

文章编号: 1001-1986(2010)03-0015-05

物理模拟技术在沁水煤层气藏水动力研究中的应用

王 勃¹, 李贵中¹, 马京长¹, 刘 俊², 孙粉锦¹, 王红岩¹, 刘洪林¹

(1. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北 廊坊 065007;

2. 中国石油集团测井有限公司华北事业部, 河北 任丘 062550)

摘要: 通过煤层气成藏模拟实验, 研究了水动力条件对煤层气成藏的控制作用。实验结果表明: 在强烈的水动力交替作用下, 煤层气藏中的甲烷碳同位素由-29.50‰变为-36.60‰, 且变轻过程中具有阶段性特征; 甲烷体积分数由 96.35%减小为 12.42%; 二氧化碳由 0.75%变为 0.68%, 随后增大到 1.13%; 氮气体积分数由 2.9%变为 86.45%。这些变化一方面说明煤层气成藏过程的复杂性, 另一方面表明强烈的水动力作用对煤层气成藏会造成不利影响。通过对以高煤阶为典型特点的沁水盆地南部水动力条件的分析, 认为径流强度与煤层含气量之间呈负相关性, 弱径流区有可能成为高煤阶煤层气富集的高产区。

关键词: 煤层气藏; 水动力条件; 物理模拟; 沁水盆地

中图分类号: TK7 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.03.004

Application of physical simulation in the study of hydrodynamic conditions of Qinshui coalbed methane reservoir

WANG Bo¹, LI Guizhong¹, MA Jingzhang¹, LIU Jun², SUN Fenjin¹, WANG Hongyan¹, LIU Honglin¹

(1. Langfang Branch, Petro China Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang 065007, China; 2. Huabei Cause Department of Well Logging Limited Company, PetroChina, Renqiu 062550, China)

Abstract: Using the CBM reservoir simulation facilities, the action of hydrodynamic force controlling coalbed methane(CBM) reservoir formation was studied in this paper. The results of experiment showed that under the strong hydrodynamic alternation, δC_1 of coalbed methane reservoir changes from -29.50‰ to -36.60‰, and the lightening process was characterized by phases; CH_4 volume content was reduced from 96.35% to 12.42%; CO_2 content decreased from 0.75% to 0.68%, then rised to 1.13%; N_2 content changed from 2.9% to 86.45%. On one hand, these changes showed the complexity of CBM reservoir formation, on the other hand, they indicated that the strong hydrodynamic action had unfavorable impact on CBM reservoir formation. Meanwhile, the hydrodynamic condition of Qinshui basin with high coal rank was analyzed, and it was found that gas content and hydrodynamic intensity had negative correlation, low hydrodynamic flow condition might result in the high productive and enrichment area of high rank CBM.

Key words: coalbed methane reservoir; hydrodynamic condition; physical simulation; Qinshui basin

高煤阶煤层气是指赋存于无烟煤($R_{max} > 2.5\%$)及其围岩中的以甲烷为主要组分的天然气。据新一轮全国煤层气资源评价结果, 我国高煤阶煤煤层气占全国煤层气总资源量的 30%^[1], 是我国煤层气开发的一个相当重要的前沿领域。随着高煤阶煤层气大规模产业化开发序幕的拉开, 国内外学者在水动力方面进行了卓有成效的研究, 在天然气成藏的水文地质条件研究中, 刘方槐指导研究生探讨了川南泸州古隆起天然气运聚和保存问题^[2]。张义纲等利

用高温高压模拟实验装置进行天然气水以及油气水混相涌流实验(40 MPa, 300℃)^[3]。煤层气成藏模拟技术正是借鉴天然气成藏模拟实验技术, 并结合煤层气成藏地质特征来开展的。前人在水动力对煤层气成藏的影响方面取得了一些认识, 认为水动力封闭及地层水超压都有利于煤层气的吸附及富集, 流动的地下水条件直接反映出储层压力状态, 对高煤阶煤储层的含气性具有一定的影响^[4-5]。可以说, 地层水参与了煤层气形成的全过程, 其动力学特征与

收稿日期: 2009-07-16

基金项目: 国家科技重大专项大型油气田及煤层气开发项目(2008ZX05033-001); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB219601)

作者简介: 王 勃(1979—), 男, 陕西蓝田人, 工程师, 从事煤层气地质及勘探开发基础理论研究。

煤层气富集成藏之间存着密切的关系。因此,利用煤层气成藏模拟装置开展高煤阶煤层气成藏过程的水动力条件模拟,从物理模拟实验的角度验证水动力对高煤阶煤层气藏的破坏作用,分析水动力条件对高煤阶煤层气成藏的控制作用,进而研究水动力作用引起高煤阶煤层气成藏过程的复杂性,对煤层气勘探开发具有一定的指导意义。

1 物理模拟实验

1.1 样品采集

沁水盆地是迄今为止世界上发现的第 1 个高煤阶煤层气田,煤种主要为无烟煤(R_{\max} 为 2.6%~3.8%)。实验样品采自沁水盆地郑庄区块晋试 7 井区晋试 7 井的 15 号煤层,在钻探过程中,利用绳索取心工具提取装罐密封的煤心并在保持储集层温度 38℃ 条件下进行自然解吸所得的煤层气气样。煤心样品为无烟煤($R_{\max}=3.45\%$),含气量为 15.03 m³/t(表 1);气体样品

与煤心样品相对应,测得甲烷组分为 95.04%(表 2)。

表 1 煤心样品含气性参数表
Table 1 Gas content of coal samples

样品号	埋深/m	$R_{\max}/\%$	含气量/m ³ ·t ⁻¹
Jsh7-15-2	829.55~29.90	3.45	15.03

表 2 气体样品组分含量表
Table 2 Gas element content of gas samples

样品号	CH ₄ /%	CO ₂ /%	N ₂ /%
Jsh7-15-2-①	95.04	2.60	2.36

1.2 实验装置及其原理

实验装置采用中国石油天然气勘探开发研究院廊坊分院研制的煤层气成藏模拟装置系统(图 1)。该装置是在煤层气吸/脱附和常规天然气模拟技术基础上形成的一套具有自主知识产权的物理模拟实验专用装置。

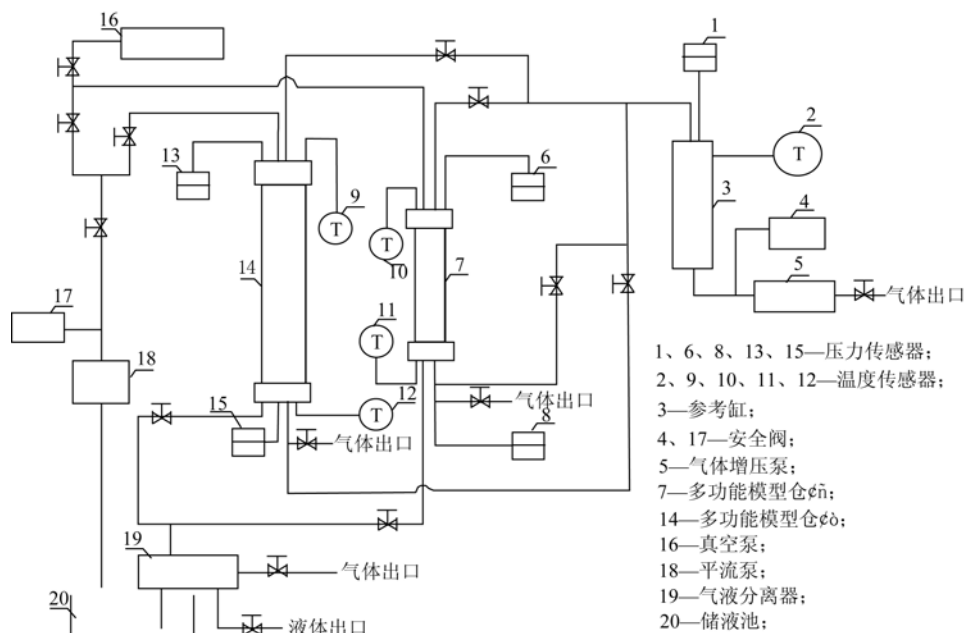


图 1 煤层气成藏模拟装置原理流程图

Fig. 1 Principle flow chart of coalbed methane reservoir simulation facilities

本模拟实验利用速率为 0.5 m/s, 流量为 0.157 2 m³/min 的水动力对煤心进行冲洗,冲洗方式通过水在煤心周围的运动和进入煤心孔隙-裂隙中进行渗流来实现。

本实验通过模拟地层水的水动力特征来分析煤层气气体组分和甲烷碳同位素的变化规律,探讨水力运移作用对煤层气藏吸附甲烷能力的影响。在考虑样品埋深及储集层温度的条件下,利用水力冲洗模拟地下水的水动力运移过程,分别在第 4 天、第 8 天、第 12 天和第 16 天采集气样进行甲烷碳同位

素测定,并分别在第 4 天、第 8 天和第 12 天对气体组分进行取样测定。

1.3 实验现象及其理论分析

1.3.1 甲烷碳同位素变轻,且表现为阶段性的特点

模拟实验采集的气体样品中,随着冲洗实验的进行,气样的甲烷碳同位素初始值为-29.50‰,在水力冲洗作用下,气样 4 的甲烷同位素已变为-36.60‰,说明甲烷同位素变轻(图 2),代表气藏遭受破坏。同时气藏破坏过程表现为 3 个阶段:a. 缓慢破坏,游离气体溶解—扩散—运移;b. 快速破坏,

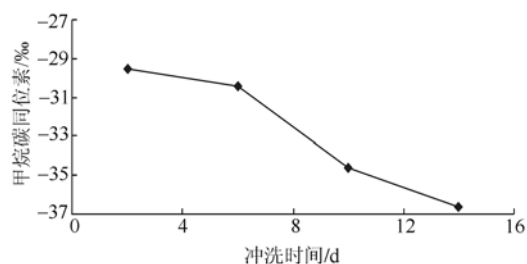


图2 冲洗实验中甲烷碳同位素变化

Fig. 2 Carbon isotope change in washing experiment

吸附气体发生溶解, 气体浓度差增大, 扩散显著, 气藏破坏程度大;c. 缓慢破坏, 随着浓度差的减小, 破坏程度降低, 气藏最终维持吸附态、溶解态和游离态三者之间的动态平衡。

1.3.2 甲烷含量减小

在水力冲洗作用下, 气样中的甲烷体积分数有所降低(图3), 由气样1中的初始值-96.35%变为气样3的-12.42%, 且表现为急剧减小的特点。前人研究中认为, 甲烷体积分数低于80%为高煤阶煤层气藏风氧化带的下限, 因此气样3中所示的甲烷体积分数表明气藏遭受严重破坏。高煤阶煤层气主要以吸附状态为主, 在水力冲洗作用下, 水对气体的主要作用是溶解^[6], 而溶解气会被水力运移带走, 因此“溶解—运移—再溶解—再运移”的过程持续发生, 直至煤层气藏遭到破坏。

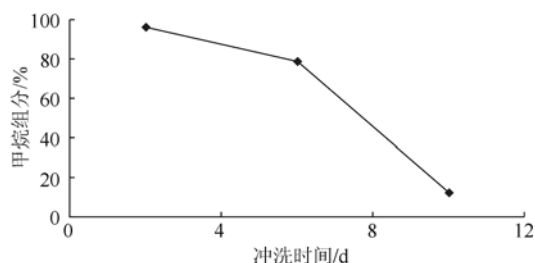


图3 冲洗实验中甲烷含量变化

Fig. 3 Methane ingredient content change in washing experiment

1.3.3 CO₂含量先减小后增大, N₂含量增大

研究发现, 随着冲洗实验的进行, N₂含量增加, 即从气样1的2.9%变为气样3的86.45%(图4), CO₂体积分数由气样1的0.75%变为气样2的0.68%, 随后又增大到气样3的1.13%(图5), 表现为先减小后增大的趋势。

煤层气中的 N₂ 含量与煤层气的保存条件存在着密切联系^[7]。因此, 可以根据 N₂ 含量的高低判别煤层气保存条件的好坏: 当 N₂ 体积分数>10%时, 认为气藏遭到完全破坏; 当 N₂ 体积分数<5%时, 认为保存条件较好。结合实验数据, 表明气藏已遭受严重破坏。因此, 注入 CO₂ 可以明显提高煤层气采收率^[8]。

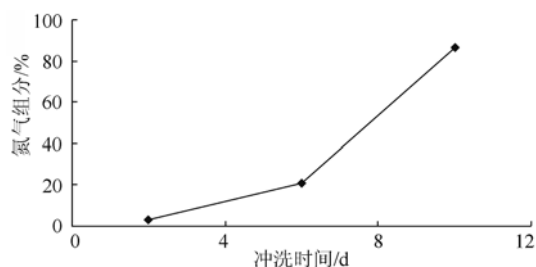


图4 冲洗实验中氮气含量变化

Fig. 4 Nitrogen content change in washing experiment

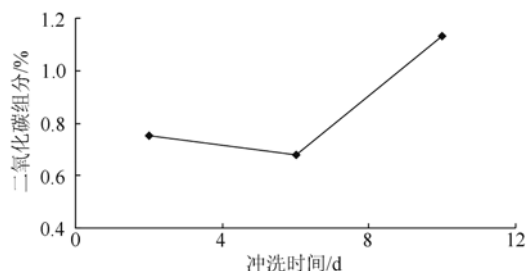


图5 冲洗实验中二氧化碳含量变化

Fig. 5 Carbon dioxide content change in washing experiment

1.3.4 理论分析

地质历史时期中, 在水动力冲刷作用下煤层气藏中气体组分的变化主要有以下原因:

a. 由于甲烷在水中部分被氧化和在水力充足条件下溶解于水并随水力运移发生扩散散失, 甲烷含量大幅度减少, 同时吸附气不断解吸—溶解—运移, 而 $^{13}\text{CH}_4$ 被优先溶解并发生运移, $^{12}\text{CH}_4$ 保留在原地, 使得 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值变轻^[9], 通过累计效应, 导致煤层气 $^{12}\text{CH}_4$ 大量富集, 煤层甲烷碳同位素逐渐变轻^[10]。

b. 在相同分压条件下, 溶解度大小的排序为 $\text{CO}_2 > \text{CH}_4 > \text{N}_2$ ^[11]。CO₂ 优先解吸, 且随水力运移含量开始减小, N₂ 几乎不溶于水, 但由于部分甲烷的氧化作用, 使得 N₂ 和 CO₂ 含量增大。

c. 在氧分子和溶解于气藏接触的水中硫酸盐作用下, 表生作用带内的甲烷部分受到氧化, 结果产生了大量的氮气、二氧化碳等^[12]; 同时, 由于氮气分子直径比甲烷的小, 随着水力运移距离的增大, 氮气含量的增加幅度很可能比甲烷增加的幅度大, 从而影响甲烷的吸附性能^[13]。

2 结果与讨论

2.1 沁水盆地南缘的现代水动力条件特征

在构造上, 本区地下水动力场分布特征总体受沁水复向斜控制, 地形地貌的影响相当明显。从向斜轴部到盆地边缘, 依次出露古近系、三叠系、二叠系、中石炭统和奥陶统, 西北部紧邻霍山隆起区, 大气降水补给是地下水的主要来源, 地下水径流方向与地表水流向总体一致。但是, 具体到不同地段来说, 水动力场条件却有较大变化, 不仅在区域上

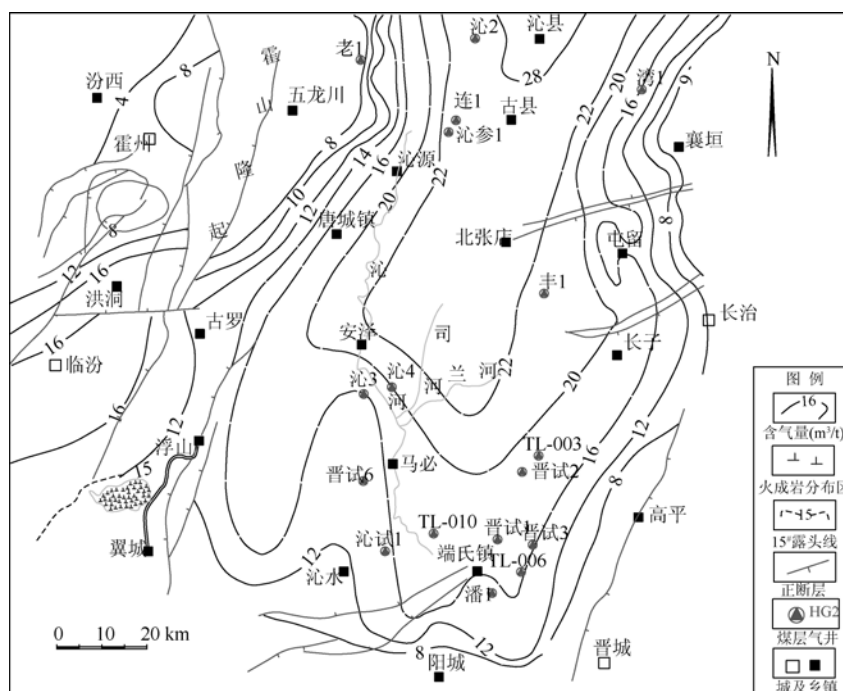


图7 沁水盆地南部上石炭统太原组主采煤层含气量图

Fig. 7 Coal seam gas content of the main mined seam in Upper Carboniferous Taiyuan Formation

综上所述可以看出,水径流强度与煤储层含气量具有一定的负相关性。对于高煤阶煤层气藏来说,弱水力交替或滞流水是气藏保存、富集及成藏最理想的水文地质条件。

沁水盆地南部目前已有的煤层气勘探结果也很好验证了这一结果。以2007年新增的煤层气探明储量区块郑庄区块晋试7井区为例,本区存在奥陶系、石炭-二叠系和第四系3套主要含水层系。含水层主要为碳酸盐岩、砂岩和松散沉积层,隔水层主要为泥质岩类,某些地段特定层位的致密碳酸盐岩也能起到一定阻水作用。其中,中奥陶统为区内主要含水层,石炭-二叠系含水层的含水性通常较弱,煤层含气量高。煤田钻孔资料和10口煤层气井资料表明,该区3号煤原煤含气量最高 $24 \text{ m}^3/\text{t}$,平均 $16.30 \text{ m}^3/\text{t}$,说明了水动力与煤储层含气量之间的负相关关系。

3 结论

a. 在强烈持续的水动力作用下,高煤阶煤层气藏的气体组分发生变化:甲烷碳同位素变轻,甲烷含量降低,氮气和二氧化碳含量增大。这些组分变化不利于煤层气成藏。

b. 持续的水动力对煤层气藏的破坏表现为“溶解-运移-再溶解-再运移”的过程,也就是通过破坏储层的吸附性(含气性)来破坏煤层气藏,直至达到新的吸附-溶解-游离(极少量)的动态平衡。

c. 沁水盆地南部从盆缘到盆地深部,水动力条件不断减弱,煤层含气量则呈现不断增大的趋势,说明地下水径流强度与煤储层含气量具有负相关

性。因此,对于高煤阶煤层气藏来说,应寻找具有弱的水力交替或滞流水的水文地质特征的地区,有可能成为煤层气富集的高产目标区。

参考文献

- [1] 王红岩,刘洪林,赵庆波,等. 中国煤层气富集成藏规律[M]. 北京:石油工业出版社,2004:88-90.
- [2] 刘方槐,颜婉荪. 油气田水文地质学原理[M]. 北京:石油工业出版社,1991:1-5.
- [3] 张义纲,陈彦华,陆嘉炎,等. 油气运移及其聚集成藏模型[M]. 南京:河海大学出版社,1997:1-8.
- [4] KAISER W R. Geologic and hydrologic characterization of coalbed-methane reservoirs in the San Juan basin[J]. SPE Formation Evaluation, 1994, 9(3): 175-184.
- [5] 秦胜飞,宋岩,唐修义,等. 水动力条件对煤层气含量的影响-煤层气滞流水控气论[J]. 天然气地球科学,2005, 16(2): 149-152.
- [6] 秦胜飞,宋岩,唐修义,等. 流动的地下水对煤层含气性的破坏机理[J]. 科学通报,2005, 50(增刊1): 99-104.
- [7] 胡国艺,关辉,蒋等文,等. 山西沁水煤层气田煤层气成藏条件分析[J]. 中国地质,2004, 31(2): 213-217.
- [8] 唐书恒,马彩霞,叶建平,等. 注二氧化碳提高煤层甲烷采收率的实验模拟[J]. 中国矿业大学学报,2006, 35(5): 607-611.
- [9] 苏现波,陈润,林晓英,等. 煤层气运移分馏机理初探[J]. 河南理工大学学报,2006, 2(4): 295-301.
- [10] 秦勇,唐修义,叶建平,等. 中国煤层甲烷稳定碳同位素分布与成因探讨[J]. 中国矿业大学学报,2000, 29(2): 113-119.
- [11] 傅晓泰,卢双航,王振平,等. 天然气组分的溶解特征及其意义[J]. 地球化学,1997, 16(3): 60-66.
- [12] 李剑,胡国艺,谢增业,等. 中国大中型气田天然气成藏物理化学模拟研究[M]. 北京:石油工业出版社,2001:94-96.
- [13] 唐书恒,韩德馨. 用多元气体等温吸附成果评价煤层气开发潜力[J]. 中国矿业大学学报,2002, 31(6): 630-633.