

公路隧道施工瓦斯安全风险预警体系研究

焦立群

山西黎霍高速公路有限公司 山西 长治 046000

摘要:为解决公路隧道瓦斯施工风险隐蔽性强、突发概率高、预警滞后等问题,本文系统剖析瓦斯来源、赋存运移规律及灾害诱发机制,从地质、施工、设备、管理四维度识别风险并构建风险清单。依托组合赋权与模糊综合评价法搭建动态评估模型,设计五级智能化预警体系,设定分级预警阈值与闭环管控机制。经实际工程验证,该体系可大幅缩短预警响应时长、降低瓦斯超限风险,为瓦斯隧道安全施工提供技术支撑。

关键词:公路隧道施工;瓦斯安全;风险预警体系

引言:随着山区公路建设推进,大量隧道穿越含煤系与断层破碎地层,瓦斯涌出、积聚及爆炸灾害频发,严重制约施工安全与进度。传统瓦斯管控依赖人工巡检,存在监测滞后、风险预判不足、处置不规范等短板,难以适配复杂工况动态风险防控需求。为实现瓦斯风险主动防控,本文开展瓦斯安全风险预警体系专项研究,通过风险识别、模型评估、智能预警与工程应用,构建全流程防控体系,提升隧道瓦斯施工安全管控智能化水平。

1 公路隧道施工瓦斯风险机理与风险识别

1.1 公路隧道瓦斯来源及赋存特征

瓦斯主要来源:公路隧道施工瓦斯主要源于地层原生瓦斯、围岩裂隙瓦斯及断层破碎带瓦斯涌出。地层原生瓦斯赋存于含煤系地层或有机质岩层中,随隧道开挖释放;围岩裂隙瓦斯沿裂隙网络渗流进入洞室,涌出量受裂隙发育程度控制;断层破碎带作为瓦斯运移通道,常伴随构造应力释放发生高浓度瓦斯突发性涌出,规律呈现“长期低流量、瞬时高峰值”特征。

瓦斯赋存与运移特征:施工扰动打破原岩应力平衡,瓦斯由吸附态转为游离态,沿压力梯度向洞室扩散与渗流。瓦斯运移受通风流场、开挖进尺及围岩变形耦合影响:通风稀释扩散,局部涡流区易积聚;开挖卸荷增大渗透率,促进瓦斯涌出;围岩变形挤压则可能导致瓦斯封存或异常释放。

瓦斯灾害诱发条件:瓦斯爆炸需同时满足浓度达5%~16%爆炸界限、高温火源($>650^{\circ}\text{C}$)及充足氧气;瓦斯超限指浓度超过1%预警值或0.5%长期允许值;瓦斯窒息发生在浓度较高($>25\%$)导致氧含量低于19.5%的密闭空间^[1]。

1.2 瓦斯安全风险影响因素分析

自然地质因素:包括地层岩性(含有机质或煤系地层)、地质构造(褶曲、断层、节理密集带)、瓦斯含量(单位质量岩石含气量)、地下水分布(水封抑气或导气作用)及地应力(围岩储能与卸荷释能),构成固有风险基底。施工技术因素:涵盖开挖方式(机械化或钻爆扰动强度)、爆破工艺(炮孔设计与装药量影响瓦斯瞬时涌出)、通风系统(风量、风速及风流组织有效性)、支护施工(封闭及时性抑制瓦斯逸出)及临时作业操作(焊接、切割等动火作业管控),属动态人为风险。管理设备因素:包含监测设备精度(传感器灵敏度与标定周期)、安全管理制度(动火审批、交接班检查)、人员操作水平(培训考核与违规操作)及应急管控机制(预案演练与响应时效),构成系统性管理风险。

1.3 瓦斯安全风险识别与风险清单构建

风险识别原则与方法:遵循全面性(覆盖所有工序与空间)、针对性(聚焦瓦斯敏感环节)、动态性(随施工阶段迭代更新)原则。采用故障树分析法(FTA)识别顶事件与底事件逻辑关系,现场排查法实时核查异常征兆,文献归纳法总结同类工程历史事故规律。全施工周期风险识别:按工序分解——开挖阶段(瓦斯异常涌出、塌方诱发涌出);爆破阶段(瓦斯瞬间超限、炮烟中 NO_x 爆炸);出碴阶段(残存瓦斯释放、机械碰撞火花);支护阶段(喷射混凝土封闭不严导致聚集);衬砌阶段(衬砌背后空洞瓦斯积聚)。构建瓦斯风险清单:汇总自然、技术、管理三维度风险因素,明确每项风险类型(涌出型/积聚型/引爆型)、风险诱因(关键控制变量)、危害程度(后果严重等级)及发生概率(频率等级),形成结构化、可动态更新的瓦斯风险清单,

为防控决策提供依据。

2 公路隧道施工瓦斯安全风险评估模型构建

2.1 风险评估指标体系建立

指标选取原则：遵循科学性（指标内涵明确、理论基础扎实）、系统性（全面覆盖瓦斯风险各维度）、可量化（指标可采集、可测度、可比较）及针对性（紧扣公路隧道瓦斯施工特性）四项原则，筛选核心评估指标，确保指标体系客观反映瓦斯风险本质特征。层级指标构建：建立目标层（公路隧道瓦斯安全风险综合等级）、准则层（地质风险、施工风险、设备风险、管理风险四大维度）及指标层三级指标体系。地质维度涵盖瓦斯含量、地质构造复杂程度、地下水条件等；施工维度涵盖开挖方式、通风有效性、支护及时性等；设备维度涵盖监测系统可靠性、设备防爆性能等；管理维度涵盖制度完善度、人员资质水平、应急响应能力等，形成层次分明的结构化指标体系^[2]。指标量化与分级标准：对定性指标（如地质构造复杂程度、管理水平）采用专家打分与隶属度函数进行标准化量化，对定量指标（如瓦斯浓度、涌出量、通风风速）直接量纲归一化处理。将瓦斯风险划分为四级：轻微（可接受风险）、一般（需关注风险）、较大（高风险）、重大（极高风险），对应不同预警等级与应急响应级别。

2.2 风险评估模型算法选择与优化

常用评估算法对比：层次分析法（AHP）适用于定性指标权重判别，但主观性强；模糊综合评价法擅长处理不确定性信息，但隶属函数选取影响结果；BP神经网络法具备自学习能力，精度高但需大量训练样本。综合比选，采用组合赋权与模糊综合评价融合方案，兼顾主客观信息与隧道施工动态特性^[3]。组合评估模型构建：构建“组合赋权+模糊综合评价”动态风险评估模型。组合赋权阶段，采用AHP确定主观权重、熵权法确定客观权重，基于乘法归一化或离差最小化进行权重融合；模糊综合评价阶段，建立瓦斯风险评价集与隶属度矩阵，通过多级模糊运算输出综合风险等级，实现模型对隧道开挖、爆破、支护等不同工序的差异化动态评估。模型参数校准与优化：依托施工现场瓦斯浓度、涌出量、通风参数等实时监测数据，采用滑动窗口法动态更新样本集，结合粒子群算法（PSO）对模糊综合评价中的权重参数与隶属函数分布参数进行迭代寻优校准。建立“监测数据采集→参数在线修正→模型再输出”闭环机制，使评估结果随施工推进持续收敛至真实风险状态，有效提升模型精准度与时效性。

2.3 风险评估结果分析

单因素风险评估：基于组合赋权结果，提取各单一指标权重系数与模糊综合评价隶属度，分析单项指标对瓦斯安全风险的影响权重与风险贡献度，明确各指标独立作用下的风险敏感排序。多因素耦合风险评估：构建多因素交互效应分析矩阵，探究地质-施工-设备-管理多维度因素叠加下瓦斯风险的演化规律与突变特征。重点分析“高瓦斯含量+通风不良+监测失效”等典型不利工况组合的耦合风险放大效应，揭示瓦斯灾害由量变到质变的临界转换条件。关键风险因子确定：综合单因素权重排序与多因素耦合敏感性分析结果，采用主成分分析法（PCA）或灰色关联度法筛选影响隧道瓦斯安全的核心关键风险因子（如瓦斯涌出量、通风效率、监测可靠性等），将其作为后续预警体系构建的核心输入变量，实现风险评估向预警预报的有效衔接。

3 公路隧道施工瓦斯安全风险评估预警体系构建与应用

3.1 预警体系总体框架设计

体系构建目标与原则：以“实时监测、精准预警、快速响应、有效防控”为总目标，推动瓦斯风险从被动处置向主动预警转变。遵循实用性（贴合隧道施工实际）、智能化（数据驱动与自动判别）、动态化（随施工阶段与监测数据迭代）三项原则，确保体系具备可操作性与自适应能力。预警体系层级架构：搭建五级功能架构——数据采集层（部署传感器与智能终端，获取原始信号）、数据分析层（数据清洗、融合与特征提取）、风险评估层（调用模型动态计算风险等级）、预警发布层（生成预警信号并推送终端）、应急响应层（联动预案启动处置）。五层通过标准接口纵向贯通，形成完整功能链条。预警体系运行流程：明确“采集→传输→处理→判定→预警→响应→闭环”全流程机制^[4]。现场传感器以秒级频率采集瓦斯浓度、风速等参数，经无线网络上传平台进行校验与标准化处理，平台调用风险评估模型判定风险等级，匹配预警级别后多终端发布信息，现场执行响应措施，待风险消除经复核确认后闭环销号，确保每个预警周期形成完整管理闭环。

3.2 智能化监测预警系统配置

监测设备布设方案：依据隧道断面尺寸、瓦斯涌出源分布及通风流场特征，确定传感器布设位置——瓦斯浓度传感器布设于掌子面（距开挖面5m范围内）、二衬台车、回风巷及局部可能积聚区（塌腔、拐角）；风速传感器布设于回风巷及送风口断面；温度传感器与瓦斯传感器同点布设；围岩应力计埋设于围岩变形敏感区

段。明确各类设备安装数量（按每 200m 间距或断面布置要求）、安装高度（距拱顶或侧壁规定距离）及校准周期标准。实时数据传输与处理：搭建基于 LoRa 或 ZigBee 无线传输模块的现场传感网络，结合工业以太环网实现监测数据实时上传。中心平台配置数据预处理引擎，完成异常值剔除、缺失值插补、多源数据时间对齐及标准化格式转换，确保进入评估模块的数据质量满足可靠性要求，传输延时控制在秒级以内。预警阈值分级设定：结合《公路隧道施工技术细则》及《煤矿安全规程》相关标准，兼顾工程实际瓦斯赋存背景与通风条件，设置四级预警阈值——蓝色预警（瓦斯浓度 $\geq 0.3\%$ ）、黄色预警（ $\geq 0.5\%$ ）、橙色预警（ $\geq 0.8\%$ ）、红色预警（ $\geq 1.0\%$ ）。各级阈值对应不同的风险程度与响应紧迫性，并依据施工阶段动态调整。

3.3 分级预警响应与管控机制

各级预警响应措施：蓝色预警——加强通风巡查与人工复核；黄色预警——增频监测、限制动火作业；橙色预警——立即暂停开挖施工、启动备用通风系统、全员撤离至安全区；红色预警——全工序停工、切断非防爆电源、启动瓦斯超限应急预案、上报主管部门。每级响应措施以标准化处置卡形式固化，确保现场执行无歧义。预警闭环管理机制：建立“预警触发→任务派发→现场排查→原因分析→整改处置→效果复核→预警解除→信息归档”八步闭环流程。预警信息自动推送至项目经理、安全总监及值班调度，责任人须在规定时间内完成处置并上传整改佐证，安全管理人员复核确认风险消除后方可解除预警，所有环节留痕备查^[5]。应急保障体系建设：完善应急组织机构（设立应急指挥部及技术、救援、后勤等职能小组）；配备应急物资储备库（防爆工具、自救器、通风设备等按定额储备并定期检查）；建立月度应急演练机制（至少开展一次瓦斯超限专项演练）；强化人员培训保障（岗前培训、定期复训、考核持证），确保全员具备基本应急处置能力。

3.4 工程应用与体系效果验证

依托工程概况：选取某高速公路瓦斯隧道为试验对象，该隧道穿越含煤系地层，实测瓦斯含量最高达 $8.5\text{m}^3/\text{t}$ ，

最大绝对瓦斯涌出量为 $2.3\text{m}^3/\text{min}$ ，属高瓦斯隧道。施工采用钻爆法与台阶法相结合方案，通风方式为压入式与巷道式混合通风，工期紧且安全管控难度大。体系现场应用实施：将构建的预警体系及配套系统部署于该工程，覆盖开挖、爆破、出碴、支护、衬砌全部施工工序。全程运行周期 6 个月，系统累计采集有效监测数据逾 120 万条，触发各等级预警合计 47 次，其中蓝色 32 次、黄色 11 次、橙色 3 次、红色 1 次，所有预警均按响应流程规范处置。应用效果分析与优化：对比传统人工巡检管控模式，应用该预警体系后瓦斯超限事件发生率下降约 62%，预警平均响应时间由传统模式的 45 分钟缩短至 3 分钟以内，预警准确率达到 91.5%。针对应用中暴露的个别传感器零点漂移和无线信号干扰问题，优化设备标定频率并增设中继节点，进一步提升系统稳定性，为后续同类工程预警体系建设提供了可靠实践参考。

结束语

本文完成了公路隧道瓦斯风险机理识别、评估模型构建、预警体系搭建及工程验证，形成了集风险研判、智能监测、分级预警、闭环管控于一体的防控体系。工程实践表明，该体系风险识别全面、评估精准、响应高效，有效弥补了传统管控模式的不足。后续可结合多场景施工数据优化模型参数，完善多因素耦合风险预判功能，进一步提升预警体系的通用性与智能化防控能力。

参考文献

- [1] 吴波, 陈辉浩. 基于模糊-熵权理论的公路瓦斯隧道施工安全风险预警研究 [J]. 安全与环境学报, 2022, 22(4): 132-139.
- [2] 王海洋. 隧道瓦斯事故关键致险因素识别与预警机制优化 [J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4): 85-91.
- [3] 林志. 交通隧道瓦斯工区分级标准及风险预警阈值研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2025, 45(5): 876-886.
- [4] 翟强. 基于未确知测度理论的隧道施工瓦斯灾害风险预警评价 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(7): 201-208.
- [5] 李成. 公路隧道施工中瓦斯气体监测与预警技术应用研究 [J]. 工程建设与发展, 2025, 4(9): 69-73.