西部地区矿区高强度开采地表裂缝发育特征及预测研究*

杨振强[1]，张琰君[2]，朱贵祯[3]，牛兴国[4]

（1.内蒙古农业大学 能源与交通工程学院， 内蒙古 呼和浩特 010018；
2.太原科技大学 车辆与交通工程学院， 山西 太原 030024；
3.内蒙古准格尔旗特弘煤炭有限公司官板乌素煤矿， 内蒙古 鄂尔多斯市 010300；
4.内蒙古有色地质矿业（集团）综合普查有限责任公司， 内蒙古 呼和浩特 010013）

摘要：地表裂缝会加速土地退化和水土流失，诱发滑坡、崩塌等次生地质灾害。为揭示高强度开采条件下的地表裂缝发育特征，以某矿615工作面为工程背景，综合采用现场实测、试验模拟、理论分析、工程应用等方法开展了相关研究。结果表明：按变形性质不同，地表裂缝以拉张型、台阶型和塌陷型为主，工作面推进过程中面内裂缝扩展周期缩短、闭合度降低。地表裂缝发育程度相比于一般地质开采条件更强，宽度为0～100 mm、100～500 mm和大于500 mm的裂缝数量分别占38%，56%和6%。覆岩裂缝伴随厚硬岩层破断同步发育，最终贯通至地表。基于地表裂缝临界变形值，预测得到走向、下山和上山裂缝角分别为79.8°、74.1°和79.5°，最大相对误差为7.1%。此外，给出了贯通型裂缝产生的深厚比临界值计算公式。研究成果对矿区土地修复及防治具有重要参考价值。

关键词：高强度开采；地表裂缝；发育特征；开采沉陷；地质灾害

中图分类号：TD325 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)05-0142-09

Study on the Development Characteristics and Prediction of Ground Fissures Induced by High-Intensity Mining in Mining Areas of Western China

Yang Zhenqiang[1], *Zhang Yanjun*[2], *Zhu Guizhen*[3], *Niu Xingguo*[4]

(1.College of Energy and Transportation Engineering,
Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;
2.School of Vehicle and Transportation Engineering,
Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;
3.Guanbanwusu Coal Mine, Inner Mongolia Jungar Banner Tehong Coal Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010300, China;
4.Inner Mongolia Nonferrous Geological and Mining (Group)
Comprehensive Survey Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010013, China)

Abstract: Ground fissures accelerate land degradation and soil erosion, and induce secondary geological disasters such as landslides and collapses. To reveal the development characteristics of ground fissures under high-intensity mining conditions, relevant research was carried out with the 615 working face of a mine as the engineering background, and multiple methods including field measurement, experimental simulation, theoretical analysis and engineering application were comprehensively utilized. The results show that ground fissures are mainly divided into tensile, step and collapse types according to different deformation properties. During the advance of the working face, the propagation period of fissures within the working face is shortened and the closure degree decreases. The development degree of ground fissures is more significant than that under conventional geological and mining conditions. The number of fissures with widths of 0-100 mm, 100-500 mm and greater than 500 mm accounts for 38%, 56% and 6%, respectively. Overburden fissures develop synchronously with the breaking of

* **收稿日期**：2025-05-06

基金项目：内蒙古农业大学（2024年财政资金）双一流建设资金—2023年引进高层次及优秀博士人才科研启动费（RK2400001920）；中央引导地方科技发展资金项目（2023ZY0036）

作者简介：杨振强（1985—），男，山西朔州人，博士，讲师，主要从事地质灾害治理方面的研究。E-mail：Yangzq@imau.edu.cn

通信作者：张琰君（1998—），男，山西长治人，博士，讲师，主要从事岩层移动与开采沉陷方面的研究。E-mail：zhangyanjun0728@163.com

thick and hard rock strata and eventually penetrate the ground surface. Based on the critical deformation values of ground fissures, the fissure angle along the strike, the fissure angle on the dip side, and the fissure angle on the rise side are predicted to be 79.8°, 74.1°, and 79.5°, respectively, with a maximum relative error of 7.1%. In addition, the calculation formula for the critical depth-thickness ratio of through fissures was proposed. The research results are of important reference significance for land remediation and geological disaster prevention in mining areas.

Key words: High-intensity mining, Ground fissure, Development characteristic, Mining subsidence, Geological disaster

0 引言

中国是全球最大的能源生产和消费国,其能源结构以煤炭资源为主[1]。在“双碳”目标建设下,煤炭资源的战略地位将逐步从“主体能源”向“兜底保障”转变,但当前“贫油、少气”(石油、天然气进口占比分别为72%和40%)的能源背景决定了煤炭资源短期内的不可替代性,预计到2050年在化石能源结构中占比仍将保持在40%左右[2-3]。西部地区(陕、蒙、新、晋、黔和宁6省份)的煤炭探明储量占全国储量80%以上,已成为我国的核心能源基地,且这些地区的煤炭资源具有地质条件稳定、煤层埋深浅、厚度大、储量集中等特点,易于实施一次采全高等高强度开采[4]。然而,西部矿区生态环境脆弱,自愈能力较低,高强度开采势必会诱发地表裂缝、地表沉陷、植被退化等一系列生态环境问题,其中地表裂缝是一种常见的地质灾害,会加速土地退化、诱发滑坡与崩塌、污染水资源,进一步激化民生矛盾并制约地区可持续发展,这已成为国内外学者的研究热点[5-6]。

目前学者们在地表裂缝成因机理、发育规律和防治方法等方面取得了较多的研究成果,相关研究手段多集中于现场监测(人工调查、无人机遥感技术和激光扫描技术)、试验模拟(相似材料模拟和数值模拟)和理论分析(力学分析、非线性分析和定量分析)的协同应用。在地表裂缝成因机理方面,陈镇等[7]基于离散元法和力学分析,提出了峰丛地貌下的地表裂缝开裂判据,揭示了地表水平移动量与地表位置的相互关系;冯泽伟等[8]、Xu Yuankun等[9]基于地表移动实测资料,建立了风积沙区动态裂缝发育周期的数学模型,揭示了动态裂缝的两个开裂—闭合过程。在地表裂缝发育规律方面,Zhao Yixin等[10]、周大伟等[11]、候恩科等[12]、徐祝贺等[13]采用无人机遥感技术与InSAR技术实现了地表裂缝的厘米级解译,揭示了其“双周期+稳定期”的发育特征和整体呈“C”形的分布特征,并将裂缝宽度变化分为增大—减小—稳定—增大—减小共5个阶段。在地表裂缝防治方法方面,Zhang Yanjun等[14]结合工程实践经验,提出了“减损控制为主+生态治理为辅”的控制原则;候恩科等[15]、李全生等[16]采用充填、协调、无煤柱和限厚开采等方法有效减缓了地表裂缝发育程度,并采用“裂缝填充+土地平整”的方法进行了治理,恢复了矿区生态环境。

已有的研究成果为地下开采引起的地表裂缝发育规律提供了理论依据,但高强度开采条件下覆岩的破坏程度相比于一般开采条件更为剧烈,地表裂缝发育规律具有特殊性,亟需深入研究高强度开采条件下地表裂缝发育特征,并提出相应的预测方法。鉴于此,本文以西部某矿615工作面为研究对象,综合采用现场实测、试验模拟、理论分析、工程应用等方法,总结了高强度开采下地表裂缝的分类及各类型裂缝成因,揭示了覆岩破坏与裂缝动态发育特征,并结合地表临界变形值预测了裂缝产生区域。研究结果可为矿区土地治理及采动损害与防护提供理论指导。

1 典型高强度开采工作面概况

某矿位于准格尔煤田,井田面积3.5 km^2,自下而上有6号、6-1号和3号共3层可采煤层,平均厚度分别为14.82 m、3.91 m和2.64 m,6-1号和6号部分区域煤层间距较小(小于0.80 m),对两层煤进行合并开采。井田内总体地形北高南低,地表标高在+1 115~+1 265 m之间,高差150 m,坡角多在10°~70°之间,降雨顺坡急下,冲沟发育。区域内年降水量为267~640.8 mm,平均为439.5 mm,多集中于7、8、9三个月,年平均气温为7.8 ℃,属于大陆干旱性气候。

615工作面开采尺寸为300 m×110 m,6-1号与6号煤层合并开采,最大采厚16 m,采用放顶煤开采,工作面平均推进速度4 m/d。工作面地表被第四系风积沙覆盖,厚0~51 m,平均采深200 m,煤层近水平赋存。矿区地貌为两树枝状沟所切割形成的山地,冲沟十分发育,地面支离破碎,山丘顶部

多呈浑圆状或鱼脊状。图 1 为工作面综合柱状图，可以看出 6-1 号煤层顶板以弱胶结砂岩为主。

岩性	层厚/m	埋深/m		柱状图
黄土	40	40		
泥岩	31	71		
粗砂岩	23	94		
泥岩	7	101		
粗砂岩	5	106		
泥岩	32	138		
砂质泥岩	9	147		
粗砂岩	10	157		
含砾砂岩	9	166		
粗砂岩	24	190		
泥岩	5	195		
粗砂岩	5	200		
6-1和6煤	16	216		

图 1 某矿 615 工作面综合柱状图

Fig.1 Synthesis histogram of 615 working face in a mine

2 地表裂缝分类及发育特征

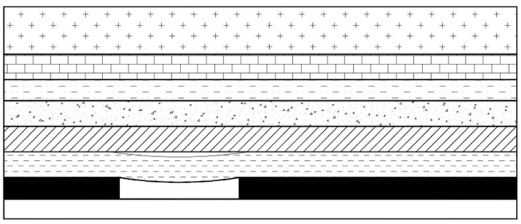
2.1 地表裂缝形成过程

地下煤层开采后，采空区周围覆岩应力状态发生变化，引起岩层及表土层产生移动变形[14]。地表移动盆地是连续变形，地表裂缝、台阶和塌陷坑是非连续变形。地表非连续变形是岩层破断与表土层变形相互作用的结果。因此，采动地表裂缝的形成过程可以分为岩层破断与表土层变形两个阶段[17-18]。

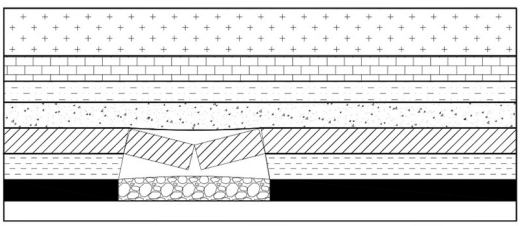
煤层开采前，岩层内部处于应力平衡的稳定状态，三向受压支撑上覆岩层荷载。煤层开采过程中，采空区的跨度会不断增大，当达到极限时，基岩发生拉剪破坏，出现破断。当采空区范围较小时，岩层两端为固支悬臂梁，中部受载荷作用出现弹性弯曲下沉，如图 2(a)所示。

当采空区范围扩大导致基本顶跨度大于其极限跨度时，基本顶会发生初次破断，之前形成的悬臂梁会破断为两个岩块，两端铰接。当岩块因运动状态而导致回转变形增大时，会发生冒落，此时两端铰接力无法平衡其自身的质量，形成具有一定支撑作用的砌体梁结构，如图 2(b)所示。

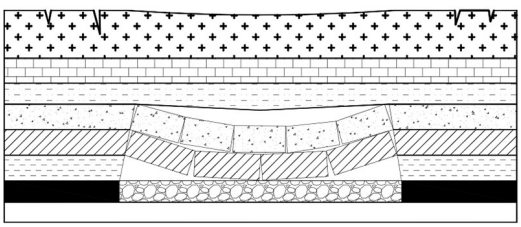
随着工作面继续推进，在砌体梁结构作用下，工作面推进侧破断岩块会形成具有一定周期性的传递岩梁结构，如图 2(c)所示。在基本顶自下而上的垮落过程中，顶板以上的覆岩也会因超过自身极限跨度随之发生破断，并最终在覆岩某个位置达到平衡，形成拱形破坏区域。该区域会随着工作面推进而逐渐增大，地表随之发生弯曲下沉，当表土层超过自身塑性变形极限时出现地表裂缝。因此，地表裂缝形成是由下至上的动态发育过程，即“井下开采—岩层破断—地表变形—裂缝产生”。



(a) 岩层 1 弯曲下沉



(b) 岩层 1 垮落



(c) 岩层破断传递

图 2 地表裂缝形成过程

Fig.2 Formation process of groud fissure

2.2 地表裂缝分类

根据地表裂缝的变形性质，分为拉张型裂缝、挤压型裂缝、台阶型裂缝、塌陷型裂缝、滑动型裂缝[15,19]，如图 3 所示。拉张型裂缝是地表拉张变形值超过自身拉张变形极限时形成的，主要在地表拉张变形区内距工作面一定距离动态发育，且在整个工作面区域及四周均有分布。挤压型裂缝出现在地表受到挤压作用形成的压缩变形区。当地表压缩变形值超过自身压缩变形极限时会产生隆起，多发育于坡脚和坡体面。台阶型裂缝形态像“台阶”，两侧土体存在非均匀下沉，具有张开量小、错动量大的特点，一般分布于黄土沟壑区。塌陷型裂缝是裂缝中间的土体下沉形成的，类似于两条朝向相反的台阶裂缝，具有张开量大、错动量小的特点，多发育于工作面内部或边界上方。滑动型裂缝是坡体下开采时，地表受到采动及滑移耦合影响共同造成的，其形成过程受地形地貌影响较大，且坡度越大，深厚比越小，发育越严重，主要存在于地表坡度较大的区域。



拉张型裂缝　挤压型裂缝　台阶型裂缝　塌陷型裂缝　滑动型裂缝

图 3　地表裂缝的分类

Fig.3　Classification of ground fissures

2.3　地表裂缝发育特征

研究人员通过无人机摄影测量和现场调查的方法，获取 615 工作面开采阶段的地表裂缝发育信息。无人机摄影测量的方法是：布设像控点和用相机拍照，在保留位置信息的基础上，大范围获取地表裂缝分布信息，利用生成的 DOM(数字正射影像)、三维模型解译地表裂缝。现场调查的方法是：用卷尺测量地表裂缝的宽度、长度、落差高度等信息，采用全站仪、GPS-RTK 移动站确定地表裂缝的坐标及位置，获取地表裂缝动态发育规律，并与无人机影像解译结果进行对比验证其准确性。根据地表裂缝的观测数据，利用 ArcMAP 软件绘制 615 工作面地表裂缝分布情况，如图 4 所示。地表裂缝分布具有以下特征：

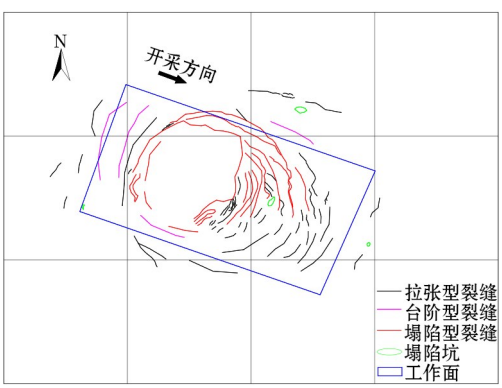


图 4　地表裂缝分布

Fig.4　Distribution of ground fissures

(1) 地表裂缝多发育于工作面内侧，整体呈弧形，边界外侧裂缝数量较少；

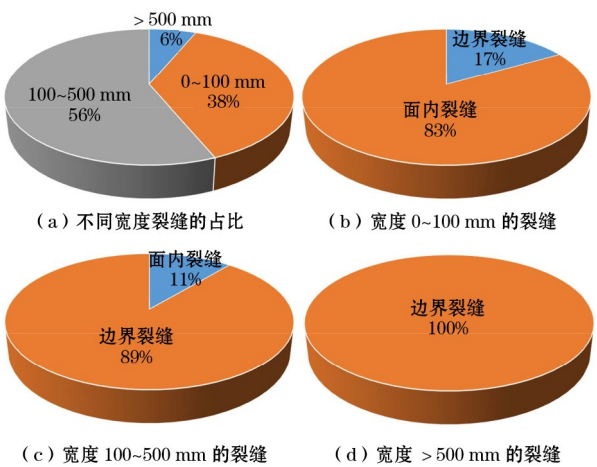
(2) 地表主要存在 3 种类型的裂缝，即拉张型、塌陷型和台阶型裂缝，其中开切眼附近以拉张型裂缝和台阶型裂缝为主，顺槽区附近以拉张型裂缝为主，推进侧以塌陷型和拉张型裂缝为主；

(3) 工作面边界处裂缝宽度和台阶高度大，两侧呈弧形中间呈直线形，与面内裂缝一起构成“O”型圈；

(4) 顺槽区域最外侧地表裂缝距工作面边界 36 m，开切眼区域最外侧地表裂缝距工作面边界 38 m，计算得到走向、下山和上山裂缝角分别为 80.9°、79.8°和 83.7°；

(5) 地表主裂缝附近出现大量次生裂缝，具有密度大、宽度小、长度短、随机分布等特点。

统计观测区地表裂缝宽度和类型数据所占比例，分析地表裂缝发育程度，如图 5 所示。根据地表裂缝的分布位置，可以将其分为边界裂缝和面内裂缝。前者位于工作面边界，可长久保留在地表，需进行人工治理；后者位于采空区正上方，随工作面推进向前推移，具有“闭合效应”。共统计了 82 条裂缝，宽度为 0～100 mm 的裂缝中，面内裂缝数量最多，占 83%；宽度为 100～500 mm 的裂缝中，边界裂缝数量最多，占 89%；宽度大于 500 mm 的裂缝均为边界裂缝。煤矿开采引起的地表移动变形是一个动态过程，具有长期性、规律性和破坏性等特点。因此，采动影响形成的地表拉张变形区和地表压缩变形区的范围是不断变化的。对于边界裂缝，其宽度不断增加，最终趋于稳定。



(a) 不同宽度裂缝的占比　(b) 宽度 0~100 mm 的裂缝

(c) 宽度 100~500 mm 的裂缝　(d) 宽度 >500 mm 的裂缝

图 5　不同宽度的地表裂缝占比

Fig.5　Proportion of ground fissures with different widths

考虑到边界裂缝始终处于拉张区，宽度呈现“扩展—稳定”的变化过程，采动程度对其影响较小，因

此,本文主要分析面内裂缝的动态发育过程,如图 6 所示,裂缝 1(长度 64 m)和裂缝 2(长度 42 m)的宽度均呈现“扩展—收缩—稳定”的变化过程,发育周期均为 14 d,扩展阶段和收缩阶段分别为 6 d 和 8 d,表明扩展阶段的时间更短。裂缝 1 最大宽度为 730 mm,稳定宽度为 410 mm,收缩了 44%;裂缝 2 最大宽度为 318 mm,稳定宽度为 195 mm,收缩了 39%,两条裂缝稳定后均未完全闭合。综上,西部地区矿区高强度开采下,岩层破坏程度大、覆岩移动传递时间短,进而导致工作面上方面内裂缝扩展周期缩短、闭合度降低。

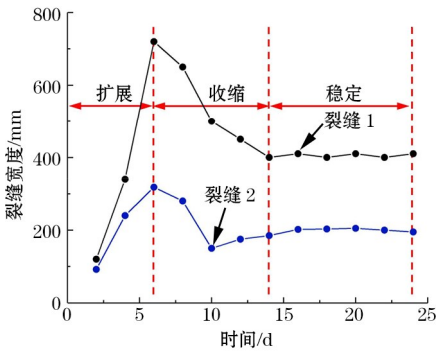


图 6 地表裂缝宽度随时间的变化

Fig.6 The width changes of ground fissure over time

3 地表裂缝演化相似模拟试验

3.1 相似材料模型构建

煤层开采是一个复杂的“黑箱”问题,地表裂缝形成涉及覆岩破断的传递过程,无法通过现场实测获得。因此,本文采用相似材料模拟试验进一步分析高强度开采下覆岩破坏及裂缝演化特征。根据相似理论和 615 工作面的具体开采地质条件,结合试验平台尺寸大小,在保证试验结果准确可靠的基础上,确定试验模型的几何相似比为 1/400,容重相似比为 1/1.5,应力相似比为 1/600,时间相似比为 1/20。本次试验的主要原料为沙子,辅助原料为云母粉,同时拌入胶结材料(碳酸钙和石膏),考虑到松散层因素,在其中加入适量木屑增加松散度,用于减少模型重度,如图 7 所示。

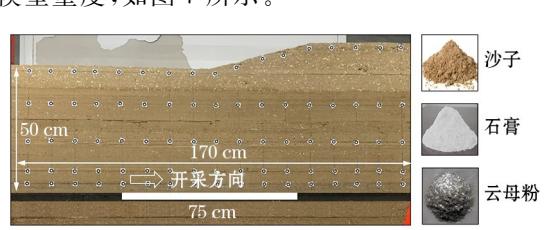


图 7 相似材料模型

Fig.7 Similar material model

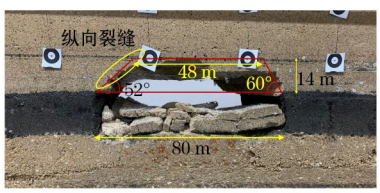
3.2 覆岩破坏及裂缝动态演化特征

工作面推进阶段,上覆岩层不断破断和变形,垮落岩层与未垮落岩层间形成离层,覆岩破坏范围呈“非等腰梯形”(0～140 m)或“等腰梯形”(140～300 m)向外扩展,前期裂缝带高度增加幅度较小,覆岩层局部垮落破坏,后期裂缝带高度增加幅度较大,覆岩层出现大面积垮落破坏(见图 8)。覆岩移动破坏过程可分为直接顶垮落、亚厚硬岩层初次破断和主厚硬岩层初次破断 3 个阶段,具有以下特征:

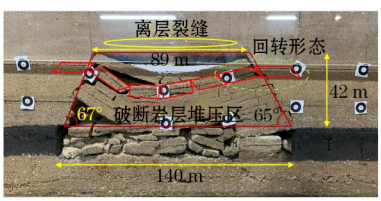
(1) 直接顶垮落后,垮落岩块杂乱无序,纵向裂缝斜角度向上延伸,垮落岩层在空间上具有非对称性;

(2) 亚厚硬岩层初次破断后,垮落岩块排列有序,随着推进侧破断岩块不断回转—滑落,岩层周期破断,同时覆岩裂缝不断向上延伸且横向扩展,垮落岩层在空间上具有对称性;

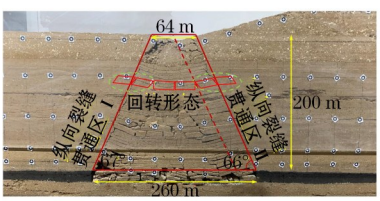
(3) 主厚硬岩层初次破断后,采动影响迅速传至地表,导致地层下沉量显著增加,覆岩裂缝与地表裂缝连通形成纵向裂缝贯通区,地表破坏严重。



(a) 直接顶垮落



(b) 亚厚硬岩层初次破断



(c) 主厚硬岩层初次破断

图 8 覆岩破坏及裂缝发育的动态演化特征

Fig.8 Dynamic evolution characteristics of overburden strata failure and fissure development

基于相似材料模型试验结果,建立高强度开采覆岩破坏与裂缝演化模型,如图 9 所示。由图 9 可知,主厚硬岩层发生初次破断后(260 m),覆岩裂缝发育至地表,形成贯通性裂缝,且随着主厚硬岩层每

一次周期性破断，覆岩裂缝均贯通至地表，最终形成纵向裂缝贯通区，地表出现拉张型、塌陷型和台阶型裂缝。根据地表裂缝贯通程度与分布形态，开采区地表可分为 5 个区域，即 2 个未扰动区，2 个裂缝产生区，1 个裂缝贯通区。未扰动区以下沉 10 mm 为边界，未受到采动应力的影响，无裂缝产生。裂缝产生区主要分布自地表向下不断延伸的拉张型裂缝，该类型裂缝始终处于地表移动变形拉张区，裂缝宽度随工作面回采由小到大直至趋于稳定，呈现“只开不和”的变化特征。裂缝贯通区主要分布在与采空区连通的贯通型裂缝和闭合裂缝，该类型裂缝经历了从地表移动变形拉张区转变为压缩区的过程，裂缝宽度随工作面回采先增大后减小，呈现“先开后合”的变化特征。综上，615 工作面为高强度开采工作面，区域内岩层移动为“两带”，垮落带高度为 42 m，裂缝带高度为 158 m，与实测结果一致。

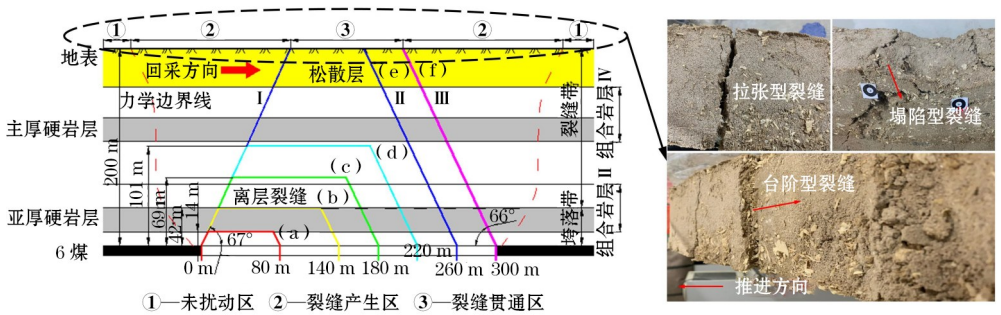


图 9　覆岩破坏及裂缝发育动态演化模型

Fig.9　Dynamic evolution model of overlying strata failure and fissure development

4　地表裂缝预测

地表裂缝临界变形值 ε_0 可以通过实测或计算求得。假设裂缝周围的表土层力学性质一致，根据弹性力学得到表土层任意单元体的应力应变关系方程：

$$\varepsilon_x=\frac{1-\mu^2}{E}\left(\sigma_x-\frac{\mu\sigma_y}{1-\mu}\right) \tag{1}$$

$$\varepsilon_y=\frac{1-\mu^2}{E}\left(\sigma_y-\frac{\mu\sigma_x}{1-\mu}\right) \tag{2}$$

式中：ε_x、ε_y 分别为水平和垂直方向的应变，mm/m；σ_x、σ_y 分别为水平和垂直应力，Pa；μ 为泊松比；E 为弹性模量，Pa。

在地表上，令 $\sigma_y=0$，$\varepsilon_x=\varepsilon_0$，式(1)可以表示为：

$$\varepsilon_0=\frac{1-\mu^2}{E}\sigma_x \tag{3}$$

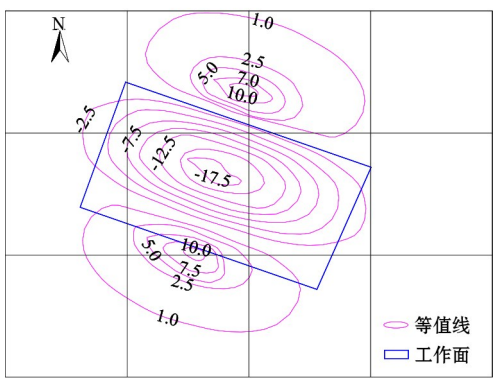
在地表上，近似认为 $\sigma_1=\sigma_x$，$\sigma_3=0$，根据式(3)和土体极限平衡条件，可得地表裂缝临界变形值 ε_0 为[20]：

$$\varepsilon_0=\frac{2-2\mu^2}{E}c\tan(45°+0.5\varphi) \tag{4}$$

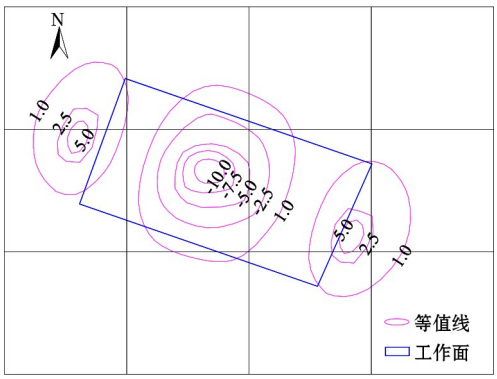
式中：c 为黏聚力，Pa；φ 为内摩擦角，(°)。

根据试验数据获得表土层的物理参数：$\mu=0.4$，$c=15.8$ kPa，$E=30$ MPa，$c=25$ kPa，$\varphi=32.3°$，代入式(4)得到地表裂缝临界变形值 $\varepsilon_0=2.5$ mm/m。当地表水平变形值大于 2.5 mm/m 时，会产生裂缝。

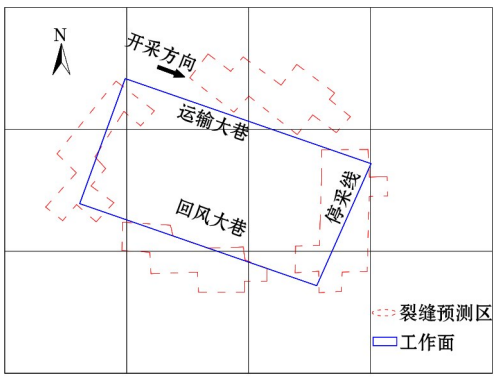
采用自主研发的 MSDPS(开采沉陷动态预测软件)预测地表水平变形，预测参数分别为：下沉系数 0.6，水平移动系数 0.3，主要影响角正切值 2.0，开采影响传播角 85.8°。地表水平变形预测结果如图 10 所示。根据图 10(a)和图 10(b)可以得出：地表最大拉伸变形为 10.0 mm/m，地表最大压缩变形为 17.5 mm/m。提取地表水平变形大于 2.5 mm/m 的区域，即地表拉张型裂缝的产生区域，如图 10(c)所示，可以看出预测区域集中于开切眼侧、停采线侧和顺槽侧，且受工作面开采和煤层上下山影响，偏向于停采线内侧和运输大巷外侧。将裂缝实测位置与预测位置相互叠加，得到的结果如图 11 所示。根据预测结果，计算得到走向、下山和上山裂缝角分别为 79.8°、74.1°和 79.5°，与实测结果的最大相对误差为 7.1%，可满足现场工程应用需求(以误差 10%为临界标准)。



(a) 垂直方向



(b) 水平方向



(c) 裂缝预测区

图 10 地表裂缝预测结果(单位:mm/m)

Fig.10 Prediction results of ground fissures (unit:mm/m)

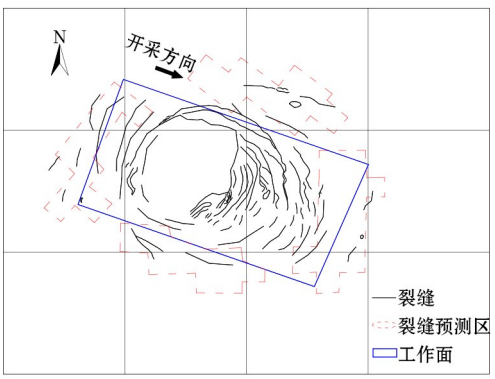


图 11 地表裂缝预测结果与实测结果对比

Fig.11 Comparison between preedicted and measured results of ground fissures

需要注意的是,贯通型裂缝是破断岩层在地表的显现,与拉张型裂缝的性质不同,因此图 10 仅为拉张型裂缝产生区域的预测结果,对于工作面内的塌陷型裂缝和台阶型裂缝产生区域还无法进行预测,但可以结合覆岩碎胀系数判断其产生的临界条件。当煤炭开采后,覆岩垮落形成的岩块不断充填采空区,当开采厚度较小或者开采深度较大时,碎胀的岩块完全充满采空区,松散层与基岩交界面表现为连续性变形,地表不会形成贯通型裂缝。假设开采厚度为 M,开采深度为 H(松散层厚度为 H_s,基岩厚度为 H_j),碎胀系数为 K,贯通型裂缝产生时对应的地表最大下沉值和离层高度分别为 W、h_c。当工作面开采尺寸一定时,贯通型裂缝产生时对应的开采厚度由岩块的碎胀值、地表下沉值和离层高度共同确定。即:

$$M=(K-1)(H-H_j)+W+h_c \tag{5}$$

根据概率积分法,取 $W=Mq\cos\alpha$,其中,q 为下沉系数;α 为煤层倾角,(°)。由于西部地区矿区地质赋存条件简单,离层高度取 0,对式(5)进行化简,可以得到:

$$\frac{H}{M}=\frac{1-q\cos\alpha}{(K-1)}+\frac{H_j}{M} \tag{6}$$

根据已有研究成果[14],台阶型裂缝和塌陷型裂缝均是由于岩层错动形成的,且与工作面连通,发育深度即为开采深度。式(6)可以作为确定贯通型裂缝产生时对应的深厚比临界值。结合 615 工作面地质条件,取碎胀系数 $K=1.09$,下沉系数 $q=0.6$,代入式(6)得到该矿区产生贯通型裂缝的条件为深厚比小于 14。615 工作面的深厚比为 13,表明地表会产生贯通型裂缝,与前文实测结果一致。

5 结论

(1) 高强度开采条件下,地表裂缝以拉张型、台阶型和塌陷型为主。地表裂缝集中于采空区范围内、整体呈弧形,且受采动程度与开采条件影响,工作面推进过程中面内裂缝扩展周期缩短、闭合度降低。矿区覆岩破碎程度高,岩层移动呈“两带”模式发育至地表。

(2) 高强度开采地表裂缝发育程度相比于一般地质开采条件更强,宽度为 0~100 mm、100~500 mm 和大于 500 mm 的裂缝数量分别占 38%,56% 和 6%。随着工作面不断推进,宽度较小的边界裂缝和宽度较大的面内裂缝数量逐渐减少,导致两者所占比例变化,即裂缝宽度较小时,面内裂缝数量较多,裂缝宽度较大时,边界裂缝数量较多。

(3) 覆岩移动破坏过程可分为直接顶垮落、亚厚硬岩层初次破断和主厚硬岩层初次破断 3 个阶段,覆岩裂缝伴随厚硬岩层破断同步发育,最终贯通至地表。依据地表裂缝发育程度,开采区地表可分为 2 个未扰动区,2 个裂缝产生区,1 个裂缝贯通区。

基于地表裂缝临界变形值,预测了裂缝产生区域(走向、下山和上山裂缝角分别为79.8°、74.1°和79.5°),最大相对误差为7.1%,可满足现场工程应用需求。此外,给出了贯通型裂缝产生的深厚比临界值计算公式。

参考文献(References):

[1] 张玉军,李友伟,肖杰,等.厚土层薄基岩高强度开采覆岩破坏高度与特征[J].采矿与岩层控制工程学报,2023,5(2):023015.
Zhang Yujun, Li Youwei, Xiao Jie, et al. Failure height and characteristics of overlying strata in high strength mining of thick soil and thin bedrock[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2023,5(2):023015.

[2] 郭文兵,白二虎,赵高博.高强度开采覆岩地表破坏及防控技术现状与进展[J].煤炭学报,2020,45(2):509-523.
Guo Wenbing, Bai Erhu, Zhao Gaobo, Current status and progress on overburden and surface damage and prevention technology of high-intensity mining[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(2):509-523.

[3] 赵毅鑫,许多,张康宁,等.采动地表浅层隐蔽裂缝的无人机红外识别现场试验[J].煤炭学报,2022,47(5):1921-1932.
Zhao Yixin, Xu Duo, Zhang Kangning, et al. In-situ experiment on the identification of shallow hidden mining-induced ground fissure using UAV infrared technology[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(5):1921-1932.

[4] 王强,党牛,蒋子龙,等.碳中和背景下能源转型研究综述与展望[J].地理学报,2025,80(3):586-604.
Wang Qiang, Dang Niu, Jiang Zilong, et al. A review and outlook on energy transition research in the context of carbon neutrality[J]. Acta Geographica Sinica,2025,80(3):586-604.

[5] 张琰君,阎跃观,朱元昊,等."斜台阶切落体"结构特性及对覆岩采动裂缝的影响研究[J].太原理工大学学报,2023,54(1):91-97.
Zhang Yanjun, Yan Yueguan, Zhu Yuanhao, et al. Study on structural characteristics of "inclined step cutting body" and its influence on overlying rock mining-induced cracks [J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2023,54(1):91-97.

[6] 李运成,黄艳利,吴运标,等.黄土沟壑区特厚煤层开采地表裂缝发育规律研究[J].矿业研究与开发,2022,42(6):68-73.
Li Yuncheng, Huang Yanli, Wu Yunbiao, et al. Study on the development law of surface cracks in extra-thick coal seam mining in loess gully region[J]. Mining Research and Development,2022,42(6):68-73.

[7] 陈镇,刘萍,朱恒忠,等.峰丛地貌下浅埋煤层采动地裂缝形成机理及其发育规律[J].矿业工程研究,2023,38(1):1-8.
Chen Zhen, Liu Ping, Zhu Hengzhong, et al.The formation mechanism and development law of mining-induced ground fractures in shallow coal seams under peak-cluster landform [J]. Mineral Engineering Research,2023,38(1):1-8.

[8] 冯泽伟,浮耀坤,胡振琪,等.陕北风积沙区超长工作面地表移动变形特征研究[J].煤炭工程,2023,55(7):120-125.
Feng Zewei, Fu Yaokun, Hu Zhenqi, et al.Characteristics of surface movement and deformation of super-long working face in eolian sand region in northern Shaanxi[J]. Coal Engineering,2023,55(7):120-125.

[9] Xu Yuankun, Wu Kan, Li Liang, et al. Ground cracks development and characteristics of strata movement under fast excavation:a case study at Bulianta coal mine,China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2019,78(1):325-340.

[10] Zhao Yixin, Ling Chunwei, Zhang Kangning, et al. Detection of hidden mining-induced ground fissures via unmanned aerial vehicle infrared system and ground-penetrating radar [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2022,160:105254.

[11] 周大伟,安士凯,吴侃,等.矿山开采损InSAR/UAV融合监测关键技术及应用[J].煤炭科学技术,2022,50(10):121-134.
Zhou Dawei, An Shikai, Wu Kan, et al. Key technology and application of InSAR/UAV fusion monitoring for coal mining damages[J]. Coal Science and Technology,2022,50(10):121-134.

[12] 侯恩科,慕佳欣,谢晓深,等.浅埋煤层开采地表裂缝发育规律及形成演化机理[J].煤田地质与勘探,2025,53(2):107-117.
Hou Enke, Mu Jiaxin, Xie Xiaoshen, et al. Developmental patterns and formation and evolutionary mechanisms of surface cracks induced by the mining of shallowly buried coal seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(2):107-117.

[13] 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.
Xu Zhuhe, Li Quansheng, Li Xiaobin, et al. Structural evolution of overburden and surface damage caused by high-intensity mining with shallow depth[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(8):2728-2739.

[14] Zhang Yanjun, Yan Yueguan, Zhu Yuanhao, et al. Evolution mechanism and treatment timing of penetrating fissures[J]. Journal of Mountain Science, 2024, 21(10):3453-3473.

[15] 侯恩科,谢晓深,冯栋,等.浅埋煤层开采地面塌陷裂缝规律及防治方法[J].煤田地质与勘探,2022,50(12):30-40.
Hou Enke, Xie Xiaoshen, Feng Dong, et al. Laws and prevention methods of ground cracks in shallow coal seam mining [J]. Coal Geology & Exploration,2022,50(12):30-40.

[16] 李全生,李晓斌,许家林,等.岩层采动裂隙演化规律与生态治理技术研究进展[J].煤炭科学技术,2022,50(1):28-47.
Li Quansheng, Li Xiaobin, Xu Jialin, et al. Research advances in mining fractures evolution law of rock strata and ecological treatment technology [J]. Coal Science and Technology,2022,50(1):28-47.

[17] Zhang Yanjun, Yan Yueguan, Zhu Guizhen, et al. Development law and prevention methods of mining-induced ground cracks:a review[J]. Journal of the Geological Society of India,2025,101(1):24-41.

[18] 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.
Cao Jian, Huang Qingxiang. Regularity and control of overburden and surface fractures in shallow-contiguous seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(4): 213-220.

[19] 谢晓深,侯恩科,冯栋,等.榆神府矿区采煤地表裂缝发育规律及特征[J].工程科学学报,2023,45(1):44-53.
Xie Xiaoshen, Hou Enke, Feng Dong, et al. Development law and characteristics of surface cracks caused by coal mining in the Yushenfu mining area[J]. Chinese Journal of Engineering,2023,45(1):44-53.

[20] 陈芳,李杰卫,张琰君,等.黄土沟壑区特厚煤层开采地裂缝发育规律研究[J].金属矿山,2023(4):229-235.
Chen Fang, Li Jiewei, Zhang Yanjun, et al. Study on the development law of ground cracks in extra-thick coal seam mining in loess gully area[J]. Metal Mine,2023(4):229-235.