引文格式:.陈宇等:卫星观测约束下的地下燃空区时空演化数值模拟研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(8):1527-1541.DOI:10.13203/j.whugis20240407

Citation:CHEN Yu,CHEN Xinlong,SUO Zhihui,et al.Numerical Simulation Research on the Spatiotemporal Evolution of Underground Combustion-Affected Areas Constrained by Satellite Observations[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(8):1527-1541.DOI:10.13203/j.whugis20240407

卫星观测约束下的地下燃空区时空演化数值模拟研究

陈 宇[1,2] 陈鑫龙[1] 索之辉[1] 冯小军[3,4] 丁凯文[1] 郭广礼[1] 杜培军[5]

1 中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州,221116
2 中国矿业大学自然资源部国土环境与灾害监测重点实验室,江苏 徐州,221116
3 中国矿业大学安全工程学院,江苏 徐州,221116
4 中国矿业大学煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室,江苏 徐州,221116
5 南京大学地理与海洋科学学院,江苏 南京,210023

摘 要:地下煤火被称为“全球性灾难”,其燃烧不仅会造成煤炭资源的浪费,还会引发严重的环境污染和地质灾害问题。了解煤层燃烧所形成燃空区的形态及其时空演变特征是煤火灭火与灾害防治的基础,将卫星观测数据融入岩层移动数值模拟中,利用热红外遥感和时序合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)技术反演的地表温度和形变信息作为约束,结合岩层热传导理论与弹塑性力学理论,对地下燃空区三维温度场及其形态的时空演化进行模拟,并在中国宁夏汝箕沟红梁火区开展应用。结果表明,卫星观测数据可为数值模拟提供更准确的地表参数约束,空间上温度自煤层核心向外逐渐降低,时间上地表和各岩层温度均随煤层燃烧时间逐渐升高。反演中,当岩层弱化系数为0.18时,煤层顶板出现了联通的塑性区域,剖面呈K型,主体受剪切塑性变形影响严重;正演中,当时步达5 400时,地表最大沉降量达149.80 mm,剖面沉降呈波峰状。正、反演两种方法模拟的地下燃空区达到吻合,标准差为4.59 mm,表明该模型能合理地描述地下燃空区的三维形态及其演化特征。该研究为揭示地下燃空区时空演化规律提供了新的思路和科学依据,为地下煤火的有效治理提供了理论支撑。

关键词:地下煤火;燃空区;时空演变;数值模拟;时序InSAR;热红外遥感

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-11-31

DOI:10.13203/j.whugis20240407 **文章编号**:1671-8860(2025)08-1527-15

Numerical Simulation Research on the Spatiotemporal Evolution of Underground Combustion-Affected Areas Constrained by Satellite Observations

CHEN Yu[1,2] *CHEN Xinlong*[1] *SUO Zhihui*[1] *FENG Xiaojun*[3,4] *DING Kaiwen*[1] *GUO Guangli*[1] *DU Peijun*[5]

1 School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
2 Key Laboratory for Land Environment and Disaster Monitoring, Ministry of Natural Resource, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
3 School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
4 Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
5 School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: **Objectives**: Underground coal fires are regarded as a global disaster, as their combustion not only leads to the waste of coal resources, but also causes severe environmental pollution and geological hazards. Understanding the morphology and spatiotemporal evolution of the combustion-affected areas formed by coal seam fires is essential for effective fire suppression and disaster prevention. **Methods**: First, we inte-

基金项目:国家自然科学基金(42171312)。

第一作者:陈宇,博士,副教授,主要从事InSAR技术与应用和煤火区遥感识别研究。chenyu@cumt.edu.cn

grate satellite observation data into strata movement numerical simulations. Using surface temperature and deformation information derived from thermal infrared remote sensing and interferometric synthetic aperture radar (InSAR) as constraints, combined with thermodynamic and elastoplastic mechanics theories. Then we conducted a numerical simulation to investigate the spatiotemporal evolution of the three-dimensional temperature field and morphology of underground combustion-affected areas. The methodology was applied to the Hongliang fire area in Rujigou, Ningxia, China. **Results**: The results indicate that satellite observation data provide more accurate surface parameter constraints for numerical simulations. Spatially, the temperature decreases gradually from the coal seam core outward, while temporally, both surface and strata temperatures rise as coal seam combustion progresses. For instance, the time series of temperatures at three characteristic points ($Q1$, $Q2$, $Q3$) along the profile reveal that $Q1$'s temperature remains stable at approximately 18 ℃ during the first three months and then increases at an accelerating rate, reaching 27 ℃ after 12 months. At $Q2$, the temperature rises slowly during the first three months, followed by a linear increase to about 145 ℃. $Q3$ experiences a rapid temperature rise, with the rate of increase decelerating over time, reaching around 600 ℃ after one year. In the inversion process, as the strata weakening coefficient decreases from 1, temperatures above the coal seam rise due to combustion, leading to the formation and continuous expansion of a plastic zone. When the strata weakening coefficient is between 1 and 0.18, no connected plastic zones are observed. However, when the coefficient reaches 0.18, a connected plastic zone appears in the coal seam roof, displaying a K-shaped profile and being significantly impacted by shear plastic deformation. In the forward simulation, the subsidence zone takes on a funnel-shaped deformation pattern, with the magnitude of deformation decreasing outward from the center, which delineates the extent of combustion influence. As the time steps increase, surface subsidence progressively increases. At time step 5 400, the maximum surface subsidence reaches 149.80 mm, with the subsidence profile showing a peak pattern. The forward and inversion simulations of the underground combustion-affected areas align well, with a standard deviation of 4.59 mm, indicating that the model can accurately represent the three-dimensional morphology and evolutionary characteristics of the combustion-affected areas. **Conclusions**: This study provides a novel approach and scientific basis for uncovering the spatiotemporal evolution patterns of underground combustion-affected areas, offering theoretical support for the effective management of underground coal fires.

Key words: underground coal fire; combustion-affected areas; spatiotemporal evolution; numerical simulation; time-series InSAR; thermal infrared remote sensing

地下煤火通常由自然或人为因素诱发,并随着时间的推移逐渐扩大而形成一定规模的火灾。地下煤火的持续燃烧会产生一氧化碳、氮硫氧化物等有害气体和大量烟尘,严重破坏大气环境并加剧全球变暖,还会导致地表裂缝和沉降,给区域生态环境的健康可持续发展带来严峻挑战[1-2]。因此,煤火被称为没有地理界限的“全球性灾难”,世界上地下煤火约有一万点以上,有的已经延烧几百年甚至上千年,以中国、印度、美国、澳大利亚等这些煤炭储量丰富的国家和地区形势最为严峻[3]。据美国《外交政策》杂志2010年报道,中国煤火属于全球五大持续性生态灾难之一[4]。自然资源部印发的《2022年全国地质灾害防治工作要点》和应急管理部国家矿山安全监察局印发的《“十四五”矿山安全生产规划》均明确指出,“支持并推动煤火探测技术的创新和发展”“遴选煤田火灾精确探测与低成本治理技术”。可见,地下煤火的探测、监测与治理是避免煤炭资源浪费、减少区域环境污染、防治相关地质灾害的根本途径。

国内外学者就地下煤火区的探测监测开展了一系列研究工作,主要方法包括物探[5]、化探[6]、热探[7]、钻探[8]、遥感[9]等五类,其中前4种方法较为常用,但实地勘探会耗费大量人力、物力、财力,且对于偏远地区或火势较大区域难以实行。而遥感技术具有大面积同步观测、可溯源性及经济性等优势,近年来逐渐成为地下煤火探测的主流方法之一。煤火区遥感探测的基本原理是:基于遥感影像提取由地下煤火燃烧引起的各种地表异常响应特征,如地表温度、地表形变、

土壤湿度、植被覆盖、烧变岩、烟气浓度等,利用某个或多个组合异常特征区分火区与背景区,达到煤火区探测识别的目的。如文献[10]提出了一种改进的劈窗算法,提高了Jharia煤田地表温度的反演精度,显著改善了利用温度异常进行煤火区识别的效果;文献[11]利用航空高光谱影像对中国宁夏汝箕沟煤火区进行定量遥感探测,明确了可用于温度反演的热红外波段、拟合关系式和热异常对应辐射温度,分析了热扩散规律以及遥感探测热异常与地下煤火热异常的对应关系;文献[12]利用新小基线集(small baseline subset,SBAS)合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)干涉测量(interferometric SAR,InSAR)技术对印度Kusunda煤火区的地表形变进行监测,发现火区地面沉降与利用Landsat 8卫星影像反演的热异常以及现场实测数据在空间上有很好的吻合;文献[4]对煤层燃烧引起的地表异常现象进行了多源遥感监测,并构建了多参数联合约束的带通滤波煤火区识别方法,在中国新疆阜康火区的识别精度达91%;文献[13]提出了一种联合多时相热红外与SAR数据的煤火区识别方法,并构建了煤火比指数,用于定量评估煤火的严重程度及其变化情况;文献[14]联合SAR、多光谱、热红外、夜光4类遥感数据源,构建了一种3层改进的集成学习煤火区识别模型,并成功应用于中国新疆将军戈壁、将军庙、三道坝火区识别中,综合识别误判率低于20%。尽管基于遥感技术的地下煤火探测监测研究已经取得了可观进展,但这些研究也主要局限于地表层面。

在煤炭开采中,煤层被采出而留下的地下空洞及其周边受影响的岩层区域被定义为采空区[15]。由于采矿活动建立在完备的地质勘察及确切的开采规划之下,人们对采空区的形成及演化一般有明确的掌握。当前开采沉陷领域的研究主要集中在利用成熟的开采沉陷模型(如概率积分模型[16])对地表形变进行预测,进而指导地质灾害的防治。煤层的燃烧也会形成地下空洞且其围岩会发生开裂和移动,类比煤炭开采中采空区的定义,本文将由于煤层燃烧形成的地下空洞及周围受到影响发生移动的岩层区域定义为燃空区。了解燃空区形态及演化特征是煤火灭火与防治的前提和基础。不同于开采沉陷的规律性及对其研究的成熟性[17-20],地下煤层燃烧具有一定的随机性和复杂性,因此对燃空区形态特征及其演化规律的研究仍面临挑战。文献[21]根据采空区浮煤氧化自燃过程的主要影响因素建立了自燃采空区数学模型,成功模拟了自燃采空区发火的动态变化情况;文献[22]以中国内蒙古乌达煤田为研究区,利用原位温度映射和数值模拟方法,获得了地下煤火与周围热能释放传输之间的相互关系;文献[23]利用深度学习算法对探地雷达图像中的煤火特征目标进行识别,进而圈定煤火区域。上述研究为理解地下煤层燃烧机理及规律提供了一定的理论依据,但均受限于空间尺度,且鲜有将地表响应与地下模拟耦合,协同分析地下燃空区时空演化规律的研究。

本文将卫星观测数据与岩层移动模型进行集成,利用遥感技术反演的地表温度和地表形变数据作为约束,结合岩层热传导理论与弹塑性力学理论,对地下燃空区三维温度场及其形态的时空演化进行数值模拟,并在中国宁夏汝箕沟红梁火区开展应用研究。首先阐述地表参数主被动遥感反演方法、地下煤层燃烧三维温度场与燃空区形态模拟方法;然后介绍案例研究区地理与地质背景,分析地表监测与地下燃空区数值模拟结果,揭示地下燃空区时空演化规律;最后探讨模型的适用性及优化方向,以期为地下煤火灭火与治理提供科学依据。

1　地下燃空区时空演化数值模拟方法

地下燃空区时空演化数值模拟方法的技术路线如图1所示,主要包括基于主被动卫星观测数据的地表形变和地表温度信息提取,基于岩层热传导理论的地下煤层燃烧温度场模拟,以及基于弹塑性力学理论的地下燃空区时空演化模拟。

1.1　地表形变与地表温度遥感反演

1.1.1　基于DS-InSAR的地表形变提取

采用能获取高精度、高分辨率和大范围地表形变的时序InSAR技术提取由地下煤层燃烧引起的地表形变信息。火区地表多以植被稀少的裸地或戈壁覆盖为主,多为分布式散射体(distributed scatters,DS),因此为提取更多相干观测点,更全面地反映地表形变的时空特性,选用小基线集法构建干涉对网络,采用DS-InSAR技术提取地表形变信息,其核心流程如下[24]:

1)小基线干涉对网络构建。基于总体相关系数分析,在SAR影像数据集中选择一景作为超级主影像,将所有辅影像与超级主影像进行配准,通过设定合适的时空基线阈值,构建小基线

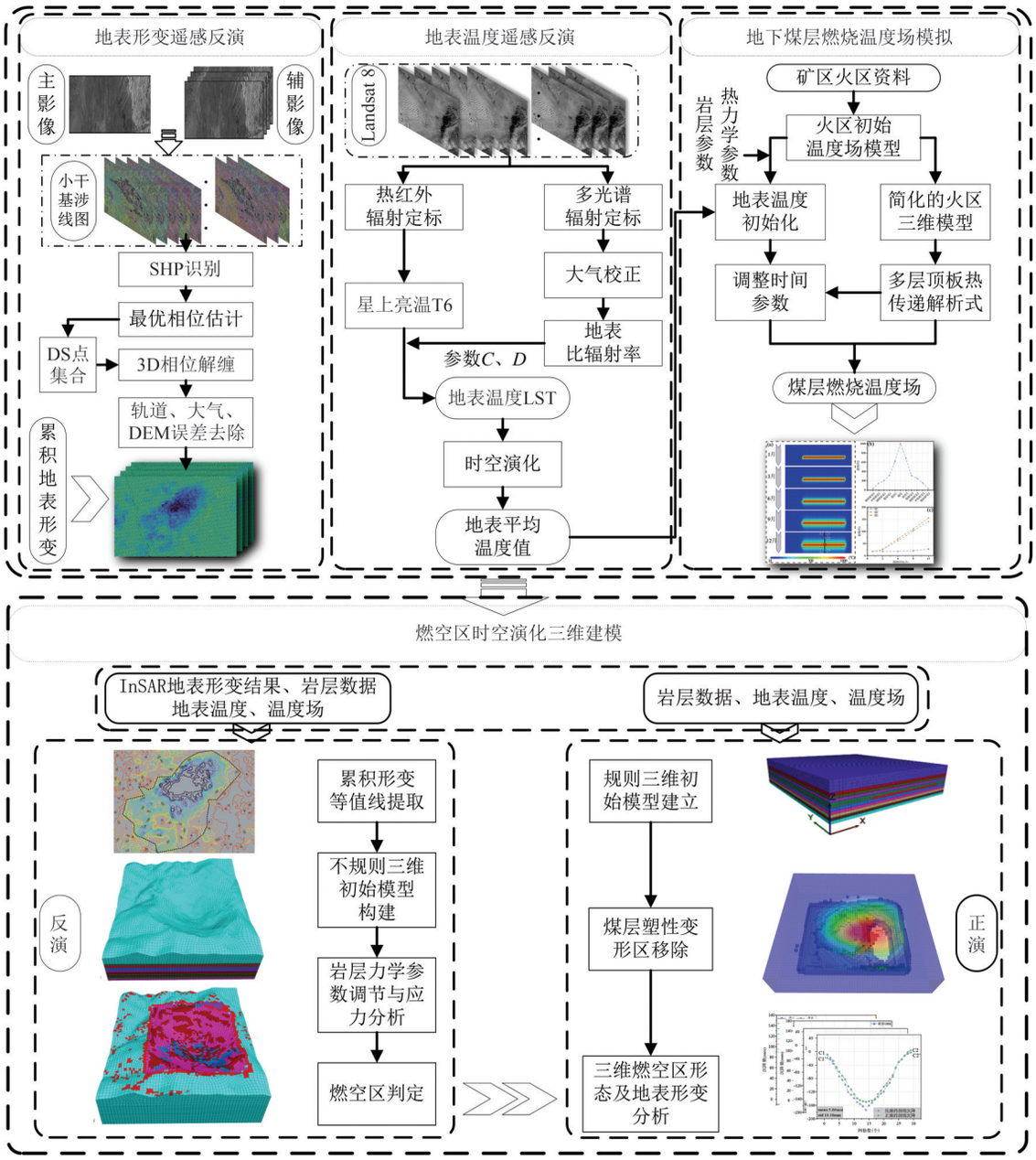


图1 技术路线图

Fig. 1 Technical Roadmap

干涉对网络。利用数字高程模型(digital elevation model,DEM)模拟并去除地形贡献量。

2)同质像元(statistically homogeneous pixel,SHP)识别。采用文献[25]提出的置信区间假设检验算法进行SHP识别。该方法结合了快速统计均匀像元选择算法和似然比检验的优势,能在最大程度上保证SHP识别的速度和准确性。

3)最优相位估计。为提高SHP相位的信噪比和增加有效观测点的密度,利用文献[26]提出的EMI(eigen-decomposition-based maximum-likelihood-estimator of the interferometric phase)算法进行相位优化。

4)DS点提取。将原始干涉相位与优化相位之间的拟合优度(即时间相干性,temporal coherence,TC)作为优化相位质量的评价指标,通过设定合适的TC阈值选取DS点。计算公式为[27]:

$$\gamma_{TC}=\frac{2}{N(N-1)}\mathrm{Re}\sum_{m=1}^{N}\sum_{n=m+1}^{N}e^{j\varphi_{m,n}}e^{-j(\theta_m-\theta_n)} \quad (1)$$

式中,γ_{TC}表示拟合优度;$\varphi_{m,n}$是第m和n景SAR影像构成的原始干涉相位;θ_m和θ_n是优化相位。

5)地表形变反演。采用3D相位解缠法[28]对步骤4)提取的DS点进行相位解缠,同时估计并纠正轨道残余误差、大气延迟误差以及DEM误差。根据相位与形变间的函数关系,反演得到所

有DS点的地表形变信息。

1.1.2　基于单窗算法的地表温度反演

单窗算法是基于遥感影像的热红外数据,结合大气校正和辐射传输模型,利用物体辐射定律和辐射特性的一种经典地表温度反演算法[29]。其核心公式为:

$$\begin{cases} T_S=[a\times(1-C-D)+(b\times(1-C-D)+C+D)\times T_6-D\times T_a]/C \\ T_6=K_2/\ln(K_1/B(T_S)+1) \\ C=\varepsilon\times\tau \\ D=(1-t)\times(1+(1-\varepsilon)\times\tau) \end{cases} \tag{2}$$

式中,T_S是反演的地表温度;a和b是常量,分别是−67.355 351、0.458 606;T_a为大气平均作用温度,可通过近地表温度经验公式计算获取;T_6为星上亮温,对应遥感影像的热红外波段;C、D是中间变量;K_1、K_2为卫星发射前预设常量,分别为607.76、1 260.56;$B(T_S)$为卫星传感器接收到的辐射强度;ε为地表比辐射率,可通过归一化植被指数阈值法反演获得;τ为大气透射率,利用大气水汽经验公式计算得到。

为了消除煤层燃烧导致的地表温度呈季节性变化的趋势,将由单窗算法获得的红梁火区地表温度时间序列结果进行时空平均,获得火区地表平均温度值。

1.2　地下煤层燃烧温度场模拟

岩层热传导的基础理论可以归结为能量守恒定律,其核心公式如下[30]:

$$\Delta E_{st}=E_{in}-E_{out}+E_g \tag{3}$$

式中,ΔE_{st}为传递的热量;E_{in}为输入的热量;E_{out}为输出的热量;E_g为自身产热。

在一般的3D问题中,假设在x方向传递一个热量q_x,输出热量为q_{x+d_x},其微分方程为[31]:

$$\rho\cdot c\cdot\frac{\partial t}{\partial\psi}=\frac{\partial}{\partial x}\left(N_x\frac{\partial t}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(N_y\frac{\partial t}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(N_z\frac{\partial t}{\partial z}\right)+q_m \tag{4}$$

式中,ρ为密度;c为比热容;N_x、N_y和N_z分别为不同方向的导热系数;t为温度;ψ为时间;q_m为自身产热。

以热力学原理和岩石特性变化规律为基础,综合考虑热量传输过程的影响,构建了一个岩层热传导模型,在理论上模拟并预测岩石内部及周围的热能传递行为,如图2所示。

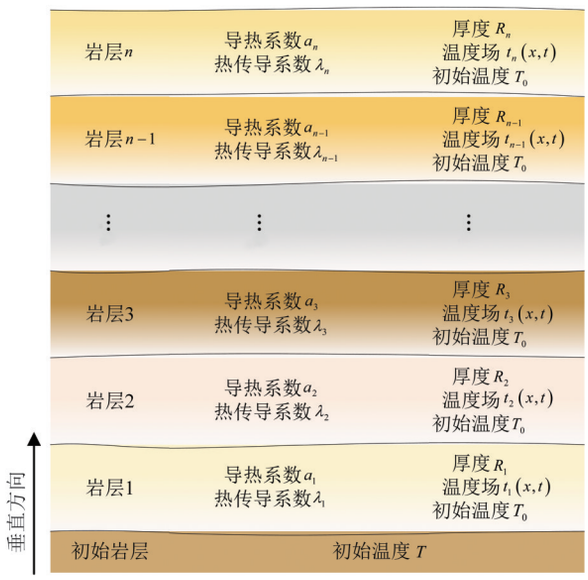


图2　岩石热传导模型

Fig. 2　Rock Thermal Conduction Model

在煤层实际燃烧过程中,热传导系数、比热容、密度等岩体热力学参数会随温度变化而变化。但研究显示,如果在数值模拟中深入考虑这个变化因素,求解难度将很大[31]。为简化模型,降低求解难度,本研究假定这些参数不随温度发生改变,只考虑温度场垂直于岩层方向的变化。因此创建以下微分方程:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial t_1(z,\psi)}{\partial\psi}=a_1\dfrac{\partial^2 t_1(z,\psi)}{\partial z^2}\ (\psi>0,0\leqslant z<R_1) \\ \dfrac{\partial t_2(z,\psi)}{\partial\psi}=a_2\dfrac{\partial^2 t_2(z,\psi)}{\partial z^2}\ (\psi>0,R_1\leqslant z<R_2) \\ \vdots \\ \dfrac{\partial t_n(z,\psi)}{\partial\psi}=a_n\dfrac{\partial^2 t_n(z,\psi)}{\partial z^2}\ (\psi>0,R_{n-1}\leqslant z\leqslant R_n) \end{cases} \tag{5}$$

式中,$a_i=\lambda_i/(\rho_i c_i)$,$i=1,2,\cdots,n$,其中$\lambda_i$为岩层的导热系数;$\rho_i$为岩层密度;$\psi$为时间。

经计算得到两层顶板热传导解析式:

$$t_1(z,\psi)=\begin{cases} (t_c-t_0)\sum_{m=1}^{\infty}(-1)^{m-1}K^{m-1}\left[K\mathrm{erfc}\left(\dfrac{2mR_1-z}{2\sqrt{a_1\psi}}\right)+\mathrm{erfc}\left(\dfrac{2(m-1)R_1+z}{2\sqrt{a_1\psi}}\right)\right]+t_0,\psi>0,0\leqslant Z<R_1 \\ (t_c-t_0)(K+1)\sum_{m=1}^{\infty}(-1)^{m-1}K^{m-1}\left[\mathrm{erfc}\left(\dfrac{(2m-1)\sqrt{a_2}R_1+\sqrt{a_1}(z-R_1)}{2\sqrt{a_1a_2\psi}}\right)\right]+t_0,\psi>0,Z\geqslant R_1 \end{cases} \tag{6}$$

式中,erfc为高斯误差函数,ψ为时间;$K=(K_c-1)/(K_c+1)$,$K_c=\lambda_1/\lambda_2\sqrt{a_2/a_1}$,$a_1$、$a_2$含义同式(5);$t_c$为施加于顶板的初始温度;$t_0$为顶板的初始温度。

根据两层顶板热传导解析式可知,如要建立多层顶板解析式,需要确定最底板的初始温度。为解决这个问题,将热传导问题看成一个整体的过程,假设经过第二层顶板和第三层顶板连接处的初始温度为t_1,经过k时间的传导,温度变为t_2,可以假定煤层燃烧k时间在该处传递的总热量q,该热量使得第二层顶板和第三层顶板连接处的温度从t_1变为t_2,即传递的总热量q使第二层顶板和第三层顶板连接处的温度升高t_3($t_3=t_2-t_1$)。当$t_3-t_1\geqslant t_1$时,t_3即为第二层顶板和第三层顶板连接处的初始温度;当$t_3-t_1<t_1$时,此时传递的总热量q较小,t_3不足以向上继续传递温度,此时的初始温度近似为t_2,由此建立多层顶板的热传递解析式。

由于火区空间范围有限,为简化模型,假设沉降前地形平坦,基于火区已知的岩层信息参数,利用FLAC3D软件构建规则的三维模型,代表煤层燃烧沉降前的初始模型。将利用卫星观测数据反演的地表温度时空平均值作为初始地表温度,结合岩层分布和岩层热力学参数,以及前述利用数值计算得到的多层顶板热传递规律,通过fish语言嵌入到模拟过程中。通过调整时间参数,模拟得到不同时间间隔下的地下煤层燃烧温度场分布。

1.3 地下燃空区形态时空演化模拟

燃空区三维形态演化模拟包括反演和正演两部分。反演基于InSAR地表形变监测结果提取形变等值线,结合岩层分布和岩层参数建立能反映煤层燃烧沉降后地表的不规则三维初始模型,调节岩层力学参数并进行应力分析,求解塑性区范围,得到燃空区三维模型。正演基于岩层数据建立反映沉降前的规则三维初始模型,确定岩层力学参数并提取反演得到的塑性区位置,对塑性区岩层进行移除,模拟燃空区形态演化。

1.3.1 Mohr-Coulomb本构模型理论

Mohr-Coulomb本构模型能够模拟岩体、土体等材料的力学行为,在边坡稳定分析、地下开挖工程等领域有着广泛的应用[32-34]。本文采用Mohr-Coulomb本构模型(理想弹塑性模型)来模拟煤岩体材料的应力-应变-强度-时间关系,当应力状态达到Mohr-Coulomb屈服准则的破坏条件时,岩体材料将发生破坏。其核心理论可表示为[35]:

$$\begin{cases} f_s=s_1-s_3N_\alpha+2c\sqrt{N_\alpha} \\ f_t=s_3-s_t \\ N_\alpha=\dfrac{1+\sin\alpha}{1-\sin\alpha} \end{cases} \tag{7}$$

式中,f_s为剪切破坏准则;f_t为拉伸破坏准则;s_1为最大轴向主应力;s_3为最小轴向主应力;s_t为抗拉强度;α为内摩擦角;c为粘聚力。当f_s=0时,材料将发生剪切破坏;当f_t=0时,材料将发生拉伸破坏。

1.3.2 燃空区三维形态反演

1)火区累积地表形变等值线提取。利用§1.1所述DS-InSAR方法获得的火区地表形变结果提取累积地表形变等值线。

2)不规则三维初始模型构建。根据提取的地表形变等值线和煤火区已知的岩层信息参数,建立能反映煤层燃烧沉降后地表的火区不规则三维初始模型。

3)岩层力学参数调节与应力分析。高温对岩石的动态物理和力学特性具有显著影响[36-40]。当温度持续升高时,岩石的力学参数一般都会弱化,温度越高,弱化强度越大。根据文献资料可得岩石力学参数随温度变化的公式如下[38-40]:

$$\mathrm{value}_i^{\mathrm{tem}}=\mathrm{value}_i^{\mathrm{ini}}\times k(1-T_c/T_{\mathrm{coal}}) \tag{8}$$

式中,$\mathrm{value}_i^{\mathrm{tem}}$是不同的力学参数在相应岩层温度下的参数值;$\mathrm{value}_i^{\mathrm{ini}}$是初始力学参数;$k$是弱化系数;$T_c$是不同岩层的平均温度值,可通过§1.2模拟获得;$T_{\mathrm{coal}}$为煤层的平均温度。因此,保持地表形态不变,通过调节k改变煤层上部岩层的力学参数。随着岩层力学参数逐渐降低,在重力和初始地应力的作用下,岩层会出现塑性区,且塑性区不断扩大。当煤层上部顶板形成联通的塑性区时,停止调节参数。

4)燃空区的判定。煤层上部顶板的塑性区域随力学参数弱化不断扩大直至联通,此时认为,煤层燃烧引起了煤层上部顶板岩层弱化、变形,传递到地表引起了对应1)的地表形变。因此这个联通的塑性区被认为是燃空区的范围。

1.3.3 燃空区三维形态正演

1)建立规则三维初始模型(同§1.2所构建的规则初始模型)。

2)移除煤体燃烧后的煤层塑性变形区域。煤体燃烧后上覆不同层位岩层受重力作用将在垂直方向由下至上形成破碎带-裂隙带-弯曲下沉带,破碎带和部分裂隙带的岩石力学结构在燃烧和下沉过程中发生破坏,失去大部分的支撑效应。因此在正演模型中,首先提取由反演过程得到的塑性区位置信息,根据煤体燃烧后煤岩层垂直方向上的“三带”分布规律,将燃烧后形成的破碎带和部分裂隙带塑性区从规则三维初始模型中移除,得到移除塑性区后的三维模型。

3) 分析步骤 2)中塑性区移除后的三维燃空区形态及地表变形随时步的演化过程。

2　研究区与数据

2.1　研究区概况

红梁火区位于宁夏石嘴山市贺兰山脉中段的汝箕沟矿区内(图 3),地理范围为 106°00′E～106°11′E,39°01′N～39°09′N,海拔约为 1 990 m。汝箕沟矿区是中国重要的煤炭工业基地之一,其中所产的太西无烟煤,含碳量高、含硫量低,被誉为“煤中之王”。该区域的地下煤火始于明清朝代,直至目前仍有包含红梁火区在内的 25 个火区[41-42]。有研究显示,若火势持续扩展,包含于其中的优质无烟煤将最快在 25 年内燃烧殆尽,这将带来严重的经济损失和生态环境污染。因此,研究红梁火区地下煤层燃烧三维形态和时空演化规律对于火区治理和降低损失具有重要现实意义。

2.2　卫星观测数据

研究中采用的主被动遥感数据信息见表 1。其中,地表形变信息提取采用了 35 景 C 波段 Sentinel-1A SAR 卫星影像,研究时段为 2017 年 10 月至 2020 年 1 月。采用与 Sentinel-1A 影像日期对应的精密轨道数据去除轨道误差,以及 30 m 分辨率的航天飞机雷达地形测绘任务 DEM 数据去除地形相位。地表温度反演采用了 29 景云量少于 10% 的 Landsat 8 影像,时间跨度为 2017 年 10 月至 2019 年 12 月。

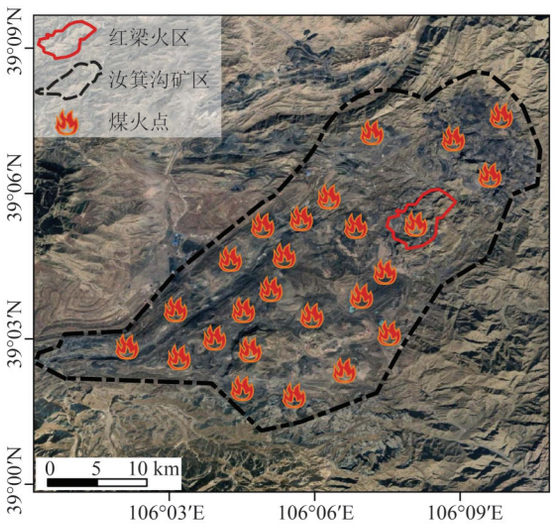


图 3　研究区火区概况图

Fig. 3　Fire Overview Map of the Study Area

表 1　遥感影像具体参数

Table 1　Specific Parameters of Remote Sensing Images

卫星	模式	轨道	轨道方向	极化方式	波长/m	分辨率/m	入射角/(°)	影像数量/景	时间间隔
Sentinel-1A	IW	157/122	降轨	VV	0.055 5	5×20	39.1	35	2017-10-12— 2020-01-06
Landsat 8	OLI_TIRS	130 (129)/33			0.43～12.51	30 (OLI)/100 (TIRS)		29	2017-10-31—2019-12-24

2.3　岩层分布与岩层参数数据

表 2 为用于数值模拟的研究区岩层分布与岩层参数,来源于《汝箕沟矿区火区现状评价分析报告》。

表 2　岩层分布及热力学参数和力学参数

Table 2　Strata Distribution and Thermodynamic and Mechanical Parameters

岩层	厚度/m	热力学参数				力学参数				
		导热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})	热扩散系数/(10^{-6} m^2·s^{-1})	比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比	内聚力/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)
粗粒砂岩 1	15	1.68	2.1	748	2780	24.4	0.14	18	2.13	31.50
粗粒砂岩 2	4	1.68	2.1	748	2 780	24.4	0.14	18	2.13	31.50
中粒砂岩 1	4	1.68	2.1	748	2 760	31.8	0.16	18	2.13	31.50
中粒砂岩 2	4	1.68	2.1	748	2 760	31.8	0.16	18	2.13	31.50
细粒砂岩 1	4	1.70	2.1	748	2 790	34.1	0.13	18	2.13	31.50
细粒砂岩 2	4	1.70	2.1	748	2 790	34.1	0.13	18	2.13	31.50
粉砂岩 1	4	1.80	2.1	748	2 750	20.2	0.17	18	2.13	31.50
粉砂岩 2	4	1.80	2.1	748	2 750	20.2	0.17	18	2.13	31.50
泥岩 1	4	0.98	1.0	800	2 680	16.0	0.16	7	2.29	31.24
泥岩 2	4	0.98	1.0	800	2 680	16.0	0.16	7	2.29	31.24
煤层	3	0.50	1.2	1 670	1 400	2.86	0.30	0.7	1.24	30

3 结果与分析

3.1 地表形变演变规律

DS InSAR形变监测结果如图4所示,其中图4(a)为汝箕沟矿区DS-InSAR累积地表形变结果,图4(b)为红梁火区DS-InSAR累积地表形变结果。同时使用SBAS-InSAR技术对同一数据集进行处理,两种方法的地表形变监测结果相关系数为0.89,形变差值的均值为-0.84 mm/a,标准差为3.66 mm/a,可见,地表形变监测结果精确可信。结果显示,汝箕沟矿区范围内25个火区地表均存在一定量级的沉降,其中,红梁火区沉降最为显著,最大形变速率达-145.33 mm/a。在红梁火区范围内提取特征点$P1$、$P2$、$P3$、$P4$进行时间序列分析,由图4(c)可知,$P2$~$P4$总体上呈沉降趋势,$P4$位于火区中心,形变速率最大,为-145.33 mm/a,累积形变量超过-200 mm;$P2$位于火区沉降盆地边缘,形变速率为-23.49 mm/a,累积形变量约为-40 mm;$P3$靠近火区中心,形变速率为-66.83 mm/a,累积形变量达到-140 mm左右;$P1$位于火区沉降漏斗外部,整个研究时段内保持稳定,形变在零值附近波动。

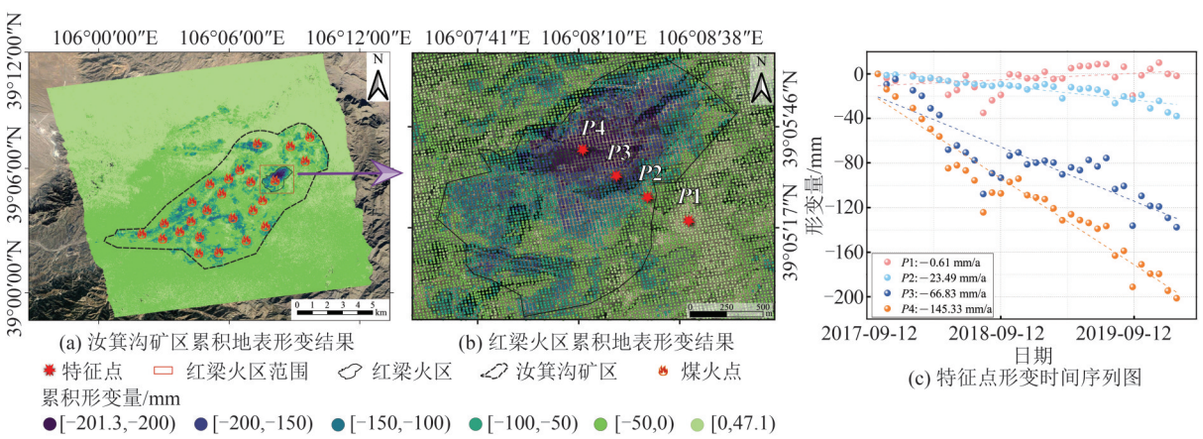


图4 DS InSAR形变监测结果

Fig. 4 DS InSAR Deformation Monitoring Results

3.2 温度场数值模拟结果

采用大气校正法对§1.1.2所述单窗算法反演的地表温度结果进行对比验证,随机选取火区内约26万个同名点的温度值绘制相关性散点密度图如图5所示。对比结果表明,两种方法反演的温度均匀分布在直线$y=x$两侧,二者皮尔逊相关系数达0.996,最大温差为2.7 ℃,平均均方根误差为0.9 ℃,由此可见,由单窗算法所获的地表温度反演结果是可靠的。将单窗算法温度反演结果的时空平均值作为地表的初始温度,约为18 ℃。

图6为构建的温度场模拟初始模型。煤层为近水平煤层,模型的长(X轴方向)、宽(Y轴方向)、高(Z轴方向)分别为200 m、240 m和54 m,网格的平面尺寸为4 m×4 m。

由文献[43]可知,煤层燃烧会释放出巨大热量,温度可达1 000 ℃以上,因此,假设煤层燃烧初始温度为1 000 ℃(未考虑不同煤层、煤炭类型和燃烧状态的影响)。结合表2模拟的煤层燃烧第1、3、6、9和12个月的温度场演化结果如图7所示,由XZ横断面图(图7(a))可知,煤层的核心部位即煤炭氧化反应最为剧烈的区域,具有最高的温度值。从这一热源中心向外,温度逐渐降低,形成了明显的中心到边缘的温度梯度。这种温度梯度的形成受到燃烧反应的热释放率、煤层物理特性、内外通风条件以及地质结构等多种因素的影响。

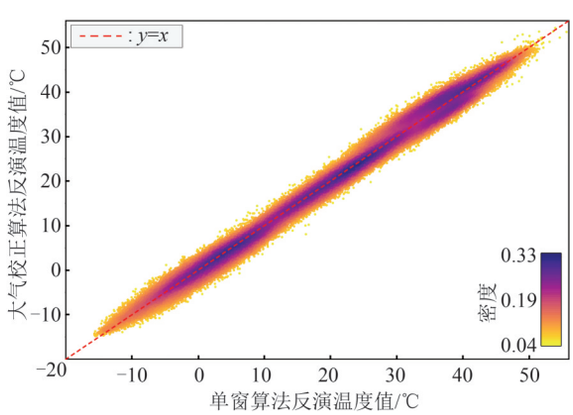


图5 单窗算法与大气校正法反演的地表温度相关性散点密度图

Fig. 5 Scatter Density Map of Surface Temperature Correlation ,Between Single-Window Algorithm and Atmospheric Correction Method

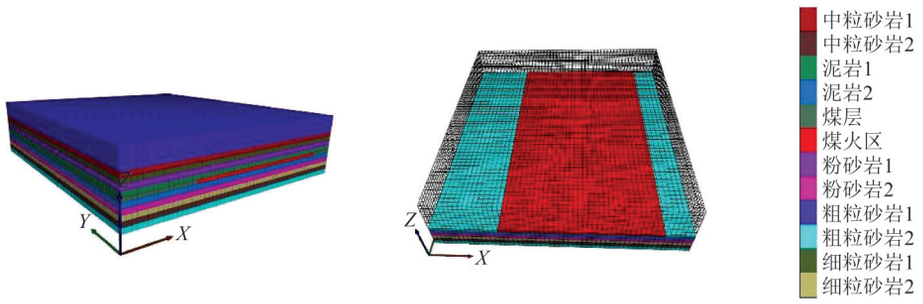
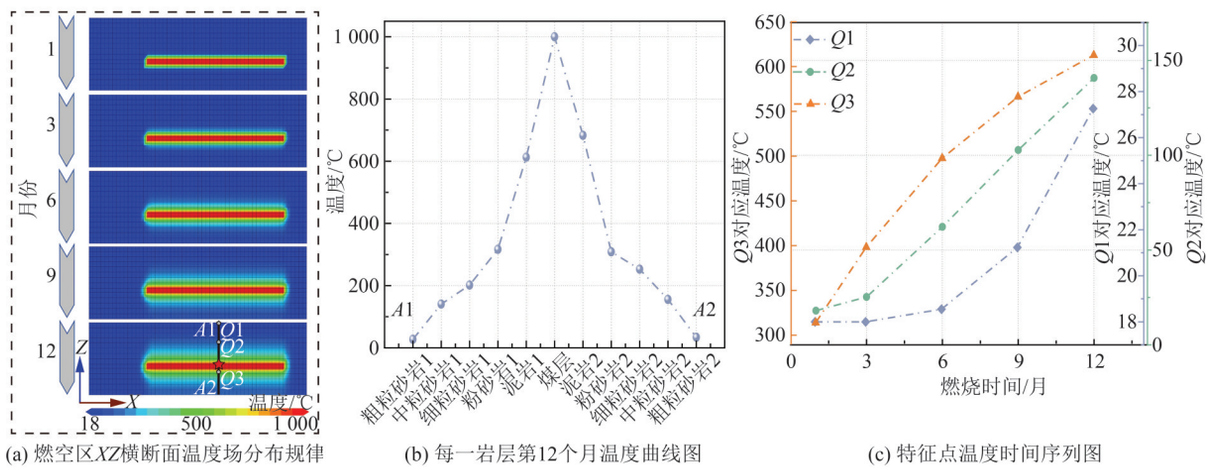


图 6　红梁火区温度场模型

Fig. 6　Temperature Field Model of the Hongliang Fire Area



(a) 燃空区*XZ*横断面温度场分布规律　(b) 每一岩层第12个月温度曲线图　(c) 特征点温度时间序列图

图 7　温度场模拟结果

Fig. 7　Temperature Field Simulation Results

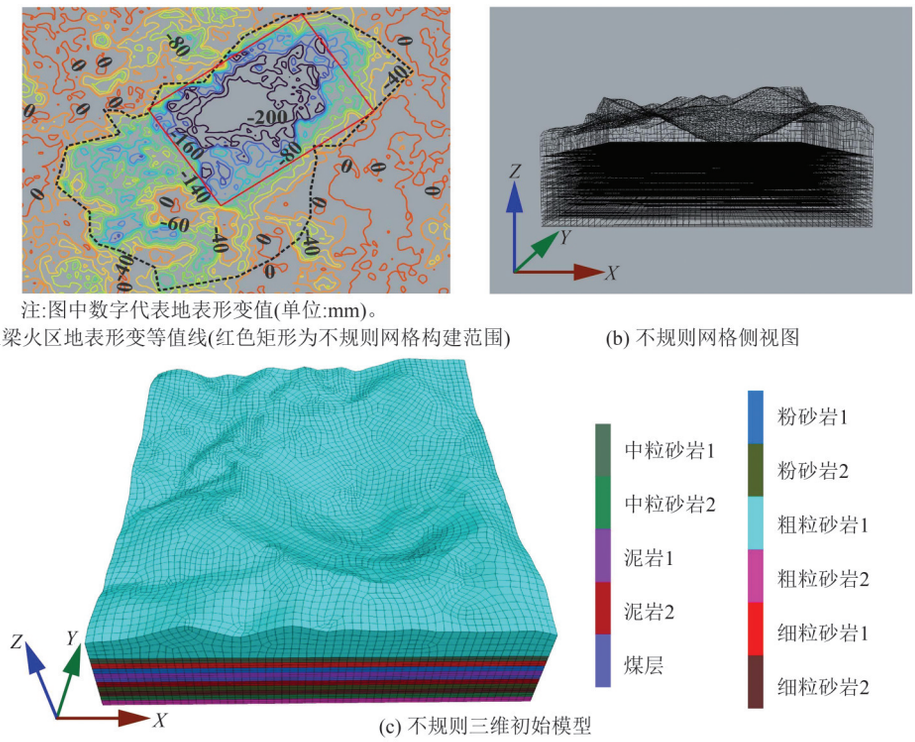
图 7(b)展示了 *A*1-*A*2 剖线上每一岩层在煤层燃烧 12 个月后的温度变化情况。可知,温度从地表至煤层持续上升,越靠近煤层,温度上升越快,自煤层往下的岩层温度呈现与煤层上覆岩层温度相似的变化规律,表现为先急剧下降后缓慢降低至 18 ℃左右。选取剖线上 3 个特征点 *Q*1、*Q*2、*Q*3 进行温度时间序列分析,其中 *Q*1 位于地表,*Q*2 位于煤层与地表之间的中粒砂岩 1 层,*Q*3 位于煤层下方的泥岩 2 层,如图 7(c)所示,*Q*1 前 3 个月温度稳定在 18 ℃左右,而后随着燃烧时间的延长,上升速率逐渐增大,12 个月后升高到了 27 ℃;*Q*2 温度前 3 个月上升较为缓慢,之后呈线性上升至约 145 ℃;*Q*3 温度上升迅速,速率随时间递减,一年后达 600 ℃左右。这一现象由持续的煤炭燃烧释放的热量所驱动,热量通过热传导和对流逐渐传递到周围岩石和上覆岩层,导致各岩层和地表温度升高。

3.3　燃空区形态时空演化规律

图 8 为利用 Rhino、Griddle 和 FLAC3D 等建模工具构建的不规则三维初始模型,网格尺寸为 4 m×4 m。由于所构建的不规则模型地表形态由累积 2 年的地表形变获得,故利用§1.2 数值模拟的方法模拟煤层燃烧 2 年的温度场,获得不同岩层的温度 T_c(如表 3 所示),进而根据式(8)求解煤层燃烧后的相关力学参数。

3.3.1　燃空区三维形态反演结果分析

图 9 展示了不同弱化程度的岩层力学参数状态下的塑性区分布与演化规律。可知,当岩层的弱化系数 k 从 1 不断降低时,即随着煤层燃烧,煤层上方顶板岩层温度不断升高,岩层力学特性不断弱化,开始出现塑性区,且其范围不断扩大。当 k 在 0.18～1 范围变化时,尚未出现联通的塑性区;当岩层的弱化系数为 0.18 时,煤层上方顶板出现了连续的塑性区域,这表明对应参数下的模拟结果可以较为合理地反映燃空区的范围。此时在剖面图上,塑性区呈现出开口向上的 K 形,主体受剪切塑性变形影响(深蓝色区域),中部受当前阶段的剪切塑性变形影响(深红色区域),K 字上端两侧的玫红色区域受拉伸塑性变形影响,K 字左翼和右翼存在着未变形区域(青色),且呈对称分布。由模型表面塑性区分布图可知,随着 k 的逐渐降低,主体受剪切塑性变形越来越严重,煤层上方塑性区范围越来越大。



注:图中数字代表地表形变值(单位:mm)。

(a) 红梁火区地表形变等值线(红色矩形为不规则网格构建范围)　(b) 不规则网格侧视图

(c) 不规则三维初始模型

图8　红梁火区地表形变等值线图(红色矩形框为不规则网格构建范围)、不规则网格侧视图和不规则三维初始模型

Fig. 8　Contour Map of Surface Deformation in the Hongliang Fire Area (Red Rectangular Box Represents the Irregular Grid Construction Area), Side View of the Irregular Grid, and Initial Irregular Three-Dimentional Model

表3　不同岩层的平均温度值

Table 3　Average Temperature Values of Different Strata

岩层	平均温度 T_c/℃
粗粒砂岩	149.33
中粒砂岩	263.91
细粒砂岩	330.67
粉砂岩	465.83
泥岩	743.58
煤层	1 000.00

3.3.2　燃空区三维形态正演结果分析

图10展示了移除破碎带和部分裂隙带塑性区后的三维形态及地表变形时空演化规律。由燃空区三维俯视透视图可知,沉降区域呈现漏斗状,变形量由中心向外递减,指示了燃烧影响的范围。随着时步的增加,模型上表面沉降量不断增加,当时步增至5 400时,最大沉降达149.80 mm,此时模型表面沉降范围与沉降量均与反演过程中构建的不规则三维初始模型相吻合。如图11所示,两个不规则模型相同位置的剖面线$C1$-$C2$、$C1'$-$C2'$和$D1$-$D2$、$D1'$-$D2'$上的沉降曲线差值的平均值分别为5.86 mm和10.38 mm,标准差分别为4.59 mm和8.99 mm,可见,地下燃空区三维形态特征反演和正演方法的结果具有高度的一致性。

从图10三维透视图和剖面图中可以看出燃空区复杂的三维形态特征,能观察到煤层燃烧后形成的空洞结构,包括其大小、形状以及在不同岩层中的分布情况。在$B1$-$B2$剖面线上等间隔选取14个观测点,定量分析其在不同时步下的沉降变化规律,如图12所示。结果表明,剖面线$B1$-$B2$上的沉降量呈波峰状,随着时步的增加,各观测点的沉降量逐渐增大,且梯度不断增加。

4　结　语

4.1　研究结论

本文提出了一种遥感卫星观测信息约束下的地下燃空区时空演化数值模拟方法,利用主被动遥感技术反演的地表温度和地表形变信息作为约束,结合岩层热传导理论与弹塑性力学理论,对地下燃空区三维温度场及其形态的时空演化进行了模拟研究,并在宁夏汝箕沟红梁火区进行了案例应用,得到主要结论如下:

1)基于DS-InSAR的地表形变监测结果表明,2017—2020年红梁火区地表沉降显著,形成了明显的沉降漏斗。火区范围内最大形变速率为−145.33 mm/a,最大累积形变量超过−200 mm。

2)温度场模拟结果显示煤火区域形成了明显

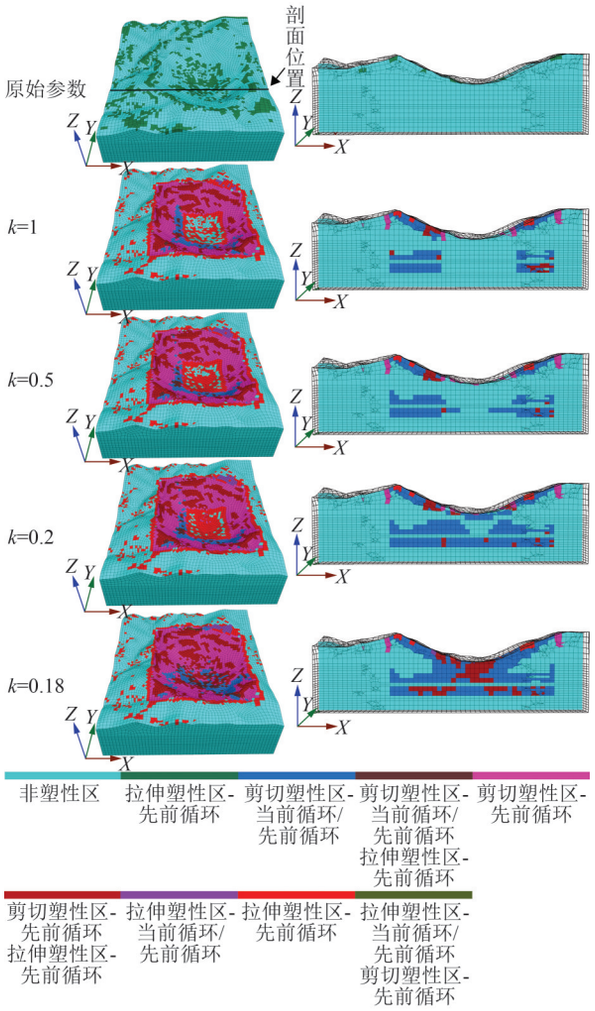


图 9　不同岩层参数下塑性区范围图和剖面图

Fig. 9　Range and Profile Diagrams of the Plastic Zone Under Different Strata Parameters

的温度梯度,温度自煤层核心向外逐渐降低。地表和各岩层温度均随煤层燃烧时间逐渐升高,燃烧 12 个月后,地表温度从 18 ℃升至 27 ℃。靠近煤层的泥岩层温度上升更为显著,可达 600 ℃,表明煤层燃烧对地表及周围岩层均产生了显著影响。

3)地下燃空区三维形态时空演化模拟结果显示,反演过程中,当岩层的弱化系数降低至 0.18,煤层顶板出现了联通的塑性区域,可用于描述燃空区形态,其剖面呈 K 形,主体受剪切塑性变形影响严重。正演过程中,随时步增加,模型上表面沉降及其梯度逐渐增大,剖面沉降呈波峰状;当时步增至 5 400 时,地表最大沉降量达 149.80 mm,此时两种方法模拟的地下燃空区达到吻合,相同位置沉降差值的均值和标准差最小值分别为 5.86 mm 和 4.59 mm,表明在地表参数约束下模拟的地下燃空区形态及其演化规律具有可靠性。

综上所述,本研究为揭示地下燃空区时空演化规律提供了新的思路和科学依据,为地下煤火的有效治理提供了理论支撑。

4.2　讨论与展望

本文在地表形变和地表温度参数的约束下,基于岩层热传导模型和弹塑性力学理论,对地下煤层燃烧过程中温度场及燃空区形态时空演化进行了模拟研究。考虑研究过程中的研究目标与可操作性等因素,对模型的相关参数进行了合理的简化。现有的研究成果表明,结构面的存在,特别是层理、片理等,使岩体产生明显的各向异性特征,每个因素对岩层破裂、垮落都具有不同的影响权重。完整结构岩体强度与岩块强度之比多在 0.5～1 之间,而在破碎结构中(例如

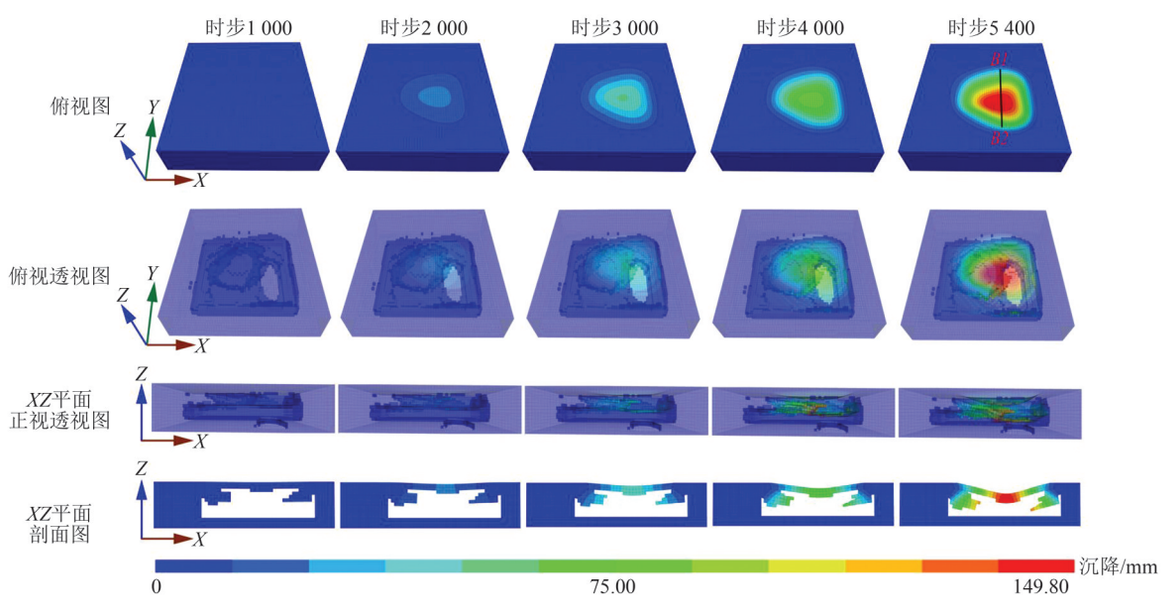
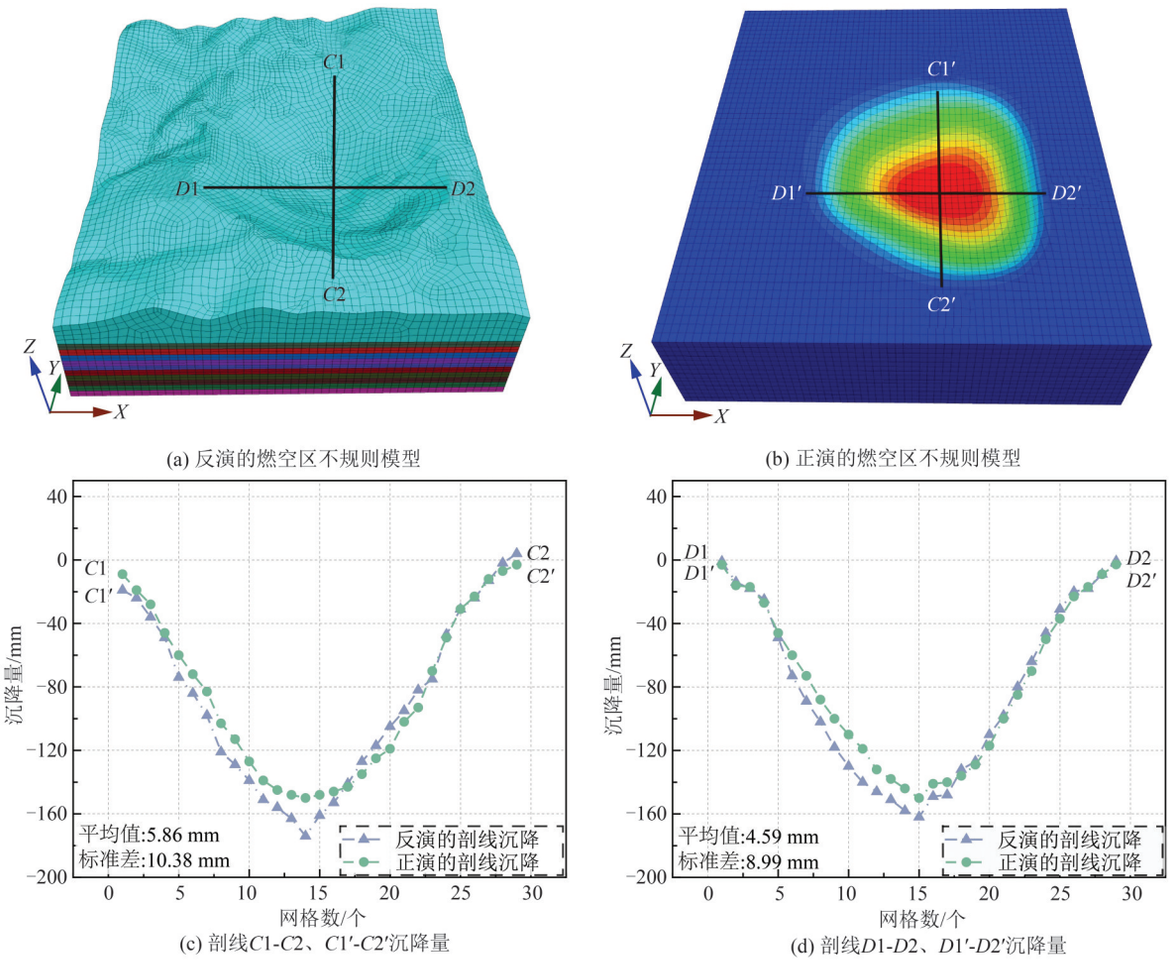


图 10　燃空区不同步长正演结果图

Fig. 10　Forward Simulation Results of the Combustion-affected Areas at Different Time Steps

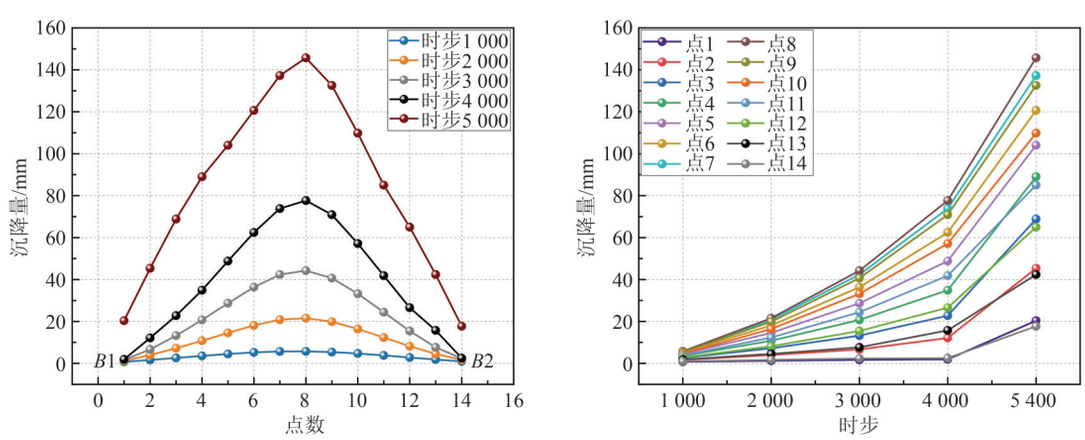


(a) 反演的燃空区不规则模型　(b) 正演的燃空区不规则模型

(c) 剖线C1-C2、C1′-C2′沉降量　(d) 剖线D1-D2、D1′-D2′沉降量

图11　剖面线位置示意图及沉降量对比

Fig. 11　Schematic Diagram of the Profile Line Location and Subsidence Comparison



(a) 等间隔点的沉降量　(b) 对应点的沉降量

图12　不同时步B1-B2剖面线上点的沉降量

Fig. 12　Subsidence of Points on the B1-B2 Profile Line at Different Time Steps

燃空区、构造区等),比值多为0.2以下[44-45]。实际上,受岩石矿物特征、微观力学结构及材质的非均质性影响,不同岩性岩层都存在各自的力学参数和热力学参数,温度对不同岩性岩石的力学行为影响存在差异,弱化系数与岩层参数和岩层温度之间存在特定的结构-力学关系。目前的定量研究岩石的力学及热学关系的成果都是基于小尺度近均质岩块试样进行试验得到的,但是大尺度岩体与小试样岩块相比具有层理结构、原生裂隙极其发育等特点,且受含水、边界条件、构造分布及应力影响显著,用小试样岩石测试结果表征岩体力学特征的程度也需要进一步研究。

在数值模型中完全定量耦合上述因素是未来数值模型建模的重点突破方向。此外,地表和岩层裂隙的分布会通过热量扩散和引导蔓延路径等多重途径加速地下煤火的蔓延,煤火反过来加剧岩层裂隙扩展,形成一种复杂的相互作用,本研究目前尚未将地表和岩层裂隙的分布对地下煤层燃烧的复杂影响考虑在内。为了使燃空区形态演化模拟更为严谨,在未来模型构建和温度场模拟的过程中,可对弱化系数与岩层参数和岩层温度间的力学关系做进一步探索和研究,并将地表和岩层裂隙分布情况进行时空定量表征,以更好地揭示岩层温度与燃空区形态时空演化的协同关系,为燃空区的温度和三维形态的准确反演提供更加严谨可靠的理论支撑。

参 考 文 献

[1] VOIGT S, TETZLAFF A, ZHANG J Z, et al. Integrating Satellite Remote Sensing Techniques for Detection and Analysis of Uncontrolled Coal Seam Fires in North China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004, 59(1/2): 121-136.

[2] 汪云甲. 矿区生态扰动监测研究进展与展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1705-1716.
WANG Yunjia. Research Progress and Prospect on Ecological Disturbance Monitoring in Mining Area[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1705-1716.

[3] STRACHER G B, TAYLOR T P. Coal Fires Burning out of Control Around the World: Thermodynamic Recipe for Environmental Catastrophe[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004, 59(1/2): 7-17.

[4] 汪云甲, 原刚, 王腾, 等. 煤田隐蔽火源多源遥感探测研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1651-1661.
WANG Yunjia, YUAN Gang, WANG Teng, et al. Research on Multi-Source Remote Sensing Detection of Concealed Fire Sources in Coalfields[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1651-1661.

[5] 邵振鲁, 王德明, 王雁鸣. 高密度电法探测煤火的模拟及应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 468-474.
SHAO Zhenlu, WANG Deming, WANG Yanming. Simulation of High-Density Electrical Method in Detecting Coal Fires and Its Application[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(3): 468-474.

[6] 金永飞, 邓军, 许延辉, 等. 测氡法探测地下煤火技术研究与应用[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(6): 647-650.
JIN Yongfei, DENG Jun, XU Yanhui, et al. Application of Radon Detection Method in Detecting of Underground Coal Fire[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2010, 30(6): 647-650.

[7] 张雷昕, 汪云甲, 赵峰, 等. 基于无人机热红外遥感的新疆宝安煤矿火区探测[J]. 煤炭工程, 2021, 53(6): 162-166.
ZHANG Leixin, WANG Yunjia, ZHAO Feng, et al. Detection and Analysis of Fire Area in Xinjiang Baoan Coal Mine Based on UAV Thermal Infrared Remote Sensing[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(6): 162-166.

[8] 武建军, 蒋卫国, 刘晓晨, 等. 地下煤火探测、监测与灭火技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2009, 34(12): 1669-1674.
WU Jianjun, JIANG Weiguo, LIU Xiaochen, et al. Innovative Technologies for Exploration, Monitoring and Extinction of Underground Coal Fires[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(12): 1669-1674.

[9] WANG T, WANG Y J, ZHAO F, et al. A Spatio-temporal Temperature-Based Thresholding Algorithm for Underground Coal Fire Detection with Satellite Thermal Infrared and Radar Remote Sensing[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 110: 102805.

[10] SINGH N, CHATTERJEE R S, KUMAR D, et al. Retrieval of Precise Land Surface Temperature from ASTER Night-Time Thermal Infrared Data by Split Window Algorithm for Improved Coal Fire Detection in Jharia Coalfield, India[J]. *Geocarto International*, 2022, 37(3): 926-943.

[11] 毛耀保. 宁夏汝箕沟煤田火区高光谱定量遥感探测研究[J]. 国土资源遥感, 2010, 22(3): 69-75.
MAO Yaobao. Research on Hyperspectral Quantitative Remote Sensing Detection of the Rujigou Coal Fire Area in Ningxia[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2010, 22(3): 69-75.

[12] RIYAS M J, SYED T H, KUMAR H, et al. Detecting and Analyzing the Evolution of Subsidence Due to Coal Fires in Jharia Coalfield, India Using Sentinel-1 SAR Data[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(8): 1521.

[13] YU B, SHE J, LIU G X, et al. Coal Fire Identification and State Assessment by Integrating Multitemporal Thermal Infrared and InSAR Remote Sensing Data: A Case Study of Midong District, Urumqi,

China[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 190: 144-164.

[14] CHEN Y, DING K W, SUO Z H, et al. A Multi-source Remote Sensing Identification Method for Coal Fire Zones Based on a Three-Layer Ensemble Learning Model[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 12666-12684.

[15] HEBBLEWHITE B. Fracturing, Caving Propagation and Influence of Mining on Groundwater Above Longwall Panels—A Review of Predictive Models [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 30(1): 49-54.

[16] 郭广礼,汪云甲. 概率积分法参数的稳健估计模型及其应用研究[J]. 测绘学报, 2000, 29(2): 162-165.
GUO Guangli, WANG Yunjia. Study of Robust Determining Parameters Model for Probability-Integral Method and Its Application[J]. *Acta Geodaetica et Cartographic Sinica*, 2000, 29(2): 162-165.

[17] GUO G L, ZHU X J, ZHA J F, et al. Subsidence Prediction Method Based on Equivalent Mining Height Theory for Solid Backfilling Mining [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(10): 3302-3308.

[18] 郭广礼,郭凯凯,张国建,等. 深部带状充填开采复合承载体变形特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 101-109.
GUO Guangli, GUO Kaikai, ZHANG Guojian, et al. Research on Deformation Characteristics of Coupled Coal-Backfills Bearing in Deep Strip Backfilling Mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(1): 101-109.

[19] 邓喀中,张冬至,张周权. 深部开采条件下地表沉陷预测及控制探讨[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 52-55.
DENG Kazhong, ZHANG Dongzhi, ZHANG Zhouquan. Study on Prediction and Control of Surface Subsidence in Deep Mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2000, 29(1): 52-55.

[20] CHEN Y, LI J, LI H Z, et al. Revealing Land Surface Deformation over the Yineng Backfilling Mining Area, China, by Integrating Distributed Scatterer SAR Interferometry and a Mining Subsidence Model [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 3611-3634.

[21] 邓军,徐精彩,张辛亥. 综放面采空区温度场动态数学模化及应用[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(2): 179-181.
DENG Jun, XU Jingcai, ZHANG Xinhai. Dynamic Computer Simulation of Temperature Field in Goaf Areas of Fully Mechanized Roof Coal Caving Face [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1999, 28(2): 179-181.

[22] WESSLING S, KUENZER C, KESSELS W, et al. Numerical Modeling for Analyzing Thermal Surface Anomalies Induced by Underground Coal Fires [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 74(3/4): 175-184.

[23] GAO R X, ZHU H Q, LIAO Q, et al. Detection of Coal Fire by Deep Learning Using Ground Penetrating Radar[J]. *Measurement*, 2022, 201: 111585.

[24] CHEN Y, SUO Z H, LI J, et al. Active - Passive Remote Sensing Identification of Underground Coal Fire Zones with Joint Constraints of Temperature and Surface Deformation Time Series [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 17: 894-915.

[25] JIANG M, DING X L, LI Z W, et al. InSAR Coherence Magnitude Estimation Based on Data Stack [J]. *Chinese Journal of Geophysics — Chinese Edition*, 2013, 56(3): 799-811.

[26] ANSARI H, DE ZAN F, BAMLER R. Efficient Phase Estimation for Interferogram Stacks[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(7): 4109-4125.

[27] FERRETTI A, FUMAGALLI A, NOVALI F, et al. A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(9): 3460-3470.

[28] HOOPER A, ZEBKER H A. Phase Unwrapping in Three Dimensions with Application to InSAR Time Series[J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2007, 24(9): 2737-2747.

[29] 覃志豪,ZHANG Minghua,KARNIELI A,等. 用陆地卫星TM^{6}数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报, 2001,56(4): 456-466.
QIN Zhihao, ZHANG Minghua, KARNIELI A, et al. Mono-Window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat TM^6 Data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001,56(4): 456-466.

[30] CHEN J L, LIANG L, JIANG F M. Analyzing Heat Extraction and Sustainability of Enhanced Geothermal Systems (EGS) with a Novel Single-Porosity Model[C]//The 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stan-

ford,USA, 2013.

[31] 李怀展. 无井式煤炭地下气化岩层移动机理与控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
LI Huaizhan. Study on Movement Mechanism and Control of Underground Coal Gasification Strata Without Well[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.

[32] ZHAO J. Applicability of Mohr - Coulomb and Hoek - Brown Strength Criteria to the Dynamic Strength of Brittle Rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(7): 1115-1121.

[33] SINGH M, RAJ A, SINGH B. Modified Mohr-Coulomb Criterion for Non-Linear Triaxial and Polyaxial Strength of Intact Rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(4): 546-555.

[34] SHEN B T, SHI J Y, BARTON N. An Approximate Nonlinear Modified Mohr-Coulomb Shear Strength Criterion with Critical State for Intact Rocks[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, 10(4): 645-652.

[35] Itasca Consulting Group Inc. FLAC3D 6.0 Theory and Background [M]. Minneapolis :Itasca Consulting Group Inc, 2017.

[36] 汤研. 煤田火地下高温区强迫对流提热降温特性及技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
TANG Yan. Heat-Extraction and Cooling Characteristics and the Corresponding Fire-Control Technology Under Forced Convection in High-Temperature Zones of Underground Coal Fires[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.

[37] 顾斌. 热力耦合作用下岩体物理力学特性及煤炭地下气化特征场研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
GU Bin. Research on Rock Physico-Mechanical Properties and Underground Coal Gasification Characteristics Field Under Thermal and Mechanical Coupling Effect [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.

[38] 尹土兵. 高温后粉砂岩动态力学特性及破坏机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
YIN Tubing. Study on the Dynamic Mechanical Properties and Failure Mechanism of Sandstone After High Temperature [D]. Changsha: Central South University, 2008.

[39] 尹土兵, 李夕兵, 王斌, 等. 高温后砂岩动态压缩条件下力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 777-784.
YIN Tubing, LI Xibing, WANG Bin, et al. Mechanical Properties of Sandstones After High Temperature Under Dynamic Loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(5): 777-784.

[40] 李明, 茅献彪, 曹丽丽, 等. 高温后砂岩动力特性应变率效应的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3479-3488.
LI Ming, MAO Xianbiao, CAO Lili, et al. Experimental Study of Mechanical Properties on Strain Rate Effect of Sandstones After High Temperature [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(12): 3479-3488.

[41] 王建华, 陈冰凌. 汝箕沟矿区火区治理及监测方法的选择与应用[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(11): 81-86.
WANG Jianhua, CHEN Bingling. Fire Zone Governance and Monitoring Method Selection and Application in Rujigou Coalmine Area[J]. *Coal Geology of China*, 2021, 33(11): 81-86.

[42] 王建华, 聂磊, 梁鹏, 等. 宁夏回族自治区石嘴山市汝箕沟矿区火区现状评价分析报告[R]. 石嘴山: 宁夏煤炭勘察工程有限公司, 2021.
WANG Jianhua, NIE Lei, LIANG Peng, et al. Evaluation and Analysis Report on the Current Situation of the Fire Area in Rujigou Mining Area, Shizuishan City, Ningxia Hui Autonomous Region[R]. Shizuishan: Ningxia Coal Exploration Engineering Co. Ltd, 2021.

[43] ZUBKOVA V, PREZHDO V. Change in Electric and Dielectric Properties of some Australian Coals During the Processes of Pyrolysis[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2006, 75(2): 140-149.

[44] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
GU Dezhen. Foundation of Rock Mass Engineering Geomechanics[M]. Beijing: Science Press, 1979.

[45] 李先炜. 岩块力学性质[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1983.
LI Xianwei. Mechanical Properties of Rock Blocks [M]. Beijing:Coal Industry Press, 1983.