

# 高寒硬岩地区人工挖孔桩质量控制技术

王龙涛

(四川二滩建设咨询有限公司, 四川 成都 610051)

**摘要** 本文以川西南某项目高寒硬岩地区人工挖孔桩施工中存在的岩层开挖效率低、低温混凝土养护难等问题为背景, 提出一次性致裂管开挖与“提标+保温”养护相结合的质量控制技术。通过优化一次性致裂管参数, 实现岩体裂解可控调控; 采用“混凝土强度提升+薄膜+双层棉被”保温工艺, 有效预防混凝土冻害。工程实践表明, 该技术体系显著提高了开挖效率与桩基质量, 可为类似环境下的桩基施工提供参考。

**关键词** 人工挖孔桩; 一次性致裂管; 坚硬岩石; 高寒地区; 低温养护

**中图分类号**: TU473.1+4

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.014

## 0 引言

在“双碳”目标下, 新能源建设迎来高峰期。桩基作为电力输送的基石, 施工质量直接关系到线路的运行安全。人工挖孔桩凭借对地形的强适应性、机械设备依赖性低等优点, 在山区桩基施工中被广泛使用。但是, 复杂地质条件与极端气候环境对施工质量的把控提出了严峻的挑战。传统施工工艺在质量、安全、进度等要求下难以协同。现有研究多聚焦人工挖孔桩单一应用场景的技术优化: 针对高海拔低温、低氧等复杂环境, 通过材料性能优化等方式提升施工质量; 路基边坡施工中则重点构建了以地质评估、安全交底为核心的坍塌风险防控体系<sup>[1]</sup>。一次性致裂管技术凭借安全可控、施工便捷等特点已在岩石爆破中得到有效应用, 但在输变电工程桩基施工中的适配性研究相对较少, 目前仍以电镐、风镐、水磨钻等传统开挖方式为主。

## 1 项目概况与施工难点分析

### 1.1 项目概况与施工条件

本项目处于四川省木里县境内, 该地区为地貌复杂的山地。作为集中式光伏电力送出的关键通道, 工程对基础施工的质量要求高。因项目全线所有塔基均处在山地, 山高坡陡, 大型机械设备无法施工, 现场施工均采用人工挖孔桩基础形式, 桩径范围为1.0 m至1.8 m, 桩长分布为6.5 m至16.5 m, 工期紧、任务重, 需要在有限的施工窗口期内高质量完成全部施工。

### 1.2 地质与气候特征分析

根据地勘数据显示, 本项目岩石覆盖率超过60%, 主要为中风化砂岩与花岗岩。此类地质条件下进行施

工, 传统的人工开挖方式效率低、设备损耗大, 且经济造价高, 难以满足现代化工程的高效与经济性能要求。

气候方面, 本项目位于20 mm以上重冰区桩基占比达35.5%, 冬春季施工期间, 昼夜温差超20℃, 夜间最低气温可降至-5℃, 甚至更低, 使混凝土初期养护遇到很大的困难和严峻的挑战, 极易引发冻害、强度不足等质量问题, 严重影响结构的耐久性与安全性。相关研究已指出, 高边坡山地超深桩基施工的核心挑战在于地质条件与气候环境的双重制约, 本项目岩石覆盖率超60%且部分地处重冰区, 面临的地质与气候更为复杂。

### 1.3 施工质量风险与挑战

1. 在坚硬岩层段施工过程中, 采用电镐、风镐、水磨钻等常规机械开挖, 日平均开挖进尺 $\leq 0.3$  m。若盲目追求施工进度, 极易对孔壁岩土体造成过度扰动, 导致孔壁出现坍塌, 增加施工难度与安全风险, 对桩基的承载力与结构完整性构成潜在的威胁。2. 在低温环境段进行混凝土浇筑时, 若新浇筑的混凝土在初凝期内遭遇低温冻结, 其内部自由水结冰膨胀将引发微裂纹, 易导致混凝土强度损失超过30%, 严重危及结构的耐久性。高寒硬岩地区人工挖孔桩施工中, 安全与质量风险具有高度的隐蔽性与突发性, 必须采取前置性的安全、质量预防措施。现场风险若未能得到有效管控, 将直接引发桩基缺陷, 严重时甚至可能引发结构失效等安全、质量事故<sup>[2]</sup>。

## 2 坚硬岩层开挖质量控制技术

### 2.1 传统局限性与技术选型

传统的电镐、风镐、水磨钻等开挖机械在坚硬岩层中效率低、成本高; 而采用民爆物品进行爆破虽能

**作者简介**: 王龙涛(1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 土木工程施工与管理。

提升施工效率，但却面临繁杂的审批流程及强烈的扰动等问题，易损伤岩体完整性并危及升压站、变电站等邻近建（构）筑物结构安全。经多方案比选与专题讨论研究，本项目最终选定一次性致裂管技术<sup>[3]</sup>。

致裂管主要利用混合粉末在高温密闭空间内产生气体致裂岩石，属物理性致裂范畴，无需公安管理部门审批，减少了繁杂的手续办理，节约了施工时间。现场通过优化致裂管规格、钻孔等参数，可精准调控裂解范围与破碎程度，且施工中噪声、粉尘排放量低，无飞石风险，高度契合节能减排、绿色施工理念，适配山地生态敏感区施工需求。

## 2.2 致裂管原理与优势

致裂管内充装混合粉末状材料（主要成分：高氯酸钾、水杨酸、草铵磷等），通过瞬间高温使高氯酸钾快速分解释放氧气，同时使水杨酸与草铵磷迅速气化，两者在分子级别混合并发生极速、自持的放热链式反应，在密闭空间内产生高温高压气体，体积瞬间膨胀数百倍，致使岩体顺着天然节理平稳裂解。相较于传统的爆破手段，该技术有以下显著优势：

（1）能量释放可控，通过致裂参数的优化可实现“裂而不碎”的效果，有效地保护孔壁的完整性，以及周边岩体及毗邻建（构）筑物结构的稳定性。（2）施工中不产生明火、冲击波及有毒有害气体，对邻近建（构）筑物的扰动控制在安全范围内。（3）流程简单易操作，单次作业的钻孔、填装时间可较传统施工时间缩短 70% 以上，施工效率显著提升。（4）施工产生的噪声、粉尘等排放符合环保标准，对生态敏感区及环境影响程度较小，符合绿色施工要求。（5）致裂的石块成块率高，便于后续人工清理，可同步提升施工效率与作业安全性。

## 2.3 质量控制关键措施

（1）参数设计：依据岩体强度试验与致裂能量理论分析，确定致裂孔深 0.8 m 至 1.0 m、孔距 0.5 m 至 1.0 m、单孔充装量为 1.0 kg 至 1.5 kg，并通过小范围的试验致裂验证其参数的合理性和稳定性，确保致裂效果与孔壁稳定达到预期。（2）施工流程：项目执行的致裂施工工艺流程，具体包括：定位与钻孔→清孔检查→安放致裂管→连接起爆装置→人员撤离与安全警戒→启动致裂→致裂后强制通风与有害气体检测→同步进行振动与噪声监测→清渣→孔壁检查与修整→最终成孔质量验收，该流程确保了各环节质量受控。（3）动态监控：桩基护壁与开挖质量是人工挖孔桩成孔的关键把控点，为确保现场一次性致裂管施工安全，采用振动监测仪将单次致裂振动速率严格地控制在 2.5 cm/s 以下，分别使用全站仪、激光铅垂仪进一步复核孔径偏差（≤ 50 mm）

与垂直度偏差（< 0.5%）。同时，对产生的噪声与粉尘数据进行记录，以验证绿色施工对环境的影响和成效。

本项目通过对一次性致裂管的参数进行系统调整和优化，并结合实时监测技术的应用，从源头上严格控制成孔过程中的施工质量与作业安全，进一步提升了成孔工艺的精准性与稳定性，有效预防施工风险，保障工程整体质量的可靠性。

## 2.4 应用成效

技术应用后，坚硬岩层段单桩日均开挖进尺跃升至 1.0 m 至 1.5 m，施工效率较机械开挖有了大幅度的提高；成孔质量验收显示，孔壁完整基本无松动、无超挖等现象；现场施工环境监测数据表明，施工作业面噪声值稳定控制在 80 dB 以下，粉尘浓度也符合环保标准，有效地降低了对周边生态的影响，基本实现了安全与环保、质量与效率的预期目标。

综合成效表明，相较于传统机械开挖，一次性致裂管技术实现了日均开挖进尺从 0.3 m 到 1.0 m 至 1.2 m 的跨越，效率提升 300% 以上；同时，在孔壁完整性、噪声与粉尘控制、环保性及综合成本（降低约 10%）等方面均展现出显著优势，且避免了民爆物品的繁杂审批流程。

## 3 低温下混凝土质量控制技术

### 3.1 低温对混凝土性能影响

当环境温度低于 5 ℃ 时，水泥的水化反应会明显减缓；若新浇筑混凝土在初凝时期受冻，内部自由水结冰膨胀将产生裂纹，导致混凝土后期强度上升受阻、耐久性下降。鉴于本项目冬春季施工时夜间温度低、昼夜温差大等影响，必须采取加强养护的措施阻断冻害风险。

### 3.2 “材料+工艺”双重保障

（1）材料优化：参考高海拔地区混凝土材料优化经验，为确保桩基础混凝土强度满足设计要求，经参建各方商议决定，将混凝土强度由“原设计的 C25 提高至 C30”。经对混凝土试块强度检测，28 天强度系数 ≥ 1.15，从材料上提升了混凝土的早期抗冻性与抗裂性能。（2）工艺设计：桩基浇筑完混凝土后，安排人员立即在桩顶覆盖“保水薄膜+双层棉被”构成的三层保温养护结构，及时形成密闭的保温养护空间，为混凝土后续养护提供坚实的物理环境。根据实测数据显示，该保温养护结构使桩顶混凝土表面温度较环境温度高出 10 ℃ 至 15 ℃，有效地维持了水化反应所需的适宜环境温度达 72 h 以上，这与低温环境下密闭保温是混凝土养护关键工艺研究结论相符<sup>[4]</sup>。

### 3.3 养护质量监控

(1) 实时监测: 为确保混凝土养护期间温度监控, 在每根桩埋设2个温度传感器(分别位于芯部与表层), 连续记录养护期内的温度曲线, 确保混凝土内外温差控制在20℃以内, 避免温度应力导致混凝土产生裂缝。

(2) 强度验证: 根据留置的同条件混凝土养护试块强度检测, 其7天、28天的抗压强度检测均满足设计要求, 且未见任何受冻迹象, 进一步验证了现场养护条件的适宜性与桩身实体混凝土强度的可靠性。(3) 外观检查: 混凝土养护是桩基后期成桩质量控制的关键环节, 每日检查保温层的完好性, 一经发现破损及时进行修补更换, 经过“监测、验证、修正”的闭环管理方式, 实现了养护过程的精准可控<sup>[5]</sup>。

### 3.4 效果验证

对全线桩基础进行低应变法检测, 结果表明: 桩身完整性I类桩占比98.5%, 其余均为II类桩, 无III、IV类桩出现。回弹法及同条件养护试块检测混凝土强度值均大于28 MPa; 现场未发现因冻害导致的开裂现象。养护温度监测曲线清晰表明, 保温措施成功将混凝土初期温度维持在5℃以上, 充分保障了水化反应的正常进行。检测结果验证了该开挖工艺及混凝土养护措施对桩基完整性的有效保障。

## 4 质量控制体系与工程应用

### 4.1 质量控制流程

本项目构建了“成孔→验孔→钢筋笼→验收→浇筑→养护”六个阶段的闭环管理体系<sup>[6]</sup>:

(1) 成孔阶段: 根据岩层地质条件的复杂性和变化情况, 实时动态调整钻孔致裂的相关工艺参数, 在土层段施工, 需加强护壁混凝土的厚度控制及强度检测, 确保施工质量和安全。(2) 浇筑阶段: 严格控制混凝土自由下落高度( $\leq 2$  m)、坍落度(160 mm至180 mm)与灌注速度( $\leq 2$  m/h), 以避免混凝土产生离析及钢筋笼上浮。(3) 养护阶段: 执行保温养护措施检查表, 并由监理人员签字确认。现场精细化的过程控制是提升施工可靠性的核心, 项目通过标准化流程, 有效地将各项技术措施转化为切实的质量技术成果。

### 4.2 综合效益分析

(1) 质量效益: 824根桩基检测一次性验收合格率达到100%, 桩身完整性与混凝土强度均满足设计及规范要求。(2) 进度效益: 通过制定质量管控措施实施要求, 项目施工时间较原计划提前了20余天完成, 为后续施工赢得了宝贵的施工窗口期。(3) 综合效益: 全面地规避了民爆物品审批周期长及安全风险, 施工综合成本降低

了约10%, 顺利地实现了质量与安全、进度与经济目标。

实践表明, 通过合理的技术优化, 可实现人工挖孔桩在质量、安全、进度与经济性的协同提升。

### 4.3 技术要点

(1) 借鉴岩土工程领域成熟技术原理, 将一次性致裂管技术应用于输电线路桩基坚硬岩层开挖施工中, 经过调控孔深、孔距等致裂参数, 实现了“致裂可控、扰动最小”的预期效果, 成功突破了传统施工工艺效率低、扰动大等瓶颈。(2) 结合高海拔地区混凝土材料优化经验与低温保温养护工艺要点, 因地制宜地提出“强度提升+物理保温”的双保险模式, 形成了适用于高寒重冰区的混凝土施工技术, 有效地避免了混凝土冻害后的返工损失。(3) 整合工艺梳理、风险防控、质量管控等现有研究核心思路, 建立了“技术优化、过程监控、多方协同”的施工质量控制体系, 为高寒硬岩等复杂环境下的桩基施工提供了施工新模式。

## 5 结束语

本文围绕“坚硬岩层高效开挖技术”与“低温环境下混凝土养护工艺”两大核心难题, 系统融合了一次性致裂管精准开挖技术与基于“强度提升+物理保温”双重策略的养护方法, 构建并实践了“技术实施—过程控制—系统协同”三位一体的高寒硬岩地区人工挖孔桩全面质量控制体系。该体系在有效保障桩体结构完整性与混凝土长期强度可靠性的基础上, 显著提升了工程施工的整体质量水平、进度控制能力与经济效益, 实现了三者的有机统一与协同优化。相关经验和路径为岩层覆盖广泛、气候条件极端恶劣地区的新能源基础设施、道路桥梁及房屋建筑等各类工程项目中的人工挖孔桩施工提供了科学合理、可操作性强的技术解决方案与管理支撑, 具有重要的工程借鉴与推广价值。

## 参考文献:

- [1] 李刚. 路基边坡人工挖孔桩施工安全管理研究[J]. 交通科技与管理, 2025, 06(14): 155-157.
- [2] 董菊花. 人工挖孔灌注桩施工技术及其质量控制研究[J]. 交通科技与管理, 2024, 05(17): 92-94.
- [3] 隆腾. 人工挖孔桩施工技术及其质量控制[J]. 交通科技与管理, 2024, 05(14): 62-64.
- [4] 魏兴. 基于高海拔地区人工挖孔桩的施工工艺研究[J]. 人民珠江, 2024, 45(S2): 89-91.
- [5] 王子一, 贾诗雨. 输变电工程人工挖孔桩施工技术探究[J]. 科技与创新, 2024(15): 111-114.
- [6] 朱宽, 钟冬望, 周桂松. 二氧化碳膨胀爆破一次性致裂管性能研究与应用[J]. 爆破, 2022, 39(02): 133-139.