

文章编号: 1673-3363-(2012)03-0307-05

采动覆岩隔水层稳定性力学模型及应用研究

姚邦华, 白海波, 黄汉富, 浦海

(中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008)

摘要 为了研究覆岩隔水层的稳定性, 预防煤矿顶板突水灾害, 实现保水采煤, 本文将单一岩层形成的顶板隔水层简化为地基上四边固支的薄板, 考虑了隔水层以下破碎岩体对隔水层的支撑作用, 根据能量法推导了其挠度以及应力表达式, 得到了覆岩隔水层应力分布特性, 求出了临界载荷随工作面推进距离的变化规律, 并结合具体工程实例, 利用数值模拟软件进行了覆岩隔水层稳定性分析。研究表明: 1) 煤层开采后, 覆岩隔水层在长边边缘中间应力最大, 容易发生破坏; 2) 破碎岩体的支撑作用对隔水层的稳定性具有重要的影响, 煤层采厚越小, 破碎岩体对覆岩隔水的支撑作用越强, 隔水层越不容易破断。研究成果可为煤矿顶板防治水研究以及保水采煤实践提供一定的参考。

关键词 隔水层; 力学模型; 薄板理论; 能量法

中图分类号 TD 74

文献标识码 A

Mechanical Model of Stability of Water-Resistant Strata Under Mining and Its Application

YAO Bang-hua, BAI Hai-bo, HUANG Han-fu, PU Hai

(State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract In this paper, to research the stability of overlying water-resistant strata and prevent the roof water inrush accidents as well as implement water-preserved-mining, we regarded the water-resistant strata composed by only one rock stratum as clamped rectangular thick plate on foundation, and took the support effect of broken rock mass under the water-resistant strata into account, then deduced the deflection and stress expression according to energy method, and obtained the stress distribution characteristics of overlying water-resistant strata, as well as the variation rule of critical load along with working face advancement. In addition, combined with specific engineering practice, the stability of overlying water-resistant strata was analyzed by numerical simulation. The results indicate that: 1) after coal seam mining, the stress of overlying strata reaches the maximum value in the middle of longer boundary of the plate, where the rock is easy to be damaged; 2) the supporting effect of broken rock mass have important influence on the stability of overlying water-resistant strata, that is, the thinner the mining thickness is, the stronger the supporting effect of broken rock mass to the overlying water-resistant strata is, and the more difficult the water-resistant strata to be broken. The research

收稿日期: 2011-10-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226800); 国家自然科学基金项目(50974115, 50904065); 高等学校学科创新引智计划项目(B07028)

作者简介: 姚邦华(1984-), 男, 山东省潍坊市人, 博士, 从事岩石力学和渗流力学方面的研究。

E-mail: yaobanghua@126.com

Tel: 13813284099

results can provide some reference for the prevention of roof water intrush and water-preserved-mining practice.

Key words water-resistant strata; mechanical model; plate theory; energy method

中国煤炭探明储量仅次于俄罗斯和美国居第 3 位,煤炭产量已居世界首位^[1-3]。然而与世界其他产煤大国相比,一方面,中国煤炭生产过程中水害事故发生率高、规模大,造成的群死群伤人数仅次于瓦斯事故^[4]。另一方面,在我国突水造成的直接经济损失一直十分严重,据统计,在过去的 20 年间,中国有 250 多对矿井被淹,造成直接经济损失 350 多亿元^[5]。此外,我国 70% 的煤矿缺水^[6],而煤矿排水浪费大量水资源,破坏了环境。为了降低突水带来的人员伤亡和财产损失,保护宝贵的水资源,中国学者开展了煤矿水灾害防治方面的研究工作并且取得了丰硕的研究成果,提出了一系列的理论和方法,为煤矿水灾害防治研究做出了重大贡献。其中,钱鸣高、缪协兴^[7]提出了岩层控制的关键层理论,将关键层视为两端固支的梁模型,分析了其变形、破断等规律,并将其应用于覆岩运动控制、煤层顶底板突水等工程实践中;缪协兴^[5, 8]教授在岩层控制的关键层理论的基础上又提出了隔水关键层的基本概念,将隔水关键层简化为两端固支的梁/组合梁模型,分析了隔水关键层的隔水性能和强度特征等。此外,一些学者^[9-10]将关键层视为四边固支的薄板,利用弹性薄板理论建立了关键层的刚度条件和强度条件等,对覆岩关键层进行了分析。

笔者在上述研究成果的基础上,考虑了覆岩隔水层以下破碎岩体对隔水层的支撑作用,将单一岩层形成的覆岩隔水层视为地基上四边固支的薄板,建立了相应的力学模型,并通过数值模拟计算,验证了力学模型的正确性,成功应用于矿区顶板突水防治实践。研究成果可为煤矿顶板突水防治及保水采煤实践提供一定的参考。

1 矿区水文地质条件

山西某矿一采区北部煤层上覆岩层基岩较薄,松散层较厚。在综采作业过程中(采厚为 5 m),首采工作面却发生了数次顶板突水,工作面停产数月,造成了较大的经济损失,为了防止工作面顶板突水,保护水资源,保证工作面安全开采,我们在此矿区开展了顶板突水防治实践,对司马矿一采区北部不同采高条件下的覆岩稳定性进行了分析。研究区的地质条件为:工作面宽为 100 m,工作面最

大推进距离约为 400 m,煤层厚为 5 m,埋深约为 200 m。第四系厚度约为 110 m,其中第四系内含水层总厚度约为 30 m,富水性强,煤层顶板主要由砂岩和砂质泥岩构成,属中硬性顶板。距离煤层上方 60 m 处为厚度为 15 m 的砂质泥岩,强度较大,隔水能力较强。

为了研究不同采高情况下覆岩隔水层稳定性,在研究区取样并进行了岩石力学实验,得到覆岩力学参数。根据岩石力学实验数据(如表 1),隔水层参数如下:弹性模型 $E = 5 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.25$,厚度 $t = 15 \text{ m}$,内聚力 $c = 3 \text{ GPa}$,内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$ 。

表 1 覆岩物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of overlying rock mass

名 称	弹性模量 /MPa	泊松比	内聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	厚度 /m
第四系	1000	0.25	0.5	20	110
细粒砂岩	15000	0.3	3.0	30	10
泥质砂岩	12000	0.3	2.5	30	10
砂质泥岩	8000	0.25	3.0	25	15
泥质砂岩	12000	0.3	3.0	30	20
粉砂岩	15000	0.3	4.0	30	10
砂质泥岩	8000	0.25	2.0	25	25
泥岩	5000	0.25	1.5	25	5
3 煤	1000	0.25	1.0	25	5
泥岩	5000	0.25	1.5	25	10
细粒砂岩	15000	0.3	4.0	30	20
砂质泥岩	10000	0.25	2.5	25	20

2 覆岩隔水层稳定性力学模型

2.1 力学模型建立

由研究区水文地质条件可知,综采工作面尺寸大于 100 m,隔水层厚度小于 20 m,则岩层分层厚度与宽度之比基本满足弹性薄板条件。并且岩层弯曲时的最大下沉量远小于板厚,故可将其视为弹性板小挠度弯曲问题,采动覆岩地质模型见图 1。

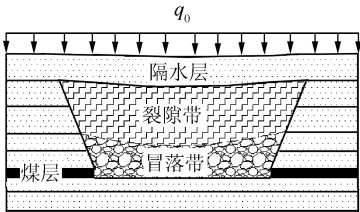


图 1 采动覆岩地质模型
Fig.1 Roof mined rock mass geology model

在隔水层中面(平分厚度的位置)上建立坐标系(如图2所示), 隔水层的厚度为 t , 工作面的长度为 a , 宽度为 b 。将隔水层看作是地基上四边固支的薄板, 受到上覆岩层的均布载荷作用, 对其进行了力学分析, 得到了其变形后挠度及应力表达式, 研究了其破断临界载荷。

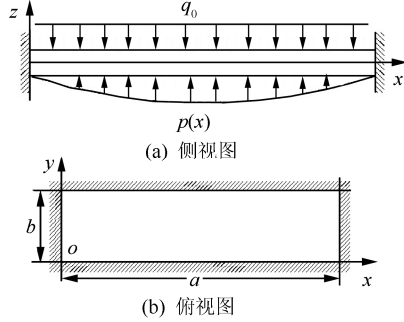


图2 采动覆岩隔水层薄板力学模型

Fig.2 Mechanical model for overlying mined rock mass

2.2 地基上四边固支薄板的能量法分析

根据弹性薄板理论, 取满足四边固支薄板边界条件的挠度函数为:

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} (1 - \cos \frac{2m\pi x}{a}) (1 - \cos \frac{2n\pi y}{b}) \quad (1)$$

当板为四边固支边界时, 其形变势能为:

$$U = \frac{D}{2} \iint (\nabla^2 w)^2 dx dy$$

将式(1)代入并整理得到

$$U = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} 2D\pi^4 A_{mn}^2 ab \left(\frac{3m^4}{a^4} + \frac{3n^4}{b^4} + \frac{2m^2 n^2}{a^2 b^2} \right) \quad (2)$$

载荷产生的外力势能包括2部分, 1) 上覆岩层的重力引起的均布载荷产生的 V_1 ; 2) 破碎岩体对隔水层支撑作用引起的 V_2 。

$$V = - \iint (q - kw) w dx dy = V_1 + V_2 \quad (3)$$

$$V_1 = - \int_0^a \int_0^b \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} q \left[(1 - \cos \frac{2m\pi x}{a}) \left(1 - \cos \frac{2n\pi y}{b} \right) \right] dx dy =$$

$$- \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} q ab$$

$$V_2 = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b k \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn}^2 \left[\left(1 - \cos \frac{2m\pi x}{a} \right) \left(1 - \cos \frac{2n\pi y}{b} \right) \right]^2 dx dy =$$

$$\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} k A_{mn}^2 \frac{9ab}{8}$$

式中 k 为弹性地基系数(MPa/m), 反映的是隔水层以下破碎岩体对其支撑能力。

形变势能和外力势能的总和为:

$$\Pi = U + V$$

得到

$$\Pi = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} 2D\pi^4 A_{mn}^2 ab \left(\frac{3m^4}{a^4} + \frac{3n^4}{b^4} + \frac{2m^2 n^2}{a^2 b^2} \right) - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (A_{mn} q ab - k A_{mn}^2 \frac{9ab}{8}) \quad (6)$$

$$\text{由 } \frac{\partial \Pi}{\partial A_{mn}} = 0 \text{ 得}$$

$$A_{mn} = \frac{q}{4D\pi^4 \left(\frac{3m^4}{a^4} + \frac{3n^4}{b^4} + \frac{2m^2 n^2}{a^2 b^2} \right) + \frac{9k}{4}} \quad (7)$$

根据薄板弹性理论, 可以求得应力的表达式, 再带入以下公式, 得到主应力的表达式

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{matrix} \right\} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (8)$$

根据岩石的摩尔-库伦屈服准则可以求出关键层的破坏临界载荷等。

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + 2c \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (9)$$

2.3 隔水层的应力分布特征

取隔水层以上压力为3 MPa, 模拟130 m的上覆岩层压力。图3为工作面推进到100, 200 m时顶板隔水层上表面的应力 σ_y 分布等值线图。

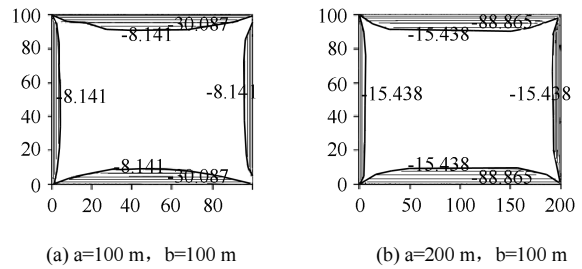


图3 隔水层上表面的应力 σ_y 分布($k=10$ MPa/m)

Fig.3 Distribution of σ_y on the surface of water-resistant strata ($k=10$ MPa/m)

由图3可发现, σ_y 在边缘较大, 中间较小, 且在边缘中间最大, 往两边逐渐减小为0。还可看到, 工作面距离从100 m推进到200 m后, 隔水层的应力 σ_y 在增大, 最大值增加了将近1倍。

2.4 隔水层的临界载荷分析

将主应力表达式带入公式(9)可求得随工作面推进距离岩层破断的临界载荷, 如图4所示。

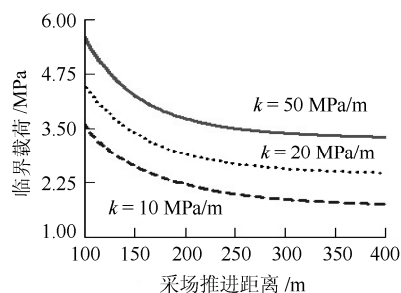


图 4 随工作面推进距离临界载荷的变化规律

Fig.4 Critical load of key strata with working face advancement

从图 4 可看出,随工作面推进,临界载荷不断减小。还可发现,地基系数对临界载荷有较大影响,地基系数越大,临界载荷也越大,表明隔水层以下岩层的性质、煤层采厚等对隔水层的稳定性起到重要作用。这是因为隔水层以下破碎岩体对其有一定支撑作用,弹性地基系数越大,表明对隔水层的支撑作用就越强,隔水层就越不容易破断,例如,弹性地基系数为 $k = 10 \text{ MPa/m}$,工作面推进到 400 m 之前隔水层已经达到临界载荷 (3 MPa),但当弹性地基系数 $k = 50 \text{ MPa/m}$ 时,隔水层最终未发生破断。

3 数值模拟验证

3.1 数值模型的建立

为了验证上述力学模型的正确性,根据矿区水文地质条件,建立了相应的数值计算模型(图 5),模拟了不同采高情况下覆岩隔水层的稳定性。建立的模型水平方向为 400 m,垂直方向为 200 m,划分为 4 800 个单元。煤层从左到右开挖,开挖长度为 200 m,每个开挖步距为 20 m,共 10 步。模型边界条件:上边界施加 1 MPa 载荷,模拟上覆 50 m 的表土层压力,其余三边都是位移约束。对于渗流边界条件:上边界含水层压力为 0.5 MPa;其他三边为不透水边界。模型求解所需要的参数见表 1 中。

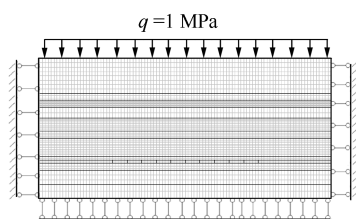


图 5 数值模拟计算模型

Fig.5 Numerical simulation model for overlying strata stability

3.2 单元损伤演化规律

根据相关文献^[11-12],弹性地基系数与弹性模量存在如下关系:

$$k = 1 / \sum_{i=1}^{i=n} \frac{h_i}{E_i} \quad (10)$$

在数值计算中,为了研究隔水层弹性地基系数的变化对隔水层稳定性的影响,分别建立了考虑单元损伤弹性模量变化,以及不考虑弹性模量变化的模型。

岩体在采动影响下发生损伤变形,当煤岩体细观单元的应力状态或应变状态满足某一给定的损伤阈值时,单元开始损伤,损伤单元的弹性模量由下式表达:

$$E = (1 - D)E_0 \quad (11)$$

式中: D 为损伤变量; E , E_0 分别为损伤单元和无损单元的弹性模量。

当剪应力达到损伤阈值时,损伤变量 D 为:

$$D = \begin{cases} 0 & (\varepsilon < \varepsilon_{c0}) \\ 1 - \frac{f_{cr}}{E_0 \varepsilon} & (\varepsilon_{c0} \leq \varepsilon_r) \end{cases} \quad (12)$$

式中: f_{cr} 为抗压残余强度, ε_{c0} 为最大压应变; ε_r 为残余应变。

3.3 数值模拟方案及结果分析

1) 数值模拟方案的确定

为充分了解弹性地基系数对隔水层的稳定性和渗流特性的影响,设计以下计算方案以便于对比分析。

方案 1: 煤层采全厚(5 m), 不考虑覆岩弹性模量变化; 方案 2: 煤层采全厚(5 m), 考虑覆岩弹性模量损伤变化; 方案 3: 煤层采厚 4 m, 考虑覆岩弹性模量损伤变化; 方案 4: 煤层采厚 3 m, 考虑覆岩弹性模量损伤变化。

2) 隔水层稳定性分析数值模拟结果及分析

图 6 为方案 1~4 的模拟结果。

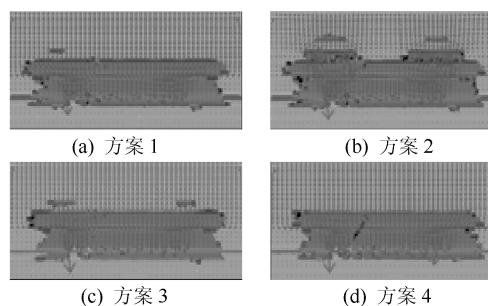


图 6 同方案情况下覆岩破坏与渗流矢量图

Fig.6 Verlying rock failure and seepage for different scheme

图7 为不同采厚情况下涌水量变化曲线。

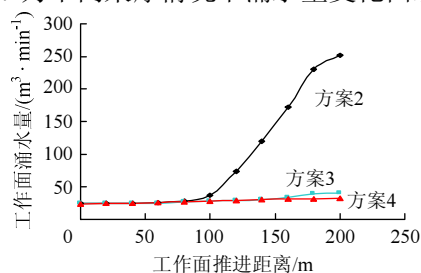


图7 不同方案下工作面涌水量变化

Fig.7 Water inflow with working face advancement under different scheme

在方案1的条件下,采动影响下隔水层只是产生轻微破坏,不会发生顶板突水,这与工程实践不符;在方案2的条件下,覆岩隔水层发生了破断,发生了顶板突水,与现场情况相符。因此,为了防止顶板突水,需要降低采高保证顶板隔水层采动后不破断,预防发生顶板突水。可以从图中看到在方案3的条件下,虽然隔水层产生了局部破坏,但仍具有较强的隔水能力(工作面涌水量小于 $50 \text{ m}^3/\text{min}$),在方案4的条件下,当采厚降低为 3 m 后,隔水层是稳定的,不会造成煤层顶板突水。

4 结 论

1) 煤层采动后,覆岩隔水层在长边边缘应力最大,若覆岩隔水层破断,则长边边缘最先破坏。

2) 不同采厚对覆岩结构稳定性影响很大,采厚越大,覆岩越容易发生失稳破坏,在综放开采无充填条件下,为了预防顶板突水,研究区煤层采厚应控制在 4 m 左右。

3) 破碎岩体的支撑作用对隔水层的稳定性具有重要的影响,煤层采厚越小,破碎岩体对覆岩隔水的支撑作用越强,隔水层越不容易破断。

参考文献:

- [1] 毛节华,许惠龙.中国煤炭资源预测与评价[M].北京:科学出版社,1999.
- [2] 阎长乐.中国能源发展报告[M].北京:经济管理出版社,1997.
- [3] 缪协兴,钱鸣高.中国煤炭资源绿色开采研究现状与展望[J].采矿与安全工程学报,2009,26(1): 1-14. MIAO Xie-xing, QIAN Ming-gao. Research on green mining of coal resources in China: current status and future prospects[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(1): 1-14.
- [4] 缪协兴,白海波.华北奥陶系顶部碳酸岩层隔水特性及分布规律[J].煤炭学报,2011,36(2): 185-193. MIAO Xie-xing, BAI Hai-bo. Water-resisting character-

istics and distribution rule of carbonate strata in the top of Ordovician in North China[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 185-193.

- [5] 缪协兴,浦海,白海波.隔水关键层原理及其在保水采煤中的应用研究[J].中国矿业大学学报,2008,37(1): 1-4. MIAO Xie-xing, PU Hai, BAI Hai-bo. Principle of water-resisting key strata and its application in water-preserved mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(1): 1-4.
- [6] 钱鸣高,缪协兴.论科学采矿[J].采矿与安全工程学报,2008,25(1): 1-10. QIAN Ming-gao, MIAO Xie-xing. On scientized mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(1): 1-10.
- [7] 钱鸣高,缪协兴,许家林,茅献彪.岩层控制的隔水关键层理论[M].徐州:中国矿业大学出版社,2000.
- [8] 缪协兴,陈荣华,白海波.保水开采隔水关键层的基本概念及力学分析[J].煤炭学报,2007,32(6): 561-564. MIAO Xie-xing, CHEN Rong-hua, BAI Hai-bo. Fundamental concepts and mechanical analysis of water-resisting key strata in water-preserved mining[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(6): 561-564.
- [9] 翟所业,张开智.用弹性板理论分析采场覆岩中的关键层[J].岩石力学与工程学报,2004,23(11): 1856-1860. ZHAI Suo-ye, ZHANG Kai-zhi. Analysis on key layer of overlying strata with elastic slab theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1856-1860.
- [10] 林海飞,李树刚,成连华,等.基于薄板理论的采场覆岩关键层的判别方法[J].煤炭学报,2008,33(10): 1081-1085. LIN Hai-fei, LI Shu-gang, CHENG Lian-hua, et al. Key layer distinguishing method of overlying strata based on the thin slab theory[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 1081-1085.
- [11] 姚邦华,周海峰,陈龙.重复采动下覆岩裂隙发育规律模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2010,27(3): 443-446. YAO Bang-hua, ZHOU Hai-feng, CHEN Long. Numerical simulation about fracture development in overlying rocks under repeated mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(3): 443-446.
- [12] 浦海,缪协兴.综放采场覆岩冒落与围岩支承压力动态分布规律的数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2004,23(7): 1122-1126. PU Hai, MIAO Xie-xing. Numerical simulation of dynamic falling of overlying rocks and abutment pressure in surrounding rocks for fully-mechanized top-coal caving stope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1122-1126.