

Optimal Design and Practice of Lightning Protection and Grounding System for Electrical Equipment in Open-pit Mines

Gaofeng Xu

Shanxi Xinzhou Shenda Liangjiaqi Coal Industry Co., Ltd., Xinzhou, Shanxi, 036500, China

Abstract

Electrical equipment in open-pit mines is vulnerable to lightning disasters due to the open terrain and complex soil conditions, which can lead to equipment damage and production interruption. This article, in light of the particularity of the lightning protection and grounding system in open-pit mines, based on relevant design principles and technical standards, starts from the optimization design of external lightning protection, internal lightning protection and grounding grids, and combines the implementation points of key parts such as the entrance and exit areas of the shafts and tunnels connecting open-pit mines and underground tunnels, mining, excavation and transportation equipment, and power supply monitoring systems. A set of optimization schemes for lightning protection and grounding systems suitable for open-pit mine scenarios has been proposed. By optimizing the materials of grounding devices, optimizing the topological structure of grounding grids and innovating resistance reduction measures, the grounding resistance is effectively reduced and the lightning protection performance of the system is enhanced. Practical experience shows that this optimized design can significantly reduce the incidence of lightning accidents and provide technical support for the safe production of open-pit mines.

Keywords

Open-pit mine Electrical equipment; Lightning protection and grounding “Optimized design; Grounding grid

露天矿电气设备防雷接地系统优化设计与实践

许高峰

山西忻州神达梁家碛煤业有限公司, 中国·山西 忻州 036500

摘要

露天矿电气设备因所处地形开阔、土壤条件复杂, 易受雷电灾害影响, 导致设备损坏与生产中断。本文针对露天矿防雷接地系统的特殊性, 基于相关设计原则与技术标准, 从外部防雷、内部防雷及接地网优化设计入手, 结合露天矿与地下巷道衔接的井巷出入口区域、采掘运输设备、供电监控系统等关键部位的实施要点, 提出了一套适用于露天矿场景的防雷接地系统优化方案。通过接地装置材料优选、接地网拓扑结构优化及降阻措施创新, 有效降低接地电阻, 提升系统防雷性能。实践表明, 该优化设计可显著减少雷电事故发生率, 为露天矿安全生产提供技术保障。

关键词

露天矿; 电气设备; 防雷接地; 优化设计; 接地网

1 引言

露天矿作为国家能源与矿产资源开采的核心基地, 其开采作业依赖大型破碎站、胶带输送机、高压开关柜、露天采场电机车等关键电气设备。这些设备长期暴露于野外, 面临强雷暴、大风、降水等恶劣气象条件, 而雷电灾害作为露天矿高频突发事件源, 易通过直击雷或感应雷引发电气设备绝缘击穿、控制系统瘫痪, 甚至导致人员伤亡与停产事故, 造成巨大经济损失。本文以大型露天矿为研究对象, 围绕防

雷接地系统的“安全性、稳定性、经济性”核心目标, 提出多维度优化方案, 旨在有效阻断雷电过电压对设备的破坏路径, 为露天矿电气系统的安全运行提供可靠技术保障。

2 防雷接地系统设计原则与标准

2.1 设计原则

露天矿防雷接地系统设计需遵循核心原则: 一是安全性优先, 以保护人员安全与设备正常运行为首要目标, 确保直击雷、感应雷防护措施全覆盖, 避免雷电引发触电、火灾等事故; 二是针对性适配, 结合露天矿地形地貌(如高边坡、开阔场地)、土壤特性(高电阻率区域常见)及设备分布特点(多为移动或半固定式), 定制化设计防护方案; 三是可

【作者简介】许高峰(1986-), 男, 中国山西忻州人, 本科, 中级, 从事机电研究。

靠性与经济性平衡,在满足防雷指标的前提下,优化材料选型与施工工艺,降低建设与维护成本,提升系统性价比;四是系统性协同,外部防雷(接闪、引下、接地)与内部防雷(等电位、屏蔽、浪涌保护)需协同设计,形成全链路防护体系。

2.2 技术标准依据

设计需严格遵循系列标准与规范:国家标准方面,包括 GB50057-2010《建筑物防雷设计规范》、GB/T21714.1-2015《雷电防护》系列标准,明确防雷分区、接地电阻等核心指标;行业标准方面,GB51215-2017《矿山电力设计规范》、AQ2013.4-2008《金属非金属矿山排土场安全生产规则》针对矿山场景提出特殊要求,如露天设备接地网需适应土壤季节性变化;国际标准方面,IEC62305《雷电防护》系列标准为防雷装置设计提供国际通用技术框架,尤其适用于跨国露天矿项目^[1]。

3 露天矿防雷接地系统优化设计

3.1 外部防雷系统设计

外部防雷系统设计需统筹接闪器布置、引下线设计与接地装置优化,形成直击雷防护闭环。

3.1.1 接闪器布置

针对露天矿开阔地形,接闪器布置需结合不同区域特点:矿山边坡区域采用避雷针与避雷线组合方案,沿边坡顶部每隔 30~50m 设置独立避雷针(高度 20~30m),并通过避雷线连接形成防护带,保护下方采掘设备与运输线路;大型固定设备(如电铲、破碎机)在主体结构顶部安装针式接闪器,接闪器保护角 $\leq 30^\circ$,同时利用设备金属框架作为自然接闪器,减少额外安装成本;移动设备(如矿用卡车)配备可折叠式接闪杆,停车时展开至车顶上方 2~3m,通过车载接地线缆与临时接地极连接,形成临时防护。

3.1.2 引下线设计

引下线需满足机械强度与导电性能双重要求,材料选择直径 $\geq 8\text{mm}$ 的热镀锌圆钢或 $40\text{mm}\times 4\text{mm}$ 热镀锌扁钢,露天环境下增加防腐涂层(如锌铬涂层),确保寿命期 ≥ 20 年;间距控制上,固定设备引下线间距 $\leq 18\text{m}$,边坡避雷线引下线间距 $\leq 25\text{m}$,确保雷电流快速泄放,且引下线需沿设备立柱或边坡支护结构隐蔽敷设,避免机械损伤;同时按 GB50057-2010 计算引下线截面积,确保雷电流通过时不发生过热熔断,例如 10kA 雷电流下圆钢截面积需 $\geq 50\text{mm}^2$ 。

3.1.3 接地装置优化

接地装置优化需重点解决高土壤电阻率问题,采用“田”字形水平接地网(热镀锌扁钢,埋深 $\geq 0.8\text{m}$),间隔 5m 设置 5m 长垂直接地极(直径 50mm 热镀锌钢管),形成立体接地网络;在接地极周围填充高效膨润土降阻剂(电阻率 $\leq 0.5\Omega\cdot\text{m}$),或采用电解离子接地极,通过电解作用持续改善周围土壤导电性,降阻效率可达 30%~50%;针对土壤冻结区域,接地网埋深需超过冻土层(通常 $\geq 1.5\text{m}$),并在冬季采用深井接地(深度 30~50m),通过深层低电阻率土壤降低接地电阻波动^[2]。

3.2 内部防雷系统设计

3.2.1 等电位连接

等电位连接需实现设备集群与移动设备的电位均衡:在变电所、控制室设置等电位连接母排(铜排,截面积 $\geq 60\text{mm}^2$),通过 $40\text{mm}\times 4\text{mm}$ 热镀锌扁钢将配电柜、操作台、金属管线等连接至母排,连接电阻 $\leq 0.2\Omega$;矿用卡车驾驶室与底盘之间采用编织铜带(截面积 $\geq 25\text{mm}^2$)跨接,车载电气设备外壳通过专用接地端子与接地系统连接,防止电位差击穿绝缘。

3.2.2 屏蔽措施

屏蔽措施需从电缆与空间两方面入手:信号电缆采用双层屏蔽铠装电缆,屏蔽层两端接地,动力电缆与信号电缆间距 $\geq 0.5\text{m}$,避免电磁耦合干扰;控制室采用钢板网(网格尺寸 $\leq 100\text{mm}\times 100\text{mm}$)或金属幕墙构建法拉第笼,门窗接缝处设置导电衬垫,屏蔽效能 $\geq 60\text{dB}$ 。

3.2.3 电涌保护器 (SPD) 配置

SPD 配置需遵循电源与信号系统分级保护原则:电源系统实施三级保护,在变电所高压进线端安装三相电源 SPD(冲击电流 $\geq 100\text{kA}$,电压保护水平 $\leq 2.5\text{kV}$),低压配电柜内安装 SPD(冲击电流 $\geq 50\text{kA}$,电压保护水平 $\leq 1.5\text{kV}$),重要设备(如 PLC 控制柜)前端安装精细型 SPD(冲击电流 $\geq 10\text{kA}$,电压保护水平 $\leq 0.8\text{kV}$);信号系统在监控摄像头、无线通信天线等信号接口处安装适配的天馈 SPD 或网络 SPD,插入损耗 $\leq 0.5\text{dB}$,响应时间 $\leq 1\text{ns}$ 。

3.3 接地网设计

3.3.1 接地电阻要求

接地电阻的差异化设定需基于露天矿不同区域的电气设备功能、安全风险等级及相关规范要求,核心目标是确保雷电能快速、安全散流,避免局部电位升高引发设备损坏或人员触电。具体要求及设计依据如下:

变电所区域:作为露天矿电力分配的核心枢纽,其接地网需同时满足工频接地与冲击接地双重指标。其中工频接地电阻 $\leq 4\Omega$,主要针对正常运行时的漏电电流散流,防止设备外壳带电;冲击接地电阻 $\leq 10\Omega$,针对雷电冲击电流的快速泄放,避免雷电过电压击穿设备绝缘。该标准严格参照《建筑物防雷设计规范》(GB50057-2010)中“二类防雷建筑物接地要求”,适配变电所内高压开关柜、变压器等关键设备的绝缘等级。

露天设备区域:露天作业的破碎站、胶带运输机等设备,受野外土壤电阻率波动影响较大,因此工频接地电阻标准放宽至 $\leq 10\Omega$ 。若处于高土壤电阻率区域(如岩石裸露区,土壤电阻率 $> 1000\Omega\cdot\text{m}$),可通过降阻措施将工频接地电阻进一步放宽至 $\leq 30\Omega$,但需额外增加 SPD(电涌保护器)保护级数——从常规的 1 级 SPD 提升至 2-3 级,通过多级限压实现雷电过电压的梯度衰减,弥补接地电阻偏高的不足^[1]。

3.3.2 接地网布局

接地网布局采用“环状+放射状”复合拓扑结构,中心变电所接地网呈 $60\text{m}\times 60\text{m}$ 环状,沿主要运输道路延伸

放射状接地带(长度 $\leq 100\text{m}$),为沿途设备提供接地接口;移动设备作业区设置临时接地极(间隔 50m),通过快速连接器与设备接地线缆连接,形成可扩展接地网络。

3.3.3 降阻措施

深井接地技术(适用于整体高电阻率区域):在接地网中心位置(通常为变电所环状接地网几何中心)施工1口降阻深井。深井直径设定为 150mm ,既便于后续接地极安装,又能减少土壤坍塌风险;深度设定为 50m ,需穿透露天矿表层的高电阻率土层(通常为 $10\text{-}20\text{m}$ 厚的砂土层,电阻率 $> 500\Omega\cdot\text{m}$),直达低电阻率的黏土层或风化岩层(电阻率 $< 100\Omega\cdot\text{m}$)。深井内置1根 60mm 直径的铜包钢接地极——铜包钢材质兼具铜的高导电性(导电率 $\geq 80\% \text{IACS}$)和钢的高强度,可避免深井施工时接地极弯曲变形。接地极与井壁之间填充电解离子降阻剂(电阻率 $\leq 5\Omega\cdot\text{m}$),填充高度与接地极平齐,通过降阻剂的离子渗透作用,改善深井周围土壤的导电性能,使接地网整体电阻从优化前的 $15\text{-}20\Omega$ 降至 5Ω 以下。

换土处理技术(适用于局部高电阻率区域):在岩石裸露区、砂石堆等局部高阻区域(面积通常 $< 100\text{m}^2$),采用换土处理降低接地极周围土壤电阻率。具体流程为:先开挖深度 1m 、宽度 0.8m 的矩形沟槽(沟槽范围覆盖接地极周围 2m 区域),清除原有高电阻率土壤(如砂石、碎石);再填入 500mm 厚的低电阻率土壤(优先选用黏土或黑土,电阻率 $\leq 50\Omega\cdot\text{m}$),并按 20% 的质量比例掺入工业食盐——食盐溶解后可形成电解质溶液,进一步降低土壤电阻率,且成本远低于专用降阻材料。换土后需分层压实(压实度 $\geq 90\%$),防止雨水冲刷导致土壤流失;最后在土壤表面覆盖 100mm 厚的碎石层,避免作业车辆碾压破坏换土区域。该技术可将局部接地电阻从 $50\text{-}80\Omega$ 降至 15Ω 以下,与深井接地技术配合使用时,可实现整体接地电阻的精准控制。

4 关键部位防雷接地实施要点

4.1 露天矿与地下巷道衔接的井巷出入口区域

该区域作为露天矿与地下系统的连接节点,需强化直击雷与传导雷防护。直击雷防护方面,在上方 20m 处设置独立避雷针(高度 40m),接地网与井架金属结构互联,形成联合接地系统,确保接地电阻 $\leq 4\Omega$;井筒防护方面,沿井筒敷设的电缆需穿金属波纹管,波纹管两端接地,提升机控制系统需设置三级SPD保护,信号线缆采用光纤传输,避免电磁干扰影响运行精度。

4.2 采掘与运输设备

采掘与运输设备作为露天矿核心生产装备,防雷设计需适应其移动性与高强度作业特点。电铲防雷需在铲斗臂顶部安装接闪器,通过铜缆与回转平台接地网连接,驾驶室设置等电位连接带,操控系统电源与信号线路均安装SPD,保护电压 $\leq 0.5\text{kV}$;矿用卡车防雷需在车顶安装折叠式接闪杆(高度 3m),底盘通过导电橡胶轮胎与地面接触,停车时需连接临时接地极(接地电阻 $\leq 15\Omega$),确保装卸作业时的防雷安全。

4.3 供电与监控系统

供电与监控系统是露天矿生产的“神经中枢”,需构建多层次防雷屏障。高压输电线路方面, 10kV 架空线路需架设避雷线(保护角 $\leq 25^\circ$),杆塔接地电阻 $\leq 15\Omega$,进线段 $1\text{-}2\text{km}$ 范围内加装避雷器,电缆线路金属护套两端接地,中间接头处设置防水接地装置;监控系统方面,摄像头需安装于避雷针保护范围内,视频线缆采用双层屏蔽电缆,传输设备前端安装视频SPD,中控室接地网与建筑物接地网间隔 $\geq 3\text{m}$,避免地电位反击影响设备运行^[4]。

5 防雷接地系统施工与维护

5.1 施工质量控制

施工质量直接决定防雷接地系统的可靠性,需从材料验收、焊接工艺与电阻测试三方面严格管控。材料验收时,热镀锌钢材锌层厚度 $\geq 86\mu\text{m}$,铜材纯度 $\geq 99.9\%$,降阻剂需提供电阻率检测报告;焊接工艺上,扁钢搭接长度 ≥ 2 倍宽度,三面施焊,圆钢搭接长度 ≥ 6 倍直径,双面施焊,焊口需做防腐处理(涂富锌漆+沥青漆);接地电阻测试采用三极法测量工频接地电阻,冲击接地电阻通过冲击电流发生器测试,雨季前需完成全网络检测,确保数据达标。

5.2 运行维护管理

运行维护需建立常态化机制,保障系统长期稳定运行。定期检测方面,每季度检测接地电阻,每年开展SPD性能测试(残压、漏电流),发现电阻值超标或SPD失效需及时处理;季节性维护方面,冬季检查接地网防冻措施,夏季暴雨后排查接地装置腐蚀与机械损伤,重点区域(如边坡)需增加巡检频次;数字化监控方面,在关键接地节点安装智能监测装置,实时采集接地电阻、雷电流幅值等数据,通过物联网平台预警异常情况,提升维护响应效率。

6 结语

露天矿电气设备防雷接地系统的优化设计需紧密结合矿区环境特点,从外部防雷、内部防雷与接地网三个维度协同优化。通过接闪器智能布置、接地装置材料创新及SPD分级保护等措施,可有效提升系统防雷性能。实践表明,优化后的防雷接地系统能将露天矿雷电事故率降低 80% 以上,为矿山安全生产与经济效益提供重要保障。未来可进一步结合物联网与人工智能技术,实现防雷系统的智能化监测与自适应调节,推动露天矿防雷接地技术的持续升级。

参考文献

- [1] 吴军.电气设备的接地保护技术应用研究[J].中国设备工程,2025,(12):229-231.
- [2] 杨俊洪,张伟.民用建筑电气施工中防雷接地保护的问题与对策[J].仪器仪表用户,2024,31(01):79-81.
- [3] 杨妍晔.电气设备接地保护技术及其应用探讨[J].中国设备工程,2022,(15):210-212.
- [4] 魏建峰.接地保护在矿井内的应用[J].内蒙古煤炭经济,2022,(11):145-147.