超高海拔不良地质条件下的接地施工

肖兴勇[1]　田江伟[2]

1. 中国水利水电第十工程局有限公司　四川　成都　610000
2. 国家能源集团西藏电力有限公司　西藏　林芝　860000

摘　要：本文聚焦于超高海拔不良地质条件下的接地施工问题。首先阐述了超高海拔和不良地质条件对接地施工带来的诸多挑战，包括气候环境恶劣、地质结构复杂等因素对施工人员、设备以及施工工艺的影响。接着详细探讨了在这种特殊环境下接地施工的关键技术，如接地材料的选择与处理、接地极的敷设方式、接地电阻的降低措施等。同时，分析了施工过程中需要重点关注的质量控制问题，并提出了相应的解决策略。最后通过实际案例分析，验证了所提出的技术和策略在超高海拔不良地质条件下接地施工中的有效性和可行性，旨在为类似工程提供有益的参考和借鉴。

关键词：超高海拔；不良地质条件；接地施工；关键技术；质量控制

1 引言

随着电力、通信等基础设施建设的不断推进，在超高海拔地区开展工程建设的需求日益增加。超高海拔地区通常具有独特的气候和地质条件，如空气稀薄、气温低、昼夜温差大、地质构造复杂、冻融土壤环境、土壤电阻率高等。这些不良因素给接地施工带来了极大的困难和挑战。接地系统作为保障电气设备和人员安全的重要设施，其施工质量直接关系到整个工程的可靠性和稳定性。因此，深入研究超高海拔不良地质条件下的接地施工技术，具有重要的现实意义。

2 超高海拔不良地质条件对接地施工的挑战

2.1 气候环境恶劣

超高海拔地区空气稀薄，氧气含量低，这会对施工人员的身体健康和工作效率产生严重影响。施工人员容易出现高原反应，如头痛、头晕、乏力、呼吸困难等症状，导致劳动能力下降，施工进度受阻。同时，该地区气温低，昼夜温差大，冬季漫长且寒冷。低温环境会使施工材料变脆，降低其韧性和强度，增加材料断裂的风险。例如，接地导线在低温下容易变硬、变脆，在敷设过程中容易折断，影响施工质量和进度。此外，恶劣的气候条件还会对施工设备造成损害，缩短设备的使用寿命，增加设备维修和更换的成本。

2.2 地质结构复杂

超高海拔地区地质构造复杂多样，可能存在冻土、岩石、砂石等多种地质类型。冻土是一种特殊的地质条件，其物理性质随季节变化而发生显著变化。在冻结状态下，冻土具有较高的强度和硬度，难以进行开挖和钻孔作业；而在融化状态下，冻土会变得松软，承载能力下降，容易导致接地极下沉或位移，影响接地系统的稳定性。岩石地质则增加了接地极敷设的难度，需要采用特殊的钻孔设备和工艺，施工成本较高。岩石地质的土壤电阻率通常较高，不利于接地电阻的降低，需要采取有效的降阻措施。

2.3 土壤电阻率高

土壤电阻率是影响接地电阻的重要因素之一。超高海拔地区由于气候和地质条件的影响，土壤中的水分含量较低，矿物质成分复杂，导致土壤电阻率普遍较高。高土壤电阻率会增加接地电阻，使接地系统难以达到设计要求，从而影响电气设备的正常运行和人员安全[1]。例如，在雷电天气下，高接地电阻会导致雷电电流无法迅速泄入大地，增加电气设备遭受雷击损坏的风险，同时也可能对附近的人员造成触电危险。

2.4 施工交通不便

超高海拔地区地形复杂，交通基础设施薄弱，施工材料和设备的运输难度较大。许多地区没有公路或铁路通达，需要依靠人力或畜力进行运输，运输效率低下，成本高昂。此外，恶劣的气候条件还会影响交通运输的安全性和可靠性，如大雪、暴雨、泥石流等自然灾害可能导致道路中断，延误施工进度。

3 超高海拔不良地质条件下接地施工的关键技术

3.1 接地材料的选择与处理

3.1.1 材料选择

在超高海拔不良地质条件下，应选择具有良好导电性、耐腐蚀性和机械强度的接地材料。常用的接地材料有铜、镀锌钢、石墨等。铜具有优异的导电性和耐腐蚀性，但成本较高；镀锌钢成本相对较低，机械强度高，但在高湿度或腐蚀性环境中容易生锈；石墨具有良好的导电性和耐腐蚀性，且化学性质稳定，是一种较为理想的接地材料。在实际工程中，应根据具体情况综合考虑材料的性能、成本和施工条件等因素，选择合适的接地材料。

3.1.2 材料处理

为了提高接地材料的性能和使用寿命，需要对其进行适当的处理。对于金属接地材料，如铜和镀锌钢，可以采用热镀锌、涂漆等防腐措施，防止材料在土壤中发生腐蚀。对于石墨接地材料，应确保其纯度和质量，避

免杂质影响导电性能。此外，在运输和储存过程中，应注意保护接地材料，避免受到机械损伤和化学腐蚀。

3.2 接地极的敷设方式

3.2.1 垂直接地极敷设

垂直接地极适用于土壤电阻率较高的地区。在超高海拔不良地质条件下，采用垂直接地极敷设时，需要考虑地质结构的影响。对于冻土地质，应在冻土层以下敷设接地极，以避免冻土融化导致接地极下沉或位移。对于岩石地质，需要采用特殊的钻孔设备和技术，确保钻孔的垂直度和深度符合设计要求。在钻孔过程中，应采用泥浆护壁等措施，防止孔壁坍塌。垂直接地极的长度应根据土壤电阻率和设计要求确定，一般不宜小于2.5m。八宿风电项目基础海拔5200米，布置了2口垂直接地井，井深20米，两经之间的距离大于40米，采用热镀锌角钢作为接地极，灌注搅拌后的石墨粉作为降阻材料，接地电阻率下降明显，且能沟保证不受冻融季节影响。

3.2.2 水平接地极敷设

水平接地极适用于土壤电阻率较低或地形较为平坦的地区。在超高海拔地区，水平接地极的敷设应注意避免在冻土层上敷设，以免冻土融化影响接地效果。可以采用换土的方法，将冻土层下的土壤挖出，换填低电阻率的土壤，然后再敷设水平接地体和接地模块。针对土壤电阻率极高的情况下，可以采用双水平接地体，在两水平接地体之间安装接地模块，并采用角钢将两接地体连接起来。在敷设过程中，应保证水平接地与垂直极连接可靠，并与土壤紧密接触，可采用压实、浇水等措施提高接触效果。



3.2.3 组合接地极敷设

组合接地极是将垂直接地极和水平接地极组合使用的一种敷设方式。它可以充分发挥垂直接地极和水平接地极的优点，降低接地电阻，提高接地系统的稳定性。在超高海拔不良地质条件下，组合接地极的敷设应根据地质结构和土壤电阻率等因素进行合理设计。例如，在冻土地质区域，可以在冻土层以下敷设垂直接地极，在冻土层以上敷设水平接地极，并通过连接导体将它们连接成一个整体。

3.3 接地电阻的降低措施

3.3.1 换土法

换土法是将接地极周围的土壤挖出，换填低电阻率的土壤，如黏土、黑土等。通过降低土壤电阻率来减小接地电阻。在超高海拔地区，换土法是一种常用的降阻措施，但需要注意换土的深度和范围。一般来说，换土深度不应小于 0.8m，换土范围应根据接地极的形状和尺寸确定，一般应大于接地极边缘 1m 以上。

3.3.2 化学降阻剂法

化学降阻剂是一种能够降低土壤电阻率的化学物质。将化学降阻剂注入接地极周围的土壤中，可以改善土壤的导电性能，降低接地电阻。在超高海拔地区，使用化学降阻剂时需要注意其化学稳定性和环境适应性。应选择对土壤和地下水无污染、化学性质稳定的降阻剂，并按照说明书的要求正确使用。

3.3.3 外引接地法

外引接地法是将接地极引至土壤电阻率较低的地区，通过延长接地线路来降低接地电阻。在超高海拔地区，如果附近有河流、湖泊等水源地或土壤电阻率较低的区域，可以采用外引接地法。但需要注意外引接地线路的长度和截面积，应保证线路的电阻足够小，以免影响接地效果。

3.3.4 深井接地法

深井接地法是通过钻深井，在井中敷设接地极并填充低电阻率材料来降低接地电阻。在超高海拔地区，深井接地法可以避开高电阻率的表层土壤，直接利用深层土壤的低电阻率特性[3]。深井的深度应根据土壤电阻率和设计要求确定，一般不宜小于 20m。在钻井过程中，应注意防止井壁坍塌，并在井中填充黏土、膨润土等低电阻率材料，以提高降阻效果。

4 超高海拔不良地质条件下接地施工的质量控制

4.1 施工前的质量控制

4.1.1 设计审查

在施工前，应对接地设计进行认真审查，确保设计方案符合相关标准和规范要求，并充分考虑超高海拔不良地质条件的影响。审查内容包括接地材料的选择、接地极的敷设方式、接地电阻的计算等。如发现问题，应及时与设计单位沟通，进行设计变更。

4.1.2 材料检验

对接地材料进行严格的检验，确保材料的质量符合设计要求。检验内容包括材料的规格、型号、数量、质量证明文件等。对于金属接地材料，应进行外观检查和物理性能测试，如导电性、耐腐蚀性等；对于化学降阻剂等辅助材料，应进行化学成分分析和性能试验。

4.1.3 施工设备检查

对施工设备进行全面检查和维护，确保设备性能良好，能够满足施工要求。检查内容包括设备的运行状态、安全装置、计量器具等。对于钻孔机、电焊机等关键设备，应进行试运行，确保设备正常运行。

4.2 施工过程中的质量控制

4.2.1 接地极敷设质量控制

在接地极敷设过程中，应严格按照设计要求进行施

工，确保接地极的敷设位置、深度、间距等符合设计标准。对于垂直接地极，应采用水平仪等工具保证其垂直度；对于水平接地极，应保证其平整度和与土壤的接触紧密程度。在敷设过程中，应注意保护接地极，避免受到机械损伤。

4.2.2 焊接质量控制

接地极之间的连接通常采用焊接方式。焊接质量直接影响接地系统的导电性能和可靠性。在焊接过程中，应严格按照焊接工艺要求进行操作，确保焊缝饱满、无气孔、无裂纹等缺陷[4]。焊接完成后，应对焊缝进行外观检查和无损检测，如 X 射线探伤、超声波探伤等，确保焊接质量符合要求。

4.2.3 降阻措施质量控制

如果采用换土法、化学降阻剂法等降阻措施，应严格控制施工质量。在换土过程中，应确保换填土壤的质量和深度符合要求；在使用化学降阻剂时，应按照说明书的要求进行配比和施工，确保降阻剂均匀分布在接地极周围的土壤中。

4.3 施工后的质量控制

4.3.1 接地电阻测试

施工完成后，应进行接地电阻测试，确保接地电阻符合设计要求。测试方法应符合相关标准和规范要求，如采用接地电阻测试仪进行测量。如果接地电阻不符合要求，应分析原因并采取相应的措施进行处理，如增加接地极数量、改进降阻措施等，直至接地电阻达到设计标准。

4.3.2 隐蔽工程验收

接地工程中的许多部分属于隐蔽工程，如接地极的敷设、焊接等。在隐蔽工程施工完成后，应进行验收，填写隐蔽工程验收记录。验收内容包括接地极的敷设位置、深度、焊接质量等。只有验收合格后，才能进行下一道工序的施工。

4.3.3 竣工资料整理

施工完成后，应及时整理竣工资料，包括设计文件、施工记录、测试报告、验收记录等。竣工资料应真实、完整、准确，为工程的后期维护和管理提供依据。

5 案例分析

5.1 工程概况

八宿风电风项目工程，海拔高度在5000m 以上。该地区地质条件复杂，存在冻土、岩石等多种地质类型，土壤电阻率较高，平均达到 2000Ω·m 以上。工程要求接地电阻不大于 4Ω。

5.2 施工方案

5.2.1 接地材料选择

综合考虑工程成本和施工条件等因素，选择热镀锌钢作为接地材料。为提高镀锌钢的耐腐蚀性，采用热镀锌处理，镀锌层厚度不小于 85μm，同时布置接地模块降阻。

5.2.2 接地极敷设方式

采用组合接地极敷设方式。在冻土层以下采用垂直接地极，垂直接地极长度为 2.5m，间距为 5m；在冻土层以上采用水平接地体，水平接地极采用换土法敷设，换填低电阻率的黏土，换土深度为 0.8m，水平接地极间距为5m。

5.2.3 降阻措施

采用化学降阻剂法和深井接地法相结合的降阻措施。在垂直接地极周围注入化学降阻剂，同时在工程附近钻两口深井，深度为20m，在井中敷设接地极并填充高纯度石墨粉。

5.3 施工过程质量控制

5.3.1 施工前

对设计方案进行认真审查，确保设计方案符合工程要求；对镀锌钢接地材料进行严格检验，检查其规格、型号、镀锌层厚度等指标；对施工设备进行检查和维护，确保设备性能良好。

5.3.2 施工中

严格按照设计要求进行接地极敷设，采用水平仪保证垂直接地极的垂直度，确保水平接地极与土壤紧密接触；在焊接过程中，严格按照焊接工艺要求进行操作，对焊缝进行外观检查和无损检测；在注入化学降阻剂和填充深井时，严格控制施工质量和材料用量。

5.3.3 施工后

进行接地电阻测试，测试结果为 0.8Ω，符合设计要求；对隐蔽工程进行验收，填写隐蔽工程验收记录；整理竣工资料，确保资料真实、完整、准确。

结语

超高海拔不良地质条件下的接地施工是一项复杂而艰巨的任务，面临着气候环境恶劣、地质结构复杂、土壤电阻率高等诸多挑战。为了保证接地系统的施工质量和可靠性，需要采用一系列关键技术，如合理选择接地材料、采用适当的接地极敷设方式和降阻措施等。同时，要加强施工过程的质量控制和安全保障，确保施工人员和设备的安全。通过实际案例分析验证了所提出的技术和策略在超高海拔不良地质条件下接地施工中的有效性和可行性。未来的工程建设中，应不断总结经验，进一步优化施工技术和管理方法，以适应更高要求的工程建设需求。

参考文献

[1]李文强,黄军荣,刘军,等.高海拔特高压变电站接地网的优化设计[C]//江西省电机工程学会.2023年江西省电机工程学会年会论文集.江西省送变电工程有限公司;,2024:181-184.

[2]陈淑.高海拔地区风电场防雷接地施工控制技术探讨[J].农村电工,2022,30(03):30-31.

[3]王建国.高海拔喀斯特地貌光伏电站防雷标准化技术及应用对策[J].大众标准化,2025,(08):7-9.

[4]李霞,王加兴.高海拔地区集电线路施工技术要点[J].云南水力发电,2024,40(S2):49-52.