

无底柱深孔后退式崩矿法采场结构参数优化

汪 伟, 罗周全, 秦亚光, 孙 杨

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 为实现某铅锌矿山无底柱深孔后退式崩矿法安全高效开采,开展采场结构参数优化研究.实测-650 m中段原岩应力,运用Surpac-FLAC^{3D}模型生成技术构建数值分析模型,进而采用多元应力回归方法反演初始地应力场.通过弹性力学小薄板理论分析得到顶板稳定性随采场结构参数的变化关系,结合实际采准条件,提出采场结构参数初选方案.基于反演地应力场,进行初选方案开采数值分析,获得各方案力学响应指标.引入多目标理想点法决策,考虑安全和经济指标,计算方案评价指标集与理想解的向量近似度,优化确定该矿无底柱深孔后退式崩矿法采场结构参数为矿房采场宽10 m,矿柱采场宽8 m.

关 键 词: 初始地应力场;采场结构参数;弹性力学;数值分析;理想点法决策

中图分类号: TD 853

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)04-0578-05

Stope Parameters Optimization of Non-pillar Longhole Retreat Caving

WANG Wei, LUO Zhou-quan, QIN Ya-guang, SUN Yang

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083. Corresponding author: WANG Wei, E-mail: csu424@163.com)

Abstract: In order to realize safe and efficient mining of non-pillar longhole retreat caving in a lead-zinc mine, stope parameters optimization was conducted. Field measurement of in-situ stress was carried out on -650 m level, and a numerical model was constructed by Surpac-FLAC^{3D} modeling technique. On these grounds, in-situ stress field was inversed by multiple regression method. The change relation of roof stability with stope parameters was obtained by using the small thin elastic mechanics theory, and the primary stope parameters schemes were put forward by combining with actual mining condition. Based on the inversion of ground stress field, the mining numerical analysis of primary schemes was conducted to get mechanical response indexes of different schemes. The safety and economy indexes were comprehensively considered, and the multi-objective TOPSIS decision method was introduced, the superior order of parameter schemes was determined by calculating the vector similarity of evaluation indexes set to ideal solution. Optimal stope parameters of non-pillar longhole retreat caving were finally determined, i. e., chamber width 10 m, pillar width 8 m.

Key words: in-situ stress field; stope parameter; elastic mechanics; numerical analysis; TOPSIS decision

采场结构参数优化可使采场内部应力分布趋于均衡,避免局部应力集中,使采场处于安全有利状态.同时,采场结构参数的改变直接影响生产能力、采掘成本等经济指标,是决定开采效益的重要因素.因此,采场结构参数优化是实现矿山安全高

效开采的重要手段.

诸多采场结构参数优化方法中,以数值方法应用最为普遍^[1],它既克服了传统经验类比法主观性大的缺点,又改善了纯数理计算效率低的不足,并可与试验手段或理论方法有效结合,适用性

收稿日期: 2014-09-28

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAK09B02-05);国家自然科学基金资助项目(51274250).

作者简介: 汪 伟(1990-),男,安徽安庆人,中南大学博士研究生;罗周全(1966-),男,湖南邵阳人,中南大学教授,博士生导师.

很强. Zhao 等^[2]通过 Ansys 有限元试算构建采场结构参数与稳定性指标对应的目标函数, 利用混沌搜索获得最优参数方案, 成功用于试验采场生产. 罗周全等^[3]采用 MIDAS/GTS 模拟开采进程, 通过比较不同方案力学响应指标, 从安全角度确定了某铜矿盘区隔离矿柱最优开采参数. 吴爱祥等^[4]基于大间距结构参数理论, 开展相似放矿试验和放矿数值模拟, 据此采用回归分析方法优化确定某铁矿采场结构参数. 然而, 采场结构参数优化是涉及多层次、多因素和多目标的决策过程^[5], 当前的优化方法仍存在一些不足: 未准确考虑初始地应力场影响, 而这恰是合理数值分析的关键; 确定采场结构参数优化区间或初选方案时, 缺乏合理依据, 主观性大; 多是从安全角度优化决策, 缺乏对其他因素, 特别是经济指标的综合考虑.

为此, 本文将针对现存采场结构参数优化方法的不足, 以某铅锌矿山无底柱深孔后退式崩矿法采场为对象, 开展初始地应力场反演、弹性力学分析和数值模拟等工作, 考虑安全和经济指标, 引入多目标理想点法决策, 综合确定采场结构参数, 以期对矿山安全高效开采提供合理依据.

1 初始地应力场反演

1.1 原岩应力实测

-650 m 中段为该矿山主要开采中段, 段内多为倾斜中厚矿体, 为准确获取中段原岩应力分布特征, 采用改进型 LUT 套孔应力测定系统^[6]进行现场实测. 经与矿山地质及采矿工程师讨论, 决定于 N3 号穿脉、S4 号穿脉与 S5 号穿脉之间各布置 1 个地应力测点. 套取带有 LUT 探头的完整岩芯, 采集岩芯解除应变, 并进行双轴率测定试验. 将岩芯解除应变和弹性参数输入 LUT-str 应力计算程序, 得到原岩应力实测结果, 见表 1.

1.2 数值建模

采用 Surpac 构建涵盖地层、断层、矿体等信息的三维实体模型, 通过 Surpac 块体约束功能将实体模型剖分为块体网格模型, 经 Surpac-FLAC^{3D}格式转换技术导出研究区域数值分析模型(图 1), 考虑边界效应, 建模范围定为 $(x, y, z)/m$: $(2\,440 \sim 2\,890, 7\,830 \sim 8\,730, -750 \sim -450)$, 模型单元数共 562 500 个, 节点数共 585 738 个.

计算区域包含①地层: 泥盘系中统东岗岭阶上亚组 (D_2d^b), 泥盘系中统东岗岭阶下亚组 (D_2d^a), 泥盘系上统天子岭下亚组 (D_3t^a). ②断层. ③铅锌矿和黄铁矿. 岩体参数来自课题组研究

结果^[7].

表 1 主应力实测结果
Table 1 Measured results of principal stress

测点编号	-650 m-1 [#]	-650 m-2 [#]
埋深/m	780.5	780.8
测点坐标 (x,y,z)/m	(8 418.607, 2 644.008, -648.500)	(8 254.220, 2 589.970, -648.800)
主应力 MPa	σ_1	31.75
	σ_2	25.32
	σ_3	11.85
方位角 (°)	β_1	20.49
	β_2	286.97
	β_3	148.89
倾角 (°)	α_1	14.02
	α_2	17.73
	α_3	76.05

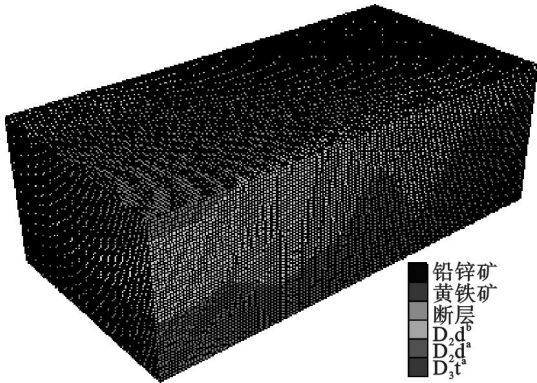


图 1 数值分析模型

Fig. 1 Numerical analysis model

1.3 初始地应力场反演

采用多元回归方法反演初始地应力场^[8], 研究中考虑自重应力和构造应力, 共 6 种载荷工况. 其中, 构造应力工况为①x 方向和 y 方向边界水平挤压构造运动; ②xy 平面内剪切变形构造运动; ③xz 平面和 yz 平面内竖向剪切变形构造运动. 依次按照上述 6 种载荷工况进行初始地应力场试算, 获得 6 组独立初始地应力场, 则应力回归值与应力实测值最小二乘逼近的函数表达式为

$$S_{残} = \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^* - \sum_{i=1}^n L_i \sigma_{jk}^i)^2. \quad (1)$$

式中: k 为测点序号; j 为应力分量编号; σ_{jk}^* 为测点应力分量实测值; L_i 为多元回归系数; σ_{jk}^i 为不同工况下测点应力分量试算值; n 为工况数.

基于最小二乘原理, 采用 SPSS 软件求解 $S_{残}$ 满足极小的方程组^[9], 解得回归系数 $L_1 = 2.333$, $L_2 = 0.124$, $L_3 = 1.685$, $L_4 = -4.014$, $L_5 = 2.824$, $L_6 = -1.731$, 复相关系数 $r = 0.854$. 研究区域内

任一点 P 的应力回归值 σ_{jp} 可由该点在各独立工况下的应力试算值按下式迭加而得:

$$\sigma_{jp} = \sum_{i=1}^6 L_i \sigma_{jp}^i. \quad (2)$$

根据式(2), 计算应力回归值, 即得到反演初始地应力场。

2 采场结构参数方案初选

2.1 优化目标确定

该矿山无底柱深孔后退式崩矿法的开采工艺: 采场垂直于矿体走向布置, 采场长度为矿体厚度, 高度为 40 m, 宽度为 8 m. 上部凿岩硐室高为 3 m, 顶板采用锚杆和铁丝网联合支护, 下部不留底柱, 采用平底硐室出矿, 出矿硐室高为 3 m. 采切工程完成后, 由上部硐室向下钻小孔径深孔进行拉槽爆破, 以爆破空场为自由面分次侧向崩矿。

采场垂直于矿体布置, 其长度为矿体厚度, 高度为中段高, 采场长度与高度均由工程实际条件决定, 可变的主要结构参数为采场宽度. 目前, 设计部门参照矿山上向水平分层充填采矿法的开拓采准参数, 暂将无底柱深孔后退式崩矿法矿房及矿柱采场的宽度均定为 8 m, 考虑到矿柱回采时, 其两帮均为强度较低的充填体, 失稳概率较大, 因此, 需要研究解决矿房和矿柱采场宽度的优化取值问题。

2.2 力学分析

以空场落矿为基本特征的采场, 其稳定性状态多由顶板要素决定^[10]. 将顶板简化为受上覆岩体自重 Q 作用的板状结构 (图 2), 采场长、宽和顶板厚度依次为 a , b 和 H , 薄板四周为固定支撑。

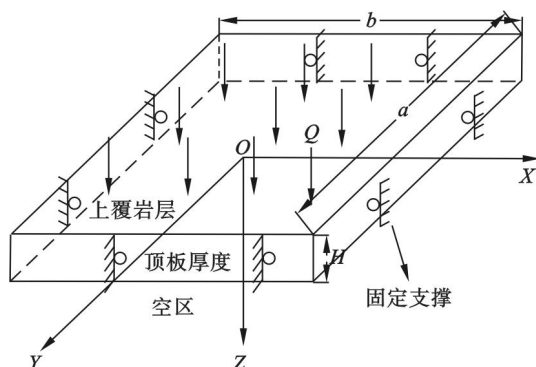


图 2 采场顶板受力示意图

Fig. 2 Force diagram of stope roof

基于弹性力学小变形薄板理论, 顶板受自重载荷 Q 作用, 运用瑞利-李兹法^[11] 解出其挠曲函数:

$$\omega(x, y) = \sum_i \sum_j \frac{\omega_{ij}}{4} \left[1 + \cos \frac{2i\pi x}{b} \right] \left[1 + \cos \frac{2j\pi y}{a} \right]. \quad (3)$$

式中, $i = j = 3, 5, 7 \dots$. 进一步推导可得

$$\omega = \frac{12(1-\nu^2)Qa^4b^4}{EH^3\pi^4[3(a^4+b^4)+2a^4b^4]} \cos^2 \frac{\pi x}{a} \cos^2 \frac{\pi y}{b}. \quad (4)$$

式中: ν 为泊松比; E 为弹性模量; H 为顶板厚。

由弹性力学理论解得顶板各向应力分布:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{A_1}{k} \left(a^2 \cos \frac{2\pi x}{b} \cos^2 \frac{\pi y}{a} + \nu b^2 \cos \frac{2\pi y}{a} \cos^2 \frac{\pi x}{b} \right), \\ \sigma_y &= \frac{A_1}{k} \left(b^2 \cos \frac{2\pi y}{a} \cos^2 \frac{\pi x}{b} + \nu a^2 \cos \frac{2\pi x}{b} \cos^2 \frac{\pi y}{a} \right), \\ \tau_{xy} &= \frac{(1-\nu)A_1}{2k} \sin \frac{2\pi x}{b} \sin \frac{2\pi y}{a}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由式(5)求出顶板最大主应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{12b^2a^2(a^2+\nu b^2)Q}{\pi^2[3(b^4+a^4)+2b^2a^2]H^2k}, \\ \sigma_2 &= \frac{12b^2a^2(b^2+\nu a^2)Q}{\pi^2[3(b^4+a^4)+2b^2a^2]H^2k}, \\ \sigma_3 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 k 为安全系数. 根据 H. Tresca 屈服准则^[12], 顶板某点产生剪切屈服时的主应力满足

$$\tau_0 = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3). \quad (7)$$

由式(6), 式(7)解得顶板最大剪应力为

$$\tau_{\max} = \frac{6b^2a^2(a^2-b^2)(1-\nu)Q}{\pi^2[3(b^4+a^4)+2a^2b^2]H^2k}. \quad (8)$$

比较 τ_{\max} 与顶板抗剪强度 τ 的大小关系, 即可判断顶板稳定性状态。

2.3 初选方案确定

现以 -650 m 中段 N6#S, N6#, N6#N 采场为具体研究对象, N6# 为设计矿柱采场. 采场上覆围岩为 D_2d^b , 覆岩容重 $\gamma = 2\,720 \text{ kg/m}^3$, 埋深 $h = 730 \text{ m}$, $Q = 19.5 \text{ MPa}$, $\tau = 21.6 \text{ MPa}$, $a = 48 \text{ m}$ (上部硐室长), $H = 1 \text{ m}$, $\nu = 0.23$, $k = 2$. 根据式(8)计算获得采场顶板受力特征随宽度变化关系见图 3。

由图 3 可知: 当采场宽度布置为 12.5 m 时, 顶板最大剪应力为 21.5 MPa, 小于岩体抗剪强度 (21.6 MPa), 当采场宽度大于 12.5 m 后, 顶板最大剪应力将超过其抗剪强度. 实际开采过程中, 应力突变、工程扰动等不可预见因素对顶板稳定性影响很大, 故采场宽度不宜大于 12.5 m. 结合当前采场布置宽度 8 m 及炮孔排距 2 m 等实际开采条件, 拟取试验采场宽度为 8, 10 和 12 m, 全部试

验共 9 组方案. 矿柱回采时两帮均为充填体, 其宽度不宜大于矿房采场, 故确定采场结构参数初选方案: ①矿房宽 8 m, 矿柱宽 8 m; ②矿房宽 10 m, 矿柱宽 8 m; ③矿房宽 12 m, 矿柱宽 8 m; ④矿房宽 10 m, 矿柱宽 10 m; ⑤矿房宽 12 m, 矿柱宽 10 m; ⑥矿房宽 12 m, 矿柱宽 12 m.

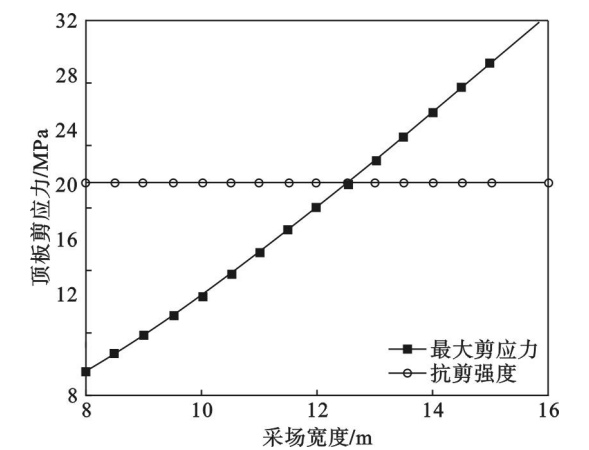


图 3 顶板最大剪应力与采场宽度关系
Fig. 3 Relationship between maximum shear stress and stope width

3 最优结构参数方案确定

3.1 开采数值分析

在确定初始地应力场和结构参数初选方案的基础上, 进行开采数值分析, 为免赘述, 以方案② (矿房宽 10 m, 矿柱宽 8 m) 为例进行分析说明.

开采扰动影响为采场规模的 2~3 倍 (图 4), 由于采场南北两帮及上部中段邻近区域均已充填, 采场周边形成了较大规模的充填体贯通区域.

充填体内形成了小范围的拉应力区, 最大拉应力值为 0.15 MPa. 开采活动引起了较为明显的应力重分布, 采场顶板及边界处均产生了应力集中, 最大主应力值达到 42.78 MPa. 采场及邻近区域产生了小规模的拉伸和剪切破坏 (图 5), 拉伸破坏分布于采场顶板, 而剪切破坏是采场围岩破坏的主要形式, 分布于采场顶底部及边界处.

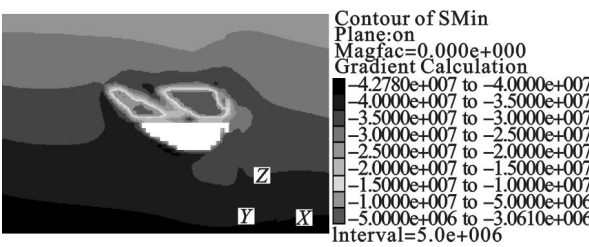


图 4 最大主应力分布 (Y=8498 m)
Fig. 4 Maximum principal stress distribution

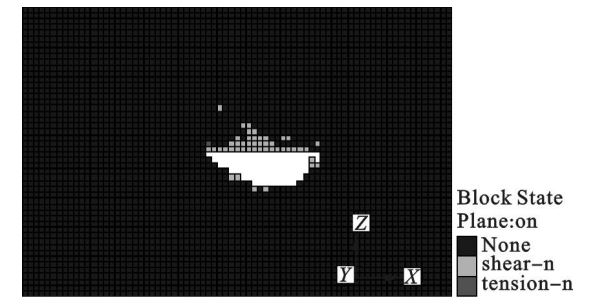


图 5 塑性区分布 (Y=8498 m)
Fig. 5 Plastic zone distribution

3.2 最优参数方案确定

基于开采数值分析结果, 获取各方案力学响应指标, 结合矿山生产科提供的方案对应经济指标, 汇总采场结构参数方案评价指标见表 2.

表 2 采场结构参数方案评价指标
Table 2 Evaluation indexes of stope parameter schemes

方案 编号	采场宽度/m		最大压应 力/MPa	最大拉应 力/MPa	塑性区体 积/m ³	顶板最大竖 向位移/cm	采切比 m·kt ⁻¹	采场生产能 力/(t·d ⁻¹)
	矿房	矿柱						
①	8	8	42.51	0.15	467.21	1.75	7.15	280
②	10	8	42.78	0.08	451.20	1.95	6.60	300
③	12	8	43.19	0.16	479.52	2.43	6.13	320
④	10	10	43.45	0.13	462.03	2.94	5.72	350
⑤	12	10	44.21	0.19	488.01	3.57	5.41	370
⑥	12	12	49.21	0.92	583.23	5.02	4.77	420

1) 构建评价矩阵. 评价矩阵综合考虑安全与经济因素, 安全指标包括最大压应力 (a_{i1})、最大拉应力 (a_{i2})、塑性区体积 (a_{i3})、顶板最大竖向位移 (a_{i4}), 经济指标为采切比 (a_{i5})、采场生产能力

(a_{i6}). 其中, 采场生产能力 (a_{i6}) 为效益型指标, 取值越大越好; 其他均为成本型指标, 取值越小越好. 为便于运算, 将 a_{i6} 的倒数定义为其新的指标取值, 进行归一化处理, 构建评价矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.425 & 0.15 & 0.467 & 0.275 & 0.715 & 0.357 \\ 0.478 & 0.08 & 0.421 & 0.541 & 0.660 & 0.333 \\ 0.432 & 0.16 & 0.479 & 0.585 & 0.613 & 0.312 \\ 0.435 & 0.13 & 0.462 & 0.494 & 0.572 & 0.286 \\ 0.442 & 0.19 & 0.458 & 0.657 & 0.541 & 0.270 \\ 0.492 & 0.92 & 0.583 & 1.000 & 0.477 & 0.238 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 A_i 为初选方案的评价指标集, $i=6$.

2) 确定正负理想解. 以待选方案指标的最小值集合为正理想解 (A^+), 最大值集合为负理想解 (A^-), 得

$$\begin{aligned} A^+ &= [0.425 \ 0.08 \ 0.421 \ 0.275 \ 0.477 \ 0.238], \\ A^- &= [0.492 \ 0.92 \ 0.583 \ 1.000 \ 0.715 \ 0.357]. \end{aligned} \quad (10)$$

3) 向量相似度计算. 计算指标向量集 A_i 与正负理想解 A^+ , A^- 的距离为 D_i^+ , D_i^- :

$$\begin{aligned} D_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^6 (a_{ij} - a_{ij}^+)^2}, \\ D_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^6 (a_{ij} - a_{ij}^-)^2}. \end{aligned} \quad (11)$$

A_i 与评价指标集正负理想解的向量相似度为

$$T_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-). \quad (12)$$

对于成本型指标集, T_i 值越大, 其解越优^[13]. 计算 6 组初选方案评价指标集与理想解的向量相似度 T_i 为 0.789 3, 0.828 9, 0.788 9, 0.822 5, 0.732 0, 0.190 8, 故采场结构参数初选方案的优劣度排序依次为②, ④, ①, ③, ⑤, ⑥. 因而, 确定方案②(矿房采场宽 10 m, 矿柱采场宽 8 m)为综合考虑安全与经济因素的最优采场结构参数.

4 结 论

1) 采用弹性力学小薄板理论分析采场顶板受力特征随宽度的变化关系, 并考虑应力突变、工程扰动等不可预见因素的影响, 从力学角度确定采场安全开采的理论最大宽度为 12.5 m.

2) 在原位实测进而反演初始地应力场的基础上, 开展采场结构参数初选方案数值分析, 综合考虑安全与经济因素, 引入多目标理想点法决策, 优化确定采场结构参数方案为: 矿房采场宽 10 m, 矿柱采场宽 8 m.

参考文献:

[1] Henry B, Jung S J, Lim H W. Room and pillar stope design

in highly fractured area[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3): 674-678.

[2] Zhao X D, Li L C, Tang C A, et al. Stability of boundary pillars in transition from open pit to underground mining[J]. *Journal of Central South University*, 2012, 19(11): 3256-3265.

[3] 罗周全, 管佳林, 冯富康, 等. 盘区隔离矿柱采场结构参数数值优化[J]. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(2): 261-264.

(Luo Zhou-quan, Guan Jia-lin, Feng Fu-kang, et al. Stope structural parameters of panel isolation pillar numerical optimization[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(2): 261-264.)

[4] 吴爱祥, 武力聪, 刘晓辉, 等. 无底柱分段崩落法结构参数研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(5): 1845-1850.

(Wu Ai-xiang, Wu Li-cong, Liu Xiao-hui, et al. Study on structural parameters of sublevel caving[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2012, 43(5): 1845-1850.)

[5] Luo Y Z, Wu A X, Liu X P, et al. Stability and reliability of pit slopes in surface mining combined with underground mining in Tonglushan mine[J]. *Journal of Central South University*, 2004, 11(4): 434-439.

[6] Chen F, Xu G, Ma C D, et al. Thermal residual stress of polycrystalline diamond compacts[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(2): 227-232.

[7] Luo Z Q, Xie C Y, Jia N, et al. Safe roof thickness and span of stope under complex filling body[J]. *Journal of Central South University*, 2013, 20(12): 3641-3647.

[8] Li K, Wang Y Y, Huang X C. DDM regression analysis of the in-situ stress field in a non-linear fault zone[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2012, 19(7): 567-573.

[9] Jiang Y, Wang Z L, Chu J X, et al. Study on the application of the fundamental statistic methods of SPSS in efficiency analysis of quercetin and resveratrol mixture[J]. *Advances in Information Sciences and Service Sciences*, 2012, 17(4): 380-387.

[10] Grasselli G. 3D Behavior of bolted rock joints: experimental and numerical study[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2005, 42(1): 13-24.

[11] Zheng T S, Hasebe N. Calculation of equilibrium position and dynamic coefficients of a journal bearing using free boundary theory[J]. *ASME Journal of Tribology*, 2000, 122(3): 616-621.

[12] Torkamani M A M. Elastic-plastic analysis for cyclic loading and Tresca yield condition[J]. *Computational Mechanics*, 1989, 12(5): 407-422.

[13] Lin M C, Wang C C, Chen M S, et al. Using AHP and TOPSIS approaches in customer-driven product design process[J]. *Computers in Industry*, 2008, 59(1): 17-31.