

采动地裂缝灾害研究进展

唐 赐, 黄 河, 顾 磊, 闫广柱

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2022年4月15日; 录用日期: 2022年5月17日; 发布日期: 2022年5月24日

摘 要

本文通过查阅大量文献, 对采动地裂缝的形成机理、危害性、研究方法、防治技术进行了系统总结分析: 采动地裂缝是至下而上经过岩层破坏移动、地表土体时效变形两个阶段形成, 目前主要从数理分析, 力学机理分析以及地裂缝破裂扩展数值模拟三个方面分析形成机理; 采动地裂缝易诱发其他地质灾害, 危害矿井安全生产, 破坏矿区生态环境; 在采动地裂缝防治方面主要包括监测装置的研发, 实施充填、增湿、应力引导, 保水开采等治理措施。

关键词

采动地裂缝, 研究进展, 危害性, 防治措施

Research Progress of Mining-Induced Ground Fracture Disaster

Ci Tang, He Huang, Lei Gu, Guangzhu Yan

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Apr. 15th, 2022; accepted: May 17th, 2022; published: May 24th, 2022

Abstract

This article, through consulting a large number of literature, to the mining-induced ground fissure formation mechanism, harm, research methods, prevention and control technology, has carried on the system summary analysis: mining ground fissures is to form on two stages, down and through the strata damage movement and surface deformation limitation, mainly from the mathematical analysis, the mechanical mechanism analysis and ground crack fracture extension numerical simulation the three aspects to analyze the forming mechanism; mining-induced ground fissures easily induce other geological disasters, endanger mine safety production and destroy the ecological environment of mining area. The prevention and control of mining-induced ground cracks mainly include

the research and development of monitoring devices, the implementation of filling, humidification, stress guidance, water mining and other treatment measures.

Keywords

Mining-Induced Ground Fissure, Research Progress, Harm, Prevention and Control Measures

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤炭开采对地表损伤的最直观的表现形式之一就是采动地裂缝, 随着其发生频率和灾害程度的逐年增加, 国际地学界已经对其密切关注[1]。相关研究表明, 工作面的采动地裂缝易诱发附加矿难, 同时也会对土地生态环境造成较大的负面影响[2], 随着煤炭资源采掘业“战略西移”以及集群化发展[3], 西部矿区已成为我国煤炭资源开采的主要区域, 大量的土地沉陷区将伴随地表开裂、山体滑坡等自然灾害[4][5], 采动地裂缝对矿区危害性大, 对生态环境的损伤难以修复。因此, 近年来对采动地裂缝的研究日益增多, 并取得了丰硕成果, 对减灾防灾工作提供了重要指导。

2. 采动地裂缝的形成机理

2.1. 采动地裂缝的形成过程

在煤炭开采过程中, 岩石和土体的应力会发生变化, 从而导致岩层的破坏和移动。岩层破坏和表土变形引起表土层变形和表面不均匀沉降[6]。因此, 现有的调查显示, 由采矿活动诱发的地裂缝形成过程分为两个步骤:

1) 岩层破断移动阶段。

矿区采动破坏岩土体的天然应力平衡, 应力集中于采动区边缘。煤层直接顶和基本顶逐渐向下变形。伴随采空区域的连续扩大, 集中应力大于岩体屈服应力, 岩层的应力平衡破坏, 发生变形和破坏。当采空区域非常大, 表土面受到上覆岩层的移动和变形影响, 岩层产生破断裂隙自下而上发育。

2) 地表土体时效形变阶段。

表土层内部应力状态受采动活动改变, 从而造成地表各点非均匀沉陷和移动变形, 当表土层受到的应力变化大于其极限强度, 土体非连续变形大于其极限形变, 土体沿着原有裂缝进行非连续破坏, 产生地裂缝。岩土体在拉压应力作用下破裂扩展(图 1), 岩土体中的应力与形变随着工作面不断推进而变化[6]。

根据近年来日益增多的采动地裂缝调查, 研究表明地裂缝的形态尽管相似, 但其力学成因各不相同, 在多个因素综合作用导致地裂缝发育, 但以其中某一因素为主导。下面从数理分析, 力学机理分析及数值模拟共 3 个方面阐述采动地裂缝形成机理。

2.2.1. 采动地裂缝数理分析

分析采动地裂缝的形成过程中常用的方法是基于实测资料来进行理论推导。胡振琪等[7]基于实测资料建立了风沙区动态地裂缝发育周期 T 与采动过程耦合的数学模型:

$$T = 2H_0 (\tan \delta + \tan \Phi) / V \quad (1)$$

式中, Φ 为最大下沉速度滞后角; δ 为动态裂缝超前角; H_0 为煤层埋深(采深), m; V 为平均开采速度, m/d。该研究定量分析了动态地裂缝两个“开裂 - 闭合”过程, 揭示了动态地裂缝快速闭合的自修复特征; 王云广等[8]通过计算下沉盆地主断面下沉曲线长度, 作为覆岩移动拉伸区地表裂缝发育判据, 通过并定性分析了动态地裂缝单一“开裂 - 闭合”过程的自修复特征(图 2)。

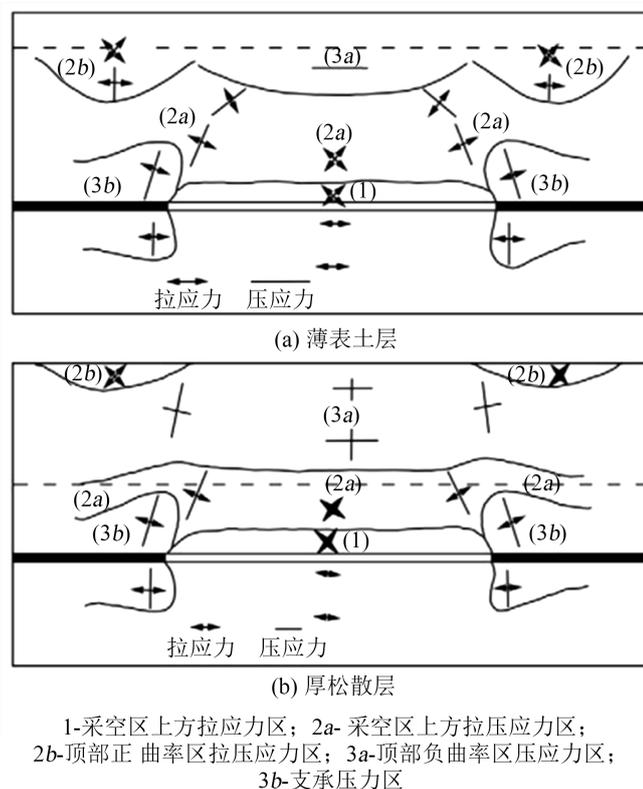


Figure 1. Principal stress zoning in mining-induced rock and soil [6]

图 1. 采动岩土体内主应力分区[6]

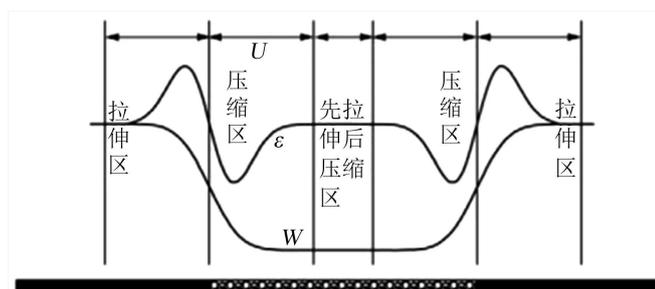


Figure 2. The distribution of tensile zone and compression zone in the main section of over-fully mined [8]

图 2. 超充分采动主断面拉伸区和压缩区分布[8]

李亮等[9] [10] [11]研究认为, 高强度开采引起的裂缝, 其发育特征是自上而下的, 其发育深度受土体力学性质控制, 并提出了裂缝角, 动态裂缝角和裂缝还原角的概念, 可准确划分开采引起的裂缝在不同时段的发育形态, 并分析了地表裂缝宽度与水平变形的关系。

汤伏全等[12] [13]基于莫尔 - 库仑理论研究, 发现土体单元破坏时, 其临界拉伸变形值与深度有线性

关系, 考虑超前工作面垂直剖面时, 地表水平变形大于黄土层深部, 地表先于深部达到极限平衡的剪切破坏状态, 产生贯通深度剪切带, 引发黄土层的剪切破坏, 土体的构造分割成土块结构, 岩层的不均匀沉降引起黄土块间的错动, 形成切落型地裂缝。

刘辉[14]等基于薄板理论的基本顶“O-X”破断原理并结合关键层理论, 分析了黄土沟壑区浅埋煤层开采塌陷型采动地裂缝形成机理(图 3)。

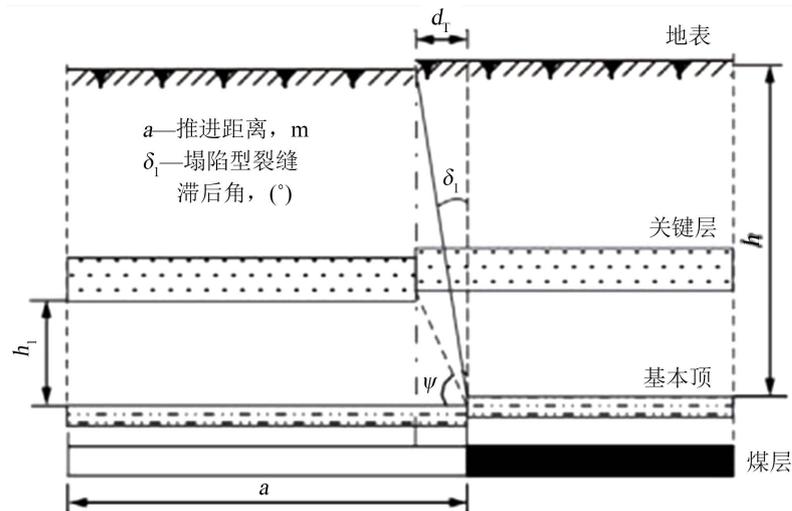


Figure 3. Collapse type ground fracture wells are compared up and down [14]
图 3. 塌陷型地裂缝井上下对照[14]

余学义等[15]认为切落裂缝破坏, 是矿区采动压力引起关键词的变形和结构不稳定性引起的, 关键层对裂隙破坏起控制作用, 保证关键层结构稳定是防止该类裂缝形成的关键。

针对现场地裂缝监测数据进行数学及力学理论分析, 有时候并不能反应岩土体复杂的介质条件和多变的应力耦合场, 需要经过大量实际工程的实测结果验证。

2.2.2. 采动地裂缝的力学机理分析

余学义等[10]认为, 上位岩层与湿陷性黄土的介质特性不同, 在工作面推进时, 岩层和黄土层之间的交界面存在摩擦力, 产生了拉应力。当拉伸应力超过土体极限拉伸强度时, 发生拉伸破坏, 土体会向弱面扩展, 与原生裂隙贯通, 形成拉伸型地裂缝。

朱川曲[16] [17] [18] [19]为了探讨土体的初始应力状态, 设计了采动作用下地裂缝的力学模型。根据土层的强度理论及广义胡克定律, 可得到土层土体单元极限平衡强度时的极限拉应变, 土体单元的埋深越大, 其极限拉应变也就越大; 而地表最容易产生裂缝的原因在于, 其埋深为 0 时极限拉应变最小, 容易发育地裂缝。

康建荣等[20]认为随着工作面不断推进扩大, 其顶板岩层跨距达到极限状态发生周期性断裂, 岩层移动变形呈跳跃式变化, 导致表土层不均衡移动, 在复杂应力作用下形成地裂缝; 韩奎峰等[21]发现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。

刁乃勤[22]认为, 裂隙带以上出现整体断裂带, 整体断裂带大面积突然切落, 造成工作面矿压显现剧烈, 容易诱发冲击地压, 形成地裂缝。

地裂缝的形成受岩土体内复杂应力构造[23], 各种连续及非连续介质综合作用影响, 现有针对地裂缝

力学机理的分析，多为特定地质条件下地裂缝形成的力学简化模型，缺少对复杂土体与各种复杂应力条件下的力学环境耦合，并不能构建实际地裂缝演化的力学模型分析。

2.2.3. 采动地裂缝的数值模拟

刘辉等研究[24]利用 UDEC 数值模拟分别研究地表沟谷坡度、沟谷位置对滑动型地裂缝的影响，建立了滑动型地裂缝动态发育模型、沟谷坡度模型、沟谷位置模型(图 4)。

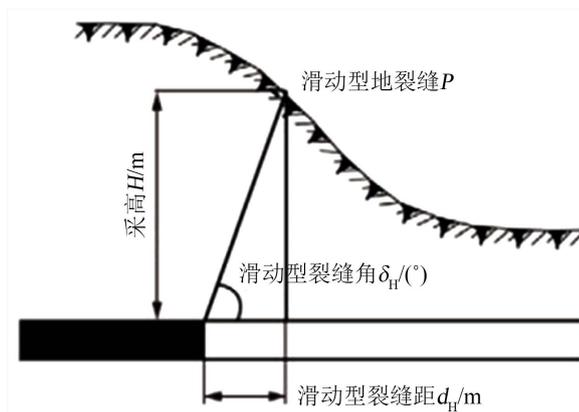


Figure 4. Sliding type ground fracture profile [24]

图 4. 滑动型地裂缝剖面[24]

刘栋林等[25]用 UDEC 进行模拟，分析了工作面上坡及下坡产生地裂缝的差异，发现实质是采动附加应力会随推进方向的变化发生变化，在工作面上下坡分别发育牵引型正裂缝，推动型逆裂缝；史文兵等[26]利用 FLAC3D 模拟计算坡面斜坡重复采动后的应力情况，基于莫尔-库仑强度准则研究斜坡岩土体材料，利用 3DEC 模拟建立斜坡典型坡面的离散元模型，分析斜坡裂缝形成与斜坡岩体结构及重复采动的关系。

杨帆等[27]采用有限差分数值模拟软件 FLAC3D 对采动地表裂缝的形成机理展开研究，并分析地表移动变形分布与煤炭采动裂隙的关系，认为采动裂缝具有集中变形特性，且会减小开采影响传播范围，采动裂隙通常是地表变形最大值处，裂缝以外区域地表移动变形值急剧减小。

对地裂缝的数值模拟研究方法较多，各种数值模拟软件的广泛应用对于地裂缝形成机理分析起到了促进作用，但每种数值模拟软件都有理论不足之处，无法全面的构建力学模型[28] [29] [30]。因此仅靠数值模拟单方面是不足以做出有说服力的结论，还需综合现场情况，物理模拟，新型监测工具等技术手段，弥补单一研究工具的缺陷，做到研究工具的理论互补，技术相互支撑，起到良好的兼容研究能力。

2.2. 采动地裂缝的类型

目前学界对于地裂缝的研究方向较多，对于地裂缝目前有 3 种常见的分类方法：力学分类法、分布状态分类法和运动特征分类法[31] [32] [33] [34]。主要有以下分类(图 5)。

3. 采动地裂缝危害性分析

地表裂缝主要有列三点危害：

1) 容易衍生地质灾害

根据实际工程的各项数据可分析得出，在山区开采煤炭对于地表产生的破坏最大，稳定的山区坡体会被采动裂缝影响失稳，诱发其他地质灾害，当坡体的坡度为 25° ~ 60° 范围内时，采动活动会导致大面积

滑坡灾害,当坡体坡度大于 60° 时,受采动影响可能出现坍塌灾害[10],进而威胁到周围的基础设施、自然资源、生命财产等。因此可得出结论:地表裂缝具有较强的危害性。

分类方法	裂隙名称	裂隙特征
力学成因	张性地裂缝	主要发育在拉伸应力区,部分分布在剪切应力区,根据其形态主要有拉伸型、塌陷型、滑动型、切落型、抽冒型
	压性地裂缝	发育条件需在压缩变形较大的区域,表现为鼓起开裂或凹陷,可称为“挤压型”
分布状态	扭性地裂缝	主要在采空区边界拐角区域,常与开采边界斜交且成带出现,呈雁列式或多字形排列,有时还呈格子状或菱块状
	动态裂缝	在回采工作面上方,随工作面的推进而不断向前推移,在采矿驱动力作用下具有“自修复”特征,会在采后一段时间内闭合
	边缘裂缝	分布在开采边界上方,形成后可长期留存地表,当相邻工作面回采或人工充填、或经较长时间自然营力作用才能闭合,在无人为扰动条件下具有“自然修复”特征
运动特征	拉张型地裂缝	地裂缝在浅表部近直立,地裂缝的张开量随着深度的增加而逐渐减小直至尖灭,但地裂缝两侧地层无明显位错
	拉张-剪切型地裂缝	地裂缝在浅表部兼具水平位移和竖向位移,地裂缝的张开量随着深度的增加而逐渐减小,且地裂缝两侧地层的位错量随深度的增加也逐渐减小,地裂缝向下延伸一定的距离后尖灭
	剪切-拉张型地裂缝	地裂缝在浅表部近直立且兼具水平位移和竖向位移,地裂缝向下延伸的过程中发生倾斜且地裂缝两侧地层的位错量随深度的增加而逐渐增加,但是地裂缝的张开量却随深度的增加而逐渐减小
	剪切型地裂缝	在浅表部具有一定的倾角,地裂缝以竖向位移为主且无明显水平位移,地裂缝两侧地层的竖直位错量随深度的增加而显著增加,地裂缝两侧局部地层具有牵引现象和剪切破裂带

Figure 5. Classification method of ground fissure

图 5. 地裂缝分类方法

2) 给矿井的安全生产造成潜在威胁

较疏松散层不具有控制基岩与土体交接处的地裂缝与台阶下沉的作用,随着工作面推进,当较大裂缝在地表发育,裂缝可能与井下通风系统或导水裂隙带联通,破坏生产矿井的通风系统,引起矿井水灾事故,影响矿井的安全生产。目前地表裂缝在这方面的影响已经引起了生产人员的重视[23]。

3) 损害矿区生态环境

不利于地下水资源的开发利用,周边环境的生态保护;使土地生产能力降低,当地表裂缝与覆岩裂隙场形成较合适的通道后[23],将会使大气降水、地表水体以及地下水发生水力联系,采煤污染物进入含水层,造成不同程度的污染,进而降低土地的生产能力。

4. 采动地裂缝防治

4.1. 地裂缝监测装置应用

针对矿区地裂缝发育及分布,多种研究理论逐渐呈现。GPS 监测,无人机遥感监测,GPR 监测技术等多种监测手段也逐渐应用于现场工程中。

4.1.1. GPS 监测技术

在地裂缝发育区域布置 GPS 监测点[35], 及时、定期分析监测点检测结果, 得到监测点的实际绝对变形量, 解析各组裂缝监测点的水平位移矢量投影, 高程绝对位移, 可分别得到对应监测点拉伸位错和水平位错位移, 裂缝两边的沉降位移, 对每组裂缝监测点做以监测时间为主线的对比分析, 通过对地裂缝发展变化的监测, 从每组监测点的变形特点及监测裂缝的分布形态综合分析, 可总结得出裂缝变化的特点。

4.1.2. 无人机遥感监测技术

基于低空无人机遥感影像[36], 结合实地查勘, 构建面向对象监督分类模型方法, 开展地表采动裂缝提取, 首先, 借助 ESP (Estimation of scale parameter) 最优尺度评价工具得到候选分割参数, 结合目视解译快速确定最优分割参数, 得到裂缝、植被等影像对象(图), 利用特征空间优化工具从 24 个初始特征集中确定 15 个优化特征参数构建优化特征集, 在此基础上结合支持向量机(SVM, Support Vector Machine)、K 最近邻(KNN, K Nearest Neighbor)、随机森林(RF, Radom Forest)、朴素贝叶斯(NB, Naive Bayes)多种机器学习分类器模型, 采用低空无人机拍摄采集影像, 提取分类特征, 基于面向对象的监督分类进行煤矿区地表采动裂缝提取, 分析不同算法分类效果和方法精度, 优选模型方法准确提取到工作面主要裂缝, 相比传统人工矢量化更加高效, 使用无人机高空间分辨率影像的面向对象方法对提取采煤沉陷区地表裂缝的可行性和准确性都较为不错。

在使用无人机遥感监测技术时, 也存在以下问题, 空间分辨率和重访时间限制会卫星数据, 在分析动态裂缝, 细节处理时比较困难; 随着分辨率的提高, 地物细节得到加强, 但增大了同类地物差异, 分类结果噪声现象明显, 分类结果不理想, 同时无人机热红外遥感对飞行航高和航飞时间等方面, 条件相对苛刻, 有一定的局限性。

4.1.3. GPR 监测

由于探地雷达能够根据电磁波在不同介质中的差异性而呈现不同的信号反射信息[37], 从而准确探测地下目标的分布形态和特征, 为了研究采动裂缝在开采区地下扩展状态和发育深度, 可采用 GPR 技术探测。具体实施步骤为: 1) 沿垂直于裂缝走向方向, 合理布置观测线, 采用透射波单测线剖面法对裂缝进行探测; 2) 使用专业软件对 GPR 进行去噪处理, 通过剖面图分析, 雷达信号幅度相对稳定, 属于裂缝发育带, 可读取裂隙带的纵向发育形态和深度信息。

目前 GPR 监测主要用于地裂缝的深度探测实验, 对于地裂缝的发育监测仍需要配合多种仪器结合使用, 分别监测裂缝发育的宽度、落差和深度, 观测地裂缝的动态发育过程。

4.2. 地裂缝治理措施

采动地裂缝分为采动中的临时性裂缝和稳沉后的永久性裂缝两种[14], 多塌陷区生态恢复治理与地裂缝治理一直受到学者密切关注, 地裂缝的常规治理方法有: 沙土充填、矸石充填、浆体充填等方法, 普通充填法工效低、充填效果差、成本高, 实际工程常用沙土灌入法[38]。由于工作面两侧形成的永久开裂具有较大的垂直深度和不规则的水平分布, 很难用一般的沙子材料进行密集填充, 经常会存在残留空腔, 水土保持困难重重, 安全风险依然存在, 针对上述问题刘辉等学者在进行超高水材料性能测试的基础上[39], 针对野外作业环境, 设计了超高水材料地裂缝充填系统, 提出采用超高水材料进行深部充填, 地表覆土, 植被绿化的地裂缝治理“3 步法”(图 6), 采用超高水材料充填, 充填效果理想, 充填密实, 治理成效优于沙土充填, 超高水材料可实现高密度填充, 维持地表稳定, 保水效果较好, 植被成活率较高, 有助于矿区修复后的生态建设及治理。

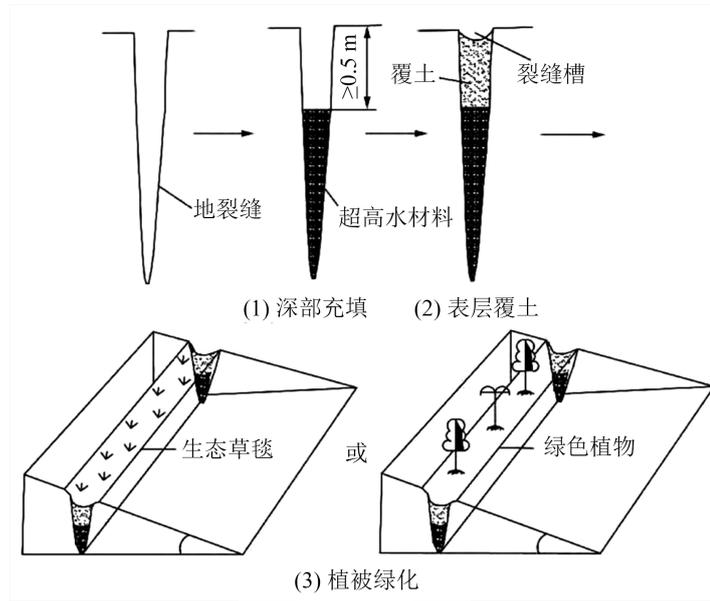


Figure 6. “3-step method” for filling treatment of Ground fractures with ultra-high water Materials [39]

图 6. 超高水材料地裂缝充填治理“3步法” [39]

在采动地裂缝中，以张性地裂缝发育较为普遍，除充填法治理外，针对拉张裂隙黄河等在地表拉张裂缝演化及其控制因素物理模拟试验的基础上[40]，提出采用增湿法和应力引导法治理，增湿法通过人工浇灌等方法提高工作面推进区域土体含水率，当含水量较高时，土体有强塑性变形能力，将变形部分拉动或全部转化为塑性变形，防止裂缝形成，范围缩小；应力引导法是在推进面的方向构造一个弱应力面，随着工作面的推进，在面上产生拉伸张力，拉伸变形优先反映在弱应力面上，在一定范围内，可以改变表面张力裂纹的发展方向，对矿区地裂缝扩张方向上，定向目标的保护有着指导意义。

煤炭的地下开采必然导致上层岩石的破坏和移动，这就产生了一系列宏观和微观的裂缝，导致地下水资源沿着采动裂缝流失。地下水位埋深是影响矿区表生生态环境的主控因素，地下埋深低于某一阈值，生态系统恶化将不可避免，难以修复[41]。目前主要通过水害防治技术、含水层原位保护技术等保水采煤技术，实现保水开采和恢复地下水位，减小裂隙发育，降低地裂缝的活动性，从而治理地裂缝。

5. 结论与展望

分析认为，当前的研究成果在一定程度上揭示了采动地裂缝的形成机理，采动地裂缝受复杂地质采矿条件影响，力学环境复杂，现有研究所假设的力学模型及数值分析软件的力学理论都有一定局限，需要增加数理论分析与工程实际的吻合性，并注意监测仪器及技术方法的兼容性。

采动地裂缝是矿区频发的地质灾害，给矿区安全生产，公共资源和国家经济发展造成较大危害，因此建立采动地裂缝变形稳定性分析及控制的技术路线非常的重要，在地裂缝防治时，首先应根据采煤区地质条件，采煤方法及工艺等，科学地分析，预测地裂缝发育特点及危害程度，制定合理的预防及治理方案，从而将采动地裂缝灾害损失减小到最低。

参考文献

- [1] 王景明. 地裂缝及其灾害的理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000.
- [2] 臧荫桐, 汪季, 丁国栋, 等. 采煤沉陷后风沙土理化性质变化及其评价研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 262-269.

- [3] 李文平, 段中会, 华解明, 等. 陕北榆神府矿区地质环境现状及采煤效应影响预测[J]. 工程地质学报, 2000(3): 324-333.
- [4] 雷少刚. 荒漠矿区关键环境要素的监测与采动影响规律研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(9): 1587-1588.
- [5] 左合君, 赵国平, 胡春元, 等. 采煤塌陷区地表动态演变对风蚀影响研究——以神府东胜煤田补连塔矿风沙区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(7): 87-92.
- [6] 隋旺华. 开采沉陷土体变形工程地质研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.
- [7] 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.
- [8] 王云广, 郭文兵. 采空塌陷区地表裂缝发育规律分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(1): 89-95.
- [9] 徐乃忠, 高超, 倪向忠, 等. 浅埋深特厚煤层综放开采地表裂缝发育规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(12): 124-128+97.
- [10] 余学义, 李邦帮, 李瑞斌, 等. 西部巨厚湿陷性黄土层开采损害程度分析[J]. 中国矿业大学学报, 2008(1): 43-47.
- [11] 李亮. 高强度开采条件下堤防损害机理及治理对策研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2010.
- [12] 张峰. 采动地表裂缝发育范围异常扩大成因分析[J]. 金属矿山, 2015(4): 154-156.
- [13] 汤伏全, 张健. 西部矿区巨厚黄土层开采裂缝机理[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(11): 1466-1470.
- [14] 刘辉, 何春桂, 邓喀中, 等. 开采引起地表塌陷型裂缝的形成机理分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 380-384.
- [15] 余学义, 黄森林. 浅埋煤层覆岩切落裂缝破坏及控制方法分析[J]. 煤田地质与勘探, 2006(2): 18-21.
- [16] 王鹏, 余学义, 刘俊. 浅埋煤层大采高开采地表裂缝破坏机理研究[J]. 煤炭工程, 2014, 46(5): 84-86.
- [17] 黄庆享, 张沛, 董爱菊. 浅埋煤层地表厚砂土层“拱梁”结构模型研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2722-2726.
- [18] 郭文兵, 黄成飞, 陈俊杰. 厚湿陷黄土层下综放开采动态地表移动特征[J]. 煤炭学报, 2010, 35(S1): 38-43.
- [19] 朱川曲, 黄友金, 芮国相, 等. 采动作用下煤矿区地表裂缝发育机理与特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(4): 47-52.
- [20] 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(1): 59-64.
- [21] 韩奎峰, 康建荣, 王正帅, 等. 山区采动地表裂缝预测方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(6): 896-900.
- [22] 刁乃勤. 巨厚覆盖层下特厚煤层综放开采岩移规律[J]. 煤矿安全, 2015, 46(2): 197-200.
- [23] 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): 864-869.
- [24] 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.
- [25] 刘栋林, 许家林, 朱卫兵, 等. 工作面推进方向对坡体采动裂缝影响的数值模拟[J]. 煤矿安全, 2012, 43(5): 150-153.
- [26] 史文兵, 黄润秋, 赵建军, 等. 山区平缓采动斜坡裂缝成因机制研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(5): 768-774.
- [27] 杨帆, 余海锋, 郭俊廷. 采动地表裂缝形成机理的数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(6): 566-570.
- [28] 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.
- [29] 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(2): 56-59.
- [30] 范立民, 马雄德, 李永红, 等. 西部高强度采煤区矿山地质灾害现状与防控技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 276-285.
- [31] 李文平, 于双忠, 姜振泉, 等. 淮河水体工程地质特性及采动裂缝研究[J]. 煤田地质与勘探, 1992(2): 47-50.
- [32] 乔建伟, 彭建兵, 郑建国, 等. 中国地裂缝发育规律与运动特征研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(5): 1016-1027.
- [33] 王艺伟, 叶淑君, 于军, 等. 中国“采水型”地裂缝特征和成因分析[J]. 高校地质学报, 2016, 22(4): 741-752.
- [34] 刘聪, 袁晓军, 朱锦旗. 苏锡常地裂缝[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2004.
- [35] 曹佳兴. 矿区地表岩移与地裂缝分布动态监测分析[J]. 华北科技学院学报, 2020, 17(4): 35-42.
- [36] 杨奇让, 胡振琪, 韩佳政, 等. 煤矿区无人机影像采动地裂缝提取方法研究[J/OL]. 煤炭科学技术, 1-13. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1204>, 2022-04-13.

- [37] 刘辉, 邓喀中, 雷少刚, 等. 采动地裂缝动态发育规律及治理标准探讨[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(5): 884-890.
- [38] 张晋纶, 张绍良, 杨永均, 等. 黄土高原煤矿区地表采动裂缝扰动范围预计方法研究[J]. 中国煤炭, 2013, 39(3): 111-115+123.
- [39] 刘辉, 雷少刚, 邓喀中, 等. 超高水材料地裂缝充填治理技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 72-77.
- [40] 黄河, 冯宇, 严家平, 等. 采煤区地表拉张裂缝演化及其控制因素物理模拟试验[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(4): 93-98.
- [41] 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.