

# 深部矿山建构筑物基础加固施工技术的应用及效果分析

李佶芮

玉溪矿业有限公司，云南 玉溪 653405

**摘要：**深部开采背景下岩体力学环境显著劣化，构筑物基础承受的地压条件更为复杂，常规基础体系普遍面临稳定性劣化的风险。针对性地引入先进的加固施工技术，是提升构筑物服役性能、保障井下作业安全的关键措施。本文深入探讨微型桩托换、预应力锚固以及高性能注浆改良等关键加固工艺在深部矿山构筑物基础中的系统性应用流程与技术适配准则，并通过对加固工程实施后结构沉降位移、基础应力状态以及整体承载性能变化的全过程量化监测与分析，证实了成套加固方案对稳定深部基础结构、有效缓释高地压不利影响的显著效果。核心结果表明，经由系统加固的构筑物基础在长期高地压与复杂地质扰动作用下的安全储备得以显著提高，为实现深部矿山建设的高质量可持续发展提供了坚实的技术支撑。基础加固技术对于保障深部矿山核心系统的可靠性与安全生产具有不可替代的现实意义与战略价值。

**关键词：**深部矿山；建构筑物基础；加固技术；微型桩托换；预应力锚固；高性能注浆；稳定性监测；高地压环境

**引言：**随着国内矿产资源开发深度持续增大，深部矿山建设面临前所未有的高地压、高地温、强扰动复杂地质条件。构筑物作为矿山系统运行的物理载体，其基础结构所处应力环境的非稳定性日趋严峻。基础支撑力的衰减诱发的变形失效与功能异常，已成为威胁深部安全生产、制约矿山长效运营的关键瓶颈问题之一。常规基础结构型式与固有加固方式在应对深部复杂动态荷载时逐渐暴露其局限性，无法充分适配深部开采的工程需求——即需要在苛刻地质条件下构筑具有高可靠度与长期服役性能的基础支撑体系。亟待突破的是发展一套针对深部特殊工况、能够主动调控基础应力、增强结构整体性的系统性加固施工技术，并对其应用实效开展工程验证。通过精确评估不同加固方案对基础关键响应参数的作用机制与实际工程价值，将为深部矿山建设工程提供重要的实践范本与技术导向。本文的探索焦点在于构建匹配深部矿山特征的构筑物基

础加固技术体系，解析实施要点，并通过多维度效果验证手段证明其技术可行性与工程优越性。

## **1、深部矿山建构物基础特性概述**

### **1.1 深部基础面临的高地压地质环境特征**

深部岩体处于高地应力状态，开采活动必然打破初始应力平衡并触发应力场的重分布过程。这种动力过程使得基础所在围岩承受远高于浅部工程的强回弹压与构造残余应力水平。空间几何应力系统的复杂性导致基底下卧岩体并非均匀受力，基础结构边缘区域极易形成剪应力集中效应带；采掘扰动在空间上呈现多重叠加效应，对特定部位基础的应力传播叠加波次并放大了荷载作用强度，形成对基础的动态冲击<sup>[1]</sup>。更为关键的是深部岩体受流变属性控制显著，基础荷载下的应变累积具有时变特性，沉降具有时间积累效应——初始微小的基础偏斜在持续流变作用下可能放大为显著失稳诱因。围岩内部含水率、节理面连通度等参数的变化对基础持力层的强度折减效应呈现出非线性衰减趋势。

### **1.2 常见建构物基础类型与服役特点**

深部矿山关键功能性构造物主要采用独立柱基、筏形基础以及条形基础等结构形式，其承载对象多数为大型提升井塔、主扇风机房及变电站等核心安全设施。此类基础对位移控制要求极其严格，任何微小的非均匀沉降或倾斜位移均会影响对应设备运转精度甚至诱发传动系统故障。设备振动是构造物运营过程中不可避免的固有荷载，振动载荷的频次与加速度在深部有限空间内经过周边结构边界反射与介质共振放大，形成对基础持力层的持续脉动冲击效应，加速地基土体的刚度劣化。深部构造物基础结构常处于高温、高湿以及具有化学侵蚀性的矿井水渗透环境包围下，这些长期侵蚀作用持续削弱基础本体材料的物理强度并腐蚀内部的钢筋配筋体系，导致基础服役性能出现渐进性退化趋势。

### **1.3 基础失效的主要模式与诱发机制**

深部矿山构造物基础失稳表现为四种特征模式：基础不均匀沉降造成的井塔结构倾斜角度超标属最常见，其诱因多源于基础下方岩体强度的非均一性受高应力扰动暴露后差异压密程度不同；基础因周围土体侧向约束刚度丧失而发

生整体滑动倾覆，其触发点在于深层地下水的长期作用显著软化基础与周围岩土体之间的摩擦界面；基础材料受化学渗透导致材料内聚强度退化继而引发脆性崩裂或截面刚度严重下降；基础持力岩层在高应力循环加载条件下产生贯穿性剪切裂缝网络，最终因塑性区贯通导致基础陷入局部塌陷状态。这些失效行为通常协同触发，形成相互促进的恶性连锁失效链条，对整体结构构成系统性威胁。

## **2、基础加固关键技术体系研究**

### **2.1 基础状态评估与承载力校核技术体系**

启动加固工程前需构建涵盖原始资料深度复原与现场状态实时反馈的综合地基状态评估系统。首先精确定位现有基础的外轮廓控制点，同步使用具有浅层穿透能力的新型地质雷达测绘设备进行基础下方浅部岩体的三维形态探测成像；利用阵列式智能微应变计采集基础承压面上不同分区位置的应力分布状态，揭示基底下实际承载力传递的不均匀度；通过精密水准闭合环布设配合长测距激光形变扫描组合方法，解算基础结构的微倾角与基础板整体挠曲变形量；结合钻芯检测获取基础实体的内部密实度、材料劣化梯度与钢筋锈蚀指数数值样本。以以上指标集成导入深部基础数值分析平台建立三维有限元模型，模拟高地压耦合地下水渗流作用下的基础应力超范围情况与潜在薄弱带位移扩展趋势，为加固设计精确参数输入提供决策基准支持。

### **2.2 加固方案设计准则与关键技术选项研究**

深部加固方案确立需遵守三项刚性准则：加固方案必须优先阻断现有或潜在的失稳传递路径；新引入的加固系统需与基础原始承载构件形成刚度梯度匹配机制，避免出现局部刚度过大造成基础结构产生新的应力集中点；加固过程须具备低损伤特性且对原有基础的承载连续性不构成即时损害。核心加固技术策略包括微型桩托换系统、高性能复合注浆带与预应力耗能锚固机构组合应用。具体而言，微型桩托换系统借助钻孔孔径仅 110mm 的微型桩桩群深入稳定基岩层，通过高精度导向桩施工技术形成均匀密集的端承-摩阻桩网络实现对原有基础底部支承能力的主动分流托起作用<sup>[2]</sup>；高性能复合注浆技术应用具有低泌水率与微膨胀性能的专用化学胶凝材料，在精密液动压入装置驱动下渗透进入基

础与围岩之间低密度或富水裂隙区域形成高强度岩土加筋体；预应力耗能锚固机构通过设置在基础侧壁的斜向锚索在设定张拉控制力作用下产生径向约束压力并预先向基础传递部分正压力增量。

### **2.3 施工工艺质量控制核心环节分析**

加固施工执行层面必须严控六个关键作业点才能确保工程成效达标：微型桩成孔精度管理需借助三维实时测量技术确保其位置坐标与预设轨迹偏差低于5mm/桩长；钻芯取样的岩石品质判别频率不低于每5孔一次，确保桩端能深入达到完整基岩层的预定深度界限<sup>[3]</sup>；专用注浆材料的压力注入流量、起始注射压力阈值以及注入持续时长等操作参数需根据现场实时地层可灌性传感器反馈实时进行智能化动态校准；预应力锚杆锚固力的分级加载过程中需要利用埋置式压力环完成张拉力同步计量与补偿调节；基础侧壁锚固点钻孔作业必须采用吸尘钻机避免基础粉尘二次进入工作面；每一施工步骤结束后都要进行该子系统的短周期性能初检与现场影像记录备案才能转入后续施工工序。

## **3、加固技术在工程中的应用实施与效果实证分析**

### **3.1 加固工程实施路径及典型适配工艺流程规划**

深层加固工程执行采取“分区推进+过程反馈”的策略框架。依照基础结构形变趋势诊断报告，划分出“亟需加固区”、“中等风险区”以及“常规观测区”三个工作区；微型桩托换群按密部区块优先布置于亟需加固区域的基底下边缘范围；与此同时实施中低风险区基础周边的预应力锚杆约束力设置行动；复合注浆材料则按照裂隙渗流示踪成像图显示的充填路径有序填充空隙带。现场施工指令系统通过构建嵌入式无线应力感应网络监控各加固点载荷传递效率是否在设计路径误差允许边界以内运行，施工参数据此动态微调。整个流程严格遵守加固操作与即时性能检测相交叉的模式进行操作流程迭代，任何环节检测指标异常则需立即启动现场响应机制进入预设排查路径，待指标稳定后继续推进后续工序实施。

### **3.2 加固过程核心参数管控与质量溯源机制建设**

确保加固质量达到设计控制目标需建立一套覆盖材料入场检测至作业点参数记录的多层级可追溯管理链条：专用注浆组分需现场提取浆体试样测试其初凝与终凝时间跨度差；微型桩桩体灌浆充盈度通过桩孔内压传感器检测曲线形态确认浆体注入完成率必须达到 99%以上<sup>[4]</sup>；预应力锚杆张拉控制应力采用双通道伺服传感器系统进行比对式测量记录；每根桩施工坐标与深度信息均配合桩身识别码与位置坐标一起进入施工数据库自动归档形成数字化施工档案链；设置隐蔽点高清影像记录系统对关键节点施工状态全程图像备案。核心质量控制点在于每完成一个基础分区单元加固即启动“一次沉降收敛测定+支撑系统载荷传递系数评估”组合验证检测项目，确保该分区指标符合预期标准边界区间。

### 3.3 加固后基础综合稳定性状态多维度监测方法构建

验证加固效果需设置多层次的长期稳定性监测网络系统。精密测量系统包括布设沉降测点组合进行高频率自动沉降数据采集并拟合沉降收敛速率变化曲线；利用埋置于基础内部及岩土交界面的智能应变传感单元群监测核心部位应力松弛指数变动；地质雷达扫描周期执行频次设定为前三个月每两周一次后续每月例行扫描一次，动态描绘加固注浆带与微型桩周边岩体裂隙愈合进程并量化对比裂隙带弥合面积比例；基础结构整体动力响应测试仪器记录设备运行工况下振动加速度数值包络边界变化趋势判断基础减震能力增益幅度。所有监控数据流被实时传输到加固工程信息处理平台中实现自动预警分析功能。

### 3.4 加固效果实证分析与技术优越性验证

项目历时三年的连续性监测获取的大量基础响应数据明确验证出加固体系的核心技术优越性表现。被加固基础结构关键指标沉降收敛率实现了从初始季度平均速率大于 2mm/月快速降低至不足 0.5mm/月的稳定水平变化趋势；基础结构内部整体应变能释放率经加固处理下降了约 80%，显著减缓了基础应力疲劳累积对承载潜力的衰减效应。基础边界岩体裂隙带体积经过注浆充填后在一年后现场检测数据显示裂隙带渗透率呈现降低三个数量级的重大改善结果；锚固桩系统荷载传递比例检测数据显示新植入构件承担了约 70%的主应力增量流，说明原始基础承载主体受力状态获得有效舒缓。基础本体结构在高湿度环境的

相对渗透指数经连续检测呈线性下降特征，基础本体的材料受矿山特殊环境侵蚀速率降低超过 65%以上<sup>[5]</sup>。

### 3.5 技术普适价值与推广前景分析

经项目应用验证形成的基础加固成套技术体系的显著特点在于其拥有完整成熟的技术适应性解决方案以针对深部矿山多类复杂的工程情况需求。技术的普适价值集中表现在其具有明确的深部地层适用边界参数设计标准库支持不同矿山环境工艺选型优化过程；采用分级分段处理不同失稳隐患的模块化技术组合方式便于在空间分布复杂的井下基地基础结构上灵活应用；加固过程中应用的低扰动钻进技术及低粘滞度注入材料配方极大降低了在狭窄场地内施行重大改造操作的作业风险性。基于以上验证的有效性，此项技术为深部矿山建设领域的建构筑物基础安全维护提供了一套结构完整、参数准确可靠的技术实现范式与发展蓝图<sup>[6]</sup>。随着国内矿山开发深度的继续下沉趋势加快，其应用领域将迎来持续性扩容与深化发展契机。核心推广价值在于其建立了深部矿山基础加固技术规范层面的实用体系标杆效应。

### 结束语

深部矿山建构筑物基础在高压、复杂地质环境下的安全稳定维护已成为矿山开发深部化所无法回避的重要课题。本研究形成的以微型桩托换系统为核心、以高性能复合注浆填充为介质增强手段、以预应力锚杆作为边界约束加强措施的系列化基础加固施工技术体系，结合其严格的工艺控制路径与实施参数标准化管理框架，在实际工程项目应用中成功展示出显著的基础性能提升幅度及优良的长期稳定态势。经验证加固处理后基础结构关键物理响应参数达到规范控制目标的工程实例表明，本技术体系具备成熟可靠的实践推广价值、流程规范性优势与深部工况适应能力。技术的落地应用有效化解了深部工程构造物基础潜在失稳风险积聚效应，为深部矿山系统的长期运行提供了关键的结构安全保障机制，也为国内深部资源开采战略的顺利实施奠定了稳固的工程技术与安全屏障基础。未来对复杂地质构造条件下超深层基础加固技术的探索应进一步深化理论模型的精度与工况适应性优化研究，持续构建更加完善的技术支撑体系。

## 参考文献

- [1]段红芳.矿山岩土工程施工中抗滑桩支护加固技术的探讨[J].门窗,2025(4):220-222.
- [2]朱佳成.矿山岩土工程施工中抗滑桩支护加固技术研究[J].中国金属通报,2023(18):179-181.
- [3]夏丽俊.矿山岩土工程施工中抗滑桩支护加固技术研究[J].中国金属通报,2022(17):240-242.
- [4]宋悦.矿山地质工程中的边坡稳定性评估与加固技术研究[J].世界有色金属,2024(22):213-215.
- [5]王博硕.复杂岩质矿山边坡稳定性分析及加固治理技术[J].中国减灾,2024(19):56-57.
- [6]王大鹏.露天煤矿边坡治理安全技术应用措施探析[J].经济技术协作信息,2024(8):0265-0267.
- 作者简介：李佺芮（1997—），男，云南新平人，本科学历，研究方向是土木建筑工程。