

岩层倾角对巷道结构稳定性的影响

凌涛^{1,2}, 王卫军^{1,2}, 张农^{1,2,3}, 吴海^{1,2,3}, 彭文庆^{1,2}

(1. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭, 411201;

2. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 3. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:为了解决倾斜岩层巷道存在的变形不对称问题,建立了巷道两帮围岩受力学模型.分析表明,巷道高帮围岩受到沿岩层倾向向下的“拉力”和岩层法向上的压力作用,围岩容易发生拉破坏;巷道低帮围岩受沿岩层法向和岩层倾向压力作用,围岩相对稳定.利用 UDEC 软件对不同倾角模型模拟分析发现倾斜岩层巷道结构非均称变形表现为 3 个方面:(1)巷道高帮变形量大于低帮变形量;(2)岩层倾角增加,高低帮水平变形量都增加,高帮水平变形量增加速度大于低帮增加速度,岩层倾角增加,高低帮垂直变形量先增加再逐渐减小;(3)高帮垂直位移量在帮角处最大,随高度增加而减小,低帮垂直位移量在底角处最小,随高度增加而增加.

关键词:倾斜岩层;变形;不对称;数值模拟;稳定性

中图分类号:TD322.4

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2014)02-0001-05

Effect characteristics of rock strata with varying inclinations on stability of roadway structure

LING Tao^{1,2}, WANG Weijun^{1,2}, ZHANG Nong^{1,2,3}, WU Hai^{1,2,3}, PENG Wenqing^{1,2}

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Mining and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. School of Mining Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Aiming at the roadway asymmetric deformation within inclined rock strata, the mechanics model of roadway sidewalls is built. The analysis shows that the surrounding rock tensile failure of long side is likely to occur under downward tension of inclined rock strata and strata normal direction stress, whereas the surrounding rock of short side is relatively stable under strata normal direction and inclined rock strata stress. According to the numerical simulation analysis of different dip angles by UDEC (Universal Distinct Element Code), it is found that the structure asymmetric deformation of the inclined rock strata roadway has three characteristics as follows: (1) the high side deformation degree is greater than that of low side within roadway; (2) the dip angles of rock strata increases, it naturally follows the sidewalls horizontal deformation degree and the increase of high side horizontal deformation degree is faster than that of low side, while the sidewalls vertical deformation degree increases at first and gradually decreases when the dip angles of rock strata increases; (3) the high side vertical displacement presents the greatest degree at the base angle and decreases with the height increases, while the low side vertical displacement presents the slightest degree at the base angle and increases with the height increase.

Key words: inclined rock strata; deformation; asymmetric; numerical simulation; stability

收稿日期:2013-03-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51374105);湖南省高等学校科学研究资助项目(12C0125;13C308);湖南省高校产业化培育资助项目(12CY013);湖南科技大学研究生创新基金资助项目(S130003)

通信作者:王卫军(1965-),男,湖南涟源人,博士,教授,研究方向:巷道围岩控制. E-mail: wjwang@hnust.cn

煤矿开采逐渐向深部发展,煤矿巷道结构稳定性对于巷道稳定影响加大,同时巷道结构稳定复杂性也不断增加.岩层倾角对深部巷道变形影响作用明显.国内对于大倾角岩层巷道稳定性进行了大量研究.辛亚军等^[1]建立了大倾角煤层软岩回采巷道围岩失稳状态方程,认为围岩稳定性与煤层倾角、剪切面长度及煤岩体物理力学参数有关,提出提高两帮支护强度利于巷道围岩稳定.李树清等^[2]建立了煤帮塑性区力学模型,认为支护结构区宽度增加,煤帮塑性区宽度呈近似线性减小;支护结构区内摩擦角增加,煤帮的塑性区宽度减小.

刘少伟等^[3]利用毕肖普算法建立了上帮煤体失稳模型,推导出上帮煤体稳定性安全系数的计算公式.勾攀峰等^[4]通过对深井巷道两帮锚固体破坏特征及作用机理分析,把深井巷道两帮锚固体失稳分为压裂失稳和剪切失稳,两帮锚固体首先失稳形态为压裂失稳,提出锚杆、锚索耦合支护方案.孙晓明等^[5]针对深部倾斜岩层巷道围岩非对称变形破坏现象,对其变形破坏机制及耦合控制对策进行了数值模拟与工程应用研究,提出非对称耦合控制对策.余远祥等^[6]建立了基于支承压力作用下回采巷道两帮煤体的力学模型,分析了煤体与顶底板界面应力、煤体轴力的基本分布规律.张蓓等^[7]研究了大倾角煤层巷道围岩非对称变形破坏机制,提出大倾角煤层巷道围岩关键部位非对称耦合支护对策.王琦等^[8]针对深部厚顶煤巷道围岩变形特点,选用让压型锚索箱梁支护系统中的纵横组合与纵向单梁方案,有效地控制巷道围岩变形.刘泉声等^[9-12]研究了深部巷道的变形特征并提出了对应的支护方案.张国锋等^[13]对岩层中薄弱面造成巷道非对称性变形的破坏特点,在理论分析的基础上提出支护设计方案.李学华等^[14]现场测试了软岩巷道围岩内部破裂发展过程和规律,提出了分阶段、分区域控制的关键技术.王忠福等^[15]针对深部高地应力巷道围岩大变形和失稳破坏的普遍问题,提出了对应的相似模拟材料配比,并进行了数值模拟和现场实验.本文旨在研究不同倾角对于巷道变形的影响,提出对应的控制措施,丰富深部倾斜岩层巷道支护的理论依据.

1 层状倾斜岩层巷道的力学模型

巷道开挖之后,破坏了巷道围岩的原岩应力

场,岩体临空面形成,岩体中的正应力分量转动到平行于开挖面的方向,巷道表面成为主应力面,由于巷道两帮是垂直的,因此巷道两帮巷道表面所受的主应力分量正好是在铅垂和沿巷道轴向方向上,随着向岩体内部发展,岩块逐渐处于三轴压缩状态,到某一个半径 R 处,岩块又处于弹性状态.小于半径 R 的范围称之为极限平衡区.在岩体层状结构和岩层倾角的作用下,巷道围岩的力学性质和受力形式较一般完整岩体或者水平岩层更加复杂,特别是非圆形巷道的应力计算更为复杂.倾斜岩层巷道示意图见图 1.

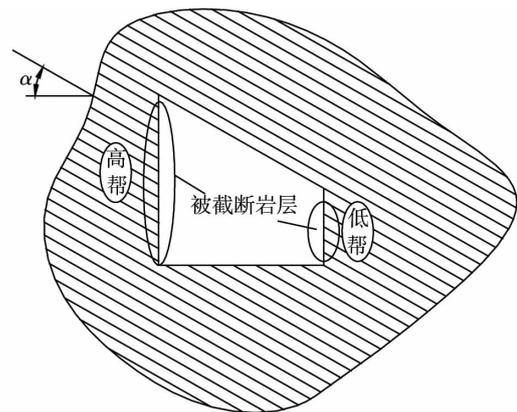


图1 倾斜岩层巷道示意图

巷道围岩岩层倾角为 α ,原岩应力 σ_1 和 σ_r .那么在岩层倾角的影响下在岩体未破坏情况下,将 σ_1 和 σ_r 沿岩层顺层方向和岩层法向方向分解.可以得到极限平衡区内巷道高帮岩层岩块受力分析图(图2)和低帮岩层岩块受力分析图(图3).

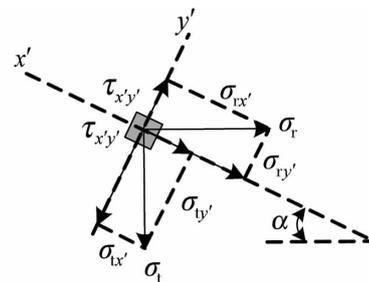


图2 高帮岩层岩块受力图

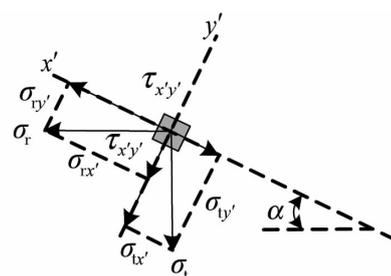


图3 低帮岩层岩块受力图

从图2可以看出,巷道高帮表面附近的围岩,在岩层的法向上,水平应力和垂直应力的应力分量方向相反,法向应力分量 $\sigma_{\text{高}y'}$ 为

$$\sigma_{\text{高}y'} = \sigma_{ry'} - \sigma_{ly'} = \sigma_r \sin\alpha - \sigma_l \cos\alpha = C \text{ctg}\varphi \left[\left(\frac{r}{r_1} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} \left(\sin\alpha - \cos\alpha \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \right) + \cos\alpha - \sin\alpha \right]. \quad (1)$$

而顺层方向的应力分量 $\sigma_{\text{高}x'}$ 为

$$\sigma_{\text{高}x'} = \sigma_{rx'} + \sigma_{lx'} = \sigma_r \cos\alpha + \sigma_l \sin\alpha = C \text{ctg}\varphi \left[\left(\frac{r}{r_1} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} \left(\cos\alpha + \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \sin\alpha \right) - \cos\alpha + \sin\alpha \right]. \quad (2)$$

在巷道低帮内岩层的法向上,水平应力和垂直应力的应力分量方向相同,法向应力分量之和 $\sigma_{\text{低}y'}$ 为

$$\sigma_{\text{低}y'} = \sigma_{ry'} + \sigma_{ly'} = \sigma_r \sin\alpha + \sigma_l \cos\alpha = C \text{ctg}\varphi \left[\left(\frac{r}{r_1} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} \left(\cos\alpha + \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \sin\alpha \right) - (\cos\alpha + \sin\alpha) \right]. \quad (3)$$

而顺层方向的应力分量 $\sigma_{\text{低}x'}$ 为

$$\sigma_{\text{低}x'} = \sigma_{rx'} - \sigma_{lx'} = \sigma_r \cos\alpha - \sigma_l \sin\alpha = C \text{ctg}\varphi \left[\left(\frac{r}{r_1} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} \left(\cos\alpha - \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \sin\alpha \right) - (\cos\alpha - \sin\alpha) \right]. \quad (4)$$

由式(1)~式(4)可知,式中存在 C , r , φ , α 等变量,当 C , r , φ 一定,可以得到岩层倾角 α 的变化对于 $\sigma_{\text{高}y'}$, $\sigma_{\text{高}x'}$, $\sigma_{\text{低}y'}$ 和 $\sigma_{\text{低}x'}$ 的影响关系图,如图4.

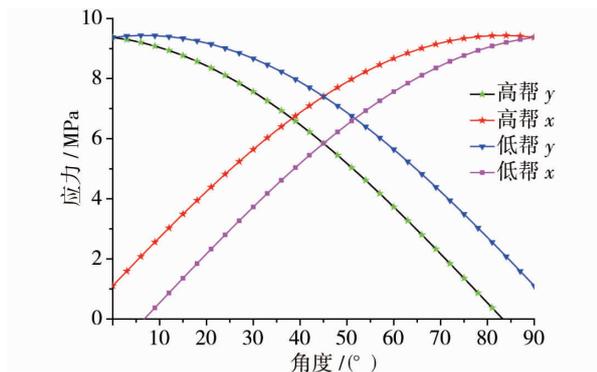


图4 岩层倾角与高低帮应力关系图

从图4中可以发现, $\sigma_{\text{高}y'}$ 和 $\sigma_{\text{低}y'}$ 随着岩层倾角

的增加而不断减小,也就是随岩层倾角增加层间压力不断减小; $\sigma_{\text{高}x'}$ 和 $\sigma_{\text{低}x'}$ 随着岩层倾角的增加而不断增加,也就是随岩层倾角增加顺层压力不断增加.当岩层倾角 α 增加到 90° 时, $\sigma_{\text{高}x'}$ 和 $\sigma_{\text{低}x'}$ 就等于巷道表面的切向压力, $\sigma_{\text{高}y'}$ 和 $\sigma_{\text{低}y'}$ 变成径向压力而等于0.

综合以上分析及图1可知,在巷道高帮和低帮内临空岩体的受力形式有差别,高帮临空岩体的受力形式为垂直于岩层的压力和沿岩层向下指向巷道方向拉力的综合作用,这种“既压又拉”受力形式下岩体极易发生拉伸破坏;在巷道底帮内岩体受到垂直于岩层的压力和沿岩层向下指向巷道围岩方向拉力的综合作用,形式和高帮不同,表现为三向压力,因此巷道底帮不易破坏.这就造成了倾斜岩层巷道中两帮变形的不对称性.

2 岩层倾角对巷道两帮变形影响的数值模拟

采用通用离散单元法程序 UDEC 建立数值模拟模型.该软件中不连续面被处理为块体间的变界面,允许块体沿不连续面发生较大的位移和转动.模型建立时还考虑了以下原则:(1)由于有岩层倾角影响,围岩结构左右不对称,取巷道全断面进行分析;(2)考虑巷道理深地压实际情况.结合矿山的实际情况,针对前面的分析结果,建立了7个不同岩层倾角的模型.角度分别为 15° , 25° , 35° , 45° , 55° , 65° , 75° .

根据巷道所在层位和已经获得的岩层岩石地质力学资料(图5),建立 $40\text{ m} \times 40\text{ m}$ 的模型,各岩层岩石参数见表1.

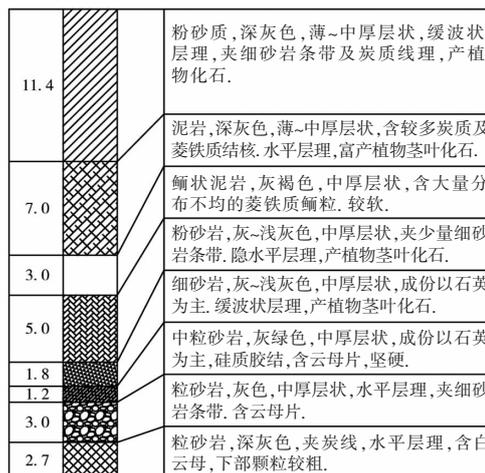


图5 倾斜岩层巷道岩层层位柱状图

表 1 各岩层岩石参数表

岩层	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	粘聚力 c/MPa	抗拉强度 ten/MPa	容重 ρ/kg
上覆岩层	11.10	8.50	30	11.85	2.20	2 500
粉砂岩	15.21	10.18	32	13.20	2.60	2 580
泥岩	10.95	7.54	28	6.00	2.06	2 300
煤	8.00	6.70	28	3.00	0.76	1 700
细砂岩	10.86	8.26	30	11.80	4.20	2 600
中砂岩	11.49	8.26	29	12.44	2.10	2 500

根据围岩地质条件和岩石力学参数,得到岩层倾角为 30°时的模型图,见图 6. 假设开挖过程瞬时完成,不考虑开挖过程对岩体的影响.

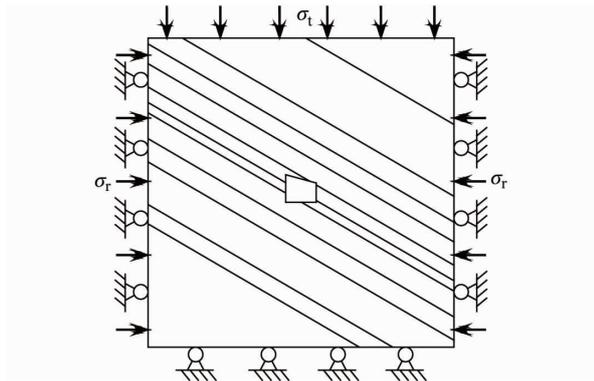


图 6 倾斜岩层巷道计算模型

为了对比不同倾角下巷道围岩应力和变形情况,在巷道两帮围岩表面设置监测线(分 20 个点),了解两帮在水平和垂直方向上位移差异,从而确定岩层倾角对于巷道两帮结构稳定性的影响,监测线布置情况见图 7.

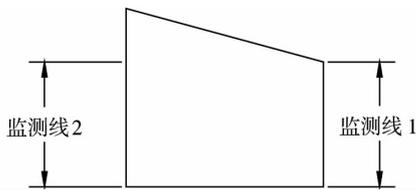


图 7 巷道两帮监测线布置图

针对不同倾角建立数值模型进行数值模拟,在模型巷道破坏后得到的监测数据导出,利用 Excel 软件中的插值函数得到高低帮监测线在不同倾角影响下的水平和垂直位移量图,水平位移量见图 8 和图 9. 垂直位移量见图 10 和图 11.

由图 8 和图 9 可以得出,在监测区域内高低帮水平位移量呈现如下特征:

- 1) 巷道两帮在水平方向上的位移量方向相反,但是均随岩层倾角增加而不断增大;
- 2) 在岩层倾角一定的条件下,高帮水平位移

量大于低帮水平位移量;

3) 高帮水平位移量在监测区域内在帮角处和顶角处最小,中间最大,呈“)”型分布. 低帮水平位移量在低帮帮角处最小,随高度增加而不断增加,呈“L”型分布;

4) 随着岩层倾角的增加,巷道两帮水平位移量逐渐趋于相等.

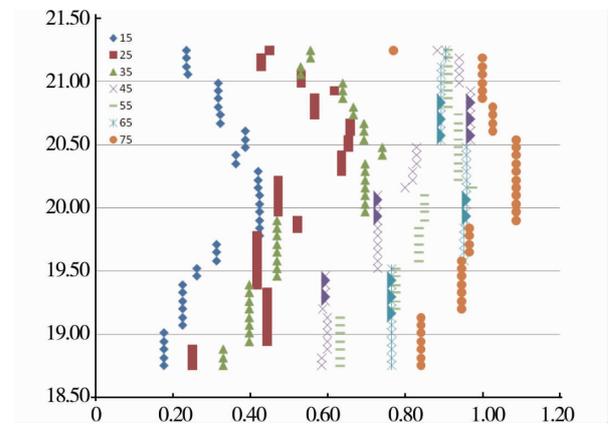


图 8 不同倾角下高帮水平位移图

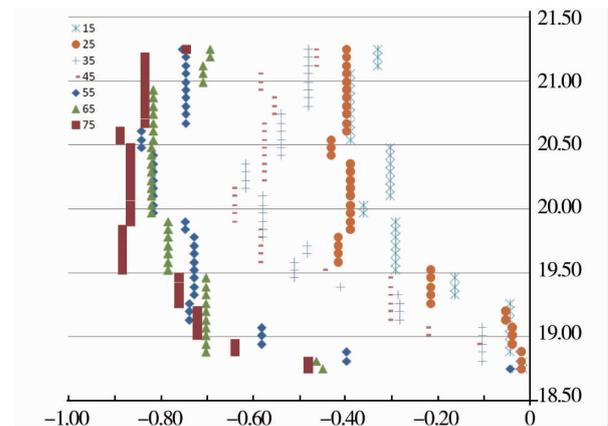


图 9 不同倾角下低帮水平位移图

由图 10 和图 11 可以得出,在监测区域内高低帮在垂直位移量呈现如下特征:

- 1) 巷道高帮和低帮垂直位移量不和岩层倾角的增加成正比例关系,均是先增加再减小;
- 2) 在岩层倾角一定的条件下,高帮垂直位移量大于低帮垂直位移量;
- 3) 低帮垂直位移量在底角处最小,随高度增加而不断增加;而高帮垂直位移量正好相反,在帮角处最大,随高度增加而减小.
- 4) 随着岩层倾角的增加,巷道两帮垂直位移量逐渐趋于相等,而且两帮上不同点的位移量也趋于相等.

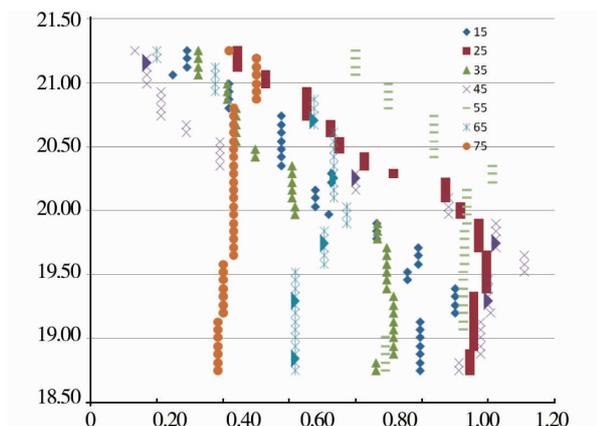


图10 不同倾角下高帮垂直位移图

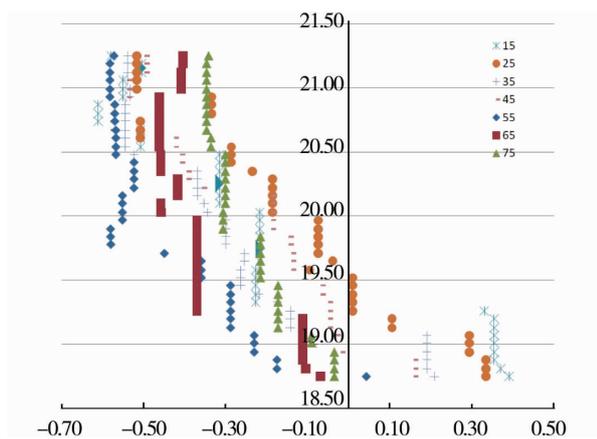


图11 不同倾角下低帮垂直位移图

3 结论

1) 受到岩层倾角的影响,巷道高帮岩体在“既压又拉”的应力环境下岩体极易发生拉伸破坏;巷道底帮内岩体主要受压力作用而不宜破坏。

2) 巷道两帮围岩位移量呈不对称分布。岩层倾角增加,高低帮水平变形量都增加,高帮水平变形量增加速度大于低帮水平变形量增加速度,岩层倾角增加高低帮垂直变形量先增加再逐渐减小;高帮水平位移呈“)”型特征,两端小而中间最大,低帮水平位移呈“L”型特征,在底角处最小,高帮垂直位移量在帮角处最大,随高度增加而减小,低帮垂直位移量在底角处最小,随高度增加而增加。

参考文献:

[1] 辛亚军,勾攀峰,负东风,等. 大倾角软岩回采巷道围岩

失稳特征及支护分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2012,29(5):637-643.

[2] 李树清,潘长良,王卫军. 锚注联合支护煤巷两帮塑性区分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2007,22(2):5-8.

[3] 刘少伟,张辉,张伟光,等. 倾斜煤层回采巷道上帮煤体滑移危险分析与应用[J]. 中国矿业大学学报,2011,40(1):14-17.

[4] 勾攀峰,辛亚军,申艳梅,等. 深井巷道两帮锚固体作用机理及稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(1):7-13.

[5] 孙晓明,张国锋,蔡峰,等. 深部倾斜岩层巷道非对称变形机制及控制对策[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(6):1137-1143.

[6] 于远祥,洪兴,陈方方. 回采巷道煤体荷载传递机理及其极限平衡区的研究[J]. 煤炭学报,2012,37(10):1630-1636.

[7] 张蓓,曹胜根,王连国,等. 大倾角煤层巷道变形破坏机理与支护对策研究[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(2):214-219.

[8] 王琦,李术才,李为腾,等. 深部厚顶煤巷道让压型锚索箱梁支护系统布置方式对比研究[J]. 岩土力学,2013,34(3):842-848.

[9] 刘泉声,肖虎,卢兴利,等. 高地应力破碎软岩巷道底脚特性及综合控制对策研究[J]. 岩土力学,2012,33(6):1703-1710.

[10] 谢广祥,常聚才. 深井巷道控制围岩最小变形时空耦合一体化支护[J]. 中国矿业大学学报,2013,42(2):183-187.

[11] 方新秋,何杰,何加省. 深部高应力软岩动压巷道加固技术研究[J]. 岩土力学,2009,30(6):1693-1698.

[12] 张农,李宝玉,李桂臣,等. 薄层状煤岩体中巷道的不均匀破坏及封闭支护[J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(1):1-6.

[13] 张国锋,曾开华,张春,等. 旗山矿倾斜煤夹层巷道破坏机理及支护设计研究[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(1):22-27.

[14] 李学华,姚强岭,张农. 软岩巷道破裂特征与分阶段分区控制研究[J]. 中国矿业大学学报,2009,38(5):618-623.

[15] 王忠福,刘汉东,王四巍,等. 深部高地应力区软岩巷道模型试验及数值优化[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(4):710-715.