

文章编号:0253-9993(2013)01-0027-06

有限元强度折减法在底板突水风险评价中的应用

胡 巍,徐德金

(中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室 资源与地球科学学院,江苏 徐州 221008)

摘 要:介绍了有限元强度折减法在 FLAC^{3D} 中的实现方法。在分析煤层底板突水的有限元计算判断依据的基础上,阐明了底板安全系数 F_{s1} 的意义,即底板实际岩体强度与折减后底板破坏贯通时的岩体强度的比值定义为底板安全系数,它反映了承压水体上底板岩体抵抗破坏贯通的能力。通过有限元强度折减的实例计算验证了将该方法应用于煤层开采底板突水评价的可行性。计算结果表明:案例中工作面底板破坏的计算深度在 15 m 左右,与实测结果一致,底板安全系数 F_{s1} 为 1.38;强度折减法揭示了底板突水的两条潜在的突水路径;底板安全系数 F_{s1} 随着工作面推进距离、工作面斜长及地应力的增大而减小。相较于突水系数,底板安全系数 F_{s1} 考虑因素更多,可信度更高。

关键词:底板;突水;风险评价;有限元强度折减法;底板安全系数

中图分类号:TD745 **文献标志码:**A

Application of finite element strength reduction method to risk assessment of groundwater inrush from coal seam floor

HU Wei, XU De-jin

(State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Introduced the finite element strength reduction method to the risk assessment for groundwater inrush from coal seam floor. On the basis of analyzing the groundwater inrush criterion of finite element calculation, the meaning of coal floor safety coefficient F_{s1} was clarified. And the implementation approach of finite element strength reduction method in FLAC^{3D} was introduced briefly. At last, the feasibility of this method using in groundwater inrush risk assessment was proved by a calculation of a case. The ratio of the actual rock mechanicals parameters to breaking mechanicals parameters after strength reduction can be seen as the safety coefficient. The numerical results indicate that the depth of fractured floor is about 15 m in the example's panel and the safety coefficient is 1.38. The safety coefficient reduces with the advance of the working face, the increase of the face length and in-situ stress. Two different water inrush paths are demonstrated by the strength reduction method. Safety coefficient F_{s1} is more credible because it considers more factors than the traditional water bursting coefficient.

Key words: coal seam floor; groundwater inrush; risk assessment; finite element strength reduction method; safety coefficient for coal seam floor

随着矿井开采深度的不断增加,水害威胁日趋严重。特别是华北型煤田,下组煤距奥陶系灰岩较近,煤层开采所受底板突水威胁尤为突出^[1-2]。国内外

相关领域专家学者对这一问题作了不少成功的探索,影响较大的理论有:突水系数法、底板相对隔水层理论、下三带理论、原位张裂与零位破坏理论、薄板模型

收稿日期:2012-01-05 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41172291);江苏高校优势学科建设工程资助项目;江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CX10B_146Z)

作者简介:胡 巍(1986—),男,湖北宜昌人,博士研究生。E-mail:huwei_cumt@163.com

理论、“强渗通道”说、“岩水应力关系”说、关键层理论、下四带理论等^[3]。其中,突水系数法简单实用,应用广泛。近年来,一些新的底板突水预测方法相继提出,如主控指标体系建设方法^[4]、脆弱性指数法^[5]、基于突变理论的突水预测方法^[6]、底板突水危险性评价专家系统^[7]等等。

随着计算技术的发展,数值模拟技术在煤层开采底板突水研究中逐渐得到应用。李连崇等^[8]应用 RFA 计算软件进行煤层底板突水过程的数值仿真分析;冯启言等^[9]应用岩石破裂过程渗流与损伤耦合作用分析系统建立了薄煤层底板采动数值模型进行突水预测;虎维岳等^[10]提出了非均布水压作用下的煤层底板突水力学模型,并进行了数值计算分析。利用数值模拟方法(有限元、离散元等)在分析岩土工程问题时,能方便、全面地提供应力、应变、位移和塑性区等信息,具有其他方法无法比拟的优越性。

国内外采用有限元强度折减法求边坡安全系数,用有限元增量加载法求地基极限承载力的研究取得了很大成功。同时,该方法也扩展到隧道开挖的稳定性研究中^[11]。最近几年,一些学者开始尝试将有限元强度折减法应用于煤矿工程,赵延林等^[12]建立基于突变理论的采空区重叠顶板稳定性强度折减法,研究了重叠顶板的安全储备;雷文杰等^[13]借助 ANSYS,采用强度折减法研究了采动底板的破坏情况。底板突水机理研究认为,采动应力和水压力共同作用下岩层破断形成突水通道是突水发生的关键^[14]。基于此,笔者尝试将有限元强度折减法用于煤矿底板突水研究中,通过有限元强度折减法计算了无构造影响时煤层开采后底板强度储备安全系数 F_{s1} ,并分析了影响底板安全系数的主要因素,为正常区段底板突水安全性评价提供了新的指标和方法。

1 底板突水评价的传统方法——突水系数法

我国学者提出的突水系数法作为预测预报底板突水与否的标准已被广泛接受和应用。突水系数就是单位隔水层所能承受的极限水压值,即

$$T = p/M \quad (1)$$

式中, T 为突水系数; p 为承压含水层实际水压值; M 为底板隔水层厚度。

式(1)被编入新的《煤矿防治水规定》,成为煤矿技术人员评价底板突水危险性的依据^[15]。但矿井底板突水受岩性、地层结构、采煤方法等多因素共同作用影响,而突水系数仅考虑了水压和底板隔水层厚度,因此一个定量的突水系数还不足以全面反映实际矿区突水安全性情况。

2 底板突水评价的有限元强度折减法

2.1 强度折减法的基本原理

有限元强度折减法起源于 20 世纪 70 年代,受计算条件的限制,该方法至最近几年才流行开来。它的基本思想是在有限元计算中,不断地降低岩土体材料的力学性质参数,使计算结果最终达到破坏状态,此时,原始参数与降低后最终参数的比值即为安全系数 F_{s1} ^[16]。

在实际应用中,材料本构模型多选用 Mohr-Coulomb 强度准则。

$$F_{s1} = \frac{c}{c'} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi'} \quad (2)$$

式中, c, φ 分别为岩土材料黏聚力、内摩擦角; c', φ' 分别为材料折减后的黏聚力和内摩擦角。

强度折减法是基于岩土材料强度理论的算法,安全系数为强度储备安全系数。它反映了岩体在一定地质环境下抵抗破坏的能力。因此,也可以将该思想用于底板突水风险评价中。

2.2 底板破坏突水判据与底板突水安全系数

在采动作用、承压水压力等多因素共同作用下,底板岩层破坏贯通,形成渗流通道,是正常区段底板突水的主要原因。如图 1 所示。

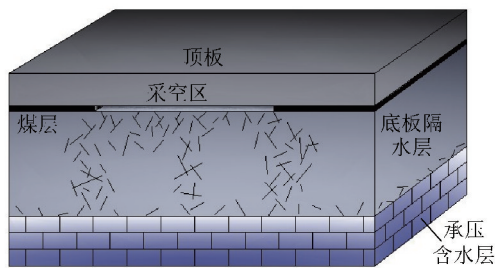


图 1 底板突水示意

Fig. 1 Model of water inrush from coal seam floor

在边坡稳定性的有限元强度折减计算中,一般根据计算不收敛、特征点位移突变或者塑性区贯通来判断边坡失稳破坏。根据底板突水的特点,本文将底板塑性区贯通作为底板突水判据,即当含水层与采空区之间塑性区贯通时,突水发生,材料强度折减或承压水压力加载终止。

因此,根据有限元强度折减法的原理,将该方法应用于煤矿底板突水评价中,以底板岩层塑性区是否贯通为突水判据,即可得到底板突水的安全系数 F_{s1} ,该系数即为底板隔水层原始强度参数与强度折减后底板破坏突水时的强度参数之比,它反映承压水体上采煤底板岩层抵抗破裂贯通的能力。

2.3 底板突水有限元极限分析法的实现

借助 FLAC^{3D} 软件实现强度折减法。通过 FISH 语言对其功能进行控制,自动求解强度储备安全系数。

承压水体上底板采动破坏同时存在剪切破坏和拉伸破坏,因此,底板材料本构模型选用 FLAC 内置的 Mohr-Coulomb 准则,破坏判据如下:

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3 \quad (3)$$

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi} \quad (4)$$

$$f^t = \sigma_3 - \sigma_1 \quad (5)$$

式中, $N_\varphi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$; f^s, f^t 分别为材料剪切、拉伸屈服准则。

煤矿底板突水评价的有限元强度折减法实现的流程如图 2 所示。在边坡工程中,由于坡体失稳滑动多由岩土体剪切破坏导致,因此在用强度折减法计算安全系数时,一般只折减剪切强度参数,即黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。但在底板破坏中,还需考虑岩体的抗拉强度,因此,本文对 c, φ 和 σ_t 同时进行折减,折减系数相同,且对底板不同岩性强度参数进行同步折减,顶板按正常情况进行计算。

3 有限元强度折减实例分析

3.1 突水评价原型及模型的建立

选取淮北某矿南一采区为地质原型,建立有限元极限分析模型。该采区实行综合机械化开采,工作面斜长 150 m,开采煤层为山西组中部 10 煤,煤厚 0 ~ 4.31 m,平均 1.67 m,倾角近水平,10 煤下方约 47 m 为太原组灰岩承压岩溶含水层,水压 2.7 MPa。

建立数值模型尺寸为 400 m×400 m×85 m,共划分 15625 个单元体,模型中煤层厚度取最大值 4.3 m,

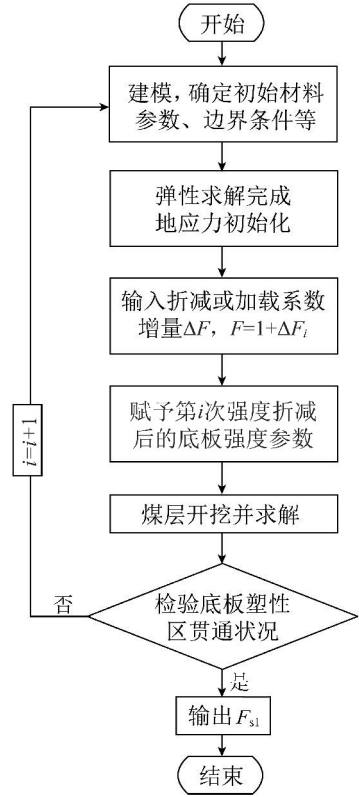


图 2 底板突水有限元强度折减分析流程
Fig. 2 Finite element strength reduction analysis procedure of water intrusion from coal seam floor

底板厚 47 m,10 煤上覆岩层厚 33.7 m,其上部至地表的岩体自重应力用外荷载代替,为 11 MPa。模型各边界均设置为应力边界,模拟生成地应力,水平地应力为 9 MPa。10 煤顶板岩性为泥岩,底板岩性为泥岩、岩浆岩,各岩组力学参数取值见表 1。模拟开采时,在底板与煤层之间设置接触面,由此保证顶板的正常垮落及计算的收敛性。

表 1 材料参数的选取

Table 1 Mechanical parameters

岩性	厚度 h/m	容重 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	抗拉强度 ρ_t/MPa	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ
泥岩	30.7	27.53	1.40	7.8	36.6	13.07	0.158
10 煤	4.3	14.00	0.03	1.0	25.0	0.08	0.360
岩浆岩	27.0	27.04	8.89	4.0	35.2	29.35	0.301
泥岩	20.0	26.25	2.36	2.3	33.5	10.91	0.174

3.2 计算结果分析

模拟时煤层一次采全高,分别对工作面推进距离 $D=50 m, D=100 m, D=150 m, D=200 m$ 四种情况进行了模拟研究,并假设考虑了 3 种不同工作面斜长的情况 ($L=100 m, L=150 m, L=200 m$),各自计算了不同阶段的底板安全系数 F_{s1} 。

3.2.1 承压水上底板破坏规律

图 3,4 分别为斜长 $L=150 m$ 时,工作面推进距离 $D=50 m, D=200 m$ 时强度折减前后塑性区状态图。

工作面推进 50 m 时,煤壁附近出现应力集中,周围岩体出现剪切破坏,而在采空区下方,底板 10 m 范

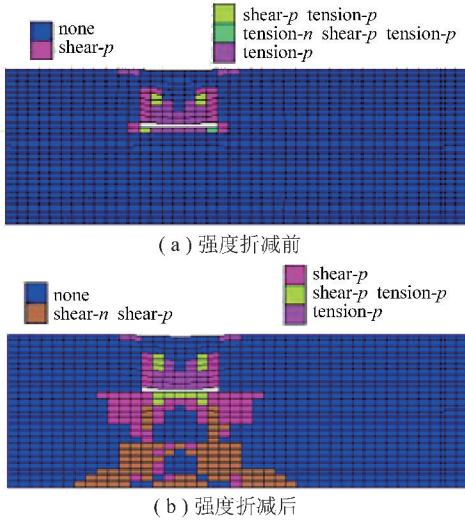


图 3 塑性区分布 ($D=50\text{ m}$)
Fig. 3 Plastic zone ($D=50\text{ m}$)

围内应力迅速释放,底板拉裂破坏,此时,底板破坏深度约为 5 m。强度折减计算后,当 $F_{s1}=2.38$ 时,底板塑性区开始贯通至承压含水层;在此计算中,底板裂隙从两侧煤壁不断向下发展,底板底部也开始出现剪切破坏区,并朝采空区方向倾斜向上发展,并最终与上部裂隙贯通。

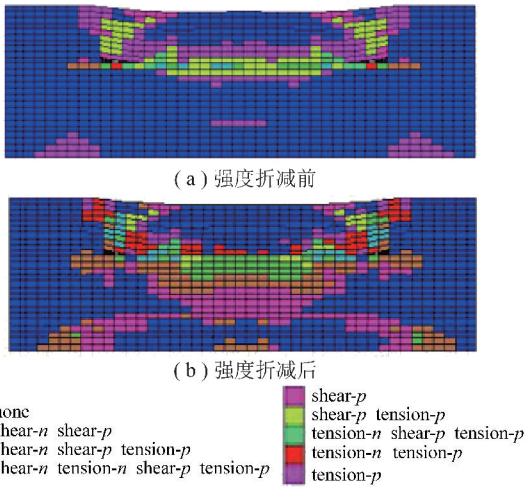


图 4 塑性区分布 ($D=200\text{ m}$)
Fig. 4 Plastic zone ($D=200\text{ m}$)

随着工作面的进一步推进,底板破坏范围不断扩大,破坏深度在推进至 150 m 后,逐渐稳定在 15 m 左右。实测破坏深度为 12.5 m,模拟结果较为接近。

工作面推进至 200 m 处后,经强度折减计算,底板导水裂隙发展贯通路径与 $L=50\text{ m}$ 时有所不同。由于顶板的垮落,底板浅处受矿压影响破裂,煤壁下方底板应力集中发生剪切破坏,该处破坏带发育至 20 m 左右时停止,而采空区下方断裂带不断发育直至与底板底部发育裂隙贯通,此时,计算终止,安全系

数 $F_{s1}=1.36$ 。

强度折减法揭示了正常区段底板突水的两条潜在路径。工作面前后 10 m 范围内,底板遭受剪切破坏严重,是最易突水的部位;随着工作面推进距离增加,由于基本顶首次来压或空顶距过大,底板承受较大附加压力,遭受破坏严重,因而也易发生突水。

3.2.2 底板安全系数与工作面斜长、推进距离的关系

当工作面斜长 $L=100\text{ m}$ 时,工作面不同开采阶段底板突水安全系数 F_{s1} 分别为:4.60,3.16,2.38,1.64; $L=150\text{ m}$ 时,底板安全系数 F_{s1} 分别为:2.38,1.80,1.52,1.36; $L=200\text{ m}$ 时,底板安全系数 F_{s1} 分别为 2.06,1.66,1.44,1.28。工作面推进距离 D 、工作面斜长 L 与突水安全系数 F_{s1} 的关系如图 5 所示。随着工作面的推进,煤矿底板突水安全系数逐渐减小,即说明煤矿突水风险越来越高。 F_{s1} 同时也随着工作面斜长的增加而减小,可见底板稳定性与采空区跨度密切相关。

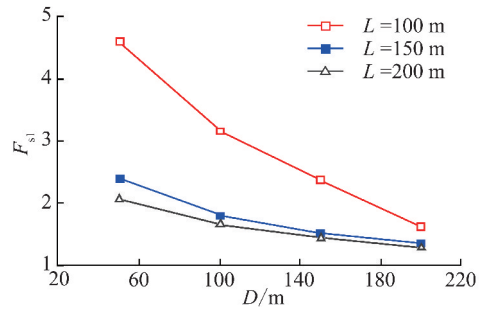


图 5 工作面推进距离、工作面斜长与安全系数的关系
Fig. 5 Relationship between advance, length of work face and safety coefficient

3.2.3 底板安全系数与地应力的关系

上述案例分析中,底板竖向地应力约为 12 MPa,水平构造应力约为 9 MPa。在模拟计算中,若改变底板地应力环境,计算 $L=150\text{ m}, D=200\text{ m}$,底板竖向应力分别为 3,6,9 MPa 时的底板安全系数。结果见表 2。

表 2 不同地应力时底板安全系数值

Table 2 The values of F_{s1} in different in-situ stress state

竖向应力/MPa	F_{s1}	水平应力/MPa	F_{s1}
3	1.92	6	1.58
6	1.62	9	1.36
9	1.46	12	1.22
12	1.36	15	1.10

保持竖向应力不变,增大水平构造应力。 $L=150\text{ m}, D=200\text{ m}$,分别计算水平构造应力为 6,12,

15 MPa 时的底板安全系数,见表 2。

从计算结果可以看出,底板稳定性随着竖向应力和水平应力的增大而减小。即说明,深部煤层开采受底板灰岩水威胁更大。

3.3 底板安全系数比较分析

进行工程规划设计时,岩土体受力部分实际能承受的力必须大于其容许承受的力,二者之比即为安全系数。因此,根据工程安全系数的含义可以换算得到基于突水系数法的底板安全系数 F_{s2} 。

$$F_{s2} = \frac{p_a}{p} \quad (6)$$

式中, p_a 为安全水压。

采煤工作面安全水头压力值可按下式进行计算^[15]:

$$p_a = T_s M \quad (7)$$

式中, T_s 为临界突水系数, MPa/m, T_s 值应当根据本区资料确定,一般情况下,在具有构造破坏的地段按 0.06 MPa/m 计算,隔水层完整无断裂构造破坏地段按 0.1 MPa/m 计算。

本案例按一般情况考虑,无断裂构造时, $T_s = 0.1$ MPa/m, $M = 47$ m, 可求得 $p_a = 4.7$ MPa, 太原组灰岩水压为 2.7 MPa, 因此, $F_{s2} = 1.74$ 。

按工作面实际开采条件,利用强度折减法求得的底板强度储备安全系数 F_{s1} 为 2.38 ~ 1.36, 安全系数随工作面的推进逐渐减小并达到稳定值。可以发现, F_{s2} 处于该区间内,但它为一定值。这也从底板强度储备的角度解释了为什么有些矿井底板突水系数在安全范围内,但仍然发生了突水事故。 F_{s1} 考虑了工作面斜长、推进距离等更为全面具体的因素,因此,结果更为保守可靠。

4 结 论

(1) 通过有限元强度折减法计算,案例中工作面底板破坏深度在 15 m 左右,与实测结果一致,安全系数 F_{s1} 随着工作面的推进逐渐减小,最终稳定在 1.38 左右。

(2) 该方法成功揭示了完整底板的两条潜在突水路径,即煤壁附近突水或大跨度采空区中部底板突水。

(3) 有限元强度折减计算结果表明,底板安全系数与工作面斜长、工作面推进距离及地应力环境等因素密切相关。工作面斜长、推进距离越长,地应力越大,底板安全系数 F_{s1} 越小,底板越不稳定,突水风险也就越大。

(4) 将有限元强度折减法应用于煤矿底板突水

评价中是可行的。底板强度储备安全系数 F_{s1} 反映了承压水体上开采时底板岩体抵抗破坏贯通的能力。该系数同时考虑了岩性、地层结构、地应力等因素,而且,它不受底板厚度变化、岩层起伏等条件限制,因此,评价无构造影响底板稳定性时,与传统的突水系数 T_s 相比, F_{s1} 具有更好的可信度和适用性。本文中底板安全系数考虑分析了正常区块底板的情况,受断裂构造影响时,考虑底板的强度储备也仍是有必要的。

参考文献:

- [1] Yang T, Liu J, Zhu W, et al. A coupled flow-stress-damage model for groundwater outbursts from an underlying aquifer into mining excavations[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2007, 44: 87-97.
- [2] Sui W H, Liu J Y, Yang S G, et al. Hydrogeological analysis and salvage of a deep coalmine after an underground water inrush[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(4): 735-749.
- [3] 施龙青. 底板突水机理研究综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2009, 28(3): 17-23.
Shi Longqing. Summary of research on mechanism of water-inrush from coal seam floor[J]. Journal of Shandong University of Science & Technology (Natural Science), 2009, 28(3): 17-23.
- [4] 武强, 张志龙, 马积福. 煤层底板突水评价的新型实用方法 I——主控指标体系的建设[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 42-47.
Wu Qiang, Zhang Zhilong, Ma Jifu. A new practical methodology of the coal floor water inrush evaluating I——the master controlling index system construction[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 42-47.
- [5] 武强, 张志龙, 张生元. 煤层底板突水评价的新型实用方法 II——脆弱性指数法[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1121-1126.
Wu Qiang, Zhang Zhilong, Zhang Shengyuan. A new practical methodology of the coal floor water inrush evaluating II——the vulnerable index method[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1121-1126.
- [6] 王连国, 宋扬, 缪协兴. 基于尖点突变模型的煤层底板突水预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 573-577.
Wang Lianguo, Song Yang, Miao Xiexing. Study on prediction of water-inrush from coal floor based on cusp catastrophic model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 573-577.
- [7] 高延法, 章延平, 张慧敏, 等. 底板突水危险性评价专家系统及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 253-238.
Gao Yanfa, Zhang Yanping, Zhang Huimin, et al. Research and application on expert system for risk assessment of water inrush from coal floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 253-238.
- [8] 李连崇, 唐春安, 梁正召, 等. 含断层煤层底板突水通道形成过程的仿真分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 290-297.
Li Lianchong, Tang Chun'an, Liang Zhengzhao, et al. Numerical analysis of pathway formation of groundwater inrush from faults in coal

- seam floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 290-297.
- [9] 冯启言, 杨天鸿, 于庆嘉, 等. 基于渗流-损伤耦合分析的煤层底板突水过程的数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2006(3): 1-4.
Feng Qiyang, Yang Tianhong, Yu Qingjia, et al. Numerical simulation on water-inrush from the seam floor based on the coupled analysis of seepage and damage[J]. Journal of Safety and Environment, 2006(3): 1-4.
- [10] 虎维岳, 朱开鹏, 黄选明. 非均匀布高压水对采煤工作面底板隔水岩层破坏特征及其突水条件研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1109-1114.
Hu Weiyue, Zhu Kaipeng, Huang Xuanming. Study on floor rock mass failure and water inrush caused by non-uniform distributed water pressure in mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1109-1114.
- [11] 郑颖人, 赵尚毅, 邓楚键, 等. 有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用[J]. 中国工程科学, 2006, 8(12): 29-61.
Zheng Yingren, Zhao Shangyi, Deng Chujian, et al. Development of finite element limit analysis method and its applications in geotechnical engineering[J]. Engineering Science, 2006, 8(12): 29-61.
- [12] 赵延林, 吴启红, 王卫军, 等. 基于突变理论的采空区重叠顶板稳定性强度折减法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1424-1434.
Zhao Yanlin, Wu Qihong, Wang Weijun, et al. Strength reduction method to study stability of goaf overlapping roof based on catastrophe theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1424-1434.
- [13] 雷文杰, 汪国华, 薛晓晓. 有限元强度折减法在煤层底板破坏中的应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 299-303.
Lei Wenjie, Wang Guohua, Xue Xiaoxiao. Application of finite element strength reduction method to destruction in coal seam floor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 299-303.
- [14] Zhang J. Investigations of water inrushes from aquifers under coal seams[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2005, 42: 350-360.
- [15] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿防治水规定[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.
- [16] 郑颖人, 赵尚毅, 张鲁渝. 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J]. 中国工程科学, 2002, 10(4): 57-61.
Zheng Yingren, Zhao Shangyi, Zhang Luyu. Slope stability analysis by strength reduction FEM[J]. Engineering Science, 2002, 10(4): 57-61.