

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.10.008

# 基于配流盘表面形貌的柱塞泵空化现象研究\*

张 娇,王兆强\*,韩 博,孙令涛,高 伟  
(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院,上海 201620)

**摘要:**针对轴向柱塞泵配流副内的空化现象,建立了考虑配流盘表面形貌的柱塞泵配流副空化模型,分析了压力、转速和配流盘表面形貌对轴向柱塞泵配流副内空化现象的影响。首先,由于机加工零部件表面具备分形特征,采用了分形理论模拟配流盘表面形貌,在此基础上建立了轴向柱塞泵配流副空化模型;然后,采用有限差分法和松弛迭代法求解了数学模型,得到了符合精度要求的数值解,从而得出了配流副油膜压力分布特征,在此基础上分析了配流盘表面容易发生空化的位置;最后,通过改变配流副的压力、转速和分形参数,得到了不同的压力、缸体转速和表面形貌对配流副空化现象的影响。研究表明:配流盘表面易在高压和低压的过渡区域发生局部空化,当配流副排油腔压力达到 30 MPa,且配流盘表面较粗糙时,配流盘局部气体体积分数达到 92% 左右;采用提高配流盘表面的加工精度,降低其表面粗糙度的方法,可以降低配流盘表面产生空化现象的严重程度。

**关键词:**容积泵;配流副空化模型;表面粗糙度;排油腔压力;局部气体体积分数;缸体转速;空化程度;油膜润滑性能

中图分类号:TH137.51

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)10-1398-07

## Study on cavitation phenomenon of piston pump based on surface morphology of port plate

ZHANG Jiao, WANG Zhao-qiang, HAN Bo, SUN Ling-tao, GAO Wei  
(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Aiming at the cavitation phenomenon in the port pair of axial piston pump, a cavitation model of the piston pump distribution pair was established considering the surface topography of the valve plate, and the effects of pressure, rotational speed and the surface topography of the valve plate on the cavitation phenomenon in the valve plate were analyzed. Firstly, because the surface of machined parts has fractal characteristics, the surface morphology of port plate was simulated by fractal theory, and the cavitation model of port plate pair of axial piston pump was established. Then, the mathematical model was solved by finite difference method and relaxation iteration method, and the numerical solution meeting the accuracy requirements was obtained, so as to obtain the distribution characteristics of oil film pressure in the port plate pair. According to the distribution characteristics of oil film pressure in the port plate pair, the position where cavitation was easy to occur on the surface of the port plate was analyzed. Finally, by changing the pressure, speed and fractal parameters of the port plate pair, the effects of different pressure, cylinder speed and surface morphology on the cavitation phenomenon of the port plate pair were obtained. The results show that the surface of the port plate is prone to local cavitation in the transition area between high pressure and low pressure. When the pressure of the oil discharge chamber of the port plate pair reaches 30 MPa and the coarser the surface of the port plate, the local gas volume fraction of the port plate is about 92%. Therefore, the severity of cavitation on the port plate surface can be reduced by improving the surface machining accuracy and reducing the surface roughness.

**Key words:** positive displacement pump; port plate pair cavitation model; surface roughness; pressure of oil discharge chamber; local gas volume fraction; cylinder speed; degree of cavitation; oil film lubrication performance

收稿日期:2022-04-16

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51505272);流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金资助项目(GZKF-201514)

作者简介:张娇(1995-),女,甘肃庆阳人,硕士研究生,主要从事摩擦润滑方面的研究。E-mail:15961167712@163.com

通信联系人:王兆强,男,副教授,硕士生导师。E-mail:wangzhaoliang\_2008@126.com

## 0 引 言

空化现象指的是当液体内部局部压力低于饱和蒸汽压时,在液体内部或液固交界面上,蒸汽或气体空穴会经历一个形成、发展和溃灭过程的一种特殊现象<sup>[1]</sup>。

随着轴向柱塞泵向高速高压方向发展,在其配流副工作过程中,由空化现象所产生的能量以及冲击无法忽视<sup>[2]</sup>。

轴向柱塞泵空化现象的起因是液体介质在进入柱塞泵时夹带气体,当液体内的压力低于饱和蒸汽压时就会产生气泡,气泡溃灭则会侵蚀金属表面<sup>[3]</sup>。配流盘表面是轴向柱塞泵中发生空化现象的重要部位之一,因此,需研究配流盘表面形貌对空化现象的影响。

国内外众多学者都对轴向柱塞泵的空化效应进行了研究。

筑地彻浩等人<sup>[4]</sup>利用高速摄影机,从轴向和侧向两个方向拍摄了配流盘 V 型槽附近的空化现象,通过对比仿真和实验,得出结果,即当 V 型槽数量为 3 时可有效抑制空化效应。YIN Fang-long 等人<sup>[5]</sup>在考虑了流体压缩效应和空化损伤的条件下,对有无阻尼槽、U 形槽和三角槽的几种轴向柱塞泵的配流盘结构进行了三维流体计算。马吉恩等人<sup>[6]</sup>使用 CFD 仿真软件,对柱塞泵内部的流场特性进行了仿真,分析了其工作流体的流动情况,并在此基础上对配流盘结构做了优化。WANG Shu<sup>[7]</sup>研究了柱塞孔和配流盘之间的控制体积,结果发现,由柱塞孔内体积增加而引起的柱塞孔内真空,需要通过流量进行补偿,否则低压时容易发生气蚀。W. KOLLEK 等人<sup>[8]</sup>对斜轴式柱塞泵的一个柱塞—气缸单元进行了模拟,为清楚地观察空化现象的过程,采用了有机玻璃制作外壳,发现泵的吸油区易发生气蚀现象;并检测到了声音诊断信号,建立了声音诊断信号与气蚀初生的关系,提出了可利用声音仪器来探测液压系统气蚀的构想。王建森等人<sup>[9]</sup>采用全空化模型,研究了柱塞泵配流盘表面空化流场的动态演化过程,结果发现,具有正开口双侧减振槽结构的配流盘表面容易受到空蚀破坏。YANG Li-jie 等人<sup>[10]</sup>使用 PumpLinx 软件仿真,分析了水液压马达的空化机制,发现了配流盘上死点的压力过渡区域空化现象比较严重。CHAO Qun 等人<sup>[11]</sup>分析了离心力对柱塞泵缸体内空化的影响,发现了离心效应可以抑制缸孔外壁附近的空化,但会加剧缸孔内壁附近的空化。刘江等人<sup>[12]</sup>对比了润滑油的黏度恒定和黏度随温度变化两种情况下,轴向柱塞泵内的空化效应,结果发现,实时黏温条件下柱塞泵内的空化效应更剧烈。

综上所述,国内外众多学者都对柱塞泵内的空化现象进行研究,但配流盘表面形貌对空化现象的影响却鲜有研究。

由于机加工零部件表面形貌具备分形特征,因此,笔者采用分形函数模拟配流盘的表面形貌,并在此基础上建立配流副的空化模型,使用有限差分法和松弛迭代法对数学模型进行求解,得出符合精度的数值解,利用 MATLAB 生成配流副油膜压力分布图,根据其分布特征分析配流盘表面容易发生空化的位置;然后通过改变压力、转速和分形参数,分析压力、转速和配流盘表面形貌对配流副内空化现象的影响,为通过优化配流盘表面形貌来改善空化现象提供依据。

## 1 轴向柱塞泵配流副数学模型

轴向柱塞泵配流副的结构示意图如图 1 所示。

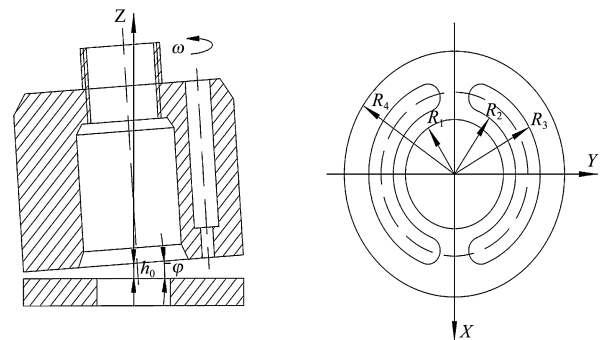


图 1 配流副结构示意图

$\omega$ —泵缸体转速; $h_0$ —柱塞泵缸体和配流盘之间的初始油膜厚度; $\varphi$ —缸体因受到偏载力矩而倾斜的角度; $R_1$ —内密封带内径; $R_2$ —内密封带外径; $R_3$ —外密封带内径; $R_4$ —外密封带外径

当配流副工作时,由于压力过高或者泵转速过快,会导致柱塞泵的柱塞腔吸排油过程中,配流盘的高压和低压过渡区域出现空化现象。

由于受到加工技术的限制,机加工零部件表面不是完全光滑的,而是呈现出凹凸不平的状态。

配流盘微观表面示意图,如图 2 所示。

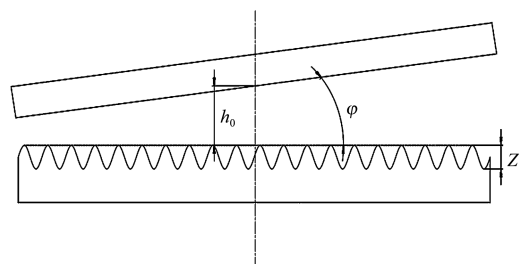


图 2 配流盘微观表面示意图

在流体压力作用下,因配流盘会发生弹性变形,所以配流副间膜厚会受弹性变形和配流盘表面微观形貌的影响,因此,膜厚方程可表示为:

$$h = h_0 + r \cdot \sin\theta \cdot \tan\varphi + \delta_{x,y} + z(x,y) \quad (1)$$

其中  $\delta_{x,y}$  指的是配流盘的弹性变形, 根据弹性变形假说可有:

$$\delta_{ij}^{kl} = \frac{2}{\pi S} \iint \frac{P_{k,l}}{\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_j - y_l)^2}} dx dy \quad (2)$$

根据研究可知: 机加工零部件表面轮廓呈现出随机性、自仿射性的分形特征, 配流盘表面也满足该特点, 因此, 笔者采用分形理论来模拟配流盘的表面面貌<sup>[13,14]</sup>。

三维分形函数为:

$$z(x,y) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} C_n \gamma^{(D_s-3)n} \sin[\gamma^n (x \cos B_n + y \sin B_n) + A_n] \quad (3)$$

式中:  $z(x,y)$  一点  $(x,y)$  处的粗糙峰高度;  $C_n$ —尺度参数;  $D_s$ —分形维数;  $n$ —频率系数;  $\gamma$ —尺度参数, 一般取  $\gamma = 1.5$ <sup>[15]</sup>;  $A_n, B_n$ — $[0, 2\pi]$  范围内的随机相位。

根据研究可知<sup>[16]</sup>: 随着分形维数  $D_s$  变化, 轮廓曲线的形状和幅值都发生变化, 分形维数越大, 则表面轮廓起伏越小, 精细程度越高; 随着尺度系数  $C_n$  的变化, 表面轮廓的形状变化较小, 复杂度基本不变, 而表面轮廓幅值随着尺度系数的减小而减小。

采用雷诺方程求解配流副油膜压力分布, 即:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6 \frac{\partial}{\partial x} (\rho h U) + 12 \rho \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

式中:  $h$ —油膜厚度;  $p$ —油膜压力;  $\eta$ —润滑油黏度;  $\rho$ —润滑油密度。

为方便计算, 笔者将直角坐标系转换为柱坐标系, 并将其离散化, 可以得到:

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_{i+0.5,j} h_{i+0.5,j}^3}{r_{i,j} \eta \Delta \theta^2} p_{i+1,j} - \frac{\rho_{i+0.5,j} h_{i+0.5,j}^3}{r_{i,j} \eta \Delta \theta^2} p_{i,j} - \frac{\rho_{i-0.5,j} h_{i-0.5,j}^3}{r_{i,j} \eta \Delta \theta^2} p_{i,j} + \\ & \frac{\rho_{i-0.5,j} h_{i-0.5,j}^3}{r_{i,j} \eta \Delta \theta^2} p_{i-1,j} + \frac{\rho_{i,j+0.5} r_{i,j+0.5} h_{i,j+0.5}^3}{\eta \Delta r^2} p_{i,j+1} - \\ & \frac{\rho_{i,j+0.5} r_{i,j+0.5} h_{i,j+0.5}^3}{\eta \Delta r^2} p_{i,j} - \frac{\rho_{i,j-0.5} r_{i,j-0.5} h_{i,j-0.5}^3}{\eta \Delta r^2} p_{i,j} + \\ & \frac{\rho_{i,j-0.5} r_{i,j-0.5} h_{i,j-0.5}^3}{\eta \Delta r^2} p_{i,j-1} = 6 \omega r_{i,j} \frac{\rho_{i+0.5,j} h_{i+0.5,j} - \rho_{i-0.5,j} h_{i-0.5,j}}{\Delta \theta} + \\ & 12 \rho_{i,j} \frac{h_{i+0.5,j} - h_{i-0.5,j}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (5)$$

当润滑油受到的压力增加时, 其体积会随之减小, 从而使密度增大。

密度和压力的关系可以表示为:

$$\rho_p = \rho_0 \left( 1 + \frac{0.6p}{1 + 1.7p} \right) \quad (6)$$

式中:  $\rho_p$ —压力为  $p$  时的密度;  $\rho_0$ —压力为  $p_0$  时的密度。

离散处理后为:

$$\rho_{p_{i,j}} = \rho_0 \left( 1 + \frac{0.6p_{i,j}}{1 + 1.7p_{i,j}} \right) \quad (7)$$

## 2 轴向柱塞泵配流副空化模型

### 2.1 连续性方程

假设柱塞泵内的液压油为气相和液相均匀混合的两相流, 其连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m u_i) = 0 \quad (8)$$

式中:  $\rho_m$ —气液混合相的平均密度;  $u_i$ —气液混合相的平均速度。

将式(5)转为柱坐标系, 并离散化后可得到:

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_{mi+1,j} - \rho_{mi,j}}{\Delta t} + \omega \frac{\rho_{mi+1,j} - \rho_{mi,j}}{\Delta \theta} + \\ & \omega r_{i,j} \frac{\rho_{mi,j+1} - \rho_{mi,j}}{\Delta r} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

### 2.2 空化流质量输运方程

在此处, 笔者以气液混合两相流为研究对象, 气液两相空化流的质量输运方程为:

$$\frac{\partial (\rho_m f_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \nabla f_v) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla f_v) + R_e - R_c \quad (10)$$

其中,  $R_e$  和  $R_c$  分别为:

$$R_e = C_e (1 - f_v) \frac{\rho_v \rho}{\sigma} \sqrt{\frac{2(P_v - P)}{3\rho}} \quad (11)$$

$$R_c = C_c f_v \frac{\rho_v \rho}{\sigma} \sqrt{\frac{2(P_v - P)}{3\rho}} \quad (12)$$

式中:  $f_v$ —空气质量分数;  $\Gamma$ —有效传递系数;  $R_e$ —气相产生率;  $R_c$ —气相压缩率;  $C_e, C_c$ —经验常数,  $C_e = 0.02, C_c = 0.01$ ;  $\rho_v$ —气体密度;  $P_v$ —气相临界压力;  $\sigma$ —气泡表面张力系数。

将式(8)转为柱坐标系, 并离散化后得到:

$$\begin{aligned} & f_{vi,j} \frac{\rho_{mi+1,j} - \rho_{mi,j}}{\Delta t} + \frac{\rho_{mi,j}}{r_{i,j} \Delta \theta} \left( \frac{f_{vi+1,j} - f_{vi,j}}{r_{i,j} \Delta \theta} + \frac{f_{vi,j+1} - f_{vi,j}}{\Delta r} \right) + \\ & \frac{\rho_{mi,j}}{\Delta r} \left( \frac{f_{vi+1,j} - f_{vi,j}}{r_{i,j} \Delta \theta} + \frac{f_{vi,j+1} - f_{vi,j}}{\Delta r} \right) = \Gamma \frac{1}{r_{i,j} \Delta \theta} \left( \frac{f_{vi+1,j} - f_{vi,j}}{r_{i,j} \Delta \theta} + \right. \\ & \left. \frac{f_{vi,j+1} - f_{vi,j}}{\Delta r} \right) + \Gamma \frac{1}{\Delta r} \left( \frac{f_{vi+1,j} - f_{vi,j}}{r_{i,j} \Delta \theta} + \frac{f_{vi,j+1} - f_{vi,j}}{\Delta r} \right) + \\ & C_e (1 - f_{vi,j}) \frac{\rho_{vi,j} \rho_{i,j}}{\sigma} \sqrt{\frac{2(P_v - P_{i,j})}{3\rho_{i,j}}} + C_c f_{vi,j} \frac{\rho_{vi,j} \rho_{i,j}}{\sigma} \end{aligned} \quad (13)$$

气相密度为:

$$\rho_v = \frac{PM}{RT} \quad (14)$$

式中: $M$ —液压油的摩尔质量; $R$ —普适气体常数; $T$ —环境温度。

离散后为:

$$\rho_{vi,j} = \frac{P_{i,j}M}{RT_{i,j}} \quad (15)$$

油液中的气体体积分数为:

$$\alpha = \frac{f_v \rho_m}{\rho_v} \quad (16)$$

离散后为:

$$\alpha_{i,j} = \frac{f_{vi,j} \rho_{mi,j}}{\rho_{vi,j}} \quad (17)$$

### 3 计算结果与分析

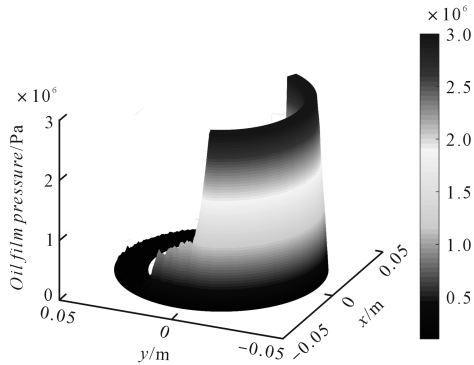
空化现象中气泡的生成、发展和溃灭与压力的变化息息相关,所以为了分析配流副间的空化现象,需了解配流副间油膜压力的分布情况。

配流副工况参数的初始值,如表 1 所示。

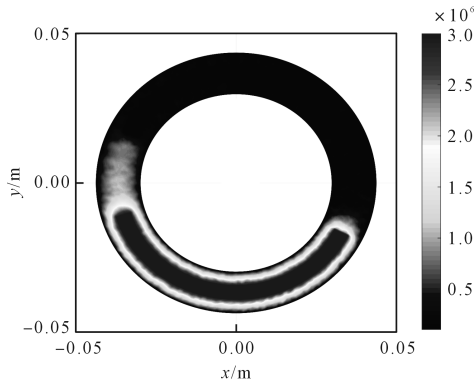
表 1 配流副工况参数初始值

参数/单位	数值	参数/单位	数值
$\omega / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	3 500	$T / \text{K}$	300
$\varphi / (^\circ)$	0.04	$P / \text{MPa}$	30
$h_0 / \mu\text{m}$	12.5	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3})$	890
$\eta_0 / (\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1})$	0.036 5		

配流副的油膜压力分布云图,即油膜压力分布三维图和油膜压力分布俯视图,如图 3 所示。



(a) 压力分布三维图



(b) 压力分布俯视图

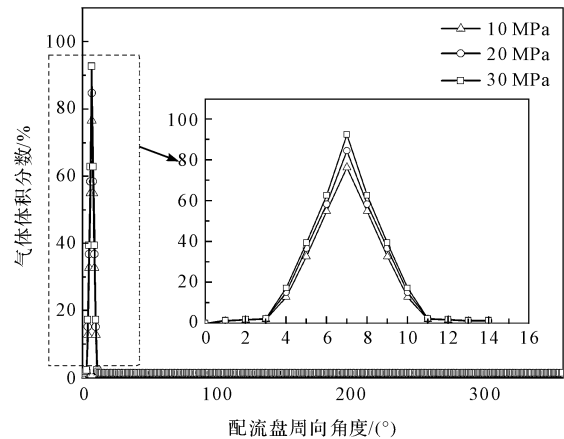
图 3 配流副油膜压力分布

从图 3 中可以看出:配流副间油膜压力分布特点为高压区与低压区相比有很大的压力峰值;柱塞泵内高、低压急剧变化的部位是极易出现空化的关键位置,如图 3(b)中所示。

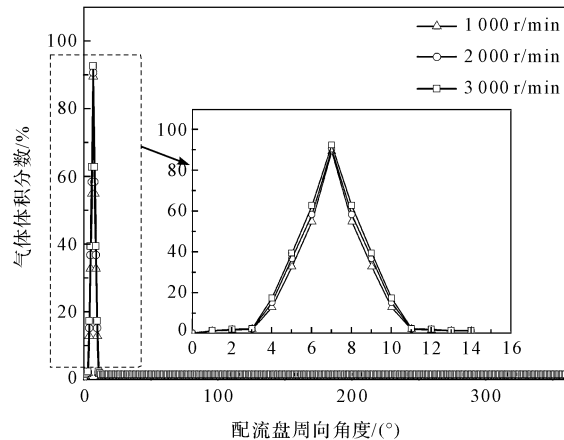
#### 3.1 压力和转速对空化程度的影响

在柱塞泵的工作过程中,液压油从配流盘进油槽流入时,柱塞腔内压力骤然变化,容易发生空化,此时会有大量气泡扩散和撞击壁面,该现象在柱塞泵的工作循环中会周期性地发生,从而引起配流盘表面金属剥蚀。因此,笔者针对无减压槽的配流盘建立全膜润滑下的空化模型,对比分析不同压力和转速下的空化程度。

压力和转速对配流盘表面空化现象的影响,如图 4 所示。



(a) 压力对空化的影响



(b) 转速对空化的影响

图 4 压力和转速对配流盘表面空化的影响

其中,图 4(a)为缸体转速为 3 000 r/min,排油腔压力分别为 10 MPa、20 MPa 和 30 MPa 时,排油腔压力对配流盘内空化的影响。

从图中可以看出:配流盘表面发生的空化主要为局部空化,空化区域主要集中于配流盘吸油腔与排油腔相连的过渡区域。当排油腔压力为 10 MPa 时,配流

盘局部最大气体体积分数为 76.5%；当排油腔压力为 20 MPa 时，配流盘局部最大气体体积分数为 84.7%；当排油腔压力为 30 MPa 时，配流盘局部最大气体体积分数可高达 92.6%。

由此可见，配流盘排油腔压力越高，其空化现象越严重。

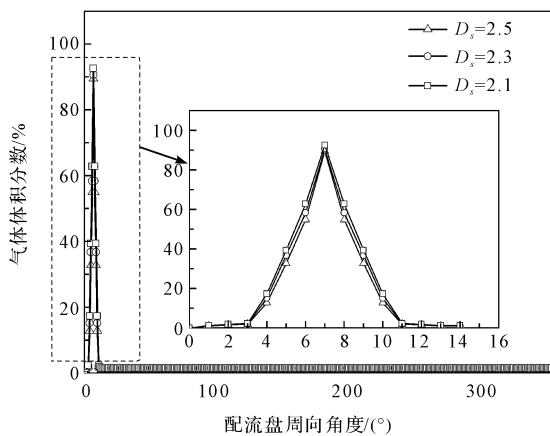
图 4(b) 为柱塞泵排油腔压力为 30 MPa，缸体转速为 1 000 r/min、2 000 r/min 和 3 000 r/min 时配流盘的气体分布情况。

从图中可以看出：转速不同时，配流盘表面发生的空化区域依旧为吸油腔与排油腔相连的过渡区域；并且不同转速下，气体体积分数相差不大，均在 92% 左右。

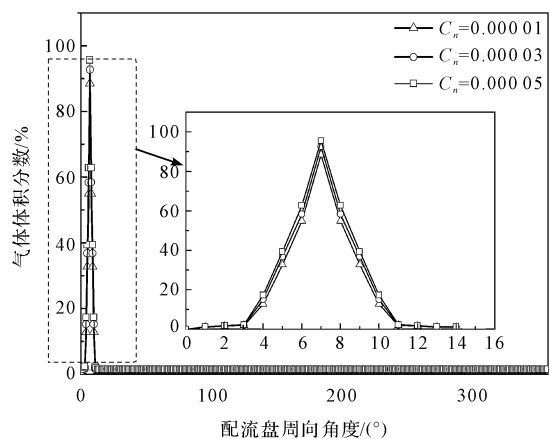
### 3.2 表面形貌对空化程度的影响

柱塞泵配流副表面存在凹凸不平的表面形貌，其微观形貌会影响到配流副间的油膜厚度，从而影响到压力分布，进而影响到配流盘表面的空化情况。为分析配流盘表面形貌对其空化现象的影响，笔者选取不同的分形维数  $D_s$  和  $C_n$  尺度系数，模拟配流盘的表面形貌。

分形参数对配流盘表面空化的影响，如图 5 所示。



(a) 分形维数对空化的影响



(b) 尺度系数对空化的影响

图 5 分形参数对配流盘表面空化的影响

图 5(a) 表示尺度系数取 0.000 01，分形维数分别取 2.1、2.3、2.5 时，配流盘的局部空化情况。

从图 5(a) 中可以看出：配流盘分形维数越小，配流盘表面的局部空化现象越严重。发生该情况的原因在于，当分形维数越大，配流盘表面轮廓复杂度越高，表面越精细，其粗糙度越小，而分形维数越小则粗糙度越大，当配流盘表面粗糙度越大则存在于缝隙中的空气也就越多，当配流副间油液压力突发变化的时候，就会产生更多气泡，从而气体体积分数增大；当分形维数越大，则表面粗糙峰高度越低，配流副间油膜厚度越大，则压力越小；从前文可知，压力越小，空化程度也越小。

图 5(b) 表示分形维数取 2.5，尺度系数分别取 0.000 01、0.000 03、0.000 05 时，配流盘的局部空化情况。

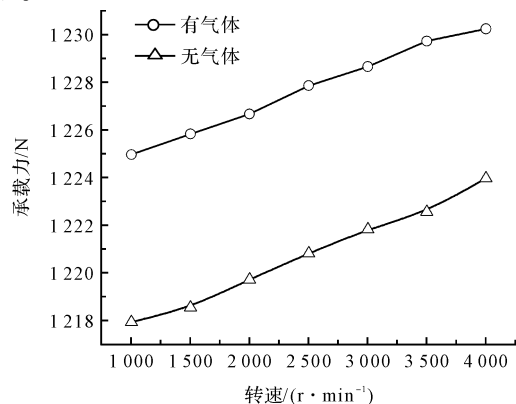
从图 5(b) 中可以看出：配流盘尺度系数增大时，配流盘表面的局部空化现象会更明显。由于尺度系数主要影响配流盘表面形貌粗糙峰的高度，当粗糙峰的高度增加时，配流盘表面粗糙度增大，更容易发生空化现象；并且当尺度系数增大时，粗糙峰的高度增加，则配流副间油膜厚度减小，使得压力变大，从而气体体积分数增加。

### 3.3 配流副内气体析出对润滑性能的影响

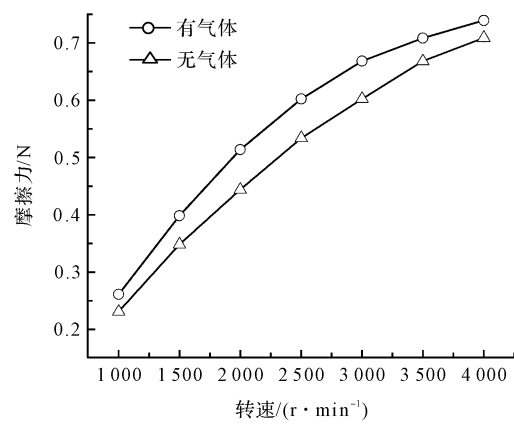
从上文可知：配流盘进油口处高低压过渡区会析出大量气体，甚至发生局部空化现象，引起柱塞泵内的噪声和振动，配流盘表面还会发生气蚀。但未发生空化现象时，配流副间油液也会因为压力转换而析出气体。

因此，为探究当未发生空泡溃灭的情况时，气体体积分数变大是否会对配流副间油膜的润滑性能造成影响，笔者对比分析缸体不同转速和不同倾角下，有气体析出和无气体析出两种情况下，油膜的承载力、摩擦力、摩擦力矩和摩擦系数大小。

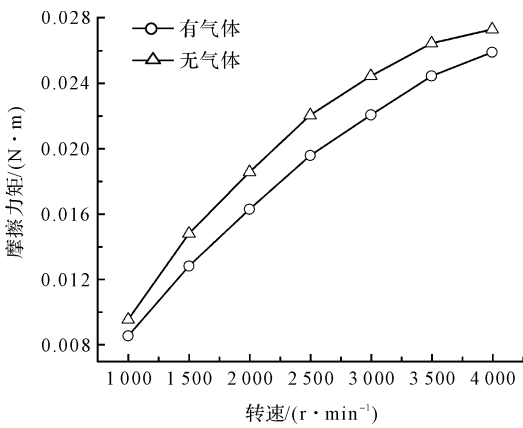
不同转速下，有无气体对其润滑性能的影响如图 6 所示。



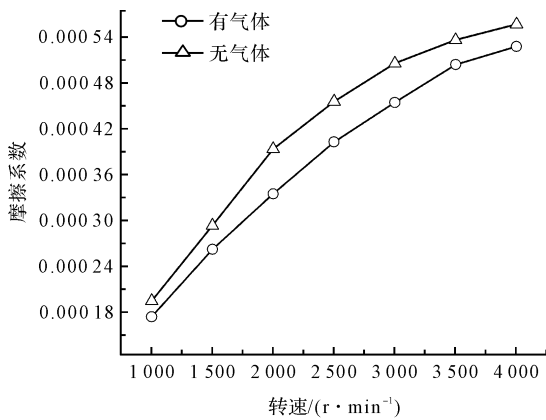
(a) 对承载力的影响



(b) 对摩擦力的影响



(c) 对摩擦力矩的影响



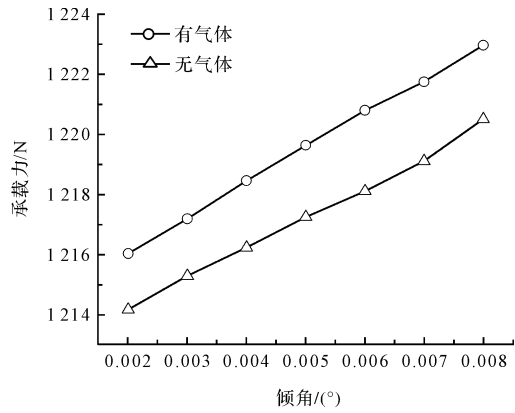
(d) 对摩擦系数的影响

图 6 不同转速下有无气体对润滑性能的影响

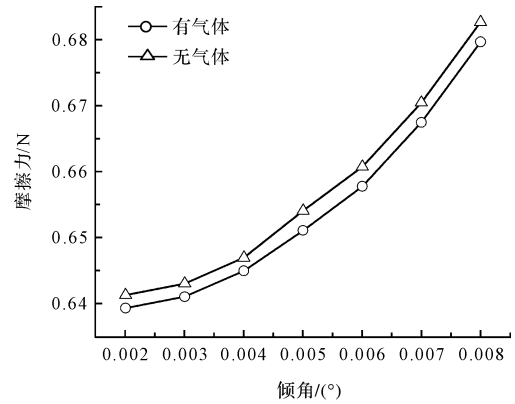
其中,图 6(a)为转速不同时,有气体和无气体情况下承载力的对比。从图 6(a)可看出:随着转速的增加,配流副间油膜的流体动压效应增强,承载力逐渐增大;相比未考虑空化的模型,考虑配流副内有气体的模型计算得出的结果偏高。

图 6(b,c,d)为摩擦力、摩擦力矩和摩擦系数的对比,从图中可以看出,当配流副内有气体析出时,摩擦力、摩擦力矩和摩擦系数均低于无气体的情况。

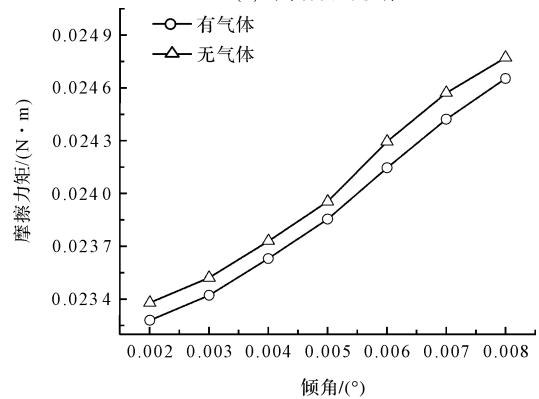
不同倾角下,有无气体析出对润滑性能的影响如图 7 所示。



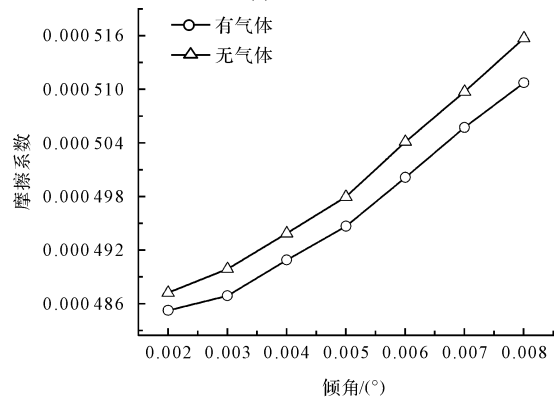
(a) 对承载力的影响



(b) 对摩擦力的影响



(c) 对摩擦力矩的影响



(d) 对摩擦系数的影响

图 7 不同倾角下有无气体对润滑性能的影响

从图 7(a)中可以看出:当缸体倾角变大时,其承载力增强,这是因为缸体倾角增大导致配流副收敛侧

油膜厚度变薄,从而使流体动压效应增强<sup>[17]</sup>;

从图 7(b,c,d)中可发现:随着缸体倾角增大,摩擦力、摩擦力矩和摩擦系数也随之增加<sup>[18]</sup>;并且当配流副内有气体析出时,配流副的润滑性能高于没有气体的情况。

## 4 结束语

针对轴向柱塞泵配流副内的空化问题,为讨论配流盘表面形貌对配流副空化现象的影响,笔者建立了考虑配流盘表面形貌的柱塞泵配流副空化模型,分析了压力、转速和配流盘表面形貌对轴向柱塞泵配流副内空化现象的影响,并且探讨了配流副间存在气体对其润滑性能造成的影响。

研究结果表明:

(1)配流盘的空化现象主要发生于高压和低压的过渡区域,由此可见,压力的变化是导致空化现象的主要原因。配流副排油腔压力为 30 MPa 时,气体体积分数达到 92.6%,局部位置的空化现象比 20 MPa 和 10 MPa 要更严重;而柱塞泵缸体的转速从 1 000 r/min 增加到 3 000 r/min 时,对配流盘空化现象的影响不大;

(2)配流盘表面越粗糙,则空化情况越严重,配流副内局部气体体积分数会增大到 92% 左右。这是由于当配流盘表面粗糙度越大时,在粗糙峰内的空气就越多,也更容易发生空化现象。可通过选择分形维数较大而尺度系数较小的配流盘,以此来降低配流副内的空化程度;

(3)配流副内发生空化后虽容易造成气蚀,但是当配流副内存在气体,但气泡未发生溃灭时,其油膜承载力提升了约 0.57%。可以通过设计合理的配流盘结构来减小空化程度,使得配流副在工作过程中既可以提升润滑性能,又减少发生气蚀。

在该研究的基础上,笔者后续将设计配流副空化实验,对该理论模型进行验证,并对其他润滑状态下的空化现象和润滑性能进行研究。

### 参考文献 (References):

[1] TOTTE G E, SUN Y H, JR R J B, et al. Hydraulic system cavitation: a review [J]. *New Technology and Successful Application of Surface Engineering*, 1998(9): 414-429.

- [2] 阳洪志,李壮云. 液压泵气蚀初生的诊断[J]. *液压与气动*, 1988(1):4-8.
- [3] 齐国宁,田 婷,何增强,等. 高压柱塞泵气蚀现象及其控制[J]. *机床与液压*, 2021, 49(9):187-191.
- [4] 筑地彻浩,陈 卓,陈晶晶. 轴向柱塞泵内部空化流的可视化分析[J]. *液压与气动*, 2015(2):1-7.
- [5] YIN Fang-long, NIE Song-lin, HOU Wei, et al. Effect analysis of silencing grooves on pressure and vibration characteristics of seawater axial piston pump [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2017, 231(8):1390-1409.
- [6] 马吉恩,徐 兵,杨华勇. 轴向柱塞泵流动特性理论建模与试验分析[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(1):188-194.
- [7] WANG Shu. The analysis of cavitation problems in the axial piston pump[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2010, 132(7):074502.
- [8] W. KOLLEK, Z. KUDZMA, M. STOSIAK, et al. Possibilities of diagnosing cavitation in hydraulic systems [J]. *Archives of civil and mechanical engineering*, 2007, 7(1):61-63.
- [9] 王建森,何鑫龙,杨 威,等. 闭式斜盘轴向柱塞变量泵配流副空蚀现象分析[J]. *兰州理工大学学报*, 2022, 48(1):59-64.
- [10] YANG Li-jie, NIE Song-lin, NIU Qing-na, et al. Water hydraulic axial piston motor cavitation characteristics based on CFD technology [J]. *Military operations research*, 2017, 14(3):231-236.
- [11] CHAO Qun, ZHANG Jun-hui, XU Bing, et al. Centrifugal effects on cavitation in the cylinder chambers for high-speed axial piston pumps [J]. *Meccanica*, 2019, 54(6): 815-829.
- [12] 刘 江,赵 斌,高贵军,等. 考虑黏-温特性对柱塞泵空化射流的影响[J]. *液压与气动*, 2021, 45(7):35-42.
- [13] SAYLES R S, THOMAS T R. Surface topography as a nonstationary random process [J]. *Nature*, 1978, 271(5644):431-434.
- [14] 葛世荣, TONDER K. 粗糙表面的分形特征与分形表达研究[J]. *摩擦学学报*, 1997, 17(1):73-80.
- [15] LI Cheng-gui, SHEN Dong, ZHANG Guo-xiong. Evaluation of the anisotropy of machined 3D surface topography [J]. *Wear*, 2000, 237(2):211-216.
- [16] 邓可月,刘 政,邓居军,等. W-M 函数模型下表面轮廓形貌的变化规律[J]. *机械设计与制造*, 2017(1):47-50.
- [17] 廖文玲,刘 欣,张 欢. 椭圆形细胞数目及分布对传热管内流动和传热特性的影响 [J]. *压力容器*, 2020, 37(4):38-45, 67.
- [18] 李正祥. 柱塞闭死容积对柱塞泵出口流量脉动的研究 [J]. *液压气动与密封*, 2022(2):16-19, 15.

[编辑:全 瑶]

### 本文引用格式:

张 娇,王兆强,韩 博,等. 基于配流盘表面形貌的柱塞泵空化现象研究[J]. *机电工程*, 2022, 39(10):1398-1404.

ZHANG Jiao, WANG Zhao-qiang, HAN Bo, et al. Study on cavitation phenomenon of piston pump based on surface morphology of port plate [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022, 39(10):1398-1404.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>