复杂山地输电铁塔基础施工改良工艺与安全管控研究

郝 勇 张子洋 韩聪明
内蒙古工业大学 内蒙古 呼和浩特 010010

摘 要：复杂山地输电线路工程建设中，铁塔基础施工面临地形陡峭、地质多变、材料运输困难及安全风险高等多重挑战，传统施工工艺难以满足质量、效率与安全的综合要求。本文在分析山地基础施工主要难点的基础上，系统阐述了桩基托换、微型桩群、岩石锚杆及大体积混凝土温度控制等改良工艺的技术原理与适用条件，从边坡稳定性评估、深基坑支护、爆破震动控制及高空作业防护等维度构建了全流程安全管控体系，并结合典型工程案例验证了改良工艺与管控措施的实际效果，为同类山地输电基础施工提供技术参考。

关键词：山地输电；铁塔基础；改良工艺；安全管控；施工技术

引言：随着我国能源战略西移和清洁能源大规模开发，输电线路逐步向西部复杂山地延伸，铁塔基础施工面临的地形与地质条件日趋复杂。山地施工不仅场地狭窄、高差悬殊，且常遇风化岩层、破碎带及地下水渗流等不良地质，传统大开挖回填工艺往往导致大量土石方开挖、边坡失稳和生态破坏，施工安全风险突出。因此，因地制宜地改良基础施工工艺、建立针对性的安全管控体系，已成为山地输电工程建设的关键技术课题。本文基于工程实际，从施工工艺改良和安全管控两个维度展开研究，为复杂山地条件下输电铁塔基础施工提供系统的技术方案。

1 复杂山地输电铁塔基础施工的主要难点

1.1 地形与地质条件的制约

复杂山地输电铁塔多坐落于山脊、陡坡、山坳等区域，地形坡度普遍处于30°~60°，局部超70°，施工平台拓展空间不足，大型施工设备进场、就位难度极大。区域地形高差悬殊，建材垂直与水平运输距离远，常规运输方式效率极低。地质条件同样复杂多变，表层风化残积土、碎石土承载力较差，中下风化基岩裂隙发育，还存在软弱夹层与破碎带。施工扰动、降雨浸泡会快速劣化岩土力学性能，易引发边坡失稳。同时山地地下水分布不均，开挖时裂隙水、滞水突发涌出，大幅提升基坑坍塌风险，整体施工不确定性远高于平原区域。

1.2 施工运输与场地布置的约束

复杂山地输电铁塔施工首要难题为材料运输，崎岖狭窄的山路无法通行常规运输车辆，塔材、钢筋、机具等物料仅能依靠索道、骡马、人工转运，运输效率不足平原地区的30%。商品混凝土搅拌车难以抵达施工现场，大多需搭建临时小型搅拌站或现场干拌制料，大幅增加混凝土质量管控难度。同时山地单塔可用施工平台面积多不足200m^2，材料堆放、设备安置、临时设施搭设空间极度受限，各工序作业面交叉重叠，无法开展标准化流水施工，不仅制约施工进度，还导致安全管控盲区增多，安全隐患叠加凸显[1]。

1.3 自然气象与生态环境的叠加影响

复杂山地微气候特征突出，昼夜温差大、突发降雨频发、冬季积雪期长，严重干扰施工连续性，同时影响混凝土养护成型质量。山地有效施工天数仅占全年日历天数的60%~70%，降雨后场地泥泞湿滑，进一步压缩作业窗口期。多数山地塔位处于生态敏感区、水源涵养区，环保管控标准严苛，传统大开挖工艺产生的弃渣、植被破坏问题受限严重。部分施工区域涉及公益林、基本农田保护红线，临时用地审批流程繁琐、难度大，进一步加剧场地布置难题，倒逼施工工艺优化与精细化管控落地。

2 山地铁塔基础施工改良工艺

2.1 桩基托换与微型桩群技术

在覆盖层较厚、承载力不足的陡坡地段，桩基托换技术是解决基础稳定的有效手段。该工艺通过在塔位中心或四角施工钻孔灌注桩或人工挖孔桩，将上部荷载直接传递至深层稳定持力层。桩径通常为0.8~1.5m，桩长一般不小于6m，进入中风化基岩深度不小于3倍桩径。与常规大开挖相比，桩基托换大幅减少了土石方开挖量和边坡扰动范围，施工平台面积可缩减50%以上，尤其适合坡度大于45°的陡峭塔位。微型桩群技术则是在直径100~300mm钻孔中植入钢筋或钢管并压力注浆，形成群桩联合受力体系，其施工设备轻便、操作空间要求低，可在大型机械无法到达的狭窄场地实施。微型桩群对原状土扰动极小，兼具抗滑和承重双重功能，适用于表层松散覆盖层较薄、下伏基岩完整的地质条件。两种桩基

技术均需根据实际地质条件进行承载力验算，合理确定桩径、桩距和嵌岩深度，确保基础长期安全运行。

2.2 岩石锚杆基础工艺

对于基岩直接出露或覆盖层较薄的硬质岩地基，岩石锚杆基础是最经济的改良方案。其原理是在完整基岩中钻凿锚孔，植入高强度锚杆并进行压力注浆，使锚杆与岩体形成整体受力体系，依靠黏结力和端承力承担上拔力和水平力。锚孔直径50~100mm，深度一般不小于3m，锚杆采用HRB400级以上螺纹钢，注浆材料优先选用微膨胀水泥砂浆。该工艺完全避免了土石方大开挖，仅需在塔脚位置进行小范围基岩表面清理，对地形地貌和植被破坏降至最低，环保效益显著。施工采用潜孔钻机或风动凿岩机成孔，设备轻便、转场灵活，可在极陡坡面实施。岩石锚杆基础适用于微风化至中等风化花岗岩、砂岩、灰岩等硬质岩地基，要求基岩完整性好、无贯穿性裂隙，在节理发育或破碎带地段应谨慎使用，必要时辅以地质雷达探测查明岩体质量[2]。

2.3 大体积混凝土温度裂缝控制工艺

山地输电铁塔基础中，大体积混凝土水化热引起的温度裂缝是影响耐久性的重要隐患。改良工艺的核心措施包括配合比优化、分层浇筑和冷却管布设。配合比优化方面，选用中低热水泥，掺入20%~30%粉煤灰替代部分水泥以削减水化热峰值，同时掺加缓凝型减水剂延长初凝时间。分层浇筑将承台沿厚度方向划分为2~3层，每层厚度1.5~2.0m，利用层间间歇时间散热。对于厚度超过2.5m的承台，在混凝土内部布设φ32~φ50mm冷却水管，通循环水强制降温，进出水温差控制在25℃以内，降温速率不大于2℃/d。同时加强测温监控，在承台不同深度埋设测温元件，实时掌握内外温差，一旦温差超限（≤ 25℃），及时调整冷却水流量或采取表面保温措施，可将温度裂缝发生率降低80%以上。

2.4 施工便道与索道运输优化

破解山地运输难题需从永久便道和临时索道两个层面统筹规划。永久施工便道尽量利用既有山路或防火通道拓宽加固，路面采用泥结碎石或山皮石铺筑，设置排水边沟和错车道，满足轻型车辆通行。对于无法修筑便道的极陡坡段，优先采用单索循环式或双索往复式货运索道，索道跨距300~500m，单次运载能力500~1000kg，可覆盖塔位周边2~3km半径内的运输需求。索道支架基础采用小型混凝土墩或钢制地锚，安装便捷、拆除后可恢复植被。运输组织上，采用“集中储料、分时供应”模式，在索道下料口设置临时中转料场，根据各塔位施工进度有计划地分批供应材料，避免现场物料积压。建立运输调度通信系统，确保索道运行与地面作业协调配合，提高运输安全性和效率。

3 全过程安全管控体系

3.1 边坡稳定性评估与监测

边坡失稳是山地基础施工的头号安全风险。施工前须对塔位周边边坡进行稳定性评估，采用赤平极射投影法分析岩体结构面，结合极限平衡法计算安全系数，明确潜在滑移模式和风险等级。对于安全系数不足的边坡，应制定挂网喷锚、预应力锚索、抗滑桩等专项加固方案。施工中建立边坡变形监测体系，在坡顶设置位移观测桩，每日监测水平位移和垂直沉降；对高风险边坡安装倾斜仪或裂缝计实时监测，设定变形预警阈值（水平位移速率 > 3mm/d或累计位移 > 20mm即触发警报），一旦异常立即停止作业并启动应急预案。

3.2 深基坑支护与降水措施

山地基础基坑坑深可达5~10m，支护设计须依据地质条件综合确定。对于土质或强风化岩基坑，可采用钢支撑或混凝土护壁支护，护壁厚度不小于150mm，每节高度1.0~1.2m，上下节搭接长度不小于50mm。对于中等风化以上岩层基坑，可采用锚喷支护，喷层厚度80~100mm。基坑降水根据地下水类型采取措施——裂隙水采用坑内集水坑明排，上层滞水采用井点降水，确保地下水位低于坑底500mm以上。所有深基坑作业前必须编制专项方案并经专家论证，作业中严格执行上下井登记制度。

3.3 爆破作业震动控制

山地爆破以控制爆破为核心，优先采用浅孔松动爆破或预裂爆破。孔深不超过3m，孔径40~50mm，孔距与排距按0.8~1.2m布置，确保爆破震动速度控制在安全允许范围（邻近建筑物 ≤ 2.0cm/s）。采用非电毫秒延期雷管逐孔起爆，延期时间25~75ms，使震动波相互干扰消减。飞石防护采用覆盖钢丝网或胶皮帘布、加压砂袋、设置柔性防抛网等多重措施[3]。起爆前须对警戒范围内所有人员和设备清场确认，爆破后由专业人员检查确认无盲炮、无松动岩块方可恢复作业。

3.4 高处坠落与物体打击防护

山地塔位施工平台与基坑底垂直高差较大，高处坠落和物体打击是高频事故类型。基坑周边1.5m范围内严禁堆放材料，设置高度不低于1.2m的钢管围栏和挡脚板。上下基坑通道采用装配式钢梯或之字形步道，坡度不大于1:1，两侧设扶手栏杆，踏步采取防滑措施。作业人员必须正确佩戴安全帽、系挂安全带，高边坡作业还需佩戴防坠器。物体打击防护方面，基坑上方设置防落

物钢棚或安全网，垂直交叉作业层间必须设置隔离层。临时用电严格落实“三级配电两级保护”和“一机一闸一漏”制度，配电箱加锁管理并由持证电工操作。

4 工程应用案例

4.1 工程概况与施工难点

某500kV输电线路工程穿越西南山区，线路全长约85km，其中约65%的塔位位于坡度大于40°的陡峭山脊。选取其中3基典型难施工塔位（Z12、Z13、Z14）进行改良工艺应用，塔型为耐张转角塔，基础设计采用钢筋混凝土独立基础，单基混凝土方量约180m^3。塔位地质以强风化花岗岩为主，覆盖层厚度不均（1.5~4.5m），基岩节理发育且存在多条贯穿裂隙。施工面临的主要难点包括：便道修筑长度超过5km，材料运输距离远；部分塔位临近省道和居民区，爆破震动控制要求严格；雨季降雨集中，边坡冲刷严重。

4.2 改良工艺应用与安全管控实践

针对覆盖层较厚的Z12塔位，采用微型桩群基础替代传统大开挖，布设16根直径200mm微型桩，桩深8~10m，进入中风化岩层不小于4m，承台厚度由2.5m优化至1.8m，土石方开挖量减少约65%。Z13、Z14塔位基岩出露条件较好，采用岩石锚杆基础，共施工锚杆48根，锚孔直径75mm，深度3.5~4.5m，单根锚杆设计抗拔力250kN。大体积混凝土施工中采用配合比优化（掺30%粉煤灰）+分层浇筑（分2层）+冷却水管联合控温措施，实测混凝土内部最高温度为62℃，内外温差最大22℃，未出现温度裂缝[4]。安全管控方面，施工前对所有塔位边坡进行了稳定性专项评估，对3处高风险边坡实施了锚杆加固；建立深基坑变形监测点12个，爆破作业采用毫秒延时控制爆破技术，单响起爆药量不超过3kg，实测震动速度均控制在1.5cm/s以内。施工期间实现了零安全事故目标。

4.3 应用效果评价

改良工艺实施后，3基塔位基础施工取得了显著效果。施工工期方面，单基基础平均施工周期由传统工艺的45天缩短至28天，工期压缩约38%；材料运输方面，索道配合小型机械运输方案使材料到位率从不足60%提升至95%以上；环保方面，土石方外运量减少约70%，施工扰动面积缩减52%，植被恢复面积较传统工艺减少60%；混凝土质量方面，28d强度检测全部满足设计要求，承台结构未发现有害裂缝。全周期成本核算显示，改良工艺单基综合成本较传统工艺降低约12%，主要得益于土石方和支护工程量的大幅削减以及施工周期缩短带来的管理成本节约。

结束语

复杂山地输电铁塔基础施工受地形、地质、运输和环境等多重因素制约，传统工艺已难以适应高质量建设要求。桩基托换、微型桩群、岩石锚杆及大体积混凝土温度控制等改良工艺，通过减小开挖扰动、充分利用原位岩体承载力和精细化温控，有效解决了山地施工的核心技术难题。与之配套的边坡稳定评估、深基坑支护、爆破震动控制及高处作业防护等安全管控措施，构建了覆盖施工全过程的防护体系。未来，随着施工装备智能化水平的提升和BIM技术在基础施工中的应用，山地输电铁塔基础施工将进一步向精准化、绿色化方向发展。

参考文献

[1]严志杰.输电线路铁塔基础工程混凝土施工质量控制与管理[J].建筑与装饰,2023(21):78-80.

[2]杨煜,周恩平,周欣,等.西南山区输电线路岩石锚杆基础的几个问题探讨[J].电力勘测设计,2023(11):39-42,55.

[3]于昊,苗峰显,张君,等.特高压输电线路工程基于迂回结构的货运索道研制与应用[J].电工技术,2026(13):174-178.

[4]刘晨,秦剑,张飞凯,等.输电线路货运索道运行过程监测系统设计[J].中国工程机械学报,2025,23(2):304-308,314.