

注二氧化碳提高煤层气采收率数值模拟

赵金¹ 张遂安¹ 马东民² 湛凤巍¹ 叶姜¹ 安腾飞¹ 张维驿³

1. 中国石油大学(北京)气体能源开发与利用教育部工程研究中心, 北京 102249

2. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 3. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

摘要:

随着全球温室效应的逐渐增强, CO₂ 的处理已成为各国关注的问题。在煤层气开采中, 利用 CO₂ 提高煤层气采收率也成为研究热点。针对煤层气开发过程中的产气量低的问题, 从物理模拟方法和数值模拟角度出发, 进行了 CO₂ 置换煤层气的等温吸附实验以及置换过程中的浓度测定研究, 并对山西晋城地区运用 ECLIPSE 软件进行了数值模拟研究。研究表明, CO₂ 能提高煤层气的产量和采收率, 使产量保持稳定, 采收率高达 94%, 同时也能有效地减少 CO₂ 的排放, 缓解温室效应。

关键词:

二氧化碳; 煤层气; 提高采收率; 数值模拟

文献标识码: A

文章编号: 1006-5539(2012)01-0067-04

0 前言

随着 CO₂ 排放的逐渐增加, 全球温室效应日益严重。自 2009 年哥本哈根会议以来, 如何减少 CO₂ 的排放与处理, 已成为世界各国急需解决的问题。众多的研究和实验表明, 在油气开采过程中, 将 CO₂ 注入地层中可以提高油、气的采收率。利用 CO₂ 开采清洁煤层气资源, 不仅可以降低 CO₂ 的排放量, 更是将 CO₂ 变废为宝, 实现资源多级利用的有效措施。

在国外, Mitra^[1-4] 采用粉末合成的煤样对注气开采煤层气进行了实验模拟研究。Theodore 集中介绍了煤层结构对 CO₂ 地质处理的影响^[5]。在国内, 冯启言等^[6] 建立了二元气固耦合的有限元数值模型, 并对气体吸附与煤层变形进行了数值模拟。唐书恒等^[7-9] 基于 CH₄-N₂ 和 CH₄-CO₂ 二元气等温吸附和解吸实验, 认为注

入 CO₂ 比注入 N₂ 可以更有效地置换和驱替煤层气。作者通过物理模拟实验和数值模拟分析, 深入研究了注 CO₂ 提高煤层气采收率及 CO₂ 埋藏机理和行为。

1 CO₂ 置换 CH₄ 实验

实验煤样采自沁水盆地东南部晋城矿区的王台铺矿, 煤样为无烟煤。将煤样制成 60~80 目颗粒, 并进行平衡水分试验(平衡水为 2.1%), 之后在 30℃ 恒温条件下进行 CO₂ 置换 CH₄ 实验。CO₂ 置换 CH₄ 实验的成功数据见表 1。

从图 1 中可知, 压力从 4.61 MPa 降低至 2 MPa 过程中, CO₂ 的吸附量始终保持在 12 m³/t 以上, 而 CH₄ 的吸附量却始终保持在 6 m³/t 左右, CO₂ 的吸附性比 CH₄ 强。由于 CO₂ 的吸附性较强, 所以当 CO₂ 与 CH₄

收稿日期:

2011-09-01

基金项目:

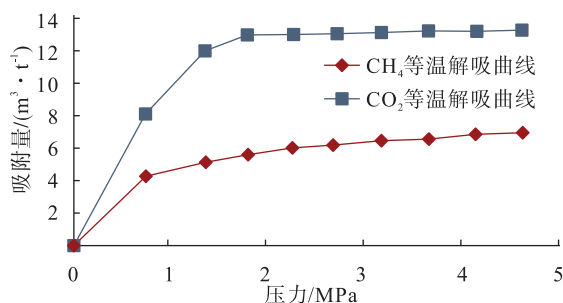
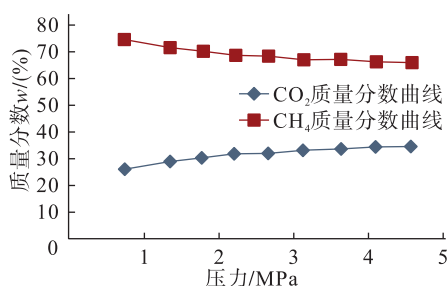
国家科技重大专项“高产水/弱含水煤储层特性排采动态预测技术”(2011ZX05034-003);“深煤层储层物性及地质因素研究”(2011ZX05042-002);“山西沁水盆地煤层气水平井开发示范工程”(2011ZX05061);“鄂尔多斯盆地东缘煤层气开发示范工程”(2011ZX05062);“山西晋城矿区一体化煤层气开发示范工程”(2011ZX05063)

作者简介:

赵金(1988-), 男, 湖北荆州人, 中国石油大学(北京)石油工程学院硕士研究生, 主要从事煤层气生产动态方面的研究。

表1 CO₂置换CH₄实验成果数据

压力/ MPa	CH ₄ 吸附量 / (m ³ ·t ⁻¹)	CO ₂ 吸附量 / (m ³ ·t ⁻¹)	吸附 CH ₄ 质 量分数 w/ (%)	吸附 CO ₂ 质 量分数 w/ (%)
0.75	4.26	8.00	25.78	74.22
1.37	5.10	12.10	28.82	71.18
1.79	5.57	12.80	29.85	70.15
2.24	6.00	12.90	31.67	68.33
2.68	6.13	13.00	31.87	68.13
3.16	6.40	13.10	32.85	67.15
3.65	6.53	13.20	33.12	66.88
4.13	6.82	13.30	34.17	65.83
4.61	6.89	13.50	34.26	65.74

图1 CO₂置换CH₄的等温解吸曲线图2 CO₂置换CH₄游离组分质量分数曲线

同时共存在煤层中时,CO₂会优先被吸附。当注入CO₂时,随着CO₂被煤层优先吸附,煤层中CH₄的吸附量会越来越少。因此从吸附的角度上,CO₂可以通过置换作用将CH₄置换出来。

从图2中可知,在一定体积的煤表面中,在相同温度压力下,游离的CH₄量比CO₂多,这是由于CO₂的吸附性比CH₄强的缘故。从2~4.5 MPa,两者游离组分的质量分数分别在70%、30%保持稳定,这是因为在2 MPa时,CO₂和CH₄的吸附量都接近饱和,当增加体系压力时,CO₂和CH₄的吸附量增加程度不大,所以在高于2 MPa时,两者的游离质量分数都基本维持稳定。在低于2 MPa时,游离CH₄的浓度较高,游离CO₂的浓度较低,这是因为在低压状态下,CO₂的吸附

速率较高且吸附能力强于CH₄,所以游离CH₄的浓度较高,因此在低压下CO₂置换CH₄的效率更高。

2 CO₂提高煤层气数值模拟研究

2.1 煤层气单井生产数值模拟研究

为了验证CO₂提高煤层气采收率的效果,首先运用eclipse对晋城区块的煤层进行了单井生产的数值模拟。模拟的煤层体积为长60.96 m×宽60.96 m×厚9.14 m。将煤层划分为11×11×1的小网格。为节省运算时间,笔者模拟了晋城地区单井在不采取任何措施的情况下进行生产,模拟的井型为直井,建立的地质模型见图3。

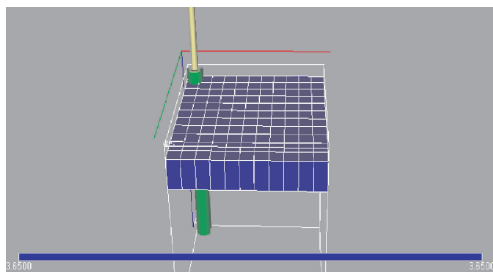


图3 晋城区块单井模拟模型

假定煤层的含水饱和度为0.62,初始压力为7.65 MPa。并以2 300 m³/d的产量进行产气,井的废气压力为0.276 MPa。300 d后单井的生产动态的模拟结果见图4。

从图4可看到,在不采取任何措施的情况下,煤层气的产量是急剧下降的,并且产气持续的时间较短。这是因为煤层渗透率较低,煤储层的压力不高,煤储层的含气饱和度较低。由于含气饱和度低,解吸的气体少,加上煤层的压力和渗透率低,使得解吸气体的渗流速率小,很难在煤层流动,所以产量较低。这也是煤层气在开采的时候,首先要进行压裂的缘故。开采初期压力下降也较快,这是因为开采初期大量水的产出,导致了地层压力的下降。

生产井的井底压力下降较快,这是因为开采初期,由于水和气的大量产出,使得地层的压力大大降低,而地层压力的降低又反过来影响了水和气的产量,产量的降低又会反过来对地层压力产生影响,由于两者的相互影响,最终煤层气的产量和地层压力保持稳定。

2.2 注CO₂提高采收率数值模拟研究

在单井模型的基础上,增加一口直井注CO₂,所用的网格是正交网格,网格划分及模拟时间保持不变。建立的模型见图5。

保持初始数据不变,注气井注入CO₂的量为

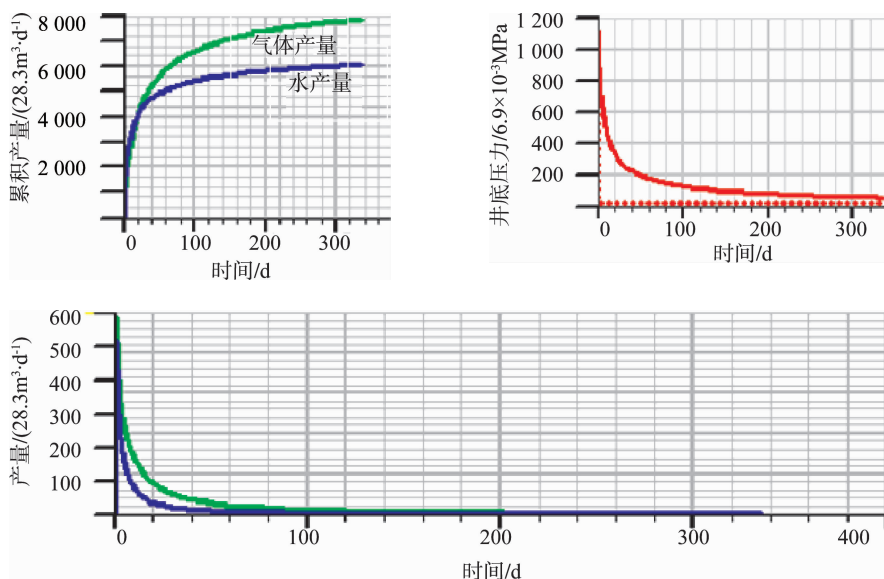


图 4 生产井的气、水产量, 累积产量, 压力随时间的变化曲线

780 m³/d。模拟的结果见图 6~7。

从图 6 可看到, 在注入 CO₂ 后, 井的产量在开采初期是逐渐降低, 这是由于刚注入的 CO₂ 量比较少, 对煤层气产量的影响还不明显; 在第 60 天后, 井的产量开始逐渐升高, 最终在 100 天左右达到稳定, 这是因为随着 CO₂ 注入量的增多, 大量的 CH₄ 被置换出来, 随着煤层吸附 CO₂ 量的增多, 煤层的吸附量达到饱和。生产井的井底压力也由于相同的原因保持同样的变化趋势。这说明在注入 CO₂ 后, 有利于提高煤层气的产量, 但对产水量的影响却不是很大, 后期产水量的增大是因为注入 CO₂ 后, 导致地层压力升高而产生的。地层压力的升高同时加快了煤层气的渗流速度, 再加上 CO₂ 的置换作用, 大量的 CH₄ 又会解吸出

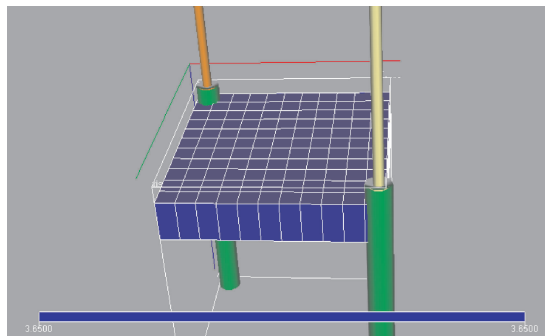
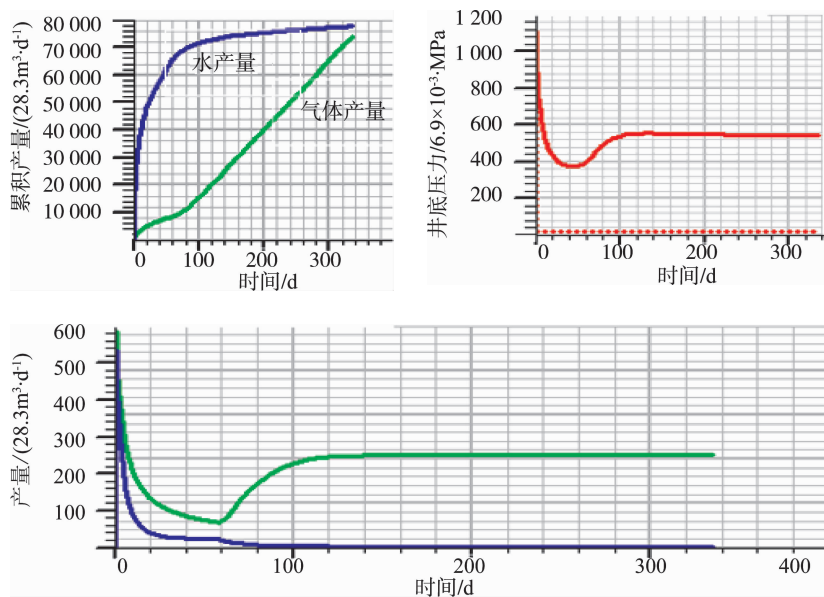
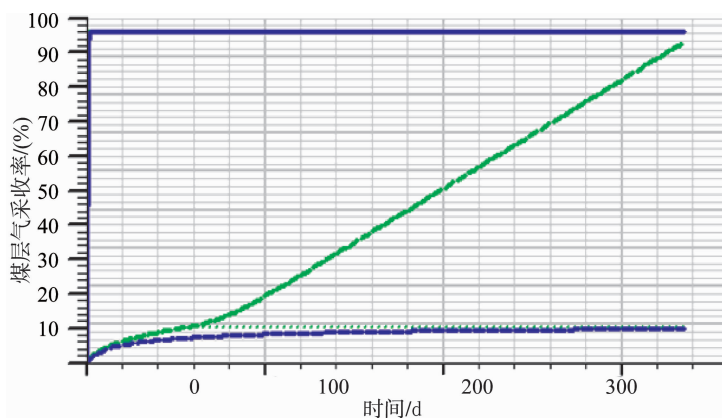


图 5 晋城区块注气井的模拟模型

来, 在这双重作用下, 煤层气的产量会逐渐增大, 最终保持稳产。煤层对 CO₂ 吸附性强, 导致 CO₂ 对 CH₄ 的影响较大, 而对水的影响较小。

图 6 注 CO₂ 后生产井的气、水产量, 累积产量, 压力随时间的变化曲线

图7 注CO₂后煤层采收率曲线

从图7可看到,注入CO₂还能提高煤层气的采收率,并且能使煤层气的采收率达到94%。不仅提高了井的产量,而且极大地提高了煤层气的采收率。

3 结论

a)室内CO₂驱替CH₄物理模拟实验结果显示,CO₂对CH₄具有一定的驱替,尤其是在压力低于2 MPa条件下,CO₂置换CH₄的作用更加明显。因此,通过注入CO₂来实现提高煤层气采收率的技术思路是值得深入探索的科学课题。

b)数值模拟研究结果进一步表明,注CO₂不仅可以提高煤层气采收率,也能提高煤层气的产量和累计产量。注入CO₂后对水的产量影响不大。

c)利用注CO₂开采煤层气,不仅能提高煤层的采收率,还能有效地减少CO₂的排放,缓解温室效应。

Injection [J]. *Transport in Porous Media*, 2008, 73 (2): 141–159.

- [2] Theodore T, Hiren P, Fayya Z N, et al. Overview of Laboratory and Modeling Studies of Carbon Dioxide Sequestration in Coal beds[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2004, 43(12): 2887–2901.
- [3] Mitra A, Harpalani S. Modeling Incremental Swelling of Coal Matrix with CO₂ Injection in Coal Methane Reservoirs [J]. *SPE*, 2007, 12(3): 36–48.
- [4] Langmuir I. The Adsorption of Gases on Plane Surface of Glass, Mica and Platinum [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2003, 40(18): 1361–1403.
- [5] 钱伯章, 朱建芳. 煤层气开发与利用新进展[J]. *天然气与石油*, 2010, 28(4): 29–34.
- [6] 冯启言, 周来, 陈中伟. 煤层处置CO₂的二元气-固耦合数值模拟[J]. *高校地质学报*, 2009, 15(1): 63–68.
- [7] 唐书恒, 汤达祯, 杨起. 二元气体等温吸附解吸实验中气体组分的变化规律[J]. *中国矿业大学学报*, 2004, 33(4): 448–452.
- [8] 吴建光, 叶建平, 唐书恒. 注入CO₂提高煤层气产能的可行性研究[J]. *高校地质学报*, 2004, 10(3): 463–467.
- [9] 钱伯章, 朱建芳. 世界非常规天然气资源和利用进展[J]. *天然气与石油*, 2007, 25(2): 28–32.

参考文献:

- [1] Jessen K, Tang G, Kovce K A. Laboratory and Simulation Investigation of Enhanced Coalbed Methane Recovery by Gas