

引文: 傅雪海, 张宝鑫, 康俊强. “煤岩气”概念的探讨与辨析[J]. 天然气工业, 2025, 45(3): 46-53.

FU Xuehai, ZHANG Baoxin, KANG Junqiang. Discussion and analysis on the concept of "coal-rock gas"[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(3): 46-53.

“煤岩气”概念的探讨与辨析

傅雪海^{1,2} 张宝鑫^{1,2} 康俊强^{1,2}

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 2. 中国矿业大学资源与地球科学学院

摘要: 深部煤层气中游离气占比高导致其产出特征与浅部煤层气呈现出差异, 部分学者提出“煤岩气”概念来表征深部煤层气, 但煤层气与“煤岩气”的赋存载体均为煤层, “煤岩气”是否具有独立于煤层气的特殊特征有待商榷。为此, 通过对比分析煤层气与“煤岩气”的气源特征、赋存相态、资源量/储量计算参数等地质和开发特征, 探讨了是否有必要提出“煤岩气”的概念。研究结果表明: ①“煤岩气”存在外源气混入是其与煤层气的区分标志之一, 但煤层气定义本身未强调气源, 煤层气由生成至保存普遍经历了运移过程, 准噶尔盆地南缘地区、鄂尔多斯盆地黄陵矿区浅部的侏罗系煤层气亦有外源气混入; ②深部温度对煤储层吸附负效应影响下, 游离气比例增大已是煤层气领域研究的共识, 吸附气临界深度等概念已得到业界认可; ③煤层气研究对吸附态、游离态及水溶态含气量关注已久, 含气量及地质储量计算已考虑了三相态含气量; ④“煤岩气”排水期较短, 开井较快产气等特征是因为深部游离气含量高占据水相空间, 一方面导致深部煤储层含水量低, 另一方面游离气产出后储层压力下降导致吸附气解吸, 只是降压方式发生了变化, 但仍遵循煤层气降压解吸机理, 产出过程符合先游离气产出、稳产期依赖吸附气接替的规律, 无水煤层、受次生物气和气水分异影响的浅部煤储层压裂后也快速产气。结论认为, “煤岩气”地质与开发特征尚未脱离煤层气的范畴, 提出“煤岩气”概念反而会导致语义重复、同一煤层浅、中、深部“煤岩气”与煤层气存在转换等问题, 现阶段分析成果未体现定义“煤岩气”的必要性。

关键词: 煤层气; “煤岩气”; 地质特征; 开发特征; 游离气; 吸附气; 水溶态含气量; 必要性

中图分类号: P168.11

文献标识码: A

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2025.03.004

Discussion and analysis on the concept of "coal-rock gas"

FU Xuehai^{1,2}, ZHANG Baoxin^{1,2}, KANG Junqiang^{1,2}

(1. MOE Key Laboratory of Coalbed Methane Resource & Reservoir Formation Process, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Natural Gas Industry, Vol.45, No.3, p.46-53, 3/25/2025. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The high proportion of free gas in deep coalbed methane (CBM) leads to differences in production characteristics from shallow CBM. Some scholars have proposed the concept of "coal-rock gas" to represent the deep CBM. However, "coal-rock gas" and CBM are both reserved in coal seams, and it is debatable whether the "coal-rock gas" has special characteristics independent of CBM. In this paper, whether it is necessary to propose the concept of "coal-rock gas" is discussed by comparatively analyzing CBM and "coal-rock gas" from the aspects of gas source, occurrence phase state, resource/reserve calculation parameters and other geological and exploitation characteristics. The following results are obtained. First, the exogenous gas introduced in "coal-rock gas" is one of the signs that distinguish "coal-rock gas" from CBM. However, the definition of CBM does not emphasize the gas source, and CBM generally undergoes a migration process during its generation to preservation. For example, there is also exogenous gas in shallow Jurassic CBM in the southern margin of the Junggar Basin and the Huangling Mining Area of the Ordos Basin. Second, a consensus that the negative effect of high temperature on coal reservoir adsorption in the deep part leads to the increasing proportion of free gas has been reached in the field of CBM research, and the concepts such as critical depth of adsorbed gas have been widely recognized in the industry. Third, CBM research has paid attention to the content of adsorbed gas, free gas, and water soluble gas, which have been included in the calculation of gas content and geological reserves. Fourth, the reasons for the characteristics of "coal-rock gas" such as short drainage period and fast gas production after well startup are that the high free gas content occupies the water space, leading to a low water content in deep coal reservoirs, and the decreasing reservoir pressure after the production of free gas results in the desorption of adsorbed gas. The pressure drop pattern changes, but it still follows the mechanism of CBM depressurization and desorption. The production conforms to the law of free gas being produced first and then the adsorbed gas serving as the replacement in the stable production period. Anhydrous coal reservoirs and shallow coal reservoirs affected by secondary biogenic gas and gas-water differentiation also produce gas rapidly after fracturing. In conclusion, the geological and exploitation characteristics of "coal-rock gas" have not been separated from the scope of CBM, and the proposal of the concept of "coal-rock gas" leads to the duplication of semantics, as well as the problem in the conversion of "coal-rock gas" and CBM in the same coal seam with varying depths. The current results do not highlight the necessity of defining "coal-rock gas".

Keywords: Coalbed methane; "coal-rock gas"; Geological characteristics; Exploitation characteristics; Free gas; Adsorbed gas; Water soluble gas content; Necessity

基金项目: 国家自然科学基金项目“淮南急倾斜储层深部孔渗与含气量随埋深非线性变化的机理研究”(编号: 42072190)。

作者简介: 傅雪海, 1965年生, 教授, 博士研究生导师; 主要从事能源地质教学与科研工作。地址: (221116) 江苏省徐州市泉山区大学路1号。ORCID: 0000-0002-0053-4526。E-mail: fuxuehai@cumt.edu.cn

0 引言

煤层气是赋存在煤层中, 原始赋存状态以吸附态在煤基质颗粒表面为主, 以游离态于煤割理、裂隙和孔隙中或溶解于煤层水中为辅, 并以甲烷为主要成分的烃类气体^[1-2]。与常规天然气相比, 煤层气通常不存在明显的气水界面, 在盆地内广泛分布, 只有富集与否的区别^[3], 属非常规天然气。基于储层类型差异, 非常规天然气还包括页岩气及致密砂岩气等, 该分类方法已得到业界认可。中国煤层气资源丰富, 早期率先在沁水盆地南部、鄂尔多斯盆地东缘等地 1 500 m 以浅煤层取得产量突破并建成产业基地^[4-5]。近年来, 煤层气开发向深部拓展, 其中鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块 JS14-5-02 井 2022 年 9 月投产, 至 2024 年 1 月累计产气量已超过 $2\,600 \times 10^4 \text{ m}^3$, 日产气量仍保持在 $43\,000 \text{ m}^3$ 以上, 显著高于浅部煤层气井, 相近的产气特征在鄂尔多斯盆地延川南、临兴、神府, 渝东南川区块, 准噶尔盆地白家海凸起等深部煤储层亦见报道^[6-9]。中国 2 000 m 以浅煤层气地质资源量为 $30.50 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[10], 2 000 m 以深的资源量初步估算结果约 $40.71 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[11], 昭示中国深部煤层气开发具有广阔的发展前景。

深部煤层气开发实践指示埋深增大导致地质条件发生显著变化, 与浅部相比, 深部高温、高压、高应力影响下煤层气赋存特征有所不同, 如游离气比例增大及含水饱和度减小等^[12-14]。这些变化导致深部煤层气排采制度与气水产出特征亦呈现出差异, 如不需通过较长时间排水降压、开井即产气等^[15-17]。因此, 部分学者为与浅部煤层气区分, 提出“煤岩气”的概念来表征深部煤层气, 即煤岩自身生成或其他气源运移而赋存于煤岩中, 游离态和吸附态并存, 游离气含量高, 通过储层改造可快速产气并能获得工业化开采的烃类气体。“煤岩气”赋存特征与页岩气相近, 开发方式与页岩气及致密砂岩气相似^[18]。然而煤层气与“煤岩气”的储层均为煤层, 当前“煤岩气”是否具有独立于广泛认可的煤层气之外的属性有待商榷。因此, 笔者通过对比分析煤层气与“煤岩气”的气源特征、赋存相态、资源量/储量计算参数等地质与开发特征, 从学术角度阐明是否有必要提出“煤岩气”的概念, 以期对深部煤层气的勘探开发提供指导。

1 煤层气与“煤岩气”地质特征对比

1.1 气源特征

“煤岩气”存在煤及页岩等岩石中分散有机质所

生成气体之外的外源气充注, 进而呈现出有别于煤层气的特征, 这与自生自储的煤层气存在差异^[18], 典型实例为准噶尔盆地彩探 1H 井侏罗系“煤岩气”碳同位素值 ($\delta^{13}\text{C}_1$) 为 $-28.13\text{‰} \sim -26.13\text{‰}$, 为石炭系气源^[19-20]。煤层气的定义强调的是“赋存在煤层中”, 也包括运移到煤层的其他气源, 现今赋存在煤层中的气也都经历了短距离的运移^[21]。因此, 当前定义的“煤岩气”从来源上煤层气都已包括。

浅部煤层气也可见外源气混入的报道, 准噶尔盆地南缘后峡及阜康区块煤层埋深小于 1 500 m, 乙烷碳同位素值 ($\delta^{13}\text{C}_2$) 为 $-30.2\text{‰} \sim -21.9\text{‰}$, 部分样品较轻的乙烷碳同位素值 ($\delta^{13}\text{C}_2$) 导致在图版中呈现出油型气混入的特征。陈大伟等^[22]测试结果与此结论相近 (图 1), 并认为煤层气存在 I、II 型干酪根泥 (页) 岩气的混入。相似地, 鄂尔多斯盆地黄陵矿区浅部侏罗系煤层气亦可见油型气混入^[23]。煤层气还可见无机成因气混入的报道, 澳大利亚悉尼盆地和鲍文盆地煤层气可见碳酸盐溶解及岩浆活动产生的高浓度二氧化碳混入^[24-25]。此外, 近地表存在煤层自燃、微生物产气等过程, 生成的气体亦可运移至煤层保存^[21]。由此可见, 是否存在外源气混入并不能作为区分“煤岩气”与煤层气的标志。

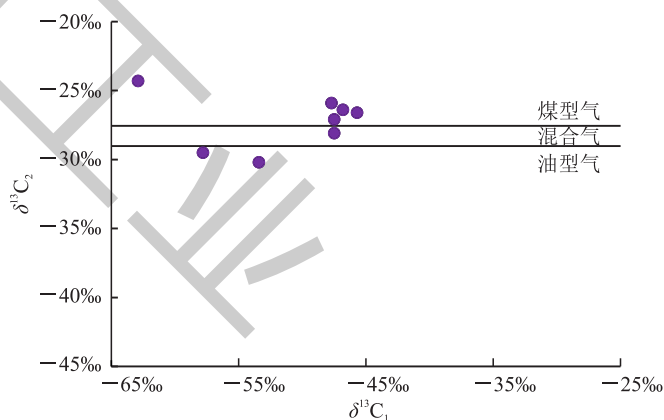


图 1 准噶尔盆地南部地区煤层气 $\delta^{13}\text{C}_1$ — $\delta^{13}\text{C}_2$ 判识图版

(资料来源: 据本文参考文献 [22] 确定煤层气类型的界限)

1.2 赋存相态特征

“煤岩气”为游离态和吸附态并存, 游离气含量高, 进而导致出现微距运移及依赖圈闭等特征^[18], 所述含气量的相态构成在煤层气定义中已包括, 并且从 20 世纪起针对浅部煤层气已取得较多的三相态含气量研究成果: 当未考虑游离气及水溶气时, 美国粉河盆地褐煤的含气量被低估 22%^[26], 美国浅部煤层吸附气、游离气及水溶气占比约 74.3%、14.3%、

11.4%^[27-29]。傅雪海等^[21]计算中国 9 个埋深 2 000 m 以浅煤层低煤阶煤的吸附气、游离气、水溶气量平均占比分别为 73.8%、11.8%、14.4%。

游离气占比高是当前研究认为“煤岩气”有别于煤层气的核心,但也存在如下较多的细节有待深入分析。

1) 当前游离气计算多结合含气量测试与等温吸附成果,即实测含气量与原位温度压力条件下实验得到的吸附量的差值为游离气量。但等温吸附测试采用甲烷单一组分、压力为气体压力,与原位煤层特征(储层压力为气压与水压、局部含有高浓度二氧化碳及氮气等非烃组分)不同,游离气计算结果的精度有待商榷。

2) “煤岩气”强调游离气占比高,但尚未脱离煤层气定义的框架。前期煤层气研究对深部温度负效应影响下吸附量减少、游离气比例增大关注已久,吸附气临界深度的认识已获得业界广泛认同^[30-32],所述的“煤岩气”游离气比例高,与煤层气以吸附态为主尚未见明显的冲突。

3) 部分学者认为“煤岩气”游离气比例高,与页岩气赋存特征相似。但海相与海陆过渡相页岩在有机碳及黏土矿物含量差异等影响下吸附气/游离气比例变化范围大,甚至超过 50.0%^[33-35]。目前尚未基于此差异提出独立于页岩气的新概念,仅是在页岩气前增加海相或过渡相作为类型的区分。

4) 中低煤阶煤吸附量通常较低,浅部在次生生物成因气的补充下具备形成含有较高游离气比例的潜力,不同煤阶煤储层在构造作用下出现气水分异也往往造成浅部游离气含量高^[36-37]。对于浅部依靠次生生物成因气补充或气水分异形成的高游离气占比的煤层气也应该属于“煤岩气”的范畴,因为“煤岩气”并没有明确提出仅赋存于深部^[18]。

2 煤层气与“煤岩气”资源量/储量计算对比

“煤岩气”储量为吸附气与游离气的总和,煤层气储量计算仅考虑吸附气^[18]。按照此说法保压取心获得的含气量不能用于估算煤层气资源储量。DZ/T 0216—2020《煤层气储量估算规范》规定需要估算资源储量的主要是吸附气^[2],事实上煤层气地质储量所利用关键参数为含气量,并不意味着不考虑游离气与水溶气,吸附气比例通常占据优势,估算的煤层气资源储量自然主要是吸附气。部分文献将煤层

气资源储量估算的主要是吸附气误解为只估算吸附气资源储量^[18]。

针对煤层含气量测定,当前已形成较多的国家及行业标准,GB/T 29119—2023《煤层气资源勘查技术规范》规定^[1]:①煤层气资源勘查阶段,煤层含气量参照 GB/T 19559—2021《煤层气含量测定方法》^[38]测定;②煤炭地勘时期,参照 GB/T 23249—2009《地勘时期煤层瓦斯含量测定方法》^[39]实测煤层瓦斯含量,根据面积权衡法所得含气量校正系数进行校正,校正后煤层含气量小于煤层气井实测含气量最大值,取校正后的煤层含气量值,校正后高于煤层气井实测含气量最大值时,取煤层气井实测含气量的最大值。针对游离态及水溶态占比高的低煤阶煤,中国能源局还专门制定了 NB/T 10018—2015《低煤阶煤层含气量测定方法》^[40],规定了游离气及水溶气测试与模拟方法。

3 煤层气与“煤岩气”开发特征对比

“煤岩气”是通过储层改造可快速产气并能获得工业化开采的烃类气体^[18],此结论是基于鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地部分深部煤层气井排采特征得到的。鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块煤层气井呈现出“见气初期产气量高的特征”^[41],准噶尔盆地白家海凸起煤层气井压裂后 4 d 开始产气^[8],与“煤岩气”定义相匹配^[18]。但对于鄂尔多斯盆地神府、临兴、纳林、大牛地等区块深部煤层气井仍呈现出“见气时间短、短期产水”的特征^[42-43],与浅部煤层气产出规律相近。

准噶尔盆地阜康西区浅部煤层通过储层改造同样实现快速产气,新疆科林思德新能源有限责任公司在阜康西区施工的第一口煤层气直井 CSD01 井煤储层埋深为 750 m (该井自 2012 年 12 月排采至今,已累计产气量 $2\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$,平均日产气量约 $6\,000 \text{ m}^3$),由于构造位于阜康向斜的仰起端,地史演化过程中气水分异、浅部煤矿开采排水及煤层气井开发过程中的气水分异(图 2),造成浅部游离气含量高,压裂改造后快速产气。CSD04 井煤层埋深 1 046 m,次生生物成因气补充亦导致煤储层游离气含量高,压裂后快速产气(图 3);CS16-X4 井(煤层埋深 2 016 m)亦是通过对压裂改造较快产气。按“煤岩气”定义^[18],阜康西区煤层埋深为 1 050 ~ 2 000 m 的煤层气井呈现出长时间排水降压后开始产气(如 CS15-X4 井排采 100 d 左右开始产气),应为“煤层气”^[18],在不

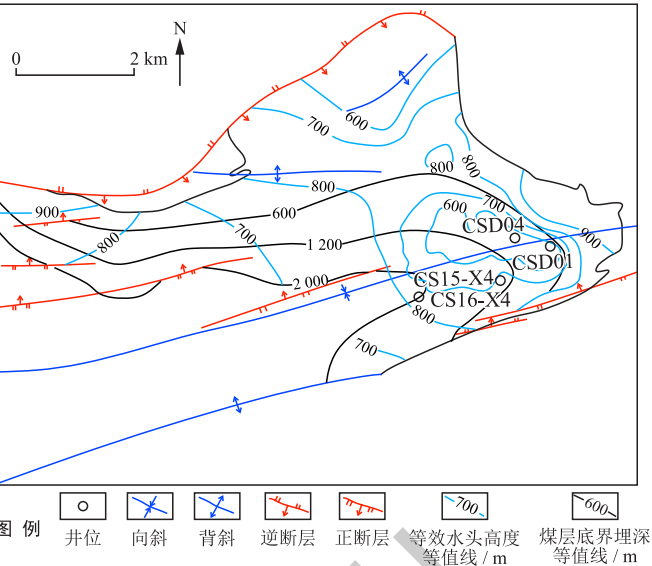


图 2 准噶尔盆地阜康西区煤层气赋存单元划分图
(资料来源：据本文参考文献 [44]，有修改)

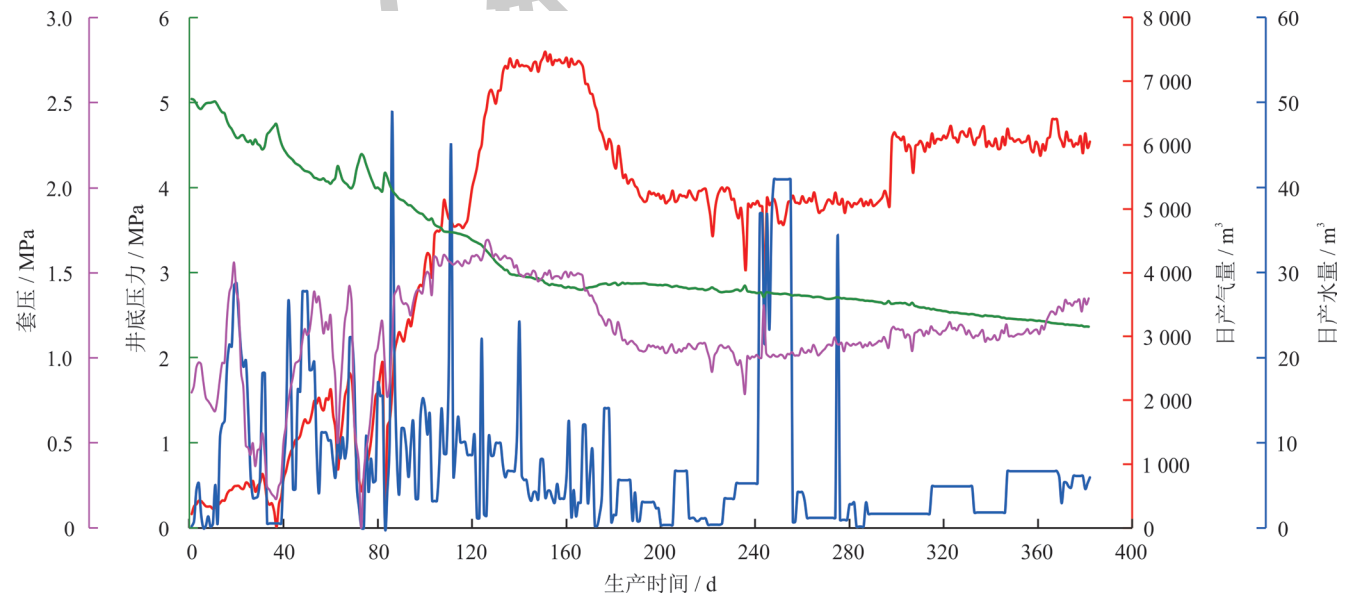


图 3 准噶尔盆地阜康西区 CSD04 井煤层气排采曲线图

低；另一方面游离气产出后储层压力下降导致吸附气解吸，这与煤层气产出的本质相同，只是降压的方式有所变化。加拿大阿尔伯塔盆地马蹄谷组煤储层呈现出干层的特征，通过注氮气提高煤层气采收率（ N_2 -ECBM）技术使得直井日产气量稳定在 $4\,000\text{ m}^3$ 左右^[45]，煤层气产出过程亦未经过排水降压。因此，降压方式差异并未改变煤层气降压解吸机理。

此外，“煤岩气”产气量多高于浅部煤层气，这与开发技术体系密切相关。当前“煤岩气”开发多采用水平井体积压裂，具有“高排量+强加砂+密切割”等特征，最终形成规模立体缝网，并且具有提高孔

足 5 km^2 的范围内同一煤层依次出现“煤岩气”—煤层气—“煤岩气”，显然这种分类是不科学的。

“煤岩气”通过改善储层连通性后依靠地层能量便可持续产出，并且开井后短期内便产气，似乎与煤层气开发存在差别。事实上：①煤储层自身产气能力较弱，“煤岩气”开发也需压裂后促进气体产出，并不是完全依靠地层能量的过程，这与当前煤层气开发的思路并无区别；②“煤岩气”产出依然遵循先游离气后吸附气的规律，前期游离气产出但产气量快速衰减，后期产气量的稳定仍依赖吸附气的接替，这符合煤层气产出的一般规律，只是游离气含量高导致开井即产气并且迅速达到产气高峰，这是由游离气自身属性决定的。

深部游离气比例高是煤层气领域研究达成的共识。深部煤层气排水降压时间短，是由于高含量游离气占据水相空间，一方面导致深部煤储层含水量

隙压力、降低有效应力的效果，有利于煤储层内气体释放^[46-49]。而浅部煤层气开发多采用直井，压裂改造也多采用 $50\sim 60\text{ m}^3$ 的小规模加砂，远低于大规模体积压裂（加砂压裂规模为 $200\sim 300\text{ m}^3$ 及以上）^[50]。中国石化华东油气分公司对鄂尔多斯盆地延川南区块深部煤层开展大规模极限连续加砂体积压裂，日产气量平均增量达 $1\,800\text{ m}^3$ ^[46,50]；中国石油华北油田公司对沁水盆地南部 50 口浅部水平井实施立体缝网改造后，单井日产气量可达 $23\,000\text{ m}^3$ ，日增气量达 $4\,000\text{ m}^3$ ^[51]，体现了开发技术差异诱发的产气量变化。

由此可见,“煤岩气”的气源、赋存相态及产出机理等均未脱离煤层气范畴,至多为一种游离气比例较高的煤层气类型。定义“煤岩气”未能产生对煤层气开发的变革性影响,反而易产生概念模糊混乱等问题,具体体现为:

1) 煤层气与“煤岩气”的赋存载体均为煤层。

2) 煤层气是以甲烷为主要成分的烃类气体,“煤岩气”定义也为烃类气体,从气组分上“煤岩气”与煤层气没有差别。

3) 当前“煤岩气”的内涵侧重于埋深影响下的游离气比例变化,准噶尔盆地南部煤储层倾角超过 45° ,呈现出急倾斜特征,导致阜康西区在面积不足 5 km^2 范围内同一层埋深差超过 $1\ 500\text{ m}$,加之浅部气水分异与次生生物成因气补充,游离气比例随埋深增大理论上呈现出先减小后增大趋势,是否意味着同一煤储层中部为煤层气,浅部和深部为“煤岩气”,依据当前定性的“煤岩气”定义尚不能确定“煤岩气”与煤层气的分界面。

4) 当前公认的非常规天然气类型划分依据为储层类型差异,如页岩气、致密砂岩气,煤岩^[52]是采用研究岩石的方法来研究煤的岩石学属性使用的名字,煤岩是描述煤的一种方法,并不能代表煤层的特征^[21],煤岩一词未囊括夹矸、宏观裂隙(深部煤储层游离气主要赋存场所)等。

5) “煤岩气”与煤系地层相似,存在名字重复。煤是一种可燃有机岩,合起来就是“有机岩岩气”,煤系是含有煤层或煤线的地层,合起来就是“含有煤层或煤线的地层”。英文翻译亦存在相似的问题,部分学者采用“coal-rock gas”指代“煤岩气”^[53-54],煤就是 combustible organic rock,部分学者采用“coal measure gas”指代“煤岩气”^[19],全国科学技术名词审定委员会审定 coal measure gas 为煤系气。

综上所述,现阶段“煤岩气”的定义与内涵未彰显其独立于煤层气的新内容,深部煤储层中游离气比例更高的现象更适合描述为一种煤层气的类型。

4 结论

1) “煤岩气”定义内涵为以自生自储为主、可存在外源气混入、游离气占比高、地质储量估算包含游离气,这些特征与煤层气定义未存在本质的差别,与煤层气定义亦未见明显的冲突。

2) 深部温度对煤储层吸附负效应影响下,游离气比例增大已是煤层气领域研究的共识,吸附气临界

深度等概念已得到业界认可;次生生物成因气补充及气水分异等作用亦可导致煤层气中游离气占比较高;煤层气研究对吸附态、游离态及水溶态含气量关注已久,含气量及地质储量计算已考虑三相态含气量。

3) “煤岩气”游离气含量高导致深部煤储层改造后可快速产气,生产过程由排水变为采气,但稳产期仍依赖煤层气降压解吸。无水煤储层、受次生生物气和气水分异影响的浅部煤储层压裂后也可快速产气。

4) “煤岩气”普遍较高的产气量与开发技术体系密切相关,广泛采用的水平井体积压裂具有提高孔裂隙压力及增大压降范围的效果,有利于气体产出,将此技术应用于浅部煤层气亦可见明显的增产效果。

5) 煤岩不能代表煤层,尤其是不包含深部煤储层游离气主要赋存场所——裂隙,“煤岩气”地质特征与开发特征未脱离煤层气范畴,提出“煤岩气”新概念反而易导致语义重复、同一煤层浅/中/深部“煤岩气”与煤层气存在转换等问题,现阶段研究成果未体现定义“煤岩气”的必要性。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.煤层气资源勘查技术规范:GB/T 29119—2023[S].北京:中国标准出版社,2023.
State Administration for Market Regulation & State Administration for Market Regulation. Technical specification of coalbed methane resource prospecting: GB/T 29119-2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [2] 中华人民共和国自然资源部.煤层气储量估算规范:DZ/T 0216—2020[S].北京:地质出版社,2020.
Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. Regulation of coalbed methane reserves estimation: DZ/T0216-2020[S]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.
- [3] 孙粉锦,周国晓,田文广,等.煤层气系统的定义、内涵、形成及应用——以鄂尔多斯盆地石炭系一二叠系煤层为例[J].天然气工业,2024,44(7): 42-53.
SUN Fenjin, ZHOU Guoxiao, TIAN Wenguang, et al. Definition, connotation, formation and application of coalbed methane system: A case study on the Carboniferous-Permian coal seams in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(7): 42-53.
- [4] 许浩,汤达祯,陶树,等.深、浅部煤层气地质条件差异性及其形成机制[J].煤田地质与勘探,2024,52(2): 33-39.
XU Hao, TANG Dazhen, TAO Shu, et al. Differences in geological conditions of deep and shallow coalbed methane and their formation mechanisms[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2): 33-39.
- [5] 穆福元,仲伟志,赵先良,等.中国煤层气产业发展战略思考[J].天然气工业,2015,35(6): 110-116.

- MU Fuyuan, ZHONG Weizhi, ZHAO Xianliang, et al. Strategies for the development of CBM gas industry in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(6): 110-116.
- [6] 周德华, 陈刚, 陈贞龙, 等. 中国深层煤层气勘探开发进展、关键评价参数与前景展望[J]. *天然气工业*, 2022, 42(6): 43-51. ZHOU Dehua, CHEN Gang, CHEN Zhenlong, et al. Exploration and development progress, key evaluation parameters and prospect of deep CBM in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(6): 43-51.
- [7] 薛冈, 郭涛, 张烨, 等. 渝南地区二叠系龙潭组 C25 煤层煤层气基础地质条件分析[J]. *油气藏评价与开发*, 2024, 14(3): 492-503. XUE Gang, GUO Tao, ZHANG Ye, et al. Analysis of general geological conditions of coalbed methane in coal seam C25 of Permian Longtan Formation, South Chongqing[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2024, 14(3): 492-503.
- [8] 李雪彬, 金力新, 陈超峰, 等. 深层煤岩气水平井压裂关键技术——以准噶尔盆地白家海地区侏罗系为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2024, 14(4): 629-637. LI Xuebin, JIN Lixin, CHEN Chaofeng, et al. Key technologies of horizontal well fracturing for deep coal-rock gas: A case study of Jurassic in Baijiahai area, Junggar Basin[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2024, 14(4): 629-637.
- [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] 张道勇, 朱杰, 赵先良, 等. 全国煤层气资源动态评价与可利用性分析[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(6): 1598-1604. ZHANG Daoyong, ZHU Jie, ZHAO Xianliang, et al. Dynamic assessment of coalbed methane resources and availability in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6): 1598-1604.
- [11] 贾慧敏, 胡秋嘉, 张聪, 等. 宁武盆地南部深部煤层气储层特征及开发实践[J]. *中国矿业大学学报*, 2025, 54(1): 149-160. JIA Huimin, HU Qiuja, ZHANG Cong, et al. Characteristics and development practice of deep coalbed methane reservoir in southern Ningwu Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2025, 54(1): 149-160.
- [12] 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.
- [13] 孙钦平, 赵群, 姜馨淳, 等. 新形势下中国煤层气勘探开发前景与对策思考[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 65-76. SUN Qinpeng, ZHAO Qun, JIANG Xinchun, et al. Prospects and strategies of CBM exploration and development in China under the new situation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 65-76.
- [14] 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.
- [15] 闫霞, 徐凤银, 张雷, 等. 微构造对煤层气的控藏机理与控产模式[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 893-905. YAN Xia, XU Fengyin, ZHANG Lei, et al. Reservoir-controlling mechanism and production-controlling patterns of microstructure to coalbed methane[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 893-905.
- [16] 李勇, 徐立富, 张守仁, 等. 深煤层含气系统差异及开发对策[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(2): 900-917. LI Yong, XU Lifu, ZHANG Shouren, et al. Gas bearing system difference in deep coal seams and corresponded development strategy[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 900-917.
- [17] 康永尚, 闫霞, 皇甫玉慧, 等. 深部超饱和煤层气藏概念及主要特点[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1781-1790. KANG Yongshang, YAN Xia, HUANGFU Yuhui, et al. Concept and main characteristics of deep oversaturated coalbed methane reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1781-1790.
- [18] 李国欣, 张水昌, 何海清, 等. 煤岩气: 概念、内涵与分类标准[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(4): 783-795. LI Guoxin, ZHANG Shuichang, HE Haiqing, et al. Coal-rock gas: Concept, connotation and classification criteria[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(4): 783-795.
- [19] 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.
- [20] 杨敏芳, 孙斌, 鲁静, 等. 准噶尔盆地深、浅层煤层气富集模式对比分析[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(S02): 601-609. YANG Minfang, SUN Bin, LU Jing, et al. Comparative analysis on the enrichment patterns of deep and shallow CBM in Junggar Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S02): 601-609.
- [21] 傅雪海, 康俊强, 陈义林, 等. 煤层气有关术语辨析[J]. *中国矿业大学学报*, 2025, 54(1): 26-33. FU Xuehai, KANG Junqiang, CHEN Yilin, et al. Analysis on terminologies related to coalbed methane[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2025, 54(1): 26-33.
- [22] 陈大伟, 李剑, 郝爱胜, 等. 准噶尔盆地天然气地球化学特征及成因判识新图版[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(9): 1666-1680. CHEN Dawei, LI Jian, HAO Aisheng, et al. Geochemical characteristics of natural gas in Junggar Basin and new chart for genetic identification[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(9): 1666-1680.
- [23] 王文博. 黄陵矿区延安组煤油气地球化学特征及其成因研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2022. WANG Wenbo. Geochemical characteristics and genesis of coal, oil, and gas in Yan'an Formation of Huangling mining area[D].

- Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2022.
- [24] GOLDING S D, UYSAL I T, BOLHAR R, et al. Carbon dioxide-rich coals of the Oak Creek area, central Bowen Basin: A natural analogue for carbon sequestration in coal systems[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2013, 60(1): 125-140.
- [25] BURRA A, ESTERLE J S, GOLDING S D. Coal seam gas distribution and hydrodynamics of the Sydney Basin, NSW, Australia[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2014, 61(3): 427-451.
- [26] PRATT T J, MAVOR M J, DEBRUYN R P. Coal gas resource and production potential of subbituminous coal in the Powder River Basin[C]//SPE Rocky Mountain Regional Meeting, Gillette: SPE, 1999: SPE-55599-MS.
- [27] BUSTIN R M, CLARKSON C R. Free gas storage in matrix porosity: A potentially significant coalbed methane in low rank coals[C]//International Coalbed Methane Symposium. [S.l.]: [s.n.], 1999: 197-214.
- [28] SCOTT A R. Hydrogeologic factors affecting gas content distribution in coal beds[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2002, 50(1/4): 363-387.
- [29] 冯三利, 胡爱梅, 霍永忠, 等. 美国低阶煤煤层气资源勘探开发新进展 [J]. *天然气工业*, 2003, 23(2): 124-126.
FENG Sanli, HU Aimei, HUO Yongzhong, et al. New progress in exploration and development of coalbed methane resources from low rank coal in the United States of America[J]. *Natural Gas Industry*, 2003, 23(2): 124-126.
- [30] 申建, 秦勇, 傅雪海, 等. 深部煤层气成藏条件特殊性及其临界深度探讨 [J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(9): 1470-1476.
SHEN Jian, QIN Yong, FU Xuehai, et al. Properties of deep coalbed methane reservoir-forming conditions and critical depth discussion[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(9): 1470-1476.
- [31] 李松, 汤达祯, 许浩, 等. 深部煤层气储层地质研究进展 [J]. *地质前缘*, 2016, 23(3): 10-16.
LI Song, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Progress in geological researches on the deep coalbed methane reservoirs[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(3): 10-16.
- [32] 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.
- [33] 王淑芳, 董大忠, 王玉满, 等. 中美海相页岩气地质特征对比研究 [J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(9): 1666-1678.
WANG Shufang, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. A comparative study of the geological feature of marine shale gas between China and the United States[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(9): 1666-1678.
- [34] 张吉振, 李贤庆, 邹晓艳, 等. 海陆过渡相煤系页岩孔隙结构特征及其对含气性的影响 [J]. *地球化学*, 2021, 50(5): 478-491.
ZHANG Jizhen, LI Xianqing, ZOU Xiaoyan, et al. Pore structure characteristics of a marine-continental coal-bearing shale reservoir and its effect on the shale gas-containing property[J]. *Geochimica*, 2021, 50(5): 478-491.
- [35] 罗力元, 李勇, 何清波, 等. 鄂尔多斯盆地东缘海陆过渡相页岩原位含气性评价及其地质应用 [J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(12): 2215-2227.
LUO Liyuan, LI Yong, HE Qingbo, et al. In-situ gas-bearing evaluation of marine-continental transitional shale in the eastern margin of Ordos Basin and its geological application[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(12): 2215-2227.
- [36] 冯树仁, 张聪, 张金笑, 等. 沁水盆地夏店区块煤层气藏气水分异特征 [J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(5): 129-134.
FENG Shuren, ZHANG Cong, ZHANG Jinxiao, et al. Gas-water differentiation characteristics of CBM reservoirs in Xiadian Block, Qinshui Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, 46(5): 129-134.
- [37] ZHANG Baoxin, DENG Ze, FU Xuehai, et al. A study on three-phase gas content in coal reservoirs and coalbed methane-water differential distribution in the western Fukang mining area, Xinjiang, China[J]. *ACS Omega*, 2021, 6(5): 3999-4012.
- [38] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 煤层气含量测定方法: GB/T 19559—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation & Standardization Administration of the People's Republic of China. Method of determining coalbed methane content: GB/T 19559-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [39] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地勘时期煤层瓦斯含量测定方法: GB/T 23249—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration of the People's Republic of China. Coalbed gas content measurement methods in geological exploration period: GB/T 23249-2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [40] 国家能源局. 低煤阶煤层含气量测定方法: NB/T 10018—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
National Energy Administration. Method of determining low-rank coal gas content: NB/T 10018-2015[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [41] 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.
- [42] 王志壮, 吴鹏, 孙强, 等. 临兴区块深部煤层气井生产特征及影响因素 [J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(8): 69-78.
WANG Zhizhuang, WU Peng, SUN Qiang, et al. Production characteristics of deep coalbed methane wells in the Linxing Block and associated their influencing factors[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(8): 69-78.
- [43] 吴见, 孙强, 石雪峰, 等. 深部煤层孔隙结构与流体差异赋存特征研究 [J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(8): 89-100.
WU Jian, SUN Qiang, SHI Xuefeng, et al. Pore structure and differential fluid occurrence of deep coal seams[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(8): 89-100.

- [44] 葛燕燕, 李鑫, 郜琳, 等. 阜康向斜煤层气开发高产关键地质要素[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(3): 328-333.
GE Yanyan, LI Xin, GAO Lin, et al. Key geological factors of high-yield coalbed methane development in Fukang syncline[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(3): 328-333.
- [45] HOCH O. The dry coal anomaly—the horseshoe Canyon formation of Alberta, Canada[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas: SPE, 2005: SPE-95872-MS.
- [46] 杨帆, 李斌, 王昆剑, 等. 深部煤层气水平井大规模极限体积压裂技术——以鄂尔多斯盆地东缘临兴区块为例[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(2): 389-398.
YANG Fan, LI Bin, WANG Kunjian, et al. Extreme massive hydraulic fracturing in deep coalbed methane horizontal wells: A case study of the Linxing Block, eastern Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 389-398.
- [47] 安琦, 杨帆, 杨睿月, 等. 鄂尔多斯盆地神府区块深部煤层气体积压裂实践与认识[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2376-2393.
AN Qi, YANG Fan, YANG Ruiyue, et al. Practice and understanding of deep coalbed methane massive hydraulic fracturing in Shenfu Block, Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2376-2393.
- [48] 李小刚, 唐政, 朱静怡, 等. 深层煤岩气压裂研究进展与展望[J]. 天然气工业, 2024, 44(10): 126-139.
LI Xiaogang, TANG Zheng, ZHU Jingyi, et al. Research progress and prospect of deep coalrock fracturing[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(10): 126-139.
- [49] LIU Changqing, YANG Zhaobiao, QIN Yong, et al. Excess pore pressure behavior and evolution in deep coalbed methane reservoirs[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2024, 34(6): 763-781.
- [50] 徐凤银, 闫霞, 林振盘, 等. 我国煤层气高效开发关键技术研究进展与发展方向[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 1-14.
XU Fengyin, YAN Xia, LIN Zhenpan, et al. Research progress and development direction of key technologies for efficient coalbed methane development in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 1-14.
- [51] 王静, 王青川, 张永琪, 等. 沁水盆地煤层气水平井缝网体积压裂工艺优化研究[J]. 中国煤层气, 2024, 21(1): 8-11.
WANG Jing, WANG Qingchuan, ZHANG Yongqi, et al. Optimization of volume fracturing network technology for coalbed methane horizontal wells in Qinshui Basin[J]. China Coalbed Methane, 2024, 21(1): 8-11.
- [52] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 煤岩术语: GB/T 12937—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration of the People's Republic of China. Terms relating to coal petrology: GB/T 12937-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [53] 王维, 韩金良, 王玉斌, 等. 大宁—吉县区块深层煤岩气水平井钻井技术[J]. 石油机械, 2023, 51(11): 70-78.
WANG Wei, HAN Jinliang, WANG Yubin, et al. Drilling technology for deep coal rock gas horizontal wells in Daning—Jixian Block[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(11): 70-78.
- [54] 赵喆, 徐旺林, 赵振宇, 等. 鄂尔多斯盆地石炭系本溪组煤岩气地质特征与勘探突破[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(2): 234-247.
ZHAO Zhe, XU Wanglin, ZHAO Zhenyu, et al. Geological characteristics and exploration breakthroughs of coal rock gas in Carboniferous Benxi Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 234-247.

(修改回稿日期 2025-02-10 编辑 陈古明)



本文互动