

文章编号: 1673-3363-(2014)06-0881-07

# 硬厚覆岩正断层附近采动应力演化特征

蒋金泉, 武泉林, 曲华

(山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 泰安 271002)

**摘要** 硬厚覆岩断层影响下采动应力出现奇异性。采用三维数值模拟方法, 研究了工作面向正断层推进、上盘工作面沿正断层布置的采动应力演化特征。研究表明: 断层显著削弱了硬厚覆岩的采动应力传播, 应力阻隔效应十分突出, 顶板断层带处于低应力状态, 底板断层带处于应力集中状态。上盘工作面向正断层推进时, 工作面与断层之间覆岩呈“倒楔形”, 采动应力高, 是灾害防治的重点区域; 断层外侧覆岩呈“楔形”, 采动应力低于原岩应力。下盘工作面向正断层推进时, 断层两侧采动应力不高。在断层带影响下, 工作面端头外侧煤体上形成强承载区。上盘工作面沿正断层走向布置时, 在断层煤柱和工作面前方形成高应力集中区, 回采巷道采动应力集中突出, 是重点治理区域。

**关键词** 正断层; 硬厚覆岩; 采动应力分布; 演化特征

**中图分类号** TD 323

**文献标志码** A

## Evolutionary characteristics of mining stress near the hard-thick overburden normal faults

JIANG Jinquan, WU Quanlin, QU Hua

(State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-Founded by Shandong Province and Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Tai'an, Shandong 271002, China)

**Abstract** Mining stress appears singularity under the influence of faults of hard thick overburden. By using three-dimensional numerical simulation method, the evolutionary characteristics of mining stress with the working face advancing to normal faults and layout along normal faults have been studied. Research shows that normal faults significantly weaken the mining stress transmission of hard thick overburden and hence, the prominent obstruction of mining stress. Roof fault zone is in a low stress state, while the stress is concentrated in the bottom fault zone. When hanging wall is advancing to normal faults, the overburden between working face and faults becomes “inverted wedge” shaped, and the mining stress is high, which becomes the key areas of disaster prevention. The lateral overburden of faults is “wedge” shaped, and mining stress is lower than that of the stress of the primary rock. When footwall is advancing to normal faults, the mining stress is low. Under the influence of fault cut, strong bearing area is formed on the lateral coal body of the end of working face. High stress concentration area appears in the front of faults coal pillar or working face when the hanging working face is distributed along the fault strike, and the stress concentration of surrounding rock in roadway is prominent, which makes it become a key harnessing zone.

收稿日期: 2013-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374139, 51344009); 山东省自然科学基金项目(ZR2013EEM018); 山东科技大学科研创新团队支持计划项目

作者简介: 蒋金泉(1961—), 男, 江苏省如东县人, 教授, 从事矿山压力与岩层控制方面的研究。

E-mail: jjqsd@163.com

Tel: 0538-3076266

**Key words** normal faults; hard-thick overburden; distribution of mining stress; evolutionary characteristics

很多煤矿构造复杂,断层发育,工作面经常遇到断层,甚至工作面沿着断层布置。由于断层切割破坏了岩层的整体性,影响采动应力的传播,在断层附近采动应力场将出现奇异性。特别是硬厚覆岩条件下,工作面向断层推进时采动应力明显变化,甚至引起断层活化及大范围顶板运动。

当工作面向断层推进时往往会出现明显的矿压显现,冲击地压频次和强度显著增加<sup>[1]</sup>。一些学者采用相似模型试验及数值模拟,研究了断层面的滑移失稳及对顶板冲击矿压的影响<sup>[2-3]</sup>;分析了断层带与上下盘围岩的变形失稳,建立了扰动响应判别准则<sup>[4]</sup>;研究了断层失稳的弹性能释放及失稳的效应<sup>[5-6]</sup>;采用相似模型试验研究了断层区巷道顶板运动特征<sup>[7]</sup>;对某矿典型断层进行了数值模拟<sup>[8]</sup>,将断层两侧评价为冲击危险区<sup>[9-10]</sup>。

研究断层构造区域采动应力特别是支承压力分布的奇异性,对冲击地压、煤与瓦斯突出等灾害防治<sup>[11-12]</sup>,对巷道支护及顶板控制等具有重要指导价值<sup>[13]</sup>。以兴隆庄煤矿七采区地质条件为基础,采用三维数值模拟方法,对正断层上盘及下盘工作面向断层推进、正断层上盘工作面沿断层走向布置等状态进行了数值模拟,研究采动应力的演化规律。

## 1 工程背景与数值模拟方法

### 1.1 工程背景

济宁地区唐口、古城、星村等深部矿井的部分采区断层构造密布,甚至大部分工作面沿着断层布置,回采巷道与落差较大的断层基本平行,工作面范围内存在落差较小的断层更为常见。

兴隆庄煤矿位于兖州向斜北翼,七采区 3 煤层深度 500 m 左右,平均厚度 8.5 m 左右,缓倾向赋存,采用综放开采工艺,工作面长度 180 m 左右。区内地质构造复杂,落差大于 5 m 的正断层 21 条。7301, 7302 工作面分别沿肖家庄 1, 2 号断层、肖家庄 2, 3 号断层布置,肖家庄 1, 2, 3 号断层的落差为 25, 58, 51 m。DF9, DF10, DF16 断层基本平行于工作面煤壁,落差分别为 5, 8, 9 m,综放工作面推过这 3 条断层。

### 1.2 数值计算模型

以兴隆庄七采区 7302 工作面地质条件为背景,建立正断层与工作面空间关系的 FLAC<sup>3D</sup> 三维数值

计算模型,研究工作面向正断层推进、工作面沿正断层布置的采动应力分布演化特征。模型尺寸 309 m(长)×160 m(宽)×140 m(高),顶板含硬厚砂岩,模型岩层力学参数见表 1。计算采用摩尔-库伦强度准则。

表 1 模型岩层力学参数

Table 1 Strata mechanics parameters of model

岩性	M/ m	$\rho/$ (kg·m <sup>-3</sup> )	K/ 10 <sup>10</sup> Pa	G/ 10 <sup>10</sup> Pa	C/ 10 <sup>6</sup> Pa	$\varphi/$ (°)
中砂岩	20	2520	1.83	1.15	1.2	41
黏土岩	28	2300	1.52	0.625	0.1	31
中砂岩	8	2520	1.83	1.15	1.2	41
黏土岩	4	2300	1.52	0.625	0.1	31
粉砂岩	8	2530	1.34	0.76	1.4	37
中砂岩	28	2520	1.83	1.15	1.2	41
粉砂岩	8	2530	1.34	0.76	1.4	37
3 煤	8	1350	1.05	0.65	1.2	23
细砂岩	4	2530	1.34	0.76	1.4	37
中砂岩	12	2520	1.83	1.15	1.2	41
泥岩	12	2340	0.98	0.71	0.5	39
断层	—	2000	0.001	0.00035	0.001	5

工作面采动期间构造应力基本得到释放,岩体接近自重应力状态,模型顶部施加均布荷载 9.6 MPa,模拟煤层埋深 500 m。水平方向施加梯形分布荷载,为垂直方向的 1/2。断层带以宽度 1 m 的软弱带来模拟。模拟分析平行正断层附近采动应力的演化过程,工作面前方正断层倾角 70°,落差 8 m,上盘或下盘工作面向断层推进;模拟走向正断层倾角 70°,落差 20 m,断层下盘留设煤柱 30 m,上盘工作面与断层之间的煤柱分别为 50, 40, 30, 20 m。

## 2 正断层上盘工作面采动应力演化

上盘工作面向断层推进时的围岩应力分布如图 1~3 所示。如图 1,上盘工作面煤壁距断层 50 m 时,在工作面与断层之间,断层切割使上覆岩层呈倒楔形状态,采动应力集中比较明显,顶底板围岩及煤层均处于高应力状态,最大应力达到 24 MPa;在断层外侧,由于硬厚覆岩呈楔形状态,在采动影响与断层切割作用下,应力降低到 6~8 MPa,低于原岩应力水平;顶板断层带处于张裂及剪切状态,垂直应力很低;因硬厚覆岩的倒楔形作用,底板深部断层带处于应力集中状态。由于断层的切割作

用，采动影响后断层带的应力阻隔效应十分突出，围岩应力的连续稳定传播特性显著削弱，断层带与

工作面之间的倒楔形区应力集中，断层带外侧的楔形区应力明显降低。

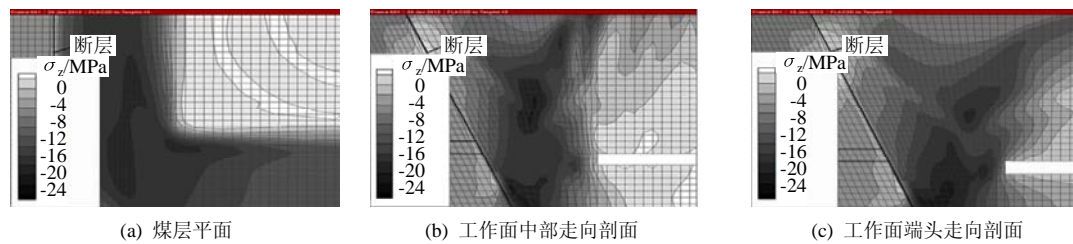


图 1 上盘工作面推进至断层 50 m 的垂直应力分布

Fig.1 Distribution of vertical stress when the distance of upper plate working face lean to normal fault is 50 m

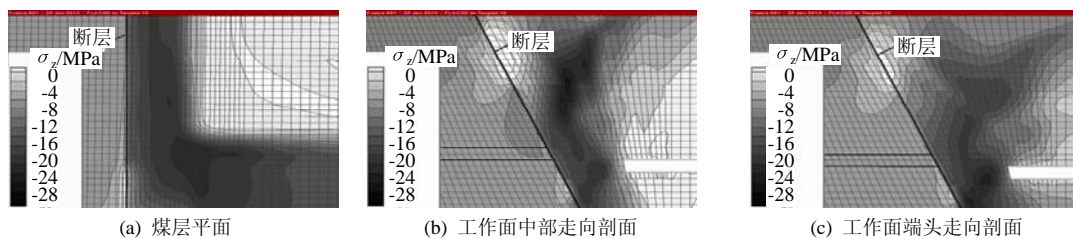


图 2 上盘工作面推进至断层 30 m 的垂直应力分布

Fig.2 Distribution of vertical stress when the distance of upper plate working face lean to normal fault is 30 m

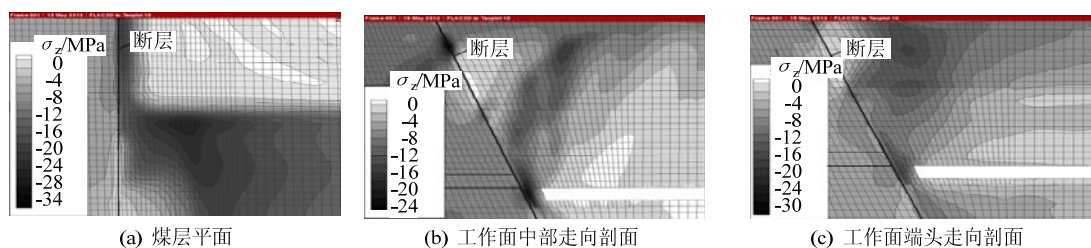


图 3 上盘工作面推进至断层 10 m 的垂直应力分布

Fig.3 Distribution of vertical stress when the distance of upper plate working face lean to normal fault is 10 m

由图 2 可见：上盘工作面煤壁距断层 30 m 时，在工作面与断层之间，由于煤壁与断层距离的减小，顶底板垂直应力及煤层支承压力的集中程度进一步增加，最大垂直应力达到 28 MPa；工作面端头外侧区域的煤体承载能力大于断层煤柱，在端头外侧煤体上形成强支承区。

由图 3 可见：上盘工作面煤壁距断层 10 m 时，由于煤柱宽度小、承载能力低，在煤壁与断层之间，

小煤柱及顶底板围岩的应力集中明显下降，端头外侧强支承区的应力集中程度升高，最大垂直应力达到 34 MPa。当工作面与断层的距离由 50 m 减小到 10 m 时，工作面端头外侧支承区的应力集中逐渐增加，最大应力由 24 MPa 逐渐增加到 34 MPa。

上盘工作面向正断层推进过程中煤层支承压力演化如图 4 所示。

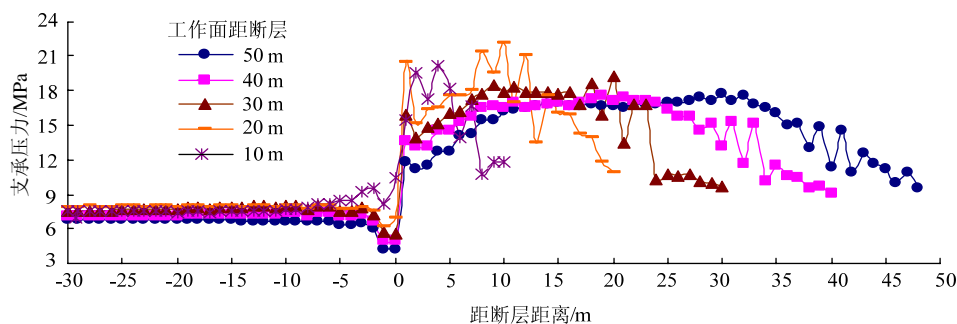


图 4 上盘工作面向正断层推进的支承压力分布

Fig.4 Distribution of abutment stress of upper plate working face lean to normal fault

在工作面中部走向剖面上,当工作面与断层的距离由 50 m 减小到 20 m 时,由于断层切割作用和断层煤柱宽度的缩小,支承压力集中范围逐渐减小、集中程度逐渐增加,最大应力由 17.72 MPa 升高到 22.11 MPa;当煤壁距离断层 10 m 时,支承压力集中有所降低,最大应力为 20.26 MPa。

### 3 正断层下盘工作面采动应力演化

下盘工作面推进至断层 50, 30 m 时, 围岩垂

直应力分布如图 5, 6 所示。如图 5, 下盘工作面距断层 50 m 时, 由于断层倾向推进方向, 在工作面与断层之间, 断层切割使硬厚覆岩呈楔形, 顶底板采动应力集中较低, 接近原岩应力水平, 工作面与断层之间的垂直应力低于工作面侧向。在断层外侧, 硬厚覆岩呈倒楔形, 在断层及采动影响作用下, 顶底板的应力集中程度不高, 应力水平 22~24 MPa。断层也处于张裂及剪切状态, 断层带附近垂直应力低, 断层切割形成了明显的应力传播阻隔效应。

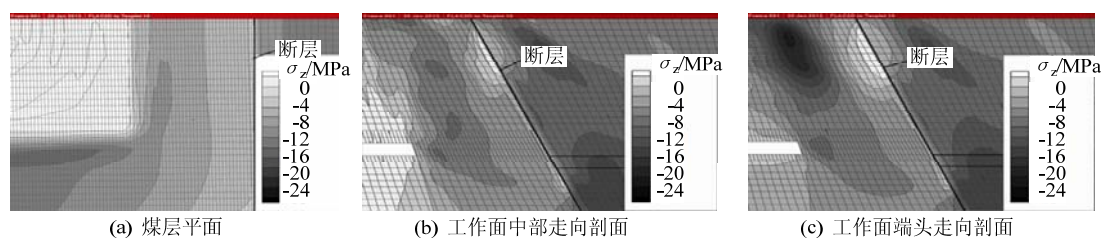


图 5 下盘工作面推进至正断层 50 m 的垂直应力分布

Fig.5 Distribution of vertical stress when the distance of bottom plate working face lean to normal fault is 50 m

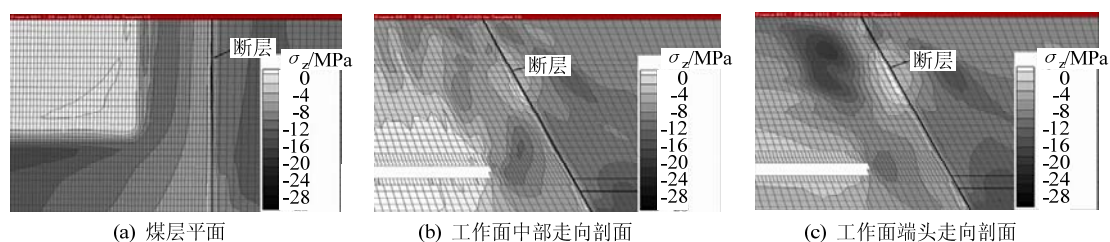


图 6 下盘工作面推进至正断层 30 m 的垂直应力分布

Fig.6 Distribution of vertical stress when the distance of bottom plate working face lean to normal fault is 30 m

如图 6, 下盘工作面距断层 30 m 时, 因工作面与断层之间覆岩呈楔形, 且断层阻隔了采动应力向断层前方的传播, 在工作面与断层之间及断层前方, 煤层及顶底板应力集中仅有一定的增加。工作面外侧区域煤体承载能力大于断层煤柱, 在工作面外侧煤体及顶底板形成了较高的应力集中区。

正断层下盘工作面向断层推进的支承压力演

化过程如图 7 所示, 在工作面中部走向剖面上, 当工作面与断层的距离由 50 m 减小到 20 m 时, 由于断层阻隔效应及硬厚覆岩呈楔形, 随断层煤柱的逐渐减小, 煤壁与断层之间的支承压力集中有所增加, 但仅比原岩应力高 2~3 MPa; 断层前方支承压力集中程度不高、变化不大。

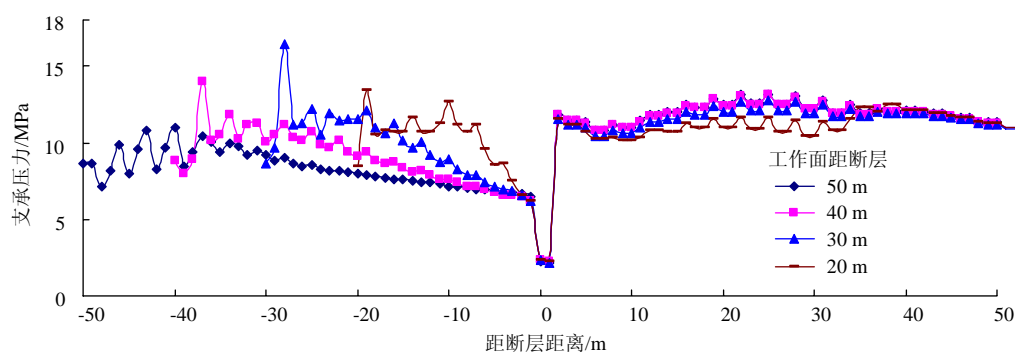


图 7 下盘工作面向正断层推进的支承压力分布

Fig.7 Distribution of abutment pressure of bottom plate working face lean to normal fault

由上所述,正断层上盘或下盘工作面向断层推进,断层附近采动应力分布特征及演化规律相反。上盘工作面向正断层推进时,由于断层切割的阻隔效应及煤柱硬厚覆岩的倒楔形状态,大煤柱状态煤壁与断层之间的应力集中程度高,随工作面向断层推进而升高,进入小煤柱状态应力集中明显降低;断层前方接近原岩应力状态。下盘工作面向正断层推进时,煤柱硬厚覆岩呈楔形,煤壁与断层之间的应力集中程度低,随工作面向断层推进有所升高;断层前方应力集中程度不高,变化不大。

冲击地压显现、现场实测及模型试验表明上述数值模拟分析是正确的。任家庄矿 11305 工作面向断层推进过程中,断层前方回采巷道顶板支护载荷

显著下降<sup>[13]</sup>,表明了断层的应力阻隔效应。现场冲击地压显现表明,工作面向断层推进时冲击地压频次和强度显著增加,龙凤煤矿与断层有关的 36 次冲击地压中,31 次是接近断层过程中发生的<sup>[1]</sup>。模型试验认为<sup>[2]</sup>,工作面向断层推进过程中,断层容易活化,支撑压力升高,工作面推过断层后矿压显现不明显。模拟分析可以有效地解释这些现象。

#### 4 上盘工作面沿正断层走向推进的采动应力演化

正断层下盘煤柱宽度 30 m,上盘工作面沿断层走向布置,不同断层煤柱宽度时煤层支撑压力分布如图 8 所示。

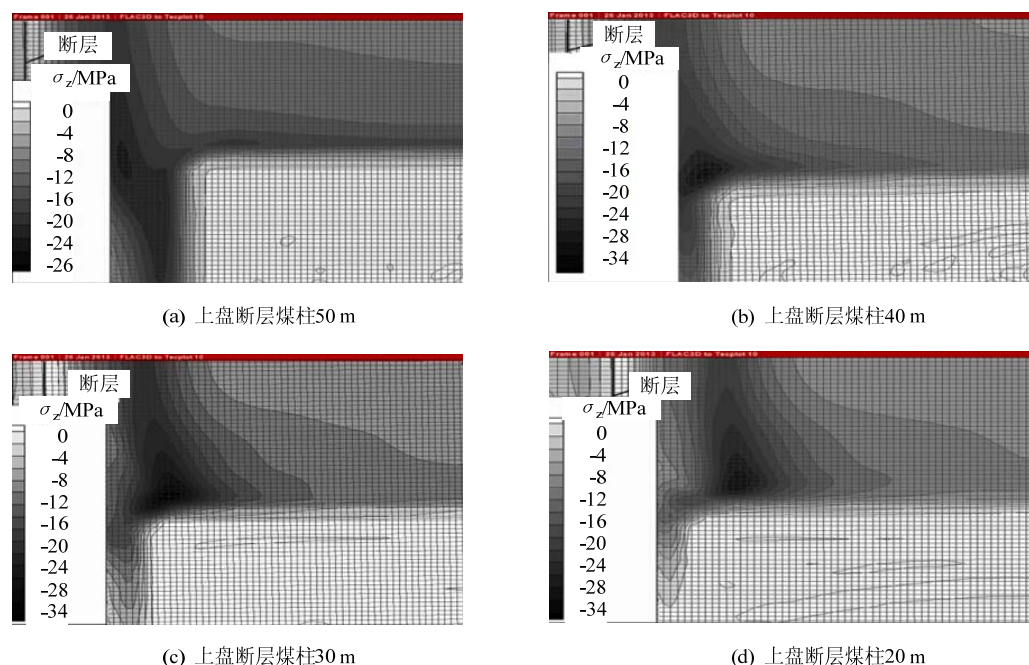


图8 工作面沿着断层走向布置的煤层支撑压力分布

Fig.8 Distribution of abutment pressure of coal seam when working face layout along the faults strike

当上盘断层煤柱为 50 m 时,应力集中程度最高的区域在断层煤柱上,高于工作面前方支撑压力;当上盘断层煤柱为 40 m 时,断层影响的最高应力集中区转移到断层煤柱与工作面前方煤体的交界处;当上盘断层煤柱为 30, 20 m 时,最高应力集中区转移到工作面煤壁前方。从煤层支撑压力分布可以看出,断层切割对围岩应力传播的阻隔效应十分显著,且断层带处于低应力状态;由于断层上盘硬厚覆岩的楔形状态,所形成的高应力集中区处于断层煤柱或工作面前方,应力集中程度和影响

范围远大于正常支撑压力分布状态,对断层上盘工作面采动应力分布有着十分显著的影响。

断层上盘工作面沿着断层走向布置,不同断层煤柱宽度下工作面长度方向的支撑压力分布如图 9。可见,断层上盘工作面受到煤柱的影响,工作面前方出现高应力区,煤柱宽度 50, 40, 30, 20 m 时,最高应力分别达到 22.14, 26.76, 29.08, 29.97 MPa, 随断层煤柱宽度的缩小,煤柱影响区的应力集中明显升高。工作面中部的支撑压力峰值和影响范围基本不受断层煤柱宽度的影响。

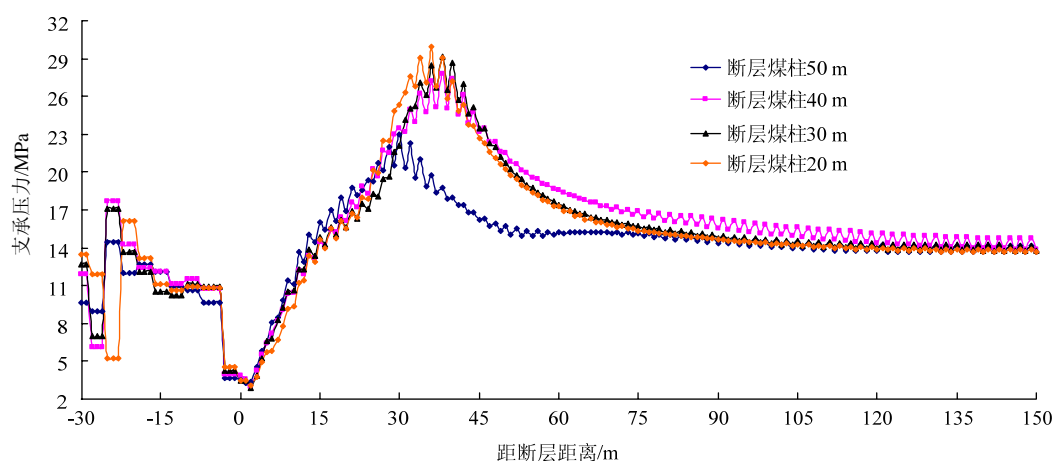


图9 不同断层煤柱下工作面长度方向支承压力分布

Fig.9 Distribution of abutment pressure of working face length direction under different fault pillars size

## 5 正断层采动应力分布的应用

上盘工作面向正断层推进时,工作面与断层之间的应力集中程度高,煤岩体积聚的弹性能大,如采动诱发断层活动引起硬厚覆岩运动<sup>[1-2]</sup>,就会形成顶板动载作用与高应力集中的双重影响,是冲击地压、煤与瓦斯突出、巷道破坏的重点区域,应加强监测与防治。断层外侧应力低于原岩应力,冲击危险性降低。

下盘工作面向正断层推进时,正断层两侧的应力集中程度低于正常状态,冲击危险性较低。

上盘或下盘工作面向正断层推进时,断层两侧采动应力演化规律不同,应科学划分冲击危险区与危险程度。

上盘工作面沿正断层走向布置时,断层附近回采巷道围岩应力远高于正常支承压力,且影响范围大,必须加强冲击地压、煤与瓦斯突出的防治,提高巷道支护强度。

## 6 结 论

1) 断层带显著削弱了硬厚覆岩的应力稳定传播特性,采动应力阻隔效应十分突出,断层带两侧采动应力有显著的差异。顶板断层带处于低应力状态,底板断层带处于应力集中状态。

2) 上盘工作面向正断层推进,在工作面与断层之间,硬厚覆岩呈倒楔形,大煤柱状态顶底板采动应力集中十分突出,随工作面向断层推进,采动应力逐渐增加;进入小煤柱状态,采动应力明显降低。在断层外侧,硬厚覆岩呈楔形,采动应力低于原岩应力。断层切割后工作面端头外侧煤体上形成强支

承区。上盘工作面向正断层推进过程中存在覆岩动载与采动高应力的双重影响,是灾害防治的重点区域。

3) 正断层下盘与上盘工作面向断层推进的采动应力演化规律不同。下盘工作面向正断层推进,在工作面与断层之间,由于硬厚覆岩呈楔形及断层切割,采动应力较低。在断层外侧,硬厚覆岩呈倒楔形,应力集中程度不高。断层两侧应力集中程度不高,冲击危险性小。

4) 断层上盘工作面沿断层走向布置,由于断层上盘硬厚覆岩呈倒楔形,在断层煤柱和工作面前方形成高应力集中区,应力集中程度和影响范围远大于正常状态,断层侧巷道采动应力集中突出。

## 参考文献:

- [1] 蒋金泉. 采场围岩应力与运动[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993: 23-49.
- [2] 李志华, 窦林名, 陆振裕, 等. 采动诱发断层滑移失稳的研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 499-503.  
LI Zhihua, DOU Linming, LU Zhenyu, et al. Study of the fault slide destabilization induced by coal mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 499-503.
- [3] 李志华, 窦林名, 牟宗龙. 断层对顶板型冲击矿压的影响[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(2): 154-158.  
LI Zhihua, DOU Linming, MU Zonglong. Effect of fault on roof rock burst[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(2): 154-158.
- [4] 潘一山, 王来贵, 章梦涛, 等. 断层冲击地压发生的理论与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 642-649.  
PAN Yishan, WANG Laigui, ZHANG Mengtao, et al. Theory and experimental study on faults rock burst[J].

- Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 642-649.
- [5] 潘岳, 解金玉, 顾善发. 非均匀围压下矿井断层冲击地压的突变理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 310-314.  
PAN Yue, XIE Jinyu, GU Shanfa. Theoretical analysis of mutation of faults rock burst under non-uniform confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 310-314.
- [6] 王学滨, 潘一山, 海龙. 基于剪切应变梯度塑性理论的断层岩爆失稳判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 588-591.  
WANG Xuebin, PAN Yishan, HAI Long. Instability criterion of fault rockburst based on gradient-dependent plasticity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 588-591.
- [7] 勾攀峰, 胡有光. 断层附近回采巷道顶板岩层运动特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(3): 285-288.  
GOU Panfeng, HU Youguang. Effect of faults on movement of roof rock strata in gateway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(3): 285-288.
- [8] 王金安, 刘航, 李铁. 临近断层开采动力危险区划分数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 28-34.  
WANG Jin'an, LIU Hang, LI Tie. Study on numerical simulation of dynamic risk regionalization during exploitation approaching to faults[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 28-34.
- [9] 李志华, 窦林名, 陈国祥, 等. 采动影响下断层冲击矿压危险性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(4): 490-495.  
LI Zhihua, DOU Linming, CHEN Guoxiang, et al. The risk of fault induced rockburst during mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(4): 490-495.
- [10] 潘立友, 张立俊, 刘先贵. 冲击地压预测与防治实用技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006: 132-137.
- [11] 刘咸卫, 曹运兴, 刘瑞珣, 等. 正断层两盘的瓦斯突出分布特征及其地质成因浅析[J]. 煤炭学报, 2000, 25(6): 571-575.  
LIU Xianwei, CAO Yunxing, LIU Ruixun, et al. Analysis on distribution features of gas outburst from two walls of normal fault and geological origin[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(6): 571-575.
- [12] 曹运兴, 彭立世. 顺煤断层的基本类型及其对瓦斯突出带的控制作用[J]. 煤炭学报, 1995, 20(4): 413-417.  
CAO Yunxing, PENG Lishi. Basic types of coal seam faults and their effect on controlling gas outburst zone[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(4): 413-417.
- [13] 姜耀东, 吕玉凯, 赵毅鑫, 等. 综采工作面过断层巷道稳定性多参量监测[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1601-1606.  
JIANG Yaodong, LYU Yukai, ZHAO Yixin, et al. Multi-parameter monitoring the stability of rock around roadway while fully mechanized coal face passing through fault[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1601-1606.

#### (上接第 880 页)

- [9] 李振雷, 窦林名, 蔡武, 等. 深部厚煤层断层煤柱型冲击矿压机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 333-342.  
LI Zhenlei, DOU Linming, CAI Wu, et al. Fault-pillar induced rock burst mechanism of thick coal seam in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 333-342.
- [10] 张国华, 张雪峰, 蒲文龙, 等. 中厚煤层区段煤柱留设宽度理论确定[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(5): 521-526.  
ZHANG Guohua, ZHANG Xuefeng, PU Wenlong, et al. Theoretical determination of the section coal pillar's reserve-width in medium thick coal seam[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(5): 521-526.
- [11] 侯凤才. 大倾角煤层区段煤柱合理留设宽度研究[J]. 煤炭工程, 2012(3): 3-5.  
HOU Fengcai. Study on rational set width of sectional coal pillar in high inclined seam[J]. Coal Engineering, 2012(3): 3-5.
- [12] 韩承强, 张开智, 徐小兵, 等. 区段小煤柱破坏规律及合理尺寸研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 370-373.  
HAN Chengqiang, ZHANG Kaizhi, XU Xiaobing, et al. Study on failure regularity and reasonable dimension of district sublevel small coal pillar[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(3): 370-373.
- [13] 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.
- [14] 刘金海. 深厚表土长大综放工作面顶板运动灾害控制研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2012: 142.
- [15] 曲效成, 姜福兴, 于正兴, 等. 基于当量钻屑法的冲击地压监测预警技术研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2346-2351.  
QU Xiaocheng, JIANG Fuxing, YU Zhengxing, et al. Rockburst monitoring and precaution technology based on equivalent drilling research and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2346-2351.