

# 基于 Plaxis 和规范的采空区稳定性分区评价

周爱红,袁颖,何国峰

(石家庄经济学院 勘查技术与工程学院, 石家庄 050031)

**摘要:**以某煤矿采空区为例,利用Plaxis软件计算得到采空区稳定性分区指标的地表下沉值;其次,结合规范,计算稳定性分区指标地表倾斜值、地表水平变形值和地表曲率值,利用Surfer软件得到各指标对应的稳定性分区结果;最后,综合对比分析四个稳定性分区指标的分区结果,利用AutoCAD软件得到采空区稳定性分区综合图。对分区结果分析后发现,案例中地表下沉值和地表水平变形值对采空区稳定性分区影响较大;在自然工况下,采空区整体处于基本稳定-欠稳定状态,而在加载工况下,采空区整体处于欠稳定-不稳定状态。文中提出的方法为采空区的稳定性评价以及在采空区上进行拟建建筑物的场地选择提供了一种新思路。

**关键词:**采空区;稳定性分区;Plaxis;Surfer;数值模拟;规范

中图分类号: X45; P642 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)04-0737-05

## Evaluation of stability regionalization of gob based on Plaxis and specification

ZHOU Ai hong, YUAN Ying, HE Guo feng

(School of Prospecting Technology and Engineering, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China)

**Abstract:** The surface subsidence value of stability regionalization index of a coal gob was calculated using Plaxis. Based on the equations in the specification, the surface inclination value, surface horizontal deformation value, and curvature value were calculated, and the corresponding stability regionalization maps of the above four indexes were plotted using Surfer. Finally, the above stability regionalization results were compared and analyzed comprehensively, and the comprehensive map of stability regionalization of the gob was plotted using AutoCAD. The results showed that the surface subsidence value and surface horizontal deformation value have greater influence on the stability regionalization of the gob, and the status of entire gob is between basically stable and understable under natural working conditions and between understable and unstable under loading conditions. The proposed approach can provide reference for the stability evaluation of gob and site selection of proposed building above the gob.

**Key words:** gob; stability regionalization; Plaxis; Surfer; numerical simulation; specification

近年来,由采空区引发的地质灾害日益增多。隐患采空区不仅会对工程建设的安全性产生不利影响,也会直接造成土地资源的浪费,因而对采空区的稳定性进行评价以保证工程建设安全和充分利用土地资源颇受关注<sup>[1-3]</sup>。随着计算机技术的发展,各种数值模拟软件和数学方法也相继应用于采空区的稳定性评价上,尤其是在采空区开展工程建设时,对其进行稳定性评价具有重要意义<sup>[4-6]</sup>。目前,常用的数值模拟软件主要有FLAC、ANSYS和MIDAS等<sup>[7]</sup>。汪吉林<sup>[8]</sup>基于FLAC3D建立了针对复杂地形地质条件的多煤层采空区,将概率积分法与数值模拟相结合,对研究区地表移动变形进行了定量计算和分析。孙国权等<sup>[9-10]</sup>采用FLAC3D计

算采空区围岩的应力、应变、位移状态,通过计算结果分析模拟围岩的发展情况,为采空区的稳定性评价提供了科学的依据。张绍国等<sup>[11]</sup>用ANSYS对采空区上覆岩体稳定性进行非线性分析,预测其可能产生塌陷的部分,结果与实际情况完全吻合。还有人提出基于实测的采空区稳定性数值模拟分析的定量方法<sup>[12-14]</sup>,对工程建设的可行性评估、规划、设计等具有一定指导意义。在采空区稳定性评价中引入数值模拟方法,可得到一个或两个采空区稳定性分区指标,从而指导工程技术人员按照某种模式完成采空区稳定性分区评价。

本文通过工程实例,提出软件结合《采空区公路设计与施工技术细则》(JT G/T D31-03-2011)规范的采空区稳定

收稿日期: 2014-12-13 修回日期: 2015-02-03 网络出版时间: 2015-07-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.T.V.20150724.1128.011.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助(41301015); 河南省教育厅自然科学重点项目(ZD2015073); 石家庄经济学院国家自然科学基金预研基金(sjy201203)

作者简介: 周爱红(1976),女,河北唐山人,副教授,博士,主要从事防灾减灾的教学和科研工作。E-mail: sensiblecall@163.com

性分区方法,为拟建建筑物的场地选择提供依据。

## 1 工程地质环境条件概况

该矿区面积为 1.421 km<sup>2</sup>,工业广场及矿区至国道连接线为重点勘查范围,面积 0.157 km<sup>2</sup>。该煤矿自开采以来,地下采空区、煤矸石堆、塌陷坑、露天采坑、工业广场等矿山地质环境不断恶化。该煤矿闭坑后,拟在该煤矿原工业广场、生活区及附近范围内结合矿山环境治理工程,建设集休闲、旅游、采摘、吃宿等为一体的农家园。

根据岩土工程勘察报告及设计方案,该区地层主要有石炭系上统太原组(C<sub>3</sub>t)和二叠系下统山西组(P<sub>1</sub>s),其中石炭系上统太原组厚 39 m,上部和中部主要是页岩,下部为砾岩夹薄层砂岩,本组含第 6 煤组;二叠系下统山西组厚 68 m,主要为砂岩、砂质页岩、铝土岩和煤层,本组含第 4 煤组。以上岩层均被第四系冲积层或残积层所掩盖。区内仅在西南角有 F1 和 F2 断层通过,走向北东。紧邻矿区南侧有 F3 断层呈北东向通过,逆断层性质,倾向南东。

本文所研究的采空区煤层具有以下特征(图 1、图 2):所采煤层为二叠系荒神山层的第 4 煤组和石炭系上统张家庄层的第 6 煤组,位的西部。其中第 4 煤组为主采煤层,位于荒神山层顶部,火成岩侵入对煤层的破坏严重。根据钻孔和生产实践来看,煤厚 5.11~6.49 m,平均 5.8 m,倾角 13°,倾角 15°~23°,平均 19°。煤层总体东部厚西部薄,煤层夹石 1~3 层,夹石总厚为 0.6~3.5 m,属于较稳定煤层。第 6 煤组距第 4 煤组 53 m,煤厚 0.18~3.41 m,平均煤厚为 1.48 m,倾角 13°,倾角 20°~30°,平均 25°。第 6 煤组在井田范围内大部分可采,但厚度变化较大属于不稳定煤层。

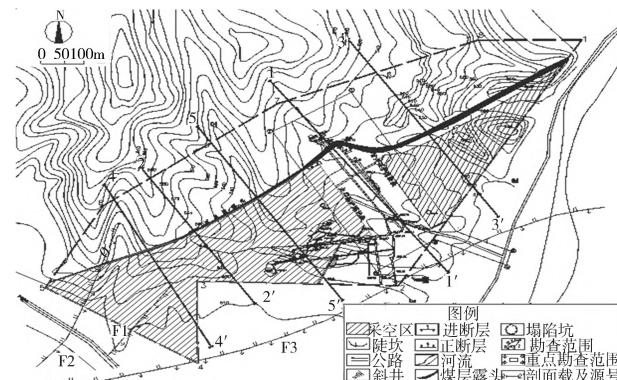


图 1 采空区平面  
Fig. 1 Plan view of the gob

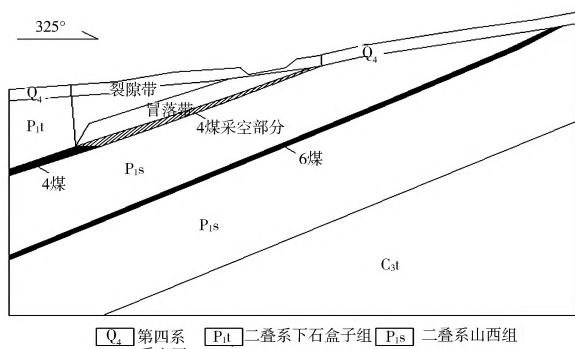


图 2 2' 剖面示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of profile 2'

## 2 计算模型的建立

这里以剖面为例 2' (图 2),说明在 Plaxis 中建立模型的过程。第 4 煤组部分被采空,上部为第四系松散层,厚度为 14~16 m,采空区标高在 300~562.6 m 范围内,采空区剖面线上的水平宽度约 198 m。

### 2.1 计算力学参数的确定

计算力学参数是采用各种有限元软件进行数值模拟研究的基础。力学参数的选取主要是根据室内外岩石力学实验、实际监测数据的分析和相关文献提供的岩体力学计算参数取值的基础上综合确定的,本工程实例中的具体取值见表 1<sup>[15]</sup>。

表 1 计算力学参数

Tab. 1 Computational mechanics parameters

岩石名称	冒落带	裂隙带	煤层	砂岩	泥质黏土	填充层细砂岩
弹性模量/MPa	60	130	530	254	110	180
泊松比	0.47	0.3	0.18	0.22	0.3	0.23
抗拉强度/MPa	0	0.25	0.31	4.5	0	3.3
黏聚力/MPa	0.25	0.41	0.52	7.4	0.09	4.8
内摩擦角(°)	28	32	43	39	24	36
剪胀角(°)	5	4	3	3	0	1

数值模拟时,冒落带和裂隙带高度由规范确定,计算公式如下<sup>[16]</sup>:

$$H_m = \frac{100\sum M}{4.7\sum M + 19} \pm 2.2 \quad (1)$$

$$H_l = \frac{100\sum M}{1.6\sum M + 3.6} \pm 5.6 \quad (2)$$

式中: $H_m$  为冒落带的高度; $H_l$  为裂隙带的高度,  $\sum M$  为累计采厚。

### 2.2 模型的建立

剖面 2' 计算模型控制宽度范围为 526.6 m,控制深度为-350 m,上部边界为地表。在 Plaxis 中建立几何模块,模型采用平面应变的 6 节点三角形单元,接触面通过岩体计算力学参数的弱化来反映,本次模拟采用符合 Mohr-Coulomb 强度准则的理想弹塑性材料本构关系。模型底面为固定约束,侧面均为左右方向约束,无上下约束。将计算力学参数和边界条件赋给几何模型的各个部分得到物理模型,然后进行网格剖分,得到有限元计算模型(图 3),共剖分 1 065 个单元,节点 2 214 个。

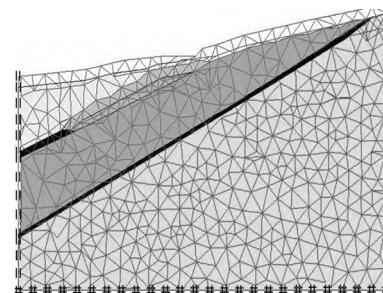


图 3 剖面 2' 有限元网格  
Fig. 3 Finite element mesh grids of profile 2'

## 3 采空区稳定性分区的数值模拟实现

考虑到拟建农家园的情况,本文以采空区加载工况为

例,说明采空区稳定性分区的数值模拟实现过程。加载范围以勘察范围为界,荷载大小根据拟建农家园的结构形式估算取用30 kN/m<sup>2</sup>。

### 3.1 分区指标计算

地表下沉值 $w$ 是采空区稳定性分区的关键指标,反映了地表移动盆地内地表点位移矢量的垂直分量的大小,也是导出其他稳定性分区指标结果的基础数据。本文采用Plaxis有限元软件进行地表下沉值 $w$ 的计算。Plaxis是一款用于各种岩土工程问题中变形和稳定性分析的有限元软件,可以模拟岩土体的非线性、时间相关性和各向异性的行为。图4为示例煤矿采空区的剖面2-2'的垂直位移分布图,即各点的下沉值结果。根据后续分析计算需要,需提取Plaxis计算的地表各有限元网格点处的稳定性分区指标地表下沉值的结果,并导出地表有限元网格点、水平和垂直距离增量等相关数据。

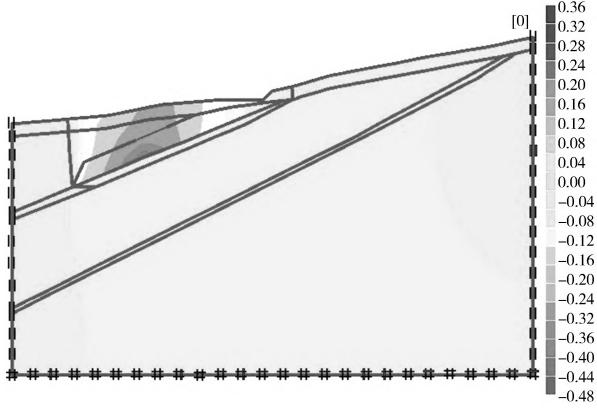


图4 剖面2-2'垂直位移分布

Fig. 4 Vertical displacement distribution of profile 2-2'

除了地表下沉值 $w$ 之外,通常还需要结合地表倾斜值 $i$ 、地表水平变形值 $\epsilon$ 和地表曲率值 $k$ 三个描述地表移动盆地内移动和变形的指标,综合进行采空区的稳定性分区。地表倾斜值能反映地表相邻两点的不均匀下沉而导致的相对垂直位移,地表水平变形值则反映地表相邻两点的不均匀水平移动而导致的相对水平位移,而地表曲率值能反应地表相邻两点的倾斜变形不均匀而导致的地表弯曲。这三个分区指标可按如下公式计算<sup>[16]</sup>:

$$i = w/r \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{w}{r} \left[ (1-b) \cot\theta + \sqrt{\cot^2\theta + 8\pi} \right] \cdot \exp \left[ -\frac{\cot\theta}{8} (\cot\theta - \sqrt{\cot^2\theta + 8\pi}) - \frac{\pi}{2} \right] \quad (4)$$

$$k = 1.5w/r^2 \quad (5)$$

式中: $w$ 为下沉值(mm); $i$ 为地表倾斜值(mm/m); $r$ 为地表主要影响范围半径(m), $r = h/\tan\theta$ ; $\theta$ 为开采影响角(°); $h$ 为采空区的底板深度(m); $\epsilon$ 为地表水平变形值(mm/m); $b$ 为水平移动系数; $\theta$ 为开采影响传播角(°); $k$ 为地表曲率值(mm/m<sup>2</sup>)。

### 3.2 Surfer等值线图

采用前述计算方法,将图1中1-1'至5-5'五个剖面加载工况下的四个稳定性分区指标的计算结果一起导入到Surfer软件,用Surfer软件分别绘制地表下沉值、地表倾斜值、地表水平变形值和地表曲率值的等值线图,见图5-图8。

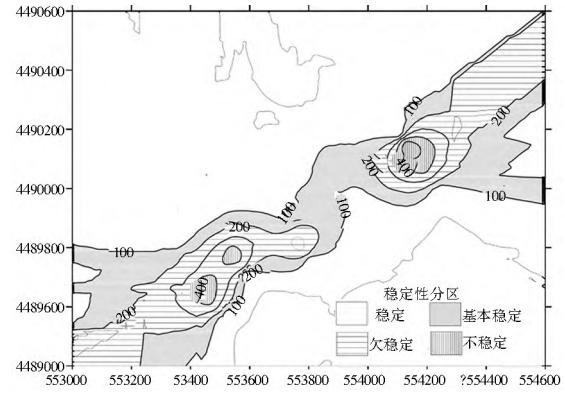


图5 地表下沉值等值线

Fig. 5 Contour map of surface subsidence value

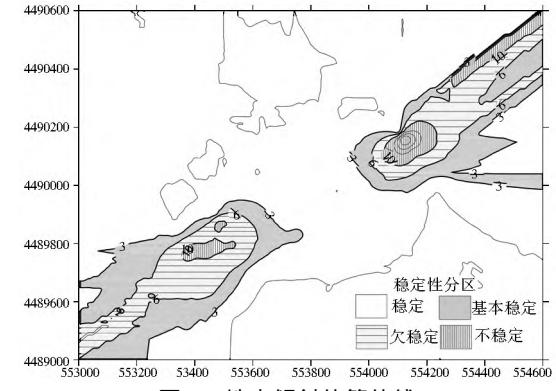


图6 地表倾斜值等值线

Fig. 6 Contour map of surface inclination value

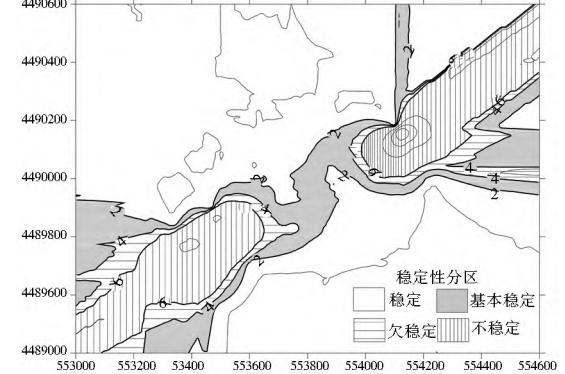


图7 地表水平变形值等值线

Fig. 7 Contour map of surface horizontal deformation value

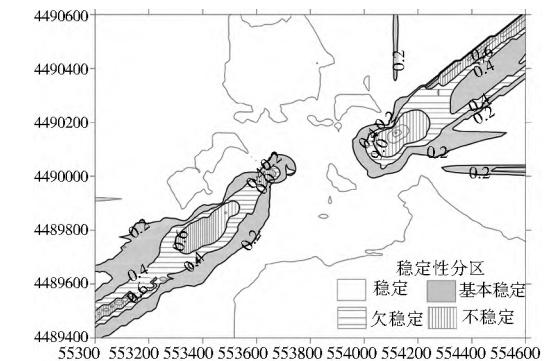


图8 地表曲率值等值线

Fig. 8 Contour map of surface curvature value

再根据表2进行各单分区指标的稳定性分区。

### 3.3 结果分析

由图5-图8可以看出,规范所采用的地表下沉值、地

表2 按地表移动变形值确定的场地稳定性等级评价

Tab. 2 Evaluation of site stability grades according to the surface movement deformation values

稳定等级	地表移动变形值			
	下沉值 $w/\text{mm}$	倾斜值 $i(\text{mm} \cdot \text{m}^{-1})$	平变形值 $\theta(\text{mm} \cdot \text{m}^{-1})$	率值 $k(\text{mm} \cdot \text{m}^{-2})$
稳定	$\leq 100$	$\leq 3.0$	$\leq 2.0$	$\leq 0.2$
基本稳定	$100 \sim 200$	$3.0 \sim 6.0$	$2.0 \sim 4.0$	$0.2 \sim 0.4$
欠稳定	$200 \sim 400$	$6.0 \sim 10.0$	$4.0 \sim 6.0$	$0.4 \sim 0.6$
不稳定	$\geq 400$	$\geq 10.0$	$\geq 6.0$	$\geq 0.6$

表倾斜值、地表水平变形值和地表曲率值四个分区指标均可以将采空区范围分出稳定、基本稳定、欠稳定和不稳定四个区域,但是所指示的分区范围差别较大。地表下沉值指标所指示的欠稳定区域范围最大,而地表水平变形值所指示的不稳定区域范围最大,这说明对于本文的实例而言,地表下沉值和地表水平变形值对采空区稳定性分区影响较大,可作为稳定性分区的主要依据。

综合分析四个稳定性分区指标的结果,由 Surfer 软件导出 DXF 图形文件并导入 AutoCAD 软件,在勘查区地形地质图上可圈定出稳定区、基本稳定区、欠稳定区和不稳定区,见图 9。为便于对比分析,给出自然工况下的稳定性分区综合图,见图 10,其稳定性分区实现过程与上述过程相同。

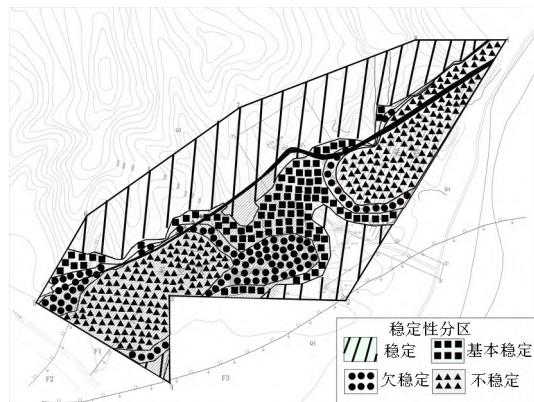


图9 加载工况稳定性分区综合图

Fig. 9 Comprehensive diagram of stability regionalization under loading conditions

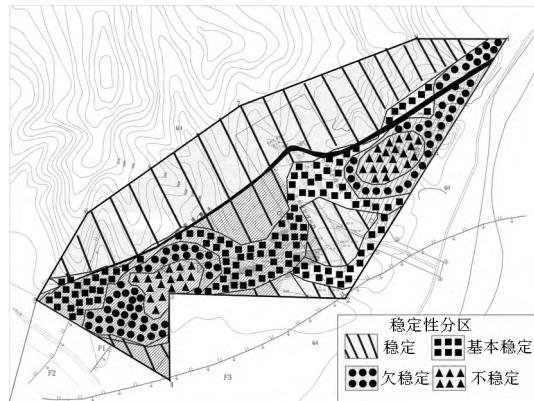


图10 自然工况稳定性分区综合图

Fig. 10 Comprehensive diagram of stability regionalization under natural conditions

对比图 9 和图 10 可见,在自然工况下,采空区整体处于

基本稳定欠稳定状态,部分区域沉降较大,达到不稳定,有可能会产生地表塌陷等次生地质灾害,应当避开在这些区域开展工程建设;在加载工况下,采空区整体处于欠稳定不稳定状态,拟建建筑物将使采空区产生更大不均匀沉降,导致各稳定性分区范围增大,加剧围岩的破坏,可能诱发大规模塌陷,导致灾难性后果。因此,如果在采空区范围内进行农家园及配套设施的建设,应该选择合适的位置,并对地下采空区进行注浆处理或加大建筑物的抗变形结构技术措施。

## 4 结论

(1) 提出了基于 Plaxis 和规范进行采空区稳定性分区的方法,为采空区的稳定性评价及在采空区上进行拟建建筑物的场地选择提供了一种新思路。

(2) 工程实例中,选用规范给出的地表移动的下沉值、倾斜值、水平变形值、曲率值四个指标对采空区稳定性分区评价结果并不完全一致,地表下沉值和地表水平变形值对采空区稳定性分区影响较大,给出的评价结果也与实际情况基本吻合。现场踏勘结果也表明较大沉降区和塌陷坑都在模拟结果的不稳定和欠稳定区内,说明本文给出的方法具有一定的可靠性,可为采空区稳定性分区提供指导。

(3) 不同的矿山由于开采的实际地质、采空条件等不同,可能四个指标对稳定性分区评价结果的影响大小排序并不相同,但是本文给出的方法对于工程技术人员按照某种模式完成采空区稳定性分区评价具有指导意义。

## 参考文献(References) :

- [1] Querol X, X Zhuang, O Font, et al. Influence of soil cover on reducing the environmental impact of spontaneous coal combustion in coal waste gob: A review and new experimental data [J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 85(1): 2-22.
- [2] K M Han, F M Li, H Y Li, et al. Fuzzy comprehensive evaluation for stability of strata over gob influenced by construction loads [J]. Energy Procedia, 2012, 16(Part B): 1102-1110.
- [3] Tugrul U, A Hakan, Y Ozgur. An integrated approach for the prediction of subsidence for coal mining basins [J]. Engineering Geology, 2013, 166: 186-203.
- [4] 唐胜利,唐皓,郭辉.基于BP神经网络的空洞型采空区稳定性评价研究[J].西安科技大学学报,2012,32(2):234-238+258.(TANG Sheng-li, TANG Hao, GUO Hui. Stability evaluation of empty mine goaf based on BP neural network[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2012, 32(2): 234-238+ 258. (in Chinese))
- [5] 唐硕,罗周全,徐海.基于模糊物元的采空区稳定性评价研究[J].中国安全科学学报,2012,22(7): 24-30. (TANG Shuo, LUO Zhouquan, XU Hai. Evaluation of stability of goaf based on fuzzy matter element theory[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(7): 24-30. (in Chinese))
- [6] 李苗,张红军,欧阳治华,等.突变理论在采空区稳定性综合评判与预测中的应用[J].化工矿物与加工,2014(01): 25-28. (LI Miao, ZHANG Hong-jun, OUYANG Zhi-hua, et al. Application of catastrophe theory in comprehensive evaluation and prediction on stability of mined out areas[J]. Industrial Minerals & Processing, 2014(01): 25-28. (in Chinese))

- [ 7 ] 杨帆, 麻凤海. 急倾斜煤层采动覆岩移动模式及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007. (YANG Fan, MA Feng hai. Steep Seam Mining Strata Movement Mode and Its Application [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [ 8 ] 汪吉林, 吴圣林, 丁陈建, 等. 复杂地貌多煤层采空区的稳定性评价 [J]. 煤炭学报, 2009, 34(4): 36-41. (WANG Jinlin, WU Shenglin, DING Chenjian, et al. Stability evaluation of mine goaf with multi coal seams and complex landform [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(4): 36-41. (in Chinese))
- [ 9 ] 孙国权, 李娟, 胡杏保. 基于FLAC3D程序的采空区稳定性分析 [J]. 金属矿山, 2007(2): 29-32. (SUN Guoquan, LI Juan, HU Xing Bao. FLAC3D-based Stability Analysis of Mined Out Area [J]. Metal Mine, 2007(2): 29-32. (in Chinese))
- [ 10 ] 张成良, 杨绪祥, 李风, 等. 大型采空区下持续开采空区稳定性研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(8): 117-120. (ZHANG Cheng-liang, YANG Xu-xiang, LI Feng, et al. Stability study on mined out area with continuous mining under the large scale mined out area [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(8): 117-120. (in Chinese))
- [ 11 ] 张绍国, 王新民, 姚建, 等. 采空区稳定性的非线性分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 908-911. (ZHANG Shaoguo, WANG Xinmin, YAO Jian, et al. Nonlinear analysis of stability of goaf areas in an underground mine [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 908-911. (in Chinese))
- [ 12 ] 罗周全, 鹿浩, 刘晓明, 等. 基于CM-S实测的采空区群稳定性数值模拟方法 [J]. 化工矿物与加工, 2008, 37(1): 18-21. (LUO Zhouquan, LU Hao, LIU Xiaoming, et al. Numerical simulation method for mined out area group stability based on Cavity Monitoring System [J]. Industrial Minerals and Processing, 2008, 37(1): 18-21. (in Chinese))
- [ 13 ] 丁陈建, 汪吉林. 神经网络法的采空区地基稳定性评价 [J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(2): 208-211. (DING Chenjian, WANG Jinlin. Using artificial neural network to assess the stability of goaf foundation [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2009, 26(2): 208-211. (in Chinese))
- [ 14 ] 李长洪, 程岩. 基于3DEC的采空区稳定性分析 [J]. 金属矿山, 2012(4): 144-147, 159. (LI Chang-hong, CHENG Yan. Stability analysis on the mined-out areas Using 3DEC [J]. Metal Mine, 2012(4): 144-147+ 159. (in Chinese))
- [ 15 ] 工程地质手册编委会. 工程地质手册 (第4版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (The editorial board of Engineering Geology Manual. Engineering geology Handbook (Fourth Edition) [M]. Beijing: Chinese Architecture Industry Press, 2007. (in Chinese))
- [ 16 ] JTGT D31-03-2011 采空区公路设计与施工技术细则 [S]. (JTGT D31-03-2011 Guidelines for Design and Construction of Highway Engineering in the Mined Out Area [S]. (in Chinese))

(上接第 728 页)

- [ 10 ] 许振浩, 李术才, 李利平, 等. 一种典型的岩溶隧道衬砌压裂突水灾害成因与防治 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1396-1404. (XU Zhenhao, LI Shucai, LI Liping, et al. Cause, disaster prevention and controlling of a typical kind of water inrush and lining fracturing in karst tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1396-1404. (in Chinese))
- [ 11 ] 李晓昭, 张国永, 罗国煜. 地下工程中由控稳到控水的断裂屏障机制 [J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 220-224. (LI Xiaozhao, ZHANG Guoyong, LUO Guoyu. Barrier effects caused by fault on excavating induced stress & deformation and mechanism of resulting groundwater inrush [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 220-224. (in Chinese))
- [ 12 ] 李宗利, 张宏朝, 任青文, 等. 岩石裂纹水力劈裂分析与临界水压计算 [J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1216-1220. (LI Zongli, ZHANG Hongchao, REN Qingwen, et al. Analysis of hydraulic fracturing and calculation of critical internal water pressure of rock fracture [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1216-1220. (in Chinese))
- [ 13 ] 杨会军, 王梦恕. 深埋长大隧道渗流数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 511-519. (YANG Huijun, WANG Mengshu. Numerical simulation of deep tunnel seepage growth [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 511-519. (in Chinese))
- [ 14 ] 顾义磊, 李晓红, 兆瑜, 等. 通渝隧道涌突泥成因分析 [J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 920-923. (GU Yilei, LI Xiaohong, ZHAO Yu, et al. Analysis of forming reason of mud breakout in Tongyu tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 920-923. (in Chinese))
- [ 15 ] 姜云, 王兰生. 深埋长大公路隧道高地应力岩爆和岩溶涌突水问题及对策 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1319-1323. (JIANG Yun, WANG Lansheng. Problems of high stress rock burst and water outburst and countermeasures in deep and long tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1319-1323. (in Chinese))
- [ 16 ] 崔芳, 高永涛, 吴顺川. 长大隧道涌水中水岩相互作用机理研究 [J]. 金属矿山, 2011(1): 12-14, 30. (CUI Fang, GAO Yongtao, WU Shunchuan. Research on interaction mechanism of water and rock in water inflow of long and large tunnel [J]. Metal Mine, 2011, (1): 12-14, 30. (in Chinese))