

峰丛地貌下浅埋煤层采动地裂缝 形成机理及其发育规律

陈镇^{1,2}, 刘萍^{1,2*}, 朱恒忠³, 贾毅超^{1,2}, 罗畅^{1,2}

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 贵州省非金属矿产资源综合利用重点实验室, 贵州 贵阳 550025;
3. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590)

摘要: 为了探究贵州地区浅埋煤层采动地裂缝的形成原因和发育规律, 基于理论分析和通用离散单元法程序 (Universal Distinct Element Code, UDEC) 数值模拟研究, 提出浅埋煤层地表地裂缝发育的起裂判据; 对贵州地区峰丛地貌下矿井进行调研分析, 得出 3 种常见顶板类型, 并建立不同顶板下峰丛地貌浅埋煤层模型. 研究表明: (1) 采动地裂缝发育类型主要为永久性地裂缝和临时性地裂缝, 地裂缝发育形态主要以张拉型、张开型、台阶型为主, 形成的发育形态与顶板结构类型具有密切联系; (2) 地裂缝发育宽度随工作面开采加深呈动态变化; (3) 地裂缝发育位置与地表水平位移量存在关联, 地表水平位移波峰处通常有地裂缝发育迹象.

关键词: 峰丛地貌; 采动地裂缝; 顶板结构; 数值模拟

中图分类号: TD325 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2023)01-0001-08

The Formation Mechanism and Development Law of Mining-induced Ground Fractures in Shallow Coal Seams Under Peak-cluster Landform

CHEN Zhen^{1,2}, LIU Ping^{1,2}, ZHU Hengzhong³, JIA Yichao^{1,2}, LUO Chang^{1,2}

(1. School of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Provincial Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Nonmetallic Mineral Resources, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

3. State Key Laboratory Breeding Base for Mine Disaster Prevention and Control,
Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: In order to explore the formation reasons and development rules of mining ground fractures in shallow coal seam in Guizhou area, theoretical analysis and UDEC numerical simulation method are adopted to present the determination formula of surface ground fractures initiation in shallow coal seam. Three kinds of common roof types are obtained through investigation and analysis of mine under peak cluster landform in Guizhou area, and shallow coal seam models of different peak cluster landform under roof are established. Results show that: (1) The development types of mining ground fractures are mainly permanent and temporary. The development forms of ground cracks are mainly tensile type, open type, and step type, which are closely related to the roof structure type. (2) The development width and height of ground fracture change dynamically with the deepening of working face mining, and (3) there is a correlation between the location of ground fractures and the amount of surface horizontal displacement, and there are usually signs of ground fractures at the peak of surface

收稿日期: 2021-10-22

基金项目: 贵州省科技计划资助项目(黔科合基础[2020]1Z047)

*通信作者, E-mail: 373388719@qq.com

horizontal displacement.

Keywords: peak-cluster geomorphology; mining-induced ground fissure; roof structure; numerical simulation

“十四五”现代能源体系规划指出,要统筹提升区域能源发展水平,推动西部省份等煤炭资源富集区的高效利用^[1].我国西部地区的矿区以浅埋煤层为主,其中西北地区浅埋煤层上,地表植物分布稀疏,水土保持能力差,较为干燥;西南地区浅埋煤层上覆地表为垂直差异显著的峰丛地貌,山峦重叠,地形地貌复杂多变,地层具有基岩较厚、松散层较薄的特点^[2-3].经现场调研发现,西南地区煤矿地表山坡区域存在宽度和深度不等的采动地裂缝发育现象,对山坡稳定性产生破坏影响,极易造成滑坡、水土流失等次生灾害.不少学者针对不同地区采动地裂缝发育形态、发育规律及影响因素等进行了深入研究.

徐祝贺等^[4]研究发现,我国中东部区域浅埋煤层矿井经过高强度开采后,工作面上方地表发育的地裂缝共有5个发育阶段,具有“双周期+稳定发育”的特点;侯恩科等^[5]以黄土沟壑区浅埋煤层为研究对象,揭示了采动地表裂缝的动态发育规律,以及地表地裂缝发育位置与工作面回采位置之间的关系;车晓阳等^[6]对陕北地区沟谷地表地裂缝进行研究,根据坡度与煤层开采方向,将地表地裂缝分为3种不同类型;曹健等^[7]对西北部煤矿浅埋近距离煤层进行研究,分析了煤层重复采动和单一采动对地表地裂缝发育的影响;刘文生等^[8]研究辽宁煤矿地表地裂缝的成因,表明地表地裂缝产生的主要原因在于上覆岩层火成岩的运动断裂;刘辉等^[9]提出了滑动型裂缝距和裂缝角的概念,研究了采动地裂缝发育位置与沟谷之间的关系,并将滑动地裂缝发育规律归纳为4个周期:累积期、形成期、发展期和稳定期;赵兵朝等^[10]研究了黄土区域地表地裂缝在湿陷性黄土情况下的发育规律,表明湿陷性黄土会让地表裂缝发育加剧.

以上理论研究和工程实践大多是针对西北或者东北地区煤矿开展,针对西南浅埋煤层矿井的研究较少.本文以西南地区浅埋煤层为研究对象,通过理论分析和数值模拟方法研究西南地区峰丛地貌下浅埋煤层地表地裂缝起裂原因,以及不同的顶板结构对采动地裂缝发育规律的影响.

1 峰丛地貌下浅埋煤层地表地裂缝发育的起裂判据

峰丛地貌地理特征决定了山坡地形受开采影响形成的地表移动与平原地区受开采影响形成的地表移动不同.在平原地区开采,地表移动向量主要是地表向采空区方向的移动向量,而在峰丛地貌浅埋煤层开采,地表移动向量主要是地表向采空区方向和地表倾斜方向移动向量的相互叠加.

假设有一段坡段 ABC 为峰丛地貌,坡段 AB 和坡段 BC 在受采动影响之前的长度分别为 L_a 和 L_b ,受工作面开采影响后,地表 A, B 两点朝地表倾斜方向的移动向量分别为 a_1, b_1 ,朝采空区方向的移动向量分别为 a_2, b_2 ,则 A, B 两点的总移动向量分别为

$$a = a_1 + a_2; \quad (1)$$

$$b = b_1 + b_2. \quad (2)$$

将 A, B 两点的各移动向量进行正交分解,其中 a_x 和 a_y 为向量 a 的水平分量和垂直分量; b_x 和 b_y 为向量 b 的水平分量和垂直分量; a_{1x}, a_{1y} 为 A 点向地表倾斜方向产生的水平移动和垂直移动分量; a_{2x}, a_{2y} 为 A 点向采空区方向产生的水平移动和垂直移动分量; b_{1x}, b_{1y} 为 B 点向地表倾斜方向产生的水平移动和垂直移动分量; b_{2x}, b_{2y} 为 B 点向采空区方向产生的水平移动和垂直移动分量.受开采影响后地表两点 A, B 移动变形的向量分析如图1所示.

根据向量运算可得

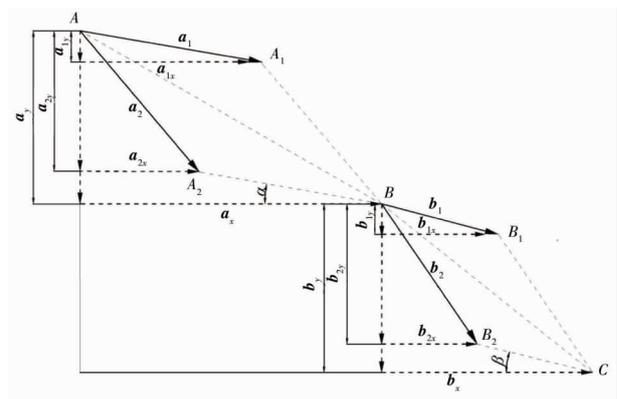


图1 峰丛地貌下受开采影响地表两点移动变形向量分析

$$\begin{cases} \mathbf{a}_x = \mathbf{a}_{1x} + \mathbf{a}_{2x}; \\ \mathbf{a}_y = \mathbf{a}_{1y} + \mathbf{a}_{2y}; \\ \mathbf{b}_x = \mathbf{b}_{1x} + \mathbf{b}_{2x}; \\ \mathbf{b}_y = \mathbf{b}_{1y} + \mathbf{b}_{2y}. \end{cases} \quad (3)$$

根据文献[11-12]中对地表坡度、坡体倾向的相关分析,可得

$$\begin{cases} \mathbf{a}_{1x} = \mathbf{a}_x - \mathbf{a}_{2x} = b_2 \mathbf{a}_{2y} \tan \alpha; \\ \mathbf{b}_{1x} = \mathbf{b}_x - \mathbf{b}_{2x} = b_2 \mathbf{b}_{2y} \tan \beta. \end{cases} \quad (4)$$

式中: b_2 为坡度影响系数,是一个与表土层性质相关的系数; α, β 为A,B两点所在地表的角度。

再结合图1的向量分析及式(4)得

$$\begin{cases} \mathbf{a}_{1y} = \mathbf{a}_{1x} \tan \alpha = b_2 \mathbf{a}_{2y} \tan^2 \alpha; \\ \mathbf{b}_{1y} = \mathbf{b}_{1x} \tan \beta = b_2 \mathbf{b}_{2y} \tan^2 \beta. \end{cases} \quad (5)$$

将式(4)和式(5)代入式(3)得

$$\begin{cases} \mathbf{a}_x = \mathbf{a}_{2x} + b_2 \mathbf{a}_{2y} \tan \alpha; \\ \mathbf{a}_y = \mathbf{a}_{2y} + b_2 \mathbf{a}_{2y} \tan^2 \alpha; \\ \mathbf{b}_x = \mathbf{b}_{2x} + b_2 \mathbf{b}_{2y} \tan \beta; \\ \mathbf{b}_y = \mathbf{b}_{2y} + b_2 \mathbf{b}_{2y} \tan^2 \beta. \end{cases} \quad (6)$$

则A,B两点的总移动向量 \mathbf{a}, \mathbf{b} 的大小分别为

$$R_a = a_{2y} (1 + b_2 \tan \alpha + b_2 \tan^2 \alpha) + a_{2x}; \quad (7)$$

$$R_b = b_{2y} (1 + b_2 \tan \beta + b_2 \tan^2 \beta) + b_{2x}. \quad (8)$$

式中: $a_{2x}, a_{2y}, b_{2x}, b_{2y}$ 分别为向量 $\mathbf{a}_{2x}, \mathbf{a}_{2y}, \mathbf{b}_{2x}, \mathbf{b}_{2y}$ 的大小。

于是坡段ABC的移动变形可表示为 $R_a - R_b$,则坡段ABC的变形比为

$$\varepsilon_{a-b} = \frac{R_a - R_b}{L_a + L_b}. \quad (9)$$

式中: ε_{a-b} 为坡段ABC的表土层变形比。

而表土层变形的临界公式^[13]为

$$\varepsilon_0 = 2(1 - \mu^2) C \tan(45^\circ + 0.5\varphi) / E. \quad (10)$$

式中: ε_0 为表土层破坏临界值; μ 为泊松比; C 为黏聚力; φ 为内摩擦角; E 为弹性模量。

如果坡段ABC的表土层变形比大于表土层破坏的临界值,则此处开采会产生地裂缝,小于表土层破坏的临界值,则不会产生地裂缝。

2 顶板结构对采动地裂缝发育的影响规律

2.1 采动地裂缝的影响因素

前人的研究表明地裂缝不仅受松散层特性影响,还受表土层结构与岩性、开采工艺、煤层赋存条件和断层等地质因素的影响^[14-16],但针对不同顶板结构对采动地裂缝的影响的研究却很少。

不同的顶板结构对采动地裂缝的产生和变形具有不同影响。顶板结构类型的划分主要考虑岩层厚度、岩性、岩层的空间相对位置和垮落步距等因素。通过对贵州安顺、大宝顶、龙鑫等峰丛地貌下浅埋煤层煤矿的顶板结构进行调查,发现根据岩层厚度划分,其顶板结构可以分为3类,即薄层顶板、中厚层顶板和厚硬顶板。其中薄层顶板指的是直接顶厚度较薄,一般小于2.3 m,基本顶厚度一般大于4 m,小于10 m;中厚层顶板指的是直接顶厚度为2.7~5.8 m,基本顶较厚,多在6~9 m;厚硬顶板一般无明显直接顶和基本顶,顶板厚度大于11 m。这3种类型的顶板结构示意图如图2所示。

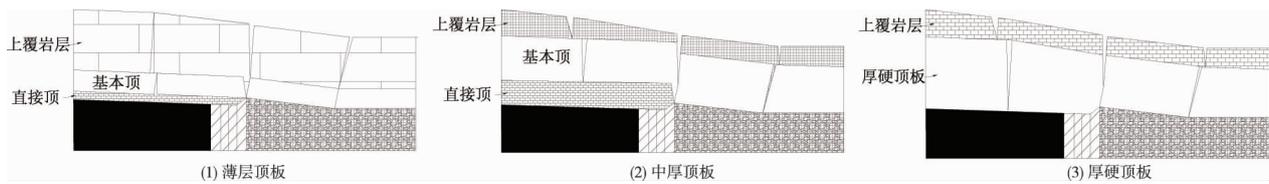


图2 顶板分类结构

2.2 数值模型建立

地表地裂缝的形成是覆岩破断失稳和坡体滑移沉降综合作用的体现,其形成过程依次是覆岩破断—坡体滑移—表土开裂.通用离散单元法程序(Universal Distinct Element Code, UDEC)模拟软件可以用来观测顶板运动及覆岩运移情况,因此选用 UDEC 数值模拟软件研究不同的顶板结构对峰丛地貌下浅埋煤层采动地裂缝发育的影响规律.峰丛地貌浅埋煤层数值模型如图 3 所示,模型宽 250 m,坡体最高处高度为 100 m,最低处高度为 60 m.模型底部边界在垂直方向上固定,左右边界在水平方向上固定,总开挖长度 150 m,开挖两边预留 50 m 煤柱,消除边界影响.模型采用摩尔库伦屈服准则.

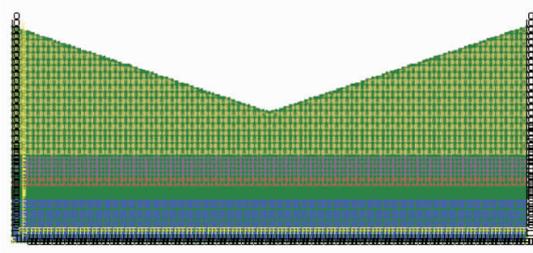


图3 峰丛地貌下浅埋煤层数值模拟模型

依据顶板结构分类,分别制定 3 个不同的数值模拟方案:(1)顶板结构为薄层顶板,直接顶厚度为 2 m,基本顶厚度为 5 m;(2)顶板结构为中厚顶板,直接顶和基本顶厚度分别为 5 m 和 10 m;(3)顶板结构为厚硬顶板,顶板厚度为 15 m.3 个方案中煤层厚度和底板厚度均保持不变,分别为 3 m 和 20 m.数值模拟主要从岩层裂隙发育及地表移动变形 2 个方面探究不同顶板结构对地裂缝发育的影响规律.煤岩体的物理和节理力学参数分别如表 1 和表 2 所示.

表1 煤岩体物理力学参数

岩层	密度/(kg/m^3)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/($^\circ$)	内聚力/MPa	抗拉强度/MPa
底板	2 650	6.6	4.0	30	3.7	3.2
煤	1 400	1.7	1.0	20	1.4	1.6
直接顶	2 100	3.0	1.3	26	2.0	2.5
基本顶	2 550	6.9	4.5	38	4.4	5.5
覆岩	2 400	4.0	3.0	27	3.0	2.8
坡体	1 700	1.8	1.1	22	1.5	2.0

表2 煤岩体节理力学参数

岩层	切向刚度/GPa	法向刚度/GPa	内摩擦角/($^\circ$)	内聚力/MPa	抗拉强度/MPa
底板	8.0	10.0	20	0.12	1.00
煤	1.0	2.0	12	0.05	0
直接顶	1.5	3.0	14	0.02	0.04
基本顶	3.0	7.0	20	0.03	0
覆岩	2.5	4.0	17	0.10	0
坡体	1.5	3.0	13	0.02	0.01

2.3 不同顶板结构下的地裂缝发育过程演化分析

2.3.1 薄层顶板结构

在方案(1)的顶板条件下,数值模拟过程中模型共出现4条采动地裂缝,为方便区分,按出现顺序依次记为地裂缝1、地裂缝2、地裂缝3和地裂缝4,地裂缝整体示意图及局部放大图分别如图4和图5所示。当工作面开挖至75 m时,直接顶全部垮落到采空区,上覆岩层及坡体整体下沉滑移,采空区上方出现地裂缝1,发育位置距离左侧边界48 m,裂缝形态为张拉型,属于永久性裂缝,裂缝宽度为36.3 cm。随着工作面开采至100,125,150 m时,地裂缝1的宽度依次增加到47.4,54.2,59.9 cm,裂缝发育宽度发展趋势由突增到缓增。同时,当工作面开挖至100 m时,出现地裂缝2,该裂缝形态为张拉型,属于临时性裂缝,裂缝宽度为14.5 cm。继续开挖至125 m时,地裂缝2闭合,地裂缝3出现,裂缝3形态为张开型,属于临时性裂缝,裂缝宽度为15.6 cm。随工作面继续开采,至150 m时地裂缝3闭合,地裂缝4出现,该裂缝属于永久性裂缝,发育形态为张拉型,发育宽度为29 cm。

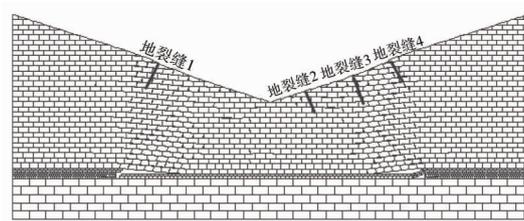


图4 薄层顶板采动地裂缝整体示意图

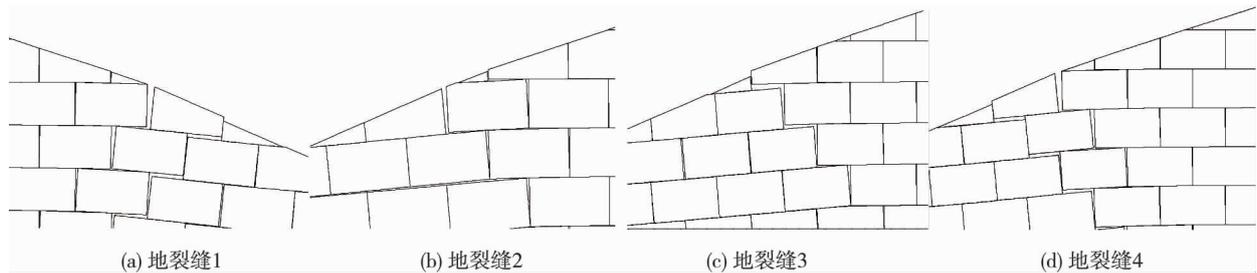


图5 薄层顶板采动地裂缝局部放大

2.3.2 中厚顶板结构

中厚顶板采动地裂缝整体示意图及局部放大图分别如图6和图7所示。在方案(2)的顶板条件下,地表依然发育了4条裂缝,其发育宽度、形态与方案(1)不尽相同。当工作面开挖到75 m时,出现地裂缝1,地裂缝1为永久性裂缝,裂缝形态为张拉型,初始宽度为27.2 cm,随着工作面开挖距离的增加,发育宽度也不断增加,最终发育宽度为39.1 cm。其中,开挖距离从75 m增加到100 m时,地裂缝宽度增幅较大,从27.2 cm增加到36.5 cm;开挖距离由100 m增加到150 m时,地裂缝宽度增幅较小。当工作面开挖至100 m时,在靠近低谷段上右侧区域出现地裂缝2,该裂缝属于临时型裂缝,裂缝形态为台阶型,裂缝宽度为30.2 cm。当工作面开挖至125 m时,地裂缝2闭合,地裂缝3出现,地裂缝3属于临时性裂缝,裂缝形态为台阶型,裂缝宽度为26.5 cm。当开挖距离推进到150 m时,地裂缝3闭合,地裂缝4出现,属于永久性裂缝,裂缝形态为张拉型,发育宽度为18.8 cm,发育位置位于右侧采空区边界。

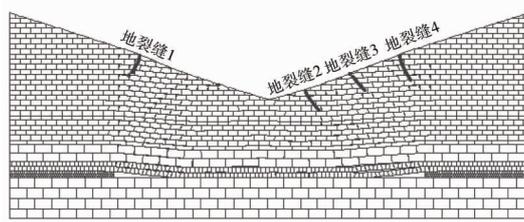


图6 中厚顶板采动地裂缝整体示意图

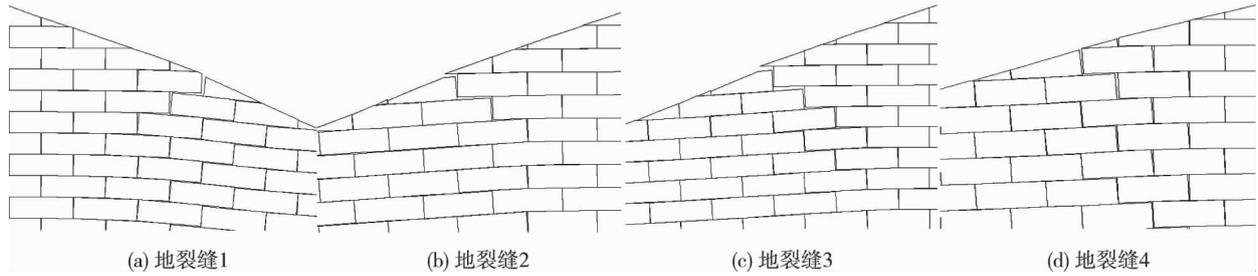


图7 中厚顶板采动地裂缝局部放大

2.3.3 厚硬顶板结构

在方案(3)的顶板条件下,厚硬顶板采动地裂缝整体示意图及局部放大图分别如图8和图9所示.在工作面开挖工程中,坡体依然出现了4条采动地裂缝,地裂缝1和地裂缝4出现在采空区左右两侧边缘,都属于永久性裂缝,地裂缝2出现在沟谷右侧上坡区域,属于临时性裂缝,地裂缝3位于地裂缝2和地裂缝4之间,属于临时性裂缝.工作面开挖从75 m至100,125,150 m时,地裂缝1宽度从19.5 cm增加到29.1,31.4,33.2 cm,裂缝宽度增量随着工作面的推进逐渐减小.当工作面开挖至100 m时,地裂缝2出现,裂缝形态为台阶型,裂缝宽度为15.7 cm.当工作面开挖至125 m时,地裂缝2闭合,地裂缝3出现,地裂缝3形态为台阶型,裂缝宽度为14.6 cm.当工作面开挖至150 m时,地裂缝3闭合,地裂缝4出现,属于永久性裂缝,其形态为张开型,裂缝宽度为30.6 cm.

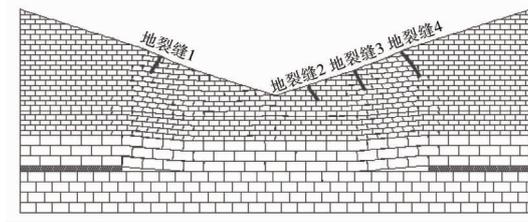


图8 厚硬顶板采动地裂缝整体示意图

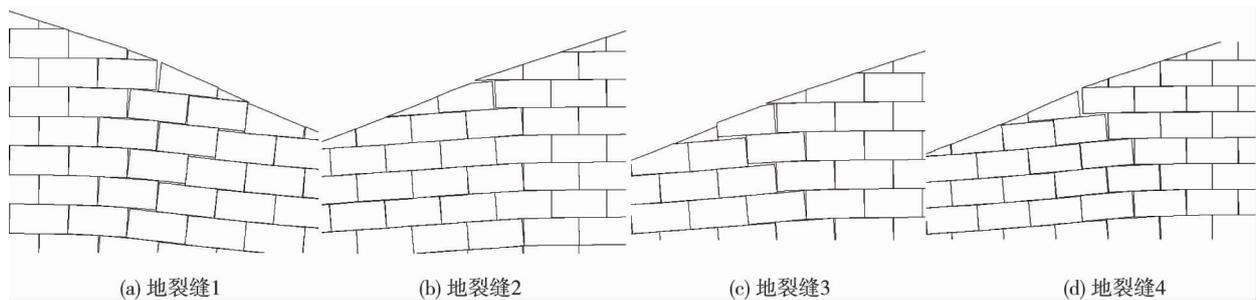


图9 厚硬顶板采动地裂缝局部放大

根据上述3种不同顶板结构的地裂缝发育过程的数值模拟,可以得出在峰丛地貌下浅埋煤层地裂缝发育的特征:(1)工作面开挖过程中,地裂缝分为永久性裂缝和临时性裂缝,永久性裂缝对坡体地表造成的伤害不可逆,一旦产生,不会闭合;临时性裂缝会随着工作面开采进度的推进,出现闭合现象.(2)峰丛地貌下地表地裂缝形态主要为张拉型、张开型和台阶型,其中,张拉型和张开型地裂缝在3种顶板条件下均有出现,台阶型地裂缝只出现在中厚层顶板或厚硬顶板条件下;永久性地裂缝具有张拉型或张开型裂缝形态,临时性地裂缝具有张拉型、张开型和台阶型这3种裂缝形态.(3)地裂缝发育宽度随着顶板厚度的减小而增大,其中采动地裂缝1在不同顶板状况下,其发育宽度不断增加,增加趋势均为先突增,后缓增.

比较3种不同顶板结构下地裂缝1的最终发育宽度,发现薄层顶板采动地裂缝1宽度最大,中厚层顶板采动地裂缝1宽度次之,厚硬顶板采动地裂缝1宽度最小,具体变化如图10所示.

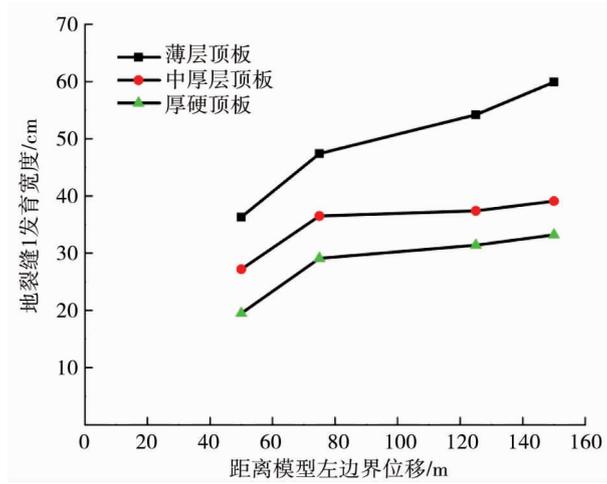


图 10 地裂缝 I 宽度随工作面开采的变化

2.4 不同顶板结构的地表水平位移分析

结合地表水平位移量的变化,能更好地反映峰丛地貌下浅埋煤层采动地裂缝演化规律的特征.在数值模型中设置地表坡体水平位移观测线,得出 3 种不同顶板结构下工作面开采时地表水平位移变化曲线,如图 11 所示.

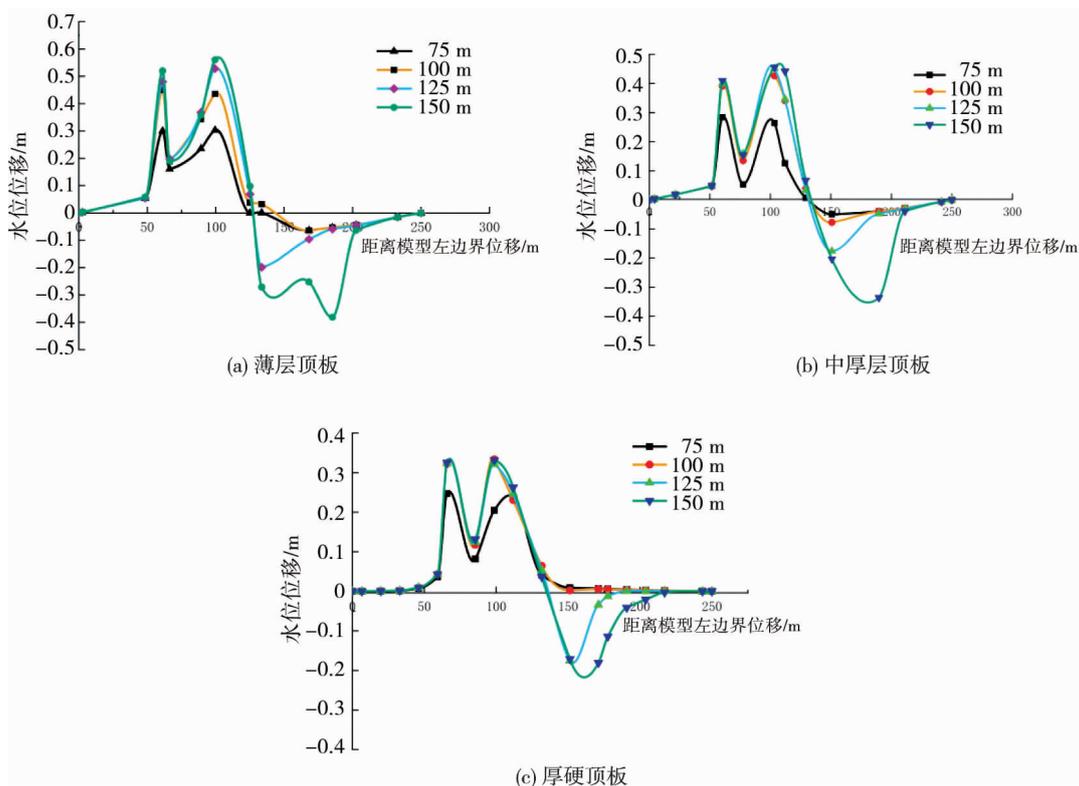


图 11 不同顶板结构下地表水平位移曲线

由图 11 可以看出:(1)薄层顶板结构工作面开采从 75 m 推进到 100,125,150 m 时,地表水平位移最大值从 0.30 m 增大到 0.43,0.50,0.56 m,该变化特点在中厚层顶板、厚硬顶板的情况下依然可以得到体现,这说明不同顶板结构下地表水平位移会随着工作面的不断推进而增大;(2)由不同顶板结构下地表水平位移峰值大小可以得出,不同顶板结构的采掘扰动程度按从大到小排序依次为薄层顶板、中厚层顶板、厚硬顶板;(3)地表水平位移波峰出现的位置与数值模拟中地裂缝出现的位置吻合,这表明水平位移波峰处通常具有地裂缝发育迹象.

3 结论

1) 峰丛地貌下浅埋煤层表土层的变形值是否大于表土层破坏的临界值,可以作为是否产生地表地裂缝的判定依据.即表土层变形值大于表土层破坏的临界值,会产生地表地裂缝;反之,则不产生.

2) 地表地裂缝在不同顶板结构下产生的裂缝类型为永久性裂缝和临时性裂缝,永久性裂缝分布在采空区边界,临时性裂缝分布在采空区中部,且这2种裂缝的主要形态为张拉型、张开型和台阶型.

3) 地裂缝的发育宽度随工作面推进距离的增大呈现出先突增再缓增的规律,且发育宽度随着顶板厚度的减小而增大.

4) 地表水平位移会随着工作面的持续推进而不断增大,水平位移峰值与顶板厚度呈负相关性,且水平位移波峰位置通常具有地裂缝发育迹象.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会,中华人民共和国国家能源局.“十四五”现代能源体系规划[R].2022.
- [2] 王旭峰.冲沟发育矿区浅埋煤层采动坡体活动机理及其控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2009.
- [3] 赵杰,刘长友,李建伟,等.沟谷区域浅埋煤层开采三维地质建模及地表损害研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(5):969-977.
- [4] 徐祝贺,李全生,李晓斌,等.浅埋高强度开采覆岩结构演化及地表损伤研究[J].煤炭学报,2020,45(8):2728-2739.
- [5] 候恩科,冯栋,谢晓深,等.浅埋煤层沟道采动裂缝发育特征及治理方法[J].煤炭学报,2021,46(4):1297-1308.
- [6] 车晓阳,候恩科,孙学阳,等.沟谷区浅埋煤层覆岩破坏特征及地面裂缝发育规律[J].西安科技大学学报,2021,41(1):104-111.
- [7] 曹健,黄庆享.浅埋近距煤层开采覆岩与地表裂缝发育规律及控制[J].煤田地质与勘探,2021,49(4):213-220.
- [8] 刘文生,吴作启,孔晶,等.煤层开采诱发地表裂缝成因数值模拟[J].安全与环境学报,2016,16(5):135-139.
- [9] 刘辉,刘小阳,邓喀中,等.基于 UDEC 数值模拟的滑动型地裂缝发育规律[J].煤炭学报,2016,41(3):625-632.
- [10] 赵兵朝,孙浩,郭亚欣,等.湿陷性黄土覆盖区煤层开采地表裂缝发育规律研究[J].矿业研究与开发,2021,41(6):105-110.
- [11] 李帅.山区部分开采地面变形规律及山坡稳定性分析研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
- [12] 何万龙.开采影响下的山区地表移动[J].煤炭科学技术,1981(7):23-29.
- [13] 尹士献,何敏俊,李德海.采动影响下厚湿陷性黄土层拉伸裂缝预测研究[J].河南理工大学学报,2014,33(4):437-440.
- [14] 陈超,胡振琪.我国采动地裂缝形成机理研究进展[J].煤炭学报.2018,43(3):810-823.
- [15] 吴侃,胡振琪,常江,等.开采引起的地表裂缝分布规律[J].中国矿业大学学报,1997,26(2):56-59.
- [16] 胡振琪,王新静,贺安民.风积沙区采煤沉陷地裂缝分布特征与发生发育规律[J].煤炭学报,2014,39(1):11-18.