

超大采高综采新近系红土层采动隔水性监测及响应特征

宋业杰^{1,2,3}, 鞠文君^{1,2,3}, 张玉军^{1,2,3}, 华照来⁴, 尹希文^{1,2,3}, 胡皓宇^{1,2,3}, 刘前进^{1,2}

(1. 中煤科工开采研究院有限公司 安全与生态环境研究分院, 北京 100013; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013; 3. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013; 4. 陕西陕煤曹家滩矿业有限公司, 陕西 榆林 719000)

摘要: 新近系红土的采动隔水性能是关系到超大采高综采工作面安全开采和浅层地下水保护的关键要素。综合超大采高工作面红土层赋存结构探查、工程地质特性测试、原位渗透性试验、采动隔水性及采动响应全周期监测等多种研究方法探测结果, 研究了曹家滩煤矿 122104 超大采高工作面覆岩红土赋存规律、岩性结构及天然状态阻隔水性能, 实测了超大采高综采过程红土层内采动应力显现及变形发展过程, 探究了采动过程红土层隔水性能演化规律, 揭示了红土层采动响应特征。结果表明: ① 红土钙质结核存在导致土层力学强度降低, 且易受扰动影响致使透水率增大; 红土层矿物组分中含有较高黏土矿物, 遇水具有膨胀性和变形特性。② 分段注水实验结果显示工作面推进时, 红土层一直保持有超过 30 m 的稳定隔水区; 萨拉乌苏组含水层水位长期动态监测结果表明采后钻孔水位缓慢下降逐渐保持稳定, 开采未直接波及第四系松散含水层, 红土层有效隔绝第四系地下水向下渗流; 钻孔窥视结果显示红土层下部地层沉积稳定, 完整性好, 原生裂隙不发育, 隔水性良好。③ 建立了隔水层采动响应监测系统, 实现了采动全过程红土层全空间变形、沉降量的实时在线监测。监测结果显示在工作面推进过程中, 位移曲线呈现出滞后性和非线性特征, 红土层出现不连续变形; 采动过程中红土层中出现泥盖效应, 采后应变恢复裂隙弥合, 隔水能力增强。④ 122104 工作面土岩厚度比 1:2, 在工作面推进过程中红土层横向、垂向上呈现出分区采动响应特征。横向可分为“采动弱响应区”、“采动强响应区”和“采后弥合区”, 纵向上可分为“上部非稳定隔水带”、“中部稳定隔水带”和“下部采动破坏带”, 红土层横向延长土体采动响应时间, 纵向保持红土层深部存在一段稳定的隔水区, 响应滞后与稳定隔水层的特征是保证红土层具有稳定隔水性能的关键因素。

关键词: 超大采高; 新近系红土层; 隔水性能; 裂隙弥合; 采动响应

中图分类号: TD745 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)04-2005-15

Water-proof property monitoring and response characteristics of Neogene red soil layer during super-high mining fully mechanized

SONG Yejie^{1,2,3}, JU Wenjun^{1,2,3}, ZHANG Yujun^{1,2,3}, HUA Zhaolai⁴, YIN Xiwen^{1,2,3}, HU Haoyu^{1,2,3}, LIU Qianjin^{1,2}

(1. Branch of Safety and Ecological Environment, CCTEG coal mining research institute, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and Design Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. Coal Mining Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;
4. Shaanxi Shaanmei Caojiata Mining Co., Ltd., Yulin 719000, China)

收稿日期: 2025-01-10 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 陈思成 DOI: 10.13225/j.cnki.jecs.2025.0048

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52174079); 天地科技股份有限公司资助项目 (2024-TD-ZD019)

作者简介: 宋业杰 (1985—), 男, 安徽旌德人, 副研究员, 博士研究生。E-mail: 18610076698@163.com

引用格式: 宋业杰, 鞠文君, 张玉军, 等. 超大采高综采新近系红土层采动隔水性监测及响应特征[J]. 煤炭学报, 2025, 50(4): 2005-2019.

SONG Yejie, JU Wenjun, ZHANG Yujun, et al. Water-proof property monitoring and response characteristics of Neogene red soil layer during super-high mining fully mechanized[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(4): 2005-2019.



移动阅读

Abstract: The mining water-proof performance of Neogene red soil is a critical factor for the safe extraction of super large mining height fully mechanized faces and the protection of shallow ground water. The results of multiple research methods, such as exploration of the occurrence structure of red soil layer, the test of engineering geological characteristics, the in-situ permeability test, the detection of mining water insulation and the full-cycle monitoring of mining response in the working face with super large mining height, The occurrence law, lithology structure and natural state water insulating effect of red soil in 122104 working face of Caojiatan Mine were studied. The mining stress appearance and deformation development process in red soil layer during fully mechanized mining with super large mining height were measured. The evolution law of water insulating performance of red soil layer during mining process was explored, and the mining response characteristics of red soil layer were revealed. The results show that: ① The red soil strength decreases when there are calcareous nodules, and the permeability tends to increase due to disturbances. The mineral composition of the red soil layer contains a high proportion of clay minerals, which exhibit expansion and deformation characteristics when exposed to water. ② The segmented water injection experiment shows that the red soil layer has maintained a stable water-resisting area of more than 30 m during the advancement of the working face. The long-term dynamic monitoring results of the aquifer water level of the Salawusu Formation show that the borehole water level slowly decreases and gradually remains stable. The mining has no directly affect the Quaternary loose aquifer, and the red soil layer effectively isolates the Quaternary groundwater from flowing downward; the results of borehole peeping show that the lower part of the red soil layer is stable, the integrity is good, the primary cracks are not developed, and the water insulation is good. ③ The mining response monitoring system of the impermeable layer is established, and the real-time online monitoring of the whole space deformation and settlement of red soil layer in the whole process of mining is realized. The monitoring results show that in the process of working face advancing, the displacement curve presents hysteresis and nonlinear characteristics, and the red soil layer appears discontinuous deformation. During the mining process, the result shows that the mud cover effect appears in the red soil layer, the post-mining strain recovery cracks are closing, and the water insulation capacity is enhanced. ④ The ratio of soil-rock thickness 122104 working face is 1 : 2, and the red soil layer shows the characteristics of zonal mining response in the horizontal and vertical directions during the advancing process of working face. Horizontally, it can be divided into "mining weak response area", "mining strong response area" and "post-mining closure area". Vertically, it can be divided into "upper unstable water-proof zone", "middle stable water-proof zone" and "lower mining failure zone". The red soil layer extends the mining response time of the soil horizontally, and maintains a stable water-proof area in the deep part of the red soil layer vertically. The characteristics of the response lag and the stable water-proof layer are the critical factor to ensure the stable water-proof performance of the red soil layer.

Key words: super-high mining; Neogene red soil layer; water-proof performance; cracks closing; mining response

0 引言

榆神矿区位于生态环境脆弱的陕北干旱半干旱地区,区内煤炭资源禀赋优良,单层最大厚度达12.5 m,矿区总面积约5 500 km²,探明煤炭储量为301亿t,是西部地区一个成长型矿区,区内逐年增长的煤炭产量为我国能源保供提供了重要支撑。面对工业生产对煤炭资源需求的逐年增加,特厚煤层高效规模化开采技术发展迅速,10 m超大采高一次全厚开采技术已在曹家滩煤矿成功应用。煤层采高增大,使覆岩受应力扰动加剧,驱动导水裂隙带发育高度上升,对生态环境影响不可避免^[1]。榆神矿区煤炭资源埋藏浅,生态环境脆弱,煤炭开采活动主要集中在埋深300 m以浅

的区域,持续进行煤炭开采活动不可避免引起含水层释水和区域生态环境退化。位于基岩与第四系松散层之间的新近系红土层是榆神矿区广泛分布的区域重要隔水层,对顶板水害防治和浅层地下水保护具有重要的屏障作用^[2-3],马雄德等^[4-8]针对榆神矿区红土层在保水开采中的作用开展了大量卓有成效的研究。

业内学者认识到新近系红土层对保水开采的重要意义,王双明等^[9-10]提出榆神府矿区科学开采问题的关键就是确保采动后隔水层的稳定性,即红土层的采动隔水性。张玉军等^[11]发现浅埋煤层“沙土基型”覆岩结构条件下,覆岩(土)破坏发育高度和特征产生变异,连续黏土层为防治矿井突水和实现保水采煤提

供了条件。范立民、蒋泽泉等^[12-17]发现土层结构疏松,黏土矿物含量高,使裂隙易于迅速闭合,形成土层屏蔽层,使浅层萨拉乌苏组地下水不至于渗透到矿井中,达到保水采煤的目的。李文平等^[18-20]研究认为离石黄土和三趾马红土共同组成的黏土层空间分布连续性、厚度、天然及采动后渗透系数变化等性质对实现保水采煤意义重大,开展了隔水层工程地质性质测试,并对保水采煤的工程地质条件进行了类型划分。曾一凡等^[21-22]研究了榆神矿区红土沉积厚度的分布规律,并探讨与红土阻水性能相关的微观工程特性和控制因素,阐述了薄弱区红土阻水性能对区域煤炭资源开发的意义。缪协兴等^[23]提出水源与工作面之间存在有厚表土层等较厚软弱隔水层时不易发生突水灾害,隔水关键层位置判别,结构稳定性判别对保水开采至关重要。

相关学者对新近系红土层的区域分布特征和工程地质特性进行了较为深入的研究。赵兵朝等^[24]研究发现蒙脱石膨胀是红土裂隙弥合的根本原因,红土膨胀率随蒙脱石含量增长呈线性增大,裂隙弥合能力随蒙脱石含量增长不断增强。王守玉等^[25]对新近系红土岩石学特征进行了研究,发现红土颗粒度配级良好,黏土矿物含量高降低土体渗透性,但红土内微裂隙发育及地下水活动会降低红土的强度。李涛等^[26]研究了浅埋煤层开采前后关键隔水黏土层渗透系数变化特征,结果显示拉张区黏土层下部的保德红土处于整体下沉带附加应力使其产生塑性变形,渗透性变小,有利于保水采煤。刘治国等^[27-29]研究了厚黏土层下煤层开采覆岩破坏形成的泥盖效应特征,发现微小裂隙进入到黏土层,由于黏土矿物良好的膨胀性,使裂隙会在采动影响的发生和发展过程中自行闭合,同时泥盖层受载后亦易于密实,从而降低导水裂隙带的发育高度。杨玉茹等^[30-31]研究了新近系红土微观结果对土层渗透性的影响。

针对薄基岩和红土隔水层薄弱区,国内学者开始了新近系红土薄弱区加固再造方向的研究。李文平等^[32]对N₂红土不同程度采动破裂前后及其采后应力恢复蠕变的隔水性能变化特征进行了深入研究分析,并从其地质结构组成、水-土相互作用及其流变特性方面,解释了隔水性自然恢复机理。曾一凡等^[21]研究了榆神矿区红土沉积厚度的分布规律,计算了非完全阻水的红土薄弱区临界厚度,通过多源数据融合,得到榆神矿区红土阻水性能的分区。黄庆享等^[33]发现隔水层土体膨胀性产生的“裂隙弥合”现象可减缓“下行裂隙”的发展,并基于黏土的渗透性和膨胀性建立了黏土隔水层“下行裂隙”模型,给出了裂隙弥合判

据,为分析裂隙弥合提供了依据。

随着单次采出厚度的增加,红土层维持其隔水性能对于保护浅层地下水、保持区域生态稳定的重要性愈发凸显,研究厚煤层开采过程红土层隔水性能变化及采动响应特征是实现优质煤炭资源安全高效回收和浅层地下水保护双重要求的关键。本文以红土层工程地质性质原位测试,红土层采前、采中和采后的隔水性能探测和全周期监测结果,分析采动过程中红土层运动模式,阐释了超大采高综采条件下新近系红土层的采动隔水性能演化规律,揭示了采动影响下红土层分区段响应特征。实测结果表明122104工作面未受到第四系含水层的影响,红土层起到有效隔水作用,为榆神矿区厚煤层开采的顶板水害防治及保水开采提供了一定的理论依据。

1 矿井地质特征分析

1.1 矿区概况

曹家滩煤矿与郭家滩煤矿、小保当一号煤矿、大保当井田、杭来湾煤矿、金鸡滩煤矿和榆树湾煤矿相邻,如图1所示。

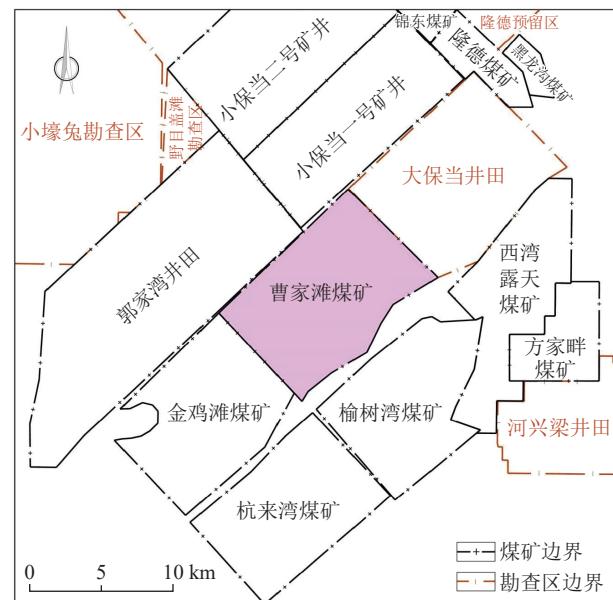


图1 曹家滩煤矿井田四邻关系

Fig.1 Caojitan Mine field relationship

结合表1曹家滩煤矿及周边矿井2⁻²煤层工作面开采厚度、土层厚度及涌水量数据发现:正常采高矿井(如杭来湾煤矿、榆树湾煤矿)采高5 m左右,红土层是否缺失对工作面涌水量影响较小,超大采高矿井(如金鸡滩煤矿)若红土层缺失,基岩风化带顶界面红土层有开“天窗”现象,涌水量明显增加,第四系松散含水层水将进入井下采区,单面涌水量甚至能够达到700~1 200 m³/h。曹家滩煤矿红土层厚度较厚,工作

面涌水量 $100\sim340 \text{ m}^3/\text{h}$ 。由上述数据, 红土层的“动态隔水屏障”对于超大采高工作面的作用显著。超大采高下, 岩层受开采扰动影响, 矿压显现加剧, 导水裂

隙带发育高度显著增加,开采过程中,红土层能否有效阻隔第四系含水层流动,防止工作面涌水量异常增大将是矿区开采顶板水害防治的关键。

表 1 曹家滩煤矿及周边矿井 2⁻² 煤层涌水量情况统计

Table 1 Statistics of water inflow of coal seams 2^{-2} in Caojiatan Mine and surrounding mines

矿井	采高/m	开采工艺	基岩厚度/m	土层厚度/m	埋深/m	工作面正常/最大涌水量/(m ³ ·h ⁻¹)	矿井正常/最大涌水量/(m ³ ·h ⁻¹)
杭来湾煤矿	5	分层综采	180	红土层缺失, 黄土层厚度约40 m	115~268	180/400	1 100/1 200
榆树湾煤矿	4.5	分层综采	150	红土层厚度平均70 m, 黄土层厚度平均20 m	250	280/290	800/900
小保当一号井	5.65	综采	249	红土层厚度50.28~90.15 m, 平均71.60 m	302	147/156	620/632
金鸡滩煤矿	8.6~11.6	综放	190~200	红土层缺失, 黄土层厚度20 m	240	420/1 200	1 950/2 080
隆德煤矿	4.7	综采	37.7~100.2	红土层厚度1.00~13.73 m	145	100/110	860/950
曹家滩煤矿	8.24	大采高综采	172.48	风积沙厚度7.34 m, 黄土层缺失, 红土层厚度0~130 m, 风化岩厚度4.54 m	277.02	230/340	1 399/1 648

1.2 覆岩岩性及结构特征

图 2 为 1220104 工作面覆岩地层综合地质柱状

图。122104 综采工作面回采 2^{-2} 煤层, 倾向长度 300 m, 走向长度 5 977 m, 煤层赋存较稳定, 埋深 268~356 m,



图 2 122104 工作面综合地质柱状

Fig.2 Comprehensive geological histogram of 122104 working face

煤厚6.20~12.20 m。

为研究曹家滩煤矿122104超大采高工作面覆岩岩性及结构特征,进行了工作面覆岩结构专项勘查,施工了6个勘查钻孔(BK1~BK6)。

122104工作面范围内第四系松散砂层厚度约2~22 m,离石组黄土层厚度约0~36 m,新近系红土层厚度约75~125 m;2⁻²煤基岩柱厚度约163~218 m。

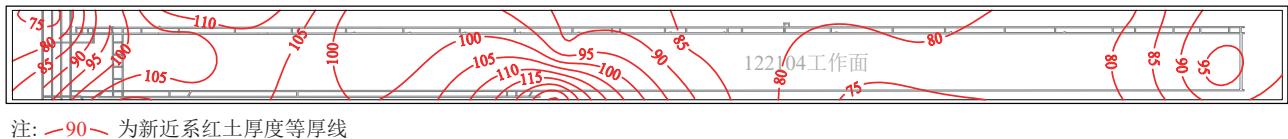


图3 122104工作面范围新近系红土厚度分布

Fig.3 Thickness distribution of Neogene red soil layer of 122104 working face

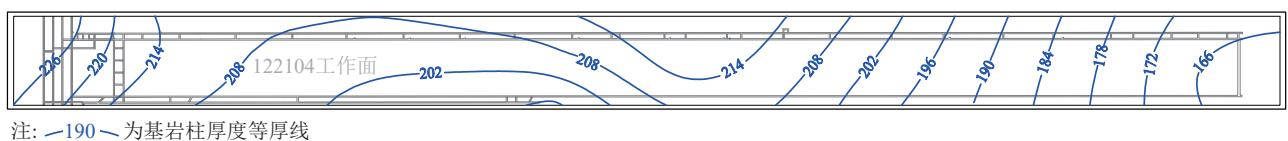


图4 122104工作面范围基岩柱厚度分布

Fig.4 Thickness distribution of bedrock column of 122104 working face

2 红土层基础特性测试

2.1 力学性质及水理性质分析

本次试验所用试样均取自曹家滩煤矿122104工作面。如图5a所示,以BK3钻孔不同埋深下红土样品为例,对比力学性质和水理性质实验结果分析垂向深度变化时红土层力学性质及水理性质的变化规律。

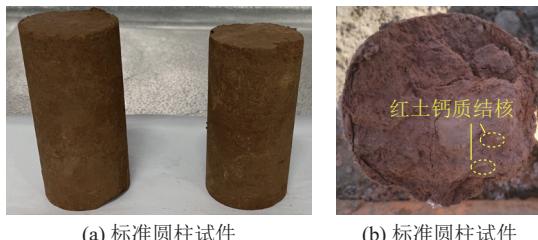


图5 红土层试件及试验结果

Fig.5 Specimen and test results of red soil

如图6a所示,122104工作面范围内红土层单轴抗压强度0.57~1.459 MPa,平均1.038 MPa,土体具有一定的固结性和强度。取样深度70 m左右时,抗压强度和弹模降低,主要归因于局部地层中存在钙质结核和砾石,如图5b所示。取样深度80~120 m时,弹模从0.1 GPa增加到0.25 GPa,土体刚度增加,抗破坏能力增强。红土层全段在垂直方向上力学性质较稳定,抗压强度在1 MPa左右,泊松比在0.35左右,若地层含钙质结核强度将会降低。

如图6b所示,红土层全段塑性指数为6.1~16.4,

工作面范围内基岩柱一般厚度在170 m左右,新生界松散层厚度小于基岩柱厚度。

图3、图4为122104工作面范围内覆岩红土层以及基岩层赋存条件的等值线图。综合来看,122104工作面范围内,开切眼附近基岩柱厚度最小。同时,工作面初采区域也是黄土和红土层厚度相对较薄的区域,红土层厚度小于100 m。

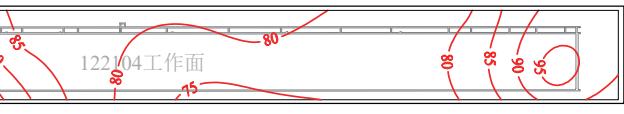


图6a 标准圆柱试件

Fig.6a Standard cylindrical test pieces

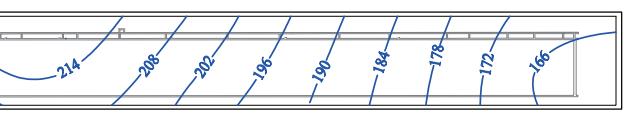


图6b 标准圆柱试件

Fig.6b Standard cylindrical test piece

变化范围较大,但基本大于10。表明红土层稳定性较好,虽然存在一定的波动,但整体性均匀。

如图6c所示,红土层全段颗粒成分构成中,砾粒含量1.1%~28.7%,砂粒含量8.2%~51%,粉粒含量34.7%~77%,黏粒含量9.7%~15%之间。保德组红土的颗粒组成不均匀。大部分红土样本的黏粒含量超过10%,平均值达到14%。这一特征表明,红土的主要成分是具有较好塑性的亚黏土和黏土,使红土具有良好的隔水性能。随埋深增加,粉粒的含量逐渐降低,大直径颗粒的含量增加,导致土体的颗粒级配发生变化,影响土层孔隙率和密实度。

如图6d所示,红土矿物主要成分是石英,保证了红土层的强度。取样深度70 m左右时,红土中出现钙质结核,方解石含量增多。红土层全段黏土矿物含量变化小,平均值在15%左右,黏土矿物成分主要为伊蒙混层。

图7为红土钙质结核内部结构的扫描电镜分析图,红土内部结构复杂多样,颗粒胶结性良好。红土颗粒内部,能够清晰观察到晶粒状方解石、黏土矿物以及晶间孔隙等微观结构。黏土矿物使本区保德组红土遇水具有膨胀性和变形特性,产生裂隙后遇水可弥合再生隔水,方解石矿物含量增多,钙质结核的存在也导致塑性指数变低。

综上,曹家滩煤矿122104工作面红土层全段红土颗粒含量以及矿物成分变化较小,但内部存在钙质

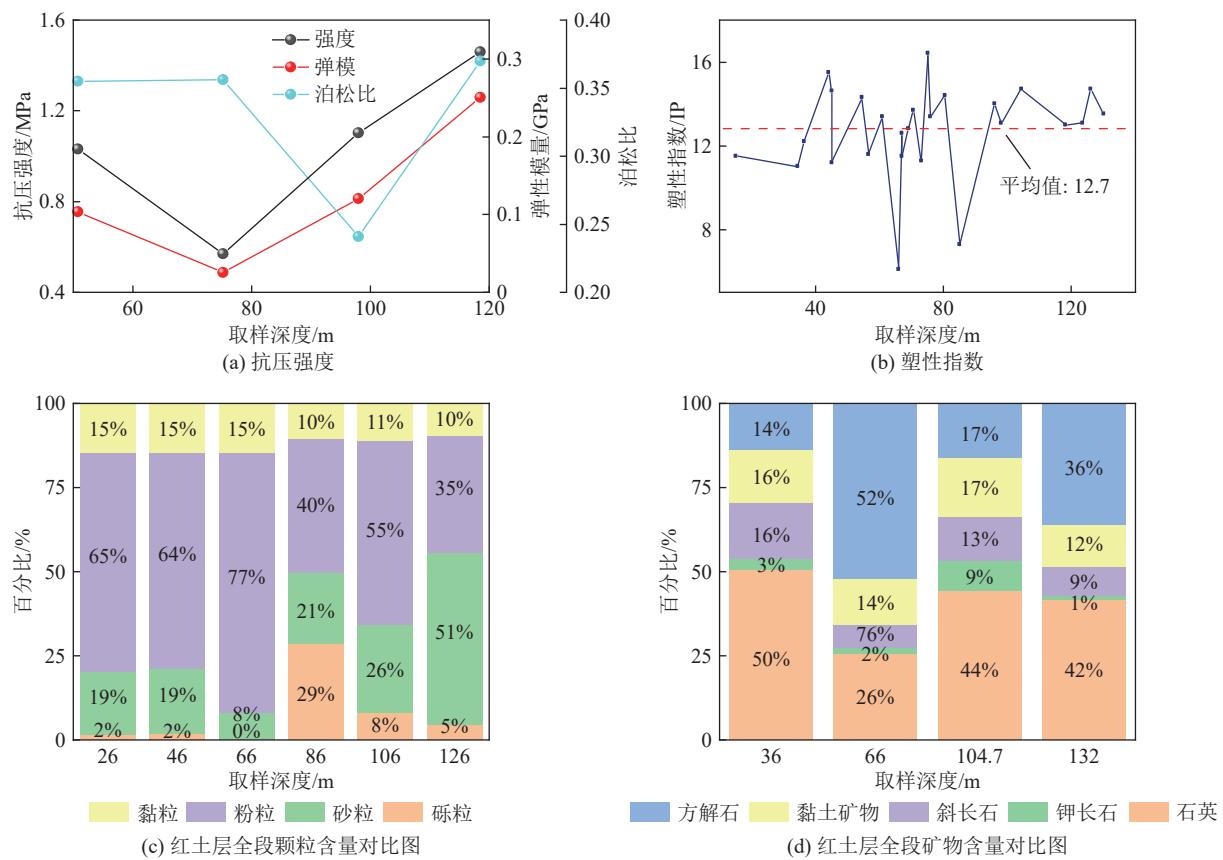


图 6 红土层全段力学参数对比

Fig.6 Comparison of mechanical parameters of the whole horizon of red soil

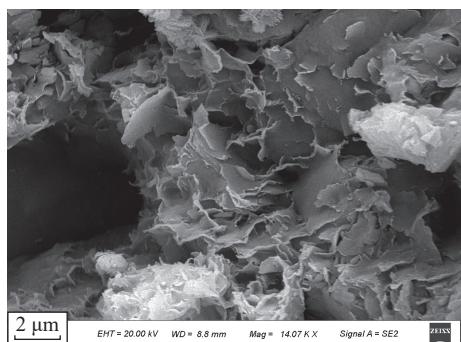
土体整体结构的影响,红土层颗粒含量中砾粒占比增大时会导致岩层孔隙率变大,渗透率增大。砾粒含量降低可以起到减少孔隙率,可提高土体的隔水性能。

2.2 原位渗透性测试原理及方案

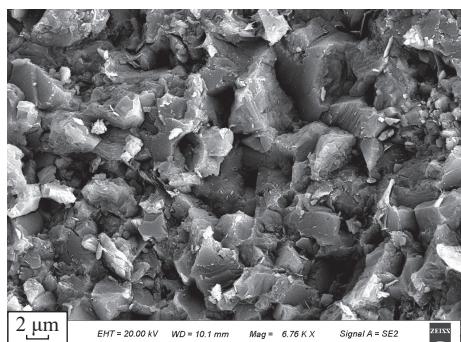
122104 工作面覆岩新近系红土层是实现保水开采的重要隔水层,红土层岩性赋存稳定性及渗透隔水性能对超大采高综采的水害防控尤为关键。分段注水试验^[34-35]广泛应用于测定土层渗透性能。本次勘查钻孔内采用自主开发设计的双端封堵原位渗透性测试仪,进行原位渗透性测试,测定上覆红土层的透水率以及地下水水位变化,以此判断红土层的隔水性能,如图 8 所示。

恒压注水试验压力采用双栓塞进行恒压注水试验,按照两级压力 P_1 、 P_2 进行恒压注水试验,各测试段的恒定注水压力 P_1 、 P_2 为 0.3 MPa、0.6 MPa。微调回水阀门使压力稳定在设计压力,每 2 min 记录一个流量,每一个压力阶段不少于 5 个数据,当连续 4 个流量达到 5 次计数的相对流量差不大于 10%,或绝对差不大于 1 L/min,即可进行下一级压力的试验。记录注水消耗量并进行土层原位透水率计算,分析地层的原位隔水性能。

透水率采用各阶段的压力值 P 和流量值 Q 计算:



(a) 伊利蒙混层



(b) 方解石

图 7 红土钙质结核 6760X 微观结构

Fig.7 Microstructure of red soil calcareous concretion 6760X

结核时土体强度降低,内部组分改变。受颗粒级配和

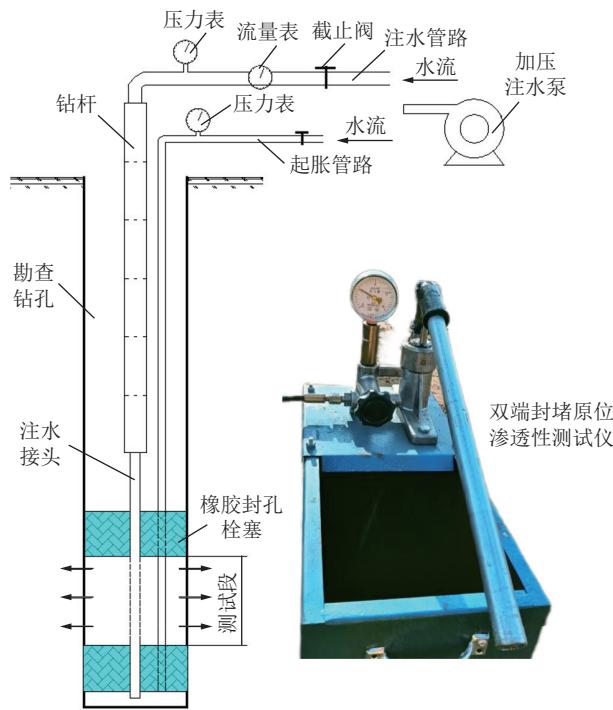


图 8 双端封堵原位渗透性恒压注水测试原理

Fig.8 Principle of constant pressure water injection test for in-situ permeability with double end plugging

$$q=Q/LP \quad (1)$$

式中: q 为试段的透水率, Lu; Q 为试段实测流量, L/min; L 为试段长度, m; P 为试段压力, MPa。

试段钻孔孔径为 133 mm。压力阶段: 分别为 0.3 MPa、0.6 MPa 2 个阶段。试段压力值采用安设在进水管的压力计测压, 试段压力计算公式为

$$P=P_p+P_z-P_s \quad (2)$$

式中: P 为试段压力, MPa; P_p 为压力计指示压力, MPa; P_z 为压力计中心至压力计算零线的水柱压力, MPa; P_s 为管路压力损失, m。

2.3 原位渗透性测试结果分析

在保证各分段封闭空间静水压差恒定的情况下, 对勘查钻孔开展红土层原位渗透性测试, 选择 0.3 MPa 和 0.6 MPa 2 个压力。

如图 9a 所示, BK3 钻孔在孔深 25~105 m 段共开展 16 个试段恒压注水试验。BK3 钻孔红土层 25~65 m 之间各压力下透水率偏大, 65~105 m 各压力下透水率在 0.03~0.19 Lu 之间, 随注水压力的增大透水率基本保持稳定。如图 9b 所示, BK5 钻孔在孔深 55~135 m 段, 开展了 16 个试段恒压注水试验。BK5 钻孔红土层 55~90 m 之间各压力下透水率偏大, 且存在不稳定变化, 分析原因为钻进期间钻杆甩动造成上部红土层尤其是存在钙质结核较硬质红土层段孔壁不完整, 栓塞膨胀后与孔壁之间存在透水空隙;

90~135 m 各压力下透水率在 0.04~0.11 Lu 之间, 随注水压力的增大透水率略有增大。

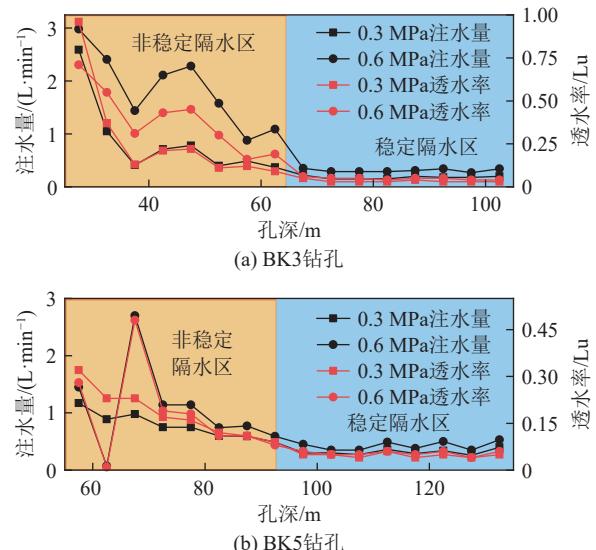


图 9 钻孔注水试验曲线

Fig.9 Water injection test curve diagram of borehole

以上实验数据表明: 红土层透水性能随着孔深增加而发生变化, 由红土层的物理性质、矿物组成、孔隙结构等因素共同影响。孔深较浅时红土层透水率较大, 此部分区域属于非稳定隔水区。随着孔深增加, 红土层深部均出现了大于 30 m 的稳定低透水率区, 形成稳定隔水区, 此部分红土层性质完整, 受采动影响时也能起到有效隔水作用。

3 采动响应全周期监测

上文通过测试红土层的透水率研究了其隔水性能, 发现受钻进影响红土层存在钙质结核会增大透水率, 但由于土层厚, 下部厚稳定隔水土层也能起到有效隔水效果。煤层采动过程中, 扰动影响更大, 下文通过对工作面采前、采中、采后全周期进行红土层隔水性能的研究。如图 10 所示, 红土层采动响应全周期监测以一孔多用为原则, 在工作面地表布设钻孔后, 采用原位渗透性恒压注水试验、钻孔冲洗液漏失量观测、孔内裂隙高清成像及变形沉降光纤在线监测等手

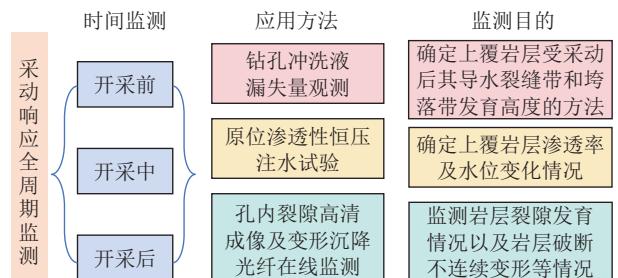


图 10 采动响应全周期监测

Fig.10 Full cycle monitoring of mining response

段,监测分析覆岩透水率及水位变化,岩层裂隙发育以及岩层破断不连续变形等情况。

为进行下一步研究,在122104工作面布置了5

个采动响应监测孔:2个采中动态监测孔CD01、CD02(相距1 m),3个采后“两带”观测钻孔CH01、CH02、CH03,孔位如图11所示。



图11 122104工作面覆岩破坏钻孔设计位置

Fig.11 Design location of overlying rock failure borehole of 122104 working face

图12为122104工作面土层采动响应钻孔设计剖面图。土层采动响应钻孔设计深度为红土层底界面以上5 m终孔;采后“两带”观测钻孔设计深度为进入工作面煤层底板5 m,实际终孔深度根据钻孔施工情况,当孔内岩层破断、卡钻现象较多时,可在揭露垮落带顶点后视孔内情况终止钻进。

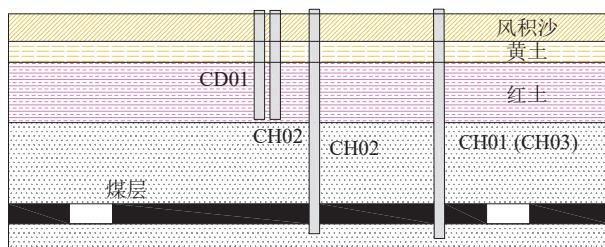


图12 采动响应钻孔设计剖面图

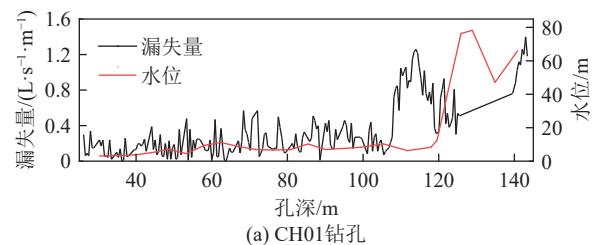
Fig.12 Design profile diagram of mining response borehole

3.1 钻孔冲洗液漏失量观测

如图13a为CH01钻孔冲洗液漏失量和水位观测结果。CH01钻孔冲洗液漏失量观测从32.45 m开始,至孔深151.75 m冲洗液循环终止,钻孔水位观测从32.45 m开始,至153.42 m孔内测不到水位。分析可知,CH01钻孔钻进初期冲洗液消耗量普遍较小,孔深32.45~113.89 m段钻孔冲洗液消耗量一般为0~0.78 L/(s·m),平均为0.184 L/(s·m),钻孔水位深度在3.51~9.98 m间小幅波动,说明该时段未受到明显的采动破坏性影响。钻进至114.14 m时,钻孔冲洗液消耗量突然大幅增加,在119.47 m提钻后孔内水位深度降至15.74 m,钻探取心揭露了多处高角度裂隙,裂隙面无充填物,表现为明显的采动裂隙发育特征。此后在钻进114.14~151.30 m时,钻孔冲洗液消耗量虽呈波动性变化,但整体消耗量偏大,钻进至151.75 m后冲洗液循环中断,至孔深153.42 m提钻后观测不到水位。

如图13b为CH02钻孔冲洗液漏失量和水位观测

结果。CH02钻孔冲洗液漏失量观测从26.14 m开始,至孔深143.42 m冲洗液循环中断,钻孔水位观测从30.32 m开始,至146.88 m孔内测不到水位。分析可知,CH02钻孔钻进初期冲洗液消耗量普遍较小,孔深26.14~125.16 m段钻孔冲洗液消耗量一般为0.01~0.5 L/(s·m),平均为0.197 L/(s·m),钻孔水位深度在3.11~11.15 m间小幅波动,说明该时段未受到明显的采动破坏性影响。当钻进至125.16 m时,钻孔冲洗液消耗量突然大幅增加,在125.87 m提钻后孔内水位深度降至74.27 m,具有明显的采动裂隙发育特征。此后钻孔冲洗液消耗量呈波动性变化,整体消耗量偏大,钻进至143.87 m后冲洗液循环中断,至孔深146.88 m提钻后观测不到水位。



(a) CH01钻孔

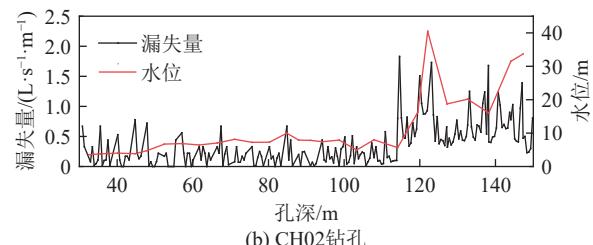


图13 钻孔冲洗液漏失量曲线

Fig.13 Permeability curve of borehole

综上,2钻孔在孔深110 m左右出现冲洗液消耗大幅增加、孔内水位突降,表明红土层与基岩层界面受采动裂隙影响,岩土层渗透性增加。而孔深110 m上部,漏失量较小,表明土层在深部区域较完整,渗透率低,起到隔水作用。

3.2 原位渗透性恒压注水试验观测

如图14所示,CD01钻孔在工作面开采过程中开展了恒压注水试验,选取注水压力为0.3 MPa、0.6 MPa。在距离工作面200 m位置时,土层受采动影响小,红土层全段透水率基本保持稳定;随工作面推进,红土层浅部透水率开始增加,岩体之间膨胀压缩,微裂隙扩张。在70~100 m之间透水率变化小,说明此时红土层虽受采动影响但下部仍有超过30 m的稳定隔水带;工作面推进超过钻孔100 m时稳定隔水带仍保持稳定,采动过程中红土层有良好的隔水作用。同时,发现在30~70 m之间土层透水率出现局部降低,说明红土层中出现泥盖效应^[28],土体采后恢复,裂隙弥合。

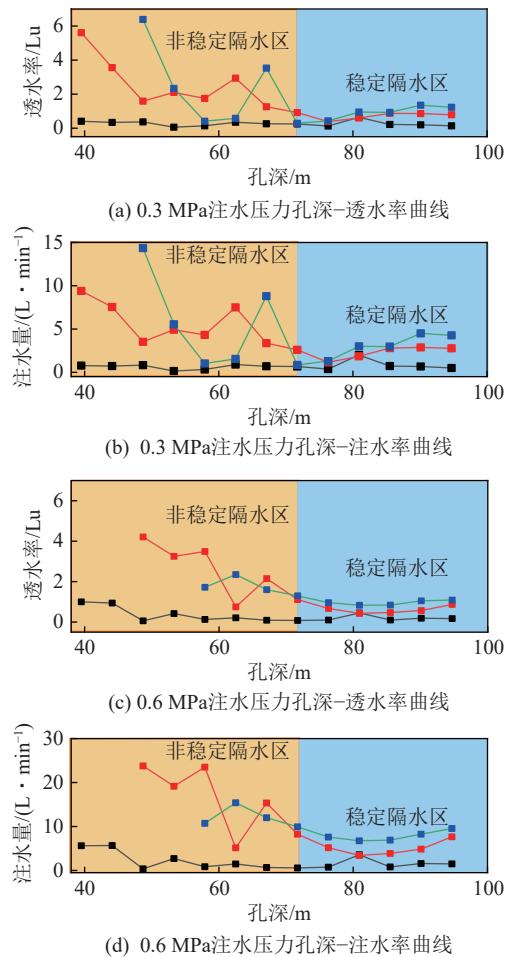


图14 CD01钻孔采动过程中注水试验曲线

Fig.14 Water injection test curve diagram during CD01 drilling and mining

3.3 光纤监测技术

图15为红土层采动响应监测站及密集分布式光纤监测原理示意图,在CD02钻孔建立了隔水层采动响应监测系统,对采动全过程对红土层全空间变形、

沉降量的实时在线监测,测点距离1 m,共设置99个。

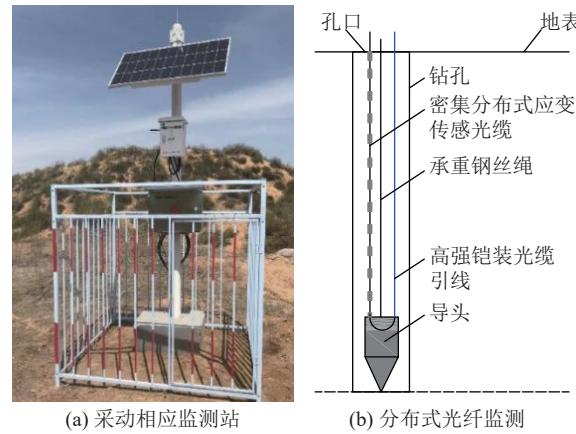


图15 红土层采动响应监测站及密集分布式光纤监测原理示意

Fig.15 Schematic diagram of red soil mining response monitoring station and dense distributed fiber optic monitoring

图16为采动响应监测数据,工作面位置距钻孔距离对红土层扰动情况有明显影响,4月9日监测初期工作面推采距钻孔大约150 m,至4月11日17:00红土层位移量小,波动不明显,此时不受应力影响,处于稳定状态。

至4月12日红土层受采动影响进入第2状态,采动弱响应阶段,此阶段红土层处于小变形阶段,测点位移变化波动大,且位移变化速率不稳定,表明受工作面采动应力影响,红土底部约20 m范围经历了“开裂-弥合-扩展-弥合”的过程。5月6日工作面推采过钻孔100 m后红土层光纤拉应变突增,历时30 h后,埋深90米位置下降30 mm;5月7日17:00红土层进入第3阶段,采动强响应阶段,距孔口位移开始徐速增长,应变率振幅增大。5月9日红土层进入位移急增期,应变率突增,至23:00土层内部最大相对沉降达500 mm,红土层底部15 m范围发生剧烈破断致使光缆拉断,钻孔变形严重,裂隙探测工作无法继续进行。

图17是99个监测点绘制的红土层全段相对沉降量变化云图。5月6日—5月9日红土层各段位移不连续变化,红土层底部应力集中引发裂隙扩展,导致底部30 m的位置大变形发生。在工作面推进超过钻孔后,下沉曲线呈现出滞后性和非线性特征,表明采动活动在较长时间内持续影响红土层的变形。

钻孔探测与光纤监测结果表明:工作面推采至距钻孔较近位置时,红土层岩体之间压缩膨胀裂隙扩展导致渗透率增加。继续推进时,裂隙扩展并伴随较大的位移变化,说明红土层应变滞后应力变形的特征,且采动活动在较长时间内持续影响红土层的变形。

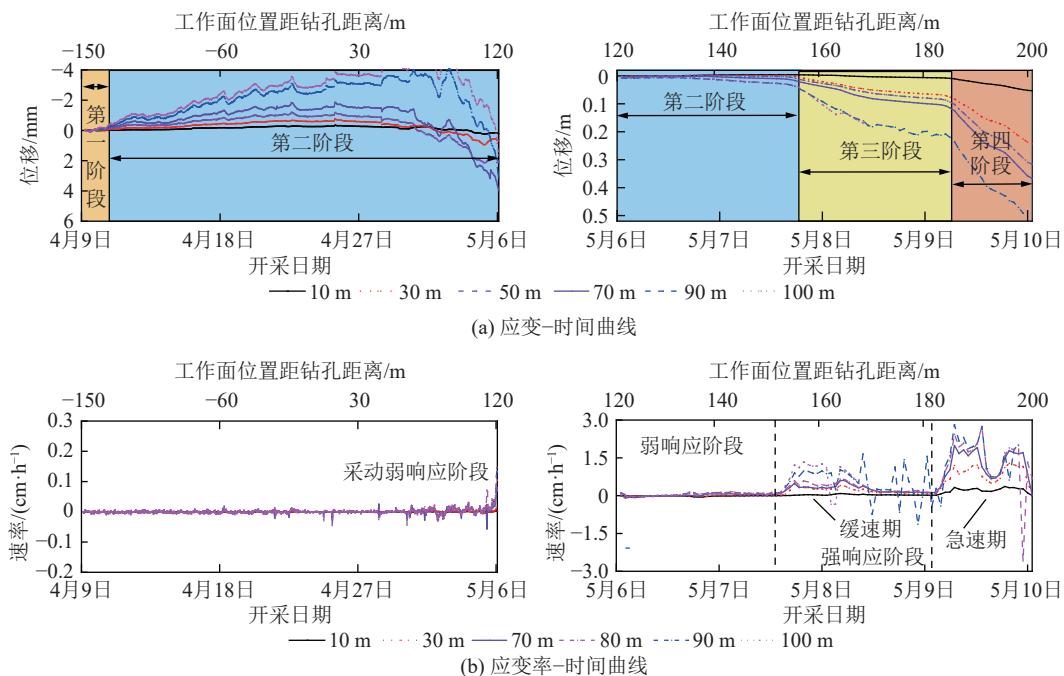


图 16 CD02 钻孔红土层采动响应监测曲线

Fig.16 Monitoring curve of mining response of red soil layer in CD02 borehole

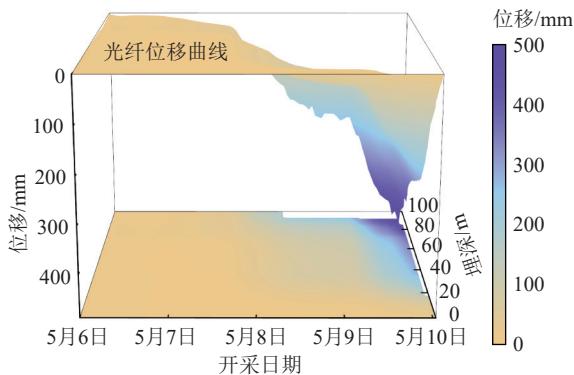


图 17 CD02 钻孔红土层全段相对沉降量变化云图

Fig.17 Cloud map of relative settlement variation between strata of red soil in CD02 borehole

4 红土采动响应特征

4.1 土层应力显现

4.1.1 红土层变形机理

4月1日—5月10日122014工作面推进过程中微震事件分布特征以及光纤监测变形量如图18所示。

工作面开采阶段微震事件分布在煤层上方100 m左右,上方红土层未监测到大能量微震事件。4月10日光纤监测变形量小,表明岩层处于稳定状态;4月10日—4月30日工作面推进超200 m,CD02钻孔下方岩层活动开采活跃,红土层受采动影响,变形量开始增加,但变形量小,红土层处于弱响应阶段;5月1日—5月9日工作面推进超过钻孔200 m,监测到CD02钻孔下方基岩层分布微震事件能量小频率大,

说明此时岩层运动活跃,红土层进入采动强响应阶段,光纤监测变形量迅速增加。

如图19所示,根据以上研究结果发现,基岩层较厚,红土层薄的情况下,受采动应力影响程度不同,红土层横向、垂向上呈现出明显的分区分带响应特征。采动弱响应区边界超前工作面135 m,滞后工作面170 m,此阶段受应力影响,土体经历断裂,弥合的过程,但红土层变形量小,整体性质稳定,未发生大范围垮落现象;进入采动强响应区后,红土层受拉伸作用,发生倾斜,变形量迅速增加,上部地表附近红土层发生开裂,渗透率增加隔水性能减弱,持续到红土层钙质结核段,中部裂隙闭合进入稳定隔水带;随着开采距离增大,采空区后方红土逐渐压实,进入采后弥合区,渗透率降低隔水性能增强。

以上结果说明红土层横向延长土体采动响应时间,延缓采动裂隙传播,阻隔裂隙持续向上扩展,纵向保持红土层存在一段稳定的隔水区,有效隔绝地下水渗流,避免了第四系松散含水层的水分向下渗透,确保了地下水资源的有效保护。

4.1.2 实测以及模拟结果分析

据钻孔揭露显示,122104工作面煤层第四系含水层底界距离207~342 m,工作面开采后第四系含水层底界以下的完整隔水岩土层厚度分布图如图20所示,工作面范围内第四系含水层底部完整隔水岩土层厚度为45~105 m,均大于3倍采厚。以CH02、CH03钻孔为例,CH02钻孔煤层采高按7.4 m计,基岩层厚

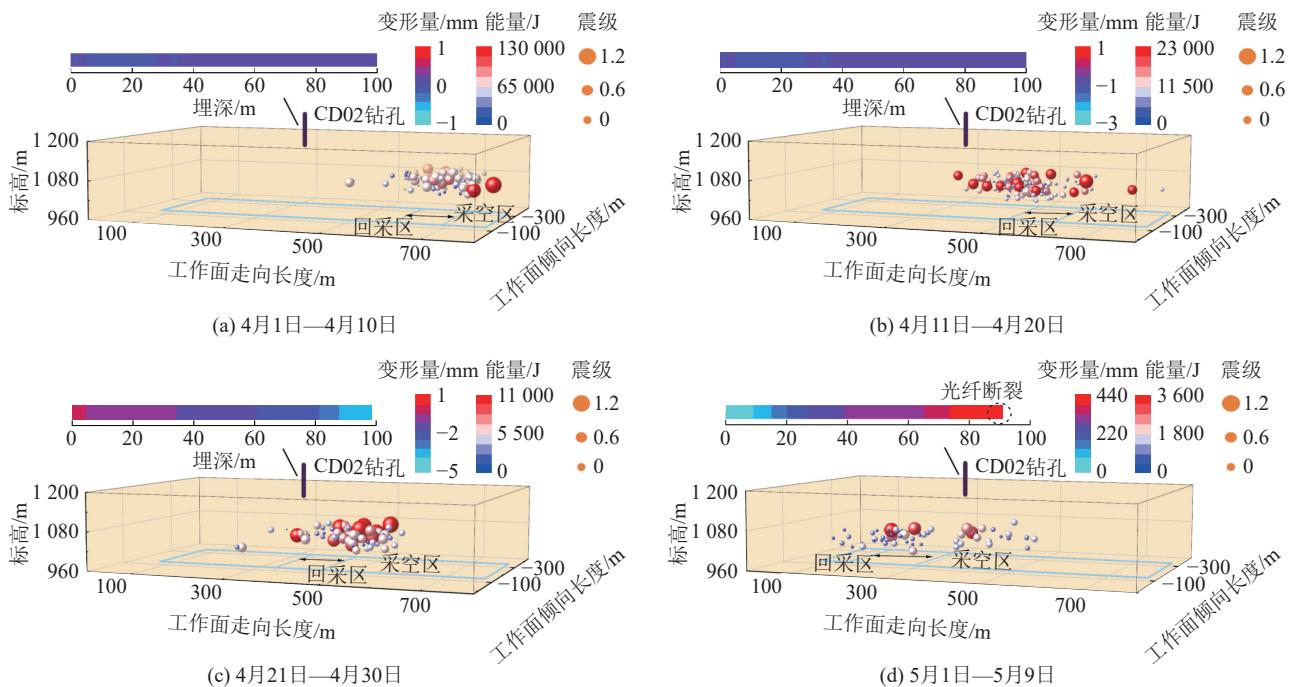


图 18 微震事件分布特征与光纤变形量

Fig.18 Distribution characteristics of micro-seismic events and fiber deformation

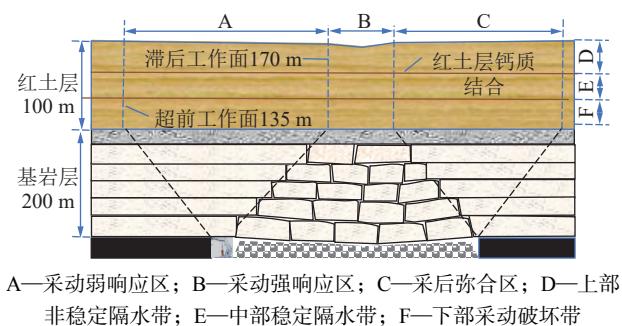


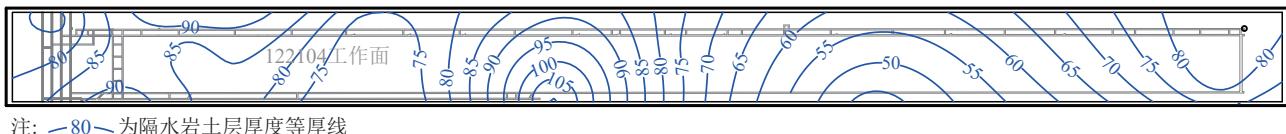
图 19 红土层采动响应分区特征

Fig.19 Mining response zoning characteristics of red soil layer

度 188.91 m, 红土层厚度 82.85 m, 采后导水裂隙带发育高度 166.99 m, 裂采比为 22.56。CH03 钻孔煤层采高按 9.1 m 计, 基岩层厚度 218.83 m, 红土层厚度

83.2 m, 采后导水裂隙带发育高度 188.25 m, 裂采比为 20.69, 导水裂隙带未进入红土层, 红土层完整。满足对第四系松散含水层留设防水安全煤岩柱, 因此第四系松散含水层水不会对工作面安全产生威胁。

在 122104 工作面回采期间, 对萨拉乌苏组含水层 BK2 水文长观孔水位进行了动态监测, 如图 21 所示。BK2 水文孔距离开切眼 602 m, 在工作面回采前初始水位 +1 234.155 m。自 2023-09-20 工作面开始回采, 推进 109 m 后采动裂隙初次导通基岩风化带, BK2 孔水位陡降 4.2 m, 其后, 受采动影响生产过程中含水层正常日水位降幅 0.1~0.5 m, 但在顶板矿压强烈显现期间, 含水层水位均表现出较大幅度下降。至 2024-03-30 含水层水位标高 +1 196.6 m, 累计下降 37.555 m。



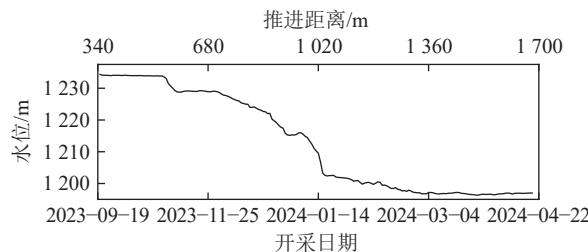


图 21 BK2 长观孔水位变化曲线

Fig.21 Variation curve of water level of BK2 long viewing hole
历弹性-塑性-损伤-断裂的过程, 单元本构选取理想
弹塑性的摩尔库伦本构模型, 界面本构选取考虑应变
软化的摩尔库伦本构模型^[36]。

如图 22 所示, 工作面推进至 500 m 时, 覆岩垮落带高度达到 58 m, 垮采比 5.8, 采空区上方基岩层发生垮落。导水裂隙带最大高度 210 m, 裂采比为 21, 模拟结果与 CH02、CH03 钻孔实测结果相近。表明红土层在覆岩垮落过程中起到了阻隔作用, 且裂隙基本只发育到红土层下部, 未穿透红土层继续向上扩展。红土层有效地抑制了裂隙的发育和扩展, 限制了上覆岩层的破坏程度。

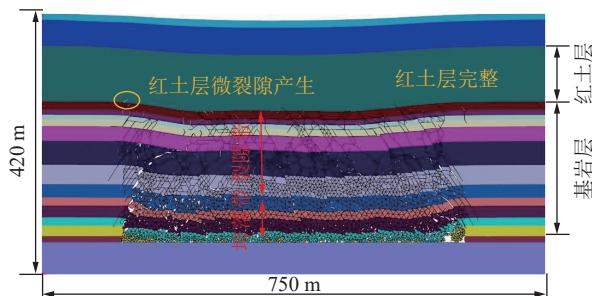


图 22 工作面推进 500 m 覆岩破断形态

Fig.22 Overburden fracture morphology of working face

advancing 500 m

4.2 采后弥合特性

红土层的裂隙弥合过程可以分为 2 个主要部分, 一是裂隙两端土体蠕变恢复, 由于裂隙两端土体受力发生蠕变, 土体应变增大; 二是裂隙上方土层中, 水砂颗粒通过流动作用进入裂隙, 水砂颗粒的运动以及其黏性起到了封堵和充填裂隙的作用, 促进裂隙的弥合。其共同作用使红土层中的裂隙在一定时间和条件下得以自然闭合, 恢复土体的整体性和稳定性。如图 23a 所示, 土体两端受力时发生剪切错动, 达到强度极限时发生断裂。在未发生断裂前, 土层 A, B 两点位于同一位置, 发生断裂后, 块体①发生滑落, A 点下沉, 记 A 点的坐标为 (u_2, v_2) , B 点的坐标为 (u_1, v_1) , A 点和 B 点的初始距离为 L_0 。

由于土体的剪胀性, 土体颗粒受剪切力开始变形。如图 23b 所示, 在块体①中取一基本单元, 记颗粒直

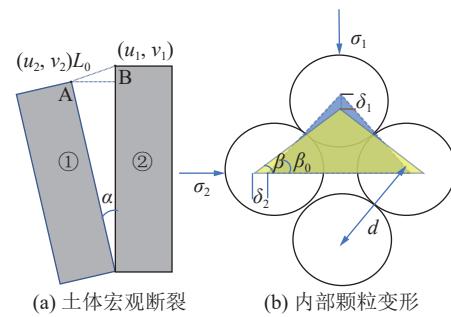


图 23 红土层采动变形机理

Fig.23 Mining deformation mechanism of red soil layer
径距离为 d , 由几何关系, 可得颗粒直径的变形量为

$$\begin{cases} \delta_1 = -2d(\sin \beta - \sin \beta_0) \\ \delta_2 = d(\cos \beta - \cos \beta_0) \end{cases} \quad (3)$$

式中: β_0 为初始颗粒夹角, $(^\circ)$; β 为变形后颗粒夹角, $(^\circ)$; δ_1, δ_2 为不同方向颗粒变形量, m。

假设同一平面颗粒数为 n , 则 A 点受应力影响总变形量为

$$\begin{cases} u = \sum_{i=1}^n d(\cos \beta_i - \cos \beta_0) \\ v = -\sum_{i=1}^n 2d(\sin \beta_i - \sin \beta_0) \end{cases} \quad (4)$$

式中: u, v 为断裂点不同方向总变形量, m; i 为平面内颗粒个数; β_i 为第 i 个颗粒夹角, $(^\circ)$ 。

A 点实际位移量为

$$\begin{cases} u_A = u_2 + \sum_{i=1}^n d(\cos \beta_i - \cos \beta_0) \\ v_A = v_2 - \sum_{i=1}^n 2d(\sin \beta_i - \sin \beta_0) \end{cases} \quad (5)$$

B 点实际位移量为

$$\begin{cases} u_B = u_1 - \sum_{i=1}^n d(\cos \beta_i - \cos \beta_0) \\ v_B = v_1 - \sum_{i=1}^n 2d(\sin \beta_i - \sin \beta_0) \end{cases} \quad (6)$$

A 点和 B 点的距离 L 为

$$L = \sqrt{(v_a - v_b)^2 + (u_a - u_b)^2} = \sqrt{L_0^2 - 4(u_1 - u_2 - \sum_{i=1}^n d(\cos \beta_i - \cos \beta_0)) \sum_{i=1}^n d(\cos \beta_i - \cos \beta_0)} \quad (7)$$

式中: L_0 为裂隙断裂点初始距离, m; L 为颗粒变形后裂隙断裂点距离, m。

记 $M = \sum_{i=1}^n d(\cos \beta_i - \cos \beta_0)$, 则 A 点与 B 点实际变形量 L 可写为

$$L = \sqrt{L_0^2 - 4(u_1 - u_2 - M)M} \quad (8)$$

土体断裂后,应力传递主要通过颗粒接触点连接,接触点孔隙具有较大的变形空间。当土体受力后,孔隙收缩或扩张,进而影响体积。土体的应力传递与变形特征也决定了相比于岩体,红土层受应力影响损伤程度小,对于地下水的保护十分重要。

图24为CD01钻孔采前原生裂隙高清成像探测结果,红土层40 m以浅地层有较多钙质结核,级配均匀性差,孔壁有凸起,50 m以下红土层均匀性良好,孔壁光滑致密,无裂隙,无孔洞和掉块,进一步表明红土层下部地层沉积稳定,完整性好,原生裂隙不发育,隔水性良好。

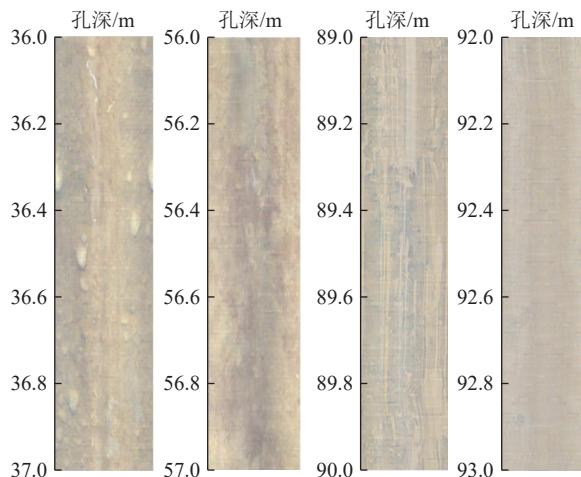


图24 CD01钻孔红土层采前原生裂隙探测图

Fig.24 Detection map of primary fracture of red soil in CD01 borehole

图25在工作面开采接近CD01探测钻孔时,红土层下部超前推进位置50 m时形成了竖向裂隙,主要

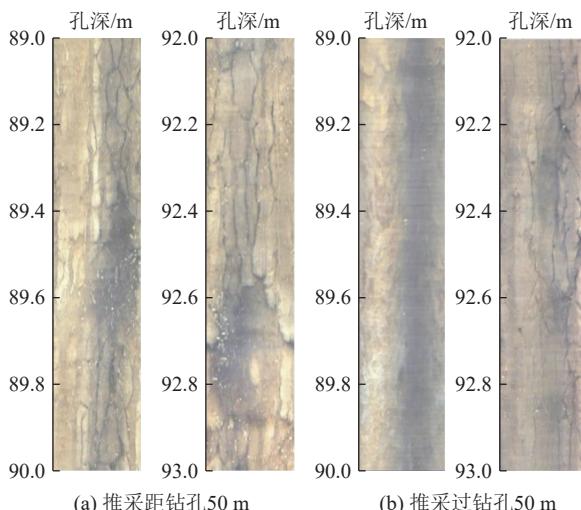


图25 CD01钻孔红土层推采过程中裂隙探测图

Fig.25 Detection map of fracture in red soil during the mining process of CD01 borehole

集中在90 m以下层位;推采过50 m后裂隙闭合。说明工作面超前采动应力在红土层底部造成扰动,但推采超过50 m时88 m以上红土层内裂隙发育迹象不明显,表明了土体的自愈能力。下部红土层应变促进了裂隙闭合,使得整体的隔水功能得以维持。

5 结 论

1) 122104工作面范围内红土层局部受钙质结核和夹砾影响,强度降低且颗粒成分组分改变;红土钙质结核方解石矿物含量增多,塑性指数降低,渗透性增强。全段红土样本黏粒含量超过10%,平均值达到14%,使红土层具有良好的隔水性能。

2) 受红土层物理性质、矿物组成、孔隙结构等因素共同影响,红土层全段隔水性能呈纵向分区特征,红土层浅部透水率较大。随埋深增加,红土层深部均有大于30 m的稳定低透水率区,形成稳定隔水带,受采动影响时也能起到有效隔水作用。

3) 红土层在覆岩垮落过程中起到了阻隔作用,采后应变恢复裂隙弥合有效地抑制了裂隙扩展,限制了上覆岩层的破坏程度。萨拉乌苏组含水层水位监测结果显示采后钻孔水位缓慢下降,逐渐保持稳定,采后未直接波及第四系松散含水层,红土层有效阻隔了第四系含水层的渗流补给。

4) 提出了红土层采动隔水性全周期监测方案,揭示了采动影响下红土层全段响应特征,红土层横向采动响应时间延长,应变滞后应力,采动活动在较长时间内持续影响红土层变形。纵向始终保持红土层深部存在一段稳定的隔水区,变形滞后与隔水性能的特征对于土岩厚度比值较大的矿区实现保水开采至关重要。

参考文献(References):

- [1] 张玉军,申晨辉,张志巍,等.我国厚及特厚煤层高强度开采导水裂隙带发育高度区域分布规律[J].煤炭科学技术,2022,50(5):38-48.
ZHANG Yujun, SHEN Chenhui, ZHANG Zhiwei, et al. Regional distribution law of water-conducting fractured zone height in high-strength mining of thick and extra-thick coal seams in China[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 38-48.
- [2] 赵春虎,靳德武,李智学,等.陕北榆神矿区煤层开采顶板涌水规律分析[J].煤炭学报,2021,46(2): 523-533.
ZHAO Chunhu, JIN Dewu, LI Zhixue, et al. Analysis of overlying aquifer water inrush above mining seam in Yushen mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 523-533.
- [3] 王双明.鄂尔多斯盆地聚煤规律及煤炭资源评价[M].北京:煤炭工业出版社,1996.
- [4] 马雄德,祁浩,郭亮亮,等.榆神矿区地下水埋深上限阈值[J].煤炭

- 学报, 2021, 46(7): 2370–2378.
- MA Xiongde, QI Hao, GUO Liangliang, et al. Upper groundwater level threshold in Yushen coal mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2370–2378.
- [5] 张玉军, 宋业态, 樊振丽, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗系煤田保水开采技术与应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 159–168.
- ZHANG Yujun, SONG, Yeqie, FAN Zhenli, et al. Technology and application of water-preserving mining in Jurassic coalfield in Ordos Basin[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 159–168.
- [6] 马立强, 余伊何, SPEARING A J S. 保水采煤方法及其适用性分区: 以榆神矿区为例 [J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1079–1085.
- MA Liqiang, YU Yihe, SPEARING A J S. Water conservation mining method and its applicability: A case study in Yushen mining area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1079–1085.
- [7] 李智学, 李明培, 申小龙, 等. 榆神矿区基岩顶面土层缺失机理分析及其防治水意义[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(6): 102–107.
- LI Zhixue, LI Mingpei, SHEN Xiaolong, et al. Genetic analysis of the bedrock top surface soil layer deletion and its significance for water prevention in Yushen mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(6): 102–107.
- [8] 王佟, 蒋泽泉. 榆神府区矿井水文地质条件分类研究[J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(1): 21–24.
- WANG Tong, JIANG Zequan. Yulin-Shenmu-Fugu mining area mine hydrogeological condition categorizing[J]. Coal Geology of China, 2011, 23(1): 21–24.
- [9] 王双明, 黄庆享, 范立民, 等. 生态脆弱矿区含(隔)水层特征及保水开采分区研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 7–14.
- WANG Shuangming, HUANG Qingxiang, FAN Limin, et al. Study on overburden aquiclude and water protection mining regionazation in the ecological fragile mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 7–14.
- [10] 王双明, 范立民, 黄庆享, 等. 榆神矿区煤水地质条件及保水开采[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(1): 1–6.
- WANG Shuangming, FAN Limin, HUANG Qingxiang, et al. Coal water geological conditions and water conserving mining for Yushen coal mine area[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, 30(1): 1–6.
- [11] 张玉军, 李凤明. 浅埋煤层高强度开采覆岩(土)破坏演化及溃沙控制技术[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S1): 44–52.
- ZHANG Yujun, LI Fengming. Failure characteristics of overburden rock (soil) and sand control technology in high strength mining of shallow coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S1): 44–52.
- [12] 范立民, 蒋泽泉, 许开仓. 榆神矿区强松散含水层下采煤隔水岩组特性的研究[J]. 中国煤田地质, 2003, 15(4): 25–26, 30.
- FAN Limin, JIANG Zequan, XU Kaicang. Research on coal mining under competent loose aquifer and properties of aquiclude in Yushen mining area[J]. Coal Geology of China, 2003, 15(4): 25–26, 30.
- [13] 范立民. 神木北部矿区浅部煤层开采地质条件[J]. 煤田地质与勘探, 1993, 21(3): 39–42.
- FAN Limin. The recovery condition of shallow coal seams in northern Shenmu coal mine area[J]. Coal Geology & Exploration, 1993, 21(3): 39–42.
- [14] 范立民, 蒋泽泉. 榆神矿区资源赋存特征及保水采煤问题探讨[J]. 西部探矿工程, 2003, 15(1): 73–74.
- FAN Limin, JIANG Zequan. Discussion on resource occurrence characteristics and water-saving coal mining in Yushen mining area[J]. West-China Exploration Engineering, 2003, 15(1): 73–74.
- [15] 范立民. 论保水采煤问题[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(5): 50–53.
- FAN Limin. Discussing on coal mining under water-containing condition[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(5): 50–53.
- [16] 蒋泽泉, 王建文, 王宏科. 浅埋煤层关键隔水层隔水性能及采动影响变化[J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(4): 26–31.
- JIANG Zequan, WANG Jianwen, WANG Hongke. Impermeability and mining impacts of key aquifuges for shallowly buried coal seams[J]. Coal Geology of China, 2011, 23(4): 26–31.
- [17] 蒋泽泉, 王建文, 王宏科. 采动条件下黏土隔水层的渗透性变化 [C]. 煤矿水害防治技术研究: 陕西省煤炭学会学术年会, 2013.
- [18] 李文平, 叶贵钧, 张莱, 等. 陕北榆神府矿区保水采煤工程地质条件研究[J]. 煤炭学报, 2000(5): 449–454.
- LI Wenping, YE Guijun, ZHANG Lai, et al. Study on the engineering geological conditions of protected water resources during coal mining action Yu-shen-fu Mining Area in the Worth Shaanxi Province[J]. Journal of China Coal Society, 2000(5): 449–454.
- [19] 陈伟, 李文平, 刘强强, 等. 陕北非饱和红土土: 水特征曲线试验研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(2): 341–347.
- CHEN Wei, LI Wenping, LIU Qiangqiang, et al. Experimental research on soil-water characteristics curves of unsaturated laterite in northern Shaanxi province[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(2): 341–347.
- [20] LIU S L, LI W P, WANG Q Q, et al. Investigation on mining-induced fractured zone height developed in different layers above Jurassic coal seam in western China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(2): 30.
- [21] 曾一凡, 包函, 武强, 等. 新近系保德组沉积薄弱区红土阻水性能及其资源开发意义[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(10): 62–71.
- ZENG Yifan, BAO Han, WU Qiang, et al. Water resistance of laterite in the sedimentary weak area of Neogene Baode Formation and its significance for resource development[J]. China Industrial Economics, 2023, 51(10): 62–71.
- [22] ZENG Y F, PANG Z Z, WU Q, et al. Roof water disaster in coal mining in ecologically fragile mining areas: Formation mechanism and prevention and control measures[M]. Cham: Springer International Publishing, 2023.
- [23] 缪协兴, 浦海, 白海波. 隔水关键层原理及其在保水采煤中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 1–4.
- MIAO Xiexing, PU Hai, BAI Haibo. Principle of water-resisting key strata and its application in water-preserved mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(1): 1–4.
- [24] 赵兵朝, 杨啸, 郭亚欣, 等. 蒙脱石含量对 N_2 红土层裂缝弥合的影响规律研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(8): 88–93.
- ZHAO Bingchao, YANG Xiao, GUO Yaxin, et al. Study on the influence of montmorillonite content on crack closing in N_2 laterite

- aquiclude[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(8): 88–93.
- [25] 王守玉. 陕北地区 N_2 红土岩石学特征及其工程地质意义[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- WANG Shouyu. Petrological characteristics of N_2 laterite in northern Shaanxi and its engineering geological significance[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [26] 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 & Safety Engineering*, 2011, 28(1): 127–131, 137.
- [27] 刘治国, 樊振丽, 张玉军, 等. 黏土隔水层抗采动能力试验研究[J]. *煤炭技术*, 2017, 36(12): 63–65.
- LIU Zhiguo, FAN Zhenli, ZHANG Yujun, et al. Experimental study of resistance to mining influence ability of clay aquiclude[J]. *Coal Technology*, 2017, 36(12): 63–65.
- [28] 樊振丽, 刘治国. 厚黏土层软弱覆岩采动破坏的泥盖效应[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(6): 1196–1204.
- FAN Zhenli, LIU Zhiguo. Mud cover effect of mining-induced failure of soft overburden in thick clay strata[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(6): 1196–1204.
- [29] LIU Z G, FAN Z L, ZHANG Y J. Fracture characteristics of overlying bedrock and clay aquiclude subjected to shallow coal seam mining[J]. *Mine Water and the Environment*, 2019, 38(1): 136–147.
- [30] 杨玉茹, 李文平, 王启庆. 上新世红土微观结构参数与渗透系数的变化关系研究[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(2): 153–160.
- YANG Yuru, LI Wenping, WANG Qiqing. A study of the relationship between the coefficient of permeability and microstructure of the Pliocene laterite[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 153–160.
- [31] YANG Y R, LI W P, WANG Q Q, et al. Experimental study on water-sand inrush characteristics and transport evolution in coal mines with N_2 laterite[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(4): 366.
- [32] 李文平, 王启庆, 李小琴. 隔水层再造: 西北保水采煤关键隔水层 N_2 红土工程地质研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(1): 88–97.
- LI Wenping, WANG Qiqing, LI Xiaoqin. Reconstruction of aquifuge: The engineering geological study of N_2 laterite located in key aquifuge concerning coal mining with water protection in northwest China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 88–97.
- [33] 黄庆享, 蔚保宁, 张文忠. 浅埋煤层黏土隔水层下行裂隙弥合研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2010, 27(1): 35–39.
- HUANG Qingxiang, WEI Baoning, ZHANG Wenzhong. Study of downward crack closing of clay aquiclude in shallowly buried coal seam[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2010, 27(1): 35–39.
- [34] SL345-2007 水利水电工程注水试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [35] 国家质量技术监督局、中华人民共和国建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [36] 张震. 多层厚硬顶板大采高综放工作面强动载矿压机理与控制研究[D]. 北京: 煤炭科学研究院, 2024.
- ZHANG Zhen. Study on the mechanism and control of strong dynamic load mine pressure in large mining height full-mechanized caving face with multiple thick and hard roof[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2024.