

王金安, 张基伟, 高小明, 等. 大倾角厚煤层长壁综放开采基本顶破断模式及演化过程(II)——周期破断[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1737–1745. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0408

Wang Jin'an, Zhang Jiwei, Gao Xiaoming, et al. Fracture mode and evolution of main roof stratum above fully mechanized top coal caving longwall coalface in steeply inclined thick coal seam (II): Periodic fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1737–1745. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0408

大倾角厚煤层长壁综放开采基本顶破断模式及演化过程(II)——周期破断

王金安¹, 张基伟¹, 高小明², 文建东², 古亚丹²

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 甘肃靖远煤电股份有限公司, 甘肃 白银 730900)

摘 要: 基于弹性力学理论, 建立了大倾角综放工作面推进过程中基本顶由小三角形悬板→大三角形悬板→斜梯形板转化的薄板力学模型, 计算出3种形状基本顶的上、下板面的应力分布, 揭示了断裂线发育轨迹与破坏区演化过程, 阐明了大倾角煤层基本顶周期破断的“四边形”型断裂模式。研究表明, 大倾角煤层基本顶周期断裂的空间顺序为“中下部→中上部→上部→下部”。结合数值模拟、现场监测等手段, 验证了基本顶周期断裂过程中采场围岩应力场分布及矿压显现具有时序性和非对称特征。

关键词: 大倾角煤层; 综放开采; 基本顶; 周期断裂; 悬顶结构

中图分类号: TD325 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2015)08-1737-09

Fracture mode and evolution of main roof stratum above fully mechanized top coal caving longwall coalface in steeply inclined thick coal seam (II): Periodic fracture

WANG Jin'an¹, ZHANG Ji-wei¹, GAO Xiao-ming², WEN Jian-dong², GU Ya-dan²

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Gansu Jingyuan Coal Industry & Electricity Power Co., Ltd., Baiyin 730900, China)

Abstract: Based on the theory of elasticity, thin plate mechanical analytic models of main roof stratum transformed from small triangular, big triangular and trapezoid above caving gob were established during the mining face advancing in steeply inclined thick coal seam. The stress distributions in the upper and lower surface of main roof stratum in three types of models as mentioned above were calculated. The laws of fracture trajectory development and failure zone evolution were revealed. The periodic fracture mode of main roof stratum, termed as “Quadrangle” was put forward with respect to the mining of steeply inclined thick coal seam. The study shows that the spatial sequence of periodic fracture is “lower-middle to upper-middle and upper to lower” of the mining face. In combination of numerical modeling and monitoring, the asymmetrical and sequential characteristic of stress distribution in the main roof stratum and the mining induced pressure in working face are verified during periodic fracture.

Key words: steeply inclined coal seam; fully mechanized top-caving mining; main roof stratum; periodic fracture; hanging roof structure

收稿日期: 2015-03-27 责任编辑: 常琛

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(U1361208)

作者简介: 王金安(1958—), 男, 河北昌黎人, 教授。Tel: 010-62334098, E-mail: wja@ustb.edu.cn。通讯作者: 张基伟(1988—), 男, 内蒙古包头人, 博士研究生。E-mail: qiyijianjuni@sina.com

大倾角长壁综放工作面经过基本顶初次垮落后,随着工作面不断推进,进入“悬露—断裂—转动—下沉触矸”的周期性破断过程。周而复始的周期破断将伴随整个工作面回采过程,造成工作面不同位置矿压显现频繁发生变化。

对大倾角特厚煤层基本顶初次断裂的“V-Y”破断模式及演化过程的研究诠释了大倾角煤层长壁综放开采基本顶在初次破断期间工作面矿压显现的“时—空—强”非对称特征^[1]。实践发现,基本顶周期破断及工作面矿压显现也具有明显的“时—空—强”非对称特征。通过对大倾角长壁综放开采的基本顶周期破断模式与过程进行深入分析,揭示大倾角长壁工作面矿压显现发展变化的本质与规律。

张益东等^[2]利用数值模拟手段给出了大倾角俯采及仰采顶板周期破断的应力场分布规律。伍永平等^[3-4]利用 R-W & Kane 原理和 Lagrange 理论建立了大倾角煤层开采“R-S-F”系统的动力学一般方程,对“R-S-F”系统在任意时刻的运动特征进行描述和分析,确定了“R-S-F”系统动态稳定性控制模

式,在理论上深化了对大倾角煤层基本顶周期断裂机理的认识。

本文在大倾角特厚煤层基本顶初次断裂模式及演化过程研究的基础上,以王家山煤矿 47407 初采工作面开采地质条件为工程背景,建立大倾角煤层开采后基本顶周期破断力学模型,推导基本顶周期破断的失稳力学判据。通过对基本顶周期断裂过程应力分布特征、断裂线发育形态、破坏区分布、应力场变化等,揭示大倾角煤层基本顶周期断裂模式与演化规律,旨在为大倾角煤层工作面矿压防治工作提供理论依据。

1 大倾角煤层开采周期断裂力学分析

1.1 基本顶周期断裂力学模型

基本顶完全初次破断后,上部、中部基本顶完全垮落,上部的断裂线沿斜线方向发育至工作面前方。下部悬顶由于矸石支撑,形成小三角形的悬顶结构(图 1(a)),悬顶结构下部受到矸石支撑的约束,很难自然垮落^[1]。

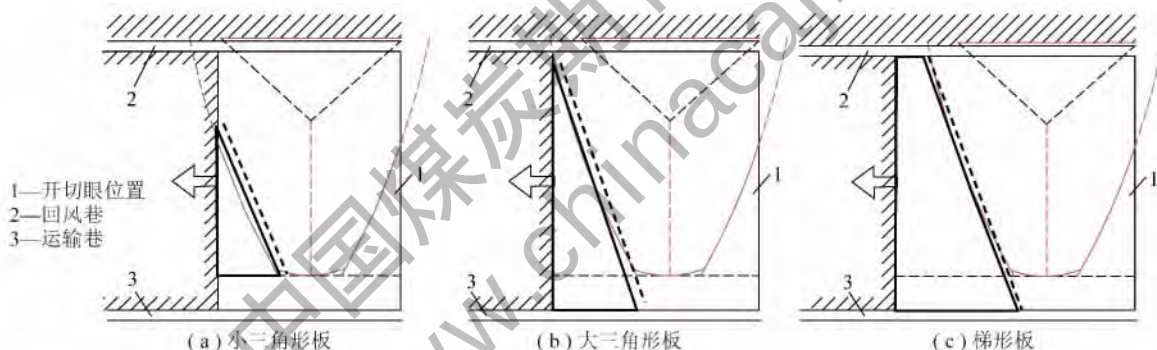


图 1 大倾角长壁工作面基本顶周期断裂发展过程

Fig. 1 Development of periodic fracture of main roof above steeply inclined seam

随着工作面不断推进,基本顶断裂线继续沿着斜线方向不断发育,最终可能会形成大三角板结构(图 1(b))。在此阶段中仅基本顶下部被矸石填充,顶板受力具有明显的非对称特征。

若大三角形悬板尚未破断,则随着工作面不断推进,会形成梯形板结构(图 1(c))。

采用薄板理论^[5]构建大倾角煤层基本顶周期断裂力学模型。计算基本顶周期断裂过程中“小三角形悬板→大三角形悬板→梯形板”3种悬板的应力函数。考虑上覆岩层与采空区矸石的共同作用与斜边临近采空区的边界条件。将周期破断前基本顶简化为“斜边简支,直角边固支”的倾斜弹性薄板(基本顶厚度 h_2 满足薄板理论)。获得大倾角煤层基本顶断裂前的力学模型如图 2 所示。

图 2 中煤层倾角为 β ,上覆岩层组的厚度为 Σ

h_1 ,其平均弹性模量为 E_1 、容重为 γ_1 、泊松比为 μ_1 ;坚硬基本顶的厚度为 h_2 ,其平均弹性模量为 E_2 、容重为 γ_2 、泊松比为 μ_2 。坐标原点位于模型中面的两直角边相交位置, x 方向指向采空区方向,小三角板的范围为 $(0, a_1)$,大三角板长度为的范围为 $(0, a_2)$,梯形板长度为的范围为 $(0, a_3)$, y 方向指向工作面上部。小三角板的范围为 $(0, b_1)$,大三角板、梯形板长度为的范围为 $(0, b)$ 。 z 方向垂直坚硬顶板向上。上覆岩层(软弱岩层)对顶板的荷载可以简化为沿着煤层倾斜方向向下(沿 y 轴负方向)线性增加的荷载 $P(y)$,即

$$P(y) = P_0 - \gamma_1 y \sin \beta \quad (1)$$

式中 P_0 为工作面下端头处上覆岩层荷载,MPa。

在倾向剖面上,基本顶充填区为小三角形板所在范围,虚线区为大三角形及梯形范围(图 3)。其中,

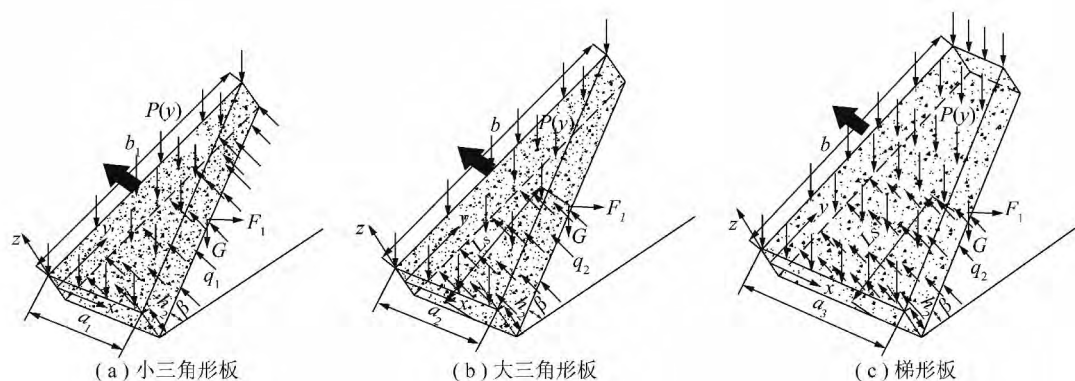


图2 周期断裂过程中3类基本顶力学模型

Fig. 2 Mechanical model of three kinds of main roof strata during periodic fracture

顶板下部填充矸石对顶板荷载可简化为 q_1 、 q_2 。由于小三角板面积相对较小,整个板下部均受到较密实的矸石充填,将矸石支撑力 q_1 简化为沿倾斜方向呈均匀分布。大三角板与梯形板均受到长度为 L_s 的局部的矸石充填,沿倾斜方向越往上冒落矸石堆积越松散,所以将 q_2 简化为沿倾斜方向的三角形支撑。矸石支撑力按照密实程度不同取上覆岩层自重的 0.2 ~ 0.4 倍。

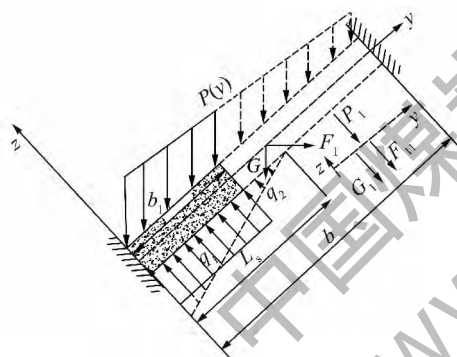


图3 大倾角煤层基本顶力学模型倾向剖面

Fig. 3 Mechanical model of main roof stratum above steeply inclined seam on dip profile

由于周期破断步距较小,纵向荷载对顶板弯曲破坏的作用有限,所以仅考虑横向荷载的作用,将坚硬顶板受到的上覆岩层荷载 $P(y)$ 、重力 G 、水平构造力 F_1 分解为垂直于顶板的横向体力 $P_1 = P(y) \cos \beta$ 、 $G_1 = G \cos \beta$ 、 $F_{11} = F_1 \cos \beta$ 。

1.2 基本顶应力状态方程

大倾角煤层回采后基本顶周期破断的形态为三角板与梯形板,均属于异形板范畴。利用康托洛维奇法^[6-8]对倾斜异形弹性薄板的弯曲问题进行求解。由于三角形是梯形的退化形状^[9],将三角形薄板近似为短边为 0.1 m 的梯形板进行求解,即可简化计算又满足工程精度。将上述的 3 种形状的倾斜异形弹性薄板均简化为“斜边简支,三直角边固支”的倾斜

梯形薄板。

基于虚位移原理^[10],利用康托洛维奇法对受到非对称荷载作用下的“斜边简支,三直角边固支”倾斜梯形薄板挠度方程进行求解。

梯形板的斜边上任意一点 x 坐标为 $ky + a$,其中 k 为斜线的斜率。将梯形板挠度方程设为一级近似位移函数:

$$w(x, y) = u(x, y)v(y) \quad (2)$$

其中 $u(x, y)$ 为 x 方向位移函数; $v(y)$ 为 y 方向位移函数。由于梯形板沿 x 方向的边界条件为“左边固支,右边简支”,故可设:

$$u(x, y) = 2x^4 - 5x^3(ky + a) + 3x^2(ky + a)^2 \quad (3)$$

梯形板的虚挠度 δw 符合 $\delta w = u(x, y)\delta v(y)$ 。在薄板全部边界没有自由边条件下,根据虚功原理得

$$\iint (\nabla^4 w - \frac{q}{D}) \delta w dx dy = 0 \quad (4)$$

结合式(2),利用虚位移原理可推出:

$$\int_0^{ky+a} (\nabla^4 w - \frac{q}{D}) u(x, y) dx = 0 \quad (5)$$

为了确定沿 y 方向的函数 $v(y)$,将式(2)、(3)代入式(5),积分并整理后得到

$$(ky + a)^4 v^{(4)} + 19k(ky + a)^3 v^{(3)} + (ky + a)^2 (66k^2 - 24) v^{(2)} - 126k(ky + a) v' + 126(k^2 + 2) v = \frac{21}{4} D \quad (6)$$

其中 $v^{(4)}$ 表示函数 $v(y)$ 的四阶导数(其他类同)。对式(6)无量纲化处理,令 $v = [(ky + a) / (kb + a)]^n$,可以得到倾斜梯形板的齐次特征方程

$$k^4 n^4 + 13k^4 n^3 + (20k^4 - 24k^2) n^2 + (-34k^4 - 102k^2) n + 126k^2 + 252 = 0 \quad (7)$$

由于特征根性质与 k 值无关,也就是与微分方程解的形式无关,为简便计算,先假设 $k = 1$ 。则齐次特征方程简化为

$$n^4 + 13n^3 - 4n^2 - 136n + 378 = 0 \quad (8)$$

求得特征根为: $n_1 = -12.207\ 23$; $n_2 = -4.887\ 52$; $n_3 = 2.047\ 37 \pm 1.464\ 19i$ 。

令 $n_1 = -12.207\ 23$, $n_2 = -4.887\ 52$, $\alpha_1 = 2.047\ 37$, $\beta_1 = 1.464\ 19$, 则“斜边简支, 三直角边固支”倾斜梯形薄板挠度方程为

$$w(x, y) = [2x^4 - 5x^3(ky + a) + 3x^2(ky + a)^2] \times \left\{ c_1 \left(\frac{ky + a}{kb + a} \right)^{n_1} + c_2 \left(\frac{ky + a}{kb + a} \right)^{n_2} + \left(\frac{ky + a}{kb + a} \right)^{\alpha_1} \times \right.$$

$$\left. \left[c_3 \cos \left(\beta_1 \ln \frac{ky + a}{kb + a} \right) + c_4 \sin \left(\beta_1 \ln \frac{ky + a}{kb + a} \right) \right] + \frac{1}{72} \frac{q}{D} \right\} \quad (9)$$

式中 $c_1 \sim c_4$ 为系数, 需要沿 y 方向的边界条件进行求解; q 为薄板受到的横向荷载之和; D 为板的弯曲刚度。

将式(9)代入弹性矩形薄板应力与挠度函数关系式^[5], 可得大倾角基本顶应力 σ_x , σ_y , τ_{xy} 表达式:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{Ez}{1-\mu^2} \left\{ [24x^2 - 30x(ky + a) + 6(ky + a)^2 + \mu 6k^2x^2] \left[f_1(y) + f_2(y) + \frac{1}{72} \frac{q}{D} \right] + [12kx^2(ky + a) - 10kx^3] \frac{\mu k}{ky + a} [f_3(y) + f_4(y)] + [2x^4 - 5x^3(ky + a) + 3x^2(ky + a)^2] \frac{\mu k^2}{(ky + a)^2} [f_5(y) + f_6(y)] \right\} \\ \sigma_y &= -\frac{Ez}{1-\mu^2} \left\{ [24\mu x^2 - 30\mu x(ky + a) + 6\mu(ky + a)^2 + 6k^2x^2] \left[f_1(y) + f_2(y) + \frac{1}{72} \frac{q}{D} \right] + [12kx^2(ky + a) - 10kx^3] \frac{k}{ky + a} [f_3(y) + f_4(y)] + [2x^4 - 5x^3(ky + a) + 3x^2(ky + a)^2] \frac{k^2}{(ky + a)^2} [f_5(y) + f_6(y)] \right\} \\ \tau_{xy} &= -\frac{Ez}{1+\mu} \left\{ [12kx(ky + a) - 15kx^2] \left[f_1(y) + f_2(y) + \frac{1}{72} \frac{q}{D} \right] + [8x^3 - 15x^2(ky + a) + 6x(ky + a)^2] \frac{k}{ky + a} [f_3(y) + f_4(y)] \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

式中,

$$\begin{aligned} f_1(y) &= c_1 \left(\frac{ky + a}{kb + a} \right)^{n_1} + c_2 \left(\frac{ky + a}{kb + a} \right)^{n_2} \\ f_2(y) &= \left(\frac{ky + a}{kb + a} \right)^{\alpha_1} \left[c_3 \cos \left(\beta_1 \ln \frac{ky + a}{kb + a} \right) + c_4 \sin \left(\beta_1 \ln \frac{ky + a}{kb + a} \right) \right] \\ f_3(y) &= n_1 c_1 \left(\frac{ky + a}{kb + a} \right)^{n_1} + n_2 c_2 \left(\frac{ky + a}{kb + a} \right)^{n_2} \\ f_4(y) &= \left(\frac{ky + a}{kb + a} \right)^{\alpha_1} \left[\cos \left(\beta_1 \ln \frac{ky + a}{kb + a} \right) (c_3 \alpha_1 + c_4 \beta_1) + \sin \left(\beta_1 \ln \frac{ky + a}{kb + a} \right) (c_4 \alpha_1 - c_3 \beta_1) \right] \\ f_5(y) &= c_1 n_1 (n_1 - 1) \left(\frac{ky + a}{kb + a} \right)^{n_1} + c_2 n_2 (n_2 - 1) \left(\frac{ky + a}{kb + a} \right)^{n_2} \\ f_6(y) &= \left(\frac{ky + a}{kb + a} \right)^{\alpha_1} \left\{ \cos \left(\beta_1 \ln \frac{ky + a}{kb + a} \right) [c_3 \alpha_1^2 + (2c_4 \beta_1 - c_3) \alpha_1 - \beta_1 (c_3 \beta_1 + c_4)] + \right. \\ &\quad \left. \sin \left(\beta_1 \ln \frac{ky + a}{kb + a} \right) [c_4 \alpha_1^2 - (2c_3 \beta_1 + c_4) \alpha_1 + \beta_1 (c_3 - c_4 \beta_1)] \right\} \end{aligned}$$

其中, 小三角形板的横向荷载 q :

$$q = P_1 + G_1 + F_{11} - q_1$$

大三角形与梯形板的横向荷载 q :

$$q = \begin{cases} P_1 + G_1 + F_{11} - q_2 & (0 \leq y \leq L_s) \\ P_1 + G_1 + F_{11} & (L_s \leq y \leq b) \end{cases}$$

且有: $q_2 = [0.4P_0(L_s - y)]/L_s$

将式(10)代入主应力求解计算公式, 得到倾斜梯形薄板任意一点的主应力表达式, 即

$$\sigma_1, \sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + (\tau_{xy})^2} \quad (11)$$

根据最大拉应力理论, 采用应力比例函数 $f(x, y) = \max\{\sigma_1, \sigma_3\} / [\sigma_T]$ 判断基本顶发生拉伸破坏的坐标点 (x_i, y_i) : 当 $f(x_i, y_i) = 1$ 时, 基本顶在点 (x_i, y_i) 处于临界破坏状态; 当 $f(x_i, y_i) > 1$ 时, (x_i, y_i) 发生拉伸破坏^[1]。

2 大倾角煤层基本顶应力分析

根据王家山煤矿 47407 工作面地质条件,在式 (10) 中取: $\beta = 45^\circ$, $k = -0.363\ 97$, $a_1 = 11\text{ m}$, $a_2 = 36.497\text{ m}$, $\mu_3 = 55\text{ m}$, $b_1 = 30\text{ m}$, $b = 100\text{ m}$, $\mu_2 = 0.318$, $D = 7.935\ 8 \times 10^6\text{ MPa} \cdot \text{m}^3$, $\sum h_1 = 435\text{ m}$, $h_2 = 20\text{ m}$, $\gamma_1 = 25\text{ kN/m}^3$, $\gamma_2 = 23\text{ kN/m}^3$, $g = 10\text{ N/kg}$, $E_1 = 1.5 \times 10^4\text{ MPa}$, $E_2 = 1.07 \times 10^4\text{ MPa}$, $F_1 = 1.6\gamma_2 h_2$, $q_1 = 0.2P_0$, $L_s = 50\text{ m}$, $[\sigma_T] = 2.261\text{ MPa}$ 。计算出工作面推进过程中基本顶各个形状悬板上下板面应力比例函数 $f(x, y)$ 分布。

如图 4(a) 所示,基本顶初次破断以后形成的小三角形悬顶在矸石支撑条件下上下板面应力函数 $f(x, y)$ 值均远小于 1。可见,小三角形悬顶较为稳定,不易自然断裂垮落,构成基本顶周期断裂前的结构组成部分。随着工作面推进,大三角板的上板面长边的中下部($y \approx 40\text{ m}$) $f(x, y) > 1$ (图 4(b)),而下板面应力比例函数仍然小于 1,此时基本顶为局部断裂,但仍能保持稳定。随工作面继续向前推进,采空区上方暴露的基本顶形状变为梯形(图 4(c)),上板面在直长变中部($y = 35 \sim 75\text{ m}$)有大范围 $f(x, y) > 1$,表明基本顶周期破断呈倾斜梯形板破断。

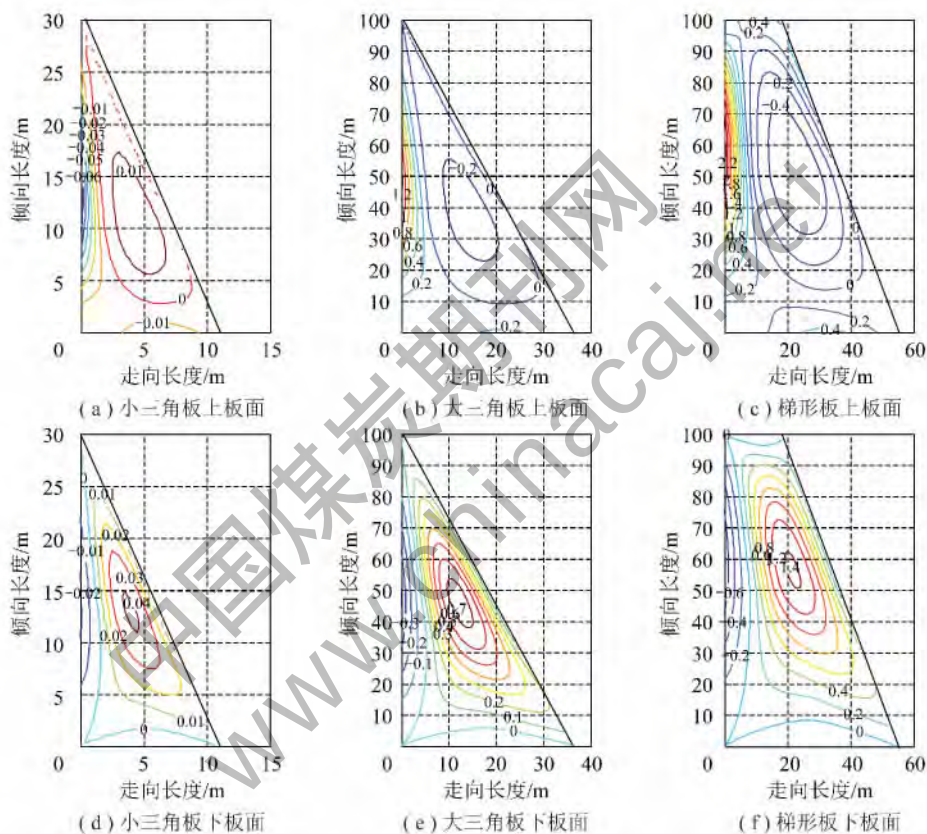


图 4 基本顶应力比例函数 $f(x, y)$ 等值线

Fig. 4 Contours of stress ratio function $f(x, y)$ in the main roof stratum

综合分析图 4(a) ~ (c) 三个不同形状板的上板面应力比例函数 $f(x, y)$ 分布,应力分布可概括为“双边或三边受拉,中部受压”。函数 $f(x, y)$ 最大拉应力比值的位置偏离几何中心,三角形板最大拉应力比值位置为长边的中部偏下区域,拉应力区呈直线分布。梯形板最大拉应力比值位置在长边的中部偏上区域,拉应力区也呈直线分布。可见,大倾角基本顶周期破断过程中,上板面长边中下部区域首先破坏,随着工作面推进,拉伸破坏区逐渐向工作面中上部发展。

基本顶上板面下部充填较密实的区域($0\text{ m} \leq y \leq 20\text{ m}$)与上部区域($80\text{ m} \leq y \leq 100\text{ m}$)范围内的应

力比例函数值较低,顶板周期破断过程中该区域相对滞后断裂。

综合分析图 4(d) ~ (f) 三个阶段不同形状板的下板面应力比例函数 $f(x, y)$ 分布,整体应力分布可概括为“双边或三边受压,中部受拉”。中部受拉区平行于斜断裂线方向发育。最大拉应力比值位于三角形板的中下部区域。随工作面不断推进,最大拉应力比值位置向中上部区域转移。基本顶发展为梯形板时,中上部区域的 $f(x, y) > 1$ 。可见,基本顶周期断裂出现在梯形板阶段,且顶板断裂后会形成斜断裂带。

基本顶下板面下部充填较密实的区域范围内的应力函数值仍然较低,可见基本顶周期断裂后也会在采空区上、下部形成悬顶结构。

3 大倾角煤层基本顶周期破断模式

3.1 基本顶断裂线发育轨迹

通过对大倾角煤层上下板面应力分析,证明基本顶周期断裂应力分布具有非对称特征。该特征导致了大倾角煤层基本顶周期断裂具有独特的方式。

根据 σ_x , σ_y , τ_{xy} 可计算出最大主应力方向^[11]。将上下板面拉应力区内的最大主应力矢量绘制同一图内(图5),其中黑色直线为上板面矢量,粉色直线代表下板面矢量。

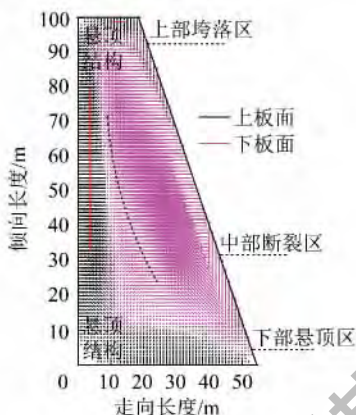


图5 基本顶上下板面拉应力区内最大主应力矢量

Fig. 5 Maximum principal stress vectors in up and low surface of main roof stratum

断裂力学研究表明,断裂线发育轨迹垂直于最大主应力矢量。据此可绘制出基本顶上下板面拉应

力区内的断裂线发育方向,其中上板面用实线表示,下板面用虚线表示。如图5所示:

(1) 顶板中部 $y = 20 \sim 90$ m 是断裂线发育较为密集的区域,所以此区域为基本顶周期断裂过程中较为活跃的区域,为中部断裂区。基本顶上板面主断裂线分布在长直角边靠近工作面附近,断裂线沿直线方向发育。下板面主断裂线主要集中在顶板的内部,主断裂线发育与初次断裂形成的斜断裂线基本平行,在顶板中部靠采空区侧形成倾斜带状的破坏区。

(2) 顶板上部主断裂线位于基本顶上端头,发育轨迹平行于 x 方向。由于主拉应力矢量值较小,断裂时序将滞后于顶板中部的断裂区,形成临时的悬顶结构。中部顶板断裂垮落后,上部临时悬顶失去约束造成拉应力增大,最终导致断裂,该区域为上部垮落区。

(3) 顶板下部 $y = 0 \sim 20$ m 范围内的主拉应力矢量较小,靠近下端头工作面附近的应力值甚至为零,表明该区域的基本顶较稳定,区域为下部悬顶区。由于顶板中部断裂线沿斜线方向发育,导致下部悬顶区与中部未断裂区在顶板中下部共同形成新的小三角形悬顶结构。该结构是下一次基本顶周期断裂的组成部分之一。

3.2 基本顶周期断裂破坏区演化过程

将基本顶上下板面的应力比例函数 $f(x_i, y_i) > 1$ 的点绘制在同一图中,得出大倾角煤层基本顶破坏区演化示意图(图6),其中:红色叉代表上板面破坏区,蓝色框代表下板面破坏区。图中推进度均按照基本顶初次垮落后的工作面煤壁位置为起始位置进行计算。

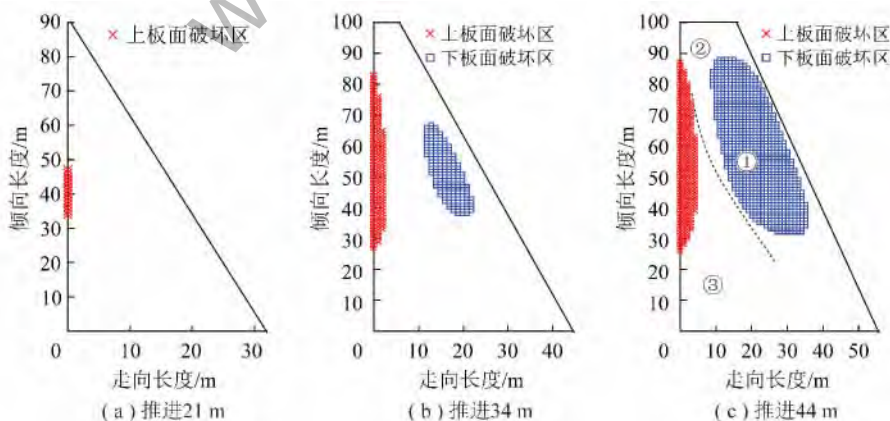


图6 基本顶上下板面破坏区演化

Fig. 6 Failure zone evolution in up and low surface of the main roof stratum

基本顶周期断裂破坏区演化过程如下:

(1) 工作面推进至 21 m 时,工作面煤壁附近的中下部基本顶出现拉伸破坏区。随着工作面走向推

进长度的增加,破裂区逐渐沿长边向上扩展(图6(a))。此时,顶板中部未出现拉伸破坏区。

(2) 工作面推进至 34 m 时,基本顶发展为倾斜梯

形板。此时基本顶中部区域出现拉伸破坏区,该破坏区沿着斜线方向发育(图6(b))。位于长边附近的拉伸破坏区向顶板上部扩展,导致工作面中部 $y=30\sim 70$ m的基本顶发生大面积的断裂、垮落,此时工作面中部区域的来压现象明显。顶板周期断裂时序与初次断裂时序略有不同,为中下部→中部→中上部。

(3) 工作面推进44 m时,顶板中部的拉伸破坏区随工作面不断推进继续沿斜线方向向上扩展,形成平行于采空区内断裂线的斜断裂带(图6(c)),断裂次序为①;断裂带完全垮落后,在顶板内形成斜断裂线。上部基本顶失去中部顶板的约束,导致上部悬顶加速断裂,断裂次序为②,可推断工作面顶板断裂的时序为中上部→上部;顶板内部斜断裂线与下部悬顶共同形成新的小三角形悬顶,小三角形悬顶在下一周期断裂过程中断裂、垮落,所以断裂次序为③。

综上,大倾角煤层基本顶破坏区特殊的演化过程,导致了工作面矿压显现具有非对称性与时序性:

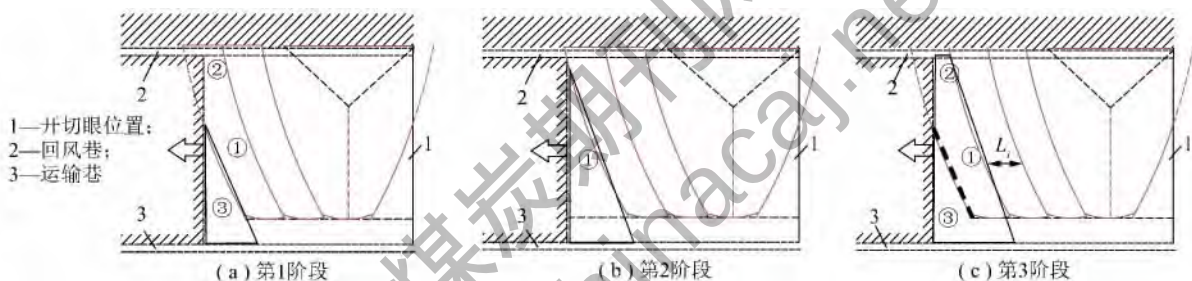


图7 基本顶周期断裂模式与演化

Fig. 7 Periodic fracture mode and evolution of the main roof stratum

(2) 随着工作面的推进,上一周期内未断裂的小三角形沿着斜断裂线扩展为大三角形悬板。此时,在大三角形基本顶的中下部区域出现拉伸破坏区,但未导致顶板垮落,工作面中下部支架压力增大(图7(b))。

(3) 随工作面继续推进,“大三角形”基本顶演变成“梯形”顶板。工作面中部区域形成斜拉伸破坏区并垮落,工作面中部及中上部区域大面积来压,形成新的斜断裂线。上部顶板失去中部顶板的约束,在超前煤壁的顶板内形成高应力集中区,导致基本顶内部的斜断裂线会沿斜线方向延伸至工作面前方煤壁顶板中。部分上部悬顶垮落,工作面上部来压。下部顶板内应力值较低,不易自然断裂,形成新的小三角形悬顶,是下一次周期断裂的组成部分。随着工作面继续推进下方的小三角形悬顶会按着超前范围内的斜断裂轨迹逐渐扩展成大三角形,进入下一次基本顶周期断裂(图7(c))。归纳出基本顶周期破断时空顺序为“中下部→中上部→上部→下部”。

综上所述,大倾角煤层综放开采基本顶周期断裂

基本顶周期破断过程中拉伸破坏区起始位置处于工作面中下部,拉伸破坏区向顶板上部发育速度明显快于下部,大面积垮落位置为顶板的中部及中上部区域。

然而,靠近工作面的基本顶下部区域没有拉伸破坏区,表明基本顶在周期断裂过程中仍然会在工作面下部形成大面积的悬顶结构。由于工作面下部矸石充填密实,该悬顶结构不易自然断裂。

3.3 基本顶周期断裂模式及演化过程

通过大倾角煤层基本顶周期断裂过程中应力分布特征、断裂线发育轨迹与破坏区演化规律的分析,可将周期断裂模式及演化过程概括为:

(1) 基本顶上一周期断裂后中部区域的顶板完全冒落,其断裂次序为①。上部区域顶板由于失去中部顶板的约束,导致应力集中而断裂,仅有少部分处于悬露状态,断裂次序为②。下部基本顶形成较稳定的小三角形悬顶结构(图7(a))。

过程为“小三角形”的悬顶结构→“大三角形”悬板→“梯形板”断裂→“小三角形”的悬顶结构。周而复始的周期断裂,形成了特殊的“四边形”周期断裂特征。“四边形”周期断裂线上部位于工作面前方,下部位于工作面后方。工作面周期断裂表现出时序性与非对称性特征。

由理论分析可知,大倾角基本顶中部最先垮落,且冒落范围较大。将四边形的中部宽度 L_i 作为理论推导的周期来压步距,王家山煤矿大倾角煤层综放开采周期来压步距为31 m。

4 基本顶周期断裂期采场围岩应力场分布及矿压显现特征

4.1 采场围岩应力分布

在基本顶初次破断研究中建立的FLAC^{3D}模型(已回采至50 m)基础上^[1],再向前推进40 m。分析基本顶周期垮落时期围岩应力场分布特征。

如图8所示,基本顶呈梯形板后进入周期破断阶段。煤层回采后,基本顶内中部区域的应力值最低,

且低应力区沿斜线分布,表明基本顶中部区域已经垮落,并在中下部区域形成斜断裂线。

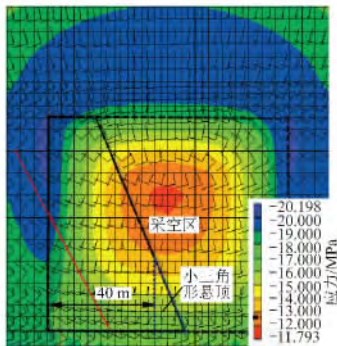


图8 基本顶内最大主应力云图

Fig. 8 Maximum principal stress nephogram in main roof

中部顶板断裂后,应力转移至未垮落区域内。处于悬露状态的上部顶板失去中部顶板的约束,在基本顶上形成20 MPa的高应力集中区。表明上部顶板随中部顶板垮落而发生断裂。根据高应力区域内的矢量,基本顶内部斜断裂线将延伸至工作面前方煤壁顶板中。造成周期来压时,回风巷矿压显现超前影响范围大于运输巷。

下部基本顶由于受到密实矸石的支撑,且应力值相对较低,形成了新的三角形悬顶。工作面下部的悬顶区内的高应力向工作面超前顶板传递。悬顶面积越大,聚集的弹性能越高,易导致工作面下隅角能量聚集型动压显现^[12]。应及时采取矿压防治措施^[13],降低工作面下出口超前范围内聚集较大弹性能。

4.2 基本顶周期破断矿压显现特征

在47407工作面沿倾斜由下至上分别在13.5, 40.5, 54, 81 m处布置矿压监测站,连续监测工作面下、中下、中上、上部4个位置支架阻力变化。

图9显示,当工作面推进11 m时,工作面中下部支架阻力突然上升,最大可以达到23 MPa以上,动载系数较大,周期来压显现剧烈。工作面中上部支架阻力再推进6 m后来压,工作面中部出现片帮现象。工作面上部支架来压较晚,滞后于中部支架来压约7

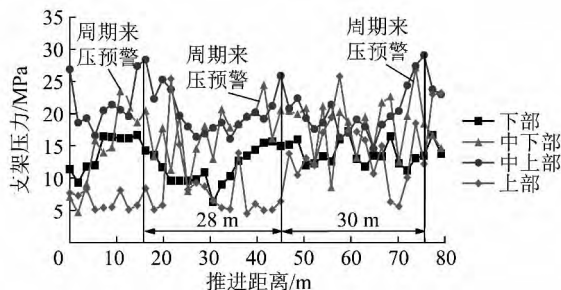


图9 工作面周期来压支架阻力变化

Fig. 9 Support resistances variation in working face during periodic weight

m。但其余大部分时段处于低荷载甚至空载状态,证明工作面上部的顶板需失去中部顶板约束后,才会断裂垮落。

下一周期来压中,仍然是中下部支架首先来压,其次是中上部→上部支架来压,反映出“四边形”周期断裂模式演化过程。

图10为初采工作面周期来压前后两巷的超前单体液压支柱压力。周期来压前回风巷超前0~80 m范围内压力值均超过17 MPa,而运输巷超前30 m范围支柱压力值均大于20 MPa。可见,回风巷矿压显现超前影响范围大于运输巷。

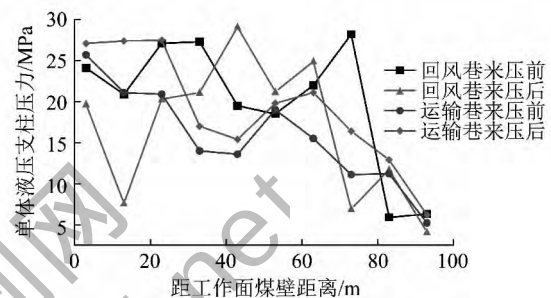


图10 工作面超前单体液压支柱压力

Fig. 10 Hydraulic prop resistances ahead of mining face

周期来压后,回风巷超前30 m范围内顶板弹性能得到充分释放,超前顶板压力峰值转移至超前40 m范围以外。工作面下部基本顶不能及时破断,由于顶板悬露面积增大与矸石被逐渐压密导致运输巷超前30 m范围内的支柱压力增大。

5 结 论

(1) 大倾角煤层基本顶应力分布具有非对称特征。基本顶上板面最大拉应力初始位置为长边的中部偏下。随着工作面的推进,最大拉应力位置逐渐向上转移。基本顶下板面受拉区平行于斜断裂线方向发育。

(2) 大倾角煤层基本顶上下板面断裂线呈非对称发育。中部基本顶上板面主断裂线分布在长直角边沿煤壁发育。下板面主断裂线在顶板内部,沿斜线方向发育。上部顶板主断裂线沿水平方向发育,下部顶板内没有主断裂线发育。断裂线发育形成上部垮落区、中部断裂区、下部悬顶区。

(3) 大倾角煤层基本顶呈“四边形”周期断裂模式。在“四边形”周期断裂模式演化过程中,基本顶断裂的空间次序为顶板中部→上部→下部;工作面周期来压的时序为“中下部→中上部→上部→下部”。

(4) 大倾角煤层开采周期来压具有时空强非对称特征。回风巷的矿压显现超前影响范围大于运输

巷,基本顶在工作面下部形成较大范围的悬顶,并聚集较高的弹性能,需及时采取卸压措施,防止动压显现事件发生。

参考文献:

- [1] 王金安,张基伟,高小明,等.大倾角厚煤层长壁综放开采基本顶破断模式及演化过程(I)——初次破断[J].煤炭学报,2015,40(6):1353-1360.
Wang Jin'an, Zhang Jiwei, Gao Xiaoming, et al. The fracture mode and evolution of main roof stratum above longwall fully mechanized top coal caving in steeply inclined thick coal seam(I) —initial fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1353-1360.
- [2] 张益东,程敬义,王晓溪,等.大倾角仰(俯)采采场顶板破断的薄板模型分析[J].采矿与安全工程学报,2010,27(4):487-493.
Zhang Yidong, Cheng Jingyi, Wang Xiaoxi, et al. Thin plate model analysis on roof break of up-dip or down-dip mining stope[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 487-493.
- [3] 伍永平,解盘石,任世广.大倾角煤层开采覆岩空间非对称结构特征分析[J].煤炭学报,2010,35(2):182-184.
Wu Yongping, Xie Panshi, Ren Shiguang. Analysis of asymmetric structure around coal face of steeply dipping seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 182-184.
- [4] 伍永平,解盘石,王红伟,等.大倾角煤层开采覆岩空间倾斜砌体结构[J].煤炭学报,2010,35(8):1252-1256.
Wu Yongping, Xie Panshi, Wang Hongwei, et al. Incline masonry structure around the coal face of steeply dipping seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8): 1252-1256.
- [5] 徐芝纶.弹性力学(第4版)[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [6] 付亚群,马启民.康托洛维奇法及其应用[J].阜新矿业学院学报,1986,5(2):42-49.
Fu Yaqun, Ma Qiming. Kantorovich method and its application[J]. Journal of Fuxin Mining Institute, 1986, 5(2): 42-49.
- [7] 谢秀松.斜角板弯曲问题的康托洛维奇解[J].湖南大学学报,1983,10(1):90-95.
Xie Xiusong. Kantorovich solution for the problem of bending of skew angular plate[J]. Journal of Hunan University, 1983, 10(1): 90-95.
- [8] 谢秀松,王磊.梯形板弯曲问题的康托洛维奇解[J].应用数学和力学,1984,5(3):399-409.
Xie Xiusong, Wang Lei. Kantorovich Solution for the problem of bending of a ladder plate[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1984, 5(3): 399-409.
- [9] 任红伟,夏永旭.任意梯形、三角形薄板的弯曲[J].西安公路交通大学学报,1995,1:104-107.
Ren Hongwei, Xia Yongxu. Bending of arbitrary trapezium plates and triangle plates[J]. Journal of Xi'an Highway Transportation University, 1995, 1: 104-107.
- [10] 老大中.变分法基础(III)[M].北京:国防工业出版社,2015.
- [11] 刘鸿文.材料力学(II)[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [12] 勾攀峰,辛亚军.大倾角煤层回采巷道顶板结构体稳定性分析[J].煤炭学报,2011,36(10):1607-1611.
Gou Panfeng, Xin Yajun. Stability analysis of roof structure in pitched seam gateway[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1607-1611.
- [13] 张基伟,王金安.大倾角特厚煤层悬顶结构能量分布特征与防冲方法[J].煤炭学报,2014,39(S2):316-324.
Zhang Jiwei, Wang Jin'an. Energy distribution characteristics and rock burst control methods of steeper inclined thick coal seam hanging roof[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S2): 316-324.