

水煤浆工况下隔膜泵易损件的寿命提升小技巧

冯 康 闫 路

陕西神渭煤炭管道运输有限责任公司 陕西 西安 717199

摘 要: 水煤浆的高浓度、高磨蚀性介质特性对隔膜泵关键易损件构成严峻考验。隔膜、单向阀、活塞密封及导向轴承在浆体冲刷、颗粒侵入及交变应力作用下频繁失效, 制约装置长周期运行。本文基于现场运维实践, 系统梳理隔膜预紧力动态调整、阀座阀芯配对研磨、密封冲洗参数优化及导向轴承润滑改进等实用技巧, 从安装规范、运行参数调控与预防性维护三个层面提出延长易损件寿命的方法。所述措施已在多套装置上验证, 易损件更换周期显著延长, 为同类工况下隔膜泵精细化管理提供了可复制经验。

关键词: 水煤浆; 隔膜泵; 易损件; 磨损机理; 寿命提升; 运维技巧

引言: 水煤浆气化工序中, 隔膜泵作为高压煤浆输送的关键设备, 其运行可靠性直接决定气化装置的负荷率与运行周期。隔膜泵面临极为恶劣的工况, 浆体呈强磨蚀性与弱碱性, 输送压力高, 隔膜、单向阀、活塞密封及导向轴承等易损件磨损速率远超常规工况, 部分部件过早失效成为制约装置长周期运行的瓶颈。当前国内维护研究多集中于故障诊断, 涉及易损件寿命延长的实用技术报道零散。本文着眼于现场易实施的技巧层面, 将阀件配合精度控制、隔膜预紧调整、密封冲洗优化等操作经验系统化梳理, 为设备管理人员提供简明有效的技术参照。

1 隔膜泵水煤浆工况的特点与易损件失效模式

1.1 隔膜泵在煤浆输送中的工作条件

水煤浆隔膜泵通常采用液压双隔膜结构, 由动力端、液力端和液压辅助系统三大部分构成。运行时电机驱动曲轴带动活塞往复运动, 液压油推动隔膜挠曲变形, 隔膜再将压力传递给煤浆腔内的浆体, 实现高压输送。介质条件对设备寿命的影响体现在以下三个方面。其一是固液两相流磨蚀, 煤浆中悬浮的煤颗粒在高压差及高流速作用下, 对过流部件表面产生持续的切削与冲击, 其磨损速率与颗粒粒径、浓度及流速呈正相关。其二是交变载荷下的疲劳, 隔膜每往复一次即完成一次拉伸—压缩应力循环, 每分钟约 50~70 次, 每年累计应力循环次数超过 2000 万次, 疲劳裂纹扩展是隔膜失效的主要机制之一。其三是密封副的磨粒磨损, 单向阀芯与阀座、活塞杆密封等摩擦副在开启和闭合过程中, 煤浆中的硬质颗粒嵌入密封面形成“三体磨损”, 导致密封比压下降、内泄漏增加。

1.2 核心易损件及典型失效特征

隔膜泵在煤浆工况下主要易损件包括四种, 各自失效模式存在明显差异。隔膜是核心关键件, 常用材质为橡胶与增强纤维复合层压结构, 典型失效形式包括疲劳断裂、边缘撕裂及鼓包变形, 断面常呈现明显疲劳辉纹^[1]。单向阀由阀芯与阀座配对组成, 失效形式主要是阀芯表面点蚀剥落及阀座密封面冲蚀沟槽, 严重时阀芯直径磨损超过 1.5mm 即丧失密封功能。活塞密封为唇形或 V 形组合密封, 失效表现为唇口快速磨损及根部挤出, 密封间隙超过 0.3mm 后液压油内泄漏加剧, 油压建立缓慢。导向轴承与十字头滑履属于动力端摩擦副, 失效形式为巴氏合金层剥离与异常过热烧瓦, 多因润滑油膜建立不良或煤浆侵入造成。

1.3 工况因素对寿命影响的权重分析

根据现场更换记录统计, 影响各类易损件寿命的因素按权重排序, 介质磨蚀性占约 35%~40%, 运行负荷占约 25%~30%, 安装与维护质量占约 20%~25%, 设备本体精度占约 10%~15%。介质因素属于既定条件难以改变, 后三项因素中除了设备本体精度需厂家保障外, 运行负荷的合理调控和安装维护质量的提升完全可通过现场管理实现, 这正是本文“小技巧”能够发挥作用的着力空间。

2 隔膜寿命提升技巧

2.1 隔膜预紧力动态调整

隔膜安装时预紧力的大小直接决定其受力状态与寿命。预紧力过大会使隔膜在非工作状态下已承受显著初始拉伸应力, 叠加工作时的交变应力后应力幅值

接近材料疲劳极限,疲劳寿命急剧缩短;预紧力过小则隔膜在工作腔内窜动、摩擦边缘支撑圈,造成边缘异常磨损甚至撕裂。现场行之有效的方法是在安装隔膜时以专用力矩扳手分三步均匀锁紧压盖螺栓,第一步以规定扭矩的 60% 预紧、第二步升至 80%、第三步达到 100% 扭矩值,每步均对称交叉顺序锁紧,确保隔膜均匀压紧、无偏斜。运行过程中应根据累计运行时间实施动态补偿:运行达 2000 小时后若出现泵压轻微波动,可在停机状态下检查隔膜压盖螺栓扭矩,若发现扭矩衰减超过初始值的 10%,则需重新紧固至标准扭矩,补偿隔膜因硫化蠕变造成的预紧力损失,可延长隔膜有效使用寿命 20% ~ 30%。

2.2 隔膜腔排气与液压油品质控制

隔膜腔液压油中夹带气体是隔膜非正常损坏的重要诱因。空气混入液压油后降低油液弹性模量,使隔膜两侧压力传递滞后,隔膜产生不规则的额外挠曲变形,局部应力集中加速疲劳开裂。腔体排气操作应安排在每次检修后首次启动及每周例行维护中进行:泵体低速空载运行约 10 分钟,开启隔膜腔顶部排气阀,待连续排出无气泡的纯油液后关闭排气阀。液压油品质方面,需选用黏度等级为 ISO VG46 或 VG68 的抗磨液压油,每运行 4000 小时抽取油样检测水分含量与清洁度,水分含量不得超过 0.05%,污染度不得低于 NAS 8 级,若超标则需更换全部液压油并清洗油池。值得注意的是换油时应彻底放净残油并用新油冲洗管路,油品更换周期不宜超过 8000 小时。

2.3 隔膜装配边缘保护

边缘是隔膜结构中最薄弱区域,安装过程中磕碰划伤会使该处成为早期疲劳裂纹源,极短时间内即扩展至整体撕裂。装配时需采用专用导向工装将隔膜均匀推入腔体,禁止使用螺丝刀或撬棍等尖锐工具强行撬入;隔膜定位止口与腔体配合面应涂抹薄层二硫化钼润滑脂,既便于安装到位又可避免干摩擦磨损^[2]。隔膜入库保存时应避免阳光直射与臭氧环境,堆码层数不超过三层,防止长期受压变形。凡边缘存在深度超过 0.5mm 的划痕或局部脱层,该隔膜即判定为不合格品,不应装机使用。

3 单向阀寿命提升技巧

3.1 阀芯阀座配对研磨

单向阀在煤浆工况下失效的首因是密封面磨损,而非阀体本身的强度问题。新阀芯与阀座出厂精度虽可满足使用标准,但在高压煤浆工况下,为提高密封可靠

性,应进行装机前的配对研磨。具体方法为在阀座密封面上涂抹 W40 金刚砂研磨膏,将阀芯置于阀座上以手动或低速气动工具带动阀芯旋转,研磨时不断改变旋转角度并适时补充研磨膏,直至阀芯与阀座密封带呈连续均匀的环状磨痕(密封带宽 2 ~ 4mm 为宜)。研磨完成后彻底清洗研磨膏残留,并用煤油做渗漏检验——将研磨好的阀芯放入阀座后注入煤油,5 分钟内无渗漏即判为合格。经过配对研磨的阀芯阀座副,初始密封比压均匀且接触面积增大,密封寿命较未经研磨的部件可延长约 40% ~ 60%。

3.2 阀芯材质选型对比

目前水煤浆隔膜泵阀芯主流材质为碳化钨和陶瓷两类。碳化钨阀芯抗冲击性能较好,造价适中,但在浆体冲蚀下表面钴粘结相优先腐蚀脱落,碳化钨颗粒失去支撑后逐层剥落,表面粗糙度快速升高,在煤浆工况下密封恶化周期一般为 3000 ~ 4000 小时。陶瓷阀芯(氧化锆增韧或氮化硅材质)硬度更高、化学稳定性好,表面光洁度保持能力强,耐磨寿命通常为碳化钨的 1.5 ~ 2 倍,但其缺点是对装配同轴度要求苛刻、抗意外冲击力差。现场使用经验表明,对非频繁启停的连续运转工况,推荐优先选用氧化锆陶瓷阀芯,虽单件采购成本高出约 30% ~ 50%,但全生命周期成本反而更低——以两年为一个更换周期统计,使用陶瓷阀芯的综合成本(采购 + 更换人工 + 停机损失)比碳化钨方案节省约 20%。

3.3 阀座密封面堆焊再加工

阀座密封面出现轻微冲蚀沟槽后不必立即报废。可将阀座拆卸后重新装夹在车床上,用车削方式去除密封面损伤层并恢复原设计角度,再以配套阀芯进行重新研磨配对。当阀座密封面累计车削量超过原始厚度的 15% 时,需采用硬质合金堆焊工艺进行补焊修复,焊后热处理消除残余应力,再精车加工至标准尺寸。修复后的阀座配合新阀芯使用,其密封效果与全新阀座相当、但寿命略短约 20%。建议阀座在达到报废标准之前最多修复 2 次,每次修复成本仅为新阀座采购价的 25% ~ 30%,是一种极为经济的降本手段^[3]。

4 活塞密封与导向轴承寿命提升技巧

4.1 冲洗油参数匹配调节

液力端活塞密封处通常设有冲洗油接口,冲洗油一方面冲洗活塞杆表面粘附的煤浆颗粒,另一方面起润滑和冷却密封圈的作用。现场普遍存在的误区是冲洗油压力越高越好,实际恰恰相反。冲洗油压力应比煤浆腔压力高 0.2 ~ 0.3MPa,压力过高会破坏密封唇口的合理压紧

力分布、加剧密封磨损；压力过低则无法有效阻隔煤浆侵入密封区域。冲洗油流量以每分钟 2~4 升为经验参考值，目视回油管有连续细流即可。此外冲洗油温度宜控制在 45~55℃，温度过低时油液粘度大、流动性差且煤浆颗粒不易被冲走，温度过高则密封橡胶加速老化。

4.2 十字头滑履间隙控制

动力端十字头与滑履的配合间隙是影响导向轴承寿命的关键参数，间隙过大时冲击载荷加剧、巴氏合金层疲劳剥落，间隙过小则油膜建立困难、干摩擦导致烧瓦。现场测量应采用压铅法检查顶部间隙，利用塞尺测量侧隙，水煤浆工况下顶部间隙推荐值 0.12~0.18mm、侧隙 0.08~0.12mm。每次大修时应应对十字头和滑履接触面进行刮研修复，接触斑点数应达到每平方英寸（约 6.45cm²）不少于 4~6 个均匀分布点，保证润滑油膜均匀承载。润滑油初次启动前应完成预润滑，即使用润滑油泵先行供油使十字头滑履与曲轴轴瓦均获得初始油膜，避免干启动造成的早期过度磨损。

4.3 润滑油污染度监控与过滤

煤浆颗粒一旦经由活塞杆密封微量泄漏进入动力端润滑油系统，即造成油品污染。硬质颗粒悬浮于润滑油中进入导向轴承和曲轴轴瓦间隙，形成三体磨粒磨损工况，轴承寿命成倍下降。遏制这一恶性循环的有效手段是加装外置旁路精细过滤系统，选择过滤精度不低于 10μm 的高压滤油器，并每月检测润滑油污染度控制在 NAS 7 级以内。同时每周检查回油滤芯压差，当压差超过 0.1MPa 时应立即更换滤芯。若发现油质呈深灰色或油底出现颗粒沉淀物，须停机排查密封泄漏源、更换全部润滑油并彻底清洗油池，不得以“补油替代换油”的方式敷衍处理。

5 运行管理与预防性维护优化

5.1 负荷升降速率控制

负荷突变造成的压力冲击是导致隔膜和单向阀早期失效的重要原因。启泵操作应遵循“先低速空载排净空气、再缓慢提速加载”的原则，加载速率控制在每分钟压力升高不超过 0.3MPa。停泵前应逐步降低转速至最低稳定转速，运行约 5 分钟后停机，使系统压力平稳下降，避免突然断电造成液压油瞬间失压，隔膜在高背压与低油压的巨大压差作用下产生极限变形甚至破裂^[4]。

5.2 定期状态监测与维修策略

建立隔膜泵状态监测记录表是预防非计划停机的基础工作。各项监测频率的确定依据为：振动测量每 500 小时

一次，对应多数隔膜泵润滑油脂更换周期（500~600 小时），便于将振动检测与日常换油作业合并实施，减少额外停机次数；单向阀阀隙与煤油渗漏检测每 2000 小时一次，该周期约为隔膜泵常规运行三个月的工作时长，与多数装置的小修间隔相匹配，可在计划停机窗口内同步完成；液压油与润滑油品质每月取样一次，基于油品实验室标准分析周期（常规理化指标检测通常需 3~5 个工作日），按月取样可获得连续的趋势数据以判断油品劣化速率。根据监测数据采用“趋向管理”原则制定维修计划——当某一指标连续出现两次劣化趋势时即安排计划性检修，而非等设备完全失效再做抢修。

5.3 易损件寿命档案建设

每台隔膜泵应单独建立易损件更换台账，记录每次换件的日期、运行时长、失效现象描述及同批次件寿命对比。该档案可以揭示不同供应商产品之间的性能差异和不同安装操作手法对寿命的影响，为后续备件采购选型和操作技能培训提供依据。档案建立后若连续三个更换周期的数据统计显示同类型件寿命稳定且呈上升趋势，说明当前维护方案有效、安装质量受控。若某一批次件寿命突发性缩短 30% 以上，应优先排查是否因来料质量问题而非工况变化所致。

结束语

水煤浆工况下隔膜泵易损件寿命的延长，依赖于安装精度、参数适配、状态监测与维护管理多环节精细化操作的叠加效应。本文从隔膜预紧力动态调整与腔体排气、阀芯阀座配对研磨与修复再利用、密封冲洗参数优化以及十字头滑履间隙与润滑油品管控四个维度，梳理了十余项可即时实施的实用技巧。建议设备管理人员结合自身工况选取适配方案，在实践中持续优化参数，逐步形成适用于本单位的易损件全生命周期精细化管理规范，从根源上降低非计划停机率，保障水煤浆气化装置长周期安全经济运行。

参考文献

- [1] 张国庆, 杜善周, 黄涌波, 等. 水煤浆制备工艺现状及发展趋势 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(5): 133-142.
- [2] 赵胜利. 水煤浆制备系统的提质与优化 [J]. 氮肥与合成气, 2024, 52(6): 4-8.
- [3] 王硕, 张亚新, 朱博韬. 基于灰色预测模型的水煤浆输送管道冲蚀磨损寿命预测 [J]. 化工进展, 2023, 42(7): 3431-3442.
- [4] 周震宇. 基于物联网的煤化工设备状态监测与故障预警系统构建 [J]. 工程管理, 2025, 6(10): 104-106.