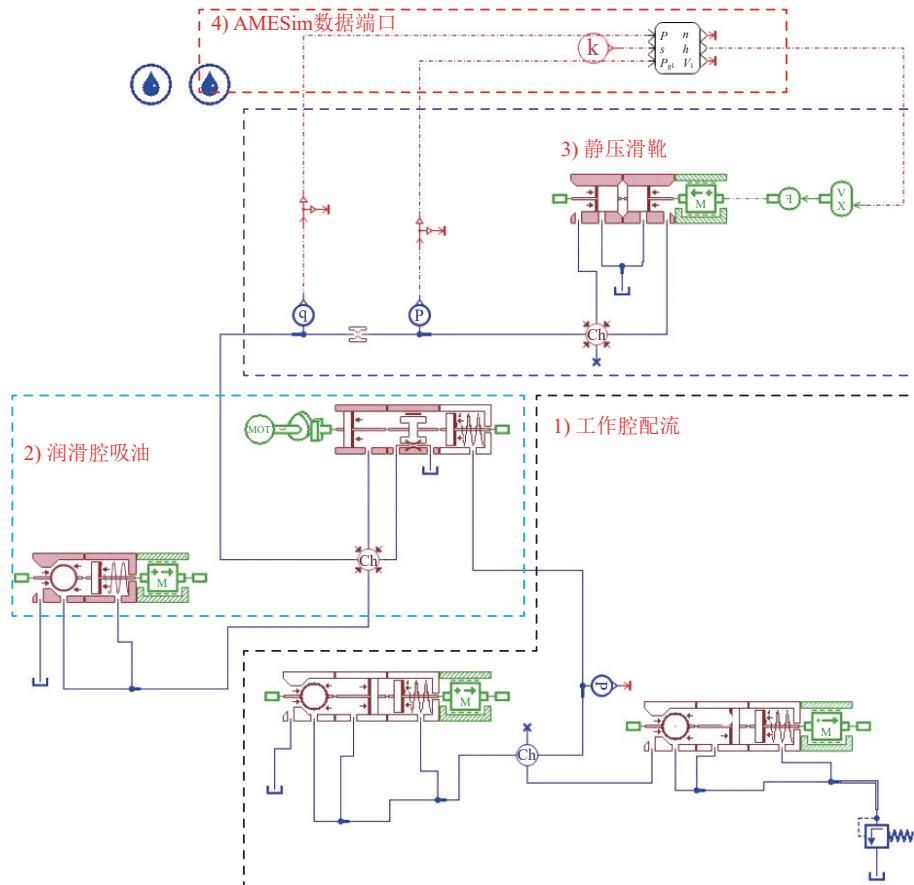


图5 液压系统 AMESim 仿真模型

Fig.5 Simulation model of hydraulic system in AMESim

泵转速增大导致吸、排液阀动作延迟也会影响工作腔压力的建立,需进一步研究吸排液阀的启闭特性。

不同转速下润滑腔压力如图 6b 所示,从图中发现润滑腔压力在排液阶段呈先上升后下降的谐波分布,在吸液阶段则较为平缓。且随泵转速的增大润滑腔压力而明显增大,但同样存在随转速增大的滞后 $\Delta\beta$ 。这是由于随着泵转速增大,静压支撑响应性会明显下降,部分润滑腔内的润滑油来不及进入含有阻尼孔的静压支撑滑靴,从而导致润滑腔压力增大。当转速大于 1 500 r/min 时,润滑腔压力已经明显超过工作腔压力,进而会影响到滑靴的力平衡与动态膜厚。同时,在柱塞副密封选型时应考虑润滑腔压力增大对其影响。

3.2 阀芯启闭特性

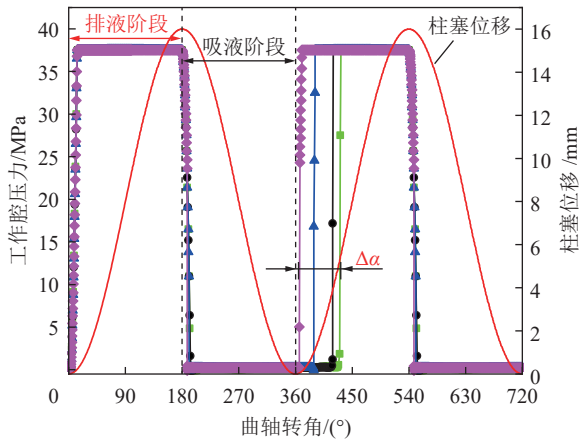
同步润滑柱塞泵工作过程中吸油单向阀能否及时开启与关闭,对滑靴副的可靠润滑至关重要。图 7 为不同泵转速下吸油阀的阀芯位移分布,从图中可以看到阀芯位移在不同转速下呈对称谐波分布,且随转速的增加其阀芯开度明显增大。在低速工况下,阀芯在吸液行程可以快速开启;但在高速工况下,阀芯开启时间滞后于柱塞运动 $\Delta\gamma$,且随着转速的增

加,阀芯开启滞后时间更加明显。不同于吸液阶段,在排液行程开始时,阀芯迅速关闭,几乎没有滞后。

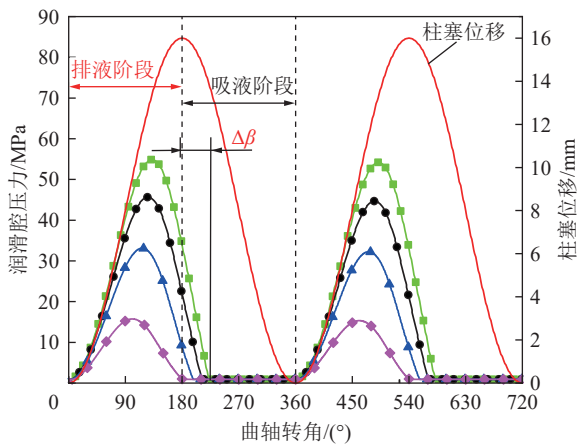
图 8a 为不同转速下吸、排液阀的阀芯位移分布,从图中发现阀芯位移呈方波分布。当相位角为 180° 时,柱塞向下运动开始吸液,阀芯滞后 $\Delta\delta_1$ 后开启。在吸液行程结束时,阀芯滞后于柱塞位移 $\Delta\delta_2$,且随转速的增加而更加明显。吸液阀阀芯的关闭滞后明显大于开启滞后,阀芯的延迟关闭将导致在排液行程开始时高水基液体经吸液阀回流。这是由于吸液阀阀芯关闭取决于工作腔内压力的建立,当工作腔内余隙容积较大时会影响柱塞工作腔压力建立时间,从而影响阀芯的响应。

排液阀的阀芯位移随曲轴角度的变化如图 8b 所示。阀芯位移与吸液阀的方波分布基本一致。在柱塞开始向上运动的排液阶段,在低转速时阀芯可以快速开启,但随着转速增加阀芯开启存在滞后时间 $\Delta\epsilon$,与吸液阀延迟关闭相同,同样是由柱塞工作腔压力建立延迟引起的。不同于吸液阀动作,排液阀的关闭滞后明显小于开启滞后。

这也说明现有条件下吸液阀的弹簧刚度偏小,可以适当增压其刚度来加快关闭;而排液阀的弹簧



(a) 工作腔

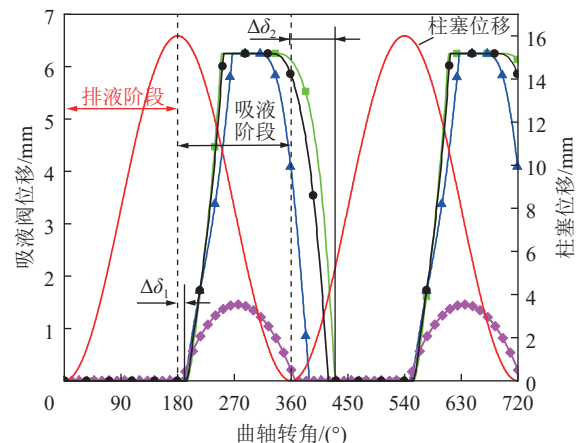


(b) 润滑腔

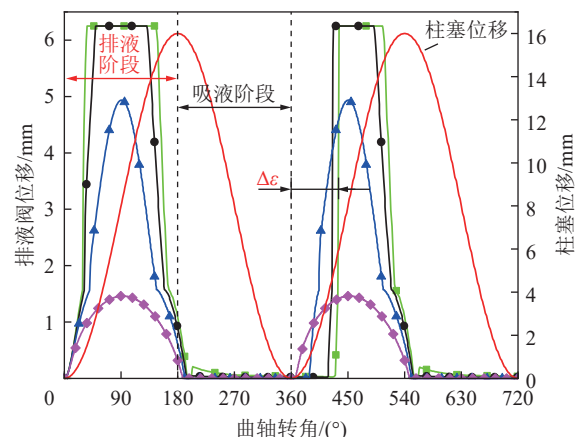
—■— 2 000 r/min —●— 1 500 r/min
—▲— 1 000 r/min —◆— 500 r/min

图 6 工作腔与润滑腔压力随曲轴转角分布

Fig.6 Pressure of working and lubrication chamber as eccentric shaft angle



(a) 吸液阀阀芯位移



(b) 排液阀阀芯位移

—■— 2 000 r/min —●— 1 500 r/min
—▲— 1 000 r/min —◆— 500 r/min

图 8 不同转速下吸、排液阀芯位移分布

Fig.8 Spool displacement of inlet and outlet valve at different speeds

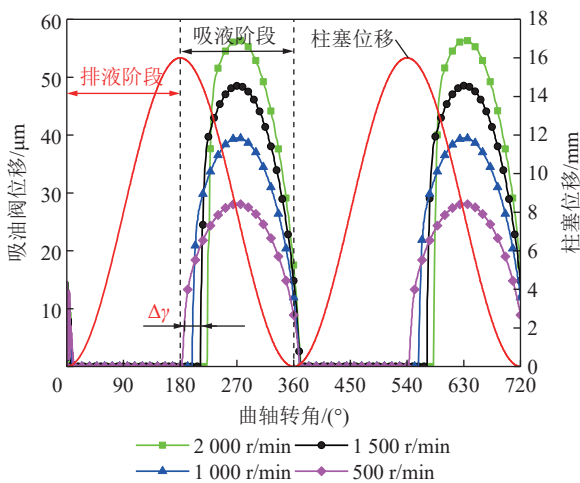


图 7 不同转速下吸油单向阀阀芯位移分布

Fig.7 Displacement distribution of spool of suction valve at different speeds

3.3 滑靴副油膜特性

滑靴副作为新型同步润滑柱塞泵的关键摩擦副,其能否及时建立压力实现有效润滑决定了同步润滑效果与系统可靠性,具体可通过油膜厚度进行量化。同时,其泄漏量对润滑腔结构设计具有指导意义。滑靴的油膜厚度随偏心主轴角度的变化如图 9a 所示。

在排液阶段,滑靴膜厚先减小后增大,而在吸液阶段保持不变。这是由于在排液行程中柱塞工作腔内压力增加,受力平衡影响滑靴与五星轮之间的间隙减少。同时,随着转速的增加,最小油膜厚度逐渐减小。这是由于通过前期研究发现转速的增加会增大润滑腔压力,因此作用在滑靴上的压紧力进一步增大,从而导致膜厚减小。同时,受转速对静压响应的影响,滑靴副的静压作用时间滞后于柱塞运动时间 $\Delta\zeta$,且随转速增加更加明显。但总体而言,稳定后的油膜厚度范围为 $8 \sim 17 \mu\text{m}$,表现为流体润滑,说明同步润滑条件下滑靴具有良好的润滑性能。

刚度选择偏大,可以通过适当减小弹簧刚度来提高开启响应。

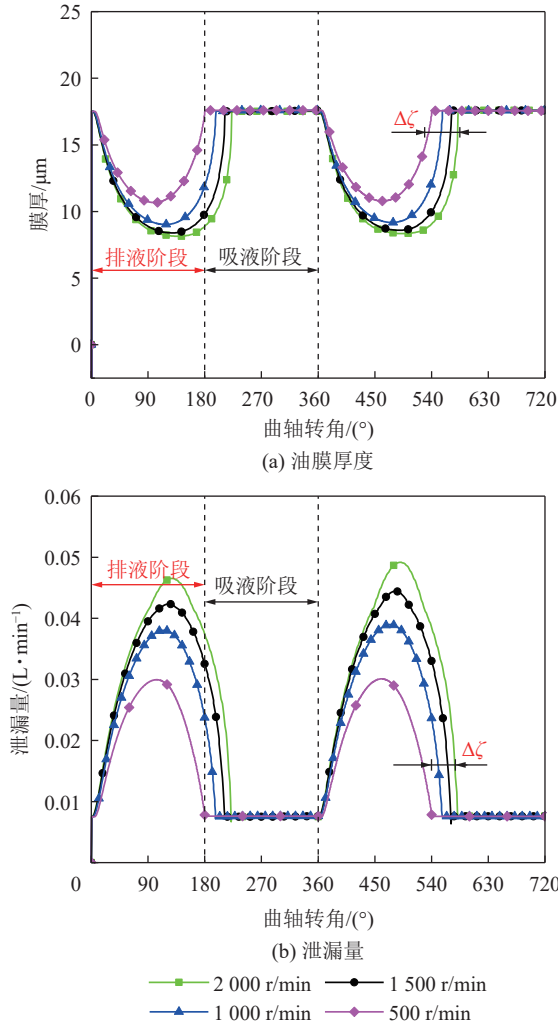


Fig.9 Variation of slipper oil film thickness and leakage at different speeds

滑靴副的泄漏随着偏心轴角度的变化如图 9b 所示。从图中发现泄漏分布刚好与膜厚相反。在排液阶段先增大后减小，而在吸液阶段泄漏量较小。这也说明所提出的同步润滑方法可间歇性仅在排液阶段产生高压润滑油，既能满足排液阶段的高压润滑需求，又能克服传统恒压供油在吸液阶段由过度供油导致的泄漏损失。另外，发现随着转速的增加，泄漏量显著增加。这是由于随着泵转速增加，虽然膜厚度减小，但滑靴副的静压作用延长时间 $\Delta\zeta$ 增大，因此总的泄漏量增加。

4 试验验证

为验证新型高水基柱塞泵在高速条件下的输出特性，加工柱塞泵样机、搭建如图 10 所示的试验平台，对样机的输出流量进行测试。该测试系统采用变频器调节泵转速，调速阀对系统加载。试验中将泵转速调整为 1 500 r/min，加载压力为 37.5 MPa，

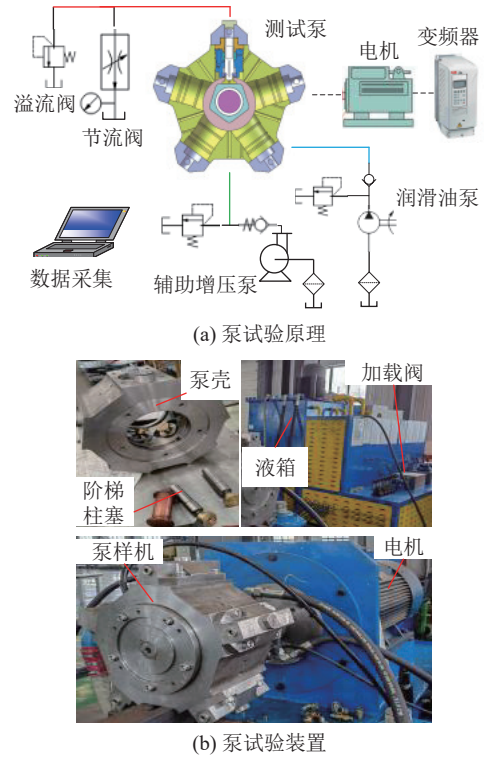


图 10 泵试验原理与装置
Fig.10 Prototype test principle and device

用流量计对泵输出流量进行测试。

图 11 为不同转速下采用仿真和试验方法获得的高水基柱塞泵输出流量对比，从图中发现新型柱塞泵在高低转速工况下均可以实现流量的稳定输出，达到了高速设计的要求。

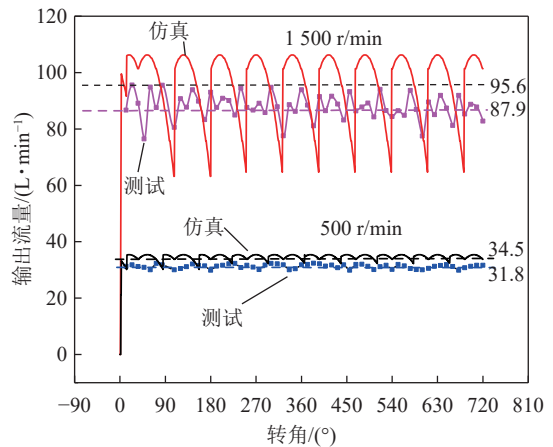


Fig.11 Transient flow rate under simulation and experiment

当泵转速为 500 r/min 时，平均输出流量的仿真结果为 34.5 L/min，实际平均输出流量为 31.8 L/min，两者偏差为 7.8%。转速为 1 500 r/min 时，平均输出流量的仿真值为 95.6 L/min，实际输出流量为 87.9 L/min，两者偏差为 8.1%。究其原因，仿真中没

有考虑柱塞泵各摩擦副间由加工精度导致的油液泄漏,以及高转速工况下流量测量误差的影响。同时发现,流量脉动随着转速的增加而增大,这与传统柱塞泵规律不同。这是由于转速增大使配流阀的响应性变差,吸液阀的延迟关闭和排液阀的延迟开启造成液体回流,同时转速增大使吸入能力下降吸不足,从而引起流量脉动加剧。

总之,转速增加引起吸、排液阀的滞后,以及吸入端能力下降对泵输出流量及其脉冲有很大的影响。为了提高泵的综合性能,有必要进一步改进和优化配流阀结构,并适当增大吸液端压力。

5 结 论

1) 柱塞工作腔内压力的建立滞后于柱塞运动,并随着转速的增加更为明显;所提出的同步润滑方法可在润滑腔内产生高压润滑油,其压力随转速的增加而增大,甚至超过柱塞工作腔压力。

2) 润滑腔吸油阀的开启滞后于柱塞运动,且随着转速的增加更加明显。工作腔吸、排液阀的阀芯开度随转速的增加而显著增加,但吸液阀的关闭和排液阀的开启同样滞后于柱塞的运动,并随着转速的增加而加剧,这将严重影响柱塞泵在高速工况下的容积效率和流量脉动率。

3) 随着泵转速增大,静压滑靴的响应下降,作用时间延长。受此影响,滑靴油膜呈现与传统滑靴不同的分布,即随泵转速的增加滑靴膜厚减小,泄漏量增大。当转速为 500~2 000 r/min 时,采用同步润滑方法的滑靴处于流体润滑状态,膜厚为 8~17 μm 。滑靴副的泄漏量主要集中在排液阶段,吸液阶段泄漏量较小,达到了同步润滑方法间歇供油利于效率提升的预期要求。

4) 新型高水基柱塞泵可以满足高转速运转要求,柱塞泵的输出流量脉动随转速的增加而增大,当转速为 500 r/min 和 1 500 r/min 时,模拟与试验的平均流量偏差分别约为 7.8% 和 8.1%,吻合性较好。

总之,新型柱塞泵的样机可以满足试运行要求,但也存在随转速增大引起的润滑腔压力建立与阀芯启闭滞后,导致流量脉动与静压润滑响应下降问题。后续可通过减小工作腔余隙容积,优化静压滑靴和配流阀参数,并适当增大吸液端压力来提高同步润滑柱塞泵综合性能。

参考文献(References):

[1] LI R, WEI W S, LIU H, et al. Tribological behavior of tribo-pairs

in water hydraulic radial piston pumps[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2023, 237(7): 1603–1623.

- [2] 廉自生,袁祥,高飞,等. 液压支架网络化智能感控方法[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 12.
LIAN Zisheng, YUAN Xiang, GAO Fei, et al. Networked intelligent sensing method for powered support[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 12.
- [3] 李振顺,寇保福,张涨,等. 高水基乳化液作用下液压元件摩擦磨损性能研究[J]. *润滑与密封*, 2021, 46(7): 102–107.
LI Zhenshun, KOU Baofu, ZHANG Zhang, et al. Study on friction and wear performance of hydraulic components under the action of high water-based emulsion[J]. *Lubrication Engineering*, 2021, 46(7): 102–107.
- [4] 寇保福,李瑞清,李振顺,等. 高水基液压阀陶瓷摩擦副摩擦学性能研究[J]. *润滑与密封*, 2023, 48(7): 86–91.
KOU Baofu, LI Ruiqing, LI Zhenshun, et al. Study on tribological properties of ceramic friction pair for high water-based hydraulic valve[J]. *Lubrication Engineering*, 2023, 48(7): 86–91.
- [5] 徐孜,潮群,高浩寒,等. 采用参数化解调的变转速下柱塞泵故障诊断方法[J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(10): 19–29.
XU Zi, CHAO Qun, GAO Haohan, et al. A fault diagnosis method for piston pump under variable speed conditions using parameterized demodulation[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(10): 19–29.
- [6] 韩伟,徐俊,史凤霞,等. 基于变转速控制的对旋轴流泵混输特性分析[J]. *液压气动与密封*, 2022, 42(9): 6–13.
HAN Wei, XU Jun, SHI Fengxia, et al. Analysis of mixed transportation characteristics of counter rotating axial flow pump based on variable speed control[J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2022, 42(9): 6–13.
- [7] 刘银水,吴德发,李东林,等. 深海液压技术应用与研究进展[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(20): 14–23.
LIU Yinshui, WU Defa, LI Donglin, et al. Applications and research progress of hydraulic technology in deep sea[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(20): 14–23.
- [8] 郭明,聂松林,纪辉,等. 海水液压柱塞泵中新型滑盘副的设计及其润滑特性研究[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(24): 2942–2952.
GUO Ming, NIE Songlin, JI Hui, et al. Design and lubrication characteristics of a new integrated slipper/swashplate interface in seawater hydraulic piston pumps[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(24): 2942–2952.
- [9] GUO T, LIN T L, REN H L, et al. Modeling and theoretical study of relief chamfer method for reducing the flow ripple of a spool valves distribution radial piston pump[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2021, 235(19): 3819–3832.
- [10] 任中永,许顺海,龚国芳,等. 基于支撑力平衡的柱塞泵滑靴副油膜厚度动态求解方法[J]. *机电工程*, 2024, 41(1): 1–10.
REN Zhongyong, XU Shunhai, GONG Guofang, et al. Dynamic calculation method of oil film thickness of piston pump slipper pair based on distribution support force balance[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2024, 41(1): 1–10.

- [11] FREY B. Piston pump: JP19800081269[P]. 1983-05-12.
- [12] 李永康, 王军, 廉自生. 混合润滑条件下的斯特封高速摩擦与密封特性[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(5): 533-539.
LI Yongkang, WANG Jun, LIAN Zisheng. High-speed friction and sealing characteristics of step seal under mixed lubrication conditions[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(5): 533-539.
- [13] WANG J, LI Y K, LIAN Z S. Numerical investigations on the sealing performance of a reciprocating seal based on the inverse lubrication method[J]. *Journal of Tribology*, 2019, 141(11): 112201.
- [14] 刘雨聪, 曹文斌, 杨国来, 等. 配流阀结构特征对微型高压柱塞泵流量输出特性的影响[J]. *机床与液压*, 2023, 51(21): 163-169.
LIU Yucong, CAO Wenbin, YANG Guolai, et al. Influence of distributing valve structure characteristics on flow output characteristics of micro high pressure piston pump[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2023, 51(21): 163-169.
- [15] 许耀铭. 油膜理论与液压泵和马达的摩擦副设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [16] 孙泽刚, 何德文, 雷德全, 等. 变流量轴向柱塞泵性能优化[J]. *机床与液压*, 2023, 51(9): 174-179.
SUN Zegang, HE Dewen, LEI Dequan, et al. Performance optimization of variable flow axial piston pump[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2023, 51(9): 174-179.
- [17] 马纪明, 王梓腾, 王凯落. 考虑表面接触力的滑靴副油膜特性分析方法[J]. *液压与气动*, 2022, 46(1): 101-108.
MA Jiming, WANG Ziteng, WANG Kailuo. Analysis method of slipper/swash plate pair film characters considering bearing force of rough surface[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2022, 46(1): 101-108.
- [18] 侯雪坤, 褚泽斐, 刘岩等. 基于模糊PID的开式径向变量柱塞泵控油压机系统特性实验研究[J]. *机电工程*, 2023, 40(10): 1535-1542.
HOU Xuekun, CHU Zefei, LIU Yan, et al. System characteristics of open radial variable plunger pump-controlled Hydraulic press controlled by fuzzy PID[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2023, 40(10): 1535-1542.
- [19] GUO T, ZHAO S D, YU Y, et al. Design and theoretical analysis of a sliding valve distribution radial piston pump[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(1): 327-335.
- [20] 汤何胜, 陈伦军, 曹捷. 基于AMESim/Simulink的轴向柱塞泵滑靴副静压支承特性仿真研究[J]. *机床与液压*, 2011, 39(15): 101-105, 73.
TANG Hesheng, CHEN Lunjun, CAO Jie. Simulation research on hydrostatic bearing characteristics of slipper pairs of axial piston pump based on AMESim/Simulink[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2011, 39(15): 101-105, 73.