

文章编号: 1000-7598 (2010) 10-3223-07

# 混合气体驱替煤层气技术的可行性研究

方志明<sup>1</sup>, 李小春<sup>1</sup>, 李 洪<sup>2</sup>, 陈寒秋<sup>2</sup>

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2.平顶山煤业集团, 河南 平顶山 467000)

**摘 要:** 气体驱替煤层气技术是近年来发展起来的具有温室气体减排和提高煤层气采收率双赢效果的新兴技术, 相关研究受到世界主要发达国家的广泛重视。对于温室气体减排的压力, 发达国家的研究主要着眼于该技术在高渗透、不可采煤层中的应用, 注入气体主要为 CO<sub>2</sub>, 目的是尽可能多地封存 CO<sub>2</sub>, 同时提高煤层气采收率。目前, 国内在这方面的研究刚刚起步。国内煤层具有渗透率普遍较低、不开采煤层与要开采煤层难以界定的特点, 注 CO<sub>2</sub> 气体驱替煤层气在这种煤层中的可行性值得商榷。针对国内煤层特点和煤矿瓦斯抽采率低的现状, 建议采用富 N<sub>2</sub> 混合气体驱替煤层气技术, 以提高煤层气采收率。通过理论分析、数值模拟和现场试验研究分析了实施混合气体驱替煤层气技术的可行性。研究表明, 混合气体驱替煤层气技术适用于国内低渗透、可开采煤层, 可以提高煤层气采收率和单产量。

**关 键 词:** 混合气体驱替煤层气; 低渗透; 不可采煤层; 煤层气采收率; 单产量; 可行性

**中图分类号:** TD 711

**文献标识码:** A

## Feasibility study of gas mixture enhanced coalbed methane recovery technology

FANG Zhi-ming<sup>1</sup>, LI Xiao-chun<sup>1</sup>, LI Hong<sup>2</sup>, CHEN Han-qi<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Pingdingshan Coal Co., Ltd., Pingdingshan, Henan 467000, China)

**Abstract:** Gas enhanced coalbed methane recovery technology (ECBM), which has the win-win effects on reducing the greenhouse gas emissions and improving coalbed methane recovery ratio, is an emerging technology in recent years. Related research of ECBM has been paid the extensive attentions by major developed countries. Because of the pressure from greenhouse gas emissions reduction, up to now, the developed countries are focusing on studying the application of CO<sub>2</sub>-ECBM technology in high permeability and unminable coal, for the purpose of permanently storing CO<sub>2</sub> as more as possible and enhancing CBM recovery ratio at the same time. Currently, research of this aspect is started just now in China. Most coal in China has the characteristics of low permeability and it is difficult to define unminable coal or minable coal, so it is questionable to apply CO<sub>2</sub>-ECBM in these coalbed. In view of the characteristics of coal and the present situation of coal mine gas drainage in China, the gas mixture enhanced coalbed methane (G-ECBM) technology has been suggested for the purpose of enhancing coalbed methane recovery ratio. The feasibility of G-ECBM in China has been analyzed by theoretical analysis, numerical simulation and field test study. The results show that G-ECBM technology is applicable to the low permeability and minable coal in China; and it can enhance the coalbed methane recovery ratio and single well production.

**Key words:** gas mixture enhanced coalbed methane recovery (G-ECBM); low permeability; unminable coal; coalbed methane recovery ratio; single well production; feasibility

## 1 引 言

气体驱替煤层气的概念起源于减少温室气体排放的 CO<sub>2</sub> 煤层封存技术。CO<sub>2</sub> 煤层封存过程中不仅减少了温室气体 CO<sub>2</sub> 的排放, 同时还大幅度提高了

煤层气的采收率, 具有双赢效果, 因此, 气体驱替煤层气技术的相关研究受到世界主要发达国家的广泛重视。美国、加拿大、日本、欧盟等国纷纷展开研究, 并先后进行了不同规模的现场试验。美国于 2001 年进行世界上首次 CO<sub>2</sub> 驱替煤层气的现场试

收稿日期: 2009-05-27

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目 (No. O631031C01)。

第一作者简介: 方志明, 男, 1981 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事煤层气注气开采和温室气体地质封存方面的研究工作。E-mail: zhmfang2002@163.com

验 (Coal-Seq), 煤层气采收率达 95%<sup>[1]</sup>。日本在北海道、欧盟在波兰、加拿大在 Alberta 盆地也分别进行了不同规模的现场试验<sup>[2-4]</sup>。

目前, 发达国家主要着眼于 CO<sub>2</sub> 驱替, 并且实施对象为渗透较高的不可采煤层。这是因为作为《京都议定书》规定的有减排义务的国家, 倾向于尽可能多地封存 CO<sub>2</sub>。但纯 CO<sub>2</sub> 作为驱替气体注入煤层有以下缺点: 一是降低煤层渗透性, CO<sub>2</sub> 置换 CH<sub>4</sub> 后, 煤将发生体积膨胀<sup>[5-7]</sup>, 导致渗透性降低; 二是 CO<sub>2</sub> 提纯技术不成熟, 成本高、产能小, 大规模纯 CO<sub>2</sub> 气源难以保证; 三是 CO<sub>2</sub> 会为其上下周边煤层的开采带来困难, 适用于不可开采煤层。

目前, 我国在这方面的研究刚刚起步。我国煤层渗透率普遍较低, 渗透率低于  $1 \times 10^{-15} \text{m}^2$  的煤层占 72%<sup>[8]</sup>, 因此, 不开采煤层与开采煤层具有难以界定的特点, 注 CO<sub>2</sub> 气体驱替煤层气在这种煤层中的可行性值得商榷。针对我国煤层特点和煤矿瓦斯抽采率低的现状, 建议采用富 N<sub>2</sub> 混合气体驱替煤层气技术, 以提高煤层气采收率。

本文通过理论分析、数值模拟和现场试验分析了在我国实施混合气体驱替煤层气技术的可行性。

## 2 可行性分析

### 2.1 混合气体驱替煤层气技术的提出及原理分析

注气驱替煤层气技术起源于 CO<sub>2</sub> 煤层封存技术。其基本概念是指将 CO<sub>2</sub> 注入深部不可开采煤层中封存起来, 以减少温室气体排放, 同时将储藏在煤层中的煤层气 (主要成分为 CH<sub>4</sub>, 大部分以吸附态存在于煤层中) 置换出来。

其主要机制 (如图 1 所示<sup>[9]</sup>) 是: ①煤层对 CO<sub>2</sub> 的吸附能力强于对 CH<sub>4</sub> 的吸附能力, 当注入 CO<sub>2</sub> 时, CO<sub>2</sub> 与 CH<sub>4</sub> 竞争吸附, CH<sub>4</sub> 被置换, 而 CO<sub>2</sub> 的注入也降低了煤层中 CH<sub>4</sub> 的分压, 进一步促进 CH<sub>4</sub> 解吸; ②CO<sub>2</sub> 的注入, 维持了比单纯抽采更高的压力梯度, 驱赶 CH<sub>4</sub> 向生产井流动。

美国的 Coal-Seq 现场试验结果显示了很明显的提高煤层气采收率的效果, 但试验过程中发现, CO<sub>2</sub> 注入后, 煤层渗透率降低了近 2 个数量级<sup>[1]</sup>。这主要是由于煤吸附气体后会膨胀, 煤层对 CO<sub>2</sub> 的吸附能力强于对 CH<sub>4</sub> 的吸附能力, 所以 CO<sub>2</sub> 置换 CH<sub>4</sub> 后煤层会膨胀, 导致渗透率降低。对于国外渗透率较高的煤层, 渗透率降低 2 个数量级对于 CO<sub>2</sub> 的注入可能影响不大, 但如果煤层初始的渗透率较低, 那么注入 CO<sub>2</sub> 后煤层渗透率降低可能会导致 CO<sub>2</sub> 无法注入, 使驱替无法进行下去。

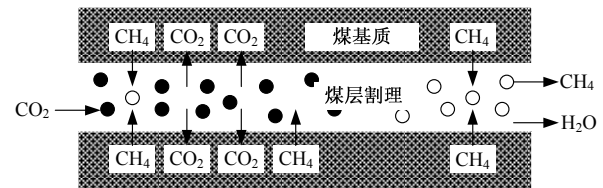


图 1 CO<sub>2</sub> 驱替煤层气的机制示意图  
Fig.1 Sketch of mechanism of CO<sub>2</sub>-ECBM

加拿大自 1998 年开始在位于 Alberta 省的 Fenn Big Valley 试验区进行了单井注入试验。试验过程中分别注入纯 CO<sub>2</sub> (100%CO<sub>2</sub>)、烟道气 (87%N<sub>2</sub>, 13%CO<sub>2</sub>)、纯 N<sub>2</sub> (100%N<sub>2</sub>) 和富含 CO<sub>2</sub> 的烟道气 (53%N<sub>2</sub>, 47%CO<sub>2</sub>)<sup>[4]</sup>。结果显示, 注入纯 CO<sub>2</sub> 时, 煤层绝对渗透率从  $3.56 \times 10^{-15} \text{m}^2$  降低到  $0.98 \times 10^{-15} \text{m}^2$ ; 注入烟道气时, 煤层绝对渗透率从  $0.98 \times 10^{-15} \text{m}^2$  增加到  $23.7 \times 10^{-15} \text{m}^2$ ; 注入富含 CO<sub>2</sub> 的烟道气时, 煤层绝对渗透率从  $1.18 \times 10^{-15} \text{m}^2$  增加到  $18.8 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 。从这个试验结果也可以看出: 注纯 CO<sub>2</sub> 会使煤层的渗透率大幅降低; 相反, 注 N<sub>2</sub> 可以使煤层的渗透率增加。N<sub>2</sub> 使煤层渗透率增加主要是由于煤层对 N<sub>2</sub> 的吸附能力弱于对 CH<sub>4</sub> 的吸附能力, 所以 N<sub>2</sub> 置换 CH<sub>4</sub> 后煤层会收缩, 渗透率会提高。

N<sub>2</sub> 驱替煤层气的机制与 CO<sub>2</sub> 驱替不同。煤对 N<sub>2</sub> 的吸附能力弱于 CH<sub>4</sub>, 不能通过竞争吸附达到置换 CH<sub>4</sub> 的目的。由于煤对气体的吸附属于物理吸附, 具有可逆性, 即吸附与解吸作用平衡, 当压力降低时, 原来的平衡被打破, 吸附在煤基质微孔内表面的 CH<sub>4</sub> 就会解吸出来, 成为自由气体, 以达到新的平衡。注 N<sub>2</sub> 就是通过降低 CH<sub>4</sub> 的有效分压使其解吸, 而达到置换、驱替的目的。

基于以上认识, 对于国内低渗透、可开采煤层, 笔者建议采用富含 N<sub>2</sub> 的混合气体 (烟道气、工业废气、空气或者它们的混合气体, 其中也含有 CO<sub>2</sub> 成分) 驱替煤层气。其优点是:

(1) 发挥 N<sub>2</sub> 的增渗效果。这对于我国低渗透煤层的煤层气开发具有重要意义。

(2) N<sub>2</sub> 的突出危险远小于 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub>。相同气压下, 煤层吸附的 N<sub>2</sub> 量远远小于甲烷和 CO<sub>2</sub> 的吸附量。

(3) 富 N<sub>2</sub> 混合气体可直接采用烟道气、工业废气、空气或者它们的混合气体, 提纯浓度要求低或者完全不需要提纯, 大幅度降低了气源成本, 从而降低了混合气体驱替煤层气的总成本; 另一方面, 很多煤田附近就有各种排放源 (火电厂、合成氨厂、水泥厂、钢铁厂、化工厂等), 不需要远距离输送, 可大幅度减少输送成本。

混合气体驱替煤层气技术兼顾 CO<sub>2</sub> 的竞争吸附和 N<sub>2</sub> 的增渗和减灾效果，其主要目的是：提高煤层气采收率和单产量，同时减排 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub>。对于不可开采煤层，CO<sub>2</sub> 将长期封存于煤层中；对于可开采煤层，CO<sub>2</sub> 最终要释放出来，但预先抽出了 CH<sub>4</sub>，减少了 CH<sub>4</sub> 排放量，减排效果十分显著。同时，也有减少瓦斯突出风险和提高采煤效率的效果，具有现实意义，比较适用于我国低渗透、可开采煤层。

## 2.2 数值模拟研究

### 2.2.1 模型的建立

#### (1) 基本假设

在模型建立过程中用到以下假设：①煤岩是由基质微孔系统和割理、裂隙宏观系统组成的双重多孔介质；②煤基质中煤层气体包括注入气体以游离和吸附两种方式赋存，各组分吸附气体含量遵守扩展的 Langmuir 方程；③煤岩中流体包括气、水两相，气相流体运移经过解吸、扩散、渗流 3 个阶段，流体渗流为等温渗流且符合达西渗流定律；④气相流体（包括煤层气中原有组分和注入气体）为理想气体，满足气体状态方程。

#### (2) 多组分混合气体的 Langmuir 方程<sup>[10]</sup>

煤层气的吸附服从 Langmuir 吸附平衡状态方程，当向煤层中注入混合气体时，煤层中的气相为多组分混合物，用扩展的 Langmuir 方程来描述各组分气体的竞争吸附特性，即

$$C_i(p_g) = V_{Li} \frac{p_{gi}}{1 + \sum_{j=1}^n \frac{p_{gj}}{p_{Li}}} = V_{Li} \frac{p_{gi} y_i}{1 + p_g \sum_{j=1}^n \frac{y_j}{p_{Li}}} \quad (1)$$

式中：C<sub>i</sub>(p<sub>g</sub>) 为单位体积煤层所含吸附状态 i 组分气体的质量；V<sub>Li</sub> 为纯气体组分 i 的 Langmuir 体积；p<sub>Li</sub> 为纯气体组分 i 的 Langmuir 压力；p<sub>gi</sub> 为 i 组分自由气体的分压；y<sub>i</sub> 为 i 组分气体的物质的量分数。

#### (3) 多组分混合气体扩散方程<sup>[10]</sup>

气体通过煤基质微孔隙系统的扩散，按拟稳态扩散模式进行处理，遵从 Fick 第一定律，认为总浓度 C<sub>m</sub> 对时间的变化率与差值 C<sub>m</sub> - C(p<sub>g</sub>) 成正比，即

$$\frac{dC_{mi}}{dt} = \sigma D (C_i(p_g) - C_{mi}) \quad (2)$$

$$q_{mi} = -F_G \frac{dC_{mi}}{dt} \quad (3)$$

式中：C<sub>m</sub> 为煤层吸附气体的平均浓度；C(p<sub>g</sub>) 为裂隙面上与自由气体压力处于平衡状态的吸附气体浓度；σ 为 Warren 和 Root 的形状因子，与基质单元的尺寸大小和形状有关；D 为煤基质的气体扩散系

数；q<sub>m</sub> 为扩散速率；τ = 1/(σD)，可由解吸试验直接测定；F<sub>G</sub> 为几何因子。

(4) 裂隙系统多组分气体和水相渗流控制方程  
根据气、水两相渗流达西定律和连续性方程可以推导得到气组分的控制方程为

$$\nabla \cdot \left( \frac{x_{gi} K K_{rg}}{B_g \mu_g} \nabla \bar{P}_g + \frac{R_{swi} K K_{rw}}{B_w \mu_w} \nabla \bar{P}_w \right) + \frac{I_{gi}}{\rho_{gsc}} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\phi x_{gi} S_g}{B_g} + \frac{\phi R_{swi} S_w}{B_w} \right) \quad (4)$$

式中：i 为 1、2、3，分别代表 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 等气相组分，将各式相加得到总的气相控制方程为

$$\nabla \cdot \left( \frac{K K_{rg}}{B_g \mu_g} \nabla \bar{P}_g + \frac{R_{sw} K K_{rw}}{B_w \mu_w} \nabla \bar{P}_w \right) + \frac{I_g}{\rho_{gsc}} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\phi S_g}{B_g} + \frac{\phi R_{sw} S_w}{B_w} \right) \quad (5)$$

同理，可得水相的渗流控制方程为

$$\nabla \cdot \left( \frac{K K_{rw}}{B_w \mu_w} \nabla \bar{P}_w \right) + \frac{I_w}{\rho_{wsc}} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\phi S_w}{B_w} \right) \quad (6)$$

式中：∇P̄<sub>α</sub> = ∇P<sub>α</sub> - ρ<sub>α</sub>g∇h - G<sub>α</sub> (α 代表 g 或者 w，分别代表气相和水相)，为 α 相的等效压力梯度；K 为绝对渗透率；K<sub>r</sub> 为相对渗透率；μ 为黏度；φ 为孔隙度；S 为饱和度；R<sub>sw</sub> 为气体溶解度；I 为源汇项；x 为质量分数；B 为体积地层系数；ρ = ρ<sub>sc</sub>/B，ρ 为地层条件下流体的密度；ρ<sub>sc</sub> 为标准状态下流体的密度。

#### (5) 辅助方程

饱和度方程为

$$S_g + S_w = 1 \quad (7)$$

毛管压力方程为

$$P_{cgw} [S_w] = P_g - P_w \quad (8)$$

相对渗透率方程为

$$K_{rw} = f(S_w), K_{rg} = f(S_g) \quad (9)$$

密度方程为

$$\rho_g = f(p_g), \rho_w = f(p_w) \quad (10)$$

黏度方程为

$$\mu_g = f(p_g), \mu_w = f(p_w) \quad (11)$$

组分约束方程为

$$\sum_{i=1}^n x_{gi} = 1 \quad (12)$$

组分分压与总压约束方程为

$$P_{gi} = x_{gi} \frac{M_g}{M_{gi}} P_g, \quad P_g = \sum_{i=1}^n P_{gi} \quad (13)$$

其中： $P_{cgw}$ 、 $K_{rw}$ 、 $K_{rg}$  可由两相流试验数据得到。

上述方程构成混合气体驱替煤层气过程的多相渗流模型。对于特定问题的求解还必须补充定解条件，定解条件包括气、水扩散和渗流的初始条件和边界条件等。由于模型非常复杂，该方程组的解析解很难求得，对数学模型进行有限差分离散，然后用 IMPES 方法求数值解。

2.2.2 计算实例分析

如图 2 所示，模拟范围为 15 m×6 m×100 m，计算用到的参数见表 1、2，表中吸附常数、孔隙率、吸附时间等由实验室测得，初始瓦斯压力、初始渗透率等由现场试验测得。抽采孔和注气孔深均为 80 m，直径为 90 mm，钻孔间距为 5 m。模拟了两种情况：①从 2008 年 1 月 1 日起，3 个钻孔同时开始抽气；②钻孔 2 注气（注入气体为含 78%N<sub>2</sub> 和 22%CO<sub>2</sub> 的混合气体），钻孔 1 和 3 抽气。

图 3、4 分别为模拟得到的驱替与纯抽时各钻孔 CH<sub>4</sub> 流量和累计产量曲线。从图中可以看出：

①纯抽时，3 个钻孔流量接近，并且呈衰减趋势；驱替时，注气钻孔相邻的抽气钻孔瓦斯流量经过短期降低（这可能与驱替促进产水有关）后开始显著升高，到达高峰后呈自然衰减趋势；驱替过程中平均瓦斯流量较纯抽时大幅提高。②驱替时，与注气钻孔相邻的抽气钻孔瓦斯单产量较纯抽时大幅提高。

模拟结果表明，混合气体驱替煤层气技术与单纯抽采方法相比，大幅提高了钻孔瓦斯流量和单产量。

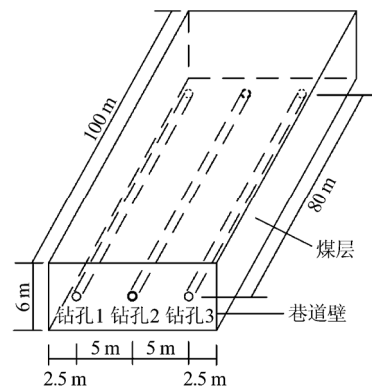


图 2 数值模拟模型

Fig.2 Numerical simulation model

表 1 计算采用的参数 (1)

Table 1 Parameters used in simulation (1)

煤层埋深 / m	重度 / (kN/m <sup>3</sup> )	瓦斯含量 / (mL/g)	CH <sub>4</sub> 吸附常数		N <sub>2</sub> 吸附常数		CO <sub>2</sub> 吸附常数		初始瓦斯压力 / MPa
			a' / (mL/g)	b' / MPa	a' / (mL/g)	b' / MPa	a' / (mL/g)	b' / MPa	
475	14.1	4.215	13.80	0.82	12.95	4.12	24.05	0.24	0.17

表 2 计算采用的参数 (2)

Table 2 Parameters used in simulation (2)

初始孔隙率		吸附时间 / d			原始 CH <sub>4</sub> 比例 / %	抽气孔压力 / kPa	注气孔恒压 / MPa	初始渗透率 / 10 <sup>-15</sup> m <sup>2</sup>	
裂隙	孔隙	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>				离巷道壁 10 m 范围内	内部
0.01	0.05	5	5	1.3	100	27.56	0.6	1.0	0.1

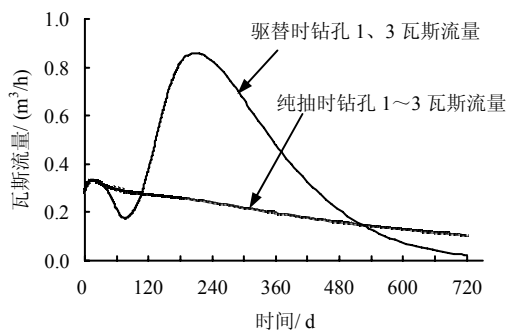


图 3 驱替与纯抽时各钻孔 CH<sub>4</sub> 流量随时间变化关系

Fig.3 Changes of flow rate of CH<sub>4</sub> with time in wells under ECBM and no ECBM conditions

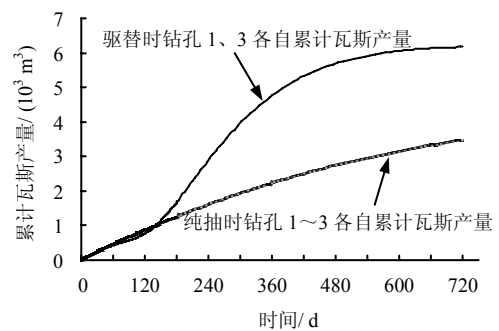


图 4 驱替与纯抽时各钻孔 CH<sub>4</sub> 累计产量随时间变化关系

Fig.4 Changes of cumulative CH<sub>4</sub> production with time in wells under ECBM and no ECBM conditions

### 2.3 现场试验研究

为了进一步证实混合气体驱替技术应用于我国低渗透、要开采煤层的可行性以及驱替效果，进行了井下混合气体驱替煤层气小规模现场试验研究。

#### 2.3.1 试验场地条件

试验场地选在平顶山煤业集团八矿戊二采区 12140 机巷（戊 9~10 层）。巷道长为 713 m，净宽为 4.3 m。巷道标高在 -480~-485 m 之间，地表标高为 142 m，该巷道未受采动影响。顶板为砂质泥岩与粉砂岩互层，底板为块状泥岩。巷道顶板锚网、索支护。

煤层埋藏深度为 622~667 m，厚度为 4.22~5.65 m，平均厚度为 4.90 m，属半光亮型肥煤，其水分为 2.80%，灰分为 23.78%，挥发分为 31.80%，重度为 14.3 kN/m<sup>3</sup>，坚固性系数为 0.15~0.60，瓦斯压力为 1.8 MPa，渗透率为 4.2×10<sup>-18</sup>m<sup>2</sup>。其中夹矸 1~3 层，平均厚度为 0.4~0.8 m。煤层倾角为 9°~13°，平均为 10°。戊二皮带巷揭露了 3 条断层。

#### 2.3.2 试验方案

试验方案设计如图 5 所示。选取未曾进行过预抽、无地质构造、煤层相对完整不易塌孔、距离避难室在 300 m 左右的区段（预留 20 m 宽）为试验区段。向煤层打 3 个长为 50 m、间距为 5 m 的平行钻孔（自左至右分别为钻孔 1、2、3）。注气孔分别与高压气瓶和抽气管道相连，抽气孔只与抽气管道相连。注气及抽气系统设有压力与流量监测装置和气体取样口，采用空气为驱替气体。由于注气量不大，加上井下用高压气泵价格昂贵、供货期长，决定采用高压气瓶供气（40 L、15 MPa 气瓶，在地面充气后搬运到现场，30 d 内每天需要 20 瓶气）。

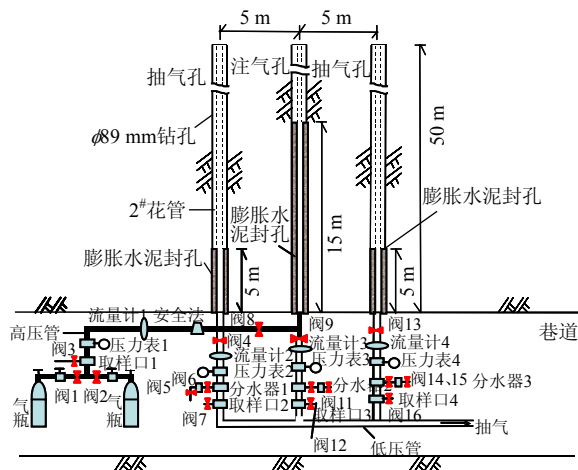


图 5 现场试验方案设计图  
Fig.5 Design of the field test

试验分为 2 个阶段：

(1) 第 1 阶段为单纯抽气阶段（2006 年 11 月 15 日~12 月 7 日）：3 个孔都抽气，观察单纯抽气的效果，以便与驱替结果相比较。

(2) 第 2 阶段为注气驱替阶段（2006 年 12 月 7 日~2007 年 2 月 5 日）：2 号钻孔注气，1 号和 3 号钻孔继续抽气，监测驱替效果。驱替气体采用空气。空气源为高压气瓶和矿井压气管，经由减压阀调节后，注气压力保持在 0.3 MPa。

试验中监测 3 个钻孔的气体压力、成分和累计产气量。压力采用机械式压力表测量，每小时测量 1 次。每天用取样袋取 3 次气样，带到地面分析成分（CH<sub>4</sub>、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>）。累计产气量采用煤气表测量。

#### 2.3.3 试验结果

图 6~11 分别为钻孔 1、钻孔 3 的 CH<sub>4</sub> 浓度、流量以及累计产量随时间的变化。图 12 为钻孔 2 纯抽时瓦斯流量及驱替时注气流量随时间变化关系。

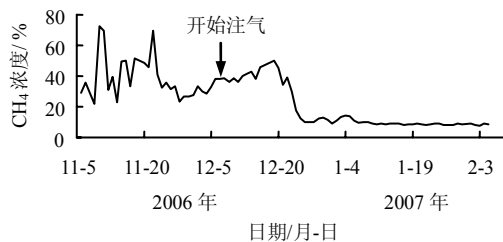


图 6 钻孔 1 内 CH<sub>4</sub> 浓度随时间变化关系  
Fig.6 Changes of concentration of CH<sub>4</sub> with time in well 1

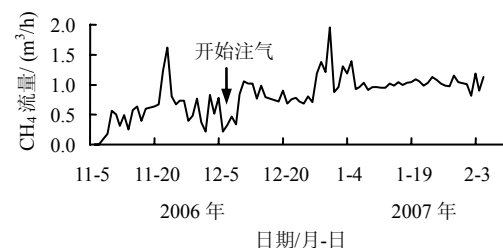


图 7 钻孔 1 内 CH<sub>4</sub> 流量随时间变化关系  
Fig.7 Changes of flow rate of CH<sub>4</sub> with time in well 1

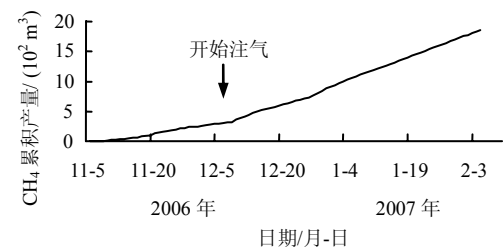


图 8 钻孔 1 内 CH<sub>4</sub> 累积产量随时间变化关系  
Fig.8 Changes of cumulative CH<sub>4</sub> production with time in well 1

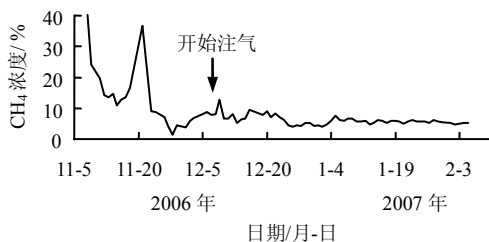


图9 钻孔3内CH<sub>4</sub>浓度随时间变化关系

Fig.9 Changes of concentration of CH<sub>4</sub> with time in well 3

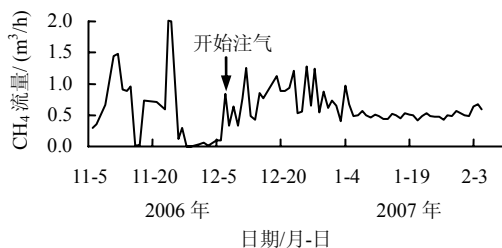


图10 钻孔3内CH<sub>4</sub>流量随时间变化关系

Fig.10 Changes of flow rate of CH<sub>4</sub> with time in well 3

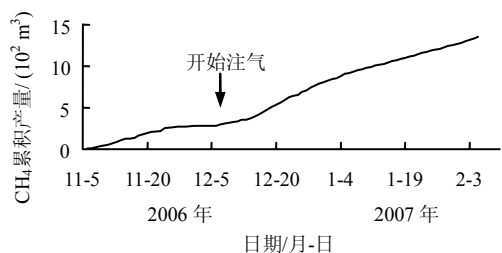


图11 钻孔3内CH<sub>4</sub>累积产量随时间变化关系

Fig.11 Changes of cumulative CH<sub>4</sub> production with time in well 3

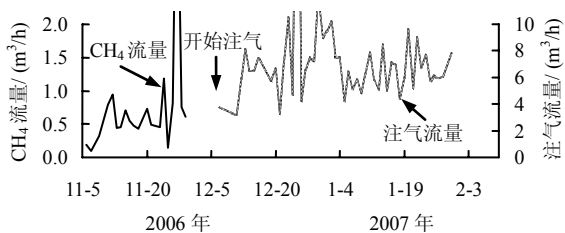


图12 钻孔2内CH<sub>4</sub>流量及注气流量随时间变化关系

Fig.12 Changes of flow rate of CH<sub>4</sub> and injected gas with time in well 2

CH<sub>4</sub> 累计产量根据煤气表读数和 CH<sub>4</sub> 浓度分析结果求得。CH<sub>4</sub> 流量根据两次 CH<sub>4</sub> 累计产量之差除以两次读数之间的时间差求得。由图可看出，单纯抽气阶段，3 个钻孔都抽气，CH<sub>4</sub> 流量和浓度曲线呈逐渐增加然后降低的趋势，钻孔 3 尤为明显，符合单纯抽气的一般规律。

注气驱替开始后，改钻孔 2 为注气孔，钻孔 1 和钻孔 3 继续抽气。驱替时，钻孔 1 的 CH<sub>4</sub> 浓度有所增加(图 6)。约 2 周后孔 1 的 CH<sub>4</sub> 浓度突然下降到 10%左右，以后长时间基本稳定并有缓慢下降的趋势。钻孔 3 的 CH<sub>4</sub> 浓度略有小幅增加(图 9)，增加幅度明显低于钻孔 1，这可能与钻孔 3 的初期 CH<sub>4</sub> 浓度水平较低有关。驱替过程中 CH<sub>4</sub> 浓度的恢复显示了驱替有助于煤层气解吸，CH<sub>4</sub> 浓度的下降意味着驱替气体达到了抽气孔。驱替气体达到抽气孔后，钻孔 1 和钻孔 3 的 CH<sub>4</sub> 平均浓度仍在 6%以上，仍然可以方便发电利用。

注气驱替开始后，钻孔 1 和钻孔 3 的 CH<sub>4</sub> 流量都明显增大，一直稳定在很高的水平，而且不随 CH<sub>4</sub> 浓度的降低而降低(图 7、10)。这是因为，虽然 CH<sub>4</sub> 浓度很低，但产气量有所增加。

2.3.4 驱替效果的评价与讨论

(1) 驱替效果评价

首先，试验孔驱替期间 CH<sub>4</sub> 平均流量比单纯抽气期间高出 1 倍左右(表 3，钻孔 1 和钻孔 3)。从 CH<sub>4</sub> 累计产量曲线也可以看出，驱替开始后累计产量增加较快(图 8、11)。尽管驱替期间 CH<sub>4</sub> 浓度有所降低，但在 6%以上，仍满足发电浓度要求。

其次，与本矿相邻 220 个抽气孔相比较(见表 3 最后一行)，CH<sub>4</sub> 流量和浓度都显著增加，全时 CH<sub>4</sub> 流量增加 4.7 倍，全时浓度增加 1.7 倍。

综上所述，驱替效果比较明显。

(2) 讨论

从上述试验结果可以看出，相对于现行单纯抽采方法，混合气体驱替煤层气技术在原理和效果上有较大突破，在技术上可行。

表 3 试验钻孔与其他钻孔比较

Table 3 Comparison between test wells and other wells

钻孔号	平均 CH <sub>4</sub> 流量/(m <sup>3</sup> /h)			累计 CH <sub>4</sub> 流量/m <sup>3</sup>			平均 CH <sub>4</sub> 浓度/%		
	纯抽	驱替	全时	纯抽	驱替	全时	纯抽	驱替	全时
钻孔 1	0.410	1.1	0.86	303.6	1 556.4	1 860.0	38.1	15.9	23.5
钻孔 2	0.422			208.1			43.4		
钻孔 3	0.400	0.75	0.63	299.3	1 036.1	1 336.1	13.5	6.0	8.6
其他 220 个钻孔		0.13					6.0		

注：试验钻孔纯抽、驱替、全时平均 CH<sub>4</sub> 流量与其他孔之比为 3.2、7.1、5.7，试验钻孔纯抽、驱替、全时平均 CH<sub>4</sub> 浓度与其他孔之比为 5.3、1.8、2.7。

考虑到成本和时间问题, 采用空气作为驱替气体, 空气含有 78%N<sub>2</sub>, 但还有大约 21%O<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 的存在对煤矿采煤安全、煤层气开采以及驱替的效果会产生影响。此次小规模现场试验的目的是证实混合气体驱替煤层气技术应用于我国低渗透、可开采煤层的可行性和驱替效果, 因此, 没有对 O<sub>2</sub> 的影响进行研究, 今后需要对氧气的影响进行深入研究。

### 3 结 语

本文分析了 CO<sub>2</sub> 驱替煤层气技术的原理、优点、对高渗透性、不可开采煤层的适用性及对于低渗透、可开采煤层的局限性。针对我国煤层渗透率普遍较低、可采煤层和不可采煤层的界线难以划清的特点以及我国煤矿瓦斯抽采率低的现状, 建议采用富含 N<sub>2</sub> 的混合气体驱替煤层气技术, 以提高煤层气采收率, 介绍了其原理和优点, 并通过理论分析、数值模拟和现场试验研究分析了在我国实施混合气体驱替煤层气技术的可行性。研究结果表明: ①该技术在原理和技术上可行, 适合于我国低渗透、要开采煤层; ②数值模拟和现场试验结果都显示该技术可以提高煤层气采收率和单产量, 而且效果比较明显。

### 参 考 文 献

- [1] SCOTT R REEVES. The Coal-Seq project: key results from field, laboratory, and modeling studies[C]// Proceedings of 7th Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT7). Oxford: Elsevier Ltd., 2004.
- [2] SHI JI-QUAN, SEVKET DURUCAN, MASAJI FUJIOKA. A reservoir simulation study of CO<sub>2</sub> injection and N<sub>2</sub> flooding at the Ishikari coalfield CO<sub>2</sub> storage pilot project, Japan[J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2008, 2(1): 47—57.
- [3] VAN BERGEN F, PAGNIER H J M, VAN DER MEER L G H, et al. Development of a field experiment of CO<sub>2</sub> storage in coal seams in the Upper Silesian Basin of Poland[C]// Proceedings of 6th Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT6). Oxford: Pergamon, 2002.
- [4] WILLIAM D GUNTER, MATHEW J MAVOR, JOHN R ROBINSON. CO<sub>2</sub> storage and enhanced methane production: field testing at Fenn-Big valley, Alberta, Canada, with application[C]// Proceedings of 7th Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT7). Oxford: Elsevier Ltd., 2004.
- [5] REUCROFT P J, PATEL H. Gas-induced swelling in coal[J]. **Fuel**, 1986, 65(6): 816—820.
- [6] REUCROFT P J, SETHURAMAN A R. Effect of pressure on carbon dioxide induced coal swelling[J]. **Energy & Fuel**, 1987, 1(1): 72—75.
- [7] 吴世跃, 赵文. 含吸附煤层气煤的有效应力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1674—1678.  
WU Shi-yue, ZHAO Wen. Analysis of effective stress in adsorbed methane-coal system[J]. **Chinse Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(10): 1674—1678.
- [8] 叶建平. 中国煤层气资源[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [9] WILLIAM (BILL) D. GUNTER. Enhanced coalbed methane course[C]// Proceedings of CBM and ECBM Advanced Technology Workshop. Hangzhou: [s. n.], 2004.
- [10] 孙可明. 低渗透煤层气开采与注气增产流固耦合理论及其应用[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2004.

### 书 讯

#### ANSYS 有限元分析工程应用实例教程 (建工版) (土木工程常用软件应用入门丛书)

建筑科学类, 本书组委会编著, 小16开, 600千字, 388页, 平膜, 估价: 35.00元, 2010年9月出版, ISBN: 978—7—112—12239—4

ANSYS 是国际流行的大型通用有限元分析软件, 是目前最在影响力的有限元软件之一。其融结构、流体、电磁场、场和耦合场分析于一体, 涵盖了机械、航空航天、能源、交通运输、土木工程、水利、电子、地矿、生物医学、教学科研等众多领域。本书共计11章, 以结构分析为主, 包括静力分析、材料非线性分析、接触非线性分析、几何非线性分析、优化分析、动力学分析、疲劳分析、复合材料等, 同时涉及了热分析。全面的理论基础与典型案例相结合是本书的显著特色, 其中案例贴合实际, 讲解精辟透彻, 处理问题思路清晰, 论述内容深入独到。

读者对象: 土木工程领域研究人员和结构计算分析人员, 机械、航空航天、能源、交通运输、水利、电子等领域技术人员。

(摘自 新华书目报·科技新书目)