

下分层综放开采矿山压力控制

张顶立

(中国矿业大学采矿系 徐州 221008)

摘要 在大量现场实测与理论研究的基础上,建立了下分层综放开采的覆岩结构模型,并对大、小结构的稳定性及其对矿压显现的影响进行了分析。深入分析了层间顶煤的破碎特点,指出层间顶煤的破碎效果是多因素综合作用的结果,而在不同的开采条件下将具有不同的放顶煤效果。所得结论已在三河尖矿下分层综放开采的矿山压力控制实践中得到了应用,并取得了较好的效果。

关键词 下分层综放开采,岩层结构,层间顶煤,再断裂

1 引言

下分层综放开采是坚硬顶板下和高瓦斯厚煤层开采的有效途径,其实质就是首先采用倾斜分层方法采出顶分层,然后沿煤层底板布置工作面进行综放开采。下分层综放开采的岩层活动特点主要表现在:(1)预采顶分层使顶板活动及矿压显现缓和,降低了对顶煤的破坏作用;(2)一次采出厚度增加且为二次采动,使上覆岩层结构形态发生了变化;(3)再生顶板的参与,改变了支架与围岩关系。由此,国内外学者都是基于上述问题进行研究的。

前苏联学者提出了确定层间顶煤稳定性厚度的计算公式^[1]。南斯拉夫学者 R. A hcan 指出,当顶板为难冒落的岩石时,需预采顶分层后才可能应用放顶煤开采,而对顶板坚硬且顶煤也较硬的条件则不宜采用综放开采^[2]。近年来,我国的鹤壁六矿、大同煤峪口矿、兖州鲍店矿和徐州三河尖矿先后试验了下分层综放开采,并进行了矿压实测研究,取得了一些有益的认识^[3~5]。

矿山压力控制作为下分层综放开采的技术难题之一,国内外尚缺乏系统深入的研究。为此,本文在大量实测资料和实验室研究的基础上,建立了下分层综放开采的覆岩结构模型,由此可为下分层综放开采的矿压控制和支架选型设计提供依据,对综放技术的推广应用具有指导意义。

2 岩层活动特点及力学模型

2.1 岩层活动特点

下分层综放开采时顶煤上方即为松散的直接顶岩石,可随顶煤的放出及时冒落。但由

1996年11月5日收到初稿,1997年3月20日收到修改稿。

于采出厚度的增加,顶分层开采时的直接顶垮落后不能充满采空区,使冒落继续向上发展。实测兖州鲍店矿1303下分层综放面的冒高达15.41 m,为煤层采厚的2.5倍;徐州三河尖矿7121下分层综放面冒高达15 m,为煤层采厚的2.3倍。由此可见,直接顶冒高较倾斜分层的中、下分层开采明显增大,可达煤层采出厚度的2.0~2.5倍。

下分层综放开采的顶板岩层活动并非顶板的断裂和回转,而是已断裂岩层的失稳和再断裂,并表现为顶板岩层的重新排列。此即为下分层综放开采岩层活动的基本特征。

2.2 岩层结构特点和形式

根据大量模拟实验和实测结果,不规则垮落带的高度可达煤层采出厚度的1.0~1.2倍。顶板岩层的再断裂和再失稳使顶分层开采时的部分下位老顶转化为直接顶,结果是在更高的层位形成老顶稳定结构。由于上位直接顶是由老顶转化而来,因而块度较大,多为短梁结构,形似岩桥状,故称之为“桥拱”结构。该结构与其上的砌体梁结构相结合,共同构成下分层综放开采覆岩结构的基本形式。

2.3 岩层结构力学模型

根据前述分析,可建立如图1所示的力学模型,此模型的特点为:

- (1) 模型体现了老顶大结构与直接顶小结构相结合的复合结构形式;
- (2) 老顶大结构为主结构,直接顶小结构为次结构,且小结构在此表现为“桥拱”结构;
- (3) 下位直接顶为松软的再生顶板,因而在煤壁前方已为刚度较低的“垫层”;
- (4) 老顶结构主要表现为再断裂和重新失稳,而“桥拱”结构则以转移失稳为主。

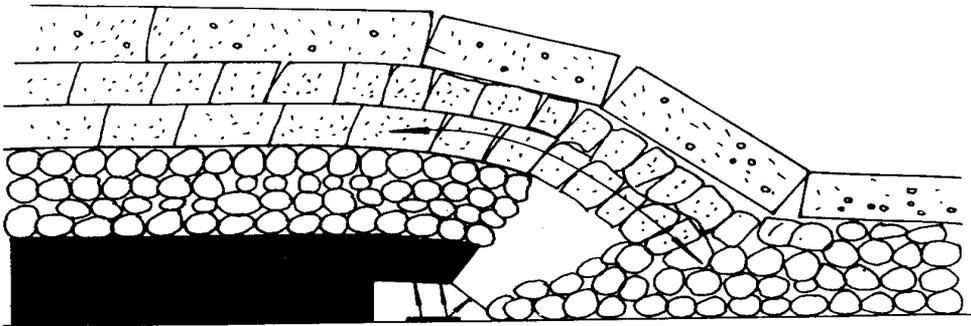


图1 下分层综放开采顶板结构模型

Fig 1 Roof structure model of sub-level caving in bottom slice

3 岩层结构稳定性分析

3.1 老顶结构的稳定性分析

当老顶岩梁承受的水平力较大,以及岩梁的载荷层较厚或承受局部冲击载荷时,都可能造成岩梁的再断裂。由此,老顶岩梁的再断裂可出现中部拉断和屈曲破坏两种形式,如图2所示。

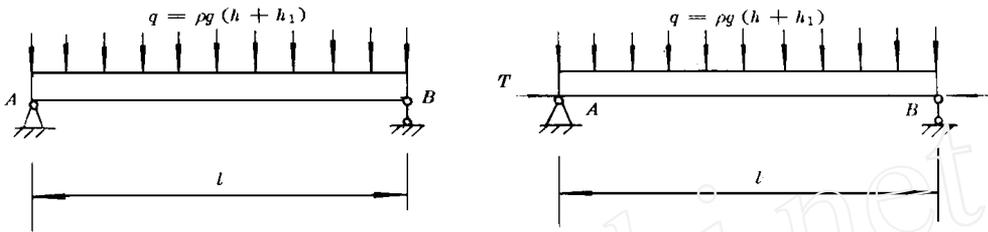


图2 老顶岩梁再断裂的力学模型

Fig. 2 Mechanical model of main roof refracture

由材料力学知识, 岩梁拉断破坏时应满足

$$\frac{M_0}{W_0} = \sigma_t \tag{1}$$

将 $M_0 = \frac{1}{8}ql^2$, $W_0 = \frac{1}{6}h^2$ 代入式(1), 并令 $i = h/l$, 则得

$$q = \frac{4}{3}\sigma_t i^2$$

而 $q = \gamma(h + h_1)$, 则

$$h + h_1 = \frac{4\sigma_t}{3\gamma} i^2 \tag{2}$$

当岩梁的各参数值满足式(2)时, 即出现顶板岩层的再断裂。图3为不同 σ_t 时, i 与 $h + h_1$ 的关系曲线。显然, 当岩梁较短且厚度较大, 即 i 值较大时, 岩梁一般不会发生再断裂; 而当岩梁厚度较小且跨度较大, 即 i 值较小时则易于发生再断裂。此外, 岩梁再断裂还应满足矸石反力为 $\frac{1}{2}\gamma(h + h_1)l$ 的条件。

岩梁承受的水平力达到一定限度后, 由此产生的弯曲变形将是一个恶性循环, 岩梁将无法达到新的平衡状态而导致破坏, 这就是顶板岩层的屈曲破坏。

由力学分析, 岩梁发生屈曲破坏的最小水平力为

$$T_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \tag{3}$$

将 $i = h/l$ 代入, 得

$$T_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{12} i^3 \tag{4}$$

由式(4)可见, 当 l 一定时, T_{cr} 随 i 的增大而迅速增大。因此当岩梁厚度较大时一般不易发生屈曲破坏, 而当单独运动的岩梁跨度较大且厚度较小时易于破坏, 从而造成结构失稳。

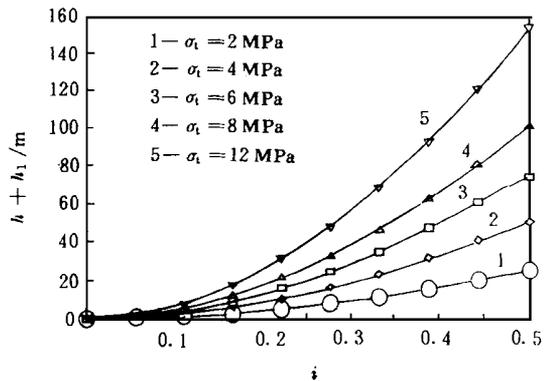


图3 岩梁受拉破坏

Fig. 3 Tension failure of rock beam

3 2 直接顶结构的稳定性分析

上位直接顶中“桥拱”结构的稳定性与其所形成的位置、块体结构产状和块度大小以及支架状况和老顶结构的稳定性有关。随着后方矸石的不断压实及老顶的回转，“桥拱”结构中的某些块体可能出现脱落、滑移和失稳，进而引起连锁反应，造成整个结构的失稳。

3 2 1 结构的失稳形式及关键块判别

通常“桥拱”结构的失稳应首先发生于最下组的“桥拱”，并且在下方临空的位置。在此应用块体理论对可能产生的滑落失稳进行分析^[6]。从结构失稳的角度出发，下组桥拱中常见的块体结构主要有楔形块体和平行块体两种形式。

块体受力状态如图4所示，则平衡方程为

$$\vec{r} + N\vec{V} - (T + F)\vec{S} = 0 \tag{5}$$

即
$$FS = \vec{r} - N\vec{V} - T\vec{S} \tag{6}$$

式中: \vec{r} ——作用在块体上的合外力;

T ——块体与平面的摩擦力, $T = N \tan \varphi$;

N ——作用在滑动面上的法向反力;

F ——虚设的滑动力;

\vec{V} ——指向块体内部的单位法向矢量;

\vec{S} ——块体运动方向单位矢量。

在平衡方程中, 若 $F > 0$, 即静滑动力为正值, 则该可动块体为关键块体; 若 $F < 0$, 说明滑动面上的切向下滑力小于摩擦阻力, 块体处于平衡。

由于块体结构面的产状不同, 桥拱结构可能出现块体脱离运动和沿双面滑动。根据力学平衡的分析, 块体产生上述两种运动时均为关键块体。

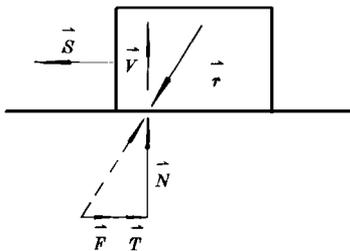


图4 块体受力状态

Fig 4 Force state of rock block

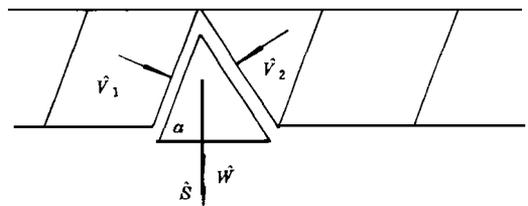


图5 块体脱离岩体运动

Fig 5 Block movement from rock mass

3 2 2 关键块体的平衡分析

(1) 楔形关键块体的平衡

由图5所示楔形关键块体的受力状况, 块体保持稳定的力学平衡条件为

$$N(V_1 + V_2) - T(S_1 + S_2) + \vec{r} = 0 \tag{7}$$

此式和下面公式中: $N_1 = N_2 = N$;

$$T_1 = T_2 = T = N \tan \varphi$$

$$\begin{aligned} \hat{V}_1 &= (\sin\alpha, \cos\alpha); \\ \hat{V}_2 &= (-\sin\alpha, \cos\alpha); \\ \hat{S}_1 &= (-\cos\alpha, \sin\alpha); \\ \hat{S}_2 &= (\cos\alpha, \sin\alpha); \\ \bar{r} &= (0, W). \end{aligned}$$

则式(7)可写成

$$2N \cos\alpha - 2N \tan\varphi \sin\alpha + W = 0 \quad (8)$$

$$\text{即 } N = -\frac{W \cos\varphi}{2 \cos(\alpha + \varphi)} \quad (9)$$

由此可见, 欲使块体保持平衡, 则桥拱所提供的水平力为

$$\begin{aligned} P_H &= N \sin\alpha + T \cos\alpha \\ &= N (\sin\alpha + \cos\alpha \tan\varphi) \end{aligned}$$

将式(9)代入上式并整理, 得

$$\frac{P_H}{W} = -\frac{1}{2} \tan(\alpha + \varphi) \quad (10)$$

由式(10)可绘出图6所示水平力与 α 的关系曲线。显然, 当 $\alpha + \varphi > 90^\circ$ 时, P_H 随 α 的增大而迅速减小, 即当 α 增大时结构所提供的水平力相对减小。而当 $\alpha > 90^\circ$ 时即变为平行滑动块体。

(2) 双面滑动平行块体的平衡

当结构中的块体沿结构面产生双面滑动时, 由图7所示的受力分析可得如下平衡方程:

$$(N_1 - N_2)\hat{V} - (T_1 + T_2)\hat{S} + \bar{r} = 0 \quad (11)$$

由此可求出 N_1 和 N_2 。同样地, 块体保持平衡时结构所提供的水平力为

$$P_H = N \sin\alpha - T \cos\alpha$$

即

$$P_H = \frac{\sin(\alpha + \varphi) \sin(\alpha - \varphi)}{\sin 2\varphi} W$$

可写成

$$\frac{P_H}{W} = \frac{\sin(\alpha + \varphi) \sin(\alpha - \varphi)}{\sin 2\varphi} \quad (12)$$

由式(12)可绘出 P_H/W 与 α 的关系曲线如图8所示。由图可见, 所需水平力 P_H 随 α 的增大而增大, 显然当 α 较小时结构易于实现平衡。

以上分析得出了维持两类结构块体平衡的水平力 P_H , 它们都与断裂面的倾角 α 有关, 并且其影响的效果是相反的。要维持楔形块体的平衡相当困难, 而平行块体的稳定则相对容易实现, 并且 α 愈小愈有利。事实上, 由于断裂岩块的回转下沉, 其 α 值也处于变化之中, 它随块体的回转而变小, 即随结构块体的回转下沉, 其稳定性提高。因此来压前夕应注意提高支架初撑力并控制放煤量(步距等), 以使桥拱结构在采场上方保持稳定。

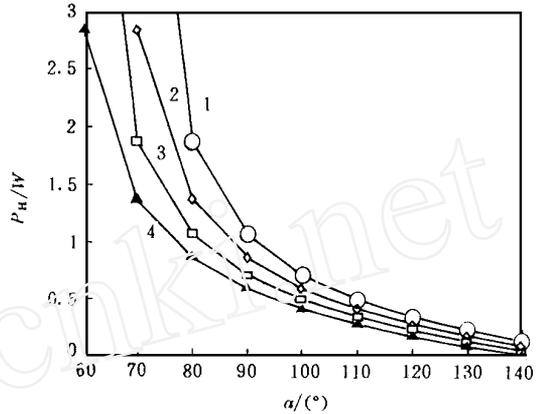


图6 楔形块体 P_H/W 与 α 的关系曲线

Fig 6 Relation of P_H/W and α when the block is separated from rock mass

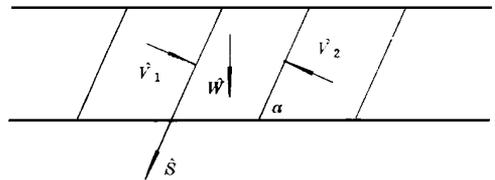
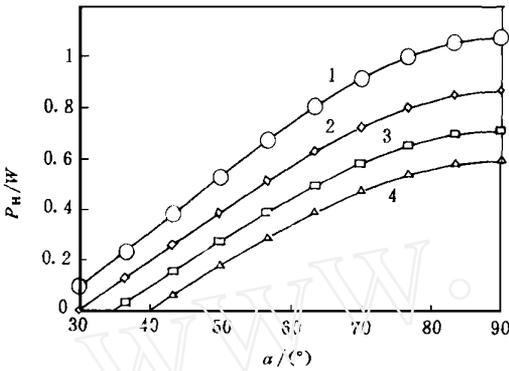


图7 块体沿双面滑动

Fig 7 Block sliding along doubled faces

以上是对桥拱结构自身的平衡条件进行分析的，外部荷载及支撑基础反力均可通过关键块体的重力 W 来表征。研究发现，桥拱结构的失稳来压使老顶结构的受力条件发生了变化，即可诱发老顶来压；老顶结构的失稳和来压可促使桥拱结构的失稳，此即为直接顶来压与老顶来压的相互作用关系。当桥拱结构能够取得平衡时，则采场不出现直接顶来压，而是随老顶的失稳而失稳，共同形成老顶来压。



1— $\varphi=25^\circ$ 2— $\varphi=30^\circ$
3— $\varphi=35^\circ$ 4— $\varphi=40^\circ$

图8 双面滑动时 P_H/W 随 α 的变化关系
Fig 8 Relation of P_H/W and α when sliding along two faces

4 矿山压力显现及其控制

由下分层综放开采岩层结构的稳定性分析可知，其矿压显现具有静载荷增加、动载荷减小以及来压步距减小等特点，并且通常矿压显现不明显。

4.1 层间顶煤的破碎特点分析

4.1.1 顶分层开采的预破煤作用

顶分层开采使上位0.5~1.0m范围内的底煤遭到破坏，同时消除了粘顶的影响，因而对顶煤的破碎和冒落是有利的。

4.1.2 支承压力的破煤作用减弱

下分层综放开采的支承压力较整层综放开采减小10%~20%^[5]，降低了对顶煤的破碎作用。如大同煤峪口矿和兖州鲍店矿下分层综放开采时常出现大块煤堵口不能放出，需经常性地施行爆破，这严重影响了生产和顶煤回收率。

4.1.3 再生顶板(垫层)刚度的影响

再生顶板刚度的降低，一方面不能将老顶的变形有效地传至顶煤，同时也会影响到支承压力的分布，进而影响到顶煤的破碎。此即为下分层综放开采破煤效果降低的主要原因。

4.1.4 支架的辅助破煤作用降低

下分层综放开采时支架的增阻量及活柱缩量都明显减小，因而对顶煤的辅助破坏作用减弱。这也是下分层综放开采块度增大的原因之一。

4.1.5 顶板活动的破煤作用

顶板活动的破煤作用是以支承压力的作用为基础的，由此对于不同的煤层条件，顶板活动将具有不同的破煤效果：(1)煤层强度较大时，支承压力的预破煤作用降低后使煤壁及支架上方的顶煤仍未遭到足够的破坏，这时下分层综放将较整层综放困难，如鲍店矿和煤峪口矿；(2)煤层中硬以下时，降低后的支承压力仍可使顶煤在煤壁处就已相当破碎，而松散顶板的及时来压又加剧了对顶煤的再破碎作用，这时将会出现下分层综放开采顶煤更加破碎，如三河尖矿和鹤壁六矿。

由以上分析可知，预采顶分层后放顶煤开采时岩层活动及矿压显现具有显著特点，其

中有些对顶煤破碎是不利的,有些则是有利的,而顶煤最终的放出效果则取决于各因素的综合作用。

4 2 下分层综放开采的矿压控制实践

在理论研究的基础上,针对三河尖矿东一采区预采顶分层且没有铺网的条件下,进行了下分层综放开采的实践。

4 2 1 支架设计和选型

通过对岩层结构的分析,确定了需控岩层范围及支架的工作阻力和初撑力,并选择了ZFSB 3600-16/28(B)型液压支架,目前已在3个综放面使用,支架运行状况良好。

4 2 2 首末采放煤及回收断层煤柱

由于初采阶段再生顶板活动及时,因而可及早放煤,减少了初采损失;分别将工作面切眼和停采线布置在实体煤柱中,回收了顶分层开采留设的断层煤柱。同时依据顶板活动及矿压显现特点,使工作面收作空间处于大、小结构都稳定的位置,从而提高了未采期间的顶煤回收率。

4 2 3 顶板来压的预测预报

由岩层结构稳定性的分析,正常推进阶段桥拱结构可取得平衡,由此对顶板来压的强度和步距进行了预测预报,取得了满意的效果。实测工作面仅出现直接顶初次来压(岩梁再失稳),而无直接顶周期来压;老顶周期来压步距为13.5 m,相当于整层综放开采的50%。

4 2 4 层间顶煤冒放性的预测

由分析可预测三河尖矿层间顶煤具有较好的冒放性,并且块度将较整层综放开采减小。而开采实践与此是吻合的,目前在采取任何特殊处理措施条件下,成功地开采了3个下分层综放面,获直接经济效益5 000万元以上,这在国内外尚属首例。

5 结论

(1) 下分层综放开采直接顶的冒落高度成倍增加,可达煤层采出厚度的2.0~2.5倍;顶板活动的主要特点是岩梁的再断裂和再失稳,并表现为已断裂顶板岩层的重新排列。

(2) 上位直接顶可形成桥拱结构,此与其上的砌体梁结构相结合,共同构成下分层综放开采岩层结构的基本形式。

(3) 老顶岩梁失稳主要表现为再断裂和重新失稳,桥拱结构失稳形成主要有脱离岩体运动和沿双面滑动。这两种结构相互作用,从而造成复杂的矿压显现。

(4) 层间顶煤的破碎是多因素综合作用的结果,因而不同的开采条件下将具有不同的放顶煤效果。

(5) 本文的主要研究成果已成功地应用于三河尖矿的实践,取得了满意的效果。

参 考 文 献

- 1 格罗莫夫 B 等著 缓倾斜厚煤层开采矿山压力控制 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990, 60~ 73
- 2 Ahcan R. Innovative methods of mechanised thick coal seam mining in Yugoslav collieries based on the estimation of exploitation conditions Journal of Mines, Metal and Fuel, 1989, (3): 247~ 254
- 3 张世凯 特厚煤层倾斜分层铺网水射流落顶煤 煤炭科学技术, 1989, (2): 19~ 22
- 4 张开智, 刘先贵, 金泰 网下综采放顶煤开采技术的研究 煤炭学报, 1995, 20(6): 595~ 600
- 5 张顶立 综放工作面煤岩稳定性研究及控制[博士学位论文] 徐州: 中国矿业大学, 1995, 53~ 68
- 6 刘锦华, 吕祖珩 块体理论在工程岩体稳定分析中的应用 北京: 水利电力出版社, 1988, 60~ 68
- 7 曲天智, 张顶立 下分层综放工作面矿压控制特点 矿山压力与顶板管理, 1996, (4): 2~ 4

GROUND CONTROL IN FULLY MECHANIZED SUB-LEVEL CAVING IN BOTTOM SLICE

Zhang Dingli

(China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008)

Abstract Based on the field measurement and theoretical analysis, the model of strata structure over the coal face is established with fully mechanized sub-level caving in bottom slice. The stability of main and immediate roof structure and its influence on strata behaviour are analysed. The failure features of roof coal between top and bottom slice are thoroughly studied. It is pointed out that breaking of the roof coal is a combined effect of many influence factors, while different caving effects will be got under different mining conditions. The research results have been applied to ground control practice for sub-level caving in bottom slice at Sanhejian coal mine, and an obvious effect has been made in practice.

Key words sub-level caving in bottom slice, strata structure, roof coal between top and bottom slice, refracture