

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.02.018

大佛寺煤矿变形及受力特性研究

刘乃飞¹, 李 宁^{1,2}, 张 柱¹, 杨 敏¹, 刘小平^{1,3}

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730101;
3. 中煤科工集团 西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 大佛寺煤矿位于彬长矿区开采边界境内, 地形地质条件非常复杂。本文采用 UDEC 离散元软件对该矿区煤层开采引起的地表变形规律及围岩应力场的分布特征进行了系统研究。研究结果表明: ①煤层开采后地表沉降呈 V 字形分布, 随着各工作面的相继开采地表沉降变形不断增大, 当达到充分采动时趋于定值(约为 10.0 m); ②地表由两侧向采区方向移动, 变形曲线呈倒 S 形, 水平移动变形最大值约为 1.73 m; ③煤层开采会引起围岩应力重分布, 且部分区域存在明显应力集中现象(40 MPa), 随着各采区的相继开采应力扰动区不断扩大, 致使顶板岩层出现临空, 引起大部分区域发生垮落(变形大, 10.0 m 以上)。

关键词: 特厚煤层; 分层开采; 地表沉降; 水平移动

中图分类号: O319.56 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2016)02-0240-07

Research on the deformation and stress behaviors of Dafosi coal mine

LIU Naifei¹, LI Ning^{1,2}, ZHANG Zhu¹, YANG Min¹, LIU Xiaoping^{1,3}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730101, China;

3. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710077, China)

Abstract: Dafosi coal mine is situated in the Bin-Chang mine boundary and its geology and land form conditions are very complicated. With the help of the discrete element software of UDEC, the surface distortion rule and distributing character of the stress field caused by coal mining have been systematic studied in this paper. This study shows that: 1) the ground settlement curves have a V distribution when the coal seam was extracted. After the follow-up mining areas are extracted, the surface subsidence deformation becomes correspondingly larger and larger when reaching full subsidence its tends to be a constant value (10.0 m); 2) the surface moved to the mining area direction from the both sides and the deformation curves show an inverted-S distribution. The maximum value of level move deformation is 1.73m; 3) the coal mining can cause adjoining rock stress redistribution and some areas appears to have the obvious stress concentration phenomena (40MPa). With the follow-up mining areas extracting, stress disturbance region continues to expand, whereby resulting in top kill as stratum to have an air face in such a way that there occurs to have the collapse in most regions (deformation is larger than 10.0 m).

Key words: thick coal seam; slice mining; surface subsidence; horizontal migration

近年来采矿工业快速发展, 厚煤层开采已成为发展的重要方向。许多学者结合各自参与的具体工程开展了大量有针对性的研究工作, 而且厚煤层开采的理论也有了较快的发展^[1-2]。冯国财等^[3]采用钻孔冲洗液耗失量法对太平煤矿覆岩的破坏特征进

行了研究, 以便确保水库下特厚煤层综放开采安全。郜锦柱等^[4]通过对任楼煤矿综采预留煤柱及跨采时底板巷道破坏的分析, 提出了一种适用的动态分步加固技术方案。于雷等^[5]对特厚煤层综放开采顶板岩层所成结构及支架工作阻力进行了研究, 并给出

收稿日期: 2015-04-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179153); 西安理工大学博士学位论文创新基金资助项目(207-002J1306)

作者简介: 刘乃飞, 男, 博士生, 研究方向为地下工程和多场耦合。E-mail: liunaifei1985@126.com

通讯作者: 李宁, 男, 教授, 博导, 研究方向为岩土工程。E-mail: ningli@xaut.edu.cn

了特厚煤层综放开采支架工作阻力的解析计算式。张宏伟等^[6]则以同忻煤矿 15 m 特厚煤层为例,采用多种方法对特厚煤层综放开采覆岩破坏高度进行了深入研究。王金华^[7]以塔山煤矿为依托研发出了大采高综放工作面片帮综合防治、高效高采出率放煤等关键技术。刘金海等^[8]通过留设合理宽度的区段煤柱来确保深井特厚煤层综放工作面顺利接续和安全回采。别小飞等^[9]采用实验室测定和现场矿压观测的方法,对千秋煤矿巨厚砾岩层下特厚煤层综放工作面矿压显现规律进行了分析研究。马立强等^[10]为了减少厚煤层开采的区段煤柱损失,提出了巷内预置充填带的无煤柱开采技术。胡青峰^[11]结合实测资料和地质采矿,初步揭示了地表裂缝的发育过程。赵景礼等^[12]提出了一种厚煤层无煤柱开采的错层位巷道布置采全厚采煤法。于斌等^[13]则以大同矿区特厚煤层开采为例得到了巷道超前支护段的强矿压显现机制。李宁等^[14-15]也通过多种方法对隧洞巷道的变形特性进行了研究。

上述研究成果在解决具体工程问题方面起到了显著作用,并对类似特厚煤层的开采具有一定的指导意义,但针对大佛寺矿区的实际情况,仍需要开展专门的研究工作。大佛寺矿区地形地质条件非常复杂,主要表现为:① 特厚湿陷性黄土覆盖层的存在使得开采沉陷为台阶式切落破坏;② 矿区位于黄土沟壑区,其开采沉陷范围不同于平原地区;③ 许多村庄位于塬面或近沟坡区。黄土高原地区这种沟坡纵横切割的地形使得开采沉陷区范围具有显著差异,因此针对大佛寺煤矿矿区开展地表变形和地层应力方面的研究至关重要,该研究不仅能够指导本矿区煤层的顺利开采,而且能够为附近区域类似矿区的开采作用提供参考和借鉴。

1 工程概况

大佛寺矿区位于彬长矿区开采边界内,地处彬县、长武两县交界地带,采矿许可范围东西长约 15 km,南北宽约 5.8 km,井田面积约 86.3 km²。矿井目前的实际生产能力达到 500 万 t/a。

该项目区属塬川地貌,南高北低。塬面开阔平坦,最高海拔 1 106 m,最低海拔 849 m。地层区划属华北地层区鄂尔多斯盆地区,从东南向西北沿沟谷依次出露三叠系上统胡家村组(T3h)、侏罗系中统延安组(J2y)、直罗组(J2z)、安定组(J2a),白垩系下统宜君组(K1y)、洛河组(K1l),详见图 1。

根据调查及资料分析,目前大佛寺煤矿 109 工作面、111 工作面及 113 工作面上方 7 m 已经开采,

开采方式为综合机械化长壁放顶煤条带式开采。采区煤层埋深约 410 m,煤层平均厚 15 m,采高 7.0 m,工作面及煤柱预留宽度均为 90 m。

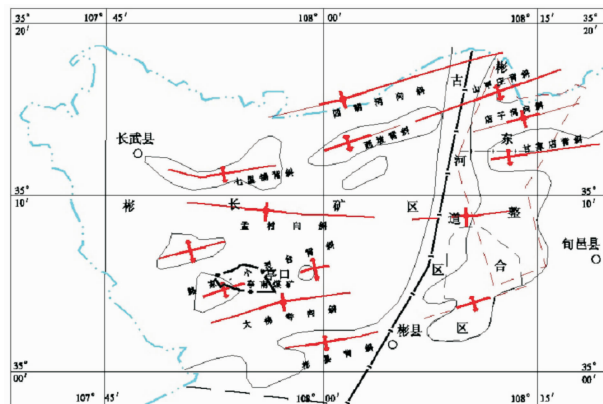


图 1 矿区构造图

Fig. 1 The mining structural diagram

2 数值模型和计算参数

2.1 数值模型

根据地质勘查报告及采空区实际情况,以开采工作面倾向断面为剖面建立计算模型,模型的长度为 1 000 m,垂直高度为 500 m,煤层埋深 400 m,煤层厚度 15 m,采用综合机械化长壁放顶煤条带式开采,分 109、111、113 三个工作面开采,每个工作面均分为上下两层开采,111 工作面的中线与模型中线相重合,每个工作面和煤柱宽度均为 90 m。本文采用 UDEC 离散元软件(主要用于评价岩体的节理、裂隙、层面对地下工程的影响)进行模拟分析,借助 gen edge 5 命令,将模型划分成三角形单元,单元的最大边长不超过 5 m。块体本构模型选择摩尔-库伦本构模型,节理模型选取库仑滑动模型。

模型采用施加速度边界条件:左右两侧边界 x 方向的速度为 0,底边界 x 和 y 方向的速度均为 0,上边界为自由边界。当最大不平衡力小于 10^{-5} N 时,即认为计算达到平衡。煤矿开采地质剖面及数值计算模型见图 2 和图 3。

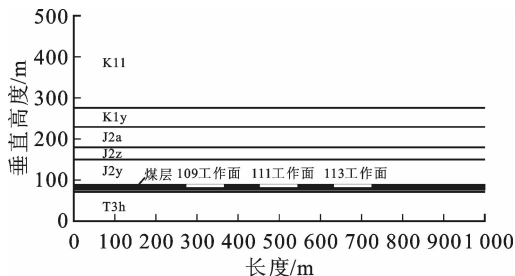


图 2 工程地质剖面图

Fig. 2 The engineering geologic profile

因开采存在多个工作面及煤柱且工作面均分为上下部分开采,为了方便下文分析,现对工作面及煤柱作如下定义(见图 4)。

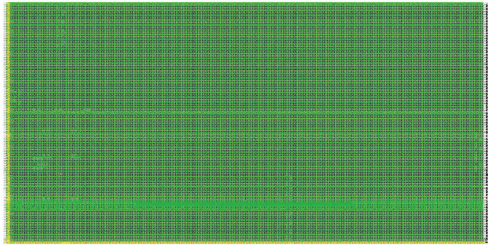


图 3 数值计算模型

Fig. 3 The numerical calculation model

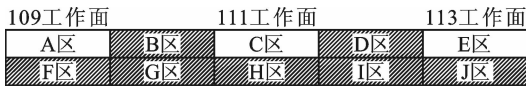


图 4 采区分区示意图

Fig. 4 The partition schematic diagram

2.2 计算参数

地层从上到下依次分为 8 层,分别为:K11、K1y、J2a、J2z、J2y、coal、J2y、T3h,各岩层参数如表 1 所示。

表 1 各层岩石参数表

Tab. 1 The parameters of different rock seams

岩石类别	密度/(kg/m ³)	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	泊松比	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)
K11	2 223	1 175.00	362.87	0.36	0.10	27.98
K1y	2 249	1 315.74	538.26	0.32	0.20	30.19
J2a	2 396	2 690.20	1 031.58	0.33	0.53	30.80
J2z	2 316	3 678.43	1 410.53	0.33	0.60	33.82
J2y	2 350	4 869.70	2 510.94	0.28	1.04	36.56
coal	1 415	410.26	258.06	0.24	0.33	28.12
J2y	2 350	6 107.25	3 318.11	0.27	1.24	35.56
T3h	2 350	6 653.47	3 801.98	0.26	1.45	38.56

3 煤矿工作面上部开采数值模拟

当前大佛寺煤矿的 109、111 和 113 工作面上部 7 m 煤层已经开采完毕,本节首先对该开采过程进行模拟。研究该煤层在进行上部开采时的变形和受力特性以及地表沉降规律等。数值分析按依次开采工作面上部的 A 区、C 区和 E 区进行模拟,并在地表每隔 50 m 设置一个观测点,用以观测地表变形情况。

3.1 地表沉降规律研究

依次开采 109、111 和 113 工作面上部 7 m 煤层

A 区、C 区和 E 区后,地表的沉降规律如图 5 所示。

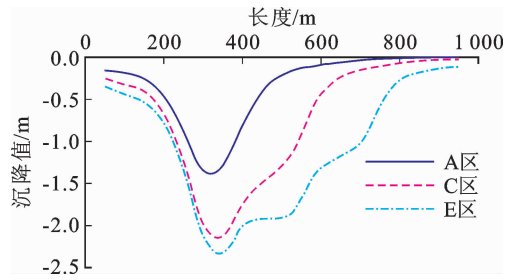


图 5 地表沉降曲线

Fig. 5 The ground settlement curves

由图 5 可看出,煤层开采引起地表沉降变形呈漏斗形,且随着 A 区、C 区、E 区的开采,地表沉降值变形呈增大趋势。A 区开采完成后地表的沉降变形位于该采区正上方约为 1.36 m,而当 E 区开采完毕后,地表最大沉降变形的位置发生了右移且量值增大到 2.34 m,增幅约为 72%。此外还可以看出 C 区开采后的地表沉降曲线呈现出明显的不对称性,在 A 区和 E 区之间的变形曲线有一较缓的区段,这是因为该处预留煤柱抑制了地表沉降所致。而当 E 区开采后的沉降曲线的不对称性更加明显,且出现了两处明显的变形台阶,而该两部位均有煤柱存在。可见预留煤柱的存在能够有效控制地表沉降变形的发展。

3.2 地表水平移动规律研究

依次开采 109、111 和 113 工作面上部 7 m 煤层 A 区、C 区和 E 区后,地表水平移动规律如图 6 所示。

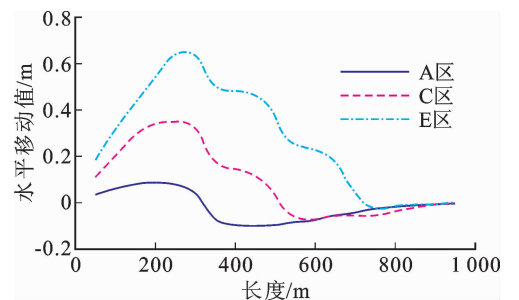


图 6 地表水平移动曲线

Fig. 6 The surface subsidence curves

由图 6 可看出,煤层开采后引起上部地表产生了较大的水平移动变形。A 区开采后采区上部地表由两侧向采区中线部位地表发生移动,地表水平移动曲线近似呈倒 S 形,且最大值约为 0.102 m。随着 C 区和 E 区依次开采,地表各点的水平移动变形不断增大且水平移动方向的拐点不断向新开采区移动。E 区开采完毕后地表的水平移动变形约为 0.635 m,近似为 A 区开采后的 6 倍。同地表沉

降变形规律类似,地表水平移动变形也存在变形台阶,这均是留设煤柱有效抑制了地表变形所致。

3.3 采区围岩应力场研究

工作面上部煤层依次开采后围岩的竖直应力场分布等值线图如图 7 所示。

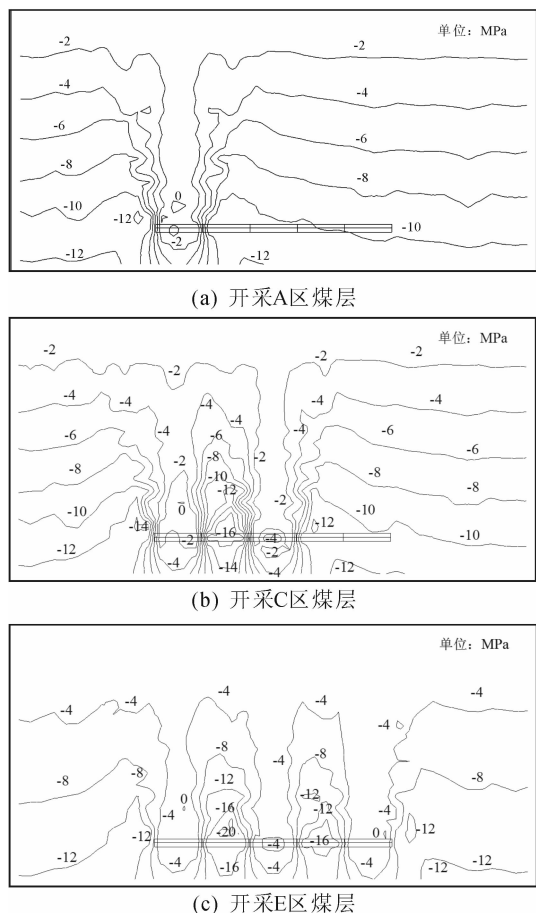


图 7 竖直应力等值线图

Fig. 7 The vertical stress contour map

从图 7 可看出,工作面上部煤层开采后,围岩竖直应力场发生了较大变化,不再呈水平分布。A 区煤层开采后围岩竖直应力等值线呈深 U 型分布,煤层开采引起围岩发生了应力重分布,越靠近开采区域应力释放现象越显著。C 区开采后再次引起了围岩应力重分布,且部分区域与 A 区开采产生的效应有叠加现象,此时应力场呈深 W 型。由于两侧煤层的开采引起 B 区预留煤层存在较大的应力集中现象(-16 MPa)。E 区开采后同样引起围岩应力释放,且与 E、C 区煤层中间的 D 区预留煤柱有应力集中现象(-16 MPa),而且使得 B 区煤柱的应力值增至-20 MPa。

3.4 采区围岩位移场研究

工作面上部煤层依次开采后围岩竖直位移分布云图如图 8 所示。

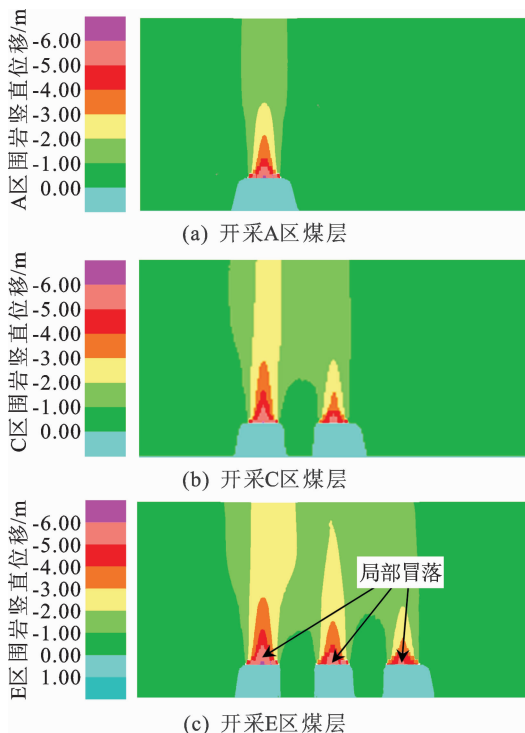


图 8 围岩竖直位移云图

Fig. 8 The vertical displacement nephogram

由图 8 可看出,工作面上部煤层开采后四周围岩向工作面移动,其中顶板以沉降为主而底板以隆起变形为主。A 区开采后围岩竖直变形以 A 采区中线呈对称分布,越靠近开采工作面变形越大,而且变形已经发展至地表,此外煤层顶板局部区域有冒落现象(变形值约为 6.0 m)。C 区开采后同样引起了周围围岩移动,并且显著增加了 A 区顶部岩体的变形情况,而且变形影响范围内存在叠加区域。E 区开采后的情况同 C 区。三采区引起的上部岩体的变形连成一片,但 A 区顶部岩体的沉降变形最大,E 区最小。各采区顶部局部都存在不同程度的冒落现象且引起地表近 2.0 m 的沉降变形,因此在煤层开采时务必要做好支护工作,确保开采工作的顺利进行。

4 预留煤柱及工作面下部回采模拟

上节对大佛寺煤矿当前的开采现状进行了模拟,研究了 A、C 和 E 区工作面上部开采后地表的沉降变形及围岩的受力情况,本节拟在此基础上模拟对预留煤柱和各工作面下部煤层的回采情况,具体开采顺序依次为: B 区、D 区、F 区、G 区、H 区、I 区、J 区。

4.1 地表沉降规律研究

各区依次回采后的地表沉降曲线如图 9 所示。

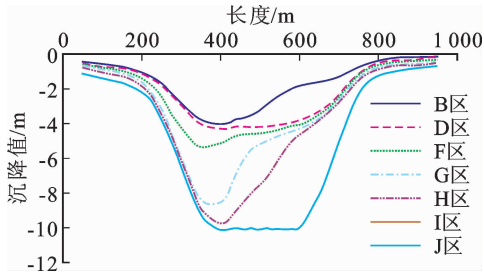


图 9 地表沉降曲线

Fig. 9 The ground settlement curves

由图 9 可看出,随着对各区域煤层先后回采,地表沉降逐渐增大且其最大值位置不断右移。B 区上部预留煤层开采后地表最大沉降变形由 2.34 m 增加为 4.01 m,增幅高达 59%,且显著增加了 A 区和 C 区上部地表的沉降变形。D 区煤层回采对 C 区和 E 区上部地表沉降变形影响最显著。当各工作面上部煤层全部开采完毕,下部煤层开采至 G 区时顶板围岩沉降变形急剧增大,由 F 区开采后的 5.36 m 增加到 8.53 m,增幅近 60%。回采至 I 区时地表沉降曲线出现了一水平区段,为沉降变形的最大值(约为 10.0 m),说明 I 区开采引起地表横坐标 400 m~500 m 范围内地层达到了充分采动。J 区开采后这一范围向右增加了近 150 m。可见地表沉降变形并不是随着开挖区域的扩大而无限地增大的,而是当开采达到充分采动时趋于定值,该值约为 10.0 m。

4.2 地表水平移动规律研究

各区域开采后的地表水平移动图如图 10 所示。

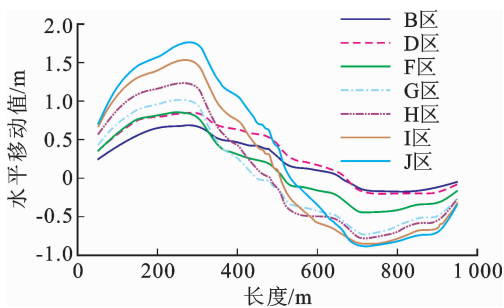


图 10 地表水平移动曲线

Fig. 10 The surface subsidence curves

由图 10 可看出,随着剩余区域煤层的相继开采,采区两侧地表以采区为中心发生相向移动,地表水平移动图呈倒 S 型,且地表存在不发生移动的点(临界点),该点左侧地表向右移动,右侧向左移动。B 区开采使得其两侧地表移动显著增加,并使得临界点向左移动了近 50 m,但其底部地表水平移动值却有所降低。E 区开采后水平移动曲线存在两个明显的台阶,但 B 区开采后却只有 D 区对应的台阶比

较显著,可见预留煤柱对抑制水平移动变形也具有较好的效果。D 区开采对左侧地表影响尤为显著。当开采下部 F 区煤层时,引起其右侧地表水平移动值急剧增大,且在横坐标为 500 m~680 m 处,地表移动方向发生了逆转,右侧水平移动最大值由 0.21 m 增大至 0.45 m,增加了 1 倍多。后续煤层的开采进一步增加了两侧地表的水平移动值。

根据上述分析可以看出,左侧煤层开采对右侧地表的水平移动变形影响较大,而右侧煤层开采则对左侧地表的水平移动变形影响较大,采区中部地表最终的水平移动变形近似为零。由于时间效应的影响,左右两侧地表的水平移动值并不相等,左边为 1.8 m,右侧为 0.9 m。

4.3 采区围岩应力场研究

为了节省篇幅,文中仅给出 D 区、H 区和 J 区开采后的应力等值线图,详见图 11。

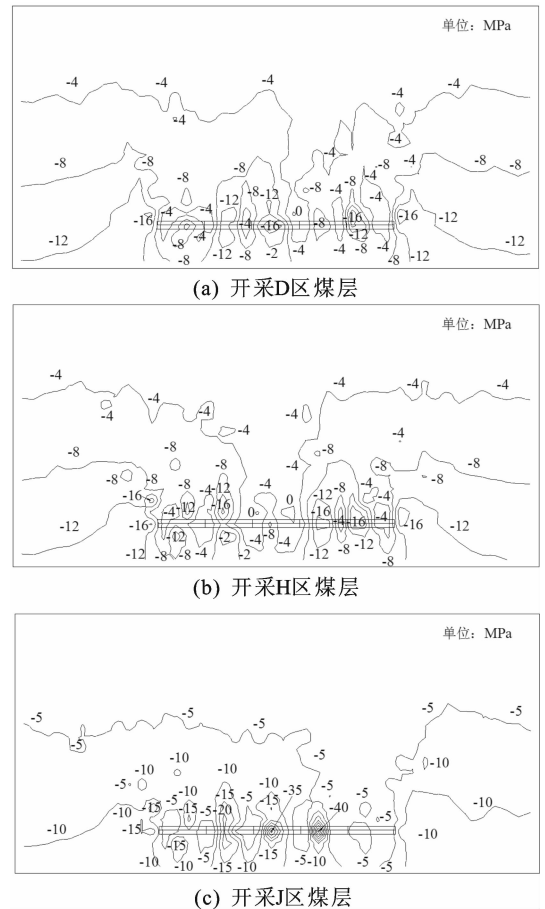


图 11 竖直应力等值线图

Fig. 11 The vertical stress contour map

从图 11(a)可看出,回采 B 区和 D 区两处煤柱后,使得整个开挖临空面贯通,跨度成倍增加,致使煤层顶板和下部煤层均发生了明显的应力重分布现象,且在 C 区和 E 区附近存在两处明显的应力集中区,此时围岩的最大竖直压应力约为 16.0 MPa。从

图 11(b) 和 (c) 可以看出,随着下部煤层不断被开采,巷道围岩应力扰动区域不断扩大,应力集中现象更加显著(-40 MPa)。通过以上各图对比分析可知,随着预留煤层的回采和下部煤层的相继开采,使得煤层顶板岩层出现悬空,顶板下方没有支撑体,致使顶板岩层将其部分自重传递给周围尚未被开采的岩体,打破了原有的应力平衡状态,因此发生了应力重分布,并且部分区域出现了应力集中甚至破坏。

4.4 围岩竖直位移研究

各个区域开采后竖直位移云图如图 12 所示。

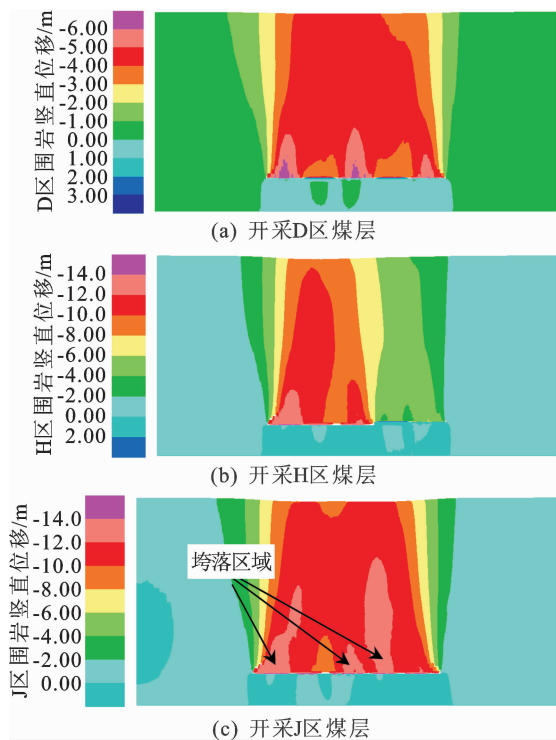


图 12 围岩竖直位移云图

Fig. 12 The vertical displacement nephogram

由图 12(a) 可看出,随着对预留煤柱的回采,煤层上部围岩变形区域连成一片,较 E 区开采后围岩变形显著增大,红色变形区域(变形量值为 5.0 m~6.0 m)已发展至地表且范围也明显增大。煤层顶板的沉降变形约为 6.0 m~7.0 m,而下部煤层则呈隆起变形。从图 12(b) 和 (c) 可以看出,随着下层煤层的相继开采,围岩的变形区域进一步扩大,变形量值也显著增加(10.0 m~12.0 m),10 m 以上变形区域的范围扩大,J 区开采后红色变形区域(量值为 10 m)已发展至地表。

综合应力和地表变形分析可知,将预留煤柱 B 区和 D 区回采后,顶板上方并未发生大规模垮落,而随着后续下层各个区域煤层的开采,开挖凌空面不断增大,围岩的竖直沉降变形值也不断增大,沉降值相同的区域不断扩大且相互贯通,直至 I 区开采

后地表变形达到充分采动,地表的最大沉降值保持不变。可见设计开采工作面规划合理,但在开采下部煤层时要做好支护,以防大规模坍塌事故发生。

5 结论

大佛寺煤矿位于位于彬长矿区开采边界内,所处区域为塬川地貌,地形地质条件非常复杂,本文采用 UDEC 离散元软件对该矿区的特厚煤层开采引起的地表变形和地层应力规律进行了研究,主要取得了以下认识。

1) 通过对开采现状的模拟(A 区、C 区和 E 区)表明地表沉降呈 V 字形,最大沉降变形为 2.34 m;地表水平移动呈倒 S 形分布,最大值为 0.64 m;预留煤柱对于抑制地表变形具有显著的效果;

2) 预留煤柱回采后地表最大沉降变形为 4.32 m,地表水平移动最大值为 0.85 m;

3) 当对下部煤层开采至 I 区时地表变形达到充分采动,此时的沉降变形近似为 10.0 m,当全部开采完毕时地表的水平移动变形为 1.73 m;

4) 上部煤层 A 区、C 区和 E 区开采引起围岩应力重分布且在预留煤柱和边墙部位存在应力集中现象(达 -20 MPa),预留煤柱回采后上部煤层开挖面贯通应力扰动范围和程度进一步增大,当下部煤层全部开采后,顶板岩层临空现象加剧,大部分区域发生冒落破坏;

5) 上部煤层(A 区、C 区和 E 区)开采后围岩变形区域相互叠加,呈 M 形分布且局部顶板存在冒落现象,预留煤柱回采后围岩变形区贯通,红色区域(变形值为 5 m 以上)发展至地表,下部煤层开采后变形范围和量值进一步增大(大部分区域变形值大于 10 m),且顶板上方存在大片垮落区域,破坏区域已经贯通。

参考文献:

- [1] 闫少宏,尹希文. 大采高综放开采几个理论问题的研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(5): 481-484.
YAN Shaohong, YIN Xiwen. Discussing about the main theoretical problems of long wall with top coal caving[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(5): 481-484.
- [2] 何富连,钱鸣高. 大采高压液支架倾倒特征与控制条件[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(4): 20-24.
HE Fulian, QIAN Minggao. Large mining height are broken hydraulic support dumping characteristics and control conditions[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1997, 26(4): 20-24.

- [3] 冯国财,李强,孟令辉. 辽宁三台子水库下特厚煤层综放开采覆岩破坏特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012,23(4):76-80.
FENG Guocai, LI Qiang, MENG Linghui. Failure rules of overburden strata in fully-mechanized sublevel caving mining of specially thick coal seam of Daping mine[J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Control, 2012,23(4):76-80.
- [4] 郜锦柱,杨耀文,王海龙. 综采预留煤柱及跨采底板巷道变形与动态支护[J]. 煤炭技术, 2006,25(8):74-76.
GAO Jinzhu, YANG Yaowen, WANG Hailong. Pre-leave coal piuar combind machinery mining and tunuel floor formation in span mining and dynamic support [J]. Coal Technology, 2006,25(8):74-76.
- [5] 于雷,闫少宏,刘全明. 特厚煤层综放开采支架工作阻力的确定[J]. 煤炭学报, 2012,37(5):737-742.
YU Lei, YAN Shaohong, LIU Quanming. Determination of support working resistance of top coal caving in extra thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2012,37(5):737-742.
- [6] 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 superhigh seam by fully mechanized caving method[J]. Journal of China Coal Science, 2014,39(5):816-821.
- [7] 王金华. 特厚煤层大采高综放开采关键技术[J]. 煤炭学报, 2013,38(12):2089-2098.
WANG Jinhua. Key technology for fully-mechanized top coal caving with large mining height in extra-thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2013,38(12):2089-2098.
- [8] 刘金海,姜福兴,王乃国,等. 深井特厚煤层综放工作面区段煤柱合理宽度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012,31(5):921-927.
LIU Jinhai, JIANG Fuxing, WANG Naiguo, et al. Research on reasonable width of segment pillar of fully mechanized caving face in extra-thick coal seam of deep shaft[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012,31(5):921-927.
- [9] 别小飞,翟新献,张帅. 千秋煤矿特厚煤层综放工作面矿压显现规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2013,41(增刊2):80-82.
BIE Xiaofei, ZHAI Xinxian, ZHANG Shuai. Research on law of strata behaviors in ultra thick seam fully-mechanized caving coal face of Qianqiu coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2013,41(S2):80-82.
- [10] 马立强,张东升,王红胜,等. 厚煤层巷内预置充填带无煤柱开采技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2010,29(4):674-680.
MA Liqiang, ZHANG Dongsheng, WANG Hongsheng, et al. Mining technique with preset packing body in roadway for thick coal seam without coal pillars[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(4):674-680.
- [11] 胡青峰,崔希民,袁德宝,等. 厚煤层开采地表裂缝形成机理与危害性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2012,29(6):864-869.
HU Qingfeng, CUI Ximin, YUAN Debao, et al. Formation mechanism of surface cracks caused by thick seam mining and hazard analysis [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012,29(6):864-869.
- [12] 赵景礼. 厚煤层错层位巷道布置采全厚采煤法的研究[J]. 煤炭学报, 2004,29(2):142-145.
ZHAO Jingli. Research on full-seam mining adopted roadway layout of stagger arrangement in thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2004,29(2):142-145.
- [13] 于斌,刘长友,刘锦荣. 大同矿区特厚煤层综放回采巷道强矿压显现机制及控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2014,33(9):1863-1872.
YU Bin, LIU Changyou, LIU Jinrong. Mechanism and control technology of pressure occurrence in roadway with extra thickness and mechanized caving coal seam in Datong mining area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014,33(9):1863-1872.
- [14] 韩焯,李宁. 隧道衬砌变形引起的地层位移规律探讨[J]. 西安理工大学学报, 2006,22(4):369-372.
HAN Xuan, LI Ning. Ground movement laws caused by the tunnel lining deformation[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006,22(4):369-372.
- [15] 张鹏,李宁,何敏. 软岩圆形隧洞衬砌支护时机现场变形监测判据研究[J]. 西安理工大学学报, 2007,23(2):140-143.
ZHANG Peng, LI Ning, HE Min. Theoretical estimation of the supporting time in soft rocks tunnels under high initial stress[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2007,23(2):140-143.

(责任编辑 王卫勋,王绪迪)