

润滑系统设计对油封链在高温工况下密封性能的影响分析

孙一凡

杭州持正科技股份有限公司 浙江杭州 310000

【摘要】本研究聚焦润滑系统硬件构造设计对油封链于高温工作条件下密封性能所产生的作用，依托流体力学、传热学以及材料科学相关理论，对润滑系统核心零件的结构参量、材料选用和组件布置与密封性能间的作用原理展开系统性剖析。将实际工程实例和理论探讨相融合，探究硬件设计和密封性能内在的关联，研究显示，对硬件结构设计加以优化、合理挑选耐高温材料并科学规划组件布局，可有效增强油封链在高温环境中的密封性能，为高温设备润滑系统的研发提供理论参考和技术支持。

【关键词】润滑系统硬件设计；油封链；高温工况；密封性能

Analysis on the influence of lubrication system design on the sealing performance of oil seal chain under high temperature condition

Sun Yifan

Hangzhou Chizheng Technology Co., LTD Zhejiang Hangzhou 310000

【Abstract】 This study focuses on the impact of the hardware design of lubrication systems on the sealing performance of oil seals under high-temperature conditions. By leveraging theories from fluid mechanics, heat transfer, and materials science, the study systematically analyzes the structural parameters, material selection, and component layout of the core components of the lubrication system, as well as their relationship with sealing performance. By integrating practical engineering examples with theoretical discussions, the study explores the intrinsic connection between hardware design and sealing performance. The research indicates that optimizing hardware structure design, selecting high-temperature resistant materials, and scientifically planning component layouts can significantly enhance the sealing performance of oil seals in high-temperature environments, providing theoretical references and technical support for the development of high-temperature equipment lubrication systems.

【Key words】 lubrication system hardware design; oil seal chain; high temperature condition; sealing performance

引言

在冶金连铸机械、火力发电汽轮机机械等高温工业设备里，油封链作为动力传递与密封防护的核心构件，需于 200 - 600℃环境中长久稳定运作，润滑系统硬件设计品质直接关系到油封链密封界面的油膜生成能力、磨损管控程度及密封件使用寿命。当前研究大多关注润滑介质流变特性，针对硬件结构参数与密封性能的耦合关联缺少系统性探究，本文依据工程热力学与摩擦学理论，深入剖析润滑系统硬件设计要素对油封链高温密封性能的作用机理，为高温条件下润滑系统的优化设计奠定理论根基。

一、润滑系统核心部件结构参数对密封性能的影响

（一）油泵结构参数的影响

油泵作为润滑系统动力核心，其结构参数直接影响润滑油输送效能与压力稳定程度。齿轮泵的模数、齿数以及齿顶

间隙规划意义重大，冶金熔炉附近等高温工业场景下，环境温度致使润滑油粘度降低，倘若齿轮泵齿顶间隙过宽，润滑油易从间隙大量渗漏，进而造成油泵容积效率下滑，难以向油封链密封界面供应稳定且充足的油膜支撑压力。某钢厂连铸机曾出现未优化齿轮泵高温运行状况，由于齿顶间隙设置不当，油封链密封区域润滑油压力波动剧烈，密封性能急剧衰退，而采取缩小齿顶间隙、运用非对称齿廓设计，同时增设压力平衡槽等举措，能够有效抑制泄漏，增强油泵高温工作效能，确保油封链密封所需的稳定油压得以维持。

叶片泵的叶片倾斜角度与厚度参数对吸排油效率构成影响，高温工作条件下，叶片材料会产生膨胀形变，若叶片倾斜角度和厚度设计存在缺陷，叶片与定子间的配合精度将受干扰，进而引发吸油不充分或排油不通畅的问题，以高温窑炉传动设备为例，叶片泵叶片因高温发生膨胀，与定子之间的间隙产生变化，造成油压输出缺乏稳定性。对叶片倾斜角度进行合理调整，并增加叶片厚度补偿设计，可保障叶片在高温环境下与定子维持良好配合状态，使油压输出保持稳

定,为油封链密封界面持续提供均匀的油膜压力,螺杆泵的螺距与导程参数会对轴向流量特性产生作用,高温环境中,螺杆热膨胀现象会使啮合间隙发生改变,对流量稳定性造成影响。石油化工高温输送设备里,若螺杆泵未对热膨胀因素加以考量,运行一段时间后,流量会出现显著波动,导致油封链密封区域油膜稳定性不足,通过对螺距实施补偿设计,能够有效控制因热膨胀导致的啮合间隙变化,确保流量稳定,进而维持油封链密封界面油膜的稳定性,避免因油膜不稳定引发密封失效问题。

(二) 油路系统结构参数的影响

油路系统的管径尺寸、管路长度及弯曲半径对润滑油流动特征与压力分布具有显著作用,当管径过细时,高温工况下润滑油粘度下降会致使流速加快,进而大幅提升摩擦阻力,这一现象不仅会引发较大压力损耗,造成润滑油难以顺畅输送至油封链密封位置,还可能因摩擦产热促使油温进一步上升,加速润滑油老化变质进程^[1]。若管径过大,则会使润滑油在管路内滞留时间延长,增大与空气接触面积,同样会加剧氧化变质风险。部分高温烘干设备润滑系统曾因管径设计不合理,出现润滑油输送受阻问题,对油封链密封性能产生不良影响,通过合理扩大管径并对管壁进行抛光处理以降低表面粗糙度,能够有效减少沿程压力损耗,保障润滑油稳定输送至密封区域。

管路弯曲频次过高或弯曲半径不足,易引发显著局部压力损耗,造成油流紊乱及压力波动,部分高温工业设备因油路布局复杂,存在频繁弯曲且弯曲半径偏小的情况,导致润滑油流动时压力稳定性不足,难以在油封链密封界面形成均匀稳定的油膜。通过采用大弯曲半径设计、合理缩减弯头数量,并配合渐缩管与渐扩管的连接形式,可有效降低局部阻力,稳定油膜压力,新型高温机械设备设计中,经优化的油路系统显著改善油流顺畅度,使油封链密封区域压力波动幅度大幅减小,密封性能得以有效提升。

二、润滑系统硬件材料选型对密封性能的影响

(一) 油泵关键部件材料的影响

油泵齿轮、叶片等运动部件的材料选型与其在高温工况下的耐磨性能和密封性能直接相关,采用粉末冶金材料制备的齿轮,其特有的孔隙结构可实现润滑油储存,在高温环境中形成独特的自润滑效应。于高温锻造设备内,粉末冶金齿轮凭借自润滑特性,相较普通齿轮更能有效降低摩擦损耗,减少因磨损产生的金属碎屑进入油封链密封区域的概率,进而对密封件形成保护,维持优良的密封性能,该材料齿轮在高温环境下具备较好的尺寸稳定性,不易因热膨胀作用影响与其他部件的配合精度,为油泵的稳定运行提供保障。

钛合金叶片因低密度、高强度及优异高温抗氧化性能在高温工况优势显著。航空发动机等高温高转速设备润滑系统油泵中,钛合金叶片可减少离心力下变形,保障叶片与泵体间隙稳定以维持正常吸排油功能^[2]。叶片表面沉积氮化钛涂层可进一步提升表面硬度、降低摩擦系数并减少磨损,确保油泵高温稳定运行,持续为油封链提供可靠润滑压力,避免因油泵性能下降导致油封链密封失效。陶瓷涂层用于油泵转子表面可大幅提升耐磨性,高温化工反应釜搅拌设备润滑系统中,涂覆陶瓷涂层的油泵转子在高温强腐蚀介质环境仍能保持良好减磨性能,有效抵抗磨损,长时间运行亦可维持油泵容积效率,确保润滑油稳定输送至油封链密封部位,间接提升油封链密封性能并延长设备整体使用寿命。

(二) 油路与密封件材料的影响

油路管材的热膨胀系数与高温强度对系统可靠性起决定作用,316L 不锈钢管材在 600℃以下表现出良好抗氧化性,但其较高导热率会导致高温环境中易吸收热量,进而影响润滑油性能。实际应用于高温锅炉润滑油路系统时,需搭配硅酸铝纤维等低导热率保温材料,以减少热量传递,避免润滑油因过热出现粘度下降、性能劣化等问题,确保其在油封链密封界面形成有效油膜,高温尼龙复合材料油管兼具柔韧性与耐油性,且线膨胀系数与润滑油接近,在一般高温环境中能较好适应温度变化,降低因热胀冷缩引发的接头泄漏风险。但在 200℃以上高温条件下,该材料存在结晶度变化问题,通过添加耐高温稳定剂可提高其使用温度上限,增强管路系统可靠性,进而保障油封链密封性能。

密封件材料选型是保障密封性能的核心,氟橡胶在 250℃高温环境下仍可维持良好弹性与耐油性,于汽车发动机等高温工况设备中应用广泛,借助化学改性手段引入特殊分子结构,可进一步延缓其老化速度,延长密封件使用周期^[3]。聚四氟乙烯填充碳纤维密封件虽具备耐高温特性且摩擦系数较低,但存在弹性不足问题,单独使用时难以实现理想密封效果,将其与丁腈橡胶复合后,既能保留耐高温性能,又可提升压缩回弹率与密封压力,在高温高压工业管道密封场景中,该复合密封件可有效阻止介质泄漏,应用于油封链密封部位时,同样能够增强密封效能,防止润滑油泄漏及外界杂质侵入。

三、润滑系统硬件布局优化对密封性能的提升策略

(一) 系统组件空间布局优化

润滑系统各组件空间布局对润滑油流动路径及热交换效率存在直接影响,基于流体力学与热力学原理的科学布局设计,目标在于构建高效稳定的润滑体系,为高温工况下的油封链提供可靠密封保障,将油泵设置于油箱最低位置,借

助液位差实现自吸,此设计可大幅降低吸油阻力并减少油泵能耗。油泵运行时,吸油不畅易引发气蚀现象,气蚀产生的气泡破裂会对油泵内部部件造成冲击与侵蚀,严重影响其使用寿命及性能,而合理的自吸布局能有效规避该问题,保障油泵正常运转,油泵入口处前置粗滤器如同为系统设立首道坚固防线,可有效截留大颗粒杂质,防止其进入系统,进而降低密封件因杂质导致的磨损风险。矿山机械设备润滑系统中,矿石开采过程产生的大量粉尘、碎屑等杂质易混入润滑油,布局优化后,油泵运行稳定性提升,油封链密封件磨损率显著下降,设备维护周期得以延长。

油滤采用三级过滤结构并通过折叠式滤芯设计扩展过滤面积,显著提升油液清洁度,粗滤承担大颗粒杂质去除任务,如金属屑、砂砾等,实现系统初步净化;精滤对较小颗粒进行进一步过滤,保障润滑油基本纯净度;超精滤则实施深度净化,确保进入油封链密封区域的润滑油清洁度符合严苛标准。这种逐层推进的过滤模式可有效避免杂质划伤密封件表面、破坏密封结构,热交换器选用翅片式结构,通过优化翅片间距并采用错列布置提升传热系数,将其设置在回油路可借助油温梯度实现高效散热^[4]。冶金轧钢设备在轧制过程中会产生大量热量,易导致润滑油温度升高,布局优化后的润滑系统通过高效热交换器有效控制油温,减缓密封件因高温加速老化的进程,显著提升油封链密封性能,保障设备连续稳定运行,化工反应釜等高温高压设备的润滑系统布局中,合理规划组件位置可避免因管道过长、弯曲过多造成压力损失,确保润滑油以适宜压力和流量抵达油封链密封部位,进一步增强密封效果。

(二) 热防护与冷却结构设计

高温工况中需针对润滑系统关键部件开展热防护与冷却设计,热量传导、对流及辐射对润滑系统部件影响显著,若缺乏控制将严重危及油封链密封性能,靠近热源的油路采用双层套管结构,中间填充氮气等隔热气体,此设计借助气体低导热特性,犹如为油路增设隔热屏障,可有效阻隔热量传递并大幅降低管路表面温度。钢铁冶炼高温区域内,炉体释放的大量辐射热与对流热易使普通油路温度骤升,双层套管结构可使油路温度降低 40 - 50℃,避免润滑油因高温出

现氧化、裂解等变质情况,保障其润滑性能以维持油封链密封界面油膜稳定,在油泵壳体表面开设螺旋形冷却槽并通入冷却液,冷却液在槽内流动时可带走油泵内部部件摩擦产生的大量热量以降低油泵温度。大功率机械设备润滑系统中,油泵长时间高负荷运转会产生大量热量,冷却槽设计可降低油泵温度并提升容积效率,确保润滑油稳定供应至油封链,规避因油泵过热导致润滑油粘度下降、润滑失效的问题。

针对密封件部位设计局部强制风冷结构,借助轴流风扇与导流罩将环境空气定向吹拂密封界面,通过加速空气对流快速带走密封区域热量以降低密封件温度,高温窑炉传动设备中,窑炉内高温环境经热传导与热辐射易使密封件温度升高,该冷却方式可将密封件温度控制在合理区间,避免因高温造成密封件材料硬化、脆化等性能劣化问题,有效延长密封件使用周期^[5]。油箱内部设置蛇形冷却管,通过循环冷却液带走润滑油热量,蛇形设计大幅增加冷却管与润滑油接触面积以提升热交换效率,将油温波动控制在合理范围,化工反应釜润滑系统中,反应过程产生的热量会导致润滑油温度大幅波动,蛇形冷却管设计可稳定润滑油温度以维持密封件工作性能,确保油封链密封可靠。汽车发动机等高转速高温设备的热防护与冷却设计,需考虑部件高速运转产生的气流影响,通过优化风道设计与冷却结构协同作用,进一步提升散热效果,保障油封链在复杂高温工况下的密封性能及设备正常运行。

结语

润滑系统硬件设计可通过结构参数优化、材料合理选型及科学布局,有效提升油封链在高温工况中的密封性能,基于流体力学、传热学与材料科学理论的分析,为硬件设计奠定可靠理论基础。实际工程应用中,需综合考量设备工况、成本及维护需求,开展多目标优化设计,未来研究可融合数字孪生技术,搭建润滑系统硬件-密封性能实时仿真平台,实现高温工况下润滑系统的智能设计与精准调控。

参考文献

- [1]郭慧强.高低温混合稀油润滑系统换热与油气分离技术研究[D].西安理工大学, 2023.
- [2]宋友成.汽车变速器润滑系统设计分析[J].机械工程师, 2022, (10): 116-118.
- [3]王翔.某行星变速传动系统润滑性能研究与密封结构优化[D].中南大学, 2022.
- [4]刘聪.油-气润滑点接触滑动摩擦磨损试验研究[D].安徽工业大学, 2019.
- [5]石峰.航空发动机润滑系统设计的建模仿真研究[D].哈尔滨工程大学, 2019.