

浅埋煤层长壁开采顶板岩层灾害控制研究

杨治林

(西安科技大学 理学院, 西安 710054)

摘 要: 根据浅埋煤层顶板岩层的赋存特点和长壁开采时基岩老顶的断裂下沉特征, 应用初始后屈曲理论和突变理论探讨了初次来压期间基岩老顶的灾害机制和灾害控制, 补充了基岩老顶破断后控制岩块滑落失稳的充分条件和岩块触矸前后台阶下沉的判据, 确定了台阶下沉量, 给出了控制台阶下沉和维持顶板稳定的支护力计算公式, 并以神东矿区大柳塔 1203 工作面为例给出了工程实例。研究发现, 顶板破断后岩块处于不平衡状态, 台阶下沉的机制是结构的滑落失稳; 岩块触矸前后的台阶下沉分别与断裂下沉和开采高度之间存在着确定的关系; 顶板强烈来压主要是由结构滑落失稳造成的, 控制台阶下沉的实质是控制岩块沿煤壁的滑落失稳。研究结果表明, 综合应用初始后屈曲理论和突变理论, 可根据顶板结构的赋存状况和结构特征, 确定基岩老顶触矸前是否会出现全厚度切落; 根据工作面的开采高度和采空区有效充填厚度等, 可确定基岩老顶触矸后岩块的运动形式; 根据顶板的破断步距、断裂下沉量和岩块摩擦因数等, 可确定岩块触矸前后控制台阶下沉的支护力。

关 键 词: 浅埋煤层; 长壁开采; 基岩老顶; 滑落失稳; 台阶下沉; 岩层控制

中图分类号: TD 325

文献标识码: A

Study of controlling catastrophe for roof strata in shallow seam longwall mining

YANG Zhi-lin

(College of Sciences, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract : In accordance with the occurrence behavior of roof strata and the breaking convergence characteristics of main roof in shallow seam longwall mining, this paper studied the catastrophe mechanism and the catastrophe control of main roof during the first weighting by using the initial post-buckling theory and the catastrophe theory, added the sufficient conditions of instability due to sliding for controlling rock blocks after the main roof breaking, perfected the criteria of step convergence of rock blocks for contacting and not contacting with the waste rock from fallen roof, determined the step convergence values, derived the formulae of support force for controlling the step convergence and ensuring the roof stability, and presented an application with the example of Daliuta 1203 face. It is pointed that the rock blocks are in a state of non-equilibrium after main roof breaking, the mechanism of the step convergence is instability due to sliding of structure; the step convergences before and after contacting with the waste rock from fallen roof have some determinate relations with the breaking convergence and the mining height respectively; the intense roof weighting is mainly caused by key roof block sliding; and controlling step convergence is essentially controlling sliding for rock blocks. The results also indicate that the synthetical application of initial post-buckling theory and catastrophe theory can determinate whether step convergence will take place before contacting with the waste rock from fallen roof in accordance with the occurrence state and structure characteristics of roof rock layer, can determinate the motion form after contacting with the waste rock from fallen roof according to mining height of working face and effective filled thickness, and can determinate the support force for controlling step convergences before and after contacting with the waste rock from fallen roof in accordance with the breaking span, the breaking convergence value and the friction coefficient.

Key words: shallow seam; longwall mining; main roof; intability due to sliding; step convergence; controlling rock layer

1 引 言

我国西北地区赋存有大量的浅埋煤层, 其地表

大多为厚松散沙土层或黄土层。神东矿区煤层赋存的典型特征是埋深浅, 基岩薄, 上覆较厚的第四纪松散沙层。浅埋煤层特殊的地质状况和长壁开采方

法, 决定了其矿压显现和采动损害的特殊性。矿井初期开采实践表明, 虽然煤层倾角近水平, 赋存稳定, 开采条件优越, 但长壁工作面普遍存在台阶下沉现象。矿压显现剧烈严重影响了开采的安全、产量和效益。矿压显现的主要表现是, 长壁工作面基岩老顶破断后呈明显的动态断裂下沉, 破断老顶普遍存在着全厚度切落。破断后的顶板结构很难形成自身稳定的结构, 由赋存状况决定的顶板结构还会出现严重的台阶下沉。采动损害的主要表现是, 台阶下沉引起了岩块沿煤壁贯通裂缝张开, 贯通裂缝形成了涌水和溃沙的通道, 造成工作面的涌水和溃沙灾害^[1-2]。

浅埋煤层特殊的地层赋存状况, 造成了采场工作面剧烈的矿压显现。基岩老顶和直接顶的赋存状况、岩体岩性及采场开采高度, 对工作面顶板结构的稳定性有着重要的影响。神东矿区目前及今后相当一段时期内, 各矿开采区域大部分集中于埋深在 100 m 以内的浅部。在埋深浅、基岩薄、上覆厚松散沙层的条件下, 现有普通长壁工作面顶板岩层控制的经验和理论, 不能很好地解释这种矿压现象及机制。我国西北地区大煤田的开发, 对浅埋煤层长壁开采采场顶板岩层控制提出了需解决的新课题。浅埋煤层特殊的赋存状况与顶板全厚切落机制, 老顶破断后岩块的台阶下沉与岩层控制, 长壁工作面开采高度与采场支护等关系有待深入研究^[3-4]。

2 基岩老顶的初始后屈曲

随着采场工作面推进, 基岩老顶在水平推力、上覆厚松散沙层传递来的载荷及自重的作用下断裂下沉, 如图 1 所示。已有的研究表明^[1-2], 基岩老顶破断后形成了铰接体系, 铰接体系的稳定性实质上是受缺陷影响而从分岔点退化出来的极值点稳定性。在这里, 顶板结构的缺陷是指上覆厚松散沙层传递来的载荷及其自重, 而缺陷在位能增量泛函中是由零阶余项 $\Pi_0(w)$ 来表示的。

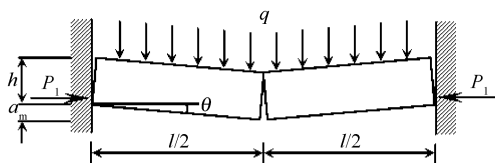


图1 基岩老顶破断后的结构形态
Fig.1 Structural for broken main roof

初始后屈曲理论指出^[5], 对于存在缺陷的结构, 只有在缺陷结构的位能增量泛函中增加关于缺陷的修正项, 才能确定其在后屈曲状态下平衡构形的稳

定性。因此, 为了探讨老顶破断后岩块的运动状态, 应将基岩老顶的位能增量泛函 $\Pi^1(w)$ 及其展开式中的每一项都视为与载荷因子有关的项, 并将存在缺陷的基岩老顶结构一般位置的破断下沉 w 表示为断裂下沉量 a_m 的简单函数^[2]:

$$F^1(a_m, \lambda) = (\lambda - \lambda_1)F_2^{\lambda'}(a_m) + \Pi_4^1(w, a_m) + \Pi_0(w, a_m) \quad (1)$$

式中: λ_1 为基岩老顶破断时的临界载荷因子, 而 $F_2^{\lambda'}(a_m) = \partial \Pi_2^1(w, \lambda) / \partial \lambda$ 。

由初始后屈曲理论知, 式 (1) 是结构分岔点附近位能增量泛函渐近展开式中的主要项。而由 $F_2^{\lambda'}(a_m)$ 和断裂下沉模态函数:

$$w = \frac{1}{2} \frac{a_m}{l} (1 - \cos 2\pi \xi) \quad (2)$$

可得出式 (1) 中的 $F_2^{\lambda'}(a_m) = -P_k \pi^2 (1 - \mu^2) a_m^2 / 2EI$, $\Pi_4^1(w, a_m) = \pi^6 a_m^4 / 8l^4$, $\Pi_0(w, a_m) = -l^2 q (1 - \mu^2) a_m / EI$ 。

根据式 (1), 并由 $\partial F^1(a_m, \lambda) / \partial a_m = 0$, 得基岩老顶的断裂下沉方程:

$$a_m^3 + D_1 a_m + D_2 = 0 \quad (3)$$

式中: $D_1 = 2l^4 (1 - \mu^2) (\lambda_1 P_k - P) / \pi^4 EI$, 为正则因子; 而 $D_2 = 2l^6 q (1 - \mu^2) / \pi^6 EI$, 为剖分因子。

3 基岩老顶破断后的性态

3.1 基岩老顶的断裂下沉量

根据式 (3) 的数学特点及其表达的采场初次来压时的矿压显现, 可给出以断裂下沉量 a_m 为状态量和以 D_1 、 D_2 为控制量的突变分岔集方程:

$$4D_1^3 + 27D_2^2 = 0 \quad (4)$$

老顶破断时, 顶板结构必须跨越分岔集左支, 因此, 由式 (3)、(4) 得基岩老顶的断裂下沉量:

$$a_m = 2(-D_1/3)^{1/2} \quad (5)$$

3.2 老顶破断后的水平推力

将 $D_1 = 2l^4 (1 - \mu^2) (\lambda_1 P_k - P) / \pi^4 EI$, $D_2 = 2l^6 q (1 - \mu^2) / \pi^6 EI$ 代入式 (4), 得基岩老顶破断后结构体系在断裂下沉过程中的水平推力为

$$P_1 = P - \lambda_1 P_k = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{q^2 EI}{1 - \mu^2}} \quad (6)$$

由式 (6) 可知, 水平推力不是由顶板破断状态下的平衡条件确定的, 而是由顶板岩层自身的边界条件、岩体材料、以及岩层的横截面几何形状状况决定的, 是一个确定的值。而由位移边界条件, 可得到载荷参数的最小值 $\lambda_1 = 1$ 。

3.3 老顶破断后的临界水平推力

根据文献[6], 并参照图 1, 岩块之间在端面的挤压长度是由顶板岩层的厚度及其破断后的断裂下沉量决定的, 即

$$a = \frac{1}{2}(h - a_m) \quad (7)$$

由文献[6-7], 顶板破断后岩块与岩块之间以及岩块与煤壁之间的水平推力作用点的位置, 取图 1 所示挤压面 $a/2$ 处。由式 (7) 和平面模型的平衡条件, 可得顶板破断后岩块在临界平衡状态下的水平推力:

$$P_0 = \frac{1}{4} \frac{ql^2}{h - a_m} \quad (8)$$

式 (8) 表明, 随着顶板下沉, 铰接体系在其下沉过程中维持平衡状态的水平推力在不断增加, 表现出基岩老顶破断后结构的非线性特性。

4 基岩老顶破断后的台阶下沉

4.1 老顶岩块触矸前的台阶下沉

由平衡条件确定的临界水平推力与由赋存状况决定的水平推力的比较, 由图 1, 当 $P_1 > P_0$, 且老顶岩块满足沿煤壁滑落条件:

$$P_0 \tan \varphi < ql/2 \quad (9)$$

则岩块将产生逆向回转, 老顶岩块沿工作面煤壁切落而出现台阶下沉。因此, 当 $P_1 > P_0$, 且满足式 (9), 为基岩老顶破断后岩块触矸前产生台阶下沉的判据。在式 (9) 中, $\tan \varphi$ 为岩块间的摩擦因数, 根据实测, 神东矿区顶板岩层的摩擦角在 $32^\circ \sim 41^\circ$, 平均值为 37° 。

随着老顶岩块沿煤壁切落, 采场工作面单一岩块出现全厚切落式台阶下沉。由图 2, 岩块的台阶下沉量为

$$\Delta = \sin \theta l/2 = a_m \quad (10)$$

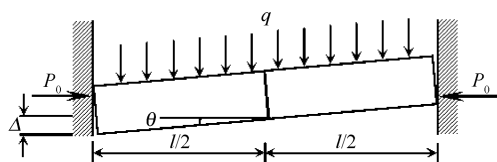


图 2 老顶岩块触矸前的台阶下沉

Fig.2 Roof step convergence before contacting with the waste rock

即岩块的全厚切落下沉量与关键层的断裂下沉量是相同的。

由现场实测和模拟试验可知^[1], 神东矿区浅埋

煤层采场工作面沿煤壁的贯通裂缝的倾角比较大, 一般约 80° , 有的接近 90° 。但采用式 (10) 在确定由回转形成的台阶下沉量时, 是以老顶岩块沿铅直煤壁切落而得出的, 且下沉岩块在由下铰结点转变为上铰结点的过程中还会出现下沉运动。因此, 台阶的实际下沉量应大于由式 (10) 给出的理论计算值。

4.2 老顶岩块触矸后的台阶下沉

根据文献[8], 并由图 1 知, 当满足下式:

$$a\eta\sigma_c \leq P_1 < P_0 \quad (11)$$

式中: η 为端角挤压因数, 取 $\eta = 0.4$ ^[1]; σ_c 为关键层的抗压强度, 且老顶岩块满足沿煤壁不出现滑落的条件:

$$P_0 \tan \varphi > ql/2 \quad (12)$$

随着岩块继续向下回转, 顶板的下沉量增加。当顶板的下沉量达到 $w = (h - a) \cos \theta_{\max}$ 时, 三塑性铰共线, 结构呈瞬变体系^[8]。结构呈瞬变体系时的最大回转角为

$$\tan \theta_{\max} = 2(h - a)/l = (h + a_m)/l \quad (13)$$

根据文献[9], 采场工作面允许老顶岩块的下沉量为

$$w_1 = m - [m_f + (K_p - 1) \sum h_i] \quad (14)$$

式中: m 为采高; m_f 为充填厚度; K_p 为直接顶碎胀系数; $\sum h_i$ 为直接顶厚度。显然, 当 $w_1 < w$ 时, 岩块触矸, 再考虑到岩块沿煤壁滑落的条件:

$$P_0 \tan \varphi < ql/4 \quad (15)$$

由于岩块触矸后受到向上的支承反力, 结构在水平推力组成的力偶作用下, 岩块在沿煤壁滑落的同时产生逆向回转, 顶板出现触矸后的台阶下沉, 如图 3 所示。因此, 当 $w_1 < w$, 且满足式 (15) 时, 为基岩老顶破断后岩块触矸后产生台阶下沉的判据。

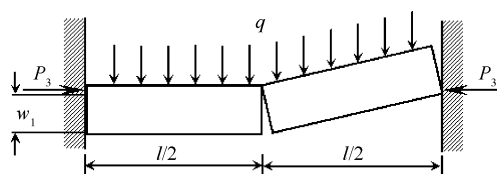


图 3 老顶岩块触矸后的台阶下沉

Fig.3 Roof step convergence after contacting with the waste rock

岩块触矸后的台阶下沉量为

$$\Delta = w_1 = m - [m_f + (K_p - 1) \sum h_i] \quad (16)$$

5 控制岩块滑落失稳的支护力

5.1 控制岩块触研前滑落失稳的支护力

基岩老顶破断后, 只有 $P_1 > P_0$, 且满足式 (9), 岩块才会出现台阶下沉。但 $P_1 > P_0$ 只是顶板破断后台阶下沉的必要条件, 式 (9) 才是岩块触研前台阶下沉的充分条件。因此, 控制岩块沿煤壁滑落, 并进而控制全厚切落台阶下沉的支护力 R_{01} 由式 (9) 确定, 即

$$P_0 \tan \varphi + R_{01} \geq \frac{ql}{2} \quad (17)$$

由式 (8) 和式 (17) 可得

$$R_{01} \geq \frac{ql}{2} \left(1 - \frac{l \tan \varphi}{2(h - a_m)} \right) \quad (18)$$

由式 (18) 可知, 岩块触研前控制台阶下沉所需的支护力, 是由工作面顶板结构的赋存状况、截面形状、岩体材料性质、岩块间的摩擦因数以及上覆厚松散沙层传递来的载荷等客观因素决定的, 顶板结构的稳定性由支架与顶板结构共同维持。

5.2 控制岩块触研后滑落失稳的支护力

当顶板的下沉量不断增大, 但采场工作面允许岩块的下沉量 $w_1 < w$ 时, 则在结构呈瞬变体系前出现岩块触研。由于 $w_1 < w$, 致岩块受到研石向上的支承反力只是岩块触研后台阶下沉的必要条件, 式 (15) 才是岩块触研后台阶下沉的充分条件。因此, 岩块触研后控制岩块沿煤壁滑落, 进而控制台阶下沉的支护力 R_{02} 由式 (15) 确定, 即

$$P_0 \tan \varphi + R_{02} \geq \frac{ql}{4} \quad (19)$$

由式 (8) 和式 (19) 可得

$$R_{02} \geq \frac{ql}{4} \left(1 - \frac{l \tan \varphi}{h - a_m} \right) \quad (20)$$

由式 (20) 可知, 岩块触研后控制台阶下沉所需的支护力, 仍然是由顶板结构自身的赋存状况等因素决定的, 但出现台阶下沉的必要条件, 即阈值是由开采后的开采高度决定的。

由式 (18) 和 (20) 可知, 浅埋煤层工作面初次来压顶板控制, 应按顶板结构触研前考虑。控制台阶下沉的实质是控制岩块沿煤壁的滑落失稳。

6 工程实例

神东矿区大柳塔煤矿 1203 工作面的煤层平均倾角约 3° , 平均厚度约 6 m, 埋藏深度为 50~60 m。覆岩上部为 15~30 m 风积沙松散层, 其下为约 3 m

的风化基岩。根据该工作面的煤系地层典型柱状图, 基岩老顶由第 4~8 号岩层组成, 主要为砂岩, 岩层完整, 其厚度 $h = 13.4$ m, 弹性模量 $E = 12\ 000$ MPa, 抗压强度 $\sigma_c = 42$ MPa, 基岩老顶载荷 $q = 0.9$ MPa, 泊松比 $\mu = 0.21$ 。直接顶由第 9~10 号岩层组成, 主要为粉砂岩、泥岩和煤线互层, 裂隙发育, 其厚度 $h = 4.6$ m。实测初次来压步距为 27.1 m, 老顶破断后岩块沿工作面煤壁全厚切落, 形成约 1 m 的台阶下沉。

文献[2, 4]确定了该工作面基岩老顶的断裂下沉量为 $a_m = 0.99$ m, 基岩老顶破断后的水平推力 $P_1 = 190.2 \times 10^6$ N/m, 临界平衡状态下的水平推力 $P_0 = 13.31 \times 10^6$ N/m。考虑到神东矿区井下湿环境因素^[1], 在顶板结构稳定性分析中取岩块间的摩擦角平均值 34° 。

由于 $P_1 > P_0$, 且 $P_0 \tan \varphi < ql/2$, 基岩老顶破断后岩块将产生逆向回转并出现台阶下沉。由式 (18), 工作面应提供的支护力为

$$R_{01} \geq \frac{ql}{2} \left(1 - \frac{l \tan \varphi}{2(h - a_m)} \right) = \frac{0.9 \times 10^6 \times 27.1}{2} \cdot \left(1 - \frac{27.1 \times 0.67}{2(13.4 - 0.99)} \right) = 3\ 273\ \text{kN/m}$$

按支架宽度 $b = 1.5$ m 计, 计算结果表明, 初次来压期间控制顶板全厚切落的工作面液压支架工作阻力要大于 4 909 kN/架。1203 工作面当时所选用的支架工作阻力为 3 500 kN/架, 初次来压期间出现了明显的台阶下沉。

7 结 论

(1) 浅埋煤层长壁开采初次来压期间, 基岩老顶破断后难以形成自身稳定的结构, 岩块沿煤壁的滑落运动可分为触研前后两种状态。顶板结构触研前后都有可能出现滑落失稳, 触研前岩块的滑落失稳与回转失稳必居其一, 而触研后形成的单斜岩块仅为滑落失稳。滑落失稳是浅埋煤层工作面初次来压强烈和出现台阶下沉的根本原因。

(2) 顶板结构触研前出现的台阶下沉是由顶板岩层的赋存状况、截面几何形状、岩体材料以及上覆厚松散沙层传递来的载荷等客观因素决定的。现场实测和理论分析表明, 神东矿区采场工作面初次来压期间的顶板控制, 应按触研前的状况进行计算。

(3) 顶板结构触研后出现的台阶下沉, 除了与直接顶厚度及其碎胀因数等客观因素有关外, 还

与工作面开采高度、采空区有效充填厚度等非客观因素有关。顶板结构的稳定性由支架与顶板结构共同维持,工作面支架提供合理的支护力可防止老顶结构滑落失稳。揭示台阶下沉与支护间的关系,可为实现浅埋煤层顶板灾害定量化控制提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] 黄庆享. 浅埋煤层长壁开采顶板结构及岩层控制研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000: 28—35.
- [2] 杨治林, 余学义. 浅埋煤层长壁开采顶板岩层的后屈曲性态[J]. 煤炭学报, 2007, 32(4): 337—340.
- YANG Zhi-lin, YU Xue-yi. Post-buckling behavior for roof strata in shallow seam longwall mining[J]. **Journal of China Coal Society**, 2007, 32(4): 337—340.
- [3] 黄庆享. 浅埋采场初次来压顶板砂土层荷载传递研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 881—883.
- HUANG Qing-xiang. Study on load transmitting factor of thick sandy soil on key roof stratum during first weighting in shallow seam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(6): 881—883.
- [4] 杨治林, 余学义, 郭何明, 等. 浅埋煤层长壁开采顶板岩层灾害机理研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1763—1766.
- YANG Zhi-lin, YU Xue-yi, GUO He-ming, et al. Study on catastrophe mechanism for roof strata in shallow seam longwall mining[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(12): 1763—1766.
- [5] 范钦珊. 初始后屈曲理论及其应用[C]//材料和结构的不稳定性. 北京: 科学出版社, 1993: 55—69.
- [6] 钱鸣高, 缪协兴, 何富连. 采场“砌体梁”结构的关键块分析[J]. 煤炭学报, 1994, 19(6): 557—563.
- QIAN Ming-gao, MIAO Xie-xing, HE Fu-lian. Analysis of key block in the structure of voussoir beam in longwall mining[J]. **Journal of China Coal Society**, 1994, 19(6): 557—563.
- [7] DIEDERICHS M S, KAISER P K. Tensile strength and abutment relaxation as failure control mechanisms in underground excavations[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36: 69—96.
- [8] 杨治林. 浅埋煤层长壁开采顶板岩层的不稳定性态[J]. 煤炭学报, 2008, (12): 1341—1345.
- YANG Zhi-lin. Instability behavior for roof strata in shallow seam longwall mining[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, (12): 1341—1345.
- [9] 余学义, 黄森林. 浅埋煤层覆岩切落裂缝破坏及控制方法分析[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(6): 18—21.
- YU Xue-yi, HUANG Sen-lin. Analyzing falling crack failure of overburden strata of shallow coal seam and its control method[J]. **Coal Geology and Exploration**, 2006, 34(6): 18—21.