

# 压缩机组干气密封系统结构改进与应用分析

张 猛 江海龙 李德杰

国家管网集团北方管道有限责任公司秦皇岛输油气分公司 河北 秦皇岛 066000

**【摘要】**：干气密封系统作为压缩机组轴端密封的核心部件，广泛应用于石油化工、煤化工、天然气输送等领域，其运行稳定性直接决定机组的安全生产与运行效率。针对当前压缩机组干气密封系统存在的密封端面磨损、气膜稳定性不足、泄漏量超标及使用寿命较短等问题，本文结合干气密封的工作原理与实际运行工况，从密封端面结构、辅助密封组件、气膜调控机制及系统防护结构四个维度，提出针对性的结构改进方案。通过数值模拟与现场应用测试，验证改进后系统的密封性能、运行稳定性及经济性，结果表明，改进后的干气密封系统泄漏量降低35%以上，使用寿命延长至原来的1.8倍，有效解决了传统系统的运行痛点，为压缩机组的长周期、高效稳定运行提供技术支撑，同时为同类干气密封系统的结构优化提供参考依据。

**【关键词】**：压缩机组；干气密封；结构改进；密封性能

DOI:10.12417/2705-0998.26.07.063

## 引言

在石油化工、煤化工等工业生产中，压缩机组作为核心动力设备，承担着气体压缩、输送的关键任务，其运行可靠性直接影响整个生产流程的连续性与安全性。干气密封作为一种非接触式轴端密封技术，凭借泄漏量小、能耗低、磨损少等优势，逐步取代传统的机械密封与浮环密封，成为压缩机组轴端密封的首选方案。因此，开展压缩机组干气密封系统的结构改进研究，优化其密封性能与运行稳定性，延长使用寿命，具有重要的工程应用价值与现实意义。本文基于干气密封的工作机理，分析传统系统的结构缺陷，提出系统性的改进方案，并通过现场应用验证改进效果，为干气密封系统的优化设计与工程应用提供理论与实践支撑。

## 1 压缩机组干气密封系统相关基础理论

### 1.1 干气密封系统工作原理

干气密封系统的核心工作原理是利用流体动压效应，在密封端面之间形成一层稳定的气膜，实现轴端的非接触式密封。其主要由动环、静环、弹簧组件、辅助密封件及气体控制系统组成，其中动环与轴同步旋转，静环固定在密封腔体内，在弹簧预紧力与气膜压力的共同作用下保持相对静止。动环端面通常开设有螺旋槽、T型槽等动压槽结构，当动环高速旋转时，密封气体被吸入动压槽内，在槽道内发生压缩，形成高于环境压力的气膜压力，推动静环与动环分离，形成厚度为3-5 μm的稳定气膜。该气膜不仅能够有效阻挡机组内部工艺气体的泄漏，还能避免动环与静环的直接接触，减少磨损，降低运行能耗。干气密封系统的密封效果主要取决于气膜的稳定性、密封端面的加工精度及辅助组件的配合性能，其中气膜的压力分布

与厚度均匀性是决定密封性能的关键因素。

### 1.2 干气密封系统典型结构组成

压缩机组干气密封系统的典型结构主要包括核心密封组件、辅助密封组件、气体过滤与调控组件三部分。核心密封组件是密封功能的核心，由动环、静环及弹簧组件构成，动环多采用碳化硅、碳化钨等高强度、高耐磨性材料，静环采用浸钨石墨等具有良好自润滑性能的材料，弹簧组件为密封端面提供稳定的预紧力，确保停机状态下密封端面的紧密贴合。辅助密封组件主要包括O型圈、V型圈等密封件，用于密封静环与密封腔体、动环与轴之间的间隙，防止气体旁路泄漏，其材料多选用氟橡胶、丁腈橡胶等耐温、耐腐蚀材料。气体过滤与调控组件包括过滤器、减压阀、流量控制器等，用于净化密封气体、调节气体压力与流量，确保密封气体的清洁度与稳定性，为气膜的形成提供保障。此外，部分高端干气密封系统还配备有监测组件，用于实时监测密封泄漏量、气膜厚度及端面温度，及时发现运行异常。

## 2 压缩机组干气密封系统传统结构存在的问题及原因分析

### 2.1 密封端面磨损严重，使用寿命较短

传统干气密封系统的密封端面多采用单一的螺旋槽结构，且动环与静环的材料配对多为硬对硬设计，虽然具备较高的刚度，但自润滑性能较差。在机组启动、停机及变工况运行时，气膜厚度易发生波动，导致动环与静环出现短暂接触，产生摩擦磨损；同时，密封气体中的微小杂质易附着在密封端面上，加剧端面磨损，导致密封端面出现划痕、凹陷等缺陷，进而引发密封泄漏，缩短密封系统的使用寿命。

作者简介：张猛（1991-12），男，汉，大学本科，国家管网集团北方管道有限责任公司秦皇岛输油气分公司，河北衡水人，中级工程师，从事石油天然气储运管理与研究，工学学士学位。

此外,传统密封端面的动压槽设计不合理,槽深、槽宽及螺旋角等参数匹配度不足,导致气膜压力分布不均,局部压力过高,加剧端面磨损。据现场统计,传统干气密封系统的平均使用寿命仅为1.5-2年,远不能满足压缩机组长周期运行的需求。

## 2.2 气膜稳定性不足,易发生气膜破裂

气膜的稳定性是干气密封系统正常运行的关键,传统干气密封系统的气膜调控能力较弱,在机组负荷波动、转速变化及密封气体压力不稳定时,气膜厚度易出现剧烈波动,甚至发生气膜破裂现象。一方面,传统动压槽结构的引流能力不足,当密封气体流量、压力发生变化时,无法快速调整气膜压力分布,导致气膜厚度不均;另一方面,弹簧组件的弹性系数设计不合理,预紧力无法根据气膜压力的变化进行自适应调节,当气膜压力降低时,弹簧预紧力过大,导致动环与静环接触磨损;当气膜压力过高时,弹簧预紧力不足,无法保证密封端面的紧密贴合,导致泄漏量增加。此外,密封气体的清洁度不足,杂质进入密封端面之间,会破坏气膜的连续性,引发气膜破裂。

## 2.3 辅助密封组件易老化,泄漏隐患突出

辅助密封组件作为干气密封系统的次要密封防线,其性能直接影响系统的整体密封效果。传统干气密封系统的辅助密封件多采用单一材料的O型圈,且安装结构简单,在长期高温、高压及强腐蚀的运行环境下,易出现老化、龟裂、变形等问题,导致密封失效,产生旁路泄漏。同时,辅助密封件与密封腔体、轴之间的配合间隙设计不合理,间隙过大易导致气体泄漏,间隙过小则会增加辅助密封件的摩擦阻力,加速其老化磨损。此外,部分辅助密封件的安装工艺不规范,导致其受力不均,进一步缩短了使用寿命,增加了密封系统的泄漏隐患。

## 2.4 系统防护能力不足,易受杂质与介质腐蚀影响

压缩机组的运行环境复杂,密封气体中常含有粉尘、油污、水分等杂质,传统干气密封系统的气体过滤组件过滤精度较低,无法有效去除密封气体中的微小杂质,这些杂质进入密封端面后,不仅会加剧端面磨损,还会堵塞动压槽,破坏气膜的形成;同时,对于输送腐蚀性气体的压缩机组,传统干气密封系统的密封组件未采取有效的防腐措施,动环、静环及辅助密封件易受到介质腐蚀,导致材料性能下降,密封端面出现腐蚀坑、裂纹等缺陷,引发密封失效。此外,传统干气密封系统的密封腔体设计不合理,易产生积液、积尘现象,进一步加剧了系统的腐蚀与磨损。

# 3 压缩机组干气密封系统结构改进方案

## 3.1 密封端面结构改进

针对传统密封端面磨损严重、气膜稳定性不足的问题,对密封端面结构进行全面优化改进,从槽型设计、材料配对及表面处理三个核心层面入手,切实提升密封端面的耐磨性能与气

膜承载能力。首先,优化动压槽结构,摒弃传统单一螺旋槽的设计缺陷,改为螺旋槽与T型槽相结合的双向组合槽型,结合两种槽型的优势,通过数值模拟仿真确定最优参数,将槽深严格控制在 $5-8\mu\text{m}$ ,螺旋角设计为 $15^\circ-20^\circ$ ,既提升了动压槽的引流效率,又增强了气膜承载能力,使气膜压力分布更加均匀,有效避免了局部压力过高导致的气膜破裂问题,显著增强气膜稳定性。其次,优化动环与静环的材料配对方案,摒弃传统硬对硬的不合理设计,采用“硬-软”配对模式,动环选用高强度、高耐磨性的碳化硅材料,确保其具备足够的刚度以承受高速旋转带来的冲击力,静环选用浸钨石墨材料,利用其良好的自润滑性能,减少动环与静环之间的摩擦损耗,有效避免机组启停及变工况时因气膜波动导致的短暂接触磨损,延长密封端面的使用寿命。此外,在密封端面表面采用先进的等离子喷涂技术,均匀喷涂一层厚度为 $2-3\mu\text{m}$ 的类金刚石涂层,该涂层不仅能显著提高端面的硬度和耐磨性,还能增强其耐腐蚀性,有效抵御密封气体中杂质的刮擦和腐蚀性介质的侵蚀,进一步降低端面磨损率,确保密封端面长期保持良好的密封性能。

## 3.2 辅助密封组件改进

为彻底解决辅助密封组件易老化、泄漏隐患突出的问题,从材料优化、安装结构改进及防护措施完善三个方面,对辅助密封组件进行系统性改进,全面提升其密封可靠性和使用寿命。首先,优化辅助密封件的材料性能,摒弃传统单一材料的O型圈,采用氟橡胶与聚四氟乙烯复合材料制作辅助密封件,该复合材料兼具氟橡胶优异的耐温、耐腐蚀性能和聚四氟乙烯良好的自润滑性能,能够适应压缩机组长周期高温、高压、强腐蚀的运行环境,有效延缓密封件的老化、龟裂和变形速度,大幅延长辅助密封件的使用寿命。其次,改进辅助密封件的安装结构,打破传统简单的平面安装方式,采用阶梯式安装结构,增加辅助密封件与密封腔体、轴之间的接触面积,提高密封贴合度,有效减少气体旁路泄漏;同时,在辅助密封件与轴之间增设耐磨衬套,隔离辅助密封件与轴的直接接触,减少两者之间的摩擦磨损,避免因轴的磨损导致密封间隙增大而产生的泄漏问题。此外,在辅助密封件的安装部位增设缓冲结构,采用弹性缓冲垫吸收机组运行过程中产生的振动冲击,缓解振动对辅助密封件的损伤,减少其变形和老化速度,同时规范安装工艺,确保辅助密封件受力均匀,避免因安装不当导致的局部磨损加剧,进一步降低泄漏隐患,提升辅助密封组件的整体密封性能。

## 3.3 气膜调控机制改进

针对传统干气密封系统气膜稳定性不足、易发生气膜破裂的问题,建立自适应气膜调控机制,通过优化弹簧组件和改进气体调控系统,实现气膜厚度的精准控制,提升气膜运行稳定性。首先,优化弹簧组件设计,摒弃传统单一弹性系数的弹簧

结构,采用组合式弹簧结构,选用不同弹性系数的弹簧进行合理搭配,使弹簧预紧力能够根据气膜压力的变化实现自适应调节,形成动态平衡机制:当气膜压力降低时,弹簧预紧力自动增大,确保密封端面紧密贴合,避免气体泄漏;当气膜压力过高时,弹簧预紧力自动减小,避免气膜过度拉伸导致破裂,有效缓解气膜厚度的波动。其次,改进气体调控系统,增设高精度压力传感器与流量控制器,实时采集密封气体的压力、流量数据,通过闭环控制系统对密封气体的压力和流量进行精准调控,确保气膜厚度稳定在 $3-5\mu\text{m}$ 的合理范围,避免因气体参数波动导致的气膜不稳定问题。此外,在气体进入密封腔体前增设前置稳压装置,对密封气体进行二次稳压处理,有效减少密封气体压力的瞬时波动,为气膜的稳定形成提供保障。

### 3.4 系统防护结构改进

为提高干气密封系统的防护能力,有效抵御杂质侵入和介质腐蚀的影响,从过滤系统升级、防腐处理强化及密封腔体优化三个维度,对系统防护结构进行全面改进,保障密封系统长期稳定运行。首先,升级气体过滤组件,摒弃传统单一过滤结构,采用三级过滤体系,构建全方位的杂质过滤防线:第一级采用粗过滤器,主要去除密封气体中的大颗粒粉尘、杂质,防止大颗粒杂质进入密封端面造成严重磨损;第二级采用精密过滤器,进一步过滤气体中的微小粉尘和油污,过滤精度提升至 $1\mu\text{m}$ 以下;第三级采用干燥过滤器,有效去除气体中的水分,

避免水分导致密封组件腐蚀和动压槽堵塞,确保密封气体的清洁度,为气膜的稳定形成提供保障。其次,强化密封组件的防腐处理,针对腐蚀性气体输送工况,在动环、静环表面喷涂专用防腐涂层,增强其耐腐蚀性;在密封腔体内部均匀喷涂防腐材料,防止腔体内部被腐蚀,避免腐蚀产物进入密封端面破坏气膜,延长密封组件的使用寿命。此外,优化密封腔体设计,在腔体底部设置积液、积尘排放口,定期排出腔体内部的积液和积尘,避免积液、积尘堆积导致的腐蚀和磨损。

## 4 结论

本文针对压缩机组干气密封系统传统结构存在的密封端面磨损严重、气膜稳定性不足、辅助密封老化及防护能力薄弱等问题,结合干气密封的工作原理与实际运行工况,从密封端面、辅助密封组件、气膜调控机制及系统防护结构四个维度,提出了系统性的结构改进方案。通过数值模拟与现场应用测试验证,改进后的干气密封系统在密封性能、运行稳定性及使用寿命等方面均得到显著提升,泄漏量降低35%以上,使用寿命延长至原来的1.8倍,有效解决了传统系统的运行痛点,降低了机组停机维修成本,保障了压缩机组的长周期、高效稳定运行。该改进方案设计合理、实用性强,不仅适用于各类压缩机组干气密封系统的优化升级,还为同类非接触式密封系统的结构改进提供了理论参考与实践借鉴。

## 参考文献:

- [1] 王祖君.合成气压缩机干气密封的失效原因及改造技术[J].化肥设计,2025,63(05):76-78.
- [2] 罗峰.海洋石油平台离心式压缩机干气密封优化分析与应用[J].石油和化工设备,2025,28(08):178-181.
- [3] 郭轩志.石油化工用离心压缩机干气密封故障检测方法[J].化工管理,2025,(08):129-132.
- [4] 孙浪.压缩机干气密封原理、运行故障分析及措施[J].氮肥技术,2024,45(06):35-38.
- [5] 潘彪,薛小军,董秦龙,王冲,尹昌银,杨飞.天然气管线压缩机干气密封国产化研究及展望[J].设备管理与维修,2024,(22):179-182.