

基于煤层底板标高控制区水量均衡的矿井突涌水蔓延模拟与应用

武强^{1,2,3}, 王潇^{1,2,3}, 赵颖旺^{1,2,3}, 张小燕², 贾明瑛²

(1. 中国矿业大学(北京)内蒙古研究院, 内蒙古鄂尔多斯 017000; 2. 中国矿业大学(北京)国家煤矿水害防治工程技术研究中心, 北京 100083; 3. 中国矿业大学(北京)矿山水防治与资源化利用国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100083)

摘要: 矿井突涌水蔓延模拟是水害应急救援与处置方案制定的重要基础, 针对数值模拟方法计算速度慢的问题, 提出了一种基于煤层底板标高控制区水量均衡的矿井突涌水蔓延模拟方法。基于矿井煤层底板标高和采掘空间展布规律, 分析了采掘空间底板标高的局部高点、局部低点和突涌水蔓延过程中的分叉分流点对突涌水蔓延过程的控制作用, 据此对采掘空间进行区域划分, 提出了控制区的概念及其划分方法。依据水量均衡原理, 控制区内积水水位与累积流入控制区的水量存在对应关系, 累积突涌水量和控制区邻接关系共同控制着矿井全局突涌水蔓延过程。煤层底板标高控制区的划分和水量均衡方法的使用简化了局部区域蔓延过程计算(控制区内水量均衡)复杂度, 缩小了采掘空间拓扑(以控制区为单元)规模, 能够大大提高矿井全局突涌水蔓延过程计算速度。但是, 对于局部蔓延过程的刻画较为粗略。因此, 利用三维流体力学仿真软件 Fluent 模拟了局部巷道水流蔓延特征, 包括水流下蔓时不同巷道坡度条件下的流速分布, 以及不同巷道分叉空间结构条件下的分流规律, 并利用随机森林方法进行了回归分析建模, 用于局部蔓延过程的精细化模拟。以邢台矿西井为例, 实现了工作面突涌水蔓延过程模拟, 结果表明: 利用基于煤层底板标高控制区水量均衡的矿井突涌水蔓延模拟方法可以计算任意时间矿井全局范围的积水水位, 动态掌握突涌水蔓延过程, 模拟 12 h 突涌水的计算速度较数值模拟方法提升了近 60 倍。同时, 基于控制区可以快速计算得到避灾与救援线径中关键位置淹没时的累积突涌水量及对应时间, 为应急救援与处置提供直接依据。

关键词: 突涌水蔓延; 采掘空间; 控制区; 水量均衡; 随机森林

中图分类号: TD 745 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)03-0545-16

Simulation and application of mine water inrush spreading based on water balance in the control area of coal seam floor elevation

WU Qiang^{1,2,3}, WANG Xiao^{1,2,3}, ZHAO Yingwang^{1,2,3}, ZHANG Xiaoyan², JIA Minghui²

(1. Inner Mongolia Research Institute, China University of Mining and Technology (Beijing), Ordos, Inner Mongolia 017000, China; 2. National Engineering Research Center of Coal Mine Water Hazard Controlling, China University of

收稿日期: 2024-12-03 修回日期: 2025-04-17 DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.20240572

基金项目: 国家自然科学基金项目(42027801, 42202274, 42202283)

通信作者: 王潇(1996—), 男, 湖北省荆门市人, 博士研究生, 从事矿井防治水方面的研究。

E-mail: wangxiao_sa@163.com Tel: 13552303593

引用格式: 武强, 王潇, 赵颖旺, 等. 基于煤层底板标高控制区水量均衡的矿井突涌水蔓延模拟与应用[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(3): 545-560.

WU Qiang WANG Xiao, ZHAO Yingwang, et al. Simulation and application of mine water inrush spreading based on water balance in the control area of coal seam floor elevation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(3): 545-560.

Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Mine Water Control and Resources Utilization, National Mine Safety Administration, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The simulation of mine water inrush spreading serves as a crucial essential foundation for formulating emergency rescue and disposal plans for water disasters. To address the computational inefficiency inherent in traditional numerical simulation methods, this study proposes a novel approach for simulating mine water inrush spreading based on water balance in the control area of coal seam floor elevation. Based on the coal seam floor elevation and spatial distribution characteristics of mining space, this study systematically analyzes the controlling effects exerted by localized elevation features (high/low points) and hydraulic bifurcation/diversion points during water inrush spreading. Thus, the mining space is regionally divided, and the concept and division method of the control area are proposed. The water balance principle reveals a corresponding correlation between the accumulated water level within a control area and the cumulative inflow into that region. The global spreading process of water inrush within the mine is governed by both the cumulative water inflow volume and the adjacency relationships between control areas. This methodology simplifies computational complexity by reducing the topological scale of the mining space (using control areas as fundamental units) and streamlining localized spread calculations through water balance analysis, thereby significantly accelerating global simulation speed. However, the depiction of the local spread process is relatively coarse. To address this limitation, high-resolution simulations of localized water flow in roadways are conducted using Fluent, a three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) software. These simulations quantify flow velocity distributions under varying roadway slopes during downward water movement and characterize diversion patterns across different bifurcation geometries. Regression analysis modeling is conducted using the random forest method for refined simulation of the local spread process. A case study of the West Well in Xingtai Mine demonstrates the method's effectiveness in simulating water inrush spreading across a working face. The results show that the simulation method of mine water inrush spreading based on water balance in the control area of coal seam floor elevation enables precise calculation of mine-wide water accumulation levels at arbitrary time while dynamically tracking water inrush spreading patterns. Notably, this approach achieved a 60-fold acceleration in computational efficiency compared to conventional numerical simulations when modeling 12-hour water inrush scenarios. Furthermore, the framework allows rapid determination of both cumulative water volumes and critical submersion timelines for key locations along evacuation and rescue routes, providing direct references for emergency rescue and disposal.

Key words: water inrush spreading; mining space; control area; water balance; random forest

矿井水害事故是影响煤矿安全生产的主要危害之一,不仅会造成巨大的经济损失,而且严重威胁井下人员的生命安全^[1-5]。随着开采深度和强度逐步加大,复杂的水文地质条件给矿井水害防治与应急处置带来了巨大的挑战^[6]。近年来,人工智能、大数据等信息技术的蓬勃发展,推动了煤矿工业向智能化、数字化转型升级^[7]。为了科学、快速地应对矿井水害事故,矿井水害应急救援与处置的研究与智能化成为目前研究热点之一^[8-12]。矿井

突涌水蔓延模拟技术是水害应急智能化建设中的关键,及时准确地掌握突涌水蔓延影响范围,是水害应急救援与处置方案制定的重要基础。

针对矿井突涌水蔓延模拟方面的问题,大量的学者进行了相应的研究。文献^[13]利用计算流体力学软件 CFX 模拟了水流在三维分叉巷道中的蔓延情况,可得到水流在三维空间的瞬态分布,分析了水流在分叉巷道流动过程中的特征和风险,但是三维数值模拟速度较慢,一般为小时级别,更

适合局部巷道的水流模拟. 文献[14]基于暴雨洪水管理模型(SWMM)将矿井巷道突涌水蔓延简化为一维水流模拟,较贴近真实的水流蔓延物理规律,进行了数值求解和可视化分析,但在实际应用中,需实时修正模拟结果与实际监测数据的差异,数值模拟方法每模拟1 h蔓延过程所需时间为几秒到几十秒之间,计算速度也难以满足实际需求. 文献[15]采用格子 Boltzmann 方法对2个及多个巷道任意角度耦合模型进行了突水蔓延模拟,并与数值模拟软件 Comsol 模拟结果进行了对比验证. 文献[16]利用元胞自动机模型进行了矿井水灾蔓延模拟与可视化. 文献[17]采用光滑粒子流体动力学算法求解 N-S 方程,结合粒子系统进行流体模拟,对水流蔓延进行了物理概化,采用固定边界粒子法进行边界处理,结合八叉树方法进行表面重构实现水体渲染,实现了突水蔓延仿真,会损失一定的精度,计算速度有所提高,但对于大规模采掘空间井巷网络蔓延模拟速度仍然不足. 文献[18]利用有向图概化了巷道网络,根据预测突涌水量,巷道断面和长度等因素,生成突水蔓延线路,并通过蔓延约束算法计算了突水范围,计算速度较快,但对于局部蔓延计算不足. 文献[19-20]利用图论理论求解了突水下向蔓延和上向升涨的路径,利用经验公式计算了突水蔓延速度与蔓延时间. 文献[21]提出了水流向下流动和向上升涨的路径生成数学模型,并将非恒定流简化为分段恒定流,用一维恒定流精确公式迭代计算水位及流速,对局部下蔓时流速的计算更加准确. 文献[22]结合图论对下蔓与上涨路径进行遍历,引入当量长度的概念求解了蔓延时间,每隔单位时间获取井巷蔓延情况并进行了可视化. 文献[23]基于 Converse Earth 平台和路径搜索算法对矿井突水蔓延过程进行了虚拟实现和可视化,也引入了当量长度的概念,用于计算蔓延时间,但在计算复杂采掘空间井巷网络中的分流和汇流情况时,计算复杂度较高,难以保证精度.

矿井采掘过程中,随着煤层高低起伏,往往形成较复杂的空间结构,突涌水在进入采掘空间后的流动蔓延过程受到采掘空间拓扑结构的控制. 本文基于矿井煤层底板标高和采掘空间展布规律,对矿井采掘空间底板标高的局部高点、局部低点和突涌水蔓延过程中的分叉分流点进行分析,提出了控制区的概念及其划分方法. 将整个采掘空间井巷网络划分成多个互不重合的控制区,利用控制区揭示矿井突涌水蔓延过程. 依据水量均

衡原理,计算了控制区的积水水位与累积流入控制区水量的对应关系,累积突涌水量与控制区邻接关系共同控制着矿井全局突涌水蔓延过程. 利用三维流体力学仿真软件 Fluent^[24]模拟局部水流下蔓时不同巷道坡度条件下的流速分布,以及不同巷道分叉空间结构条件下的分流规律,并利用随机森林方法进行回归分析建模,应用于控制区内的下蔓速度计算与控制区之间的分叉分流计算. 以河北邢台煤矿西井为例,模拟了回采和掘进工作面突涌水时,采掘空间中的水流蔓延过程.

1 基本原理

基于矿井煤层底板标高和采掘空间展布规律,对采掘空间底板标高的局部高点、局部低点和突涌水蔓延过程中的分叉分流点进行分析. 局部高点能够起到阻隔水流蔓延的作用,利用局部高点可以将采掘空间划分为若干区域. 这些区域形似“水池”具有一定的积水能力,只有当积水水位超过其任意一个局部高点的边界点时,水流流向相邻区域. 这些由局部高点划分的区域控制着突涌水蔓延过程,因此将这些区域称为控制区. 控制区内的局部低点是水流由下蔓过程转为积水上涨过程的转折点,也是突涌水蔓延过程最早的积水位置. 突涌水蔓延过程中的分叉分流点同时具备局部高点的阻水作用和水流下蔓分流的特性,可进一步细化控制区的划分,简化控制区内水流蔓延过程的计算. 控制区内水流蔓延过程均表现为先下蔓至控制区高程最低点,然后逐渐积水上涨至局部高点或分叉分流点. 控制区内的积水上涨过程可依据水量均衡原理考虑积水空间和积水体积进行计算. 当水流上涨越过局部高点和分叉分流点时,将蔓延至邻接控制区,且邻接控制区内部具有类似的蔓延过程. 当分叉分流点的分流分支均被淹没后,可将分流分支所在控制区合并进行积水上涨过程计算. 利用累积突涌水量与控制区邻接关系可快速模拟突涌水蔓延过程.

2 煤层底板标高控制区划分

2.1 突涌水蔓延控制点分析

在井巷工程中,采掘空间的关键断面可抽象为节点,2个相邻节点之间的采掘空间可抽象为段,矿井采掘空间可概化成由节点和段组成的网络结构,如图1所示. 其中,关键断面是指变坡位置、分叉位置、断面形态或尺寸改变的位置. 矿井采掘空间井巷网络结构可以用无向图 $G=(V, E)$

表示,其中 V 为网络结构中所有节点的集合, E 为所有段的集合. 基于矿井煤层底板标高和采掘空间展布规律,对突涌水蔓延过程起控制作用的节点主要包括底板标高的局部高点、局部低点和突涌水蔓延过程中的分叉分流点 3 类,本文中称为突涌水蔓延控制点.

局部高点是指某点的高程大于其所有邻接点高程,即局部区域内的高程最大点;局部低点对应为局部区域内的高程最小点,如图 1 所示,编号为 3,11,14,22 的黑色点为局部高点,编号为 1,12,18,21 的绿色点为局部低点. 当突涌水蔓延到局部低点时,可以形成局部低洼地积水;而当积水上涨漫过局部高点时,水流会进入到相邻的局部低点所在区域,形成新的低洼地积水.

在突涌水向下蔓延流动遇到多分支时,水流会同时流向各个分支形成分流,这样的分流位置兼具局部高点和局部低点的作用,命名为“分叉分

流点”,编号为 13,17,20 的红色点均为分叉分流点. 当其某一分流分支积水后,该点的作用类似于局部高点,水流漫过该点后才向其他分流分支的局部低点流动. 当该点所有分流分支淹没后,该点又可以作为局部低点开始积水,水位不断上涨. 如果一个分叉点所有分流分支聚合为一处,则该分叉点不再具有局部高点的作用,只是普通分叉点,如图 1 中点 10,2 个分流分支聚合到点 7.

若某一局部区域内所有连通点的高程都相等,则该区域称为平地区域. 若平地区域邻接点的高程都小于此区域高程,则平地区域为局部高地,具有和局部高点一样的性质,点 4,5 组成了局部高地;若邻接点的高程都大于此区域高程,则平地区域为局部低地,具有和局部低点一样的性质,点 15,16 组成了局部低地. 在分析突涌水蔓延过程时,平地区域作为一个整体进行分析和计算.

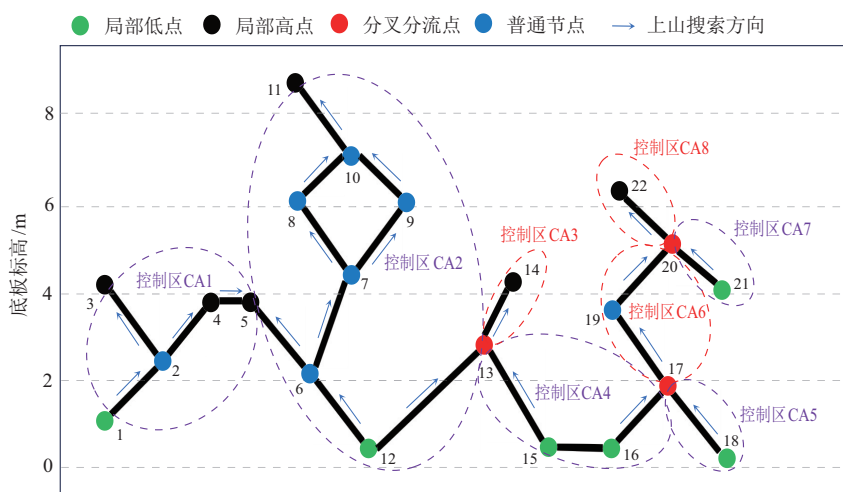


图 1 矿井采掘空间井巷网络底板标高结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of floor elevation structure of the tunnel network in mining space

2.2 控制区

矿井采掘空间具有复杂的井巷网络拓扑结构,通过对突涌水蔓延控制点的分析并结合水往低处流的基本规律,利用局部高点(局部高地)和分叉分流点将整个采掘空间划分为具有相同性质的子区域. 在某一子区域中,任意一点发生突涌水,水流都会先流向子区域的最低点,然后开始淹没子区域直至子区域的边界点(即局部高点或分叉分流点),才会蔓延到相邻的子区域. 这样的子区域称为控制区,控制区内任意点发生突涌水后的矿井全局突涌水蔓延过程是一致的.

矿井采掘空间划分控制区的方法如下:遍历采掘空间,以煤层底板标高为依据,确定局部高点、局部高地和局部低点、局部低地,如

图 1 所示,局部高点有 {3, 11, 14, 22}, 局部高地有 {4, 5}; 局部低点有 {1, 12, 18, 21}, 局部低地有 {15, 16}. 分别以局部低点、局部低地或分叉分流点为起始点,划分控制区. 具体计算过程为:1)从局部低点或局部低地开始上山搜索;2)若遇到局部高点或局部高地,则停止搜索;3)在上山搜索过程中遇到分叉点时,若此次搜索过的分支数等于其下山分支数,则继续沿所有上山分支搜索,如点 10;否则,此分叉点为分叉分流点,重新开始计算新的控制区,如点 17;

4)当搜索完整个采掘空间后,控制区划分完成且划分结果是唯一的. 如图 1 所示,整个采掘空间划分控制区时的搜索方向如蓝色箭头所示. 局部高点(局部高地)和分叉分流点将采掘空间

井巷网络划分成 8 个控制区, 记为: $CA1 = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, $CA2 = \{12, 13, 6, 5, 7, 8, 9, 10, 11\}$, $CA3 = \{13, 14\}$, $CA4 = \{15, 16, 13, 17\}$, $CA5 = \{18, 17\}$, $CA6 = \{17, 19, 20\}$, $CA7 = \{21, 20\}$, $CA8 = \{20, 22\}$.

根据控制区的划分方式可将控制区分为 2 类: 一类是包含局部低点或局部低地区域的控制区, 如图 1 紫色虚线圈的控制区 CA4; 另一类是以分叉分流点作为最低点的控制区, 如图 1 红色虚线圈的控制区 CA6. 第 1 类控制区具有优先积水能力, 水流到局部低点或局部低地区域即开始积水. 第 2 类控制区只有当水流蔓延到其分支的第 1 类控制区形成积水且水位标高超过分叉分流点后, 该类控制区才开始积水、水位上涨. 控制区的局部高点 and 分叉分流点统称为控制区的边界点.

3 基于水量均衡的突涌水蔓延模拟

3.1 模拟流程

基于突涌水蔓延控制点的分析, 以控制区为基本单元对矿井突涌水蔓延过程进行快速计算, 主要包括控制区内和控制区间水流蔓延模拟两部分. 其中, 控制区内水流蔓延模拟主要包括水流下蔓和上涨计算两部分. 当控制区内部任意位置发

生突涌水后, 由于重力作用水流先下蔓至控制区高程最低点, 然后开始积水, 水位上涨. 根据水量均衡方法由控制区的进水量、排水量及容量计算控制区水位, 可以得到控制区内各个位置的积水水位值. 当水流蔓延到控制区的边界点时, 开始控制区间水流蔓延模拟计算, 主要包括 2 种情况: 1) 边界点为分叉分流点, 水流分叉分流进入邻接控制区; 2) 边界点为局部高点, 水流越过局部高点流入邻接控制区. 当邻接控制区水位也上涨至此边界点时, 相邻控制区合并进行积水上涨过程计算. 控制区内水流下蔓速度计算和控制区间分叉分流计算显著影响着矿井全局突涌水蔓延过程模拟精度. 本文对突涌水局部蔓延规律进行了建模分析, 三维模拟软件 Fluent^[26] 或 CFX^[13] 可以准确刻画三维局部空间中的水流蔓延情况, 尤其是局部分叉分流的规律. 但由于其计算速度较慢, 实际应用时可提前模拟大量局部蔓延(下蔓流速和分叉分流)的水流特征数据, 并利用随机森林算法对这些局部蔓延规律进行回归学习, 最后用于突涌水蔓延过程中下蔓流速的计算和分叉分流量的计算, 既保证了局部蔓延的精度, 也提高了计算速度. 突涌水蔓延模拟流程如图 2 所示.

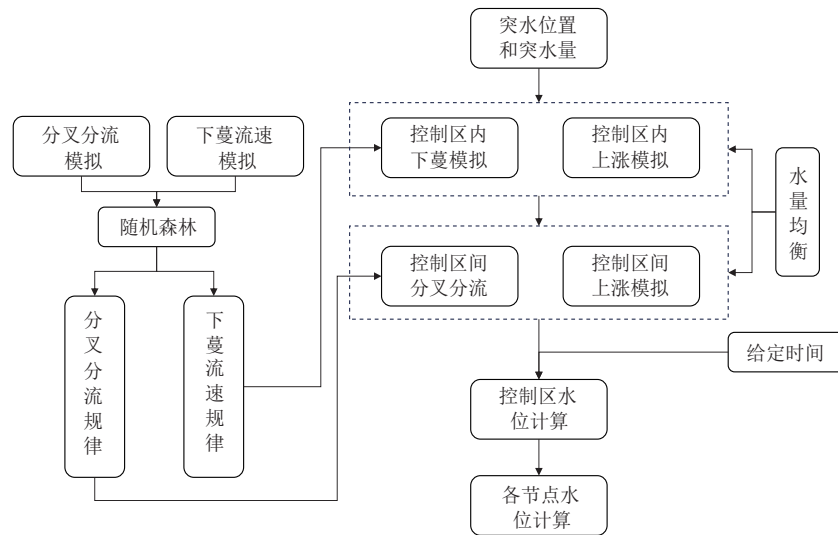


图 2 突涌水蔓延模拟流程

Fig. 2 Simulation process of water inrush spreading

3.2 控制区内部水流蔓延模拟

控制区内发生突涌水, 水流进入采掘空间后先下蔓至控制区的高程最低点. 当高程最低点为局部低点或分流分支均被淹没的分叉分流点时, 控制区内水位开始上涨, 累积流入控制区的水量和控制区空间形态决定了积水水位. 在淹没该控

制区与其他邻接控制区的边界点前, 突涌水不会扩散到其他区域. 如图 1 所示, 若点 15 发生突涌水, 首先淹没局部低地区域 {15, 16}, 在淹没分叉分流点 13 和 17 之前, 不会扩散到其他区域.

当积水水位标高达到某一水平时, 可以根据巷道的断面尺寸、长度、倾角等计算出某一巷道段

的积水量,由采空区的面积、煤层倾角、采煤高度等计算采空区的积水量,并通过巷道段和采空区积水量的累加计算控制区的累积水量. 矿井巷道通常有水平巷道、倾斜巷道和垂直巷道 3 类. 如图 3 所示,当倾角为 0° 时即为水平巷道,当倾角为 90° 时即为垂直巷道. 根据矿井地质条件、采掘条件、用途等的不同,巷道断面包括矩形、梯形、半圆拱形等横截面.

以矩形截面为例,根据倾角的大小不同,巷道段积水量计算方法可分为以下 2 类:

1) 近垂直巷道: 倾角 α 满足 $h \cdot \cos \alpha < l \cdot \sin \alpha$ (图 3a), 可由式(1)计算.

$$V = \begin{cases} \frac{(x-x_0)^2 w}{\sin 2\alpha} \\ \frac{w \cdot h \cdot (x-x_0)}{\sin \alpha} - \frac{w \cdot h^2 \cdot \cot \alpha}{2} \\ w \cdot h \cdot l - \frac{w(h \cdot \cos \alpha + l \cdot \sin \alpha - x + x_0)^2}{\sin 2\alpha} \end{cases}$$

$$V = \begin{cases} \frac{(x-x_0)^2 w}{\sin 2\alpha} \\ \frac{w \cdot l \cdot (x-x_0)}{\cos \alpha} - \frac{w \cdot l^2 \cdot \tan \alpha}{2} \\ w \cdot h \cdot l - \frac{w \cdot (h \cdot \cos \alpha + l \cdot \sin \alpha - x + x_0)^2}{\sin 2\alpha} \end{cases}$$

式中: V 为巷道段积水量; w 为巷道段断面宽度; h 为巷道段高度; l 为巷道段长度; x 为水位标高; x_0 为巷道段较低点的底板标高; α 为巷道倾角, $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. 其他截面巷道积水量的计算思路与矩形截面类似,不同截面巷道的计算方式只影响局部巷道体积的计算,不影响本文方法的整体思路.

采空区积水量的计算公式为

$$V = \frac{K \cdot S \cdot H}{\cos \theta}, \quad (3)$$

式中: S 为采空区水平面积; θ 为煤层倾角; H 为采煤高度; K 为经验系数,一般取 0.20~0.35.

$$V_{12-7}(x) = V_{12-6}(x) + V_{12-13}(x) + V_{6-5}(x) + V_{6-7}(x), \quad (5)$$

$$V_{7-11}(x) = V_{7-8}(x) + V_{7-9}(x) + V_{8-10}(x) + V_{9-10}(x) + V_{10-11}(x), \quad (6)$$

每条巷道段的累积水量函数 ($V_{12-6}(x)$, $V_{12-13}(x)$, ...) 可使用式(1)和(2)计算. W_{12} 表示与节点 12 底板标高相等的水位; $V(x)$ 为控制区的累积水量.

若已知突涌水量大小,可依据水量均衡原理计算不同时间控制区中各位置的水位以掌握突涌

2) 近水平巷道: 倾角 α 满足 $h \cdot \cos \alpha \geq l \cdot \sin \alpha$ (图 3b), 可由式(2)计算.

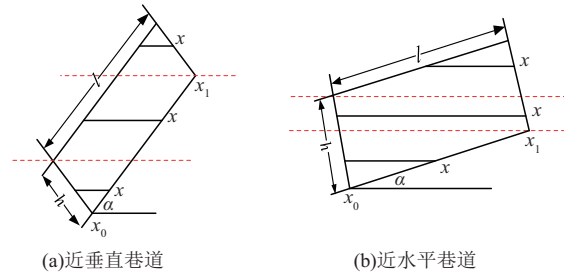


图 3 矩形近垂直巷道与近水平巷道示意
Fig. 3 Rectangular near-vertical and near-horizontal roadway

$$x_0 < x \leq h \cdot \cos \alpha + x_0,$$

$$h \cdot \cos \alpha + x_0 < x \leq l \cdot \sin \alpha + x_0,$$

$$l \cdot \sin \alpha + x_0 < x \leq l \cdot \sin \alpha + h \cdot \cos \alpha + x_0, \quad (1)$$

$$x_0 < x \leq l \cdot \sin \alpha + x_0,$$

$$l \cdot \sin \alpha + x_0 < x \leq h \cdot \cos \alpha + x_0,$$

$$h \cdot \cos \alpha + x_0 < x \leq l \cdot \sin \alpha + h \cdot \cos \alpha + x_0, \quad (2)$$

在突涌水发生之前,可以提前计算和记录淹没控制区每个边界点的累积水量. 累积水量可表示为不同标高边界节点对应的分段函数. 例如在图 1 中,控制区 CA2 的累积水量可通过下式计算:

$$V(x) = \begin{cases} 0 & x < W_{12}, \\ V_{12-7}(x) & W_{12} \leq x < W_{13}, \\ V_{12-7}(x) & W_{13} \leq x < W_5, \\ V_{12-7}(x) + V_{7-11}(x) & x \geq W_5, \end{cases} \quad (4)$$

其中:

水动态蔓延情况. 首先,计算水流向下蔓延时的流速和水位. 当水流向下蔓延时属于明渠流流动,传统方法一般采用流体力学中的谢才公式计算流速^[25],本文利用随机森林模型计算. 水流下蔓时的水位、水量与流速具有以下关系:

$$h_p = \frac{Q}{\omega \cdot v}, \quad (7)$$

式中： h_p 为水位； Q 为流量； v 为流速。

其次，计算每个控制区的积水水位。通过控制区的进水量和排水量计算给定时间的累积水量 V 。然后，利用插值方法计算上涨水位，如图 4 所示。绿点代表控制区的最低点，红点和黑点分别代表控制区的 2 个不同底板标高的边界点，图中 x_1-V_1 为黑色节点的底板标高和此标高下 2 条巷道的容量； x_2-V_2 为红色节点的底板标高和此标高下 2 条巷道的容量； x_3-0 为绿色节点的底板标高和对应的容量。控制区的水位 x 可由下式计算：

$$x = \begin{cases} x_3 + \frac{V}{V_2}(x_2 - x_3) & 0 \leq V \leq V_2, \\ x_2 + \frac{V - V_2}{V_1 - V_2}(x_1 - x_2) & V_2 < V \leq V_1, \end{cases} \quad (8)$$

其中计算 V_2 时同时考虑了 2 条巷道，所以当 $0 \leq V \leq V_2$ 时，控制区水位受 2 条巷道影响，也可插值计算。最后，控制区内每个节点的积水水位可由下式计算：

$$h_n = \begin{cases} x - x_n & x \geq x_n, \\ 0 & x < x_n, \end{cases} \quad (9)$$

式中： h_n 和 x_n 分别为控制区内任意节点的水位和底板标高。

$$\begin{cases} V_{17} = V_{CA4}(x_{17}) + V_{CA5}(x_{17}), \\ V_{13} = V_{CA2}(x_{13}) + V_{CA4}(x_{13}) + V_{CA5}(x_{17}) + V_{CA6}(x_{13}), \end{cases} \quad (10)$$

式中： $V_{CA2}(x)$ 、 $V_{CA4}(x)$ 、 $V_{CA5}(x)$ 、 $V_{CA6}(x)$ 为控制区 CA2、CA4、CA5 和 CA6 的累积水量计算函数，通过类似式(4)计算； V_{17} 和 V_{13} 分别为淹没节点 17 和 13 的累积水量； x_{13} 和 x_{17} 分别为节点 13 和 17 的底板标高。

突涌水位置、累积突涌水量、控制区的积水特征与控制区的邻接关系决定了突涌水蔓延过程。如图 1 所示，如果局部高点 22 处发生突涌水，水流会在点 20 和点 17 处分叉分流，并在局部低点 21、18 和局部低地区域 {15, 16} 形成积水，然后水位不断上涨，水流蔓延范围不断扩大到左侧区域。如果同样是局部高点 3 处发生突涌水，水流将在局部低点 1 处形成积水，然后越过局部高地区域 {4, 5} 向相邻控制区蔓延。即在划分矿井控制区后，特定的位置发生突涌水的全局蔓延过程是确定的，且可在灾前进行分析和预测，突涌水发展阶段主要受到累积突涌水量的控制。

累积突涌水量与积水水位的关系为矿井水害

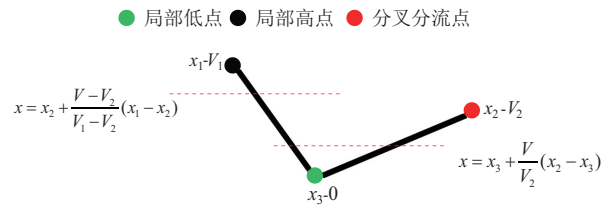


图 4 控制区水位计算示意
Fig. 4 Schematic diagram of water level calculation in control area

3.3 控制区之间水流蔓延模拟

突涌水在控制区之间的蔓延主要包括 2 种情况：一种是向下蔓延到分叉分流点形成分流，需计算流向每个分支的流量，分支流量利用随机森林模型进行计算；另一种是水位上涨越过控制区边界点蔓延到相邻控制区。相邻控制区的淹没过程同样受到累积突涌水量的影响。若相邻控制区也淹没到边界点标高时，这 2 个控制区可以合并分析，随着累积突涌水量的增加，积水水位共同上涨。如图 1 所示，若点 14 发生突涌水，首先会向下蔓延到点 13，形成分流，流向 2 个相邻的包含局部低点的控制区 CA2 和 CA4。对于控制区 CA4，只有累积突涌水量足以淹没点 17 时，才会扩展到右侧的相邻区域。当右侧相邻区域也淹没到点 17 时，2 个控制区水位共同上涨。淹没分叉分流点 17 和 13 的累积突涌水量由下式计算：

灾后分析与预测提供了新的思路。矿井突涌水量的大小不仅与充水水源性质有关，而且受充水通道过水能力的控制^[26]。由于突涌水过程中水岩作用机理复杂，充水通道的性质往往难以精细探查或预测分析，导致突涌水量的大小很难准确预测，为矿井水害灾情分析及预测带来不确定性。控制区的积水特征突出了累积突涌水量的作用，使得突涌水量分析可以更加关注累积水量的结果而不必纠结其时变过程，增加了以矿井淹没情况预测为目的的突涌水量分析的容错空间，且有利于不同范围淹没时间的分析与预测。

4 突涌水蔓延局部规律分析

4.1 下蔓流速模拟

水流在巷道中从高处向低处蔓延的过程中，流速主要受巷道坡度(β)和突涌水量的影响。从 3 个实际矿井的采掘工程平面图中提取了巷道的坡度数据，以 5° 为基础区间长度统计了巷道坡度在

各区间的数量及比例,如表 1 所示.巷道坡度主要集中在 $0^\circ\sim 5^\circ$ 范围内,存在少量坡度较大的情况,多为竖井、斜井等.使用 Fluent 模拟时巷道坡度选

取范围为 $0^\circ\sim 20^\circ$.突涌水量方面,根据历史水害事故中,达到的最大水量为 $21\text{ m}^3/\text{s}$.因此,本次模拟选取的水量范围为 $0.0167\sim 20.0000\text{ m}^3/\text{s}$.

表 1 巷道坡度统计表

Table 1 Roadway slope statistical chart

坡度范围/ $^\circ$	巷道数量/个	占比/%	坡度范围/ $^\circ$	巷道数量/个	占比/%
0~5	17 327	79.745	45~50	12	0.055
5~10	2 021	9.301	50~55	7	0.032
10~15	1 015	4.671	55~60	7	0.032
15~20	754	3.470	60~65	11	0.051
20~25	327	1.505	65~70	5	0.023
25~30	112	0.515	70~75	1	0.005
30~35	35	0.161	75~80	3	0.014
35~40	16	0.073	80~85	1	0.005
40~45	17	0.078	85~90	57	0.262

利用 Fluent 建立巷道模型,如图 5 所示,圆形进水口直径为 2 m,巷道断面为 $3\text{ m}\times 4\text{ m}$,前延巷道长 5 m、倾角为 1° ,下蔓巷道长 50 m.采用 Meshing 中的补片协调算法划分网格,添加膨胀层,网格数为 76 000,节点数为 25 600.模型导入 Fluent 中,瞬态模拟,考虑重力,选用标准 k-e 湍流模型和 VOF 多相流模型,近壁面均采用标准壁面函数法.入口采用流量入口,依次设置不同的流量,出口采用压力出口,其余边界为无滑移壁面.为获取流速值,设置 10 m 等间距的 5 个监测面 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 ,

其中 x_1 是距离出口 5 m 的局部高点.根据流速和网格大小选定时间步长为 0.03,收敛控制的最大迭代次数为 15,收敛平均残差目标值为 0.001.工况设计及 Fluent 模拟稳定后的流速结果如表 2 所示.

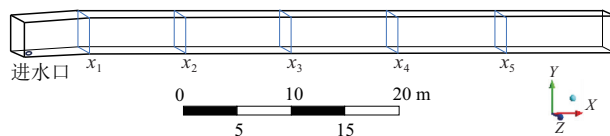


图 5 下蔓巷道模型

Fig. 5 Descending roadway model

表 2 不同流量不同坡度条件水流下蔓流速模拟结果

Table 2 Simulation results of flow velocity under different flow and slope conditions

流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$										
	$\beta=0.17^\circ$	$\beta=1^\circ$	$\beta=2^\circ$	$\beta=3^\circ$	$\beta=4^\circ$	$\beta=5^\circ$	$\beta=7^\circ$	$\beta=9^\circ$	$\beta=10^\circ$	$\beta=15^\circ$	$\beta=20^\circ$
0.016 7	0.35	1.20	1.76	2.21	2.56	2.79	3.22	3.73	4.01	4.64	5.42
0.167 0	0.49	1.48	2.03	2.52	2.90	3.07	3.61	4.26	4.55	5.40	6.43
0.500 0	0.48	1.71	2.76	3.21	3.43	3.79	3.94	4.08	4.18	5.32	5.53
1.000 0	0.65	2.69	3.18	4.18	4.55	4.92	5.21	5.73	6.17	6.53	6.60
2.000 0	0.95	3.34	4.27	5.02	5.49	6.05	6.59	7.35	7.68		
3.000 0	1.21	3.71	4.63	5.47	6.00	6.58	7.28	8.15	8.62	10.00	11.36
6.000 0	1.64	4.41	5.45	6.19	6.83	7.46	8.27	9.32	9.66		
10.000 0	1.90	4.84	5.89	6.55	7.08	7.85	8.64	9.79	10.19	12.10	13.47
15.000 0	2.35	5.30	6.37	7.22	7.68	8.42	9.19	10.19	10.48	12.81	14.26

4.2 分叉分流模拟

突涌水向下蔓延流动遇到多分支时,水流会同时流向各个分支形成分流,每条分支巷道的流量大小主要受到分叉角度、分支的坡度和突涌水量的影响.实际井巷工程中,主要存在三分叉与四分叉的巷道结构,本文以三分叉结构为研究对象进行分析.从 3 个实际矿井的采掘工程平面图中

提取了巷道分叉角数据,如图 6 所示,横纵轴分别为分支巷道的分叉角度 α_1 和 α_2 .从图 6 中可以看出,巷道分叉角度多为一个小角度与其他较大角度的组合,因此本次模拟设计的巷道分叉角度以 $\alpha_1=0^\circ$ 和 $\alpha_2=10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ$ 组合为主.模拟的突涌水量的取值为 $0.0167, 0.1670, 0.5000$ 和 1.0000 .

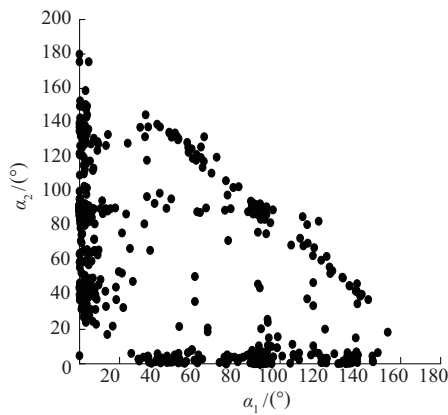


图 6 分叉角度统计

Fig. 6 Bifurcation angle chart

利用 Fluent 建立分叉巷道模型,如图 7 所示,圆形进水口直径为 2 m,巷道断面为 3 m×4 m,前延巷道长 20 m,2 条分支巷道分别为 a,b,长度均

为 40 m.采用补片协调算法划分网格,网格数为 188 000,节点数为 59 000,其余设置同下蔓模拟.为便于表示,2 条分支巷道的分叉角分别为 α_1 和 α_2 ,其中 $\alpha_1=0^\circ, \alpha_2=10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ$.工况设计及 Fluent 模拟稳定后的分支巷道 b 与 a 的分流量之比结果如表 3 所示.

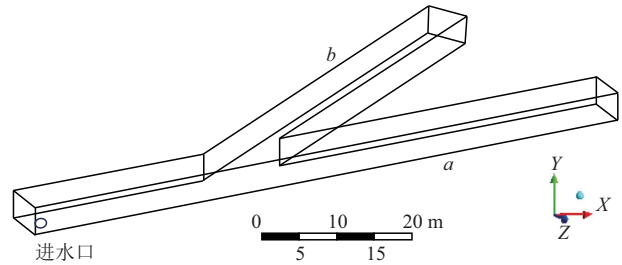


图 7 分叉巷道模型

Fig. 7 Bifurcation roadway model

表 3 不同流量不同分叉结构条件分叉分流模拟结果

Table 3 Simulation results of bifurcation diversion under different flow and bifurcation structure conditions

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$\alpha_2/$ ($^\circ$)	分支坡度/ ($^\circ$)	分流比	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$\alpha_2/$ ($^\circ$)	分支坡度/ ($^\circ$)	分流比	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$\alpha_2/$ ($^\circ$)	分支坡度/ ($^\circ$)	分流比
0.016 7	10	0.17	0.87	0.016 7	30	4	0.12	0.016 7	70	2	0.07
0.167 0	10	0.17	0.90	0.167 0	30	4	0.11	0.167 0	70	2	0.08
0.500 0	10	0.17	0.93	0.500 0	30	4	0.11	0.500 0	70	2	0.20
1.000 0	10	0.17	0.99	1.000 0	30	4	0.11	1.000 0	70	2	0.19
0.016 7	10	1	0.84	0.016 7	30	5	0.10	0.016 7	70	3	0.06
0.167 0	10	1	0.86	0.167 0	30	5	0.10	0.167 0	70	3	0.06
0.500 0	10	1	0.90	0.500 0	30	5	0.11	0.500 0	70	3	0.07
1.000 0	10	1	1.03	1.000 0	30	5	0.12	1.000 0	70	3	0.07
0.016 7	10	2	0.56	0.016 7	50	0.17	0.44	0.016 7	70	4	0.06
0.167 0	10	2	0.55	0.167 0	50	0.17	0.44	0.167 0	70	4	0.07
0.500 0	10	2	0.58	0.500 0	50	0.17	0.22	0.500 0	70	4	0.08
1.000 0	10	2	0.67	1.000 0	50	0.17	0.25	1.000 0	70	4	0.09
0.016 7	10	3	0.41	0.016 7	50	1	0.14	0.016 7	70	5	0.05
0.167 0	10	3	0.39	0.167 0	50	1	0.15	0.167 0	70	5	0.05
0.500 0	10	3	0.42	0.500 0	50	1	0.14	0.500 0	70	5	0.06
1.000 0	10	3	0.45	1.000 0	50	1	0.17	1.000 0	70	5	0.08
0.016 7	10	4	0.36	0.016 7	50	2	0.10	0.016 7	90	0.17	0.12
0.167 0	10	4	0.32	0.167 0	50	2	0.10	0.167 0	90	0.17	0.02
0.500 0	10	4	0.34	0.500 0	50	2	0.10	0.500 0	90	0.17	0.02
1.000 0	10	4	0.36	1.000 0	50	2	0.13	1.000 0	90	0.17	0.03
0.016 7	10	5	0.33	0.016 7	50	3	0.08	0.016 7	90	1	0.08
0.167 0	10	5	0.27	0.167 0	50	3	0.08	0.167 0	90	1	0.10
0.500 0	10	5	0.30	0.500 0	50	3	0.09	0.500 0	90	1	0.09
1.000 0	10	5	0.31	1.000 0	50	3	0.08	1.000 0	90	1	0.09
0.016 7	30	0.17	0.82	0.016 7	50	4	0.08	0.016 7	90	2	0.06
0.167 0	30	0.17	0.76	0.167 0	50	4	0.08	0.167 0	90	2	0.06
0.500 0	30	0.17	0.63	0.500 0	50	4	0.08	0.500 0	90	2	0.07
1.000 0	30	0.17	0.67	1.000 0	50	4	0.08	1.000 0	90	2	0.07

续表3

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	α_2 / ($^\circ$)	分支坡度/ ($^\circ$)	分流比	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	α_2 / ($^\circ$)	分支坡度/ ($^\circ$)	分流比	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	α_2 / ($^\circ$)	分支坡度/ ($^\circ$)	分流比
0.016 7	30	1	0.28	0.016 7	50	5	0.05	0.016 7	90	3	0.06
0.167 0	30	1	0.25	0.167 0	50	5	0.06	0.167 0	90	3	0.06
0.500 0	30	1	0.24	0.500 0	50	5	0.07	0.500 0	90	3	0.06
1.000 0	30	1	0.30	1.000 0	50	5	0.08	1.000 0	90	3	0.07
0.016 7	30	2	0.18	0.016 7	70	0.17	0.25	0.016 7	90	4	0.04
0.167 0	30	2	0.16	0.167 0	70	0.17	0.16	0.167 0	90	4	0.05
0.500 0	30	2	0.17	0.500 0	70	0.17	0.10	0.500 0	90	4	0.05
1.000 0	30	2	0.21	1.000 0	70	0.17	0.09	1.000 0	90	4	0.06
0.016 7	30	3	0.15	0.016 7	70	1	0.12	0.016 7	90	5	0.04
0.167 0	30	3	0.14	0.167 0	70	1	0.12	0.167 0	90	5	0.04
0.500 0	30	3	0.13	0.500 0	70	1	0.14	0.500 0	90	5	0.05
1.000 0	30	3	0.13	1.000 0	70	1	0.15	1.000 0	90	5	0.05

4.3 基于随机森林的局部规律分析

突涌水局部蔓延规律受多变量的影响且非线性,本文利用机器学习中的回归算法进行建模分析,其中支持向量回归、随机森林回归和神经网络回归均可用于多元非线性回归问题,因此这3种回归算法均适用.随机森林算法是一种强大的机器学习算法,结合了决策树的思想 and 集成学习的优势^[27],能够处理大规模数据集,调参容易、训练速度快,具有较高的准确性和鲁棒性,因此本文利用随机森林回归进行说明.随机森林算法已在多个领域取得应用,包括煤矿瓦斯预测^[28-29]、小麦叶绿素含量估算^[30]、地下水水质评价^[31]和风速预测^[32]等.随机森林回归模型的基本单元是分类回归树,基于集成学习中的 Bagging 思想将多颗回归树集成在一起,提高模型的准确率.其基本原理如下:

- 1) 随机选择样本:从原始训练集中随机选择一部分样本,构成一个子样本集.这样可以使得每棵决策树都在不同的样本集上进行训练,从而增加模型的多样性.
- 2) 随机选择特征:对于每个决策树的每个节点,在选择最佳划分特征时,只考虑随机选择的一部分特征.这样可以防止某些特征对整个模型的影响过大,从而提高模型的鲁棒性.
- 3) 构建决策树:在 N 个子样本集上使用某种决策树算法(如 CART 算法)构建一棵决策树.决策树的生长过程中,通常采用递归地选择最佳划分特征,将数据集划分为不纯度最小的子集.
- 4) 集成预测:对于新的输入样本,通过将多棵决策树的预测结果进行平均或加权平均,从而得到最终的回归结果.随机森林回归算法计算流程如图 8 所示.

利用随机森林方法对水流下蔓时流速与坡

度、突涌水量之间的关系进行回归分析建模.将 95 组模拟结果随机分割为训练集和测试集,比例为 9 : 1.建模过程中,决策树的数量(N)和决策树的深度(D)是影响回归模型准确率的主要参数.若决策树的数量太小,容易欠拟合,太大则不能显著提升模型.每颗决策树的深度也需要选取适当的值,深度太深容易过拟合.本次所使用的决策树棵数 N 范围为 1~100,决策树深度 $D=3,5,10$,分别计算每种参数组合条件下模型在测试集上的准确率,结果如图 9a 所示.随着决策树棵数的增加,准确率的提高并不明显, $D=10$ 时准确率已逼近 99%,因此对下蔓流速规律建立随机森林模型时,选择 $N=9, D=10$,准确率达到 99.3%.

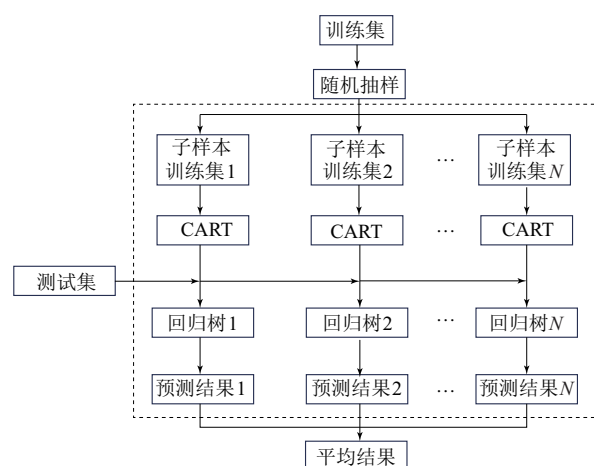


图 8 随机森林回归算法计算流程

Fig. 8 Calculation flow of random forest regression algorithm

利用随机森林模型对分流比例与分叉角度、分支坡度和突涌水量之间的关系进行了回归分析建模.将 120 组模拟结果随机分割为训练集和测试

集,比例为9:1.本次所使用的决策树棵数 N 范围为1~100,决策树深度 $D=3,5,10$,分别计算每种参数组合条件下模型在测试集上的准确率,结果如图9b所示. $D=10$ 的准确率均好于 $D=3$ 和 $D=5$,所以决策树深度参数选取 $D=10$.同时,随着决策树棵数的增加,准确率刚开始提高比较明显,后期基本提升不大.因此对分叉分流规律建立随机森林模型时,选择 $N=5, D=10$,准确率达到99.5%.

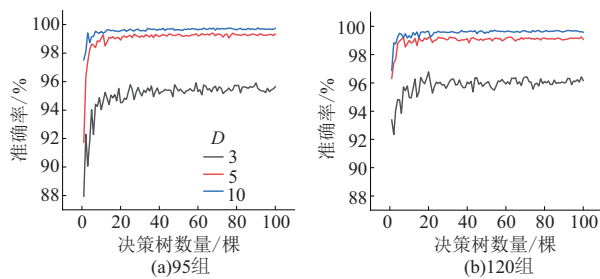


图9 随机森林准确率
Fig. 9 Accuracy rate of random forest

5 应用示例

5.1 矿区概况

邢台煤矿位于河北省邢台市境内,隶属于冀中能源集团有限公司.井田内主要含煤地层为石炭系、二叠系近海型海陆交互相含煤岩系.邢台矿区面积为 31.9201 km^2 ,长近 9 km (EW),宽近 3 km (SN).

本文研究的区域为邢台煤矿西井,西井开采 $9^{\#}$ 煤层时,地质构造复杂程度为复杂型,断层发育,揭露有10条大中型断层.水文地质类型为极复杂型,矿井开采 $9^{\#}$ 煤层时受影响的含水层为大青灰岩裂隙岩溶含水层、本溪灰岩裂隙岩溶含水层和奥陶系灰岩岩溶裂隙含水层.大青灰岩裂隙岩溶含水层单位涌水量为 $0.020\sim 3.984 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$,富水性由弱到强,补给条件好,补给水源充沛.本溪灰岩裂隙岩溶含水层单位涌水量为 $0.191\sim 3.438 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$,富水性由中等到强,补给条件较好;奥陶系灰岩岩溶裂隙含水层单位涌水量为 $0.078\sim 19.290 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$,富水性由弱到极强,补给条件很好,补给来源极其充沛.

5.2 控制区

利用邢台西井采掘工程平面图建立采掘空间井巷网络模型,包含579个节点和606条巷道段.对邢台西井采掘空间井巷网络进行遍历,一共有27个局部高点或局部高地区域、26个局部低点或局部低地区域,共划分了49个控制区,结果如图

10所示.相邻的控制区用不同的颜色着色,控制点用红色、绿色、黑色标记.

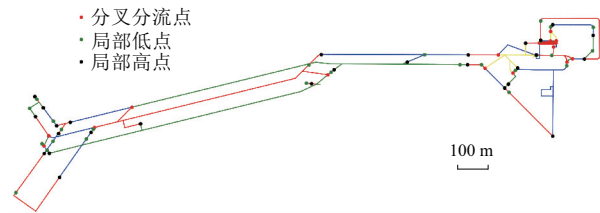


图10 邢台西井采掘空间控制区划分平面图
Fig. 10 Mining space control area division plan in Xingtai West Well

5.3 突涌水蔓延模拟分析

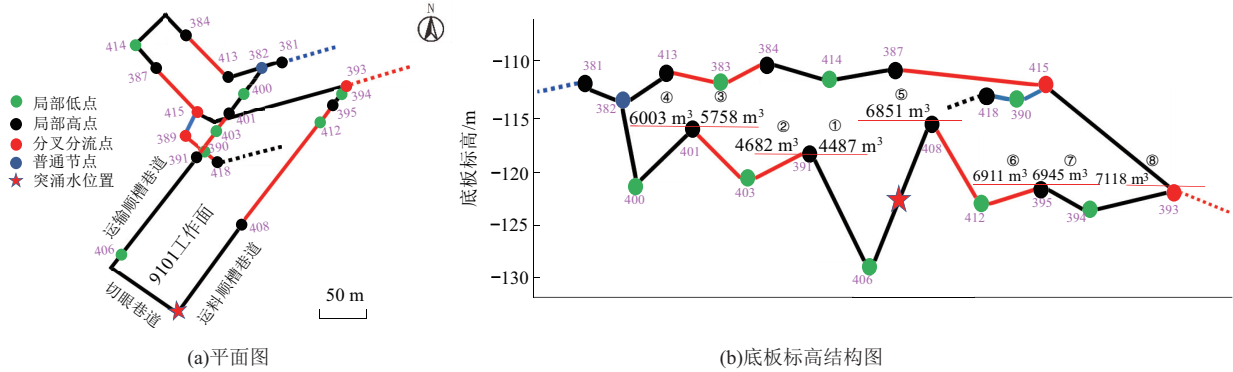
9100采区是目前的主要采区,采掘工程中受到底板奥陶系灰水的威胁.本文将通过2个突涌水蔓延示例说明如何利用累积突涌水量和控制区进行突涌水蔓延模拟,以及突涌水蔓延中下蔓时间的计算和分叉分流规律的使用.以下示例中,对于采空区的破碎岩石,渗流量较大,考虑其对采空区累积水量的影响.而对于巷道壁面等稳定的岩体,其渗流量相对于灾害性的突涌水量而言影响很小,因此忽略不计.

当9101工作面红色五角星处发生突涌水(图11a),水流先向下蔓延至局部低点406,然后在此形成积水,控制区{406, 391, 408}将首先被淹没.通过对淹没控制区边界点的累积突涌水量进行计算,说明突涌水的蔓延过程,如图11b所示,为采掘空间井巷网络底板标高结构示意图,纵轴代表底板标高,图11a为对应的平面图.当累积突涌水量超过 4487 m^3 时,水流越过局部高点391蔓延至邻接控制区,随后依次淹没局部低点403和400.累积突涌水量达到 6851 m^3 时,局部高点408一侧的3个控制区{406, 391, 408}, {403, 401, 391}和{400, 413, 381, 401}均被淹没至节点408的底板标高.随后淹没局部高点408右侧的控制区{412, 408, 395}和{394, 395, 393}.直到累积突涌水量超过 7118 m^3 ,整个9101工作面几乎都被淹没,突涌水会蔓延至大巷.

矿井控制区的划分以及控制区内积水水位与累积流入控制区水量关系的计算均可在突涌水发生之前完成,并且随着采掘工程的进度实时更新.在突涌水发生时,利用累积突涌水量标记突涌水蔓延的积水过程,然后根据各节点标高对应的累积突涌水量估算其淹没时间.如图11b中,若突涌水量大约为 $2000 \text{ m}^3/\text{h}$,在突涌水发生2.24h后控制区{406, 391, 408}淹没到局部最高点391的底板标高,开始向点403蔓延.因此,可提前在局部

最低点 403 处采取应急排水措施,排水量为 400 m³/h,由于排水系统的作用,3.19 h 后局部最高点 401 完全被淹没,并且 3.88 h 后淹没到分叉分流点 393,开始向大巷蔓延.若局部最低点 403 被淹

没导致排水系统失效,突涌水发生 3 h 后会完全淹没局部最高点 401,3.56 h 后蔓延到大巷,比排水时提前了 19 min.



注:各节点旁粉色数字为节点编号;编号①、②等代表各控制点淹没顺序;编号下方为淹没所需的累积水量;实线巷道为此区域内分析所用巷道;虚线巷道表示此区域与其他区域的连接巷道,不参与此区域内分析.

图 11 9101 工作面及附近大巷控制区的平面图和底板标高结构图

Fig. 11 Plan and floor elevation structure of No. 9101 working face and nearby main lane control area

若突涌水水源为底板奥陶系灰水,突涌水量变化情况如图 12 所示,且水源能够维持当前突涌水量.在控制区的基础上对 9101 工作面发生突涌水后的蔓延过程进行模拟,利用配备英特尔酷睿 i5-1135G7 处理器(2.40 GHz)、DDR4 RAM (16 GB)、SSD 存储(512 GB)和 NVIDIA GeForce MX450 显卡的 ThinkBook 14 笔记本电脑进行计算,输入突水点 423(图 13 中红色五角星)和图 12 所示的突涌水量,计算时间为 392 ms,结果如图 13 所示.对巷道利用蓝色到红色进行着色,代表巷道水位从小(0 m)到大(大于 1.5 m).如图 13a 所示,突涌水发生 1 h 时,水流淹没了切眼巷道,开始向两侧的顺槽巷道蔓延.突涌水发生 6 h 时,水流淹没了 2 条顺槽巷道,开始向大巷蔓延,如图 13b 所示.由于大巷由西向东逐渐下山,且坡度较大,水

流下蔓延速度较大,严重威胁井下矿工的安全.一般应在此之前立即采取相应的应急措施,防止突涌水蔓延至大巷.突涌水发生 10 h 后,水流蔓延至中央水仓,如图 13c 所示.

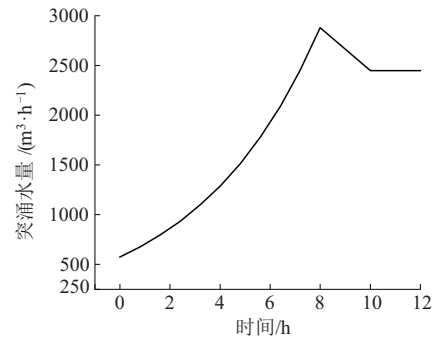


图 12 底板突涌水量曲线

Fig. 12 Water flow curve of bottom plate

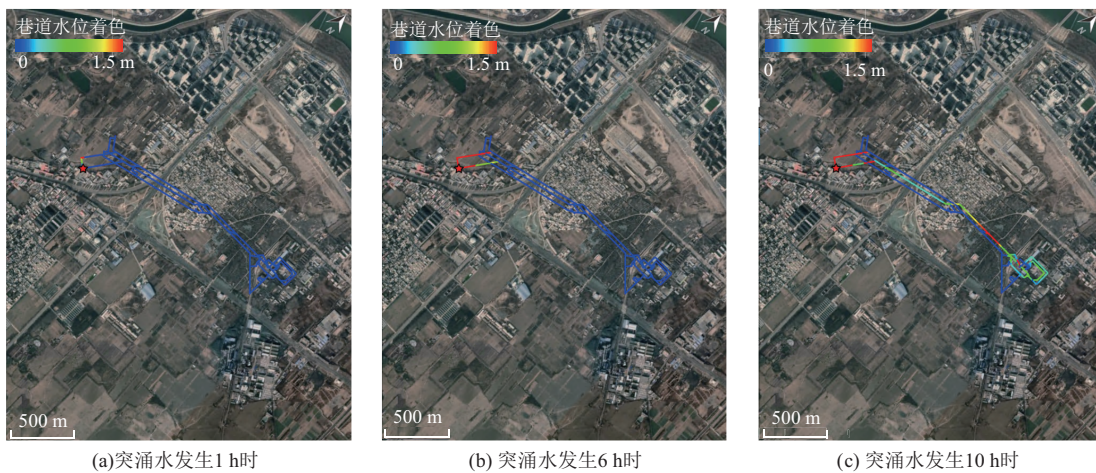
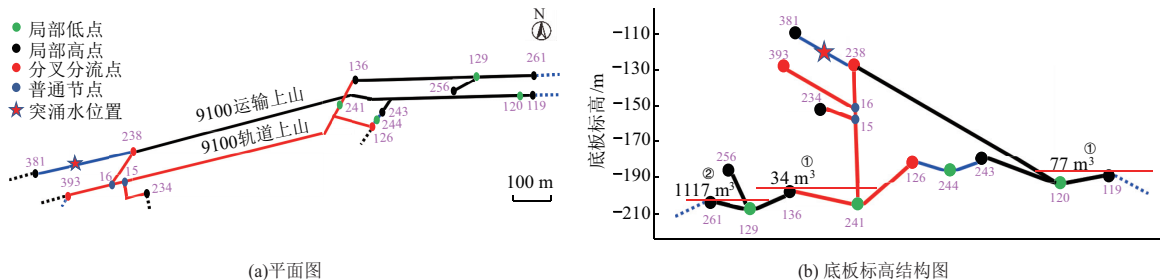


图 13 9101 工作面突涌水蔓延过程

Fig. 13 Water inrush spreading process on No. 9101 working face

当 9100 运输上山掘进巷道发生突涌水时, 48.3 s 后向下蔓延至分叉分流点 238 并分流, 如图 14b 所示, 为采掘空间井巷网络底板标高结构示意图, 纵轴代表底板标高, 图 14a 为对应的平面图. 若突涌水量大小为 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$, 则分流比为 0.064, 分流至控制区 {241, 136, 126} 的水量为 $120.3\ \text{m}^3/\text{h}$, 分流至控制区 {120, 243, 119} 的水量为 $1\ 879.7\ \text{m}^3/\text{h}$. 水流从点 238 下蔓至点 241 需要 443.5 s, 从点 238 下蔓至点 120 需要 1 079 s. 突涌水发生 491.8 s 后局部低点 241 开始积水.

1 127.3 s 时局部低点 120 开始积水. 控制区 {241, 136, 126} 积水至局部高点 136 底板标高需要 1 017.4 s, 水流从点 136 下蔓至点 129 需要 543 s. 控制区 {129, 261, 136} 积水至局部高点 261 底板标高需要 9 h, 即突涌水发生 9.57 h 后淹没局部高点 261 一侧, 开始向水仓蔓延, 其中积水过程所需时间占主要部分. 而控制区 {120, 243, 119} 积水至局部高点 119 底板标高需要 147.5 s, 即突涌水发生 1 274.8 s 后淹没局部高点 119 一侧, 开始向水仓蔓延.



注: 各节点旁粉色数字为节点编号; 编号①、②等代表各控制点淹没顺序; 编号下方为淹没所需的累积水量; 实线巷道为此区域内分析所用巷道; 虚线巷道表示此区域与其他区域的连接巷道, 不参与此区域内分析

图 14 9100 大巷控制区的平面图和底板标高结构图

Fig. 14 Plan and floor elevation structure of No. 9100 main lane control area

对本文方法与基于 SWMM 的矿井突(透)水蔓延一维数值模拟方法^[14]在不同突水时长下的模拟计算速度进行对比, 共统计了 100 组突涌水情况, 其中包括 9101 工作面和大巷上的 50 个突水点, 如图 15 所示, 每个突水点设计了 2 种突涌水量情况, 即 $3\ 600\ \text{m}^3/\text{h}$ 的恒定水量和图 12 所示的非恒定水量, 计算速度结果如表 4 所示. 可以看出, 在 1 h 突涌水模拟中, 本文方法平均耗时仅需 0.37 s, 较数值模拟方法的 2.67 s 提升了 7.2 倍计算效率. 当模拟时长增至 12 h 时, 本文方法平均计算时

间仅增至 0.60 s, 而数值模拟方法则达到 35.83 s, 速度提升约 60 倍. 这表明随着模拟时长增加, 本文方法通过控制区划分实现的计算效率增益呈非线性增长趋势. 数值模拟方法因需迭代求解, 其计算复杂度随巷道规模和模拟时长增幅较大. 而本文方法通过控制区划分与局部精细化建模的协同方式, 降低了计算复杂度. 尤其在突涌水后期, 随着淹没区域扩大, 数值模拟需处理大量增长的拓扑节点, 而本文方法仅需更新有限控制区的淹没情况, 从而大幅降低计算量.

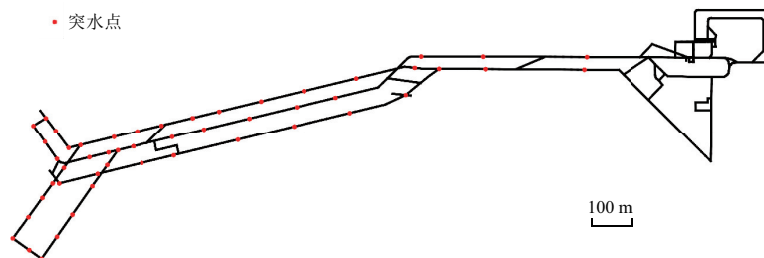


图 15 突水点分布图

Fig. 15 Water inrush point distribution map

本文提出的基于煤层底板标高控制区水量均衡的突涌水蔓延模拟方法, 更加关注累积突涌水量对蔓延过程的影响, 可用于顶板水、底板水和老空水等各类水害的模拟. 控制区水量均衡方法计算积水过程的精度较高, 但对于下蔓和分叉分流的模拟具有一定局限性, 因此对于采掘空间存在

显著起伏的矿井, 包括多煤层开采的矿井, 可以保证控制区的划分效果和积水计算的精度. 对于采掘空间底板标高整体平缓的矿井, 水流下蔓路径延长且分叉分流频次增加, 应用本文方法则具有一定局限性.

表 4 不同突涌水时长下模拟计算速度对比结果

Table 4 Comparison of simulation calculation speed of different water inrush time

模拟突水时长/h	组数	本文方法耗时			一维数值模拟耗时		
		最小值/s	最大值/s	平均值/s	最小值/s	最大值/s	平均值/s
1	100	0.27	0.47	0.37	1	3	2.67
2		0.29	0.50	0.41	3	7	5.50
5		0.30	0.65	0.52	11	15	13.17
12		0.39	0.78	0.60	31	40	35.83

6 结 论

1) 矿井采掘空间底板标高的局部高点、局部低点和突涌水蔓延过程中的分叉分流点共同控制着突涌水蔓延过程. 利用这 3 种控制点可以将矿井采掘空间划分为互不重叠的突涌水蔓延控制区.

2) 各控制区内水流蔓延过程相似, 均表现为先下蔓至控制区内高程最低点, 然后开始积水, 水位上涨. 依据水量均衡原理, 控制区内积水水位与累积流入控制区的水量存在对应关系, 可利用巷道和采空区的空间大小进行计算. 当分叉分流点的分流分支均被淹没后, 可将分流分支所在控制区合并进行积水上涨过程计算.

3) 控制区内水流下蔓速度计算和控制区间分叉分流量计算显著影响着矿井全局突涌水蔓延过程模拟精度. 根据矿井突涌水量和巷道空间结构, 利用三维流体力学仿真软件 Fluent 模拟了水流下蔓时不同巷道坡度条件下的流速分布, 以及不同巷道分叉空间结构条件下的分流规律, 并利用随机森林方法进行了回归分析建模, 用于局部蔓延过程的精细化模拟.

4) 在邢台矿西井进行了示范应用. 构建了矿井采掘空间井巷网络和控制区, 进行了突涌水蔓延模拟计算, 计算速度可达到毫秒级, 模拟 12 h 较数值模拟方法提升了近 60 倍. 分析了工作面发生突涌水后的蔓延过程以及淹没各控制区边界点所需的累积水量, 结果表明累积突涌水量达到 7 118 m³ 时, 将淹没整个工作面, 蔓延到大巷, 威胁整个邢台西井的安全. 同时也分析了下坡巷道突涌水时下蔓和分叉分流的情况.

5) 本文提出的方法为突涌水蔓延模拟提供了一种新思路, 即使用累积突涌水量和控制区描述矿井淹没过程. 控制区和累积突涌水量控制着矿井全局突涌水蔓延过程.

参考文献:

[1] 刘守强, 武 强, 李 哲, 等. 多煤层底板单一含水层

矿区突水变权脆弱性评价与应用[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 587-597.

LIU Shouqiang, WU Qiang, LI Zhe, et al. Vulnerability assessment and application of water inrush in single aquifer mining area with multiple coal seam floor [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(3): 587-597.

[2] 武 强, 徐 华, 杜沅泽, 等. 矿山突(透)水灾害应急疏散模拟系统与工程应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(10): 2491-2497.

WU Qiang, XU Hua, DU Yuanze, et al. Emergency evacuation simulation system and engineering application of mine outburst (permeable) water disaster [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2491-2497.

[3] 武 强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795-805.

WU Qiang. Research progress, problems and prospects of mine water control and resource utilization in China [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795-805.

[4] 曾一凡, 武 强, 赵苏启, 等. 我国煤矿水害事故特征、成因与防治对策[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 1-14.

ZENG Yifan, WU Qiang, ZHAO Suqi, et al. Characteristics, causes and prevention measures of water damage accidents in coal mines in China [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 1-14.

[5] 武 强, 张小燕, 赵颖旺, 等. 矿井巷道系统突(涌)水蔓延过程物理仿真试验模拟与应用[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(3): 421-434.

WU Qiang, ZHANG Xiaoyan, ZHAO Yingwang, et al. Simulation and application of physical simulation test on water surge spreading process in mine roadway system [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(3): 421-434.

[6] 景国勋, 秦瑞琪. 2011—2020 年我国煤矿水害事故相关因素特征分析[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(4): 2297-2304.

JING Guoxun, QIN Ruiqi. Analysis of relevant fac-

- tors of coal mine water disaster accidents in China from 2011 to 2020[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(4): 2297-2304.
- [7] 王国法, 庞义辉. 智能化示范煤矿建设成效与发展方向[J]. 智能矿山, 2024, 5(1): 2-11.
WANG Guofa, PANG Yihui. Construction effect and development direction of intelligent demonstration coal mine[J]. Intelligent Mine, 2024, 5(1): 2-11.
- [8] 王少龙, 刘再斌, 安林, 等. 基于透明地质的矿井智能水害仿真系统[J]. 智能矿山, 2023, 4(4): 75-80.
WANG Shaolong, LIU Zaibin, AN Lin, et al. Intelligent water damage simulation system of mine based on transparent geology[J]. Intelligent Mine, 2023, 4(4): 75-80.
- [9] 靳德武, 乔伟, 李鹏, 等. 煤矿防治水智能化技术与装备研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 10-17.
JIN Dewu, QIAO Wei, LI Peng, et al. Research status and prospect of intelligent technology and equipment for water control in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 10-17.
- [10] 靳德武, 赵春虎, 段建华, 等. 煤层底板水害三维监测与智能预警系统研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2256-2264.
JIN Dewu, ZHAO Chunhu, DUAN Jianhua, et al. Research on 3D monitoring and intelligent early warning system for water hazard of coal seam floor[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2256-2264.
- [11] 武强, 徐华, 赵颖旺, 等. 基于云平台的矿井水害智慧应急救援系统与应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(10): 2661-2667.
WU Qiang, XU Hua, ZHAO Yingwang, et al. Intelligent mine water disaster emergency rescue system and its application based on cloud platform[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(10): 2661-2667.
- [12] 赵颖旺, 武强, 王潇, 等. 基于人工智能的矿井水害灾情研判及预测研究[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(1): 10-19.
ZHAO Yingwang, WU Qiang, WANG Xiao, et al. Research and prediction of mine water disaster based on artificial intelligence[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(1): 10-19.
- [13] WANG Q, YE Y C, JIANG Y. Simulation on mine water-inrush characteristics of cross roadway based on CFX [J]. Procedia Engineering, 2011, 26: 759-764.
- [14] 武强, 张小燕, 赵颖旺, 等. 矿井巷道突(透)水蔓延模型研究及应用[J]. 煤炭工程, 2018, 50(2): 1-5.
WU Qiang, ZHANG Xiaoyan, ZHAO Yingwang, et al. Research and application of water bursting spread model in mine roadway[J]. Coal Engineering, 2018, 50(2): 1-5.
- [15] 李智勇, 张雪英, 李凤莲, 等. 基于LBM的多巷道任意角度耦合的突水漫延仿真[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(11): 1241-1246.
LI Zhiyong, ZHANG Xueying, LI Fenglian, et al. Water inrushing diffusion simulation with multi-roadway coupling at arbitrary angle based on LBM [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2016, 35(11): 1241-1246.
- [16] 黄光球, 乔坤, 陆秋琴. 基于元胞自动机的地下水突出与漫延仿真方法[J]. 计算机工程, 2007, 33(14): 219-221.
HUANG Guangqiu, QIAO Kun, LU Qiuqin. Simulation method of groundwater outburst and diffusion based on cellular automata[J]. Computer Engineering, 2007, 33(14): 219-221.
- [17] 冯文琪, 孙农亮. 基于粒子系统的矿井突水蔓延仿真研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(6): 22-29.
FENG Wenqi, SUN Nongliang. Simulation research of mine water inrush spread based on particle system[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 37(6): 22-29.
- [18] 符辉, 毛善君, 骆云秀. 矿井突水蔓延线路生成算法及实现[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(3): 104-106.
FU Hui, MAO Shanjun, LUO Yunxiu. Algorithm and realization on spreading route formation of mine water inrush [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(3): 104-106.
- [19] 李翠平, 李仲学, 郑瑶瑕, 等. 地下矿突水过程的三维动态仿真模型构建[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(2): 140-147.
LI Cuiping, LI Zhongxue, ZHENG Yaoxia, et al. Construction of 3D dynamic simulation model for water inrush process in underground mine[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(2): 140-147.
- [20] LI C P, LI J J, LI Z X, HOU D Y. Establishment of spatiotemporal dynamic model for water inrush spreading processes in underground mining operations[J]. Safety Science, 2013, 55: 45-52.
- [21] 张丽娟. 基于OSG的矿井突水应急虚拟仿真系统关键技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.

- ZHANG Lijuan. Research on key technologies of mine water inrush emergency virtual simulation system based on OSG[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2014.
- [22] 黄东旭, 李仲学, 李翠平, 等. 矿井突水仿真构模及系统实现[J]. 金属矿山, 2016(8):155-160.
- HUANG Dongxu, LI Zhongxue, LI Cuiping, et al. Modeling and system implementation of mine water inrush simulation [J]. Metal Mine, 2016(8):155-160.
- [23] 李 腾, 朱希安, 王占刚. 矿井水灾漫延过程推演及其虚拟实现[J]. 煤矿安全, 2019, 50(8):120-123.
- LI Teng, ZHU Xi'an, WANG Zhangang. Prediction and virtual realization of mine flood spreading process [J]. Safety in Coal Mine, 2019, 50(8):120-123.
- [24] 郑德志, 程 蕾, 赵迪斐. 基于 FLUENT 的交叉巷道煤矿老空水害突水过程模拟[J]. 煤炭技术, 2018, 37(3):158-160.
- ZHENG Dezhi, CHENG Lei, ZHAO Difei. Simulation of goaf water inrush process based on FLUENT[J]. Coal Technology, 2018, 37(3):158-160.
- [25] 刁洋洋. 大型水利工程泄洪放空洞掺气设施水力特性数值模拟研究[J]. 中国新技术新产品, 2023(23):90-92.
- DIAO Yangyang. Numerical simulation of hydraulic characteristics of cavitation aeration facilities in large water conservancy projects [J]. China New Technology and New Products, 2023(23):90-92.
- [26] 虎维岳, 周建军. 煤矿水害防治技术工作中几个易混淆概念的分析[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(8):60-65.
- HU Weiyue, ZHOU Jianjun. Discussion on some confused key concepts used in mine water disaster control and protection[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(8):60-65.
- [27] 吕红燕, 冯 倩. 随机森林算法研究综述[J]. 河北省科学院学报, 2019, 36(3):37-41.
- LYU Hongyan, FENG Qian. A review of stochastic forest algorithms[J]. Journal of Hebei Academy of Sciences, 2019, 36(3):37-41.
- [28] 张增辉, 马文伟. 基于随机森林回归算法的回采工作面瓦斯涌出量预测[J]. 工矿自动化, 2023, 49(12):33-39.
- ZHANG Zenghui, MA Wenwei. Prediction of gas emission in mining face based on random forest regression algorithm[J]. Automation of Industry and Mine, 2023, 49(12):33-39.
- [29] 吴奉亮, 霍 源, 高佳南. 基于随机森林回归的煤矿瓦斯涌出量预测方法[J]. 工矿自动化, 2021, 47(8):102-107.
- WU Fengliang, HUO Yuan, GAO Jianan. Prediction method of coal mine gas emission based on random forest regression[J]. Industrial and Mine Automation, 2021, 47(8):102-107.
- [30] 王 琪, 常庆瑞, 李 铠, 等. 基于主成分分析和随机森林回归的冬小麦冠层叶绿素含量估算[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(4):532-542.
- WANG Qi, CHANG Qingrui, LI Kai, et al. Estimation of chlorophyll content in winter wheat canopy based on principal component analysis and random forest regression[J]. Journal of Wheat Crops, 2024, 44(4):532-542.
- [31] 许飞青, 李 潇, 李 凯, 等. 随机森林回归模型在地下水水质评价的新应用[J]. 地质与勘探, 2023, 59(2):408-417.
- XU Feiqing, LI Xiao, LI Kai, et al. A new application of random forest regression model in groundwater quality evaluation [J]. Geology and Exploration, 2023, 59(2):408-417.
- [32] 朱昶胜, 李岁寒. 基于改进果蝇优化算法的随机森林回归模型及其在风速预测中的应用[J]. 兰州理工大学学报, 2021, 47(4):83-90.
- ZHU Changsheng, LI Suihan. Random forest regression model based on improved Drosophila optimization algorithm and its application in wind speed prediction[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2021, 47(4):83-90.

(责任编辑 沈 菊 全 腾)