复杂地质条件下铁路隧道施工塌方风险预警与防控技术研究

高锐

中铁十八局集团有限公司，中国 ·天津 300222

摘要： 铁路隧道施工在复杂地质条件下面临着较高的塌方风险，这一问题不仅威胁施工人员的生命安全，也对工程进度和工程质量造成严重影响。如何实现科学有效的塌方风险预警与防控，成为当前隧道工程研究与实践中的重要课题。本文基于复杂地质条件的特点，对铁路隧道施工过程中塌方风险的成因、影响因素及风险机制进行了深入分析，探讨了风险预警体系的构建原则与实现途径，并提出了针对性的防控技术措施。研究结果表明，塌方风险预警需要依托多源监测信息和数据融合技术，防控措施应当结合地质勘察、支护优化、信息化施工管理与智能化预警系统的综合应用。实践表明，该技术路径不仅能够有效降低塌方发生概率，还能够提升铁路隧道施工的安全性与经济性，为复杂地质条件下隧道施工安全提供了重要参考。

关键词： 复杂地质条件；铁路隧道；塌方风险；预警；防控技术

Research on Early Warning and Prevention Technologies for Tunnel Collapse in Railway Construction under Complex Geological Conditions

Gao Rui

China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., China Tianjin 300222

Abstract: Railway tunnel construction faces a high risk of collapse under complex geological conditions. This issue not only threatens the lives of construction personnel but also seriously affects project progress and quality. How to achieve scientific and effective collapse risk early warning and prevention has become an important topic in current tunnel engineering research and practice. Based on the characteristics of complex geological conditions, this paper deeply analyzes the causes, influencing factors, and risk mechanisms of collapse during railway tunnel construction, explores the principles and implementation approaches for establishing a risk early warning system, and proposes targeted prevention and control measures. The research results show that collapse risk early warning requires reliance on multi-source monitoring information and data fusion technology, while prevention and control measures should integrate geological investigation, support optimization, informatized construction management, and intelligent early warning systems. Practical application demonstrates that this technical approach can not only effectively reduce the likelihood of collapses but also improve the safety and economic efficiency of railway tunnel construction, providing an important reference for the safe construction of tunnels under complex geological conditions.

Keywords: Complex geological conditions; Railway tunnels; Collapse risk; Early warning; Prevention and control technology

0 引言

铁路隧道施工作为铁路建设中的重点和难点环节，在复杂地质条件下尤为凸显安全风险。由于复杂地质结构的不均匀性和不确定性，隧道在施工过程中极易发生围岩失稳和塌方问题。塌方一旦发生，不仅会造成施工进度延误、经济损失增加，更会对施工人员的生命安全造成威胁。因此，如何在复杂地质条件下有效识别风险因素，构建科学合理的预警体系，并采取切实可行的防控措施，已成为保障隧道工程顺利实施的重要问题。本文将从复杂地质条件下塌方风险的成因与特点入手，结合现代监测技术与施工管理理念，系统分析风险预警与防控的技术路径，力求为铁路隧道安全施工提供理论指导和实践支持。

1 复杂地质条件下隧道塌方风险的成因与特点

1.1 地质结构复杂性

复杂地质条件是隧道塌方风险形成的根本原因。黄土、砂岩、泥岩、石灰岩等地层常见于铁路隧道工程中，不同地层结构差异显著，力学性能复杂多变。断层破碎带和褶皱发育带往往岩体松散，存在大量结构裂隙，导致围岩整体稳定性下降。当隧道掘进时，地应力重新分布，原本脆弱的岩层极易失稳，出现局部破裂和整体坍塌。部分区域存在溶蚀空洞或岩溶裂隙，开挖过程中若未能有效探测和加固，则可能引发大面积塌方。由此可见，地质结构复杂性是塌方风险的内在诱因，其隐蔽性强、不可预知性高。

1.2 外部环境影响

除了地质因素，外部环境也是不可忽视的塌方触发条件。降雨、地下水渗透、河流侵蚀等水文因素对围岩稳定性影响尤为显著。在富水地层中，地下水压力使围岩抗剪强度下降，软弱层被冲刷和侵蚀，进而失稳塌落。地震作用同样是风险的重要外部因素，震动会加速裂隙扩展，使原本稳定的岩体发生失衡。季节冻融循环也可能导致岩体强度降低，从而增加塌方几率。这些外部环境因素呈现出随机性和突发性，加大了施工过程中的风险管理难度。

1.3 施工扰动作用

在隧道施工中，施工扰动是最直接、最常见的塌方诱因。不合理的施工工艺、爆破震动过大、支护滞后或欠缺、超挖欠挖等问题都会破坏围岩原有的应力平衡。特别是在复杂地质条件下，围岩稳定性对扰动极为敏感，稍有不当即可能导致结构失稳。例如，过快的掘进速度使围岩暴露时间过长，若未及时支护，极易出现塌方。因此，施工扰动是塌方风险中最可控却又最需要严格管理的因素。

2 铁路隧道塌方风险预警的理论基础

2.1 风险演化机理

隧道塌方风险的演化是一个由量变到质变的过程。孕育阶段，围岩内部微裂隙逐渐发展，岩体变形积累，虽未出现明显表征，但已埋下隐患。发展阶段，裂隙贯通，围岩开始出现收敛变形、拱顶下沉等可观测征兆。失稳阶段，围岩强度不足以抵抗外界荷载，最终整体坍塌。理解这一机理有助于提前识别风险信号，将预警建立在科学的物理过程之上，实现从事后处置转向事前预防。

2.2 多参数监测理论

塌方风险预警不能依赖单一指标，而需通过多参数综合分析。常用指标包括拱顶下沉、周边收敛、围岩裂隙扩展速率、地表沉降、孔隙水压力等。通过布设传感器和监测点，实时采集数据，结合数据融合与动态分析方法，可以综合反映围岩稳定状态。多参数监测的优势在于互补性，当单一指标波动不明显时，其他参数可能提前反映风险变化，从而提升预警的可靠性与准确性。

2.3 风险评估与分级

科学的预警体系必须配套完善的风险评估与分级机制。风险评估需综合地质勘察结果、施工工艺条件和监测数据，建立定性与定量相结合的评估模型。风险分级通常划分为低风险、中风险和高风险三个等级，不同等级对应不同的应对策略。低风险状态下，可采取常规监测与防护；中风险阶段，应加强支护措施、调整施工工艺；高风险状态，则需暂停施工并启动应急预案。通过分级管理，可以合理分配资源，做到“分级预警、分类处置”。

3 复杂地质条件下塌方风险监测与预警体系构建

3.1 监测技术应用

现代监测技术为风险预警提供了可靠支撑。地质雷达可以探测前方岩层结构，提前识别隐伏空洞和断层；光纤传感技术可实时监测变形与应力变化，精度高且覆盖范围大；三维激光扫描能快速获取隧道内部变形情况，形成可视化模型；地震波监测可识别裂隙扩展和潜在滑移面。这些技术相互配合，构成多维度、多尺度的监测体系，为塌方风险判断提供科学依据。

3.2 信息化平台建设

风险预警的核心在于数据处理与分析。通过建立信息化管理平台，将多源监测数据实现自动采集、传输与分析，形成可视化图表和风险趋势曲线。平台应具备大数据存储与智能分析功能，利用人工智能算法实现异常数据识别和风险预测。这样不仅提高了预警的实时性，也提升了决策的科学性和精准度。

3.3 预警响应机制

有效的预警体系离不开完善的响应机制。当监测数据超出设定阈值时，系统应自动触发预警信号，并迅速传递至施工管理层。施工方需立即启动应急响应，包括支护加固、调整开挖工艺、降低掘进速度等措施。同时，应建立多部门联动机制，确保在最短时间内完成风险控制。预警与响应的紧密衔接，是将监测成果转化为防控成效的关键

环节。

4 复杂地质条件下塌方防控技术措施

4.1 施工前地质勘察

在隧道施工中，详尽的地质勘察是有效防控塌方的前提和保障。通过钻探、物探、地质测绘等多种手段，可以全面掌握岩层结构特征、地下水分布规律以及断层发育情况，为施工方案的科学制定提供可靠依据。对施工区域地质条件的深入了解，有助于预测潜在的不良地质因素，从而提前制定相应的防控措施。在高风险区域，常规勘察手段可能难以满足需求，此时应增加超前地质预报手段，如地质雷达探测、水平钻探与地震波监测等。这些技术能够在施工前或施工过程中实时揭示前方围岩状况，使施工团队做到心中有数，避免盲目开挖带来的风险。通过多层次、多手段的地质勘察与预报，可以显著提升塌方防控的科学性与精准性，为隧道施工的安全和顺利推进奠定坚实基础。

4.2 合理施工方法选择

在隧道施工过程中，施工方法的合理性对塌方风险的防控起着决定性作用。不同的地质条件要求采取相应的工艺，以最大限度减少对围岩的扰动，确保施工安全。在软弱围岩环境中，若大面积暴露极易导致围岩失稳，因此应采用台阶法、双侧壁导坑法等分部开挖工艺，通过逐步开挖与及时支护相结合的方式，保证围岩结构的稳定。在富水地层中，地下水对围岩强度和稳定性影响显著，需要配合注浆加固、冻结法等特殊工法，以增强围岩整体强度和密实性，从而减少渗水和坍塌风险。合理选择施工方法不仅能够降低塌方发生的可能性，还能有效提升施工效率和工程质量，为项目的顺利推进创造有利条件。这种因地制宜的施工策略，体现了工程技术与地质环境的深度结合，是保障铁路隧道建设安全与可持续发展的关键环节。

4.3 动态施工管理

在复杂地质条件下，隧道施工的塌方防控离不开动态管理理念的贯彻。动态管理强调在施工过程中形成“监测—反馈—调整”的循环机制，以确保防护措施的科学性与有效性。通过实时采集地质变化、围岩变形和支护受力等监测数据，管理人员能够快速识别潜在风险，并根据反馈结果及时优化支护参数和开挖工艺。支护设计不仅要体现超前性，还要具备灵活性，能够根据不同地质条件和施工阶段进行适度调整，从而保持系统的稳定性与适应性。动态管理的精髓在于实现“边施工、边监控、边调整”，这一过程不仅保证了施工安全，也提升了资源利用效率，使风险始终控制在可接受范围内。通过这种良性循环，施工现场能够在不确定性与风险中保持稳定运行，为隧道工程的顺利推进提供有力保障。

5 铁路隧道塌方风险防控的优化与发展方向

5.1 智能化预警系统的完善

随着信息技术的不断进步，隧道施工风险防控的预警系统正向智能化迈进。未来，人工智能、机器学习与大数据分析将在其中发挥核心作用。通过对监测过程中产生的海量数据进行深度挖掘，系统能够识别潜在的风险规律，实现从数据采集到风险识别的全流程自动化。智能化预警不仅限于提前发出风险信号，还能够结合历史案例和实时数据，自动生成多种处置方案，为施工人员提供科学决策依据。这种预警模式极大提升了防控的主动性与精准性，使管理人员能够在风险萌芽阶段采取有效措施，避免事故扩大化。与此同时，系统的自学习功能还能不断优化识别模型和应急策略，适应复杂多变的地质条件。智能化预警系统的构建，将推动隧道施工风险管理从传统的被动应对转向主动预防，为工程安全与高质量发展提供更为坚实的技术支撑。

5.2 多主体协同机制建立

隧道塌方防控是一项系统工程，涉及施工企业、设计单位、科研机构和政府监管部门等多方力量，仅依靠单一主体难以实现全面有效的防控。未来应在行业层面建立多主体协同机制，通过制度化的合作框架实现信息共享、责任共担和联合决策。施工企业能够提供一线的施工数据，设计单位负责优化方案，科研机构提供技术支持与前沿成果，政府部门则发挥监督与政策引导作用。通过构建区域性风险数据库，不同主体能够实现数据资源的集中化管理，对复杂地质条件下的风险特征进行精准分析。同时，标准化管理平台的建立，有助于将各方经验和措施转化为可推广的规范，提升防控的整体效率与可靠性。多主体协同不仅能够提高隧道塌方防控的科学性与系统性，还能在突发风险事件中形成快速反应机制，保障铁路工程建设的安全与可持续发展。

5.3 绿色与可持续发展理念融入

在铁路隧道施工过程中，安全防控固然是核心目标，但环境保护与资源节约同样不容忽视。复杂地质条件下的塌方防控技术若能与绿色施工理念相结合，不仅能够有效提升安全水平，还能为可持续发展提供保障。通过选用环保型材料，可以在支护和衬砌环节减少有害物质排放；采用低能耗设备，则能降低能源消耗，提升施工的整体效率。与此同时，施工中应注重生态修复，如对弃渣场进行植被

恢复，对地下水环境进行动态监测和保护，从而减轻工程对生态系统的影响。未来的塌方防控工作，不应局限于单一的安全目标，而是要兼顾经济效益、社会效益与生态效益的协调统一。只有在安全防控的基础上实现绿色发展，才能真正推动铁路隧道施工走向高质量与可持续的方向，为工程建设树立良好的环境与社会形象。

6 结语

在复杂地质条件下进行铁路隧道施工，塌方风险一直是影响施工安全与工程进度的重大难题。其成因复杂，既包括地质构造、岩体性质和地下水等自然因素，也涉及施工方法、设备条件和管理水平等人为因素。塌方具有突发性和不可预测性，对施工安全构成严重威胁。研究表明，有效的风险防控必须建立在多参数监测与动态预警机制之上。通过系统的地质勘察，可以提前掌握围岩类别、断层破碎带分布和地下水情况，为施工方案提供科学依据。在施工过程中，合理选择施工方法，如新奥法、超前支护与分部开挖等手段，能够有效减轻围岩扰动。同时，信息化平台的应用为风险管控提供了技术支撑，通过实时数据采集与分析，施工方可以动态调整施工策略，形成“预测—监测—反馈—调控”的闭环管理。未来，随着智能化技术与绿色施工理念的深入应用，铁路隧道塌方风险防控将更加精准和可持续，为铁路建设的高质量发展提供更为坚实的保障。

参考文献：

[1] 王磊. 复杂地质条件下隧道施工风险分析与控制[J]. 铁道建筑，2021(6): 45-51.

[2] 李强. 隧道塌方风险监测与预警技术研究[J]. 岩土工程技术，2022(4): 72-79.

[3] 张敏. 铁路隧道施工安全管理与风险防控对策[J]. 中国安全生产科学技术，2023(3): 88-94.

作者简介：高锐（1998.07-），男，汉族，本科，助理工程师。