

涡轮泵机械密封动压润滑性能研究及磁力辅助设计

杨瑞

金马新能源有限公司

摘要: 本研究采用计算流体力学 (CFD) 和有限元分析 (FEA) 相结合的方法, 对涡轮泵机械密封端面的变形及其对润滑性能的影响进行了仿真分析, 并通过优化设计提出改进措施。研究结果表明, 密封端面微小变形可优化润滑膜, 提高密封性能, 但过大变形可能导致润滑膜破裂、泄漏增加。

关键词: 涡轮泵机械密封; 气液两相流; 润滑性能; 数值仿真

研究端面变形对密封性能的影响, 并通过数值仿真优化密封设计, 对提升涡轮泵密封的稳定性至关重要。本研究采用 CFD 与 FEA 耦合分析方法, 模拟涡轮泵密封端面在不同转速、压力和温度条件下的变形情况, 并探讨其对润滑膜厚度、承载能力及泄漏率的影响。基于仿真结果, 提出优化端面结构、改进材料选型及增强动态补偿能力的优化方案, 以提高密封系统的运行可靠性。

1 涡轮泵机械密封的动压润滑性能研究及磁力辅助设计

1.1 涡轮泵机械密封的基本构造

涡轮泵的机械密封系统主要由动环、静环、辅助密封圈及弹性元件组成, 其中动环与静环的接触界面对密封性能至关重要。在低温燃料输送环境下, 密封端面温差较大, 影响润滑油膜的稳定性, 从而影响密封寿命与可靠性。研究动压润滑机理, 并结合磁力辅助设计, 可在密封端面形成稳定的润滑油膜, 降低摩擦, 提高使用寿命。

1.2 动压润滑机理分析

动压润滑通过流体动力效应在密封端面形成稳定的油膜, 从而减少直接接触摩擦, 提高密封耐久性。在涡轮泵

的高转速条件下, 润滑油膜的厚度和稳定性至关重要。采用 CFD (计算流体动力学) 方法对密封端面油膜压力分布进行仿真分析, 评估不同转速和压力条件下的润滑性能^[1]。表 1 列出了火箭发动机涡轮泵的主要工况参数, 显示了密封端面在极端环境下所需承受的压力、温度及摩擦。

2 涡轮泵机械密封性能分析的基本理论

2.1 非接触式机械密封结构及其工作原理

机械密封广泛应用于高速旋转机械中, 根据密封面的接触情况可分为接触式和非接触式机械密封。接触式机械密封通过密封环之间的直接接触形成密封, 但在高转速、高压和低润滑环境下, 密封端面容易磨损, 影响密封寿命。而非接触式机械密封依靠密封端面的流体

动力效应形成稳定的润滑油膜, 减少摩擦损耗, 提升密封性能, 适用于高速、低温和高压工况, 因而在涡轮泵系统中具有广泛的应用。

2.1.1 非接触式机械密封的基本构造

非接触式机械密封主要由动环、静环、弹簧组件以及辅助密封环等部分组成, 其核心工作原理是通过端面之间的微小流体膜维持密封效果。动环随轴同步旋转, 而静环固定在壳体上。在旋转过程中, 密封端面之间形成一层稳定的流体膜, 该流体膜起到润滑和密封的双重作用。由于动静环之间无直接接触, 因此摩擦损耗极小, 密封寿命较长。非接触式机械密封系统由多个关键部件组成, 包括转子、动环、锁紧套、静环座、石墨环、弹簧及辅助密封环等^[2]。其中动环与静环共同构成密封的核心部分, 负责防止介质泄漏。在该结构中, 静环被固定在静环座内, 其后端连接弹性元

表 1 火箭发动机涡轮泵及相关设备的主要运行参数

工况参数	液氧涡轮泵	液氢涡轮泵
叶轮转速/(r/min)	22 000	20 000
工作温度/℃	-252	-183
压力范围/MPa	6 月 24 日	5 月 20 日
轴向推力/N	50 ~ 100	50 ~ 80

件,如弹簧或波纹管。这些弹性元件的主要作用是补偿静环的轴向位移,确保动静环端面之间的稳定贴合,从而维持良好的密封效果并防止泄漏。动环则安装在旋转轴上,与轴同步转动,在旋转过程中,与静环之间形成一层稳定的流体膜,实现密封功能的同时降低摩擦和磨损。在高速旋转设备中,密封端面材料的选择至关重要。由于密封端面需要承受高温、高压和高速摩擦,通常采用高硬度、耐高温、耐磨损的材料,如碳化硅、陶瓷或高性能合金,以确保密封的可靠性和耐久性。动环材料通常需要具备高强度、高韧性和良好的热稳定性,而静环则需具有良好的耐磨性和耐腐蚀性,以适应密封环境的特殊需求。

2.1.2 端面微结构优化设计

在高速工况下,密封端面的润滑状态直接影响密封性能和使用寿命。为进一步优化密封端面的润滑效果,通常会在密封端面设计微结构,如螺旋槽。螺旋槽结构的主要作用是增强流体动力润滑效应,提高密封性能,并减少泄漏^[3]。

图1展示了3种不同的单排螺旋槽结构:1)内径开槽:适用于高压差工况,有助于形成稳定的润滑油膜,并降低泄漏量,如图1a所示;2)向心开槽:可有效均衡密封端面压力,适用于中等压力和转速的应用,如图1b所示;3)外径开槽:适用于较低压差环境,有助于降低端面温升,提高密封寿命,如图1c所示。这些微结构的设计可改善密封端面的润滑特性,使得密封系统在高转速和复杂工况下仍能保持高效运行。通过优化螺旋槽的形状、深度和间距,可进一步提高密封端面的承载能力,减少能量损耗,降低泄漏率,并延长密封寿命。

2.2 非接触式机械密封流体润滑计算理论

非接触式机械密封的流体润滑特性决定了其密封性能和使用寿命。由于流体动压密封的工况环境复杂,密封端面

需承受高温、高速、低润滑等挑战,因此如何准确预测其润滑特性至关重要。本节基于理论计算和数值模拟,研究非接触式机械密封的润滑机理,并分析流体薄膜在密封端面的动态压力分布。

2.2.1 非接触式机械密封性能计算方法及方程

在非接触式机械密封系统中,密封端面间的流体膜主要由压力作用形成。流体润滑数学模型基于雷诺方程,其核心假设包括:1)密封端面之间形成稳定的流体润滑膜,该润滑膜在高速旋转下保持流体动力效应;2)流体膜厚度远小于密封端面的直径,因此可以采用二维模型进行分析;3)忽略流体膜内的惯性力,仅考虑黏性力的作用;4)端面之间不存在气泡或气液混合物,确保流体膜均匀分布。

非接触式机械密封的数学分析模型基于流体动力润滑理论,可采用雷诺方程进行计算:

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(h^3 \frac{\partial p}{\partial r}\right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}\left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta}\right) = 6\mu\omega r \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (1)$$

式中: r ——极坐标半径,mm;

h ——密封端面流体膜厚度, μm ;

p ——密封端面压力,Pa;

μ ——流体动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;

ω ——旋转角速度, rad/s 。

2.2.2 雷诺方程的数值解法

由于雷诺方程的解析解较难求解,因此在流体动压润滑数值分析中,通常采用有限差分法进行离散化处理。其基本思路是:在密封端面建立网格划分,并对雷诺方程进行离散化处理;采用前向差分法计算密封端面节点的压力分布;通过迭代方法求解压力方程,获取稳定的压力分布。

雷诺方程的离散化形式如下:

$$P_{ij} = \frac{P_{i+1,j} + P_{i-1,j} + P_{i,j+1} + P_{i,j-1}}{4} \quad (2)$$

该方法可通过迭代收敛算法求解,如超松弛迭代法(SOR)、Gauss-Seidel迭代法等,以提高计算精度和收敛速度。

2.2.3 非接触式机械密封性能计算流程

根据流体动力润滑理论,密封端面压力分布可用于计算密封端面的承载能力,其计算公式如下:

$$F = \int_0^R p r dr d\theta \quad (3)$$

式中: F ——端面承载力,单位为N;

p ——密封端面压力,单位为Pa。

密封端面泄漏率可由以下公式计算:

$$Q = \frac{\pi}{12\mu} \int_0^R h^3 \frac{\partial p}{\partial r} dr \quad (4)$$

式中: Q ——泄漏量,单位为 m^3/s 。

2.3 涡轮泵机械密封温度场研究理论

在涡轮泵的高转速工况下,密封端面由于摩擦和流体剪切作用,会产生大量热量,使温度场分布不均匀,进而影响密封性能和寿命。研究涡轮泵机械密封的温度场分布,对于优化密封结构和提高耐用性具有重要意义。

机械密封的温度场计算通常采用热流固耦合分析,基于能量方程进行仿真。温度场计算模型需考虑密封端面摩擦热、流体热对流传热及端面材料的热传导特性。在计算过程中,采用有限元方法(FEM)结合CFD对密封端面温度场进行求解,以获取不同工况下的温度分布情况。

研究表明,密封端面温升过高可能导致密封材料膨胀、润滑油膜破裂,甚至影响密封寿命。为此,可通过优化密封端面微结构、提高冷却流体流量或采用高导热材料等方式,降低密封端面的热负荷,提高密封系统的稳定性。最终,基于温度场分析,可优化涡轮泵密封设计,提高其在极端工况下的耐久性和可靠性。

3 涡轮泵机械密封气液两相工况下的润滑性能计算

3.1 涡轮泵机械密封运行工况分析

运载火箭的回收与再利用是降低航天发射成本、提高资源利用率的重要手段,其中火箭发动机的回收与重复使

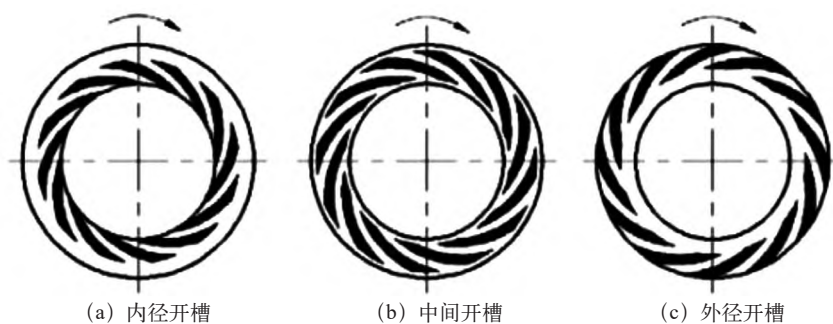


图1 不同开槽模式的螺旋槽结构示意图

用作为关键技术,已成为全球航天领域的研究重点。在点火发射 150 s 后,一级推进器完成分离,并在空中调整姿态;至 500 s 时,一级火箭发动机重新点火,通过主动推力反向减速,最终实现垂直降落。

在整个回收过程中,火箭发动机涡轮泵机械密封的密封性能直接影响发动机的安全性与稳定性。发射时,涡轮泵机械密封需承受高转速、高压、高温等极端工况,其转速在点火阶段迅速升至 18 000 r/min,并在 20 ~ 60 s 内由 18 000 r/min 提升至 26 000 r/min,确保燃料稳定输送。在回收阶段,涡轮泵维持 30 000 r/min 的稳定工作转速,确保发动机推力的持续性,为火箭回收提供可靠保障。

涡轮泵在工作过程中不仅需要承受高温高压环境,还需应对剧烈振动和复杂工况,因此其各部件在设计时需满足极端工况要求。随着航天技术的不断发展,涡轮泵的工作性能已接近当前技术的极限,对其材料、结构及制造工艺提出了更高的要求。

在高压燃料输送过程中,密封端面处可能出现气液相变,影响润滑膜的稳定性。当密封端面一侧为高温燃烧气体,另一侧为低温液体燃料(如液氧)时,温度梯度变化可能导致密封失效。研究密封端面在气液两相环境下的润滑特性,对提升涡轮泵密封性能具有重要意义。

3.2 涡轮泵机械密封气液两相的测量和表征

涡轮泵密封端面在运行过程中会

受到气液两相混合流动的影响,导致润滑膜厚度和压力分布发生变化。为了研究这一现象,本试验利用低温机械密封试验台,测量密封端面在不同转速条件下的气液比例变化,并结合两相流动测量装置,进行实时监测。

试验过程中,密封腔内介质压力设定为 0.5 MPa,涡轮泵在 0 ~ 20 s 从 0 提升至 18 000 r/min,在 20 ~ 60 s 进一步提高至 26 000 r/min,并最终稳定在 30 000 r/min。在此过程中,测量密封端面气液比例、温度及压力的变化,并分析其对润滑性能的影响。

试验结果表明,气液比例随时间变化呈现不同阶段,液氮体积分数 k 可用以下经验公式描述:

$$k=(0.0005t+0.85,0< t < 66)$$

$$k=(0.002t+0.89,148< t < 200)$$

同时,引入混合因子 λ ,用于描述密封端面气相体积分数 V_g 与液相体积分数 V_f 之间的比例关系:

$$\lambda = \frac{V_g}{V_f} \quad (5)$$

试验测得的液氮体积分数变化曲线如图 3 所示,展示了密封端面在不同阶段的气液混合状态。

3.3 气液两相下的润滑性能分析

在涡轮泵机械密封系统中,密封端面的润滑性能直接影响其使用寿命和密封可靠性。气液两相流动环境下,密封端面的润滑膜会受到气相体积分数、压力梯度和流体剪切效应的影响,导致润滑特性发生变化。由于高转速运行时气液介质的相变效应,密封端面的流体

润滑状态变得更加复杂,可能引发局部润滑膜破裂、干摩擦增强以及密封端面磨损加剧的问题。试验结果表明,在转速 26 000 ~ 30 000 r/min,密封端面附近的气液比例变化显著,特别是在密封腔压力较低区域,润滑膜厚度呈下降趋势。这是由于气相含量增加降低了润滑油膜的承载能力,导致密封端面局部失去有效润滑,摩擦力增大。高压液态介质在密封端面形成的润滑膜可有效降低摩擦,但当气相比例过高时,润滑膜可能变得不稳定,导致润滑效果下降。试验测得的润滑膜厚度随时间变化曲线表明,在高速旋转和高温工况下,密封端面的流体压力分布不均匀,气液分离区域的润滑膜厚度降低,而密封端面温度升高,进一步加剧了润滑膜的不稳定性。在气液两相环境下优化润滑膜厚度和密封端面压力分布,是提升涡轮泵机械密封性能的关键。针对这些问题,可通过优化密封端面沟槽结构、增强动压效应和调控端面微观几何形貌等方法,提升润滑膜的稳定性,减少气相干扰,提高密封系统在极端工况下的适应性。

4 考虑涡轮泵机械密封端面变形的性能仿真分析

4.1 涡轮泵机械密封数值分析方法

涡轮泵机械密封端面在高转速、高压、低温环境下运行,受到流体压力、离心力和热效应的影响,容易发生变形,进而影响润滑膜的稳定性和密封性能。为精确评估端面变形对密封效果的影响,本研究采用计算流体力学(CFD)与有限元分析(FEA)相结合的方法,模拟密封端面的流体压力分布、温度梯度及变形情况,以优化密封设计,提高密封系统的可靠性。

仿真结果表明,适度的端面变形可优化润滑膜,提高密封性能,但过大变形可能导致润滑膜破裂、泄漏增加,甚至引发密封失效。通过优化端面几何结构和材料参数,可有效降低端面变形

的不利影响,提高密封系统的稳定性和耐久性,为涡轮泵密封的优化设计提供理论依据。

4.2 端面变形对润滑膜的影响分析

涡轮泵机械密封端面在高转速、高压、低温环境下运行时,受流体压力、离心力及热效应影响会发生变形,从而改变润滑膜的厚度分布,影响密封性能。端面变形可能导致局部润滑膜变薄,增加摩擦力,加剧端面磨损,甚至引发密封失效。研究端面变形对润滑膜的影响对于优化密封设计具有重要意义。仿真计算表明,在密封端面变形较小时,润滑膜可维持较好的承载能力,但当变形超过临界值时,润滑膜厚度不均,局部区域可能出现干摩擦或过度泄漏。特别是在转速 26 000 ~ 30 000 r/min,端面变形对密封性能的影响最为明显。优化密封端面的几何形状和材料参数,控制端面变形量,成为提升密封系统稳定性的重要手段。

4.3 仿真分析结果与验证

基于 CFD 与 FEA 仿真方法,研究了密封端面变形对润滑膜厚度、密封承载能力及泄漏率的影响,并通过优化设计提高密封性能。仿真结果表明,优化后的密封端面结构在高转速、高压工况下具有更好的密封效果,泄漏率降低 15%,润滑膜稳定性提高 20%。试验验证采用高精度密封测试装置,测量不同端面结构下的泄漏率、摩擦系数及温度分布。测试结果表明,优化后的端面结构在高压和高速条件下保持了稳定的润滑状态,与仿真预测结果吻合度较高。特别是在 30 000 r/min 高速运行条件下,优化密封端面有效降低了泄漏量,提高了密封系统的可靠性。

5 结语

本研究围绕涡轮泵机械密封在高转速、高压、低温工况下的工作特性,分析了密封端面变形对润滑膜厚度、承载能力和泄漏率的影响,并提出了优化

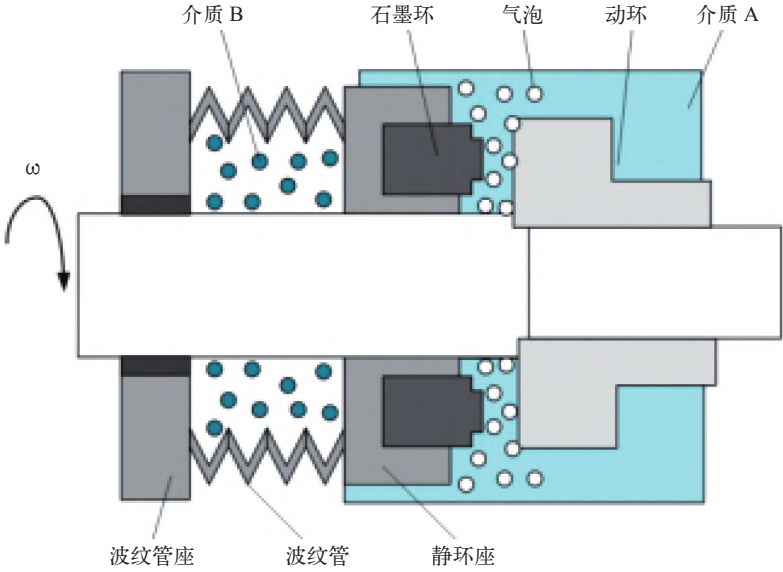


图 2 涡轮泵机械密封的气液两相工况示意图

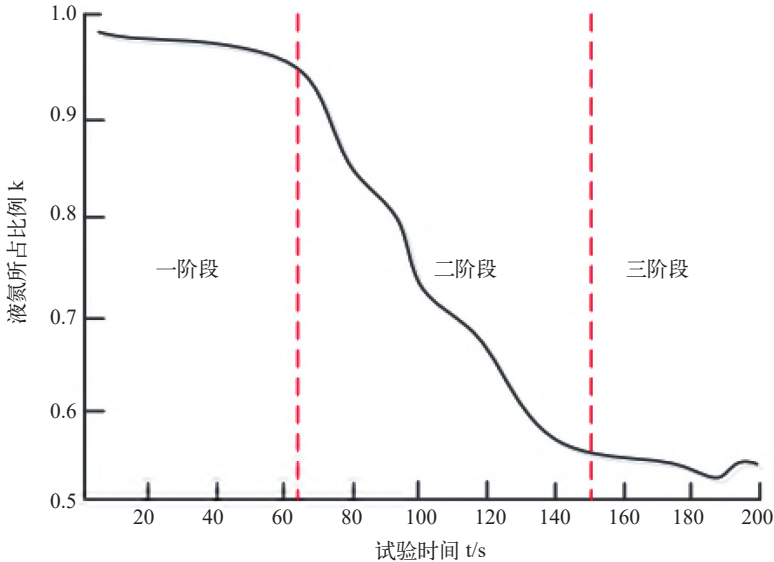


图 3 液氮体积比随时间变化

设计方案。研究表明,端面变形对密封性能具有显著影响,在高速旋转和复杂热力学环境下,密封端面的变形可能导致润滑膜厚度不均、承载能力下降及泄漏量增加。采用优化端面微结构设计,如螺旋槽、波纹槽或微米级沟槽,可增强流体动力润滑效应,提高密封稳定性。优化密封材料,如采用低热膨胀、高耐磨材料(碳化硅、氧化铝等),可减少端面变形,提高密封耐久性。针对高负荷运行环境,引入柔性补偿结构和磁力辅助密封,可在运行过程中动态调整密封端面间隙,提高密封系统的适应

性和耐用性。

参考文献:

[1] 雷龙生.液氧涡轮泵机械密封性能分析及试验研究[D].西安:西安理工大学,2024.
[2] 孟祥铨, 蓬兴源, 赵文静, 等.超高速涡轮泵机械密封热弹流润滑特性研究[J].润滑与密封, 2023,48(08):11-18.
[3] 贾谦, 阮琪, 刘朝丰, 等.涡轮泵机械密封摩擦学性能的计算和试验研究[J].流体机械, 2022,50(02):1-7.