

复杂地质条件下地下厂房开挖支护关键技术分析

杨泽许 杨润飞 李梅洁

浙江省第一水电建设集团股份有限公司 浙江 杭州 471900

摘要：随着我国能源、交通及水利等基础设施建设向深部、复杂区域不断延伸，大型地下厂房工程日益增多。此类工程常面临高地应力、软弱破碎围岩、断层破碎带、高外水压力、岩爆、大变形等多种复杂地质条件的挑战，给施工安全与结构稳定带来极大风险。本文系统梳理了复杂地质条件下地下厂房开挖与支护所面临的主要地质难题，深入分析了针对性的关键技术体系，包括精细化地质超前预报、动态信息化施工、分区分块开挖策略、多元复合支护体系以及智能监测预警系统。通过理论分析与工程实践相结合，论证了上述技术在保障施工安全、控制围岩变形、提升支护效能方面的有效性，并对未来发展趋势进行了展望，旨在为类似复杂地质条件下的地下工程建设提供理论参考与技术支持。

关键词：复杂地质；地下厂房；开挖；支护；超前预报；动态设计

引言

地下厂房作为水电站、抽水蓄能电站、核电站等重大能源工程的核心构筑物，其规模宏大、结构复杂、埋深较大。近年来，随着西部大开发战略的推进和清洁能源需求的增长，越来越多的地下厂房选址于高山峡谷、深埋隧洞等区域，不可避免地遭遇高地应力、强震区、活动断裂带、软岩大变形、岩溶突涌水等极端复杂的地质环境。例如，锦屏二级水电站引水隧洞最大埋深达2525米，面临极高高地应力与岩爆风险；乌东德、白鹤滩等巨型水电站地下厂房均穿越多条大型断层带，围岩稳定性差；部分西南地区水电工程则需应对高地温、高外水压力等多重不利因素。在此类复杂地质条件下，传统的“新奥法”（NATM）理念虽仍具指导意义，但其静态、经验性的设计与施工方法已难以满足安全、高效、经济的建设需求。一旦开挖扰动引发围岩失稳、塌方、涌水甚至结构破坏，不仅会造成巨大的经济损失，更可能危及人员生命安全，延误工期。因此，如何科学识别地质风险、精准预测围岩行为、动态优化开挖支护方案，成为当前地下工程领域的核心课题。

1 复杂地质条件的主要类型及其工程挑战

1.1 高地应力与岩爆

高地应力是深埋地下工程最典型的地质特征之一。当原岩应力超过围岩强度时，开挖卸荷将导致能量急剧释放，引发岩爆——一种突发性、破坏性的动力失稳现象。岩爆具有不可预测性强、破坏速度快、危害范围广等特点，严重威胁施工设备与人员安全。此外，高地应力还可能导致围岩产生挤压大变形，尤其在软弱岩层中更为显著。

1.2 软弱破碎围岩与断层破碎带

地下厂房常穿越泥岩、页岩、糜棱岩、断层角砾岩等软弱破碎地层。此类围岩强度低、自稳能力差、遇水易软化崩解，开挖后极易发生松弛、坍塌。大型断层破碎带不仅力学性能极差，还常构成地下水的良好通道，易诱发突涌水灾害，进一步恶化围岩条件。

1.3 高外水压力与突涌水风险

在富水地层或邻近水库、河流的区域，地下厂房承受较高的静水压力。高外水压力一方面会降低围岩有效应力，削弱其承载能力；另一方面，在开挖揭露含水构造时，可能引发高压突涌水，造成淹井、设备损毁甚至人员伤亡^[1]。此外，长期渗流还可能导致围岩软化、溶蚀，影响结构耐久性。

1.4 岩溶与采空区

在可溶性岩层（如石灰岩、白云岩）分布区，地下厂房可能遭遇溶洞、暗河、落水洞等岩溶形态。这些空腔结构稳定性差，充填物复杂，一旦揭露极易失稳。若工程区域存在历史采矿活动，则采空区的存在同样构成重大安全隐患。

1.5 高地温与有害气体

在某些深埋或地热活跃区，地下厂房施工环境温度可高达40℃以上，严重影响作业效率与人员健康。同时，封闭空间内可能积聚甲烷、硫化氢等有害气体，存在爆炸或中毒风险。

上述复杂地质条件往往并非孤立存在，而是相互耦合、叠加作用，使得围岩力学行为呈现高度非线性、非连续性和不确定性，对开挖支护技术提出极高要求。

2 开挖支护关键技术体系

2.1 精细化地质超前预报技术

准确掌握掌子面前方地质信息是规避风险的前提。传统钻探虽直观但效率低、成本高，难以满足大型地下厂房快速推进的需求。现代超前预报技术强调“长短结合、多源融合”，通过多种手段协同工作，实现对前方地质体的立体化、动态化感知。长距离预报通常采用TSP（隧道地震波法）或TRT（真反射层析成像）等地球物理方法，可在百米级范围内初步圈定断层、破碎带或含水异常区；中短距离则依赖地质雷达（GPR）或瞬变电磁法（TEM），以更高分辨率识别小尺度裂隙或局部富水区；而在临近开挖面前方30米以内，则必须辅以超前水平钻孔，并同步采集岩芯、水压、气体成分等直接参数，结合红外探水和精细地质素描进行验证。这一多层次、递进式的预报流程，不仅提高了地质判识的准确性，也为后续施工决策提供了可靠依据^[2]。更重要的是，通过将各类预报数据实时集成至三维地质信息系统，构建动态更新的“地质BIM模型”，实现了地质风险的可视化表达与空间定位，使工程技术人员能够提前预判风险并制定针对性措施。

2.2 动态信息化施工与反馈设计

面对复杂多变的地质条件，传统的“一次性设计、按图施工”模式已显僵化，难以适应实际围岩响应的不确定性。因此，推行“动态设计、信息化施工”成为必然选择。该理念的核心在于将施工过程视为一个持续反馈与优化的闭环系统。首先，根据前期地质分区，将整个地下厂房划分为若干施工单元，针对不同地质段制定差异化的开挖支护预案。随后，在施工过程中布设全面的监测网络，实时采集围岩位移、支护结构应力、渗流压力等关键参数。这些数据被迅速传输至分析平台，用于反演围岩力学参数，并驱动三维数值模拟（如FLAC3D、MIDAS GTS等）预测后续开挖引起的围岩变形趋势。一旦监测值或模拟结果接近或超过预设的安全阈值，系统即触发预警机制，工程团队随即启动应急预案，动态调整开挖步序、缩短循环进尺、加密锚杆布置或增设钢拱架等强化措施。这种“边施工、边监测、边优化”的工作模式，不仅显著提升了工程应对突发地质风险的能力，也实现了从被动抢险向主动防控的根本转变，极大增强了施工过程的可控性与安全性。

2.3 分区分块、时空有序的开挖策略

大型地下厂房通常跨度超过30米、高度逾70米，若采用全断面一次性开挖，将对围岩造成剧烈扰动，极易诱发失稳。因此，必须采取分区分块、时空有序的开挖策略，以控制围岩变形速率并维持整体稳定性。实践

中，普遍采用竖向分层与横向分块相结合的方式：先开挖顶部导洞形成拱效应，再逐层向下扩挖，每层又可细分为多个块段，通过“中部先行、两侧滞后”或“跳仓开挖”等工艺，利用未开挖岩体作为临时支撑，有效限制围岩向临空面的位移。特别是在穿越断层破碎带或软弱夹层时，常保留核心岩柱或采用岛状开挖，形成稳定的“岩岛”结构，防止局部塌陷蔓延为整体失稳。与此同时，爆破作业也需精细化控制——在硬岩区实施光面爆破或预裂爆破，严格限制单响药量与起爆时序，以最大限度减少爆破振动对围岩完整性的损伤；而在软岩段或邻近已建结构区域，则优先采用机械铣挖或小型掘进设备，避免动力扰动^[3]。这种时空有序的开挖逻辑，本质上是通过人为调控开挖扰动的空间分布与时间节奏，引导围岩应力逐步重分布，从而在保证进度的同时维护结构安全。

2.4 多元复合、协同作用的支护体系

在复杂地质条件下，单一形式的支护往往难以兼顾强度、刚度、韧性与耐久性等多重需求，必须构建一个由初期支护与二次衬砌共同组成的多元复合支护体系，实现“主动约束”与“被动承载”的有机统一。初期支护以调动围岩自承能力为核心目标，通常由系统锚杆（或预应力锚索）、喷射混凝土（常掺入钢纤维或合成纤维以提升抗裂性能）以及必要时设置的钢拱架组成。锚杆通过径向约束抑制围岩松动圈扩展，而纤维喷砼则迅速封闭岩面，防止风化剥落并提供即时支护力；在极破碎或高应力区，I型或H型钢拱架可形成刚性骨架，承担主要荷载并为后续注浆提供支撑平台。在此基础上，针对特殊地质风险还需采取强化措施：例如在断层带前方施作超前小导管或管棚，形成“伞状”超前支护体；对松散围岩实施水泥-水玻璃双液浆或化学浆液注浆，提高其整体强度与抗渗性；在岩爆高风险区，则通过钻孔卸压或切缝等方式提前释放积聚的应变能。待初期支护变形趋于稳定后，再施作模筑混凝土二次衬砌，作为永久结构承担剩余荷载及高外水压力。整个支护体系的设计遵循“及时封闭、刚柔并济、宁强勿弱”的原则，确保各构件在时间与空间上协同工作，共同构建一个稳定可靠的承载结构。

2.5 智能化监测与预警系统

监测是动态设计的眼睛，也是保障施工安全的最后一道防线。现代地下工程监测正从人工、离散、滞后向自动、连续、实时的方向演进。当前的监测体系已不再局限于单一的收敛或沉降测量，而是涵盖变形、应力、渗流、微震等多个物理场的多参量融合监测网络。全站

仪自动监测系统可全天候追踪拱顶沉降与周边收敛，多点位移计与测斜仪则深入岩体内部捕捉深层位移轨迹；锚杆测力计与土压力盒实时反映支护结构的受力状态；渗压计与流量计监控外水压力变化及渗漏风险；而高灵敏度微震传感器阵列则能捕捉岩体微破裂事件，为岩爆提供早期预警。这些海量数据被实时上传至云端智能预警平台，借助大数据分析与机器学习算法（如LSTM神经网络、支持向量机等），建立围岩变形演化预测模型，并设定黄、橙、红三级预警阈值。一旦某项指标异常，系统不仅自动推送警报至管理人员移动终端，还可联动应急预案，如暂停开挖、启动注浆或疏散人员^[4]。更进一步，通过构建地下厂房的“数字孪生体”，将BIM模型、地质模型、监测数据与施工进度深度融合，实现物理空间与虚拟空间的实时映射，为工程决策提供沉浸式、可视化的智能支持，真正迈向“感知—分析—决策—执行”一体化的智慧建造新范式。

3 工程应用实例分析

以某西南地区大型水电站地下厂房为例，该厂房埋深800米，穿越3条区域性断层（F1、F2、F3），其中F2为宽约15米的糜棱岩带，RQD值低于20%，且存在高承压水（水头超过200米），地质条件极为恶劣。面对这一挑战，工程团队系统应用了前述关键技术体系。在开挖前，通过TSP、地质雷达与超前钻探的组合手段，提前120米精准识别出F2的位置、宽度及富水特性，为方案制定赢得宝贵时间。进入F2段后，采用“中部导洞先行、两侧扩挖滞后”的分块开挖策略，并严格控制每循环进尺不超过0.8米，最大限度减少扰动。同时，在掌子面前方施作 $\phi 108\text{mm}$ 超前管棚，形成稳固的超前支护壳体。初期支护采用 $\Phi 25$ 中空注浆锚杆、I20b型钢拱架（间距0.6米）及25厘米厚的C25钢纤维喷射混凝土，并同步实施全断面帷幕注浆，有效封堵水源、加固围岩。整个过程中，自动化监测系统持续运行，微震监测亦未发现明显

岩爆前兆。最终监测数据显示，拱顶最大沉降仅为18毫米，远低于30毫米的预警阈值，表明支护体系有效控制了围岩变形。该工程成功穿越F2断层，未发生任何重大安全事故，工期亦得到有效控制，充分验证了所提技术体系在极端复杂地质条件下的适用性与可靠性。

4 结语

复杂地质下地下厂房开挖支护是高度集成的系统工程，依赖精准地质认知、精细开挖调控、科学支护配置及快速监测反馈。本文构建的“精细化超前预报—动态信息化施工—分区分块开挖—多元复合支护—智能监测预警”五位一体技术体系，在多个国家级重大工程成功应用，提升了施工安全性、效率与经济性。展望未来，该领域将更注重智能化与绿色化。人工智能和深度学习将助力地质解译与风险预测，实现从“人判”到“智判”；机器人化施工装备将替代高危人工作业，提升施工精度与安全性；超高性能混凝土等新型材料有望突破传统支护性能瓶颈。此外，工程管理理念将延伸至全生命周期，依托数字孪生平台实现智能运维。唯有持续推动技术创新、学科交叉与工程实践融合，才能应对挑战，为国家重大基础设施建设提供坚实支撑。

参考文献

- [1]郝利军,白军平,冯俊淮.复杂地质条件下地下厂房岩壁梁开挖施工技术[J].四川水利,2024,45(S1):61-65+85.
- [2]郑文全.大型地下洞室群开挖支护关键技术——以天台抽水蓄能电站主副厂房为例[J].四川水利,2025,46(06):56-59+83.
- [3]傅建.尚义抽水蓄能电站地下厂房开挖与支护施工[J].人民长江,2024,55(S2):202-207.
- [4]韩进奇,曾强,薛本垚.高地应力条件下巨型水电站地下厂房机坑开挖支护施工技术[J].四川水力发电,2020,39(05):1-5.