

往复式压缩机气阀故障诊断与预测性维护策略

刘博群

伊犁新天煤化工有限责任公司 新疆 伊犁哈萨克自治州 835000

摘要: 气阀是往复式压缩机核心易损部件, 故障频发易引发设备低效运行、非计划停机甚至安全事故。本文剖析气阀结构原理、故障类型及失效机理, 重点针对煤化工介质中碳铵结晶导致的气阀失效问题, 提出在压缩机入口增设超重力除尘器的源头治理方案。采用数据整理分析方法, 结合设备运行参数与现场经验, 构建实用故障诊断方法。针对传统维护弊端, 设计分级式预测性维护策略。经工程验证, 该体系可精准识别各类故障, 有效提升机组运行稳定性与运维经济性。

关键词: 往复式压缩机; 气阀故障诊断; 超重力除尘器; 碳铵结晶; 预测性维护

引言: 往复式压缩机广泛应用于化工、能源等工业领域, 气阀作为控制气体循环的关键部件, 长期在复杂工况下往复运行, 极易出现磨损、积碳、卡滞等故障。在煤化工行业中, 原料气中的 CO_2 和 NH_3 在特定条件下会生成碳铵结晶, 附着于气阀部件表面, 导致气阀卡滞、关闭不严, 严重威胁机组安全运行。传统人工诊断、定期检修及事后维修模式, 存在故障识别滞后、运维盲目性强、资源浪费严重等问题, 难以适配现代化工业设备高效运维需求。为此, 本文开展气阀智能故障诊断研究, 重点解决结晶引发的气阀失效问题, 构建预测性维护体系, 为机组安全稳定长效运行提供技术支撑。

1 往复式压缩机气阀结构原理与故障机理分析

1.1 气阀结构与工作原理

(1) 往复式压缩机进、排气阀核心结构由阀片、弹簧、阀座、升程限制器组成, 各部件协同完成气体通断控制, 是压缩机气体压缩循环的核心部件。阀座为密封基体, 阀片负责开合封堵, 弹簧提供复位弹力, 升程限制器用于管控阀片最大开启行程, 避免部件超程损坏。

(2) 气阀启闭贴合压缩机四大工作循环运行。吸气阶段, 缸内负压克服弹簧弹力推开进气阀, 气体进入气缸; 压缩阶段, 缸内压力升高, 进气阀关闭, 气体被持续压缩; 排气阶段, 高压气体顶开排气阀完成排气; 膨胀阶段, 缸内压力回落, 排气阀闭合, 进入下一循环。

(3) 气阀正常运行需匹配标准工况参数, 工作压力、介质温度需维持设备额定区间, 运行振动幅值需控制在规范范围, 同时阀片启闭时序需与活塞往复运动精准匹配, 时序偏差、参数超标均会引发设备异常运行。

1.2 气阀典型故障类型及特征

(1) 机械类故障: 阀片长期往复撞击出现磨损、局部断裂; 弹簧反复伸缩产生疲劳失效、弹力衰减; 阀座

密封面磨损、划伤, 直接导致密封性能下降, 是最常见的基础故障类型。(2) 热力与介质类故障: 高温工况下介质杂质堆积造成气阀积碳、流道结垢堵塞; 腐蚀性介质侵蚀阀片、阀座; 长期高温运行引发部件热变形, 造成气阀闭合不严、通气不畅。(3) 装配与运行类故障: 装配偏差、杂质卡阻导致阀片启闭卡滞; 密封失效引发持续漏气; 弹簧弹力异常造成阀片回弹滞后、回弹过度, 打乱设备正常运行节奏。

1.3 煤化工介质中的碳铵结晶问题

(1) 碳铵结晶具有强附着性, 极易沉积于气阀阀座密封面、阀片表面、弹簧间隙及升程限制器流道内。结晶物堆积会导致以下后果: 一是阀片无法完全闭合, 造成气体泄漏, 压缩效率下降; 二是阀片开启受阻, 响应滞后, 打乱正常启闭时序; 三是结晶颗粒嵌入密封面, 划伤阀座和阀片, 造成永久性损伤; 四是弹簧被结晶物包裹, 弹力失效, 气阀无法正常工作。(2) 碳铵结晶问题在冬季低温环境或压缩机间歇性运行时尤为突出。停机期间, 气阀温度下降至环境温度, 结晶加速生成; 再次开机时, 结晶未及时清除, 直接导致气阀卡滞失效。

1.4 气阀故障诱因及失效机理

(1) 设备自身因素: 核心部件材质耐磨、耐高温性能不达标, 结构设计存在缺陷, 装配精度未满足工艺要求, 使部件先天存在运行隐患, 长期运行后逐步失效。

(2) 运行工况因素: 设备长期超负荷运行, 工况压力、温度频繁波动, 介质含粉尘、杂质及结晶物, 持续加剧部件摩擦、腐蚀与老化, 加速气阀损耗失效。(3) 维护管理因素: 定期检修流于形式, 未及时清理积碳、结晶物, 检查部件损耗, 拆装维护操作不规范, 老化备件更换不及时, 小隐患持续累积引发故障。

1.5 气阀故障危害分析

(1) 轻微故障：会直接造成压缩机排气量降低、运行能耗上升，设备振动、运行噪声异常增大，整体运行效率小幅下降。(2) 中度故障：设备运行稳定性大幅降低，气阀及关联部件磨损速率加快，冷却、润滑等辅助系统负荷超标，加速配套设备老化。(3) 严重故障：易引发机组非计划停机，造成核心部件损坏，若介质为易燃易爆气体，还可能出现泄漏问题，引发爆炸、火灾等安全事故^[1]。

2 增设超重力除尘器解决气阀结晶问题

2.1 超重力除尘器工作原理

(1) 超重力除尘器是一种基于旋转填充床技术的高效气液净化设备，其核心原理是利用高速旋转产生的超重力场强化气液传质过程，高效脱除气体中的粉尘、结晶前驱物及可溶性杂质。(2) 超重力场中的传质机理：在普通重力场中，气液两相接触面积小、相对速度低，传质效率受限。而在超重力场中，液体受到强大的离心力作用，被撕裂、粉碎成微米级液滴、细丝及附着在填料表面的极薄液膜，气液两相在高度湍动状态下剧烈接触，相界面不断高速更新，使传质效率较传统塔器提高1-2个数量级。(3) 对于碳铵结晶问题，超重力除尘器的核心作用是从源头脱除煤气中的 NH_3 和部分 CO_2 ，破坏碳铵结晶的生成条件。当煤气中的 NH_3 浓度降低至结晶露点以下时，即使温度下降也不会析出结晶物，从而从根本上解决气阀结晶卡滞问题。

2.2 超重力除尘器的技术优势

(1) 高效脱除：对亚微米级粉尘和可溶性气体杂质的脱除效率可达95%以上，远高于传统旋风分离器和水洗塔。(2) 设备紧凑：超重力除尘器的体积仅为传统填料塔的1/10-1/5，占地面积小，便于在现有压缩机入口管路中增设改造。(3) 适应性强：对进气负荷波动不敏感，可在30%-110%设计负荷范围内保持稳定高效运行，适配煤化工装置负荷频繁调整的工况。(4) 运行成本低：吸收液可循环使用，补充量小；设备压降低对压缩机入口压力影响可忽略不计^[2]。

3 基于运行参数的气阀故障诊断方法

3.1 基于运行参数的气阀状态判断方法

(1) 声音判断是气阀故障诊断最直接有效的手段之一。正常运行时，气阀启闭声音清脆、节奏均匀。当阀片出现磨损或断裂时，会产生尖锐的撞击异响或金属敲击声；弹簧失效会导致阀片回弹无力，启闭声音变得沉闷；积碳或卡滞时，气阀动作不连贯，声音杂乱无章。经验丰富的运维人员通过听诊器或电子听音棒即可初步判断气阀健康状态。(2) 气阀温度判断是监测气阀运

行状态的重要指标。进气阀正常运行时温度接近吸气温度，排气阀温度接近排气温度。若气阀密封不严产生泄漏，高温高压气体反复冲刷会造成阀体温度异常升高；积碳严重时，流道堵塞导致气体流动受阻，阀体局部温度也会明显上升。通过手持红外测温仪或在线温度传感器定期监测阀体温度变化，可及时发现气阀异常。(3) 吸入压力与排气压力判断是气阀性能评估的关键参数。在压缩机转速和工况稳定的前提下，若吸入压力异常降低，可能原因是进气阀开启不畅或流通面积不足；若排气压力无法达到额定值，则可能是排气阀泄漏或进气阀故障导致压缩效率下降。通过对比实际压力与理论压力曲线的偏差，结合压缩机工作循环时序，可准确锁定故障气阀的位置和类型。

3.2 气阀故障的数据整理分析

(1) 对压缩机运行过程中采集的温度、压力、声音等数据进行系统整理，建立气阀运行状态台账。记录每次检修前后的气阀状态参数、故障现象及处理措施，形成历史数据库，为后续故障分析提供对比依据。(2) 通过对比同一气阀在不同时期的温度变化趋势、压力波动范围及声音特征，判断气阀性能衰退程度。例如，排气阀温度逐月上升，表明阀片密封性能逐步下降；吸入压力呈现周期性波动，可能预示弹簧疲劳导致阀片启闭不稳定。(3) 结合压缩机负荷、转速、介质组分等工艺参数，综合分析气阀运行数据。排除工艺波动对气阀状态的干扰，准确识别由气阀本身故障引发的参数异常，避免误判误修。

3.3 压缩机负荷波动与压力波动对气阀的影响

(1) 压缩机负荷频繁波动会直接导致进、排气压力的大幅变化。负荷骤增时，吸气压力降低、排气压力升高，气阀两侧压差增大，阀片撞击阀座的速度和冲击力显著增加，加速阀片和阀座的磨损甚至断裂。(2) 进排气压力波动过大会造成气阀启闭时序紊乱。当吸气压力过低时，进气阀可能无法正常开启，造成进气不足；当排气压力过高时，排气阀需要克服更大阻力才能打开，弹簧负荷加重，长期运行易导致弹簧疲劳失效。(3) 针对负荷波动大、压力不稳定的工况，需结合工艺系统进行综合调节。优化上游气源供应稳定性，调整压缩机运行台数匹配用气负荷，加设缓冲罐平抑压力波动，避免压缩机长期在变工况下运行，从源头上减少气阀因压力冲击造成的损坏。

4 气阀维护保养与故障处理

4.1 气阀核心部件的使用与保养

(1) 阀座的维护重点是保证密封面的光洁度和平整

度。每次检修时检查密封面有无划伤、腐蚀坑或疲劳剥落,轻微损伤可通过研磨修复,严重损伤需更换阀座。安装前确保阀座与气缸贴合面清洁无异物。(2) 阀片是气阀中最易损坏的部件,其使用寿命受材质、工况和维护质量影响。选用耐冲击、耐疲劳的高性能阀片材料(如PEEK、不锈钢热处理等),定期检查阀片厚度、平面度及边缘有无裂纹。阀片出现轻微磨损时可翻面使用,出现裂纹或断裂必须立即更换。(3) 升程限制器用于控制阀片的最大开启高度,升程过大会加剧阀片撞击力度,升程过小则影响气阀流通能力。定期测量并调整升程至设备规定值,同时检查限制器表面有无阀片撞击产生的凹坑,必要时进行修磨或更换。(4) 弹簧的作用是辅助阀片及时复位,其弹力稳定性直接影响气阀启闭性能。定期检测弹簧自由高度和弹力值,同一气阀上各组弹簧的弹力差值不得超过规定范围(通常不超过5%-10%)。发现弹力衰减、锈蚀或断裂的弹簧应成组更换,避免新旧混用。

4.2 气阀的选型优化

(1) 根据不同工况特点选择合适的阀型和材料。对于含粉尘较多的介质,选用环状阀或网状阀,其自清洁能力优于条状阀;对于含腐蚀性组分的气体,阀片和阀座应选用耐腐蚀材料;对于高温工况,选用耐热合金或PEEK阀片。(2) 气阀升程与流通面积的匹配需根据压缩机转速和气体性质优化设计。高转速压缩机宜选用较小升程以降低阀片撞击速度;低转速、大排气量压缩机可适当增大升程提升流通能力^[1]。

5 基于数据整理的预测性维护策略构建

5.1 传统维护模式弊端分析

(1) 事后维修为故障发生后的被动维修模式,仅在气阀出现失效、机组异常后开展检修。该模式无法预判故障,故障突发性强,极易造成机组非计划停机,大幅降低生产连续性,同时气阀断裂、部件磨损等严重失效会造成不可逆的设备损伤,增加维修难度与成本。(2) 定期检修属于固定周期的预防性维护模式,存在明显局限性。固定检修周期无法适配气阀差异化损耗状态,易出现设备状态良好时过度维修,造成备件、人力资源

浪费;也会出现损耗严重但未到检修周期的维修不足问题,故障隐患无法及时消除,维护针对性与灵活性极差,难以适配现代化机组高效运维需求。

5.2 分级式预测性维护策略设计

(1) 建立基于故障预警等级的分级维护机制,根据气阀运行状态划分隐患等级。针对轻微隐患,采取持续监测、定期跟踪的处置方式;针对一般故障,安排计划性停机检修,消除故障隐患;针对严重故障,立即停机处置,杜绝故障扩大,实现故障精准分级、按需维护。

(2) 制定气阀全生命周期梯度维护规划,设备运行初期以清洁、巡检、参数校准为主,开展预防性维护;运行中期依托状态监测数据,实施动态状态维护,及时处理轻微损耗问题;运行后期结合历史数据与状态评估结果,提前预判部件失效节点,实施预判更换策略,保障设备稳定运行。(3) 同步优化配套运维体系,结合状态评估结果优化备件库存,避免备件积压或短缺;根据设备状态规划合理维修时序,避开生产高峰期;统一运维人员作业流程与操作标准,规范检修、更换流程,全面提升运维工作的规范性与高效性。

结束语

本文完成往复式压缩机气阀故障机理分析、超重力除尘器源头治理方案设计、实用故障诊断方法研究及预测性维护策略构建,形成了“源头预防、过程监测、精准维护”的全链条运维体系。工业应用表明,超重力除尘器可有效消除碳铵结晶生成条件,结合状态评估与分级维护策略,可显著降低气阀故障发生率,减少停机损失与运维成本。后续将继续优化运行参数,扩充故障案例库,细化评估标准,进一步提升体系的工业场景适配性与精准运维能力。

参考文献

- [1] 往复式压缩机气阀故障分析及预防措施[J]. 管信刚;高小强;李欣;张文洁;辛芳.中国设备工程,2025(02)
- [2] 基于故障诊断的往复式压缩机气阀维修与管理策略研究[J]. 齐帅朋.化学工程与装备,2025(07)
- [3] 往复式压缩机气阀故障诊断与可靠性提升的智能监测方法. 刘斌.石化技术,2026(04)