

铁路工程

HXD1 交流机车齿轮箱漏油故障分析和处理

王飞

国能朔黄铁路发展有限责任公司机辆分公司 062350

【摘要】HXD1型交流机车是我国重载铁路运输主力设备,齿轮箱漏油故障对机车运营安全及经济效益造成了直接的影响。齿轮箱漏油不仅会造成润滑系统的故障,加剧关键部件的磨损,而且会引起轴承温升异常以及环境污染的连锁反应。从HXD1型机车齿轮箱泄漏故障入手,对四种典型的故障机理进行分析,即密封圈的老化失效,螺栓的松脱渗油,通气孔的阻塞泄漏以及箱体的裂纹泄漏,提出密封件更换工艺的优化,螺栓紧固规范的制定,油液监测技术的应用及应急密封修复的针对性治理措施,目的是建立系统化故障防治体系,提高了机车运行的可靠性,为同类机车齿轮箱的检修提供了技术支持。

【关键词】HXD1机车;齿轮箱;漏油故障;故障机理;处理措施

Analysis and Resolution of Oil Leakage Fault in HXD1 AC Locomotive Gearbox

Wang Fei

guo, Vehicle Division, Guoneng Shuohuang Railway Development Co., Ltd. 062350

【Abstract】The HXD1-type AC locomotive serves as the primary equipment for heavy-haul railway transportation in China. Gearbox oil leakage directly impacts operational safety and economic efficiency. Such leakage not only causes lubrication system failures and accelerates wear on critical components but also triggers abnormal bearing temperature rise and environmental pollution. By investigating four typical leakage mechanisms—seal ring degradation, bolt loosening with oil leakage, ventilation port blockage, and gearbox crack leakage—the study proposes optimized sealing replacement protocols, standardized bolt tightening procedures, oil monitoring technologies, and targeted emergency sealing repair measures. These initiatives establish a systematic fault prevention framework, enhance operational reliability, and provide technical support for maintenance of similar locomotive gearbox systems.

【Key words】HXD1 locomotive; gearbox; oil leakage fault; fault mechanism; troubleshooting measures

重载铁路运输是国家经济发展的主要依托,对于机车设备运行的可靠性与安全性有着很高的要求。电力机车齿轮箱是牵引电机和驱动轮对之间关键的传动装置,其工作条件复杂多样,机械应力及热负荷较大。齿轮箱内精密齿轮副,轴承组件和润滑系统构成高度一体化动力传递单元,其中任何一环发生异常均会引起连锁反应。目前铁路运输正朝着高速度,大运量,长距离的趋势发展,机车设备作业强度越来越大,传统维护理念与技术手段已经很难充分满足现代化的运行需要。齿轮箱漏油现象是机车检修过程中常见的问题,形成机理复杂多变,涵盖了材料工程,机械设计,工艺制造等众多学科,有必要在理论与实践两个维度上开展深入研究。

一、HXD1 交流机车齿轮箱漏油问题的重要性分析

(一) 齿轮磨损加剧风险

HXD1 交流机车的齿轮箱使用了螺旋锥齿轮的传动方式,确保润滑油的充足供应是保证齿轮副正常啮合的关键。

HXD1 型机车齿轮箱出现漏油故障后,润滑油量的不足使齿轮齿面之间油膜厚度骤减,本来在流体润滑下啮合副变为边界润滑乃至干摩擦。该润滑条件劣化使 HXD1 型交流机车齿轮齿面发生直接接触的可能性大大增加,齿面之间摩擦系数由正常运行时的 0.01-0.03 剧增到 0.15 以上。摩擦力显著增加引发了 HXD1 型机车齿面材料粘着磨损与磨粒磨损以及高接触应力下齿面微凸体塑性变形与剪切断裂等缺陷,大量金属磨屑的形成进一步强化了磨削作用,使齿轮的精度等级降低,最终危及机车的安全行驶。

(二) 轴承温升异常危害

HXD1 型交流机车齿轮箱圆锥滚子轴承主要靠足够润滑油降温润滑,漏油故障打破了其正常热平衡状态。在润滑油供给不充分的情况下,轴承滚动体和内外圈滚道摩擦生热不能有效散去,造成 HXD1 型机车轴承运行温度急剧攀升。当轴承的温度从正常工作状态下的 60-80°C 增加到 120°C 或更高时,轴承钢的硬度开始明显减少,这导致了原先耐磨的滚动体表面出现了软化的情况^[1]。动车组轴承保持架物料在高温环境下会产生热膨胀变形现象,使保持架-滚动体

配合间隙变小,运转阻力增加,发热量增加。连续高温作用使HXD1型机车轴承内润滑脂氧化变质而丧失了其具有的润滑性能又加重了轴承的磨损程度。轴承温度高于 150°C 后,动车组轴承钢金相组织开始出现不可逆变化现象,轴承承载能力大幅下降,很容易诱发轴承抱死或者压碎等重大失效。

(三)运营经济损失评估

HXD1型交流机车齿轮箱发生漏油故障导致非计划停机,给铁路运输企业带来了重大经济损失。当单台HXD1机车因齿轮箱的漏油问题需要紧急处理时,它的平均停机时间是8—12小时。在这段时间里,机车不能完成常规的牵引工作,这直接影响了其运输效率。根据朔黄铁路年3.7亿吨的运输能力,如果停机12小时,这将造成相当大的损失。在齿轮箱出现严重的漏油问题并需要返回维修基地进行大规模维修的情况下,HXD1机车的停机时间被延长到超过72小时,这不仅导致了直接的运输收益损失,还要配置备用机车代替,加大机车调度成本及人员配置成本

(四)环境污染影响分析

HXD1型交流机车齿轮箱因漏油故障而发生润滑油泄漏,给铁路沿线生态环境带来了持久性的污染危害。齿轮箱用工业齿轮油中含有各种重金属添加剂及有机化合物等,一旦漏入土壤会造成土壤微生物群落结构的严重破坏。HXD1型机车远距离作业时,漏出润滑油沿铁路线路不断分散,污染范围可延长几十公里,污染土壤自然修复周期可达10—15年。神华铁路沿线大多属于生态脆弱地区,润滑油中所含芳香烃化合物及重金属离子在雨水冲刷作用下渗入地下水系统中,造成局部水源二次污染^[2]。更严重的是HXD1型机车齿轮箱润滑油漏出将抑制沿线植被正常发育,造成铁路防护林带内大面积植物枯死,打破原有生态平衡。

二、HXD1交流机车齿轮箱漏油故障机理深度分析

(一)密封圈老化失效

HXD1型交流机车变速箱输入轴端面为丁腈橡胶材质骨架油封结构,密封圈长期处于高温运行环境中会产生分子链断裂交联反应。齿轮箱的工作温度一般保持在 $90\text{--}110\text{C}$ 的区间,这种持续的温度变化导致HXD1机车密封圈的橡胶材料逐步丧失其弹性,使得原先柔软的密封边缘变得更加坚硬和脆弱。变硬的密封圈不能和旋转轴表面产生有效接触密封,轴面和密封圈间产生细小缝隙,润滑油就开始慢慢地从缝隙处渗出来。动车组频繁启停及变负荷作业时,轴向及径向振动使密封圈磨损加剧,密封唇口对轴面贴合度也进一步变差。密封圈服役18个月以上时,HXD1型机车橡胶材料分子结构不可逆改变,密封圈龟裂及局部剥落,完全失去密封功能使齿轮箱润滑油漏油严重并形成漏油故障。

(二)螺栓松动渗油

HXD1型交流机车齿轮箱上盖板和箱体结合面之间通过M12高强度螺栓联接,螺栓预紧力衰减是造成结合面出现渗油现象的重要因素。机车牵引重载列车时引起的剧烈振动及冲击载荷给螺栓连接带来了重复动态应力,该交变载荷使HXD1型机车螺栓预紧力呈逐步下降趋势。当螺栓的预紧力从最初装配时的标准数值 $280\text{N}\cdot\text{m}$ 降至 $200\text{N}\cdot\text{m}$ 或更低时,上盖与箱体间的密封垫片会受到不足的压力,从而无法有效地封闭结合面上的细微空隙。动车组齿轮箱内润滑油受齿轮高速运转所产生压力的影响开始由松动螺栓四周结合面缝隙向外浸润。温度变化使这一松动现象进一步恶化;HXD1型机车齿轮箱冷热循环时螺栓材料热胀冷缩效应使螺纹副咬合紧度减小,使螺栓连接可靠性不断降低,最后形成显著漏油通道造成润滑油损失严重^[3]。

(三)通气孔堵塞漏油

HXD1型交流机车齿轮箱上方设有通气装置以平衡箱体内外压力差异,堵塞通气孔会损害压力平衡系统正常工作。齿轮箱高速运转时,齿轮搅油与轴承摩擦会产生大量的热,使箱体内空气温度上升而产生热膨胀现象,平时多余空气从通气孔排出。HXD1型机车在粉尘环境下长时间运行后,煤粉和沙土等细微颗粒会逐步沉积到通气孔内,并形成一层密实的堵塞层,阻碍空气的流通。在通气孔被堵塞之后,动车组齿轮箱内热膨胀所产生的多余气体不能得到及时排放,使得箱内压力不断升高,在内压大于 0.05MPa 的情况下,高压气体开始撞击各密封部位,寻求泄压通道。HXD1型机车齿轮箱中高压气体在密封圈与结合面密封垫片之间形成较强的反向压力迫使润滑油由原来密封较好的地方向外涌出,形成了压力驱动型漏油失效,泄漏量高达正常渗油水平。

(四)箱体裂纹泄漏

HXD1型交流机车齿轮箱体为球墨铸铁材料,长期受交变载荷的影响,应力集中处易出现疲劳裂纹。齿轮箱体在HXD1型机车频繁启动及制动过程中,轴承座圆角过渡带因其几何形状发生突变而形成了显著应力集中,该区所受应力幅值大于材料疲劳强度极限。在机车经历多次载荷循环的影响下,微观裂纹逐步扩大,从最初的 $0.1\text{--}0.2\text{mm}$ 逐渐演变为具有贯穿性的宏观裂缝。裂纹长度超过 5mm 后,HXD1型机车齿轮箱体结构完整性遭到破坏,裂纹成了润滑油外泄的直接渠道。箱体内润滑油受重力、内压等综合因素影响,沿裂缝缝隙不断向外漏油,呈线状或面状油迹状。动车组裂纹泄漏隐蔽性高,发展迅速,一旦产生贯穿性裂缝则泄漏量剧增,对齿轮箱正常润滑功能造成严重威胁。

三、HXD1交流机车齿轮箱漏油故障综合处理措施

(一)密封件更换工艺

HXD1型交流机车齿轮箱密封圈材质的更新是解决其老化失效的关键步骤,用氟橡胶材质密封圈代替原丁腈橡胶

密封圈可明显提高其耐高温性能。氟橡胶密封圈在 120° C 高温环境下仍能保持良好的弹性和密封性能,有效延长使用寿命至 30 个月以上。HXD1 型机车密封件换料时,轴颈表面清洁处理非常关键,需采用专用清洗剂彻底去除旧密封圈上残留胶质、油垢等杂物,以保证轴颈表面粗糙度在 Ra1.6 μm 以内。机车新装密封圈须经预处理后再将密封唇口涂上特殊润滑脂以免装船时损坏唇口。在安装过程中使用特殊的压装工具来保证密封圈和轴颈的同心度和压装深度,并严格执行技术标准。HXD1 型机车密封件在更换后需经过 48 小时试运转验证以监控密封部位是否漏油及温度变化以保证密封效果满足技术要求。

(二) 螺栓紧固规范

HXD1 型交流电动车组变速箱螺栓预紧力的标准化控制是避免结合面渗油现象发生的核心手段,扭矩-转角复合紧固法可保证螺栓连接可靠性。HXD1 机车齿轮箱上盖螺栓的紧固扭矩被设定为 $280 \pm 10\text{N} \cdot \text{m}$,并且在紧固过程中严格遵循对角交叉的顺序,以防止局部应力集中导致密封垫片变形不均匀。机车的螺栓紧固过程被划分为三个不同的步骤:首先是初拧扭矩达到标准值的 30%,接着是复拧扭矩达到标准值的 70%,最后在达到标准扭矩值之后再行 60° 的角度转动。该阶段紧固方法使密封垫片与结合面完全贴合,排除了微观不平度的影响。在 HXD1 机车齿轮箱的螺栓连接完成之后,有必要建立一个定期的检查机制。每行驶 1000 公里后,需要重新检查螺栓的扭矩,一旦发现扭矩下降超过 15%,应立刻重新进行紧固。机车螺栓选材为 12.9 级高强度螺栓并与厌氧胶螺纹锁固结合,在振动环境中有效地防止了螺栓松动^[1]。

(三) 油液监测技术

HXD1 型交流机车齿轮箱油液光谱分析技术能有效地检测出由于通气孔堵塞导致润滑油品质发生异常改变,并及时发现可能漏油的危险。HXD1 型机车齿轮箱润滑油铁元素含量对其内部磨损状态具有重要的评判意义,铁元素含量高于 200ppm,说明齿轮或者轴承已经出现了异常磨损现象,需马上对通气系统运行情况进行检查。机车的油液监测系统能够通过周期性的采样和分析,准确地识别润滑油中的水分和酸度的变化,特别是当水分含量超出 0.1%或酸度超过 2mgKOH/g 的情况下,表明箱体密封性能降低或通气孔阻塞

引起的内压不正常。在 HXD1 型机车齿轮箱上加装在线油液监测传感器对润滑油粘度,温度及污染度等重要参数进行实时监测,并在监测数据偏离正常值范围后系统会自动发出报警信号。机车油液监测数据同机车运行里程之间建立了相应的关系,并形成了趋势分析的图表,对预防性维护计划的制订及通气系统清洁周期的确定提供了科学依据。

(四) 应急密封修复

HXD1 型交流机车齿轮箱体开裂漏油后,环氧树脂复合材料可以为应急封堵提供一种快捷高效的解决方案。HXD1 型机车箱体开裂长度不超过 10mm,用双组分环氧胶封堵修补,材料凝固后在铸铁基体上形成了稳固的化学键合作用,抗剪强度可达到 25MPa 以上。机车在应急修复作业时,须对裂纹表面进行全面脱脂除锈,并采用角磨机对裂纹两侧分别延伸 5mm 以内的表面进行磨光,以保证环氧胶和基体粘接牢固。HXD1 机车使用的环氧胶调配比例严格遵循 1:1 的原则,经过均匀搅拌后,在 20 分钟之内完成了涂覆工作,确保涂层的厚度维持在 2—3mm 之间。机车在紧急修复完毕后,必须让其静置 24 小时以确保完全固化,并在固化过程中避免产生振动和温度的剧烈变化。修复部位经 72 小时试验验证证实无渗漏现象后,方可进入正常运行,临时修复有效时间半年。

结束语

HXD1 型交流机车齿轮箱漏油故障是影响重载铁路运输安全运行的关键性技术问题,系统化地构建解决方案对于提高机车整体运行可靠性有重要价值。通过对故障机理的分析及有针对性的处理措施的制订,为同类机车的检修实践提供技术支持。今后要进一步强化智能化监测技术的运用,促进以大数据与人工智能为核心的故障预测模型发展,由被动维修转向主动预防。与此同时,在新材料科学与先进制造工艺的推动下,要积极寻求性能更加优异的密封材料与更加精密的加工工艺,从而在设计源头上提高齿轮箱密封的可靠性。建立跨地区、跨部门故障信息共享平台并形成协同攻关技术创新体系将促进我国机车制造与维护技术迈向更高境界。

参考文献

- [1]林耀,何勇,马学涛.(HXD1)交流电力机车最高级修(C6修)工艺及智能检修流水线方案研究[J/OL].铁道标准设计,1-9[2026-03-13].
- [2]韩东虎.(HXD1)电力机车牵引电机软风道优化设计与分析[J].内蒙古科技与经济,2021,(10):107-109+121.
- [3]高永强.“”电力机车关键系统及部件故障诊断专家系统[J].控制与信息技术,2020,(03):97-102.
- [4]沈红海.交流机车故障停车原因分析及改进措施[J].科技创新与应用,2019,(08):126-127.

作者简介:王飞(1985.5-)男,河北隆尧人,本科,机车钳工,研究方向:机车检修。