



厚硬岩层影响下高强度开采覆岩裂隙分形与空隙率演化特征

张 村^{1,2,3}, 陈彦宏¹, 任赵鹏¹, 任一铭¹, 廉永奇¹, 李晓斌⁴

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)能源与矿业学院, 北京 100083;

3. 中国矿业大学(北京)厚煤层绿色智能开采教育部工程研究中心, 北京 100083;

4. 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室, 北京 102209

摘要: 在煤层高强度开采扰动下, 上覆岩层发生移动变化, 形成复杂的采动裂隙网络, 并极易贯通松散含水层并逐渐延伸至地表, 造成矿区生态环境的破坏, 严重威胁工作面安全生产。基于此, 本文以上湾煤矿为研究背景, 采用物理模拟、分形理论等方法分析了覆岩采动裂隙时空演化特征, 同时基于分形图像特征识别了工作面推进过程中覆岩空隙, 揭示了采动覆岩空隙率空间分布和演化规律, 提出了基于覆岩裂隙空间演化的采中“近场垮落带与远场高位离层空隙”协同注浆减损、采后残余空间维稳注浆减损设计, 并给出合理的注浆空间和注浆时机参数。结果表明: 由于厚硬岩层与厚软岩层缓冲层的协同导控作用, 覆岩离层空间开度与分形维数呈现协同演化特征; 随着工作面的推进, 覆岩裂隙分形维数呈现台阶形波动降维趋势, 覆岩空隙率呈现非线性减小。当工作面达到完全充分采动后覆岩裂隙场呈现非对称空隙形态, 空隙率为 2.37%。覆岩裂隙网络在空间上随采动损伤传导自下而上、由表及里扩展演化, 分形维数分布呈现规律性波动降维, 其扩展空间由拱形扩展为梯形纵深发展。研究结果可为神东矿区同类型矿井减损开采提供科学借鉴。

关 键 词: 煤矿开采; 覆岩裂隙; 分形特征; 空隙率; 注浆减损

The fractal and porosity evolution characteristics of overlying rock fractures in high-intensity mining under the influence of thick and hard rock layers

ZHANG Cun^{1,2,3}, CHEN Yanhong¹, REN Zhaopeng¹, REN Yiming¹, LI-AN Yongqi¹, LI Xiaobin⁴

(1. Inner Mongolia Research Institute, China University of Mining and Technology (Beijing), Ordos 017010, China;

2. School of Energy and Mining, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

3. Engineering Research Center of Green and Intelligent Mining for Thick Coal Seam, Ministry of Education, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

4. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102209, China)

收稿日期: 2026-01-09

修回日期: 2026-0-10

基金项目: 国家自然科学基金(52474161, 52404109); 鄂尔多斯市青年科技人才项目(RC20250108)

Abstract: Under high-intensity coal mining disturbance, the overlying strata undergo movement and deformation, forming a complex network of mining-induced fractures. These fractures can easily penetrate loose aquifers and gradually extend to the surface, leading to ecological damage in mining areas and posing serious threats to safe production in the working face. Based on this, taking Shangwan Coal Mine as the research background, this study analyzes the spatiotemporal evolution characteristics of mining-induced fractures in overlying strata using methods such as physical simulation and fractal theory. Meanwhile, based on fractal image features, voids in overlying strata during the advance of the working face are identified, revealing the spatial distribution and evolution patterns of mining-induced void ratios in overlying strata. A design for coordinated grouting for damage reduction is proposed, targeting "near-field caved zone and far-field high-level separation voids" during mining, along with post-mining grouting for stabilizing residual voids to mitigate damage. Reasonable grouting spaces and timing parameters are provided. The results show that due to the synergistic guiding and controlling effects of thick hard rock layers and thick soft rock buffer layers, the height of separation spaces and the fractal dimension in overlying strata exhibit coordinated evolution characteristics. As the working face advances, the fractal dimension of overlying fractures shows a step-like fluctuating downward trend, while the void ratio decreases nonlinearly. After the working face reaches full and sufficient mining, the overlying fracture field presents an asymmetric void morphology, with a void ratio of 2.37%. The fracture network in overlying strata expands and evolves spatially, propagating from bottom to top and from surface to interior with mining-induced damage conduction. The distribution of fractal dimensions shows a regular fluctuating downward trend, and its expansion space develops from an arch shape to a trapezoidal depth. The research findings provide scientific reference for damage-reducing mining in similar mines in the Shendong mining area.

Key words: Coal mining; Overburden fracture; Fractal dimension; Porosity evolution; Damage mitigation grouting

随着煤炭资源开采逐渐向西部转移,西部矿区浅埋深、薄基岩、厚煤层和厚松散层等复杂地质特征带来的开采挑战日益凸显^[1]。高强度开采扰动下,上覆岩层发生大规模垮落、断裂与变形,在煤层上方形成垮落带、破碎带和弯曲下沉带^[2]。原有裂隙随着岩层移动逐渐扩展形成复杂的采动裂隙网络,并极易贯通松散含水层并逐渐延伸至地表,诱发突水溃沙、地表塌陷等灾害^[3-5]。因此,准确把握采动裂隙的分布形态、结构特征及动态演化规律对于分析上覆岩层移动规律、地表沉降预测以及工作面安全生产等具有重要意义。

研究表明,采动裂隙网络具有明显的分形特征^[6-7],并直接影响着瓦斯运移、水害防治及地表沉降等关键工程问题^[8-12]。由于实际工程中采动裂隙演化规律难以直接监测,目前对于采动裂隙演化规律的研究主要集中在室内实验和数值模拟两方面。赵鹏翔^[8-9]等揭示了巨厚煤层下分层开采扰动下邻近采空区破断岩体裂隙的“激活-构建-稳定”三阶段继发性演化规律,提出分形维数动态分区方法,为瓦斯抽采靶区定位提供理论依据。Meng et al.^[10]通过物理模型试验方法,系统

研究了矿层上覆岩体中裂缝动态分布规律、发育规律及其影响。Liu et al.^[12]基于相似模拟和分形维数分析,研究了多层充填开采诱发的裂隙网络演化及分形特征,建立了裂隙分形与覆岩变形的定量关系,明确了裂隙网络发展阶段、分形维数与导水裂隙带高度的指数关系及裂隙参数间的相关性。

汪北方等^[13]引入分形理论,选用Menger海绵分形模型建立采空区垮落岩体空隙结构模型,推导了采空区垮落岩体空隙率和残余碎胀系数公式,预测了采空区垮落岩体空隙储水量。相似模拟能较好地还原实际岩层分布,常与分形理论结合用于表征采动裂隙的演化规律。李春睿^[14]、李宏艳^[15]等人联合裂隙条数和占位空间统计分形值变化,应用“双重分形”理论揭示采场覆岩裂隙的萌生、扩展、贯通的过程,获得了采动条件下覆岩裂隙时空演化的定量描述方法。宋颜金^[16]等人利用弹性薄板理论和关键层理论,对采空区上覆岩层的下沉进行定量描述,研究采动影响下覆岩裂隙的分布特征,得到了基于相对下沉量的覆岩规则移动带空隙率的近似公式。邢景超^[17]、梁

涛^[18]等人分别结合三维、二维相似模拟和分形维数对裂隙场定性分区,建立了裂隙岩体分形-渗透率模型,揭示了覆岩裂隙重构下分形渗透特征。栗东平^[19]、薛东杰^[20-21]、周宏伟^[22]等引入分形与逾渗理论定量评价了采动裂隙的分布及发育特征。王志国等^[23]提出了分形维数四阶段演化模型,建立三带裂隙分形维数比,为深部开采覆岩稳定性评估提供量化指标。陈凯等^[24]结合分形几何理论发现覆岩裂隙分形维数演化可分为快速升维、快速降维、平稳稳维、周期性变维四个阶段。Ran et al.^[25]采用相似模拟实验,分析了急倾斜煤层群多次开采下覆岩垮落特征及采动裂隙的频率、角度、宽度等参数演化,探究裂隙分形维数和贯通度变化。

在数值模拟方面,离散元法(DEM)凭借其非连续介质表征能力,可直观模拟块体分离、转动及接触行为,成为研究采动裂隙网络演化机制的理想工具。卢方超等^[26]采用 UDEC 数值模拟软件研究采空区覆岩垮落和裂隙演化规律,根据采空区覆岩下沉量,计算得到采空区孔隙率三维分布规律。谭毅等^[27]通过数值模拟并引入分形几何理论,定量表征了采动覆岩裂隙网络场的动态时空演化分形特征。郭文兵^[28]、汪北方^[29]等人结合数值模拟、相似模拟和分形分析方法揭示了采空区采动覆岩裂隙发育及空间分布特征,构建了空隙率分析模型,并量化表征了覆岩裂隙分区特征,同时针对性的提出井上下一体化治理技术方案。Wang et al.^[30]基于关键层理论与随机介质理论,

构建垮落带孔隙率、离层带裂隙率及地表沉降带裂隙率的三维动态分布模型,揭示深部开采覆岩空隙“三带异质演化”规律。

综上所述,目前关于覆岩采动裂隙的量化表征多集中于导水裂隙带高度和形态,关于孔隙空间的量化表征多集中于离层空间。西部高强度开采覆岩裂隙发育演化快,全覆岩裂隙量化表征难。现有关于导水裂隙带以及离层空间的量化表征很难识别导水裂隙网络的演化特征,不利于现场注浆减损时空参数的设计。基于此,本文以上湾煤矿特大采高工作面为研究背景,结合相似模拟与分形理论对采空区覆岩采动裂隙网络时空演化规律进行了定量表征,揭示了覆岩空隙率的演化机制,研究结果为神东矿区同类型矿井减损开采提供科学支撑。

1 工程背景

上湾煤矿特大采高综采面沿倾向布置,走向长度 299.2m,推进长度 5254.8m,设计采高 8.6m;南侧为井田边界,与乌兰集团温家塔井田相邻;北侧为井田边界,与补连塔井田(12510)相邻。工作面伪顶为泥岩,属不坚硬类不稳定型;直接顶为灰白色细粒砂岩,属坚硬类不稳定型;基本顶为灰白色粉砂岩。由于工作面开采强度大,覆岩与地表损伤剧烈,水土流失严重,具体如图 1 所示。



图1 上湾煤矿地表破坏特征

2 覆岩空隙时空演化规律量化表征

2.1 分形维数计算方法

覆岩采动裂隙的现场探测和全局可视化难以实现,通过相似材料模拟试验能有效再现采场覆岩裂隙的演化过程和分布特征,以此揭示覆岩破坏机制和采动损伤传导特征^[31]。由于覆岩裂隙形态具有自相似性,运用分形几何理论可定量表征覆岩采动裂隙演化规律^[6-7,23]。目前多采用分形盒子维数法,该方法通常是将裂隙网络放在一个可均匀分割的网格上,并按比例放大或缩小网格尺寸进行精细分割,并计算覆盖裂隙网络的盒子数量,从而得到盒子维数 D 。当格子边长为 r 时所对应的格子数量为 $N(r)$,可由式(1)表示。

$$D = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg(N(r))}{\lg r} \quad (1)$$

本文运用ImageJ软件对开挖过程中覆岩破断照片进行二值化、降噪处理,以黑色表征空隙,白色表征岩层,并利用Fractal Box Count插件计算覆岩裂隙网络数字图像分形维数,直观反映覆岩裂隙分布形态,如图2所示。

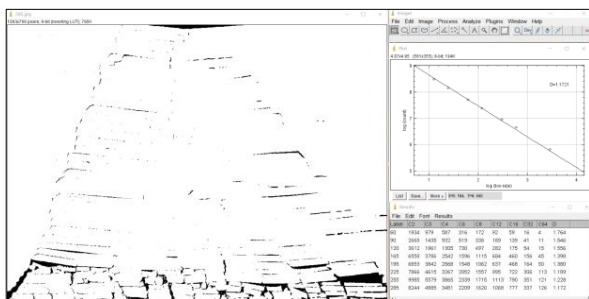


图2 分形维数图像处理及其计算

Fig. 2 Fractal dimension image processing and its calculation

2.2 覆岩采动裂隙分形演化规律

2.2.1 采动影响下覆岩分形维数演化规律 以上湾煤矿特大采高工作面为背景构建了相似模型,相似比为 $C = 1:200$,容重相似比 $C_\gamma = 1:1.5$ (岩层)、 $C_\gamma = 1:1$ (煤层),应力相似比 $C_\sigma = C_\gamma \times C$,即 $1:300$,时间相似比 $C_t = 1:10$,相似模型实验平台的尺寸为长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $=1625 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 1165 \text{ mm}$ 。由于模拟架尺寸的限制,模拟开挖煤层距离设定为 1425 mm ;按照相似比例计算,对应实际推进距离为 285 m ,模型煤层上覆岩层厚度为 219 m 。工作面的开挖速度为 15 m/d ,由于该矿井采用4/6工作制,根据几何相似比($1:200$)和时间相似比($1:$

10),即每 1.8 小时开挖 7.5 cm ,每隔 0.6 小时开挖一次。采用长深比作为评价开采活动充分性的指标^[32],根据计算可知开挖结束后物理相似模拟在走向上已经达到充分采动。

工作面推进过程中覆岩破断状态及其分形维数结果如图3所示,由于篇幅限制,仅展示了厚硬岩层破断前后及覆岩充分采动后的结果图。覆岩整体受到“双关键层+远场厚软岩层缓冲层”的导控作用,离层跳跃式纵深传导,覆岩呈现分组破断^[33]。随着工作面的推进,直接顶受到开采扰动开始产生微裂隙,分形维数迅速增加。如图3(a)所示,当工作面推进至 90 m 时,直接顶完全破断垮落,采动损伤传导至基本顶。由于基本顶的承载作用以及超大开采空间,其下方存在明显离层空间,此时覆岩分形维数为 1.55 ,发育至最大;随着工作面的继续推进,直接顶随工作面的推进继续垮落,基本顶下方离层横向扩展,垮落带横向扩展,当工作面推进 120 m 时覆岩裂隙分形维数增加至 1.56 。当暴露距离达到基本顶破断步距时基本顶及其随动岩层发生初次破断,如图3(b)所示,当工作面推进至 165 m 时,基本顶及其随动岩层破断垮落,基本顶下方离层闭合,采空区中部裂隙部分压实,采动损伤传导至主关键层,同时伴随着离层的跳跃传导,此时覆岩分形维数为 1.40 ,相对降低了 10.3% 。随着基本顶的周期破断,采动损伤范围持续扩展,主关键层下方离层空间逐渐发育,当工作面推进至 195 m 时,覆岩裂隙分形维数为 1.38 ,并无明显变化。如图3(c)所示,当工作面推进至 225 m 时,主关键层破断,其下方离层闭合,同时由于厚软岩层缓冲层的抑制作用,离层向上传导,采空区中部裂隙大面积压实,此时分形维数降低至 1.19 ,相对降低 13.77% 。如图3(d)所示,由于厚软岩层强度较小,并无显著承载能力,当工作面推进至 255 m 时,厚软岩层弯曲下沉,离层空间完全闭合,同时在靠近地表区域形成远场高位离层,此时覆岩分形维数为 1.23 ,相对增加 3.36% ,出现二次升维现象,这是由于覆岩损伤范围扩展,覆岩微裂隙发育,高位离层扩展,导致裂隙场分形维数的增加。如图3(e)所示,当工作面推进至 285 m 时,覆岩整体发生变形,地表沉降,离层均完全闭合,采空区中部压实程度较高,此时覆岩分形维数降低至 1.17 ,相对降低 4.88% 。

综上所述,厚硬岩层的承载特征为离层空间

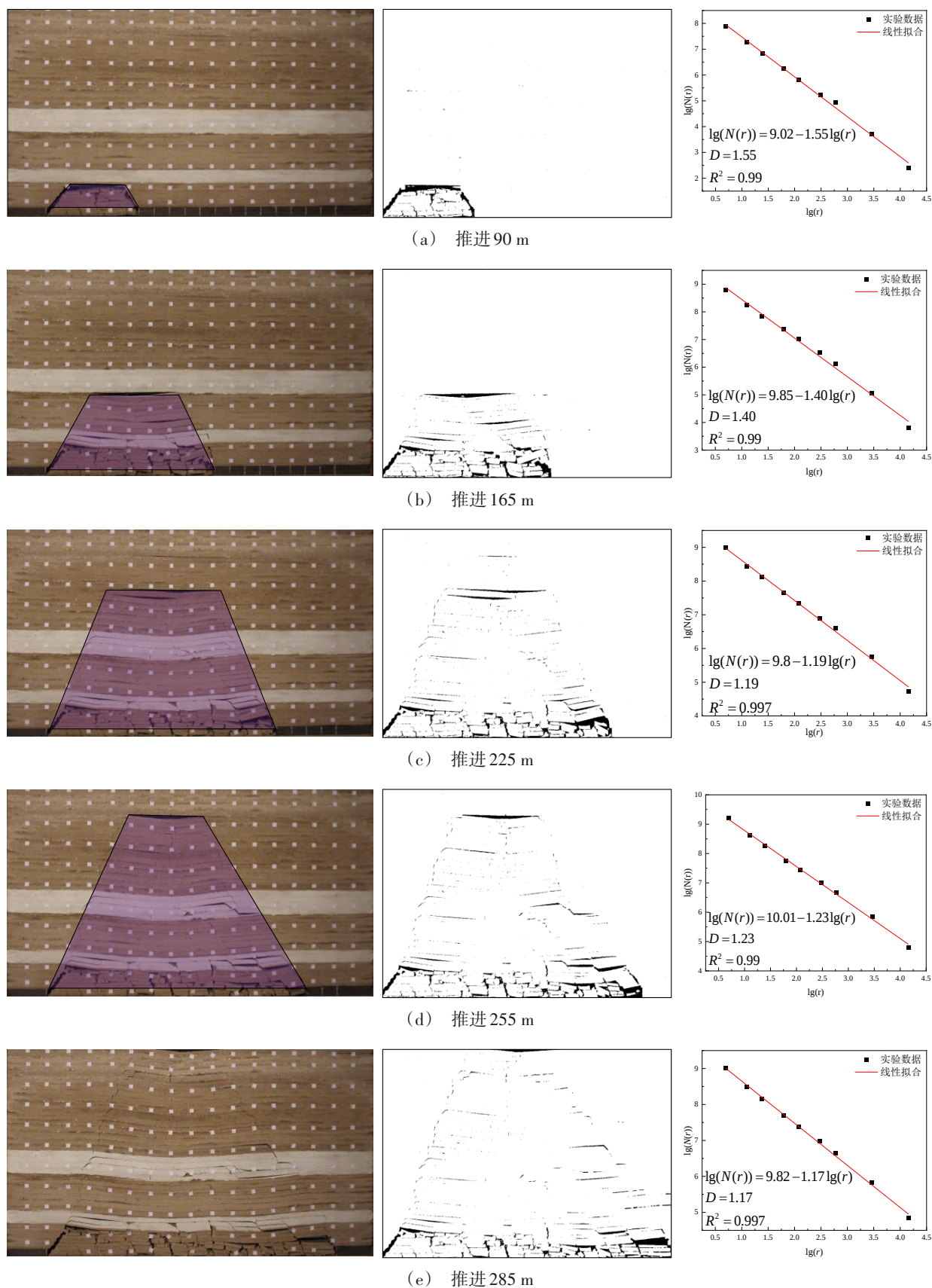


图3 工作面推进过程中覆岩破断、二值化图像及分形维数

Fig. 3 During the process of advancing the working face, the overlying rock fractures, binary images, and fractal dimensions

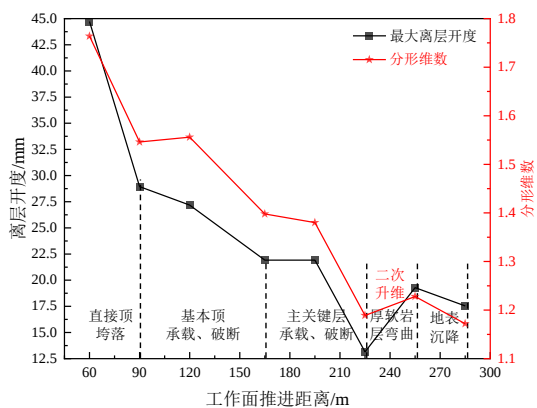


图4 分形维数与离层开度随推进距离的演化过程

Fig. 4 Evolution of fractal dimension and maximum separation aperture with advancing distance

的纵深动态发育提供了桥梁,而离层空间作为覆岩损伤破断的源头,又决定了覆岩裂隙的复杂程度及其空间占位大小^[23],成为分形维数演化的主要影响因素。如图4所示,覆岩最大离层空间开度与分形维数随工作面推进距离呈现协同演化特征。在开采初期,由于特大采高以及厚硬岩层的影响,煤层开采扰动较强,离层裂隙发育较为迅速,覆岩裂隙场复杂程度较高。当基本顶和主关键层初次破断后微裂隙发育,低位离层闭合,采空区中部裂隙压实区范围较大,裂隙多分布在工作面边界区域,呈现明显分区特征,覆岩裂隙场复杂程度相对降低。随着采动损伤的传导,覆岩损伤范围逐渐扩展,裂隙逐渐向上发育,协同高位离层的扩展,由于离层对分形维数的影响,形成二次升维现象,但增加程度较低,仅为3.36%;当充分采动后,地表沉陷,覆岩整体压实,内部离层空间闭合,形成完整垮落带、裂隙带、弯曲下沉带,分形维数降低并保持稳定。

2.2.2 分形维数与覆岩破坏高度的相互关系
随着工作面的推进,覆岩裂隙网络处于动态变化,裂隙网络随着覆岩移动高度的增加逐步向上覆岩层和工作面前方纵深扩展,离层裂隙和竖向破断裂隙交互存在,形成冒落带、裂隙带、弯曲下沉带的岩体结构。如图7所示为工作面推进过程中覆岩裂隙分形维数与破坏高度的相互关系,由图7(a)可知,由于厚硬岩层与厚软岩层缓冲层的协同导控作用,随着工作面的推进覆岩移动高度呈现台阶形上升趋势,覆岩裂隙分形维数呈现台阶形波动降维趋势。结合图6与图7(b),随着覆岩破

坏高度的演化,覆岩裂隙的降维过程可分为5阶段:由于特大采高的影响,直接顶的垮落并无法充填采空区,在基本顶的承载作用下形成近场离层空间,随着直接顶的迅速垮落,离层空间逐渐减小,形成降维阶段Ⅰ;由于基本顶厚度相对较厚、强度较高,当覆岩破坏高度演化至基本顶时离层空间随着直接顶的破断横向扩展,分形维数略有增加,当基本顶及其随动岩层破断后近场离层空间闭合,垮落带中部破碎岩体压实,裂隙部分闭合,形成降维阶段Ⅱ,此时覆岩破坏高度发育至主关键层,覆岩破坏高度增加264%,分形维数减小10.97%;随着主关键层的弯曲变形,其下方离层空间压缩,当主关键层破断后由于上方厚软岩层缓冲层的抑制作用,覆岩破坏高度演化缓慢,同时由于厚软岩层缓冲层的渐进破坏形成远场离层空间,由于下方裂隙的进一步压实,形成降维阶段Ⅲ,覆岩破坏高度增加49.99%,分形维数减小13.77%;当厚软岩层缓冲层完全弯曲下沉后覆岩裂隙压实程度进一步增加,同时受到地表随动层的控制离层跳跃传导,形成远场高位离层,受离层空间的影响形成升维阶段Ⅳ,覆岩破坏高度增加28.71%,分形维数增加3.36%。当覆岩、地表协同沉降后覆岩整体达到完全充分采动,采动裂隙高度压实,分形维数再次降低且保持稳定,形成降维阶段Ⅴ,覆岩破坏高度增加13.31%,分形维数减小4.88%。

2.3 覆岩采动裂隙分形维数时空演化特征

为了进一步描述工作面推进过程中覆岩裂隙分形维数的时空演化特征,本文基于图像处理法构建精细化网格分析体系,如图6所示。将研究区域细化为 10×7 共70个分析单元,对工作面不同推进距离下网格分形维数进行计算,并绘制云图,如图7所示。未受到采动影响区域分形维数为0,受采动影响覆岩裂隙分形维数处于0~2。

由图7可知,在高强度开采扰动影响下,岩层损伤范围不断扩展,伴随水平离层裂隙与纵向破断裂隙纵横交错,从而形成复杂的覆岩裂隙网络。结合相似模拟破断效果可知,覆岩裂隙分形维数的空间扩展形态与覆岩损伤破坏轮廓具有较好对应关系。工作面推进前期,直接顶垮落后受基本顶悬露承载作用控制,覆岩裂隙主要沿采空区上方及两侧边界发育,损伤破坏轮廓整体表现为向上拱曲扩展,随着基本顶和主关键层相继破断,采空区中部破碎岩体逐渐压实,低位裂隙复杂程度

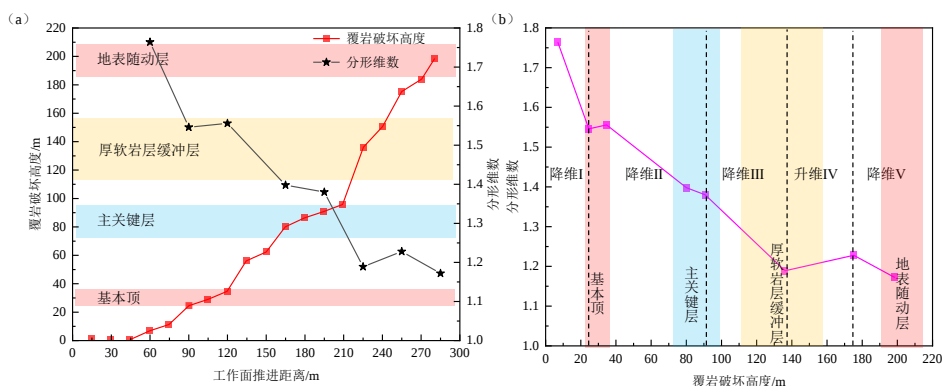


图5 分形维数与覆岩破坏高度的关系

Fig. 5 The relationship between fractal dimension and the height of overlying rock failure

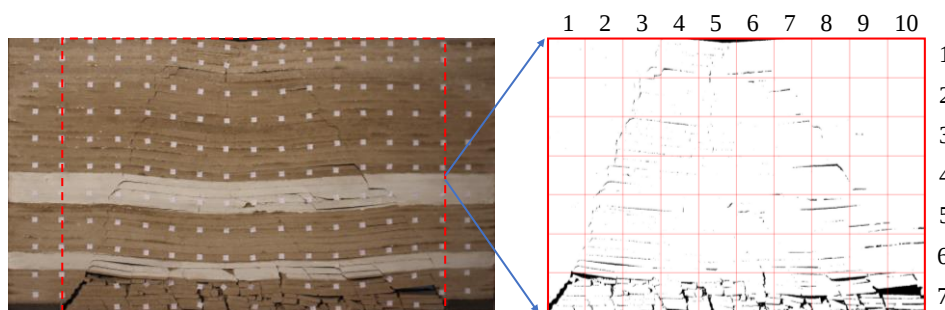


图6 覆岩裂隙网格划分

Fig. 6 Grid division of overlying rock fissures

降低,而工作面边界裂隙和远场高位离层继续发育,损伤破坏范围由采空区上方局部区域向两侧边界及上部岩层转移,分形维数扩展空间由拱形(图7(a)、(b))扩展为梯形(图7(c)~(e))向纵深发展。由于采空区中部裂隙压实,裂隙主要分布在工作面边界区域,边界裂隙发育扩展充分、贯通性强,具有更强的分形特征。

当工作面推进90~165 m时,覆岩裂隙高分形维数区域主要集中于采空区上方及两侧边界,整体呈拱形分布;由于采动损伤范围较小,压实作用并不显著,破断岩体裂隙复杂程度较高。随着工作面的推进,工作面前方覆岩导水裂隙通道不断发育,原有导水裂隙远离工作面进入中部压实区开始闭合,分形维数下降。当工作面推进至225 m时,采空区中部裂隙分形维数约为0.9~1.1,边界裂隙区域分形维数保持在1.6~1.9,表明中部压实区裂隙复杂程度降低,而边界裂隙及远场离层区仍保持较强发育,垮落带呈现马鞍形形态,同步形成远场离层区。当工作面推进285 m时覆岩已经达到完全充分采动,边界裂隙分形维数主要处于1.2~1.4,采空区中部压实范围全方位扩展,与边界裂隙区分形维数相比偏小,无显著裂隙分

布,同时垮落带分形维数整体主要处于1.4~1.6,呈现非对称马鞍形形态。

3 覆岩空隙场量化表征

采空区精细探测及可充空间精准计算是实施煤矸石注浆充填技术的关键和难点,垮落区矸石浆体规模化高效充填须建立在精细探查垮落区发育范围及垮落岩块间空隙结构分布的基础之上。因此,深入研究采动覆岩损伤规律及精准判识采空区空间范围与结构演化是垮落区高效充填的关键科学问题^[34]。

随着工作面的推进,覆岩不断生成新的采动裂隙,原有采动裂隙逐渐压实闭合,形成横三区,竖三带。本文引入采动空隙场概念量化表征覆岩内部空隙分布规律,由于是在二维平面空间内研究空隙率的分布特征,采空区孔隙率可视为采空区破碎岩体中,岩块之间的空隙面积与岩体总面积的比例,如图8所示。在裂隙岩层的数字图像中,将黑色表征裂隙区域,白色表征岩块^[28]。因此,采空区范围图像中黑色像素数与总像素数的比值可计算为裂隙岩层中的总体空隙率,可由式

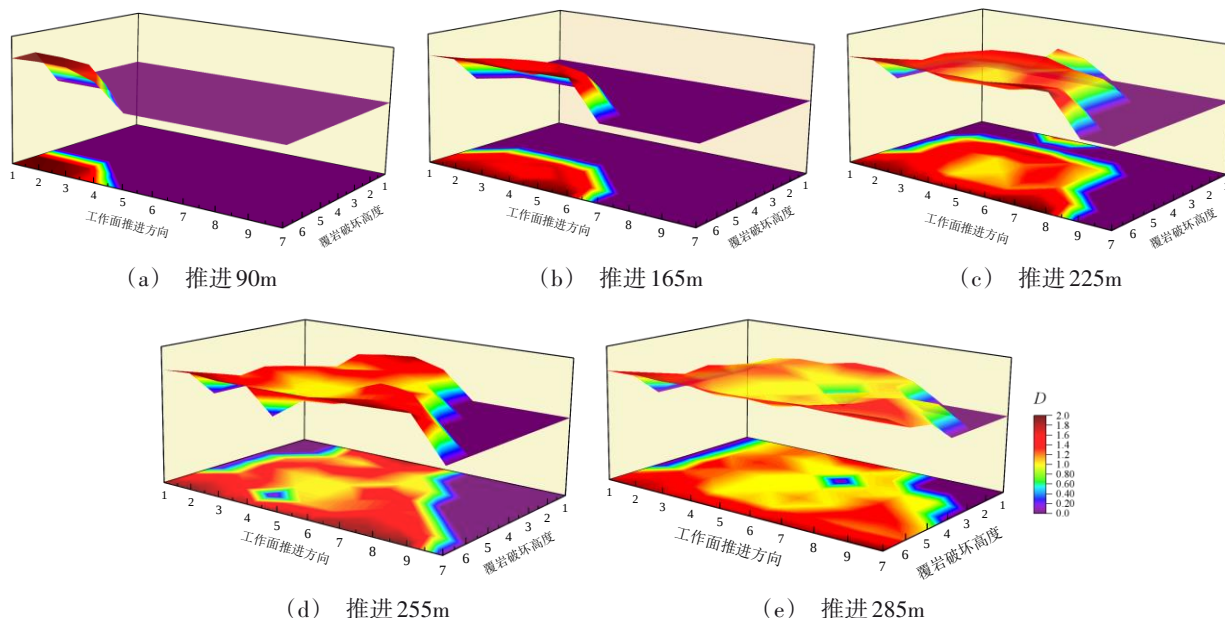


图7 覆岩裂隙分形维数分布时空演化规律

Fig. 7 The spatiotemporal evolution law of fractal dimension distribution of overlying rock fractures

(2)表示^[35]。

$$V = \frac{B_{\text{void}}}{P_{\text{total}}} \quad (2)$$

式中, B_{void} 为图像中的黑色总像素, P_{total} 为图像的总像素。

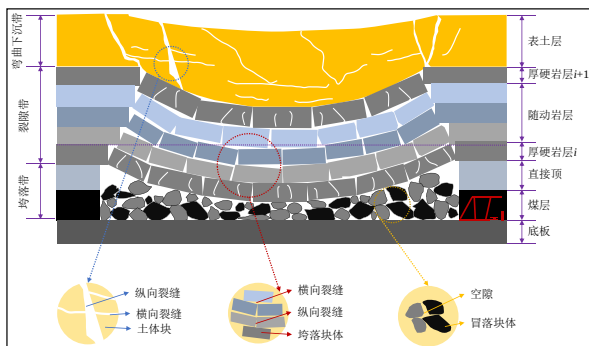


图8 覆岩空隙示意图^[30]

Fig. 8 Schematic diagram of overlying rock voids

3.1 覆岩空隙分布时空演化特征

3.1.1 覆岩空隙率与推进距离的关系 覆岩破碎岩体空隙主要分布在垮落带与裂隙带,裂隙带多发育离层裂隙。根据式(2),通过MATLAB识别计算得到覆岩空隙率随推进距离的演化过程,如图9所示。由图可知,在工作面推进至255 m的过程中,覆岩空隙率随工作面的推进逐渐增大,当工作面推进至255 m时覆岩空隙率最大,达到2.63%;当工作面推进至285 m后,覆岩已达到充分采动,由于覆岩、地表的协同变形对岩体内部空

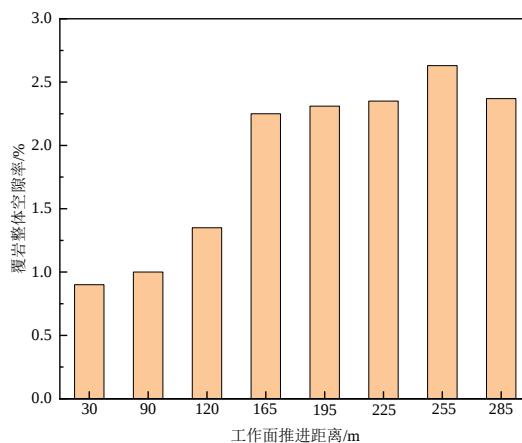


图9 覆岩整体空隙率变化规律

Fig. 9 The variation law of overall porosity of overlying rock

隙的压实效应,造成覆岩空隙率减小,最终空隙率为2.37%。

3.1.2 覆岩空隙率的时空演化特征 如图10所示为工作面推进距离影响下覆岩空隙率的时空演化分布特征。由图10(a)可知,当工作面推进90 m时,仅有直接顶垮落,此时垮落带内采动裂隙以离层空间为主;随着工作面的推进,由图10(b)可知,当工作面推进至165 m时,基本顶及其随动岩层完全垮落,形成垮落带和裂隙带,垮落带中部空隙率降低,边界空隙率空间分布升高,同步空隙向深部扩展,在主关键层下方形成大范围水平离层空隙。由图10(c)所示,当工作面推进至225 m时,主关键层发生破断,覆岩损伤范围迅速增加,

离层空隙向上传导,采空区大范围进入中部压实区,裂隙场呈现马鞍形分布,垮落带内开切眼区域主要处于8.31%~13.9%,工作面附近区域空隙率主要处于19.4%~22.2%,相对开切眼区域较高。由图10(d)~(e)所示,随着工作面进入充分采动阶段,覆岩内部空隙压实程度逐步提高,垮落带空隙分布范围在垂直方向上进一步减小,在工作面一侧裂隙带发育较为活跃,而在开切眼侧,由于受压时间最久,压实程度相对较高,但由于受到煤壁支撑作用,下沉量相对较小,最终形成非对称“马鞍形”空隙形态。

3.2 覆岩空隙率与分形维数的关系

如图11所示为分形维数与空隙率的相互关系曲线。由图可知,随着覆岩裂隙网络的降维演化,覆岩空隙率呈现非线性增高。在基本顶破断前期,裂隙主要集中在采空区内部,由于特大开采空间,随着工作面的推进,直接顶充分垮落,基本顶下方离层空间横向扩展,呈现空隙率增加、分形维数减小的特殊现象,反映出离层空间对覆岩裂隙网络分形维数的导控作用。

随着工作面的推进,当工作面推进至90~165 m,基本顶及其随动岩层破断垮落,损伤范围扩展,垮落带中部裂隙压实,离层空间跳跃传导,边界裂隙贯通,呈现明显裂隙分区,空隙率增加迅速,由于岩层碎胀性,离层空间高度相对压缩(图5),分形维数同步减小,反映出裂隙网络的压实效应与裂隙网络的分区效应;工作面推进165~225 m时,主关键层破断,裂隙重心向远场转移,裂隙网络压实效应增强,空隙率变化较为缓慢;工作面推进225~255 m时,远场离层扩展,下方破碎块体压实,空隙率和分形维数呈现同步增加现象,说明了基本顶、主关键层的联动破坏效应及远场离层的扩展;当工作面推进至285 m后,覆岩进入充分采动阶段,整体压实回落,分形维数和空隙率均下降。但在开切眼处和停采线等特殊区域,以垂向贯通裂隙为主,空隙分布和分形特性相对明显。

4 基于覆岩裂隙空间演化的注浆减损设计

4.1 采中近场垮落带与远场高位离层空隙”协同

注浆减损

采空区顶板垮断后不规则堆积块体间空隙、岩层运移产生的裂缝空隙以及弯曲下沉产生的离层空间等是注浆减损的主要空间^[36]。注浆空间和时机决定着注浆减损效果,注浆空间过低可能造成贯通裂隙的浆液泄露,注浆空间过高导致无法有效压实下方碎胀空间,从而造成覆岩地表的二次沉降。因此本文根据采动覆岩分形维数和空隙分布协同演化特性提出注浆减损时空参数设计。

根据图10,在工作面推进过程中,岩层逐层向上破断垮落,覆岩空隙逐渐向前、向上发育。由于垮落岩层的压实特性,覆岩空隙以水平离层空间为主,由于厚硬岩层以及厚软岩层缓冲层的抑制作用,岩层呈现分组协同沉降,在埋深方向上离层空隙空间跳跃传导扩展。在垮落带内部覆岩空隙纵横交错,在开切眼和工作面两侧存在纵向贯通裂隙,在采空区中部分布微小空隙空间。基于此本文基于“近场垮落带与远场离层裂隙带协同注浆减损”技术^[37],通过垮落带注浆减小顶板下沉量,离层带注浆阻止损伤向上传导,最终有效降低高强度开采工作面覆岩损伤程度,如图12所示。

结合图5,在工作面推进过程中由于厚硬岩层和厚软岩层的导控效应分形维数整体上呈现台阶式降维趋势,下降段对应覆岩控制层的破断,仅在远场高位离层发育时出现二次升维现象。控制层的破断造成裂隙网络的纵深发育以及垮落带裂隙压实和离层闭合效应,使得采动裂隙在覆岩内部的空间占位下降,裂隙场复杂程度降低。如图10(a)所示,当工作面推进90 m后覆岩垮落至基本顶下方,由于特大采高的影响,直接顶垮落后并不能有效填充采空区,在基本顶下方形成大范围空隙,提供了可注浆空间,此时分形维数显著降低(图5)。由于基本顶的承载作用,在工作面推进90~120 m范围内分形维数基本稳定,因此应在此阶段内进行近场垮落带注浆。由于垮落带内岩层破断充分,内部微空隙较为发育,一方面可利用浆液胶结破碎块体,增强破碎岩体承载能力,维持其碎胀效应,另一方面可从源头填充基本顶可运动空间,人为导控其破断结构,限制岩层沉降传导。同时,如图10(c)所示,当工作面推进225 m后主关键层破断,同步厚软岩层缓冲层所导控离层发育,距离地面约66.58 m,此时分形维数降至最低1.19,随后由于远场高位离层的发育产生升维现象,因此应在工作面推进225~255 m时间范围内

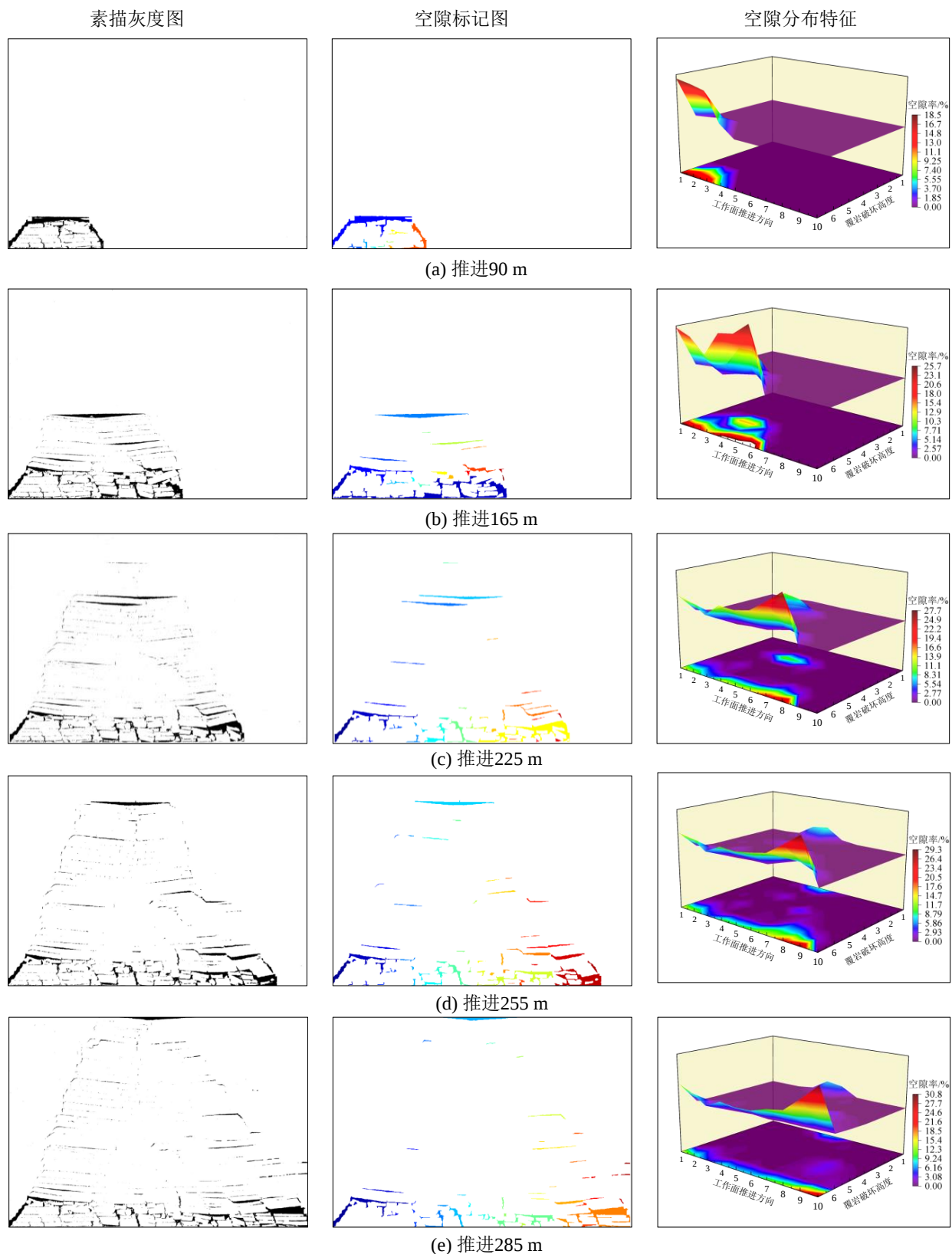


图 10 覆岩空隙率随推进距离演化特征

Fig. 10 Evolution characteristics of overburden porosity with advancing distance

在距离地面约 66.58 m 处进行远场离层空隙注浆,形成上覆岩层刚性支撑体,抑制远场高位离层

的发育,从而调控覆岩-地表沉降传导过程,缓解地表下沉。

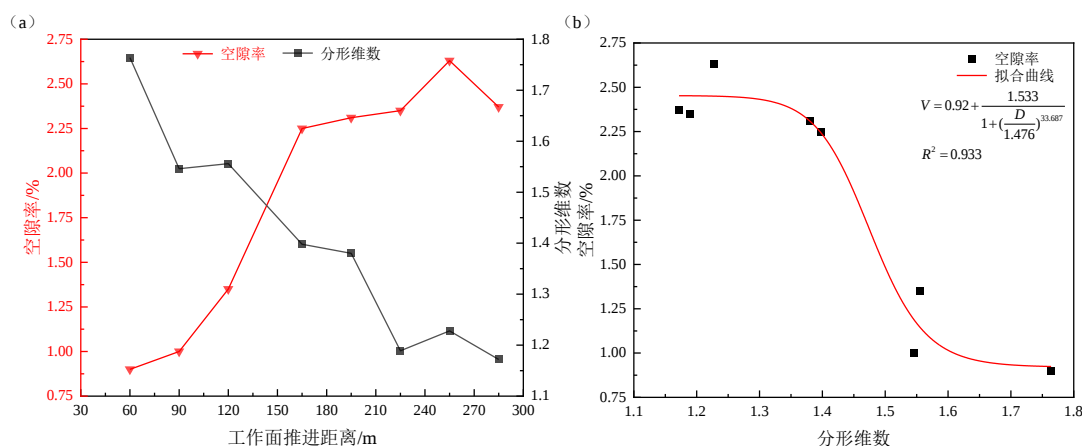


图 11 空隙率与分形维数的影响特征

Fig. 11 Characteristics of the influence of porosity and fractal dimension

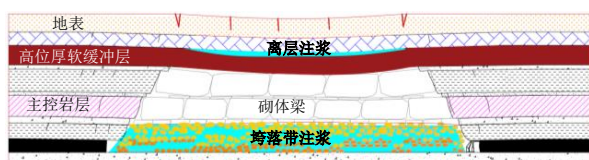


图 12 近场垮落带与远场高位离层空隙协同注浆

Fig. 12 Collaborative grouting of near-field collapse zone and far-field high-level separation gap

受现场工程条件及研究周期限制,本文暂未开展工业性注浆试验,尚无法获得注浆前后地表沉降、钻孔窥视或微震监测等现场对比数据。因此,本文主要基于相似模拟结果、分形维数演化特征及覆岩空隙空间分布规律,从注浆空间匹配性、注浆时机合理性和损伤传导控制机理等方面对注浆时空参数的可行性进行分析。

工作面推进 90~120m 时,直接顶垮落后在基本顶下方形成大范围近场空隙,且该阶段分形维数基本稳定,表明垮落带裂隙空间相对发育并具备一定连续性,可为浆液扩散和破碎岩体胶结提供空间条件。此时开展近场垮落带注浆,一方面可利用浆液胶结破碎岩体,提高垮落带破碎岩体承载能力,维持其碎胀支撑效应;另一方面可充填基本顶下方运动空间,限制基本顶及其随动岩层进一步下沉,从源头减弱覆岩损伤向上传导。

随着工作面推进 225~255m 阶段,主关键层破断后远场高位离层开始发育,分形维数由最低值 1.19 后出现二次升维,说明覆岩损伤范围具有继续向上扩展的趋势。此时在距地面约 66.58m 处进行远场高位离层注浆,可利用浆体充填离层空间并形成局部支撑体,抑制高位离层继续扩展,

从而减缓覆岩—地表沉降传导过程。由此可见,所提出的注浆时机与覆岩空隙发育阶段相匹配,注浆位置与近场垮落空隙及远场高位离层分布相对应,具备一定的理论可行性。

后续工程应用中,可结合钻孔窥视、注浆压力—注浆量曲线、地表沉降监测及微震监测等手段,对注浆扩散范围和减损效果进行现场验证。其中,钻孔窥视可用于判识注浆前后裂隙及离层空间充填状态;注浆压力—注浆量曲线可用于反映浆液扩散和空隙充填过程;地表沉降监测可用于评价注浆对覆岩—地表沉降传导的控制效果;微震监测可用于分析注浆后覆岩损伤活动的变化。上述监测结果可为后续注浆参数优化提供依据。

4.2 采后残余空间维稳注浆减损

由于岩层的蠕变特性,覆岩承载结构和压实体块应力分布缓慢变化,将导致地表沉降周期长达数年甚至数十年^[38]。同时,考虑时间效应的影响,在地下水弱化以及长期承载作用下注浆材料将会发生劣化,围岩承载强度降低,造成采空区地表的次生沉陷现象^[39-40]。基于此,本文结合工作面充分采动下覆岩空隙“非对称马鞍形”形态及空间分布特征(图 10(e))提出采后残余空间注浆,对导水裂隙带非压实裂隙进行采后注浆充填。

采后残余空间注浆对象主要包括三类:一是采空区边界裂隙发育区,即开切眼侧和停采线附近尚未完全压实的垂向裂隙及贯通裂隙;二是充分采动后仍保留一定空隙特征的高位离层残余空间;三是垮落带与裂隙带交界区域内局部未压实的破碎岩体空隙。上述区域在充分采动后仍可能作为覆岩二次变形和地表次生沉陷的主要空间来源,因此可作为采后维稳注浆的重点治理对象。

注浆时机应结合采后地表沉降监测和残余空隙识别结果综合确定。当工作面回采结束后,覆岩进入整体压实阶段,若地表沉降速率明显降低但仍存在持续沉降趋势,或钻孔探测显示采空区边界、高位离层区仍存在未压实残余空隙,可开展采后残余空间维稳注浆。注浆方式宜采用分区、分阶段、低压稳定注浆:首先对开切眼和停采线附近边界裂隙区进行封堵加固,限制垂向裂隙进一步张开;其次对高位离层残余空间进行充填支撑,降低上覆岩层后期弯曲变形空间;最后对局部未压实垮落空隙进行补充注浆,提高破碎岩体整体承载能力。

在工程实施中,可通过注浆压力—注浆量曲线、钻孔窥视、地表沉降监测和地表裂缝巡查等方式对注浆效果进行反馈评价。当单位时间注浆量明显降低、注浆压力趋于稳定,且地表沉降速率进一步减小或趋于稳定时,可认为残余空间充填和维稳效果达到预期。由于本文尚未开展现场采后注浆实施,相关方案仍属于基于相似模拟与空隙分布识别结果提出的设计建议,后续需结合现场监测数据进一步验证和优化。

5 结论

(1)采用相似模拟与分形维数相结合的方法,分析特大采高工作面开采过程中覆岩裂隙发育动态。覆岩离层空间开度与分形维数随工作面推进距离呈现协同演化特征,厚硬岩层导控下离层空间是覆岩裂隙场分形维数演化的主要影响因素。

(2)覆岩裂隙网络在空间上随采动损伤传导自下而上、由表及里扩展演化,分形维数分布呈现规律性波动降维,其扩展空间由拱形扩展为梯形纵深发展。覆岩边界裂隙发育扩展充分、贯通性强,具有更强的分形特征。

(3)由于厚硬岩层与厚软岩层缓冲层的协同导控作用,随着工作面的推进覆岩移动高度呈现台阶形上升趋势,覆岩裂隙分形维数呈现台阶形波动降维趋势,覆岩空隙率呈现非线性降低。当工作面初步达到充分采动时覆岩空隙率最大为2.63%;当工作面达到完全充分采动后覆岩裂隙场呈现非对称空隙形态,空隙率为2.37%。

(4)基于覆岩空隙空间分布特征及分形维数演化规律,提出了采中“近场垮落带与远场高位离层空隙协同注浆”-采后残余空间维稳注浆减损方

法,给出了合理的注浆时空参数。

参考文献:

- [1] 宋世杰,李源红,王艺,等.黄河中游黄土采煤沉陷对坡面水土流失经济损失的影响规律[J].煤田地质与勘探,2025,53(10):33-44.
SONG Shijie, LI Yuanhong, WANG Yi, et al. Influence patterns of coal mining-induced subsidence on economic losses from soil erosion of loess slopes in the middle reaches of the Yellow River[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(10): 33-44.
- [2] 钱鸣高,许家林.煤炭开采与岩层运动[J].煤炭学报,2019,44(4):973-984.
QIAN Minggao, XU Jialin. Behaviors of strata movement in coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 973-984.
- [3] 赵毅鑫,令春伟,刘斌,等.浅埋超大采高工作面覆岩裂隙演化及能量耗散规律研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(1):9-18+30.
ZHAO Yixin, LING Chunwei, LIU Bin, et al. Fracture evolution and energy dissipation of overlying strata in shallow-buried underground mining with ultra-high working face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(1): 9-18+30.
- [4] 宋世杰,成星,白莉,等.黄河中游陕北煤矿区黄土沉陷坡面土壤入渗特性变化规律及其侵蚀效应[J].西北大学学报(自然科学版),2025,55(3):633-646.
SONG Shijie, CHENG xXing, BAI Li, et al. The variation law of soil infiltration characteristics and its erosion effect on loess subsidence slope in northern Shaanxi coal mining area in the middle reaches of the Yellow River[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2025, 55(3):633-646.
- [5] 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.
- [6] 谢和平,于广明,杨伦,等.采动岩体分形裂隙网络研究[J].岩石力学与工程学报,1999,18(2):147-151.
XIE Heping, YU Guangming, YANG Lun, et al. Research on the fractal effects of cracknetwork in overburden rock stratum[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 147-151.

- [7] YU Guangming, XIE Heping, ZHAO Jianfeng, et al. Fractal evolution of a crack network in overburden rock stratum. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2000, 5(1): 47-52.
- [8] 赵鹏翔, 裴文博, 李树刚, 等. 巨厚煤层下分层开采邻近采空区破断岩体分形继发性演化机理[J]. *中国矿业大学学报*, 2024, 53(4): 696-709.
- ZHAO Pengxiang, PEI Wenbo, LI Shugang, et al. Fractal secondary evolution mechanism of fractured rock mass in adjacent goaf areas under extremely thick coal seam lower slice mining [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(4): 696-709.
- [9] 赵鹏翔, 常泽晨, 李树刚, 等. 倾斜厚煤层开采卸压瓦斯运储区能量耗散结构时变机理研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2025, 54(1): 202-214.
- ZHAO Pengxiang, CHANG Zechen, LI Shugang, et al. Study on time-varying mechanism of energy dissipation structure in depressed-pressure gas transport and storage area of inclined thick coal seam mining [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2025, 54(1): 202-214.
- [10] MENG Xiangqi, HU Shengyong, Liu Fengyun, et al. Distribution Patterns of the Dominant Mining Fracture Fields in Pressure Relief Methane Migration. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024, 57(11), 10115-10132.
- [11] ZHANG Bichuan, Sun Haitao, Liang Yunpei, et al. Characterization and quantification of mining-induced fractures in overlying strata: implications for coalbed methane drainage. *Natural Resources Research*, 2020, 29(4), 2467-2480.
- [12] LIU Jiawei, SUI Wanghua, DUAN Zhongwen, et al. Quantitative correlation between fracture fractal and overburden deformation due to the multiple layers backfill mining. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2025, 84(2), 65.
- [13] 汪北方, 梁冰, 姜利国, 等. 采空区垮落岩体空隙储水分形计算及应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(7): 1444-1451.
- WANG Beifang, LIANG Bing, JIANG Liguang, et al. Fractal calculation and application of water storage in void of caving rock in the goaf[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(7): 1444-1451.
- [14] 李春睿, 齐庆新, 彭永伟, 等. 采动覆岩裂隙演化规律的定量描述[J]. *煤矿开采*, 2010, 15(6): 4-8.
- LI Chunrui, QI Qingxin, PENG Yongwei, et al. Quantitative description of fissure development rule of overlying strata influenced by mining[J]. *Coal Mining Technology*, 2010, 15(6): 4-8.
- [15] 李宏艳, 王维华, 齐庆新, 等. 基于分形理论的采动裂隙时空演化规律研究[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(6): 1023-1030.
- LI Hongyan, WANG Weihua, QI Qingxin, et al. Study on fissure development rule of overlying strata influenced by mining based on fractal theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(6): 1023-1030.
- [16] 宋颜金, 程国强, & 郭惟嘉. (2011). 采动覆岩裂隙分布及其空隙率特征. *岩土力学*, 32(2), 533-536.
- SONG Yanjin, CHENG Guoqiang, GUO Weijia. Study of distribution of overlying strata fissures and its porosity characteristics [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(2): 533-536.
- [17] 邢景超, 梁冰, 房胜杰, 等. 覆岩裂隙重构下分形-渗透特征研究[J/OL]. *煤炭学报*, 1-13.
- XING Jingchao, LIANG Bing, FANG Shengjie, et al. Study on fractal-permeability characteristics under overburden fracture reconstruction [J/OL]. *Journal of China Coal Society*, 1-13.
- [18] 梁涛, 刘晓丽, 王思敬. 采动裂隙扩展规律及渗透特性分形研究[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(12): 3729-3739.
- LIANG Tao, LIU Xiaoli, WANG Sijing. Fractal study on the crack network evolution and permeability change in mining rock mass[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12): 3729-3739.
- [19] 栗东平, 周宏伟, 薛东杰, 等. 煤岩体采动裂隙网络的逾渗与分形特征关系研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(4): 1135-1140.
- LI Dongping, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, et al. Relationship between percolation and fractal properties of mining-induced crack network in coal and rock masses[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(4): 1135-1140.
- [20] 薛东杰, 周宏伟, 任伟光, 等. 浅埋深薄基岩煤层组开采采动裂隙演化及台阶式切落形成机制[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(8): 1746-1752.
- XUE Dongjie, ZHOU Hongwei, REN Weiguang, et al. Stepped shearing-induced failure mechanism and cracks propagation of overlying thin bedrocks in shallow deep coal seams mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(8): 1746-1752.
- [21] 薛东杰, 周宏伟, 王超圣, 等. 上覆岩层裂隙演化逾渗模型研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42

- (6): 917-922+940.
- XUE Dongjie, ZHOU Hongwei, WANG Chaosheng, et al. Percolation model of mining-induced crack evolution of the overlying strata[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2013, 42 (6): 917-922.
- [22] 周宏伟, 张涛, 薛东杰, 等. 长壁工作面覆岩采动裂隙网络演化特征[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 1957-1962.
- ZHOU Hongwei, ZHANG Tao, XUE Dongjie, et al. Evolution of mining-induced crack network in overburden strata of longwall face[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 1957-1962.
- [23] 王志国, 周宏伟, 谢和平. 深部开采上覆岩层采动裂隙网络演化的分形特征研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2403-2408.
- WANG Zhiguo, ZHOU Hongwei, XIE Heping. Research on fractal characterization of mined crack network evolution in overburden rock stratum under deep mining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2403-2408.
- [24] 陈凯, 葛颖, 张全, 等. 基于离散元模拟的巨厚煤层分层开采覆岩裂隙演化分形特征[J]. 工程地质学报, 2021, 29(4): 1113-1120.
- CHEN Kai, GE Ying, ZHANG Quan, et al. Discrete element simulation for crack fractal evolution laws associated with slicing mining in super thick coal stratum[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4): 1113-1120.
- [25] RAN, Qican, LIANG Yunpei, ZOU Quanle, et al. Characteristics of mining-induced fractures under inclined coal seam group multiple mining and implications for gas migration. Natural Resources Research, 2023, 32(3), 1481-1501.
- [26] 卢方超, 张学博. 倾斜特厚煤层采空区孔隙率分布规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(8): 119-124.
- LU Fangchao, ZHANG Xuebo. Research on porosity distribution laws of goaf in inclined extra-thick coal seam[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(8): 119-124.
- [27] 谭毅, 张少普, 何满潮, 等. 巨厚砂岩下采动覆岩裂隙场及微震时空演化规律研究[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(1): 70-85.
- TAN Yi, ZHANG Shaopu, HE Manchao, et al. Fissure field and microseismic spatiotemporal evolution patterns in mining overburden under giant thick sandstone[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(1): 70-85.
- [28] 郭文兵, 徐曙光, 杨伟强, 等. 采空区采动覆岩空隙率分布规律及分区治理方法[J/OL]. 煤炭学报, 1-15.
- GUO Wenbing, XU Shuguang, YANG Weiqiang, et al. Distribution pattern of overburden void ratio induced by mining in goaf areas and corresponding zoning-based control measures. [J/OL]. Journal of China Coal Society, 1-15.
- [29] 汪北方, 吕元昊, 张晶. 浅埋复合采空区覆岩采动裂隙分区特征及其治理技术[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(2): 41-52.
- WANG Beifang, YuanhaoLYU, ZHANG Jing. Zone feature and control technology of overlying strata mining - induced fracture in shallow buried compound goaf[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(2): 41-52.
- [30] WANG Shaofeng, LI Xibing, WANG Deming. Void fraction distribution in overburden disturbed by longwall mining of coal. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(2), 151.
- [31] 袁亮, 马衍坤, 黄勤豪, 等. 煤岩动力灾害模型试验灾变地层模拟材料研制现状与展望[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(5): 827-856.
- YUAN Liang, MA Yankun, HUANG Qin hao, et al. Development status and prospects of simulation materials for catastrophic prone strata in the physical model experiments on coal and rock dynamic disasters[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(5): 827-856.
- [32] 张平松, 许时昂, 吴海波, 等. 厚松散层下煤层开采全地层移动变形时空演化特征[J/OL]. 煤炭学报, 1-16.
- ZHANG Pingsong, XU Shiang, WU Haibo, et al. Spatio-Temporal Evolution Characteristics of Whole Strata Movement and Deformation During Coal Seam Mining Under Thick Loose Layers[J]. Journal of China Coal Society, 1-16.
- [33] 任赵鹏, 樊柏强, 程聚豪, 等. 西部矿区特大采高工作面覆岩破断运移全周期动态演化特征[J/OL]. 矿业科学学报, 2025, 10(4): 1-13.
- REN Zhaopeng, FAN Baiqiang, CHENG Juhao, et al. The whole-cycle dynamic evolution characteristics of overburden fracture and movement in extremely high mining longwall face in western mining area[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(4): 1-13.
- [34] 魏江波, 王双明, 刘浪, 等. 基于多场信息融合的

- 采动覆岩宏-细观损伤演化及“两带”发育位置判识[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(4): 128-140.
- WEI Jiangbo, WANG Shuangming, LIU Lang, et al. Multi-field information fusion-based analysis of the macroscopic and mesoscopic damage evolution and location identification of caving and water-conducting fracture zones for mining overburden[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(4): 128-140.
- [35] LIANG Yuntao, LIU Kanghui, GUO Sida, et al. Stochastic distribution characteristics of void fraction in overburden disturbed by longwall mining in shallow seam[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2024, 83(1).
- [36] 张吉雄, 周楠, 高峰, 等. 煤矿开采嗣后空间矸石注浆充填方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 150-162.
- ZHANG Jixiong, ZHOU Nan, GAO Feng, et al. Method of gangue grouting filling in subsequent space of coal mining[J]. Journal of China Society, 2023, 48(1): 150-162.
- [37] 李全生, 张村. 基于采动空间守恒的西部矿区高强度开采损伤传导模型及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(1): 1-8.
- LI Quansheng, ZHANG Cun. Damage conduction model of high intensity mining in western mining area based on conservation of mining space and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(1): 1-8.
- [38] 毕冉, 杨超凡, 黄浩哲, 等. 基于FDEM的浅埋特厚煤层采动覆岩破断规律及地表沉陷预测[J/OL]. 煤炭科学技术, 1-13.
- BI Ran, YANG Chaofan, HUANG Haozhe, et al. FDEM-based analysis of overlying strata fracture mechanisms and surface subsidence prediction in shallow-buried ultra-thick coal seam mining[J]. Coal Science and Technology, 1-13.
- [39] 杨科, 于祥, 何祥, 等. 煤矿开采多层位立体空间煤基固废充填方法及应用[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 46-64.
- YANG Ke, YU Xiang, HE Xiang, et al. Method and application of coal based solid waste filling in multi-layer three dimensional space of coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 46-64.
- [40] 陈炳乾, 刘辉, 李振洪, 等. 关闭矿井次生沉陷监测、预测与稳定性评价研究进展和展望[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 943-958.
- CHEN Bingqian, LIU Hui, LI Zhenhong, et al. Research progress and prospect of secondary subsidence monitoring, prediction and stability evaluation in closed underground mines[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 943-958.