



## 沟谷区多煤层开采覆岩破坏及径流水害防治研究

刘一龙 杨天鸿 马凯 叶强 赵永 赵乾百

### 引用本文：

刘一龙, 杨天鸿, 马凯, 等. 沟谷区多煤层开采覆岩破坏及径流水害防治研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 243–254.  
LIU Yilong, YANG Tianhong, MA Kai. Study on overburden damage and prevention of runoff disaster in multiseam mining of gully region[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 243–254.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2023-0353>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 黄土沟谷区浅埋煤层开采覆岩破坏与地表损伤特征研究

Study on overburden and surface damage characteristics of shallow-buried coal seam mining in loess gully area  
煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e2e70fbd-d9b8-40b4-993b-4015877a7e95>

##### 陕北黄土沟壑地貌地表移动变形特征研究

Research on surface movement and deformation characteristics of loess gully landform in Northern Shaanxi  
煤炭科学技术. 2023, 51(4): 157–165 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021-0626>

##### 富水沟谷区浅埋煤层导水裂隙演化特征

Evolution characteristics of water flowing fracture in shallow buried coal seam in water abundance gully valley area  
煤炭科学技术. 2024, 52(4): 1–11 <https://doi.org/10.12438/est.2023-1985>

##### 浅埋煤层过沟开采覆岩破坏特征及裂隙演化规律研究

Study on overburden failure characteristics and fracture evolution law of shallow buried coal seam through trench mining  
煤炭科学技术. 2021, 49(10): 185–192 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d749e872-e15c-4dff-b196-aa45fb971793>

##### 多煤层开采中间岩层对覆岩移动的影响研究

Study on effect of interburden on movement of overburden in multiple coal seams  
煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b56cf698-a608-4f2d-a7e7-7a4c12213e6d>

##### 关键层对特厚煤层综放开采地表沉陷规律的影响研究

Study on influence of key strata on surface subsidence law of fully-mechanized caving mining in extra-thick coal seam  
煤炭科学技术. 2019(9) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1c026d18-de56-493c-8bff-1651a6b527b8>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



刘一龙, 杨天鸿, 马 凯, 等. 沟谷区多煤层开采覆岩破坏及径流水害防治研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 243-254.

LIU Yilong, YANG Tianhong, MA Kai, et al. Study on overburden damage and prevention of runoff disaster in multiseam mining of gully region[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 243-254.

## 沟谷区多煤层开采覆岩破坏及径流水害防治研究

刘一龙<sup>1,2</sup>, 杨天鸿<sup>1,2</sup>, 马 凯<sup>1,2</sup>, 叶 强<sup>3</sup>, 赵 永<sup>1</sup>, 赵乾百<sup>1,2</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 岩石破裂与失稳研究所, 辽宁 沈阳 110819;  
3. 西山煤电(集团)有限责任公司 西曲矿, 山西 太原 030200)

**摘要:** 沟谷地形下多煤层开采带来了严重且复杂的“裂隙发育—山体滑坡—河道堵塞—涌水加剧”链式灾害。探究沟谷地形与煤层重复采动耦合作用下的覆岩破坏特征与规律是滑坡、涌水灾害防治的关键。以西曲矿沟谷地形下多煤层开采为研究对象, 综合采用集地表勘察、InSAR 动态观测、降雨-径流分析和数值模拟为一体的“覆岩移动-地表变形-径流积水”分析方法, 分析了沟谷区多煤层下行开采引发覆岩破坏与地表沉降的空间扩展全过程。结果表明: 沟谷区下组煤充分采动后, 煤层间关键层以下岩层移动范围无明显外扩特征, 坚向裂隙发育, 以张拉开裂为主。关键层上方岩层剪切裂隙占比明显增加, 采动沉降效应与重力作用下的沟谷坡体易产生剪切滑移, 甚至发生坡体下行裂隙与覆岩上行裂隙的贯通现象。重复采动造成山体滑坡形成的堆积体若阻塞河道并在汛期形成堰塞湖, 则具有井下涌水风险。基于无人机倾斜摄影测量合成的高精度地形, 通过降雨-径流模拟再现了山西“百年一遇”暴雨期间砾石沟流域不同历时降雨淹没范围与时间百分比, 为砾石沟小流域的沟谷水灾害防范和风险评估提供了支撑, 并提出了基于裂隙发育与地表淹没范围的地表径流水害综合防治方法。研究可为沟谷区多煤层开采条件下地表地质灾害防治与水资源保护提供有益参考。

**关键词:** 沟谷地形; 多煤层开采; 岩层移动; 地表沉降; 径流水害

中图分类号: TD327 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)07-0243-12

### Study on overburden damage and prevention of runoff disaster in multiseam mining of gully region

LIU Yilong<sup>1,2</sup>, YANG Tianhong<sup>1,2</sup>, MA Kai<sup>1,2</sup>, YE Qiang<sup>3</sup>, ZHAO Yong<sup>1</sup>, ZHAO Qianbai<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Center for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Xiqu Coal Mine, Xishan Coal Electricity Group Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Multi-seam mining in gully region has resulted in serious and complex chain disasters, including fissure development, mountain landslides, river blockage, and intensified water inflow. To prevent and control landslides and water inrush disasters, it is crucial to explore the characteristics and laws of overlying strata failure under the coupling effect of gully terrain and repeated mining in coal seams. This study focuses on the mining of multiseam in the gully terrain of Xiqu Coal Mine. The comprehensive analysis method, integrating surface exploration, InSAR dynamic observation, rainfall-runoff analysis, and numerical simulation, is used to analyze the entire process of spatial expansion of overlying strata failure and surface subsidence caused by downward mining of multiseam in the gully region. The results reveal that after the critical mining of the lower coal seam in the gully region, the lower strata beneath the key stratum in interlayered formations are prone to develop cutting failure and vertical fissure, with tensile cracking being the dominant mode of failure. The proportion of shear fractures in the overburden above the key stratum increases significantly, and the gully slope is prone to shear slip under the effects of mining subsidence and gravity. The connection phenomenon between the downward fractures of the slope and the upward fractures of the overburden can even occur. In addition, if the accumulation formed by mountain landslides due to repeated mining blocks the

收稿日期: 2023-03-23 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0353

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U1710253, U1903216); 国家自然科学基金资助项目(52004052)

作者简介: 刘一龙(1993—), 男, 黑龙江绥化人, 博士研究生。E-mail: liuyilong913@163.com

通讯作者: 杨天鸿(1968—), 男, 辽宁抚顺人, 教授, 博士生导师。E-mail: yang\_tianhong@126.com

river channel and forms a barrier lake during the flood season, there is a risk of underground water inflow. To prevent such disasters, high-precision terrain synthesized by UAV tilt photogrammetry is used to simulate the rainfall inundation range and time percentage of different durations in Fanshigou watershed during the “100-year return period” rainstorm in Shanxi Province. The research proposes a comprehensive prevention and control method of surface runoff water disaster based on fissure development and surface inundation range, which provides support for gully water disaster prevention and risk assessment in Fanshigou small watershed. This study can serve as a useful reference for the prevention and control of surface geological disasters and the protection of water resources under the condition of multiseam mining in gully regions.

**Key words:** gully terrain; multiseam mining; strata movement; surface subsidence; runoff disaster

## 0 引言

矿井水害是制约矿山安全高效生产的主要灾害之一。其中,地表水害作为矿井水害的一种主要形式,是我国西北与华北地区浅埋藏煤层与地表沟谷发育矿区面临的突出问题<sup>[1-3]</sup>。沟谷地形浅埋煤层顶板岩层多为单一关键层存在或关键层缺失,采动后地表沉陷剧烈。覆岩裂隙发育贯穿基岩直达地表,不仅会产生因采空区漏风引发的煤矸自燃风险,还会破坏浅、表层水资源系统,并成为汛期地表积水的下渗通道<sup>[4-8]</sup>。此外,沟谷区两侧坡体在煤层采动扰动下易发生失稳破坏,滑坡堆积体堵塞河道还会形成堰塞湖<sup>[9-11]</sup>。加之近年极端天气频发,如2021年山西省现“百年一遇”大范围强降水,受汛情影响,山西全省60座煤矿被迫停产,采动地质灾害防治不当将严重影响生产与安全。因此,研究沟谷地形下煤层采动覆岩破坏特征及其对地表山体滑坡、径流涌水灾害的影响具有重要意义。

目前国内外学者对于浅埋深与沟谷地形下煤层覆岩移动、破断特征以及裂隙扩展贯通开展了诸多研究,但多仅限于单一煤层开采,且未提及对地表水害产生的影响与防治。张杰等<sup>[12]</sup>通过多元素拟合公式及有限元差分软件,研究了工作面过沟谷开采过程中隔水岩层的隔水性、周期性“破坏—恢复”变化特点,并提出了沟谷下留设煤柱的防突水开采措施;李建伟等<sup>[13]</sup>分析了沟谷区域浅埋煤层开采井上下地质灾害发生机理及其相互作用,认为地表沟谷对覆岩应力的影响作用随着埋深增加而减弱,并提出了针对地表滑坡预防性控制措施;赵杰等<sup>[14]</sup>以现场煤层地质条件为基础,分析了浅埋煤层过沟谷开采时覆岩关键层破断形式及失稳结构特征,建立了沟谷坡角与关键层破坏类型的关系;刘辉等<sup>[15]</sup>通过对西部矿区浅埋煤层开采造成的地裂缝的现场观测和分析,提出了采动过程中的临时性地裂缝治理标准和依据,并提出了初步的控制方法;孙魁等<sup>[16]</sup>研究了“对滑型”黄土滑坡的形成过程,提出了“对滑型”

滑坡的形成是由黄土坡体、沟谷地貌、采矿扰动、降雨催化以及相互之间的耦合作用导致。

目前我国煤炭资源开发已进入深部开采阶段,煤层重复采动作用下沟谷区坡体结构损伤加剧,开展沟谷地形与煤层重复采动耦合作用下的覆岩破坏特征研究更符合工程实际需求。同时,针对汛期降雨引发径流水害机理以及沟谷区水害防治方法也需深入开展研究。因此,笔者以西曲煤矿典型的沟谷区多煤层开采为工程背景,综合应用集地表勘察、In-SAR 动态观测、降雨-径流分析和数值模拟为一体的“覆岩移动-地表变形-径流积水”分析方法,探究沟谷地形下的“裂隙发育—山体滑坡—河道堵塞—涌水加剧”灾害链形成过程,最终提出基于裂隙发育与地表淹没范围的沟道防渗方法,以期为沟谷区煤层开采造成的地表地质灾害防治与水资源保护提供借鉴和指导。

## 1 地质概况与开采条件

研究区位于山西省古交市西曲煤矿,矿区范围内沟谷纵横,地形切割剧烈(图1)。目前西曲煤矿上组煤2+3号煤层大部分资源已于2010年前开采完毕,主采下部8号煤层。本文即以8号煤层的28306号工作面与其上覆的2+3号煤层形成的多煤层开采为研究工况。28306号工作面位于西曲矿矾石沟沟谷区,矾石沟为西曲矿东部主要沟谷,贯穿井田南北,属季节性沟谷,沟谷平时水量不大,雨季有水。雨季多集中在7、8、9、10四个月,年平均降水量511.5 mm,降水最终汇入汾河。28306(1)号工作面因遇到风化带仅推进了130 m,风化带的煤层、岩层均较为破碎,裂隙发育,对井下安全生产带来威胁。为确保安全,此处留设了一段近50 m煤柱,之后继续开采28306(2)号工作面。在28306(2)号工作面推进15 m时,地表为一条矾石沟支沟低洼处,支沟倾向南东和东,水流易汇集沿支沟倾斜方向流入东部矾石沟内。

28306号工作面于2021年完成开采,开采方向

由北向南,该工作面地表覆盖层厚度90~188 m,西侧为2017年已开采结束的28307采空区,东侧为未开采的28305采区,其上覆靠近沟谷区的2+3号煤层由小煤窑巷柱式开采,其余2+3号煤层由西曲矿机械化开采。8号煤层厚度稳定,煤厚3.90~4.20 m,平均4.10 m,煤层整体倾向西南,倾角1°~8°,一般为4°,皆采用倾斜长壁后退式、一次采全高、全部垮落法综合机械化采煤。

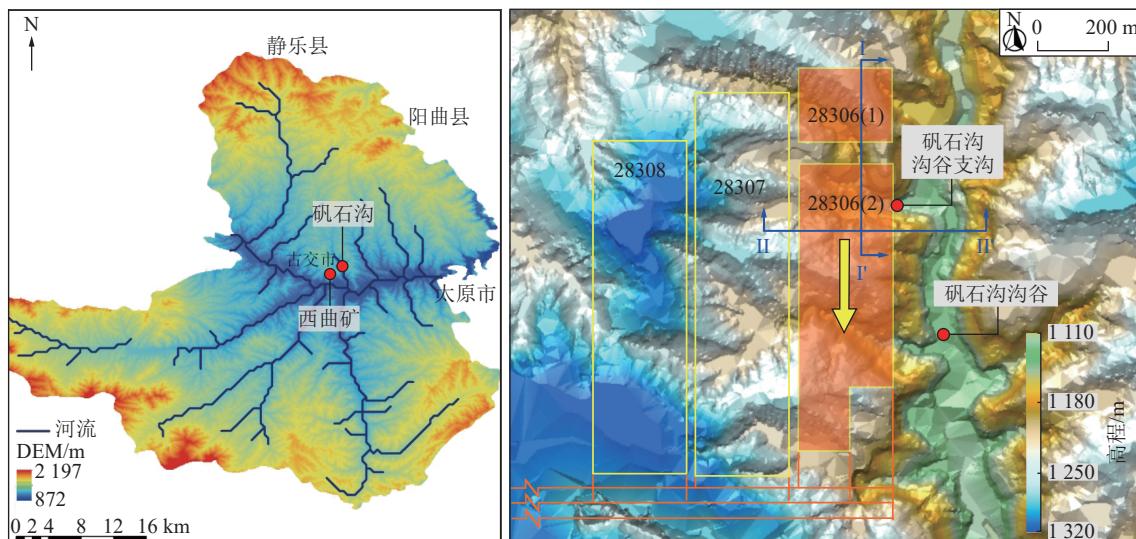


图1 研究区地质与开采条件  
Fig.1 Geological and mining context of the study area

图2为研究区钻孔综合柱状图。8号煤上方143 m范围内赋存有5层较厚顶板(厚度不小于5 m),其中有3层顶板岩性为泥岩(厚度小于10 m),1层近地表的顶板岩性为细粒砂岩(厚度为5 m),顶板中19.64 m厚的粉砂岩呈深灰-灰黑色,以石英为主,较硬,全层普遍呈致密状,含有较少的孔隙和裂缝,再由关键层的定义与变形特征<sup>[17-18]</sup>,对于多层次顶板组合结构的承载满足如下公式:

$$(q_n)_m = E_m h_m^3 \sum_{i=m}^n \gamma_i h_i / \sum_{i=m}^n E_i h_i^3 \quad (1)$$

式中:( $q_n$ )<sub>m</sub>为第n层顶板对第m层顶板的载荷;  $E_m$ 为第m层岩层的弹性模量;  $\gamma_i$ 为第i层岩层的容重;  $h_i$ 为第i层岩层的厚度。

对于满足式(2)的第n层岩层,可判定其为关键层:

$$(q_n)_m < (q_{n-1})_m \quad (2)$$

综上,判别19.64 m厚的粉砂岩地层为煤层间关键层。8号煤顶板地层总体属硬质岩,2+3号煤上部地层主要为砂泥岩互层。

## 2 沟谷区岩层移动与地表变形特征

### 2.1 地表破坏类型及特征

图3为研究区现场勘察和航拍影像,由图3总结出了28306号工作面开采引发的地表破坏类型主要为无明显落差的地裂缝、台阶状裂缝、滑坡与堰塞

湖。在开切眼附近采空区边界上方,地表裂隙呈现明显发育的现象(图3a)。这些单条裂缝的宽度在400~500 mm,且宽窄不一,顶端尖灭。裂缝群则呈现弧形或椭圆形的展布特征。在同一地区,大部分地裂缝的展布方向近乎平行。但在矾石沟支沟区域,由于地形的陡峭山坡,地势西高东低,因此地裂缝的展布方向比较杂乱。台阶状裂缝出现在井下采煤工作面切眼位置及采区边界附近的地表,是由浅埋煤层开采顶板初次切落所造成的(图3b)。这些台阶状地裂缝的深度不尽相同,一般不超过3 m。地裂缝在垂直方向上呈现“V”字形,上部较宽,下部较窄,两壁陡峭,呈现出明显的台阶状,其裂缝长度一般在几米到几十米不等。在采空区上方地形切割强烈的沟谷边坡地带地表出现黄土层及砂层崩塌、崩滑,崩塌块呈破碎状,完全丧失原有的结构(图3c)。至2021年7月31日工作面回采结束,地裂缝已扩展至全地表。沟谷区地下煤层开采导致地下垮塌引发覆岩渐进式破坏,进一步引发地表沟谷坡体的地质结构改变,使得地表坡体的稳定性受到影。降雨等自然力的作用加剧了地表坡体的滑动和崩塌(图3d),堵塞河道还引发了土石流和堰塞湖等次生地质灾害(图3e、图3f)。

### 2.2 地表沉降的空间扩展过程

InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar)

| 层厚/m  | 埋深/m   | 岩性      | 柱状 | 岩性描述                                  | 备注  |
|-------|--------|---------|----|---------------------------------------|-----|
| 3.49  | 3.49   | 细粒砂岩    |    | 灰褐色细砂岩,以石英为主,泥质胶结薄层状                  |     |
| 0.90  | 4.39   | 泥岩      |    | 含云母片,有滑面,土质胶结                         |     |
| 5.00  | 9.39   | K5 细粒砂岩 |    | 深灰色细砂岩,胶结坚硬,分选差                       |     |
| 0.85  | 10.24  | 泥岩      |    | 含云母片,有滑面,土质胶结                         |     |
| 2.14  | 12.38  | 细粒砂岩    |    | 灰褐色,以石英为主,泥质胶结薄层状                     |     |
| 7.55  | 19.93  | 泥岩      |    | 含云母片,有滑面,土质胶结                         |     |
| 0.70  | 20.63  | 砂质泥岩    |    | 含云母植物碎片及煤粒                            |     |
| 0.93  | 21.56  | 泥岩      |    | 含植物化石及云母片                             |     |
| 0.60  | 22.16  | 砂质泥岩    |    | 砂岩,石英质胶结含云母片                          |     |
| 3.01  | 25.17  | 中粒砂岩    |    | 含云母片,有斜节理                             |     |
| 2.87  | 28.04  | 砂质泥岩    |    | 含云母,为石英质,有方解石脉含砂质泥岩                   |     |
| 3.61  | 31.65  | 中粒砂岩    |    |                                       |     |
| 2.80  | 34.45  | 砂质泥岩    |    | 含少量云母及黄铁矿                             |     |
| 1.82  | 36.27  | 细粒砂岩    |    | 细砂岩,粒细均匀                              |     |
| 1.81  | 38.08  | 泥岩      |    | 含植物碎片,有滑面                             |     |
| 8.92  | 47.00  | 砂质泥岩    |    | 含植物碎片,斜节理发育                           |     |
| 2.92  | 49.92  | 中粒砂岩    |    | 砂岩,含少量云母及黄铁矿                          |     |
| 1.69  | 51.61  | 砂质泥岩    |    | 垂直节理发育,含植物化石及云母片                      |     |
| 3.00  | 54.61  | K4 中粒砂岩 |    | 砂岩,以石英为主,含云母片                         |     |
| 7.30  | 61.91  | 砂质泥岩    |    | 含植物化石,有斜节理                            |     |
| 0.79  | 62.70  | 3号煤     |    | 煤                                     |     |
| 1.42  | 64.12  | 中粒砂岩    |    | 垂直节理发育,含云母片,钙质充填                      |     |
| 3.88  | 68.00  | 2+3号煤   |    | 煤                                     | 煤层  |
| 1.35  | 69.35  | 炭质页岩    |    | 炭质页岩,黑色                               |     |
| 2.98  | 72.33  | 砂质泥岩    |    | 含云母及植物化石,状结构                          |     |
| 4.07  | 76.40  | 中粒砂岩    |    | 垂直节理发育,钙质充填,下部有斜节理                    |     |
| 6.38  | 82.78  | 砂质泥岩    |    | 含白云片及炭质黄铁矿,垂直节理发育                     |     |
| 3.48  | 86.26  | 4号煤     |    | 煤,顶部不纯,下部灰分高                          |     |
| 2.11  | 88.37  | 砂质泥岩    |    | 灰色,致密无层理,上部疏松易碎                       |     |
| 2.84  | 91.21  | 泥质粉砂岩   |    | 灰黑色泥质粉砂岩,细泥质胶结                        |     |
| 1.60  | 92.81  | 石英粉砂岩   |    | 浅灰色,以石英为主,泥质胶结,分选差                    |     |
| 0.65  | 93.46  | K3 细粒砂岩 |    | 浅灰色,以石英长石为主,泥质胶结,分选良好                 |     |
| 1.20  | 94.66  | 石英粉砂岩   |    | 灰黑色,以石英为主,泥质胶结,层理不明显                  |     |
| 3.48  | 98.14  | 石英细粒砂岩  |    | 浅灰,以石英为主,泥质胶结,分选良好                    |     |
| 2.15  | 100.29 | Qs 细粒砂岩 |    | 灰褐色细砂岩,呈明显之薄层状,泥质胶结,疏松,含云母较多          |     |
| 19.64 | 119.93 | 粉砂岩     |    | 深灰-灰黑色粉砂岩,以石英为主,全层普遍呈致密状,较硬           | 关键层 |
| 1.61  | 121.54 | L4 石灰岩  |    | 深灰色石灰岩,致密厚层状,极硬                       |     |
| 0.86  | 122.40 | 7号煤     |    | 煤                                     |     |
| 1.60  | 124.00 | Mb 粗粒砂岩 |    | 深灰色,以石英为主,泥质胶结较硬,分选好                  |     |
| 1.13  | 125.13 | 石英细粒砂岩  |    | 灰黑色,致密状泥质胶结,层理不明显                     |     |
| 2.00  | 127.13 | 粉砂岩     |    | 灰黑色,质细,致密,底部含钙质坚硬                     |     |
| 1.07  | 128.20 | 砂质泥岩    |    | 灰黑色,质细较硬,微含砂质,层理不清                    |     |
| 0.63  | 128.83 | 泥岩      |    | 深灰色,致密块状厚层坚硬,局部含泥质                    |     |
| 3.00  | 131.83 | K2 石灰岩  |    | 灰黑色,质细致密,上部含黄铁矿                       |     |
| 0.85  | 132.68 | 砂质泥岩    |    | 灰褐色,以石英为主,泥质胶结薄层状                     |     |
| 2.55  | 135.23 | 细粒砂岩    |    | 灰黑色,薄层状,层理明显                          |     |
| 1.62  | 136.85 | 粉砂岩     |    | 灰褐色,薄层状,粒度分选好,下部含泥质多                  |     |
| 2.00  | 138.85 | Ma 细粒砂岩 |    | 深灰色,致密块状坚硬,含方解石脉                      |     |
| 3.06  | 141.91 | L1 石灰岩  |    | 黑色,呈薄层状,性脆易碎,含少量砂质                    |     |
| 1.16  | 143.07 | 炭质泥岩    |    | 煤,上部夹石为泥,下部0.04 m为黄铁矿                 | 煤层  |
| 3.93  | 147.00 | 8号煤     |    | 灰黑色砂质泥岩,上部质细较软,下部含砂质较多,局部为粉砂岩         |     |
| 0.50  | 147.50 | 砂质泥岩    |    | 灰褐色粗砂岩,以石英为主,含较多炭质碎屑,泥质胶结较硬,层理不明显,分选差 |     |
| 8.95  | 156.45 | Ts 粗粒砂岩 |    | 灰黑色,致密状,质细,含砂质及少量炭质                   |     |
| 2.66  | 159.11 | 砂质泥岩    |    | 煤                                     |     |
| 1.85  | 160.96 | 9号煤     |    | 灰黑色砂质泥岩,致密状                           |     |
| 1.02  | 161.98 | 砂质泥岩    |    | 深灰色粉砂岩,以石英为主,泥质胶结,薄层状,层理不清,夹炭屑及粉砂岩薄层  |     |
| 3.15  | 165.13 | 粉砂岩     |    | 灰黑色泥岩,极软,很细,具滑感                       |     |
| 0.70  | 165.83 | 泥岩      |    | 浅灰色粘土质粉砂岩,含粘土质,局部具明显之鲕状结构,底部含砂量较高     |     |
| 3.01  | 168.84 | 粉砂岩     |    | 深灰色,以石英为主,泥质胶结,分选差                    |     |
| 1.10  | 169.94 | 石英中粒砂岩  |    | 深灰色,以石英为主,泥质胶结,坚硬,薄层状,分选良好            |     |
| 2.06  | 172.00 | 石英细粒砂岩  |    |                                       |     |

图2 综合地层柱状图  
Fig.2 Synthetical stratum histogram

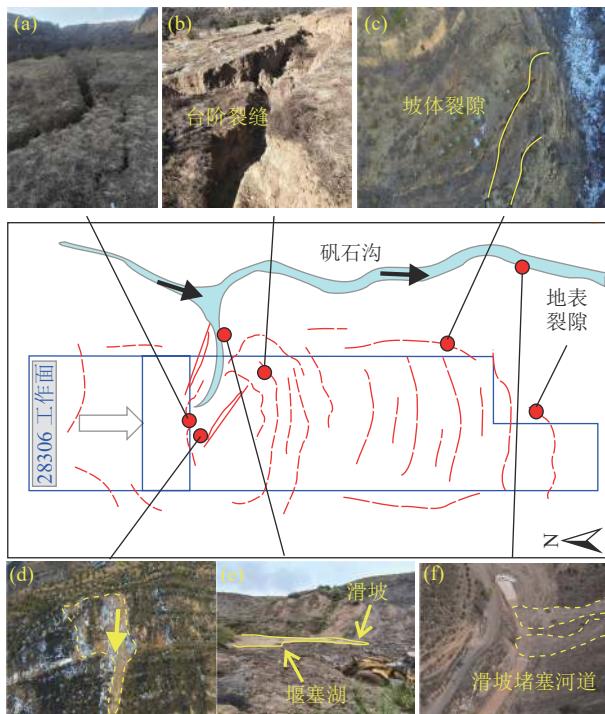


图3 研究区现场勘察和航拍影像

Fig.3 Field survey and UAV image in the study area

技术是一种利用合成孔径雷达(SAR)成像的干涉测量方法,可以实现毫米级的地表形变监测,具有范围广、时间跨度大、受气候干扰小等优势,已成功应用于观测滑坡的动态变形过程<sup>[19-20]</sup>和采煤引起的地表沉降<sup>[21-22]</sup>。地表沉降是深部岩层变形、破断影响至地表的体现,具有明显的滞后性,且滞后周期较长。28306(2)号工作面开采时间为2020-10-31—2021-07-31,因此分析了2021年1月至2022年9月期间的时间序列InSAR形变监测结果,如图4所示,28306(2)号工作面地表累积沉降自北向南扩展,与开采推进方向一致。图4为基于InSAR数据的研究区累积沉降,图4a展示了此次研究的InSAR形变范围,至2021年1月9日,工作面累计推进约176.23 m,开采引发的地表沉降已开始显现(图4b),此阶段岩层移动为非充分采动阶段;至2021年2月26日,工作面累计推进约348.18 m,此阶段地表沉降值增大,时间序列InSAR形变监测得到的地表累计沉降值已达到-69.4 mm(图4c);至2021年4月15日,工作面累计推进约494.5 m,岩层移动为充分采动阶段,沉降范围扩大(图4d);至2021年7月31日工作面完成回采,此时累计推进约680.52 m。由图4可知,28307号采空区在28306号工作面采动影响下地表发生残余沉降,地下开采造成的塌陷面积明显大于实际开采面积,但与平缓地表形成的椭圆形塌陷区不同。本次塌陷区形状与沟谷地形走势大体相同,

特别是28306号工作面东侧由北向南延伸的砾石沟沟谷处的InSAR结果位移云图,具有明显分界特征。尽管28306号工作面的煤炭开采活动已经终止,但地表下沉量仍在增加。至2022年9月,28306号工作面的最大地面沉降量达到-98.66 mm(图4f)。

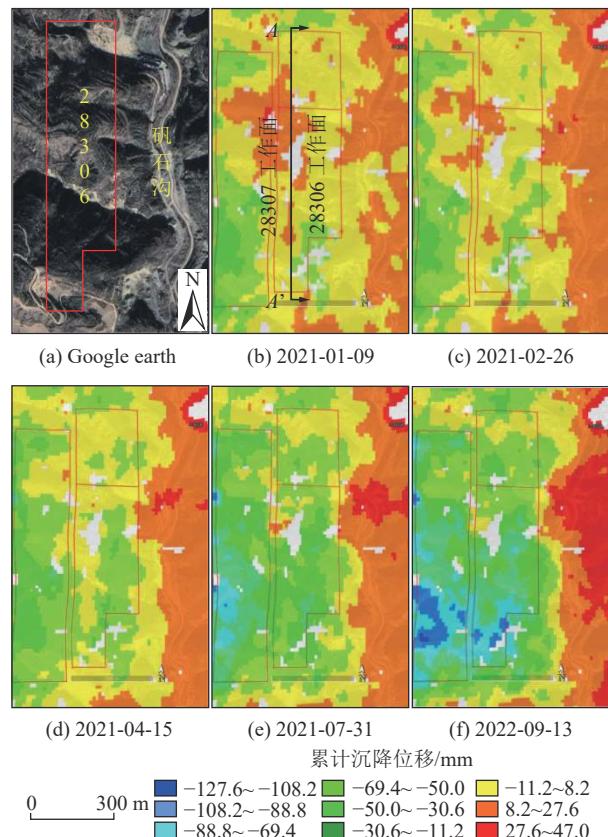


图4 基于InSAR数据的研究区累积沉降

Fig.4 Cumulative subsidence in the study area based on InSAR data

为分析地下煤层开采后造成地表沉降的空间扩展过程,选取了AA'主断面上最大下沉监测点,并绘制了随时间变化的沉降曲线(图5),研究区地表沉降总体可划分为3个阶段:第1阶段为初始沉降阶段(2021-01-09—2021-04-15),此阶段煤层开采过后,致使煤层顶板受到破坏,覆岩渐进式坍塌引起地表沉降,这一阶段累计沉降指标为10 mm;第2阶段为加速沉降阶段(2021-04-15—2021-10-09)。在煤层开采达到充分采动后,地表移动变形活跃,采空区周围的地层受到压缩产生变形,地表沉降持续时间较长;第3阶段为长期沉降阶段,时间尺度拉长,地下岩层移动会趋于稳定。虽然地下空洞的存在会使地表沉降持续进行,但沉降速度逐渐减缓,沉降量也会逐渐减小,6个月的沉降值不超过30 mm。

自2022年2月8日后,地表沉降达到相对稳定状态,估算终采后地表达到充分沉降的滞后周期为

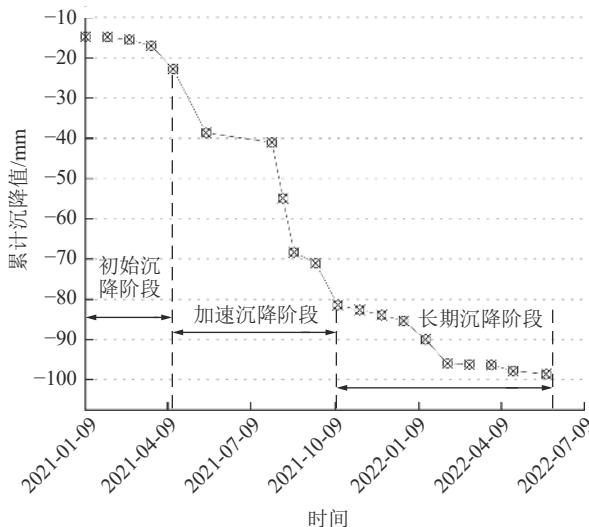


图 5 地表最大沉降点累计沉降值

Fig.5 Cumulative settlement value of the maximum settlement point on the ground

5~7个月,较该矿区记录的中深埋煤层终采后地表达到充分沉降的滞后周期短了1~2个月。受限于现有SAR卫星的极轨飞行和侧视成像模式,In-

SAR形变观测值对南北向形变不敏感,导致该方法在对沟谷区地表的应用中,存在局部入射角过大/小的问题,进一步导致视线向位移与实际位移相差较大。但InSAR技术可展示煤层地下开采造成地表沉降的空间扩展过程的持续性与阶段性,进一步得出煤层终采后地表达到充分沉降的滞后周期,指导未达到充分沉降范围内的地表河道优先采用“柔性治理”技术。

### 2.3 覆岩垮落和变形特征

在分析岩层渐进式破坏过程中,三维离散单元法程序3DEC应用广泛,此软件较好还原出了材料介质破坏过程中的不连续特性。基于试验采场的地表等高线和钻孔柱状图,沿着图1中的I—I'和II—II'剖面分别建立了用于3DEC数值计算的三维地质模型。图6为数值计算模型及开采范围,图6a中的数值方案1主要用于研究28306号工作面推进过程中覆岩垮落特征及矸石沟支沟处坡体破坏特征,图6b中的数值方案2主要用于研究向沟开采对河床的稳定性影响,同时考虑了上部2+3号煤层巷柱式开采工况。

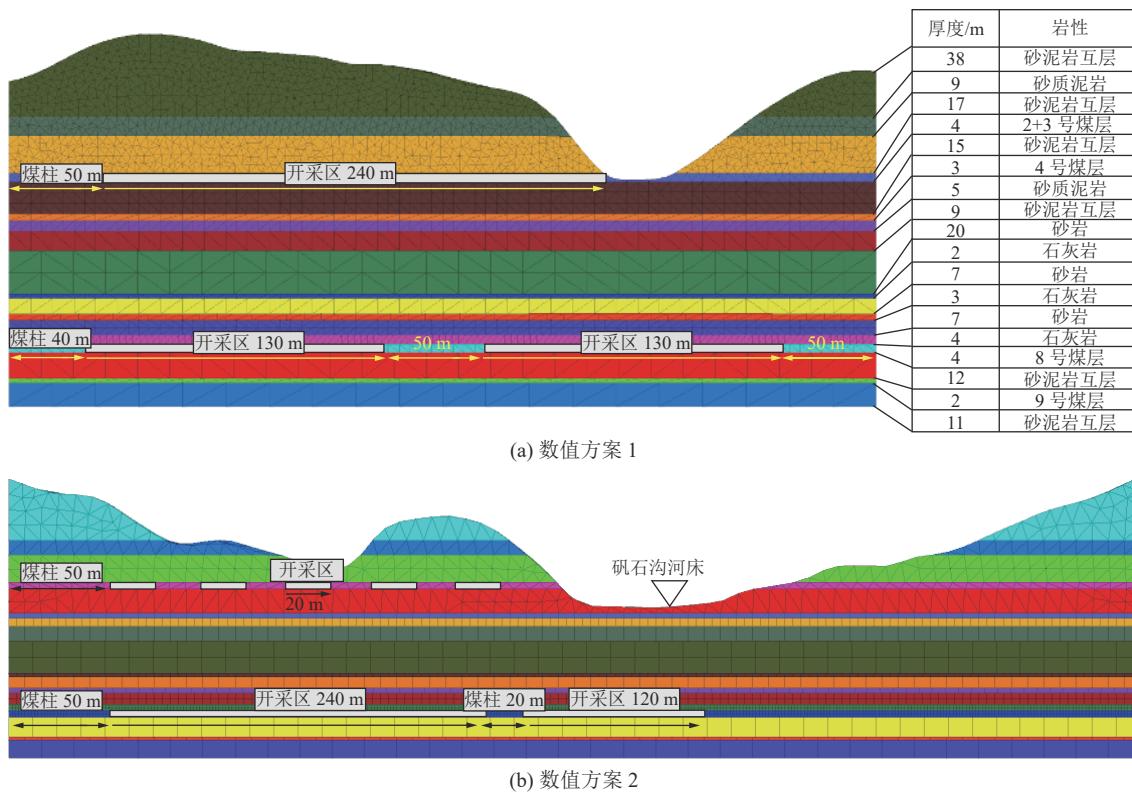


图 6 数值计算模型及开采范围  
Fig.6 Numerical calculation model and mining range

考虑到块体数量将影响计算的效率,对厚度太薄岩层按照四舍五入的原则进行合并和简化,并将数值计算模型简化为0°。数值模型中涉及到的岩性

主要有5种(砂岩、砂泥岩互层、砂质泥岩、煤和石灰岩),这5种岩体力学参数见表1。所用参数的可靠性已在此矿山的已有文献[23-24]中得到验证。

模型块体采用莫尔-库伦模型, 节理模型采用节理面接触库伦滑移模型。模型四周均为法向位移约束, 模型底界面限制水平方向和垂直方向位移, 地表曲面为自由边界。煤层开采方向从左至右, 详细的开采参数如图6所示。

表1 煤岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal and rock

| 岩性    | 密度/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | 单轴抗拉<br>强度/MPa | 黏聚力/<br>MPa | 弹性模<br>量/GPa | 泊松比 $\mu$ |
|-------|------------------------------|----------------|-------------|--------------|-----------|
| 砂质泥岩  | 2 520                        | 3.00           | 4.36        | 14.20        | 0.26      |
| 砂泥岩互层 | 2 600                        | 3.25           | 4.95        | 15.40        | 0.22      |
| 煤     | 1 460                        | 1.28           | 2.40        | 5.20         | 0.30      |
| 石灰岩   | 2 750                        | 3.90           | 5.90        | 16.57        | 0.20      |
| 砂岩    | 2 700                        | 3.50           | 5.60        | 16.70        | 0.21      |

图7为岩层移动与地表变形特征数值方案1计算过程中, 首先对2+3号煤层进行开采, 然后对8号

煤层进行开采。结合矿山现场勘察报告, 浅部2+3号煤层开采后形成了无明显落差的地裂缝, 塌陷坑较少, 偶发坡体滑移。下部煤层28306(1)号工作面推进至20 m时顶板初次垮落(图7a), 这与现场记录的工作面顶板初次垮落步距(19 m)接近, 且小于西曲矿8号煤平均顶板初次垮落步距35~40 m, 主要原因在于顶板存在风化现象。28306(1)号工作面推进至100 m时关键层发生破断(图7b), 这与CHENG等<sup>[23]</sup>通过微震监测得到的西曲矿8号煤顶板关键层发生破断结果接近。关键层破断后, 下部煤层开采扰动已影响至上覆地表, 地表发生二次变形、损伤, 并产生明显地表沉降(图7c)。28306(2)号工作面推进至110 m时, 关键层以下形成大面积离层, 继续开采至120~130 m时, 砾石沟支沟北侧坡体在采动与地形拉伸作用下向临空面一侧发生剧烈变形(图7d), 重复采动后地表具有明显落差的台阶裂缝数量增加, 塌陷坑范围扩大, 地表下沉加剧, 地表岩层移动范围扩大, 沟谷坡体产生大量裂隙。

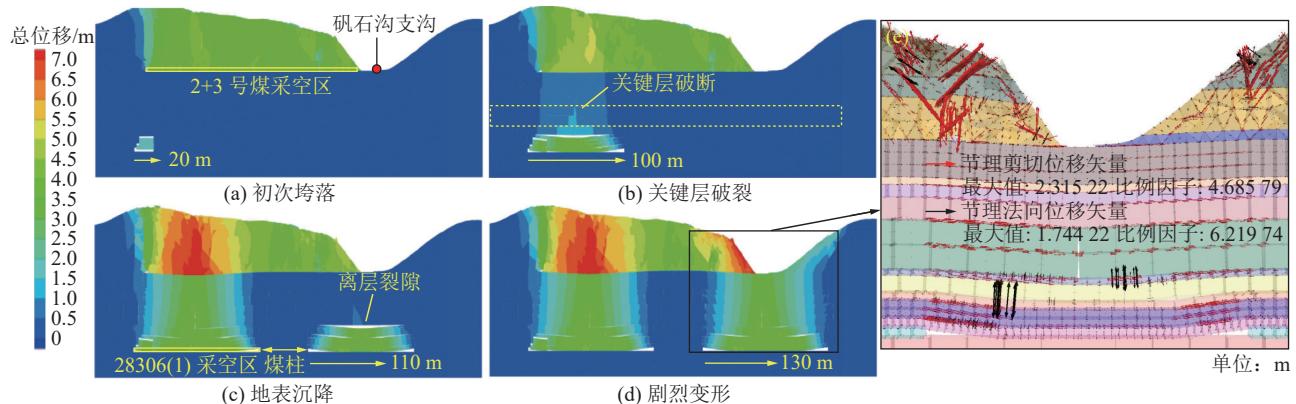


图7 岩层移动与地表变形特征

Fig.7 Characteristics of strata movement and surface deformation

浅埋沟谷地形下煤层开采后, 围岩应力重新分布, 岩层不断变形并周期性破断, 煤层间关键层以下岩层垮落后岩层移动范围无明显外扩特征, 此范围的岩层张拉破裂形成的裂隙居多, 剪切破裂次之, 以竖向裂隙为主, 主要集中在顶板上方23 m范围内(图7e); 相反, 关键层以上岩层剪切破裂形成的裂隙占比增加, 关键层破断后覆岩裂隙不断向上发育, 如图8所示。岩层移动破坏了沟谷两侧坡体稳定性, 图8中沟谷地形对浅部岩层移动与裂隙发育特征的影响作用加强, 在岩土体重力作用下坡体易发生剪切滑移。同时, 坡体地表形成的大量裂隙向深部扩展并与覆岩上行裂隙贯通, 由此沟通地表形成导水通道, 这些裂隙对地表降水的截流作用会造成井下涌水量的突增。

图9为重复采动作用下覆岩二次破坏特征, 如图9所示, 数值方案2(图1中II-II'剖面)中首先对上部2+3号煤巷柱式开采, 每开采20 m后留设20 m煤柱, 然后开采其下部的28306号工作面, 开采方向皆朝向砾石沟方向。因浅部煤层“巷柱式”开采, 留设的大量煤柱较大程度地减少了应力集中的扰动, 覆岩垮落并不充分。在28306号工作面开采结束后, 由于层间关键层破断, 浅部2+3号煤采空区在重复采动作用下发生“活化”, 地裂缝剧烈发育, 成为了地表水主要下渗通道。

28305号工作面(待采)位于28306号工作面东侧, 且处于砾石沟沟谷正下方。通过离散元程序模拟28305号工作面开挖, 结果如图10所示, 28305号工作面过沟开采至100 m时关键层下方产生大范围

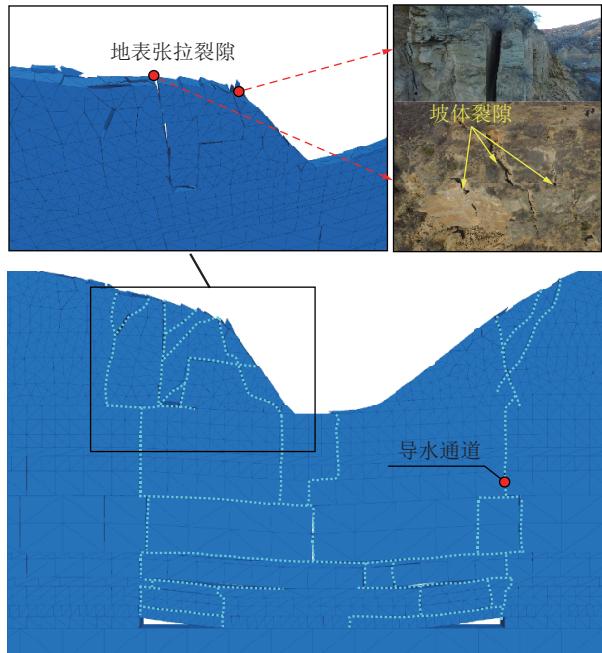


图 8 覆岩裂隙与坡体裂隙发育特征

Fig.8 Development characteristics of overlying strata and slope fractures

离层裂隙,关键层弯曲的变形引起了地表沉降与坡体变形。当工作面推进至120 m时,地表河床发生大范围沉降,采动裂隙贯通至地表以及两侧山坡。28305号工作面的开采将影响地表河床稳定性,引发沟谷水下渗,因此,开展河床加固以及沟谷区地表防渗治理是必要的。

### 3 矶石沟降雨-径流特征及径流水害防治

#### 3.1 矶石沟小流域降雨-径流模拟

采用河道水力计算程序HEC-RAS开展矶石沟

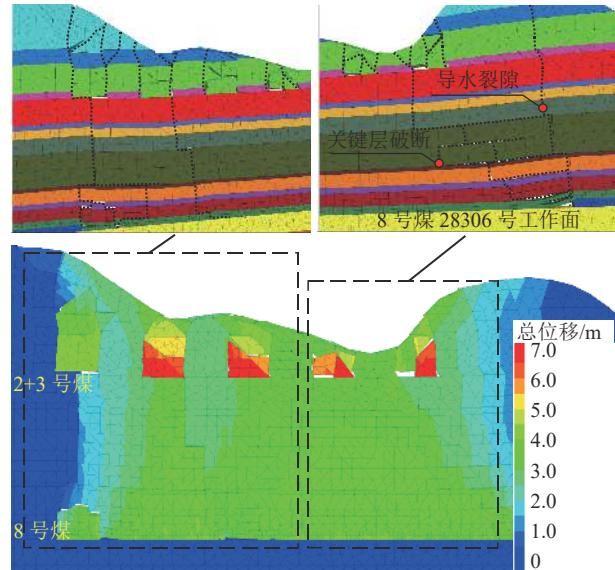


图 9 重复采动作用下覆岩二次破坏特征

Fig.9 Secondary failure characteristics of overlying strata under repeated mining

小流域降雨-径流模拟。软件二维水动力学模型的数值计算混合了有限体积法和有限差分法,可有效计算二维圣维南方程组<sup>[25]</sup>。软件中水动力研究模式,可对研究区流域实现降雨影响分析,进行稳定、快速的洪水淹没模拟。非恒定流模拟的计算公式采用连续性方程(式(3))和动量方程(式(4))。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(h_u)}{\partial x} + \frac{\partial(h_v)}{\partial y} + q = 0 \quad (3)$$

式中: $H$ 为水面高程, m;  $h$ 为水深, m;  $u, v$ 分别为 $x, y$ 方向上的平均流速, m/s;  $q$ 为项源, 代表降雨等外部信息。

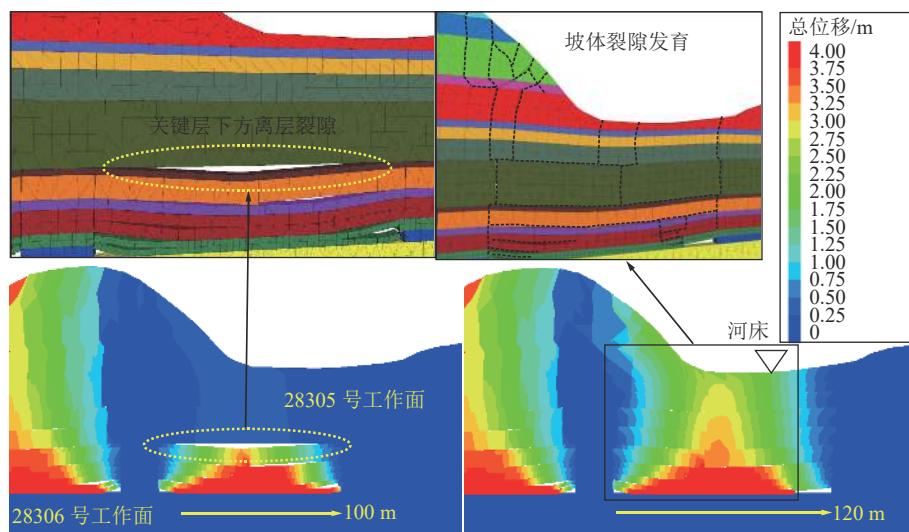


图 10 沟谷下开采引发的地表沉降与裂隙发育特征

Fig.10 Characteristics of surface subsidence and fractures development caused by mining under the gully

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \nabla V = -g \nabla H + v_t \nabla^2 V - c_f V + f k V \quad (4)$$

式中:  $V$  为流速,  $\text{m/s}$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $v_t$  为水平方向运动黏度,  $\text{m/s}^2$ ;  $c_f$  为河床底部糙率;  $f$  为科里奥利系数;  $k$  为垂直方向单位矢量。

高精度的 DSM 可满足 HEC-RAS 模拟小流域的洪水淹没的精度, 研究采用无人机倾斜摄影测量获取了研究区 DSM 数据。设置二维网格的空间步长为  $5 \text{ m}$ , 网格数量为 24 428 个, 根据研究区植被覆盖和土地利用类型, 选取河道糙率值为 0.035, 草地糙率值为 0.04, 耕地糙率值为 0.03。本案例模型选取全局降水为入流条件。下边界为河道出口, 并假设此处因采动滑坡引发堰塞湖。全局降水数据选取 2021 年 10 月 3 日 00:00 至 2021 年 10 月 6 日 23:00 共 4 天 95 h 的降雨数据(表 2), 模拟计算间隔为 1 h, 输出水力要素间隔为 1 h。

表 2 2021-10-03—2021-10-06 每小时降雨量

Table 2 Hourly rainfall from 2021-10-03 to 2021-10-06

| 时刻    | 降雨量/mm     |            |            |            |
|-------|------------|------------|------------|------------|
|       | 2021-10-03 | 2021-10-04 | 2021-10-05 | 2021-10-06 |
| 00:00 | 0          | 0          | 0.5        | 1.2        |
| 01:00 | 0          | 0          | 2.2        | 2.9        |
| 02:00 | 0          | 0          | 1.4        | 2          |
| 03:00 | 0          | 1.6        | 0.8        | 1.5        |
| 04:00 | 0          | 1.7        | 3.9        | 0.1        |
| 05:00 | 1.2        | 6.2        | 1.1        | 1.4        |
| 06:00 | 8.6        | 5.2        | 1.3        | 1.4        |
| 07:00 | 1          | 5.5        | 0.6        | 1.8        |
| 08:00 | 4.6        | 10.1       | 2.6        | 1.3        |
| 09:00 | 3.7        | 6.2        | 2          | 3.3        |
| 10:00 | 3.1        | 6.5        | 3.6        | 2.7        |
| 11:00 | 1.2        | 5.2        | 4.9        | 4.9        |
| 12:00 | 0.1        | 6.5        | 4.7        | 2.5        |
| 13:00 | 0.2        | 6.9        | 3.2        | 0.6        |
| 14:00 | 1.5        | 4.5        | 4.3        | 0          |
| 15:00 | 1.3        | 3.2        | 5.7        | 0          |
| 16:00 | 0.5        | 0.9        | 6          | 0          |
| 17:00 | 0          | 3.1        | 5.2        | 0          |
| 18:00 | 0.1        | 2.2        | 4          | 0          |
| 19:00 | 0          | 3.4        | 4.1        | 0          |
| 20:00 | 0          | 1.8        | 2.7        | 0          |
| 21:00 | 0          | 2.4        | 2.2        | 0          |
| 22:00 | 0          | 3.9        | 2          | 0          |
| 23:00 | 0          | 1.2        | 1.2        | 0          |

根据二维非恒定流模拟结果, 2021 年 10 月 4 日至 10 月 6 日不同时刻降水淹没深度对比如图 11 所示(图 11a 为 4 日 0 点降雨淹没范围; 图 11b 为 5 日 0 点降雨淹没范围; 图 11c 为 6 日 0 点降雨淹没范围), 可以看出砾石沟汇水由高流向低洼河道, 下游堰塞湖积水深度最大处近  $8 \text{ m}$ , 成为井下涌水的潜在危险源。同时得到了降雨期间全局淹没时间百分比图(图 11d), 砾石沟及其支流的淹没时间百分比超过 50%, 这些区域也在煤矿开采引起的最大沉降区范围内, 满足这 2 个特征的区域被称为淹没及最大沉降区, 这需要保证该区内沟谷河床稳定性。尽管冲沟边坡两侧的淹没百分比仅为 20%, 但采动滑坡作用下坡体裂隙发育, 需要及时填埋沟谷两侧边坡裂缝, 符合这 2 个特征的区域被称为淹没及裂隙发育区, 这是防渗的重点区域, 地裂缝采用分层填埋, 而其余区域可以被称为径流区, 该区域内的地裂缝可直接单层填埋。

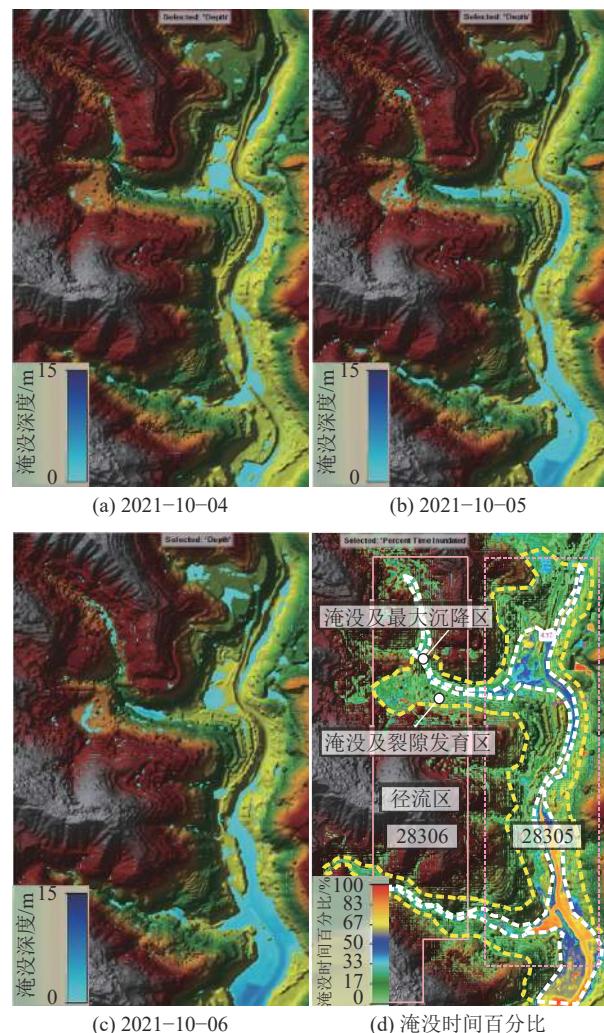


图 11 降雨引发的研究区地表淹没过程

Fig.11 Ground inundation process caused by rainfall in the study area

### 3.2 矿山地表径流水害防治方法

开展矿山地表径流水害防治的研究不仅会减小地表水引发矿山涌突水事故风险,通过地表裂缝填埋和河床防渗加固,也极大减少了煤层开采对地表水、土壤等环境造成影响,可以有效减少开采过程中对地表水的污染,保证地表水的质量与水资源的可持续利用。通过前述研究总结得到了矸石沟致灾因素主要为多煤层开采形成的地表张拉裂缝、采动沉降引发的边坡失稳以及汛期沟谷积水下渗。本小节针对上述问题提出了以下治理措施,并取得了良好的应用效果。

针对沟谷区不再发育且裂缝宽度小于0.1 m的地表裂缝可直接填埋,当地表裂缝宽度大于0.1 m时,采用由浅至深的黄土表土层+三合土防渗层+碎石块衬垫层的分层填充,各分层厚度可控制在0.3~0.5 m。沟谷两侧坡体上的地裂缝在蠕变与滞后沉降作用下仍有加剧破坏趋势,提前对潜在滑坡区实施削坡处理,削坡后的坡角为30°~45°。对沟谷区河床防渗治理为主,对地表积水疏放为辅。在工作面开采之前,对地表低洼区域进行填平处理,尽量保持河床坡度一致。实施土方工程延河道加高构筑堤坝,防止河床大面积塌陷后沟流外溢。在工作面开采过程中,及时清理沟谷两侧滑移堆积体;

最后,在构筑好的堤坝一旁备足填堵裂缝用的沙土、三合土和碎石。对受山体滑坡影响,易堵塞、积水的河道采用涵管引流的方式进行治理,保证正常行洪,减小井下入渗量。

对沉降未稳定的河床(停采后5~7个月内)采用红黏土、尼龙网柔性材料进行治理,受重复采动影响河床不易开裂,防渗效果好,治理方法如下:①清理河道碎石,整平河床形成河道基槽并扩宽至4~6 m以上,在河道弯曲系数较大区段进行河道改直;②河道铺设200 mm厚度黏土垫层后夯实,在垫层上方铺设一层钢塑土工栅格,上方再铺设一层复合土工膜加强防渗水效果,覆盖500 mm厚红胶土后夯实;③上方再交替施工两层由钢塑土工栅格和红胶土组成的700 mm厚加筋土层并压实,形成可靠的防渗层;④在表层红胶土上方铺设200 mm厚碎石并压实嵌入红胶土,提高河床表面强度,防止流水冲刷及车辆行驶破坏河道;⑤河道两侧采用抗紫外线生态袋垒筑800 mm高度的护坝,形成护坝后进行充填,与山脚形成一定坡度,确保山体流水能正常汇入河道;⑥河道与各支沟交汇处留设汇水口,汇水口两侧采用片石混凝土砌坝20 m,确保各支沟汇水畅通,汇水口两侧不被流水冲刷破坏。实施“柔性”技术治理后的河床断面及治理效果如图12所示。

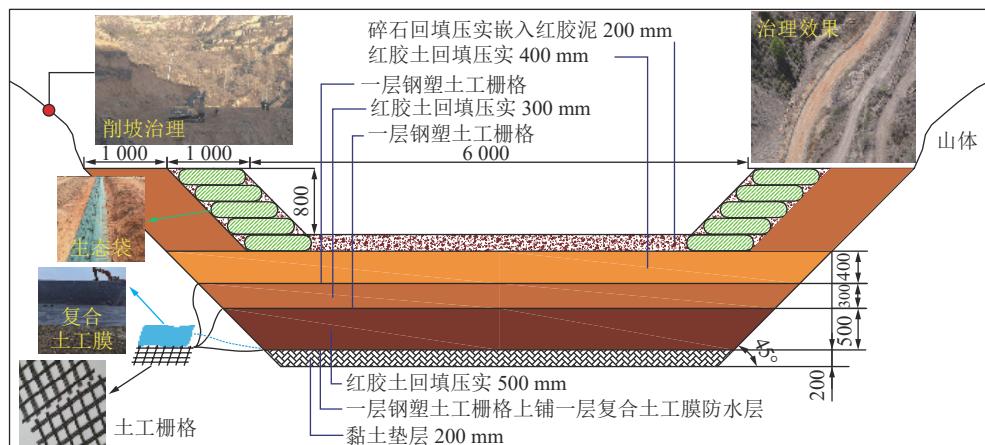


图12 河床断面及加固效果  
Fig.12 River bed section and reinforcement effect

## 4 结 论

1)通过对矸石沟地表破坏类型的多手段综合分析及运用离散元法数值模拟计算,揭示了多煤层开采地表沉降与沟谷采动滑坡耦合作用下的覆岩破坏及裂隙发育特征。煤层间关键层以下岩层垮落后岩层移动范围无明显外扩特征,以张拉破裂形成的竖

向裂隙发育为主。关键层上方岩层剪切破裂形成的裂隙占比增加,在采动沉降效应与重力作用下沟谷坡体易发生剪切滑移,导致坡体下行裂隙与覆岩上行裂隙贯通,贯通裂隙对地表降水的截流作用会导致井下涌水量增大。

2)通过降雨-径流模拟与矸石沟高精度的DSM再现了山西“百年一遇”暴雨期间矸石沟流域不同历

时雨水淹没范围与淹没时间百分比。坡体两侧的径流区属于重点防渗区，需要及时采取裂缝填埋、防渗等防治措施。

3)沟谷区地下多煤层开采引发的覆岩沉降效应对地表地貌造成不可逆影响，会引发“裂隙发育—山体滑坡—河道堵塞—涌水加剧”复杂灾害链。提出了沟谷地形下地表径流水害综合防治方法，即径流区、淹没及裂隙发育区地表裂缝填埋、潜在滑坡区削坡治理、淹没及最大沉降区河床“柔性”加固。不仅减小了地表水引发矿山涌突水事故风险，也保证了地表水的质量与水资源的可持续利用。

4)后续将重点探究汛期地表水入渗采场机理及井下涌水量变化规律，指导矿山企业探放水。

#### 参考文献(References):

- [1] 武强,崔芳鹏,赵苏启,等.矿井水害类型划分及主要特征分析[J].煤炭学报,2013,38(4):561–565.  
WU Qiang, CUI Fangpeng, ZHAO Suqi, et al. Type classification and main characteristics of mine water disasters[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 561–565.
- [2] 尹尚先,王玉国,李文生.矿井水灾害:原因·对策·出路[J].煤田地质与勘探,2023,51(1):214–221.  
YIN Shangxian, WANG Yugu, LI Wensheng. Cause, countermeasures and solutions of water hazards in coal mines in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 214–221.
- [3] 朱阁,武雄,李平虎,等.黄土地区煤矿地表水防排水研究[J].煤炭学报,2014,39(7):1354–1360.  
ZHU Ge, WU Xiong, LI Pinghu, et al. Coalmine surface water prevention and drainage in loess area[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1354–1360.
- [4] 侯恩科,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.  
HOU Enke, FENG Dong, XIE Xiaoshen, et al. Development characteristics and treatment methods of mining surface cracks in shallow-buried coal seam gully[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(4): 1297–1308.
- [5] 董书宁,虎维岳.中国煤矿水害基本特征及其主要影响因素[J].煤田地质与勘探,2007,35(5):34–38.  
DONG Shuning, HU Weiyue. Basic characteristics and main controlling factors of coal mine water hazard in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2007, 35(5): 34–38.
- [6] 李文平,王启庆,刘士亮,等.生态脆弱区保水采煤矿(区)等级类型[J].煤炭学报,2019,44(3):718–726.  
LI Wenping, WANG Qiqing, LIU Shiliang, et al. Grade types of water-preserved coal mining coalmines in ecologically fragile area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 718–726.
- [7] 王方田,屠世浩,张艳伟,等.冲沟地貌下浅埋煤层开采矿压规律及顶板控制技术[J].采矿与安全工程学报,2015,32(6):877–882.  
WANG Fangtian, TU Shihao, ZHANG Yanwei, et al. Ground pressure rules and roof control technology for the longwall mining of shallow seam beneath the gully topography[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(6): 877–882.
- [8] 武强,申建军,王洋.“煤·水”双资源型矿井开采技术方法与工程应用[J].煤炭学报,2017,42(1):8–16.  
WU Qiang, SHEN Jianjun, WANG Yang. Mining techniques and engineering application for “Coal-Water” dual-resources mine[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 8–16.
- [9] 朱伟,滕永海.堰塞湖下特厚煤层综放开采安全性及采动影响研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2021,3(1):39–46.  
ZHU Wei, TENG Yonghai. Study on the safety and mining influence of fully-mechanized caving mining with ultra-thick seam under barrier lake[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(1): 39–46.
- [10] FATHI Salmi E, NAZEM M, KARAKUS M. Numerical analysis of a large landslide induced by coal mining subsidence[J]. Engineering Geology, 2017, 217: 141–152.
- [11] LI Zhu, YU Shengchao, ZHU Weibing, et al. Dynamic loading induced by the instability of voussoir beam structure during mining below the slope[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 132: 104343.
- [12] 张杰,杨涛,王斌,等.浅埋煤层沟谷径流下开采顶板突水预测分析[J].采矿与安全工程学报,2017,34(5):868–875.  
ZHANG Jie, YANG Tao, WANG Bin, et al. Prediction analysis of roof water-inrush in shallow coal seam with surface valley runoff[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(5): 868–875.
- [13] 李建伟,刘长友,赵杰,等.沟谷区域浅埋煤层采动矿压发生机理及控制研究[J].煤炭科学技术,2018,46(9):104–110.  
LI Jianwei, LIU Changyou, ZHAO Jie, et al. Study on occurrence mechanism and control technology of mining-induced strata pressure in shallow depth coal seams of valley region[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 104–110.
- [14] 赵杰,刘长友,李建伟.沟谷区域浅埋煤层工作面覆岩破断及矿压显现特征[J].煤炭科学技术,2017,45(1):34–40.  
ZHAO Jie, LIU Changyou, LI Jianwei. Overburden failure and strata pressure behavior characteristics under condition of shallow coal seam in gully terrain[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 34–40.
- [15] 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.  
LIU Hui, DENG Kazhong, LEI Shaogang, et al. Dynamic developing law and governance standard of ground fissures caused by underground mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(5): 884–890.
- [16] 孙魁,李永红,刘海南,等.彬长矿区“对滑型”黄土滑坡及其形成机制[J].煤炭学报,2017,42(11):2989–2997.  
SUN Kui, LI Yonghong, LIU Hainan, et al. “Opposite-slide” loess landslides and its formation mechanism in Binchang mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(11): 2989–2997.
- [17] 钱鸣高,石平五,许家林.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010: 176–230.

- [18] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 10–63.
- [19] DONG J, LIAO M, XU Q, et al. Detection and displacement characterization of landslides using multi-temporal satellite SAR interferometry: a case study of Danba County in the Dadu River Basin[J]. *Engineering Geology*, 2018, 240: 95–109.
- [20] WEI L, FENG Q, LIU F, et al. Precise topographic model assisted slope displacement retrieval from small baseline subsets results: case study over a high and steep mining slope[J]. *Sensors* (Basel, Switzerland), 2020, 20(22): 6674.
- [21] CHEN B, LI Z, YU C, et al. Three-dimensional time-varying large surface displacements in coal exploiting areas revealed through integration of SAR pixel offset measurements and mining subsidence model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 240: 111663.
- [22] ZHAO C, LU Z, ZHANG Q. Time-series deformation monitoring over mining regions with SAR intensity-based offset measurements[J]. *Remote Sensing Letters*, 2013, 4: 436–445.
- [23] CHENG G, YANG T, LIU H, et al. Characteristics of stratum movement induced by downward longwall mining activities in middle-distance multi-seam[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 136: 104517.
- [24] 刘一龙, 杨天鸿, 叶强, 等. 山区多煤层重复采动下地表变形特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(3): 507–516.
- LIU Yilong, YANG Tianhong, YE Qiang, et al. Characteristics of surface deformation under repeated mining in mountainous area[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(3): 507–516.
- [25] 沈泽宇, 丁永生, 孔乔. 降雨径流与洪水淹没模型耦合的应用研究[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(8): 1473–1483.
- SHEN Zeyu, DING Yongsheng, KONG Qiao. Application study of coupling rainfall-runoff modeling and flood plain inundation mapping[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2021, 23(8): 1473–1483.