

# 海南露天铁矿开采地表移动及其对环境的影响<sup>①</sup>

齐栋梁<sup>1,2</sup>, 高重阳<sup>3</sup>

(1.河北水利电力学院 土木工程系,河北 沧州 061001; 2.河北省岩土工程安全与变形控制重点实验室,河北 沧州 061001; 3.东北电力大学 建筑工程学院,吉林 吉林 132012)

**摘要:** 采用模糊测度理论对海南某大型露天铁矿开采引起的周围地表变形进行预测分析,并与随机介质理论计算结果进行对比,验证了模糊测度理论在分析露天开采对周围环境影响方面的优越性和实用性。

**关键词:** 露天开采; 模糊测度理论; 随机介质理论; 地表移动; 铁矿山; 开挖深度

中图分类号: TD325

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.02.007

文章编号: 0253-6099(2024)02-0027-04

## Ground Surface Displacement and Its Influence on Environment During Open-Pit Mining in Hainan Iron Mine

QI Dongliang<sup>1,2</sup>, GAO Chongyang<sup>3</sup>

(1.Department of Civil Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, Hebei, China; 2.Hebei Key Laboratory of Geotechnical Engineering Safety and Deformation Control, Cangzhou 061001, Hebei, China; 3.School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin, China)

**Abstract:** The ground surface displacement caused by open-pit mining of a large iron mine in Hainan was analyzed by using fuzzy measurement theory. Base on the comparison with the calculated results by using the theory of random media, it has verified that the fuzzy measurement theory is superior and practicable in the analysis of influence of open-pit mining on the surrounding environment.

**Key words:** open-pit mining; fuzzy measurement theory; theory of random media; surface displacement; iron mine; excavation depth

随着矿山露天开采的深凹化,开挖引起的周围地表移动变形越来越明显。开挖深度较大导致的地表错动影响范围可达1 km,甚至更远,由此产生的环境问题,如水土流失、良田毁坏、诱发地质灾害等,不容忽视;采场周围土地塌陷、张裂也会对周围建筑基础产生破坏,甚至对周围地下水水流场产生一定影响。因此,对露天开采引起的周围地表变形情况进行预测分析具有重要意义<sup>[1-5]</sup>。

近年来,学者们对矿山露天开采所引起的地表变形问题进行了大量研究,并取得了系列研究成果<sup>[6-14]</sup>。本文采用模糊测度理论对海南某铁矿露天开挖地表移动问题进行预测,并结合随机介质理论计算结果进行对比分析,探讨了模糊测度理论在处理此类工程问题

的优越性及实用性。

### 1 露天开采地表移动分析理论模型

实际采矿工程中,铁矿露天开采引起地表变形往往受开采工艺、工程地质条件、岩石物理力学性质、开采深度、地下水等诸多客观因素影响,这些影响因素难以被定量且精确地确定,具有一定随机性和模糊性。

模糊数学法可综合诸多不确定因素建立适用于分析岩体移动变形的理论模型。为便于建立理论模型,进行如下定义:假设模糊事件 $A$ 为研究空间 $\Omega$ 中某些样本所构成的一个模糊子集合,则模糊事件 $A$ 的概率测度简称为“模糊测度”,并可表述为<sup>[1]</sup>:

① 收稿日期: 2023-10-13

基金项目: 河北省自然科学基金(A2022412001); 河北水利电力学院基本科研业务费研究项目(SYKY2201)

作者简介: 齐栋梁(1987—),男,河北沧州人,博士,讲师,主要从事计算力学与结构工程、岩土力学与工程方面研究。E-mail:qidongliang@hbwe.edu.cn

通信作者: 高重阳(1990—),女,河北唐山人,博士,讲师,主要从事岩土力学与工程方面研究。E-mail:gaochongyang99@stu.xjtu.edu.cn

$$\begin{cases} M(A) = \int_{\Omega} \mu_A(x) dp(x) \\ \int_{\Omega} dp(x) = 1.0 \end{cases} \quad (1)$$

式中隶属函数  $\mu_A(x) : \Omega \rightarrow [0, 1]$  为 Borel 可测;  $dp(x)$  为分布密度函数。

本文将模糊测度理论应用于预测露天开挖引起的地表变形,不仅可以获得最大下沉值,还可以预测影响范围内不同地表点的下沉量,进而为分析露天开挖对周围环境的影响程度提供理论指导。为了便于建立模糊测度理论模型,本文所采用的直角坐标系统如图 1 所示。

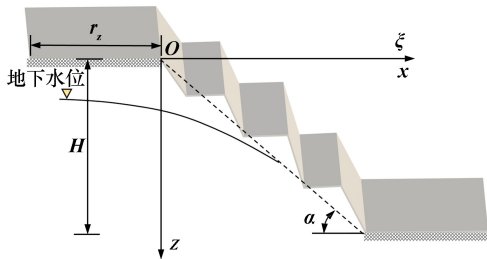


图 1 露天矿开采坐标图

考虑到地下水对边坡岩体移动变形影响较大,基于以上定义,对文献[15]中反映岩体移动变形与地下水相关程度的隶属函数  $\mu_A(z, w)$  进行了修正,具体表达式为:

$$\mu_A(z, w) = \exp\left[-\frac{w \times (H - z)}{H}\right] \quad (2)$$

式中  $w$  为地下水影响系数,取值范围  $[0, 1]$ ;  $H$  为露天矿开挖的最大深度;  $z$  为开挖深度。

为了验证所提隶属函数的适用性,假定地下水影响系数  $w = 0.5$ ,最大开挖深度  $H = 20$  m。图 2 给出了修正后隶属函数  $\mu_A(z, w)$  随开挖深度的变化趋势。从图 2 可以看出,修正后的隶属函数值随开挖深度增加而增大。与文献[15]中的隶属函数形式相比,修正后的隶属函数更符合工程实际,即露天开挖深度对地表变形影响程度与隶属函数值正相关。

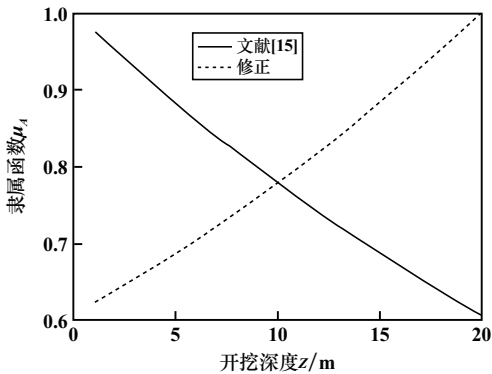


图 2 隶属函数随开挖深度变化规律

另一方面,统计和分析大量实测数据可知,开采到一定深度后,边坡垂直变形服从以下分布密度函数:

$$dp(x, z) = \int_{z \cot \alpha}^{\infty} \frac{1}{r_z} \exp\left[-\frac{\pi(\lambda \cdot x - \xi)^2}{r_z^2}\right] d\xi \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为边坡角;  $\lambda$  为与地下水有关的岩体移动系数;  $r_z = z / \tan \beta_w$ , 为开挖深度  $z$  处的主要影响半径,它随着开挖深度变化而变化;  $\beta_w$  为主要影响范围角;  $\xi$  为图 1 中地下水水位下降曲线上点的横坐标。

最后,将式(2)和式(3)代入式(1),得到预测露天矿开挖地表下沉量的模糊测度理论公式为:

$$M(A) = \int_{\Omega} \mu_A(z, w) dp(x, z) \quad (4)$$

当开挖深度达到  $H$  时,地表下沉量为:

$$W = k_w M(A) \quad (5)$$

式中  $k_w$  为待定下沉系数。

根据随机介质理论<sup>[16]</sup>,地表下沉量计算公式为:

$$W = \int_0^H \int_{z \cot \alpha}^{\infty} \frac{\tan \beta_w}{z} \cdot \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta_w (x - \xi)^2}{z^2}\right] dz d\xi \quad (6)$$

利用上述理论模型,即可对露天矿开采引起的边坡岩体移动变形进行具体计算分析。

考虑到露天矿边坡移动变形数据较少,以文献[15]某软岩地层露天矿为例,该矿所处地层为泥质粉砂岩,厚度达到 230 m,属于软岩地层。该露天矿的边坡角为  $40^\circ$ 。采用模糊测度理论和随机介质理论模型分别探讨了开采深度 113 m 时的模拟结果。理论计算所采用的相关工程参数如表 1 所示。

表 1 工程参数

$w$	$\beta_w / (^\circ)$	$k_w$	$\lambda$	$H / \text{m}$	$\alpha / (^\circ)$
0.5	36.54	1.4	0.035	113	40

基于 Matlab 平台编制了相应模糊测度理论和随机介质理论模型计算程序,图 3 给出了采用两种计算方法与实测数据对比结果。从图 3 可以看出,随着水平影响范围增加,采用模糊测度理论计算的结果收敛较缓慢,且与工程实测数据吻合度较高;随机介质理论并没有考虑地下水的影响,其计算结果收敛较为迅速,水平影响距离 100 m 时地表下沉量趋于 0,与工程实测数据相差较大。开挖深度 113 m 时,采用模糊测度理论计算的最大下沉值为 1 671.3 mm,采用随机介质理论计算的最大下沉值为 1 517.0 mm。上述数值模拟计算结果表明,与随机介质理论相比,采用模糊测度理论预测露天矿开挖引起的地表下沉问题更符合工程实际。

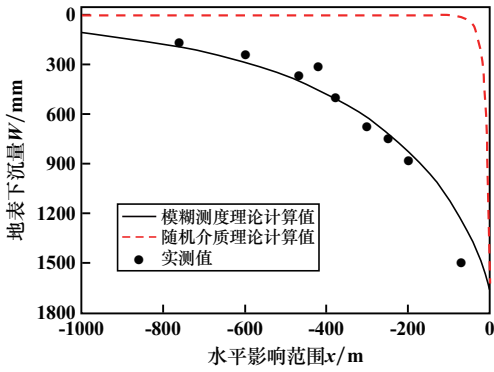


图 3 两种理论计算结果与实测值对比

## 2 工程实例计算分析

### 2.1 工程概况

海南石碌铁矿为一大型露天铁矿,位于海南省昌江县石碌镇。矿区出露地层主要为寒武系-奥陶系石碌群。石碌群由海相沉积的泥岩、粉砂岩、碳酸盐岩和铁、铜、钴矿层组成,经区域变质和接触变质作用,岩石为板岩-千枚岩、粉砂岩-石英岩、大理岩-白云岩和透辉透闪石岩等。共划分为 7 个分层,第 6 分层为主要含矿层,有 3 个较大的主采场:北一采场、枫树下采场和南六采场,其中规模最大的北一主采场于 1957 年 7 月 1 日恢复生产,2017 年 8 月资源已基本开挖完,闭坑后形成了长约 1 100 m、宽约 750 m、边坡角 29°~49°、深约 300 m 的近椭圆形大型露天采坑,是海南第一大采坑,也是亚洲第一大富铁矿采坑。如此大规模采矿工程导致的地表移动变形势必对周边环境产生严重影响,目前对该类问题的研究主要依赖实时实地监测,而对未来变化趋势的研究较少。

### 2.2 边坡开挖岩体移动分析

以海南石碌铁矿北一主采场已形成的高陡露天矿边坡为例,利用模糊测度理论和随机介质理论分别模拟了该矿山开挖至 200 m 和 300 m 时地表移动的变形情况。理论计算所用相关工程参数见表 2。

表 2 海南石碌铁矿北一主采场工程参数

$w$	$B_w/(^\circ)$	$k_w$	$\lambda$	$H/m$	$\alpha/(^\circ)$
0.5	41	1.0	0.04	200	44
0.7	39	1.2	0.08	300	44

为了进一步验证模糊测度理论的优越性,开挖深度 200 m 和 300 m 时采用两种理论预测的地表下沉量见表 3。结果表明,随着水平影响范围增加,采用模糊测度理论计算的结果收敛较缓慢,影响范围超过 2 km;

忽略地下水影响的随机介质理论计算结果收敛迅速,地表下沉预测影响范围在 300 m 左右。采用模糊测度理论预测时,开挖深度 200 m 时的最大下沉预测值为 1 892.2 mm,开挖深度 300 m 时的最大下沉预测值为 4 602.9 mm;采用随机介质理论的预测结果远高于模糊测度理论的预测结果。

表 3 预测结果

开挖深度/m	水平影响范围/m	地表下沉量预测值/mm	
		模糊测度理论	随机介质理论
200	0	1 892.2	2 404.6
	100	1 364.2	14.0
	200	1 067.9	0.1
	300	855.3	0.0
	400	693.4	0.0
	500	566.6	0.0
	600	465.4	0.0
	700	383.7	0.0
	800	317.1	0.0
	900	262.7	0.0
	1 000	217.9	0.0
	1 100	180.9	0.0
	1 200	150.2	0.0
	1 300	124.8	0.0
1 400	103.7	0.0	
1 500	86.2	0.0	
1 600	71.6	0.0	
1 700	59.5	0.0	
1 800	49.4	0.0	
1 900	41.0	0.0	
2 000	34.0	0.0	
300	0	4 602.9	5 333.8
	100	3 219.1	213.9
	200	2 450.9	11.7
	300	1 908.9	0.5
	400	1 504.5	0.0
	500	1 194.2	0.0
	600	952.2	0.0
	700	761.5	0.0
	800	610.2	0.0
	900	489.4	0.0
	1 000	392.8	0.0
	1 100	315.3	0.0
	1 200	253.0	0.0
	1 300	202.9	0.0
1 400	162.6	0.0	
1 500	130.2	0.0	
1 600	104.1	0.0	
1 700	83.2	0.0	
1 800	66.4	0.0	
1 900	52.9	0.0	
2 000	42.0	0.0	

两种方法计算结果也间接揭示出,地表下沉量随着开挖深度增加而增大,地表变形过大也可能导致矿

山边坡发生滑坡或崩塌等灾害。现场实测资料指出<sup>[17]</sup>,北一采场强风化岩深度达数十米,且呈碎屑状;随着露天开挖深度增加,矿山边坡多处发生滑坡或崩塌,与理论预测结果相吻合。

### 2.3 露天开挖对周围环境的影响分析

露天矿山开采不仅改变了原来的自然生态环境,而且还会影响周围建筑物的基础设施及交通设施,同时也会对矿区周围居民生活环境造成影响。此外,矿山开采所剥离的弃土、废石侵占了大面积土地,破坏了良田。采取相应的治理措施,如回填采坑、造地复垦、修复良田及基础设施等,会消耗大量人力和财力。预测露天开采对环境的影响范围及程度至关重要,这样不仅可以为施工提供技术指导,还能节约后期修复成本。

随着矿山开采深度增加,地表移动的影响范围增大。采用模糊测度理论不仅可以计算地表移动的影响范围,还能计算影响范围内各地表点的下沉值。在矿山开采过程中,可以依据相应地表点下沉预测值对矿区环境治理方案及施工方案及时作出调整,将保护矿区生态环境和安全生产有效地融为一体。

## 3 结 论

1) 采用模糊测度理论对露天开采引起的地表移动进行预测,计算结果与实测数据相吻合,它比随机介质理论更符合工程实际。

2) 露天矿山开采对周围地表的影响范围很大,模糊测度理论不仅可以预测地表下沉值,还可以预测影响范围内不同地表点的下沉值,以此来评估露天开挖对周围环境的影响,可为分析开挖所引起的周围地表错动(如周围土地局部塌陷、张裂及对建筑物基础产生的破坏等)提供技术指导。

### 参考文献:

- [1] 李文秀. Fuzzy 理论在采矿及岩土工程中的应用[M]. 北京:冶金工业出版社,1998.
- [2] 高重阳. 露天铁矿岩体移动分析的模糊测度方法[D]. 保定:河北

大学,2016.

- [3] 杨晓杰,侯定贵,王嘉敏,等. 南芬露天铁矿下盘高陡边坡稳定性分析与监测预警技术研究[J]. 采矿与安全工程学报,2017,34(5):1000-1007.
- [4] WANG Z, SONG G, DING K. Study on the ground movement in an open-pit mine in the case of combined surface and underground mining[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020; 8728653.
- [5] 许梦国,张威威,王平,等. 程潮铁矿深部开采塌陷坑移动规律研究[J]. 金属矿山,2021,50(9):1-7.
- [6] 李文秀,王菲,刘南北. 近城区露天开采对边坡及周围建筑物影响分析[J]. 化工矿物与加工,2017,46(9):37-39.
- [7] 韩文斌,高琨鹏,王汉斌. 露天铁矿端帮开采诱发的地表及岩层移动规律[J]. 科学技术与工程,2020,20(19):7596-7601.
- [8] 张褚强,沈强,陈从新,等. 程潮铁矿西区分段崩落法开采影响范围和极限角研究[J]. 岩土力学,2021,42(6):1713-1723.
- [9] 陈树林,朱志岗,李世彬,等. 尖山铁矿西北帮岩体及地表移动范围预测研究[J]. 采矿技术,2022,22(5):59-64.
- [10] 彭岩岩,宋南,刘宇航,等. 南芬露天铁矿边坡开挖稳定性实验研究[J]. 矿冶工程,2022,42(6):18-23.
- [11] 胡军,邱俊博,栾长庆,等. 基于 IGWO-SVM 的露天矿边坡变形预测[J]. 矿冶工程,2022,42(1):15-18.
- [12] 胡斌,李剑飞,李京,等. 基于软弱夹层蠕变特性的边坡长期稳定性分析[J]. 矿冶工程,2023,43(4):6-11.
- [13] Paradelia W R, Ferretti A, Mura J C, et al. Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis[J]. *Engineering Geology*, 2015,193:61-78.
- [14] WANG H, LI K, ZHANG J, et al. Monitoring and analysis of ground surface settlement in mining clusters by SBAS-InSAR technology[J]. *Sensors*, 2022,22(10):3711.
- [15] 李文秀,田治州. 软岩地层露天开采地表移动分析[J]. 化工矿物与加工,2012,41(3):26-28.
- [16] LIU B C. Theory of stochastic medium and its application in surface subsidence due to excavation[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 1992,2(3):17-24.
- [17] 符贤,陈福雄. 浅谈北一采场南帮边坡综合治理[J]. 海南矿冶,1999,9(2):6-8.
- 引用本文: 齐栋梁,高重阳. 海南露天铁矿开采地表移动及其对环境的影响[J]. 矿冶工程,2024,44(2):27-30.