

DOI: 10.11779/CJGE201806020

矩形断面巷道冲击地压机理研究

尹万雷¹, 潘一山^{*1,2}, 李忠华¹

(1. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁大学物理学院, 辽宁 沈阳 110036)

摘要: 基于顶板剪切梁模型研究矩形巷道冲击地压发生问题, 得到矩形断面巷道发生冲击地压的临界塑性软化区深度和临界载荷, 分析巷道宽度、巷道高度或煤层厚度、顶板厚度等几何因素, 以及煤层与顶板刚度比、煤的模量比、煤的强度参数、侧压力系数和水平应力分布指数等煤岩力学性质因素对临界条件的影响规律。结果表明: 巷道顶板岩层以剪切变形破坏为主, 当临界塑性区深度与临界载荷较小时, 易于发生冲击地压, 其发生频度较高, 强度较小, 破坏性较小; 反之, 冲击地压不易发生, 其发生频度较低, 一旦发生其强度会较大, 破坏性较大。临界塑性区深度与巷道宽高比、初始黏聚力的大小无关, 随顶板厚度、刚度比、模量比、水平应力分布指数的增加而增大, 随煤层塑性软化刚度、内摩擦角、侧压力系数的增加而减小。临界载荷随巷道宽高比、煤层塑性软化刚度、水平应力分布指数的增加而降低, 随顶板厚度、刚度比、模量比、初始黏聚力、内摩擦角、侧压力系数的增加而增大。

关键词: 巷道冲击地压; 矩形断面巷道; 顶板剪切梁模型; 临界塑性软化区深度; 临界载荷

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)06-1135-08

作者简介: 尹万雷(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事矿山动力灾害研究, E-mail: ywl696@126.com。

Mechanism of rock burst in rectangular section roadway

YIN Wan-lei¹, PAN Yi-shan^{1,2}, LI Zhong-hua¹

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. School of Physics, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

Abstract: The critical plastic softening zone depth and the critical load of rock bursts in a rectangular section tunnel are obtained based on the roof shear beam model for rock burst problem of roadway, and the effects of correlation factors on the critical conditions are investigated. The results show that the damage of roof rock strata is dominated by the shear deformation, and the critical depth and the critical load of the plastic zone are important parameters for identifying risk impact. Rock burst will easily happen if the critical depth and the critical load of the plastic zone are small. Its occurrence frequency is higher, but its intensity is smaller, and the destruction is also small. When they are large enough, the opposite situations occur. The influence factors of rectangular section in roadways include roadway width, height or thickness of coal seam, thickness of roof, stiffness ratio of coal seam and roof, modulus, intensity parameter, lateral pressure coefficient and horizontal stress distribution index. The critical depth of the plastic zone increases a little with the height-width ratio of roadway, and it increases with the increase of the thickness of the roof, stiffness ratio and horizontal stress distribution index. It decreases with the increasing plastic stiffness softening, internal friction angle and lateral pressure coefficient, and it has nothing to do with the initial magnitude of the cohesive force. The critical load decreases with the height-width ratio of roadway and it increases with the increase of the thickness of the roof, stiffness ratio, modulus ratio, cohesive force, internal friction angle and lateral pressure coefficient. It decreases with the increasing plastic stiffness softening and horizontal stress distribution index.

Key words: roadway rock burst; rectangular section tunnel; roof shear beam model; critical plastic softening zone depth; critical load

0 引言

冲击地压是煤矿开采的重大灾害事故之一。现场调研发现, 大多数冲击地压的发生位于巷道位置, 巷道冲击地压的防治成为防冲研究的重点。目前巷道冲击地压理论研究成果主要体现在两大方面: 一方面为

静水压力作用下的圆形断面巷道研究, 另一方面为顶

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0801401); 国家自然科学基金项目(51174107, 51374119); 国家青年自然科学基金项目(51404131)

收稿日期: 2017-03-08

*通讯作者(E-mail: panyish_cn@sina.com)

板岩层压力作用下的矩形断面巷道研究。前者模型简单, 易于得到解析解, 研究比较成熟; 后者目前研究成果相对较少, 但与实际生产情况更为相符, 因此, 本文在前人研究的基础上, 以矩形巷道为研究对象, 研究矩形巷道冲击地压的发生条件及其影响因素。

文献[1~3]建立了冲击地压失稳理论, 建立了能量准则和扰动响应判别准则, 解析分析了圆形断面巷道和煤柱冲击地压的发生条件。文献[4]基于损伤理论进行了圆形巷道围岩应力场分析, 为圆形断面巷道冲击地压研究提供了理论依据。文献[5]研究了两向不等压作用下圆形巷道围岩的弹塑性问题, 得到巷道围岩的弹塑性交界线形状类似于椭圆, 随着内摩擦角的增加更接近于圆形。文献[6]基于统一强度理论和塑性应变损伤模型, 合理考虑中间主应力效应和剪胀特性, 对高地应力下的圆形巷道进行弹塑性分析, 由冲击地压扰动失稳理论建立了圆形巷道临界冲击地压解析解。

然而圆形断面毕竟是一种理想化的简化模型, 煤矿现场实际采用的很少, 而矩形断面巷道采用的较多。但由于模型比较复杂, 很难得到解析解, 因此相关研究一直进展缓慢。文献[7]采用 Griffith 能量理论及能量判据, 考虑材料的损伤积累, 分析了平巷煤壁中预存裂纹尖端产生翼型张裂纹, 形成薄煤层壳, 薄煤层壳弯曲变形失稳引发冲击地压的机理, 确定了发生冲击地压的临界应力。文献[8]通过对隧道围岩位移、塑性区和矩形、圆弧应力分布的研究, 确定了巷道断面最佳形状, 文献[9, 10]给出了刚性平板之间的弹塑性条带柱承载能力数值解。文献[11]将煤柱视为软化性质的弹塑性材料, 将顶板简化为剪切梁模型, 确定了煤柱内弹塑性应力分布和在临界采空区宽度时发生的失稳, 给出了与简化的弹簧模型解的比较。顶板剪切梁模型与煤层弹簧模型用于分析两个对称采空区之间的煤柱失稳问题获得了成功。

本文将文献[11]建立的简化模型应用于矩形巷道冲击地压研究, 通过解析分析得到矩形断面发生巷道冲击的临界条件, 分析巷道及其顶板的几何因素和力学性质因素对矩形断面发生巷道冲击地压的临界塑性软化区深度与临界载荷的影响规律。

1 基本假设与基本方程

在埋深为 H_0 的水平煤层中掘进巷道, 巷道断面形状为矩形。假设巷道宽度为 $2a$, 高度等于煤层厚度 h , 如图 1 所示。

煤矿现场实践表明, 顶板岩层的变形破坏以剪切为主, 因此将顶板岩层简化为主要发生剪切变形的剪

切梁模型^[11]。顶板剪切梁在上覆岩层压力和煤层支承力共同作用下, 发生剪切变形而下沉。顶板厚度为 H , 等效剪切模量为 G , 令 $K = GH$ 。顶板岩石弹性模量为 E_d , 泊松比为 ν_d , 则 $G = \frac{E_d}{2(1+\nu_d)}$ 。煤层上覆岩层

平均重度为 $\bar{\gamma}$, 则作用于顶板上表面的分布载荷为 $q = \bar{\gamma}H_0$ 。煤层对顶板岩层的支承分布力为 $P(x)$ 。忽略煤层与顶板间摩擦力对顶板与煤层变形的影响。在载荷 q , $P(x)$ 作用下, 顶板剪切梁的下沉量(挠度)为 $w(x)$, 则顶板的变形方程为

$$\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{p - q}{K} \quad . \quad (1)$$

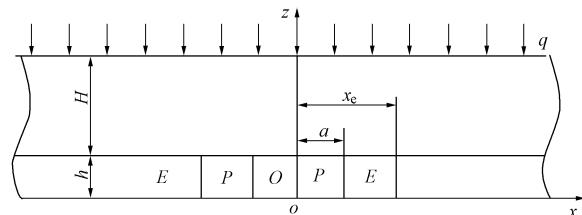


图 1 巷道冲击地压分析模型

Fig. 1 Analysis model for rock burst of roadway

假设煤层为具有应变软化性质的均匀、连续、各向同性材料, 置于刚性底板基础之上。顶板对煤层的压力为 $p(x)$ 。在 $p(x)$ 和水平应力作用下, 煤层发生平面应变压缩变形, 忽略剪切变形。假设煤层水平应力分量 σ_x 、垂直应力分量 σ_z 沿煤层厚度方向(z 轴)均匀分布。假设煤层水平应力分量 σ_x 服从指数函数规律^[11]:

$$\sigma_x(x) = q\lambda \left[1 - \exp\left(-\frac{x-a}{\rho}\right) \right] \quad , \quad (2)$$

式中, λ 为侧压力系数, ρ 称为水平应力分布指数。

在上覆岩层压力 q 较小(埋深较浅)的条件下, 媒体只发生弹性变形。在上覆岩层压力 q 较大(埋深较深)的条件下, 巷道附近的媒体发生塑性软化变形, 距离巷道较远的媒体仍然处于弹性变形状态。煤层分为两个变形区域, 弹性变形区(E 区)和塑性软化区(P 区)。

E 区的垂直应力分量:

$$\sigma_z(x) = p(x) = kw(x) \quad , \quad (3)$$

式中, $k = \frac{E}{h}$ 为煤层的弹性刚度, E 为煤的弹性模量。

P 区服从莫尔-库仑屈服准则

$$\sigma_z(x) = m\sigma_x(x) + p_m - k_1 [w(x) - w_m] \quad . \quad (4)$$

式中 $k_1 = \frac{E_1}{h}$ 为煤层的软化刚度, E_1 为煤的弹性模量; $p_m = \sigma_m = 2c_0\sqrt{m}$ 为煤层的峰值强度; $w_m = \frac{p_m}{k}$;

$m = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$, φ 为煤的内摩擦角, c_0 为煤的初始黏聚力。

2 煤层弹性变形与弹性极限状态

巷道上方, $0 \leq x \leq a$, 顶板处于无支承状态, $p = 0$ 。由式(1)得

$$\left. \begin{aligned} \omega &= C_2^0 x + C_1^0 x - \frac{qx^2}{2K}, \\ \frac{d\omega}{dx} &= C_1^0 - \frac{qx}{K}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, C_1^0 , C_2^0 为积分常数。

煤层处于弹性变形状态, $x \geq a$, 由式(1)、(3)得

$$\left. \begin{aligned} \omega &= C_1^e \exp(-sx) + C_2^e \exp(sx) + \frac{q}{k}, \\ \frac{d\omega}{dx} &= -sC_1^e \exp(-sx) + sC_2^e \exp(sx), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中, C_1^e , C_2^e 为积分常数, $s = \sqrt{\frac{k}{k^0}}$ 。

由图1分析模型的对称性, 在 $x=0$ 处, $\frac{dw}{dx}=0$, 得 $C_1^0=0$ 。由 $x \rightarrow \infty$ 时, $\frac{dw}{dx}=0$, 得 $C_2^e=0$ 。由 $x=a$ 处 w , $\frac{dw}{dx}$ 的连续条件, 得 $C_2^0 = \frac{qa^2}{2K} + \frac{qa}{Ks} + \frac{q}{k}$, $C_1^e = \frac{qa}{Ks} \exp(sa)$ 。

由式(3)、(6), 并将积分常数代入, 得支承压力分布规律:

$$p(x) = sq \exp(sa - sx) + q \quad . \quad (7)$$

当 $x=a$ 处满足 $p(a)=p_m$ 时, 为弹性极限状态。此时的上覆岩层压力 q_e (称为弹性极限载荷) 为

$$q_e = \frac{pm}{1+sa} \quad . \quad (8)$$

弹性极限载荷与煤层及其顶板的几何尺寸和力学性质有关。 p_m 反映了煤的抗压强度, 抗压强度越大, 弹性极限载荷越大; s 反映了煤层与顶板的刚度比, 刚度比越小, 弹性极限载荷越大; $2a$ 为巷道宽度, 巷道越宽, 弹性极限载荷小。

对于冲击地压矿井, 大多采用宽巷掘进。当巷道较宽时, 由于弹性极限载荷较小, 巷道附近部分煤体处于塑性软化变形状态。

3 煤层弹塑性变形与塑性极限状态

在上覆岩层压力 q 较大 (埋深较深) 的条件下, 如果满足条件 $q > q_e$, 巷道附近的煤体发生塑性软化

变形, 距离巷道较远的煤体仍然处于弹性变形状态。煤层分为两个变形区域, 弹性变形区 (E 区, $x \geq x_e$) 和塑性软化区 (P 区, $0 \leq x \leq x_e$)。 $x=x_e$ 为 E 区与 P 区的交界位置。

巷道上方 ($0 \leq x \leq a$) 的顶板变形满足式(5)。弹性变形区 ($x \geq x_e$) 的顶板变形满足式(6)。其中积分常数 $C_1^0=0$, $C_2^e=0$, 而 C_2^0 , C_1^e 的值与前节不同。

塑性软化区 ($a \leq x \leq x_e$), 由式(1)、(2)、(4)得

$$\omega = C_1^p \cos(rx) + C_2^p \sin(rx) + p_m a_0 + \frac{m\lambda-1}{k_1} q - a_1 q \exp\left(-\frac{x-a}{\rho}\right) \quad , \quad (9a)$$

$$\frac{d\omega}{dx} = -rC_1^p \sin(rx) + rC_2^p \cos(rx) + \frac{a_1 q}{\rho} \left(-\frac{x-a}{\rho}\right), \quad (9b)$$

式中, C_1^p , C_2^p 为积分常数, $r = \sqrt{\frac{k_1}{k}}$, $a_0 = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k}$, $a_1 = \frac{m\lambda}{k_1 + K\rho^{-2}}$ 。

由 $x=a$ 和 $x=x_e$ 处 ω , $\frac{dw}{dx}$ 的连续条件, 可确定积分常数 C_2^0 , C_1^e , C_1^p , C_2^p 。

由 $x=x_e$ 处, 满足初始屈服条件 $p(x_e)=p_m + m\lambda q \left[1 - \exp\left(-\frac{x_e-a}{\rho}\right)\right]$, 得确定 E 区与 P 区交界位置 x_e 的等式为

$$\begin{aligned} &C_1^p \sin(rx_e) + C_2^p \cos(rx_e) \\ &= \frac{s}{r} \left[\frac{p_m + (m\lambda-1)q}{k} + \left(\frac{a_1 q}{\rho s} - \frac{m\lambda q}{k} \right) \exp\left(-\frac{x_e-a}{\rho}\right) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

当 $x=a$ 处满足 $p(a)=p_r=2c_r\sqrt{m}$ (c_r 为残余黏聚力) 时, 为塑性极限状态, 即

$$C_1^p \cos(ra) + C_2^p \sin(ra) + \frac{m\lambda\lambda}{k_1} q - a_1 q = -\frac{p_r}{k_1} \quad . \quad (11)$$

式(10)、(11)联立, 即可解出塑性极限状态的上覆岩层压力 q_p (称为塑性极限载荷) 和对应的 E 区与 P 区交界位置 x_{ep} 。

当上覆岩层压力很大, $q > q_p$ 时, 在巷道附近的煤体将处于残余变形状态。

4 矩形断面巷道发生冲击地压的临界条件

巷道围岩 (煤层、顶板) 构成的变形系统, 在外载荷 (上覆岩层压力) 作用下处于平衡状态。根据冲击地压发生机理^[2-3], 由于煤岩材料具有峰后软化性

质, 为非稳定材料, 所以巷道围岩变形系统为非稳定平衡系统。在一定条件(几何条件、煤岩力学性质条件、外部载荷条件)下, 系统处于临界状态, 遇外部扰动将失稳而发生冲击地压。临界状态的塑性软化区范围称为发生冲击地压的临界软化区尺寸, 临界状态的外部载荷称为发生冲击地压的临界载荷。

对于本文研究的矩形断面巷道, 系统几何条件和煤岩力学性质条件是确定的, 外部载荷条件与煤层埋深和上覆岩层相关。一般情况下, 上覆岩层压力是确定的, 巷道围岩变形系统处于稳定平衡状态。即使外部载荷较大(埋深较大), 系统也不会失稳而发生冲击地压。或者巷道附近煤体处于残余变形状态, 甚至破碎而被压出; 或者顶板出现裂隙, 甚至断裂而冒落。这也是煤矿井下现场大部分时间不会发生冲击地压, 而是发生通常的煤岩变形破坏, 如片帮、冒顶等。从能量角度分析, 系统积聚的变形能因煤岩静力破坏(煤体破碎、顶板断裂)而耗散, 没有剩余能量转化为动能, 驱动破碎煤岩体向采掘空间(巷道内部)迅速抛出, 或产生煤岩体强烈振动。因此, 不会发生冲击地压。

然而, 煤矿井下生产条件复杂, 扰动(放炮、割煤、断层错动等)不可避免发生。当巷道煤岩变形系统处于非稳定平衡的临界状态时, 遇外部扰动将失稳而发生冲击地压。外部能量瞬间传递进入巷道围岩变形系统, 不能被煤岩体静力破坏而完全耗散, 或者来不及耗散, 剩余能量转化为动能, 驱动破碎煤岩体向采掘空间迅速抛出, 或者产生煤岩体强烈振动, 形成冲击地压。这就是巷道冲击地压发生机理。

当巷道围岩变形系统处于临界状态时, 遇外部扰动, 施加于系统的外部载荷(上覆岩层压力 q)产生增量 Δq , 引起塑性区范围(E 区与 P 区交界位置 x_e)迅速扩大而发生冲击地压。因此矩形巷道发生冲击地压的判别准则^[1-3, 5]为

$$\frac{\Delta q}{\Delta x_e} = \frac{dq}{dx_e} = 0 \quad (12)$$

由式(10)得 q 与 x_e 的关系为

$$q = \frac{p_m}{k} \frac{F_1(x_e)}{F_0(x_e)} \quad (13)$$

式中:

$$F_0(x_e) = (f_1 - f_2) \sin(rx_e - ra) - \frac{s}{r} f_1 \cos(rx_e - ra) + a_2,$$

$$F_1(x_e) = \frac{k}{k_1} \sin(rx_e - ra) + \frac{s}{r} \cos(rx_e - ra),$$

$$f_1(x_e) = \frac{m\lambda}{k} - \frac{1}{k} + a_3 \exp\left(-\frac{x_e - a}{\rho}\right),$$

$$f_2(x_e) = \frac{m\lambda}{k_2} - a_0 + a_4 \exp\left(-\frac{x_e - a}{\rho}\right), \quad a_2 = \frac{a}{Kr} + \frac{a_1}{\rho r},$$

$$a_3 = \frac{a_1}{\rho s} - \frac{m\lambda}{k}, \quad a_4 = \frac{a_1}{\rho s} - a_1.$$

由式(12)、(13)得临界状态 E 区与 P 区交界位置 x_{ecr} 满足如下等式:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{r}{2s} \left(\frac{s^2}{r^2} + \frac{a_4}{a_3} - 1 \right) \sin(2rx_{\text{ecr}} - 2ra) + \right. \\ & \left. \left(\frac{a_4}{a_3} - 2 \right) \sin^2(rx_{\text{ecr}} - ra) + 1 \right] \frac{a_3}{\rho} \frac{s}{r} \exp\left(-\frac{x_{\text{ecr}} - a}{\rho}\right) - \\ & a_2 [s \cos(rx_{\text{ecr}} - ra) - r \sin(rx_{\text{ecr}} - ra)] + \\ & r \left(1 + \frac{s^2}{r^2} \right) f_1(x_{\text{ecr}}) - r f_2(x_{\text{ecr}}) = 0 \quad (14) \end{aligned}$$

临界塑性软化区深度 L_{cr} 为

$$L_{\text{cr}} = x_{\text{ecr}} - a \quad (15)$$

由式(15)得 x_{ecr} 代入式(13), 得矩形巷道发生冲击地压的临界载荷

$$q_{\text{cr}} = \frac{p_m}{k} \frac{F_1(x_{\text{ecr}})}{F_0(x_{\text{ecr}})} \quad (16)$$

临界塑性区深度和临界载荷是判别冲击危险性的重要参数。当临界塑性区深度较小、临界载荷较小时, 易于发生冲击地压, 其发生频度较高, 但其强度较小, 破坏性也较小; 当临界塑性区深度较大、临界载荷较大时, 冲击地压不易发生, 其发生频度较低, 但一旦发生其强度会较大, 破坏性也较大。所以, 对于具有冲击倾向性的煤岩层, 实施防冲措施的目标是: 首先降强冲击为弱冲击, 其次降弱冲击为无冲击。

临界塑性软化区深度是一个只取决于巷道围岩变形系统本身材料力学性质和几何条件的参数。这个参数可用于巷道冲击地压的监测。通过钻屑法检测钻粉量或应力计测量应力, 得到钻粉量峰值位置或应力峰值, 即可得到塑性软化区深度。通过与临界值对比, 即可对冲击危险性进行预警。

巷道周围的塑性软化区也称阻力区^[3], 在冲击地压孕育过程中起到消耗弹性区释放能量的作用。临界塑性软化区深度也称为临界阻力区深度。可以通过检测阻力区深度的变化情况, 检验防冲措施的实施效果。

临界载荷也是一个取决于巷道围岩变形系统本身材料力学性质和几何条件的参数。这个参数可用于确定冲击地压矿井的临界开采深度。由 $q = \bar{\gamma} H_0$, 得 $H_{0\text{cr}} = \frac{q_{\text{cr}}}{\bar{\gamma}}$, $H_{0\text{cr}}$ 即为临界开采深度。

5 矩形断面巷道发生冲击地压的因素分析

由式(14)、(16)知, 矩形断面巷道发生冲击地压的影响因素包括: 几何因素(巷道宽度、巷道高度

或煤层厚度、顶板厚度)、煤岩力学性质因素(煤层与顶板刚度比、煤的模量比、煤的强度参数、侧压力系数、水平应力分布指数)两大方面。



图2 室内试验

Fig. 2 Laboratory tests

以五龙煤矿运输平巷为例, 通过辽宁工程技术大学室内实验(图2)结合现场实测, 得以下基础参数: $a=2.5\text{ m}$, $h=3.15\text{ m}$, $H=12.5\text{ m}$, $G=1.58\text{ GPa}$, $E=2.14\text{ GPa}$, $E_1=3.16\text{ GPa}$, $\varphi=32^\circ$, $c_0=3.12\text{ MPa}$, $\lambda=1.15$, $o=4.45\text{ m}$, $H_0=720\text{ m}$, $\bar{\gamma}=25.3\text{ kN/m}^3$ 。

按以上参数计算, 得 $q=18.2\text{ MPa}$, 弹性极限载荷 $q_e=7.69\text{ MPa}$, $x_{e\text{er}}=4.35\text{ m}$, 发生冲击地压的临界塑性软化区深度 $L_{e\text{er}}=1.85\text{ m}$, 临界载荷 $q_{\text{cr}}=14.74\text{ MPa}$ 。由于 $q>q_{\text{cr}}$, 所以该巷道存在冲击危险性。由于该矿其他煤巷与该巷道条件相似, 因此同样具有冲击危险, 历史上已有数次巷道冲击地压事故发生。

由于式(14)为 $x_{e\text{er}}$ 的隐式, 所以采用数值计算方法分析以上参数对矩形巷道发生冲击地压的影响规律。

5.1 几何因素的影响

巷道高度与煤层厚度相关。当不留顶煤和底煤时, 巷道高度等于煤层厚度, 所以巷道的宽高比 η_1 等于巷道宽度与煤层厚度之比, $\eta_1=\frac{2a}{h}$ 。选择顶板厚度 H 分

别为 5, 10, 20 m, 临界塑性区深度 L_{cr} 与宽高比 η_1 的关系如图3所示, 临界载荷 q_{cr} 与宽高比 η_1 的关系如图4所示。

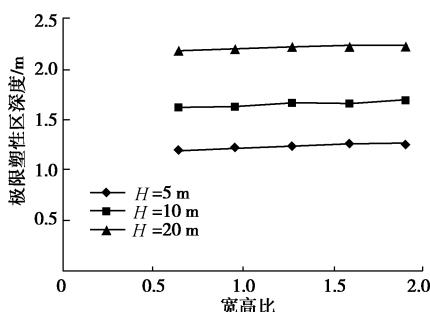


图3 临界塑性区深度与巷道宽高比的关系

Fig. 3 Relationship between critical plastic zone depth and width-height ratio of roadway

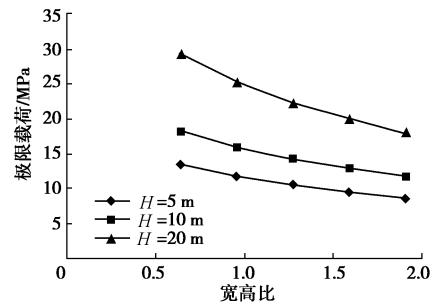


图4 临界载荷与巷道宽高比的关系

Fig. 4 Relationship between critical load and width-height ratio of roadway

临界塑性区深度随宽高比增加变化不大, 近似为常数, 但受顶板厚度影响较大, 顶板越厚, 临界塑性区深度越大。临界载荷随宽高比增加而降低, 宽高比越大, 临界载荷越小。临界载荷受顶板厚度影响也较大, 顶板越厚, 临界载荷越大。结果表明: 宽高比越大、顶板越薄, 越易于发生冲击地压。

在巷道高度受到煤层厚度限制的条件下, 巷道宽度应根据现场实际情况合理选择。对于具有冲击危险性的煤层, 除了满足巷道正常使用要求之外, 必须考虑防冲要求。一般情况下, 煤矿现场采用宽巷掘进, 巷道宽度的增大, 虽然易于发生冲击地压, 但其强度较低, 破坏性也较小, 更主要的是由于巷道断面较大, 抛出的破碎煤岩不易堵塞巷道, 既利于救援, 又利于采取有效支护措施加强巷道围岩, 从而降低冲击危险性。

煤层上方的厚层顶板对冲击地压影响很大。顶板岩层越厚, 极限载荷越大, 潜在强冲击危险性的可能性越大。这也煤矿现场采用断顶措施的重要依据。

5.2 煤层与顶板刚度比的影响

定义煤层与顶板刚度比 $\eta_2=\frac{k}{KH^{-2}}$ 。选择煤层软化刚度 k_1 分别为 0.5, 1.0, 2 GPa/m, 临界塑性区深度 L_{cr} 与刚度比 η_2 的关系如图5所示, 临界载荷 q_{cr} 与刚度比 η_2 的关系如图6所示。

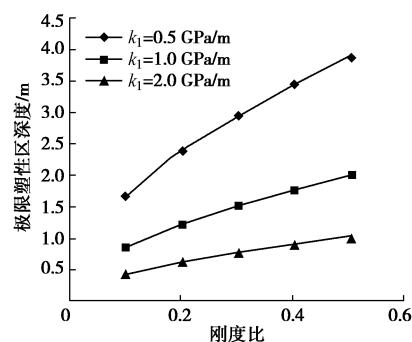


图5 临界塑性区深度与刚度比的关系

Fig. 5 Relationship between depth of critical plastic zone and stiffness ratio

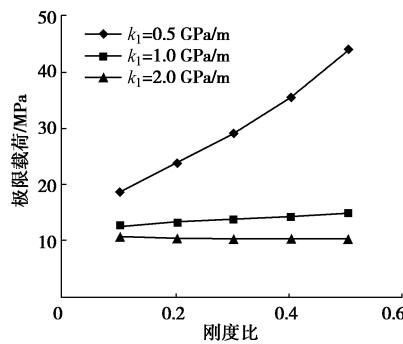


图 6 临界载荷与刚度比的关系

Fig. 6 Relationship between critical load and stiffness ratio

临界塑性区深度、临界载荷均随刚度比增加而增大, 随煤层塑性软化刚度增加而减小。刚度比越大, 临界塑性区深度、临界载荷越大, 不易发生低强度冲击地压, 易于发生高强度冲击地压; 煤层塑性软化刚度越大, 临界塑性区深度、临界载荷越小, 易于发生低强度冲击地压, 不易发生高强度冲击地压。

当煤层塑性软化刚度较大时, 极限载荷较小, 且随刚度比增加而变化不大, 近似为常数。表明对于塑性软化性质特别显著的煤层, 非常容易发生冲击地压, 体现出煤岩的塑性软化性质是发生冲击地压的根本因素。

5.3 煤模量比的影响

定义煤模量比 $\eta_3 = \frac{E}{E_1}$ 。选择煤弹性模量 E 分别为

1.0, 2.0, 3.0 GPa, 临界塑性区深度 L_{cr} 与模量比 η_3 的关系如图 7 所示, 临界载荷 q_{cr} 与模量比 η_3 的关系如图 8 所示。

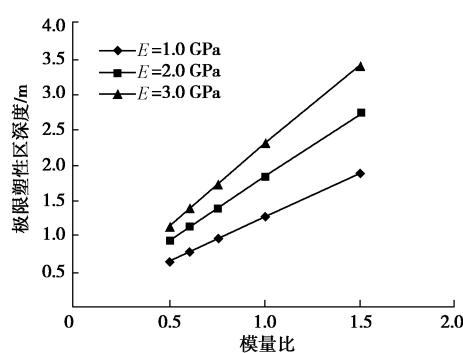


图 7 临界塑性区深度与模量比的关系

Fig. 7 Relationship between depth of critical plastic zone and modulus ratio

临界塑性区深度、临界载荷均随模量比增加而增大, 随煤弹性模量增加而增大。模量比越大、煤弹性模量越大, 临界塑性区深度、临界载荷越大, 不易发生低强度冲击地压, 易于发生高强度冲击地压。

模量比是反映了煤塑性软化性质的重要参数, 因

此也成为评价冲击地压危险性的重要指标。文献[12]根据圆形断面巷道的分析, 提出了模量比可作为评价冲击危险性的重要指标。本文结论进一步验证了其正确性。

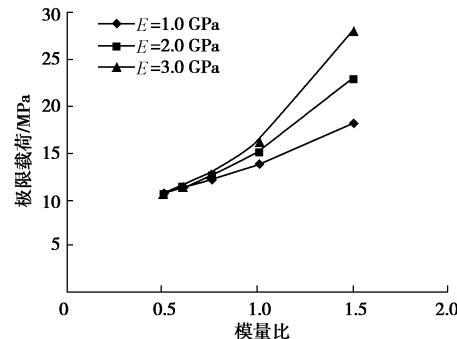


图 8 临界载荷与模量比的关系

Fig. 8 Relationship between critical load and modulus ratio

煤层注水和钻孔卸压等防冲措施可有效改变煤层与顶板的刚度比, 通过降低模量比有效防治强冲击的发生。

5.4 煤强度参数的影响

煤的强度参数为初始黏聚力 c_0 和内摩擦角 φ , 峰值强度 $\sigma_c = p_m = 2c_0\sqrt{m}$, $m = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}$ 。选择内摩擦角 φ 分别为 20° , 30° , 40° , 临界塑性区深度 L_{cr} 与初始黏聚力 c_0 的关系如图 9 所示, 临界载荷 q_{cr} 与初始黏聚力 c_0 的关系如图 10 所示。

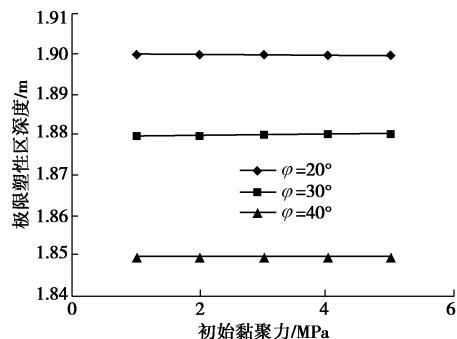


图 9 临界塑性区深度与强度参数的关系

Fig. 9 Relationship between depth of critical plastic zone and strength parameters

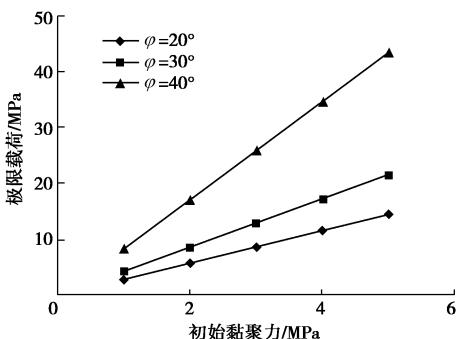


图 10 临界载荷与强度参数的关系

Fig. 10 Relationship between critical load and strength parameters

临界塑性区深度与初始黏聚力的大小无关, 随内摩擦角增加而减小。临界载荷随初始黏聚力增加而增大, 随内摩擦角增加而增大。说明煤的强度越大, 临界载荷越大, 不易发生低强度冲击地压, 易于发生高强度冲击地压。

国家标准中将煤的单轴抗压强度作为一项冲击倾向性指数, 单轴抗压强度越大, 冲击倾向性越强。本文的结论是符合国家标准的规定的。煤岩体的强度不仅是衡量冲击倾向性的重要指数, 而且也是评价冲击危险性的重要指标。

煤层注水和钻孔卸压等防冲措施可有效改变煤的强度参数, 通过降低煤的强度有效防治强冲击的发生。

5.5 侧压力系数与水平应力分布指数的影响

侧压力系数 λ 是反映水平地应力大小的重要参数。按照金尼克假说 $\lambda = \frac{v}{1-v}$, v 为对应煤岩层的泊松比; 按照海姆假说, $\lambda = 1$ 。实际上, 侧压力系数 λ 主要取决于地质构造条件。在地质构造复杂的煤层中开挖的巷道, 受侧压力系数 λ 影响较大。

水平应力分布指数 ρ 的反映煤壁附近围岩体中水平应力变化规律的参数。本文假设其为指数规律分布, 这与现场实际比较接近。通过钻屑法间接测量, 或钻孔应力法直接测量, 经过曲线拟合, 确定水平应力分布指数 ρ 的大小。

选择水平应力分布指数 ρ 分别为 4, 5, 6 m, 临界塑性区深度 L_{cr} 与侧压力系数 λ 的关系如图 11 所示, 临界载荷 q_{cr} 与侧压力系数 λ 的关系如图 12 所示。

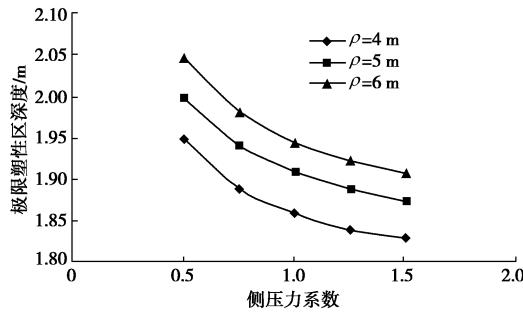


图 11 临界塑性区深度与侧压力系数 - 水平应力分布指数的关系

Fig. 11 Relationship among depth of critical plastic zone, lateral pressure coefficient and horizontal stress distribution index

临界塑性区深度随侧压力系数增加而减小, 随水平应力分布指数增加而增大, 但变化不大。临界载荷随侧压力系数增加而增大, 随水平应力分布指数增加而减小。

当巷道周围地质构造条件较复杂时, 侧压力系数较高, 临界载荷较大, 易于发生强冲击。所以地质构造条件复杂的区域是防治冲击地压的重点区域, 不可

忽视。

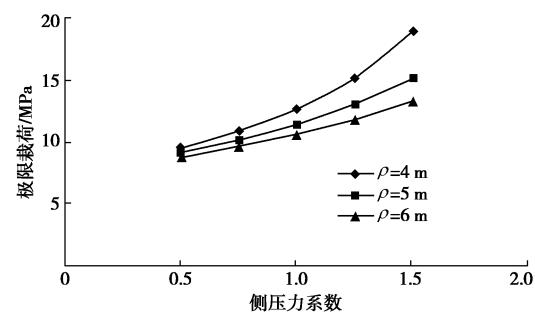


图 12 临界载荷与侧压力系数 - 水平应力分布指数的关系

Fig. 12 Relationship among critical load, lateral pressure coefficient and horizontal stress distribution index

水平应力分布指数主要受巷道施工工艺与支护强度的影响。可通过选择合适的掘进技术和加强支护得到改善, 进而降低巷道冲击危险性。

由于垂直地应力随煤层埋深增加而增大, 本文所述载荷 q 相当于垂直地应力, 而临界载荷即为发生冲击地压时 q 的临界值。所以, 可以认为: 临界载荷越大, 则临界开采深度越大, 虽然浅部开采是相对安全的, 但深部开采仍然面临冲击地压威胁。

由前述结果: 临界载荷 (即临界开采深度) 随刚度比增加而增大, 随模量比增加而增大, 随煤弹性模量增加而增大, 随初始黏聚力增加而增大, 随内摩擦角增加而增大, 随侧压力系数增加而增大; 临界载荷随宽高比增加而减小, 随水平应力分布指数增加而减小。临界载荷是刚度比、模量比、弹性模量、初始黏聚力、内摩擦角、侧压力系数等参量的增函数, 是宽高比、水平应力分布指数等参量的减函数。因此, 当刚度比、模量比、弹性模量、初始黏聚力、内摩擦角、侧压力系数等参量值较高, 而宽高比、水平应力分布指数等参量值较低时, 浅部开采相对安全, 但深部开采仍然存在冲击危险性。

6 结 论

(1) 巷道顶板岩层以剪切变形破坏为主, 将顶板简化为剪切梁模型用于分析矩形巷道冲击地压是合理的。

(2) 临界塑性区深度和临界载荷是判别冲击危险性的重要参数。当临界塑性区深度较小、临界载荷较小时, 易于发生冲击地压, 其发生频度较高, 但其强度较小, 破坏性也较小; 当临界塑性区深度较大、临界载荷较大时, 冲击地压不易发生, 其发生频度较低, 但一旦发生其强度会较大, 破坏性也较大。

(3) 矩形断面巷道发生冲击地压的影响因素主要包括几何因素 (巷道宽度、巷道高度或煤层厚度、顶

板厚度) 和煤岩力学性质因素 (煤层与顶板刚度比、煤的模量比、煤的强度参数、侧压力系数和水平应力分布指数) 两大方面。

(4) 临界塑性软化区深度可用于巷道冲击地压的监测, 也可用于检验防冲措施的实施效果。临界载荷可用于确定冲击地压矿井的临界开采深度, 也为采用断顶、煤层注水、钻孔卸压等防冲措施参数设计提供理论依据。

参考文献:

- [1] 潘一山, 章梦涛, 李国臻. 稳定性动力准则的圆形洞室岩爆分析[J]. 岩土工程学报, 1993, **15**(5): 59 - 66. (PAN Yi-shan, ZHANG Meng-tao, LI Guo-zhen. Analysis on circular chamber rockburst by dynamic stability criterion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(5): 59 - 66. (in Chinese))
- [2] 潘一山, 章梦涛. 冲击地压失稳理论的解析分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, **15**(增刊): 504 - 510. (PAN Yi-shan, ZHANG Meng-tao. The exact solution for rockburst in coal mine by instability rockburst theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, **15**(S0): 504 - 510. (in Chinese))
- [3] 潘一山. 冲击地压发生和破坏过程研究[D]. 北京: 清华大学, 1999. (PAN Yi-shan. Study on rockburst initiation and failure propagation[D]. Beijing: Tsinghua University, 1999. (in Chinese))
- [4] 李忠华, 官福海, 潘一山. 基于损伤理论的圆形巷道围岩应力场分析[J]. 岩土力学, 2004, **25**(增刊): 160 - 163. (LI Zhong-hua, GUAN Fu-hai, PAN Yi-shan. Analysis of stress field of rock surrounding circular roadway based on damage theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(S0): 160 - 163. (in Chinese))
- [5] 魏悦广. 两向不等压作用下圆形巷道弹塑性分析摄动解[J]. 岩土工程学报, 1990, **12**(4): 11 - 20. (WEI Yue-guang. Perturbation solutions for elasto-plastic analysis of circular tunnel under unequal compression in two directions[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **12**(4): 11 - 20. (in Chinese))
- [6] 郭延华, 姜福兴, 张常光. 高地应力下圆形巷道临界冲击地压解析解[J]. 工程力学, 2011, **28**(2): 118 - 122. (GUO Yan-hua, JIANG Fu-xing, ZHANG Chang-guang. Analytical solution for critical rockburst of a circular chamber subjected to high in-situ stress[J]. Engineering Mechanics, 2011, **28**(2): 118 - 122. (in Chinese))
- [7] 黄庆享, 高召宁. 巷道冲击地压的损伤断裂力学模型[J]. 煤炭学报, 2001, **26**(2): 156 - 159. (HUANG Qing-xiang, GAO Zhao-ning. Mechanical model of fracture and damage of coal bump in the entry[J]. Journal of China Coal Society, 2001, **26**(2): 156 - 159. (in Chinese))
- [8] MENG Qing-bin, HAN Li-jun, QIAO Wei-guo, et al. Support technology for mine roadways in extreme weakly cemented strata and its application[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, **24**(2): 157 - 164. (in Chinese)
- [9] PIETRUSZCZAK S, MROZ Z. Numerical analysis of elastic-plastic compression of pillars accounting for material hardening and softening[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1980, **17**(4): 199 - 207.
- [10] PIETRUSZCZAK S, MRÓZ Z. Finite element analysis of deformation of strain-softening materials[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1981, **17**(3): 327 - 334.
- [11] MRÓZ Z, NAWROCKI P. Deformation and stability of an elasto-plastic softening pillar[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1989, **22**: 69 - 108.
- [12] 潘一山, 李国臻, 章梦涛. 回采巷道冲击地压危险指标的确定[J]. 矿山压力与顶板管理, 1994(1): 56 - 59. (PAN Yi-shan, LI Guo-zhen, ZHANG Meng-tao. Determination of the rock burst hazardous indices in mining working[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1994(1): 56 - 59. (in Chinese))