

工作面底板突水危险性评价研究综述

刘帅康

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2026年4月22日; 录用日期: 2026年5月25日; 发布日期: 2026年7月20日

摘要

我国煤矿开采逐步向深部拓展, 底板突水灾害防控已成为决定矿井安全生产的关键问题。传统底板突水危险性评价方法多围绕隔水层厚度、水压等单一因素开展静态分析, 既无法体现采动过程中岩层阻水性能的动态劣化规律, 也难以揭示其与应力场、渗流场的耦合作用机制。文章系统梳理了底板突水机理、岩层阻水性能表征、采动效应影响规律、危险性评价方法四个领域的研究进展。现有研究已完成从单一因素经验判断到多场耦合数值模拟、微震监测与机器学习结合的综合评价体系的转变, 但岩层阻水性能的定量表征尚未形成统一标准, 采动效应与阻水性能的动态耦合机制亦未完全明确。后续研究可重点构建“阻水性能-采动损伤-渗流演化”一体化动态评价模型, 结合智能化监测预警技术, 进一步提高底板突水危险性评价的精度与工程适用性。

关键词

底板突水, 岩层阻水性能, 采动效应, 危险性评价, 多场耦合

A Review of Research on Risk Assessment of Water Inrush from Coal Mine Working Face Floor

Shuaikang Liu

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

Received: April 22, 2026; accepted: May 25, 2026; published: July 20, 2026

Abstract

As China's coal mining gradually extends to deeper depths, the prevention and control of water inrush from the floor has become a key issue determining safe mine production. Traditional risk assessment methods for floor water inrush mostly rely on static analyses focusing on single factors such

as aquiclude thickness and water pressure. These methods fail to reflect the dynamic deterioration of water-resisting properties of rock strata during mining and can hardly reveal the coupled mechanism with the stress field and seepage field. This paper systematically reviews the existing research in four areas: mechanism of floor water inrush, characterization of water-resisting performance of rock strata, influence of mining-induced effects, and risk assessment methods. Current studies have evolved from empirical judgment based on single factors to a comprehensive assessment system involving multi-field coupled numerical simulation, microseismic monitoring, and machine learning. However, a unified standard for quantitative characterization of rock water-resisting performance has not been established, and the dynamic coupling mechanism between mining-induced effects and water-resisting performance remains incompletely clarified. Future research should focus on establishing an integrated dynamic assessment model of “water-resisting performance, mining-induced damage, seepage evolution”. Combined with intelligent monitoring and early-warning technologies, this will further improve the accuracy and engineering applicability of risk assessment for coal floor water inrush.

Keywords

Floor Water Inrush, Rock Water-Resisting Property, Mining Effect, Risk Assessment, Multi-Field Coupling

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

煤矿底板突水是我国矿井水害的主要类型之一，具有突发性强、破坏程度高、防治难度大等特点。当前，随着浅部煤炭资源逐步枯竭，国内煤矿开采深度持续增加，华北型煤田多数矿井已进入带压开采阶段，煤层底板承受的奥陶系灰岩含水层水压不断升高，底板突水风险随之上升。据统计，近年发生的重特大矿井水害事故中，底板突水占比超过 60%，直接威胁矿工生命安全，也阻碍煤炭资源的安全高效开采。

底板突水危险性评价是水害防控的核心环节，重点在于判断底板隔水层能否有效阻隔承压含水层水压，以及采动扰动是否会诱发导水通道贯通。传统评价方法以突水系数法、安全隔水层厚度法为代表，多基于经验公式或简单力学模型，虽在工程实践中得到广泛应用，但存在明显局限：其一，假设隔水层为均质完整岩体，未考虑岩层内部裂隙、层理、构造等非均质特征对阻水性能的影响；其二，对采动效应的刻画过于简化，无法反映回采过程中应力重分布、塑性区扩展、裂隙动态演化等过程；其三，未定量分析阻水性能与采动效应的耦合作用，评价结果常偏于保守或过于激进。

近年来，岩石力学、渗流力学、地球物理探测及人工智能等学科交叉发展，底板突水危险性评价研究逐步从单一因素分析转向多因素综合研判，从静态评估转向动态推演，从经验判断转向智能预测，如表 1 所示。现有研究多采用相似材料模拟、数值仿真、微震监测、机器学习等手段，分析采动条件下岩层阻水性能的劣化规律，及其与突水风险的关联机制。但当前研究仍存在核心概念界定模糊、评价指标体系不统一、岩层阻水与采动效应的耦合作用机制阐释不足等问题，需要进一步系统梳理。

本文系统梳理岩层阻水性能与采动效应耦合下工作面底板突水危险性评价的研究进展，首先归纳底板突水机理的现有理论成果；其次分析岩层阻水性能的定量表征方法及主要影响因素；再探讨采动效应对底板岩体损伤、渗流特性的影响规律，进而总结现有各类危险性评价方法的原理、适用场景及局限；最后明确现有研究的不足，提出未来可能的研究方向，为煤矿底板水害防控工作提供理论参考。

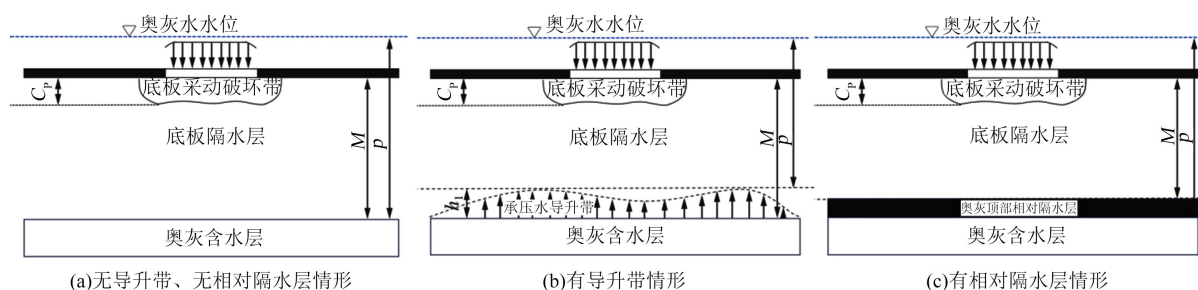
Table 1. Major developments and changes in the water inrush coefficient method**表 1.** 突水系数法主要发展与变化

时间	公式形式	特征
60 年代		建立了水压 P 与隔水层厚度 M 的直接线性关系，奠定了突水系数法的基础。
70 年代		在隔水层厚度中扣除了采动引起的底板破坏深度 C_p ，使评价更符合开采实际。
80 年代初		进一步考虑了高承压水对隔水层的自然劈裂作用，引入了承压水导升高度 h_1 。
80 年代末		针对华北型煤田特征，引入了奥陶系顶部风化壳作为相对隔水层 h_2 的增厚作用。
2009 年至今		回归初始形式，通过设定不同的临界突水系数值来区分正常与构造破坏地段，简化应用。

2. 底板突水机理研究现状

底板突水机理是危险性评价的理论基础，核心是阐明承压水受采动扰动后突破底板隔水层进入采掘空间的物理过程。围绕该问题，国内外学者已从不同角度开展大量研究，形成多个代表性理论模型。

从力学机制分析，底板突水是采动应力场与承压水渗流场耦合作用下，底板岩体损伤演化至失稳破坏的过程。早期研究多依托材料力学或弹性力学框架，将底板简化为梁板结构展开分析，其中基于薄板理论的底板突水模型提出，采空区底板在矿压与水压共同作用下产生弯曲变形，当拉应力超过岩层抗拉强度时底板发生破断，进而形成突水通道。该理论对完整底板的突水现象解释适用性较好，但无法覆盖含断层、裂隙等非连续结构的复杂工况。

**Figure 1.** Base plate strip distribution**图 1.** 底板分带情况

针对含构造底板突水问题，现有研究已证实地质结构是影响突水过程的核心要素。吴焘等[1]采用数值模拟方法，明确完整型煤层底板奥灰突水依次经历递进补给、裂隙扩展、渗透增加、通道形成四个阶段，同时提出底板垂向结构可划分为采动破坏导水带、采动裂隙增生带、完整岩层带、承压渗透增生带、承压原始导升带的“五带”模型(如图 1 所示)，相比传统“下三带”理论，该模型对底板垂向分区特征的刻画更为精细。范军平等[2]聚焦构造诱发突水机制，基于尖点突变理论构建采动与高承压水耦合作用下的底板破坏力学模型，研究表明底板存在陷落柱或断层时突水风险明显提升，且断层面剪应力随工作面推进呈先增后减的变化规律，为构造区域的突水预测提供了力学支撑。

深部开采场景中，动力扰动是底板突水的重要诱发因素。卢兴州[3]开展静动载荷联合作用下的巷道底板突水机理研究，将底板隔水关键层简化为四边固支厚板，分别推导得到静动载叠加条件下的挠度方程、内力表达式及突水力学判据。研究结果显示，动载作用会使静载与动载应力场产生叠加效应，导致底板应力集中程度与影响范围向深部扩展，底板破坏深度和范围明显增大，有效隔水层厚度快速降低。王俊光等[4]通过相似模拟试验验证，扰动幅值和频率的提升会造成突水压力下降、突水时间提前，且底板对扰动幅值的敏感度高于频率；该研究进一步在 Hoek-Brown 准则基础上，建立了引入岩体扰动系数的 P-M 临界方程，综合预测准确率可达 87.6%。

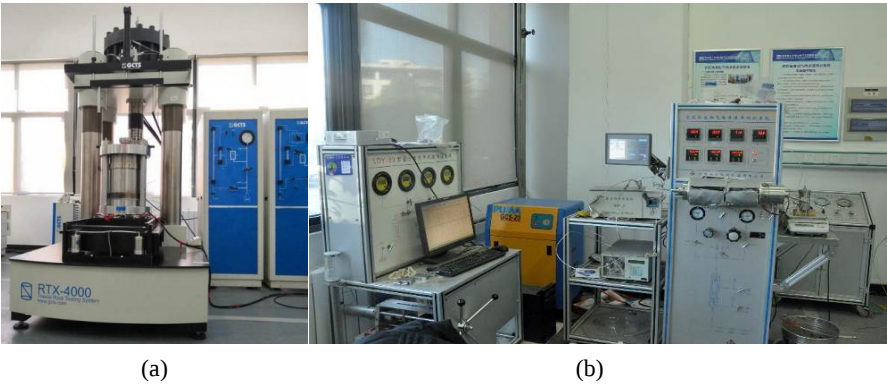


Figure 2. (a) Overall view of the universal testing system; (b) Schematic diagram of the fully automated rock gas permeability testing machine

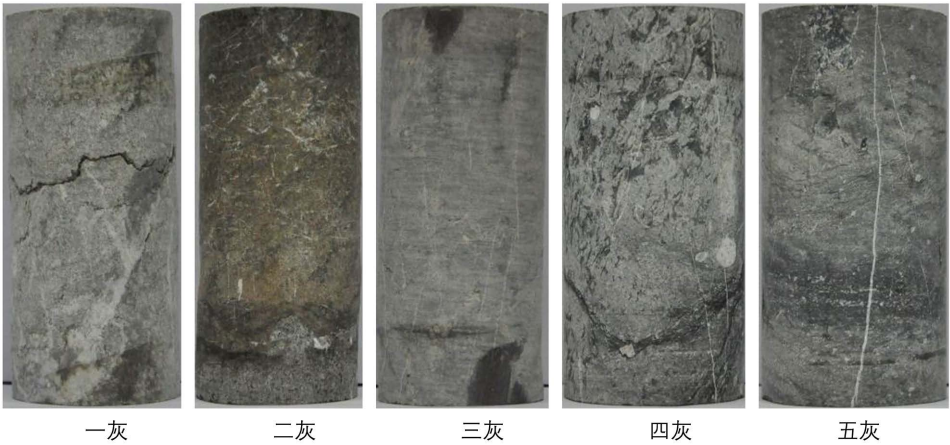
图 2. (a) 万能试验系统全貌图；(b) 岩石全自动气体渗透率测试试验机图

底板突水并非单纯的力学破坏问题，而是涉及应力场、渗流场、损伤场多场耦合的过程。刘伟韬等 [5] 构建了考虑电场特性的非饱和岩石渗流 - 应力 - 损伤多场耦合模型，经 COMSOL 有限元求解验证：3 MPa 水压下底板不会形成突水通道，4 MPa 水压下回采至 120 m 时，采空区两侧会形成连通承压含水层与采空区的突水通道，模拟结果与突水系数法的判断结论一致，如图 2 所示。该研究同时建立了基于 Wenner 装置的视电阻率正演成像模型，引入视电阻率变化率作为动态识别指标，可有效捕捉低阻区向上扩展、高阻区回缩等突水前兆信息，为突水过程的电法监测提供了理论支撑。

现有突水机理研究的发展趋势主要包含两方面：研究介质假设从均质连续向非均质非连续转变，裂隙、断层等结构面的控灾作用得到更多关注；分析维度从单一静力分析向静动载耦合分析拓展，动力扰动的致灾效应被纳入研究框架，且研究重点逐渐从力学破坏过程转向多场耦合演化规律，渗流 - 应力 - 损伤的相互作用机制已逐步明晰。当前机理研究多针对特定地质条件或简化模型展开，缺乏对岩层阻水性能这一核心要素的系统性刻画，如何将岩层固有阻水能力与采动诱发的损伤演化过程有机统一，仍是待突破的理论难点。

3. 岩层阻水性能研究进展

岩层阻水性能是底板隔水层抵抗承压水向上渗流或突破的能力，是底板突水危险性评价的关键参量。传统研究多以隔水层厚度、岩性组合作为阻水性能的核心表征指标，后续研究逐步发现，岩层非均质性、裂隙发育程度、水力连通性及应力状态等，均会对阻水性能产生显著影响。试验岩样照片见图 3。



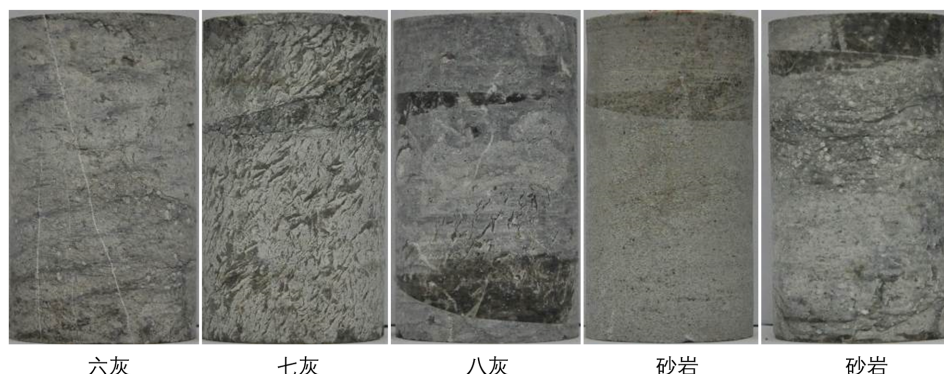


Figure 3. Photograph of rock sample
图 3. 岩样照片

岩层阻水性能是多因素综合指标，内涵涵盖三类要素：一是岩层自身的物理力学属性，包括强度、变形模量、渗透系数等；二是内部结构特征，包括层理、节理、裂隙的产状与密度；三是赋存边界条件，包括水压、地应力。近年来，已有学者尝试对阻水性能开展定量表征，改变了过往仅以定性描述为主的研究现状。任正瑞等[6]在底板突水危险性评价研究中，首次将煤层底板隔水层阻水性能纳入评价指标体系，与含水层性能、地质条件、煤层条件共同作为决策层指标，通过 FAHP-TOPSIS 模型实现阻水性能与其他影响因素的耦合计算，推动阻水性能从常规背景参数向主动评价指标转变。

当前阻水性能的定量表征主要沿两个路径推进。一类基于岩体质量分级方法，借鉴岩石力学领域的 RMR、Q 系统等分类体系，对岩层厚度、岩芯采取率、裂隙发育程度、岩石强度等参数加权求和，建立阻水性能分级标准。另一类基于渗流力学方法，通过原位测定或数值反演获取底板岩层的渗透系数、孔隙率、储水系数等水力参数，结合实际水压分布计算岩层阻水能力。刘江斌等[7]建立的孔隙-裂隙型多孔介质数值模拟模型进一步提升了定量表征的精细度，该模型同时考虑完整岩体的渗透性与裂隙的导水能力，模拟发现水压在裂隙位置处呈现“下凹”趋势，且裂隙内部压力梯度小于两侧多孔岩体，为复杂介质条件下的阻水性能模拟计算提供了可行方法。

影响岩层阻水性能的因素可分为内在因素与外在因素两类。内在因素包括岩性组合、成岩作用、胶结程度、原生裂隙发育特征等。泥岩、页岩等塑性岩层的阻水性能优于砂岩、灰岩等脆性岩层，完整岩体的阻水性能优于破碎岩体。外在因素主要包括地应力状态、承压水压、采动扰动等。张雪莲[8]采用五图双系数法对潞安矿区李村煤矿 3 号煤层底板奥灰水突水危险性进行评价时发现，ZK4 钻孔处隔水层厚度小、总体抗压强度低、承受的奥灰水压相对较高(5.18 MPa)，被判定为非直通式危险区，说明阻水性能是厚度、强度与水压协同作用的结果，单一指标难以全面反映。

阻水性能在采动过程中并非恒定不变，会呈现动态劣化特征。采动应力重分布导致底板岩层经历加载-卸载-损伤的应力路径，原有裂隙张开或扩展，新裂隙萌生并贯通，岩层渗透系数可能增大数个数量级，阻水性能随之急剧下降。宋子琦[9]在潘二矿的微震监测研究显示，底板破坏深度达 25~30 m，虽未波及富水性较强的含水层，可印证采动对阻水性能的削弱效应。武大川通过数值模拟发现，断层构造影响下的巷道底板鼓起量是无断层情况的 2.6 倍，底板挠度达 644 mm，破坏区线应变参数达 67，可说明构造弱面对阻水性能的损伤存在放大效应。

当前岩层阻水性能研究仍存在明显不足。阻水性能的定义和量化标准尚未统一，不同研究者采用的指标体系差异较大，研究结果难以横向比较。现有研究多将阻水性能视为静态属性，即便考虑动态变化也多采用简化的折减系数，缺乏基于损伤演化的动态本构模型。阻水性能与采动效应的耦合机制研究尚

不成熟，建立“采动损伤程度-渗透性演化规律-阻水性能时变特征”的定量关系，是后续需要突破的核心问题。

4. 采动效应及其对底板的影响

采动效应是煤矿开采活动诱发围岩应力场重分布、岩体结构损伤演化、渗流场调整等一系列物理力学响应的总称，是触发底板突水通道形成的核心动力因素，影响程度由开采条件、地质环境、工程参数共同决定。

采动应力场变化是分析采动效应的基础。工作面回采过程中原岩应力平衡被打破，采空区上方岩层重量向两侧煤柱转移，形成超前支承压力与侧向支承压力。底板岩层在支承压力作用下产生压缩、剪切或拉伸变形，应力状态从三向受压逐渐转为卸压与应力集中交替的模式。卢兴州等的数值模拟结果显示，静载与动载应力场叠加后，底板应力集中程度与影响深度明显提升，底板破坏深度和范围同步扩大，有效隔水层厚度被压缩，突水风险随之上升。张世平等[10]对担水沟煤矿 9104 工作面高精度微震监测发现，96.6%的微震事件分布在煤层底板下 0~24 m 范围内，直接印证了采动影响深度与底板破坏范围的对立关系。

底板破坏带发育规律是采动效应最直观的外在表现。结合大量现场实测与数值模拟结果，底板破坏深度与采高、工作面斜长、开采深度、底板岩性等因素直接相关。通常采高越大、工作面斜长越长、开采深度越大，底板破坏深度也越大；坚硬完整底板的破坏深度偏小，软弱破碎底板的破坏深度偏大。宋子琦[9]对潘二矿的监测数据显示，11023 工作面底板破坏深度为 25~30 m，11411 工作面为 22~27 m，两个工作面的破坏深度均波及富水性较弱的 C 组灰岩含水层，但未导通强含水层，说明特定开采与地质条件下，采动破坏深度与突水之间存在安全阈值。牛俊伟在董家河煤矿 22517 工作面布置的微震监测系统，测得底板破坏深度约为 11.01 m，与钻孔声波仪测试结果的误差仅 0.22 m，验证了微震技术测定底板破坏深度的可靠性。

断层等地质构造对采动效应具有显著的放大作用。断层带本身岩体破碎、胶结程度差，在采动应力扰动下极易活化，成为优先导水通道。黄刚等[11]在潘二煤矿开展的全光纤微震监测显示，断层与煤层变薄异常区附近微震事件数量增多、强度增大，相对大能量事件主要分布在断层异常区的底板位置。张磊[12]针对新驿煤矿巷道掘进过大落差断层的研究发现，当掘进工作面距离断层 4~6 m 时，断层区出现位移，标志断层活化，塑性区沿断层带逐渐扩展，底板方向最大塑性区范围达 10 m，可形成底板含水层沿断层的突水通道。上述研究证实，构造与采动效应的耦合是底板突水的重要诱因。

动力扰动是采动效应的特殊形式，相关研究近年逐步增多。矿山地震、顶板垮落、爆破作业等产生的动载扰动，可在极短时间内对底板施加冲击荷载，诱发底板结构瞬态失稳。王俊光等[4]通过相似模拟试验得到，动力扰动下底板突水的前兆特征为土压力下降、水压力急剧上升、声发射事件大量出现。卢兴州[3]采用单因素分析法对比计算，各致灾因素对底板突水的影响程度为动载幅值 > 动载持时 > 承压水水压，当动载幅值超过临界值 20 MPa 且作用时间在 20 ms 内时，底板隔水层破坏概率显著上升。该结论可用于指导深部高应力矿井的突水防控，评价相关风险时需充分考虑动载因素的权重。

采动效应会直接改变底板渗流场分布特征。采动裂隙的萌生和扩展既改变底板岩体的力学特性，也会提高岩层渗透性，为承压水导升提供通道。吴焘等[1]的研究显示，奥灰水在承压水压力作用下沿隐伏裂隙逐步导升至十四灰含水层，与工作面底板破坏带沟通后即可发生底板突水，整个过程符合“采动损伤-渗透增强-水压驱动-通道贯通”的演化逻辑。刘伟韬等[5]通过多场耦合模拟进一步得到视电阻率随采动过程的动态变化规律，低阻区向上扩展、高阻区回缩等电性特征可作为突水前兆识别指标，为采动效应的实时监测提供了物性依据。

采动效应研究的核心科学问题,是定量描述采动应力场与底板岩体响应的本构关系,实现其与渗流演化过程的耦合。现有研究已完成从定性描述到定量模拟、从单应力场分析到多场耦合分析的转变,但动载扰动的随机特征、构造分布的隐蔽性、岩体参数的不确定性,仍会导致采动效应预测结果出现偏差。

本研究仅针对特定地质条件下的薄煤层开采场景开展模拟分析,未考虑多煤层重复采动的累积影响,后续可扩大原位监测样本覆盖范围,建立适配多开采场景的数据驱动型采动效应动态表征模型,为矿井水害危险性评价提供更精准的采动参数支撑。

5. 底板突水危险性评价方法综述

底板突水危险性评价是煤矿水害防控由被动治理转向主动预警的核心技术环节。现有评价方法随理论认知深化、技术手段迭代,逐步从单因素经验判断向多因素综合定量评价、静态分区向动态预警、确定性分析向不确定性智能预测发展。本节按方法类型梳理现有评价体系的研究进展。

传统评价方法以突水系数法、安全隔水层厚度法、突水临界水压法为主,其中突水系数法操作简便,是目前工程实践中应用最广的方法。该方法的核心逻辑是计算单位厚度隔水层承受的水压,将其与临界突水系数对比,以此判断突水风险。杨鹤鹤等[13]运用突水系数法分析潘家窑煤矿8号煤层底板突水性,结合多组钻孔数据,将研究区划分为相对安全区、威胁区和危险区。郝耀军[14]针对西曲矿的研究中,联合使用突水系数法与安全水头值计算法评价各煤层突水危险性,判定所有煤层均满足开采安全要求。

突水系数法存在明确的应用局限:其假设隔水层为均质体,未考虑岩性组合、裂隙发育程度、构造分布等地质要素的影响,且临界突水系数的选取高度依赖经验,不同矿区的取值差异明显。张雪莲[8]的对比研究显示,在李村煤矿ZK4钻孔位置,突水系数法与五图双系数法的评价结果不一致,前者对突水风险的估计偏低,说明传统评价方法在复杂地质条件下的适用性存在局限。

多因素综合定量评价方法是对传统评价方法的重要拓展。这类方法先构建多层次评价指标体系,通过层次分析法、熵权法、模糊数学、灰色系统理论等工具确定各因素权重,最终结合地理信息系统(GIS)实现评价结果的空间可视化。尹武平[15]采用层次分析法评价高阳煤矿9#煤层底板突水危险性时,选取含水层压力、有效水层等效厚度、隔水层岩层位置及厚度、断层分布、陷落柱分布作为评价指标,借助GIS完成分区制图,评价结果与实际突水点、钻孔水文地质条件吻合度较高。杨茹蕙等[16]采用区间层次分析法与熵权法结合的博弈论组合赋权方法,确定含水层厚度、富水性、水压、隔水层厚度等8个主控指标的权重,构建脆弱性指数模型完成评价分区。任正瑞等[6]将隔水层阻水性能纳入评价指标体系,运用FAHP-TOPSIS模型确定10个指标的主观权重,以生成的相对贴适度作为突水危险系数进行排序,最终将评价结果划分为6个等级区间。这类方法可整合多源信息,但权重确定过程仍存在一定主观性,也难以充分反映各指标间的交互作用与非线性关系。

数值模拟方法可为底板突水危险性评价提供过程化分析路径。FLAC3D、COMSOL、RFPA等数值软件可模拟采动条件下应力场、渗流场、损伤场的时空演化过程,以此判断突水通道形成的临界条件。范军平等[2]采用FLAC3D模拟分析底板存在陷落柱和断层时,工作面回采过程中的底板破坏及导水通道演化规律。刘江斌等[7]建立孔隙-裂隙型耦合模型,研究不同裂隙结构参数对底板导水能力的影响,明确了水压和水流速度的空间分布变化规律。数值模拟方法可定量刻画多场耦合过程,但计算精度高度依赖岩体力学参数、初始条件和边界条件的准确性,上述参数在工程实践中往往难以精准获取,因此该方法暂不适合作为常规评价工具大范围推广。

地球物理监测与预警是底板突水动态评价的核心技术路径。微震监测技术通过捕捉岩体破裂产生的微震信号,可实时反演底板破坏的空间位置、能量大小与时间序列,直接反映岩体损伤演化过程,为突水危险性评价提供依据。张世平等[10]采用高精度微震监测技术,研究担水沟煤矿大采高工作面围岩破坏

规律,明确了工作面底板破坏深度及突水脆弱区分布范围。郝宪杰等[17]基于赵固一矿 16091 工作面的微震与水位监测数据,建立微震-水位综合预警指标,研究发现微震处于高频次、高能量时段时,工作面水位下降、涌水量增大,反之水位回升,二者时空关联性明显,最终确定综合预警指标阈值为 0.30,经现场应用验证预警效果良好。宋子琦[9]将微震监测数据与深度神经网络结合,融合地质构造、水文地质、采动参数及底板破坏深度等 15 项核心指标,建立底板突水概率预测模型,经检验模型预测误差可控制在 0.2 范围内。黄刚等[11]研发的全光纤微震监测系统,提升了监测灵敏度与信噪比,为底板突水连续实时预警提供了更可靠的技术支撑。

机器学习方法是目前底板突水预测领域的研究热点。底板突水是多因素耦合作用下的非线性过程,传统统计模型难以充分刻画各影响因素与突水风险的内在关联,机器学习算法可自动学习样本数据中特征与风险的映射关系,有效适配这一复杂问题的建模需求。张志等[18]提出基于蜣螂优化算法-支持向量分类(DBO-SVC)的煤层底板突水预测模型,选取 13 种主要控制因素作为输入指标,通过 DBO 算法优化 SVC 参数,与 KPCA-DBO-SVC、DBO-BP、BP 模型对比结果显示,DBO-SVC 模型可有效避免局部最优问题,收敛速度与识别精度均有明显提升。李晨曦等[19]针对突水案例样本量不足的问题,采用 K 近邻算法(KNN)以及梯度提升决策树与逻辑回归组合算法(GBDT + LR)开展测试,结果显示当样本数量达到 18 时,模型预测精度趋于稳定,且 KNN 与 GBDT + LR 在小样本条件下的预测精度高于常规模型,为地质勘探程度较低、数据获取困难的矿区提供了可行的突水预测方案。段鑫[20]系统评估了经验分析、数值模拟、大数据与机器学习三类方法的适用性与局限性,提出多方法融合的底板突水预测模型构建思路。底板突水危险性评价方法的演进趋势可归纳为三方面。如表 2 所示,第一是评价时效从静态分区转向动态预警,传统方法仅能输出相对固定的危险分区结果,微震监测结合机器学习的技术路径可实现风险的动态连续更新。第二是技术路径从单一方法应用转向多方法融合,目前已出现模糊层次分析法-逼近理想解排序法结合地理信息系统、微震监测与神经网络耦合、数值模拟与监测数据同化等组合方案,能够发挥不同方法的互补优势。第三是底层逻辑从经验驱动转向数据驱动,现有监测体系不断完善、实测数据持续累积,数据驱动的智能预测方法在后续研究中的适用性会进一步提升。本研究当前主要针对华北型煤田典型水文地质条件开展方法验证,未涉及南方岩溶发育区等特殊地质条件下的适配性分析,后续研究可补充不同地质背景的样本训练,进一步优化模型的泛化能力。

Table 2. Comparison of methods for assessing the risk of water intrush from the bottom plate
表 2. 底板突水危险性评价方法对比

评价方法类型	代表性方法	核心原理	优势	局限性	适用场景
传统经验方法	突水系数法、安全隔水层厚度法	基于经验公式计算水压与隔水层厚度比值	简便快捷,参数易获取	忽略岩层非均质性,临界值经验性强	地质条件简单、资料有限的初步评价
多因素综合评价	层次分析法、FAHP-TOPSIS、脆弱性指数法	构建多指标层次体系,加权综合评分	综合多源信息,结果可视化	权重确定存在主观性	区域尺度危险性分区
数值模拟方法	FLAC3D、COMSOL 多场耦合	求解应力-渗流-损伤耦合控制方程	刻画时空演化过程,揭示物理机制	参数获取困难,计算成本高	典型工作面机理分析与方案优化
地球物理监测	微震监测、电法监测	实时捕捉岩体破裂或电性变化信号	动态连续,可识别前兆信息	设备成本高,信号解释存在多解性	重点工作面的实时预警
机器学习预测	支持向量机、神经网络、KNN	从样本数据中学习输入-风险映射关系	处理非线性问题,预测精度高	依赖训练样本质量,可解释性弱	数据积累较多的矿区智能预测

6. 研究评述与展望

6.1. 现有研究评述

综上分析,我国煤层底板突水危险性评价领域已形成从机理认识到方法技术的完整研究体系。理论研究方面,底板突水机理由早期力学简化模型演进为多场耦合损伤演化模型,对断层活化、动载扰动、非饱和渗流等过程的认知逐步深化;岩层阻水性能由静态经验参数调整为多因素综合表征,其动态劣化特征已进入研究视野;采动效应的定量刻画由单一破坏深度经验公式拓展为应力-损伤-渗流协同演化数值模拟。方法技术方面,危险性评价依次经历突水系数法、多因素综合评价、数值模拟、微震监测、统计学习、深度学习的迭代,评价精度与时效性均有提升。现有研究仍存在部分瓶颈待突破。当前岩层阻水性能相关研究存在两方面核心局限。首先是理论框架层面的概念分歧,不同研究者对阻水性能的界定尚未形成共识,部分研究侧重岩层自身物理力学属性,部分强调结构面的控制作用,也有研究直接将其等同于隔水层厚度与水压的比值。概念界定的不统一直接导致评价指标体系碎片化,不同研究结论的可比性较低。同时现有研究对阻水性能在采动过程中的动态演化规律刻画不足,多数评价方法仍将阻水性能作为静态输入参数,和煤矿井下工程实际情况存在明显偏差。

其次是阻水性能与采动效应的耦合机制尚不清晰。尽管多场耦合数值模拟技术已相对成熟,但“采动损伤-渗透性演化-阻水能力劣化”三者间的定量本构关系仍未建立。现有研究多将渗透系数的变化简化为损伤变量的经验函数,未对裂隙几何特征、连通程度、水压驱动等细观过程开展机理性分析,导致评价结果对参数选取高度敏感,难以形成普适性结论。危险性评价方法存在适用场景分化问题。以突水系数法为代表的传统方法操作简便,目前仍是工程实践中的主流应用方案,但其假设条件偏于简化,部分复杂水文地质条件下易出现评价偏差。机器学习类智能评价方法精度更优,但训练过程对样本数据的体量与质量要求较高,多数生产矿井难以满足相关条件,难以大范围推广。当前工程领域仍亟待开发精度与实用性兼顾的评价方法。

评价结果的工程验证环节存在明显短板。现有研究多以方法的正演计算精度和历史突水点回溯匹配度为验证依据,缺乏工作面回采全周期的前瞻性预测及现场效果跟踪。同时,目前尚未形成体系化的技术路径,难以实现评价结果向可操作防治水措施的有效转化,以及预警指标与注浆加固、卸压开采等工程手段的有机联动。

6.2. 未来研究展望

基于上述评述,本文认为未来研究应重点关注以下方向。

第一,建立岩层阻水性能的标准化表征体系。建议从岩体质量、渗透特性、力学强度和结构完整性四个维度构建阻水性能评价指标体系,明确各指标的测试方法与分级标准。同时,应发展基于现场原位测试(如钻孔压水试验、孔内电视成像)的阻水性能直接测定技术,减少对室内试验和经验参数的依赖。在此基础上,开展不同矿区、不同岩性组合条件下阻水性能的数据库建设,为区域评价提供统计基础。

第二,发展“阻水性能-采动损伤-渗流演化”一体化的动态耦合模型。应突破现有模型中将渗透系数视为损伤变量函数的简化处理,从裂隙细观演化机理出发,建立基于裂隙密度、开度、连通率的渗透张量演化方程,并与应力场、损伤场控制方程联立求解。同时,应将岩层固有的阻水性能作为初始条件嵌入模型,实现阻水性能与采动效应的内在统一。模型参数的反演辨识应充分利用微震、电法、水位等多源监测数据,形成“监测-反演-预测”的闭环系统。

第三,构建“机理驱动+数据驱动”的混合评价模型。纯机理模型受限于参数不确定性,纯数据模型受限于样本质量和可解释性,两者融合是提升评价性能的有效路径。建议以多场耦合数值模拟生成大量训

练样本, 弥补现场突水案例稀少的不足; 在此基础上训练机器学习模型, 同时引入物理约束(如质量守恒、能量守恒)增强模型的物理一致性。混合模型可在保持较高精度的同时, 降低对现场实测样本的依赖。

第四, 推进评价方法的工程实用化转型。应针对不同地质条件矿井开发分级分类的评价技术指南, 明确各类方法的适用条件和操作流程。对于条件简单、资料有限的矿井, 可优化传统方法的参数取值; 对于条件复杂、数据丰富的工作面, 应积极推广应用微震监测与智能预警系统。同时, 应加强评价方法与防治水措施的联动研究, 建立“评价-预警-治理”一体化的技术体系, 使评价结果真正服务于工程决策。

第五, 深化动载扰动条件下底板突水危险性评价研究。随着开采深度增加, 矿山地震、顶板垮落等动力现象频发, 其对底板稳定性的冲击效应不容忽视。未来应开展更多动载扰动下底板岩体动力响应特性试验, 建立考虑动载幅值、频率、持时等因素的动态评价模型, 并将动载风险纳入日常评价指标体系。

总之, 底板突水危险性评价正处在一个从静态经验判断向动态智能预警跨越的关键时期。岩层阻水性能与采动效应的耦合研究是这一跨越的核心科学问题, 需要在理论深化、技术创新和工程应用三个层面协同推进。可以预见, 随着多场耦合理论、智能监测技术和人工智能算法的持续突破, 底板突水危险性评价将朝着更精确、更动态、更智能的方向发展, 为我国深部煤炭资源的安全高效开采提供更加坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 吴焘, 王泽田, 华伟, 等. 承压含水层上完整型煤层底板突水机制模拟[J]. 现代矿业, 2025, 41(11): 162-168.
- [2] 范军平, 张靖, 苏怡瑶, 等. 采动作用下构造诱发底板突水机理及微震监测防控研究[J]. 煤炭技术, 2025, 44(10): 171-177.
- [3] 卢兴州. 静动载荷作用下巷道底板突水机理及关键致灾因素分析[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2025.
- [4] 王俊光, 杨松, 马峥, 等. 动力扰动下底板突水前兆特征及危险性评价[J]. 力学学报, 2025, 57(7): 1671-1687.
- [5] 刘伟韬, 陈东祺, 杜衍辉, 等. 基于非饱和渗流-应力-损伤耦合模型的煤层底板突水演化及电场响应特征研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 1-21. <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2025-1427>, 2026-06-15.
- [6] 任正瑞, 连会青, 尹尚先, 等. 基于 FAHP-TOPSIS 模型的煤层底板突水危险性评价[J]. 中国矿业, 2025, 34(11): 145-153.
- [7] 刘江斌, 张仲杰, 李洋, 等. 孔隙-裂隙型耦合底板突水数值模拟模型研究[J]. 煤炭技术, 2025, 44(11): 114-119.
- [8] 张雪莲. 煤层底板突水危险性评价及突水防治措施[J]. 煤炭与化工, 2025, 48(2): 65-69+99.
- [9] 宋子琦. 潘二矿微震监测与煤层底板突水预警研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2025.
- [10] 张世平, 王应政, 苏文, 等. 担水沟煤矿大采高工作面底板突水危险性评价[J]. 内蒙古煤炭经济, 2026(2): 38-40.
- [11] 黄刚, 韩云春, 余国锋, 等. 全光纤微震监测技术在底板突水监测中的应用研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(6): 36-45.
- [12] 张磊. 新驿煤矿巷道掘进过大落差断层围岩破坏规律及底板突水防控研究[J]. 煤炭科技, 2024, 45(3): 109-116.
- [13] 杨鹤鹤, 王欣欣, 赵璐, 等. 潘家窑煤矿 8 号煤层底板突水性分析[J]. 西部探矿工程, 2025, 37(5): 93-96.
- [14] 郝耀军. 西曲矿带压开采煤层底板突水危险性评价[J]. 煤炭与化工, 2025, 48(3): 72-77.
- [15] 尹武平. 层次分析法在煤层底板突水评价中的应用研究[J]. 江西煤炭科技, 2024(3): 195-197+201.
- [16] 杨茹蕙, 李小萌, 王铁记. 基于 IAHP-EWM 博弈论的煤层底板突水影响因素研究[J]. 煤炭与化工, 2024, 47(7): 43-47+52.
- [17] 郝宪杰, 李航, 赵毅鑫, 等. 基于日累积微震指标与水位关联效应的底板突水预警方法与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(9): 2125-2139.
- [18] 张志, 刘进晓. 基于 DBO-SVC 的煤层底板突水灾害预测[J]. 山东煤炭科技, 2025, 43(5): 168-173.
- [19] 李晨曦, 鲁海峰. 基于小样本数据机器学习的煤层底板突水预测[J]. 煤矿安全, 2025, 56(1): 171-179.
- [20] 段鑫. 深部煤层底板突水机理与预测方法研究[J]. 煤炭新视界, 2025(1): 108-109.