

## 突水系数 60 年：面临困境及发展方向

尹尚先<sup>1,2</sup>, 姚 辉<sup>1,2</sup>, 梁满玉<sup>1,2</sup>, 吴 威<sup>2</sup>, 连会青<sup>2</sup>, 侯恩科<sup>1</sup>, 赵 鹏<sup>3</sup>, 张义安<sup>3</sup>, 王 雄<sup>3</sup>

(1. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 华北科技学院 河北省矿井灾害防治重点实验室, 北京 101601; 3. 鄂尔多斯市国源矿业开发有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

**摘 要:** 自 1964 年突水系数诞生以来, 60 年里尽管历经多次改良变化, 但其主体一直是我国预测和评价底板突水危险性的主要方法, 在保障带压开采生产安全及推动带压开采理论发展方面发挥了重要作用。回顾了突水系数法的传承与发展历程, 总结突水系数法发展历史, 认为突水系数法演变主要围绕“有效隔水层厚度”这一概念展开, 临界突水系数无法确定限制了其他版本突水系数法的应用。从充水水源、强度、通道、时间、水质 5 个维度阐释了浅部与深部水害特征及异同, 指出了深部开采条件下突水系数法局限所在; 总结改良版本, 指明深部条件下突水系数法改良方向: 围绕针对性不强、隔水层厚度影响、考虑因素单一等进行改良。剖析学科概念, 回归突水危险性评价命题本身, 危险性评价应回答突水的可能性及突水的危害程度两部分内容; 梳理突水危险性影响因素, 指出突水系数法缺陷: 对地质构造、含水层富水性等重要影响因素考虑不全面。展望未来, 探讨了突水系数法发展方向, 包括与其他理论及方法形成组合模型、选用大数据评价方法。随着信息化技术的进步及煤矿智能化建设进程的稳步推进, 深度学习、机器学习以及配套方法等将成为主流评价方法, 特别是物理机制约束下的大数据评价方法是未来攻关热点。

**关键词:** 带压开采; 深部开采; 突水危险性评价; 突水系数法

**中图分类号:** TD745 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)01-0600-10

## 60 years of investigation on water inrush coefficient: Challenges faced and development directions

YIN Shangxian<sup>1,2</sup>, YAO Hui<sup>1,2</sup>, LIANG Manyu<sup>1,2</sup>, WU Wei<sup>2</sup>, LIAN Huiqing<sup>2</sup>, HOU Enke<sup>1</sup>, ZHAO Peng<sup>3</sup>, ZHANG Yian<sup>3</sup>, WANG Xiong<sup>3</sup>

(1. School of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Hebei State Key Laboratory of Mine Disaster Prevention, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China; 3. Ordos Guoyuan Mining Development Co., Ltd., Ordos 017000, China)

**Abstract:** Since the birth of the water inrush coefficient in 1964, in spite of it has undergone many improvements and changes in the past 60 years, its main body has always been the main method for predicting and evaluating the danger of bottom water inrush in my country, and has played an important role in ensuring the safety of pressure mining production and promoting the development of pressure mining theory. The inheritance and development of the water inrush coefficient method was reviewed, and the development history of the water inrush coefficient method was summarized. It was considered that the evolution of the water inrush coefficient method mainly revolved around the concept of “effective

收稿日期: 2024-12-23 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YG24.1580

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2024YFC3013802)

作者简介: 尹尚先 (1964—), 男, 山西朔州人, 教授, 博士。E-mail: yinshx03@126.com

通讯作者: 姚 辉 (1998—), 男, 山西运城人, 博士。E-mail: yaohui103@163.com

引用格式: 尹尚先, 姚辉, 梁满玉, 等. 突水系数 60 年: 面临困境及发展方向[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 600-609.

YIN Shangxian, YAO Hui, LIANG Manyu, et al. 60 years of investigation on water inrush coefficient: Challenges faced and development directions[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 600-609.



移动阅读

aquiclude thickness". The inability to determine the critical water inrush coefficient limited the application of other versions of the water inrush coefficient method. The characteristics and differences of shallow and deep water hazards are explained from the five dimensions of water source, intensity, channel, time and water quality, and the limitations of the water inrush coefficient method under deep mining conditions are pointed out; the improved version is summarized, and the improvement direction of the water inrush coefficient method under deep conditions is pointed out: improvements are made around the lack of specificity, the influence of the thickness of the impermeable layer, and the single consideration factors. Analyzing the concepts of the subject and returning to the proposition of water inrush hazard assessment itself, the hazard assessment should answer two parts: the possibility of water inrush and the degree of harm caused by water inrush; sorting out the factors affecting the hazard of water inrush, and analyzing the defects of the water inrush coefficient method: it does not fully consider important influencing factors such as geological structure and water-richness of aquifers. Looking into the future, the development direction of the water inrush coefficient method is discussed, including forming a combined model with other theories and methods and selecting big data evaluation methods. With the advancement of information technology and the steady progress of the intelligent construction of coal mines, deep learning, machine learning and supporting methods will become the mainstream evaluation methods. In particular, big data evaluation methods under the constraints of physical mechanisms are the future research hotspots.

**Key words:** mining under water pressure; deep mining; water inrush risk assessment; water inrush coefficient method

## 0 引言

底板奥陶系灰岩(简称奥灰)水是华北型石炭二叠纪煤田开采主要威胁。奥灰含水层具有较高的含水能力,且岩溶裂隙发育,一旦突水,将造成大量人员伤亡及财产损失,因此,底板奥灰水防治一直是煤矿安全生产工作的重点。围绕此问题,科研工作者展开系统研究,形成带压开采理论及技术体系<sup>[1]</sup>,解放了大量受奥灰水威胁的煤炭资源。突水系数法作为带压开采理论体系的重要组成部分,由于简洁高效特性而被广泛应用,在评价和预测煤层底板突水方面起到了积极作用<sup>[2]</sup>。

随着资源需求增加及开采强度增大,浅部资源日渐枯竭,转向深部开采<sup>[3]</sup>。深部开采条件下,矿井水文地质条件更为复杂,突水影响因素增多。与浅部水害相比,深部突水模式及特征发生巨大转变<sup>[4]</sup>。传统带压开采理论和技术不能满足安全开采需求,突水系数法显示出一定局限性。突水系数法的改良逐步提上议事日程。

## 1 突水系数法历史沿革

突水系数为单位隔水层厚度所能承受的水压力,是衡量底板突水危险性的重要指标,其发展历程如图1所示<sup>[2,5-6]</sup>。

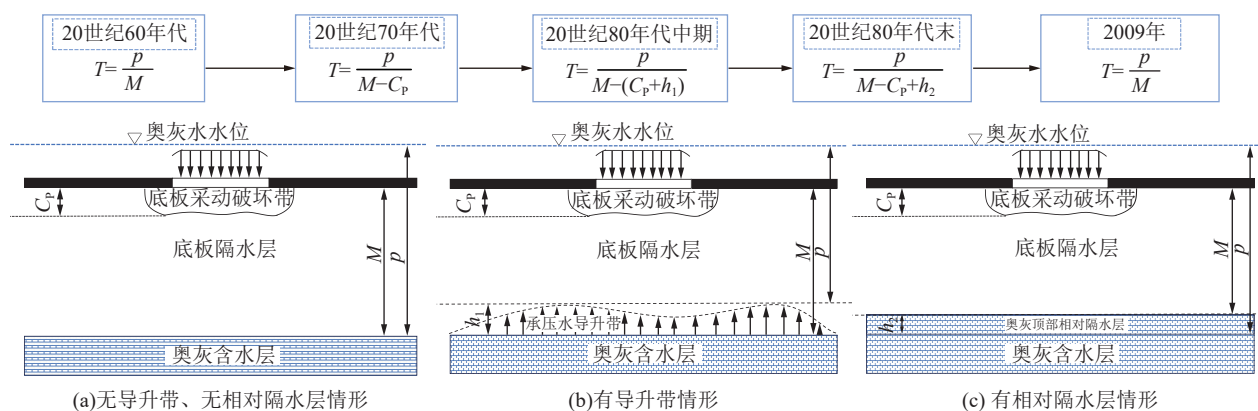


图1 突水系数法发展历程

Fig.1 Development history of water inrush coefficient method

突水系数法脱胎于“底板相对隔水层”概念。1944年,匈牙利科学家韦格·弗伦斯指出底板突水现象与底板所承受水压大小及隔水层厚度有关,认为相

对隔水层的厚度制约着突水事件的发生。1964年,原煤炭工业部组织相关专家于焦作进行水文地质会战,根据焦作矿区实际突水资料,结合防治水生产与实践

经验,综合分析,在“底板相对隔水层”概念的基础上提出突水系数计算公式:

$$T = \frac{p}{M} \quad (1)$$

式中:  $T$  为突水系数, MPa/m;  $p$  为底板隔水层承受水压, MPa;  $M$  为底板隔水层厚度, m。

初版公式考虑了奥灰水水压与隔水层厚度 2 个重要因素,能够定量表征隔水层厚度与奥灰水压力矛与盾之间的关系,并根据矿井突水资料给出了临界突水系数 ( $T_s$ ) 值,推进了底板突水危险性评价量化工作,具有参考价值及较大的影响力。20 世纪 70 年代,煤炭科学研究总院西安分院相关专家与其他单位技术人员根据实际及模拟研究资料<sup>[2]</sup>,对初版公式进行了改进:

$$T = \frac{p}{M - C_p} \quad (2)$$

式中:  $C_p$  为底板破坏深度, m。

式 (2) 考虑了采矿活动对煤层底板隔水层的破坏作用,将煤层底板破坏深度纳入考量,符合客观实际,被 1984 年发布的《矿井水文地质规程》(试行)<sup>[7]</sup>和 1986 年发布的《煤矿防治水工作条例》(试行)<sup>[8]</sup>所采用。但 2 个文件给出的突水系数临界值参考却存在差异:《矿井水文地质规程》(试行)认为“底板受构造破坏块段突水系数一般不大于 0.6,正常块段不大于 1.5”,《煤矿防治水工作条例》(试行)认为“临界突水系数应根据本区资料确定,一般情况下,在具有构造破坏的地区按 0.6 计算,隔水层完整无断裂构造破坏地区按 1.0 计算”(2 个文件中突水系数单位都采用 kgf/(cm<sup>2</sup> · m), 1 kgf/(cm<sup>2</sup> · m) ≈ 0.1 MPa/m)。

20 世纪 80 年代,研究人员考虑底板高压水对隔水层的劈裂作用而产生的承压水导升现象,将式 (2) 改进为

$$T = \frac{p}{M - (C_p + h_1)} \quad (3)$$

式中:  $h_1$  为底板承压水导升高度, m。

式 (3) 考虑了采矿活动对隔水层的人为破坏,同时也考虑了奥灰水压对隔水层的自然破坏。研究人员给出了不同水压条件下的承压水导升高度研究方法 with 经验值<sup>[9-12]</sup>,但对于该式对应的临界突水系数尚未有明确标准。

华北型奥陶系中统顶界面以下岩溶风化壳经过岩溶发育、沉积、充填、压实、胶结长时间作用后,形成具有一定强度和低渗透特性的相对隔水层<sup>[13-15]</sup>。20 世纪 80 年代末,考虑到奥灰顶界面相对隔水层的

存在,将式 (3) 改进为

$$T = \frac{p}{M - C_p + h_2} \quad (4)$$

式中:  $h_2$  为奥灰顶部相对隔水层厚度, m。

式 (4) 考虑了奥灰顶部相对隔水层存在的问题,符合华北型煤田实际情况。

2009 年,由国家煤矿安全监察局颁布的《煤矿防治水规定》<sup>[16]</sup>规定采用式 (1) 计算突水系数评价煤层底板突水危险性,并规定正常地段临界突水系数取 0.10 MPa/m,具有构造破坏的地段临界突水系数取 0.06 MPa/m,沿用至今。

纵观突水系数法发展历程,改进主要围绕“有效隔水层厚度”这一概念展开,式 (2)、式 (3)、式 (4) 分别考虑了采矿活动对隔水层的破坏作用,承压水自然导升对隔水层的破坏作用以及奥灰顶界面风化带对隔水层的增厚作用,都有一定的科学道理与参考价值。但临界突水系数未能确定,缺乏应用基础。

## 2 深部开采条件下突水系数法改进

### 2.1 深部及深部水害特征

深部是一个力学概念,由地应力水平、采动应力水平、围岩属性共同决定<sup>[1,17]</sup>。何满潮院士认为:深部是岩体出现冲击地压、瓦斯突出、底板突水等非线性力学现象的深度<sup>[18]</sup>。谢和平院士认为:由浅部向较深部、超深部转变,就是地应力状态由构造应力主导向两向等压应力状态,继而向三向等压应力状态转变的过程<sup>[19]</sup>。

华北型煤田底板浅部突水最突出特点是隔水层厚度一般小于 35 m,大部分在 30 m 以下,承受水压在 3.0~4.0 MPa 以下,此时,突水系数法评价带压开采危险性的适用性良好<sup>[1,20-21]</sup>。

与浅部水害相比,深部水害在充水水源、强度、通道、时间、水质 5 个方面都呈现出不同特征<sup>[22]</sup>: ① 充水水源。奥灰水是深部水害的总源头,夹存于底板隔水层中的薄层灰岩是深部水害的中转站,采掘空间是深部水害的目的地。在高压水作用下,奥灰水源源不断补充薄层灰岩,中转递进导升至采煤工作面,形成突水事故。② 充水通道。深部水害多发生于小断层或断层交叉、褶曲带等构造集中处附近及地应力集中带。③ 充水强度。奥灰水对充水通道不断压裂、扩容、冲刷合并,水量及水能不断积聚,突水以台阶式累进态势由小到大增长。④ 充水时间。采掘活动导致应力释放后一段时间,伴随底板破坏出现渗水、涌水至突水的现象。⑤ 充水水质。突水过程中,水中阳离子以 Na<sup>+</sup>或 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>为主向 Ca<sup>2+</sup>或 Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>转变,



$\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 或 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 逐渐转变为 $\text{HCO}_3^-$ , 矿化度逐渐降低。

### 2.2 深部开采突水系数法局限性

深部充水条件与浅部相比发生巨大转变。首先是各矿区隔水层厚度普遍大于 50 m, 有的矿区甚至达到了 300 m<sup>[15]</sup>; 其次是奥灰水压的变化, 千米以深矿井, 奥灰水压达到了 7 MPa 以上, 为底板超高承压水; 最后是突水模式的转变, 深部岩体有效应力升高并驱动

裂隙扩展<sup>[23]</sup>, 承压水沿裂隙渗透、扩容、压裂, 中转导升, 形成大面积散流突水。实际统计数据规律 (图 2) 显示, 带压开采底板隔水层厚度与所承受水压之间的平衡关系并非线性关系。突水系数是隔水层厚度小于 50 m 条件下简化的线性关系, 其公式是薄板理论公式的近似, 建立在薄板破断机理之上。深部突水以散点大面积涌水为特征, 发生发展受厚板压裂导升机制控制, 突水系数法显然不适用于深部厚隔水层情形。

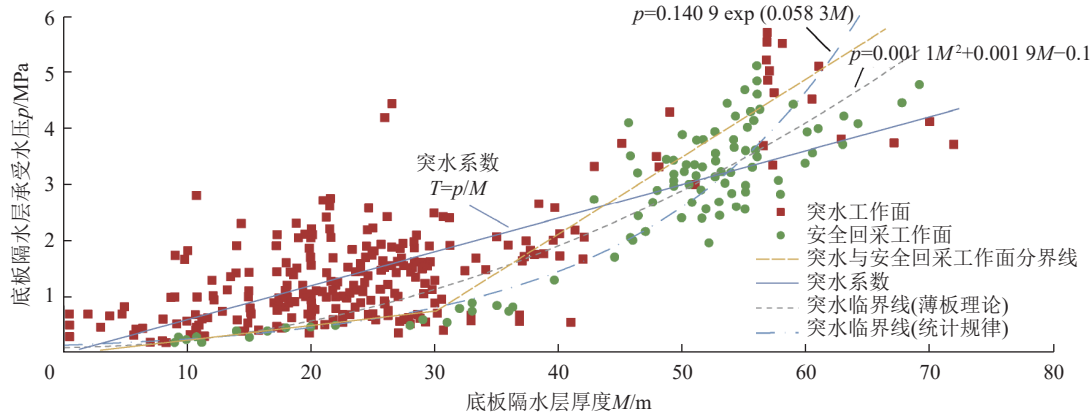


图 2 带压开采水压与隔水层厚度数据统计分析

Fig.2 Statistical analysis of water pressure and aquiclude thickness data when mining under water pressure

以下这些统计数据更能说明突水系数法的准确性问题 (表 1)。

表 1 典型矿区突水点突水系数统计表 (据文献[24]修改)

Table 1 Typical mining area water breakthrough point water breakthrough system statistics table(revised according to literatures[24])

突水系数 $T/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	肥城矿区	焦作矿区	淄博矿区	合计
$T < 0.06$	26	59	42	127
$0.06 \leq T < 0.10$	0	21	41	62
$0.10 \leq T$	0	10	18	28

在典型矿区突水点突水系数统计表中, 突水系数  $T < 0.06 \text{ MPa/m}$  时, 总计发生突水 127 次; 突水系数  $0.06 \text{ MPa/m} \leq T < 0.10 \text{ MPa/m}$  时, 总计发生突水 62 次; 突水系数  $T \geq 0.10 \text{ MPa/m}$  时, 总计发生突水 28 次。可以看出, 在突水系数判别安全区间内, 发生突水次数要大于判别危险区间内的发生次数。

### 2.3 突水系数法改进版本

除被规程和条例引用的改良突水系数法外, 学者们针对突水系数法实际应用的一些弊端, 对突水系数法进行了不同程度的改良 (表 2)。

这些改良尽管没有大规模应用于生产实际, 但对于推动突水系数法公式发展起到了一定的积极意义。改良主要围绕 3 方面展开:

1) 围绕突水系数法针对性不足的问题进行改良, 如文献[25]及文献[26]。高莲凤等<sup>[25]</sup>以东山煤矿为研究对象, 重新建立奥灰水压力与隔水层厚度关系式, 并给出建立在特定矿井突水数据之上的突水临界判别值; 樊亚红等<sup>[26]</sup>针对先锋煤矿隔水层岩体强度低、水理性差、易膨胀和易软化的特点, 利用摩尔库仑准则对突水系数法进行了改进。这类改良尽管提升了突水系数法在特定条件下评价的准确率, 但削弱了突水系数法的普适性, 不适宜全面推广。

2) 围绕隔水层厚度对突水系数法表现影响进行改良, 如文献[27]及文献[22]。LI 等<sup>[27]</sup>从隔水层越薄突水危险性越大的实际现象出发, 将隔水层厚度分为两级并给出对应的临界突水系数判别式; 尹尚先等<sup>[22]</sup>为淡化突水系数法在极薄、厚、巨厚隔水层中的应用, 综合隔水层厚度、底板破坏深度、奥灰导升带高度、突水系数等因素将底板隔水层划分为极薄、薄、中、厚、巨厚 5 类隔水层, 并给出相应危险性判定标准及开采条件。随着开采深度增加, 隔水层厚度增大, 对隔水层厚度分级处理, 并依此对突水系数法本身或突水系数临界值进行改良, 能够大幅提高突水系数法在深部开采中的适用性。

3) 围绕突水系数法考虑因素单一的问题进行改良, 如文献[5]、[28]、[29]、[30]、[31]及[32]。比较典型的有乔伟等<sup>[31]</sup>针对深部超高承压弱富水的环境特性,

表 2 突水系数法改进版本统计  
Table 2 Improved version of water inrush coefficient method for statistical analysis

序号	表达式	符号含义	改进原因	应用效果	文献来源
1	$y = -3.087 \lg p + 5.661 \lg M$	$y$ —判别函数值	临界突水系数是根据大多数矿井突水资料确定的临界值，不具有针对性，对某一矿井而言并不一定适用	评价结果与突水系数评价结果基本一致，但改进后形成的判别分析法对已有突水资料的矿井判别效果更好	[25]
2	$T = \frac{p_0 - p_{\text{waste}}}{M - C_p - h_1}$ $p_{\text{waste}} = 0.090 \ 6 h_1 e^{-14.969K}$	$p_0$ —含水层的静水压力，MPa； $p_{\text{waste}}$ —水头损失值，MPa； $K$ —底板隔水层渗透系数，m/d	先锋煤矿隔水层岩体强度较低，水理性差，具有明显的膨胀性和软化性，从剪切破坏的角度对突水系数法进行修正	实地勘察验证发现改进突水系数法适用性良好，评价得到的可能突水区域是实际重点突水防治对象	[26]
3	$T_s = \frac{1}{6\ 000} M + 0.02, 0 < M \leq 30 \text{ m}$ $T_s = 0.002 \ 5 M - 0.05, 30 < M \leq 80 \text{ m}$		考虑隔水层厚度对临界突水系数的影响：隔水层越薄突水危险性越大	适用于不同厚度隔水层分级判别	[27]
4	$T = K_1(aF + \frac{bp}{M})$	$F$ —构造复杂程度； $a, b$ —权重系数，分别为0.6和0.4； $K_1$ —富水性指数	突水系数法考虑因素较为单一，不能满足煤矿生产及安全需要	评价结果与突水系数评价结果相似，但改进后分区分级预测信息更加详细，评价结果更准确	[28]
5	$T = \frac{p}{\sum_{i=1}^n M_i d_i - \sum_{i=1}^n C_i d_i - \sum_{i=1}^n h_i d_i}$	$n$ —隔水层分层总数； $M_i$ —各隔水层分层厚度，m； $C_i$ —第 <i>i</i> 分层采动破坏厚度，m； $d_i$ —第 <i>i</i> 分层厚度折算系数； $h_i$ —第 <i>i</i> 分层承压水导升高度，m	不同岩性隔水层分层阻水能力存在差异	预测上孔煤业15号煤层无突水危险，并提出针对性防治措施	[29]
6	$\xi = \frac{p}{p_{\text{max}}}$	$\xi$ —突水指数； $p_{\text{max}}$ —隔水层突水极限水压，MPa	突水系数法仅考虑了隔水层厚度，未考虑隔水层岩层岩性结构特征和开采方式、工作面布置等因素，存在局限和不足	通过实例分析发现突水系数法适用于浅埋、窄面情形，突水指数适用于工作面斜长较大的情形，可以弥补突水系数法不足	[30]
7	$T$ - $q$ 法		在反映含水层性质方面，仅考虑了含水层水压，并未考虑涌水量这一关键因素，且突水系数法实际预测准确率差	针对富水性较差的含水层突水评价，可以作为突水系数法的补充	[31]
8	$T = \frac{p}{\sum_{i=1}^n M_i \zeta_i - 0.65 C_p}$ $T = \frac{p}{\sum_{i=1}^n M_i \zeta_i - \zeta_a C_p}$	$\zeta_i$ —隔水层各分层的比值系数； $\zeta_a$ —底板破坏带发育岩层的质量比值系数	各类岩石力学强度及各隔水层分层阻水性能存在差异	不仅对突水危险区域有更直观精确的显示，而且能够给出临界突水系数最大值与最小值	[32]
9	$T = \frac{p}{\sum_{i=1}^n M_i \xi_i - C_p - h_1 + h_2}$	$\xi_i$ —底板隔水层第 <i>i</i> 层岩层等效隔水系数	考虑各岩性分层隔水层阻水能力差异及奥灰顶界面存在相对隔水层的情况	修正公式评价结果安全度相对高于《煤矿防治水规程》公式评价结果	[5]
10	依据 $M$ 、 $C_p$ 、 $h_1$ 、 $T$ 等因素将底板隔水层划分为极薄、薄、中、厚、巨厚5类隔水层，并给出5类隔水层所对应的带压开采条件		突水系数在极薄、厚、巨厚隔水层情形下表现不佳	成功应用于邯邢矿区梧桐庄井田突水灾害治理工程	[22]

注：为使文章上下文参数含义统一，对各论文表达式中参数做出统一替换。

将能够表征含水层富水性的指标——单位涌水量引入突水系数法中，建立  $T$ — $q$ (钻孔单位涌水量，L/(m·s))法作为突水系数法的补充来评价底板突水危险性。深部开采环境下，地质条件更为复杂，底板突水促因众多，突水系数法所能考虑的影响因素极为有限，仅凭水压和隔水层厚度之间的线性关系无法精准描绘受控于多因素且因素之间相互作用的底板突水演变过程。将更多因素纳入考量，能够提高突水危险性评价结果的准确性和科学性。但考虑多因素影响的要

求，无法被突水系数法形式满足，也会破坏其简洁特性，因此需要借助其他评价方法来实现。

3 突水危险性分析

突水系数法是用于底板突水危险性评价的一种方法。要论述突水系数法的优缺点，可以回到对突水危险性评价的一些认识上来。

突水危险性评价，即综合地质信息与生产信息，分析煤矿是否具备安全生产条件<sup>[33]</sup>。从矿井水防治

学科内容及实际生产要求来看, 突水危险性评价需要回答矿井在一定时期内可能发生突水的时间、空间范围、强度、规模、频次等问题<sup>[34-36]</sup>。这里面就包含了发生突水的可能性评价与突水危害程度评估两部分内容<sup>[35-36]</sup>。

### 3.1 突水危险性影响因素分析

底板突水是受多种因素影响并具有非线性动力特征的复合动态现象<sup>[37]</sup>。根据突水过程分析及前人工作成果总结, 突水危险性影响因素可概括为以下 4 个方面<sup>[24,38]</sup>(图 3): ① 采掘活动是底板突水的诱导因素; ② 有效隔水层厚度是底板突水的抑制因素; ③ 水压是底板突水的动力因素; ④ 含水层富水性是底板突水量的决定因素。其中, 有效隔水层厚度通过“隔水

层厚度及性能”及“构造破坏带”来考量。

有别于其他可归结于内因的大类, 采掘活动影响因素为人类社会所影响的外因, 隶属于“易损性评价”研究内容<sup>[36]</sup>, 牵涉指标复杂且多属于定性评价, 难以量化; 相关行为多通过条例、细则等进行规范, 开采工艺、工作面斜长、煤层倾角等采掘活动要素也多通过底板破坏带内容间接作用, 因此在底板突水危险性评价工作中较少考虑。

有效隔水层厚度是隔水层阻水能力的综合反映。不仅包含对不同岩性岩层的等效厚度置换, 也包含对“采动破坏”“奥灰顶部相对隔水层”“地质构造”等因素对隔水层厚度的考量。有效隔水层厚度越大, 对突水的抑制作用就越明显。

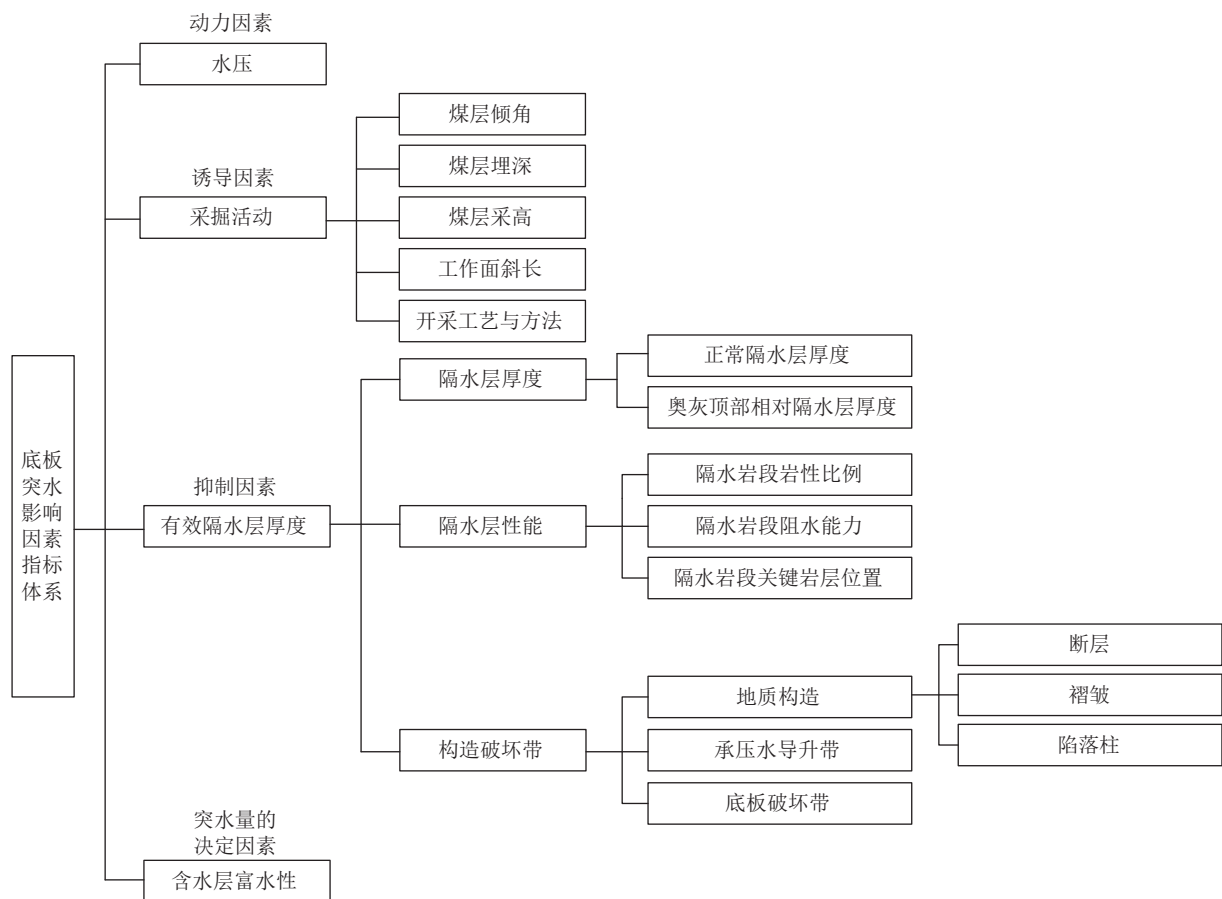


图 3 底板突水影响因素指标体系

Fig.3 Index system of factors affecting water inrush from floor

水压是充水含水层作用于煤层底板的压强, 提供突水的基本动力。如果水压的“矛”能够突破有效隔水层的“盾”, 则形成突水。在考虑承压水原始导升高度的情况下, 其值采用作用于有效隔水层的残余水头应力来表示, 一般变化不大<sup>[37]</sup>。

含水层富水性是表征岩层出水能力的指标, 与含水层补给量、储量及导水性有关, 是突水量的决定

因素。根据乔伟教授研究成果<sup>[31]</sup>, 随着开采深度增加, 地应力增加, 岩溶含水层水压增大, 富水性变弱, 含水层水压与富水性之间并无必然联系。笔者认为: 富水性是表征水量的指标, 不提供突水动能, 只决定突水量的大小和突水持续时间的长短。从这个角度来讲, 水压与有效隔水层厚度是突水可能性的评价指标, 含水层富水性是突水危害程度的评价指标。



### 3.2 突水系数法局限性

通过突水危险性影响因素分析,可以发现突水系数法主要存在以下不足:

1) 对“地质构造”影响因素考量较少。地质构造包含断层、陷落柱、褶皱等,深部开采条件下煤层底板突水事故基本都与地质构造有关<sup>[39-41]</sup>,因此理应重视地质构造因素作用,但现行突水系数法公式仅在临界突水系数确定(底板受构造破坏地段按 0.06 MPa/m 计算,正常完整地段按 0.10 MPa/m 计算)中对地质构造要素有所涉及,考量明显不够。

2) 缺乏含水层富水性指标考虑。含水层富水性、承压水水压力与隔水层阻水能力,是带压开采能否正常开展的决定因素<sup>[1]</sup>。含水层富水性虽不能决定突水可能性,但对衡量突水危害程度有决定性作用,理应属于突水危险性评价内容,但突水系数法却缺少此指标考虑。

## 4 突水系数法发展方向探讨

突水系数法长期被《煤矿防治水工作条例》(试行)《矿井水文地质规程》《煤矿防治水规定》《煤矿防治水细则》<sup>[42]</sup>等法规推荐使用,在 60 年煤矿带压开采工作中起到了积极作用,其形式简单,深入人心,但从深部开采的生产实际条件及突水危险性评价的理论研究方面分析,突水系数法都存在一定局限性,针对突水系数法的改良工作势在必行。

### 4.1 与其他理论及方法结合

深部开采的复杂环境与突水系数法在不同隔水层厚度条件下的表现差异决定了对突水系数法的改良要根据隔水层厚度大小分开看待。

针对浅部极薄隔水层(隔水层厚度 $\leq 30$  m),考虑到突水系数法的表现不佳,需要收集全国矿井突水数据,重新确定合适临界突水系数。针对深部厚及巨厚隔水层(隔水层厚度 $> 80$  m),考虑到突水系数法无法反映深部复杂突水机理及突水要素,需要与其他理论及方法形成组合模型解决现有困境。

一种思路是重新考虑围岩应力与水压力的平衡关系,建立深部突水行为力学判据。与浅部相比,深部地应力环境与岩体力学性质发生巨大转变。深部突水,是以能量突然释放为核心驱动力,建立在传统浅部能量耗散基础上的应力应变破坏准则已完全不适用<sup>[19]</sup>。因此,必须系统研究深部开采条件下岩体破裂能量耗散与释放规律,定量表征突水过程中岩体应力场、能量场、温度场等的大小、集聚及变化特征,建立深部突水判识准则,整体形成“浅部突水系数+深部力学理论”的判别模式,实现对不同隔水层厚度下突

水危险性的科学评价。但目前对深部岩石性质及行为缺乏了解,基本概念及基本理论并不成熟,因此,需要深部及深部开采条件下基本力学理论的突破,这种改良模式方才具备理论可行性。

另一种有效思路是针对深部厚及巨厚隔水层情形,选用其他评价方法,如脆弱性指数法。脆弱性指数法是由武强院士于 2007 年提出<sup>[43]</sup>并被写入《煤矿防治水细则》的底板突水危险性评价方法,利用多源信息集成理论及地理信息系统,对多种突水要素进行耦合做出评价,通过“突水系数法+脆弱性指数法”的组合模型,一方面可以保证含水层富水性、地质构造等对突水有显著影响的指标被考虑,另一方面,也形成了评价结果的双重保护,进一步保证评价结果的客观与准确。这种模式具备实践基础,已被应用并取得突出表现<sup>[44]</sup>,但缺点是流程较为繁琐。

### 4.2 大数据评价方法

有赖于矿井数据规模的爆炸增长与信息处理技术的稳步提升,以机器学习为代表的大数据方法成为目前刻画突水非动力现象的主流方法。同时为突水危险性评价方法改良提供了新的可能途径,即完全摒弃传统突水系数法,改用大数据评价方法进行突水危险性评价。

大数据时代背景下,以机器学习为代表的人工智能方法,是实现产业变革和科技进步的核心驱动力<sup>[45-46]</sup>。机器学习通过概率统计模型,挖掘生产数据和地质数据得到高价值信息,从而提升危险性评价的准确率<sup>[47]</sup>。一种可靠的观点是:突水系数法来自于焦作、峰峰等代表性矿区的隔水层厚度与奥灰水水压的数据统计与分析,本就属于大数据评价方法范畴,能够考虑更多要素、处理更多类型数据的机器学习算法可以说是突水系数法的上位替代<sup>[48]</sup>。

针对突水系数法在不同隔水层厚度条件下表现存在差异的问题,以全国水害事故为样本,通过机器学习方法学习不同隔水层厚度条件下突水事件发生概率,建立针对不同厚度隔水层的分级评价标准;针对突水系数法考虑因素较少、特定指标未涉及的问题,通过机器学习方法进行数据挖掘,整合指标数据特征,使评价指标更完备、评价信息更准确,提升突水危险性评价结果准确率<sup>[49-50]</sup>。

目前,机器学习方法已经在突水危险性评价领域有较多应用,取得了良好成效,但依然存在一些突出问题需要解决<sup>[51]</sup>。

一是煤矿数据质量与数量的问题。数据质量和数量会对危险性评价结果造成较大影响。尽管近几年煤矿在智能化的道路上稳步推进,但部分评价关键

数据(如钻孔柱状图等地质信息、涌水量台账等水文信息)仅实现了电子化的转变,依然需要人工提取信息并进行数据格式转化,无法直接使用;数据量距普遍意义上的大数据量级(PB级)也有很大差距<sup>[52]</sup>,数据量级问题的解决不仅需要依靠机器学习算法(如迁移学习算法对小样本问题的处理<sup>[53]</sup>、插值算法对数据量的扩充)的更新与进化,而且也对煤矿的智能化建设提出了更高的要求。煤矿数据也存在数据不完整、不准确、更新不及时等质量缺陷,需要依赖数据清洗相关算法来推动解决<sup>[52]</sup>。

二是机器学习方法本身所存在的可解释性差的问题。突水系数法在形式简单的前提下能够反映出地下水渗流最基本规律—Darcy定律的核心思想,具有一定的理论基础与科学意义<sup>[48]</sup>,但机器学习属于黑箱模型,缺乏实际系统结构及其参数的物理意义解释,能够给出危险性评价的结果,却给不出评价结果的合理解释。这也造成研究者对机器学习方法参与突水危险性评价工作的信心不足。因此,利用底板突水过程中蕴含的规律和模式、物理关系等知识约束机器学习评价过程,构建物理导引的机器学习模型,获得物理一致的危险性评价结果,是机器学习参与突水危险性评价工作的前沿挑战<sup>[47]</sup>。

## 5 结 论

1) 现行突水系数法是带压开采现场实践与科研经验的高度总结,经历了多次更新进化,先后考虑了采矿活动对隔水层的破坏作用、承压水自然导升对隔水层的破坏作用以及奥灰顶界面风化带对隔水层的增厚作用,其改良主要围绕“有效隔水层厚度”展开,具有一定的科学道理和参考价值。

2) 突水危险性评价,包含对发生突水的可能性与突水危害程度的评估,需要回答矿井在一定时期内发生突水的时间、空间范围、强度、规模、频次等,显然,突水系数法只是突水可能性的概率评估,而且对地质构造、含水层富水性等重要影响因素考虑不全面。

3) 与浅部底板突水相比,深部底板突水具有突水水源中转递进、通道集中于薄弱带、充水强度累进增长、滞后出水、离子交换吸附的特点,突水系数法已不适用于深部环境,提出其改进方向:围绕针对性不强进行改良,围绕隔水层厚度影响进行改良,围绕考虑因素单一进行改良。

4) 探讨了突水系数法未来发展方向,浅部薄隔水层对临界突水系数进行修正,深部厚及巨厚隔水层压裂导升理论及方法评价。突水的时间、空间范围、强度、规模、频次等突水危险性评估,除了传统经典数学

力学方法外,深度学习、机器学习以及迁移算法等将成为主流,特别是在物理机制约束下的大数据方法是未来攻关的重要热点。

## 参考文献(References):

- [1] 尹尚先,连会青,徐斌,等.深部带压开采:传承与创新[J].*煤田地质与勘探*,2021,49(1):170-181.  
YIN Shangxian, LIAN Huiqing, XU Bin, et al. Deep mining under safe water pressure of aquifer: Inheritance and innovation[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 170-181.
- [2] 刘其声.关于突水系数的讨论[J].*煤田地质与勘探*,2009,37(4):34-37,42.  
LIU Qisheng. A discussion on water inrush coefficient[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2009, 37(4): 34-37,42.
- [3] 袁亮.我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J].*煤炭学报*,2016,41(1):1-6.  
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 1-6.
- [4] 李文平,乔伟,李小琴,等.深部矿井水害特征、评价方法与治水勘探方向[J].*煤炭学报*,2019,44(8):2437-2448.  
LI Wenping, QIAO Wei, LI Xiaoqin, et al. Characteristics of water disaster, evaluation methods and exploration direction for controlling groundwater in deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2437-2448.
- [5] 王计堂,王秀兰.突水系数法分析预测煤层底板突水危险性的探讨[J].*煤炭科学技术*,2011,39(7):106-111.  
WANG Jitang, WANG Xiulan. Discussion on water inrush coefficient method applied to predict water inrush danger of seam floor based on gaojiata mine as example[J]. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(7): 106-111.
- [6] 张乐中.煤矿深部开采底板突水机理研究—以王峰井田为例[D].西安:长安大学,2013.  
ZHANG Lezhong. Mechanism of water inrush for coal mine deep exploitation—taking Wangfeng coal mine as an example[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [7] 煤炭工业部.矿井水文地质规程[S].北京:煤炭工业出版社,1984.
- [8] 煤炭工业部.煤矿防治水工作条例[S].北京:煤炭工业出版社,1986.
- [9] 虎维岳.矿山水害防治理论与方法[M].北京:煤炭工业出版社,2005.
- [10] 王经明.承压水沿煤层底板递进导升突水机理的模拟与观测[J].*岩土工程学报*,1999,21(5):546-549.  
WANG Jingming. In situ measurement and physical analogue on water inrush from coal floor induced by progressive intrusion of artesian water into protective aquiclude[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(5): 546-549.
- [11] 王经明.承压水沿煤层底板递进导升突水机理的物理法研究[J].*煤田地质与勘探*,1999,27(6):40-43.  
WANG Jingming. Physical investigation on water inrush from coal floor induced by pressure water progressive intrusion up into protective aquiclude[J]. *Coal Geology & Exploration*, 1999, 27(6):



- 40–43.
- [12] 尹尚先, 虎维岳. 岩层阻水性能及自然导升高度研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2008, 36(1): 34–36, 40.
- YIN Shangxian, HU Weiyue. Rocks' water-resistance ability and natural progressive intrusion height[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2008, 36(1): 34–36, 40.
- [13] 白喜庆, 白海波, 沈智慧. 新驿煤田奥灰顶部相对隔水性及底板突水危险性评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(2): 273–280.
- BAI Xiqing, BAI Haibo, SHEN Zhihui. Relative strata impermeability in Ordovician top and risk assessment of water inrush from coal floor in Xinyi coalfield[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(2): 273–280.
- [14] 董书宁, 刘其声. 华北型煤田中奥陶系灰岩顶部相对隔水段研究[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(3): 289–292.
- DONG Shuning, LIU Qisheng. Study on relative aquiclude existed in mid-Ordovician limestone top in North China coal field[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(3): 289–292.
- [15] 缪协兴, 白海波. 华北奥陶系顶部碳酸岩层隔水特性及分布规律[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(2): 185–193.
- MIAO Xiexing, BAI Haibo. Water-resisting characteristics and distribution rule of carbonate strata in the top of Ordovician in North China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(2): 185–193.
- [16] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水规定[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.
- [17] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 716–725.
- YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 716–725.
- [18] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(16): 2803–2813.
- HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2803–2813.
- [19] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(11): 2161–2178.
- XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(11): 2161–2178.
- [20] 张乐中, 许田柱. 煤层底板带压开采危险性评价方法探讨[J]. *人民长江*, 2012, 43(13): 39–42.
- ZHANG Lezhong, XU Tianzhu. Discussion on risk assessment methods of water inrush from coal seam floor[J]. *Yangtze River*, 2012, 43(13): 39–42.
- [21] 吕玉广. 侏罗系煤层开采弱胶结软岩底板渗流破坏突水机理及水害防治[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- LYU Yuguang. Water inrush mechanism of weakly cemented floor due to seepage failure and prevention for water hazard of Jurassic coal seam mining[D]. Xuzhou: China university of mining & technology, 2023.
- [22] 尹尚先, 王屹, 尹慧超, 等. 深部底板奥灰薄灰突水机理及全时空防治技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(5): 1855–1864.
- YIN Shangxian, WANG Yi, YIN Huichao, et al. Mechanism and full-time-space prevention and control technology of water inrush from Ordovician and thin limestone in deep mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1855–1864.
- [23] 徐智敏. 深部开采底板破坏及高承压突水模式、前兆与防治[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
- XU Zhimin. Mining-induced floor failure and the model, precursor and prevention of confined water inrush with high pressure in deep mining[D]. Xuzhou: China university of mining & technology, 2010.
- [24] 朱宗奎. 基于风险评估及突变理论的煤层底板突水危险性预测[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- ZHU Zongkui. Floor water inrush prediction based on risk evaluation and catastrophe theory[D]. Xuzhou: China university of mining & technology, 2014.
- [25] 高莲凤, 李喜荣. 东山煤矿 15 号煤带压开采评价[J]. *太原理工大学学报*, 1999, 30(3): 297–300, 304.
- GAO Lianfeng, LI Xirong. Evaluating the mining with pressure of No<sub>15</sub> coal in Dongshan colliery[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 1999, 30(3): 297–300, 304.
- [26] 樊亚红, 刘文连, 曹福明. 改进突水系数法在先锋露天矿底板突水评价中的应用[J]. *煤炭工程*, 2016, 48(1): 114–117.
- FAN Yahong, LIU Wenlian, CAO Fuming. Application of modified water inrush coefficient method to evaluation of coal floor water inrush of Xianfeng open-pit coal mine[J]. *Coal Engineering*, 2016, 48(1): 114–117.
- [27] LI W P, LIU Y, QIAO W, et al. An improved vulnerability assessment model for floor water bursting from a confined aquifer based on the water inrush coefficient method[J]. *Mine Water and the Environment*, 2018, 37(1): 196–204.
- [28] 张历峰. 滨湖煤矿湖下—深部区域 16 煤开采水情探测与底板突水危险性评价[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
- ZHANG Lifeng. Detection of water condition and risk assessment of floor water inrush of 16 coal mining in the area under the lake deep of Binhu coal mine[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.
- [29] 杜伟升, 姜耀东, 高林涛. 带压开采底板破坏因素分析及突水预测研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(6): 112–117, 130.
- DU Weisheng, JIANG Yaodong, GAO Lintao. Study on water inrush prediction and floor failure factors analysis in pressurized coal mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(6): 112–117, 130.
- [30] 张伟杰, 李术才, 魏久传, 等. 基于岩体极限平衡理论的煤层底板突水危险性预测[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2013, 43(1): 86–91.
- ZHANG Weijie, LI Shucai, WEI Jiuchuan, et al. Study on water-inrush prediction of coal floor based on the limit equilibrium theory of rock mass[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2013, 43(1): 86–91.
- [31] 乔伟, 李文平, 赵成喜. 煤矿底板突水评价突水系数—单位涌水量法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(12): 2466–2474.
- QIAO Wei, LI Wenping, ZHAO Chengxi. Water inrush coefficient-unit inflow method for water inrush evaluation of coal mine floor[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(12): 2466–2474.

- [32] 刘钦,孙亚军,徐智敏.改进型突水系数法在矿井底板突水评价中的应用[J].煤炭科学技术,2011,39(8):107-109.  
LIU Qin, SUN Yajun, XU Zhimin. Application of modified water inrush coefficient method to evaluation of water inrush from mine floor[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(8): 107-109.
- [33] 姚辉,尹尚先,徐维,等.基于组合赋权的加权秩和比法的底板突水危险性评价[J].煤田地质与勘探,2022,50(6):132-137.  
YAO Hui, YIN Shangxian, XU Wei, et al. Risk assessment of floor water inrush by weighted rank sum ratio based on combination weighting[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(6): 132-137.
- [34] 尹尚先,徐斌,尹慧超,等.矿井水防治学科基本架构及内涵[J].煤炭科学技术,2023,51(7):24-35.  
YIN Shangxian, XU Bin, YIN Huichao, et al. Basic structure and connotation of mine water prevention and control discipline[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 24-35.
- [35] 王玠佳,文宝萍,李文鹏,等.地面沉降灾害风险评估研究进展与展望[J].地质论评,2024,70(5):1949-1962.  
WANG Binjia, WEN Baoping, LI Wenpeng, et al. Review and prospective on land subsidence risk assessment[J]. Geological Review, 2024, 70(5): 1949-1962.
- [36] 张蓝兮,鲁军景,彭纪超.基于地理信息系统(GIS)的地质灾害评价现状[J].中国矿业,2024,33(S1):223-229.  
ZHANG Lanxi, LU Junjing, PENG Jichao. Current status of geological disaster assessment based on Geographic Information Systems(GIS)[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(S1): 223-229.
- [37] 左人宇,龚晓南,桂和荣.多因素影响下煤层底板变形破坏规律研究[J].东北煤炭技术,1999(5):3-7.  
ZUO Renyu, GONG Xiaonan, GUI Herong. Research of the coal seam floor's strain and fracture regularity influenced by several facts[J]. Coal Technology of NorthEast China, 1999(5): 3-7.
- [38] 武强,张志龙,马积福.煤层底板突水评价的新型实用方法 I:主控指标体系的建设[J].煤炭学报,2007,32(1):42-47.  
WU Qiang, ZHANG Zhilong, MA Jifu. A new practical methodology of the coal floor water bursting evaluating I: The master controlling index system construction[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 42-47.
- [39] 李白英,沈光寒,荆自刚,等.预防采掘工作面底板突水的理论与实践[J].煤矿安全,1988(5):47-48.  
LI Baiying, SHEN Guanghan, JING Zigang, et al. Theory and practice of preventing water inrush from the bottom plate of mining face[J]. Safety in Coal Mines, 1988(5): 47-48.
- [40] 马力.塔山煤矿5号和9号煤层底板突水危险性评价[D].阜新:辽宁工程技术大学,2016.  
MA Li. The coal floor water bursting risk evaluation of No. 5 and No. 9 coal seams at Tashan coal mine[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2016.
- [41] 王计堂,王秀兰.王家岭煤矿2号煤层顶底板突水危险性分析[J].煤炭科学技术,2011,39(12):120-124.  
WANG Jitang, WANG Xiulan. Analysis on water inrush danger from roof and floor of No. 2 seam in wangjialing mine[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(12): 120-124.
- [42] 国家煤矿安全监察局.煤矿防治水细则[M].北京:煤炭工业出版社,2018.
- [43] 武强,张志龙,张生元,等.煤层底板突水评价的新型实用方法 II:脆弱性指数法[J].煤炭学报,2007,32(11):1121-1126.  
WU Qiang, ZHANG Zhilong, ZHANG Shengyuan, et al. A new practical methodology of the coal floor water bursting evaluating II: The vulnerable index method[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1121-1126.
- [44] 李志强.基于五图-双系数法与脆弱性指数法的煤矿底板突水预测研究[D].焦作:河南理工大学,2017.  
LI Zhiqiang. Study on water bursting prediction of coal mine floor based on Five graph-Double coefficient method and Vulnerability index method[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2017.
- [45] 刘峰,郭林峰,张建明,等.煤炭工业数字智能绿色三化协同模式与新质生产力建设路径[J].煤炭学报,2024,49(1):1-15.  
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHANG Jianming, et al. Synergistic mode of digitalization-intelligentization-greeniation of the coal industry and its path of building new coal productivity[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 1-15.
- [46] 董书宁.人工智能技术在煤矿水害防治智能化发展中的应用[J].煤矿安全,2023,54(5):1-12.  
DONG Shuning. Application of artificial intelligence technology in intelligent development of coal mine water disaster prevention and control[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(5): 1-12.
- [47] 姚辉,尹慧超,梁满玉,等.机器学习方法在矿井水防治理论体系研究中的应用思考[J].煤田地质与勘探,2024,52(5):107-117.  
YAO Hui, YIN Huichao, LIANG Manyu, et al. Some reflections on the application of machine learning to research into the theoretical system of mine water prevention and control[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(5): 107-117.
- [48] 姚辉,尹慧超,尹尚先,等.底板突水危险性评价研究进展[J].煤炭科学技术,2024,52(S1):183-191.  
YAO Hui, YIN Huichao, YIN Shangxian, et al. Developing of the evaluation of water inrush risk from coal seam floor[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S1): 183-191.
- [49] YIN H C, WU Q, YIN S X, et al. Predicting mine water inrush accidents based on water level anomalies of borehole groups using long short-term memory and isolation forest[J]. Journal of Hydrology, 2023, 616: 128813.
- [50] YIN H C, ZHANG G Z, WU Q, et al. A deep learning-based data-driven approach for predicting mining water inrush from coal seam floor using microseismic monitoring data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 4504815.
- [51] 尹尚先,王玉国,李文生.矿井水灾害:原因·对策·出路[J].煤田地质与勘探,2023,51(1):214-221.  
YIN Shangxian, WANG Yuguo, LI Wensheng. Cause, countermeasures and solutions of water hazards in coal mines in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 214-221.
- [52] 王国法,刘峰,孟祥军,等.煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J].煤炭科学技术,2019,47(8):1-36.  
WANG Guofa, LIU Feng, MENG Xiangjun, et al. Research and practice on intelligent coal mine construction(primary stage)[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 1-36.
- [53] YIN H C, ZHANG G Z, WU Q, et al. Transfer learning with transformer-based models for mine water inrush prediction: A multivariate analysis using sparse and imbalanced monitoring data[J]. Mine Water and the Environment, 2024, 43(4): 707-726.