

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.02.012

# 不同注源气体置换-驱替煤层甲烷突破时间的 差异性分析

杨宏民<sup>1a,1b</sup>, 鲁小凯<sup>1a</sup>, 陈立伟<sup>1a,2</sup>

(1.河南理工大学 a.安全科学与工程学院;b.煤矿灾害预防与抢险救灾教育部工程研究中心,河南 焦作 454003;  
2.东北大学 资源与土木工程学院,沈阳 110819)

**摘要:**煤层注气促抽瓦斯是近年来逐步发展起来的强化抽采技术,注气突破时间是该技术的重要参数之一。突破时间是指注源气体从煤层一端注入到另一端检测出该组分所需的时间,它与注源气体的吸附性、渗透性有着密切的关系。为了研究渗透和吸附对注气突破时间的影响规律,利用含瓦斯煤层注气模拟实验装置,进行了煤层注 He、N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 置换-驱替 CH<sub>4</sub> 的实验室模拟实验。实验结果表明,不考虑煤对气体吸附性的纯渗流条件下,N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 纯渗流突破时间极短,仅为总突破时间的 5.93% 和 0.28%,表明气体吸附性能是引起总突破时间差异的主要因素;另外,随着注源气体吸附性增强,其总突破时间大幅度增加,He、N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的总突破时间分别为 0.92,14,246 min。实验结果结合理论模型计算分析得出:注源气体吸附性越强,总突破时间越长,注气初期的置换效应越明显,但随着注源气体的吸附不断趋于饱和,其驱替效应逐渐增强。

**关键词:**煤层注气;注源气体;置换-驱替效应;突破时间;差异性分析

**中图分类号:**TD456.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2018)02-096-07

## Analysis on the difference of breakthrough time for different injection gases to replace-displace methane in coal seams

YANG Hongmin<sup>1a,1b</sup>, LU Xiaokai<sup>1a</sup>, CHEN Liwei<sup>1a,2</sup>

(1a. School of Safety Science and Engineering; 1b. MOE Engineering Center of Mine Disaster Prevention and Rescue, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, P.R.China; 2. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, P.R.China)

**Abstract:** Coal gas injection is an intensive extraction technology which is gradually developed in recent years, and the breakthrough time of gas injection is one of the important parameters of the technology. The breakthrough time is the required time of injection gas goes from one end of the coal seam to the other end, and it is closely related to the adsorption and the permeability of the source gas. In order to study the laws of permeability and adsorption on the breakthrough time, the laboratory simulation experiment is carried out with injecting He, N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> in coal seams to replace-displace CH<sub>4</sub>. The results show that the

**收稿日期:**2017-07-02

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51174081);河南省高校科技创新团队支持计划资助项目(17IRTSTHN030)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51174081) and Program for Innovative Research Team (in Science and Technology) in Universities of Henan

**作者简介:**杨宏民(1967—),男,河南理工大学教授,博士生导师,主要从事煤矿瓦斯防治技术、煤矿火灾防治以及矿井通风方面的研究,(E-mail)yanghm@hpu.edu.cn。

breakthrough time on pure seepage of  $N_2$  and  $CO_2$  is very short, only 5.93% and 0.28% of the total breakthrough time, which indicates that gas adsorption performance is the main factor that causes the difference of breakthrough time. The breakthrough time increases as the gas adsorption performance of injection gas increases, and the breakthrough time of He,  $N_2$  and  $CO_2$  is 0.92 min, 14 min and 246 min, respectively. According to the laboratory experiment and theoretical model analysis, it can be concluded that the stronger the adsorption performance of injection gas is, the longer the breakthrough time and the more obvious the replacement effect in the initial stage of gas injection is, but the displacement effect gradually increases as the adsorption of the injection gas tends to be saturated.

**Keywords:** gas injection into coal seam; injection gas; replacement-displacement effect; breakthrough time; difference analysis

煤层瓦斯抽采是矿井瓦斯防治最根本的技术手段。中国大多数高瓦斯、突出矿井所开采的煤层属于低透气性、难抽采煤层<sup>[1]</sup>,人们采用了多种技术手段增加煤层透气性,以不断提高煤层瓦斯抽采效率。受石油系统“气驱油”技术的启发,20世纪末,美国圣胡安盆地将 $CO_2$ 注入煤层以提高煤层气采出率( $CO_2$ -ECBM)实验<sup>[2]</sup>取得成功,并逐渐将这种技术推广应用于煤层注气增产(ECBM, enhanced coal bed methane)领域。之后世界各国也尝试将煤层注气置换-驱替技术应用于煤层瓦斯强化抽采领域,并且取得了较好的效果<sup>[3-4]</sup>。煤层注气实质是“气驱气”,其作用机理与石油系统的“水驱油”、“气驱油”有着很大的区别,它不存在两相介质统一的驱替面,且弱吸附性气体( $N_2$ )能表现出对强吸附性气体( $CH_4$ )的良好置换-驱替效应,这与经典的吸附理论存在较大的差异。为此,国内外学者针对煤层注气置换-驱替煤层瓦斯机理进行了大量研究<sup>[5-7]</sup>。

通常用作注源气体的 $N_2$ 和 $CO_2$ ,其吸附性相对于 $CH_4$ 有着明显的差异,因此在置换-驱替煤层甲烷的机理上也存在较大的差异。在定容变压的置换系统(向密闭容器中充入高压气体)中, $N_2$ 之所以能够置换比自己吸附性强的 $CH_4$ ,主要是因为注入的 $N_2$ 改变了系统总压及 $N_2$ 吸附引起总吸附饱和度增加所致;而 $CO_2$ 能够置换 $CH_4$ 则主要是依靠其对吸附位的竞争优势<sup>[8-14]</sup>。而在定容恒压的渗流系统(一端充气另一端排气的渗流系统)中,其作用机理非常复杂,是吸附置换(发生在吸附位上的置换)、扩散置换(发生在微孔自由空间的置换)、驱替(渗流携带)及增压充填等多重作用机理的耦合效应。笔者在煤层注 $N_2$ 模拟实验中发现,注源气体在煤体中的置换-驱替效应会表现出分时分段特征,其突破时间随着注气压力增加而减小<sup>[15]</sup>。

然而,在煤层注气过程中,注源气体吸附性强弱会对总突破时间造成多大的差异?气体动力粘性的差异又会对渗流突破时间造成多大差异?造成总突破时间差异的主要因素是气体吸附吸附性还是动力粘性呢?为此,作者进行了不同气体的煤层注气实验室模拟实验。

为了便于理解,这里需要澄清两个概念:总突破时间和纯渗流突破时间。总突破时间是指注源气体置换-驱替含瓦斯煤中甲烷的模拟实验中,从排气口能够检测到注源气体的最短时间。纯渗流突破时间是指不考虑煤对注源气体的吸附性(或使用与实验煤体相同的非吸附性相似材料)的前提下,注源气体渗流通过煤体(或相似材料)的最短时间。

## 1 煤层注气模拟实验

### 1.1 实验装置

实验装置由煤样腔体(内尺寸为400 mm×300 mm×300 mm)、抽真空系统、应力加载系统、压力采集系统、流量监测系统、注气控制系统及气体组分分析系统等组成,如图1所示。煤样腔体内气压通过预埋小管径的中空管外接压力传感器的方式监测,通过钢瓶减压阀和高压流量计对注源气体压力和流量进行控制和监测,用煤气表测定出口低压气体的流量,用气样袋收集出口气样并通过气相色谱仪分析气体组分体积分数。

### 1.2 实验方法和条件

实验流程包括煤样分层预压装载→抽真空→充入甲烷吸附平衡→高压游离甲烷自然泄压排放→注气置换-驱替实验→注气结束后残留自由气体的自然泄压排放和煤中吸附气体的常压解吸等。

实验所采用的煤样取自河南郑州矿区的华泰煤矿二<sub>1</sub>煤层,煤种属于无烟煤,实验煤样粒径<1 mm,水

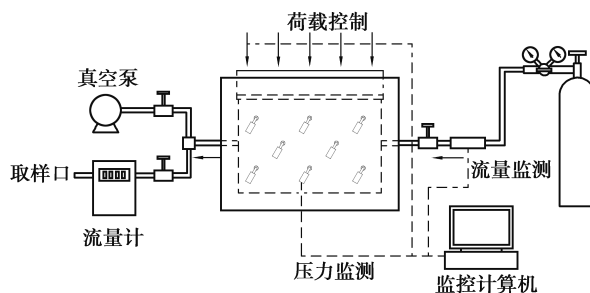


图 1 实验装置示意图

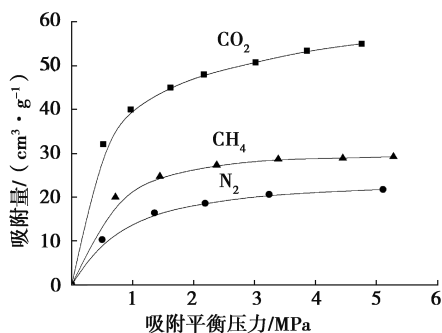
Fig.1 Schematic diagram of experimental installation

分为 2.44%、灰分为 12.47%、挥发分为 8.43%、真相对密度为  $1.72 \text{ t/m}^3$ 、视相对密度为  $1.65 \text{ t/m}^3$ ，装样量均为 39.85 kg，实验温度为室温。垂直应力加载控制在  $(150 \pm 2) \text{ kN}$ （相当于垂直应力  $1.25 \text{ MPa}$ ）；实验前先对煤样抽真空，使真空度小于  $500 \text{ Pa}$ ，然后充入  $\text{CH}_4$  使其吸附平衡压力为  $0.7 \text{ MPa}$ 。注气前先将腔体内的游离  $\text{CH}_4$  排放。实验过程中实时监测出口气体的流量、体积分数、腔体内气体压力等参数。注气结束时间为出口气体甲烷体积分数降低到 10% 左右，注气结束后继续自然排放实验腔体内的气体。

需要解释的是，一方面考虑到大部分煤层注气工程背景条件一般受地质构造应力的影响较小，另一方面是受实验设备加载能力的限制，本实验是在垂直应力较小、水平刚性约束（没有加载围压）的条件下进行的，其研究成果对浅部或卸压区煤层注气有理论指导意义。

## 2 煤对 $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ , $\text{N}_2$ , $\text{He}$ 吸附性差异

实验室测定了在  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  时煤样对单组分  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$  的等温吸附曲线，如图 2 所示。计算得出常数分别为  $a_{\text{CH}_4} = 31.82 \text{ cm}^3/\text{g}$ ,  $b_{\text{CH}_4} = 2.42 \text{ MPa}^{-1}$ ,  $a_{\text{N}_2} = 25.15 \text{ cm}^3/\text{g}$ ,  $b_{\text{N}_2} = 1.37 \text{ MPa}^{-1}$ ,  $a_{\text{CO}_2} = 59.23 \text{ cm}^3/\text{g}$ ,  $b_{\text{CO}_2} = 2.15 \text{ MPa}^{-1}$ 。实验证明，煤对  $\text{He}$  没有吸附性，所以  $a_{\text{He}} = 0 \text{ cm}^3/\text{g}$ ,  $b_{\text{He}} = 0 \text{ MPa}^{-1}$ 。因此，煤样对实验气体的吸附能力大小为  $\text{CO}_2 > \text{CH}_4 > \text{N}_2 > \text{He}$ 。

图 2 煤对  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$  吸附特征曲线Fig.2 Adsorption characteristic curve of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$  in coal samples

## 3 煤层注气过程的特征分析

### 3.1 注源气体的突破时间

注气实验过程中，注源气体往往在注气后滞后一段时间才能从出口气体中检测出来，这一滞后时间就是突破时间。在注气开始到突破时间之前，出口气体组成均为 100% 的  $\text{CH}_4$  气体；达到突破时间之后，出口才可以检测到注源气体，并且体积分数不断增大，同时  $\text{CH}_4$  体积分数开始降低。当采用不同气源进行注气时，由于注源气体吸附性的差异，其总突破时间存在极大的差异。根据实验结果，煤层注  $\text{He}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  的总突破时间分别为 0.92, 14, 46 min。注气模拟实验中出口气体体积分数变化规律如图 3 所示。

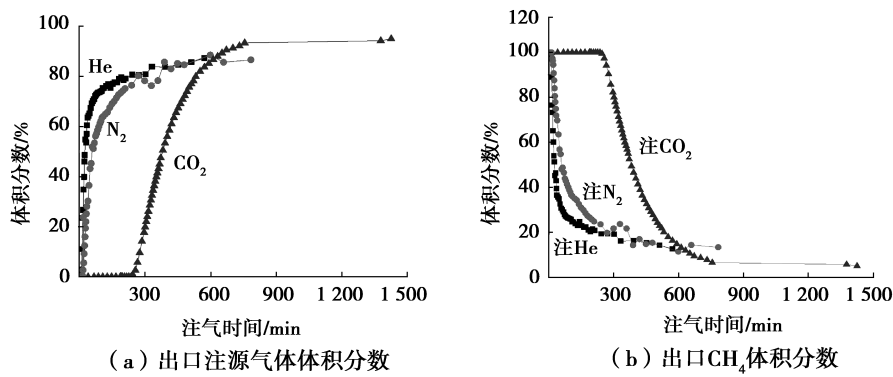


图3 出口气体组分体积分数变化曲线

Fig.3 Gas component concentration in the outlet

### 3.2 注气过程中的分时分段特征

从煤层注气模拟实验的出口气体体积分数变化规律可以看出,煤层注气过程表现出明显的分段特征,并且总体上可以分为三个阶段。

第一阶段:注源气体没有突破到出口,即注气时间小于突破时间。这一阶段的特征是随着注气时间的增加原吸附气体 CH<sub>4</sub> 的出口流量不断增加,并趋于平衡,而体积分数却保持 100% 不变。在这段时间内,出口检测不到注源气体流出,其体积分数始终保持为 0。

第二阶段:注源气体已经突破到出口,并且其体积分数逐渐增大。这一阶段的特征是原吸附气体流出的体积分数逐渐减小,而注源气体流出的体积分数不断增大,二者最终达到平衡状态。

第三阶段:原吸附气体和注源气体体积分数均达到平稳状态。注气实验经过一段较长的时间后,出口各组分体积分数均达到平稳状态,体积分数基本保持不变。

在注气置换驱替煤层 CH<sub>4</sub> 的过程中,与注 CO<sub>2</sub> 产出 CH<sub>4</sub> 机理不同,N<sub>2</sub> 的吸附性比 CH<sub>4</sub> 要弱,不能依靠自身的吸附能力把 CH<sub>4</sub> 从吸附位上置换下来。但当 N<sub>2</sub> 注入到煤体之后会稀释煤体中的 CH<sub>4</sub>,使 CH<sub>4</sub> 的分压降低,其吸附平衡状态被打破,从而使吸附态的 CH<sub>4</sub> 发生解吸,并通过气体流动的携载作用将其“带”出煤体。综上所述,注 N<sub>2</sub> 产出 CH<sub>4</sub> 的机理主要有注入气体的稀释扩散作用及气体的携载作用。而注非吸附性 He 产出 CH<sub>4</sub> 也有类似的作用机理。

## 4 突破时间差异性的定量分析

### 4.1 纯渗流的突破时间

假设气体流经煤体时没有吸附和置换作用,或假设注源气体流过的是没有吸附性的煤体相似材料,那么气体在煤体或相似材料中的流动以渗流运动为主,其突破时间仅与煤体的渗透率、气体的粘性和注气压力有关。由于实验条件下煤体均质性较好,除了边界效应(实验中作专门处理后降到最小)外其透气性分布均匀,符合线性渗流特征,服从达西定律:

$$v = -\frac{K}{\mu} \cdot \frac{dp}{dx}, \quad (1)$$

式中: $v$  为流速, m/s;  $\mu$  为气体动力粘度系数, Pa·s;  $K$  为煤层的渗透率, m<sup>2</sup>;  $dp/dx$  为流体沿  $x$  方向压力梯度, Pa/m。

腔体内煤体可看作是水平、等厚、条带状均质地层,其长  $L=0.4$  m,宽  $W=0.3$  m,高  $H=0.3$  m。由于煤对 He 没有吸附性,因此可以将 He 在煤中的运动简化成流速在各断面上均匀分布的纯线性渗流运动,注 He 时两端压力差为 0.9 MPa。当注气后期 He 体积分数达 97.5% 时,可近似看做是纯 He 的稳定渗流,此时流量为 2.65 L/min,垂直于流速的断面上平均流速为 0.007 2 m/s。He 的动力粘度为  $1.98 \times 10^{-5}$  Pa·s,则根据达西计算的实验煤体渗透率  $K$  为  $6.355 6 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>。

在相同条件下注 N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 时,假设煤中也不存在吸附置换作用,N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的动力粘度分别取  $1.780 5 \times$

$10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  和  $1.493 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  时,则按式(1)可以计算出气体的流速,进而结合煤体长  $L$  可以算出 He,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  的纯渗流突破时间分别为 0.92, 0.83, 0.70 min。如表 1 所示。

表 1 三种注源气体突破时间

注源气体	突破时间/min	
	总突破时间/min	纯渗流突破时间/min
He	<2	0.92
$\text{N}_2$	14	0.83
$\text{CO}_2$	246	0.70

从表中可以看出,如果不考虑吸附和置换的影响,三种气体流经煤体的纯渗流突破时间均在 1 min 之内。但在考虑吸附置换作用下,实验的总突破时间大大增加。 $\text{N}_2$  和  $\text{CO}_2$  的纯渗流突破时间仅为总突破时间的 5.93% 和 0.28%。因此,气体的纯渗流突破时间远远小于总突破时间,它不是决定总突破时间大小的主要因素。

在总突破时间内,注源气体并未从出口析出,表明所注入的气体全部滞留在煤层中,主要表现为两种形式:一是充填扩散到煤体自由空间内导致煤体内气体总压升高;二是吸附于煤体表面,但吸附量远远低于平衡吸附状态的吸附量,因此不会有多余的注源气体流出。

#### 4.2 突破时间内注源气体的升压充填量

在注气过程中,由于注源气体的充入,腔体内气体压力升高过程如图 4 所示。从图 4 中可以看出,气体吸附性越弱,升压越快,越早达到稳定。

实验中,注  $\text{CO}_2$  压力上升过程中,在总突破时间附近有一个拐点,拐点之后的 100 min 内腔体内气体压力保持平稳,之后压力迅速上升。此现象与  $\text{CO}_2$  从煤体中流出有关。由于煤对  $\text{CO}_2$  的吸附能力大, $\text{CO}_2$  的流出减缓了对煤体自由空间的填充和气体压力上升的速率,出现了相对平稳的阶段。随着  $\text{CO}_2$  吸附饱和度的不断增大, $\text{CO}_2$  的吸附逐渐接近平衡状态,自由空间继续被填充并导致压力继续上升。 $\text{N}_2$  和 He 由于其吸附性较弱,没有表现出明显的拐点现象。

根据注 He 实验数据,在 0.92 min 的突破时间内,注入 He 的平均流量为 5.075 L/min,实测煤体中 He 累积滞留量为 4.68 L,导致煤体内气体总压由 0.1 MPa 升至 0.14 MPa。由于 He 不具有吸附性,因此可以计算出注气压力下煤体自由空间内气体充填量。

自由空间充填量(游离气体量) $Q_{yi}$ (标况下)按式(2)计算:

$$Q_{yi} = \frac{273.2 \times P_i \times V_s}{Z_i \times (273.2 + t) \times 0.101325}, \quad (2)$$

式中: $Z_i$  为环境温度为  $t$  和压力为  $P_i$  条件下吸附腔体中气体的压缩因子,无量纲; $t$  为吸附平衡时实验温度,℃; $V_s$  为煤体吸附腔体剩余体积, $\text{cm}^3$ 。

因为 He 为非吸附性气体,所以突破时间内的注入量即为自由空间的充填量。对于  $\text{N}_2$  和  $\text{CO}_2$  来说,尽管其具有一定的吸附性能,但充入后也有一定的气体量充入到煤体自由空间并导致气体总压上升。这部分注源气体也不会从出口析出。从图中可以看出注  $\text{N}_2$  和  $\text{CO}_2$  在达到总突破时间时由于气体的充填煤体内气体总压分别上升至 0.32 MPa 和 0.43 MPa。可以得到  $\text{N}_2$  和  $\text{CO}_2$  的相应气体升压充填量分别为 25.13 L 和 38.25 L,如表 2 所示。

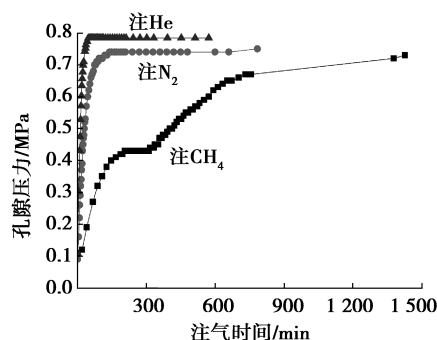


图 4 腔体内气体压力变化曲线

Fig.4 Curve of gas pressure in sample cavity

表2 突破时间内注源气体注入量和吸附量

Table 2 Adsorption capacity of injection volume of injection source gas in breakthrough time

注源气体	煤样量 $M/g$	平衡时最大 吸附总量 $Q_1/cm^3$	突破时间 $T/min$	突破时间内 注入量 $Q_1'/cm^3$	自由空间填 充量 $Q_3/cm^3$
He	39 850	0.00	0.92	4 684.62	4 684.62
N <sub>2</sub>	39 850	196 150.02	14.00	35 068.60	25 128.73
CO <sub>2</sub>	39 850	858 131.16	246.00	580 470.00	38 248.35

根据实验数据可以得出注 He, N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 在达到总突破时间时煤体内气体总压分别为 0.14, 0.32, 0.43 MPa。不难看出存在这样一个趋势:注源气体的吸附性越强,突破煤体时所需要的气体总压越高,即  $P_{CO_2} > P_{N_2} > P_{He}$ 。

### 4.3 注源气体的吸附量对突破时间的影响

由实验可是看出,随着注源气体吸附性增强,总突破时间大幅度增加。在相同注气压力下,CO<sub>2</sub>的总突破时间是 N<sub>2</sub>的总突破时间的 17.57 倍。因此,气体吸附性差异才是决定总突破时间的主要因素。

注源气体进入煤体后,经过渗流和扩散充填到煤体微孔自由空间并到达煤体表面,一方面与吸附态的 CH<sub>4</sub> 展开竞争吸附,另一方面也可以继续占据空闲的吸附位,使煤体的总吸附饱和度增加。由于注入气体的总量较少,此时注入的气体全部滞留在煤体中,并没有多余的气体从出口排出。

注气实验中注源气体的吸附量可以用多元气体的扩展 Langmuir 方程计算。对于二元气体来说其吸附量可用下式描述。

$$V_1 = \frac{a_1 b_1 p_1}{1 + b_1 p_1 + b_2 p_2}, \quad (3)$$

式中:  $V_1$  为气体组分 1 在压力  $p_1$  下的吸附量,  $m^3/t$ ;  $a_1, b_1$  为气体组分 1 的吸附常数,  $m^3/t, MPa^{-1}$ ;  $p_1, p_2$  分别为气体组分 1 和 2 的分压力, MPa;  $b_2$  为气体组分 2 的吸附常数,  $MPa^{-1}$ 。

注气实验时,煤体内无 CH<sub>4</sub> 补充进来,因此认为 CH<sub>4</sub> 分压为 0.1 MPa 不变,根据上面实验得到的注源气体突破煤体时的气体总压,可得 CO<sub>2</sub> 的分压为 0.43 MPa - 0.1 MPa = 0.33 MPa,同理 N<sub>2</sub> 的分压为 0.22 MPa。根据式(3)计算注源气体吸附量如表 2 所示。

从表中可以看出,在突破时间内的注入总量扣除煤体自由空间的填充量, N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 分别共有 9 939.87  $cm^3$  和 542 221.65  $cm^3$  被吸附,仅占该状态下平衡吸附量总量的 5.07% 和 63.19%,因此在突破时间内没有“多余”的注源气体从出口排出。

当然,以上分析和计算都是基于突破时间内某一静态条件下的,而吸附、解吸、置换、渗流及扩散均是一个瞬变的动态过程,而且这些过程同时进行、相互耦合。即注源气体进入煤体后同时进行渗流和扩散,充填煤体自由空间使煤层内气体总压升高的同时,在其到达的煤体表面也进行着吸附、解吸和置换,不可能存在独立的渗流、扩散、充填、吸附、解吸和置换过程。

## 5 结 论

1) 不同注源气体置换-驱替煤中 CH<sub>4</sub> 过程均表现出明显的分时分段特征,气体的吸附性强弱是决定总突破时间的主要因素,总突破时间的大小与气体吸附性强弱呈正相关关系。CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> 和 He 的总突破时间分别为 246, 14, 0.92 min, 其大小关系为  $T_{CO_2} > T_{N_2} > T_{He}$ 。

2) 总突破时间内, N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 吸附量占同一状态下平衡吸附总量的 5.07% 和 63.19%。

3) 实验条件下注源气体渗流通过煤体的时间均在 1 min 之内,造成总突破时间大幅度增加的原因是气体吸附和置换,造成不同注源气体总突破时间巨大差异的原因是注源气体吸附性差异引起的初始不平衡吸附。

## 参考文献:

- [1] 易丽军,俞启香.低透气性煤层瓦斯抽采增流技术[J].矿业安全与环保,2005,32(6):46-48.  
YI Lijun, YU Qixiang. Gas drainage and increasing technology of low permeability coal seam[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2005, 32(6):46-48. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] 杨宏民. 井下注气驱替煤层甲烷机理及规律研究[D]. 焦作:河南理工大学, 2010.  
YANG Hongmin. Study on mechanism and characteristics laws of displacement coalbed methane by underground gas injection[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2010. (in Chinese)
- [4] 郑尚超, 代志旭. 气体驱替在提高瓦斯抽采率中的创新与应用[J]. 煤矿安全, 2008, 39(8):22-24.  
ZHENG Shangchao, DAI Zhixu. Innovation and application of gas displacement to improve gas drainage rate[J]. Safety in Coal Mines, 2008, 8:22-24. (in Chinese)
- [5] Teng T, Wang J G, Gao F, et al. Complex thermal coal-gas interactions in heat injection enhanced CBM recovery[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 34:1174-1190.
- [6] Yang H, Xu J, Peng S, et al. Large-scale physical modelling of carbon dioxide injection and gas flow in coal matrix[J]. Powder Technology, 2016, 294:449-453.
- [7] 张美红, 吴世跃, 李川田. 煤系地层注入 CO<sub>2</sub> 开采煤层气质交换的机理[J]. 煤炭学报, 2013, 38(7):1196-1200.  
ZHANG Meihong, WU Shiyue, LI Chuantian. Mass exchange mechanism of coalbed methane exploitation by CO<sub>2</sub> injection in coal measure strata[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(7):1196-1200. (in Chinese)
- [8] 王永康. 注二氧化碳驱替甲烷实验及数值模拟分析[D]. 徐州:中国矿业大学, 2016.  
WANG Yongkang. Experiment and numerical simulation analysis of displacing CH<sub>4</sub> by CO<sub>2</sub> injection[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016. (in Chinese)
- [9] Frédéric G, Eric P, Aurélien L. CO<sub>2</sub> injection in a coal seam: insights from the European CARBOLAB project with focus on water geochemical monitoring[J]. Energy Procedia, 2014, 63(4):5836-5848.
- [10] Qu H, Liu J, Chen Z, et al. Complex evolution of coal permeability during CO<sub>2</sub> injection under variable temperatures[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 9:281-293.
- [11] 徐龙君, 刘成伦, 鲜学福. 注入增产法提高煤层气采收率的理论探讨[J]. 重庆大学学报, 2000, 23(6):42-44.  
XU Longjun, LIU Chenglun, XIAN Xuefu. Study on the mechanism of increasing coal-bed methane production by gas injection[J]. Journal of Chongqing University, 2000, 23(6):42-44. (in Chinese)
- [12] Syed A, Durucan S, Shi J Q, et al. Flue gas injection for CO<sub>2</sub> storage and enhanced coalbed methane recovery: mixed gas sorption and swelling characteristics of coals[J]. Energy Procedia, 2013, 37(2):6738-6745.
- [13] Lafortune S, Adeline F, Lahaie F, et al. Monitoring a 120-kg CO<sub>2</sub> injection in a coal seam with continuous gas and microseismic measurements (European RFCS CARBOLAB research project)[J]. Energy Procedia, 2014, 63:4464-4472.
- [14] 杨宏民, 王兆丰, 任子阳. 煤中二元气体竞争吸附与置换解吸的差异性及其置换规律[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7):1550-1554.  
YANG Hongmin, WANG Zhaofeng, REN Ziyang. Differences between competitive adsorption and replacement desorption of binary gases in coal and its replacement laws[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7):1550-1554. (in Chinese)
- [15] 杨宏民, 冯朝阳, 陈立伟. 煤层注氮模拟实验中的置换-驱替效应及其转化机制分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(9):2246-2250.  
YANG Hongmin, FENG Zhaoyang, CHEN Liwei. Analysis of replacement-displacement effect and its change mechanism on simulation experiment of nitrogen injection into coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9):2246-2250. (in Chinese)