

露天矿新能源无人驾驶矿卡动力电池故障成因分析与预防性维护对策

王仕均

中国水利水电第七工程局有限公司 四川 成都 611130

摘 要：露天矿复杂多变的作业环境与高强度作业模式，极易诱发无人驾驶矿卡动力电池各类运行故障，制约设备稳定作业效能。本文系统梳理矿区动力电池故障的四大核心类型，从环境工况、运行作业、配套设备及运维管理四个维度，逐层拆解故障诱发机理。结合现场运维实际，剖析当前动力电池维护模式适配性差、监测体系不完善、人员专业能力不足等现存短板，针对性提出动态运维模式搭建、专项养护体系完善、全维度监测机制健全及运维能力提质等优化路径，可为矿区动力电池长效安全运维提供技术参考。

关键词：露天矿；无人驾驶矿卡；动力电池；故障成因；预防性维护

引言：新能源无人驾驶矿卡已成为露天矿智能化开采的核心装备，动力电池作为设备动力核心，运行稳定性直接关乎矿区作业效率与生产安全。露天矿多温差、高粉尘、强震动的特殊工况，区别于常规车辆运行场景，持续对动力电池结构与电化学性能造成损耗。设备长期重载运行、频繁充放电切换，叠加配套设备适配偏差与运维管控疏漏，导致电池故障频发、使用寿命缩减。立足矿区特殊作业条件，厘清电池故障诱因、优化预防性维护体系，是保障智能矿卡持续稳定作业的关键。

1 露天矿无人驾驶矿卡动力电池运行工况与常见故障类型

1.1 露天矿复杂作业工况特征

露天矿开采作业完全暴露于自然环境中，无封闭遮挡条件，各类气候与场地干扰因素贯穿矿卡全作业周期^[1]。矿区温差波动极大，高低温交替变化会直接影响电池内部电化学反应活性，加速电芯老化损耗。矿区空气湿度、矿尘浓度较高，加之作业路面凹凸不平，车辆全程持续承受机械颠簸与震动冲击，长期作用于动力电池本体结构。目前矿区主流的新能源无人驾驶宽体自卸车吨位负荷极大，额定载重不低于 70 吨，长期处于重载运输状态，往返采掘点与排土场的坡道、起伏路段，让电池持续保持高负荷输出状态。同时，无人驾驶系统自主控制车辆启停、变速、爬坡、制动等工况切换，作业频次密集、功率切换频繁，整体作业工况具备高负荷、强波动、多干扰的特征，持续加剧动力电池运行损耗，极易诱发各类运行故障。

1.2 动力电池结构及工作原理

露天矿无人驾驶矿卡动力电池以模块化组合为核心结构，整体由若干单体电芯、电池模组、防护外壳、内部线路及配套连接部件组成。各单体电芯按照固定串并联方式集成组装，形成满足矿卡高压、大电流供电需求的电池模组。多组电池模组整合为完整电池包，可为车辆行驶、车载设备运转提供稳定电力支撑。电池日常运行分为充电与放电两种工作状态。充电阶段依托专属充电设备补充电能，内部完成化学能储存转化。放电阶段释放电能，将化学能转化为机械能，支撑矿卡完成运输作业。各部件分工明确且相互配合，单体电芯负责能量存储与释放，线路负责电力传输，外壳与防护结构负责抵御外部损伤，整套结构保障动力电池持续稳定运转。

1.3 动力电池典型故障分类

结合矿卡动力电池运行状态与结构组成，可将常见故障划分为四大核心类型。电池本体故障集中于电芯层级，多表现为电芯性能衰减、内部结构损伤、能量存储能力下降等问题，会直接改变电池供电稳定性。电池管理系统故障体现在智能调控环节，系统数据采集失真、功能调控失效、运行逻辑紊乱等问题，都会干扰电池正常充放电节奏。连接组件故障涵盖线束、接口、固定固件等部件，长期震动会引发部件松动、磨损、接触不良，造成电力传输中断或供电异常。热管理配套故障主要指向散热、温控相关附属结构，散热效率不足、温控调节失效会引发电池局部积热、温度异常，逐步引发各类电池运行隐患。不同故障类型的诱发源头与异常表现各不相同，可作为故障溯源与维护工作的重要依据。

2 露天矿无人驾驶矿卡动力电池核心故障成因剖析

2.1 环境因素引发的电池故障

露天矿作业场景完全暴露于自然环境中, 各类环境条件持续对动力电池产生侵蚀与损耗。矿区昼夜温差、季节温差跨度较大, 温度反复升降会打乱电池内部化学平衡, 弱化电芯活性, 加速内部介质老化。高湿天气会提升空气含水率, 水分侵入电池防护结构内部, 降低线路绝缘性能, 催生漏电、氧化等问题。矿区空气中悬浮大量细微矿尘, 颗粒物会堆积在电池外壳与散热缝隙中, 堵塞散热通道, 阻碍热量散发。矿区路面平整度较差, 机械震动贯穿车辆全程作业过程。持续震动会磨损密封结构, 造成密封防护能力下降, 还会松动内部线路与固定结构, 引发结构错位、接触不良等各类电池故障隐患。

2.2 作业运行因素引发的电池故障

露天矿无人驾驶矿卡拥有固定且高强度的作业模式, 长期特殊运行状态会持续损耗动力电池综合性能。车辆需要反复完成起步、制动、怠速流程, 作业频次密集且工况切换频繁。瞬时大功率放电会加重电芯工作负荷, 加剧内部极化反应, 造成电芯性能逐步下降。整车长期承载大吨位物料行驶, 持续重载状态会让电池长期维持高倍率输出, 压缩电池有效循环寿命。无人驾驶行驶模式存在匀速巡航与变速爬坡的交替切换特征, 电芯输出功率频繁波动。长期不均衡的放电状态会拉大单体电芯之间的性能差距, 破坏电芯整体一致性, 让电池模组整体工作状态持续劣化。

2.3 设备配套因素引发的电池故障

动力电池稳定运行依赖整套车载配套设备协同支撑, 各类配套设备工作异常都会诱发电池故障。电池管理程序参数与电池实际工作特性存在偏差, 会造成电压、电流、温度数据采集失真, 无法精准调控充放电状态, 造成电芯长期处于不合理工作区间^[2]。热管理设备散热功率不足、温控调节失灵, 会让电池工作热量无法及时散出, 积累高温损伤内部结构。充电设备输出参数与电池适配度不足, 充电流程管控不精准, 会造成过充、虚充等问题, 持续损伤电池内部介质。线路接插件长期处于复杂工况下会出现老化、氧化、松动问题, 电力传输稳定性下降, 引发电池工作状态异常。

2.4 运维管理因素引发的电池故障

运维管理工作的疏漏与不规范, 是动力电池各类隐性故障爆发的主要人为诱因。日常运维工作存在巡检覆盖不全的问题, 部分隐蔽线路、密封接口、散热缝隙等

点位长期缺少检查, 微小损耗问题无法及时发现。维护人员操作流程不标准, 养护、检修工序随意简化, 会对电池结构与线路造成人为损伤。电池运行状态管控存在滞后性, 缺少常态化状态监测机制, 无法及时捕捉电芯性能衰减、设备运行偏移等隐性问题。粗放的运维模式会持续积累电池运行隐患, 逐步转化为显性故障, 大幅缩短动力电池使用寿命。

3 露天矿无人驾驶矿卡动力电池现有维护存在的问题

3.1 维护模式适配性不足

露天矿新能源无人驾驶矿卡的动力电池拥有独特损耗规律, 传统定期维护模式难以适配设备运行需求。固定化的维护周期按照统一时间节点开展检修工作, 无法匹配矿区作业强度波动带来的电池损耗差异。标准化的维护流程面向通用设备设计, 没有针对无人矿卡重载波动、高频工况切换、长期露天作业的电池损耗特点制定专属方案。传统维护以故障出现后的检修整改为主要方式, 整体运维具备明显的被动属性。运维工作无法提前干预电池运行过程中的隐性损耗, 各类微小隐患持续累积, 逐步发展为影响设备运行的显性故障。

3.2 专项维护内容不完善

当前动力电池运维体系的专项养护内容存在较多漏洞, 覆盖范围无法满足设备长效运行要求。电芯状态监测仅聚焦基础电性参数, 缺少对电芯一致性、老化程度、容量衰减的精细化检测流程。热管理组件养护工作较为粗放, 日常仅开展简单除尘作业, 忽视散热效率检测、温控部件性能校验等关键内容。线路与电池密封结构的精细化检查长期缺位, 细微密封老化、接口缝隙隐患难以及时排查。无人矿卡智能化运行对应的电池参数校准工作频次不足, 运行参数长期偏离最优标准, 持续影响动力电池的工作稳定性。

3.3 运维监测管控不全面

无人化作业模式对电池监测与数据管控提出更高标准, 现有运维监测体系存在明显短板。电池运行监测指标较为单一, 大多采集基础温度、电压数据, 忽略单体电芯差异、线路负载变化等关键监测维度。监测工作仅完成基础数据采集记录, 未建立完善的隐患预判机制, 难以提前识别电池性能衰减、运行状态偏移等潜在风险。电池运行数据缺少系统化整理与深度分析手段, 海量运行数据无法转化为运维优化依据, 大幅降低预防性运维工作的科学性与精准度。

3.4 运维人员专项能力不足

新能源动力电池与无人驾驶智能设备的融合应用,

更新了矿区运维工作的技术标准。多数运维人员熟悉传统矿用设备养护流程,对动力电池电化学特性、智能控制系统运行原理认知浅薄。人员缺少电池精细化养护的实操经验,标准化检修流程落实不到位,作业质量参差不齐。面对无人矿卡电池参数异常、系统匹配偏差等新型问题,隐患识别与问题溯源能力薄弱。专业能力的欠缺,会制约运维工作质量,无法满足动力电池精细化、常态化的养护管控需求。

4 露天矿无人驾驶矿卡动力电池预防性维护优化对策

4.1 构建工况适配的动态维护模式

传统固定周期维护模式无法适配露天矿复杂多变的作业场景,需要搭建贴合无人矿卡运行特征的动态维护体系。结合矿区季节环境变化、场地作业强度差异,调整动力电池维护间隔与检修重点^[3]。根据矿卡重载运行时长、爬坡作业频次、作业班次密度等实际工况,划分不同损耗等级对应的维护周期。摒弃被动检修的运维思维,围绕电池性能衰减规律开展前置化运维工作。依托矿卡运行工况的动态变化调整检修内容,针对高温高尘作业阶段侧重防护结构与散热性能检修,针对高强度作业阶段侧重电芯状态与线路稳定性排查,让维护工作完全适配电池真实损耗状态。

4.2 完善动力电池专项维护内容体系

针对现有专项维护的漏洞与缺失,全方位细化动力电池精细化养护内容。制定电芯一致性常态化养护流程,定期完成单体电芯性能检测与均衡调控,缩小模组内部电芯性能差异,延缓电池整体性能衰减。落实电池外壳、密封胶条、接线端口的常态化养护,及时更换老化密封部件,清除缝隙堆积矿尘,阻断潮气与颗粒物侵入设备内部。制定热管理系统专属养护流程,定期检查散热管路通畅性、温控部件灵敏度,清理散热组件积尘,保障热量高效散出。规范充放电线路与接插件检修标准,重点排查线路磨损、接口松动、氧化锈蚀等问题,保障电力传输稳定。

4.3 健全全时段运行监测运维机制

依托无人矿卡智能车载系统,升级动力电池全维度、全时段监测运维体系。拓展电池运行监测维度,持续采集电池温度、工作电压、工作电流、单体电芯状态

等核心参数,完整覆盖电池运行关键指标。搭建常态化数据筛查机制,对参数异常波动进行精准识别,捕捉电池隐性故障苗头。建立分级隐患处置流程,针对轻微参数偏移开展及时校准,针对重度异常状态启动停机检修流程。落实监测数据常态化归档梳理工作,依托长期运行数据总结电池损耗规律,为维护方案迭代优化提供可靠依据,实现隐患问题前置管控。

4.4 强化专项运维能力保障建设

专业的运维团队是动力电池预防性维护工作落地的核心支撑,需要系统性提升运维人员专项作业能力。搭建分层分类的技能培训体系,重点讲解动力电池结构原理、无人矿卡电池工况特性、各类故障诱发机理等专业知识。聚焦实操环节开展专项训练,规范电芯养护、线路检修、设备校准、隐患排查等标准化作业流程。针对无人矿卡电池运维常见难点、高频隐患开展专项实训,提升人员故障识别与处置能力。统一矿区动力电池运维作业标准,严控每一项养护、检修工序质量,全面提升新能源无人矿卡电池运维工作的规范化与专业化水平。

结束语

露天矿复杂工况下动力电池故障的滋生,是环境损耗、设备运行、配套支撑及运维管控多重因素叠加的结果。常态化运行损耗与隐蔽性隐患积累,是造成电池性能衰减、故障频发的核心原因。优化适配矿区工况的预防性维护体系,补齐传统运维模式的各项短板,能够有效延缓动力电池性能衰退,降低设备故障发生率。精细化、动态化、智能化的运维方式,可切实提升无人矿卡动力电池运行可靠性,助力露天矿智能化、高效化安全生产推进。

参考文献

- [1] 郑明芽,郑晓东,王薇薇,等.基于探索性数据分析的电动矿卡动力电池故障影响因素研究[J].煤矿机电,2025,46(1):91-95.
- [2] 彭倩,付泽,杨晨瀚,等.基于FTA-FBN的电动矿卡动力电池故障诊断[J].中国工程机械学报,2024,22(5):667-672.
- [3] 熊学涛,张艳辉,黄崇亨,等.动态信息熵电动卡车锂电池故障检测[J].电子测量与仪器学报,2025,39(12):1-9.