

基于剪切梁的地垒断层型矿震 解析分析¹⁾

朱小景²⁾ 潘一山 唐 治 王世娟

(辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要 为得到地垒组合型断层失稳诱发矿震的方式及断层影响区顶板平衡结构的解析解, 将顶板简化为剪切梁模型进行分析. 基于弹性剪切梁确定了顶板最大等效剪力位置和顶板初次垮落步距的计算公式. 顶板等效剪力随着采空区跨度的增加而增加, 达到顶板极限值时发生初次来压, 顶板断裂位置出现在煤层内部. 用弹塑性剪切梁模型分析存在地垒断层的采场顶板初次来压和周期来压, 当最大等效剪力达到断层剪切极限时, 断层错动, 释放能量, 发生矿震.

关键词 剪切梁, 地垒断层, 等效剪力, 矿震

中图分类号: TD32 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-14-182

HORST FAULT ROCKBURST ANALYSIS BASED ON SHEAR BEAM THEORY¹⁾

ZHU Xiaojing²⁾ PAN Yishan TANG Zhi WANG Shijuan

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract In order to simulate the rockburst induced by the horst combination fault instability and to obtain the analytical solution for the roof equilibrium structure in the horst combination fault influence areas, the roof is simplified into a shear beam model. Based on the elastic shear beam model, the position of the maximum equivalent shear in the roof is determined and the computational formula for the roof's first caving step is obtained. The roof equivalent shear increases with the increase of the span of the gob. The first weighting takes place when the equivalent shear reaches the top limit, and the roof fracture location appears in the interior of the coal seam. The first weighting and the periodical weighting of the roof in the stope are analyzed. In the stope, horst faults are found. And the elastic-plastic shear beam model is used in the analysis. which shows that horst faults may exist in the stope. The faults will slip, the energy will be released and the mine tremor will occur, when the maximum equivalent shear reaches the shear limit of the faults.

Key words shear beam, horst fault, the equivalent shear, rockburst

引 言

矿产资源对国民经济与社会发展的作用是不可

替代的, 但在其开采中所造成的矿山灾害也是无法避免的. 断层矿震多发生在采掘活动接近断层时, 由于受采矿活动影响而突然破裂错动, 发生矿震^[1-3].

2014-05-19 收到第 1 稿, 2014-07-07 收到修改稿.

1) 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2010CB226803).

2) 朱小景, 硕士研究生, 研究方向为矿山灾害力学. E-mail: zhuxiaojing0608@163.com

引用格式: 朱小景, 潘一山, 唐治等. 基于剪切梁的地垒断层型矿震解析分析. 力学与实践, 2015, 37(2): 182-188

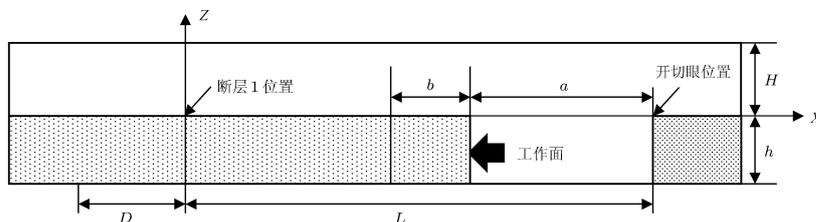
Zhu Xiaojing, Pan Yishan, Tang Zhi, et al. Horst fault rockburst analysis based on shear beam theory. *Mechanics in Engineering*, 2015, 37(2): 182-188

这类矿震具有震源深、震级大、能量释放多、破坏力度大等特征。目前，国内外学者已对断层型矿震进行了大量的研究，并建立了相应的力学模型及失稳判据 [4-9]。但是，这些研究本质上只是对单一断层进行了研究，而实际中，断层很少单独出现，常由多条断层带状组合在一起 [10-15]。因此，为研究地垒组合型断层失稳诱发矿震的问题，基于剪切梁对地垒组合型断层影响区顶板平衡结构进行了解析分析 [16-19]。研究为监测、预报及防治地垒断层型矿震奠定了理论基础 [20]。

1 剪切梁理论模型

如图 1 所示，采空区由工作面自开切眼向前推进形成，当其跨度达到一定值时，顶板直接垮落。假

设顶板只产生剪切变形，忽略基本顶、直接顶与煤层之间的摩擦力。断层 1：倾角为 θ_1 （逆时针方向），位于 $x = 0$ 处。顶板梁横截面等效剪应力为 $\tau^{(1)} = \tau(0)$ ，断层面剪应力 $\tau_{n1} = \tau(0) \cos(2\theta_1)$ ，正应力 $\sigma_{n1} = \tau(0) \sin(2\theta_1)$ ，抗剪强度 τ_{f1} 。当 $|\tau_{n1}| < \tau_{f1}$ 时，断层不错动，积聚能量；当 $|\tau_{n1}| = \tau_{f1}$ 时，断层错动，释放能量，产生断层错动矿震。断层 2：倾角为 θ_2 （顺时针方向），位于 $x = -D$ 处。顶板梁横截面等效剪应力为 $\tau^{(2)} = \tau(-D)$ ，断层面剪应力 $\tau_{n2} = \tau(-D) \cos(2\theta_2)$ ，正应力 $\sigma_{n2} = -\tau(-D) \sin(2\theta_2)$ ，抗剪强度 τ_{f2} 。当 $|\tau_{n2}| < \tau_{f2}$ 时，断层不错动，积聚能量；当 $|\tau_{n2}| = \tau_{f2}$ 时，断层错动，释放能量，产生断层错动矿震。



H 为顶板厚度； q 为上覆岩层压力； h 为煤层厚度； a 为采空区跨度； b 为塑性软化区； D 为两条断层的间距； L 为开切眼与断层 1 距离

图 1 剪切梁计算模型

1.1 方程建立

(1) 顶板：简化为剪切梁，厚度 H ，承受沿 x 轴均匀分布的上覆岩层压力和自重，简化为载荷 $q(x)$ ，与煤层间作用力为 $p(x)$ ，取单元体 dx 微段， K 为等效剪切刚度， w 为顶板下沉量，如图 2。则可得平衡方程

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

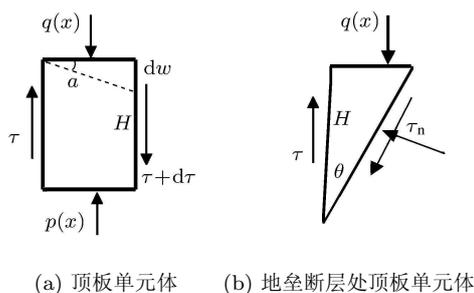


图 2 顶板单元体

(2) 煤层：煤的弹性模量为 E ，降模量为 λ ；峰值强度为 σ_c ，对应的应变 $\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E}$ ，残余强度

$\sigma_r = 0.5\sigma_c$ ，则应力 σ 与应变 ε 的关系为

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_c \\ \sigma_c \left(1 + \frac{\lambda}{E}\right) - \lambda\varepsilon, & \varepsilon_c \leq \varepsilon \leq \varepsilon_r \\ \sigma_r, & \varepsilon \geq \varepsilon_r \end{cases} \quad (2)$$

应力 $\sigma = p$ ，则载荷 p 与位移 w 的关系为

$$p = \begin{cases} kw, & 0 \leq w \leq w_c \\ p_c \left(1 + \frac{k_1}{k}\right) - k_1 w, & w_c \leq w \leq w_r \\ p_r, & w \geq w_r \end{cases} \quad (3)$$

假设顶板与煤体材料是均质且各向同性的。在压应力 σ 作用下产生压缩变形 w 。 k 为顶板与煤层的竖向平均刚度， k_1 为顶板与煤层的平均软化刚度。

1.2 方程的解

(1) 采空区： $p = 0$ ， q 为常数，代入式 (1) 得

$$Q = -qx + c_1 \quad (4)$$

$$w = \left(-\frac{q}{2}x^2 + c_1x + c_2 \right) / K \quad (5)$$

(2) 弹性区: $p = kw$, q 为常数, 代入式 (1) 得

$$Q = K\alpha [c_3 \exp(\alpha x) - c_4 \exp(-\alpha x)] \quad (6)$$

$$w = c_3 \exp(\alpha x) + c_4 \exp(-\alpha x) + \frac{q}{k} \quad (7)$$

式中, $\alpha^2 = \frac{k}{K}$.

(3) 塑性区: $p = p_c \left(1 + \frac{k_1}{k} \right) - k_1 w$, q 为常数, 代入式 (1) 得

$$Q = K\beta [c_5 \cos(\beta x) - c_6 \sin(\beta x)] \quad (8)$$

$$w = c_5 \sin(\beta x) + c_6 \cos(\beta x) + C_{11} \quad (9)$$

式中, $\beta^2 = \frac{k_1}{K}$, $c_1 = \frac{p_c}{K} \left(1 + \frac{k_1}{k} \right) - \frac{q}{K}$, $C_{11} = \frac{c_1}{\beta^2} = \frac{\sigma_c}{k_1} + \frac{\sigma_c}{k} - \frac{q}{k_1}$.

(4) 残余区: $p = p_r$, 代入式 (1) 得

$$Q = (p_r - q)x + c_7 \quad (10)$$

$$w = \left(\frac{p_r - q}{2}x^2 + c_7x + c_8 \right) / K \quad (11)$$

2 基于剪切梁的地垒断层型矿震解析解

2.1 基于弹性剪切梁的解析解

2.1.1 弹性变形状态

工作面由开切眼推进初期, 采空区尺寸较小, 煤层处在弹性变形状态. 采空区: $L - a \leq x \leq L$, 有式 (4) 和式 (5); 煤层弹性区: $x \leq L - a$, 有式 (6) 和式 (7); 则弹性变形状态下的解析解为

$$w = q \begin{cases} \frac{1}{K} \left[-\frac{x^2}{2} + \left(L - \frac{a}{2} \right) x + \frac{a}{2\alpha} + \frac{K}{k} + \frac{2L^2 - 3La + a^2}{2} \right] & (L - a \leq x \leq L) \\ \frac{a}{2\alpha K} \exp(\alpha x + \alpha a - \alpha L) + \frac{1}{k} & (x \leq L - a) \end{cases} \quad (12)$$

$$Q = q \begin{cases} -x + L - \frac{a}{2} & (L - a \leq x \leq L) \\ \frac{a}{2} \exp(\alpha x + \alpha a - \alpha L) & (x \leq L - a) \end{cases} \quad (13)$$

$$\tau = \frac{Q}{H} = \frac{q}{H} \begin{cases} -x + L - \frac{a}{2} & (L - a \leq x \leq L) \\ \frac{a}{2} \exp(\alpha x + \alpha a - \alpha L) & (x \leq L - a) \end{cases} \quad (14)$$

由上述公式可知, 在 $x_{e1} = L - \frac{a}{2}$ (采空区中点), 变形达弹性极限状态, 即

$$w_{\max} = w(x_{e1}) = \frac{q}{K} \left[\frac{1}{2} \left(L - \frac{a}{2} \right)^2 + \frac{a}{2\alpha} + \frac{K}{k} + \frac{2L^2 - 3La + a^2}{2} \right]$$

工作面煤壁 ($x = L - a$) 处, 煤层压缩量最大, $w(L - a) = \frac{qa}{2\alpha K} + \frac{q}{k}$. 随工作面推进, $w(L - a)$ 增大. $a = a_e$ 时, 达弹性极限状态, 此时 $w(L - a_e) = w_c$, $a_e = 2\sqrt{\frac{K}{k} \frac{\sigma_c - q}{q}}$, 条件为 $q < \sigma_c$, 即只有当载荷小于煤的抗压强度时, 才可能出现全弹性状态.

由于开采初期, a 相较于 L 是个小量, 故 $\tau(0)$, $\tau(-D)$ 均很小, 满足 $|\tau_{n1}| < \tau_{f1}$, $|\tau_{n2}| < \tau_{f2}$, 断层不错动, 积聚能量, 不发生矿震. 顶板与煤层处于弹性变形状态, 最大等效剪应力在 $x = L - a$ 和 $x = L$ 处出现, $\tau(L) = -\tau(L - a) = \sqrt{\frac{K}{k} \frac{\sigma_c - q}{H}}$.

2.1.2 弹塑性变形状态

随工作面推进, 采空区跨度增大, 煤层出现塑性软化区, 尺寸为 b . 采空区: $L - a \leq x \leq L$, 有式 (4) 和式 (5); 煤层塑性软化区: $L - a - b \leq x \leq L - a$, 有式 (8) 和式 (9); 煤层弹性区: $x \leq L - a - b$, 有式 (6) 和式 (7). 则弹塑性变形状态的解析解为

$$w(x) = \begin{cases} \frac{1}{K} \left(-\frac{q}{2}x^2 + c_1x + c_2 \right) & (L - a \leq x \leq L) \\ c_5 \sin(\beta x) + c_6 \cos(\beta x) + C_{11} & (L - a - b \leq x \leq L - a) \\ c_3 \exp(\alpha x) + c_4 \exp(-\alpha x) + \frac{q}{k} & (x \leq L - a - b) \end{cases} \quad (15)$$

$$Q(x) = q \begin{cases} L - \frac{a}{2} - x & (L - a \leq x \leq L) \\ K\beta \left[\frac{1 - \sigma_c/q}{k_1} \sin(\beta L - \beta a - \beta b - \beta x) + \frac{\alpha \sigma_c/q - 1}{\beta k} \cos(\beta L - \beta a - \beta b - \beta x) \right] & (L - a - b \leq x \leq L - a) \\ \alpha \frac{\sigma_c/q - 1}{k} \exp(\alpha x - \alpha L + \alpha a + \alpha b) & (x \leq L - a - b) \end{cases} \quad (16)$$

$$\tau(x) = \frac{q}{H} \begin{cases} L - \frac{a}{2} - x & (L - a \leq x \leq L) \\ K\beta \left[\frac{1 - \sigma_c/q}{k_1} \sin(\beta L - \beta a - \beta b - \beta x) + \frac{\alpha \sigma_c/q - 1}{\beta k} \cos(\beta L - \beta a - \beta b - \beta x) \right] & (L - a - b \leq x \leq L - a) \\ \alpha \frac{\sigma_c/q - 1}{k} \exp(\alpha x - \alpha L + \alpha a + \alpha b) & (x \leq L - a - b) \end{cases} \quad (17)$$

随工作面推进，采空区继续增大。\$a = a_s\$ 时，达塑性极限状态，此时 \$w(L - a_s) = w_r\$，得

$$b_s = \frac{1}{\beta} \left[\arcsin \left(\frac{q - p_r}{q - \sigma_c} \frac{1}{\sqrt{1 + k_1/k}} \right) + \arctan \sqrt{\frac{k}{k_1}} \right]$$

$$a_s = \frac{2(q - p_r)}{q\beta} \sqrt{\left(\frac{q - \sigma_c}{q - p_r} \right)^2 \left(1 + \frac{k_1}{k} \right) - 1}$$

将二者代入式 (17)，可得塑性极限状态下各关键点的剪应力。

断层面 1 上剪应力 \$\tau_{n1} = \tau(0) \cos(2\theta_1)\$，抗剪强度 \$\tau_{f1} = \sigma_{n1} \tan \phi_1 + c_1\$，\$|\tau_{n1}| < \tau_{f1}\$ 时，断层不错动，能量积聚；断层面 2 上剪应力 \$\tau_{n2} =

\$\tau(-D) \cos(2\theta_2)\$，抗剪强度 \$\tau_{f2} = \sigma_{n2} \tan \phi_2 + c_2\$，\$|\tau_{n2}| < \tau_{f2}\$ 时，断层不错动，能量积聚。

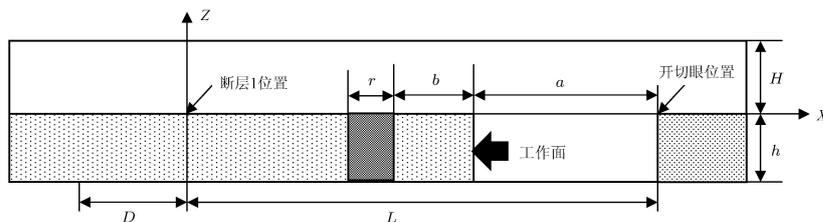
\$a > a_s\$ 时，顶板与煤层处在弹塑性变形状态，据式 (16) 知，\$Q_{max}^r\$ 在塑性软化区内部出现。据 \$\frac{dQ^r}{dx} = 0\$，得 \$x_m = \sqrt{\frac{K}{k_1}} \arctan \sqrt{\frac{k}{k_1}} + L - a - b\$，故 \$Q_{max} = Q_{max}^r\$，即最大等效剪力在 \$x = x_m > a\$ 处出现。随采空区跨度增加，塑性软化区范围继续增加，最大等效剪力也增加。当 \$\tau_{max} = \tau_f\$ 时，断层错动，发生矿震；若 \$\tau_c \leq \tau_{max} \leq \tau_f\$，老顶初次来压，且老顶在煤层内部断裂。这即是老顶超前断裂现象。由

$$qK\beta \left[\frac{1 - \sigma_c/q}{k_1} \sin(\beta L - \beta a - \beta b - \beta x_m) + \frac{\alpha \sigma_c/q - 1}{\beta k} \cos(\beta L - \beta a - \beta b - \beta x_m) \right] = Q_c$$

确定初次来压步距 \$a_c\$。

2.2 基于弹塑性剪切梁的解析解

如图 3 所示，从现场实际考虑采场顶板破断的情况，将其简化为弹塑性剪切梁，设顶板抗剪强度为 \$\tau_0\$，应力应变关系为式 (2)、载荷-位移关系为式 (3)。



\$H\$ 为顶板厚度；\$q\$ 为上覆岩层压力；\$h\$ 为煤层厚度；\$a\$ 为采空区跨度；\$b\$ 为塑性软化区；\$r\$ 为残余应力区

图 3 弹塑性剪切梁计算模型

若断层错动前，顶板先破断，由 \$\tau(L) = -\tau(L - a) = \frac{qa}{2H}\$ 知，破断位置在 \$x = L\$ 或 \$x = L - a\$ 处。由 \$|\tau(L - a)| = |\tau(L)| = \frac{qa}{2H} = \tau_0\$，得顶板破断时的采空区跨度 \$a_1 = \frac{2H\tau_0}{q}\$，顶板初次来压。顶板破断后，应力重新分布。随工作面推进，顶板形成悬臂梁。

若 \$a_1 < a_e\$，则顶板破断在煤层弹性变形阶段发生；若 \$a_e < a_1 < a_s\$，则顶板破断在煤层弹塑性变形阶段发生；若 \$a_1 > a_s\$，则顶板破断在煤层弹塑残余变形阶段发生。\$a_e, a_s\$ 由下述推导确定。

2.2.1 全弹性状态

悬臂长度较小时，煤层处在弹性状态。采空区：\$L - a \leq x \leq L - a_1\$，有式 (4) 和式 (5)；煤层弹性区：\$x \leq L - a\$，有式 (6) 和式 (7)。则弹性状态下的解析解为

$$\tau = \frac{Q}{H} = \frac{q}{H} \begin{cases} L - a_1 - x & (L - a \leq x \leq L - a_1) \\ (a - a_1) \exp(\alpha x - \alpha L + \alpha a) & (x \leq L - a) \end{cases} \quad (18)$$

分别由 $|\tau_{n1}| < \tau_{f1}$, $|\tau_{n2}| < \tau_{f2}$ 判断断层 1、断层 2 是否错动; 由 $|\tau(L-a)| < \tau_0$ 判断顶板是否破断. 若断层错动, 则发生矿震; 若断层未错动, 而顶板破断, 则为周期来压. 以 a 替换 a_1 , 重复上述步骤计算. 若断层未错动, 顶板也未破断, 则随工作面推进, a 增大, $w(L-a)$ 随之增大. 当 $a = a_e$ 时, 达弹性极限状态, 此时 $w(L-a_e) = w_c$, $a_e = \frac{K\alpha}{q} \left(w_c - \frac{q}{k} \right) + a_1$.

2.2.2 弹塑性状态

随工作面继续推进, 采空区跨度增大时, 煤层出现塑性软化区, 尺寸为 b . 采空区: $L-a \leq x \leq L-a_1$, 有式 (4) 和式 (25); 煤层塑性软化区: $L-a-b \leq x \leq L-a$, 有式 (8) 和式 (9); 煤层弹性区: $x \leq L-a-b$, 有式 (6) 和式 (7). 则弹塑性状态下的解析解为

$$\tau(x) = \frac{q}{H} \begin{cases} L-a_1-x & (L-a \leq x \leq L-a_1) \\ K\beta \left[\frac{1-\sigma_c/q}{k_1} \sin(\beta L - \beta a - \beta b - \beta x) + \frac{\alpha \sigma_c/q - 1}{\beta k} \cos(\beta L - \beta a - \beta b - \beta x) \right] & (L-a-b \leq x \leq L-a) \\ \alpha \frac{\sigma_c/q - 1}{k} \exp(\alpha x - \alpha L + \alpha a + \alpha b) & (x \leq L-a-b) \end{cases} \quad (19)$$

分别由 $|\tau_{n1}| < \tau_{f1}$, $|\tau_{n2}| < \tau_{f2}$ 判断断层 1、断层 2 是否错动, 由 $|\tau(L-a)| < \tau_0$ 判断顶板是否破断. 如果断层错动, 则发生矿震; 如果断层没有错动, 而顶板破断, 则为周期来压. 以 a 替换 a_1 , 重复以上步骤进行计算. 如果断层没有错动, 顶板也没有破断, 则随工作面继续推进, 采空区继续增大. 当 $a = a_s$ 时, 达到塑性极限状态, 此时 $w(L-a_s) = w_r$, 即

$$b_s = \frac{1}{\beta} \left[\arcsin \left(\frac{q-p_r}{q-\sigma_c} \frac{1}{\sqrt{1+k_1/k}} \right) + \arctan \sqrt{\frac{k}{k_1}} \right]$$

$$a_s = a_1 + \frac{q-\sigma_c}{q\beta} \sqrt{1 + \frac{k_1}{k} - \left(\frac{q-p_r}{q-\sigma_c} \right)^2}$$

2.2.3 弹塑残余应力解

若断层未错动, 顶板也未破断, 则随工作面继续推进, 采空区继续增大, 煤层出现塑性软化区和破碎区 (残余应力区), 尺寸分别为 b, r . 采空区: $L-a \leq x \leq L-a_1$, 有式 (4) 和式 (5); 破碎区 (残余应力区): $L-a-r \leq x \leq L-a$, 有式 (10) 和式 (11); 煤层塑性软化区: $L-a-r-b \leq x \leq L-a-r$,

有式 (8) 和式 (9); 煤层弹性区: $x \leq L-a-r-b$, 有式 (6) 和式 (7). 则弹塑残余应力解析解为

$$\tau(x) = \frac{q}{H} \begin{cases} L-a_1-x & (L-a \leq x \leq L-a_1) \\ \left(\frac{p_r}{q} - 1 \right) x + (L-a_1) - \frac{p_r}{q} (L-a) & (L-a-r \leq x \leq L-a) \\ \frac{1}{\beta} \left(\frac{\sigma_c}{q} - 1 \right) \cdot \left[\sqrt{\frac{k_1}{k}} \cos(\beta L - \beta a - \beta r - \beta b - \beta x) - \sin(\beta L - \beta a - \beta r - \beta b - \beta x) \right] & (L-a-r-b \leq x \leq L-a-r) \\ \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\sigma_c}{q} - 1 \right) \cdot \exp(\alpha x - \alpha L + \alpha a + \alpha r + \alpha b) & (x \leq L-a-r-b) \end{cases} \quad (20)$$

$|\tau_{n1}| < \tau_{f1}$ 时, 断层 1 不错动; $|\tau_{n1}| = \tau_{f1}$, 断层 1 错动, 条件为

$$\tilde{a}_1 = \frac{2H\tau_0}{p_r} + \frac{q-\sigma_c}{\beta p_r} \sqrt{1 + \frac{k_1}{k} - \left(\frac{q-p_r}{q-\sigma_c} \right)^2} + \frac{q-p_r}{\beta p_r} \left[\arcsin \left(\frac{q-p_r}{q-\sigma_c} \frac{1}{\sqrt{1+k_1/k}} \right) + \arctan \sqrt{\frac{k}{k_1}} \right] - \frac{q-p_r}{\alpha p_r} \ln \frac{\alpha H \tau_{f1}}{|\sigma_c - q| \cos(2\theta_1)} - \frac{q-p_r}{p_r} L \quad (21)$$

$|\tau_{n2}| < \tau_{f2}$ 时, 断层 2 不错动; $|\tau_{n2}| = \tau_{f2}$, 断层 2 错动, 条件为

$$\tilde{a}_2 = \frac{2H\tau_0}{p_r} + \frac{q-\sigma_c}{\beta p_r} \sqrt{1 + \frac{k_1}{k} - \left(\frac{q-p_r}{q-\sigma_c} \right)^2} + \frac{q-p_r}{\beta p_r} \left[\arcsin \left(\frac{q-p_r}{q-\sigma_c} \frac{1}{\sqrt{1+k_1/k}} \right) + \arctan \sqrt{\frac{k}{k_1}} \right] - \frac{q-p_r}{\alpha p_r} \ln \frac{\alpha H \tau_{f2}}{|\sigma_c - q| \cos(2\theta_2)} - \frac{q-p_r}{p_r} (L+D) \quad (22)$$

由上式可知, 随采掘活动进行, a 增加, r 和 b 增加. 失稳条件为 a 微小增加即使得 r 和 b 迅速增大, 断层错动, 系统失稳, 发生矿震.

3 东滩煤矿地垒断层顶板来压理论分析

开切眼与断层 1 相距 $L = 712.39\text{ m}$, 两断层间距 $D = 19.52\text{ m}$.

断层 1 (EF93): 在 $x = 0$ 处. 倾角 $\theta_1 = 27^\circ$ (逆时针方向), 内摩擦角 $\phi_1 = 30^\circ$, 黏聚力 $c_1 = 0.07\text{ MPa}$. 顶板梁横截面上等效剪应力 $\tau^{(1)} = \tau(0)$, 断层面上剪应力 $\tau_{n1} = \tau(0) \cos(2\theta_1)$, 正应力 $\sigma_{n1} = \tau(0) \sin(2\theta_1)$, 抗剪强度 $\tau_{f1} = \sigma_{n1} \tan \phi_1 + c_1 = 0.47\tau(0) + 0.07$, MPa. 故 $|\tau_{n1}| < \tau_{f1}$ 时, 断层不错动, 能量积聚; $|\tau_{n1}| = \tau_{f1}$ 时, 断层错动, 释放能量, 发生断层错动矿震.

断层 2 (EF32): 在 $x = -D$ 处. 倾角 $\theta_2 = 46.5^\circ$ (顺时针方向), 内摩擦角 $\phi_2 = 35^\circ$, 黏聚力 $c_2 = 0.08\text{ MPa}$. 顶板梁横截面上等效剪应力 $\tau^{(2)} = \tau(-D)$, 断层面上剪应力 $\tau_{n2} = \tau(-D) \cos(2\theta_2)$, 正应力 $\sigma_{n2} = -\tau(-D) \sin(2\theta_2)$, 抗剪强度 $\tau_{f2} = \sigma_{n2} \tan \phi_2 + c_2 = 0.7\tau(-D) + 0.08$, MPa. $|\tau_{n2}| < \tau_{f2}$ 时, 断层不错动, 能量积聚; $|\tau_{n2}| = \tau_{f2}$ 时, 断层错动, 释放能量, 发生断层错动矿震.

顶板: 老顶: 中、细砂岩, 平均厚度 $H = 20.18\text{ m}$, $E = 23\text{ GPa}$, $\mu = 0.2$, $G = 9.58\text{ GPa}$, $K = 1.9 \times 10^{11}\text{ N/m}$. 直接顶: 粉砂岩, 平均厚度 $H_z = 3.20\text{ m}$, 上覆岩层压力和自重简化为 $q(x)$, 与煤层间作用力 $p(x)$, 取单元体 dx 微段.

煤层: 平均厚度 $h = 8.78\text{ m}$, $E = 3.97\text{ GPa}$, $\lambda = 1.5E = 5.955\text{ GPa}$; 峰值强度 $\sigma_c = 19.6\text{ MPa}$, 对应应变 $\varepsilon_c = 0.005$; 残余强度 $\sigma_r = 9.8\text{ MPa}$, $k = 4.52 \times 10^8\text{ N/m}^3$, $k_1 = 6.78 \times 10^8\text{ N/m}^3$.

1305 工作面: 地面标高为 48.36 m , 工作面标高为 -550 m , 埋深 $H_0 = 550 + 48.36 \approx 600\text{ m}$, 上覆岩层的平均容重 $\rho_0 = 2500\text{ kg/m}^3$, $q = 15\text{ MPa}$.

3.1 弹性变形状态

工作面由开切眼推进初期, 采空区较小, 煤层处在弹性状态, 故 $\tau(0)$, $\tau(-D)$ 均很小, 满足 $|\tau_{n1}| < \tau_{f1}$, $|\tau_{n2}| < \tau_{f2}$, 断层不错动, 能量积聚, 不发生矿震. $q < \sigma_c$ 时, 即只有载荷小于煤的抗压强度时, 全弹性状态才可能出现. 在弹性极限状态下, $a_e = 12.575\text{ m}$, 所以 $\tau(L) = -\tau(L - a) = 4.674\text{ MPa}$. 断层处: $\tau(0) = 2.706 \times 10^{-14}\text{ MPa}$,

$\tau(-D) = 1.075 \times 10^{-14}\text{ MPa}$. 断层面 1 上剪应力 $\tau_{n1} = 1.591 \times 10^{-14}\text{ MPa}$, 抗剪强度 $\tau_{f1} = 0.07\text{ MPa}$, $|\tau_{n1}| < \tau_{f1}$ 时, 断层不错动, 能量积聚; 断层面 2 上剪应力 $\tau_{n2} = -0.052 \times 10^{-14}\text{ MPa}$, 抗剪强度 $\tau_{f2} = 0.08\text{ MPa}$, $|\tau_{n2}| < \tau_{f2}$ 时, 断层不错动, 能量积聚.

随工作面继续推进, 采空区增大, 煤层出现塑性软化区, 因为工作面较长, a 相较于 L 是个小量, 故 $\tau(0)$, $\tau(-D)$ 均很小, 满足 $|\tau_{n1}| < \tau_{f1}$, $|\tau_{n2}| < \tau_{f2}$, 断层不错动, 能量积聚, 不发生矿震. 工作面继续推进, 采空区继续增大. $a = a_s$ 时, 达塑性极限状态, 此时 $w(L - a_s) = w_r$, 得 $b_s = 1.873\text{ m}$, $a_s = 16.244\text{ m}$. 将二者代入 $\tau(L - a_s - b_s) = 4.674\text{ MPa}$, $\tau(0) = 7.516 \times 10^{-15}\text{ MPa}$, $\tau(-D) = 2.905 \times 10^{-15}\text{ MPa}$, 得塑性极限状态下各关键点的剪应力. 断层面 1 上剪应力 $\tau_{n1} = 4.418 \times 10^{-15}\text{ MPa}$, 抗剪强度 $\tau_{f1} = 0.07\text{ MPa}$, $|\tau_{n1}| < \tau_{f1}$ 时, 断层不错动, 能量积聚; 断层面 2 上剪应力 $\tau_{n2} = -0.152 \times 10^{-15}\text{ MPa}$, 抗剪强度 $\tau_{f2} = 0.08\text{ MPa}$, $|\tau_{n2}| < \tau_{f2}$ 时, 断层不错动, 能量积聚.

3.2 弹塑性变形状态

若断层错动前, 顶板先破断, 破断在 $x = L$ 或 $x = L - a$ 处发生. 由 $|\tau(L - a)| = |\tau(L)| = \frac{qa}{2H} = \tau_0$, 顶板岩体抗剪强度 $\tau_0 = 14.122\text{ MPa}$, 得顶板破断时采空区跨度 $a_1 = \frac{2H\tau_0}{q} = 37.996\text{ m}$, 顶板初次来压. 顶板破断后, 应力重分布. 随工作面推进, 顶板形成悬臂梁.

若 $a_1 < a_e$, 顶板破断在煤层弹性变形阶段发生; 若 $a_e < a_1 < a_s$, 顶板破断在煤层弹塑性变形阶段发生; 若 $a_1 > a_s$, 顶板破断在煤层弹塑残余变形阶段发生. a_e, a_s 由下述推导确定.

(1) 全弹性状态

悬臂长度较小时, 煤层处在弹性状态. 依式 (18) 得

$$\begin{cases} \tau(L - a) = \frac{q(a - a_1)}{H} \\ \tau(0) = \frac{q(a - a_1)}{H} \exp(\alpha a - \alpha L) \\ \tau(-D) = \frac{q(a - a_1)}{H} \exp(-\alpha D + \alpha a - \alpha L) \end{cases}$$

$a = a_e$ 时, 达弹性极限状态, 此时 $w(L - a_e) = w_c$, 得 $a_e = 44.287\text{ m}$.

因为 $a_1 < a_e$, 顶板破断在煤层弹性变形阶段发生; 断层未错动, 顶板破断, 则为周期来压. 将 a_1 替

换为 a , 重复上述步骤计算.

(2) 弹塑性状态

随工作面推进, 采空区跨度继续增大, 煤层出现塑性软化区, 尺寸 b . 依式 (19) 得

$$\begin{cases} \tau(L-a) = \frac{a-a_1}{H} \\ \tau(L-a-b) = \frac{\alpha(\sigma_c - q)}{kH} \\ \tau(0) = \frac{\alpha(\sigma_c - q)}{kH} \exp(-\alpha L + \alpha a + \alpha b) \\ \tau(-D) = \frac{\alpha(\sigma_c - q)}{kH} \exp(-\alpha D - \alpha L + \alpha a + \alpha b) \end{cases}$$

计算

$$\begin{cases} \tau_{n1} = \tau(0) \cos(2\theta_1) \\ \tau_{n2} = \tau(-D) \cos(2\theta_2) \end{cases}$$

分别由 $|\tau_{n1}| < \tau_{f1}$, $|\tau_{n2}| < \tau_{f2}$ 判断断层 1 和 2 是否错动. 由 $|\tau(L-a)| < \tau_0$ 判断顶板是否破断. $a = a_s$ 时, 达塑性极限状态, 此时 $w(L-a_s) = w_r$, $b_s = 1.873 \text{ m}$, $a_s = 81.371 \text{ m}$.

(3) 弹塑残余应力解

若断层未错动, 顶板未破断, 则随工作面推进, 采空区继续增大, 煤层出现塑性软化区与破碎区 (残余应力区), 尺寸分别为 b 和 r . 依式 (20) 得

$$\begin{cases} b = \frac{1}{\beta} \left[\arcsin \left(\frac{q-p_r}{q-\sigma_c} \frac{1}{\sqrt{1+k_1/k}} \right) + \arctan \sqrt{\frac{k}{k_1}} \right] \\ r = \frac{1}{\beta} \frac{q-\sigma_c}{q-p_r} \sqrt{1 + \frac{k_1}{k} - \left(\frac{q-p_r}{q-\sigma_c} \right)^2} - \frac{q(a-a_1)}{q-p_r} \end{cases}$$

$|\tau_{n1}| < \tau_{f1}$ 时, 断层 1 不错动; $|\tau_{n1}| = \tau_{f1}$ 时, 断层 1 错动, 条件为式 (21); $|\tau_{n2}| < \tau_{f2}$ 时, 断层 2 不错动; $|\tau_{n2}| = \tau_{f2}$, 断层 2 错动, 条件为式 (22).

通过理论分析得出老顶初次来压的步距为 37.996 m , 周期来压的步距为 $16.0 \text{ m} \sim 63 \text{ m}$. 工作面推进到离地垒 170 m , 100 m 时组成地垒的两断层相继错动. 比较发现, 基于弹塑性剪切梁模型分析地垒断层顶板来压, 能够为准确预报顶板来压奠定理论基础.

4 结论

(1) 首先认为煤层具有塑性软化性质, 把顶板简化成弹性剪切梁模型, 对存在地垒断层影响区顶板平衡结构进行力学分析. 工作面向地垒断层推进

时, 顶板形成剪切梁平衡结构, 最大等效剪力达到顶板极限值时发生初次来压, 且顶板在煤层内部出现断裂, 即老顶超前断裂. 并可确定相应的初次来压步距 a_c .

(2) 随采掘活动进行, 采空区 a 增加, 出现破碎区 r 、塑性区 b . 故将顶板简化成弹塑性剪切梁分析存在地垒断层的采场顶板初次来压和周期来压. a 微小增加, 即可使 r 和 b 迅速增大, 最大等效剪力达断层剪切极限时, 断层错动, 能量释放, 系统失稳, 发生矿震. 若断层错动前, 顶板先破断, 破断在 $x = L$ 或 $x = L - a$ 处产生. 由 $|\tau(L-a)| = |\tau(L)| = \frac{qa}{2H} = \tau_0$, 可得顶板破断时采空区跨度 a_1 , 即顶板初次来压. 若 $a_1 < a_e$, 顶板破断在煤层弹性变形阶段发生; 若 $a_e < a_1 < a_s$, 顶板破断在煤层弹塑性变形阶段发生; 若 $a_1 > a_s$, 顶板破断在煤层弹塑残余变形阶段发生. 在各个阶段若断层未错动, 顶板破断, 为周期来压. 基于弹塑性剪切梁模型对东滩煤矿进行地垒断层顶板来压理论分析的结果同现场实际情况吻合很好, 能够为准确地预报顶板来压奠定理论基础.

参考文献

- 白玉梅. 地质构造对采煤沉降的控制作用研究. [硕士论文]. 西安: 西安科技大学, 2006
- 夏玉成. 构造环境对煤矿区采动损害的控制机理研究. [博士论文]. 西安: 西安科技大学, 2003
- 潘一山. 矿震的发生和破坏规律研究. [博士后出站报告]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2003
- Cook NGW. The failure of rock. *Int Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1965, (4): 389-403
- Cook NGW. A note on rock bursts considered as a problem of stability. *South Afr Int Min and Metallurgy*, 1965, (65): 437-446
- Petukhov IM, Linkov AM. The theory of post-failure deformations and the problem of stability in rock mechanics. *Int Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1979, (16): 57-76
- 刘学增, 朱合华. 断层在土体中的传播模式及对地下管线的影响. *力学与实践*, 2004, 26(5): 7-13
- Dems K, Mroz Z. Stability conditions for brittle-plastic structures with propagating damage surfaces. *Struct Mech*, 1985, (1): 95-122
- Shen B, King A, Guo H. Displacement stress and seismicity in roadway roofs during mining induced failure. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2008, 45(5): 672-688
- 李术才, 朱维申, 宋振骥等. 采场围岩破损过程的断裂损伤模型研究. *力学与实践*, 1999, 20(1): 22-25

(下转第 213 页)

3 其他因素的影响

为了保证结构的安全使用, 还需对使用过程中有可能出现的意外载荷进行分析, 例如由于风载或者人为拖曳造成吊篮偏置, 或由于重物坠落造成动态冲击等等. 高明敏^[4]分析了由于风载与物体意外坠落时可能造成的水平载荷, 给出图 7 中 x 与 y 方向载荷大小在 1000~2000 N 之间.

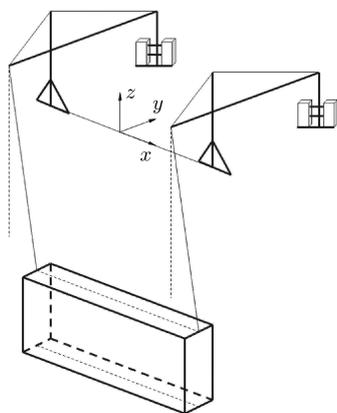


图 7 载荷偏置示意图^[4]

x 方向的偏置载荷对于强度的影响值得考虑, 主要原因是横梁在 x 方向的弯曲刚度与 z 方向一致, 但缺少了钢丝绳的“帮助”, 以 $F_x = 2000$ N 为例, 弯曲应力

$$\sigma_{\max} = \frac{F_x a}{W_z} = 102 \text{ MPa} \quad (12)$$

该数值大大超过垂直载荷造成的弯曲应力, 所以控制吊篮使用条件, 规定最大使用风速是非常必要的. 事实上, 我们可以设想对悬挂机构进行改进: 仿照垂直面内钢丝绳的设计, 在横梁水平面内对称布置预紧钢丝绳. 这样就可对抗由于风载造成的影响, 考虑到风载比垂直载荷小, 所需钢丝绳的直径和根数均可减小.

y 方向偏置载荷对强度的影响不大, 但需注意其对悬挂机构有整体的拖曳作用, 这种拖曳载荷依赖悬挂机构与楼顶之间的摩擦力平衡, 由图 4 所示的平衡分析, 楼顶地面所受总正压力约为 12000 N, 钢材与楼面的摩擦系数需大于 0.17 才能在极限状态下保证安全. 一般情况下, 钢与混凝土地面的摩擦系数大于 0.5, 所以安全应该有保障, 但对于光滑的地面或者出现有积水的情况, 摩擦系数将大大降低, 此时整体稳定问题需要考虑.

4 小结

高层建筑外墙作业吊篮是一种常见的装修施工设备, 其悬吊机构的结构看似非常简单, 但考察其安全性将涉及基础力学中的多个方面, 包括杠杆平衡、弯曲梁与拉压杆的应力分析、杆与梁组合变形协调问题、预应力问题、压杆稳定性分析以及合理设计与安全性评估等多方面内容. 同时作者通过问题的探究过程, 不仅对教科书的内容有了进一步的理解, 更为重要的是学习了如何分析与研究问题. 这种在日常生活中随处可见的实例不仅可以作为基础力学教学的素材, 更可成为学生课外设计极好的题目: 培养学生认真观察、独立思考、综合运用相关知识分析与解决工程实际问题的能力.

参 考 文 献

- 1 卢震. 高空作业施工平台力学特性研究. [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011
- 2 田申, 王定川, 谢家学. 吊篮悬挂机构的受力分析. 建筑机械化, 2013, (8): 66-68
- 3 徐艳华, 许芹祖, 段红莉等. 高处作业吊篮悬挂构架的有限元分析. 建筑机械化, 2006, (3): 36-37
- 4 高明敏. 水平载荷对吊篮悬挂机构的影响. 建筑机械化, 2007, (11): 41-44
- 5 耿青武, 吴玉厚, 张珂等. 高处作业吊篮悬挂机构强度分析. 建筑机械化, 2010, (7): 53-55

(责任编辑: 胡 漫)

(上接第 188 页)

- 11 左宇军, 李夕兵, 唐春安. 二维动静组合加载下岩石破坏的试验研究. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1809-1820
- 12 朱万成, 左宇军, 尚世明. 动态扰动触发深部巷道发生失稳破裂的数值模拟. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 915-921
- 13 潘一山, 王来贵, 章梦涛. 断层冲击地压发生的理论与实验研究. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 642-649
- 14 潘岳, 刘英, 顾善发. 矿井断层冲击地压的折迭突变模型. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 43-48
- 15 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. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 310-314
- 16 沈新普, 泽鲁, 穆荣日. 求解层间界面反平面剪切破坏的剪切梁模型 (I)——基本特性. 应用数学和力学, 2000, 21(11): 1101-

1108

- 17 刘延柱, 薛纭. 关于弹性梁的数学模型. 力学与实践, 2011, 22(1): 74-78
- 18 王省哲, 怡晓玲. 弹性力学问题复变函数解法的应用与发展. 力学与实践, 2008, 19(6): 110-113
- 19 缪协兴, 茅献彪, 周廷振. 采场老顶弹性地基梁结构分析与来压预报. 力学与实践, 1995, 17(5): 21-41
- 20 Mogi K. Study of the elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relation to earthquake phenomena, bull. *Earthquake Res Inst*, 1962, 40: 125-173

(责任编辑: 胡 漫)