

文章编号: 1673-3363-(2013)05-0659-06

深部构造区域地应力分布与巷道稳定关系研究

肖同强¹, 支光辉², 张治高³

(1. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南理工大学机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000; 3. 山东新巨龙能源有限责任公司, 山东 菏泽 274918)

摘要 针对深部构造区域巷道围岩控制问题, 研究了巷道稳定性与地应力分布关系。地应力实测及其反演表明, 巨野矿区深部地应力场属于构造应力场类型。基于地应力场分布特征, 采用模型试验、数值计算、现场观测等方法, 研究了埋深、构造应力、断层等因素对巷道稳定性的影响规律: 埋深超过 800 m, 侧压系数超过 2.5 以后, 巷道变形量急剧增大, 肩角锚杆大量破断, 顶板和底板剪切破坏严重, 顶煤呈现“尖顶型”垮冒; 断层附近地应力较高, 巷道与最大水平应力夹角越大, 巷道变形量越大、支护结构破坏越严重。深部构造区域巷道应加强顶板与肩角围岩控制。

关键词 深部巷道; 构造区域; 地应力; 巷道稳定性

中图分类号 TD 322

文献标志码 A

Relationship between ground stress distribution and roadway stability in deep tectonic region

XIAO Tong-qiang¹, ZHI Guang-hui², ZHANG Zhi-gao³

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;
2. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;
3. Shandong Xinjulong Energy Limited Liability Company, Heze, Shandong 274918, China)

Abstract In this paper, aimed at controlling the stability of roadway surrounding rock in deep tectonic stress field, relationship between ground stress distribution and roadway stability was studied. Through ground stress measurement and inversion, the deep ground stress field in Juye Mining Area belongs to tectonic stress field. Meanwhile, based on the ground stress distribution characteristics, by using similar simulation, numerical simulation and field test, the effects of buried depth, tectonic stress, roadway layout, fault, etc, on roadway stability were systematically studied. The results show that when buried depth is over 800 m, and lateral pressure coefficient is over 2.5, roadway deformation increases rapidly, plenty of shoulder bolts are broken, the shear failures in roof and floor are serious, and the thick top coal appears "fastigium" shape collapse. Meanwhile, ground stress is higher near fault structures, and the larger the angle between roadway and the maximum horizontal stress is, the larger roadway deformation is, and the more serious the damage of support structure is. Thus, the surrounding rock control in roadway roof and shoulder needs strengthening in deep tectonic regions.

Key words deep roadway; tectonic region; ground stress; roadway stability

收稿日期: 2012-07-28

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51204167); 河南理工大学博士基金项目(B2012-081)

作者简介: 肖同强(1981-), 男, 山东省单县人, 博士, 讲师, 从事巷道围岩控制理论及支护技术方面的研究。

E-mail: xtq2000@163.com

Tel: 13598503079

地应力是巷道围岩变形破坏的根本作用力,是围岩稳定性分析及巷道合理布置与支护设计的重要依据^[1-5]。我国煤矿地应力实测资料表明^[1-3],绝大多数情况下,最大水平应力大于垂直应力,在构造发育区域,水平应力尤为显著。在深部构造区域,自重应力和构造应力均较大,巷道变形破坏程度加剧,呈现出“大变形、强流变”特性,冒顶、片帮、强烈底鼓问题突出,支护难度更大^[4-7]。深部构造区域巷道围岩稳定控制问题,成为深部煤矿安全开采亟待解决的难题之一。深部巷道布置与支护设计时,应掌握地应力场分布与巷道稳定性的关系,以便采取措施保证巷道稳定。

巨野矿区煤层埋深为 700~1 300 m,断层多,构造应力大,地应力对巷道布置及其稳定性影响极大。在构造区域,不同深度、不同位置,围岩变形破坏程度相差较大;同一地段,巷道走向不同,围岩变形破坏程度相差也较大^[5-8]。为此,本文依据地应力测量结果及其反演,分析了构造区域地应力分布特征,研究了地应力与巷道稳定性的关系。

1 巨野矿区地应力分布规律

1.1 地质条件

巨野矿区位于山东省西南部,规划建设有新巨龙(龙固)、赵楼、郭屯、万福、郓城、彭庄及梁宝寺等 7 对矿井。鲁西南地区是华北新生代沉降的一部分,它由东明拗陷、济宁拗陷和埕宁伏隆起等部分组成,各大型拗陷内部又有若干次级凹陷和凸起^[9]。该地区经历多次构造运动形成一系列东西向和南北向展布的地堑和地垒,相间排列的“棋盘”式构造形态^[9],如图 1 所示。

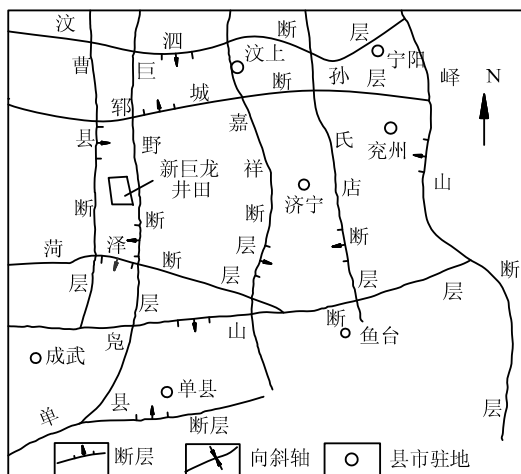


图 1 区域构造示意图

Fig.1 Regional tectonic schematic drawing

巨野矿区地层从上而下依次为第四系、新近系、二叠系、石炭系、奥陶系,为全隐蔽的华北型石炭二叠系煤田。第四系、新近系主要由黏土、砂质黏土、砂组成,厚度较大,可达 500~600 m,属于巨厚表土层矿区。石炭二叠系主要由泥岩、砂岩、煤组成,为本区的含煤地层,主采煤层为 3 号煤,煤层埋深约为 700~1 300 m,平均厚度为 6.6 m。奥陶系主要由灰岩、白云岩、泥灰岩等组成。

1.2 地应力实测分析

巨野矿区新巨龙、万福、郭屯等煤矿采用应力解除法或水压致裂法进行了地应力测量。依据相关资料^[9-11],统计了 43 个测点的地应力数据,包括最大水平应力 σ_H 、最小水平应力 σ_h 和垂直应力 σ_v 等。通过地应力实测数据分析,得到巨野矿区地应力场分布特征:

1) 地应力场类型及量级

地应力场属于构造应力场类型:43 个测点中 41 个测点最大主应力为水平应力,最小主应力为垂直应力;最大水平应力与垂直应力的比值一般为 1.5~3.2。43 个测点中,最大水平应力超过 30 MPa 的有 40 个,占 93%;超过 40 MPa 的有 20 个,占 46.5%,属于超高地应力矿区。

2) 地应力随深度的变化规律

测点应力与深度之间的关系,如图 2 所示。由图 2 可看出,最大水平应力、最小水平应力分布较为离散,即使同一深度、不同位置的地应力值变化也较大。但从趋势回归线可以看出,最大水平应力、最小水平应力均随深度呈线性增长,但前者增速大于后者。

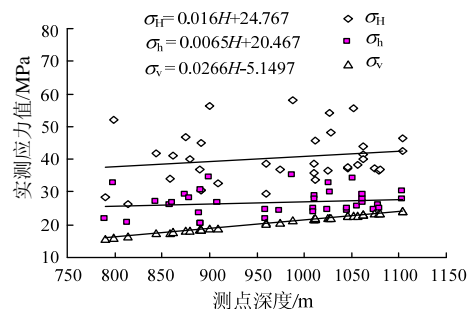


图 2 测点应力与深度的关系

Fig.2 Relationship between in-situ stress and depth in boreholes

3) 应力比值与深度的关系

最大水平应力与垂直应力的比值与埋深的关系如图 3 所示。二者比值一般为 1.5~3.2,分布较为离散,平均为 1.94。由其回归趋势线可知,随着埋

深增加，二者比值逐渐减小，表明随着埋深增加，地应力场具有进入静水压力状态的趋势。

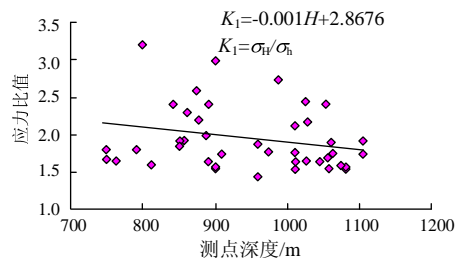


图 3 测点应力比值与深度的关系

Fig.3 Relationship between in-situ stress ratio and depth

4) 矿区最大主应力方向为 NE60°~SE60°，在区域构造应力方向东西向附近波动。受“棋盘”构造

及井田内断层影响，各井田地应力方向有所不同，如新巨龙矿最大水平应力方向为 SE60°左右，而万福矿为 NE60°左右。

2 断层区域地应力场反演分析

“棋盘式”构造使得巨野矿区形成了典型的构造应力场，而各井田内的小断层，对其附近的地应力场影响也较大。新巨龙矿北区胶带运输大巷、北区回风大巷、1，2 号辅助运输大巷等开拓巷道，受断层 FL10，FL11，FL42 等影响较大。3 个断层倾角为 70°，断层落差为 0~16 m。巷道与断层位置关系如图 4 所示。为研究巷道稳定与地应力的关系，进行断层附近区域地应力反演分析。

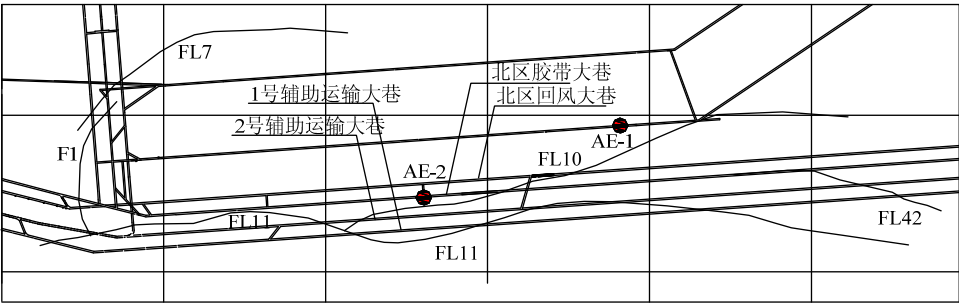


图 4 巷道与断层位置关系

Fig.4 Relationship between roadway and fault position

采用声发射法进行地应力实测，测点位置见图 4 中的 AE-1，AE-2，实测地应力数据见表 1。

表 1 AE 法地应力实测值

Table 1 Measured value of ground stress using AE method

测点	深度/m	σ_H /MPa	σ_v /MPa	σ_H/σ_v	方位角/(°)
AE-1	830	25.1	15.6	1.33	154
AE-2	825	31.7	14.9	1.69	125

选取北区胶带运输大巷附近的断层区域(图 4)，进行地应力反演。

模型范围：以 3 煤-750 m 标高为基准水平面，其范围为 3 煤以下 50 m 至 3 煤以上 150 m 范围内岩层。应用 ADINA 有限元软件建立计算模型，模型尺寸为 6000 m×2850 m，共划分 7 组，13 697 个三角形单元，网格划分如图 5 所示。采用 Drucker-Prager-Cap 本构模型，模型底边界、左边界固定法向位移，上边界和右边界施加法向应力，反演方法为边界荷载调整法。

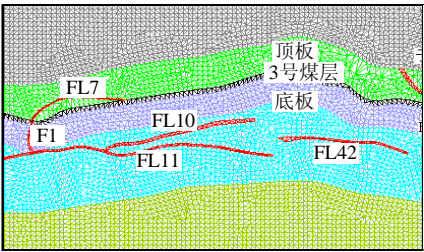


图 5 模型网格划分

Fig.5 Grid generation of model

通过反演得到-750 m 水平切面地应力场分布图，如图 6 所示。由图 6 可知，断层附近地应力分布规律为：① 最大水平主应力受断层影响较大，FL10，FL11，FL42 断层附近出现了应力集中，断层端部尤为明显，而远离断层时应力值减小。② 最小水平主应力在 FL10，FL11，FL42 断层附近及端部也出现了应力集中，但与远离断层的区域相比，应力增大不明显。③ 在断层、煤层等软弱岩层内剪应力较小，而在 FL10，FL11，FL42 断层端部出现应力集中。

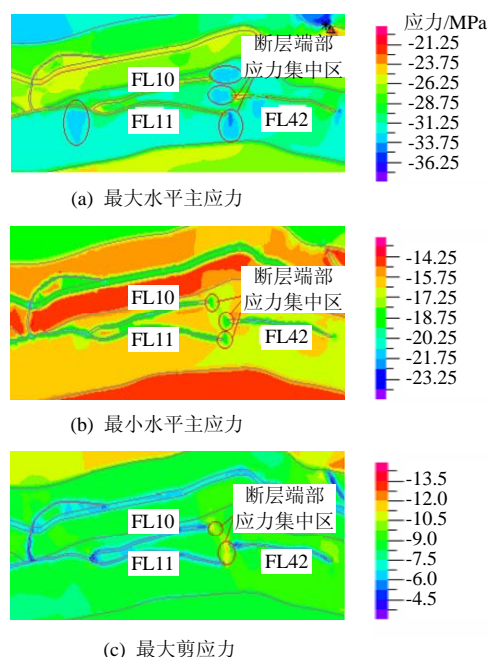


图 6 断层附近地应力分布

Fig.6 Ground stress distribution near fault

3 构造应力对巷道稳定性的影响分析

3.1 相似模型试验分析

由矿区地应力分析可知,巨野矿区最大水平应力一般为 30~50 MPa,侧压系数平均为 2,属于典型的构造应力场类型;且随着埋深的增大,最大水平应力逐渐增大。埋深大(700~1 300 m)和最大水平应力显著(侧压大)是影响该矿区巷道稳定性的重要因素。为此,采用相似模型试验研究了埋深和侧压系数对巷道稳定性的影响。

试验采用中国矿业大学研制的平面应变模型试验台。该试验台可进行三向六面加载,能够模拟巷道的平面应变问题。针对巨野矿区新巨龙矿 3 号煤层地质条件,煤厚 8.5 m,沿着煤层底板掘进尺寸为 5.0 m×3.75 m 矩形巷道,顶煤厚 4.75 m,建立巷道物理模型(见图 7),并进行加载试验。



图 7 巷道平面应变相似模型

Fig.7 Similarity simulation test-bed of plane strain for roadway

通过模型试验,得到巷道变形量与埋深的关系,如图 8a 所示。由图 8a 可以看出,随着埋深的增大,顶板下沉量、底鼓量及两帮移近量逐渐增大,但超过 800 m 以后,巷道变形量急剧增大,表明围岩应力超过围岩强度,导致巷道变形量增长较快。

巷道变形量与侧压系数的关系如图 8b 所示。由图 8b 可以看出,随着构造应力的增大,巷道变形量逐渐增大,构造应力较小时,增幅较小,侧压系数超过 2.5 之后,巷道变形量急剧增大。

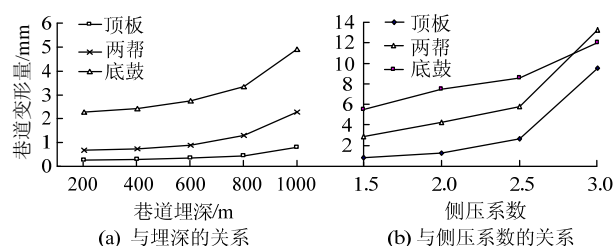


图 8 巷道变形量

Fig.8 Deformation of roadway

在埋深为 1 000 m、侧压系数 $\lambda=3$,以及侧压进一步增大致冒顶后,围岩变形破坏状况如图 9 所示。由图 9 可以看出,巷道顶板下沉量、底鼓量均较大,而且剪切破坏明显,顶板呈现“尖顶型”垮冒,底板亦出现剪切破坏面;两帮变形量虽较大,但未见宏观破裂面。由此表明,构造应力对顶板、底板的破坏作用较大,而两帮的破坏作用相对较小,两帮变形主要是高垂直应力及顶底板转移至两帮的压力引起的。

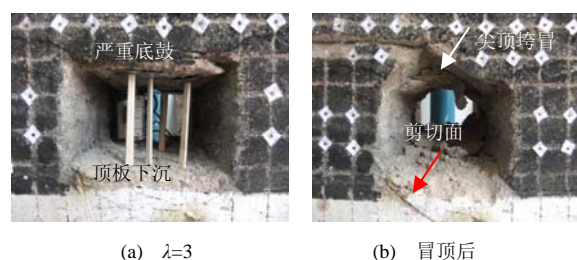


图 9 构造应力作用下巷道变形破坏状况

Fig.9 Deformation and failure characteristics of roadway under the action of tectonic stress

综上所述,随着埋深、构造应力增大,巷道变形量增大,在埋深超过 800 m,侧压系数超过 2.5 后,尤为明显。因此,巨野矿区深部构造区域巷道支护难度非常大。

3.2 数值模拟分析

在深部构造区域,不仅地应力大小对巷道稳定性有较大影响,地应力与巷道的方位关系也具有较

大影响。依据 Brady 等提出的广义平面应变模型, 采用 FLAC^{3D} 数值软件建立巷道与构造应力(与最大水平应力方向相同)夹角为 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° 数值模型。通过模拟得到巷道与构造应力的夹角对巷道变形的影响, 如图 10 所示。

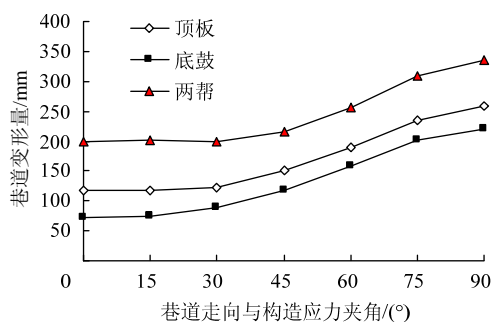


图 10 巷道走向与构造应力夹角对巷道变形的影响

Fig.10 Influence of the angle of roadway strike and tectonic stress on roadway deformation

由图 10 可知, 随着巷道走向与最大水平应力夹角增大, 围岩变形量逐渐增大。从 0 增加至 30° 时, 巷道变形量增长较为缓慢, 构造应力对巷道的破坏作用较小, 巷道较稳定; 夹角超过 30° 以后, 巷道变形增长速度较快, 构造应力对巷道的破坏作用较大, 巷道稳定性较差。

4 构造应力场中巷道稳定性实测分析

断层区域地应力分布与巷道稳定性密切相关。结合第 2 节地应力反演规律, 采用现场实测方法研究构造应力场中巷道布置与其稳定性的关系。观测巷道与断层的位置关系如图 11 所示, 加粗凸显段为巷道矿压观测段, 包括北区胶带运输大巷(“北胶大巷”)、2 号辅助运输大巷(“辅二大巷”)、4 号联络巷等 3 条巷道。

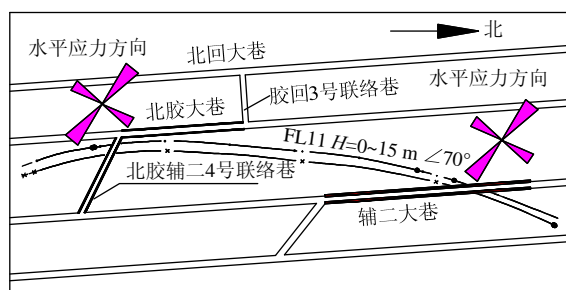


图 11 巷道与断层位置关系

Fig.11 Relationship between roadway and fault

由地应力实测(见表 1)可知, 水平应力方向如图 11 所示。北胶大巷、辅二大巷走向与最大水平应力夹角较大, 约为 30°~50°, 4 号联络巷与最大水平应

力几乎平行, 与其夹角接近 0。现场观测表明, 巷道走向不同, 其稳定性相差较大。

1) 北胶大巷矿压显现

北胶大巷走向与最大水平应力夹角较大, 巷道矿压显现较剧烈。掘进过程中, 顶板断裂声不断, 肩角锚杆(两帮最上部锚杆)出现大量破断。巷道变形破坏严重, 两帮沿顶板出现较大滑移, 两帮相对移近量超过 400 mm, 顶角锚杆托盘被煤体覆盖, 两帮网兜现象严重。而随着北胶大巷向北掘进, 远离断层, 巷道变形破坏程度减小, 围岩稳定性转好。

2) 辅二大巷矿压显现

辅二大巷走向与最大水平应力夹角较大, 矿压显现亦较为剧烈。顶板较破碎、下沉量大, 底鼓也较严重, 不得不进行挑顶卧底, 两帮相对移近量达 500~600 mm, 出现了网兜和钢带鼓出现象, 托盘明显受压、中部有凹进现象。

3) 4 号联络巷矿压显现

4 号联络巷走向与最大水平应力近于平行, 巷道变形量较小, 支护结构完好, 巷道维护效果较好。

结合地应力反演和矿压观测结果, 可以看出断层区域巷道的稳定性具有较强的区域性和方向性:

- ① 断层附近及端部地应力较高, 随着远离断层地应力降低; 而相应地, 在断层附近巷道变形量大、支护结构破坏严重, 而远离断层的巷道变形量则较小。
- ② 在断层附近, 不同走向的巷道, 其围岩变形破坏程度不同, 巷道走向与最大水平应力夹角越大, 围岩稳定性越差, 表现出极强的方向性。因此, 巷道布置设计时, 应避开高构造应力区域, 否则, 巷道则应尽可能与最大水平应力保持较小角度。

5 结 论

1) 巨野矿区煤层埋深为 700~1 300 m, 最大水平应力一般为 30~50 MPa, 是垂直应力的 1.5~3.2 倍, 属于典型的构造应力场类型。水平应力、垂直应力均随埋深增大而增大, 但最大水平应力与垂直应力的比值随着埋深增大而减小, 具有进入静水压力状态的趋势。

2) 埋深大和构造应力大是影响巨野矿区深部巷道稳定性的重要因素。在埋深超过 800 m, 侧压系数超过 2.5 后, 巷道变形量急剧增大, 顶板和底板剪切破坏严重, 肩角锚杆大量破断, 顶煤呈现“尖顶型”垮冒。深部构造区域巷道应加强顶板与肩角围岩控制。

3) 断层对地应力场影响较大。断层附近地应力

增大, 其中最大水平应力尤为显著。断层区域巷道的稳定性具有较强的区域性和方向性: 断层附近, 巷道走向与最大水平主应力夹角越大, 巷道变形量越大、支护结构破坏越严重。巷道布置时, 尽可能与最大水平应力夹角较小。

参考文献:

- [1] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 沈明荣. 岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1999.
- [3] 康红普, 姜铁明, 张晓, 等. 晋城矿区地应力场研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 1-8. KANG Hong-pu, JIANG Tie-ming, ZHANG Xiao, et al. Research on in-situ stress field in Jincheng mining area and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 1-8.
- [4] 姜耀东, 刘文岗, 赵毅鑫, 等. 开滦矿区深部开采中巷道围岩稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1857-1861. JIANG Yao-dong, LIU Wen-gang, ZHAO Yi-xin, et al. Study on surrounding rock stability of deep mine in Kailuan mining group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(11): 1857-1861.
- [5] 鲁岩, 邹喜正, 刘长友, 等. 构造应力场中的巷道布置[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(2): 144-149. LU Yan, ZOU Xi-zheng, LIU Chang-you, et al. Roadway layout in tectonic stress Field[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2008, 25(2): 144-149.
- [6] 谢和平. 深部开采基础理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [7] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2814. HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2814.
- [8] 张百红, 韩立军, 韩贵雷, 等. 深部三维地应力实测与巷道稳定性研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2547-2551. ZHANG Bai-hong, HAN Li-jun, HAN Gui-lei, et al. Study of 3D in-situ stress measurement and stability of roadways in depth[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2547-2551.
- [9] 蔡美峰, 彭华, 乔兰, 等. 万福煤矿地应力场分布规律及其与地质构造的关系[J]. 煤炭学报, 2008, 33(11): 1248-1252. CAI Mei-feng, PENG Hua, QIAO Lan. Distribution law of in-situ stress field and its relationship to regional geological structures in Wanfu coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(11): 1248-1252.
- [10] 孔凡顺, 孙如华, 李文平. 彭庄井田区域地应力场分析[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 33(4): 14-17. KONG Fan-shun, SUN Ru-hua, LI Wen-ping. Research and analysis of in-situ stress field on Pengzhuang mining field[J]. Coal Geology and Exploration, 2004, 33(4): 14-17.
- [11] 肖同强, 柏建彪, 王襄禹, 等. 深部大断面厚顶煤巷道围岩稳定原理及控制[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1874-1880. XIAO Tong-qiang, BAI Jian-biao, WANG Xiang-yu, et al. Stability principle and control of surrounding rock in deep coal roadway with large section and thick top-coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1874-1880.

(上接第 658 页)

- [7] 顾士亮. 软岩动压巷道围岩稳定性原理及控制技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学矿业工程学院, 2004.
- [8] 李明远, 王连国, 易恭猷, 等. 软岩巷道锚注支护理论与实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [9] 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.
- [10] 徐芝伦. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [11] 孙金山, 卢文波. 非轴对称荷载下圆形隧洞围岩弹塑性分析解析解[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 327-332. SUN Jin-shan, LU Wen-bo. Analytical elastoplastic solutions to supporting rock masses of circular tunnels under asymmetric load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Supp): 327-332.
- [12] 张华磊. 采场底板应力传播规律及其对底板巷道稳定性的影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 2011.
- [13] 王连国, 缪协兴, 董建涛. 动压巷道锚注支护数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 39-42. WANG Lian-guo, MIAO Xie-xing, DONG Jian-tao. Numerical simulation of bolt-grouting support in soft roadway affected by mining[J]. Journal of Mining & Safty Engineering, 2006, 23(1): 39-42.