

引用格式:康毅力,邵俊华,刘嘉榕,等.深部致密煤藏适度就地气化可行性评价方法及应用[J].油气藏评价与开发,2025,15(2):237-249.

KANG Yili, SHAO Junhua, LIU Jiarong, et al. Feasibility evaluation method and application of moderate in-situ gasification in deep tight coal & gas reservoirs[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(2): 237-249.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.02.008

深部致密煤藏适度就地气化可行性评价方法及应用

康毅力¹, 邵俊华¹, 刘嘉榕¹, 陈明君¹, 游利军¹, 陈雪妮¹, 曹望坤^{1,2}

(1.西南石油大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室,四川成都 610500;2.中石油煤层气有限责任公司工程技术研究院,陕西西安 710082)

摘要:为形成对于深部致密煤藏系统评价,保证深部致密煤藏就地气化工程的高效、经济和安全实施,基于模糊层次分析法形成了深部致密煤藏适度就地气化可行性评价方法,包括:①建立资源条件、储集条件和保存条件在内的3类一级指标和煤级、煤岩储层厚度和煤岩储层压力系数等参数在内的18项二级指标的评价指标集和以“可行”“基本可行”“不可行”为评语的分级评语集;②通过层次分析法,明确各类指标权重;③采用梯形型隶属函数计算各指标隶属度,构建评价矩阵;④将评价矩阵和权重矩阵合成,确定候选区致密煤藏适度就地气化对“可行”“基本可行”“不可行”的隶属度,根据最大隶属度原则,明确候选区深部致密煤藏适度就地气化可行性。将评价方法应用于鄂尔多斯盆地M区块深部8号煤藏适度就地气化可行性评价,评价结果表明:M区块深部8号煤藏适度就地气化对应“可行”“基本可行”“不可行”的隶属度分别为0.413、0.425和0.162,最大隶属度为0.425,确定8号煤藏适度就地气化可行性为“基本可行”。深部致密煤藏适度就地气化可行性评价方法为综合性的定量评价方法,更加注重对保存条件的评价,为深部致密煤藏适度就地气化工程实施提供了科学指导。

关键词:致密煤藏;适度就地气化;模糊层次综合评价;可行性评价;煤岩储层评价

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Feasibility evaluation method and application of moderate in-situ gasification in deep tight coal & gas reservoirs

KANG Yili¹, SHAO Junhua¹, LIU Jiarong¹, CHEN Mingjun¹, YOU Lijun¹, CHEN Xueni¹, CAO Wangkun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Engineering Technology Research Institute, Coalbed Methane Co., Ltd., PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710082, China)

Abstract: In order to establish a systematic evaluation of deep tight coal reservoirs and ensure the efficient, economic and safe implementation of moderate in-situ gasification projects in deep tight coal reservoirs, a feasibility evaluation method based on fuzzy analytic hierarchy process was developed. The methodology comprises: (1) the establishment of an evaluation index set of 3 first-level indicators, including resource conditions, reservoir conditions and preservation conditions, and 18 second-level indicators, including parameters such as coal rank, coal rock reservoir thickness, and coal rock reservoir pressure coefficient, along with a graded comment set categorizing outcomes as “feasible”, “basically feasible”, and “infeasible”; (2) the determination of indicator weights through the analytic hierarchy process; (3) the calculation of each indicator’s membership degree using a trapezoidal membership function to construct an evaluation matrix; and (4) the synthesis of the evaluation and weight matrices to ascertain the membership degrees corresponding to “feasible”, “basically feasible”, and “infeasible” for candidate areas, thus determining the feasibility based on the principle of maximum membership degree. The evaluation method was applied to the feasibility evaluation of moderate in-situ gasification for the deep No. 8 tight coal reservoir in the M block of the Ordos Basin. The evaluation results show that the membership degrees of “feasible”, “basically feasible” and “infeasible” for moderate in-situ gasification of No. 8 coal reservoir in the deep part of M block are 0.413, 0.425 and 0.162 respectively, with the maximum being 0.425, thus determining the feasibility as “basically feasible”. The comprehensive quantitative feasibility evaluation method of moderate in-situ gasification of deep tight coal reservoir, which places particular emphasis on the evaluation of preservation conditions, provides scientific guidance for the implementation of moderate in-situ

收稿日期:2024-09-26。

第一作者简介:康毅力(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事储层保护理论与技术、非常规天然气和油气田开发地质方向的研究与教学工作。地址:四川省成都市新都区新都大道8号,邮政编码:610500。E-mail:cwctky1@163.com

基金项目:中国石油前瞻性、基础性科研攻关项目“煤系地层‘三气合采’立体开发技术研究”(2021DJ2304);非常规油气层保护四川省青年科技创新研究团队项目“页岩气层氧化协同水力压裂减量增渗方法研究”(2021JDTD0017)。

gasification projects in deep tight coal reservoirs.

Keywords: tight coal & gas reservoir; moderate in-situ gasification; fuzzy analytic hierarchy process; feasibility evaluation; evaluation of coal rock reservoir

中国深部煤炭和煤岩气资源丰富,埋深介于1 000~2 000 m的煤炭资源约 2.7×10^{12} t,1 500 m以深的煤岩气资源约 50×10^{12} m³[1-2]。据邹才能等[3]专家预测,埋深介于1 000~3 000 m煤炭就地气化折合天然气量约为 $(272 \sim 332) \times 10^{12}$ m³。受全球气候变暖、绿色低碳发展、世界能源转型、深部煤炭开采利用风险增加等因素影响,人们更加重视深部煤炭就地气化理论与技术的发展[4-6]。深部煤藏是深部煤炭(即有机固体矿藏)与深部煤岩气藏的复合体,罗平亚院士在2022年完成的中国工程院战略研究与咨询项目“中国煤层气有效开发发展战略研究”成果报告中曾使用“煤藏”概念,因此,深部煤藏的有序、安全、高效开发利用,将是油气行业与煤炭行业共同关心的重大领域。目前,深部煤岩气藏勘探开发活动日趋活跃,但深部煤炭固体矿藏的开发利用仍面临十分严峻的工程技术挑战。

深部煤藏就地气化,不仅增加清洁能源供给,且一定程度上调整并优化中国“相对富煤,相对少气”的能源结构,加快“双碳”目标实现[7-11]。刘江[12]、刘嘉榕[13]提出了煤藏适度就地气化概念,并探讨了深部致密煤藏适度就地气化技术实现路径。深部致密煤藏适度就地气化通过气化适量煤炭,产生CO、CH₄和H₂等可燃气体,变煤炭固态开采为流态化开采;同时激励邻近较大范围煤岩储层升温,加快致密煤岩储层气体解吸—扩散—渗流进程,使之能够通过增压力强渗透方式促进煤岩气的产出。深部致密煤藏适度就地气化还可以减少甚至防止地表塌陷、地下水污染、气化中止等安全、环保和经济问题发生,具有安全性好、成本低、资源回收率高、开采流程短和污染排放低的优点[14-15]。

煤藏就地气化可行性评价是工程规划、生产、污染防治的基础和保障,其目标是优选出煤藏资源丰富、构造较完整,便于实施就地气化的煤藏[16]。煤藏就地气化可行性评价方法经历了全定性、半定量、相对定量、定性定量相结合4个发展阶段[17-23]。部分学者将数学决策方法应用于煤藏就地气化选区评价,形成了“地质研究+定量排序+地质分析”综合评价思路。HUANG等[24]通过地质条件调查、实验研究和理论分析手段评价了凤凰山煤矿15号煤层地下气化的可行性,从资源、技术、经济、环境、安全和能耗6个方面选取了89项评价指标,构建了残留煤地下气化可行性评价多层次结构模型与残留煤地下气化变权—模糊层次综合评价模型,避免了部分极值指标的影响因权重太小而被“淹没”[25-26]。郑超等[21]基于模糊

层次分析法构建了煤藏就地气化资源条件评价层次结构模型,包括地质构造、煤层赋存、水文地质、煤岩煤质4个一级指标和煤层埋深、煤层厚度等9个二级指标,指出煤岩煤质特征是控制煤藏就地气化可行性最关键的指标,其次是水文地质条件,影响力最小的是地质构造特征。王志刚等[22]则运用二级模糊综合评判法,从勘探情况、煤层特征、煤质特征、水文条件4个方面入手,构建了天津静海含煤区无井式煤藏就地气化地质评价模型。尹振勇等[27]利用多层次模糊数学方法从煤层空间展布、储层物性和开采条件出发评价了准东地区煤藏就地气化开发潜力。

目前,煤炭就地气化可行性评价工作的注意力主要集中在浅层、中-深层,且重点关注煤藏的地质条件和资源条件等方面,评价指标比较单一。同时,还忽略了就地气化的工程背景及初始地质条件的扰动变化,缺乏对于深部(埋深大于等于1 500 m)煤藏系统评价,导致就地气化安全事故频发,绝大多数矿场试验令人遗憾地以失败告终[28]。因此,亟须考虑深部致密煤藏适度就地气化独特的地质与工程条件,采用综合性的定量评价方法,从资源条件、储集条件、保存条件等多方面,对候选区就地气化可行性进行系统科学评价,以保证深部致密煤藏适度就地气化工程的高效、经济和安全实施,取得预期效果。

1 深部致密煤藏适度就地气化可行性评价总体思路

目前,国内外虽未形成统一的煤藏就地气化可行性评价标准,但就评价内容和基本原则已达成了共识。评价参数主要包括3类:资源参数主要有煤岩热演化程度和煤岩组分;储集参数以煤岩储层厚度、埋深、倾角、煤岩体结构和煤岩储层连续性及其变化趋势为主;保存参数主要包含煤藏盖层岩性及厚度、煤岩储层含气量、煤岩储层压力系数、水文地质条件和地质构造[29-31]。

深部致密煤藏适度就地气化可行性评价的总体思路可概括为3个阶段、5个环节,其中3个阶段主要为:①资料整理与校核量化。根据候选区资料和数据丰富程度,完成3类影响因素的分类统计工作;②建立评价指标体系。以3类一级指标为基础,建立各项二级评价指标的分级评价体系;③形成综合评价方法。系统考虑各类评价方法的优缺点,形成定性与定量相结合的综合评价方法,具体可行性评价流程见图1。

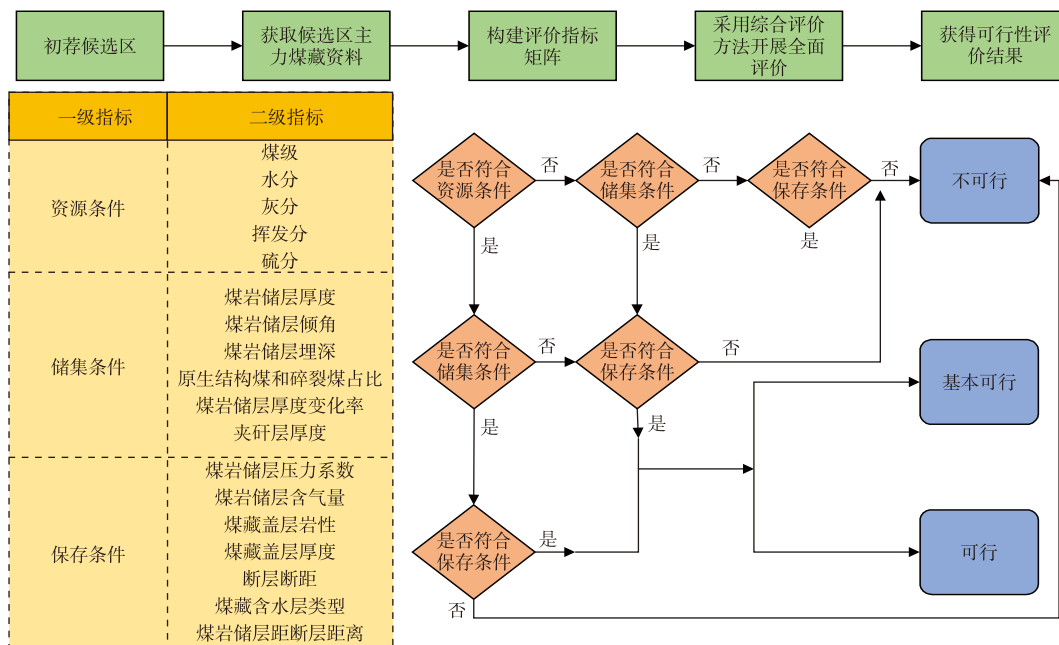


图1 煤藏就地气化可行性评价的基本思路

Fig. 1 Fundamental concept of feasibility evaluation for moderate in-situ gasification of coal & gas reservoirs

2 深部致密煤藏资源条件评价

2.1 煤岩热演化程度

煤岩热演化程度的实质是温度升高条件下化学反应进行的程度,是煤岩煤级(煤种)划分的重要依据,而煤级又是众多煤质指标的综合反映,通过镜质组反射率确定^[32]。煤岩热演化程度决定了产出气中有效气体(CO、CH₄和H₂)含量和热值^[33],产出气热值随镜质组反射率升高而减小;CO含量随镜质组反射率升高呈现先减少后增多的趋势,H₂含量则呈现与之相反的变化趋势;CH₄含量随镜质组反射率升高而减少;从产出气热值的角度来看,煤级越高,越不利于煤岩就地气化的进行^[34]。无黏结性或弱黏结性煤岩更适合就地气化,相较于烟煤和无烟煤,褐煤最适于进行煤炭地下气化,其次为长焰煤^[20,35]。因此,以产出气质量及黏结性强弱为评价依据确定的适合就地气化的煤岩煤级评级为:褐煤、长焰煤评级为优;瘦煤、气煤评级为良;肥煤、贫煤评级为中;无烟煤和焦煤评级为劣。

2.2 煤岩组分

煤岩组分的含量影响着产出气质量、气化热值和气化效率^[36]。煤岩中的水分、灰分与挥发分含量均与有效气体含量呈负相关关系,而硫化氢含量则随硫分含量增大而增大。一般认为,灰分含量越高越不利于气化,气化效果最佳介于0~20%;挥发分含量越高,生成的轻质烃与H₂含量越高,从而气化热值越高,气化速率越快;水分

阈值最优介于0~15%^[37-38];气化热值及CH₄含量随着固定碳含量增加呈现先降低后升高的趋势;硫分含量过高则会增加防腐的难度与费用^[39]。基于煤藏就地气化煤岩组分含量有利与不利范围,划分煤岩组分含量等级,进行煤岩组分资源条件评级(表1)。

表1 煤藏就地气化背景下煤岩组分资源条件评级

Table 1 Resource endowment ratings of coal rock components in context of moderate in-situ gasification of coal & gas reservoirs

煤岩组分	资源条件评级			
	优	良	中	劣
水分	(0, 15]	(15, 35]	(35, 55]	>55
挥发分	(0, 10]	(10, 30]	(30, 50]	>50
灰分	(0, 20]	(20, 35]	(35, 50]	>50
硫分	(0, 1.0]	(1.0, 2.5]	(2.5, 4.0]	>4.0
固定碳	(0, 62.0]	(62.0, 64.5]	(64.5, 67.0]	>67.0

3 深部致密煤藏储集条件评价

3.1 煤岩储层厚度

煤岩储层厚度影响产出气热值、热效率及资源采出率^[35]。煤岩储层厚度与热损失量呈负相关关系,煤岩储层厚度越大,热量散失越慢,气化区升温快,效率高;反之,热量被围岩吸收,热量散失快,气化区升温慢,效率低。从煤岩煤级角度考虑,褐煤厚度下限为2 m,烟煤和无烟煤的厚度下限介于0.8~1.0 m;从气化的安全性、有

效性和经济性角度考虑,安全气化总厚度上限为15 m,有效气化厚度下限为1.5 m;经济气化厚度下限为1.2 m,上限为12 m^[34-35,40]。确定煤岩储层厚度资源禀赋评级:煤岩储层厚度为5 m时,评级为优;煤岩储层厚度大于5 m小于等于12 m时,评级为良;煤岩储层厚度大于等于2 m小于5 m时,评级为中;煤岩储层厚度小于2 m或大于12 m时,评级为劣。

3.2 煤岩储层埋深

煤岩储层的埋深决定了地下气化炉的密闭性、安全性和经济性。煤岩储层较浅时,气化腔易垮塌,气化炉密闭性差,产出气易泄漏;煤岩储层较深时,工程实施难度大,投资成本高。产出气热值随煤岩储层埋深增加而增大,但相关性逐渐减弱。当煤岩储层埋深达到2 000 m以后,所处地层温压条件使地层水以“近临界水”甚至“超临界水”的形式存在,气化反应剧烈,安全气化难度极高。确定煤岩储层埋深资源禀赋评级:煤岩储层埋深小于等于500 m或大于等于4 500 m评级为劣;在大于500 m小于等于1 000 m之间或在大于3 500 m小于4 500 m之间评级为中;在大于1 000 m小于等于1 500 m之间或在大于2 500 m小于等于3 500 m之间评级为良;在大于1 500 m小于等于2 500 m之间评级为优。

3.3 煤岩储层倾角

煤岩储层倾角影响气化安全性,主要表现为:倾角小,气化腔易塌陷,燃烧产生的煤灰降低气化速率;倾角大,易引起钻井事故。中国气化试验煤岩储层倾角介于12°~70°,国外气化试验煤岩储层倾角一般不超过10°^[41-47],因此,适宜煤藏就地气化的倾角介于0°~70°,最佳气化倾角为35°^[48-49]。综合各方面因素确定煤岩储层倾角资源禀赋评级:煤岩储层倾角为35°时,评级为优;倾角介于12°~<35°评级为良;倾角介于>35°~70°评级为中;倾角小于12°或大于70°评级为劣。

3.4 煤岩体结构

煤岩体结构反映煤岩储层在地质历史演化过程中受不同地质作用后,煤岩体内部受破坏变形的程度是井壁稳定性的主控因素。原生结构煤结构较完整,井壁不宜坍塌;碎裂结构煤井壁由于张性破裂而易导致井壁失稳,而碎粒结构煤和糜棱结构煤内存在大量煤粉,煤粉进入钻井液引起井壁严重坍塌^[51],煤岩体结构越破碎,井壁稳定性越差^[50-51]。以原生结构和碎裂结构在煤岩体结构中总占比为指标,提出煤岩体结构资源禀赋评级,研究结果表明:原生结构煤和碎裂煤占比

大于70%,评级为优;在大于50%小于等于70%之间为良;在大于30%小于等于50%之间,评级为中;小于等于30%,评级为劣。

3.5 煤岩储层连续性及变化趋势

煤岩储层连续性及变化趋势是指煤岩储层厚度、结构、煤类和可采性等特征在一定空间范围内的变化情况,通过煤岩储层厚度变化及其结构进行表征。煤岩储层厚度变化率低于25%,夹矸数量越少越有利于气化。夹矸气化产生的灰分会导致气化热效率降低,单个夹矸层厚度不宜超过1 m,夹矸层总厚度不宜超过煤岩储层厚度的20%^[52]。因此,确定煤岩储层厚度变化率的上限为25%,夹矸层厚度上限为1 m,相应变化率上限为20%,确定煤岩储层连续性及变化趋势资源禀赋评级(表2)。

表2 煤藏就地气化背景下煤岩储层连续性及变化趋势资源禀赋评级

煤岩储层连续性及 变化趋势指标	资源禀赋评级			
	优	良	中	劣
煤岩储层厚度变化率/%	≤25	(25,45]	(45,65]	>65
夹矸层厚度变化率/%	≤20	(20,40]	(40,60]	>60
夹矸层厚度/m	≤0.4	(0.4,0.8]	(0.8,1.0]	>1.0

4 深部致密煤藏保存条件评价

4.1 水文地质条件

水文地质条件影响气化工艺的选择及气化过程的稳定进行^[53],主要评价指标包括隔水层厚度、煤岩储层与含水层距离及涌水量。隔水层需起到隔水作用,保证含水层不被加热,同时起承压作用^[39],因此,煤岩储层与含水层距离应不小于导水裂隙带的最大高度^[54-55],就地气化条件下温度扩散的最大范围约为35 m^[56],确定煤岩储层距含水层的距离下限为35 m。若候选区水文地质资料不足,可转变思路选取含水层类型作为评价指标并明确不同类型含水层的保存等级。以地层水水型及其总矿化度为指标将深部煤藏水文地质区带划分为4种类型^[57-58](表3),再结合不同的含水层类型对保存等级进行评级,结果表明:承压水区的保存等级为优;弱径流区的保存等级为良;强径流区的保存等级为中;供水区或泄水区的保存等级为劣。

表3 水文地质区带划分
Table 3 Hydrogeological zoning

地层水水型	总矿化度/(mg/L)	区带类型
CaCl ₂	>20 000	承压水区
NaHCO ₃	>5 000~20 000	弱径流区
NaHCO ₃ 或Na ₂ SO ₄	>1 000~5 000	强径流区
Na ₂ SO ₄	≤1 000	供水区或泄水区

4.2 地质构造

地质构造影响煤岩储层的稳定性和连续性,进而影响煤岩就地气化过程^[59],影响气化过程主要包括断层、褶皱、岩浆岩侵入和陷落柱。

研究分析影响气化过程的主要地质构造中断层的存在破坏煤岩储层连续性,易造成产出气泄漏和地下水涌入气化腔,可采用断层断距来评价断层对气化的影响程度^[42],单个气化炉内断距应小于平均煤岩储层厚度或与最大断层距离应大于200 m至等于250 m^[60];褶皱主要影响燃空区的稳定性和气化剂的流通性,褶皱幅度不应超过煤岩储层厚度的一半^[39];岩浆(岩)侵入易增加煤中灰分含量,造成基岩水和产出气泄漏;陷落柱则以切割煤岩储层或沟通裂隙带的方式造成气化中断。综合各方面因素确定煤藏就地气化地质构造评价原则,采用断层断距和煤岩储层距断层距离为指标参数对地质构造进行评级,评级结果表明:断层断距小于等于0.1倍的煤岩储层厚度时,评级为优;在大于0.1倍小于等于0.3倍煤岩储层厚度之间,评级为良;在大于0.3倍小于等于0.5倍煤岩储层厚度之间,评级为中;大于0.5倍煤岩储层厚度时,评级为劣。煤岩储层距断层距离大于200 m,评级为优;在大于125 m小于等于200 m之间,评级为良;在大于50 m小于等于125 m之间为中;小于等于50 m时,评级为劣。

4.3 煤藏盖层岩性及厚度

煤藏顶盖层是阻止气化产物泄漏的重要屏障,当顶盖层岩性致密且足够厚时,就能发挥有效的封盖作用^[59-61]。在煤藏地下气化过程中,顶盖层裂隙会向周围扩展,导致产出气泄漏或涌水事故^[25,62],因此,煤藏顶盖层岩性和厚度是评价盖层封盖性的重要指标参数。当烟煤厚度介于0.8~2.3 m,顶盖层厚度需大于煤厚的0.9~1.8倍;当烟煤厚度介于3~9 m,顶盖层厚度需大于煤厚的2~4倍^[35,63-64];煤藏顶盖层以一定厚度的泥岩和粉砂岩为主时,可视为稳定隔水层,起到较好的封闭作用^[57]。盖层岩性以泥岩最为有利,砂质泥岩和粉砂岩中等,砂岩和岩浆岩不利于煤炭地下气化的实施^[42]。

根据不同岩性的渗透率,建立盖层岩性评价等级,评价结果表明:泥岩、粉砂质泥岩、膏质盐岩评级为优;粉砂

岩、细砂岩、泥灰岩评级为良;中砂岩评级为中;粗砂岩评级为劣。在盖层岩性评价后再采用煤岩储层厚度、 $\delta_{\text{coal}}/\delta_{\text{rc}}$ (煤岩储层厚度与顶盖层厚度之比)进行盖层厚度等级评价,结果表明: $\delta_{\text{coal}}/\delta_{\text{rc}}$ 为0.154时,评级为优;大于0.154小于等于0.414之间,评级为良;在等于0.059小于0.154之间,评级为中;小于0.059或大于0.414时,评级为劣。

4.4 煤岩储层含气量

煤藏的盖层在煤藏的成藏富集中起着决定性作用,盖层封盖性可采用含气量进行评价,煤岩储层含气量高,表明盖层封盖性好。一般认为,含气量大于20 m³/t为Ⅰ类A区(表示封盖性好);含气量介于15~20 m³/t为Ⅰ类B区;含气量介于8~15 m³/t为Ⅱ类区;当含气量小于8 m³/t则认为盖层的封盖性差,不利于产出气保存^[65-69]。通过煤岩储层含气量情况,进行煤藏含气量保存等级评价,结果表明:煤岩储层含气量小于等于8 m³/t时,评级为劣;在大于8 m³/t小于等于15 m³/t之间,评级为中;在大于15 m³/t小于等于20 m³/t之间,评级为良;在大于20 m³/t小于等于35 m³/t之间,评级为优。

4.5 煤岩储层压力系数

煤岩储层压力系数直观地表现煤岩储层中煤岩气的富集程度和保存条件的好坏^[70-71]。煤岩储层压力系数较高时,表明煤岩储层中存在异常高压,高压通过压实作用增强盖层的致密性,提高其封闭能力;地层压力系数越低,说明盖层的封盖性较差^[72]。将地层压力系数作为适度就地气化可行性评价参数指标进行评级,结果表明:煤岩储层压力系数小于等于0.7,评级为劣;在大于0.7小于等于1.2之间,评级为中;在大于1.2小于等于1.6之间,评级为良;大于1.6时,评级为优。

5 深部致密煤藏适度就地气化可行性评价方法

选取3类一级指标和18项二级指标形成深部致密煤藏适度就地气化可行性评价指标评级体系(表4),采用模糊层次综合评价方法对研究区进行可行性评价。

5.1 建立评语集和评价指标集

基于评价目标,构建元素个数适中的分级评语集 $V=\{V_1, V_2, V_3\}$,分别表示“可行”“基本可行”“不可行”。根据不同指标之间的关系建立评价指标集 $U=\{U_1, U_2, \dots, U_j, \dots, U_n\}$,共包含资源条件、储集条件、保存条件3类一级指标和煤级、煤岩储层厚度、煤岩储层压力系数等18项二级指标(表5)。

表4 深部致密煤藏适度就地气化可行性评价指标评级体系

Table 4 Indicator rating system for feasibility evaluation of moderate in-situ gasification in deep coal & gas reservoirs

一级指标	二级指标	分类评价级别			
		优	良	中	劣
资源条件	煤级	HM/CY	SM/QM	FM/PM	WY/JM
	水分/%	(0,15]	(15,35]	(35,55]	>55
	灰分/%	(0,20]	(20,35]	(35,50]	>50
	挥发分/%	(0,10]	(10,30]	(30,50]	>50
	硫分/%	(0,1]	(1,2.5]	(2.5,4]	>4
储集条件	煤岩储层厚度/m	5	(5,12]	[2,5)	<2或>12
	煤岩储层倾角/ $^{\circ}$	35	[12,35)	(35,70]	<12或>70
	煤岩储层埋深/m	(1 500,2 500]	(1 000,1 500] (2 500,3 500]	(500,1 000] (3 500,4 500)	≤ 500 或 $\geq 4 500$
	原生结构煤和碎裂煤占比/%	>70	(50,70]	(30,50]	≤ 30
	煤岩储层连续性 & 变化趋势/%	≤ 25	(25,45]	(45,65]	>65
	煤岩储层夹矸层厚度/m	≤ 0.4	(0.4,0.8]	(0.8,1]	>1
	含水层类型	承压水区	弱径流区	强径流区	供水区/泄水区
保存条件	断层断距/m	(0,0.18]	(0.18,0.38]	(0.38,0.58]	>0.58
	煤岩储层距断层距离/m	>200	(125,200]	(50,125]	≤ 50
	顶盖层岩性	泥岩、粉砂质泥岩、膏质盐岩	粉砂岩、细砂岩、泥灰岩	中砂岩	粗砂岩
	$\delta_{\text{coal}}/\delta_{\text{rc}}$	0.154	(0.154,0.414]	[0.059,0.154)	<0.059或>0.414
	煤岩储层含气量/(m^3/t)	(20,35]	(15,20]	(8,15]	≤ 8
	煤岩储层压力系数	>1.6	(1.2,1.6]	(0.7,1.2]	≤ 0.7

注:HM为褐煤;CY为长焰煤;SM为瘦煤;QM为气煤;FM为肥煤;PM为贫煤;WY为无烟煤;JM为焦煤; δ 为平均煤岩储层厚度,单位 m; $\delta_{\text{coal}}/\delta_{\text{rc}}$ 为煤岩储层厚度与顶盖层厚度之比。

表5 深部致密煤藏适度就地气化可行性评价指标

Table 5 Indicators for evaluating feasibility of moderate in-situ gasification in deep tight coal & gas reservoirs

一级指标	资源条件	储集条件	保存条件
二级指标	煤级	煤岩储层厚度	含水层类型
	水分	煤岩储层倾角	断层断距
	灰分	煤岩储层埋深	煤岩储层距断层距离
	挥发分	原生结构煤和碎裂煤占比	顶盖层岩性
	硫分	煤岩储层连续性 & 变化趋势	$\delta_{\text{coal}}/\delta_{\text{rc}}$
		夹矸层厚度	煤岩储层含气量
		煤岩储层压力系数	

5.2 确定隶属函数和评价矩阵

在模糊逻辑中,隶属函数通常表示元素(隶属函数值域介于0~1)在模糊集合中的隶属程度,可用于描述各种具有不确定性的情况。常见的隶属函数分为线性和非线性两种,前者包括矩形、三角形和梯形等形式,而后者有抛物型、正态型、柯西型等形式,其中,梯形型和正态型隶属函数被采用的频率较高。综合考虑指标特点和计算复杂性,可采用梯形型隶属函数进行各指标隶属度的计算,并将其划分为效益型(偏大型)、成本型(偏小型)和中间型3种(图2、表6)。

基于深部致密煤藏适度就地气化可行性评价指标评级体系(表4),利用隶属函数将评价指标隶属函数模糊

等级划分为5项,分别为 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r' 和 r'' (表7),计算得到各二级指标对一级评价等级的隶属度,构建评价矩阵。

5.3 确定指标权重

采用层次分析法和1~9标度确定各级指标权重^[73]进行计算分析,评价指标权重计算结果如表8所示。

5.4 综合评价

将评价矩阵与权重矩阵通过加权平均型模糊算子 $M(\cdot, \oplus)$ 进行合成,构建资源条件、储集条件、保存条件的“可行”“基本可行”“不可行”评价矩阵^[74],按照最大隶属度原则判断研究区煤藏就地气化可行性程度。

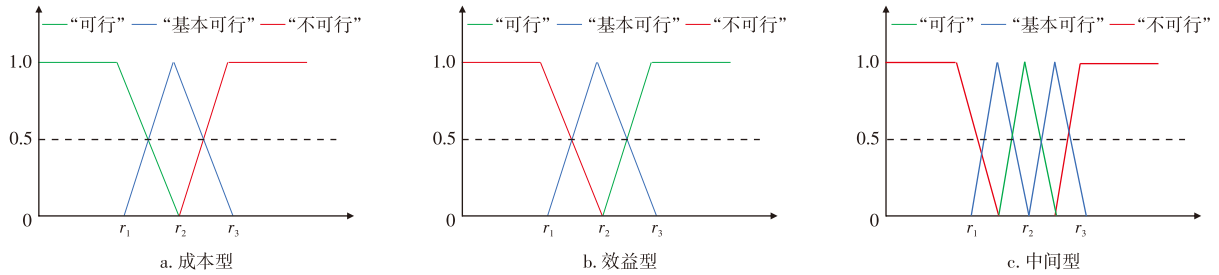


图2 评价指标隶属函数类型

Fig. 2 Types of evaluation indicator membership functions

表6 评价指标隶属函数

Table 6 Evaluation indicator membership functions

函数类型	“可行”	“基本可行”	“不可行”
成本型	$A(x) = \begin{cases} 1 & x \leq r_1 \\ \frac{r_2 - x}{r_2 - r_1} & r_1 < x < r_2 \\ 0 & x \geq r_2 \end{cases}$	$A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq r_1 \\ \frac{x - r_1}{r_2 - r_1} & r_1 < x \leq r_2 \\ \frac{r_3 - x}{r_3 - r_2} & r_2 < x < r_3 \\ 0 & x \geq r_3 \end{cases}$	$A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq r_2 \\ \frac{x - r_2}{r_3 - r_2} & r_2 < x < r_3 \\ 1 & x \geq r_3 \end{cases}$
效益型	$A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq r_2 \\ \frac{x - r_2}{r_3 - r_2} & r_2 < x < r_3 \\ 1 & x \geq r_3 \end{cases}$	$A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq r_1 \\ \frac{x - r_1}{r_2 - r_1} & r_1 < x \leq r_2 \\ \frac{r_3 - x}{r_3 - r_2} & r_2 < x < r_3 \\ 0 & x \geq r_3 \end{cases}$	$A(x) = \begin{cases} 1 & x \leq r_1 \\ \frac{r_2 - x}{r_2 - r_1} & r_1 < x < r_2 \\ 0 & x \geq r_2 \end{cases}$
中间型	$A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq r' \\ \frac{x - r'}{r_2 - r'} & r' < x \leq r_2 \\ \frac{r'' - x}{r'' - r_2} & r_2 < x < r'' \\ 0 & x \geq r'' \end{cases}$	$A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq r_1 \\ \frac{x - r_1}{r' - r_1} & r_1 < x \leq r' \\ \frac{r_2 - x}{r_2 - r'} & r' < x < r_2 \\ \frac{x - r_2}{r'' - r_2} & r_2 < x \leq r'' \\ \frac{r_3 - x}{r_3 - r''} & r'' < x < r_3 \\ 0 & x \geq r_3 \end{cases}$	$A(x) = \begin{cases} 1 & x \leq r_1 \\ \frac{r' - x}{r' - r_1} & r_1 < x \leq r' \\ \frac{x - r'}{r_3 - r'} & r' < x < r_3 \\ 1 & x \geq r_3 \end{cases}$

表7 评价指标隶属函数模糊等级划分

Table 7 Fuzzy classification of evaluation indicator membership functions

一级指标	二级指标	模糊等级划分值				
		r_1	r'	r_2	r''	r_3
资源条件	煤级	0.1		0.2		0.3
	水分/%	15		35		55
	灰分/%	20		35		50
	挥发分/%	10		30		50
	硫分/%	1		2.5		4
储集条件	煤岩储层厚度/m	2	3	5	9	12
	煤岩储层倾角/(°)	12	23	35	52	70
	煤岩储层埋深/m	500	1 500			4 500
	原生结构煤和碎裂煤占比/%	30	50	2 500	3 500	70
	煤岩储层连续性及变化趋势/%	25		45		65
保存条件	夹矸层厚度/m	0.4		0.8		1.0
	含水层类型	0.1		0.2		0.3
	断层断距/m	0.6		1.8		3.0
	距断层距离/m	50		125		200
	顶盖层岩性	0.1		0.2		0.3
	$\delta_{\text{coal}}/\delta_{\text{rc}}$	0.590	0.107	0.154	0.297	0.414
	煤岩储层含气量/(m ³ /t)	8		17		35
	煤岩储层压力系数	0.7		1.2		1.6

表8 评价指标权重计算结果
Table 8 Calculation of evaluation indicator weights

一级指标	权重	二级指标	同级权重	综合权重
资源条件	0.28	煤级	0.51	0.14
		水分	0.03	0.01
		灰分	0.06	0.02
		挥发分	0.27	0.07
		硫分	0.13	0.04
储集条件	0.60	煤岩储层厚度	0.27	0.16
		煤岩储层倾角	0.13	0.08
		煤岩储层埋深	0.21	0.13
		原生结构煤和碎裂煤占比	0.04	0.02
		煤岩储层连续性及变化趋势	0.22	0.13
		夹矸层厚度	0.13	0.08
保存条件	0.12	含水层类型	0.08	0.01
		断层断距	0.08	0.01
		煤岩储层距断层距离	0.10	0.01
		顶盖层岩性	0.14	0.02
		$\delta_{\text{coal}}/\delta_{\text{rc}}$	0.20	0.02
		煤岩储层含气量	0.18	0.02
		煤岩储层压力系数	0.22	0.03

6 应用实例

基于建立的深部致密煤藏适度就地气化可行性评价方法,对鄂尔多斯盆地M区块深部致密8号煤藏适度就地气化可行性进行评价。

6.1 M区块地质概况

M区块位于鄂尔多斯盆地晋西挠褶带南部,为过渡性质盆地构造类型,整体呈现为自东向西倾斜的巨大单斜构造^[56],表现为“一隆、一凹、两斜坡”构造形态,东缘和东南缘受紫荆山断裂带影响,发育北东—南西向系列构造,西部地层平缓,构造简单,断层不发育。M区块自下而上发育的沉积地层由老到新依次为古生界的奥陶系、石炭系—二叠系,中生界的三叠系,新生界的第四系,共发育10套煤系地层,其中石炭系—二叠系太原组8号煤藏为研究区勘探开发的主要煤藏^[31]。共发育4套含水岩组,分别是第四系松散岩透水局部孔隙潜水含水岩组、第三系砂砾石孔隙含水岩组、二叠系—三叠系碎屑岩裂隙含水岩组、石炭系碎屑岩夹碳酸盐岩岩溶—裂隙含水岩组、奥陶系—寒武系碳酸盐岩裂隙、岩溶含水岩组。深部煤藏地层水水质类型为CaCl₂,总矿化度介于32 284~217 912 mg/L,含水层类型为承压水型。

M区块深部8号煤藏煤岩储层埋深普遍在2 000 m,

厚度变化介于5~12 m,平均为7.6 m,倾角小于10°。煤岩体结构以碎粒煤为主,占57.4%,碎裂煤占22.7%,原生结构煤占19.95%,镜质组反射率介于1.95%~3.09%,平均为2.58%(图3)。煤岩类型以宽条带结构的光亮煤为主,半亮煤居中,暗淡煤次之,半亮煤和暗淡煤呈层状过渡。煤岩储层结构简单,含0~2层夹矸,夹矸厚度介于0.30~0.37 m,夹矸率为9.2%。煤岩具有“特低水分、中等灰分和挥发分、中高固定碳”的特点(图4),硫分质量分数介于0.5%~4.48%,平均为2.20%。顶盖层岩性以灰岩、细砂岩、粉砂岩为主,底垫层以灰黑色泥岩、砂质泥岩为主;顶盖层垂向厚度介于31.125~34.375 m,平均为32.402 m,厚度变化率介于0~9.45%,盖层厚度评级大部分为良(表9)。8号煤藏平均含气量介于7.64~33.48 m³/t,平均为18.1 m³/t,干燥无灰基含气量介于9.27~42.50 m³/t,平均为23 m³/t;煤岩储层压力系数介于0.37~1.20,平均为0.89。

6.2 可行性评价结果

根据M区块各评价指标实测值采用确定的隶属函数,构建了相应的评价矩阵。根据评价矩阵计算结果(表10),对M区块深部致密煤藏适度就地气化可行性进行综合评价(表11),评价结果表明:8号煤藏适度就地气化对应“可行”“基本可行”“不可行”的隶属度分别为0.413、0.425和0.162,按照最大隶属度原则确定8号煤藏适度就地气化可行性为“基本可行”,其隶属度为0.425。

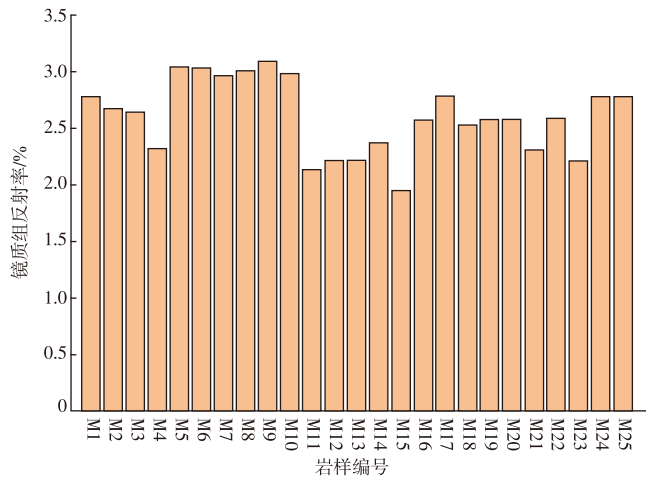


图3 8号煤藏镜质组反射率统计结果

Fig. 3 Statistical results of vitrinite reflectance in the 8th coal reservoir

7 结论

1) 理清了深部致密煤藏适度就地气化可行性评价思路,深部煤藏适度就地气化可行性评价的总体思路分为3个阶段、5个环节,从煤藏埋深角度来看,深部煤藏的保存条件最为有利。

2) 形成了深部致密煤藏适度就地气化可行性评价方法。基于模糊层次综合评价方法,建立了涵盖3类一

表9 8号煤藏盖层厚度评价

Table 9 Evaluation of cover layer thickness of the 8th coal reservoir

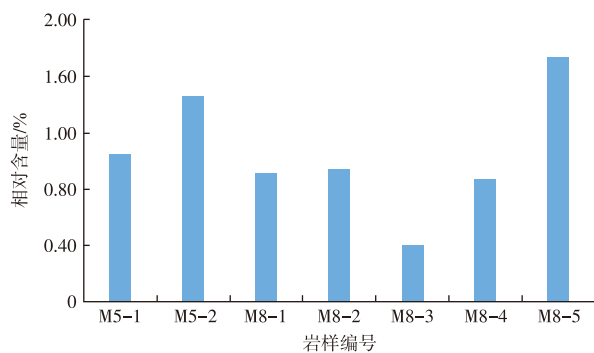
井名	$\delta_{\text{coal}}/\text{m}$	$\delta_{\text{rc}}/\text{m}$	$\delta_{\text{coal}}/\delta_{\text{rc}}$	盖层厚度评级
M1	1.25	34.375	0.036	劣
M2	7.75	31.125	0.249	良
M3	6.75	31.625	0.213	良
M5	5.50	32.250	0.171	良
M6	3.13	33.438	0.093	中
M7	5.50	32.250	0.171	良
M8	6.50	31.750	0.205	良

注: δ_{coal} 为煤岩储层厚度,单位m; δ_{rc} 为顶盖层厚度,单位m; $\delta_{\text{coal}}/\delta_{\text{rc}}$ 为煤岩储层厚度与顶盖层厚度之比。

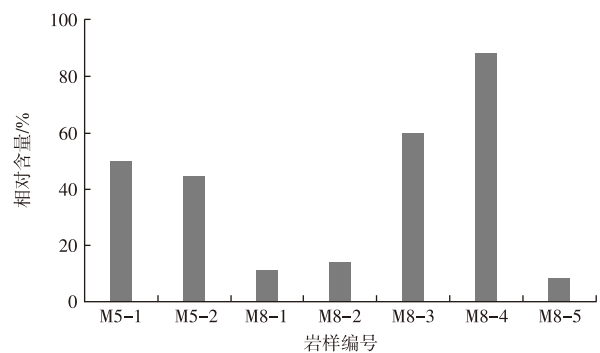
级指标和18项二级指标的评价指标集和以“可行”“基本可行”“不可行”为评语的分级评语集,根据最大隶属度原则,确定研究区致密煤藏适度就地气化可行性。

3) 对鄂尔多斯盆地M区块深部8号煤藏适度就地气化可行性进行评价,评价结果表明8号煤藏适度就地气化对应“可行”“基本可行”“不可行”的隶属度分别为0.413、0.425和0.162,确定8号煤藏适度就地气化可行性为“基本可行”。

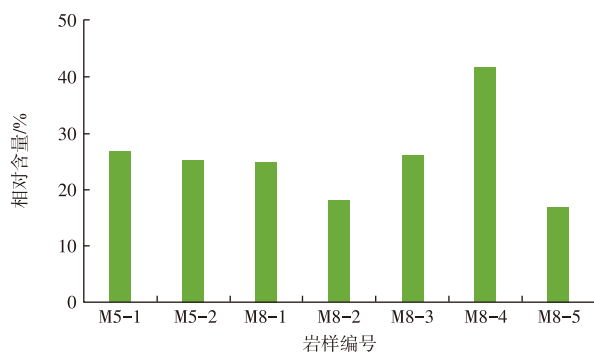
4) 研究形成的评价方法具有计算简便、结果可靠等特点,然而,深部致密煤藏适度就地气化工程的应用效果受多因素、多作用、长时间的综合影响,还需要对各因素耦合作用开展进一步深入研究,不断完善评价方法。



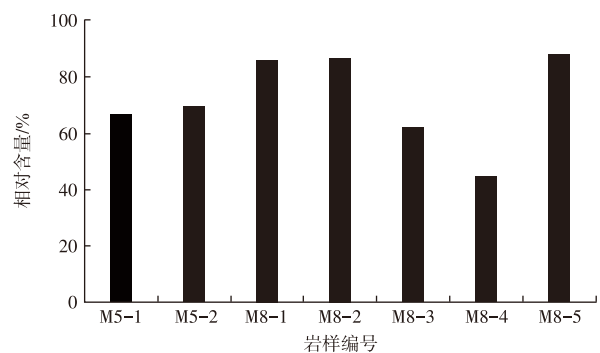
a. 煤岩水分测试结果



b. 煤岩灰分测试结果



c. 煤岩挥发分测试结果



d. 煤岩固定碳测试结果

图4 8号煤藏煤岩组分分析结果

Fig. 4 Analysis results of coal rock components in the 8th coal reservoir

表10 评价矩阵计算结果

Table 10 Evaluation matrix calculation results

一级指标	二级指标	“可行”	“基本可行”	“不可行”
资源条件	煤级	0.000 0	0.500 0	0.500 0
	水分	1.000 0	0.000 0	0.000 0
	灰分	0.000 0	0.677 0	0.323 0
	挥发分	0.214 5	0.785 5	0.000 0
	硫分	0.200 0	0.800 0	0.000 0
储集条件	煤岩储层厚度	0.350 0	0.650 0	0.000 0
	煤岩储层倾角	0.000 0	0.000 0	1.000 0
	煤岩储层埋深	0.400 0	0.600 0	0.000 0
	原生结构煤和碎裂煤占比	0.000 0	0.632 5	0.367 5
	煤岩储层连续性及变化趋势	0.750 0	0.250 0	0.000 0
	夹矸层厚度	1.000 0	0.000 0	0.000 0
保存条件	含水层类型	1.000 0	0.000 0	0.000 0
	断层断距	1.000 0	0.000 0	0.000 0
	距断层距离	1.000 0	0.000 0	0.000 0
	顶盖层岩性	1.000 0	0.000 0	0.000 0
	$\delta_{\text{coal}}/\delta_{\text{rc}}$	0.937 1	0.062 9	0.000 0
	煤岩储层含气量	0.277 8	0.722 2	0.000 0
	煤岩储层压力系数	0.620 0	0.380 0	0.000 0

表11 M区块深部致密煤藏适度就地气化可行性综合评价

Table 11 Comprehensive evaluation of feasibility of moderate in-situ gasification in deep tight coal & gas reservoirs for M block

评价目标与指标	“可行”	“基本可行”	“不可行”
资源条件	0.114	0.612	0.274
储集条件	0.474	0.382	0.144
保存条件	0.774	0.226	0.000
8号煤藏适度就地气化可行性	0.413	0.425	0.162

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国自然资源部. 固体矿产资源储量分类: GB/T 17766—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Classification of solid mineral resources reserves: GB/T 17766—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [2] 中国煤炭地质总局. 中国煤炭资源赋存规律与资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
China General Administration of Coal Geology. China's coal resource existence law and resource evaluation[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [3] 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.
- [4] 孔令峰, 张军贤, 李华启, 等. 我国中深层煤炭地下气化商业化路径[J]. 天然气工业, 2020, 40(4): 156–165.
KONG Lingfeng, ZHANG Junxian, LI Huaqi, et al. Commercialization path of medium-deep underground coal gasification in China[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(4): 156–165.
- [5] 秦勇, 易同生, 周永锋, 等. 煤炭地下气化碳减排技术研究进展与未来探索[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 495–512.
QIN Yong, YI Tongsheng, ZHOU Yongfeng, et al. Research progress and future study of carbon emission reduction for UCG[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 495–512.
- [6] 陈井瑞, 杨瑞召, 韩枫涛, 等. 煤炭地下气化开发利用现状与发展趋势[J]. 中国煤炭, 2024, 50(2): 13–23.
CHEN Jingrui, YANG Ruizhao, HAN Fengtao, et al. Current status and development trends of the development and utilization of underground coal gasification[J]. China Coal, 2024, 50(2): 13–23.
- [7] 谢和平, 鞠杨, 高明忠, 等. 煤炭深部原位流态化开采的理论与技术体系[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1210–1219.
XIE Heping, JU Yang, GAO Mingzhong, et al. Theories and technologies for in-situ fluidized mining of deep underground coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1210–1219.
- [8] YOUNGER P L. Hydrogeological and geomechanical aspects of underground coal gasification and its direct coupling to carbon capture and storage[J]. Mine Water and the Environment, 2011, 30(2): 127–140.
- [9] 袁亮, 张通, 张庆贺, 等. 双碳目标下废弃矿井绿色低碳多能互补体系建设思考[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2131–2139.
YUAN Liang, ZHANG Tong, ZHANG Qinghe, et al. Construction of green, low-carbon and multi-energy complementary system for abandoned mines under global carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2131–2139.
- [10] 杨兰和, 宋全友, 李耀娟. 煤炭地下气化工程[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2001.
YANG Lanhe, SONG Quanyou, LI Yaojuan. Underground gasification of coal[M]. Beijing: China University of Mining and

- Technology Press, 2001.
- [11] 刘淑琴,刘欢,郭巍,等.深部煤炭地下气化制氢先进能效分析[J].煤炭学报,2024,49(2):1138-1147.
LIU Shuqin, LIU Huan, GUO Wei, et al. Advanced energy analysis of deep UCG to hydrogen production[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 1138-1147.
- [12] 刘江.深部煤层原位适度气化协调气体多尺度传质行为研究[D].成都:西南石油大学,2023.
LIU Jiang. Study on in-situ moderate gasification to enhance multiscale mass transfer behavior in deep coal reservoir[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2023.
- [13] 刘嘉榕.深部致密煤藏适度就地气化选区评价方法研究[D].成都:西南石油大学,2024.
LIU Jiarong. Research on the evaluation method of moderate in-situ gasification selection of deep tight coal reservoirs[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2024.
- [14] BHUTTO A W, BAZMI A A, ZAHEDI G. Underground coal gasification: From fundamentals to applications[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2013, 39(1): 189-214.
- [15] 段天宏,周丽敏,王作棠,等.改进的两阶段法及其在煤炭地下气化制天然气项目选址中的应用[J].煤炭工程,2014,46(3):4-7.
DUAN Tianhong, ZHOU Limin, WANG Zuoatang, et al. Improved two-stage method and application to site selection of coal underground gasification to natural gas project[J]. Coal Engineering, 2014, 46(3): 4-7.
- [16] HAGGIN J. Key tests set for underground coal gasification[J]. Chemical & Engineering News, 1983, 61(29): 15-19.
- [17] YOUNG B C. Evaluating the feasibility of underground coal gasification in Thailand[J]. Fuel & Energy Abstracts, 1997, 38(5): 315.
- [18] SOLC J, BOYSEN J E, YOUNG B C, et al. The commercial feasibility of underground coal gasification in southern Thailand[C]. Proceedings of coal-energy and the environment, vol. 1: Thirteenth Annual International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh, PA, September 1996.
- [19] KHADSE A, MOHAMMED Q, MAHAJANI S, et al. Underground coal gasification: A new clean coal utilization technique for India[J]. Energy, 2007, 32(11): 2061-2071.
- [20] VYAS D U, SINGH R P. Worldwide developments in UCG and Indian initiative[J]. Procedia Earth & Planetary Science, 2015, 11: 29-37.
- [21] 郑超,余岚,张巨峰,等.煤炭地下气化资源条件的模糊层次综合评价[J].矿业工程研究,2019,34(1):40-44.
ZHENG Chao, YU Lan, ZHANG Jufeng, et al. Fuzzy hierarchical comprehensive evaluation on resource conditions for underground coal gasification[J]. Mining Engineering Research, 2019, 34(1): 40-44.
- [22] 王志刚,付小锦,梁杰,等.天津静海含煤区无井式煤炭地下气化选址地质评价模型[J].煤田地质与勘探,2019,47(3):41-48.
WANG Zhigang, FU Xiaojin, LIANG Jie, et al. Geological evaluation model for site selection of underground coal gasification without wells in the coal-bearing area of Jinghai, Tianjin[J]. Coalfield Geology and Exploration, 2019, 47(3): 41-48.
- [23] 侯海海,邵龙义,唐跃,等.基于多层次模糊数学的中国低煤阶煤层气选区评价标准:以吐哈盆地为例[J].中国地质,2014,41(3):1002-1009.
HOU Haihai, SHAO Longyi, TANG Yue, et al. Evaluation criteria of low coal rank coalbed methane constituency in China based on multilevel fuzzy mathematics: a case study of Tuha Basin[J]. Geology in China, 2014, 41(3): 1002-1009.
- [24] HUANG W G, WANG Z T, XIN L, et al. Feasibility study on underground coal gasification of No. 15 seam in Fenghuangshan Mine[J]. Journal-South African Institute of Mining and Metallurgy, 2012, 112(10): 897-903.
- [25] 黄温钢.残留煤地下气化综合评价与稳定生产技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
HUANG Wengang. Research on comprehensive evaluation and stable production technology of underground gasification of residual coal[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [26] 黄温钢,王作棠.煤炭地下气化变权-模糊层次综合评价模型[J].西安科技大学学报,2017,37(4):500-507.
HUANG Wengang, WANG Zuoatang. Comprehensive evaluation model of fuzzy analytic hierarchy process with variable weight for underground coal gasification[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(4): 500-507.
- [27] 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 Zhenyong, XU Hao, TANG Dazhen, et al. Geological evaluation for underground coal gasification and favourable area optimization in eastern Junggar Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(10): 3845-3851.
- [28] 许浩,陈艳鹏,幸福东,等.煤炭地下气化面临的挑战与技术对策[J].煤炭科学技术,2022,50(1):265-274.
XU Hao, CHEN Yanpeng, XIN Fudong, et al. Challenges faced by underground coal gasification and technical countermeasures[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 265-274.
- [29] YANG D M, KOUKOUZAS N, GREEN M, et al. Recent development on underground coal gasification and subsequent CO₂ storage[J]. Journal of the Energy Institute, 2016, 89(4): 469-484.
- [30] 王安民,曹代勇,魏迎春.煤层气选区评价方法探讨:以准噶尔盆地南缘为例[J].煤炭学报,2017,42(4):950-958.
WANG Anmin, CAO Daiyong, WEI Yingchun. Discussion on methods for selected areas evaluation of coalbed methane: A case study of southern Juggar Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 950-958.
- [31] KHAN M, MMBAGA J, SHIRAZI A, et al. Modelling underground coal gasification: A review[J]. Energies, 2015, 8(11): 12603-12668.
- [32] 康毅力,孙琳娜,房大志,等.氧化处理缓解煤岩储层煤粉堵塞损害实验[J].天然气工业,2020,40(11):68-75.
KANG Yili, SUN Linna, FANG Dazhi, et al. Experiment of relieving coal dust blockage damage in coal reservoirs by oxidation treatment[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(11): 68-75.
- [33] 单佩金,梁杰,王皓正,等.不同体积分数氧气的地下气化过程焓分析[J].煤炭学报,2021,46(8):2673-2680.
SHAN Peijin, LIANG Jie, WANG Haozheng, et al. Exergy analysis of underground coal gasification with different oxygen concentrations[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2673-2680.
- [34] 周贺.煤炭地下气化地质选区主控因素及产气潜力评价:以黔西松河井田为例[D].徐州:中国矿业大学,2022.
ZHOU He. Evaluation of main controlling factors and gas production

- potential of coal underground gasification geological zoning: Taking Qianxi Songhe well field as an example[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [35] 刘淑琴, 师素珍, 冯国旭, 等. 煤炭地下气化地质选址原则与案例评价[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2531-2538.
- LIU Shuqin, SHI Suzhen, FENG Guoxu, et al. Geological site selection and evaluation for underground coal gasification[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2531-2538.
- [36] 刘淑琴, 梁杰, 余学东, 等. 不同煤种地下气化特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(6): 28-32.
- LIU Shuqin, LIANG Jie, YU Xuedong, et al. Underground gasification characteristics of different coal types[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2003, 32(6): 28-32.
- [37] 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 favourable area for underground coal gasification[J]. Journal of Earth Science, 2022, 47(5): 1777-1790.
- [38] BIELOWICZ B, KASIŃSKI J. The possibility of underground gasification of lignite from polish deposits[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 131: 304-318.
- [39] 吴蒙, 秦云虎, 李国璋, 等. 煤炭地下气化影响因素及评价方法研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(8): 259-269.
- WU Meng, QIN Yunhu, LI Guozhang, et al. Research progress on influencing factors and evaluation methods of underground coal gasification[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 259-269.
- [40] 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, 34(11): 79-82.
- LIU Yinghong, LIANG Xinxing, LIANG Jie, et al. Factors influenced to stability of coal underground gasification[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(11): 79-82.
- [41] PEI P, NASAH J, SOLC J, et al. Investigation of the feasibility of underground coal gasification in North Dakota, United States[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 113(2): 95-103.
- [42] 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 Yue, HUANG Wengang, XU Qiang, et al. Study on evaluation of geological conditions for underground coal gasification: Taking Zhuzhai minefield of Jiangsu Province as an example[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2018, 37(3): 1-11.
- [43] 陈亚伟, 王明玉, 李玮, 等. 煤炭地下气化地下水质量影响评价及其趋势分析[J]. 中国科学院大学学报, 2015, 32(3): 309-316.
- CHEN Yawei, WANG Mingyu, LI Wei, et al. Impact assessment and trend analysis of underground coal gasification on groundwater quality[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2015, 32(3): 309-316.
- [44] 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, 20(2): 9-11.
- XIE Mingzhong. Analysis of underground gasification geological condition in Yushugou coalmine area, northern Hebei Province[J]. Coal Geology of China, 2008, 20(2): 9-11.
- [45] 杨甫, 段中会, 马东民, 等. 煤炭地下气化技术进展[J]. 科技导报, 2020, 38(20): 71-85.
- YANG Fu, DUAN Zhonghui, MA Dongmin, et al. New development of coal gasification technology[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(20): 71-85.
- [46] PERKINS G. Underground coal gasification-Part I: Field demonstrations and process performance[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 67(1): 158-187.
- [47] 李永环, 王力, 刘钰川, 等. 煤炭地下气化技术现状及大庆油田发展潜力分析[J]. 石油地质与工程, 2024, 38(6): 125-126.
- LI Yonghuan, WANG Li, LIU Yuchuan, et al. Current status of underground coal gasification technology and development potential analysis of Daqing Oilfield[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2024, 38(6): 125-126.
- [48] 汪云甲, 黄宗文, 汪应宏, 等. 矿产资源评价及其应用研究[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1998.
- WANG Yunjia, HUANG Zongwen, WANG Yinghong, et al. Evaluation of mineral resources and its application[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 1998.
- [49] 易同生, 秦勇, 周永峰, 等. 煤炭地下气化项目技术经济评价研究进展述评[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(7): 1-16.
- YI Tongsheng, QIN Yong, ZHOU Yongfeng, et al. Research advances on the techno-economic evaluation of UCG projects[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(7): 1-16.
- [50] 高向东, 王延斌, 张崇崇. 钻井中煤体结构特征与井壁稳定性分析研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(5): 95-99.
- GAO Xiangdong, WANG Yanbin, ZHANG Chongchong. Study and analysis on coal structure features during drilling operation and well stability[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 95-99.
- [51] 秦勇, 易同生, 汪凌霞, 等. 面向项目风险控制的煤炭地下气化地质条件分析[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 290-306.
- QIN Yong, YI Tongsheng, WANG Lingxia, et al. Analysis of geological conditions for risk control of UCG project[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 290-306.
- [52] SINGAN A, RANADE V. Deployment of underground coal gasification in India[J]. Current Science, 2017, 113(2): 218-227.
- [53] 张金华, 陈艳鹏, 张梦媛, 等. 水文地质条件与煤炭地下气化的相互影响[J]. 煤炭工程, 2021, 53(12): 150-154.
- ZHANG Jinhua, CHEN Yanpeng, ZHANG Mengyuan, et al. Interaction between hydrogeological conditions and underground coal gasification[J]. Coal Engineering, 2021, 53(12): 150-154.
- [54] 刘淑琴, 畅志兵, 刘金昌. 深部煤炭原位气化开采关键技术及发展前景[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(3): 261-270.
- LIU Shuqin, CHANG Zhibing, LIU Jinchang. Key technologies and prospect for in-situ gasification mining of deep coal resources[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(3): 261-270.
- [55] 张金华, 张梦媛, 陈艳鹏, 等. 煤炭地下气化现场试验进展与启示[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 213-222.
- ZHANG Jinhua, ZHANG Mengyuan, CHEN Yanpeng, et al. Progress and revelation of underground coal gasification field test[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 213-222.
- [56] 赵明东, 董东林, 田康. 煤炭地下气化覆岩温度场和裂隙场变化机制模拟研究[J]. 矿业科学学报, 2017, 2(1): 1-6.
- ZHAO Mingdong, DONG Donglin, TIAN Kang. Change mechanism simulation study of the overlying strata temperature field and fracture

- field in UCG[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 2(1): 1-6.
- [57] 刘淑琴,周蓉,潘佳,等.煤炭地下气化选址决策及地下水污染防治[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(5): 23-27.
LIU Shuqin, ZHOU Rong, PAN Jia, et al. Location selection and groundwater pollution prevention & control regarding underground coal gasification[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(5): 23-27.
- [58] 章新文,王勇,金芸芸,等.鄂尔多斯盆地南部旬-宜探区深部煤层气成藏条件与勘探潜力[J]. *石油地质与工程*, 2024, 38(2): 77-81.
ZHANG Xinwen, WANG Yong, JIN Yunyun, et al. Reservoir-forming conditions and exploration potential of deep coalbed methane in Xun-Yi exploration area, southern Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2024, 38(2): 77-81.
- [59] 蒋秀明,吴财芳.煤炭地下气地质可行性和工艺适用性研究现状与进展[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(5): 1-12.
JIANG Xiuming, WU Caifang. A review: Geological feasibility and technological applicability of underground coal gasification[J]. *Coalfield Geology & Exploration*, 2022, 50(5): 1-12.
- [60] 刘淑琴,张尚军,牛茂斐,等.煤炭地下气化技术及其应用前景[J]. *地学前缘*, 2016, 23(3): 97-102.
LIU Shuqin, ZHANG Shangjun, NIU Maofei, et al. Technology process and application prospect of underground coal gasification[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(3): 97-102.
- [61] 潘怡.郭家河井田煤层气富集主控因素与富集区预测研究[D].西安:西安科技大学, 2017.
PAN Yi. Study on the main controlling factors and the prediction of the enrichment area of coalbed methane in Guojiahe Minefield[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.
- [62] SU F Q, HAMANAKA A, ITAKURA K, et al. Monitoring and evaluation of simulated underground coal gasification in an ex-situ experimental artificial coal seam system[J]. *Applied Energy*, 2018, 223(2): 82-92.
- [63] 陆银龙,王连国,唐芙蓉,等.煤炭地下气化过程中温度-应力耦合作用下燃空区覆岩裂隙演化规律[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(8): 1292-1298.
LU Yinlong, WANG Lianguo, TANG Furong, et al. Fracture evolution of overlying strata over combustion cavity under thermal-mechanical interaction during underground coal gasification[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(8): 1292-1298.
- [64] 刘培,于水明,王福国,等.珠江口盆地恩平凹陷海相泥岩盖层有效性评价及应用[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(3): 452-459.
LIU Pei, YU Shuiming, WANG Fuguo, et al. Cap rock effectiveness evaluation and application of marine mudstone in Enping Sag of Pearl River Mouth Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(3): 452-459.
- [65] 李曙光,王成旺,王红娜,等.大宁-吉县区块深部煤层气成藏特征及有利区评价[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(9): 59-67.
LI Shuguang, WANG Chengwang, WANG Hongna, et al. Reservoir forming characteristics and favorable area evaluation of deep coalbed methane in Daning-Jixian Block[J]. *Coalfield Geology & Exploration*, 2022, 50(9): 59-67.
- [66] 李启晖,任大忠,甯波,等.鄂尔多斯盆地神木地区侏罗系延安组煤层微观孔隙结构特征[J]. *岩性油气藏*, 2024, 36(2): 76-88.
LI Qihui, REN Dazhong, NING Bo, et al. Micro-pore structure characteristics of coal seams of Jurassic Yan'an Formation in Shenmu area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2024, 36(2): 76-88.
- [67] 金晓波.渝东南地区深部煤层气成藏特征及有利区评价[J]. *非常规油气*, 2024, 11(6): 25-33.
JIN Xiaobo. Reservoir forming characteristics and favorable area evaluation of deep coalbed methane in southeastern Chongqing[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2024, 11(6): 25-33.
- [68] 郭广山,徐凤银,刘丽芳,等.鄂尔多斯盆地府谷地区深部煤层气富集成藏规律及有利区评价[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(2): 81-91.
GUO Guangshan, XU Fengyin, LIU Lifang, et al. Enrichment and accumulation patterns and favorable area evaluation of deep coalbed methane in the Fugu area, Ordos Basin[J]. *Coalfield Geology & Exploration*, 2024, 52(2): 81-91.
- [69] 向文鑫,桑树勋,吴章利,等.贵州省煤层气规划区块煤储层特征与有利区优选[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(3): 156-164.
XIANG Wenxin, SANG Shuxun, WU Zhangli, et al. Characteristics of coal reservoirs and favorable areas classification and optimization of CBM planning blocks in Guizhou Province[J]. *Coalfield Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 156-164.
- [70] 何发岐,雷涛,齐荣,等.鄂尔多斯盆地大牛地气田深部煤层气勘探突破及其关键技术[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(6): 1567-1576.
HE Faqi, LEI Tao, QI Rong, et al. Breakthroughs and key technologies in deep coalbed methane exploration in the Daniudi gas field in the Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(6): 1567-1576.
- [71] 许晓凡,杨铁梅,邓志宇,等.深煤层可改造性测井评价方法研究[J]. *石油地质与工程*, 2024, 38(5): 30-35.
XU Xiaofan, YANG Tiemei, DENG Zhiyu, et al. Logging evaluation of the transformability potential for deep coalbed methane reservoir[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2024, 38(5): 30-35.
- [72] 李亚辉.鄂尔多斯盆地大牛地气田深层中煤阶煤层气勘探实践及产能新突破[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(6): 1555-1566.
LI Yahui. Exploration practices of and recent production breakthroughs in deep middle-rank coalbed methane in the Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(6): 1555-1566.
- [73] 彭文利,薛湧,胡斌,等.准噶尔盆地东部煤层气地质特征及有利区优选[J]. *非常规油气*, 2015, 2(5): 7-12.
PENG Wenli, XUE Lie, HU Bin, et al. CBM geological characteristics and favorable zone optimization in eastern Juggar Basin[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2015, 2(5): 7-12.
- [74] 宣强磊.基于层次分析-模糊综合评价法的煤矿顶板安全评价[J]. *化工装备技术*, 2023, 44(6): 11-15.
XUAN Qianglei. Safety evaluation of coal mine roof based on analytic hierarchy process fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *Chemical Equipment Technology*, 2023, 44(6): 11-15.