

# 煤炭地下气化腔体稳定性研究

董京楠<sup>1,2\*</sup>, 何爱国<sup>1</sup>, 刘奕杉<sup>1</sup>, 郭文彬<sup>3</sup>, 熊浩宇<sup>1</sup>, 乔磊<sup>1</sup>, 张应斌<sup>4</sup>

1 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 北京 102206

2 中国石油国家卓越工程师学院, 北京 100096

3 内蒙古自治区高校矿产资源安全开采与综合利用工程中心, 呼伦贝尔 021008

4 浙江中科依泰斯卡岩石工程研发有限公司, 杭州 311122

\* 通信作者, djn7909@163.com

收稿日期: 2021-08-24; 修回日期: 2022-03-10

中国石油集团有限公司课题(JT 2019E-25、2020D-5008-08、2021DJ5402) 联合资助

**摘要** 煤炭地下气化过程中气化炉腔体的稳定性是保障气化炉安全稳定生产的重要条件。本文基于吐哈—三塘湖盆地沙尔湖凹陷煤层的地层物性、尺寸、热力学参数及岩石力学等参数, 通过离散元方法建立地质—腔体模型, 研究了不同形态腔体在不同压力情况下的蠕变稳定性, 得到腔体塑性区分布规律, 通过对腔体进行长期蠕变行为计算, 得到了可能的地表沉降情况。结论表明, 蠕变过程中塑性区趋向于分布于腔体内壁, 整体来说以剪切破坏为主, 在腔体壁面外 1 m 范围内并未出现大面积向外扩展的情况; 在地下 1000 m 处形成特征半径 5 m 的腔体, 由腔体蠕变本身对地表所带来的沉降比较有限, 地表沉降的主要来源是地层自身性质。本研究对地下煤炭气化运行及废弃过程中的腔体稳定性评价具有指导意义。

**关键词** 煤炭地下气化; 腔体稳定性; 地表沉降

**中图分类号**: TE319; TD84

## Study of stability of underground coal gasification caverns

DONG Jingnan<sup>1,2</sup>, HE Aiguo<sup>1</sup>, LIU Yishan<sup>1</sup>, GUO Wenbin<sup>3</sup>, XIONG Haoyu<sup>1</sup>, QIAO Lei<sup>1</sup>, ZHANG Yingbin<sup>4</sup>

1 CNPC Engineering Technology R&D Company Limited, Beijing 102206, China

2 National Elite Institute of Engineering, CNPC, Beijing 100096, China

3 Engineering Research Center for the Safe Exploitation and Comprehensive Utilization of Mineral Resources at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, Hulunbeir 021008, China

4 HydroChina-ITASCA R&D Center, Hangzhou 311122, China

Received: 2021-08-24; Revised: 2022-03-10

**Abstract** The stability of the cavern in the process of underground coal gasification is an important issue for ensuring gasification production. Based on the formation physical properties, dimensions, thermodynamic parameters and rock mechanics parameters of the coal formation in the Shaerhu Sag of the Tuha-Santanghu Basin, the geological-cavity model is established by the discrete element method, and the different pressures of different cavities are studied. Under the conditions of creep, the

引用格式: 董京楠, 何爱国, 刘奕杉, 郭文彬, 熊浩宇, 乔磊, 张应斌. 煤炭地下气化腔体稳定性研究. 石油科学通报, 2024, 04: 690-698

DONG Jingnan, HE Aiguo, LIU Yishan, GUO Wenbin, XIONG Haoyu, QIAO Lei, ZHANG Yingbin. Study of stability of underground coal gasification caverns. Petroleum Science Bulletin, 2023, 05: 690-698. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.04.052

distribution of the plastic zone of the cavity is obtained, and the subsidence of the ground surface is obtained by calculating the long-term creep behavior of the cavity. The conclusion shows that the plastic zone tends to be distributed on the inner wall of the cavity, and on the whole it is dominated by shear failure. There is no large-scale outward expansion within 1 m of the cavity wall. As for a cavity with a radius of 5 m at 1000 m underground, the subsidence to the surface caused by the cavity creep itself is relatively limited, and the main source of surface subsidence is the creep of the coal formation itself. This research provides guidance for the evaluation of the stability of the cavity during the operation and abandonment of underground coal gasification.

**Keywords** underground coal gasification; cavern stability; surface subsidence

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.04.052

## 0 引言

煤炭地下气化是将煤层在地下点燃并进行控制燃烧从而产生可燃气体的过程，其主要问题是气化炉的选择。气化炉设计影响因素主要包括：煤层赋存的地质构造、煤质、预采用的贯通方法等。选择合理的气化炉炉形可以保证产气过程的稳定性，增大煤炭气化过程中可燃气体含量，提高煤炭的综合利用率。目前技术比较成熟的有U型气化炉、V型气化炉、长壁式气化炉、填充式气化炉等。U型气化炉由于施工简单、对煤层赋存条件适应性较高、贯通技术成熟所以被广泛应用。U型气化炉炉形如图1所示，由煤层、煤层顶底板岩层、进气口、排气口、气化通道构成。

随着地下煤炭不断气化消耗，气化炉的空间不断增大，同时煤层上方顶板的裸露面积也不断增大。气化空间不断扩大的同时也伴随着煤层顶板岩层的冒落，若顶板岩层冒落过多，有可能会堵塞气化通道或者影响气化炉的密闭性，甚至造成灭炉或者地表坍塌<sup>[1]</sup>。为了保障气化过程的稳定进行，要求顶板岩层冒落与煤层消耗率处于平衡状态，需要对气化炉周围岩层的特性以及气化腔的稳定性进行深入分析，以实现顶板岩层冒落和煤层消耗率处于平衡状态。

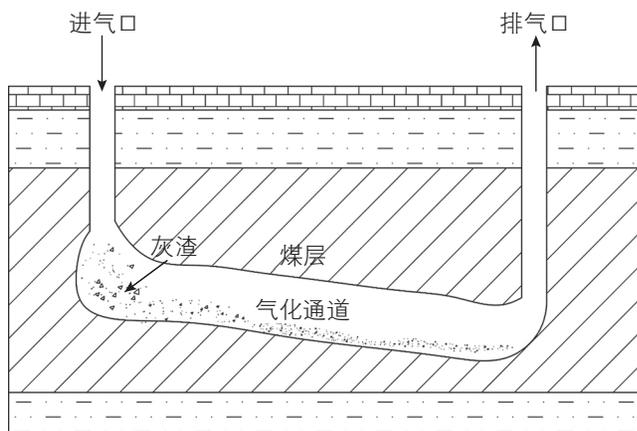


图1 煤炭地下气化原理

Fig. 1 Principle of underground coal gasification

气化腔稳定性影响因素主要有以下几方面：

(1) 气化炉产状、倾角的影响：较大的煤层倾角有利于气化但是技术成本较高，较小的煤层倾角容易造成煤层顶板坍塌，合适的煤炭地下倾角能够降低燃烧后的灰渣掉落的影响<sup>[2]</sup>。

(2) 煤层厚度的影响：煤层厚度越大，煤炭地下气化所获得的粗煤气热值也就越高，两者成正比关系。

(3) 煤层埋深的影响：煤层埋深主要影响气化炉的渗透性和密闭性，煤层埋深越大，密闭性越好，渗透性越小，有利于煤炭地下气化，但也会增加施工作业成本<sup>[3]</sup>。

(4) 盖层的影响：为保障气化炉密闭性，要求有利的顶底板岩层（泥岩或者泥质砂岩）将煤层完全覆盖<sup>[4]</sup>。

煤炭地下气化在国外研究起步较早，前苏联在1933年开始进行UCG现场试验，但生产的粗煤气热值低，产量不稳定，成本高；美国在20世纪80年代发明受控注入点后退（CRIP）气化工艺，能够在一定程度上避免顶板掉落造成气化终止的现象<sup>[5]</sup>；对于燃控区扩展及气化通道的稳定性问题，Evans U. Jegbefume等人<sup>[6]</sup>考虑气化炉周围岩石受热载荷、热软化等因素对煤层顶板冒落和地表沉降进行了研究，结果表明地表下沉主要由覆岩的冒落引起。

国内大量煤炭气化学者给出了包括现场试验、数值模拟和室内实验方面的研究成果。刘建明<sup>[7]</sup>通过数值模拟分析得出热应力的存在改变了围岩垂直应力的分布状态使应力集中更加明显，由于温度改变了岩石的力学性质同时还增加了岩石的热膨胀变形值，使得气化过程燃空区顶底板位移比常规开采要大得多，他还通过实验对煤炭地下气化过程中煤层顶板岩层温度场进行相似模拟研究，并直观地给出了气化炉扩展的形态；席建奋<sup>[8]</sup>通过相似材料方式模拟了煤层顶板泥质软岩并进行了大尺岩层度顶板实验，得到了煤层和顶板温度场的扩展情况，并分析了顶板热应力的变化规律，最终得到了顶板热应力场与煤层温度场扩展速率之间的关系；辛林<sup>[9]</sup>等通过搭建观测站，获得华



30 m。煤层顶界 1136 m，煤层底界 1187 m，煤层厚度 51 m，气化腔底板距离煤层底界 20 m。顶板为厚度 46 m 的粉砂岩，底板为厚度 50 m 的粉砂岩。此设定中，边界效应最明显的维度是宽度维度，在本文进行的模拟中，腔体宽度方向最大特征半径为 5 m，是地层模型宽度的六分之一，这是在计算机算力允许的条件下为了最大程度上减少边界效应进行的选择。其他地层依据 T1-XX1 井钻井地质设计使用泥岩和粗砂岩。FLAC3D 能够进行本研究所需要的热-固耦合计算，并给出塑性区大小、热力学场分布、地表沉降等我们需要的关键参数。此项研究的数值模拟部分由 FLAC3D 完成。FLAC3D 中建模形态如图 3 所示，图中灰色部分为煤层，腔体各大小几何相似，特征半径从左至右分别为 5 m、4 m、3 m、2 m、1 m，腔体是 1/4 半球和 1/2 半圆锥拼接而成的半雨滴形，特征半径为 1/4 半球的半径。

(1) 导热系数

一般来说，认为无烟煤 20 °C 时的导热系数为 0.26 W/(m·K)。烟煤 30 °C 时 0.217 W/(m·K)。各种岩性的导热系数差别不大，且主要的热传导过程存在与煤层，此处取煤岩和其他岩石的导热系数均为定值 0.3 W/(m·K)。

(2) 热膨胀系数

煤岩的热膨胀系数会随温度的升高而升高，主要的热膨胀效应存在于煤层，认为各种岩性的热

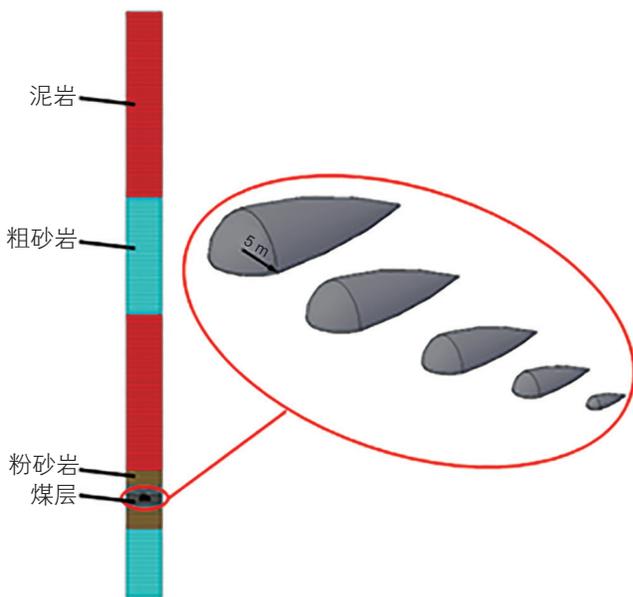


图 3 地层整体分层建模情况及不同尺寸雨滴形腔体形态  
Fig. 3 Overall stratum stratification modeling and raindrop cavity shape of different sizes

膨胀系数相同，根据文献<sup>[8]</sup>取热膨胀系数均为定值  $6.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。

(3) 比热容

煤的比热容会一定程度上随温度变化，本文除了煤岩和其他地层根据文献<sup>[14]</sup>统一取比热容值为 5.0 kJ/(kg·K)。

(4) 岩石的力学参数随温度的变化

抗拉强度方面，根据已有文献，我们将 1000 °C 情况下的抗拉强度定为常温下的 0.5 倍，即 0.165 MPa。

煤的力学性质与温度关系的拟合函数如下所示<sup>[7]</sup>：  
弹性模量 (GPa):

$$y = 10^{-5} x^2 - 0.016x + 6.290 \quad (R^2 = 0.934) \quad (1)$$

内聚力 (MPa):

$$y = 3 \times 10^{-6} x^2 - 0.004x + 6.037 \quad (R^2 = 0.960) \quad (2)$$

热膨胀系数:

$$y = 2 \times 10^{-5} x^2 - 0.007x + 2.131 \quad (R^2 = 0.952) \quad (3)$$

根据内聚力公式计算，0 °C 与 700 °C 的煤岩内聚力相差 1.33 MPa。本文使用的煤的内聚力较小，只有 0.64 MPa，因此在进行高温条件下的屈服计算时，根据所在温度和以上内聚力拟合函数关系式对内聚力降低百分比的预测，内聚力为 0.64 MPa 的 67%，即 0.43 MPa。此处对整个模拟过程中的煤岩内聚力均使用 0.43 MPa。

弹性模量方面，在温度升至 500 °C 之后，弹性模量降至常温下的 1/10 以下，此处取高温情况下的弹性模量为 0.1 倍的常温下弹性模量，即 0.315 MPa。

根据初步数值模拟计算，由于煤层厚度较大，温度对顶底板的影响不大，对顶底板及其他层位的力学参数不做调整。地层热力学参数见表 1。

表 1 热力学参数表

Table 1 Thermodynamic parameters

参数	煤岩、泥岩、粗砂岩、粉砂岩
导热系数	0.3 W/(m·K)
热膨胀系数	$6.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
比热容	5.0 kJ/(kg·K)

2.2 岩石力学参数确定

岩石力学参数选取是进行煤炭地下气化腔体稳定性模拟的关键步骤，力学参数直接影响着稳定性模拟的结果<sup>[15]</sup>。本研究采用吐哈现场试验取芯井关于吐哈沙尔湖岩石力学参数测试的结果，室内实验方法参照《钻井地质环境因素描述技术规范》，具体测试结果不在此详细描述。主要包括地层的弹性模量、泊松比以

表2 岩石力学参数表

Table 2 Mechanical parameters of rock

参数	煤岩	泥岩	粗砂岩	粉砂岩
密度	1.53 g/cm <sup>3</sup>	2.65 g/cm <sup>3</sup>	2.69 g/cm <sup>3</sup>	2.62 g/cm <sup>3</sup>
弹性模量	3.15 GPa	8.75 GPa	7.07 GPa	19.50 GPa
泊松比	0.31	0.26	0.22	0.20
剪切模量	1.20 GPa	3.47 GPa	2.90 GPa	8.13 GPa
体积模量	2.76 GPa	6.08 GPa	4.21 GPa	10.83 GPa
单轴抗压强度	6.46 MPa	14.93 MPa	26.56 MPa	13.23 MPa
抗拉强度	0.33 MPa	0.87 MPa	1.32 MPa	0.73 MPa
稳定蠕变速率	5e <sup>-8</sup> S <sup>-1</sup>			
WIPP模型常数A	15.625	15.625	15.625	15.625
WIPP模型常数B	210.013	210.013	210.013	210.013
WIPP模型常数D	4.768 × 10 <sup>-25</sup> S <sup>-1</sup> Pa <sup>-3.3</sup>	4.768 × 10 <sup>-26</sup> S <sup>-1</sup> Pa <sup>-3.3</sup>	4.768 × 10 <sup>-26</sup> S <sup>-1</sup> Pa <sup>-3.3</sup>	4.768 × 10 <sup>-26</sup> S <sup>-1</sup> Pa <sup>-3.3</sup>
活化能Q(Activation-energy Q)	12 000 cal/mol	12 000 cal/mol	12 000 cal/mol	12 000 cal/mol
气体常数R(Gas constant R)	1.987 cal/(mol·K)	1.987 cal/(mol·K)	1.987 cal/(mol·K)	1.987 cal/(mol·K)
WIPP模型指数n	3.3	3.3	3.3	3.3
温度	300 K	300 K	300 K	300 K
材料常数kphi(内聚力)	0.64 MPa	1.39 MPa	2.61 MPa	1.10 MPa
材料常数kkappa(扩张系数)	0.1	0.1	0.1	0.1
材料常数qphi(内摩擦角斜率)	0.807	0.787	0.780	0.791

及抗压强度、抗拉强度、内聚力、内摩擦角等参数，具体参数见下表2。

### 2.3 腔体形态及工作面气化速度选择

本文将地下气化工作面的长度分别设置为4 m, 8 m, 12 m, 16 m, 20 m, 分别对应运行4 d, 8 d, 12 d, 16 d, 20 d, 此为短期稳定性的模拟时间。长期稳定性模拟中，由于腔体被废弃，不再扩展，因此对20 m工作面长度的腔体进行为期30年的模拟。其中内压变化为人为设定量，我们分别对0 MPa, 2 MPa, 4 MPa, 6 MPa, 9 MPa, 10 MPa腔体内压进行了模拟。腔体形态方面，将气化面认为是半圆形截面，腔体是1/4半球和1/2半圆锥拼接而成的半雨滴形。通过对徐州马庄和重庆中梁山高瓦斯矿井地下气化工作面的平均移动速度进行调研，设置气化工作面的平均移动速度为1 m/d。

### 2.4 腔体稳定性数值模拟

使用FLAC3D有限差分软件中的WIPP模型对煤岩进行蠕变模拟。WIPP模型的第一阶段蠕变速率取决于第二阶段蠕变速率(稳态蠕变速率)表达式如下：

$$\dot{\epsilon}_p = \begin{cases} (A - B\epsilon_p)\dot{\epsilon}_s & \text{if } \dot{\epsilon}_s \geq \dot{\epsilon}_{ss}^* \\ \left[ A - B\epsilon_p \left( \dot{\epsilon}_{ss}^* / \dot{\epsilon}_s \right) \right] \dot{\epsilon}_s & \text{if } \dot{\epsilon}_s < \dot{\epsilon}_{ss}^* \end{cases} \quad (5)$$

WIPP模型中稳态蠕变速率使用如下公式计算

$$\dot{\epsilon}_s = D e^{(-Q/RT)} \bar{\sigma}^n \quad (6)$$

其中式子左边为稳态蠕变速率， $D$ 为WIPP model constant  $D$ ， $D$ 和 $n$ 为待确定的材料常数， $Q$ 、 $R$ 、 $T$ 分别为活化能、气体常数、开尔文温度，参考Xu(2015)的研究<sup>[16]</sup>，取 $n$ 典型值为3.3， $D$ 为 $4.768 \times 10^{-25}$ 。其他地层岩石的稳态蠕变速率取煤层的1/10，即其他地层岩石的 $D$ 为 $4.768 \times 10^{-26}$ 。值得注意的是，腔体的短时稳定性并不受到蠕变的影响，因此此处只考虑温度影响抗拉强度、内聚力这两个岩石破坏参数。

### 2.5 短期腔体稳定性及地表塌陷数值模拟

腔体在形成之后，会因地应力、热应力的影响，腔体壁面产生塑性区。塑性区的大小与腔体形态、岩石力学性质、腔体内压大小等因素有关。图4展示了不同特征半径腔体在以9 MPa的腔体内压状态下运行一段时间后的塑性区分布图。根据气化工作面的平均移动速度(1 m/d)，认为腔体运行4 d、8 d、12 d、16 d、20 d后的形态如图4所示。可以看到，塑性区

趋向于分布于腔体内壁，整体来说以剪切破坏为主，部分位置(腔体顶部及侧面)会出现少量张性破坏区。塑性区分布于腔体壁面向外 1 m 的范围内，未出现大面积向外扩展的情况。值得注意的是，此处设定的煤层的内聚力和抗拉强度全部为高温情况下的数值，要远小于常温情况下的数值。

腔体内压对塑性区的大小影响较大，根据我们的

模拟结果，塑性区的分布范围很大程度上取决于腔体的运行压力，在腔体内压为 9 MPa 时，塑性区基本只分布于腔体内壁表面，随着腔体内压减小，塑性区开始变大。4 MPa 为一个典型的分界点，腔体运行压力大于 4 MPa 时，塑性区基本不随着腔体运行内压变化而变化，当腔体运行压力小于 4 MPa 时，由于气化腔自然形成的半水滴状形态，且顶板为穹顶形状，有利

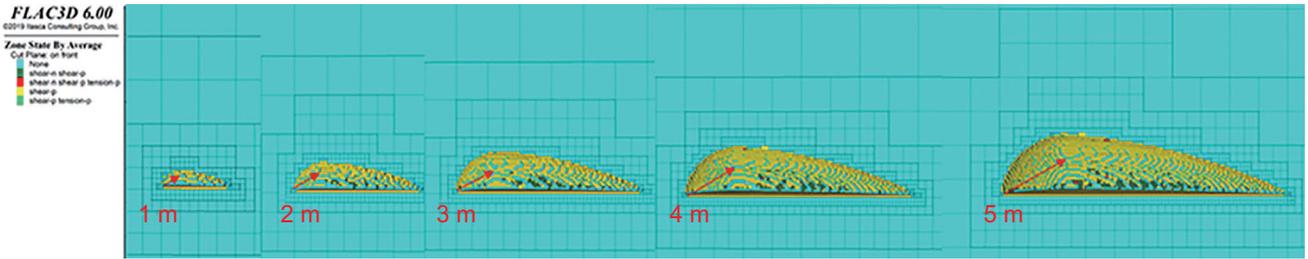


图 4 塑性区分布图(腔体特征半径分别为 1~5 m，对应运行时间分别为 4 d、8 d、12 d、16 d、20 d)

Fig. 4 Distribution of plastic zone(The characteristic radius of the cavity is 1~5 m, and the operation time is 4 days, 8 days, 16 days and 20 days respectively)

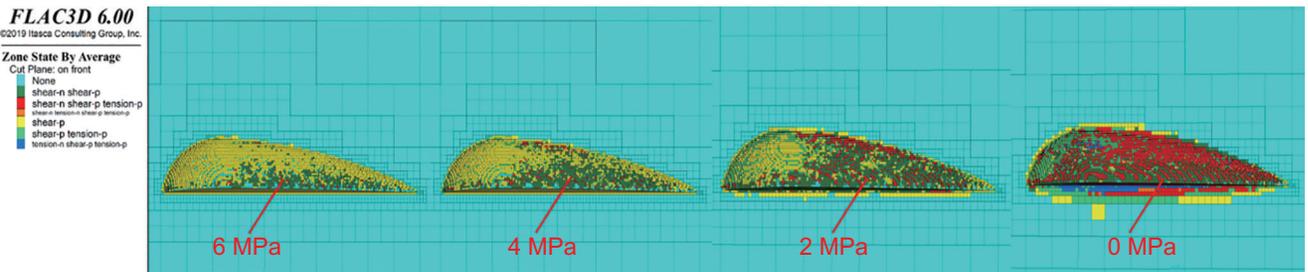


图 5 塑性区分布图(运行时间 20 d，特征半径 5 m，腔体内压分别为 6 MPa、4 MPa、2 MPa、0 MPa)

Fig. 5 Distribution of plastic zone(The operation time is 20 days, the characteristic radius is 5 m, and the internal pressure of the cavity is 6, 4, 2 and 0 MPa respectively)

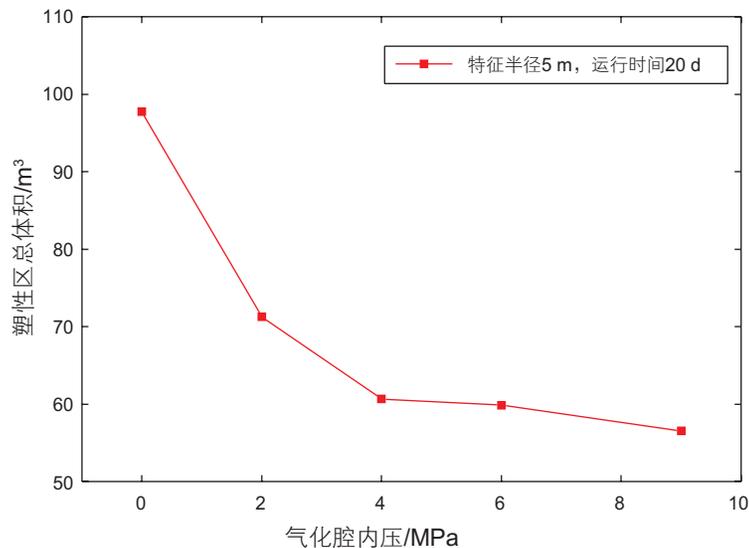


图 6 塑性区体积随气化腔内压变化曲线

Fig. 6 variation curve of plastic zone volume with pressure in gasification chamber

于保证顶板的稳定性。但如果底板为平板形状，则在低内压运行状态下容易出现大面积塑性区，会出现塑性区壁面以外扩展的情况，塑性区的分布范围随压力变化情况如图5所示。图5中，腔体内压为0 MPa时，底板呈现大面积凸起，挤压腔体空间。实际运行过程中，底板会被顶板的冒落所覆盖。

图6表明，腔体内压即使接近地层压力，依然会在腔体内壁出现大面积塑性区。腔体内压塑性区大小在0 MPa至4 MPa区间对腔体内压比较敏感，超过4 MPa之后，腔体塑性区依然会随着内压的增加而减少，但是减少体积不明显。腔体内压在2 MPa以上时，塑性区仅限于内壁向外1 m以内的范围，当腔内内压为0 MPa时，塑性区会扩展至内壁向外3 m左右。

### 2.6 长期腔体稳定性及地表塌陷数值模拟

气化腔废弃后认为腔体内部压力为地层压力，地层压力系数为0.9，腔体位置深度地层压力约为10 MPa。在废弃之后，对模型腔体特征半径分别为5 m、4 m、3 m、2 m、1 m五种情况下的腔体内壁施加10 MPa内压，观察腔体中心线位置对应的地面监测点产生的地表沉降情况以及特征半径为3~5 m的腔体顶板、底板位移。具体数据如图7和图8所示。

由上图7可知，空腔本身所带来的地表沉降比较有限，地表沉降的主要来源是煤层自身的蠕变。原因是煤层较深，腔体的存在对地表的影响较为有限。

腔体特征半径分别为5 m、4 m、3 m、2 m、1 m 5种情况下放置30年后，地表沉降量分别为1265 mm、

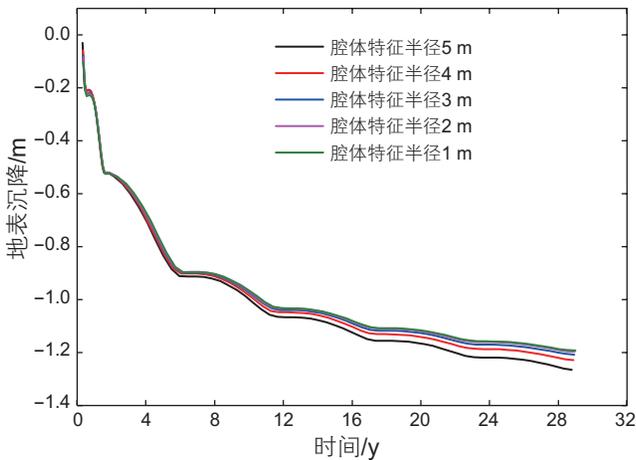
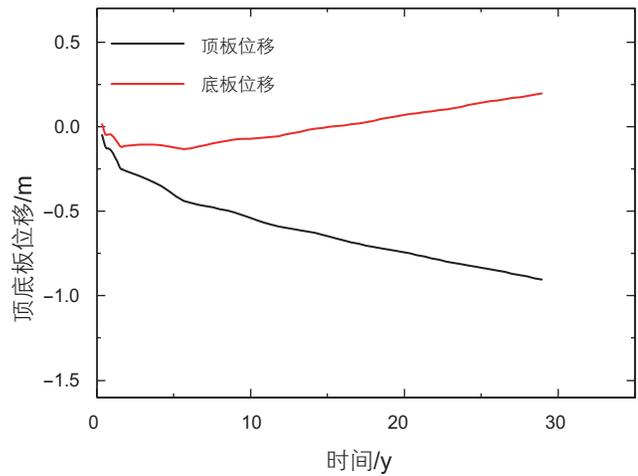
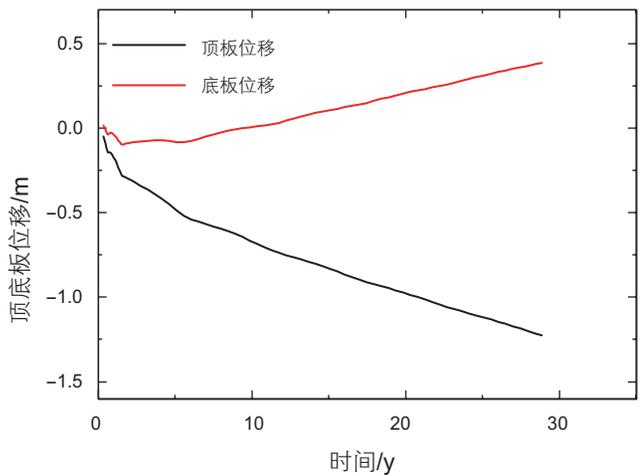


图7 不同特征半径腔体总地表沉降(腔体内压10 MPa, 运行时间30 y)

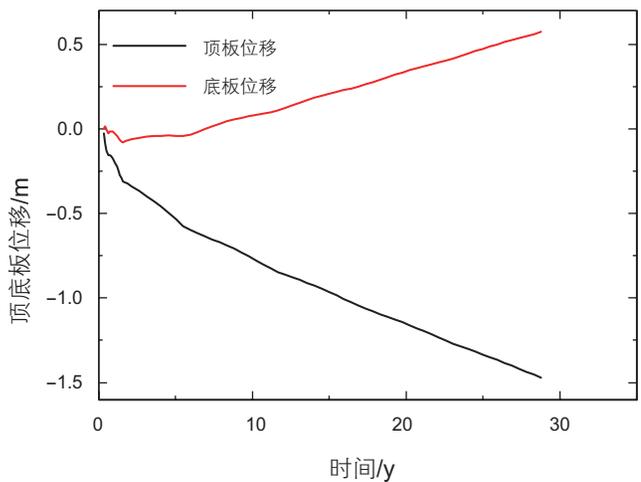
Fig. 7 Total surface settlement of cavities with different characteristic radius (Internal pressure of cavity 10 MPa and operation time of 30 years)



(a) 腔体特征半径3 m



(b) 腔体特征半径4 m



(c) 腔体特征半径5 m

图8 气化腔顶、底板位移(腔体内压10 MPa, 运行时间30 y)

Fig 8 The top and bottom of the gasification chamber are displaced (the pressure in the chamber is 10 MPa, and the operating time is 30 years)

表 3 不同特征半径腔体造成的地表沉降

Table 3 Surface subsidence caused by cavities with different characteristic radii

特征半径/m	地表总沉降/mm	腔体存在引起的地表沉降/mm
1	1193	8
2	1196	11
3	1207	22
4	1228	43
5	1265	80

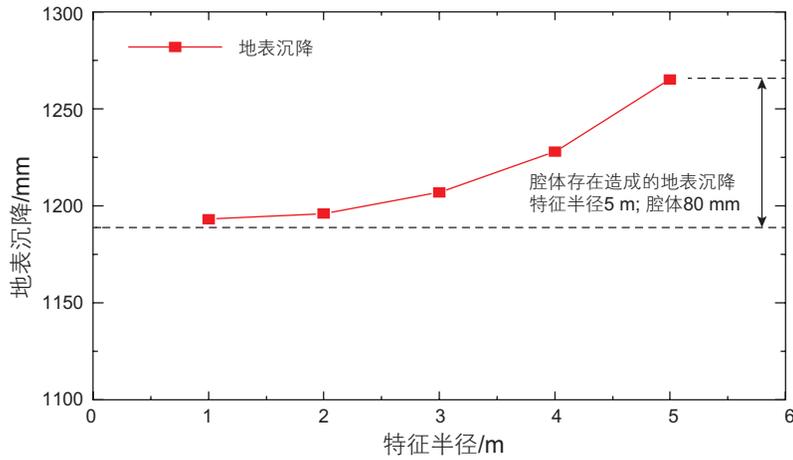


图 9 腔体存在造成的地表沉降(腔体内压 10 MPa, 运行时间 30 y)

Fig. 8 Surface settlement caused by cavity(internal pressure of cavity is 10 MPa, and operation time is 30 years)

1228 mm、1207 mm、1196 mm 和 1193 mm。其中绝大部分 (>90%) 的地表沉降来源于煤层和其他地层的蠕变。5 种情况下, 腔体存在所造成的地表沉降分别为 80 mm、43 mm、22 mm、11 mm、8 mm。具体数如表 3 和图 9 所示, 结果表明, 所研究的腔体大小在此深度引起的地表沉降非常有限。

### 3 总结

本文通过确定地层物性、尺寸、热力学参

数、岩石力学参数, 建立了地层与气化腔离散元模型, 得到不同特征半径的腔体在不同压力条件下的蠕变及塑性区域分布情况, 并对腔体中心线位置对应的地面监测点产生的地表沉降做了分析。结果表明: 塑性区趋向于分布于腔体内壁分布范围很大程度上取决于腔体的运行压力。当腔体运行压力较小时, 会出现塑性区壁面以外扩展的情况。在 1000 m 深度的地层建立特征半径为 5 m 的腔体, 地表沉降主要由于自身的蠕变引起, 气化腔的蠕变对地表沉降所带来的影响比较有限。

### 参考文献

[1] 谌伦建. 煤炭地下气化炉顶板结构模型及其对气化过程的影响[J]. 矿业安全与环保, 2003(6): 1, 7-9. [CHEN L J. Roof structure model of underground coal gasifier and its influence on the gasification process[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2003(6): 1, 7-9.]

[2] 尹振勇, 许浩, 汤达祯, 等. 准东地区煤炭气化地质评价与有利区预测[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(10): 3845-3851. [YIN Z Y, XU H, TANG D Z, et al. Geological evaluation and favorable area prediction of coal gasification in Zhundong area[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(10): 3845-3851.]

[3] 赵岳, 黄温钢, 徐强, 等. 煤炭地下气化地质条件评价研究\_以江苏省朱寨井田为例[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2018, 37(3): 1-11. [ZHAO Y, HUANG W G, XU Q, et al. Evaluation of geological conditions for underground coal gasification\_Taking Zhuzhai Minefield in Jiangsu Province as an example[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science Edition), 2018,

- 37(3): 1–11.]
- [4] 谢明忠. 冀北榆树沟煤矿区褐煤地下气化地质条件分析[J]. 中国煤炭地质, 2008, 9(2): 9–11. [XIE M Z. Analysis on the geological conditions of underground lignite gasification in Yushugou coal mine area in northern Hebei[J]. China Coal Geology, 2008, 9(2): 9–11.]
- [5] 朱铭, 徐道一, 孙文鹏, 等. 国外煤炭地下气化技术发展历史与现状[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(5): 4–9, 15. [ZHU M, XU D Y, SUN W P, et al. Development history and status quo of foreign underground coal gasification technology[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(5): 4–9, 15.]
- [6] JEGBEFUME E U. THE FEASIBILITY OF UNDERGROUND GASIFICATION OF NIGERIAN LIGNITE DEPOSITS[J]. Large Scale Systems in Developed Countries, 1987, 1: 381.
- [7] 刘建明. 煤炭地下气化燃空区扩展及顶板稳定性研究[D]. 中国矿业大学, 2014. [LIU J M. Study on expansion of combustion zone and roof stability of underground coal gasification [D]. China University of Mining and Technology, 2014.]
- [8] 席建奋, 梁杰, 王张卿, 等. 煤炭地下气化温度场动态扩展对顶板热应力场及稳定性的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1949–1955. [XI J F, LIANG J, WANG Z Q, et al. The influence of the dynamic expansion of the temperature field of underground coal gasification on the thermal stress field and stability of the roof[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1949–1955.]
- [9] 辛林, 王作棠, 黄温钢, 等. 条带气化开采覆岩移动与地表沉陷实测分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(3): 447–455. [XIN L, WANG Z T, HUANG W G, et al. Measurement analysis of overburden movement and surface subsidence in strip gasification mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(3): 447–455.]
- [10] 徐云龙. 地下气化过程中煤层顶板岩石渗透特性研究[D]. 太原理工大学, 2014. [XU Y L. Study on rock permeability characteristics of coal seam roof during underground gasification [D]. Taiyuan University of technology, 2014.]
- [11] 柳迎红, 梁新星, 梁杰, 等. 影响煤炭地下气化稳定性生产因素[J]. 煤炭科学技术, 2006(11): 79–82. [LIU Y H, LIANG X X, LIANG J, et al. Production factors affecting the stability of underground coal gasification[J]. Coal Science and Technology, 2006(11): 79–82.]
- [12] 梁杰, 崔勇, 王张卿, 等. 煤炭地下气化炉型及工艺[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(5): 10–15. [LIANG J, CUI Y, WANG Z Q, ET al. Type and technology of underground coal gasification furnace[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(5): 10–15.]
- [13] 王斌, 马跃, 岳长涛, 等. 吉化油泥热解燃烧特性及动力学研究[J]. 石油科学通报, 2021, 6(2): 292–301. [WANG B, MA Y, YUE C T, et al. Study on pyrolysis and combustion characteristics and kinetics of Jihua oil sludge [J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6 (02): 292–301.]
- [14] 彭担任, 赵再春, 禹申友. 煤的比热容及其影响因素研究[J]. 煤, 1998(4): 4–7. [PENG Z, ZHAO Z C, YU S Y. Research on the specific heat capacity of coal and its influencing factors[J]. Coal, 1998(4): 4–7.]
- [15] 曹东升, 曾联波, 吕文雅, 等. 非常规油气储层脆性评价与预测方法研究进展\_曹东升[J]. 石油科学通报, 2021, 6(1): 31–45. [CAO D S, ZENG L B, LV W Y, et al, Tian H. Research progress on brittleness evaluation and prediction methods of unconventional oil and gas reservoirs [J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(1): 31–45.]
- [16] XU SHENG-QI-YANG. PENG-XU. TAO. Nonlinear visco-elastic and accelerating creep model for coal under conventional triaxial compression[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2015, 1(3): 109–120.

(责任编辑 马桂霞 编辑 杨雅露)