

doi:10.3969/j.issn.1001-358X.2016.04.018

开采沉陷

## 基于空间等效效应的下沉系数计算方法研究

张广伟<sup>1,2</sup>, 方军<sup>1</sup>

(1. 中煤科工集团唐山研究院有限公司, 河北唐山 063012;

2. 煤炭科学研究总院, 北京 100013)

**摘要:**文中根据空间等效效应,利用随机介质理论证明了下沉系数与地表沉陷体积和开采空间体积比之间的等效关系,研究了下沉系数的近似计算方法,并进行了实例分析。结果表明:在无实测资料情况下,本文方法能够满足工程应用。

**关键词:**下沉系数;空间等效效应;随机介质

中图分类号:TD73

文献标识码:A

文章编号:1001-358X(2016)04-0066-03

## The calculation method of subsidence coefficient based on the rule of space equivalence

Zhang Guangwei<sup>1,2</sup>, Fang Jun<sup>1</sup>

(1. Tangshan Branch of China Coal Research Institute, Tangshan, 063012, China;

2. China Coal Research Institute, Beijing, 100013, China)

**Abstract:** According to the rule of space equivalence, the equivalent relationship between the subsidence coefficient and the volume ratio is proved with the theory of stochastic medium. Then, the approximate calculation method of subsidence coefficient is given and used in the example. The result shows that the method in this paper can satisfy the engineering application when there is no measured data.

**Keywords:** subsidence coefficient; the rule of space equivalence; stochastic medium

下沉系数是预测地表沉陷的关键参数之一,目前在预计参数的确定方面主要有两种方法:一是基于实测资料的参数反演<sup>[1-5]</sup>;二是无实测资料条件下的参数求解。由于实测资料条件下的求参,周期长、成本高,实际应用不多<sup>[6]</sup>。无实测资料求参目前,主要有经验公式法<sup>[7]</sup>、基于相似第二定理的方程分析法<sup>[8]</sup>、神经网络法<sup>[9]</sup>、模矢法<sup>[10]</sup>、模糊识别算法<sup>[11]</sup>以及其它优化算法等。但上述方法在进行参数求取时,不仅操作起来较为复杂,而且需要人为提供经验初值,初值的可靠性在很大程度上影响着求参的准确性。

本文将利用开采沉陷中的空间等效效应,探讨无实测资料条件下的下沉系数求解方法。

### 1 开采沉陷过程中的空间等效效应

煤层的开采使得原岩应力遭到破坏,应力重分

布,岩体产生移动变形进而波及到地表,并在地表形成下沉盆地,随着开采空间的不断扩大,下沉盆地的空间范围不断扩大。直到破断垮落的覆岩堆积形成具有支撑作用的砌体结构,抑制了岩体的移动变形,并最终使下沉盆地范围趋于稳定。这种地表沉陷空间 $V_{沉}$ 与井下开采空间 $V_{采}$ 之间的相对关系就称为开采沉陷的空间效应。

假设地表沉陷空间的体积为 $V_{沉}$ ,则其在采动过程中的变化可表示为如下公式:

$$V_{沉} = f(V_{采}, V_{悬}, V_{碎}, V_{损}) \quad (1)$$

式中: $V_{沉}$ 为地表沉陷空间体积; $V_{采}$ 为开采空间体积; $V_{悬}$ 为悬臂空间体积; $V_{碎}$ 为垮落岩块碎胀体积; $V_{损}$ 为岩体损伤(离层或裂缝)发育空间。

上式说明,地表沉陷空间是与地下开采空间、悬臂空间、采场碎胀空间和覆岩离层空间息息相关的,

引用格式:张广伟,方军.基于空间等效效应的下沉系数计算方法研究[J].矿山测量,2016,44(4):66-68,118.

相互之间处于一个动态的变化过程之中,刚开始开采空间主要转化为悬臂空间,使得地表沉陷空间较小;随着工作面的推进,顶板垮落,岩块在采场堆积,覆岩的挠曲程度加深,但由于开采尺寸仍然较小,加上岩层的非均质性,在覆岩内部形成一定离层空间,此时,开采空间主要转化为悬臂空间、离层空间和碎胀空间;随着工作面的持续推进,采场及覆岩形成“双梁”结构,开采空间通过“双梁”结构向上转化为地表沉陷空间,当离层空间闭合,覆岩呈协调变形时,开采空间向地表沉陷空间的转化能力达到最强,下沉系数也逐渐增大,当达到充分采动条件时,下沉系数达到最大。

## 2 下沉系数与体积比关系函数推导

开采沉陷的空间效应可用如下公式表示:

$$\frac{V_{\text{沉}}}{V_{\text{采}}} = \text{常量} \quad (2)$$

式(2)的含义是在某一地质采矿条件下,开采空间所对应的最大地表沉陷空间是固定的。根据空间的等效性,当地下开采空间  $V_{\text{采}}$  完全转化成地表沉陷空间  $V_{\text{沉}}$  时,则体积比为 1。但实际开采中,由于开采空间受到冒落岩体碎胀空间、煤壁四周悬臂空间以及覆岩离层空间等的占用,地表沉陷空间要小于地下开采空间,即体积比  $V_{\text{沉}}/V_{\text{采}}$  小于 1。

下面将以随机介质理论为依据,推导下沉系数  $q$  与体积比  $V_{\text{沉}}/V_{\text{采}}$  之间的函数关系。

设开采厚度为  $m$  的矩形水平煤层工作面,沿走向开采长度为  $x_1x_2$ ,沿倾向方向开采长度为  $y_1y_2$ ,则根据克诺特教授研究成果并结合前章的分析可知,地表任意点  $A(x,y)$  的下沉计算公式如下:

$$W_A(x,y) = mq \left( \frac{1}{r} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\pi(\frac{z}{r})^2} dx \right) \left( \frac{1}{r} \int_{y_1}^{y_2} e^{-\pi(\frac{z}{r})^2} dy \right) \quad (3)$$

则地表沉陷空间的体积  $V_{\text{沉}}$  可按下式计算:

$$V_{\text{沉}} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_A(x,y) dx dy \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)可得,

$$\begin{aligned} V_{\text{沉}} &= mq \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{r} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\pi(\frac{z}{r})^2} dx \right) dx \right] \times \\ &\quad \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{r} \int_{y_1}^{y_2} e^{-\pi(\frac{z}{r})^2} dy \right) dy \right] \\ &= mq \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{x_1}^{x_2} \left( \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{\sqrt{\pi}}{r}x\right)^2} d\left(\frac{\sqrt{\pi}}{r}x\right) \right) dx \right] \times \end{aligned}$$

$$\left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{y_1}^{y_2} \left( \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{\sqrt{\pi}}{r}y\right)^2} d\left(\frac{\sqrt{\pi}}{r}y\right) \right) dy \right] \quad (5)$$

由于  $\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{\sqrt{\pi}}{r}x\right)^2} d\left(\frac{\sqrt{\pi}}{r}x\right) = \sqrt{\pi}$ ,将其代入到上式可简化为:

$$\begin{aligned} V_{\text{沉}} &= mq \left( \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{\pi} dx \right) \left( \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{y_1}^{y_2} \sqrt{\pi} dy \right) \\ &= mq(x_2 - x_1)(y_2 - y_1) \quad (6) \end{aligned}$$

而矩形采场的开采空间体积  $V_{\text{采}}$  可按下式计算:

$$V_{\text{采}} = (x_2 - x_1)(y_2 - y_1)m \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可知,

$$\frac{V_{\text{沉}}}{V_{\text{采}}} = q \quad (8)$$

式(8)说明,下沉系数  $q$  与体积比  $\frac{V_{\text{沉}}}{V_{\text{采}}}$  相等。

从式(1)可知,地表沉陷空间与地下开采空间、悬臂空间、采场碎胀空间和覆岩离层空间存在一定的关系,地表沉陷空间是地下开采空间的最终反映,在经过复杂的采动影响、覆岩的扰动变形和开采空间的不断传递之后,将有限的空间传递到地表。由此可见,地表沉陷的空间总是小于地下开采空间,而地表沉陷空间的体积可由地下开采空间、悬臂空间和采场碎胀空间近似计算,公式如下:

$$V_{\text{沉}} = V_{\text{采}} - V_{\text{悬}} - V_{\text{碎}} - V_{\text{离}} \quad (9)$$

式中:  $V_{\text{沉}}$  为地表沉陷空间体积;  $V_{\text{采}}$  为地下开采空间体积;  $V_{\text{悬}}$  为悬臂梁结构体下方残留空间体积;  $V_{\text{碎}}$  为因冒落岩体的碎胀而增加的空间体积;  $V_{\text{离}}$  为覆岩中离层空间的体积。

假定为矩形等厚采场,走向开采长度  $L_1$ ,倾向开采长度  $L_2$ ,采厚  $m$ ,则开采空间的体积  $V_{\text{采}}$  可由下式计算:

$$V_{\text{采}} = L_1 L_2 m \quad (10)$$

而开采空间转化成覆岩挠曲沉陷空间的体积可近似由下式计算:

$$V_{\text{可}} = (L_1 - S_1 - S_2)(L_2 - S_3 - S_4)m\varepsilon_{\text{采}}/k_{\text{碎}} \quad (11)$$

式中:  $V_{\text{可}}$  为覆岩可陷空间体积;  $L_1, L_2$  为沿走向和倾向开采长度;  $S_1, S_2, S_3, S_4$  为分别为走向和倾向拐点偏移距;  $m$  为开采厚度;  $\varepsilon_{\text{采}}$  为煤炭采出率;  $k_{\text{碎}}$  为冒落岩块碎胀系数。

当不考虑覆岩离层空间时,可近似认为地表沉陷空间体积  $V_{\text{沉}}$  与覆岩可陷体积  $V_{\text{可}}$  相等,即:

$$V_{\text{沉}} = V_{\text{可}} \quad (12)$$

将式(10)~式(12)代入到式(8),可得出:

$$q = K_q \frac{\varepsilon_{\text{采}}}{K_{\text{碎}}} \quad (13)$$

式中:  $K_q$  为空间相关系数,  $K_q = \frac{L_1 - S_1 - S_2}{L_1} \times \frac{L_2 - S_3 - S_4}{L_2}$ ; 式(13)即为下沉系数的近似计算公式。

### 3 实例分析

#### 3.1 充分采动条件实例

某一采区,走向长 1 000 m,倾向长 800 m,开采深度 500 m,开采厚度 5 m,煤炭采出率 90%,拐点偏移距系数  $S/H=0.05$ ,冒落岩体碎胀系数 1.1。

根据式(13)可近似计算出该地质采矿条件的下沉系数  $q$ :

$$q = \frac{1\,000 - 0.05 \times 500 \times 2}{1\,000} \times \frac{800 - 0.05 \times 500 \times 2}{800} \times \frac{0.9}{1.1} = 0.73$$

由于走向方向和倾向方向均达到充分采动条件(即  $L/H > 1.4$ ),该情况为充分采动。由计算结果可以看出,在采深 500 m 且考虑拐点的情况下,下沉系数达到 0.73。若不考虑拐点偏移距影响,充分或超充分采动时,  $K_q \approx 1$ ,其下沉系数能够达到 0.82。

#### 3.2 不充分采动条件实例

某一工作面,走向长 800 m,倾向长 200 m,开采深度 500 m,开采厚度 5 m,煤炭采出率 90%,拐点偏移距系数  $S/H=0.05$ ,冒落岩体碎胀系数 1.1。

根据式(13)可近似计算出该地质采矿条件的下沉系数  $q$ :

$$q = \frac{800 - 0.05 \times 500 \times 2}{800} \times \frac{200 - 0.05 \times 500 \times 2}{200} \times \frac{0.9}{1.1} = 0.57$$

由于开采未达到充分采动条件,此时的下沉系数较充分采动时的下沉系数偏小,由此可以看出,工作面开采尺寸对地表下沉系数影响较大,非充分采动时的下沉系数要小于充分采动时的下沉系数。

#### 3.3 极不充分采动实例实例

某一工作面,走向长 800 m,倾向长 60 m,开采深度 500 m,开采厚度 5 m,煤炭采出率 90%,拐点偏移距系数  $S/H=0.05$ ,冒落岩体碎胀系数 1.1。

根据式(13)可近似计算出该地质采矿条件的下沉系数  $q$ :

$$q = \frac{800 - 0.05 \times 500 \times 2}{800} \times \frac{60 - 0.05 \times 500 \times 2}{60} \times \frac{0.9}{1.1} = 0.12$$

计算结果与实际基本相符。由计算结果可以看出,极不充分采动条件下,地表下沉系数要远小于充分采动时的下沉系数,即地表沉陷量要远小于充分采动时的地表沉陷,对地表的破坏能力也远弱于充分采动。因此,通过缩小开采尺寸能够起到控制地表沉陷的作用。

### 4 结论

本文通过对开采沉陷中空间变化关系的分析,研究了无实测资料条件下下沉系数的计算方法,主要结论如下:

- (1) 利用随机介质理论证明了下沉系数与体积比之间的等价关系;
- (2) 下沉系数可由拐点偏移距、开采尺寸、采出率和岩体碎胀系数近似计算;
- (3) 开采尺寸越小,下沉系数越小,地表移动变形越不充分,因而可以通过控制开采尺寸达到控制地表沉陷的目的。

#### 参考文献:

- [1] 邹友峰,邓喀中,马伟民. 矿山开采沉陷工程[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2003.
- [2] 王明柱,郭广礼,王磊,等. 基于岭估计的概率积分法预计参数的求取[J]. 煤矿开采,2012,17(2):17-19,85.
- [3] 查剑锋,冯文凯,朱晓峻. 基于遗传算法的概率积分法预计参数反演[J]. 采矿与安全工程学报. 2011,28(4):655-659.
- [4] 宫灿. 邢台矿区地表移动变形规律研究[J]. 矿山测量,2015,43(3):17-19,22.
- [5] 张广伟,朱强,魏耀军. 软弱覆岩综采地表移动变形规律初探[A]//. 全国矿山测量新技术学术会议论文集[C]. 中国甘肃兰州,2009:156-159.
- [6] 张广伟,李凤明,李树志,等. 基于岩体破裂规律的下沉系数变化[J]. 煤炭学报,2013,38(6):977-981.
- [7] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 北京:煤炭工业出版社,2000.

(下转第 118 页)



图3 背景图

菜单【File > Open Background Data】打开背景 dwg 文件。

文件第一次被调入时需要选择对应的坐标系, 打开成功后会在相应目录下生成一个同文件名的“. dwg\_rxl”文件, 此文件用于记录对应 dwg 文件的坐标系。

只要“. dwg\_rxl”文件存在, 那么下次再打开对应的 dwg 文件, 就无需再选择坐标系。如果 dwg 文件打开时坐标系选择错误的话, 可以删除“. dwg\_rxl”文件, 再重新选择一次正确的坐标系即可。

#### 2.4 节省空间的方法

软件安装目录下的 TEMP 文件夹下的文件可以

删除, 全部是临时文件。删除这些临时文件, 可以节省很多空间。

【D:\CARIS】1\HIPS\TEMP 文件夹下的\*. bin 文件会在 caris 导出数据时产生, 而且导出的数据越大, 该 bin 文件越大, 所以要定时清理该文件夹下的文件。

#### 3 结 语

以上是作者在应用 CARIS HIPS 7.1 作图时的几点体会, 希望能给大家在用该软件作图时带来一些方便。由于本人学识及经验有限, 以上论述难免有误, 敬请大家批评指正。

#### 参考文献:

- [1] 叶志荣. CARIS 系统全要素制图的实现[A]. //中国航海学会航标专业委员会测绘学组学术研讨会学术交流论文集[C]. 2006.

作者简介: 赵永强(1980-), 男, 汉族, 秦皇岛市测绘大队工程师。

(收稿日期: 2016-04-18)

(上接第 68 页)

- [8] 邹友峰. 地表下沉系数计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 109-112.
- [9] 郭文兵, 邓喀中, 邹友峰. 地表下沉系数计算的人工神经网络方法研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 212-215.
- [10] 胡奎. 模失法在求取地表移动预计参数中的应用[J]. 能源技术与管理, 2013, 38(2): 15-17.
- [11] 柴华彬, 邹友峰, 郭文兵. 用模糊模式识别确定开采沉降预计参数[J]. 煤炭学报, 2005, 30(6): 701-704.

- [12] 胡青峰, 崔希民, 李春意, 等. 基于 Broyden 算法的概率积分法预计参数求取方法研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2009, 24(1): 5-8.

作者简介: 张广伟(1981-), 男, 江苏徐州人, 博士, 副研究员, 从事开采损害防治与矿山环境恢复治理方面的研究工作。

(收稿日期: 2016-05-18)