

引用格式:曹明辉,刘钊,王同旭.断层活化过程及煤柱失稳机理的数值模拟研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(2):61-68.

CAO Minghui, LIU Fan, WANG Tongxu. Numerical simulation study of fault activation process and coal pillar instability mechanism[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(2):61-68.

断层活化过程及煤柱失稳机理的数值模拟研究

曹明辉^{1,2}, 刘 钊^{1,3}, 王同旭^{1,2}

(1.山东科技大学 矿业与安全工程学院,山东 青岛 266590;2.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 青岛 266590;3.山东省能源局,山东 济南 250000)

摘 要:为研究工作面沿断层走向推进时,断层煤柱宽度的大小对断层活化失稳与断层煤柱内部能量变化的影响,采用 UDEC 数值模拟软件建立平面应变模型。模拟研究了当逆断层下盘工作面的断层煤柱宽度减小时,断层煤柱内储存的能量与储能极限值的变化特征、断层活化过程与破坏趋势。研究表明:断层煤柱宽度减小时,煤柱支承压力峰值增大,弹性应变能增加,断层出现活化现象,并释放能量至煤柱,与弹性应变能叠加,同时断层煤柱的储能极限降低;当煤柱宽度为 30 m 时,煤柱中的弹性应变能首次超过储能极限值,当煤柱宽度为 20 m 时,煤柱中的弹性应变能峰值为储能极限值的 1.84 倍。当断层煤柱宽度小于 30 m 时,煤柱易发生整体失稳和冲击危险,需要采取必要的灾害防治措施。

关键词:逆断层;断层活化;断层煤柱;数值模拟;冲击地压

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2020)02-0061-08

DOI:10.16452/j.cnki.sdkjzk.2020.02.007

Numerical simulation study of fault activation process and coal pillar instability mechanism

CAO Minghui^{1,2}, LIU Fan^{1,3}, WANG Tongxu^{1,2}

(1. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology,
Qingdao, Shandong 266590, China; 2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and
Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong
University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
3. Energy Administration of Shandong Province, Jinan, Shandong 250000, China)

Abstract: In order to study the influence of fault pillar width on fault activation instability and internal energy change of fault pillar when the working face advances along the fault direction, the UDEC numerical simulation software was used to establish the plane strain model. Simulation was made to study the variation characteristics of energy and limit energy storage in fault pillar, and the fault activation process and failure trend when the fault pillar width of the footwall of reverse fault working face was reduced. The results show that when the width of the fault pillar decreases, the peak pressure of the coal pillar and the elastic strain energy increase, the activated fault releases ener-

收稿日期:2019-09-20

基金项目:山东省重点研发计划项目(2015GSF116012);山东省自然科学基金项目(ZR2016EEM36)

作者简介:曹明辉(1995—),男,山东济宁人,硕士研究生,从事矿山压力与岩层控制方面的研究。

王同旭(1963—),男,山东海阳人,教授,博士生导师,从事矿山压力与岩层控制方面的研究,本文通信作者。

E-mail:997141708@qq.com

gy into the coal pillar, which is superimposed upon the elastic strain energy, and the limit energy storage of coal pillar is reduced. When the coal pillar width is 30 m, the elastic strain energy in the coal pillar exceeds the limit energy storage for the first time. When the coal pillar width is 20 m, the peak value of the elastic strain energy in the coal pillar is 1.84 times the limit energy storage. When the width of the fault pillar is less than 30 m, the overall instability and rock burst of the coal pillar are prone to occur, and necessary disaster prevention measures need to be taken.

Key words: reverse fault; fault activation; fault pillar; numerical simulation; rock burst

随煤炭资源开采深度与强度的增加,开采地质条件日趋复杂,冲击地压已成为国内外煤矿开采领域面临的主要灾害之一^[1-3]。生产实践表明,当采煤工作面推进至断层附近时,冲击地压灾害发生频率明显升高^[4-5]。煤炭开采不可避免会遇到地下断层,受采动影响,断层易发生活化,断层附近易形成高应力集中,从而引发冲击地压危害^[6]。因此,有必要研究断层煤柱宽度减小的过程中,煤柱的冲击破坏机理。

煤炭开采过程中,当工作面接近地下断层时,极易发生冲击矿压事故。王存文等^[7]理论分析了逆断层条件下冲击地压发生机理,认为应力叠加与弹性能的释放是导致逆断层诱发冲击地压的主要因素。潘一山等^[8]采用理论分析与模拟试验的方法,从应力分析的角度,建立了断层冲击地压的判别准则。王爱文等^[9]通过试验分析了巨型逆冲断层冲击地压特征,结果表明,应力集中及断层发生活化是诱发冲击的主要因素。姜耀东等^[10]建立断层数值模型,分别研究了上下盘开采时断层发生活化的机理。华安增^[11]理论分析了工作面接近断层时,工作面前方发生能量堆积,当堆积的能量超过围岩储能极限值后,会造成岩石冲击。李守国等^[12]从应力、能量等角度分析了工作面遇断层时的冲击地压发生机理。上述研究主要侧重于工作面遇断层时,煤柱的支承压力与弹性应变能的变化,断层活化时断层带上的剪切应力与法向应力的关系,并未考虑断层的活化趋势与活化释放能量对断层煤柱产生的影响,也未考虑断层煤柱内部的弹性应变能、断层活化能与储能极限值的关系。

当煤炭开采接近断层时,由于断层存在着阻隔作用,将导致煤柱内部应力、弹性能等发生变化,造成煤柱失稳,甚至发生冲击地压等危害。为此,本研究针对逆断层下盘工作面开采受断层影响的情况,采用二维离散元数值模拟,研究工作面开采接近断层时,随着断层煤柱宽度的减小,断层煤柱的应力、弹性能(实际上为一点的应变能密度,为简单起见,以下统一简称为弹性能)的变化,分析断层活化机理,断层活化释放能量,并对煤柱中的储能极限值进行计算,分析断层煤柱失稳特性。

1 数值模拟研究方案

1.1 模型建立

通用离散单元法程序(universal distinct element code, UDEC)是处理不连续介质的二维离散元程序,适用于模拟含结构面等不连续块体的集合问题,能够满足研究需要。采用 UDEC 5.0 建立模拟逆断层下盘开采的二维数值模型(如图1),模型长250 m,高140 m,断层落差5 m,断层倾角70°,断层带的宽度为4 m,通过查阅文献[13-14],结合本研究的工程条件,得到模型中煤岩体物理力学参数(如表1)。模型采用摩尔-库仑强度准则。模拟煤层埋深为500 m,模型上部采用均布载荷 q ,其大小为:

$$q = \sum \gamma h = 2\,500 \times (500 - 100) \times 10 = 10 \text{ MPa}。 \quad (1)$$

式中: γ 为上部岩层容重, $\gamma = 2\,500 \text{ kg/m}^3$; h 为上部岩层厚度,m。

模型 x 、 y 方向如图1所示, x 方向限制水平方向的位移; y 方向底部边界限制垂直方向的位移,上部边界为自由面,施加有均布载荷。

1.2 模拟计算方案

以空单元模型模拟工作面开采过程,模型左边界不留煤柱,第一次开采70 m,之后每次开采10 m,距离断层10 m后每次开采5 m。模型中布置一条应力监测线,该应力监测线经过下盘煤层、断层、上盘岩层,见图1,监测煤柱宽度分别为80、70、60、50、40、30、20、10和5 m时断层煤柱内的应力(垂直应力、水平应力、切应力)变化趋势。在下盘断层面上设置A、B、C、D四个监测点,分别距煤层顶板90、60、30和10 m,在A、

B、C、D 同一水平的上盘断层面布置监测点 A'、B'、C'、D'，监测 A、B、C、D 四个点的法向应力与剪切应力，监测 A、B、C、D、A'、B'、C'、D'八个点的断层滑移量。

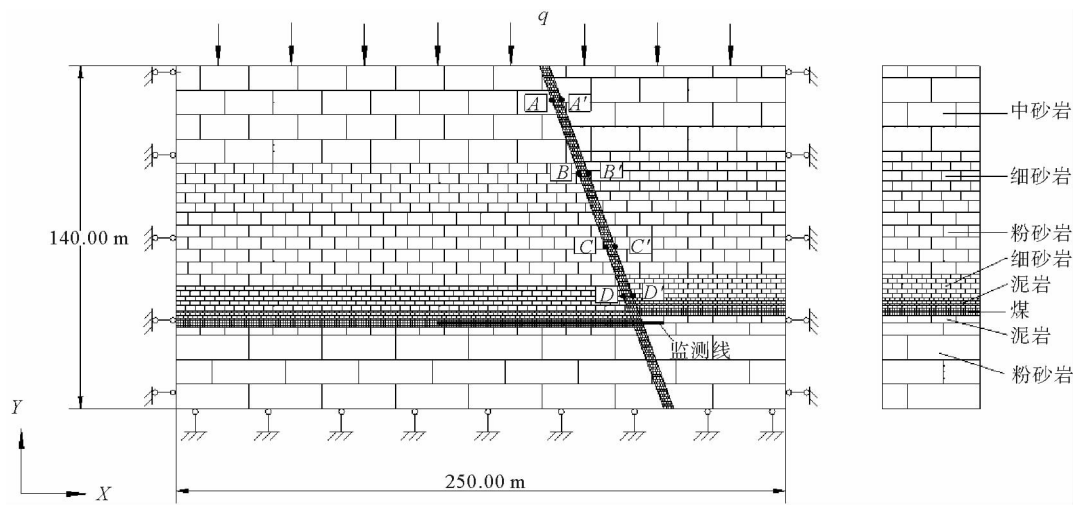


图 1 数值计算模型

Fig.1 Numerical model

表 1 模型岩层及力学参数

Table 1 Model rock formation and mechanical parameters

岩性	厚度/m	密度/ (kg/m ³)	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	黏聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa	内摩擦角/ (°)
中砂岩	40	2 702	10.000 0	9.450 0	4.500	6.00	32
细砂岩	20	2 700	8.810 0	3.380 0	4.200	5.00	30
粉砂岩	30	2 603	7.810 0	7.870 0	4.100	7.00	35
细砂岩	10	2 700	8.810 0	3.380 0	4.200	5.00	30
泥岩	4	2 550	5.130 0	2.320 0	3.000	3.00	26
煤	3	1 450	4.550 0	1.000 0	4.000	2.00	35
泥岩	3	2 550	5.130 0	2.320 0	3.000	3.00	26
粉砂岩	30	2 603	7.810 0	7.870 0	4.100	7.00	36
断层	4	2 003	0.078 1	0.063 6	0.009	0.03	10

2 数值计算结果及分析

根据数值计算结果，分别从三个方面探讨断层附近煤柱稳定性及冲击危险性：①断层下方的煤柱宽度逐渐减小时，煤柱内支承压力与弹性应变能的变化；②分析断层煤柱宽度减小时，断层发生活化失稳的过程；③断层煤柱内弹性应变能与储能极限值的关系，断层活化释放能量对煤柱内能量变化及冲击危险性的影响。

2.1 断层对煤柱支承压力与应变能传递的影响

图 2 为随着断层煤柱宽度减小，煤柱宽度分别为 80、70、60、50、40、30、20、10 和 5 m 时，应力监测线监测的支承压力变化规律。由图 2 可知，由于逆断层受挤压作用而形成，断层处的岩石破碎，断层内部的垂直应力低于原岩应力，断层处上下两盘应力变化明显。断层对支承压力的传递有着明显的阻隔作用，且距离越近作用越明显。当断层煤柱的宽度大于 30 m 时，随着煤柱宽度的减小，煤柱内部支承压力峰值的变化不明

显。断层煤柱宽度分别为 80、50 和 30 m 时,煤柱内支承压力峰值分别为 21.6、22.5 和 24.3 MPa,峰值处于增大趋势,但增速缓慢,支承压力的传递受断层的阻隔作用较小。断层煤柱宽 20 m 时,支承压力峰值为 27.3 MPa,峰值发生了突然增大,断层的阻隔作用显现明显;煤柱宽度进一步减小,煤柱所承受的支承压力超过其极限强度,出现了塑性破坏,峰值不再增大,开始出现降低趋势。当断层煤柱宽 5 m 时,支承压力峰值降为 19.4 MPa,煤柱进入塑性阶段,其承载能力降低,极易发生煤柱冲击失稳等灾害。因此可以判断,煤柱宽度由 20 m 到 0 时,煤柱最易发生冲击破坏,是冲击地压重点防治的阶段。

使用二维离散元软件 UDEC 模拟逆断层下盘开采,属于平面应变问题,故岩体处于三向受力状态,岩体弹性应变能

$$U = [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] / 2E_0 \quad (2)$$

式中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为三个主应力; ν 为泊松比; E_0 为煤的弹性模量。

工作面从断层下盘沿断层的走向方向推进时,由监测线上各点的 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 可计算出弹性应变能 U ,绘制弹性应变能曲线,如图 3。可见,其变化规律与图 2 类似。

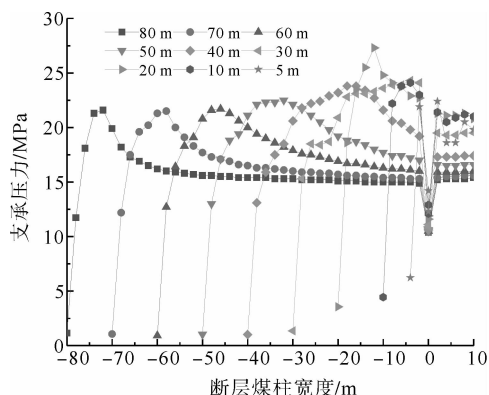


图2 断层煤柱内支承压力变化曲线

Fig. 2 Abutment pressure variation curve in fault pillar

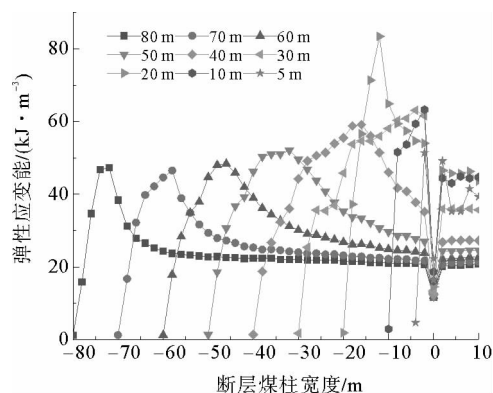


图3 断层煤柱内弹性应变能变化曲线

Fig. 3 Elastic strain energy variation curve in fault pillar

弹性应变能为煤柱内所储存的能量,当弹性应变能突然释放时,极易诱发煤体冲击灾害。由于断层的存在,断层煤柱内弹性应变能易发生积聚现象。断层煤柱宽度分别为 80、50 和 30 m 时,弹性应变能峰值分别为 47.4、52.1 和 63.1 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$,峰值逐渐增大,断层对能量的阻隔作用显现;断层煤柱宽 20 m 时,弹性应变能出现突然增大的现象,达到了 83.4 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$,由于断层的存在,煤柱内部出现了大量弹性应变能聚集的情况,煤柱处于临界破坏状态;煤柱宽度进一步减小,断层煤柱出现了塑性破坏,并伴随着弹性能的大量释放,弹性应变能出现降低趋势,煤柱宽为 5 m 时,弹性应变能峰值为 50.2 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。煤柱进入塑性区,弹性应变能的大量释放,常伴随着动力显现,煤柱易发生冲击事故。

2.2 采动影响下断层的活化过程、判据、渐进破坏到突然破坏

根据摩擦定律,剪切应力与法向应力的比值决定了断层面的摩擦性质,因此,可取断层面上的剪切应力与法向应力的比值来考察断层活化^[10]。随着煤柱宽度的变化,断层面上 A、B、C、D 四个测点的剪切与法向应力的比值变化见图 4。分析计算断层上下盘测点处的相对滑移,断层两盘测点 A-A'、B-B'、C-C'、D-D' 相对滑移量变化如图 5。

由图 4、图 5 可知,随着断层煤柱宽度的逐步减小,4 个测点剪切法向应力的比值都出现了先增大后减小的变化趋势。距煤层顶板 90 m 的 A 测点最先发生变化,当断层煤柱宽 60 m 时,A 点应力比值达到峰值 0.19,图 5 所示 A-A' 测点的断层相对滑移量开始出现增加的趋势,此时 A 点已经出现了活化趋势;煤柱宽 40 m 时,B 点的应力比值到达峰值,为 0.23,此时,B-B' 测点处的断层相对滑移量为 0.04 m,此时 B 点处断层已经活化,并伴随着能量的释放,但 B 点距煤柱边界较远,活化释放能量对煤柱影响较小;煤柱宽 20 m

时, C、D 两个测点的应力比值同时达到最大, 分别为 0.26、0.23, 当煤柱宽度继续减小时, C、D 测点的应力比值迅速降低, 断层相对滑移量急剧增大, 断层全面活化, 释放大量能量并传递到煤柱, 使煤柱内能量增加。

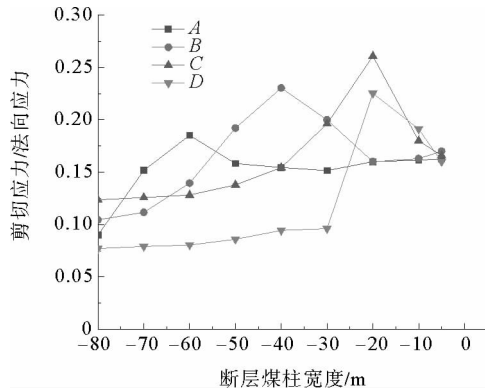


图4 断层面剪切与法向应力比值

Fig. 4 Ratio of shear stress to normal stress at the fault face

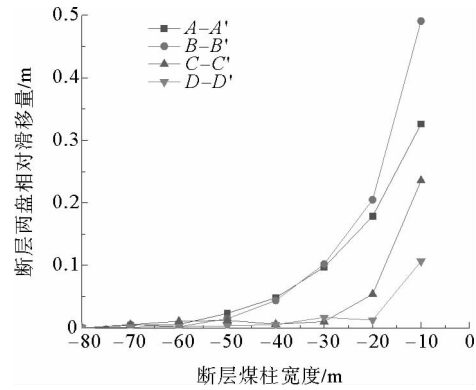


图5 断层两盘相对滑移量

Fig. 5 Relative slip of the hanging wall and footwall

综合分析图4、图5可知, 当煤柱的宽度为60 m时, 与煤层顶板相距90和60 m的A、B测点最先出现活化趋势; 煤柱宽度为20 m时, 距煤层顶板30和10 m的C、D测点同时活化, 此时断层已全面活化。可以看出, 逆断层下盘开采情况下, 受采动影响, 距离煤层顶板较远的高位处断层最先活化。由图5可知, 煤柱宽10 m时, A-A'、B-B'、C-C'、D-D'测点的断层两盘相对滑移量分别为0.33、0.49、0.24和0.11 m, 断层滑移量大幅度增加, 断层出现了突然活化破坏。煤层开采对断层活化滑移的影响范围有限, 距煤层顶板60 m的B-B'点滑移量最大, 距煤层顶板90 m的A-A'点滑移量小于B-B'点, 说明采动对不同层位的断层扰动效应不同, 超过一定距离之后, 距离煤层更远的岩层损伤滑移程度逐步减弱。断层活化失稳的同时, 伴随着能量的释放, 活化能传递到煤柱内, 与弹性应变能叠加, 使煤柱内能量积聚, 当积聚的能量超过其储能极限值时, 煤柱易发生冲击事故。

2.3 工作面前方煤柱的能量变化与冲击危险性分析

华安增^[11]分析了地下开挖过程中的岩体内部的能量变化。岩体所受的应力状态不同, 其允许存储的储能极限值也不同, 三轴应力作用下, 岩石破断时总的应变能即为该应力状态下的储能极限值。原岩应力状态时, 所储存的应变能较大, 当地下采矿工作面沿着断层走向方向推进时, 煤柱中最小主应力不断降低, 极限储存能也随之降低。岩石在三向应力状态下的极限储存能(储能极限值) U_j ^[15]为:

$$U_j = \frac{\sigma_c^3}{2E_0(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (3)$$

式中: σ_1 、 σ_3 、 E_0 符号同前, σ_c 为单轴抗压强度。

$$\sigma_c = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (4)$$

式中: c 为黏聚力, φ 为内摩擦角。

由于工作面开采时, 工作面右侧的煤壁出现松散破碎的情况, 黏聚力较小, 但本次模拟中, 断层煤柱内煤体挤压严重, 黏聚力较大, 与现场实际情况有较大差距。为了保证计算结果的准确性, 断层煤柱中靠近工作面侧5 m内的煤柱储能极限值的计算不采用本公式。例如, 断层煤柱的宽度是80 m时, 距断层75~0 m的煤柱内采用公式(3)和(4)计算储能极限值并作曲线, 距断层80~75 m的煤柱内不采用公式(3)和(4), 直接拟合原点与75 m处的储能极限值, 其他储能极限值曲线作图方法与此类似。图6显示了煤柱内能量的变化, (a)代表弹性应变能变化曲线, (b)代表储能极限值变化曲线。

由图6可知, 断层煤柱的宽度由80减小到10 m时, 储能极限值 U_j 由 $109 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 减小到 $47 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$,

可以看出,煤柱内的储能极限值出现一个降低的趋势。由2.1节分析可知,由于断层带松散破碎,导致能量无法传递,因此断层煤柱内积聚了大量的弹性应变能,即 U_e 出现增大趋势,而 U_j 逐渐降低,表现为二者的曲线将逐步逼近。煤柱宽度为30 m时,弹性应变能曲线与储能极限值曲线大致重合;煤柱宽度为20 m时,弹性应变能曲线完全超过其储能极限值曲线,弹性应变能峰值为 $83 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$,此时储能极限值为 $45 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$,弹性应变能峰值为储能极限值的1.84倍;煤柱宽度为10 m时,弹性应变能峰值为 $63 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$,该点处的储能极限值仅为 $40 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。当弹性应变能曲线超过储能极限值曲线时,意味着工作面与断层之间的煤柱将整体失稳,甚至抛出形成冲击。

断层煤柱宽度减小,将导致断层带出现活化失稳现象,并伴随着断层活化扰动能的释放,断层活化扰动能传递到断层煤柱,与弹性应变能叠加,导致煤柱内部能量瞬间增大,增加了冲击地压发生的几率。由图6可以看出,煤柱宽30 m时,弹性应变能曲线与储能极限值曲线大致重合,煤柱宽20 m时,弹性应变能出现了大幅度超过储能极限值的现象。由2.2节分析知,当煤柱宽度为20 m时,断层全面活化,释放断层活化能量,此时断层煤柱内接收到的大量的断层活化能量与弹性应变能叠加,煤柱内能量积聚,且超过其极限储能强度,极易发生冲击事故。因此,当煤柱宽30 m时,煤柱冲击危险性开始增大,煤柱宽20 m时,煤柱冲击危险性达到最大,此时极易发生冲击地压灾害,是重点防冲阶段。

3 工程实例验证

某煤矿2107工作面^[13]开采深度为1 000 m,位于DF4与F9断层之间,煤层具有强冲击倾向性。DF4断层倾角为 70° ,落差为10 m,F9断层倾角为 60° ,落差为8 m,2107工作面与DF4断层之间的最小断层煤柱宽度小于15 m。在该工作面回采期间,出现多次冲击事故,如图7所示,十代表冲击位置。图7表明,随着断层煤柱宽度的减小,冲击事故的频率逐步增加,出现这一现象的主要原因为:工作面沿逆断层下盘走向布置,工作面的回采导致断层活化并释放能量,同时断层煤柱内部弹性应变能增加,断层煤柱储能极限值降低,煤柱内能量大量释放导致断层煤柱出现冲击失稳。

辽宁龙凤煤矿有多次发生冲击地压灾害的记录,采用随机分析的方法取50次冲击事故进行分析,与断层相关的冲击事故占36起,如图8所示^[16]。图中显示巷道距断层的距离小于25 m时,冲击地压发生次数开始明显增加,巷道过断层后,冲击次数减少。本研究采用数值模拟的方法探讨断层煤柱发生冲击失稳,其结果与现场工程实际相吻合,可以合理解释工作面遇断层时冲击地压的位置及原因。

4 结论

1) 开采逆断层下盘煤层时,由于断层带松散破碎的影响,断层存在阻隔作用,工作面与断层之间的煤柱

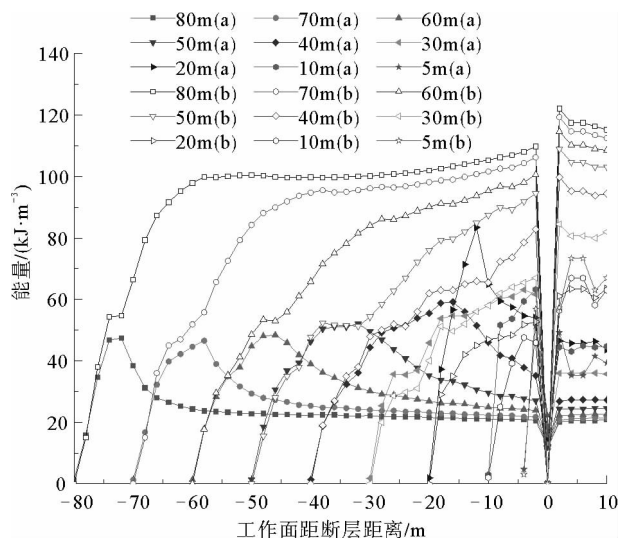


图6 弹性应变能与储能极限值变化规律

Fig. 6 Variation law of the elastic strain energy and limit energy storage

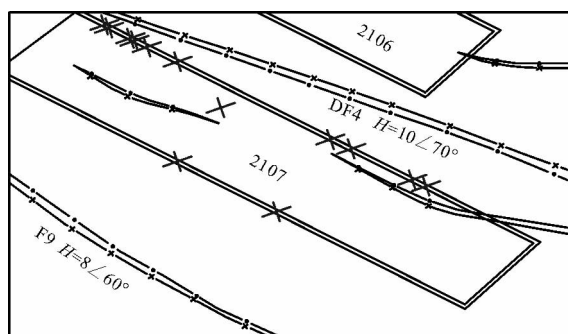


图7 某矿2107工作面冲击地压位置^[13]

Fig. 7 Location of rock burst in 2107 working face of a mine^[13]

上支承压力与弹性应变能随煤柱宽度的减小而呈现出先增加后减少的变化趋势,煤柱宽 20 m 时,支承压力与弹性应变能峰值达到最大,之后煤柱发生塑性破坏,支承压力减小,弹性应变能降低。

2) 通过断层带剪切与法向应力的比值及断层两盘相对滑移量指标考察断层活化特性,结合模拟过程中断层内活化单元变化规律,得出当断层煤柱宽度减小时,与煤层顶板相距较远的高位处断层最先出现活化,但采动对断层的扰动范围有限。

3) 随着断层煤柱宽度的减小,煤柱的储能极限也逐渐降低,当煤柱宽度为 30 m 时,煤柱内弹性应变能首次超过其储能极限值;煤柱宽 20 m 时,煤柱中的弹性应变能峰值为储能极限值的 1.84 倍,此时断层已经发生全面活化,断层活化释放能量传递至工作面前方煤柱,与煤柱弹性应变能叠加,使工作面前方煤柱内的总能量大幅超过其储能极限值,此时煤柱有较大冲击危险。

参考文献:

- [1]姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报,2014,39(2):205-213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [2]MARK C. Coal bursts in the deep longwall mines of the United States[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2016, 3(1): 1-9.
- [3]姜耀东,赵毅鑫,刘文岗,等.煤岩冲击失稳的机制和实验研究[M].北京:科学出版社,2009:1-40.
- [4]蒋金泉,武泉林,曲华,等.硬厚岩层下逆断层采动应力演化与断层活化特征[J].煤炭学报,2015,40(2):267-277.
JIANG Jinquan, WU Quanlin, QU Hua, et al. Characteristic of mining stress evolution and activation of the reverse fault below the hard-thick strata[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 267-277.
- [5]赵毅鑫,王浩,焦振华,等.逆断层下盘工作面回采扰动引发断层活化特征的试验研究[J].煤炭学报,2018,43(4):914-922.
ZHAO Yixin, WANG Hao, JIAO Zhenhua, et al. Experimental study of the activities of reverse fault induced by footwall coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 914-922.
- [6]罗浩,李忠华,王爱文,等.深部开采临近断层应力场演化规律研究[J].煤炭学报,2014,39(2):322-327.
LUO Hao, LI Zhonghua, WANG Aiwen, et al. Study on the evolution law of stress field when approaching fault in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 322-327.
- [7]王存文,姜福兴,刘金海.构造对冲击地压的控制作用及案例分析[J].煤炭学报,2012,37(增2):263-268.
WANG Cunwen, JIANG Fuxing, LIU Jinhai. Analysis on control action of geologic structure on rock burst and typical cases[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S2): 263-268.
- [8]潘一山,王来贵,章梦涛.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. The theoretical and testing study of fault rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 642-649.
- [9]王爱文,潘一山,李忠华,等.断层作用下深部开采诱发冲击地压相似试验研究[J].岩土力学,2014,35(9):2486-2492.
WANG Aiwen, PAN Yishan, LI Zhonghua, et al. Similar experimental study of rockburst induced by mining deep coal seam under fault action[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2486-2492.
- [10]姜耀东,王涛,赵毅鑫,等.采动影响下断层活化规律的数值模拟研究[J].中国矿业大学学报,2013,42(1):1-5.
JIANG Yaodong, WANG Tao, ZHAO Yixin, et al. Numerical simulation of fault activation pattern induced[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(1): 1-5.
- [11]华安增.地下工程周围岩体能量分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(7):1054-1059.
HUA Anzeng. Energy analysis of surrounding rocks in underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1054-1059.
- [12]李守国,吕进国,姜耀东,等.逆断层不同倾角对采场冲击地压的诱导分析[J].采矿与安全工程学报,2014,31(6):869-875.

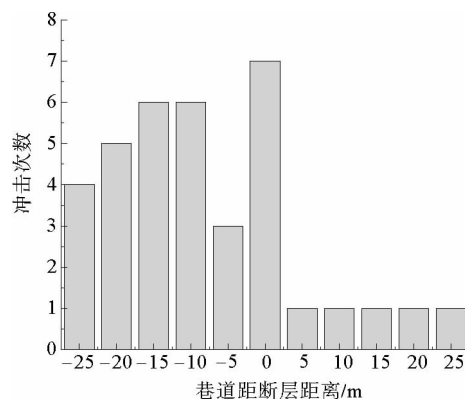


图8 龙凤煤矿冲击地压发生规律^[16]

Fig. 8 Rock burst law in Longfeng coal mine^[16]

- LI Shouguo, LÜ Jinguo, JIANG Yaodong, et al. Coal bump inducing rule by dip angles of thrust fault[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(6): 869-875.
- [13] 武泉森, 蒋力帅, 孔朋, 等. 断层煤柱及倾角对采动应力及能量分布的影响特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 708-716.
- WU Quansen, JIANG Lishuai, KONG Peng, et al. Effects characteristics of fault pillar and its dip angle on mining-induced stress and energy distribution[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4): 708-716.
- [14] 孟召平, 张娟, 师修昌, 等. 煤矿采空区岩体渗透性计算模型及其数值模拟分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1997-2005.
- MENG Zhaoping, ZHANG Juan, SHI Xiuchang, et al. Calculation model of rock mass permeability in coal mine goaf and its numerical simulation analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 1997-2005.
- [15] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003-3010.
- XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003-3010.
- [16] 李鹏, 蔡美峰, 郭奇峰, 等. 煤矿断层错动型冲击地压研究现状与发展趋势[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(3): 1-17.
- LI Peng, CAI Meifeng, GUO Qifeng, et al. Research situations and development tendencies of fault slip rock burst in coal mine[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3): 1-17.

(责任编辑: 吕海亮)

(上接第 60 页)

- [8] 程远方, 沈海超, 李令东, 等. 天然气水合物藏物性参数综合动态模型的建立及应用[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 320-323.
- CHENG Yuanfang, SHEN Haichao, LI Lingdong, et al. Comprehensive and dynamical modeling for physical parameters of natural gas hydrate reservoirs and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 320-323.
- [9] 刘建军, 邵祖亮, 郑永香. 天然气水合物降压分解过程的数值模拟[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2017, 39(1): 80-90.
- LIU Jianjun, SHAO Zuliang, ZHENG Yongxiang. Numerical simulation of the decomposition of natural gas hydrates by depressurization[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2017, 39(1): 80-90.
- [10] 陈月明. 天然气水合物开采理论与技术[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2011: 36-42.
- [11] KAMATH, V A. Study of heat transfer characteristics during dissociation of gas hydrates in porous media[D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 1984.
- [12] KIM H C, BISHNOI P R, HEIDEMANN R A, et al. Kinetics of methane hydrate decomposition[J]. Chemical Engineering Science, 1987, 42(7): 1645-1653.
- [13] SUN X, NANCHARY N, MOHANTY K K. 1-D modeling of hydrate depressurization in porous media[J]. Transport in Porous Media, 2005, 58(3): 315-338.
- [14] MA T, RUTQVIST J, OLDENBURG C M, et al. Fully coupled two-phase flow and poromechanics modeling of coalbed methane recovery: Impact of geomechanics on production rate[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 45: 474-486.
- [15] CHEN D, PAN Z, LIU J, et al. An improved relative permeability model for coal reservoirs[J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 109-110: 45-57.
- [16] BROOKS R H, COREY A T. Properties of porous media affecting fluid flow[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1966, 92(2): 61-90.
- [17] DELSHAD M, LENHARD R J, OOSTROM M, et al. A mixed-wet hysteretic relative permeability and capillary pressure model in a chemical compositional reservoir simulator[J]. SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 2003, 6(5): 328-334.
- [18] LEVERETT M C. Capillary behavior in porous solids[J]. Transactions of the AIME, 1941, 142(1): 152-169.

(责任编辑: 吕海亮)