

基于 GIS 和概率积分法的北洛河铁矿开采 沉陷预测及应用

李春雷, 谢谟文, 李晓璐

(北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 金属矿山多为裂隙发育的块状岩体, 因而开采引起的地表沉陷机制不同于层状地层的煤矿。为指导矿山安全生产及地表沉陷治理提供科学依据, 以崩落法开采矿山地表沉陷为具体研究对象, 对北洛河铁矿开采沉陷预测研究, 将基于 GIS 和概率积分法的开采沉陷预测方法应用于采用无底柱分段崩落法的金属矿山中。通过 GIS 建模全面反映矿区的三维地理、地质信息及其内在属性, 应用基于概率积分法和组件技术开发的 MSDAS-GIS 系统进行开采沉陷预测。利用 GIS 强大的空间分析和图形显示功能对预测结果进行分析和处理, 并直观反映出开采沉陷对周围环境的影响程度及范围。通过与地表观测数据及实际情况的对比分析, 验证预测方法的适用性, 同时也为指导金属矿山安全生产提供良好的三维可视平台。

关键词: 采矿工程; 开采沉陷; 金属矿山; 无底柱分段崩落法; 地理信息系统; 概率积分法

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)06 - 1243 - 08

GIS AND PROBABILITY INTEGRAL BASED APPROACH FOR SUBSIDENCE PREDICTION AND APPLICATION TO BEIMINGHE IRON MINE

LI Chunlei, XIE Mowen, LI Xiaolu

(School of Civil and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The mining subsidence mechanism of metal mine with fractured blocky rock mass is different from that of coal mine with layered rock mass. In order to guide the safety production and prevent the ground subsidence, the Beiminghe iron mine is taken as the research background. Based on GIS(geographic information system) and probability integral approach, a research is done for predicting the subsidence of Beiminghe iron mine. A three-dimensional calculating model related to geographic, geologic and inherent information is established; and then the system MSDAS-GIS, which is developed by the probability integral and component techniques, is used to predict the mining subsidence. By using the effective spatial analytical function and the drawing tool of GIS, the analytic results intuitively show the degree and scope of mining subsidence. By comparison with the observation data of the ground surface and actual situation, the proposed approach is verified and a three-dimensional visual platform is offered for safety control of the metal mine.

Key words: mining engineering; mining subsidence; metal mine; sublevel caving method without sill pillar; geographic information system(GIS); probability integral method

收稿日期: 2006 - 06 - 19; **修回日期:** 2006 - 08 - 20

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目(2004BA615A - 18)

作者简介: 李春雷(1978 -), 男, 2000年毕业于河北理工大学建筑工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土及地理信息系统方面的研究工作。
E-mail: lcl_bj@163.com

1 引言

开采沉陷作为一门学科进行系统研究始于 20 世纪 20 年代,其主要研究内容是地下矿体采出以后,岩层及地表移动变形机制及其分布形态、力学特征、破坏程度,预测并控制岩体与地表破坏。

开采沉陷预测的基本目的是能够对开采沉陷及其对环境产生的影响做出合理的评价。国内外许多学者^[1~3]为此做出了许多的努力,提出了不少预测方法和沉陷模型,大致可以分为以下 5 类:(1) 经验方法(例如典型曲线法);(2) 剖面函数法(例如负指数函数法、Weibull 分布法、双曲函数型剖面函数等);(3) 影响函数法(例如概率积分法);(4) 理论模型;(5) 物理模型。

概率积分法属于影响函数法,因其所用的移动和变形预测公式中含有概率积分而得名。由于概率积分法算法简单,易于计算机实现,并且计算结果可靠,目前已成为我国较为成熟、应用最广的开采沉陷预测方法。目前主要用于煤矿开采沉陷预测,而在金属矿山中很少应用。

金属矿床岩体地质结构十分复杂,岩层的力学性质各种各样,边界条件也千差万别,再加之地下采矿引起不同岩层的崩落、离层和黏弹塑性变形,使得数学模拟方法也存在很大的局限性。

我国学者杜维吾、刘宝探对金属矿山地表移动与变形规律进行过研究,在考虑岩石垮落与碎胀性后,结合随机介质,对金属矿山地表移动与变形作了定量探讨。李文秀等^[4]用模糊测度理论,建立了具有普遍意义的岩体移动理论分析的数学模型,并对在金属矿开采岩体的移动进行了预测,但由于不便与计算机技术相结合,预测结果可视化程度有待提高。

邯邢矿山管理局北洛河铁矿位于河北省武安市上团村北 1 km 的北洛河河床中,为国内典型的河床下赋存的大型地下金属矿山。该矿采用无底柱分段崩落法进行开采,经过几年的开采,开采沉陷引起了岩层与地表的剧烈移动,在措施井附近的地表形成两个塌陷坑,其中较大的一个塌陷坑的塌陷区东西长约 20 m,南北宽约 15 m,造成措施井被迫废弃,靠近塌陷坑周边地表的裂缝很多,裂缝宽度最大的达到 400 mm 左右^[5],严重影响了安全生产,并对周边环境造成了不良的影响。为减小开采沉陷造成的危害,必须进行较为准确的开采沉陷预测。

针对北洛河铁矿覆层岩石完整性差,且采用采

用无底柱分段崩落开采方法等特点,本文把概率积分法引入到北洛河铁矿开采沉陷预测中,以研究地表在时间和空间的动态移动规律,同时验证此方法在北洛河铁矿的适用性。

常规预测分析结果大多数以报表、二维的剖面线或等值线图的形式输出,图形表现能力差,不能直观反映地表沉陷实际的空间信息及对周围环境的影响^[6]。因此,如何利用计算机技术实现开采沉陷预测的动态可视化是当前亟待解决的难题。

地理信息系统(geographic information system, GIS)的发展始于 20 世纪 60 年代,集计算机科学、地理学、地图学、计算机图形学以及数据库技术于一体,能够对复杂的地球空间数据进行采集、储存、分类、检索查询、分析建模,适时提供多种空间的和动态的地理信息,从而为研究开采沉陷提供了良好的软件平台^[7~9]。

目前世界上常用的 GIS 软件已达 400 多种,如 ARC/INFO, MAP/INFO, MAPGIS 等。这些 GIS 软件都具有基本的空间分析功能,但对开采沉陷这样大型、综合、复杂的应用方面则存在较大的局限性。由于 GIS 具有良好的集成性,可以通过集成技术把概率积分法和 GIS 结合起来,以充分发挥两者的技术优势,形成技术上的互补,能够很好地实现开采沉陷预测的数据处理、信息管理、空间分析、反演预测、决策支持及可视化等要求。

因此,本文采用基于 GIS 和概率积分法的预测系统对北洛河铁矿开采沉陷进行研究,以验证其适用性,对金属矿山开采预计开采沉陷预测的动态可视化进行有意义的探讨。

2 理论支撑及预测系统

作为开采沉陷研究主体的岩体可以用两种完全不同的介质模型来模拟:连续介质模型和非连续介质模型。连续介质模型认为:在移动过程中,介质始终保持其连续性,介质单元之间的联系关系保持不变;非连续介质模型认为:在移动过程中,介质的连续性受到破坏,介质单元之间原有的联系关系发生变化,单元互相分离并发生相对运动。

北洛河铁矿采用无底柱分段崩落采矿方法,此方法适用于上盘岩石及覆盖层易于冒落,地表允许陷落的矿床,采空区被崩落的围岩所填充。为保证采场工作面的安全,当覆层顶板没有按计划冒落时,采用中深孔爆破的方式使其冒落。因此覆层的岩体

中有大量的原生以及开采引起的裂隙面和其他非连续面, 所以用非连续介质模型研究采用无底柱分段崩落法的金属矿山开采沉降问题是适当的。概率积分法就是应用非连续介质力学中的颗粒体介质力学来研究开采沉降问题。

2.1 概率积分法预测原理

在概率积分法^[10]中, 开采工作面以上受影响的岩体被看作随机介质的颗粒介质, 其理论模型见图 1。该理论模型认为, 介质是由类似于砂粒或相对来说很小的岩块这样的介质颗粒组成的。颗粒之间完全失去联系, 可以相对运动。颗粒介质的运动用颗粒的随机移动来表征, 并将大量的颗粒介质的移动看作是随机过程。模型中某个方格内的小球被移走, 由于重力作用, 此方格上一层的相邻方格中的哪一个小球滚入被移走方格完全是随机的, 并具有相同的概率 1/2。

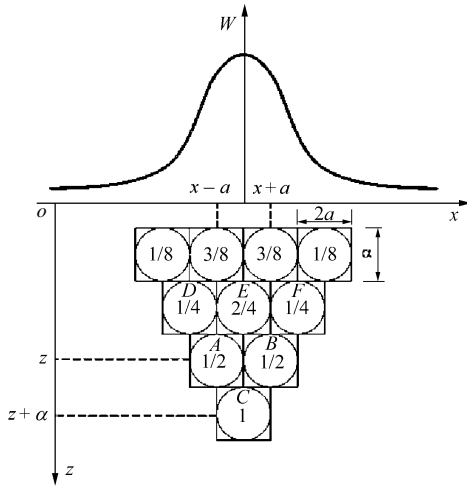


图 1 概率积分法理论模型

Fig.1 Theoretical model of probability integral method

基于概率积分法的开采沉降预计公式如下:

(1) 地表任意点 $P(x, y)$ 点的下沉量 $W_p(x, y)$ 为

$$\left. \begin{aligned}
 W_p(x, y) &= W_{\max} C_x C_y \\
 W_{\max} &= qtM \cos \alpha \\
 C_x &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\sqrt{\pi} \frac{x-l}{r}}^{\sqrt{\pi} \frac{x}{r}} e^{-\lambda^2} d\lambda = \\
 &\quad \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\sqrt{\pi} \frac{x}{r} \right) - \operatorname{erf} \left(\sqrt{\pi} \frac{x-l}{r} \right) \right] \\
 C_y &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\sqrt{\pi} \frac{y-L}{r_2}}^{\sqrt{\pi} \frac{y}{r_1}} e^{-\lambda^2} d\lambda = \\
 &\quad \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\sqrt{\pi} \frac{y}{r_1} \right) - \operatorname{erf} \left(\sqrt{\pi} \frac{y-L}{r_2} \right) \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: W_{\max} 为最大下沉值; q 为下沉系数; t 为时间系数(由于矿体采出后引起的开采沉降是一个时间和空间过程, 所以用时间系数反映地表点的沉降程度), 是一个在 $[0, 1]$ 区间的数, 当地表点达到最终稳态沉降时, $t = 1$; M 为开采厚度; α 为矿层倾角; C_x, C_y 分别为待求点在走向和倾向主断面上投影点处的下沉分布系数; l 为采区走向长度; L 为采区倾向开采宽度; $r = H / \tan \beta, r_1 = H_1 / \tan \beta, r_2 = H_2 / \tan \beta$ 分别为采区走向方面、下山方向、上山方向的影响半径, $\tan \beta$ 主要影响角正切值, H, H_1, H_2 分别为采区走向方向、下山方向、上山方向的开采深度。

(2) 地表任意点 $P(x, y)$ 沿 φ 方向倾斜变形值 T_φ 为

$$\left. \begin{aligned}
 T_\varphi &= T(x)C_y \cos \varphi + T_{1,2}(y)C_x \sin \varphi \\
 T(x) &= \frac{W_{\max}}{r} \left\{ \exp \left[-\pi \left(\frac{x}{r} \right)^2 \right] - \exp \left[-\pi \left(\frac{x-l}{r} \right)^2 \right] \right\} \\
 T_{1,2}(y) &= \frac{W_{\max}}{r_{1,2}} \left\{ \exp \left[-\pi \left(\frac{y}{r_1} \right)^2 \right] - \exp \left[-\pi \left(\frac{y-L}{r_2} \right)^2 \right] \right\}
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $T(x), T_{1,2}(y)$ 分别为待求点沿走向和倾向主断面上投影点处迭加后的倾斜变形值(mm/m); $r_{1,2}$ 为倾斜方向上下山边界的平均影响半径。

(3) 地表任意点 $P(x, y)$ 沿 φ 方向的曲率变形值 K_φ 为

$$\left. \begin{aligned}
 K_\varphi &= K(x)C_y \cos^2 \varphi + K_{1,2}(y)C_x \sin^2 \varphi + \\
 &\quad \frac{T_{1,2}(y)T(x)}{W_{\max}} \sin 2\varphi \\
 K(x) &= -2\pi \frac{W_{\max}}{r^2} \left[\frac{x}{r} \exp \left(-\pi \left(\frac{x}{r} \right)^2 \right) - \right. \\
 &\quad \left. \frac{x-l}{r} \exp \left[-\pi \left(\frac{x-l}{r} \right)^2 \right] \right] \\
 K_{1,2}(y) &= -2\pi \frac{W_{\max}}{r_{1,2}^2} \left[\frac{y}{r_1} \exp \left(-\pi \left(\frac{y}{r_1} \right)^2 \right) - \right. \\
 &\quad \left. \frac{y-L}{r_2} \exp \left(-\pi \left(\frac{y-L}{r_2} \right)^2 \right) \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $K(x), K_{1,2}(y)$ 分别为待求点沿走向及倾向在主断面投影处迭加后的曲率值。

(4) 地表任意点 $P(x, y)$ 沿 φ 方向的水平移动值 U_φ 为

$$U_\varphi = U(x)C_y \cos \varphi + U(y)C_x \sin \varphi$$

$$U(x) = bW_{\max} \left\{ \exp \left[-\pi \left(\frac{x}{r} \right)^2 \right] - \exp \left[-\pi \left(\frac{x-l}{r} \right)^2 \right] \right\}$$

$$U(y) = bW_{\max} \left\{ \exp \left[-\pi \left(\frac{y}{r_1} \right)^2 \right] - \exp \left[-\pi \left(\frac{y-L}{r_2} \right)^2 \right] \right\}$$

(4)

式中: $U(x)$, $U(y)$ 分别为待求点沿走向和倾向在主断面投影点处的水平移动值(单位为 mm); b 为水平移动系数。

(5) 地表任意点 $P(x, y)$ 沿 φ 方向的水平移动值 ε_φ 为

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\varepsilon(x)C_y \cos^2 \varphi + \varepsilon_{1,2}(y)C_x \sin^2 \varphi + \sin(2\varphi)(U_{1,2}(y)T(x) + U(x)T_{1,2}(y))}{2W_{\max}}$$

$$\varepsilon(x) = -2\pi b \frac{W_{\max}}{r} \left\{ \frac{x}{r} \exp \left[-\pi \left(\frac{x}{r} \right)^2 \right] - \frac{x-l}{r} \exp \left[-\pi \left(\frac{x-l}{r} \right)^2 \right] \right\}$$

$$\varepsilon_{1,2}(y) = -2\pi b \frac{W_{\max}}{r_{1,2}} \left\{ \frac{y}{r_1} \exp \left[-\pi \left(\frac{y}{r_1} \right)^2 \right] - \frac{y-L}{r_2} \exp \left[-\pi \left(\frac{y-L}{r_2} \right)^2 \right] \right\}$$

(5)

式中: $\varepsilon(x)$, $\varepsilon_{1,2}(y)$ 分别为待求点沿走向及倾向在主断面投影处迭加后的水平变形值。

2.2 开采沉陷预计系统

ARC/INFO 是当前众多 GIS 软件中非常优秀的一款软件, 全面采用组件对象模型(component object model, COM)技术^[11, 12], 其优点是软件复用性强、结构清晰、易于维护、开放性强, 易于实现向决策支持系统的移植。

MSDAS-GIS(mining subsidence damage assessment systems, GIS)是日本九州大学环境系统科学研究中心开发的一款开采沉陷预测系统^[13], 该系统利用 COM 技术将 ARC/INFO 与基于概率积分法的开采沉陷预测模型集成起来, 既能充分发挥专业模型针对性强、计算速度快等特点, 又能很好地利用 GIS 强大的空间分析和图形显示能力, 并将分析结果以二维和三维的图形形式直观地表现出来。因此, 本

文采用 MSDAS-GIS 对北洛河铁矿的开采沉陷进行动态预测与分析。

3 北洛河铁矿开采沉陷预计

3.1 工程背景

北洛河铁矿属于邯邢矿山管理局, 矿体埋深为 136~679 m, 矿体形态在平面上为向南突出的“新月形”, 地质储量为 7.90971×10^7 t, 采用无底柱分段崩落采矿方法进行开采, 设计年产量 1.8×10^6 t, 服务年限为 35 a。

由于北洛河覆层岩石整体性差, 且有近百米的砾石层, 地表仅 1 a 多即出现强烈的采动影响。开采沉陷引起岩层与地表的剧烈移动, 严重影响了安全生产。北洛河铁矿离改道后的河道距离比较近, 如果对开采沉陷可能造成的危险不能进行可靠的预测, 这种近水体采矿常常会发生淹井事故, 引起灾难性的后果。因此本文采用 MSDAS-GIS 对北洛河铁矿动态的开采沉陷进行研究, 并对开采过程中可能出现的危害进行预测, 以指导安全生产。

3.2 北洛河铁矿空间模型的建立

(1) 进行原始资料收集与整理

包括矿区地形图、矿区总平面图、采场平面图等。

(2) 图形格式转换

由于矿区图形资料均为 CAD 图形格式, 需要进行格式转换才能成为开采沉陷预测所需的 ARC/INFO 环境下的图形。

(3) 建立地理信息系统数据库

转换后的图形数据还需要进行数据预处理, 包括修改错误、建立正确的拓扑关系、建立特征属性表以及将特征属性与相应的 Coverage 特征相连接。

经过以上步骤的数据处理, 最终建立的北洛河铁矿空间模型如图 2 所示。

北洛河铁矿空间模型真实地反映了矿区及周围环境的空间地理信息, 并包含与矿区相关的属性信息, 为北洛河开采沉陷预测及分析奠定了良好基础。

3.3 北洛河铁矿 GIS 三维计算模型的建立

MSDAS-GIS 的预计原理是: 基于概率积分法原理, 计算任意采场开采引起的地表指定网格点对应的时空沉陷值。为方便与实际开采引起的地表沉陷情况进行对比, 本文以北洛河铁矿正在开采的 -50 m 水平采场为例进行预测, 其三维计算模型如图 3 所示。

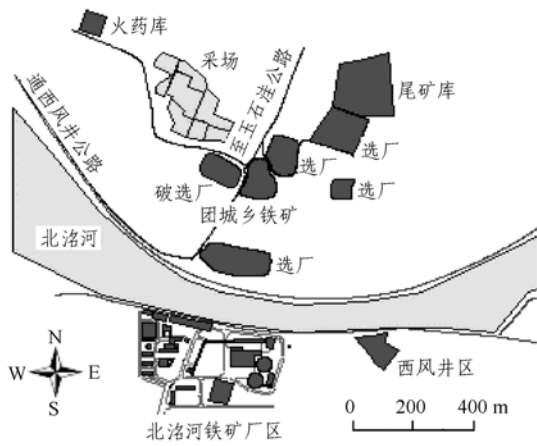


图 2 北洛河铁矿空间模型

Fig.2 Spatial model of Beiminghe iron mine

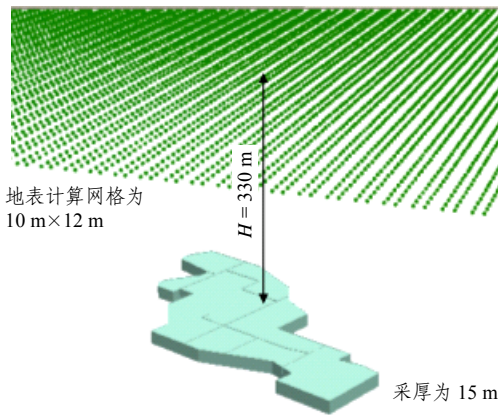


图 3 北洛河铁矿三维计算模型

Fig.3 3D calculation model of Beiminghe iron mine

图 4 所示为 -50 m 水平采区分布图。

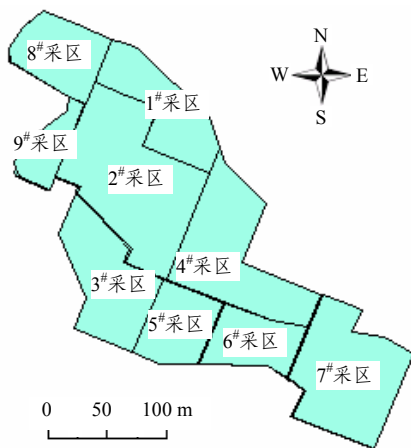


图 4 -50 m 水平采区分布图

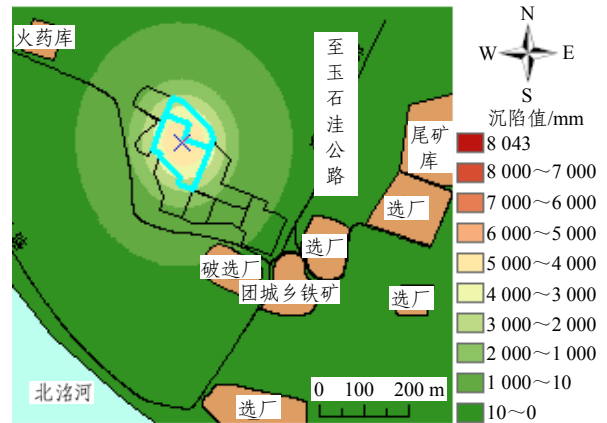
Fig.4 Distribution of stopes on -50 m level

3.4 模拟开采及沉陷预测

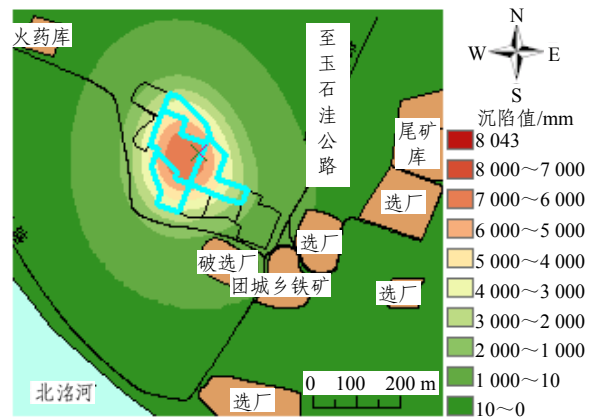
按采区 1#~9# 编号顺序, 对 -50 m 水平采场

以一个采区为步长进行连续模拟开采。为直观表现开采沉陷盆地产生的动态过程, 各沉陷图采用相同的坐标系。主要开采阶段地表沉陷预测结果对应的地表最终沉陷盆地及影响范围如图 5 所示。通过对图 5 进行分析, 可以得出以下结果:

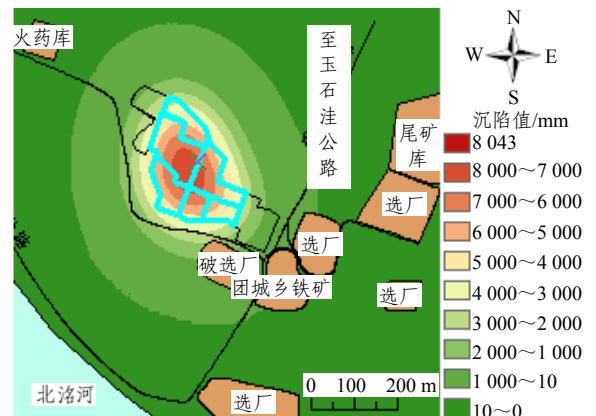
(1) 以地表沉陷 10 mm 为界限, 当采动影响波及到地表, 地表会产生一个比采空区本身大得多的沉陷盆地, 最大沉陷值出现在采空区中心。对于 -50 m 水平采场, 由于采区尺寸小于充分采动临界



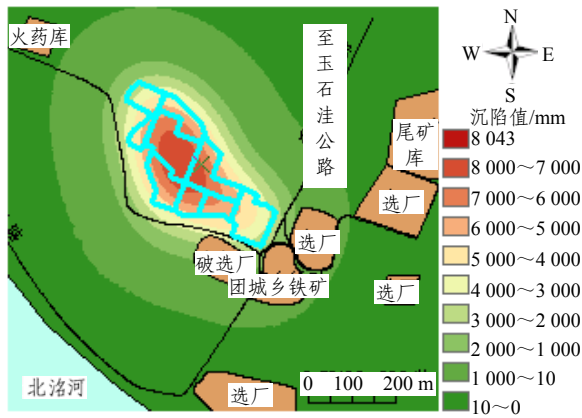
(a) 1#~2# 采区开采完毕地表最终沉陷图



(b) 1#~4# 采区开采完毕地表最终沉陷图



(c) 1#~6# 采区开采完毕地表最终沉陷图



(d) 1#~9# 采区开采完毕地表最终沉陷图

图 5 开采沉陷预测结果

Fig.5 Prediction results of mining subsidence

值($D/H = 1.2 \sim 1.4$, D 为采区尺寸, H 为采深), 随着采空区范围的增大, 沉陷盆地的范围和深度都随之增大, 而主要影响半径(采空区边界至移动边界之间的距离)基本保持不变, 平均为 154 m。

(2) 采完 -50 m 水平采场的 2# 采区, 地表稳态时最大下沉值达到 4 969 mm。稳态沉陷盆地范围已经波及到破选厂, 破选厂地表的最大的沉降差为 100 mm, 最大倾斜达到 4 mm/m, 超过我国一般砖木结构的临界变形值 3 mm/m, 会引起破选厂局部破坏。由于开采沉陷是一个动态过程, 一般会经历开始阶段、活跃阶段和衰退阶段, 时间上会持续 1 a 以上, 甚至几年, 所以破选厂的破坏不会刚采完 2# 采区即达到破坏。

(3) 采完 -50 m 水平采场的 4# 采区, 地表稳态时最大下沉值达到 7 024 mm, 最终稳态沉陷盆地范围已经波及到破选厂、团城乡铁矿和选厂, 对应的地表的最大的沉降差分别为 750, 110 和 40 mm, 最大倾斜分别为 5.4, 2.2 和 1.3 mm/m, 所以破选厂进一步被破坏, 而团城乡铁矿和选厂则基本没有破坏。同时稳态沉陷盆地范围也波及至玉石洼的公路, 最大沉降差为 135 mm, 最大倾斜为 1.6 mm/m, 也基本没有破坏。

(4) 采完 -50 m 水平采场的 6# 采区, 地表稳态时最大下沉值达到 7 743 mm, 团城乡铁矿最大的沉降差和最大倾斜分别达到 241 mm 和 3.2 mm/m, 已经开始破坏。选厂最大的沉降差和最大倾斜分别为 75 mm 和 1.4 mm/m, 基本没有破坏。

(5) 当 -50 m 水平采场全部采完后, 最终稳态沉陷盆地范围波及到破选厂、团城乡铁矿、选厂和至玉石洼的公路, 对应的地表的最大的沉降差分别

为 2 545, 1 708, 1 065 和 2 150 mm, 最大倾斜分别为 27, 12, 8 和 14 mm/m, 说明均严重破坏。

(6) 当 -50 m 水平采场全部采完后, 地表稳态时最大下沉位移出现在采场中心, 最大下沉值达到 8 043 mm。最大水平位移为 2 413 mm, 出现在采场边界正上方略靠近采空区一侧, 同时倾斜也达到最大值 75 mm/m。最终形成一个 810 m × 565 m (长 × 宽) 的沉陷盆地, 沉陷面积达 $3.5 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。稳态沉陷盆地边界离河堤最近距离为 138 m, 河堤未受到开采沉陷影响。

3.5 预计结果与地表观测数据比较

北洛河铁矿地表观测站目前仅有半年多的观测数据, 2004 年 7~12 月期间沉降差值大于 10 mm 的地表观测点分布图如图 6 所示。

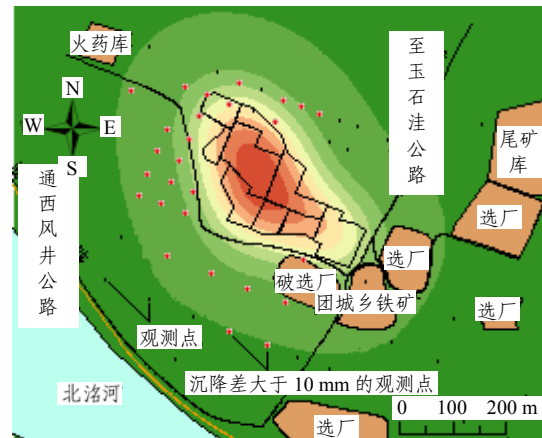


图 6 观测点分布图

Fig.6 Distribution of observation points

首次观测时, -50 m 水平采场已经部分开采, 因此采动已经影响范围内的观测点只能获得两次观测期间的沉陷差值, 不能得到地表实际沉陷值。出于安全考虑, 采场在地表投影范围内没有观测点。

开采引起地表沉陷是一个动态的过程, 是不同采区在各自不同沉陷阶段对地表影响的叠加, 因此我们很难在预测结果和观测值之间找到一一对应的关系, 但还是可以通过定性的分析得出一些有益的结果。

(1) 由图 6 可知, 沉降差值大于 10 mm 移动观测点绝大部分出现在开采完 -50 m 水平采场预测形成的地表最终沉陷盆地范围内, 说明预测结果基本反映了北洛河铁矿开采沉陷现状。

(2) 最大沉陷差值为 749 mm, 且在 3 次观测期间沉陷速度稳定, 尚未出现停止迹象, 该观测点相

应的预测稳态沉陷值为 1 596 mm。在空间分布上, 离采空区中心的距离越近, 则沉陷差值越大。

(3) 沉陷差值与实际沉陷值不同, 沉陷差值的大小仅反映地表在某段时期内的沉陷速度及活跃状态。

3.6 预计结果与实际情况比较

北洛河铁矿于 2001 年 11 月开始无底柱崩落法回采, 经过几年的开采, 开采沉陷引起岩层与地表的剧烈移动。2003 年 2 月 23 日出现第一次塌陷, 时间间隔为 14 个月。

在措施井附近的地表形成两个塌陷坑, 其中较大的一个塌陷坑的塌陷区东西宽约 20 m, 南北宽约 15 m, 造成措施井被迫废弃。

地表错动范围随着塌陷坑的出现而出现, 随着开采范围的增加而增加, 中心区域缓慢下沉。至 2004 年 2 月, 井下主要采空区上部约 10 000 m² 范围整体下沉 2 m 左右。

塌陷坑周边地表的裂缝很多, 裂缝宽度最大的达到 400 mm 左右, 严重的影响了安全生产, 并对周边环境造成了不良的影响。塌陷区内的地表建筑均出现很多的裂缝, 已被严重破坏而废弃, 具体塌陷情况如图 7 所示。

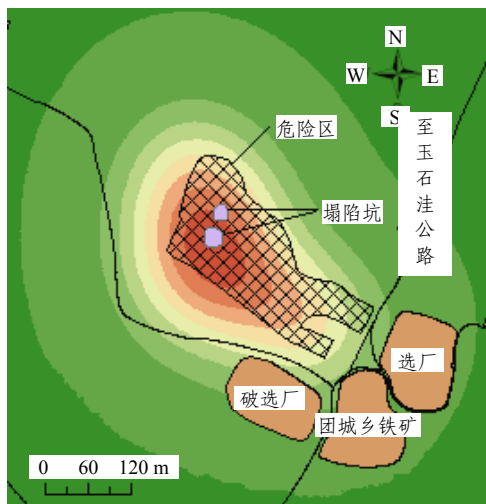


图 7 塌陷坑及危险区

Fig.7 Subsidence pit and dangerous area

由图 7 可知, 最大的塌陷坑出现在预测沉陷盆地中心, 2004 年底圈定的危险区也都在预测沉陷值超过 1 000 mm 的范围内。

到目前为止, -50 m 水平采场大部分采区已开采完毕, 预测沉陷区内的建筑物均出现破坏, 破选厂、团城乡铁矿和选厂也都已关闭。

以上情况进一步证明了基于 GIS 和概率积分法的 MSDAS-GIS 系统能够动态地预测开采引起的地表沉陷, 真实地反映出开采沉陷在时间和空间上的动态发展过程, 其预测结果较为准确地反映了开采沉陷的实际情况。

4 结 论

对于金属矿山的开采沉陷动态预测一直是一个难题, 本文针对北洛河铁矿覆层岩石整体性差及易于冒落的地质特点, 将基于 GIS 和概率积分法的开采沉陷预测系统(MSDAS-GIS)应用于采用无底柱分段崩落法的金属矿山中。

由于 GIS 具有空间坐标与现实世界精确对应的特点, 利用 GIS 强大的图形表现和空间分析功能实现了开采沉陷动态预测的可视化, 能够真实、精确地反映开采沉陷对周围环境的影响范围及程度。

通过地表观测数据及实际沉陷情况验证了基于 GIS 和概率积分法开采沉陷预测方法在北洛河铁矿的适用性。

参考文献(References):

- [1] 黄乐亭. 开采沉陷力学的研究与发展[J]. 煤炭科学技术, 2003, 31(2): 54 - 56.(HUANG Leting. Research and development of mining subsidence mechanism[J]. Coal Science and Technology, 2003, 31(2): 54 - 56.(in Chinese))
- [2] 于广明, 孙洪泉, 赵建锋. 采矿引起地表点动态下沉的分形增长规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 34 - 37.(YU Guangming, SUN Hongquan, ZHAO Jianfeng. The fractal increment of dynamic subsidence of the ground surface point induced by mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 34 - 37.(in Chinese))
- [3] 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.(in Chinese))
- [4] 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.(in Chinese))
- [5] 欧阳振华, 蔡美峰, 李长洪, 等. 北洛河铁矿地表塌陷机制研究[J]. 矿业研究与开发, 2005, 25(1): 21 - 23.(OUYANG Zhenhua, CAI Meifeng, LI Changhong, et al. Study on the mechanism of ground collapse in Beiminghe iron mine[J]. Mining Research and Development, 2005, 25(1): 21 - 23.(in Chinese))
- [6] 柴华彬, 邹友峰, 刘景艳. DTM 在开采沉陷可视化预计中的应用[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. (in Chinese)).
- [7] MILLER H J, WENTZ E A. Representation and spatial analysis in geographic information systems[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2003, 93(3): 574 - 594.
- [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): 2 170 - 2 175.(LIU Limin, LIU Hanlong, Li Jiangan, 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): 2 170 - 2 175.(in Chinese))
- [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] ESAKI T, DJAMALUDDIN I, MITANI Y. Synthesis subsidence prediction method due to underground mining integrated with GIS[C]// OHNISHI Y, AOKI K, ed. Proc. of the 3rd Asian Rock Mechanics Symposium Contribution of Rock Mechanics to the New Century. Kyoto: Millpress Science Publishers, 2004: 147 - 152.
- [11] SONG G F, ZHONG E S. Research and development of components geographic information system[J]. Journal of Image and Graphics, 1998, 3(4): 314 - 316.
- [12] LI C L, ZHANG K X. Study on regional multi-source geological spatial information system based on techniques of GIS[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2001, 25(6): 545 - 550.
- [13] ESAKI T, DJAMALUDDIN I. Development of GIS—based dynamic subsidence prediction and assessment system due to underground mining[R]. Fukuoka: Institute of Environmental System, Kyushu University, 2005.

本刊的 h 指数位居同类专业期刊前列

期刊在一定时间内发表的论文中, 至少有 h 篇论文在某一特定时间内的被引频次不低于 h 次, 而其余论文的被引频次又不大于 h 次时, 这一 h 值就称为期刊的 h 指数。它是美国科学家赫希(J. E. Hirsch)于 2005 年 8 月提出的一项新的文献计量指标, 不但可用于评价论文作者的个人成就, 也可用于对一个群体(如期刊、学科、科研机构等)的评价。期刊的 h 指数是对总被引频次、影响因子等传统的计量指标的很好补充和发展, 也是对期刊整体评价与论文评价相结合的一种探索、实践和创新。目前已得到国内外文献情报界专家和同行的广泛关注、重视和认可。

清华大学中国科学文献计量评价研究中心等单位对 2005 年全国公开发行的 6 331 种专业期刊的有关资料进行收集统计后, 于 2006 年 11 月由科学出版社公开出版了《中国学术期刊综合引证报告(2006 年版)》, 公布了《岩石力学与工程学报》2001~2003 年载文量在 2001~2005 年的被引频次符合上述含义的 h 值为 22。在土木建筑类 110 种专业期刊中, 2005 年本刊这项指标排列第 2 名。

(范文田供稿)