

姚琦,冯涛,廖泽.急倾斜煤层走向综采覆岩破坏特性研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(4):8-16.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.002

Yao Q, Feng T, Liao Z. Study on Characteristics of Rock-strata Fracture of Fully Mechanized Mining in Steep Inclined Coal Seam [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019,34(4): 8-16.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.002

急倾斜煤层走向综采覆岩破坏特性研究

姚琦^{1,2},冯涛^{2*},廖泽²

(1.湖南城市学院 土木工程学院,湖南 益阳 413000;

2.湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201)

摘要:为研究急倾斜煤层走向综采覆岩变形及破坏规律,采用力学分析、相似模拟实验及数值模拟分析,得到工作面覆岩破坏特性及岩层移动规律.研究表明:(1)急倾斜煤层综采面推进后,顶板位于工作面中部偏上覆岩处的岩层出现了挠度最大值,导致顶板断裂呈现由工作面顶板岩层的“中上部-上部-中下部-下部”的垮落顺序.(2)工作面上部覆岩以产生拉伸破坏为主,中、下部覆岩以剪切破坏为主;直接顶冒落的矸石充填下部近1/3的采空区域,且上部出现垮落区域比下部范围明显更大.(3)工作面下部应力集中系数比上部大1.2倍左右,工作面的下部端头支护处在极不均匀的高应力集中区,工作面端头及超前支护相当困难.

关键词:急倾斜煤层;综采;岩层移动;相似模拟;数值分析

中图分类号:TD323 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2019)04-0008-09

Study on Characteristics of Rock-strata Fracture of Fully Mechanized Mining in Steep Inclined Coal Seam

Yao Qi^{1,2}, Feng Tao², Liao Ze²

(1. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mimes, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: To study the overlying strata deformation and failure of steep seam when using fully mechanized mining along the strike, the failure characteristics and movement of overlying strata was studied by mechanical analysis, simulated experiment with analogy material and numerical simulation analysis. And the results show that, (1) the maximum deflection appeared on the position about middle-upper part, the caving sequence of roof is middle-upper part, upper part, lower-middle part and bottom. (2) after mining along the strike, the overlying strata failure is mainly tensile fracture, the failure of middle and bottom of working face overlying strata is mainly shear failure. The one third lower gob area filled by gangue which is caved from immediate roof, and the upper cave zone is obvious bigger than lower cave zone. The caving shape is upturned bear bottle in the direction of dip. (3) the stress concentration factor at the lower part of the working face is about 1.2 times larger than that of the upper part. The lower end support of the working face is in a highly uneven high stress

收稿日期:2017-07-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274095);煤矿安全开采技术湖南省重点实验室开放基金资助项目(201402)

*通信作者,E-mail: Tfeng@hnust.edu.cn

concentration area, and the working face end and advanced support are quite difficult.

Keywords: steep inclined coal seam; fully mechanized mining; rock-strata deformation; similar simulation; numerical analysis

我国急倾斜煤层储量占煤炭总储量的15%左右,开采急倾斜煤层引起的顶板破断与岩层移动规律有着与水平煤层或缓斜煤层明显的差异.伍永平等^[1]提出了“R-S-F”系统动力学控制理论,该理论奠定了大倾角煤层开采的理论和技術基础;王金安等^[2]建立了基本顶在横纵载荷作用下出现了“V-Y”断裂,解释了基本顶的破断裂隙线发育规律,同时得到了基本顶在周期来压下从“中下部-中上部-上部-下部”的破断顺序;LI Xiaomeng^[3]对急倾斜煤层开采顶板岩层的“砌体梁”结构的稳定性进行了分析,得到急倾斜岩梁的稳定性判据;杨帆^[4]对急倾斜煤层开采后,顶板岩层产生“厂”型拱岩板的稳定性进行了分析,得到了影响软硬互层巷道破坏影响因素;屠洪盛^[5]对顶板呈现“耳朵”形结构壳体分析,揭示基本顶以倾斜“砌体梁”模型的特点;王红伟^[6]基于应力拱壳理论,提出顶板岩层应力拱壳演化判别系数,得出了应力拱壳的变形移动规律;王宁波等^[7]通过急倾斜综放工作面顶板岩层结构产生的裂隙分区破裂的力学条件,得到了裂隙发育的动态破裂演化特征;冯锦艳^[8]通过离散元数值模拟计算,建立了采动裂隙分形维数和采深的关系式,定量描述裂隙的演化规律;来兴平^[9]针对急倾斜水平分段综放开采诱发的动力学灾害,综合分析煤岩体失稳的时空演化特征,得到急斜煤层巷道顶板侧煤岩体变形失稳起始于开挖自由面的中部位置,底板侧煤岩体表现为起始于底角位置的剪切滑移;姚琦^[10]通过急倾斜煤层综采走向分段充填的顶板应力分布规律和倾向岩梁破坏特性进行探索,得到急倾斜煤层分段充填开采顶板应力集中于工作面中上部,顶板最先破断位于中上部位置,未充填段的倾向岩梁断裂呈现“F”断裂.从以上学者们的研究成果可知:开采急倾斜煤层,顶板变形破断呈现非对称破坏特性,顶板岩层变形机理极为复杂,很有必要进一步探索顶板岩层变形破坏机理.

本文以湘永煤矿工程地质资料为背景,采用理论分析、物理模拟及数值模拟等手段,得到急倾斜综采工作面的破坏特性及岩层变形移动规律,为急倾斜煤层开采的工作面支护与矿压控制提供理论参考.

1 力学模型

急倾斜工作面沿走向推进后,直接顶垮落的矸石充填采空区下部对顶板起到支撑作用,而上部的顶板冒落后出现暴露,在上覆岩层与自身重力的共同作用下产生弯曲、变形、移动及破坏,相比工作面下部顶板破坏程度更大.顶板在层面上的分力随着煤层层倾角的增大而增大,促使顶板岩层向下滑移趋势更大.急倾斜煤层开采顶板受力分析如图1所示,图1中: L 为工作面长度, m ; q_0 为上部岩层对岩梁的作用力, kN/m ; σ_0 为 b 点埋深以上岩层的重力, N ; P , P_{by} 为 σ_0 在顶板岩梁层面与垂直层面的分力, N ; M_0 为 O 点的弯矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; R_0, R_b 为支座反力, N .图1为将顶板简化为梁的模型,下部有充填矸石反支撑作用可简化为固支端,上部简化为简支端较为适宜.工作面下部冒落矸石的充填反力随着压实度由上至下逐渐增大,设 q 为线性分布:

$$q = F_0 \left(1 - \frac{x}{l}\right), \quad (0 \leq x \leq l). \quad (1)$$

式中: q 为下部线性充填反力; F_0 为充填反力最大值, MPa ; l 为充填长度, m .

如图1所示,顶板岩梁受到上覆岩层重力(q_0)、充填反力(q)和自身重力的共同作用,在此忽略岩梁自重(相对地应力为小量).由此,上覆岩层重力 q_0 与 b 点以上岩层重力的分力 P 均对岩梁起到弯曲变形

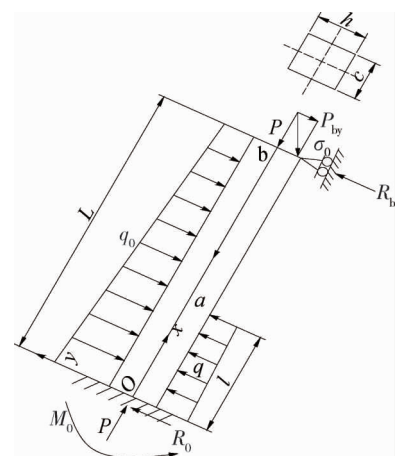


图1 急倾斜煤层开采顶板受力分析

作用.图中 $\sigma_0 = \gamma H$ (H 为上顺槽埋深),由于梁受到的弯矩、挠度与外力为非线性关系,不能采用叠加原理进行分析计算.

根据力学平衡原理及边界条件(上部为简支端 $M_b = 0$),得出两端支座反力和弯矩方程 $M(x)$ 为

$$\begin{cases} R_0 = \frac{P_{by} + q_0L - ql - qL^2 - ql^2 + \frac{1}{2}q_0l^2 - P_{by}L + qLl}{l - L}; \\ R_b = q_0L - ql + \frac{P_{by} - P_{by}l - ql + q_0l - ql^2 + \frac{1}{2}q_0l^2}{L - l} + \frac{2P\omega}{L}. \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} M(x) = \left(\frac{q_0 - q}{2}\right)x^2 + \left(\frac{P_{by} + q_0L - ql - qL^2 - ql^2 + \frac{q_0l^2}{2} - P_{by}L + qLl}{L - l}\right)x + P\omega, (0 \leq x \leq l); \\ M(x) = \left(q_0 - \frac{q}{2}\right)x^2 + \left(\frac{2\left(P_{by} + q_0L - ql - qL^2 - ql^2 + \frac{q_0l^2}{2} - P_{by}L + qLl\right)}{L - l} - ql\right)x + 2P\omega, (l \leq x \leq L). \end{cases} \quad (3)$$

再由载荷集度、剪力和弯矩之间的微分关系有

$$\begin{cases} EI \frac{d^2\omega}{dx^2} - P\omega = \left(\frac{q_0 - q}{2}\right)x^2 + \left(\frac{P_{by} + q_0L - ql - qL^2 - ql^2 + \frac{1}{2}q_0l^2 - P_{by}L + qLl}{L - l}\right)x, (0 \leq x \leq l); \\ EI \frac{d^2\omega}{dx^2} - 2P\omega = \left(q_0 - \frac{q}{2}\right)x^2 + \left(\frac{2\left(P_{by} + q_0L - ql - qL^2 - ql^2 + \frac{1}{2}q_0l^2 - P_{by}L + qLl\right)}{L - l} - ql\right)x, (l \leq x \leq L). \end{cases} \quad (4)$$

式中: E 为岩梁弹性模量,Gpa; I 为岩梁转动惯量, m^4 .

式(4)是一组关于 ω 的二阶微分方程,轴力 P 起到增大岩梁弯矩的作用.令

$$\begin{cases} K^2 = \frac{P}{EI}; \\ G = \frac{P_{by} + q_0L - ql - qL^2 - ql^2 + \frac{q_0l^2}{2} - P_{by}L + qLl}{L - l}. \end{cases} \quad (5)$$

则有

$$\begin{cases} \frac{d^2\omega}{dx^2} - K^2\omega = K^2\left(\frac{q_0}{2P} - \frac{q}{2P}\right)x^2 + \frac{G}{P}x, (0 \leq x \leq l); \\ \frac{d^2\omega}{dx^2} - 2K^2\omega = K^2\left(\frac{2q_0 - q}{2P}\right)x^2 + \left(\frac{2G - ql}{P}\right)x, (l \leq x \leq L). \end{cases} \quad (6)$$

通过计算,上式通解为

$$\begin{cases} \omega = -\frac{K^2Pqx^4}{24} - \frac{x^3(4G - K^2q_0x)}{24P} + Bx + A, (0 \leq x \leq l); \\ \omega = -\frac{K^2x^4(q - 2q_0)}{12P} - \frac{x^3(2G - ql)}{6P} + Dx + C, (l \leq x \leq L). \end{cases} \quad (7)$$

式中: A, B, C, D 为积分常数.

由于岩梁在两端挠度为0,且挠曲线是连续光滑曲线,在岩梁 a 点($x=l$)处挠度相同,转角也相同,则有

$$\begin{cases} A = 0; \\ C + DL - \frac{L^3(2G - ql)}{6P} - \frac{K^2L^4(q - 2q_0)}{12P} = 0; \\ Bl - \frac{l^3(4G - K^2q_0l)}{24P} - \frac{K^2Pql^4}{24} = C + Dl - \frac{l^3(2G - ql)}{6P} - \frac{K^2l^4(q - 2q_0)}{12P}; \\ B - \frac{3l^2G}{8P} - \frac{K^2q_0l^3}{6P} - \frac{K^2Pql^3}{6} = D - \frac{Gl^2}{P} + \frac{2ql^3}{3P} - \frac{K^2l^3(q - 2q_0)}{3P}. \end{cases} \quad (8)$$

则由式(8)联立解出4个常数:

$$\begin{cases} A = 0; \\ B = \frac{16ql^3 - 15Gl^2 + 8GL^2P^2 + 2K^2qL^3 - 4K^2q_0L^3 - 8K^2ql^3 + 16K^2q_0l^3 + 4K^2Pql^3 - 4L^2P^2ql + 4K^2P^2ql^3}{24P} - \frac{l^3(12ql - 11G - 6K^2ql + 12K^2q_0l + 4K^2Pql + K^2Pq_0l + 3K^2P^2ql)}{24LP}; \\ C = \frac{K^2l^4(4q + q_0 + 3Pq)}{24} - \frac{l^3(11G - 12ql + 6K^2ql - 12K^2q_0l)}{24P}; \\ D = \frac{L^2(4GP^2 + K^2qL - 2K^2Lq_0 - 2P^2ql)}{12P} - \frac{l^3(12ql - 11G - 6K^2ql + 12K^2lq_0 + 4K^2Pql + K^2Pq_0l + 3K^2P^2ql)}{24LP}. \end{cases} \quad (9)$$

可知由于在矸石支撑的区域内,顶板下沉量有限,最大的挠度发生在 $l < x < L$ 区间,即求在此区间 $d\omega/dx=0$ 时,存在最大值:

$$\frac{d\omega}{dx} = d \left(\begin{array}{l} -\frac{K^2x^4(q - 2q_0)}{12P} + Dx \\ -\frac{x^3(2G - ql)}{6P} + C \end{array} \right) / dx = 0, \quad (l \leq x \leq L). \quad (10)$$

以湘永煤矿工作面工程条件为算例:工作面长度为100 m,煤层平均厚度1.6 m,走向 30° ,倾向 120° ,平均倾角 58° ,平均开采深度为500 m,顶板为粉砂岩或中细粒砂岩,底板为细砂岩或粉砂岩.根据力学实验及工程类比,将基本顶的各项基本参数取值:煤层倾角 $\alpha=60^\circ$,岩层平均容重 $\gamma=2\,500\text{ N/m}^3$,上顺槽埋深 $H=530\text{ m}$,工作面长度 $L=90\text{ m}$,下部充填长度 $l=L/3$, $F_0=0.2\sigma_0$,岩梁弹性模量 $E=10.4\text{ GPa}$,岩梁转动惯量 $I=bh^3/12=3.512\times 10^3\text{ m}^4$,将参数代入式(10)与式(9)联立,计算可得 $x=0.58L$ 处有最大值,即为在工作面顶板岩层的中上部挠度取得最大值,说明工作面推进后,顶板上部岩层最初开裂位置位于工作面的中上部位置.

2 相似模拟实验

2.1 模型设计

相似实验采用平面应力模型,尺寸宽厚高 $2.5\text{ m}\times 0.2\text{ m}\times 1.8\text{ m}$,顶部补偿应力采用重力恒压加载.相似材料用“砂石+石膏+水泥”进行相应配比制成,分层采用云母粉进行分层处理.岩层位移用全站仪进行观测并记录,采用压力盒进行应力监测.根据相似材料配比实验结果和力学实验,如表1所示为岩层力学参数.通过相似材料配比实验,模型相似比及用料配比如表2所示.

沿层面在距煤层法线距离分别为5,10,15,20,25 cm 设置 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5 共5条监测线,每条线上设10个监测点,底板离煤层5 cm 处设置1条监测线,布置9个监测点.同时在顶板 Z_1 监测线的岩层中布置了6个压力盒,监测顶板来压变化.

表1 围岩力学参数

岩性名称	厚度/m	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
粉砂岩	55.52	2 580	9.3	6.0	3.4	5.9	37
中粒砂岩	35.40	2 700	6.8	3.5	3.0	5.6	33
粉砂岩	26.35	2 580	9.3	6.0	3.4	5.9	37
6煤	1.60	1 460	5.0	2.0	0.8	1.8	25
中粒砂岩	15.80	2 700	6.8	3.5	3.0	5.6	33
砂质泥岩	32.06	2 250	4.8	2.1	1.2	3.5	30
粉砂岩	29.65	2 580	9.3	6.0	3.4	5.9	37

表2 模型相似材料配比

岩层名称	骨料:胶结材料	石灰:石膏:水泥	水灰比	几何相似比	容重相似比	时间相似比	动力学相似 R_M
粉砂岩	9:1	4.5:6.0:0.5					$0.007R_H$
中粒砂岩	8:2	3.0:6.0:1.0					
粉砂岩	9:1	4.5:6.0:0.5					
6煤	散煤		0.6:1.0	1:100	0.7:1.0	1:10	
中粒砂岩	8:2	3.0:6.0:1.0					
砂质泥岩	9.5:1.0	4.0:5.9:0.1					
粉砂岩	9:1	4.5:6.0:0.5					

注: R_H 为原型

2.2 实验结果分析

通过按照相似时间比进行开采,进行了观测和记录顶板的应力和位移变化情况.如图2所示为各监测线上的点的位移变化.从图2可以看出:位于工作面中上部的3#~5#监测点水平位移和垂直位移移动量较大,最大分别达到了23,19和17mm.可以说明上覆岩层移动在工作面的中上部位置变形量最大,随后向工作面中部及下部变形逐渐减小.

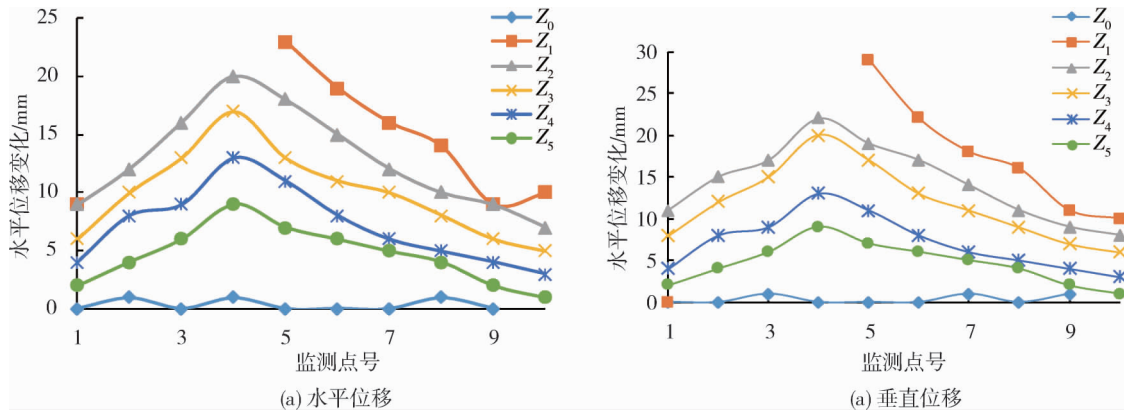


图2 各监测点的位移量

如图3所示为压力监测结果.从图3可知:工作面推进后压力值比开采前的压力值减小了.其实质是煤层开挖后,顶板覆岩层出现了卸压.

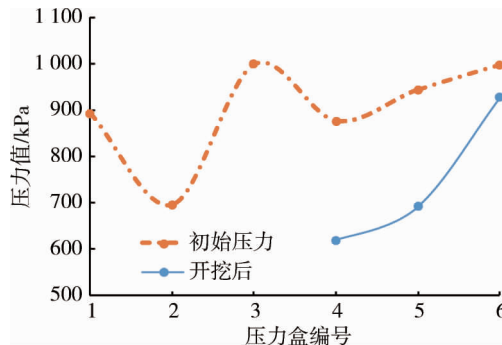


图3 顶板应力监测点结果

如图4所示为模型开挖后的垮落形态变化图.从图4可以看出:顶板岩层呈现垮落区、裂隙发育区、弯曲下沉区和下部采空充填区,压实支撑区占工作面近1/3的区域,为工作面下部的顶、底板提供了支撑反力.

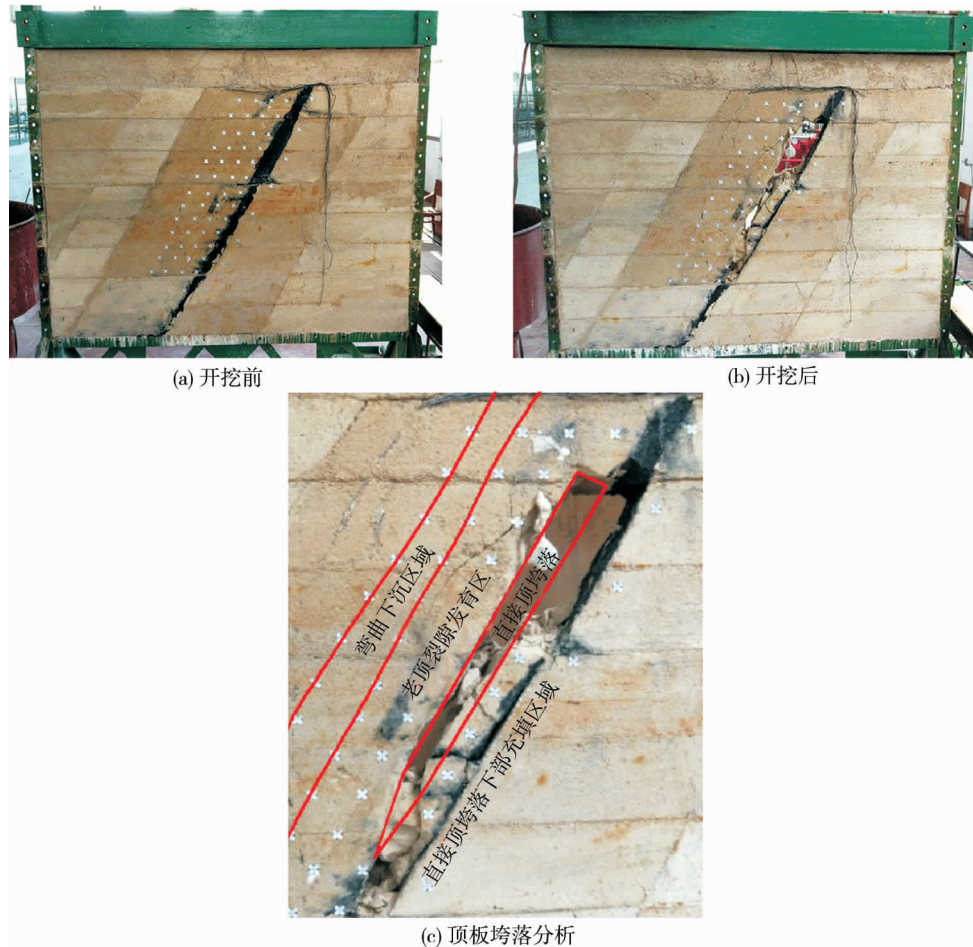


图4 急倾斜走向开采岩层模拟实验垮落形态

3 数值模拟分析

3.1 应力与位移变化

依据湘永煤矿的工程实际条件,岩层力学参数如表1所示.利用FLAC^{3D}软件建立模型 $200\text{ m}(x) \times 200\text{ m}(y) \times 200\text{ m}(z)$,模型有183 360单元,191 552节点.设置底部为固定边界,侧面为位移边界,上表面为应力边界(10.4 MPa),采用Mohr-Coulomb强度准则,在离工作面的上覆岩层2 m处切出一层面和离工作面切眼中心位置($y=52\text{ m}$)处作一倾斜剖面.图5为工作面从开切眼4 m,推进20,40,60,80,100 m不同尺寸时的两剖面主应力变化图.

从图5中的主应力的等值线云图可以看出:随着工作面的推进,在顶板形成了由上至下的“瓶状”的卸压范围,且上顺槽处的应力集中系数为1.2,而下顺槽应力集中系数为2.3.由此可知:工作面下顺槽的端头支护和超前支护在集力区,且处在应力不均匀状态,支护较为困难.

如图6为工作面推进不同尺寸时的最大位移变化图,从图6可以看出:位移变化则是刚开切眼出来时,工作面中上部出现了最大位移为16.8 mm,随后工作面继续推进至20 m后,最大位移向工作面下部开始转移,直至工作面推进100 m后,最大位移出现在工作面偏下处,位移为92.6 mm.可见,位移大小变化也说明了顶板从工作面的中上部开始移动垮落,随后转向下部,与相似模拟结果出现了类似的位移变化现象.

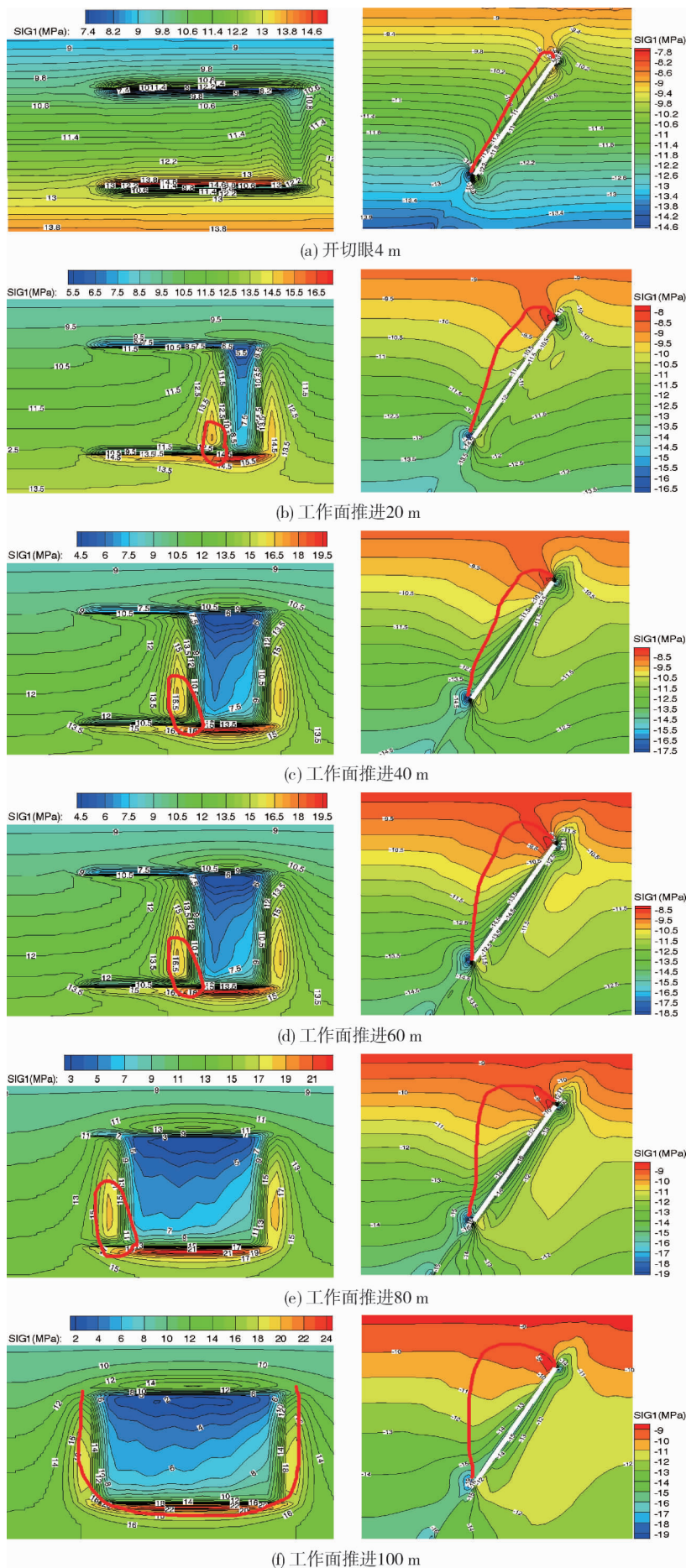


图5 工作面推进不同尺寸时的主应力状态变化

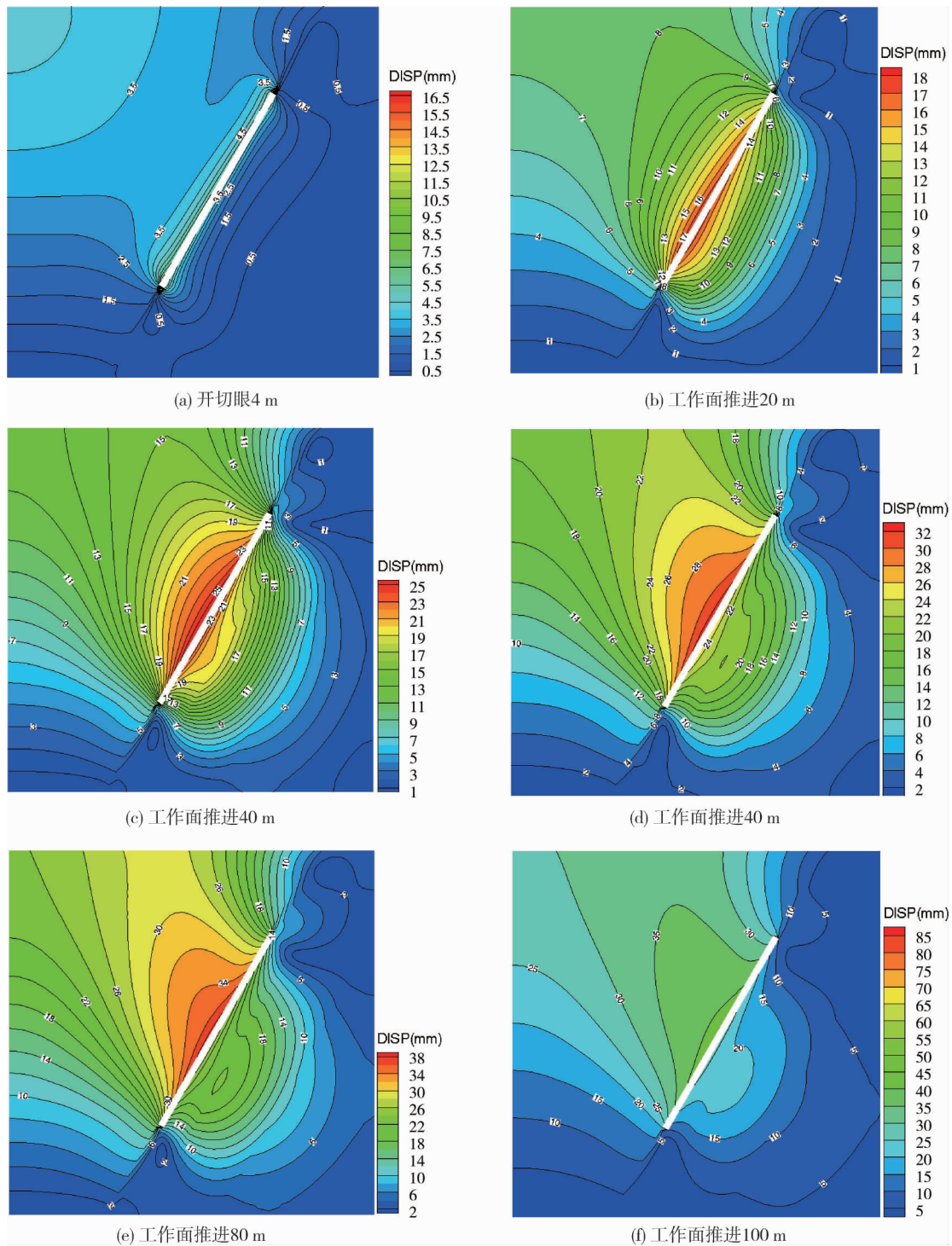


图 6 工作面推进不同尺寸时的最大位移变化

3.2 岩层塑性变形破坏分析

图 7 为工作面推进不同尺寸围岩塑性区变化规律图.从图 7 可以看出:由于工作面下部围岩的应力集中度大于上部,因此在工作面下部围岩产生塑性变形的区域较上部大.工作面上部主要产生拉伸破坏为主,下部主要以压剪破坏为主.随着工作面的推进,工作面下部应力集中程度越来越大,工作面下部产生的塑性区也逐渐增大,最大处的范围是采高的 5 倍宽度.因此,急倾斜工作面下顺槽的端头支护是重点,也是难点.

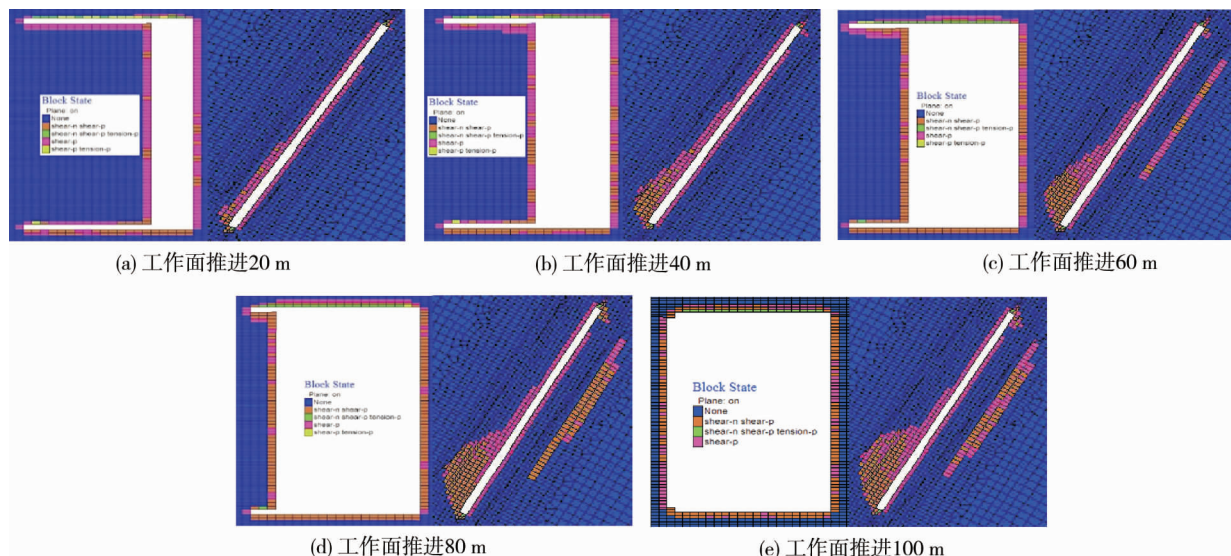


图7 工作面推进不同尺寸围岩塑性区变化规律

4 结论

1) 在工作面中上部(0.58L)处的覆岩出现了挠度最大值,说明在工作面开采后,最先从工作面的中上部开始垮落.

2) 工作面沿走向推进后,工作面上部覆岩以产生拉伸破坏为主,工作面中、下部采空区覆岩以剪切破坏为主.顶板断裂呈现工作面中上部-上部-中下部-下部的垮落顺序,直接顶冒落的矸石充填下部近1/3的采空区域,上部出现垮落区域比下部范围明显更大.

3) 工作面上顺槽应力集中系数为1.2,下顺槽应力集中系数为2.3,工作面的下部端头支护处在极不均匀的高应力集中区,工作面端头及超前支护相当困难.

参考文献:

- [1] 伍永平.“顶板-支护-底板”系统动态稳定性控制模式[J].煤炭学报,2007,32(4):341-346.
- [2] 王金安,张基伟,高小明,等.大倾角厚煤层长壁综放开采基本顶破断模式及演化过程(I)——初次破断[J].煤炭学报,2015,40(6):1353-1360.
- [3] Li X M, Wang Z H, Zhang J W. Stability of roof structure and its control in steeply inclined coal seams [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27 (2): 359-364.
- [4] 杨帆.急倾斜煤层采动覆岩移动模式及机理研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2006.
- [5] 屠洪盛,屠世浩,陈芳,等.基于薄板理论的急倾斜工作面顶板初次变形破断特征研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(1):49-54.
- [6] 王红伟,伍永平,解盘石.大倾角煤层开采覆岩应力场形成及演化特征[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2013,32(8):1022-1026.
- [7] 王宁波,张农,崔峰,等.急倾斜特厚煤层综放工作面采场运移与巷道围岩破裂特征[J].煤炭学报,2013,38(8):1312-1318.
- [8] 冯锦艳,刘旭杭,于志全.大倾角煤层采动裂隙演化规律[J].煤炭学报,2017,42(8):1971-1978.
- [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] 姚琦,冯涛,廖泽.急倾斜走向分段充填倾向覆岩破坏特性及移动规律[J].煤炭学报,2017,42(12):3096-3105.