

基于强度和渗透性的煤炭地下气化采收率分析

郝鹏程¹,王创业¹,刘 猛²,曹望坤¹,李 翔¹,袁淑霞³,吴 松³,齐文娇³

(1. 中石油煤层气有限责任公司, 北京 100028; 2. 中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司, 北京 100095; 3. 西安石油大学 机械工程学院, 陕西西安 710065)

摘 要: 中深层煤炭地下气化是新型的煤炭利用技术, 尚缺乏采收率评价标准。剩余煤墙强度和气体渗透性是气化后地层安全性的重要评价指标。为确保气化后地层安全性, 基于强度和渗透性理论, 采用有限元法对多因素影响下煤层应力分布状态进行分析, 得到不同载荷作用下煤层产生裂纹的临界条件, 确定不同形状气化腔、不同厚度煤层以及不同地层压力和工作压力下的最小预留煤墙厚度; 采用 Darcy 定律对煤层渗透率进行分析。根据强度和渗透率计算地下气化过程可用于气化的煤量, 结合煤炭采区回采率和油田原油采收率定义煤炭地下气化采收率, 并针对不同煤层厚度、不同形状气化腔进行了采收率计算。研究表明, 煤炭地下气化无法以回采率衡量其采收率, 因气化腔的圆柱/圆锥形状特点, 其采收率低于煤炭开采过程的回采率, 预留安全煤墙后, 煤炭地下气化采收率进一步降低。随着煤墙厚度的增加, 采收率逐渐降低, 但煤墙厚度对厚煤层影响较小, 对薄煤层影响较大。煤层越厚, 需要预留的最小煤墙厚度越大, 但采收率越高, 尤其是梨形气化腔更是如此。与煤炭开采不同, 煤炭地下气化采收率受煤层厚度影响较大, 如果采用梨形气化腔, 薄煤层的开采价值较低。煤炭地下气化解了深层煤炭的开采利用问题, 由于国内外尚未建立起煤炭地下气化采收率评价方法, 该研究结果可为煤炭地下气化选址、资源评价和气化工艺的制定提供参考, 也可为煤炭地下气化采收率标准的制定提供参考。

关键词: 煤炭地下气化; 采收率; 气化腔; 煤层强度; 渗透率

中图分类号: TD844 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2023)09-3562-11

Analysis of recovery rate for underground coal gasification based on strength and permeability

HAO Pengcheng¹, WANG Chuangye¹, LIU Meng², CAO Wangkun¹, LI Xiang¹,
YUAN Shuxia³, WU Song³, QI Wenjiao³

(1. PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China; 2. China United Coalbed Methane National Engineering Research Center Co., Ltd., Beijing 100095, China; 3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: The medium and deep underground coal gasification (UCG) is a new technology of coal utilization, and there is still lack of criterions to evaluate recovery rate. The strength of remaining wall between the gasification chambers and the gas permeability are two important factors indicating the safety of the formation. To ensure the safety of the formation after gasification, the recovery rate was defined according to the wall strength and seam permeability theory. Firstly, the stress distribution of target coal seam under the influence of the multiple factors was analyzed through the finite element

收稿日期: 2022-07-23 修回日期: 2022-09-12 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.1097

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技攻关资助项目 (2019E-25)

作者简介: 郝鹏程 (1973—), 男, 辽宁大连人, 高级工程师, 硕士。E-mail: haopengcheng@petrochina.com.cn

通讯作者: 袁淑霞 (1977—), 女, 内蒙古通辽人, 教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: flowingcloud269@163.com

引用格式: 郝鹏程, 王创业, 刘猛, 等. 基于强度和渗透性的煤炭地下气化采收率分析[J]. 煤炭学报, 2023, 48(9): 3562-3572.

HAO Pengcheng, WANG Chuangye, LIU Meng, et al. Analysis of recovery rate for underground coal gasification based on strength and permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(9): 3562-3572.



移动阅读

method, and the critical conditions of crack under different loads were analyzed. The minimum wall thickness between the gasification chambers was determined under different conditions, such as different shape of the gasification chamber, different thickness of the coal seam, and different formation pressure and working pressure. Secondly, the Darcy Law was used to analyze the coal seam permeability quantitatively. Thirdly, the amount of coal could be used by the underground coal gasification process was calculated, and the recovery rate of underground coal gasification was defined based on the mining rate of coal and the recovery rate of crude oil. Finally, the recovery rates of different formation thicknesses and different gasification chambers were calculated and analyzed. The research results reveal that the recovery rate of UCG cannot be measured by the mining rate. Due to the cylindrical/conical shape of the gasification chamber, the recovery rate is lower than that of coal mining. Because a wall between the gasification chambers is kept to support the roof rock, the recovery rate of UCG is reduced further. With the increase in the wall thickness, the recovery rate decreases. However, the influence of wall thickness on the thick coal seam is minor, while the influence on the thin coal seam is greater. The thicker the coal seam, the thicker the wall between the chambers. On the other hand, the recovery rate of thick coal seam is greater than that of thin coal seam, especially for the pear-shaped gasification chamber. Different from coal mining, the recovery factor of UCG is affected significantly by the thickness of the coal seam. If a pear-shaped gasification chamber is used, the mining value of thin coal seam is low. Underground coal gasification provides a solution for deep coal mining and utilization. Since no UCG recovery rate evaluation method has been established universally, the results of this work provide a reference for the site selection, resource evaluation and gasification process of underground coal gasification, as well as the formulation of UCG recovery rate criterions.

Key words: underground coal gasification; recovery rate; gasification chamber; strength of coal seam; permeability

为合理开发和保护煤炭资源,提高煤炭资源利用率,根据《中华人民共和国煤炭法》^[1],在煤炭开采、利用过程中应进行回采率的监督考查。国家发改委2013年1月施行的《生产煤矿回采率管理暂行规定》^[2]第10条指出,采区回采率=采区采出煤量(t)/采区动用储量(t)×100%。采区采出煤量是指采区内所有工作面采出煤量与掘进煤量之和,采区动用储量指采区采出煤量与损失煤量之和。GB 50215—2015《煤炭工业矿井设计规范》^[3]及 GB/T 31089—2014《煤矿回采率计算方法及要求》^[4]中规定了不同类型煤矿的回采率最小值。

常规煤炭开采中提高回采率的方法已相对成熟^[5-8],但煤炭地下气化是一种新型的化学采煤技术,是对中深层煤炭资源的开发利用^[9-11]。与常规煤炭开采不同,煤炭地下气化不是工作面形成后再向回开采,显然无法以回采率来衡量资源利用率。在煤炭地下气化这个全新的领域里,采收率尚缺乏评价方法和评价标准,相关研究也很少,仅有 LI 等^[12]根据剩余煤柱宽度方面探讨了提高煤炭地下气化采收率问题。

结合煤炭采区回采率和油田原油采收率(采出原油数量与油藏原始地质储量之比),将煤炭地下气化采收率定义为气化煤用量与动用煤炭资源量之比。煤炭地下气化的最终产品是气体,气体的产量不但与气化用煤有关,还与注入的气体有关,这部分对应煤炭采出后的地上气化过程中的煤气产率、气化效率、碳

转化率等参数,煤炭地下气化采收率评价的是资源的采收率,只与气化的煤量有关。事实上参与气化的煤量也随反应工况发生变化,基于强度和渗透性临界条件计算的是该工况下所能达到的最大采收率。

根据地质评价与选址^[13-14]、气化炉建造以及煤层厚度确定气化腔尺寸^[15-16],建立气化炉之间煤墙分析模型,根据强度准则和渗透率准则,确定满足强度和渗透性要求的最小煤墙厚度,根据气化腔体积及动用资源体积计算采收率。在此基础上研究不同形状气化腔、不同厚度煤层可达到的最大采收率。

1 煤炭地下气化采收率理论分析

1.1 煤炭地下气化采收率影响因素分析

影响煤炭地下气化采收率的主要因素包括:

(1) 煤层和岩层物性,主要指煤炭资源赋存条件的限制,物性包括煤层在不同温度下的强度、热导率、膨胀系数等;赋存条件指岩层顶板等地质构造、煤层结构、煤层厚度等。

(2) 煤炭地下气化过程中的气化腔结构和位置设计,预留煤墙尺寸、气化腔的形状、大小等。

1.2 强度准则

强度准则又称破坏准则,即在某一应力或组合应力的作用下,材料产生破坏的判据。强度不足引起的失效现象主要归结为屈服和断裂两大类^[17]。岩石力学研究表明,岩石破坏有2种基本类型:一是脆性

破坏,它的特点是岩石达到破坏时不产生明显的变形;二是塑性破坏,破坏时会产生明显的塑性变形而不呈现明显的破坏面。通常认为,岩石的脆性破坏是由于应力条件下岩石中裂隙的产生和发展的结果;而塑性破坏通常是在塑性流动状态下发生的,因组成物质颗粒间相互转移所致^[18]。目前岩石的强度理论多数是从应力的观点来考察材料破坏,具有代表性的有 Mohr-Coulomb(莫尔-库伦)强度准则、Drucker-Prager(德鲁克-普拉格)准则(简称 D-P 岩石破坏准则)和 Griffith(格里菲斯)强度准则。本文采用 Mohr-Coulomb 准则作为煤层失效判据。Mohr-Coulomb 强度准则是建立在对试验数据(单轴压缩和三轴压缩)统计分析基础之上,其基本思想为:岩石不是在简单应力状态下发生破坏,而是在不同的正应力和剪应力组合作用下发生破坏进而丧失承载能力,并认为岩石材料的破坏属于剪切破坏,即在剪应力与正应力综合作用下丧失承载能力。Mohr-Coulomb 强度准则可以用莫尔极限应力圆直观地表示。

如图 1 所示(图中, σ_1 和 σ_3 分别为最大和最小主应力; θ 为剪切面与最小主应力 σ_3 之间的夹角; σ 为正应力; τ 为剪应力),在 σ - τ 坐标系中 Mohr-Coulomb 强度包络线的表达式为

$$|\tau_f| = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中, τ_f 为正应力 σ 作用下的极限剪应力, MPa; c 为该类型岩石的黏聚力, MPa; φ 为内摩擦角, ($^\circ$)。

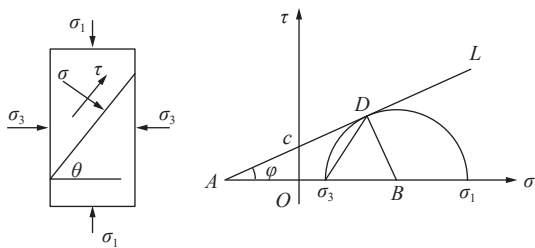


图 1 Mohr-Coulomb 破坏准则及破坏面

Fig.1 Failure criterion of Mohr-Coulomb and Mohr strength

式(1)在 τ - σ 平面上是一条曲线,即在不同应力状态下达到破坏时的应力圆的包络线。根据 Mohr-Coulomb 强度理论,在判断材料内某点处于复应力状态下是否破坏时,只要在 τ - σ 平面上作出该点的莫尔应力圆。如果所作应力圆在莫尔包络线以内,则通过该点任何面上的剪应力都是小于相应面上的抗剪强度,说明该点没有破坏。如果所绘应力圆刚好与包络线相切,则通过该点有一对平面上的剪应力刚好达到相应面上的抗剪强度,该点开始破坏,或者称之为处于极限平衡状态。

1.3 煤层渗透率计算方法

根据达西定律,煤层的渗透率可表示为

$$K = \frac{Q\mu L}{A\Delta p} \quad (2)$$

式中, K 为煤层渗透率, m^2 ; Q 为渗透量, m^3/s ; μ 为渗透流体的黏度, $Pa \cdot s$; L 为煤墙厚度, m ; A 为通流面积, m^2 ; Δp 为煤墙两侧压差, Pa 。

根据式(2)计算所选煤墙厚度下一定孔隙率煤层不同气化腔每天的泄漏量。根据强度分析和渗透率分析结果确定的气化腔计算采收率。

1.4 煤炭地下气化采收率计算方法

在煤炭地下气化过程中,煤炭采出量可以理解为参与气化的煤,即气化腔的总体积。则煤炭地下气化的采收率可表示为气化腔的体积与采区煤层体积之比,即

$$\text{采收率} = \frac{\text{气化腔体积}(m^3)}{\text{采区煤层体积}(m^3)} \times 100\% \quad (3)$$

当存在落煤时,采区采收率表示为

$$\text{采收率} = \frac{(\text{气化腔体积} - \text{落煤体积})(m^3)}{\text{采区煤层体积}(m^3)} \times 100\% \quad (4)$$

2 基于强度和渗透率分析的最小煤墙厚度计算

煤炭地下气化产生可燃性或腐蚀性气体,一旦发生泄漏,将会污染地下水和影响地层结构,因此气化腔结构需满足渗透性要求。而强度是保持气化腔结构完整性的重要指标,气化腔顶底板、气化腔之间的煤墙必须满足强度要求^[19-21],反之,轻者会造成气化腔泄漏,重者会造成气化腔坍塌,发生事故。因此从强度和渗透率 2 个方面研究最小煤墙厚度。

2.1 最小煤墙厚度有限元分析

2.1.1 模型及网格划分

采用有限元法进行强度分析,根据岩石材料失效准则判定煤墙最小安全厚度。煤炭地下气化的气化腔多为梨形连续腔或梨形单腔(图 2),如果气化腔较长,将会有很长的圆柱段,圆柱形腔比梨形腔强度更弱,选择圆柱形腔进行强度分析,建立图 3 所示的强度分析模型,图 3 中气化腔直径为 24 m,气化腔长度为 60 m,煤墙距离根据强度分析结果确定。采用间接耦合方法进行数值模拟,首先进行热分析,选择 8 节点六面体 Solid 278 单元,该单元具有温度自由度,最终输出节点温度。划分网格如图 3 所示(2 种颜色分别代表不同材料)。热分析结束后,得到所有节点的温度,同时需要将网格单元转化为结构分析单元,采用钢筋混凝土单元 Solid 65,该单元作为混凝土使用时

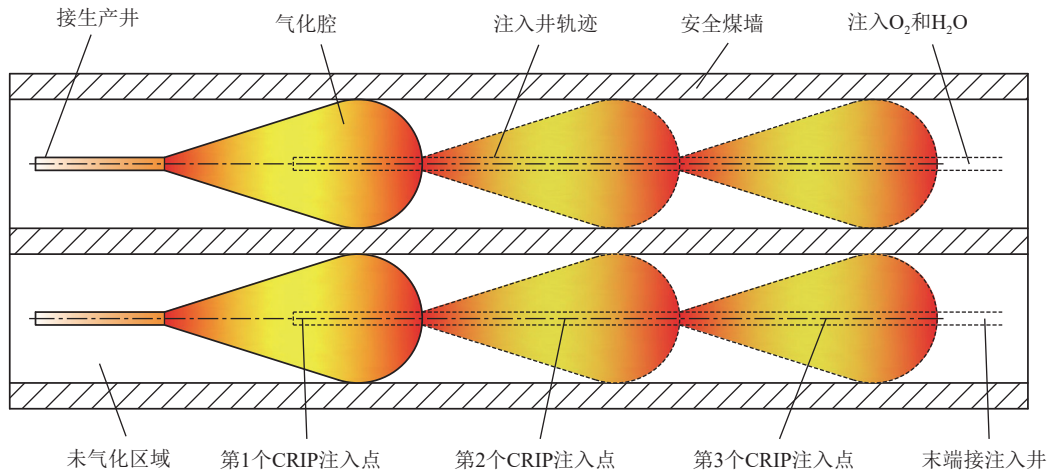


图 2 煤炭地下气化梨形气化腔

Fig.2 Pear-shaped gasification chambers of underground coal gasification

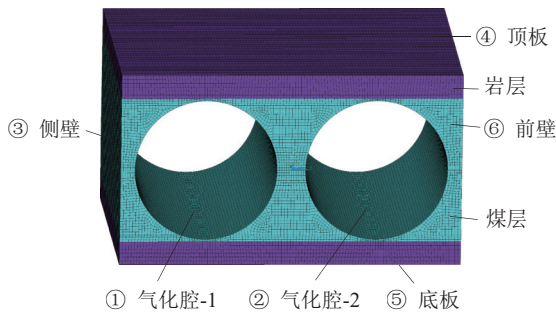


图 3 煤墙强度分析模型

Fig.3 Modelling of strength analysis

可在 3 个方向分别配筋, 而作为煤炭等岩石力学分析时不配钢筋。单元转化完成后, 将节点温度作为体载荷施加于强度分析单元上, 再施加强度分析所需边界条件。

通过划分不同数量网格进行对比分析, 可以看出网格密度对温度场分布几乎无影响, 对最高应力略有影响, 但随着网格数量的增加, 最高应力趋于稳定。例如当气化腔直径为 24 m, 煤墙厚度为 5 m, 压力为 6 MPa, 地层温度为 350 K, 气化温度为 1 300 K, 两气化腔同时气化时, 不同网格密度下的最高温度和最大 Von mises 应力对比见表 1。选择网格数为 268 000 进行计算。

表 1 不同网格密度最高温度和最大 Von mises 应力对比

Table 1 Comparison of maximum temperature and maximum Von mises stress for different mesh quantities

网格数量	最高温度/°C	最大应力/MPa
163 600	1 027	49.3
202 500	1 027	54.8
268 000	1 027	55.1
456 800	1 027	55.1

2.1.2 材料属性及本构方程

分别指定煤炭和岩石的材料属性。考虑温度影响的煤力学分析材料属性包括密度、弹性模型、泊松比、线膨胀系数、热导率、非线性本构方程、破坏准则等。根据实验结果, 煤的密度以视密度表示, 为 1 350 kg/m³、弹性模量和泊松比分别为 3.133 GPa 和 0.36、线膨胀系数取 6.435×10⁻⁶ °C⁻¹、热导率为 1.2 W/(m·K)、非线性本构方程采用 Drucker-Prager 模型, Drucker-Prager 模型需要给定材料的黏聚力、内摩擦角和膨胀角。其中的膨胀角用于控制体积膨胀大小, 在岩土工程中, 一般密实砂土和超强固结土在发生剪切时会由于颗粒重新排列而出现体积膨胀; 而一般砂土或正常固结的土体, 只会发生剪缩, 煤炭结构也适用于该情况, 因此膨胀角设置为 0°。根据文献 [22] 的实验结果, 煤的黏聚力及抗拉强度随着围压的增加而增加, 当围压为 10 MPa 时, 煤的黏聚力为 13 MPa, 内摩擦角为 21.4°, 抗拉强度极限为 1.15 MPa, 抗压强度极限为 60.7 MPa, 抗剪强度极限为 21 MPa。因煤炭为脆性材料, 在拉力作用下容易开裂, 而压力过大也会被压碎。鉴于研究目的是确定满足强度要求的最小煤墙厚度, 并非进行极限分析, 不考虑压碎情况, 关闭压碎选项。为防止拉力作用下的破坏, 考虑开裂情况, 并假设裂纹张开时的剪切传递系数是 0.4, 裂纹闭合时的剪切传递系数是 0.9, 根据文献 [23] 确定煤的单轴起裂强度为 9.8 MPa。

2.1.3 边界条件

考虑气化过程的温度场、压力场及地层应力进行强度分析。煤炭地下气化是在高温下的化学反应过程, 温度的影响不可忽略, 采用热-应力耦合分析, 首先进行温度场分析, 再把温度场分析后的节点温度施加于强度分析模型, 进行煤层受力强度分析。气化腔

顶部和底部按地层压力和温度计算,热分析时 4 个侧面为绝热边界,强度分析 2 个侧面为对称边界,前后表面约束位移。气化腔轴向温度按线性变化,所施加

边界条件见表 2,共包含 46 种工况。其中对称边界代表 2 个气化腔同时气化,非对称边界代表一个气化腔冷却之后进行另一气化腔的气化。

表 2 计算工况

Table 2 Working conditions

气化腔直径/m	最小煤墙厚度/m	左腔		右腔		地层		
		温度/K	压力/MPa	温度/K	压力/MPa	温度/K	压力/MPa	
24	对称边界	880~1 300	4	880~1 300	4	350	10	
			6		6			
			8		8			
			10		10			
			4		4			
			6		6			
	非对称边界	350	10	4	880~1 300	4	350	10
				6		6		
				8		8		
				10		10		
				4		4		
				6		6		
30	对称边界	880~1 300	4	880~1 300	4	350	10	
			6		6			
			8		8			
			10		10			
			4		4			
			6		6			
	非对称边界	350	10	4	880~1 300	4	350	10
				6		6		
				8		8		
				10		10		
				4		4		
				6		6		
20	2	880~1 300	4	880~1 300	4	350	10	
	3	880~1 300	4	880~1 300	4	350	10	
16	2	880~1 300	4	880~1 300	4	350	10	
12	2	880~1 300	4	880~1 300	4	350	10	

2.2 煤墙应力分析

2.2.1 直径 24 m 对称工况

当气化腔直径为 24 m, 若两腔同时气化时, 所选区域的温度场分布如图 4 所示, 气化腔内温度在轴向方向呈梯度变化, 最高温度为 1027 °C。中间煤墙温度较高。

根据图 4 所示的温度场分布及前述边界条件进行强度分析, 得到所选区域内的应力分布。计算结果包括每个方向正应力、剪应力、3 个主应力、第三强度理论等效应力、第四强度理论等效应力等。通过应力云图无法直观显示 Mohr-Coulomb 强度理论等岩石材料等效应力, 但第四强度理论 (Von mises) 等效应力体现了 3 个主应力的综合影响, 可以表现出多向应力条件下材料的应力分布情况。对比了不同煤墙厚度情况下腔内压力为 6 MPa 时的 Von mises 等效应力分布情况, 如图 5 所示。可见在内压力作用下气化腔周围的应力分布基本呈蝶形, 两腔之间的煤墙处应力较高,

尤其是煤墙较窄时。随着煤墙厚度的增加, 最大应力逐渐转移至顶层岩板和底层岩板接触处, 但由于岩板的保护, 该处不会导致破坏, 最危险截面仍为煤墙中

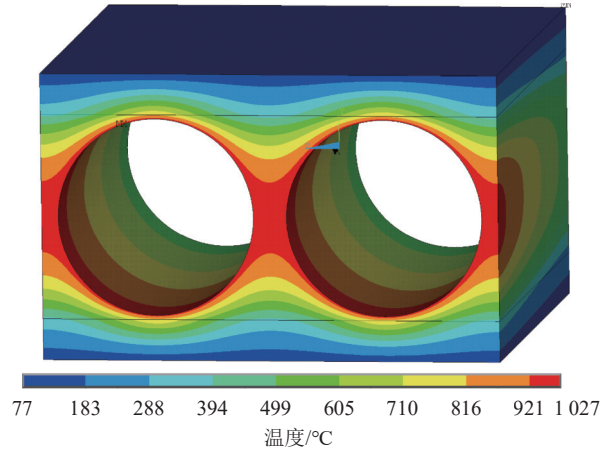


图 4 温度场分布

Fig.4 Distribution of temperature

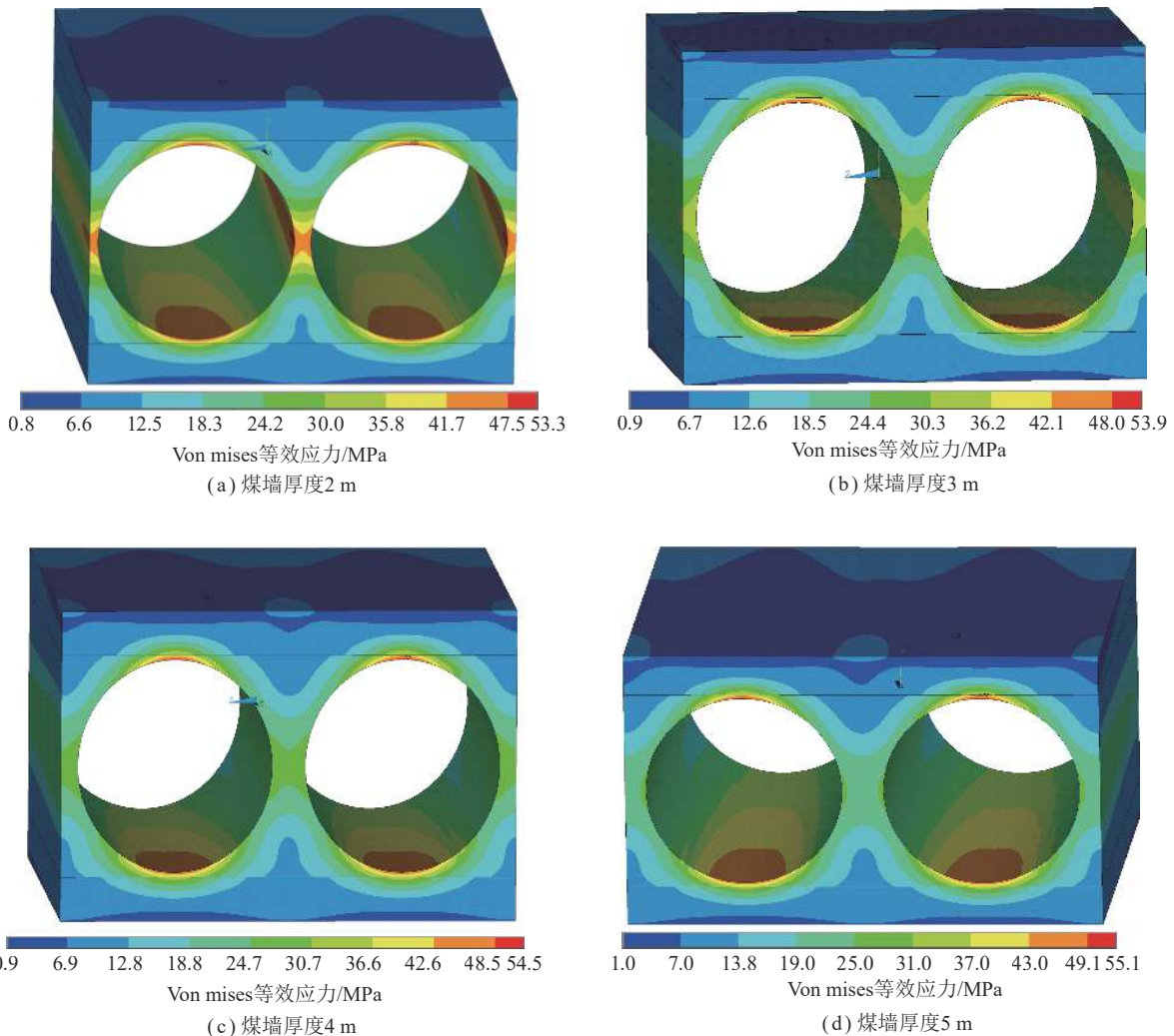


图 5 不同煤墙厚度等效应力对比

Fig.5 Comparison of von Mises stress for different wall thickness

心处。

根据 Mohr-Coulumb 准则对强度进行评定, 选取每个计算模型的煤墙中间位置作为分析面, 宽度为整个煤墙厚度, 高度和长度各为 2 m 计算 3 个方向的主应力, 画出应力圆。不同厚度煤墙的气化腔结构在不同压力下 σ - τ 平面的应力圆如图 6 所示。在工作压力为 6 MPa 时不同厚度煤墙气化腔的应力圆如图 7 所示。应力圆与 σ 轴的右侧交点为 σ_1 (第 1 主应力), 左

侧交点为 σ_3 (第 3 主应力), 半径为 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 。图 6 中截距 c 为材料的黏聚力, 煤的黏聚力随着围压的增加而增加, 无烟煤在围压 10 MPa 下的黏聚力为 13 MPa; 夹角 φ 为内摩擦角, 无烟煤的内摩擦角为 21.4° , 由截距 c 和内摩擦角 φ 确定的线为包络线。应力圆在包络线以下代表按照 Mohr-Coulumb 准则材料不会发生破坏, 与包络线相切代表临界状态, 与包络线相割代表材料发生破坏。

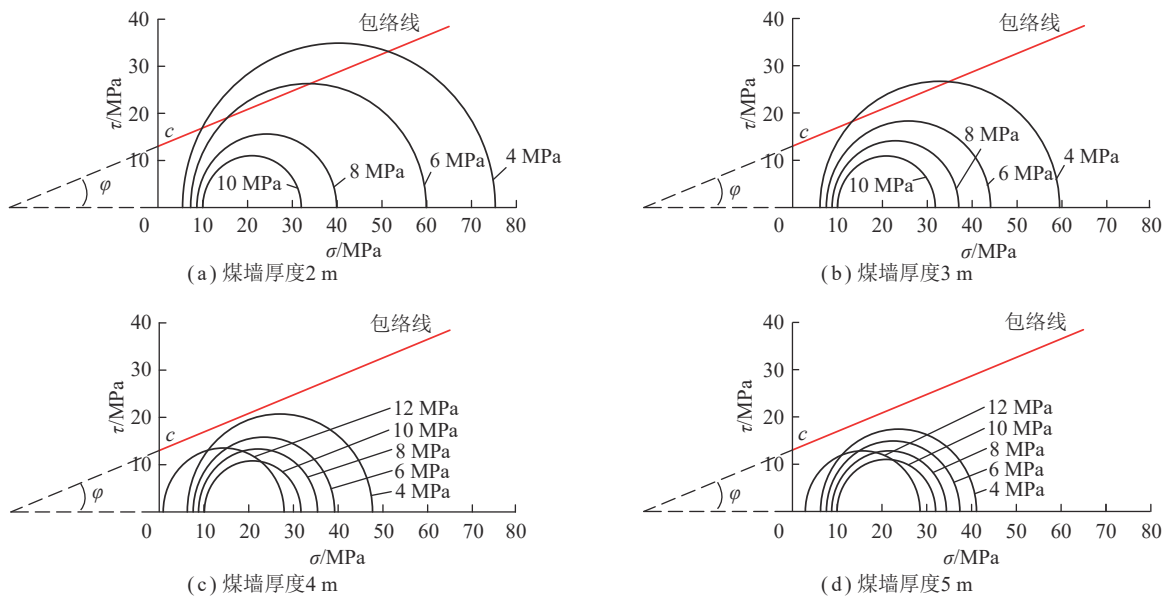


图 6 不同压力下不同厚度煤墙莫尔强度对比

Fig.6 Comparison of Mohr strength of different wall thickness under different pressure

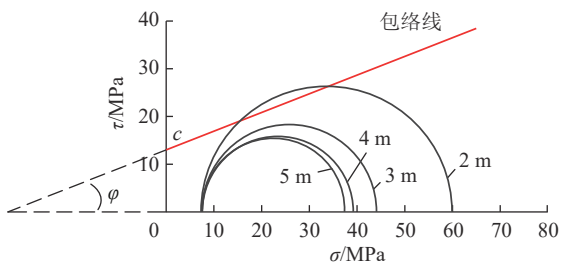


图 7 6 MPa 下不同厚度煤墙莫尔强度对比

Fig.7 Comparison of Mohr strength of different wall thickness under the pressure of 6 MPa

从图 6 可以看出, 对于两气化腔温度压力完全相同工况, 气化腔压力越接近地层压力, 应力圆越小, 代表越安全; 气化腔压力与地层压力相差越大, 应力圆越大, 煤墙越容易破坏; 当气化腔压力高于地层压力时, 即图 6(c)、(d) 中 12 MPa 情况, 应力圆严重左移, 有可能出现拉应力, 使得煤层更容易出现裂纹。由图 7 可以看出, 工作压力相同时, 不同厚度煤墙的 σ_3 相同, 但 σ_1 随着煤墙厚度的增加而减小, 应力圆半径也随之减小, 代表煤墙越安全。

当煤墙厚度为 2 m 时, 气化腔压力为 4 和 6 MPa 时应力圆与包络线相割, 而煤墙厚度为 3 m 时, 气化腔压力为 4 MPa 时应力圆与包络线相割, 实际操作中应根据应力圆与包络线相对位置确定煤墙厚度。

2.2.2 直径 24 m 非对称工况

煤炭地下气化过程中, 通常会出现一个气化腔气化完成后再进行下一个腔的气化情况, 极端情况是假设气化完成的腔已冷却至地层温度。假设第 1 个腔的压力与地层压力相同, 温度为地层压力, 研究第 2 个腔在工作温度下压力分别为 4、6、8 和 10 MPa 时煤墙的应力状态。各工况下的应力圆如图 8 所示。

由图 8 可以看出, 应力圆直径先随着工作压力的增加而缩小, 进而随着工作压力的增加而增大。尤其是当工作压力大于 8 MPa 后, 应力圆出现左移现象, 意味着拉应力的出现。尽管图 8 中当工作压力为 10 MPa 时所有平均应力仍均为压应力, 但输出所有点的应力发现已有部分节点应力为拉应力, 并且在煤墙中间部位已出现了裂纹(图 9), 因此煤墙厚度为 4 m 已无法适用于该工况, 将煤墙厚度增加到 5 m 后强度

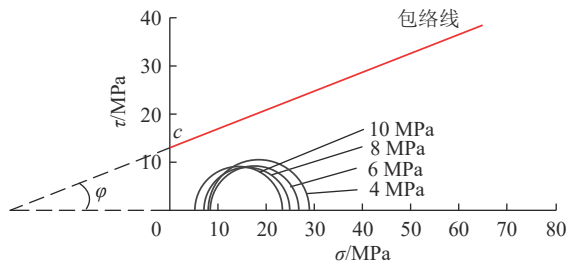


图 8 煤墙厚度 4 m 非对称工况不同压力下的应力圆

Fig.8 Comparison of asymmetrical Mohr's stress circle of wall with the thickness of 4 m under different pressure

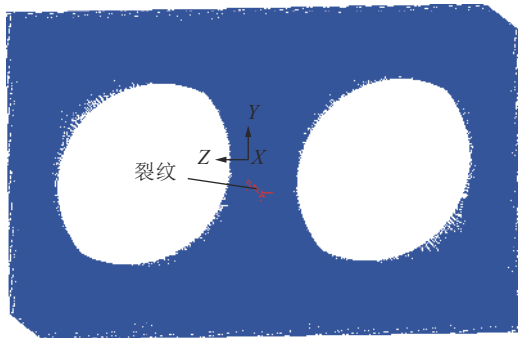


图 9 煤墙中出现裂纹

Fig.9 Cracks appeared in the wall

满足要求。

2.2.3 不同煤层厚度对比

由于煤层厚度的差异, 气化腔直径也随之变化。气化腔直径的改变将导致应力圆发生变化。由图 10 可以看出, 当气化腔直径为 20 m、工作压力为 4 MPa 时, 煤墙厚度 2 m 时应力圆与包络线相割, 煤墙厚度为 3 m 时应力圆与包络线相切, 与图 6(a)、(b) 相比, 其安全性已大大提高。通过对气化腔直径为 30、20、16 和 12 m 进行计算可知, 当气化腔直径为 30 m 时, 煤墙最小厚度需取为 6 m 以上, 气化腔直径为 20 m 和 16 m 时, 煤墙最小厚度可取为 3 m, 而气化腔直径为 12 m 时, 煤墙最小厚度可取为 2 m。

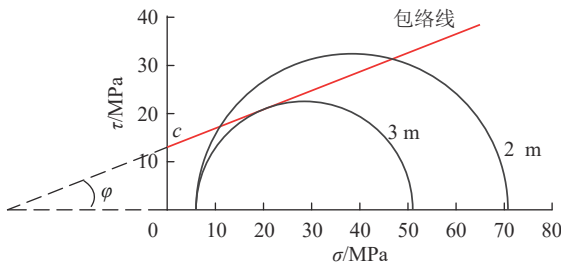


图 10 直径 20 m、工作压力 4 MPa 时不同厚度煤墙应力圆

Fig.10 Mohr's stress circle of different wall thickness under the pressure of 4 MPa for a gasification chamber with the diameter of 20 m

2.3 渗透率分析

根据式 (2) 所示的 Darcy 定律可得煤层渗透量为

$$Q = \frac{KA\Delta p}{\mu L} \quad (5)$$

由文献 [17], 煤层渗透率随着煤层压力的升高而降低, 具体关系如图 11 所示, 可知当地层压力为 10 MPa 时, 煤层渗透率为 $0.002 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。

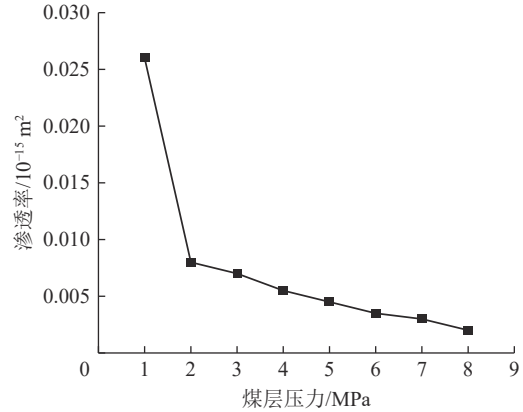


图 11 渗透率与煤层压力关系

Fig.11 Relationship between permeability and pressure

按照最危险工况, 取渗透面积为 $D \times 60 \text{ m}^2$ (D 为气化腔直径), 当工作压力为 10 MPa, 已完成气化腔压力为 4 MPa 时二者压差最大, 取 $\Delta p_{\text{max}} = 6 \text{ MPa}$ 。 L 分别取 2、3、4、5 和 6 m。气体在 1000 °C、10 MPa 下的黏度为 $51.92 \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

根据式 (5), 计算各工况下一个气化腔的日渗透量见表 3, 压差为 6 MPa、煤墙厚度 2 m 时不同直径气化腔每天渗透量见表 4。其中最大渗透量为 $133.65 \text{ Nm}^3/\text{d}$, 通过计算, 该尺寸气化腔粗煤气产量约为 $3 \times 10^5 \text{ Nm}^3/\text{d}$, 泄漏量仅占粗煤气产量的 0.04%, 因此, 对渗透率而言煤墙厚度足够。

表 3 气化腔直径 30 m、压差 6 MPa 时不同煤墙厚度渗透量
Table 3 Permeability of different wall thicknesses under the gasification chamber diameter of 30 m and the pressure difference of 6 MPa

煤墙厚度/m	2	3	4	5	6
渗透量/(Nm ³ · d ⁻¹)	133.65	89.10	66.82	53.46	44.55

表 4 不同直径气化腔压差 6 MPa、煤墙厚度 2 m 渗透量
Table 4 Permeability of different gasification chamber diameter under the pressure difference of 6 MPa with the wall thickness of 2 m

直径/m	30	24	20	16	12
渗透量/(Nm ³ · d ⁻¹)	133.65	106.92	89.10	71.28	53.46

3 煤炭地下气化采收率计算

3.1 煤炭地下气化采收率计算方法

根据《生产煤矿回采率管理暂行规定》，生产煤矿采区回采率采用式 (3) 进行计算。在煤炭地下气化过程中，采出煤量可以理解为参与气化的煤量，即气化腔的总体积。则煤炭地下气化的采收率可表示为气化腔的体积与采区煤层体积之比。当存在落煤时，采区采收率表示为式 (4)。

3.2 不同条件下气化腔的采收率计算

3.2.1 气化腔形状定义

中深层煤炭地下气化尚处于试验阶段，气化腔的具体形状及其控制技术有待开发，美国 Lawrence Liv-

ermore National Laboratory 提出注入点可控后退 (CRIP) 技术，在气化的同时控制注入点后退使得气化腔扩展，当注入的气化剂无法满足气化腔扩展要求，气化质量开始恶化时，控制注入管后退并重新点火形成新的气化腔。根据加拿大天鹅山示范工程项目 (Swan Hills Synfuels In Situ Coal Gasification Demonstration Project) 的调查报告，其气化腔形状为梨形，类似图 12(c)。实际气化过程，其结构并非理想梨形结构，而是类似香肠形状，简化为图 12(b) 所示圆柱形结构，如果仅考虑圆柱段，气化腔又可简化为图 12(a) 所示的圆柱形结构。分别研究了以上 3 种形状气化腔的采收率。

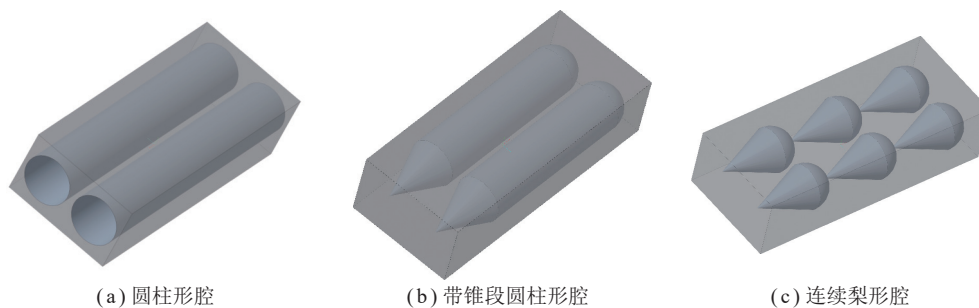


图 12 3 种形状气化腔

Fig.12 Three types of gasification chambers

在动用煤炭区域内取 2 列气化腔所占区域进行研究，为满足周期对称边界条件，气化腔与壁面距离为两气化腔距离一半。考虑气化腔为理想形状，此时计算的采收率为该工况下最大采收率。根据几何尺寸计算气化腔的体积，最终采收率等于气化腔体积/所

选动用煤炭区域体积。

3.2.2 不同形状气化腔采收率计算结果分析

不同形状气化腔在不同煤墙厚度下的采收率见表 5，通过煤墙强度分析，在一定温度、压力和气化腔直径下，存在最小煤墙厚度。

表 5 不同形状气化腔采收率

Table 5 Recovery rate of different gasification chambers

气化腔直径/m	气化腔形状	不同煤墙厚度时的采收率/%				
		2 m	3 m	4 m	5 m	6 m
30	圆柱形					65.5(52.4)
	带锥段圆柱形					55.3(44.3)
	梨形					35.1(28.1)
24	圆柱形				65.0(52.0)	62.8(50.3)
	带锥段圆柱形				52.6(42.1)	50.9(40.7)
	梨形				27.9(22.3)	26.9(21.5)
20	圆柱形			65.5(52.4)	62.8(50.3)	60.4(48.3)
	带锥段圆柱形			51.4(41.1)	49.4(39.5)	47.5(38.0)
	梨形			23.4(18.7)	22.4(17.9)	21.6(17.3)
16	圆柱形		66.1(52.9)	62.8(50.3)	59.8(47.9)	57.1(45.7)
	带锥段圆柱形		50.4(40.3)	47.9(38.3)	45.6(36.5)	43.5(34.8)
	梨形		18.9(15.1)	17.9(14.4)	17.1(13.7)	16.3(13.1)
12	圆柱形	67.3(53.9)	62.8(50.3)	58.9(47.1)	55.4(44.4)	52.4(41.9)
	带锥段圆柱形	49.7(39.8)	46.4(37.1)	43.5(34.8)	40.9(32.7)	38.7(30.9)
	梨形	14.4(11.5)	13.5(10.8)	12.6(10.1)	11.9(9.5)	11.2(9.0)

注：表 5 中加粗字体表示该厚度煤层所能达到的最大采收率；()内数值为气化腔内有 20% 残炭时的采收率。

从表5可以看出,圆柱形气化腔的采收率略低于国家标准要求的厚煤层75%回采率的要求,且根据强度要求,气化腔直径较大而煤墙厚度较小时的工况为不安全工况,实际中不予采用,没有采收率。带锥段圆柱腔的采收率比圆柱腔略有降低。而梨形连续腔的采收率远低于标准要求。可见,一定煤墙厚度下气化腔直径越大采收率越高。但气化腔直径大也会削弱其强度,不得不采用更厚的煤墙。从表5可以看出,当气化腔直径为30 m时,煤墙厚度需达到6 m才能满足各工况要求,而气化腔直径为12 m时,煤墙厚度只需2 m便可满足要求。对于圆柱形气化腔2者在满足强度要求的最小间距下采收率基本相等,但对于梨形气化腔,气化腔直径的降低仍会导致采收率的大幅降低,即使煤墙厚度减小也无法弥补。

当考虑气化腔中存在20%残炭时,不同煤墙厚度时的采收率见表5括号内数值,其采收率率进一步降低,连续梨形气化腔的采收率甚至会降到10%以下。

4 结论和意义

4.1 结论

(1) 煤炭地下气化的采收率与煤层及岩层在不同温度下的物性、煤层赋存的地层条件、煤层厚度、预留煤墙厚度、气化腔形状、大小、是否有残炭有关。

(2) 煤炭地下气化的采收率在10%~65%,总体小于煤炭开采的回采率。

(3) 采收率圆柱形腔 > 带锥段的圆柱形腔 > 梨形腔。

4.2 结果所体现的意义

由于煤炭地下气化的固有特点,在气化反应过程中,气化腔趋向于向圆形演化,形成圆柱形或梨形气化腔,无法像煤炭开采一样形成方形通道,这也决定了即使没有预留安全煤墙,其采收率也仅能达到75%,当预留安全煤墙后,其采收率会进一步降低。随着煤墙厚度的增加,采收率逐渐降低,但煤墙厚度对厚煤层影响较小,对薄煤层影响较大。煤层厚度为30 m时,安全煤墙厚度从2 m增加到6 m其采收率仅降低8%,而厚度为12 m的煤层,安全煤墙厚度从2 m增加到6 m其采收率降低15%。梨形连续腔的采收率远低于标准要求,尤其是考虑残炭存在时,其采收率甚至低于10%。

通过强度分析和渗透率分析,提出了新的煤炭地下气化采收率的评价方法,由于国内外尚未建立起煤炭地下气化资源评价方法,本研究提出的方法可为创建煤炭地下气化资源评价方法提供可利用率或可开采率的评价方法。

参考文献(References):

- [1] 全国人大常委会. 中华人民共和国煤炭法(2016修正) [EB/OL]. (2016-11-07)[2023-08-29]. <https://zcfg.cs.com.cn/chl/8fe905b62a8514dfdbfb.html?libraryCurrent=history>.
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会令. 生产煤矿回采率管理暂行规定 [EB/OL]. (2012-12-09)[2023-08-29]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2013/content_2355020.htm.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50215—2015《煤炭工业矿井设计规范》[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 31089—2014《煤矿回采率计算方法及要求》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [5] CHEN Y L, SHIMADA H, SASAOKA T, et al. Research on exploiting residual coal around final end-walls by highwall mining system in China[J]. *International Journal of Mining Reclamation and Environment*, 2013, 27(3): 166-179.
- [6] GUO W B, TAN Y, BAI E H. Top coal caving mining technique in thick coal seam beneath the earth dam[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(1): 165-170.
- [7] KUZNETSOVA L V, ANFYOROV B A. Combined geotechnical potentials in the process of coal deposits integrated development[C]//International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources, SibSIU, Novokuznetsk. RUSSIA: Iop Publishing Ltd., 2019.
- [8] WANG J C, ZHANG J W, LI Z L. A new research system for caving mechanism analysis and its application to sublevel top-coal caving mining[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 88: 273-285.
- [9] 葛世荣. 深部煤炭化学开采技术[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(4): 679-691.
GE Shirong. Chemical mining technology for deep coal resource[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(4): 679-691.
- [10] 邹才能, 陈艳鹏, 孔令峰, 等. 煤炭地下气化及对中国天然气发展的战略意义[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(2): 195-204.
ZOU Caineng, CHEN Yanpeng, KONG Lingfeng, et al. Underground coal gasification and its strategic significance to the development of natural gas industry in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(2): 195-204.
- [11] BLINDERMAN M S, KLIMENKO A Y. Underground coal gasification and combustion[M]. Duxford, UK: Woodhead Publishing, 2017.
- [12] LI H, ZHA J, GUO G, et al. Improvement of resource recovery rate for underground coal gasification through the gasifier size management[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 259: 120911.
- [13] 韩磊, 秦勇, 王作棠. 煤炭地下气化炉选址的地质影响因素[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(2): 44-50.
HAN Lei, QIN Yong, WANG Zuoatang. Geological consideration for site selection of underground coal gasifier[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(2): 44-50.
- [14] 周贺, 吴财芳, 蒋秀明, 等. 煤炭地下气化地质选区指标体系构建

- 及有利区评价技术[J]. 地球科学, 2022, 47(5): 1777-1790.
- ZHOU He, WU Caifang, JIANG Xiuming, et al. Construction of geological selection index system and evaluation technology of favorable area for underground coal gasification[J]. Earth Science, 2022, 47(5): 1777-1790.
- [15] 刘淑琴, 牛茂斐, 闫艳, 等. 煤炭地下气化工作面径向扩展探测研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 2044-2051.
- LIU Shuqin, NIU Maofei, YAN Yan, et al. Exploration of radial expansion of the gasification face from underground coal gasification[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 2044-2051.
- [16] 苏发强, 荆士杰, 高喜才, 等. 煤炭地下气化燃空区发育及能量回收评价[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3682-3691.
- SU Faqiang, JING Shijie, GAO Xicai, et al. Evaluation of gasification cavity growth and gas energy recovery in underground coal gasification[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3682-3691.
- [17] 程远平, 刘清泉, 任廷祥. 煤力学[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [18] 张永兴. 岩石力学[M]. 北京: 中国建筑出版社, 2004.
- [19] 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 Jianfen, LIANG Jie, WANG Zhangqing, et al. Effect of temperature field dynamic expansion of underground coal gasification on thermal stress field and stability of roof[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1949-1955.
- [20] 辛林, 韩立民, 冯洛泽, 等. 煤炭地下气化覆岩相似材料热损伤特性研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(11): 52-57.
- XIN Lin, HAN Linmin, FENG Mingze, et al. Study on thermal damage characteristics of similar overburden materials in underground coal gasification[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(11): 52-57.
- [21] YU Y, DENG KZ, CHEN SE. Mine size effects on coal pillar stress and their application for partial extraction[J]. Sustainability, 2018, 10: 792.
- [22] 申卫兵, 张保平. 不同煤阶煤岩力学参数测试[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(S1): 860-862.
- SHEN Weibing, ZHANG Baoping. Testing study on mechanical parameters of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19 (S1): 860-862.
- [23] 郝宪杰, 魏英楠, 杨科, 等. 煤储集层起裂强度和损伤强度的各向异性特征[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 211-221.
- HAO Xianjie, WEI Yingnan, YANG Ke, et al. Anisotropy of crack initiation strength and damage strength of coal reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 211-221.