

矿用自卸卡车制动控制阀失效机理及改进措施研究

孙 利

国能准能集团有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘 要：矿用自卸卡车制动控制阀是制动系统的核心元件，其可靠性直接关系矿山运输安全。矿山恶劣工况下，泄漏、卡滞、响应异常等失效问题频发。本文基于失效数据统计分析，系统研究了三类主要失效模式的机理：油液污染与密封老化是泄漏的主因，颗粒卡滞与磨损是卡滞的核心机理，弹簧衰减与黏温特性是响应异常的根源。从材料优化、结构设计、制造工艺、装配调试及维护保养五个维度提出了针对性改进措施，可为制动控制阀可靠性提升提供理论依据。

关键词：矿用自卸卡车；制动控制阀；失效机理；改进措施

引言：矿用自卸卡车是露天矿山运输的核心装备，单台载重可达400吨，制动系统安全冗余要求极高。制动控制阀作为制动压力调节的关键元件，其工作状态直接影响制动响应速度与制动力分配。现场统计表明，制动系统故障中与控制阀相关的占比超过35%，严重威胁行车安全并造成巨额停机损失。当前对制动控制阀失效的研究多集中于单一故障模式，缺乏系统性机理分析与全链条改进措施。本文立足矿山实际，系统揭示制动控制阀失效机理，提出针对性改进方案，为提升矿用自卸卡车制动安全性提供技术支撑。

1 矿用自卸卡车制动控制阀概述

1.1 制动控制阀的结构与工作原理

制动控制阀是矿用自卸卡车制动系统的核心控制元件，通常采用串联双腔或比例控制结构。其主要由阀体、阀芯、复位弹簧、密封件、调节螺杆及进出油口组成。串联双腔制动阀通过踏板机械推杆推动上腔阀芯，建立压力后液压油推动下腔阀芯，实现双回路独立控制，确保单回路失效时另一回路仍能提供制动力。电液比例制动阀则通过比例电磁铁将电信号转换为阀芯位移，实现制动压力的连续线性调节，具有响应快、控制精度高的特点。阀芯与阀体间的配合间隙通常为5-8 μm ，通过阀芯的轴向移动控制油口的开启与关闭，从而调节输出压力。该结构对油液清洁度、零件精度及密封可靠性均有极高要求^[1]。

1.2 制动控制阀的工作环境与性能要求

矿用自卸卡车制动控制阀服役环境极为恶劣。工作压力高达10-20MPa，日均制动操作频次超过500次，且矿山路面颠簸导致阀内元件承受持续振动与冲击。环境温度跨度大，从北方冬季的-40 $^{\circ}\text{C}$ 到发动机舱附近的80 $^{\circ}\text{C}$ 以上，伴随大量粉尘、泥水侵入风险。液压油长期处于高温氧化

状态，污染度常在NAS 10级以上，远高于阀件要求的NAS 7级。性能要求方面，制动控制阀必须具备快速响应（建压时间 $\leq 0.3\text{s}$ ）、精确调压（压力控制误差 $\leq 3\%$ ）、良好密封（内外泄漏量低于规定限值）及长期可靠性（MTBF $\geq 5000\text{h}$ ）。此外，还需具备抗污染能力与低温适应性，以适应矿山复杂工况的全天候作业需求。

2 矿用自卸卡车制动控制阀失效模式分析

2.1 常见失效模式分类

基于矿山现场维修记录与故障统计，制动控制阀失效模式可归纳为四类。第一，泄漏失效，包括内部泄漏（阀芯与阀体间隙过大导致压力建立缓慢）和外部泄漏（密封老化、接合面渗油），占比约38%。第二，卡滞失效，表现为阀芯在阀体内无法正常移动，导致制动抱死或完全无制动，占比约27%。第三，响应异常失效，包括制动响应延迟（建压时间超0.5s）和制动力不足/过猛，占比约22%。第四，其他失效，如弹簧疲劳断裂、调节螺杆松动导致压力漂移、电磁铁烧损等，占比约13%。各类失效模式往往相互关联，例如油液污染既可导致阀芯卡滞，也可加速阀芯磨损引发内泄漏，单一故障可能触发连锁反应^[2]。

2.2 失效数据收集与统计分析

对某大型露天矿近三年120台矿用自卸卡车的制动系统故障数据进行统计分析，共记录制动控制阀相关故障186次。按车型分，100-150吨级矿卡故障率最高（0.42次/车·年），200吨级以上次之（0.31次/车·年），与使用频率和维护水平相关。按运行时间分布，0-2000h为磨合期，故障以装配问题为主；2000-8000h为稳定期，故障率较低；8000h后进入耗损期，密封老化、弹簧疲劳导致的故障显著上升。季节分布显示，冬季（12-2月）卡滞类故障占比达全年同类故障的67%，与低温下水分结冰及油液

黏度过高直接相关。油液清洁度检测表明,故障车辆液压油污染度平均达NAS 11级,远超允许上限NAS 8级。

2.3 典型失效案例分析

案例一:某100吨级矿卡行驶中制动突然失效,检查发现制动控制阀阀芯卡滞在关闭位置。拆解发现阀芯表面有大量纵向划痕,配合间隙由设计 $6\mu\text{m}$ 扩大至 $15\mu\text{m}$,污染物为粒径 $10\sim 30\mu\text{m}$ 的铁系颗粒。分析认为,液压油污染度超标(NAS 12级),颗粒侵入间隙后反复划伤阀芯,最终导致卡滞。案例二:某150吨级矿卡冬季早晨启动后制动抱死无法起步,经检测为阀芯冻结。拆检发现阀体内存在明显水分,在 -35℃ 环境下结冰导致阀芯无法回位。追溯原因为空气干燥器失效,压缩空气中水分进入制动系统。案例三:某220吨级矿卡制动偏软,踏板行程过半仍无足够制动力。测试发现内泄漏过大,拆检确认密封圈硬化断裂,液压油从高压腔直接泄入回油腔。密封材料为丁腈橡胶,长期高温(实测阀体温度 85℃)导致老化失效。

3 矿用自卸卡车制动控制阀失效机理研究

3.1 泄漏失效机理

泄漏失效分为内部泄漏与外部泄漏。内部泄漏主要源于阀芯与阀体配合间隙的超差。正常间隙为 $5\sim 8\mu\text{m}$,当油液中的硬质颗粒(石英砂、金属磨屑)通过间隙时,颗粒对阀芯表面产生切削作用,形成纵向划痕。划痕深度超过镀铬层后,基体材料暴露,磨损速率急剧加快,间隙逐步扩大至 $15\sim 20\mu\text{m}$ 。此时高压腔液压油直接通过间隙泄漏至回油腔或低压腔,导致输出压力不足、建压缓慢。外部泄漏则以密封失效为主。密封圈承受高压油液冲击(最大 20MPa)与高温(80℃ 以上)双重作用,丁腈橡胶在高温下发生热氧老化,分子链断裂导致弹性丧失,密封预紧力下降。当压力波动时,密封圈被挤入沟槽间隙发生“挤出”破坏。此外,装配时密封圈的剪切、扭转及表面划伤也是早期泄漏的常见原因。

3.2 卡滞失效机理

卡滞失效的机理可分为颗粒卡滞、磨损卡滞及低温卡滞三类。颗粒卡滞是最主要的形式:当粒径介于阀芯与阀体间隙($5\sim 8\mu\text{m}$)之间的污染物颗粒进入配合面时,颗粒在液压力作用下被压入间隙,产生额外摩擦阻力。多颗颗粒累积效应导致阀芯运动阻力超过液压力和弹簧力之和,阀芯无法移动。磨损卡滞是颗粒卡滞的后续发展阶段:被压入间隙的颗粒在阀芯往复运动中不断研磨配合表面,形成磨损凹坑与毛刺,毛刺进一步增加运动阻力^[1]。低温卡滞主要发生在冬季矿山:制动系统压缩空气中含有的水分在反复加压降温过程中析出并积聚于

阀内, -30℃ 以下时结冰膨胀,冰晶填充间隙并产生粘接力,使阀芯冻结在某一位置,导致制动无法解除或无法建立。

3.3 响应异常失效机理

响应异常表现为制动滞后或制动力非线性。制动滞后的根源在于压力建立时间延长。内泄漏增大后,输入流量需先补偿泄漏损失,剩余流量才能推动制动轮缸活塞,导致建压时间由正常 0.2 秒延长至 0.5 秒以上。油液黏度也是关键因素,低温条件下油液黏度指数增大,流经阀内节流孔时流动阻力增加,同样造成响应迟缓。弹簧衰减是制动力不足的另一重要机理,复位弹簧长期处于压缩状态并承受交变应力,发生应力松弛后预紧力下降,阀芯开启压力降低,输出压力随之减小。制动力突跳(非线性)则多由阀芯表面划伤导致运动阻力不均引起,当液压力克服静摩擦瞬间,阀芯突然窜动,造成压力阶跃式变化,驾驶员感觉制动“发贼”、难以平稳控制。

3.4 其他失效机理

弹簧疲劳断裂是偶发但后果严重的失效模式。阀内复位弹簧在每分钟数次至数十次的动作频次下承受高频交变应力,若弹簧材质存在微裂纹或表面脱碳等缺陷,裂纹在循环应力下扩展最终导致断裂。断裂后阀芯无法回位,制动灯常亮或完全无制动。电磁铁烧损主要见于电液比例阀,原因包括:线圈持续通电时间过长(超过设计占空比)、散热不良导致温升超过绝缘等级、供电电压波动超出允许范围。调节螺杆松动由振动引起,矿用自卸卡车在颠簸路面行驶时,阀体承受持续宽频振动,若锁紧装置失效,螺杆逐渐旋出或旋入,导致弹簧预紧力改变,制动压力设定值漂移,严重影响制动稳定性。振动还可能导致内部零件微动磨损,加速老化进程。

4 矿用自卸卡车制动控制阀改进措施研究

4.1 材料选择与优化

阀芯材料由 40Cr 合金钢升级为 $9\text{Cr}18$ 不锈钢或 440C 高碳不锈钢,铬含量 $12\sim 18\%$,兼具高硬度(HRC $58\sim 62$)与优异耐腐蚀性能。表面处理采用DLC(类金刚石)涂层,厚度 $2\sim 3\mu\text{m}$,摩擦系数低至 0.1 以下,硬度达HRC 70 以上,耐磨性较镀铬层提升 5 倍。密封材料根据工况分区选用:常规工况采用HNBR(氢化丁腈橡胶),使用温度 $-40\sim 150\text{℃}$,耐老化性能是普通丁腈橡胶的 3 倍;高温区域采用氟橡胶(FKM)。复位弹簧选用 50CrVA 或 $60\text{Si}2\text{MnA}$ 合金弹簧钢,增加喷丸强化处理,疲劳寿命较普通弹簧提高 2 倍。阀体材料采用球墨铸铁QT $600\sim 3$ 替代普通灰铸铁,强度提高 50% ,且避免了灰铸铁的显微缩松缺陷。

4.2 结构设计改进

优化阀芯与阀体配合间隙,从5-8 μm 调整至8-12 μm ,在保证密封性的前提下提高抗污染能力。增加阀芯导向长度,由原1.5倍阀芯直径增加至2.5倍,提高阀芯运动直线度,降低倾斜卡滞风险。密封沟槽采用组合密封结构(导向环+主密封圈),导向环承受径向力,防止主密封圈被挤入间隙。弹簧设计采用不等螺距结构,消除特定频率下的弹簧谐振。电液比例阀增加冗余电磁铁设计,单一电磁铁失效时备用电磁铁可维持基本制动功能。阀体增设隔热板安装接口,隔离发动机热辐射。集成压力传感器与阀芯位置传感器,实现制动压力与阀芯状态的实时监测与故障自诊断^[4]。

4.3 制造工艺改进

关键零件加工采用精密磨削与珩磨工艺,阀芯圆度 $\leq 0.8\mu\text{m}$,表面粗糙度 $R_a \leq 0.1\mu\text{m}$ 。热处理采用真空淬火工艺,避免表面氧化脱碳,硬度均匀性控制在 $\pm 1\text{HRC}$ 。镀铬改用微裂纹硬铬工艺,裂纹密度30-60条/mm,提高储油能力与耐磨性。DLC涂层采用物理气相沉积(PVD)工艺,确保涂层与基体的结合强度。铸件采用树脂砂铸造替代粘土砂铸造,减少气孔与夹渣缺陷。阀体流道采用高压水射流去毛刺,保证流道光滑无残留切屑。批量生产中推行清洁度抽检制度,每批次抽样检测残留颗粒物重量,目标 $\leq 5\text{mg/kg}$ 。

4.4 装配与调试工艺改进

装配环境由普通车间改造为十万级洁净间,恒温恒湿($22\pm 2^\circ\text{C}$, $\text{RH} \leq 50\%$),减少空气中悬浮颗粒。零部件装配前采用超声波清洗(频率40kHz,时间15分钟)并烘干。密封圈安装使用专用安装工具,避免金属锐边划伤;装配前涂抹润滑脂,防止启动干摩擦。阀芯装配采用导向套辅助推入,避免偏斜刮伤阀体。紧固件采用扭矩扳手定扭矩拧紧并涂刷力矩标记,螺杆锁紧增设防松垫圈或螺纹锁固胶。调试环节建立标准化测试流程:低压密封性测试(2MPa保压3分钟无泄漏)、高压密封性测试(20MPa保压3分钟)、压力特性曲线测试(输

入-输出关系符合设计要求)、响应时间测试(建压时间 $\leq 0.3\text{s}$)。

4.5 维护与保养策略优化

建立油液定期检测制度,每季度取样检测污染度(目标NAS 7级)、水分含量($\leq 0.05\%$)、黏度变化(偏差 $\leq 15\%$)。滤芯更换周期由500h缩短至300h,或依据压差指示器报警更换。制动系统排气操作标准化,使用专用排气装置避免空气残留。冬季来临前检查空气干燥器功能并更换干燥剂,添加制动系统防冻剂。制动控制阀分解检修周期定为2000h或12个月,维修包(密封圈、弹簧、垫片)到期强制更换。建立制动阀维修档案,记录故障现象、维修内容及使用时长。驾驶员培训中增加制动阀基础知识与异常判断技能,当觉察制动异常(踏板行程异常、制动异响、反应迟钝)时及时上报。推行“定期检查+状态监测”相结合的预测性维护模式,基于压力传感器数据趋势分析提前预警潜在失效。

结束语

矿用自卸卡车制动控制阀失效是矿山运输安全的重要隐患。本文揭示了泄漏、卡滞、响应异常三类主要失效机理:油液污染与密封老化是泄漏的核心成因,颗粒侵入与低温结冰是卡滞的主导因素,弹簧衰减与黏温特性是响应异常的关键根源。从材料优化、结构设计、制造工艺、装配调试及维护保养五个维度提出了改进措施。后续研究应聚焦智能制动阀自诊断技术与大数据剩余寿命预测方法,进一步提升制动系统主动安全保障能力。

参考文献

- [1]王彬彬.大吨位矿用自卸卡车电动轮故障分析及检修技术[J].矿业装备, 2025(12): 61-63.
- [2]郭俊义.大型矿用自卸卡车无触点式接触器设计[J].机械制造与自动化, 2022,51(4):220-223.
- [3]蔡晓,王鑫,丁新,等.矿用自卸卡车发电机集电环故障分析[J].矿山机械, 2024, 52(1):15-19.
- [4]王勃.矿用自卸卡车转向蓄能器及蓄能器过滤装置的技术改造[J].露天采矿技术,2024,39(3):89-92.