

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.03.17

断层冲击地压的影响因素分析

李忠华¹, 梁 影¹, 包思远¹, 尹万蕾²

(1. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000;
2. 安阳工学院机械工程学院, 河南 安阳 455000)

摘要: 针对断层冲击地压问题, 通过建立断层-煤柱变形系统, 得到了断层错动型冲击地压的发生条件, 并对其主要影响因素进行分析。结果表明: 当采空区宽度一定时, 载荷随煤层塑性区宽度的变化是先增大再减小, 达到临界载荷前, 临界断层保护煤柱宽度随载荷增大而增大; 当载荷一定时, 采空区宽度随煤层塑性区宽度的变化是先增大再减小, 达到临界采空区宽度前, 断层保护煤柱宽度随采空区宽度的增大而增大, 则保证断层保护煤柱宽度大于临界断层保护煤柱宽度, 可避免断错型冲击地压的发生; 当断层抗剪强度较大时, 留设较窄的断层保护煤柱, 断层错动型冲击地压也不会发生。根据工作面走向与断层位置的关系, 选择合适的方法计算临界断层保护煤柱宽度, 可避免断层错动型冲击地压的发生。研究结果为有效防治断层错动型冲击地压提供理论依据。

关键词: 采矿工程; 冲击地压; 断层活化; 断层保护煤柱; 临界断层保护煤柱宽度

中图分类号: TD324

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)03-0126-06

Analysis on influence factors of the fault rock burst

LI Zhonghua¹, LIANG Ying¹, BAO Siyuan¹, YIN Wanlei²

(1. Department of Mechanics and Engineering Sciences, Liaoning Technical University,
Fuxin, Liaoning 123000, China; 2. Department of Mechanical Engineering,
Anyang Technical University, Anyang, Henan 455000, China)

Abstract: Aiming at the problem of fault rock burst, we have established a fault-coal pillar deformation system, from which the occurrence conditions of fault-dislocation rock burst are obtained and the main influencing factors are analyzed. The following conclusions can be drawn. (1) When the width of the goaf is constant, the load increases first and then decreases with the width of the plastic zone of the coal seam. Before reaching critical load, the width of critical fault protection pillar only increases with the increase of load. (2) When the load is constant, the width of the goaf increases first and then decreases with the width of the plastic zone of the coal seam. Before reaching critical width of the goaf, the width of coal pillar only increases with the goaf width. (3) When the shear strength of the fault is relatively large, the fault-type rock burst will not occur even when the fault protection pillar is narrower. According to the relationship between working face strike and fault position, taking an appropriate method to calculate the width of critical pillar of fault can help to avoid the occurrence of fault-dislocation-type rock burst. The research results provide a theoretical basis for

收稿日期: 2019-07-17; 修订日期: 2019-11-27

基金项目: 国家重点研发计划: 煤矿冲击地压失稳灾变动力学机理与多场耦合致灾机制(2016YFC0801401); 国家重点研发计划: 稳构恒阻吸能“O型”棚支护防控巷道冲击地压技术与装备(2017YFC0804205)

第一作者: 李忠华(1964-), 男, 辽宁葫芦岛人, 力学专业, 博士, 教授, 博导, 主要从事矿山环境与灾害力学方面的教学与研究工作。
E-mail: 13941824411@139.com

通讯作者: 梁 影(1993-), 女, 辽宁葫芦岛人, 力学专业, 硕士研究生, 主要从事矿山环境与灾害力学方面的研究工作。E-mail: 1432656675@qq.com

the effective prevention and treatment of rock burst caused by fault dislocation.

Keywords: mining engineering; rock burst; fault activation; fault protection coal pillar; critical fault protection pillar width

0 引言

冲击地压又称岩爆,常发生在井巷或工作面周围岩体,是一种复杂的岩石力学动力现象,具有很大的破坏性,也是煤炭开采过程中的严重灾害之一。世界上很多国家都不同程度的受到冲击地压的威胁,对冲击地压的发生条件及影响因素进行研究显得尤为重要。由于煤层赋存条件千变万化,地质构造极为复杂,开采技术条件变化多端,造成煤岩动力系统的结构形式和外部环境多种多样,所以,冲击地压的诱发因素和显现形式也是多种多样的,应采取科学的方法进行冲击地压分类,进而针对不同类型冲击地压进行研究,实现准确预测和有效防治^[1-4]。

目前冲击地压的分类方法有许多种。赵本钧^[5]将龙凤矿冲击地压分为煤爆、浅部冲击和深部冲击三类。王乃鹏^[6]根据煤岩体受力来源将冲击地压分为重力型和构造型两大类。邵英楼等^[7]将冲击地压分为采掘诱发的煤岩体压应力型、顶底板受拉应力型及断层走滑受剪型三类。潘一山等^[8]根据释放能量的主体将冲击地压分为煤体压缩型冲击地压、顶板断裂型冲击地压和断层错动型冲击地压三类。大量资料显示,与断层相关的冲击地压是一种常见的、破坏性相对比较严重的基本类型,称为断层错动型冲击地压,这类型的冲击地压给煤矿开采带来很大的影响^[9-10]。

王来贵等^[11]通过分析断层等不连续面冲击地压现象,得出了发生断层冲击地压的原因及影响因素。潘一山等^[12]把断层冲击地压看成断层带与上、下盘围岩系统的变形失稳,不仅提出扰动响应判别准则,还对断层冲击地压进行了解析分析。徐东强等^[13]对断层冲击地压的发生机制及声发射特性进行了研究。李志华等^[14]对采动影响下断层滑移诱发煤岩体冲击的机制进行了研究,认为开采过程中断层下盘发生断层冲击地压的危险性较高。

本文参考上述文献,通过建立断层-煤柱变形系统,采用顶板剪切梁模型,建立断层活化条件,研究断层错动型冲击地压的发生条件及影响因素,重点研究断层保护煤柱宽度在煤矿开采中的作用,为有效防治断层错动型冲击地压提供理论依据。

1 断层-煤柱变形系统分析模型

煤层采空区边界至断层的煤体称为断层保护煤柱,在断层附近的煤岩层中进行采掘活动时,采空区周围煤岩体受采动影响而发生变形破坏。当在此影响范围内存在断层时,断层可能活化而产生错动。据此建立断层-煤柱变形系统。断层活化前,系统处于稳定平衡状态。在断层错动型冲击地压孕育过程中,断层上下盘围岩产生压剪变形,积聚变形能,并不断累积、传播、转移、耗散。系统演化过程中,如果稳定度增加,则发生冲击地压的可能性降低;如果稳定度降低,发生冲击地压的可能性增加。当处于临界平衡状态时,如果遇外部扰动,造成断层活化,释放大量的压剪变形能,系统将会失稳而发生断层错动型冲击地压。

如图1所示,假设煤层置于刚性底板之上。假设煤层及其底板岩层、断层上下盘围岩为均匀、连续的各向同性材料。建平面直角坐标系 $o-xz$ 。 a 为采空区宽度, x_p 为煤层塑性区宽度, L 为断层保护煤柱宽度, H 为顶板岩层厚度, h 为煤层厚度,其中 a 、 x_p 、 L 、 H 、 h 的单位均是 m。假设顶板岩层为抗剪刚度为 $K = GH$ 的弹性剪切梁,单位是 N/m, G 为顶板剪切弹性模量,单位均是 Pa, p_o 为原岩应力,单位是 Pa。

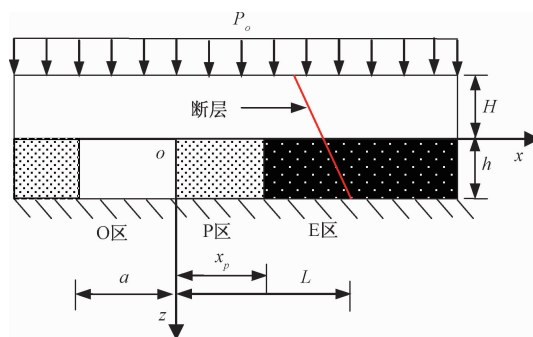


图1 断层-煤柱系统分析模型

Fig. 1 Analysis model of the pillar-fault system

2 断层处的顶板剪力

顶板在载荷 p_o 和煤层支承压力 $p(x)$ 作用下产生剪切变形而下沉,下沉量 w ,剪力为 Q ,其中 $p(x)$ 、 w 、 Q 的单位分别是 Pa、m、N,则顶板变形微分方程为:

$$K \frac{d^2 w}{dx^2} = p(x) - p_o, \quad Q = -K \frac{dw}{dx} \quad (1)$$

式中: w ——下沉量;

Q ——剪力;

p_o ——载荷。

假设煤层内应力均匀分布,即 $\sigma_z = p(x)$, 得煤层单元体平衡方程为:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} - \frac{2\tau_w}{h} = 0 \quad (2)$$

式中: σ_x 、 σ_z ——为应力分量,单位是 Pa;

τ_w ——为煤层与顶底板间摩擦力,单位是 Pa。

当煤层与顶底板间有相对滑动时, $\tau_w = f\sigma_z$, 无相对滑动时, $\tau_w < f\sigma_z$ 。 f 为滑动摩擦系数。

煤层单元体几何方程为:

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx}, \quad \varepsilon_z = \frac{w}{h} \quad (3)$$

式中: u ——为水平位移,单位是 m;

ε_x 、 ε_z ——为应变分量。

当煤层埋深较大时,采空区附近区域的煤层处于塑性变形状态(简称为 P 区),距离采空区较远处的煤层处于弹性变形状态(简称为 E 区)。设 P 区宽度为 x_p 。

E 区 ($x \geq x_p$): 煤层与顶底板间无相对滑动

$$\sigma_x = \mu_1 \sigma_z, \quad \sigma_z = \frac{E_1}{h} w \quad (4)$$

式中: $\mu_1 = \frac{\mu}{1-\mu}$, $E_1 = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}$; E 为煤层弹性模量,单位是 Pa, μ 为煤层泊松比。

P 区 ($0 \leq x \leq x_p$): 煤层与顶底板间有相对滑动。采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,并忽略剪切变形的影响,则屈服函数 $f(\sigma)$ 为:

$$f(\sigma) = \sigma_z - m\sigma_x - \sigma_c = 0 \quad (5)$$

式中: $m = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}$, $\sigma_c = 2C/\sqrt{m}$ ——单轴抗压强度,

单位是 Pa,对应应变为 ε_c ;

C ——黏聚力,单位是 Pa;

φ ——内摩擦角,单位是度。

假设塑性区体积不可压缩,得等效应变 $\bar{\varepsilon} = \frac{2w}{\sqrt{3}h}$ 。

假设塑性区损伤线性演化,得损伤演化方程 $D -$

$\frac{\lambda}{\sigma_c}(\bar{\varepsilon} - \varepsilon_c) = \frac{\lambda}{E} \left(\frac{2w}{\sqrt{3}h\varepsilon_c} - 1 \right)$ 。由应变等效假设,得:

$$\sigma_z = m\sigma_x + b_1 - b_2 w \quad (6)$$

式中: $b_1 = \left(1 + \frac{\lambda}{E}\right)\sigma_c$; $b_2 = \frac{2\lambda}{\sqrt{3}h}$; λ 为降模量,单位是

Pa。

定解条件:

a) 当 $x = -a/2$ 时, $Q = 0$;

b) 当 $x = 0$ 时, w 、 Q 连续, $\sigma_x = 0$;

c) 当 $x = x_p$ 时, w 、 Q 、 σ_x 连续;

d) 当 $x = \infty$ 时, $Q = 0$ 。由定解即可得到煤层及其顶板的变形与应力分布规律和煤层区宽度。

假设断层处于煤层弹性区位置, $L > x_p$, 得断层处的顶板剪力为:

$$Q(L) = p_o(f_1 - b_3)\exp(\alpha x_p - \alpha L) \quad (7)$$

式中: $\alpha = \frac{\sqrt{E_1}}{Kh}$; $b_5 = 1 + \frac{2f}{\alpha h \mu_1}$ 。

煤层塑性区宽度 x_p 由下式确定:

$$\left(\frac{b_1}{p_o} - 1 - \alpha_1 \alpha_2 f_2\right)f_3 + f_1 f_4 - b_4 = 0 \quad (8)$$

式中: $f_1 = b_3 - \frac{1}{\alpha b_5} + \left(1 - \frac{1}{b_5}\right)\left(x_p + \frac{a}{2}\right)$;

$$f_2 = \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha b_5} - b_3\right)\left(x_p + \frac{a}{2} + \frac{1}{\alpha} + b_3\right) + \frac{b_3}{\alpha b_5};$$

$$f_3 = \exp(-\alpha_1 x_p) - \exp(-\alpha_2 x_p);$$

$$f_4 = \alpha_2 \exp(-\alpha_2 x_p) - \alpha_1 \exp(-\alpha_1 x_p);$$

$$b_3 = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2};$$

$$b_4 = \alpha_1 + \alpha_2 \left(\frac{a}{2} + b_3\right);$$

$$\alpha_1 = \frac{mf}{h} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{b_2}{K} \left(\frac{h}{fm}\right)^2}\right);$$

$$\alpha_2 = \frac{mf}{h} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{b_2}{K} \left(\frac{h}{fm}\right)^2}\right)。$$

3 断层错动型冲击地压发生条件及其影响因素

断层错动型冲击地压的发生条件为:在断层处满足断层活化条件。下面对断层错动型冲击地压的发生条件及其影响因素进行分析。

设断层抗剪强度为 τ_f , 单位是 Pa, 则直立断层活化条件为

$$Q(L) = H\tau_f \quad (9)$$

由式(7)、(9)得发生断层错动型冲击地压的临界断层保护煤柱宽度 L_{cr} , 单位是 m。

$$L_{cr} = x_p + \frac{1}{\alpha} \ln \frac{p_o(f_1 - b_3)}{H\tau_f} \quad (10)$$

3.1 载荷(采深)的影响

下面分析采空区宽度一定的条件下,载荷(采深)对临界断层保护煤柱宽度 L_{cr1} 的影响。

通过实验室测试及现场实际情况,取 $H=8\text{ m}$, $G=8\text{ GPa}$, $f=0.8\text{ m}$, $h=2\text{ m}$, $a=3\text{ m}$, $E=2\text{ GPa}$, $\lambda=3\text{ GPa}$, $\mu=0.35$, $C=2\text{ MPa}$, $\varphi=30^\circ$, 分别取断层抗剪强度 $\tau_f=1\text{ MPa}$ 、 3 MPa , 得载荷 p_o 、临界断层保护煤柱宽度 L_{cr1} 随煤层塑性区宽度 x_p 变化曲线(图2)所示。

由图2可见,载荷 p_o 随煤层塑性区宽度 x_p 变化曲线存在一个极大值点 x_{per} 。当 $x_p < x_{per}$ 时,载荷 p_o 随煤层塑性区宽度 x_p 增大而增大;当 $x_p > x_{per}$ 时,载荷 p_o 随煤层塑性区宽度 x_p 增大而减小。当 $x_p = x_{per}$ 时,满足 $dp_o/dx_p = 0$ 。由冲击地压失稳理论知, $x_p = x_{per}$ 为煤层发生煤体压缩型冲击地压的临界点,对应的载荷为发生煤体压缩型冲击地压的临界载荷。在发生煤体压缩型冲击地压(煤层失稳)之前,如果留设的断层保护煤柱宽度 $L < L_{cr1}$, 则存在断层活化而发生断层错动型冲击地压的危险性。因此,留设的断层保护煤柱宽度必须大于临界断层保护煤柱宽度 $L > L_{cr1}$ 。

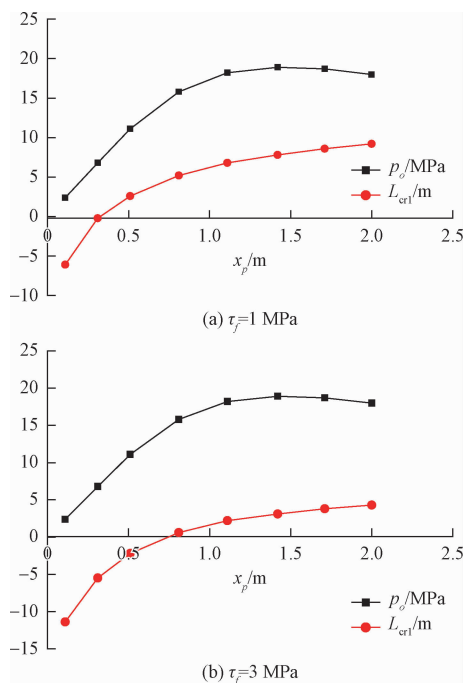


图2 载荷和临界断层保护煤柱宽度随煤层塑性区宽度变化曲线

Fig.2 Curves of load and critical fault protection coal pillar width with the change of coal seam plastic zone width

由图2可见,临界断层保护煤柱宽度 L_{cr1} 随煤层塑性区宽度 x_p 增大而增大。在满足 $x_p < x_{per}$, $p_o < p_{ocr}$ 的条件下,临界断层保护煤柱宽度 L_{cr1} 随载荷 p_o 增大而

增大。如果采深较大,相应的载荷 p_o 也较大,则应留设较宽的断层保护煤柱,以避免断层活化造成断层错动型冲击地压。当采深较浅,相应的载荷 p_o 较小时,临界断层保护煤柱宽度 L_{cr1} 很小,理论值甚至小于零。表明即使留设很窄的断层保护煤柱,断层也不会活化,因此对于浅部开采不会发生断层错动型冲击地压。

令 $L_{cr1} = x_p$, 由式(10)得

$$p_o(f_1 - b_3) = H\tau_f \quad (11)$$

式(11)与式(8)联立,得不会发生断层错动型冲击地压的最小断层保护煤柱断层宽度 L_{min1} 、最小载荷 p_{omin} 或最小采深 H_{omin} 。当 $\tau_f = 1\text{ MPa}$ 时,由以上数据计算得 $L_{min1} = 0.35\text{ m}$, $p_{omin} = 7.9\text{ MPa}$ 或 $H_{omin} = 316\text{ m}$ 。

由图2(a)、(b)对比可见,当断层抗剪强度 τ_f 较大时,临界断层保护煤柱宽度 L_{cr1} 较小,表明断层不易活化,断层错动型冲击地压不会发生,可以留设较窄的断层保护煤柱。

3.2 采动(采空区宽度)的影响

下面分析载荷(采深)一定的条件下,采空区宽度(采动)对临界断层保护煤柱宽度 L_{cr2} 的影响。

通过实验室测试及现场实际情况,取 $H=8\text{ m}$, $G=8\text{ GPa}$, $f=0.8\text{ m}$, $h=2\text{ m}$, $p_0=10\text{ MPa}$, $E=2\text{ GPa}$, $\lambda=3\text{ GPa}$, $\mu=0.35$, $C=2\text{ MPa}$, $\varphi=30^\circ$, 分别取 $\tau_f=1\text{ MPa}$ 、 3 MPa , 得采空区宽度 a 、临界断层保护煤柱宽度 L_{cr2} 随煤层塑性区宽度 x_p 变化曲线,如图3所示。

由图3可见,采空区宽度 a 随煤层塑性区宽度 x_p 变化曲线存在一个极大值点 x_{per} 。当 $x_p < x_{per}$ 时,采空区宽度 a 随煤层塑性区宽度 x_p 增大而增大;当 $x_p > x_{per}$ 时,采空区宽度 a 随煤层塑性区宽度 x_p 增大而减小。当 $x_p = x_{per}$ 时,满足 $da/dx_p = 0$ 。由冲击地压失稳理论知, $x_p = x_{per}$ 为煤层发生煤体压缩型冲击地压的临界点,对应的采空区宽度 a_{cr} 为发生煤体压缩型冲击地压的临界采空区宽度。在发生煤体压缩型冲击地压(煤层失稳)之前,如果留设的断层保护煤柱宽度 $L < L_{cr2}$, 则存在断层活化而发生断层错动型冲击地压的危险性。因此,留设的断层保护煤柱宽度必须大于临界断层保护煤柱宽度 $L > L_{cr2}$ 。

由图3可见,临界断层保护煤柱宽度 L_{cr2} 随煤层塑性区宽度 x_p 增大而增大。在满足 $x_p < x_{per}$, $a < a_{cr}$ 的条件下,临界断层保护煤柱宽度 L_{cr2} 随采空区宽度 a 增大而增大。

由图3可见,当采空区宽度 a 较小时,临界断层保护煤柱宽度 L_{cr2} 很小,理论值甚至小于零。表明即使留设很窄的断层保护煤柱断层也不会活化,因此初采

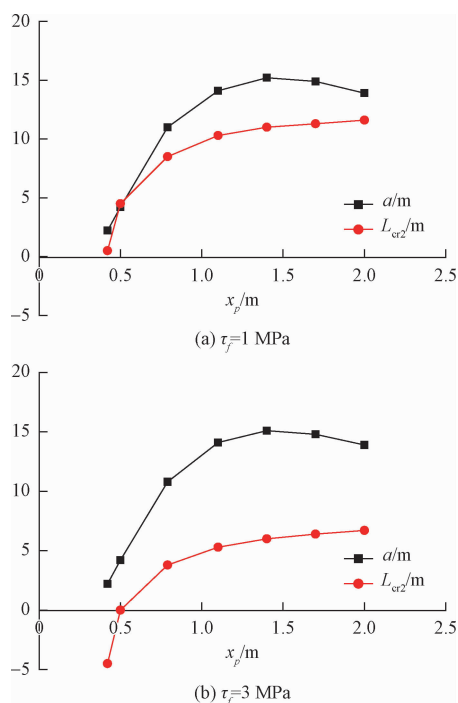


图3 采空区宽度和临界断层保护煤柱宽度随煤层塑性区宽度变化曲线

Fig. 3 Curves of gob width and critical fault protection pillar width with the change of coal seam plastic zone width

阶段一般不会发生断层错动型冲击地压。

由图3(a)、(b)对比可见,当断层抗剪强度 τ_f 较大时,临界断层保护煤柱宽度 L_{cr2} 较小,表明断层不易活化,断层错动型冲击地压不会发生,可以留设较窄的断层保护煤柱。

在工作面走向平行断层面布置时,应根据工作面倾向长度 a 计算临界断层保护煤柱宽度 L_{cr} 。留设足够宽度的断层保护煤柱, $L > L_{cr}$,以避免断层错动型冲击地压的发生。

在工作面走向垂直断层面布置时,应首先选择将开切眼布置在断层附近,背离断层推进。根据顶板初次来压步距计算临界断层保护煤柱宽度 L_{cr} ,留设足够的断层保护煤柱宽度, $L > L_{cr}$,以避免断层错动型冲击地压的发生。

在回采工作面前方遇到断层时,应根据顶板垮落情况计算临界断层保护煤柱宽度 L_{cr} 。在达到临界断层保护煤柱宽度之前, $L = L_{cr}$ 采取煤体卸压、顶板预裂、断层弱化等措施,以避免断层错动型冲击地压的发生。

4 结论

通过建立断层-煤柱变形系统,得到了断层错动型冲击地压的发生条件,并对其主要影响因素进行了分

析,得到结论如下:

(1)留设的断层保护煤柱宽度足够时,在断层活化之前潜在发生煤体压缩型冲击地压的危险性;留设的断层保护煤柱宽度不够时,存在断层活化发生断层错动型冲击地压的危险性。

(2)在采空区一定时,满足 $x_p < x_{per}$, $p_o < p_{ocr}$,临界断层保护煤柱宽度 L_{cr1} 随载荷 p_o 增大而增大;当 p_o 较小时, L_{cr1} 很小,理论值甚至小于零,则浅部开采不会发生断层错动型冲击地压。

(3)在载荷一定时,满足 $x_p < x_{per}$, $a < a_{cr}$,临界断层保护煤柱宽度 L_{cr2} 随采空区宽度 a 增大而增大;当 a 较小时, L_{cr2} 很小,理论值甚至小于零,则初采阶段不会发生断层错动型冲击地压。

(4)当断层抗剪强度较大时,临界断层保护煤柱宽度较小,断层不易活化,断层错动型冲击地压不会发生,可以留设较窄的断层保护煤柱。

(5)在工作面走向平行断层面布置时,应根据工作面倾向长度计算临界断层保护煤柱宽度;在工作面走向垂直断层面布置时,根据顶板初次来压步距计算临界断层保护煤柱宽度,以避免断层错动型冲击地压的发生。

(6)在回采工作面前方遇到断层时,应根据顶板垮落情况计算临界断层保护煤柱宽度,以避免断层错动型冲击地压的发生。

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 Y D, PAN Y S, JIANG F X, 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. (in Chinese)]
- [2] 齐庆新,李宏艳,潘俊锋,等. 冲击矿压防治的应力控制理论与实践[J]. 煤矿开采, 2011, 16(3): 114-118. [QI Q X, LI H Y, PAN J F, et al. Stress control theory and practice of rock-burst prevention[J]. Coal Mining Technology, 2011, 16(3): 114-118. (in Chinese)]
- [3] 王存文,姜福兴,孙庆国,等. 基于覆岩空间结构理论的冲击地压预测技术及应用[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 150-155. [WANG C W, JIANG F X, SUN Q G, et al. The forecasting method of rock-burst and the application based on overlying multi-strata spatial structure theory[J]. Journal of China

- Coal Society, 2009, 34 (2): 150 - 155. (in Chinese)]
- [4] 姜耀东, 赵毅鑫. 我国煤矿冲击地压的研究现状: 机制、预警与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2188 - 2204. [JIANG Y D, ZHAO Y X. State of the art: investigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2188 - 2204. (in Chinese)]
- [5] 赵本钧. 抚顺龙凤矿冲击地压成因规律、预测和防治的研究[J]. 矿山压力, 1985, 2(2): 1 - 9. [ZHAO B J. Study on the cause regularity and prevention of rock burst in Longfeng mine Fushun[J]. Mine Pressure Technology, 1985, 2(2): 1 - 9. (in Chinese)]
- [6] 王乃鹏. 关于冲击地压的类型与治理途径的探讨[C]//中国北方岩石力学与工程应用学术会议论文集. 郑州, 1991: 509 - 517. [WANG N P. Discussion on the types of rock burst and its management approaches [C]//Proceedings of the academic conference on rock mechanics and engineering applications in northern China. Zhengzhou, 1991: 509 - 517.]
- [7] 邵英楼, 王来贵, 章梦涛. 冲击地压的分类研究[J]. 煤矿开采, 1998, 3(1): 27 - 28. [TAI Y L, WANG L G, ZHANG M T. Classified research on the rock burst[J]. Coal Mining Technology, 1998, 3(1): 27 - 28. (in Chinese)]
- [8] 潘一山, 李忠华, 章梦涛. 我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1844 - 1851. [PAN Y S, LI Z H, ZHANG M T. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1844 - 1851. (in Chinese)]
- [9] 宋义敏, 马少鹏, 杨小彬, 等. 断层冲击地压失稳瞬态过程的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 812 - 817. [SONG Y M, MA S P, YANG X B, et al. Experimental investigation on instability transient process of fault rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 812 - 817. (in Chinese)]
- [10] 夏永学, 王金华, 毛德兵. 断层活化的地应力判别准则及诱发冲击地压的典型微震特征[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 3008 - 3015. [XIA Y X, WANG J H, MAO D B. Analysis of fault activation induced rock burst risk based on *in situ* stress measurements [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 3008 - 3015. (in Chinese)]
- [11] 王来贵, 潘一山, 梁冰, 等. 矿井不连续面冲击地压发生过程分析[J]. 中国矿业, 1996, 5(3): 61 - 65. [WANG L G, PAN Y S, LIANG B, et al. Analysis of rockburst process for noncontinuous area in mines[J]. China Mining Magazine, 1996, 5(3): 61 - 65. (in Chinese)]
- [12] 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 Y S, WANG L G, ZHANG M T, et al. The theoretical and testing study of fault rockburst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 642 - 649. (in Chinese)]
- [13] 徐东强. 断层冲击地压发生机制及声发射特性[J]. 黄金, 2000, 21(6): 25 - 27. [XU D Q. The occurrence mechanism of pressure bump and the character of acoustic emission (AE) [J]. Gold, 2000, 21(6): 25 - 27. (in Chinese)]
- [14] 李志华, 窦林名, 曹安业, 等. 采动影响下断层滑移诱发煤岩冲击机理[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增刊1): 68 - 73. [LI Z H, DOU L M, CAO A Y, et al. Mechanism of fault slip induced rockburst during mining[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(Sup1): 68 - 73. (in Chinese)]