

# 厚松散层下矸石充填开采地表移动规律研究

王启春<sup>1 2 3</sup> 郭广礼<sup>1 2</sup> 查剑锋<sup>1 2</sup> 肖 勇<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学 国土环境与灾害监测国家测绘地理信息局重点实验室 江苏 徐州 221116;  
2. 中国矿业大学 江苏省资源环境信息工程重点实验室 江苏 徐州 221116; 3. 重庆市地理信息中心 重庆 401121)

**摘 要:** 为分析厚松散层下矸石充填开采地表移动规律,采用FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件,利用正交均匀设计试验校正室内岩样力学参数,分别建立不同松散层厚度条件下矸石充填开采数值计算模型。通过对相同基岩层厚度、不同松散层厚度条件下与相同采深、不同松散层厚度条件下矸石充填开采地表移动规律的研究得出:①在相同基岩层厚度的条件下,随着松散层厚度的增大,矸石充填开采地表最大下沉量、最大水平移动以及主要影响角正切均增大;②厚松散层下充填开采地表下沉系数随松散层厚度与采深之比呈线性递增;③采深是厚松散层下矸石充填开采地表移动范围的主要影响因素,而松散层厚度对地表移动范围的影响较小。

**关键词:** 厚松散层; 开采沉降; 矸石充填开采; 数值模拟

**中图分类号:** TD325.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2013)02-0096-04

## Study on Surface Ground Movement Law of Coal Rejects Backfill Mining Under Thick and Loose Overburden Strata

WANG Qi-chun<sup>1 2 3</sup> GUO Guang-li<sup>1 2</sup> ZHA Jian-feng<sup>1 2</sup> XIAO Yong

(1. State Bureau of Surveying and Mapping's Key Lab of Land Environment and Disaster Monitoring China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116 China; 2. Jiangsu Provincial Key Lab of Resources and Environmental Information Engineering China University of Mining and Technology Xuzhou 221116 China; 3. Chongqing Geomatics Center Chongqing 401121 China)

**Abstract:** In order to analyze the surface ground movement law of coal rejects backfill mining under thick and loose overburden strata, the FLAC<sup>3D</sup> numerical simulation software with orthogonal and uniform designed test to calibrate the mechanics parameters of indoor rock samples was applied to individually establish and calculate numerical model of the coal rejects backfill mining under the different thickness of the thick and loose overburden strata. Under the conditions of the same base rock thickness and different loose strata thickness and under the conditions of same mining depth and different loose strata thickness, the study on the surface ground movement law of the coal rejects backfill mining showed that firstly, under the conditions of the same base rock thickness, with the loose strata thickness increased, the max subsidence value of the surface ground above the coal rejects backfill mining, the max horizontal movement value and the tangent value of main effect angle would be increased. Secondly, the surface ground subsidence coefficient of the backfill mining under the thick and loose overburden strata would be increased in linear with the rate of the loose strata thickness and the mining depth. Finally, the mining depth would be the major factor affected to the surface ground movement scope of the coal rejects backfill mining under the thick and loose overburden strata and the thick and loose overburden strata would be less affected to the surface ground movement scope.

**Key words:** thick and loose overburden strata; mining subsidence; coal rejects backfill mining; numerical simulation

## 0 引 言

我国华中、华东、华北等地区的煤田,煤系地层上部多被厚松散层覆盖(通常称为厚松散层矿区),

地面建(构)筑物分布密集、范围广大,压占着大量的煤炭资源,造成资源的大量浪费,缩短矿井服务年限<sup>[1]</sup>。有些厚松散层矿区采用全采垮落法采煤时,地表出现最大下沉值大于煤层采高,地表沉陷范围

收稿日期:2012-10-22;责任编辑:曾康生

基金项目:国家自然科学基金重点项目资助(50834004);“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAB13B03);国家自然科学基金青年基金资助项目(41104011);江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPDSA1102)

作者简介:王启春(1987—),男,重庆人,硕士研究生。Tel:15152119664, E-mail: wqcls@cumt.edu.cn

引用格式:王启春,郭广礼,查剑锋,等.厚松散层下矸石充填开采地表移动规律研究[J].煤炭科学技术,2013,41(2):96-99,103.

扩大,对地表环境和建(构)筑物等的危害大等独特现象<sup>[2]</sup>。矸石充填采煤技术是针对上述我国存在的“三下”压煤问题、煤矸石排放问题和土地资源问题而开发出来的绿色采煤技术之一<sup>[3]</sup>,目前已在新汶、邢台、淄博等矿区实施并取得成功<sup>[4]</sup>。现阶段对于一般地质条件下开采引起上覆岩层及地表移动规律的研究较为成熟,但对特殊地质条件下(如厚松散层条件下)开采引起的覆岩及地表移动规律的研究较少<sup>[5]</sup>。特别是对厚松散层下矸石充填开采地表移动规律的实测资料和相关研究都较少,所以研究厚松散层下矸石充填开采地表移动规律研究具有重要的现实意义。本研究根据淮北矿某矿某工作面具体的地质采矿条件,采用FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件,利用正交均匀设计试验校正室内岩样力学参数,分别建立和计算不同松散层厚度条件下矸石充填开采地表移动变形值之间的关系。

## 1 数值模拟模型的建立

### 1.1 矿区及观测资料基本情况

模型以淮北某矿某工作面的地质与采矿条件为原型,该工作面的平均采深约为470 m,煤层厚度1.22~2.40 m,实际采高为2 m,煤层属近水平煤层。松散层厚度约为340 m。该工作面采用全部垮落管理顶板,工作面走向长平均1 640 m、倾向长约180 m。该工作面已有地表移动实测观测资料,其工作面及观测站测点布设情况如图1所示,根据观测站实测的地表下沉曲线如图2所示。

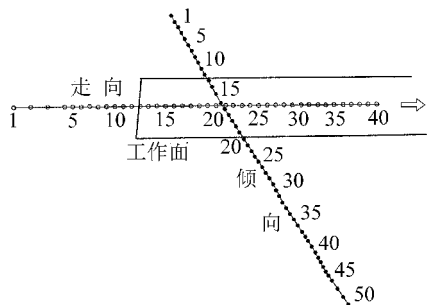


图1 工作面及观测站测点布设情况

### 1.2 数值模型岩层物理力学参数校准

根据该矿区工作面的综合柱状图建立模型的空间结构,从地表往下各岩层的室内岩样力学参数见表1。以煤层倾向为 $x$ 方向,走向为 $y$ 方向,重力方向为 $z$ 轴建立直角坐标系 $xoyz$ ,其中倾向宽度为

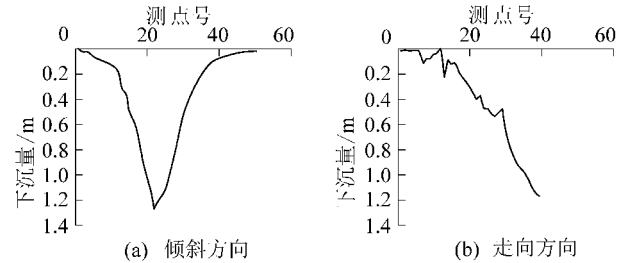


图2 工作面地表实测下沉曲线

1 000 m,走向长度为3 000 m,岩层总厚度为520 m,模型开挖部分为180 m×800 m,具体模型如图3所示。煤层的本构模型选择应变硬化/软化模型,其他岩层的本构模型选择摩尔-库仑模型。

表1 岩层物理力学参数

岩层	厚度/ m	弹性模 量/GPa	泊松 比	黏聚 力/MPa	内摩擦 角/(°)	抗拉强 度/MPa	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )
表土层	340	0.10	0.40	0.10	20	0.05	1 680
泥岩	32	12.50	0.26	1.76	25	0.83	2 681
中砂岩	18	10.30	0.26	5.22	37	1.38	2 600
细砂岩	27	7.10	0.22	4.02	34	1.55	2 750
砾岩	20	22.50	0.29	11.40	32	3.88	2 700
粉砂岩	33	16.90	0.25	3.78	19	0.86	2 691
煤	2	1.00	0.30	1.50	25	0.21	1 427
石灰岩	50	28.00	0.24	15.00	38	4.79	2 813
矸石	2	0.08	0.25	0.70	40	0.40	1 850

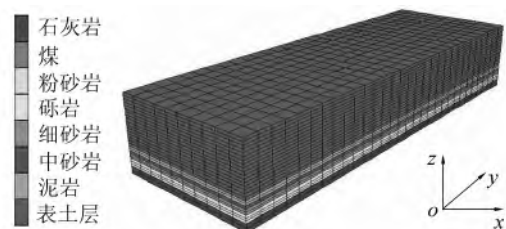


图3 FLAC<sup>3D</sup>计算正交试验的模型

由于岩层的物理力学参数是通过室内岩样力学试验获取的,与实际根据该矿区的基岩钻探和地质勘察取样测定的岩样力学参数相差较大,所以必须对室内岩块力学试验获取的岩样力学参数进行一定的修正。国内外许多学者都对这方面进行了大量的研究,获得一些定性的结论,如采用正交设计<sup>[6]</sup>、神经网络<sup>[7]</sup>等方法。笔者采用文献[8]中的均匀正交设计的方法对岩层力学参数进行反演分析,各因素水平见表2,其中弹性模量 $E$ 、黏聚力 $C$ 、抗拉强度 $T$ 等参数为室内岩样力学测试值;接触面法向刚度 $T_n$ 、切向刚度 $T_s$ 为接触面两侧最大刚度。

表 2 5 因素 6 水平试验设计

因素	水 平					
	1	2	3	4	5	6
弹性模量	$E/20$	$E/15$	$E/10$	$E/5$	$E/2$	$2E/3$
黏聚力	$C/20$	$C/15$	$C/10$	$C/5$	$C/2$	$2C/3$
抗拉强度	$T/20$	$T/15$	$T/10$	$T/5$	$T/2$	$2T/3$
接触面法向刚度	$10T_n$	$5T_n$	$T_n$	$0.1T_n$	$0.05T_n$	$0.01T_n$
接触面切向刚度	$10T_s$	$5T_s$	$T_s$	$0.1T_s$	$0.05T_s$	$0.01T_s$

按照表 2 的因素水平,采用 DPS(Digital Process System) 数据处理系统,设计出相应的均匀设计方案,测试结果见表 3。通过对测试结果与图 2 中的实测结果比较,得出第 6 组试验的模拟效果最好,得出的岩层参数与实际岩层参数更接近。

表 3 均匀设计方案和模拟结果

试验次数	弹性模量	黏聚力	抗拉强度	接触面法向刚度	接触面切向刚度	最大下沉量/mm
1	$E/10$	$C/2$	$2T/3$	$T_n/10$	$T_s/10$	0.45
2	$E/15$	$2C/3$	$T/15$	$T_n/20$	$5T_s$	0.78
3	$2E/3$	$C/5$	$T/15$	$T_n$	$10T_s$	0.02
4	$E/10$	$C/10$	$T/10$	$T_n/100$	$10T_s$	0.87
5	$E/15$	$C/20$	$T/15$	$10T_n$	$T_s/20$	0.16
6	$E/20$	$C/15$	$T/2$	$T_n/20$	$T_s/20$	1.34
7	$E/10$	$C/20$	$T/5$	$T_n$	$T_s$	0.07
8	$E/10$	$C/2$	$T/20$	$5T_n$	$T_s/100$	0.02
9	$E/5$	$C/10$	$2T/3$	$T_n$	$T_s/100$	0.13
10	$E/20$	$C/5$	$T/2$	$10T_n$	$5T_s$	0.01
11	$2E/3$	$C/10$	$T/5$	$10T_n$	$T_s/10$	0.02
12	$E/5$	$C/2$	$T/10$	$10T_n$	$T_s$	0.16
13	$E/20$	$C/10$	$T/20$	$T_n/10$	$T_s$	0.13
14	$E/2$	$C/15$	$T/20$	$5T_n$	$5T_s$	0.02
15	$2E/3$	$C/2$	$2T/3$	$T_n/100$	$T_s$	0.16
16	$2E/3$	$C/15$	$T/10$	$T_n/10$	$T_s/100$	0.12
17	$E/15$	$C/5$	$T/5$	$T_n/100$	$T_s/100$	1.08
18	$E/2$	$C/20$	$T/2$	$T_n/20$	$5T_s$	0.03
19	$E/20$	$2C/3$	$T/10$	$T_n$	$T_s/10$	0.14
20	$E/5$	$C/20$	$T/15$	$T_n/100$	$T_s/10$	1.13
21	$E/2$	$C/5$	$T/20$	$T_n/20$	$T_s/20$	0.12
22	$E/2$	$C/3$	$T/2$	$5T_n$	$T_s/20$	0.01
23	$E/15$	$C/15$	$2T/3$	$5T_n$	$10T_s$	0.11
24	$E/5$	$2C/3$	$T/5$	$T_n/10$	$10T_s$	0.02

### 1.3 数值模型建立和方案设计

由于该矿区的工作面未达到充分采动,为了得出在充分采动条件下的地表移动规律,所以需要重新建立模型。重新建立模型的岩层空间分布与正交

试验的模型一样,其岩层力学参数采用均匀正交设计第 6 组的岩层力学参数。模型的倾向宽度为 3 000 m,走向长度为 3 000 m,模型开挖部分为 800 m × 1 000 m。模型中矸石充填体采用文献[9]中压缩率 30% 的矸石充填体,其力学参数见表 1。

模型开挖与充填采用即采即充的方法,首先运行模型至稳定状态,开采煤层每次开挖 50 m,计算时步为 100,再开挖下一步进行循环,直到工作面推进至 1 000 m,然后计算模型至稳定状态。

为了更好地研究巨厚松散层下矸石充填开采地表移动规律,设计了 2 种方案。①方案 I:模拟基岩层按照矿区岩层空间分布建立,其取值为 130 m,厚松散层厚分别取 140、240、340、440、540 m。②方案 II:模拟采深固定为 470 m,基岩层厚分别取 65、130、260 m,相应地有松散层厚度为 405、340、210 m,其中基岩层按照该矿区岩层空间分布取值,各岩层厚度按比例缩放取值。

## 2 数值模拟结果及分析

根据上述 2 种方案进行模拟计算,得出 2 种方案的地表最大下沉量 W、最大水平移动 U 及下沉系数 q,结果见表 4。

表 4 不同松散层厚度的数值模拟结果

方案	松散层厚度/m	采深/m	最大下沉量/mm	最大水平移动/mm	下沉系数	主要影响角正切 $\tan \beta$
I	140	270	113.66	37.23	0.056	1.095
I	240	370	135.90	41.57	0.067	1.388
I	340	470	143.39	48.97	0.072	1.487
I	440	570	146.60	51.48	0.073	1.613
I	540	670	148.20	50.63	0.074	1.621
II	210	470	132.15	43.78	0.066	1.506
II	340	470	143.39	49.67	0.072	1.487
II	405	470	152.06	51.15	0.076	1.472

图 4a、图 4b 为相同基岩层厚度、不同松散层厚度条件下走向主断面的地表下沉和水平移动曲线,其中 140、240、340、440、540 m 为松散层厚度;图 4c、图 4d 为采深一定时,不同松散层厚度条件下走向主断面的地表下沉和水平移动曲线,其中 210、340、405 m 为松散层的厚度。根据图 4 的地表下沉曲线利用文献[10]方法求取不同松散层厚度模型的地表移动主要影响角正切  $\tan \beta$ ,结果见表 4。

1) 根据表 4 和图 4 可以得出:在相同基岩层厚

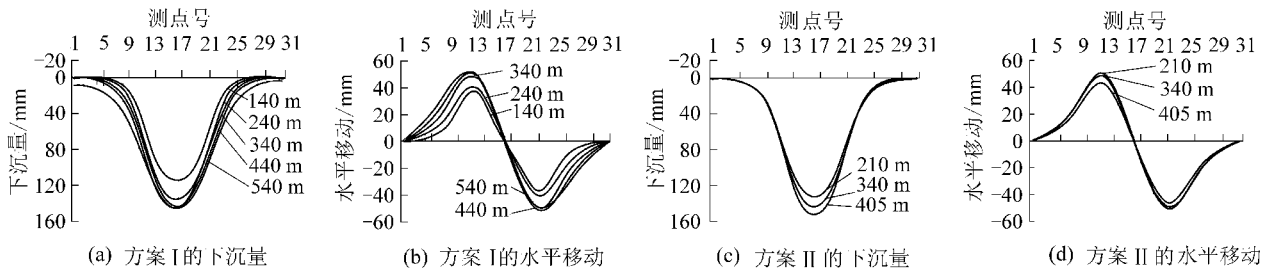


图4 不同松散层厚度下方案 I 和方案 II 走向主断面地表下沉量和水平移动

度的条件下,随着松散层厚度的增大,矸石充填开采地表最大下沉量  $W$  和最大水平移动  $U$  均增大,其增长趋势大致呈线性关系增长。根据最小二乘法回归得出其增长曲线如图 5 所示。

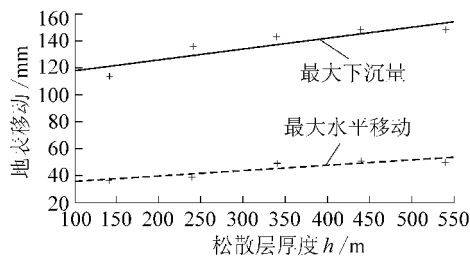
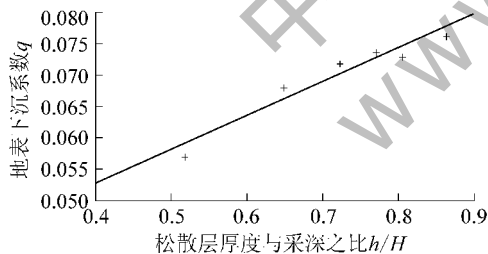


图5 松散层厚对充填开采地表最大下沉、水平移动影响

2) 根据表 4 可得:厚松散层下充填开采地表下沉系数  $q$  随松散层厚度  $h$  与采深  $H$  之比呈线性递增。根据最小二乘法回归分析得出其函数关系式为  $q = 0.054h/H + 0.0313$  (图 6)。

图6  $h/H$  对充填开采地表下沉系数的影响

3) 根据表 4 可得出:在相同基岩层厚度的条件下,随松散层厚度的增大,其主要影响角正切值增大;在相同采深的条件下,随着松散层厚度的增大,其主要影响角正切值大致趋于不变。根据最小二乘法回归分析得出在基岩层为 130 m 时,主要影响角正切与松散层厚度的函数关系:  $\tan \beta = 0.398 \ln h - 0.842$ ,其中回归函数曲线如图 7 所示。

4) 根据图 4a、图 4b 可以得出:在相同基岩层厚度的条件下,矸石充填开采地表移动范围随采深的增大而增大;根据图 4c、图 4d 可以得出:在相同采

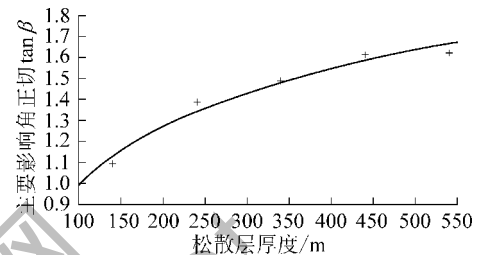


图7 松散层厚度对主要影响角正切的影响

深条件下,矸石充填开采地表移动范围随松散层厚度的变化较小。从而可以看出:采深是厚松散层下矸石充填开采地表移动范围的主要影响因素,而松散层厚度对地表移动范围的影响较小。

### 3 结 论

1) 对于已有实测下沉资料的矿区或邻近矿区,利用正交均匀设计试验方法校正室内岩样力学参数,能有效得出与接近实际岩石的力学参数。

2) 在相同基岩层厚度的条件下,随着松散层厚度的增大,矸石充填开采地表下沉量和水平移动均增大,其增长趋势大致呈线性关系增长。

3) 厚松散层下充填开采地表下沉系数  $q$  随松散层厚度  $h$  与采深  $H$  之比呈线性递增,其函数关系式为  $q = 0.054h/H + 0.0313$ 。

4) 在相同基岩层厚度的条件下,主要影响角正切随着松散层厚度的增大而增大;在相同采深的条件下,主要影响角正切随松散层厚度的变化较小。

5) 采深是厚松散层下矸石充填开采地表移动范围的主要影响因素,而松散层厚度对地表移动范围的影响较小。

#### 参考文献:

- [1] 刘义新.厚松散层下深部开采覆岩破坏及地表移动规律研究[D].北京:中国矿业大学(北京)2010.
- [2] 刘义新,戴华阳,郭文兵.巨厚松散层下深部宽条带开采地表移动规律[J].采矿与安全工程学报2009 26(3):88-92.

(下转第 103 页)

性。因此,可以判断出多元非线性回归方程的残差具有正态性和随机性。

4) 多元非线性回归方程实用性检验。通过以上检验,可知建立的单轴抗压强度多元非线性回归方程具有显著性和适用性。为了验证其实用性,笔者利用建立的模型对相似地质条件下的淮南矿区13号煤层顶板岩石单轴抗压强度进行预测,见表4。除第10组数据预测偏差比较大外,其他预测强度与实测强度均比较接近。由此可见,多元非线性回归模型对岩石单轴抗压强度预测误差小,预测精度高。因此,在现场取心困难或实验室岩石试验获取数据不全的情况下,该模型可为相似煤系地层开采参数设计、巷道支护设计、数值模拟和相似模拟试验中估算岩石单轴抗压强度提供参考和依据。

表4 13号煤层顶板岩石实测强度与模型预测强度

编号	实测单轴抗压强度/MPa	天然密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/GPa	预测单轴抗压强度/GPa	相对误差/%
1	57.22	2 527.95	11.33	56.65	-1.00
2	131.20	3 265.72	43.07	136.67	4.16
3	123.33	3 268.97	40.12	122.71	-0.51
4	172.58	3 325.72	56.75	179.93	4.26
5	73.88	2 481.50	16.51	73.53	-0.46
6	81.73	2 465.89	19.09	80.22	-1.86
7	71.28	2 480.23	15.28	69.42	-2.61
8	49.86	2 257.47	16.29	46.96	-5.82
9	74.35	2 538.83	15.56	73.11	-1.67
10	41.32	2 662.62	9.89	47.66	15.37
11	91.20	2 941.74	23.76	92.01	0.88

### 3 结 语

对淮南矿区11-2号煤层顶板岩石进行单轴压缩试验,在获得88组单轴压缩试验数据基础上,运用专业数理统计软件进行非线性回归拟合,建立了岩石单轴抗压强度多元非线性回归模型,并进行了 $F$ 检验、 $t$ 检验、残差正态性和随机性检验。结果表明,多元非线性回归模型具有较高的适用性。运用多元非线性回归模型对淮南矿区13号煤层岩石进行预测,预测值具有较高的预测精度,因此,该模型可为相似煤系地层有关工程设计和试验估算岩石的单轴抗压强度提供参考。

参考文献:

[1] 刘效云,张弛.浅谈岩石抗压强度试验中应注意的几个问题

[J].煤炭科技,1999(1):18-20.

- [2] 熊文林,李胡生.岩石样本力学参数值的随机-模糊处理方法[J].岩土工程学报,1992,14(6):101-108.
- [3] 李胡生,魏国荣.用随机-模糊线性回归方法确定岩石抗剪参数[J].同济大学学报,1993,21(3):421-429.
- [4] Sabatakakis N, Koukis G, Tsimabos G *et al.* Index Properties and Strength Variation Controlled by Microstructure for Sedimentary Rocks[J]. Engineering Geology, 2007, 97(1/2): 80-90.
- [5] JENG F S, WANG M C, LIN M L *et al.* Influence of Petrographic Parameters on Geotechnical Properties of Tertiary Sandstones from Taiwan[J]. Engineering Geology, 2004, 73(1/2): 71-79.
- [6] Farmer I W. Engineering Behaviour of Rocks[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1988: 15-20.
- [7] 林志红,项伟,张云明.湘西红砂岩基本物理指标和微结构参数对其强度影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(1):124-133.
- [8] 王敏生,李祖奎.测井声波预测岩石力学特性的研究与应用[J].采矿与安全工程学报,2007,24(1):74-78.
- [9] 蒋昱州,杨圣奇,徐卫亚,等.非贯通裂纹岩石压缩试验及非线性回归分析[J].采矿与安全工程学报,2008,25(3):291-296.
- [10] 曹辉,杨小聪,解联库.某矿岩石力学特性及力学参数相关性研究[R].中国矿业,2010,19(7):84-87.
- [11] GB/T 23561-2009 煤和岩石物理力学性质测定方法[S].
- [12] 刘锦萼,杨喜寿,愈纯权,等.概率论与数理统计[M].北京:科学出版社,2001:50-60.
- [13] 陈绍杰,郭惟嘉,刘进晓,等.岩石II类曲线形成机制的试验研究[J].煤炭学报,2010,35(S):54-58.
- [14] 何军,郭佳奇,秦本东,等.高温单向约束下煤系砂岩物理力学及声学特性研究[J].煤炭学报,2011,36(S):232-236.
- [15] 于秀林,任雪松.多元统计分析[M].北京:中国统计出版社,2006:21-30.

(上接第99页)

- [3] 钱鸣高,许家林,缪协兴.煤矿绿色开采技术[J].中国矿业大学学报,2003,32(4):343-348.
- [4] 张吉雄,缪协兴,郭广礼.矸石(固体废物)直接充填采煤技术发展现状[J].采矿与安全工程学报,2009,26(4):395-401.
- [5] 李德海,苏美德,宋常胜.巨厚松散层下开采地表移动特征研究[J].煤矿开采,2002,7(3):54-56.
- [6] 高富强,王兴库.岩体力学参数敏感性正交数值模拟试验[J].采矿与安全工程学报,2008,25(1):95-98.
- [7] 郝哲.基于均匀设计差分法和模糊神经网络的隧道围岩物理力学参数反分析[J].中国矿业,2004,13(12):85-90.
- [8] 查剑锋.矸石充填开采沉陷控制基础问题研究[D].徐州:中国矿业大学,2008:73-75.
- [9] 徐斗斗,郭广礼,栗帅,等.矸石充填体压缩率对充填效果影响的数值模拟[J].金属矿山,2011(3):47-50.
- [10] 何国清,杨伦,凌赓娣,等.矿山开采沉陷学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1991.