

往复式压缩机活塞环磨损预测模型与寿命评估

王贵林

山西焦化股份有限公司 山西 临汾 041600

摘要: 往复式压缩机是工业生产中的核心设备,其可靠性与运行效率关乎生产系统的安全与经济性。活塞环作为关键摩擦副,磨损状态直接影响压缩机的性能与故障发生率。本文旨在构建科学精准的活塞环磨损预测与寿命评估体系。先系统分析活塞环磨损机理,明确主要失效模式及耦合作用;接着基于Archard磨损理论,结合FEA与CFD技术,构建考虑热-力-流多物理场耦合的磨损预测数值模型,可动态模拟真实工况并计算磨损量;随后设计搭建试验台,通过对比试验与仿真数据,验证模型精度;最后基于预测模型,引入RUL概念,结合Paris定律评估磨损-疲劳耦合失效寿命,提出预防性维护策略。该研究为压缩机状态监测等提供理论与技术支撑。

关键词: 往复式压缩机; 活塞环; 磨损预测; 多物理场耦合; 剩余使用寿命

引言

往复式压缩机凭借压力比高、适应性强、结构简单等优势,广泛应用于石油、化工等关键工业领域。活塞环作为核心运动部件,承担密封、刮油润滑、导热散热等功能,其与气缸套形成的摩擦副,在极端工况下极易磨损。活塞环过度磨损会使压缩机容积效率下降、能耗增加,还可能引发窜气、窜油等问题,导致设备停机甚至安全事故。传统维护策略采用定期检修或事后维修,易造成资源浪费或无法避免突发故障损失^[1]。因此,发展基于状态的预测性维护技术,实时监测活塞环健康状态与寿命预测,是提升压缩机可靠性与经济性的迫切需求。但活塞环磨损过程复杂,单一理论或公式难准确描述。随着相关技术发展,构建高精度磨损预测模型成为可能。本文旨在剖析磨损机理、建立模型并验证,发展寿命评估方法,为智能运维提供依据。

1 活塞环磨损机理分析

活塞环的磨损并非单一模式,而是多种磨损机理在特定工况下共同作用、相互耦合的结果。准确识别和量化这些机理是构建预测模型的基础。

1.1 主要磨损模式

磨粒磨损 (AbrasiveWear): 这是活塞环最常见的磨损形式。其主要来源包括:润滑油中混入的外部硬质颗粒(如灰尘、金属屑);燃烧产物中的硬质灰分(在工艺气压缩机中则可能是工艺介质中的固体颗粒);以及因腐蚀或疲劳剥落的材料碎屑。这些硬质颗粒在活塞环与缸套的接触面间滚动或犁削,导致材料被刮擦、切削而损失。

粘着磨损 (AdhesiveWear): 当活塞环与缸套表面的微观凸峰在高压下直接接触时,局部接触点会发生

冷焊(粘着)。随着相对运动的进行,粘着点被剪切分离,导致材料从一方或双方表面转移或脱落。这种磨损在润滑不良、边界润滑或混合润滑状态下尤为严重,通常发生在活塞换向的上、下止点(TopDeadCenter,TDC和BottomDeadCenter,BDC)附近,因为此处速度为零,油膜难以形成。

腐蚀磨损 (CorrosiveWear): 压缩介质或润滑油在高温高压下可能发生化学反应,生成具有腐蚀性的物质(如酸性物质)。这些物质会侵蚀活塞环和缸套的表面,形成一层脆弱的腐蚀层。该腐蚀层在机械作用下极易被磨掉,暴露出新的金属表面继续被腐蚀,形成“腐蚀-磨损”的恶性循环。在压缩含硫、含水等腐蚀性介质的压缩机中,此问题尤为突出。

疲劳磨损 (FatigueWear): 活塞环在往复运动中承受着周期性的交变应力,尤其是在与缸套接触的边缘区域。长期的应力循环会导致材料表层或次表层产生微裂纹,裂纹逐渐扩展、连接,最终使材料以片状或颗粒状剥落。这种磨损模式通常与高载荷、高频率的工况相关。

1.2 磨损影响因素

活塞环的磨损速率受以下关键因素影响:(1)接触压力:由气体压力、环自身弹力及惯性力共同决定,是磨损的直接驱动力。(2)相对滑动速度:影响摩擦热的产生和润滑油膜的形成。(3)温度:高温会降低材料硬度,加速化学反应,改变润滑油粘度,从而影响所有磨损模式。(4)润滑状态:良好的流体动压润滑能有效隔离摩擦副,大幅降低磨损;而边界润滑或干摩擦则会急剧加剧磨损^[2]。(5)材料配对:活塞环与缸套的材料硬度、相容性、表面处理(如镀铬、氮化)等对磨损性能有决定性影响。(6)表面形貌:粗糙度、波纹度等影响

实际接触面积和油膜承载能力。这些因素相互交织，共同决定了活塞环的磨损行为，为后续模型构建指明了需要考虑的关键物理场。

2 多物理场耦合磨损预测模型构建

为了精确模拟活塞环在真实工况下的磨损过程，本文提出一个集成热-力-流（Thermo-Mechanical-Fluid, TMF）多物理场耦合的数值模型。该模型以经典的Archard磨损模型为核心，通过FEA和CFD技术获取其所需的输入参数。

2.1 Archard磨损模型

Archard磨损模型是描述粘着磨损和磨粒磨损最基础且广泛使用的模型，其表达式为：

$$dV = k \frac{F_n}{H} ds$$

其中， dV 是磨损体积， F_n 是法向接触载荷， H 是较软材料的硬度， ds 是滑动距离， k 是无量纲的磨损系数，它综合反映了材料配对、润滑条件、环境等因素的影响。

对于活塞环的二维轴对称模型，磨损深度 h_w 可表示为：

$$h_w = k \frac{p}{H} s$$

其中， p 是局部接触压力， s 是累积滑动距离。

2.2 多物理场耦合框架

模型的构建遵循以下耦合逻辑：

2.2.1 流体动力学分析（CFD）

首先，利用CFD软件（如ANSYS Fluent）模拟压缩机气缸内的瞬态气体流动与传热过程。通过求解Navier-Stokes方程和能量方程，可以获得气缸内壁在每个曲轴转角下的瞬时温度分布 $T_{gas}(\theta)$ 和气体压力分布 $p_{gas}(\theta)$ 。

2.2.2 热-结构耦合分析（FEA）

热分析：将CFD得到的 $T_{gas}(\theta)$ 作为热边界条件，施加到活塞环和缸套的FEA模型上。同时考虑活塞环内部的摩擦热源。通过瞬态热传导分析，计算得到活塞环和缸套在整个工作循环中的瞬态温度场 $T(\theta)$ 。

结构分析：将CFD得到的 $p_{gas}(\theta)$ 作为压力载荷，将FEA热分析得到的 $T(\theta)$ 作为热载荷，同时施加活塞环的预紧力（弹力），进行瞬态结构力学分析。该分析可以精确计算出活塞环与缸套接触面上的法向接触压力分布 $p(\theta)$ 。

2.2.3 磨损计算与几何更新

在每个时间步长（或曲轴转角步长）内，利用上一步得到的瞬时接触压力 $p(\theta)$ 和当前的滑动速度，根据Archard模型计算该时间步内的局部磨损深度增量 Δh_w 。将计算得到的磨损增量 Δh_w 叠加到活塞环的几何模型上，更新其轮

廓^[3]。将更新后的几何模型作为下一个时间步长FEA分析的输入，从而实现磨损-变形-应力的动态反馈。

2.3 关键技术处理

磨损系数 k 的确定：磨损系数 k 是模型的关键参数，通常通过台架试验或文献数据标定。在本模型中，我们将其视为一个与局部温度、压力和润滑状态相关的函数，以提高模型的适应性。

润滑模型的引入：为了更真实地反映润滑状态对接触压力的影响，可以在FEA的接触对中引入基于雷诺方程的流体动压润滑模型，计算油膜压力，并将其与固体接触压力耦合，得到总承载压力。

网格自适应技术：由于磨损会导致几何形状变化，需要采用网格自适应或重划分技术，确保在磨损区域始终保持足够精细的网格，以保证计算精度。

3 磨损试验与模型验证

为验证所提出模型的有效性，本文设计并搭建了一套往复式压缩机活塞环磨损试验台。

3.1 试验台设计与工况

试验台以一台小型单缸往复式空气压缩机为基础，对其气缸部分进行改造，以便于安装传感器和拆卸活塞环。关键设计包括：（1）可控工况：可调节压缩机的排气压力（0.5-1.0MPa）、转速（600-1200rpm）和进气温度。（2）在线监测：在气缸壁安装热电偶阵列，实时监测缸壁温度；通过高精度压力传感器监测气缸内瞬时压力。（3）试样制备：采用与工业压缩机相同的活塞环材料（铸铁环）和缸套材料（球墨铸铁），并对活塞环进行初始轮廓测量。

试验在额定工况（排气压力0.8MPa，转速900rpm）下进行，分别运行100小时、200小时和300小时后停机，拆卸活塞环，使用轮廓仪测量其外圆轮廓，并计算磨损量。

3.2 仿真与试验结果对比

利用第三部分构建的模型，对相同的工况进行仿真。将仿真得到的活塞环轮廓磨损量与试验测量结果进行对比。（1）磨损轮廓：仿真结果与试验结果均显示，活塞环的磨损主要集中在上止点（TDC）和下止点（BDC）附近，这与理论分析的粘着磨损高发区一致。两者在磨损轮廓的形状和趋势上高度吻合。（2）磨损量：在300小时运行后，试验测得的平均径向磨损量为0.12mm，而仿真预测值为0.115mm，相对误差仅为4.2%。在不同运行时间点的磨损量对比也显示出良好的一致性。对比结果充分证明了本文所构建的多物理场耦合磨损预测模型具有较高的精度和可靠性，能够有效模拟活塞环在真实工况下的磨损演化过程。

4 寿命评估与维护策略

基于高精度的磨损预测模型，可以进一步开展活塞环的寿命评估，并制定科学的维护策略。

4.1 剩余使用寿命 (RUL) 定义

活塞环的失效通常不是突然发生的，而是性能逐渐退化的过程。本文将活塞环的失效阈值定义为其径向磨损量达到一个临界值 h_{crit} 。该临界值可根据压缩机的性能要求（如容积效率下降至某一百分比）或安全裕度（如环的最小厚度要求）来确定。例如，设定 $h_{crit} = 0.3 \text{ mm}$ 。

剩余使用寿命 (RUL) 即为从当前时刻 $t_{current}$ 到磨损量达到 h_{crit} 所需的时间。

4.2 基于磨损预测的RUL评估

利用已验证的磨损预测模型，可以外推活塞环未来的磨损轨迹。具体步骤如下：（1）状态初始化：将当前时刻活塞环的实际磨损轮廓作为模型的初始几何。（2）工况输入：输入未来计划的运行工况（压力、转速、时间等）^[4]。（3）磨损仿真：运行模型，预测未来时间序列下的磨损量 $h_w(t)$ 。（4）RUL求解：通过插值或拟合，找到满足 $h_w(t) = h_{crit}$ 的时间点 t_{fail} ，则 $RUL = t_{fail} - t_{current}$ 。

4.3 考虑磨损-疲劳耦合的寿命评估

对于高可靠性要求的场合，仅考虑磨损可能不够全面。严重的磨损会改变活塞环的应力分布，在磨损沟槽的边缘形成应力集中，从而加速疲劳裂纹的萌生与扩展。为此，可以将Paris裂纹扩展定律与磨损模型结合。

Paris定律描述了疲劳裂纹扩展速率：

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

其中， a 是裂纹长度， N 是循环次数， ΔK 是应力强度因子幅值， C 和 m 是材料常数。

评估流程为：首先通过磨损模型得到磨损后的几何形状，然后进行FEA疲劳分析，计算关键位置的 ΔK ，再利用Paris定律预测裂纹从萌生到临界尺寸所需的时间。最终的寿命取磨损寿命和疲劳寿命中的较小值。

4.4 预防性维护策略

基于RUL评估结果，可以制定动态的预防性维护策略：（1）阈值报警：当预测的RUL低于一个安全阈值（如30天）时，系统发出预警，提示准备备件和安排检修窗口。（2）维护决策优化：结合生产计划、备件库存和维修成本，选择最优的维护时机，在避免非计划停机的同时，最大化设备的运行时间。（3）工况优化建议：模型还可以用于反向分析，探究不同运行参数（如降低排气压力、改善润滑）对磨损速率的影响，为操作人员提供延长部件寿命的运行建议。

5 结语

本文围绕往复式压缩机活塞环磨损预测与寿命评估问题展开系统性研究，得出重要结论：机理上，明确了磨粒、粘着、腐蚀、疲劳等多重失效机理，指出热、力、流等多物理场是影响磨损行为的核心要素；模型方面，成功构建基于Archard理论、融合FEA与CFD技术的热-力-流多物理场耦合磨损预测数值模型，可高精度模拟活塞环轮廓演化；验证环节，通过自主设计试验台获取真实数据，与模型预测结果高度一致，证实模型有效性与实用性；应用上，发展剩余使用寿命评估方法，提出基于RUL的预防性维护框架，助力实现“预测性维护”。未来，将引入机器学习方法修正参数、扩展模型至其他关键摩擦（如填料函、十字头滑道）的磨损预测、开发集成化压缩机健康管理系统的。

参考文献

- [1]刘奔发.往复式压缩机支撑环活塞环磨损分析[J].机械管理开发,2024,39(02):198-200.
- [2]卢忠宇.往复式压缩机一级缸活塞环和支撑环磨损分析[J].石化技术,2024,31(09):40-42.
- [3]孟红霞.往复式压缩机活塞环异常断裂原因分析[J].设备管理与维修,2019,(08):78-79.
- [4]高仁鹏,李海林,吴长春,等.往复式压缩机气缸活塞环磨损检修与预防措施[J].中国设备工程,2018,(07):104-107.