

基于数值模拟的充填开采地表下沉系数分析

苏仲杰¹, 黄厚旭¹, 赵松¹, 胡亚净²

(1. 辽宁工程技术大学 土木与交通学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 充填开采是解放“三下”压煤的重要手段。为了研究充填体强度对充填开采时下沉系数的影响, 本文以本溪彩屯矿的充填开采实践为基础, 结合工程实际建立了 FLAC3D 数值模型并对充填开采地表下沉系数进行了模拟分析, 得到了不同强度充填时对应的地表下沉特征和充填开采时充填体强度与地表下沉系数之间的一般关系。通过改变充填体弹性模量得到了相应的等效采厚比和地表下沉系数, 通过多项式拟合建立了等效采厚比和地表下沉系数两者之间的函数关系, 并给出了相关参数的参考值, 为预测充填开采的地表下沉系数提供了依据。

关键词: 充填开采; 等效采厚比; 地表下沉系数; FLAC3D; 多项式拟合

文章编号: 1003-8035(2014)02-0098-05

中图分类号: TD8

文献标识码: A

0 引言

截止 1996 年我国“三下”压煤量高达 $137.9 \times 10^8 \text{ t}^{[1-2]}$, 随着村镇规模的扩大和新矿井的建设, 目前压煤量远高于这一数字。面对我国紧张的能源局势解放“三下”压煤迫在眉睫。传统的开采方法易造成严重地表破坏^[3]。充填开采是使煤炭行业转入绿色发展道路的重要途径, 但目前对充填开采地表下沉系数的研究较少。传统的研石和水砂充填使用较多, 人们在工程实践中积累了一定的经验, 而高水膨胀材料充填是近年来才开始使用的一种新充填技术, 其减沉效果目前在理论方面缺少研究。本文基于彩屯矿的充填开采实践, 通过 FLAC3D 数值模拟对高水充填开采地表下沉系数进行了一定的研究。

1 模型参数的选取及建立

1.1 计算基本参数的选取

彩屯矿位于辽宁省本溪市。采取高水膨胀材料充填开采, 采区平均走向长 750m, 平均倾向长 660m, 工作面沿走向推进, 保护煤柱周围采空区都经历了 30 年以上的压实时间。开采技术条件如表 1, 煤岩层顶底板组成及物理力学参数如表 2。

表 1 保护煤柱开采技术条件

Table 1 Protective coal pillar condition

煤层	采厚(m)	煤层倾角(°)	采深(m)
七煤层	2.0	15	434~537

1.2 计算模型的建立

根据规范^[4], 考虑该矿区地表变形移动角和边

界角等因素确定模型走向长 1440m, 倾向长 1350m。

表 2 煤岩力学参数

Table 2 Coal mechanical paraments

岩层	密度 (kg/m^3)	厚度 (m)	弹性 模量 (GPa)	泊松比	内摩擦 角(°)	内聚力 (MPa)	抗拉 强度 (MPa)
沙质泥岩	1260	5	0.3	0.41	17	0.05	0.01
砂岩	2100	280	26.0	0.28	38	9.6	2.2
泥岩	2260	120	15.0	0.26	24	4.5	2.0
砂质页岩	2210	100	45.0	0.30	25	10.4	4.1
粗粒砂岩	2560	80	30.0	0.28	40	10.2	3.5
细粒砂岩	2430	18	28.6	0.28	40	12.4	3.8
煤层	1314	2	0.85	0.31	20	3.8	1.2
围岩	2200	2	21.0	0.26	37	10.8	1.5
石英砂岩	2600	30	38.8	0.25	42	16.5	4.9
砂质页岩	2580	170	48.7	0.27	27	13.6	4.6

1.3 模型屈服准则及边界条件假设

本次模拟采用 FLA3D 软件和摩尔-库伦屈服准则。即: $\tau_f = \sigma \tan \varphi + c$; τ_f 为抗剪强度, σ 为岩土体某点所受正应力, φ 为岩土体摩擦角, c 为岩土体内聚力。

1.4 模型假设

- (1) 同一岩土层为性质均一的弹塑性体;
- (2) 当岩土层中含夹薄层时仍视为一个岩土层;
- (3) 根据地质条件分析, 该采区不受断层等地质

收稿日期: 2013-03-31; 修订日期: 2013-04-28

基金项目: 辽宁省教育厅重点实验室支持计划(2008S107)

作者简介: 苏仲杰(1960—), 男, 教授, 博导, 省重点实验室主任, 主要从事开采沉陷治理及岩石力学方面的教学研究工作。

E-mail: Suzhong_jie@163.com

构造和地下水的影响;

(4)将三个工作面简化为规则的四边形。

1.5 模型边界条件和初始条件

(1)模型倾向为 x 方向,对倾向两侧面施加 x 方向的应力,以等效边界约束和地应力;

(2)模型走向为 y 方向,对走向两侧面施加 y 方向的应力,以等效边界约束和地应力;

(3)约束模型底面 z 方向的位移;

(4)在得到初始地应力的基础上实施开采充填。

本次模拟了三种充填方案:低强度充填、中强度充填、高强度充填,低强度充填体参数参考矸石充填体强度^[5-7],高强度充填体参数参考高水膨胀材料强度,中强度充填体参数取二者平均值,此处指广义强度包括强度和刚度。充填体力学参数如表 3。

表 3 充填体特性

Table 3 Properties of the backfilling body						
充填体	密度 (Kg/ m ³)	弹性 模量 (GPa)	泊松比	内摩擦 角(°)	内聚力 (MPa)	抗拉 强度 (MPa)
低强度充填体	1080	0.4	0.35	15	1.8	0.3
中强度充填体	1225	1.9	0.33	18	2.8	0.6
高强度充填体	1370	3.4	0.30	20	3.8	0.9

最终得到 FLAC3D 模型如图 1。

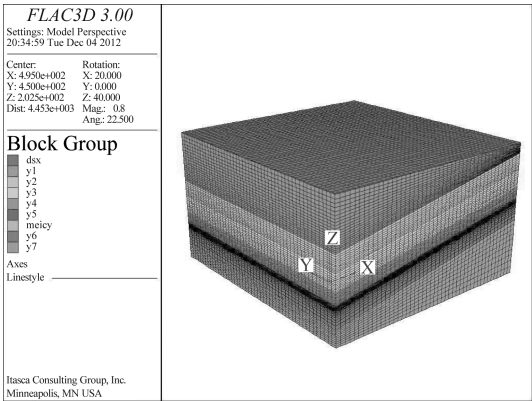


图 1 FLAC3D 模型

Fig. 1 FLAC3Dmodels

2 数值模拟结果分析

将采用不同强度充填体进行充填开采时地表变形的竖向位移提取出来并将其转化为三维地表下沉模型图(图 2~图 4)。从图 2~图 4 可以看出无论采用何种强度的充填体进行充填开采时地表都会出现中间低而四周高的盆状,这与开采沉陷理论相符并在彩屯矿现场观察到的情况是基本一致的。

如图 2 所示当采用低强度充填体进行充填开采时地表变形明显,盆地中心下沉值最大(超过 0.4m)但盆地中心范围狭小而尖锐,在三维图上的盆地形状表现出明显的“开口小、底部尖、深度大”的特点。这说明较低强度的充填体无法有效的减小地表沉陷深度。

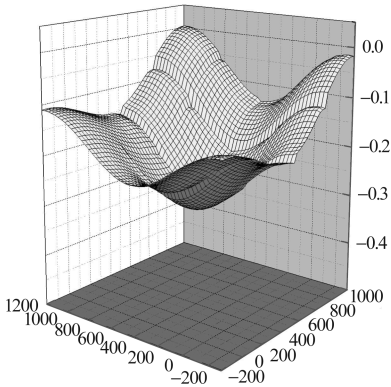


图 2 低强度充填时三维地表下沉

Fig. 2 3-D subsidence value of the ground with low strength backfilling body

当采用中强度充填体进行充填开采时地表变形比采用低强度充填体时明显有所减小(图 3)。此时盆地中心的最大下沉值小于 0.2m,比图 2 中最大下沉值减小了 0.2m 以上,而盆地的开口和中心范围相比于图 2 中均有所增大,即随着充填体强度的增大盆地的开口和平底范围有所增长但深度却减小了。

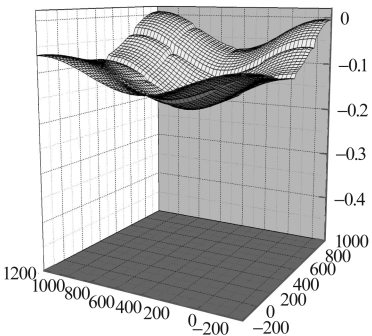


图 3 中强度充填时三维地表下沉

Fig. 3 3-D subsidence value of the ground with medium strength backfilling body

如图 4 所示当采用高强度充填体进行充填开采时,相比于前两个地表沉陷三维图此时的地表沉陷变形不再明显,图 4 中的最大下沉值仅为 0.05m,比图 2 和图 3 中的地表最大下沉值分别减小了 0.35m 和 0.15m,但此时盆地的平底范围却比图 2 和图 3 中都要大,地表沉陷三围图的形状不再尖锐,表现出随着

充填体强度的进一步增长盆地的开口范围和平底范围进一步扩大,但深度也进一步减小,即在高强度充填体充填开采时表现出明显的“开口大、底部平、深度小”的特点。

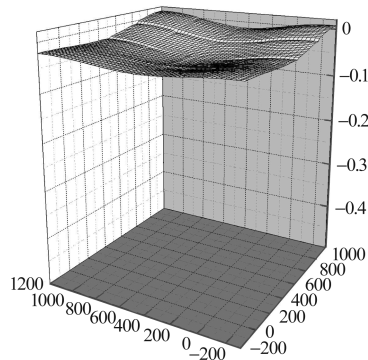


图 4 高强度充填时三维地表下沉
Fig. 4 3-D subsidence value of the ground with high strength backfilling body

从图 2 ~ 图 4 可以看出,随着充填体强度的增加,地表最大下沉值逐渐减小,三维沉陷盆地的开口范围和底部范围都不断增加。通过增大充填体的强度能有效的减小地表最大下沉值但地表沉陷变形的范围却逐渐增大了。所以应该根据控制地表变形的实际需要采用不同强度的充填体进行充填开采。

3 充填开采与等效采厚比的关系分析

不同强度充填和垮落法开采时的最终下沉值及对应地表下沉系数如表 4。充填开采地表下沉系数计算式为:

$$q_c = W_{max} / M \cos \alpha$$

式中: q_c ——充填开采下沉系数;

W_{max} ——地表下沉最大值;

M ——煤层采厚;

α ——煤层倾角。

表 4 不同开采方法的地表下沉和地表下沉系数

Table 4 The ground subsidence value and its coefficient of the different mining method

充填方法	$m(\text{mm})$	$\alpha(^{\circ})$	W_{max} (mm)	等效采 厚比 ΔZ (%)	地表下 沉系数 q_c	$q_c / \Delta Z$
低强度充填	2000	15	308.59	37.03	0.1597	0.431
中强度充填	2000	15	180.76	20.19	0.0936	0.464
高强度充填	2000	15	48.13	5.16	0.0249	0.483
垮落法	2000	15	1294.34	—	0.67	—

从表中可以看出, $q_c / \Delta Z$ 大概为一常数。垮落

法开采的地表下沉系数,主要是根据实践中的地表沉降监测值和煤层采厚等参数计算得到,它已经考虑了垮落法开采时开采沉陷体系(开采沉陷所涉及的地质条件和工艺等)对地表下沉系数的影响。而充填开采相对于垮落法开采,开采沉陷体系中增加了充填体和充填工艺对地表下沉系数的影响,这两个影响因素可以通过等效采厚比(ΔZ)加以考虑。等效采厚比的计算式为

$$\Delta Z = \frac{M_e}{M} = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{M}$$

式中: M_e ——煤层的等效采出厚度;

M ——煤层真实采厚。

煤层的等效采出厚度包括:充填完成时充填体与顶板间的空隙(U_1)、充填前顶底板移近量和煤壁压缩量(U_2)、充填体压缩量(U_3)。等效采厚比有一定的适用范围,此处等效采厚比的适用范围为: $0.04 \leq \Delta Z \leq 0.07$ 。

为进一步研究充填开采地表下沉系数与等效采厚比之间的关系,在不改变地质条件的前提下以上述高强度充填体为原型通过改变其弹性模量进行数值模拟得到了充填开采地表下沉系数和等效采厚比的数据如表 5,表中 q 为垮落法开采的地表下沉系数(通过观察彩屯矿垮落法开采的地表下沉系数 $q = 0.67$)。

表 5 充填体强度和地表下沉系数

Table 5 Backfilling body's strength and the corresponding ground subsidence coefficient

充填 体序号	弹性模量 (GPa)	W_{max} (mm)	ΔZ	$\Delta Z \times q$	q_c	拟合值 q_c
1	2.6	60.7250	0.0681	0.0456	0.0314	0.0315
2	2.7	58.1470	0.0646	0.0433	0.0301	0.0302
3	2.8	55.9410	0.0619	0.0415	0.0290	0.0291
4	2.9	54.1440	0.0596	0.0399	0.0280	0.0282
5	3.0	52.5810	0.0578	0.0387	0.0272	0.0275
6	3.1	51.3460	0.0554	0.0371	0.0266	0.0265
7	3.2	50.1010	0.0545	0.0365	0.0259	0.0262
8	3.3	49.0700	0.0525	0.0352	0.0254	0.0254
9	3.4	48.1270	0.0516	0.0346	0.0249	0.0250
10	3.5	47.1820	0.0507	0.0340	0.0244	0.0247
11	3.6	46.5470	0.0497	0.0333	0.0241	0.0242
12	3.7	45.1300	0.0478	0.0320	0.0234	0.0235

将表 5 中充填体的弹性模量和对应的地表最大下沉值绘成散点图并进行多项式拟合如图 5。

从拟合曲线可以看出随着充填体的强度增加地表最大下沉值将逐渐减小,且以弹性模量约为

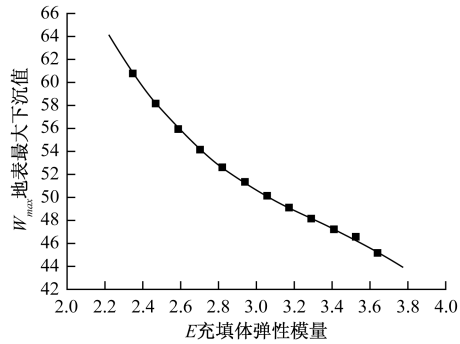


图 5 地表最大下沉值随充填体弹性模量变化图

Fig. 5 The variation of maximum subsidence value with the filling body elastic modulus

3.0GPa 为最大下沉值减小速度的分界点,曲线的下降表现出明显的“前急后缓”趋势。说明当充填体的弹性模量较小时通过增大弹性模量来减小地表的最大下沉值效果比较明显,但当弹性模量达到一定值时再通过增大充填体的弹性模量来减小地表最大下沉值效果将有所减弱。

将等效采厚比与垮落法开采地表下沉系数的乘积作为横坐标,以充填开采地表下沉系数为纵坐标,将数据绘于图 6 并进行多项式拟合,得到了其函数关系式(公式 3),同时给出了相关系数的参考值。

$$q_c = K_1 \times \Delta z \times q + K_0 = 0.59267 \times \Delta z \times q + 0.00439 \quad (3)$$

式中: q_c ——充填开采的地表下沉系数;

K_1, K_0 ——系数,参考值分别为 0.59267、0.00439。

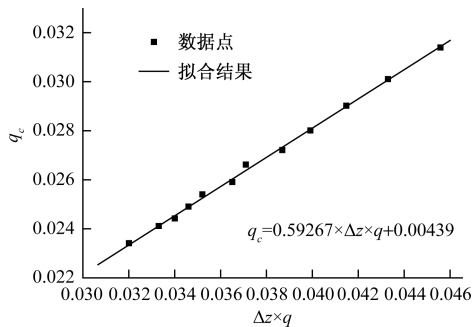


图 6 q_c 与 $\Delta z \times q$

Fig. 6 q_c and $\Delta z \times q$

垮落法开采时地表的下沉系数 q 是一个受诸多因素影响的值,在同一矿区一般当作定值处理(如在彩屯矿垮落法开采的地表下沉系数 $q = 0.67$),而不同矿区的 q 值一般不同。从图 6 可知在同一矿区充填开采的地表下沉系数随等效采厚比的增大近似呈

线性增长,在没有进行过充填开采实践的矿区可以根据垮落法开采的下沉系数以及等效采厚比来初步预测该矿区进行充填开采时的地表下沉系数,等效采厚比是影响充填开采效果的关键因素之一,减小等效采厚比能优化充填开采的减沉效果。

4 结论

(1)地表最大下沉值随着充填体强度的增加而减小,但减小的幅度随着充填体强度的增加并不相同。当充填体强度较小时,增加充填体强度能明显的减小地表沉陷,当充填体强度超过一定值时减沉效果不再明显。

(2)当充填体的强度逐渐增加时,地表下沉盆地的深度减小,下沉盆地的范围却不断增大,实践中应根据减沉的具体需要进行充填体强度的选择。

(3)将同一矿区等效采厚比与垮落法开采地表下沉系数的乘积和充填开采地表下沉系数进行了多项式拟合,建立了两者之间的函数关系式,并给出了相关参数的参考值。通过该多项式可以由垮落法开采时的地表下沉系数以及等效采厚比初步预测在某矿区进行充填开采时的地表下沉系数。

(4)为了使由等效采厚比计算得到的充填开采地表下沉系数更为准确,更好的为实际工程服务,实践中应根据地表移动变形的监测数据,对函数关系式 3 中的相关参数进行优化和修改,进而建立并完善适合各矿区自己的参数系统。

参考文献:

- [1] 当代世界煤炭工业课题组. 当代世界煤炭工业发展趋势[J]. 中国煤炭, 2011, 37(3): 119-124.
The modern world coal industry group. The modern world coal industry development trend[J]. China Coal, 2011, 37(3): 119-124.
- [2] 常庆粮. 膏体充填控制覆岩变形与地表沉陷的理论研究与实践[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
CHANG Qingliang. Research on theory and practice of mining induced overlying strata deformation and surface subsidence with paste backfilling[D]. XuZhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [3] 陈俊杰, 陶宛东, 黄成飞. 巨厚松散层下开采地表损害机理研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(1): 51-55.
CHEN Junjie, TAO Wandong, HUANG Chengfei. Study on

- surface damage mechanism of mining under thick alluvium [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(1): 51–55.
- [4] 金连生, 牟金锁. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
- JIN Liansheng, MOU Jinsuo. Buildings, water, railway and main shaft and leaving coal pillar and press coal mining regulations [S]. Beijing: Coal Industry Publish House, 2000.
- [5] 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): 805–809.
- GUO Guangli, MIAO Xiexing, CHA Jianfeng, et al. Preliminary analysis of the effect of controlling mining subsidence with waste stow for long wall workface [J]. Sciencepaper Online, 2008, 3(11): 805–809.
- [6] 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 raw waste in coal mining [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2009, 26(4): 395–401.
- [7] 余伟健, 王卫军. 矸石充填整体置换“三下”煤柱引起的岩层移动与二次稳定理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 105–112.
- YU Weijian, WANG Weijun. Strata movement induced by coal-pillar under three circumstance exchanged by gangue backfill and quadratics stability law [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 105–112.

Numerical simulation analysis of surface subsidence coefficient of filling mining

SU Zhong-jie¹, HUANG Hou-xu¹, ZHAO Song¹, HU Ya-jing²

(Liaoning technical university, School of civil engineer and transportation, Fuxin 123000, China;

2. No. 1 Institute of geological & mineral resources survey of Henan, Luoyang 471023, China)

Abstract: Filling mining was an important means to liberate the “three under” coal, In order to study the impact of the strength of filling body to the subsidence coefficient of filling mining, this study based on the filling mining practice of BenXi Cai Tung mine, the numerical model based on FLAC3D was established combined with practical engineering, And the surface subsidence coefficient of the filling mining was carried out based on simulation analysis, characteristics of surface subsidence coefficient corresponding to different filling intensity was gotten, the corresponding equivalent mining thickness ratio and the coefficient of surface subsidence were obtained by changing the filling body elastic modulus and general relation between the strength of filling body and the coefficient of surface subsidence was obtained Equivalent mining thickness ratio by polynomial fitting and the function relation between the surface subsidence coefficient and equivalent mining thickness ratio were established. The related parameters for reference was given, a certain reference for predicting the surface subsidence coefficient in filling mining was provided.

Key words: backfilling mining; equivalent mining thickness ratio; ground subsidence coefficient; FLAC3D; polynomial fitting