



顶板瓦斯抽采巷布置位置智能预测方法

郭世斌 胡国忠 朱家铎 许家林 秦伟 杨南

引用本文:

郭世斌, 胡国忠, 朱家铎, 等. 顶板瓦斯抽采巷布置位置智能预测方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 203–213.

GUO Shibin, HU Guozhong, ZHU Jiabin. Intelligent prediction method for roof gas drainage roadway layout[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 203–213.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0065>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于MPC的瓦斯抽采智能调控模型研究

Research on intelligent control model of gas drainage based on model predictive control

煤炭科学技术. 2022, 50(8): 82–90 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d060fcdd-85f1-4fc7-bf54-44ecc7e0e642>

大直径顶板定向长钻孔替代高抽岩巷的瓦斯抽采效果分析

Analysis on gas drainage effect of large diameter roof directional long borehole instead of high drainage rock roadway

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/43a033be-eee3-4ad6-9101-14d9f64d0df2>

卸压瓦斯运移区“孔-巷”协同抽采布置参数优化及高效抽采

Optimization of “hole-drift” collaborative drainage layout parameters and high efficient drainage in pressure relief gas migration area

煤炭科学技术. 2022, 50(2): 137–146 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c32fa046-e2df-4a93-a86d-a80edf917f85>

煤矿瓦斯智能抽采关键技术研究进展及展望

Research progress and prospect of key technology of intelligent gas drainage in coal mine

煤炭科学技术. 2021, 49(5): 27–34 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6c432411-043a-4643-b8b0-c2227107b7bb>

煤层顶板裂隙带瓦斯抽采技术与装备探索

Exploration on gas drainage technology and equipment of fracture zone in coal seam roof

煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/233321f6-1b87-47e6-a34d-88b3f1076ef7>

采空区顶板高位走向长钻孔高效抽采瓦斯机理研究

Mechanism study on high efficiency gas drainage of high level strike long boreholes in gob roof

煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1deeb4d4-0f2e-48e9-b91b-273e536ab92f>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

郭世斌, 胡国忠, 朱家铎, 等. 顶板瓦斯抽采巷布置位置智能预测方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 203–213.
GUO Shibin, HU Guozhong, ZHU Jiabin, *et al.* Intelligent prediction method for roof gas drainage roadway layout[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 203–213.

顶板瓦斯抽采巷布置位置智能预测方法

郭世斌¹, 胡国忠^{1,2}, 朱家铎¹, 许家林^{1,2}, 秦伟², 杨南²

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 顶板瓦斯抽采巷因具有大流量和连续抽采的优点, 被广泛用于高瓦斯或突出矿井回采工作面瓦斯治理。如何确定合理的顶板巷布置位置, 以高效抽采采空区卸压瓦斯, 是保障工作面瓦斯治理效果的关键。为此, 在深入分析顶板瓦斯抽采巷布置原则及其布置位置影响因素的基础上, 提出了一种基于 GA-BP 神经网络模型的顶板瓦斯抽采巷布置位置智能预测方法; 采用灰色关联分析法确定了 GA-BP 神经网络模型的预测指标, 并设计开发了顶板瓦斯抽采巷布置位置智能预测系统。研究表明: ① 工作面的采厚、埋深、覆岩结构、煤层倾角、倾向长度等 5 个物理指标是顶板瓦斯抽采巷布置位置的主控因素, 且其权重值排序由大到小依次为采厚、埋深、覆岩结构、煤层倾角、倾向长度。② 随着遗传代数的增加, GA-BP 神经网络适应度不断减小, 且当遗传代数为 60 时其适应度变化基本稳定, 表明 GA-BP 神经网络初始权重和偏置效果较好。③ 在当前训练样本数据集的前提下, 基于 GA-BP 神经网络模型的顶板瓦斯抽采巷布置位置的预测结果与实际工况值的相对误差仅为 0.43%~11.27%, 在可接受的范围内。该研究可为顶板瓦斯抽采巷精准设计提供一定的参考。

关键词: 瓦斯抽采; 顶板瓦斯抽采巷; 巷道布置; 遗传算法; 智能预测

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)04-0203-11

Intelligent prediction method for roof gas drainage roadway layout

GUO Shibin¹, HU Guozhong^{1,2}, ZHU Jiabin¹, XU Jialin^{1,2}, QIN Wei², YANG Nan²

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The roof gas drainage roadway, with its advantages of large flow and continuous extraction, is widely used in the gas control of high gas or outburst mine working faces. How to determine the reasonable arrangement position of the roof roadway to efficiently extract the pressure-relief gas in the goaf is key to ensuring the effect of gas control on the working face. Therefore, through a deep analysis of the arrangement principles of the roof gas drainage roadway and the main controlling factors of its arrangement position, an intelligent prediction method for the arrangement position of the roof gas drainage roadway based on the GA-BP neural network model is proposed. The prediction indicators of the GA-BP neural network model were determined using the grey correlation analysis method, and an intelligent prediction system for the arrangement position of the roof gas drainage roadway was designed and developed. The research results show: ① The mining thickness, burial depth, overlying rock structure, coal seam dip angle, and dip length of the working face are the main controlling factors for the arrangement position of the roof gas drainage roadway, and their weight values are ranked as: mining thickness > burial depth > overlying rock structure > coal seam dip angle > dip length; ② With the increase of genetic generations, the fitness of the GA-BP neural network continuously decreases, and when the genetic generation is 60, its fitness change is basically stable, indicating that the initial weight and bias of the GA-BP neural network are good; ③ Under the premise of the current training sample data set, the relative error of the prediction result of the arrangement position of the roof gas drainage roadway based on the GA-BP neural network model

收稿日期: 2024-01-05

责任编辑: 常琛

DOI: 10.12438/cst.2024-0065

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点资助项目(U22A20169); 江苏高校“青蓝”工程资助项目; 江苏省“六大人才高峰”高层次人才资助项目(JNHB-094)

作者简介: 郭世斌(1999—), 男, 山西阳泉人, 硕士研究生。E-mail: shibinguo@cumt.edu.cn

通讯作者: 胡国忠(1981—), 男, 湖南衡阳人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: gzhu@cumt.edu.cn

and the actual working condition value is only 0.43% ~ 11.27%, which is within an acceptable range. This research can provide a certain reference for the precise design of the arrangement of the roof gas drainage roadway.

Key words: gas drainage; roof gas drainage roadway; precision arrangement; genetic algorithm; intelligent prediction

0 引言

随着我国浅部煤炭资源日趋枯竭,大部分煤矿逐步转入深部开采,造成煤层瓦斯含量增大,极易诱发工作面瓦斯超限,从而制约煤矿安全生产^[1]。通过利用采动对煤层瓦斯的卸压增透效应,构建顶板瓦斯抽采巷(简称“顶板巷”)抽采卸压瓦斯是治理工作面瓦斯超限的有效途径之一^[2]。顶板巷因其大流量和连续抽采的优点被广泛应用,尤其在山西地区^[3]。然而,合理确定顶板巷布置位置是保障顶板巷瓦斯抽采效果的关键。因此,开展顶板巷精准布置方法研究,对防治煤矿瓦斯灾害与开发煤层瓦斯资源具有重要意义。

目前,顶板巷布置位置主要根据采动覆岩裂隙发育的空间形态来确定^[3-4],常用方法有现场考察和经验公式理论计算,但上述两种方法均需耗费较多时力、成本较高。近年来,基于GA-BP神经网络的回归预测法因具有考虑因素较为全面、低成本、高效率和高精度的特点,在矿业领域的预测中得到了广泛应用^[5-6],这为提出一种利用GA-BP神经网络模型来实现顶板巷布置位置智能预测的新方法提供了可能。

因此,通过深入分析顶板巷的布置原则及其影响因素,利用山西地区顶板巷的实际布置参数作为数据样本,从数据驱动角度运用GA-BP神经网络模型进行回归预测,形成了一种基于GA-BP神经网络模型的顶板巷布置位置智能预测方法,并设计开发了相应的智能预测系统,可为顶板巷精准布置提供参考。

1 顶板瓦斯抽采巷布置原则及影响因素

1.1 顶板瓦斯抽采巷的布置原则

在煤层开采过程中,煤层采动引起上覆岩层破断、移动并产生大量裂隙,为煤层瓦斯的运移与持续解吸创造了有利条件。因此,掌握覆岩采动裂隙空间形态的发育特征是确定顶板巷布置位置的关键。

针对上述问题,袁亮等^[7]提出了采动覆岩“高位环形裂隙体”理论,并将其应用于顶板巷布置位置的确定。李树刚、林海飞^[8-10]等建立了采动裂隙椭抛带动态演化模型。钱鸣高院士^[11]揭示了长壁工作面覆岩采动裂隙的两阶段发展规律与“O”形圈分布特

性。近年来,笔者研究团队^[2-4,11-16]提出了采动覆岩瓦斯卸压运移“三带”理论以及采动裂隙“O”形圈理论,建立了基于关键层运动的顶板巷布置优化设计方法。上述研究成果为确定顶板巷布置位置提供了基本原则。

根据采动覆岩瓦斯卸压运移“三带”理论,采空区上覆煤岩层可划分为导气裂隙带、卸压解吸带和不易解吸带,其中导气裂隙带中煤岩层裂隙发育程度高且数量多,是煤岩层卸压瓦斯的主要贮存空间和运移通道^[12];采动裂隙“O”形圈理论指出,随着工作面的不断推进,离层裂隙增加,采空区中部裂隙先增加后减少然后逐渐被压实,采空区两侧离层裂隙仍能保持,从平面看,在采空区四周存在如图1所示的沿层面横向连通的离层发育区,称之为采动裂隙“O”形圈,“O”形圈裂隙区煤岩体透气性较好,是采场卸压瓦斯流动的主要通道^[11]。

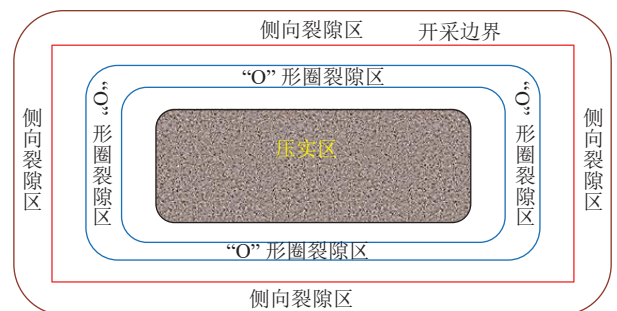


图1 采动裂隙“O”形圈^[11]

Fig.1 Sketch of the “O-shape” circle^[11]

由此可见,在垂直方向上,为防止抽采巷过早破坏、保证抽采效率,顶板巷应布置在裂隙充分发育且富集瓦斯的导气裂隙带中上部;在水平方向上,回风巷侧受工作面风流影响,瓦斯体积分数较高,顶板巷应靠近回风巷,且远离采空区中部的重新压实区,并布置在“O”形圈裂隙中^[11,15]。顶板巷布置原则如图2所示。

1.2 顶板瓦斯抽采巷布置的影响因素

根据上述的顶板巷布置原则,其布置位置主要由采动覆岩的导气裂隙带和“O”形圈的范围所决定。大量研究和现场实践表明^[11-23],采动覆岩导气裂隙带和“O”形圈的范围受到多种因素影响,包括工作面的采厚、倾向长度、覆岩结构、埋深、煤层倾向、推进速度等,且与上述影响因素之间存在着非线性关系,具体见表1。

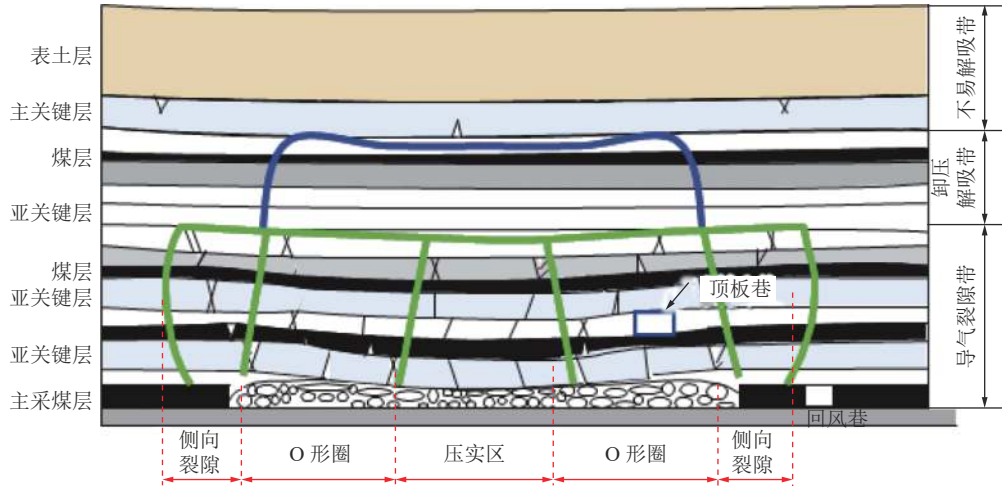


图2 顶板巷布置原则

Fig.2 Principles of arranging roof gas drainage roadway

表1 覆岩采动裂隙空间形态的影响因素

Table 1 Factors influencing spatial morphology of mining-induced fractures

影响因素	影响规律
采厚	覆岩导气裂隙带高度和“O”形圈裂隙区宽度随工作面采厚的增加而增大，且“O”形圈宽度变化整体近似呈对数分布 ^[12-13]
倾向长度	在一定的覆岩结构条件下，工作面倾向长度越大，覆岩“O”形圈裂隙区宽度越大 ^[11,15]
覆岩结构	在其他条件相同时，覆岩岩性越坚硬，覆岩的采动裂隙发育越显著 ^[12,14,19]
埋深	随着工作面埋深的增加，顶板岩层的地应力增大，工作面覆岩裂隙越发育 ^[6]
煤层倾角	当煤层倾角小于45°时，覆岩裂隙带高度随着煤层倾角增大而增大；当煤层倾角为45°~60°时，覆岩裂隙带高度随倾角的增大而减小 ^[23]
推进速度	较慢的推进速度增加覆岩的变形量和裂隙分布，加剧覆岩的破坏程度；而较快的推进速度则可以减小覆岩变形量和裂隙发育，有效抑制覆岩裂隙发育 ^[20]

2 基于GA-BP神经网络的顶板瓦斯抽采巷布置位置智能预测模型

2.1 GA-BP神经网络模型

2.1.1 BP神经网络

BP神经网络是一种使用误差反向传播算法训练的多层前馈网络，是应用最广泛的神经网络模型之一，主要由输入层、隐藏层和输出层构成^[23]，单隐藏层神经网络数学表达式如式(1)和式(2)所示。BP神经网络包括数据的前向传播、误差计算、误差反向传播、权重更新和迭代等5个过程^[24]，当预测输出与实际输出之间的误差未满足终止条件或者满意的训练效果，则将误差通过网络反向传播，进行权重更新，通过反复迭代，使神经网络的预测输出达到满意的训练效果。

$$z_j^h = f\left(\sum_{i=1}^m v_{ij}x_i + b_j^h\right) \quad (1)$$

$$y_k = f\left(\sum_{j=1}^q w_{jk}z_j^h + b_k\right) \quad (2)$$

式中： z_j^h 为隐藏层第 j 个神经元的输出； y_k 为第 k 个输出层神经元的输出； x_i 为第 i 个输入层神经元的输出； v_{ij} 为输入层到隐藏层的权重； w_{jk} 为隐藏层到输出层的权重； b_j^h 为隐藏层的偏置项； b_k 为输出层的偏置项； m 为输入层神经元的个数； q 为隐藏层神经元的个数。

2.1.2 遗传算法

遗传算法 (Genetic Algorithms) 是1962年由美国Michigan大学Holand教授提出的模拟自然界遗传机制和生物进化论而形成的一种启发式搜索和优化方法^[25]。该算法借鉴了自然生物体中基因的传承与种群的适应性进化过程，以“适者生存”为核心原则，旨在追求问题的最优解。通过定义适应度函数，并依此函数在种群中执行选择、交叉和变异操作，算法能够筛选出表现良好的个体进行保留，同时淘汰那些适应度较低的个体。新一代的种群在继承前一代优秀特征的基础上，会表现出更加优越的适应性。这一过程将不断重复迭代，直至达到既定的停止条件，从而完成优化任务，其基本步骤如图3所示。

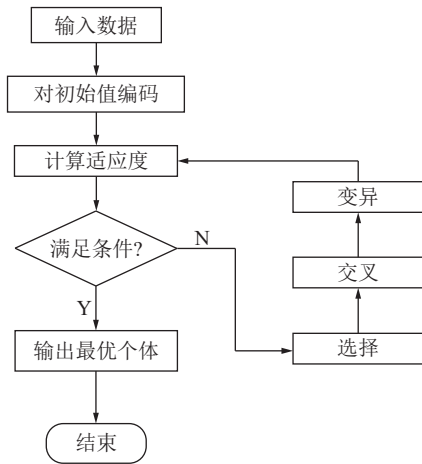


图 3 遗传算法步骤

Fig.3 Steps of genetic algorithm

2.1.3 GA-BP 神经网络

GA-BP 神经网络是利用遗传算法优化 BP 神经网络的初始权重和偏置,以改善 BP 神经网络的收敛速度慢和可能陷入局部最优解的问题^[26-27]。GA-BP 神经网络分为初始化神经网络、遗传算法优化初始权重和偏置和训练 BP 神经网络 3 个部分。其中,初始化神经网络包括根据输入层和输出层神经元节点个数确定 BP 神经网络结构,进而确定遗传算法种群的大小即不同的权重和偏置组合的数量;使用遗传算法优化 BP 神经网络的初始权值和偏置,种群中的每个个体都包含了一个网络所有的权值和偏置,个体通过适应度函数计算个体的适应度值,遗传算法通过选择、交叉和变异操作找到最优适应度值对应个体;BP 神经网络用遗传算法得到最优个体对网络初始权值和偏置赋值,使用收集的数据进行训练和预测。

GA-BP 神经网络预测流程如图 4 所示。

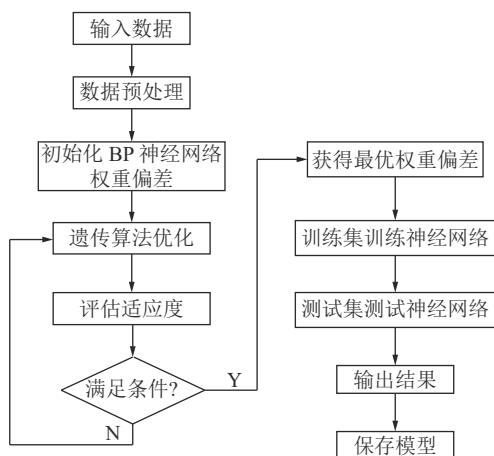


图 4 GA-BP 神经网络流程

Fig.4 Flow of GA-BP neural network

2.2 模型输入指标

由 1.2 节可知,影响顶板巷布置的物理指标有采厚、埋深、推进速度、覆岩结构、倾向长度、煤层倾角。其中覆岩结构参照文献 [19] 用覆岩硬岩岩性比例系数来量化,计算在工作面顶板导气裂隙带高度范围内各硬岩地层(细砂岩、中砂岩、粗砂岩和石灰岩)的总厚度和导气裂隙带高度的比值。硬岩岩性比例系数计算公式为

$$Q = \frac{\sum k}{(15 \sim 20)h} \quad (3)$$

式中: Q 为硬岩岩性比例系数; h 为采厚; $\sum k$ 为 15 ~ 20 倍采厚中硬岩岩层的累计厚度。

以表 2 寺家庄 15303 工作面覆岩结构为例,覆岩结构量化值 $Q = \frac{42.31}{88.17} = 0.48$ 。

顶板巷布置受上述众多物理指标的影响,为获得主要影响指标,将所述的 7 个指标作为候选集,结合灰色关联度分析,得到各指标与顶板巷垂直层位和水平位置的关联度 $\xi_i(j)$ 和权重 W_i , 根据权重大小绝对模型输入指标。

灰色关联度分析^[28] 是一种用于研究变量之间关联程度的方法,适用于研究变量之间的关联性,特别是在样本数据较少或者数据分布不规则的情况下。

其关联系数 $\xi_i(j)$ 计算公式为

$$\xi_i(j) = \frac{\min_i \min_j |x_i(j) - y(j)|}{|x_i(j) - y(j)| + \rho \max_i \max_j |x_i(j) - y(j)|} + \frac{\rho \max_i \max_j |x_i(j) - y(j)|}{|x_i(j) - y(j)| + \rho \max_i \max_j |x_i(j) - y(j)|} \quad (4)$$

式中: x_i 为第 i 个序列; y 为参考序列; j 为序列中的第 j 个数值; ρ 为分辨系数,本文取 0.5。

关联度 γ_i 计算公式为

$$\gamma_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \xi_i(j) \quad (5)$$

根据关联度可得权重 W_i 为

$$W_i = \frac{\gamma_i}{\sum_{i=1}^n \gamma_i} \quad (6)$$

式中, W_i 为第 i 个指标的权重。

为了消除输入数据指标之间的量纲影响,采用线性归一化法对数据进行归一化处理,使各指标数据转化为 [0,1] 之间的数。转换公式为

$$Y = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (7)$$

式中, Y 为归一化处理后的数据; X 为输入数据; X_{\min} 为输入的样本数据中的最小值; X_{\max} 为输入的样本数

表2 寺家庄15303工作面覆岩结构

Table 2 Overlying strata structure of No. 15303 working face in Sijia Village

岩层岩性	厚度/m	距15号煤累厚/m
8 ₁ 号煤	0.90	89.61
砂质泥岩	1.00	88.61
8 ₂ 号煤	0.44	88.17
粉砂岩	4.75	83.42
砂质泥岩	1.39	82.03
粉砂岩	5.80	76.23
泥岩	1.40	74.83
8 ₄ 号煤	1.20	73.63
泥岩	2.30	71.33
9号煤	1.30	70.03
砂质泥岩	1.60	68.43
9号下煤	0.60	67.83
粉砂岩	1.50	66.33
中砂岩	3.73	62.60
细砂岩	1.00	61.60
粗砂岩	6.05	55.55
石灰岩	1.50	54.05
砂质泥岩	0.30	53.75
11号煤	0.30	53.45
砂纸泥岩	2.90	50.55
12号煤	0.90	49.65
粉砂岩	3.90	45.75
细砂岩	3.80	41.95
中砂岩	3.00	38.95
泥岩	0.93	38.02
石灰岩	4.00	34.02
13号煤	0.60	33.42
细砂岩	7.15	26.27
砂质泥岩	3.30	22.97
泥岩	2.00	20.97
石灰岩	4.70	16.27
14号煤	0.23	16.04
泥岩	1.00	15.04
粉砂岩	3.20	11.84
14号下煤	0.26	11.58
砂质泥岩	2.20	9.38
中砂岩	3.56	5.82
细砂岩	3.82	2.00
砂质泥岩	2.00	0
15号煤	5.13	—
砂纸泥岩	4.00	0
细砂岩	6.00	4.00

据中的最大值。

从大量相关文献和煤矿企业实际工作面的生产数据中收集了山西地区各个工作面的顶板巷布置位置的实际工况数据,组建了GA-BP神经网络模型的训练集,见表3。

将表3中的数据通过式(7)进行线性归一化处理,依次将顶板巷垂直层位和水平位置作为参考序列;在此基础上,由式(4)和(5)计算出影响顶板巷布置的各个物理指标与参考序列的关联度,而后结合式(6)确定各个物理指标对顶板巷垂直层位和水平位置的影响权重,进而根据各个物理指标的权重之和得到各指标对顶板巷布置的影响程度,其排序结果见表4。

由此可知,各物理指标对顶板巷布置位置的综合影响程度由大到小依次为:采厚、埋深、覆岩结构、倾角、倾向长度、推进速度。将总权重大于0.32的采厚、埋深、覆岩结构、倾角、倾向长度等物理指标作为山西地区顶板巷布置位置的主要影响指标,并选取上述5个指标作为GA-BP神经网络输入指标。

2.3 GA-BP神经网络参数的确定

GA-BP神经网络参数由神经网络参数和遗传算法参数2部分组成。在神经网络参数取值方面,选择合适的BP神经网络的隐藏层层数和神经元个数可以提高模型预测的准确性;Kolmogorov定理证明,单隐藏层结构能够以任意精度映射非线性输入输出关系^[28],因此本文选择隐藏层层数为1,隐藏层节点数通过式(8)计算,进而借助试错法细化,以达到预测误差最小化^[26];在激活函数的选择上,隐藏层采用ReLU函数,以引入非线性并提高训练效率,而输出层则使用线性激活函数,以直接输出预测值,模型性能的评估以均方误差(MSE)为标准。同时,在构建GA-BP神经网络模型过程中,遗传算法编码使用“浮点数编码方法”,选择算法使用“轮盘赌选择法”,交叉算法使用“模拟二进制交叉”,变异算法使用“高斯变异”。对于上述遗传算法参数的取值,通过选取各参数不同数值进行组合进行多次训练,比较模型收敛速度和预测准确率,选择收敛速度快和准确率高的参数组合,具体见表5。

$$b = \sqrt{m+n} + a \quad (8)$$

式中, m 为输入层神经元个数; n 为输出层神经元个数; a 为[1, 10]的常数。

以2.1节选择出的采厚、覆岩结构、倾向长度、倾角和埋深等5个指标作为GA-BP神经网络的输入,垂直层位(离煤层顶板距离)和水平位置(离回风巷的水平投影距离)作为预测模型的输出,见表3的

表3 顶板巷布置位置训练集
Table 3 Roof gas drainage roadway location training set

序号	工作面	采厚/m	覆岩结构	倾向长度/m	倾角/(°)	埋深/m	日推进距离/m	垂直层位/m	伸入工作面水平距离/m	抽采效果
1	五阳煤矿7603 ^[29,30]	6.10	0.55	180	8.5	480	5.6	35	40	抽采量22 m ³ /min
2	赵庄矿1310 ^[31]	4.88	0.33	219	10	510	3.6	30	20	抽采浓度29%
3	赵庄矿1307 ^[32,33]	4.50	0.21	220	3	568	4.2	47	34	抽采量30 m ³ /min
4	漳村煤矿2601 ^[34]	6.00	0.56	225	5	550	4.8	22	21	抽采量8 m ³ /min
5	寺家庄矿15106 ^[35]	5.40	0.32	286.2	4	480	6.4	30	40	抽采量29 m ³ /min
6	新大地15201 ^[3]	5.20	0.32	180	10	406	3.0	46	54	抽采率92%
7	李村煤矿1303 ^[36]	5.10	0.40	280	5	482	5.2	45	35	抽采浓度18%
8	阳泉三矿K8206 ^[10]	6.80	0.55	252.2	5	547	3.4	60	50	抽采率87%
9	阳煤三矿K8108 ^[37]	6.35	0.33	190.3	7	580	3.0	70	50	抽采量59 m ³ /min
10	阳煤三矿K8110 ^[38]	6.42	0.48	190.3	5	527	3.5	80	63	抽采量49 m ³ /min
11	阳煤一矿S8101 ^[39]	6.02	0.28	240	3	434.5	4.2	67	51	抽采率66%
12	石港煤矿15101 ^[40]	7.02	0.18	152	9	470	2.5	54	60	抽采率70%
13	开元9404 ^[10]	4.23	0.59	180	5	365	3.0	54	28	抽采率77%
14	阳泉一矿S8310 ^[41]	6.51	0.74	220	6	602	5.6	70	50	抽采量28 m ³ /min
15	开元9801 ^[42]	5.58	0.32	180	8	440	3.6	43	40	抽采浓度45%
16	五阳煤矿7607 ^[43]	6.06	0.52	227	5	450	3.6	35	41	抽采率55%
17	白羊岭煤矿15118 ^[44]	4.60	0.26	240	9	390	3.2	52	45	抽采浓度21%
18	阳煤五矿83206 ^[45]	6.40	0.61	191.5	8	520	2.9	57	45	抽采率90%
19	漳村煤矿2603 ^[46]	5.85	0.46	240	5	538	4.8	20	15	抽采量8 m ³ /min
20	马兰矿18305高瓦斯工作面 ^[47]	4.20	0.71	228	3	468	6.0	40	25	抽采量16 m ³ /min

表4 影响指标权重
Table 4 Influence weight of indicators

影响指标	垂直层位关联度	水平位置关联度	垂直层位影响权重	水平位置影响权重	总权重	综合排名
采厚	0.652	0.744	0.177	0.189	0.366	1
覆岩结构	0.624	0.624	0.170	0.159	0.329	3
倾向长度	0.598	0.647	0.162	0.164	0.326	5
倾角	0.584	0.666	0.159	0.169	0.328	4
埋深	0.651	0.668	0.177	0.170	0.347	2
推进速度	0.572	0.585	0.155	0.149	0.304	6

20组数据作为GA-BP神经网络模型的训练样本。

GA-BP神经网络适应度变化如图5所示,由图5中可以看到随着遗传代数的不断增加,适应度不断

表5 GA-BP神经网络参数取值
Table 5 Parameter setting of GA-BP neural network

遗传算法参数	取值	神经网络参数	取值
种群大小	60	输入层节点数	5
遗传代数	70	输出层节点数	2
交叉概率	0.7	隐藏层层数	1
变异概率	0.2	隐藏层节点数	8

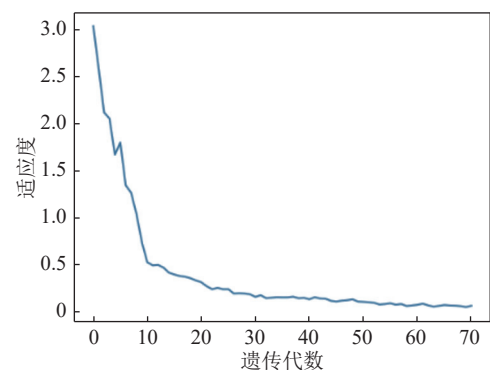


图5 GA-BP神经网络适应度曲线
Fig.5 GA-BP neural network fitness curve

减小,遗传代数到60代之后,变化幅度很小,基本维持稳定,因适应度选择用MSE(均方误差)表示,所以适应度越小,表明GA-BP神经网络初始权重和偏差效果越好。

2.4 模型预测结果及分析

利用表6中的3组数据对训练之后的GA-BP神经网络模型进行检验,GA-BP神经网络模型的测试结果见表6。

表6 模型预测结果
Table 6 Model prediction results

工作面	采厚/m	硬岩岩性比例系数	倾向长度/m	倾角/(°)	埋深/m	垂直层位/m				伸入工作面水平距离/m			
						预测	实际	绝对误差	相对误差/%	预测	实际	绝对误差	伸入工作面水平距离/%
寺家庄15110	5.67	0.35	180.0	5	327	48.6	53	4.4	0.83	46	48	2	4.17
阳煤K8205	6.90	0.62	260.8	8	580	48.8	55	6.2	11.27	47.2	47	0.2	0.43
阳煤五矿8204	6.50	0.58	225.0	8	623	56.7	60	3.3	0.55	41.2	40	0.2	0.50

由表6的预测结果可知,顶板巷垂直层位预测结果的绝对误差最大为6.2、相对误差最大为11.27%,水平距离预测结果的绝对误差最大为2、相对误差最大为4.17%,预测结果相对可靠,可以为山西地区煤矿回采工作面顶板巷布置位置提供一定的参考,后续研究应进一步搜集更多现场实测原始数据样本,解决顶板巷布置位置预测的“小样本、贫信息”问题。

3 顶板瓦斯抽采巷布置智能预测系统软件的设计及实现

3.1 预测系统设计

顶板瓦斯抽采巷布置预测系统包含模型训练、指标参数输入、预测结果输出等3个模块,其运行原理如图6所示。

首先,收集模型训练所需的相关数据,将初步处理的数据存放到文件中,并采用GA-BP神经网络算法训练预测模型。而后,用户在预测系统交互界面中输入指标参数,并通过加载训练好的预测模型,计算得到预测结果,并显示在结果输出界面上。预测系统的交互界面设计本着便捷和直观的原则,方便用户输入参数和查看预测结果,且在预测系统交互界面中展示顶板巷布置位置示意。

3.2 预测系统的软件实现

采用PyQt5和python语言开发了顶板瓦斯抽采巷布置智能预测系统软件。该系统软件展示了训练模型所用的样本数据,并可将软件界面输入的相应参数保存到文件中(图7);对于覆岩结构参数量化,可通过在系统中输入岩层岩性和层厚,系统即可自动计算得到硬岩岩性比例系数(图8);另外,用户也

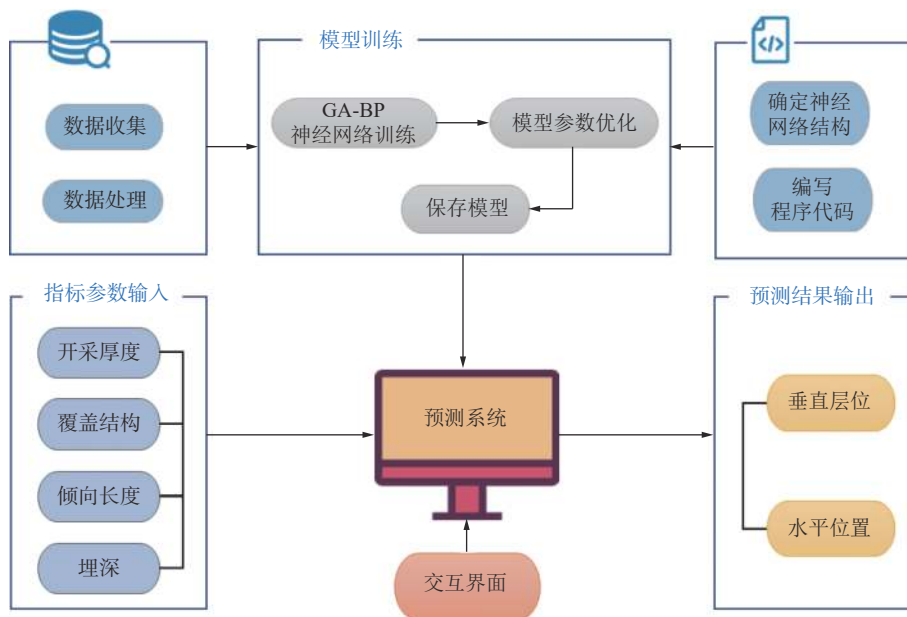


图6 顶板瓦斯抽采巷预测系统运行原理

Fig.6 Operating principle of roof gas extraction roadway prediction system



图7 模型训练样本

Fig.7 Training samples for model



图10 系统预测界面

Fig.10 System prediction interface



图8 覆岩结构量化值计算

Fig.8 Quantitative calculation of overburden structure

可查看预测系统调用的GA-BP模型参数(图9)。该系统软件通过识别输入参数栏中的采厚、覆岩结构、倾向长度、倾向和埋深参数的数值,调用训练好的GA-BP神经网络模型,计算得到顶板巷的空间布置位置,并显示在预测结果栏中,软件界面如图10所示。

例如,寺家庄煤矿15110工作面煤层均厚为5.67 m,可采长度1 915 m,倾向长度180 m,硬岩岩



图9 模型参数

Fig.9 Model parameters

性比例系数为0.35,平均倾角为5°,工作面埋深为327 m,将上述相关物理指标参数输入系统界面后,得到顶板巷的预测结果如图10所示。

同时,在15110工作面实际生产过程中,考虑到覆岩地质条件的影响,15110工作面顶板巷布置在9号煤层下部的砂质泥岩中,其距15煤层顶板平均垂距为53.5 m,与回风巷水平距离为47.8 m。顶板巷的抽采效果如图11所示^[48]。

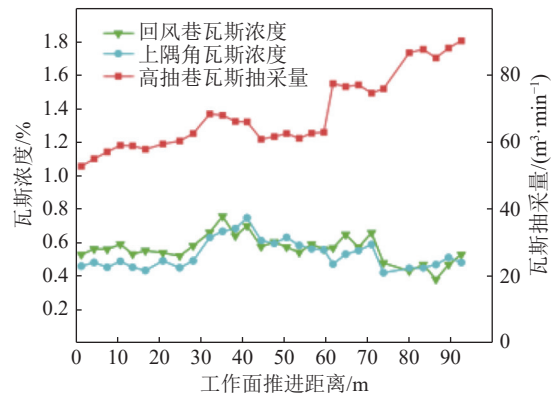


图11 15110工作面瓦斯涌出情况^[48]

Fig.11 Gas emission situation of No. 15110 working face^[48]

由此可知,15110工作面上隅角和回风巷区域内瓦斯体积分数在0.6%左右,未发生瓦斯超限现象,平均瓦斯抽采量约72 m³/min,抽采率为75.5%,且抽采量随推进距的增加呈现不断增加的趋势。而与之相邻的15106工作面顶板巷瓦斯抽采率为75.6%^[35],两者的顶板巷瓦斯抽采效果基本持平,这进一步验证了该预测方法的可靠性。

4 结论

1) 在深入分析顶板巷布置原则及其布置位置的主控因素的基础上,提出了一种基于GA-BP神经网络模型的顶板巷布置位置智能预测方法,为顶板巷

布置精准设计提供了一种新的技术手段。

2) 采用灰色关联分析法确定了采厚、埋深、覆岩结构、煤层倾角、倾向长度等5个物理指标是顶板巷布置位置的主控因素,并将其作为GA-BP神经网络模型的预测指标。

3) 设计开发了基于GA-BP神经网络模型的顶板瓦斯抽采巷布置位置智能预测系统,软件系统的预测结果与实际工况值的相对误差仅为0.43%~11.27%,在可接受的范围内。该研究可为顶板巷布置精准设计提供一定的参考。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 周华东, 许家林, 胡国忠, 等. 综采工作面初采期局部高抽巷瓦斯治理效果分析[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(5): 55-59.
ZHOU Huadong, XU Jialin, HU Guozhong, et al. Effect analysis on gas control with local high level gas drainage gateway at initial mining period of fully mechanized top coal caving mining face[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(5): 55-59.
- [3] 胡国忠, 许家林, 秦伟, 等. 基于关键层运动的邻近层卸压瓦斯抽采优化设计方法[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 52-59.
HU Guozhong, XU Jialin, QIN Wei, et al. Optimization designing method of pressure-relief gas drainage in adjacent layers based on key strata movement[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 52-59.
- [4] 胡国忠, 李康, 许家林, 等. 覆岩采动裂隙空间形态反演方法及在瓦斯抽采中的应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 750-762.
HU Guozhong, LI Kang, XU Jialin, et al. Spatial morphology inversion method of mining-induced fractures of overburden and its application in gas drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 750-762.
- [5] 张玉军, 申晨辉, 张志巍, 等. 我国厚及特厚煤层高强度开采导水裂缝带发育高度区域分布规律[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 38-48.
ZHANG Yujun, SHEN Chenhui, ZHANG Zhiwei, et al. Regional distribution law of water conducting fractured zone height in high-strength mining of thick and extremely thick coal seam in China[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 38-48.
- [6] 尹尚先, 徐斌, 徐慧, 等. 综采条件下煤层顶板导水裂缝带高度计算研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 138-142.
YIN Shangxian, XU Bin, XU Hui, et al. Study on height calculation of water conducted fractured zone caused by fully mechanized mining[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 138-142.
- [7] 袁亮, 郭华, 沈宝堂, 等. 低透气性煤层群煤与瓦斯共采中的高位环形裂隙体[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 357-365.
YUAN Liang, GUO Hua, SHEN Baotang, et al. Circular overlying zone at longwall panel for efficient methane capture of multiple coal seams with low permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 357-365.
- [8] 李树刚, 李生彩, 林海飞, 等. 卸压瓦斯抽取及煤与瓦斯共采技术研究[J]. 西安科技学院学报, 2002(3): 247-249, 263.
LI Shugang, LI Shengcai, LIN Haifei, et al. Technique of drawing relieved methane and simultaneous extraction of coal and coakbed methane[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2002(3): 247-249, 263.
- [9] 李树刚, 林海飞, 赵鹏翔, 等. 采动裂隙椭抛带动态演化及煤与甲烷共采[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1455-1462.
LI Shugang, LIN Haifei, ZHAO Pengxiang, et al. Dynamic evolution of mining fissure elliptic paraboloid zone and extraction coal and gas[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1455-1462.
- [10] 林海飞, 李树刚, 赵鹏翔, 等. 我国煤矿覆岩采动裂隙带卸压瓦斯抽采技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 28-35.
LIN Haifei, LI Shugang, ZHAO Pengxiang, et al. Research progress on pressure released gas drainage technology of mining cracking zone in overburden strata of coal mine in China[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 28-35.
- [11] 钱鸣高, 许家林. 覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(5): 466-469.
QIAN Minggao, XU Jialin. Study on the "O-shape" circle distribution characteristics of mining-induced fractures in the overlying strata[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(5): 466-469.
- [12] 吴仁伦. 煤层群开采瓦斯卸压抽采“三带”范围的理论研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
WU Renlun. Study on the scope of the "three zones" of Gas pressure relief and extraction in coal seam group mining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.
- [13] 吴仁伦, 王继林, 折志龙, 等. 煤层采高对采动覆岩瓦斯卸压运移“三带”范围的影响[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(6): 1223-1231.
WU Renlun, WANG Jilin, SHE Zhilong, et al. Effects of mining height on range of "Three Zones" of gas pressure relief and migration in overlying strata[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(6): 1223-1231.
- [14] 屈庆栋, 许家林, 钱鸣高. 关键层运动对邻近层瓦斯涌出影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1478-1484.
QU Qingdong, XU Jialin, QIAN Minggao. Study on influences of key strata movement on gas emissions of adjacent layers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1478-1484.
- [15] 李新华, 许家林, 汪锋, 等. 工作面宽度对采动裂隙“O”形圈发育形态的影响规律[J]. 煤矿安全, 2012, 43(9): 34-36.
LI Xinhua, XU Jialin, WANG FENG, et al. The influence laws of working face width on the developmental morphology of mining fissure "O-shaped" circle[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(9): 34-36.
- [16] 许家林. 煤矿绿色开采20年研究及进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 1-15.

- XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 1-15.
- [17] 李树刚, 李志梁, 林海飞, 等. 采高对采动裂隙演化规律的影响研究[J]. 矿业安全与环保, 2015, 42(5): 25-28.
LI Shugang, LI Zhiliang, LIN Haifei, *et al.* Research on Influence of Mining Height on Mining Fissure Evolution.[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2015, 42(5): 25-28.
- [18] 秦伟. 地面钻井抽采老采空区瓦斯的理论与应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
QIN Wei. Study on the theory and its application of gas drainage from abandoned gob by surface wells[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [19] 胡小娟, 李文平, 曹丁涛, 等. 综采导水裂隙带多因素影响指标研究与高度预计[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 613-620.
HU Xiaojuan, LI WenPing, CAO Dingtao, *et al.* Index of multiple factors and expected height of fully mechanized water flowing fractured zone.[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 613-620.
- [20] 李全生, 李晓斌, 许家林, 等. 岩层采动裂隙演化规律与生态治理技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 28-47.
LI Quansheng, LI Xiaobin, XU Jialin, *et al.* Research advances in mining fractures evolution law of rock strata and ecological treatment technology. [J] Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 28-47.
- [21] 李奇, 秦玉金, 高中宁. 基于BP神经网络的覆岩“两带”高度预测研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(8): 53-59.
LI Qi, QIN Yujin, GAO Zhongning. Research on prediction of water conducted fissure height in roof of coal mining seam[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(8): 53-59.
- [22] 赵德星. 基于Elman神经网络的导水裂隙带高度预测模型[J]. 山西煤炭, 2022, 42(2): 8-14.
ZHAO Dexing. Prediction model for the height of water flowing fractured zones based on elman neural network[J]. Shanxi Coal, 2022, 42(2): 8-14.
- [23] 娄高中, 谭毅. 基于PSO-BP神经网络的导水裂隙带高度预测[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 198-204.
LOU Gaozhong, TAN Yi. Prediction of the height of water flowing fractured zone based on PSO-BP neural network[J]. Coal Geology Exploration, 2021, 49(4): 198-204.
- [24] 樊振宇. BP神经网络模型与学习算法[J]. 软件导刊, 2011, 10(7): 66-68.
FAN Zhenyu. BP neural network model and learning algorithm.[J]. Software Guide, 2011, 10(7): 66-68.
- [25] 边霞, 米良. 遗传算法理论及其应用研究进展[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(7): 2425-2429, 2434.
BIAN Xiao, MI Liang. Development on genetic algorithm theory and its applications.[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(7): 2425-2429, 2434.
- [26] 阳俊, 曾维伟. 基于GA-BP神经网络的采空区地表沉降预测模型[J]. 矿冶工程, 2022, 42(2): 42-45.
YANG Jun, ZENG Weiwei. A surface subsidence prediction model for underground goafs based on GA-BP neural network.[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(2): 42-45.
- [27] 刘奕君, 赵强, 郝文利. 基于遗传算法优化BP神经网络的瓦斯浓度预测研究[J]. 矿业安全与环保, 2015, 42(2): 56-60.
LIU Yijun, ZHAO Qiang, HAO Wenli. Study of gas concentration prediction based on genetic algorithm and optimizing bp neural network[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2015, 42(2): 56-60.
- [28] 栾元重, 纪赵磊, 崔诏, 等. 基于组合权重的地表下沉系数预测分析[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(4): 223-228.
LUAN Yuanzhong, JI Zhaolei, CUI Zhao, *et al.* Prediction and analysis of surface subsidence coefficient based on combined weight. [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 223-228.
- [29] 秦帅. 高瓦斯综放面走向高抽巷布置与抽采技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
QIN Shuai. Research on Strike High Extraction Roadway Drainage Technology in Wuyang Coal Caving Face with High Gas[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [30] 王雷超. 五阳煤矿7603工作面动压回采巷道围岩控制技术研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2015.
WANG Leichao. Study on control technology of dynamic pressure roadway of wuyang coal, 7603 Island Face[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2015.
- [31] 王文林, 李翔. 赵庄二号井高抽巷抽采技术及位置优化[J]. 建井技术, 2020, 41(1): 17-20.
WANG Wenlin, LI Xiang. Mine gas drainage technology and optimization on location in high level gas drainage gateway of zhaozhuang No. 2 mine.[J]. Mine Construction Technology, 2020, 41(1): 17-20.
- [32] 高宏. 赵庄矿高抽巷层位布置及瓦斯抽放效果分析[J]. 煤炭工程, 2018, 50(3): 8-11.
GAO Hong. Position arrangement of high level gas drainage roadway and investigation on the gas drainage effect in Zhaozhuang Coal Mine.[J]. Coal Engineering, 2018, 50(3): 8-11.
- [33] 田茂霖. 深厚工作面软弱顶板与煤壁偏压失稳机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
TIAN Maolin. Study on the mechanism of deviatoric pressure instability of weak roof and thick coal wall in the deep buried working face[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [34] 马巍. 漳村矿2601工作面高抽巷层位确定研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2020.
MA Wei. Study on the layer of high-level entry in the, 2601 Face of Zhangcun Mine[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2020.
- [35] 朱红青, 霍雨佳, 方书昊, 等. 寺家庄矿综采工作面顶板走向高抽巷合理层位研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 234-239.
ZHU Hongqing, HUO Yujia, FANG Shuhao, *et al.* Study on the reasonable stratum of high-drainage roadway with roof strike of fully-mechanized working face in Sijiazhuang Mine.[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 234-239.
- [36] 郝家兴. 基于覆岩裂隙带发育高度的走向高抽巷合理位置确定[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(7): 75-81.
HAO Jiaying. Determination of reasonable location of strike high-

- level drainage roadway based on development height of overlying strata fracture zone. [J] *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(7): 75–81.
- [37] 娄金福. 顶板瓦斯高抽巷采动变形机理及优化布置研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
- LOU Jinfu. Research on the deformation mechanism and the location optimization of high-level entry for gas extraction [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.
- [38] 王义江, 杨胜强, 许家林, 等. 阳泉三矿大采长综放工作面瓦斯涌出特征分析 [J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2007(1): 11–15.
- WANG Yijiang, YANG Shengqiang, XU Jialin, *et al.* Analysis of methane emission for the bigger mining-length and fully mechanized top-coal caving face in yangquan III mine. [J] *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2007(1): 11–15.
- [39] 张瑞功. 综放工作面瓦斯治理技术效果研究分析 [J]. *煤矿现代化*, 2014(2): 33–35.
- ZHANG Ruigong. A study and analysis of the effectiveness of gas control technology in the comprehensive management of working face gas. [J] *Coal Mine Modernization*, 2014(2): 33–35.
- [40] 胡起晨, 鹿存荣. 石港煤矿 15101 综放面瓦斯综合治理技术及效果分析 [J]. *煤炭科技*, 2013(3): 122–124.
- HU Qichen, LU Cunrong. The comprehensive governance technology and effect analysis of gas in the, 15101 fully mechanized mining face in Shigang coal mine. [J]. *Coal Science & Technology Magazine*, 2013(3): 122–124.
- [41] 赵杰. 阳煤一矿 S8310 工作面瓦斯抽采技术研究与应用 [J]. *能源技术与管理*, 2020, 45(5): 36–38.
- ZHAO jie. Study on gas drainage technology of S8310 working face in Yangquan Coal industry group. [J] *Energy Technology and Management*, 2020, 45(5): 36–38.
- [42] 申文斌, 王毅. 开元矿综放面高抽巷瓦斯抽采研究 [J]. *煤炭技术*, 2017, 36(4): 182–184.
- SHEN Wenbin, WANG Yi. Research on technology of mining gas drainage in Kaiyuan Mine fully mechanized face. [J] *Coal Technology*, 2017, 36(4): 182–184.
- [43] 宋计生. 厚煤层综采工作面采用高抽巷治理瓦斯 [J]. *煤*, 2017, 26(8): 95–97.
- SUN Jisheng. The thick coal seam fully mechanized mining face adopts high-ventilation roadway to control gas. [J]. *Coal*, 2017, 26(8): 95–97.
- [44] 董雪剑. 邻近层灰岩瓦斯异常涌出条件下的高抽巷瓦斯抽采特性与布置研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- DONG Xuejian. Research on gas drainage characteristics and layout of high-drainage roadway under the condition of abnormal gas emission from neighboring limestone [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [45] 唐江波. 阳煤五矿走向高抽巷布置位置的合理确定 [J]. *能源技术与管理*, 2017, 42(1): 40–42.
- TANG Jiangbo. The reasonable determination of the layout of high extraction roadway in Yangmei coal mine. [J]. *Energy Technology and Management*, 2017, 42(1): 40–42.
- [46] 刘梦晨. “Y+高抽巷”工作面初采期瓦斯治理技术研究与应用 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- LIU Mengchen. “Y high pumping lane” working face research and application of gas control technology in early mining period [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [47] 崔林柱. 马兰矿瓦斯高抽巷合理布置及抽采效果分析 [J]. *能源与环保*, 2017, 39(6): 132–136.
- CUI Linzhu. Analysis on reasonable location and extraction effect of high-level gas drainage roadway in Malan Mine. [J] *China Energy and Environmental Protection*, 2017, 39(6): 132–136.
- [48] 钱雷杰. 寺家庄煤矿顶板高抽巷层位优化研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- QIAN Leijie. Study on Optimizing Strata Level of High Drainage Roadway in Sijiazhuang Coal Mine. [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.