

露天煤矿剥离运行作业与电气设备风险防控对策研究

尤昊¹, 于天阳¹, 于晓莉²

1. 扎鲁特旗扎哈淖尔煤业有限公司, 内蒙古 通辽 029200

2. 内蒙古霍煤鸿骏铝电有限责任公司, 内蒙古 通辽 029200

DOI:10.61369/EPTSM.2025070003

摘要: 露天煤矿剥离运行作业在煤炭开采当中是值得前置的关键环节, 它涉及到了爆破、采装、运输、排土等多工序协同, 且比较依赖大型电气设备的支撑。尽管其作业安全与电气设备稳定性会直接决定煤矿生产效率与人员安全, 可当前在露天煤矿剥离作业中, 因地质条件复杂、工序衔接不当、设备老化及操作不规范等问题, 依然容易引发坍塌、机械碰撞、电气短路等安全事故, 严重地威胁着作业人员生命与煤矿财产安全。本文便系统地梳理了剥离运行作业的核心风险(与电气设备的关键风险, 并从技术优化、管理升级、人员培训这几个方面提出了对应的防控对策, 希望能够推动煤炭行业安全生产的高质量发展。

关键词: 露天煤矿; 剥离运行作业; 电气设备; 风险防控; 边坡稳定性; 设备状态监测; 安全管理

Research on Risk Prevention and Control Measures for Stripping Operation and Electrical Equipment in Open-Pit Coal Mines

You Hao¹, Yu Tianyang¹, Yu Xiaoli²

1. Zha Lu Te Qi Zha Naoer Coal Industry Co., Ltd. Tongliao, Inner Mongolia 029200

2. Inner Mongolia Huomei Hongjun Aluminum and Electric Co., Ltd. Tongliao, Inner Mongolia 029200

Abstract: The stripping operation of open-pit coal mines is a crucial step in coal mining, which involves the coordination of multiple processes such as blasting, mining, transportation, and soil dumping, and relies heavily on the support of large electrical equipment. Although the safety of operations and the stability of electrical equipment directly determine the production efficiency and personnel safety of coal mines, the current stripping operations in open-pit coal mines are still prone to safety accidents such as collapse, mechanical collisions, and electrical short circuits due to complex geological conditions, improper process connections, equipment aging, and non-standard operations, seriously threatening the lives of workers and the safety of coal mine property. This article systematically summarizes the core risks of stripping operation operations (including key risks of electrical equipment), and proposes corresponding prevention and control measures from the aspects of technical optimization, management upgrading, and personnel training, hoping to promote the high-quality development of safety production in the coal industry.

Keywords: open-pit coal mine; peel off the running job; electrical equipment; risk prevention and control; slope stability; equipment status monitoring; safety management

引言

露天煤矿作为我国煤炭能源供应的重要基地, 其开采流程包括了剥离与采矿两大核心环节, 其中剥离运行作业是指通过爆破、采装、运输等工序, 清除煤层上方的表土、岩层等覆盖物, 目的是为后续的煤炭开采创造条件。当前随着我国煤炭行业朝向“智能化、大型化”地转型, 露天煤矿剥离作业的机械化、电气化程度得到了显著地提升, 而大型电动挖掘机(如20m³以上斗容)、电动轮自卸卡车(载重100t以上)、高压供电系统(110kV及以上)等电气设备均已成为了剥离作业的核心装备, 其运行稳定性影响着剥离作业的效率。但因为露天煤矿剥离作业环境恶劣, 需要长期面临高温、严寒、粉尘、潮湿及强电磁干扰, 加之部分煤矿存在“重生产、轻安全”的理念, 所以对剥离作业风险预判不足、电气设备维护不到位, 极其容易导致安全事故的发生。而这些事故不仅会造成巨大的经济损失, 更暴露了露天煤矿在剥离运行作业风险管控与电气设备安全管理中的短板。基于此, 本文针对露天煤矿剥离运行作业的特殊性与电气设备的运行特性, 系统地分析了作业与设备的核心风险点, 并以此构建了多维度的防控对策体系。

作者简介: 尤昊(1991.11-), 赤峰巴林左旗人, 本科, 工程师, 研究方向: 露天煤矿生产剥离运行、电气设备使用安全。

一、露天煤矿剥离运行作业的核心风险分析

露天煤矿剥离运行作业涉及到了爆破、采装、运输、排土四大核心工序，各工序之间衔接非常紧密，且受到地质条件、环境因素、人为操作的多重影响，以此形成了多类型、高风险的安全隐患^[1]。结合实际情况，可将其归纳为地质风险、工序协同风险、机械操作风险三种类型。

（一）地质风险

地质风险是剥离作业的基础性风险，它主要源于露天煤矿边坡的不稳定性与地质构造的复杂性，具体表现为边坡坍塌、滑坡、泥石流等事故隐患。因为露天煤矿剥离作业需形成台阶式边坡，通常边坡高度达到30~50m，但部分深凹露天矿边坡高度会超过100m。而边坡的稳定性取决于岩层物理力学性质、水文条件与边坡角设计参数。若前期对于地质地勘察不全面，未准确地掌握岩层断层、软弱夹层分布，又或者是边坡角设计过大（超过岩层稳定临界角），那么在长期雨水浸泡、爆破震动的作用之下，就会导致边坡岩层失稳。

（二）工序协同风险

当剥离作业种各环节衔接不当时便会引发工序协同风险，当中涉及了爆破与采装、采装与运输、运输与排土的协同配合，核心问题在于“时间差控制”与“空间冲突规避”。一般爆破作业后需等待烟尘消散、边坡稳定才能开展采装作业，如果间隔时间过短（少于30分钟），就会导致采装设备进入未稳定区域，进而引发坍塌事故^[2]。反之，间隔时间过长（超过2小时）则会导致采装设备闲置，使得作业效率被降低。对于采装与运输环节的协同风险，主要体现在“车铲匹配”失衡，即挖掘机采装能力与自卸卡车运输能力不匹配。通常卡车数量不足时，挖掘机采装后就需等待运输，致使设备的利用率下降；但若卡车数量过多，将会导致采装点周边车辆拥堵，以此增加了车辆碰撞的风险。

（三）机械操作风险

机械操作风险主要源于剥离作业大型设备（如挖掘机、自卸卡车、推土机）的操作不规范与设备故障，其中人员操作因素占比超过了60%。由于露天煤矿剥离作业设备的体积大、操作复杂，要求驾驶员具备专业技能与应急处置能力。如若驾驶员存在违章操作，便会引发设备损坏与安全事故^[3]。此外，设备长期高负荷运行导致的机械部件磨损（如挖掘机斗杆销轴磨损、自卸卡车制动系统磨损）也会加剧操作风险，尤其是日常维护不到位以及磨损部件未及时进行更换时，设备在作业中发生故障的几率会有大幅度的增加。

二、露天煤矿剥离作业电气设备的关键风险分析

实践当中，露天煤矿剥离作业依赖的电气设备涵盖“开采设备、供电设备、控制设备”三大类，而这些设备长期处于恶劣的作业环境之中，面临着绝缘失效风险、过载短路风险、防雷接地风险、高温老化风险等多种类型的风险，且各类风险相互关联，极易引发设备故障甚至火灾、触电事故。

（一）绝缘失效风

绝缘失效风险是电气设备最核心的风险之一，它出现的主要原因时设备绝缘材料在恶劣环境下的性能劣化，该部分涉及了高压电缆、电机绕组、开关柜绝缘件等关键部件。具体来说：露天煤矿剥离作业的现场粉尘浓度高（日均粉尘浓度可达10~20mg/m³）、湿度大（雨季相对湿度超过85%），粉尘附着在绝缘材料表面便会降低其绝缘电阻，潮湿环境则会加速绝缘材料的水解老化，同时设备运行中的振动还会导致绝缘材料出现裂纹，进一步地破坏了其绝缘性能。而高压电缆的绝缘失效风险也尤为突出，因为剥离作业中电缆需随设备移动频繁地拖拽，因此会导致电缆的外皮破损，此时粉尘、雨水侵入后就会破坏绝缘层，继而引发电缆相间短路或对地短路^[4]。

（二）过载短路风险

过载短路风险主要由“设备负荷异常”与“电气回路故障”引发，究其原因是供电系统、设备驱动系统的电流异常升高。若在露天煤矿剥离作业中，挖掘机的采装过载、自卸卡车超载行驶，均会导致设备的电机负荷急剧增加，一旦定子电流超过额定值的1.5倍以上，就会引发电机过载。若供电系统的变压器、高压开关柜长期处于满负荷或超负荷运行状态，将会导致电气元件过热，从而加速了元件地老化，甚至会引发烧毁故障^[5]。短路风险则多由“绝缘失效”“异物侵入”“操作失误”导致，比如高压开关柜内进入金属异物会造成相间短路、操作人员误操作会引发操作短路。因为短路电流可达额定电流的10~20倍，此时巨大的电流会产生电弧，然后烧毁电气元件，甚至还会引发开关柜的爆炸。

（三）防雷接地风险

当露天煤矿电气设备在恶劣天气下进行作业时，防雷接地的风险就会急剧增加^[6]。因剥离作业区域大多数为开阔的场地，设备与建构筑物便成为了雷击目标，且接地系统失效还会导致雷击电流无法得到有效地泄放，随之引发设备损坏与人员触电。实践中露天煤矿的防雷系统包括“接闪器、引下线、接地装置”三个部分，如果接闪器的保护范围不足，雷击时设备便会直接遭受直击雷；而引下线连接松动、接地装置腐蚀等情况，会导致接地电阻地升高，那么雷击电流无法快速地导入大地，就会在设备外壳与接地极之间形成高电压，进而引发设备绝缘击穿，同时人员接触带电外壳还会发生触电事故。此外雷电感应也会引发电气设备风险，因为雷击产生的电磁感应会在电缆线路中产生感应过电压，其过电压值可达10~50kV，远远超过了设备绝缘的耐受电压（通常为6~10kV），因此会导致电缆、电机、控制设备的绝缘击穿，最终引发故障。

（四）防雷接地风险

防雷接地风险是电气设备在长期运行与恶劣环境下的慢性风险，它主要源于“环境高温”与“设备自身发热”的双重作用，会加速电气元件与绝缘材料的老化失效。展开如下：露天煤矿剥离作业区域在夏季最高气温可达40℃以上，设备若长时间在高温环境下运行，就会导致电机、变压器、变频器等设备的温升超过额定值，加速了绕组绝缘材料的热老化，并缩短了设备的使用寿命。

命。同时高温环境还会导致电气元件的参数漂移，影响着设备的控制精度，甚至会引发控制回路故障。不仅如此，设备自身发热也是高温老化的重要诱因，向高压开关柜内的断路器、隔离开关在运行中会产生接触电阻发热，一旦接触不良，接触电阻就会从 0.01Ω 升高至 0.1Ω 以上，发热功率随之显著地增加，接着便会导致开关柜内温度升高至 60°C 以上，加速了柜内绝缘材料的老化^[7]。

三、露天煤矿剥离运行作业与电气设备风险防控对策

(一) 技术优化

技术优化需要聚焦于剥离作业地质风险预判、工序协同智能化、电气设备状态监测三大领域，即通过技术创新来提升风险防控的精准性与时效性。就剥离作业的地质风险防控进行阐述，建议采用“三维地质建模+实时监测”技术，来实现边坡稳定性的动态预判^[8]。在前期通过无人机航测、钻孔勘探获取地质数据，再利用FLAC3D、3DEC等数值模拟软件构建露天矿三维地质模型，基于此分析不同边坡角、爆破参数下的边坡稳定系数，然后确定出最优的边坡设计方案；作业的过程中，可以在边坡关键位置安装GNSS位移监测站（精度达 $\pm 2\text{mm}$ ）、测斜仪（监测岩层深层位移）与雨量传感器，用于实时地采集边坡位移、降雨量数据，接着通过物联网平台传输至监控中心，当位移速率超过 0.5mm/d 或降雨量超过 50mm/24h 时，系统会自动地发出预警信号，且及时地停止边坡下方作业。在此基础上，还应该优化爆破技术参数，可以采用“毫秒延时起爆+控制装药量”的方式，达到降低爆破震动对边坡影响的效果。原理是根据岩层性质调整单孔装药量（硬岩单孔装药量控制在 $50\text{--}80\text{kg}$ ，软岩控制在 $20\text{--}30\text{kg}$ ），再采用毫秒延时雷管来实现分段起爆，以此将爆破震动速度控制在 10cm/s 以下，避免了破坏边坡岩层的完整性。

(二) 管理升级

管理升级作为风险防控的制度保障，应当围绕着剥离作业全流程与电气设备全生命周期，建立起“责任明确、流程规范、考核严格”的管理体系，从而解决“管理松散、责任缺失”的问题。以电气设备的全生命周期管理为切入点，需要构建“采购—安装—使用—维护—报废”的全流程管理制度^[9]。其中采购环节

要严格地执行“资质审核+技术选型”标准，并优先选择具有煤矿安全标志（MA）的设备；安装环节则要由专业的施工队伍按规范进行施工，在验收时还要进行绝缘电阻测试、接地电阻测试等10项检测，只有检测合格才能投入使用；而使用环节需要制定设备的操作规程，在规程中明确操作人员需经培训合格才能持证上岗，且严禁超载、超温、超压运行；在维护环节要建立“日常巡检+定期检修”机制，通常日常巡检由设备维护人员每日进行，主要检查设备的外观、温度、振动等情况，定期检修应该按“季度小修、年度大修”执行；最后是报废环节，应制定设备报废标准，如电机绝缘电阻持续低于 $5\text{M}\Omega$ 、变压器铁芯损耗超过额定值20%的设备，且经技术部门评估确认无法修复后，才能按程序进行报废。

(三) 人员培训

在风险防控当中人员是执行主体，因此需通过系统化地培训来提升作业人员与设备维护人员的安全意识、操作技能与应急处置能力，以此解决“技能不足、应急乏力”的问题。一方面是在培训内容地设计上，要构建“理论+实操+应急”三维课程体系。即理论课程需涵盖露天煤矿剥离作业风险知识、电气设备工作原理、安全法律法规与管理制度，且采用“线上微课+线下集中授课”结合的方式，务必确保人员掌握基础的理论知识^[10]。实操培训则要聚焦于“规范操作+设备维护”技能，尽量在煤矿实训基地为员工搭建模拟的作业场景。而应急培训的重点是提升员工“事故处置+协同配合”能力，为此需要定期地组织应急演练，特别是针对剥离作业常见事故与电气设备事故，要制定专项的应急预案。

四、结语

本文通过系统地分析剥离作业的地质、工序协同、机械操作风险与电气设备的绝缘失效、过载短路、防雷接地、高温老化风险，提出了相对的对策但随着露天煤矿向“智能化、深部化”发展，剥离作业面临的地质条件会变得更复杂，所以未来还需进一步地研究智能化技术在风险防控中的应用，促使风险预判的精准性与应急处置的智能化水平得到提升。

参考文献

- [1] 王洪超.关于露天煤矿电气设备的检修与维护研究[J/OL].中国科技期刊数据库 工业 A,2022(3)[2022-03-01].<https://www.cnvip.com/doc/journal/2010228877610091011>.
- [2] 陈诚.露天煤矿剥离运输设备的管理与维护分析[J/OL].中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术,2022(12)[2022-12-01].<https://www.cnvip.com/doc/journal/2010228838219153920>.
- [3] 路明辉.露天煤矿电气设备的检修和维护[J/OL].中国科技期刊数据库 工业 A,2024(6)[2024-06-01].<https://www.cnvip.com/doc/journal/2010228830457169409>.
- [4] 王鹏飞.露天煤矿剥离运输设备的安全管理与维护[J].内蒙古科技与经济,2011,(16):105-106.
- [5] 刘辉.露天煤矿电气设备的检修与维护研究[J].电子世界,2017,(07):177-177.DOI:10.19353/j.cnki.dzsj.2017.07.143.
- [6] 黄美琴.让“多管闲事”成为习惯——准能集团黑岱沟露天煤矿运输队剥离运行一班安全联防互保侧记[J].班组天地,2017,(10):45-45.
- [7] 肖运振.露天煤矿电气设备的检修与维护研究[J].内蒙古煤炭经济,2022,(05):44-46.
- [8] 吴泽.关于露天煤矿电气设备检修和维护的探索[J].矿业装备,2022,(03):281-283.
- [9] 齐振磊.露天煤矿电气设备的检修与维护研究[J].内蒙古煤炭经济,2023,(23):37-39.
- [10] 史俊伟.煤矿冲击地压事故风险演化评估与防控研究[D].安徽省：安徽理工大学,2021.DOI:10.26918/d.cnki.ghngc.2021.000452.