

张广超, 张广有, 周广磊, 等. 多工作面连续开采地表沉陷与强矿震联动响应规律[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(1): 013032.

ZHANG Guangchao, ZHANG Guangyou, ZHOU Guanglei, et al. The linking response law of surface subsidence and strong mine earthquake in continuous mining of multiple working faces[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(1): 013032.

多工作面连续开采地表沉陷与强矿震联动响应规律

张广超¹, 张广有¹, 周广磊¹, 张照允², 吕凯¹, 尹茂胜¹, 闫宪洋², 李振国²

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 兖矿能源集团股份有限公司, 山东 济宁 272000)

摘要: 深部矿井多工作面大空间开采导致大能量强矿震事件频发, 同时地表伴随剧烈的下沉变形, 掌握具体地层条件下地表移动与强矿震时空分布响应规律对于深部矿井动力灾害防控意义重大。以兖州矿区东滩煤矿63_±04, 63_±05, 63_±06工作面为工程背景, 基于关键层理论与复合破断原理, 对东滩煤矿复杂地层进行了科学划分, 现场实测了深井厚硬岩层下多工作面开采地表沉降规律及强矿震时空分布特征, 分析了多工作面连续开采下关键层组运移演化规律, 揭示了关键层组破断演化、地表沉陷规律与大能量强矿震分布的联动效应。研究结果表明: ①东滩煤矿六采区地层可以划分出4个关键层组, 每个关键层组包含一层关键层和若干坚硬岩层, 相比单一关键层, 关键层组发生复合破断时的矿震能量更高、破断步距更大, 对上覆岩层的运移及地表下沉影响也更为突出。②地表沉陷观测结果显示, 63_±04, 63_±05工作面开采结束, 地表下沉系数分别为0.189, 0.458; 63_±06工作面当前已开采808.29 m, 地表下沉系数为0.492, 受多关键层组地质赋存特征影响, 东滩煤矿六采区地表下沉系数远小于兖州矿区其他矿井平均地表下沉系数(0.75~0.85), 地表未达到充分采动, 下沉趋势为: 无明显下沉—下沉空间显著—下沉空间逐渐增大。③矿震监测结果显示, 63_±04工作面开采时, 大能量强矿震事件主要集中在低位关键层组I, II层位, 随着多工作面连续开采, 大能量强矿震逐渐向高位转移, 逐渐集中至关键层组II, III层位。④由地表沉陷及大能量强矿震实测数据可知, 东滩煤矿六采区多工作面连续开采下关键层组复合破断覆岩结构呈“断悬”结构—“铰接”结构交替上升, 逐层演化过程验证了覆岩运动、地表沉陷及大能量强矿震三者之间存在一定的联动效应。研究成果可对类似工程地质条件下多关键层组复合破断研究及大能量强矿震预控提供一定参考。

关键词: 关键层组; 复合破断; 强矿震; 地表沉陷; 覆岩运移; 联动效应

中图分类号: TD32

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2024)01-3032-14

The linking response law of surface subsidence and strong mine earthquake in continuous mining of multiple working faces

ZHANG Guangchao¹, ZHANG Guangyou¹, ZHOU Guanglei¹, ZHANG Zhaoyun², LYU Kai¹,
YIN Maosheng¹, YAN Xianyang², LI Zhenguo²

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Yankuang Energy Group Co., Ltd., Jining 272000, China)

收稿日期: 2023-11-30

修回日期: 2024-01-02

责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52374098); 山东省优秀青年基金资助项目(ZR202211070181); 山东省高等学校青创团队计划资助项目(2022KJ212)

作者简介: 张广超(1987—), 男, 山东泰安人, 教授, 博士。

通信作者: 周广磊(1990—), 男, 山东枣庄人, 讲师, 博士, 主要从事深部岩体力学及矿山灾害防控技术等方面的研究工作。E-mail: guangleizhou@sdust.edu.cn

Abstract: Large-space mining in multiple working faces in deep mines leads to frequent large-energy strong mine earthquakes, while the surface is accompanied by severe subsidence and deformation. Mastering the spatial and temporal distribution response law of surface movement and strong mine earthquakes under specific stratum conditions is of great significance for the prevention of dynamic disasters in deep mines. Based on the engineering circumstances of the 63_{upper}04, 63_{upper}05 and 63_{upper}06 working faces in the Dongtan Coal Mine of Yanzhou Mining Area, the complex geological strata are scientifically classified using the Key Stratum Theory and the principle of composite failure. Field measurements are conducted to investigate the surface subsidence patterns and the spatiotemporal distribution characteristics of strong mining-induced seismicity during multi-working face mining under the deep and hard rock layer. The evolutionary patterns of the key stratum group during the continuous mining of multiple working faces is analyzed, revealing the interactive effects among key stratum group failure, surface subsidence patterns, and the distribution of large-energy strong mining-induced seismic events. The main conclusions are as follows: (1) The geological strata in the Dongtan Coal Mine Six Mining Area can be divided into four key stratum groups, each comprising one key stratum and several hard rock layers. Compared to a single key stratum, the seismic energy is higher and the failure step distance is larger when a key stratum group experiences composite failure, resulting in a more pronounced impact on the movement of overlying rock layers and surface subsidence. (2) The observation results of surface subsidence show that the surface subsidence coefficients of the 63_{upper}04 and 63_{upper}05 working faces are 0.189 and 0.458, respectively, and the 63_{upper}06 working faces have been mined for 808.29 m, and the surface subsidence coefficient is 0.492, which is much smaller than the average surface subsidence coefficient of other mines in Yanzhou mining area (0.75–0.85) due to the geological characteristics of multiple key layer groups. Also, the surface is not fully mined, and the subsidence sequentially changes from no obvious subsidence, significant subsidence, to the trend that the subsidence space is gradually increasing. (3) During the mining of 63_{upper}04 working face, the strong mine earthquake events with large energy are mainly concentrated near the low key strata group I and II. With the continuous mining of multiple working faces, the large-energy strong mine earthquake gradually shifts to the high level. gradually concentrated near the second and third layers of the key strata. (4) According to the measured data of surface subsidence and high-energy strong mine earthquakes, the composite cracking overburden structure of the key layer group under the continuous mining of multiple working faces of the No. 6 mining area of Dongtan Coal Mine changes between "fault-suspended" structure and "hinged" structure, and the layer-by-layer evolution process verifies that there is a certain linkage effect between overburden movement, surface subsidence and high-energy strong ore earthquake. The research results have a certain guiding significance for the study of compound fracture of multi-key strata and the pre-control of high-energy strong mine earthquakes under similar engineering geological conditions.

Key words: key layer groups; compound fracture; strong mine earthquakes; subsidence of the earth's surface; migration of overburden rock; linkage effect

随着我国煤炭开采深度和强度不断增加,多工作面大空间开采使得覆岩运动^[1]及应力环境^[2]更加复杂,矿震发生频率和危险程度均呈迅猛增长趋势,其中大能量强矿震事件占比增加,导致井下冲击地压^[3]的发生概率增加,严重威胁了煤矿安全生产。矿震还会传递到地表并产生强烈的震感^[4],致使地表显著下沉,给矿区居民造成心理恐慌,使矿震从采矿安全问题演变为公共安全问题。采动诱发的矿震与上覆岩层的破断运移过程密切相关,而地表沉陷^[5-6]又是覆岩运动的直观体现,岩层运移

演化^[7]、地表移动变形^[8]及大能量强矿震事件^[9]具有显著的时间序列关系,3者之间的内在联系具备复杂的时空特性。兖州矿区东滩煤矿属于典型的多厚硬岩层地质条件,工作面上方赋存有多组坚硬岩层,多工作面大空间连续开采导致坚硬岩层发生复合破断,使得地表移动变形及大能量强矿震时空分布规律与其他简单地层开采明显不同。笔者期望通过研究典型地层条件下的地表沉陷规律揭示岩层运动的真实状态和运动效果的传播方式,结合能量事件分析得到与大能量强矿震事件相关

的重要信息, 进而从这些数据信息中识别出未来大能量强矿震发生的某些定量标志和触发机制, 通过分析岩层的移动和变形预测矿震的时空特性, 为大能量强矿震事件的预测和防治提供科学决策。

国内外众多学者针对地表移动与冲击地压关联性及其孕育发生机制开展了大量有益的研究。李永靖等^[10]发现岩层移动变形可以预测矿震的大小及分布, 为矿山地下开采活动预测矿震相关参数提供了依据; 曹安业等^[11]采用理论分析、数值模拟和现场实践等方法, 分析了上覆岩层破断特征及开采期间围岩应力分布特征, 研究了不规则工作面开采矿震活动规律; 王乃国等^[12]综合分析了微震与地表沉陷数据, 从地表沉陷速度变化的角度验证了其冲击地压具有一定的相关性, 可作为冲击地压预警的辅助参考; 唐巨鹏等^[13]通过理论研究和数值计算, 总结了地表移动变形与冲击地压具有反弹效应、波段效应和滞后性的对应关系, 并将地表沉陷反弹效应定义为地表下沉速度突变为负值时刻, 为冲击地压的预测和防治提供了理论指导; 张广超等^[14]揭示了厚硬地层煤炭开采地表沉陷具有下沉系数小的特点, 且地表沉陷与强矿震具有某种对应关系; 郭惟嘉等^[15]通过现场观测、室内试验和数值计算分析, 发现地表下沉、反弹与冲击地压的发生具有某种对应关系, 研究指出当地表沉陷反弹时冲击危险性最大, 此时井下冲击地压发生次数多, 能量大; 任文涛等^[16]在分析巷道冲击微震监测能量特征的基础上, 通过应力、能量、位移表征了不同能级矿震矿震波对巷道围岩的扰动效应; 左建平^[17]

将基岩的破断和移动规律与地表沉降规律两者进行有机结合, 基于基岩初次断裂和周期断裂力学模型, 建立了岩层运移的“类双曲线”模型; 王桂利等^[18]采用微震监测技术对矿震事件进行了定位, 采用统计分析的方法研究了特厚煤层临空巨厚坚硬顶板断裂的矿震规律; 李春意等^[19]综合分析了工程实测数据, 得到地表形变与冲击地压的关系并揭示了地表下沉速度的反弹可作为冲击地压危险的预警信息。

以上研究成果均侧重于岩层运动与矿震或其与地表移动之间的关系, 并未系统总结开采活动、地层结构特征、覆岩破断演化、地表沉陷规律、强矿震事件之间的联动效应。因此, 笔者以兖州矿区东滩煤矿63_上04, 63_上05, 63_上06工作面为工程背景, 采用理论分析与现场实测相结合的方法, 系统分析了六采区的典型地层结构特征, 实测了多工作面开采地表沉降规律及强矿震时空分布特征, 分析了多工作面连续开采下关键层组复合破断演化规律, 揭示了关键层组破断演化、地表沉陷规律与大能量强矿震分布的联动效应。

1 工程地质概况

1.1 典型工作面概况

东滩煤矿地处山东省邹城、兖州、曲阜三市(区)接壤地带。六采区位于东滩井田南翼, 埋深507.32~996.66 m, 平均661.79 m; 开采煤层厚度0.81~8.15 m, 平均5.38 m; 煤层倾角0°~11°, 整体平均倾角4°; 煤层普氏硬度 $f=3\sim4$ 。六采区共布置10个工作面, 如图1所示。

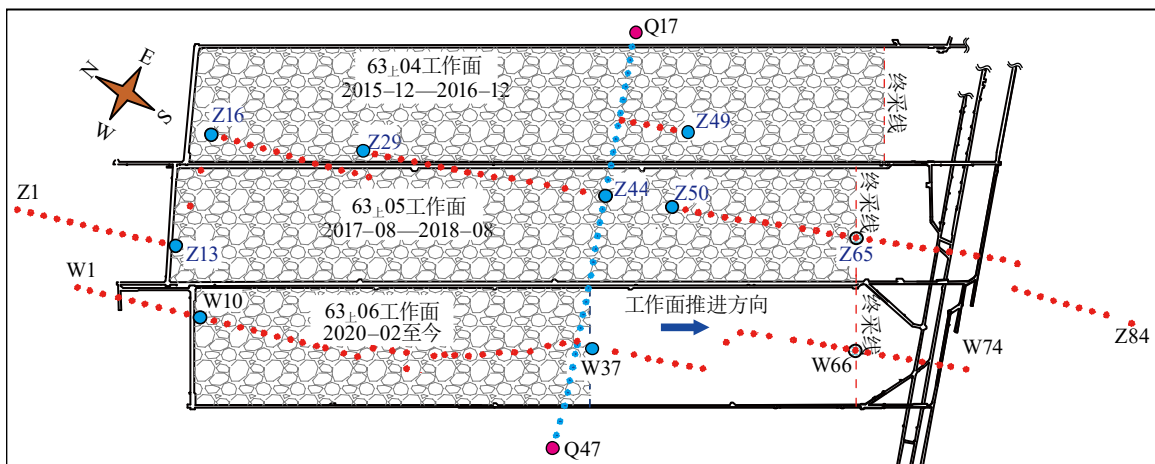


图1 东滩煤矿六采区工作面布置及地表移动测站布置

Fig. 1 Layout of working face and surface movement station in No. 6 mining area of Dongtan Coal Mine

开采顺序为63_上04工作面→63_上05工作面→63_上06工作面,目前正在开采63_上06工作面。考虑到63_上04工作面已开采结束较长时间,覆岩运移已趋于稳定,笔者选择63_上05, 63_上06工作面为主要研究对象。其中,63_上05工作面倾向长度约252 m、走向长度约1 623 m; 63_上06工作面倾向长度约261 m、走向长度约1 456 m。

1.2 地层地质条件

东滩煤矿六采区3_上煤层为华北型石炭二叠系全隐蔽式煤田,自上而下分别为第四系、侏罗系上统、二叠系上部石盒子组与二叠系下部山西组,六采区O2–D2钻孔柱状图如图2所示。

序号	岩层岩性	柱状	厚度/m	埋深/m
1	表土层		123.16	123.16
2	粉砂岩		11.15	134.31
3	细砂岩		67.74	202.05
4	粉砂岩		11.05	213.10
5	细砂岩		83.75	296.85
6	粉砂岩		3.93	300.78
7	细砂岩		4.15	304.93
8	中砂岩		4.94	309.87
9	砂泥岩互层		10.19	320.06
10	细砂岩		63.13	383.19
11	中砂岩		4.70	387.89
12	细砂岩		23.87	411.76
13	中砂岩		22.61	434.37
14	细砂岩		6.21	440.58
15	中砂岩		56.07	496.65
16	细砂岩		11.96	508.61
17	粉砂岩		2.10	510.71
18	细砂岩		42.86	553.57
19	砂泥岩互层		9.87	563.44
20	粉砂岩		5.09	568.53
21	细砂岩		9.05	577.58
22	砂泥岩互层		9.22	586.80
23	粉砂岩		19.53	606.33
24	粉细砂岩互层		3.10	609.43
25	砂质泥岩		9.70	619.13
26	粉砂岩		11.27	630.40
27	中砂岩		2.00	632.40
28	细砂岩		1.70	634.10
29	铝质泥岩		4.31	638.41
30	中砂岩		18.73	657.14
31	粉细砂岩互层		3.90	661.04
32	粉砂岩		5.13	666.17
33	细砂岩		6.60	672.77
34	粉细砂岩互层		1.50	674.27
35	泥岩		2.14	676.41
36	3 _上 煤层		5.35	681.76

图2 六采区O2–D2钻孔柱状图

Fig. 2 Column chart of O2–D2 borehole in the sixth mining area

其中,第四系厚度79.15~141.18 m,平均121.98 m,以黏土与砂质泥土为主;侏罗系厚度393.27~735.20 m,平均500.56 m,分为上、下两段,上段以灰绿色粉砂岩、细砂岩与粉细砂岩互层为主,平均175.31 m,下段以紫红色中砂岩、细砂岩和粉砂岩为主,平均338.52 m;二叠系上部石盒子组,平均27.18 m,以一套紫红、灰绿花斑状杂色泥岩为主;二叠系下部山西组,平均77.26 m,为主要含煤地层。

由上述分析可知,3_上煤层上方覆盖有多层厚度大、强度高、完整性好的坚硬岩层,坚硬岩层之间又赋存岩性较弱的软弱分层,由此造成东滩煤矿六采区地层条件异常复杂。如何对不同岩性组合条件下的坚硬岩层及软弱分层进行科学划分,成为探究多工作面连续开采地表移动与强矿震时空分布响应规律的前提与基础。

2 地层结构特征及其破断规律分析

众所周知,地层结构不同,覆岩运动规律不同,相应的地表沉降及矿震规律也不同。东滩煤矿六采区地层结构具有多层厚硬岩层赋存特征,相应的岩层运动及其诱发的地表或微震响应规律也必将呈现特殊性。

2.1 地层结构特征判识方法

根据钱鸣高院士的关键层理论及复合破断规律^[20]可知,地层结构特征的判识可分以下几个步骤。

①确定坚硬岩层的位置

假设岩层所荷载荷均匀分布,则煤层上方第n层岩层对第i层岩层所传递的载荷为

$$(q_n)_i = E_i h_i^3 \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i / \sum_{i=1}^n E_i h_i^3 \quad (1)$$

式中,(q_n)_i为第n层岩层对第i层岩层的载荷;E_i为第i层岩层的弹性模量;h_i为第i层岩层的厚度;γ_i为第i层岩层的容重。

由于第n+1层岩层为坚硬岩层,其挠度小于下部岩层的挠度,第n+1层以上岩层已不再需要其下部岩层去承担它所承受的载荷,即第n+1层以上岩层不随下部岩层发生同步变形,则必然有

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

从煤层上方第1层岩层开始计算,当满足式(2)时,停止计算。此时却从第1层往上数,第n+1层岩层为第1层硬岩层。从第1层硬岩层开始,按上述

方法确定第2层硬岩层的位置, 以此类推, 直至确定出煤层上方所有坚硬岩层。

②计算各硬岩层的破断步距

坚硬岩层破断是弹性力学上板的破断问题, 为简化计算, 硬岩层破断步距可简化为两端固支梁模型进行计算, 则第 k 层硬岩的破断步距 L_k 为

$$L_k = h_k \sqrt{\frac{2R_k}{q_k}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中, h_k 为第 k 层硬岩层的厚度; R_k 为第 k 层硬岩层的抗拉强度; q_k 为第 k 层硬岩层承受的载荷。

③确定关键层的位置

按照式(3)确定硬岩层还须满足关键层强度条件, 即满足下层硬岩层的破断步距小于上层硬岩层

的破断步距, 即

$$l_j < l_{j+1} \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (4)$$

式中, l_j 为第 j 层岩层的破断步距; k 为由式(2)确定的硬岩层层数。

若第 j 层硬岩层不满足式(4), 则将第 $j+1$ 层硬岩层所控制的全部岩层载荷作用到第 k 层上, 重新计算第 k 层硬岩层破断步距后再继续判别。按照式(4)的原则, 由下往上逐层判别, 最终确定所有关键层位置。

根据上述原则, 假设覆岩中有 m 层硬岩层, 第 n 层为第1层硬岩层, 由下往上任取3层硬岩, 其破断步距分别为 l_{n+1} , l_{n+1} , l_{n+2} , 则确定关键层位置的流程^[21]如图3所示。

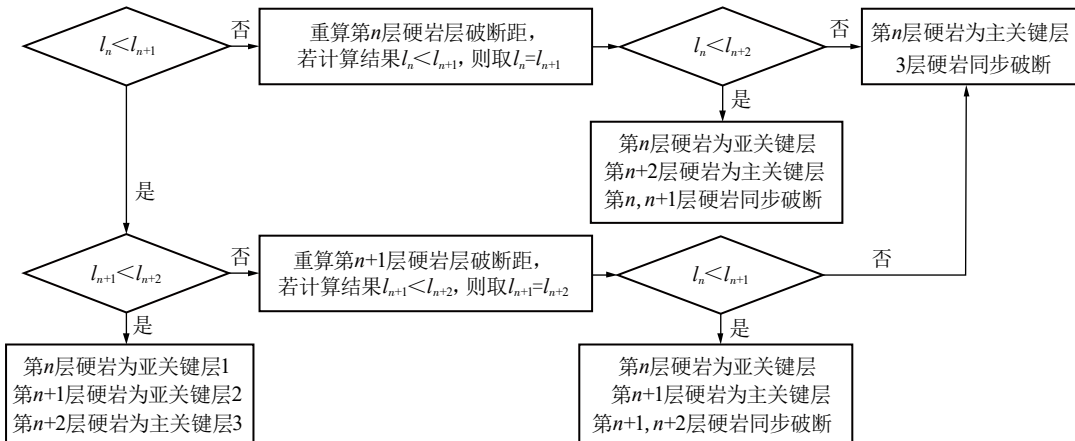


图3 m 层硬岩层时关键层及破断规律判别流程

Fig. 3 Flow chart for distinguishing key strata and breaking law of hard rock strata in m layer

④确定岩层发生复合破断的位置

由关键层理论可知, 一定条件下相邻两层硬岩层产生同步破断。若相邻两层硬岩层的载荷条件满足式(2), 其破断步距不满足式(4), 则会发生同步破断的现象, 即关键层复合破断。因此, 关键层发生复合破断的条件为

$$\begin{cases} (q_{n+1})_i < (q_n)_i \\ l_j \geq l_{j+1} \quad (j = 1, 2, \dots, k) \end{cases} \quad (5)$$

式中, l_j 为第 j 层岩层的破断步距; k 为由式(2)确定的硬岩层层数。

⑤确定关键层组

若所判识复合岩层包含一层关键层和若干坚硬岩层且满足复合破断规律, 则将复合岩层称为关键层组, 其物理力学参数由其组成岩层的参数等效替换。

2.2 关键层组复合破断规律

由关键层理论可知, 若关键层满足自身承载能力或其破断步距小于上层硬岩层时, 则坚硬岩层之间将会出现同步破断, 其上方软弱岩层与下方硬岩层发生同步变形。

根据上述判识方法, 对东滩煤矿六采区上覆岩层内关键层组划分并确定各关键层组相关参数, 具体情况见表1。

关键层组I: 关键层1(硬岩层2)与硬岩层3, 4发生复合破断, 距离煤层19.27 m, 厚度约为70.34 m;

关键层组II: 关键层2(硬岩层5)与硬岩层6发生复合破断, 距离煤层122.84 m, 厚度为112.99 m;

关键层组III: 关键层3(硬岩层7)与硬岩层8发生复合破断, 距离煤层264.65 m, 厚度为91.7 m;

关键层组IV: 关键层4(硬岩层9)与硬岩层10发生复合破断, 距离煤层379.56 m, 厚度为162.54 m。

表1 六采区覆岩分层情况及其破断特征判别结果

Table 1 Stratification of overlying strata and the discriminant results of its breaking characteristics in the sixth mining area

序号	岩性	厚度/m	容重/(N·m ⁻³)	弹性模量E/GPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	坚硬岩层情况	破断步距/m	破断情况	关键层组位置
36	表土层	123.16	23.618							
35	粉砂岩	11.15	25.676	7.24	16.24	1.08				
34	细砂岩	67.74	24.402	28.92	65.94	5.87	硬岩层10	164.10		
33	粉砂岩	11.05	23.030	21.01	85.60	8.17			复合破断	关键层组IV
32	细砂岩	83.75	24.402	15.52	78.87	7.82	硬岩层9	223.73		
31	粉砂岩	3.93	22.246	16.94	63.04	6.31				
30	细砂岩	4.15	22.344	20.23	76.56	7.91				
29	中砂岩	4.94	24.108	13.18	48.26	7.21				
28	砂泥岩互层	10.19	24.598	23.99	45.23	6.23				
27	细砂岩	63.13	24.598	16.62	28.45	2.24	硬岩层8	115.77		
26	中砂岩	4.70	23.520	10.91	46.16	2.96			复合破断	关键层组III
25	细砂岩	23.87	22.148	19.34	47.38	3.00	硬岩层7	120.56		
24	中砂岩	22.61	24.010	7.10	25.45	1.86				
23	细砂岩	6.21	21.266	19.00	43.04	2.83				
22	中砂岩	56.07	23.324	6.96	25.22	1.48	硬岩层6	73.54		
21	细砂岩	11.96	25.970	11.96	39.14	2.11				
20	粉砂岩	2.10	22.246	23.56	72.23	5.12			复合破断	关键层组II
19	细砂岩	42.86	24.206	9.67	35.23	2.09	硬岩层5	78.28		
18	砂泥岩互层	9.87	25.578	6.53	56.27	5.43				
17	粉砂岩	5.09	23.716	20.61	70.88	4.14				
16	细砂岩	9.05	24.794	12.26	37.89	2.98				
15	砂泥岩互层	9.22	25.284	13.80	54.87	2.47				
14	粉砂岩	19.53	25.284	30.13	103.01	5.98	硬岩层4	62.79		
13	粉细砂岩互层	3.10	25.284	30.13	103.01	6.65				
12	砂质泥岩	9.70	25.774	15.00	28.44	2.74				
11	粉砂岩	11.27	25.480	50.71	115.01	8.29	硬岩层3	64.17	复合破断	关键层组I
10	中砂岩	2.00	24.990	43.35	106.58	6.23				
9	细砂岩	1.70	25.284	35.51	103.21	8.63				
8	铝质泥岩	4.31	23.912	21.29	72.24	7.17				
7	中砂岩	18.73	25.578	20.79	60.06	3.93	硬岩层2	65.65		
6	粉细砂岩互层	3.90	25.578	24.23	74.88	6.46				
5	粉砂岩	5.13	25.382	24.23	74.88	6.46				
4	细砂岩	6.60	25.186	50.89	107.14	7.57	硬岩层1	46.77		
3	粉细砂岩互层	1.50	25.088	40.04	105.06	5.90				
2	泥岩	2.14		39.04	105.06	5.90				
1	3 _上 煤	5.35								

通过上述关键层组判别结果可知,东滩煤矿六采区地层赋存多个关键层组,每个关键层组均由一层关键层和若干坚硬岩层组成,相比单一关键层,关键层组复合破断具有破断步距大、破断周期长、破断释放能量大的特点。

3 厚硬岩层多工作面开采地表沉陷

为了研究巨厚坚硬岩层条件下综采多工作面

地表沉陷规律,沿六采区走向和倾斜方向布置多条地表移动观测线,测站间距25~30 m。

考虑到传统的水准仪测量在监测地表沉陷方面存在诸多不足,笔者采用监测频率高、响应快速、监测数据精准且全面的GNSS实时监测系统对63_上05和63_上06工作面各监测点进行地表移动变形观测。GNSS主要由基准站、测量站、传输网络和解算平台组成,通过基准站提供的差分信息,测量

站采集原始卫星数据, 传输给解算平台进行差分解算, 以提供精准位置信息, 具体原理如图4所示。

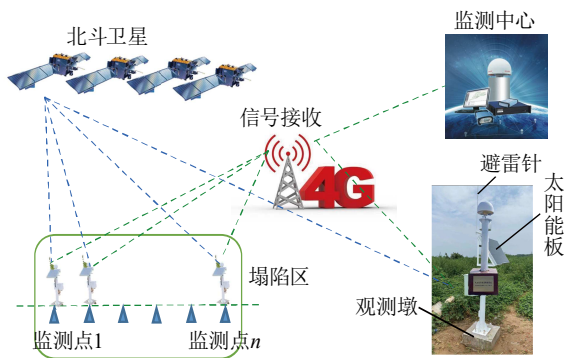


图4 GNSS实时在线监测原理

Fig. 4 Principle of GNSS real-time on-line monitoring

考虑到63_上05工作面上方存在大量农田, 在其区域内规律布置测站易遭到破坏, 难以保障监测的长期性和持续性, 因而测站位置多是根据现场实际情况综合确定, 以保证测站不受破坏; 测站布置的

差异性会对沉陷实测数据造成一定偏差, 通过邻近工作面沉陷数据校正对比发现, 该实测数据可满足实际分析需要。工作面测点布置如图1所示。地表移动测站具体布置为: 布置在63_上05工作面上走向方向的测点有Z13~Z15, Z26~Z28, Z35~Z44, Z50~Z65; 布置在63_上04工作面上的测点有Z16~Z23, Z29~Z32, Z45~Z49; 其余测站布置在63_上04工作面和63_上05工作面的交界处, 测站编号为Z24~Z25, Z33~Z34。63_上06工作面上的走向观测线主要布设在工作面中心线附近, 测站编号为W10~W66。在理论最大下沉位置布置与走向观测线垂直相交的倾向观测线, 测站编号为Q18~Q42。

3.1 63_上05工作面开采地表沉陷规律

63_上05工作面于2017年8月开始开采, 2018年8月结束, 期间对地表移动进行了34次观测。

图5为63_上05工作面走向线Z1~Z84测点地表下沉曲线。

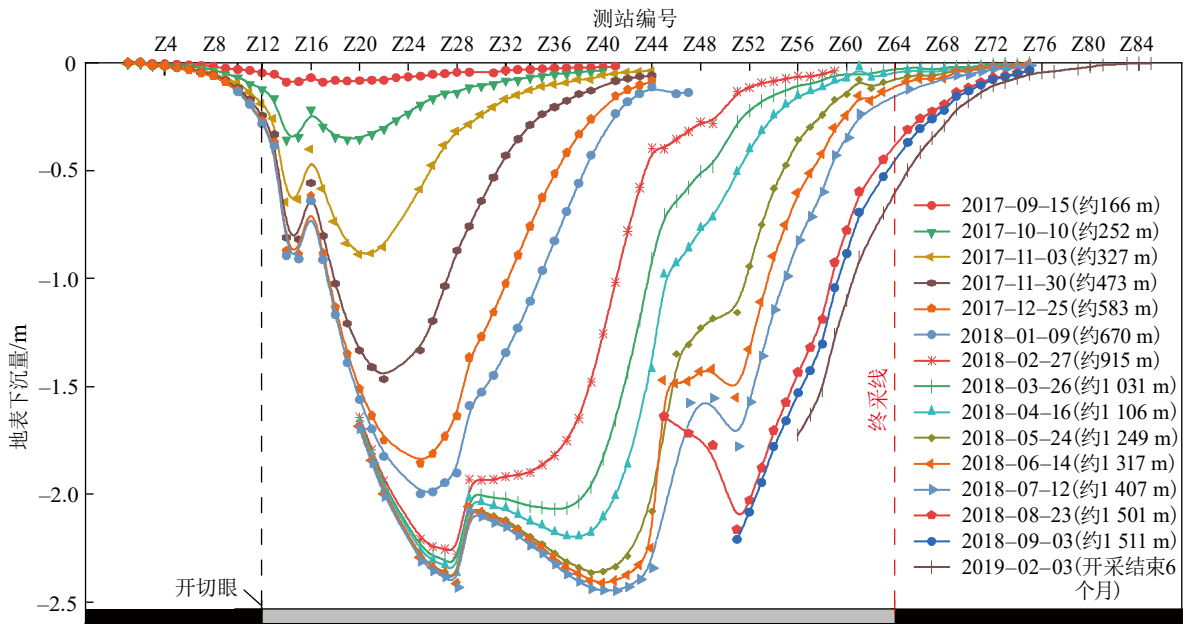


图5 63_上05工作面走向线Z1~Z84测点地表下沉曲线

Fig. 5 63_{upper_05} working face strike line Z1~Z84 survey point surface subsidence curves

由图5可知: ①在整个沉降过程中, 63_上05工作面下沉盆地未出现平底现象, 直至63_上05整个工作面开采结束, 工作面最大下沉量仅为2.45 m, 对应地表下沉系数仅为0.458, 下沉系数远小于该矿区平均地表下沉系数(0.75~0.85), 兖州矿区各矿的地表下沉系数见表2。需要说明的是, 63_上05工作面沿走向最大下沉值在Z44测点得到, 这是由于63_上04与63_上05工作面采空区贯通, 地表最大下沉区域邻近

63_上04采空区, 而非位于63_上05工作面中间。②因63_上04工作面未能提前布设监测点, 则无法得到实测数据, 根据矿方粗略估计, 63_上04工作面测点Z16, Z29的地表下沉值约为0.34, 1.01 m, 相应沉陷系数为0.064, 0.189; 63_上05工作面开采结束时, 两测点地表下沉值约为0.660, 1.787 m, 相应沉陷系数为0.123, 0.334, 分别增大0.059, 0.145, 这表明63_上04工作面在开采结束两年后, 地表沉降量仍然较小;

受相邻63_上05工作面开采造成的覆岩破断影响, 地表将继续下沉, 但仍未达到充分采动, 充分验证了厚硬岩层赋存对地表沉降有显著影响^[25]。③不同于常规地表呈现出的“U”字形下沉曲线, 63_上05工作面下沉曲线在Z16, Z29测点出现下沉量减小现象, 这主要与两测点布置在保护煤柱上有关; Z16, Z29测点位于63_上04工作面上方且安装时63_上04工作面已开采结束, 63_上05工作面开采过程中, 开采引发的覆岩运动主要对63_上05工作面上方测点造成影响, 对63_上04工作面采空区上方Z16, Z29两测点影响较小, 因而出现地表下沉量减小的现象。

表2 兖州矿区的地表下沉系数、开采深度、采厚与表土层厚度对比

Table 2 Comparison of surface subsidence coefficient, mining depth, mining thickness and topsoil thickness in Yanzhou mining area

观测站	平均采深/m	采厚/m	表土层厚度/m	地表下沉系数 q
鲍店1308 ^[22]	427	8.50	194	0.83
鲍店1310 ^[22]	409	8.70	180	0.82
鲍店1312 ^[22]	369	8.79	211	1.00
鲍店5304-1 ^[23]	289	2.90	190	1.35
兴隆庄5306 ^[22]	420	7.25	183	0.81
兴隆庄4314 ^[22]	325	8.32	197	0.84
济三63 _上 04 ^[24]	700	4.40	199	0.82
济三163 _上 00 ^[24]	631	5.17	193	0.74
济二号矿4302 ^[23]	610	2.58	186	0.82
杨村三采区 ^[23]	285	1.25	196	1.28
东滩14303 ^[23]	610	2.80	100	0.79

图6为63_上05工作面倾向线Q1~Q56测点地表下沉曲线。由图6可知: ①地表最大下沉值均出现在Q29测点附近, 监测到最大下沉量为2.54 m, 地表下沉系数为0.475, 下沉系数较小, 这是由于63_上05工作面上方存在多层关键层组, 在覆岩破断过程中能够起到“托板”作用, 限制了采场覆岩破坏高度的发展, 从而阻碍了地表的持续下沉。②63_上05工作面开采结束后, 倾向下沉系数大于走向下沉系数(0.475>0.454), 这是由于63_上05工作面最终地表下沉数据于2019年2月监测得到, 此时63_上03工作面已推采约198 m, 沿倾斜方向63_上03, 63_上04及63_上05多个工作面连续开采形成大范围采空区, 致使岩层破坏更加突出, 从而引起了更为显著的地表下沉。

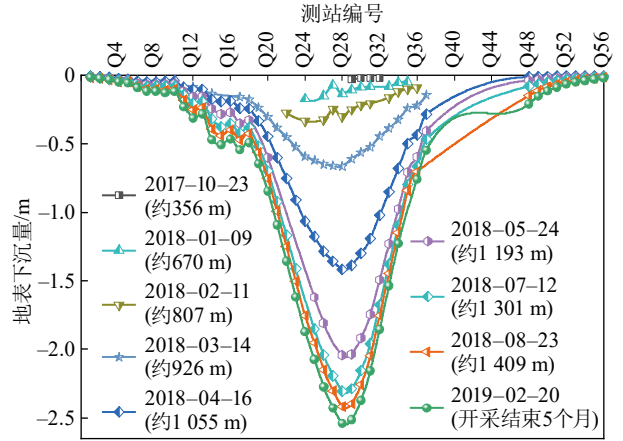


图6 63_上05工作面倾向线Q1~Q56测点地表下沉曲线
Fig. 6 63_{upper}05 working face inclination line Q1~Q56 survey point surface subsidence curves

3.2 63_上06工作面开采地表沉陷规律

63_上06工作面自2020-02-11开始开采, 至2022-06-30, 工作面已开采808.29 m, 期间经历多次长时间停采; 之后工作面一直处于停采状态延续至今。图7为63_上06工作面开采期间走向线W1~W50测点地表下沉曲线。

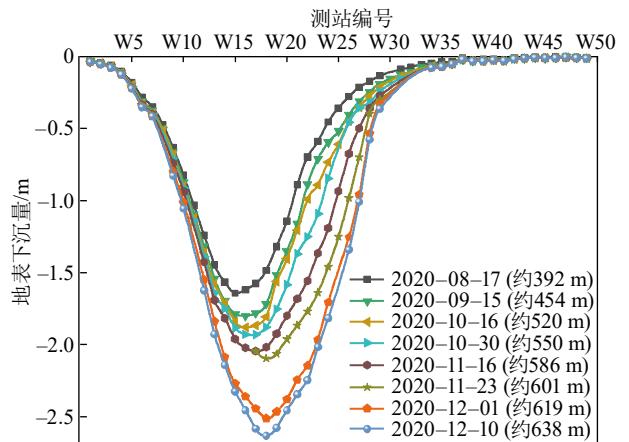


图7 63_上06工作面走向线W1~W50测点地表下沉曲线
Fig. 7 63_{upper}06 working face strike line W1~W50 survey point surface subsidence curves

由图7可知: ①2020-12-10, 监测地表最大下沉量出现在W18测点附近, 监测到最大下沉值为2.63 m, 地表下沉系数为0.492; 这也证实了63_上06工作面上方存在厚硬岩层, 致使63_上06工作面上方岩层未充分运动, 从而导致63_上06工作面地表未充分采动。②随着工作面的推进, 沉陷程度加深且范围逐渐扩大, 地表沉降盆地最大下沉点发生偏移, 向63_上06工作面沉陷中心移动, 这是由于63_上03, 63_上04, 63_上05多个工作面连续开采形成的大范围采

空区, 致使地表下沉影响范围更为显著, 从而引起沉陷中心向理论下沉值靠拢。

综合分析图5~7可知, 多工作面连续开采下的地表沉陷具有启动距大、下沉速度小、下沉量小等特点, 说明多关键层组的赋存对工作面地表下沉影响较大。

由表2分析可知, 兖州矿区其他矿井平均地表下沉系数为0.75~0.85, 远大于东滩煤矿63_上04~63_上06工作面的地表下沉系数, 说明了63_上04~63_上06工作面的地表沉陷程度较低, 同时也验证了多关键层组的赋存对其地表的影响比较突出。故可根据工作面上覆地表沉陷情况来推断岩层运动规律及影响范围, 并为工作面动力灾害防控提供基础。需要说明的是, 由于地层中赋存有多层厚硬岩层, 煤层开采造成的地表沉陷响应, 需要较长的时间才能充分显现; 同时考虑到工作面的实际情况, 63_上04工作面开采时间为2015-12—2016-12; 63_上05工作面开采时间为2017-08—2018-08; 63_上06工作面自2020年2月开始开采, 由于强矿震的原因, 至今只推进至距开切眼800 m左右处, 整个覆岩未能充分运动, 因此笔者得到的沉降数据并非最终下沉量。

4 多工作面开采强矿震时空分布特征

微震监测技术^[26]是一种通过监测岩石或地下结构受到应力变形和破裂时产生的微小震动信号来研究岩体稳定性的手段。通过在采场顶、底板内布置多组地震传感器, 全方位实时监测地下覆岩结构时空演化的全过程。根据矿震活动时空位置、震动能量和发生频次来推演开采活动引起的上覆岩层结构破坏特征, 揭示矿震事件与岩层运动的协同效应。

在东滩煤矿六采区3_上煤层开采过程中, 63_上04工作面发生大能量($E > 10^5$ J)震动事件39次; 63_上05工作面开采期间, 发生大能量($E > 10^5$ J)震动事件55次; 63_上06工作面目前共监测大能量($E > 10^5$ J)震动事件30次。

63_上04工作面剖面及水平面大能量强矿震事件如图8所示, 由图8可知, ①大能量($E > 10^5$ J)强矿震发生在63_上04工作面上方覆岩29次及63_上03工作面上方岩层10次。其中, 63_上04工作面 $10^5 < E < 10^6$ J强矿震出现6次, 占比15.4%; $E > 10^6$ J强矿震出现23次, 占比59%。63_上03工作面 $10^5 < E < 10^6$ J强矿震

出现3次, 占比7.7%; $E > 10^6$ J强矿震出现4次, 占比10.3%。②大能量($E > 10^5$ J)强矿震高度主要集中在埋深-430~-600 m区域, 距离3_上煤层82~252 m, 对应关键层组I, II层位(-563~-632 m, -434~-554 m)。

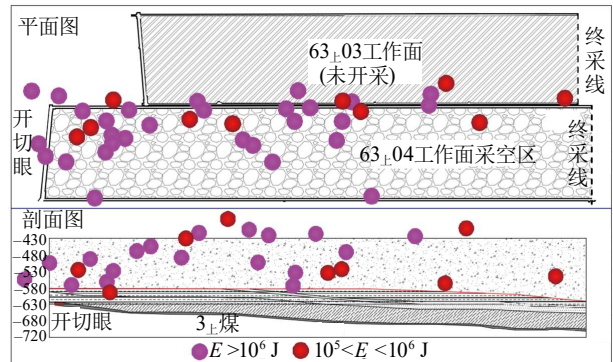


图8 63_上04工作面强矿震分布
Fig. 8 Distribution of strong mine earthquakes at 63_{upper}04 working face

图9为63_上05工作面剖面及水平面大能量强矿震事件。由图9可知, ①大能量($E > 10^5$ J)强矿震发生在63_上05工作面上方覆岩51次及63_上04工作面上方岩层4次。其中63_上05工作面 $10^5 < E < 10^6$ J强矿震出现13次, 占比23.6%; $10^6 < E < 10^7$ J强矿震出现41次, 占比74.6%; $E > 10^7$ J强矿震出现1次, 占比1.8%。63_上04工作面 $10^5 < E < 10^6$ J和 $10^6 < E < 10^7$ J强矿震均出现2次, 占比3.6%。②大能量($E > 10^5$ J)强矿震高度主要集中在埋深-410~-560 m区域, 距离3_上煤层122~272 m, 对应关键层组II, III层位(-434~-554 m, -301~-412 m)。③ $E > 10^7$ J强矿震, 震级大于3.0, 发生位置位于采空区上方顶板150 m处, 距离工作面465 m(关键层组II上方), 这正好解释了关键层组III上覆岩层的运移情况。

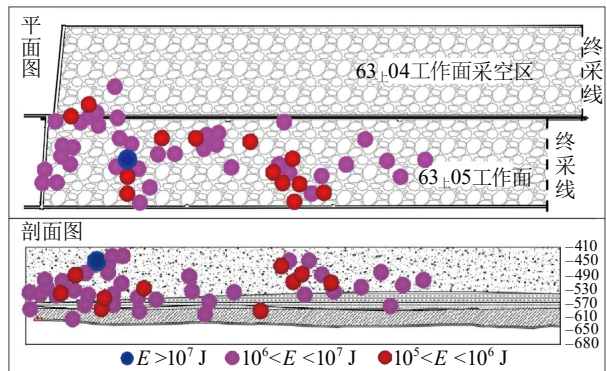


图9 63_上05工作面强矿震分布
Fig. 9 Distribution of strong mine earthquakes at 63_{upper}05 working face

图10为63_上06工作面剖面及水平面大能量强矿震事件。

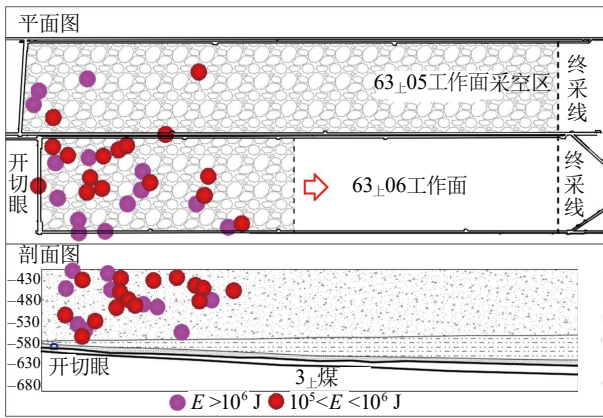


图 10 63_上06 工作面强矿震分布

Fig. 10 Distribution of strong mine earthquakes at 63_{upper}06 working face

由图10可知, ①推进至当前位置时, 63_上06工作面大能量($E > 10^5$ J)强矿震发生在63_上06工作面上方

覆岩25次及63_上05工作面上方岩层5次。其中63_上06工作面 $10^5 < E < 10^6$ J强矿震出现14次, 占比46.7%; $E > 10^6$ J强矿震出现11次, 占比36.7%。63_上05工作面 $10^5 < E < 10^6$ J强矿震出现2次, 占比6.7%; $E > 10^6$ J强矿震出现3次, 占比10%。②63_上06工作面大能量($E > 10^5$ J)强矿震高度主要集中在埋深-400~-550 m区域, 距离3_上煤层132~282 m, 对应关键层组II, III层位(-434~-554 m, -301~-412 m)。

综合分析图8~10可知, 随着63_上04, 63_上05, 63_上06工作面的连续开采, 其工作面上覆岩层的运移不可避免受到相邻工作面的影响, 即63_上04工作面、63_上05工作面、63_上06工作面依次开采时, 采动范围和开采程度逐渐增大, 相邻工作面上方的覆岩也会发生大能量强矿震($E > 10^5$ J); 强矿震发生频次及震级逐渐增大, 层位也由低位关键层组逐渐向高位转移^[27]。多工作面连续开采下大能量强矿震具体情况详见表3。

表3 多工作面连续开采下大能量强矿震具体情况

Table 3 Specific conditions of large energy and strong mine earthquakes under continuous mining of multiple working faces

时间段	工作面强矿震($E > 10^5$ J)发生频次				强矿震能级			强矿震($E > 10^5$ J)发生位置	对应关键层组位置
	63 _上 03	63 _上 04	63 _上 05	63 _上 06	$10^5 < E < 10^6$ J	$10^6 < E < 10^7$ J	$E > 10^7$ J		
63 _上 04工作面开采期间	10	29	0	0	6	23	0	-430~-600 m	关键层组I, II
63 _上 05工作面开采期间	0	4	51	0	13	41	1	-410~-560 m	关键层组II, III
63 _上 06工作面开采至808.29 m	0	0	5	25	14	11	0	-400~-550 m	关键层组II, III

5 地表沉陷与强矿震的联动效应

通过分析63_上04, 63_上05, 63_上06工作面推进时的大能量强矿震的层位、能级和峰值及地表沉陷规律, 推断得到东滩煤矿六采区多工作面连续开采下关键层组的运移演化过程。多工作面连续开采下关键层组运移演化过程如图11所示。

(1)63_上04工作面开采期间

63_上04工作面大能量强矿震主要集中在关键层组I, II层位(-563~-632 m, -434~-554 m)区域, 由此可以推断, 63_上04工作面开采结束后, 岩层最大破坏拱高度至关键层组II层位下方。由矿压理论可知, 此阶段, 关键层组I在充分破断后呈“铰接”结构状态, 而关键层组II破断不充分, 其破坏形态呈“断悬”结构, 如图11(a)所示。由于关键层组II不充分破断, 且关键层组III, IV仍能保持较好的完整性, 不发生破断, 因而63_上04工作面开采结束后, 地

表无明显沉降, 地表下沉系数仅为0.189。

(2)63_上05工作面开采期间

63_上05工作面大能量强矿震主要集中在关键层组II, III层位(-434~-554 m, -301~-412 m)附近, 由此可以推断, 63_上04, 63_上05双工作面开采结束后, 岩层破裂拱高度及范围向上发展, 最大破坏高度至关键层组III下方, 关键层组II形态由“断悬”结构转化为充分破断后的“铰接”结构, 关键层组III则呈“断悬”结构, 如图11(b)所示。关键层组III与关键层组IV仍能一定程度阻碍上覆岩层运移及地表下沉, 因而, 63_上05工作面开采后地表下沉系数有一定程度的增大, 但最大值也仅为0.475。

(3)63_上06工作面开采期间

63_上06工作面大能量强矿震主要分布在关键层组II, III层位(-434~-554 m, -301~-412 m)附近, 由于63_上06工作面多次停采, 覆岩无法规律活动, 强矿震($E > 10^5$ J或 $E > 10^6$ J)的次数比63_上05工作面相

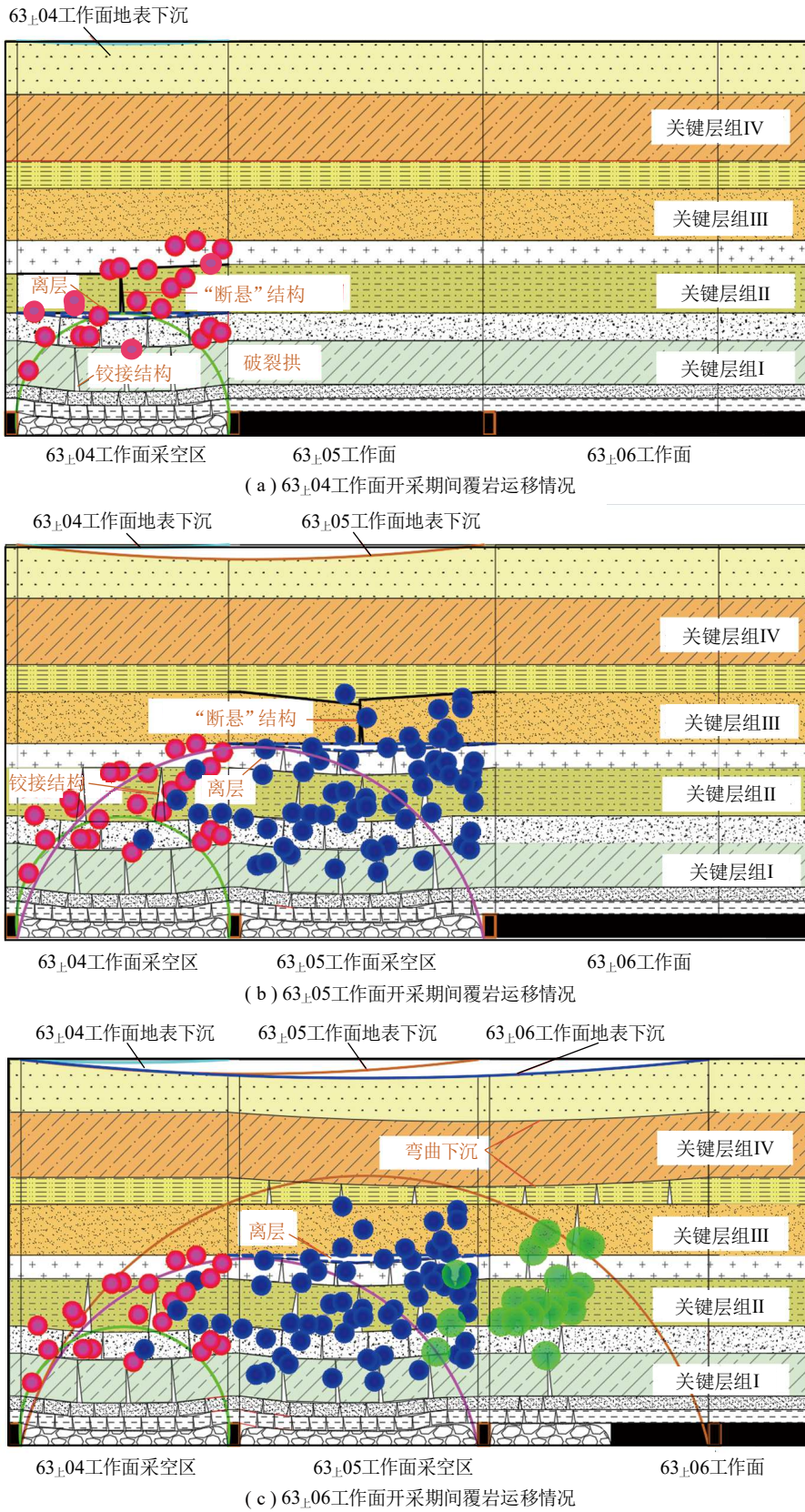


图 11 多工作面连续开采下关键层组运移演化过程

Fig. 11 Migration and evolution process of key strata under continuous mining of multiple working faces

对较少。由此可以推测,随着63₀₄, 63₀₅, 63₀₆工作面的连续开采,覆岩破坏拱高度和范围逐渐增

大,最大破坏高度至关键层组IV层位附近。关键层组III由“断悬”结构转为“铰接”结构;由于关键

层组IV距离地表较近、完整性好、强度高, 其在上覆岩层的高静载及下方破断传递的能量和应力作用下, 仅发生弯曲下沉, 如图11(c)所示。由上述可知, 63_上06工作面地表下沉系数为0.492, 这验证了63_上06工作面多关键层组赋存对其产生的影响。

综上分析可知: 随着63_上04, 63_上05, 63_上06工作面的连续开采, 覆岩破裂高度逐渐增大, 多关键层组破断呈现“断悬-铰接”结构交替上升、逐层演化的过程, 在此过程中, 大能量强矿震的分布高度和范围呈逐渐增大的趋势, 地表下沉系数逐渐增大, 具有较为直接的联动关系。

6 结论

(1)由关键层理论及复合破断可知, 东滩煤矿六采区地层可以划分为4个关键层组, 每个关键层组由一层关键层和若干坚硬岩层复合而成, 相比单一关键层, 关键层组发生复合破断时的破断步距更大, 特别是关键层组II, III的破断对工作面上覆岩层运移及地表沉陷的影响较为突出。

(2)综合分析东滩煤矿六采区多工作面连续开采下的地表沉陷数据可知, 63_上04, 63_上05, 63_上06工作面的地表下沉系数依次为0.189, 0.458, 0.492, 远小于该矿区平均地表下沉系数(0.75~0.85), 地表未达到充分采动, 证明了3_上煤层上方多关键层组的赋存对地表沉陷的抑制作用。

(3)大能量强矿震监测结果表明, 63_上04工作面开采时, 大能量强矿震主要集中在低位关键层组I, II层位, 随着多工作面连续开采, 低位大能量强矿震逐渐向高位转移, 逐渐集中至关键层组II, III层位。

(4)六采区多工作面连续开采下多关键层组复合式破断呈“断悬-铰接”结构交替上升, 逐层演化的过程, 揭示了覆岩运动、地表沉陷及大能量强矿震三者之间的联动响应。

参考文献(References):

[1] 荣海, 于世棋, 王雅迪, 等. 坚硬覆岩的结构失稳运动规律及其对冲击地压的影响[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(6): 063026.
RONG Hai, YU Shiqi, WANG Yadi, et al. Analysis of structural instability movement of hard overburden and its influence mechanism on rockburst[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(6): 063026.

[2] 张明, 姜福兴, 陈广尧, 等. 基于厚硬岩层运动状态的采场应力转移模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1396-1407.
ZHANG Ming, JIANG Fuxing, CHEN Guangyao, et al. A stope stress transfer model based on the motion state of thick and hard rock layers and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(7): 1396-1407.

[3] 陈玉涛. 邻正断层不规则孤岛工作面冲击危险性评估方法研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(6): 118-122, 129.
CHEN Yutao. Study on impact risk assessment method of irregular island working face of adjacent positive fault[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(6): 118-122, 129.

[4] 蒋金泉, 张开智. 综放开采矿震的成因及防治对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 3276-3282.
JIANG Jinquan, ZHANG Kaizhi. Cause and control method of mine earthquake in fully mechanized top coal caving mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3276-3282.

[5] 张海洋, 李小明, 孙利辉. 大倾角煤层开采地表沉陷规律研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(6): 108-112.
ZHANG Haiyang, LI Xiaomeng, SUN Lihui. Regulation of surface subsidence over mining coal seam with large dip angle[J]. Coal Engineering, 2022, 54(6): 108-112.

[6] 陈绍杰, 刘瑞, 徐贞社, 等. 不同覆岩地层正断层下盘煤层开采地表下沉规律[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(1): 38-48.
CHEN Shaojie, LIU Rui, XU Zhenshe, et al. Surface subsidence laws of footwall coal seam mining of normal fault under different overburden strata[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2023, 42(1): 38-48.

[7] 冯泽伟, 浮耀坤, 胡振琪, 等. 陕北风积沙区超长工作面地表移动变形特征研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(7): 120-125.
FENG Zewei, FU Yaokun, HU Zhenqi, et al. Characteristics of surface movement and deformation of super-long working face in eolian sand region in Northern Shaanxi[J]. Coal Engineering, 2023, 55(7): 120-125.

[8] 蒋旭梓, 李新举, 闵祥宇, 等. 济宁井工矿区不同开采条件对沉陷阶段的影响[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(6): 063028.
JIANG Xuzi, LI Xinju, MIN Xiangyu, et al. Influence of different underground mining conditions on the ground surface subsidence in the Jining coal district[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(6): 063028.

[9] 郭惟嘉, 孙文斌. 强冲击地压矿井地表非连续移动变

- 形特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3514–3519.
- GUO Weijia, SUN Wenbin. Surface discontinuous movement and deformation characteristics of strong rockburst mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2): 3514–3519.
- [10] 李永靖, 张向东, 兰常玉, 等. 矿山地下岩层移动变形用于预测矿震的研究[J]. 中国矿业, 2005, 14(10): 66–68.
- LI Yongjing, ZHANG Xiangdong, LAN Changyu, et al. The moving deformation of underground mining bed on the study of pre-estimation on mineral earthquake[J]. China Mining Magazine, 2005, 14(10): 66–68.
- [11] 曹安业, 赵书宁, 孙伟, 等. 不规则工作面开采矿震活动规律及其致冲风险控制研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(7): 1–10.
- ANYE CAO, ZHAO Shuning, SUN wei, et al. Research on law of shock bump activity in irregular face and control of inducing rock burst risk[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(7): 1–10.
- [12] 王乃国, 朱斯陶, 王慧涛, 等. 深厚表土薄基岩综放工作面地表沉陷与冲击地压联动效应研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(2): 214–219.
- WANG Naiguo, ZHU Sitao, WANG Huitao, et al. Connected effect between surface subsidence and rock burst in fully mechanized caving face under deep alluvium[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(2): 214–219.
- [13] 唐巨鹏, 潘一山, 徐方军. 根据地表下沉预测冲击地压的研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 2002, 19(3): 107–108, 118.
- TANG Jupeng, PAN Yishan, XU Fangjun. Study on predicting rock burst according surface subsidence[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2002, 19(3): 107–108, 118.
- [14] 张广超, 曲治, 孟祥军, 等. 远场高位厚硬岩层破断运动机理及响应规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(11): 12–22.
- ZHANG Guangchao, QU Zhi, MENG Xiangjun, et al. Study on mechanism and response of fracture and movement of the far-field high-position hard-and-hick stratum[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(11): 12–22.
- [15] 郭惟嘉, 孔令海, 陈绍杰, 等. 岩层及地表移动与冲击地压相关性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 447–451.
- GUO Weijia, KONG Linghai, CHEN Shaojie, et al. Correlation between rock burst and movement of strata and ground surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 447–451.
- [16] 任文涛, 郭鹏慧, 曲柱, 等. 不同能级矿震波对深部盘区大巷围岩扰动效应[J]. 煤矿安全, 2023, 54(7): 11–18.
- REN Wentao, GUO Penghui, QU Zhu, et al. Disturbance effect of shock bump waves with different energy levels on surrounding rock of deep roadway[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(7): 11–18.
- [17] 左建平, 孙运江, 钱鸣高. 厚松散层覆岩移动机理及“类双曲线”模型[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1372–1379.
- ZUO Jianping, SUN Yunjiang, QIAN Minggao. Movement mechanism and analogous hyperbola model of overlying strata with thick alluvium[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1372–1379.
- [18] 王桂利, 孙文杰, 赵猛, 等. 深部临空巨厚坚硬顶板断裂矿震规律及成因研究[J]. 能源与环境, 2021, 43(10): 300–305.
- WANG Guili, SUN Wenjie, ZHAO Meng, et al. Study on law and cause of mine earthquake with huge thick and hard roof in deep space[J]. China Energy and Environmental Protection, 2021, 43(10): 300–305.
- [19] 李春意, 李彦辉, 梁为民, 等. 大采深巨厚砾岩综放开采地表沉陷规律[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2013, 32(6): 703–708.
- LI Chunyi, LI Yanhui, LIANG Weimin, et al. Research on surface subsidence law under condition of deep mining with thick overburden conglomerate based on field measurement datum[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2013, 32(6): 703–708.
- [20] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- QIAN Minggao, SHI Pingwu, XU Jialin. Mine pressure and rock formation control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010.
- [21] 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): 21–25.
- XU Jialin, QIAN Minggao. Method to distinguish key strata in overburden[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2000, 29(5): 21–25.
- [22] 谭志祥, 邓喀中. 综放面地表变形预计参数综合分析及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1041–1047.
- TAN Zhixiang, DENG Kazhong. Comprehensive analysis and application study on ground deformation prediction parameters of fully-mechanized mining with sublevel caving[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1041–1047.
- [23] 顾伟. 厚松散层下开采覆岩及地表移动规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- GU Wei. Study on laws of overburden and surface movement when mining under thick alluvium[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.

- [24] 蒋乾. 济宁矿区厚松散层下开采地表沉陷规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
JIANG Qian Research on surface subsidence law during mining under thick and loose layers in Jining mining area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [25] 李晓斌, 李全生, 韩鹏华, 等. 高强度开采地表损伤程度分类判别与控制研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(3): 033014.
LI Xiaobin, LI Quansheng, HAN Penghua, et al. Identification of surface damage degree in high-intensity mining and control technologies[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(3): 033014.
- [26] 田向辉, 李振雷, 宋大钊, 等. 某冲击地压频发工作面微震冲击前兆信息特征及预警方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2471–2482.
TIAN Xianghui, LI Zhenlei, SONG Dazhao, et al. Study on microseismic precursors and early warning methods of rockbursts in a working face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(12): 2471–2482.
- [27] 蒋金泉, 张培鹏, 聂礼生, 等. 高位硬厚岩层破断规律及其动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1366–1374.
JIANG Jinquan, ZHANG Peipeng, NIE Lisheng, et al. Fracturing and dynamic response of high and thick stratas of hard rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1366–1374.