

复杂工况下钻机密封系统失效机理及防护设计研究

周中宁

中煤科工西安研究院(集团)有限公司 陕西 西安 710077

摘要: 钻机密封系统在复杂工况条件下长期面临高温、高压、高转速、磨粒介质及化学腐蚀等多重极端因素的耦合作用,其失效问题已成为制约钻井作业效率与安全性的关键技术瓶颈。本文系统分析了钻机密封系统在复杂工况下的主要失效模式,深入揭示了密封材料磨损、密封结构变形、润滑膜破裂及介质腐蚀等核心失效机理,在此基础上提出了涵盖材料优化、结构改进、表面工程及工况适配策略的综合防护设计方案。研究表明,复杂多场耦合效应对密封性能的劣化具有显著加速作用,需从多尺度视角构建密封系统的全生命周期防护体系。本文为钻机密封系统的可靠性提升与寿命延长提供了理论依据与设计参考。

关键词: 钻机密封系统;复杂工况;失效机理;多场耦合;防护设计

引言

钻机作为资源勘探与开采领域的核心装备,其密封系统直接关系到整机的运行可靠性、经济性与安全性。在深井、超深井及海洋钻井等复杂作业场景中,密封系统需同时承受高温、高压、高转速、大振动以及含砂、含硫等极端工况的综合作用。传统的密封设计往往基于单一工况或简化条件进行,难以适应实际工况的多因素耦合特性,导致密封过早失效、钻井液泄漏、轴承损坏乃至井下事故频发。近年来,随着钻井深度不断增加和作业环境日益苛刻,钻机密封系统的失效问题愈发突出。统计数据显示,密封系统故障约占钻机总故障次数的30%以上,由其引发的非生产停机时间占总停机时间的比例更是高达40%。因此,深入理解复杂工况下钻机密封系统的失效机理,并据此开展针对性的防护设计,已成为行业亟待解决的关键科学问题。本文从复杂工况的物理化学特征出发,系统分析密封系统的失效模式与机理,进而提出多层次的防护设计策略,旨在为钻机密封技术的进步提供理论支撑。

1 复杂工况特征及其对密封系统的挑战

钻机密封系统所处的工况环境具有显著的时变性和多因素耦合特征,主要表现为以下几个维度。

1.1 温度场特性

在深井钻进过程中,井底温度随深度增加而显著升高,地温梯度通常为 $2.5\sim 3.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,万米深井井底温度可超过 300°C 。与此同时,钻头与岩层摩擦、钻杆旋转剪切钻井液等过程产生大量热量,使密封区域局部温度进一步升高。高温环境导致密封材料发生热老化、热膨胀

及性能退化,同时使润滑介质黏度下降、蒸发加剧,削弱润滑与密封效果。

1.2 压力场特性

钻井液柱压力、地层压力及动压效应的共同作用使密封系统承受高达数十至上百兆帕的压力。压力波动与压力脉冲现象普遍存在,特别是在起下钻、接单根等操作过程中,压力急剧变化对密封结构产生冲击载荷^[1]。高压环境加剧密封唇口的接触应力,促进密封材料的蠕变与应力松弛,同时驱使磨粒介质侵入密封界面。

1.3 运动学特性

钻机主轴同时存在旋转运动与轴向窜动,形成复合运动模式。高转速(可达数百转每分钟)使密封界面产生高频摩擦,产生大量摩擦热。轴向振动与径向跳动则使密封接触状态发生周期性变化,引发动态失稳。

1.4 介质环境特性

钻井液中通常含有石英砂、岩屑等硬质磨粒,粒径分布从微米级到毫米级不等。同时,钻井液常添加各类化学处理剂,并可能含有硫化氢、二氧化碳、氯离子等腐蚀性组分。磨粒的三体磨损作用与腐蚀介质的化学侵蚀相互促进,形成磨蚀耦合损伤机制。

上述各工况因素并非独立作用,而是通过复杂的耦合机制共同影响密封系统性能。例如,高温不仅直接劣化材料性能,还会加速化学腐蚀反应速率,同时降低润滑介质的携屑能力。多场耦合效应使得密封系统的失效行为远较单一工况复杂。

2 钻机密封系统失效模式与机理分析

2.1 密封材料磨损失效机理

磨损是钻机密封系统最常见的失效形式,其物理本质是密封接触界面材料在相对运动过程中发生的渐进式去除。(1)黏着磨损:当密封唇口与对磨面之间局部微凸体发生冷焊时,相对运动使材料从一处转移至另一处。高温高压条件下,界面润滑膜难以维持稳定,直接接触概率增加,黏着倾向加剧。(2)磨粒磨损:钻井液中的硬质颗粒进入密封界面后,在接触压力作用下压入较软材料表面,相对运动时产生犁削或切削作用,形成沟槽状磨痕。磨粒磨损速率与颗粒浓度、硬度、形状及相对运动速度正相关。(3)疲劳磨损:在循环接触应力作用下,密封表面亚表层累积塑性变形,导致裂纹萌生、扩展,最终引发材料剥落。钻机运行中的振动与压力波动使接触应力呈现周期变化,加速疲劳损伤累积。

2.2 密封结构变形失效机理

密封结构在复杂载荷作用下发生弹性或塑性变形,导致密封界面几何构型改变,进而引发泄漏。(1)挤出失效:高压条件下,密封件在间隙处被挤压变形,部分材料突入间隙,在反复挤压与剪切作用下发生撕裂或根部断裂。挤出失效与间隙尺寸、压力等级及材料硬度密切相关。(2)应力松弛与压缩永久变形:橡胶类密封材料在长期压缩状态下,分子链发生重排与滑移,导致弹性回复能力下降。当压缩永久变形超过临界值时,密封界面无法维持必要的接触压力,丧失密封能力。高温显著加速应力松弛过程^[2]。(3)螺旋失效:旋转轴密封在单向旋转时,密封唇口可能发生扭曲变形,形成螺旋状泄漏通道。该现象与密封唇口的几何不对称性及摩擦力分布不均匀有关。

2.3 润滑膜失稳失效机理

密封界面间的润滑膜对于降低摩擦磨损、隔离介质至关重要。润滑膜失稳将导致干摩擦或边界摩擦状态,显著加剧损伤。(1)热致失稳:摩擦热使局部温度升高,润滑介质黏度降低,膜厚减小;膜厚减小又使摩擦加剧、产热增加,形成正反馈过程,最终导致润滑膜崩溃。(2)压力致失稳:高压条件下,密封接触应力增大,润滑膜承受的挤压作用增强,膜厚被强制压缩。当膜厚与表面粗糙度处于同一量级时,微凸体直接接触概率急剧上升。(3)供油不足:在高速旋转条件下,润滑介质受到离心力作用,难以持续供给至密封界面,导致贫油状态。

2.4 化学腐蚀与老化失效机理

钻井液中的腐蚀性组分与密封材料发生化学反应,

改变材料化学组成与微观结构,导致性能劣化。(1)高分子材料降解:橡胶密封材料在高温、化学介质及应力共同作用下,分子链发生断裂或交联密度变化。断链使材料变软、强度下降;过度交联使材料变脆、弹性丧失。(2)介质溶胀:密封材料吸收钻井液中的某些组分后发生体积膨胀,改变密封几何尺寸与接触应力分布。适度溶胀可能增强密封性,但过度溶胀导致接触应力过高,加速磨损与永久变形。(3)化学腐蚀磨损:腐蚀介质在密封界面形成化学反应膜或腐蚀产物,这些产物在摩擦过程中被去除,暴露出新鲜表面,继续与介质反应,形成腐蚀与磨损的协同加速机制。

2.5 多场耦合加速失效机制

上述各失效机理并非孤立发生,而是通过复杂的耦合关系相互促进。典型的多场耦合失效机制包括:(1)热-力耦合:温度升高引起材料模量下降、热膨胀,改变接触压力分布;接触压力变化又影响摩擦热生成,形成热力循环耦合。(2)力-化学耦合:接触应力使材料表面产生形变能,降低化学反应的活化能,加速腐蚀与老化反应速率。(3)磨-蚀耦合:磨损去除表面保护膜,暴露新鲜材料加速腐蚀;腐蚀在材料表面产生微裂纹与孔洞,降低抗磨损能力。(4)热-介质耦合:高温加速化学反应的动力学过程,同时改变介质的物理化学性质,如黏度、扩散系数及溶解能力。在复杂工况下,多场耦合效应使密封系统的失效阈值显著低于各单一因素作用的叠加,呈现非线性加速特征。

3 钻机密封系统防护设计策略

基于上述失效机理分析,从材料选择、结构设计、表面工程及工况管理四个层面提出防护设计策略。

3.1 密封材料体系优化设计

密封材料体系的优化是提升密封系统可靠性的基础。针对高温工况,应选用氟橡胶、全氟醚橡胶、聚四氟乙烯及聚醚醚酮等耐高温材料。氟橡胶通常可耐受两百至两百五十摄氏度高温,全氟醚橡胶在三百摄氏度仍能保持良好的弹性。对于含硫化氢等腐蚀性介质工况,推荐采用氢化丁腈橡胶或四丙氟橡胶,这两类材料具有更优异的耐化学腐蚀性能。在基体材料中添加纳米粒子可显著改善材料的力学性能与摩擦学性能,纳米二氧化硅、纳米碳管、石墨烯等填料能提高材料的模量、强度、耐磨性及导热系数^[3]。同时,添加适量二硫化钼或石墨可形成自润滑特性,有效降低摩擦系数。梯度功能材料是另一重要发展方向,沿密封件厚度方向设计材料组分梯度分布,例如表面层赋予优异耐磨性、中间层赋予良好

弹性、内层赋予高强度,从而实现多性能的协同优化。

3.2 密封结构创新设计

密封结构的创新设计能够从几何构型层面改善密封系统的工况适应能力。改进型唇形密封通过优化唇口几何参数,包括唇口角度、过盈量及唇口半径,采用非对称唇口设计使泵送效应与密封效应协调发挥,同时增设回油线或螺旋槽结构以增强润滑介质回流能力。组合密封结构将多种密封形式组合使用,各自发挥优势,例如主密封采用聚四氟乙烯唇形密封提供低摩擦特性,辅助密封采用 O 形圈提供弹性补偿,或者采用串联式机械密封以多级密封分担压差负荷。自补偿密封结构的设计思路是使密封接触压力随介质压力升高而自动增大,从而保证高压下的密封可靠性,弹簧蓄能密封圈在唇口内部嵌入弹簧以提供持久稳定的径向压力就是典型实例。仿生密封结构借鉴生物体表微观形貌,设计非光滑表面,仿生凹坑或沟槽结构可储存润滑介质,在摩擦界面形成微观流体动压润滑效应,降低摩擦磨损。

3.3 表面工程与界面调控

表面工程与界面调控技术着眼于密封对磨面的微观物理化学性质,以控制摩擦与磨损行为。高硬度耐磨涂层是在密封对磨面制备类金刚石涂层、氮化钛涂层或碳化钨涂层,提高表面硬度与抗磨粒磨损能力。涂层厚度通常控制在微米至亚毫米级,需兼顾涂层与基体的结合强度及热膨胀匹配性。微织构表面技术采用激光加工、光刻等工艺在密封界面制备微米尺度规则形貌,微坑、微沟槽织构可作为润滑介质储池与微粒捕获陷阱,同时产生流体动压效应以改善润滑状态。表面化学改性通过等离子体处理、化学接枝等方法改变表面化学性质,降低表面能,提高疏液性,减少介质吸附与腐蚀,硅烷偶联剂处理可增强涂层与基体的界面结合^[4]。自适应摩擦界面是更前沿的方向,设计在摩擦过程中能够原位形成低剪切强度转移膜的界面体系,某些固体润滑添加剂在摩擦热作用下向界面富集,形成自润滑膜,实现磨损的自修复功能。

3.4 工况适配与智能监测

工况适配与智能监测是从运行管理层面保障密封系统长期可靠性的重要手段。密封副材料匹配优化要求

依据具体工况条件合理选择密封圈与对磨面的材料组合,软硬材料搭配可降低黏着磨损倾向,相近热膨胀系数的组合可减小热应力。润滑介质优选与维护方面,应根据温度范围与介质相容性选择润滑脂或润滑油,合成油基润滑脂具有更宽的工作温度范围,同时需定期检测润滑介质性能指标,及时补充或更换。主动冷却与隔热设计是在密封区域设置冷却流道或散热结构以控制工作温度,采用隔热套、隔热涂层等措施减少热源向密封区的热传导。密封状态在线监测是智能化发展的核心,通过集成温度传感器、压力传感器及声发射传感器实时监测密封区域运行参数,建立基于数据驱动的健康评估模型,识别失效早期特征,实现预测性维护,从而避免突发性密封失效事故。

4 结语

针对复杂工况下钻机密封系统失效问题,本文得出以下结论:温度、压力、运动及介质等多因素耦合的非线性作用,使密封性能加速劣化,多场耦合效应是过早失效的根本原因。主要失效模式包括材料磨损、结构变形、润滑膜失稳及化学腐蚀老化,各模式间存在协同加速关系,其中磨-蚀耦合与热-力耦合最具代表性。防护设计应从材料、结构、表面及工况四个层面协同展开:采用高性能弹性体与纳米复合改性;改进唇形与组合密封结构;运用涂层、微织构及表面化学改性;实施工况匹配与智能监测。未来需探索极端工况下的失效物理模型,发展多场耦合数值模拟方法,建立寿命预测与可靠性设计理论,推动密封技术向高可靠、长寿命、智能化方向发展。

参考文献

- [1] 张德坤,王大鹏.深井钻机旋转密封多工况耦合损伤机制及寿命预测研究.石油机械,2021,49(7):45-53.
- [2] 马晓明,李方义.高温高压下橡胶密封材料的热-化学-力耦合老化行为与失效机理.机械工程学报,2022,58(11):234-245.
- [3] 陈国需,赵立涛.极端工况机械密封润滑膜失稳的非线性动力学特性研究.摩擦学学报,2021,41(5):712-723.
- [4] 吴华,孙冬柏.基于激光表面织构的钻机密封界面摩擦调控与抗磨设计.表面技术,2023,52(2):156-167.