

# 长距离引水隧洞 TBM 掘进施工风险识别与应对策略

杨润飞 李梅洁 杨泽许

浙江省第一水电建设集团股份有限公司 浙江 杭州 471900

**摘要:** 随着我国水资源优化配置和重大水利基础设施建设的持续推进,长距离引水隧洞工程日益增多。全断面岩石隧道掘进机(TBM)因其高效、安全、环保等优势,已成为此类工程的核心施工装备。然而,长距离、大埋深、复杂地质条件下的TBM掘进施工面临着前所未有的挑战,各类风险交织叠加,一旦失控,极易导致工期严重延误、成本超支乃至灾难性事故。本文旨在系统性地识别长距离引水隧洞TBM施工过程中的主要风险源,深入剖析其成因与演化机理,并在此基础上,构建一套覆盖勘察设计、设备选型、施工组织、监测预警及应急管理全过程的综合应对策略体系。研究认为,必须坚持“地质先行、风险预控、动态管理、科技赋能”的原则,通过精细化地质预报、智能化设备运维、科学化施工组织与协同化的应急响应,方能有效驾驭TBM掘进风险,保障国家重大水利工程的安全、优质、高效建成。

**关键词:** 长距离引水隧洞; TBM掘进; 施工风险; 风险识别; 应对策略

## 引言

我国水资源分布不均,南水北调等重大引调水工程是解决矛盾的关键。其中,长距离引水隧洞是工程“主动脉”,具有“三长一深一复杂”特征:掘进、通风、运输距离长,埋深大且地质复杂。传统钻爆法在此环境下效率低、风险高、扰动大,难满足现代水利工程高标准要求。全断面岩石隧道掘进机(TBM)技术凭借工厂化、机械化等优势,成为长距离硬岩隧洞施工首选。但TBM是精密复杂系统工程,掘进依赖地质环境,长距离掘进如同在“黑箱”穿行,遇不良地质概率高,易引发刀具磨损、设备卡机等问题,甚至造成巨大经济损失和工期延误。因此,系统识别风险并制定应对策略,既是保障项目实施的技术需求,也是推动TBM技术发展的战略支撑,对提升国家重大基础设施建设风险防控能力意义深远。

## 1 长距离引水隧洞TBM施工主要风险识别

风险识别是风险管理的第一步,也是最关键的一步。长距离引水隧洞TBM施工风险可归纳为四大类:地质与水文地质风险、TBM设备与技术风险、施工组织与管理风险以及环境与社会风险。

### 1.1 地质与水文地质风险

地质与水文地质风险是TBM施工最根本且不可控的风险源,直接关乎工程成败:(1)突涌水灾害:在高压富水地层掘进,隔水屏障被突破后,地下水在巨大压力下瞬间涌入隧洞,淹没工作面和设备,威胁人员安全,冲蚀围岩致坍塌,携带泥沙淤塞隧洞。长距离隧洞穿越多个水文地质单元,水压高,风险大。(2)软岩大变形:穿越软弱、膨胀性围岩时,围岩在高地应力下持续塑性

流动变形,挤压设备致卡机,初期支护易被压溃,影响掘进效率。(3)岩爆:在坚硬、完整、高应力脆性岩体中掘进,围岩弹性应变能突然释放,损坏设备,威胁人员安全,长距离深埋隧洞是岩爆高发区<sup>[1]</sup>。(4)断层破碎带与蚀变岩:规模较大的断层破碎带结构松散,掘进时易掌子面失稳坍塌,甚至埋机;蚀变岩强度低,遇水软化泥化,掘进困难。(5)高地温:深埋隧洞常伴高地温,影响作业人员健康和工作效率,还导致设备过热失效,加速磨损。

### 1.2 TBM设备与技术风险

TBM作为核心装备,其自身状态和适应性是风险的重要来源。(1)刀具异常磨损与失效:在长距离掘进中,刀具是消耗最快的部件。遇到石英含量高的硬岩、孤石或节理发育不均的地层,会导致滚刀偏磨、弦磨、刀圈断裂等非正常磨损,大幅降低掘进效率,增加换刀频率和成本。在高压富水条件下换刀,更是高风险作业。(2)主轴承与关键部件故障:TBM主轴承是传递巨大推力和扭矩的核心部件,一旦发生故障,几乎意味着整机报废。此外,液压系统、电气系统、控制系统等任何一个子系统的故障都可能导致全线停工。长距离施工使得设备维修、备件供应周期长、成本高。(3)设备选型不当:TBM类型(敞开式/护盾式)及其具体参数(推力、扭矩、功率、扩挖能力等)必须与预期地质条件高度匹配。若前期地质勘察不清,导致设备选型错误,例如在极不稳定地层选用敞开式TBM,或在可能发生大变形地段未配置足够的扩挖功能,则设备将难以应对实际地质挑战。(4)后配套系统瓶颈:长距离掘进对出渣、通风、物料

运输、供电、排水等后配套系统提出了极高要求。皮带机出渣能力不足、独头通风效果差导致空气质量恶化、有轨/无轨运输效率低下等问题，都会成为制约TBM高效掘进的“卡脖子”环节。

### 1.3 施工组织与管理风险

再先进的设备和技术，也需要科学的组织管理来保障。(1) 地质信息滞后与误判：尽管有超前地质预报，但其精度和范围有限。若对预报信息解读错误，或未能及时根据揭露的地质情况调整施工方案，就会导致风险应对措施滞后，错失最佳处置时机。(2) 应急预案缺失或演练不足：面对突发险情，若没有针对性强、可操作的应急预案，或虽有预案但未进行充分演练，现场人员将手忙脚乱，无法有效控制事态，小风险可能演变成大事故。(3) 多专业协同不畅：TBM施工涉及地质、机械、电气、测量、支护、通风、安全等多个专业。若各专业间沟通协调机制不健全，信息共享不及时，容易出现决策失误或执行偏差。(4) 人员技能与经验不足：TBM操作、维护和地质判识都需要高度专业化的技能。若施工队伍缺乏在类似复杂地质条件下长距离掘进的经验，面对新问题时可能束手无策。

### 1.4 环境与社会风险

此类风险虽不直接作用于掘进面，但影响深远。(1) 生态环境影响：施工废水、废渣若处理不当，可能污染地表水和地下水；施工活动可能破坏地表植被，扰动野生动物栖息地；隧洞排水可能引起区域地下水位下降，影响周边生态和居民用水。(2) 社会维稳风险：大型工程征地拆迁、施工噪声粉尘扰民、交通堵塞等问题若处理不当，可能引发与当地社区的矛盾冲突，影响工程正常推进。

## 2 风险成因与演化机理分析

上述风险并非孤立存在，而是相互关联、耦合演化的。(1) 地质不确定性是根源：勘察手段的局限性（钻孔间距大、深度有限）导致对地下三维地质结构的认知存在“盲区”，这是所有地质风险的根本原因。(2) 设备-地质不匹配是导火索：TBM作为一种刚性设备，其设计工况是理想化的。一旦遭遇超出其适应范围的地质条件，设备系统便会承受异常载荷，从而诱发设备故障或施工困难。(3) 信息流不畅是放大器：从地质预报、现场揭露到决策响应之间存在时间延迟和信息衰减。如果这个信息闭环不畅通，风险信号就无法被及时捕捉和处理，导致风险不断累积和放大<sup>[2]</sup>。(4) 管理缺陷是催化剂：不完善的组织架构、不清晰的职责分工、不到位的培训演练，会削弱整个项目团队的风险抵御能力，使得本可控制的小问题演变为系统性危机。例如，一次典型的“断

层破碎带突涌水”事件的演化路径可能是：前期勘察未能准确定位断层位置和规模（地质不确定性）→TBM选型时未充分考虑强富水断层风险（设备-地质不匹配）→超前预报虽有异常但未引起足够重视（信息流不畅）→掘进至断层时未采取有效的超前加固和排水措施（管理缺陷）→最终导致高压水突破掌子面，引发灾难性突涌水。

## 3 综合应对策略体系构建

针对上述风险，必须建立一个多层次、全过程、动态化的综合应对策略体系。

### 3.1 勘察设计阶段：强化源头控制

#### 3.1.1 精细化综合地质勘察：

采用“空-天-地-洞”一体化勘察技术。在传统钻探基础上，大力应用高密度电法、音频大地电磁法（AMT）、微动探测等物探手段，构建高精度的区域三维地质模型。对于重大风险段（如推测的断层、岩溶区），应加密钻孔，必要时进行定向钻探和水文试验，摸清水文地质参数。

#### 3.1.2 基于风险的TBM适应性设计

摒弃“一刀切”的设备选型模式，推行“地质风险导向”的TBM定制化设计。例如：对于高岩爆风险洞段，选用具备强扩挖能力和快速支护系统的敞开式TBM，并预留岩爆监测与防护接口。对于高突涌水风险洞段，优先选用具有封闭式护盾和强大排水能力的单护盾或双护盾TBM，并集成高压水喷射破岩（HDD）等辅助功能<sup>[3]</sup>。为应对软岩大变形，TBM应具备多次扩挖功能，并配备高效的钢拱架安装和喷锚设备。

#### 3.1.3 BIM+GIS全生命周期管理

建立工程BIM（建筑信息模型）与区域GIS（地理信息系统）融合的数字孪生平台。将勘察数据、设计模型、施工计划、风险源信息等全部集成于该平台，实现可视化、可模拟、可追溯的全生命周期管理，为后续施工决策提供强大的数据支持。

### 3.2 施工准备阶段：夯实风险预控基础

#### 3.2.1 构建多源融合的超前地质预报体系

建立“长-中-短”距离相结合的预报体系。长距离（100m+）采用TSP、TRT等地震反射法；中距离（30-100m）采用地质雷达、瞬变电磁法；短距离（<30m）采用超前水平钻探（配孔内电视、水文测试）。关键是将多种方法的数据进行融合解译，利用AI算法（如卷积神经网络CNN）提高预报准确率，并建立预报-验证-反馈的迭代优化机制。

#### 3.2.2 制定分级分类的应急预案库

针对识别出的每一类主要风险，编制详细的专项应急预案。预案应明确触发条件、响应流程、责任主体、资源

调配、技术措施和撤离路线。预案库应动态更新,并定期组织桌面推演和实战演练,确保关键时刻拉得出、用得上、打得赢。

### 3.2.3 建立专业化的人才梯队

组建由地质专家、TBM工程师、测量师、安全总监等组成的“TBM地质工作组”,全程驻场,负责地质研判、风险预警和方案优化。同时,加强对一线操作和维护人员的系统性培训,提升其风险意识和应急处置能力。

## 3.3 施工掘进阶段:实施动态精准管控

### 3.3.1 基于大数据的TBM掘进智能诊断

实时采集TBM掘进参数(推力、扭矩、转速、贯入度、振动、油温等)和地质信息,构建掘进数据库。利用机器学习模型(如LSTM长短期记忆网络)对数据进行深度挖掘,实现对刀具磨损状态、围岩级别、潜在地质风险的智能诊断与预测,做到“掘进即感知,感知即预警”<sup>[4]</sup>。

### 3.3.2 动态设计与信息化施工(AICD)

打破传统静态设计的束缚,推行“动态设计、动态施工”理念。根据超前预报结果和TBM实时掘进反馈,由地质工作组牵头,联合设计、施工、监理各方,快速会商,动态调整支护参数、掘进参数甚至施工工法。例如,在接近破碎带前,提前施作超前管棚或进行化学注浆加固。

### 3.3.3 关键风险点的针对性处治技术

突涌水遵循“先探后掘、以堵为主、限量排放”的原则。采用超前钻孔探水,高风险段实施全断面帷幕注浆或局部注浆封堵。软岩大变形采用“快封闭、强支护、预留变形量、分次扩挖”的综合对策。初期支护要及时、封闭成环,并采用可缩性钢拱架;TBM扩挖后立即进行二次衬砌。岩爆采取“应力释放、加固围岩、防护设备、躲避人员”的综合措施。可通过钻孔、爆破等方式进行应力释放;采用高强锚杆、纤维混凝土进行加固;在TBM上加装防护网;严格控制作业人数,设置避险硐室。

### 3.3.4 保障后配套系统高效运行

优化物流组织,采用智能调度系统管理有轨/无轨运

输;加强通风管理,采用接力风机、大功率风机保证洞内空气质量;建立高效的排水系统,确保涌水能及时排出。

## 3.4 应急响应与恢复阶段:快速有效处置

一旦发生险情,立即启动相应级别的应急预案。首要任务是确保人员安全,迅速撤离。其次,组织专家团队进行险情评估,制定科学的抢险救援方案。利用无人机、机器人等先进装备进入危险区域进行勘察,避免盲目施救。抢险成功后,要进行全面的设备检修和地质复勘,评估后续掘进风险,制定安全可靠的恢复掘进方案。

## 4 结语

长距离引水隧洞TBM掘进施工是高风险、高技术、高投入的系统工程,风险具有源头性、系统性、动态性和不确定性。本文系统识别四大类风险并剖析成因与机理,提出覆盖工程全生命周期的综合应对策略体系。该体系核心在于源头把控,通过精细化勘察与适应性设计降低风险;前瞻预控,构建超前预报体系和应急预案库;动态智控,依托数字化技术实时感知、智能诊断和动态优化;协同共治,建立多专业协同决策机制。未来,随着智能传感等前沿技术深度融合,TBM施工风险管控将更精准、智能、自主。坚持科技创新与精细管理并重,才能驾驭TBM,打通国家水网,为中华民族永续发展筑牢水利基石。

## 参考文献

- [1]王志强.长距离引水隧洞重难点分析[J].中国水运,2025,(10):105-107.
- [2]任小亮,孙凯宇.长距离引水隧洞TBM掘进及施工布置研究[J].陕西水利,2024,(07):138-141+145.
- [3]王明辉.TBM法和钻爆法在长距离引水隧洞中的联合应用[J].水利技术监督,2023,(08):251-253+279.
- [4]吕斌,邱道宏,杨修,等.深埋长距离引水隧洞敞开放式TBM施工不良地质灾害处置措施研究[J].水利规划与设计,2022,(11):121-125.