



矿业科学学报

JOURNAL OF MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY

厚松散层薄基岩综放开采覆岩破坏与地裂缝发育规律

郭文兵, 葛志博, 胡玉杭, 王宇, 胡超群, 丘宝汶

Patterns of overburden failure and ground fissure development of thick loose layer and thin bedrock

引用本文:

郭文兵, 葛志博, 胡玉杭, 王宇, 胡超群, 丘宝汶. 厚松散层薄基岩综放开采覆岩破坏与地裂缝发育规律[J]. [矿业科学学报](#), 2024, 9(5): 723–736.

GUO Wenbing, GE Zhibo, HU Yuhang, et al. Patterns of overburden failure and ground fissure development of thick loose layer and thin bedrock[J]. [Journal of Mining Science and Technology](#), 2024, 9(5): 723–736.

您可能感兴趣的其他文章

1. 西部矿区厚基岩特大采高工作面导水裂隙带发育特征

引用本文: 张村, 任赵鹏, 韩鹏华, 等. 西部矿区厚基岩特大采高工作面导水裂隙带发育特征[J]. [矿业科学学报](#), 2022, 7(3): 333–343.

2. 神东保德浅埋煤层覆岩裂隙带高度数值指标判别阈值及采高效应

引用本文: 郝宪杰, 孙卓文, 赵毅鑫, 等. 神东保德浅埋煤层覆岩裂隙带高度数值指标判别阈值及采高效应[J]. [矿业科学学报](#), 2021, 6(4): 472–479.

3. 软弱覆岩分层综放开采工作面“两带”发育高度研究

引用本文: 张彬, 许延春, 李江华, 等. 软弱覆岩分层综放开采工作面“两带”发育高度研究[J]. [矿业科学学报](#), 2019, 4(6): 515–523.

4. 基于Hoek–Brown准则的薄基岩厚松散层覆岩变形破坏特征研究

引用本文: 李全生, 徐祝贺, 张勇, 等. 基于Hoek–Brown准则的薄基岩厚松散层覆岩变形破坏特征研究[J]. [矿业科学学报](#), 2019, 4(5): 417–424.

5. 推采陷落柱工作面覆岩异常破坏规律研究

引用本文: 许延春, 曹光明, 张星宇, 等. 推采陷落柱工作面覆岩异常破坏规律研究[J]. [矿业科学学报](#), 2018, 3(3): 268–276.

郭文兵,葛志博,胡玉杭,等. 厚松散层薄基岩综放开采覆岩破坏与地裂缝发育规律[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(5): 723-736. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024.05.007

GUO Wenbing, GE Zhibo, HU Yuhang, et al. Patterns of overburden failure and ground fissure development of thick loose layer and thin bedrock [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(5): 723-736. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024.05.007

厚松散层薄基岩综放开采覆岩破坏 与地裂缝发育规律

郭文兵^{1,2}, 葛志博¹, 胡玉杭¹, 王宇¹, 胡超群¹, 丘宝汶¹

1. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南焦作 454003;

2. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南焦作 454000

摘要: 开采引起的覆岩移动、破坏及地表变形裂缝的研究对于煤矿安全生产和采动损害保护具有重要意义。以郑煤集团某矿 12203 工作面为工程背景, 采用理论分析、现场实测与数值模拟等方法分析了覆岩受采动影响演化机制, 给出了回采距离与覆岩发育高度之间的函数关系以及覆岩充分破坏埋深与回采距离之间关系, 分析了该地质情况下的地裂缝分布特征。结果表明: ① 厚松散层薄基岩覆岩破坏演化可分为开始、快速增加阶段、缓慢增加及稳定 4 个阶段; 覆岩破坏高度与回采距离存在 Logistic 函数关系、与煤层厚度存在线性函数关系, 该地质条件下覆岩充分破坏时, 回采距离等于埋深; ② 覆岩裂隙演化中, 基岩部分比松散层部分破坏程度剧烈; ③ 地裂缝形态主要为拉伸裂缝与台阶裂缝, 二者交互存在, 工作面边缘裂缝整体随工作面回采呈现椭圆形—圆形—椭圆形动态变化; 地裂缝发育超前工作面一段距离出现, 动态超前裂缝距为 84.07 m, 动态超前裂缝角为 73.15°。

关键词: 覆岩破坏; 裂隙演化; 数值模拟; 地裂缝; 薄基岩

中图分类号: TD 325

文献标志码: A

文章编号: 2096-2193(2024)05-0723-14

Patterns of overburden failure and ground fissure development of thick loose layer and thin bedrock

GUO Wenbing^{1,2}, GE Zhibo¹, HU Yuhang¹, WANG Yu¹, HU Chaoqun¹, QIU Baowen¹

1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China;

2. State Collaborative Innovative Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Jiaozuo Henan 454000, China

Abstract: Studies on mining-induced overburden rock movement, damage and surface deformation cracks are essential to the safety production of coal mines and mining damage protection. Taking the 12203 working face of a mine of Zhengzhou Coal Group as an example, this study analyzed the evolution mechanism of overburden rock affected by mining via theoretical analysis, on-site measurement and numerical simulation. We investigated the functional relationship between back-mining distance and height of overburden development and between sufficiently destructive depth of overburden and back-

收稿日期: 2024-06-11 修回日期: 2024-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(U21A20108, U22A20620)

作者简介: 郭文兵(1969—), 男, 河南商丘人, 博士, 教授, 主要从事绿色开采、采动损害与保护等方面的研究工作。Tel: 0391-3987902, E-mail: guowb@hpu.edu.cn

mining distance. Moreover, we analyzed the distribution of the ground cracks in this geological conditions. Results show that: ① The overburden destruction of thin bedrock in thick loose layer encompasses 4 stages: the beginning, rapid increase, slow increase and stabilization; the overburden destruction height shows a Logistic relationship with back-mining distance, and a linear relationship with the thickness of the coal seam. The back-mining distance is equal to the depth of burial when the overburden is sufficiently destroyed in this geologic condition. ② In the evolution of overlying rock fracture, bedrock is more violently damaged than the loose layer. ③ The cracks in the ground are mainly tensile cracks interacting with step cracks. The cracks at the edge of the working face show an “elliptical-circular-elliptical” dynamic variation pattern along with the back mining of the working face; the development of cracks in the ground occurs at a certain distance in front of the working face. The distance of the dynamically overrunning cracks is 84.07m, and its angle is 73.15°.

Key words: overburden failure; fissure fracture evolution; numerical simulation; ground cracks; thin bedrock

能源是国家繁荣富强、经济可持续发展的重要保障^[1]。2023年,我国煤炭消费总量为57.2亿t标准煤,占能源消费总量的55.3%。煤炭开采会导致岩层运移,引起岩层内部应力场、裂隙场发生变化,造成地表沉陷、地裂缝等采动问题^[2]。对于松散层厚度大、基岩薄的特殊地层条件,覆岩运动规律及其破坏趋于复杂。若覆岩破坏贯穿松散层底部含水层层位,极易造成突水溃砂事故,对井下人身及财产安全造成极大威胁^[3-4]。

近年来,国内外学者对覆岩演化规律、煤层开采覆岩破坏与地表沉陷及地裂缝发育分布特征开展了大量研究。张广超等^[5]利用数值模拟揭示了巨厚松散层下软弱覆岩破坏形态及裂隙发育拓展规律;梅福星等^[6]运用DIC技术监测相似模拟覆岩裂隙演化过程,揭示了覆岩运移在工作面推进方向上呈不对称分布;GHABRAIE等^[7]利用三维激光扫描仪、数字图像处理技术研究物理模拟中岩层运移,提出模拟采矿相关物理测试规程;徐超等^[8]采用数值模拟结合分形维数方法对覆岩裂隙开展研究,发现裂隙网络的分形维数随着煤层工作面的推进呈现动态变化;左建平^[9]以力学为切入点将二维“类双曲线”模型进行拓扑演化,建立了采动覆岩移动全空间“类双曲面”模型;孟祥军等^[10]利用对深厚表土覆岩结构运移演化的研究,建立了深厚表土条件下高应力突变致灾的宏观判别准则;KIDYBINSKI等^[11]采用二位有限元应力分析方法,研究了煤矿长壁开采工作面顶板岩石应力分布和岩石裂隙发育过程;张宏伟等^[12]对特厚煤层综放开采覆岩破坏高度进行研究,说明了关键层的破断

对覆岩破坏的控制作用;郭文兵等^[13]通过对中部矿粮复合区采煤沉陷及耕地损毁的研究,厘清不同地质采矿条件下覆岩破坏与地表沉陷之间的作用关系,揭示采动覆岩破坏-地表沉陷传导机理;王双明等^[14]通过对浅埋煤层开采覆岩破坏与地表损伤特征的研究,揭示了覆岩力链演化对块体分布和地裂缝发育的影响规律;徐飞亚等^[15]通过对浅埋煤层高强度开采地表沉陷规律研究发现,高强度开采、关键层结构单一且赋存层位低条件下,易引起顶板活动剧烈、滑落失稳,致使地表下沉盆地四周收敛快、中部破坏严重,地裂缝发育密集;胡振琪等^[16]、王新静等^[17]通过对风积沙区地裂缝的研究,提出了动态地裂缝具有快速闭合的自修复特征;MILLS等^[18]利用测斜仪对岩层水平剪切运动进行研究分析,揭示了岩层水平运移机制;戴华阳等^[19]通过对上湾煤矿地裂缝连续实测,揭示了工作面推进过程中地表周期性产生主裂缝组、主裂缝“产生—扩展—收缩—稳定”的动态发育规律;赵毅鑫等^[20]、杨奇让等^[21]利用无人机对裂缝数据采集,验证了无人机高空间分辨率影像的面向对象方法对提取采煤沉陷区地表裂缝的可行性和准确性;王朋飞等^[22]对浅埋薄表土层特厚煤层地裂缝演化规律进行实测研究,说明了110和N00工法及错层位等无煤柱开采技术可扩大均匀沉陷区范围,缓解边界台阶裂缝损害,有利于源头治理和节省成本。

上述研究成果为覆岩破坏规律、破坏高度计算及地裂缝发育分布特征研究奠定了基础。但是,由于煤矿生产地质条件的复杂性,影响覆岩发育演化

规律及地裂缝发育分布特征的因素有许多,且单一因素对覆岩发育演化规律及地裂缝发育分布特征的影响程度也不同。河南郑煤集团某煤矿 12203 工作面地质特点属于厚松散层薄基岩,当前对该类复杂地质生产条件下覆岩破坏规律的研究尚不足。

针对 12203 工作面生产地质条件,采用理论分析、数值模拟与现场实测等方法对厚松散层薄基岩覆岩演化规律、破坏高度及地裂缝发育分布特征进行研究,揭示工作面回采距离及煤层厚度对覆岩破坏演化机制及地裂缝动态分布特征,以期为类似地质条件下的煤炭安全开采、耕地损坏修复提供借鉴。

1 地质概况

1.1 矿区概况

该煤矿地理坐标为 113°34'00"—113°43'00"E, 34°23'30"—34°26'30"N;其北部以大隗断层为界,南部西段以欧阳寺断层为界,南部东段以新密公路为界,西部以二₁煤-800 m 底板等高线为界,东部以贾梁断层和二₁煤露头线为界。井田东西长 13.5 km,南北宽 3~4 km,面积约 50 km²,矿井设计生产能力 3 Mt/a。

1.2 工作面概况

12203 工作面走向长 560 m,倾向长 220 m,开采二₁煤层,工作面平均埋深约 280 m,平均煤厚约 12 m,煤层自西向东呈厚-薄-厚趋势,煤层平均倾角约 8°,为近水平煤层。煤层上覆基岩厚度约 83.5 m,表土层厚度约 194.1 m。12203 工作面采用走向长壁后退式综合机械化放顶煤采煤方法,全部垮落法管理顶板,工作面推进速度约 2 m/d。其位于 12 采区东翼下部,东邻岳庄断层保护煤柱,南邻徐庄断层保护煤柱,西邻 12 采区上山保护煤柱,北邻已回采 12205 工作面。顶板岩性以砂质泥岩为主,其次为细粒砂岩;底板岩性多为砂质泥岩及细粒砂岩。上覆岩层详见柱状图(图 1)。

2 厚松散层薄基岩覆岩破坏演化分析

2.1 松散层-基岩双层介质覆岩破坏分析

在煤炭开采中,随着工作面的持续回采,上覆岩层发生移动、变形和破坏,进而引发一系列的岩层及地表动态响应^[23]。在厚松散层薄基岩条件下煤炭开采时,由于基岩和松散层双层介质联合作用,覆岩破坏发育特征与常规工作面存在明显区

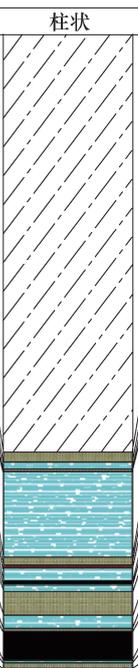
层号	厚度/m	岩性	柱状	埋深/m	关键层位置
13	194.10	松散层		194.10	
12	4.80	细粒砂岩		198.90	
11	3.10	砂质泥岩		202.00	
10	1.20	细粒砂岩		203.20	
9	39.80	砂质泥岩		243.00	主关键层
8	4.00	细粒砂岩		247.00	
7	0.76	泥岩		247.76	
6	6.32	砂质泥岩		254.08	
5	1.44	二 ₃ 煤		255.52	
4	3.40	砂质泥岩		258.92	亚关键层
3	11.18	细粒砂岩		270.10	亚关键层
2	6.10	砂质泥岩		276.20	
1	1.40	细粒砂岩		277.60	
	12.00	二 ₁ 煤	289.60		
	1.43	砂质泥岩	291.03		
	2.50	细粒砂岩	293.53		
	1.12	石灰石	294.65		

图 1 12203 工作面柱状图

Fig. 1 Histogram of 12203 working face

别,具有自身特异性。

由于基岩较薄,在厚松散层整体重力影响下,随着煤层的开采顶板率先垮落,持续回采过程中上覆岩层逐层破断,在破坏向上发育的过程中,破坏范围逐渐减小,整体近似梯形^[24];松散层地表拉伸与沉降、地下滑移近似倒梯形移动;采动上覆岩层整体运移符合类双曲线模型^[9]。

松散层与基岩特性有明显区别,其抗压、抗拉能力较差。基岩破坏发育高度达到松散层与基岩交界处时,松散层没有抵抗破坏能力,并在自身重力与下方基岩破坏出现的自由空间的联合作用下产生滑移破坏,同时诱发松散层发生拉伸破坏。地表出现的地裂缝,即为拉伸破坏的直观现象;在工作面正上方地表,则出现下沉盆地。厚松散层薄基岩覆岩破坏特征如图 2 所示。

2.2 厚松散层薄基岩覆岩裂隙发育高度分析

2.2.1 覆岩结构分析

根据各岩层的体积力、层厚及弹性模量等参数计算载荷:

$$(q_n)_1 = \frac{E_1 h_1^3 (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \dots + \gamma_n h_n)}{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3 + \dots + E_n h_n^3} \quad (1)$$

式中, $(q_n)_1$ 为第 1 层岩层所受上方第 2 层至第 n 层的载荷, kPa; $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ 分别为各层岩层的体积力, MN/m³; h_1, h_2, \dots, h_n 分别为各层岩层的厚度, m; E_1, E_2, \dots, E_n 分别为各层岩层的弹性模量, MPa。

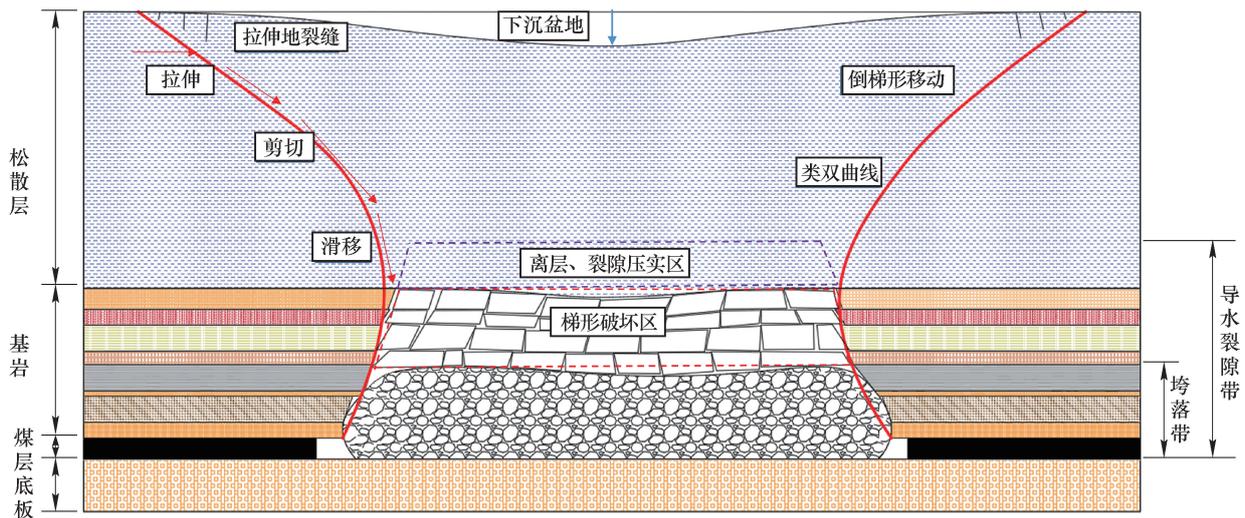


图2 厚松散层薄基岩覆岩破坏特征示意图

Fig. 2 Overburden failure characteristics of thick loose bed and thin bedrock

若第 $n+1$ 层岩层成为第 2 层关键层,必须满足的条件是

$$(q_{n+1})_1 < (q_n)_1 \quad (2)$$

满足式(2)的岩层称为坚硬岩层。对上覆岩层进行逐层判断,按照式(2)确定的坚硬岩层还必须满足关键层的强度条件,即

$$l_j < l_{j+1} \quad (3)$$

式中, l_j 、 l_{j+1} 分别为第 j 层和第 $j+1$ 层坚硬岩层的破断距, $j=1, 2, \dots, k$ 。

依据计算得出,坚硬岩层为第 2 层砂质泥岩、第 3 层细粒砂岩及第 9 层砂质泥岩,共 3 层硬层。

按固支梁^[25]的极限破断距和周期破断距计算公式[式(4)、式(5)],对上述坚硬岩层的极限破

断距和周期破断距进行计算,并结合关键层判定理论进行判别。

极限破断距计算公式:

$$L_j = h \sqrt{\frac{2R_T}{q}} \quad (4)$$

周期破断距计算公式:

$$L_z = h \sqrt{\frac{R_T}{3q}} \quad (5)$$

式中, L_j 为极限破断距, m; L_z 为周期破断距离, m; R_T 为极限抗拉强度, MPa; q 为所受载荷, MPa。

采用固支梁结合覆岩关键层判别方法中 3 层坚硬岩层关键层判别流程^[26](图 3)对硬层破断距计算结果进行关键层判定,判定结果见表 1。

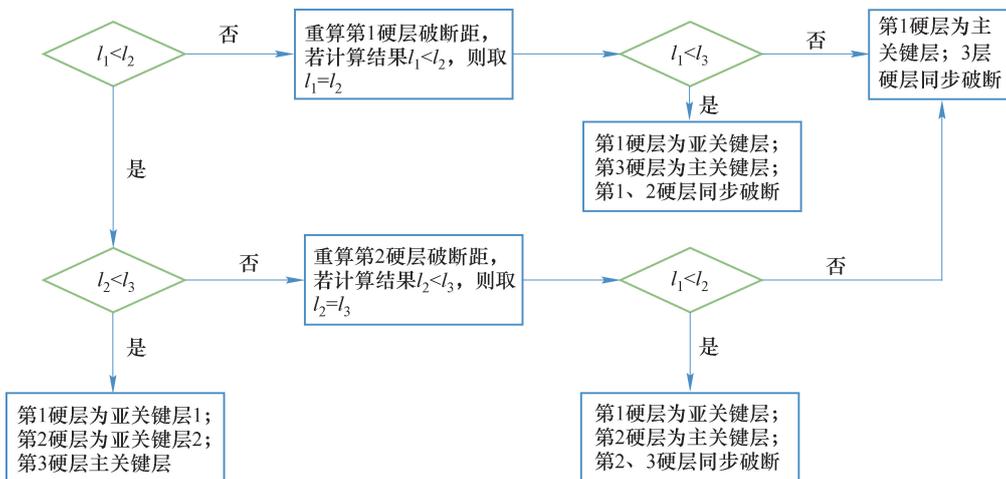


图3 3层坚硬岩层关键层判别流程^[26]

Fig. 3 Identification process of the key layer in the three-layer hard layers^[26]

表1 坚硬岩层破断距计算及关键层判定

Table 1 Calculation of breaking distance of hard layer and identification of the key layer

岩层层号	岩层名称	抗拉强度/MPa	岩层厚度/m	载荷/MPa	极限破断距/m	周期破断距/m	关键层位置
2	砂质泥岩	2.37	6.10	0.159	33.31	13.60	亚关键层
3	细粒砂岩	3.48	11.20	0.623	37.44	15.28	亚关键层
9	砂质泥岩	2.37	39.80	4.670	40.10	16.37	主关键层

2.2.2 关键层破断及覆岩破坏高度分析

岩层的破断与否,可依据挠度结合自由空间高度来定量判定。依据工作面实际情况,关键层挠度采用固支梁挠度计算公式进行:

$$\omega_q = -\frac{F}{24EI_z}x^2(x-L)^2 \quad (6)$$

$$I_z = \frac{bh^3}{12}$$

式中, ω_q 为该层挠度,m; F 为集中载荷,N; E 为弹性模量,MPa; L 为固支梁长度,m; I_z 为惯性矩,m⁴; b 为工作面倾向长度,m; h 为岩层厚度,m。

考虑岩层破裂碎胀性,得到岩层下方自由空间高度表达式:

$$\Delta n = M - \sum_{i=1}^{n-1} h_i(kp_i - 1) \quad (7)$$

式中, Δn 为第 n 层下方自由空间高度,m; M 为煤层高度,m; kp_i 为第 i 层岩层碎胀系数; h_i 为第 i 层岩层厚度,m。

结合实际地质情况,泥岩的碎胀系数为 1.03,细粒砂岩的为 1.05,砂质泥岩的为 1.04,煤的为 1.02。

在实际工程中,可通过岩层最大挠度值 ω_q 与其下部自由空间高度 Δn 的关系,判断覆岩破坏的发育情况。当 $\Delta n > \omega_q$ 时,岩层发生塑性破裂,即

$$\omega_q < M - \sum_{i=1}^{n-1} h_i(kp_i - 1) \quad (8)$$

根据关键层理论计算可知,第 2、9 层的砂质泥岩和第 3 层的细粒砂岩为关键层,其破断距见表 1,可根据判别式(8)得到覆岩破坏情况,计算结果见表 2。

表2 关键层破断情况

Table 2 Breakage of the key layers

序号	岩性	岩层厚度/m	容重/(kN·m ⁻³)	集中载荷/kN	弹性模量/GPa	下沉空间/m	最大挠度/m	破断结果
2	砂质泥岩	6.10	25	159	3.24	11.93	3.020	破断
3	细粒砂岩	11.20	26	623	17.90	11.686	0.346	破断
9	砂质泥岩	39.80	25	4670	3.24	10.486	0.319	破断

通过挠度的计算,对于关键层的破断给出了定量的判定,以此为基础结合《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》(安监总煤装[2017]66号)(下文简称《规范》)确定“两带”高度。

按照《规范》中的规定,利用 12203 工作面附近钻孔 1110 资料对覆岩综合评价系数 P [27] 进行计算:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n m_i Q_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (9)$$

式中, m_i 为覆岩 i 分层的法线厚度,m; Q_i 为覆岩 i 分层岩性评价系数。

计算得到 12203 工作面覆岩综合评价系数 P 为 0.80,对应的岩性影响系数为 2.20,确定为软弱

岩性。煤层上方垮落带高度 H_k 、导水裂隙带高度 H_{li} 依据《规范》中给出的经验公式进行计算。由于工作面上覆岩层岩性为软弱岩性,因此,选用式(10)对垮落带高度进行计算,利用式(11)、式(12)计算结果综合确定导水裂隙带发育高度范围:

$$H_k = 5M + 5 \quad (10)$$

$$H_{li} = \frac{100M}{0.31M + 8.81} \pm 8.21 \quad (11)$$

$$H_{li} = 10M + 10 \quad (12)$$

通过计算得到,垮落带高度为 65 m,导水裂隙带发育高度为 113~130 m。

通过上述关键层破断判定与“两带”高度的计算,说明覆岩破坏高度回跨过基岩发育至松散层,与方新秋等[28]给出的薄基岩定义相契合。

3 覆岩破坏特征数值模拟

为探究厚松散层薄基岩下覆岩破坏特征,利用3DEC数值模拟软件对工作面回采过程进行模拟分析,并深入研究不同煤层厚度对覆岩破坏的影响特征。

3.1 数值模型建立与模拟方案

该煤矿12203工作面实际生产中,当工作面在充分采动时,地表下沉达到理论最大值,此时覆岩破坏最为严重,导水裂隙带发育到最大高度。即当工作面在走向为充分采动时,不再对工作面倾向方向进行考虑,所以简化模型宽度为1 m。基于以上情况构建数值计算模型如图4所示。模型X轴长960 m,Z轴高310 m,Y轴为1 m,每次开挖步距为20 m,分28步开挖完成。模拟煤层底板高度为20.4 m,煤厚12 m,煤层顶板到地表277.6 m,其中松散层厚度194.1 m,基岩厚度为83.5 m。数

值模拟中单元格的划分取决于岩层的厚度,模型上边界自由,其余边界固定,煤层顶板边界无特殊设置。为探究相同埋深情况下不同煤层厚度回采对上覆岩层破坏特征,分别对煤厚为2、4、6、8、10及12 m进行开挖模拟。结合该煤矿实际地质资料与12203工作面附近钻孔取芯获取的实测数据,综合确定工作面数值模型煤岩体及节理力学参数见表3。

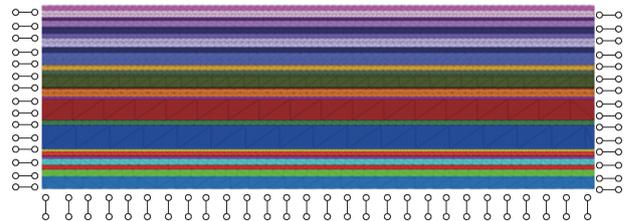


图4 二维数值计算模型

Fig. 4 Two-dimensional numerical calculation model

表3 工作面数值模型煤岩体及节理力学参数

Table 3 Mechanical parameters of coal-rock bodies and joints for the numerical model of the working face

岩性	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ MPa	节理法向刚度/ ($\text{GN} \cdot \text{m}^{-1}$)	节理切向刚度/ ($\text{GN} \cdot \text{m}^{-1}$)
松散层	1 950	0.33	0.09	18	0.21	0.18	0.18
细粒砂岩	2 600	12.08	8.58	38	2.9	3.4	3.4
泥岩	2 340	1.32	1.25	24	1.42	0.89	0.89
砂质泥岩	2 500	1.54	1.41	28	1.8	1.2	1.2
煤	1 400	1.16	0.43	20	0.34	0.45	0.45

3.2 数值模拟结果分析

3.2.1 覆岩破坏特征分析

随着工作面回采,采空区逐渐变大,上覆岩层原有的应力平衡状态被打破,在上覆岩层自重作用下超过其所承受应力极限,上覆岩层依次出现弯曲下沉、破断直至垮落。以12203工作面为实际情况进行模拟的模型在达到平衡后,对模型进行开挖。图5为工作面在不同开挖步距条件下的覆岩运移特征。可以看出,工作面回采至40 m,煤层顶板初次垮落,垮落高度为7.5 m,如图5(a)所示;当工作面回采至120 m,煤层顶板持续垮落,上覆岩层持续破坏近似成梯形,裂隙高度发育到34.6 m(破坏至细粒砂岩),出现离层空间,如图5(b)所示;工作面回采至160 m,上覆岩层出现较大离层空间,岩层持续破断,出现较多裂隙,裂隙高度发育到47.6 m,在厚层砂质泥岩下方出现较大离层,如图5(c)所示;工作面回采至240 m,采空区处出现压实区,裂隙持续发育跨过基岩发育至松散层,此时局部裂隙发育高度为114.4 m,地表开

始出现形成下沉盆地的趋势并出现非连续裂缝,如图5(d)所示;工作面回采至400 m,离层空间、裂隙逐渐闭合,压实区域增加,覆岩裂隙发育高度至125 m,裂隙分布面积随工作面回采持续增加,地表下沉盆地增大,部分地裂隙闭合,如图5(e)所示;工作面回采完毕,裂隙高度不再发育,离层空间全部闭合,地表下沉盆地进一步扩大,如图5(f)所示。

3.2.2 覆岩裂隙发育分析

依据数值模拟开挖过程可知,工作面直接顶以破碎、垮落的形式对采空区进行充填,随着直接顶的充填以及岩石碎胀性作用,后续岩层断裂与垮落形成铰链结构。随着工作面的持续回采,上覆岩层之间会出现离层,在离层空间达到极限时,岩层破断垮落,裂隙也随之发育。在此地质条件下,裂隙持续发育,由于松散层抗压、抗拉能力较弱,受自重影响局部裂隙自动愈合,表明松散层中的裂隙存在自愈性,但地下裂隙自愈性相较于地表裂缝弱。整体裂隙带发育高度为125 m。

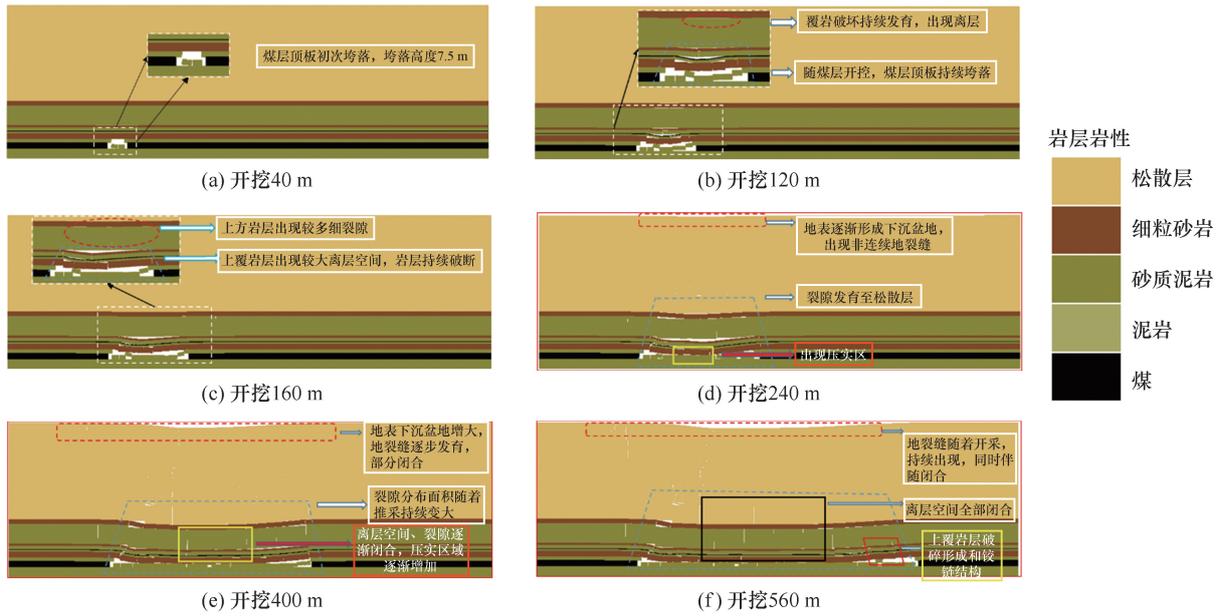


图 5 不同回采距离覆岩破坏特征

Fig. 5 Failure characteristics of overburden at different mining distances

将工作面回采距离和导水裂隙带发育高度拟合成曲线(图 6),近似呈 S 形。结合 Logistic 函数,拟合方程形式为

$$H_d = A + \frac{A - B}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^p} \quad (13)$$

式中, H_d 为导水裂隙带高度, m; x 为工作面推进距离, m; A, B, x_0, p 为常数。

$$H_d = 122.4 - \frac{110.8}{1 + \left(\frac{x}{171.9}\right)^{5.3}}, R^2 = 0.983 \quad (14)$$

随着工作面持续回采,导水裂隙带发育高度持

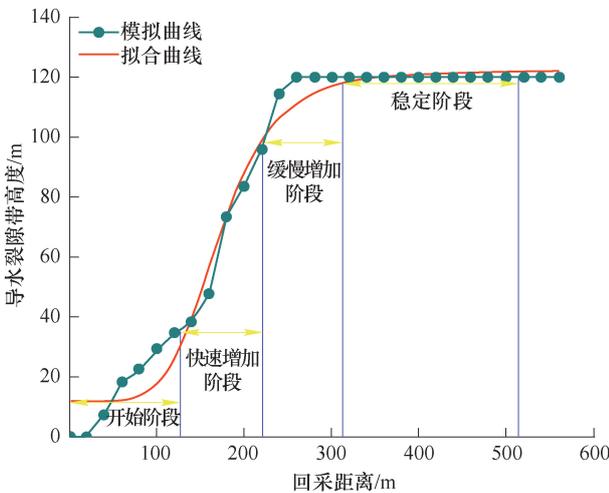


图 6 回采距离与导水裂隙带高度关系

Fig. 6 Relationship between retrieval interval and the height of the channelized fissure zone

续上升,上升状态可分为开始、快速增加、缓慢增加及稳定 4 个阶段。

开始阶段:随着工作面持续回采,上覆岩层达到极限破坏距时开始破坏,覆岩导水裂隙带高度随之增加。

快速增加阶段:导水裂隙带发育至关键层时开始受阻,直至关键层破断,导水裂隙带发育开始突增。

缓慢增加阶段:导水裂隙带发育跨过基岩至松散层,由于松散层抗拉、抗压强度较小,导水裂隙带发育过程中伴随着松散层的压实作用,进入缓慢增加阶段。

稳定阶段:随着工作面持续回采上覆岩层达到充分破坏,导水裂隙带发育高度也逐渐停止,进入稳定阶段。

实验研究表明,工作面回采至 280 m 时,导水裂隙带不再向上发育,此时覆岩达到充分破坏。在此地质条件下,覆岩充分采动的回采距离等于埋深。

3.3 不同煤厚对覆岩破坏特征的影响

导水裂隙带发育高度随煤层厚度的增加而增加,当煤层厚度为 2、4、6、8、10 及 12 m 时,导水裂隙带发育高度分别为 33.6、52.4、74.3、94.1、112.1 及 125 m,如图 7、图 8 所示。这是由于在各岩层厚度及力学性质一致条件下,回采煤层厚度的增加使得覆岩中各岩层下部自由空间高度增加,在松散层自重力作用下岩层更容易达到破裂力学条件,最终

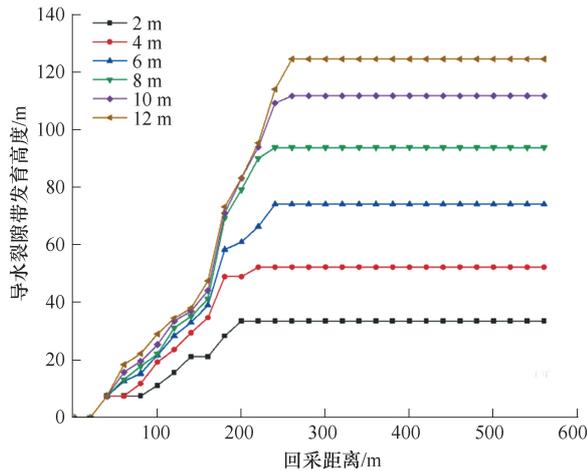


图7 不同煤层厚度下回采距离与导水裂隙带高度关系

Fig. 7 Relationship between mining distance and height of water conduction fracture zone under different coal seam thicknesses

使得上覆岩层导水裂隙带发育高度随之增加。利用不同类型函数对覆岩破坏高度 H_d 与煤层厚度 M 关系进行拟合,通过对比相关性系数,最终确定二者之间的关系式形式为

$$H_d = 9.37M + 16.3, \quad R^2 = 0.994 \quad (15)$$

4 覆岩裂隙分形演化规律

4.1 分形维数计算选取

采用 3DEC 数值模拟开挖过程,利用分形维数中盒子法对裂隙网格图进行计算,可以准确获取工作面回采过程中裂隙动态变化情况:

$$D = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\lg A(a)}{-\lg a} \quad (16)$$

式中, D 为分形维数,对于二维图形, $0 < D < 2$; $A(a)$ 为覆盖全部裂隙网络的方格数量; a 为覆盖裂隙网络图形的方格边长, m 。

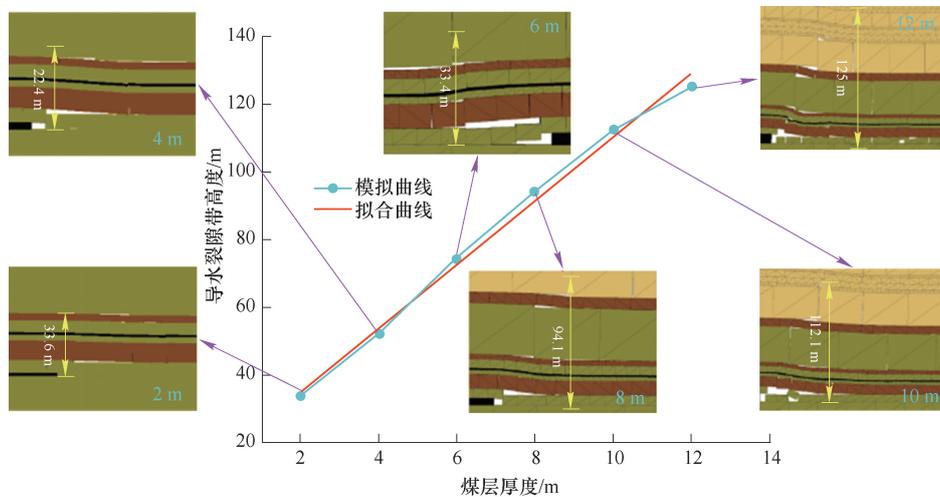


图8 不同煤层厚度与导水裂隙带发育高度拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of coal seam thicknesses and the development height of water conduction fracture zones

4.2 分形维数与工作面回采距离之间的关系

结合式(16),将不同回采距离的覆岩裂隙模拟图像利用 Fraclab 分形工具箱进行求解,不同阶段覆岩破断特征与分形维数关系如图9所示,部分回采阶段二值图与覆岩裂隙分形值图,如图10所示。可以看出,覆岩采动裂隙发育与地表采动响应呈现出非常规律的分形特征。

由覆岩裂隙发育二值图(图10)可看出,随工作面持续回采岩层发生运移,产生横向离层与垂直破断两种类型裂隙。当上覆岩层达到充分破坏时,裂隙发育与压实会逐渐呈现出动态平衡,垂直破断裂隙不再持续向上发育,随着煤层回采离层裂隙张开、闭合交替出现,直至整体垮落、压实。地表采动响应主要表现形式包含地裂缝和地表沉降盆地

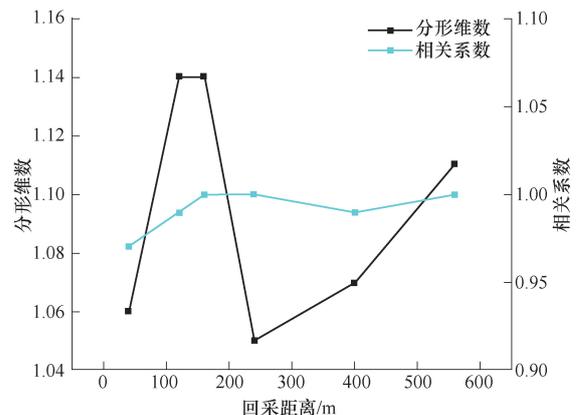


图9 覆岩裂隙发育特征与裂隙分形维数关系
Fig. 9 Relationship between the development characteristics of overburden fractures and the fractal dimension of fractures

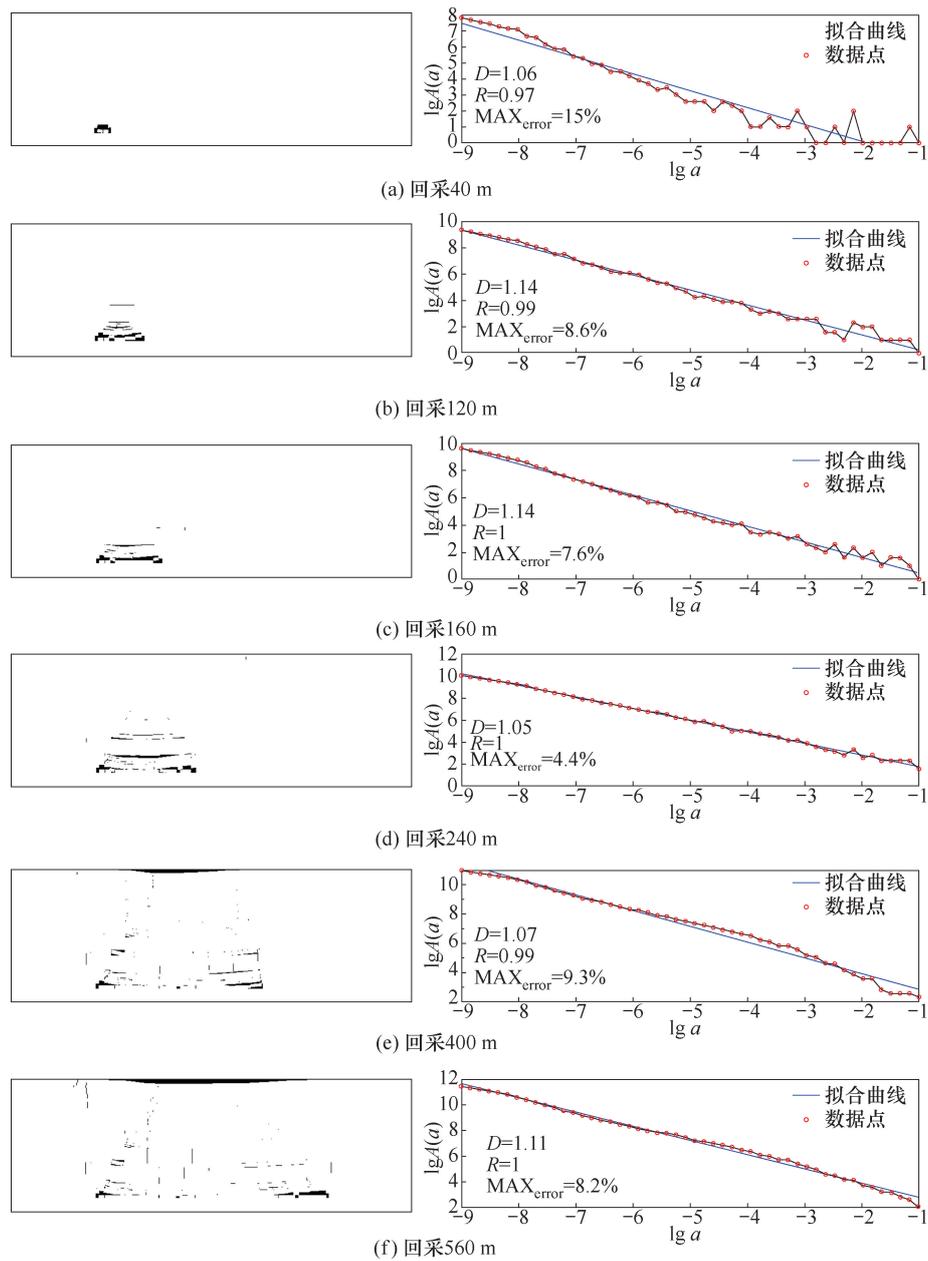


图 10 不同工作面回采覆岩裂隙发育二值图、分维值图

Fig. 10 Binary diagram and fractal dimension diagram of fracture development of mining overburden rock in the working face

两种。从二值图还可以看出,处于工作面开切眼侧的地裂缝会持续发育,这是由于工作面的持续回采的扰动与岩层自重力作用形成下沉盆地过程中对边界的拉伸;随工作面持续回采,下沉盆地的范围与沉降量会逐渐增加。

由分维值图(图 10)可知,覆岩采动裂隙发育与地表采动响应的分形维数随着工作面的推进呈现动态变化。煤层回采 40 m 时,煤层顶板初步垮落,分形维数 1.06;煤层回采至 120~160 m 时,上覆岩层不断破碎,但尚未达到关键层,离层空间不断增大,分形维数上升至 1.14;当工作面回采至

240 m 时,关键层破断,受自重力影响上覆岩层离层、裂隙被压实,分形维数降至 1.05;此后,上覆岩层裂隙发育处于平衡,地表采动响应逐渐剧烈,随着工作面持续回采,地裂缝与地表沉陷盆地逐渐变大,直至回采结束,分形维数回升至 1.11。

4.3 分形演化规律

进一步分析覆岩裂隙发育状态及地表响应情况,对所分的 150 个子区域采用盒计数法对二值化后数据进行分形维数解算,依据解算结果绘制上覆岩层裂隙发育及地表受采动响应的分维等值线图、云图及三维规律图,如图 11 所示。

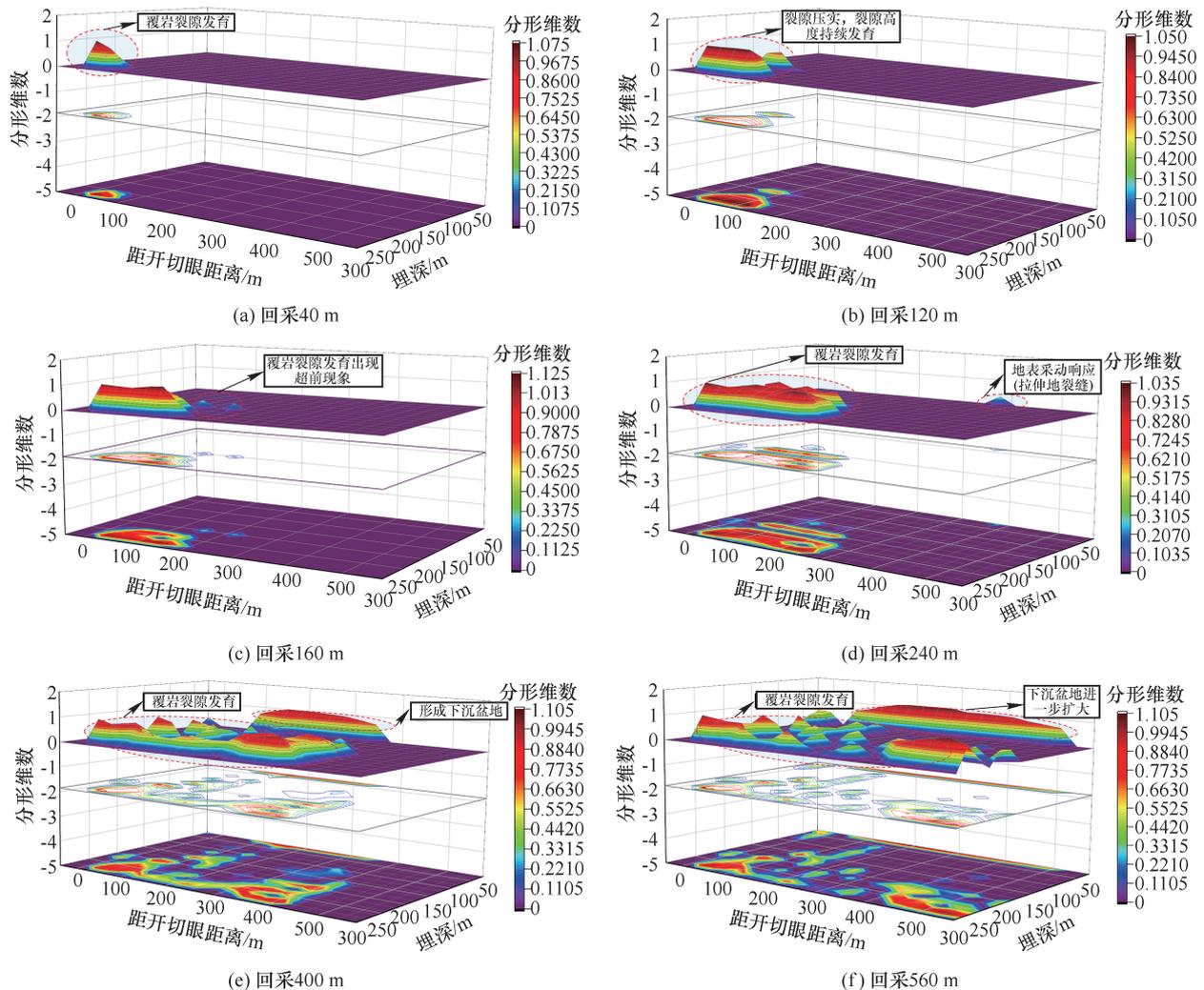


图 11 采动影响覆岩裂隙发育与地表响应

Fig. 11 Effect of mining on the fracture development and surface response of overburden rock

由图 11(a)~(c)可以看出,随着工作面回采不断推进,覆岩破坏逐渐发育,破坏区域不断扩大,破坏程度逐渐增大。其中,图 11(c)覆岩发育中伴随超前裂隙出现,此时地表受到的采动响应尚不明显。由图 11(d)~(f)可以看出,随着工作面持续回采,由于覆岩裂隙被压实以及覆岩破坏跨过基岩到达松散层部分,覆岩破坏程度开始降低,而裂隙压实致使地下自由空间减小,地表采动响应明显;图 11(d)所示地表出现拉伸裂缝,图 11(e)地表形成下沉盆地,图 11(f)地表下沉盆地进一步发育。整体分析覆岩裂隙发育情况,当覆岩裂隙发育跨过基岩到松散层时,可发现覆岩中基岩部分裂隙发育剧烈程度高于松散层部分。

5 地表裂缝特征分析

5.1 数据采集

利用 GNSS-RTK 对地裂缝的发育与延伸情况

进行周期性定位监测,以确定该工作面在开采过程中的动态裂缝角,采集裂缝发育位置数据;利用 LUMIX-G10 相机结合钢尺对裂缝宽度进行现场实测,记录裂缝发育形态和裂缝发育宽度。

5.2 地裂缝分布特征

随着煤层回采,地表受到外来或自身的应力超过本身所能承受应力(拉伸或挤压)的最大限度时,地表产生不同程度的破坏,常见的有拉伸裂缝、隆起及塌陷裂缝(坑)等。通过对现场监测发现,12203 工作面上方地表主要有拉伸裂缝、台阶裂缝、塌陷裂缝及塌陷坑等,如图 12 所示。针对 12203 工作面地裂缝现场观测、记录,结合矿井井上下对照图,可得到工作面持续开采过程中裂缝分布延伸特征(图 13)。

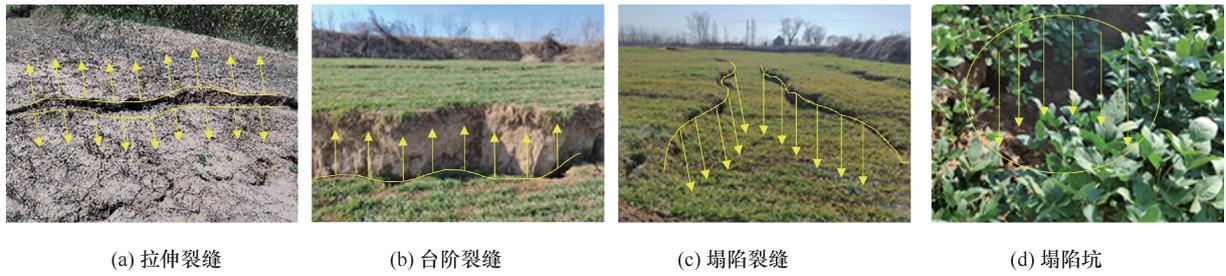


图 12 地裂缝类型

Fig. 12 Types of ground fissures

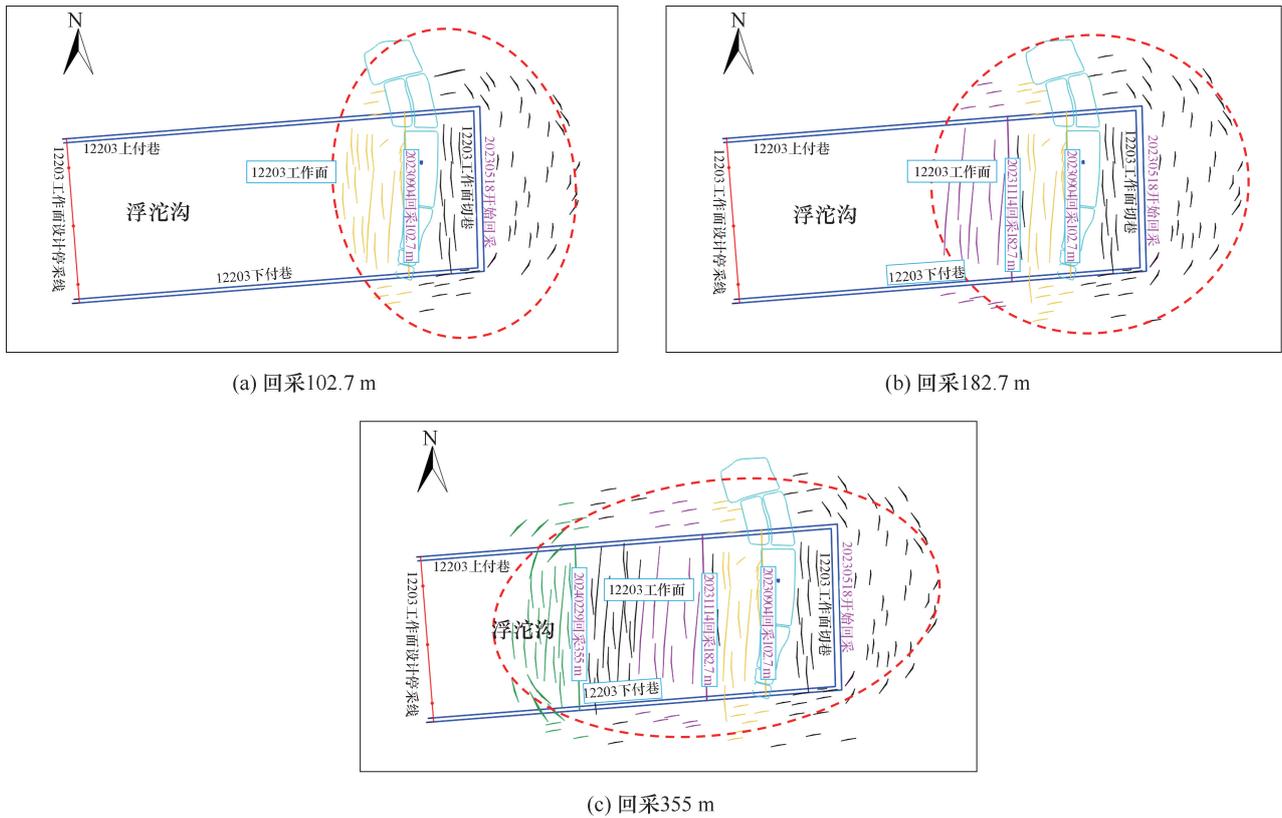


图 13 不同回采距离裂缝分布特征

Fig. 13 Fracture distribution at different mining distances

由图 13 结合现场实测数据可得,12203 工作面地裂缝空间分布有以下 3 个特征。

(1) 地裂缝分布较为密集,在工作面正上方多平行于开切眼,上、下副巷裂缝多垂直于开切眼,在工作面回采对应的四角裂缝呈锐角“弧状”环绕。

(2) 工作面边缘裂缝整体分布变化形态随着工作面持续开采呈椭圆形—圆形—椭圆形,工作面正上方地裂缝随着煤层回采持续沿着工作面推进方向发育并伴随超前发育现象。

(3) 拉伸型地裂缝长度最大可达到 115.6 m,宽度最大为 0.75 m;台阶型裂缝最大落差高度达

到 1.13 m。相邻两条裂缝间距最大为 13.6 m,平均间距为 6.15 m。

5.3 地裂缝与工作面回采距离的关系

当地表开始受到煤层采动影响后,12203 工作面地裂缝总是超前于工作面推进位置一段距离出现,该距离称裂缝超前距 L_c ,对应的有裂缝超前角 τ 。图 14 为地裂缝与工作面不同回采距离相对位置示意图。

依据现场实测记录,对裂缝出现位置、超前裂缝距、工作面当日回采位置进行了统计,并对超前裂缝角进行解算,结果见表 4。

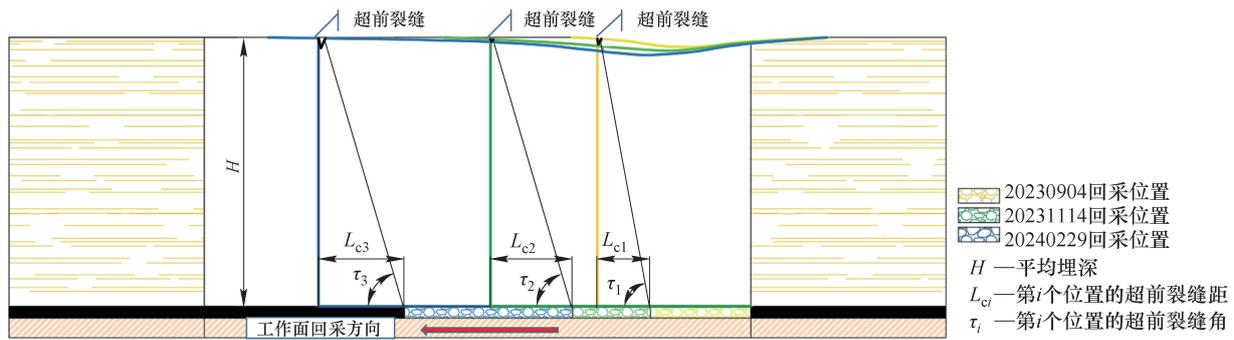


图 14 地裂缝与工作面不同回采距离相对位置示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the relative position of different mining distances between ground fissures and working faces

表 4 超前裂缝距与超前裂缝角解算结果

Table 4 Calculation results of leading crack spacing and leading crack angle

测量日期	回采位置/ m	裂缝出现 位置/m	超前裂缝 距/m	超前裂缝角/ (°)
2023-07-14	33.75	—	—	—
2023-07-23	50.90	81.60	30.70	83.69
2023-08-11	82.75	133.00	50.25	79.75
2023-09-04	102.70	157.11	54.41	79.75
2023-10-11	123.75	197.83	74.08	75.07
2023-11-14	182.70	267.35	84.65	73.05
2023-12-22	252.00	334.23	82.23	73.51
2024-01-23	293.00	376.66	83.66	73.24
2024-02-29	355.00	440.75	85.75	73.24

依据现场实测与计算结果分析:

(1) 该矿 12203 工作面开采造成地表拉伸型与台阶型地裂缝交互存在,且存在裂缝超前现象。出现这一现象原因,一方面是岩性软弱、基岩较薄,在厚松散层自重力作用下,采动影响传导较快;另一方面,回采速度较慢给应力传导足够时间,致使在回采前方地表受拉伸应力作用地表出现裂缝。

(2) 超前裂缝距在工作面回采前期低于 60 m,后期回采稳定后动态超前裂缝距在 74.08 ~ 85.75 m。以 2023 年 11 月 14 日后测量的超前裂缝距数据为基础,计算平均值求取动态超前裂缝距为 84.07 m,并计算动态超前裂缝角为 73.15°。

6 结论

以郑煤集团某矿 12203 工作面为研究背景,采用理论分析、现场实测与数值模拟等方法对覆岩裂隙演化及地裂缝规律进行研究,得到如下结果:

(1) 对厚松散层薄基岩综放开采引起的覆岩

运移进行了阐述,明晰了厚松散层、薄基岩联合演化对覆岩破坏的影响机制,结合关键层、固支梁理论以及经验公式定量分析确定了覆岩破坏高度。

(2) 覆岩破坏高度与回采距离存在 Logistic 函数关系,与煤层厚度存在线性函数关系,并结合回归分析理论给出了对应数学关系式;发现该地质采矿条件下,回采距离等于埋深时,覆岩破坏充分,裂隙发育高度不再增加。

(3) 覆岩裂隙演化过程中,基岩部分比松散层部分裂隙演化破坏程度剧烈。

(4) 厚松散层薄基岩综放开采引起的地裂缝形态多为拉伸裂缝与台阶裂缝交互存在,工作面边缘裂缝整体随工作面回采呈现椭圆形—圆形—椭圆形动态变化;地裂缝发育超前工作面一段距离出现,确定了动态超前裂缝距为 84.07 m,动态超前裂缝角为 73.15°。

参考文献

- [1] 谢和平,王金华,王国法,等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. 煤炭学报,2018,43(5):1187-1197.
XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5):1187-1197.
- [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 Jalin. Behaviors of strata movement in coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4):973-984.
- [3] 杜锋,白海波. 厚松散层薄基岩综放开采覆岩破坏机理研究[J]. 煤炭学报,2012,37(7):1105-1110.
DU Feng, BAI Haibo. Mechanism research of overlying strata activity with fully mechanized caving in thin bed-

- rock with thick alluvium[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(7): 1105-1110.
- [4] 来兴平,张旭东,单鹏飞,等. 厚松散层下三软煤层开采覆岩导水裂隙发育规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1739-1750.
- LAI Xingping, ZHANG Xudong, SHAN Pengfei, et al. Study on development law of water-conducting fractures in overlying strata of three soft coal seam mining under thick loose layers [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 40(9): 1739-1750.
- [5] 张广超,陶广哲,孟祥军,等. 巨厚松散层下软弱覆岩破坏规律[J]. 煤炭学报, 2022, 47(11): 3998-4010.
- ZHANG Guangchao, TAO Guangzhe, MENG Xiangjun, et al. Failure law of weak overburden stratum underlying extra-thick alluvium[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(11): 3998-4010.
- [6] 梅福星,尚宇琦,孔德中,等. 基于 DIC 技术近距离煤层采动裂隙-位移-应变演化规律相似模拟研究[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(4): 519-528.
- MEI Fuxing, SHANG Yuqi, KONG Dezhong, et al. DIC-based similar simulation study on the evolution patterns of mining-induced fracture, displacement and strain in close distance coal seam[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(4): 519-528.
- [7] GHABRAIE B, REN G, SMITH J, et al. Application of 3D laser scanner, optical transducers and digital image processing techniques in physical modelling of mining-related strata movement[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 80: 219-230.
- [8] 徐超,王凯,郭琳,等. 采动覆岩裂隙与渗流分形演化规律及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(12): 2389-2403.
- XU Chao, WANG Kai, GUO Lin, et al. Fractal evolution law of overlying rock fracture and seepage caused by mining and its engineering application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(12): 2389-2403.
- [9] 左建平,李颖,李宏杰,等. 采动岩层全空间“类双曲面”立体移动模型[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(1): 001-014.
- ZUO Jianping, LI Ying, LI Hongjie, et al. The model of spatial analogous hyperboloid for three-dimensional rock strata movement in mining engineering [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(1): 001-014.
- [10] 孟祥军,张广超,李友,等. 深厚表土覆岩结构运移演化及高应力突变致灾机理[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1919-1931.
- MENG Xiangjun, ZHANG Guangchao, LI You, et al. Migration evolution laws of overburden structure with deep-lying thick surface soil and disaster mechanism induced by high stress mutation [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1919-1931.
- [11] KIDYBINSKI A., BABCOCK C. O. Stress distribution and rock fracture zones in the roof of longwall face in a coal mine [J]. Rock mechanics, 1973, 5(1): 1-19.
- [12] 张宏伟,朱志洁,霍利杰,等. 特厚煤层综放开采覆岩破坏高度[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 816-821.
- ZHANG Hongwei, ZHU Zhijie, HUO Lijie, et al. Overburden failure height of super high seam by fully mechanized caving method [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 816-821.
- [13] 郭文兵,赵高博,白二虎,等. 中部矿粮复合区采煤沉陷及耕地损毁研究现状与展望[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 388-401.
- GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, BAI Erhu, et al. Research status and prospect on cultivated land damage at surface subsidence basin due to longwall mining in the central coal grain compound area [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 388-401.
- [14] 王双明,魏江波,宋世杰,等. 黄土沟谷区浅埋煤层开采覆岩破坏与地表损伤特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 1-9.
- WANG Shuangming, WEI Jiangbo, SONG Shiie, et al. Study on overburden and surface damage characteristics of shallow-buried coal seam mining in loess gully area [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 1-9.
- [15] 徐飞亚,郭文兵,王晨. 浅埋深厚煤层高强度开采地表沉陷规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 11-20.
- XU Feiya, GUO Wenbing, WANG Chen. Research on surface subsidence law in high-intensity mining of shallow buried with thick coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 11-20.
- [16] 胡振琪,王新静,贺安民. 风积沙区采煤沉陷地裂缝分布特征与发生发育规律[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 11-18.
- HU Zhenqi, WANG Xinjing, HE Anming. Distribution characteristic and development rules of ground fissures due to coal mining in windy and sandy region [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 11-18.
- [17] 王新静,胡振琪,胡青峰,等. 风沙区超大工作面开采土地损伤的演变与自修复特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 2166-2172.
- WANG Xinjing, HU Zhenqi, HU Qingfeng, et al. Evolution and selfhealing characteristic of land ecological

- environment due to super-large coalface mining in windy and sandy region[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40 (9): 2166-2172.
- [18] MILLS K, GARRATT O, BLACKA B, et al. Measurement of shear movements in the overburden strata ahead of longwall mining[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, 26 (1): 97-102.
- [19] 戴华阳, 罗景程, 郭俊廷, 等. 上湾矿高强度开采地表裂缝发育规律实测研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(10): 124-129.
- DAI Huayang, LUO Jingcheng, GUO Junting, et al. In-site surveying and study on development laws of surface cracks by high-intensity mining in Shangwan Mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48 (10): 124-129.
- [20] 赵毅鑫, 许多, 张康宁, 等. 采动地表浅层隐蔽裂缝的无人机红外识别现场试验[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(5): 1921-1932.
- ZHAO Yixin, XU Duo, ZHANG Kangning, et al. In-situ experiment on the identification of shallow hidden mining-induced ground fissure using UAV infrared technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(5): 1921-1932.
- [21] 杨奇让, 胡振琪, 韩佳政, 等. 煤矿区无人机影像采动地裂缝提取方法研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(6): 187-196.
- YANG Qirang, HU Zhenqi, HAN Jiazheng, et al. Research on extraction method of ground fissures caused by mining through UAV image in coal mine areas[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(6): 187-196.
- [22] 王朋飞, 牛一帆, 陈可夯, 等. 浅埋薄表土层特厚煤层强制放顶条件下主要地裂缝演化规律实测[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(10): 3674-3687.
- WANG Pengfei, NIU Yifan, CHEN Kehang, et al. Field survey on the evolution of main ground cracks under condition of forced hard roof caving in mining ultrathick coal seams under shallow overburden[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(10): 3674-3687.
- [23] 郭文兵, 白二虎, 赵高博. 高强度开采覆岩地表破坏及防控技术现状与进展[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(2): 509-523.
- GUO Wenbing, BAI Erhu, ZHAO Gaobo. Current status and progress on overburden and surface damage and prevention technology of high-intensity mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45 (2): 509-523.
- [24] 郭文兵, 赵高博, 白二虎. 煤矿高强度长壁开采覆岩破坏充分采动及其判据[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(11): 3657-3666.
- GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, BAI Erhu. Critical failure of overlying rock strata and its criteria induced by high-intensity longwall mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(11): 3657-3666.
- [25] 滕浩. 覆岩隔离注浆充填压实区形成机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- TENG Hao. Formation mechanism of compacting area in the gob with grouting into overburden of isolated panels during long-wall mining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [26] 许家林, 钱鸣高. 覆岩关键层位置的判别方法[J]. *中国矿业大学学报*, 2000, 29(5): 463-467.
- XU Jialin, QIAN Minggao. Method to distinguish key strata in overburden[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2000, 29(5): 463-467.
- [27] 国家安全监管总局, 国家煤矿安监局, 国家能源局, 国家铁路局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017. 07.
- State Administration of Work Safety, National Mine Safety Administration, National Energy Administration, National Railway Administration of People's Republic of China. Code of practice for coal pillar retention and compression coal mining in buildings, water bodies, railroads and major shafts[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2017. 07.
- [28] 方新秋, 黄汉富, 金桃, 等. 厚表土薄基岩煤层开采覆岩运动规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008 (S1): 2700-2706.
- FANG Xinqiu, HUANG Hanfu, JIN Tao, et al. Movement rules of overlying strata around longwall mining in thin bedrock with thick surface soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008 (S1): 2700-2706.

(责任编辑: 王晓玲)