

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2017.07.024

煤层注 N₂ 促排瓦斯时效性实验研究

陈立伟¹, 杨天鸿¹, 杨宏民², 冯朝阳²

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南焦作 454000)

摘要: 为了研究煤层注弱吸附性气体强化瓦斯排放的过程和效果,利用自行搭建的煤层注气驱替实验装置,进行了注 N₂ 驱替 CH₄ 实验.实验结果表明:注 N₂ 驱替煤层 CH₄ 具有时效特性,排出 CH₄ 体积分数逐渐衰减,流量先升后降.注气压力对驱替 CH₄ 效果显著,注气压力越高,驱出 CH₄ 体积分数衰减越快,驱出气体流量越大,增流效应越明显;相同时间内,注气压力越高,累计驱出 CH₄ 体积越大,促排效果越明显.结合实验过程中二元气体物理状态变化规律,认为注 N₂ 促排煤层 CH₄ 机理有:气体的置换作用、气流的携载作用和气流的稀释扩散作用等.

关键词: N₂-ECBM; 促排瓦斯; 时效性; 置换; 携载; 扩散

中图分类号: TD 712.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)07-1026-05

Experimental Research on Timeliness of Promoting Gas Drainage by N₂ Injection in Coal Bed

CHEN Li-wei¹, YANG Tian-hong¹, YANG Hong-min², FENG Zhao-yang²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China. Corresponding author: CHEN Li-wei, E-mail: clwlf@163.com)

Abstract: In order to make clearly the process and features of gas emission by injecting N₂, N₂ displacement coal seam CH₄ tests were performed by using coal bed gas injection displacement experiment device. The results show that N₂ displacement coal bed CH₄ is a time-dependent process with a gradual decay of drained CH₄ concentration, and CH₄ flow increases at first and then decreases. Gas injection pressure has significant impact on the displacement effect, the higher the injection pressure, the faster the drained CH₄ concentration decay, the larger injection gas flow, the more significant the flow rate increases. During the same time, the higher gas injection displacement pressure is, the larger the drained CH₄ volume. According to the theoretical analysis, the mechanisms of injecting N₂ displacement coal bed CH₄ include the gas displacement, the air carrying and the dilution and diffusion of gas flow.

Key words: N₂-ECBM; promoting gas drainage; timeliness; displacement; carrying; diffusion

煤层注气促使瓦斯排放源于石油系统的气驱油技术和 CO₂ 地质封存技术. CO₂ 地质封存技术不仅减少了温室气体的排放,而且提高了煤层气的采收率.因此,美国、日本、欧盟、加拿大、中国等国家和地区纷纷对此技术展开研究,并进行了不同规模的现场试验^[1].2001年,美国进行了首次 CO₂ 驱替煤层气的现场试验^[2].日本在北海道、欧盟在波兰、加拿大在 Alberta 盆地、中国在沁水

盆地分别进行了不同规模的现场试验^[3-6].杨宏民在阳泉矿区煤矿井下进行煤层低压注氮气(< 0.6 MPa)促抽/排瓦斯现场试验^[7],试验发现:向煤层中注入氮气可起到明显的促抽/排瓦斯效果.与此同时,国内外学者也进行了相关的理论研究. Fitzgeralda 等^[8]和 Busch 等^[9]认为,煤对 N₂, CH₄, CO₂ 的吸附能力逐渐变强. Katayama^[10]认为,CO₂ 置换 CH₄ 的机理是由于 CO₂ 具有更强的

收稿日期: 2016-02-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174081); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51404091).

作者简介: 陈立伟(1980-),男,辽宁朝阳人,东北大学博士研究生; 杨天鸿(1968-),男,辽宁抚顺人,东北大学教授,博士生导师.

吸附性能,而 N_2 置换 CH_4 是由于注 N_2 降低了 CH_4 的分压. Clarkson等^[11]同样认为,向煤层中注入非 CH_4 气体后,可以降低 CH_4 的分压,促使 CH_4 解吸,增加 CH_4 的采气率. 方志明等^[1]认为注 CO_2 强化煤层气采收率主要作用有两方面,一是由于 CO_2 与 CH_4 发生竞争吸附,从而置换 CH_4 气体,同时降低 CH_4 分压;二是注入气体维持了更高的压力梯度,起到增流作用,这两种作用共同提高 CH_4 产气率. 杨宏民^[7]认为注气促使 CH_4 解吸产出机理有:置换作用、驱替作用、稀释扩散作用和膨胀增透作用等.

综上所述,煤层注入弱吸附性气体(N_2)能够强化煤中 CH_4 排放,为了研究促使煤中 CH_4 排放的过程和作用效果,本文提出向煤层注入 N_2 驱替煤中 CH_4 的实验研究.

1 实验装置与方法

1.1 实验装置

实验装置包括7个组成部分:实验腔体、加载系统、注气系统、抽真空系统、气体压力采集系统、气体定量与分析系统(见图1).

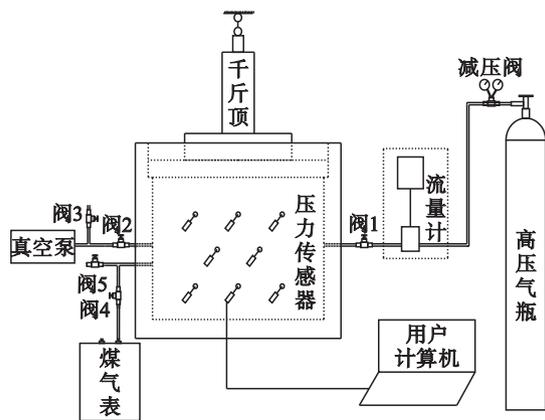


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

实验腔体内腔尺寸(长×宽×高)为400 mm×300 mm×300 mm,壁厚40 mm,密封采用双“O”型圈,轴向加载通过千斤顶和反压架实现,围压通过实验腔体的被动刚性约束限制,通过伺服系统控制压力的大小和保压. 通过腔体侧面预留孔插入煤体的空心管和压力传感器(YHT3015)监测煤体内部压力的变化,实时采集压力数据. 注气口采用高压气瓶提供注气压力,减压阀提供恒定压力,高压流量计记录注气流量. 出气口采用高精度流量计(煤气表)测定流量,采样

袋采集气样并进行色谱分析,得到实验不同时刻的气体浓度.

1.2 实验煤样

实验采用颗粒煤(粒度<1 mm)在垂直应力加载条件下分层预压成型煤,分三次装样,每次厚度100 mm,压力150 kN,保压时间2 min. 实验煤样的各项参数:水分4.54%,灰分14.66%,挥发分8.43%,真密度1.76 t/m³,视密度1.68 t/m³,坚固性系数0.15.

1.3 实验方法及步骤

1) 抽真空:将系统连接到真空泵上,开启真空泵进行抽真空,直到真空计的读数为500 Pa以下为止.

2) CH_4 吸附平衡: CH_4 气源由高压钢瓶提供,钢瓶出口连接减压阀,注气采用不定时间断补气法,甲烷的最终吸附平衡压力为0.7 MPa,为了使甲烷充分被吸附,此过程所需时间不少于48 h.

3) 放气:打开腔体的出气口,让甲烷自由流出,放掉腔体内的游离甲烷,当压力降到0.1 MPa左右后,通过煤气表记录放出气体的体积.

4) 注气:步骤3完成后,立即向腔体注入 N_2 . 压力梯度为0.6 MPa→1 MPa→1.4 MPa,流量计和煤气表分别记录进、出口的流量.

5) 出气口收集气体及组分分析:驱替过程中在出气口定时收集气体,每收集一次气体,记录一次煤气表和流量计的读数,用气相色谱仪分析组分的浓度,来确定驱替过程结束的时间.

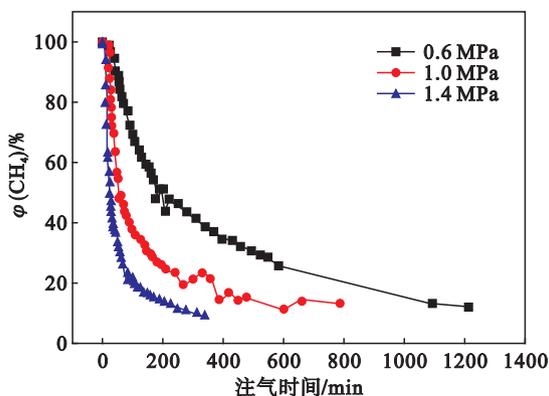
6) 卸压:停止注气后,记录煤气表和流量计的最终读数. 使钢瓶与流量计断开,让腔体中的气体从出气口自由释放,模拟卸压过程.

7) 实验结束:当腔体内气体压力稳定时,卸压结束,收集数据.

2 实验结果及分析

2.1 注气压力越高, CH_4 体积分数衰减越快

注 N_2 驱替煤层 CH_4 实验中驱出 CH_4 体积分数变化规律如图2所示. 由图2中可以看出:当注气压力为0.6 MPa时,120 min时 CH_4 体积分数急剧下降到50%,随着 N_2 的持续注入,体积分数持续下降,驱替结束(1210 min)时下降到12.27%. 当注气压力为1.0 MPa时,55 min时 CH_4 体积分数急剧下降到50%,驱替结束(784 min)时 CH_4 下降到13.36%. 当注气压力为1.4 MPa时,27 min时 CH_4 体积分数急剧下降到50%,驱替结束(340 min)时下降到9.12%.

图 2 驱出 CH_4 体积分数随注气时间的变化Fig. 2 Change of driven out of the CH_4 concentration with injection time

2.2 注气压力越高,驱出气体流量变化幅度越大,增流效应越显著

注 N_2 驱替煤层 CH_4 实验中驱出混合气体流量变化规律如图 3 所示,驱出 CH_4 流量随注气时间的变化规律如图 4 所示。

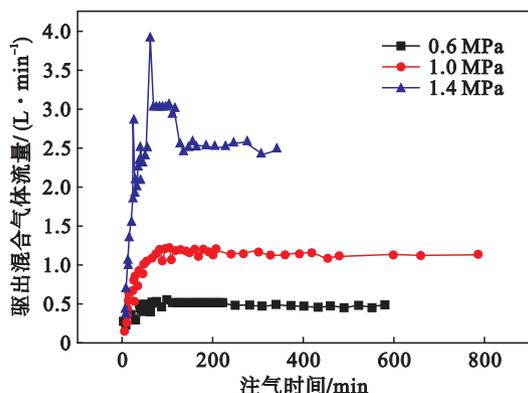


图 3 驱出混合气体流量随注气时间的变化

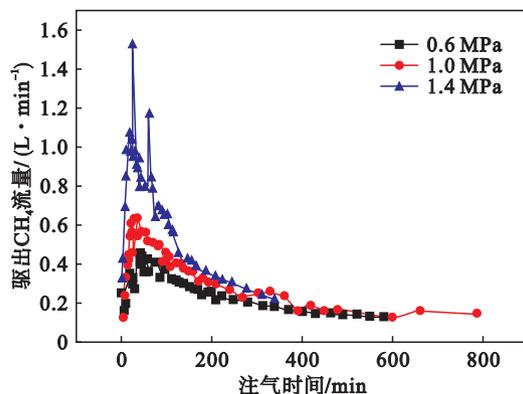
Fig. 3 Change of driven out of the mixed gas flow with injection time

由图 3 中可以看出:

1) 初始时驱出混合气体流量迅速上升. 当注气压力为 0.6 MPa 时,注气 45 min 时混合气体流量由 0.25 L/min 上升到 0.5 L/min,随着 N_2 的持续注入,混合气体流量稳定在 0.5 L/min 左右. 当注气压力为 1.0 MPa 时,注气 18 min 时混合气体流量由 0.14 L/min 上升到 0.55 L/min,到 84 min 时混合气体流量上升到 1.20 L/min,随着 N_2 的持续注入,混合气体流量稳定在 1.2 L/min 左右. 当注气压力为 1.4 MPa 时,注气 13 min 时混合气体流量上升到 1.0 L/min,到 29 min 时混合气体流量上升到 2.1 L/min,而到 66 min 时混合气体流量上升到 3.0 L/min,随着 N_2 的持续注入,混合气体流量略有变化,最终稳定在 2.5 L/min 左右.

2) 注气压力越高,驱出气体稳定流量越大.

当注气压力为 0.6 MPa 时,流量稳定在 0.5 L/min,当注气压力为 1.0 MPa 时,流量稳定在 1.2 L/min,当注气压力为 1.4 MPa 时,流量稳定在 2.5 L/min.

图 4 驱出 CH_4 流量随注气时间的变化Fig. 4 Change of driven out of the CH_4 flow with injection time

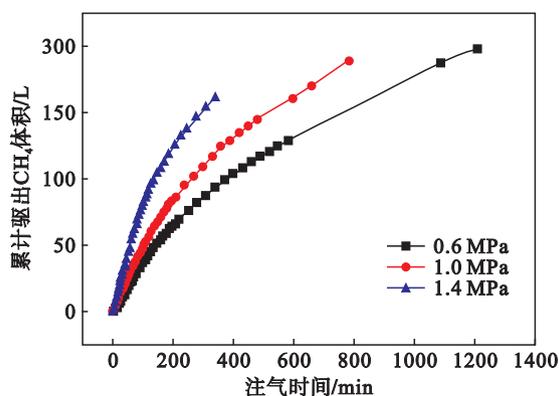
由图 4 中可以看出:

1) 驱出 CH_4 流量先上升后下降. 当注气压力为 0.6 MPa 时,注气 35 min 时 CH_4 流量由 0.25 L/min 迅速上升到 0.46 L/min,之后随着 N_2 的持续注入, CH_4 流量缓慢下降,驱替结束时稳定在 0.15 L/min 左右. 当注气压力为 1.0 MPa 时,注气 28 min 时 CH_4 流量由 0.14 L/min 迅速上升到 0.64 L/min,之后随着 N_2 的持续注入, CH_4 流量缓慢下降,驱替结束时稳定在 0.15 L/min 左右. 当注气压力为 1.4 MPa 时,注气 28 min 时 CH_4 流量由 0.33 L/min 迅速上升到 1.07 L/min,之后随着 N_2 的持续注入, CH_4 流量缓慢下降,驱替结束时稳定在 0.22 L/min 左右.

2) 注气压力越高,驱出 CH_4 流量变化幅度越大.

2.3 驱替压力越高,驱出 CH_4 体积越大

注 N_2 驱替煤层 CH_4 实验中驱出 CH_4 体积变化规律如图 5 所示.

图 5 驱出 CH_4 体积随注气时间的变化Fig. 5 Change of driven out of the CH_4 volume with injection time

由图5中可以看出:随着注气时间的延长,驱出CH₄体积增大;相同的注气时间内,驱替压力越高,驱出CH₄体积越大。

2.4 煤层注N₂促排CH₄效果分析

由上述实验结果可知,煤层注N₂驱替CH₄是一个动态过程,驱出CH₄的体积分数、流量和体积随着注入N₂的压力、流量、时间不断发生变化,说明注N₂驱替煤层CH₄具有时效性。注气刚开始时,腔体内CH₄经过自然排放后仍有部分残余,随着N₂的注入,腔体内孔隙压力升高,渗流速度加快,残余的游离CH₄渗流速度随之加快,煤体中吸附的CH₄也开始解吸并随N₂气流流出,由于腔体内气体压力的迅速上升造成驱出CH₄流量迅速上升;当残留的游离CH₄不足以维持析出CH₄流量上升的趋势时,驱出CH₄流量开始下降,由于煤中CH₄含量的减少,析出的CH₄流量缓慢下降,逐渐趋于稳定。注气压力的提高,加快了渗流的速度,提高了腔体内孔隙压力,促使吸附CH₄快速解吸,所以驱出CH₄流量随注气压力提高而上升,相同时间内,压力越高,累计驱出CH₄体积越大,促排效果越明显。

3 注N₂促排煤层CH₄机理分析

3.1 置换作用机理

注入的N₂进入腔体后,腔体内压力升高,氮气的分压也呈上升趋势,参考扩展的Langmuir方程(式(1))可知,在甲烷没有析出时,甲烷分压不变,但是氮气的注入后,系统内多了一种气体且分压 $p_2 > 0$,分母由于多了一项而增大,在分子不变的情况下,吸附量 V_1 减小,所以吸附态的CH₄会解吸,成为游离态。而在本次实验中,腔体内CH₄是随着注入的N₂不断析出腔体的,CH₄的分压降低,故式中分子也在不断减小,加剧了煤体中吸附态CH₄的解吸。

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

式中: V_1 为CH₄在 p_1 下的吸附量, m^3/t ; a_1, b_1 为CH₄的吸附常数, $\text{m}^3/\text{t}, \text{MPa}^{-1}$; b_2 为N₂的吸附常数, MPa^{-1} ; p_1, p_2 分别为CH₄和N₂的分压,MPa。

从式(1)可以看出,N₂分压促使CH₄解吸的同时,也会有一部分N₂被吸附进入煤体,宏观表现出来的是N₂被煤体吸附,而CH₄被置换出来。

3.2 稀释扩散作用机理

煤体中的CH₄由于分压降低会从基质的孔

隙中解吸,吸附在煤基质中小孔和微孔的CH₄分子解吸后,其主要的运动形式是在浓度梯度的作用下进行扩散运动,符合菲克扩散定律,即

$$j = -D \frac{\partial X}{\partial n} \quad (3)$$

此次实验中,N₂注入后,CH₄被稀释后体积分数降低,这就使得裂隙表面的微孔及小孔两端重新获得浓度差,气体定向扩散继续进行。不仅CH₄会由于裂隙表面的CH₄体积分数降低而向外扩散,同时,注入的N₂也会在浓度差的作用下从裂隙空间被煤基质表面吸附并向微孔、小孔扩散。N₂通过扩散进入微孔、小孔内后,增加了孔内压力,可以促进CH₄的解吸。而从煤体解吸并扩散至裂隙的CH₄会被注入的N₂气流带走,这样微孔、小孔与煤基质表面的浓度差一直存在,所以解吸的CH₄会不断扩散出来,这也是注N₂促使CH₄解吸的机制之一。

3.3 气流的携载作用机理

注入的N₂在煤体流动过程中,不断将CH₄携载出腔体,携载作用的理论基础是达西渗流理论,即

$$\mu = -\lambda \frac{dp}{dx} \quad (4)$$

此次实验中,腔体中高压CH₄经过自然排放后,腔体内CH₄接近吸附平衡状态,且与外界大气的压差非常小,与渗流阻力非常接近,CH₄渗流速度趋近于0,注入N₂后提高了腔体与外界的压差,为腔体内流量的渗流提供了能量,腔体内流体的渗流速度提高,宏观表现为注入的N₂携载CH₄流出腔体。这样打破了腔体内原来的吸附状态,引起了N₂的分压促进CH₄解吸作用,携载作用和分压解吸作用相辅相成,不断使煤体中吸附的CH₄解吸并被排出。

4 结 论

1) 将不同注气压力条件下驱出气体体积分数、流量和体积数据进行对比分析,得到了提高注气压力对注气过程的影响规律。注气压力越高,驱出CH₄体积分数衰减得越快;注气压力越高,驱出气体流量越大,增流效果越显著。

2) 注气压力的提高,加快了渗流的速度,提高了腔体内孔隙压力,促使吸附CH₄快速解吸,所以驱出CH₄流量随注气压力提高而上升,相同时间内,压力越高,累计驱出CH₄体积越大,促排效果越明显。

3) 煤层注 N_2 促排瓦斯的作用机理主要有: 气体的置换作用、气流的稀释扩散作用、气流的携载作用等。

参考文献:

- [1] 方志明, 李小春, 李洪. 混合气体置换煤层气技术的可行性研究 [J]. 岩石力学, 2010, 31 (10): 3223 - 3229.
(Fang Zhi-ming, Li Xiao-chun, Li Hong. Feasibility study of gas mixture enhanced coal bed methane recovery technology [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31 (10): 3223 - 3229.)
- [2] Scott R R. The Coal-Seq project: key results from field, laboratory, and modeling studies [C] // Proceedings of the 7th Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT7). Oxford: Elsevier, 2005: 1399 - 1403.
- [3] Shi J Q, Sevet D, Masaji F. A reservoir simulation study of CO_2 injection and N_2 flooding at the Ishikari coalfield CO_2 storage pilot project, Japan [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2008, 2 (1): 47 - 57.
- [4] Van Bergen F, Pagnier H J M, van der Meer L G H, et al. Development of a field experiment of CO_2 storage in coal seams in the upper Silesian basin of Poland [C] // Proceedings of the 6th Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT6). Oxford: Pergamon, 2002: 569 - 574.
- [5] Gunter W D, Mavor M J, Robinson J R. CO_2 storage and enhanced methane production: field testing at Fenn-Big Valley, Alberta, Canada, with application [C] // Proceedings of the 7th Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT7). Oxford: Elsevier, 2005: 413 - 421.
- [6] 中联煤层气有限责任公司. 中国煤层气勘探开发技术研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 197 - 272.
(China United Coal Bed Methane Corporation Ltd. China's CBM exploration and exploitation technical researches [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 197 - 272.)
- [7] 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 Hong-min. Study on mechanism and characteristics laws of displacement coal bed methane by underground gas injection [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2010.)
- [8] Fitzgerald J E, Pana Z, Sudibandriyo M, et al. Adsorption of methane, nitrogen, carbon dioxide and their mixtures on wet Tiffany coal [J]. *Fuel*, 2005, 84 (18): 2351 - 2363.
- [9] Busch A, Krooss B M, Gensterblum Y, et al. High-pressure adsorption of methane, carbon dioxide and their mixtures on coals with a special focus on the preferential sorption behavior [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2003, 78 (5): 671 - 674.
- [10] Katayama Y. Study of coal bed methane in Japan [C] // Proceedings of United Nations International Conference on Coal Bed Methane Development and Utilization. Beijing: Coal Industry Press, 1995: 238 - 243.
- [11] 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.