

文章编号: 1673-3363-(2013)06-0911-06

基于无量纲多源信息融合的底板突水危险性 评价方法研究

朱宗奎, 徐智敏, 孙亚军, 黄鑫磊

(中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要 矿井底板突水危险性的有效评价是矿井水害防治和实现安全开采的基本前提与重要基础。开展了以无量纲多源信息融合为基础的底板突水危险性评价方法研究, 并以新安煤矿为例, 在系统分析该矿底板突水致灾机理的基础上, 从构造条件和水文地质条件2个方面确定了断层分布带、断层交点和端点分布带、断层突水指数、奥灰含水层水压、奥灰含水层富水性、有效隔水层等效厚度6个要素为该矿二₁煤层底板突水的关键影响因素, 并对其进行无量纲处理。通过定性排列定量转化的方法确定了各因素的权重, 基于GIS的多源信息融合技术, 构建了新安煤矿二₁煤底板突水危险性评价的无量纲多源信息融合模型, 并应用到该煤矿底板突水评价及预测中, 结果真实可靠。

关键词 底板突水; 突水危险性评价; 多源信息融合; 地理信息系统

中图分类号 TD 745

文献标志码 A

Research on the risk evaluation methods of water inrush from coal floor based on dimensionless multi-source information fusion technique

ZHU Zong-kui, XU Zhi-min, SUN Ya-jun, HUANG Xin-lei

(School of Resource and Earth Science, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract Effective evaluation of the risk of water inrush from coal floor is the prerequisite and basis for coal mine water hazard control and safety mining. The paper researches the risk evaluation methods of water inrush from coal floor based on dimensionless multi-source information fusion technique. Taking Xin'an coal mine as example and based on systematic analysis of floor water inrush mechanism, six key factors affecting the water inrush from the floor of NO.2₁ coal seam including distribution of faults belts, distribution of the endpoints and intersection-points in faults, index of water inrush caused by faults, water pressure and watery of the Ordovician limestone aquifer and the effective aquifuge thickness are identified and dealt with dimensionless quantity due to the structural and hydro-geological conditions. The weights of each factor are determined by qualitative arrangement and quantitative transformation. After that, dimensionless multi-source information fusion model for the evaluation of the water inrush risk of NO.2₁ coal seam in Xin'an coal mine are established on the basis of the GIS multi-source information fusion technique. The result is proved to be reliable when the model is applied

收稿日期: 2012-09-06

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2010QNB35)

作者简介: 朱宗奎(1981-), 男, 江苏省徐州市人, 博士, 讲师, 从事矿井水害防治方面的研究。

E-mail: zhzk@cumt.edu.cn

Tel: 13813298155

into the evaluation and prediction work of water inrush from coal floor in this coal mine.

Key words water inrush from coal floor; evaluation of the water inrush risk; multi-source information fusion; geographic information system

石炭二叠系是我国的主要含煤岩系,其下伏的奥陶系石灰岩是占我国煤炭储量近 60% 的华北地区区域性强含水层,也是该区煤矿引起底板突水事故的重大隐患^[1]。近年来,我国东部矿区开采水平不断向深部拓展,随之面临“水压高、矿压高、地温高”等“三高”问题以及其他难以预料的地质灾害^[1-2],使得底板突水事故时有发生,造成严重的人员伤亡和经济损失。

上世纪 50 年代以来,国内外学者提出了多种底板突水危险性评价的模型与方法。其中,有代表性的是斯列萨列夫公式法^[3]、突水系数法^[4]、GIS 拟合模型法^[5]、脆弱性指数法^[6]等。传统的方法在指导底板突水预测预报方面发挥了重要作用,但限于矿井突水机理的复杂性与水文地质结构的多样性,一些问题仍然没有得到有效解决,特别是多个关键因素影响下的底板突水危险性评价问题有待进一步研究。如何筛选关键突水致灾因素以及采用有效方法综合评价各因素对底板突水的影响是研究的重点。

基于模糊综合评判的定性排列定量转化方法适用于一些不易直接量化的模糊性因素的权重确定,该方法在对众多因素进行定性排序的基础上,可对其进行较为合理的定量处理。无量纲化可以消除原始数据的量纲影响,使不同量纲的评价因素具有可比性。多元信息融合技术基于构建的评价模型可以对多个因素的信息层进行复合叠加进而获得有用信息。

本文以新安煤矿二₁煤承压水上开采底板突水危险性评价为例,在筛选并量化底板突水各个关键影响因素以及确定其权重的基础上,提出并采用了无量纲多源信息融合技术拟合各类关键影响因素对底板突水的复杂作用关系,真实反映了受多因素影响且具有非常复杂机理和演变过程的底板突水,较好地实现了底板突水的中长期预测预报。

1 底板突水关键影响因素的确定与量化

1.1 因素的确定

底板突水关键影响因素的正确选择是评价结果可靠的基础。煤层底板突水的影响因素众多^[7],本文通过认真研究新安煤矿底板突水机理,深入分

析各类因素对底板突水的影响,结合煤矿现有的水文与地质资料,借鉴华北型煤田底板突水的评价经验,决定从地质构造条件与水文地质条件 2 个方面选择关键影响因素。

地质构造特别是断层的存在不仅严重地破坏了隔水层的完整性,而且也是潜在的突水通道。因此,断层的分布、发育程度及突水可能性对煤层底板突水具有关键的影响作用。从新安井田 12 采区和 15 采区实际揭露断层的情况来看,区内小断层发育,断层平均密度 9.55 条/km²,绝大多数为正断层。对 1989~2004 年的突水资料进行统计,发现 5 次底板突水中有 4 次与断层相关。可见,新安煤矿开采过程中断层是底板突水的关键影响因素。

煤层底板以下承压含水层的高水压是底板突水的动力来源,含水层的富水性决定了底板突水量的大小。新安煤矿水位监测数据显示奥陶系灰岩含水层水位一般为 230~290 m,当进行二水平(-50~-150 m)开采时,突水系数为 0.06~0.09 MPa/m,已超临界值^[8]。抽水试验资料显示该含水层单位涌水量为 0.000 61~4.03 L/(s·m),存在强富水岩段。对 1989~2004 年的突水资料进行统计,发现 5 次底板突水中有 4 次是奥灰水。因此,奥陶系灰岩含水层是二₁煤层底板突水的关键影响因素。

隔水层等效厚度反映了隔水层的阻水能力。新安煤矿钻孔资料显示井田内奥陶系灰岩含水层距二₁煤层底界的距离 43.77~74.50 m,平均距离 53.76 m,这是抑制底板突水的有利因素,但是由于矿压作用的影响,煤层底板受采动扰动破坏了一定深度。因此,去除矿压破坏带后的有效隔水层等效厚度是抑制二₁煤层底板突水的关键因素。

根据以上分析,本文最终从地质构造条件与水文地质条件 2 个方面确定断层分布带、断层交点和端点分布带、断层突水指数、奥灰含水层水压、奥灰含水层富水性和有效隔水层等效厚度 6 个因素作为底板突水的关键影响因素。

1.2 因素的量化

1) 断层分布带

断层分布带一般分为断层破碎带和断层影响带。新安井田内小断层发育,且多为斜交正断层。正断层破碎带宽度的经验公式为:

$$W_b = \lambda H^{3/5} \quad (1)$$

正断层影响带宽度的经验公式为:

$$W_a = 2H \quad (2)$$

式中: W_b 为正断层破碎带宽度; W_a 为正断层影响带宽度; λ 为岩性系数, 松软岩层取 1.14, 中硬岩层取 0.76, 坚硬岩层取 0.38; H 为断层落差^[9-11]。

由于断层破碎带和影响带对煤层底板突水的威胁程度不同, 本文参考相关文献^[12], 对正断层破碎带量化赋值为 1, 影响带量化赋值为 0.7, 其他区域量化赋值为 0。

2) 断层交点和端点分布带

对断层交点带进行量化时, 若 2 条相交断层破碎带区域分别为 X_1, X_2 , 影响带区域分别为 Y_1, Y_2 , 则叠加后生成的 4 种区域类型 X_1X_2 (破碎带叠加破碎带), X_1Y_2 (破碎带叠加影响带), X_2Y_1 (破碎带叠加影响带), Y_1Y_2 (影响带叠加影响带)即为交点带范围, 根据叠加原理它们对应的量化赋值应分别为 2, 1.7, 1.7, 1.4。对断层端点带进行量化时, 断层端点往四周分别延伸影响带宽度的范围即为端点带范围, 由于端点岩体破碎, 导水性能好, 统一量化赋值为 1.7, 其他区域量化赋值为 0。如图 1。

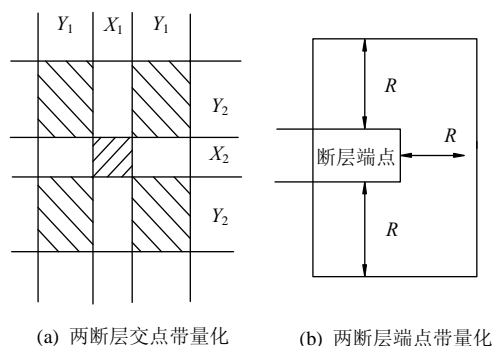


图 1 断层交点和端点分布带示意图

Fig.1 Sketch map of the fault endpoints and intersection points

3) 断层突水指数

单位面积内所有断层的落差、走向长度、时间优势值、性质优势值、岩性优势值乘积之和即为断层突水指数, 它综合反映了断层的突水危险性。突水指数越大, 突水可能性越大。其表达式如下:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n H_i L_i T_i C_i R_i}{S} \quad (3)$$

式中: F 为断层突水指数; H 为断层的落差; L 为断层在单元内的走向长度; T 为时间优势值: 印支期取 0.1, 燕山早期取 0.3, 燕山中晚期取 0.5, 喜

山期 Q_2 以前取 0.8, 喜山期 Q_2 以来取 1.0; C 为性质优势值: 压性取 0.1, 压扭取 0.55, 扭性取 0.65, 张扭取 0.8, 张性取 1.0; R 为岩性优势值: 软塑性岩取 0.1, 一硬一软取 0.6, 脆性或可溶岩取 1.0; n 为单元内的断层条数; S 为单元面积^[12-13]。

新安井田走向长度约 15.5 km, 倾向宽度约 3.5 km, 面积约 50.26 km²。依据便于数据采集与处理的原则将井田划分为 400 m×400 m 的单元网格, 计算每个单元网格的断层突水指数。以网格中心点坐标代表该网格坐标, 将计算所得数据作为该坐标的量化赋值。

4) 奥灰含水层水压

根据新安煤矿水文地质勘探资料, 统计出不同钻孔水位数据以及奥灰含水层的顶界标高, 计算得到奥灰含水层的水位、水压值。

5) 奥灰含水层富水性

单位涌水量是衡量含水层富水性最主要的指标。根据新安煤矿奥灰钻孔抽水试验资料, 将单位涌水量换算成钻孔孔径为 91 mm、降深为 10 m 时的标准单位涌水量^[8]。

6) 有效隔水层等效厚度

有效隔水层厚度等于隔水层总厚度减去矿压破坏带深度和导升带高度。根据新安煤矿生产实践经验, 二₁煤层底板矿压破坏带深度约为 14.2 m, 导升带高度一般为零。

2 专题图的绘制

在多指标评价中涉及到 2 个基本变量, 一个是各指标的实际值, 另一个是各指标的评价值。由于各指标所代表的物理含义不同, 因此存在着量纲上的差异。这种异量纲性是影响评价的主要因素。指标的无量纲化处理是解决这一问题的主要手段。无量纲化也称做数据的标准化、规格化, 是一种通过数学变换来消除原始数据量纲影响的方法。本文采用极值化法对关键影响因素进行无量纲化。越大越优型指标无量纲化转换公式为:

$$N_i = \frac{x_i - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (4)$$

越小越优型指标无量纲化转换公式为:

$$N_i = \frac{\max(x_i) - x_i}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (5)$$

式中: N_i 为评价值; x_i 为实际值; $\min(x_i)$ 为最小实际值; $\max(x_i)$ 为最大实际值。

对于断层分布带、断层交点和端点分布带、断

层突水指数、奥灰含水层水压、奥灰含水层富水性而言, 值越大越能体现突水危险性, 因而采用越大越优型指标无量纲化转换公式; 对于有效隔水层等效厚度而言, 值越小越能体现突水危险性, 因而采用越小越优型指标无量纲化转换公式。

根据以上确定的方法与原则, 计算各关键影响因素的评价值并依据计算结果分别绘制新安煤矿二₁煤层底板突水 6 个关键影响因素的无量纲专题图。

3 构建评价模型

3.1 关键影响因素权重确定

煤层底板突水是一个受多种因素综合影响的非线性动力问题, 各类关键影响因素的权重难以确定。定性排列定量转化方法适用于一些不易直接量化的模糊性因素权重的确定, 可信度高, 应用范围广^[14]。本文采用该方法确定底板突水各类关键影响因素的权重。当专家难以对众多因素给出其权重分配值时, 可以让专家对众多因素进行定性排序, 即对各因素按其重要程度排出 1, 2, 3, …的顺序。若认为某些因素处于同等重要的地位, 可把它们排在同一序号上, 然后做如下定量处理:

$$S_k(I) = \frac{\ln(Q-I)}{\ln(Q-1)} \quad (6)$$

$$W_k = \frac{S_k(I)}{\sum_{k=1}^n S_k(I)} \quad (7)$$

式中: I 为排序值, $I \in (1, 2, \dots, J)$, J 为实际最大排序值; Q 为转换参数, 可令 $Q=J+2$; $S(I)$ 为 I 的定量转化对应值; k 为关键影响因素; W 为权重; n 为关键影响因素个数。

研究发现, 新安煤矿二₁煤层底板突水机理表现为在断层构造和采掘扰动的影响下, 底板高承压水从断层带等导水通道进入矿井的过程。地质构造是突水的主要影响因素, 矿山压力和采掘活动是突水的触发和诱导因素。根据各类关键影响因素在底板突水中所起的作用^[7], 结合新安煤矿实际情况进行专家评分, 最终确定含水层水压定性排序为 1, 断层交点和端点分布带定性排序为 1.5, 断层分布带定性排序为 2, 有效隔水层等效厚度定性排序为 2.5, 含水层富水性定性排序为 4.5, 断层突水指数定性排序为 6。然后通过定量计算得到各关键影响因素的权重如表 1。

表 1 关键影响因素权重
Table 1 Weights of the key factors

主要影响因素	排序(I)	Q 值	$(Q-I)$ 值	$S(I)$	权重
含水层水压	1	8	7	1	0.210 14
断层交点和端点分布带	1.5	8	6.5	0.961 91	0.202 13
断层分布带	2	8	6	0.920 78	0.193 49
有效隔水层等效厚度	2.5	8	5.5	0.876 07	0.184 10
含水层富水性	4.5	8	3.5	0.643 79	0.135 29
断层突水指数	6	8	2	0.356 21	0.074 85

3.2 构建底板突水危险性评价模型

GIS 具有强大的多源信息融合能力, 它能够综合考虑煤层底板突水的各类关键影响因素, 绘制各因素等值线图, 建立拓扑关系, 形成各因子专题图, 依据评价模型复合叠加各类子专题图并最终输出底板突水危险性评价分区图。本文借助 ArcGIS 将关键影响因素的无量纲化值函数按照各因素的权重进行融合, 建立新安煤矿二₁煤层底板突水危险性评价模型如下:

$$EI = \sum_{i=1}^n W_i \cdot f_i(x, y) = 0.19349 f_1(x, y) + 0.20213 f_2(x, y) + 0.07485 f_3(x, y) + 0.21014 f_4(x, y) + 0.13529 f_5(x, y) + 0.18410 f_6(x, y) \quad (8)$$

式中: EI 为评价指数(evaluation index); W_i 为关键影响因素权重系数; $f_i(x, y)$ 为关键影响因素无量纲化值函数; (x, y) 为地理坐标; n 为关键影响因素个数。

利用 ArcGIS 将含有无量纲化值函数的各关键影响因素无量纲化专题图按照评价模型进行融合, 便可输出叠加图。

4 底板突水危险性评价

4.1 危险性评价分区

根据上述评价模型计算出叠加图各栅格的评价指数 EI , 利用 ArcGIS 生成其频数统计直方图如图 2 所示。运用 Natural Breaks(Jenks)(自然分级法)对其进行分级, 可得到最佳的 5 级分级结果如图 3 所示, 各级阈值分别为 0.201 6, 0.272 0, 0.343 1, 0.520 8。评价指数越大, 突水的可能性也就越大, 根据分级阈值将研究区域划分为 5 个区域:

$EI \in [0.071\ 3, 0.201\ 6]$ 相对安全区

$EI \in [0.201\ 6, 0.272\ 0]$ 较安全区

$EI \in [0.272\ 0, 0.343\ 1]$ 过渡区

$EI \in [0.343\ 1, 0.520\ 8]$ 较危险区

$EI \in [0.520\ 8, 0.870\ 5]$ 危险区

根据上述划分, 最终生成新安煤矿二₁煤层底板突水危险性评价分区。

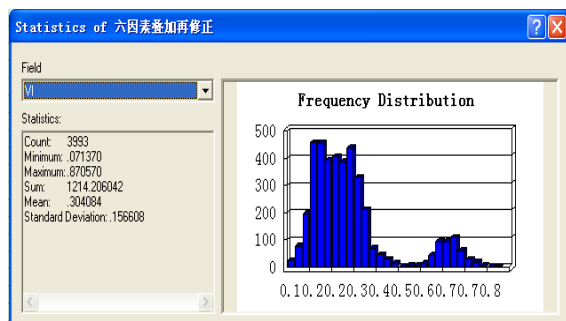


图 2 评价指数统计直方图

Fig.2 Evaluation index chart

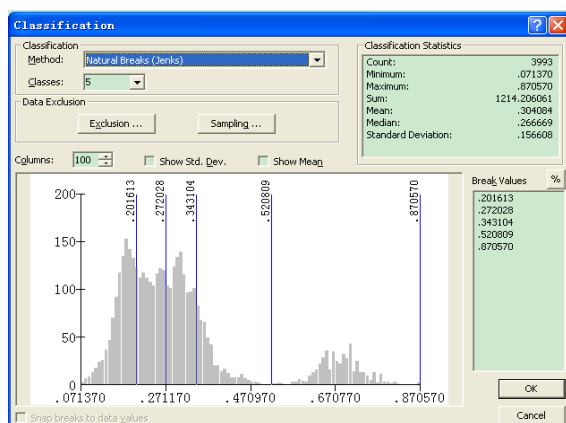


图 3 自然分级法确定阈值

Fig.3 Partial enlarged map of the faults distribution

从煤层底板突水危险性分区可以看出, 危险区主要是断层分布带和断层交点分布带; 较危险区和过渡区主要分布在奥灰水压较大、有效隔水层等效厚度较薄以及富水性较好的区域, 特别是具有一定规模的断层端点处和断层突水指数较大的区域; 相对安全区和较安全区主要分布在隔水层厚度相对较厚、断层等地质构造相对不发育、水压小且富水性差的区域。

4.2 评价模型的识别与检验

如果实际突水点位置处于评价模型危险区、较危险区、过渡区的几率大于 90%, 则认为评价模型可信。否则需要调整参数, 重新拟合, 直至符合要求。本文将新安煤矿奥灰突水点与评价分区图进行拟合, 发现突水点均处在危险性评价指数较大的区域内, 拟合率达到 100%, 证明评价模型真实可靠, 可用于新安煤矿二₁煤层底板突水中长期预测预报。

5 结 论

本文运用无量纲多源信息融合方法对新安煤矿二₁煤层底板突水危险性进行综合评价, 主要结论如下:

1) 确定了影响煤层底板突水的 6 个关键影响因素: 断层分布带、断层交点和端点分布带、断层突水指数、奥灰含水层水压、奥灰含水层富水性和有效隔水层等效厚度。

2) 对关键影响因素进行量化, 运用 ArcGIS 绘制各关键影响因素无量纲化专题图。

3) 运用定性排序定量转化方法确定各关键影响因素权重。

4) 构建底板突水危险性评价模型, 根据阈值划分评价区域。将实际突水情况与评价结果进行拟合, 拟合效果较好, 评价结果可信。

参考文献:

- [1] 赵铁锤. 华北地区奥灰水综合防治技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006: 1-19.
- [2] 靳德武. 我国煤层底板突水问题的研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(6): 1-4.
JIN De-wu. Research status and outlook of water outburst from seam floor in China coal mines [J]. Coal Science and Technology, 2002, 30(6): 1-4.
- [3] 潘元伯. 关于斯列萨列夫安全水头公式的推导[J]. 合肥工业大学学报, 1986, 8(1): 99-103.
PAN Yuan-bo. An inquiry of secure hydraulic head formula of Slisalif's[J]. Journal of Hefei University of Technology, 1986, 8(1): 99-103.
- [4] 田干. 突水系数计算公式的演变及实验研究[J]. 煤炭工程, 2010(5): 99-102.
TIAN Gan. Study on the evolution and experimental of the formula for calculating the water burst coefficient[J]. Coal Engineering, 2010(5): 99-102.
- [5] 孙亚军, 夏镛华. 信息拟合方法在焦作东部矿区底板突水预测中的初步应用[J]. 中州煤炭, 1990(2): 44-47.
SUN Ya-jun, XIA Yong-hua. Application of the information fitting to forecast of water intrush from coalbed's floor in the east of Jiaozuo mining area[J]. Zhongzhou Coal, 1990(2): 44-47.
- [6] WU Qiang, ZHOU Wan-fang. Prediction of groundwater intrush into coal mines from aquifers underlying the coal seams in China: vulnerability index method and its construction[J]. Environ Geol, 2008, 56(2): 245-254.
- [7] 张金才, 刘天泉. 煤层底板突水影响因素的分析与研究[J]. 煤矿开采, 1993, 8(4): 35-39.
ZHANG Jin-cai, LIU Tian-quan. Analysis and research of

- the influencing factors for water-inrush from coal floor[J]. Coal Mining Technology, 1993, 8(4): 35-39.
- [8] 国家煤矿防治安全监察局. 煤矿防治水规定释义[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009.
- [9] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [10] 冯本超, 洪允河. 正断层上盘防水煤柱合理宽度的研究[J]. 中国矿业大学学报, 1993, 22(3): 117-122.
FENG Ben-chao, HONG Yun-he. Study on rational width of coal pillar positioned in the upthrown block of normal fault for flood prevention[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1993, 22(3): 117-122.
- [11] 孟召平, 彭苏萍, 黎洪. 正断层附近煤的物理力学性质变化及其对矿压分布的影响[J]. 煤炭学报, 2001, 26(6): 561-566.
MENG Zhao-ping, PENG Su-ping, LI Hong. Influence of normal faults on the physical and mechanical properties of coal and the distribution of underground pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(6): 561-566.
- [12] 李云龙. 基于多源信息融合的姚桥矿水害防治方法与应用研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 2010.
- [13] 倪宏革, 罗国煜. 煤矿水害的优势面机理研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(5): 518-521.
NI Hong-ge, LUO Guo-yu. Study on the mechanism of preferred plane of water hazard in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(5): 518-521.
- [14] 孙淑霞, 吴征. 模糊综合评判系统在生烃条件评价中的应用[J]. 成都理工学院学报, 1995, 22(3): 6-10.
SUN Shu-xia, WU Zheng. Application of fuzzy synthesized evaluation to the hydrocarbon-generating conditions[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1995, 22(3): 6-10.

(上接第 910 页)

- [16] 方从严, 卓家寿. 锚杆加固机理的试验研究现状[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(6): 696-700.
FANG Cong-yan, ZHUO Jia-shou. Experimental study on anchorage mechanism of anchor bolts[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005, 33(6): 696-700.
- [17] 赵星光, 蔡明, 蔡美峰. 岩石剪胀角模型与验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 970-981.
ZHAO Xing-guang, CAI Ming, CAI Mei-feng. A rock dilation angle model and its verification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 970-981.
- [18] 孔位学, 芮勇勤, 董宝弟. 岩土材料在非关联流动法则下剪胀角选取探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3278-3284.
KONG Wei-xue, RUI Yong-qin, DONG Bao-di. Determination of dilatancy angle for geomaterials under non-associated flow rule[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3278-3284.