



# 综放采场上覆厚层坚硬岩层破断规律的分析及应用

史 红<sup>1,2</sup>, 姜福兴<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学土木与环境学院, 北京 100083; 2. 山东农业大学水利土木学院, 山东 泰安 271018)

**摘 要:** 根据厚层坚硬岩层的赋存和运动特点, 利用基于弹性理论、考虑岩梁体积力的厚层坚硬岩层运动规律的力学判据, 给出厚层坚硬岩层运动方式的判断曲线, 通过分析厚层坚硬岩层运动方式的影响因素, 得出厚层坚硬岩层分层运动的可能性大、层间效应明显、关键层的“关键性”下降的结论; 通过与传统研究方法的对比和工程实例分析, 表明文中厚层坚硬岩层运动规律的力学判据和判断方法可对“关键层”在运动过程中的破断方式进行较准确的预测。

**关键词:** 综放采场; 厚层坚硬岩层; 破断规律; 判断曲线

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2006)04-0525-04

**作者简介:** 史 红 (1968 - ), 女, 山东泰安人, 博士, 副教授, 现为北京科技大学博士后, 主要研究方向为岩层运动与控制。

## Analysis on rupture of hard and massive overlying strata in fully-mechanized sublevel caving face

SHI Hong<sup>1,2</sup>, JIANG Fu-xing<sup>2</sup>

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

**Abstract:** According to the characteristics of sediment rock and the movement of hard and massive overlying strata, using the mechanical rules of movement based on the mechanical model of fixed beam with gravity taken into account, the judgment curves of movement modes of overlying strata were worked out and their applications were explained. Using the judgment curves and the thickness of key strata decided from the parameters of drilling hole, the movement modes of key strata were judged and the theoretical basis for controlling the hard and massive strata were analyzed in mining engineering was provided. The factors influencing the movement modes of hard and massive overlying strata and the delamination movement of hard and massive overlying strata were explained as ubiquitous because of the characteristics of hard and massive strata with interbedding. The suggested mechanical judgment model had been tested by field experiments, and compared with the simple uniform stress method usually used, and it was shown to be useful for the prediction of the initial rupture and span of the main roof of the hard and massive strata.

**Key words:** fully-mechanized sublevel caving face; hard and massive strata; rupture regularity; judgment curves

## 0 引 言

关于初次来压阶段采场上覆岩层运动破坏的形式, 前人已取得了丰富的成果<sup>[1-6]</sup>。但近年来, 许多综放工作面支架被压垮的事实表明: 对一般综放采场, 采空区的空间高度在 7 m 左右, 综放工作面斜长为 150~170 m, 当工作面推进到 60 m 左右时, 考虑下位直接顶和顶煤的垮落、碎胀、充填作用, 采空区仍可形成 10000 m<sup>3</sup> 左右的大空穴。如果上覆岩层中赋存厚层坚硬岩层 (关键层), 一旦大空穴上方的厚层坚硬岩层整体运动, 可形成冲击地压、压缩风吹倒支架等危害。但矿压观测、模拟试验又表明: 当厚层坚硬岩层暴露达到一定的跨度时, 下部岩层产生剥离垮落, 实际垮落步距比按整体运动预测的垮落步距小。因此,

采场厚层坚硬岩层究竟是整体运动, 还是分层运动, 是现场十分关心的问题, 如何较准确的预测厚硬岩层的运动形式和垮落步距, 进而对厚层坚硬岩层进行控制是具有现实意义的理论问题。

## 1 综放采场上覆厚层坚硬岩层的运动和破坏规律的力学判断准则

由于沉积岩的特性, 厚度为十几米乃至几十米的坚硬岩层层间多存在弱面, 文献[7]考虑到厚层坚硬层

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: 2005-04-18

板在体积力作用下的应力分布特点及其在顶板运动过程中的重要地位,在前人研究基础上作了进一步细化和研究,厚岩层运动方式的分析考虑了层间效应,得出了基于弹性理论、考虑岩梁体积力的厚层坚硬岩层运动规律的力学判据。其力学模型如图1所示。

根据文献[7],厚层坚硬岩层在沉降过程中的运动方式大致为如下3种。

(1) 随工作面的推进,岩梁中的剪应力增加,当岩层厚度方向某层面上的剪应力超过了该处岩石的抗剪强度时,岩层沿该层面剪开,厚岩层转化成两个或更多的岩层分开运动。厚岩层的分层运动可分为两种情况:①厚层坚硬岩层在厚度范围内存在一个或多个弱面,弱面处的剪应力超过此处材料的抗剪强度而引起的分层运动,其极限跨度一半为  $l_1 \leq \frac{2h^2[\tau]}{3\rho g(4y^2-h^2)}$ ;

②厚层坚硬岩层较完整,不存在弱面,岩层中的剪应力超过岩石的抗剪强度导致的分层运动,其极限跨度一半为  $l_2 \leq \frac{2[\tau_1]}{3\rho g}$ 。

(2) 岩层暴露后只产生不大的弯曲,以压剪破坏为主,或当工作面在推进过程中遇到顺面断层等地质构造时,岩梁产生全厚度压剪破坏,岩层整体切落,其运动的极限跨度一半为  $l_3 \leq \sqrt{\frac{h}{3\rho g} \left( \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} - \frac{1}{5} \rho g \right)}$ 。

(3) 在支座负弯矩区岩层被拉断而使两端嵌固梁模型变为简支梁模型,进而简支梁中部断裂,则极限

跨度一半为  $l_4 \leq \sqrt{\frac{h[\sigma_1] + \frac{\rho g h}{5}}{3\rho g}}$ 。其中  $y$  为岩层中结构面或软弱夹层在厚度方向的位置坐标,  $m$ ;  $[\tau]$  为岩层中结构面或软弱夹层的容许抗剪强度,  $MPa$ ;  $[\tau_1]$  为坚硬岩石的容许抗剪强度,  $MPa$ ;  $\varphi$  为顶板岩石的内摩擦角,材料常数;  $c$  为顶板岩石的粘聚力,材料常数;  $\rho g$  为岩石的单位体积力,  $kN/m^3$ ;  $h$  为岩梁的厚度,  $m$ 。

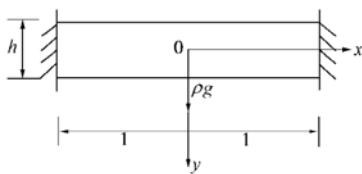


图1 大厚度坚硬岩层力学模型

Fig. 1 Mechanical model of hard and massive strata

## 2 综放采场上覆厚层坚硬岩层运动规律判断准则的应用

### 2.1 综放采场上覆厚层坚硬岩层运动方式的判断方法

根据上述3种岩层破坏方式的力学判据,可对上

覆岩层的运动方式进行预测。在工程实践中,对给定采场的柱状图,利用上述方法,可对不同覆岩组合的岩层的运动方式进行自动判断。其判断步骤如下:①根据采场柱状图,找出对岩层运动起控制作用的厚层坚硬岩层,分别计算不同运动方式下岩梁的极限跨度  $l_1, l_2, l_3, l_4$ , 取  $l_i = \text{Min}(l_1, l_2, l_3, l_4)$ ,  $i=1, 2, 3, 4$ ,  $i$  表示第  $i$  种运动方式,即岩层以第  $i$  种方式运动;②若  $i=1, 2$ , 则表明岩层先被剪开,形成两层或多层分开运动,对各分层再计算其极限跨度  $l_1, l_2, l_3, l_4$ , 取  $l_j = \text{Min}(l_1, l_2, l_3, l_4)$ ,  $j=1, 2, 3, 4$ ,  $j$  表示第  $j$  种运动方式,即分层后的岩层以第  $j$  种方式运动。以次类推,最终可判断出厚层坚硬岩层的运动方式。

### 2.2 综放采场上覆厚层坚硬岩层运动方式的判断曲线

综放采场上覆厚层坚硬顶板运动的极限跨度不同,决定了岩层的运动方式的不同。为方便现场应用以上岩层运动方式的判断准则,对给定采场的柱状图,根据坚硬岩层的厚度即可判断该岩层的运动方式,现将厚层坚硬岩层的各种运动方式的极限跨度与厚度的关系用图表表示。以细砂岩、中砂岩顶板为例,并假定在厚层顶板中,弱面在岩层厚度方向的位置分别为  $y=0, \pm \frac{h}{8}, \pm \frac{h}{4}, \pm \frac{3h}{8}$ , 得到岩层厚度与运动方式的关系曲线,如图2所示。

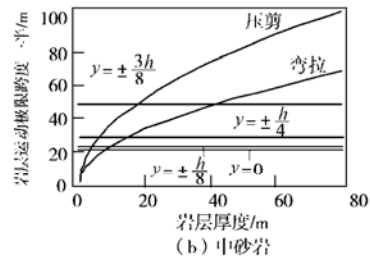
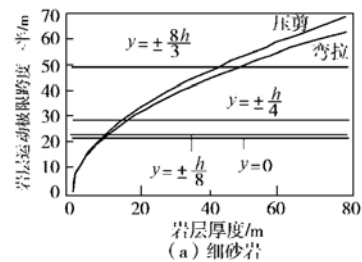


图2 岩层运动方式判断曲线

Fig. 2 Judgment curve of strata movement

在工程应用中,首先根据柱状图,确定关键岩层的厚度和岩性;根据岩石性质,判断采用图2中的哪一条曲线;再由水平轴上查得关键层厚度后作垂线,垂线首先与哪条极限跨度曲线相交,该曲线对应的运动方式即为该岩层的运动方式,竖轴对应点的数值即

为该运动岩层极限跨度的一半。若岩层首先产生分层运动,对分层后的岩层仍可采用上述方法判断其下一步的运动方式。

另外,在工程中应用此判断曲线时,可根据具体采场的顶板岩层组成情况和顶板各岩石的强度试验值,利用岩层运动极限跨度公式,依照上述方法,作出具体采场顶板岩层的运动方式判断曲线,从而判断关键岩层的运动方式,使判断曲线和判断方法更具体、更实用。

### 3 综放采场上覆厚层坚硬岩层运动方式的影响因素

#### 3.1 岩层厚度的影响

由图2可知,岩层的弯拉破坏的极限跨度和全厚度压剪破坏的极限跨度随岩层厚度的增加而增大,而岩层分层运动的极限跨度不随岩层厚度的变化而变化。当岩层的厚度小时,岩梁两端的拉应力首先超过了岩石的极限抗拉强度,而此时岩层厚度方向上某弱面处剪应力小于其抗剪强度,不足以使岩层分层运动,岩石的运动方式表现为弯拉破坏。随岩层厚度增加,弯拉破坏的极限跨度增加,若岩层中弱面处的剪应力首先超过了弱面材料的抗剪强度,此时岩梁两端的拉应力还未达到岩石的极限抗拉强度,岩层首先被剪开,岩层的运动表现为在弱面被剪开的分层运动。岩层由弯拉破坏运动方式转化为分层运动方式的厚度称为岩层运动方式的临界厚度。岩层的厚度超过临界厚度后,岩层不再呈整体运动,而表现为分层运动。因此,岩层的厚度越大,岩层的层间效应越明显,分层运动的可能性越大。

#### 3.2 岩性的影响

岩石的强度越高,岩层的运动步距越大,这与以往的研究结论相同。但考虑到厚层坚硬岩层的层间效应,不同性质的岩石,由弯拉破坏运动方式转化为分层运动方式的岩层临界厚度是不同的,岩石的强度越高,此临界厚度值越小。主要原因为弯拉破坏的极限跨度是由坚硬岩石的抗拉强度决定的,而岩层分层运动的极限跨度是由软弱夹层的抗剪强度决定的,坚硬岩石的抗拉强度和软弱夹层的抗剪强度越接近,则两种运动方式的极限跨度值越接近,两种运动方式的相互转化的临界厚度越小。由以上分析可知,两种运动方式相互转化的临界厚度随坚硬岩石强度的增加而变小。这表明若厚层岩石中存在软弱夹层,坚硬岩层的层间效应将更明显,更容易表现为分层运动。

#### 3.3 软弱夹层性质和在岩层厚度方向的影响

厚层坚硬岩层是整体运动,还是分层运动,另一个重要的影响因素为岩层厚度范围内分布的弱面的性

质和位置。弱面处的抗剪强度越低,岩层分层运动的极限跨度越小,厚层岩层分层运动的可能性越大。根据力学分析,岩梁中任一截面剪应力在梁高度方向的分布为靠近梁高中间位置的剪应力最大,向两侧其值递减。因此,软弱夹层的位置越靠近梁高的中间位置,岩层分层运动的可能性越大。

如果坚硬岩层弱面处的抗剪强度很低,即使弱面靠近岩层厚度方向的下侧,剪应力较小,仍可能超过弱面处材料的抗剪强度。由于弱面下方的岩层较薄,分层运动后的岩层进一步断裂,断裂后的岩层难形成结构,表现为在采空区碎落堆积,这与现场很多厚层坚硬顶板的运动过程较为相似。岩层剥落后,厚层坚硬顶板的厚度减小,岩层运动的步距变小,厚层岩层整体运动的剧烈程度减轻。

### 4 综放采场上覆厚层坚硬岩层运动方式的判断准则与材料力学方法的对比

前人的研究中,初压阶段采场上覆岩层运动规律的力学判据是基于两端嵌固梁考虑线荷载的力学模型、利用材料力学方法得到的<sup>[4-6]</sup>,由于不考虑岩层的层间效应,预测的岩层的运动方式为整体运动。

以细砂岩为例,作出本文所述的岩层运动的极限跨度、基于材料力学方法的岩层运动极限跨度与岩层厚度的关系曲线,如图3所示。当岩层为整体运动,在岩层厚度相同的情况下,基于弹性理论的岩层极限跨度比传统方法预测的极限跨度小。传统的材料力学方法,不考虑层间挤压力的影响,对于厚度较小的岩层,其结果是较精确的,但对于厚层岩层误差较大,基于弹性理论的研究方法考虑了层间挤压力的影响,岩层运动的极限跨度减小,即使岩层产生弯拉破坏,所预测的岩层运动的剧烈程度比传统材料力学方法预测的剧烈程度减弱。

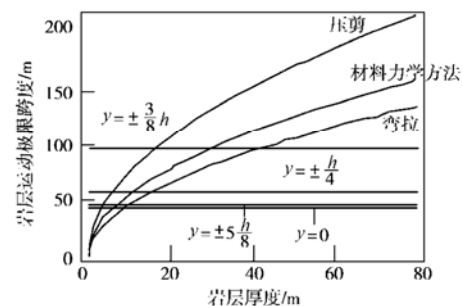


图3 岩层运动的诊断方式的对比曲线

Fig. 3 Comparative curve for judgment of strata movement

基于弹性理论的方法由于考虑了岩层的层间效应,可预测出厚硬岩层的分层运动,分层运动的岩层极限跨度比同厚度的整体运动的极限跨度小,关键层

的关键性下降。由于沉积岩的成岩特点, 厚层岩层多存在弱面, 岩层的分层运动是普遍存在的, 因此, 利用本文的判断方法更符合厚层坚硬岩层的运动规律。

## 5 综放采场上覆厚层坚硬岩层运动方式的判断准则和判断方法的现场应用

某井田#2 钻孔, 其柱状图如图 1 所示, 30.6 m 厚的砂岩是对上覆岩层运动起控制作用的岩层, 应对 30.6 m 厚的砂岩的运动规律进行预测。砂岩的材料常数:  $[\tau] = 11.4 \sim 16.1 \text{ MPa}$ ,  $[\sigma_1] = 2.0 \sim 5.4 \text{ MPa}$ ,  $\varphi = 35^\circ \sim 50^\circ$ ,  $c = 7.85 \sim 39.2 \text{ MPa}$  弱面处的抗剪强度为 0.8 MPa。

表 1 某井田#2 钻孔

Table 1 Drilling hole #2 of a coal mine

柱状图	分层厚度/m
泥岩	4.06
砂质泥岩粉砂岩互层	3.83
砂质泥岩	3.91
砂质泥岩泥质粉砂岩层	6.48
砂岩	30.60
煤	7.34
炭质泥岩	0.25

(1) 30.6 m 厚的砂岩完整, 不考虑弱面的影响

利用本文 2.1 节的判断方法, 对厚层坚硬岩层的运动方式进行诊断, 其破坏为弯拉破坏, 岩层断裂后成为两块, 初次垮落步距为 78 m。

(2) 弱面在岩层中间位置

利用本文 2.1 节的判断方法, 对厚层坚硬岩层的运动方式进行诊断。厚层坚硬岩层首先在靠近岩层厚度方向的中部被剪开, 岩层的初次垮落步距为 42 m。岩层分层的厚度为 15.3 m,

下面继续对分层后的岩层的运动规律进行判断。分层后的岩层以弯拉破坏方式运动, 且  $l_4 > l_1$ , 说明岩层分层后, 岩层并未马上断裂, 工作面还可再向前推进一段距离, 之后岩层发生弯拉破坏。

由图 2 (a) 也可得到与上述计算相同的结论。

而基于材料力学方法预测的 30.6 m 厚砂岩无论是否存在弱面, 其初次垮落步距均为 86 m。

## 6 结 论

利用厚层坚硬岩层运动方式的判断准则, 以砂岩顶板为例, 作出了岩层运动方式的判断曲线, 并给出了使用方法, 使现场可以方便地利用关键岩层的厚度, 诊断其运动方式, 为岩层控制决策提供理论依据。

厚层坚硬岩层中弱面处的抗剪强度及其在岩层厚度方向的位置是影响岩层运动方式的重要因素, 岩性和厚度影响厚层坚硬岩层的层间效应, 表现为厚层

坚硬岩层更易分层运动。

通过与传统的简单加线载荷、用材料力学进行力学分析的方法的对比, 本文的岩层运动方式判断方法更符合厚层坚硬顶板的实际情况, 能对“关键层”在运动过程中的破断方式做出准确的判断。通过实例应用, 验证了本章方法的实用性, 此方法可用于老顶初次断裂方式和步距的预测。

## 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. (JIANG Fu-xing. Design of roof control and it's specialist system[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press. 1995: 205 - 213)
- [2] 杨淑华, 姜福兴. 综采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. (YANG Shu-hua, JIANG Fu-xing. Research on the relationship between sublevel caving support load and roof structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 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. (ZHANG Ding-li, WANG Yue-han. Analysis of strata structure in fully-mechanized sublevel caving face[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 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: 41 - 78. (SONG Zhen-qi. Practical ground pressure [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press. 1988, 41 - 78)
- [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. (QIAN Ming-gao, LIU Ting-cheng. Ground pressure and strata control [M]. Beijing: Coal Industry Press. 1984: 32 - 87)
- [6] QIAN Ming-gao, MIU Xie-xing. Theory of key stratum in ground control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press. 2000: 30 - 86)
- [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: 30 - 86. (QIAN Ming-gao, MIU Xie-xing, et al. Theory of key stratum in ground control[M]. China University of Mining and Technology Press. 2000: 30 - 86)
- [7] 史红, 姜福兴. 采场上覆大厚度坚硬岩层破断规律的力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(18): 3066 - 3069. (SHI Hong, JIANG Fu-xing. Mechanics analysis of rupture regularity of hard and massive overlying strata of longwall face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2004(18): 3066 - 3069.)