

金属矿山安全生产管理中的风险评估与控制方法

张玲

华北理工大学

DOI:10.32629/gmsm.v9i1.2408

[摘要] 金属矿山是我国重要的基础产业,生产过程伴随着复杂地质条件与高强度作业带来的固有风险。因此需要系统研究金属矿山安全生产管理中的风险评估与控制关键方法,以推动安全管理由被动事故应对向主动风险预控转型。首先,探讨应用安全检查表法进行系统性危险源辨识的实践;进而,深入剖析故障树分析法在追溯重大事故深层致因链上的演绎逻辑;并阐述如何借助作业条件危险性评价法对具体作业活动进行半定量分级,为风险排序提供依据。在精准评估的基础上,研究构建多层次风险控制体系。该体系着重采用自动化改造、智能化监测等工程技术手段从源头消除或降低风险;辅以精细化的作业许可、动态检查等管理措施规范人员作业;借助功能化、智能化的个体防护装备,强化末端安全保障;同时引入应急管理理念,提升系统整体的应急与恢复能力。综上,通过评估与控制结合,形成闭环管理,不仅为有效落实双重预防机制提供方法论支持,也为从根本上提升金属矿山本质安全水平指明了现实路径。

[关键词] 金属矿山; 安全生产; 风险评估; 风险控制

中图分类号: TD3 文献标识码: A

Risk Assessment and Control Methods in Safety Production Management of Metal Mines

Ling Zhang

North China University of Science and Technology

[Abstract] Metal mines represent a crucial foundational industry in China, with their production processes accompanied by inherent risks from complex geological conditions and high-intensity operations. A systematic study of key methods for risk assessment and control in safety production management is essential to drive the transformation of safety management from passive accident response to proactive risk prevention and control. Firstly, the study explores the practice of applying the safety checklist method for systematic identification of hazard sources. Then, it delves into the deductive logic of the Fault Tree Analysis in tracing the deep-seated causal chains of major accidents. Additionally, it elucidates how to employ the Operation Condition Risk Assessment Method to conduct semi-quantitative grading of specific operational activities, providing a basis for risk ranking. Based on precise assessments, the study focuses on constructing a multi-level risk control system. This system mainly employs engineering approaches such as automation upgrades and intelligent monitoring to eliminate or mitigate risks at the source, supplemented by refined management measures, including detailed work permits and dynamic inspections, to regulate personnel operations. Furthermore, it strengthens end-point safeguards by utilizing functional and intelligent personal protective equipment and incorporates emergency management concepts to enhance the overall emergency response and recovery capabilities of the system. In summary, integrating assessment and control to form a closed-loop management approach, not only provides methodological support for the effective implementation of the dual prevention mechanism, but also points out a practical path for fundamentally improving the intrinsic safety level of metal mines.

[Key words] Metal Mine; Safety Production; Risk Assessment; Risk Control

引言

金属矿产资源作为基础设施建设、高端制造业和新能源转

型不可或缺的原材料,直接关系到国家的经济安全、国防安全和科技创新。然而,其生产过程地质条件复杂、作业环境恶劣、不

确定性因素多,决定了其高危行业的属性。近年来,尽管我国金属矿山安全生产形势总体趋于稳定,但重特大事故仍时有发生,给人民生命财产造成巨大损失。顶板事故、透水、中毒窒息及爆破事故是主要的灾害类型。随着开采深度和强度的增加,地压活动愈发剧烈,水文地质条件更趋复杂,传统与新型风险交织并存,给安全生产管理带来严峻的挑战。

为应对这一严峻形势,国家相继出台了《中华人民共和国安全生产法》、《关于推进安全生产领域改革发展的意见》以及《金属非金属矿山安全规程》(GB 16423)等一系列法律法规与政策文件,明确要求矿山企业建立并有效运行风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制^[1]。这一机制的核心在于“关口前移”,即从被动的事故处理转向主动的风险预防。然而,在实际管理中,部分矿山企业在风险辨识的全面性、评估方法的科学性以及控制措施的有效性上仍存在不足,存在评估方法单一、风险评估流于形式、管控措施与风险不匹配等问题,导致风险管控体系未能发挥其应有的作用。

鉴于此,系统研究并应用科学有效的风险评估与控制方法,对金属矿山生产全过程、全要素的危险、有害因素进行全面辨识、精准评估和有效控制,是防范和遏制生产安全事故、提升矿山本质安全水平的关键所在,具有重要的理论意义和现实指导价值。

1 金属矿山安全生产管理中的风险评估方法

风险评估的本质在于系统化地辨识生产活动中的危险源,并运用定性或定量的方法分析和评价其风险等级,从而为风险控制提供决策依据。在众多评估方法中,安全检查表法、故障树分析法以及作业条件危险性评价法因其各自的特点与适用性,在金属矿山安全管理实践中得到了广泛应用。

1.1 安全检查表法

安全检查表法是一种基础且应用广泛的危险源辨识与风险评估工具,其技术核心在于以法律法规、安全标准、设备操作手册、历史事故教训及专家经验为依据,将系统安全要素分解并对照,从而使抽象风险转化为可操作、可追溯的检查表。检查表的设计旨在通过“是/否/不适用”的判断,对设备、环境、人员操作及管理流程的合规性进行逐项排查实现潜在缺陷与不安全状态的精准识别。在金属矿山的应用中,针对不同作业单元,检查表的内容会高度定制化。例如,针对井下提升系统的安全检查表,项目不仅包括“钢丝绳日检、周检、月检记录是否齐全有效?”,还会深入到技术细节,如“钢丝绳断丝、锈蚀、变形是否在报废标准之内?”、“天轮、导向轮转动是否灵活,轮槽磨损是否超标?”、“过卷、过放保护装置的动作是否灵敏可靠?”等。通过这种结构化的排查,能够将抽象的安全要求具象化为可操作的检查点,确保风险辨识的系统性和全面性,有效避免因检查人员经验不足或疏忽而导致的遗漏。

1.2 故障树分析法

与安全检查表法的正向排查不同,故障树分析法是一种演绎式的、自上而下的系统风险分析方法。从一个不希望发生的

系统顶事件出发,通过逻辑门逐层向下分析,直至找出导致顶事件发生的所有可能的初始原因,即基本事件。其技术应用的关键步骤包括:明确顶事件、构建故障树、进行定性与定量分析。

在金属矿山中,该方法尤其适用于分析复杂、偶发的重大事故。例如,在分析“井下采空区有毒有害气体中毒窒息事故”时,顶事件被设定。其下一层可能通过一个“或门”连接两个中间事件:“有毒有害气体异常涌出”和“通风系统失效”。“通风系统失效”又可通过“与门”连接“主通风机故障”和“备用通风机未能及时启动”等。通过构建完整的故障树,可以清晰地揭示事故发生的逻辑路径和因果关系^[2]。

进一步地,通过确定各基本事件的发生概率,可以计算出顶事件的发生概率,公式为:

$$\text{对于“或门”： } P(T) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(X_i))$$

$$\text{对于“与门”： } P(T) = \prod_{i=1}^n P(X_i)$$

其中, $P(T)$ 为上层事件发生概率, $P(X_i)$ 为下层事件发生概率。这种定量分析能够识别出系统中的薄弱环节(即最小割集),如“局部通风机故障”和“气体传感器失效”同时发生是导致事故的关键路径,从而指导管理者将有限的资源投入到最关键的风险点控制上。

1.3 作业条件危险性评价法

作业条件危险性评价法是一种半定量的风险评估方法,它通过评估特定作业活动中事故发生的可能性(L)、人员暴露于危险环境的频繁程度(E)以及一旦发生事故可能造成的后果(C)三者的乘积来确定风险等级(D)。其核心评价模型为:

$$D = L \times E \times C$$

在应用此方法时,首先需对L、E、C三个参数进行量化分级。再结合金属矿山的作业特点,建立如下评分标准:

表1 LEC法评价参数分级标准

等级分值	可能性(L)描述	暴露频率(E)描述	损失后果(C)描述
10	完全可以预料	连续暴露	造成10人以上死亡,灾难性后果
6	相当可能	每天工作时间内暴露	造成3-9人死亡,严重后果
3	可能,但不经常	每周一次或偶然暴露	造成1-2人死亡或重伤
1	可能性小,完全意外	每月一次暴露	导致轻伤
0.5	很不可能,可以设想	每年几次暴露	引人注目,但无伤害
0.2	极不可能	很少暴露	-

例如,在对“独头巷道掘进作业中,爆破后未按规程进行充分通风即进入工作面”这一行为进行风险评估时:爆破后有毒气体超标是相当可能的(L=6);作业人员每天工作时间内需要进入(E=6);一旦发生中毒事故,极易造成人员重伤或死亡(C=40,此分级可根据矿山实际情况细化)。则该作业的风险值 $D=6 \times 6 \times 40=1440$ 。根据预设的风险等级划分标准,此项作业被评定为不可接受的重大风险,必须立即采取强制性控制措施。LEC法以其计算简便、逻辑清晰、结果量化的特点,尤其适用于对具体作业活动和操作行为的风险进行快速评估与排序,为一线班组长和管理人员提供了直观的风险管理工具。

2 风险控制方法

在通过科学方法对风险进行有效评估与分级后,采取针对性且层次分明的控制措施,是实现风险闭环管理、降低事故发生率的必然路径。针对金属矿山复杂的生产系统,风险控制策略主要聚焦于工程技术、管理措施、个体防护和应急响应四个层面,这些方法相辅相成,共同构筑起矿山安全的立体防线。

2.1 工程技术控制

工程技术控制是通过改进设计、采用先进设备、优化工艺流程等技术手段,从源头上消除或降低危险、有害因素的强度,是最高效、最可靠的风险控制措施。在金属矿山安全管理中,工程技术控制的理念是“预防为主、技术先行”,通过技术创新和装备升级实现本质安全。

针对顶板/片帮事故这一金属矿山的典型高发风险,现代支护技术已从传统的被动支护发展为主被动结合的系统化工程解决方案。在深部高应力环境下,工程技术人员可首先运用地质雷达、三维激光扫描、摄像测量等技术,精确获取围岩的地质构造和应力状态等关键参数。基于这些数据,通过数值模拟软件建立围岩力学模型,优化设计锚杆锚索的规格、间排距和预应力大小。施工过程中采用全长粘结式中空注浆锚杆,通过高压注浆与围岩形成复合承载体,同时配合高强度钢筋网和纤维喷射混凝土,构建起“锚网喷索”立体支护系统。这种技术组合增强了围岩的整体性和抗渗性,从而有效防止巷道围岩的变形和破坏^[3],从根本上消除了冒顶片帮的风险源头。

在机械化和自动化改造方面,金属矿山正加快推进“机械化换人、自动化减人”战略。以采掘作业为例,现代化矿山广泛应用遥控铲运机、无人驾驶矿用卡车等智能装备,这些设备集成了激光雷达导航、机器视觉识别、惯性定位等先进技术,能够在复杂的井下环境中实现精准定位和自主避障。操作人员在地面安全的集控中心,通过高清视频监控和数据传输系统,远程完成铲装、运输、卸载等全部作业流程,实现了人员与危险作业面的完全物理隔离。

安全监测预警系统的建设是工程技术控制的重要组成部分。现代化的综合监测系统融合了多种传感技术和数据分析方法,形成了立体化的安全防护网络。水文地质监测子系统通过在关键部位布设水位、水压传感器,实时监控地下水动态变化;微

震监测子系统利用高精度地震检波器捕捉岩体微破裂信号;环境监测子系统则通过气体传感器阵列,持续监测井下有害气体浓度。这些子系统产生的数据通过工业物联网汇聚到数据中心,运用大数据分析和人工智能算法进行融合处理,能够识别出潜在的危险征兆并提前发出预警。

2.2 管理措施控制

管理措施控制是通过建立健全安全管理制度、严格执行操作规程、强化人员培训和监督检查等管理手段,规范人的不安全行为,弥补工程技术措施的局限性。在金属矿山安全管理体系中,管理措施控制发挥着承上启下的关键作用,是连接技术手段与现场实践的重要桥梁。

作业许可管理是管理措施控制的核心环节,特别是对爆破、动火、有限空间作业等特殊高风险作业的精细化管控。现代化的作业许可制度已从传统的纸质审批转向数字化、智能化管理模式。以有限空间作业为例,作业人员需通过移动终端提交电子作业申请,系统会自动调用该区域的历史风险评估数据和实时监测信息,生成针对性的安全检查清单。申请人必须逐项确认安全措施落实情况,包括现场气体检测结果、通风设施运行状态、应急救援器材配备等关键要素。审批流程严格按照“班组初审、技术复核、安全确认、领导批准”的四级管控模式,每个环节都有明确的责任人和时限要求,形成完整的责任链条和电子化审计轨迹。

基于风险评估结果的差异化检查管理是提升监督效能的重要创新。安全管理部门需将第二章风险评估的量化结果转化为可视化的风险分布图,不同风险等级的区域和设备采用不同颜色标识和检查频次。重大风险点实行每日巡检制度,配备专门的安全监督员进行现场监护;较大风险点实行每周专项检查,由技术人员和安全管理联合检查;一般风险点纳入月度综合检查范围。检查内容和标准严格对照风险评估时识别的关键控制要素,确保检查的针对性和有效性。同时,建立检查问题的闭环管理机制,对发现的隐患按照“五定”原则进行整改,并跟踪验证整改效果^[4]。

2.3 个体防护控制

个体防护控制是保护作业人员安全的最后一道防线,是在工程技术和措施无法完全消除风险时,为个体提供的必要保护。具体而言,工程应根据不同工种和作业环境的特定风险,进行防护用品的差异化 and 功能化配备。如从事凿岩作业的工人,其粉尘暴露风险极高,必须佩戴正压式动力送风过滤式呼吸器,该设备通过风机将过滤后的清洁空气送入面罩,形成正压,有效阻止外部粉尘的吸入。对于井下爆破作业人员,则强制要求随身携带并熟练使用化学氧自救器,它能在灾变环境下提供30分钟以上的氧气,为逃生创造条件。

同时,现代个体防护装备正向智能化发展。如可以在安全帽上安装集成定位芯片(UWB/LoRa)、气体传感器和无线通信模块。该装备不仅能实时追踪人员位置,实现电子围栏报警,还能监测佩戴者周围的CO、O₂浓度,一旦超标立即在帽上发出

声光报警,并同步将报警信息和位置发送至调度中心。部分高端安全帽还应该集成“一键呼救”和跌倒检测功能,当人员遭遇意外失去行动能力时,可自动或手动求援,极大地缩短应急响应时间^[5]。

2.4 应急响应控制

应急响应控制是在传统的工程技术、管理措施和个体防护基础上,构建贯穿预防、处置、恢复与改进的完整行动链。在金属矿山复杂多变的生产环境中,应急响应控制通过构建多层次、多维度的安全缓冲机制,提升整个系统应对突发事件和异常状况的能力。

在设备层面,关键系统均配备备用设施,如主通风机配置双机并联运行模式,一旦主机故障,备机能在30秒内自动启动并达到额定风量。在人员配置上,实行AB岗制度和技能交叉培训,确保任何岗位人员缺失时都有合格替代者能够立即顶岗。同时,建立多级应急预案体系,针对不同风险等级和事故类型制定相应的响应策略,组建应急救援队伍并定期开展应急演练,检验和优化预案的可操作性。

应急响应控制还注重从失效中学习和持续改进。通过建立事故事件数据库和经验反馈机制,系统分析各类安全事件的发生规律和深层原因,不断优化风险识别方法和控制措施。这种“从失败中学习”的文化,使矿山安全管理体系形成自我完善与动态演进的良性循环,实现了从被动处置向主动优化的根本转变。

3 结论

金属矿山的安全生产管理是一个复杂的系统工程,其关键在于实现从“事后补救”到“事前预防”的根本转变。本文所论述的风险评估方法为精准识别“病灶”提供了科学工具,而工程技术、管理措施、个体防护和应急管理相结合的多层级风险控制策略则构成了系统性的“治疗方案”。二者的有机结合与有效应用,是构筑坚实安全防线的核心。未来,随着智能化技术的发展,应进一步推动风险管控与生产过程的深度融合,构建动态、智能的预警与决策支持系统,持续提升矿山本质安全水平。

[参考文献]

- [1]马翔.论述金属非金属矿山安全现状及标准化管理建设路径[J].世界有色金属,2025,(03):229-231.
- [2]李鸿一.金属非金属矿山安全生产标准化创建过程研究[J].中国减灾,2024,(13):50-51.
- [3]王海杰.某煤矿煤柱回收工作面的巷道围岩控制技术研究[J].科技资讯,2025,23(13):209-211.
- [4]贝鑫,李林,贝宗军.金属非金属矿山安全生产的主要影响因素及管理对策[J].中国盐业,2022,(09):52-54.
- [5]葛珊珊.金属非金属矿山企业安全生产风险评价研究[D].河北工业大学,2020.

作者简介:

张玲(1986—),女,汉族,河北唐山人,在职硕士研究生,河钢集团矿业公司,职称:经济师,研究生方向:工程管理。