

软岩地层地下铁矿开采岩体移动影响 范围及变化趋势分析

李文秀¹, 郑小平², 王晶¹

(1. 河北大学 建筑工程学院, 河北 保定 071002; 2. 河北建设集团有限公司, 河北 保定 071051)

摘要: 在我国官庄东矿北采区, 采用分段崩落法进行回采, 虽然矿区地表建筑物远离设计的地表移动影响范围, 但仍受到影响。结合官庄东铁矿北采区进行分析, 对深部开采引起的动态岩体移动变形问题进行具体计算, 分析深部开采的岩体移动变形规律及特点, 实际观测和理论分析均表明, 深部开采工作面的覆岩破坏, 具有整体移动变形均匀的特点; 软岩地层深部铁矿开采引起的地表移动变形发展缓慢且周期较长。

关键词: 采矿工程; 深部开采; 软岩; 岩体移动; 深部开采; 下沉控制

中图分类号: TD 803

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增2 - 3673 - 06

ANALYSIS OF INFLUENCED REGIONS AND CHANGE TREND FOR ROCK MASS DISPLACEMENT DUE TO MINING OF IRON ORE IN SOFT ROCK STRATA

LI Wenxiu¹, ZHENG Xiaoping², WANG Jing¹

(1. College of Machinery and Civil Engineering, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China; 2. Hebei Construction Group Co., Ltd., Baoding, Hebei 071051, China)

Abstract: In north mining area of Guanzhuangdong Mine, in which the sublevel caving was used, although the buildings are beyond the ground subsidence influence criteria, there has been widespread evidence of deformation of land surface far away from the mining area. Combining with analysis of north mining area of Guanzhuangdong Mine analysis, laws and characteristics of rock mass displacement and deformation caused by the deep mining of iron ore in soft rock strata are given. Both observed and theoretical analysis show that the subsidence of overburden layer is characterized by uniform and entire compression, displacement and deformation. And the surface deformation is continual and slow with a long duration of movement due to deep mining of iron ore in soft rock strata.

Key words: mining engineering; deep mining; soft rock; rock mass displacement; deep mining; subsidence control

1 引言

地下开采岩体移动研究已有许多成果。如多种

影响函数法分析公式^[1]; 岩体移动分析的网格积分法^[2]; 将遗传规划方法用于确定岩体移动参数^[3]; 针对煤矿开采水平移动对水库大坝的影响进行了研究^[4]; 分析了地形对岩体移动的影响^[5]; 将 Fuzzy

收稿日期: 2009 - 05 - 19; **修回日期:** 2009 - 06 - 27

基金项目: 河北省科技攻关项目(072156142)

作者简介: 李文秀(1954 -), 男, 1989 年于中南工业大学采矿工程专业获硕士学位, 现任教授, 主要从事岩土力学、采矿及岩土工程等方面的教学与研究工作。E-mail: Leewenxiu@yahoo.com.cn

数学理论用于分析岩体移动^[6]；将神经网络理论用于分析地表下沉^[7]；采用模拟试验方法确定岩体移动极限角^[8]；研究岩体移动的动态过程^[9]；采用经典力学理论分析了岩体移动的蠕变问题^[10]；分析地下开采引起的大范围岩体移动问题^[11]；分析山区厚矿层开采岩体移动规律^[12]；将模糊-遗传规划理论用于分析岩体移动问题^[13]；提出一种新的三维影响函数公式并用于分析急倾斜矿体开采岩体移动问题^[14, 15]；介绍 GPS 用于地表下沉观测的技术进展^[16]。近年来，随着金属和非金属用量的不断增加，地下开采也不断向深部延伸，尤其是金属矿开采深度已超过 1 000 m，与开采相关的岩石力学研究也获得了大量成果。而对于软岩地层条件下深部金属矿开采影响及变化趋势预测分析问题，尚无成熟经验可供借鉴。如我国的官庄铁矿属于软岩地层，最终开采深度将达到 1 100 m，深部高地应力、岩体移动以及移动影响时间的预测等方面都具有较大难度。

采矿工程实践表明，深部开采的地表移动具有其自身特点。由于采深大，地表移动变形连续且变形周期较长；地表移动变形值不易达到该地质采矿条件的极值；地表下沉的范围大，盆地边缘移动变形值小。因此在采深较大的情况下，工作面开采的单方向充分程度受到影响；在采空区覆岩破坏的特征上，具有悬臂梁、崩落带、地表连续变形并在影响边缘处出现裂缝等特点(见图 1)。

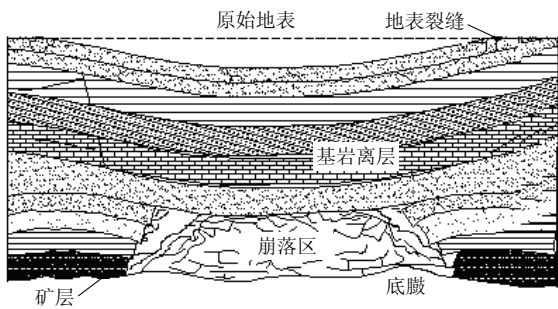


图 1 深部开采覆岩破坏示意图

Fig.1 Strata disturbance caused by deep mining

深部开采的采空区覆岩破坏，具有均匀、整体压缩、移动、变形的特点，由深部采空区上方覆岩破坏的特点反映出地表沉陷机制，主要表现为一定范围内的整体沉陷。我国对浅部开采的地表沉陷预测方法研究得较多，提出多种实用可行的预测方法，如典型曲线法负指数函数法和概率积分法等，在煤矿应用较多。概率积分法是我国目前煤矿开采中应

用较多的一种方法，且较适用。在各种方法的具体应用过程中，其中的一个重要概念就是充分采动程度问题。而充分采动程度又与采空区尺寸大小有关，对于浅部开采来说，很容易达到充分采动，而对于深部开采，由于受地质条件等因素影响，采动程度一般很小，而采动程度对地表变形值的影响有直接的影响，尤其对于深部开采的地表沉陷预测更为重要。本文针对深部铁矿开采对地表影响范围和影响时间变化趋势进行具体研究分析。

2 软岩地层深部开采影响范围预测

2.1 深部开采问题

根据国内外已有的大量研究成果和工程经验，对于一定的采深，一般认为，在非充分采动条件下，随着采空区面积的增加，地表下沉值逐渐增大，直至达到最大下沉值。由于深部铁矿开采地质条件等情况较为复杂，而大多数深部铁矿开采宽度是有限的，因此在短期内地表不可能达到最终最大下沉，水平移动值在短期内地表不可能达到最终最大值。在这种条件下，对矿区岩体移动变形预计分析带来很大困难。有限开采宽度条件下地表效应如图 2 所示(H 为开采深度， D 为有限开采宽度)。由图 2 可知，深部开采时，在未达到充分采动程度的情况下，地表只出现有限最大下沉，而达不到最终最大下沉，即最大下沉值将会随着开采的延续而逐步增大。可见，在这种条件下，下沉系数、水平移动系数、移动角等工程参数受充分采动程度影响很大。为此，针对我国的官庄东铁矿深部开采进行具体研

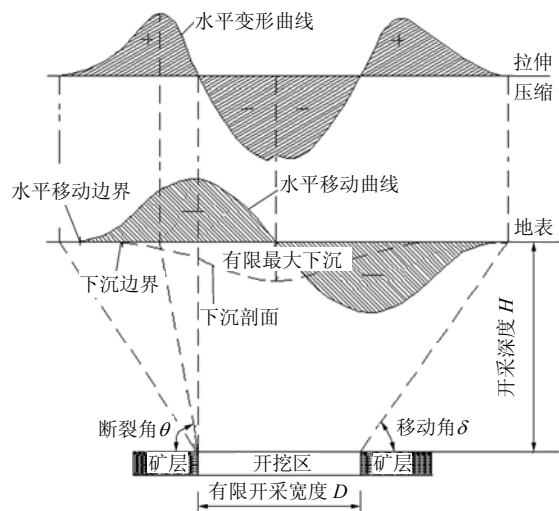


图 2 有限开采宽度条件下地表效应

Fig.2 Surface affects for a subcritical width of extraction

究分析。

2.2 官庄东铁矿地质采矿条件

本研究针对官庄矿北采区地表下沉观测结果进行具体分析。矿区基本地质概况如下：第四纪 Q 层：为黄色亚砂土，亚黏土，官庄东矿北区观测线地表观测点高程表部有古河道的流沙层，厚 2~20 m；第三系官庄组(E2+3G)：红色黏土质粉砂岩，砂岩夹绿色砂岩，泥灰岩，底部含砾石砂层或砾岩，一般厚度 200~700 m；石炭系：砂岩、页岩、黏土岩等，厚 50~100 m；奥陶系：马家沟组灰岩泥质灰岩，黄褐色泥灰岩受热变质作用，多蚀变为大理岩。

上述地层中第三系官庄组分布较广，全区内以不整合覆盖于古生代地层上。其走向近于北东，倾向 NW，倾角 10°~20°，其上又覆有第四系。第三系官庄组的红色黏土质粉砂岩，砂岩夹灰绿色砂岩，页岩及泥灰岩，底部含砾石或砂岩，胶结物主要为泥质、钙质，遇水膨胀，随着含水量增加其强度降低。同时，因闪长岩的侵入和后期矿化热液的影响而产生了不同程度的热变质，砂卡岩化或矿化热液蚀变，灰岩多变为大理岩，砂岩多为变质砂岩、页岩、角岩、板岩等。

根据官庄东矿矿体初步设计说明书介绍：矿区错动范围是根据矿床顶部红板岩的性质确定，错动角按 55°圈定，范围为矿体下盘(东部)和南端，主要井筒都是布置在错动界限之外 25 m 处。

官庄东矿采矿方法为无底柱分段崩落法，中段高度为 50 m，分段高度为 10 m，进路间距为 10 m，上下分段采矿进路交错开。北采区地表海拔标高为 +208 m，第一个分段为 -310 m(N - 310 分段)，实际开采深度为 518 m；而开采宽度为 146 m，并未达到充分采动程度，仍属于有限开采。

2.3 官庄东铁矿已有观测资料分析

为说明深部有限开采地表下沉与水平移动的差别，官庄矿部分地表移动实测结果见表 1。

实际观测资料分析结果表明，水平移动对矿山竖井等建(构)筑物影响较大，必须引起足够的重视。而要真正掌握矿区水平移动状况，必须正确判断开采的充分程度。为确定开采的充分程度，以官庄东铁矿北采区多个观测站的多年积累的大量观测资料，总结分析并绘制出下沉系数 k 与 D/H 的变化关系曲线，具体如图 3 所示。

由表 1 地表实测资料可知：

表 1 地表移动实测结果

Table 1 Measured values of ground movements

测点编号	时间/年月	方位角	位移(增为正, 减为负)/mm		
			北向	东向	下沉
J1	200409*	N67.0°W	+7	-13	-2
J2	200409*	S72.0°W	+5	-14	-3
J1	200510	N69.0°W	+12	-30	-15
J2	200510	N79.0°W	+5	-22	-12
J1	200610	N85.0°W	+7	-72	-31
J2	200610	N83.5°W	+4	-34	-45
J1	200710	N82.0°W	+8	-82	-40
J2	200710	N79.0°W	+8	-58	-19
J1	200804	N86.0°W	+8	-96	-83
J2	200804	N81.0°W	+8	-48	-55

注：“*”表示 2004 年 9 月 28 日。

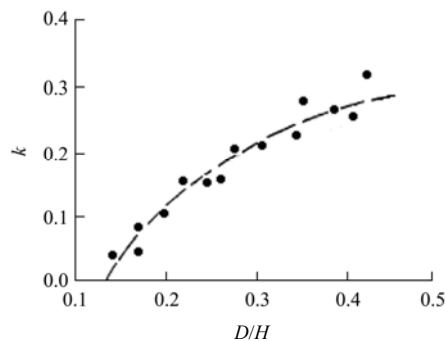


图 3 下沉系数 k 与 D/H 关系曲线

Fig.3 Relationship curve between subsidence coefficients k and (D/H)

- (1) 水平移动大于垂直移动(下沉)值；
- (2) 水平移动影响范围大于垂直移动范围；
- (3) 随着各分段地下开采的延续，地表移动影响的时间较长，目前情况下，地表仍处于未稳定阶段，即地表移动变形仍在进一步发展过程中。

而图 3 进一步说明地表下沉与采空区大小的关系极为密切。对于一定的采空区尺寸，一般认为：随着开采深度的增加，地表移动盆地变得平缓，各项变形值减小，所以在其他条件相同的情况下，地表移动变形值是采深成反比的。

2.4 官庄东铁矿深部开采地表移动影响范围分析

为合理确定地表移动及其影响范围，应确定出矿区岩层移动角。为了对比分析参考，以便于确定符合该矿山工程实际情况的矿区移动角，国内外相关的部分矿山移动角实测值见表 2。

表 2 不同矿山的移动角

Table 2 Angles of draw in different mines

国内外矿山	岩层	采深/m	移动角/(°)
中国金岭铁矿	闪长岩、蚀变闪长岩	48~94	50.0~55.0
中国锡矿山南矿	灰岩	200~250	68.0~69.0
中国大吉山钨矿	石英脉	760	68.0
中国云锡马拉格	矽化大理岩	200	68.0
中国石咀子铜矿	条带状大理岩	1 000	80.0
中国小铁山矿	石英钠长斑岩	450~650	60.0
中国柏坊铜矿	钙质石英砂岩	10~90	51.0~55.0
中国易门铜矿	白云岩、板岩互层	600	55.0
中国弓长岭铁矿	角闪岩	450~500	60.0~80.0
荷兰 imburg 矿	饱和砂岩、松散材料	-	50.0~55.0
澳大利亚 Tertiary 煤田	软弱、饱和岩层	-	48.0~49.0
南非 Velenje 矿	巨厚粗结晶玄武岩	-	79.0
南斯拉夫 Velenje 矿	黏土, 泥炭和砾石	-	48.0~57.0
英国 British 煤田	以泥质岩层为主	-	51.4~63.0
印度 Pench 矿	覆岩 62%以上黏土	-	49.0

根据地表移动变形实测资料分析, 矿体下盘岩层移动角 $\delta = 53^\circ$, 这一角度值与国内外同类矿区相似。如国内金岭铁矿(闪长岩、蚀变闪长岩), $\delta = 50^\circ \sim 55^\circ$; 易门铜矿(白云岩、板岩互层), $\delta = 55^\circ$; 荷兰 Limburg 矿(饱和砂岩、松散材料为主), $\delta = 50^\circ \sim 55^\circ$; 南斯拉夫 Velenje 矿区(黏土, 淤泥, 砂岩, 泥炭和砾石), $\delta = 48^\circ \sim 57^\circ$; 英国 British 煤田(以泥质岩层为主), $\delta = 51.4^\circ \sim 63.0^\circ$; 而官庄矿覆岩属于软岩, 实测移动角 $\delta = 53^\circ$ 与同类矿山情况一致。

由表 2 实测资料可见, 软弱岩层移动角一般要小于坚硬岩层移动角, 而官庄矿实测结果进一步证实了这一结论。有了这一实测移动角, 即可较为准确的确定出开采岩体移动对地表的影响范围。

3 与时间相关的地表下沉预计分析

3.1 基本分析理论模型

大量的工程结果表明, 在深部开采之后, 地下开采引起地表移动变形是一个复杂的 4 维空间问题。在煤田开采条件下, 地表移动过程可从 6 个月延续到 5 a 之久; 而在钾盐矿床开采条件下, 移动持续时间甚至达到 100 a 以上。而对于金属矿山, 移动持续时间是有待分析解决的问题。本文采用随

机影响函数模型进行具体计算分析, 其地下开挖动态地表移动示意图如图 4 所示。

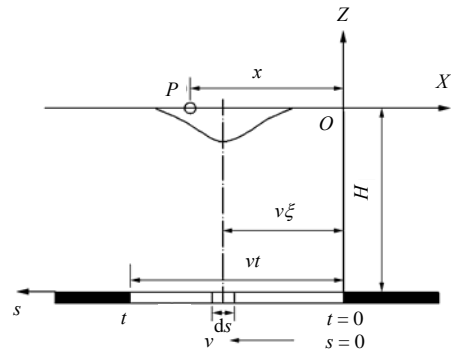


图 4 地下开挖动态地表移动示意图

Fig.4 Sketch of progressive surface movements

在图 4 中, 开采深度为 H , 开采矿层厚度为 m , 开采工作面以等速 v 推进, 自点 $x = 0$, 于 $t = 0$ 瞬间开始向左连续开采。在 t 瞬间的开采宽度为 j , 则 $j = vt$ 。取 XOZ 及 sOZ 直角坐标系来讨论地表面坐标为 x 的点 P 的下沉。

设在时间间隔 $(0, t)$ 之内的任意瞬间, 采出了一个微小单元 ds , 其坐标为 $s = v\xi$, 则对于任意的单元 ds 开采是在 ξ 瞬间进行的, 故应以 $(t - \xi)$ 代替 t 。

因此, 开采单元 ds 影响下地表下沉^[2]为

$$s_e(x, t) = \frac{S_{\max}}{r} \exp\left[-\pi \frac{(x+s)^2}{r^2}\right] [1 - e^{-c(t-\xi)}] \quad (1)$$

式中: r 为主要影响半径, s_{\max} 为最大下沉, c 为时间系数。

根据叠加原理, 当开采宽为 j 时, 所引起的地表上某点的下沉^[2]应为

$$s(x, t) = \int_0^j \frac{S_{\max}}{r} \exp\left[-\pi \frac{(x+s)^2}{r^2}\right] [1 - e^{-c(t-\xi)}] ds \quad (2)$$

根据已有的研究, 随机影响函数的计算公式可根据随机介质理论经一系列推导后得出, 在此只给出动坐标系中的下沉盆地断面方程式。由于本文所分析的官庄铁矿北采区属于有限开采, 因此只需给出有限开采的计算公式。具体表达式^[2]如下:

$$s(\xi, t) = \frac{S_{\max}}{\sqrt{\pi}} \left[\int_{\frac{\sqrt{\pi}}{r}(vt-\xi)}^{\frac{\sqrt{\pi}}{r}\xi} \exp(-\lambda^2) d\lambda - \exp\left(\frac{c^2 r^2}{4\pi v^2} - \frac{c}{v} \xi\right) \int_{\frac{\sqrt{\pi}}{r}(vt-\xi) - \frac{cr}{2v\sqrt{\pi}}}^{\frac{\sqrt{\pi}}{r}\xi - \frac{cr}{2v\sqrt{\pi}}} \exp(-\lambda^2) d\lambda \right] \quad (3)$$

式中: λ 为积分变量。

式(3)就是有限开采时, 地表下沉非稳定盆地断

面方程式。当开采宽度增加时, 固定边界上方地表移动渐趋稳定, 与半无限开采情况下的地表稳定下沉盆地完全一致。

3.2 基本参数的确定

在式(1)中, 需要确定的重要参数是时间系数 c , 由于该参数与岩性相关, 因此, c 值可根据工程实际确定。一般来说, 岩石塑性愈大, 开采深度愈小, 时间系数 c 愈大。目前, 应用较广的确定 c 的方法是 S. W. Knothe 提出的图解法。根据矿区观测站大量的下沉过程观测结果, 采用图解法求出时间系数 c , 并取其平均值, 对实际工程来说是足够精确的。本文采用图解法求出时间系数 c , 再对北区开采动态影响进行分析。

由于金属矿山的实际观测资料远比煤矿要少, 我国一些煤矿的时间系数 c 值, 可供金属矿山开采动态影响分析参考。

对于该铁矿北采区, 利用图解法(具体方法在此不再详述)求得北区的与岩性相关的时间系数 $c = 0.40/a$, 随后即可利用上述模型对开采后影响时间趋势进行具体分析。

3.3 北采区影响时间趋势分析

将 $c = 0.40/a$ 代入式(1), 即可计算并获得与时间相关的下沉曲线图。该矿北区无因次下沉时间曲线与北区实测值对比图(见图 5)。

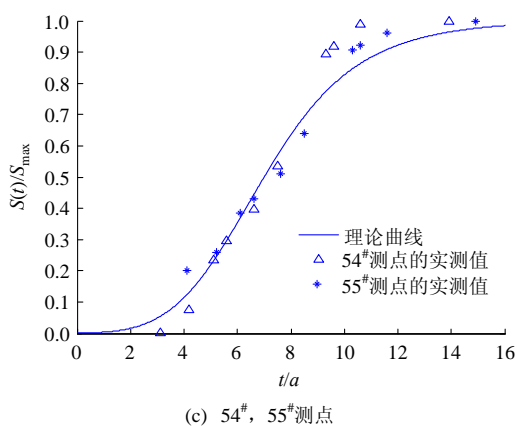


图 5 理论曲线与实测值对比图

Fig.5 Comparison of measured and predicted values

从下沉影响周期统计结果可见, 开采深度愈小, 时间系数 c 愈大。在此, 用所确定出的岩性时间系数 c 代入式(1), 并将理论预计结果和 50#, 51#, 52#, 53#, 54#, 55#测点的实测值进行了对比(见图 5), 通过对比结果可知, 随机影响函数模型拟和下沉时间过程效果较好。

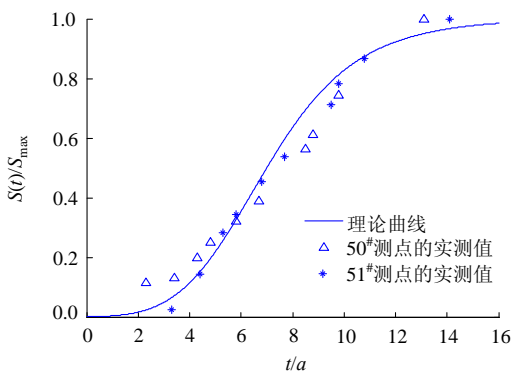
由于各矿区工程地质条件的复杂性, 矿山下沉影响时间的预测具有一定难度, 一般应根据矿区实际观测资料, 结合具体情况进行估算。

此外, 为了预测该矿区开采后的影响时间, 对北采区实际下沉情况进行具体分析。矿山投产后, 为观测地表下沉, 在地表布置了 12 条地表移动观测线。1989 年 1 月在北采区地表布置了 89 个观测点并获得了大量的实测资料, 北采区观测线 B-B 地表测量结果见表 3。

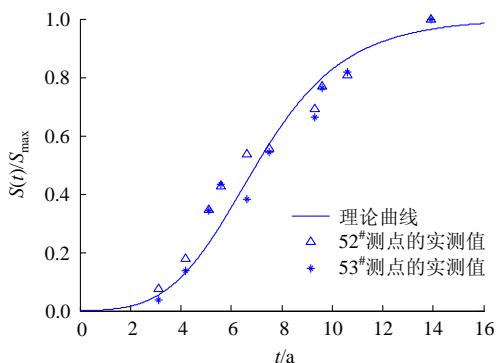
表 3 北采区观测线 B-B 地表下沉观测结果

Table 3 Ground subsidences for line B-B in north mining area

时间/年月日	测点地表下沉/m			
	48#	49#	50#	51#
19890923	205.138	205.560	205.924	206.210
19891006	205.134	205.552	205.918	206.206
19891204	205.086	205.504	205.866	206.144
19900115	205.042	205.457	205.817	206.095
19900509	204.972	205.381	205.733	206.005
19901124	204.829	205.230	205.557	205.756
19910404	204.756	205.148	205.451	205.572
19910522	204.756	205.148	205.423	205.503
19920325	204.560	204.929	205.162	204.986
19930208	204.371	204.728	204.922	204.581
19940114	204.216	204.551	204.704	204.257
19951115	203.657	203.992	204.111	203.590
19960313	203.480	203.828	203.954	203.324
19970304	202.921	203.329	203.512	203.001



(a) 50#, 51#测点



(b) 52#, 53#测点

在官庄矿北采区, 当-330 m 分段 1989 年 4 月开始采矿后, 于 1989 年 12 月初地表开始观测到宏观下沉, 如地表 48[#]测点在 1989 年 12 月 4 号实测值为 205.086 m, 与初始观测值(205.138 m)之差为 0.052 m(即 52 mm), 已不属于测量误差范围内的数值, 即地表已开始下沉。49[#], 50[#], 51[#]测点也出现了明显的下沉。

从观测资料来看, 官庄矿北采区从开采到地表产生宏观下沉, 时间约为 7 个月~1 a; 北采区从开采-310 m 水平引起地表下沉, 到-340 m 水平最终开采结束, 整个下沉过程需要经历大约 15 a 时间。由于矿区软岩地层的蠕变作用, 随着深部开采的延续, 岩体移动变形量仍会继续增加, 仍需加强地表移动观测。

4 结 论

(1) 根据理论预计和矿山实际观测结果, 官庄矿 518 m 厚的覆岩(红色黏土质粉砂岩)属于软岩, 所确定出的移动角 $\delta = 53^\circ$ 符合工程实际情况, 依此可确定出矿区地表移动影响具体范围。

(2) 深部有限开采条件下, 实测水平移动大于垂直移动(下沉)值; 水平移动影响范围大于垂直移动范围。

(3) 随着各分段地下开采的延续, 地表移动影响的时间较长, 目前情况下, 地表仍处于未稳定阶段, 即地表移动变形仍在进一步发展过程中。

(4) 由于矿区目前仍属于有限开采, 因此, 今后随着深部开采的延续, 地表下沉量仍会继续增加, 仍需加强观测。

(5) 本文采用图解法所确定出该铁矿北区的与岩性相关的时间系数 $c = 0.40/a$; 通过和实测值的对比, 说明该值符合工程实际情况。

(6) 由理论预测结果可知, 对于官庄铁矿北区, 从开采-310 m 水平引起地表下沉, 到-340 m 水平最终开采结束, 整个下沉过程需要经历大约 15 a。

参考文献(References):

[1] SINGH M M. Mine subsidence: SME mining engineering handbook [R]. [S. l.]: [s. n.], 1992.

[2] Department of Mining and Minerals Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University. Prediction of ground movements due to underground mining in the eastern United States coalfields, Blacksburg[R]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1987.

[3] 李文秀, 侯晓兵, 郭玉贵, 等. 遗传规划方法用于确定岩体移动

参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 2 974 - 2 978.(LI Wenxiu, HOU Xiaobing, GUO Yugui, et al. Genetic programming method for determining parameters of rock mass displacement due to underground mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 2 974 - 2 978.(in Chinese))

[4] REID P. Horizontal movements around cataract dam, southern coalfield[C]// Proceedings of the MSTS 4th triennial conference on buildings and structures subject to ground movement. Newcastle: [s. n.], 1998: 157 - 170.

[5] KHAIR A W, QUINN M K, CHAFFINS R D. Effect of topography on ground movement due to longwall mining[J]. Mining Engineering, 1988, 40(8): 820 - 822.

[6] LI W X, MEI S H, ZHAI S H, et al. Fuzzy models for analysis of rock mass displacements due to underground mining in mountainous areas[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(4): 503 - 511.

[7] TOMAZ A, GORAN T. Prediction of subsidence due to underground mining by artificial neural networks[J]. Computers and Geosciences, 2003, 29(5): 627 - 637.

[8] AKSOY C O, KOSE H, ONARGAN T, et al. Estimation of limit angle using laminated displacement discontinuity analysis in the Soma coal field, Western Turkey[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(4): 547 - 556.

[9] CUI X, WANG J, LIU Y S. Technical note: Prediction of progressive surface subsidence above longwall coal mining using a time function[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 1 057 - 1 063.

[10] DRAGAN G, FRANC O H, DASHNOR. A short- and long-term rheological model to understand the collapses of iron mines in Lorraine, France[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(7): 557 - 570.

[11] HEBBLEWHITE B K. Regional horizontal movements associated with longwall mining[R]. Sydney: University of New South Wales Mining Research Centre, 2001.

[12] RAJENDRA S, MANDAL P K, SINGH A K, et al. Upshot of strata movement during underground mining of a thick coal seam below hilly terrain[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(1): 29 - 46.

[13] LI W X, DAI L F, HOU X B, et al. Fuzzy genetic programming method for analysis of ground movements due to underground mining[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(6): 954 - 961.

[14] GONZALEZ N C, ALVAREZ F M I, MENENDEZ D A, et al. The new three-dimensional subsidence influence function denoted by n-k-g[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(3): 372 - 387.

[15] ÁLVAREZ F M I, GONZALEZ N C, MENENDEZ D A, et al. Generalization of the n-k influence function to predict mining subsidence [J]. Engineering Geology, 2005, 80(1/2): 1 - 36.

[16] JUNG H C, KIM S W, JUNG H S, et al. Satellite observation of coal mining subsidence by persistent scatterer analysis[J]. Engineering Geology, 2007, 92(1/2): 1 - 13.