5月

2009年

煤 炭 学 报 JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY Vol. 34 No. 5 May 2009

文章编号:0253-9993(2009)05-0594-05

## 急倾斜多煤层上保护层保护范围的数值模拟

袁志刚,王宏图,胡国忠,李晓红,范晓刚,洪 松

(重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室,重庆 400030)

摘 要:针对急倾斜煤层上保护层俯伪斜开采的保护范围划定问题,采用三维快速拉格朗日法, 通过模拟上保护层俯伪斜开采后被保护层的应力场及变形场的动态发展过程,确定了随着上保护 层工作面的推进,被保护层的垂直层理面应力和煤层变形规律;根据上保护层开采后的应力卸压 保护准则和煤层变形保护准则,确定了上保护层沿走向和倾向的保护范围.研究表明,急倾斜煤 层俯伪斜上保护层开采后,上保护层俯伪斜采煤法沿倾向上、下边界的卸压角分别为81.5 和 74°;沿走向的卸压角在倾向上呈非均匀分布,大小为30~52°,伪倾斜工作面中部的走向卸压 角最大,为52°.数值模拟结果与现场考察结果比较接近.

关键词:急倾斜煤层;上保护层;保护范围;俯伪斜开采

中图分类号: TD713.3 文献标识码: A

# Numerical simulation for protection scope of upper protective seam in steeply inclined multi-coal seam

YUAN Zhi-gang, WANG Hong-tu, HU Guo-zhong, LI Xiao-hong, FAN Xiao-gang, HONG Song

(Key Lab for Exploitation of China Southwestern Resources & Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract**: Aimed at the problem on protection scope demarcation of upper steeply inclined protective seam of pitching oblique mining, based on the method of three dimensional fast Lagrange method, the dynamic development process of stress distribution and deformation of protected coal seam with exploitation of steeply inclined protective seam of pitching oblique mining were simulated using FLAC<sup>3D</sup>. Besides, the law of the stress and deformation normal to the protected coal samdwich were analyzed with the advance of upper protective layer coalface; based on the protection rule of pressure-relieving and normal deformation of protected seam, the pressure-relief angles on the dip and strike were ascertained. The result shows that the protection angles on the upper and bottom dip direction are 81.5 and 74° respectively; while the protection angles on strike direction are variant ranging from 30 to 52°; the most largest pressure-relieving angle is in the middle pitching oblique coalface. Through comparison, the result of the numerical simulation is close to the field investigation.

Key words: steeply inclined coal seam; upper protective layer; protection scope; pitching oblique mining

《煤矿安全规程》规定:"在煤与瓦斯突出矿井开采煤层群时,必须首先开采保护层".保护层开采 的关键是确定保护范围和保护效果,尤其是针对急倾斜俯伪斜上保护层保护范围划定遇到的难题更大.现 有方法是根据矿井实际条件进行现场考察确定,采用的考察指标主要有煤层的瓦斯压力、煤层变形参数以

收稿日期: 2008-06-19 责任编辑: 柴海涛

作者简介: 袁志刚 (1984—), 男, 江西吉安人, 硕士研究生. E-mail: cquyzg@163.com

**基金项目**:国家重点基础研究发展计划(973)基金资助项目(2005CB221502);国家自然科学创新群体基金资助项目(50621403); 河南省煤矿瓦斯与火灾防治重点实验室开放基金资助项目(HKLGF200706);重庆市科委资助项目(CSTC, 2006BB7147, 2006AA7002)

袁志刚等: 急倾斜多煤层上保护层保护范围的数值模拟

内摩擦

角/(°)

34.6

12.5

33.4

29.8

42.7

32.0

12.5

20.0

40 0

抗拉强

度/MPa

3.34

1.90

4.70

4.17

7.10

2.56

1.90

3.60 4.00 595

及煤层透气性系数等参数,工作面需要考察的工作量大日被保护层切眼位置难以确定.因此,目前还没有 一种科学地确定保护层开采保护范围的方法.本文结合某矿急倾斜俯伪斜上保护层开采的实际,针对俯伪 斜开采与一般直壁工作面不同的布置条件,采用 FLAC<sup>3D</sup>有限差分软件进行保护层开采的数值模拟,根据 上保护层开采后被保护层各点的应力值、应变值进行分析,从而确定上保护层开采的保护效果和划定保护 范围.

岩石名称

粉砂岩

K4 煤层

石灰岩

粉砂质页岩

硅质石灰岩

钙质页岩

K<sub>6</sub> 煤层

铝土页岩

茅口灰石

弹性模

量/MPa

5 318

1 800

7 228

5 762

7 867 6 500

2 600

4 650

7 800

泊松比

0.25

0.38

0.24

0.28

0.23

0.24

0.35

0.30

0.24

#### 矿井煤系地层与开采条件 1

某矿开采的煤层属二叠系龙潭组的煤 层,煤系含煤6层,K<sub>6</sub>,K<sub>4</sub>为主采煤层. 2609 采区 K<sub>6</sub>, K<sub>4</sub> 煤层平均厚度分别为 1.3 和 2.2 m、均有突出危险性、2 层煤倾角和 层间距平均为 81° 和 38 m; K<sub>6</sub> 煤层作为上 保护层开采,工作面采用伪倾斜柔性掩护支 架采煤法, 伪斜角为 30°, 垂高 46 m, 上、 下部同时推进,采空区处理方法为自然垮落 法. K<sub>6</sub> 与 K<sub>4</sub> 煤层之间的岩性分布见表 1.

#### 2 数值计算模型

### 2.1 FLAC<sup>3D</sup>模型的建立

坦坦工作而开采引起的覆岩移动变 为模拟 2609 工作面 K。煤层俯伪斜开采,同时消除模型边界效应

形规律建立三维数值模型<sup>[1]</sup>(图1).三维计算模型的尺寸为 380 m×100 m×116 m (长×宽×高),其中工作面开采的模拟 范围为170.0 m×93.0 m×1.3 m (走向长×伪斜长×高)、伪 斜角 30°的平行六面体.

#### 2.2 岩体破坏准则和物理力学参数的选取

煤系岩体是塑性较强的弹塑性材料,可用近似理想的弹塑 性模型,破坏准则选用 Mohr – Coulomb 准则,即f =  $\sigma_3 - \sigma_1$ ,  $f_s = (\sigma_1 - \sigma_3) - 2c\cos \varphi - (\sigma_1 + \sigma_3)\sin \varphi$ ,其中,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ 分别 Fig. 1 Numerical simulation model 为最大和最小主应力;  $c, \varphi, \sigma_1$ 分别为材料的黏聚力、内摩擦角和抗拉强度. 当 $f_1 < 0$ 时, 材料将发生剪 切破坏; f, >0时, 材料将发生拉伸破坏.

采空区垮落矸石是一种松散介质,随着时间的增加,垮落矸石逐渐被压实,强度逐渐提高,可近似的 用弹性支撑体表述. 矸石的密度 $\rho$ 、弹性模量 E 和泊松比 $\nu$  都随时间t (年) 增加, 由 $\rho$  = 1600 + 800(1  $e^{-1.25t}$ ,  $E = 15 + 175(1 - e^{-12.5t})$ ,  $\nu = 0.05 + 0.2(1 - e^{-1.25t})$  来表述<sup>[2]</sup>.

在计算所需的岩体物理力学参数中,参数修正的主要任务是对岩体的弹性模量进行修正<sup>[3]</sup>.本文结 合邻近矿井对研究区域的岩层物理力学参数进行修正,表1给出了主要煤岩层的物理力学参数.

#### 2.3 模型边界条件的确定

根据采区相邻煤矿地应力测量结果,水平方向的最大主应力远远大于竖直方向的主应力,说明水平方 向的地应力包括由构造作用所产生的构造应力.因此,为了更好地模拟初始应力场,在模型的z方向(平 行煤层走向)、x方向(垂直煤层走向)两端施加应力边界,经反复调整边界应力反演计算,使实测点计 算应力与实测应力达到较佳的拟合效果. 最终确定模型上部以等效荷载方式加载均部载荷 12.25 MPa, x 方向水平应力近似为 21.7 MPa, z 方向的水平应力近似为 7.2 MPa,模型底部法向位移约束.

<u>w</u> ,	侬煝□	「作曲」	丌木'	刀起的	)復石	Ť
y						
					1 1 2 2 2 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	

表1 煤岩物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of coal and rockmass

容重/

30.00

19.80

28.30

25.00

28.04

23.00

19.80

23.50

27.60

(kN · m<sup>-3</sup>) 力/MPa

黏聚

6.45

2.60

7.40

6.37

12.10

4.90

2.80

3.85

15.00



图1 数值计算模型

学

报

炭

煤

### 3 数值模拟结果及分析

(1)被保护层倾向应力变化规律.图2为工作 面推进170m时走向中部倾斜剖面的垂直层理面的 应力场特征.由图2可知,上保护层开采后,在采 空区两侧的煤体上形成应力集中后,煤层底板的周 围岩层向采空区移动和变形,底板煤岩垂直层理面 应力得到一定释放,煤体膨胀卸压产生变形并释放 弹性潜能,煤层透气性增加,从而降低突出危险性.

(2)被保护层走向应力变化规律.图3为保护 层从开切眼(图示横坐标为0处)开始,在不同推进 距离下,被保护层倾向中部垂直层理面应力变化分 布特征.由图3可知,与初始应力(推进0)相比, 当工作面推进50m时,被保护层垂直层理面应力有 所降低,但卸压程度和范围都很小<sup>[4]</sup>,说明保护层 开采对被保护层影响很小;当工作面继续向前推进 (如170m),被保护层应力进一步降低,应力最终 稳定在某一值附近.被保护层经历了采前应力升高、 采后应力降低和应力逐渐稳定几个阶段.开切眼附 近及保护层工作面前方一定范围(30~85m)形成应 力集中区,而在采空区中部卸压范围较大,煤与瓦 斯突出危险性降低.

(3)被保护层水平移动规律.图4为保护层开 采后,倾向剖面水平位移的分布特征.由图4可 知,煤岩层向采空区方向移动,煤层底板出现膨胀 变形,采空区中部底板煤层变形及卸压范围达到最 大值.因此,保护层开采后底板煤层中存在煤层变 形增大区,该区裂隙发育,利于瓦斯运移和煤层瓦 斯卸压抽放,从而消除煤与瓦斯突出危险性.

### 4 保护范围的划定

#### 4.1 卸压保护准则的确定



图 2 垂直层理面应力场特征

Fig. 2 Characteristics of stress normal to coal samdwich



图 3 垂直层理面应力随开挖尺寸变化的分布特征 Fig. 3 Distribution characteristics of stress normal to coal samdwich along with the change of mining excavation range



图 4 水平位移(垂直走向方向)的分布特征 Fig. 4 Distribution characteristics of horizontal displacement (normal to strata strike)

上保护层开采后,被保护层应力降低,但小于原岩应力的减压区域,并非是使底板中突出煤层消除突出危险的有效卸压保护范围,消除突出危险的有效卸压保护范围应小于这一范围<sup>[5]</sup>.因此,根据保护层 开采后被保护层的应力重新分布特性,采用考虑采动应力因素的保护准则<sup>[6]</sup>,即 $|\sigma_{ye}| \leq (\cos^2 \alpha + \lambda \sin^2 \alpha) \gamma H_B$ ,其中, $\sigma_{ye}$ 为垂直于煤层层理方向的应力,MPa;  $\alpha$ 为煤层倾角, $\alpha = 81^\circ$ ;  $\lambda$ 为侧压力系数,  $\lambda = 2.23$ ;  $H_B$ 为第1次发生煤与瓦斯突出的矿井作业深度,本矿井始突深度为340 m.因此,被保护层的 应力卸压保护准则上限为18.7 MPa.为获得应力 $\sigma_{ye}$ ,由弹性力学转轴公式,某单元面上M点在新坐标系 o'x'y'z'下的 $\sigma_{x'}$ 可以表示为

 $\sigma_{x'} = \sigma_{x} l_{1}^{2} + \sigma_{y} m_{1}^{2} + \sigma_{z} n_{1}^{2} + 2\tau_{xy} l_{1} m_{1} + 2\tau_{xz} l_{1} n_{1} + 2\tau_{yz} n_{1} m_{1},$ 

其中,  $l_1$ ,  $m_1$ ,  $n_1$ 分别为新坐标系下 x'轴相对于原坐标系 oxyz 下的 x, y, z 轴的方向余弦.  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,

 $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$ 为 *M* 点在原坐标系下的应力值. 转换坐标系使新坐标 系下的 *x*'轴与层理面垂直,  $\sigma_{x'}$ 即为所求的  $\sigma_{yc}$ , 如图 5 所示. 由 此可得  $\sigma_{yc} = 0.976\sigma_x + 0.024\sigma_y - 0.309\tau_{xy}$ .

国内外保护层开采研究表明,被保护煤层法向变形大于 0.6%时,该煤层的突出、冲击地压等动力现象基本消除.因此, 取 0.6%作为被保护煤层变形卸压的保护准则判据,求解并提取  $\sigma_{ve}$ 由 FISH 编程完成.

#### 4.2 倾向卸压保护角的确定



图 5 坐标转换 Fig. 5 Two coordinates transformation





图 6 倾向各点的垂直煤层层理方向应力变化及法向变形规律

过计算可得 K<sub>6</sub> 煤层沿 Fig. 6 Change law of stress normal to coal samdwich and coal normal deformation 倾向的上、下卸压保护角分别为 82 和 74°. 图 6(b)为伪倾斜方向各监测点的煤层法向变形变化规律,由 图 6(b)可知, K<sub>6</sub> 煤层倾向下部保护范围边界距运输巷 4.5 m,倾向上部保护范围边界距回风巷 11.6 m, 计算可得 K<sub>6</sub> 煤层沿倾向的上、下卸压保护角分别为 81.5 和 75°. 综合 K<sub>6</sub> 煤层沿倾向的应力和变形卸压 保护范围划定结果,得 K<sub>6</sub> 保护层沿倾向的上、下卸压保护角分别为 81.5 和 74°.

#### 4.3 走向卸压保护角的确定

为确定上保护层走向卸压保护角的范围,根据上述分析结果,沿被保护层的倾向上、下保护范围边界和中部分别设置了1条监测线.图7(a)为工作面推进170m后,被保护层监测线上监测点处所受的垂直层面应力分布.由图7(a)可知,保护层开采后,被保护层卸压程度沿走向和倾向都有很大的不同.依据图7(a)和应力卸压保护准则,可以判断K。煤层倾向中部的走向保护边界为K。煤层工作面内退30m,得到走向卸压保护角为52°;而K。煤层倾向上、下卸压保护范围边界的走向卸压角分别为33,51°,即最小走向卸压角位于工作面倾向的上边界处.图7(b)为工作面推进170m后,被保护层的倾向上、下保护范围边界处监测线和中部监测线上监测点法向变形分布.根据图7(b)和煤层法向变形卸压保护准则,可判

断倾向中部的走向卸压 角最大,为51°,而倾 向上下卸压保护范围边 界处的走向卸压角分别 为28,51°.综上所述, 最终确定 K<sub>6</sub>煤层倾向 中部走向卸压保护角为 52°,倾向上、下卸压 保护范围边界的走向卸 压角分别为30,51°.



图 7 倾向监测线上垂直层面应力分布及煤层法向变形分布 Fig. 7 Distribution of stress and normal to coal samdwich coal normal deformation

#### 4.4 现场考察结果对比分析

为验证数值模拟结果,对模拟区域被保护层的瓦斯压力和瓦斯流量进行了现场考察试验<sup>[7]</sup>.由于 2609 工作面上部已经回采,因此只对保护层工作面采止线走向保护边界和倾向下部边界进行了瓦斯压力 考察试验.试验结果表明,当保护层 K<sub>6</sub> 开采后,被保护层 K<sub>4</sub> 的瓦斯压力、钻孔瓦斯流量发生了变化,当 工作面推过考察钻孔 30~50 m 后瓦斯压力降为 0.2 MPa,被保护层得到了有效保护.根据《防治煤与瓦斯突出细则》,确定保护层倾斜下山方向的卸压保护角为 78.7°,倾向方向各点沿走向的卸压保护角分别为:+1.56 m (以工作面运输巷的标高 ±0 为参考)处为 51.7°;+10.1 m 处为 46.5°;+15.3 m 处为 53.6°;+33.32 m 处为 43.5°.

#### 5 结 论

(1)上保护层开采过程中,被保护层经采前应力升高、采后应力降低和应力逐渐稳定3个阶段.被保护层卸压膨胀变形产生裂隙,利于瓦斯运移,同时配合卸压瓦斯抽放,达到降低煤与瓦斯突出危险性.

(2)得到了急倾斜俯伪斜上保护层沿倾向上、下边界的卸压角分别为81.5,74°;沿走向的卸压角在 倾向上呈非均匀分布,大小为30~52°,工作面中部的走向卸压角最大,为52°.

(3)通过改变垮落矸石的物理力学参数来模拟开挖的时间效应,数值模拟与现场考察的倾向和走向 卸压保护角具有一致的规律性.因此,采用数值模拟来研究急倾斜俯伪斜上保护层的保护范围是可行的.

#### 参考文献:

- [1] 谢文兵,陈晓祥,郑百生.采矿工程问题数值模拟研究与分析 [M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2005.
  Xie Wenbing, Chen Xiaoxiang, Zheng Baisheng. Numerical simulation research and analysis on mining engineering problem
  [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2005.
- [2] 谢和平,周宏伟,王金安,等.FLAC 在煤矿开采沉陷预测中的应用及对比分析 [J]. 岩石力学与工程学报,1999,18 (4): 397-401.

Xie Heping, Zhou Hongwei, Wang Jin'an, et al. Application of FLAC to predict ground surface displacement due to coal extraction and its comparative analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18 (4): 397-401. 高明中, 余忠林. 急倾斜煤层开采对地表沉陷影响的数值模拟 [J]. 煤炭学报, 2003, 28 (6): 578-582.

- [3] 高明中,余忠林. 急倾斜煤层开采对地表沉陷影响的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2003, 28 (6): 578 582.
  Gao Mingzhong, Yu Zhonglin. Numerical analysis of surface subsidence behavior relative to steep excavation [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28 (6): 578 582.
- [4] 石必明, 刘泽功. 保护层开采上覆煤层变形特性数值模拟 [J]. 煤炭学报, 2008, 33 (1): 17-22.
  Shi Biming, Liu Zegong. Numerical simulation of the upper coal and rock deformation characteristic caused by mining protecting stratum [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33 (1): 17-22.
- [5] 周德永.新庄孜矿煤层群多重开采上保护层防突技术的研究 [D]. 安徽:安徽理工大学, 2003.
  Zhou Deyong. Study of techniques for controlling coal and gas outbursts in multiple mining of upper protective coal layers in Xinzhuangzi Mine [D]. Anhui: Anhui University of Science & Technology, 2003.
- [6] 马雷舍夫 Ю Н, 艾鲁尼 А Т, 胡金 Ю Л, 等. 煤与瓦斯突出预测方法和防治措施 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.

Малыше Ю Н, Фоменко А Т, Далецкий Ю Л, et al. Forecast method and preventing measure of coal and gas burst [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2004.

[7] 胡国忠,王宏图,范晓刚,等. 俯伪斜上保护层保护范围的瓦斯压力考察 [J]. 中国矿业大学学报,2008,37 (3): 329-333.

Hu Guozhong, Wang Hongtu, Fan Xiaogang, et al. Gas pressure investigation on protection region of up-protective layer of pitching oblique mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37 (3): 329-333.