

文章编号: 1673-3363-(2015)02-0175-07

# 浅埋薄基岩高强度开采工作面初次来压 基本顶结构稳定性研究

王家臣, 王兆会

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

**摘要** 为了更合理地进行浅埋采场围岩控制设计, 针对工作面出现的顶板沿煤壁大范围切落压架等异常矿压现象, 对其发生机理进行了理论分析, 得到载荷层厚度、采高、工作面长度的增加导致基本顶破断岩块的高长比增大; 由最小势能原理得到了基本顶岩块发生回转失稳的极限位置, 由于破断岩块的高长比增加, 岩块回转过程中水平挤压力变化曲线斜率减小, 而铰接面高度变化曲线斜率增大, 铰接结构达到极限平衡位置所需回转的角度增大, 导致基本顶结构不容易出现回转失稳, 而极易发生滑落失稳。根据浅埋高强度采场顶板结构所特有的失稳形式, 提出了确定支架合理工作阻力的动载荷法, 并对乌兰木伦井田 31402 工作面初次来压进行了分析。

**关键词** 浅埋工作面; 基本顶; 破断岩块; 高长比; 回转失稳; 滑落失稳

**中图分类号** TD 323 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.02.001

## Stability of main roof structure during the first weighting in shallow high-intensity mining face with thin bedrock

WANG Jiachen, WANG Zhaohui

(Faculty of Resource and Safety Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract** For achieving better surrounding rock control in shallow working face, the mechanism of abnormal overlying strata behavior such as large-scale shear-caving along the rib is analyzed in this paper. The scale between the height and the length of key block increases because of the increase of the overburden load, mining height and the length of working face. Limit position of rotary instability is obtained according to the principle of minimum potential energy. The slope of horizontal extrusion pressure curve decreases while the slope of the height of articulated surface increases in the turning process of the key block because of increasing of the scale between the height and the length, and the allowing rotation angle before the hinged structure turning to the limit equilibrium position also increases, which is not likely to cause rotary instability of the hinged structure. However, sliding instability is apt to occur. According to the specific instability form of shallow high-intensity mining face, dynamic method for the determining of the supporting resistance is put forward, then first weighting of 31402 working face in Wulanmulun Mine is analyzed.

**Key words** shallow working face; main roof; broken block; the scale between the height and the length; rotary instability; sliding instability

收稿日期: 2013-07-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB227903)

作者简介: 王家臣(1963—), 男, 黑龙江省方正县人, 教授, 博士生导师, 博士, 从事采矿工程等方面的研究。

E-mail: wangjiachen@vip.sina.com

Tel: 13910874385

近年我国西部浅埋煤炭资源逐步开发,特别是位于晋陕蒙三省交界处的鄂尔多斯煤田,资源储量大,开采条件好。为实现这一区域优质赋存条件煤炭资源的高产高效回收,大尺度、快速推进的高强度开采工作面迅速增多,这在大幅度提高工作面单产的同时也导致浅埋薄基岩高强度开采工作面出现非常规性质的矿压显现现象,如顶板沿煤壁全厚切落、工作面来压时伴有涌水溃沙现象、采动影响迅速波及地表,形成地表裂缝甚至地堑等。

文献[1-3]分析了采高对采场矿压显现造成的影响,认为同传统采高(2~3 m)相比,采高增大会导致来压步距减小,相同顶板条件的大采高采场实际来压步距同传统方法得到的来压步距呈线性负相关关系,浅埋采场采高的增大会导致顶板台阶下沉量增大,若松散层含水,则涌水溃沙灾害发生的概率也会提高;文献[4-7]认为加快工作面推进速度,采场围岩破坏范围变小,支承压力峰值向煤壁靠近,动压灾害发生可能性增大,非来压期间采场“三量”较小,来压时迅速增大,支架受动载荷作用明显。推进速度对来压步距的影响不明显,但过快的推进速度会导致顶板台阶下沉量增大,适当提高推进速度有利于采场围岩的管理。文献[8-9]研究了组合单一关键层破断后结构的稳定性,认为基本顶断裂后形成岩柱平衡结构,并对结构的稳定性进行了分析,认为地表松散层厚度对于结构的失稳形式有很大影响。文献[10-14]认为基本顶断裂是工作面推进过程中损伤积累的结果,并将损伤增量引入来压步距的预测公式,基本顶中损伤积累量同最大拉应力分布不一致,因此初次来压基本顶形成“非对称三铰拱”结构,周期来压时形成“短砌体梁”或“台阶岩梁”结构;并对浅埋煤层基本顶破断后顶板结构及其稳定性进行了系统研究,认为破断岩块的块度、载荷层厚度、岩块回转角度是影响结构稳定性的主要因素,岩块触矸前结构容易发生滑落失稳。

本文在考虑基本顶破断卸荷后变形恢复的前提下利用弹性力学理论对其初次破断时结构的稳定性进行分析,根据浅埋高强度开采工作面特有的失稳形式提出了确定支架工作阻力的动载荷法。

## 1 基本顶结构模型的建立

工作面推进过程中,基本顶暴露长度达到极限值时,顶板就会断裂。根据 Winkler 弹性地基梁理论可以求得基本顶的断裂位置并不在煤壁处,而是

超前煤壁一定距离,因此基本顶断裂后并不是迅速落向采空区,而是存在一定的缓慢回转过程,在采空区中部上方再次破断,形成铰接平衡结构。

工作面推出开切眼,在基本顶发生断裂前可视其为两端固支的梁,如图 1 所示,在上覆载荷层及其自重作用下发生一定的弯曲变形。由材料力学理论可知:固支梁两固定端的弯矩最大,  $M_1=qL^2/3$ ;固定端断裂后,两端的支撑条件转变为简支,此时梁中部的弯矩最大,  $M_2=qL^2/2$ 。由于  $M_2>M_1$ ,可假设梁中的 3 个断裂面同时产生,根据简化后的边界条件,两端固支梁各点的竖向位移可由式(1)表示。

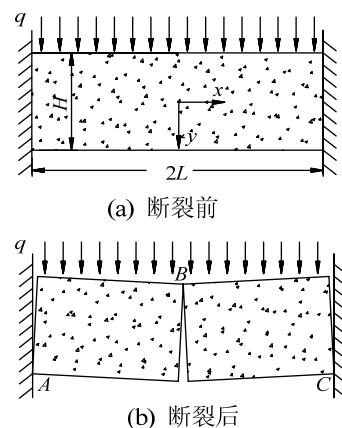


图 1 基本顶结构模型

Fig.1 The model of main roof

$$y = \frac{q}{2EH^3} \left\{ (L^2 - x^2)^2 - y^4 + \frac{3H^2}{2} y^2 - H^3 y - 2\mu \left[ -3x^2 y^2 + y^4 + L^2 y^2 - \frac{3(2+\mu)H^2}{4} y^2 - \frac{\mu H^3}{2} y \right] \right\} \quad (1)$$

由式(1)可知基本顶表面裂纹开始扩展时,梁中部的挠度最大。将 B 点的坐标代入式(1),基本顶的泊松比取 1/3,可得 B 点的下沉量为

$$v = \frac{qL^4}{2EH^3} + \frac{L^2}{12EH} \quad (2)$$

式中:  $q$  为基本顶自身及其上覆载荷, MPa;  $E$  为基本顶的弹性模量, MPa;  $H$  为基本顶的厚度, m;  $2L$  为基本顶的极限跨距, m;  $\mu$  为基本顶岩层的泊松比。

由式(2)求得基本顶断裂时 B 点的下沉量很小,可以忽略不计;但随着裂纹的扩展,基本顶岩梁迅速回转下沉,当裂纹贯通基本顶全厚时,岩梁破断成两关键块,如图 1b 所示,此时两岩块间的接触形式为线接触, B 点的下沉量为  $w$ , 且  $w>v$ 。两岩

块之间的裂缝是基本顶断裂后出现卸荷作用, 弯曲应力产生的拉应变弹性变形恢复以及裂纹扩展过程中基本顶岩块的回转造成的。随着岩块的回转挤压, 岩块之间的接触类型由线接触转变为面接触。

## 2 基本顶破断岩块高长比的影响因素

### 2.1 载荷层厚度对高长比的影响

高强度开采的主要表现形式是采高、工作面长度大, 推进速度快。相对小尺寸工作面而言, 四周煤柱对工作面顶板运动的影响较小, 可简化为二维梁模型; 采高大, 垮落的直接顶难以充满采空区, 在分析基本顶运动时可忽略垮落直接顶的作用。由于浅埋煤层上覆基岩只有1层基本顶, 工作面推进过程中覆岩运动受采动影响非常明显, 基本顶破断后, 工作面上方对应地表迅速产生裂缝甚至地堑, 由裂缝间的距离就可以判断工作面来压步距的大小。

过去在预测采场来压步距时普遍采用材料力学理论, 根据材料力学对弯曲梁变形特征的几个假设可得到两端固支梁的挠曲函数为式(3)。

$$y = \frac{q}{2EH^3}(x^2 - L^2)^2 \quad (3)$$

由于假设条件较多, 材料力学求得的位移和应力解产生的误差较大, 而利用应力函数法得到的弹性力学解更能逼近实际情况。由式(1)和式(3)可分别求出基本顶岩层中拉应力2种不同解。图2中的曲线为基本顶高度10 m、泊松比取0.3时, 工作面推进不同距离时岩层中最大拉应力的材料力学解和弹性力学解的变化趋势。从图中可以看出: 当基本顶的厚度同跨度比( $H/2L$ )较小时, 2种解的相对误差并不大; 而厚跨比较大时, 相对误差不可忽略不计。

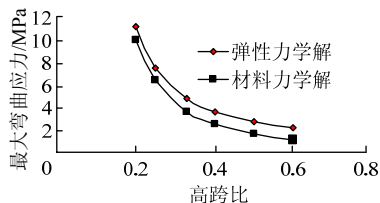


图2 2种解的变化趋势

Fig.2 Comparison of two solutions

为减小误差, 利用固支梁的弹性力学解分析基本顶承受的载荷对其破断距的影响, 根据简化后的应力和位移边界条件可以得到基本顶上表面即  $y=-H/2$  面上水平应力的大小为

$$\sigma_x = \frac{2q}{H^3}(L^2 - 3x^2)y + \frac{4q}{H^3}y^3 - \frac{3(2+\mu)}{2H}qy - \frac{\mu q}{2H} \quad (4)$$

假设基本顶岩层厚10 m, 泊松比取0.3, 抗拉强度取2 MPa, 将以上参数代入式(4), 可得基本顶岩块的长度随基本顶承受载荷的变化曲线(图3)。基本顶岩块的长度随载荷层的增加逐渐变小, 即浅埋煤层基本顶断裂后破断岩块的高长比较大。

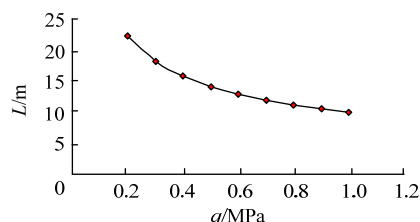


图3 基本顶岩块长度同载荷的关系

Fig.3 Relation between the block length and the load

### 2.2 高长比的其他影响因素

文献[15]通过对路天煤矿1603和1604这2个相邻浅埋工作面的初次来压和多次周期来压的监测、分析和比较发现, 随着工作面长度的增加, 初次来压和周期来压步距都呈减小的趋势。

文献[16]利用数值分析软件模拟不同采高条件下基本顶岩层的极限跨距, 可以得到基本顶破断距随采高的增大而减小, 对基本顶岩层极限跨距与采高的关系进行回归分析, 得到回归方程为式(5), 两者之间存在相关性很强的线性负相关关系。

$$2L = 2l - k(M - M_0) \quad (5)$$

式中:  $L$  为实际破断岩块长度, m;  $l$  为破断岩块传统矿压理论估算值, m;  $k$  为修正系数, 可取1.3;  $M_0$  为传统采高, 小于3 m;  $M$  为实际采高, 大于3 m。

因此, 浅埋高强度开采工作面由于煤层埋深浅, 开采高度大, 工作面长度大, 导致基本顶在厚度及物理力学性质相同的条件下, 其极限破断距呈现减小的趋势, 即破断岩块的高长比增加。

## 3 破断岩块的受力分析

基本顶岩层破断后, 破断岩块随着工作面推进不断回转, 铰接形式由线接触转变为面接触, 接触面高度为  $a$ 。为简化分析, 将接触面上的载荷视为集中力  $T$ , 根据静力等效可知岩块所受合力作用点位于接触面的中部(图4), 将两破断岩块视为一个整体进行研究, 根据静力平衡关系可得在  $A$  和  $C$  处:

$$R = qL \quad (6)$$

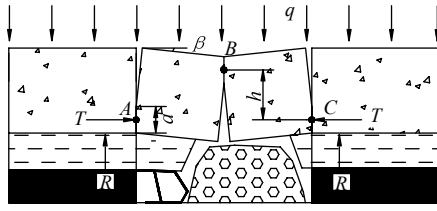


图 4 破断岩块受力分析

Fig.4 Force analysis of broken block

由于  $A$ 、 $C$  处剪力  $R$  相等, 因此  $B$  处铰接面上不存在剪力, 只存在水平挤压力, 为求得其大小, 取  $AB$  岩块进行受力分析, 对  $A$  点取矩平衡可得

$$Th = \frac{1}{2}q(L \cos \beta)^2 + qLH \sin \beta \quad (7)$$

式中:  $T$  为水平挤压力, N;  $R$  为保持结构平衡所需的剪力, N;  $\beta$  为破断岩块的回转角, ( $^\circ$ );  $h$  为  $A$  和  $B$  两铰接点的垂直距离, 可由几何关系求出, m;  $L$  为破断岩块长度, m;  $H$  为破断岩块高度, 即基本顶厚度, m;  $q$  为破断岩块承受的载荷, Pa。

由式(7)可看出水平挤压力  $T$  同破断岩块的回转角成正比, 与合力作用点间的垂直距离成反比。

#### 4 破断岩块平衡结构稳定性分析

##### 4.1 回转失稳条件

若不考虑滑落失稳的可能性, 同样将破断岩块所承载荷均简化为集中力作用, 根据静力等效确定集中力作用点的位置, 则根据破断岩块的受力边界条件可将基本顶岩块结构简化为图 5 所示的铰接杆结构。浅埋煤层基本顶破断岩块的高长比大, 初始破断时  $\alpha_0$  较大, 由结构力学理论可知此时该结构不会发生回转失稳。

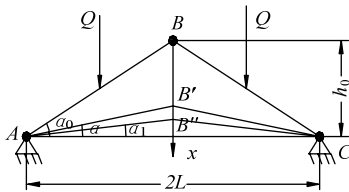


图 5 基本顶结构简化图

Fig.5 Simplified model of main roof structure

随着破断岩块的回转, 当  $\alpha$  很小时铰接杆结构可视为浅梁结构, 平衡结构可能会失去稳定性, 此时  $B$  点下沉至  $B'$  点位置;

假设  $B'$  点的坐标  $x = -h_{\min}$ , 由三角函数关系可得  $AB'$  的长度

$$l = \frac{L}{\cos \alpha} = L \left( 1 + \frac{\alpha^2}{2} \right)$$

当  $AB'$  回转至角  $\alpha_1$  时,  $B'$  点下沉至  $B''$  位置,  $AB''$  的长度为

$$l_1 = \frac{L}{\cos \alpha_1} = L \left( 1 + \frac{\alpha_1^2}{2} \right)$$

$B''$  点的坐标为  $x \approx l\alpha_1$ , 杆的变形量为

$$\Delta l = \frac{1}{2}L(\alpha^2 - \alpha_1^2)$$

杆的应变值为  $\varepsilon = \frac{1}{2}(\alpha^2 - \alpha_1^2)$

$B'$  点的位移为  $u = l\alpha_1 + h_{\min}$ , 应变值用  $B$  点的位移表示, 则  $\varepsilon = \frac{-u(u - 2h_{\min})}{2l^2}$ , 结构的应变能为

$$U = E\varepsilon^2 Al = EA \frac{u^2(u - 2h_{\min})^2}{4l^3} \quad (8)$$

基本顶岩块及载荷层的重力所做的功为:

$$V = -Qu \quad (9)$$

式中  $Q$  为基本顶岩块及载荷层的重力, kN。

铰接结构的总势能为

$$\Pi = U + V = EA \frac{u^2(u - 2h_{\min})^2}{4l^3} - Qu \quad (10)$$

根据最小势能原理, 铰接结构保持平衡的条件为

$$\delta \Pi = \left[ EA \frac{u(u - h_{\min})(u - 2h_{\min})}{l^3} - Q \right] \delta u = 0 \quad (11)$$

结构总势能在其二次变分大于 0 时取得最小值, 因此, 当  $\delta^2 \Pi > 0$  时结构的平衡是稳定的,  $\delta^2 \Pi < 0$  时结构很可能会过渡到失稳的状态。对系统的总势能取二次变分得

$$\delta^2 \Pi = \left( EA \frac{3u^2 - 6h_{\min}u + 2h_{\min}^2}{l^3} \right) (\delta u)^2 = \left\{ \frac{EA}{l^3} \left[ u - \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \right) h_{\min} \right] \left[ u - \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) h_{\min} \right] \right\} (\delta u)^2 \quad (12)$$

由式(12)可看出: 当  $B$  点的位移  $u < \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \right) h_{\min}$

时, 结构是稳定的; 而当  $u > \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \right) h_{\min}$  结构便突变至失稳状态。即  $B$  点位移  $u = \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \right) h_{\min}$  时是铰接结构能够保持平衡的极限位置。

因此当铰接点  $B$  下沉至距基本顶岩层下表面距离为  $\Delta = \frac{a}{2} + \frac{\sqrt{3}}{3} h_{\min}$  时, 平衡结构便会失去稳定性。式中:  $a$  为铰接面的高度;  $h_{\min}$  值可根据基本顶极

限破断距适当选取。

在中间铰接点下沉至极限平衡位置前, 得到不同高长比时, 铰接点垂直距离和铰接面高度随回转角度的变化曲线如图6所示。可以看出当高长比较大时, 铰接点之间的垂直距离随破断岩块的回转,

其下降曲线趋于平缓, 而接触面高度变化曲线的斜率增大, 趋于陡峭。在这一过程中, 若保持结构平衡所需的水平力满足式(13), 则结构停止回转, 处于平衡状态; 否则,  $B$  点会随着岩块的回转不断下沉, 直至达到极限平衡位置, 平衡结构失稳。

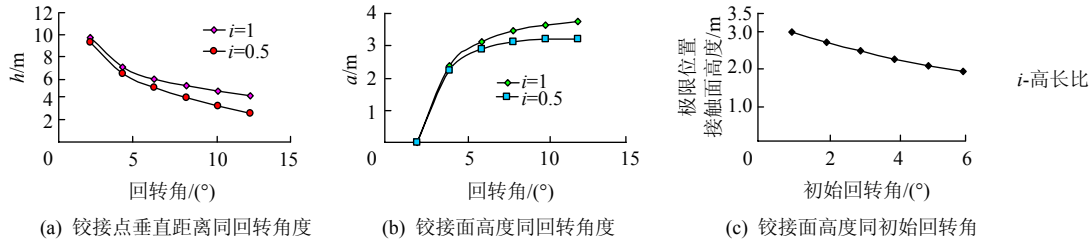


图6 铰接面高度及其位置变化曲线

Fig.6 Height and position change of articulated surface

$$T < \eta a \sigma_c \quad (13)$$

式中:  $\eta$  为端角挤压系数, 取值范围 0~1;  $\sigma_c$  为关键块的抗压强度, MPa。

由式(7)可知, 保持铰接结构平衡所需的水平挤压力同铰接点之间的垂直距离  $h$  成反比。图 6a 表明, 由于破断岩块的高长比较大时两铰接点之间的垂直距离随岩块的回转, 下降曲线区域平缓, 所以浅埋煤层基本顶保持结构平衡所需水平挤压力的上升曲线同深埋煤层相比, 曲线上升斜率减小。

不同高长比破断岩块回转过程中铰接面的高度变化曲线如图 6b。考虑到基本顶断裂卸荷后的变形恢复后, 铰接面高度随回转角度的增加先增大后减小, 当高长比较大时, 破断岩块回转相同角度时铰接面的高度值比高长比较小时的要大, 即曲线上升的斜率较大。

$$\tau = \frac{6q}{H^3} xy^2 - \frac{3q}{2H} x \quad (14)$$

此外, 基本顶岩块回转到不同位置时, 铰接面高度同基本顶断裂时形成的裂缝宽度有关, 而裂缝宽度同基本顶断裂时拉伸应变的弹性恢复量有关,

由式(4)可知, 弯曲拉应力与  $q\left(\frac{L}{H}\right)^2$  的阶数相同, 而剪应力的解可由式(14)表示, 其值与  $q\left(\frac{L}{H}\right)$  的阶数

相同, 因此在浅埋煤层中基本顶的断裂是在拉剪复合作用下产生的。而深埋采场的破断中弯曲应力起主导作用, 因此相对于深埋采场, 浅埋采场基本顶断裂卸荷时, 初始回转角小, 产生的变形恢复量小, 而铰接点  $B$  下沉至同一位置时, 接触面的高度随初始回转角的增大而减小(图 6c), 因此浅埋煤层基本

顶断裂后, 破断岩块间的接触面高度大。

由上述分析可知, 浅埋煤层覆岩基本顶破断后岩块的高长比大, 当破断岩块回转至一定角度时, 由于铰接面中点之间的垂直距离  $h$  大, 保持结构平衡所需的水平挤压力较相同基本顶条件的深埋采场小, 而铰接面的高度大, 端面挤压系数  $\eta$  可取较大值, 因此式(13)容易满足, 即基本顶岩块的铰接结构容易保持平衡状态。

由图 5 可知浅埋采场覆岩基本顶刚破断时  $\alpha_0$  大, 若破断岩块结构由于采动影响不能保持平衡而一直处于回转运动状态, 则回转至极限平衡位置所需的时间较长, 适当提高工作面推进速度可以使结构在架后失稳, 避免结构失稳对支架形成冲击。

综上所述, 浅埋薄基岩高强度采场不易受到基本顶破断岩块回转失稳产生的冲击影响。

#### 4.2 滑落失稳条件

事实上图 5 中的断裂岩块在铰接点  $A$  和  $C$  处同未断裂岩层之间依靠摩擦力保持结构的平衡, 因此在中间铰接面回转至极限平衡位置前, 很可能因前后铰接面处的摩擦力太小发生滑落失稳。根据静力平衡关系可知平衡结构发生滑落失稳的条件为

$$T \tan \varphi < qL \quad (15)$$

式中  $\varphi$  为基本顶岩层的内摩擦角, ( $^\circ$ )。

由以上分析可知, 浅埋覆岩基本顶破断岩块在回转过程中产生的水平挤压力较小, 而唯一的基本顶结构控制着直至地表的所有基岩和表土的运动, 即载荷层的厚度大, 因此式(15)很容易满足, 即浅埋采场基本顶破断岩块极易发生滑落失稳。



## 5 支架阻力确定

由以上分析可知浅埋高强度开采工作面初次来压时断裂岩块以滑落的形式作用在直接顶上对工作面支架形成冲击, 图 5 中的平衡结构失稳后, 两岩块同时下落, 形成图 7 所示的结构形式。

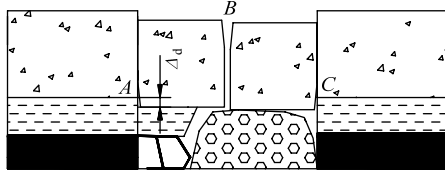


图 7 平衡结构失稳

Fig.7 Instability state of main roof

顶板系统再次取得平衡后, 取支架上方的破断岩块及直接顶松脱体进行能量守恒分析, 岩块重力势能的减少量等于摩擦力做的功及直接顶形变能的增加量<sup>[17]</sup>, 即

$$Q(\Delta h + \Delta_d) = T \tan \varphi (\Delta h + \Delta_d) + \frac{E_i A}{2 \sum h} \Delta_d^2 \quad (16)$$

式中:  $\Delta h$  为直接顶与基本顶的离层量, m;  $\Delta_d$  为直接顶受基本顶岩块冲击产生的最大变形, m;  $T$  为水平挤压力, 可由式(7)求出, N;  $\tan \varphi$  为端面摩擦因数;  $E_i$  为直接顶弹性模量, Pa;  $A$  为直接顶的悬顶面积,  $\text{m}^2$ ;  $\sum h$  为直接顶高度, m。

另  $Q_B = Q - T \tan \varphi$ , 则式(16)可简化为

$$Q_B (\Delta h + \Delta_d) = \frac{E_i A}{2 \sum h} \Delta_d^2 \quad (17)$$

当断裂岩块以静力方式作用在直接顶之上时, 直接顶产生的变形量为

$$\Delta_{st} = \frac{Q_B \sum h}{A E_i} \quad (18)$$

将式(18)代入式(17)可得破断岩块分别以动载和静载作用在直接顶上时造成直接顶变形量  $\Delta_d$ ,  $\Delta_{st}$  之间的关系为

$$\Delta_d = \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \Delta h}{\Delta_{st}}} \right) \Delta_{st} \quad (19)$$

因此断裂岩块失稳时对直接顶的最大冲击作用力为

$$F_d = A E_i \frac{\Delta_d}{\sum h} = \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \Delta h}{\Delta_{st}}} \right) Q_B = k_d Q_B \quad (20)$$

式中  $k_d$  为动载系数。当直接顶同基本顶之间的离层量为 0 时, 动载系数等于 2; 由于计算过程中将直接顶松脱体视为弹性体过于理想化, 实际来压过

程中直接顶松脱体产生塑性变形释放一部分冲击能量, 因此在确定支架工作阻力时可根据直接顶的厚度和岩性, 在 1~2 的范围内对动载系数进行赋值。

## 6 工程实例

乌兰木伦井田 3-1 煤四盘区 31402 工作面埋深 103~171 m, 推进速度可达到 10 m/d, 为浅埋高强度开采工作面。3-1 煤层厚度 4.6 m, 直接顶为厚 9 m 的粉砂质泥岩, 基本顶为平均厚度 14 m 的中砂岩。采用大采高综采采煤工艺。

工作面推出开切眼 42 m 时, 工作面初次来压, 可以确定破断岩块的高度  $H$  为 14 m, 长度为 21 m。结构运动至极限平衡位置时, 岩块的回转角接近  $\arctan(H/L) = 33.7^\circ$ , 而实际岩块的最大允许回转角为  $\arcsin \left[ \frac{M - \sum h(k_p - 1)}{L} \right]$  (式中:  $k_p$  为直接顶的碎胀系数, 取 1.3), 则最大允许回转角等于  $6^\circ$ , 所以结构不会发生回转失稳。破断岩块以滑落失稳形式冲击工作面支架, 31402 工作面支架宽度 1.75 m, 最大控顶距 5.4 m, 直接顶为强度不大的砂质泥岩, 较厚, 动载系数取 1.3, 根据动载荷法可求得支架合理工作阻力为 9 491 kN, 而工作面所用 2 种支架型号额定工作阻力为 9 000, 8 600 kN, 所选用支架工作阻力偏小, 因此初次来压时支架损坏严重: 67~73<sup>#</sup> 支架掩护梁被压断, 9 个支架的平衡油缸损坏, 7 个支架平衡油缸的耳座损坏。在之后回采过程中工作面来压时需采取相应的辅助支护措施, 如对支架破坏处进行补焊加固, 增加立柱加强支护等。

## 7 结 论

1) 载荷层厚度、采高、工作面长度的增加是导致浅埋高强度开采工作面基本顶破断距减小的主要原因, 得到了均布载荷作用下两端固支梁中位移和应力的材料力学解和弹性力学解。在预测采场基本顶破断距时宜采用弹性力学理论进行求解。

2) 由于基本顶破断卸荷后存在变形恢复现象, 破断岩块在回转过程中, 岩块间的接触形式由线接触转变为面接触, 接触面高度先增大后减小。利用最小势能原理导出了结构发生回转失稳的极限位置, 由于浅埋煤层破断时形成岩块的高长比增大, 初始回转角小, 初次来压时基本顶岩块不易发生回转失稳现象, 而滑落失稳极易产生。

3) 根据浅埋高强度开采工作面初次来压时基本顶平衡结构的滑落失稳模式, 提出了确定支架合

理工作阻力的动载荷法。以乌兰木伦井田 3-1 煤四盘区 31402 工作面初次来压为工程背景, 验证了基本顶平衡结构以滑落形式失稳的正确性; 并利用动载荷法计算了该工作面支架所需的额定工作阻力, 解释了初次来压时工作面支架损坏严重的原因, 即所选架型额定工作阻力偏小。

## 参考文献:

- [1] 茅献彪, 缪协兴, 钱鸣高. 采高及复合老顶效应对采场来压步距的影响[J]. 湘潭矿业学院学报, 1999, 14(1): 1-5.  
MAO Xianbiao, MIAO Xiexing, QIAN Minggao. Influence of mining height and compound effect of key strata on the weighting length[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 1999, 14(1): 1-5.
- [2] 张杰. 采高对浅埋煤层老顶岩层破断距的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2009, 28(2): 161-164.  
ZHANG Jie. Influence of mining height of main roof on broken length[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2009, 28(2): 161-164.
- [3] 吕军, 侯忠杰. 影响浅埋煤层矿压显现的因素[J]. 矿山压力与顶板管理, 2000, 17(2): 39-40.  
LYU Jun, HOU Zhongjie. Factors influencing mining appearance in the shallow buried coal seam[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2000, 17(2): 39-40.
- [4] 谢广祥, 常聚才, 华心祝. 开采速度对综放面围岩力学特征影响研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 963-967.  
XIE Guangxiang, CHANG Jucai, HUA Xinzhu. Influence of mining velocity on mechanical characteristics of surrounding rock in fully mechanized top-coal caving face [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 963-967.
- [5] 黄庆享. 浅埋煤层高产工作面矿压分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 1999, 16(3/4): 53-56.  
HUANG Qingxiang. Analysis of mining pressure in shallow high-intensity mining face[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1999, 16(3/4): 53-56.
- [6] 黄庆享. 浅埋煤层的矿压特征与浅埋煤层定义[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1174-1177.  
HUANG Qingxiang. Mining pressure characteristics and the definition of shallow coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1174-1177.
- [7] 王晓振, 许家林, 朱卫兵, 等. 浅埋综采面高速推进对周期来压特征的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(3): 349-354.  
WANG Xiaozhen, XU Jialin, ZHU Weibing, et al. Influence of high mining velocity on periodic weighting during fully mechanized mining in a shallow coal seam [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(3): 349-354.
- [8] 侯忠杰, 谢胜华. 采场老顶断裂岩块失稳类型判断曲线讨论[J]. 矿山压力与顶板管理, 2002, 19(2): 1-3.  
HOU Zhongjie, XIE Shenghua. Discussion on judgment curve of main roof broken block instability type[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2002, 19(2): 1-3.
- [9] 侯忠杰. 地表厚松散层浅埋煤层组合老顶的稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 127-131.  
HOU Zhongjie. Combinatorial key strata stability analysis in shallow buried coal seam with thick loose bed[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(2): 127-131.
- [10] 黄庆享. 浅埋煤层长壁开采顶板结构理论与支护阻力确定[J]. 矿山压力与顶板管理, 2000, 17(1): 70-72.  
HUANG Qingxiang. Roof structure theory and determination of working resistance in shallow longwall mining face[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2000, 17(1): 70-72.
- [11] 黄庆享, 祈万涛, 杨春林. 采场老顶初次破断机理与破断形态分析[J]. 西安矿业学院学报, 1999, 19(3): 193-197.  
HUANG Qingxiang, QI Wantao, YANG Chunlin. Analysis of the broken block during the first weighting in shallow working face[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1999, 19(3): 193-197.
- [12] 黄庆享, 钱鸣高, 石平五. 浅埋煤层采场老顶周期来压的结构分析[J]. 煤炭学报, 1999, 24(6): 581-585.  
HUANG Qingxiang, QIAN Minggao, SHI Pingwu. Analysis of main roof structure during the periodic weighting in shallow buried working face[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6): 581-585.
- [13] 黄庆享. 采场老顶初次来压的结构分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 521-526.  
HUANG Qingxiang. Structure analysis during the first weighting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(5): 521-526.
- [14] 黄庆享. 浅埋煤层长壁开采顶板结构与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000: 80-95.
- [15] 杨永康, 李建胜, 康天合, 等. 浅埋厚基岩松软顶板综放采场矿压特征工作面长度效应[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 709-716.  
YANG Yongkang, LI Jiansheng, KANG Tianhe, et al. Effect of working face length on underground pressure characteristics by fully-mechanized top-coal caving mining under shallow-buried thick bedrock loose roof[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 709-716.
- [16] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 45-48.
- [17] 王家臣. 厚煤层开采理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 176-190.