



## 煤储层改造背景下深部煤层气藏物质平衡方程的建立与应用

石军太 徐凤银 曹运兴 李相方 黄红星 王凯 陈明 张硕 吉义天宇 王伟 孙政 李靖

### 引用本文:

石军太, 徐凤银, 曹运兴, 等. 煤储层改造背景下深部煤层气藏物质平衡方程的建立与应用[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(3): 200–217.

SHI Juntao, XU Fengyin, CAO Yunxing. Establishment and application of material balance equation for deep coalbed methane reservoirs based on coal formation stimulation background[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(3): 200–217.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0125>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 深部煤储层孔裂隙结构对煤层气赋存的影响

Influence of deep coal pore and fracture structure on occurrence of coalbed methane: a case study of Daning–Jixian Block in eastern margin of Ordos Basin

煤炭科学技术. 2024, 52(8): 106–123 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1334>

#### 延川南煤层气田深部煤层气藏排采制度的建立与优化

Establishment and optimization of drainage system for deep coalbed methane in South Yanchuan CBM Field

煤炭科学技术. 2021, 49(6): 251–257 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e78a882f-0c4b-4ccc-8ce0-df0b13a9d583>

#### 煤储层水文地质特征及其煤层气开发意义研究综述

Hydrological characters of coal reservoir and their significances on coalbed methane development: A review

煤炭科学技术. 2023, 51(4): 105–117 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1367>

#### 贵州中岭–坪山区块多煤层煤层气可采性评价

Recoverability evaluation on coalbed methane of multiple coal seams in Zhongling–Pingshan Block of Guizhou Province

煤炭科学技术. 2020, 48(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a8bdbe88-3d11-43f9-95a3-50e2194218a1>

#### 鄂尔多斯盆地深部煤层气差异富集的地质控制

Geological control of differential enrichment of deep coalbed methane in the Ordos Basin

煤炭科学技术. 2025, 53(1): 203–215 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1144>

#### 煤储层压力变化规律模拟研究

Simulation research of coal reservoir pressure variation law

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 169–177 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0698>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

石军太,徐凤银,曹运兴,等.煤储层改造背景下深部煤层气藏物质平衡方程的建立与应用[J].煤炭科学技术,2025,53(3):200-217.

SHI Juntai, XU Fengyin, CAO Yunxing, *et al.* Establishment and application of material balance equation for deep coalbed methane reservoirs based on coal formation stimulation background[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(3): 200-217.

## 煤储层改造背景下深部煤层气藏物质平衡方程的建立与应用

石军太<sup>1,2</sup>,徐凤银<sup>3,4,5</sup>,曹运兴<sup>6</sup>,李相方<sup>1,2</sup>,黄红星<sup>5,7</sup>,王凯<sup>1,2</sup>,陈明<sup>1,8</sup>,张硕<sup>1,2</sup>,  
吉义天宇<sup>1,2</sup>,王伟<sup>9</sup>,孙政<sup>10</sup>,李靖<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油大学(北京) 油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 煤层气研究中心, 北京 102249; 3. 成都理工大学 能源学院(页岩气现代产业学院), 四川 成都 610059; 4. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 四川 成都 610059; 5. 中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司, 北京 100095; 6. 河南省非常规能源与开发国际联合实验室, 河南 焦作 454003; 7. 中石油煤层气有限责任公司, 北京 100028; 8. 中石油煤层气有限责任公司 临汾分公司, 山西 太原 030000; 9. 中石油煤层气有限责任公司 勘探开发建设分公司, 山西 临汾 041400; 10. 中国矿业大学 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:**近些年深部煤层气发展迅速,在多个深部煤层气区块都取得单井日产万方的突破,为了更加科学高效地开发深部煤层气,大幅提高煤层气的采收率,建立合理、可靠且考虑因素全面的煤层气物质平衡方程,并研究深部煤层气藏或气井控制储量、平均煤储层压力、不同类型气体产量占比、产能评价指标和最终可采储量具有重要的理论与现实意义。目前考虑游离气、煤基质收缩、溶解气、吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔之间的压差和煤储层改造影响的煤层气物质平衡方程鲜有报道。首先基于深部煤层气藏物质平衡原理,在常规物质平衡方程考虑应力敏感引起的孔隙压缩、基质收缩、水的膨胀和产水因素的基础上,进一步考虑吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔之间的压差、煤储层改造引起的煤储层物性参数变化和溶解气的影响,建立了基于煤储层改造背景下的深部煤层气藏物质平衡方程;然后提出了深部煤层气线性拟合的吸附气-游离气-溶解气储量评价方法、平均地层压力显式计算方法、吸附气-游离气-溶解气产量占比评价方法、深部煤层气井产能评价方法和最终可采储量 EUR 预测方法;最后对提出的方法进行了实例应用,评价了实例井控制的吸附气-游离气-溶解气储量,揭示了深部煤层气井生产过程中吸附气-游离气-溶解气产量占比变化规律,剖析了产能指标变化特征并预测了不同废弃压力下的 EUR 和煤层气采收率。研究表明:提出的深部煤层气储量评价方法,仅需实测 2 次以上的平均煤储层压力和对应的累计产气量和产水量数据,即可采用线性拟合的方法,评价出深部煤层气井吸附气-游离气-溶解气的储量;提出的深部煤层气平均地层压力计算方法为显式表达式,避免了隐式求解方法中复杂的计算机编程计算;提出的深部煤层气井吸附气-游离气-溶解气产量占比评价方法,无需在井口安装碳同位素监测装置,可实时评价出不同气体产量占比;提出的综合流体、游离气、吸附气、溶解气和水井底采出指数可以用于识别深部煤层气井工作制度的合理性;提出的深部煤层气井 EUR 预测方法,可将生产数据整理成视压力  $p/Z^*$  与累计产气量  $G_p$  的直线表达式,给定某一废弃压力,即可预测出深部煤层气井的 EUR;实例井生产初期游离气日产气量占比和吸附气日产气量占比相当,在生产过程中,游离气日产气量占比先快速上升后缓慢降低最后逐渐稳定在 29%,吸附气日产气量占比则先快速降低后缓慢上升最后逐渐稳定在 70%,而溶解气日产气量占比一直较低;当废弃压力分别为 4、3 和 2 MPa 时,该深部煤层气井的煤层气采收率分别为 37.8%、44.2% 和 52.4%,降低废弃压力是提高深部煤层气藏

收稿日期:2025-01-22 策划编辑:常琛 责任编辑:王晓珍 DOI: 10.12438/cst.2025-0125

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(42230814);山西省科技重大专项资助项目(20201101002)

作者简介:石军太(1984—),男,甘肃靖远人,副教授,博士。E-mail: shijuntai@cup.edu.cn

采收率较为有效的手段。

**关键词：**深部煤层气；物质平衡方程；游离气；储量评价；煤储层压力；产量占比；产能评价；最终可采储量 EUR 预测

中图分类号：TD713

文献标志码：A

文章编号：0253-2336(2025)03-0200-18

## Establishment and application of material balance equation for deep coalbed methane reservoirs based on coal formation stimulation background

SHI Juntao<sup>1,2</sup>, XU Fengyin<sup>3,4,5</sup>, CAO Yunxing<sup>6</sup>, LI Xiangfang<sup>1,2</sup>, HUANG Hongxing<sup>5,7</sup>, WANG Kai<sup>1,2</sup>, CHEN Ming<sup>1,8</sup>, ZHANG Shuo<sup>1,2</sup>, JI Yitianyu<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>9</sup>, SUN Zheng<sup>10</sup>, LI Jing<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum Beijing, Beijing 102249, China; 2. Coalbed Methane Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. College of Energy (College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 5. China United Coalbed Methane National Engineering Research Center Co., Ltd., Beijing 100095, China; 6. Henan International Joint Laboratory for Unconventional Energy Geology and Development, Jiaozuo 454003, China; 7. PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China; 8. Linfen Branch of PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Taiyuan 030000, China; 9. Exploration, Development and Construction Branch of PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Linfen 041400, China; 10. State Key Laboratory of Coal Fine Exploration and Intelligent Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In recent years, the deep coalbed methane was developed rapidly, with breakthroughs in daily production of tens of thousands of cubic meters per well in multiple deep coalbed methane blocks. In order to develop deep coalbed methane more scientifically and efficiently, significantly improve the recovery rate of coalbed methane, establishing a reasonable, reliable, and comprehensive coalbed methane material balance equation, and studying the controlled reserves, average coal reservoir pressure, proportion of different types of gas production, productivity evaluation indicators, and EUR of deep coalbed methane reservoirs or gas wells have important theoretical and practical significance. At present, there are few reports on the material balance equation of coalbed methane considering the presence of free gas, coal matrix shrinkage, the presence of dissolved gas, the pressure difference between micropores enriched with adsorption gas and mesopores occupied by free gas and water, and the impact of coal formation stimulation. Firstly, based on the principle of material balance in deep coalbed methane reservoirs, a material balance equation for deep coalbed methane reservoirs under formation stimulation background was established by further considering the pressure difference between micropores enriched with adsorption gas and mesopores occupied by free gas and water, changes in coal reservoir physical parameters caused by formation stimulation, and dissolved gas, except considering pore compression caused by stress sensitivity, matrix shrinkage, water expansion, and water production in conventional material balance equation of coalbed methane reservoir. Then, a linear fitting method for evaluating the reserves of adsorbed gas, free gas, and dissolved gas, an explicit calculation method for average formation pressure, an evaluation method for the production proportion of adsorbed gas, free gas, and dissolved gas, a productivity evaluation method for deep coalbed methane wells, and an EUR prediction method were proposed. Finally, the proposed methods were applied in an example to evaluate the reserves of adsorbed gas, free gas, and dissolved gas controlled by the well. The variation law of the production proportions of adsorbed gas, free gas, and dissolved gas in the production process of deep coalbed methane well were revealed, and the characteristics of changes in productivity indicators were analyzed. The EUR and coalbed methane recovery under different abandoned pressures were predicted. Results show that: The proposed method for evaluating coalbed methane reserves only requires two or more actual measurements of the average coal reservoir pressure and corresponding cumulative gas and water production data, and can use linear fitting to evaluate the reserves of adsorbed gas, free gas, and dissolved gas controlled by deep coalbed methane wells. The proposed method for calculating the average formation pressure of deep coalbed methane is an explicit expression, which avoids the complex computer programming calculation of implicit solving methods; The proposed evaluation method for the production proportion of adsorbed gas, free gas, and dissolved gas in deep coalbed methane wells does not require the installation of carbon isotope monitoring devices at the wellhead, and can real-time evaluate the proportion of different gas production. The proposed productivity indexes of comprehensive fluid, free gas, adsorbed gas, dissolved gas, and water at bottomhole condition for deep coalbed methane wells can be used to identify the rationality of working systems of the deep coalbed methane well; The proposed EUR prediction method for deep coalbed methane wells can organize production data into a linear expression of apparent pressure  $p/Z^*$  and  $G_p$ . Given a certain abandoned pressure, the EUR of deep coalbed methane wells can be predicted. In the initial stage of production of the example well, the production proportion of free gas is almost equivalent to that of adsorbed gas. During the production process, the proportion of free gas first rapidly increases, then slowly decreases, and finally gradually stabilizes at 29%. The production proportion of adsorbed gas first rapidly decreases, then slowly increases, and finally gradually stabilizes at 70%, while the production proportion of dissolved gas remains low. When the abandoned pressure is 4, 3, and 2 MPa, the coalbed methane recovery rates of the deep coalbed meth-

ane well are 37.8%, 44.2%, and 52.4%, respectively. Reducing the abandoned pressure is an effective way to improve the coalbed methane recovery rate of the deep coalbed methane reservoirs.

**Key words:** deep coalbed methane; material balance equation; free gas; reserve evaluation; coal reservoir pressure; production proportion; deliverability evaluation; EUR prediction

## 0 引 言

煤层气作为重要的非常规资源之一,可以缓解能源短缺、降低煤矿安全事故并缓解环境压力,在全球引起了广泛关注。近些年深部煤层气发展迅速,在鄂东大吉区块<sup>[1-5]</sup>、鄂东临兴神府区块<sup>[6-7]</sup>、鄂尔多斯盆地中部区块<sup>[8]</sup>、延川南区块<sup>[9]</sup>、新疆白家海凸起<sup>[10]</sup>、宁武盆地南部<sup>[11]</sup>、大牛地区块<sup>[12-15]</sup>、大城区块<sup>[16]</sup>等多个深部煤层气区块都取得单井日产万方的突破,但同时面临着气井生产制度不合理导致产气量递减快、不同气体产量占比不清、产能评价方法缺乏、最终可采储量(Estimated Ultimate Recovery, EUR)预测不准等问题。为了更加科学高效地开发深部煤层气,大幅提高煤层气的采收率,研究深部煤层气藏或气井控制储量、平均煤储层压力、不同类型气体产量占比、产能评价指标和 EUR 具有重要的理论与现实意义。然而要准确评价储量、平均地层压力、产量占比并预测 EUR,需要先建立合理、可靠且考虑因素全面的煤层气物质平衡方程。

煤层气物质平衡方程最早由 KING<sup>[17]</sup>提出,该方程考虑了吸附气的解吸、孔隙的压缩性、水的膨胀性和水侵与产水的影响,而后 JENSEN 等<sup>[18]</sup>、SEIDLE<sup>[19]</sup>通过忽略孔隙压缩性、水的压缩性和水侵的影响,简化了 KING 提出的物质平衡方程。以上物质平衡方程均未考虑原始游离气、原始溶解气和煤基质收缩效应的影响。

CLARKSON 等<sup>[20]</sup>通过考虑原始游离气的存在,扩展了 JENSEN 和 SMITH 的物质平衡方程的应用范围,然而为了简化计算过程,将含水饱和度设为定值,与事实不符。AHMED 等<sup>[21]</sup>、CHEN 等<sup>[22]</sup>、MOGHADAM 等<sup>[23-24]</sup>建立了额外考虑游离气的煤层气藏物质平衡方程。IBRAHIM 等<sup>[25]</sup>建立了额外考虑煤基质收缩效应的煤层气储层的物质平衡方程。SHI 等<sup>[26-27]</sup>建立了额外考虑溶解气和临界解吸压力的煤层气藏物质平衡方程。

截至目前,煤层气藏物质平衡方程中先后考虑了吸附气的解吸、孔隙的压缩性、水的膨胀性、水侵与产水、游离气存在、煤基质收缩、溶解气的存在和临界解吸压力的影响,对中浅部煤层气藏来说考虑因素非常全面,但对于深部煤层气藏,煤储层更加致

密,通常需开展大规模改造才能建产,改造过程会注入大量液体,会影响煤层气藏投产前的煤储层物性,尤其煤储层孔隙率和含水饱和度。因此对于深部煤层气藏,目前常规的煤层气藏物质平衡方法不能满足要求,需要在建立其物质平衡方程时,额外考虑煤储层改造的影响。

此外,在深部煤层气藏中吸附气的储集空间与游离气 and 水的储集空间不同,吸附气主要聚集于微孔中,而游离气和水聚集于介孔以上的孔隙中,介孔中水相的存在导致微孔与介孔之间存在毛管压力差,导致吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔之间存在一定的压差,因此在深部煤层气藏物质平衡方程建立过程中仍需额外考虑吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔之间的压差。

综上,综合考虑吸附气的解吸、孔隙的压缩性、水的膨胀性、水侵与产水、游离气存在、煤基质收缩、溶解气存在、吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔之间的压差和煤储层改造影响的煤层物质平衡方程鲜有报道。笔者首先基于深部煤层气藏物质平衡原理,综合考虑吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔之间的压差、煤储层改造、孔隙压缩、基质收缩、水的膨胀、水侵与产水、溶解气等因素的影响,建立了深部煤层气煤储层改造背景下的物质平衡方程。然后基于此物质平衡方程,提出了深部煤层气线性拟合的吸附气-游离气-溶解气储量评价方法、平均地层压力显式计算方法、吸附气-游离气-溶解气产量占比评价方法、深部煤层气井产能评价方法和 EUR 预测方法。最后对提出的方法进行了实例应用,评价了实例井控制范围内的吸附气-游离气-溶解气储量,揭示了深部煤层气井生产过程中吸附气-游离气-溶解气产量占比变化规律,剖析了产能指标变化特征并预测了不同废弃压力下的 EUR。

## 1 深部煤层气煤储层改造背景下物质平衡方程的建立

目前煤层气藏物质平衡方程<sup>[17-27]</sup>,是基于累计产气量等于原始煤储层压力下的原始煤层气储量减去生产过程中平均煤储层压力下的剩余煤层气储量的原理。在吸附气原始储量和剩余储量的表达式中,始终假设吸附气的压力与游离气的压力相等,且在



游离气和溶解气原始储量表达式中采用的是煤储层原始孔隙率和原始含水饱和度这 2 个参数。在生产过程中游离气和溶解气剩余储量表达式中采用的是以煤储层原始孔隙率和原始含水饱和度为起点而变化的煤储层孔隙率和含水饱和度。事实上,深部煤层气井刚投产时的状态并不是煤储层的原始状态,而是煤储层改造后的状态,累计产水量和累计产气量是以煤储层改造后气井刚投产时刻的状态为起点进行计量的。因此,在游离气和溶解气原始储量表达式中应该采用煤储层改造后气井刚投产时刻的孔隙率和含水饱和度,在生产过程中游离气和溶解气剩余储量表达式中采用的煤储层孔隙率和含水饱和度也应以煤储层改造后气井刚投产时刻的孔隙率和含水饱和度作为起点。

倘若将常规的煤层气物质平衡方程应用于实际储层改造后的深部煤层气井,将可能出现实际累计产水量大于煤层气藏中总的水量的情况,这显然是不合理的。

总之,常规的煤层气物质平衡方程未考虑吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔之间的压差和煤储层改造的影响,导致基于常规物质平衡方程的储量评价、平均煤储层压力计算、EUR 预测存在较大误差。

下面首先对比考虑吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔之间的压差存在与否情况下吸附气物质平衡方程的差异性,然后对比考虑储层改造影响与否情况下游离气和溶解气物质平衡方程的差异性,最后推导综合考虑吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔之间压差和煤储层改造影响的深部煤层气物质平衡方程。

### 1.1 吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔压差对物质平衡方程的影响

在常规煤层气藏物质平衡方程中,表征吸附气原始储量和吸附气剩余储量的表达式<sup>[17-27]</sup>分别为

$$G_{ai} = V\rho_c \frac{V_L p_i}{p_L + p_i} \quad (1)$$

$$G_a = V\rho_c \frac{V_L p}{p_L + p} \quad (2)$$

式中:  $G_{ai}$  为吸附气原始储量,  $10^6 \text{ m}^3$ ;  $G_a$  为吸附气剩余储量,  $10^6 \text{ m}^3$ ;  $V$  为煤层气藏或气井的控制体积,  $10^6 \text{ m}^3$ ;  $\rho_c$  为煤岩密度,  $\text{t/m}^3$ ;  $V_L$  为 Langmuir 体积,  $\text{m}^3/\text{t}$ ;  $p_L$  为 Langmuir 压力, MPa;  $p_i$  为原始煤储层压力, MPa;  $p$  为生产过程中某一时刻的平均煤储层压力, MPa。

由此可见,式(1)和式(2)中采用的压力分别为原始煤储层压力和生产一段时间后的平均煤储层压力,都是游离气和水占据的介孔以上孔隙中的压力,而非吸附气富集的微孔的压力。实际上,深部煤层气吸附气主要赋存于煤基质微孔(孔径小于  $2 \text{ nm}$ )中,而游离气、溶解气和水赋存于割理裂隙(孔径大于  $1\,000 \text{ nm}$ )、宏孔(孔径介于  $50 \sim 1\,000 \text{ nm}$ )和介孔(孔径介于  $2 \sim 50 \text{ nm}$ )中<sup>[28]</sup>。原始煤储层压力  $p_i$  实际上是煤储层割理裂隙、宏孔和介孔中流体所承受的原始压力,是压力计实测的压力,为游离气和水占据的孔隙的原始压力。由于介孔中赋存着水相<sup>[28-29]</sup>,煤岩孔隙表面又具有一定的水润湿性,润湿角通常小于  $90^\circ$ ,因此吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔之间存在一定的压差,采用基质微孔与介孔之间的毛管压力差公式,即式(3)进行计算:

$$p_c = 2 \left( \frac{1}{D_a} - \frac{1}{D_f} \right) \sigma_{gw} \cos \theta \quad (3)$$

式中:  $p_c$  为煤储层微孔与介孔之间的毛管压力差, MPa;  $D_a$  为煤基质微孔的平均孔径, nm;  $D_f$  为煤基质介孔的平均孔径, nm;  $\sigma_{gw}$  为气水界面张力, mN/m;  $\theta$  为煤基质表面润湿角,  $(^\circ)$ 。

已知原始煤储层压力  $p_i$  和生产过程中的平均煤储层压力  $p$ ,按照式(4)可以计算出煤储层吸附气富集的微孔中吸附气的原始压力  $p_{mi}$  和煤储层吸附气富集的微孔中吸附气的目前压力  $p_m$ :

$$p_{mi} = p_i + p_c \quad (4)$$

$$p_m = p + p_c \quad (5)$$

式中:  $p_{mi}$  为煤储层吸附气富集的微孔中吸附气的原始压力, MPa;  $p_m$  为煤储层吸附气富集的微孔中吸附气的目前压力, MPa。

考虑吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔压差的煤层气藏物质平衡方程中表征吸附气原始储量和吸附气剩余储量的表达式分别为

$$G_{ai} = V\rho_c \frac{V_L p_{mi}}{p_L + p_{mi}} = V\rho_c \frac{V_L (p_i + p_c)}{p_L + p_i + p_c} \quad (6)$$

$$G_a = V\rho_c \frac{V_L p_m}{p_L + p_m} = V\rho_c \frac{V_L (p + p_c)}{p_L + p + p_c} \quad (7)$$

### 1.2 煤储层改造对物质平衡方程的影响

在常规煤层气藏物质平衡方程中,表征游离气和溶解气原始储量和剩余储量的表达式<sup>[26-27]</sup>分别为

$$G_{fi} + G_{si} = \frac{V\phi_i(1 - S_{wi})Z_{sc}T_{sc}p_i}{p_{sc}Z_iT} + V\phi_i S_{wi} C_s p_i \quad (8)$$

$$G_f + G_s = \frac{V\phi(1-S_w)Z_{sc}T_{sc}P}{p_{sc}TZ} + V\phi S_w C_s p =$$

$$\frac{V\phi_i Z_{sc} T_{sc} p}{p_{sc} T Z} \left[ 1 - S_{wi} - (C_p + S_{wi} C_w)(p_i - p) - \right.$$

$$\left. \frac{W_e - W_p B_w}{V\phi_i} + C_a \left( \frac{p_i}{p_L + p_i} - \frac{p}{p_L + p} \right) \right] +$$

$$V\phi_i C_s p \left[ S_{wi} + S_{wi} C_w (p_i - p) + \frac{W_e - W_p B_w}{V\phi_i} \right] \quad (9)$$

式中:  $G_f$  为煤层气藏中游离气原始储量,  $10^6 \text{ m}^3$ ;  $G_s$  为煤层气藏中溶解气原始储量,  $10^6 \text{ m}^3$ ;  $G_f$  为煤层气藏中游离气剩余储量,  $10^6 \text{ m}^3$ ;  $G_s$  为煤层气藏中溶解气剩余储量,  $10^6 \text{ m}^3$ ;  $\phi_i$  为煤储层原始孔隙率, %, 通过测井解释或岩心试验得到;  $S_{wi}$  为煤储层中原始含水饱和度, %, 通过测井解释或游离气饱和度模型<sup>[30]</sup> 计算得到;  $p_{sc}$  为标准状况下压力, 取值为 0.101 325, MPa;  $T_{sc}$  为标准状况下温度, 取值为 293.15 K;  $Z_{sc}$  为标准状况下天然气偏差系数, 取值为 1;  $T$  为煤储层温度, K;  $Z_i$  为原始煤储层压力下气体的偏差系数;  $Z$  为生产过程中某一时刻的平均煤储层压力下气体的偏差系数;  $\phi$  为生产过程中煤储层孔隙率, %;  $S_w$  为生产过程中煤储层含水饱和度, %;  $W_p$  为煤层气藏或气井生产过程中累计产水量,  $10^6 \text{ m}^3$ ;  $B_w$  为水的体积系数;  $W_e$  为生产过程中累计水侵量,  $10^6 \text{ m}^3$ ;  $C_p$  为孔隙体积压缩系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $C_w$  为水的等温压缩系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $C_s$  为煤层气在水中的溶解系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $C_a$  为煤基质收缩系数。

由此可见, 式(8)中采用的是煤储层原始孔隙率和原始含水饱和度, 且在式(9)中采用的是以煤储层原始孔隙率和原始含水饱和度为起点而变化的孔隙率和原始含水饱和度。

事实上, 深部煤层气井一般都要进行煤储层改造后才具有商业开发价值, 煤储层改造后煤储层的孔隙率和含水饱和度随之发生变化, 生产过程中孔隙率和含水饱和度的变化也是以改造后刚投产时刻的孔隙率和含水饱和度为起点的。

煤储层改造的作用是给煤储层中的流体创造高速的渗流通道, 使得煤储层中的水和气体更容易流入井筒。在煤储层改造过程中, 如压裂过程, 注入压裂液, 煤储层平均地层压力上升, 破裂地层产生裂缝; 压裂液返排后煤储层平均地层压力又回落至原始煤储层压力, 因此对比压裂前的原始煤储层状态和压裂返排后刚投产时的状态, 原始煤储层压力未发生变化。同时, 在压裂和返排过程中, 气体的原始储量保持不变, 即吸附气原始储量、游离气原始储量和溶解气原始储量不发生变化。

基于以上分析, 基于压裂前和压裂返排后水相物质平衡原理, 建立压裂前与压裂返排后水相物质平衡方程:

$$W_{fp} B_w = V\phi_i S_{wi} - V\phi_{ip} S_{wip} +$$

$$(C_p + S_{wi} C_w)(p_i - p_{ip}) + W_{fi} B_w \quad (10)$$

式中:  $W_{fp}$  为开始生产前压裂液累计返排量,  $10^6 \text{ m}^3$ ;  $\phi_{ip}$  为压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层孔隙率, %;  $S_{wip}$  为压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层含水饱和度, %;  $p_{ip}$  为煤层气藏压裂返排后平均煤储层压力, MPa, 其数值等于原始煤储层压力  $p_i$  的数值;  $W_{fi}$  为压裂液累计注入量,  $10^6 \text{ m}^3$ 。

基于压裂前和压裂返排后游离气物质平衡原理, 建立压裂前与压裂返排后游离气的物质平衡方程:

$$V\phi_i(1-S_{wi})\frac{Z_{sc}T_{sc}p_i}{p_{sc}Z_iT} = V\phi_{ip}(1-S_{wip})\frac{Z_{sc}T_{sc}p_{ip}}{p_{sc}Z_{ip}T} \quad (11)$$

式中:  $Z_{ip}$  为煤层气藏压裂返排后平均煤储层压力下气体的偏差系数, 其数值等于原始煤储层压力下的气体偏差系数。

联立式(10)和式(11), 推导得出压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层孔隙率  $\phi_{ip}$  的表达式为

$$\phi_{ip} = \phi_i + \frac{(W_{fi} - W_{fp})B_w}{V} \quad (12)$$

将式(12)代入式(10), 推导得出压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层含水饱和度  $S_{wip}$  的表达式:

$$S_{wip} = \frac{\phi_i S_{wi} + \frac{(W_{fi} - W_{fp})B_w}{V}}{\phi_{ip}} \quad (13)$$

考虑煤储层改造影响的煤层气藏物质平衡方程中, 表征游离气和溶解气原始储量和剩余储量的表达式分别为

$$G_{fi} + G_{si} = \frac{V\phi_{ip}(1-S_{wip})Z_{sc}T_{sc}p_i}{p_{sc}Z_iT} + V\phi_{ip}S_{wip}C_s p_i \quad (14)$$

$$G_f + G_s = \frac{V\phi_p(1-S_{wp})Z_{sc}T_{sc}p}{p_{sc}Z_iT} + V\phi_pS_{wp}C_s p =$$

$$\frac{V\phi_{ip}Z_{sc}T_{sc}p}{p_{sc}TZ} \left[ 1 - S_{wip} - (C_p + S_{wip}C_w)(p_i - p) - \frac{W_e - W_p B_w}{V\phi_{ip}} + \right.$$

$$\left. C_a \left( \frac{p_i}{p_L + p_i} - \frac{p}{p_L + p} \right) \right] +$$

$$V\phi_{ip}C_s p \left[ S_{wip} + S_{wip}C_w(p_i - p) + \frac{W_e - W_p B_w}{V\phi_{ip}} \right] \quad (15)$$

式中:  $\phi_p$  为煤储层改造后生产过程中的煤储层孔隙率, %;  $S_{wp}$  为煤储层改造后生产过程中的煤储层含水

饱和度, %。

### 1.3 综合考虑微孔与介孔压差和煤储层改造影响的深部煤层气藏物质平衡方程建立

深部煤层气藏原始状态-压裂返排后-生产过程中的物质平衡原理如图 1 所示。压裂返排过程中游离气的储量保持不变, 压裂返排后煤储层压力恢复至原始煤储层压力, 但压裂液的净注入量使得煤储层孔隙率和含水饱和度增大。生产过程中, 随着气和水的采出, 平均煤储层压力降低, 孔隙率和含水饱和度以压裂后刚投产时的孔隙率和含水饱和度为起点而发生变化。由于介孔中的水最不易采出, 介孔

一直有水, 导致吸附气富集的微孔压力与游离气和水占据的介孔压力之间的压差保持恒定。

根据吸附气解吸物质平衡原理, 深部煤层气藏微孔中的吸附气向介孔以上孔隙中解吸的累计量等于原始状态吸附气储量减去目前状态吸附气的剩余储量, 建立微孔中吸附气的物质平衡方程为

$$G_{pa} = V\rho_c \frac{V_L(p_i + p_c)}{p_L + p_i + p_c} - V\rho_c \frac{V_L(p + p_c)}{p_L + p + p_c} \quad (16)$$

式中:  $G_{pa}$  为深部煤层气藏微孔中吸附气向游离气和水占据的孔隙中解吸的累计量, 即吸附气的累计产量,  $10^6 \text{ m}^3$ 。

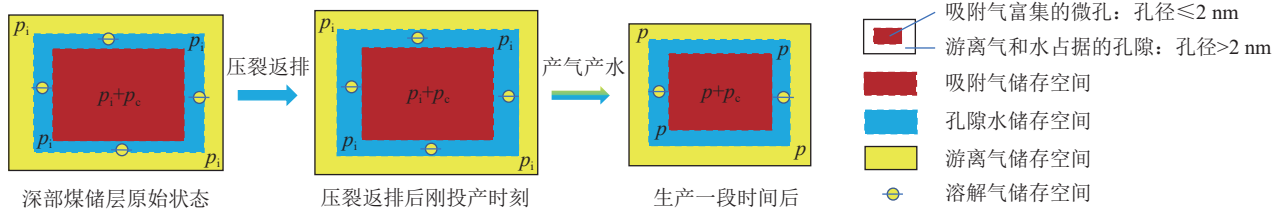


图 1 深部煤层气藏原始状态-压裂返排后-生产过程中的物质平衡原理示意

Fig.1 Schematic diagram of material balance principle of deep coalbed methane reservoir in the initial state, after fracturing and flowback, and during production

在深部煤层气井生产过程中, 气井从游离气和水占据的孔隙中采出煤层气, 而吸附气富集的微孔又向游离气和水占据的孔隙供给解吸气, 因此对于深部煤储层游离气和水占据的孔隙而言, 气井累计产气量属于流出, 而吸附气富集的微孔累计解吸量属于供给, 深部煤储层游离气和水占据孔隙的净累计产气量(气井累计产气量减去吸附气富集的微孔累计解吸量)等于游离气和水占据的孔隙中原始游离气储量与溶解气储量之和减去游离气和水占据的孔隙中目前游离气储量与溶解气储量之和。由此, 建立深部煤层气藏游离气和占据的孔隙中游离气和溶解气的物质平衡方程为

$$G_p - G_{pa} = \frac{V\phi_{ip}(1-S_{wip})Z_{sc}T_{sc}p_i}{p_{sc}Z_iT} + V\phi_{ip}S_{wip}C_s p_i - \frac{V\phi_{ip}Z_{sc}T_{sc}p}{p_{sc}TZ} \left[ 1 - S_{wip} - (C_p + S_{wip}C_w)(p_i - p) - \frac{W_e - W_p B_w}{V\phi_{ip}} + C_a \left( \frac{p_i + p_c}{p_L + p_i + p_c} - \frac{p + p_c}{p_L + p + p_c} \right) \right] - V\phi_{ip}C_s p \left[ S_{wip} + S_{wip}C_w(p_i - p) + \frac{W_e - W_p B_w}{V\phi_{ip}} \right] \quad (17)$$

式中:  $G_p$  为深部煤层气藏或气井生产过程中累计产气量,  $10^6 \text{ m}^3$ 。

将式(16)和式(17)相加, 可得到考虑吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔压力差异和煤储层

改造影响的深部煤层气藏物质平衡方程, 如式(18):

$$G_p = V\rho_c \frac{V_L(p_i + p_c)}{p_L + p_i + p_c} - V\rho_c \frac{V_L(p + p_c)}{p_L + p + p_c} + \frac{V\phi_{ip}(1-S_{wip})Z_{sc}T_{sc}p_i}{p_{sc}Z_iT} + V\phi_{ip}S_{wip}C_s p_i - \frac{V\phi_{ip}Z_{sc}T_{sc}p}{p_{sc}TZ} \left[ 1 - S_{wip} - (C_p + S_{wip}C_w)(p_i - p) - \frac{W_e - W_p B_w}{V\phi_{ip}} + C_a \left( \frac{p_i + p_c}{p_L + p_i + p_c} - \frac{p + p_c}{p_L + p + p_c} \right) \right] - V\phi_{ip}C_s p \left[ S_{wip} + S_{wip}C_w(p_i - p) + \frac{W_e - W_p B_w}{V\phi_{ip}} \right] \quad (18)$$

## 2 深部煤层气煤储层改造背景下物质平衡方程的应用

基于建立的深部煤层气物质平衡方程, 研究深部煤层气储量评价方法、平均煤储层压力计算方法、不同类型气体产量占比评价方法、产能评价方法和 EUR 预测方法。

### 2.1 深部煤层气储量评价方法

深部煤层气藏储量评价方法有静态法和动态法, 其中, 静态法即体积法, 应用最为广泛, 是煤层气储量计算的基础, 通常采用煤层气藏控制体积乘以煤岩密度再乘以实测含气量而计算得出, 而动态法为采用生产动态数据和测试资料评价储量的方法。采



用体积法进行储量计算时,煤层气藏的控制体积一般不好确定,因此在实际应用时,通常采用动态法进行储量评价,而物质平衡方程又是最为常用的动态法。目前煤层气藏物质平衡储量评价方法<sup>[17-26]</sup>皆通过引入拟偏差系数  $Z^*$  构建  $p/Z^*$  与  $G_p$  之间的线性关系来评价储量,也有学者提出了采用其他线性关系评价游离气、吸附气和溶解气储量的方法<sup>[27]</sup>,但这些方法均未考虑吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔之间的压差以及煤储改造引起的煤储层物性参数变化的影响。

基于第一部分建立的考虑吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔压力差异和煤储层改造影响的深部煤层气藏物质平衡方程,在深部煤层气井实测过至少 2 次以上的平均煤储层压力的前提下,提出了深部煤层气藏或气井控制储量的评价方法。

对式(18)进行转化,可以得到如下表达式:

$$Y = M_1 X + N_1 \quad (19)$$

式中:

$$Y = G_p - \left( \frac{Z_{sc} T_{sc}}{p_{sc} T Z} - C_s \right) p (W_c - W_p B_w) \quad (20)$$

$$X = \frac{\rho_c V_L (p_i + p_c)}{p_L + p_i + p_c} - \frac{\rho_c V_L (p + p_c)}{p_L + p + p_c} + \phi_{ip} S_{wip} C_s (p_i - p) (1 - p C_w) - \frac{\phi_{ip} Z_{sc} T_{sc} p}{p_{sc} T Z} \times \left[ 1 - S_{wip} - (C_p + S_{wip} C_w) (p_i - p) + C_a \left( \frac{p_d}{p_L + p_d} - \frac{p}{p_L + p} \right) \right] \quad (21)$$

$$M_1 = V \quad (22)$$

$$N_1 = V \phi_{ip} (1 - S_{wip}) \frac{Z_{sc} T_{sc} p_i}{p_{sc} Z_i T} = G_{fi} \quad (23)$$

以  $X$  为横轴,以  $Y$  为纵轴,在直角坐标图中绘制散点图,采用线性拟合,得到的线性趋势线的斜率值  $M_1$  和  $Y$  轴截距值  $N_1$ ,如图 2 所示。

则该深部煤层气藏或气井的控制体积  $V$  就等于拟合得到的线性趋势线斜率  $M_1$  的数值,拟合得到的线性趋势线  $Y$  轴截距值  $N_1$  即为深部煤层气藏中游离气原始储量  $G_{fi}$  的数值。

需要注意的是,在计算  $Y$  和  $X$  时,压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层孔隙率  $\phi_{ip}$  和含水饱和度  $S_{wip}$  需要已知,而根据式(12)和式(13)可知,  $\phi_{ip}$  和  $S_{wip}$  与深部煤层气藏或气井的控制体积  $V$  相关,即需要已知深部煤层气藏或气井的控制体积  $V$  的数值,但是储量评价的目的就是为了确定这个参数,因此

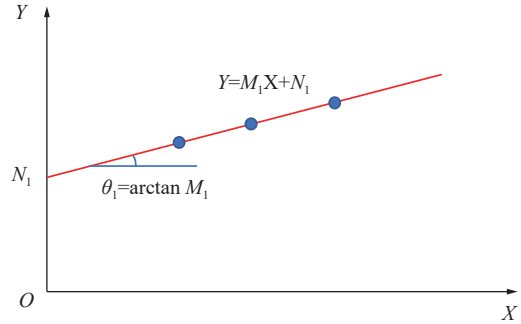


图 2 深部煤层气储量评价  $Y$ - $X$  指示曲线

Fig. 2  $Y$ - $X$  Indicator curve for deep coalbed methane reserve evaluation

需采用循环迭代法进行计算,先采用水平井长度、水平井井距和煤储层厚度的乘积作为煤层气井控制体积的初值,根据式(12)和式(13)计算出压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层孔隙率  $\phi_{ip}$  和含水饱和度  $S_{wip}$  的初值,计算  $Y$  和  $X$ ,线性拟合,确定线性趋势线的斜率  $M_1$  和  $Y$  轴截距  $N_1$  的值,确定新的控制体积  $V$  和  $G_{fi}$ ,如此循环多次,直到相邻两次计算出  $S_{wip}$  差值小于 0.001,最终确定压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层含水饱和度  $S_{wip}$ 、线性趋势线斜率  $M_1$ 、线性趋势线  $Y$  轴截距  $N_1$ 、深部煤层气藏或气井的控制体积  $V$ 、压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层孔隙率  $\phi_{ip}$  和深部煤层气藏中游离气原始储量  $G_{fi}$  的数值。

事实上,游离气储量除了通过线性趋势线的  $Y$  轴截距  $N_1$  直接确定,也可通过线性趋势线的斜率  $M_1$  计算得出。为了提高计算结果的一致性,并加速循环迭代过程,在每次拟合之后,采用式(24)对  $S_{wip}$  再次计算,并取式(13)和式(24)计算结果的平均值作为新的  $S_{wip}$  数值。

$$S_{wip} = 1 - \frac{p_{sc} Z_i T}{\phi_{ip} Z_{sc} T_{sc} p_i} \frac{N_1}{M_1} \quad (24)$$

在确定深部煤层气藏或气井的控制体积  $V$ 、压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层孔隙率  $\phi_{ip}$ 、压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层含水饱和度  $S_{wip}$  和深部煤层气藏中游离气原始储量  $G_{fi}$  的数值之后,采用式(6)计算深部煤层气藏或气井控制范围内的吸附气原始储量,采用式(25)计算深部煤层气藏或气井控制范围内的溶解气原始储量:

$$G_{si} = V \phi_{ip} S_{wip} C_s p_i \quad (25)$$

式中:  $G_{si}$  为深部煤层气藏或气井控制范围内的溶解气原始储量,  $10^6 \text{ m}^3$ 。

## 2.2 深部煤层气井控制范围内平均煤储层压力计算方法

在确定深部煤层气储量之后,即可应用式(18)



进行平均煤储层压力的评价。

将深部煤层气井每天的累计产气量  $G_p$ 、累计产水量  $W_p$ 、累计水侵量  $W_e$  (通常取值为 0, 除非在压裂过程中不慎压窜含水层, 开采过程随着煤层中流体的采出, 含水层中的水逐渐侵入煤层)、压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层孔隙率  $\phi_{ip}$ 、压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层含水饱和度  $S_{wip}$  和深部煤储层物性参数及流体物性参数代入式 (18), 应用牛顿迭代方法或弦截法可求解出深部煤层气井每天的平均地层压力。在求解过程中, 应用 DRANCHUK 等<sup>[31]</sup> 提出的方法或李相方等<sup>[32]</sup> 提出的方法, 根据天然气相对密度  $\gamma_g$  和储层温度  $T$ , 计算任一地层压力下的气体平均偏差系数  $Z$ 。

由于牛顿迭代方法和弦截法属于隐式求解方法, 需借助计算机程序辅助完成。为了计算简便, 提出了一种简便的显式计算平均储层压力的方法。

$$b = \frac{\frac{Z_{sc} T_{sc}}{p_{sc} Z T} \left[ 1 - S_{wip} - (C_p + S_{wip} C_w)(p_i - p_L - p_c) + C_a \left( \frac{p_d + p_c}{p_L + p_d + p_c} - 1 \right) \right]}{\frac{Z_{sc} T_{sc}}{p_{sc} Z T} (C_p + S_{wip} C_w) - C_s S_{wip} C_w} + \frac{C_s [S_{wip} + S_{wip} C_w (p_i - p_L - p_c)]}{\frac{Z_{sc} T_{sc}}{p_{sc} Z T} (C_p + S_{wip} C_w) - C_s S_{wip} C_w} + \frac{\left( C_s - \frac{Z_{sc} T_{sc}}{p_{sc} Z T} \right) \frac{(W_e - W_p B_w)}{V \phi_{ip}}}{\frac{Z_{sc} T_{sc}}{p_{sc} Z T} (C_p + S_{wip} C_w) - C_s S_{wip} C_w} \quad (28)$$

系数  $c$  的表达式为

$$c = \frac{\frac{G_p - G_{ai} - G_{fi} - G_{si}}{V \phi_{ip}} + \frac{V_L}{\phi_{ip}} - \frac{Z_{sc} T_{sc}}{p_{sc} Z T} C_a p_c}{\frac{Z_{sc} T_{sc}}{p_{sc} Z T} (C_p + S_{wip} C_w) - C_s S_{wip} C_w} + \frac{C_s (p_L + p_c) (S_{wip} + S_{wip} C_w p_i)}{\frac{Z_{sc} T_{sc}}{p_{sc} Z T} (C_p + S_{wip} C_w) - C_s S_{wip} C_w} + \frac{\frac{Z_{sc} T_{sc}}{p_{sc} Z T} (p_L + p_c) \left[ 1 - S_{wip} - (C_p + S_{wip} C_w) p_i + C_a \left( \frac{p_d + p_c}{p_L + p_d + p_c} \right) \right]}{\frac{Z_{sc} T_{sc}}{p_{sc} Z T} (C_p + S_{wip} C_w) - C_s S_{wip} C_w} + \frac{\left( C_s - \frac{Z_{sc} T_{sc}}{p_{sc} Z T} \right) (p_L + p_c) \frac{(W_e - W_p B_w)}{V \phi_{ip}}}{\frac{Z_{sc} T_{sc}}{p_{sc} Z T} (C_p + S_{wip} C_w) - C_s S_{wip} C_w} \quad (29)$$

系数  $d$  的表达式为

$$d = \frac{\frac{G_p - G_{ai} - G_{fi} - G_{si}}{V \phi_{ip}} (p_L + p_c) + \frac{V_L}{\phi_{ip}} p_c}{\frac{Z_{sc} T_{sc}}{p_{sc} Z T} (C_p + S_{wip} C_w) - C_s S_{wip} C_w} \quad (30)$$

将式 (27) 整理成为  $y^3 + C_1 y + C_2 = 0$  的形式, 那么  $y$ 、 $C_1$  和  $C_2$  分别为

$$y = p + \frac{b}{3} \quad (31)$$

$$C_1 = \frac{3c - b^2}{3} \quad (32)$$

首先将式 (18) 中吸附气原始储量表达式、游离气原始储量表达式和溶解气原始储量表达式分别用  $G_{ai}$ 、 $G_{fi}$  和  $G_{si}$  表示, 式 (18) 变为

$$G_p = G_{ai} + G_{fi} + G_{si} - V \rho_c \frac{V_L (p + p_c)}{p_L + p + p_c} - V \phi_{ip} C_s p \left[ S_{wip} + S_{wip} C_w (p_i - p) + \frac{W_e - W_p B_w}{V \phi_{ip}} \right] - \frac{V \phi_{ip} Z_{sc} T_{sc} p}{p_{sc} T Z} \left[ 1 - S_{wip} - (C_p + S_{wip} C_w) (p_i - p) - \frac{W_e - W_p B_w}{V \phi_{ip}} + C_a \left( \frac{p_i + p_c}{p_L + p_i + p_c} - \frac{p + p_c}{p_L + p + p_c} \right) \right] \quad (26)$$

然后将式 (26) 整理成平均煤储层压力  $p$  的一元三次方程, 可得

$$p^3 + b p^2 + c p + d = 0 \quad (27)$$

式中: 系数  $b$  的表达式为

$$C_2 = \frac{2b^3 - 9bc + 27d}{27} \quad (33)$$

方程  $y^3 + C_1 y + C_2 = 0$  的其中一个实数解为

$$y = \left[ -\frac{C_2}{2} + \sqrt{\left( \frac{C_2}{2} \right)^2 + \left( \frac{C_1}{3} \right)^3} \right]^{\frac{1}{3}} + \left[ -\frac{C_2}{2} - \sqrt{\left( \frac{C_2}{2} \right)^2 + \left( \frac{C_1}{3} \right)^3} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (34)$$

那么深部煤层气井每天的平均煤储层压力  $p$  可通过转化式 (31) 得出, 即式 (35):

$$p = y - \frac{b}{3} \quad (35)$$

在计算系数  $b$ 、 $c$  和  $d$  时,  $Z$  的取值可先取  $Z_i$  的值作为初值, 待计算出新的平均煤储层压力  $p$  时, 再应用 DRANCHUK 等<sup>[31]</sup> 提出的方法或李相方等<sup>[32]</sup> 提出的方法计算出新的  $Z$ , 然后将计算出的新的  $Z$  代替上一步的  $Z$ , 反复循环计算  $p$ , 当前后两次计算出  $p$  的相对误差满足  $1 \times 10^{-6}$  时, 退出循环, 将最后一次计算的  $p$  作为最终的平均煤储层压力  $p$  的值。

### 2.3 深部煤层气井不同类型气体产量占比评价方法

目前关于深部煤层气不同类型气体含量占比(即储量占比)的方法较多, 比如, 何发岐等<sup>[33]</sup> 根据理想气体状态平衡方程和 Langmuir 等温吸附式, 考虑甲烷吸附层的体积, 建立了游离气饱和度计算模型; 李勇等<sup>[34]</sup> 综合保压取心和等温吸附试验数据, 使用剔除吸附态甲烷的孔隙率替换储层孔隙率, 构建了基于吸附膨胀效应的深部煤层游离气含量预测模型; 石军太等<sup>[30]</sup> 基于 Langmuir 等温吸附式、亨利定律及物质平衡原理, 考虑吸附层和溶解气的影响, 建立了深部煤层气游离气饱和度计算模型; 蔡瑞豪等<sup>[35]</sup> 基于核磁  $T_2$  谱的分形维数公式, 考虑孔隙形体复杂程度和吸附气含量与分形维数的正相关性, 构建了煤储层游离气含量公式; 史锐等<sup>[36]</sup> 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。

然而, 关于深部煤层气不同类型气体产量占比的方法较少, 仅有少量文献基于碳同位素分馏模型建立了气井吸附气/游离气比例的评价方法, 如 LIU 等<sup>[37]</sup>、LIU 等<sup>[38]</sup>、MA 等<sup>[39]</sup>、张金川等<sup>[40]</sup> 先后基于页岩/煤岩多阶解吸试验和首样解吸气同位素值( $\delta^{13}C_i$ )或解吸过程同位素分馏幅度( $\Delta\delta^{13}C_i$ ), 提出了解吸过程中吸附气/游离气产量占比的半经验半定量评价方法, 等效描述气井生产过程中吸附气/游离气产量占比; 李文鏖等<sup>[41-42]</sup> 基于碳同位素分馏模型建立了含气性参数评价的方法和流程, 通过模型的正演计算实现吸附气产量占比的评估; 但碳同位素分馏方法要么将现场解吸试验的产出量等效为气井的产量, 要么需要在井口安装碳同位素监测装置, 致使其应用受限, 且无法考虑溶解气产量占比。

胡渤等<sup>[43]</sup> 基于气藏工程原理和煤层气吸附解吸理论, 建立了深部煤层气游离气/吸附气产量占比的评价方法, 但是该方法假设游离气满足定容封闭干气藏物质平衡方程, 与实际煤层气藏含水且在生产过程中产水与孔隙压缩导致游离气的地下储集空间体积一直发生变化的特征不符, 而且水的膨胀、煤基

质收缩、吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔压差、煤储层改造等效应均未考虑。

基于建立的深部煤层气藏物质平衡方程, 建立了深部煤层气储量评价方法、平均地层压力计算方法, 形成了深部煤层气井不同类型气体(游离气、吸附气和溶解气)产量占比评价方法。

基于 2.2 节提出的平均煤储层压力计算方法, 将计算出的深部煤层气井每天的平均煤储层压力  $p$  代入式(16), 计算深部煤层气井每天的吸附气累计产量  $G_{pa}$ 。将计算出的深部煤层气井每天的平均煤储层压力  $p$  代入式(36), 计算深部煤层气井每天的游离气累计产量  $G_{pf}$ :

$$G_{pf} = G_{fi} - \frac{V\phi_{ip}Z_{sc}T_{sc}p}{p_{sc}TZ} \times \left[ 1 - S_{wip} - (C_p + S_{wip}C_w)(p_i - p) - \frac{W_e - W_pB_w}{V\phi_{ip}} + C_a \left( \frac{p_i + p_c}{p_L + p_i + p_c} - \frac{p + p_c}{p_L + p + p_c} \right) \right] \quad (36)$$

式中:  $G_{pf}$  为深部煤层气井每天的游离气累计产量,  $10^6 \text{ m}^3$ 。

将计算出的深部煤层气井每天的平均煤储层压力  $p$  代入式(37), 计算深部煤层气井每天的溶解气累计产量  $G_{ps}$ :

$$G_{ps} = G_{si} - V\phi_{ip}C_s p \left[ S_{wip} + S_{wip}C_w(p_i - p) + \frac{W_e - W_pB_w}{V\phi_{ip}} \right] \quad (37)$$

式中:  $G_{ps}$  为深部煤层气井每天的溶解气累计产量,  $10^6 \text{ m}^3$ 。

若当天的游离气累计产量大于前一天的游离气累计产量, 当天的游离气日产气量等于当天的游离气累计产气量减去前一天的游离气累计产气量; 若当天的游离气累计产量小于或等于前一天的游离气累计产量, 则当天的游离气日产气量为 0。游离气日产气量计算公式如式(38):

$$q_{pf,j} = \begin{cases} 10^6 \frac{G_{pf,j} - G_{pf,j-1}}{1}, & G_{pf,j} > G_{pf,j-1} \\ 0, & G_{pf,j} \leq G_{pf,j-1} \end{cases} \quad (38)$$

式中:  $q_{pf,j}$  为煤层气井当天(第  $j$  天)的游离气日产气量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $G_{pf,j}$  为深部煤层气井当天(第  $j$  天)的游离气累计产量,  $10^6 \text{ m}^3$ ;  $G_{pf,j-1}$  为深部煤层气井前一天(第  $(j-1)$  天)的游离气累计产量,  $10^6 \text{ m}^3$ 。

若当天的游离气累计产量大于前一天的游离气累计产量, 当天的吸附气日产气量等于当天的吸附气累计产气量减去前一天的吸附气累计产气量; 若

当天的游离气累计产量小于或等于前一天的游离气累计产量,说明吸附气解吸后一部分充填了游离气的孔隙空间,采出的吸附气则将变少,那么当天的吸附气日产气量等于当天的吸附气累计产气量减去前一天的吸附气累计产气量再加上当天的游离气累计产气量减去前一天的游离气累计产气量。吸附气日产气量计算公式如式(39):

$$q_{pa,j} = \begin{cases} 10^6 \frac{G_{pa,j} - G_{pa,j-1}}{1}, & G_{pf,j} > G_{pf,j-1} \\ 10^6 \frac{G_{pa,j} - G_{pa,j-1} + G_{pf,j} - G_{pf,j-1}}{1}, & G_{pf,j} \leq G_{pf,j-1} \end{cases} \quad (39)$$

式中:  $q_{pa,j}$  为煤层气井当天(第  $j$  天)的吸附气日产气量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $G_{pa,j}$  为深部煤层气井当天(第  $j$  天)的吸附气累计产量,  $10^6 \text{ m}^3$ ;  $G_{pa,j-1}$  为深部煤层气井前一天(第  $(j-1)$  天)的吸附气累计产量,  $10^6 \text{ m}^3$ 。

将当天的溶解气累计产量减去前一天的溶解气累计产量,即可计算得到当天的溶解气日产气量,如式(40):

$$q_{ps,j} = 10^6 \frac{G_{ps,j} - G_{ps,j-1}}{1} \quad (40)$$

式中:  $q_{ps,j}$  为煤层气井当天(第  $j$  天)的溶解气日产气量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $G_{ps,j}$  为深部煤层气井当天(第  $j$  天)的溶解气累计产量,  $10^6 \text{ m}^3$ ;  $G_{ps,j-1}$  为深部煤层气井前一天(第  $(j-1)$  天)的溶解气累计产量,  $10^6 \text{ m}^3$ 。

当日产气量不为 0 时,采用式(41)计算深部煤层气井当天(第  $j$  天)的吸附气日产气量占比  $f_{qpa,j}$

$$f_{qpa,j} = \frac{q_{pa,j}}{q_{pa,j} + q_{pf,j} + q_{ps,j}} \quad (41)$$

式中:  $f_{qpa,j}$  为煤层气井当天(第  $j$  天)的吸附气日产气量占比, %。

采用式(42)计算深部煤层气井当天(第  $j$  天)的游离气日产气量占比  $f_{qpf,j}$

$$f_{qpf,j} = \frac{q_{pf,j}}{q_{pa,j} + q_{pf,j} + q_{ps,j}} \quad (42)$$

式中:  $f_{qpf,j}$  为煤层气井当天(第  $j$  天)的游离气日产气量占比, %。

采用式(43)计算深部煤层气井当天(第  $j$  天)的溶解气日产气量占比  $f_{qps,j}$

$$f_{qps,j} = \frac{q_{ps,j}}{q_{pa,j} + q_{pf,j} + q_{ps,j}} \quad (43)$$

式中:  $f_{qps,j}$  为煤层气井当天(第  $j$  天)的溶解气日产气量占比, %。

## 2.4 深部煤层气井产能评价方法

在获得深部煤层气井每天的平均煤储层压力之后,即可分析深部煤层气井的产能。在分析气井产

能时,为了消除气体和水的地面产量受体积系数的影响,将所有流体的井口产量都折算到了井底状态,以期反映气体和水在储层中的真实渗流状况。鉴于有些煤层气井井底流压不是实时监测的,因此根据气井每天的井口压力(采用油管生产时为油压,采用套管生产时为套压),来分析深部煤层气井不同流体的井底采出指数,包括综合流体井底采出指数、游离气井底采出指数、吸附气井底采出指数、溶解气井底采出指数和水的井底采出指数。

### 2.4.1 综合流体井底采出指数计算

首先计算出井底状态流体日产量,等于井底状态的日产气量与井底状态的日产水量之和,计算公式为

$$q_{rt} = q_{sc} \frac{p_{sc} Z_a T}{Z_{sc} T_{sc} p_a} + q_w B_w \quad (44)$$

式中:  $q_{rt}$  为煤层气井井底状态流体日产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $q_{sc}$  为煤层气井日产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $p_a$  为从储层到井口的平均压力, MPa, 其数值等于平均煤储层压力  $p$  与井口压力  $p_t$  的平均值;  $Z_a$  为从储层到井口的平均压力下的气体偏差系数;  $q_w$  为煤层气井日产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

然后定义煤层气井综合流体井底采出指数为井底状态流体日产量除以从储层到井口的压差,计算公式为

$$J_{rt} = \frac{q_{rt}}{p - p_t} \quad (45)$$

式中:  $J_{rt}$  为煤层气井综合流体井底采出指数,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

### 2.4.2 游离气井底采出指数计算

首先计算出井底状态游离气的日产气量,计算公式为

$$q_{rf} = q_{pf} \frac{p_{sc} Z_a T}{Z_{sc} T_{sc} p_a} \quad (46)$$

式中:  $q_{rf}$  为煤层气井井底状态游离气的日产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $q_{pf}$  为煤层气井游离气日产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

然后定义煤层气井游离气井底采出指数为井底状态游离气日产量除以从储层到井口的压差,计算公式为

$$J_{rf} = \frac{q_{rf}}{p - p_t} \quad (47)$$

式中:  $J_{rf}$  为煤层气井游离气井底采出指数,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

### 2.4.3 吸附气井底采出指数计算

首先计算出井底状态吸附气的日产气量,计算公式为

$$q_{ra} = q_{pa} \frac{p_{sc} Z_a T}{Z_{sc} T_{sc} p_a} \quad (48)$$

式中:  $q_{ra}$  为煤层气井井底状态吸附气的日产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;

$q_{pa}$  为煤层气井吸附气日产气量,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

然后定义煤层气井吸附气井底采出指数为井底状态吸附气日产气量除以从储层到井口的压差, 计算公式为

$$J_{ra} = \frac{q_{ra}}{p - p_t} \quad (49)$$

式中:  $J_{ra}$  为煤层气井吸附气井底采出指数,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

#### 2.4.4 溶解气井底采出指数计算

首先计算出井底状态溶解气的日产气量, 计算公式为

$$q_{rs} = q_{ps} \frac{p_{sc} Z_a T}{Z_{sc} T_{sc} p_a} \quad (50)$$

式中:  $q_{rs}$  为煤层气井井底状态溶解气的日产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $q_{ps}$  为煤层气井溶解气日产气量,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

然后定义煤层气井溶解气井底采出指数为井底状态溶解气日产气量除以从储层到井口的压差, 计算公式为

$$J_{rs} = \frac{q_{rs}}{p - p_t} \quad (51)$$

$$Z^* = \left[ \frac{p_{sc} T \rho_c V_L (p_i + p_c)}{\phi_{ip} Z_{sc} T_{sc} p (p_L + p + p_c)} + \frac{p_{sc} T C_s \left( S_{wip} + S_{wip} C_w (p_i - p) + \frac{W_e - W_p B_w}{V \phi_{ip}} \right)}{Z_{sc} T_{sc}} + \frac{1 - S_{wip} - (C_p + S_{wip} C_w) (p_i - p)}{Z} + \frac{C_a \left( \frac{p_i + p_c}{p_L + p_i + p_c} - \frac{p + p_c}{p_L + p + p_c} \right) - \frac{W_e - W_p B_w}{V \phi_{ip}}}{Z} \right]^{-1} \quad (54)$$

$$N_2 = \frac{p_i}{Z_i^*} \quad (55)$$

$$M_2 = \frac{p_i}{Z_i^*} \frac{1}{G_i} \quad (56)$$

$$Z_i^* = \left[ \frac{p_{sc} T \rho_c V_L (p_i + p_c)}{\phi_{ip} Z_{sc} T_{sc} p_i (p_L + p_i + p_c)} + \frac{p_{sc} T C_s \left( S_{wip} + \frac{W_e - W_p B_w}{V \phi_{ip}} \right)}{Z_{sc} T_{sc}} + \frac{1 - S_{wip} - \frac{W_e - W_p B_w}{V \phi_{ip}}}{Z} \right]^{-1} \quad (57)$$

式中:  $Z^*$  为生产过程中某一时刻的平均煤储层压力下气体的拟偏差系数;  $Z_i^*$  为原始煤储层压力下气体的拟偏差系数;  $G_i$  为深部煤层气井控制的煤层气原始储量,  $10^6 \text{ m}^3$ 。

将深部煤层气井每天的平均煤储层压力和累计产水量数据代入式(54), 计算得出每天的平均煤储层压力所对应的  $Z^*$ 。然后以  $p/Z^*$  为纵轴,  $G_p$  为横轴, 在直角坐标系中作散点图, 数据点将呈现一条直线, 通过线性拟合, 可以确定纵轴截距  $N_2$  和斜率  $-M_2$ , 如图 3 所示。那么, 该深部煤层气井控制的煤层气原始储量  $G_i$  将为  $N_2/M_2$ 。

式中:  $J_{rs}$  为煤层气井溶解气井底采出指数,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

#### 2.4.5 水的井底采出指数计算

定义煤层气井水的井底采出指数为井底状态日产水量除以从储层到井口的压差, 计算公式为

$$J_{rw} = \frac{q_w B_w}{p - p_t} \quad (52)$$

式中:  $J_{rs}$  为煤层气井水的井底采出指数,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

应用以上 5 种井底采出指数, 即可对深部煤层气井生产过程中的产能进行监测和分析, 为气井工作制度调整和优化提供理论依据。

#### 2.5 深部煤层气井 EUR 预测方法

为了使建立的深部煤层气藏物质平衡方程具有预测气井 EUR 的功能, 将式(18)进行变换和重新整理, 使其变为如下形式:

$$\frac{p}{Z^*} = N_2 - M_2 G_p \quad (53)$$

式中:

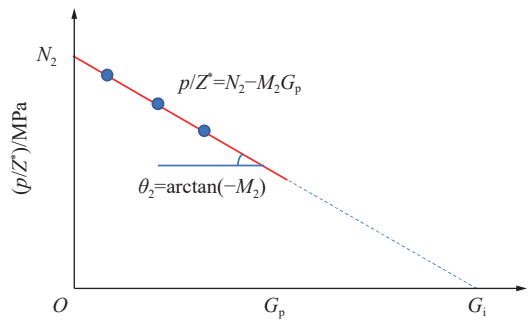


图 3 深部煤层气井 EUR 预测  $p/Z^*-G_p$  指示曲线

Fig.3  $p/Z^*-G_p$  indicator curve of EUR prediction for deep coal-bed methane wells

根据深部煤层气井生产后期的累计产水量数据和计算的平均煤储层压力, 拟合确定深部煤层气井累计产水量与平均煤储层压力的关系, 然后代入式(46), 预测  $Z^*$  与平均煤储层压力  $p$  的关系, 最终得出  $p/Z^*$  与平均煤储层压力  $p$  的关系。

在给定深部煤层气藏废弃压力  $p_{ab}$  的情况下, 即可计算得出  $p_{ab}/Z_{ab}^*$  的数值, 代入式(53)中即可计算得出深部煤层气井的 EUR。最终实现给定任一深部煤



层气藏废弃压力预测气井 EUR 的目的。

3 实例应用

某深部煤层气藏中一口多段压裂水平井,煤储层的物性参数、流体物性参数及压裂液注入-返排资料如表 1 所示。

表 1 某深部煤储层物性参数、流体物性参数和气井压裂-返排数据统计

Table 1 Statistical table of physical and fluid property parameters of a deep coal seam and fracturing backflow data of gas well	
参数	数值
煤岩密度 $\rho_c/(t \cdot m^{-3})$	1.5
煤储层原始孔隙率 $\phi_i/\%$	7
原始煤储层压力 $p_i/MPa$	21
煤储层温度 $T/K$	343.15
煤储层原始含水饱和度 $S_{wi}/\%$	60.433
孔隙压缩系数 $C_p/MPa^{-1}$	0.005
煤基质微孔的平均孔径 $d/nm$	2
煤基质介孔的平均孔径 $D/nm$	10
煤基质表面润湿角 $\theta/(^\circ)$	89
煤基质收缩系数 $C_a$	0.1
Langmuir 体积 $V_L/(m^3 \cdot t^{-1})$	25
Langmuir 压力 $p_L/MPa$	3.21
气体相对密度 $\gamma_g$	0.6
原始煤储层压力下气体的偏差系数 $Z_i$	0.889 5
水的体积系数 $B_w$	1
水的等温压缩系数 $C_w/MPa^{-1}$	0.000 435
煤层气在水中的溶解系数 $C_g/MPa^{-1}$	0.17
气水界面张力 $\sigma_{gw}/(mN \cdot m^{-1})$	60
总的压裂液量 $W_{fp}/10^6 m^3$	0.03
开始生产前压裂液累计返排量 $W_{fp}/10^6 m^3$	0.007 5

该深部煤层气井的生产动态曲线如图 4 所示。在该煤层气井生产期间,由于更换生产方式,曾多次进行关井,实测了平均煤储层压力,如表 2 所示。应用 DRANCHUK 等<sup>[31]</sup>提出的方法或李相方等<sup>[32]</sup>提出的方法,根据气体相对密度  $\gamma_g$  和煤储层温度  $T$ , 计算这些实测平均煤储层压力下的气体平均偏差系数  $Z$ , 同时记录了对应的累计产气量和累计产水量,见表 2。

下面采用提出的方法,评价该煤层气井控制范围内吸附气-游离气-溶解气的储量,计算该深部煤层气井生产过程中平均煤储层压力,计算不同类型

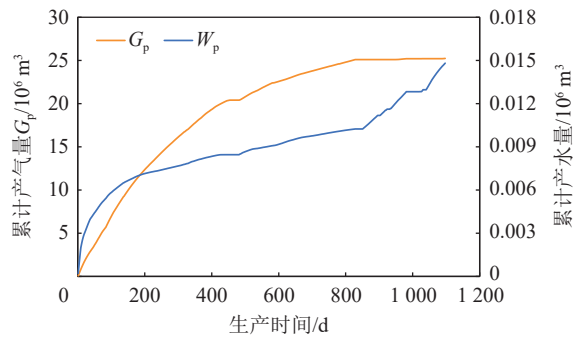


图 4 深部煤层气井每天的累计产气量  $G_p$  和累计产水量  $W_p$  曲线

Fig.4 Daily cumulative gas production  $G_p$  and cumulative water production  $W_p$  curve of the deep coalbed methane well

表 2 某深部煤层气井实测的平均煤储层压力 and 对应累计产气量和累计产水量

Table 2 Average coal reservoir pressure and corresponding cumulative gas and water production measured in a deep coalbed methane well				
生产时间/d	实测的平均煤储层压力 $p/MPa$	气体平均偏差系数 $Z$	累计产气量 $G_p/10^6 m^3$	累计产水量 $W_p/10^6 m^3$
481	11.30	0.892 42	20.404 332	0.008 452 09
842	9.69	0.901 82	25.099 218	0.010 238 33
941	9.62	0.902 29	25.099 518	0.011 816 23
1 075	9.50	0.903 09	25.204 769	0.014 221 13

气体的产量占比,评价该深部煤层气井的产能并预测 EUR。

3.1 深部煤层气储量评价

- 采用如下步骤评价该深部煤层气的储量:
- 1)采用式(3)计算得出该煤层气藏吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔之间的压差为 0.837 7 MPa,从而得出该煤层气藏吸附气富集的微孔的压力为 21.837 7 MPa。
  - 2)按照该煤层气井水平井段长度为 1 000 m,水平井井距为 350 m,深部煤储层厚度为 10 m,计算得出该口深部煤层气井的控制体积  $V$  的初值为  $3.5 \times 10^6 m^3$ 。
  - 3)采用式(12)计算得出压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层孔隙率  $\phi_p$  的初值为 0.076 429,再采用式(13)计算出压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层含水饱和度  $S_{wip}$  的初值为 0.637 61。
  - 4)采用式(20)和式(21)计算实测平均煤储层压力下的  $Y$  值和  $X$  值,在直角坐标系中绘制  $Y$  与  $X$  的散点图并拟合线性趋势线,获取线性趋势线的斜率  $M_1$  值和  $Y$  轴截距  $N_1$  值,从而得到该口深部煤层气井

的控制体积  $V$  的新值和该深部煤层气井控制范围内游离气原始储量  $G_{fi}$  的值。

5) 以该口深部煤层气井的控制体积  $V$  的新值替换其旧值, 采用式(12)计算得出压裂返排后气井刚开始投产时的煤层孔隙率  $\phi_{ip}$  的新值, 采用式(13)和式(24)分别计算压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层含水饱和度, 并取平均值作为  $S_{wip}$  的新值。

6) 循环步骤 4) 和步骤 5), 直到相邻两次计算出  $S_{wip}$  差值小于 0.001。

最终确定压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层含水饱和度  $S_{wip}$  的数值为 0.637 55, 压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层孔隙率  $\phi_{ip}$  为 0.076 416, 线性趋势线斜率  $M_1$  的值为 3.507 06, 线性趋势线  $Y$  轴截距  $N_1$  的值为 19.334 71, 如图 5 所示。

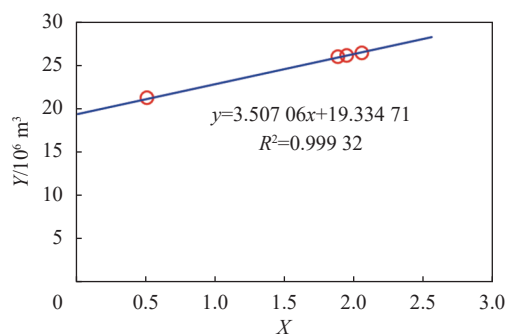


图 5 某深部煤层气井最终确定的  $Y$ - $X$  关系

Fig.5 Final  $Y$ - $X$  diagram of a deep coalbed methane well

那么, 最终确定该深部煤层气井的控制体积  $V$  为  $3.507\ 06 \times 10^6\ m^3$ , 深部煤层气藏中游离气原始储量  $G_{fi}$  为  $19.334\ 71 \times 10^6\ m^3$ 。采用式(6)和式(25)分别计算得出该深部煤层气井吸附气原始储量  $G_{ai}$  为  $114.660\ 4 \times 10^6\ m^3$ , 溶解气原始储量  $G_{si}$  为  $0.610\ 0 \times 10^6\ m^3$ 。将游离气原始储量  $G_{fi}$ 、吸附气原始储量  $G_{ai}$  和溶解气原始储量  $G_{si}$  相加, 得到该深部煤层气井控制的煤层气原始储量为  $134.605\ 11 \times 10^6\ m^3$ 。

假若采用 KING 提出的煤层气藏物质平衡方程<sup>[17]</sup>, 将表 1 中的静态参数和表 2 中的动态数据代入文献 [17] 中的  $Z^*$  表达式, 计算出表 2 中各生产天数下的  $Z^*$ , 绘制  $p/Z^*$  与  $G_p$  的直角坐标散点图并拟合直线, 如图 6 所示, 求出直线的斜率绝对值和纵轴截距, 然后将直线的纵轴截距除以直线的斜率绝对值, 得到该深部煤层气井控制的煤层气原始储量为  $120.880\ 6 \times 10^6\ m^3$ , 控制体积为  $3.177\ 64 \times 10^6\ m^3$ 。

由于 KING 提出的煤层气藏物质平衡方程未考虑基质收缩、溶解气、吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔压差、煤储层改造的影响, 评价的煤层

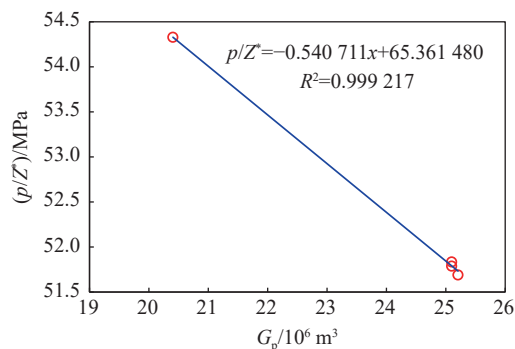


图 6 KING 提出的物质平衡方程中  $p/Z^*$  与  $G_p$  指示曲线

Fig.6  $p/Z^*$  and  $G_p$  indicator curve using the material balance equation proposed by KING

气储量与本方法评价的煤层气储量存在较大偏差, 低估了约 10% 的煤层气原始储量。从该深部煤层气井生产状况来看, 该井生产效果很好, 预计控制体积已经达到了整个井组内单井的平均控制体积 (约  $3.5 \times 10^6\ m^3$ ), 而采用 KING 提出的方法评价的控制体积低估了约 9%。

### 3.2 深部煤层气井控制范围内的平均煤储层压力计算

将图 4 中深部煤层气井每天的累计产气量  $G_p$  和累计产水量  $W_p$ 、累计水侵量  $W_e$  (日产水量逐渐降低且后期逐渐稳定在很小的值, 表明该井未压穿水层, 因此其值始终为 0)、已经确定的该深部煤层气控制体积  $V$ 、压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层孔隙率  $\phi_{ip}$ 、压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层含水饱和度  $S_{wip}$ 、深部煤层气藏中游离气原始储量  $G_{fi}$ 、吸附气原始储量  $G_{ai}$ 、溶解气原始储量  $G_{si}$  和表 1 中的深部煤层物性参数及流体物性参数代入式(28)、式(29)和式(30),  $Z$  的初值设为  $Z_i$  的值, 为 0.889 5, 计算得出系数  $b$ 、 $c$  和  $d$  的值。采用式(32)一式(35), 计算出每天的平均煤储层压力  $p$ , 应用 DRANCHUK 等<sup>[31]</sup> 提出的方法或李相方等<sup>[32]</sup> 提出的方法, 计算对应的  $Z$ , 再替换初值  $Z$ , 循环计算系数  $b$ 、 $c$  和  $d$  的值, 再次计算出每天的平均煤储层压力  $p$ , 如此循环往复, 直至前后 2 次计算出  $p$  的相对误差满足  $1 \times 10^{-6}$  时, 退出循环, 将最后一次计算结果作为最终的平均煤储层压力  $p$ 。

该深部煤层气井 1 097 d 的平均煤储层压力计算结果, 及井底流压与套压数据如图 7 所示。由图 7 可看出, 计算的平均煤储层压力曲线正好穿过了 4 次关井期间实测的井底流压 (即平均煤储层压力) 实测点, 进一步验证了储量评价方法和平均煤储层压力评价方法的合理性。

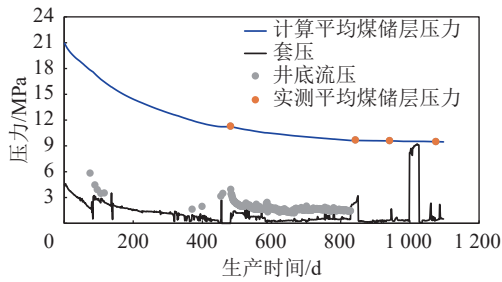


图 7 深部煤层气井每天的平均煤储层压力曲线

Fig.7 Daily average coal reservoir pressure curve of the deep coalbed methane well

### 3.3 深部煤层气井不同类型气体产量占比计算

根据计算出的深部煤层气井每天的平均煤储层压力,采用式(16)、式(36)和式(37),分别计算深部煤层气井每天的吸附气累计产量、游离气累计产量和溶解气累计产量。应用式(38)、式(39)和式(40),分别计算得出每天的游离气日产气量、吸附气日产气量和溶解气日产气量,连同实际日产气量和计算的 3 种类型气体产量之和(计算日产气量)如图 8 所示。

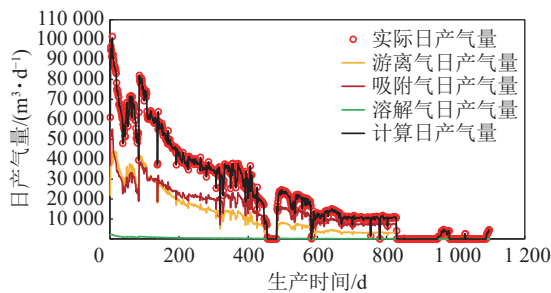


图 8 深部煤层气井日产气量、吸附气日产气量、游离气日产气量和溶解气日产气量曲线

Fig.8 Curves of daily gas production, adsorbed gas production, free gas production, and dissolved gas production of the deep coalbed methane well

由图 8 可看出,计算日产气量与实际日产气量非常吻合,说明每天的吸附气日产气量、游离气日产气量和溶解气日产气量计算结果可靠。

当日产气量不为 0 时,应用式(41)、式(42)和式(43),分别计算得出每天的吸附气日产气量占比、游离气日产气量占比和溶解气日产气量占比,如图 9 所示。

由图 9 可看出,该深部煤层气井游离气日产气量占比先从投产初期的 36% 上升至生产 40 d 后的 54%,而后逐渐降低至生产 800 d 后的 29%;吸附气日产气量占比则先从投产初期的 61% 降低至生产 40 d 后的 45%,而后逐渐上升至生产 800 d 后的 70%;而溶解气日产气量占比从投产初期的 3% 逐渐降低至生产 800 d 后的 1%。以上认识与游离气日产气量

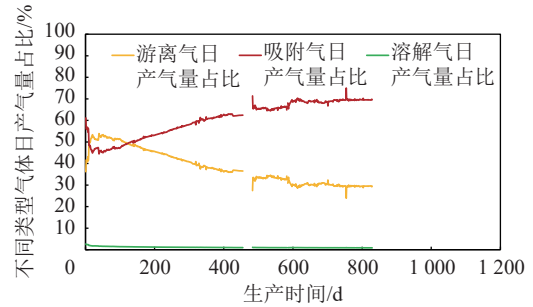


图 9 深部煤层气井吸附气日产气量占比、游离气日产气量占比和溶解气日产气量占比曲线

Fig.9 Curves of daily adsorbed gas production ratio, free gas production ratio, and dissolved gas production ratio of the deep coalbed methane well

占比从始至终逐渐降低的常规认识不同,分析其原因为:该深部煤层气井投产初期,日产水量较大,含水饱和度快速降低(图 10),含气饱和度快速上升,游离气在煤储层孔隙中降压膨胀,一部分游离气补偿了大量产水导致的含气饱和度上升所多出的游离气空间,剩余的游离气则产出至地面,因此导致投产初期游离气日产气量占比不是最高的。

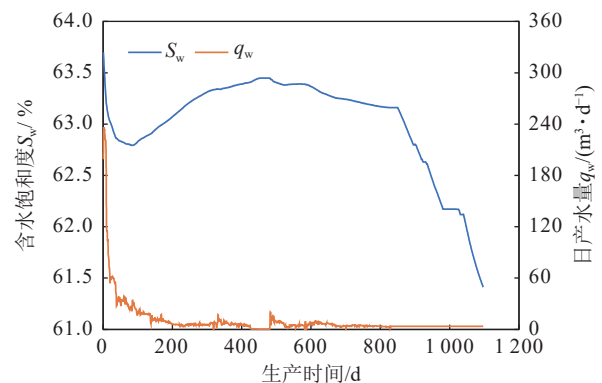


图 10 深部煤层气井每天的平均含水饱和度和日产水量曲线

Fig.10 Curves of average water saturation and daily water production of the deep coalbed methane well

### 3.4 深部煤层气井产能评价

应用式(44)、式(46)、式(48)和式(50)分别计算出该深部煤层气井生产过程中井底状态流体日产量、井底状态游离气的日产气量、井底状态吸附气的日产气量和井底状态溶解气的日产气量。应用式(45)、式(47)、式(49)、式(51)和式(52)分别计算出该深部煤层气井生产过程中的综合流体井底采出指数、游离气井底采出指数、吸附气井底采出指数、溶解气井底采出指数和水的井底采出指数,如图 11 所示。

由图 11 可看出,在该深部煤层气井生产过程中,综合流体井底采出指数前 400 d 在  $45 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$



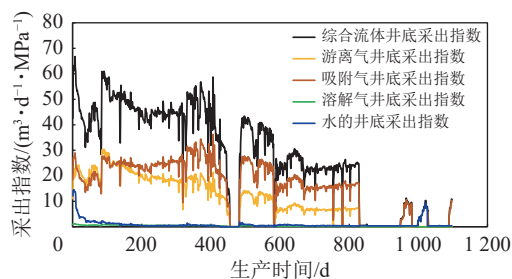


图 11 深部煤层气井每天的产能指标变化曲线

Fig.11 Variation curves of daily productivity indices of the deep coalbed methane well

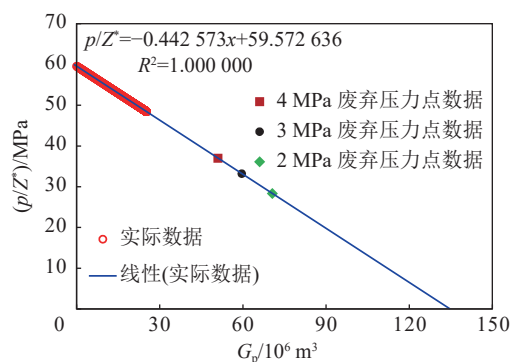
上下波动,而后逐渐降低至 600 ~ 800 d 的  $22 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ ; 游离气井底采出指数前 90 d 在  $20 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$  上下波动,第 90 天上升至  $30 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ ,而后逐渐降低,至第 600 天后基本稳定在  $7 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ ; 吸附气井底采出指数前 90 d 在  $20 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$  上下波动,第 90 天上升至  $28 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$  后缓慢上升至  $30 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ ,之后缓慢下降,至第 600 天后稳定在  $16 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ ; 溶解气井底采出指数一直较小,从投产初期的  $1.2 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$  逐渐下降至  $0.2 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ ; 水的井底采出指数从投产初期的  $12 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$  快速下降至第 40 天后的  $2 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ ,随后缓慢下降至  $0.2 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ 。

由此可见,该深部煤层气井在 400 d 以前,游离气井底采出指数逐渐降低,说明该深部煤层气井早期生产工作制度偏快;而在 600 ~ 800 d 期间的综合流体井底采出指数、游离气井底采出指数、吸附气井底采出指数、溶解气井底采出指数和水的井底采出指数都比较稳定,说明这段时间气井生产工作制度较为合理。

### 3.5 深部煤层气井 EUR 预测

将该深部煤层气井每天的平均煤储层压力计算结果和累计产水量数据代入式(54),计算出每天的平均煤储层压力所对应的  $Z^*$ 。然后以  $p/Z^*$  为纵轴,  $G_p$  为横轴,在直角坐标系中作散点图,如图 12 所示,数据点的确呈现一条直线,通过线性拟合,可以确定纵轴截距  $N_2$  为 59.572 636 和斜率  $-M_2$  为  $-0.442 573$ 。那么,该深部煤层气井控制的煤层气原始储量  $G_i$  将等于  $N_2/M_2 = 134.605 2 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,其实也是线性趋势线与横轴的交点所对应的数值。

根据深部煤层气井生产后期的累计产水量数据和计算的平均煤储层压力,结合该深部煤层气井控制体积内水的储量为  $0.170 86 \times 10^6 \text{ m}^3$  (根据该深部煤层气控制体积  $V$ 、压裂返排后气井刚开始投产时

图 12 深部煤层气井 EUR 预测  $p/Z^*-G_p$  指示曲线Fig.12  $p/Z^*-G_p$  indicator curve of EUR prediction for deep coalbed methane wells

的煤储层孔隙率  $\phi_p$  和压裂返排后气井刚开始投产时的煤储层含水饱和度  $S_{wip}$  计算得出),在确保平均煤储层压力为 0 时的累计产水量不能大于水的储量,拟合确定深部煤层气井累计产水量与平均煤储层压力的关系,如图 13 所示。

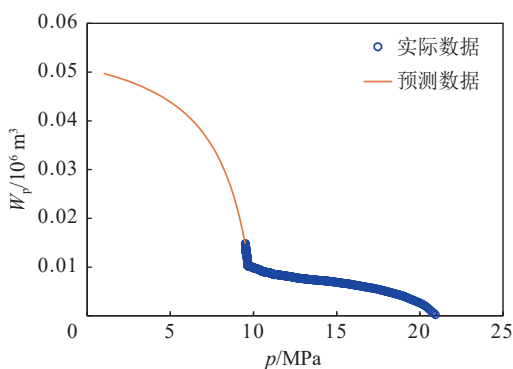


图 13 深部煤层气井累计产水量与平均煤储层压力关系

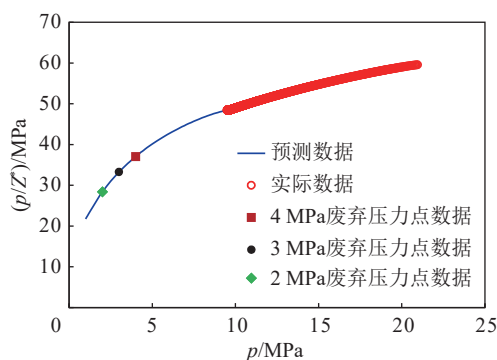
Fig.13 Relationship between cumulative water production of the deep coalbed methane well and average coal reservoir pressure

然后将  $p$  和  $W_p$  代入式(54),预测  $Z^*$  与平均煤储层压力  $p$  的关系,最终得出  $p/Z^*$  与平均煤储层压力  $p$  的关系,如图 14 所示。

在给定深部煤层气藏废弃压力  $p_{ab}$  分别为 4、3 和 2 MPa 的情况下,按照图 14 中预测的曲线,得出  $p_{ab}/Z_{ab}^*$  的数值分别为 37.052 89、33.256 67 和 28.359 27 MPa。将  $p_{ab}/Z_{ab}^*$  的数值代入式(53)中即可计算出该深部煤层气井的 EUR 分别为  $50.88 \times 10^6$ 、 $59.46 \times 10^6$  和  $70.53 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,如图 12 中的 3 个实心点,计算得出采收率分别为 37.8%、44.2% 和 52.4%。

废弃压力从 4 MPa 降为 3 MPa,采收率提高幅度为 6.4%,废弃压力从 3 MPa 降为 2 MPa,采收率提高幅度为 8.2%,由此可见降低废弃压力是提高深部煤层气藏采收率最为有效的手段。



图 14  $p/Z^*$  与平均煤储层压力  $p$  关系Fig.14 Relationship between  $p/Z^*$  and average coal reservoir pressure  $p$ 

## 4 结 论

1)建立了煤储层改造背景下的深部煤层气物质平衡方程,该方程在常规物质平衡方程考虑应力敏感引起的孔隙压缩、基质收缩、水的膨胀、产水这些因素的基础上,进一步考虑了吸附气富集的微孔与游离气和水占据的介孔压差、煤储层改造和溶解气的影响,反映了深部煤储层中的真实情况。

2)提出的深部煤层气储量评价方法,仅需实测2次以上的平均煤储层压力和对应的累计产气量和产水量数据,即可采用线性拟合的方法,评价出深部煤层气井吸附气-游离气-溶解气的储量;与牛顿迭代方法和弦截法这些隐式求解方法不同,提出的深部煤层气平均地层压力计算方法为显式表达式,计算简便且高效,避免了隐式求解方法复杂的计算机编程计算。

3)提出的深部煤层气井吸附气-游离气-溶解气产量占比评价方法,所需参数较少,无需在井口安装碳同位素监测装置,适用于所有深部煤层气井,便于大范围推广应用;根据提出的多个深部煤层气井产能评价指标,可以识别出气井工作制度的合理性;提出的深部煤层气井 EUR 预测方法,通过定义新的拟偏差系数  $Z^*$ ,可将生产数据整理成视压力  $p/Z^*$  与  $G_p$  的直线表达式,给定某一废弃压力,即可快速预测出深部煤层气井的 EUR。

4)实例井生产初期游离气日产气量占比和吸附气日产气量占比相当,分别在 50% 上下,溶解气日产气量占比较低,仅为 3%,在生产过程中,游离气日产气量占比先快速上升后缓慢降低最后逐渐稳定在 29%,吸附气日产气量占比则先快速降低后缓慢上升最后逐渐稳定在 70%,而溶解气日产气量占比一直降低,最后低至 1%。

5)当废弃压力分别为 4、3 和 2 MPa 时,该深部

煤层气井的 EUR 分别为  $50.88 \times 10^6$ 、 $59.46 \times 10^6$  和  $70.53 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,采收率分别为 37.8%、44.2% 和 52.4%,单位废弃压降采收率增幅逐渐增大,说明降低废弃压力是提高深部煤层气藏采收率最为有效的手段。

## 参考文献(References):

- [1] 徐凤银. 深部煤层气助力产业发展进入新阶段[J]. 石油知识, 2023(4): 4-6.  
XU Fengyin. Deep Coalbed Methane Development Propels Industry into a New Phase[J]. Petroleum Knowledge, 2023(4): 4-6.
- [2] 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, 262.  
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, 262.
- [3] 聂志宏,时小松,孙伟,等. 大宁—吉县区块深层煤层气生产特征与开发技术对策[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 193-200.  
NIE Zhihong, SHI Xiaosong, SUN Wei, et al. Production characteristics of deep coalbed methane gas reservoirs in Daning-Jixian Block and its development technology countermeasures[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 193-200.
- [4] 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.
- [5] 巢海燕,李泽,甄怀宾,等. 大宁—吉县区块深部煤层气水平井压裂干扰行为及其机理[J]. 煤炭科学技术, 2024: 1-16.  
CHAO Haiyan, LI Ze, ZHEN Huaibin, et al. Fracture interference behavior and mechanism of deep coalbed methane horizontal wells in Daning-Jixian block[J]. Coal Science and Technology, 2024: 1-16.
- [6] 米立军,朱光辉. 鄂尔多斯盆地东北缘临兴—神府致密气田成藏地质特征及勘探突破[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 53-67.  
MI Lijun, ZHU Guanghui. Geological characteristics and exploration breakthrough in Linxing-Shenfu tight gas field, northeastern Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 53-67.
- [7] 刘建忠,朱光辉,刘彦成,等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气勘探突破及未来面临的挑战与对策:以临兴—神府区块为例[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1827-1839.  
LIU Jianzhong, ZHU Guanghui, LIU Yancheng, et al. Breakthrough, future challenges and countermeasures of deep coalbed methane in the eastern margin of Ordos Basin: A case study of Linxing-Shenfu block[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1827-1839.
- [8] 范立勇,周国晓,杨兆彪,等. 鄂尔多斯盆地深部煤层气差异富集

- 的地质控制[J]. 煤炭科学技术, 2024: 1-13  
4-08-12]. FAN Liyong, ZHOU Guoxiao, YANG Zhaobiao, et al. Geological control of differential enrichment of deep coalbed methane in Ordos basin[J]. Coal Science and Technology, 2024: 1-13.
- [9] 姚红生, 肖翠, 陈贞龙, 等. 延川南深部煤层气高效开发调整对策研究[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(4): 545-555.  
YAO Hongsheng, XIAO Cui, CHEN Zhenlong, et al. Adjustment countermeasures for efficient development of deep coalbed methane in southern Yanchuan CBM Field[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4): 545-555.
- [10] 郭绪杰, 支东明, 毛新军, 等. 准噶尔盆地煤岩气的勘探发现及意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(6): 38-49.  
GUO Xujie, ZHI Dongming, MAO Xinjun, et al. Discovery and significance of coal measure gas in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(6): 38-49.
- [11] 郝兆栋, 唐书恒, 刘忠, 等. 宁武盆地南部深部煤层气临界深度与成藏特征[J]. 天然气工业, 2024, 44(1): 108-118.  
XI Zhaodong, TANG Shuheng, LIU Zhong, et al. Critical depth and accumulation characteristics of deep coalbed methane in the southern Ningwu Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(1): 108-118.
- [12] 何发岐, 董昭雄. 深部煤层气资源开发潜力: 以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 277-285.  
HE Faqi, DONG Zhaoxiong. Development potential of deep coalbed methane: A case study in the Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 277-285.
- [13] 郭旭升, 赵培荣, 申宝剑, 等. 中国深层煤层气地质特征与勘探实践[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(6): 1511-1523.  
GUO Xusheng, ZHAO Peirong, SHEN Baojian, et al. Geological features and exploration practices of deep coalbed methane in China[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1511-1523.
- [14] 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 technology in deep coalbed methane exploration in the Daniudi gas field in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1567-1576.
- [15] 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.
- [16] 范立红, 韩晟, 宋鑫, 等. 大城游离气与吸附气 AVO 地震响应特征差异研究与应用[J]. 中国煤层气, 2021, 18(4): 7-10.  
FAN Lihong, HAN Sheng, SONG Xin, et al. Study and application of AVO seismic response characteristics difference between free gas and adsorbed gas in Dacheng Rise[J]. China Coalbed Methane, 2021, 18(4): 7-10.
- [17] KING G R. Material-balance techniques for coal-seam and Devonian shale gas reservoirs with limited water influx[J]. SPE Reservoir Engineering, 1993, 8(1): 67-72.
- [18] JENSEN D, SMITH L K. A practical approach to coalbed methane reservoir prediction using a modified material balance technique[C]. In: Presented at the International Coalbed Methane Symposium, Tuscaloosa, Alabama, USA. 1997.
- [19] SEIDLE J P. A modified p/Z method for coal wells[C]//SPE Rocky Mountain Regional Meeting. SPE, 1999: SPE-55605-MS.
- [20] CLARKSON C, MCGOVERN J. Study of the potential impact of matrix free gas storage upon coalbed gas reserves and production using a new material balance equation[C]. In: Presented at the International Coalbed Methane Symposium, Tuscaloosa, USA. 2001
- [21] AHMED T, CENTILMEN A, ROUX B. A generalized material balance equation for coalbed methane reservoirs[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. SPE, 2006.
- [22] CHEN Y, HU J. Derivation of methods for estimating OGIP and recoverable reserves and recovery ratio of saturated coal-seam gas reservoirs[J]. Oil Gas Geology, 2008, 29(1): 151-156.
- [23] MOGHADAM S, JEJE O, MATTAR L. Advanced gas material balance, in simplified format[C]//Canadian International Petroleum Conference. Petroleum Society of Canada, 2009: SPE-55605-MS.
- [24] MOGHADAM S, JEJE O, MATTAR L. Advanced gas material balance in simplified format[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2011, 50(1): 90-98.
- [25] IBRAHIM A F, NASR-EL-DIN H A. A comprehensive model to history match and predict gas/water production from coal seams[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 146: 79-90.
- [26] SHI J T, CHANG Y C, WU S G, et al. Development of material balance equations for coalbed methane reservoirs considering dewatering process, gas solubility, pore compressibility and matrix shrinkage[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 195: 200-216.
- [27] SHI J T, JIA Y R, ZHANG L L, et al. The generalized method for estimating reserves of shale gas and coalbed methane reservoirs based on material balance equation[J]. Petroleum Science, 2022, 19(6): 2867-2878.
- [28] 江同文, 熊先钺, 金亦秋. 深部煤层气地质特征与开发对策[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1918-1930.  
JIANG Tongwen, XIONG Xianyue, JIN Yiqiu. Geological characteristics and development countermeasures of deep coalbed methane[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1918-1930.
- [29] 邓泽, 王红岩, 姜振学, 等. 深部煤储层孔裂隙结构对煤层气赋存的影响—以鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县区块为例[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(8): 106-123.  
DENG Ze, WANG Hongyan, JIANG Zhenxue, et al. Influence of deep coal pore and fracture structure on occurrence of coalbed methane: a case study of Daning-nixian Block in eastern margin of Ordos Basin[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(8): 106-123.
- [30] 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.
- [ 31 ] DRANCHUK P M, ABOU-KASSEM H. Calculation of Z factors for natural gases using equations of state[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1975, 14(3): PETSOC-75-03-03.
- [ 32 ] 李相方, 任美鹏, 胥珍珍, 等. 高精度全压力全温度范围天然气偏差系数解析计算模型[J]. *石油钻采工艺*, 2010, 32(6): 57–62.
- LI Xiangfang, REN Meipeng, XU Zhenzhen, et al. A high-precision and whole pressure temperature range analytical calculation model of natural gas Z-factor[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2010, 32(6): 57–62.
- [ 33 ] 何发岐, 董昭雄, 赵兰, 等. 深部煤层游离气形成机理及资源意义[J]. *断块油气田*, 2021, 28(5): 604–608, 613.
- HE Faqi, DONG Zhaoxiong, ZHAO Lan, et al. Formation mechanism and resource significance of free gas in deep coalbed[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2021, 28(5): 604–608, 613.
- [ 34 ] 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.
- [ 35 ] 蔡瑞豪, 张兵, 晁薇薇, 等. 深部煤储层游离气含量计算方法研究——以鄂尔多斯盆地 L 区为例[J]. *中国煤层气*, 2024, 21(4): 19–22.
- CAI Ruihao, ZHANG Bing, Chao Weiwei, et al. Study on calculation method of free gas content in deep coal reservoirs: a case study of L area, ordos basin[J]. *China Coalbed Methane*, 2024, 21(4): 19–22.
- [ 36 ] 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.
- [ 37 ] LIU Y, ZHANG J C, TANG X. Predicting the proportion of free and adsorbed gas by isotopic geochemical data: A case study from Lower Permian shale in the southern North China basin (SNCB)[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 156: 25–35.
- [ 38 ] LIU Z Y, CHEN D X, ZHANG J C, et al. Combining isotopic geochemical data and logging data to predict the range of the total gas content in shale: A case study from the Wufeng and Longmaxi shales in the middle Yangtze area, South China[J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(11): 10487–10498.
- [ 39 ] MA Y, ZHONG N N, YAO L P, et al. Shale gas desorption behavior and carbon isotopic variations of gases from canister desorption of two sets of gas shales in South China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 113: 104127.
- [ 40 ] 张金川, 刘树根, 魏晓亮, 等. 页岩含气量评价方法[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 28–40.
- ZHANG Jinchuan, LIU Shugen, WEI Xiaoliang, et al. Evaluation of gas content in shale[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 28–40.
- [ 41 ] LI W B, LU S F, LI J Q, et al. Geochemical modeling of carbon isotope fractionation during methane transport in tight sedimentary rocks[J]. *Chemical Geology*, 2021, 566: 120033.
- [ 42 ] 李文鏢, 卢双舫, 李俊乾, 等. 页岩气/煤层气运移过程中的同位素分馏研究进展[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(5): 929–942.
- LI Wenbiao, LU Shuangfang, LI Junqian, et al. Research progress on isotopic fractionation in the process of shale gas/coalbed methane migration[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(5): 929–942.
- [ 43 ] 胡渤, 刘小波, 周涌沂, 等. 深部煤层气井开采中游离气与吸附气产量占比的确定方法 [P]. 河南, CN202311456257.3, 2024-08-06.
- HU Bo, LIU Xiaobo, ZHOU Yongxi, et al. Method for determining the proportion of free gas and adsorbed gas production in deep coalbed methane well exploitation[P]. Henan, CN202311456257.3, 2024-08-06.