

煤层气有关术语辨析

傅雪海, 康俊强, 陈义林, 段超超, 卢杰林, 张宝鑫

(中国矿业大学 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 在煤层气勘探开发报告、文章及新闻报道中时常出现诸如“煤岩气”“煤层气藏”“含气量临界深度与深部”“含气量高饱和-超饱和”“低、中、高煤阶煤层气”“可燃基煤层瓦斯含量”等不规范词汇。通过查阅相关标准和教材,对上述术语进行了辨析。认为煤层气是以甲烷为主的烃类气体,不存在“低、中、高煤阶煤层气”;“煤岩气”“煤层瓦斯”实际就是煤层气;煤层气为连续型非常规天然气,没有明显的圈闭,浮力、水动力不起主导作用,不存在真正意义上的气、水界面和遮挡条件,存在富集区或“甜点区”;吸附气含量存在转换深度,含气量不一定存在转换深度;煤储层的深部以地应力临界深度划分较为科学,一是煤储层力学状态发生了改变,二是煤储层压裂裂缝展布方向发生了变化;吸附气饱和度不能代表含气饱和度,浅部低阶煤储层水溶气、游离气占比分别随平衡水分含量、孔隙度增加呈指数形式增大;挥发分和灰分是煤中的原始组分在特定条件下的转化产物,不能称之为挥发分含量和灰分含量,只能称为挥发分产率和灰分产率。研究成果对规范煤层气术语和相态含气量分析均具有指导意义。

关键词: 煤层气;煤岩气;煤层气藏;含气饱和度;转换深度;基准

中图分类号: P 618.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)01-0026-08

Analysis on terminologies related to coalbed methane

FU Xuehai, KANG Junqiang, CHEN Yilin, DUAN Chaochao, LU Jielin, ZHANG Baoxin

(Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation

Process, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: In coalbed methane (CBM) exploration and development reports, papers, and news, unstandardized terminologies were utilized, such as “coal rock gas”, coalbed gas reservoirs, critical depth of gas content, highly saturated/supersaturated gas content, low/medium/high-rank CBM, and gas content of combustible base. The authors consulted relevant standards and textbooks to analyze those terminologies. It is believed that CBM is a hydrocarbon gas mainly composed of methane, and there is no low/medium/high rank CBM. The “coal rock gas” and “gas of coal seam” are actually CBM. The CBM is a continuous unconventional natural gas without traps, and is less affected by buoyancy and hydrodynamic force. There is no real gas-water interface and blocking condition, and rich areas or “sweet areas” can be found. A conversion depth occurs for adsorbed gas content, but not for total gas content. It is more scientifically to determine “deep regions” based on the critical depth of geostress, due to the changes in mechanical state and fracturing fracture propagation direction. The adsorbed gas satura-

收稿日期: 2024-03-18 修回日期: 2024-04-17 DOI:10.13247/j.cnki.jcumt.20240106

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42372183, 42072190);国家自然科学基金青年科学基金项目(42202198);江苏省自然科学基金资助项目(BK20221149)

通信作者: 康俊强(1993—),男,安徽省亳州市人,副教授,硕士生导师,工学博士,从事能源地质方面的研究。

E-mail: kshif@cumt.edu.cn Tel: 18252430938

引用格式: 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.

tion cannot represent the total gas saturation, and the proportion of water-soluble gas and free gas in shallow low-rank coal reservoirs increases exponentially with the increasing equilibrium moisture content and porosity, respectively. As volatile matter and ash are the conversion products of the original components in coal under specific conditions, it is inappropriate to utilize volatile matter content and ash content, which should be replaced by volatile matter yield and ash yield. The results provide guidance for standardizing the CBM terminology and analyzing the phase gas content.

Key words: coalbed methane; coal rock gas; coalbed methane reservoir; gas saturation; conversion depth; standard

笔者在《能源地质学》教学过程中,有学生询问什么是“煤岩气”,“煤岩气”与煤层气有何关系?近段审阅有关煤层气报告、稿件,也常出现“煤岩气”一词^[1],一些新闻报道也使用“煤岩气”^[2-3]。另外,在煤层气勘探开发报告、文章中也经常见到煤层气藏^[4]、含气量临界深度与深部^[5]、含气量高饱和和超饱和^[6-7]、低、中、高煤阶煤层气^[8-9]、可燃基煤层瓦斯含量^[10]等不规范词汇。作为高校教师,本着对学生负责的态度,就上述词汇阐述下自己的见解,请同行们批评指正。

1 煤岩气

煤岩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,宏观上用煤岩成分(lithotype of coal)来表述,即腐殖硬煤中肉眼可以鉴别的基本组成单位,可划分4种基本岩石类型,即镜煤、亮煤、暗煤和丝炭。根据总体相对光泽强度和光亮成分含量,按《GB/T 18023—2000 烟煤的宏观煤岩类型分类》划分为光亮煤、半亮煤、半暗煤、暗淡煤4种宏观煤岩类型^[11];微观上用显微组分(maceral)来表述,根据煤中有机成分在显微镜下的颜色、突起、反射率、成因和荧光性、各向异性等物理性质、化学性质及工艺性质,按《GB/T 15588—2001 烟煤显微组分分类》划分为3个有机显微组分,即镜质组、惰质组和壳质组,1个无机显微组分,即矿物组^[12]。

有观点认为新疆准噶尔盆地东缘白家海凸起的煤层气被证实至少一大部分是外源的,要称之为“煤岩气”^[1]。殊不知,煤层气是指赋存在煤层中,原始赋存状态以吸附在煤基质颗粒表面为主,以游离于煤的割理、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(《DZ/T 0216—2020 煤层气储量评估规范》)^[13]。从上述定义来看,只要现赋存在煤层中,且以甲烷为主,就是煤层气,并没有涉及其来源问题,即使现在赋存于煤层中的气,也不一定是其“亲生”的。

1)煤层埋藏初期生成的原生生物气大多没有保存;2)先期演化生成的煤层气被后期构造改造或地层抬升遭逸散,后期再吸附深部运移来的烃类气体或浅部次生物气;3)西部巨厚煤层,由于其顶底板岩层封闭性相对较差,靠近顶底板煤层气被逸散,中部煤层气向上部、下部煤层扩散运移;4)断层附近、褶曲附近高含气量系侧向运移而来的。鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县煤层气中没有明显外缘气也进行过“鄂尔多斯盆地首口深层5号煤岩气水平井获得稳定高产”的报道^[2]。

此外,煤层气一词的出现比“煤层瓦斯”晚多了,煤炭资源勘探阶段实测的煤层瓦斯含量就是煤层气含量。

2 煤层气藏

一些学者借鉴常规气藏按照圈闭成因分类方法,提出了煤层气圈闭的概念^[3],一些学者认为鄂尔多斯盆地东缘临兴区块、准噶尔盆地东部白家海凸起深部煤层气产出不明显依赖于排水降压,退液过程中或投产后很快就有煤层气产出,且深部煤层气超饱和,提出了深部超饱和煤层气藏概念^[4-5]。排水降压只是煤层气开发的一种方式,加拿大阿尔巴塔省白垩系马蹄谷组煤储层几乎没有水,采用 N_2 -ECBM技术煤层气单直井稳产在 $4\ 000\ m^3/d$ 左右^[14]。此外,还有 CO_2 -ECBM、注热开采、洞穴完井等多种煤层气开发技术^[15-17]。

气藏定义为在具有统一压力系统和气水界面的单一圈闭中的天然气聚集体^[18],是天然气在地壳中聚集的基本单位。储集层、盖层、遮挡条件是圈闭的三要素。一方面煤层气不存在气水界面,也不存在明显的圈闭。另一方面煤层气是非常规天然气,以吸附气为主,煤储层也不是常规意义上的储集层。因此,不存在严格意义上的煤层气藏,笔者在《煤层气地质学》教材中就没有使用“煤层气藏”这个术语^[19]。

煤储层无自然产能,均要通过改造才能产气.鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县区块、中石化重庆南川区的深部煤层,煤层气水平井日产气量在 10 万 m^3 以上,直井在 1 万 m^3 以上,均是通过大规模压裂改造才取得上述高产量^[20-21],也证明深部煤层气仍然为非常规天然气.

煤层气以吸附态、游离态、溶解态、固溶态或超临界态赋存在煤储层中^[22],为连续型非常规天然气,没有明显的圈闭,浮力、水动力不起主导作用,不存在气、水界面和遮挡条件,不是真正意义上的气藏,存在富集区或“甜点区”.但煤储层裂隙发育区,如背斜高部位或人工改造后,煤层气聚集可能符合“背斜油气藏或岩性油气藏”的定义^[23-24].煤层气藏虽说不十分准确,但煤层气工作者都明确煤层气“藏”的意涵,使用也不影响沟通.

3 临界深度与深部

地应力研究将某地最大水平应力 $\sigma_{H_{\max}}$ 等于垂向应力 σ_v 时的埋深称为临界深度^[25].临界深度以浅 $\sigma_{H_{\max}} > \sigma_v > \sigma_{H_{\min}}$,表现为大地动力场,现今地应力状态为压缩状态,又称为走滑断层应力体制;即临界深度以深 $\sigma_v > \sigma_{H_{\max}} > \sigma_{H_{\min}}$,表现为大地静力场型,现今地应力状态为拉张状态,又称为正断层应力体制.

“深部”不仅指埋藏深度,而是一种由地应力水平、采动应力状态和围岩属性共同决定的力学状态^[26].因此,由地应力得出的临界深度可作为煤储层深部划分依据.一方面煤储层力学状态发生了改变,另一方面煤储层压裂裂缝展布方向发生变化,直接影响到煤储层渗透率,制约了煤层气的高效开发.我国煤层气开发区块煤储层地应力“临界深度”介于 450~1 100 m 之间^[27-29].

现今一些煤层气文献基于上述思路,提出煤储层含气量转换深度,有时直接称为“临界深度”^[3].《DZ/T 0216—2020 煤层气储量评估规范》中煤层气定义表明煤层气含量包括吸附气含量、游离气含量、水溶气含量.吸附气含量随储层压力增大先线性增大,后缓慢增加,压力较高时几乎不增加(图 1).而温度升高,吸附气含量逐渐减少(图 2).因此,吸附气含量随埋深(温度、压力)增大呈现先增大后减少的变化趋势,存在一个极值点,即转换深度^[30-31].随埋深增大煤储层孔裂隙被压缩,游离气赋存空间减少,游离气含量减少,而埋深增大压力增大,游离气含量增大,到一定深部,孔裂隙压缩很少,而压力增大较大,游离气含量总体增

大.如鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县区块与中石化重庆南川区深部煤层气的高产量多缘于此因;甲烷溶解度随压力增大而增大,温度 $< 80\text{ }^\circ\text{C}$ 时,随温度升高而减少,温度 $> 80\text{ }^\circ\text{C}$ 时,随温度升高而增加,到一定深度甲烷溶解度随埋深增大而增大.然而,随埋深增大煤储层水分含量大量减少,水溶气含量随埋深增大而减少.因此,煤层总含气量随埋深变化不存在先增大后减少的成因机制,也就不存在所谓的“临界深度”.而某些煤层气区块含气量与埋深拟合关系呈现的“临界深度”主要是由于没有实测或模拟游离气含量、水溶气含量所导致,也可能是埋深浅的中、高阶煤储层吸附气含量占绝对优势的缘故.

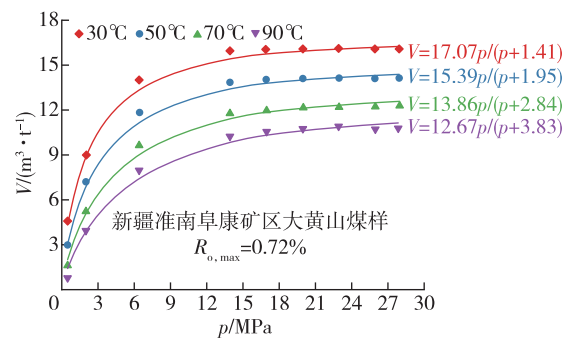


图 1 不同温度条件下吸附气含量(空气干燥基)随储层压力变化曲线(据文献[32])

Fig. 1 Curves of adsorbed gas volume (air-dried basis) with reservoir pressure under different temperature conditions

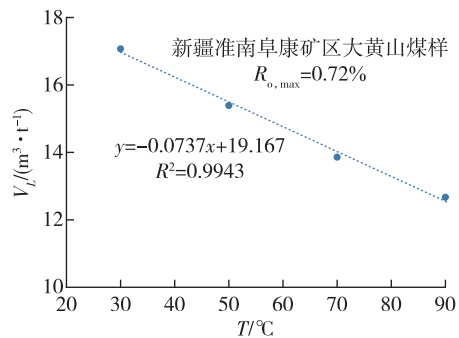


图 2 最大吸附气含量(空气干燥基)随温度的变化曲线(据文献[32])

Fig. 2 Curves of the maximum adsorption gas volume (air-dried basis) with temperature

4 含气饱和度

笔者在编写《煤层气地质学》时,考虑到当时煤层气研究程度不高,测试仪器、模拟方法少,测试数据、测试精度不高等具体情况,为了方便科技工作者对煤储层气饱和状态进行估算,提出了实测饱和度的概念,即实测含气量与实测储层压力投影到吸附等温(储层温度)线上所对应的理论含

气量的百分比。现在许多学者用实测饱和度代替含气饱和度，导致“超饱和”或“过饱和”煤储层的出现^[4,6-7]。

用实测饱和度代替含气饱和度存在下列问题：

1) 煤层原位含气量测不准

煤炭资源勘探阶段每个钻孔每个煤层一般只测 1~2 个含气量，煤层气勘探阶段每个煤层气井每个煤层每米测 1 个含气量，测试数据不连续，测试方法不统一^[22]。实测含气量一般不包括水溶气量，由于煤芯采取方法、装罐时间的差异，一些样品中游离气，甚至部分解吸气被逸散。

浅部煤储层，低阶煤由于含水量高、孔裂隙发育，水溶气量、游离气量占有较高比例。笔者模拟计算 9 个低阶煤中吸附气、游离气、水溶气量平均占比分别为 73.8%，11.8%，14.4%（表 1）。水溶气占比(V_w)随平衡水分含量增加呈指数形式增大（图 3），游离气占比(V_f)随孔隙度增大呈指数形式增大（图 4）。

表 1 三相态含气量占比模拟成果表

Table 1 Simulation results of gas content ratio in three phase state

地点	样号	$R_{o,max}/\%$	$M_{ad}/\%$	$M_e/\%$	$\varphi/\%$	$V_{总}$ / $(m^3 \cdot t^{-1})$	V_{ad} / $\%$	V_w / $\%$	V_f / $\%$
内蒙 海拉尔 ^①	HLR-02	0.26	22.17	48.62	22.29	8.03	48.5	50.3	1.2
	HLR-05	0.42	8.20	21.67	25.18	3.17	84.1	6.0	10.0
	HLR-06	0.42	11.65	29.12	31.91	6.17	67.1	16.2	16.7
河北万全 ^②	HLR-07	0.42	15.66	36.80	20.29	1.85	70.2	9.3	20.5
	WQ	0.41	12.06	32.03	19.70	1.42	80.3	14.8	4.9
准东	ZGR-02	0.40	3.46	7.70	16.30	2.35	68.8	1.5	29.7
	ZGR-03	0.54	3.63	5.67	24.4	2.47	0.8	53.8	45.4
淮南 硫磺沟	LHG-01	0.62	0.58	1.21	6.32	9.63	96.1	3.6	0.2
	LHG-02	0.62	1.56	1.39	3.39	10.12	95.7	3.6	0.7
平均		0.46	8.77	20.47	18.86	5.02	73.8	11.8	14.4

注： $R_{o,max}$ 为油浸下镜质体最大反射率，%； M_{ad} 为空气干燥基水分含量，%； M_e 为等温吸附实验平衡水分含量，%； φ 为孔隙度（真密度、视密度计算值，%）； $V_{总}$ 为模拟埋深 2 000 m 以浅平均总含气量， m^3/t ； V_{ad} 为吸附气含量占比，%； V_w 为水溶气含量占比，%； V_f 为游离气含量占比，%；^① 数据来源于文献[33]；^② 数据来源于文献[34]；其他数据根据于文献[33]的方法模拟得到。

2) 理论含气量一般只测储层压力下的甲烷饱和和吸附量

等温吸附实验大多是对单一甲烷气体进行的实验，煤层气是混合气，笔者统计山西、安徽、贵州、河南、河北、云南、内蒙、新疆、四川、陕西、黑龙江等地煤层含气量达到《煤层气储量评估规范 DZ/T 0216—2020》起算下限标准（表 2，甲烷体积分数大于 50%）的各煤阶煤的气成分测试成果 4 144 个数据，结果表明 CH_4 平均体积分数为 88.53%、 N_2 平均体积分数为 7.06%、 CO_2 平均体积分数为 3.19%、重烃的平均体积分数为 1.09%^[35]，甲烷饱和和吸附量不能代表混合煤层气组分的饱和和吸附量。此外，等温吸附实验采用的是气压，而储层压

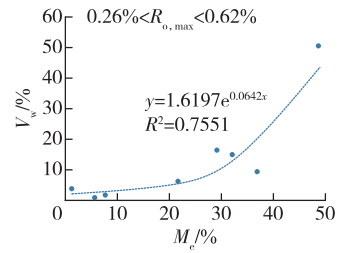


图 3 水溶气占比与平衡水分含量的关系
Fig. 3 The relationship between the proportion of water-soluble gas and the equilibrium water content

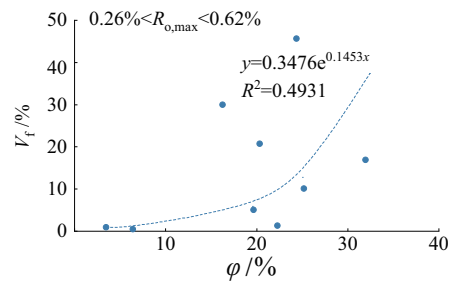


图 4 游离气占比与孔隙度的关系
Fig. 4 The relationship between the proportion of free gas and porosity

力是流体压力，包括水压与气压，储层条件下水压与气压的关系至今还没有完全厘清。

文献[7]估算鄂尔多斯盆地临兴区块 8+9 号煤层（埋深 1 769~2 088 m， $R_{o,max}$ 介于 1.01%~1.87%之间）27 个煤样中有 9 个煤样饱和度介于 105.2%~197.1%之间，平均为 132.9%，折算游离气含量占比为 24.8%，若 27 个煤样平均则为 8.3%；文献[36]估算鄂尔多斯盆地东缘（埋深 1 911.60~1 924.84 m）9 件保压密闭取芯样品游离气含量占比介于 11.00%~36.17%之间；文献[7]估算准噶尔盆地东部白家海凸起西山窑组底部煤层（埋深 3 360~3 363 m， $R_{o,max}$ 介于 0.84%~0.85%之间）2 个煤样饱和度分别为 166.2%，

175.2%，平均为170.7%，折算游离气含量占比为41.4%。

表2 煤层含气量起算下限标准(据DZ/T 0216—2020^[13],将变质程度修改为煤化程度)

Table 2 Minimum limit standard for calculating coal seam gas content

煤类	煤化程度 $R_{o,max}/\%$	含气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}, \text{ad}$)
褐煤-长焰煤	<0.7	1
气煤-瘦煤	$0.7 \sim 1.9$	4
贫煤-无烟煤	≥ 1.9	8

现在国内煤层气研究程度、测试精度均较高了,测试仪器、模拟方法、测试数据也较多了,建议不再使用实测饱和度这一概念,回归到笔者在《煤层气地质学》第73页的定义,含气饱和度是指煤储层在原地温度、压力、水分含量等储层条件下,煤层含气量与总容气能力的比值^[19]。要分析煤层是否吸附饱和,建议将实测饱和度改为吸附气饱和度。

5 低、中、高煤阶煤层气

煤阶与煤级反映煤的演化程度,据镜质体反射率的煤化程度分级(MT/T 1158—2011)^[37],将 $R_{o,max} < 0.50\%$ 划分为低煤阶煤、 $0.50\% \leq R_{o,max} < 2.50\%$ 划分为中煤阶煤、 $R_{o,max} \geq 2.50\%$ 划分为高煤阶煤。《煤层气储量估算规范DZ/T 0216—2020》对煤层含气量起算下限划分为 $R_{o,max} < 0.7\%$ 、 $0.7\% \leq R_{o,max} < 1.9\%$ 、 $R_{o,max} \geq 1.9\%$ 这3个阶段(表2)^[13],煤层气研究者通常将 $R_{o,max} < 0.65\%$ 划分为低煤阶煤^[38]。

与煤阶相对应的还有一个名词,是煤类,中国煤炭分类(GB/T 5751—2009)根据煤化程度和工艺性能指标把煤划分为褐煤、长焰煤、不黏煤、弱黏煤、1/2中黏煤、气煤、气肥煤、1/2焦煤、肥煤、焦煤、瘦煤、贫瘦煤、贫煤、无烟煤14大类^[39]。一些学者混淆煤阶与煤类,尤其是将处于成岩阶段的褐煤划归到变质阶段^[13]。因此,表2中褐煤-长焰煤阶段用“煤化程度”代替“变质程度”更科学。

煤层气是以甲烷为主的烃类气体,不存在低、中、高煤阶煤层气。若要表明不同煤化阶段的煤层气可使用生物成因气、热降解气、热裂解气等。

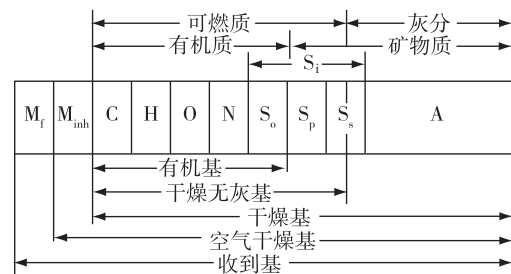
6 基准的问题

“基”就是分析化验结果是以什么状态下的煤样为基础得出的。研究煤储层含气量通常使用空气干燥基(ad),一些学者用干燥无灰基(daf)煤层含气量等值线平面图来预测钻井对应煤层含气

量^[40],理论上误差是较大的。一方面煤层水中存在溶解气,另一方面煤中矿物质,尤其是黏土矿物对煤层气也有较强的吸附能力^[41],干燥无灰基是以假想无水、无灰状态的煤为基准,就是说把水溶气、矿物吸附气全部算到有机质上了。

现在与国际接轨,可燃基(r)已不再使用了,但一些文章,甚至一些标准还在使用可燃基《MT/T 1174—2019 煤层瓦斯风化带确定方法》以可燃基煤层瓦斯含量来划分瓦斯风化带^[10]。煤中可燃部分不仅是有机质,煤中硫化物中的硫(S_p)可燃,部分硫酸盐中的硫(S_s)也可燃(图5)。

此外,一些学者在文章中将煤中挥发分产率、灰分产率说成是挥发分含量、灰分含量^[27]。挥发分是煤样在规定条件下隔绝空气加热,并进行水分校正后的质量损失,煤中本身没有挥发分。因此,不能称之为挥发分含量,只能称为挥发分产率。灰分是煤中可燃质完全燃烧(图5),煤中矿物质在一定温度下产生分解、化合等复杂反应后剩下的残渣。煤中有矿物质,没有灰分,所以不能称之为灰分含量,只能称为灰分产率。



注: M_f 为外在水分,即直径 $d > 200 \text{ nm}$ 孔隙中的游离水; M_{mh} 为内在水分,即 $d < 200 \text{ nm}$ 孔隙中的吸附水; S_o 为有机硫。

图5 煤中水分、有机质、矿物质及基准分布示意

Fig. 5 Schematic distribution diagram of moisture, organic matter, minerals and standard in coal

7 结论

1) 煤层气是以甲烷为主的烃类气体,不存在低、中、高煤阶煤层气;“煤岩气”“煤层瓦斯”统一称为煤层气。

2) 煤层气为连续型非常规天然气,不存在明显的圈闭,浮力、水动力不起主导作用,不存在气、水界面和遮挡条件,不是真正意义上的气藏,存在富集区或“甜点区”。

3) 吸附气含量存在转换深度,含气量不存在转换深度;煤储层的深部以地应力临界深度划分较为科学,一是煤储层力学状态发生了改变,二是煤储层压裂裂缝展布方向发生了变化。

4) 吸附气饱和度不能代表含气饱和度;浅部

低阶煤储层水溶气、游离气含量占比分别随平衡水分含量、孔隙度增加呈指数形式增大。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 鄂尔多斯盆地首口深层5号煤岩气水平井获得稳定高产[EB/OL].(2023-10-27)[2024-01-02].<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1780874020422329055>. The first deep No.5 coal-rock gas horizontal well in the Ordos Basin has achieved stable and high production[EB/OL].(2023-10-27)[2024-01-02].<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1780874020422329055>.
- [3] 中国石油西南油气田公司首口深层煤岩气井完成取心工作[EB/OL].(2023-11-13)[2023-11-17].<https://finance.sina.com.cn/jjxw/2023-11-17/doc-imzuxmnn5610309.shtml?cref=cj>
The first deep coal rock gas well of PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company has completed coring work [EB/OL](2023-11-13)[2023-11-17].<https://finance.sina.com.cn/jjxw/2023-11-17/doc-imzuxmnn5610309.shtml?cref=cj>
- [4] 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.
- [5] 陈世达,汤达祯,陶树,等.沁南-郑庄区块深部煤层气“临界深度”探讨[J].煤炭学报,2016,41(12):3069-3075.
CHEN Shida,TANG Dazhen,TAO Shu,et al. Discussion about“critical depth”of deep coalbed methane in Zhengzhuang area, Qinshui Basin [J]. Journal of China Coal Society,2016,41(12):3069-3075.
- [6] 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 midium-rank coalbed methane[J]. Acta Petrolei Sinica,2020,41(12):1555-1566.
- [7] 康永尚,皇甫玉慧,张兵,等.含煤盆地深层“超饱和”煤层气形成条件[J].石油学报,2019,40(12):1426-1438.
KANG Yongshang,HUANGFU Yuhui,ZHANG Bing,et al. Formation conditions for deep oversaturated coalbed methane in coal-bearing basins[J]. Acta Petrolei Sinica,2019,40(12):1426-1438.
- [8] 王丹,任文军,王春宇.中高煤阶煤层气开发技术[M].北京:石油工业出版社,2017.
WANG Dan,REN Wenjun,WANG Chunyu. Development technology of middle and high rank coalbed methane[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,2017.
- [9] 胡秋嘉,毛崇昊,石斌,等.沁水盆地南部高煤阶煤层气井“变速排采-低恒套压”管控方法[J].煤炭学报,2019,44(6):1795-1803.
HU Qiujia,MAO Chonghao,SHI Bin,et al. “Variable speed drainage-low casing pressure” control method of high rank CBM wells in South Qinshui Basin[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(6):1795-1803.
- [10] 国家煤矿安全监察局.煤层瓦斯风化带确定方法:MT/T 1174-2019[S].北京:中国标准出版社,2019.
National Mine Safety Administration. The determination method of gas weathered zone in coal mine: MT/T 1174-2019 [S]. Beijing: Standards Press of China,2019.
- [11] 国家质量技术监督局.烟煤的宏观煤岩类型分类:GB/T 18023-2000[S].北京:中国标准出版社,2000.
The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Classification of macrolithotype for bituminous coal:GB/T 18023-2000[S]. Beijing: Standards Press of China,2019.
- [12] 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.烟煤显微组分分类:GB/T 15588-2013[S].北京:中国标准出版社,2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Classification of macerals for bituminous coal: GB/T 15588-2013 [S]. Beijing: Standards Press of China,2019.
- [13] 中华人民共和国自然资源部.煤层气储量评估规范:DZ/T 0216-2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Regulation of coalbed methane reserves estimation: DZ/T 0216-2020 [S]. Beijing: Standards Press of China,2020.
- [14] HOCH O F. The dry coal anomaly-the horseshoe Canyon Formation of Alberta, Canada [C]//SPE

- Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2005.
- [15] 韩思杰, 桑树勋, 段飘飘, 等. 改进的深部煤层 CO₂ 地质封存潜力评价方法: 以沁水盆地郑庄区块 3# 煤层为例[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(4): 772-788.
- HAN Sijie, SANG Shuxun, DUAN Piaopiao, et al. Modified assessment method of CO₂: Geologic storage capacity in deep coal and its application in the Zhengzhuang Block, Qinshui Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(4): 772-788.
- [16] 杨新乐, 张永利. 热采煤层气藏过程煤层气运移规律的数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(1): 89-94.
- YANG Yongle, ZHANG Yongli. Numerical simulation on flow rules of coalbed methane by thermal stimulation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(1): 89-94.
- [17] 陈健翔, 杨睿月, 秦小舟, 等. 煤层气水平井扇形洞穴完井应力-渗透率演化机理[J]. 天然气工业, 2024, 44(3): 184-198.
- CHEN Jianxiang, WANG Ruiyue, QIN Xiaozhou, et al. Mechanism of stress-permeability evolution in fan-shaped cavity completion of coalbed methane horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(3): 184-198.
- [18] 秦勇, 傅雪海, 吴财芳, 等. 化石能源地质学导论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2017, 324.
- QIN Yong, FU Xuehai, WU Caifang, et al. Introduction to fossil energy geology[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2017, 324.
- [19] 傅雪海, 秦勇, 韦重韬. 煤层气地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007, 73.
- FU Xuehai, QIN Yong, WEI Chongtao. Coalbed methane geology[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2007, 73.
- [20] 徐凤银, 聂志宏, 孙伟, 等. 大宁-吉县区块深部煤层气高效开发理论技术体系[J/OL]. 煤炭学报, 1-17[2024-06-05]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1290>.
- XU Fengyin, NIE Zhihong, SUN Wei, et al. Theoretical and technological system for highly efficient development of deep coalbed methane in Daning-Jixian Block[J]. Journal of China Coal Society, 1-17[2024-06-05]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1290>.
- [21] 中国石化重庆南川深层煤层气勘探取得突破[EB/OL]. (2023-08-23)[2024-01-02]. http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2023-08/03/content_7072572.html.
- Sinopec Chongqing Nanchuan deep coalbed methane exploration has made a breakthrough[EB/OL]. (2023-08-23)[2024-01-02]. http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2023-08/03/content_7072572.html.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 邹才能, 丁云宏, 卢拥军, 等. “人工油气藏”理论、技术及实践[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 144-154.
- ZOU Caineng, DING Yunhong, LU Yongjun, et al. Concept, technology and practice of “man-made reservoirs” development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 144-154.
- [25] 李志明, 张金珠. 地应力与油气勘探开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- LI Zhiming, ZHANG Jinzhu. Ground stress and exploration and development of oil and gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [26] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深部开采的定量界定与分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 1-10.
- XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Quantitative definition and investigation of deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 1-10.
- [27] CHEN S D, TANG D Z, TAO S, et al. Characteristics of in-situ stress distribution and its significance on the coalbed methane (CBM) development in Fanzhuang-Zhengzhuang Block, Southern Qinshui Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 161: 108-120.
- [28] 姜波, 汪吉林, 屈争辉, 等. 大宁-吉县地区地应力特征及其对煤储层渗透性的影响[J]. 地学前缘, 2016, 23(3): 17-23.
- JIANG Bo, WANG Jilin, QU Zhenghui, et al. The

- stress characteristics of the Daning-Jixian Area and its influence on the permeability of the coal reservoir [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(3): 17-23.
- [29] MENG Z P, ZHANG J C, WANG R. In-situ stress, pore pressure and stress-dependent permeability in the Southern Qinshui Basin [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(1): 122-134.
- [30] 秦 勇, 宋全友, 傅雪海. 煤层气与常规油气共采可行性探讨-深部煤储层平衡水条件下的吸附效应 [J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(4): 492-498.
QIN Yong, SONG Quanyou, FU Xuehai. Discussion on reliability for co-mining the coalbed gas and normal petroleum and natural gas: Absorptive effect of deep coal reservoir under condition of balanced water [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(4): 492-498.
- [31] 傅雪海, 程 鸣. 煤储层中吸附气含量随埋深非线性变化的研究进展 [J]. *煤炭科技*, 2022, 43(4): 19-26.
FU Xuehai, CHENG Ming. Research progress on nonlinear variation of adsorbed gas content with buried depth in coal reservoir [J]. *Coal Science & Technology Magazine*, 2022, 43(4): 19-26.
- [32] 陈 峰. 阜康西区块深部煤储层物性特征模拟研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020: 40-42.
CHEN Feng. Simulation of physical properties of deep coal reservoirs in the Fukang West Block [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020: 40-42.
- [33] 傅雪海, 简 阔, 丁永明, 等. 低煤化储层三相态含气量模拟研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 117-124.
FU Xuehai, JIAN Kuo, DING Yongming, et al. Gas content simulation of three-phase state in low rank coal reservoir [M]. Beijing: Science Press, 2015: 117-124.
- [34] 张 军, 秦 勇, 赵本肖, 等. 河北省煤层气资源及其开发潜力 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009: 42-47.
ZHANG Jun, QIN Yong, ZHAO Benxiao, et al. Coalbed methane resources and their development potential in Hebei Province [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2009: 42-47.
- [35] 傅雪海, 许行行, 王 强, 等. 煤层气异常成分的界定、分布及其成因研究进展 [J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 344-353.
FU Xuehai, XU Hanghang, WANG Qiang, et al. Review of research on definition, distribution and causes of abnormal coalbed methane composition [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 344-353.
- [36] 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.
- [37] 国家安全生产监督管理总局. 镜质体反射率的煤化程度分级: MT/T 1158-2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
State Administration of Work Safety. Classification of coalification degree by vitrinite reflectance: MT/T 1158-2011 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [38] 傅雪海, 焦宗福, 秦 勇, 等. 低煤级煤平衡水条件下吸附实验 [J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2005, 24(2): 161-164.
FU Xuehai, JIAO Zongfu, QIN Yong, et al. Adsorption experiments of low coal ranks under equilibrium moistures [J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2005, 24(2): 161-164.
- [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. 中国煤炭分类: GB/T 5751-2009 [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. Chinese classification of coals: GB/T 5751-2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [40] 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.
- [41] 吉利明, 邱军利, 宋之光, 等. 黏土岩孔隙内表面积对甲烷吸附能力的影响 [J]. *地球化学*, 2014, 43(3): 238-244.
JI Liming, QIU Junli, SONG Zhiguang, et al. Impact of internal surface area of pores in clay rocks on their adsorption capacity of methane [J]. *Geochimica*, 2014, 43(3): 238-244.