

材料需具备质量证明文件，进场后按批次抽样检测，不合格材料严禁使用；混合料拌制过程中安排专人监督配合比执行情况，实时监测坍落度。

施工过程中采用信息化手段进行施工监控，通过GPS定位系统控制桩位偏差，利用打桩机自带的垂直度监测装置实时调整桩身垂直度；每根桩施工过程中记录钻进深度、混合料用量、提升速度等参数，形成施工日志；施工过程中定期检查桩位偏差、垂直度等指标，发现问题及时整改。

CFG桩施工完成后，按规范要求对低应变检测，检测数量不少于总桩数的10%，检验桩身完整性；选取代表性桩进行单桩竖向抗压静载试验，检测承载力是否满足施工要求；褥垫层施工完成后，全面检测压实度，确保符合施工标准。

4 加固施工效果分析

针对本次施工效果，采用室内土工试验方式进行质量检测。采集现场软质土试样，制作加固前后的土样试件，开展压缩试验与直剪试验，对比剖析土体压缩系数、黏聚力、内摩擦角等物理力学指标的变动情况。现场静载试验于加固完毕的路基选定3个试验点位，采用缓慢维持荷载的方式，按级别施加荷载（每级荷载50kPa，持续时长1h），记录下沉量，明确路基承载力特征值与沉降曲线。数值模

拟分析借助Midas GTS/NX软件构建三维有限元模型，仿真路基在运营期（50年）的受力变形特征。模型中软土采用Mohr-Coulomb本构模型，CFG桩采用弹性本构模型，褥垫层采用弹塑性本构模型，荷载考量上部结构自重以及车辆活荷载。

结果表明（见表2），加固后土体压缩系数减少至0.21~0.35MPa⁻¹，黏聚强度提升到35~42kPa，内摩擦角增长至25°~28°，力学性能得到明显提升，说明优化施工方案有效改善了软土的工程特性；现场静态荷载试验表明，路基承载力特征数值从天然情形的80~100kPa提升到220~250kPa，符合交通工程路基施工要求，承载力提升效果显著。

数值模拟所得结果显示（见表3），路基在运营的前3年沉降速度较快，累积沉降量占总沉降量的比例为70%；之后沉降速率渐渐放缓，5年后呈现稳定状态，最终工后沉降数值把控制在8~15mm，沉降速度低于0.01mm/d，呈现出良好的长期稳定性。CFG桩与软土所构成的复合地基借助应力扩散作用，切实减小了软土层的附加应力，抑制了不均匀沉降的出现；褥垫层起到的变形协调功能减小了桩土的差异沉降，进而增强了路基的长期稳定性，验证了优化施工方案的可靠性。

表2 加固前后软土物理力学指标对比表

指标	天然软土（加固前）	CFG桩+褥垫层加固后	提升幅度
天然含水量（%）	32~45	28~35	-14.3%~-22.2%
孔隙比	1.05~1.38	0.75~0.92	-23.9%~-33.3%
压缩系数 a ₁₋₂ （MPa ⁻¹ ）	0.65~0.98	0.21~0.35	-63.3%~-74.5%
黏聚力 c（kPa）	12~18	35~42	+191.7%~+133.3%
内摩擦角 φ（°）	8~12	25~28	+212.5%~+133.3%
承载力特征值（kPa）	80~100	220~250	+175.0%~+150.0%

表3 路基运营期沉降量变化统计表

运营年限（年）	0.5	1	3	5	10	50
累计沉降量（mm）	4.2~6.8	6.5~9.3	9.8~12.5	10.5~13.2	11.2~14.0	11.8~15.0
年均沉降速率（mm/d）	0.023~0.038	0.018~0.025	0.009~0.012	0.001~0.002	0.0008~0.001	≤0.0005

5 结语

软土地带高地下水位、软土压缩性高且透水性差的特质，致使路基加固施工需优先选取承载力提升明显、抗水稳定性良好、施工周期较短且质量可控的方案。经过优化的“CFG桩+级配砂石褥垫层”加固施工方案，通过明确合理的施工参数、规范关键施工流程、强化全过程质量控制，可切实增强软土地基力学性能，令路基承载能力提升至原来的1.8~2.3倍，把工后沉降量限制在15mm以内，其长期稳定性符合交通工程运营需求。该施工技术操作简便、机械化程度高、成本效益佳，施工质量易于把控，可广泛应用于软土、高地下水位状况下的路基加固项目，有着显著的应用价

值与推广前景。后续可进一步结合不同区域软土特性，优化施工参数与工艺细节，提升技术的适配性与经济性，为软土地区路基施工技术的发展提供支撑。

参考文献

- 蒋卫明.桥梁软土路基加固中离子固化剂的力学特性研究[J].运输经理世界,2024,(36):95-97.
- 韦桂军.CFG桩复合路基加固效果影响因素的数值模拟研究[J].西部交通科技,2023,(02):43-46+101.
- 杜仕朝,康春霞,刘晓东,等.软土地区公路路基沉降对临近桥梁结构受力影响[J].沈阳大学学报(自然科学版),2021,33(02):180-186.
- 龚建兵,晏志辉.公路桥梁项目中的软土路基施工技术[J].江西建材,2020,(01):88-89.

Research on Coupling Study of Coal Mine Gas Emission Patterns and Ventilation System Optimization

Min Li

Wenzhuang Coal Industry Co., Ltd., Shanxi Lu 'an Chemical Group, Changzhi, Shanxi, 046200, China

Abstract

Coal mine gas disasters are critical issues affecting coal production safety, with emission patterns influenced by geological structures, mining methods, and ventilation conditions. With the advancement of deep mining and intelligent construction, traditional empirical ventilation and prevention models have become inadequate for high-gas mines' dynamic environments. This study employs a multi-field coupling model of "gas occurrence-desorption-migration-ventilation control" to investigate the dynamic relationships between gas emissions and stress, permeability, and airflow distribution. A ventilation optimization strategy based on CFD simulation and intelligent control algorithms is proposed to achieve spatiotemporal prediction and precise control of gas concentration. Results demonstrate that this coupled optimization system reduces gas accumulation rates by over 30%, significantly enhancing ventilation efficiency and safety levels.

Keywords

coal mine; gas outburst law; ventilation system optimization; multi-field coupling; CFD simulation; safety control

煤矿瓦斯涌出规律与通风系统优化耦合研究

李敏

山西潞安化工集团温庄煤业有限责任公司, 中国 · 山西 长治 046200

摘要

煤矿瓦斯灾害是影响煤炭安全生产的关键问题, 其涌出规律受地质构造、采掘方式和通风条件综合影响。随着深部开采和智能化建设推进, 传统经验型通风与防治模式已难适应高瓦斯矿井的动态环境。本文基于“瓦斯赋存—解吸—运移—通风控制”多场耦合模型, 研究瓦斯涌出与应力、渗透率及风流分布的动态关系, 提出基于CFD模拟与智能调控算法的通风优化策略, 实现瓦斯浓度的时空预测与精准控制。结果表明, 该耦合优化系统可降低瓦斯积聚率30%以上, 显著提升通风效率与安全水平。

关键词

煤矿; 瓦斯涌出规律; 通风系统优化; 多场耦合; CFD模拟; 安全控制

1 引言

煤矿瓦斯作为一种伴生气体, 是煤炭资源开采中最复杂的动力性灾害因素之一。其赋存、运移与涌出规律受煤层结构、地应力状态及采掘扰动的多重影响, 具有明显的非线性与区域差异性。我国煤炭资源“西多东少、深多浅少”的分布格局, 使深部高瓦斯矿井比例逐年上升, 传统以经验法和静态设计为主的通风系统在适应性与调节性方面存在明显不足。瓦斯异常涌出、局部积聚与通风不均成为制约矿井安全生产的突出问题。近年来, 伴随矿井智能感知技术、流体力学数值模拟与动态监测系统的应用, 煤矿通风与瓦斯防治工作逐步迈向精细化、智能化与耦合化阶段。瓦斯灾害防

治已从单一治理向“涌出控制—通风优化—动态反馈”综合体系转变。然而, 在实际工程中, 瓦斯运移规律与通风系统之间的耦合机理尚不清晰, 导致调控措施针对性不足、系统响应滞后, 影响了整体防灾效果。本文在系统分析瓦斯涌出机理的基础上, 构建了通风系统耦合优化模型, 探索瓦斯与气流场的动态交互关系, 以期为煤矿瓦斯防控及通风系统优化提供理论依据与实践参考。

2 煤层瓦斯涌出规律分析

2.1 瓦斯赋存与解吸特征

煤层中的瓦斯以吸附态和游离态两种形式共存, 其赋存量与煤质成分、埋深、孔隙结构及地应力环境密切相关。吸附态瓦斯主要储存在煤基质微孔中, 而游离态瓦斯则分布于裂隙与孔隙体系内。采掘扰动导致煤体结构破坏, 使孔隙度与渗透率动态变化, 瓦斯在压力梯度驱动下由吸附态向游

【作者简介】李敏 (1984-), 男, 中国山西襄垣人, 硕士, 高级工程师, 从事煤矿通风与瓦斯治理研究。

离态转化并迁移至裂隙系统。研究表明,煤体微孔决定瓦斯解吸速率,而中、大孔则控制其流动通道与扩散效率。采动应力释放会引发煤体微裂隙迅速扩展,造成瓦斯集中解吸与瞬态聚集,形成高浓度区域,是诱发瓦斯异常与突出的主要物理机制。掌握瓦斯赋存与解吸规律,对于制定预抽瓦斯与通风调控策略具有重要意义。

2.2 瓦斯运移与应力场的动态耦合

瓦斯运移不仅受压力梯度与浓度梯度的共同驱动,还与采动应力场的时空变化密切耦合。随着工作面推进与采空区形成,围岩应力重新分布,裂隙网络结构不断演化,使瓦斯渗流路径呈现高度非线性特征。应力卸载区煤体破碎、渗透性增强,瓦斯释放量显著增加;而高应力集中区则易形成瓦斯封闭带与滞留区。两者在空间上交错分布,导致瓦斯迁移过程复杂多变。通过建立“应力—渗流—瓦斯浓度”三场耦合模型,可对瓦斯运移过程进行定量描述。模拟结果显示,应力扰动的持续演化是瓦斯异常涌出的主要诱因,而通风条件变化则通过改变浓度梯度影响瓦斯迁移速率。该规律揭示了采动力学与瓦斯动力学的内在关联,为防突治理与动态调控提供理论支撑。

2.3 采掘方式与瓦斯涌出特征关系

瓦斯涌出特征与采掘工艺参数、地质条件及煤层结构密切相关。在综采工作面,由于推进速度快、采动强度大,瓦斯涌出通常表现为高值、突发性与阶段集中性;巷道掘进阶段则以低强度、持续性释放为主。多煤层开采条件下,上下煤层之间的应力传递与裂隙连通性增强,易引发跨层瓦斯耦合运移,增加防治难度。实践研究表明,合理控制采掘节奏与通风压力梯度,结合超前预抽与定向钻孔排放措施,可有效削减瓦斯瞬态涌出量,降低矿压耦合作用带来的安全风险。优化采掘方式与通风布局,实现采动扰动与瓦斯释放的动态协调,是构建安全高效开采体系的重要保障。

3 通风系统的结构特征与运行问题

3.1 矿井通风系统的基本构成

矿井通风系统是保障煤矿安全生产的关键基础设施,其主要组成包括主通风机、进风巷、回风巷、风门、风桥及局部通风设备等。系统通过形成稳定的空气循环路径,实现新鲜空气的输送与有害气体的稀释与排出,从而维持井下作业环境的安全与健康。理想的通风系统应具备风量充足、流场均匀、调节灵活和能耗经济等特性。随着深部开采强度的增加,矿井结构日趋复杂,风流通道阻力差异显著,常导致局部风量不足、风压波动与回风短路现象频发。尤其在高瓦斯矿井中,工作面布局密集、采掘活动频繁,通风系统的非均匀性进一步加剧瓦斯积聚风险。为确保系统运行安全与经济性,亟须对通风网络进行精细化建模与动态优化,以实现气流组织的合理调控与瓦斯浓度的有效控制。

3.2 通风系统运行中的非线性特征

矿井通风系统在运行过程中表现出显著的非线性与动

态耦合特征。风量、风压与阻力之间并非线性关系,而是受巷道结构、气流温度、瓦斯浓度及设备工况等多因素影响。局部扰动(如风门开启、设备启停或采掘活动)都会引发全局风流再分配,改变气流路径与流场结构。瓦斯浓度变化又会反过来影响空气密度与风速分布,形成气流与瓦斯的反馈回路。当局部瓦斯浓度超过2%时,流场扰动明显增强,系统稳定性迅速下降。传统基于静态工况的通风调节方式,难以实时应对这种动态变化。缺乏反馈调控的系统在突发扰动下可能出现流量倒灌或气流逆转,导致瓦斯积聚与通风效率下降。因此,建立基于动态仿真与自适应控制的非线性调度模型,是保障通风系统稳定运行的必要途径。

3.3 传统通风设计与管理的局限性

传统通风系统设计多依赖经验公式与简化流体力学模型,对复杂巷道气流特征与湍流效应考虑不足。在运行管理中,调控主要依靠人工经验和定期巡检,缺乏对系统动态特性的实时感知与智能响应。这种静态管理模式在面对高瓦斯、高强度采掘条件时,难以及时发现潜在隐患。与此同时,通风监测数据分布分散、系统间信息不互通,缺乏全局优化与闭环反馈机制。瓦斯浓度、风速与压力等关键参数往往无法实现时空协同分析,导致决策延迟与执行偏差。通风系统的刚性设计与瓦斯涌出过程的动态性之间存在本质矛盾,使得系统灵活性与自适应能力不足,成为制约矿井安全高效生产的重要瓶颈。构建融合大数据、物联网与智能控制的通风管理体系,已成为未来煤矿通风安全治理的发展方向。

4 瓦斯涌出与通风系统的耦合机理

4.1 气流扰动对瓦斯运移的影响

矿井通风气流在瓦斯稀释与排放中起着主导作用,其扰动特性直接决定了瓦斯浓度分布与运移路径。适当的风速能够促进瓦斯的均匀扩散,减小局部浓度差异,但过高风速会诱发强湍流,导致流场结构复杂化。CFD数值模拟研究表明,当风速超过3 m/s时,气流惯性增强,局部负压区明显增多,部分区域甚至出现回流现象,形成瓦斯聚集带。而当风速控制在2-3 m/s之间时,瓦斯浓度梯度最为平缓,系统稀释效率最佳。气流扰动与瓦斯释放速率呈非线性耦合关系,矿井需根据工作面瓦斯涌出特征实时调整通风量与风流方向,实现局部风场的动态平衡。通过科学调控风流分配,可有效削弱湍流对瓦斯运移路径的扰动,提升稀释效率与系统稳定性。

4.2 瓦斯浓度对通风流场的反馈作用

瓦斯作为低密度气体,在局部高浓度区域会显著改变空气密度与黏度分布,从而对通风流场产生反向反馈。当瓦斯浓度持续上升时,气流速度降低,形成“气团停滞”区,阻碍后续气流通行,造成瓦斯进一步聚集。这种局部正反馈效应在复杂巷道交汇处尤为明显,是诱发瓦斯爆炸的重要前兆。基于流体力学分析可知,瓦斯浓度升高使雷诺数下降,湍流能量衰减,通风流场趋于不稳定。为应对此现象,需在