

# 基于正交试验巷道松动圈 影响因素的数值模拟

张俊明<sup>1</sup>, 朱川曲<sup>1,2</sup>, 史应恩<sup>1</sup>, 周泽<sup>1,2</sup>

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 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)

**摘要:**针对巷道松动圈的影响因素与松动圈的大小进行正交试验,综合考虑围岩级别、侧压力系数、埋深、高跨比、跨度5个主要影响因素,利用FLAC<sup>3D</sup>数值软件对16个方案进行数值模拟。正交试验结果表明:对巷道综合位移影响程度最大的因素为围岩级别,其次为埋深。在描述松动圈时引入松动圈系数,将其与最大松动圈厚度进行比较后发现:引入松动圈系数后,对巷道松动圈的描述更加完善。对巷道两侧及前方的应力分析后可知,巷道两侧及前方的切向应力随围岩强度的降低和埋深的增加,应力峰值减小,巷道侧边的应力曲线出现明显的平直段,巷道两侧及前侧岩体的破裂始于距巷道内侧一定距离。

**关键词:**松动圈系数;应力分布规律;影响因素;数值模拟

中图分类号:TD322

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2016)01-0017-06

## Numerical simulation of loose circle influence factors based on orthogonal test

ZHANG Junming<sup>1</sup>, ZHU Chuanqu<sup>1,2</sup>, SHI Ying'en<sup>1</sup>, ZHOU Ze<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy and Safety Engineering, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Coal Mining Safety Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** For the influence factors of roadway loose circle and its size, this paper takes into consideration the levels of surrounding rock, lateral pressure coefficient, burying depth, and height - span ratio by using the FLAC<sup>3D</sup> numerical software to analyze the 16 numerical computation schemes based on the orthogonal test. The orthogonal test results show that the level of surround rock is the important factor for total displacement, followed by depth. By introducing loose circle coefficient, and compared with maximum loose circle thickness, it can be seen that loose circle coefficient and maximum loose thickness can better describe the roadway loose circle. By analyzing both sides and front stress of roadway, it can also be seen that the tangential stress peak decreases, with the increase of the surrounding rock strength and the burying depth, stress of roadway appears the straight section, and rock fracture of the two sides and the front starts from the inside of the roadway at a distance.

**Key words:** loose circle; stress distribution rule; influence factor; numerical simulation

巷道开挖前,位于地下的岩体处于三向受压状态;由于巷道的开挖,原有的平衡状态遭到破坏,使得巷道周边一定范围内出现应力重分布,巷道周围岩体的应力状态发生改变,原有的三向应力状态逐渐过渡成双向应力状态,围岩强度下降。若应力集中值小于降低后的围岩强度,则不需支护;如果相反,围岩将发生

收稿日期:2015-10-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51474104)

通信作者:朱川曲(1962-),男,湖南望城人,教授,博士生导师,研究方向:南方复杂煤层开采. E-mail: cqzhu@hnust.edu.cn

破裂. 这种破裂从巷道周边开始逐渐向深部扩展, 直到达到另一新的三向应力平衡状态为止, 此时围岩中出现一个破裂区, 这个破裂区称为围岩松动圈. 夏峰利用 FLAC<sup>3D</sup> 数值计算软件计算粘聚力、内摩擦角、地应力和硐室形状对松动圈厚度的影响<sup>[1]</sup>. 孙有为对下硐室几何形状对松动圈厚度影响进行研究, 分别从地下硐室断面积、高度、跨度、组合断面论述其对松动圈的影响<sup>[2]</sup>. 董方庭等通过现场实践和实验室研究表明: 地应力与围岩的相互作用会产生大小不同的围岩松动圈; 松动圈扩展过程中产生的碎胀力及其所造成的有害变形是巷道支护的主要对象; 松动圈尺寸越大, 巷道收敛变形也越大, 支护越困难<sup>[3,4]</sup>. 平雯等通过理论分析与数值模拟研究圆形巷道在不同水平应力条件下围岩松动圈的演化规律<sup>[5]</sup>. 刘刚等利用 ANSYS 对矩形巷道松动圈影响因素进行分析, 认为地应力和围岩强度是松动圈厚度的主要影响因素<sup>[6]</sup>. 文献<sup>[7-9]</sup>对深部巷道围岩承载特性进行研究. 本文根据前人的研究成果, 利用 FLAC<sup>3D</sup> 岩土工程数值软件, 对围岩级别、侧压力系数、埋深、跨度、高跨比对巷道围岩松动圈厚度的影响及其周边应力分布进行了基于正交试验的研究.

## 1 松动圈判定指标

### 1.1 松动圈系数

通常松动圈厚度是依据其最大厚度来确定, 此指标简单直观, 然而, 仅以此作为松动圈厚度的判别指标不能全面反映松动圈的分布, 基于此, 定义松动圈系数, 即松动圈面积与巷道断面积之比. 假设开挖断面为圆形(图1), 根据实验室实验, 当围岩各向同性时, 若地应力为静水压力时, 则为圆形松动圈<sup>[2]</sup>. 假设圆形巷道半径为  $r_0$ , 松动圈半径为  $r_1$ , 则松动圈系数  $F_p$  可由式(1)计算:

$$F_p = \frac{\pi(r_1^2 - r_0^2)}{\pi r_0^2} \quad (1)$$

式(1)仅适用于圆形断面巷道, 本文对直墙拱形巷道松动圈系数进行计算仍基于此, 即巷道开挖后松动区面积与原巷道断面之比.

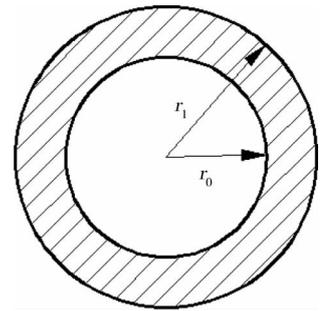


图1 巷道松动圈示意图

### 1.2 松动圈判定

在 FLAC<sup>3D</sup> 中对模型进行计算时, 不同本构模型, 单元具有不同的塑性状态; 采用莫尔-库仑本构模型时, 单元有 4 个应力状态, 分别为 shear - p, shear - n, tension - p, tension - n 4 种应力状态. 本文在对巷道松动圈进行模拟时, 将以上 4 种塑性区状态的任一状态均认为该单元已发生破坏, 则巷道周围已破坏的单元为围岩的松动圈. 本文针对巷道开挖后, 松动圈厚度、松动圈系数及周边应力进行研究.

## 2 松动圈影响因素的正交试验

### 2.1 正交试验设计

试验设计方法主要有全因素试验、正交试验设计和均匀试验设计等. 正交试验法是用于多因素试验的一种方法, 它是从全面试验中挑选出部分有代表的点进行试验, 这些代表点具有均匀和整齐的特点. 正交试验设计是部分因子设计的主要方法, 效率很高, 试验中把所要考察的结果称为指标, 把要考察的对试验指标可能有影响的因素简称为因素, 把每个因素在试验中要比较的具体条件称为水平. 假定设计一个试验, 安排  $k$  个因子, 做  $n$  次试验, 因子的水平数分别为  $t_1, t_2, \dots, t_n$ . 若此试验满足 2 个条件: (1) 每一因子的不同水平在试验中出现相同次数(均衡性); (2) 任意 2 因子的不同水平组合在试验中出现相同次数(正交性), 则这个试验称为正交试验. 正交试验法采用正交表安排试验, 既能使试验点分布得很均匀, 又能减少试验次数<sup>[10]</sup>. 根据前文所述, 巷道松动圈的影响因素主要为: 围岩级别、侧压力系数、巷道埋深、距离和高跨比, 由正交试验法, 选择 5 因素 4 水平的正交试验  $L_{16}(4^5)$ , 共需进行 16 次试验, 各试验方案取值见表 1, 各因素不同水平的值见表 2.

表1 正交试验方案

方案编号	围岩级别	侧压力系数	巷道埋深/m	跨度/m	高跨比	综合位移/m	松动区厚度/m	松动区系数
01	II	1.0	600	3.8	0.9	0.002	0.85	0.45
02	II	1.2	800	4.2	1.0	0.003	0.98	0.62
03	II	1.5	1 000	4.6	1.1	0.006	1.46	0.90
04	II	1.8	1 200	5.0	1.2	0.011	1.75	1.11
05	III	1.0	800	4.6	1.2	0.010	2.12	1.59
06	III	1.2	600	5.0	1.1	0.008	1.88	1.33
07	III	1.5	1 200	3.8	1.0	0.028	2.15	3.08
08	III	1.8	1 000	4.2	0.9	0.027	2.13	2.97
09	IV	1.0	1 000	5.0	1.0	0.072	2.56	2.83
10	IV	1.2	1 200	4.6	0.9	0.119	3.20	4.11
11	IV	1.5	600	4.2	1.2	0.048	2.14	2.89
12	IV	1.8	800	3.8	1.1	0.101	2.58	3.84
13	V	1.0	1 200	4.2	1.1	0.255	3.68	5.24
14	V	1.2	1 000	3.8	1.2	0.236	3.45	5.49
15	V	1.5	800	5.0	0.9	0.202	3.70	4.76
16	V	1.8	600	4.6	1.0	0.155	3.78	4.97

表2 正交试验5因素4水平

围岩级别	侧压力系数	巷道埋深/m	跨度/m	高跨比
II	1.0	600	3.8	0.9
III	1.2	800	4.2	1.0
IV	1.5	1 000	4.6	1.1
V	1.8	1 200	5.0	1.2

## 2.2 计算模型及过程

根据正交试验方案,利用FLAC<sup>3D</sup>有限差分软件对前述不同方案进行数值模拟.计算模型采用50 m×25 m×50 m,计算模型见图2.为监测巷道周边应力分布情况,同时减少模型尺寸,计算模型单元由中心点处(即巷道中心),由内向外逐渐变大,模型共有73 756个单元,77 246个节点.将模型上方岩体自重换算为施加于上边界的应力.模型上部为应力边界,其余为位移边界.本构模型为莫尔-库仑,各方案的围岩力学参数见表3.

首先模拟地下工程中的原始应力,在模型中生成初始应力场,在巷道开挖以前,监测关键点的位移值,监测示意图见图3,然后在模型y方向开挖3 m,计算达到平衡后,导出关键点的位移值,然后以4个关键点的位移值为基础,计算各方案综合位移量,即以各关键点绝对位移量乘以相应权重,本文均取为0.25,计算得到的综合位移值见表1.

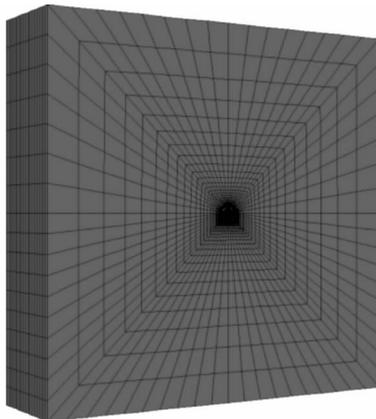


图2 计算模型示意图

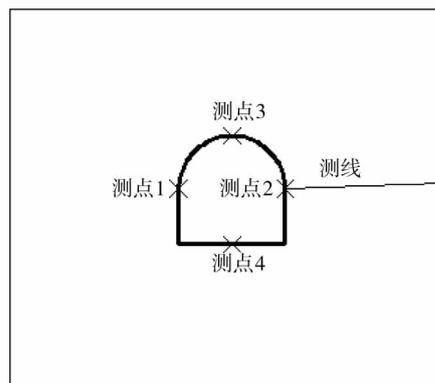


图3 测点及测线布置示意图

表 3 围岩力学参数

围岩级别	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	变形模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	粘聚力/MPa
II	24.0	20.0	0.25	55	2.30
III	20.0	8.0	0.27	43	1.30
IV	17.5	2.0	0.30	35	0.70
V	15.0	0.9	0.38	25	0.15

### 3 试验结果分析

#### 3.1 敏感性分析

直观分析法是通过每一因素的极差来分析问题,极差大小反映了该因素选取不同水平变动对指标的影响大小.根据正交试验理论,将各个因素相同水平平均,极差是在各水平之和中由最大值减去最小值求得,极差大说明此因素的不同水平产生的差异较大,是重要因素,对试验结果影响明显<sup>[11]</sup>.下面通过极差分析法对各因素对综合位移、最大松动圈厚度和松动圈系数的影响进行敏感性分析.

#### 3.2 综合位移敏感性分析

对正交试验结果(表 1)中对巷道综合位移影响的各因素每个水平求均值和极差,结果见表 4.从中可看出,各因素对综合位移的敏感性由大到小依次为围岩级别、埋深、高跨比、侧压力系数、跨度.这说明对于综合位移,围岩级别和埋深起主要作用.根据表 1 中数据可作出各因素对综合位移影响的直观分析图,如图 4 所示.从图中可看出,综合位移随围岩级别和埋深的增加而增加;随跨度的增加而减少,笔者认为由于跨度和侧压力共同作用下,巷道上方压力拱所起的作用增大的原因;其他影响因素对综合位移的影响并不明显.

表 4 综合位移极差分析

水平组数	围岩级别	侧压力系数	埋深/m	跨度/m	高跨比
1	5.60	84.69	53.22	91.60	87.36
2	18.10	91.59	79.20	83.19	64.55
3	85.18	70.89	85.11	72.84	92.52
4	211.91	73.62	103.26	73.16	76.36
极差	206.30	20.70	50.04	18.75	27.97

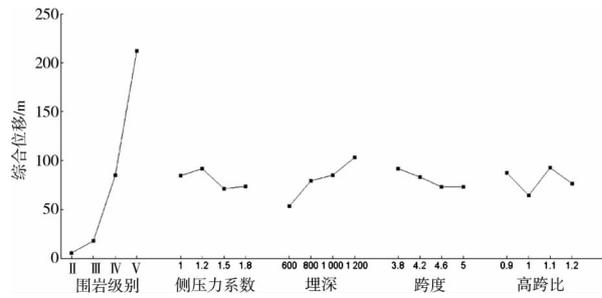


图 4 综合位移敏感因素分析

#### 3.3 最大松动圈厚度与松动圈系数敏感性分析

通过对巷道最大松动圈厚度和松动圈系数的正交试验结果(表 1)与其极差分析表(表 5 和表 6)分析可知,各因素对其敏感性大小一致,均为围岩级别、埋深、跨度、侧压力系数、高跨比;其中围岩强度的影响最大,其次为埋深,这与文献<sup>[12]</sup>所得结论基本一致;随着跨度的增加,从敏感性分析图(图 5 和图 6)可看出,最大松动圈厚度与松动系数均随围岩级别和埋深的增大而增加,接近于线性关系.侧压力系数、跨度和高跨比对其影响并不明显.

表 5 最大松动圈厚度极差分析

水平组数	围岩级别	侧压力系数	埋深/m	跨度/m	高跨比
1	1.26	2.30	2.16	2.26	2.47
2	2.07	2.38	2.35	2.23	2.37
3	2.62	2.36	2.40	2.64	2.40
4	3.65	2.56	2.70	2.47	2.37
极差	2.39	0.26	0.53	0.41	0.11

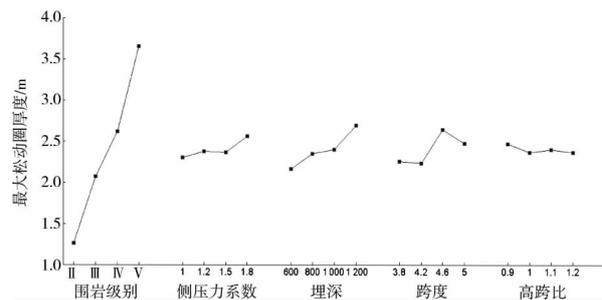


图 5 最大松动圈厚度敏感因素分析

表 6 松动圈系数极差分析

水平组数	围岩级别	侧压力系数	埋深/m	跨度/m	高跨比
1	0.77	2.53	2.41	3.22	3.07
2	2.24	2.89	2.70	2.93	2.88
3	3.42	2.91	3.05	2.89	2.83
4	5.12	3.22	3.39	2.51	2.77
极差	4.35	0.70	0.98	0.71	0.30

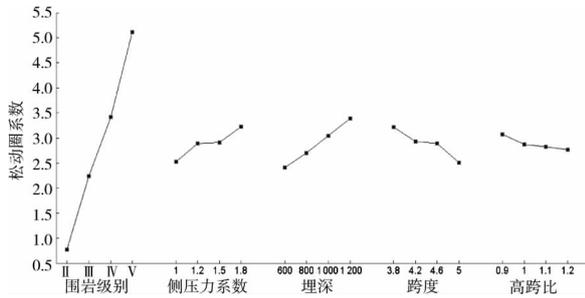


图 6 松动圈系数敏感因素分析

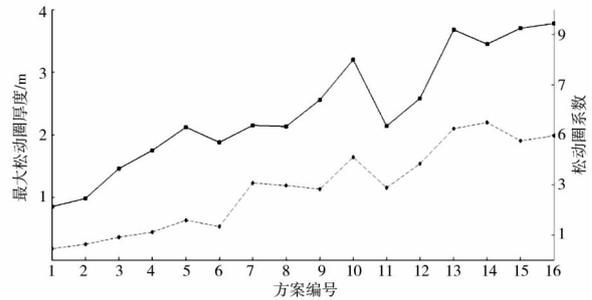


图 7 最大松动圈厚度与松动圈系数随各方案变化图

由最大松动圈厚度与松动圈系数的对比分析图(图 7)可知,最大松动圈厚度与松动圈系数变化基本一致,但存在最大松动圈厚度减小,而松动圈系数增大的情况,此时松动圈不再向深处扩展,转而向巷道四周均匀扩展;也存在最大松动圈厚度增加,而松动圈系数减少的情况,此种情况和前述原因一致.这说明仅以最大松动圈厚度作为判定松动圈的厚度并不全面,在最大松动圈厚度的基础上,引入松动圈系数可使得围岩松动圈的判定更加全面.

### 3.4 巷道周边应力分析

为分析巷道前方及两侧应力分布,在巷道侧边及前方布置侧线(见图 3),将监测结果整理并绘制出各方案巷道侧边及前方的应力分布图.由上文对巷道松动圈的论述,围岩级别和埋深为松动圈影响最大的因素,以下主要针对这 2 个因素对巷道两侧及前方的应力分布情况进行分析.由于模型的对称性,在分析两侧应力的分布时,可仅对一侧的应力分布进行分析.

当围岩级别为 II,III 级时,巷道两侧从巷道侧边至模型边界切向应力分布由应力降低到应力升高,最后逐渐过渡为原岩应力.距巷道侧边一定距离岩体的应力接近零,巷道侧边岩体的破裂并不一定从巷道最边缘开始,而是距巷道边缘一定距离,典型曲线见图 8.随着埋深的增加,应力降低段的宽度逐渐增加,此时靠近巷道两侧的岩体积聚的变形能释放,导致应力降低段宽度增加,巷道内位移增大.

当围岩级别为 VI,V 级时,巷道两侧的应力降低段消失,转变为平直线,这说明该宽度内岩体已发生破坏,应力升高往深部发展;与围岩级别较高时相比,此时应力升高段增加量较小,是由于岩体内积聚的变形能释放的结果,典型曲线见图 9.

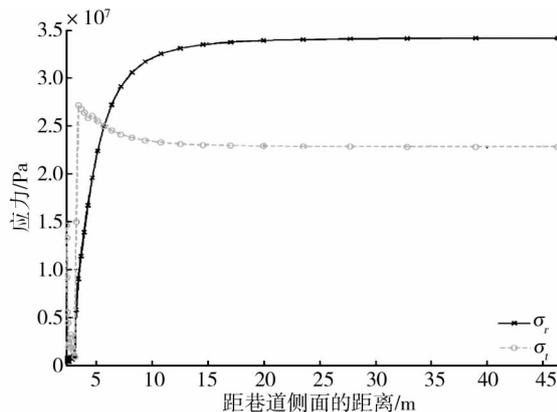


图 8 方案 3 巷道两侧应力分布

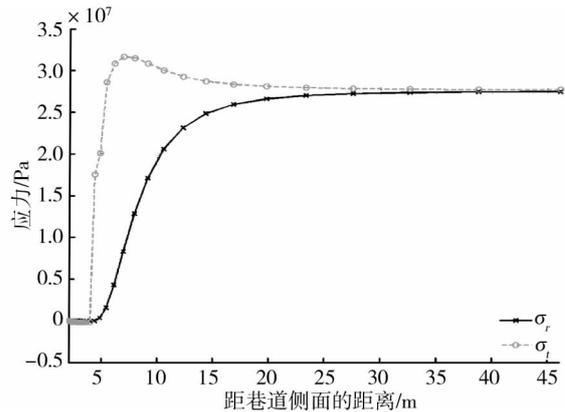


图 9 方案十五巷道两侧应力分布

围岩强度较高时巷道前方切向应力曲线总体趋势为随着巷道前向距离增大,迅速上升至最大值,然后逐渐过渡为应力;巷道前方岩体的破裂与两侧岩体的破裂基本一致,均始于距前侧一定距离,典型曲线见图10。围岩强度较高且埋深较浅时,巷道前方切向应力升高幅度大,随着埋深的增加切向应力升高增加幅度变小,此时表现为巷道的变形量增大,周围岩体破裂。当围岩强度较低时,巷道前方的切向应力出现平直段,该段内切向应力接近于零,典型曲线见图11。此时巷道周边岩体已完全破坏,应力增高向深部转移;由于岩体的变形能释放,巷道内的变形量增大。

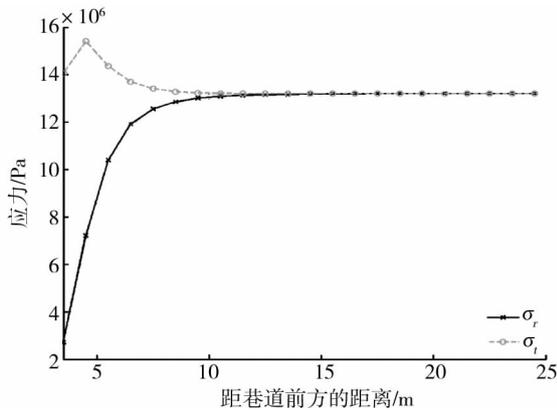


图10 方案一巷道前方应力分布

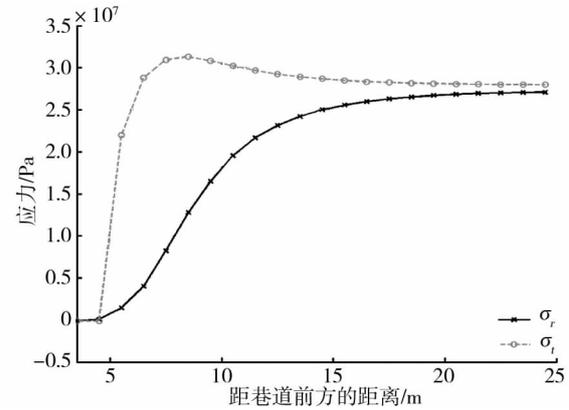


图11 方案十三巷道前方应力分布

## 4 结论

1) 巷道综合位移影响因素从大到小依次为:围岩级别、埋深、高跨比、侧压力系数、跨度。其中围岩级别与埋深对巷道综合位移的影响最大。

2) 各因素对松动圈影响程度的排序一致,均为:围岩级别、埋深、跨度、侧压力系数、高跨比。在对围岩松动圈进行判定时,对围岩的松动圈描述更加全面。

3) 巷道周边切向应力随着围岩强度的降低与埋深的增加,应力升高逐渐减小;随着围岩强度的降低,巷道侧边一定范围的岩体应力曲线接近于零,应力升高部分向岩体深部转移;巷道前方切向应力在出现最大切向应力时,无应力降低段;应力分布与巷道侧边的切向应力特征基本一致。

## 参考文献:

- [1] 夏峰. 地下硐室围岩松动圈影响因素分析[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2009.
- [2] 孙有为. 地下洞室的几何性质对松动圈的影响[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2006.
- [3] 董方庭. 巷道围岩松动圈支护理论及应用技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,2001.
- [4] 董方庭. 巷道围岩松动圈支护理论. 煤炭学报,1994,19(1):21-32.
- [5] 平雯,周传波,夏志强,等. 不同地应力条件下巷道围岩松动圈演化研究[J]. 金属矿山,2014(2):59-63.
- [6] 刘刚,宋宏伟. 围岩松动圈影响因素的数值模拟[J]. 矿冶工程,2003,23(1):1-3.
- [7] 余伟健,王卫军,黄文忠,等. 高应力软岩巷道变形与破坏机制及返修控制技术[J]. 煤炭学报,2014,39(4):614-623.
- [8] 李树清,王卫军,潘长良. 深部巷道围岩承载结构的数值分析[J]. 岩土工程学报,2006,28(3):377-381.
- [9] 王卫军,李树清,欧阳广斌. 深井煤层巷道围岩控制技术及其试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,10(25):2102-2107.
- [10] 陈颖,杨楠,王黎明. 应用回归分析[M]. 上海:复旦大学出版社,2008.
- [11] 靖洪文,付国彬,郭志宏. 深井巷道围岩松动圈影响因素实测分析及控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,1998,18(1):70-74.
- [12] 张华. 深井软岩巷道返修锚喷支护的研究[D]. 徐州:中国矿业大学,1999.