

大倾角负坡岩巷环境下综掘工艺施工的风险评估与管控

马玉平 张吉虎

国家能源集团宁夏煤业有限公司综掘服务分公司，宁夏 银川 750411

[摘要]本研究针对大倾角负坡岩巷环境中综掘工艺实施的风险进行系统评估与管控。研究首先通过地质调查和现场数据收集，确立了具有代表性的大倾角负坡岩巷工作环境模型。接着，运用改进的定性与定量相结合的风险评估模型，评价了环境因素、工艺技术和操作行为等多方面对安全生产的影响。研究着重分析了坡度变化、岩石稳定性及施工机械操作风险点，揭示了主要风险源和危害。通过构建风险矩阵和事故树分析法，文中明确了风险等级和可能的事故后果，提出了相应的风险管理策略，包括但不限于强化现场监测、优化作业方案和提升应急管理。实证分析表明，应用本研究成果能显著提高负坡岩巷的施工安全性和工程效率。本研究的成果可为类似复杂地质条件下的综掘工艺的风险评估与管控提供理论依据和实践指南，具有重要的理论意义和应用价值。

[关键词]大倾角负坡岩巷；综掘工艺；风险评估；风险管理；安全生产

DOI: 10.33142/aem.v7i9.18030

中图分类号: TD79

文献标识码: A

Risk Assessment and Control of Comprehensive Excavation Technology Construction in Steep Negative Slope Rock Roadway Environment

MA Yuping, ZHANG Jihu

Comprehensive Mining Service Branch of CHN Energy Ningxia Coal Industry Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia, 750411, China

Abstract: This study systematically evaluates and controls the risks associated with the implementation of comprehensive excavation technology in steep negative slope rock roadway environments. The study first established a representative working environment model for steep negative slope rock tunnels through geological surveys and on-site data collection. Next, an improved risk assessment model combining qualitative and quantitative methods was used to evaluate the impact of various factors such as environmental factors, process technology, and operational behavior on safety production. The study focuses on analyzing slope changes, rock stability, and risk points of construction machinery operation, revealing the main risk sources and hazards. By constructing a risk matrix and accident tree analysis method, the article clarifies the risk level and possible accident consequences, and proposes corresponding risk control strategies, including but not limited to strengthening on-site monitoring, optimizing operation plans, and enhancing emergency management. Empirical analysis shows that applying the results of this study can significantly improve the construction safety and engineering efficiency of negative slope rock tunnels. The results of this study can provide theoretical basis and practical guidance for risk assessment and control of comprehensive excavation technology under similar complex geological conditions, and have important theoretical significance and application value.

Keywords: large angle negative slope rock roadway; comprehensive excavation technology; risk assessment; risk management and control; work safety

引言

在现代矿山开采中，大倾角负坡岩巷的工作环境具有较高的复杂性和风险性，影响着矿山安全生产的稳定性和效率。由于传统的风险评估方法难以准确掌握此类环境的风险因素，安全事故的发生率较高。因此，本研究通过地质调查和现场数据收集构建了一个代表性的工作环境模

型，运用改进的风险评估模型结合定性和定量评估技术，对坡度变化、岩石稳定性和施工机械操作等风险源进行了深入分析，明确了潜在的风险和可能的危害。通过风险矩阵和事故树分析法，精确评估了不同风险等级，并揭示了可能的事故后果，提出了有效的风险管理策略，如强化现场监测、优化作业方案和提升应急管理能力，

以降低或预防事故发生，确保施工安全性和提升工程效率。这些成果对于其他复杂地质条件的风险评估与管控亦具有重要的参考价值，将显著提升矿山安全领域的理论和实践水平。

1 地质调查与岩巷模型构建

1.1 大倾角负坡岩巷地质特征

大倾角负坡岩巷地质特征是影响综掘工艺施工风险的核心要素之一^[1]。大倾角负坡岩巷通常表现为岩层倾斜角度较大，并具有复杂的地质构造。地质特征包括岩石类型、岩层结构、孔隙率和岩体完整性等方面。岩石类型直接影响岩巷的稳定性和施工难度，常见的岩石类型如砂岩、页岩和石灰岩等，各有其物理性质和力学行为^[2]。岩层结构对岩巷的稳定性具有显著影响，尤其是存在断层、褶皱或节理等地质构造时，会导致岩石应力集中，增加失稳的风险。孔隙率决定了岩石的渗透性和含水量，对采掘工艺的选择和风险评价至关重要。岩体完整性是衡量岩巷稳定性的重要指标，完整性良好的岩体有助于减少岩石的变形和破坏。在负坡条件下，岩层倾斜增加了施工机械操作的复杂性和安全风险。坡度变化不仅影响岩层的应力分布，而且对施工人员的活动安全构成威胁。准确识别和描述大倾角负坡岩巷的地质特征，是进行全面风险评估与制定管控策略的基础。通过地质调查和详细勘探，能够为综掘工艺的安全实施提供可靠的数据和信息支持，确保施工过程的安全性和有效性。

1.2 岩巷工作环境的建模与数据采集

岩巷工作环境的建模与数据采集在研究大倾角负坡岩巷环境中具有关键作用。通过综合分析现场实际地质条件，建立能充分反映环境特征的三维数字模型，以准确表示岩巷的坡度、岩体结构和分布特性。模型构建过程中，采用先进的测绘技术和地质分析工具，对巷道坡度变化、岩体物理力学参数以及周边地层结构进行详细测量与记录^[3]。地质勘察数据的采集包括岩体稳定性测试、地层裂隙分布调查以及施工历史数据的汇总整理，以确保数据的全面性和可靠性。现场数据采集过程严格遵循标准化操作规程，利用高精度仪器如全站仪、激光扫描设备和地质雷达，监测岩巷内岩石的微观裂隙状况和宏观结构特征。为满足不同地段的参数需求，调整测量方法与采集密度，从而精确捕捉地质环境可能引发的风险因素。最终形成的数学和地质模型为风险评估提供科学依据，为后续施工工艺设计和安全管控提供参考，奠定了系统性分析与优化的基础。岩巷模型和数据的建立确保了综掘工艺的实施更加精准和高效。

2 风险评估模型的构建与应用

2.1 风险评估模型的选择与改进

风险评估模型的选择与改进是实施综掘工艺风险防控的重要环节。基于大倾角负坡岩巷的复杂地质特性，筛选了符合施工环境特征的定性与定量相结合的风险评估模型，兼顾多因素协同作用和动态变化的条件下的评估需求。在模型选择中，重点考虑了其对施工环境变化的灵敏性，对地质参数的适配性，以及对生产安全风险源辨识的效率。为提升模型在负坡岩巷环境中的适用性，通过引入动态评估机制，增强模型对实时数据的响应能力。模型改进的核心在于结合现场实时监测数据，构建环境因子、工艺参数和施工行为之间的交互关系，从而提升风险评估的精准度。优化了风险分类及事件预测逻辑，以事故发生的动态路径为基础，完善了评估模型对风险等级的划分功能，确保对潜在危害的判别更加准确。上述改进有助于提高施工安全保障能力，为复杂地质条件下相关工艺的稳定运行提供方法支持。

2.2 安全与生产影响因素的整合分析

安全与生产影响因素的整合分析围绕岩巷施工环境展开。环境因素包括岩体结构特征、岩石强度及地质应力分布等，直接关系施工稳定性。工艺技术影响因素涉及掘进设备性能、切割参数和推进方式，这些因素对施工效率与安全性具有重要影响。操作行为的分析重点在于人员操作规范、协作模式及异常处理能力。通过构建风险评估模型，将上述因素进行逻辑关联和数学量化，并综合考虑其彼此间的联动效应，从多维度对大倾角负坡岩巷综掘工艺的施工风险进行全面诊断，为后续管控措施的制定提供数据支撑与理论基础。

2.3 模型在负坡岩巷的应用

改进的风险评估模型被应用于负坡岩巷环境，通过定性与定量相结合的方法动态评价施工过程中的安全性和关键风险点。模型将坡度变化、岩体稳定性及设备操作等因素纳入分析范围，使其能够有效反映复杂地质条件下的风险特征。通过实际应用，模型展现出在风险识别与等级划分方面的高度准确性，并为风险管控策略的制定提供了科学依据。模型在负坡岩巷的应用，显著优化了施工方案，并提高了工程安全性及生产效率，为类似环境的风险评估提供了可行参考。

3 主要风险点的识别与分析

3.1 坡度变化对工艺的影响

坡度变化对综掘工艺的影响在大倾角负坡岩巷环境中尤为显著，其主要体现在工程的安全性与施工效率两个

方面^[4]。坡度变化可能导致设备运行稳定性下降，容易引发滑移、偏移等机械操作问题，直接威胁作业人员的安全。较大的坡度会对施工设备的驱动力需求提出更高要求，增加设备能耗与磨损，使得工程成本显著上升。在负坡施工时，坡度的变化还会影响岩石稳定性，倾斜方向的应力集中可能促成滑坡或坠落风险。由于负坡环境存在复杂的排水与岩屑清理问题，坡度变化进一步加剧了排水和岩屑移除的难度。坡度突变区域已被识别为关键风险点，这些区域不仅存在复杂的动态受力环境，还会影响施工机械操作的精确性。综合分析认为，坡度变化显著加剧了工艺实施的风险等级，加强坡度变化区域的实时监测及调整施工方案是降低风险的关键措施。

3.2 岩石稳定性分析

岩石稳定性作为大倾角负坡岩巷综掘施工的关键风险影响因素，直接关系到施工安全和工程的正常推进。岩石的结构特性、物理力学性能以及内部裂隙分布均对稳定性产生重要影响。复杂地质条件可能引发岩体内部应力重新分布，进一步导致岩石破裂或滑移风险。在负坡环境中，岩体重力作用与坡度特性相结合，将加剧岩体失稳的概率。通过对岩石的抗压强度、剪切强度及岩体完整性指数进行精细测试和分析，可科学评估岩石在施工过程中潜在的破坏模式。运用改进的数值模拟技术，结合实际地质条件的监测数据，能够有效预测岩体失稳位置及演化趋势，为施工环节的风险预警与管控提供科学依据。合理的岩石支护和稳定性加固措施将是保障施工安全的重要实践路径。

3.3 施工机械操作风险

施工机械操作风险主要集中在机械稳定控制、设备故障与操作不规范等方面。负坡环境下易导致机械滑移、失衡和误操作，增加施工事故发生概率。通过对设备性能检测、操作标准化培训及动态调整施工设备，可有效降低机械操作事故风险，提高安全性。

4 风险量化与等级划分

4.1 风险矩阵的建立

风险矩阵作为风险量化的重要工具，用于识别不同风险因素对施工安全的潜在影响，以及发生频率与后果的定量表达。在风险矩阵建立过程中，将各类风险因素划分为可能性与严重性两个维度，根据定量和定性数据对其分别进行评分^[5]。施工环境特点决定了风险的多元性与复杂性，需要针对大倾角负坡岩巷的地质特征、坡度变化、岩石稳定性与机械操作等影响因素，以统一评价标准实现风险数据的归类与综合评估。通过设定风险发生频率的概率区间和后果等级，例如从轻微影响到灾难性冲击，构建区分度

明确的矩阵结构。每一风险源依据矩阵结果获得对应等级，矩阵的高风险区域与低风险区域形成清晰分布，为后续实施目标化的管控措施奠定基础。此框架既提高了评估的系统性，又保证了风险量化的精确性与可操作性。

4.2 事故树分析法的应用

事故树分析法是通过逻辑推演和事件因果关系图示来识别风险源及其触发路径的一种系统分析工具。在大倾角负坡岩巷综掘工艺的施工环境中，该方法被用于构建事故树模型，明确潜在危险事件、基础事件及其递进关系。研究通过对坡度变化、岩石失稳、施工设备故障及人为操作失误等关键风险因素进行梳理，将其作为顶端事件与底层基础事件之间的逻辑连接，建立事故因果链。进一步结合环境参数及施工数据，对各基础事件的发生概率和诱发上层事件的逻辑关系进行了量化分析。研究表明，坡度剧烈变化引发机械滑移事故，岩体破碎导致支护失效是典型的高风险路径，并对不同路径的风险等级进行了分类与计算。这为精准识别高危施工环节和制定针对性管控措施提供了理论支持。

4.3 风险等级的明确与事故后果预测

基于建立的风险矩阵和事故树分析模型，对不同施工情景的风险等级进行细化划分，明确潜在危险的严重程度和发生概率。结合风险源特性，对可能引发的事故后果进行科学预测，重点分析高风险等级区域的潜在危害及其影响范围，为制订针对性管控措施提供可靠依据，从而降低施工过程中事故发生的概率和损失程度。

5 风险管控策略与实践应用

5.1 强化现场监测与预警系统

强化现场监测与预警系统是提升综掘工艺施工安全性的关键措施之一。在大倾角负坡岩巷环境中，因地质条件复杂、施工风险点多，现场监测系统的实时性和精确性显得尤为重要。针对坡度变化、岩层稳定性及机械操作等因素，需建立多参数联动的监测体系，通过布设倾角传感器、岩石压力监测仪及机械运行状态传感装置，完成对关键风险点的数据采集与动态跟踪。预警系统需整合多源信息，通过大数据算法与智能化分析技术，对潜在风险进行早期识别和预判，将潜在危险传递至施工现场，以指导施工人员及时调整应对方案。加强监测数据的传输与处理，确保数据分析与风险评估的快速响应能力。通过完善信息共享网络和提升设备抗干扰性能，可有效增强系统的可靠性与适应性，缩短监测预警时间，提高施工安全管理水准。

5.2 作业方案的优化

在综掘工艺施工风险管理中，优化作业方案是提升安

全性和生产效率的关键措施之一。优化方案应综合考虑地质条件、机械性能及人员行为等因素，针对负坡岩巷复杂环境进行定制化设计。坡度调整需精确计算，以减少机械滑移及稳定性问题，提升巷道结构强度。施工程序应合理规划，尽可能减少不必要的作业环节，降低人员与机械工序之间的交叉风险。机械设备的选型和配置应适应岩巷条件，确保动力与操控性能的匹配。人员操作流程需明确规范，作业中关键环节设置专职人员监控，以降低人为误操作的可能性。优化后的方案在实际应用中能够减少安全事故率，提升整体施工效率，为后期施工经验积累与风险防控措施改进提供可靠依据。

5.3 应急管理能力的提升

应急管理能力的提升是降低施工风险的重要环节，通过建立完善的应急预案和实施体系，可快速响应突发事件。强化人员培训与演练，提高应急处置能力，优化资源配置效率，确保紧急情况下的安全和生产恢复。完善信息化应急管理平台，实现对风险数据的实时监控与指挥调度，增强复杂环境下的应急处置效果，有效保障负坡岩巷施工的安全性与连续性。

6 结束语

本文对大倾角负坡岩巷环境下综掘工艺的风险评估与管控进行了系统研究。通过地质调查与实际数据分析，本研究建立了代表性的工作环境模型，对环境因素、工艺技术和操作行为对安全生产的多方面影响进行了深入评价。研究重点分析了坡度变化、岩石稳定性及施工机械操作的主要风险点，并通过风险矩阵和事故树分析法，成功识别了风险等级及可能的事故后果，确立了有效的

风险控制策略和应急管理提升方法。此外，实证分析验证了所提策略的有效性，对提高施工安全性和工程效率有直接影响。然而，研究仍存在一定限制，如地质环境的多样性导致的数据集局限，未能全面覆盖所有可能的风险情境。同时，风险评估模型尽管已结合定性与定量分析，但模型的适用性和精确性在不同工况下的泛化能力仍需要进一步验证。未来研究可在扩大数据样本范围、深化对特定工艺条件下风险因素的解析，以及优化风险评估模型方面进行探索。此外，研究应加强跨学科方法的应用，如将机器学习技术用于风险预测和管理，以进一步提高风险评估的准确性与实用性。通过这些方式，有望为复杂地质条件下的工程施工提供更全面、更可靠的风险管理支持。

[参考文献]

- [1] 高慧琪. 岩巷综掘工艺优化[J]. 能源与节能, 2021(10):147-148.
- [2] 程辉. 大断面岩巷综掘工艺优化研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(16):198-199.
- [3] 郝勇. 综掘岩巷掘进工艺优化实践[J]. 山东煤炭科技, 2021, 39(4):206-208.
- [4] 秦飞龙. 沙坪煤矿岩巷大倾角综掘技术研究及应用[J]. 煤炭工程, 2021, 53(1):46-49.
- [5] 陈宇满. 土城矿大倾角负坡综掘技术研究与应用[J]. 大众标准化, 2023(18):145-147.

作者简介：马玉平（1984.9—），性别：男，民族：汉，籍贯：宁夏回族自治区固原市，学历本科，研究方向：大倾角负坡岩巷环境下综掘工艺施工的风险评估与管控。