

# 煤矿通风与灭火研究现状及展望

彭顺长

山东能源集团西北矿业有限责任公司, 陕西 西安

收稿日期: 2025年5月7日; 录用日期: 2025年8月26日; 发布日期: 2025年9月11日

## 摘要

煤矿通风与防灭火技术是保障矿井安全生产的关键手段。随着煤炭开采向深部和智能化发展, 通防工作面临新挑战。本文综述了通风系统优化、瓦斯治理与抽采、煤自燃与火灾防治、监测预警与智能系统等方面的研究现状。重点介绍了通风网络建模、CFD模拟、瓦斯抽采技术及自燃倾向性判定。最后, 探讨了未来向智能化、集成化及深部灾害适应方向的发展趋势。研究对提升煤矿本质安全与智能化水平具有重要参考价值。

## 关键词

通风系统, 瓦斯治理, 火灾防治, 智能预警, 煤矿安全

# Current Status and Prospects of Coal Mine Ventilation and Fire Extinguishing Research

Shunchang Peng

Shandong Energy Group Northwest Mining Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: May 7<sup>th</sup>, 2025; accepted: Aug. 26<sup>th</sup>, 2025; published: Sep. 11<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Ventilation and fire prevention technology in coal mines are key means to ensure safe production in mines. With the development of deep and intelligent coal mining, the prevention and control work is facing new challenges. This article summarizes the research status of ventilation system optimization, gas control and extraction, coal spontaneous combustion and fire prevention, monitoring and warning, and intelligent systems. The focus is on ventilation network modeling, CFD simulation, gas extraction technology, determination of spontaneous combustion tendency, and

**intelligent monitoring and early warning methods. Finally, the future development trends towards intelligence, integration, and deep disaster adaptation were discussed. The research has important reference value for improving the intrinsic safety and intelligence level of coal mines.**

## Keywords

**Ventilation System, Gas Control, Fire Prevention and Control, Intelligent Warning, Coal Mine Safety**

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

煤矿通风与防灭火技术是煤矿安全生产体系中的核心组成部分，对于预防瓦斯爆炸、煤尘爆炸、煤自燃及其他有害气体积聚等重大事故具有基础性保障作用。通风系统通过为井下作业环境持续供给新鲜空气、稀释有害气体和调节温湿条件，维持了作业人员生命安全所必需的环境条件；防灭火系统则通过多种主动与被动手段，对井下火源进行早期预警、有效控制和快速扑灭，最大限度地降低灾害损失风险。

随着我国煤炭资源开发逐步向“三深”（深部、深井、深层）[1]方向推进，矿井通防工作面临一系列新的挑战。一方面，深部开采导致井下温度升高、通风阻力增加、瓦斯赋存条件复杂化，极易诱发瓦斯突出、自燃及连锁灾害事故[2]；另一方面，矿井空间结构更趋复杂，人员作业密集程度高，对通风系统的调控精度和火灾防控能力提出了更高要求。同时，煤矿智能化建设不断推进，亟需实现通防系统的数字化、网络化、智能化升级，以支撑智能矿山安全生产的整体目标[3]。

因此，全面梳理当前煤矿通防领域的研究现状，系统总结其关键技术进展与不足，明确未来的发展趋势和面临的技术挑战，对于提升矿井本质安全水平、推动煤矿智能化安全体系建设具有重要的现实意义与战略价值。

## 2. 通风系统优化研究现状

### 2.1. 通风网络建模与仿真

矿井通风系统具有结构复杂、节点众多、运行环境动态变化等特点，建立科学合理的通风网络模型是系统优化的前提。当前，研究普遍采用图论方法将巷道、通风设施等抽象为“节点-边”结构[4]，以实现风量分布、风压变化及系统稳定性的定量分析[5][6]。基于该模型，研究者借助模拟软件实现对不同通风布置方案的动态仿真与性能评估，进而识别瓶颈区域、优化通风路径和提升系统鲁棒性[7]。同时，部分研究结合实时数据，探索通风网络的在线建模与动态重构，为实现智慧矿山通风系统的自主调节提供基础支持[8]。

### 2.2. 通风调控技术

随着矿井规模扩大和多采区开采作业模式普及，通风系统的调控需求日益增强。当前主要调控手段包括风流调节、风阻管理、局部通风和分区通风等。风流调节侧重通过调节风门、风筒等装置实现不同区域风量的合理分配[9]；风阻控制则通过优化巷道结构和局部构件布设，降低不必要的风压损失[10]；局部通风系统可对特殊作业面如掘进头或高瓦斯区提供定向支持，保障人员安全[11]；而分区通风技术则实

现了对复杂通风系统的分区管理、局部自适应调控和故障隔离能力提升[12]。整体来看,通风调控正向精细化、分级化和响应式方向演进。

### 2.3. 数值模拟与 CFD 应用

近年来,计算流体力学(CFD)技术在矿井通风研究中的应用日益广泛。通过构建包括巷道、采空区、障碍物等复杂空间结构的三维模型,结合 FLUENT、ANSYS 等仿真平台,可实现对井下空气流动、热传导、有害气体扩散等过程的高精度模拟[13]。这类仿真不仅可以评估现有通风布局的有效性,还可预测事故状态下的气体扩散路径和积聚区域,为应急通风方案提供依据。部分先进研究还将 CFD 模拟与优化算法结合,实现基于仿真的自动通风布置设计和调控参数优化,提高了系统的智能化水平[14]。

### 2.4. 智能通风与算法应用补充

近年来,智能通风逐渐成为研究重点。部分研究利用遗传算法、粒子群优化及改进灰狼算法实现通风风量分配与阻力调控的优化,遗传算法具备全局搜索能力但计算量较大,粒子群优化收敛速度快但易陷入局部最优,改进灰狼算法在复杂非线性环境下表现出较高的鲁棒性。此外,图神经网络等深度学习方法已用于通风系统故障诊断,能够在数据稀疏条件下识别阻变故障与异常工况。案例方面,如张双楼煤矿与转龙湾煤矿已初步部署智能通风系统,实现了对异常风流的实时识别与自动调控,显著降低了安全风险。但目前智能通风系统仍存在数据孤岛、模型泛化性不足以及现场适应性有待提高等问题。总体来看,智能通风的发展趋势是多算法融合与实际案例结合,向着高度自动化与自适应控制方向演进。

### 2.5. 本章小结

综上所述,煤矿通风系统的优化研究正在从传统经验型设计向模型驱动、数据驱动和智能化演进。特别是在智能通风方面,各类优化算法与实际案例的应用正在拓展系统的调控能力与自适应水平,但也存在计算复杂性高、对数据依赖性强的不足。未来该领域的发展应注重多源数据融合、算法轻量化与现场工程适配,以满足深部、复杂矿井的安全需求。

## 3. 瓦斯治理与抽采技术研究现状

### 3.1. 瓦斯赋存与运移规律研究

瓦斯在煤层中的赋存状态及其运移机制,是决定抽采效果与灾害风险评估的基础。目前,研究主要依托渗流理论[15]、双孔介质模型[16]以及非达西流动模型[17],深入剖析瓦斯在煤岩体中的赋存特性与运移路径。煤层中瓦斯的流动不仅受渗透率、孔隙度和压力梯度等物理参数控制,还受煤体应力状态、断裂发育程度及采掘扰动影响。部分研究已建立多物理场耦合模型,较为全面地刻画了“赋存-运移-逸散”全过程,为精准抽采与风险控制提供理论依据[18]。

### 3.2. 瓦斯抽采技术优化

为实现对高瓦斯区域的安全高效治理,抽采技术不断向系统化、精细化方向发展。区域抽采技术着眼于整个工作面的统一治理,通过合理布设抽采巷道、钻孔群,提高煤层整体瓦斯降压速率与控制范围[19]。区域抽采技术适用于高瓦斯工作面的整体治理,能够显著降低煤层瓦斯压力,但施工周期长、投资成本较高;钻孔布置优化则主要用于裂隙发育区,通过优化孔距和封孔工艺提升抽采效率,但其效果高度依赖封孔质量[16];高负压抽采在低渗透煤层表现突出,可增强瓦斯迁移驱动力,实现深部抽采,但可能引起煤体结构破坏及抽采管路堵塞[20]。总体来看,各类技术在适应性和效果上各具优势与不足,未来

发展趋势是多种技术的组合应用以及与智能调控系统的融合。

### 3.3. 瓦斯超限预警与控制系统研究

在监测预警方面,传统的单点监控手段已难以满足复杂环境下的快速响应需求,研究正朝着多参数融合、智能识别、实时干预方向推进。布设于井下多点位的智能传感器集群可实现对瓦斯浓度、流速、温度、湿度等参数的实时采集与数据同步[21]。基于自动控制系统,能实现对抽采负压、抽放风量、启停设备等的智能调节与联动响应。此外,借助大数据分析、深度学习与异常检测算法,可对瓦斯异常变化趋势进行预测性识别,提升了预警系统的准确性与响应效率,为构建主动式安全防控体系奠定了基础[22]。

### 3.4. 本章小结

综上所述,当前瓦斯治理技术正处于由被动治理向主动感知、协同治理、智能决策转型的关键阶段。围绕“机理精准识别-抽采高效协同-监测智能预警”的系统化思路,研究不断向多学科交叉、数据驱动与装备升级方向拓展。未来,应进一步加强赋存规律与抽采动态过程的多尺度建模,提升复杂矿井条件下系统的适应性与响应速度,为实现煤矿本质安全与智能化运营提供坚实保障。

## 4. 煤自燃与火灾防治技术研究现状

### 4.1. 煤自燃机理研究

煤自燃是由煤在低温条件下与空气中的氧气缓慢氧化放热引起的复杂物理化学过程。当前研究普遍从煤的低温氧化反应机制入手,探讨其在不同环境因素作用下的热释放、吸附-解吸行为及反应动力学特征[23]。常用的实验方法包括热重分析(TG)、差热分析(DTG)、差示扫描量热(DSC)等热分析手段[24],以及CO、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>等典型气体的释放量检测,用于表征煤样在不同温湿度、粒径、含氧浓度下的氧化活性和升温曲线[25]。近年来,有研究通过引入氧化反应动力学建模[26]与多参数拟合方法[27],对临界温度、反应速率常数、氧浓度下限等进行量化,建立了煤自燃倾向性分级评价体系,为自燃风险区划提供理论依据。

### 4.2. 煤火灾防治技术研究

针对煤自燃演化为火灾的全过程,煤矿火灾防治技术主要围绕切断氧气供应[28]、降低温度[29]与阻断火源扩散[30]三大核心路径持续发展。目前常用手段包括:密闭封堵技术,通过构建高强度隔离墙体,将自燃区域与空气有效隔离,适用于早期控制与局部封闭场景[31];惰性气体注氮或二氧化碳技术,通过注入惰性气体以取代氧气、稀释可燃气体浓度,广泛应用于采空区及老空区的封闭防火[32];注浆降温与堵漏技术,借助阻火浆液封堵漏风通道,同时吸热降温,有效抑制煤温上升趋势[33]。而在高瓦斯矿井环境中,火灾防治需综合考虑防爆需求与通风系统稳定性,逐步形成了集“密闭-惰化-冷却-堵漏-智能监测”为一体的多元协同治理体系,显著提升了灾害应对的安全冗余与治理效率。

### 4.3. 煤自燃预测与智能预警系统研究

在预防为主的思想下,煤自燃的预测与早期预警技术日益受到重视。研究逐步从传统定期监测向连续在线监测、智能识别与预警模型构建转变。传感器网络实现对CO浓度、CH<sub>4</sub>浓度、O<sub>2</sub>含量、温度变化率等多参数的实时获取[34];融合人工智能(如SVM、决策树、深度学习)建立的预警模型,能够动态识别自燃风险等级,提升预判准确率[27];大数据分析的边缘计算的引入则优化了异常信号筛查、决策响应与报警机制,促进预警系统由响应式向预测式进化[35]。部分矿区已初步部署热异常识别-自动注氮

联动控制系统，实现智能感知和精准干预的闭环管控。

#### 4.4. 本章小结

综上所述，煤自燃与火灾防治技术已从传统的被动响应阶段迈向机理研究 - 主动预测 - 智能治理一体化发展新阶段。未来研究方向将更加注重新多源感知融合、灾变演化模拟、智能干预策略与远程应急协同等方面，特别是在深部高瓦斯矿井、老空区等高风险区域的应用具有广阔前景。构建覆盖预测、干预、治理和反馈的全流程、全周期闭环系统，是实现煤矿火灾灾害本质安全控制的重要路径。

### 5. 未来发展趋势与挑战

随着煤矿安全生产向高效、绿色与智能化方向发展，通防系统及其相关技术正迎来深度融合与全面升级的新阶段。未来的研究与实践将主要呈现以下几个发展趋势，同时也面临一系列新的技术与应用挑战：

(1) 煤矿通防系统将加速向智能化、自动化与集成化方向发展。基于传感器网络、智能控制设备、边缘计算与工业互联网平台的融合应用，将实现感知 - 判断 - 响应的闭环运行机制，使灾害防控更具主动性、灵敏性与精准性。集成化的发展还将推动瓦斯抽采、通风调控与火灾预防等系统实现跨部门联动与统一调度，提升整体安全管理水平。

(2) 需强化多源信息融合与动态风险预判能力。单一监测指标已难以全面反映矿井动态安全态势，未来需融合地质、通风、瓦斯、水害、温度、人员定位等多维数据，构建面向灾害链的风险识别与动态评估模型。同时，引入人工智能与时序建模方法(如 LSTM、贝叶斯网络等)，实现对异常工况的趋势判断与风险演化路径预测。

(3) 须提升系统的鲁棒性与容错能力。煤矿井下环境复杂，传感器故障、信号丢失、误报干扰等问题普遍存在。因此，构建具备自校验、自修复与容错能力的安全监测预警系统成为关键。研究应关注系统的稳定性建模、关键节点冗余设计与信息可信度评估等方面，以增强系统在极端工况下的持续运行能力。

(4) 随着开采深度的增加，煤矿通防系统将面临深部高温、高压及强扰动条件下的新型灾害风险挑战。深部矿井中高地应力、高温湿环境不仅加剧瓦斯运移的不确定性，也增加自燃和热灾害发生的可能性。因此，亟需开发适用于深部环境的耐高温传感器、新型阻燃材料及高效通风控制技术，提升系统适应性与灾害响应效率。

### 6. 结论

综上所述，煤矿通防技术正处于从传统安全保障手段向智能防控体系跃升的关键阶段，面对新需求与新挑战，亟需多学科交叉融合、技术系统协同创新，为实现本质安全型煤矿提供有力支撑。

### 参考文献

- [1] 徐杰. 岩石注浆中的压裂效应研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2019.
- [2] 潘一山, 宋义敏, 刘军. 我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2081-2095.
- [3] 齐俊铭, 王凯, 王志静, 等. 转龙湾煤矿矿井智能化通防系统与信息平台构建[J]. 煤矿安全, 2022, 53(9): 212-220.
- [4] 梁倩. 基于力导向模型的矿井通风网络拓扑结构自动布局[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(6): 4-6.
- [5] 李秉芮, 陈凤梅, 刘娜. 矿井通风系统异常诊断的方法研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(5): 2453-2460.
- [6] 袁金波. 基于图神经网络的矿井通风系统阻变故障诊断方法研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2024.
- [7] 刘海胜, 陈诚, 李瑞卿, 等. 基于小生境粒子群优化特征图的矿井通风网络设计[J]. 矿山机械, 2024, 52(10): 5-9.

- [8] 马翔宇. 煤矿智能通风系统建设研究[J]. 西部探矿工程, 2025, 37(1): 85-87.
- [9] 尹昌胜. 基于遗传算法的矿井通风系统阻变型故障诊断研究[D]: [博士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2019.
- [10] 张芝超. 改进灰狼算法在矿井风网风量优化调节中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2021.
- [11] 储诚赞. 高瓦斯矿井局部通风机三回路方案探讨[J]. 中国高新技术企业, 2015(29): 167-168.
- [12] 杨洪新. 子域分区通风方式的研究与应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2003(4): 38-40.
- [13] 李鑫. 张双楼煤矿通风网络风流密度监测点优化布置研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2023.
- [14] 刘湘滢. 矿井智能通风研究进展及展望[J]. 工矿自动化, 2025, 51(4): 44-56.
- [15] 庞明坤, 张天宇, 潘红宇, 等. 高压 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂钻孔瓦斯渗流机理及方程改进[J/OL]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(5): 36-45.
- [16] 闫路, 王涛, 王连聪, 等. 非对称荷载下煤层瓦斯渗流特性与抽采半径优化[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(12): 149-158.
- [17] 杨旭. 新安煤矿水体下采煤隔水关键层渗透性演化规律研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2022.
- [18] 吴长富. 煤矿瓦斯抽采多物理场模拟与钻孔布置[J]. 山东煤炭科技, 2025, 43(2): 48-53.
- [19] 温德拥. 煤层群开采工作面瓦斯综合治理技术研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(13): 61-63.
- [20] 谢靖. 低瓦斯矿井上隅角高瓦斯风险区域瓦斯治理技术应用实践[J]. 山西冶金, 2025, 48(1): 207-209.
- [21] 万广涛, 孙涛, 赵连飞. 煤矿智能化开采技术及创新[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(17): 47-49.
- [22] 刘全亮. 煤矿井下通风瓦斯防治技术研究[J]. 能源与节能, 2025(3): 188-191.
- [23] 郭志国, 杨雨润, 郑彪华, 等. 热力耦合效应下深部氧化煤自燃行为特征研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(5): 1724-1731.
- [24] 田富超, 贾东旭, 陈明义, 等. 采空区复合灾害环境下含瓦斯煤自燃特征研究进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2711-2727.
- [25] 何欣. 低阶煤低温热解、氧化机理及抗氧化特性[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2022.
- [26] 邓军, 赵夏琦, 王彩萍, 等. 煤欠氧氧化热动力学特性研究[J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(2): 9-16.
- [27] 邓军, 杨成, 任立峰, 等. 基于机器学习的煤自燃预测研究进展及展望[J/OL]. 煤炭学报, 1-22. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1369>, 2025-09-07.
- [28] 拜云龙, 惠双琳, 李慧刚, 等. 采空区遗煤自燃“三带”及有害气体分布数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2024, 43(6): 641-647.
- [29] 朱永兴. 不同通风条件下浅埋深综放面采空区“三带”分布特征研究[D]: [硕士学位论文]. 廊坊: 华北科技学院, 2024.
- [30] 苏凯. 冯家塔矿 1401 面采空区火源探测及煤自燃防治技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2012.
- [31] 王国靖. 基于漏风“源汇”关系的采空区气体分布规律及漏风防治研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(S1): 371-376.
- [32] 王安军, 任浩, 彭宝山, 等. 基于响应面法的巨厚煤层采空区堵——注协同防灭火参数研究[J]. 煤炭科技, 2025, 46(2): 39-45+52.
- [33] 刘军祥. 色连二矿易自燃煤层工作面发火规律及防治技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2016.
- [34] 王士华, 雷沛德, 赵春鸣, 等. 矿井火灾防治: 煤自燃的一体化综合治理方案[J]. 中国安全生产, 2024, 19(10): 68-69.
- [35] 胥海东, 和树栋, 苏明强, 等. 煤矿灾害精准预警与矿井智能通风系统架构及建设内容[J]. 能源与环保, 2025, 47(3): 1-10.