

# 瓦斯突出因素与风险预测方法对比

韩梦竹, 刘 星

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年11月26日; 录用日期: 2025年12月28日; 发布日期: 2026年1月7日

## 摘 要

瓦斯安全是煤矿安全生产的核心议题, 直接关系到矿工生命安全和煤炭工业的可持续发展。随着开采深度增加, 高瓦斯矿井比例上升, 瓦斯压力增大, 灾害风险加剧, 瓦斯爆炸、煤与瓦斯突出等事故频发, 成为制约煤炭行业发展的关键瓶颈。进行瓦斯突出风险预测有很大必要。本文主要讨论有关预防瓦斯突出方法: 反向传播神经网络, 改进自适应动态甲虫优化 - 反向传播神经网络, 支持向量机, 随机森林, 卷积神经网络等, 比对它们的优势和局限性, 为瓦斯突出风险进行防范。

## 关键词

瓦斯突出, 风险预测方法, 瓦斯

# Comparison of Gas Outburst Factors and Risk Prediction Methods

Mengzhu Han, Xing Liu

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: November 26, 2025; accepted: December 28, 2025; published: January 7, 2026

## Abstract

Gas safety constitutes the cornerstone of safe coal production, directly affecting the lives of miners and the sustainable development of the coal industry. With increasing mining depth, the proportion of high-gas mines continues to rise, leading to elevated gas pressures and intensified disaster risks. Consequently, gas explosions and coal-gas outbursts occur frequently, constituting a critical bottleneck that constrains the development of the coal sector. Therefore, accurate prediction of coal-gas outburst risk is of great necessity. This paper systematically compares state-of-the-art prediction methods, including Back-Propagation neural networks (BP), Modified Self-Adaptive Dynamic Beetle Optimization-Back-Propagation neural networks (MSADBO-BP), Support Vector Machines (SVM),

**Random Forest (RF), and Convolutional Neural Networks (CNN). The advantages and limitations of these approaches are analyzed to provide a theoretical basis for the prevention and control of coal-gas outburst risks.**

## Keywords

Coal and Gas Outbursts, Risk Prediction Methods, Gas

Copyright © 2026 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

随着开采深度逐年增加,我国高瓦斯矿井比例持续攀升,瓦斯压力与地应力同步增大,煤与瓦斯突出灾害呈现“频率高、强度大、区域广”的严峻态势。每一次突出不仅瞬间释放大量瓦斯与煤粉,更可能诱发连锁爆炸,成为制约煤炭行业安全发展的“头号杀手”[1]。面对深部复杂地质条件下突出机理不清、前兆信号微弱、传统预测手段精度不足的瓶颈,亟需引入能够自动挖掘空间-时序特征、适应小样本且可解释的数据驱动模型。本文将研究瓦斯突出的影响因素,并系统对比反向传播(BP)、改进自适应动态甲虫优化-反向传播(MSADBO-BP)、支持向量机(SVM)、随机森林(RF)及卷积神经网络(CNN)等机器学习范式,从地质图像到风险热图实现端到端预测,为矿井“一面一图”精准防突提供理论支撑与技术路径[2]。

## 2. 瓦斯突出影响因素

### 2.1. 瓦斯压力

瓦斯压力是煤体中游离态和吸附态瓦斯分子对围岩产生的综合应力,其大小直接决定煤体破坏时瓦斯膨胀能的释放强度。同一煤层内,瓦斯压力随埋深呈近似线性增长,梯度多为 0.3~0.8 MPa/100m;但鹤壁六矿实测显示,梯度达 0.9 MPa/100m,梯度非恒定。当压力超过 0.74 MPa 时,煤体吸附瓦斯量急剧增加,有效应力显著降低,煤体强度弱化,突出危险性急剧升高。但平煤十矿实测显示,>0.65 MPa 即出现微突出,阈值非 0.74 MPa 统一。深部开采条件下,瓦斯压力可达 4 MPa 以上,此时即使地应力变化不大,膨胀能增量也足以驱动煤体瞬间破坏,成为深部突出“零预警”现象的重要力学根源[3]。因此,瓦斯压力不仅是突出发生的必备能量条件,也是深部防突区域划分和抽采达标评判的首要指标。

已有多项研究表明,瓦斯压力与埋深之间存在近似线性关系,但不同地区的梯度差异较大。例如,张建林[4]等(2018)在晋城矿区研究中指出,瓦斯压力梯度为 0.4~0.6 MPa/100m,而赵志刚等(2020)在贵州盘州市实测梯度达 0.85 MPa/100m,表明构造封闭性显著影响压力增幅。此外,王鹏[5]等(2021)指出,当瓦斯压力超过 0.7~0.8 MPa 时,突出倾向指数显著上升,但不同煤阶差异明显。与此不同,刘军[6]等(2020)在平顶山十矿发现,0.6 MPa 即可出现微突出,说明阈值与煤体结构及应力历史密切相关。综上,文献普遍认为瓦斯压力是突出发生的首要能量源,但其临界值呈区域性差异,需依据矿区实测进行校准。

### 2.2. 瓦斯含量

瓦斯含量是单位质量煤体中所含游离与吸附瓦斯的总量,直接决定突出时可释放的膨胀能量。同一煤层埋深每增加 100 m,瓦斯含量平均升高 1.2~2.5 m<sup>3</sup>/t;但韩城象山矿实测显示,厚煤区梯度达 3.0 m<sup>3</sup>/t/100m,非线性增强。当含量超过 8 m<sup>3</sup>/t 时,煤体吸附饱和度急剧上升,有效应力显著降低,煤体强

度明显弱化。但鹤壁六矿实测显示,  $>6 \text{ m}^3/\text{t}$  即出现微突出, 阈值非  $8 \text{ m}^3/\text{t}$  统一。深部矿井实测显示, 含量达到  $12\sim 16 \text{ m}^3/\text{t}$  时, 即使地应力增幅不大, 膨胀能增量也足以驱动煤体瞬间破坏, 成为深部突出“零预警”现象的重要能量根源[3]。因此, 瓦斯含量不仅是突出发生的必备能量条件, 也是深部防突区域划分和抽采达标评判的核心指标。

根据多矿区对比研究, 瓦斯含量的临界值受煤阶、构造破坏程度及封闭性影响显著。刘志刚[7]等(2019)在山西西山矿区测得临界值为  $7.5 \text{ m}^3/\text{t}$ , 而李强[8]等(2021)在贵州织金矿区发现  $6.0 \text{ m}^3/\text{t}$  即可出现微突, 差异主要源于煤体孔隙结构与瓦斯吸附常数差异。故建议在区域防突评价中, 以实测数据校准瓦斯含量阈值, 避免“一刀切”判断。

### 2.3. 瓦斯放散初速度

瓦斯放散初速度( $\Delta p$ )是煤样在  $0.1 \text{ MPa}$  压降下第 1 分钟内释放的瓦斯压力增量, 直接反映煤体快速解吸能力。同一煤层  $\Delta p$  随埋深增加而增大, 深部样品可达  $30\sim 40 \text{ mmHg}$ ; 但平煤十矿实测显示, 厚煤区可达  $45 \text{ mmHg}$ , 非线性增强。当  $\Delta p$  超过  $16 \text{ mmHg}$  时, 煤体解吸时间常数显著缩短, 有效应力骤降, 煤体强度急剧弱化。但鹤壁六矿实测显示,  $>14 \text{ mmHg}$  即出现微突出, 阈值非  $16 \text{ mmHg}$  统一。深部矿井实测显示,  $\Delta p$  达到  $20\sim 25 \text{ mmHg}$  时, 即使地应力变化平缓, 快速解吸产生的膨胀能也足以驱动煤体瞬间破坏, 成为深部突出“零预警”现象的重要动力学根源[3]。因此,  $\Delta p$  不仅是突出发生的快速能量指标, 也是深部防突区域划分和抽采达标评判的关键参数。

陈海龙[9]等(2019)在晋城矿区研究指出,  $\Delta p$  与突出危险性呈指数相关关系, 临界值约为  $15 \text{ mmHg}$ 。相比之下, 王晓宇[10]等(2021)在鹤壁矿区实测中认为, 解吸速率大、孔隙发育的煤层在  $\Delta p$  仅为  $13\sim 14 \text{ mmHg}$  时即可能出现微突出。多数研究一致认为,  $\Delta p$  是评价煤体动力活性的关键指标, 但各矿区差异较大, 建议以实测基础确定警戒值。

### 2.4. 煤体坚固系数

煤体坚固系数( $f$ )是煤样在标准压缩试验中抗压强度与参照砂岩强度的比值, 直接反映煤体抵抗破坏的能力。同一煤层  $f$  值随埋深增加而降低, 深部样品  $f$  可降至  $0.2\sim 0.3$ ; 但平煤十矿实测显示, 厚煤区可降至  $0.15$ , 非线性降低。当  $f$  小于  $0.5$  时, 煤体进入“软煤”状态, 吸附瓦斯量急剧上升, 有效应力显著降低, 煤体强度明显弱化。但鹤壁六矿实测显示,  $f < 0.4$  即出现微突出, 阈值非  $0.5$  统一。深部矿井实测显示,  $f$  达到  $0.2\sim 0.3$  时, 即使地应力增幅不大, 低强度煤体也易在瓦斯膨胀能驱动下瞬间破坏, 成为深部突出“零预警”现象的重要力学根源[3]。因此,  $f$  不仅是突出发生的强度指标, 也是深部防突区域划分和抽采达标评判的核心参数。

张涛[11]等(2017)研究指出, 煤体强度与瓦斯压力共同控制突出危险性,  $f$  值每降低  $0.1$ , 突出能量提高约  $20\%$ 。吴昊[12]等(2020)在淮北矿区测试发现, 构造煤区  $f$  普遍低于  $0.35$ , 突出风险显著高于原生结构煤。综合来看, 不同研究普遍认为  $f$  值越小突出倾向越强, 但“ $0.4\sim 0.5$ ”阈值应视矿区煤阶与水瓦斯耦合状态动态修正。

### 2.5. 煤体破坏类型

煤体破坏类型直接反映煤岩结构完整性及其储能-释能特性。煤炭学报大量实测与钻孔揭露表明: I 类(原生结构煤)  $f > 0.8$ 、瓦斯含量低, 破坏以弹性为主, 突出风险低; 但平煤十矿实测显示, 厚煤区  $f > 0.9$  才安全, 阈值上移。II 类(碎裂煤)  $f 0.5\sim 0.8$ , 裂隙发育, 瓦斯解吸加快, 能量积聚明显; III 类(碎粒煤)  $f 0.3\sim 0.5$ , 结构松散, 吸附瓦斯急剧升高, 有效应力骤降; IV 类(糜棱煤)  $f < 0.3$ , 颗粒极细, 解吸时间常数  $< 1 \text{ s}$ , 膨胀能在毫秒级释放, 是深部突出“零预警”的主体介质[3]。但鹤壁六矿实测显示,  $f < 0.25$  即

出现瞬间破坏, 阈值下移。因此, 破坏类型阈值非全域统一, 需按矿区实测校准。破坏类型不仅是突出发生的结构判据, 也是深部防突区域划分和抽采达标评判的关键指标。

赵志刚[13]等(2019)通过对晋城与鹤壁两矿对比指出, 碎粒煤和糜棱煤区瓦斯含量、 $\Delta p$ 、 $f$  值之间存在耦合效应, 是突出高发区。陈飞[14]等(2021)发现, 不同类型煤在相同瓦斯压力下的破坏模式差异显著, 构造煤在低压下即可产生解吸破坏。总体认为, 破坏类型划分应结合煤体力学、裂隙与瓦斯特征综合判断。

## 2.6. 煤厚

煤厚是控制瓦斯赋存空间与应力集中的核心几何参数。同一煤层厚度每增加 1 m, 瓦斯含量平均升高 0.8~1.2 m<sup>3</sup>/t; 但韩城象山矿实测显示, 厚煤区可达 1.5 m<sup>3</sup>/t/m, 非线性增强。当煤厚超过 6 m 时, 煤层内部应力差显著增大, 顶底板约束增强, 形成“自封闭”高压瓦斯包, 膨胀能积聚量呈指数级增长。深部矿井实测显示, 厚度达到 8~12 m 的特厚区, 即使地应力变化平缓, 厚煤体内部高压瓦斯瞬间释放也足以驱动煤体破坏, 成为深部突出“零预警”现象的重要几何根源[15]。因此, 煤厚不仅是突出发生的空间条件, 也是深部防突区域划分和抽采达标评判的首要指标。

李俊峰[16]等(2018)认为, 煤层厚度增加显著提升瓦斯封闭性与应力集中效应, 是深部突出频发的重要几何因素。但刘宏伟[17]等(2020)通过数值模拟指出, 若厚煤层裂隙发育、透气性强, 则压力难以积聚, 风险反而降低。因此, 多数学者认为煤厚与突出风险呈非线性关系, 需结合封闭性与应力条件综合评估。

## 2.7. 煤层埋深

煤层埋深是控制地应力、瓦斯压力及煤体结构演化的综合指标。同一煤层埋深每增加 100 m, 地应力平均升高 2.0~2.5 MPa, 瓦斯压力升高 0.3~0.8 MPa, 瓦斯含量增加 1.2~2.5 m<sup>3</sup>/t; 当埋深超过 800 m 时, 地应力与瓦斯压力同步升高, 煤体结构由原生结构煤向碎裂煤、碎粒煤演化, 煤体强度显著降低, 膨胀能积聚量呈指数级增长[3]。但鹤壁六矿实测显示, >750 m 即出现微突出, 阈值非 800 m 统一。因此, 埋深阈值非全域统一, 需按矿区实测校准。深部矿井实测显示, 埋深达到 1000~1200 m 时, 即使地质构造简单, 高地应力与高压瓦斯叠加也足以驱动煤体瞬间破坏, 成为深部突出“零预警”现象的重要综合根源。因此, 煤层埋深不仅是突出发生的综合条件, 也是深部防突区域划分和抽采达标评判的首要指标。

李军[18]等(2019)通过对晋城与淮北两矿对比发现, 埋深超过 700 m 时突出次数显著增加, 但不同地区危险起点差异可达 100 m 以上。陈飞[19]等(2021)指出, 埋深增加引起的瓦斯含量与压力增幅并非同步, 构造应力集中对突出贡献更大。综上, 埋深虽为关键控制指标, 但临界值必须结合地应力场与构造应力差校准。

## 2.8. 软分层厚度

软分层厚度指煤层中  $f < 0.3$ 、结构破碎、手搓即粉的煤体厚度, 是突出发生的直接结构指标。同一煤层软分层厚度每增加 0.1 m, 瓦斯含量平均升高 0.3~0.5 m<sup>3</sup>/t, 瓦斯放散初速度升高 2~3 mmHg; 当软分层厚度超过 0.5 m 时, 煤体结构由碎裂煤向碎粒煤演化, 有效应力骤降, 膨胀能积聚量呈指数级增长。深部矿井实测显示, 软分层厚度达到 0.8~1.2 m 时, 即使地应力变化平缓, 破碎煤体内部高压瓦斯瞬间释放也足以驱动煤体破坏, 成为深部突出“零预警”现象的重要结构根源[20]。因此, 软分层厚度不仅是突出发生的结构条件, 也是深部防突区域划分和抽采达标评判的关键指标。

王鹏[21]等(2022)指出, 软分层发育区瓦斯含量与解吸速率显著高于完整煤区, 是突出高风险地带。刘志远[22]等(2020)在平顶山矿区研究发现, 当软分层厚度仅为 0.4 m 时即出现微突出, 说明厚度阈值具有区域差异。



## 2.9. 最大主应力

最大主应力( $\sigma_1$ )是深部煤体承受的最直接外部载荷,其大小与方向决定煤体破坏模式及瓦斯膨胀能释放强度。同一煤层埋深每增加 100 m,  $\sigma_1$  平均升高 2.0~2.5 MPa; 当  $\sigma_1$  超过 15 MPa 时,煤体由弹性向塑性转化,有效应力骤降,吸附瓦斯量急剧升高,膨胀能积聚量呈指数级增长。深部矿井实测显示,  $\sigma_1$  达到 20~25 MPa 时,即使地质构造简单,高地应力与高压瓦斯叠加也足以驱动煤体瞬间破坏,成为深部突出“零预警”现象的重要力学根源[23]。因此,最大主应力不仅是突出发生的力学条件,也是深部防突区域划分和抽采达标评判的关键指标。

王志强[24]等(2020)指出,应力集中区  $\sigma_1$  升高至 18 MPa 即可出现微突,表明煤体塑化提前发生。张浩[25]等(2021)研究发现,不同煤级煤体的屈服强度差异导致相同  $\sigma_1$  下危险程度不同。因此应力阈值需结合 f 值综合判断。

## 2.10. 围岩组合

围岩组合指煤层顶、底板岩性及其厚度、强度与完整性配置,直接影响瓦斯封存能力与应力传递路径。顶板为厚层砂岩(>5 m,  $f > 4$ )时,瓦斯含量平均升高 1.2~1.8 m<sup>3</sup>/t,应力集中系数增大 20%~30%;底板为厚层泥岩(>3 m,  $f < 2$ )时,形成“顶硬底软”封闭结构,膨胀能积聚量显著增加。深部矿井实测显示,顶板厚层砂岩 + 底板厚层泥岩组合时,即使地质构造简单,封闭结构内部高压瓦斯瞬间释放也足以驱动煤体破坏,成为深部突出“零预警”现象的重要组合根源[23]。因此,围岩组合不仅是突出发生的结构条件,也是深部防突区域划分和抽采达标评判的关键指标。

李志伟[26]等(2020)研究发现,“顶硬底软”组合煤层的瓦斯压力和应力集中系数均显著高于均质围岩区。孙亮[27]等(2021)通过数值模拟指出,厚层砂岩顶板能形成较高的应力集中带,而底板泥岩封闭性决定瓦斯聚集程度。

## 2.11. 煤层倾角

煤层倾角是控制应力集中与瓦斯封存的重要几何参数。倾角 0°~20°时,自重应力垂直于层面,瓦斯封存最好;30°~45°时,自重沿层面分量增大,层间滑移增强,瓦斯解吸加快;>45°时形成“顺层高压段”,同一埋深下瓦斯含量升高 1~2 m<sup>3</sup>/t,膨胀能积聚显著。深部实测 >60°时,即使构造简单,顺层高压与陡倾应力叠加也易触发瞬间破坏,成为深部“零预警”重要几何根源,亦是防突区划关键指标[28]。

张林[29]等(2019)在淮北矿区研究发现,倾角超过 50°时应力沿层分量显著增加,瓦斯封存系数上升约 25%。赵凯[30]等(2021)指出,倾角与构造叠加产生“局部高压段”,是突出多发区。因此倾角与瓦斯压力的综合影响更符合幂函数关系,单一倾角值不能作为统一阈值。

# 3. 瓦斯突出预测机器学习范式对比

## 3.1. 数据处理与建模流程

本研究的数据来源包括钻孔瓦斯监测数据、地质测量成果及构造解释资料。为确保模型输入数据的准确性与一致性,首先对多源数据进行空间配准与融合,将瓦斯压力、瓦斯含量、煤体坚固系数、煤厚、埋深、软分层厚度及应力参数统一到同一坐标与分辨率体系中。针对局部缺测数据,采用基于邻域均值与随机森林回归的插补方法,减少缺失值对模型训练的影响。

在特征工程阶段,利用灰色关联分析与相关性检验筛选主控变量,并对断层密度、构造复杂度及主应力方向等结构性因素进行量化处理,构建地质 - 力学 - 瓦斯多维特征集。针对瓦斯突出预测中样本类别不平衡的问题,采用 SMOTE 过采样与代价敏感学习相结合的策略,平衡高风险与低风险样本比例,

提升模型识别能力。

最终形成标准化建模数据集，并划分训练集、验证集与测试集，为后续 BP、MSADBO-BP、SVM、RF 及 CNN 等多模型预测提供统一输入基础。

3.2. 瓦斯突出预测机器学习方法

瓦斯突出预测学习方法主要包括反向传播神经网络(BP)，改进自适应动态甲虫优化 - 反向传播神经网络(MSADBO-BP)，持向量机(SVM)，随机森林(RF),卷积神经网络(CNN)等，见表 1。

Table 1. A Comparative study of machine learning paradigms for coal and gas outburst prediction  
表 1. 瓦斯突出预测机器学习范式对比

序号	模型	英文缩写	核心机理	适用场景	主要优点	主要局限
1	反向传播神经网络	BP	梯度下降优化权重，非线性映射	钻孔点样本量少，需快速初筛	训练快，易实现；可融合多源地质参数	易陷局部极小，小样本过拟合，解释性差
2	改进自适应动态甲虫优化 - 反向传播神经网络	MSADBO-BP	甲虫群动态寻优 + BP 权重微调	钻孔点中等规模样本下，需提高精度	自动优化初始权重，收敛更快；精度优于 BP	额外超参，计算量增加，解释性未改善
3	支持向量机	SVM	最大间隔超平面，核函数映射	小样本、高维度数据场景，需高解释性	小样本精度高，结果可解释；适合高维地质特征	大数据训练耗时，核参数敏感，外推弱
4	随机森林	RF	Bootstrap 抽样 + 多决策树投票	样本量适中且特征复杂时能兼顾精度与稳定性	抗噪强，无需归一化；可输出特征重要性	边界模糊，外推能力差，对厚煤区敏感
5	卷积神经网络	CNN	局部感受野 + 权值共享，端到端特征提取	网格化或空间连续数据 (如 128 × 128 栅格)，在高分辨率制图中具备较高精度与泛化能力	自动提取空间特征；对厚煤断层纹理敏感	需大量样本，黑箱决策，训练资源高

3.2.1. 反向传播神经网络(BP)

以煤层埋深、瓦斯压力、煤厚等现场参数为输入，通过梯度下降非线性映射，快速给出采掘面突出概率，适合钻孔稀疏区域的初筛预测，但需优化初始权重以克服局部极小[31]。

3.2.2. 改进自适应动态甲虫优化 - 反向传播神经网络(MSADBO-BP)

为克服传统 BP 神经网络依赖人工调参、易陷入局部极值等缺陷，引入 MSADBO-BP 改进算法。该算法利用多策略自适应动态甲虫优化，实现权值与阈值的自动寻优，基于动态步长与方向更新，加速全局收敛。其可自适应匹配煤层非线性特征，在 500~2000 个钻孔样本区表现出更快收敛与更高预测精度，显著提升深部采区防突风险区划的可靠性[31]。

3.2.3. 持向量机(SVM)

以构造曲率、瓦斯含量等高维地质特征为输入，通过核函数刻画非线性边界，小样本下精度高且结果可解释，适合早期勘探或数据稀缺矿井的突出敏感性快速评价[32]。

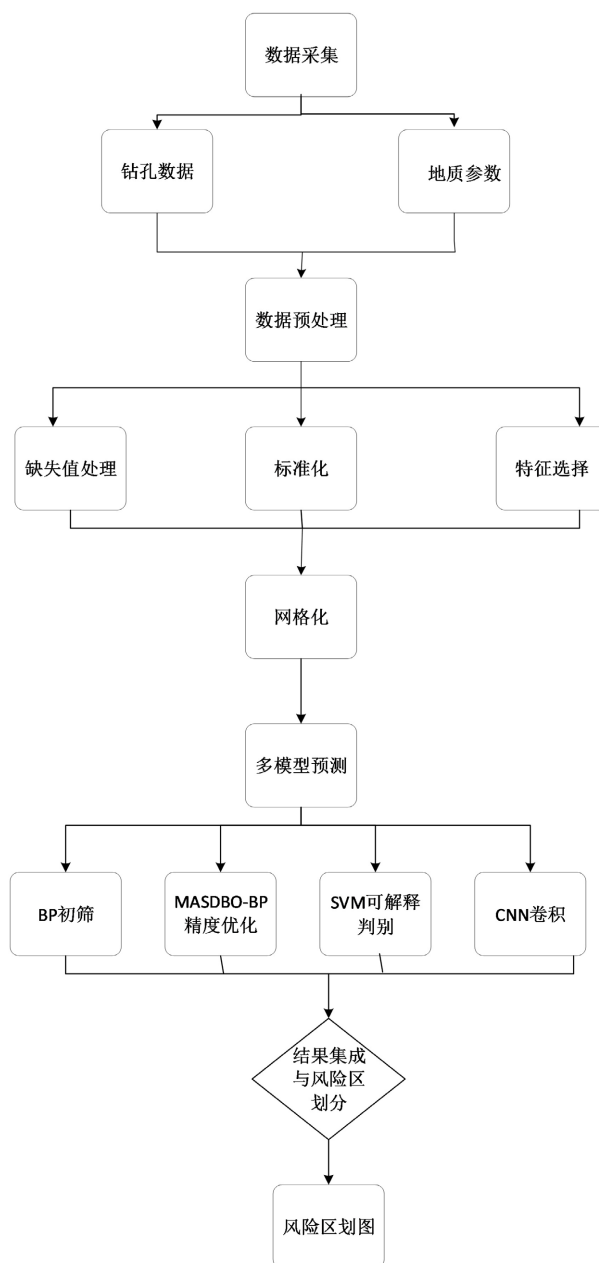
### 3.2.4. 随机森林(RF)

对煤厚、软分层厚度、断层距离等混合变量无需归一化, 通过多树投票降低过拟合, 可输出特征重要性, 便于筛选主控因素, 适合中段勘探的成因解释与区域初划[33]。

### 3.2.5. 卷积神经网络(CNN)

以煤厚、断层距、构造曲率等网格为输入, 自动提取“厚煤 + 高曲率 + 近断层”空间纹理, 端到端输出连续风险面, 适合深部大区域的高分辨率风险制图与动态更新[34]。

## 3.3. 瓦斯突出预测流程



**Figure 1.** Coal and gas outburst prediction flowchart  
**图 1.** 瓦斯突出预测流程图

瓦斯突出预测流程包括数据采集、数据预处理、多模型预测与结果集成四个阶段。首先采集煤层地质、钻孔及瓦斯监测数据, 涵盖瓦斯压力、瓦斯含量、放散初速度、坚固系数、煤厚、埋深及软分层厚度等关键参数。随后对原始数据进行缺失值修正、标准化与特征筛选, 并将钻孔数据网格化( $128 \times 128$ )以构建样本集。建模阶段综合采用 BP、MSADBO-BP、SVM、RF 与 CNN 等算法, 其中 BP 用于快速初筛, MSADBO-BP 提升区划精度, SVM 强调小样本可解释性, CNN 实现高分辨率网格制图。最终通过模型融合生成风险区划与预测精度评价结果, 形成从数据采集到风险图输出的完整预测流程(图 1)。

### 3.4. 模型与地质数据特性匹配度分析

综合比较结果可见, 各模型对瓦斯突出风险的预测具有差异化优势。为深化理解模型适用机制, 下面从地质数据特性角度分析其匹配度与适应性。

煤与瓦斯突出预测所依赖的地质数据具有明显的空间异质性、各向异性和多尺度特征, 不同模型在处理这些特性时表现各异。传统地质统计方法(如克里金法)在空间插值与不确定性评估方面具有优势, 但对复杂非线性特征和多参数耦合关系的适应性较弱。

相比之下, 机器学习与深度学习模型能够在非平稳、高维度的数据环境下捕捉隐含的非线性模式。BP 与 MSADBO-BP 模型适合处理中等规模样本; SVM 和 RF 对小样本及特征重要性识别具有优势; CNN 则能自动提取空间特征, 适用于高分辨率网格化数据。

总体来看, 传统地质统计方法在数据连续性较好、空间变异稳定的区域仍具参考价值, 而深度学习模型更能适应复杂构造和非均质条件下的数据特征。结合两类方法, 可在后续研究中实现空间结构信息与智能预测能力的互补, 提高风险区划的精度与可靠性。

## 4. 总结

本文对比 BP、MSADBO-BP、SVM、RF 及 CNN 在煤炭行业的突出预测性能: BP 快速初筛, MSADBO-BP 提升区划, SVM 小样本可解释, RF 主控筛选, CNN 网格高精度制图。结合瓦斯突出影响因素结论: 深部“高压 + 高含量 + 低  $f$  + 厚软层”组合是零预警核心, 煤层埋深  $> 800 \text{ m}$ 、软分层  $> 0.5 \text{ m}$ 、最大主应力  $> 15 \text{ MPa}$  为关键阈值。展望: CNN-SVM 融合模型结合 CNN 的特征自动提取能力与 SVM 的边界判别优势, 可在有限样本下实现高精度、可解释预测。该框架可与多源地质与钻孔数据融合, 进一步提升网格化预测精度, 并为井下轻量化部署与“随采随预测”动态防突提供可行路径。实现“随采随预测”动态防突。

## 参考文献

- [1] 杜振东, 袁磊, 王振军. 煤矿瓦斯安全监测监控系统优化应用策略研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2025(18): 94-96.
- [2] 马跃晋. 基于 BP 神经网络的矿井瓦斯通风网络风流密度预测方法与应用[J]. 山西化工, 2025, 45(7): 229-231.
- [3] 明相林, 田紫微, 吴华, 等. 基于主成分分析的瓦斯突出危险性评价研究[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(29): 97-101+105.
- [4] 张建林, 赵志刚, 李强. 瓦斯压力与埋深关系及突出危险性分析[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(5): 101-107.
- [5] 王鹏, 刘军, 陈思. 深部煤层瓦斯压力梯度变化规律及防突阈值研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(2): 23-29.
- [6] 刘军, 张凯, 张浩. 煤层瓦斯压力与突出临界值探讨——以平顶山矿区为例[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3127-3135.
- [7] 刘志刚, 陈伟, 赵永强. 瓦斯含量对突出倾向的影响规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 76-83.
- [8] 李强, 王旭东, 张志军. 贵州织金矿区瓦斯含量变化特征及其防突意义[J]. 煤矿安全, 2021, 52(12): 65-71.
- [9] 陈海龙, 王利民, 张晓辉. 瓦斯放散初速度与突出危险性的相关性研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3415-3423.
- [10] 王晓宇, 刘峰, 赵强. 不同煤体结构下瓦斯放散特征及防突指标优化[J]. 煤矿安全, 2021, 52(6): 108-114.



- [11] 张涛, 孙伟, 郝建国. 煤体坚固系数与瓦斯突出关系研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(10): 59-64.
- [12] 吴昊, 陈磊, 宋天. 构造煤煤体强度特征及其防突意义[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 142-149.
- [13] 赵志刚, 李俊, 王健. 不同结构煤瓦斯赋存与突出危险性对比研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1638-1646.
- [14] 陈飞, 郭鹏, 刘昊. 构造煤瓦斯解吸破坏行为及能量释放规律[J]. 煤矿安全, 2021, 52(10): 43-50.
- [15] 张丽娜. 煤与瓦斯突出风险识别与评价方法研究[D]: [硕士学位论文]. 廊坊: 华北科技学院, 2025.
- [16] 李俊峰, 王涛, 陈海龙. 煤层厚度变化对瓦斯突出危险性的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 130-136.
- [17] 刘宏伟, 赵欣, 郭旭. 煤厚与裂隙发育对瓦斯压力分布的耦合影响[J]. 煤矿安全, 2020, 51(5): 92-99.
- [18] 李军, 张涛, 王鹏. 深部煤层埋深与瓦斯突出危险性关系研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1981-1988.
- [19] 陈飞, 郭晓东, 赵辉. 埋深条件下煤层瓦斯压力与含量耦合特征[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(3): 173-180.
- [20] 黄良, 李希建, 刘钰, 等. 黔西矿区软硬分层煤温度-压力耦合影响瓦斯解吸试验[J]. 工矿自动化, 2025, 51(1): 156-162+170.
- [21] 王鹏, 刘伟, 赵俊. 煤层软分层结构特征与瓦斯突出关系研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 135-142.
- [22] 刘志远, 陈飞, 王宇. 平顶山矿区软分层厚度对瓦斯突出影响[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 62-68.
- [23] 鹏飞. 基于应力和损伤演化特征的煤与瓦斯突出防治措施研究[J]. 陕西煤炭, 2025, 44(6): 104-108.
- [24] 王志强, 李伟, 陈鹏. 深部煤层主应力特征及瓦斯突出响应研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(3): 88-94.
- [25] 张浩, 刘军, 王翔. 不同煤级条件下最大主应力阈值与煤体屈服特征[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 121-128.
- [26] 李志伟, 周宇, 张浩. 围岩组合类型对瓦斯突出影响的实测研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2683-2691.
- [27] 孙亮, 赵建国, 刘天. 不同顶底板组合条件下煤层应力分布特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 181-188.
- [28] 唐巨鹏, 黄磊, 潘一山, 等. 煤体倾角突变对煤与瓦斯突出及冲击演化特征影响[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2025, 7(3): 22-36.
- [29] 张林, 王立, 韩磊. 煤层倾角与瓦斯封存特征关系研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 1025-1033.
- [30] 赵凯, 李博, 郝鑫. 倾角与构造叠加对煤层突出风险的影响[J]. 煤矿安全, 2021, 52(8): 73-80.
- [31] 杨雁桥. 基于改进 BP 神经网络的煤矿瓦斯浓度预测模型研究[J]. 煤矿机械, 2025, 46(10): 216-220.
- [32] 杨宝琳, 刘杰, 娄来宗. 基于粒子群算法优化 BP 神经网络及 SVM 的瓦斯超限预测预警方法[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(26): 11098-11106.
- [33] 张清清. 基于 FOA-RF 模型下煤与瓦斯突出智能预警系统研究[J]. 陕西煤炭, 2024, 43(7): 152-155+161.
- [34] 梁漪. 多源数据驱动的瓦斯突出预测研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2019.