

煤矿开采瓦斯安全通风技术综述

胡育鹏^{1,2}

1. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 中国·重庆 400039
2. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 中国·重庆 400037

摘要: 煤矿开采过程中, 瓦斯是导致重大安全事故的主要隐患之一。瓦斯爆炸、煤与瓦斯突出等事故频繁发生, 给矿工生命安全和煤矿生产造成严重威胁。通风技术作为煤矿瓦斯安全管理的核心手段, 通过有效控制瓦斯浓度、改善矿井空气质量, 显著降低了事故发生率。本文综述了煤矿瓦斯安全通风技术的国内外研究现状, 包括传统通风方法、现代智能通风系统、瓦斯监测与预测技术, 以及未来发展趋势。基于文献分析, 讨论了通风系统优化、喷雾除尘与通风结合等关键技术, 并指出了当前面临的挑战, 如深部开采下的通风难度增加和智能化水平的不足。旨在为煤矿安全通风技术的进一步发展提供参考。

关键词: 煤矿瓦斯; 安全通风; 智能系统; 优化技术

A Review of Gas Safety Ventilation Technologies in Coal Mining

Hu Yupeng^{1,2}

1. Chongqing Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, China Chongqing 400039
2. State Key Laboratory of Gas Disaster Detecting, Preventing and Emergency Controlling, China Chongqing 400037

Abstract: During coal mining, gas is one of the major hazards leading to significant safety accidents. Frequent incidents such as gas explosions and coal-gas outbursts pose serious threats to miners' lives and coal production. Ventilation technology, as the core measure for coal mine gas safety management, effectively controls gas concentration and improves mine air quality, thereby significantly reducing accident rates. This paper reviews the current research status of gas safety ventilation technologies domestically and internationally, including traditional ventilation methods, modern intelligent ventilation systems, gas monitoring and prediction technologies, and future development trends. Based on literature analysis, key technologies such as ventilation system optimization, integration of spray dust removal with ventilation, and others are discussed. Current challenges, including increased ventilation difficulties under deep mining conditions and insufficient intelligentization, are also pointed out. The aim is to provide references for the further development of coal mine safety ventilation technologies.

Keywords: Coal mine gas; Safety ventilation; Intelligent systems; Optimization technologies

0 引言

随着全球能源需求的持续增长, 煤炭作为传统能源的重要组成部分, 其开采规模不断扩大。然而, 煤矿开采面临诸多安全挑战, 其中瓦斯灾害是最为突出的问题。瓦斯, 即煤矿中释放出的可燃气体, 主要成分为甲烷, 其浓度超过一定阈值时易引发爆炸或窒息事故。根据国际劳工组织 (ILO) 统计, 全球煤矿事故中, 瓦斯相关事件占比高达 40% 以上。我国作为世界最大的煤炭生产国, 瓦斯事故更是煤矿安全的首要威胁。国家煤矿安全监察局数据显示, 2024 年全国煤矿瓦斯事故造成数百人伤亡, 经济损失巨大^[1]。

通风技术是防控瓦斯灾害的核心策略。通过合理的通风设计, 可以稀释瓦斯浓度、排出有害气体, 并维持矿井内适宜的氧气水平。传统通风依赖于机械风机和巷道布局,

而随着科技进步, 智能通风、预测模型和辅助技术逐渐融入其中。本文作为一篇综述性论文, 将系统回顾煤矿瓦斯安全通风技术的演变、关键方法、应用案例, 以及未来展望。文献来源包括国内外期刊、会议论文和报告, 涵盖英文和中文参考, 确保综述的全面性。

煤矿瓦斯灾害的成因主要包括地质因素、开采深度增加导致的压力变化, 以及通风系统失效^[2]。早期研究聚焦于被动通风, 而现代研究强调主动预测和动态调控。本文将从瓦斯危害分析入手, 逐步展开通风技术的综述。

1 煤矿瓦斯危害及通风必要性

煤矿瓦斯主要来源于煤层解吸和围岩释放, 其浓度受开采方式、煤层倾角和地质构造影响。瓦斯灾害主要表现为: (1) 瓦斯爆炸: 当瓦斯浓度在 5%–16% 之间遇明火或

火花时发生；(2) 煤与瓦斯突出：高压瓦斯突然涌出，伴随煤粉喷出；(3) 瓦斯积聚导致窒息或中毒。历史上，众多重大事故如美国 1907 年蒙农加煤矿爆炸和国内 2005 年孙家湾煤矿瓦斯爆炸，均与通风不足直接相关^[1]。

瓦斯灾害不仅威胁生命安全，还造成环境污染和经济损失。瓦斯排放是温室气体的重要来源，全球煤矿瓦斯排放占甲烷总排放的 10%–15%。因此，安全通风不仅是事故防控，更是可持续发展的要求。

通风系统通过引入新鲜空气、排出污浊空气，实现瓦斯稀释和粉尘控制。煤矿通风的基本原则包括：全风压通风、局部通风和辅助通风。通风不足会导致瓦斯超限，增加事故风险。研究表明，优化通风可将瓦斯浓度控制在 0.5% 以下，显著降低爆炸概率。在高瓦斯矿井，通风需求更迫切，随着开采深度超过 1000m，传统方法已难以应对热害和高压瓦斯^[4]。

2 通风系统布局与设计

传统煤矿通风系统是煤矿瓦斯安全管理的基石，主要依赖机械通风原理，通过主风机提供动力，形成串联式或并联式通风网络，巷道作为风路载体，实现新鲜空气的引入和污风的排出。通风网络的设计需考虑矿井地质条件、瓦斯涌出量和生产布局，确保风流稳定且覆盖所有作业区域。典型布局包括 U 型通风和 Y 型通风。U 型通风结构简单、施工成本低，广泛应用于单一长壁工作面，但易在上隅角形成涡流区，导致瓦斯积聚。Y 型通风通过增加尾巷或专用回风巷，提高风流平行度，显著降低上隅角瓦斯浓度，适用于高瓦斯长壁面^[5]。例如，在贵州六龙煤矿，采用 U 型通风结合专用回风斜井，实现了独立回风系统，瓦斯稀释效率提升 20% 以上。

国际标准方面，美国煤矿安全与健康管理局 (MSHA) 规定，工作面风速不低于 0.3m/s，瓦斯浓度不超过 1%，并要求连续监测甲烷水平。《煤矿安全规程》(2022 版) 进一步明确，高瓦斯矿井必须配备双风机双电源系统，主通风机实现自动切换，备用风机切换时间不超过 10min，确保通风不间断。在分区通风设计中，常采用对角式或中央并列式布局，前者适用于多水平开采，后者便于集中控制风量分配。

局部通风针对掘进面和盲巷，使用轴流式或压入式局部风机结合柔性风筒供给风流。辅助措施包括风门自动调节、风桥隔离漏风和风帘导流。案例分析显示，在长壁采煤面，采用压入式局部通风结合尾巷抽采，可将瓦斯涌出控制在 0.8% 以下。例如，华亭煤业山寨煤矿通过优化风

门和风桥，减少了巷道漏风率 15%，有效防控了瓦斯超限。数值模拟工具如 COMSOL 软件已被用于验证 U 型与 Y 型通风流场差异，Y 型系统下瓦斯浓度分布更均匀，涡流区缩小 30%。

然而，传统方法高度依赖人工经验，易受巷道变形、支护失效或地质构造影响，导致风阻急剧增加。研究指出，风网不稳定时，瓦斯积聚风险上升 30%–50%，能耗占矿井总能耗的 25% 以上。在复杂地质条件下，如断层带或煤层倾角大，传统布局灵活性差，难以实现按需供风，限制了深部开采的应用。这些局限性推动了从被动通风向智能动态调控的转型。

3 智能通风系统

人工智能 (AI) 在煤矿通风中的应用已成为研究热点，通过大数据分析风网动态变化、预测瓦斯扩散路径，实现精准调控。AI 技术涵盖神经网络风量优化、机器学习故障诊断和深度学习浓度预测^[7]。例如，DL-Koopman 模型结合深度学习与 Koopman 算子，对深部矿井瓦斯浓度预测平均相对误差仅 3.94%，显著优于传统 DNN 模型^[8]。模糊 PID 控制器集成 AI 算法，通过实时调整风机转速，减少风量超调 60% 以上，提高通风效率 15%–20%。

国内研究强调智能通风本土化，如基于物联网 (IoT) 的监测系统，集成多传感器实现风门自动控制和瓦斯预警。专利《煤矿智能通风方法、系统及装置》提出了一种煤矿智能通风方法，利用风速、湿度、气压和瓦斯数据动态优化风量分配^[9]。在陕西三道沟煤矿，反风效果动态模拟结合参数库构建，解决了火灾事故中决策滞后问题。国际上，通风按需控制 (VOD) 系统通过 AI 算法根据作业人员位置调整风量，节能 30%^[10]。

现代监测采用高精度传感器网络 (如激光甲烷传感器)，实时采集浓度、风速和温度数据。预测模型包括计算流体力学 (CFD) 模拟和统计学习方法^[11]。平衡压力通风技术通过调节风压差，控制上隅角气体超限，应用在石圪台煤矿 104 工作面，瓦斯浓度降低至 0.5% 以下。知识图谱技术构建通风安全知识库，处理历史事故数据，提升风险识别准确率 25%^[12]。

煤矿粉尘与瓦斯共存，喷雾除尘辅助通风。表面活性剂喷雾和磁化水喷雾可捕集 80% 以上呼吸性粉尘，但存在二次污染和设备复杂问题^[13]。未来方向是纳米材料喷雾与智能通风融合，通风系统处理未捕集粉尘，实现协同降尘率 95%。

针对高瓦斯矿井，动态调控技术分析涌出规律，优化

风网配置^[14]。国内提出井巷断面优化和多风机协同控制,国际上采用面部通风与气体稀释结合, GIS 不稳定网络模型支持智能通风决策^[15]。

4 挑战与问题分析

随着开采深度超过 1500m, 地温升高、瓦斯压力增大, 通风需求翻倍^[16]。传统风机难以维持有效风量, 热害导致风流逆转风险增加。智能系统需应对数据噪声和传感器失效, 高瓦斯矿井不稳定风流和通风管理混乱是主要组织影响因素。

通风事故分析显示, 人为因素占比高达 60%。HFACS 模型识别组织影响, Apriori 算法挖掘事故关联规则, 发现风门误操作与瓦斯超限强相关。防范对策包括优化通风网络、加强多源数据融合预警和定期模拟演练。

当前 AI 通风高度依赖高质量数据, 边缘计算能力不足导致实时性差。喷雾技术对疏水性粉尘无效, 需要新型绿色材料。通风空气甲烷利用率低, 全球 70% 甲烷排放来自通风系统。此外, 智能化改造初期投资高, 中小矿井推广困难。

5 未来发展趋势

未来煤矿通风技术将向高端智能化、绿色化和精准化方向发展。5G 通信与边缘 AI 融合, 实现毫秒级风流调控和灾害自适应响应。碳捕集利用技术减少瓦斯排放, 推动“双碳”目标。国际合作推动标准统一, “煤矿智能化”计划强调瓦斯防治理论创新和多系统融合。

预计到 2030 年, 智能通风覆盖率达 80%, 到 2035 年实现全矿井无人值守通风。新趋势包括: (1) 数字孪生技术构建虚拟风网, 预演优化方案; (2) 区块链确保监测数据不可篡改; (3) 生物酶降解瓦斯等绿色技术。总体上, 通风将从“保安全”转向“提效率、减排放、促可持续发展”。

6 结语

煤矿瓦斯安全通风技术是保障矿工生命和生产高效的关键支撑。从传统 U/Y 型布局到 AI 驱动的智能系统, 技术演变已将瓦斯事故率降低 70% 以上, 显著提升了防控能力。然而, 深部开采复杂性、管理人为风险和技术瓶颈仍需克服。未来, 通过 5G、数字孪生和绿色技术的深度融合, 煤矿通风将实现更高效、更环保的瓦斯管理, 推动煤炭行业高质量发展。持续创新与国际合作是实现“零事故”目标的必由之路。

参考文献:

[1] 王国法, 任世华, 庞义辉等. 煤炭工业“十三五”

发展成效与“双碳”目标实施路径[J]. 煤炭科学技术, 2021,49(09):1-8.

[2] Fan, C., Sun, H., Yang, L., et al. (2024). Simulation on harmful gas control by balanced pressure ventilation in the fully mechanized caving face under sealed fire area of small coal mine. ACS omega, 9(14), 16168-16175.

[3] 王祥溪. 煤矿瓦斯通风安全问题分析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2020,(20):111-112.

[4] 李鹏飞. 煤矿高瓦斯矿井通风技术研究[J]. 西部探矿工程, 2024,36(12):102-104.

[5] 程红林, 周礼杰, 李美晨等. U 型和 Y 型通风方式下工作面流场特征及瓦斯浓度分布规律探究[J]. 华北科技学院学报, 2023,20(05):84-93.

[6] Jing, M., Zhang, G., Yang, D., et al. (2025). Research on Risk Identification of Coal Mine Ventilation Systems Based on HFACS and Apriori Algorithm. Advances in Civil Engineering, 2025(1), 9579500.

[7] Semin, M., Kormshchikov, D. (2024). Application of artificial intelligence in mine ventilation: a brief review. Frontiers in Artificial Intelligence, 7, 1402555.

[8] Yuan, K., Gao, K., Liu, Y. (2025). Enhancing gas concentration prediction and ventilation efficiency in deep coal mines: a hybrid DL-Koopman and Fuzzy-PID framework. Scientific Reports, 15(1), 23630.

[9] 山西中科联合工程技术有限公司. 煤矿智能通风方法、系统及装置, 202510297480.0[P].2025-06-20.

[10] An, R., Lin, P., Li, Z., et al. (2024). Intelligent ventilation-on-demand control system for the construction of underground tunnel complex. Journal of Intelligent Construction, 2(2), 1-16.

[11] Geng, F., Li, W., Liu, Y., et al. (2025). Intelligent equalizing pressure ventilation system for coal mine: A case study of the 104 coal mining face in Shige Tai Mine. Energy Reports, 13, 4998-5005.

[12] 徐记全, 陈康, 保玉德等. 煤矿智能化建设中 5G 通信技术的应用[J]. 矿业装备, 2025,(08):144-146.

[13] 韩文鑫. 基于 CiteSpace 的矿井通风文献综述[J]. 陕西煤炭, 2024,43(02):135-141. DOI:10.20120/j.cnki.issn.1671-749x.2024.0228.

[14] Wan, Y. (2024). Design and optimization of intelligent ventilation system in coal mine. In E3S Web of

Conferences (Vol. 528, p. 03020). EDP Sciences.

[15] An, R., Lin, P., Li, Z., et al. (2024). Intelligent ventilation-on-demand control system for the construction of underground tunnel complex. *Journal of Intelligent Construction*, 2(2), 1-16.

[16] Yuan, K., Gao, K. Liu, Y. Enhancing gas concentration prediction and ventilation efficiency in deep coal mines: a hybrid DL-Koopman and Fuzzy-PID framework. *Sci Rep* 15,

23630 (2025).

基金项目：1. 中煤科工集团重庆研究院有限公司重点实验室项目（2025YBXM37）；2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司重点实验室项目（2025YBXM36）。

作者简介：胡育鹏（1997-），男，汉族，浙江省温州市，初级（研究实习员），本科，研究方向：矿井智能通风。