浅埋煤层长壁开采顶板岩层灾害机理研究

杨治林[1]，余学义[2]，郭何明[3]，郭 文[1]，谢大平[1]

（1．西安科技大学基础课部，陕西 西安 710054；2．西安科技大学能源学院，陕西 西安 710054；3．西安科技大学继续教育学院，陕西 西安 710054）

摘 要：应用初始后屈曲理论和尖点突变模型探讨了顶板岩层分岔失稳的机理及其屈曲后的不稳定性，得出了采场老顶初次来压时断裂下沉的计算公式，建立了顶板破断后台阶下沉的判据，给出了台阶下沉量。研究发现，顶板破断后岩块处于非平衡状态；台阶下沉是由单一岩块逆向回转引起的；台阶下沉与断裂下沉之间存在着确定的关系。研究结果表明，综合应用初始后屈曲理论和突变理论，可根据浅埋煤层顶板结构的结构特征、岩体材料以及上覆厚松散沙层等赋存状况确定长壁开采工作面初次来压期间基岩老顶可能出现的灾害形式。

关键词：采矿工程；浅埋煤层；基岩老顶；初始后屈曲；台阶下沉；结构稳定性

中图分类号：TD823.4 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2007)12－1763－04

作者简介：杨治林(1957－)，男，陕西榆林人，教授，主要从事固体力学与结构稳定方面的教学和研究工作。E-mail: yangzlyzl@163.com。

Study on catastrophe mechanism for roof strata in shallow seam longwall mining

YANG Zhi-lin[1]，YU Xue-yi[2]，GUO He-ming[3]，GUO Wen[1]，XIE Da-ping[1]

(1. Department of Basic Courses, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Energy, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China; 3. School of Continuing Education, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Using the initial post-buckling theory and the cusp catastrophic model, the bifurcation buckling mechanism and unstability of roof strata were studied to derive the formulae of the main roof breaking convergence during the first weighting, to build the criterion of step convergence after the main roof breaking and to determine the final step convergence value. It was pointed out that rock blocks were in a non-equilibrium state after the main roof breaking, and the step convergence was caused by the reverse rotation of single rock block and was determinately related with the breaking convergence. It was also indicated that in accordance with the occurrence behavior of roof structure, rock mass materials and thick unconsolidated layers above the roof, the integrated application of the initial post-buckling theory and the catastrophe theory could be employed to determinate catastrophic forms of the main roof structure during the first weighting.

Key words: mining engineering; shallow seam; main roof; initial post-buckling; step convergence; structural stability

0 引 言

大多数情况下，采场来压最猛烈、最难控制的是老顶初次来压。神东矿区开采实践表明，对于基岩比较薄、松散载荷层厚度比较大的浅埋煤层，工作面老顶初次破断具有明显的切落特征，基岩老顶普遍存在着台阶下沉现象。初次来压不仅会出现具有强烈矿压显现的台阶下沉，而且还伴随着涌水和溃沙危害[1]。

通过模拟实验和观测分析，对浅埋煤层初次来压期间顶板的破断和运动规律，以及破断后的结构特征，取得了如下基本认识：顶板岩层的破断裂隙通常在煤壁前方的老顶上部产生，随工作面推进裂隙逐渐向下扩展，并在煤壁处完全断裂形成贯通裂缝。贯通裂缝的倾角比较大，呈上开下闭型，是工作面的直接涌水通道[2-3]；老顶初次来压有一过程，期间顶板结构存在着运动，如果老顶沿煤壁出现严重的台阶下沉，则可能引起贯通裂缝张开，形成工作面溃沙的直接通道。顶板的破断运动使采场矿压显现明显有别于普通工作面，破断运动直接波及地表[4-5]；老顶结构具有砌体梁结构关键块的基本特征，但是岩块不易形成自身稳定的砌体梁结构。老顶破断后的运动主要有断裂下沉、台阶下沉和回转失稳，其中对工作面安全构成直接威胁的是由沿煤壁贯通裂缝引起的老顶岩块的台阶

基金项目：国家自然科学基金资助项目（40572155）

收稿日期：2006－12－28

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

下沉[6]。本文应用初始后屈曲理论和突变理论研究了基岩老顶分岔失稳的机理及其破断后的平衡稳定性，根据顶板岩层的赋存状况预测了采场工作面可能出现的顶板灾害。

1 顶板关键层的初始后屈曲

在对顶板关键层从图 1 所示的基本状态过渡到图 2 所示的破断了的后屈曲状态进行性态分析时，需将其位能增量泛函中的每一项都视为与载荷因子 λ 有关的项。

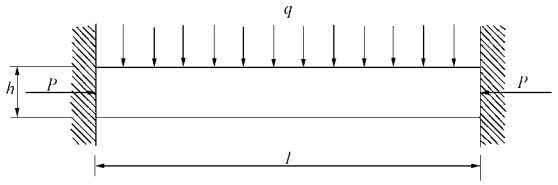


图 1 浅埋煤层单一关键层力学模型

Fig. 1 Mechanical model for single roof key stratum

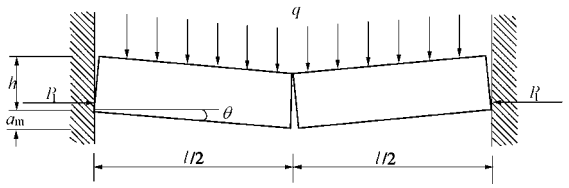


图 2 顶板关键层破断后的结构形态

Fig. 2 Structural form of broken roof key stratum

对于一级近似，仅在泛函能量的二次变分中考虑与 λ 有关的项是充分的[7]。于是位能增量泛函对于任意位移场，考虑 $\Pi_0(w,a_m)$ 影响时的屈曲模态 w 可表示为关于极限下沉量 a_m 的代数函数[8]

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

式中，λ_1 为临界载荷因子，$F_2^{\lambda'}(a_m)=\partial\Pi_2^{\lambda}(w,\lambda)/\partial\lambda$。式（1）是近似的，但它是分叉点附近能量渐近展开式中的主要项。由 $F_2^{\lambda'}(a_m)$ 的表达式和屈曲模态可得

$$F_2^{\lambda'}(a_m)=-P_k\pi^2(1-\mu^2)\frac{a_m^2}{2EI}\text{，}$$

$$\Pi_4^{\lambda}(w,a_m)=\frac{\pi^6 a_m^4}{8l^4}\text{，}$$

$$\Pi_0(w,a_m)=-l^2q(1-\mu^2)\frac{a_m}{EI}\text{。} \tag{2}$$

分叉点附近的平衡构形由顶板极限下沉量 a_m 的函数 $F^{\lambda}(a_m,\lambda)$ 的驻值所确定，仅当这些驻值为本征最小时，平衡构形才是稳定的。为确定顶板的极限下沉量，由驻值定理 $\partial F^{\lambda}(a_m,\lambda)/\partial a_m=0$，可得顶板关键层断裂下沉幅值方程

$$a_m^3+D_1a_m+D_2=0\text{。} \tag{3}$$

式中 $D_1=2l^4(1-\mu^2)(\lambda_1P_k-P)/\pi^4EI$，与临界载荷因子有关；$D_2=2l^6q(1-\mu^2)/\pi^6EI$；$P_k$ 为临界载荷，当 $P<\lambda_1P_k$ 时，顶板关键层保持未变形的基本状态；当 $P<\lambda_1P_k$ 时，D_1 恒为负值。

式（3）亦给出了关键层下沉幅值 a_m 与水平推力 P、临界载荷 P_k、以及极限跨距 l 之间的关系。

2 顶板关键层的后屈曲性态

2.1 关键层的断裂下沉

在给定单一模态的情形下，几何非线性方程一般会产生若干不相关的分支解，有意义的分支将使满足式（3）的 a_m 取正实根。为此，由式（3）给出以断裂下沉幅值 a_m 为状态参量，以 D_1，D_2 为控制参量的尖点突变型分叉集方程

$$4D_1^3+27D_2^2=0\text{。} \tag{4}$$

由式（4）可知，只有当 $D_1\leq 0$ 时，顶板关键层沿煤壁的裂缝贯通后，破断岩块形成的体系才有可能跨越分叉集。也就是说，体系稳定性发生分叉的必要条件为 $P\geq\lambda_1P_k$。当控制参量 D_1，D_2 满足分叉集方程时，体系处于临界状态。

当系统跨越分叉集左支时，由式（3），（4）可得关键层断裂后的下沉幅值为

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

2.2 关键层破断后的水平推力

将控制参量 D_1，D_2 代入式（4），得顶板关键层破断后系统跨越分叉集时的水平推力

$$P_1=P-\lambda_1P_k=\frac{3}{2}\sqrt[3]{\frac{q^2EI}{1-\mu^2}}\text{。} \tag{6}$$

式（6）以水平推力的形式给出了分叉点附近的邻域。应该指出，水平推力是由顶板岩层的赋存状况所决定，而不是由顶板破断状态下的平衡条件所确定。确定顶板破断后的水平推力是有意义的，它是进行滑落失稳和回转失稳等后续研究的统一基础。由图 1 浅埋煤层单一关键层的位移边界条件，得到非零解载荷参数的最小值，即 $\lambda_1=1$。

2.3 关键层破断后的临界平衡态

根据文献[9]，参照图 2，老顶岩块间的端角挤压面长度

$$a=\frac{1}{2}(h-\frac{l}{2}\sin\theta)=\frac{1}{2}(h-a_m)\text{，} \tag{7}$$

是由顶板岩层的厚度及其破断后的结构形态决定的。鉴于岩块间的铰接关系，水平推力作用点的位置可取图 2 所示 $a/2$ 处[9-10]。由式（7）和破断后岩块对中部破断面塑性铰接处的力矩平衡条件，得顶板破断后临

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

界平衡状态下的水平推力

$$P_0=\frac{1}{4}\frac{ql^2}{h-a_{\mathrm{m}}}\quad 。\tag{8}$$

由式（8）知，随着下沉量的增加，维持平衡状态的水平推力也在增加，表现出基岩老顶破断后结构的几何非线性特征。

2.4　关键层破断后的台阶下沉

神东矿区开采实践表明，老顶初次来压期间顶板破断后，岩块并非处于平衡状态，顶板结构普遍存在着运动。显然，当

$$P_1>P_0\tag{9}$$

时，由图 2，岩块产生逆向回转。逆向回转使贯通裂缝全部张开，老顶岩块沿工作面煤壁切落，进而出现台阶下沉。式（9）即为关键层破断后顶板台阶下沉的判据。

随老顶岩块沿煤壁切落，其铰结点由下铰结点转变为上铰结点，采场工作面单一岩块出现台阶下沉。由图 3，岩块的台阶下沉量为

$$\Delta=\sin\theta\cdot l/2=a_{\mathrm{m}}\quad 。\tag{10}$$

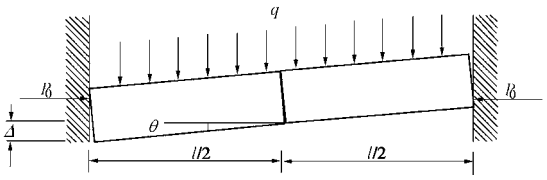


图 3 顶板台阶下沉

Fig. 3 Roof key stratum after step convergence

贯通裂缝张开还会形成溃沙通道，导致工作面溃沙灾害。实验发现，溃沙通道裂缝并非是在基岩刚破断时形成的，而是在顶板破断后的逆向回转和下沉运动中出现的。根据现场实测[1]，涌水后的第三天才出现溃沙，证实了这一实验现象。

由现场实测和模拟实验知[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）在确定由逆向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。

3　工程算例

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 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，直接顶为粉砂岩、泥岩和煤线互层，裂隙发育。老顶关键层由第 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 $E=12000$ MPa，老顶关键层载荷 $q=0.9$ MPa，泊松比 $\mu=0.21$，老顶破断后岩块沿工作面煤壁切落，形成约 1 m 的台阶下沉[1]。

将以上有关数据代入本文建立的公式（5）、（6）、（10），得顶板关键层的断裂下沉量

$$a_{\mathrm{m}}=2(-D_1/3)^{1/2}=2\left(\frac{l}{\pi}\right)^2\left(\frac{q(1-\mu^2)}{EI}\right)^{1/3}$$

$$=2\times\left(\frac{26.37}{3.14}\right)^2\left(\frac{0.9\times10^6\times(1-0.21^2)}{12\times10^9\times13.4^3/12}\right)^{1/3}=0.99\ \mathrm{m}。$$

关键层破断后的水平推力

$$P_1=\frac{3}{2}\left(\frac{q^2EI}{1-\mu^2}\right)^{1/3}=\frac{3}{2}\left(\frac{0.9^2\times10^{12}\times12\times10^9\times13.4^3/12}{1-0.21^2}\right)^{1/3}$$

$$=190.2\times10^6\ \mathrm{N/m}。$$

$$P_1>P_0=\frac{1}{4}\frac{ql^2}{h-a_{\mathrm{m}}}=\frac{1}{4}\frac{0.9\times10^6\times26.37^2}{13.4-0.99}=12.52\times10^6\ \mathrm{N/m}。$$

关键层破断后岩块产生逆向回转，出现台阶下沉。台阶下沉量

$$\Delta=a_{\mathrm{m}}=2(-D_1/3)^{1/2}=0.99\ \mathrm{m}。$$

4　结　论

（1）浅埋煤层条件下老顶为单一关键层结构。根据长壁开采的特点，分析中可采用平面应变模型。浅埋煤层顶板控制的关键区域在工作面中部，用平面模型简明地刻画顶板结构的主要特征是可行的。

（2）应用初始后屈曲理论和突变理论，可根据浅埋煤层顶板结构的结构特征、岩体材料以及上覆厚松散沙层等赋存状况，确定顶板破断后的极限下沉量及其在非平衡状态下岩块间的水平推力，以判定顶板结构运动状态的形式，估算台阶下沉量。确定长壁工作面初次来压期间基岩老顶可能出现的灾害形式。

（3）基岩老顶的破断机理是顶板结构的分岔失稳，顶板的台阶下沉是由老顶破断后结构的不平衡特性引起的。通过实例计算老顶初次来压期间采场工作面的有关灾害，表明研究结果有助于提高顶板灾害预测预报的准确性。

（4）过去认为浅埋煤层不存在结构效应的观点是缺乏理论根据和实验依据的。实际上，浅埋煤层顶板结构正体现了砌体梁结构关键块的基本特征。厚松散载荷层下单一老顶关键层破断后难以形成自身稳定的结构，构成了浅埋煤层长壁开采工作面特殊的矿压显现。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

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. (HUANG Qing-xiang. Study on roof structure and ground control in shallow seam longwall mining[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press. 2000. (in Chinese))

[2] 黄正全. 浅埋煤层开采岩移特征与渗水机理分析[J]. 西部探矿工程, 2006, **18**(2): 95－97. (HUANG Zheng-quan. Analysis of features of rock movement and seepage mechanism for shallow-lying coal seam mining[J]. West -China Exploration Engineering, 2006, **18**(2): 95－97. (in Chinese))

[3] 张 杰, 侯忠杰. 浅埋煤层导水裂隙发展规律物理模拟分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 2004, **21**(4): 32－34. (ZHANG Jie, HOU Zhong-jie. The simulation experiment analysis of the shallow coal seam water fluid cracks development law[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2004, **21**(4): 32－34. (in Chinese))

[4] 张 杰, 侯忠杰. 浅埋煤层开采中的溃沙灾害研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2005, **20**(9): 15－18. (ZHANG Jie, HOU Zhong-jie. Study on sand inrush disaster in shallow seam mining[J]. Journal of Hunan University Science and Technology (Natural Science Edition). 2005, **20**(9): 15－18. (in Chinese))

[5] 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. (in Chinese))

[6] 黄庆享. 浅埋煤层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 Qing-xiang. Ground pressure behavior and definition of shallow seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(8): 1174－1177. (in Chinese))

[7] 范钦珊. 初始后屈曲理论及其应用[C]// 中国力学学会, 等. 材料和结构的不稳定性. 北京: 科学出版社, 1993: 55－69. (FAN Qin-shan. Theory of initial post-buckling and its applications in engineering[C]// Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, et al. Unstability of Material and Structure. Beijing: Science Press, 1993. 55－69. (in Chinese))

[8] 杨治林. 层状边坡岩体结构的后屈曲[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, **25**(2): 73－76. (YANG Zhi-lin. Post-buckling for side slop with stratified rock mass[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2005, **25**(2): 73－76.(in Chinese))

[9] 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. (in Chinese))

[10] 杨治林. 浅埋煤层长壁开采顶板结构稳定性分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005, **22**(2): 7－9. (YANG Zhi-lin. Stability on roof structure in shallow seam longwall mining[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2005, **22**(2): 7－9. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net