

涡旋压缩机油气混合介质径向间隙泄漏特性研究

邢占元

国家管网集团甘肃分公司

【摘要】本文针对油润滑的涡旋压缩机，研究了油气混合介质在径向间隙的泄漏特性。通过建立物理模型和数学模型，并采用CFD软件进行数值模拟，分析了不同油气比和压差下的径向间隙泄漏规律。结果表明，润滑油含量的增加能够有效减少泄漏量，且在油气体积比为2%时，泄漏量最小。本研究为油润滑涡旋压缩机的优化设计提供了重要参考。

【关键词】涡旋压缩机；油气混合介质；径向间隙泄漏；数值模拟

Study on radial gap leakage characteristics of vortex compressor

Xing Zhanyuan

National pipe network Group Gansu Branch

【Abstract】 This paper studies the leakage characteristics of oil and gas mixed medium in the radial clearance. By establishing the physical model and mathematical model and using CFD software, the radial gap leakage law under different gas ratio and pressure difference are analyzed. The results show that the increase of lubricating oil content can effectively reduce the leakage, and minimize the leakage at the oil volume ratio of 2%. This study provides an important reference for the optimal design of oil lubrication vortex compressor.

【Key words】 vortex compressor; oil and gas mixed medium; radial gap leakage; numerical simulation

涡旋压缩机因其高效、低噪声的特点，广泛应用于制冷、空调和气体输送领域。然而，动静涡旋盘之间的径向间隙泄漏是影响其性能的主要问题之一。尤其在油润滑涡旋压缩机中，润滑油不仅能减少泄漏，还改善了密封和润滑性能。现有研究多集中于间隙尺寸优化和密封材料改进，但对油气混合介质的流动特性及其泄漏影响规律的研究仍显不足。同时，复杂的流动环境和多相介质特性增加了建立精确物理和数学模型的难度。针对这一问题，本文通过建立物理模型并利用CFD软件模拟不同油气比和压差条件，深入分析了油气混合介质对泄漏特性的影响，为优化涡旋压缩机设计提供了科学依据，进一步推动了其高效应用和性能提升。

1. 径向间隙泄漏理论及物理模型

径向间隙泄漏是指由于涡旋压缩机压缩腔之间的压差变化，导致气体从高压腔向低压腔的泄漏。在涡旋压缩机的运行过程中，动静涡旋盘之间存在一定的啮合间隙，这些间隙会导致泄漏现象的发生。本文通过建立物理模型和CFD软件进行网格划分与三维数值模拟，分析了不同油气比下径向间隙的泄漏规律，发现润滑油含量的增加会减少泄漏量，且在油气体积比为2%时，切向泄漏量最小。这一研究为油润滑涡旋压缩机的优化设计提供了理论支持。

2. 间隙混合物流动数学模型

在涡旋压缩机中，混合物流动的特性参数是关键。考虑到油润滑的影响，两相混合物流动采用均相模型进行计算。首先，计算质量含气率和体积含气率，通过公式分别求得两者的关系。然后，计算混合物的密度和黏度，以及绝热指数等物性参数。这些参数通过控制方程（包括连续性方程、动量守恒方程和体积分数方程）进行建模。基于这些数学模型，可以分析涡旋压缩机在不同油气体积比和压差条件下的混合物流动情况，进一步了解混合物在径向间隙中的流动规律和泄漏特性。

3. 几何模型及网格划分

3.1 几何模型

几何模型是数值模拟的基础。在涡旋压缩机的压缩过程中，动涡盘绕静涡盘以一定的偏心距离作公转平动运动，从而完成吸排气过程。本文采用圆渐开线设计涡旋压缩机的型线，基圆半径为3.5mm，涡旋齿高为40mm，吸气压力为0.1MPa，排气压力为0.5MPa。通过这些参数建立的几何模型能够准确反映涡旋压缩机的实际工作状态，为后续的数值模拟提供了基础。

3.2 网格划分

网格划分是数值模拟中的关键步骤。本文通过Solidworks软件对几何模型进行建模，并将模型导入CFD软件中进行网格划分。采用结构化网格和非结构化网格两种类型进行划分，其中结构化网格的总体质量水平较高。具体网

格划分结果显示,结构化网格的网格数为17,388,节点数为20,988,网格质量在0.85到1.00之间;非结构化网格的网格数为476,813,节点数为85,161,网格质量在0.35到1.00之间。最终选择结构化网格进行模拟分析,以确保数值模拟结果的准确性和可靠性。

3.3 湍流模型

气液两相流的数值模拟方法主要有拉格朗日法和欧拉法。本文基于涡旋压缩机油气两相流的特点,选用欧拉模型来描述气液两相之间的相互作用。具体采用 Standardk- ϵ 湍流模型进行模拟,其控制方程包括时均动能方程和湍动能方程。通过这些湍流模型,可以准确模拟涡旋压缩机中的湍流特性,分析混合物流动和泄漏的复杂行为。

4. 数值计算与结果分析

4.1 边界条件的设置

将划分好的单个月牙形压缩腔的结构化网格导入 FLUENT 软件中进行数值模拟。边界条件设定为:出口为 Pressure-outlet,入口为 Pressure-inlet,采用标准的 $\kappa-\epsilon$ 湍流模型;两相流模型选择 VOF 模型。扩散项用中心差分格式离散,其余项用二阶迎风格式离散,压力项用 PRESTO! 格式离散,并选用 PISO 算法进行求解。

4.2 理论计算结果

根据所建立的泄漏模型,计算出在不同油气体积比下径向间隙的泄漏量随转角的变化情况,结果如图1所示。计算结果显示,在其他条件一定的情况下,径向间隙的泄漏量随转角的增加而增加,达到排气角时,泄漏量呈现小幅度的减小。随着油气体积比的增加,泄漏量随之减少。

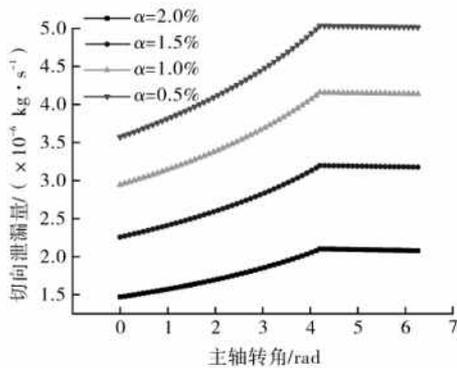


图1 理论计算结果

4.3 模拟计算

模拟计算分为两个部分:不同油气体积比和不同压差对切向泄漏的影响。首先,在压差为0.2MPa时,设定油气比分别为0.5%、1.0%、1.5%和2.0%进行模拟计算。结果显示,随着润滑油含量的增加,间隙处的泄漏速度随油气体积比的增加而减小,这说明润滑油在避免形成一定厚度的油膜,对间隙泄漏的气体产生了一定的阻力作用。压力云图如图2所示。

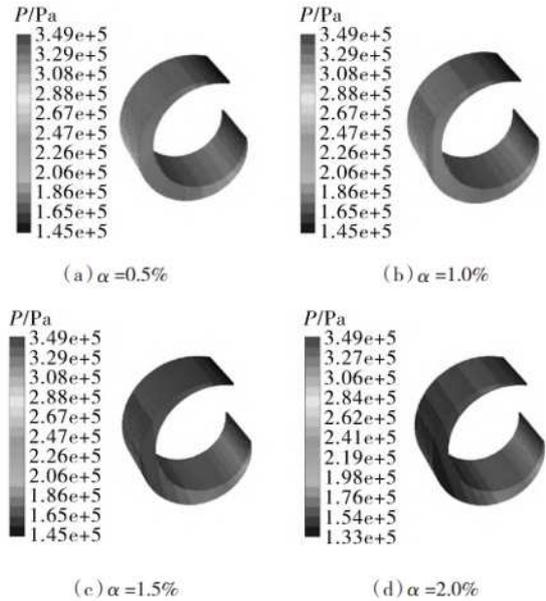


图2 压力云图 ($\Delta P=0.2 \text{ MPa}$)

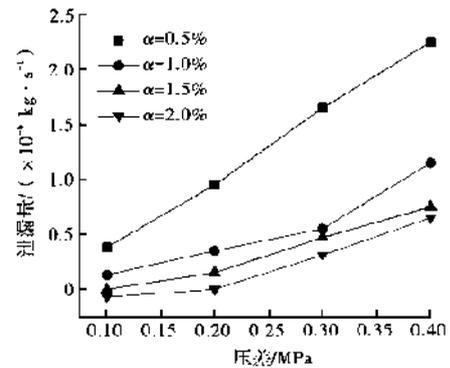


图3 泄漏量随压差的变化关系

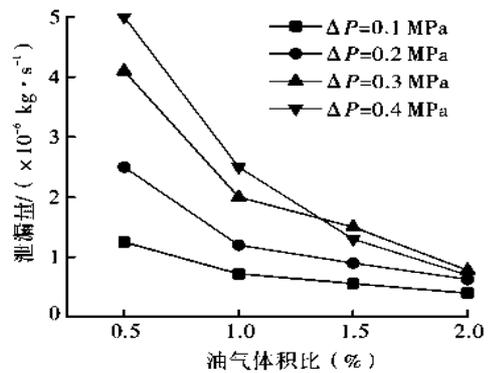


图4 泄漏量随油气体积比的变化关系

4.4 数据对比分析

通过对不同油气体积比和压差下的模拟结果与理论计算结果进行对比,发现两者的变化规律基本一致。图3展示了不同油气体积比下,泄漏量随压差的变化关系。可以看出,在径向间隙与压差一定的情况下,泄漏量随着油气比的增大而减小,而随着压差的增加,泄漏量进一步增大。图4展示了不同压差下,泄漏量随油气体积比的变化关系,显示泄漏

量随着油气比的增加而减小,压差越大,泄漏量越大。通过这些数据的对比分析,可以得出结论:在一定范围内,增大油气比能够有效减少泄漏量,但最佳油气比应控制在1.5%左右。

5. 研究结果与讨论

5.1 数值模拟与实验结果的对比分析

通过数值模拟和实验测试对油气混合介质在径向间隙泄漏特性的研究进行对比分析,结果显示,两者在趋势上具有高度一致性。在理论模型和CFD模拟中,不同油气体积比和压差条件下的泄漏量均呈现出规律性变化:随着油气体积比的增加,泄漏量逐步减少,而随着压差的增大,泄漏量则有所增加。实验结果进一步验证了模拟计算的准确性,尤其是在油气体积比1.5%~2%范围内,理论和实验结果的误差较小。这表明,润滑油的加入在减少泄漏量方面具有显著作用,能够通过形成油膜增加流体阻力。此外,数值模拟的压力云图和速度场分布图与实验数据呈现一致特征,进一步表明所建数学模型和网格划分具有较高的可靠性,为后续研究提供了可靠的基础。

5.2 泄漏特性规律的总结与理论解释

通过对径向间隙泄漏的数值模拟与实验数据的综合分析,可以总结出以下规律:第一,油气体积比的增大能够显著减少泄漏量,这是由于润滑油在间隙中形成的油膜对气体流动产生阻力,减少了气体通过间隙的速度。最佳油气体积比控制在1.5%~2%之间,此时泄漏量最小。第二,压差的增大会导致泄漏量明显增加,这是因为压差是泄漏的主要驱动力,压差越大,气体通过间隙的流速越高,泄漏也就越多。第三,泄漏量在排气角附近出现下降的现象,可能是由于该位置的流动条件更加稳定,且油膜阻力作用增强。上述规律表明,润滑油的加入和间隙条件的优化设计可以有效控制泄漏量,为涡旋压缩机的性能提升提供了理论支撑。

6. 提高涡旋压缩机性能的优化策略

6.1 降低径向间隙泄漏的结构优化设计

径向间隙泄漏是影响涡旋压缩机性能的重要因素。通过结构优化、润滑技术改进、密封材料升级以及动态控制技术的应用,可以有效降低泄漏并提升设备性能。在结构优化方

面,改进涡旋盘的几何设计,如优化齿高、齿宽和啮合方式,结合高精度加工和耐磨涂层,可显著减少间隙变化。此外,设计弹性补偿结构可在运行中自动调整间隙,进一步降低泄漏量。

6.2 润滑油黏度与混合比例的优化选择

润滑技术方面,选择适宜黏度的润滑油有助于形成稳定油膜,避免黏度过低导致油膜不足或过高增加流动阻力。研究表明,油气体积比控制在2%可使泄漏最小化并提高效率,同时满足设备润滑与冷却需求。

6.3 密封材料的改进与应用

在密封材料的改进中,采用耐高温、低摩擦系数的复合材料和自润滑材料如聚四氟乙烯,可显著提升密封性能与耐久性。动态密封技术的引入,如弹性密封件,可适应运行中的间隙变化,确保长期稳定的密封效果。

6.4 涡旋压缩机动态控制技术的探索

动态控制技术通过监测运行参数并结合智能控制算法,实时调整涡旋压缩机的间隙和负载工况。高负载时增加油量形成稳定油膜,低负载时减少油量降低能耗。未来,可借助大数据与机器学习进一步优化动态控制策略,为实现复杂流体机械的高效运行提供技术支持。这些措施为涡旋压缩机性能提升提供了可靠途径。

7 结论

本文结合理论计算与数值模拟,研究了油润滑涡旋压缩机径向间隙的泄漏特性。研究发现,润滑油能显著减少泄漏量,油气体积比为2%时效果最佳。合理控制油气比和压差可有效提升压缩机效率。然而,本研究仍有局限性。数值模拟中采用的均相模型和标准 $\kappa-\epsilon$ 湍流模型简化了气液两相流的复杂性,未完全反映实际微观流动行为。实验测试范围局限于特定油气比和压差条件,缺乏对更广泛工况的验证。此外,忽略了润滑油老化及分布变化对泄漏特性的长期影响,可能导致结果偏差。尽管研究为压缩机优化设计提供了参考,实际应用仍需结合具体工况进行改进。未来可通过高精度模拟与更广范围实验进一步完善研究成果。

参考文献

- [1]李连生.涡旋压缩机[M].北京:机械工业出版社,1998:1-10.
 - [2]李超,王海宏,张晓东,等.考虑间隙影响的涡旋压缩机转子系统动态特性研究[J].流体机械,2021,49(1):43-50.
 - [3]周新华,肖必宏,戴明,等.涡旋压缩机静盘外壁面强化传热研究[J].机电工程,2020,37(11):X ZHOU 1323-1328.
- 作者简介:邢占元,大学本科,高级工程师,研究方向:油气储运设备设施,维修,抢修,工业控制,石油化工仪器仪表。