

急倾斜特厚煤层开采煤岩应力场-位移场 演化规律数值模拟

朱帛繁,王正义*,李心涵,赵棫,朱永恒,邱翊

(常州工学院 土木建筑工程学院,江苏 常州 213032)

摘要:为了揭示急倾斜特厚煤层开采矿压显现规律,建立急倾斜特厚煤层工作面数值分析模型,研究水平分段开采过程的应力场-位移场演化规律,确定矿压防治的重点区域,提出针对性的防治建议.结果表明:急倾斜特厚煤层开采煤岩应力场呈现非对称分布特征,顶板侧煤岩处于外错应力集中区,底板侧煤岩处于上方采空卸压区,顶板侧煤岩是防治的重点区域;急倾斜特厚煤层开采工作面煤体变形以底煤底鼓为主,呈现中间大两侧小的“单峰”分布;煤岩位移场演化受开采深度影响显著,上覆岩层随开采深度增大依次发生破断;通过顶板预处理和煤岩体强度弱化可实现对急倾斜特厚煤层开采矿压显现的有效防治.

关键词:急倾斜特厚煤层;采动应力;数值模拟;矿压显现;防治

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2023)03-0038-07

Numerical Simulation of Evolution Law for Stress-displacement Field of Coal-rock Mass in Steeply-inclined and Extra-thick Coal Seam

ZHU Bofan, WANG Zhengyi, LI Xinhan, ZHAO Yan, ZHU Yongheng, QIU Yi

(School of Civil Engineering and Architecture, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China)

Abstract: In order to reveal the regularity of mine pressure behaviors in steeply-inclined and extra-thick coal seams, the numerical analysis model for working faces is established to analyze the evolution law for stress-displacement field of coal-rock mass during the horizontal section mining process. The key areas of mine pressure prevention are determined, and the targeted control suggestions are put forward. Results show that the stress field of coal-rock mass in steeply-inclined and extra-thick coal seam shows the asymmetric distribution characteristics. The coal-rock mass on the roof side is in the exterior stress concentration zone, while the coal-rock mass on the floor side is the distressed zone under the goaf. Therefore, the coal-rock mass on the roof side is the key area of mine pressure prevention. The coal deformation in the working face is dominated by the heaving floor of bottom coal, showing a “single peak” distribution with largeness in the middle and smallness on both sides. The evolution of displacement field for coal-rock mass is significantly affected by the mining depth, and the overlying strata break is in turn with the increase of the mining depth. The effective prevention of mining pressure behavior in steeply-inclined and extra-thick coal seam can be realized through the roof pretreatment and intensity weakening of coal-rock mass.

Keywords: steeply-inclined and extra-thick coal seam; mining stress; numerical simulation; mine pressure behavior; prevention

收稿日期:2022-02-14

基金项目:江苏省高校大学生创新创业训练计划资助项目(202111055051Y);江苏省高等学校自然科学研究资助项目(20KJB440001)

*通信作者, E-mail:15062193699@163.com

急倾斜煤层广泛分布于甘肃、新疆、宁夏等煤炭生产基地,其煤层储量占国内煤炭总储量的15%~20%^[1].我国急斜煤层分布广泛,地质条件大多比较复杂^[2].近年来,在急倾斜特厚煤层开采过程中已出现多起不同破坏程度的冲击地压显现,对急倾斜特厚煤层安全开采和井下作业人员生命安全造成较大威胁^[3].

急倾斜特厚煤层由于特殊的赋存条件和采煤方法,导致其覆岩破断运移和矿压显现规律与一般煤层显著不同,相关的矿压防治对策也不相同.王家臣等^[4]揭示了急倾斜煤层水平分段开采顶板“倾倒-滑塌”破坏模式,提出顶板岩块“破坏形态转变点”的判别准则;石平五、张幼振^[5]构建急倾斜特厚煤层跨层拱结构力学模型,深入分析了跨层拱结构的滑落失稳、结构失稳及对工作面矿压的影响;蓝航^[6]指出近直立特厚两煤层分段同采下的冲击力来自两侧采空岩柱对煤体产生的“撬杆效应”.急倾斜特厚煤层开采矿压显现规律研究已成为煤矿安全开采研究的热点^[7].

现有文献对特定矿井赋存和开采条件下的覆岩运移或层间岩柱失稳诱发应力集中区动力显现进行了研究,但对急倾斜特厚煤层工作面采动应力非对称分布特征、煤岩变形时空演化规律还未深入涉及.因此,亟待构建数值模拟模型研究急倾斜特厚煤层开采煤岩应力场-位移场演化规律,揭示该类矿压显现特征,对类似条件下的矿压防治具有指导作用.

1 数值模型建立

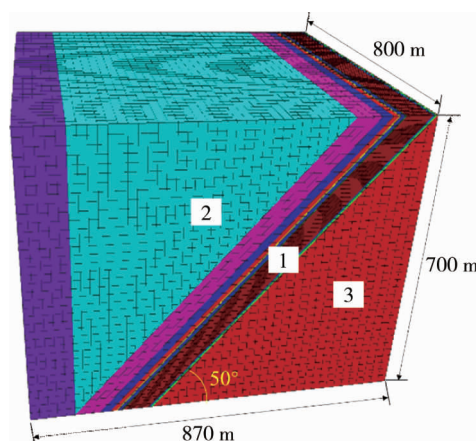
窑街三矿五采区的主采煤层为煤二层.基于五采区5521工作面地质和开采条件,采用FLAC^{3D}软件建立三维数值模型,如图1所示.模型尺寸为800 m(长)×870 m(宽)×700 m(高),煤层倾角50°;煤层工作面采用水平分段开采方法,工作面推进长度400 m.

采用莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)屈服准则作为煤岩体的破坏判据^[8],如式(1)所示.

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - 2C \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (1)$$

式中: f_s 为煤岩破坏评价指标; σ_1, σ_3 分别为最大、最小主应力,MPa; φ 为内摩擦角,(°); C 为黏聚力,MPa.

当 $f_s > 0$ 时,表示煤岩体已发生剪切破坏;当 $f_s < 0$ 时,表示煤岩体未发生剪切破坏;当 $f_s = 0$ 时,表示煤岩体处于极限平衡状态.



1—煤层;2—顶板;3—底板.

图1 三维数值计算模型

模型顶面按实际地表水平设置,不再施加补偿载荷;模型侧面和底面均为固定边界.重力加速度取 9.8 m/s^2 ,侧压系数为1.2.基于五采区527钻孔柱状,并通过室内岩石力学试验,测定煤岩物理力学参数,如表1所示.

表1 岩石力学参数

岩石名称	厚度/m	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
矩形砂岩带	100	2 600	6.0	4.2	3.0	32
上楔形砂岩带	—	2 600	6.0	4.2	3.0	32
油页岩	57	2 100	3.4	2.8	1.9	33
油砂互层	24	2 500	6.0	4.3	1.2	36
铝质泥岩	13	2 418	4.5	2.2	2.3	35
煤一层	4	1 328	1.0	0.4	2.8	30
油页岩	9	2 100	10.4	2.8	1.9	33
细砂岩	4	2 800	7.1	4.0	4.0	33
煤二层	60	1 328	1.0	0.4	2.8	30
粉砂岩	4	2 450	9.4	2.0	2.5	36
粗砂岩	6	2 250	8.0	2.0	2.5	40
下楔形砂岩带	—	2 600	6.0	4.2	3.0	32

以 15 m 为一个分段工作面开挖高度,沿煤层倾向共开挖 6 个分段工作面,分析急倾斜特厚煤层沿煤层倾向的应力场-位移场演化规律;此外,每个分段工作面推进过程中,以 50 m 为开挖步距,分析急倾斜特厚煤层沿煤层走向的应力场-位移场演化规律.

2 首采工作面的应力场-位移场演化规律

2.1 首采工作面回采 50 m 处

首采工作面的埋深为 250 m,其原岩自重应力为 6.25 MPa.首采工作面回采 50 m 处的倾向剖面应力场-位移场分布如图 2 所示.由图 2a 可知,工作面开挖使得上方煤体和底煤应力释放,而高应力向顶板和底板转移;顶板侧和底板侧煤岩受力呈现非对称性,即顶板侧的应力高于底板侧,其原因是顶板侧处于外错应力集中区,而底板侧处于上方采空卸压区.因此,工作面顶板侧煤岩是急倾斜特厚煤层开采矿压防治的重点区域^[9].由图 2b 和图 2c 可知,首采工作面的围岩变形以底煤底鼓为主,呈现中间大两侧小的“单峰”分布;上方煤体下沉次之,顶板弯曲下沉和底板隆起最小.这表明底煤底鼓也是急倾斜特厚煤层开采矿压防治的重点,底煤底鼓最大位置位于工作面中部,需要防范中部区域的工作面支架发生破损.

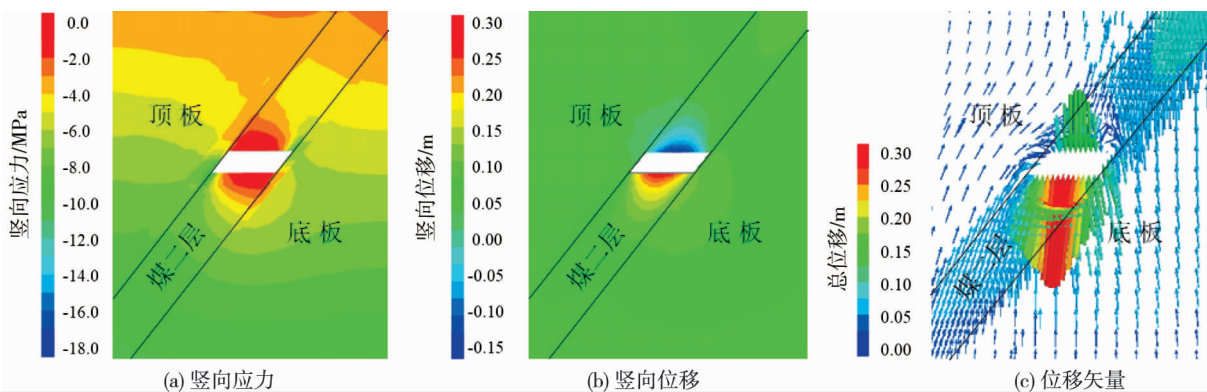


图2 工作面回采 50 m 处的倾向剖面应力场-位移场分布

2.2 首采工作面推进过程

首采工作面每 50 m 开挖一次,获得首采工作面推进过程的走向剖面应力演化规律,如图 3 所示.由图 3 可知,随着工作面不断向前推进,工作面超前支撑压力随之前移,上覆岩层的竖向应力逐步降低且应力降低区域逐步增大.这表明顶板的破裂范围不断向上贯通扩大,类似于近水平煤层工作面开采过程的应力演化规律.

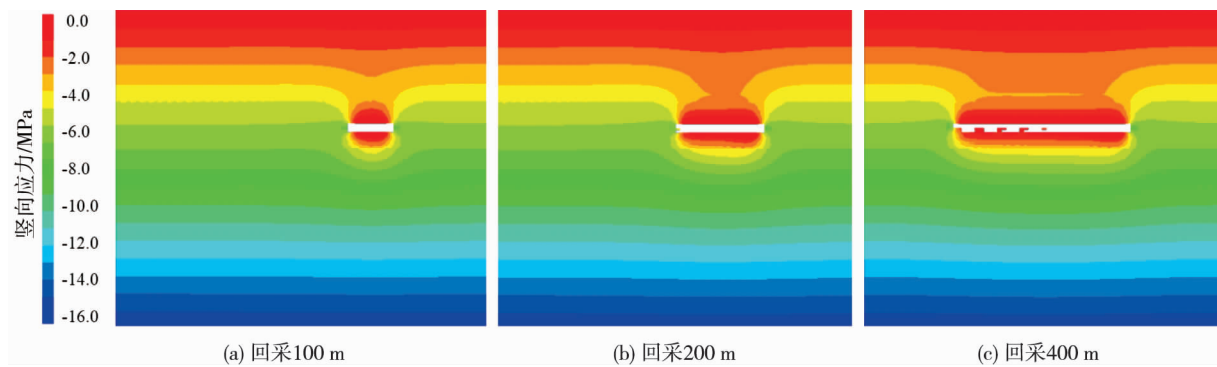


图 3 首采工作面推进过程的走向剖面应力演化

首采工作面推进过程的走向剖面位移演化规律,如图 4 所示.由图 4 可知,随着工作面的推进,上覆岩层不断下沉,而工作面下部底煤不断底鼓,且开挖空间越大,煤岩位移量也越大.首采工作面从回采 100 m 起至回采 400 m 结束,底煤的底鼓量变化较覆岩的下沉量更为显著,表明首分段工作面底煤受采动应力影响较大.

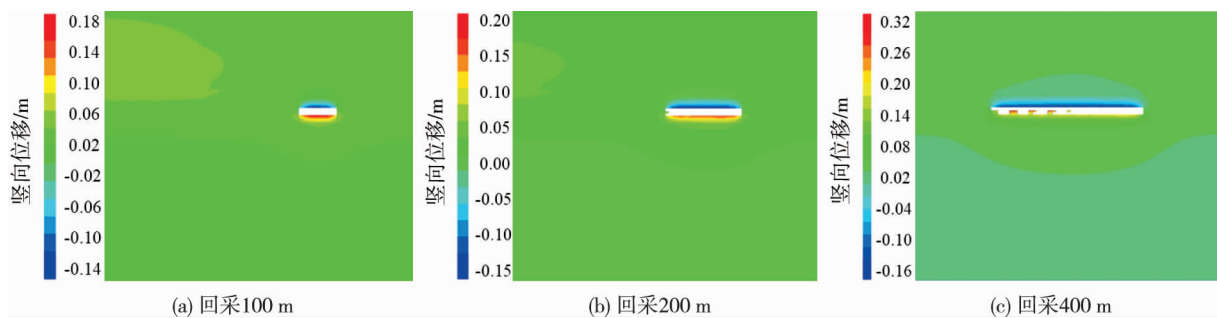


图 4 首采工作面推进过程的走向剖面位移演化

3 多分段开采过程的应力场-位移场演化规律

3.1 第 2 分段工作面回采期间

首分段工作面回采结束后,接替回采第 2 分段工作面.同样以回采 50 m 处为例,获得第 2 分段工作面倾向剖面应力场-位移场分布,如图 5 所示.由图 5a 可知,第 2 分段开挖下的围岩应力分布特征与首分段开挖下的类似,但顶板侧煤体的集中应力由 7.4 MPa 升高至 9.2 MPa,应力集中更为显著.由图 5b 和图 5c 可知,第 2 分段工作面的围岩变形同样以底煤底鼓和上方煤体下沉为主,但顶板弯曲下沉量有所增大,表明直接顶已发生初次破断.

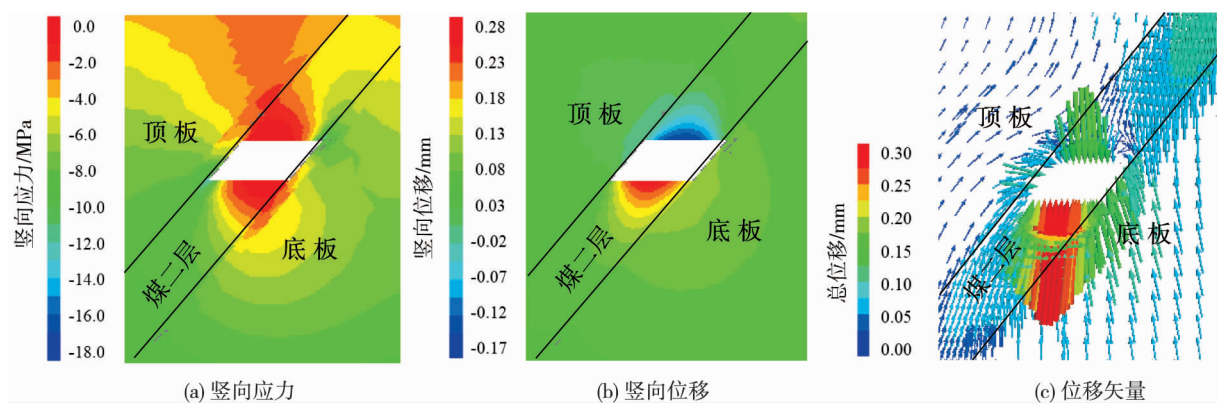


图 5 第 2 分段工作面倾向剖面应力场-位移场分布

3.2 第3、第4分段工作面回采期间

继续开挖第3、第4分段工作面,同样以回采50 m处为例,获得第3、第4分段工作面倾向剖面应力场-位移场分布,如图6所示.由图6a和图6d可知,随着倾向开挖空间的增大,工作面顶板侧煤岩的应力集中程度进一步增大,第3分段达到10.2 MPa,第4分段达到11.3 MPa,顶底板两侧煤岩的非对称性进一步加剧.顶板侧煤岩较高的应力集中容易使上覆岩层积聚大量的弹性应变能,一旦发生破断将对工作面产生较强的动载扰动^[10].由图6b和图6c可知,第3分段工作面的围岩变形同样以底煤底鼓为主,但此时顶板的弯曲下沉量已经接近上方煤体的下沉量,且明显大于第2分段开采时的位移量,表明老顶发生了初次破断.由图6e和图6f可知,第4分段工作面的围岩变形同样以底煤底鼓为主,此时顶板的弯曲下沉量进一步增大,覆岩破裂范围进一步向上方亚关键层岩层延伸,不断扩大.

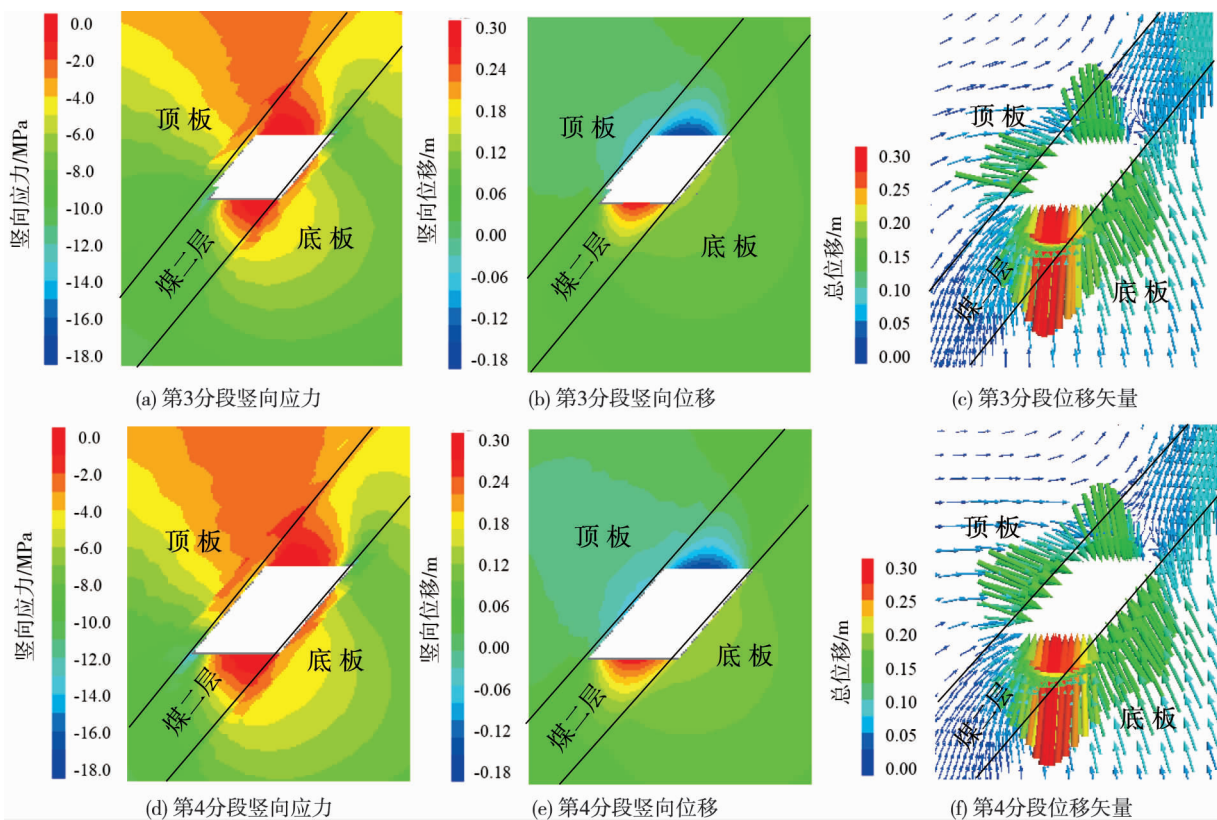


图6 第3、第4分段工作面倾向剖面应力场-位移场演化

3.3 第5、第6分段工作面回采期间

继续开挖第5、第6分段工作面,同样以回采50 m处为例,获得第5、第6分段工作面倾向剖面应力场-位移场分布,如图7所示.由图7a和图7d可知,随着倾向开挖空间的增大,工作面顶板侧煤岩的应力集中程度进一步增大,第5分段达到12.4 MPa,第6分段达到14.8 MPa.显然,随着分段开挖次数的增加,一方面采深随之增大,原岩应力也相应增大;另一方面,顶底板岩层的活动空间也随之增大,工作面煤岩所受的采动影响也相应增大.由图7b和图7c可知,第5分段工作面的围岩变形特征与之前的完全不同,此时顶板弯曲下沉量稍大于底煤底鼓变形量,表明开挖至第5分段工作面时,顶板下沉进一步增大,老顶发生了周期破断,且上方亚关键层也有一定的弯曲变形.现场监测表明^[11],在急倾斜特厚煤层水平分段综放开采过程中,一般每开采2~3个分段老顶垮落一次,呈现周期性垮落特征.因此,在实际生产中应注意顶板岩层随开采分段的增加而产生的周期性垮落,及时采取针对性的卸压解危措施.

由图7e和图7f可知,第6分段工作面的围岩变形特征又与第5分段工作面的显著不同,顶板弯曲下沉量远大于底煤底鼓变形量,煤岩变形由最初的以底煤向采空区方向运移为主转变为以顶板岩层向采空区运移为主,此时上方亚关键层已发生初次破断.由此可以推测,在矿井实际开采过程中,当开采分段数量

足够多,即开采空间足够大时,上覆岩层的破裂范围将逐步向上方岩层发展,直至贯通地表,引起地表的台阶沉降^[12].

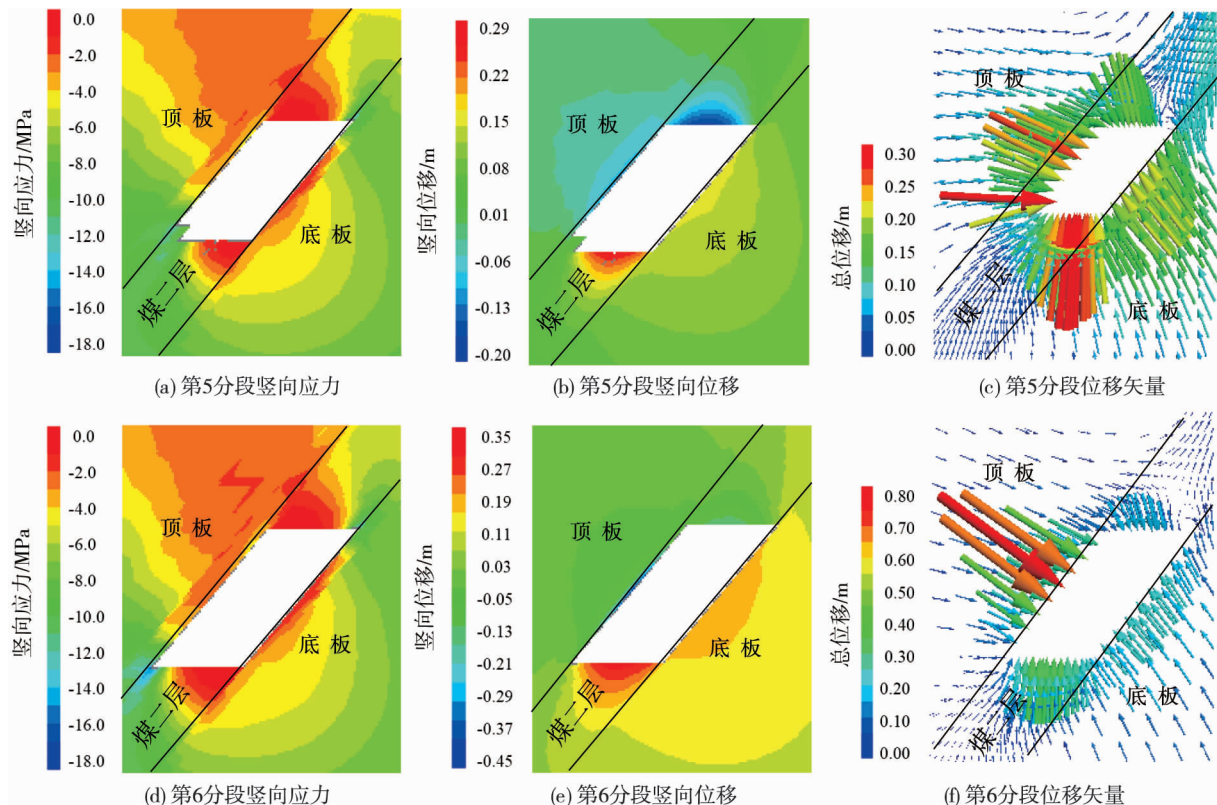


图7 第5、第6分段工作面倾向剖面应力场-位移场演化

4 急倾斜特厚煤层开采矿压防治建议

基于上述数值模拟分析结果,可从如下2个方面提出急倾斜特厚煤层开采矿压防治建议.

1) 顶板预处理

缩短顶板岩层暴露长度可大幅度降低岩梁所集聚的弹性变形能^[13-14].据此,可以对急倾斜特厚煤层开采顶板岩层采取深孔预裂爆破技术,即在每一分段顶板巷按一定间距向顶板钻孔进行爆破,人为地切断老顶及其他亚关键层,从而切断采空区与待采区之间顶板的连续性,减小顶板的来压步距,使顶板提前破断,降低顶板的来压强度.此外,顶板爆破后其破碎程度更高,可以使采空区的充填程度更高,形成可以缓和和冲击的垫层.

2) 煤岩体弱化

针对工作面煤体,尤其是底煤,可采用爆破卸压、大直径钻孔卸压等措施进行强度弱化^[15].急倾斜特厚煤层顶板侧煤岩应力集中显著,因此选取顶板巷作为煤岩体弱化实施的场所,在工作面超前150 m区域实施以上弱化措施.其中,爆破卸压钻孔孔径一般为42 mm,通过爆破释放煤岩体中的弹性能,使高集中应力向煤体深部转移;大直径卸压钻孔孔径一般大于100 mm,通过钻孔给煤体破裂提供空间,扩大煤体破坏范围,起到弱化煤岩的作用.

5 结论

1) 急倾斜特厚煤层开采煤岩应力场呈现非对称分布,顶板侧煤岩处于外错应力集中区,底板侧煤岩处于上方采空卸压区,顶板侧煤岩是防治的重点区域.随着开采深度的增大,顶板侧煤岩的应力集中程度相应增大,矿压显现危险性也增大.

2) 急倾斜特厚煤层工作面煤体变形以底煤底鼓为主, 呈现中间大两侧小的“单峰”分布。煤岩位移场演化受开采深度影响显著, 当浅部开采时, 工作面煤体变形以底煤底鼓为主, 随着开采深度的增大, 上覆岩层依次破断导致顶板下沉量逐步增大。第3分段开采时老顶初次破断, 第5分段开采时老顶周期破断, 第6分段开采时亚关键层初次破断。

3) 顶板深孔预裂爆破技术可以人为切断采空区与待采区之间顶板的连续性, 减小顶板暴露面积, 降低顶板来压强度。爆破卸压和大直径钻孔卸压可实现煤岩体强度弱化, 降低矿压显现的危险性。

参考文献:

- [1] 孙闯, 陈东旭, 程耀辉, 等. 急倾斜煤层坚硬顶板塌落规律及控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(8): 1647-1658.
- [2] 鞠文君, 郑建伟, 魏东, 等. 急倾斜特厚煤层多分层同采巷道冲击地压成因及控制技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(2): 280-289.
- [3] 何江, 窦林名, 曹晋荣, 等. 急倾斜特厚煤层水平分段开采冲击矿压机理[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1701-1709.
- [4] 王家臣, 杨胜利, 李良晖. 急倾斜煤层水平分段综放顶板“倾倒-滑塌”破坏模式[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(6): 1175-1184.
- [5] 石平五, 张幼振. 急斜煤层放顶煤开采跨层拱结构分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 79-82.
- [6] 蓝航. 近直立特厚两煤层同采冲击地压机理及防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(增刊2): 308-315.
- [7] 荣海, 张宏伟, 陈建强, 等. 基于多因素模式识别的急倾斜特厚煤层冲击地压危险性预测[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(1): 125-132.
- [8] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [9] 来兴平, 杨毅然, 王宁波, 等. 急斜煤岩体动力失稳时空演化特征综合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 583-592.
- [10] 王正义, 窦林名, 何江. 动静组合加载下急倾斜特厚煤层开采煤岩冲击破坏特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(5): 886-894.
- [11] 崔峰, 来兴平, 曹建涛, 等. 急倾斜煤层水平分段综放面开采扰动影响分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(4): 610-616.
- [12] 戴华阳, 郭俊廷, 易四海, 等. 特厚急倾斜煤层水平分层开采岩层及地表移动机理[J]. 煤炭学报, 2013, 38(7): 1109-1115.
- [13] 王正义, 窦林名, 何江, 等. 急倾斜特厚煤层水平分段开采冲击机理及防治[J]. 煤矿安全, 2021, 52(7): 207-214.
- [14] 张基伟, 王金安. 大倾角特厚煤层悬顶结构能量分布特征与防冲方法[J]. 煤炭学报, 2014, 39(增刊2): 316-324.
- [15] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 煤矿冲击地压动静载叠加原理及其防治[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1469-1476.