

# 复杂地质条件下隧洞施工关键技术与风险应对策略

杨伟业

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司 新疆 石河子 832000

**摘要:**随着我国基础设施建设向纵深推进,越来越多的隧洞工程穿越高山峡谷、深埋地层及城市密集区,所面临的地质条件日益复杂。断层破碎带、高地应力、岩爆、涌水突泥、软弱围岩大变形等地质灾害频发,对施工安全、进度与成本构成严峻挑战。本文系统梳理了复杂地质条件下隧洞施工面临的主要风险类型,深入分析了超前地质预报、动态设计与信息化施工、围岩稳定控制、地下水处理等关键技术体系,并提出了“预防为主、动态响应、多措并举、智能协同”的综合风险应对策略。研究表明,构建以精准地质认知为基础、以智能监测为支撑、以快速决策为核心的风险管理体系,是保障复杂地质隧洞工程安全高效建设的关键路径。

**关键词:**复杂地质;隧洞施工;关键技术;风险识别;风险应对;动态设计

## 引言

隧洞工程是交通、水利等国家重大基础设施的核心部分,对区域经济发展、资源配置和应急保障意义重大。近年来,随着“交通强国”等国家战略推进,川藏铁路雅安至林芝段、滇中引水工程等一批超长、深埋、大断面隧洞工程启动。这些工程多穿越构造活动强、地质条件复杂的区域,施工环境恶劣、技术难度高、安全风险大。复杂地质条件涵盖多种不良地质体或极端地质现象,如活动性断层破碎带、高地应力与强岩爆区等。在此类条件下施工,易引发围岩失稳等灾害,威胁人员安全,导致工期延误、投资超支甚至工程失败。所以,深入研究复杂地质条件下隧洞施工关键技术与风险应对策略,对提升我国地下工程建设水平、保障国家重大工程顺利实施,具有重要理论价值与现实意义。

### 1 复杂地质条件下隧洞施工的主要风险识别

准确识别风险是有效防控的前提。复杂地质隧洞施工风险主要源于地质环境的不确定性与施工扰动的耦合作用,可归纳为以下几类:

#### 1.1 围岩失稳与大变形风险

在软弱破碎围岩(如千枚岩、页岩、断层泥)或高地应力区,开挖卸荷后围岩强度迅速劣化,产生显著的流变或挤压变形。若支护措施不当或不及时,将导致初期支护侵限、钢架扭曲、喷射混凝土开裂剥落,严重时引发掌子面失稳或局部塌方<sup>[1]</sup>。例如,兰渝铁路西秦岭隧洞穿越炭质板岩段时,曾出现日均收敛速率超过10cm的大变形,对施工安全构成极大威胁。

#### 1.2 涌水突泥风险

当隧洞穿越富水断层、岩溶管道或地下暗河时,一旦揭露承压水体,高压水携带泥沙、碎石瞬间涌入洞内,

形成突涌水或突泥灾害。此类灾害具有突发性强、破坏力大、救援困难的特点。

#### 1.3 岩爆风险

在深埋硬岩隧洞(埋深通常大于500m)中,高地应力集中于开挖临空面,当围岩储存的弹性应变能超过其强度极限时,会突然猛烈释放,导致岩石碎片高速弹射,即岩爆。岩爆可分为应变型、应变-结构面滑移型和断裂型,其破坏形式从轻微剥落到剧烈崩塌不等,严重威胁人员与设备安全。锦屏二级水电站引水隧洞最大埋深达2525m,施工期间共记录岩爆事件上千次,其中强岩爆数十次。

#### 1.4 有害气体与高地温风险

在煤系地层或油气田附近施工,可能遭遇瓦斯、硫化氢等易燃易爆或有毒有害气体,存在爆炸、中毒窒息风险。此外,深埋隧洞常伴随高地温( $>28^{\circ}\text{C}$ ),影响工人健康与设备运行效率,增加通风降温成本。

#### 1.5 地质信息不确定性风险

由于前期勘察手段(钻探、物探)的局限性,地下地质体的空间展布、物理力学参数往往存在较大误差。这种“地质盲区”使得施工方案缺乏精准依据,成为各类衍生风险的根源。

## 2 复杂地质隧洞施工关键技术体系

针对上述风险,现代隧洞工程已发展出一套集“探、预、支、排、监、调”于一体的综合技术体系。

### 2.1 超前地质预报技术(“探”)

超前地质预报作为风险防控的“眼睛”,其核心目标在于提前揭示掌子面前方一定范围内的地质状况,从而为施工决策提供科学依据。目前,超前地质预报技术已形成由长、中、短距离方法构成的多层次体系。长距离

预报主要依赖TSP（隧道地震波法）或TRT（真反射层析成像）等地震波技术，能够大致圈定断层、破碎带或岩溶发育区的位置，适用于宏观地质趋势判断；中距离预报则常采用瞬变电磁法（TEM）或地质雷达（GPR），对含水构造或空洞体具有较高敏感性；而短距离预报以超前水平钻探最为直接可靠，辅以红外探水和精细地质素描，可获取岩芯样本、水压数据及气体成分等关键一手资料<sup>[2]</sup>。未来的发展方向在于多源信息融合，通过人工智能算法对地震、电磁、钻探及地质编录等多维数据进行综合解译，有望实现从定性判断向定量预测的跨越，显著提升预报精度与可靠性。

## 2.2 动态设计与信息化施工技术（“预”与“调”）

面对复杂地质的高度不确定性，传统的静态设计模式已难以满足工程安全需求，动态设计理念应运而生。该理念强调设计方案必须根据施工过程中揭示的实际地质信息进行实时调整，实现“地质适配性”。信息化施工则是动态设计得以落地的关键执行机制，它通过建立现场信息的快速反馈通道——如每日地质编录、监测数据日报等——将一线实况即时传递至设计、施工与监理各方，支撑高效协同决策。在此基础上，BIM（建筑信息模型）与GIS（地理信息系统）技术的融合应用，进一步推动了隧洞工程全生命周期数字孪生模型的构建。该模型不仅集成地质、设计、施工与监测等多源异构数据，还能实现风险可视化、施工过程模拟推演及多方协同管理，为复杂地质条件下的精细化管理提供了强大平台支撑。

## 2.3 围岩稳定控制技术（“支”）

围岩稳定控制是确保隧洞结构安全的核心环节，其技术路径需根据具体地质风险特征进行差异化设计。在软弱围岩大变形区段，控制策略通常采取“主动加固+柔性支护+分步开挖”的组合方式。一方面，通过超前小导管注浆或深孔预注浆在开挖面前方形成加固圈，提升围岩自稳能力；另一方面，采用可缩式钢架、预留足够变形量、分次施作二次衬砌等柔性支护措施，允许围岩在可控范围内适度变形以释放高地应力，避免支护结构因刚性过大而被压溃。同时，选用核心土法、CD法或CRD法等分部开挖工法，有效减小开挖面暴露面积，抑制变形速率。而在高地应力硬岩区，岩爆防治则侧重于应力释放与表面防护。通过施工超前应力释放孔或实施深孔爆破切缝，人为诱导围岩能量缓慢释放；同时，在开挖面及时喷射钢纤维混凝土、挂设钢筋网并设置防护网，防止岩片高速飞溅伤人。此外，优化开挖方式，如采用光面爆破或TBM掘进，可最大限度减少对围岩的扰动，从源头上降低岩爆发生概率。

## 2.4 地下水综合治理技术（“排”）

地下水处理是复杂地质隧洞施工中的另一大难题，尤其在生态敏感区，必须摒弃“以排为主”的粗放模式，转而遵循“防、排、截、堵”相结合的综合治理原则。其中，超前帷幕注浆被视为控制高压富水断层或溶洞突涌水的根本性措施。该技术通过在开挖面前方注入水泥浆或化学浆液，形成封闭或半封闭的止水帷幕，有效隔断水源通道。然而，注浆效果高度依赖于对地质条件的精准把握，需科学设计浆液配比、注浆压力与扩散范围。对于无法完全封堵的水源，则可在确保围岩稳定的前提下，通过设置泄水孔进行限量排放，并配套建设大容量、高扬程的排水系统，实现有控疏排<sup>[3]</sup>。与此同时，环保要求的日益提高也推动了生态友好型注浆材料的研发与应用，低毒、可降解的新型浆材正逐步替代传统高污染材料，以最大限度减少对地下水环境的负面影响。

## 2.5 智能化监测与预警技术（“监”）

全天候、全方位的智能监测构成了风险响应的“神经中枢”。现代隧洞工程已广泛部署由收敛计、多点位移计、锚杆轴力计、水压力计、微震监测仪及气体传感器等组成的多元传感网络，对围岩变形、支护结构受力、地下水状态、微震活动及有害气体浓度等关键指标进行自动化、连续化采集。在此基础上，借助大数据分析与人人工智能技术，特别是长短期记忆网络（LSTM）、支持向量机（SVM）等机器学习算法，可对海量监测数据进行深度挖掘，识别异常模式并预测发展趋势，从而构建多参数融合的智能预警模型。这一转变使得预警机制从传统的“阈值触发式报警”升级为“趋势预测式预警”，显著提升了风险响应的前瞻性与主动性。此外，为保障人员安全，隧洞内还普遍配备UWB精确定位系统、应急广播及自救呼吸装置，确保在灾害突发时能够迅速组织人员撤离并开展有效救援。

## 3 综合风险应对策略

技术是基础，策略是灵魂。有效的风险应对需要一套系统性的管理框架。

### 3.1 构建“预防为主、关口前移”的风险管理体系

风险管理不应仅局限于施工阶段，而应贯穿于工程全生命周期。在勘察阶段，应强化地质工作的深度与精度，推广“地质选线”理念，尽可能规避已知的重大不良地质体。在设计阶段，则需充分考虑最不利地质组合情景，预留充足的安全裕度，并编制详尽的专项应急预案。这种“预防为主、关口前移”的管理思路，能够从源头上降低风险发生的可能性与后果严重性，是实现本质安全的根本途径。

### 3.2 推行“动态响应、分级管控”的决策机制

面对复杂多变的地质条件，僵化的管理流程难以适应实际需求。因此，有必要建立一套基于风险等级的动态响应与分级管控机制。该机制通常将风险划分为蓝、黄、红三个等级，并对应不同的响应措施：蓝色预警（低风险）状态下，主要加强常规监测与日常巡查；黄色预警（中风险）时，则需启动专项预案，如加强支护、限制掌子面作业人数、加密监测频率等；一旦触发红色预警（高风险），必须立即停工，组织人员撤离，并迅速召集专家团队进行会诊，制定科学的抢险加固方案。这种分级响应模式确保了资源投入的精准性与应急处置的高效性。

### 3.3 实施“多措并举、协同作战”的综合治理

实践证明，单一技术手段往往难以有效应对复杂的地质灾害，就像单兵作战难以抵挡敌人的强大火力。成功的风险控制必然是多种技术协同作用的结果。例如，在处理高压富水断层时，仅靠注浆或仅靠排水都存在局限性。注浆虽然可以封堵水流通路，但如果排水不畅，可能会导致水压升高，引发新的地质灾害；排水虽然可以降低水压，但如果注浆不充分，水流可能会绕过注浆区域，继续对隧洞造成威胁<sup>[4]</sup>。因此，必须将超前钻探探明、帷幕注浆封堵、初期支护强化、排水系统完善以及实时水压监测等多项措施有机结合，形成“五位一体”的综合治理体系。这就像一场精心策划的战役，各个兵种密切配合，发挥各自的优势，共同攻克敌人防线，才能确保施工安全万无一失。这种“多措并举、协同作战”的思维，体现了系统工程的整体观与协同观，是应对复杂地质条件的有效法宝。

### 3.4 打造“智能协同、平战结合”的应急保障体系

高效的应急保障体系不仅是“战时”的救命稻草，更需在“平时”通过常态化演练不断磨合与优化。依托数字孪生平台，可以定期开展虚拟应急演练，检验预案的可行性与各参与方的协同效率。数字孪生技术就像一个

虚拟的战场，能够模拟各种真实的地质灾害场景，让应急人员在不实际面临危险的情况下进行实战演练，提高他们的应急处置能力和协同作战能力。同时，必须在施工现场储备充足的应急物资，如速凝水泥、大功率应急水泵、生命探测仪、正压式呼吸器等。这些应急物资就像战士的武器和弹药，是应对灾害的重要保障。并且要与地方消防、医疗等专业救援力量建立联动机制，确保在真实灾害发生时能够“召之即来、来之能战、战之能胜”。这就如同建立了一支强大的后援部队，在关键时刻能够提供有力的支持和援助，真正实现“平战结合”，为隧洞施工的安全保驾护航。

## 4 结语

复杂地质下隧洞施工是极具挑战的系统工程。其安全高效建设依赖综合体系，即以“精准地质认知”为基石、“动态设计与信息化施工”为核心、“多元化关键技术”为支撑、“智能化风险预警”为保障。未来，前沿科技深度融合，隧洞施工将更安全、智能、绿色。研究与实践应聚焦：推动地质透明化，发展高分辨率勘探技术，构建厘米级精度模型；加速装备智能化，研发智能掘进机器人，实现高危作业“无人化”；探索材料功能化，开发智能支护材料，让支护结构“主动调控”；推进管理平台化，构建国家级智慧管理云平台，实现资源共享。持续推动创新与管理变革，才能应对挑战，保障国家重大战略工程实施。

## 参考文献

- [1]胡有军.复杂地质条件下水利隧洞施工技术研究[J].建筑机械,2025,(06):76-79.
- [2]王鑫.复杂地质条件下的水利隧洞施工稳定性研究[J].水上安全,2025,(16):139-141.
- [3]何炬鹏.复杂地质下的输水隧洞施工难点及支洞封堵技术[J].内蒙古水利,2023,(09):33-35.
- [4]罗舟.深埋复杂地质软岩大变形隧洞施工技术[J].广东建材,2022,38(05):76-78.