

基于多相流理论高速动车组齿轮箱密封系统分析

张雨, 张开林, 姚远

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都, 610031)

摘要: 为了研究高速动车组齿轮箱密封系统的密封机理, 分析润滑油液滴和理想气体混合介质下迷宫密封的密封性能, 建立某国产驱动齿轮箱输出端密封系统结构的计算模型, 采用 Euler-Euler 双流体模型, 通过数值模拟得到密封系统的内部流场, 对比研究转子转速对混合介质下密封内部流场的介质分布影响, 分析润滑油液滴体积分数和直径对密封结构泄漏量的影响。研究表明: 密封间隙的直通效应、润滑油液滴分布于静子腔或转子腔以及空腔所处位置是影响迷宫密封性能的主要因素; 随着转子转速的增加, 润滑油液滴的泄漏量先上升后下降最后趋于稳定; 润滑油液滴体积分数越高, 直径越大, 泄漏量越大; 当液滴体积分数越高时, 液滴体积分数对泄漏量的影响越小, 呈非线性关系, 但泄漏量随液滴直径的增大呈近线性关系增大。

关键词: 高速齿轮箱; 密封系统; 多相流; 润滑油; 泄漏量

中图分类号: U270.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2019)03-0550-07

Analysis of high-speed EMU gearbox sealing system based on multiphase flow theory

ZHANG Yu, ZHANG Kailin, YAO Yuan

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 6130031, China)

Abstract: In order to investigate the sealing mechanism of the gearbox sealing system for high-speed electric multiple unit(EMU), the sealing performance of the Labyrinth seal with the mixture of lubricating oil and ideal gas was analyzed, and the calculation model of the sealing system structure of the output end of a domestic driving gearbox was established. The internal flow field of the sealing system was obtained by using Euler-Euler two-phase model. The influence of the rotor speed on the media distribution of the internal flow field in the mixed medium, and the oil droplet concentration and diameter on the leakage loss of the sealing structure were also studied. The results show that the straight-through effect of seal clearance, the distribution of lubricant droplets in the stator cavity or the rotor cavity, and the position of the cavity are the main factors in affecting the performance of labyrinth seal. The leakage loss of lubricating oil droplet increases with the increase of rotor speed, reaches a maximum, and then decreases and levels off with the further increase of rotor speed. The higher the oil droplet concentration, the larger the diameter, and thus the larger the leakage loss. However, the higher the oil droplet concentration, the smaller the effect of the concentration on the leakage loss, which shows non-linear relation. The leakage loss increases linearly with the increase of oil droplet diameter.

Key words: high-speed gearbox; sealing system; multiphase flow; lubricating oil; leakage loss

收稿日期: 2018-04-16; 修回日期: 2018-05-17

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(51675443, 51735012); 牵引动力国家重点实验室自主研究课题资助项目(2017TPL-T2, 2018TPL-T05) (Projects(51675443, 51735012) supported by the National Natural Science Foundation of China; Projects(2017TPL-T2, 2018TPL-T05) supported by State Key Laboratory of Traction Power of the Independent Research and Development Program)

通信作者: 张雨, 博士研究生, 从事齿轮箱润滑与密封研究; E-mail: zhangyutpl@163.com

齿轮箱作为高速动车组驱动系统的核心部件,直接影响列车运行的动力性和安全性。当列车时速达到 350 km/h 时,齿轮箱输出端转速达 6 000 r/min,对齿轮箱密封系统提出较高要求。为保证齿轮箱安全高效的运行,密封系统需要达到双重密封效果,一方面,防止箱体内部润滑油通过密封系统向外泄漏,造成箱内润滑油含量不足,影响齿轮、轴承等部件的润滑;另一方面,防止外界液体及灰尘等污染物穿过密封系统进入箱体内部,造成润滑油乳化等现象^[1],因此,对齿轮箱密封系统的研究是保证齿轮箱安全运行、实现齿轮箱国产化的重要课题之一。高速动车组齿轮箱密封系统主要有 2 种类型:日式齿轮箱密封系统采用非接触式迷宫密封与接触式机械密封相结合的组合式密封方法,欧式齿轮箱密封只采用非接触式迷宫密封的方法。组合式迷宫密封的密封性能更好,但由于接触式密封更换周期短,缩短齿轮箱检修维护周期;非接触式迷宫密封占用空间小,检修维护成本低,目前齿轮箱密封系统国产化研究重点为提高迷宫密封的密封性能。典型的迷宫密封形式有直通式^[2]、错齿式^[3]、蜂窝式^[4-5]、刷式^[6-7]等,在工程实践应用中,一般采用典型结构的变形体或多种典型结构联合使用,在有限的结构空间中保证迷宫密封的密封性能,如轴向双边直通式^[8]、高低齿式^[9-10]以及径向对插式迷宫密封^[11]。密封结构的主要研究方向是典型密封结构的密封机理以及影响密封性能的因素分析,曹丽华等^[12]研究了叶顶间隙对汽轮机高低齿式迷宫密封性能的影响。杜发青等^[13]通过正交试验研究了齿形几何参数对航空涡轮发动机直通错齿式迷宫密封泄漏量的影响。BONDARENKO 等^[14-15]运用数值模拟和试验分析了转速、压力比等因素对直通式迷宫密封的影响。WANG 等^[3]分析了错齿式迷宫密封的密封机理和运用条件。SUBRAMANIAN 等^[16]分析了热效应与旋转效应对迷宫密封结构变形以及密封性能的影响。对于迷宫密封系统的研究,吴特等^[17]以高速动车组某国产化驱动齿轮箱小齿轮电机端的密封系统为研究对象,分析了理想气体为介质时密封系统的密封性能和影响因素。但齿轮箱设计密封系统的主要目的是减少润滑油泄漏、运行稳定状态下齿轮箱内部高速旋转的齿轮搅拌、打碎润滑油液滴;同时,内部的高温高压环境使得箱内介质为微米级润滑油小液滴、润滑油蒸汽和理想气体的混合物。分析迷宫密封的密封机理和密封性能时,应考虑以润滑油小液滴、润滑油蒸汽和理想气体为研究介质,从混合介质角度评估密封结构对特定介质的密封性能。张雨等^[18]从油雾与理想气体混合介质角度分析齿轮箱径向迷宫密封,研究了混合介质下迷宫密

封的密封机理。两相流模拟模型主要分为欧拉-拉格朗日模型和欧拉双流体模型, Euler-Euler 双流体模型采用形式统一的模型方程,计算量相对较小,因此,对于结构复杂的工程实践模型,该方法更具有实用性^[19]。本文作者采用 Euler-Euler 双流体模型,忽略润滑油蒸汽的影响,以润滑油小液滴和理想气体混合物为研究介质,分析高速动车组齿轮箱密封系统的密封机理以及转速、润滑油参数等因素对密封性能的影响,以便为国产化齿轮箱密封结构设计以及性能优化提供依据。

1 计算模型与数值仿真方法

1.1 密封结构

图 1 所示为驱动齿轮箱输出端密封系统结构模型。密封系统由直通式和错齿式迷宫密封组合变形而来,由入口至出口,转子与静子结构构成 4 道空腔,分别记为 I 腔、II 腔、III 腔、IV 腔。其中, I 腔和 II 腔参考双边直通式迷宫密封结构,分别设有明显的转子腔和静子腔,且 I 腔中设有甩油环结构。III 腔参考错齿式迷宫密封,转子和静子形成较大的空腔,IV 腔为单边直通式迷宫密封,空腔设置于静子结构区。

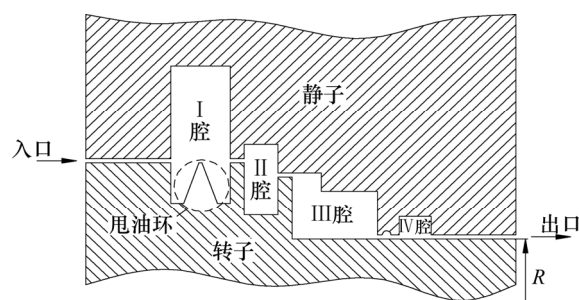


图 1 驱动齿轮箱输出端密封结构

Fig. 1 Seal configuration of output end of gearbox

1.2 数值计算

当齿轮箱迷宫密封系统入口压力、出口压力与泄漏量稳定时,内部流场可以看作三维定常的稳态流动。迷宫密封的入口边界设为压力入口,出口边界设为压力出口,出口压力为环境背压,进出口压力比设为 1.5,转子转速为 0~10 000 r/min,转子半径 R 设为 50 mm。齿轮箱采用 75W_90 润滑油。进行数值分析时,采用 Euler-Euler 两相流模型,以理想气体为主相,微米级润滑油小液滴为次相,两相均无相变反应。润滑油小液滴直径取 5 μm ,密度取 816 kg/m^3 ,运动黏度取 16.6 mm^2/s ,混合相中润滑油体积分数为 10%。

网格密度影响仿真计算的结果, 设置合适尺寸的网格是仿真计算的前提。齿轮箱迷宫密封系统几何模型形状规则, 采用结构化网格进行划分, 壁面采用标准壁面函数, 对密封间隙以及甩油环等区域进行局部加密。随着网格数量增加, 密封泄漏量增加, 当网格数量进一步增加时, 泄漏量受网格数量的影响较小。综合考虑计算精度和计算效率, 选择网格数为 83 万的离散模型进行后续分析研究, 图 2 所示为密封系统的截面网格模型图。

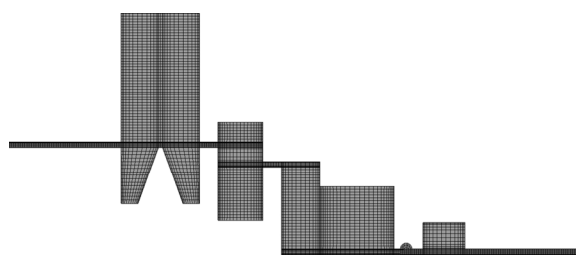


图 2 密封系统中截面 CFD 网格模型

Fig. 2 Middle section CFD grid model in sealing system

1.3 数值方法验证

目前缺乏多相混合介质下迷宫密封的相关试验数据, 本文参考经典迷宫密封试验, 以理想气体为研究介质, 对比 WITTIG^[20]的试验结构与数据, 论证仿真方法的可行性和准确性。

采用密封系数 C_D 评估密封性能:

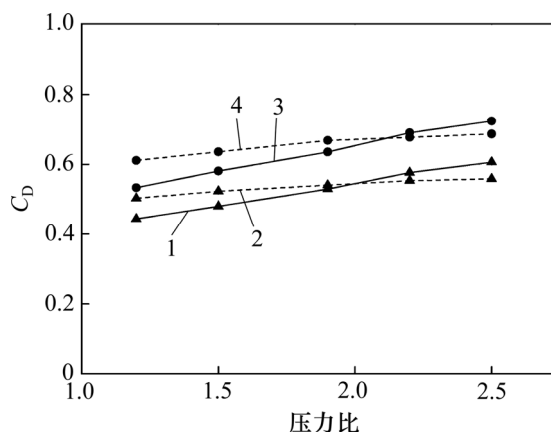
$$C_D = \frac{m_{\text{means}}}{m_{\text{id}}} \quad (1)$$

$$m_{\text{id}} = Q_{\text{id}} \cdot \frac{P_0 A}{\sqrt{T_0}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{id}} = \left(\frac{P_n}{P_0} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)} \left(1 - \frac{P_n}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (3)$$

式中: m_{means} 为试验或数值计算得到的理想气体泄漏量; m_{id} 为等熵理论计算得到的理想气体泄漏量; Q_{id} 为泄漏参数; A 为间隙面积; P_0 和 P_n 分别为入口压力和出口压力; T_0 为初始温度; R 为理想气体比定压热容; k 为理想气体比热容。

采用结构化网格对迷宫密封进行结构离散, 仿真分析密封间隙分别为 1 mm 和 2.5 mm 的密封结构及其密封性能。图 3 所示为不同进出口压力比下密封系数对比。由图 3 可知, 在同一工况下, 数值计算结果与试验结果变化规律基本一致, 在同一压力比下, 相对误差不超过 15%, 满足工程应用的要求, 说明仿真方法可行。



1—间隙 1.0 mm, 仿真结果; 2—间隙 1.0 mm, 试验结果; 3—间隙 2.5 mm, 仿真结果; 4—间隙 2.5 mm, 试验结果。

图 3 仿真与试验密封系数 C_D 对比

Fig. 3 Comparison of C_D of simulated and experimental results

2 计算结果及分析

2.1 流场分析

采用 Euler-Euler 模型, 转子转速为 6 000 r/min, 其他参数保持不变, 仿真分析混合介质下驱动齿轮箱密封系统的内部流场。图 4 所示为迷宫密封中截面的压力分布云图, 图 5 所示为润滑油液滴的速度分布云图, 图 6 所示为液滴的分布云图。

由图 4 和图 5 可知, 密封介质通过密封齿发生加速降压, 空腔中形成涡流, 耗散介质的动能, 降低介质的流速。通过空腔的耗散作用和密封齿的降压作用, 介质压力逐渐降低, 最终趋向环境背压, 达到了密封的作用。由图 6 可知, 由于转子旋转作用, 润滑油主要分布于静子腔中, 在空腔中以理想气体为中心, 小油滴聚集在外围的分布现象。通过设置甩油环结构,

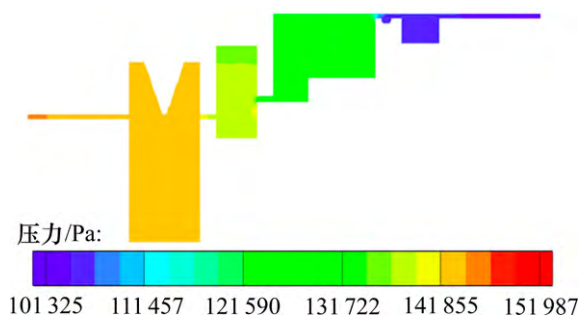


图 4 中截面压力分布云图

Fig. 4 Pressure distribution nephogram at the middle section

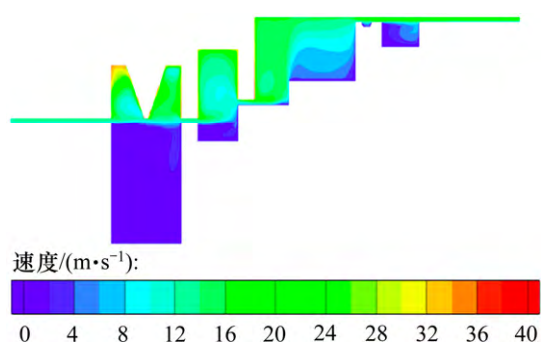


图5 润滑油液滴的速度分布云图

Fig. 5 Velocity vector graph of oil droplet

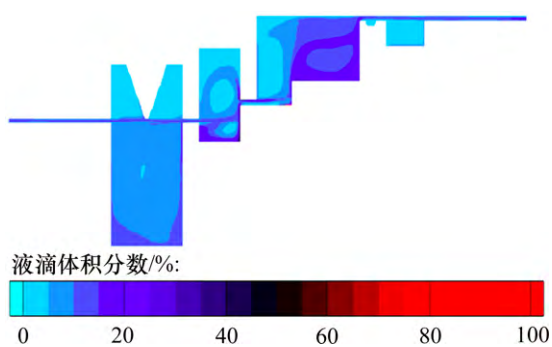


图6 润滑油液滴分布云图

Fig. 6 Distribution nephogram of oil droplet

更多润滑油小液滴集中于静子腔,通过在静子腔底部布置回油孔,有利于润滑油的回油,提高密封系统的密封性能。

2.2 转子转速对泄漏量的影响

迷宫密封介质为润滑油小液滴和理想气体混合物,介质密度相差较大,转子转速对不同介质的影响不同,造成混合介质分布发生变化,影响密封系统的密封性能。

为了分析转子转速与密封系统的密封性能的关系,保持其他参数不变,当数值计算转子转速为 0~10 000 r/min 时迷宫密封的润滑油泄漏量。转速与密封泄漏量的关系曲线如图 7 所示。

由图 7 可知:当转子转速较低时,密封结构的泄漏量随着转速升高而上升,但转速超过一定阈值时,泄漏量随着转速升高而下降,当转速超过 8 000 r/min 时,密封泄漏量下降减缓,趋于稳定。

图 8 所示为不同转子转速下驱动齿轮箱密封系统中截面的润滑油小液滴分布云图。由图 8 可知:随着转子转速增加,润滑油液滴分布明显不同。润滑油的分布直接影响密封结构的泄漏量,主要体现为:1) 迷宫密封的直通效应;2) 转子旋转造成转子腔内介质速度高于静子腔,介质速度越快,泄漏量越大,转子腔

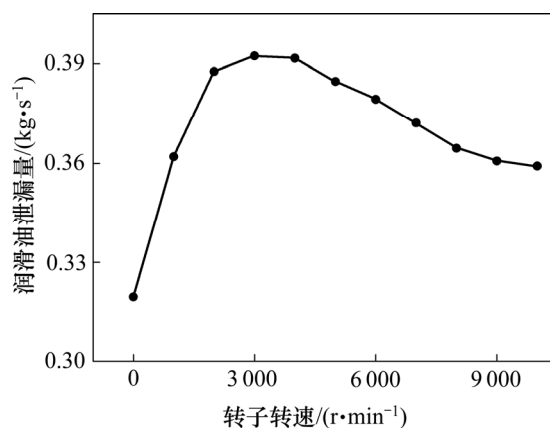


图7 不同转子转速下密封泄漏量曲线

Fig. 7 Curves of leakage loss at different rotor speeds

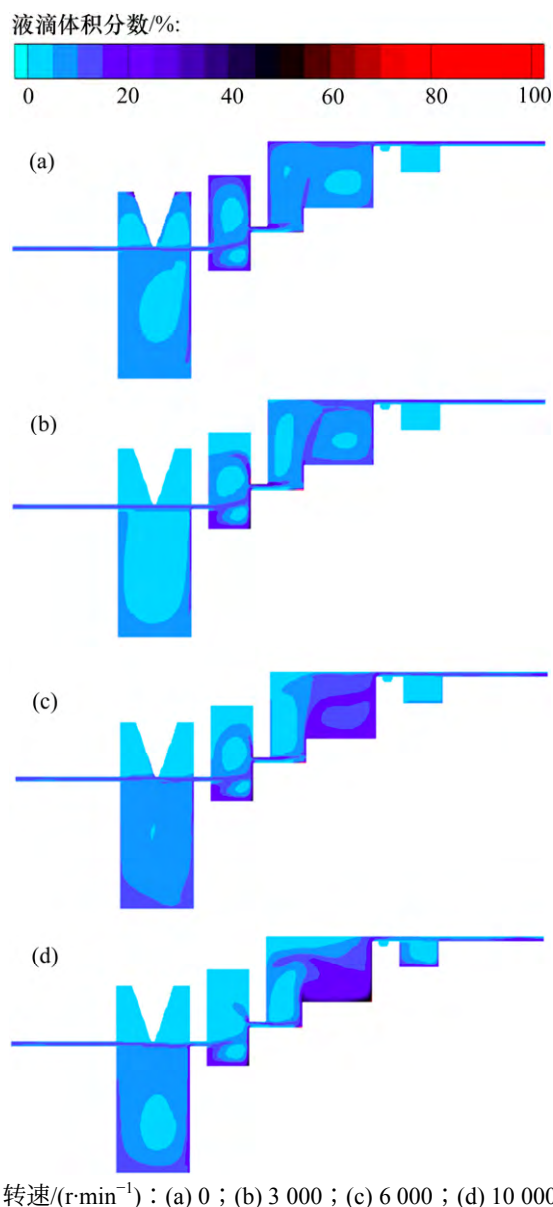
转速/(r·min⁻¹): (a) 0; (b) 3 000; (c) 6 000; (d) 10 000

图8 不同转子转速下润滑油液滴分布云图

Fig. 8 Distribution nephogram section of oil drops at different rotor speeds

内介质更容易泄漏;3) 密封结构中不同的空腔位置对泄漏影响不同,靠近出口的密封腔内介质更容易泄漏。驱动齿轮箱密封系统通过设置高低齿等结构变形,避开直通式泄漏,非接触式密封的直通效应影响较小。

当转子转速为 0 r/min 时,静子腔与转子腔中液滴分布较为一致。液滴主要分布于空腔四周,空腔中形成以理想气体为主的涡流,受介质轴向流动的影响,涡流中心沿介质流动方向发生偏移。当转子转速达到 3 000 r/min 时, I 腔、II 腔中转子腔内润滑油电到静子腔中,在电油环作用下, I 腔转子腔中基本无润滑油,有利于减小润滑油泄漏;同时,更多润滑油由 I 腔、II 腔流向 III 腔中, I 腔、II 腔润滑油含量明显降低, III 腔中润滑油含量明显上升; IV 腔中只设有静子腔,润滑油越过静子腔由间隙通道直接泄漏。润滑油由 I 腔、II 腔向 III 腔、IV 腔转移的过程中,造成润滑油小液滴泄漏增加。综合作用下,润滑油泄漏量随着转速增加而上升。

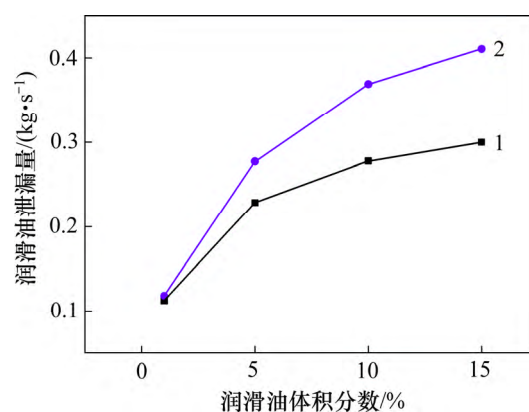
当转速进一步提高,达到 6 000 r/min 时, I 腔、II 腔中润滑油含量增大,减少了润滑油的泄漏。同时,由于润滑油密度较大,转速对润滑油离心力影响较大, I 腔、II 腔中润滑油主要集中于静子腔, III 腔中润滑油主要偏向于静子侧,润滑油泄漏量进一步减少。当转速达到 10 000 r/min 时, I 腔、II 腔中转子腔润滑油含量进一步降低,更多润滑油集中于静子腔, III 腔中润滑油偏向于静子侧;同时, IV 腔中静子腔中存储一部分润滑油,降低润滑油泄漏量,但更多润滑油由 I 腔、II 腔转向 III 腔、IV 腔,增加了润滑油泄漏。综合作用下,润滑油泄漏量下降,但下降幅度减小,趋于稳定。

转子转速对迷宫密封内部流场分布影响较大,当转子产生旋转效应时,转子腔中润滑油含量下降。综合考虑转子腔和静子腔的润滑油含量以及润滑油所在空腔所处的位置,最终造成润滑油泄漏量先上升后下降最后趋于稳定的现象。

2.3 润滑油液滴体积分数对泄漏量的影响

为分析润滑油液滴体积分数对密封系统的密封性能影响,数值计算进出口压比为 1.5,液滴直径分别为 1 μm 和 5 μm ,转子转速为 6 000 r/min,润滑油体积分数为 1%~15%时驱动齿轮箱密封系统的泄漏量。图 9 所示为不同液滴直径下密封结构泄漏量与润滑油体积分数之间的关系。

由图 9 可知:在不同润滑油液滴直径下,润滑油体积分数对迷宫结构泄漏量的影响规律基本一致;在同一转速下,润滑油液滴体积分数越高,泄漏量越大,



液滴直径/ μm : 1—1; 2—5。

图 9 不同润滑油液滴体积分数下密封泄漏量曲线

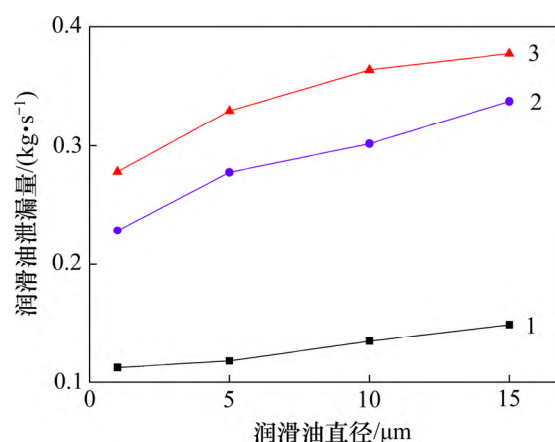
Fig. 9 Leakage loss curves of oil drop with different volume fractions

但液滴体积分数越高,对泄漏量的影响越小,呈非线性关系。

随着润滑油体积分数增加,进入密封系统的润滑油含量增加,造成润滑油泄漏量增加;但润滑油体积分数越高,在转子旋转作用下,密封介质承受离心力作用,更多的润滑油由转子腔进入静子腔或静子侧,润滑油体积分数对密封泄漏的影响减弱,泄漏量并没有随润滑油体积分数的增加呈等比例线性增长。

2.4 润滑油液滴直径对泄漏量的影响

对比分析润滑油液滴直径(微米级)对密封系统的密封性能影响,数值计算进出口压力比为 1.5,转子转速为 6 000 r/min,润滑油体积分数为 1%、10%和 15%,液滴直径为 1~15 μm 时驱动齿轮箱密封系统的泄漏量。图 10 所示为不同液滴体积分数下密封结构泄漏量与液滴直径的关系。



润滑油体积分数/%: 1—1; 2—5; 3—10。

图 10 不同润滑油液滴直径的密封泄漏量曲线

Fig. 10 Leakage loss curves of oil drops with different diameters

由图 10 可知:不同润滑油液滴体积分数下,润滑油直径对迷宫结构泄漏量的影响规律基本一致;在同一转速和润滑油体积分数下,润滑油液滴直径越大,泄漏量越大,泄漏量随液滴直径的变化呈近线性变化。这是由于随着润滑油直径增大,单个润滑油颗粒的体积增大,转子旋转造成离心力影响增大,更多的润滑油由 I 腔、II 腔转向 III 腔、IV 腔,造成润滑油泄漏增大,呈近线性增加。

3 结论

1) 转子转速对迷宫密封的内部流场分布产生影响,直接决定密封结构的密封性能,主要表现为:直通式密封的直通效应;转子腔内介质泄漏较静子腔更容易;不同的空腔位置中的介质对泄漏影响不同,靠近出口的密封腔内介质容易泄漏。

2) 随着转子转速增加,润滑油液滴的泄漏量先上升后下降最后趋于稳定。

3) 润滑油液滴体积分数越高,泄漏量越大,但液滴体积分数较高时,对泄漏量的影响较小,呈非线性关系。

4) 微米级润滑油液滴直径越大,泄漏量越大,泄漏量随液滴直径的变化呈近线性变化。

5) 齿轮箱迷宫密封设计时,应充分考虑转速对密封介质分布的影响,通过结构设计和优化,使得润滑油尽可能集中于靠近入口的腔室中,尤其是静子腔,同时减少进入密封系统的液滴体积分数和直径,提高密封系统的密封性能,减少齿轮箱的润滑油泄漏。

参考文献:

- [1] 周平. 高速列车驱动齿轮箱密封系统分析[J]. 铁道机车车辆, 2004, 24(S1): 31-35.
ZHOU Ping. Seal system analysis of the driving gearbox of high speed train[J]. Railway Locomotive & Car, 2004, 24(S1): 31-35.
- [2] 丁学俊, 黄来, 黄丕维, 等. 迷宫密封中可压流体流场的数值模拟[J]. 润滑与密封, 2007, 32(5): 27-29.
DING Xue-jun, HUANG Lai, HUANG Piwei, et al. Numerical simulation of compressible flow in labyrinth seals[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(5): 27-29.
- [3] WANG Weizhe, LIU Yingzheng. Numerical analysis of leakage flow through two labyrinth seals[J]. Journal of Hydrodynamics: Ser B, 2017, 19(1): 107-112.
- [4] 李金波, 何立东. 蜂窝密封流场旋涡能量耗散的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(32): 67-71.

- LI Jinbo, HE Lidong. Energy dissipation of vortex in honeycomb seals using numerical simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(32): 67-71.
- [5] 李盼, 李勇, 曹丽华, 等. 一种新型蜂窝密封的封严特性[J]. 化工进展, 2018, 37(5): 1655-1663.
LI Pan, LI Yong, CAO Lihua, et al. Sealing characteristics of a new honeycomb seal[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(5): 1655-1663.
- [6] 张元桥, 闫嘉超, 李军. 刷式密封泄漏和传热特性影响因素的数值研究[J]. 推进技术, 2018, 39(1): 116-124.
ZHANG Yuanqiao, YAN Jiachao, LI Jun. Numerical investigations on influence factors of leakage flow and heat transfer characteristics of brush seal[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(1): 116-124.
- [7] LI Jun, QIU Bo, FENG Zhenping. Experimental and numerical investigations on the leakage flow characteristics of the labyrinth brush seal[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(10): 2201-2210.
- [8] ZHAO W, NIELSEN T K, BILLDAL J T. Effects of cavity on leakage loss in straight-through labyrinth seals[C]// 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Timisoara, Romania: IOP Publishing Ltd., 2010: 1-8.
- [9] 李军, 吕强, 丰镇平. 高低齿迷宫式汽封泄漏流动特性研究[J]. 机械工程学报, 2006, 42(5): 165-168.
LI Jun, LÜ Qiang, FENG Zhenping. Research on the leakage flow characteristics in the stepped labyrinth seal[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(5): 165-168.
- [10] 张尧, 张万福, 李春, 等. 变工况下高低齿迷宫密封泄漏特性及结构优化[J]. 热能动力工程, 2018, 23(5): 33-39.
ZHANG Yao, ZHANG Wanfu, LI Chun, et al. Leakage characteristics and structure optimization of staggered labyrinth seal at off-design condition[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 23(5): 33-39.
- [11] 张雨, 张开林, 姚远. 高速动车组齿轮箱径向迷宫密封的数值研究[J]. 润滑与密封, 2016, 41(12): 16-20.
ZHANG Yu, ZHANG Kailin, YAO Yuan. Numerical study of radial labyrinth seal for high-speed train unit gearbox[J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(12): 16-20.
- [12] 曹丽华, 贾彦铭, 李盼, 等. 汽轮机高低齿叶顶汽封泄漏流动的数值分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(8): 1545-1550.
CAO Lihua, JIA Yanming, LI Pan, et al. Numerical analysis on leakage flow of blade tip stepped seal in steam turbine[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2016, 50(8): 1545-1550.
- [13] 杜发青, 吉洪湖, 帅海山, 等. 齿形几何参数对直通筒齿封严泄漏特性影响的正交实验[J]. 航天动力学报, 2013, 28(4): 825-831.

- DU Faqing, JI Honghu, SHUAI Haishan, et al. Orthogonal experiment of effect of fin geometrical parameters on leakage of straight-through labyrinth seals[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(4): 825–831.
- [14] BONDARENKO G A, BAGA V N, BASHLAK I A. Flow simulation in a labyrinth seal[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 630: 234–239.
- [15] 李志刚, 李军, 丰镇平. 迷宫密封泄漏特性影响因素的研究[J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(3): 16–20.
- LI Zhigang, LI Jun, FENG Zhenping. Effects of gap pressure ratio and rotational speed on discharge behavior of labyrinth seal[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(3): 16–20.
- [16] SUBRAMANIAN S, SEKHAR A S, PRASAD B V S S. Rotor dynamic characterization of rotating labyrinth gas turbine seals with radial growth: combined centrifugal and thermal effects[J]. *International Journal of Mechanical Science*, 2017, 123: 1–19.
- [17] 吴特, 米彩盈. 高速齿轮箱润滑系统密封结构的数值研究[J]. *铁道学报*, 2014, 36(4): 26–31.
- WU Te, MI Caiying. Numerical analysis on seal structure for high-speed gearbox lubrication system[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(4): 26–31.
- [18] 张雨, 张开林, 姚远. 基于 Mixture 模型的机车齿轮箱径向密封机理研究[J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(6): 1210–1216.
- ZHANG Yu, ZHANG Kailin, YAO Yuan. Mechanism research of radial labyrinth seals for locomotive gearbox based on Mixture model[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(6): 1210–1216.
- [19] 王小芳, 金保升, 钟文琪. 基于欧拉多相流模型的流化床煤气化过程三维数值模拟[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2008, 38(3): 454–460.
- WANG Xiaofang, JIN Baosheng, ZHONG Wenqi. 3D numerical simulation on coal gasification in fluidized bed based on Eulerian multiphase fluid model[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2008, 38(3): 454–460.
- [20] WITTIG S, SCHELLING U, KIM S, et al. Numerical predictions and measurements of discharge coefficients in labyrinth seals[R]. New York: ASME, 1987: 1–7.

(编辑 赵俊)