

海拔5200m 高寒矿山梯式接地网设计与降阻技术研究

王雄

西藏巨龙铜业有限公司，西藏 拉萨 850212

DOI:10.61369/ME.2026040015

摘 要： 海拔5200m冻土矿区电力设施接地系统的运行精度有着严格的行业规范，本次工程将接地电阻控制阈值设定为 1Ω 。该指标能够保障电力系统出现单相接地故障时，继电保护装置可精准触发动作，维持电气设备平稳运行，切实保障现场作业人员的人身安全。高海拔高寒矿区地质环境极端恶劣，场地土壤电阻率常年维持在 $4000 \sim 6000\Omega \cdot m$ 的高阻区间，季节性冻土最大埋深可突破1.4m。区域地形地貌特征与厂区既有构筑物布局，大幅压缩接地工程施工空间，造成现场作业范围受限。传统接地施工模式难以适配这类极端冻土工况，低温环境会大幅抬升接地电阻数值，无法满足高寒矿山电力工程的标准化建设要求。

关 键 词： 高海拔矿山；高寒冻土；梯式接地网

Research on the Design of Ladder-Type Grounding Grid and Resistance Reduction Technology for High-Altitude and Cold Mines at 5,200m Above Sea Level

Wang Xiong

Xizang Julong Copper Industry Co., Ltd., Lasa, Xizang 850212

Abstract： Power facilities in permafrost mining areas at an altitude of 5,200 meters are subject to stringent industry standards regarding the operational accuracy of grounding systems, with the grounding resistance control threshold set at 1Ω for this project. This threshold ensures that in the event of a single-phase grounding fault in the power system, the relay protection device can accurately trigger actions, maintaining the stable operation of electrical equipment and effectively safeguarding the personal safety of on-site personnel. The geological environment in high-altitude and cold mining areas is extremely harsh, with soil resistivity consistently remaining in the high-resistance range of 4,000 to 6,000 $\Omega \cdot m$ throughout the year, and the maximum burial depth of seasonal permafrost exceeding 1.4 meters. The regional topography and the layout of existing structures within the plant significantly restrict the construction space for grounding projects, limiting the scope of on-site operations. Traditional grounding construction methods are ill-suited to such extreme permafrost conditions, as low temperatures substantially increase grounding resistance values, failing to meet the standardized construction requirements for power engineering in cold mines.

Keywords： high-altitude mine; cold permafrost; ladder-type grounding grid

海拔5200m高寒矿区独特的地理与气候条件，给接地工程施工落地及系统长期运维带来诸多技术难题。区域土体以冻土、碎石土为主，高电阻率土层分布广泛，整体导电性能远弱于平原及低海拔区域，常规接地结构难以实现故障电流的高效泄放。区域季节性冻土发育特征显著，冬季土层完全冻结后，土体导电性能大幅衰减，接地电阻参数急剧攀升，极端低温环境易引发接地系统整体性能失效。矿区地形构造复杂，生产构筑物排布密集，接地作业可用空间被大幅压缩，无法通过外延大面积接地网的方式提升散流性能。区域昼夜温差悬殊，土层冻融循环频次高，常规接地构件长期服役过程中，易出现冻胀抬升、节点松动、金属腐蚀老化等病害，造成接地系统运行稳定性下降，设备整体服役周期大幅缩短。

一、设计目标与技术路线

（一）工程概况与设计依据

本次工程选址于青藏高原边缘海拔5200m的高寒铜矿矿区，
厂区配置35kV变电站、成套配电装置、集中控制室及各类辅助

供电设施，为矿山开采、物料提升、通风排水等核心生产设备提供持续稳定的电力保障。区域气候严寒，冬季持续时间漫长，全年平均气温偏低，现场勘测数据显示区域最大冻土深度可达1.2~1.4m。场地土体为冻融碎石土，实测土壤电阻率稳定处于 $4000 \sim 6000\Omega \cdot m$ 的高阻区间。矿区生产布局紧凑，接地工程

作业空间极其有限，不具备大面积铺设接地网的施工条件。高海拔区域空气绝缘强度大幅衰减，雷暴活动更为频繁，对接地系统的防雷性能与故障电流泄放能力，提出了更为严苛的建设标准。

（二）技术路线

工程统一采用 1.5 ~ 2m 深层沟槽开挖工艺，穿透季节性冻土层，将接地主体布设至冻深线下方地质稳定、电阻率更低的深层土层，弱化表层高阻冻土对电流散泄的负面作用。梯式搭接钢筋接地网结构的创新应用，依托双扁钢纵向主梁搭配横向钢筋踏步的组合形式，最大化提升接地金属构件的有效散流面积与等效散流半径，在狭小作业空间内实现散流能力的最优配置。选用低温耐受、无腐蚀、性能稳定的石墨基降阻材料，对梯式接地单元实施全方位包裹施工，构建连续均匀的低阻导电包覆层，消除构件与冻土间的接触冰膜，优化界面导电特性。所有金属连接节点均采用满焊工艺施工，严格规范搭接长度标准，焊接作业完成后通过涂刷防腐涂层、缠绕防护带完成双重防腐处理，抵御高寒环境下的电化学腐蚀与冻融损伤，保障接地系统长期导通性能稳定。这套多技术协同的施工体系，可有效突破高寒冻土环境的施工瓶颈，将接地电阻稳定控制在 1Ω 以内，同时满足工程安全性、运行稳定性与结构耐久性的多重建设要求。

二、梯式接地网结构设计

（一）沟槽开挖设计

接地沟槽的开挖深度与断面尺寸，直接关乎接地构件埋设精度与降阻材料包覆效果，是高寒冻土环境下接地系统全年稳定运行的重要保障。结合现场实测 2.3m 最大冻土深度数据，本次施工确定标准化沟槽施工参数。1.5 ~ 2m 的开挖深度，可确保接地构件底部坐落于冻深线周边及下方的稳定土层，规避表层冻土冻结产生的高阻干扰。80cm 的统一沟槽宽度，可满足梯式接地单元居中布设、降阻材料全方位包裹的施工需求。开挖过程中需保证槽底平整顺畅，彻底清理槽内尖锐石块、浮土及各类杂质，防止接地构件与降阻包覆层出现破损。沟槽整体保持顺直规整，为梯式单元平行排布、横向连通组网提供良好施工基础。

（二）梯式接地单元构造设计

梯式接地单元采用双纵梁搭配横向踏步的阶梯式焊接结构，相较于传统单一扁钢接地构件，具备散流面积广、材料贴合度高、抗冻胀性能优异等突出优势。纵向散流主梁选用两根 50mm 规格热镀锌扁铁，平行对称布设，中心间距固定为 50cm。热镀锌工艺可强化构件防腐能力，保障纵向电流传输平稳顺畅。横向连接踏步采用直径不小于 12mm 的变形钢筋，钢筋两端与纵向扁铁实施双面满焊搭接，形成均匀规整的阶梯式散流支撑结构。变形钢筋表面的肋纹可增大与降阻材料的接触面积，强化机械咬合效果，有效提升整体结构的抗冻胀性能。

相邻横向踏步钢筋间距控制在 30 ~ 50cm，均匀排布的结构

形式可保障电流散泄均匀性，规避大间距形成的散流盲区与小间距产生的电流屏蔽效应。场内多组梯式接地单元以 60cm 间距平行布设，单元端部通过同规格热镀锌扁铁横向焊接连通，形成闭合完整的电气导通回路，消除单点结构缺陷引发的接地隐患，提升整体接地网的导通可靠性与散流均匀性。

（三）焊接与防腐设计

高寒冻土环境下，金属构件的焊接质量与防腐处理效果，直接决定接地系统的导通稳定性与服役年限。区域冻融循环频繁、电化学腐蚀作用强烈，施工全过程需严格落实焊接与防腐工艺标准。所有金属连接节点均采用双面满焊工艺，要求焊缝饱满密实，无夹渣、气孔、虚焊等施工缺陷。钢筋与扁铁搭接长度不低于 6 倍钢筋直径，扁铁之间搭接长度不低于 2 倍扁铁宽度，保证连接节点结构牢固，最大限度降低接触电阻。焊接作业完成且构件充分冷却后，及时清除表面焊渣与氧化层，均匀涂刷富锌防腐漆，构建第一道防腐防护体系。防腐漆固化干燥后，缠绕沥青防腐带完成二次防护，隔绝土壤、水分、盐分对金属构件的侵蚀作用。所有接地金属构件统一采用热镀锌材质，规避不同金属接触产生的电化学腐蚀，适配高海拔高湿度、强腐蚀的特殊环境，保障接地系统长期稳定运行。

三、降阻剂选型与施工工艺

（一）降阻剂选型要求

高海拔高寒冻土区域的特殊工况，对降阻材料的低温耐受性、导电稳定性、抗腐蚀性、长效性及环保性提出严苛要求。常规化学降阻剂存在低温失效、易流失、腐蚀性强等缺陷，无法适配本工程复杂工况。本次工程选用物理型长效石墨基降阻剂，各项核心性能指标可完全适配极端高寒施工环境。材料以鳞片石墨作为核心导电介质，导电性能稳定，不受土壤酸碱度、温度大幅波动的干扰。材料冰点低于 -45°C ，矿区极端低温环境下可维持浆体状态，不会出现冻结开裂问题，能够有效隔离接地构件与冻土介质，杜绝冰膜引发的高接触电阻问题。材料整体呈中性，不会对热镀锌扁铁、变形钢筋等金属构件产生腐蚀作用，保障接地结构完整完好。材料物理性能稳定，不溶于水、不易流失，与土壤结合紧密，单次敷设即可实现长期稳定降阻效果。材料不含任何有毒有害物质，契合矿区生态环保建设标准，不会造成土壤与水源污染。

（二）降阻剂施工工艺

本次工程采用全方位包裹式降阻剂施工工艺，让梯式接地单元完全嵌入低阻包覆层内部，构建连续均匀的导电介质体系，最大化释放降阻材料的应用效能。沟槽清理验收合格后，在槽底均匀铺设 10cm 厚石墨基降阻剂垫层，整平压实后为接地单元提供稳定支撑，避免金属构件直接接触碎石土层。将预制完成的梯式接地单元平稳吊装至垫层中心位置，微调构件水平度与垂直度，确

保构件四周预留均匀的包覆空间。位置校准完成后，在接地单元两侧及上部逐层灌注石墨基降阻剂，分层振捣密实，消除内部空洞与缝隙。最终形成厚度30cm、宽度80cm的整体包覆结构，以双根纵向扁铁为中心向两侧均匀延展，实现接地单元360°无死角包裹。降阻剂初步固化后开展分层回填作业，每层回填土厚度控制在30cm以内，逐层夯实压实，严禁重型机械直接碾压接地区域。回填施工完成后恢复场地原貌，完善周边排水设施，规避雨水冲刷、积水浸泡对接地结构与降阻层的破坏。该施工模式可彻底隔离接地构件与高阻冻土，构建全天候稳定的低阻散流通道，有效抑制冬季低温环境下接地电阻的增幅。

四、降阻机理分析

（一）拓展等效散流半径与散流面积

传统裸扁钢接地构件的等效散流半径仅为2.5cm左右，散流覆盖范围有限，高阻土壤环境下故障电流泄放效率偏低。本次设计的梯式接地结构搭配全覆盖降阻剂包覆层，可将系统等效散流半径提升至40cm，散流面积较传统工艺提升数十倍。多组梯式单元平行排布形成的密网结构，可在狭小施工场地内最大化利用散流面积，大幅降低系统整体接地电阻。大范围散流结构可实现故障电流快速扩散，规避局部电位积聚问题，让跨步电压、接触电压始终维持在安全运行区间。

（二）优化介质界面结合效果

横向踏步采用的变形钢筋自带独特肋纹结构，相较于常规光圆钢筋具备显著应用优势。肋纹结构可提升20% ~ 30%的有效接触面积，让金属构件与石墨基降阻介质贴合更为紧密，有效降低界面接触电阻。肋纹与固化后的降阻材料形成机械锁结结构，可抵御冻融循环引发的土层位移，防止接地构件与降阻层脱离、接触电阻增大等问题。均匀分布的横向钢筋可分散电流传输路径，优化电流散泄均匀性，减少局部电流集中引发的高温老化与局部腐蚀病害。

（三）消除低温冰膜的电阻干扰作用

高寒冻土区域冬季低温环境下，接地构件与冻土接触面极易形成高阻冰膜，是接地电阻大幅超标的核心诱因。本次选用的石墨基降阻材料具备优异的低温适配性能，-45℃极端低温下仍可保持柔性浆体状态，能够永久隔离金属接地构件与冻土介质，彻底杜绝冰膜生成。降阻材料导电性能不受季节温度变化与土层冻融状态干扰，全年维持稳定低阻特性，让冬季最不利工况下的接地系统依旧满足1Ω设计标准，实现全季节可靠运行。

五、现场实测与结果分析

（一）测试方案与环境

为全面验证梯式接地网在不同季节、不同冻土深度工况下的

运行性能，本次测试选取施工竣工期（10月）、冬季极寒期（1月）、冻土解冻期（5月）三个典型时段，依托三极法开展多点位接地性能检测。测试所用接地电阻测试仪、电压测试仪、冻土深度检测仪均经过专业校验，设备精度契合国家检测规范。测试点位覆盖接地网中心、边缘、端部等关键区域，涵盖全场不同位置，保障检测数据的全面性与代表性。测试环境温度区间为-30℃ ~ 15℃，冻土深度包含0.5m、1.0m、2.3m三种典型工况，全面模拟矿区全年极端运行环境，确保实测数据真实有效。

（二）接地电阻实测结果

各时段多点位实测接地电阻数据统计如下表所示。

表1 接地电阻实测结果					
测试时段	冻土深度	测量点 1/Ω	测量点 2/Ω	测量点 3/Ω	最大值 /Ω
施工完成期（10月）	0.5m	0.62	0.58	0.71	0.71
冬季最冷月（1月）	2.3m	0.95	0.87	0.98	0.98
次年解冻期（5月）	1.0m	0.68	0.72	0.81	0.81

实测结果表明，三个典型工况下全场接地网所有检测点位的接地电阻数值均控制在1Ω设计阈值以内，完全契合工程建设标准。冬季冻土深度达到最大值2.3m的极端工况中，接地电阻峰值仅为0.98Ω，未出现超标情况，验证了深层敷设结合石墨基降阻包覆工艺的抗冻降阻成效。系统接地参数随土层冻融状态变化仅存在小幅波动，整体数值差值仅为0.4Ω，工况适配性与运行稳定性表现优异。

（三）跨步电压与稳定性测试

跨步电压专项检测数据显示，接地网边缘区域最大跨步电压为116V，低于高海拔环境修正后的150V安全限值，可充分保障现场人员作业安全。系统长效稳定性测试结果表明，72小时满负荷运行状态下，接地电阻参数无明显波动衰减，在-10℃ ~ 50℃高低温交替及电磁干扰环境中，系统性能始终保持稳定。现场抽样开挖检测证实，接地构件焊接节点无腐蚀、松动病害，整体结构未出现冻胀抬升问题，降阻剂包覆层完整密实，结构耐久性与运行可靠性符合设计预期。

（四）与传统方案对比分析

本次梯式接地网搭配石墨基降阻剂的施工方案，与常规水平接地网、传统接地处理工艺开展多维度对比后，综合应用优势十分突出。常规水平接地网受冻土干扰极强，冬季接地电阻普遍超标，难以适配高寒极端工况。传统接地工艺施工占地面积大，降阻效果有限，长期运行稳定性不足。本次优化方案可在狭小施工场地内完成布设，全季节接地参数稳定达标，无明显性能衰减问题，结构抗冻胀、抗腐蚀性性能更强，高度适配高海拔高寒矿区长期运行需求，综合工程应用价值远超传统施工模式。

六、结束语

综上所述，优化后的梯式接地结构，依托双扁钢纵梁搭配变形钢筋踏步的组合形式，配合 1.5 ~ 2m 深层穿冻敷设工艺，可在狭小施工空间内大幅提升接地系统散流面积，将等效散流半径提升至 40cm，有效化解场地受限与高标准降阻需求的工程矛盾。30cm 厚、80cm 宽的全包裹石墨基降阻层，可彻底消除接地构件

与冻土之间的冰膜接触电阻，优异的低温适配性能保障极端寒冬工况下接地参数稳定达标。多季节现场实测数据充分证实，整套接地系统全年接地电阻数值均低于 1Ω，极端工况峰值为 0.98Ω，跨步电压参数契合高海拔安全运行标准，各项指标均满足规范设计要求。

参考文献

[1]宋玉. 矿井井下保护接地设计 [J]. 矿业工程, 2020, 18(01):67-68.
[2]孙献玲, 张子民. 矿井供电接地电阻影响因素及数值浅析 [J]. 通讯世界, 2016, (01):119-120.
[3]衡旭, 马万里. 剩余电流保护器在地下金属矿山的应用 [J]. 现代矿业, 2015, 31(08):200-202.
[4]惠清龙. 矿井井下保护接地网的分析与优化 [J]. 采矿技术, 2015, 15(04):83-84.
[5]李国安. 矿井井下安全用电技术问题及应对措施分析 [J]. 硅谷, 2014, 7(13):87+79.