

近距离煤层群上煤层回采的 底板应力分布规律

王志平*

(河南大有能源股份有限公司 新安煤矿,河南 新安 471842)

摘要:为了研究近距离煤层群开采时的巷道围岩应力及塑性区发育的变化规律,以某煤矿回采近距离煤层群上位煤层为研究背景,采用理论分析计算、数值模拟的研究方法,对工作面回采期间煤层底板及巷道周边围岩应力的变化规律进行研究,同时模拟研究了回采对原开切眼周边围岩及底板塑性变化情况.计算结果显示:煤层在回采期间底板应力最大值位于回采位置前方 10~15 m,随着工作面回采距离的不断增加,其底板的应力集中系数也逐渐变大,同时位于原开切眼处的巷道周边围岩塑性区发育范围也逐渐增大、发育更深.

关键词:近距离煤层群;开切眼;应力;数值模拟

中图分类号:TD323

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2021)02-0006-07

The Floor Stress Distribution Law After Coal Seam Above Exploiting of Contiguous Seams

WANG Zhiping

(Xin'an Coal Mine, Henan Dayou Energy Co., Ltd., Xin'an 471842, China)

Abstract: Taking the mining upper coal seam in close-distance seams of a mine as the research background, this paper uses the theoretical analysis and calculation, numerical simulation to study close distance coal seams group downward mining process of floor stress distribution rules, and to explore the surrounding rock and the bottom of plastic deformation of the original open-off cut. Results show that the peak stress of coal seam floor in the floor is ten meters ahead of the set-up room, and stress concentration coefficient is proportional to working face advancing distance, and at the same time, the roof influenced by original open-off cut becomes wider, and the bottom plastic zone development scope is deeper.

Keywords: close-distance coal seam; set-up room; stress; numerical simulation

煤层开采所产生的矿山压力是矿井开采设计中最为重要的基础指标之一,它展现的变化规律错综复杂,尤其是在近距离煤层群开采过程中.位于煤层群的上煤层工作面在回采后,其采动应力场和位移场对下煤层工作面开切眼位置的选择及支护方案设计有最为直接的影响^[1-4].钱鸣高^[5]、蔡光顺^[6]等认为近距离煤层开采后,底板遭到破坏的范围与煤层的开采范围和采空区周围支承压力的分布情况有关;文献[7]对煤层采空区底板的破坏形态进行了描述,在国内率先提出了煤层采空区底板岩层破坏的“三带”概念:底板自上而下有鼓胀开裂带(8~15 m)、微小变形移动带(20~25 m)和应力微变带(60~80 m);李白英^[8]的研究提出了“下三带”理论,该理论认为煤层底板自上而下存在着三个带:采动底板破坏带(I带)、完整岩层带(II带)、承压水导升高度带(III带);王作宇^[9]提出了“底板移动的原位张裂和零位破坏”理论.本文

以某煤矿近距离煤层群开采为实际案例,以该煤层群的煤岩实际赋存情况为研究基础,采用相关力学理论计算、数值模拟等研究方法,对上覆煤层回采期间巷道底板的应力分布及周边围岩塑性区发育情况进行探讨,对类似条件下的煤层开采具有一定的参考价值 and 指导意义。

1 工作面概况

该矿井工作面煤层属太原组中下部,东翼三盘区上覆煤层9煤与下覆煤层10煤的层间距约为2.6~10.5 m,煤层厚度为0.89~3.5 m,平均1.91 m,含0~3层夹矸.煤层顶板较不稳定以泥岩和砂质泥岩为主,其中直接顶为深黑色的中粗砂岩,基本顶为深灰色、致密的粉砂岩;直接底为深灰色泥岩,带有一定的层理发育,老底为致密深黑色粉砂岩,同样带有一定的层理发育.综合柱状图如图1所示.

柱状	岩石名称	厚度/m	岩性描述
	中砂岩	8.0	深黑色、成份石英、长石胶结、分选、磨圆较好
	泥岩	0~0.8	深灰色、致密、性脆、水平层理发育
	9#煤	1.91	半亮型焦煤 1.13(0.18)0.43(0.17)局部分层
	泥岩	2.8	深灰色、质软 层理发育、局部区域夹薄层砂岩
	砂岩	5.2	灰白色、致密、性软、局部区域泥岩
	10#煤	$\frac{2.22 \sim 3.25}{2.6}$	瘦煤 0.54(0.17)0.44(0.09)0.24(0.05)1.23
	泥岩	1.62	黑色、致密、块状、平坦状断口
	粉砂岩	4.38	深黑色、致密、块状、层理发育

图1 综合柱状图

2 底板应力理论

在煤层回采过程中,本处于平衡状态的原岩应力在采动影响下,各种空间关系被破坏,导致工作面周边围岩应力不断重新分布变化,最终形成新的围岩应力.然而,这种新的围岩应力分布对整个煤层群中下煤层的回采空间及其边界安全保护煤柱都会产生不同范围和不同程度的应力集中^[10],同时也会进一步传递至煤层底板的深部岩层.

根据岩土力学原理,当某一集中力 P 作用于地下某一点时(如图2所示),会产生影响垂直应力 σ_z 为

$$\sigma_z = \frac{3}{2} \frac{P}{\pi R^3} Z^3 \quad (1)$$

式中: Z 为上煤层底板至下煤层底板之间的垂直距离; R 为集中力 P 至地下某点的直线距离.

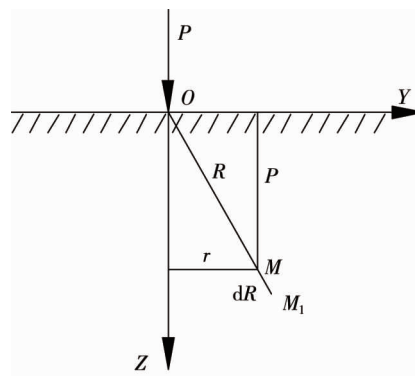


图2 集中力作用在地下某一点

当某一集中力 $q dx$ 作用于各向同性均质半无限平面体上时(如图3所示),我们可以得到在该平面体内任意一点 (θ, r) 产生的应力大小.同时,根据相同的边界条件和集中力的作用方式,在力的叠加原理基础上,受均布载荷的自由边界上任一点 (θ, r) 的应力结果为^[11,12]

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{q}{\pi} [-\sin(\theta_2 - \theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_1) + \theta_2 - \theta_1]; \\ \sigma_z = \frac{q}{\pi} [\sin \theta_2 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \cos \theta_1 + \theta_2 - \theta_1]; \\ \tau_{xz} = \frac{q}{\pi} (\sin^2 \theta_2 - \sin^2 \theta_1). \end{cases} \quad (2)$$

式中: q 为作用在底板上的载荷; θ 为压力传递影响角; r 为点到 z 方向的垂距.

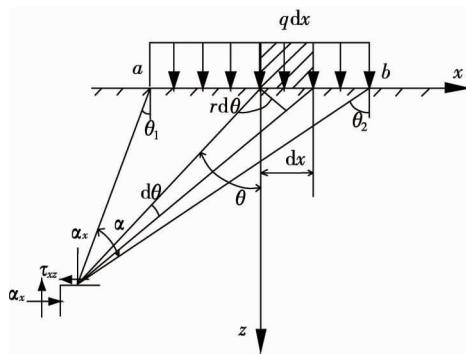


图3 均布载荷下半无限平面体的受力分布

根据式(1)和式(2)可以得出,在均布载荷下,底板受水平应力、垂直应力、剪切应力的影响结果综合考虑2个主要因素:(1)底板所处位置的埋深;(2)作用在底板上均布载荷的分布宽度 l .由式(2)可以看出,在同一垂面上随深度的增加, θ 逐渐减小,垂直应力 σ_z 也逐渐减小,即垂直应力 σ_z 随深度的增加而变小;当深度减小时, σ_z 逐渐增大,其主要影响范围为 $6.25l$;与垂直应力 σ_z 相比,水平应力 σ_x 的影响范围较小,一般为 $1.5l$;剪切应力 τ_{xz} 一般出现在载荷作用边界,其影响范围一般为 $2l$,所以受力岩体的边缘部位受剪切破坏的可能性较大.

结合材料力学相关理论知识,在平面条件下,主应力的计算公式^[13]为

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2}; \quad (3)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2}. \quad (4)$$

将式(2)的对应数值代入式(3)和式(4),同时令 $\alpha = \theta_2 - \theta_1$,通过数学运算可以得到作用于底板岩层的最大主应力以及最小主应力,分别是

$$\sigma_{\max} = \frac{q}{\pi} (\alpha + \sin \alpha); \quad (5)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{q}{\pi} (\alpha - \sin \alpha). \quad (6)$$

最大剪应力为

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{4\tau_{xz}^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2} = \frac{q}{\pi} \sin \alpha. \quad (7)$$

当 $\alpha = \pi/2$ 时,剪应力达到极值:

$$\tau_{\max} = \frac{q}{\pi}. \quad (8)$$

根据式(7)和式(8)可以看出,位于以分布载荷宽度 l 为直径的半圆上,煤层底板岩层剪应力处于极值状态.从而得知,其最大剪应力在底板中能够达到的深度最大为

$$h_{\tau} = \frac{l}{2}. \quad (9)$$

3 数值模拟分析

3.1 模型建立

根据实际的岩性综合柱状图建立数值模拟模型.煤层巷道围岩的物理力学特性参照该工作面提供的实测岩体力学特性来确定,建立的FLAC^{3D}数值计算力学模型如图4所示.模型两侧限制水平方向位移,底部限制垂直方向位移,上部顶端增加平均分布的载荷,本模型采用Mohr-Coulomb模型.由于数值计算力学模拟模型需要综合考虑计算时间、精细度等各种影响因素,特对模拟煤层周边的围岩进行网格细化^[14,15],如图5所示.

本模拟方案模型尺寸为360 m(长)×300 m(宽)×90 m(高).模型两侧面为滑动支承,底部为固定支承,上部为应力边界,模型共划分460 800个单元、484 875个节点.

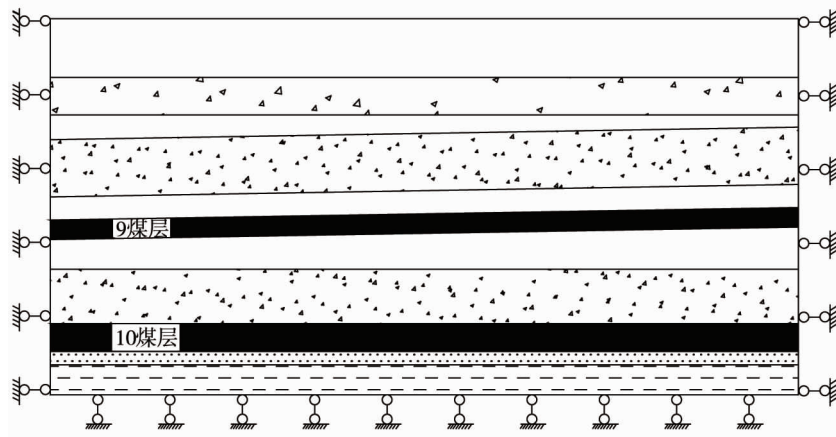


图4 数值计算力学模型

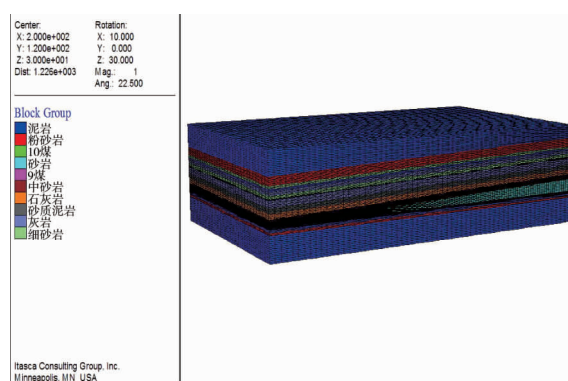


图5 模型的网格剖分

3.2 模拟方案

3.2.1 方案设计

结合实际煤层赋存情况,模型设定上层9煤切眼长度为150 m,采高为1.91 m;下煤层10煤切眼长度为200 m,采高为2.63 m.9煤原开切眼位置位于模型边界煤柱30 m处,从原开切眼处进行回采开挖,模型设定了工作面5个推进距离,分别为10,30,100,150,200 m;在该条件下,对回采过程中的顶底板应力分布、围岩塑性区发育变化情况进行分析研究^[16].

3.2.2 模拟步骤

- 1) 建立整体模型,模型原岩应力平衡计算.
- 2) 开挖9煤工作面,模型应力平衡计算.

3.3 模拟结果分析

根据数值模拟方案,得到工作面不同推进距离时切眼边界煤柱及原开切眼底板围岩应力变化云图,如图6所示.

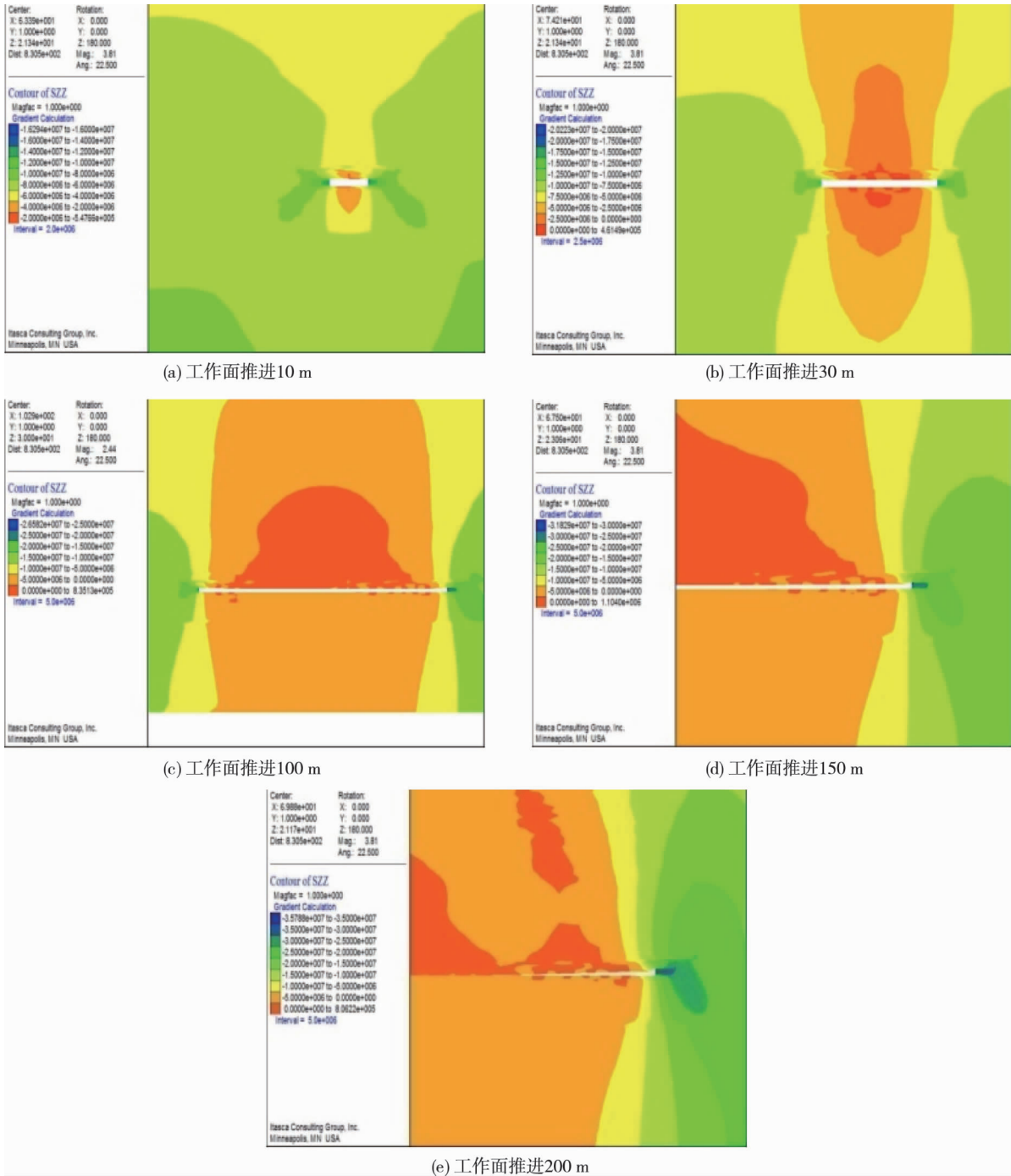


图6 不同推进距离下回采位置及原开切眼底板围岩应力分布

图6模拟结果显示,切眼推进位置的前方为应力集中区,采空区下部底板应力较小;随着工作面推采距离的增加,底板应力卸压区也逐渐变大;当工作面回采距离达到一定的范围后,工作面后方一定范围内将趋于稳定状态,同时该范围内的顶底板的围岩应力将处于稳定状态,然而原开切眼位置的巷道底板围岩应力随工作面回采距离变大而逐渐增加.

图 7 为工作面不同推进距离时原开切眼边界煤柱围岩塑性区分布变化云图.图 7 模拟结果显示,从原开切眼处向前掘进至 10 m 左右时,9 煤切眼塑性区扩展至基本顶上方 3 m 左右,底板塑性区基本没有发育;当掘进 30,100,150,200 m 左右时,该塑性区扩展至基本顶上方 6~50 m 左右,底板塑性区开始发育,并且底板塑性区向采空区后方发展,底板塑性区最深向下扩展至 7 m 左右.

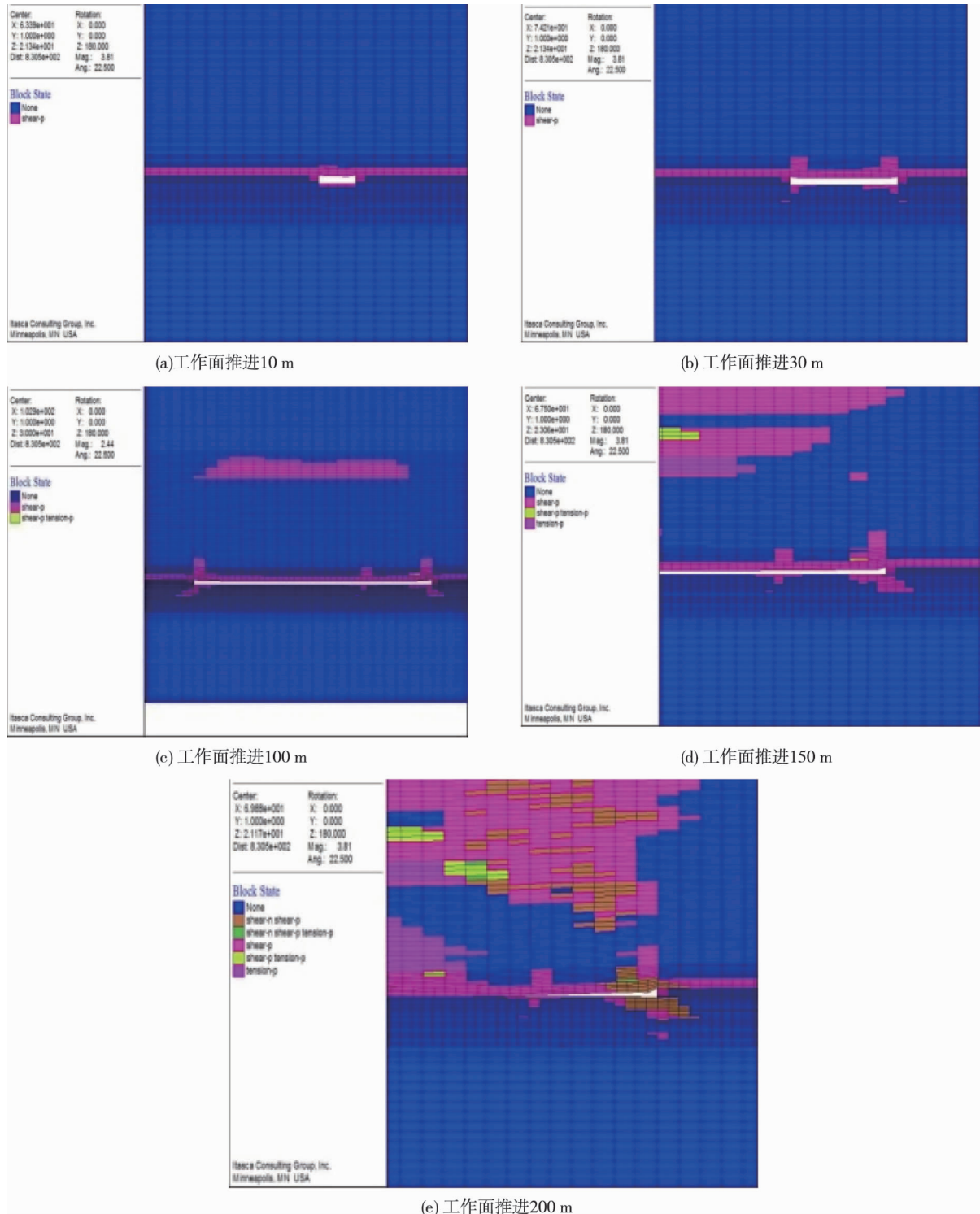


图 7 不同推进距离下回采位置及原开切眼的围岩塑性区分布

随着工作面推采距离的增加,开切眼塑性区对顶部影响范围与推进距离成正比,当工作面推进至一定距离后底板塑性区开始发育,并随着推进距离的增大,底板塑性区范围愈深.

按照模拟方案,从原开切眼位置向前推进至不同位置,原开切眼处的前后方支撑压力分布如图 8 所

示,采空区底板前后支撑压力分布如图9所示。

由图8与图9看出:采空区底板应力受回采影响很小,切眼前方15 m左右为应力增高区。随着推采距离的不断增大,一方面原开切眼处围岩应力峰值一般处于回采位置前方10~20 m处,其最大值达到25.16 MPa,其应力集中系数与回采距离成正比,最大系数为3.55;另一方面回采位置底板前方的应力峰值也位于工作面前方10~20 m处,最大值为16.25 MPa,应力集中系数也与工作面推进距离成正比,其最大系数为2.29。

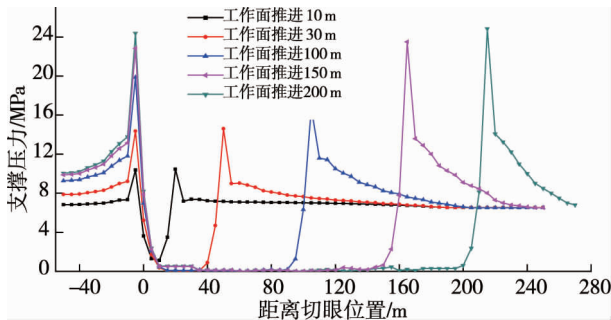


图8 不同推进距离下原开切眼前后支撑压力分布

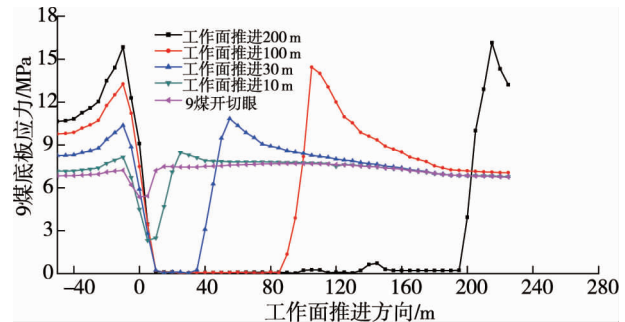


图9 不同推进距离下采空区底板支撑压力分布

4 结论

1) 煤层群上位煤层从回采至结束,9煤开切眼塑性区对顶底板塑性发育范围逐渐增大,推采位置前方10~20 m始终为应力集中区;切眼前方和采空区底板的应力集中系数也与工作面推进距离成正比。

2) 采用FLAC^{3D}数值模拟的方法为下煤层10煤工作面的开切眼位置选择提供了重要的理论计算依据,能够避免上煤层9煤原开切眼边界遗留煤柱形成的集中应力的影响,同时为10煤开切眼支护方案设计提供技术支持。

3) 本文采用的FLAC^{3D}数值模拟方法对近距离煤层下行开采进行研究,但是在实际应用过程中,是否同样适用于近距离煤层上行开采有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 彭跃金,李青锋,谷洪飞,等.北平矿综采工作面巷道布置及矿山压力分析[J].矿业工程研究,2018,33(3):8-13.
- [2] 张百胜.极近距离煤层开采围岩控制理论及技术研究[D].太原:太原理工大学,2008.
- [3] 谷拴成,陈盼,王建文.近距离煤层采空区下工作面矿压显现规律研究[J].煤炭工程,2014,46(5):74-76.
- [4] 刘超,李树刚,许满贵,等.采空区覆岩采动裂隙演化过程及其分形特征研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2013,28(3):1-5.
- [5] 钱鸣高,刘听成.矿山压力及其控制[M].北京:煤炭工业出版社,1992:187-235.
- [6] 蔡光顺,左建平,李毅,等.中兴矿近距离煤层上覆岩层移动规律研究[J].矿业工程研究,2010,25(2):1-5.
- [7] 煤炭科学研究院北京开采研究所.煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用[M].北京:煤炭工业出版社,1981:64-69.
- [8] 李白英.预防矿井底板突水的“下三带”理论及其发展与应用[J].山东矿业学院院报,1999,18(4):11-18.
- [9] 王作宇.底板零位破坏带最大深度的分析计算[J].煤炭科学技术,1992(2):2-6.
- [10] 张文彬.采煤工作面推进过程中采场围岩的应力分布[J].岩石力学与工程学报,1987(2):165-174.
- [11] 徐志英.岩石力学[M].3版.北京:水利水电出版社,1993:60-92.
- [12] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2019:76-116.
- [13] 刘鸿文.材料力学I[M].6版.北京:高等教育出版社,2017:220-251.
- [14] 王公忠,张袁娟.长臂充填开采上覆岩层移动规律数值模拟[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2016,31(4):1-5.
- [15] 吴海,张农,王卫军,等.深部倾斜岩层巷道变形特征模拟与控制技术[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2013,28(1):6-12.
- [16] 李洪生,李树清,汤铸,等.近距离煤层群叠加开采卸压效应的数值模拟分析[J].矿业工程研究,2014,29(1):48-52.