

文章编号: 1673-3363-(2014)06-0896-05

# 山区采动地表裂缝预测方法研究

韩奎峰<sup>1,2</sup>, 康建荣<sup>2</sup>, 王正帅<sup>2</sup>, 吴侃<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 江苏师范大学测绘学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要** 为客观预测山区采动地表裂缝的位置和宽度, 在分析地表裂缝产生机理的基础上, 以主断面上等坡度的坡段为研究对象, 并以山区地表下沉、水平移动预计值为主要参数, 按照矢量分解与合成法则求取坡段变形预计值, 将岩土力学中的临界变形值作为地表起裂判据, 进而确定采动裂缝出现的坡段及单位长度内地表裂缝宽度, 最后分析了所提方法的适用性。选择山西古交嘉乐泉煤矿 1208~1210 对拉工作面为例进行实例分析, 结果表明: 坡段变形预测值和变形分布规律与实际符合较好, 出现裂缝的坡段与现场勘查结果基本一致, 从而验证了该方法的可行性与有效性。

**关键词** 地表裂缝; 预测模型; 山区开采沉陷; 变形预计; 煤矿塌陷区

中图分类号 TD 327

文献标志码 A

## Prediction of surface fissure in high relief areas induced by underground coal mining

HAN Kuifeng<sup>1,2</sup>, KANG Jianrong<sup>2</sup>, WANG Zhengshuai<sup>2</sup>, WU Kan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Land Environment and Disaster Monitoring for SBSM,

China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. School of Geodesy & Geomatics, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract** To objectively predict the location and width of surface fissures in high relief coal mining subsidence areas, according to the generation mechanism of surface fissures, a slope segment deformation has been predicted based on the vectors' decomposition and synthesis principles using the equal gradient slope segment in the main section as research object and the subsidence and horizontal movement prediction values as main parameters. Taking the critical deformation value in rock and soil mechanics as the criterion of the beginning of surface fissures, this model is used to determine the location of the slope segment of the surface fissures and the width of surface fissures per unit length induced by mining. The feasibility and effectiveness of the method are tested by a case study of the 1208~1210 double face subsidence area of Jialequan Coal Mine in Shanxi Province, which shows a good fitness between the observed results and the predicted values and distribution pattern of slope segment deformation and location of surface fissures.

**Key words** surface fissure; prediction model; high relief mining subsidence; deformation prediction; coal mining subsidence area

收稿日期: 2013-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51074139); 国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室开放基金项目(LED2011B10); 江苏省高校优势学科建设工程项目

作者简介: 韩奎峰(1975—), 男, 山东省夏津县人, 博士, 讲师, 从事山区开采沉陷预计及防治方面的研究。

E-mail: hkftougao@126.com

Tel: 0516-83500257

山区采动地表裂缝是山区煤矿开采引发的一种突出的衍生灾害, 山区地下煤炭大面积开采遗留大量的采动地表裂缝, 造成矿区耕地生产力下降, 水土流失加剧, 甚至诱发山体滑坡、泥石流等地质灾害, 致使矿区生态环境日益恶化。因此, 准确预测山区采煤塌陷区采动地表裂缝的大小和分布情况对于矿区灾害防治、生态环境治理有着重要的理论意义和实用价值。目前, 一般采用现场勘测方法采集地表裂缝的相关信息, 该方法费用高、效率低, 且不具备超前预测性。在平原煤矿塌陷区, 地表裂缝危害性往往不明显, 相关预测方法的研究也较为深入<sup>[1-3]</sup>, 比较而言, 由于山区地表沉陷规律的复杂性, 致使山区采动地表裂缝发育规律相对于平原也有明显不同, 目前大多采用数值分析方法结合实际勘测情况对山区采动地表裂缝进行定性分析和规律总结<sup>[4-8]</sup>, 所得结论尚有待于进一步验证。工程实践表明<sup>[9]</sup>, 相对平原矿区概率积分法模型, 《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》<sup>[10]</sup>(下称《规程》)中的山区开采沉陷预计模型的变形预计精度偏低, 难以直接用于采动裂缝预测; 但该模型的下沉和水平移动预计结果符合山区开采沉陷基本规律, 且能够满足工程精度要求。因此, 本文以山区地表下沉和水平移动预计值为主要参数, 建立了等坡度坡段变形计算模型, 通过评判坡段变形值是否大于其临界变形值来确定某坡段是否出现采动裂缝, 并给出了单位长度内地表裂缝的宽度。

## 1 山区煤矿塌陷区内地表采动裂缝的机理分析及预测模型

研究表明<sup>[1-3]</sup>, 地表介质沿某一坡向的变形值超出其临界变形值时, 地表即产生裂缝。与平原矿区地表变形不同, 在山区开采沉陷过程中, 地表某一等坡度坡段的变形值主要由该坡段两端点的地表下沉和水平移动组合而成, 见图1。

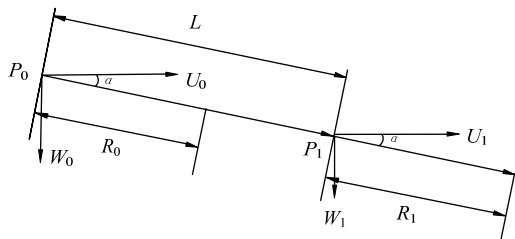


图1 地表裂缝产生机理分析

Fig.1 Analysis of mechanism for surface cracks

如图1所示, 假设有一坡段  $P_0P_1$ , 未受采动影响之前的长度为  $L$ , 平均坡度为  $\alpha$ , 采动影响之后, 端点  $P_0$  处的下沉值为  $W_0$ , 水平移动值为  $U_0$ , 端点  $P_1$  处的下沉值为  $W_1$ , 水平移动值为  $U_1$ 。则端点  $P_0$  处沿方向  $P_0P_1$  的移动向量大小为

$$R_0 = W_0 \sin \alpha + U_0 \cos \alpha \quad (1)$$

端点  $P_1$  处沿  $P_0P_1$  延长线方向的移动向量大小

$$R_1 = W_1 \sin \alpha + U_1 \cos \alpha \quad (2)$$

由式(1), (2)可知,  $P_0P_1$  坡段长度变形  $\Delta L = R_1 - R_0$  ( $R_1 > R_0$ ),  $P_0P_1$  坡段的变形值可表示为

$$\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L} = \frac{(W_1 - W_0) \sin \alpha + (U_1 - U_0) \cos \alpha}{L} \quad (3)$$

若  $\varepsilon_L$  大于临界变形值, 该坡段即产生裂缝。临界变形值按式(4)计算<sup>[2]</sup>:

$$\varepsilon_0 = 2(1 - \mu^2)C \tan(45^\circ + 0.5\varphi) / E \quad (4)$$

式中:  $\mu$  为泊松比;  $C$  为黏聚力;  $\varphi$  为内摩擦角;  $E$  为弹性模量。

坡段  $P_0P_1$  上的地表裂缝宽度按式(5)计算:

$$F = \varepsilon_L - \varepsilon_0 \quad (5)$$

式(5)即是坡段  $P_0P_1$  的地表裂缝宽度预测模型, 其中,  $F$  为 1 m 长度内发生地表裂缝宽度。需要指出的是, 当  $\Delta L < 0$  时, 坡段  $P_0P_1$  的变形为压缩变形, 不产生裂缝。

## 2 山区地表移动变形值的确定

上述各式中,  $\alpha$  为地形坡度参数, 可以从地表塌陷区的大比例尺地形图获取;  $\mu$ ,  $C$ ,  $\varphi$  和  $E$  为地表介质的力学参数, 根据地质报告或力学实验获得;  $W_0$ ,  $W_1$  和  $U_0$ ,  $U_1$  为地表移动变形参数, 在此采用《规程》中的山区开采沉陷预计模型计算得到。山区开采沉陷下沉和水平移动(沿  $\varphi$  方向)的预计模型<sup>[10]</sup>见式(6), (7)。

$$W'(x, y) = W(x, y) + D_{x,y} [P(x) \cos^2 \phi + P(y) \sin^2 \phi + P(x)P(y) \sin^2 \phi \cos^2 \phi \tan^2 \alpha'_{x,y}] \cdot W(x, y) \tan^2 \alpha'_{x,y} \quad (6)$$

$$U'(x, y, \varphi) = U(x, y, \varphi) + |D_{x,y}| W(x, y) \cdot [P(x) \cos \phi \cos \varphi + P(y) \sin \phi \sin \varphi] \tan \alpha'_{x,y} \quad (7)$$

$$P(x) = 1 + A \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x}{r} + P \right)^2 \right] + W_m \exp \left[ -t \left( \frac{x}{r} + P \right)^2 \right] \quad (8)$$

$$P(y) = 1 + A \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{r} + P \right)^2 \right] + W_m \exp \left[ -t \left( \frac{y}{r} + P \right)^2 \right] \quad (9)$$

上述模型中的相关参数的含义见《规程》，此处不再赘述。

依据式(6)~(9)，在 VC++ 环境下研制了山区地表移动变形预计软件系统(MMSPS)<sup>[9]</sup>。该系统可以实现多煤层开采时任意形状的任意多个工作面的开采沉陷预计。从实际应用效果来看，该系统所得的塌陷区地表下沉、水平移动的预计值均能够满足工程精度要求。此外，文献[11]给出了上述预计模型中统一预测参数的赋值方法，为山区地表移动变形预计提供了便利。

3 地表裂缝预测的实验研究及其分析

3.1 实验区及地表观测站概况

为使实验更具现实意义，实验地点的地形特点、地质采矿条件以及表土层属性应该具有典型性和代表性。通过综合分析，最后选择在山西古交嘉乐泉煤矿 1208-1210 对拉工作面走向主断面开展研究工作。该工作面上部均为黄土梯田，地表坡度为 7°~40°，1 220 m 标高以下有基岩出露，区内地表风化侵蚀作用明显，冲沟发育，沟谷两侧大都为呈 V 字形的黄土峭壁或陡坡，区内平均高程约为 1235 m。工作面平均采深约 120 m，走向 N20°E，倾向 N110°E，煤层平均倾角 9°，走向长度 630 m，倾向采长北部为 180 m，中南部为 210~240 m，平均采厚为 2.2 m。

沿 1208-1210 对拉工作面走向主断面布设 1 条观测线，工作面及观测站的相对位置关系见图 2。

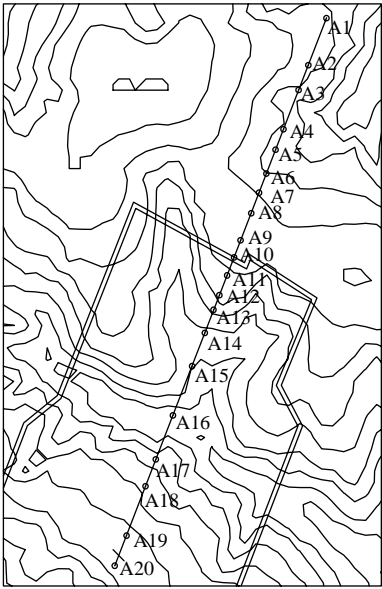


图 2 1208-1210 对拉工作面 A-A 观测线  
Fig.2 A-A observation line of 1208-1210 double face

现场共采集 12 期 A1~A20 观测点的地表移动变形数据，经过数据处理得到了各观测点的下沉、水平移动、倾斜、曲率和水平变形等数据。另外，为了分析地表采动裂缝与地表移动变形之间的关系，同时采集了观测线方向上的地表裂缝位置、宽度等相关数据，并进行了现场勾绘。

3.2 开采沉陷预计及其结果分析

基于 MMSPS 的山区开采沉陷预计的主要过程如下：

- 1) 建立塌陷区的数字地面模型(DTM)，并提取地形参数。
- 2) 在采掘工程平面图上，采集工作面角点坐标，确定各角点的采深，并以逆时针顺序排列。
- 3) 根据 DTM 计算各观测点的地表倾角、地表最大倾斜方向的方位角和地表特性参数，其中地表特性参数的符号根据 DTM 的垂直曲率来确定，其数值根据矿区地质报告确定。
- 4) 确定开采沉陷预计参数，其中概率积分法参数： $q=0.8$ ， $b=0.33$ ， $\tan\beta=2.0$ ， $\theta=86$ ， $s_1=-12$  m， $s_2=-12$  m， $s_3=-13$  m， $s_4=-15$  m；山区地表滑移参数： $A=7.63$ ， $P=1.60$ ， $t=3.40$ 。
- 5) 将上述数据输入 MMSPS 系统完成 A1~A20 观测点的开采沉陷预计，得到稳定后各点的地表移动变形值。A5~A18 号点的下沉、水平移动和水平变形预计值与实测值的对比情况见图 3。

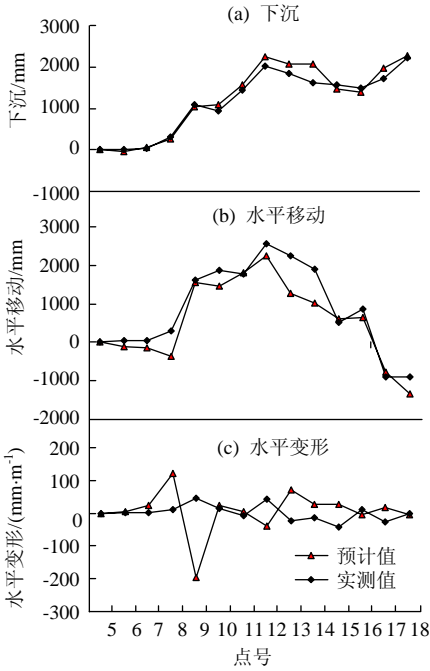


图 3 开采沉陷预计结果分析  
Fig.3 Analysis of mining subsidence prediction results

《规程》要求：下沉值和水平移动值预计结果的平均相对误差应分别小于 10% 和 20%。对图 3 分析后可知，下沉(图 3a)和水平移动(图 3b)预计精度满足要求，但水平变形(图 3c)的预计精度偏低，实际应用价值不大，无法像平原矿区那样直接用于地表裂缝预计。

3.3 沿 A-A 剖面线各测段水平变形值预测及分析

基于塌陷区 DTM 采集得到 A5~A15 相邻点之间的平均坡度角、坡长，然后按式(3)计算相邻观测点之间坡段的变形值，所得结果与实测值的对比情况见表 1。

表 1  $\varepsilon_L$  的计算结果  
Table 1 Calculation results of  $\varepsilon_L$

点号	W/ mm	U/ mm	L/ m	$\alpha /$ (°)	$\varepsilon_L / (\text{mm} \cdot \text{m}^{-1})$		测段
					预计	实测	
5	0	3					
6	-33	-104	26.724	20	-4	1	5-6
7	52	-135	17.705	13	-1	0	6-7
8	247	-362	18.795	23	-7	12	7-8
9	1 043	1 559	29.309	0	66	33	8-9
10	1 082	1 449	19.626	-17	-6	-32	9-10
11	1 561	1 793	15.303	-16	13	-20	10-11
12	2 237	2 247	18.727	-9	18	50	11-12
13	2 081	1 280	13.179	-29	-58	-67	12-13
14	2 057	1 028	23.393	-42	-7	11	13-14
15	1 466	607	31.835	-11	-9	-29	14-15

表 1 中， $\alpha$  是为测段的平均坡度，在 A5~A15 方向上，上坡取正，下坡取负； $\varepsilon_L$  实测值由测段端点的水平变形实测值相减而得； $\varepsilon_L$  预计值和实测值均为每个测段的平均变形值，如需计算该测段的裂缝宽度，则将预计值减去临界值后，再乘以测段长度即可。各测段预计值和实测值的对比情况见图 4。

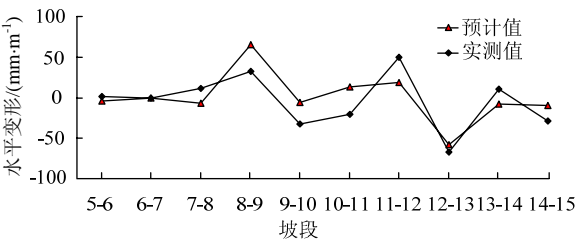


图 4 水平变形值预计结果对比

Fig.4 Comparison horizontal deformation values between prediction and measure

从图 4 可知，个别测段水平变形预测值和实测值相比误差较大，但两者所反映的正负分布规律基本一致，因此按照测段预测值预计所得的裂缝分布

规律与采动地表裂缝的实际分布规律一致，从而避免了直接采用各测点的水平变形值预测采动地表裂缝引起的偏差，准确度得到提高。

3.4 地表裂缝预测结果及分析

将  $\varepsilon_L$  预计值制作成折线图，其上方相应位置绘制 A5~A15 剖面线，并把地表裂缝现场勘测结果绘在剖面线上，形成对照图，如图 5 所示，其中“V”表示地表裂缝，“U”表示塌陷槽。按照式(4)计算得到  $\varepsilon_0=4 \text{ mm/m}$ ，用水平直线表示，与坡段变形预计折线相交于 a, b, c 和 d 这 4 点，由 4 点向剖面线做垂线，如图 5 所示。

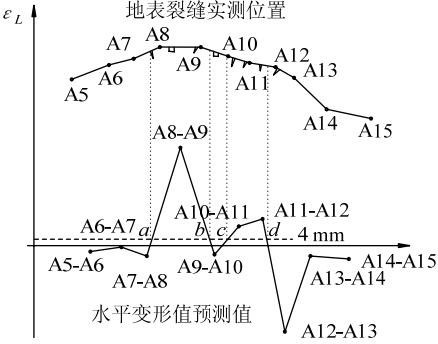


图 5 地表裂缝预测结果

Fig.5 Prediction results of surface cracks

分析图 5 可知，ab 段和 cd 段所对应的位置即是产生裂缝的区域。现场裂缝勘察结果表明，A8~A12 号测点附近是产生地表裂缝集中的区域，其他区域零散分布细微的地表裂缝，且在 A8~A10 号测点之间出现了塌陷槽。其中，a~b 预测区段：A8~A9 号点之间的水平拉伸变形值较大，故本坡段地表裂缝较发育，这与该坡段出现塌陷槽和大量大尺寸地表裂缝的实际勘测结果相一致；c~d 预测区段：该区段地表裂缝较为发育，这主要与凸形地表的特殊地貌相关，预测结果如实反映了这一现象；在 a~b 和 c~d 预测区段之间出现了水平变形压缩区，这是由于塌陷槽对拉伸变形的削弱作用所导致，此区段预测结果出现了偏差，说明该方法对于有突变型地表移动现象预测有着一定的局限性。

山区采煤塌陷区采动地表裂缝分布符合如下基本规律：

- 1) 塌陷区稳定后，地表裂缝主要分布在采煤工作面边界上方以及凸形地貌区域内；
- 2) 地表裂缝大小是由地表移动变形值大小决定的，地表移动变形值大小受微地貌、表土层性质和开采情况等多种因素的影响；
- 3) 一般情况下，塌陷区内地表裂缝方向与等高

线大致平行, 凹形地貌部位的裂缝受到抑制;

4) 在塌陷区中央区域, 受地表滑移影响, 裂缝动态发育规律较复杂, 大致分为产生、发展和闭合或变小 3 个阶段。

实践表明, 本文提出的地表裂缝预测方法有以下 2 点不足之处:

1) 仅能预测塌陷区内稳定后沿某一剖面方向上的地表裂缝分布情况, 且要求剖面线根据塌陷区地形条件布设, 尽量避免跨地形趋势变坡点。对于采动地表裂缝的全盆地分布规律和时空演化过程仍有待进一步研究。

2) 裂缝宽度预测结果精度较低, 特别是在地表坡度变化大的区域预测精度偏低, 且目前尚无法预测采动地表裂缝的发育深度。

山区煤炭开采对矿区环境的影响多种多样, 开采沉陷规律又极其复杂, 本文所提出的地表裂缝的预测方法具有一定的实用价值, 可为山区土地复垦和矿区生态环境治理提供技术支持。

## 4 结 论

1) 针对山区开采沉陷预计模型的水平变形预计值精度偏低, 难以直接用于预测山区采动地表裂缝分布的问题, 以地表下沉和水平移动预计值为主要参数计算坡段变形值, 并结合地表介质的力学性质参数和相关力学分析结果, 建立了山区采动地表裂缝的预测模型。

2) 选择山西古交嘉乐泉煤矿 1208-1210 对拉工作面的地表移动变形和采动裂缝实测数据对所提的地表裂缝预测方法进行实例验证, 结果表明, 该方法的预测结果与现场实际情况基本一致, 从而证明了该方法应用于山区采动地表裂缝预测具有可行性。

3) 由于山区开采沉陷规律的复杂性及地表裂缝预测方法本身存在的局限性, 在实际应用过程中, 预测方向线应尽量与煤层主断面保持一致, 坡段尺寸结合下沉、水平移动预计值大小及地表微地貌综合确定, 在工作面边界和凸形地貌区域内应适当增加坡段数, 以提高采动地表裂缝的预测精度。

## 参考文献:

- [1] 吴侃, 李亮, 敖建锋, 等. 开采沉陷引起地表土体裂缝极限深度探讨[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(6): 108-111.  
WU Kan, LI Liang, AO Jianfeng, et al. Discussion on

limit development depth of cracks in surface soil mass caused by mining subsidence[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(6): 108-111.

- [2] 吴侃, 葛家新, 王铃丁, 等. 开采沉陷预计一体化方法[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998: 60-84.
- [3] 吴侃, 周鸣, 胡振琪. 开采引起地表裂缝深度和宽度预计[J]. 辽宁工程技术大学学报, 1997(5): 25-28.  
WU Kan, ZHOU Ming, HU Zhenqi. Mining due to the depth and width of the surface cracks expected[J]. Journal of Liaoning Technical University, 1997(5): 25-28.
- [4] 蓝航, 张华兴, 姚建国, 等. 山区地表采动沉陷预计的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2007, 32(9): 912-916.  
LAN Hang, ZHANG Huaxing, YAO Jianguo, et al. Numerical simulation of mining subsidence predict of mountain surface[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(9): 912-916.
- [5] 康建荣. 山区采动裂缝对地表移动变形的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008: 27(1): 59-64.  
KANG Jianrong. Analysis of effect of fissures caused by underground mining on ground movement and deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 59-64.
- [6] 胡青峰, 崔希民, 袁德宝, 等. 厚煤层开采地表裂缝形成机理与危害性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(6): 864-870.  
HU Qingfeng, CUI Ximin, YUAN Debao, et al. Formation mechanism of surface cracks caused by thick seam mining and hazard analysis[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(6): 864-870.
- [7] 姚娟, 徐工. 开采引起地表裂缝规律研究[J]. 山东理工大学学报, 2009, 23(6): 105-108.  
YAO Juan, XU Gong. The study on ground fissure by mining[J]. Journal of Shandong University of Technology, 2009, 23(6): 105-108.
- [8] 邹友峰, 邓喀中, 马伟民, 等. 矿山开采沉陷工程[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 64-82.
- [9] 康建荣, 何万龙, 胡海峰. 山区采动地表变形及坡体稳定性分析[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002: 42-64.
- [10] 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: 112-130.
- [11] 韩奎峰, 康建荣, 王正帅, 等. 山区采动滑移模型的统一预测参数研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(1): 107-111.  
HAN Kuifeng, KANG Jianrong, WANG Zhengshuai, et al. Uniform prediction parameters for ground movement model in mountain area caused by coal mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1): 107-111.