

综放采场初压阶段顶板稳定性与顶煤放出率关系探讨

Study on relationship between roof stability and recovery ratio of top coal at first weight period in fully-mechanized sublevel caving face

史 红^{1,2}, 姜福兴³

(1. 山东科技大学 资源与环境工程学院, 山东 泰安 271019; 2. 山东农业大学水利学院, 山东 泰安 271018 3. 北京科技大学 土木学院, 北京 100083)

摘 要: 初次来压是综放采场矿压控制的重点之一, 而顶煤从垮落到放完是一个动态过程, 因此建立与顶煤放出率相关的顶板结构的稳定性判断准则是一个重要的理论课题。本文建立了综放采场顶板结构整体变形失稳和局部铰接失稳的力学模型; 根据结构稳定理论和强度理论, 得到了保持顶板结构整体变形稳定的顶板容许下沉量和保持岩块局部铰接稳定的顶板容许下沉量, 通过与顶板回转下沉运动几何状态所决定的顶板下沉量的对比, 分析了顶板结构整体变形稳定和岩块局部铰接稳定相统一的力学条件, 从而建立与顶煤放出率相关的综放采场顶板稳定性判断准则; 结合具体采场实例, 给出了与顶煤放出率相关的综放采场顶板稳定性判断曲线和方法, 为现场针对不同顶板设计合理的顶煤放出率, 从而实现顶板的安全控制提供理论依据。

关键词: 综放采场; 初次来压; 顶板稳定性; 顶煤放出率

中图分类号: TD 322.1 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2005)04 - 0414 - 04

作者简介: 史 红 (1968 -), 女, 山东泰安人, 副教授, 山东科技大学在读博士, 主要研究方向为岩层运动与控制。

SHI Hong^{1,2}, JIANG Fu-xing³

(1. College of Resources & Environmental Engineering, Shandong University of Science & Technology, Tai'an 271019, China; 2. College of Hydraulic and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 3. Beijing University of Science & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The first weight is the key of controlling mine pressure in fully-mechanized sublevel caving face. The course of top coal falling from beginning to end is a dynamic process. To set up the judgment rules of roof stability with the recovery ratio of top coal is an important theoretical problem. This paper establishes the mechanical model of the stability of the whole deformation of roof structure and the stability of partial contact of the main roof. Based on the structure stability theory and the strength theory, two kinds of limited convergence maintaining the stability of the whole deformation of roof structure and the stability of part contact of the main roof are obtained. According to the comparison of the two limited subsidence and the subsidence of roof caused by the movement situation of roof in the course of rotation, the unifying mechanical conditions between the stability of the whole transmutation of roof structure and the stability of part contact of the main roof are analyzed and the judgment rules of roof stability with the recovery ratio of top coal are established. Based on an example of fully-mechanized sublevel caving face, the judgment curve and method with the recovery ratio of top coal are put forward, the theoretical bases of designing the safe recovery ratio of top coal are provided for different roof, and the safe roof controlling is achieved at coal mine.

Key words: fully-mechanized sublevel caving face; first weight; roof stability; the top coal's recovery ratio

0 引 言

实践表明, 初次来压是综放采场矿压控制的重点之一, 顶板结构的稳定性是现场非常关心的问题。已有研究成果表明^[1-3], 综放采场顶煤从垮落到放完是一个动态过程, 老顶的厚度和位态是变化的, 其变化主要由顶煤放出率控制。如何从理论上论证顶板结构的稳定性与顶煤放出率的关系, 是一个有实用价值的研究课题。本文采用结构稳定理论和强度理论, 分析顶板结构整体变形稳定和岩块局部铰接稳定相统一的力学条件, 从而建立与顶煤初次放出率相关的顶板稳定判断准则, 为现场针对不同顶板设计合理的顶煤放出率, 从而实现顶板的安全控制提供理论依据。

1 初压阶段顶板力学模型的建立

人们普遍认为, 在初次来压阶段老顶端部及中部断裂后形成了如图 1 所示三铰拱结构, 并对三铰拱结构的稳定性进行了大量的研究^[4-6]。在初次来压阶段, 老顶的运动与稳定受力学稳定条件和回转状态的几何条件控制。力学稳定条件是指老顶不产生结构整体变形失稳和岩块局部铰接失稳。当老顶触矸后, 冒落的矸石和顶煤对老顶结构有一定的支撑作用, 增加了

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目 (50320120001); 国家自然科学基金资助项目 (50074021)

收稿日期: 2003 - 05 - 05

其稳定性, 但随着顶煤放出率的增加, 冒落的矸石和顶煤对顶板的支承减弱, 采空区充填不满, 顶板的回转下沉量增加, 此时的顶板下沉量不但应满足力学稳定条件, 同时还应满足其回转状态的几何条件, 从而避免顶板结构整体变形失稳或由于岩块铰接处强度不足而引起局部铰接失稳。

建立如图1所示的坐标系, 则: 顶板结构在初始位置三个咬合点 A 、 B 、 C 的坐标分别为 $(0, h)$ 、 $(l, 0)$ 、 $(2l, h)$; 岩块回转下沉后三个咬合点 A_1 、 B_1 、 C_1 点的坐标分别为: $(0, h)$ 、 (l, SA_0) 、 $(2l, h)$ 。

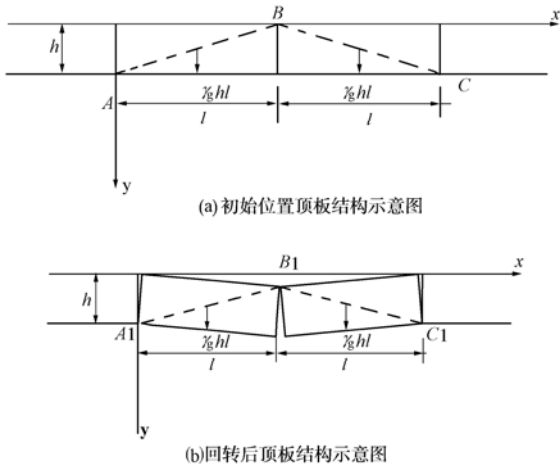


图1 顶板初次断裂的“三铰拱”结构

Fig. 1 Arch with three articulations structure of roof of first weight

其中 l 为岩块的长度, m ; SA_0 为岩块中部断裂处的下沉量, m ; α_0 为断裂岩块回转下沉角; h 为岩层的厚度, m ; γ_g 为岩块的单位体积力, kN/m^3 。

为分析顶板结构的稳定性, 对顶板结构作如下假定:

- (1) 岩梁在回转下沉过程中, 在各咬合点间的水平距离不变, 如图1所示。
- (2) 断裂岩块在回转下沉过程中, 由于挤压咬合而形成结构, 结构以受压为主, 只考虑压缩而产生的变形能。

2 顶板结构的力学稳定分析

2.1 最小势能原理

根据稳定理论^[7-8]的势能驻值定理: 具有理想、双面约束, 且所作用的主动动力均有势的系统, 其符合约束的位置为平衡位置的充要条件是系统在此位置的总势能 E 取驻值。即 $\frac{\partial E}{\partial q_j} = 0$ ($j = 1, 2, \dots, r$), 式

中 q_j 为广义坐标。系统满足上式, 是处于平衡状态的。但由于所研究系统的自由度不等于零, 它在平衡

位置还可以发生位移, 所以尽管满足了平衡条件, 系统的平衡不一定是稳定的。也就是说, 当系统受到微小扰动后, 它还可能偏离平衡位置甚至失稳。

根据最小势能原理: 具有理想、双面约束, 且所作用的主动动力均有势的系统, 其所有满足约束的平衡位置中, 只有使系统的总势能取极小值者是稳定的。

即: 如果 $(\frac{\partial^2 E}{\partial q^2})_{q_0} > 0$, 则 $E(q_0)$ 是 E 的极小值, 系统在平衡位置 q_0 为稳定平衡。

2.2 顶板结构系统的整体稳定性分析

结构的整体失稳是指结构由稳定的工作状态转入不稳定的工作状态。顶板结构一旦达到稳定的临界状态, 稍加干扰即产生急剧增大的下沉量, 引起结构的整体失稳。采场顶板结构受体积力作用, 在回转下沉的过程中以受压为主, 根据结构稳定理论, 对于受压为主的结构均可能存在结构的整体稳定问题。岩块断裂后形成的“三铰拱”结构符合上述约束条件且主动动力为重力, 是有势力, 可利用势能驻值定理确定“三铰拱”结构的平衡位置^[9]。

由基本假定(2)可知, 顶板结构在回转下沉的过程中, 只考虑岩块由于弹性压缩而产生的变形能。根据如图1所示的平面几何关系, 系统在初始位置时,

$$AB \text{ 的长度为 } AB = \sqrt{(0-h)^2 + (l-0)^2} = \sqrt{l^2 + h^2}$$

当岩块回转下沉角为 α_0 时, 根据基本假定(1), 岩块受挤压而使其长度产生弹性压缩, A_1B_1 的长度

$$\text{为: } A_1B_1 = \sqrt{(h-SA_0')^2 + l^2}, \text{ 其中 } SA_0' \text{ 为整体变形}$$

稳定时岩块的下沉量。 $SA_0' = l \sin \alpha_0$, 则岩块在回转过程中, 沿 AB 方向的长度缩短值为 Δl

$$\Delta l = \sqrt{h^2 + l^2} - \sqrt{(h-l \cdot \sin \alpha_0)^2 + l^2}。$$

系统的变形能为

$$E_1 = K(\sqrt{h^2 + l^2} - \sqrt{(h-l \cdot \sin \alpha_0)^2 + l^2})^2,$$

式中 K 为岩梁变形刚度系数(沿 AB 方向)。

顶板结构在回转下沉过程中只受体积力作用, 系统的重力势能变化值为: $E_2 = -\gamma_g hl \times l \sin \alpha_0$,

系统的总势能为

$$E = K(\sqrt{h^2 + l^2} - \sqrt{(h-l \cdot \sin \alpha_0)^2 + l^2})^2 - \gamma_g hl \times l \sin \alpha_0,$$

根据势能驻值定理: $\frac{\partial E}{\partial \alpha_0} = 0$, 则系统的平衡位置为

$$\gamma_g hl = \frac{2K(\sqrt{h^2 + l^2} - \sqrt{(h-l \cdot \sin \alpha_0)^2 + l^2})}{\sqrt{(h-l \cdot \sin \alpha_0)^2 + l^2}}。 \quad (1)$$

为使系统沿平衡状态时稳定, 则应使

$$\frac{\partial^2 E}{\partial \alpha_0^2} > 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial \alpha_0^2} = 2Kl(\cos \alpha_0^2) \left(1 - \frac{2\sqrt{2}l^2\sqrt{h^2+l^2}}{[2h^2+3l^2-l(l\cos 2\alpha+4h\sin \alpha_0)]^2} \right),$$

$$\text{即 } 1 - \frac{2\sqrt{2}l^2\sqrt{h^2+l^2}}{[2h^2+3l^2-l(l\cos 2\alpha+4h\sin \alpha_0)]^2} > 0,$$

$$\text{解不等式, 得 } l\sin \alpha_0 < h - \sqrt{(l^4(h^2+l^2))^{1/3} - l^2}. \quad (3)$$

因此, 系统保持整体变形稳定的岩块运动允许下沉量为

$$SA_0' < h - \sqrt{(l^4(h^2+l^2))^{1/3} - l^2}. \quad (4)$$

2.3 顶板岩块结构的局部铰接稳定性分析

老顶在初次断裂后形成的“三铰拱”结构除满足整体稳定条件外, 还应满足强度条件。顶板结构的强度问题主要为咬合点处的剪切强度。若岩块接触面上的摩擦阻力小于接触面上的切向力, 则顶板产生沿接触面的滑落失稳。

岩梁断裂后, 咬合点处为面接触, 假定挤压力在相邻岩块接触面上均匀分布, 设咬合点处岩块接触面长度为 $2a_0$ [6,10,11], 如图 2 所示, 则

$$2a_0 = \frac{1}{2}(h - l\sin \alpha_0). \quad (5)$$

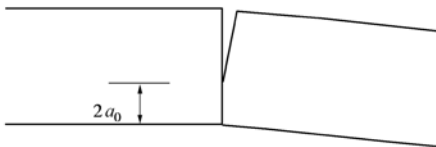


图 2 岩块接触面详图

Fig. 2 Detail of rock contact face

分析三铰拱结构的受力知

$$N_A' = N_c' = \frac{\gamma_g hl \times l}{2(h - l\sin \alpha_0)}, \quad (6)$$

$$Q_A' = Q_c' = \gamma_g hl, \quad (7)$$

式中 N_A' 、 N_c' 分别为结构前后铰接点处的水平挤

顶板结构不产生整体变形失稳的条件 $SA \leq SA_0'$

由上式及式 (4)、(11) 知, 对放顶煤采场, 顶板结构不产生整体失稳时顶煤的放出率应满足

$$\eta \leq \frac{(4 \sim 6.67)SA_0' - H}{T}. \quad (13)$$

压力; Q_A' 、 Q_c' 分别为结构前后铰接点接触面上的切向力。岩梁在铰接点的接触面不产生滑落失稳的条件为

$$N_A' f \geq Q_A', \quad (8)$$

同时, 还应满足岩块在铰接点处不被压坏, 则

$$N_A' \leq 2a_0 \eta_0 \sigma_0, \quad (9)$$

式中 η_0 为岩块端角挤压系数, 由文献[6], $\eta_0=0.3$; f 为岩块与煤壁挤压接触面的摩擦系数, 根据文献[10], $f=0.4$; σ_0 为岩块的单轴抗压强度, MPa。

$$\text{由式 (5)、(8)、(9) 得 } l\sin \alpha_0 \leq h - \frac{2\gamma_g hl}{\eta_0 \sigma_0 f}.$$

顶板结构不产生滑落失稳的运动允许下沉量为

$$SA_0'' = l\sin \alpha_0 \leq h - \frac{2\gamma_g hl}{\eta_0 \sigma_0 f}. \quad (10)$$

3 触研后顶板结构的稳定性判据

断裂岩梁形成“三铰拱”结构后, 其运动的可能结果有三种: 一是局部铰接处摩擦阻力不足引起滑落失稳; 二是岩梁回转变形过大引起整体变形失稳; 三是保持“假塑性岩梁”的准静态。顶板结构是否发展到滑落失稳或整体变形失稳, 由老顶的沉降量所决定, 只有其沉降量超过运动岩层稳定的允许沉降量, 岩层才会出现运动失稳。

根据文献[1], 综放采场老顶的厚度和位态是随顶煤放出率的变化而变化的, 老顶的回转下沉量是由顶板回转运动的几何状态所决定的, 其表达式

$$SA = (0.15 - 0.25)h, \quad (11)$$

式中 SA 为老顶在触研处的由几何状态决定的沉降量, m; 在放顶煤采场, $h = H + \eta T$, H 为采高, m; η 为顶煤的放出率; T 为顶煤的厚度, m。因此, 顶板结构不产生滑落失稳的条件为: $SA \leq SA_0''$, 由上式及式 (10)、(11) 知, 对放顶煤采场, 顶板结构不产生滑落失稳时顶煤的放出率应满足

$$\eta \leq \frac{(4 \sim 6.67)SA_0'' - H}{T}. \quad (12)$$

4 算例

某综放采场, 采高 $H=2.5 \sim 3$ m, 顶煤的厚度 $T=4 \sim 5$ m, 初次来压步距 60 m, 老顶厚度 $h=5$ m, 单轴抗压强度为 60 MPa, 岩块端角摩擦系数 $f=0.4$, 端角挤压系数为 0.3。由式 (4)、(10) 分别计算岩块的下沉量

$$SA_0', SA_0'': SA_0' = h - \sqrt{(l^4(h^2+l^2))^{1/3} - l^2} = 2.1 \text{ m},$$

$$SA_0'' = h - \frac{2\gamma_g hl}{\eta_0 \sigma_0 f} = 3.96 \text{ m}, \text{ 顶板结构不产生整体失}$$

稳时顶煤的放出率应满足: $\eta \leq \frac{4SA' - H}{T} = 108\%$,

同时顶板结构不会发生滑落失稳,因此,老顶初压阶段不会产生失稳。但当顶煤的放出率 $\eta > 90\%$, 见图3(a),由回转下沉几何状态决定的下沉量 SA 达 1.88 m 时,见图3(b),当老顶厚度小于等于 4.4 m 时,老顶失稳。

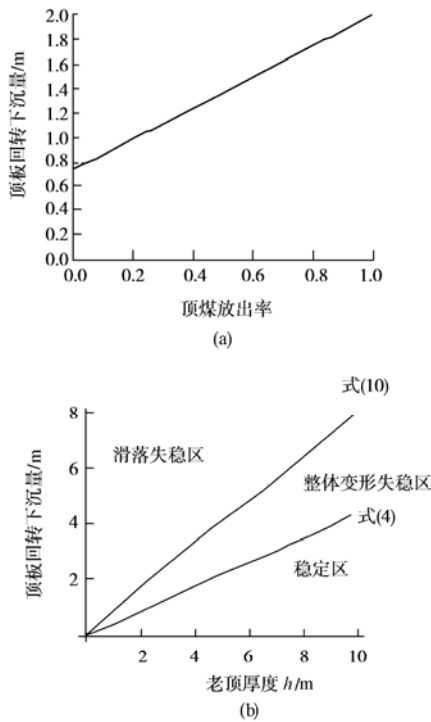


图3 老顶稳定性判断曲线

Fig. 3 Judgment curve for stability of main roof

5 结 论

(1) 老顶在回转下沉过程中的失稳有两种原因 一是由于回转下沉变形过大而引起的整体失稳; 二是由于岩块挤压面的挤压强度不足而引起的滑落失稳。根据能量原理和强度理论, 给出了保持初次来压阶段

老顶结构整体变形稳定和局部铰接稳定的力学条件, 分别为式(4)和(10), 建立了老顶保持整体稳定和保持局部铰接稳定相统一的力学判据。

(2) 建立了综放采场初次来压阶段顶煤放出率与顶板结构稳定性的关系式, 即分别保证顶板整体变形稳定和顶板不产生滑落失稳的顶煤放出率的表达式, 式(12)和(13), 结合具体采场实例, 给出了顶板结构稳定判断曲线和方法, 为现场针对不同顶板设计合理的顶煤放出率, 从而实现顶板的安全控制提供理论依据。

参考文献:

- [1] 姜福兴. 采场顶板控制设计及其专家系统[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995: 205 - 213.
- [2] 杨淑华, 姜福兴. 综放顶煤支架受力与顶板结构的关系探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 1999,(3): 287 - 290.
- [3] 张顶立, 王悦汉. 综采放顶煤工作面岩层结构分析[J]. 中国矿业大学学报, 1998,(4): 340 - 343
- [4] 宋振骥. 实用矿山压力[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988.
- [5] 钱鸣高, 刘听成. 矿山压力及其控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [6] 钱鸣高, 缪协兴, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.
- [7] 范钦珊. 理论力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.355 - 378.
- [8] 王照林. 运动稳定性及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [9] 钟新谷. 顶板岩梁结构的稳定性与支护系统刚度[J]. 煤炭学报, 1995(6): 601 - 606.
- [10] 黄庆享, 石平五, 钱鸣高. 老顶岩块端角摩擦系数和挤压系数实验研究[J]. 岩土力学, 2000,(1): 60 - 63.
- [11] 侯忠杰. 老顶断裂岩块端角接触尺寸[J]. 矿山压力与顶板管理, 1999,(3 - 4): 29 - 31.