

文章编号: 1673-3363-(2014)04-0569-06

# 浅埋煤层工作面弱胶结顶板破断结构模型研究

宁建国<sup>1</sup>, 刘学生<sup>1</sup>, 谭云亮<sup>1</sup>, 张明<sup>2</sup>, 张立生<sup>3</sup>

(1. 山东科技大学矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东能源集团新汶矿业集团有限责任公司, 山东 新汶 271200; 3. 鄂尔多斯市昊华精煤能源公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

**摘要** 通过对鄂尔多斯盆地矿井 2<sup>-2</sup> 煤层综采工作面支架循环末阻力增长规律分析, 建立浅埋煤层工作面弱胶结顶板破断结构模型, 推导了工作面顶板不同运动阶段综采支架支护强度计算公式, 并与现场观测结果进行对比。研究发现浅埋煤层弱胶结顶板中存在着由若干小断块岩块挤压构成的“岩块挤压岩梁”, 这部分岩层可称为“类基本顶”, 其不仅能够传递水平力, 而且可起到减缓上覆岩层对支架的冲击作用; 在浅埋煤层工作面开采期间, 弱胶结顶板破断运动过程可分为 3 个阶段: 阶段 I, 直接顶垮落, 上方砂质泥岩断裂、挤压、离层; 阶段 II, 类基本顶“岩块挤压岩梁”结构形成阶段; 阶段 III, 基本顶冲击沉降阶段; 随着工作面推进, 液压支架循环末阻力增长过程也呈现工作阻力初次升高段、缓慢升高段和显著升高段 3 个阶段。研究可为鄂尔多斯盆地浅埋煤层工作面顶板控制设计、支架选型等提供借鉴和参考。

**关键词** 浅埋煤层; 弱胶结顶板; 类基本顶; 破断结构

**中图分类号** TD 325

**文献标志码** A

## Fracture structure model of weakly cemented roof in shallow seam

NING Jianguo<sup>1</sup>, LIU Xuesheng<sup>1</sup>, TAN Yunliang<sup>1</sup>, ZHANG Ming<sup>2</sup>, ZHANG Lisheng<sup>3</sup>

(1. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Shandong Energy Xinwen Mining Group Co Ltd, Xintai, Shandong 271233, China; 3. Ordos Haohua Clean Coal Co Ltd, Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

**Abstract** In this paper, based on the growth law of support circulation resistance in the fully-mechanized mining face of No.2<sup>-2</sup> coal seam, Ordos basin, the fracture structure model of weakly cemented roof in shallow coal seam was built, the supporting strength formulas of hydraulic support in different roof movement stages were derived, and were compared with the field observations. The results show that there exists a rock beam composed of some squeezing rock blocks in the weakly cemented roof, which can be seen as a similar basic roof. The rock beam can not only transfer the horizontal force, but also reduce the impact of overlying strata on support. During the mining process of shallow seam, the moving process of weakly cemented roof can be divided into three stages. Stage one, the immediate roof caves, and the overlying sandy mudstone breaks, squeezes and generates separations. Stage two, similar basic roof breaks and forms the rock beam. Stage three, the basic roof subsides and impacts the support. With the working face advancing forwards, the growth of the support resistance can also be divided into three stages, which are initial increasing stage, slow increasing stage and significant

收稿日期: 2013-09-05

基金项目: 山东省“泰山学者”建设工程专项经费项目; 山东科技大学“矿山压力与岩层控制”创新团队基金项目; 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2012NJ007)

作者简介: 宁建国(1975—), 男, 山东省宁阳县人, 副教授, 博士, 从事矿山压力与岩层控制等方面的研究。

E-mail: njglxh@126.com

Tel: 15954841060

increasing stage. This research can provide reference to roof control design, support selection, et al, in shallow seam of Ordos Basin.

**Key words** shallow seam; weakly cemented roof; similar basic roof; fracture structure

鄂尔多斯盆地广泛赋存着浅埋的侏罗纪煤田,储量十分丰富,约占全国煤炭探明可采储量的 1/4 以上,在我国能源发展战略中占有重要地位。但该区域煤系岩层多以泥岩、砂质泥岩为主,胶结性差,抗压强度较小<sup>[1-4]</sup>;煤层采出后其覆岩破断运动不同于东部中硬及坚硬顶板工作面,传统的煤层工作面顶板破断结构模型并不适用此类工作面,如类拱结构<sup>[5-6]</sup>、砌体梁结构<sup>[7]</sup>及传递岩梁结构<sup>[8-9]</sup>等。因此有必要对此类工作面顶板破断结构进行研究,为鄂尔多斯盆地煤层工作面顶板控制设计、支架选型等提供借鉴和参考。

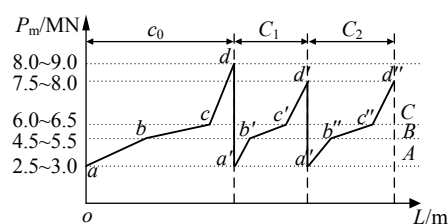
以鄂尔多斯盆地典型矿井地质及开采条件为背景,以综采工作面液压支架工作阻力监测数据为基础,建立浅埋弱胶结顶板破断结构模型,推导顶板不同运动阶段支架工作阻力计算公式,并与现场测试结果对比,揭示浅埋煤层弱胶结顶板破断运动规律,为类似矿井工作面顶板控制设计提供理论依据。

## 1 弱胶结顶板工作面矿压显现规律

鄂尔多斯盆地矿井主采煤层有 2<sup>-2</sup> 煤、3 煤、4 煤和 6 煤;目前大部分矿井正在开采 2<sup>-2</sup> 煤层。该区域 2<sup>-2</sup> 煤层埋深 96~148 m,平均约 120 m;可采煤层平均厚度 3.37 m;煤层直接顶岩性以泥岩、砂质泥岩为主,平均厚度 41 m,抗压强度为 18 MPa 左右;直接顶上方为细粒砂岩、粉砂岩互层,平均厚度 35 m,抗压强度 45 MPa 左右;底板岩性主要为砂质泥岩为主,平均厚度 12 m,抗压强度为 20 MPa 左右。

利用 KJ216 液压支架工作阻力在线监测系统,分别在内蒙古高家梁煤矿、金阳煤矿,陕西榆家梁煤矿、哈拉沟煤矿等 10 余矿井,选取 2<sup>-2</sup> 煤层工作面上端头、中部和下端头各 3~5 个液压支架,进行连续、系统的矿压监测,获得 2<sup>-2</sup> 煤层工作面液压支架油管压力  $P$  与工作面推进距离  $L$  关系曲线;计算每工作循环液压支架循环末工作阻力  $P_m$ ,建立  $P_m$  与工作面推进距离  $L$  间关系曲线。图 1 为液压支架循环末阻力典型变化曲线。由图 1 可知:随着工作面推进,在工作面来压期间( $c_0$  表示初次来压步距,  $c_n$  表示第  $n$  次周期来压步距),液压支架循环末

阻力曲线大致可分为 3 个阶段: A(曲线  $ab$ ,  $a'b'$ ,  $a''b''$ )段为工作阻力初次升高段,最大值为 4.5~5.5 MN; B(曲线  $bc$ ,  $b'c'$ ,  $b''c''$ )段为工作阻力缓慢升高段,最大值为 6.0~6.5 MN; C(曲线  $cd$ ,  $c'd'$ ,  $c''d''$ )段属于工作阻力显著升高段,最大值为 7.5~9.0 MN,动载系数约为 1.15~1.5。工作面初次来压步距 20~30 m,周期来压步距 14~20 m。



A-工作阻力初次升高段; B-工作阻力缓慢升高段;  
C-工作阻力显著升高段

图 1 液压支架循环末阻力典型变化曲线

Fig.1 The end cycle typical resistance curve of hydraulic support

## 2 浅埋煤层工作面弱胶结顶板破断结构模型

### 2.1 顶板破断运动过程

对于鄂尔多斯盆地浅埋 2<sup>-2</sup> 煤层,其上方存在厚度较大的弱胶结砂质泥岩,这部分岩层成岩时期较晚,强度较低,胶结性差,其破断特征及运动规律与东部中硬或坚硬顶板不同。随着工作面推进,在工作面开采期间其顶板破断过程可分 3 个阶段。

阶段 I: 直接顶垮落,上方砂质泥岩断裂、挤压、离层。当工作面由开切眼推进一定距离后,直接顶垮落;直接顶上方砂质泥岩 1 暴露,并在工作面前方及采空区内断裂成尺寸较小的岩块,各岩块相互挤压同时下沉,同时与砂质泥岩 2 之间产生离层;工作面继续推进,砂质泥岩 2, ..., 砂质泥岩  $n$  先后在煤壁的前方及采空区内断裂,同一岩层断裂成较小岩块、相互挤压并同时下沉,两两岩层之间的离层逐渐增大,如图 2 所示。

阶段 II: “岩块挤压岩梁”结构形成阶段。工作面继续推进,砂质泥岩 1 岩块搭接在采空区矸石上,砂质泥岩 2, ..., 砂质泥岩  $n$  继续下沉,两两

岩层间的离层减小，最终黏结成一体，形成“岩块挤压岩梁”；这类岩梁由尺寸较小的岩块构成，能够传递水平力，但岩梁内岩块尺寸小于传统的基本顶传递岩梁，这类顶板暂定义为“类基本顶”。此时，类基本顶与上方抗压强度较大的岩层(基本顶)间出现离层，使基本顶逐渐显露出来，如图3所示。

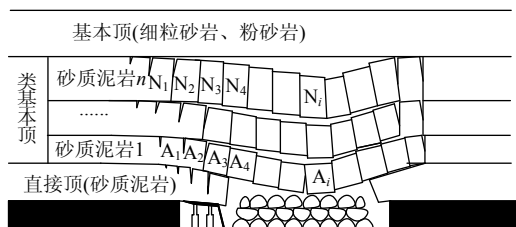


图2 阶段I顶板破断运动过程

Fig.2 The roof breaking movement in stage I

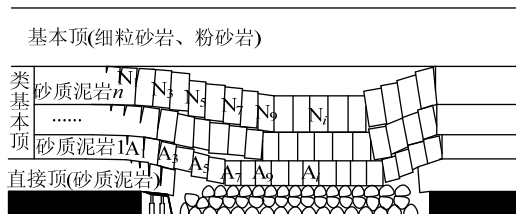


图3 阶段II“岩块挤压岩梁”结构形成

Fig.3 The structure of crushing rock beam in stage II

阶段 III: 基本顶冲击沉降阶段。工作面继续推进，基本顶岩层逐渐达到极限跨度，并在工作面煤壁前方断裂，进而中部开裂，断裂的基本顶突发性沉降，冲击在“岩块挤压岩梁”结构上，完成基本顶初次来压过程，如图4所示。该阶段由于基本顶冲击，造成液压支架阻力迅速上升，存在动载现象，矿压显现相对剧烈。

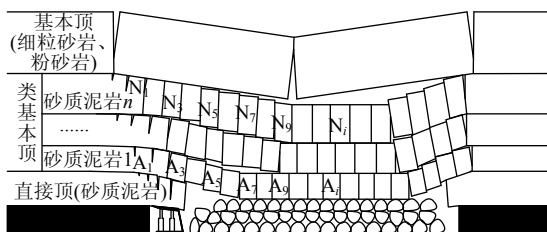


图4 阶段III基本顶冲击沉降

Fig.4 The basic roof shock settlement in stage III

随后，工作面进入周期来压阶段。在每次周期来压期间，工作面顶板破断运动也大致可分为上述3个阶段，只是在阶段I中各砂质泥离层间距较小，离层运动不明显，阶段II与初次来压时基本一致，阶段III基本顶岩层在工作面煤壁前方断裂，断裂

的基本顶沉降，冲击在“岩块挤压岩梁”结构上，完成一次周期来压过程，如图5所示。

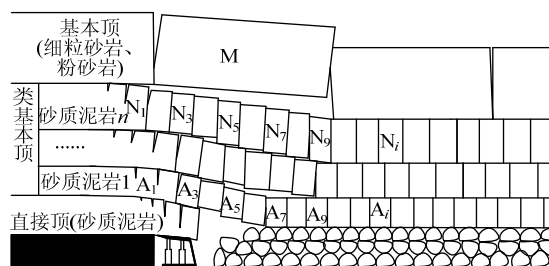


图5 周期来压阶段

Fig.5 The periodic weighting stage

## 2.2 工作面液压支架支护强度计算

### 1) 初次来压阶段。

阶段 I: 此阶段直接顶上方弱胶结砂质泥岩断裂成相互挤压的岩块，形成自稳结构，工作面支架只需承担直接顶的重量即可，直接顶对支架的作用力可按式(1)计算。

$$A = \frac{m_z \gamma_z L_z}{2L_k} \quad (1)$$

式中:  $m_z$  为直接顶厚度, m;  $\gamma_z$  为直接顶容重,  $\text{kN/m}^3$ ;  $L_z$  为直接顶极限垮落步距, m;  $L_k$  为工作面控顶距, m。

阶段 II: 此阶段基本顶还没有达到极限跨度，其下部类基本顶岩层的作用力可以忽略不计。此阶段工作面支架应承担工作面控顶区内直接顶的全部重量和直接顶悬顶重量，以及类基本顶的部分重量。

直接顶对支架的作用力按式(2)计算。

$$A = \frac{m_z \gamma_z (L_s + L_k)^2}{L_k^2} \quad (2)$$

式中  $L_s$  为直接顶最大悬顶长度, m。

为计算类基本顶对支架的作用力，以砂质泥岩1为例，假设岩块  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  间力的作用位置在岩块底部，其余岩块间力的作用位置在岩块顶部，如图6所示。悬空部分岩块可看成受均布载荷作用的不等高三铰拱结构，其受力分析如图7所示。

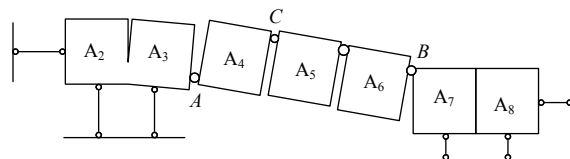


图6 砂质泥岩1各岩块受力分析图

Fig.6 The stress analysis chart of rocks in sandy mudstone 1

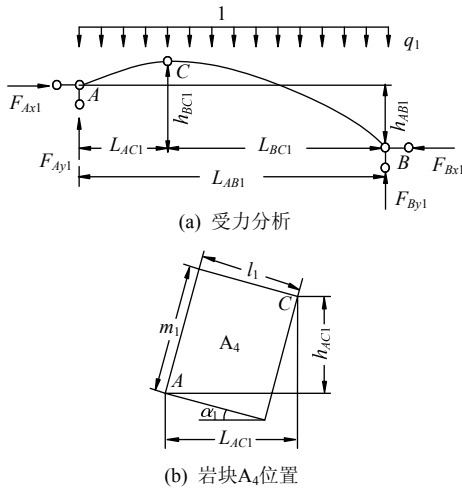


图 7 不等高三铰拱受力分析

Fig.7 The stress analysis of unequal three hinged arch

对图 7a, 建立力学平衡方程, 有:

$$\sum F_{x1} = 0, \quad \sum F_{y1} = 0 \quad (3)$$

$$\sum M_{A1} = 0, \quad \sum M_{C1} = 0 \quad (4)$$

对图 7b, 有下列几何关系:

$$L_{BC1} = L_{AB1} - L_{AC1} \quad (5)$$

$$h_{BC1} = h_{AC1} + h_{AB1} \quad (6)$$

联立上式得:

$$F_{Ay1} = \frac{L_{AB1}^2 h_{AC1} + L_{AC1}^2 h_{AB1}}{2(L_{AB1} h_{AC1} + L_{AC1} h_{AB1})} q_1$$

$$F_{Ax1} = F_{Bx1} = \frac{L_{AB1} - L_{AC1}}{2(L_{AB1} h_{AC1} + L_{AC1} h_{AB1})} L_{AC1} L_{AB1} q_1$$

式中:  $h$  为工作面采高,  $m$ ;  $L_{AB1}$  为砂质泥岩 1 悬空岩块水平投影长度,  $m$ 。并有:

$$h_{AC1} = m_1 \cos \alpha_1 - l_1 \sin \alpha_1$$

$$L_{AC1} = \frac{l_1}{\cos \alpha_1} + m_1 \sin \alpha_1 - l_1 \sin \alpha_1 \tan \alpha_1$$

$$h_{AB1} = h + m_z - K_A m_z - m_1$$

其中:  $K_A$  为直接顶碎胀系数;  $l_1$  为砂质泥岩 1 第一悬空岩块  $A_4$  的长度,  $m$ ;  $m_1$  为砂质泥岩 1 的分层厚度,  $m$ ;  $\gamma_1$  为砂质泥岩 1 的重力密度,  $kN/m^3$ ;  $\alpha_1$  为砂质泥岩 1 第一悬空岩块  $A_4$  的相对转角, ( $^\circ$ )。

$F_{Ay1}$  即为砂质泥岩 1 悬空岩块(岩块  $A_4 \sim A_6$ )对直接顶的作用力。由结构力学可知, 随着工作面推进, 该三铰拱结构将达到极限跨度, 并发生垮落, 其垮落条件为: 岩块  $A_3$  与  $A_4$  之间的摩擦力小于岩块  $A_4$  在  $A$  点的垂直分力, 即

$$F_{Ay1} > F_{Ax1} \cdot f_1$$

式中  $f_1$  为砂质泥岩 1 各岩块间的摩擦因数。

因此, 该三铰拱结构发生垮落的条件为:

a) 当  $h_{AC1} - f_1 L_{AC1} > 0$  时

$$L_{AB1} > \frac{L_{AC1} \sqrt{f_1^2 L_{AC1}^2 - 4 h_{AB1} (h_{AC1} - f_1 L_{AC1})} - f_1 L_{AC1}^2}{2(h_{AC1} - f_1 L_{AC1})} \quad (7)$$

b) 当  $h_{AC1} - f_1 L_{AC1} < 0$  时

$$L_{AB1} < \frac{L_{AC1} \sqrt{f_1^2 L_{AC1}^2 - 4 h_{AB1} (h_{AC1} - f_1 L_{AC1})} - f_1 L_{AC1}^2}{2(f_1 L_{AC1} - h_{AC1})} \quad (8)$$

另外, 受岩石强度的限制, 该结构在接触点  $A$  处还易发生由于岩块相互挤压破碎造成的结构失稳现象, 其条件为

$$F_{Ax1} > \alpha \eta \sigma_c$$

式中  $\alpha$ ,  $\eta$  的含义及取值参见文献[6]。即

$$L_{AB1} > \frac{L_{AC1}^2 + 2\xi h_{AC1} + \sqrt{(L_{AC1}^2 + 2\xi h_{AC1})^2 + 8\xi L_{AC1}^2 h_{AB1}}}{2L_{AC1}} \quad (9)$$

式中  $\xi = \alpha \eta \sigma_c / q$ 。

由于下部岩层暴露面积依次大于上部各岩层, 因此类基本顶各岩块所构成的不等高三铰拱结构将按砂质泥岩 1, 砂质泥岩 2, ..., 砂质泥岩  $n$  的顺序失稳, 即砂质泥岩 1 失稳前夕, 类基本顶对直接顶的作用力达到最大。此时, 类基本顶岩层通过直接顶对支架的作用力为

$$F_L = K_G \sum_{i=1}^n \frac{L_{ABi}^2 h_{ACi} + L_{ACi}^2 h_{ABi}}{2(L_{ABi} h_{ACi} + L_{ACi} h_{ABi})} \gamma_i m_i \quad (10)$$

式中:  $i$  为第  $i$  层砂质泥岩;  $K_G$  为载荷传递系数, 其意义及取值见文献[10]。

综上所述, 此阶段支架所需支护强度为

$$p = \frac{m_z \gamma_z (L_s + L_k)^2}{L_k^2} + \frac{F_L}{L_k} \quad (11)$$

阶段 III: 基本顶初次断裂时, 为计算基本顶断裂下沉对支架的冲击载荷, 进行如下假设: ① 基本顶的变形忽略不计, 从开始冲击到冲击产生最大位移时, 基本顶与类基本顶一起运动, 且不发生回弹; ② 冲击载荷引起的应力和变形在冲击瞬间遍及类基本顶; ③ 冲击过程中没有其他形式的能量转换, 机械能守恒定律仍成立。计算模型如图 8。

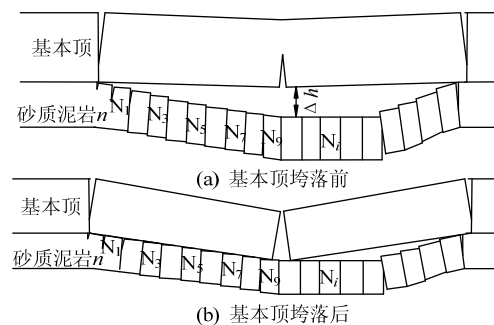


图 8 基本顶初次断裂时冲击载荷计算

Fig.8 The impact load calculation of first break on main roof

基本顶垮落前和垮落完成后, 其速度均为零, 即  $T_1=T_2=0$ ; 以基本顶垮落前, 即图 9a 位置为势能零点, 则  $V_1=0$ ; 基本顶垮落后, 即图 9b 位置时, 基本顶、类基本顶的势能分别为  $V_{21}$ ,  $V_{22}$ 。

由于基本顶的垮落, 类基本顶最大下沉量增大  $\Delta h_d$ , 设冲击载荷为  $F_d$ , 将类基本顶视为线性弹簧, 刚度系数为  $k$ , 则

$$V_{21} = -\frac{F_s(\Delta h + \Delta h_d)}{2}, \quad V_{22} = \frac{1}{8}k\Delta h_d^2$$

基本顶作为动载时有  $F_d = k\Delta h_d$ , 作为静载时有  $F_s = k\Delta h_s$ 。

根据系统的机械能守恒定律, 得

$$F_d = F_s \times \frac{\Delta h_d}{\Delta h_s} = \frac{m_E \gamma_E L_0}{2} \left( 2 + \sqrt{4 + \frac{4\Delta h}{\Delta h_s}} \right) \quad (12)$$

式中:  $\Delta h$  为基本顶来压前夕与下部砂质泥岩  $n$  的最大离层量,  $m$ ;  $\Delta h_s$  为基本顶初次来压前后采空区矸石压实量,  $m$ 。

假设基本顶冲击载荷作用在砂质泥岩  $n$  不等高三铰拱结构的拱顶位置, 则其传递到直接顶上的力  $F_E$  按下式计算:

$$F_E = \frac{L_{ABn} - L_{ACn}}{L_{ABn}h_{ACn} + L_{ACn}h_{ABn}} K_G h_{ACn} F_d \quad (13)$$

基本顶初次来压期间, 支架所需支护强度为

$$p = \frac{m_z \gamma_z (L_s + L_k)^2}{L_k^2} + \frac{F_L}{L_k} + \frac{F_E}{L_k} \quad (14)$$

## 2) 周期来压阶段。

基本顶周期断裂期间, 顶板运动第 I 阶段, 工作面只需承担控顶区内直接顶重量及其悬顶重量, 支架支护强度按式(2)计算; 顶板运动第 II 阶段, 支架应承担工作面控顶区内全部直接顶的重量、直接顶悬顶重量和类基本顶的部分重量, 与初次来压时基本一致, 支架支护强度按式(11)计算; 顶板运动第 III 阶段, 为计算基本顶岩块失稳对下部类基本顶岩层的冲击载荷, 做如下近似假设: ① 本顶岩块失稳后自由下落直至冲击到类基本顶岩层上; ② 基本顶不等高三铰拱结构的两端位移为零。计算模型如图 9 所示。

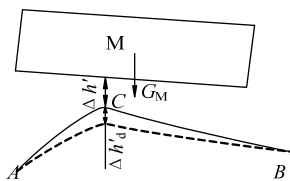


图9 基本顶周期断裂时冲击载荷计算  
Fig.9 The impact load calculation  
of periodic caving on basic roof

基本顶岩块  $M$  运动前及运动结束后, 其速度均为零, 即动能为零。取岩块  $M$  运动前位置为势能零点, 则运动结束后, 岩块  $M$  和不等高三铰拱结构的势能分别为

$$V'_{21} = -G_M(\Delta h' + \Delta h'_d), \quad V'_{22} = \frac{1}{2}k\Delta h'_d{}^2$$

在岩块  $M$  静载作用下,  $G_M = k\Delta h'_s$ 。

由系统的机械能守恒定律, 得

$$F'_d = G_M \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2\Delta h'}{\Delta h'_s}} \right) \quad (15)$$

式中:  $\Delta h'$  为基本顶周期来压前夕悬空岩块  $M$  与类基本顶岩层拱顶位置的离层量,  $m$ ;  $\Delta h'_s$  为基本顶周期来压前后砂质泥岩  $n$  的下沉量,  $m$ 。

基本顶对类基本顶的冲击载荷近似作用于  $C$  点, 其传递到工作面支架上的作用力

$$F'_E = \frac{L_{ABn} - L_{ACn}}{L_{ABn}h_{ACn} + L_{ACn}h_{ABn}} K_G h_{ACn} F'_d \quad (16)$$

此阶段支架所需支护强度计算公式为

$$p = \frac{m_z \gamma_z (L_s + L_k)^2}{L_k^2} + \frac{F_L}{L_k} + \frac{F'_E}{L_k} \quad (17)$$

## 3 现场验证

以高家梁煤矿 20107 工作面地质条件为例, 根据现场探测, 该工作面直接顶砂质泥岩平均重力密度为  $21.5 \text{ kN/m}^3$ , 垮落后碎胀系数为 1.1; 类基本顶砂质泥岩平均重力密度为  $23.1 \text{ kN/m}^3$ , 平均分层厚度为  $2.0 \text{ m}$ , 断裂岩块平均长度  $2.5 \text{ m}$ , 岩块间摩擦因数  $f$  取 0.35; 基本顶粉砂岩平均重力密度为  $24.8 \text{ kN/m}^3$ , 平均分层厚度为  $5.2 \text{ m}$ , 初次断裂步距为  $36 \text{ m}$ , 平均周期断裂步距为  $17.33 \text{ m}$ ; 工作面控顶距  $4.6 \sim 5.5 \text{ m}$ , 支架后方悬顶长度最大约为  $1.6 \text{ m}$ , 基本顶来压前夕控顶区内顶板最大下沉量  $0.43 \text{ m}$ , 来压后控顶区内顶板最大下沉量  $0.78 \text{ m}$ , 根据岩层沉降量反推获得第一悬空岩块倾角约为  $17.5^\circ$ 。

初次来压时, 在顶板运动的第 I 阶段, 直接顶(厚度为  $33.7 \text{ m}$  的砂质泥岩)垮落, 由式(1)得工作面最小支护强度为  $0.289 \text{ MPa}$ , 支架工作阻力为  $2421.7 \text{ kN}$ ; 在顶板运动的第 II 阶段, 由式(2)~(11)得, 类基本顶(直接顶上方厚为  $7.3 \text{ m}$  的砂质泥岩)所构成不等高三铰拱的最大跨度为  $9.3 \text{ m}$ , 类基本顶岩层对支架的最大作用力为  $1182.4 \text{ kN/m}$ , 此时工作面最小支护强度为  $0.523 \text{ MPa}$ , 支架工作阻力为  $5430 \text{ kN}$ ; 在顶板运动的第 III 阶段, 由式(12)~(14)得, 基本顶(厚度  $20.8 \text{ m}$  的细粒砂岩、粉砂岩互层)来压

时对类基本顶的冲击载荷为 1 1160 kN/m, 而通过类基本顶施加到工作面的作用力仅为 2 023 kN/m, 减小了 81.9%, 此时工作面最小支护强度为 0.963 MPa, 支架工作阻力为 9 128 kN。

周期来压时, 在顶板运动的第 I 阶段, 工作面支护强度按式(2)计算, 此时支架工作阻力为 2 169.5 kN; 在顶板运动的第 II 阶段, 支架工作阻力与初次来压时相同, 为 5 430 kN; 在顶板运动的第 III 阶段, 由式(15)~(17)得, 基本顶来压时对类基本顶的冲击载荷为 6 622 kN/m, 通过类基本顶施加到工作面的作用力为 1 200 kN/m, 同样减小了 81.9%, 此时工作面最小支护强度为 0.784 MPa, 支架工作阻力为 7 615.5 kN。

对高家梁煤矿 20107、金阳煤矿 20305 等工作面支架工作阻力进行计算, 并与实测值对比, 见表 1。可知, 周期来压时, 支架工作阻力理论计算与实测基本一致, 误差在允许的范围内。将理论计算结果与现场实测对比可知, 图 1 所示支架工作阻力缓慢增高段为类基本顶“岩块挤压岩梁”结构形成阶段, 此阶段支架只需承担直接顶和部分类基本顶岩层的重量; 工作阻力显著增高段为基本顶来压阶段, 此阶段基本顶断裂, 造成支架工作阻力显著增高, 但由于“岩块挤压岩梁”(类基本顶)可起到减缓上覆岩层对支架冲击作用, 因此此时冲击动载系数较小, 仅为 1.15~1.5。

表 1 工作面支架工作阻力实测值与理论值对比

Table 1 Parameters for different rocks tested

矿井/工作面	周期来压时支架工作阻力/kN		
	实测平均值	理论值	误差/%
高家梁煤矿/20107 工作面	7 821	7 415.5	-5.2
金阳煤矿/20305 工作面	7 852	8 432	7.39
榆家梁煤矿/2106 工作面	7 625	8 059	5.69
哈拉沟煤矿/2315 工作面	7 331	6 826	-6.89

## 4 结 论

1) 对于鄂尔多斯盆地浅埋煤层, 煤系岩层成岩时期较晚, 大部分为强度较低、胶结性较差的砂质泥岩, 通过工作面支架支护阻力监测, 结果表明: 随着工作面推进, 在工作面来压期间液压支架循环末阻力曲线大致可分为 3 个阶段, 即工作阻力初次升高段、工作阻力缓慢升高段和显著升高段。

2) 研究发现浅埋煤层弱胶结顶板中存在着由若干小断块岩块挤压构成的“岩块挤压岩梁”, 这部分岩层可称为“类基本顶”; 其不仅能够传递水

平力, 而且可起到减缓上覆岩层对支架冲击作用。建立鄂尔多斯盆地浅埋煤层工作面弱胶结顶板破断结构模型, 将其顶板破断运动过程分为 3 个阶段, 即阶段 I: 直接顶垮落, 上方砂质泥岩断裂、挤压、离层; 阶段 II: 类基本顶“岩块挤压岩梁”结构形成阶段; 阶段 III: 基本顶冲击沉降阶段。

3) “类基本顶”中各岩块间水平力对“岩块挤压岩梁”结构的稳定性具有重要作用, 其大小由各岩块的容重、尺寸、倾角等决定; 水平力越大, 结构的稳定性越好, 所能承受的基本顶压力越大, 但传递至支架上的载荷比例减小, 即基本顶压力相同时, 传递到支架上的载荷减小。

4) 推导了浅埋煤层弱胶结顶板不同运动阶段工作面支护强度计算公式。实例分析表明, 理论计算结果与实测基本一致, 验证了本文浅埋煤层工作面弱胶结顶板破断结构模型的正确性。

## 参考文献:

- [1] 晋香兰, 张慧. 鄂尔多斯盆地东北部侏罗纪煤系烃源岩的分布特征[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(1): 15-19.  
JIN Xianglan, ZHANG Hui. Distributing features of Jurassic coal measures hydrocarbon source rock in north-eastern Ordos basin[J]. Journal of Coal Geology of China, 2010, 22(1): 15-19.
- [2] 王连国, 王占盛, 黄继辉, 等. 薄基岩厚风积沙浅埋煤层导水裂隙带高度预计[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(5): 607-612.  
WANG Lianguo, WANG Zhansheng, HUANG Jihui, et al. Prediction on the height of water-flowing fractured zone for shallow seam covered with thin bedrock and thick windblown sands[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(5): 607-612.
- [3] 范钢伟, 张东升, 马立强. 神东矿区浅埋煤层开采覆岩移动与裂隙分布特征[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(2): 196-201.  
FAN Gangwei, ZHANG Dongsheng, MA Liqiang. Fracture distribution induced by longwall mining of the shallow coal seam in the Shendong coalfield[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(2): 196-201.
- [4] 李国华, 任艳芳, 徐天发, 等. 厚松散层浅埋煤层工作面矿压显现规律研究[J]. 煤炭工程, 2013(1): 76-78.  
LI Guohua, REN Yanfang, XU Tianfa, et al. Study on mine strata pressure behavior law of coal mining face in shallow depth seam and with thick and loose overburden strata[J]. Journal of Coal Engineering, 2013(1): 76-78.

(下转第 579 页)