

# 基于有效孔隙度的深部煤层游离气含量预测模型

史锐<sup>1,2</sup>, 边利恒<sup>3</sup>, 张伟<sup>1,2,3</sup>, 马壮<sup>3</sup>, 焦嘉慧<sup>1,2</sup>, 申建<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 3. 中石油煤层气有限责任公司, 北京 100028)

**摘要:** 游离气含量是深部煤层气勘探开发中重要的指标, 对于评价深部煤层气开发潜力具有重要的理论意义和工程价值。针对现有的游离气计算模型的局限性, 通过分析深部储层条件下煤孔隙压缩特性, 结合游离气赋存特征, 构建了基于孔隙压缩特性的深部煤层游离气含量预测模型。研究表明: 煤层游离气含量主要受气体状态相关因素(储层温度、储层压力、气体压缩因子)和有效孔隙度这2项因素的影响; 储层温度、储层压力、气体压缩因子控制气体状态影响含气量大小; 有效孔隙度(考虑孔隙压缩、水分所占孔隙体积)控制游离气储集空间的大小。随着埋深的增大, 大宁—吉县区块游离气含量呈现出先增大后逐渐稳定的特征。在同一层煤层厚度范围内, 孔隙度是影响游离气含量的主要因素, 在计算游离气含量的过程中需要考虑孔隙压缩特征以及含水性的影响。随着埋深的增大, 不同煤级煤游离气含量均逐渐增大, 且增大的速率随着埋深逐渐降低。本研究实现了在考虑孔隙压缩特征以及水分所占孔隙体积条件下开展深部煤层游离气含量准确预测的目标, 以为深部煤层气勘探开发提供更为准确的储层物性参数。

**关键词:** 深部煤层气; 孔隙压缩性; 含水性; 游离气; 预测模型

**中图分类号:** TE 13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)01-0161-11

## Prediction model for free gas content in deep coal seams based on effective porosity

SHI Rui<sup>1,2</sup>, BIAN Liheng<sup>3</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2,3</sup>, MA Zhuang<sup>3</sup>, JIAO Jiahui<sup>1,2</sup>, SHEN Jian<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 2. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China)

**Abstract:** The content of free gas is a crucial indicator in the exploration and development of deep coalbed methane, offering significant theoretical and engineering value for evaluating the development potential of such resources. This study addresses the limitations of existing free gas calculation models by analyzing coal pore compression characteristics under deep reservoir conditions and developing a prediction model for free gas content in deep coal seams. The results indicate that the free gas content of coal seams is primarily influenced by two factors: those related to the gas state (reservoir temperature, reservoir pressure, and gas compression

收稿日期: 2024-07-01 修回日期: 2024-10-19 DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.20240320

基金项目: 国家自然科学基金项目(42130802, 42202201); 中国石油天然气股份有限公司攻关性应用性科技专项(2023ZZ18-02, 2023ZZ18-01)

通信作者: 申建(1983—), 男, 四川省遂宁市人, 教授, 博士生导师, 工学博士, 从事煤层气地质与开发方面的研究。

E-mail: jianshen@cumt.edu.cn Tel: 15062141240

引用格式: 史锐, 边利恒, 张伟, 等. 基于有效孔隙度的深部煤层游离气含量预测模型[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(1): 161-171.

SHI Rui, BIAN Liheng, ZHANG Wei, et al. Prediction model for free gas content in deep coal seams based on effective porosity[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(1): 161-171.

factor) and effective porosity. The gas state, controlled by reservoir temperature, pressure, and the gas compression factor, affects gas content, while effective porosity (which accounts for pore compression and the pore volume occupied by water) determines the size of the free gas storage space. With increasing burial depth, free gas content in the Danning-jixian block initially increases before gradually stabilizing. Within the same coal seam thickness range, porosity is the predominant factor affecting free gas content, and pore compression characteristics and water content must be considered when calculating free gas content. As burial depth increases, free gas content across different coal grades rises gradually, with the increasing rate diminishing with depth. This study achieved the goal of accurately predicting free gas content in deep coal seams by considering pore compression characteristics and the pore volume occupied by water, thereby providing more precise reservoir physical parameters for deep coalbed methane exploration and development.

**Key words:** deep coalbed methane; pore compressibility; water content; free gas; prediction model

我国煤层气分布范围广、资源丰富、开发潜力大,据初步评估,中国 2 000 m 以深的煤层气资源量为  $40.71 \times 10^{12} \text{ m}^3$ <sup>[1]</sup>,其中 2 000~3 000 m 深度的煤层气资源量为  $18.47 \times 10^{12} \text{ m}^3$ . 2019 年以来,中石油煤层气有限责任公司在鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县区块 2 000 m 以深区域深部煤层气勘探获重大突破(吉深 6-7 平 01 井获日产 10.1 万方高产工业气流)<sup>[2]</sup>,并探明国内首个规模超千万方深部煤层气田,表明我国深部煤层气具有大规模高效开发潜力<sup>[3-4]</sup>.

煤层气是一种自生自储式的非常规天然气,通常认为其主要以吸附态、游离态、溶解态 3 种形式赋存于煤层中<sup>[5-7]</sup>. 而深部煤层气赋存特征不同于浅部煤层气,很大的一个特点即是含有大量的游离气<sup>[8]</sup>. 游离气含量主要受煤孔隙度与地层温度压力等因素影响<sup>[9-13]</sup>,其中孔隙度决定着储气空间的大小,而温度和压力影响气体压缩状态.

在游离气计算模型构建方面,文献[14]构建了基于有效孔隙体积、储层压力、气体压缩系数、含气饱和度的游离气计算模型. 文献[15]基于游离气主要存在于煤孔隙中的认识,构建了真密度和视密度测试结果为依据的游离气模型,优化了游离气含量估算方法. 文献[16]利用气体状态方程,并结合游离态甲烷密度与孔隙度等参数构建了深部低阶煤游离气含量计算模型. 文献[6]基于除去吸附层的煤孔隙率、游离气饱和度和煤层气原始状态体积系数等参数,对深部煤层气进行了计算. 文献[9]基于已有游离气含量预测模型的验证与评价,提出了排除吸附态甲烷所占孔隙空间

影响的游离气含量预测模型. 文献[17]基于气体状态方程计算了原地条件下游离气含量,并在模型中采用经验公式拟合了储层孔隙度与有效应力之间的关系. 文献[18]计算发现深部煤储层整体处于含气过饱和状态,其游离气占比为 17%~43%,且随着储层压力升高呈增大的趋势,游离气含量与含水饱和度呈负相关关系.

在游离气纵向分布规律研究方面,文献[16]研究发现深部低阶煤层以吸附气和游离气为主,随着埋深的增加,含气量占比由吸附气量高于游离气量逐渐转换为游离气量高于吸附气量. 文献[19]研究发现游离气量随埋深增大而快速增高,但是当埋深增加到一定深度时游离气的含量不再增大,临界深度不是十分明显,但存在增速明显变缓的“停滞深度”. 文献[18]通过模型计算发现随着埋深增加游离气含量呈现出“稳定升高—增速减缓—趋于恒定”的变化趋势.

以上模型与分析在一定程度上可应用于深部煤层游离气含量预测,但是现有的模型中没有充分考虑煤强应力敏感性导致的孔隙压缩特征,没有构建出考虑多因素综合影响的可广泛适用于不同煤级煤样的游离气含量预测模型. 为了更准确预测深部煤层气含量分布特征,笔者基于气体状态方程,同时考虑了储层温度-压力、游离气压缩因子、不同煤级煤样力学性质、孔隙压缩特性等因素的纵向变化规律,构建了基于有效孔隙度的深部煤层游离气含量预测模型,以期成为深部煤层气开发中的关键参数——游离气含量,提供准确可靠且可广泛适用于不同煤级煤的预测模型,为深部煤层气高效勘探开发提供理论依据.

## 1 游离气含量计算模型

### 1.1 游离气含量计算方法

在煤层气成藏过程中生成气量充足的条件下,游离气主要储存在深部煤的孔隙及微裂隙系统中,扣除水分所占孔隙体积,单位体积煤内所含游离气质量可由下式计算:

$$m_f = \varphi \rho_g (1 - S_w), \quad (1)$$

式中: $m_f$  为单位体积煤内游离气质量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\varphi$  为煤孔隙度;  $\rho_g$  为储层条件下游离态甲烷密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $S_w$  为孔隙含水饱和度. 本研究中采用工业分析的方法计算煤样含水特征以对其进行表征.

$$S_w = \frac{V_w}{\varphi} = \frac{m_{ar} \rho_c}{\varphi \rho_w}, \quad (2)$$

式中: $V_w$  为单位体积煤中水所占体积;  $m_{ar}$  为煤工业分析含水率,采用原煤基进行表征;  $\rho_c/\rho_w$  为煤样视密度与水密度比值.

单位质量煤所含游离气转化为标况下体积  $V_f$  可表示为

$$V_f = \frac{m_f}{\rho_c \rho_{sc}}, \quad (3)$$

式中: $\rho_c$  为煤的视密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_{sc}$  为标况下甲烷气体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

由气体状态方程可知,储层条件下真实甲烷密度基本方程<sup>[10]</sup>为

$$\rho_g = \frac{M_g P}{ZRT}, \quad (4)$$

式中: $P$  为系统绝对压力, MPa;  $T$  为储层绝对温度, K;  $M_g$  为甲烷摩尔质量,  $\text{g}/\text{mol}$ ;  $Z$  为气体压缩因子;  $R$  为气体常数, 其值为  $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ .

将式(1)、(2)、(4)代入式(3)可得:

$$V_f = \frac{\varphi M_g P}{\rho_c \rho_{sc} ZRT} = \frac{M_g}{\rho_c \rho_{sc} R} \cdot \frac{P}{ZT} \left( \varphi - \frac{m_{ar} \rho_c}{\rho_w} \right). \quad (5)$$

上式中甲烷摩尔质量、标况下甲烷气体的密度、气体常数为定值. 如果忽略煤视密度的变化, 则式(5)可以拆分为  $A, B$  两项, 其中  $A$  项为定值, 因此煤层游离气含量主要受  $B$  项气体状态相关因素(温度、压力、压缩因子)以及孔隙度所影响, 即游离气含量整体上主要受以下因素影响: 1) 储层温度、压力、气体压缩因子, 控制气体状态影响含气量大小; 2) 有效孔隙度: 考虑孔隙压缩、水分所占孔隙体积, 控制游离气储集空间的大小.

### 1.2 储层温-压计算方法

实际储层的温度、压力分布规律较复杂, 同一

深度范围内可能存在超压储层和常压储层, 压力梯度和温度梯度与埋深存在耦合关系, 对于勘探资料丰富的地区储层温度与储层压力可参考试井报告或测井数据计算. 本研究中为了计算含气性垂向分布特征, 此处依据现场实测温压参数求取相关储层温度、压力梯度进行计算. 整体上随着埋藏深度的增大, 储层温度和压力呈逐渐增大的趋势, 为了分析其对深部煤层含气性影响, 充分考虑其变化范围, 按照一定间隔选取一定值, 进而计算地温梯度以及储层压力梯度.

#### 1.2.1 储层压力垂向分布

$$p = f_p H + p_0, \quad (6)$$

式中: $p$  为储层压力, MPa;  $f_p$  为储层压力梯度, MPa/hm;  $H$  为储层埋深, hm;  $p_0$  为储层压力拟合线 0 点压力, MPa.

#### 1.2.2 储层温度垂向分布

$$T = f_T (H - H_0) + T_0, \quad (7)$$

式中: $f_T$  为储层温度梯度, K/hm;  $H_0$  为恒温带埋深, hm;  $T_0$  为恒温带温度, K.

### 1.3 气体压缩因子计算方法

文献[20-21]采用立方型状态方程 Van der Waals (VDW)、Redlich-Kwong (RK)、Soave-Redlich-Kwong (SRK)、Peng-Robinson (PR)、Patel-Teja (PT) 等计算了不同温度、压力条件下的甲烷压缩因子, 并与美国国家标准技术研究所 (NIST) 数据库中真实流体的热力学性质进行比较, 发现 RK 状态方程对甲烷热力学性质的描述最准确, 平均相对误差小于  $0.26\%$ <sup>[20]</sup>. 因此本次研究采用 RK 状态方程对甲烷热力学性质进行计算. RK 状态方程表达式为

$$\begin{cases} Z^3 - Z^2 + (A - B - B^2)Z - AB = 0, \\ A = \frac{ap}{R^2 T^{2.5}} = 0.42748 \frac{p_r}{T_r^{2.5}}, \\ B = \frac{bp}{RT} = 0.08664 \frac{p_r}{T_r}, \end{cases} \quad (8)$$

式中: $A, B, a, b$  均为方程系数项;  $p_r$  为相对临界压力比值;  $T_r$  为相对临界温度比值.

### 1.4 孔隙压缩模型

基于孔弹性力学, 在单轴应变条件下, 煤层孔隙度<sup>[22]</sup>可表示为

$$\frac{d\varphi}{\varphi} = \left( \frac{1}{K} - \frac{1}{K_p} \right) d(\sigma - p), \quad (9)$$

式中: $K$  为煤体积模量, MPa;  $K_p$  为煤孔隙系统体积模量, MPa;  $\sigma$  为地应力平均值, MPa. 对于线性孔隙弹性条件, 孔隙体积模量  $K_p$  可以表示为

$$K_p = \frac{\varphi}{\alpha} K, \quad (10)$$

式中  $\alpha$  为 Biot 系数. 将式(10)代入式(9)可得:

$$\frac{d\varphi}{\varphi} = (1 - \frac{\alpha}{\varphi}) \frac{1}{K} d(\sigma - p), \quad (11)$$

忽略 Biot 系数影响, 假设 Biot 系数为 1, 式(11)可表示为

$$\frac{d\varphi}{d(\sigma - p)} - \frac{1}{K}\varphi = -\frac{1}{K}. \quad (12)$$

求解式(12)可得

$$\varphi = e^{\frac{1}{K}[(\sigma - \sigma_0) - (p - p_0)]} \cdot \left[ -\frac{1}{K} e^{-\frac{1}{K}[(\sigma - \sigma_0) - (p - p_0)]} d(\sigma - p) + c \right], \quad (13)$$

式中:  $\sigma_0$  为初始孔隙度测试模拟地应力;  $c$  为常数, 由初始条件决定, 进一步计算可得:

$$\varphi = e^{\frac{1}{K}[(\sigma - \sigma_0) - (p - p_0)]} \left[ e^{-\frac{1}{K}[(\sigma - \sigma_0) - (p - p_0)]} + c \right] = 1 + c \cdot e^{\frac{1}{K}[(\sigma - \sigma_0) - (p - p_0)]}. \quad (14)$$

当  $(\sigma - \sigma_0) - (p - p_0)$  为 0 时, 可得  $c = \varphi_0 - 1$ , 因此式(14)可表示为

$$\varphi = 1 + (\varphi_0 - 1) \cdot e^{\frac{1}{K}[(\sigma - \sigma_0) - (p - p_0)]}, \quad (15)$$

式中:  $\varphi_0$  为煤样初始孔隙度, 由样品在无应力状态下通过气测孔隙度方法求取, 在此条件下  $\sigma_0 = 0$  MPa,  $p_0 = 0$  MPa. 同时因为煤体积模量可以表示为  $K = E/3(1 - 2\nu)$ , 式中:  $\nu$  为煤泊松比系数,  $E$  为煤杨氏模量, 均通过煤样岩石力学试验获取. 则煤孔隙压缩模型可表示为

$$\varphi = 1 + (\varphi_0 - 1) \cdot e^{\frac{3(1-2\nu)}{E}(\sigma - p)}. \quad (16)$$

结合式(5)、式(6)、式(7)、式(16), 可得基于有效孔隙度(考虑孔隙压缩特性以及含水率影响)的深部煤层游离气含量预测模型表达式为

$$V_f = \frac{M_g(f_p H + P_0)}{\rho_c \rho_{sc} ZR(f_T H + T_0)} \cdot \left( 1 + (\varphi_0 - 1) \cdot e^{\frac{3(1-2\nu)}{E}(\sigma - p)} - \frac{m_{ar} \rho_c}{\rho_w} \right). \quad (17)$$

## 2 深部煤层游离气含量影响因素

由 1.1 节分析可知, 游离气含量整体上主要受以下因素影响: 1) 储层温度、压力、气体压缩因子, 控制气体状态影响含气量大小; 2) 孔隙度以及含水饱和度, 控制游离气储集空间的大小. 此处对 2 种因素影响下游离气分布特征进行计算表征.

### 2.1 气体状态影响下含气量分布规律

#### 2.1.1 储层温度-压力分布规律

储层温度和压力随着埋深的增大呈逐渐增大

的趋势<sup>[23-24]</sup>, 整体上储层压力分为: 低压异常(欠压)、正常(常压)、高压异常(超压)3类(表 1); 地温分为: 低温区、正常地温区、高温区 3类(表 2). 忽略储层压力拟合线 0 点压力, 选取常见的储层压力梯度 0.70, 0.95, 1.07 MPa/hm 代表欠压、常压、超压煤层, 由式(6)可知储层压力随埋深变化规律如图 1 所示.

表 1 储层压力类型<sup>[24]</sup>  
Table 1 Reservoir pressure types

分类	压力梯度 / (MPa · hm <sup>-1</sup> )
低压异常(欠压)	<0.93
正常(常压)	0.93~1.03(0.98 ± 0.05)
高压异常(超压)	>1.03

表 2 地温类型<sup>[24]</sup>  
Table 2 Ground temperature types

分类	地温梯度 / (°C · hm <sup>-1</sup> )
低地温区	<2.0
正常地温区	2.0~3.0
高地温区	>3.0

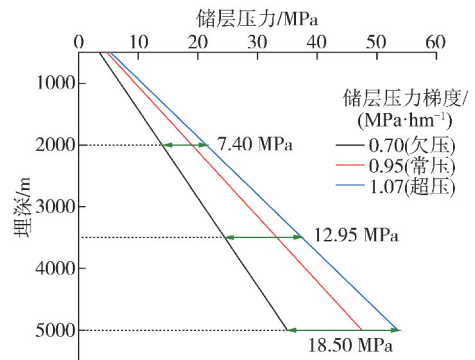


图 1 储层压力垂向变化规律

Fig. 1 Vertical variation rule of reservoir pressure

计算结果表明, 煤储层压力随着埋深逐渐增大(图 1), 对于不同类型储层其储层压力增加幅度相差较大, 在 2 000 m 埋深条件下欠压储层与超压储层之间的压力差可达 7.40 MPa, 在 3 500 m 埋深条件下欠压储层与超压储层之间的压力差可达 12.95 MPa, 在 5 000 m 埋深条件下欠压储层与超压储层之间的压力差可达 18.50 MPa.

假设恒温带温度  $T_0$  取 8 °C, 恒温带厚度  $H_0$  为 30 m. 选取 1.8, 2.5, 3.2 °C/hm 代表低地温区、正常地温区、高地温区, 由式(7)可得储层温度随埋深变化规律如图 2 所示.

储层温度也表现出类似的规律(图 2), 对于不同类型储层其储层温度增加幅度相差较大, 在 2 000 m 埋深条件下低地温区储层与高地温储层

之间的温度差可达 28 K, 在 3 500 m 埋深条件下低地温区储层与高地温储层之间的温度差可达 49 K, 在 5 000 m 埋深条件下低地温区储层与高地温储层之间的温度差可达 70 K.

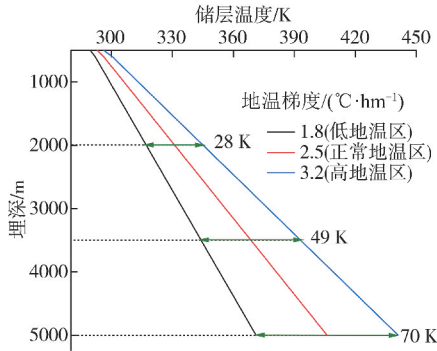


图 2 储层温度垂向变化规律  
Fig. 2 Vertical variation of reservoir temperature

### 2.1.2 储层温压对甲烷热力学性质影响

#### 1) 甲烷压缩因子

采用式(8), RK 状态方程对甲烷热力学性质进行计算, 发现随着储层埋深的增大, 温度、压力均会增大, 在埋深影响下气体压缩因子会逐渐变化. 以储层温度、压力均采用常压(储层压力梯度 0.95 MPa/hm)和正常地温(地温梯度 2.5 °C/hm)为例, 计算随埋深影响下气体压缩因子变化规律如图 3 所示. 计算结果表明在埋深 500~5 000 m 范围内, 储层温度由 292.9 K 线性增加到 405.4 K, 储层压力由 4.75 MPa 线性增加到 47.5 MPa, 而游离态甲烷气体压缩因子则呈现出先减小后增大的趋势, 由开始的 0.91 减小到 0.86, 随后逐渐增加到 1.15.

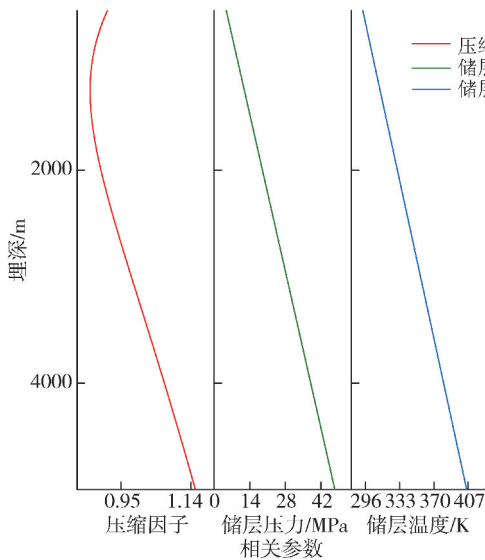


图 3 埋深影响下气体压缩因子变化规律  
Fig. 3 Changes of gas compression factor under the influence

#### 2) 游离态甲烷密度

游离态甲烷密度是影响游离气含量的重要参数, 由式(4)可知游离态甲烷的密度主要受储层温度、储层压力以及气体压缩因子影响. 采用式(4)计算不同温度、压力条件下游离态甲烷密度结果如图 4 所示.

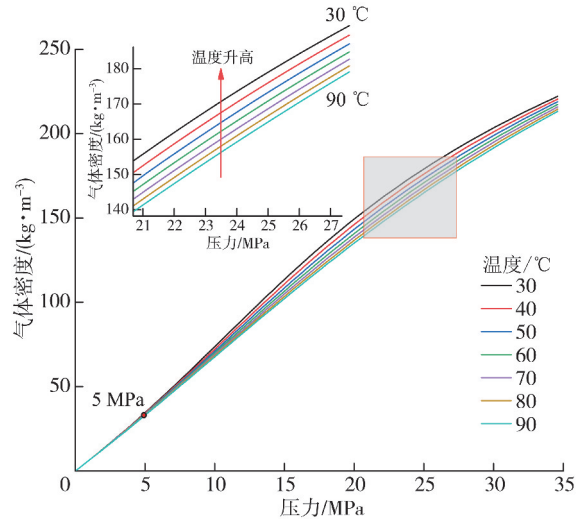


图 4 不同温度压力条件下游离态甲烷的密度计算结果  
Fig. 4 Calculation results of the density of free methane under different temperature and pressure conditions

计算结果表明, 整体上随着储层压力的增大, 游离态甲烷密度逐渐增大, 从 5 MPa 条件下的约 35 kg/m<sup>3</sup> 逐渐增长到 35 MPa 条件下的约 220 kg/m<sup>3</sup>; 且在相同储层压力条件下, 随着温度的增大游离态甲烷密度逐渐减小. 在储层压力 < 5 MPa 时, 游离态甲烷密度对温度敏感性整体上较低, 当储层压力 > 5 MPa 后温度的影响逐渐增大, 当储层压力增加到约 20 MPa 后温度的影响趋于稳定.

#### 2.1.3 气体状态影响下含气量分布范围

储层温度、压力、气体压缩因子、气体密度等参数控制气体状态进而影响含气量大小, 而气体压缩因子、气体密度是由储层压力与储层温度控制的. 因此, 选取常见的储层压力梯度 0.70, 0.95, 1.07 MPa/hm 代表欠压、常压、超压煤层, 选取 1.8, 2.5, 3.2 °C/hm 代表低地温区、正常地温区、高地温区, 进行正交计算, 见表 3. 其中, L(Low) 代表低储层温度梯度, M(Medium) 代表中等储层温度梯度, H(High) 代表高储层温度梯度; 1 代表欠压储层, 2 代表常压储层, 3 代表超压储层. 假设煤初始孔隙度为 7.90%, 最大镜质体反射率  $R_{o,max}$  为 1.50%, 游离气含量分布计算结果如图 5 所示. 选取统一的工业分析含水率  $m_{ar}=0.47%$ , 煤样视密度为 1.32 g/cm<sup>3</sup>, 泊松比 0.33 进行计算.

表 3 储层温度、压力梯度正交模拟参数组合  
Table 3 Orthogonal simulation parameter combinations of reservoir temperature and pressure gradients

储层温度梯度/ ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{hm}^{-1}$ )	储层压力梯度/( $\text{MPa} \cdot \text{hm}^{-1}$ )		
	0.70	0.95	1.07
1.8	L1	L2	L3
2.5	M1	M2	M3
3.2	H1	H2	H3

对比发现,当储层压力梯度一致时(图 5 中同一类型线条,如实线),储层温度梯度越高,游离气含量越低.当储层温度梯度一致时(图 5 中同一颜色线条,如红色),储层压力梯度越高,游离气含量越高.且储层压力梯度对游离气含量大小的影响远大于储层温度梯度的影响.含气量最低的为 H1 组合,即高地温梯度,低储层压力;含气量最高的为 L3 组合,即低地温梯度,高储层压力.

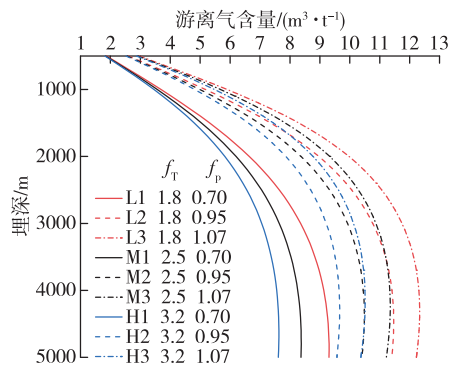


图 5 不同气体状态参数条件下游离气分布特征  
Fig. 5 Distribution characteristics of free gas under different gas state parameter conditions

## 2.2 不同煤级煤孔隙压缩特性

煤发育有复杂的孔裂隙系统<sup>[25]</sup>,整体上具有较强的应力敏感性,随着有效应力的增加,孔隙逐渐压缩.煤变质作用过程中,在高温高压的作用下,煤不断被压实,整体上孔隙度随煤变质程度的增加呈现出下降的趋势<sup>[26]</sup>.此处以具有代表性的 3 个低、中、高煤级区域:保德区块、柳林区块、柿庄区块为例,开展孔隙压缩性分析;结合参考文献以及现场测试资料采用如下参数进行计算,保德地区( $\varphi_0$  为 16.65%,  $R_{o,max}$  为 0.49%,  $m_{ar}$  为 2.59%,  $\rho_c$  为 1.29  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,  $E$  为 3.9 GPa,  $\nu$  为 0.31)<sup>[26-27]</sup>;柳林区块( $\varphi_0$  为 7.90%,  $R_{o,max}$  为 1.50%,  $m_{ar}$  为 0.70%,  $\rho_c$  为 1.32  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,  $E$  为 5.3 GPa,  $\nu$  为 0.35)<sup>[28-29]</sup>;柿庄区块( $\varphi_0$  为 5.74%,  $R_{o,max}$  为 2.84%,  $m_{ar}$  为 0.91%,  $\rho_c$  为 1.53  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,  $E$  为 4.9 GPa,  $\nu$  为 0.21)<sup>[26, 30-31]</sup>.依据式(16)计算孔隙压缩结果如图 6 所示.在同一个研究区内地应力、储层压力以及储层温度也存在一定

的变化,为了突出不同煤级煤特性影响下游离气含量变化规律,此处采用相同地应力梯度(2.0  $\text{MPa}/\text{hm}$ )、地温梯度(2.5  $^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ )、储层压力梯度(0.95  $\text{MPa}/\text{hm}$ ).

计算结果表明,对于不同煤级煤样力学性质差异较大,导致孔隙压缩特性差异较大.当深度增加到 4 000 m 时,保德地区低煤级煤孔隙度由初始条件的 16.65% 逐渐降低至 12.60%, 下降幅度达到 24.10%;柳林区块中煤级煤孔隙度由初始条件的 7.90% 逐渐降低至 6.16%, 下降 22.0%;柿庄区块高煤级煤孔隙度由初始条件的 5.74% 逐渐降低至 4.38%, 下降 23.6%.

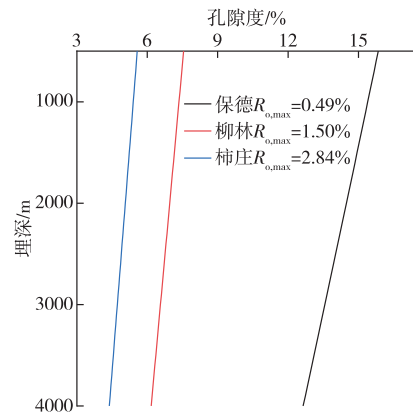


图 6 不同煤阶煤样孔隙度随埋深变化规律  
Fig. 6 Variation of porosity of coal samples of different coal rank with buried depth

基于孔隙度压缩特征计算结果,开展不同煤级煤游离气含量预测计算,结果如图 7 所示.结果表明随着埋深的增大,不同煤级游离气含量均逐渐增大,且增大的速率随着埋深逐渐降低.例如对于柿庄地区煤样( $R_{o,max} = 2.84\%$ ),游离气含量由初始 500 m 埋深的 1.51  $\text{m}^3/\text{t}$  增加至 6.23  $\text{m}^3/\text{t}$ .

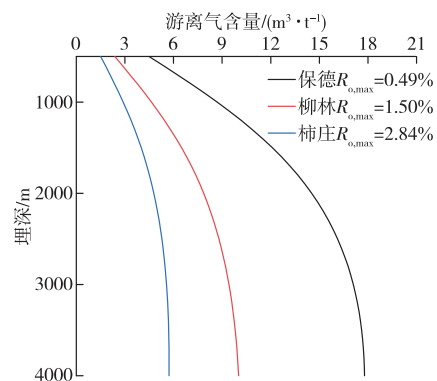


图 7 不同煤级煤游离气含量预测  
Fig. 7 Prediction of free gas content for different coal ranks

## 2.3 不同煤样含水率

煤样的工业分析含水率是影响有效孔隙度进而影响游离气含量的重要指标,以柳林区块 8# 煤

层为例,分析含水率对煤层游离气含量影响. 柳林区块 8# 煤层工业分析含水率  $m_{ar}$  主要分布在 0.32%~2.69% 范围内,均值为 0.76%<sup>[32]</sup>,选取低( $m_{ar} = 0.32\%$ )、中( $m_{ar} = 0.76\%$ )、高( $m_{ar} = 2.69\%$ )3 类条件进行游离气含量分析计算(图 8). 计算主要参数: $\varphi_0$  为 7.90%, $R_{o,max}$  为 1.50%, $\rho_c$  为 1.32 g/cm<sup>3</sup>, $E$  为 5.3 GPa, $\nu$  为 0.35<sup>[28-29]</sup>.

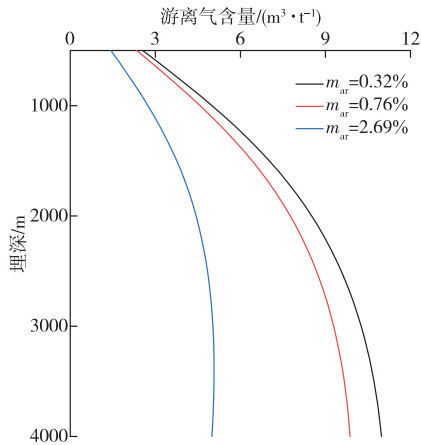


图 8 不同含水率煤游离气含量预测

Fig. 8 Prediction of free gas content of coal with different moisture content

计算结果表明,对于不同含水率条件下煤中所含游离气差异较大. 当煤样含水率为低值 0.32% 与中值 0.76% 时,在深度由 500 m 增加至 4 000 m 条件下计算所得游离气含量逐渐增大,由初始的约 2.5 m<sup>3</sup>/t 增加至约 10.5 m<sup>3</sup>/t. 当煤样含水率为高值 2.69% 时,在深度由 500 m 增加至

4 000 m 条件下计算所得游离气含量在增加至约 2 600 m 后基本保持不变,游离气含量由 500 m 埋深的 1.4 m<sup>3</sup>/t 增加到 2 600 m 之后的约 5.0 m<sup>3</sup>/t. 由此可知,在低含水率条件下,游离气随着埋深的增大逐渐增大,而在高含水率条件下游离气含量随埋深增大大幅度远远降低.

### 3 深部煤层游离气含量模型验证及预测

#### 3.1 深部煤层游离气含量模型验证

大宁—吉县地区位于鄂尔多斯盆地东缘晋西挠褶带南段,整体表现为走向 NNE、向 NW 方向缓倾的单斜构造<sup>[18]</sup>. 深部 8# 煤层在大宁—吉县区块大面积连片展布,厚度为 4.0~12.0 m(平均为 7.8 m),埋深为 1 865~2 500 m<sup>[33]</sup>. 研究区深部 8# 煤层热演化程度高, $R_{o,max}$  为 2.14%~2.78%,主要为贫煤-无烟煤<sup>[34]</sup>. 孔隙度试验测试结果主要分布在 5.36%~8.13% 之间. 以鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块 M 井深部 8# 煤层为例,开展深部煤层游离气含量模型验证. 大宁—吉县区块 M 井深部 8# 煤层埋深为 1 960.9~1 968.8 m,煤层厚度为 7.9 m, $R_{o,max}$  为 2.14%. 保压取心结果显示大宁—吉县区块深部 8# 煤层的游离气平均含量为 5.24 m<sup>3</sup>/t<sup>[34]</sup>. 煤层由上至下间隔采集 9 个样品开展分析测试(表 4). 采用现场实测参数计算储层压力梯度为 0.92 MPa/hm,地应力梯度为 1.98 MPa/hm,地温梯度为 3.2 °C/hm, $p_0$  为 0 MPa, $T_0$  为 283.15 K.

表 4 大宁—吉县区块 M 井样品计算参数

Table 4 Sample calculation parameters of well M in Daning—Jixian block

样品	样品埋深/ m	视密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	$\varphi_0$ / %	$m_{ar}$ / %	杨氏模量/ GPa	泊松比	储层压力/ MPa	地应力/ MPa	储层温度/ K	压缩因子
D1	1 960.89	1.33	7.29	1.46	6.2	0.21	18.04	38.24	344.94	0.890 9
D2	1 961.19	1.32	8.13	1.92	6.2	0.21	18.04	38.25	344.95	0.890 9
D3	1 961.79	1.41	6.56	1.32	6.2	0.21	18.05	38.26	344.97	0.890 9
D4	1 962.09	1.35	6.90	1.39	6.2	0.21	18.05	38.26	344.98	0.890 9
D5	1 962.69	1.41	7.24	3.17	6.2	0.21	18.06	38.28	345.00	0.891 0
D6	1 963.59	1.47	5.36	1.55	6.2	0.21	18.07	38.29	345.02	0.891 0
D7	1 964.19	1.39	6.68	1.20	6.2	0.21	18.07	38.30	345.04	0.891 1
D8	1 965.60	1.41	7.24	1.11	6.2	0.21	18.08	38.33	345.09	0.891 1
D9	1 966.19	1.40	6.30	1.51	6.2	0.21	18.09	38.34	345.11	0.891 2

将上述相关参数代入式(17)开展模型验证分析, M 井深部 8# 煤层游离气含量计算结果如图 9 所示. 模型计算结果表明,在储层深度 1 960.89~1 966.19 m 范围内,随着埋深增加,储层温度、储层压力、压缩因子以及游离态甲烷密度均呈线性增大,但整体上增加幅度均较小,其中储层温度增

加 0.049%, 储层压力增加 0.27%, 压缩因子增加 0.034%, 游离态甲烷密度增加 0.187%. 压缩后煤孔隙度分布在 4.83%~7.62% 范围内,计算所得游离气含量分布在 2.75~6.63 m<sup>3</sup>/t 范围内,平均值为 5.1 m<sup>3</sup>/t. 计算所得游离气含量平均值 5.1 m<sup>3</sup>/t 与保压取心测试游离气含量 5.24 m<sup>3</sup>/t 具有

较好的一致性,验证了模型的可靠性.

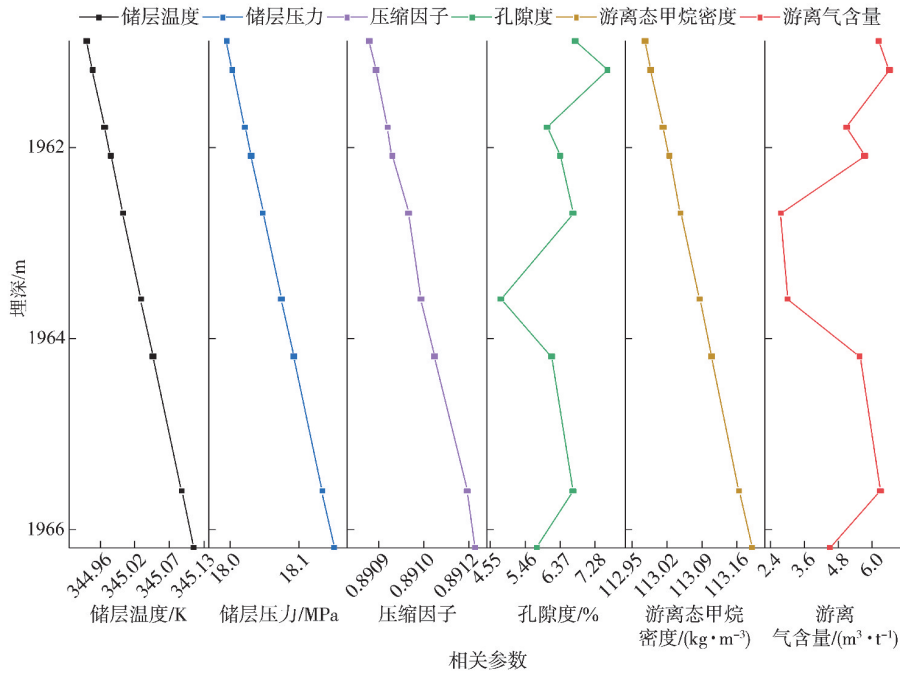


图 9 大宁—吉县区块深部 8# 煤层 M 井游离气含量模型计算结果

Fig. 9 Free gas content model calculation results of deep 8# coal seam M well in Daning—Jixian block

### 3.2 深部煤层游离气含量预测

将孔隙度、储层压力梯度参数均采用平均值, 带入式(17)开展研究区 8# 煤储层游离气含量预测. 需要说明的是, 在同一区块内煤储层各种参数均存在一定的变化范围, 此处的分析主要以取平均值进行计算为主. 通过分析游离气含量平均值

变化规律, 以期相应研究区内游离气计算提供一种思路, 即在获取样品初始孔隙度、储层温度、储层压力等参数的情况下, 如何开展游离气含量的理论计算预测. 大宁—吉县区块 8# 煤层游离气含量预测结果如图 10 所示.

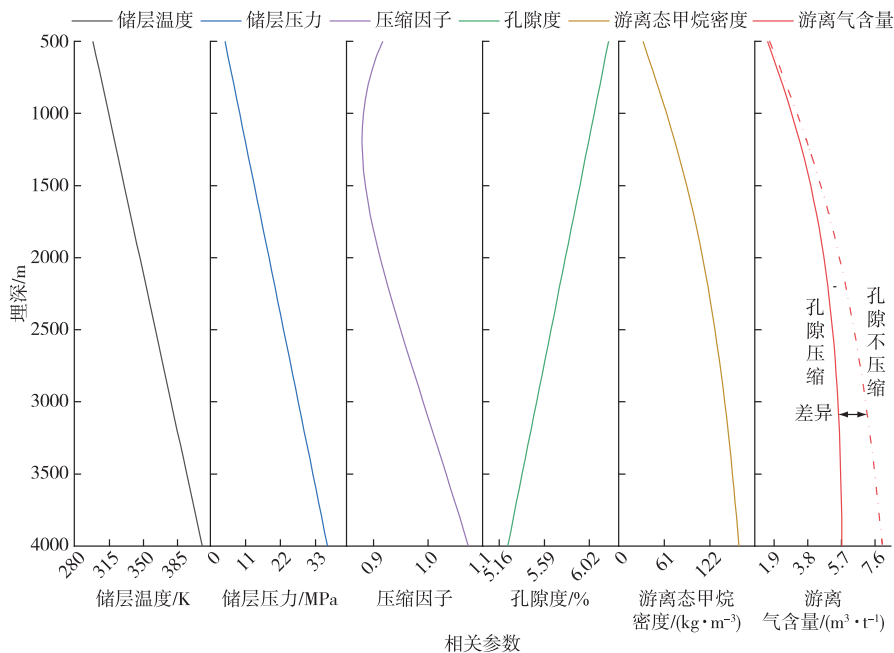


图 10 大宁—吉县区块 8# 煤层游离气含量预测结果

Fig. 10 Prediction results of free gas content for deep 8# coal seam in Daning—Jixian block

相关计算参数采用 3.1 节中的数值, 计算结果表明, 在埋深 500~4 000 m 范围内, 随着埋深增加,

储层温度、储层压力以及游离态甲烷密度均逐渐增大, 其中储层温度增加 112 K、储层压力增加 32.20

MPa、游离态甲烷密度增加  $128.37 \text{ kg/m}^3$ 。气体压缩因子呈现出先减小后增大的趋势,由 0.916 降低到 0.879 随后又缓慢增加至 1.074。孔隙度随着埋深增大逐渐减小,由初始的 6.34% 压缩至 5.24%。

如果考虑孔隙压缩效应,游离气由 500 m 埋深的  $1.51 \text{ m}^3/\text{t}$ , 逐渐增加至 4 000 m 的  $5.73 \text{ m}^3/\text{t}$ , 增速逐渐降低。而在不考虑孔隙压缩特征(孔隙度始终为初始孔隙度),游离气由 500 m 埋深的  $1.60 \text{ m}^3/\text{t}$  逐渐增加至 4 000 m 埋深的  $8.01 \text{ m}^3/\text{t}$ 。2 种条件下游离气计算结果差异较大,且随着埋深的增大两者之间的差异百分比由初始 500 m 的 5.5% 逐渐增大至 4 000 m 的 28.5%。

### 3.3 不同游离气含量模型计算结果对比

国内外学者构建了一系列游离气计算模型,其本质上为式(5)中考虑的因素是否差异,按照种类可以分为考虑孔隙压缩与含水性影响(本研究)、考虑含水性影响且不考虑孔隙压缩(一类模型)、考虑孔隙压缩且不考虑含水性影响(二类模型)以及不考虑孔隙压缩也不考虑含水性影响(三类模型)。针对大宁—吉县区块 8# 煤层,相关计算参数采用 3.1 节中的数值。对比图 11 计算结果发现,仅考虑一种因素的条件下游游离气含量变化差异相对较小,而完全不考虑孔隙压缩以及含水性影响会造成含气量的严重高估,因此在研究煤层游离气含量的过程中必须对上述 2 种因素进行系统分析研究。

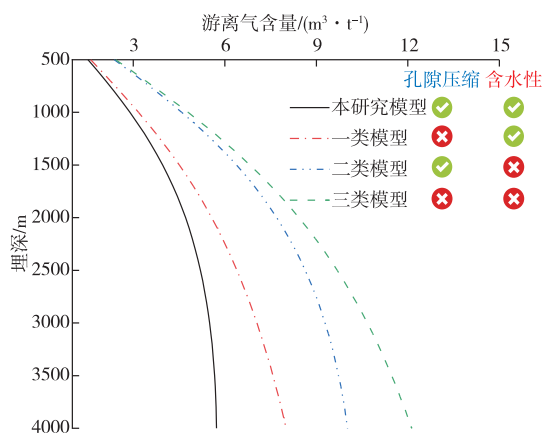


图 11 不同游离气计算模型含气量差异

Fig. 11 Comparison chart of gas content differences in various free gas calculation models

## 4 结 论

1)在不同的储层温压组合条件下,游离气含量最低的条件为高地温梯度、低储层压力组合;游离气含量最高的条件为低地温梯度、高储层压力组合。

2)在煤层气成藏过程中生成气量充足的条件下,不同煤级煤样力学性质差异较大,导致孔隙压缩特性差异较大。随着埋深的增大,不同煤级游离气含量均逐渐增大,且增大的速率随着埋深逐渐降低。

3)随着埋深增加,储层温度、储层压力以及游离态甲烷密度均逐渐增大,气体压缩因子呈现出先减小后增大的趋势,孔隙度随着埋深增大逐渐减小,游离气含量则随着埋深的增大呈现出先增大后逐渐稳定的特征。

4)在计算游离气含量的过程中需要考虑孔隙压缩特征以及含水性的影响,否则计算所得的游离气含量被严重高估。

### 参考文献:

- [1] 秦勇,申建,李小刚. 中国煤层气资源控制程度及可靠性分析[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 19-32.  
QIN Yong, SHEN Jian, LI Xiaogang. Control degree and reliability of CBM resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 19-32.
- [2] 徐凤银,闫霞,李曙光,等. 鄂尔多斯盆地东缘深部(层)煤层气勘探开发理论技术难点与对策[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 115-130.  
XU Fengyin, YAN Xia, LI Shuguang, et al. Theoretical and technological difficulties and countermeasures of deep CBM exploration and development in the eastern edge of Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 115-130.
- [3] 秦勇,申建,史锐. 中国煤系气大产业建设战略价值与战略选择[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 371-387.  
QIN Yong, SHEN Jian, SHI Rui. Strategic value and choice on construction of large CMG industry in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 371-387.
- [4] 秦勇. 中国深部煤层气地质研究进展[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1791-1811.  
QIN Yong. Progress on geological research of deep coalbed methane in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1791-1811.
- [5] 傅雪海,秦勇,韦重韬. 煤层气地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.  
FU Xuehai, QIN Yong, WEI Chongtao. Coalbed gas geology[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2007.
- [6] 石军太,曹敬添,徐凤银,等. 深部煤层气游离气饱和度计算模型及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 134-146.

- SHI Juntai, CAO Jingtian, XU Fengyin, et al. A calculation model of free gas saturation in deep coalbed methane reservoirs and its application[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(2):134-146.
- [7] 傅雪海, 康俊强, 陈义林, 等. 煤层气有关术语辨析[J/OL]. *中国矿业大学学报*, 1-8[2024-10-15]. <https://doi.org/10.13247/j.cnki.jcumt.20240106>.
- FU Xuehai, KANG Junqiang, CHEN Yilin, et al. Analysis on terminologies related to coalbed methane[J/OL]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1-8[2024-10-15]. <https://doi.org/10.13247/j.cnki.jcumt.20240106>.
- [8] 桑树勋, 李瑞明, 刘世奇, 等. 新疆煤层气大规模高效勘探开发关键技术领域研究进展与突破方向[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1):563-585.
- SANG Shuxun, LI Ruiming, LIU Shiqi, et al. Research progress and breakthrough directions of the key technical fields for large scale and efficient exploration and development of coalbed methane in Xinjiang[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1):563-585.
- [9] 李勇, 高爽, 吴鹏, 等. 深部煤层气游离气含量预测模型评价与校正:以鄂尔多斯盆地东缘深部煤层为例[J]. *石油学报*, 2023, 44(11):1892-1902.
- LI Yong, GAO Shuang, WU Peng, et al. Evaluation and correction of prediction model for free gas content in deep coalbed methane: A case study of deep coal seams in the eastern margin of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11):1892-1902.
- [10] 傅雪海, 秦勇, 王万贵, 等. 煤储层水溶气研究及褐煤含气量预测[J]. *天然气地球科学*, 2005(2):153-156.
- FU Xuehai, QIN Yong, WANG Wangui, et al. Study of gas-dissolving in coalbed water and prediction of gas content of lignite reservoir[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005(2):153-156.
- [11] 杨兆彪, 李存磊, 郭巧珍, 等. 新疆准噶尔盆地白家海凸起深部煤层气不同赋存态分配规律[J/OL]. *中国矿业大学学报*, 1-11[2024-10-12]. <https://doi.org/10.13247/j.cnki.jcumt.20240080>.
- YANG Zhaobiao, LI Cunlei, GUO Qiaozhen, et al. Distribution patterns of various occurrence states of deep coalbed methane in the Baijiahai Uplift, Junggar Basin, Xinjiang[J/OL]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1-11[2024-10-12]. <https://doi.org/10.13247/j.cnki.jcumt.20240080>.
- [12] 贾秉义, 晋香兰, 李建武, 等. 低煤级煤储层游离气含量计算:以准噶尔盆地东南缘为例[J]. *煤田地质与勘探*, 2015, 43(2):33-36.
- JIA Bingyi, JIN Xianglan, LI Jianwu, et al. Calculation of free gas content of low rank coal reservoirs: A case study of the southeast margin of Junggar basin[J]. *Coal Geology & Exploration* 2015, 43(2):33-36.
- [13] YAO Y B, WANG F, LIU D M, et al. Quantitative characterization of the evolution of in-situ adsorption/free gas in deep coal seams: Insights from NMR fluid detection and geological time simulations[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2024, 285:104474.
- [14] 张新民, 韩保山, 李建武. 褐煤煤层气储集特征及气含量确定方法[J]. *煤田地质与勘探*, 2006, 34(3):28-31.
- ZHANG Xinmin, HAN Baoshan, LI Jianwu. CBM storage character of lignite and gas content estimate method[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2006, 34(3):28-31.
- [15] 降文萍, 张群, 张培河, 等. 煤中游离气含量估算方法及应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(5):111-117.
- JIANG Wenping, ZHANG Qun, ZHANG Peihe, et al. Estimation method and application of free gas content in coal[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(5):111-117.
- [16] 申建, 杜磊, 秦勇, 等. 深部低阶煤三相态含气量建模及勘探启示:以准噶尔盆地侏罗纪煤层为例[J]. *天然气工业*, 2015, 35(3):30-35.
- SHEN Jian, DU Lei, QIN Yong, et al. Three-phase gas content model of deep low-rank coals and its implication for CBM exploration: A case study from the Jurassic coal in the Junggar Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(3):30-35.
- [17] 姚海鹏. 鄂尔多斯盆地北部晚古生代煤系非常规天然气耦合成藏机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2017.
- YAO Haipeng. Study on the coupling mechanism of unconventional natural gas accumulation in the Late Paleozoic coal series in the northern Ordos Basin[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology, 2017.
- [18] 杨焦生, 冯鹏, 唐淑玲, 等. 大宁—吉县区块深部煤层气相态控制因素及含量预测模型[J]. *石油学报*, 2023, 44(11):1879-1891.
- YANG Jiaosheng, FENG Peng, TANG Shuling, et al. Phase control factors and content prediction model of deep coalbed methane in Daning-Jixian block[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11):1879-1891.
- [19] 秦勇, 申建. 论深部煤层气基本地质问题[J]. *石油学报*, 2016, 37(1):125-136.

- QIN Yong, SHEN Jian. On the fundamental issues of deep coalbed methane geology[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(1): 125-136.
- [20] 曾泉树, 高清春, 汪志明. 煤岩吸附高压甲烷的实验与模型研究[J]. *石油科学通报*, 2020, 5(1): 78-92.  
ZENG Quanshu, GAO Qingchun, WANG Zhiming. Experimental and modeling studies on high pressure methane adsorbed on coals[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 5(1): 78-92.
- [21] 郭 涛. 深部煤层气赋存态及其含量预测模型[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.  
GUO Tao. Occurrence state and prediction model of deep coalbed methane content [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [22] CUI X J, BUSTIN R M. Volumetric strain associated with methane desorption and its impact on coalbed gas production from deep coal seams[J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 89 (9): 1181-1202.
- [23] 钟玲文. 中国煤储层压力特征[J]. *天然气工业*, 2003 (5): 132-134.  
ZHONG Lingwen. Pressure characteristics of coal reservoirs in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2003 (5): 132-134.
- [24] 熊先钺, 张 伟, 边利恒, 等. 深层煤层气储层评价方法: Q/SYCBM0043—2023[S]. 中国石油天然气股份有限公司, 2023: 1-20.  
XIONG Xianyu, ZHANG Wei, BIAN Liheng, et al. Evaluation method of deep coalbed methane reservoir: Q/SYCBM0043—2023[S]. China National Petroleum Company Limited, 2023: 1-20.
- [25] LI Y B, GUO X X, SONG D Y, et al. Expulsion of small molecule hydrocarbons and expansion of nanopores effect in tectonically deformed coal evolution [J]. *Fuel*, 2024, 357: 129961.
- [26] 刘 娜, 康永尚, 李 喆, 等. 煤岩孔隙度主控地质因素及其对煤层气开发的影响[J]. *现代地质*, 2018, 32(5): 963-974.  
LIU Na, KANG Yongshang, LI Zhe, et al. Geological controlling factors of coal pore system and its significance in CBM development[J]. 2018, 32(5): 963-974.
- [27] 黄 强. 不同煤级煤力学强度与覆压孔渗实验对比研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.  
HUANG Qiang. A comparative study on the mechanical strength and pressure pore permeability of different coal ranks[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [28] 曲英杰. 柳林地区煤层气富集产出规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.  
QU Yingjie. Research on coalbed methane enrichment and productivity in Liulin Area[D]. Beijing: China University of Geoscience, 2012.
- [29] 刘帅帅. 柳林矿区南部煤储层特征及煤层气开发单元划分[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.  
LIU Shuaishuai. Coal reservoir characteristics and CBM development unit division in southern Liulin Coal Mine Area [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [30] 袁 钧. 沁水盆地南部 3# 煤层煤相及对储层物性影响的测井研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015.  
YUAN Jun. Research on coal facies of 3# coal and the influence of reservoir properties by coal facies based on well logging in Southern Qinshui Basin [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2015.
- [31] 牛庆合. 超临界 CO<sub>2</sub> 注入无烟煤力学响应机理与可注性试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.  
NIU Qinghe. Experimental study on mechanical response mechanism and injectivity of anthracite injected with supercritical CO<sub>2</sub> [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [32] 刘云亮. 柳林地区煤层气开发地质条件研究及产能评价[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2016.  
LIU Yunliang. Research on geological conditions and productivity evaluation of coalbed methane development in Liulin Area [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2016.
- [33] 徐凤银, 王成旺, 熊先钺, 等. 深部(层)煤层气成藏模式与关键技术对策: 以鄂尔多斯盆地东缘为例 [J]. *中国海上油气*, 2022, 34(4): 30-42.  
XU Fengyin, WANG Chengwang, XIONG Xianyue, et al. Deep (layer) coalbed methane reservoir forming modes and key technical countermeasures: Taking the eastern margin of Ordos Basin as an example [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34 (4): 30-42.
- [34] 徐凤银, 王成旺, 熊先钺, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气成藏演化规律与勘探开发实践[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1764-1780.  
XU Fengyin, WANG Chengwang, XIONG Xianyue, et al. Evolution law of deep coalbed methane reservoir formation and exploration and development practice in the eastern margin of Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1764-1780.