

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.03.19

条带开采充填体压缩率的确定方法探讨

张子月,冯婷婷,孟海梅

(河南理工大学测绘与国土信息工程学院,河南 焦作 454003)

摘要: 固体充填条带开采时,等效采厚方法是分析覆岩移动与地表沉陷问题的主要方法,其等效厚度的确定是应用该方法的关键,充填体压缩率是计算等效采厚的关键参数。文中总结分析了充填条带开采时充填体压缩率的影响因素,并运用数值模拟重点分析了充填体充留宽度、开采深度、覆岩岩性对充填体压缩率的影响。模拟结果表明:当充填宽度由 40 m 增加到 200 m 时,充填体压缩率由 0.023 增大到 0.097;当采深由 150 m 增大到 750 m 时,充填体压缩率由 0.01 增大到 0.06;当岩性折减系数由 0.33 增大到 2 时,充填体压缩率由 0.111 减小到 0.037。在实际应用中可根据压缩率与相关因素的相互关系确定不同开采条件下充填体的压缩率,进而准确的计算等效采厚,并通过实例验证了此方法的适用性和准确性,为准确分析及预计充填条带开采后覆岩移动与地表沉陷问题提供了新的方法。

关键词: 固体充填条带;等效采厚;压缩率;影响因素;数值模拟

中图分类号: TD8

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2015)03-0101-06

Discussion on the method for determination of compression ratio of filling body with strip mining

ZHANG Ziyue, FENG Tingting, MENG Haimei

(School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China)

Abstract: Method of equivalent mining thickness is the principal method to analyze strata movement and surface subsidence when mining solid filling strip, whose equivalent thickness is the key to the application of the method, And the compression ratio of determining filling body is the key parameter to calculate equivalent mining thickness. In this paper, the influencing factors of compression ratio in filling strip mining were analyzed and summarized. And using numerical simulation mainly analyzed the influence of the width of coal pillar and filling, depth of mining, and the reduction factors of rock properties on compression ratio. Simulation results show that when the filling width increases from 40 m to 200 m, the compression ratio of filling body increases from 0.023 to 0.097; when mining depth increases by 150 m to 750 m, the compression ratio of filling body increases from 0.01 to 0.06; when the reduction coefficient of strata lithology increases from 0.33 to 2, the compression ratio of filling body reduces from 0.111 to 0.037. The relation between the compression ratio and related factors was derived from the analysis. In a practical application, compression ratio of filling body under different mining conditions can be determined according to the relationship between compression ratio and related factors. On this basis the accurate equivalent mining thickness is calculated. Meanwhile the applicability and accuracy of this method has been verified by cases. This method provides a new idea to analyze and expect problems of strata movement and surface subsidence meeting when mining filling strip.

Keywords: solid filling strip mining; equivalent mining thickness; compression ratio; influencing factor; numerical simulation

收稿日期: 2014-10-10; 修订日期: 2014-10-29

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U1261206); 国家自然科学基金项目(41102169); 河南省博士后科研资助项目(2011036)

第一作者: 张子月(1988-), 男, 河南邓州人, 博士研究生, 主要从事开采沉陷与变形监测方面的研究。E-mail: zzy0377@126.com

0 引言

固体充填条带开采是将开采区域分为若干个条带,采一条留一条,在采出条带的同时,条带采空区内即刻进行固体充填,使充填条带和条带煤柱共同支撑上覆岩层,进而达到更好的控制覆岩移动与地表沉陷。

目前,国内外学者对于充填开采和条带开采都有较多的研究成果。在充填开采的研究中,缪协兴、郭广礼^[1-2]将矸石充填开采等效为薄煤层开采,并采用等效采厚方法研究充填开采覆岩移动及地表沉陷问题,并很适用;苏仲杰^[3]采用FLAC^{3D}对充填开采地表下沉系数进行了分析,得到了充填体强度与地表下沉值的关系;徐斗斗^[4]研究了矸石压缩率对充填效果的影响,得到了压缩率与地表移动变形值的关系。在条带开采的研究中,郭文兵^[5]研究了大采宽条带开采地表移动的预计,提出全采多条带工作面叠加的预计公式,并进行了更准确的预计;刘义新^[6]研究了不同地质条件对条带开采地表移动规律的影响,并分析认为松散层厚度对地表移动变形的影响较大;袁坚^[7]研究了条带采宽及留宽对地表移动沉陷的影响,得到采宽与留宽不同对地表移动变形的关系。这些研究表明,充填开采和条带开采都可有效的控制覆岩移动与地表沉陷,可保证开采区域地表建筑物安全使用。但是,在进

行长壁充填开采时,在充填率较低、煤层厚度较大、充填密实度较低等情况下,地表移动变形值仍然较大;在进行条带开采时,不同采出条带宽度不同对地表变形影响不同,宽度较小影响开采效率,宽度较大地表变形较大。对于一些对地表沉陷要求更高的地区,长壁充填开采或宽条带开采就难以满足要求,而在已有的研究中,对两种开采技术结合起来控制地表沉陷进行研究的较少,因此,有必要进行固体充填条带相关问题的研究。文中以固体充填条带开采充填体压缩率变化为研究对象,研究不同开采条件下对充填体压缩率的影响,试图得到更优的开采设计,将地表沉陷控制在一定的范围内。

1 固体充填条带等效采厚模型

充填开采等效采厚理论首先由缪协兴、郭广礼等^[1-2]提出,认为固体充填开采由于开采后采空区填入充填体,充填体在上覆岩层压力作用下产生压缩,压缩后的充填体到顶板岩层的高度可定义为等效采厚,即:等效采厚为工作面采厚减去采空区充填体压实后的厚度,因此,充填开采也即相当于降低了采厚。对于固体充填条带开采仍可根据这一思路进行分析,充填体充满条带采空区后(图1(a)),在受到上覆岩层的压力作用下被压缩,将充填体上方的被压缩的空间等效为规则的易计算的采出厚度(图1(c))。

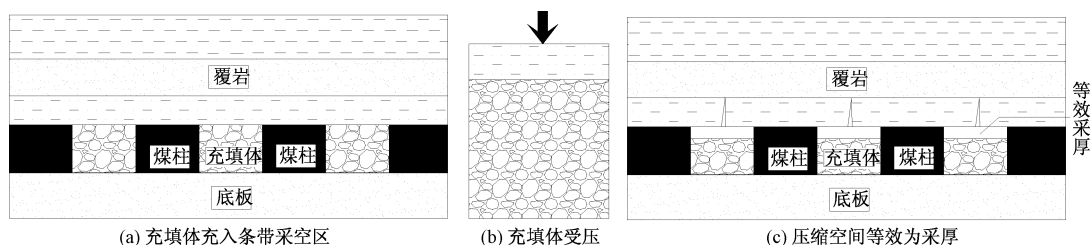


图1 充填条带开采等效采厚模型示意图

Fig.1 Sketch map of equivalent mining thickness model for solid filling strip mining

充填开采实践表明^[8-10],在保证充填质量和充填率的情况下,充填效果较好,等效采厚的厚度较小,运用等效采厚的方法,可将固体充填条带开采等效为薄煤层的条带开采。目前,对于条带开采,有较多的开采实践和岩层、地表移动观测资料,对于研究分析固体充填条带开采引起的覆岩移动、矿山压力显现和地表沉陷等问题有重要意义。但是,运用等效采厚方法的关键在于等效厚度的求取。

等效采厚的计算可根据充填前的顶底板移近量、充填综采欠接顶量和固体充填体的压缩率来实现,可

按下式进行计算^[10]:

$$H_z = h_d + h_w + k \times (H - h_d - h_w) \quad (1)$$

式中: H_z ——充填条带开采等效采厚/m;

h_d ——充填前顶底板移近量/m;

h_w ——充填综采欠接顶量/m;

H ——采厚/m;

k ——充填体的压缩率。

由公式(1)可以看出,固体充填条带开采等效采厚的计算主要与充填开采顶底板移近量、充填综采欠接顶量和充填体的压缩率有关。其中,顶底板移

近量、充填欠接顶量可在实际充填过程进行实测,而固体充填体的压缩率需要在实验室内进行压实试验和根据实际充填过程中压实机械的压实效果进行选取。对于长壁充填工作面开采,充填体在上覆岩层持续的压力作用下,会有一个极限压缩率。文献[8]研究了不同粒径矸石在持续压力作用下的实验室压力试验。试验得出矸石充填体在初始压力作用下产生较大的压缩量,当压力增大到一定程度后,矸石充填体压缩量趋于定值,达到极限压实。对于充填条带开采,由于有间隔煤柱的存在,上覆岩层的压力不能全部施加在充填体上,其大部分的压力有煤柱支撑,其压缩率就不能应用极限压缩思想。因此,分析固体充填条带开采充填体受上覆岩层压力的大小,是确定其压缩率的关键。

2 充填体压缩率的主要影响因素

固体充填条带开采充填体压缩率,是等效采厚准确确定的关键,也是定量分析覆岩移动与地表沉陷的关键,其值可由公式2计算求取。由于地下开采引起的矿山压力是一个复杂力学变化过程,因此。研究充填体压缩率在复杂的矿山压力作用下的影响因素是十分必要的。

$$k = \frac{V' - V''}{V'} \quad (2)$$

式中: V' ——充入采空区的充填体体积;

V'' ——受压缩后的充填体体积。

在理论分析和充填开采实践的基础上可总结出,充填条带开采充填体压缩率主要有以下影响因素。

2.1 开采深度

采深不同,固体充填体所受到的覆岩压力也不同。采深越大,作用在充填体上的压力也越大,充填体的压缩应变量增加。文献[11]通过研究认为,采深越大,固体充填开采地表移动变形也越大,这说明采深的增大,造成充填开采等效采厚的增大,而造成地表变形增大。

2.2 煤层采厚

采厚对充填体压缩率的影响主要是由于开采厚度越大,造成充填空间增大,在充填过程中,上部的充填体易向下滑落流动,以及充填机械对上部充填体的推压密实度的降低,从而造成上部的充填体压实度较低。煤层采厚越大,充填体的初始压实度相应的降低,造成充填体最终压缩量就越大。

2.3 充留宽度

固体充填条带开采,充填宽度和留设煤柱宽度对充填体压缩率有较大影响。充填条带开采后,留设煤柱和充填体共同支撑上覆岩层的压力,其中煤柱承担较大的应力。当留设煤柱宽度在覆岩较大压力作用下不发生破坏时,充填条带内的充填体随着宽度的增加,顶板不断的发生断裂,作用在充填体上的压力不断增大,从而造成充填体压缩率的增大;当留设煤柱宽度较小在覆岩压力作用下发生破坏时,此时与长壁工作面开采相同,就失去了充填条带开采的意义。

2.4 上覆岩层的岩性

组成岩体的岩石主要有极软弱、软弱、中硬、坚硬四种类型^[12]。上覆岩层的岩性影响着覆岩的移动变形,岩石越坚硬,覆岩移动变形越小。当上覆岩层岩性较弱时,其覆岩断裂距较小,在充填区域内,顶板发生连续的断裂,这样作用在充填体上的压力就大,造成充填体压缩量较大;当顶板岩性较硬时,其断裂距较大,煤柱还可有效支撑着断裂的岩块,使其作用在充填体上的压力较小,充填体产生的压缩量就较小。

2.5 充填体的颗粒级配

充填体的颗粒级配是影响充填体压缩率主要因素,不同的充填体颗粒级配在压力作用下,其压缩性能不同。文献[13]通过对粒径为0~20 mm、0~30 mm、30~50+mm和0~50+mm四种不同粒径的矸石充填体进行了压缩试验,试验结果表明,矸石的颗粒级配对充填体试样的变形有较大影响,其中,颗粒级配为0~50+mm矸石试样抗压缩变形能力最强。

2.6 充填体的相对压实度

充填体的相对压实度反映充入采空区充填材料的压实程度,压实度越大,在上覆岩层荷载作用下的再压缩量越小。对于传统的手工矸石充填与风力矸石充填来讲,由于缺乏压实的过程,导致充填体相对压实度较低,在荷载作用下再下沉量大。近年来采用充填液压支架和自压式充填机进行采空区充填,充填体自充自压的过程增大了充填体的压实度,减小了荷载作用下充填体发生的再压缩量。

2.7 人工、机械设备因素

人工、机械设备因素主要指工人对充填工艺、规范的熟练程度、工人对充填工作的负责程度和充填机器设备的稳定性等因素造成充填体初始压实度较低,进而影响充填体的压缩率,但这些因素可以通过对工人培训、以及对设备和工艺流程的改进等措施减小该因素的影响程度。

上述因素中一些是地质采矿因素,一些是充填过

程中充填质量因素,对于充填质量因素在充填过程中可以加以控制,对于地质采矿因素需要进行不同方法的模拟研究,以及在长期的开采实践中得到这些因素与充填体压缩率的相互关系。

3 充填体压缩率数值模拟研究

数值模拟可以很好的分析各种采矿条件下覆岩应力及移动变化的变化规律,为了进一步研究固体充填条带开采充填体压缩率的影响因素,结合该矿实际情况运用数值模拟软件对充填体压缩率影响因素定量分析,找出各影响因素与压缩率的关系。

3.1 矿区概况

某矿区域内铁路、城区、村庄密集,“三下”压煤问题严重影响了矿区的产量和生产接替,开采“三下”压煤已经成为该矿的必然选择。因此,该矿在井田范围内的铁三采区开展固体充填开采。

铁三采区地层沉积较稳定,岩性变化不大,采区走向长约 1750 m,倾向长约 1150 m。采区内共同 5 个可采煤层,该矿在 8#煤层开展了 T3281N 试采面的固体充填,2013 年 8 月已充填开采完毕,现正在开展 9#煤层固体充填条带开采,后续将进行 12-1#煤层和 12-2#煤层的固体充填条带开采。

3.2 固体充填条带分析模型

根据该矿铁三采区煤系地质条件,选取有限差分软件 FLAC^{3D} 进行数值模拟分析,建立固体充填条带开采充填体压缩率数值模拟分析模型(图 2)。

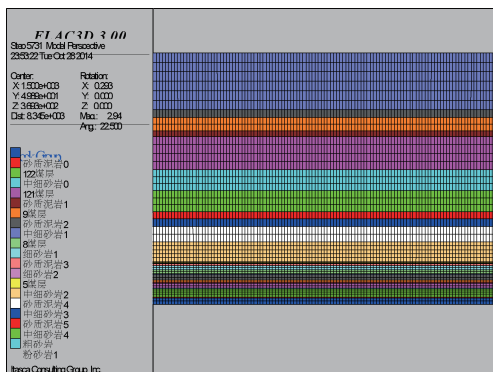


图 2 数值模拟分析模型

Fig. 2 Analytical model of numerical simulation

分析模型按该矿铁三区的实际地层进行分层,在确定各岩层力学性质时,结合铁三区 5#煤层、8#煤层条带开采和固体充填试采面开采的地表移动观测站资料进行各岩层的力学参数反演,综合确定了覆岩的力学参数(表 1)。

表 1 岩层力学性质参数

Table 1 Mechanical property parameters of strata

岩层名称	弹性模量 /GPa	泊松比 μ	粘聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
表土层	0.15	0.3	0.10	0	17	1900
粉砂岩	21.9	0.25	4.93	2.47	29	2600
中粗砂岩	14.5	0.23	4.12	1.96	33	2630
腐泥质泥岩	6.5	0.32	2.05	1.1	30	2200
中细砂岩	16.4	0.23	4.4	2.06	33	2540
煤	3.3	0.33	1.2	0.64	25	1440
细砂岩	19.5	0.22	4.66	2.25	34	2500
砂质泥岩	9.38	0.32	2.52	1.3	30	2320

数值分析模型中覆岩及煤层的本构模型采用摩尔-库仑模型,考虑固体充填体在覆岩压力作用下其特性的不断变化,因此充填体采用双屈服模型。模型在煤层倾向 1200 m 范围内设计充填条带开采,其左右边界建立至覆岩移动的边界范围以外,上边界建立至地表。

3.3 模拟方案

根据对充填体压缩率的影响因素分析,充填体压缩率与煤层采厚、采深、充留宽度、覆岩岩性等因素有关。在上述分析的基础上,结合该矿的工程地质条件,选择不同充留宽度长度、采深和覆岩岩性为主要考虑因素,定量的分析各因素对充填体压缩率的影响。

试验采用单因素分析方法,逐个分析不同充留宽度长度、采深和覆岩岩性对固体充填条带开采充填体压缩率的影响。

(1)方案 1:模拟采深为 750 m、采厚为 5 m、采出率为 50%、充填率为 100% 时,充填工作面和留设煤柱宽度分别为:40 m、60 m、100 m、120 m、150 m、200 m,共六个方案;

(2)方案 2:模拟采厚为 5 m、采出率为 50%、充填率为 100%、充留宽度为 100 m 时,煤层采深分别为:150 m、300 m、450 m、600 m、750 m,共 5 个方案;注:采深的模拟按照同比例对各岩层厚度进行改变,保持岩层原有的层系结构。

(3)方案 3:模拟采深为 750 m、采厚为 5 m、采出率为 50%、充填率为 100%、充留宽度为 100 m 时,上覆各岩层岩性在初始模型岩性的基础上折减,折减系数分别为:0.33、0.5、1、1.5、2,共 5 个方案。

3.4 模拟结果

3.4.1 方案 1 模拟结果与分析

通过数值模拟,得到了不同充留宽度时充填体的压缩率,其值变化见图 3。

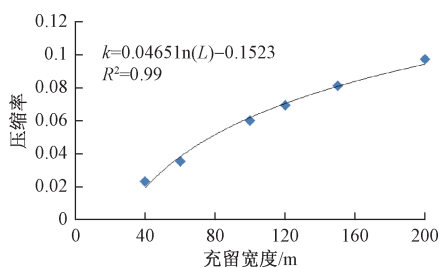


图3 充留宽度与压缩率的关系

Fig.3 The relations of width and compression ratio

分析图3可以得到固体充填条带开采时充留宽度不同时,充填体压缩率变化的一些规律:

(1)随着充填宽度的增大,充填体的压缩率也不断增大,两者之间符合对数关系,对模拟数据进行回归,得到压缩率 k 与充留宽度 L 的关系为:

$$k = 0.0465 \ln(L) - 0.1523 \quad R^2 = 0.99 \quad (3)$$

(2)当充留宽度为 40 m 时,充填体的压缩率为 0.023,此时留设煤柱对覆岩的有较大的支撑力;当充留宽度增大到 200 m 时,充填体的压缩率为 0.097,压缩率值有较大的提高,此时,更多的覆岩压力作用在充填体上,使充填体压缩率较大。

3.4.2 方案2模拟结果与分析

通过数值模拟,得到了不同采深时充填体的压缩率,其值变化见图4。

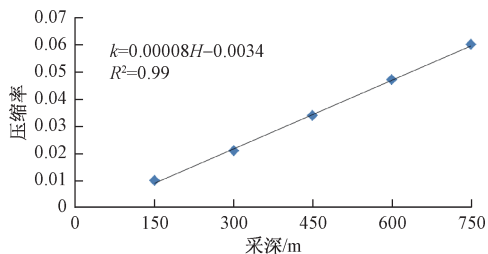


图4 采深与压缩率的关系

Fig.4 The relations of mining depth and compression ratio

分析图4可以得到固体充填条带开采深度不同时,充填体压缩率的一些变化规律:

(1)充填体压缩率随着采深的增大也随之增大,两者之间符合线性关系,对模拟数据进行回归分析,得到压缩率 k 与采深 H 之间的关系为:

$$k = 0.00008H - 0.0034 \quad R^2 = 0.99 \quad (4)$$

(2)当采深为 150 m 时,充填体压缩率为 0.010,此时,上覆岩层的自重应力较小,作用在充填体上压力也较小;随着采深的增加,覆岩对充填体的压力增大,使充填体压缩率较大,因此,当采深为 750 m 时充填体充填率达到 0.06。

3.4.3 方案3模拟结果与分析

通过数值模拟,得到了不同覆岩岩性时充填体的压缩率,其值变化见图5。

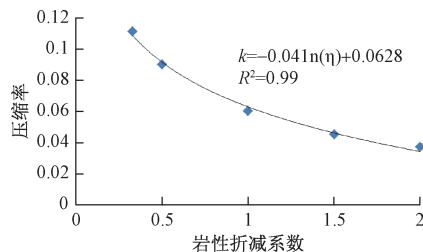


图5 岩性折减系数与压缩率的关系

Fig.5 The relations of the reduction factors of rock properties and compression ratio

分析图5,可以得到充填体压缩率随覆岩岩性变化的一些规律:

(1)充填体压缩率随着覆岩岩性折减系数的增大而减小,两者之间符合对数关系,对模拟数据进行回归分析,得到压缩率 k 与折减系数 η 之间的关系为:

$$k = -0.041 \ln(\eta) + 0.0628 \quad R^2 = 0.99 \quad (5)$$

(2)当岩性折减系数为 0.33 时,充填体压缩率为 0.111,此时,覆岩岩性较弱,覆岩连续破断,煤柱对覆岩的支撑效果减弱,造成作用在充填体上的压力较大,从而产生较大的压缩率;当岩性折减系数为 2 时,此时覆岩岩性较硬,因此,充填体压缩率为 0.037。

4 实例分析

该矿在铁三区8煤层进行了T3281N试采面的固体充填,以确定各项充填参数,T3281N工作面平均采深725 m,工作面宽度为118 m,则由式(3)和式(4)综合可得出,充填体的压缩率 k 为 0.067。试采面平均采厚为 3.7 m,实测充填前顶底板移近量 h_d 平均为 0.255 m,充填综采欠接顶量 h_w 平均为 0.06 m,则由公式(1)可计算出等效采厚为 0.54 m。

参考该矿薄煤层概率积分法预计参数,应用编制的概率积分法预计软件进行地表沉陷预计,预计得到地表最大下沉值为 110 mm。到目前为止,试采面上方观测站进行了多期水准观测,由于观测的误差和观测站设站缺陷,实测到的数据与预计值有一定的偏差,整理并剔除偏差较大的数据,实测数据整体与预计结果相符,其中部分测点实测值与预计值见表2。

表 2 试采工作面地表下沉实测值与预计值比较

Table 2 Contrast the measured value and prediction value for surface subsidence with trial mining working face

点号	实测值 /mm	预计值 /mm	点号	实测值 /mm	预计值 /mm
N10	-17	-34	N17	-12	-15
N11	-26	-32	W4	-25	-23
N12	-15	-31	W5	-26	-28
N13	-24	-27	W7	-21	-33
N16	-14	-16	W12	-7	-5

5 结论

(1)在应用等效采厚法分析充填条带开采时矿山压力、覆岩移动与地表沉陷等问题时,压缩率是求取等效采厚的关键因素,其值的选取影响着上述问题的准确分析。通过分析可总结出,压缩率的影响因素可从地质采矿条件因素和充填质量因素方面考虑。

(2)结合该矿实际地质采矿条件,运用 FLAC^{3D}数值模拟软件重点分析并得到了充留宽度、采深、覆岩岩性与充填体压缩率的关系。对于实际开采过程中,应根据不同因素与压缩率的相互关系,综合确定不同开采条件下的充填体压缩率,准确的确定等效采厚值,对于分析不同充填条带开采条件下的矿山压力、覆岩移动与地表沉陷有重要意义。

(3)当充填条带宽度越小,巷道掘进量和工作面搬家倒面的次数越多,造成充填工作量越大,因此,在实际条带设计中应充分考虑地表建筑物的设防标准,以设防标准来设计充填条带的相应参数,充分考虑各影响因素,合理的对充填体粒径进行配比,并合理的选取充留宽度,达到工作量与控制地表沉陷最优化。

参考文献:

- [1] 缪协兴,张吉雄. 矸石充填采煤中的矿压显现规律分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4): 379-382.
- MIAO Xiexing, ZHANG Jixiong. Analysis of strata behavior in the process of coal mining by gangue backfilling [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(4): 379-382.
- [2] 郭广礼,缪协兴,查剑锋,等. 长壁工作面矸石充填开采沉陷控制效果的初步分析[J]. 中国科技论文在线, 2008, 3(11): 806-809.

GUO Guangli, MIAO Xiexing, ZHA Jianfeng, et al. Preliminary analysis of the effect of controlling mining subsidence with waste stow for long wall workplace[J]. Sciencepaper Online, 2008, 3(11): 806-809.

- [3] 苏仲杰,黄厚旭,赵松,等. 基于数值模拟的充填开采地表下沉系数分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(2): 98-102.
- SU Zhongjie, HUANG Houxu, ZHAO Song, et al. Numerical simulation analysis of surface subsidence coefficient of filling mining[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(2): 98-102.
- [4] 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): 42-45.
- XU Doudou, GUO Guangli, LI Shuai, et al. Numerical simulation on the backfilling effect by compression rate of gangue backfilling [J]. Metal Mine, 2011(3): 42-45.
- [5] 郭文兵. 深部大采宽条带开采地表移动的预计[J]. 煤炭学报, 2008, 33(4): 368-372.
- GUO Wenbing. Surface movement predicting problems of deep strip pillar mining [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(4): 368-372.
- [6] 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): 336-340.
- LIU Yixin, DAI Huayang, GUO Wenbing. Surface movement laws of deep wide strip-pillar mining under thick alluvium [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(3): 336-340.
- [7] 袁坚,冯涛,刘金海,等. 条带采宽及留宽对地表沉陷影响的研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(1): 88-91.
- YUAN Jian, FENG Tao, LIU Jinhai, et al. Effect of mining width and retaining width on ground subsidence [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(1): 88-91.
- [8] 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.
- ZHANG Jixiong, MIAO Xiexing, GUO Guangli. Development status of backfilling technology using waste in coal mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(4): 395-401.

(下转第 139 页)