

注气提高煤层甲烷采收率机理及实验研究

唐书恒, 杨 起, 汤达祯, 邵先杰, 王 江

(中国地质大学 能源系, 北京 100083)

摘要: 该文讨论了采用注气方法提高煤层甲烷采收率的机理, 认为注入的气体在增加储层能量的同时, 还可以与煤层甲烷产生竞争吸附或置换驱替效应, 从而提高煤层甲烷的采收率。通过煤对纯甲烷气体和甲烷-氮气、甲烷-二氧化碳二元气体的等温吸附和解吸实验, 分别获得了它们的 Langmuir 方程, 并对它们的理论最大采收率进行了对比分析。结果表明, 在含气量相同的情况下, 煤层中二元气体的理论最大采收率比纯煤层甲烷的理论最大采收率要高得多。

关键词: 煤层甲烷; 开采技术; 注气方法; 机理研究; 吸附解吸实验

中图分类号: TE327

文献标识码: A

在目前的煤层气开发实践中, 一般都是采用压力衰竭技术, 即通过排水降压来开采煤层气。但是由于降压的幅度受到各种因素的限制, 造成煤层甲烷的采收率低, 煤层气井的生产周期很长, 因而煤层气开发的经济效益差, 严重阻碍了我国煤层气工业的发展^[1,2]。此外, 传统的煤层甲烷生产方法需要从煤层中排出大量水, 进行水处理需要大量费用, 还可能造成水资源的浪费; 低压下生产的煤层甲烷还需要花费高额的加压费用将其压力提高到管线的压力。所以, 目前国内外已开始试验采用注气技术来提高煤层甲烷的采收率。

1 国内外研究现状

Puri 等^[3]认为, 使用储层压力衰竭法开采煤层甲烷, 尽管简便实用, 但效率不高。因为降低储层压力的方法是从井筒中排出储层中的水, 这在实际操作和经济方面都对降压的程度有所限制。一般这种方法只能采出原地煤层气资源的 50%, 甚至更少。他用试验证实了注入氮气可以提高煤层甲烷的回采率。

Arri 等^[4]通过对二元气体在煤中的吸附试验研究, 表明每一种气体成分都不会被单独吸附, 而是互相竞争吸附空间, 两种气体之间存在相互干扰现象。他们还模拟了注入氮气提高甲烷气产率的操作过程。Hall 等人^[5]通过进行混合气体的吸附实验研

究, 也认为注气技术可以有效提高煤层甲烷的采收率。

Clarkson 和 Bustin^[6]提出, 在煤层气生产期间, 可以通过向煤层中注入非甲烷气体来降低游离气体中甲烷的分压或与其竞争吸附空间, 从而促使甲烷从煤层中解吸, 增加甲烷的气产率。二氧化碳优先于甲烷被吸附是煤层的一个重要特性。因此, 注入二氧化碳可以成功地进行提高甲烷采收率的计划。

Yukuo Katayama^[7]认为, 注入二氧化碳增加煤层甲烷采收率, 是利用了不同气体在煤中的吸附能存在差异的特性。二氧化碳在煤中的吸附能比甲烷的吸附能大。他还进行了二氧化碳置换甲烷的实验研究和氮气置换甲烷的实验研究。他认为, 二氧化碳置换甲烷的机理是由于二者吸附能的差异, 而氮气置换甲烷是由于二者之间的分压变化形成了新的吸附平衡。

Stevens 等^[8]专门研究了注入二氧化碳提高煤层甲烷采收率的工艺。他认为, 传统的煤层甲烷生产方法需要从煤层中排出大量水, 增加了水处理的费用, 而且效率很低, 煤层甲烷采收率也很低。低压下生产的煤层甲烷还需要花费高额的加压费用将其压力提高到管线的压力。他们还讨论了在圣胡安盆地北部进行的注入二氧化碳增强甲烷采收率的实验方案和经济可行性, 认为该工艺可以大幅度提高美国煤层甲烷的生产潜力。另外, 还可以利用该工艺开发深部低渗透性煤层中的煤层气, 因为注入二氧

化碳有助于维持孔隙压力,可以较好地保护深部煤层中的割理和其它孔隙通道不致于闭合。

吴世跃等人^[9]从理论上研究了注气开采煤层气的增产机制,计算了注气开采时的采收量和采收率,认为注气增加的采收量与煤层和注入气体的吸附特性及停采时注入气体和煤层气的分压有关。他们还对二氧化碳和氮气在静态下的注气效果进行了实验研究,得到了和理论分析一致的实验结果。

2 注气开采煤层甲烷机理

注气开采煤层气就是向煤层注入氮气、二氧化碳、烟道气等气体,其实质是向煤层注入能量,改变压力传导特性和增大或保持扩散速率不变,从而达到提高单产量和采收率的目的。这一过程相当于增能驱动过程,与负压抽气产生的效果相似,但比负压抽气的效果大得多。因为负压抽气时其抽放负压仅变化在一个大气压左右,与储气层内十几个乃至几十个大气压相比,其增能效果非常有限;而注气压力可达到与储气层内相同数量级的压力,甚至更高。另一方面,注气造成的渗流速度增大又引起裂隙系统中煤层气分压下降速度加快,由此引起更多的吸附煤层气参与解吸;解吸扩散速率的增大,反过来又促使渗流速度加快。

其次,由于煤是一种具有较高剩余表面自由能的多孔介质,并且煤的剩余表面自由能总量(吸附空位)是一定的,所以煤层与混合气体达到吸附平衡后,每一组分的吸附量都小于其在相同分压下单独吸附时的吸附量。注气后,产生竞争吸附和置换驱替,必然使一部分吸附的甲烷发生解吸扩散,从而引起扩散速率、渗流速率和采收率提高。

而且,当注气压力较大时,还可能在煤层内形成新的裂隙,使渗透率即压力传导系数增大,从而引起渗流速度增大。

根据吸附平衡理论,单组分 Langmuir 等温吸附方程在一定范围内可推广应用于多组分吸附平衡的计算,即:

$$V_i = \frac{a_i b_i p_i}{1 + b_1 p_1 + b_2 p_2 + \dots + b_n p_n} \quad (1)$$

式中, V_i 为各组分在相应平衡分压下在煤层中的吸附量, m^3/t ; a_i 为各组分在煤层中单独吸附时在参考压力 P_c 下的极限吸附量, m^3/t ; P_i 为各组分在混合气体吸附平衡时的分压力, Pa; b_i 为各组分在煤

层中单独吸附时的吸附平衡常数, Pa^{-1} ; n 为混合气体中的组分个数。

由式(1)可知,某一组分气体单独吸附平衡时的压力与其在混合气体中的平衡分压相等时,前者吸附量大于后者。因此,当煤层中吸附煤层气与游离煤层气处于平衡状态,或吸附煤层气解吸扩散处于相对稳定时,向煤层中注入新的气体,注入气体要向孔隙中吸附扩散,打破了原来的平衡和稳定,所以吸附的煤层甲烷含量要降低,解吸扩散速率要增大,渗流速度和采收率要提高。

在煤层气开采的过程中,随着时间延长,流场中煤层气的压力梯度和渗流速度逐渐降低。当降到非常小时,流场内任意点的解吸与吸附接近静态平衡状态,煤层气开采便失去意义。此时,可由残余孔隙压力 P_1 及静态吸附平衡方程计算出煤层气的采收量和采收率^[10],即:

$$m' = \frac{\varphi_0}{RT} [p_0 - p_1 \exp \kappa (p_1 - p_0)] + \frac{a_1 b_1 p_c}{RT} \left(\frac{p_0}{1 + b_1 p_0} - \frac{p_1}{1 + b_1 p_1} \right) \quad (2)$$

$$\eta' = \frac{1}{p_0} [p_0 - p_1 \exp \kappa (p_1 - p_0)] + \frac{1}{p_0} \left(\frac{p_0}{1 + b_1 p_0} - \frac{p_1}{1 + b_1 p_1} \right) \quad (3)$$

式中: m' 为未注气开采时煤层气的采收量, m^3/t ; η' 为采收率, %。

右边第 1、2 项分别是游离和吸附煤层气的采收量和采收率。

根据式(1)和式(2),注气开采的采收量和采收率可由下式计算:

$$m'' = \frac{\varphi_0}{RT} [p_0 - p_1 \exp \kappa (p - p_0)] + \frac{a_1 b_1 p_c}{RT} \left(\frac{p_0}{1 + b_1 p_0} - \frac{p_1}{1 + b_1 p_1 + b_2 p_2} \right) \quad (4)$$

$$\eta'' = \frac{1}{p_0} [p_0 - p_1 \exp \kappa (p - p_0)] + \frac{1}{p_0} \left(\frac{p_0}{1 + b_1 p_0} - \frac{p_1}{1 + b_1 p_1 + b_2 p_2} \right) \quad (5)$$

$$p = p_1 + p_2 \quad (6)$$

式中: m'' 为注气开采时煤层气的采收量, m^3/t ; η'' 为采收率, %; 下标 1 的参数代表煤层甲烷,下标 2 的参数代表注入气体。

设注气开采停采时煤层气的残余孔隙分压与未注气开采时的残余孔隙压力相同, 则由式(1)–(5)可知, 注气开采时的采收量和采收率高于未注气开采时的采收量和采收率。由于煤层气含量的 90% 以上处于吸附状态, 所以利用式(2)–(5)计算时可忽略右边第 1 项, 于是采收量的增加量及采收率提高的百分比分别为:

$$\Delta m = \frac{pca_1 b_1 p_1 b_2 p_2}{RT(1+b_1 p_1)(1+b_1 p_1+b_2 p_2)} \quad (7)$$

$$\Delta \eta = \frac{b_2 p_1 p_2}{p_0(1+b_1 p_1)(1+b_1 p_1+b_2 p_2)} \quad (8)$$

上式表明, 注气增加的采收量与煤层和注入气体的吸附特性、停采时注入气体和煤层气的分压有关, 与初始压力无关; 而采收率提高的百分比与这些因素都有关; 注入气体分压力和吸附常数越大, 增加的采收量越多, 采收率也越高。因此, 对吸附性能差的气体, 可以通过提高注入压力, 达到提高采收率的目的。

3 实验研究

作者通过对氮气、甲烷和二氧化碳及其二元混合气体的吸附解吸特性进行详细的实验研究^[11]发现, 当煤层气中含有一定比例的非甲烷组分(氮气、二氧化碳)时, 可以明显提高低压下煤层气的解吸速率^[12]。这就意味着, 可以通过注入二氧化碳或氮气的方法, 增加煤层气中非甲烷组分的比例, 从而达到提高煤层甲烷解吸速率的目的, 增加其采收率。

吸附—解吸实验在中国矿业大学分析测试中心进行, 所用仪器是美国 Terra Tek 公司生产的 IS-100 型气体等温吸附解吸仪。

实验所用煤样采自晋城矿区施工的一口煤层气井的 15 号煤层, 煤级为无烟煤。除了对其进行纯甲烷的等温吸附和解吸实验之外, 还进行了 3 种二元混合气体的等温吸附和解吸实验, 这 3 种二元气体分别为 50% CH₄+50% N₂、80% CH₄+20% N₂ 和 80% CH₄+20% CO₂。通过实验, 获得了煤样对于 4 种气体的 Langmuir 曲线, 见表 1 和图 1。

表 1 煤样的等温吸附和解吸实验结果

Table 1 Results of isothermal adsorption and desorption experiments for coal samples

气体组成	等温吸附曲线		等温解吸曲线	
	V_L/m^3t^{-1}	P_L/MPa	V_L/m^3t^{-1}	P_L/MPa
100% CH ₄	36.93	1.34	37.02	1.32
50% CH ₄ +50% N ₂	26.38	2.06	28.37	1.46
80% CH ₄ +20% N ₂	30.77	1.53	28.07	1.87
80% CH ₄ +20% CO ₂	30.77	0.97	28.87	1.02

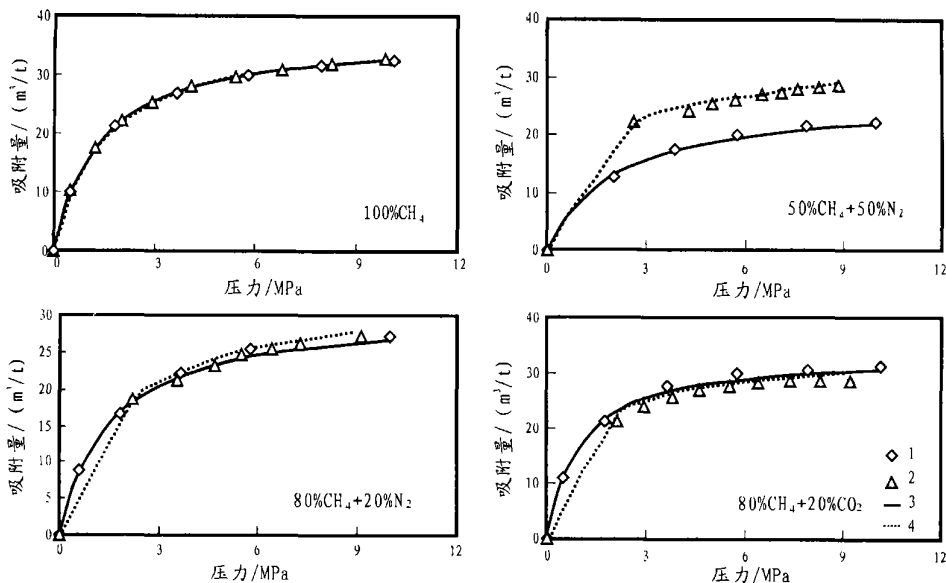


图 1 煤样对 4 种气体的等温吸附和解吸曲线比较

1. 吸附实验数据; 2. 解吸实验数据; 3. Langmuir 吸附曲线; 4. Langmuir 解吸曲线

Fig.1 Comparison of isothermal adsorption and desorption curves for coal samples to four kinds of gases

4 实验结果讨论

由表 1 和图 1 可以看出, 纯 CH₄、80% CH₄+20% N₂ 和 80% CH₄+20% CO₂ 3 种气体的等温吸附和解吸曲线基本重合, 而 50% CH₄+50% N₂ 的吸附和解吸曲线相差较大。虽然所有这些气体的吸附和解吸过程都遵循 Langmuir 方程, 但是 50% CH₄+50% N₂ 的二元气体分别沿着不同的轨迹在煤中进行吸附和解吸。所以, 应当根据等温解吸曲线计算其采收率。

煤的等温吸附和解吸方程可用于预测煤储层在降压解吸过程中煤层气的采收率。理论最大采收率的计算公式^[13]为:

$$\eta = 1 - V_L P_{ad} / V_{me} (P_{ad} + P_L) \quad (9)$$

式中: η 为理论最大采收率; V_L 为 Langmuir 体积, m³/t; P_L 为 Langmuir 压力, MPa; P_{ad} 为废弃压力, 即煤层气井生产中所能降到的最低储层压力, MPa; V_{me} 为煤层实际含气量, m³/t。

为了便于对比 4 种气体的理论最大采收率, 此处假定煤层的含气量均为 20m³/t, 而其开采时的废弃压力均为 0.7MPa。然后根据不同气体等温解吸曲线的 Langmuir 常数和公式 (9), 可以计算出在煤层含气量为 20m³/t 时 4 种气体在降压解吸过程中的理论最大采收率 (表 2)。

由表 2 可以看出, 在含气量相同的情况下, 二元气体的理论最大采收率比纯甲烷的理论最大采收率要高得多。

5 结论

a) 采用注气方法开采煤层甲烷, 在增加储层能

表 2 4 种气体在降压解吸时的理论最大采收率

Table 2 Maximum theoretical recovery ratio for four kinds of gases during pressure decreasing desorption

气体组成	$V_L / m^3 t^{-1}$	P_L / MPa	理论最大采收率 / %
100% CH ₄	37.02	1.32	35.86
50% CH ₄ +50% N ₂	28.37	1.46	54.03
80% CH ₄ +20% N ₂	28.07	1.87	61.77
80% CH ₄ +20% CO ₂	28.87	1.02	41.25

量的同时, 注入的气体还会与煤层甲烷产生竞争吸附或置换驱替效应, 从而提高煤层甲烷的采收率。

b) 煤对纯甲烷气体的等温吸附和解吸曲线基本重合, 但是对二元气体的等温吸附曲线和等温解吸曲线并不一定相同, 有时甚至差别很大。

c) 在含气量相同的情况下, 煤层中吸附的二元气体的理论最大采收率比煤层吸附的纯甲烷的理论最大采收率要高得多。由此可以证明, 注气技术是提高煤层甲烷采收率的有效方法。

参考文献:

- [1] 刘泽英, 穆青. 我国煤层气勘探开发的科学技术问题[J]. 石油实验地质, 1998, 20(1).
- [2] 池卫国, 吴松钦. 对我国煤层气勘探前景的再认识[J]. 石油实验地质, 2000, 22(2).
- [3] Puri R, Yee D. Enhanced coalbed methane recovery[A]. Proceedings of the Society of Petroleum Engineers[C], New Orleans, LA; 1990, SPE 20732, September 23-26.
- [4] Ari L E, Yee D, Morgan W D, et al. Modeling coalbed methane production with binary gas sorption[A]. SPE Rocky Mountain Regional Meeting[C]. Casper, Wyoming; SPE Paper 24363, 1992.
- [5] Hall F E, Zhou Chunhe, et al. Adsorption of pure methane, nitrogen, and carbon dioxide and their binary mixtures on wet Fruitland coal[A]. The 1994 Eastern Regional Conferences and Exhibition Held in Charleston[C]. W.V., U.S.A.; SPE 29194, 1994.
- [6] Clarkson C R, Bustin R M. Binary gas adsorption/desorption isotherms: effect of moisture and coal composition upon carbon dioxide selectivity over methane[J]. International Journal of Coal Geology, 2000, 42(4): 241-272.
- [7] Yukuo Katayama. Study of coalbed methane in Japan[A]. Proceedings of United Nations International Conference on Coalbed Methane Development and Utilization[C]. Beijing; Coal Industry Press, 1995. 238-243.
- [8] Stevens Scott H, Schoeling Lanny, Pekot Larry. CO₂ injection for enhanced coalbed methane recovery: project screening and design[A]. Proceedings of the 1993 International Coalbed Methane Symposium[C]. 1999.
- [9] 吴世跃, 郭勇义. 注气开采煤层气增产机制的研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(2): 199-203.
- [10] 吴世跃, 郭勇义. 煤层气运移特征的研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(1): 65-69.
- [11] 周胜国, 郭淑敏. 煤储层吸附/解吸等温曲线测试技术[J]. 石油实验地质, 1999, 21(1).
- [12] 唐书恒, 韩德馨. 煤对多元气体的吸附与解吸[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(1): 58-60.
- [13] 叶建平, 秦勇, 林大扬. 中国煤层气资源[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998. 101-112.

STUDY ON THE EXPERIMENT AND MECHANISM OF RAISING THE RECOVERY RATIO OF COALBED METHANE BY GAS INJECTION

TANG Shu-heng, YANG Qi, TANG Da-zhen, SHAO Xian-jie, WANG Jiang

(*Department of Energy Resources, China University of Geology, Beijing 100083, China*)

Abstract: In this paper, the mechanism of raising the recovery ratio of coalbed methane by gas injection was discussed. It was considered that injected gases not only enhanced reservoir energy, but also completed with coalbed methane for adsorption or replaced and expelled coalbed methane. As a result, the recovery ratio of coalbed methane was raised. By the isothermal adsorption and desorption experiments of coal samples to pure CH₄ gas as well as CH₄-N₂ and CH₄-CO₂ two binary gases, their Langmuir equations were obtained respectively, and their maximum theoretical recovery ratio was compared and analysed. The results revealed that the maximum theoretical recovery ratio of binary gases in coal beds was much higher than that of pure coalbed methane under the condition of the same gas content.

Key words: coalbed methane; exploitation technology; injection method; mechanism research; adsorption and desorption experiment

(continued from page 544)

DISCUSSION ON THE SECONDARY HYDROCARBON -GENERATION MECHANISM OF COAL

GONG Se^{1,2}, LI Jian², ZHANG Ying², LUO Xia²

(1. *Department of Resource Development and Engineering, Beijing Campus, China University of Mining Industry, Beijing 100083, China*; 2. *Key Laboratory of Natural Gas Accumulation and Development, CNPC, Langfang, Hebei 065007, China*)

Abstract: In this paper, the secondary hydrocarbon-generation mechanism of the Upper Paleozoic coal in the South Huabei Basin was studied using a new kind of quantitative evaluation method for gas source rock. Two series of thermal simulation experiments were conducted, that is, the successive hydrocarbon-generation thermal simulation and the stepwise hydrocarbon-generation thermal simulation (simulating the process of subsidence-uplifting-subsidence). Besides, the characteristics of secondary hydrocarbon generation for coal rock were also discussed.

Key words: secondary hydrocarbon generation; thermal simulation; the South Huabei Basin