

高寒山地光伏土建基础抗冻胀技术应用研究

王 斌

中电建宁夏工程有限公司 宁夏 银川 750000

摘 要：本文系统阐述了高寒山地环境下冻胀现象的形成机理及其对光伏基础的危害模式，深入剖析了当前主流的抗冻胀技术路径，包括螺旋地桩的优化设计、混凝土基础的综合防治措施（保温法、换填法、结构优化）以及新型专利技术的应用。通过结合具体工程案例，对不同技术方案的适用条件、经济性及长期可靠性进行了对比分析。研究表明，在高寒山地光伏项目中，应摒弃“一刀切”的传统思路，转而采用“地质适配、技术组合、动态调整”的系统性策略。未来，随着材料科学、智能监测与数字孪生技术的发展，光伏基础的抗冻胀设计将向更智能、更精准、更耐久的方向演进，为我国清洁能源在极端环境下的规模化开发提供坚实的技术支撑。

关键词：高寒山地；光伏电站；土建基础；冻胀；抗冻胀技术；螺旋地桩

引言

随着优质平地资源稀缺，光伏开发加速向高寒山地拓展，这类地区主要分布在我国青藏高原、西北高海拔山区及东北部分高纬度地带，海拔高、气温低、地质条件复杂。在此建设光伏电站，土建基础工程面临挑战，其中季节性冻土冻胀问题最为突出。冻胀是土壤水分在负温下冻结成冰、体积膨胀约9%，对基础结构产生向上抬升力，春季冰层融化土壤沉降，不均沉降会导致基础倾斜、支架变形，引发光伏组件隐裂、接线盒损坏甚至结构失稳，威胁电站安全与发电效率。所以，有效防治冻胀灾害、确保光伏基础长期稳定，是高寒山地光伏项目成败的关键。

1 高寒山地冻胀机理及对光伏基础的危害

1.1 冻胀形成的物理机制

冻胀的发生需同时满足三个基本条件：一是存在易冻胀的细颗粒土质（如粉土、黏性土），二是土体中含有充足的水分，三是具备持续的负温环境。在高寒山地，这三个条件往往并存。冬季，地表温度降至冰点以下，土体孔隙水开始冻结。由于冰晶的形成，未冻区的水分在毛细作用和渗透压力的驱动下，会不断向冻结锋面迁移并补给，形成冰透镜体或冰夹层^[1]。这一过程被称为“分凝冻胀”，是导致土体体积显著膨胀的主要原因，其产生的冻胀力远大于单纯孔隙水结冰所产生的膨胀力。

1.2 冻胀对光伏基础的破坏模式

光伏基础，无论是螺旋地桩还是混凝土基础，一旦处于冻胀土层中，便会受到冻胀力的作用。其破坏模式主要有两种：（1）整体抬升与复位失败：基础被冻胀土整体抬起，春季融沉后，由于土体结构已被破坏，基础

无法完全回落至原位，造成永久性沉降差。（2）不均匀抬升：场地内土质、含水率或冻结深度存在差异，导致基础各部位受力不均，产生倾斜或扭曲。对于刚性连接的光伏阵列而言，这种不均匀变形极易传递至上部支架和组件，造成结构性损伤。

2 主流光伏土建基础类型及其抗冻胀技术路径

高寒山地光伏电站的土建基础是整个项目安全与耐久性的基石。面对季节性冻土带来的严峻冻胀挑战，业界主要依托两大类基础形式——螺旋地桩基础与混凝土基础，并围绕它们发展出一系列精细化、系统化的抗冻胀技术路径。这些技术并非孤立存在，而是根据具体地质条件、气候特征和经济性要求进行灵活组合与优化，共同构成了抵御冻害的综合防线。

2.1 螺旋地桩基础的精细化抗冻胀设计体系

2.1.1 几何参数的精准化配置

首先，埋置深度是第一道防线。依据《建筑地基基础设计规范》（GB50007-2011），基础必须置于设计冻深线以下至少0.25米。例如，在青海格尔木地区（标准冻深约1.85米），螺旋地桩的有效桩长通常需达到2.2至2.5米，以确保桩端及主要承载段完全位于非冻胀的稳定持力层中。其次，螺旋叶片的设计直接决定了侧向摩擦阻力。针对冻胀风险，常采用下半部布置大直径叶片的短桩型式。叶片直径可从常规的250mm增大至300-350mm，螺距也需根据土质进行调整，以最大化有效侧阻。研究表明，增加叶片数量或采用双螺旋叶片设计，能显著提升抗拔承载力，但也会增加旋入扭矩，需在设计阶段进行精确平衡^[2]。最后，桩体规格需满足结构强度要求。常用热轧无缝钢管规格为 $\Phi 76 \times 4.0\text{mm}$ 或 $\Phi 89 \times 4.5\text{mm}$ ，材质为Q235B或更高强度的Q355B，并施加

双面热浸镀锌防腐处理, 锌层厚度须符合ISO 1461标准, 通常要求平均厚度 $\geq 85\mu\text{m}$, 局部厚度 $\geq 70\mu\text{m}$, 以抵抗高寒地区强烈的紫外线和干湿交替腐蚀。对于风荷载极大的区域, 甚至会采用壁厚达6.0mm的加厚管材。

2.1.2 表面隔离与润滑技术

在螺旋地桩入土前, 可在其表面均匀涂覆一层专用的防冻胀隔离涂料。这类涂料通常由改性沥青、聚合物乳液及石墨粉等成分复合而成, 干燥后形成一层光滑、憎水的膜。该膜能有效降低冻结锋面与桩壁间的切向冻胀应力, 使桩体在冻胀发生时能产生微小的相对滑动, 从而显著减小所承受的抬升荷载。这是一种成本低廉但效果显著的被动防护措施。施工时, 涂层需保证完整性和均匀性, 尤其在焊缝和切割边缘处不得有遗漏。

2.1.3 桩周土体改良技术

对于局部存在高含水率粉质黏土等强冻胀性土层的点位, 可采取针对性的桩周改良。具体做法是在螺旋地桩旋入到位后, 通过预设的注浆管或直接从桩顶向下, 在桩周环形空间内回填级配良好的粗砂或砾石(粒径5-20mm)。这种非冻胀性填充料形成了一个物理隔离带, 切断了水分向桩周迁移的通道, 从根本上消除了局部冻胀源, 确保了单桩的稳定性^[3]。回填作业应分层进行, 并轻微注水以助其密实, 但需严格控制水量, 避免形成新的饱和软弱层。

2.1.4 安装过程的质量控制

螺旋地桩的安装需遵循“定深度、定扭矩、定垂直度”的三定原则。其中, 终孔扭矩是判定桩体是否达到设计承载力的关键指标。在冻土区, 由于土体在低温下强度较高, 旋入扭矩会显著增大。因此, 必须使用带有实时扭矩监测功能的专业液压钻机, 并根据现场试桩数据校准扭矩-承载力关系曲线。只有当桩体达到设计深度且终孔扭矩满足要求时, 方可判定为合格。此外, 桩顶标高的控制精度也至关重要, 通常要求误差控制在 $\pm 2\text{cm}$ 以内, 以保证上部支架的平整度, 避免因初始不平而放大后续的不均匀沉降效应。

2.2 混凝土基础的多维度综合防治策略

2.2.1 保温隔热法

该方法通过设置保温隔热层, 人为抬高冻结零度线, 减小实际冻结深度。工程中普遍采用挤塑聚苯乙烯板(XPS)作为保温材料。XPS板因其闭孔率高达99%以上, 吸水率极低($< 0.3\%$), 导热系数小($\leq 0.030\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), 且具有优异的抗压强度(150-700kPa), 非常适合地下长期使用。保温层通常铺设于基础四周及底部, 厚度需经热工计算确定, 一般在80-120mm之间。施

工时, XPS板接缝处需用专用胶粘剂密封, 并在其上覆盖一层 $300\text{g}/\text{m}^2$ 的聚丙烯长丝土工布作为保护层, 防止回填时被尖锐物刺穿。值得注意的是, 保温层的顶部应略高于原始地表, 形成一个“保温帽”, 以有效阻断来自地表的冷量侵入。

2.2.2 非冻胀性材料换填法

核心思想是将基础影响范围内的所有冻胀性土全部置换为非冻胀性材料。具体操作是: 开挖基坑至冻深线以下0.3-0.5米, 然后分层回填并压实级配碎石或砂砾。回填料的质量控制极为关键, 要求碎石为连续级配, 最大粒径不超过50mm, 含泥量严格控制在5%以内。压实作业必须分层进行, 每层虚铺厚度不超过300mm, 并采用重型振动压路机或平板夯进行碾压, 确保压实系数 λ_c 不低于0.97。虽然此法工程量大、成本高, 但对于关键设备区或高风险区域, 其长期安全效益远超初期投入^[4]。在高寒山地, 还需考虑冬季施工问题, 必要时需搭设暖棚并采用防冻混凝土。

2.2.3 结构强化与高性能材料应用

一方面, 通过增大基础底面积、加深基础埋深或在基础内部设置抗拔钢筋笼、预埋抗拔锚杆等方式, 直接提高其抗拔承载力。锚杆通常采用HRB400级钢筋, 直径不小于25mm, 锚固深度需深入稳定持力层不少于2米。另一方面, 采用高性能混凝土是提升耐久性的关键。基础混凝土强度等级不应低于C30, 并应掺加优质引气剂, 引入大量微小、封闭、稳定的气泡(含气量控制在4%-6%), 以缓冲冰晶膨胀产生的内应力, 大幅提高混凝土的抗冻融循环能力。此外, 针对高寒地区的盐渍土环境, 还需在混凝土配合比中考虑抗硫酸盐侵蚀措施, 如选用抗硫酸盐水泥或掺加矿物掺合料(粉煤灰、矿粉), 以提升其在恶劣化学环境下的服役寿命。

2.2.4 创新构造与专利技术集成

行业技术创新为混凝土基础抗冻胀提供了新思路。例如, 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司于2025年获得授权的实用新型专利“一种冻土区光伏支架安装用抗冻胀桩基础”(CN 222332749 U), 其巧妙之处在于采用内外双层套筒结构。外筒先行打入土中, 内筒随后插入, 两者之间的环形空间浇筑混凝土。这种构造允许内外筒在冻胀作用下产生微小的相对位移, 有效释放了部分冻胀应力, 避免了应力集中导致的结构破坏。另一项值得关注的技术是“U型”或“T型”扩展底板基础, 通过增大基础底部的水平投影面积, 利用更大的自重和侧向土压力来平衡冻胀力。此类专利技术的集成应用, 代表了未来抗冻胀设计向更智能、更柔性方向

发展的趋势。

3 工程实证分析与技术选型建议

3.1 实证分析

近年来,多个高寒山地光伏项目为抗冻胀技术的应用提供了宝贵案例。西藏拉妥一期700MW光伏发电项目,地处高海拔寒冷地区,在设计阶段就充分考虑了冻胀风险,通过对地质的详细勘察,分区采用了优化后的螺旋地桩和局部换填的混凝土独立基础相结合的方案,确保了项目的顺利实施与稳定运行。同样,四川甘孜州得荣县的高海拔光伏实证基地,也通过系统性的数据采集,验证了特定抗冻胀措施在极端环境下的长期有效性。

3.2 基于冻胀等级的差异化技术策略

场地的冻胀等级是决定抗冻胀技术选型的首要依据。根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2011),可依据土的类别、冻前天然含水率及冻结期间地下水位等因素,将场地划分为不冻胀、弱冻胀、冻胀、强冻胀和特强冻胀五个等级。针对光伏项目常见的弱、中、强三个等级,应采取如下差异化策略:

弱冻胀土: 此类土质(如含少量粉粒的砂土)冻胀风险较低。可优先采用经过几何参数优化的螺旋地桩,确保其埋深超过冻深线即可。为增强可靠性,可辅以表面隔离涂层技术,成本低廉且效果显著。

中冻胀土: 此类土质(如粉土、粉质黏土)具有明显的冻胀潜力。若采用螺旋地桩,除保证足够埋深外,必须结合桩周土体改良技术,即在桩周回填粗砂或砾石形成隔离带。若地质条件允许或对沉降控制要求较高,可选用保温隔冻法处理的混凝土基础,通过XPS保温层有效抑制冻结深度。

强冻胀土及以上: 此类土质(如黏土、高含水率粉质黏土)冻胀力巨大,对基础安全构成严重威胁。此时,非冻胀性材料换填法是最可靠的选择。应将基础影响范围内的冻胀土全部置换为级配碎石或砂砾,并严格控制压实质量。在极端情况下,可结合结构强化措施(如增设抗拔锚杆)或采用创新专利构造(如双层套筒桩基础),形成多重安全保障。

3.3 选型建议

基于这些实践与分级策略,本文提出以下技术选型建议:(1)对于坡度较大、地质以碎石土为主的山地,优先选用经过几何参数优化的螺旋地桩,并辅以表面隔离涂层。(2)在项目规划初期,必须进行详尽的岩土工程勘察,准确判定场地的冻胀等级、标准冻结深度和地下水位,这是所有抗冻胀设计的前提。(3)应严格遵循“弱冻胀用优化螺旋桩、中冻胀用改良螺旋桩或保温混凝土基础、强冻胀用换填混凝土基础”的分级应对原则,杜绝“一刀切”的设计方法,确保技术方案的经济性与安全性达到最优平衡。

4 结语

高寒山地光伏土建基础的抗冻胀问题,是一个涉及岩土工程、材料科学、结构力学和气候学的复杂系统工程。本文研究表明,单一技术难以应对所有复杂工况,成功的工程实践依赖于对冻胀机理的深刻理解、对地质条件的精准把握以及对抗冻胀技术的灵活组合应用。未来,该领域的发展将呈现三大趋势:一是材料智能化,开发能主动感知温度、湿度变化并作出响应的智能混凝土或复合材料;二是监测数字化,通过在基础内部预埋传感器,结合物联网技术,实现对冻胀变形的实时、在线监测与预警;三是设计精准化,利用BIM和数字孪生技术,在虚拟空间中模拟不同工况下的冻胀效应,实现抗冻胀方案的动态优化与迭代。

参考文献

- [1]孙浩杰,张轩,王炜贵,等.季节性冻土区光伏支架基础冻胀防治措施[J].四川建材,2024,50(12):116-118.
- [2]姜伟,晏华斌,张钰,等.季节性冻土区光伏支架基础冻胀防治措施研究综述[J].低温建筑技术,2022,44(07):144-148.
- [3]于满满,杜俊蕾.应用于强冻胀土的光伏支架基础方案分析[J].太阳能,2021,(10):52-58.
- [4]田天伦.季节冻土区光伏桩基冻胀特性研究[D].黑龙江大学,2023.DOI:10.27123/d.cnki.ghlju.2023.002658.