

文章编号:1671-3559(2012)02-0217-04

基于 ANSYS 二次开发的采场损伤演化规律研究

师 访^{a,b} 程红梅^{a,b} 许爱斌^{a,b}

(中国矿业大学 a. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室; b. 力学与建筑工程学院 江苏 徐州 221116)

摘 要:基于 ANSYS 软件的 UPFs 二次开发平台,借助损伤变量描述煤岩体的裂隙演化,建立弹性损伤本构模型,对单一煤层分步开采过程进行模拟并研究其损伤演化规律。研究表明,随着工作面的推进,损伤不断扩展,覆岩损伤场的分布形态沿走向由“拱形”向“马鞍形”转变。上覆岩层水平方向中部观测线上,随岩层深度的增加,观测到的初始损伤值减小,损伤增长剧烈程度增加。

关键词:岩石力学; 损伤; ANSYS; 二次开发

中图分类号:TD712

文献标志码:A

Damage Evolution Law Research of Slope Based on ANSYS Second Development

SHI Fang^{a,b}, CHENG Hong-mei^{a,b}, XU Ai-bin^{a,b}

(a. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering;

b. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to research fracture distribution law and gas migration law of coal and rock by mining, a second development platform ANSYS UPFs was used. An elastic damage constitutive model has been built with the help of damage variable, which can be used to describe the fracture evolution of coal and rock. It is found that the damage develops and grows with working face advancing, and the distribution feature of damage field changes from arch to saddle along the strike. In the horizontal middle survey line of the overlain strata, the observed initial damage values decrease and the damage growth rate increases.

Key words: geomechanics; damage; ANSYS; second development

长期以来,煤矿瓦斯事故的致死率居高不下,制约着矿井生产的发展,而瓦斯又是一种经济性可燃气体,是高温、洁净、方便的能源,而且我国瓦斯(煤层气)储量巨大,极具开发和利用价值^[1]。大力开发抽采煤层瓦斯,不仅能保障我国经济持续发展对能源的依赖,还将进一步提升我国煤矿安全高效生产的水平,同时对减少温室气体的排放也具有重要意义。

煤层的低渗透率和高可塑性,使得沿煤层打钻孔十分困难,是制约高瓦斯突出矿井瓦斯抽放的主要原因^[2]。对于单一煤层,不具备保护层开采条件,所以在本煤层抽放瓦斯是解决瓦斯突出威胁、提高瓦斯抽放量的主要途径^[3]。寻找瓦斯富集区是高效抽放瓦斯的关键,煤层开采后,煤岩体中出现的裂隙会大大提高煤岩的渗透率,从而出现瓦斯富集区域^[4],而煤岩体裂隙场的产生和发育过程可以通过

收稿日期:2011-11-01

网络出版时间:2012-01-15 22:18

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)(2011CB201205)

作者简介:师 访(1988-),男,江苏徐州人,硕士生。

通讯作者:程红梅(1978-),女,江苏徐州人,副教授,博士,硕士生导师。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/37.1378.N.20120115.2218.025.html>

损伤场描述。因此,研究采场损伤演化规律对于指导瓦斯抽放设计具有重要意义。

为研究煤层开采过程中煤岩体裂隙的产生和发育规律,利用 ANSYS UPFs 二次开发平台,引入与开采步序有关的损伤变量,编写了 Usermat 损伤本构子程序,并利用该子程序对单一煤层动态开采过程进行模拟计算,得出其损伤场演化的规律。

1 ANSYS UPFs 二次开发平台

ANSYS 具有强大的功能,为高级用户提供了强大的二次开发工具 UPFs(User Programmable Features)。UPFs 采用 Fortran 语言接口方式,提供了若干用户子程序和一些编译工具。用户可以利用这个平台定义新材料^[5-7],创建新单元或者编写新的屈服准则,甚至可以编写优化算法。

在这些用户子程序中,Usermat. f 是专门用于开发用户本构模型的。它的基本任务是:已知第 n 步的应力和应变结果 σ_n 、 ε_n ,由给出的应变增量 $\Delta\varepsilon_{n+1}$ 计算新的应力 δ_{n+1} 和新的应变 ε_{n+1} ;另一个重要任务是给出 4 阶张量一致切线算子的矩阵 D_{ijkl} (ANSYS中称为 Jacobian 矩阵) D_{ijkl} 的表达式为

$$D_{ijkl} = \frac{\partial \Delta \sigma_{ij}}{\partial \Delta \varepsilon_{kl}} \quad (1)$$

Usermat. f 可用于 18X 族单元。通过 ANSYS 参数化设计语言的 TB,USER 命令可调用用户自定义的本构模型, TB STATE 命令可定义损伤状态变量, TB DATA 命令可以给相关变量赋值。

2 弹性损伤本构模型

2.1 损伤本构方程

假设岩体是由基体(无裂纹的完整岩体)和损伤体(微裂纹部分)组成,且损伤仅由偏应力引起,用 ω 表示标量损伤参数,则其损伤本构方程为^[8]

$$\sigma_{ij} = (1 - \omega) E_{ijkl} \varepsilon_{kl}^e + \frac{\omega}{3} \delta_{ij} E_{ppkl} \varepsilon_{kl}^e \quad (2)$$

式中: E_{ijkl} 是岩体中基体的弹性常数张量, ε_{kl}^e 为弹性应变张量, δ_{ij} 为 Kronecker 符号。式(2)可以改写成

$$\sigma_{ij} = \tilde{D}_{ijkl} \varepsilon_{kl}^e \quad (3)$$

其中 \tilde{D}_{ijkl} 与弹性常数张量 E_{ijkl} 及损伤变量 ω 有关。

Usermat. f 程序需要按增量形式计算,对式(3)中的应力 σ_{ij} 取差分,得

$$\Delta \sigma_{ij} = \tilde{D}_{ijkl} \Delta \varepsilon_{kl}^e + \varepsilon_{kl}^e \frac{\partial \tilde{D}_{ijkl}}{\partial \omega} \Delta \omega \quad (4)$$

由张量函数的微分可知

$$\tilde{D}_{ijkl} = \frac{\partial \Delta \sigma_{ij}}{\partial \Delta \varepsilon_{kl}} \quad (5)$$

结合式(1)可知

$$D_{ijkl} = \tilde{D}_{ijkl} \quad (6)$$

2.2 损伤演化方程

假设煤岩体是均质、各向同性的弹性材料,损伤也是各向同性的,则可取一标量作为损伤变量。引入与应变相关的损伤变量 ω ,其在单向应力状态下的表达式为^[9]

$$\omega = \begin{cases} 0, & 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_f, \\ \varepsilon_u (\varepsilon - \varepsilon_f) / \varepsilon (\varepsilon_u - \varepsilon_f), & \varepsilon_f < \varepsilon < \varepsilon_u, \end{cases} \quad (7)$$

式中: ε_f 为单向应力状态下煤岩体的损伤演化门槛应变, ε_u 为极限应变,可由单轴试验获得。

对于三向应力状态,物体的总损伤^[10]可写为

$$\omega = \alpha_t \omega_t + \alpha_c \omega_c \quad (8)$$

式中 ω_t 、 ω_c 分别由等效拉应变 ε_t 和等效压应变 ε_c

按式(7)确定。等效拉应变计算式为 $\varepsilon_t = \sqrt{\sum_i \varepsilon_i^2}$

($\varepsilon_i > 0$),等效压应变计算式为 $\varepsilon_c = \sqrt{\sum_j \varepsilon_j^2}$ ($\varepsilon_j < 0$)

ε_i 表示主应变。而 α_t 、 α_c 为相应的权系数,可按下式计算:

$$\alpha_t = \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon}\right)^2, \alpha_c = \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon}\right)^2 \quad (9)$$

3 程序流程

在单元水平上,每个积分点的每次迭代均执行一次 Usermat. f 程序,具体流程如下。

(1) 读入当前积分点材料参数和上一迭代步的损伤值。材料参数存放在 prop 数组中,损伤值存放在状态变量 statev(1) 中。

(2) 根据式(8)计算损伤变量。

(3) 根据式(2)更新应力分量 stress(ncomp)。

(4) 根据式(6)计算 Jacobian 矩阵 dsdePl(i, j)。

(5) 更新损伤状态变量 statev(1)。

4 工程应用

4.1 工程概况

某矿一工作面煤层平均厚度为 5 m,采深 600 m 左右。煤层为黑色半亮型煤,顶板为中砂岩,底板为粉砂岩。根据该工作面的生产地质条件,确定模型走向 290 m,倾向 240 m,垂直方向 85 m,工作面宽 120 m,工作面向前共开挖 150 m,分 15 步开挖。图 1 是煤层开挖顶视剖面图,表 1 是地层材料的相关

参数。模型顶部施加 11.2 MPa 压力,四周约束水平位移。由于对称性,取半边结构进行计算。

表 1 地层材料物理参数

岩层名称	厚 h/m	弹模 E/GPa	泊松比 μ	拉伸门槛应变	拉伸极限应变	压缩门槛应变	压缩极限应变	容重/ $(N \cdot m^{-3})$
岩层	50	41.2	0.29	0.000 16	0.001 6	0.000 34	0.003 4	25 950
顶板	20	57.8	0.16	0.000 32	0.003 2	0.000 67	0.006 7	27 820
煤层	5	1.24	0.31	0.001 4	0.014	0.002 5	0.025	14 130
底板	10	40.3	0.18	0.003 1	0.031	0.005 1	0.051	26 760

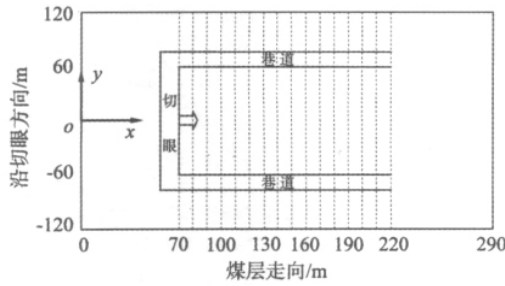
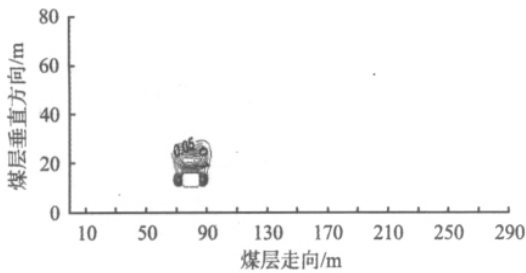


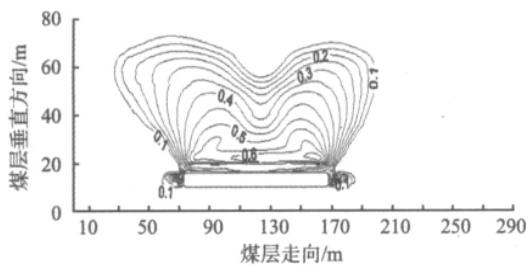
图 1 开挖步序顶部剖面图

4.2 损伤场演化及规律分析

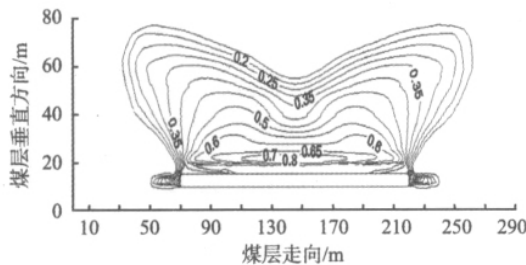
图 2 给出了工作面分别推进到 10 m、90 m 和 150 m 时 $y = 0$ 剖面煤岩体损伤场分布情况。



a 工作面推进 10 m



b 工作面推进 90 m



c 工作面推进 150 m

图 2 $y = 0$ 剖面煤岩体损伤场分布情况

从图 2 可见,切眼和工作面附近煤层较大的压应力导致损伤分布密集,且随着工作面的推进煤层中损伤场范围逐步扩大。采空区中部对应的上覆岩层损伤值较大,且其值随着工作面的推进持续增加。这可以由采空区中部上覆岩层受拉所致,由此引发的不断发育的裂隙场为煤体内瓦斯运移提供了通道。此外,从图 2b 可见,损伤分布图并不对称,这可能是由边界条件造成的。

图 2a 是工作面推进 10 m 时,覆岩损伤分布情况。在采空区上方岩体裂隙发育较弱,损伤度较小,最大值为 0.1,且由下向上岩体损伤程度逐渐降低。整个损伤场分布范围较小,其高度约为 10 m,呈“拱形”分布。

图 2b 是工作面推进 90 m 时,覆岩损伤场分布情况。损伤场分布高度增幅较大,达到 50 m 左右,损伤度最大值为 0.6,分布范围较工作面推进 10 m 时增大许多,损伤场分布形态呈“马鞍形”。

图 2c 为工作面推进 150 m 时,围岩损伤分布情况。在充分采动条件下,覆岩损伤度最大达到 0.8,损伤影响高度约为 60 m。随工作面推进,采空区上覆岩层损伤场的分布范围进一步扩大,损伤场分布范围由采空区顶板开始自下而上逐渐变大,“马鞍形”损伤场分布形态更加明显。

从工作面推进的全过程来看,损伤场分布的范围不断扩大,损伤分布形态逐渐由“拱形”演化为“马鞍形”。而损伤是煤岩体裂隙产生、发育的体现,也就是说,随着煤层开采的进行,采场面积不断增大,上覆岩层开始松动变形,煤岩体中的微孔隙逐渐演化成孔隙、裂隙,从而导致煤岩体中裂隙场的分布范围不断扩大,形成了卸压瓦斯流动的通道和积聚瓦斯的区域。

为了具体研究上覆岩层的损伤演化规律,特在距开切眼 75 m 处,沿竖向布置一条观测线,分别在距开采煤层上方 10 m 和 30 m 处选取 2 个观测点,提取各开挖步所对应的观测点处的损伤值,绘于图 3 中。

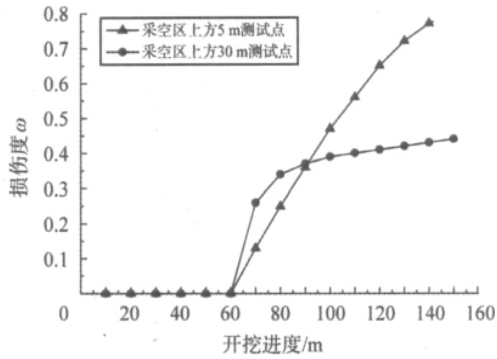


图3 上覆岩层观测点损伤演化曲线

从图3中可以看出,当工作面推进至测试点前方约5 m时,观测点首次出现损伤,并且上方观测点损伤值大于下方观测点。随后采空区上方30 m处的观测点损伤值稳步增加,最大值为0.44;而采空区上方5 m处的观测点损伤值急剧增加,最大值0.8。

5 结论

(1) 煤岩体损伤场的分布随着时间和空间的变化而不断演化。煤层中的损伤场随工作面的推进而不断向深部扩展;覆岩损伤场的分布范围亦随工作面的推进而不断扩大,其形状由“拱形”逐渐向“马鞍形”转变;文中所取上覆岩层观测线上,损伤首先出现在距煤层较远的观测点处,随后损伤值稳步增加,而距煤层较近的观测点初始损伤值较小,随后急剧增大。

(2) 煤层的开挖会导致围岩应力场的重新分布,对煤岩体的透气性影响很大。在应力集中区,由于裂隙及孔隙受压闭合,可使透气性降低;在卸压区,由于原有裂隙的张开、扩展以及新裂隙的大量形成,可使煤岩体的透气性急剧提高。

参考文献:

- [1] 袁亮. 低透高瓦斯煤层群安全开采关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1370-1379.
- [2] LI S, QIAN M G, XU J L. Simultaneous extraction of coal and coal-bed methane in China[J]. Mining Science and Technology, 1999, 99(10): 357-360.
- [3] 郭奉贤. 单一煤层区域防突技术[J]. 煤矿安全, 2010, 423(1): 19-22.
- [4] 刘泽功, 袁亮, 戴广龙, 等. 采场覆岩裂隙特征研究及在瓦斯抽放中应用[J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2004, 24(4): 10-15.
- [5] 吴鹏, 曾红, 韩迈. 基于 ANSYS 的二次开发技术的实现方法[J]. 辽宁工学院学报, 2004, 24(5): 26-29.
- [6] 吴艺. 用 ANSYS 的 UPFs 对非线性黏弹性本构模型进行二次开发[J]. 西南科技大学学报, 2011, 26(2): 65-69.
- [7] 关云飞, 高峰, 赵维炳, 等. ANSYS 软件中修正剑桥模型的二次开发[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 976-980.
- [8] 吴刚, 孙钧, 吴中如. 复杂应力状态下完整岩体卸荷破坏的损伤力学分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1997, 23(3): 44-49.
- [9] 钱济成, 周建方. 混凝土的两种损伤模型及其应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1989, 17(3): 40-47.
- [10] Mazars J. 5th International Conference on Fracture [C]. New York: Pergamon press, 1980.

(责任编辑:赵 雁 校对:刘建亭)