

矿山安全事故风险评估与预警机制研究

朱佳晖

杭州启程安全科技有限公司

摘要: 矿山安全事故威胁人员安全。2023 年数据显示, 全国矿山企业自查问题隐患 60.6 万条, 其中重大隐患 1.48 万条; 各级监管部门检查发现煤矿隐患 46.02 万条, 重大隐患 2269 条, 同比增加 51.3%^[1]。随着技术发展, 构建风险评估预警机制成重要课题, 本文旨在探索其构建路径。

关键词: 矿山安全; 风险评估; 层次分析法

DOI: 10.65976/3078-8145.2026.02.025

1 矿山安全事故风险评估方法

1.1 LEC 法及其应用步骤

LEC 法 (LEC Risk Assessment Method) 是一种广泛应用的半定量风险评估方法, 由美国安全工程师威廉·T·芬克 (William T.Fine) 在 1971 年提出。该方法通过评估事故发生的可能性 (L)、人员暴露于危险环境的频率 (E) 和事故可能造成的后果严重程度 (C) 三个因素, 计算出风险值 (D), 从而确定风险等级^[2]。LEC 法具有计算简便、参数明确、可操作性强等特点, 特别适用于矿山作业环境中各类危险源的风险评估, 是矿山企业开展安全风险分级管控的重要工具。

LEC 法的具体计算公式为: 风险值 $D=L \times E \times C$ 。其中, L 表示事故发生的可能性大小, 取值范围为 0.1 ~ 10, 当几乎不可能发生事故时取 0.1, 当事故必然发生且后果严重时取 10; E 表示人员暴露于危险环境的频率, 取值范围为 0.5 ~ 10, 从非常罕见地暴露 (0.5) 到连续暴露 (10); C 表示事故可能造成的后果严重程度, 取值范围为 1 ~ 100, 从轻微伤害 (1) 到灾难性多人死亡 (100)。根据计算结果, 风险等级划分为: D 值在 70 以上为极其危险, 需要立即采取控制措施; D 值在 40 ~ 70 之间为高度危险, 需要及时整改; D 值在 20 ~ 40 之间为显著危险, 需要引起关注; D 值在 20 以下为一般危险, 可以接受但需要监控。以某煤矿回采工作面为例, 采用 LEC 法进行风险评估时, 首先需要组织安全管理人员、技术人员和一线作业人员组成评估小组, 对工作面内各作业环节进行系统分析, 确定 L 值为 3 (可能发生但可能性较小)、E 值为 6 (作业人员每周工作期间暴露)、C 值为 40 (可能导致人员重伤), 计算得出 D 值为 720, 属于极其危险等级, 必须立即制定专项管控措施后方可继续作业。

1.2 模糊综合评价法及权重计算

模糊综合评价法 (Fuzzy Comprehensive Evaluation

Method) 是以模糊数学为基础, 应用模糊关系合成原理, 将边界条件不清、不易量化的因素定量化, 并进行综合评价的一种方法^[3]。该方法能够有效处理矿山安全评价中大量存在的模糊性和不确定性问题, 特别适用于多因素、多层次的复杂安全评价系统。在矿山安全风险评估中, 由于很多风险因素难以精确量化, 如人员安全意识、设备维护质量、管理制度执行力度等, 模糊综合评价法提供了一种科学的定量分析途径。

模糊综合评价法的实施需要遵循严格的数学步骤。首先, 建立因素集 $U=(u_1, u_2, \dots, u_n)$, 其中 u_i 表示影响评价对象的第 i 个因素; 其次, 建立评判集 $V=(v_1, v_2, \dots, v_m)$, 其中 v_j 表示第 j 个评判结果, 通常包括“极其危险”“高度危险”“中度危险”“低度危险”等等级; 第三, 构建隶属度矩阵 R , 通过专家调查问卷或历史数据分析, 确定各因素对各评判等级的隶属程度, 形成 $n \times m$ 阶隶属度矩阵; 第四, 确定因素权向量 A , 反映各因素在评价中的重要程度; 第五, 进行模糊变换, 计算综合评价向量 $B=A \circ R$, 其中 \circ 表示合成算子; 最后, 计算综合得分 $S=B \cdot T$, T 为评判集各等级对应分数组成的向量^[4]。

以某煤矿工作面瓦斯超限风险模糊综合评价为例, 该评价体系包含瓦斯因素、地质构造因素、通风因素和管理因素四个一级指标, 权重分别为 0.36、0.18、0.29 和 0.17^[3]。通过专家调查法确定的隶属度矩阵显示, 瓦斯因素对“红色预警”的隶属度为 0.39、对“黄色预警”的隶属度为 0.41、对“绿色安全”的隶属度为 0.20; 地质构造因素对各等级的隶属度分别为 0.35、0.42、0.23; 通风因素对各等级的隶属度分别为 0.28、0.45、0.27; 管理因素对各等级的隶属度分别为 0.32、0.40、0.28。根据模糊变换计算, 综合评价向量 $B=(0.34, 0.42, 0.24)$, 表明该工作面瓦斯超限风险以 42% 的概率属于黄色预警等级, 需制定相应管控措

施。

1.3 层次分析法在指标权重确定中的应用

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是一种定性与定量分析相结合的多准则决策方法, 由美国运筹学家萨蒂 (Thomas L. Saaty) 于 20 世纪 70 年代提出^[4]。该方法通过构建层次结构模型, 将复杂问题分解为目标层、准则层和方案层, 利用 1-9 标度法对各层次因素进行两两比较, 构造判断矩阵, 计算各因素的相对权重, 并进行一致性检验。在矿山安全风险评估中, 层次分析法能够系统整合专家经验和客观数据, 科学确定各风险指标的权重值, 为后续的模糊综合评价提供可靠依据。

层次分析法的具体实施步骤如下: 第一步, 构建层次结构模型, 将总目标分解为若干准则层因素和指标层因素; 第二步, 采用 1-9 标度法构造判断矩阵, 标度 1 表示两因素同等重要, 3 表示前者比后者稍微重要, 5 表示前者比后者明显重要, 7 表示前者比后者非常重要, 9 表示前者比后者极端重要, 2、4、6、8 表示相邻判断的中间值^[4]; 第三步, 计算判断矩阵的最大特征值及其对应的特征向量, 归一化处理后得到各因素的权重向量; 第四步, 进行一致性检验, 计算一致性比率 $CR=CI/RI$, 其中 $CI=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)$ 为一致性指标, RI 为平均随机一致性指数, 当 $CR<0.1$ 时认为判断矩阵具有满意的一致性。以某煤矿企业风险评估指标体系为例, 准则层包括煤矿事故风险、安全防范系统风险和应急救援系统风险三个因素, 通过专家打分构造判断矩阵, 计算得出一级指标权重分别为 0.1638、0.5390 和 0.2972, 安全防范系统风险的权重最高, 表明其在整体风险评估中占据最重要地位^[4]。在此基础上, 进一步对二级指标进行权重计算, 如安全防范系统风险下的采掘生产系统风险权重为 0.4190、人员风险权重为 0.2503、安全管理机构风险权重为 0.1634、防灾系统风险权重为 0.1002、辅助生产系统风险权重为 0.0671。

2 矿山安全预警机制构建

2.1 预警指标体系构建原则

矿山安全预警指标体系构建是科学预警的基础, 需遵循系统性、科学性、可操作性和动态性原则^[5]。系统性要求指标涵盖矿山生产全要素; 科学性要求指标体系基于科学理论, 客观反映风险状况; 可操作性要求指标数据获取可靠; 动态性要求指标体系随矿山环境变化调整。根据国家矿山安全监察局 2025 年办法, 预警信息等级分为红、橙、黄、蓝四级, 对应不同风险程度和响应措施^[6]。

预警指标体系分环境监测、设备状态、人员行为、管理过程四大类。环境监测指标含瓦斯浓度等反映作业环境安全的参数; 设备状态指标含通风机运行参数等反映设备安全性能的指标; 人员行为指标含人员位置等反映人员安全行为的指标; 管理过程指标含安全制度执行率等反映安全管理水平的指标^[5]。各类指标相互关联, 构成矿山安全预警指标网络。

2.2 预警阈值设定方法

预警阈值的科学设定直接关系到预警机制的准确性和有效性。根据《煤矿安全规程》和相关行业标准, 结合矿山实际情况, 预警阈值的设定应采用定量分析与定性判断相结合的方法^[3]。对于定量指标, 如瓦斯浓度、温度、风速等, 可依据国家标准设定绝对阈值, 如工作面瓦斯浓度达到 0.7% 时发出黄色预警、达到 0.8% 时发出红色预警; 对于定性指标或复合指标, 需通过历史数据分析、专家经验判断或模型计算确定合理的阈值区间。

以瓦斯超限预警阈值设定为例, 预警指标体系包括实时预警指标和趋势预警指标两类^[3]。实时预警指标从监控系统自动获取数据, 包括同一工序条件下瓦斯体积分数变化值 ΔC 和回风瓦斯探头值 T_2 平均增加值等; 趋势预警指标则包括地质构造带范围、通风系统状态、管理因素等, 反映未来一段时间内发生瓦斯超限的概率。依据《煤矿安全规程》规定, 工作面瓦斯探头值 $T_1 \geq 0.7\%$ 时触发黄色预警、 $T_1 \geq 0.8\%$ 时触发红色预警; 回风瓦斯探头值 $T_2 \geq 0.7\%$ 时触发黄色预警、 $T_2 \geq 0.8\%$ 时触发红色预警; 瓦斯含量 W 在 $7.5 \sim 8 \text{ m}^3/\text{t}$ 之间时触发黄色预警、 $W \geq 8 \text{ m}^3/\text{t}$ 时触发红色预警; 瓦斯压力 P 在 $0.7 \sim 0.74 \text{ MPa}$ 之间时触发黄色预警、 $P \geq 0.74 \text{ MPa}$ 时触发红色预警^[3]。地质构造因素方面, 作业地点处于地质构造带 20m 范围内或地面钻井钻孔 50m 范围内时触发黄色预警; 通风因素方面, 存在停风区域、通风断面小于设计断面 2/3 或工作面风量低于计划风量时触发相应级别预警。

2.3 预警响应与闭环管理机制

矿山安全预警机制的有效运行需要建立完善的预警响应与闭环管理流程。根据国家矿山安全监察局的要求, 矿山企业应建立“值班查看-预警接警-响应处置-分析研判-核查反馈”的闭环工作流程^[6]。值班查看环节要求矿山企业明确监测预警值班机构, 配备专职值班人员, 煤矿、金属非金属地下矿山、尾矿库等实行 24 小时值班, 保持监测预警系统实时在线, 确保系统声光报警功能正常; 预警接警环节要求矿山按照“逢预警接警、必响应处置”的原则, 第一时间

接收预警信息并根据预警等级启动相应响应程序；响应处置环节要求矿山针对不同类型和等级的预警信息，采取相应处置措施，对于瓦斯超限、一氧化碳超限、水文指标异常等可能危及人身安全的红色预警信息，必须立即对受影响区域采取撤人措施；分析研判环节要求矿山分析预警信息的产生原因、处置情况，制定并落实重大安全风险防控和改进措施；核查反馈环节要求矿山在规定时间内（红色预警1小时内）向监管部门反馈预警原因和处置措施。

3 实证分析与效果评价

3.1 某煤矿工作面风险评估应用案例

以某煤矿2201回采工作面为实证研究对象，该工作面位于矿井二水平东翼，走向长度850m，倾斜长度150m，煤层厚度3.2~4.5m，平均倾角12°，属于高瓦斯矿井。采用LEC法对该工作面主要作业环节进行风险评估，包括采煤作业、移架作业、支护作业、运输作业等。以采煤作业为例，组织5名专家进行L、E、C三个因素评分，取平均值后得到L=4、E=6、C=45，计算风险值D=1080，远超极其危险阈值，必须制定专项安全技术措施后方可作业^[2]。通过对各作业环节的系统评估，共识别出高度以上风险点23个，其中移架作业风险值最高达1260，通风作业风险值为840，运输作业风险值为720。

采用模糊综合评价法对该工作面瓦斯超限风险进行综合评价，构建以瓦斯因素、地质构造因素、通风因素和管理因素为一级指标的评价体系^[3]。通过专家调查确定各指标权重分别为0.36、0.18、0.29和0.17，各指标下的二级指标权重按照层次分析法计算确定。隶属度矩阵的确定综合考虑了监测数据、历史事故记录和专家经验，如瓦斯因素下的T₁探头值隶属度根据连续7天的监测数据计算，当日均浓度为0.65%时对“绿色安全”的隶属度为0.75、对“黄色预警”的隶属度为0.25。计算得到综合评价向量B=(0.31,0.45,0.24)，表明该工作面瓦斯超限风险处于黄色预警等级，建议加强瓦斯抽采作业管理，优化通风系统配置，增加监测频次。

3.2 预警系统应用效果分析

该煤矿2201工作面自2023年6月引入多指标量

化预警模型以来，预警效果显著改善。与传统单一指标预警模式相比，多指标预警模型有效降低了误报率和漏报率^[3]。统计数据显示，2023年下半年该工作面共发生红色预警23次，较上半年单一指标预警模式的48次减少了52.1%；黄色预警发生31次，较上半年的46次减少了32.6%。更重要的是，预警准确率显著提升，经现场核实确认的实际危险情况与预警结果相符率从68%提升至89%，有效避免了因误报导致的频繁停产和因漏报导致的事故发生。

预警机制实施提升了安全管理水平，安全管理团队通过跟踪分析预警数据，能识别高风险点并加强管理。2023年该工作面安全生产零事故，工伤事故率降67%，隐患整改及时率超98%，瓦斯抽采效率提15%，通风电耗降8%，获良好安全与经济效益。该案例表明，基于多种方法的综合风险评估与预警机制，可为矿山安全生产提供有力保障。

4 结论

文中系统分析矿山安全事故风险评估与预警机制，LEC法用于风险初筛，模糊综合评价法处理风险不确定性，层次分析法确定指标权重，三者综合形成完整技术链。预警机制遵循系统性、科学性原则，合理设定阈值，建立闭环响应流程。实证多指标预警模型可提高准确率、降低误报率。未来可探索新技术在矿山安全预警中的应用。

参考文献：

- [1] 国家矿山安全监察局. 2023年全国矿山安全生产工作报告[R]. 北京: 国家矿山安全监察局, 2024.
- [2] 王家臣. 矿山安全评价理论与方法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2018.
- [3] 张建国, 李树刚, 秦跃平. 矿井瓦斯超限实时预警技术研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(8): 181-185.
- [4] 刘永立, 李新春, 宋朝阳. 基于层次分析-模糊综合评判的煤矿企业风险评估研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(7): 58-65.
- [5] 李季, 张明, 王鹏. 基于大数据的矿山安全风险预警机制研究[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(3): 52-57.
- [6] 国家矿山安全监察局. 矿山安全风险监测预警处置工作管理办法(试行)[Z]. 矿安〔2025〕100号, 2025.