

织构设计对润滑脂密封副密封特性影响的数值模拟

武怀彪¹, 潘家保^{1,2}, 汪奥¹

(1.安徽工程大学 机械工程学院, 安徽 芜湖 241000;
2.南京航空航天大学 直升机传动技术国家重点实验室, 南京 210016)

摘要: **目的** 探究织构设计对润滑脂密封副密封性能的影响规律, 得到织构化设计的最佳结构参数和工况条件。**方法** 基于润滑脂 Herschel-Bulkley 流变模型和非接触机械密封原理, 选择直线型沟槽织构建立端面密封模型。采用数值模拟方法分析不同倾斜角和转速下密封间隙的流场规律, 进一步对密封副泄漏量的影响因素进行系统探究。**结果** 倾斜角不同, 泄漏量随转速的变化规律不同。倾斜角为 30°时, 泄漏量随转速的提升而增大; 倾斜角为 35°时, 泄漏量较小, 且随转速变化不大; 倾斜角为 40°, 且转速大于 2 000 r/min 时, 泄漏量几乎为 0; 倾斜角大于等于 45°, 且转速大于 1 000 r/min 时, 流体反向泵送, 无泄漏。密封间隙和介质初始温度是影响泄漏的主要因素, 泄漏量随密封间隙和介质温度的增大而增大。一定范围内, 增加沟槽数量和长度也可减少泄漏。最佳织构参数和工况条件为倾斜角 40°, 槽数 14, 槽长 8 mm, 槽宽 1.5 mm, 密封间隙 0.03 mm, 槽深 0.07 mm, 温度小于 320 K, 转速大于 2 000 r/min。**结论** 织构设计能有效抑制流体端面泄漏, 润滑脂非牛顿特性对密封副间隙流场有显著影响, 后续润滑脂密封副设计中应考虑流体的非牛顿特性。

关键词: 润滑脂; 密封副; 织构化设计; 泄漏控制; 密封机理; 非牛顿流体

中图分类号: TH117.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)04-0155-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.04.012

Numerical Simulation of Effect of Texture Design on Sealing Characteristics of Grease Sealing Pair

WU Huai-biao¹, PAN Jia-bao^{1,2}, WANG Ao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui Polytechnic University, Anhui Wuhu 241000, China;
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

收稿日期: 2022-04-06; 修订日期: 2022-08-12

Received: 2022-04-06; Revised: 2022-08-12

基金项目: 国家自然科学基金 (52005004); 清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金 (SKLTKF21B02); 南京航空航天大学直升机传动技术重点实验室开放课题 (HTL-O-20G09)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (52005004); The Tribology Science Fund of State Key Laboratory of Tribology (SKLTKF21B02); Open Fund of the National Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission (HTL-O-20G09)

作者简介: 武怀彪 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为机械密封。

Biography: WU Huai-biao (1997-), Male, Postgraduate, Research focus: mechanical seal.

通讯作者: 潘家保 (1990—), 男, 博士。

Corresponding author: PAN Jia-bao (1990-), Male, Doctor.

引文格式: 武怀彪, 潘家保, 汪奥. 织构设计对润滑脂密封副密封特性影响的数值模拟[J]. 表面技术, 2023, 52(4): 155-163.

WU Huai-biao, PAN Jia-bao, WANG Ao. Numerical Simulation of Effect of Texture Design on Sealing Characteristics of Grease Sealing Pair[J]. Surface Technology, 2023, 52(4): 155-163.

ABSTRACT: The work aims to investigate the effects of surface texture design and non-Newtonian characteristics of grease on sealing performance of grease seal pair, and obtain the optimal structural parameters and working conditions in texture design. Based on the Herschel-Bulkley rheological model of grease and the principle of non-contact mechanical seal, the viscose-temperature relationship of grease was fitted, and the linear groove texture was selected to establish the end seal model. The pressure distribution, temperature distribution and apparent viscosity distribution of seal end face flow field were obtained by numerical simulation. The influence law of different inclination angle and speed on seal clearance flow field was analyzed, and other factors affecting leakage, such as grease temperature, groove number, length, width, depth and seal clearance, were systematically explored.

The groove structure would produce fluid dynamic pressure in the flow field, forming a high pressure area and a low pressure area, with the highest pressure of 1.75 MPa and the lowest pressure of -0.165 MPa. Under the effect of internal friction of fluid, the average temperature of liquid film rose from 300 K to 324 K. The high pressure area blocked the flow of fluid inward, and the low pressure area made part of the fluid reverse flow, which could reduce the leakage amount of grease. At the same speed, increasing the inclination angle of the groove would increase the flow back, which would change the flow field from leakage to reverse pumping. With different inclination angles, the change law of leakage with speed was different: when the inclination angle was 30° , the leakage increased with the increase of speed; When the inclination angle was 35° , the leakage was small and changed little with the speed; When the inclination angle was 40° and the speed was greater than 2 000 r/min, the leakage was almost zero. When the inclination angle was greater than or equal to 45° and the rotating speed was greater than 1 000 r/min, the fluid was pumped in reverse without leakage. The sealing gap and the initial temperature of the medium were the main factors affecting the leakage, and the leakage increased with the increase of the sealing gap and the temperature of the medium. To a certain extent, increasing the number and length of grooves could also reduce leakage. The best texture parameters and working conditions were: inclination angle 40° , number of grooves 14, groove length 8 mm, groove width 1.5 mm, sealing gap 0.03 mm, groove depth 0.07 mm, temperature less than 320 K, speed greater than 2 000 r/min.

The results show that the surface texture design can effectively suppress the leakage of the fluid end face, and the zero leakage of the end face seal can be achieved by the excellent structural parameters with appropriate rotational speed and temperature conditions. The non-Newtonian characteristics of grease have significant effects on the flow field of the seal pair, which will affect the sealing performance of the seal pair. Therefore, the non-Newtonian characteristics of fluid should be considered in the subsequent design of the seal pair of grease.

KEY WORDS: grease; sealing; texture design; leakage control; sealing mechanism; non-Newtonian fluid

在密封副表面开展织构设计,实现非接触式机械密封是近年来研究的热点^[1-2]。其原理在于在密封端面上加工出表面织构,利用流体介质产生的动压效应来平衡闭合力,在端面间隙形成动压油膜,实现密封端面的非接触^[3-4],减少磨损^[5],提高可靠性。

1966年,Hamilton等^[6]首次提出织构化密封端面能够产生明显的动压效应,可有效改善密封端面的润滑性能。Etsion等^[7]对激光加工端面的机械密封进行了理论和实验研究,初步得出工况和织构参数对密封性能的影响。此后许多学者对各类型织构对密封端面间的润滑特性、密封特性和密封环的形变情况进行了大量研究,并对织构的尺寸参数及进行了优化^[8-12]。研究人员设计织构的形状主要分为两大类:沟槽型和凹坑型。沟槽型包括:人字槽^[13-14]、螺旋槽^[15-16]和直沟槽^[17]等;凹坑型包括:圆形孔^[18]、椭圆形孔^[19]和三角形孔^[20]等。Shi等^[21-22]构建了沟槽型与凹坑型织构密封模型,通过对比分析发现,高速旋转条件下,

沟槽型织构具有更优的密封性能,且通过调整沟槽的倾斜角可获得较低的摩擦系数和较小的泄漏率。

与此同时,介质的流体属性与织构设计间也存在耦合关联性。Sharma等^[23-25]研究了在幂律型润滑油作用下具有表面织构的推力轴承的性能,表面织构和润滑油的流变特性明显改变了轴承的摩擦功率损耗。若聚焦到密封领域,非牛顿特性对密封副的密封性能也产生了直接影响。Wang等^[26]研究了润滑油的非牛顿特性对螺旋槽液膜密封性能的影响,表明液膜密封设计应考虑流体非牛顿特性。王赞磊等^[27]结合JFO模型和幂律模型,研究了幂律指数和空化率对下游泵送螺旋槽液膜密封性能的影响。陈果等^[28]采用解析法研究了幂律流体对螺旋密封性能的影响。然而,现有研究多以润滑油为研究对象,其非牛顿特性多符合幂律模型。在机械领域,具有复杂流变特性的润滑脂应用广泛,但对以润滑脂为密封介质的研究甚少。

基于此,本文以不同倾斜角的直线型沟槽为研究

对象,结合润滑脂热流变特性的模型参数,拟合润滑脂粘温关系,开展润滑脂密封副的泄漏数值模拟。通过流场分布和流体流变特性揭示斜沟槽抑制泄漏机理,得出不同倾斜角和转速对密封副间隙流的流场影响规律。对显著影响泄漏量的沟槽参数和工况条件等因素进行系统探究,得出最佳值。相关研究可为润滑脂织构化密封副泄漏(如润滑脂泵端面泄漏)控制提供设计依据和参考。

1 润滑脂密封副分析模型

1.1 几何模型

本文研究的机械密封结构如图 1a 所示。机械密封由动环与静环组成,密封端面间隙中为密封介质形

成的液膜,动环端面加工有不同类型的沟槽,图中 h_o 为密封端面间隙, h_g 为沟槽深度, ω 为动环旋转角速度。动环端面的几何构造如图 1b 所示, r_o 和 r_i 分别为密封端面的外径和内径, p_o 为介质压力, p_i 为泄漏侧压力。在动环端面上,一定数量的沟槽呈周期分布,沟槽数量为 N 。单个沟槽的几何特征如图 1c 所示, L 为沟槽长度, W 为沟槽宽度, α 为沟槽倾斜角。Shi 等^[22]通过试验得到最佳的织构面积比 S_p 为 15% 左右。本文的沟槽参数 N 、 L 、 W 三个变量在此面积比的基础上取值。当探究倾斜角的影响时,取 $N=10$, $L=7.5\text{ mm}$, $W=2\text{ mm}$, 此时 $S_p=15.9\%$ 。当控制变量分别探究 N 、 L 、 W 的影响时,取值计算的 S_p 在 7%~23%。

本文数值模拟计算所采用的密封结构的几何参数和工况参数见表 1。

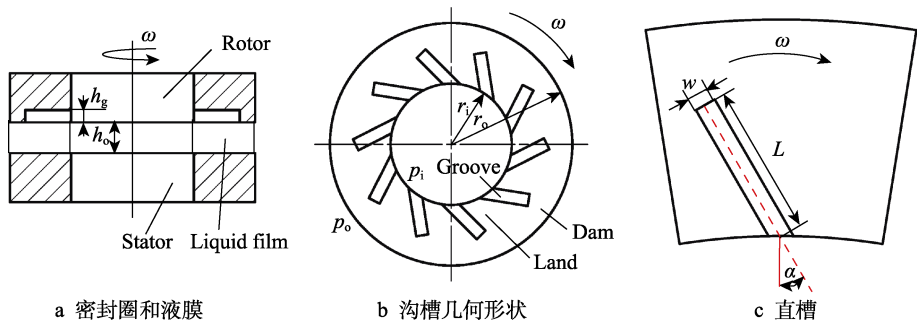


图 1 密封结构几何模型
Fig.1 Geometrical model of sealing structure: a) seal ring and liquid film;
b) groove geometry; c) straight groove

表 1 几何和工况参数
Tab.1 Geometric and operating parameters

Parameters	Values	Parameters	Values
Inner radius r_i /mm	10	Groove number N	10
Outer radius r_o /mm	20	Rotational speed $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	5 000
Groove length L /mm	7.5	Inner pressure p_i /MPa	1
Groove width W /mm	2	Outer pressure p_o /MPa	0.1
Groove depth h_g /mm	0.06	Fluid density $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	900
Seal clearance h_o /mm	0.03	Initial temperature T_o /K	300
Inclination angle $\alpha/(\text{°})$	45		

1.2 网格及边界条件

液膜直径与厚度尺寸大小差距较大,为方便网格划分,在建模时将液膜厚度尺寸放大 100 倍,用 Fluent 软件计算时再将其尺寸缩小。使用 Workbench Mesh 工具对模型进行网格划分,通过扫掠的方法划分为三棱柱网格,液膜厚度方向划分一定层数。扫掠法能够快速划分网格,同时三棱柱网格的倾斜度较小,能够提高计算精度。

为保证数值模拟计算结果的准确性,选取不同的面网格尺寸对模型的网格无关性进行验证,以液膜开启力作为验证标准,见表 2。从计算结果中可以看出,

不同网格尺寸得到的开启力大小非常接近,网格对计算结果的影响可忽略不计。综合考虑计算准确性和计算时间,选择面网格尺寸为 0.2 mm,无沟槽液膜拉伸网格层数为 5 层,沟槽拉伸网格层数为 10 层。最后检查网格质量,网格倾斜度均在 0.6 以下,划分的网格质量很高,能够满足精确计算要求,网格划分结果如图 2 所示。

本文计算区域为密封端面间隙的流体区域,流体泄漏方向为内径方向。图 2 给出了流体域的边界条件,将外径面设为压力入口,内径面设为压力出口,流体与静环接触面设为静止壁面,流体与动环接触面设为旋转壁面。

表 2 不同尺寸网格下的开启力
Tab.2 Opening force under grids of different sizes

Grid size/mm	Number of grids	F_o/N
0.25	225 335	757.42
0.2	347 860	757.86
0.15	626 790	757.73
0.1	1 424 775	757.88
0.05	5 725 835	757.82

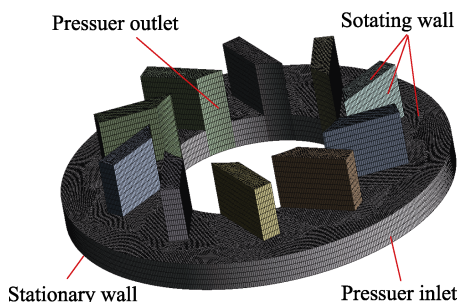


图 2 网格及边界条件
Fig.2 Grid and boundary conditions

2 数值模拟

根据润滑脂流动特性,对机械密封端面间液膜作出以下假设:1)流体为不可压缩流体,流动特性为非牛顿流体,满足 Herschel-Bulkley 模型;2)液膜和密封端面之间无壁面滑移效应;3)密封端面保持平行,忽略端面粗糙度的影响;4)间隙内的流体为层流状态;5)考虑流体的粘温效应和内摩擦效应。

2.1 控制方程

润滑脂为不可压缩流体,在流动过程中遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒三大守恒定律,由此可以推导出润滑脂的连续性方程、运动方程($N-S$ 方程)和能量方程^[29]。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

运动方程:

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = \rho \mathbf{f} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (2)$$

能量方程:

$$\rho \frac{De}{Dt} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) - p \nabla \cdot \mathbf{v} + \Phi \quad (3)$$

根据壁面不滑移的假设条件,润滑脂速度边界条件为:

$$\begin{cases} u_o = v_o = v_h = 0 \\ u_h = U \end{cases} \quad (4)$$

流体的内摩擦效应会导致旋转流场中的液膜温度升高,并且液膜与动环端面和静环端面存在对流换

热,对流换热系数由经验公式^[30]计算得到:

$$\alpha_{fr} = \alpha_{fs} = 0.664 \lambda_f Pr^{0.33} \left(\frac{u_f}{\nu L_c} \right)^{0.5} \quad (5)$$

式中: α_{fr} 、 α_{fs} 分别为润滑膜与动环端面和静环端面的对流传热系数; L_c 为密封间隙流体的特征长度; u_f 为密封间隙流体的周向平均速度; Pr 为普朗特数; λ_f 为流体热导率; ν 为运动黏度。

2.2 流动状态判断

在旋转流场中存在周向、径向和轴向速度分量,王衍等^[31]提出的椭球模型能够准确对流场流态进行判定,如式(6)~(8)所示。

$$\lambda = \sqrt{\left(\frac{Re_c}{1600} \right)^2 + \left(\frac{Re_p}{2300} \right)^2 + \left(\frac{Re_a}{40000} \right)^2} \quad (6)$$

$$\begin{cases} Re_c = \frac{\rho V_c d_{Hc}}{\mu} \\ Re_p = \frac{\rho V_p d_{Hp}}{\mu} \\ Re_a = \frac{\rho V_a d_{Ha}}{\mu} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} d_{Hc} = 4 \frac{A_c}{S_c} = 4 \frac{Bh}{2B} = 2h \\ d_{Hp} = 4 \frac{A_p}{S_p} = 4 \frac{\pi 2r_m h}{2\pi 2r_m} = 2h \\ d_{Ha} = 4 \frac{A_a}{S_a} = 4 \frac{\pi(r_o^2 - r_i^2)}{2\pi(r_o + r_i)} = 2B \end{cases} \quad (8)$$

式中: ρ 为流体的密度; V 为速度分量; d_H 为特征尺寸;下角标 c、p、a 分别表示周向、径向及轴向。

当 $\lambda < 0.56$ 时,液膜表现为完全层流状态;当 $0.56 < \lambda < 1$ 时,液膜表现为由层流到湍流的过渡状态;当 $\lambda > 1$ 时,液膜表现为完全湍流状态。通过计算得知,当转速在 500~5 000 r/min 时, $\lambda < 0.56$,因此可以判定本文旋转流场中润滑脂的流态为层流。

2.3 粘温方程

润滑脂流动状态下剪切应力值变化规律符合 Herschel-Bulkley 流变模型^[32]:

$$\tau = \tau_o + k \dot{\gamma}^n \quad (9)$$

润滑脂的表现黏度方程可表示为:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_o + k \dot{\gamma}^n}{\dot{\gamma}} \quad (10)$$

式中: τ 为润滑脂的剪切应力; τ_o 为屈服应力; k 为稠度系数; n 为剪切变稀指数; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; η 为润滑脂的表现黏度。

前期开展润滑脂热流变特性研究^[33]所得到的各温度下润滑脂的流变参数见表 3。采用 MATLAB 数据拟合的方法拟合润滑脂的表现黏度与温度和剪切

速率的关系方程, 并得到如图 3 所示的关系。从图 3 中可以看出, 在同一剪切速率下, 温度越高, 润滑脂的表现黏度越小; 在同一温度下, 润滑脂的表现黏度随剪切速率的增大而减小。将所获得的粘温关系方程编译成 UDF, 并载入 Fluent 计算模块。

表 3 各温度下 Herschel-Bulkley 方程参数值
Tab.3 Parameters of Herschel-Bulkley equation at various temperature

$t/^{\circ}\text{C}$	τ_0/Pa	$k/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	n
25	542	286.40	0.43
45	350	136.51	0.45
65	283	43.25	0.48
85	132	27.44	0.49

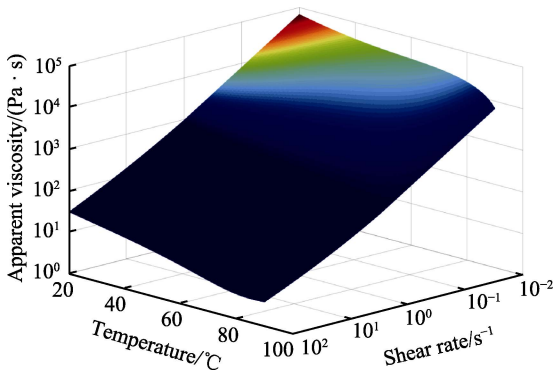


图 3 润滑脂表现黏度与温度和剪切速率的关系
Fig.3 Relationship between apparent viscosity of grease and temperature and shear rate

2.4 性能参数

Fluent 数值模拟计算后, 可以得到流场的压力分布和速度分布等, 再通过表面积分计算得到相应的性能参数, 开启力和泄漏量是机械密封的主要性能参数^[34]。

开启力:

$$F_o = \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_o} p r dr d\theta \tag{11}$$

泄漏量:

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^h v r dz d\theta \tag{12}$$

3 结果与分析

3.1 计算模型验证

为验证本文计算方法的正确性, 建立了文献[17]中倾斜角为 30°的直线型沟槽密封模型, 用本文计算方法进行数值模拟。数值模拟泄漏量与文献泄漏量对比如图 4 所示。由图 4 可知, 数值模拟计算结果与文献试验结果比较接近, 验证了本文计算方法的正确性。

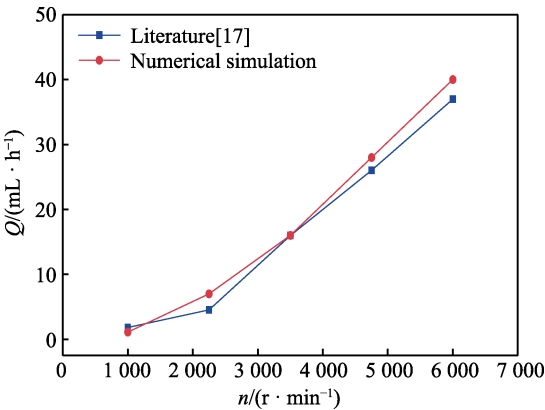


图 4 数值模拟与文献试验结果对比
Fig.4 Comparison between numerical simulation and literature test results

3.2 流场分析

数值模拟得到的液膜压力分布如图 5 所示。液膜外径压力为 1 MPa, 内径压力为 0.1 MPa, 内液膜压力由外到内逐渐减小, 形成了压力梯度, 压差是流体泄漏的主要因素。流体经过沟槽时, 产生流体动压, 在沟槽末端形成局部的高压区, 压力最大值为 1.75 MPa, 高压区可阻止外部流体向内流动。同时, 在沟槽顶端形成局部的负压区, 压力最小值为-0.165 MPa, 负压区与液膜内径相连, 可将内部泄漏出去的流体反向吸回密封间隙, 称为反向泵送。高压区和负压区的出现可以有效提升密封效果。

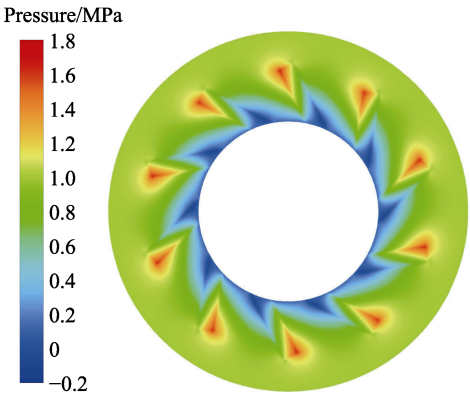


图 5 液膜压力分布
Fig.5 Pressure distribution of liquid film

液膜的温度分布如图 6 所示。润滑脂在旋转流场中因流体内摩擦效应产生大量热量, 使液膜温度升高, 润滑脂的初始温度为 300 K, 而最终液膜的平均温度达到 324 K。密封坝区的液膜温度明显高于密封堰区和沟槽区的液膜温度。一方面, 因液膜高压区的阻隔作用, 减缓了密封坝区高温润滑脂的径向流动; 另一方面, 沟槽反向泵送的低温润滑脂降低了沟槽区和密封堰区的液膜温度。

液膜表现黏度的分布如图 7 所示。可以看出, 沟槽区润滑脂的表现黏度较高, 密封坝区和密封堰区润

滑脂的表现黏度变化不大。当温度较低时, 润滑脂的表现黏度较高, 流动性较差, 容易在沟槽底部形成堆积, 不利于流体动压的产生, 从而影响沟槽发挥作用^[35]。

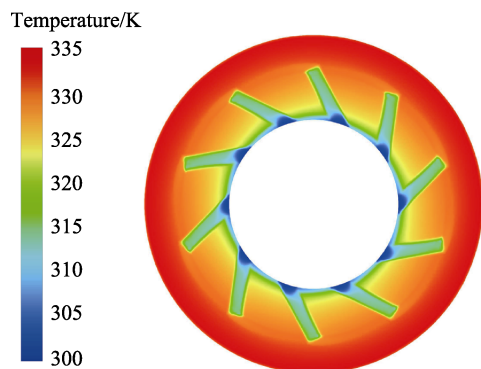


图 6 液膜温度分布

Fig.6 Temperature distribution of liquid film

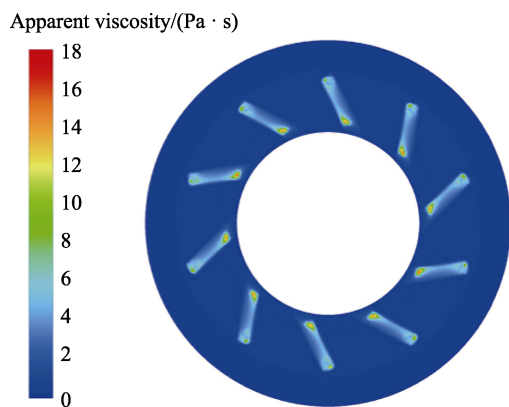


图 7 液膜表现黏度分布

Fig.7 Apparent viscosity distribution of liquid film

液膜速度分布及速度矢量如图 8 所示。可以发现, 沟槽之外区域润滑脂的流动速度随液膜半径大小改变而变化。沟槽区域润滑脂的流动性差, 流动速度极低。少量润滑脂在沟槽顶端一侧流出, 同时也有少量润滑脂在沟槽顶端另一侧回流至密封间隙。润滑脂膜的密封性能由润滑脂流出量 Q_p 与回流量 Q_s 的大小决定。当 $Q_p > Q_s$ 时, 表示润滑脂由高压侧向低压侧产生泄漏, 泄漏量 $Q = Q_p - Q_s$; 当 $Q_p = Q_s$ 时, 表示润

滑脂实现零泄漏; 当 $Q_p < Q_s$ 时, 表示润滑脂由低压侧向高压侧反向泵送。

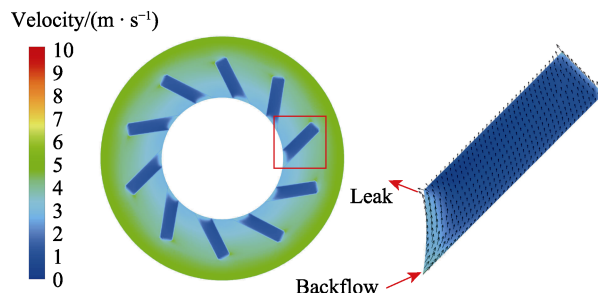


图 8 液膜速度分布及速度矢量

Fig.8 Velocity distribution and velocity vector of liquid film

3.3 倾斜角 α 和转速 n 对流场的影响

倾斜角 α 和转速 n 对流场液膜的平均压力 P 、平均温度 T 和表现黏度 η 的影响规律如图 9 所示。由图 9a 可知, 随着倾斜角 α 的增大, 流体动压效应越强, 液膜的平均压力 P 逐渐增大。由图 9b 可见, 液膜的平均温度 T 随着 α 的增大并没有呈现显著的变化, 温度略有升高, 但最大温差小于 0.5 K, 对温度的影响可忽略不计。在对温度影响不大的情况下, 润滑脂表现黏度 η 却有较为明显的变化, 随着 α 的增大, 润滑脂的 η 降低, 润滑脂的流动性有所增强, 如图 9c 所示。因此, 倾斜角 α 是影响流体动压效应的重要因素。

随着转速 n 的增大, P 先递增, 然后趋于平缓, 在一定范围提高转速可有效增强流体的动压效应。 T 随着 n 的增大逐渐增大, 变化规律近似于线性增长, 转速越高, 润滑脂内摩擦生热越明显。 η 的变化规律是随 n 增大逐渐减小, 逐渐趋于平缓。润滑脂剪切速率和 T 均是 η 的直接影响因素, 由图 3 可知, 润滑脂的流变特性为, η 随剪切速率的增大和温度的升高而减小, 图 9c 中 η 的变化规律符合润滑脂的流动特性。转速 $n < 3000$ r/min 时, 一定程度地增大转速可以明显提高流体的动压效应; 转速 $n > 3000$ r/min 时, 提高转速难以较大幅度提高流体的动压效应。

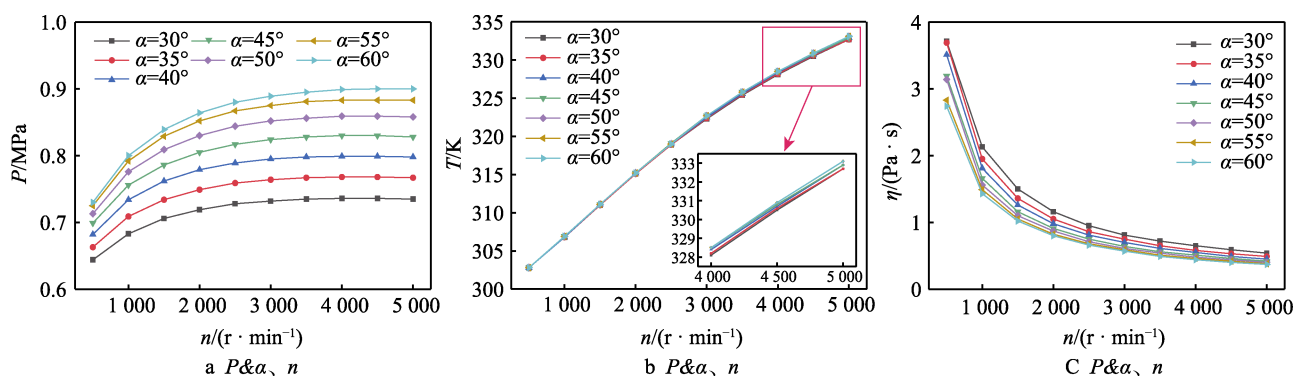


图 9 倾斜角 α 和转速 n 对流场的影响

Fig.9 Effect of inclination angle α and speed n on flow field

3.4 倾斜角 α 和转速 n 对密封性能的影响

倾斜角 α 和转速 n 对密封性能的影响规律如图 10 所示。以密封端面开启力 F_o 和泄漏量 Q 作为密封性能的指标。图 10a 中, 随着 n 的增大, 倾斜角 α 为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 的沟槽, 液膜的开启力 F_o 均表现为先递增、后趋近于不变的变化规律, 且 α 越大, F_o 的值越大。这表明, 改变沟槽的倾斜角和动环的转速有助于密封端面的开启, 端面开启后润滑脂进入端面形成动压膜, 进一步提升端面密封效果。

图 10b 中, 不同 α 得到的变化规律不同。 $\alpha=30^\circ$ 时, Q 随 n 增大而增大, 此时液膜的回流量 Q_s 较小, 增大流体的流动只会增大泄漏。 $\alpha=35^\circ$ 时, Q 值较小, 且随 n 的变化不大, 液膜呈现出一种平衡状态。 $\alpha=40^\circ$ 且 $n > 2\,000$ r/min 时, Q 值几乎为 0, 实现零泄漏。 $\alpha \geq 45^\circ$ 且 $n=500$ r/min 时, Q 值较小, 液膜少量泄漏; 当 n 提升到 1 000 r/min 时, Q 接近于 0, 液膜不泄漏,

当 $n > 1\,000$ r/min 时, Q 值为负且逐渐减小, 表明流体反向泵送, 泵送量随 n 提高不断增大, 意味着泄漏得到有效控制, 实现了可靠密封。流体反向泵送虽然能够防止泄漏, 但泵送量不宜过大, 泵送量过大时, 端面间隙无法得到足够流体补充, 液膜会被破坏, 造成密封端面的干摩擦, 使密封端面磨损。

以上变化规律表明, 改变沟槽的倾斜角能够改变流体的流动方向, 进而改变密封性能。在实际的织构设计时, 应当首先确定沟槽的倾斜角。

3.5 结构参数与工况对密封性能的影响

不仅倾斜角和转速能够影响密封性能, 沟槽的其他结构参数和机械工况也是影响性能的因素。这些因素 (初始温度 T_o 、沟槽数量 N 、长度 L 、宽度 W 、深度 h_p 和密封间隙 h_o) 对密封性能的影响规律如图 11 所示, 通过泄漏量 Q 和开启力 F_o 来进行评价。开启力大小变化规律恰好与泄漏量的变化规律相反。流场

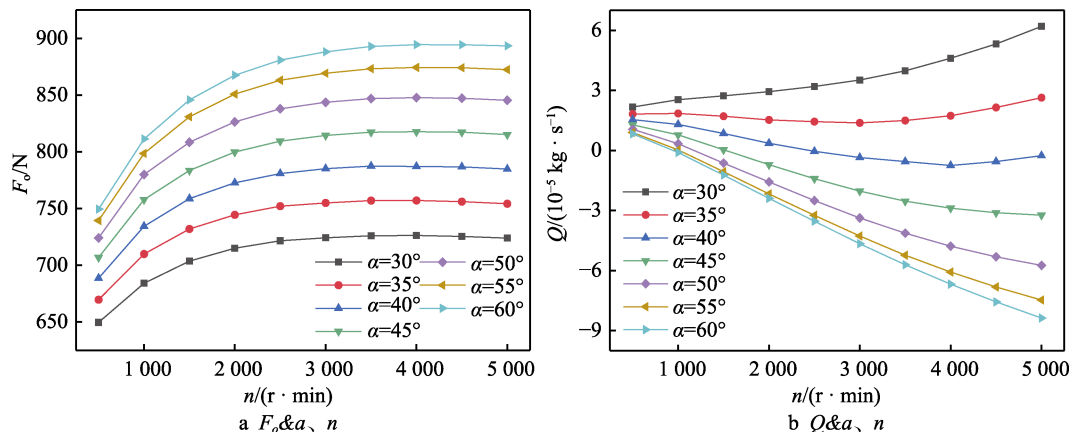


图 10 倾斜角 α 和转速 n 对密封性能的影响

Fig.10 Effect of inclination angle α and speed n on sealing performance

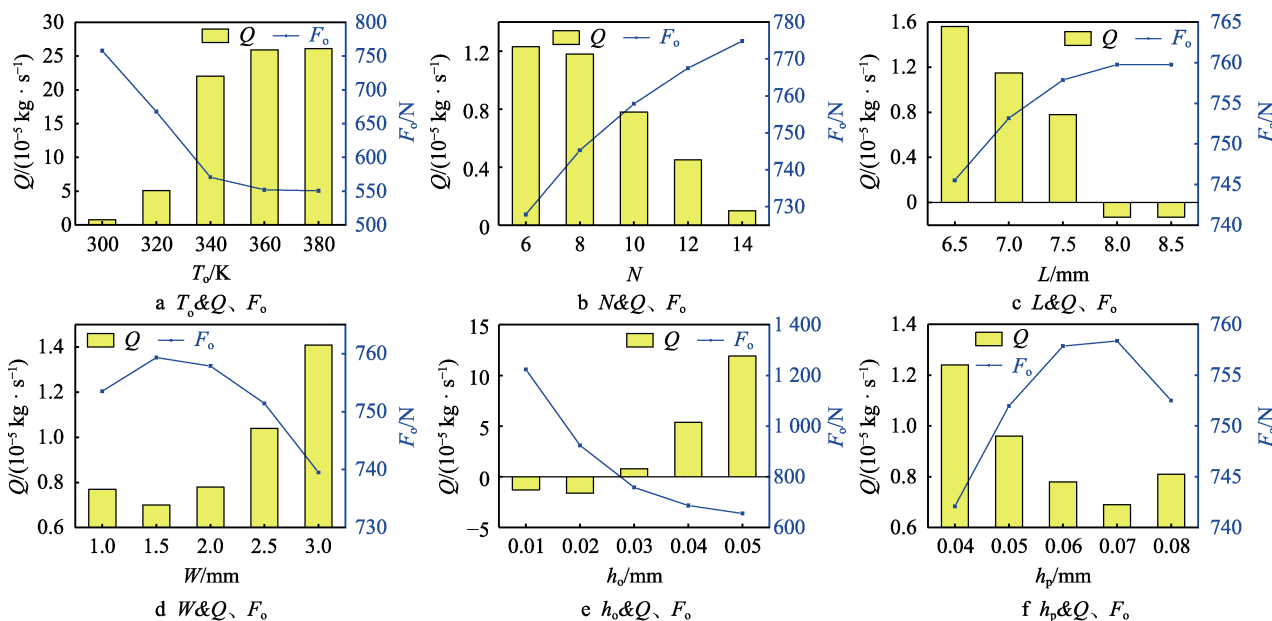


图 11 结构参数与工况对密封性能的影响

Fig.11 Effect of structural parameters and working conditions on sealing performance

动压越强,产生的开启力越大,泄漏量将越小。

润滑脂的输送往往会提前进行加热处理,将润滑脂加热到一定温度,能提升其流动能力,减小输送阻力^[36]。从图 11a 中可以看到,随着初始温度 T_0 的提高,润滑脂泄漏量不断增大,在 320~340 K 时,增长幅度较大。根据润滑脂的热流变特性得知,低温下润滑脂的流动性差,不易泄漏;高温下润滑脂流动性好,但泄漏量急剧增大。在润滑脂输送过程中,应该通过控制温度高低,来兼顾减少流动阻力和泄漏控制的问题。

在结构参数方面,对不同沟槽数量 N 、长度 L 、宽度 W 、深度 h_p 和密封间隙 h_o 进行了仿真计算,得到了密封性能的变化规律,如图 11b—f 所示。较大沟槽数量 N 和长度 L 能够减少润滑脂的泄漏;泄漏量随沟槽宽度 W 和沟槽深度 h_p 的变化均是先减小、后增大;密封间隙变大则会增加润滑脂的泄漏。沟槽数量增多,会增大流体动压的总面积,长度和宽度的变化则会改变流体动压的位置,沟槽深度和密封间隙大小都会改变流体动压强度。对比图 11a—f 的纵坐标可以发现,在各影响因素中,温度和密封间隙的影响效果较大,为影响润滑脂密封副密封性能的主要因素。

综上所述,最佳的结构参数和工况条件为:

$\alpha=40^\circ$ 、 $N=14$ 、 $L=8\text{ mm}$ 、 $W=1.5\text{ mm}$ 、 $h_o=0.03\text{ mm}$ 、 $h_p=0.07\text{ mm}$ 、 $n>2\ 000\text{ r/min}$ 、 $T_0<320\text{ K}$ 。

4 结论

以润滑脂密封副为研究对象,选择直线型沟槽织构,建立端面密封模型,探究了沟槽结构参数和润滑脂密封副运行工况参数对其密封性能的影响规律,得到以下主要结论。

1) 不同倾斜角的沟槽能够改变润滑脂在密封间隙中的流动方向,增大倾斜角能够降低润滑脂密封副的泄漏量,控制密封副的泄漏。当 $\alpha=40^\circ$ 、 $n>2\ 000\text{ r/min}$ 时,润滑脂密封副的泄漏量 Q 几乎为 0,实现了端面密封的零泄漏。当 $\alpha\geq 45^\circ$ 、 $n>2\ 000\text{ r/min}$ 时,端面密封装置会转变成反向泵送装置。根据不同工作需求,选择不同倾斜角可实现功能上的转变。

3) 润滑脂非牛顿特性是影响端面密封的重要因素。实现端面密封主要通过织构产生的流体动压来阻止流体流动,并将流体反向泵送。旋转密封转速增大和流场温度升高都会改变润滑脂流动性能,进而影响流体动压效果。

4) 泄漏量随温度的升高不断增大,随沟槽数量和长度的增大而减小,随沟槽宽度和沟槽深度的变化均是先减小、后增大。密封间隙变大,将会增加润滑脂的泄漏。温度和密封间隙的影响效果较大,为影响润滑脂密封副密封性能的主要因素。织构参数 $\alpha=40^\circ$ 、 $N=14$ 、 $L=8\text{ mm}$ 、 $W=1.5\text{ mm}$ 、 $h_o=0.03\text{ mm}$ 、 $h_p=0.07\text{ mm}$ 为最佳参数,工况条件 $T_0<320\text{ K}$ 和 $n>2\ 000\text{ r/min}$ 为润滑脂密封副较优的工作条件。

参考文献:

- [1] 王秀英,李思远,戴庆文,等. 织构化机械密封的润滑与泄漏特性协调优化研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(8): 1-8.
WANG Xiu-ying, LI Si-yuan, DAI Qing-wen, et al. Research Progress in Coordinated Optimization of Lubrication and Leakage for Textured Mechanical Seals[J]. Surface Technology, 2019, 48(8): 1-8.
- [2] 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 Jing-qiu, WANG Xiao-lei. State of the Art in Innovative Design of Surface Texture[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(23): 84-95.
- [3] ETSION I, HALPERIN G. A Laser Surface Textured Hydrostatic Mechanical Seal[J]. Tribology Transactions, 2002, 45(3): 430-434.
- [4] NAKANO M, KORENAGA A, KORENAGA A, et al. Applying Micro-Texture to Cast Iron Surfaces to Reduce the Friction Coefficient under Lubricated Conditions[J]. Tribology Letters, 2007, 28(2): 131-137.
- [5] SCHUH J K, EWOLDT R H. Asymmetric Surface Textures Decrease Friction with Newtonian Fluids in Full Film Lubricated Sliding Contact[J]. Tribology International, 2016, 97: 490-498.
- [6] HAMILTON D B, WALOWIT J A, ALLEN C M. A Theory of Lubrication by Micro Irregularities[J]. Journal of Basic Engineering, 1966, 88(1): 177.
- [7] ETSION I, BURSTEIN L. A Model for Mechanical Seals with Regular Microsurface Structure[J]. Tribology Transactions, 1996, 39(3): 677-683.
- [8] WANG Xiu-ying, SHI Li-ping, HUANG Wei, et al. A Multi-Objective Optimization Approach on Spiral Grooves for Gas Mechanical Seals[J]. Journal of Tribology, 2018, 140(4): 041701.
- [9] WANG Xiu-ying, SHI Li-ping, DAI Qin-wen, et al. Multi-Objective Optimization on Dimple Shapes for Gas Face Seals[J]. Tribology International, 2018, 123: 216-223.
- [10] SHEN Cong, KHONSARI M M. Texture Shape Optimization for Seal-Like Parallel Surfaces: Theory and Experiment[J]. Tribology Transactions, 2016, 59(4): 698-706.
- [11] SUN Jian-jun, MA Chen-bo, YU Qiu-ping, et al. Numerical Analysis on a New Pump-out Hydrodynamic Mechanical Seal[J]. Tribology International, 2017, 106: 62-70.
- [12] BLASIAK S. An Analytical Approach to Heat Transfer and Thermal Distortions in Non-Contacting Face Seals[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 81: 90-102.
- [13] 王建磊, 门川皓, 赵伟刚, 等. 动静压机械密封的结构设计及端面槽型优化研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(9): 108-117.
WANG Jian-lei, MEN Chuan-hao, ZHAO Wei-gang, et al. Research on Structural Design and End Face Slot of Optimization of Hydrodynamic and Hydrostatic Mec-

- hanical Seal[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(9): 108-117.
- [14] WANG Yu-ming, YANG Hui-xia, WANG Jian-li, et al. Theoretical Analyses and Field Applications of Gas-Film Lubricated Mechanical Face Seals with Herringbone Spiral Grooves[J]. Tribology Transactions, 2009, 52(6): 800-806.
- [15] 孟祥铠, 江莹莹, 赵文静, 等. 考虑空化效应的螺旋槽机械密封液膜动力学特性研究[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(2): 171-180.
- MENG Xiang-kai, JIANG Ying-ying, ZHAO Wen-jing, et al. Fluid Film Dynamic Characteristics of Spiral-Grooved Mechanical Seals with Cavitation Effect[J]. Tribology, 2019, 39(2): 171-180.
- [16] MA Gang, ZHAO Wei, SHEN Xin-min. Analysis of Parameters and Performance for Spiral Grooved Cylindrical Gas Film Seal[J]. Procedia Engineering, 2011, 23: 115-119.
- [17] 戴庆文, 李思远, 王秀英, 等. 不同密封副材料的表面织构设计及其润滑和密封特性[J]. 中国表面工程, 2019, 32(3): 21-29.
- DAI Qing-wen, LI Si-yuan, WANG Xiu-ying, et al. Surface Texturing of Different Sealing Materials and Their Lubrication and Sealing Performances[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(3): 21-29.
- [18] 张培耘, 华希俊, 符永宏, 等. 激光表面微织构工艺试验及应用研究[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 55-58.
- ZHANG Pei-yun, HUA Xi-jun, FU Yong-hong, et al. Experimental Investigations on Laser Surface Micro-Texturing Technology and Application[J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 55-58.
- [19] YU Hai-wu, WANG Xiao-lei, ZHOU Fei. Geometric Shape Effects of Surface Texture on the Generation of Hydrodynamic Pressure between Conformal Contacting Surfaces[J]. Tribology Letters, 2010, 37(2): 123-130.
- [20] XIE Yi, LI Yong-jian, WANG Yu-ming, et al. An Experimental Investigation of Tribological Performance of Triangular Textures in Water Lubrication Regime[J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2014, 57(2): 273-279.
- [21] SHI Li-ping, ZHANG Yi-cong, CHEN Si, et al. Comparative Research on Gas Seal Performance Textured with Microgrooves and Microdimples[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2019, 41(7): 280.
- [22] SHI Li-ping, WEI Wei, WANG Tao, et al. Experimental Investigation of the Effect of Typical Surface Texture Patterns on Mechanical Seal Performance[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42(5): 227.
- [23] SHARMA S C, YADAV S K. A Comparative Study of Full and Partial Textured Hybrid Orifice Compensated Circular Thrust Pad Bearing System[J]. Tribology International, 2016, 95: 170-180.
- [24] SHARMA S C, YADAV S K. Performance Analysis of a Fully Textured Hybrid Circular Thrust Pad Bearing System Operating with Non-Newtonian Lubricant[J]. Tribology International, 2014, 77: 50-64.
- [25] SHARMA S C, RAJPUT A K. Effect of Geometric Imperfections of Journal on the Performance of Micro-polar Lubricated 4-Pocket Hybrid Journal Bearing[J]. Tribology International, 2013, 60: 156-168.
- [26] WANG Yun-lei, WU Jiu hui, XU Lu-shuai. Influence of Power-Law Fluid on Transient Performance of Liquid Film Seal Based on the Time-Dependent Non-Newtonian Dynamic Reynolds Equation[J]. Tribology International, 2021, 159: 106984.
- [27] 王赞磊, 郝木明, 李振涛, 等. 基于 JFO 空化和幂律模型的螺旋槽液膜密封流体动压特性[J]. 化工学报, 2017, 68(12): 4665-4674.
- WANG Yun-lei, HAO Mu-ming, LI Zhen-tao, et al. Hydrodynamic Performance of Spiral Groove Liquid Film Seals Based on JFO Boundary Condition and Power Law Model[J]. CIESC Journal, 2017, 68(12): 4665-4674.
- [28] 陈果, 宋鹏云. 用于幂律流体螺旋槽液膜机械密封性能的解析法[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(2): 148-153.
- CHEN Guo, SONG Peng-yun. Approximate Analytic Method for Mechanical Seal Performance of Spiral Groove Liquid Film Sealing Power-Law Fluid[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(2): 148-153.
- [29] 陈汇龙, 侯婉, 桂铠, 等. 介质温度对密封润滑膜颗粒沉积特性及性能影响[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(11): 1105-1110.
- CHEN Hui-long, HOU Wan, GUI Kai, et al. Effect of Medium Temperature on Particle Deposition Characteristics and Performance of Sealing Lubrication Film[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(11): 1105-1110.
- [30] 陈汇龙, 桂铠, 李新稳, 等. 工况参数对机械密封液膜汽化特性及性能的影响[J]. 中国机械工程, 2021, 32(1): 2-11.
- CHEN Hui-long, GUI Kai, LI Xin-wen, et al. Influences of Operating Parameters on Vaporization Characteristics and Properties of Liquid Films for Mechanical Seals[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(1): 2-11.
- [31] 王衍, 曹志康, 王英尧, 等. 旋转流场流态预测模型验证及其速度分量选择的差异性[J]. 化工进展, 2021, 40(5): 2389-2400.
- WANG Yan, CAO Zhi-kang, WANG Ying-yao, et al. Validation of Flow Regime Prediction Model and Differences of Velocity Component Selection for Rotating Flow Field[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(5): 2389-2400.