

胡雄武,邓日新,王二满.煤层采动覆岩破裂数值模拟与电法监测[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(6):651-658.
DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250076

HU Xiongwu, DENG Rixin, WANG Erman. Numerical simulation and electrical monitoring of coal mining-induced fracturing of overlying rock strata[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(6): 651-658. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250076

煤层采动覆岩破裂数值模拟与电法监测

胡雄武, 邓日新, 王二满

(安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为揭示深部复杂地质条件下煤层采动覆岩破坏规律, 以丁集煤矿 11-2 煤层为研究对象, 综合采用岩层力学参数测试与数值模拟方法, 分析采动过程中覆岩垂直应力分布与塑性区发育特征。在此基础上, 应用钻孔并行电法监测技术, 获取煤层开采前后覆岩电阻率的动态演化规律。研究结果表明: 煤层顶板导水裂隙带高度的理论值为 40.5 m; 现场监测显示, 煤层顶板 0~11.0 m 层段采后视电阻率上升至采前的 4.6 倍, 11.0~41.5 m 层段增至 2 倍, 据此判定垮落带高度为 11.0 m (垮采比 3.67), 导水裂隙带高度为 41.5 m (裂采比 13.8)。数值模拟与实测结果基本一致, 研究成果为淮南矿区类似条件矿井的瓦斯抽采巷道优化布置提供参考。

关键词: 煤层开采; 覆岩破坏; 数值模拟; 电法监测; 裂采比

中图分类号: TD745

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)06-0651-08

Numerical simulation and electrical monitoring of coal mining-induced fracturing of overlying rock strata

HU Xiongwu, DENG Rixin, WANG Erman

(School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: To investigate the overburden failure law induced by coal mining under deep and complex geological conditions, this study takes the No. 11-2 coal seam in the Dingji Mine as the research object. A combined methodology was employed, integrating laboratory testing of mechanical parameters of rock strata with numerical simulation using FLAC^{3D}. These methods were utilized to elucidate the distribution characteristics of vertical stress and the plastic zone within the overburden following coal extraction. Based on the simulation results, in-situ monitoring was conducted employing the parallel electrical resistivity method via boreholes to capture the evolution characteristics of overburden resistivity in response to mining activities. The results indicate that the theoretical height of the water-flowing fractured zone in the coal seam roof is 40.5 m. Field monitoring data revealed that the apparent resistivity in the roof zones of 0 – 11.0 m and 11.0 – 41.5 m post-mining increased to 4.6 times and 2.0 times the pre-mining values, respectively. Accordingly, the heights of the caved zone and the water-flowing fractured zone were determined to be 11.0 m (with a caving-to-mining ratio of 3.67) and 41.5 m (with a fracture-to-mining ratio of 13.8), respectively. The numerical simulation results are in good agreement with the field measurements. The research results provide a reference for optimizing the layout of gas drainage roadways in similar mines within the Huainan mining area.

Keywords: coal seam mining; overburden failure; numerical modeling; electrical monitoring; fracture-to-mining ration

0 引言

煤层开采必然引起覆岩变形与破坏, 形成采

动裂隙与离层空间。离层并非必然诱发矿震灾害, 通过科学调控顶板垮落过程, 实现岩层有序卸压, 可有效防治冲击地压。然而, 当离层空间上部岩

收稿日期: 2025-03-01 修回日期: 2025-06-24 接受日期: 2025-07-01 责任编辑: 张雯

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFF1303302)

作者简介: 胡雄武 (1984-), 男, 安徽宣城人, 博士, 副教授, 主要从事矿井物探技术方面的研究。E-mail: hxw_aust@163.com

层形成高弹性储能的“梁式”结构,且下部岩体因未充分破碎、塑性变形能力受限而难以有效耗散能量时,可能诱发冲击地压灾害。此外,采动裂隙的持续演化会显著改变覆岩渗透特性,直接影响瓦斯运移与积聚,进而加剧透水、瓦斯突出等次生事故风险^[1]。因此,掌握煤层采动引发的覆岩变形与破坏规律,准确探测覆岩垮落带和导水裂隙带(简称“两带”)的发育高度,对矿井采场瓦斯、水害及冲击地压等多种动力灾害的精准防治具有重要意义^[2-4]。

目前,煤层顶板覆岩破坏高度的判定方法主要包括理论方法^[5](如经验公式和数值模拟)与现场实测方法^[6-7](如地面钻孔窥视探测、钻孔分段注水^[8-9]、三维地震属性解释^[10]、微震监测^[11-13]、钻孔电阻率^[14-15]、钻孔电视及其他方法^[16])。实践表明,不同方法在不同矿区、不同地质条件下取得不同的应用效果,实际应用中常采用2种及以上方法相互验证。然而,随着煤炭资源开采深度不断增加,地质条件日趋复杂,现有方法的适用性和可靠性面临严峻挑战。尤其是经验公式法,因其普适性限制,在不同地质条件下获得的“两带”高度值与实际偏差较大。数值模拟与钻孔电阻率监测相结合的方法能较为准确地得出煤层顶板覆岩破坏规律及“两带”发育高度。其中,钻孔电阻率监测可连续获取覆岩随采动过程的电性变化特征,对比性强、成果直观,已在多数矿区推广应用^[17-19]。以安徽淮南矿区为例,其煤炭开采通常需要在煤层顶板合理布置高抽采巷道,以实现煤与瓦斯安全共采。但该矿区煤层埋深大、地应力集中、地质构造复杂,煤层开采后覆岩裂隙发育规律的系统性实测数据匮乏,导致高抽巷道布置

缺乏科学依据,工程决策面临困难。

本文以安徽淮南丁集煤矿东二南采区主要开采C组11-2煤层为研究对象,通过测定顶板岩石物理力学参数,基于FLAC^{3D}构建数值模型模拟覆岩破坏规律。依据模拟结果,在1361工作面布置顶板钻孔电阻率监测系统,动态分析覆岩电性特征以精确判定“两带”高度,为瓦斯抽采巷道优化设计提供技术支撑。

1 研究区地质条件

丁集煤矿东二南采区现阶段主要开采C组11-2煤层,选择该采区1361工作面作为研究对象。该工作面可采走向长度为1 935 m,倾向宽度为200 m,开采标高为-982~-827 m。工作面东侧以F42正断层为界(落差为5~10 m),西侧毗邻大巷保护煤柱,南侧与未开采的1371工作面相邻,北侧为已回采完毕的1351工作面,目前采用沿空留巷开采工艺。钻探、三维地震及巷道揭露数据综合分析表明,1361工作面11-2煤层平均厚度为3 m,煤层倾角为6°,工作面内共发育断层25条,其中3条断层落差大于等于2 m,22条断层落差小于2 m。煤层顶底板岩性以砂岩-泥岩互层为主。通过室内岩石物理力学试验及参数计算,获得了11-2煤层顶板上覆岩层详细的物理力学参数,见表1。另据采区已知水文地质资料,研究区11-2煤层顶板砂岩裂隙以静储量为主,补给条件差,易于疏干;工作面回采过程中不会形成离层再生水体,且北侧1351工作面采空区无积水。这一水文地质特征使得覆岩导电性主要受采动裂隙发育程度控制,为利用钻孔电阻率动态监测“两带”发育高度提供了有利条件。

表 1 实测岩石物理力学参数

Tab.1 measured physical and mechanical parameters of rock

岩组	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	内摩擦角 /(°)	内聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa	容重 /(g·cm ⁻³)	抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
泥岩	0.60	0.40	35.6	4.91	2.28	2.43	28.8	0.98	0.23
砂质泥岩	0.55	0.33	35.0	4.39	1.30	2.07	22.4	0.82	0.25
中砂岩	0.83	0.60	36.9	6.02	1.87	2.54	49.8	1.45	0.21
粉砂岩	0.83	0.16	33.0	2.72	0.73	2.40	25.9	0.41	0.45
细砂岩	0.58	0.36	35.3	4.67	1.40	2.46	25.8	0.90	0.24

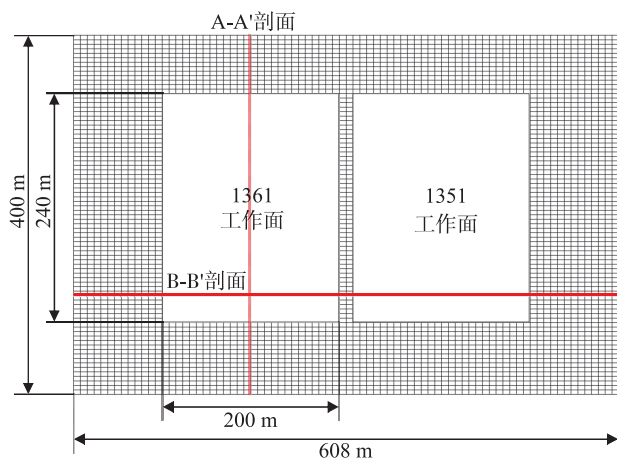
2 数值模拟

2.1 模拟方案

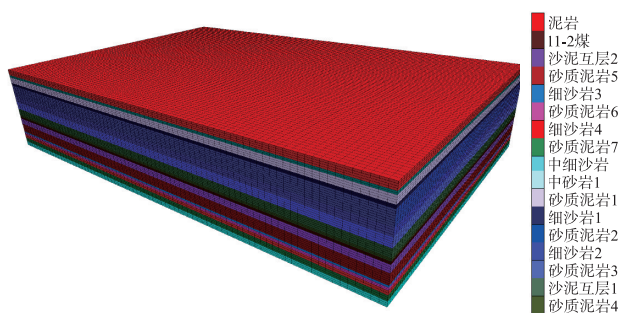
采用FLAC^{3D}软件构建回采模型,通过开挖后回填的方式模拟开采过程。为简化计算,忽略地

层倾角影响建立水平模型,设置工作面走向(X向)长度为400 m、倾向(Y向)宽度为200 m、垂直(Z向)高度为120 m。鉴于相邻1351工作面采空区的影响,模型先模拟1351工作面分步开挖过程,再进行1361工作面的开采模拟。模型整体

尺寸为 $608\text{ m} \times 400\text{ m} \times 120\text{ m}$, 见图 1 (a)。采用 Mohr-Coulomb 本构模型, 并按岩性分层将岩体划分为 17 层, 见图 1 (b)。为降低边界效应, 模拟时沿走向和倾向两端分别留设 100 m 和 80 m 保护煤柱, 并在模型前后面 ($Y=0\text{ m}$ 和 $Y=400\text{ m}$) 限制水平方向位移, 左右面约束 X 方向位移, 底面 ($Z=0\text{ m}$) 对位移进行全约束, 顶面根据地应力换算实施 22 MPa 均匀载荷。模拟时, 设定回采步距为 20 m , 采高为 3 m , 共进行 24 次循环开采。



(a) 研究区 11-2 煤层顶、底板模型尺寸



(b) 研究区 11-2 煤层顶板模型

图 1 数值仿真模型

Fig.1 numerical simulation model

2.2 模拟结果分析

不同回采阶段沿 A-A' 剖面的垂直应力分布云图见图 2。可见, 在回采过程中, 采空区覆岩的垂直应力持续释放。同时, 采空区两端及部分区段存在应力陡增和突变现象。随着回采距离增大, 最大垂直主应力逐渐增大, 且工作面两侧的应力集中现象愈发显著。此外, 采场覆岩的卸压范围不断扩大, 形成了明显的拱形卸压区。卸压拱的半径随着回采距离增大而增大。原因是煤壁和工作面两侧与围岩共同形成了拱形应力承载结构, 使得采煤面覆岩的应力分布呈现两端高、中间低的特征。

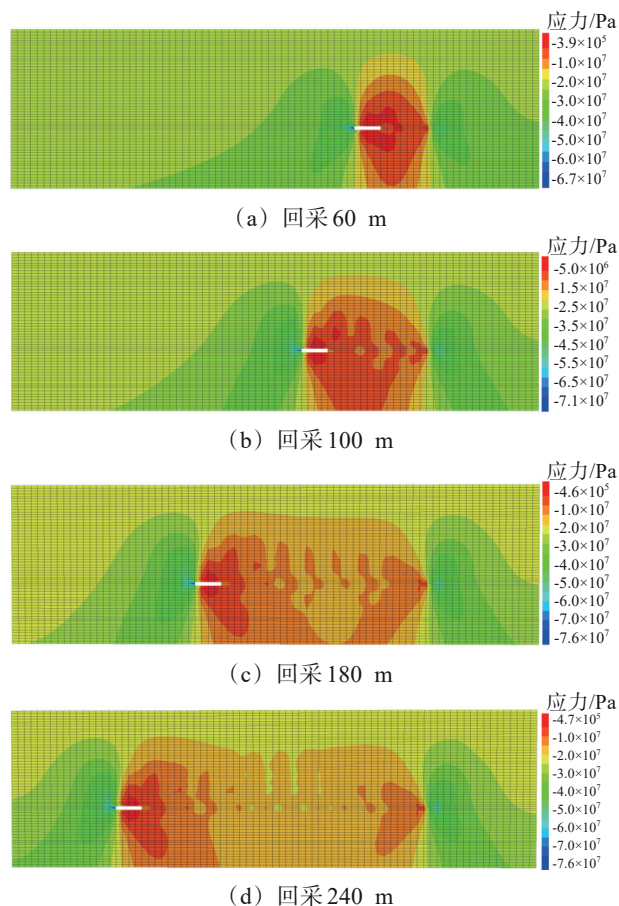


图 2 不同回采阶段沿 A-A' 剖面的垂直应力分布云图

Fig.2 cloud map of vertical stress distribution in sections along A-A' at different mining stages

不同回采阶段沿 A-A' 剖面的塑性区分布见图 3。随着回采距离增大, 采动覆岩塑性区发育高度不断增大。回采距离为 60 m 时, 塑性区高度为 23.4 m ; 回采距离为 100 m 时, 塑性区高度为 38.5 m ; 回采距离为 120 m 时, 塑性区高度为 40.7 m ; 当回采距离进一步增加时, 覆岩塑性区的发育高度不再继续上升, 而是随着工作面的回采推进, 沿着回采方向不断向前扩展。由此可推断, 研究区 11-2 煤采动覆岩导水裂隙带的最大高度为 40.7 m , 裂采比为 13.6 。此外, 采空区上部岩层以剪切破坏为主, 下部则存在拉伸和剪切破坏的复合破坏。

为进一步观测沿煤层倾向方向的采场围岩应力分布和塑性区分布情况, 并与走向塑性区剖面的结果进行对比, 获取回采完成后 (即回采 240 m) 倾向 B-B' 剖面的垂直应力分布和塑性区分布情况, 见图 4、图 5。经计算, B-B' 剖面导水裂隙带的最大发育高度为 40.7 m , 与走向分布一致。受相邻 1351 工作面开采的影响, 靠近采空区一侧的导水裂隙带发育高度略低。

集进一步加密。考虑到1361工作面每日回采4~6 m,该阶段数据采集做到每日1组,以确保能够捕捉覆岩破坏的关键变化特征。在回采位置与监测孔口距离分别为217 m、209 m、146 m、115 m、90 m、78 m、70 m、65 m、60 m、56 m、52 m、47 m、34 m、29 m、22 m和17 m处进行数据采集。经现场实测,当回采位置距离监测孔口17 m时,受顶板覆岩应力的影响,孔中的测试电缆已被岩石错断,未获得数据。

3.4 测试结果分析

不同回采阶段的钻孔实测视电阻率拟断面见图7。当工作面位置距离孔口217 m(图7(a))时,观测区岩层视电阻率较低,总体分布于150~300 $\Omega\cdot\text{m}$,可作为背景值。后期结果可与该背景值进行对比分析,以判断顶板覆岩破坏特征。当工作面位置距离孔口146 m时(图7(b)),岩层视电阻率与前次探测结果相比无明显变化,表明此时煤层开采对观测区覆岩的影响较小,主要原因是开采区域距离观测系统较远。

工作面推进至距孔口115 m时(图7(c)),钻孔顶端局部视电阻率开始增大,原因是采动应力超前影响。由此可判定煤层采动超前影响距离约为48 m。随着工作面继续回采(图7(d)和图7(e)),受采动应力超前影响区域的岩层视电阻率继续升高,达到400 $\Omega\cdot\text{m}$,并且影响范围逐步扩大,此时影响区内岩层裂隙相对发育。

当工作面回采进入钻孔下方时(图7(f)和图7(h)),观测区覆岩受采动应力影响更为显著,岩层视电阻率普遍升高。钻孔顶端局部视电阻率进一步升高至650 $\Omega\cdot\text{m}$,而已回采区域煤层顶板下部岩层的视电阻率升高至700 $\Omega\cdot\text{m}$ 。此时,观测范围内已初步出现电阻率分带现象。同时,随着工作面回采位置进入主要观测区,受采动应力影响,钻孔顶部岩层裂隙逐渐呈现上下相连的特征,高阻区逐渐向下发育,表明裂隙向下发育,导水裂隙带逐渐形成。在垂向裂隙发育的同时,层间横向裂隙发生二次发育,导致钻孔顶部较高视电阻率的范围扩大。此外,钻孔下部岩层视电阻率大范围升高,表明受采空影响,下部岩层逐渐垮落,形成垮落带。

当工作面位置逐步趋向钻孔底端(图7(i)和图7(l))时,观测区覆岩整体位于采空区上方,此时整个观测剖面主要呈现高电阻率分布,部分区域电阻率显著升高至700 $\Omega\cdot\text{m}$ 以上,垂向上电阻率呈现明显的分带现象。总体来看,煤层顶板上方0~11.0 m内高视电阻率分布最广,大部分区域

视电阻率在700 $\Omega\cdot\text{m}$ 左右,视电阻率增幅约为背景值的4.6倍,推测为垮落带的电性响应特征。煤层顶板11.0~41.5 m内岩层视电阻率为620~680 $\Omega\cdot\text{m}$,并向下有一定延伸。其中,煤层顶板41.5 m处视电阻率为620 $\Omega\cdot\text{m}$,是该处背景视电阻率的2.08倍,与煤层顶板11.0 m以下岩层相比,该段岩层视电阻率的涨幅明显偏小,说明岩层破坏程度较小,符合导水裂隙带的电性响应特征。41.5 m上方岩层的视电阻率小于520 $\Omega\cdot\text{m}$,该处背景视电阻率为300 $\Omega\cdot\text{m}$,视电阻率增幅小于1.7倍,表明该部分岩层受煤层开采影响较小,岩层未发生明显破裂,完整性较好,符合弯曲下沉带的岩体变化特征。

由于煤层采动过程中上覆岩层的受力状态发生变化,岩层电阻率也随之改变,并随着采动进程表现出不同特征。因各电极接触不同岩性,存在一定的耦合差异,且各个岩层电阻率本身存在差异,因此在监测分析时采用视电阻率的相对变化量来反映岩层变形与破坏情况。以电极耦合稳定后的背景视电阻率值为参照,将不同时间测试的视电阻率与背景视电阻率进行比较,从而反映煤层开采对顶底板岩层破坏的动态变化情况。

于师建等^[20]、程久龙等^[21]认为垮落带内岩层破碎垮落,岩石碎胀造成的视电阻率变化是背景值的2~3倍。张平松等^[22]、吴荣新等^[23]研究发现,采用崩落法开采的煤层工作面在采空后,未充水的老空区上方岩层会呈现明显的电性差异特征。表现为下部的垮落带岩层电阻率增幅最为显著;中部裂隙带岩层的导电性能也发生明显变化;而最上部的弯曲下沉带岩层电阻率变化相对较小,仅出现轻微增大的现象。这种电性特征的层状分布规律为煤层采动覆岩“两带”发育高度判定提供了重要的依据。根据以上研究,本次监测区煤层采动前后的视电阻率变化特征,可判定监测区11-2煤层垮落带高度为11.0 m,对应垮采比为3.67,顶板导水裂隙带最大发育高度为41.5 m,对应裂采比为13.8,导水裂隙带上部为弯曲下沉带。

数值模拟预测的导水裂隙带高度为40.7 m,裂采比为13.6,见图3(d)。钻孔电法监测的导水裂隙带高度为41.5 m,裂采比为13.8,见图7(l)。数值模拟结果与钻孔电法监测结果高度吻合,最大差值仅为0.8 m,该差值可能源于模型简化与实际地质条件的差异。后续经1361工作面顶板瓦斯抽采巷道探查,证实数值模拟与实际情况较为吻合,验证了FLAC^{3D}数值模型的有效性及其钻孔电阻率法动态监测煤层采动覆岩破坏的可靠性。

(a) 退尺线距离孔口 217 m

(b) 退尺线距离孔口 146 m

(c) 退尺线距离孔口 115 m

(d) 退尺线距离孔口 90 m

(e) 退尺线距离孔口 78 m

(f) 退尺线距离孔口 70 m

(g) 退尺线距离孔口 60 m

(h) 退尺线距离孔口 52 m

(i) 退尺线距离孔口 47 m

(j) 退尺线距离孔口 34 m

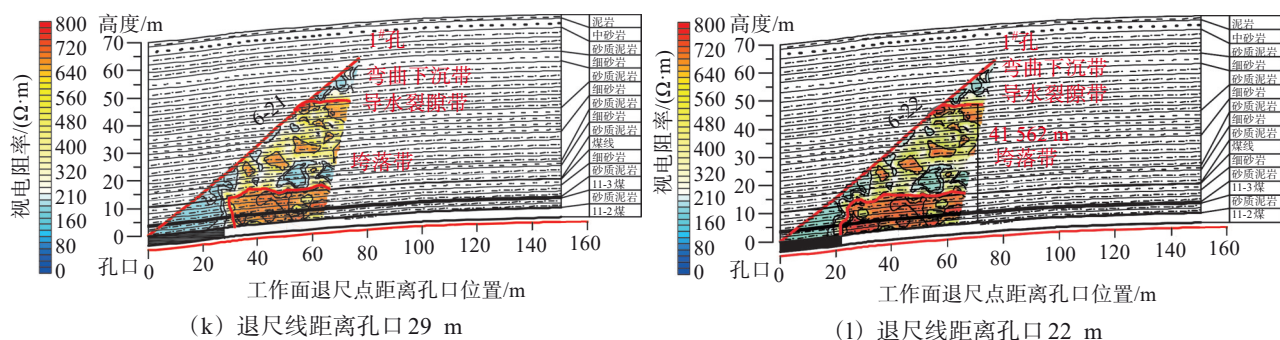


图7 不同回采退尺钻孔视电阻率拟断面

Fig.7 pseudo-profile of apparent resistivity for borehole at various mining positions

4 结论

(1) 以淮南丁集煤矿东二南C组煤采区1361工作面为研究对象,通过测试11-2煤层顶板各地质层岩石力学参数,基于FLAC^{3D}构建岩石物理模型,模拟了煤层开采过程中覆岩裂隙的发育规律。数值模拟结果表明,11-2煤层顶板导水裂隙带的理论高度为40.5 m。

(2) 现场采用钻孔并行电法监测技术,获取了1361工作面开采前后煤层覆岩电阻率的动态演化特征。监测数据显示,顶板0~11.0 m层段采后视电阻率上升至采前的4.6倍,11.0~41.5 m层段视电阻率增至2倍。据此判定垮落带高度为11.0 m (垮采比3.67),导水裂隙带高度为41.5 m (裂采比13.8),为覆岩破坏特征提供了实测依据。

(3) 数值模拟与现场实测结果吻合良好,导水裂隙带高度误差较小,表明将数值模拟与电法监测相结合的研究方法能够有效且准确判断覆岩破坏特征。

参考文献(References):

[1] 王超,张广超,赵西坡,等.基于顶板结构特征的冲击危险性评价方法及应用[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,6(2): 125-135.
WANG Chao, ZHANG Guangchao, ZHAO Xipo, et al. Evaluation method and application of impulse hazard based on roof structure characteristics[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(2): 125-135.

[2] 张玉军,张志巍.煤层采动覆岩破坏规律与控制技术研究进展[J].煤炭科学技术,2020,48(11): 85-97.
ZHANG Yujun, ZHANG Zhiwei. Research progress of mining overlying stratas failure law and control technology[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 85-97.

[3] 杨晋华,李刚,白永利,等.采场覆岩变形破坏原位测试技术研究进展及展望[J].煤炭技术,2025,44(6): 11-17.

YANG Jinhua, LI Gang, BAI Yongli, et al. Research progress and prospects of in situ testing technology for deformation and failure of overlying strata in mining areas[J]. Coal Technology, 2025, 44 (6): 11-17.

[4] 张平松,许时昂,郭立全,等.采场围岩变形与破坏监测技术研究进展及展望[J].煤炭科学技术,2020,48(3): 14-48.

ZHANG Pingsong, XU Shiang, GUO Liquan, et al. Prospect and progress of deformation and failure monitoring technology of surrounding rock in stope[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(3): 14-48.

[5] HUANG W P, LI C, ZHANG L W, et al. In situ identification of water-permeable fractured zone in overlying composite strata[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 105: 85-97.

[6] 王宏志.地面窥视钻孔采动破坏机理及覆岩活动规律反演研究[D].徐州:中国矿业大学,2018:16-21.

[7] 张海峰,李文,李少刚,等.浅埋深厚松散层综放工作面覆岩破坏监测技术[J].煤炭科学技术,2014,42(10): 24-27.

ZHANG Haifeng, LI Wen, LI Shaogang, et al. Research on technology of overlying strata failure monitoring in fully-mechanized caving coal face with shallow and thick loose bed[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(10): 24-27.

[8] XIONG Z Q, WANG C, ZHANG N C, et al. A field investigation for overlying strata behaviour study during protective seam longwall overmining[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8 (10): 7797-7809.

[9] 李超峰,刘英锋,李抗抗.导水裂隙带高度井下仰孔探测装置改进及应用[J].煤炭科学技术,2018,46(5): 166-172.

LI Chaofeng, LIU Yingfeng, LI Kangkang. Equipment improvement and application on determining height of water flowing fractured zone in upward slant hole[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(5): 166-172.

[10] 袁峰,申涛,谢晓深,等.基于深度学习的地震多属性融合技术在导水裂隙带探测中的应用[J].煤炭学报,2021,46(10): 3234-3244.

- YUAN Feng, SHEN Tao, XIE Xiaoshen, et al. Application of deep learning-based seismic multi-attribute fusion technology in the detection of water conducting fissure zone[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3234-3244.
- [11] 乔小龙. 大采高综放开采覆岩破坏特征和裂隙演化规律[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 858-866.
- QIAO Xiaolong. Failure characteristic and fracture evolution law of overburden of thick coal in fully mechanized sub-level caving mining[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 858-866.
- [12] SUN J C, LI H Z, GUO G L, et al. Research on the correlation between overburden rock fracture development and high-energy events during deep mining in extremely thick and weakly consolidated strata for regional coal mining safety[J]. Sustainability, 2024, 16(23): 10705.
- [13] LONG T W, HOU E K, XIE X S, et al. Study on the damage characteristics of overburden of mining roof in deeply buried coal seam[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 11141.
- [14] 吕文斌, 杜明泽, 管彦太, 等. 弱胶结地层大采高工作面覆岩“两带”发育高度研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(8): 92-97.
- LYU Wenbin, DU Mingze, GUAN Yantai, et al. Development height of “two zones” in weakly cemented soft stratum[J]. Coal Engineering, 2021, 53(8): 92-97.
- [15] 鲁晶津, 王冰纯, 颜羽. 矿井电法在煤层采动破坏和水害监测中的应用进展[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 18-26.
- LU Jingjin, WANG Bingchun, YAN Yu. Advances of mine electrical resistivity method applied in coal seam mining destruction and water inrush monitoring[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 18-26.
- [16] 程久龙, 王慧杰, 徐忠忠, 等. 基于全卷积神经网络的钻孔瞬变电磁法岩层富水性预测研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 289-297.
- CHENG Jiulong, WANG Huijie, XU Zhongzhong, et al. Research on aquifer water abundance evaluation by borehole transient electromagnetic method based on FCNN[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 289-297.
- [17] 程磊, 罗辉, 李辉, 等. 近年来煤矿采动覆岩导水裂隙带的发育高度的研究进展[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(1): 28-38.
- CHENG Lei, LUO Hui, LI Hui, et al. Research progress on the development height of water-conducting fracture zone in overlying strata caused by coal mining in recent years[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(1): 28-38.
- [18] 张平松, 刘盛东, 舒玉峰. 煤层开采覆岩破坏发育规律动态测试分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 217-222.
- ZHANG Pingsong, LIU Shengdong, SHU Yufeng. Analysis on dynamic testing results of distortion and collapsing of the top rock by geophysical method during mining of coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 217-222.
- [19] WU R X, WU Y Z, SUN B Y, et al. Monitoring of overburden failure with a large fractured-height working face in a deep Jurassic coal seam based on the electric method[J]. Applied Sciences, 2024, 14(22): 10293.
- [20] 于师建, 程久龙, 王玉和. 覆岩破坏视电阻率变化特征研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(5): 457-460.
- YU Shijian, CHENG Jiulong, WANG Yuhe. The study on apparent resistivity change feature of overlying strata[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(5): 457-460.
- [21] 程久龙, 于师建. 覆岩变形破坏电阻率响应特征的模拟实验研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(5): 699-706.
- CHENG Jiulong, YU Shijian. Simulation experiment on the response of resistivity to deformation and failure of overburden[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(5): 699-706.
- [22] 张平松, 刘盛东, 吴荣新, 等. 采煤面覆岩变形与破坏立体电法动态测试[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1870-1875.
- ZHANG Pingsong, LIU Shengdong, WU Rongxin, et al. Dynamic detection of overburden deformation and failure in mining workplace by 3d resistivity method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1870-1875.
- [23] 吴荣新, 吴茂林, 曹建富, 等. 厚松散层薄基岩坚硬顶板工作面覆岩破坏电法监测[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 239-245.
- WU Rongxin, WU Maolin, CAO Jianfu, et al. Electrical monitoring of overburden failure in hard roof working face with thick loose layer and thin bedrock[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 239-245.