

文章编号: 1673-3363-(2022)06-1143-11

多煤层时空协调开采模式与岩层控制机理

阎跃观, 朱元昊, 戴华阳, 张琰君, 代安进, 李明

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要 针对黄河流域中下游矿井多煤层的赋存特点,基于资源与生态、人居环境绿色发展的理念,提出了基于煤柱法向错距变化和煤柱空间形态变化的多煤层时空协调开采模式。以山东某矿的地质采矿条件为研究背景,通过数值模拟计算和岩体力学结构分析,研究多煤层时空协调开采地表移动规律和岩层控制机理。主要结论如下:随煤柱错距系数和开采层数的增加,地表下沉加大,当错距系数大于0.75时,地表下沉和水平移动受煤柱错距变化影响较小,各布局模式中,“正梯形煤柱”布局总采出率减小,柱充联合体的稳定性和垮落区的隔离效果增加,对地表移动的控制效果较好;多煤层时空协调开采地表下沉率与煤柱错距系数及煤柱宽度均呈乘幂函数关系,并建立了本区基于采深、煤柱法向错距和煤柱宽度的多煤层时空协调开采地表下沉率的拟合经验公式;揭示了多煤层时空协调开采岩层控制机理。通过多组开采单元协同作用,形成柱充联合体的有效承载结构以减小主关键层的移动空间,保证主关键层不破断,控制地表沉降;多煤层时空协调开采地表下沉率介于0.20~0.32之间,水平移动系数约为0.09,总采出率可达70%左右,相比多煤层条带开采,采出率提升约30%~40%。多煤层时空协调开采模式,既保证了资源采出率,又能有效地控制岩层和地表移动,为黄河流域多煤层矿区带压煤炭资源的绿色开采提供了一项经济可靠、资源损失率小的技术选择。

关键词 多煤层开采; 时空协调; 岩层控制; 煤柱错距系数; 煤柱空间形态

中图分类号 TD 325

文献标志码 A

DOI 10.13545/j.cnki.jmse.2021.0425

Spatio-temporal coordinated mining pattern and strata control mechanism of multiple coal seams

YAN Yueguan, ZHU Yuanhao, DAI Huayang, ZHANG Yanjun, DAI Anjin, LI Ming

(School of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract Aiming at the occurrence characteristics of multiple coal seams mines in the middle and lower reaches of the Yellow River Basin, and based on resources and ecology, green development of human settlements, a spatio-temporal coordinated mining pattern of multiple coal seams based on the change of normal offset distance distance and spatial patterns of coal pillars. Taking the geological and mining conditions of a mine in Shandong as the research background, through numerical simulation and rock mechanical structure analysis, the surface movement law and rock strata control mechanism of multi-seam spatio-temporal coordinated mining were studied. The main conclusions were as follows: the surface subsidence increased with the increase of the coal pillar offset coefficient and the number of coal mining lay-

收稿日期: 2021-08-30

责任编辑: 侯世松

基金项目: 国家自然科学基金项目(51574242, 51404272)

作者简介: 阎跃观(1981—),男,山西省太原市人,副教授,工学博士,硕士生导师,从事开采沉陷、大地测量、变形监测等方面的研究。

通信作者: 朱元昊

E-mail: zhuyuanhao2020@163.com

Tel: 18810108470

ers, When the coal pillar offset coefficient $s > 0.75$, the surface subsidence and horizontal movement were less affected by the change of coal pillars offset distance. In each layout mode, the total recovery rate of "Positive trapezoidal coal pillar" layout was reduced, while the stability of pillar filling combination and the isolation effect of collapse area were increased, and the control effect of surface movement was better. The subsidence rate of coordinated mining had a power function relationship both with the spatio-temporal coordination distance coefficient and the width of coal pillars, respectively. Based on mining depth, coal pillars offset distance and the width of pillars, a fit empirical formula of the subsidence rate for multi-seam spatio-temporal coordinated mining was established, and the rock control mechanism of spatio-temporal coordinated mining was revealed. That is through the synergistic action of multiple groups of mining units to form effective bearing structure of pillar filling combination, which can reduce the movement space of main key stratum to ensure the primary key stratum is not broken and reduce surface subsidence. The subsidence rate of spatio-temporal coordinated mining was in the range of 0.20~0.32, the horizontal movement coefficient was approximately 0.09, and the recovery rate reached about 70% which increased about 30%~40% compared with multiple coal seams strip mining. This model can ensure high recovery rate and control rock and surface movement effectively, providing an economical and reliable technology with low resource loss rate for green mining of pressed coal in multiple coal seams mining in the Yellow River Basin.

Key words multiple coal seams mining; spatio-temporal coordination; rock strata control; coal pillar offset coefficient; spatial pattern of coal pillar

黄河流域煤炭资源丰富,是我国最重要的煤炭生产基地,同时也是我国重要的生态屏障^[1]。但是大量煤炭资源的开采不可避免地引发了一系列生态环境损伤和人居环境破坏问题,特别是多煤层开采重复扰动、持续时间长、破坏性大,对当地人居和生态环境均产生较大的负面影响^[2]。源头减沉控损开采与环境后期治理是保证黄河流域地区人居和生态环境绿色可持续发展的关键所在,而前者是最直接、最重要的技术途径。

为此国内外很多学者都进行了相关的研究工作。源头减沉控损开采的本质就是利用“三下”采煤技术进行岩层控制,主要包括条带开采、充填开采和协调开采。

条带开采作为一种部分开采技术^[3],沉陷控制效果较好,应用广泛。吴立新等^[4]提出了一种基于托板理论的条带开采沉陷预计方法;邹友峰^[5]提出了条带开采三维层状介质理论和地表移动控制的主控因素,并建立了条带开采的弹性力学模型;王旭春等^[6]针对 A. H. 威尔逊设计理论应用的局限性,给出了不受地质采矿条件约束的计算公式;郭文兵^[7]针对深部大采宽条带开采的特点,提出了全采多工作面概率积分叠加预计方法,能更准确预计深部条带开采地表移动和变形;于洋等^[8-9]建立了条带煤柱非均匀剥离模型,并提出了条带煤柱长期稳定性现场评价方法。条带开采同时也是多煤层开采主要的技术手段,邓喀中等^[10-11]对多煤层煤柱

空间位置等因素与岩层和地表移动间关系进行研究,并给出相应的函数关系式;张俊英^[12]采用相似模拟和数值模拟试验相结合的方法,揭示了多煤层条带开采过程覆岩和地表移动变形规律;胡炳南^[13]提出了煤层群条带开采的最小采动影响原则、条带布置设计和参数计算原则;王冰等^[14]提出了煤层错动系数的概念,并指出了在实际多煤层条带开采时,极限煤层错动系数的求取方法。

充填开采作为“三下”压煤的“置换”开采技术^[15],能有效缓解地表沉陷和变形。在充填材料的选择方面,冯光明等^[16-17]对超高水充填工艺及袋式充填法进行研究;郭惟嘉等^[18]分析膏体充填开采顶板运动特征,并对充填体的承载特性及工作面支护强度进行研究;张吉雄等^[19]基于井下分选,构建了煤矸石井下分选原位充填开采模式;郭广礼等^[20]提出了“条带开采-注浆充填固结采空区-剩余条带开采”的三步法开采沉陷控制的新思路;基于充填位置和充填材料要素变化,许家林等^[21-22]提出采空区膏体条带充填技术、覆岩离层分区隔离注浆充填技术和条带开采冒落区注浆充填技术,并结合关键层理论,揭示了部分充填开采岩层的控制机理。

协调开采作为一种宽泛的岩层移动时空控制理念^[23],方式多样,技术要求高。余学义等^[24]基于协调减损的原理,制定了局部限高协调开采方案,并成功指导河流下安全开采;戴华阳等^[25-26]提出“采-充-留”耦合协调开采技术,并给出地表非充分

开采预计公式。

综上所述,条带开采资源采出率低,充填开采成本高,覆岩控制的可靠性有待提高,协调开采虽具有一定的技术优势,但多见于单煤层的应用。然而黄河中下游大多数生产矿井均具有多层煤层的赋存特征,地面建筑物繁多。在首层煤开采完成后,矿井面临着建筑物受下层煤组重复开采扰动的问题。如何合理布局下煤层组开采方案,实现岩层和地表的有效控制,减小对建筑物的扰动程度,值得探讨。显然,现有的岩层控制技术难以满足现阶段多煤层复杂条件下矿区煤炭经济发展与人居、生态环境保护相协调的要求。因此本文基于多煤层开采的特点及煤层间煤柱、充填工作面 and 垮落工作面的空间位置关系,以黄河中下游某矿多煤层地质采矿条件为研究对象,进行时空协调开采模式与岩层控制机理研究。

1 多煤层时空协调开采理念与模式

1.1 技术理念

多煤层时空协调开采技术是在单煤层协调开采的基础上,考虑多煤层重复采动效应和布局模式的环境减损技术。其技术理念主要在于解决上下煤层之间的煤柱、充填工作面和垮落工作面的空间位置关系和开采时序问题,从而达到既能提高资源采出率,又能实现保护人居和生态环境的目标,主

要技术思路为:

1) 采用煤柱+充填联合体协同支撑进行岩层控制。多煤层时空协调开采技术充分利用了现有的岩层与地表移动控制方法,在采区内布设多组相邻垮落工作面、充填工作面和煤柱的开采单元,如图 1 (a)所示。在多煤层的采充布局下,预留的煤柱和充填体耦合形成柱充联合体,通过煤层间的协同作用,形成对覆岩的有效支撑。多个充采区(单元内邻接的垮落工作面和充填工作面)形成各自独立的极不充分开采单元,并保证总体开采程度为非充分开采,减缓地表的采动影响。

2) 通过多煤层时空协调开采实现人居和生态环境保护的目标。“三下”多煤层开采存在重复扰动的现象,结合地表受护对象的位置和特点,通过合理设计上下煤层之间煤柱、充填工作面和垮落工作面的布局模式和开采顺序,实现同组开采单元内充采区协调开采,柱充联合体协同支撑,上下煤层多组开采单元的协调变形,达到控制“两带”发育高度,保证隔水岩组和关键层不破断,从而保护含水层,减缓岩层和地表沉降,实现保护人居和生态环境的目标,如图 1 (b)所示。

3) 经济可行、资源损失率小。多煤层时空协调开采属于部分开采、部分充填,留设窄煤柱的开采方法,采出率相对于多煤层条带开采有所提高,面积充填率和充填成本相对于全采全充有所降低。

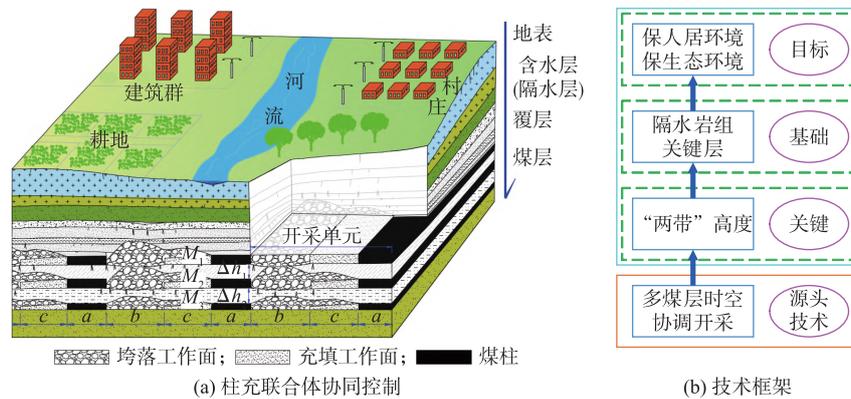


图 1 多煤层时空协调开采模式控制理念

Fig. 1 Control concept of spatiotemporal coordinated mining mode in multiple coal seams

1.2 开采布局模式

煤矿开采中,人为开采因素包括采宽、采厚、顶板管理方法和工作面推进速度等。本文将多煤层开采单元垮落工作面、充填工作面、煤柱的空间位置关系和开采时序定义为多煤层时空协调开采布局模式。多煤层时空协调开采布局以首层煤为基础,以煤层间开采单元的煤柱空间分布为基准,综

合考虑开采充分性、矿山压力及煤柱稳定性,分别构建基于煤柱法向错距变化和煤柱空间形态变化的开采布局模式。

1.2.1 基于煤柱法向错距变化的布局模式

1) 布局模式

基于矿山压力显现规律和开采充分性的特点,多煤层时空协调开采布局按照煤柱法向错距的不

同,可分为:煤柱法向对齐、煤柱部分错开、煤柱完全错开,具体布置方式如图 2 所示。

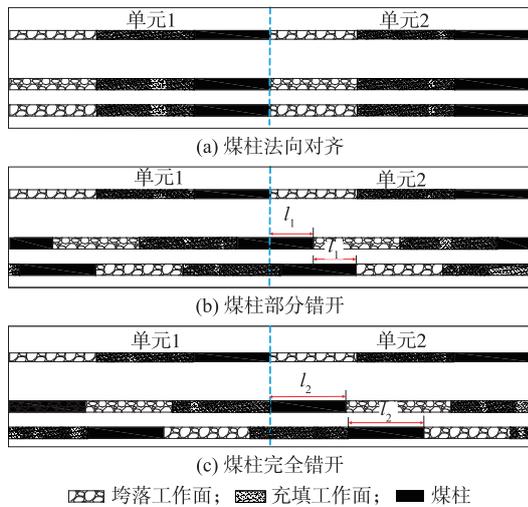


图 2 基于煤柱法向错距的布局模式示意图

Fig. 2 Layout mode diagram based on normal stagger distance of coal pillar

由图 2 可知,煤柱法向对齐布局模式,其特征在于,多层煤的煤柱、充填工作面、垮落工作面均沿煤层法向方向对齐;煤柱部分错开布局模式中,多层煤的煤柱、充填工作面、垮落工作面均较上层煤横向偏出不足一个煤柱宽度;煤柱完全错开布局模式中,多层煤的煤柱、垮落工作面和充填工作面均较上层煤层横向偏出一个煤柱宽度。为了研究方便,将布局模式中的错距程度用煤柱错距系数 s 表示, s 为煤柱法向错距 l 与煤柱宽 a 的比值,即 $s = \frac{l}{a} \in [0,1]$,其数值大小代表了上下煤层间煤柱的错开程度。

2) 尺寸确定方法

基于煤柱法向错距变化的布局模式中,各煤层的煤柱、充填工作面和垮落工作面的尺寸均与首层煤相同,布置位置沿煤层面做相应调整。首层煤开采单元各工作面尺寸的确定可参考文献[25,27]。

1.2.2 基于煤柱空间形态变化的布局模式

1) 布局模式

基于煤柱空间形态变化的布局模式,考虑到多层煤柱充联合体整体的稳定性,在煤柱法向对齐的基础上,按照上下煤层开采单元煤柱宽度的不同,可分为“正梯形煤柱”布局和“倒梯形煤柱”布局。“正梯形煤柱”布局中各层煤柱以一定的角度,从上层煤到下层煤宽度依次增大,总煤柱率增加,充填率和采出率减小,多煤柱充联合体的覆岩支撑效

果更好;“倒梯形煤柱”布局中各层煤柱以一定的角度从上层煤到下层煤宽度依次减小,煤柱减小的同时增大了相邻垮落面和充填面宽度,但仍以保证多层煤柱充联合体整体稳定性为前提,如图 3 所示。其中煤柱尺寸变化角度可由能较好反映本区地质采矿特点的移动角 δ 计算确定,见式(1):

$$\theta = 45^\circ - \frac{\delta}{2} \quad (1)$$

式中 θ 为岩层破裂迹线角,其值主要与采深及煤间岩层岩性有关,其中采深越小、煤间岩性越硬, θ 值越小,反之亦然。

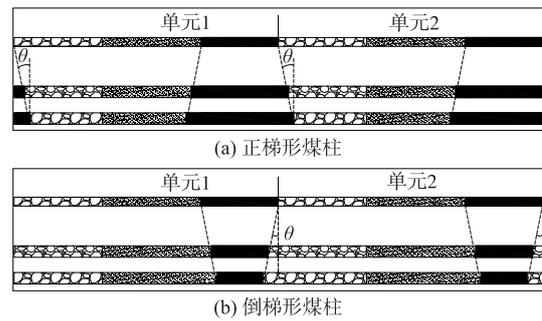


图 3 基于煤柱空间形态的布局模式示意图

Fig. 3 Layout mode diagram based on spatial shape of coal pillar

2) 尺寸确定方法

基于煤柱空间形态变化的布局模式,首层以下各煤层的煤柱、充填工作面和垮落工作面尺寸由下式计算:

“正梯形煤柱”布局

$$a_i = a_{i-1} + 2\Delta h_{i-1} \tan \theta \quad (2)$$

$$b_i = b_{i-1} - \Delta h_{i-1} \tan \theta \quad (3)$$

$$c_i = c_{i-1} - \Delta h_{i-1} \tan \theta \quad (4)$$

“倒梯形煤柱”布局

$$a_i = a_{i-1} - 2\Delta h_{i-1} \tan \theta \quad (5)$$

$$b_i = b_{i-1} + \Delta h_{i-1} \tan \theta \quad (6)$$

$$c_i = c_{i-1} + \Delta h_{i-1} \tan \theta \quad (7)$$

式中: a_i 为第 i 层煤的煤柱宽度; b_i 为垮落面宽度; c_i 为充填面宽度; Δh_{i-1} 为第 $i-1$ 层与第 i 层煤的间距; $i = 2, 3, \dots, n$ 。

此时煤层间距对布局模式的影响存在两个临界值:

① 当煤层间距过小,下煤层的垮落带与上煤层采空区连通,布局模式对覆岩移动影响较小,即保证煤层间距 $\Delta h_{i-1} > H_{垮} = k_r M_i$,其中 M 为煤层采厚, k_r 为与层间岩性有关的参数,中硬岩性时一般取 3~5;

② 当煤层间距过大时,倒梯形煤柱布局煤层煤柱宽度减小较快,要保证柱充联合体整体稳定性,需控制下层煤煤柱宽度大于多煤层开采该层煤柱临界破坏宽度,即 $a_i > a_{\text{临}i}$,且 $a_{\text{临}i}$ 可通过数值模拟试验获得。

1.2.3 多煤层时空协调开采参量计算

根据各煤层煤柱、充填工作面和垮落工作面尺寸,计算多煤层时空协调开采布局方法相关参量。

总面积充填率为:

$$\eta_c = \frac{\sum_{i=1}^m c_i}{\sum_{i=1}^m (a_i + b_i + c_i)} \times 100\% \quad (8)$$

总煤柱率为:

$$\eta_a = \frac{\sum_{i=1}^m a_i}{\sum_{i=1}^m (a_i + b_i + c_i)} \times 100\% \quad (9)$$

总采出率为:

$$\eta_b = \frac{\sum_{i=1}^m (b_i + c_i)}{\sum_{i=1}^m (a_i + b_i + c_i)} \times 100\% \quad (10)$$

1.2.4 开采顺序的确定原则

多层煤时空协调开采虽然可通过合理的空间布局使受护区域最终处于均匀沉降区,但不能忽视单个开采单元回采过程中地表动态沉降对受护区域的破坏。所以需要合理的开采顺序减缓采动区地表动态损坏特征。

多煤层时空协调布局开采顺序的总体原则为以受护区域(即地表村庄)为中心,先远后近,对称协调,先上后下。先远后近即先采村庄保护煤柱外侧非“三下”区域的开采单元;然后在影响村庄沉降范围内的开采单元采用对称协调原则,利用非充分采动原理,先跳采,再全采,分步协调沉降,形成平缓的下沉盆地;在不同煤层之间,先上层煤后下层煤;在一组开采单元内,先充填工作面后垮落工作面,使充填体和煤柱组成联合支撑体,确保充填效果。以煤柱法向对齐布局为例,时空协调开采单元如图 4 所示,其中, h_1 、 h_2 分别为煤层 1、2 的埋深。开采单元顺序可分为 4 个阶段:

- 第 I 阶段 1-1→1-5→1-3;
- 第 II 阶段 1-2/1-4;
- 第 III 阶段 2-1→2-5→2-3;
- 第 IV 阶段 2-2/2-4。

在特殊条件下,也可将 I、III 互换,即上行卸压开采。而其他布局模式下,可根据矿压显现、地表沉降的特点,选择合适的开采顺序。

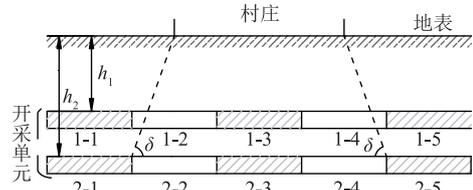


图 4 时空协调开采单元示意图
Fig. 4 Schematic diagram of spatiotemporal coordinated mining unit

2 数值模拟试验及结果分析

2.1 研究区概况

研究区矿井隶属于黄河中下游某矿区,井田内地势平坦,“三下”压煤率达 100%,主采 5、8 和 12-1 煤,煤厚 2.95、3.94 和 2.95 m,煤层间距分别为 49、43 m,主要为细砂岩和砂质泥岩等,煤层倾角约 10°,松散层厚 80 m,采深 491~723 m。

采用文献[27]中单煤层开采单元各工作面尺寸计算方法,并结合研究区地质采矿条件和实际生产效益,确定本矿井首层煤 5 煤各开采单元垮落工作面、充填工作面和留设煤柱的最优宽度分别为 80、90、70 m,并于 2018 年 1 月至 2020 年 6 月完成了第一个开采单元的回采。

同期进行了地表移动观测,由实测可知,倾向主断面地表移动观测站的最大下沉位于开采单元上方偏垮落工作面一侧,地表最大下沉值为 152 mm,反演本区地质采矿条件下的下沉率约为 0.05,对地表移动影响轻微,开采期间地表建筑物未发生明显损坏。

2.2 模型的建立

选用 UDEC 二维离散元模拟软件,以山东某矿地质采矿条件为原型,根据矿井钻孔揭露的岩层分布情况进行适当简化建模。模型尺寸为 1 800 m×800 m,离散单元块体参考岩层的实际发育和分布情况进行划分,共 20 550 个单元。

模型中每层煤布置 3 个开采单元,其中首层煤的垮落工作面、充填工作面和留设煤柱宽度为 5 煤实际开采尺寸,即:80、90、70 m;煤层间开采顺序为先上后下,同组开采单元中先充填工作面后垮落工作面。其中煤层倾角为 10°时,煤柱法向对齐布局数值模拟的几何模型如图 5 所示。

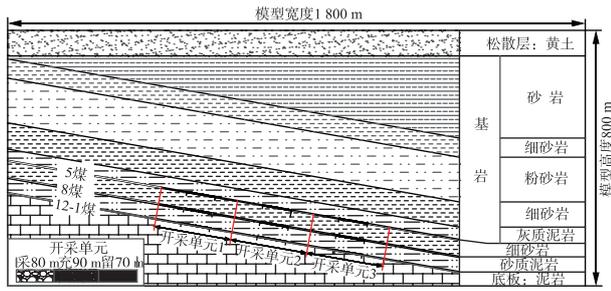


图 5 煤柱法向对齐布局数值模拟的几何模型
Fig. 5 Geometric model for numerical simulation of coal pillar normal alignment layout

1) 充填工作面开采关键参数的确定

深井充填开采工作面, 充填材料的充填率和压实率对柱充联合体承载能力具有直接影响^[28-29], 同时也是控制覆岩及地表移动变形的关键。参考该矿区已有工作面充填开采的实际情况, 模拟的充填

率为 80%, 压实率为 85%。

2) 本构模型及边界条件

根据材料差异和 UDEC 软件特点, 模型中松散层和煤岩体选用反映材料剪切破坏特性的 Mohr-Coulomb 模型, 充填体用反映低黏结颗粒材料 Double-yield 模型^[27], 节理选用面接触库仑滑动模型, 模型上边界为自由面, 左右施加约束边界条件限制水平位移, 下部边界以固定支承约束, 限制水平和垂直两个方向的位移, 初始应力场为地层自重应力。

3) 基于已采工作面数值模拟参数的确定

煤岩体物理力学参数在实验室力学测定的基础上, 与已采工作面地表实测对比综合研究确定。结合实验室测定和经验参数, 初步确定数值模拟煤岩体物理力学参数见表 1。并对模型的 5 煤层开采单元 1 进行开挖。

表 1 UDEC 模型煤岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal and rock in UDEC model

岩层名称	厚度/m	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
黄土	80	1 800	0.67	0.3	0.20	20	0.12
砂岩	183	2 462	15.7	5.9	0.25	31	0.20
细砂岩	59	2 662	35.2	7.4	0.38	34	0.21
粉砂岩	138	2 627	26.4	5.1	0.48	34	0.24
细砂岩	81	2 662	35.2	7.4	0.38	37	0.21
灰质泥岩	34	2 500	9.14	2.1	0.57	35	0.45
5 煤	2.95	1 400	0.90	0.8	0.28	25	0.10
细砂岩	49	2 500	9.14	1.9	0.38	35	0.21
8 煤	3.94	1 400	0.90	0.8	0.28	25	0.10
砂质泥岩	43	2 500	13.5	2.2	0.54	37	0.21
12-1 煤	2.95	1 400	0.90	0.8	0.28	25	0.10
泥岩	143	2 700	45.1	7.8	0.60	30	0.24

5 煤开采后地表实测与数值模拟下沉结果对比如图 6 所示。

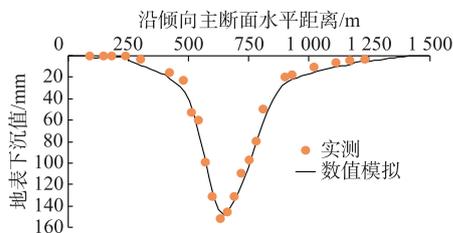


图 6 5 煤开采地表实测与数值模拟下沉结果对比
Fig. 6 Comparison of subsidence results of surface measurement and numerical simulation in No.5 seam mining

由上图可知, 模拟的地表最大下沉值为 148 mm, 接近实测最大下沉值, 且模拟的下沉曲线与地

表实测中误差 10.2 mm, 相对误差 6.7%, 验证了数值模型的力学参数取值的可靠性, 所以后续 5 煤其他单元和各模拟方案的开挖均采用该套参数。

4) 数值模拟方案

为探究不同布局模式下多煤层开采地表移动规律与覆岩控制机理, 本节在单煤层时空协调开采的基础上改变下层煤煤柱法向错距 ($s = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$)、煤柱空间形态(“正梯形煤柱”“倒梯形煤柱”)和煤柱宽度($a = 40, 50, 60, 70$ m), 建立多煤层时空协调开采数值模拟方案。

2.3 数值模拟结果分析

多煤层的时空协调开采模式的研究, 其实质在于对地表非充分性的控制、煤柱的稳定性以及充填

体可靠性的把握。不同布局模式的设计和选择,需要对地表移动演化规律进行分析。图 7 为改变煤柱

法向错距、煤柱空间形态和煤柱宽度等布局的部分模拟方案的地表下沉曲线。

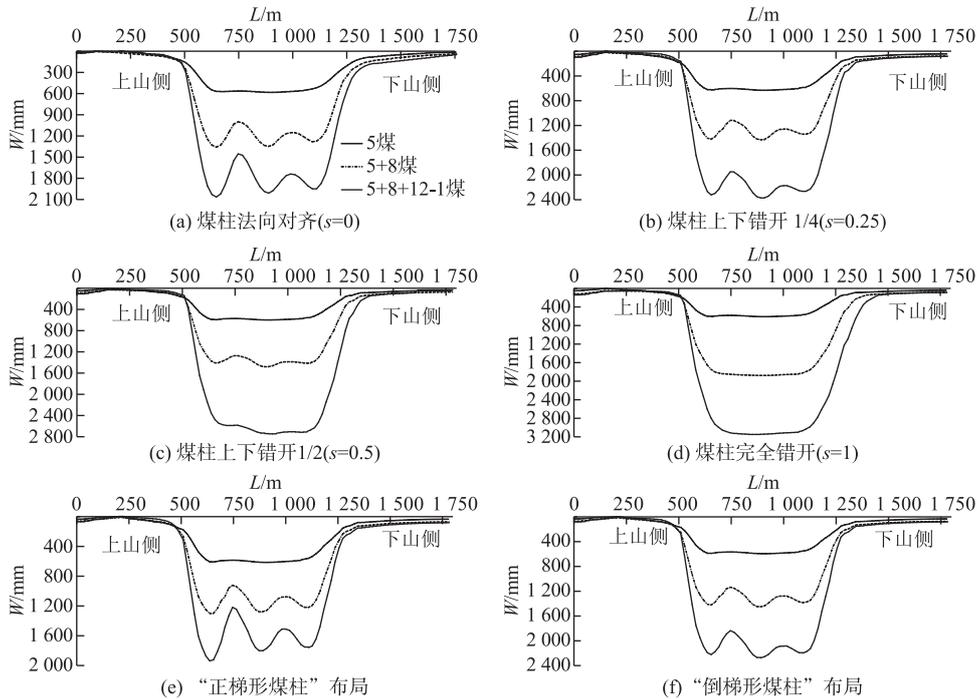


图 7 部分数值模拟方案地表下沉曲线

Fig. 7 Surface subsidence curve of some numerical simulation schemes

由图 7 可知,随开采煤层数增加,地表出现多次重复扰动,移动变形值增加。而不同布局模式下,多煤层开采地表移动规律也不相同。煤柱法向错距布局,随煤柱错距增加,多层煤开采地表下沉曲线形态由多个小盆地逐渐联通为整体下沉盆地。而“正梯形煤柱”布局相对于法向对齐模式,总采出率降低,地表沉降控制效果较好,下沉率为 0.197,有利于地表建筑物的保护。

0.09。当错距系数大于 0.75 时,地表下沉和水平移动受煤柱错距变化影响较小。回归分析,建立地表下沉率与煤柱错距系数的乘幂函数正相关关系: $q = 0.117s^{0.796} + 0.2086$,拟合优度 $R^2 = 0.9678$ 。

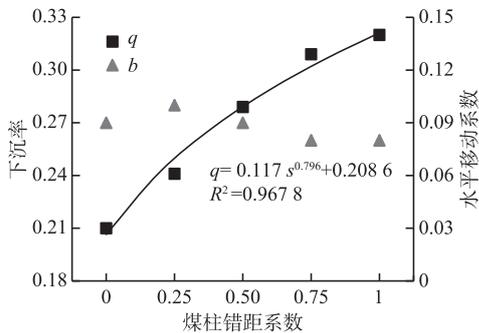


图 8 下沉率和水平移动系数与煤柱错距系数的关系
Fig. 8 Relationship between subsidence rate, horizontal movement coefficient and coal pillar offset coefficient

由图 8 分析可知,煤柱法向对齐即 $s = 0$ 时,地表下沉率最小,为 0.210,煤柱完全错开即 $s = 1$ 时,地表下沉率最大,为 0.320。水平移动系数约

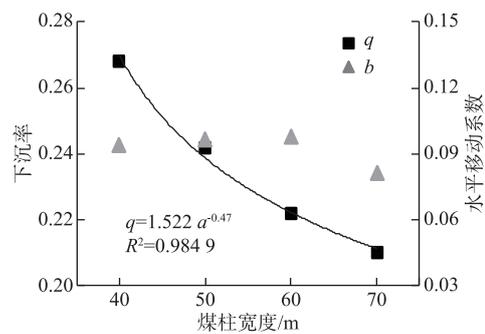


图 9 下沉率和水平移动系数与煤柱宽度的关系
Fig. 9 Relationship between subsidence rate, horizontal movement coefficient and coal pillar width

由图 9 分析可知,在垮落和充填工作面宽度不变的条件下,地表下沉率与煤柱宽度近似呈幂函数负相关关系。通过回归分析,建立地表下沉率与煤柱宽度 a 经验关系: $q = 1.522a^{-0.47}$,拟合优度 $R^2 = 0.9849$ 。

随着煤柱宽度增大,柱充联合体整体的支撑效果和垮落面隔离效果增加,控制地表移动能力变

强。煤柱宽为 70 m 时,3 层煤开采地表最大下沉值为 2 066 mm,下沉率为 0.210。由模拟结果可知,当煤柱宽度 a 为 40 m 时,煤柱受力过大发生失稳,柱充联合体失去有效的承载能力。所以在该矿地质开采条件下,当 $a \leq 40$ m 时无法满足多煤层时空协调开采岩层和地表的控制要求。

综合采深、煤柱法向错距和煤柱宽度 3 种因素的影响,建立了该矿区多煤层时空协调开采地表下沉率的拟合经验公式:

$$q = -0.0025 + 1.540a^{-0.47} + 0.1196 \left(\frac{l}{a} \right)^{0.796} - \frac{H - 600}{3500}$$

其中 $a > 40$ m, 491 m $\leq H \leq 723$ m。

3 多煤层时空协调开采岩层控制机理

多煤层时空协调耦合开采,煤柱错距系数 $s \leq 0.5$ 时,覆岩竖向位移在各开采单元采充面上方呈现拱形,其大小为:垮落工作面 $>$ 充填工作面 $>$ 煤柱;在应力的分布方面,当煤柱法向对齐时,开采单元内留设煤柱处于应力增高状态,与煤柱旁充填体共同承载覆岩荷载,开采面处于应力降低区。当煤柱错距系数 $s \geq 0.75$ 时,开采单元内各煤层采充面错开程度较大,拱形位移逐渐联通,与全采类似,工作面附近位移大小为:中间开采单元大于两侧开采单元,且近似呈对称分布;在应力分布方面,开采单元应力分布较分散,采空区整体承受覆岩的重量,有利于岩层和地表移动的长期稳定性。

应力拱是岩体抵抗不均匀变形而进行自我调节的一种现象,能够把煤层或岩层开挖空间上覆岩层的重量转移到周围岩体,相当于采场围岩的承载结构^[30-31],拱内为应力降低区,导水裂隙带形成拱的内曲面。地层结构中的厚硬岩层(关键层)对地表移动变形特征有重要影响^[32],其中主关键层对地表移动变形起控制作用,影响地表的下沉特征。本节根据拱-梁的结构理论^[33],揭示多煤层时空协调开采不同布局模式下覆岩移动的控制机理。

各布局模式下覆岩支撑结构的变化反映了岩层移动、覆岩破坏及煤柱应力分布特征,多煤层时空协调开采覆岩支撑结构如图 10 所示,采空区承载结构中应力拱拱脚位于煤柱支承压力区即煤柱核心区上,拱高和跨度与开采后覆岩的破坏范围有关。

1) 煤柱法向错距开采模式中,煤层间柱充联合体空间协同作用关系发生改变,覆岩呈现不同的承载结构形式。

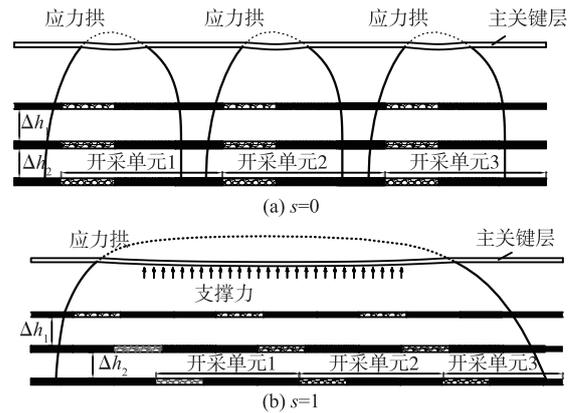


图 10 多煤层时空协调开采覆岩支撑结构

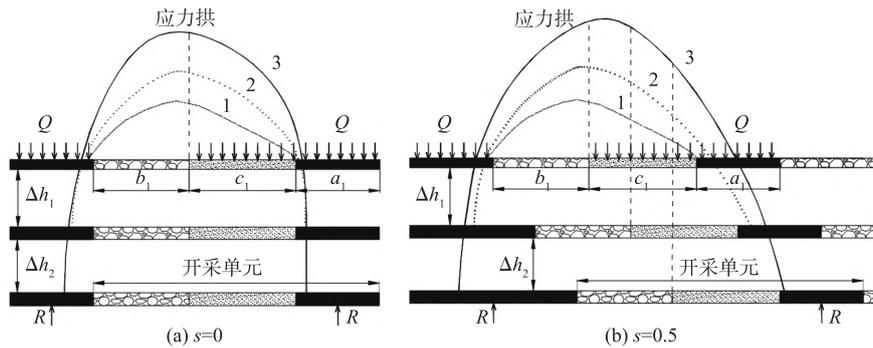
Fig. 10 Overburden support structure in multi-seam spatiotemporal coordinated mining

当 $0 \leq s \leq 0.5$ 时,煤层间的错距较小,多煤层柱充联合体叠置区域较大,煤柱双向或三向受力状态下压应力小于煤柱极限抗压强度,柱充联合体及上覆岩柱有效支撑主关键层,如图 10(a) 所示。此时岩层控制机理与条带开采类似,以柱充联合体为拱脚,在采充面上方形成多组应力拱。单个开采单元应力拱的演化过程如图 11 所示,随着下煤层的依次开采,柱充联合体垂直应力、拱的发育高度及拱脚到采空区的距离均逐渐增加,即覆岩破坏范围随着多层煤的开采逐渐增大,且应力拱的最大高度偏向垮落工作面。

当 $0.75 \leq s \leq 1$ 时,多煤层柱充联合体叠置区域较小,煤柱双向或三向受力状态下压应力超过了煤柱极限抗压强度,柱充联合体失去主要承载作用,各开采单元覆岩破坏区联通,在采区上方形成横跨 3 个开采单元的扁平拱,此时主关键层跨度和挠度均出现明显增加,并与下部岩体接触,形成了采区整体受力,如图 10(b) 所示。但与条带开采煤柱失稳“多米诺效应”所造成的大范围剧烈沉降不同,多煤层时空协调开采“煤柱-充填工作面-垮落工作面”的顺序布局避免顶板大面积的悬空,这种煤柱到垮落工作面平缓的过渡过程,能够有效减小主关键层下离层空间,避免主关键层因应力集中而发生突发性破断失稳。

当 $0.5 < s < 0.75$ 时,覆岩处于以上 2 种承载结构的过渡阶段。

2) 基于煤柱空间形态的布局开采模式,覆岩压力拱的演化形态与图 11(a) 类似。煤柱空间形态变化,仅改变下层煤的煤柱宽度,柱充联合体自身的稳定性及对垮落区的隔离效果发生改变,导致地表的充分采动程度和岩层破坏范围也发生相应变化。



R 为底板的支撑反力;Q 为覆岩荷载;1、2、3 为开采煤层的数量及其对应的演化过程

图 11 多煤层开采单元应力拱演化过程

Fig. 11 Evolution process of stress arch in multi seam mining unit

4 各开采布局模式的综合特征分析

多煤层时空协调开采在开采方式和布局模式

上的特殊性导致其开采参量、岩层控制、地表移动等特征与多煤层条带开采和多煤层全采不同,多煤层各开采布局模式综合特征见表 2。

表 2 多煤层各开采布局模式综合特征

Table 2 Comprehensive characteristics of each layout mode of multi coal seam spatiotemporal coordinated mining

布局模式	开采参量			地表最大下沉值/mm	支撑结构的稳定性	特征及其适用性	
	总充填率/%	总煤柱率/%	总采出率/%				
多煤层时空协调开采	$s = 0$			2 066	稳定性逐渐减弱	柱充联合体有效承载覆岩,随错距增加,柱充联合体支撑有效宽度减小,地表的控制效果减弱。	
	$s = 0.25$	37.5	29.2	2 371			
	$s = 0.50$			2 745			
	基于煤层法向错距	$s = 0.75$	37.5	29.2	70.8	—	柱充联合体失去主要承载能力阶段,开采横向充分性增加,地表下沉加大;但覆岩受力状态由柱充联合体局部受力转变为采空区整体受力,有利于覆岩和地表移动长期稳定性。
基于煤柱空间形态	“正梯形煤柱”布局	35.4	33.3	66.7	1 938	稳定	地表控制效果最好,可用于重要建(构)筑物的保护。
	“倒梯形煤柱”布局	39.6	25.0	75.0	2 276	较稳定	确保煤柱和被护建筑物安全的前提下适当提高资源采出率。
多煤层全采	0	0	100	6 397	—	资源采出率最高,地表破坏最严重。	
多煤层条带开采	0	65	35	1 377	稳定	资源采出率低,地表破坏较轻微。	

由表 2 可知,采用多煤层时空协调开采模式,地表下沉率约为 0.20~0.32,地表建(构)筑物变形能够得到有效控制,总采出率为 70% 左右,较多煤层条带开采的资源采出率提升约 30%~40%,实现了较大限度解放建筑物下煤炭资源的目的。多煤层时空协调开采布局模式各具特色,应用时需综合受保护对象的保护等级和开采经济效益,选择合适的布局模式。

5 结论

1) 针对多煤层开采的特点,基于资源与生态、人居环境绿色发展的理念,提出了基于煤柱法向错距变化和煤柱空间形态变化的多煤层时空协调开采模式,并给出了相应的计算公式。其技术基础是

控制关键层或隔水岩组的不破断,技术关键是控制“两带”的发育高度,实现保护人居和生态环境的目标。

2) 揭示了多煤层时空协调开采地表移动规律。多煤层时空协调开采地表下沉率与煤柱错距系数及煤柱宽度均呈乘幂函数关系,下沉率约 0.20~0.32,水平移动系数约 0.09。构建了本矿区基于采深、煤柱法向错距和煤柱宽度的多煤层时空协调开采地表下沉率的拟合公式。煤柱错距模式中,当错距系数 $s \geq 0.75$ 时,地表下沉和水平移动受煤柱错距变化影响较小。

3) 煤柱空间形态模式中,“正梯形煤柱”布局采出率减小,柱充联合体的稳定性和垮落区的隔离效果增加,对地表移动的控制效果较好。

4) 揭示了多煤层时空协调开采岩层控制机理。通过多组开采单元协同,形成柱充联合体的有效承载结构以减少主关键层的移动空间,保证主关键层不破断,控制地表沉降,同样的也可以通过保证隔水岩组不破断,来实现保水绿色开采。

参考文献:

- [1] 彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术及战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211-1221.
PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River basin of China [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211-1221.
- [2] 于斌. 多煤层上覆破断顶板群结构演化及其对下煤层开采的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 261-266.
YU Bin. Structural evolution of breaking roof group of multiple coal seams and its influence on lower coal seam mining [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 261-266.
- [3] 郭文兵, 马志宝, 白二虎. 我国煤矿“三下一上”采煤技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 16-26.
GUO Wenbing, MA Zhibao, BAI Erhu. Current status and prospect of coal mining technology under buildings, water bodies and railways, and above confined water in China [J], Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 16-26.
- [4] 吴立新, 王金庄, 刘延安, 等. 建(构)筑物下压煤条带开采理论与实践[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.
- [5] 邹友峰. 条带开采优化设计及其地表沉降预计的三维层状介质理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [6] 王旭春, 黄福昌, 张怀新, 等. A. H. 威尔逊煤柱设计公式探讨及改进[J]. 煤炭学报, 2002, 27(6): 604-608.
WANG Xuchun, HUANG Fuchang, ZHANG Huaixin, et al. Discussion and improvement for A. H. Wilson's coal pillar design [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(6): 604-608.
- [7] 郭文兵. 深部大采宽条带开采地表移动的预计[J]. 煤炭学报, 2008, 33(4): 368-372.
GUO Wenbing. Surface movement predicting problems of deep strip pillar mining, Journal of China Coal Society, 2008, 33(4): 368-372.
- [8] YU Y, CHEN S E, DENG K Z, et al. Long-term stability evaluation and pillar design criterion for room-and-pillar mines [J]. Energies, 2017, 10(10): 1644.
- [9] YU Y, DENG K Z, CHEN S E. Mine size effects on coal pillar stress and their application for partial extraction [J]. Sustainability, 2018, 10(3): 792.
- [10] 邓喀中, 马伟民, 何国清. 多煤层开采时条带空间位置对岩层移动的影响[J]. 中国矿业大学学报, 1991, 20(2): 75-81.
DENG Kazhong, MA Weimin, HE Guoqing. Influence of stripe space position on strata movement in multiple coal seams mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1991, 20(2): 75-81.
- [11] 张立亚, 邓喀中. 多煤层条带开采地表移动规律[J]. 煤炭学报, 2008, 33(1): 28-32.
ZHANG Liya, DENG Kazhong. The law of surface movement for multi-coal seam strip mining [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(1): 28-32.
- [12] 张俊英. 多煤层条带开采模拟理论研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(增刊1): 67-70.
ZHANG Junying. Theoretic study by simulation method on the strip mining of multiple coal seams [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(Sup 1): 67-70.
- [13] 胡炳南. 煤层群条带开采优化设计原则[J]. 煤矿设计, 2000(4): 3-6.
HU Bingnan. Strip mining coal seam group optimization design principle [J]. Design of Coal Mine, 2000(4): 3-6.
- [14] 王冰, 郭广礼, 朱晓峻, 等. 多煤层开采条带错动程度对岩层控制的影响[J]. 金属矿山, 2015(11): 153-157.
WANG Bing, GUO Guangli, ZHU Xiaojun, et al. Influence of strip dislocation degree on the strata control in multi-coal seam mining [J]. Metal Mine, 2015(11): 153-157.
- [15] 孙希奎, 李学华. 利用矸石充填置换开采条带煤柱的新技术[J]. 煤炭学报, 2008, 33(3): 259-263.
SUN Xikui, LI Xuehua. The new technology of waste-filling replacement mining on strip coal pillar [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(3): 259-263.
- [16] 冯光明, 孙春东, 王成真, 等. 超高水材料采空区充填方法研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 1963-1968.
FENG Guangming, SUN Chundong, WANG Chengzhen, et al. Research on goaf filling methods with super high-water material [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 1963-1968.
- [17] 冯光明, 王成真, 李凤凯, 等. 超高水材料袋式充填开采研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(4): 602-607.
FENG Guangming, WANG Chengzhen, LI Fengkai, et al. Research on bag-type filling mining with super-high-water material [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(4): 602-607.
- [18] 郭惟嘉, 江宁, 王海龙, 等. 膏体置换煤柱充填体承载特性及工作面支护强度研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(4): 585-591.
GUO Weijia, JIANG Ning, WANG Hailong, et al. Bearing characteristics of filling body and supporting in-

- tensity of working face during coal pillar mined with paste backfill[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(4): 585-591.
- [19] 张吉雄, 巨峰, 李猛, 等. 煤矿矸石井下分选协同原位充填开采方法[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 131-140.
ZHANG Jixiong, JU Feng, LI Meng, et al. Method of coal gangue separation and coordinated in-situ backfill mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 131-140.
- [20] 郭广礼, 王悦汉, 马占国. 煤矿开采沉陷有效控制的新途径[J]. *中国矿业大学学报*, 2004, 33(2): 150-153.
GUO Guangli, WANG Yuehan, MA Zhanguo. A new method for ground subsidence control in coal mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004, 33(2): 150-153.
- [21] 许家林, 朱卫兵, 李兴尚, 等. 控制煤矿开采沉陷的部分充填开采技术研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2006, 23(1): 6-11.
XU Jialin, ZHU Weibing, LI Xingshang, et al. Study of the technology of partial-filling to control coal mining subsidence[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2006, 23(1): 6-11.
- [22] 许家林, 轩大洋, 朱卫兵, 等. 部分充填采煤技术的研究与实践[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(6): 1303-1312.
XU Jialin, XUAN Dayang, ZHU Weibing, et al. Study and application of coal mining with partial backfilling[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(6): 1303-1312.
- [23] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 资源与环境协调(绿色)开采及其技术体系[J]. *采矿与安全工程学报*, 2006, 23(1): 1-5.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Resources and environment harmonics (green) mining and its technological system[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2006, 23(1): 1-5.
- [24] 余学义, 王飞龙, 赵兵朝. 河流下限高协调开采方案[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(9): 1183-1187.
YU Xueyi, WANG Feilong, ZHAO Bingchao. Harmonic limited height under river mining project[J]. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science*, 2014, 33(9): 1183-1187.
- [25] 戴华阳, 郭俊廷, 阎跃观, 等. “采-充-留”协调开采技术原理与应用[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8): 1602-1610.
DAI Huayang, GUO Juntao, YAN Yueguan, et al. Principle and application of subsidence control technology of mining coordinately mixed with backfilling and keeping[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1602-1610.
- [26] 郭俊廷, 戴华阳, 李佳琦, 等. “采-充-留”协调开采地表移动预测方法[J]. *煤矿开采*, 2016, 21(2): 45-48.
GUO Juntao, DAI Huayang, LI Jiaqi, et al. Forecast method of surface movement with mining coordinately mixed with backfilling and keeping[J]. *Coal Mining Technology*, 2016, 21(2): 45-48.
- [27] 郭俊廷. 建(构)筑物下“采-充-留”耦合开采理论研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
- [28] 王方田, 李岗, 班建光, 等. 深部开采充填体与煤柱协同承载效应研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(2): 311-318.
WANG Fangtian, LI Gang, BAN Jianguang, et al. Synergistic bearing effect of backfilling body and coal pillar in deep mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(2): 311-318.
- [29] 黄艳利, 张吉雄, 张强, 等. 充填体压实率对综合机械化固体充填采煤岩层移动控制作用分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(2): 162-167.
HUANG Yanli, ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, et al. Strata movement control due to bulk factor of backfilling body in fully mechanized backfilling mining face[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(2): 162-167.
- [30] 谢广祥. 综放工作面及其围岩宏观应力壳力学特征[J]. *煤炭学报*, 2005, 30(3): 309-313.
XIE Guangxiang. Mechanical characteristics of fully mechanized top-coal caving face and surrounding rock stress shell[J]. *Journal of China Coal Society*, 2005, 30(3): 309-313.
- [31] 冯军发, 周英, 李回贵, 等. 试论近水平煤层采场的3种基本结构形式[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(10): 2576-2587.
FENG Junfa, ZHOU Ying, LI Huihui, et al. Three kinds of basic structures of working face in near horizontal coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(10): 2576-2587.
- [32] 许家林, 钱鸣高. 关键层运动对覆岩及地表移动影响的研究[J]. *煤炭学报*, 2000, 25(2): 122-126.
XU Jialin, QIAN Minggao. Study on the influence of key strata movement on subsidence[J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(2): 122-126.
- [33] 张艳丽, 伍永平, 罗生虎, 等. 覆岩宏观支撑结构演化过程与特征[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(2): 280-288.
ZHANG Yanli, WU Yongping, LUO Shenghu, et al. Evolution process and characteristics of overlying strata macro support structure[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(2): 280-288.