



## 浅埋煤层群上下层位土层与基岩层协同隔水稳定性研究

杨涛 闫医慧 张杰 林海飞 何义峰 张一铭 高守世

### 引用本文:

杨涛, 闫医慧, 张杰, 等. 浅埋煤层群上下层位土层与基岩层协同隔水稳定性研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 234–242.  
YANG Tao, YAN Yihui, ZHANG Jie. Study on synergistic water-resisting stability of upper and lower soil layers and bedrock layer in shallow coal seam group[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 234–242.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0629>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 浅埋煤层群裂隙演化规律及组合承载结构载荷研究

Research on the fracture evolution law and combined bearing structure load of shallow buried coal seam group  
煤炭科学技术. 2023, 51(9): 65–76 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1108>

#### 坚硬顶板厚隔水层条件下底板突水致灾机理及全周期治理技术

Mechanism and whole cycle control technology of water inrush from coal seam floor on condition of hard roof and thick waterproof layer  
煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 318–327 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2032>

#### 浅埋薄基岩顶板采动突水溃砂固流耦合相似模拟试验研究

Study on solid–fluid coupling similarity simulation test of water–sand inrush during mining of shallow buried thin bedrock roof  
煤炭科学技术. 2024, 52(6): 165–175 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1227>

#### 陕北浅埋煤层似膏体充填条带开采参数研究及应用

Study and application of paste–like filling mining parameters of shallow buried coal seam in Northern Shaanxi  
煤炭科学技术. 2021, 49(7): 63–70 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5cfd9688-585f-4857-9aa9-b5af68cbc22d>

#### 弱胶结巨厚砂砾岩含水层离层突水机制研究

Study on separated layer water burst mechanism for weakly cemented giant thick glutenite  
煤炭科学技术. 2024, 52(2): 209–218 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1681>

#### 巷道掘进顶板突水危险性预测研究

Study on prediction of water inrush hazard in roof of roadway driving  
煤炭科学技术. 2022, 50(10): 110–120 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/18d85e6d-28ed-4fec-9e8e-e693a3c54562>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

杨涛, 闫医慧, 张杰, 等. 浅埋煤层群上下层位土层与基岩层协同隔水稳定性研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 234-242.

YANG Tao, YAN Yihui, ZHANG Jie, *et al.* Study on synergistic water-resisting stability of upper and lower soil layers and bedrock layer in shallow coal seam group[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 234-242.

## 浅埋煤层群上下层位土层与基岩层协同隔水稳定性研究

杨涛<sup>1,2</sup>, 闫医慧<sup>1,2</sup>, 张杰<sup>1,2</sup>, 林海飞<sup>3</sup>, 何义峰<sup>1,2</sup>, 张一铭<sup>1,2</sup>, 高守世<sup>1,2</sup>

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室,

陕西 西安 710054; 3. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 浅埋煤层顶板突水是由于导水裂隙带贯穿隔水层而引起的, 随着煤层群的下行开采, 土层与基岩层的协同隔水机理亟待明确。为了分析隔水土层在煤层群下行开采工程背景下的破坏机理, 以便准确预测煤矿顶板突水问题, 以陕北神府矿区韩家湾煤矿 2<sup>-2</sup>、3<sup>-1</sup> 和 4<sup>-2</sup> 煤下行开采为研究背景, 通过原位钻孔取心试验得出不同埋深的隔水土层性质的差异; 通过建立上层位隔水土层渗透扩展力学模型来描述裂隙发育形态; 采用土-岩复合隔水层力学模型, 在“给定变形”条件下计算下层位隔水土层处于整体稳定状态时的力学判据。研究表明, 隔水土层根据其性质不同可以分为上层位隔水土层和下层位隔水土层; 通过比较总载荷与上层位隔水土层抗拉强度的大小, 当总载荷小于等于上层位隔水土层抗拉强度时裂隙不再向下发育从而得出裂隙发育长度; 在“给定变形”条件下, 当下层位隔水土层长边中部位产生拉应力小于或等于拉伸强度阈值时, 下层位隔水土层整体结构处于稳定状态, 不会产生拉伸破坏; 根据韩家湾煤矿地质情况进行数值模拟, 模拟结果与理论分析结果相吻合。研究可为相似地质条件下顶板突水预测提供参考。

**关键词:** 浅埋煤层群; 上下层位土层; 土-岩协同; 复合隔水层; 突水预测

中图分类号: TD745

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)07-0234-09

### Study on synergistic water-resisting stability of upper and lower soil layers and bedrock layer in shallow coal seam group

YANG Tao<sup>1,2</sup>, YAN Yihui<sup>1,2</sup>, ZHANG Jie<sup>1,2</sup>, LIN Haifei<sup>3</sup>, HE Yifeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Yiming<sup>1,2</sup>, GAO Shoushi<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention with Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The roof water inrush of shallow buried coal seam is caused by the water flowing fractured zone through the aquifuge. With the downward mining of coal seam group, the mechanism of synergistic water isolation between soil layer and bedrock layer needs to be clarified. In order to analyze the failure mechanism of aquiclude under the background of downward mining of coal seam group, so as to accurately predict the water inrush problem of coal mine roof, taking the downward mining of 2<sup>-2</sup>, 3<sup>-1</sup> and 4<sup>-2</sup> coal seams in Han Jiawan Coal Mine of Shenfu Mining Area in Northern Shaanxi as the research background, the differences in the properties of aquiclude at different depths were obtained by in-situ borehole coring experiments. The development form of cracks is described by establishing the mechanical model of seepage expansion of upper aquifuge soil layer. Using the mechanical model of soil-rock composite aquiclude, the mechanical criterion of the lower aquiclude in the overall stable state is calculated under the condition of 'given deformation'. The research shows that the aquiclude can be divided into upper aquiclude and lower aquiclude according to its different properties. By comparing the total load with the tensile strength of the upper aquifuge, when the total load is less than or equal to the tensile strength of the upper aquifuge, the crack no longer develops downward to obtain the crack development length. Under the condition of 'given deformation', when the tensile stress generated at the middle position of the long side of the aquiclude is less than or equal to the tensile strength threshold, the overall structure of the lower aquiclude is in a stable state, and no tensile failure will occur. According to the geological conditions of Han Jiawan

收稿日期: 2023-04-28

责任编辑: 周子博

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0629

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52004200, 51774229), 中国博士后科学基金资助项目(2020M673609XB)

作者简介: 杨涛(1990—), 男, 河南南阳人, 副教授, 硕士生导师, 博士后。E-mail: yangtao@xust.edu.cn

coal mine, the numerical simulation results are consistent with the theoretical analysis results. The research can provide reference for roof water inrush prediction under similar geological conditions.

**Key words:** shallow coal seam group; upper and lower soil layer; soil-rock synergy; composite aquifuge; water inrush prediction

## 0 引 言

目前,煤炭资源的持续开采已经使各矿区逐步过渡到下煤层的开采<sup>[1]</sup>。近年来在陕北浅埋煤层群开采过程中顶板突水事故的发生对中国能源安全构成了威胁<sup>[2-4]</sup>。由于榆神府矿区煤层顶板有天然保水屏障——隔水土层,所以目前对顶板突水的研究不再局限于采场附近小范围基岩的破坏,而需要综合考虑在基岩-土体-水体的协同作用下隔水层的稳定性。

对于存在上覆松散含水层的煤层开采后,隔水土层的稳定性与覆岩中导水通道的分布以及裂隙渗流规律有着密切的联系<sup>[5]</sup>。开采扰动及水体渗透的作用使得隔水土层渗透性增强,将导致潜水层水流沿裂隙流向工作面,严重时将引发煤矿顶板突水事故<sup>[6-8]</sup>。神府矿区井田煤层埋藏较浅,各可采煤层导水裂隙带高度在大部分地区大于相邻两煤层间的距离,导水裂隙带互相叠加,大部分地区导水裂隙带可直达地表,沟通第四系松散层潜水和地表水。然而在实际生产过程中顶板涌水机理相对复杂,从薄基岩浅埋煤层顶板突水因素考虑,隔水土层是一层特殊且关键的隔水地层,不能以普通隔水基岩或者地表松散土层一概而论<sup>[9-11]</sup>。笔者前期通过建立孔隙水压解析力学模型分析了隔水土层孔隙水压的波动与顶板突水之间的规律。土层与基岩性质差异较大,不同埋深的土层之间也有性质差异,那么对于厚土层-基岩层之间协同隔水性能的判定,需要充分考虑上述差异性。范立民等<sup>[12-13]</sup>提出将含水层底部的土层与基岩风化带一起构成隔水岩组来开采煤层,许延春<sup>[14]</sup>根据黏土液塑限试验结果,认识到深部饱和黏土处于半固态或硬塑状态,建议允许将埋深大的厚层黏土作为防砂安全煤柱的保护层;崔广心<sup>[15]</sup>指出深部土是典型的“土不土、岩不岩”的特殊类型土,是一种土向软岩过渡的特殊性质土,认为深部土的研究与浅部土的不同在于:浅表土常规土力学以研究土的承载能力有关,而深部土研究以土对结构的荷载为主。刘世奇<sup>[16]</sup>通过建立散体相似模型对底层中岩体、黏土层这两种不同力学性质的地层组合的采动协同变形及其力学传递方式展开了研究。目前,也有一些学者从微观角度以及固液耦合作用角度来描述裂隙,黄庆享等<sup>[17]</sup>提出隔水土层“上行裂隙”与“下行裂隙”的发育及弥合,并提出以隔采比来判定

隔水土层的稳定性。张杰等<sup>[18-19]</sup>通过固-液耦合试验提出采用长壁间隔式开采来抑制采动裂隙在隔水土层中的发展并提出土采比的不同将导致隔水土层发生不同的破坏形式并用试验验证,为浅埋煤层顶板突水提供参考依据。

以薄基岩浅埋煤层群开采时土-岩协同隔水稳定性为研究目标,拟通过原位钻孔土力学试验来获取隔水土层性质,根据性质的不同将隔水土层分层,再根据理论计算以及现场观测对隔水土层在重复开采扰动以及上覆松散潜水含水层渗流作用下破坏形式进行研究,为浅埋煤层群下行开采顶板突水提供了一定的理论依据。

## 1 不同埋深土层性质差异分析

### 1.1 状态异性

神府矿区地处陕北黄土高原北部和毛乌素沙漠东南缘,地形西北高东南低,海拔一般+1 100~+1 350 m,地表大部分被第四系及新近系松散层覆盖,基岩沿沟谷两岸出露。韩家湾煤矿水文地质类型属中等,该区地貌单元大致为风积沙地貌。该地松散含水层水储量分布不均且变化较大,加之季节性降雨会使地表径流量不稳定,进一步增大了下行开采水害预测难度。

韩家湾煤矿隔水土层全区分布,厚度一般 10~55 m。经过原位钻孔试验、室内液相指数测试试验发现隔水土层天然可塑,形态从硬塑到坚硬均有分布(图 1)。

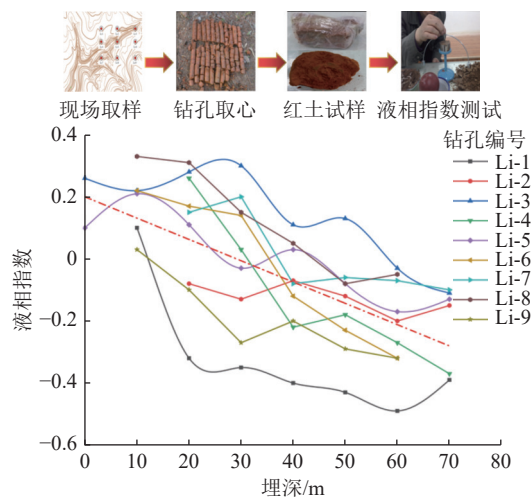


图 1 液相指数与埋深之间的关系

Fig.1 Relationship between liquid index and buried depth



由试验数据得上图,对数据拟合处理得出线性拟合方程,拟合方程为 $y(\text{液相指数}) = -0.00687x(\text{埋深}) + 0.15801$ ,  $R^2 = 0.93167$ ,拟合度较好。令上述拟合方程中 $y=0$ ,则可求得韩家湾煤矿红土的平均变性界限深度为23 m。以此为界限将韩家湾煤矿土层埋深小于变性界限深度的土层称为上层位隔水土层,这层土呈现为塑性状态,具有良好的延展性和可塑性;将韩家湾煤矿土层埋深大于变性界限深度的土层称为下层位隔水土层,这层土呈现为固结状态,具有良好的硬度及固结性,性质类似于基岩。笔者为区分隔水土层与普通基岩在状态上随着埋深的变化特征,为此提出隔水土层随埋深变化的状态异性,示意如图2所示。

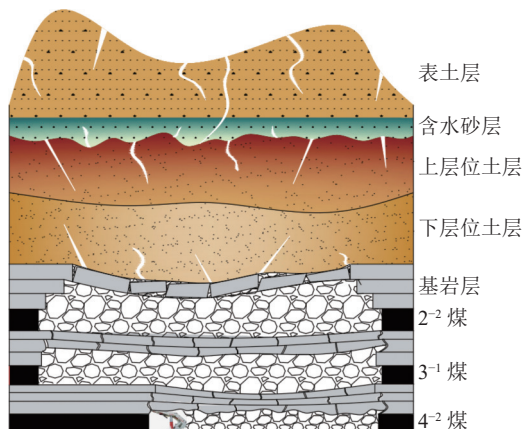


图2 “煤-覆岩-土层”三位一体结构模型

Fig.2 “Coal-overburden-soil” trinity structure model

## 1.2 不同层位土层渗流特性试验

由于基岩较薄,煤层开采初期会对隔水层产生弱的扰动,产生细小的裂隙。可以将此阶段描述为突水孕育的阶段,即水在裂隙中的渗流阶段。裂隙宽度小,水流过裂隙时所受到的阻力大,这里可将此阶段的裂隙渗流等效为低速的多孔介质渗流进行描述,方程可表示为:

$$v = -\frac{k}{\eta} \nabla p \quad (1)$$

式中: $v$ 为流体流速; $k$ 为渗透系数; $\eta$ 为动力黏度系数; $p$ 为含水层的压力; $\nabla$ 为梯度算子。

隔水土层在开采扰动作用下通常同时发生应力变形和渗流作用,当隔水土层厚度较大、开采煤层厚度较小时,煤层开采对隔水土层的扰动较小,不会使隔水土层发生大的拉伸、剪切破坏,但土体的体积、孔隙、结构等物理特性会发生变化从而导致隔水土层的渗透性发生变化,在自重应力作用下,含水层的水向下运动形成渗透水压差,从而引起水体通过隔

水土层出现渗透现象。我们可以通过变水头试验法得到不同层位隔水土层的渗透系数。

图3中, $Q$ 为出水量; $A$ 为土样横断面积; $r$ 为土样厚度。设试验过程中任意时刻 $t$ 作用于土样两端的水头差为 $\Delta h$ ,经过 $dt$ 微时段后,管中水位下降 $dh$ ,则 $dt$ 时段内流入试样的水量微增量为:

$$dV_e = -sdh \quad (2)$$

式中: $s$ 为玻璃管横截面积;右端的负号表示流入水量随 $\Delta h$ 的减少而增加。

根据达西定律, $dt$ 时段内流入土样的渗流量为

$$dV_0 = kiAdt = k \frac{\Delta h}{r} Adt \quad (3)$$

式中: $A$ 为土样的横断面积; $i$ 为水力梯度; $r$ 为土样长度

根据水流连续原理,应有 $dV_e = dV_0$ ,即:

$$\begin{aligned} -sdh &= k \frac{\Delta h}{r} Adt \\ dt &= -\frac{sr}{kA} \frac{dh}{\Delta h} \end{aligned} \quad (4)$$

从而得土样的渗透系数:

$$k = \frac{sr}{A\Delta t} \ln \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} \quad (5)$$

通过选定几组不同的 $\Delta h_1$ 、 $\Delta h_2$ 值,分别测出他们所需的时间 $\Delta t$ ,利用上式计算土体的渗透系数 $k$ ,然后取平均值,作为该土样的渗透系数。可以在现场选3组土样,分别试验求出其渗透系数,然后取平均值,作为该矿区的渗透系数。此试验适用于测定透水性较小的粘性土的渗透系数。

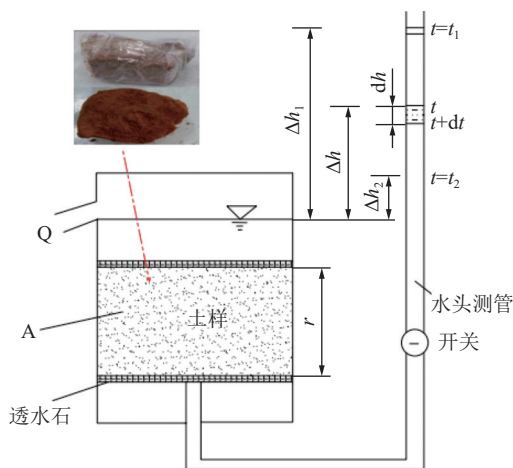


图3 变水头试验装置示意

Fig.3 Schematic of variable head experimental device

通过试验研究表明,黏土的平均孔隙直径在 $0.14 \sim 0.19 \mu\text{m}$ ,黏土的渗透系数 $k$ 在 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。当渗透系数降低一个或数个数量级时,可判断黏土隔水稳定性完好。对韩家湾煤矿选取土样进行试验发现

埋深在 20 m 时隔水土层渗透系数降低了一个数量级,之后随着隔水土层深度的增加渗透系数保持不变,表明埋深在 20 m 以下的隔水土层隔水性能良好。试验测得数据如图 4 所示。

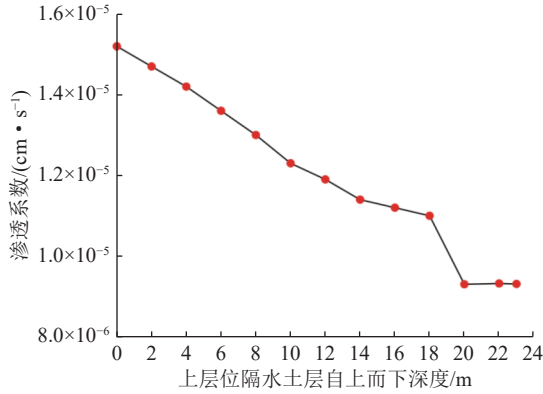


图 4 渗透系数与上层位隔水土层顶界面以下深度关系

Fig.4 Relationship between permeability coefficient and depth below the top interface of upper aquifuge soil layer

## 2 上层位土裂隙发育机理

煤层顶板上覆岩层的垮落是导致裂隙发育的根本原因,而隔水土层上部潜水重力是工作面顶板突水的动力。一方面,水会对隔水土层起到软化作用,另一方面,水在重力作用下会对隔水土层产生挤入破坏作用。在这两方面的作用下,裂隙不断延伸拓展。

前人通过大量的试验及现场测定发现,隔水土层裂隙在潜水的软化作用以及采动应力恢复作用下<sup>[20-21]</sup>,土层裂隙会出现弥合现象,将会进一步增加隔水保护层厚度。这是由于采空区内应力恢复是由上覆岩体垮落堆积、下沉压缩而形成的,而上覆岩体及隔水土层在垮落及断裂破坏过程中形成的大量裂隙、孔隙等空间也将在采空区应力恢复的过程中被压缩。

当上煤层开采对隔水土层产生的影响较弱时,下煤层开采在采动应力恢复以及潜水的软化作用下使得隔水土层中的大量裂隙闭合,形成孔隙系统,但因此形成渗流优势面,在下煤层重复开采扰动应力以及水压力作用下,新的裂隙在原裂隙面基础上再次发生扩展。

潜水在重力作用下使得裂隙结构面发生拉-张型扩展位移,增大裂隙结构面的张开度。自然条件下,地下水顺着岩体裂隙向下渗流,并对其中的裂隙进行冲刷侵蚀破坏使之扩展。

裂隙受水压力作用扩展过程中,裂隙应在长宽深 3 个方向破裂及延伸。相应应有 3 个流动方向,但

具体条件下将裂隙受裂隙水压扩展问题简化成在裂隙长、宽的二维破裂。设  $L$  为裂隙的发展方向,裂隙面上任一点  $L$  处的压力为  $P$ ,由于裂隙表面是粗糙的,则裂隙面上的阻力与该点的压力成正比,其比例系数为裂隙面的粗糙系数  $K$ 。裂隙承受的压力包括潜水含水层水压和部分上覆载荷。

如图 5 所示沿裂隙的发展方向取一微元,长度为  $dL$ ,宽度为  $dB$ ,其承受的水压力为  $P + \frac{\partial P}{\partial L}dL$ ,裂隙面产生的阻力为  $K\left(P + \frac{\partial P}{\partial L}dL\right)$ 。根据水流运动定律, $L$  方向上有:

$$\left(P + \frac{\partial P}{\partial L}dL\right)(B - dB) - PB + 2\left(P + \frac{\partial P}{\partial L}dL\right)KdL = \left[\rho \frac{1}{2}(2B - dB)dL\right] \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (6)$$

式中:  $v$  为流体流速;  $\rho$  为水的密度。

因为地下水流速度随时间变化很小,所以可以忽略所有二阶微量,得:

$$B \frac{\partial P}{\partial L} + 2PK = 0 \quad (7)$$

解得:

$$P = p_0 e^{\frac{KL}{B}} \quad (8)$$

式中:  $p_0$  为潜水层含水层水压及部分上覆荷载总压力。

饱和土体内任一平面上受到的总应力可分为由土骨架承受的有效应力和由孔隙水承受的孔隙水压力两部分,二者之间关系总是满足下式:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (9)$$

式中:  $\sigma$  为作用在饱和土体中任意面上的总应力;  $\sigma'$  为有效应力,作用于同一平面的土骨架上;  $u$  为孔隙水压力,作用于同一平面的孔隙水上。

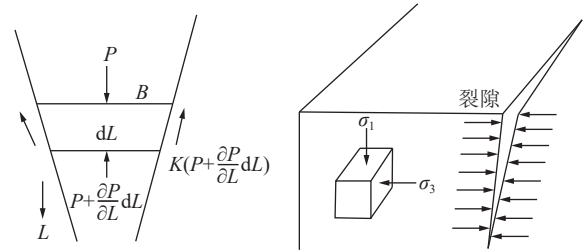


图 5 上层位隔水土层裂隙扩展力学模型

Fig.5 Mechanical model of crack propagation in upper aquifuge soil layer

引起土的体积压缩和抗剪强度变化的原因,并不取决于作用在土体上的总应力,而是取决于总应力与孔隙水压力之间的差值,即有效应力。

由于含水层骨架具有一定的支撑载荷能力,所

以上覆载荷只有部分传递至隔水土层。则作用在隔水土层上的全部总载荷为

$$p_0 = u + l\sigma' \quad (10)$$

则裂隙岩体中潜水的水头压力表达式为

$$P_s = \rho gh \quad (11)$$

在稳定的渗流场中孔隙水压力的不随时间而变化,则

$$u = P_s = \gamma_w h \quad (12)$$

代入上式得

$$p_0 = \gamma_w h + l(\gamma_b H + \gamma_{sat} H' - \gamma_w h) \quad (13)$$

式中:  $h$  为松散含水层的水位高度;  $\gamma_w$  为水的容重;  $H$  为表土层的厚度;  $\gamma_b$  为表土层平均容重;  $l$  为载荷传递系数,取 0.75;  $H'$  为含水层的厚度;  $\gamma_{sat}$  为含水层平均容重

载荷传递系数  $l$  的大小与含水层骨架颗粒的粒径大小、骨架岩性等有关<sup>[22]</sup>。当含水层以大粒径砾石、砂砾为主时,颗粒相对松散,含水层渗透性能相对较好,有效应力相对较低,即作为骨架的承载性能相对较弱,载荷传递系数较大,更多的将载荷传递到基岩顶界面。而当含水层以细砂、黏土等小粒径骨架为主时,骨架颗粒紧密,有一定的承载性能,载荷传递系数较小。

由上式裂隙水渗入岩体内部时的压力与裂隙参数的关系可知,水压力随着裂隙的深度及裂隙的粗糙度的增大而衰减。可以得出裂隙水渗入裂隙的深度:

$$L = \frac{B}{K} (\ln p_0 - \ln P) \quad (14)$$

由上式可知,原始水压越大,则渗入的裂隙深度越大,并且裂隙宽度越大时裂隙的深度也越大。当总载荷  $p_0$  小于或等于上层位隔水土层抗拉强度  $\sigma_T$  时,则认为裂隙不再继续扩展,则裂隙的发育深度为

$$L = \frac{B}{K} (\ln p_0 - \ln \sigma_T) \quad (15)$$

在实际计算中对隔水土层裂隙进行概化,认为在单位面积内隔水土层裂隙为一条,其宽度之和作为单裂隙计算的宽度,使计算模型简化为单裂隙模型。

榆神府矿区隔水土层裂隙分为永久裂隙和临时裂隙两种类型,永久裂隙一般位于采空区外围,开采结束后,裂隙发育稳定,临时裂隙位于工作面前方,当临时裂隙宽度发育最大时,其裂隙总宽度  $B$  计算公式为:

$$B = \sum g = \int_0^r 2\pi e \frac{\omega}{R^2} z \exp\left(-\pi \frac{z^2}{R^2}\right) dz \quad (16)$$

式中:  $g$  为单个裂隙宽度;  $e$  为水平移动系数;  $\omega$  为采场上覆下层位土层挠度;  $R$  为主要影响半径

### 3 下层位土-岩协同承载作用

张永双等<sup>[23]</sup>基于对新近系硬黏土工程特性的全面分析,认为深部硬黏土应分类为“硬土/软岩”类,即属于岩、土之间的过渡类型。崔广心<sup>[24]</sup>在进行深厚表土层中地下结构物的物理模拟试验中发现,深部土的密度可达  $2.3 \times 10^3 \sim 2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  (与岩石近似)。由于隔水层往往在导水裂隙带或弯曲下沉带出现,则煤层开采后,下层位隔水土层由于与基岩性质相似,因此与岩层将发生同步的移动变形,将隔水土层部分固结的、与基岩性质相似的高强度土层(下层位土层)视为横跨采空区上端的具有一定承载能力的梁,采用弹性力学的方法分析煤层上覆固结土层受力情况。

实际开采中,直接顶和老顶破断垮落后,其上薄基岩一般由破碎岩体支撑着,碎石对上部基岩作用一定的分布反力,若假设薄基岩下的支撑介质具有弹性抗力,即假设符合弹性地基条件,则可将薄基岩简化为下图6所示的复合隔水层弹性地基基础板。

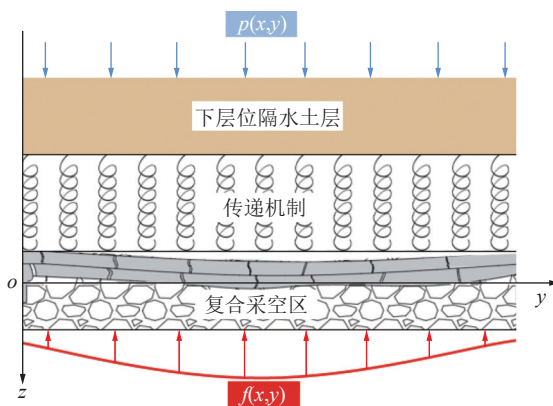


图6 复合隔水层弹性地基模型

Fig.6 Elastic foundation model of composite aquifuge

将压实后的破碎岩石视为弹性地基,进而获得支撑载荷  $f(x, y)$  的表达式为:

$$f(x, y) = k^i \omega \quad (17)$$

式中:  $k^i$  为弹性地基系数;  $\omega$  为采场上覆下层位土层挠度。

弹性地基系数与煤岩层厚度之间的关系<sup>[25]</sup>:

$$\begin{cases} k_m = E_m/h_c \\ k_i = E_i/h_i \end{cases} \quad (18)$$

煤层及其上方  $i-1$  层基岩组成的“组合体”的弹



性地基系数  $k^i$ :

$$\frac{1}{k^i} = \frac{1}{k_m} + \frac{1}{k_1} + \cdots + \frac{1}{k_{i-1}} \quad (19)$$

式中:  $k_m$  为煤体的弹性地基系数;  $k_1, \dots, k_{i-1}$  为各岩层的弹性地基系数;  $E_m$  为煤体的弹性模量;  $E_i$  为任一岩层的弹性模量;  $h_i$  为煤层上方各岩层厚度;  $h_c$  为综合采高。

煤层开采后, 采掘空间内原来承受上部载荷的煤炭被开采, 在顶板初次来压断裂前, 上部岩层处于一种四边固支的情况。将下层位隔水土层视为由上覆松散层、上层位隔水土层以及垮落带矸石共同支撑的四边固支的弹性地基矩形薄板(厚度远小于其长度和宽度, 并且作用于板的载荷垂直于板的平面), 构建顶板复合隔水层力学模型(图 7)。取隔水层的中性面为  $x$ - $y$  平面, 垂直于中性面的方向为  $z$  轴, 其中工作面推进方向为  $y$  轴方向, 长度为  $a$ ; 工作面倾向方向为  $x$  轴方向, 长度为  $b$ 。

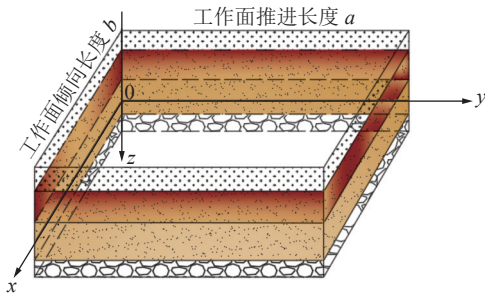


图 7 土-岩复合隔水层力学模型

Fig.7 Mechanical model of soil-rock composite aquiclude

为便于分析计算, 假设下层位隔水土层之上岩土层包括上层位隔水土层以及上覆松散含水层的有效应力视为均布载荷, 此外还有含水层的孔隙水压力; 根据隔水层赋存特征及实际的开采条件, 周围岩体对其支承视为固支边界, 其中固支边为  $x=0, x=b, y=0, y=a$ 。边界条件满足:

$$\begin{cases} (\omega)_{x=0,b,y=0,a} = 0 \\ \left(\frac{\partial \omega}{\partial x}\right)_{x=0,b} = 0 \\ \left(\frac{\partial \omega}{\partial y}\right)_{y=0,a} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

根据弹性薄板理论, 采用瑞利-里茨法取满足四边固支的顶板下层位隔水土层一阶挠度表达式<sup>[26]</sup>:

$$\omega = A \sin^2 \frac{\pi x}{b} \sin^2 \frac{\pi y}{a} \quad (21)$$

式中,  $A$  为挠度函数的系数。

依据最小势能原理, 可以求得顶板复合关键层挠度函数系数  $A$  为:

$$A = \frac{\gamma_1 h_1 + \gamma_x h_x + p_s + \gamma_s h_s - f}{D \pi^4 \left( \frac{3}{b^4} + \frac{2}{a^2 b^2} + \frac{3}{a^4} \right)} \quad (22)$$

式中:  $\gamma_s$  为上层位土层的容重;  $h_s$  为上层位土层的厚度;  $\gamma_1$  为隔水土层上覆岩层的平均容重;  $h_1$  为隔水土层上覆岩层的厚度;  $\gamma_x$  为下层位土层的容重;  $h_x$  为下层位土层的厚度;  $p_s$  为潜水水头压力;  $f$  为支撑载荷;  $D$  为下层位土层的抗弯刚度,

$$D = \frac{E_x h_x^3}{12(1-\mu_x^2)} \quad (23)$$

式中:  $E_x$  为下层位土层的弹性模量;  $\mu_x$  为下层位土层的泊松比。

则:

$$\omega = \frac{\gamma_1 h_1 + \gamma_x h_x + p_s + \gamma_s h_s - f}{D \pi^4 \left( \frac{3}{b^4} + \frac{2}{a^2 b^2} + \frac{3}{a^4} \right)} \sin^2 \frac{\pi x}{b} \sin^2 \frac{\pi y}{a} \quad (24)$$

将主要应变分量  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$  用  $\omega$  表示, 就得到

$$\begin{cases} \varepsilon_x = -\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} z = -\frac{2A z \pi^2}{b^2} \cos \frac{2\pi x}{b} \sin^2 \frac{\pi y}{a} \\ \varepsilon_y = -\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} z = -\frac{2A z \pi^2}{a^2} \cos \frac{2\pi y}{a} \sin^2 \frac{\pi x}{b} \\ \gamma_{xy} = -2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} z = -\frac{2A z \pi^2}{ab} \sin \frac{2\pi x}{b} \sin \frac{2\pi y}{a} \end{cases} \quad (25)$$

将主要应力分量  $\sigma_x, \sigma_y$  和  $\tau_{xy}$  用  $\omega$  表示, 就得到

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_x + \mu \varepsilon_y) \\ \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_y + \mu \varepsilon_x) \\ \tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\mu)} \gamma_{xy} \end{cases} \quad (26)$$

根据弹性地基板挠度与应力之间的关系, 由挠曲方程可分别求出隔水层中  $\sigma_x, \sigma_y$  和  $\tau_{xy}$  的应力表达式:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E_x z A}{1-\mu_x^2} \left( \frac{2\pi^2}{b^2} \cos \frac{2\pi x}{b} \sin^2 \frac{\pi y}{a} + \mu_x \frac{2\pi^2}{a^2} \sin^2 \frac{\pi x}{b} \cos \frac{2\pi y}{a} \right) \\ \sigma_y = \frac{E_x z A}{1-\mu_x^2} \left( \frac{2\pi^2}{a^2} \cos \frac{2\pi y}{a} \sin^2 \frac{\pi x}{b} + \mu_x \frac{2\pi^2}{b^2} \sin^2 \frac{\pi y}{a} \cos \frac{2\pi x}{b} \right) \\ \tau_{xy} = \frac{E_x z A}{1+\mu_x} \left( \frac{\pi^2}{ab} \sin \frac{2\pi x}{b} \sin \frac{2\pi y}{a} \right) \end{cases} \quad (27)$$

根据诸多文献的研究成果, 以及调研现场实际情况分析可知, 当采场覆岩达到充分采动状态后, 采场覆岩沉降变形将达到最大值; 此后, 尽管长壁综采工作面继续推进, 采场覆岩的沉降变形值仍维持最大值不再继续增加, 即采场覆岩沉降变形属于“给定变形”。考虑到这一特点, 对上述力学方程做进一步

求解,设采场覆岩板结构“给定变形”条件下下层位土层最有可能率先在长边中部位置出现最大拉应力,坐标为( $y=a/2, x=0, b$ ),此时最大拉应力  $\sigma_t$  为:

$$\sigma_t = \frac{2E_x z \mu_x [\gamma_1 h_1 + \gamma_x h_x + p_s + \gamma_s h_s - k' \omega]}{D \pi^2 b^2 (1 - \mu_x) \left( \frac{3}{b^4} + \frac{2}{a^2 b^2} + \frac{3}{a^4} \right)} \quad (28)$$

因此,下层位隔水土层不产生拉伸破坏,而处于整体稳定状态时必须满足:  $\sigma_t < [\sigma_t]$ 。上式为采动影响下层位隔水土层稳定性的力学判据。当下层位隔水土层长边中部位置处产生的拉应力小于或等于拉伸强度阈值时,下层位隔水土层整体结构处于稳定状态,不会产生拉伸破坏;当长边中部位置处产生的拉应力大于其拉伸强度阈值时,采场覆岩下层位隔水土层产生拉伸破坏,覆岩下层位隔水土层发生破断。

#### 4 工程实践

韩家湾主采煤层  $2^{-2}$ 、 $3^{-1}$  和  $4^{-2}$ ,研究区  $2^{-2}$  煤层平均采高为 4.3 m,  $3^{-1}$  煤平均采高为 2.7 m,  $4^{-2}$  煤平均采高为 1.9 m,目前该矿  $2^{-2}$  煤已经开采完毕,  $3^{-1}$  煤层进入末采期,正在回采  $4^{-2}$  煤 214201 工作面,对其回采有影响的含水层是井田沉积的大面积位于隔水土层上方的萨拉乌苏孔隙潜水层,煤岩层综合柱状图如图 8 所示。

目前,韩家湾煤矿  $4^{-2}$  煤 214201 工作面推进长度  $a$  为 2000 m,倾向长度  $b$  为 240 m,潜水水头压力  $p_s$  为 1.57 MPa,通过计算可得下层位隔水土层最大挠曲度  $\omega$  为 1.21 m,弹性地基系数  $k'$  为 0.643,代入式(28)计算得出  $\sigma_t$  为 0.18 MPa,而根据试验所知下层位隔水土层的抗拉强度阈值为 1.13 MPa,不满足下层位处于整体稳定状态的条件,因此韩家湾煤矿 214201 工作面推进过程中下层位隔水土层随基岩层的破断而发生拉伸破坏。

综合韩家湾矿水文孔测得韩家湾隔水土层厚度为 45.57 m,上更新统萨拉乌苏组( $Q_3s$ )孔隙潜水含水层水位高度 13.87 m,含水砂层厚度 4.55 m,代入式(13)得  $p_0=0.785$  MPa,又有  $4^{-2}$  煤埋深 193.11 m,主要影响角正切值 1.85,由此计算可得影响半径为 104.38 m,神府矿区韩家湾煤矿浅埋煤层群开采时的综合采高为 7.06 m,进而计算可得土层最大下沉量为 5.3 m,开采移动系数  $e=0.305$ ,代入式(16)得裂隙总宽度  $B=1.47$  m,与文献[27]描述的榆神府矿区地裂隙宽度在 0.01 ~ 2.21 m 相符,将  $p_0=0.785$  MPa,  $B=1.47$  m,根据工程经验取  $K=0.3$ ,上层位隔水土层的

层序	岩性	柱状	厚度/m	埋深/m
1	表土层		9.32	9.32
2	细砂		4.55	13.87
3	黏土		45.57	59.44
4	粉砂层		1.05	60.49
5	细粒砂岩		1.47	61.96
6	泥岩		1.42	63.38
7	细粒砂岩		5.99	69.37
8	中粒砂岩		2.15	71.52
9	细粒砂岩		4.64	80.78
10	泥岩		2.80	83.58
11	细粒砂岩		0.80	84.38
12	砂质泥岩		1.69	86.07
13	细粒砂岩		4.80	90.87
14	砂质泥岩		2.60	93.47
15	泥岩		2.80	96.27
16	中粒砂岩		16.04	112.31
17	细粒砂岩		2.80	115.11
18	砂质泥岩		0.97	116.08
19	$2^{-2}$ 煤		4.30	120.38
20	粉砂岩		2.78	123.16
21	砂质泥岩		2.42	125.58
22	粉砂岩		3.88	129.46
23	泥岩		4.35	133.81
24	细粒砂岩		12.0	145.81
25	中粒砂岩		4.30	150.11
26	$3^{-1}$ 煤		2.70	152.81
27	粉砂岩		2.83	155.64
28	砂质泥岩		4.44	160.08
29	中粒砂岩		9.35	169.43
30	泥岩		3.55	172.98
31	粉砂岩		2.81	175.79
32	泥岩		3.12	178.91
33	粉砂岩		5.35	184.26
34	泥岩		3.74	188.00
35	粉砂岩		3.21	191.21
36	$4^{-2}$ 煤		1.90	193.11

图 8 煤岩层综合柱状图

Fig.8 Coal rock comprehensive histogram

抗拉强度取 0.02 MPa,代入式(15)计算可得裂隙的发育深度  $L=17.98$  m,我们定义韩家湾埋深小于 23 m 的隔水土层称为上层位隔水土层,通过计算得上层位隔水土层仍具备隔水能力。此外,隔水土层裂隙在潜水的软化作用下以及采动应力恢复作用下,土层裂隙会出现弥合现象,将会进一步增加隔水保护层厚度。根据韩家湾的隔水土层的赋存特点,选取埋深在 10 ~ 55 m 的土层层位,水头压力选取 0.6 ~ 1.2 MPa 的水压值,纵向裂隙侵入角受基岩破断的影响,一般较小,这里选取  $0^\circ$  的角度进行单裂隙模拟方案设计。分别施加对应应力函数分布,来模拟不同埋深层位,其中水压使用 Fish 语言植入动态水压梯度。将模型通过 COMSOL 构建后,进行赋值有限元计算。模拟结果如图 9 所示。

由图 10 可知,随着下行开采的重复扰动,上层



位隔水土层的非贯穿裂隙会出现弥合,从土体裂隙介质大变形角度来看,随着水头压力的增大,裂隙弥合度分别增大至 0.12、0.37、0.73、0.98,裂隙弥合由尖端开始,结束于裂隙尾端。模拟结果与“上层位隔水土层仍具备隔水能力”的现场实际结果相吻合。目前韩家湾井田内第四系松散层潜水随着矿井煤炭资源的高强度开发,除水库附近地段尚存部分松散层潜水外,其余地段第四系松散层潜水储量随着补给量变动,所以仍要做好雨季相关的矿井防治水工作。

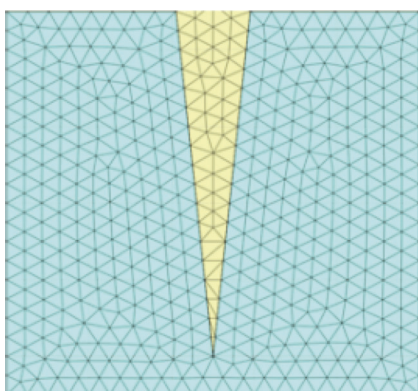


图 9 裂隙模型构建

Fig.9 Construction of fracture model

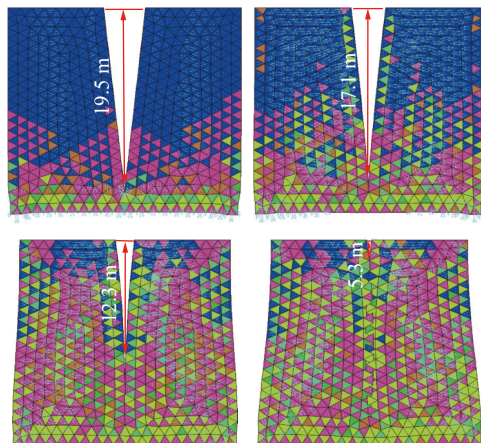


图 10 上层位隔水土层裂隙应力恢复过程

Fig.10 The fracture stress recovery process of upper aquifuge soil layer

## 5 结 论

1)通过对韩家湾不同深度的土取样、测样得出韩家湾煤矿红土的平均变性界限深度为 23 m,笔者将隔水土层随埋深变化的特性定义为状态异性。并以此为界限将韩家湾煤矿土层埋深小于变性界限深度的土层称为上层位隔水土层,反之为下层位隔水土层。

2)在厚松散层富含潜水浅埋煤层条件下,揭示

了韩家湾煤矿下行开采过程中上层位隔水土层裂隙发育机理,并建立了潜水渗入上层位隔水土层裂隙力学模型得到了在采动及渗流作用下裂隙发育形态;通过采用弹性薄板理论,在“给定变形”条件下得出了下位隔水土层处于整体稳定状态时的力学判据。

3)结合现场工程地质条件,通过理论计算得出韩家湾煤矿 214 201 工作面推进过程中下层位隔水土层随基岩层的破断而发生拉伸破坏,上层位隔水土层裂隙发育深度为 17.98 m,上层位隔水土层仍具备隔水能力,并通过 COMSOL 数值模拟软件模拟了上层位隔水土层应力恢复过程,表明了韩家湾煤矿下煤层在开采过程中几乎不会发生突水事故,但仍要加强雨季矿井防水工作。

## 参考文献(References):

- [1] 黄庆享. 浅埋煤层的矿压特征与浅埋煤层定义[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1174-1177.  
HUANG Qingxiang. Ground pressure behavior and definition of shallow seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1174-1177.
- [2] 董书宁, 姬亚东, 王 皓, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田典型顶板水害防控技术与应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2367-2375.  
DONG Shuning, JI Yadong, WANG Hao, et al. Prevention and control technology and application of roof water disaster in Jurassic coal field of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2367-2375.
- [3] 赵毅鑫, 刘文超, 张 村, 等. 近距离煤层蹬空开采围岩应力及裂隙演化规律[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 259-273.  
ZHAO Yixin, LIU Wenchao, ZHANG Cun, et al. Stress and fracture evolution of surrounding rock during mining above mined out area in contiguous coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 259-273.
- [4] 曾一凡, 梅傲霜, 武 强, 等. 基于水化学场与水动力场示踪模拟耦合的矿井涌(突)水水源判别[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4482-4494.  
ZENG Yifan, MEI Aoshuang, WU Qiang, et al. Source discrimination of mine water in flow or intrush using hydrochemical filed and hydrodynamic filed tracer simulation coupling[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4482-4494.
- [5] 仵拔云, 彭 捷, 向茂西, 等. 榆神府矿区保水采煤受保护萨拉乌苏组含水层研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(5): 984-990.  
WU Boyun, PENG Jie, XIANG Maoxi, et al. Research on Salawusu formation aquifer protected by water preserving mining in Yushenfu mining area[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2018, 35(5): 984-990.
- [6] 彭 捷, 李 成, 向茂西, 等. 榆神府区采动对潜水含水层的影响及其环境效应[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(2): 156-162.  
PENG Jie, LI Cheng, XIANG Maoxi, et al. Influence of coal mining on phreatic aquifer and its environmental effects in Yulin - Shenmu - Fugu Area[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2): 156-162.

- [7] PAN Weidong, JIANG Peng, LI Boyang, *et al.* The spatial evolution law and water inrush mechanism of mining-induced overburden in shallow and Short Coal Seam Group[J]. *Sustainability*, 2022, 14(9): 5320.
- [8] 李涛, 李文平, 常金源, 等. 陕北浅埋煤层开采隔水土层渗透性变化特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 127-131, 137. LI Tao, LI Wenping, CHANG Jinyuan, *et al.* Permeability features of water-resistant clay layer in Northern Shaanxi Province while shallowly buried coal mining[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2011, 28(1): 127-131, 137.
- [9] 张杰, 何义峰, 罗南洪, 等. 浅埋煤层群重复采动覆岩运移及裂隙演化规律研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(3): 58-65. ZHANG Jie, HE Yifeng, LUO Nanhong, *et al.* Research on overburden movement and fracture evolution of repeated mining in shallow coal seams group[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(3): 58-65.
- [10] 王双明, 范立民, 黄庆享, 等. 基于生态水位保护的陕北煤炭开采条件分区[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(3): 81-83. WANG Shuangming, FAN Limin, HUANG Qingxiang, *et al.* Northern Shaanxi coal based on ecological water level protection mining conditions zone[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2010, 37(3): 81-83.
- [11] 王双明, 段中会, 马丽, 等. 西部煤炭绿色开发地质保障技术研究现状与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(2): 1-6. WANG Shuangming, DUAN Zhonghui, MA Li, *et al.* Research status and future trends of geological assurance technology for coal green development in Western China[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(2): 1-6.
- [12] 范立民, 孙魁, 李成, 等. 榆神矿区煤矿防治水的几点思考[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 182-188. FAN Limin, SUN Kui, LI Cheng, *et al.* Thoughts on mine water control and treatment in Yushen mining area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 182-188.
- [13] 范立民, 孙强, 马立强, 等. 论保水采煤技术体系[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 196-204. FAN Limin, SUN Qiang, MA Liqiang, *et al.* Technological system of water-conserving coal mining[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 196-204.
- [14] 许延春, 杜明泽, 李江华, 等. 水压作用下防砂安全煤岩柱失稳机理及留设方法[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 328-334. XU Yanchun, DU Mingze, LI Jianghua, *et al.* Instability mechanism and design method of coal and rock pillar under water pressure[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(2): 328-334.
- [15] 崔广心. 深土冻土力学: 冻土力学发展的新领域[J]. 冰川冻土, 1998(2): 1-4. CUI Guangxin. Mechanics of Frozen Soil for Deep Alluvium: A New Field of Frozen Soil Mechanics[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998(2): 1-4.
- [16] 刘世奇. 厚煤层开采覆岩破坏规律及粘土隔水层采动失稳机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016: 66-76. LIU Shiqi. The law of the overburden failure in thick coal seam mining and instability criterion of the clay aquiclude under the influence of mining[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2016: 66-76.
- [17] 黄庆享. 浅埋煤层覆岩隔水性及保水开采分类[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 3622-3627. HUANG Qingxiang. Impermeability of overburden rock in shallow buried coal seam and classification of water conservation mining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(S2): 3622-3627.
- [18] 张杰, 杨涛, 索永录, 等. 基于隔水土层失稳模型的顶板突水致灾预测研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(10): 2718-2724. ZHANG Jie, YANG Tao, SUO Yonglu, *et al.* Roof water-inrush disaster forecast based on the model of aquiclude instability[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(10): 2718-2724.
- [19] 张杰, 杨涛, 田云鹏, 等. 采动及渗流作用下隔水土层破坏规律研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 219-224. ZHANG Jie, YANG Tao, TIAN Yunpeng, *et al.* Experimental test for destruction law of aquiclude under action of mining and seepage[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(1): 219-224.
- [20] 王文学, 隋旺华, 董青红. 应力恢复对采动裂隙岩体渗透性演化的影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1031-1038. WANG Wenxue, SUI Wanghua, DONG Qinghong. Influence of cover stress re-establishment on the permeability evolution of the mining-induced fractures[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(6): 1031-1038.
- [21] JU Jinfeng, LI Quansheng, XU Jialin, *et al.* Self-healing effect of water-conducting fractures due to water-rock interactions in undermined rock strata and its mechanisms[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment: the official journal of the IAEG*, 2020, 79(2): 287-297.
- [22] 王晓振, 许家林, 吴玉华, 等. 松散承压含水层下重复采动对覆岩破碎特征的影响研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 437-443. WANG Xiaozhen, XU Jialin, WU Yuhua, *et al.* The influence of repeated mining on failure characteristic of overburden strata under unconsolidated confined aquifer[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2017, 34(3): 437-443.
- [23] 张永双, 曲永新. 硬土—软岩的厘定及其判别分类[J]. 地质科技情报, 2000, 19(1): 77-80. ZHANG Yongshuang, QU Yongxin. Definition of hard soil-soft rock and its discrimination and classification[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2000, 19(1): 77-80.
- [24] 崔广心. 论深厚表土层中确定地下结构物外载的基础理论: 深土力学[J]. 煤炭学报, 1999, 24(2): 13-16. CUI Guangxin. The basic theory for analyzing loads on underground structure in deep alluvium-mechanics of deep soil[J]. *Journal of China Coal Society*, 1999, 24(2): 13-16.
- [25] 张云, 曹胜根, 来兴平, 等. 短壁块段式采煤覆岩导水裂隙发育力学特性分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 551-560. ZHANG Yun, CAO Shenggen, LAI Xingping, *et al.* Analysis on the mechanical properties of water-conducting fractures development during the shortwall block mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S2): 551-560.
- [26] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2016: 39-41.
- [27] 李涛. 陕北煤炭大规模开采含隔水层结构变异及水资源动态研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012: 56-74. LI Tao. Study on structural variation and water resource dynamics of aquifers for large-scale coal mining in northern Shaanxi[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012: 56-74.