

引用本文: 吴见, 张松航, 贾腾飞, 等. 深部煤层钻孔保压取心流程分析及含气量测定方法[J]. 石油实验地质, 2025, 47(1): 163–172. DOI: 10.11781/sysydz2025010163.

WU Jian, ZHANG Songhang, JIA Tengfei, et al. Analysis of pressure-maintaining coring process in deep coal seams and gas content determination methods[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2025, 47(1): 163–172. DOI: 10.11781/sysydz2025010163.

深部煤层钻孔保压取心流程分析及含气量测定方法

吴见^{1,2}, 张松航³, 贾腾飞³, 晁巍巍², 彭文春¹, 李世龙³

1. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100016;

2. 山西省三气共采省技术创新中心, 太原 030000;

3. 中国地质大学(北京), 北京 100083

摘要: 含气量是煤层气储量计算和勘探开发的重要参数。针对深煤层, 由于提心时间长, 损失气量计算失准, 导致绳索取心含气量测试方法准确性降低。为了准确获取深煤层的真实含气量, 确定气体的赋存状态, 能够保留样品原位压力和原位含气量的保压取心技术被认为是最有效的方法。然而, 由于非常规储层保压取心的特殊性(含吸附气), 目前还没有统一的取心流程和标准的含气量测定方法。为此, 通过分析保压取心各阶段的环境特点和含气量损失特征, 针对深煤层存在吸附气和游离气的特点, 提出了基于保压取心的吸附气和游离气的测定方法。分析表明, 保压取心含气量计算具有“四阶段、两损失、两收集”的特点; 合理设计保压取心降压集气阶段的压力点, 能够有效区分吸附气和游离气。此外, 分析保压取心和常规绳索取心的差异和联系, 认为通过同井台保压取心含气量可校正绳索取心损失气量, 进而建立基于绳索取心的深煤层含气量计算方法。保压取心技术的成功应用对深煤层勘探意义重大, 建议在深煤层勘探区适当增加保压取心井测试, 以明确储层的真实含气性。

关键词: 保压取心; 绳索取心; 保压取心流程; 含气量校正方法; 深部煤层气; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

DOI: 10.11781/sysydz2025010163

Analysis of pressure-maintaining coring process in deep coal seams and gas content determination methods

WU Jian^{1,2}, ZHANG Songhang³, JIA Tengfei³, CHAO Weiwei², PENG Wenchun¹, LI Shilong³

1. China United Coalbed Methane Co., Ltd., Beijing 100016, China;

2. Technical Innovation Center for Three Gas Co-Production of Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi 030000, China;

3. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: Gas content is an important parameter for calculating coalbed methane (CBM) reserves and guiding their exploration and development. For deep coal seams, the prolonged coring duration and inaccuracies in lost gas volume calculations result in reduced accuracy in gas content measurement using conventional wireline coring methods. To accurately determine the actual gas content in deep coal seams and gas occurrence state, pressure-maintaining coring technology, which retains in-situ pressure and gas content in samples, is considered the most effective method. However, due to the unique characteristics of unconventional reservoirs, such as adsorption gas, there are currently no standardized coring processes or gas content determination methods. To address this issue, this paper analyzed the environmental conditions and gas loss characteristics during each stage of pressure-maintaining coring. Considering the presence of both adsorbed gas and free gas in deep coal seams, the study proposes a method for determining both components based on pressure-maintaining coring. The analysis shows that gas content calculations in pressure-maintaining coring have the characteristics of “four stages, two losses, and two collections”. The reasonable design of pressure points during pressure-reducing and gas-collecting stages of pressure-maintaining coring can effectively distinguish adsorption gas from free gas. In addition, by analyzing the differences and connections between the two methods, the gas content measured using pressure-maintaining

收稿日期 (Received): 2024-08-29; 修订日期 (Revised): 2024-12-10; 出版日期 (Published): 2025-01-28.

作者简介: 吴见 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事非常规油气资源评价工作。E-mail: ilcby@163.com.

通信作者: 张松航 (1982—), 男, 博士, 副教授, 从事煤与煤层气地质相关研究工作。E-mail: zhangsh@cugb.edu.cn.

基金项目: 中海油“十四五”重大科技项目 (KJGG2022-1002) 和国家自然科学基金项目 (41872178, U1910205) 联合资助。

© Editorial Office of Petroleum Geology & Experiment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

coring can be used to correct gas loss caused by using wireline coring at the same well platform. Based on this, a method for calculating gas content in deep coal seams based on wireline coring was established. The successful application of pressure-maintaining coring technology is significant for deep coal seam exploration. The study recommends appropriately increasing the number of pressure-maintaining coring test wells in deep coal seam exploration areas to precisely determine the actual gas content in reservoirs.

Key words: pressure-maintaining coring; wireline coring; pressure-maintaining coring process; gas content correction method; deep coalbed methane; Ordos Basin

1 研究现状

煤层气具有自生自储的特征,中、浅部煤层气主要以吸附态赋存于煤岩基质孔隙中,而深部煤层由于储层压力大、温度高,相比之下能够更容易达到储层条件下的最大吸附量,从而可能赋存一定比例的游离气。煤层气作为一种高效清洁能源,对改善我国能源结构,推进“双碳”目标意义重大,极具开发潜力和价值,产业前景广阔^[1]。目前,我国已经在沁水盆地、鄂尔多斯盆地实现了中、浅部煤层气规模效益开发^[2-3]。同时,随着鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县区块吉深6-7平01井等一批深部煤层气井获得日产万立方米至十万立方米的工业气流^[4],深部煤层气开发也冲破禁锢,逐步迎来了商业大开发的曙光。

煤层含气量是煤储层的关键参数,其准确测定对煤层气勘探开发具有重要意义^[5]。目前,常见的含气量测试方法包括直接法和间接法^[6-8]。间接法往往基于直接法的数据,构建含气量与储层温压、埋深、测井、煤岩煤质、等温吸附、物性等参数的关系模型计算含气量,因此直接法被认为是最准确的含气量测定方法。直接法经历过多个发展阶段,如真空罐法、集气法、解吸法等,各种方法都存在一定的适用条件。目前最新的煤层含气量测试国家标准《煤层气含气量测定方法:GB/T 19559—2021》,是基于绳索取心技术,通过解吸法获得解吸气和残余气,并通过解吸气与时间的关系反演损失气,进而求和损失气、解吸气和残余气算得总含气量。直接法具有快捷、高效等优势,但也存在损失气计算的准确性问题^[9-10]。特别是对于含游离气的层位,提心时间的增加直接导致损失气占储层总含气量的比例增大,绳索取心产气量计算方法更加失准。据估算,传统取心方法在无任何保护措施的情况下,逸散的介质流体能够达到50%以上^[11]。因此,为了减少煤样暴露的时间,一系列方法被提出,如钻孔引射取心等^[12-13],以降低煤样在取心过程中的暴露时间。谢和平院士

等^[14]提出了原位保压取心,能够有效解决深部煤层原位瓦斯含量精准测定的技术难题。与绳索取心技术相比,保压取心技术作为近年来在非常规油气储层中探索使用的新技术,在取心过程中能够保存原位储层压力和原位含气量^[15-17],有效降低由于损失气估算产生的误差,极大地增强深部储层含气量计算的准确性。此外,游离气的含量和比例深刻影响煤层气的产出过程和特征。由于保压取心保留了原位储层的压力和含气特征,因此勘探工作中也希望通过保压取心获取原位深层气的赋存特征。

目前,保压取心技术在煤层气勘探领域的应用较少,但孙四清等^[18]在淮北和淮南矿区的现场应用已经证明,保压取心含气量测试值相对于常规取心含气量测试值提高了10%以上,能够提高含气量测试的准确性。尽管部分区块已经开展保压取心含气量测试研究^[17,19-22],但是对保压取心各阶段气含量构成的认识仍然存在不足,且尚未形成统一的保压取心含气量测试标准,尚未实现深煤层保压取心吸附气和游离气含量的直接测量。本文从原理和技术手段上对保压取心各阶段的气含量构成进行了厘定,提出了一种新的测试流程,以期能更准确地厘定深煤层的含气量和气体赋存特征。

2 保压取心及含气量测试设备

2.1 保压取心装置

保压取心装置是深煤层保压取心的核心装备,从现有的文献^[14,16-17]报道看,保压取心装置一般主要由控制系统、保压系统、测量系统和球阀4个部分组成(图1)。在取心钻进时,球阀始终处于打开状态,保证岩心顺利通过球阀进入保压内筒。岩心钻取完成时,差动总成在液压作用下进行差动,内筒相对外筒做反向抬升运动。与此同时,密封装置和球阀关闭以确保取心内筒完成保压工作。测量总成在设定的时间间隔内不断记录取心内筒的温度和压力变化;压力补偿总成内部

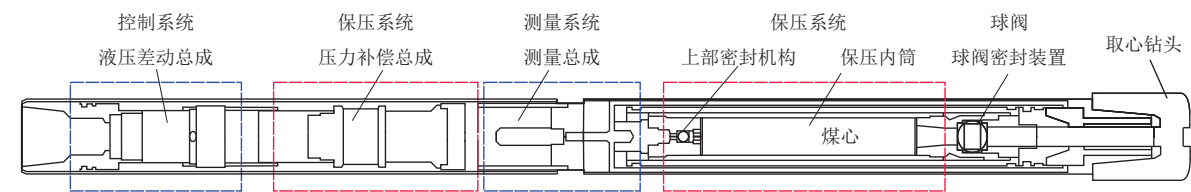


图 1 保压取心设备示意图
据参考文献[23-24],有修改。

Fig.1 Schematic diagram of pressure coring equipment

设有高压氦气,当保压内筒压力下降时,压力补偿总成对保压内筒进行压力回注,从而对保压内筒实现精准的地层原位压力加载^[23-24]。通过以上装置的配套使用,能够确保得到有连续温压记录变化的高质量保压取心样品。根据不同的地层条件和取心要求,保压取心装置的取心长度和岩心直径等有多种类型。目前,非常规领域常见的保压取心设备的钻头尺寸为 215.9 mm,岩心直径为 75 mm 和 80 mm,取心长度为 4.5 m 和 6 m,保压能力从 30 MPa 到 60 MPa 不等^[16-17,23]。

2.2 集气装置

保压内筒由地下上提至地面后,在岩心出筒前需要对取心筒完成泄压、集气计量操作,此时,保压内筒中包含了岩心、岩心内储层流体和钻井泥浆。在保压内筒泄压集气时,由于取心筒内气体和钻井泥浆会一并喷出,为了准确计量喷出的气体和泥浆体积,需要专门的气、液分离集气装置(图 2)。集气装置主要由气液分离筒、流量计、管线和阀门等组成^[17,25]。具体操作流程如下:

- (1)连接保压内筒、气液分离设备和集气装置。
- (2)打开注水阀和排水阀,注入纯水,直到气液分离筒内的空气全部排出。

(3)关闭注水阀,打开放气阀和排水阀。慢慢旋转保压内筒放气阀(密封阀),控制保压缸内的高压流体平稳流入钢桶。在桶内,高密度泥浆倾向于在气液分离筒底部沉积,而低密度气体则向上聚集,通过气体流量计计量体积,并通过集气口采集检测。筒内的水在钻井泥浆的驱替作用下,通过排水阀流出,并通过量筒计量体积。当排出的水量接近内筒的体积时,需要关闭保压内筒放气阀门。

(4)关闭排水阀,打开注水阀,让水重新充满气液分离筒,排出筒内所有气体,即可获得第一次降压排气量(V_{g1})和钻井泥浆排出量(V_{m1})。除流量计外,也可以使用水置换法计量气体体积。

(5)首次集气后,清理分离筒内泥浆,然后重复步骤(2)、(3)和(4),直至保压内筒降压结束,以获得不同降压气、液排量(V_{gi})和钻井泥浆排出量(V_{mi})。

2.3 解吸装置

取心筒内按泄压设计完成压力释放后,在规定时间内完成岩心出筒、清理工作,并挑选岩心开展常规的煤层气解吸测试,测定岩心内的解吸气和残余气。保压取心解吸装置与常规取心一致,装置主要由解吸仪、球磨仪和集气计量装置 3 个部分组成。该阶段主要采用控温的方法,连续 7 天平均每

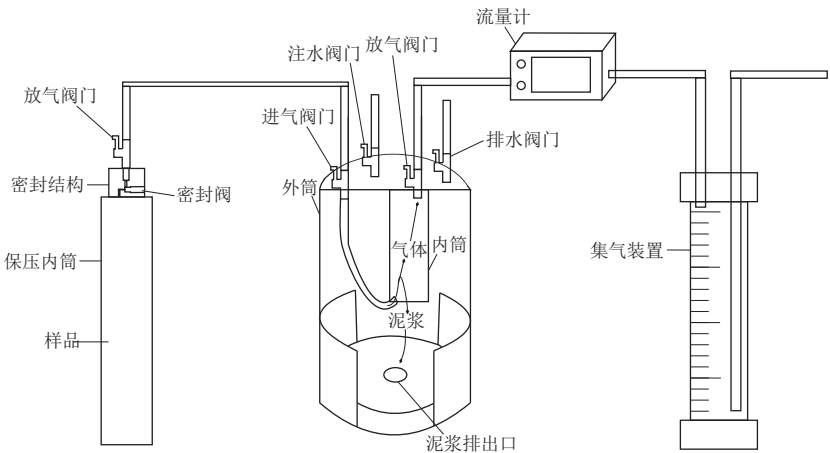


图 2 排水集气装置示意图
据参考文献[17,25],有修改。

Fig.2 Schematic diagram of drainage and gas collection device

天的解吸气量不大于 10 mL,解吸测定结束。具体操作依据国家标准《煤层气含气量测定方法:GB/T 19559—2021》执行。

3 深煤层保压取心阶段划分

3.1 钻心阶段

由于多数保压取心仅在目的层段取心,取心时需要更换保压取心钻头和钻具,因此地面施工须对施工钻井钻具进行调配,施工钻孔直径必须大于保压取心钻头直径。此外,钻井液密度是影响保压取心的重要因素,当钻井液为非清水钻井液时,钻井液密度应该控制在 1.05 g/cm³ 以内^[20]。在钻取岩心过程中,保压内筒中的钻井液通过单向排压阀排出。

钻进取心过程中,关键是要保持平衡钻进,也就是井底钻井泥浆压力基本与地层压力持平。此外,钻进过程中,钻头与地层摩擦升温,可能造成少量气体膨胀散失进入取心筒。岩心入筒后,受取心长度影响,岩心并不能完全驱替钻井泥浆。取心完成后,保压内筒密封阀关闭。总体上,该阶段基本不存在气体散失(表 1)。

3.2 提心阶段

煤心入筒封闭后,从原位储层深度抬升到地表的过程称为提心阶段。提心阶段岩心被钻井液包裹且封存在保压内筒中。提心之初,取心筒与储层温压条件一致,为高温高压环境;提心结束,取心筒处于地表条件,环境温度降低,为高压常温环境。理论上温度降低,取心筒内游离气压力会降低,会造成岩心吸附气的解吸;同时温度降低又会造成岩心吸附能力的增加,造成气体的吸附。理想情况下,保压内筒密封良好,内部吸附气和游离气动态平衡,无压力和气体损失。然而,受制于技术手段,目前尚未成功研制能够完全保压的保压取心装置^[26-27]。实际生产过程中,随着取心筒的提升,存在一定程度的压力散失。保压内筒提至地面的压力与原地压力的比值即为保压率。此阶段需要根据测量总成提供的温压变化曲线,确定吸附气和游

离气的转化特性及保压损失气量。

3.3 取心筒降压排气阶段

保压内筒与集气装置连接,筒内压力从储层压力不断下降为大气压力的过程称为降压排气阶段。为了获取储层温度条件下的含气特征,该阶段存在 3 种降压排气方法:方法①先加热保压内筒至储层温度后降压;方法②先降压后加热保压内筒至储层温度再降压;方法③先将保压筒加热到储层温度,同时注入甲烷气体使保压筒恢复至原地储层压力后再降压。前两者得出的降压排气量理论上一致,区别在于方法①由于先升温,导致吸附气不断解吸,在降压排气的过程中需要更长的时间才能稳定压降到大气压。但是,方法①一方面能够更为精准地计算保压率,定量原位高压下单位压降得到的排气量;另一方面能够还原储层温度和压力条件下的原位含气结构(温度的升高导致吸附气量的降低),从而准确划分吸附气和游离气。方法②由于先降压,导致后续加热过程存在由于压降造成的吸附气解吸,因此对于划分吸附气和游离气的准确性较差。但是,此方法所需的压降时间更短,更为便捷使用。方法③程序相对复杂,但能够克服保压取心过程中保压率低的问题,使原地含气量计算更加准确。由于保压内筒岩心吸附气的存在,每次排气(游离气)后,保压内筒吸附气解吸扩散,逐步达成新的吸附—游离平衡状态,但由于解吸扩散的滞后性,保压内筒很难完全降为大气压。现场通常以阀门打开条件下、规定时间内搜集的气体量小于某一定值时,认为保压内筒降压排气阶段结束。此阶段气体损失可能性低。

3.4 岩心出筒阶段

在完成降压排气阶段后,从打开保压内筒出心,到样品装入解吸罐的过程称为岩心出筒阶段。此阶段所处的环境条件为常温常压。由于降压阶段泥浆可能堵塞泄压阀,造成保压内筒压力高于大气压,因此出筒阶段开始时要保证泄压阀的开启。此阶段岩心直接暴露在空气中,势必存在吸附气的

表 1 保压取心阶段划分
Table 1 Division of pressure coring stages

阶段	工具	环境条件	气体损失情况	重点测试数据
钻心阶段	保压取心工具	高温高压	基本无气体损失	岩心筒温压变化
提心阶段	保压取心工具	降温(高温—常温)高压	可能造成气体损失(保压率)	岩心筒温压变化
取心筒降压排气阶段	气液分离装置等	常温高压	可能造成气体损失(钻井泥浆喷射)	岩心筒温压变化、集气量、环境温压特点
岩心出筒阶段	记录设备等	常温常压	主要损失气阶段	岩心出筒时间以及岩心整理时间
解吸气和残余气测量阶段	解吸罐等	室温常压	基本无气体损失	装罐时间、岩心质量和长度等

解吸、扩散、渗流和逸散,因此是主要的损失气阶段。岩心出筒后,需要进行必要的清理、计量和称量等工作。国标规定岩心出筒阶段的时间应控制在 10 min 以内,但由于各个生产单位现场条件不一,调研得知岩心出筒时间普遍介于 20~60 min 之间。该阶段气体损失满足菲克定律和基质与裂隙之间的气体交换方程,存在多种损失气量校正方法。由于各种方法均存在一定假设条件,损失气计算时需要注意假设条件的满足情况。条件允许的情况下,可以借鉴页岩保压取心方法,在该阶段探索采用液氮冷冻保压筒,后切割保压筒,取出岩心后分段解吸。这样能够极大避免气体损失,从而更准确地测量含气量。然而,由于煤心力学性质普遍较页岩弱,水的结冰膨胀作用和冻裂作用可能破坏岩心,该方法实用性有待进一步验证。

3.5 解吸气和残余气测量阶段

岩心装罐后,进入解吸气和残余气测量阶段。该阶段国标明确规定了实施方法,此处简单概述。在解吸气和残余气的测量阶段中,岩心分别以原煤和粉煤的形式在解吸罐中解吸,所处的环境条件为室温常压,此阶段气体损失可能性低。

4 保压取心含气量构成及测量方法

4.1 保压取心含气量构成

从提心阶段开始,到解吸气和残余气测量阶段结束,保压取心含气量构成总体划分为 4 个阶段,包括两损失、两收集(图 3)。

第一阶段是提心—损失气阶段,由于保压取心内筒未能完全保压造成的损失气量(Q_1),此阶段受到仪器固有的限制,存在一定的压力泄漏,目前普遍的保压率(P_r)(标况条件下,保压筒内压力(P_m)/储层压力(P))能够达到 85% 以上^[19,26,28]。需要注意的是,该阶段测试保压筒内压力前应将保压内筒加热至储层温度,以避免温度对压力的影响。

第二阶段是取心筒降压排气—收集气阶段,保

压内筒通过集气装置进行多次阶段降压所收集的 气体(Q_2),由仪器直接记录。该阶段获取 Q_2 的同时,为了探究煤样的含气(吸附气和游离气)构成,通常涉及不同的压降方案。要注意的是,该阶段需选用 2.3 章节论述的方式①,即先升温后进行阶段降压。

第三阶段是岩心出筒—损失气阶段,为最主要的损失气阶段,岩心由于暴露于大气中而产生的损失气量(Q_3)。目前,在绳索取心中,多数学者通过解吸气量和解吸时间的关系反演损失气^[29-31],常用的方法有 USBM 方法、多项式拟合法、ACF 法和 MCF 法等。保压取心相对于常规取心而言, Q_3 的持续时间更短,温压环境条件不变,符合上述方法的公式推导的假设条件。因此,可以应用 USBM 方法直接计算 Q_3 。

第四阶段是解吸气和残余气测量—收集气阶段,由解吸实验获得解吸气(Q_4)和残余气(Q_5)。

针对损失气 Q_1 ,LI 等^[25]根据保压率定量计算得出[公式(1)]:

$$Q_1=(Q_2+Q_4)\left(\frac{1}{P_r}-1\right)$$

(1)

式中: Q_1 为损失气量(未能完全保压),单位 cm^3 ; Q_2 为降压收集气,单位 cm^3 ; Q_4 为解吸气,单位 cm^3 ; P_r 为保压率,单位%。

笔者认为以上计算方法未考虑阶段三的损失气 Q_3 。因此,将定量 Q_1 的损失气计算方法改进为公式(2):

$$Q_1=(Q_2+Q_3+Q_4)\left(\frac{1}{P_r}-1\right)$$

(2)

式中: Q_3 为损失气量(岩心出筒),单位 cm^3 。

此外,由于 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 是针对整个保压内筒计算的,而 Q_4 和 Q_5 是针对部分装入解吸罐的小段样品计算的,在计算样品的总含气量时应选用相应的方法,如宏观煤岩类型、煤体结构长度或质量加权计算,确保计算结果的准确性。本文以岩心的长度和保压筒内岩心的长度为权重指标,以 Q_3 为例,详细的计算方法如公式(3)所示。

$$V_f=\frac{Q_3d}{ml}$$

(3)

式中: V_f 为游离气含量,单位 cm^3/g ; d 为岩心的长度;单位 m ; m 为空气干燥基条件下的样品质量,单位 g ; l 为保压筒内岩心的长度,单位 m 。

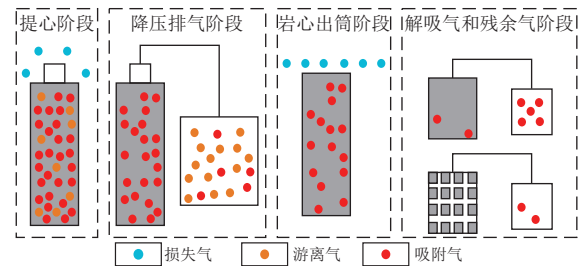


图 3 保压取心含气量构成示意图

Fig.3 Schematic diagram of gas composition using pressure-maintaining coring

4.2 保压取心吸附气、游离气测量方法

含气性参数是煤层气勘探开发的重要参数,含气性参数(包括含气量和含气构成)的准确获取也是保压取心的目的所在。由于损失气可校正,通常认为保压取心可获得准确的储层含气量。但储层含气量的构成,特别是深部煤层条件下,储层游离气含量较大且不可忽略时,如何厘定储层中吸附气和游离气的含量仍为行业难点。一般来说,保压取心含气量的含气形态,可以基于取心筒降压排气阶段进行区分。由于取心筒降压集气阶段时间较短,且保压内筒的压力会降低为大气压,因此部分学者假设此阶段的吸附气和游离气未发生转化,认定该阶段收集的气体 Q_2 即为游离气^[17]。但是保压内筒吸附气和游离气始终处于动态平衡的变化,当降压排气开始时,岩心内部吸附气会解吸转变为游离气,因此不能简单地根据保压内筒压力的变化划分吸附气和游离气。

从等温吸附曲线形态可知,压力越高,吸附曲线越平缓,不同压力点的吸附量差别较小(图 4)。特别是在深煤层条件下,煤储层埋深普遍大于 1 800 m,储层压力普遍大于 14 MPa^[1,32-33]。此时,储层压力(P)一般大于 5 倍的兰氏压力(P_L),储层的吸附气量(V)大于 5/6 的兰氏体积(V_L),降低单位压力,即使不考虑时间因素且在完全解吸的情况下,吸附气的解吸量也有限。再考虑到降压时间段吸附气解吸扩散具有滞后效应,因此当控制取心筒最低压力大于 12 MPa(煤样 P_L 一般在 2 MPa 左右)时,短时间的降压排气认为基本不存在吸附气和游离气的转变,排出气量基本为游离气。此时,保压内筒游离气符合理想气体状态方程,气体体积和压力成正比,通过阶段降压,可测定保压内筒游

离气的总量。然而,与现场条件不同,实验室条件下可以利用吸附解吸曲线定量降压过程中的实际解吸气量,从而进一步细化吸附气和游离气含量。

综上所述,针对吸附气和游离气的特性,对取心筒降压集气阶段提出了更为细化的测试方案,具体的操作流程如下:

(1) 将取心筒升温至储层温度(可后置)。

(2) 打开注水阀门和排水阀门,注入纯水,直到钢桶内的空气全部排出。

(3) 关闭注水阀门,打开放气阀门,慢慢旋转密封阀,记录内筒初始压力 P_0 (保压筒原始压力 P_0 不低于 12 MPa),控制保压筒内的高压流体平稳流入钢桶。

(4) 高压下实施降压。为了计算游离气含量,计划在储层压力至 12 MPa 间,设计尽量均匀分布的 3 个压降点。第一次降压为相对较高的压力点。降压后,关闭密封阀,静置 10 min(压降后必然存在解吸,因此需要等待压力回弹),记录压力 P_i ,或可以根据以压力回弹值小于 1% 为界限,记录压力 P_i 。

(5) 打开出气阀门,然后打开注水阀门,当内桶中积聚的气体全部进入流量计后,即可获得第一次排气量($V_{i,ST}$),也可以使用水置换法在流量计的出口处收集提取的气体,同时根据注水量和排出量的差异计算排采泥浆体积 V_{si} 。

(6) 在完成气体收集后,重复 2~3 次步骤(2)至(5)以获得提取的气体体积 $V_{i,ST}$ 和泥浆体积 V_{si} 。

(7) 根据公式(4)和(5)计算取心筒游离气空间体积并验证数据准确性。

$$V_{f,i} \times \rho_{P_i,T} = (V_{f,i} + V_{si}) \times \rho_{P_{i+1},T} + n_i \quad (4)$$

$$n_i = V_{i,ST} \times \rho_{ST} \quad (5)$$

式中: $V_{f,i}$ 为保压筒内游离空间,单位 cm^3 ; $\rho_{P_i,T}$ 为在温度 T 和压力 P_i 下保压筒内甲烷气体的密度,单位 g/cm^3 ,其数值可根据美国国家标准与技术研究所(NIST)的 Refprop 软件获取; n_i 为每次降压放出气体的量,单位 g ; $V_{i,ST}$ 为标况下放出气体的体积,单位 cm^3 ; ρ_{ST} 为标况下甲烷气体的密度,单位 g/cm^3 ; $i=0,1,2,3,\dots$,当 $i=0$ 时为取心筒至地面的初始状态; V_{si} 为每次降压排采泥浆的体积,单位 cm^3 。注意:当不同 $V_{f,0}$ 的误差在 10% 以内(或可以更为严格地控制在 5% 以内),视为数据准确可行。计算得出保压筒内游离气空间体积后,根据储层温度和压力条件下的气体密度,计算取心筒内的总游离气量。

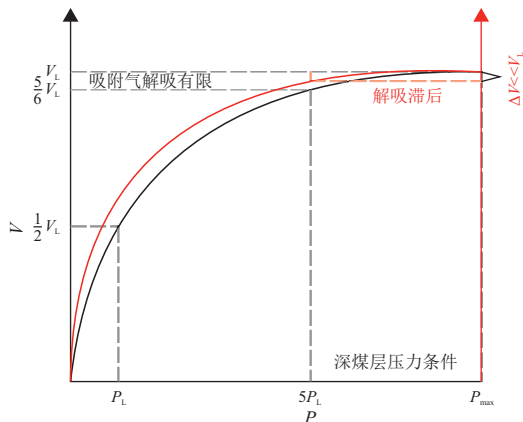


图 4 高压下降压解吸、解吸气含量示意图

Fig.4 Schematic diagram of gas desorption and desorbed gas content during high-pressure depressurization

(8)步骤(7)完成之后,将取心筒升温至储层温度(如果步骤(1)后置),实施直接降压,直至取心筒内压力为 0.1 MPa,然后通过流量计计算降压集气量($V_{降}$),使用水置换法在流量计的出口处收集提取的气体。

通过以上方法可直接得到总游离气量。后续的岩心出筒和气体测量工作与常规的绳索取心法一致,不再赘述。通过以上所有测试阶段,可以得出深煤层的原位总含气量;总含气量减去游离气量,即为吸附气量。

4.3 保压取心和绳索取心的对比与校正

前人针对常规绳索取心损失气的计算方法已经做过大量研究,不同计算方法得到的损失气含量差异较大,但在方法选用上尚未形成共识。周尚文等^[17]针对页岩气现场损失气的计算方法对比研究发现,对于短损失时间的样品 ACF 方法更为准确,大面积对于长损失时间的样品 USBM 方法的适用性更强。邓泽等^[10]认为 USBM 方法受温度的影响更大,多项式拟合更加稳定。刘刚等^[9]则是通过修正解吸时间对损失气含量进行校正。

对比保压取心和绳索取心阶段划分和含气量构成(图 5)可知,保压取心和绳索取心的差异主要体现在岩心出筒前的差异,而经过降压排气和岩心出筒 2 个阶段后,由于煤岩孔隙结构和扩散渗流通道的相似性以及煤岩低孔低渗解吸扩散的滞后性,2 种方法煤心中剩余的解吸气和残余气基本认为是等量可比的。同时,一般认为保压取心能够获取储层含气量的真值,因此可用保压取心方法的总含气量减去绳索取心方法的解吸和残余气量得到理论损失气量,进而来校正绳索取心方法损失气量的多少。由于在实际操作中,同一样品不能既做保压取心又做绳索取心,因此本方法隐含了使用 2 种方

法的储层含气量相同、储层孔渗条件相同的假设。因此,此方法在使用中,基准的校正要保证保压取心和绳索取心测试属于同井台操作。

5 方法应用展望

目前,详细的保压取心数据基本未见报道,本文通过收集到的数据讨论保压取心与常规取心的含气量差异。通过表 2 可知,保压取心含气量均比绳索取心含气量至少提高 10% 以上,对深部煤层气而言,保压取心含气量比绳索取心含气量能够提升 20% 以上,其中主要的原因是深部煤层可能存在游离气。聂志宏等^[22]针对鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县区块基于保压取心手段得到含气饱和度大于 100% 的煤层,验证了深部煤层存在游离气,且游离气占比高达 29% 以上。因此,保压取心的优势明显,能够进一步深入刻画深部煤储层的气体赋存形态。

此外,李勇等^[34]基于鄂尔多斯盆地太原组 8+9 号煤的保压取心数据显示深部煤储层游离气发育(1.24~2.56 m³/t),且游离气平均占比高达18.70% (图 6a)。聂志宏等^[22]基于鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县区块 P20-Y2、P20-Y3、P20-Y4 和 P20-Y5 井的 8 号煤的保压取心数据和基于相似地质条件下的 P20-Y1 井的 8 号煤的绳索取心数据,显示保压取心井的总含气量(平均 25.40 m³/t)相比于绳索取心井的总含气量(平均 19.76 m³/t)平均提高 3~10 m³/t。周尚文等^[17]基于四川盆地南部昭通页岩气示范区 Y151 井的保压取心数据,显示中浅部页岩储层游离气发育(1.26~3.29 m³/t),且游离气平均占比高达 64.76% (图 6b);Y151 井相比于相似地质条件下绳索取心的 Y138 井,总含气量平均提高 1.79 m³/t。

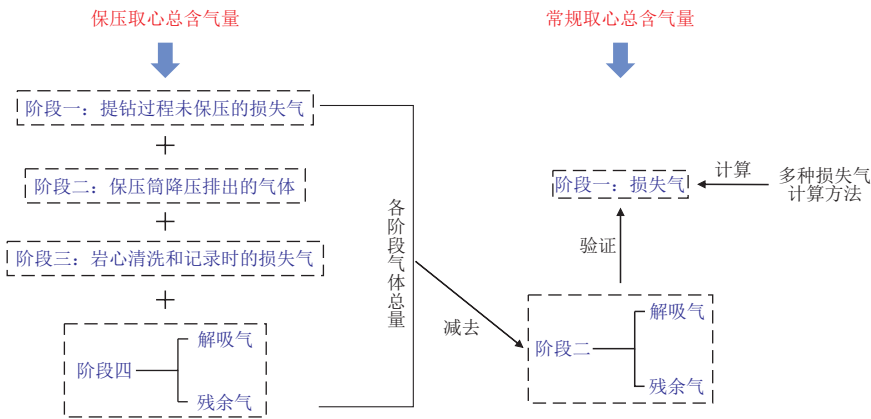


图 5 保压取心—常规取心损失气计算示意图

Fig.5 Schematic diagram of gas loss calculation using pressure-maintaining coring and conventional wireline coring

表 2 保压取心和常规绳索取心测试方法结果对比

Table 2 Comparison of test results between pressure-maintaining coring and conventional wireline coring methods

矿区	井位	深度/m	取心类型	气类型	含气量/(m ³ /t)
昭通地区 ^[17]	Y151	1 699.50~1 726.68	常规取心	页岩气	0.72~2.13
		1 727.07~1 764.96	保压取心		1.72~5.36
芦岭矿区 ^[19]	LLMBQX	673.6~675.9	常规取心	煤层气	8.70
		676.8~678.1	保压取心		10.50~10.72
潘三矿区 ^[19]	PSK	739.9~740.7	常规取心	煤层气	5.92~6.04
		736.4~738.9	保压取心		7.19~7.87
晋城矿区 ^[20]	SHX2-01	331.30~332.20	常规取心	煤层气	7.81~7.89
		334.30~334.60	保压取心		8.93
	SHX2-02	431.80~433.58	常规取心	煤层气	5.60~6.65
		435.20~436.20	保压取心		7.25
	SHX3-02	314.79~316.65	常规取心	煤层气	8.76~8.79
		317.20~318.00	保压取心		9.89
晋城矿区 ^[21]			常规取心	煤层气	18.07
			保压取心		22.65
淮北矿区 ^[21]			常规取心	煤层气	8.68
			保压取心		11.76
大吉矿区 ^[22]	P19-Y1, P20-Y2, P22-Y1-Y2	>2 000	常规取心	煤层气	19.76~24.68
	P20-Y2-Y5	>2 000	保压取心	煤层气	22.87~29.89

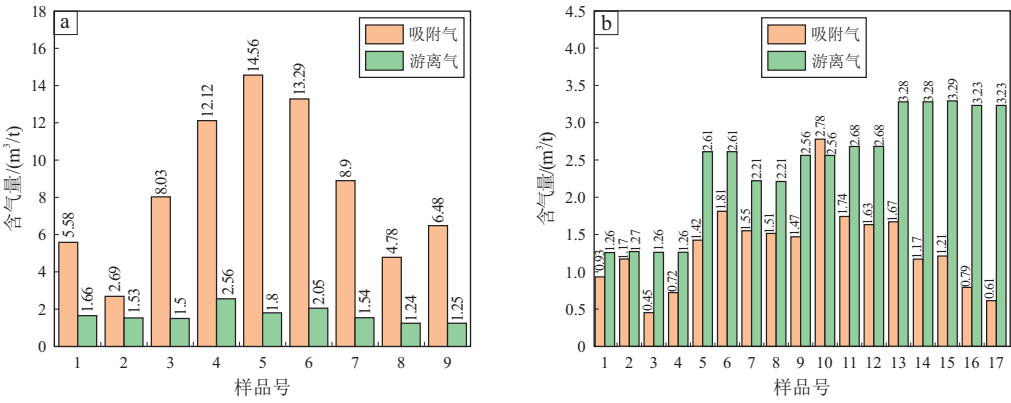


图 6 吸附气和游离气测试结果

图 a 据参考文献[17],图 b 据参考文献[34],有修改。

Fig.6 Test results of adsorbed and free gas content

以上结果均表明,相对于绳索取心,保压取心能够更加准确地刻画储层原位条件下的含气量。同时,通过一定的手段和方法,能够明确储层条件下的吸附气和游离气的构成。然而,目前在各个区块公开报道的保压取心工作比较有限,且没有统一的保压取心测试标准,导致各测试结果难以对比。因此,形成一套行之有效的保压取心测试流程及方法是目前煤层气行业的迫切需求,能够为深煤层含气性评价^[35]、富集主控因素和盆地选区^[36]提供科学依据,为储层含气量测定和吸附气与游离气含量的定量问题提供行之有效的解决方案。

6 结论

- (1)保压取心划分为钻心阶段、提心阶段、取心筒降压排气阶段、岩心出筒阶段,指出提心阶段和岩心出筒阶段是 2 个主要的含气损失阶段。
- (2)明确了保压取心的含气量构成和计算方法,提出了一种保压取心降压排气阶段确定储层游离气和吸附气含量的方法流程。
- (3)提出了保压取心含气量校正绳索取心含气量的方法基础,指出绳索取心方法低估了煤储层,特别是深部煤储层的含气量。建议对于煤层气

新区或深部煤层气勘探,优先使用保压取心,并形成绳索取心含气量校正方法,其对于评价储层真实的含气性、评估区块的资源量具有重要意义。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

作者贡献/Authors' Contributions

吴见、张松航、贾腾飞参与论文的构思;吴见、晁巍巍、李世龙参与论文的写作和修改;彭文春参与论文的审查。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

The study was designed by WU Jian, ZHANG Songhang, and JIA Tengfei. The manuscript was drafted and revised by WU Jian, CHAO Weiwei, and LI Shilong. The manuscript was supervised by PENG Wenchun. All authors have read the final version of the paper and consented to its submission.

参考文献:

[1] 徐凤银,侯伟,熊先钺,等.中国煤层气产业现状与发展战略[J].石油勘探与开发,2023,50(4):669-682.
XU Fengyin, HOU Wei, XIONG Xianyue, et al. The status and development strategy of coalbed methane industry in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 669-682.

[2] 康永尚,邓泽,皇甫玉慧,等.中煤阶煤层气高饱和-超饱和带的成藏模式和勘探方向[J].石油学报,2020,41(12):1555-1566.
KANG Yongshang, DENG Ze, HUANGFU Yuhui, et al. Accumulation model and exploration direction of high- to over-saturation zone of the medium-rank coalbed methane[J]. Acta Petrolei sinica, 2020, 41(12): 1555-1566.

[3] 周优,张松航,唐书恒,等.柿庄南区块 3 号煤层含气量三维建模[J].煤田地质与勘探,2020,48(1):96-104.
ZHOU You, ZHANG Songhang, TANG Shuheng, et al. Gas content modeling of No.3 coal seam in district 3 of southern Shizhuang block[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(1): 96-104.

[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] 傅雪海,张小东,韦重韬.煤层含气量的测试、模拟与预测研究进展[J].中国矿业大学学报,2021,50(1):13-31.
FU Xuehai, ZHANG Xiaodong, WEI Chongtao. Review of research on testing, simulation and prediction of coalbed methane content[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(1): 13-31.

[6] 吴双.深部煤层气储层储渗机理及开发特征研究[D].北京:中国地质大学(北京),2018.
WU Shuang. Storage-seepage mechanism and development features of deep coalbed methane reservoir[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.

[7] 范章群,张群,卢相臣,等.煤层气损失气含量及其影响因素分析[J].煤炭科学技术,2010,38(3):104-108.
FAN Zhangqun, ZHANG Qun, LU Xiangchen, et al. Analysis on gas lost content of coal bed methane and influenced factors[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(3): 104-108.

[8] 张群,范章群.煤层气损失气含量模拟试验及结果分析[J].煤炭学报,2009,34(12):1649-1654.
ZHANG Qun, FAN Zhangqun. Simulation experiment and result analysis on lost gas content of coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(12): 1649-1654.

[9] 刘刚,赵谦平,高潮,等.提高页岩含气量测试中损失气量计算精度的解吸临界时间点法[J].天然气工业,2019,39(2):71-75.
LIU Gang, ZHAO Qianping, GAO Chao, et al. A critical desorption time method to improve the calculation accuracy of gas loss in shale gas content testing[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(2): 71-75.

[10] 邓泽,刘洪林,康永尚.煤层气含气量测试中损失气量的估算方法[J].天然气工业,2008,28(3):85-86.
DENG Ze, LIU Honglin, KANG Yongshang. Estimation methods of lost gas in coalbed gas content testing[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(3): 85-86.

[11] BJORUM M. A new coring technology to quantify hydrocarbon content and saturation[C]//Proceedings of the SPE Unconventional Resources Conference. Calgary: SPE, 2013:1-4.

[12] 陈雄,胡杰.不同取样方式对煤层瓦斯含量测定的研究分析[J].工业安全与环保,2017,43(2):15-17.
CHEN Xiong, HU Jie. The research on determination of coal seam gas content based on different sampling modes[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2017, 43(2): 15-17.

[13] 杨昌光,蔡发现,贾翠芝.用风力排渣采样方法测定煤层瓦斯含量[J].煤矿安全,2000,31(2):15-17.
YANG Changguang, GOU Faxian, JIA Cuizhi. Determination of coal seam gas content by sampling method of wind slagging[J]. Safety in Coal Mines, 2000, 31(2): 15-17.

[14] 谢和平,崔鹏飞,尚德磊,等.深部煤层原位保压取心技术原理与瓦斯参数测定研究进展[J].煤田地质与勘探,2023,51(8):1-12.
XIE Heping, CUI Pengfei, SHANG Delei, et al. Research advances on the in-situ pressure-preserved coring and gas parameter determination for deep coal seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(8): 1-12.

[15] 俱养社,马峰良,华立.钻孔瓦斯密闭保压取心器研制及应用[J].中国煤炭地质,2022,34(4):79-83.
JU Yangshe, MA Fengliang, HUA Li. Development and application of borehole gas airtight pressurized corer[J]. Coal Geology of China, 2022, 34(4): 79-83.

[16] 王西贵,邹德永,杨立文,等.深层超深层煤层气保压取心工具设计[J].石油机械,2020,48(1):40-45.
WANG Xigui, ZOU Deyong, YANG Liwen, et al. Design of a pressure-preservation coring tool for deep and ultra-deep coalbed methane samples[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(1): 40-45.

[17] 周尚文,张介辉,邹辰,等.基于保压取心的页岩含气量测试

- 新方法[J].煤炭学报,2022,47(4):1637-1646.
- ZHOU Shangwen, ZHANG Jiehui, ZOU Chen, et al. A new method for testing shale gas content based on pressure-holding coring technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1637-1646.
- [18] 孙四清, 张群, 郑凯歌, 等. 地面井煤层气含量精准测试密闭取心技术及设备[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2523-2530.
- SUN Siqing, ZHANG Qun, ZHENG Kaige, et al. Technology and equipment of sealed coring for accurate determination of coalbed gas content in ground well[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2523-2530.
- [19] 任红, 裴学良, 吴仲华, 等. 天然气水合物保温保压取心工具研制及现场试验[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(3): 44-48.
- REN Hong, PEI Xueliang, WU Zhonghua, et al. Development and field tests of pressure-temperature preservation coring tools for gas hydrate[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(3): 44-48.
- [20] 龙威成, 孙四清. 煤层气含量测定用绳索密闭取心装置及技术研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 133-139.
- LONG Weicheng, SUN Siqing. Research on wireline sealed coring equipment and technology for coalbed methane content determination[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(3): 133-139.
- [21] 景兴鹏. 煤层气含量密闭取心测定装置及测试技术[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(4): 603-609.
- JING Xingpeng. Testing device of methane content sealed coring and measuring technology[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(4): 603-609.
- [22] 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.
- [23] 朱庆忠, 苏雪峰, 杨立文, 等. GW-CP194-80M 型煤层气双保压取心工具研制及现场试验[J]. 特种油气藏, 2020, 27(5): 139-144.
- ZHU Qingzhong, SU Xuefeng, YANG Liwen, et al. Development and field test of GW-CP194-80M CBM dual pressure coring tool[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(5): 139-144.
- [24] 杨立文, 苏洋, 罗军, 等. GW-CP194-80A 型保压取心工具的研制[J]. 天然气工业, 2020, 40(4): 91-96.
- YANG Liwen, SU Yang, LUO Jun, et al. Development and application of GW-CP194-80A pressure-maintaining coring tool[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(4): 91-96.
- [25] LI Wenbiao, LI Xiao, ZHAO Shengxian, et al. Evaluation on carbon isotope fractionation and gas-in-place content based on pressure-holding coring technique[J]. Fuel, 2022, 315: 123243.
- [26] 李小洋, 张永勤, 王汉宝, 等. 煤层气调查评价钻探保压取心钻具设计与试制[J]. 地质与勘探, 2019, 55(4): 1045-1050.
- LI Xiaoyang, ZHANG Yongqin, WANG Hanbao, et al. Design and trial-manufacture of the pressure-holding core drilling tool for evaluation of coal-seam gas[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(4): 1045-1050.
- [27] 马力宁, 李江涛, 华锐湘, 等. 保压取心储层流体饱和度分析方法: 以柴达木盆地台南气田第四系生物成因气藏为例[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 76-80.
- MA Lining, LI Jiangtao, HUA Ruixiang, et al. An analysis method for reservoir fluid saturation by pressure coring: a case study from Quaternary biogenetic gas reservoirs in the Tainan Gas Field, Qaidam Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 76-80.
- [28] 杨立文, 孙文涛, 罗军, 等. GWY194-70BB 型保温保压取心工具的研制和应用[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(5): 58-61.
- YANG Liwen, SUN Wentao, LUO Jun, et al. Study and application of GWY194-70BB heat and pressure preservation coring tool[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(5): 58-61.
- [29] 闫涛滔, 郭怡琳, 孟艳军, 等. 基于煤层气井生产数据的储层含气量校正新方法[J]. 现代地质, 2022, 36(5): 1360-1370.
- YAN Taotao, GUO Yilin, MENG Yanjun, et al. Coal reservoir gas content correction based on coalbed methane well production data[J]. Geoscience, 2022, 36(5): 1360-1370.
- [30] 王思远. 煤岩与页岩原位含气性评价与地质应用研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
- WANG Siyuan. Study on the method of gas-in-place content evaluation in coal and shale reservoirs and its geological application[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [31] 姚光华, 王晓泉, 杜宏宇, 等. USBM 方法在页岩气含气量测试中的适应性[J]. 石油学报, 2016, 37(6): 802-806.
- YAO Guanghua, WANG Xiaoquan, DU Hongyu, et al. Applicability of USBM method in the test on shale gas content[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(6): 802-806.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [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] 徐旭辉, 周卓明, 宋振响, 等. 油气资源评价方法关键参数研究和资源分布特征: 以中国石化探区“十三五”资源评价为例[J]. 石油实验地质, 2023, 45(5): 832-843.
- XU Xuhui, ZHOU Zhuoming, SONG Zhenxiang, et al. Methods and key parameters for oil and gas resource assessment and distribution characteristics of oil and gas resource: a case study of resource assessment of SINOPEC during the 13th Five-Year Plan period[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(5): 832-843.
- [36] 程建, 周小进, 刘超英, 等. 中西部大盆地重点勘探领域战略选区研究[J]. 石油实验地质, 2023, 45(2): 229-237.
- CHENG Jian, ZHOU Xiaojin, LIU Chaoying, et al. Strategic area selection and key exploration fields in central and western large basins[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(2): 229-237.