

文章编号: 1000-7598 (2011) 01-0299-05

有限元强度折减法在煤层底板破坏中的应用

雷文杰, 汪国华, 薛晓晓

(河南理工大学 瓦斯地质研究所, 河南 焦作 454003)

摘 要: 采用有限元强度折减法, 求得煤层开采后底板岩体破坏滑移面, 并给出底板塑性区贯通过程, 得出其滑移线与理论形态相近, 底板塑性滑移形状类似 Prandtl 型, 并与滑移线理论计算结算进行了对比, 两者误差在 10% 以内, 说明了采用有限元法求解煤层底板破坏情况是可行的。并用于模拟上保护层开采过程中底板及下伏煤层卸压范围, 为保护层工作面回采过程中瓦斯来源提供理论依据。说明有限元强度折减法可用于确定承压水体上煤层开采其底板所需的临界厚度和上保护层开采过程中的有效层间距。

关 键 词: 有限元强度折减法; 滑移线; 煤层底板; 保护层

中图分类号: O 242.21

文献标识码: A

Application of finite element strength reduction method to destruction in coal seam floor

LEI Wen-jie, WANG Guo-hua, XUE Xiao-xiao

(Institute of Gas-geology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China)

Abstract: The plastic characteristics of the coal seam floor has been explored with the finite element strength reduction software of ANSYS; and its plastic area perforation process is given; and that the slip lines given by this methods are much close to theoretical solution; the plastic failure fields depth of the coal seam floor similar to Prandtl type; some parameters are compared with that by theoretical solution; the error is less than 10% so as to show that used the finite element intensity reduction method to solve floor damage situation is feasible. The scope of its plastic area can be used to reserve the safe thickness in water inrush from coal seam floor and the maximum effective spacing of liberated seam; then further utilizes in liberated seam to obtain its plastic area and slip lines.

Key words: finite element strength reduction method; slip lines; coal floor; protecting coal seam

1 引 言

运用滑移线理论计算极限状态下底板的塑性区时需假定滑裂面形状, 不能考虑煤岩体的应力-应变关系。而有限元法可以模拟不同材料之间的相互作用, 通过应力-应变关系确定底板及下伏煤层的稳定性, 而且可以分析煤岩层破坏的发生和发展过程, 计算更加精确和合理。为检验有限元强度折减法的准确性, 首先利用滑移线理论计算出煤层开采后底板破坏滑移面理论形态, 然后与有限元强度折减法^[1-3]计算结果相比较, 其滑移线与理论解相近, 两者差在 10% 以内, 证明了有限元强度折减法的可靠性。并应用这一方法, 直接计算出上保护层开采

过程中底板及下伏煤层最大破坏深度及其破裂面的形状, 从而为承压水体上开采确定底板临界安全厚度, 分析上保护层开采过程中底板卸压范围, 为确定上保护层开采临界层间距提供合理依据。

2 工作面底板塑性区理论

对于承受均匀垂直刚性条带荷载的半无限刚塑性无重地基, Prandtl^[3-5]依据关联塑性理论将均匀受力的地基及其一定宽度范围的基础变形划分成主动区、过渡区和被动区, 并分别计算主动区、被动区的影响深度和被动区的影响宽度。采煤工作面走向回采一定距离(周期来压步距范围内), 煤层底板受力状态重新分布: 煤壁前方一定宽度范围处于

收稿日期: 2009-07-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 40872191, No. 40772094); “863”专题 (No. 2007AA06Z221)。

第一作者简介: 雷文杰, 男, 1974 年生, 副教授, 主要从事煤矿瓦斯灾害发生机理及其防治的研究工作。E-mail: leiwenjie@163.com

应力集中区,工作面底板处于卸压区,即一定范围内的煤层底板为垂直非均匀条带状半无限刚塑性无重地基,可以依据 Prandtl 理论对一定范围内的煤层底板塑性变形进行简化计算。钱鸣高、张金才、赵启峰、关英斌等人认为^[6-9],工作面底板岩体在一定范围内处于塑性状态,其中文献[6]给出了极限状态下底板中塑性区的范围图,如图 1 所示(图中为对称情况)。底板岩体塑性区可分为 3 个区,即: I 区为主动极限区(朗肯区),最大主应力垂直向下,破坏面与水平面的夹角 $\angle abc = 45^\circ + \varphi/2$; II 区为过渡区,是形成底板破坏的最大深度区; III 区为被动极限区(被动朗肯区),煤柱顶板支承压力通过 I 区,并经过渡区 II 区的压伸传递作用传递到 III 区,由于采空区的存在,应力作用转向采空区垂直向上,其破坏面与水平面夹角为 $\angle edd_1 = 45^\circ - \varphi/2$ 。

图 1 中 B 为煤层开挖长度, φ 为煤层底板内摩擦角, h 为竖向塑性区范围, m 为煤层厚度, γH 为原岩应力, n 为最大应力集中系数,底板岩体的滑移线场即塑性区的边界为 $bced$ 和 $b_1c_1e_1d_1$; 主动极限区 abc 、 $a_1b_1c_1$ 和被动极限区 aed 、 $a_1e_1d_1$ 其滑移线各由两组直线组成; 过渡区滑移线各由一条对数螺旋线 ce 、 c_1e_1 组成。

张金才、钱鸣高^[6-7]根据图 1 得出了极限条件下对数螺旋线的方程以及竖向塑性区范围 h 与工作面前方煤体塑性区屈服长度 x 的关系式分别为

$$r = r_0 e^{\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \tan \varphi} \quad (1)$$

$$\frac{h}{x} = \frac{\cos \varphi}{2 \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)} e^{\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \tan \varphi} \quad (2)$$

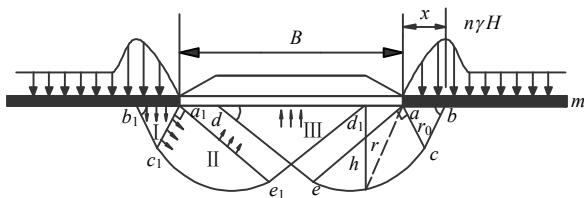


图 1 极限状态下底板塑性破坏示意图
Fig.1 Plastic failure of coal seam floor

3 工作面底板破坏形态的有限元解

3.1 计算原理及过程

煤层开采后底板塑性区滑移形态可用有限元强度折减法得到。所谓有限元强度折减,就是在理想弹塑性有限元计算中保持工作面回采导致顶板应力

重分布的应力状态不变,将底板岩体抗剪强度参数(黏聚力 c 和内摩擦角 φ) 逐渐降低至其达到极限破坏状态为止,此时程序可以根据有限元计算结果得到煤层底板的破坏滑移面。

本文采用平面应变关联法则下摩尔-库仑匹配 D-P 准则(D-P4)代替传统摩尔-库仑准则,对于平面应变问题,它较高的计算精度^[8-9]。该准则相应的 α 、 k 值分别为

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3(3 + \sin^2 \varphi)}} \\ k &= \frac{3c \cos \varphi}{\sqrt{3(3 + \sin^2 \varphi)}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

计算采用有限元分析软件 ANSYS 4 结点 plane42 平面单元,计算过程如下:

(1) 首先进行系统建模、加载。底板岩体采用理想弹塑性模型。对式(3)中的 α 、 k 值进行折减,折减系数采用二分法,将折减值代入式(4)(D-P1 屈服准则)反算 c 、 φ 值。结构施加的荷载保持不变,继续进行迭代计算输入反算后的 c 、 φ 值。

$$\left. \begin{aligned} c &= \frac{\sqrt{3}k(3 - \sin \varphi)}{6 \cos \varphi} \\ \varphi &= \sin^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3}\alpha}{2 + \sqrt{3}\alpha} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(2) 如果收敛,则继续折减,进行计算;若不收敛,则在所取最后两个折减系数间继续折减,以求得满足精度要求的折减系数。直至最后有限元计算不收敛。

3.2 数值模型的建立及模拟计算

根据某矿煤层工作面地质条件,建立的计算模型见图 2,图中红色区域为开挖区域。模型沿水平方向取 125 m,沿垂直方向取 40 m。为了概化数值模型,将含煤地层层间位置为单一布置,模型为走向平面应变模型。其中含煤地层物理力学参数如表 1。

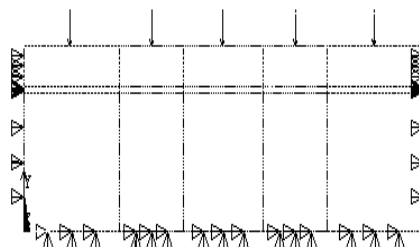


图 2 煤岩地层模型示意图
Fig.2 Model of the coal and rock seams

表1 含煤地层的物理力学参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of coal and rock seams

岩性	密度 g/cm ³	弹性模量 /MPa	黏聚力 c/MPa	泊松比 μ	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	层厚 /m
细砂岩	2.50	22 000	5.2	0.22	24	8.5
煤层	1.30	3 100	1.0	0.3	25	1.5
砂岩	2.50	22 000	5.4	0.23	31	30

划分网格时, 开挖区域附近单元加密。模型的左右边界为单约束边界, 下部边界为全约束边界, 上部边界为自由边界, 上部未模拟的岩层作为外均匀载荷, 其值为 16 MPa 施加在模型的上边界上。煤层开挖长度 $B=25$ m, 这个长度是一般顶板周期来压步距。煤层平均厚度为 1.5 m, 一次采全高。求解时采用力和位移不收敛作为底板破坏判断。当折减系数为 2.99 时得到极限状态下底板塑性区的形成及发展过程如图 3 所示。

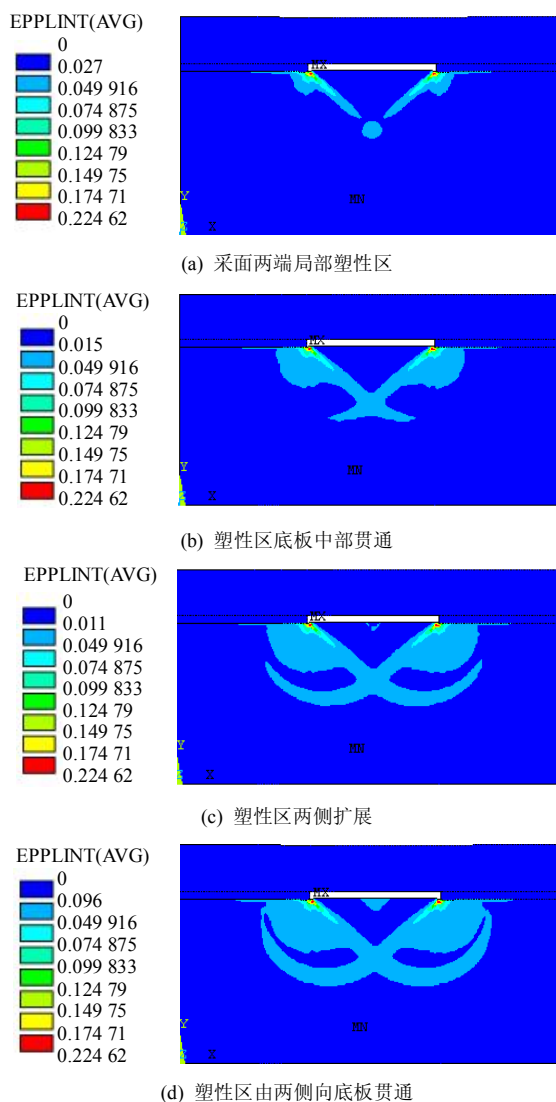


图3 极限状态时滑移面破坏形成过程
Fig.3 Failure surfaces process by FEM

3.3 模拟的结果分析及应用

从图 3 中可以看出, 底板岩层破坏滑移面的形成过程和特征, 由图可知: 在理论解中, 被动朗肯区 (III 区) 破裂面与水平面夹角为 $(45^{\circ}-\varphi/2)$ 此时折减后的 φ 值为 7.844° 即 41.1° , 而有限元解为 39° 。过渡区 (II 区) 中的滑动线为对数螺旋线, 将 φ 值代入公式 1 可以求得 $r/r_0=1.87$, 有限元 r/r_0 结果为 1.72, 代入式 (2) 可以得到 $h/x=1.64$, 有限元 h/x 结果为 1.6, 两者计算结果误差为 10% 以内, 计算结果见表 2。

表2 理论解与有限元解计算结果对比
Table 2 Comparison between results by theory and by FEM

对比项目	理论解	有限元解	相对误差/%
被动朗肯区破裂面与水 平面夹角 $\angle edd_1/(^{\circ})$	41.1	39	-5.1
被动朗肯区破裂面与水 平面夹角 $\angle e_1d_1d/(^{\circ})$	41.1	39	-5.1
竖向塑性区深度 h 与塑 性区屈服长度 x 的比值	1.64	1.6	-2.5
数螺旋线 r/r_0	1.87	1.72	-8

从图 3 还可以看出, 煤层底板塑性区的发展过程为: 随着底板强度的不断折减, 首先在煤壁附近沿着产生塑性区, 随后沿着一与水平面成 $(45^{\circ}-\varphi/2)$ 角度向下继续产生塑性区, 之后, 两煤壁处的塑性区连通, 并向两侧发展, 最后塑性区发展到巷道底板面上, 整个塑性区贯通, 形成完整的塑性区图。从图 3 (d) 可以看出, 其塑性区破坏形态与滑移线理论结果十分相近。

对于底板有突水危险的煤层, 按照“下三带”理论, 带压开采底板的安全厚度为底板最大破坏深度 h 与完整岩层带临界厚度之和^[10]。对于 h 的求法, 可以由滑移线经验公式计算获得, 但滑移线理论没有考虑底板黏聚力, 不能分析复合底板条件下底板最大破坏深度; 有限元解中可以很直观的得到 $h=14.43$ m, 而且还能得到 h 与工作面前方煤体屈服长度 x 的关系。从图中也可以看出, 底板塑性破坏带深度类似 Prandtl 型, 即巷道两边角处底板塑性破坏带的深度最大, 这也是最易发生底板突水的部位^[10-12]。

有限元折减法也可用于计算上保护层开采条件下的塑性区形态, 可以直观地看出保护层开采时底板及下伏高突煤层的卸压范围, 从而判断相应层间距是否达到保护层开采效果。如果层间距过大可导致 h 大于层间距, 下伏被保护高突煤层应力场没有变化, 被保护层没有发生变形, 达不到卸压增透效

果,保护层开采方案不可行;如果层间距过小,在考虑被保护层瓦斯压力情况下,可能导致保护层开采后没有进行强度折减时就会导致底板及被保护层应力和应变失稳,从而可以判断是否会出现串层突出的危险。将本文图 2 模型底板砂岩厚度改为 8 m,被保护层位于底板砂岩以下,厚度为 5 m。采用有限元强度折减法,计算出保护层开采后极限状态下的底板及下伏被保护层的破坏滑移面。

保护层开采过程中底板及被保护层极限破坏形态的计算过程如下:保护层开采后,保持保护层及其上覆顶板的应力状态不变,将底板及被保护层的煤岩强度不断折减,获得相应的极限状态,从而获得底板及被保护层极限状态下的破坏形态(见图 4、5)。从图中可以看出,其塑性矢量图与塑性等直线图与 Prandtl 理论解很相近。

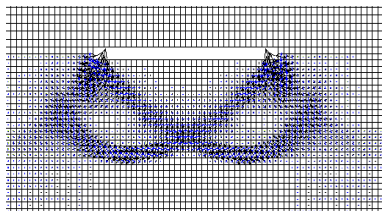


图 4 塑性应变矢量图

Fig.4 Plastic strain vector diagram

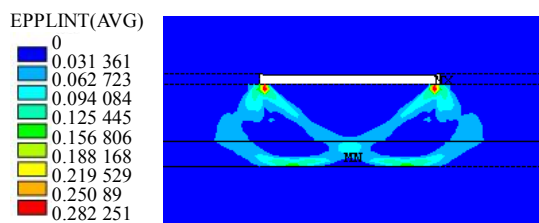


图 5 极限状态时的破坏滑移面

Fig.5 Failure surface by FEM

4 结 论

(1) 有限元折减法计算滑移面,克服了传统方法将煤岩体假定为弹性刚塑性体的缺点,考虑了材料的应力-应变关系。该法可以分析煤岩体破坏情况,无需假设滑移面,计算更加合理,而且能反映煤层底板破坏的发展过程。

(2) 本文有限元强度折减法计算塑性形态与理论形态相近,两者某些参数误差在 10%左右,证明了该法计算底板破坏滑移面的可靠性。

(3) 煤层底板塑性区的发展过程为:随着单元计算的逐步增加,首先在煤壁附近沿着产生塑性区,随后沿着一与水平面成 $(45^\circ - \varphi/2)$ 角度向下继续

产生塑性区,之后,两煤壁处的塑性区连通,并向两侧发展,最后塑性区发展到巷道底板面上,整个塑性区贯通,形成完整的塑性区图。底板塑性破坏带深度类似 Prandtl 型,即巷道两边角处底板塑性破坏带的深度最大,这也是最易发生底板突水的部位。

(4) 有限元折减二分法求解快速、可靠,适合底板破坏滑移面的计算,可用于计算煤层底板的最大破坏深度,确定临界开采厚度,也可用于计算保护层与被保护层之间的有效层间距,判断上保护层的卸压效果。

参 考 文 献

- [1] 邓华锋,李建林,王乐华,等. 基于强度折减法的库岸滑坡三维有限元分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1606—1608.
DENG Hua-feng, LI Jian-lin, WANG Le-hua, et al. 3D finite element analysis of reservoir bank landslide based on strength reduction method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(5): 1606—1608.
- [2] 邓楚键,何国杰,郑颖人. 基于 M-C 准则的 D-P 系列准则在岩土工程中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 736—739.
DENG Chu-jian, HE Guo-jie, ZHENG Ying-ren. Studies on Drucker-Prager yield criterions based on M-C yield criterion and application in geotechnical engineering[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(6): 736—739.
- [3] 孔位学,郑颖人,赵尚毅,等. 地基承载力的有限元计算及其在桥基中的应用[J]. 土木工程学报, 2005, 38(4): 97—102.
KONG Wei-xue, ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, et al. Finite element analysis for the bearing capacity of foundations and its application in bridge engineering[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(4): 97—102.
- [4] 梅岭,梅国雄,宰金珉,等. 埋深基础地基极限承载力的数值求解方法[J]. 岩土力学, 2009, (6): 1813—1814.
MEI Ling, MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min, et al. Numerical analysis of ultimate bearing capacity of ground with deep buried foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, (6): 1813—1814.
- [5] 赵成刚,白冰,王运霞. 土力学原理[M]. 北京: 北方交通大学出版社, 2004.

- [6] 张金才, 张玉卓, 刘天泉. 岩体渗流与煤层底板突水[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [7] 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.
- [8] 赵启峰, 孟祥瑞, 刘庆林. 采动过程中底板岩层变形破坏与损伤机理分析[J]. 煤矿安全, 2008, 39(4): 12—16.
ZHAO Qi-feng, MENG Xiang-rui, LIU Qing-lin. Damage mechanism analysis of deformation failure characteristics in floor strata[J]. **Coal Mine Safety**, 2008, 39(4): 12—16.
- [9] 关英斌, 李海梅, 路君臣. 显德汪煤矿9号煤层底板破坏规律的研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(2): 121—125.
GUAN Ying-bing, LI Hai-mei, LU Jun-chen. Research of No.9 coal seam floor's fracture regularity in Xiandewang coal mine[J]. **Journal of China Coal Society**, 2003, 28(2): 121—125.
- [10] 潘德祥, 张金才. 巷道底板塑性破坏带的研究[J]. 煤矿开采, 1997, (1): 43—45.
- [11] 曾德建, 刘长武, 陈云波, 等. 承压含水层上部工作面底板临界厚度研究[J]. 能源技术与管理, 2008, (4): 1—3.
ZENG De-jian, LIU Chang-wu, CHEN Yun-bo, et al. Research on critical thickness of the working face floor above the confined aquifer[J]. **Energy Technology and Management**, 2008, (4): 1—3.
- [12] 杨小刚, 刘洋, 张壮路. 数值模拟在回坡底煤矿底板突水防治中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(5): 58—61.
YANG Xiao-gang, LIU Yang, ZHANG Zhuang-lu. Numerical simulation in the floor inrush water control of Huipodi coal mine[J]. **Coal Geology and Exploration**, 2008, 36(5): 58—61.

上接第275页

- [5] 赵万强. 遂渝铁路荆竹岭隧道复杂地质段设计[J]. 铁道工程学报, 2006, 92(2): 52—58.
ZHAO Wan-qiang. Design made for complex geological section of Jingzhuling tunnel on Suining-Chongqing railway line[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2006, 92(2): 52—58.
- [6] 张胜, 沈洪波, 王飞. 不同施工工法对既有隧道影响的数值模拟研究[J]. 合肥工业大学学报, 2007, 30(5): 611—616.
ZHANG Sheng, SHEN Hong-bo, WANG Fei. Study on influence of two different construction methods on an existing tunnel by numerical simulation[J]. **Journal of Heifei University of Technology**, 2007, 30(5): 611—616.
- [7] 李元松, 李新平, 代翼飞, 等. 隧道围岩与衬砌受力特性测试与数值分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1348—1353.
LI Yuan-song, LI Xin-ping, DAI Yi-fei, et al. Mechanical property testing and numerical calculating on surrounding rock mass and support system of tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(7): 1348—1353.
- [8] 肖明, 叶超, 傅志浩, 等. 地下隧洞开挖和支护的三维数值分析计算[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2501—2505.
XIAO Ming, YE Chao, FU Zhi-hao, et al. Three-dimensional numerical simulation and analysis of excavation and support in underground tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(12): 2501—2505.
- [9] 瞿万波, 刘新荣, 傅晏, 等. 洞桩法大断面小净距隧道围岩稳定性数值分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2799—2804.
QU Wan-bo, LIU Xin-rong, FU Yan, et al. Numerical simulation of preliminary lining of large section crossing tunnels constructed with PBA method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(9): 2799—2804.
- [10] 王俊杰, 朱俊高, 吴寿昌. 大规模超长群桩基础工作性能的数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, (3): 701—706.
WANG Jun-jie, ZHU Jun-gao, WU Shou-chang. Numerical simulation on behavior of large-scale overlength pile group foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, (3): 701—706.