

Research on Risk Assessment Methods and Accident Prevention Strategies in Ventilation Management of Metal Mines

Chao Wang

Yunnan Diqing Mining Development Co. Ltd., Shangri-La, Yunnan, 674400, China

Abstract

The underground mining environment in metal mines presents complex operational conditions. As the “lifeline” ensuring miners’ safety, the stability and reliability of ventilation systems directly impact mine safety. This study systematically identifies risk factors in ventilation management based on the unique characteristics of metal mine ventilation systems. It explores risk assessment methodologies combining qualitative and quantitative approaches, including safety checklists, fault tree analysis (FTA), and fuzzy comprehensive evaluation. Incorporating recent advancements in intelligent technologies, innovative models such as digital twin systems and AI-driven dynamic early warning systems are introduced. The research proposes accident prevention strategies from three dimensions: technical optimization, management mechanisms, and regulatory standards. Key measures include constructing smart ventilation systems, implementing dynamic ventilation network control, and conducting personnel training with emergency drills. Verified through case studies at Sanxin Jintong Mine and Shanxi Coking Coal Tunlan Mine, these methods effectively reduce ventilation-related accident risks while enhancing inherent safety levels. The findings provide theoretical references and technical support for risk control and accident prevention in metal mine ventilation systems.

Keywords

metal mine; ventilation management; risk assessment; accident prevention; intelligent monitoring

金属矿山通风管理中的风险评估方法与事故预防策略研究

王超

云南迪庆矿业开发有限责任公司, 中国·云南 香格里拉 674400

摘要

金属矿山井下作业环境复杂, 通风系统作为保障矿工生命安全的“生命线”, 其稳定性与可靠性直接关系到矿山安全生产。本文基于金属矿山通风系统的特殊性与复杂性, 系统梳理了通风管理中的风险因素, 深入探讨了定性与定量相结合的风险评估方法, 包括安全检查表法、故障树分析法(FTA)、模糊综合评价法等, 并结合近年来智能化技术发展, 引入数字孪生、AI动态预警等创新评估模型。同时, 从技术优化、管理机制、法规标准三个维度提出事故预防策略, 包括智能通风系统构建、通风网络动态调控、人员培训与应急演练等。通过三鑫金铜矿、山西焦煤屯兰矿等实际案例验证, 所提方法与策略可有效降低通风事故风险, 提升矿山本质安全水平。研究成果可为金属矿山通风系统的风险管控与事故预防提供理论参考与技术支持。

关键词

金属矿山; 通风管理; 风险评估; 事故预防; 智能监测

1 引言

金属矿山井下作业面临高温、高湿、有毒有害气体积聚、粉尘超标等多重挑战, 通风系统通过向井下输送新鲜空气、稀释污染物、调节气候, 直接保障作业人员健康与生产安全^[1]。近年来, 随着矿山开采深度增加(部分矿山已超千米)、开采强度加大, 通风系统的复杂性与运行压力显著提升, 通风故障导致的瓦斯爆炸、中毒窒息等事故时有发生。据国家矿山安全监察局统计, 2020-2024年金属非金属矿山因通

风问题引发的事故占比达23.7%, 直接经济损失年均超5亿元^[2]。因此, 建立科学的风险评估方法与高效的事故预防策略, 成为金属矿山安全管理的核心议题。

当前, 国内外学者在通风风险评估领域已开展大量研究: 传统方法多依赖定性分析(如安全检查表法), 难以量化风险等级; 近年来, 定量方法如故障树分析(FTA)、层次分析法(AHP)逐渐应用, 但面对动态变化的通风网络仍存在局限性^[3]。同时, 智能化技术(如物联网、数字孪生)为通风管理提供了新手段, 王培涛等研发的基于树莓派的智能监测系统实现了通风参数实时采集与预警^[4], 陈开岩提出的风网解算方法提升了风量调控精度^[5]。然而, 现有研究多聚焦单一技术或方法, 缺乏对风险评估与预防策略的系统性整合。

【作者简介】王超(1987-), 男, 中国云南香格里拉人, 本科, 工程师, 从事金属矿山通风技术与管理研究。

本文结合《金属非金属地下矿山通风技术规范(征求意见稿)》等最新标准,从风险识别、评估方法、预防策略三个层面构建通风管理体系,通过理论分析与案例验证,为金属矿山通风安全提供全面解决方案。

2 金属矿山通风系统的风险因素识别

2.1 系统本身的复杂性风险

金属矿山通风系统由进风井、回风井、通风机、风门、风筒等组成,网络结构随开采进程动态变化。深井开采中,通风线路长(可达数千米)、阻力大(摩擦阻力占比超60%),易形成局部风流短路或“死角”^[6]。例如,某铁矿井下因巷道支护变形导致断面缩小,通风阻力骤增30%,引发工作面瓦斯浓度超标^[7]。

2.2 环境与地质风险

有毒有害气体:矿体氧化、爆破作业产生CO、H₂S等气体,若通风不及时,浓度易超安全阈值(如CO浓度需<24ppm)。

高温高湿:深部矿井地温可达40℃以上,空气密度降低导致通风效率下降,同时加剧设备老化。

粉尘积聚:开采过程中粉尘浓度常超0.3mg/m³,长期吸入引发尘肺病,且煤尘达到一定浓度易引发爆炸。

2.3 设备与人为风险

设备故障:主通风机轴承磨损、风筒破损等导致风量不足,某金矿因风机叶片裂纹未及时发现,造成工作面风量骤降40%。

操作失误:违规关闭风门、局部通风机未按规定切换,某铜矿掘进面因停风2小时导致瓦斯积聚,引发爆炸。

管理缺陷:通风制度不健全、巡检频次不足,某铅锌矿因未定期清理风窗积尘,导致有效风量率降至65%。

3 金属矿山通风管理的风险评估方法

3.1 定性评估方法

3.1.1 安全检查表法(SCL)

基于《金属非金属矿山安全规程》,制定涵盖通风系统设计、设备状态、操作流程的检查表,逐项评分。例如,检查主通风机“是否配备备用电机”“轴承温度是否<75℃”等指标,总分低于80分判定为高风险。该方法操作简便,但主观性较强,适用于初步筛查。

3.1.2 危险与可操作性分析(HAZOP)

通过偏差分析识别通风系统潜在风险,如“风量不足”可能由“风机转速异常”“风筒漏风”等原因导致,结合引导词(如“过量”“不足”)构建风险矩阵。某镍矿应用HAZOP法,成功识别出12项通风偏差,其中“回风巷风速超标”被列为I级风险。

3.2 定量评估方法

3.2.1 故障树分析(FTA)

以“通风系统失效”为顶事件,逆向追溯基本事件(如风机故障、电源中断),通过布尔代数计算最小割集与概率。

陈开岩等以某矿通风系统为例,建立FTA模型,得出“主扇停机”的发生概率为0.002次/年,关键重要度排序前三位为“电机故障”“控制回路失效”“轴承过热”。

3.2.2 模糊综合评价法

结合层次分析法(AHP)确定风险因素权重,通过模糊矩阵量化风险等级。某铜矿将“瓦斯浓度”“风速”“设备完好率”作为评价指标,权重分别为0.35、0.25、0.20,最终评估风险等级为“中高”,需优先整改。

3.3 智能化评估模型

3.3.1 数字孪生动态评估

构建通风系统数字孪生体,实时映射井下风速、瓦斯浓度等参数,通过仿真模拟预测风险。某金矿应用该技术,提前3小时预测到采空区风流逆转风险,联动调控风门开度,避免瓦斯积聚。

3.3.2 AI多参量预警模型

王培涛等研发的树莓派智能监测系统,集成风速、CO、温湿度传感器,通过ONENET平台实现数据实时传输,AI算法每10秒优化一次风量分配,预警准确率达92%^[3]。山西焦煤屯兰矿应用类似系统后,通风事故响应时间从30分钟缩短至30秒。

4 金属矿山通风事故的预防策略

4.1 技术优化策略

4.1.1 通风系统智能化改造

动态调控:采用变频风机与自动风门,根据工作面需风量实时调节。安科高新院智能系统在山西某矿应用后,通风能耗降低37%,有效风量利用率提升至92%。

智能监测:部署分布式光纤传感器,覆盖全巷道风速、瓦斯浓度监测,采样间隔≤10秒,数据传输延迟<500ms。

4.1.2 通风网络优化设计

网络解算:采用陈开岩提出的“空气状态参数与风量耦合迭代法”,优化风网布局,某深井矿应用后通风阻力降低25%。

局部通风强化:独头巷道采用双风机双电源供电,风筒百米漏风率<8%,确保掘进面风量≥3m³/min。

5 管理机制完善

5.1 制度建设

制定《通风系统定期检测制度》,每月测定风量、风压,每季度进行通风阻力测定,确保有效风量率≥85%^[1]。某铁矿通过该制度,将通风设备故障率从15%降至5%。

5.2 人员培训与应急演练

专项培训:每年开展通风操作培训,考核通过率需达100%,内容包括风机启停、风门调节、自救器使用等。

应急演练:每半年组织通风事故演练,模拟“瓦斯超标”“风机停机”等场景,提升矿工应急处置能力。

5.3 法规与标准落地

严格执行《金属非金属地下矿山通风技术规范》,重点落实:

设备要求：主通风机必须配备备用电机，且能在10分钟内切换；

监测要求：瓦斯浓度超1%（体积比）时自动切断作业面电源；

设计要求：新建矿山通风系统需通过三维仿真验证，确保风流稳定性。

6 案例分析：三鑫金铜矿通风系统优化实践

6.1 矿井概况

三鑫金铜矿为深井开采，原通风系统采用多级机站模式，随着开采深度增加（达800m），出现总风量不足（设计需风120m³/s，实际仅95m³/s）、风机效率低（<70%）、部分中段风流反风等问题。

6.2 风险评估与优化方案

风险评估：采用FTA法分析，顶事件“通风系统失效”的最小割集为“主扇故障+备用扇未启动”，风险等级判定为“高”。

优化方案：

系统改造：前期采用井下集中通风，后期过渡到多级机站接力，新增2台450kW主扇，优化风网布局；

智能调控：引入Ventsim三维动态仿真软件，实时解算风量分配，AI算法优化风门开度。

6.3 实施效果

改造后，矿井总风量达130m³/s，有效风量率提升至81.33%，主扇运行效率超85%，通风能耗降低28%，连续3年未发生通风相关事故。

7 面临的挑战与对策

7.1 技术挑战与对策

风险评估模型和预防技术的创新面临诸多技术挑战。首先，矿山环境复杂多变，传感器易受干扰，影响数据质量。对策是开发抗干扰能力强的新型传感器，采用数据融合技术提高数据可靠性。其次，数字孪生和AI模型需要大量高质量数据进行训练，而矿山往往缺乏完善的历史数据库。对策是建立矿山数据共享机制，构建行业级数据库，为模型训练提供数据支持。

7.2 经济挑战与对策

新技术的应用往往伴随着较高的初始投资，这成为制约创新技术推广的重要因素。对策包括：一是开发模块化系统，允许矿山分阶段投资；二是建立技术经济效益评估模型，量化新技术的长期收益；三是政府出台相关扶持政策，鼓励矿山企业进行技术创新。哈萨克斯坦某金属矿的案例显示，尽管通风系统改造初期投入较大，但通过长期运营可获得显著的经济收益，额外净现值达320-850万美元。

7.3 管理挑战与对策

新技术的应用需要相应的管理体系和人员技能支撑。许多矿山企业缺乏掌握先进技术的专业人才，难以充分发挥新技术的优势。对策包括：一是加强校企合作，培养既懂矿

山通风又掌握信息技术的复合型人才；二是制定新的安全管理制度，适应技术创新带来的变化；三是加强矿工培训，提高矿工对新技术的接受度和操作技能。安科高新院的实践证明，通过系统培训，矿工能够快速掌握智能通风系统的基本操作和维护技能。

8 结语

本文系统研究了金属矿山通风管理中的风险评估方法与事故预防策略，通过理论分析和案例研究，得出以下主要结论：

金属矿山通风风险评估方法已从传统的定性评估发展到定性与定量相结合的综合评估阶段，风压难度系数等新型评价指标的提出显著提高了评估准确性，数字孪生、AI等新兴技术的应用为风险评估提供了新手段。典型通风事故案例分析表明，通风系统不完善、安全管理制度不落实和人为操作失误是导致事故的三大主要原因。有效的预防策略应是技术措施与管理措施的有机结合。智能通风调控、物联网监测网络、AI辅助决策、绿色节能通风和VR培训等技术构成了事故预防技术的主要创新方向，这些技术的集成应用将显著提升矿山通风管理水平。风险评估模型和预防技术的创新面临技术、经济和管理等多方面挑战，需要通过技术创新、政策支持和人才培养等多维度措施加以应对。

基于本文的研究成果和金属矿山通风管理的发展趋势，未来可在以下方向开展进一步研究：

深入研究动态风险评估模型，结合实时监测数据和机器学习算法，实现风险等级的实时更新和精准预警。开发适用于中小型矿山的低成本智能通风系统，降低技术应用门槛，推动先进技术的广泛应用。研究数字孪生技术在通风系统全生命周期管理中的应用，实现通风系统设计、运行、维护的全程优化。探索区块链技术在矿山通风数据管理中的应用，提高数据的安全性和可信度，为风险评估提供可靠数据支持。开展通风系统的韧性研究，提高通风系统应对极端事件的能力，保障矿山安全生产。随着信息技术和人工智能的快速发展，金属矿山通风管理将朝着更加智能化、高效化和绿色化的方向发展。通过持续的技术创新和管理优化，有望实现金属矿山通风系统的本质安全，为矿山安全生产提供坚实保障。

参考文献

- [1] 国家矿山安全监察局. 金属非金属地下矿山通风技术规范(征求意见稿)[S]. 2025.
- [2] GB 16423-2020 金属非金属矿山安全规程(2025版)[S]. 2025.
- [3] 王培涛,等.基于树莓派的矿井通风环境智能化监测预警系统研发[J]. 中国矿业大学学报, 2025.
- [4] 陈开岩,周福宝,等.基于空气状态参数与风量耦合迭代的风网解算方法[J]. 中国矿业大学学报, 2021.
- [5] 魏连江,康家康,等.矿井通风难易程度评价指标及分级方法[J]. 中国矿业大学学报, 2021.
- [6] 安科高新院.矿山智能通风系统技术报告[R]. 2025.
- [7] 胡勇,王维,等.三鑫金铜矿深井复杂通风系统方案优化改造实践[R]. 黄金杂志社, 2020.