

基于空间分析的概率积分法在预测多煤层采空区塌陷中的应用——以青海塔妥煤矿为例

张正兴¹, 赵爱军², 李威¹, 李小林², 孙莹³, 彭亮¹

(1. 青海省水文地质工程地质环境地质调查院, 青海 西宁 810008;

2. 青海省环境地质勘查局, 青海 西宁 810007; 3. 青海省地质环境监测总站, 青海 西宁 810003)

摘要: 概率积分法是预测煤矿采空区产生地面移动最直接, 最简单的方法之一, 应用广泛。但该方法的应用条件非常苛刻, 对于地层复杂的地区, 预测精度不高。本文为预测出多煤组开采造成的地面破坏, 将概率积分法与空间分析软件相结合, 运用 GMS 软件的空间分析功能和概率积分法的理论基础, 对采空区产生的地面破坏进行预测。将这种方法运用到塔妥煤矿中, 得到了当该煤矿的四个煤组完全开采时产生的地面破坏预测, 其计算结果比直接运用概率积分法更加接近实际。

关键词: 采空区塌陷; 概率积分法; 空间分析; 塔妥煤矿

文章编号: 1003-8035(2012)04-0094-05

中图分类号: P642.26

文献标识码: A

0 引言

煤炭是我国的主要能源资源, 对国民经济的发展起着举足轻重的作用, 但煤矿开采引起的地表移动和变形将影响位于下沉盆地范围内的建筑物、河流、铁路、管道及其他构筑物。煤层开采前对开采沉陷做出预计, 对保护地面建筑物和地面环境具有十分重要的意义。关于矿区开采沉陷国内外已进行了大量的研究工作, 原苏联学者早在 20 世纪 30 年代就开始了相关研究, 我国则是从 20 世纪 50 年代开始的^[1-2]。近年来, 由于数学、力学、计算机等学科的新成果不断地引入到开采沉陷预测中, 形成了许多开采沉陷变形预计的新方法和新理论, 并取得了一定的研究成果。目前我国用于地面变形预测的方法中, 概率积分法是最为成熟、应用最广泛的方法之一。但该方法也存在一些缺陷, 尤其是对于地层结构比较复杂的地区^[3-5], 若以概率积分法为基础, 运用一些空间分析软件, 将矿区不同煤组的破坏作用进行叠加, 便得到了更加符合实际的预测结果^[6-11]。

1 概率积分法

概率积分法是以正态分布函数为影响函数, 用积分式表示地表盆地下沉的方法。这种方法的基础是随机介质理论。其数学模型为:

下沉(W , 单位 mm):

$$W(x, y) = W_{cm} \iint_D \frac{1}{r^2} e^{-\frac{(\eta-x)^2 + (\zeta-y)^2}{r^2}} d\eta d\zeta$$

倾斜(i , 单位 mm/m)

$$i_x(x, y) = W_{cm} \iint_D \frac{2\pi(\eta-x)}{r^4} e^{-\frac{(\eta-x)^2 + (\zeta-y)^2}{r^2}} d\eta d\zeta$$

$$i_y(x, y) = W_{cm} \iint_D \frac{2\pi(\zeta-y)}{r^4} e^{-\frac{(\eta-x)^2 + (\zeta-y)^2}{r^2}} d\eta d\zeta$$

曲率(K , 单位 $10^{-3}/m$)

$$K_y(x, y) =$$

$$W_{cm} \iint_D \frac{2\pi}{r^4} \left(\frac{2\pi(\zeta-y)^2}{r^2} - 1 \right) e^{-\frac{(\eta-x)^2 + (\zeta-y)^2}{r^2}} d\eta d\zeta$$

$$K_x(x, y) =$$

$$W_{cm} \iint_D \frac{2\pi}{r^4} \left(\frac{2\pi(\eta-x)^2}{r^2} - 1 \right) e^{-\frac{(\eta-x)^2 + (\zeta-y)^2}{r^2}} d\eta d\zeta$$

水平位移(U , 单位 mm):

$$U_x(x, y) = U_{cm} \iint_D \frac{2\pi(\eta-x)}{r^3} e^{-\frac{(\eta-x)^2 + (\zeta-y)^2}{r^2}} d\eta d\zeta$$

$$U_y(x, y) = U_{cm} \iint_D \frac{2\pi(\zeta-y)}{r^3} e^{-\frac{(\eta-x)^2 + (\zeta-y)^2}{r^2}} d\eta d\zeta$$

水平变形(ξ , 单位 mm/m):

收稿日期: 2012-03-10; 修订日期: 2012-05-10

作者简介: 张正兴(1984—), 男, 助理工程师, 主要从事地质灾害调查与治理工作。

E-mail: zhangzhengxingdyx@qq.com

$$\xi_x(x,y) = U_{cm} \iint_D \frac{2\pi}{r^3} \left(\frac{2\pi(\eta-x)^2}{r^2} - 1 \right) e^{-\pi \frac{(\eta-x)^2 + (\zeta-y)^2}{r^2}} d\eta d\zeta$$
$$\xi_y(x,y) = U_{cm} \iint_D \frac{2\pi}{r^3} \left(\frac{2\pi(\zeta-y)^2}{r^2} - 1 \right) e^{-\pi \frac{(\eta-x)^2 + (\zeta-y)^2}{r^2}} d\eta d\zeta$$

式中: r ——主要影响半径(m);
 $r = H/\tan\beta$, H ——采深(m), $\tan\beta$ - 主要影响角正切;
 W_{cm} 、 U_{cm} ——地表充分采动下的最大下沉值和最大水平移动值(mm)。

该方法的预测模型相对简单,参数比较稳定,计算精度也较高。在《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》、《矿山环境保护与综合治理方案技术规范》(DZ/T223 - 2007)等标准中,有明确的规定^[2]。

从其数学模型可以看出,该方法适用于连续的,分布规整的单一煤层采空区。但在实际情况下,煤层分布的规则性一般都较弱,其采空区分布凌乱,这样就导致了地表移动预测的困难,单靠概率积分法难以解决问题。为了使预测计算结果更加接近实际,将复杂煤层开采形成的采空区概化成一系列比较连续、规整的采空区组合体,先运用概率积分法预测计算出每一个采空区产生的地表移动,然后利用一些空间分析软件,将各个采空区产生的地面破坏进行叠加,从而得到最终的预测结果。

2 塔妥煤矿

塔妥煤矿位于青海省都兰县沟里乡境内,自建国初期就开始开采,目前年生产能力 $6 \times 10^4 \text{t}$ 。由于长期的开采,浅层地下水已完全疏干。矿区地层缺失较多,可分为三个部分:煤系地层;基底地层以及第四系地层。基底地层为石炭系和二叠系,岩性主要为砂岩、板岩、千枚岩;煤系地层岩性主要为侏罗系砂岩、碳质页岩、页岩为主;第四系地层以砂砾石、砂土、角砾为主。

研究区含煤层分布复杂,自下而上沉积有一、二、三、四 4 个煤组,其中三煤组最为发育,厚度大,分布广;二煤组次之;一煤组因受古地理影响,沉积面积较少,仅矿区东部有沉积;四煤组因成煤后期剥蚀作用的影响,保存的范围较小,仅在矿区中部可见。依据矿山的探矿钻孔以及塌陷区勘探钻孔资料,所揭示的

各煤组产状特征如图 1、表 1 所示。

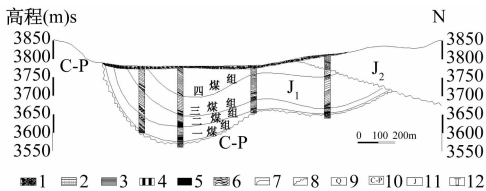


图 1 塔妥煤矿地质剖面图

Fig. 1 The cross-section of Tatuo coal mine

1 - 表土;2 - 砂岩;3 - 页岩;4 - 碳质页岩;5 - 煤层;6 - 板岩;
7 - 地质界线;8 - 不整合线;9 - 第四系;10 - 石炭 - 二叠系;
11 - 侏罗系;12 - 勘探孔

表 1 塔妥煤矿各煤组产状特征表

Table 1 The attitude characteristics of Tatuo coal mine's all coal groups

煤组 编号	煤层倾 角(°)	煤层厚 度(m)	倾向长 度(m)	走向长 度(m)	采空区下边 界采深(m)	采空区上边 界采深(m)
四	23.2	0.97	601.37	333.42	80.66	27.25
三	23.0	8.10	2147.37	526.56	159.62	25.32
二	22.9	2.08	1470.09	586.00	207.21	60.32
一	23.5	1.27	827.93	437.42	215.16	75.78

3 地面破坏预测

3.1 计算参数

在参考前人研究成果的基础上,根据以往的钻孔资料、相关图件以及本次勘查的钻探、物探成果,结合勘查区内四个主要含煤组段的形态特征,得出塔妥煤矿的相关计算参数。其中下沉系数、主要影响角正切以及开采影响传播角与上覆围岩的特性关系密切,根据当地围岩的相关力学实验和经验参数给定,水平移动系数是最大水平移动值与最大下沉值的比值,根据经验确定(表 2)。

表 2 各煤组计算参数表

Table 2 Counting parameters of every coal group

煤组 编号	煤层倾 角(°)	煤层厚 度(m)	下沉 系数	主要影响 角正切	水平移 动系数	开采影响 传播角(°)
四	23.2	0.97	0.35	1.503	0.3	74.22
三	23.0	8.10	0.35	1.391	0.3	74.36
二	22.9	2.08	0.35	1.281	0.3	74.43
一	23.5	1.27	0.35	1.236	0.3	74.02

3.2 预测计算过程

塔妥煤矿并非单煤层开采,其含煤层主要分为四个组段,地表沉陷也非一个煤组的开采所造成的,而是四个煤组共同作用的结果。传统的概率积分法通

常会将多个煤层概化为单一含煤层,然后再进行地面沉陷预测,这样难以突出主采煤层的影响,同时计算结果的误差较大。因此在本次预测计算中,为了充分考虑各煤组采空区对地表的破坏作用,先运用概率积分法计算出各采空区对地表的作用,然后利用 GIS 软件将各煤组的预测结果进行叠加。

3.3 预测结果

图 2~图 4 为运用概率积分法计算出的二煤组采空区产生的地面破坏结果。图 2 反映了二煤组采空区产生的地面沉陷值,最大沉陷量为 671mm;图 3 体现了采空区产生的地面倾斜程度,其最大曲率值为 $0.095 \times 10^{-3}/\text{m}$,出现在离计算边界 44.24m 的位置;图 4 反映了采空区导致地面水平变形值的大小,在距离西部计算边界 0~16.49m 的范围内,地面呈拉伸态,其余地区均为压缩态。最大拉伸变形为 1.97mm/m,出现在西侧计算边界处,最大压缩变形为 4.32mm/m,出现在距离东侧计算边界 53.00m 的位置。同理运用概率积分法分别计算预测出一煤组、三煤组和四煤组采空区产生的地面破坏。

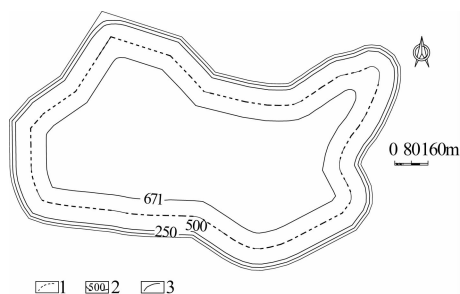


图 2 二煤组采空区地面沉陷预测图

Fig. 2 The forecasting chart for surface depression of the second coal group

1 - 二煤组边界; 2 - 沉陷等值线 (mm); 3 - 计算边界

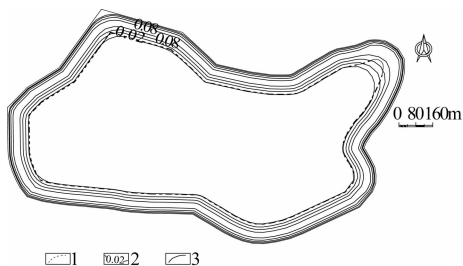


图 3 二煤组采空区地面曲率预测图

Fig. 3 The forecasting chart for surface curvature of the second coal group

1 - 二煤组边界; 2 - 曲率等值线 ($10^{-3}/\text{m}$); 3 - 计算边界

由二煤组的预测结果可以推出若按照传统的概

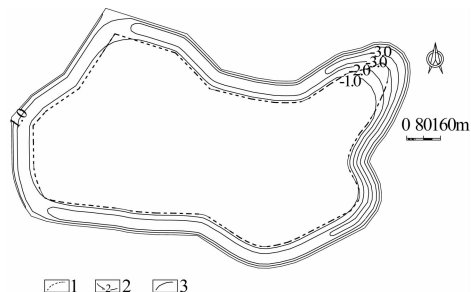


图 4 二煤组采空区地面水平变形预测图

Fig. 4 The forecasting chart for surface horizontal distortion of the second coal group

1 - 二煤组边界; 2 - 水平变形等值线 (mm/m, “-”表示出于压缩态, 否则为拉伸态); 3 - 计算边界

率积分法,将塔妥煤矿的所有含煤层概化为单一煤层而进行地面沉陷预测的结果。届时矿区中部的大面积区域都将呈均匀沉降趋势,都将达到地面塌陷的最大值,地面弯曲变形和水平变形也仅发生在矿区的边缘地带。煤矿开采形成的采空区对矿区中部的地表建筑物和道路等影响不大,然而通过现场的实际调查发现,塔妥煤矿中部地带的房屋等设施目前也发生严重的变形,由此可见按照传统概率积分法进行地面沉陷预测的结果与现实情况存在较大差异。

运用 GIS 软件的矢量叠加功能,将各煤组采空区产生的破坏结果进行叠加,便可得到假定塔妥煤矿中的含煤层完全开采时,所有采空区造成的地面破坏情况。其地面沉陷预测结果如图 5,其最大沉陷量为 4002mm,出现在四个煤组重叠地带。图 6 反映了采空区致使的地面曲率值,其预测最大值为 $0.88 \times 10^{-3}/\text{m}$,分布在三煤组边界附近,呈条带状,矿区地面曲率的大小主要受到三煤组和四煤组的影响。采空区产生的地面水平变形预测值反映在图 7 中,由图可见,采空区地面水平变形的大小也主要是受到三煤组和四煤组的影响,其最大值为 28.03mm/m,出现在距离东侧计算边界约 124.2m 的位置。将此预测结果与目前的实际房屋损坏调查相比较,此预测结果更具有实际意义。

由此可见,塔妥煤矿一、二、三、四煤组的开采对地表都会有一定的影响,只是影响程度的大小不一。其中三煤组的开采对地表的破坏程度最大,它产生的地面沉陷值、曲率值和水平变形值较其他煤组大,这是由于三煤组的分布范围广,煤层厚度较大,它的开采会产生较大的地下采空区,而且上覆岩层较薄;四

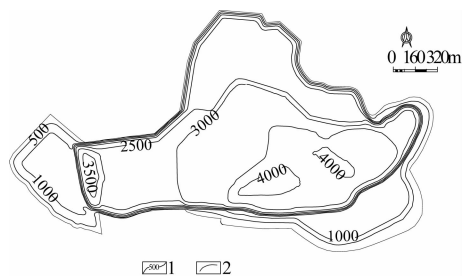


图5 塔妥煤矿地面沉陷预测图

Fig. 5 The forecasting chart for surface depression of the Tatuo Coal Mine

1 - 沉陷等值线 (mm); 2 - 计算边界

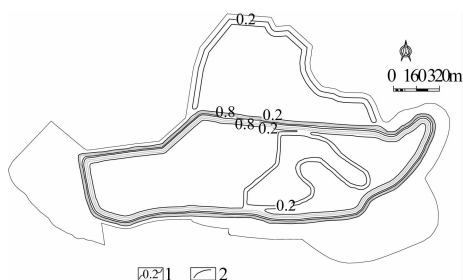


图6 塔妥煤矿地面曲率预测图

Fig. 6 The forecasting chart for surface curvature of the Tatuo Coal Mine

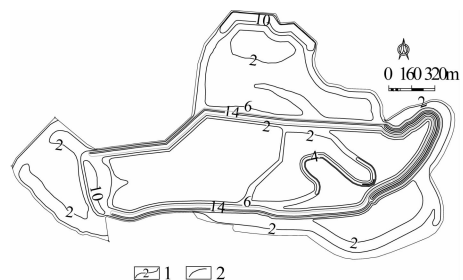
1 - 曲率等值线 ($10^{-3}/m$); 2 - 计算边界

图7 塔妥煤矿地面水平变形预测图

Fig. 7 The forecasting chart for surface horizontal distortion of the Tatuo Coal Mine

1 - 水平变形等值线 (mm/m); 2 - 计算边界

煤开采组对地表的破坏程度居于次席,这主要是由于该煤组的采深较小,它的影响之所以比三煤组小,主要是因为它的分布范围小,煤层的厚度也比三煤组的薄,因此其产生的地表破坏较三煤组小;二煤组和一煤组随着地下埋深的增加,对地表的影响逐渐减弱。

4 结论

概率积分法计算模型简单,参数稳定,对于平原

区的单一煤层,计算精度较高。但由于其采用的参数中大多数以平均值代替,难以客观完全的反映实际煤层的特征,从而致使误差较大,尤其是对于地层复杂的地区,煤层参数更加难以准确把握,计算精度较低。在本文中,对于地层结构非常复杂的塔妥煤矿,改变传统的平均值法,运用概率积分法分别计算出每一个煤组的地面破坏,然后利用 GIS 软件,将其破坏结果进行合理叠加,而不是先将煤层概化成单层煤层之后,再运用概率积分法进行预测计算。根据目前的监测资料和煤矿的开采进程来看,这样预测方法的计算结果离实际情况又靠近一步,对该区地面沉陷的防护和治理有很好的指导意义。

参考文献:

- [1] 邹友峰,邓喀中,马伟民. 矿山开采沉陷工程[M]. 中国矿业大学出版社,2003.
ZOU Youfeng, DENG Kazhong, MA Weimin. Mining Subsidence Project[M]. Mns University China Publishing Company, 2003.
- [2] 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[S]. 煤炭工业出版社,2000.
The regulations of supposing coal wedge for building, water, railway together with main tunnel and mining pressing coal[S]. Coal Industry Publishing Company, 2000.
- [3] 何国清,杨伦,等. 矿山开采沉陷学[M]. 中国矿业大学出版社,1991.
HE Guoqing, YANG Lun, et al. Mining Subsidence [M]. Mns University China Publishing Company, 1991.
- [4] 李丰亮,郝兵元,杨双锁,等. 大宁矿区开采沉陷规律研究[J]. 科技情报开发与经济,2009, 19(6):227-228.
LI Fengliang, HAO Bingyun, YANG Shuangsoo, et al. Research on the mining subsidence laws of Daning mining area [J]. Sci-Tech Information Development and Economy, 2009, 19(6): 227-228.
- [5] 张应昌,孙亚峰,何尧. 基于概率积分法的开采沉陷预计分析[J]. 山西建筑,2009, 35(20):119-120.
ZHANG Yingchang, SUN Yafeng, HE Rao. On mining subsidence anticipate analysis on the base of probability-integral method [J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(20): 119-120.
- [6] 李文秀,赵胜涛,梁旭黎,等. 鲁中矿区地下开采对竖井井塔楼的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1):74-78.
LI Wenxiu, ZHAO Shengtao, LIANG Xuli, et al.

- Influence of underground mining on shaft towers in Luzhong Mining Areas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 74-78.
- [7] 李新强, 高延法, 张庆松. 开采沉陷动态数值仿真研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 86-90.
- LI Xinqiang, GAO Yanfa, ZHANG Qingsong. Study on dynamic numerical simulation of mining-induced subsidence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 86-90.
- [8] 刘立民, 刘汉龙, 李建刚, 等. 基于 GIS 的地下开挖沉陷计算的有限层法及数据场表达[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2170-2175.
- LIU Limin, LIU Hanlong, LI Jiangang, et al. FLEM for ground subsidence calculation and data field expression model based on GIS [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2170-2175.
- [9] MARBLE D F. Some thoughts on the integration of spatial analysis and geographic information systems[J]. Journal of Geographical System, 2000(2): 31-35.
- [10] 柴华彬, 邹友峰, 刘景艳. DTM 在开采沉陷可视化预测中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004, 23(2): 171-174.
- CHAI Huabin, ZOU Youfeng, LIU Jingyan. Application of DTM in visualization prediction of mining subsidence [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2004, 23(2): 171-174.
- [11] 李春雷, 谢谟文, 李晓璐. 基于 GIS 和概率积分法的北沟河铁矿开采沉陷预测及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1243-1250.
- LI Chunlei, XIE Mowen, LI Xiaolu. Gis and probability integral based approach for subsidence prediction and application to beiminghe iron mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1243-1250.

Application of probability-integral method base of spatial analysis for complex stratum layer-a case study of Tatuo coal mine

ZHANG Zheng-xing¹, ZHAO Ai-jun², LI Wei¹, LI Xiao-lin², SUN Ying³, PENG Liang¹

(1. Qinghai Province Institute of Hydrogeology and Engineering Geology Prospecting, Xining 810008, China;

2. Qinghai Province Environmental Geological Exploration Bureau, Xining 810001, China;

3. Geo-environment Monitoring Station of Qinghai Province, Xining 810003, China)

Abstract: Probability-integral method is the most direct and easiest way to forecast the surface movement produced by goaf of the coal mine. But the application condition of this method is very rigor, for the complex layer area, the forecasting accuracy is not grate. To forecast the surface destruction made by some coal groups, this article connects the Probability-integral method with spatial analysis software, using the spatial analysis function of GMS software and the theory of Probability-integral method. Taking the Tatuo Coal Mine for example, the result of this method is more practical than the result of Probability-integral method.

Key words: goaf collapse; probability-integral method; spatial analysis; Tatuo coal mine