

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2289

考虑层间剪应力作用的煤矿岩层控制理论探讨

李学华^{1,2}, 姚强岭^{1,2}, 张有乾³

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116;
3. 中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410007)

摘 要: 目前已被广泛应用的煤矿开采的关键层理论对煤矿岩层控制提供了重要理论依据, 并合理解释了煤矿开采矿压显现现象。该理论认为煤矿开采引起的岩层破断、失稳后形成的铰接结构控制了覆岩的运移规律, 但其忽略了层与层之间剪应力对覆岩破断运移规律的影响。基于岩层间存在剪应力这一假设, 建立了覆岩组合梁力学模型, 获得了非均质组合梁剪应力理论解; 提出了考虑层间剪应力的关键层判断步骤, 并修正了煤矿开采关键层破断距的计算公式; 研究认为关键层控制的上覆岩层并不一定同时随其破断; 基于双层岩层开采模型, 分析提出了柔性控制层概念: 即关键层破断后起到类似关键层作用而控制上覆一层或几层岩层变形的一类岩层; 进一步提出了柔性控制层的判别方式, 探讨了柔性控制层对关键层复合破断和矿压显现规律的影响, 分析认为柔性控制层的存在一定程度上减弱了周期来压强度并产生二次伴随来压现象; 结合工程案例, 验证了该假设的合理性。

关 键 词: 煤系沉积岩; 关键层; 柔性控制层

中图分类号: TU 521.2+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 07-2371-08

Study of theory of mine strata control based on shear stress between stratum

LI Xue-hua^{1,2}, YAO Qiang-ling^{1,2}, ZHANG You-qian³

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;
3. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha, Hunan 410007, China)

Abstract: The key stratum theory widely applied to coal mining area has provided a significant theoretical foundation for controlling the strata and reasonably explained the strata behaviours after excavating coal seam. The theory contends that hinge structure formed after roof failure and instability controls the movement behaviour of overburden strata, but it ignores the influence of shear strength between strata on the movement. Based on the hypothesis of interlaminar shear stress, this paper establishes the mechanical model of composite beam in overlying strata, and then derives the theoretical solution of shear stress of nonhomogeneous beam. Meanwhile, a key stratum decision step is proposed by considering the inter-layer shear stress, and the equation for calculating the breaking interval of the key stratum is corrected. The results show that overlying strata controlled by key stratum probably does not fracture with key stratum at the same time. According to the double-layer rock mining model, we propose a concept of flexible control layer (FCS) which can hinder the deformation of one or more overlying strata above it after the key stratum broke. Additionally, the discrimination method for FCS is further deduced, and the effects of FCS on the composite fracture and strata behaviours are discussed. The existence of FCS weakens periodic roof weighting to some extent and generates a secondary weighting. Finally, the rationality of this hypothesis is proved with the examples in practical engineering.

Keywords: sedimentary of coal series; key stratum; flexible control stratum (FCS)

1 引 言

砌体梁与岩层控制的关键层理论^[1-3]和传递岩梁理论^[4]在我国煤矿岩层控制中得到了广泛应用,

对促进我国煤矿岩层控制理论的发展及生产技术水平提高起到了关键作用。同时, 薄板理论也得到了较为广泛的认同^[5], 该理论能够解释一些矿压现象。针对我国西部浅埋薄基岩煤层顶板结构的特

收稿日期: 2016-09-28

基金项目: 国家重点研发计划专项(No. 2016YFC0600904); 江苏高校优势学科建设工程项目。

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFC0600904) and the Project Fund by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions.

第一作者简介: 李学华, 男, 1972 年生, 博士, 教授, 主要从事矿山岩体力学与岩层控制方面的研究。E-mail: lsxh2001@126.com

通讯作者: 姚强岭, 男, 1982 年生, 博士, 教授, 主要从事矿山岩体力学与岩层控制方面的研究。E-mail: yaoqiangling@126.com

殊性,一些学者提出了基本顶初次破断非对称三铰拱结构以及周期性破断时的短砌体梁和台阶岩梁结构^[6]等假说,合理地解释了我国浅埋深薄基岩矿区煤层开采矿压显现规律。其中,对我国煤矿开采影响最为深远的键层理论认为对岩体局部或直至地表的全部岩体的运动起控制作用的坚硬岩层称为关键层,关键层较其他岩层厚而坚硬^[3]。关键层理论将整个覆岩作为统一研究对象,对层状矿体开采过程中的矿压控制、开采沉陷控制、瓦斯抽放以及突水防治等具有重要指导意义^[7-13]。

但在工程实践中,利用关键层计算与判别关键层及关键层破断距,与实际矿压观测之间存在一些偏差,研究认为主要原因在于:一是对关键层判别和破断距计算时忽略了层间剪应力的作用^[14-17],而层间剪应力对组合梁的整体性、抗弯矩能力以及组合梁的破断距有显著影响^[18];二是由关键层的定义可知,关键层与上覆所控制的岩层同步变形。但是关键层破断时,关键层控制的上覆岩层并不一定也同时破断,对该种情形下上覆岩层运移规律研究较少。

2 非均质组合梁应力求解

煤矿覆岩关键层的判别、破断距计算等忽略层间剪应力的作用。本文假设覆岩破断后层间剪应力存在,且岩层之间不可滑移,岩层组成一组非均质组合梁,如图 1(a)所示;岩层变形几何关系如图 1(b)所示。

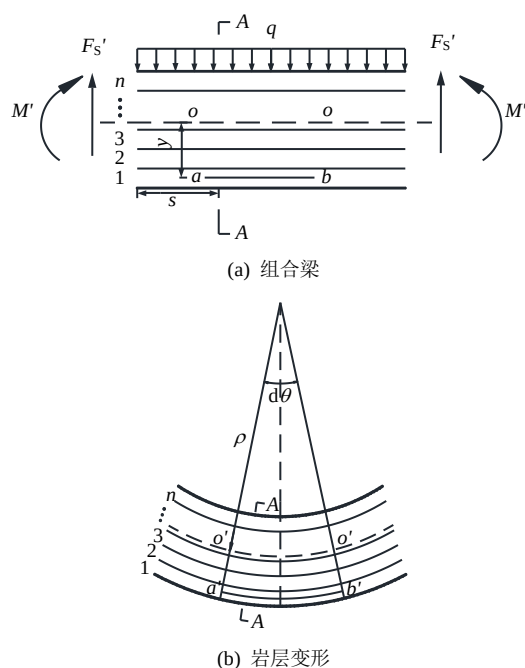


图 1 组合梁力学模型

Fig.1 Mechanical model of combination beam

假设各岩层厚度、弹性模量、体积力分别为 $h_i (i=1,2,\dots,n)$ 、 $E_i (i=1,2,\dots,n)$, $\gamma_i (i=1,2,\dots,n)$, 上覆岩层组合梁受到上部均布载荷 q , 端部受到剪力 F_s' 和弯矩 M' 的作用, 发生弯曲变形, a 、 b 点所在横截面旋转了一个角度 $d\theta$ 。假设中性层为 oo , ab 为一纵向纤维, 发生弯曲后纤维 ab 的长度变为

$$a'b' = (\rho + y)d\theta \quad (1)$$

式中: ρ 为中性层的曲率半径 (m); y 为纤维 ab 到中性层距离 (m)。

则纤维 ab 的应变为

$$\varepsilon = \frac{(\rho + y)d\theta - \rho d\theta}{\rho d\theta} = \frac{y}{\rho} \quad (2)$$

根据胡克定理, 忽略纵向纤维之间的正应力, 可以得出任意纤维的正应力 σ :

$$\sigma = E_i \frac{y}{\rho} \quad (3)$$

得到岩层横截面正应力分布特征如图 2 所示。

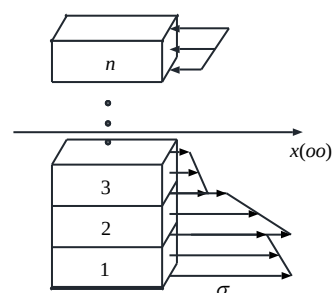


图 2 横截面 A 正应力分布特征
Fig.2 Force analysis of cross section A

组合梁横截面 A 轴力 F_N 为 0, 即

$$F_N = \int_A \sigma dA = \frac{1}{\rho} \int_A y E_i dA = \frac{1}{\rho} \int_A y dE_i A = 0 \quad (4)$$

因 $\frac{1}{\rho}$ 不为 0, 所以有

$$\int_A y dE_i A = 0 \quad (5)$$

式 (5) 如果为 0, 令 $B = E_i A$, 式 (5) 变为

$$\int_B y dB = 0 \quad (6)$$

即组合梁横截面 A 变形得到的横截面 B 对 z 轴 (中性轴) 的静矩为 0, 即中性轴通过截面 B 的形心。截面 A 与截面 B 转化关系见图 3。

问题归结为确定截面 B 的形心 y 的坐标，形心坐标计算如图 4 所示，则形心坐标 $\bar{y}$ 可用下式得出：

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i y_i}{\sum_{i=1}^n S_i} = \frac{\sum_{i=1}^n b E_i h_i y_i}{\sum_{i=1}^n b E_i h_i} \quad (7)$$

式中： b 为岩层横截面宽度 (m)； S_i 为 i 层截面转化后横截面面积 ($\text{m}^2 \text{GPa}$)； y_i 为 i 层横截面中心到中性轴的距离 (m)。

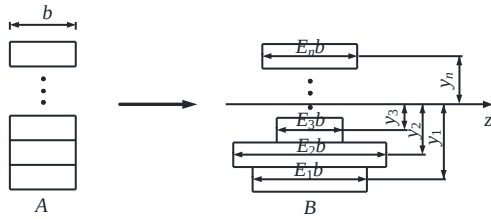


图 3 截面转化

Fig.3 Cross-section conversion

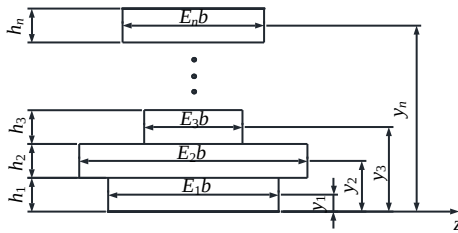


图 4 形心坐标计算

Fig.4 Calculation of centroid coordinate

横截面上的内力归结为一个力偶矩 M ，即

$$M = \int_A y \sigma dA = \frac{1}{\rho} \int_A y^2 dE_i A = \frac{1}{\rho} \int_B y^2 dB \quad (8)$$

令式 (8) 积分：

$$\int_A y^2 dE_i A = \int_B y^2 dB = I_{Bz} \quad (9)$$

式中： I_{Bz} 为横截面 B 对中性轴 z 的惯性矩，具体可通过惯性矩的平行移轴和叠加公式求得，由式 (8) 得

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{I_{Bz}} \quad (10)$$

式 (10) 代入式 (3)，得任意一点正应力的推导：

$$\sigma = \frac{E_i M y}{I_{Bz}} \quad (11)$$

关于任意一点剪应力的推导，不再赘述，结合

文献[18]和正应力推导过程中横截面转换的思想，利用横截面转换的力学思想，容易求得任意一点剪应力为

$$\tau = \frac{F_s S_{Bz}^*}{I_{Bz} b} \quad (12)$$

式中： F_s 为横截面上的剪力 (N)； I_{Bz} 为整个横截面 B 对中性轴的惯性矩 ($\text{m}^4 \text{GPa}$)； S_{Bz}^* 为横截面 B 距中性轴为 y 的横线以下部分对中性轴的静距，为关于 y 的函数 (m^3)。

3 关键层破断距修正

当上覆岩层层间剪应力不足以引起岩层脱层时，数层岩层成为一个组合梁。本文仅考虑关键层及其相邻岩层间剪应力作用，忽略上覆其他岩层间剪应力作用；当关键层和其相邻岩层发生脱层，同样忽略岩层间剪应力。通过以下几步判断关键层及求解关键层破断距：

第 1 步，根据文献[14]判断出覆岩中硬岩的位置。硬岩特指关键层理论中的概念，指在忽略层间剪应力条件下，那些在变形中挠度小于其下部岩层，而未与其下部岩层协调变形的岩层。判断出上覆岩层中所有的 m 层硬岩和所控制的软岩层组。

第 2 步，计算关键层破断距。首先假设硬岩和其上位相邻岩层不发生脱层而形成组合梁，则组合梁受到的载荷，可应用文献[3, 19]中的关键层荷载的计算方法并结合式 (10) 求出。硬岩岩层 1 与其上位相邻岩层 2 组合梁受到的载荷 q_{12} 为

$$q_{12} = \frac{I_{Bz} (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \cdots + \gamma_n h_n)}{(I_{Bz} + E_3 J_3 + E_4 J_4 + \cdots + E_n J_n)} \quad (13)$$

式中： J_n 表示岩层 n 横截面惯性矩。

若将上覆岩层考虑为固支梁，宽度为单位宽度，根据最大抗拉强度确定破断距，最大拉应力发生在最大弯矩处，最大弯矩为

$$M_{\max} = \frac{q_{12} L^2}{12} \quad (14)$$

式中： L 为顶板跨距 (m)。

根据式 (9)、(12) 求得最大抗拉强度极限跨距 L_t 为

$$L_t = \sqrt{\frac{12 R_1 I_{Bz}}{E_1 y_{\max} q_{12}}} \quad (15)$$

式中： R_1 为硬岩岩层 1 最大抗拉强度 (Pa)； $y_{\max}$ 为最底端到硬岩岩层 1 至上位相邻岩层 2 所组成的组合梁中性轴的距离 (m)。

最大弯矩处, 横截面剪力 F_s 为

$$F_s = \frac{q_{12}}{2} L \quad (16)$$

将式 (16) 代入式 (12) 得出当层间剪应力 τ 等于层间极限剪切强度 R_s 时, 跨距 L_s 为

$$L_s = \frac{2I_{Bz}R_s}{S_{Bz}^*q_{12}} \quad (17)$$

若 $L_s > L_t$, 则 L_t 为最终硬岩破断距; 反之, 则硬岩与上覆岩层发生脱层, 此种情形下, 首先根据文献[14]计算出忽略所有层间剪应力条件下的硬岩破断距 L_p ; 若 $L_s > L_p$, 则 L_s 为最终硬岩破断距, 反之, L_p 为最终硬岩破断距。

第 3 步, 确定关键层位置及其破断距。第 k 层硬岩层若为关键层, 其破断距应小于其上部所有 $m-1$ 层硬岩层的破断距, 即满足:

$$L_j < L_{j+1} \quad (j = 1, 2, \dots, m-1) \quad (18)$$

式中: L_j 、 L_{j+1} 分别为第 j 和 $j+1$ 层硬岩的破断距。

若第 j 层岩层不满足式 (18), 则将 $j+1$ 层所控制的全部岩层载荷作用到第 j 层岩层上, 重新计算第 j 层硬岩层破断距后继续判别, 最终确定出所有关键的位置、所控制的软弱岩层组及其破断距。

4 柔性控制层的概念

关键层破断时, 关键层控制的上覆岩层并不一定也同时破断, 而可能出现上覆岩层中存在某一层岩层不随其破断, 起到类似关键层的作用, 控制该层及以上一层或数层岩层的活动。为了说明这样一种岩层的存在, 建立如图 5 所示的双层岩层开采模型。煤层上覆岩层中已知岩层 1 为关键层, 并且控制上覆岩层 2, 假设一共只有岩层 1 (关键层) 和岩层 2。各岩层厚度、体积力、弹性模量、抗拉强度分别为 $h_i (i=1, 2)$ 、 $\gamma_i (i=1, 2)$ 、 $E_i (i=1, 2)$ 、 $R_i (i=1, 2)$ 。

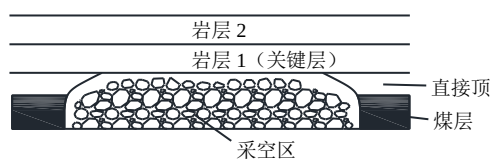


图 5 双层岩层模型示意图

Fig.5 Schematic of double-layer strata model

考虑到岩层 2 对岩层 1 (关键层) 的作用, 岩层 1 和岩层 2 不发生脱层时, 按简支梁来计算岩层

1 极限跨距为

$$(L_1)_2 = \sqrt{\frac{12R_1I_{Bz}}{E_1\gamma_{\max}\sum_{i=1}^2\gamma_i h_i}} \quad (19)$$

假设岩层 1 破断, 单独分析岩层 2, 岩层 2 的自重为

$$q_2 = \gamma_2 h_2 \quad (20)$$

极限跨距为

$$L_2 = h_2 \sqrt{\frac{2R_2}{q_2}} = \sqrt{\frac{2R_2 h_2}{\gamma_2}} \quad (21)$$

当 $L_2 < (L_1)_2$ 时, 即满足式 (22) 时, 有

$$\sqrt{\frac{R_2 h_2}{\gamma_2}} > \sqrt{\frac{6R_1 I_{Bz}}{E_1 \gamma_{\max} \sum_{i=1}^2 \gamma_i h_i}} \quad (22)$$

当岩层 1 的破断距小于岩层 2 破断距时, 即岩层 1 发生破断时, 岩层 2 并未发生破断。

岩层 1 和岩层 2 发生脱层时, 按上述思路易得出, 当满足下式时岩层 1 发生破断时, 岩层 2 不发生破断:

$$\sqrt{\frac{R_1(E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3)}{E_1 h_1(\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2)}} < \sqrt{\frac{R_2 h_2}{\gamma_2}} \quad (23)$$

岩层 1 控制岩层 2 的变形, 在忽略层间剪应力作用条件下, 可以推知在单独考虑岩层 1 和岩层 2 时, 岩层 2 的曲率 k_2 必大于岩层 1 对应位置的曲率 k_1 。因此, 岩层 1 施加给岩层 2 一定的支撑作用力, 使岩层 2 的曲率变小, 岩层 1 和岩层 2 挠曲线曲率趋于相同, 即

$$k_2 > k_1 \quad (24)$$

$$\frac{M_2}{E_2 J_2} > \frac{M_1}{E_1 J_1} \quad (25)$$

式中: M_1 、 M_2 为岩层 1 和岩层 2 所受到的弯矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)。

这里我们假定岩层 1 和岩层 2 的几何尺寸和体积力均相同, 则 M_1 和 M_2 、 J_1 和 J_2 也相同, 则岩梁的抗弯刚度 $J_1 E_1$ 、 $J_2 E_2$ 满足:

$$J_1 E_1 > J_2 E_2 \quad (26)$$

由此可以得出岩层 1 的抗弯刚度大于岩层 2 的抗弯刚度。

岩层 2 在岩层 1 破断之后仍可保持平衡,在一定条件下,可以继续作为关键层控制上覆岩层的变形,但相比岩层 1,岩层 2 的刚度较小,这里我们定义这种在关键层破断后继续作为关键层控制上覆一层或几层岩层变形的岩层为柔性控制层。

5 柔性控制层的判别

假设图 6 所示为一组岩层,其中岩层 1 为关键层,控制上覆岩层 2~ n 的变形移动,各岩层厚度为 $h_i (i=1,2,\dots,n)$, 体积力为 $\gamma_i (i=1,2,\dots,n)$, 弹性模量为 $E_i (i=1,2,\dots,n)$, 各岩层抗拉强度为 $R_i (i=1,2,\dots,n)$ 。

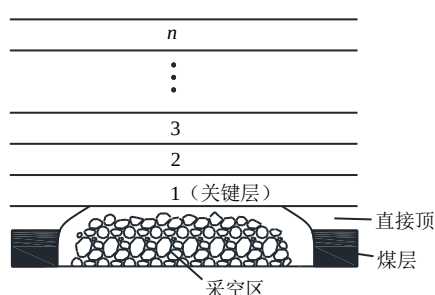


图 6 柔性控制层判别岩层示意图

Fig.6 Strata schematic of flexible control strata discriminant

岩层 1 (关键层) 发生破断后,如果上覆岩层中存在柔性控制层,柔性控制层会继续起到关键层的作用控制上覆岩层的活动和变形,并做如下判别分析:关键层 1 破断后,设关键层破断距为 L_1 ,这里把 2~ n 层岩层重新视为一组新的岩层组,在此基础上根据文献[14]寻找新的硬岩(默认岩层 2 为第 1 层硬岩),根据新的岩层组中硬岩数目是否为 1 可以分为两种情况:

(1) 新的岩层组中硬岩数目为 1,硬岩只有岩层 2,岩层 2 控制 3~ n 全部岩层,计算出硬岩 2 的破断距为 L_2 ,若满足下式:

$$L_2 > L_1 \quad (27)$$

则岩层 2 为柔性控制层,在关键层 1 破断后,岩层 2 会成为关键层,支撑上覆岩层,控制上覆岩层的变形,不随关键层 1 的破断而破断。如果 $L_2 < L_1$,则岩层 2 不是柔性控制层,关键层 1 破断后,岩层 2 会随关键层 1 的破断而破断。此后,3~ n 层岩层重新看做一组新的岩层,回到开始部分进行新的分析。

(2) 新的岩层组中硬岩数目大于 1 层,设有硬

岩 $m_j (j=1,2,3,\dots)$ 。

关键层 1 破断后,分别求出岩层 2 和各层硬岩 m_j 的极限跨距 L_2, L_{m_j} , 若

$$L_1 < L_2 < L_{m_j} \quad (j=1,2,3,\dots) \quad (28)$$

则岩层 2 为柔性控制层;若

$$L_2 < L_{m_j} \text{ 且 } L_2 < L_1 \quad (29)$$

则岩层 2 不是柔性控制层。

若岩层 2 的破断距大于任何一层硬岩 m_j 的破断距,即

$$L_2 > L_{m_j} \quad (30)$$

则岩层 2 和硬岩层 m_j 会产生复合破断,需重新计算岩层 2 和各个硬岩 m_j 破断距,重新计算时是否将硬岩 m_j 控制的所有岩层载荷作用到下位组合梁上取决于 m_j 层以上是否存在柔性控制层,若不存在柔性控制层或存在柔性控制层但破断距小于 L_1 ,则硬岩 m_j 控制的所有岩层载荷作用到下位组合梁上。判断 m_j 硬岩控制的软岩组合中是否存在柔性控制层,可将 m_j 硬岩及其控制的软岩组看作一组新的岩层进行相同的判断,重新求出岩层 2 和各个硬岩 m_j 破断距后返回开始部分重新分析,最终确定岩层 2 是不是柔性控制层。

按照上述方法对 3~ n 层岩层由下而上逐层进行判断是否为柔性控制层。

判别流程图见图 7,图中 L_i 为第 i 层岩层破断距。

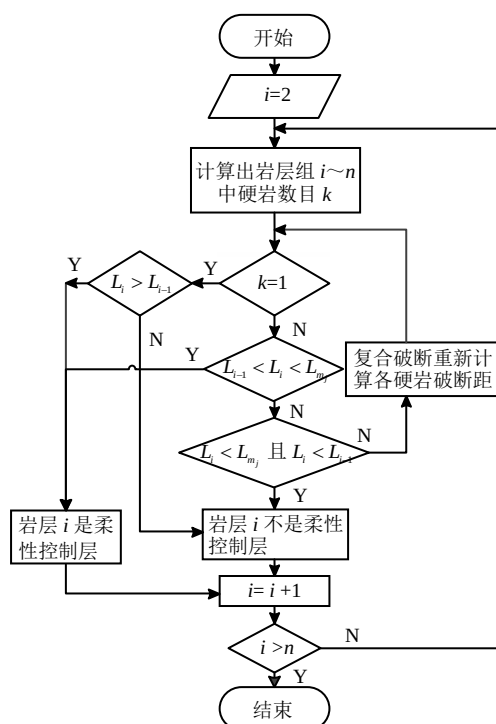


图 7 柔性控制层判别流程图

Fig.7 Flow diagram of flexible control strata discriminant

6 柔性控制层与矿压显现规律

6.1 柔性控制层对“砌体梁”结构稳定性的影响

为了防止老顶关键层“砌体梁”结构发生滑落失稳, 关键层承担的厚度在一定范围内^[19]:

$$h + h_1 \leq \frac{2\sigma_t}{\gamma} \left(\tan \varphi + \frac{3}{4} \sin \theta \right)^2 \quad (31)$$

式中: h 为关键层厚度 (m); h_1 为随关键层同步破断的上覆岩层厚度 (m); σ_t 为关键层抗拉强度 (MPa); γ 为岩层平均体积力 (MN/m³); φ 为岩层内摩擦角 (°); θ 为关键层破断块体回转角 (°)。

当关键层破断时, 上覆岩层可能随关键层的破断而破断, 如果上覆岩层中存在柔性控制层, 当关键层破断后, 上覆部分岩层因柔性控制层的存在不发生破断, 从而式子中的 h_1 会减小, 进而 $h + h_1$ 减小, 使式子得到满足, 老顶关键层砌体梁结构不发生滑落失稳, 采场的来压显现减弱。

6.2 柔性控制层对关键层复合破断的影响

此外, 关键层复合破断的砌体梁结构更容易发生滑落失稳, 柔性控制层的是否存在会产生很大的影响。见图 8, 假设硬岩 $n+1$ 下岩层中不存在柔性控制层, 仅根据硬岩 $n+1$ 控制的岩层中是否存在柔性控制层分类讨论:

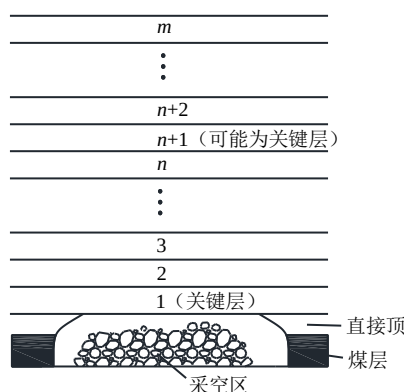


图 8 复合破断岩层模型示意图

Fig.8 Strata schematic of compound breakage

(1) 硬岩 $n+1$ 所控制的岩层中不存在柔性控制层, 此时, 当关键层 1 破断时, 硬岩 $n+1$ 控制的 $n+1 \sim m$ 层岩层的全部重量载荷作用到下位组合梁上重新计算破断跨距和判断砌体梁结构稳定性。此时, 式 (31) 中 h_1 即是关键层以上到 m 层所有层的厚度之和, 进而可以判断是否会发生老顶关键层滑落失稳。

(2) 硬岩 $n+1$ 所控制的岩层中存在柔性控制层 k , 此时, 当硬岩 $n+1$ 破断时, 由于存在柔性控制

层, 因而当硬岩随关键层 1 破断时, 硬岩所控制的上覆岩层并不一定随关键层破断而破断:

情形 1: 柔性控制层破断距大于关键层 1 的破断距, 此时, 分析老顶关键层是否发生滑落失稳时候, 只需计算第 $1 \sim k-1$ 层岩层的作用, 不需要考虑 $k \sim m$ 层对关键层 1 的作用。可以发现由于存在柔性控制层, 复合破断的层数减少, 因而矿山压力的显现会减小。

情形 2: 柔性控制层破断距小于关键层 1 的破断距, 此时, 当关键层 1 破断时, 柔性控制层也会随之破断, 所控制的岩层会随柔性控制层的破断而破断, 在计算关键层 1 的破断距和老顶是否滑落失稳时要考虑这部分岩层对关键层 1 的作用, 情况和没有柔性控制层时的情况就基本一样。

7 工程案例

某矿煤层上方数层岩层简化如表 1 所示。

表 1 岩层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanics parameters of strata

层序	厚度 /m	重度 /(kN/m ³)	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	岩性
3	2.9	24.1	1.53	18.0	砂质泥岩
2	2.0	23.8	3.83	39.0	粉砂岩
1	2.2	23.8	3.83	40.0	粉砂层

首先判断硬岩层数量, 易判断出数量为 1, 岩层 1 为硬岩, 则岩层 1 为关键层。关键层 1 与其相邻岩层间抗剪强度为 0.5 MPa。

7.1 计算关键层破断距

关键层 1 和岩层 2 形成的组合梁进行截面转化后得到截面 B, 如图 9 所示, 截面 B 对中性轴 z 惯性矩 I_{Bz} :

$$I_{Bz} = 243.835 \text{ m}^4$$

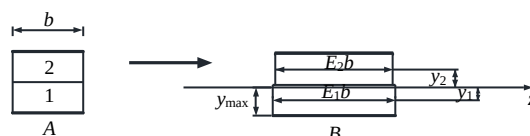


图 9 截面转化

Fig.9 Cross-section conversion

岩层 1 与其上位相邻岩层 2 组合梁受到的载荷 q_{12} 为

$$q_{12} = \frac{243.835 \times (23.8 \times 2.0 + 23.8 \times 2.2 + 24.1 \times 2.9)}{(243.835 + 36.584)} = 147.691 \text{ kPa}$$

中性轴位置可由式 (7) 确定。 $y_{\max}$ 为中性轴

到组合梁最低端的距离 $y_{\max} = 2.087 \text{ m}$ 。

由式(15)求得根据抗拉极限破断跨距 L_t :

$$L_t = \sqrt{\frac{12 \times 3830 \times 243.835}{40 \times 2.087 \times 147.691}} = 30.15 \text{ m}$$

由式(17)求得根据抗剪强度极限破断跨距 L_s :

$$L_s = \frac{2 \times 500 \times 243.835}{147.691 \times 86.8374} = 19.01 \text{ m}$$

根据文献[14]计算出忽略所有层间剪应力条件下的硬岩破断距 L_p :

$$L_p = 2.2 \times \sqrt{\frac{2 \times 3830}{61.467}} = 24.56 \text{ m}$$

根据第2节中极限跨距判断步骤,关键层1和上覆岩层发生脱层, $L_1 = L_p = 24.56 \text{ m}$ 为最终硬岩破断距。

7.2 判断柔性关键层

关键层1破断后,把2~3层岩层重新看作一组新的岩层组,新的岩层组中硬岩数目为1,岩层2为硬岩。忽略岩层2和岩层3之间的剪应力,按文献[14]中硬岩破断距计算方法,可求得 $L_2 = 25.05 \text{ m}$ 。 $L_2 > L_1$, 则岩层2为柔性控制层,不会随关键层1破断而破断,而是在关键层破断后发生二次伴随破断。

岩层2破断后,岩层3破断距 $L_3 = 19.19 \text{ m} < L_2$, 会随之破断,岩层3不是柔性控制层。

7.3 矿压观测对比

工作面开切眼完成后,在工作面中部布置测站对支架压力进行检测,连续进行50d的现场矿压观测,得到支架压力和距开切眼距离的关系,如图10所示,其中周期来压判据以支架的平均循环末阻力与均方差之和来作为判断顶板周期来压的主要指标^[20]。

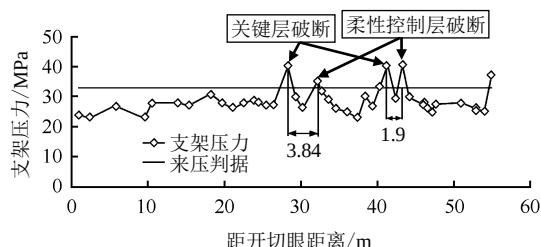


图10 现场矿压观测分析
Fig.10 On-site pressure observation and analysis

由图可知,基本顶初次来压跨距为28.32m,来压之后推进3.84m后发生二次来压,同样在第2次关键层破断顶板来压后1.9m发生二次来压。采

场顶板来压后伴随二次来压,说明顶板岩层并非一次性随关键层破断而发生破断,存在前文所述柔性控制层,在关键层破断后起到类似关键层作用而控制上覆一层或几层岩层变形。

8 结 论

(1) 给出了非均质组合梁任意点正应力和切应力的确定公式,并在考虑层间剪应力的基础上对关键层破断距进行修正。

(2) 关键层破断后上覆岩层中可能存在某一层岩层不随之破断,控制该层以上数层岩层的活动。提出了柔性控制层概念,即指关键层破断后起到类似关键层作用而控制上覆一层或几层岩层变形的一类岩层。

(3) 通过比较各岩层破断距和关键层破断距的关系,以确定岩层是否为柔性控制层,并探讨了柔性控制层对关键层复合破断和矿压显现规律的影响。

参 考 文 献

- [1] 钱鸣高,李鸿昌.采场上覆岩层活动规律及其对矿山压力的影响[J].煤炭学报,1982,(2):1-12.
QIAN Ming-gao, LI Hong-chang. The movement of overlying strata in longwall mining and its effect on ground pressure[J]. *Journal of China Coal Society*, 1982, (2): 1-12.
- [2] 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.
- [3] 钱鸣高,缪协兴,许家林.岩层控制中的关键层理论研究[J].煤炭学报,1996,21(3):225-230.
QIAN Ming-gao, MIAO Xie-xing, XU Jia-lin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. *Journal of China Coal Society*, 1996, 21(3): 225-230.
- [4] 宋振骐.实用矿山压力控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,1988.
SONG Zhen-qi. Practical underground pressure control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1988.
- [5] 贾喜荣,李海,王青平,等.薄板矿压理论在放顶煤工作面中的应用[J].太原理工大学学报,1999,30(2):179-183.

- JIA Xi-rong, LI Hai, WANG Qing-ping, et al. Rock slab theory of ground pressure applied in sub-level caving face[J]. **Journal of Taiyuan University of Technology**, 1999, 30(2): 179—183.
- [6] 黄庆享. 浅埋煤层长壁开采顶板控制研究[D]. 西安: 西安科技大学, 1999.
- HUANG Qing-xiang. Study on roof control in shallow seam longwall mining[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 1999.
- [7] 许家林, 钱鸣高. 关键层运动对覆岩及地表移动影响的研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 122—126.
- XU Jia-lin, QIAN Ming-gao. Study on the influence of key strata movement on subsidence[J]. **Journal of China Coal Society**, 2000, 25(2): 122—126.
- [8] 李迎富, 华心祝, 杨科, 等. 松散含水层上下提工作面压架因素敏感性分析与压架预防[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1425—1433.
- LI Ying-fu, HUA Xin-zhu, YANG Ke, et al. Sensitivity analysis of factors influencing support crushing in working face of improving upper limit under loose aquifer and countermeasures against support crushing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(5): 1425—1433.
- [9] 缪协兴, 钱鸣高. 采动岩体的关键层理论研究新进展[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 25—29.
- MIAO Xie-xing, QIAN Ming-gao. Advance in the key strata theory of mining rockmass[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2000, 29(1): 25—29.
- [10] FENG M M, MAO X B, BAI H B, et al. Analysis of water insulating effect of compound water-resisting key strata in deep mining[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2007, 17(1): 1—5.
- [11] WANG L G, MIAO X X, WU Y, et al. Discrimination conditions and process of water-resistant key strata[J]. **Mining Science and Technology**, 2010, 20(2): 224—229.
- [12] ZHANG Z Q, XU J L, ZHU W B, et al. Simulation research on the influence of eroded primary key strata on dynamic strata pressure of shallow coal seams in gully terrain[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2012, 22(1): 51—55.
- [13] PU H, MIAO X X, YAO B H, et al. Structural motion of water-resisting key strata lying on overburden[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2008, 18(3): 353—357.
- [14] 许家林, 钱鸣高. 覆岩关键层位置的判别方法[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(5): 463—467.
- XU Jia-lin, QIAN Ming-gao. Method to distinguish key strata in overburden[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2000, 29(5): 463—467.
- [15] 钱鸣高, 茅献彪, 缪协兴. 采场覆岩中关键层上载荷的变化规律[J]. 煤炭学报, 1998, 23(2): 135—139.
- QIAN Ming-gao, MAO Xian-biao, MIAO Xie-xing. Variation of loads on the key layer of the overlying strata above the workings[J]. **Journal of China Coal Society**, 1998, 23(2): 135—139.
- [16] 茅献彪, 缪协兴, 钱鸣高. 采动覆岩中关键层的破断规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(1): 39—42.
- MAO Xian-biao, MIAO Xie-xing, QIAN Ming-gao. Study on broken laws of key strata in mining overlying strata[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 1998, 27(1): 39—42.
- [17] 茅献彪, 缪协兴, 钱鸣高. 采动覆岩中复合关键层的断裂跨距计算[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 1—4.
- MAO Xian-biao, MIAO Xie-xing, QIAN Ming-gao. Calculation for fracture span of compound key strata in mining rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(2): 1—4.
- [18] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- LIU Hong-wen. Mechanics of materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [19] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- QIAN Ming-gao, SHI Ping-wu. Ground pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.
- [20] 郭浩森. 特厚煤层综放采场矿压显现特征及覆岩移动规律研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2012.
- GUO Hao-shen. Study on movement law of overlying strata and surface of fully mechanized sublevel caving mining in extremely thick coal seam[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2012.