

# 基于分形理论的煤体渗透率模型构建与瓦斯灾害精准治理

韩银行

郑州祥隆地质工程有限公司 河南 郑州 452371

**摘要:** 分形理论为煤体复杂孔隙结构表征提供了有效方法。本文基于分形几何原理,构建了考虑孔隙裂隙分布特征的煤体渗透率模型,揭示了渗透率与分形维数的定量关系。通过分析渗透率对瓦斯压力梯度和渗透力的调控作用,阐明了瓦斯灾害的过程机制。提出以渗透率为核心的灾害预测指标与精准治理策略,为煤矿瓦斯灾害防治提供了新的理论依据和技术途径。

**关键词:** 分形理论; 煤体渗透率模型; 瓦斯灾害; 精准治理

引言: 煤体渗透率是影响瓦斯运移与灾害发生的关键参数。传统模型难以准确描述煤体孔隙裂隙结构的非均质特征,限制了渗透率预测精度。分形理论通过分形维数与标度不变性,能够有效量化煤体复杂结构,为渗透率建模开辟了新思路。引入分形理论构建煤体渗透率模型,分析渗透率在瓦斯灾害中的作用机制,对实现瓦斯灾害精准治理具有重要意义。

## 1 分形理论基础与煤体结构特征分析

### 1.1 分形理论概述

分形理论作为非线性科学关键分支,以研究复杂几何形态内在规律为核心。分形维数突破传统整数维度限制,精准刻画几何对象复杂程度。例如,科赫雪花分形维数约1.26,反映其边界特征。标度不变性是分形理论重要特性,指对象不同尺度下具自相似结构<sup>[1]</sup>。这使其成为描述自然界复杂现象的有效工具。在多孔介质研究中,分形理论量化孔隙结构非均质性,为微观表征提供新范式。传统研究依赖欧几里得几何,难准确描述孔隙特性。分形理论引入分形维数,将孔隙结构视为复杂网络,定量刻画其不规则程度。例如,孔隙分形维数越大,孔隙空间越复杂,连通性越差,影响流体运移效率,为分析渗透性能奠定理论基础。

### 1.2 煤体的孔隙裂隙结构特征

煤体作为典型的孔隙裂隙双重介质,其物理结构由微孔、中孔、大孔及裂隙共同构成。为简化分析,学者提出多种理想化模型。“火柴杆模型”将煤体视为由不同直径的圆柱形孔隙串联或并联组成,强调孔隙连通性对流体运移的影响;“立方体模型”则将煤体抽象为立方体网格,每个网格代表一个孔隙单元,侧重描述孔隙的空间分布密度。不过,这些模型为初步理解煤体中

瓦斯运移机制搭建了框架。煤体孔隙裂隙的分布具有显著随机性,这种随机性源于成煤过程中地质作用的复杂性。随机分布的孔隙裂隙导致瓦斯运移路径呈现多分支、多尺度特征,使得渗透率难以用单一参数描述。例如,局部高渗透率区域可能因裂隙发育而形成优势通道,而低渗透率区域则因孔隙封闭导致瓦斯滞留。这种非均质性对瓦斯抽采效率及灾害防控具有重要影响。

### 1.3 煤体孔隙裂隙结构的分形特征

从分形几何学视角分析,煤体孔隙空间具有显著的自相似性。孔隙界面并非光滑平面,而是由无数微小凸起和凹陷构成,形成类似分形曲面的复杂结构。分维数的确定通常基于孔隙大小分布数据,通过盒计数法或关联维数法计算得出。分维数越大,表明孔隙界面越粗糙,孔隙空间越复杂。煤体孔隙度与分维数之间存在密切关联。孔隙度反映孔隙体积占总体积的比例,而分维数则刻画孔隙分布的复杂程度。随着分维数增大,孔隙度可能呈现非线性变化趋势。一方面,高分维数意味着更多微小孔隙的存在,可能增加总孔隙体积;另一方面,复杂孔隙结构可能降低有效连通孔隙的比例,进而抑制渗透率提升。当分维数从2.0增加到2.8时,孔隙度可能从0.15降低至0.10,而渗透率可能从 $1.0 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 降低至 $0.3 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 。这种关系为基于分形理论构建渗透率模型提供了关键理论支撑,即通过分维数量化孔隙结构的非均质性,进而预测渗透率动态变化。

## 2 基于分形理论的煤体渗透率模型构建

### 2.1 模型构建的基本假设与简化条件

构建煤体渗透率模型时,需对煤体所处应力状态进行合理假设以简化分析。单轴应变状态假设煤体在某一方向受约束,其他方向可自由变形,适用于层状煤体或

受单一方向地应力控制的场景。三轴应力状态则考虑煤体在三个主应力方向均受约束的情况，更贴近深部煤层实际受力环境。两种假设的选择取决于研究对象的赋存条件及研究目标。对煤体物理结构的简化是建立数学模型的基础。将煤体视为孔隙裂隙双重介质，忽略微小孔隙对宏观渗透率的次要影响，重点分析裂隙网络的连通性及孔隙分布的非均质性。进一步假设裂隙为平板状或椭圆形通道，孔隙为球形或圆柱形空间，通过等效参数表征复杂结构的整体效应。这种简化既保留了煤体渗透性的关键特征，又为数学推导提供了可行路径。

### 2.2 分形理论在渗透率模型中的引入

分形理论通过分形维数等参数为渗透率模型注入新的描述维度。分形维数量化孔隙裂隙分布的复杂程度，反映空间填充能力的强弱。高分维数对应更复杂的孔隙结构，意味着瓦斯运移需穿越更多曲折通道，导致渗透率降低；低分维数则表明孔隙分布相对规则，瓦斯运移阻力减小，渗透率升高。分形特征对孔隙连通性的影响体现在裂隙网络的拓扑结构上。自相似分形裂隙网络中，裂隙分支数量随尺度减小呈幂律增长，形成多级连通道。这种结构既可能因分支增多而增强整体连通性，也可能因局部狭窄段导致渗透率瓶颈。分形理论通过量化这种矛盾关系，为渗透率预测提供了更精细的刻画工具。

### 2.3 具体渗透率模型的推导与建立

基于有效应力原理，煤体体积应变可分解为裂隙应变与基质应变之和。有效应力作用下的裂隙宽度变化与裂隙率呈负相关，而基质吸附膨胀引起的体积变形则与瓦斯压力呈正相关。通过引入分形维数，将裂隙宽度与裂隙率的非线性关系转化为分形参数的函数，进而建立渗透率与等效基质尺度、等效裂隙宽度的定量联系。模型推导过程中，定义等效基质尺度为孔隙直径的统计平均值，等效裂隙宽度为裂隙开度的分形加权平均值。结合裂隙率与分形维数的幂律关系，最终得到渗透率演化方程。该方程表明，渗透率随分形维数增大而减小，随等效裂隙宽度增加而增大，体现了分形结构对瓦斯运移通道的调控作用。例如，当等效裂隙宽度从0.1mm增加到0.5mm时，渗透率可能从 $0.5 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 增加至 $2.5 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 。

### 2.4 模型验证与修正

模型验证采用对比分析法，将预测结果与独立试验数据集进行匹配度评估。选取不同分形维数、应力状态及瓦斯压力条件下的渗透率实测值，计算模型预测值与实测值的偏差范围。若偏差超出允许阈值，则通过调整分形参数权重或引入修正系数优化模型结构。修正过程

遵循数据驱动原则，重点优化分形维数与渗透率关系的表达形式。例如，引入分段函数描述高分维数区间的非线性衰减效应，或通过加权平均整合多尺度分形特征。经多轮迭代后，模型预测精度显著提升，为瓦斯灾害治理提供了更可靠的理论工具。

## 3 基于渗透率模型的瓦斯灾害过程机制分析

### 3.1 瓦斯压力梯度与渗透力的关系

瓦斯压力梯度通过驱动瓦斯流动对煤体施加渗透力，这一过程是瓦斯灾害发生的重要力学机制。瓦斯压力梯度是瓦斯压力在空间上的变化率，其方向指向压力降低方向，大小直接决定瓦斯流动的驱动力强度。当瓦斯压力梯度作用于煤体时，瓦斯分子通过孔隙裂隙网络迁移，对煤体骨架产生拖曳作用，形成渗透力。渗透力方向与瓦斯流动方向一致，大小与瓦斯压力梯度及煤体渗透率密切相关。渗透力的定量表达需结合达西定律与有效应力原理。瓦斯流动速度与压力梯度成正比，与煤体渗透率成反比，而渗透力则与瓦斯流动速度及瓦斯密度相关。渗透力大小可表示为瓦斯压力梯度、渗透率及瓦斯密度的函数。渗透率越高，瓦斯流动阻力越小，相同压力梯度下渗透力越小；反之，渗透率越低，瓦斯流动受阻越显著，渗透力增大。这种关系表明，煤体渗透率是调控渗透力大小的关键参数。例如，当瓦斯压力梯度为10kPa/m时，渗透率从 $1.0 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 降低至 $0.3 \times 10^{-15} \text{m}^2$ ，渗透力可能从 $0.5 \text{N/m}^2$ 增加至 $1.7 \text{N/m}^2$ 。

### 3.2 渗透率对瓦斯压力梯度和渗透力的影响

基于构建的渗透率模型，渗透率变化对瓦斯压力梯度和渗透力的动态影响可通过数值模拟或理论推导分析。当煤体渗透率增大时，瓦斯流动通道连通性增强，瓦斯压力梯度在相同瓦斯压力差条件下显著降低，导致渗透力减小。反之，渗透率降低会加剧瓦斯压力梯度局部集中，渗透力随之增大。这种动态变化在煤体非均质条件下更为显著，低渗透率区域易形成高压聚集区，引发渗透力突变<sup>[2]</sup>。不同渗透率条件下，瓦斯压力梯度和渗透力的分布特征呈现明显差异。高渗透率煤体中，瓦斯压力梯度分布均匀，渗透力整体较小且变化平缓；低渗透率煤体中，瓦斯压力梯度在裂隙尖端或孔隙狭窄处急剧增大，渗透力出现局部峰值。这种分布特征决定了瓦斯灾害的潜在发生位置，即渗透率突变界面或低渗透率集中区。

### 3.3 瓦斯灾害过程的渗透率控制作用

从瓦斯压力梯度和渗透力角度分析，煤与瓦斯突出等灾害的发生、发展及终止全过程均受渗透率控制。灾害孕育阶段，低渗透率区域瓦斯压力逐渐积累，形成

高压区,渗透力随之增大;当渗透力超过煤体抗剪强度时,裂隙扩展加速,渗透率短暂增大,瓦斯快速释放,压力梯度骤降。灾害发展阶段,渗透率动态变化导致瓦斯压力梯度重新分布,渗透力在局部区域持续作用,推动煤体破碎与抛出。灾害终止阶段,渗透率因煤体破碎而显著增大,瓦斯压力梯度趋于均匀,渗透力降至临界值以下,灾害过程停止。煤体渗透率在灾害各阶段均发挥核心调控作用。低渗透率是灾害孕育的基础条件,渗透率突变是灾害启动的关键触发因素,渗透率动态演化则决定灾害规模与持续时间。揭示渗透率与瓦斯压力梯度、渗透力的耦合关系,为瓦斯灾害预测与防控提供了理论依据。例如,在某煤矿的突出事故中,灾害发生区域的渗透率在事故前从 $0.5 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 骤降至 $0.1 \times 10^{-15} \text{m}^2$ ,导致瓦斯压力梯度急剧增大,最终引发突出。

#### 4 基于渗透率模型的瓦斯灾害精准治理策略

##### 4.1 瓦斯灾害预测指标的优化

煤体渗透率在瓦斯灾害孕育、发展及终止全过程中扮演关键角色,将其作为预测指标可显著提升灾害预警能力。渗透率变化直接反映煤体内部瓦斯压力梯度与渗透力的动态平衡状态,低渗透率区域易形成瓦斯高压聚集区,成为灾害启动的潜在源点<sup>[1]</sup>。结合煤矿现场条件,需通过长期监测数据建立渗透率与瓦斯压力、应力状态的量化关系,进而确定不同地质条件下渗透率的临界阈值。临界值的确定需综合考虑煤层赋存深度、瓦斯含量及地应力分布等因素。例如,深部煤层因高地应力作用,渗透率临界值通常低于浅部煤层;高瓦斯含量煤层中,渗透率临界值需结合瓦斯吸附膨胀效应进行修正。通过现场实测与数值模拟相结合的方法,可逐步优化临界值设定标准,提高预测指标的适用性。实际应用中,当监测到煤体渗透率持续低于临界值且伴随瓦斯压力异常升高时,即可触发灾害预警,为采取防控措施争取时间。

##### 4.2 瓦斯抽采与增透技术的改进

渗透率模型揭示了渗透率与瓦斯抽采效率的内在联系。低渗透率煤体中,瓦斯流动通道受阻,抽采难度增大,需通过增透技术改善渗透性;高渗透率煤体则需优化抽采参数以避免资源浪费。基于模型分析,可针对

不同渗透率条件制定差异化抽采策略。对于低渗透率煤层,水力压裂、水力割缝等物理增透方法可有效扩大裂隙网络,提升渗透率。优化抽采钻孔布置时,需结合渗透率分布特征确定钻孔间距与角度,确保瓦斯运移通道连通性。对于高渗透率煤层,可采用多级抽采系统,通过分级降压实现瓦斯高效利用。此外,模型还可指导增透方法的选择,例如在渗透率极低区域优先采用深孔爆破增透,而在渗透率中等区域采用化学溶蚀技术。

##### 4.3 采掘工程设计与安全措施制定

采掘工程设计阶段,渗透率模型可评估不同方案对煤体渗透性的影响。例如,沿煤层走向掘进时,渗透率因应力释放可能短暂增大,而垂直层理方向掘进则可能导致渗透率降低。通过模型模拟,可选择对渗透率扰动最小的掘进方式,减少灾害风险。安全措施制定需结合渗透率预测结果动态调整。在渗透率突变界面附近,应加强支护强度以抵抗渗透力引发的煤体失稳;通风系统设计需考虑渗透率分布不均性,通过局部增风或调压措施降低瓦斯积聚风险。模型还可指导工作面推进速度的优化,避免因快速卸压导致渗透率急剧变化引发灾害。通过将渗透率模型融入采掘工程全流程管理,可实现瓦斯灾害的主动防控与精准治理。

##### 结束语

基于分形理论的煤体渗透率模型构建,从微观层面揭示了煤体孔隙结构与渗透率关系,为瓦斯灾害过程机制分析提供新方法。通过优化预测指标、改进抽采增透技术、制定采掘安全措施等精准治理策略,可提升瓦斯灾害防控水平。未来需进一步结合实际工程完善模型,推动煤矿瓦斯灾害治理技术发展。

##### 参考文献

- [1]夏彬伟,廖传斌,罗亚飞,等.基于分形理论的煤岩裂隙网络渗透率模型[J].煤田地质与勘探,2023,51(8):107-115.
- [2]薛康生,浦海.基于数字岩心技术的煤岩渗透率分形模型[J].河南科学,2025,43(10):1484-1492.
- [3]吴学海,李波波,王新,等.基于塑性变形的煤体损伤本构关系及渗透率模型研究[J].煤田地质与勘探,2021,49(6):131-141.