

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.025

基于 AHP-多级模糊综合评估方法的 工程爆破事故分析与防范对策研究

王爱华^{1,2}

(1. 中国地质大学 工程学院, 武汉 430074; 2. 福建省新华都工程有限责任公司, 厦门 361000)

摘要: 工程爆破作为矿产开采与基础设施建设的关键技术,其作业过程伴随着极高的安全风险。为科学、系统地评估工程爆破作业的安全风险,并提出针对性的防范对策,构建有效处理评价过程中不确定性与模糊性的风险评估模型。通过对2014—2024年间国内90起典型工程爆破事故案例进行统计分析,构建了包含“人、机(物)、环境、管理”四个维度的工程爆破事故致因指标体系。统计结果表明:“人的不安全行为”是事故最主要的原因,而“管理缺陷”(特别是安全教育培训不到位、安全制度不落实及现场管理混乱)则是事故的深层原因。其次,针对爆破风险评价中诸多因素难以精确量化的问题,引入了模糊数学理论,并结合层次分析法(AHP)确定各指标权重,构建了基于AHP-多级模糊综合评估的工程爆破安全风险评价模型。通过案例分析,验证了该模型能够对爆破作业的整体安全状况及各致因维度的风险等级进行有效判别,识别出关键风险因素。最后,基于模型评价结果和详实的事故数据分析,从技术、管理、人员和应急四个层面,系统地提出了工程爆破事故的综合防范对策。研究结果表明:该模型为工程爆破的动态风险管控和事前预防提供了科学方法,提出了强化安全培训、完善设备维护、优化作业环境管控及落实安全管理责任等防范对策,为工程爆破事故的风险防控提供科学依据和实践参考。

关键词: 工程爆破事故; 多级模糊综合评估; 风险分析; 防范对策

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2026)01-0235-11

Research on Engineering Blasting Accident Analysis and Preventive Countermeasures based on AHP-Multilevel Fuzzy Comprehensive Assessment Methods

WANG Ai-hua^{1,2}

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Fujian Xinhua Du Engineering Co., Ltd., Xiamen 361000, China)

Abstract: Engineering blasting serves as a critical technology in mineral extraction and infrastructure development, yet carries inherent operational safety risks. To establish a scientific and systematic safety risk assessment framework with targeted preventive measures, this study develops a risk evaluation model that addresses uncertainty and ambiguity in the assessment process. Based on an analysis of 90 engineering blasting accidents in China (2014—2024), a causal index system spanning four dimensions was constructed: human, machine (object), environment, and management. Statistical analysis indicates human unsafe behavior (particularly illegal operation) as the primary direct cause. At the same time, management defects (particularly inadequate safety training, unimplemented safety protocols, and disorganized site management) constitute fundamental systemic causes. To address quantification challenges,

收稿日期 (Date of reception): 2025-07-25

网络首发日期 (Published online): 2025-10-20

作者简介: 王爱华 (1984-), 男, 宁夏永宁县, 本科、高级工程师, 从事矿山爆破技术和安全管理研究工作, (E-mail) 404618316@qq.com。

About the author: WANG Ai-hua (1984-), male, born in Yong ning city, Ningxia province, bachelor's degree, senior engineer, mainly engaged in mining blasting technology and safety management research, (E-mail) 404618316@qq.com.

ges in risk evaluation, fuzzy mathematical theory and the analytic hierarchy process (AHP) were integrated to determine indicator weights, thereby establishing an AHP-based multilevel fuzzy comprehensive evaluation model. Case validation confirms the model's effectiveness in assessing overall blasting safety status and identifying risk levels across causal dimensions, enabling key risk factor identification. Based on model outputs and a detailed accident analysis, comprehensive preventive countermeasures against engineering blasting accidents were systematically proposed across four domains: technology, management, personnel, and emergency response. The findings demonstrate the model's scientific utility for dynamic risk control, suggesting countermeasures such as enhanced safety training, improved equipment maintenance, optimized environmental controls, and strengthened safety accountability systems. This study provides both a theoretical foundation and practical guidance for mitigating engineering blasting risks.

Key words: engineering blasting accident; multilevel fuzzy comprehensive assessment; risk analysis; preventive measures

工程爆破技术广泛应用于我国基础设施建设和矿产资源开发领域,爆破量逐年增加,2024 年全国工业炸药累计销量 448.50 万 t,爆破过程涉及多变的人为因素、高危爆破器材和复杂的作业环境,任何环节的疏忽都可能导致爆破地震、飞石、冲击波、炮烟中毒等事故,严重威胁作业人员的生命安全和周边环境、设施及社会公共安全,经济损失巨大,社会影响恶劣^[1,2]。随着我国矿产资源开采向深地、深空、深海和爆破对象大型化方向发展,爆破作业环境日趋复杂,安全管理难度激增。因此,基于真实事故数据,科学辨识和评估爆破作业中的风险,并据此制定有效的预防和控制措施,已成为当前工程爆破安全领域亟待解决的重要课题^[3]。国内外学者围绕工程爆破事故开展了多维度研究。在事故机理方面,Kecojevic 等通过对全球范围露天爆破事故统计指出爆破飞散物和爆破警戒区域管控失效是主要致灾因子^[4];曹杨等构建行为因果链模型,揭示 80% 的爆破事故源于违章作业^[5];张其胜则量化预裂爆破中瓦斯积聚与起爆能量耦合的临界阈值^[6],显示爆破事故具有多因素交互作用的非线性特征。在安全评价方法方面,事故树分析法(FTA)可以直观展示事故的因果关系,但依赖逻辑推理^[7]。层次分析法(AHP)可以量化权重,但难以处理模糊信息^[8]。近年来,智能算法推动评估方法创新,Gerassis 等开发贝叶斯网络-隐类聚类结构方程,解析飞石事故中地质条件与装药参数的关联结构特征^[9]。柳蕴洋创新性融合博弈论组合赋权与云物元模型^[10],解决了矿山爆破安全评价中的指标模糊性与随机干扰问题,准确率达 92%。在事故防范方面,王维基于“2-4”模型提出从个人安全习惯培养和组织安全文化建设双维度预防爆破事故的方法^[11]。韩传伟等提出精细爆破综合评估标准体系是实现从控制性管理到系统性管理的转型的有效手段^[12],是防范工程爆破施工的重要方法。国际上,Dworzak M 提出

基于改进 FMECA 算法的采石场爆破作业风险评估方法^[13],通过系统的风险识别流程确定预防措施优先级。这些研究共同表明,爆破事故本质是“人、机、料、环、管”多层次要素的动态失衡,亟需系统性动态评估工具。

研究提出 AHP-多级模糊综合评估方法将 AHP 的定量权重确定与模糊理论的不确定性处理有机结合,通过隶属度函数刻画风险的模糊边界,弥补单一方法缺陷。同时构建“指标层-准则层-目标层”三级评估结构,可逐层识别风险,既输出整体风险等级,又能定位关键致因维度,实现从宏观到微观的风险解析。通过模糊合成运算与实时数据输入,可动态更新风险评估结果,为现场动态管控提供依据,克服传统静态评估的滞后性^[14]。

1 工程爆破事故统计分析和风险评价体系构建

为了使本研究更具现实性和针对性,对收集到的 2014—2024 年间国内 92 起公开的典型爆破事故案例进行多维度统计分析。数据来源于对各级政府应急管理部门发布的事故调查报告的系统整理。根据统计的 90 起典型工程爆破事故数据,2014—2024 年间这些事故共造成 173 人死亡、110 人受伤,直接经济损失达 27461.61 万元,反映出工程爆破事故的高危害性和严重性。

1.1 事故时间与地区分布特征

对 90 起工程爆破事故的时间分布进行统计,如图 1 和图 2 所示,工程爆破事故发生数量在年度间呈现波动状态,2020 年后事故数量有所下降,这种波动与国家安全生产监管政策的调整、行业安全专项整治行动的开展具有相关性,事故数量逐年稳步下降,表明监管政策对事故防控具有显著影响。2018 年事故起数仅 9 起,但总伤亡人数却高达 53 人,为近十年来之最。这主要是由于该年发生了

“本溪龙新矿业 6·5 重大炸药爆炸事故”(死亡 14 人,受伤 10 人)和“陕西祥盛民爆 4·10 较大爆炸事故”(死亡 7 人,受伤 13 人)两起群死群伤事故。上述事故数据清晰反映了控制事故总伤亡人数的关键,不仅在于减少事故的总起数,更在于有效防范重大、较大等级事故的发生,一两起重大事故造成的伤亡,远超数年一般事故的总和,爆破作业单位安全管理重点应放在对存在导致群死群伤的高危作业(如井下爆破、炸药销毁、运输、储存等)的管控上。

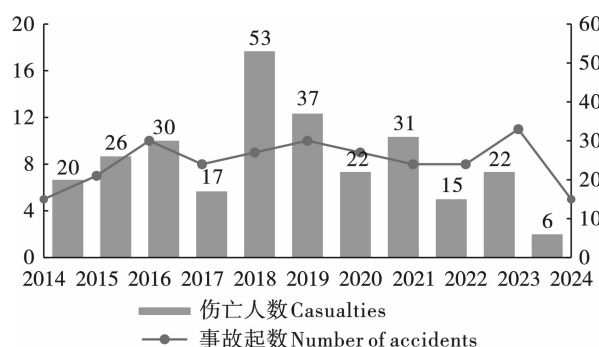


图1 事故数量和伤亡人数年度分布图

Fig. 1 Annual distribution of accident numbers and casualties

各月份事故起数和伤亡人数也存在较大波动,呈现明显的“双峰”特征。3~5月和11月事故集中,占全年事故伤亡人数的54.06%,3~5月因节后集中复工、抢抓开局进度,导致人员思想松懈与培训

不足,事故进入首个高发期。冬季11月则因年终冲刺、生产任务繁重,安全管理易被忽视,成为全年事故最集中的波峰。夏季需警惕高温、雷雨等极端天气诱发的风险,而秋季因气候适宜、生产节奏平稳,是事故发生的低谷期。这一规律揭示了生产节奏与安全管理的紧密关联。

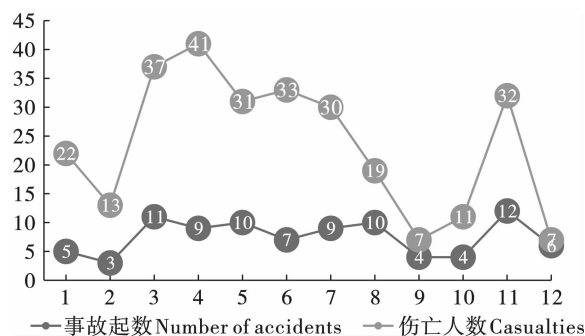


图2 事故数量和伤亡人数月度分布图

Fig. 2 Monthly distribution of accident numbers and casualties

从地区分布来看,工程爆破事故主要集中在四川、云南、贵州、黑龙江和山西等矿产资源丰富或基础设施建设活跃的省份,上述省份事故伤亡人数占比33.9%,事故起数占比37.8%。这些地区由于矿山开采、交通工程等爆破作业需求频繁,且多为山区地形,地质条件复杂,气候多变,增加了爆破作业的安全风险。见图3。

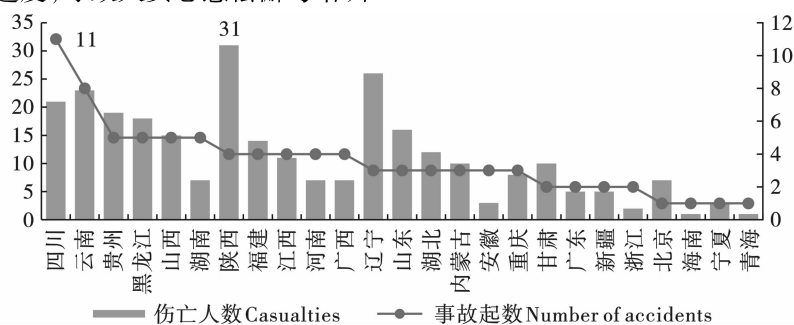


图3 工程爆破事故伤亡人数和事故起数的地域分布情况

Fig. 3 Regional distribution of casualties and number of accidents caused by engineering blasting

1.2 事故类型与级别分布

90起事故中,爆炸事故占比最高,达69起,其次为飞石事故11起,物体打击事故6起,其他类型(如瓦斯爆炸、早爆等)4起。对爆破事故作业环节进行统计,发现起爆作业是最高风险环节,发生了41起事故,占比高达54.7%(在有明确环节记录的75起事故中)。其次是装药作业、盲炮处理和销毁作业,反映出爆破作业关键环节的安全管理存在薄

弱点,也表明从网络连接到起爆瞬间及之后极短时间内的安全管理和操作是预防事故的关键。事故级别分布显示,一般事故70起,较大事故18起,重大及以上事故2起。尽管一般事故占比较大,但较大及以上事故造成的死亡人数占总死亡人数的58%,凸显了重大事故的灾难性后果,工程爆破事故类型和级别分布情况如图4所示。

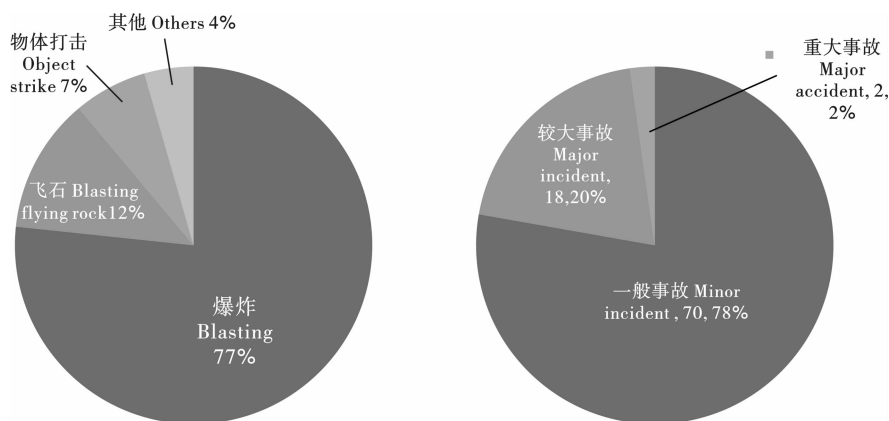


图4 工程爆破事故类型和级别分布情况

Fig. 4 Distribution of types and levels of engineering blasting accidents

1.3 事故原因多维分析

1.3.1 人的不安全行为(直接原因)

通过对90起工程爆破事故中“人、物、环、管”四方面原因的梳理,超过95%的事故都与人的不安全行为直接相关,其中,“违章作业”一词基本出现在所有工程爆破事故报告统计的原因描述中,具体表现为:未确认警戒或擅自起爆11起,是起爆环节最致命的错误;处理盲炮不当或未处理6起,包括违规使用风镐、打钻残孔等;无证作业8起,反映了人员资质管理的缺失;违法制造、销毁、储存爆炸物8起,人因词频分析如图5所示。



图5 事故人因词频分析

Fig. 5 Frequency analysis of human factors in accidents

1.3.2 物的不安全状态

物的因素引发的事故35起,主要表现为:爆破器材问题:使用不防静电的塑料管、PVC管做炮棍、炸药雷管混存、起爆网路连接错误等。设备与防护问题:用起爆器替代仪表检测、起爆站安全距离不足、防护设施不当或缺失。

1.3.3 环境的不良因素

环境因素引发的事故26起,主要为地质条件不良(如岩石裂隙、顶板冒落、高温火区)9起,作业环境杂乱7起,气候条件不利(如雷雨天气)10起。环

境因素多作为事故的诱发或加剧条件,占比不高但不可忽视。

1.3.4 管理的缺陷

管理缺陷是滋生不安全行为和状态的土壤,是事故发生的根本原因。通过对90起事故的管理原因进行词频分析,如图6所示,主要的管理缺陷如下:安全教育培训不到位38次,是最高频的管理缺陷。安全制度不落实35次,有章不循,让制度成为“墙上文件”;现场管理混乱25次,缺乏现场有效监管,是普遍违章行为的诱因;主体责任不落实22次,企业负责人安全意识淡薄;监管不力18次,政府主管部门或上级单位监管缺失;技术管理不到位16次,爆破设计、技术措施存在缺陷;隐患排查治理不到位12次,对风险视而不见,隐患酿成事故。



图6 事故管理原因词频分析

Fig. 6 Frequency analysis of accident management causes

值得注意的是,76.9%的事故存在多因素耦合作用,如“人、管”双重因素引发的事故占52.7%,“人、机、管”三重因素引发的占21.9%,反映出工程爆破事故的发生是多因素交互影响的结果,单一因素防控难以有效遏制事故发生。

1.4 工程爆破事故风险评价指标体系的构建

基于90起工程爆破事故原因分析,结合文献中

提及的具体风险点,构建了一个包含 1 个目标层、4 个准则层和 20 个指标层的多级风险评价指标体系,如表 1 所示。一级指标包括人的因素(U_1)、设备因素(U_2)、环境因素(U_3)、管理因素(U_4)4 个维度,二级指标根据事故主要原因细化为 16 个具体指标。

该指标体系的建立遵循系统性、针对性原则,所有二级指标均从 90 起事故的具体原因中提炼而来,如“未确认警戒情况”和“盲炮未处理”等指标直接对应事故统计表中的高频原因,确保指标体系与工程爆破事故的实际风险特征高度契合。

表 1 工程爆破事故多级风险评价指标体系
Table 1 Multi-level risk evaluation index system for engineering blasting accidents

目标层 Target level A	准则层 Guideline level U	指标层 Indicator level C	指标说明 Indicator description
工程爆破 安全风险	U_1 人的因素	C_{11} 安全意识与资质	无证上岗、对安全重要性认识不足、侥幸心理
		C_{12} 专业知识与技能	爆破工艺不熟练、对器材性能不熟悉、未发现并处理盲炮 ^[15]
		C_{13} 违章作业行为	高频致因
		C_{14} 生理与心理状态	疲劳作业、身体不适、情绪不稳定等,虽直接证据少但为潜在重要因素 ^[16]
	U_2 物的因素	C_{21} 爆破器材质量与使用	炸药雷管不合格或混存、PVC 管做炮棍、电子雷管未卡接、违规自制爆炸物
		C_{22} 爆破设备与工具	设备故障、用起爆器替代仪表检测网络、起爆站安全距离不足
		C_{23} 防护设施与工具	警戒设施、个人防护用品(PPE)不足或失效、防护设施不当
		C_{24} 爆破参数设计	抵抗线过小、装药过量、起爆网路连接错误等 ^[17]
	U_3 环境因素	C_{31} 地质与天气条件	地质裂隙、不良地质、雷雨天气、高温天气等 ^[1]
		C_{32} 高温与火区影响	在高温或火区环境下爆破,易发生早爆或意外 ^[18]
		C_{33} 作业空间与周边环境	邻近重要设施、对头掘进、炮烟中毒、避炮点设置不合理 ^[19,20]
		C_{41} 安全责任与制度	高频致因
	U_4 管理因素	C_{42} 安全教育与培训	高频致因
		C_{43} 现场管理与监督	高频致因
		C_{44} 技术管理水平	技术措施不落实、技术管理不到位、图纸造假、风险辨识不足
		C_{45} 隐患排查与应急	隐患排查治理不到位(高频)、应急预案缺失或不切实际 ^[8,14]

2 基于 AHP-模糊综合评估的风险评价模型

2.1 层次分析法(AHP)权重确定

层次分析法是一种将复杂的决策问题分解为多个层次,并通过两两比较的方式确定各因素相对重要性的定量分析方法^[21]。其步骤如下:

(1)构造两两比较判断矩阵:针对上一层次的某个因素,对其下一层次的各相关因素进行两两比较,根据其相对重要性,采用 1~9 标度法(如表 2)赋值,构造判断矩阵 A 。

(2)权重的确定

通过计算判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 及其对应的特征向量,归一化后即各因素的权重向量 W 。

首先求解判断矩阵 A 的主特征向量

$$A \cdot W = \lambda_{\max} \cdot W$$

式中: W 为待求的权重向量; $\lambda_{\max}$ 为矩阵 A 的最大特征值。

其次,归一化特征向量

$$w'_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j}, i = 1, 2, \dots, n$$

式中, w_i 为归一化后第 i 个指标的权重。

最后,进行一致性检验

计算 $\lambda_{\max}$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw')_i}{w'_i}$$

式中, n 为矩阵阶数。

计算 CI 和 CR

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

式中: CI 为平均一致性指标; RI 为随机一致性指标; 可以通过查表获取。 CR 为一致性比率, 当 $CR < 0.1$ 时, 认为判断矩阵具有满意的一致性, 否则需调整。

表 2 AHP 判断矩阵标度及其含义

Table 2 AHP judgment matrix scale and its meaning

标度 Scale	含义 Meaning
1	两个因素相比, 同等重要
3	前者比后者稍微重要
5	前者比后者明显重要
7	前者比后者强烈重要
9	前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	上述两相邻判断的中间值

2.2 多级模糊综合评估模型构建

模糊综合评估是运用模糊数学理论, 对受多种因素影响的事物进行综合评价的一种方法^[8,14]。其步骤为:

(1) 确定因素集 U : 即评价指标的集合, $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\}$, 每个 U_i 又包含若干子因素 C_i 。

(2) 确定评语集 V : 即评价结果的等级集合, 设为 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{\text{风险很高, 风险较高, 风险中等, 风险较低, 风险很低}\}$ 。

(3) 建立模糊关系矩阵 R : 通过邀请专家组对每个最底层的指标 C_i 进行打分, 统计每个指标 C_i 隶属于评语集 V 中各个等级 V_j 的专家比例, 从而得到一个模糊关系向量 $r_{ij} = (r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}, r_{i5})$ 。将同一准则层下的所有指标的模糊关系向量组合起来, 便构成了该准则层的模糊关系矩阵 R 。

(4) 进行模糊合成运算: 模糊合成是将各因素的权重向量 W 与模糊关系矩阵 R 进行合成运算, 得到综合评价结果 B 。采用经典 Max-Min 算子, 即

$$B_i = w_i \circ R_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}) \circ$$

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix}$$

式中: w_i 为指标层权重向量, n 为指标数; R_i 为指标层隶属度矩阵, m 为评价等级数; “ $\circ$ ”表示合成运算, $b_{ij} = \max_k [\min(w_{ik}, r_{kj})]$ 。通常采用加权平均

模型: $S = A \cdot V^T = \sum_{j=1}^m a_j v_j$, A 为目标层隶属度向量, V 为评价等级量化值向量。

3 工程爆破事故评估实例分析

3.1 案例概况

选取 2020 年洛阳市栾川县民安爆破服务有限公司“6·22”较大爆炸事故作为评估案例^[22]。该事故发生发生在爆破器材退库作业环节, 造成 3 人死亡, 直接经济损失 1159 万元。事故直接原因是违章作业导致炸药与雷管混存, 间接原因包括安全制度不健全, 事故作业现场为临时搭建的爆破器材存放点, 未设置独立的雷管与炸药存放区域, 通风、防火设施不完善。作业人员均未取得爆破作业资格证, 且未接受过系统的安全培训, 对爆破器材的存储规范不熟悉。企业安全管理机构形同虚设, 未建立爆破器材领退制度, 现场无专职安全管理人员监督。

3.2 风险评估过程

首先采用层次分析法 (AHP) 构建判断矩阵, 结合案例分析, 对表 1 中准则层指标中各因素重要程度之间两两比较, 通过九级标度法确定矩阵元素, 构建判断矩阵 A , 然后求取矩阵的最大特征值并归一化特征向量, 可以调用 MATLAB 软件中 $[V, D] = \text{eig}(A)$ 函数, 直接得到各因素的权重和一致性检验结果, 准则层判断矩阵 A 和权重值如表 3 所示。

表 3 准则层判断矩阵和权重值

Table 3 Criteria layer judgment matrix and weight values

	U_1	U_2	U_3	U_4	W_i
U_1	1	2	5	3	0.483
U_2	1/2	1	3	2	0.272
U_3	1/5	1/3	1	1/2	0.088
U_4	1/3	1/2	2	1	0.157

即人的因素权重 0.483, 设备因素 0.272, 环境因素 0.088, 管理因素 0.157。最大特征根 $\lambda_{\max} = 4.015$, 一致性指标 $CI = 0.005$, 随机一致性比率 $CR = 0.0054 (< 0.1)$, 通过一致性检验, 表明权重分配合理。对每个准则层下的指标层重复上述步骤, 如 U_1 (人的因素) 下指标 $C_{11} \sim C_{14}$ 的权重向量 $w_1 = (0.201, 0.201, 0.520, 0.078)$, 判断矩阵和权重向量如表 4 所示。最大特征根 $\lambda_{\max} = 4.043$, 一致性指标 $CI = 0.0143$, 随机一致性比率 $CR = 0.0159 (< 0.1)$, 通过一致性检验。最终准则层和指标层权重向量计算结果如表 5 所示。

表 4 指标层 $C_{11} \sim C_{14}$ 判断矩阵和权重向量值

Table 4 Judgment matrix and weight vector values for indicator layers $C_{11} \sim C_{14}$

	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	W_1
C_{11}	1	1	1/3	3	0.201
C_{12}	3	1	1/3	3	0.201
C_{13}	3	3	1	5	0.520
C_{14}	1/3	1/3	1/5	1	0.078

其次,定义风险评价等级论域 $V = \{\text{很危险}(81 -$

100),较危险(61 - 80),一般危险(41 - 60),较低危险(21 - 40),低危险(1 - 20)\}。通过专家调研法(邀请 10 位爆破安全专家)根据本工程爆破事故案例分析、伤亡数据以及事故调查报告结果对各二级指标的风险状态进行评分,评分范围 0 ~ 100 分,其中危险状态代表潜在风险水平,评估状态代表当前实际状况,两者权重各取 0.5。

表 5 最终权重向量体系计算结果

Table 5 Calculation results of the final weight vector system

准则层 Guideline level w	指标层 Indicator level w_c
$U_1(0.483)$	$C_{11}(0.201), C_{12}(0.201), C_{13}(0.520), C_{14}(0.078)$
$U_2(0.272)$	$C_{21}(0.483), C_{22}(0.157), C_{23}(0.272), C_{24}(0.088)$
$U_3(0.088)$	$C_{31}(0.333), C_{32}(0.333), C_{33}(0.333)$
$U_4(0.157)$	$C_{41}(0.407), C_{42}(0.219), C_{43}(0.219), C_{44}(0.089), C_{45}(0.066)$

采用 S 型隶属度函数将专家评分映射为隶属度值,函数表达式为

$$M(s) = \begin{cases} 1, & s \leq l_1 \\ \frac{1}{1 + e^{-k(s-m)}}, & l_1 < s \leq l_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 - \frac{1}{1 + e^{-k(s-m)}}, & l_{n-1} < s \leq l_n \\ 1, & s > l_n \end{cases}$$

式中, $l_1, l_2, \dots, l_n$ 为评分等级界限, m 为等级中点, $k = \frac{10}{l_n - l_{n-1}}$ 为调整曲线陡峭程度的常数。以 U_1 (人的因素)为例,经各专家打分分析评估指标隶属度,采用归一化处理,最后得到 C_{11} 安全意识与资质、 C_{12} 专业知识与技能、 C_{13} 违章作业行为、 C_{14} 生理与心理状态的隶属度矩阵如表 6 所示。

表 6 U_1 (人的因素)评估指标隶属度矩阵

Table 6 U_1 (human factors) assessment indicator membership matrix

	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
R_{11}	0.014	0.986	0	0	0
R_{12}	0	0.027	0.973	0	0
R_{13}	0.332	0.668	0	0	0
R_{14}	0	0	0.040	0.960	0

进行一级模糊合成,得到每个准则层的评价结果向量 $B_i = w_i \circ R_i$ 。 B_i 反映了第 i 个准则层的整体风险分布情况。人的因素的权重向量 $w_1 = [0.201,$

0.201,0.520,0.078],则人的因素的一级评估向量为

$$B_1 = A_1 \cdot R_1 = [0.201, 0.201, 0.520, 0.078] \cdot \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{12} \\ R_{13} \\ R_{14} \end{bmatrix} = [0.177, 0.552, 0.197, 0.074, 0]$$

同理,计算物的因素、环境因素、管理因素的一级评估向量分别为

$$\begin{aligned} B_2 &= [0.218, 0.510, 0.184, 0.088, 0] \\ B_3 &= [0, 0.196, 0.253, 0.373, 0.178] \\ B_4 &= [0.198, 0.715, 0.078, 0.069, 0] \end{aligned}$$

然后,对每个一级指标下的二级指标进行一级模糊评估,得到一级评估向量 B_i ,再将一级指标权重向量与一级评估向量合成,得到二级模糊综合评估结果 C ,即

$$C = A \cdot B = [0.483, 0.272, 0.088, 0.157] \cdot \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = [0.158, 0.513, 0.196, 0.106, 0.017]$$

3.3 评估结果分析

根据评估结果,该案例的风险等级得分为

$$f = 90 \times 0.158 + 70 \times 0.513 + 50 \times 0.196 + 30 \times 0.106 + 10 \times 0.017 = 63.6$$

属于“较危险”等级,与事故实际后果相符。从各指标贡献度来看,人的因素和管理因素的隶属度

在“较危险”等级及以上分别达 0.729 和 0.913,是导致事故的主要风险源。具体而言,“违章作业”、“无证上岗”、“安全制度不落实”和“现场管理混乱”等指标的隶属度在“较危险”等级均超过 0.70,表明这些因素在事故中起到了决定性作用。设备因素和环境因素的风险等级相对较低,但“爆破器材混存”作为物的因素的子指标爆破器材质量与使用,其隶属度“较危险”等级及以上达 0.73,处于高风险水平,反映出民用爆炸物品管理不善也是事故的重要诱因。

4 工程爆破事故防范对策

4.1 强化人员安全行为管控

针对人的因素引发的高风险,建立“培训、考核、监督”的安全行为管控体系。首先,新入职员工应完成 72 学时的理论与实操培训,重点强化《爆破安全规程》(GB6722)、岗位操作规程等内容;在岗员工每年应进行不少于 20 学时的复训,并结合典型事故案例开展警示教育。其次,严格人员准入培训考核和持证上岗制度,2020 年冷水滩鑫源采石场“7·10”事故就因无证爆破导致 2 人死亡。最后,构建爆破作业现场安全行为智能监控系统,通过无人机、摄像头、定位传感器等智能装备实时监测作业人员的违规行为,如未确认警戒、擅自进入爆区,发现异常自动预警并记录,结合安全考核制度,对违规行为实行“零容忍”,从根本上遏制人的不安全行为。

4.2 完善设备设施本质安全管理

4.2.1 严控爆破器材质量与流转

建立严格的爆破器材入库、检验、储存、领用、清退全流程追溯管理体系。严禁炸药雷管混存、乱放,优先选用质量稳定、安全性高的耐高温、抗水型炸药和数码电子雷管。加强爆破作业单位与公安部门联动,严厉打击违法制贩、储存、使用爆炸物,从源头切断非法链条。

4.2.2 优化爆破参数与施工工艺

加强爆破设计审核,确保孔网参数、装药结构、填塞长度等科学合理,杜绝因设计不当导致的飞石、振动超标等问题。推广应用智能机器人设备进行危险作业,减少人工作业风险^[23]。推广使用安全可靠的器材与技术,如应用数码电子雷管,实现精准延时和网络在线检测,规范起爆站建设,确保安全距离,淘汰不合规的爆破工具(如 PVC 炮棍)等。

4.3 优化作业环境安全管控

针对环境因素的复杂性,建立爆破作业环境风险动态评估机制。在作业前,首先应组织地质、安全

等专业人员对作业现场的地质条件(如岩石稳定性、裂隙分布)、气候因素(如雷雨、大风)进行评估,制定针对性的环境风险防控方案。例如针对高温火区,采取注水降温、使用耐热炸药、优化起爆网络等综合措施^[24]。同时建立沟通机制,提前告知和疏散,如 2015 年岳阳利宇矿业有限公司“7·22”事故因雷雨天气爆破导致 4 人死亡,严重违反《爆破安全规程》有关雷雨天气严禁露天爆破作业规定,应引以为戒。其次,改善作业现场安全条件,合理规划爆破器材存放区、作业区、警戒区,确保各区域之间的安全距离符合规范要求,并设置明显的安全标识和警戒标志,配备必要的防护设施(如防爆掩体、防尘降噪设备)。

4.4 落实安全管理责任体系

管理因素的防控核心是构建“全员、全过程、全方位”的安全管理责任体系。企业主要负责人作为安全生产第一责任人,必须组织制定和落实爆破作业安全管理制度,如 2018 年本溪“6·5”事故就暴露出安全制度不落实问题的严重后果。企业应利用信息化手段强化监督,杜绝“两张皮”现象^[25];建立爆破作业安全管理台账,详细记录作业计划、人员资质、器材使用、隐患整改等信息,实现作业过程的可追溯管理;推行“三人连锁”放炮制度,明确各岗位在爆破作业各环节的安全职责,形成相互监督、相互制约的工作机制。2017 年黑龙江龙煤七台河矿业有限公司“6·12”事故因未执行该制度导致 1 死 1 伤,证明了制度落实的关键作用。引入第三方安全评价机构,对企业的爆破作业项目进行安全评估,及时发现和纠正管理漏洞,提升安全管理水平。编制科学、可操作的专项应急预案,涵盖各类典型事故场景。定期组织应急演练,检验预案的有效性,并根据演练结果进行修订,确保在事故发生时能快速响应、有效处置,最大限度减少损失。

5 结论

基于 2014—2024 年 90 起典型工程爆破事故数据,统计分析事故时空分布特征、事故类别和级别情况,并对事故原因分析表明工程爆破事故的发生是“人、机、环、管”多因素耦合作用的结果,其中人的因素(违章作业、安全培训不到位)和管理因素(安全制度不落实、现场管理混乱)是最主要的风险源,反映出人为失误和管理缺陷是导致事故的核心。采用 AHP-多级模糊综合评估方法能有效处理工程爆破事故风险的不确定性和复杂性,通过构建系统化的指标体系和量化评估模型,实现了从定性分析

到定量评估的转变,评估案例的风险等级为“较危险”,与事故实际后果一致。构建的 AHP 和多级模糊综合评估模型不仅能判别整体风险等级,还能识别出关键的风险维度和具体指标,为安全管理重点投入提供了决策依据。基于评估结果和致因分析,从“人员行为管控、设备本质安全、环境动态评估、管理责任落实”四个层面提出了一套闭环的、系统化的事故防范对策,具有较强的针对性和可操作性。

研究虽取得了一定成果,但仍存在局限性,如针对特定类型的爆破工程(如水下爆破、特种爆破),还需要进行个案的补充和调整。如何将该模型嵌入到信息化管理平台中,实现风险的实时监测、动态评估和自动预警,是未来重要的研究方向,同时结合物联网技术实现风险因素的实时监测与评估,或引入大数据分析优化指标权重,提升评估的精准度和时效性,为工程爆破事故的超前预警和主动防控奠定基础。

附录

Matlab 代码:

%输入数据:专家打分情况(H = 风险状态;E = 评估状态)

```
H = [78 79 75 70 68 77 71 72 69 76;
```

```
50 55 60 66 61 56 59 54 50 58;
```

```
42 40 43 49 41 44 40 42 41 43];
```

```
E = [45 42 44 38 36 43 45 31 38 40;
```

```
30 29 21 25 38 33 45 32 25 35;
```

```
10 26 22 17 11 23 22 20 15 16];
```

```
l_set = [1 21 41 61 81 100];
```

```
m_set = (l_set(1:end-1) + l_set(2:end))/2;
```

```
k_set = 10./(l_set(2:end) - l_set(1:end-1));
```

```
num_factor = size(H,1);%4
```

```
num_expert = size(H,2);%10
```

```
num_grade = 5;
```

```
V_danger = zeros(num_factor,num_grade);
```

```
V_eval = zeros(num_factor,num_grade);
```

```
for c = 1:num_factor
```

```
for g = 1:num_grade
```

```
%危险状态
```

```
mf_H = zeros(1,num_expert);
```

```
idx_H = H(c,:) >= l_set(g) & H(c,:) <= l_set(g+1);
```

```
mf_H(idx_H) = 1./(1 + exp(-k_set(g) * (H(c,idx_H) - m_set(g))));
```

```
V_danger(c,g) = mean(mf_H);
```

```
%评估状态
```

```
mf_E = zeros(1,num_expert);
```

```
idx_E = E(c,:) >= l_set(g) & E(c,:) <= l_set(g+1);
```

```
mf_E(idx_E) = 1./(1 + exp(-k_set(g) * (E(c,idx_E) - m_set(g))));
```

```
V_eval(c,g) = mean(mf_E);
```

```
end
```

```
end
```

```
%综合隶属度
```

```
V_com = 0.5 * V_danger + 0.5 * V_eval;
```

```
%归一化,确保每行和为1
```

```
V_sum = sum(V_com,2);%4 × 1
```

```
V_norm = V_com./repmat(V_sum,1,num_grade);%4 × 5
```

```
%输出结果
```

```
grade_name = {'基本无危险','较低危险','一般危险','较危险','很危险'};
```

```
factor_name = {'C11','C12','C13'};
```

```
T = array2table('V_norm','VariableNames',factor_name,'RowNames',grade_name);
```

```
disp('各因素五级归一化综合隶属度:');
```

```
disp(T);
```

参考文献 (References)

- [1] 汪飞. 复杂环境下露天矿山爆破及安全控制[J]. 工程爆破, 2022, 28(4): 120-124, 130.
- [1] WANG Fei. Open-pit blasting and safety control in a complex environment[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(4): 120-124, 130. (in Chinese)
- [2] 李雷雷, 王洪强, 李进军, 等. 2020—2024 年矿山爆破安全风险与应对模式研究[J]. 中国矿业, 2025, 34(S1): 460-464.
- [2] LI Lei-lei, WANG Hong-qiang, LI Jin-jun, et al. Research on safety risks and response modes in mine blasting from 2020 to 2024 [J]. China Mining Magazine, 2025, 34(S1): 460-464. (in Chinese)
- [3] 刘知言, 陈银友, 许艳生. 露天爆破事故分析与安全管理研究[J]. 工程爆破, 2022, 28(1): 118-122.
- [3] LIU Zhi-yan, CHEN Yin-you, XU Yan-sheng. Surface blasting accident analysis and safety management research [J]. Engineering Blasting, 2022, 28(1): 118-122. (in Chinese)
- [4] KEKOJEVIC V, RADOMSKY M. Flyrock phenomena and area security in blasting-related accidents[J]. Safety Science, 2005, 43(9): 739-750.

- [5] 曹 杨,纪洪广,由 爽,等. 爆破事故因果连锁模型研究及其应用[J]. 金属矿山,2016(10):161-164.
- [5] CAO Yang,JI Hong-guang,YOU Shuang,et al. Research on casual-effect model of blasting accident and its application. [J]. Metal Mine,2016(10):161-164. (in Chinese)
- [6] 张其胜. 预裂爆破切顶卸压诱发瓦斯事故的风险分析[J]. 煤炭技术,2020,39(2):134-136.
- [6] ZHANG Qi-sheng. Risk analysis of gas accidents induced by cutting off pressure in presplit blasting[J]. Coal Technology,2020,39(2):134-136. (in Chinese)
- [7] 李曙光,焦帅朋,张金山,等. 井下爆破作业安全管理事故树分析[J]. 煤炭技术,2018,37(1):337-338.
- [7] LI Shu-guang,JIAO Shuai-peng,ZHANG Jin-shan,et al. Fault tree analysis of safety management for underground blasting[J]. Coal Technology,2018,37(1):337-338. (in Chinese)
- [8] 赵珂劫,张义平,池恩安,等. 改进 AHP-模糊综合评价在工程爆破安全评价中的应用[J]. 中国矿业,2019,28(8):160-164.
- [8] ZHAO Ke-jie,ZHANG Yi-ping,CHI En-an,et al. Application of improved AHP-fuzzy comprehensive evaluation in safety evaluation of engineering blasting [J]. China Mining Magazine,2019,28(8):160-164. (in Chinese)
- [9] GERASSIS S,ALBUQUERQUE MTD,GARCÍA JF,et al. Understanding complex blasting operations: A structural equation model combining Bayesian networks and latent class clustering [J]. Reliability Engineering & System Safety,2019,188:195-204.
- [10] 朱必勇. 基于盲数理论改进云模型的露天矿爆破安全评估研究[J]. 有色金属科学与工程,2024,15(4):543-552.
- [10] ZHU Bi-yong. Research on safety assessment of open pit blasting based on blind number theory and improved cloud model[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering,2024,15(4):543-552. (in Chinese)
- [11] 王 维,任 翔,张 宁,等. 基于“2-4”模型的矿山爆破事故致因研究[J]. 采矿技术,2022,22(1):128-132.
- [11] WANG Wei,REN Xiang,ZHANG Ning,et al. Research on the causes of mining blasting accidents based on the “2-4” model [J]. Mining Technology,2022,22(1):128-132. (in Chinese)
- [12] 韩传伟,黄建文,李 亮,等. 爆破安全管理的优化升级:从控制性管理到系统性管理[J]. 爆破,2021,38(2):192-196.
- [12] HAN Chuan-wei,HUANG Jian-wen,LI Liang,et al. Optimization and upgrading of blasting safety management: from controlling management to systematic management [J]. Blasting,2021,38(2):192-196. (in Chinese)
- [13] DWORZAK M. Occupational risk management method for quarry blasting operations based on Modified FMECA Algorithm[J]. Inzynieria Mineralna-Journal of the Polish Mineral Engineering Society,2023(1):241-249.
- [14] 王小涵,高 魁. 基于 AHP-模糊数学法的煤层深孔预裂爆破效果综合评价[J]. 煤炭工程,2021,53(4):126-130.
- [14] WANG Xiao-han,GAO Kui. Comprehensive evaluation on the effects of deep-hole pre-splitting blasting in coal seam based on AHP-fuzzy mathematics method[J]. Coal Engineering,2021,53(4):126-130. (in Chinese)
- [15] 刘全龙,法子薇,李新春,等. 数据为证:各类煤矿事故致因差异化分析与危险源管控研究[J]. 管理工程学报,2024,38(5):277-291.
- [15] LIU Quan-long,FA Zi-wei,LI Xin-chun,et al. Evidence based on data: risk analysis of accident-causing factors and hazards precautions in coal mines[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management,2024,38(5):277-291. (in Chinese)
- [16] 任 军. 煤矿采掘面爆破事故因素及安全爆破技术探究[J]. 山西冶金,2020,43(2):60-61,67.
- [16] REN Jun. Study on the blasting accident factors and safety blasting technology of coal mining face [J]. ShanXi Metallureg 2020,43(2):60-61,67. (in Chinese)
- [17] 周红敏,赵玉杰,张宪堂,等. 露天爆破飞石距离智能预测研究[J]. 安全与环境学报,2024,24(7):2554-2564.
- [17] ZHOU Hong-min,ZHAO Yu-jie,ZHANG Xian-tang,et al. Intelligent prediction of flyrock distance in open blasting [J]. Journal of Safety and Environment,2024,24(7):2554-2564. (in Chinese)
- [18] 杨茂森,李进霞,岳玉刚,等. 露天火区煤矿高温爆破安全管理探究[J]. 煤矿爆破,2022,40(3):32-34.
- [18] YANG Mao-sen,LI Jin-xia,YUE Yu-gang,et al. Research on safety management of high-temperature blasting in fire area of open-pit coal mine [J]. Coal Mine Blasting,2022,40(3):32-34. (in Chinese)
- [19] 张飞燕,温佳宇,韩 颖. 巷道掘进爆破炮烟中毒应急救援虚拟仿真系统构建[J]. 爆破,2021,38(3):166-171.
- [19] ZHANG Fei-yan,WEN Jia-yu,HAN Ying. Construction of virtual simulation system for emergency rescue of blasting fume poisoning accident during roadway excavation [J]. Blasting,2021,38(3):166-171. (in Chinese)
- [20] 李文涛,李恺峰,赵庆东. 研究煤矿采掘工作面爆破

- 安全技术[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(18): 115-117.
- [20] LI Wen-tao, LI Kai-feng, ZHAO Qing-dong. Research on blasting safety technology in coal mine excavation work-faces[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2024(18): 115-117. (in Chinese)
- [21] 张志雄, 许汝康, 廖承立, 等. 基于非线性模糊层次分析法的爆破安全评价[J]. 工程爆破, 2025, 31(3): 161-169.
- [21] ZHANG Zhi-xiong, XU Ru-kang, LIAO Cheng-li, et al. Blasting safety evaluation based on nonlinear fuzzy analytic hierarchy process[J]. Engineering Blasting, 2025, 31(3): 161-169. (in Chinese)
- [22] 栾川县民安爆破服务有限公司“6·22”较大爆炸事故调查报告_事故调查处理_河南省应急管理厅[EB]. [2025-08-12].
- [22] Investigation Report on the “June 22” Major Explosion Accident at Luo chuan County Min'an Blasting Services Co., Ltd. Accident Investigation and Handling Henan Provincial Department of Emergency Management[EB]. [2025-08-12].
- [23] 关开荣, 赵文琦. 智能机器人在深井爆破中的应用及发展趋势[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(12): 228-235.
- [23] GUAN Kai-rong, ZHAO Wen-qi. Applications and development trends of intelligent robots in deep well blasting[J]. Mining R & D, 2024, 44(12): 228-235. (in Chinese)
- [24] 王桂林, 费鸿禄, 刘秉轩, 等. 露天煤矿火区爆破技术现状与趋势[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 145-160.
- [24] WANG Gui-lin, FEI Hong-lu, LIU Bing-xuan, et al. Status quo and trend of blasting technology in open-pit coal mine fire area[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 145-160. (in Chinese)
- [25] 刘健修. 我国爆破行业安全管理标准体系构建[J]. 工程爆破, 2019, 25(5): 79-82.
- [25] LIU Jian-xiu. Safety management standard system construction for blasting industry of China[J]. Engineering Blasting, 2019, 25(5): 79-82. (in Chinese)

《爆破》论文网络首发及著作权使用声明

《爆破》为使录用论文首发权及时获得确认,自2019年12月起与中国知网合作启动“网络首发”在线优先数字出版项目,即《中国学术期刊(网络版)》(简称CAJ-N),统一连续出版物号ISSN 2096-418、CN 11-6037/Z。

作者稿件经审稿录用后,将会以“录用定稿”模式第一时间上传至中国知网“网络首发”平台发布。每篇网络首发论文均可下载一份“中国知网学术期刊网络首发论文出版证书”,其效力等同于纸质出版论文。

为避免出现一稿多投的现象,凡已投《爆破》的稿件,在未确认录用或退稿前,请勿再投他刊!

《爆破》是中文核心期刊要目总览、中国科学引文数据库(CSCD)、科技期刊世界影响力指数(WJCI)报告、高质量科技期刊分级目录总汇、中国科技核心期刊、中国学术期刊评价研究报告(RCCSE)、中国应用型期刊评价研究报告(CACJ)等评价体系收录期刊。《爆破》还是Scopus 科研检索分析和学科规划管理数据库、SciFinder CAS 美国化学文摘数据库、Ulrich's 乌利希国际期刊指南、JST 日本科学技术振兴机构数据库、中国知网知识发现网络平台、万方数据知识服务平台、超星期刊域出版平台、维普资讯中文期刊服务平台、SciOpen 平台、SciEngine 发布平台、Researching 中国光学期刊网、楚天科技期刊论文在线开放平台等数据库和平台收录期刊。本刊已许可上述机构以数字化方式网络传播本刊全文。所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议,请在投稿时说明,本刊将按作者说明处理。