

复杂地质条件下大型水工隧洞施工关键技术与风险控制

李金钟

红河锦瑞建筑工程有限公司 云南 红河 661100

摘要: 随着我国水利水电事业的快速发展,越来越多的大型水工隧洞工程被规划和建设于高山峡谷、断裂带、岩溶区等复杂地质环境中。此类工程具有埋深大、断面大、线路长、地质条件多变等特点,施工过程中面临围岩失稳、突涌水、高地应力、有害气体释放等多重风险,严重威胁工程安全、进度与投资控制。本文系统梳理了复杂地质条件下大型水工隧洞施工面临的主要地质风险类型,重点分析了超前地质预报、围岩分类与动态设计、TBM与钻爆法适应性选择、高压突涌水防控、软岩大变形控制、岩爆防治及信息化施工管理等关键技术,并结合典型工程案例,提出了全过程、多层次的风险控制体系。研究表明,构建“地质先行—动态设计—智能装备—精准防控—数字孪生”一体化施工技术路径,是保障复杂地质条件下大型水工隧洞安全高效建设的关键。

关键词: 复杂地质;大型水工隧洞;施工技术;风险控制;超前地质预报;TBM;突涌水;岩爆;信息化施工

引言

水工隧洞作为引水、泄洪、排沙、发电输水等水利工程的核心构筑物,在水资源调配、防洪减灾、清洁能源开发中发挥着不可替代的作用。近年来,随着国家“十四五”重大水利工程和“西电东送”战略的推进,一批超长、超大断面、深埋水工隧洞相继开工建设,如滇中引水工程、引汉济渭工程、雅砻江两河口混合式抽水蓄能电站引水系统等。这些工程普遍穿越构造活跃带、强震区、高寒高海拔区域或喀斯特地貌区,地质条件极其复杂,给施工带来前所未有的挑战。复杂地质条件主要表现为:①地层岩性多变,软硬互层频繁;②构造发育,断层破碎带、节理密集带广泛分布;③高地应力场导致岩爆或大变形;④岩溶发育,存在突泥突水风险;⑤地下水丰富,水压高、补给强;⑥有害气体(如瓦斯、 H_2S)赋存。在此背景下,传统施工方法难以有效应对突发地质灾害,亟需发展适应性强、风险可控的施工关键技术体系。

1 复杂地质条件下主要施工风险类型

1.1 围岩失稳与塌方

在断层破碎带、风化夹层或软弱围岩段,围岩自稳能力差,开挖后易发生局部掉块、拱顶坍塌甚至大规模冒顶。尤其在富水条件下,围岩强度进一步降低,塌方风险显著增加。

1.2 高压突涌水与突泥

岩溶管道、断层导水带或承压含水层一旦被揭露,可能引发瞬时高压涌水,流量可达数百甚至上千立方米每小时。若伴随泥沙或碎屑物质,则形成突泥灾害,不仅中断施工,还可能造成设备损毁与人员伤亡。例如,引汉济渭秦岭隧洞曾遭遇单日涌水量超 4万m^3 的极端情况。

1.3 软岩大变形

在千枚岩、页岩、泥岩等低强度、高塑性岩体中,围岩在应力作用下产生持续流变变形,初期支护结构常因挤压而开裂、扭曲甚至失效,导致断面收敛严重,影响后期衬砌施工。

1.4 岩爆灾害

在坚硬脆性岩体(如花岗岩、石英砂岩)中,当最大主应力超过岩体抗压强度的0.5倍以上时,开挖扰动可诱发岩爆。岩爆具有突发性、高能量释放特征,对人员与设备构成直接威胁。

1.5 有害气体释放

部分隧洞穿越煤系地层或有机质富集区,可能释放甲烷(CH_4)、硫化氢(H_2S)等有毒有害或可燃气体,存在爆炸、中毒风险,需严格监测与通风管理。

2 关键施工技术体系

2.1 超前地质预报技术

面对复杂地质环境,单一手段往往难以全面揭示前方地质状况,因此必须构建长、中、短距离相结合的综合预报体系。在长距离范围(通常大于100米),可采用TSP(隧道地震波法)或TRT(真反射层析成像)等地球物理方法,有效识别大型构造带、岩性分界面或潜在含水区域;进入中距离范围(30至100米),则可辅以地质雷达(GPR)或BEAM电磁波法,对溶洞、破碎带等局部异常体进行精细刻画;而在临近掌子面的短距离范围内(小于30米),必须依赖超前水平钻孔配合孔内电视成像、水压测试等直接手段,对围岩完整性、裂隙发育程度及地下水状态进行验证^[1]。这种多尺度、多方法融合的预报模式已在滇中引水工程香炉山隧洞段得到成功应用,通过

TSP、地质雷达与超前钻探的协同作业，多次提前预警断层破碎带与高压富水区，有效避免了重大安全事故的发生。

2.2 围岩分类与动态设计

推行基于Q值、RMR或BQ等指标的精细化围岩分类，并结合施工过程中的实时反馈实施动态设计，已成为现代水工隧洞建设的重要理念。具体而言，在开挖后应立即开展地质素描、收敛监测与应力反演，依据实测数据对初始围岩等级进行修正，并据此动态调整锚杆长度与间距、喷混凝土厚度、钢拱架型号等支护参数。对于高风险段，如预测存在大变形或突涌水可能的区域，应提前加强支护措施，例如增设锁脚锚管、注浆小导管或采用双层钢筋网。锦屏二级水电站引水隧洞工程正是通过这一动态设计理念，实现了支护结构与围岩变形的协调匹配，显著提升了施工安全性与经济性。

2.3 掘进方法选择：TBMvs钻爆法

2.3.1 TBM（全断面隧道掘进机）适用性

全断面隧道掘进机（TBM）因其掘进效率高、成型质量好、对围岩扰动小等优势，在长距离硬岩隧洞中广泛应用。然而，其对地质条件的适应性存在明显局限。当遭遇宽度超过20米的断层破碎带、发育强烈的岩溶空腔、或软岩大变形段时，TBM极易发生卡机、刀具异常磨损甚至主机倾覆等事故。此外，在小半径曲线段（转弯半径小于300米），常规TBM也难以灵活转向。为提升其地质适应能力，近年来已发展出双模式TBM（可在硬岩敞开式与土压平衡模式间切换）、扩挖式TBM等新型装备，使其在复杂地层中具备更强的通过性与容错能力。

2.3.2 钻爆法灵活性

相比之下，钻爆法虽在效率上不及TBM，但其对地质变化的适应性极强。通过调整炮孔布置、装药量及起爆顺序，可实现减震爆破或光面爆破，有效控制围岩损伤范围。在断层破碎带、岩溶发育区或TBM无法通过的特殊地段，钻爆法仍是不可替代的施工手段。然而，其振动效应需严格控制，一般要求质点振速不超过8厘米/秒，以避免对邻近结构或围岩稳定性造成不利影响^[2]。实践中，越来越多的大型水工隧洞采用“TBM为主、钻爆为辅”的混合掘进模式，如引汉济渭工程即在主干硬岩段使用TBM快速掘进，而在局部破碎带或溶洞区切换为钻爆法进行绕行或处理，兼顾了效率与安全。

2.4 高压突涌水防控技术

高压突涌水防控必须坚持“探、放、堵、排”相结合的原则。首先，在超前地质预报提示存在高压水体时，应立即实施超前水平钻孔探水，通常布置3至5个深度30至50米的钻孔，并配备止水阀与流量计，实现有控泄压，

防止失控涌水。其次，针对富水断层或岩溶通道，需进行系统性注浆加固。全断面帷幕注浆可在开挖面前方形形成封闭止水圈，注浆材料可根据地层渗透性选择普通水泥、超细水泥或化学浆液（如聚氨酯）；对于已开挖段的渗漏点，则可通过径向注浆进行补强；在低渗透性岩体中，还可采用高压劈裂注浆技术，强制扩大浆液扩散半径。注浆效果必须通过压水试验与钻孔取芯进行验证，确保止水效果达标。此外，施工现场必须同步建设完善的临时排水系统，包括排水沟、集水井及大功率水泵（单泵排水能力宜大于600立方米/小时），以应对突发涌水事件，防止淹井事故发生。

2.5 软岩大变形控制技术

软岩大变形问题源于低强度、高塑性岩体在高地应力作用下的持续流变特性，其控制核心在于“强支早闭、分层支护、适度让压”。初期支护必须足够强大，通常采用I25a或更大型号的钢拱架，间距控制在0.5至0.8米之间，并配合双层钢筋网与厚度不小于25厘米的喷射混凝土，形成刚柔并济的支护体系。同时，应根据地质预测和监测数据，在开挖轮廓上预留足够的变形量（通常可达30至50厘米），避免支护结构过早受压破坏。二次衬砌的施作时机亦需科学把握，一般应在围岩变形速率降至每日0.5毫米以下时进行，以确保结构长期稳定^[3]。在极端大变形段，还可采用U型钢可缩支架或让压锚杆等特殊支护形式，允许围岩在可控范围内释放部分能量，从而避免支护体系整体失效。

2.6 岩爆防治技术

岩爆防治需贯穿“监测—预警—防护—卸压”全过程。首先，应建立微震监测系统，在隧洞周边布设高灵敏度传感器网络，实时捕捉岩体破裂产生的微震信号，并通过算法评估岩爆风险等级，实现早期预警。其次，在高风险区域，可采取应力解除措施，如在掌子面前方钻设密集的应力释放孔，或实施浅孔松动爆破，人为降低局部应力集中程度。同时，必须加强掌子面及已开挖段的表面防护，通常采用挂设钢筋网并喷射掺加钢纤维或合成纤维的混凝土，有效抑制弹射碎块对人员和设备的伤害。此外，还需建立严格的人员避险机制，在岩爆高发时段暂停作业，组织人员撤离至安全区域。锦屏二级水电站引水隧洞通过集成微震监测与应力解除孔技术，成功将岩爆发生频率降低70%以上，显著提升了施工安全性。

2.7 信息化与智能施工管理

依托BIM（建筑信息模型）、GIS（地理信息系统）与IoT（物联网）技术，可构建覆盖全生命周期的数字孪生施工平台。该平台能够集成高精度地质模型、三维设

计模型及实时监测数据,实现施工进度、风险点分布、设备运行状态的可视化管理。更进一步,通过引入人工智能算法,可对围岩变形趋势、涌水概率等关键指标进行智能预测,辅助技术人员做出科学决策。在应急情况下,平台还能支持远程专家会诊与指挥调度,大幅提升响应效率。目前,该模式已在滇中引水、珠三角水资源配置等重大工程中开展试点应用,初步展现出在提升施工安全、质量和效率方面的巨大潜力。

3 典型工程案例分析:引汉济渭秦岭输水隧洞

引汉济渭秦岭输水隧洞穿越秦岭主脊,最大埋深达2012米,面临高地温(超过40°C)、高地应力、多条区域性断层及频繁岩爆等严峻挑战。为应对这些难题,工程采用了直径8.02米的敞开式TBM,并配套微震监测系统与强制降温装置。在施工过程中,通过TSP与超前水平钻相结合的方式,成功提前识别出F4等关键断层,并针对性采取注浆加固措施。针对岩爆风险,项目团队实施了应力解除孔钻设与表面纤维混凝土喷护,并建立了全隧洞光纤测温与变形监测网络,实现对围岩状态的全天候监控。最终,该工程成功穿越20余条断层,最高月进尺达到842米,且未发生重大安全事故,充分验证了综合技术体系的有效性。

4 全过程风险控制体系构建

为系统应对复杂地质带来的多重风险,有必要构建覆盖工程全周期的“五位一体”风险控制体系。首先,在前期勘察阶段应深化地质工作,通过加密钻孔、三维地震勘探等手段,构建高精度三维地质模型,为设计提供可靠依据。其次,在设计阶段应充分考虑地质不确定性,预留地质处理预案段、设置应急通道与备用排水系统,增强工程韧性。第三,在施工阶段必须落实“预报—决策—处置—反馈”的闭环管理机制,确保风险响应及时有效。第四,应强化应急管理,制定专项应急预案,配备

专业救援队伍与应急物资,提升突发事件处置水平^[4]。最后,施工期建立的监测系统应延伸至运行期,实现从建设到运维的全生命周期安全监控。此外,人员培训与安全文化建设同样不可忽视,只有全面提升一线作业人员的风险识别与应急处置能力,才能真正筑牢安全生产防线。

5 结语

复杂地质条件下大型水工隧洞施工是一项高风险、高技术集成的系统工程。本文研究表明,超前地质预报是风险预控的前提,需构建多尺度、多方法融合的综合预报体系;动态设计与信息化施工是适应地质不确定性的核心手段;针对突涌水、大变形、岩爆等典型风险,应采取“预防为主、防控结合”的技术策略;TBM与钻爆法的合理组合可兼顾效率与安全;全过程、全要素的风险管理体系是工程成功的保障。未来,随着人工智能、数字孪生、智能装备的发展,水工隧洞施工将向“感知—认知—决策—执行”智能化方向演进。建议进一步加强基于大数据的地质风险智能预测模型研究,发展自适应TBM智能控制系统,推广绿色低碳注浆材料与工艺,并探索隧洞施工机器人集群协同作业技术。唯有持续推动技术创新与管理优化,方能有效攻克复杂地质难题,支撑我国重大水利基础设施高质量、可持续发展。

参考文献

- [1]孟宪令.不良地质条件下水工隧洞施工技术[J].人民黄河,2025,47(S1):166-167.
- [2]池明伟.水工隧洞软岩大变形施工控制技术[J].建筑机械化,2025,46(01):104-107.
- [3]宋纯.富水环境下水工隧洞施工措施及结构响应规律研究[J].水利科技与经济,2024,30(11):131-134.
- [4]王垚琪.大断面水工隧洞施工安全管理举措[J].工程机械与维修,2024,(08):78-80.