

煤层注 N_2 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 N_2 驱替 CH_4 实验. 实验结果表明: 注 N_2 驱替煤层 CH_4 具有时效特性, 排出 CH_4 体积分数逐渐衰减, 流量先升后降. 注气压力对驱替 CH_4 效果显著, 注气压力越高, 驱出 CH_4 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 CH_4 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 N_2 促排煤层 CH_4 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: N_2 -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 N_2 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: clwlwf@163.com)

Abstract: In order to make clearly the process and features of gas emission by injecting N_2 , N_2 displacement coal seam CH_4 tests were performed by using coal bed gas injection displacement experiment device. The results show that N_2 displacement coal bed CH_4 is a time-dependent process with a gradual decay of drained CH_4 concentration, and CH_4 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 CH_4 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 CH_4 volume. According to the theoretical analysis, the mechanisms of injecting N_2 displacement coal bed CH_4 include the gas displacement, the air carrying and the dilution and diffusion of gas flow.

Key words: N_2 -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 CO_2 地质封存技术. CO_2 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 CO_2 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 N_2 , CH_4 , CO_2 的吸附能力逐渐变强. Katayama^[10] 认为, CO_2 置换 CH_4 的机理是由于 CO_2 具有更强的

吸附性能,而 N₂ 置换 CH₄ 是由于注 N₂ 降低了 CH₄ 的分压. Clarkson 等^[11] 同样认为,向煤层中注入非 CH₄ 气体后,可以降低 CH₄ 的分压,促使 CH₄ 解吸,增加 CH₄ 的采气率. 方志明等^[1] 认为注 CO₂ 强化煤层气采收率主要作用有两方面,一是由于 CO₂ 与 CH₄ 发生竞争吸附,从而置换 CH₄ 气体,同时降低 CH₄ 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 CH₄ 产气率. 杨宏民^[7] 认为注气促使 CH₄ 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(N₂)能够强化煤中 CH₄ 排放,为了研究促使煤中 CH₄ 排放的过程和作用效果,本文提出向煤层注入 N₂ 驱替煤中 CH₄ 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).

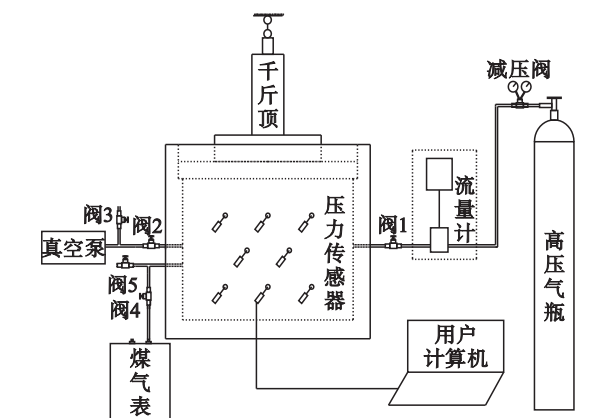


图 1 实验系统示意图

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) CH₄ 吸附平衡:CH₄ 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 N₂. 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,CH₄ 体积分数衰减越快

注 N₂ 驱替煤层 CH₄ 实验中驱出 CH₄ 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 CH₄ 体积分数急剧下降到 50%,随着 N₂ 的持续注入,体积分数持续下降,驱替结束(1 210 min)时下降到 12.27%. 当注气压力为 1.0 MPa 时,55 min 时 CH₄ 体积分数急剧下降到 50%,驱替结束(784 min)时 CH₄ 下降到 13.36%. 当注气压力为 1.4 MPa 时,27 min 时 CH₄ 体积分数急剧下降到 50%,驱替结束(340 min)时下降到 9.12%.

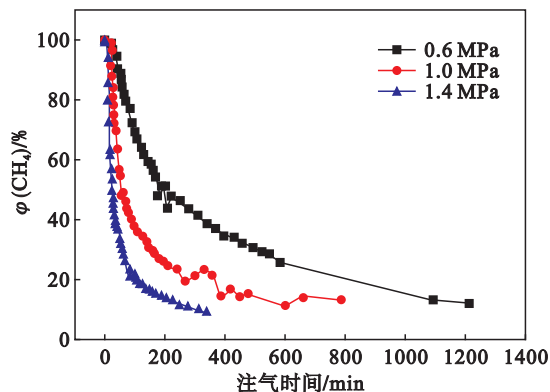


图 2 驱出 CH₄ 体积分数随注气时间的变化
Fig. 2 Change of driven out of the CH₄ concentration with injection time

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 N₂ 驱替煤层 CH₄ 实验中驱出混合气体流量变化规律如图 3 所示,驱出 CH₄ 流量随注气时间的变化规律如图 4 所示。

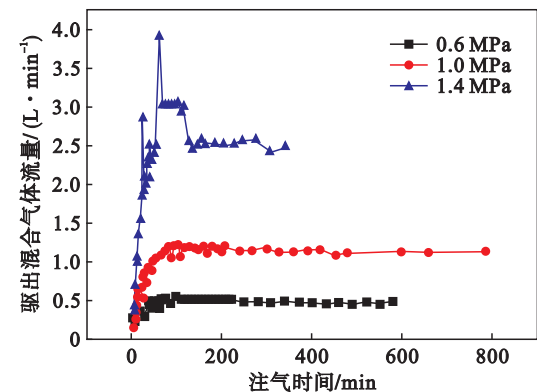


图 3 驱出混合气体流量随注气时间的变化
Fig. 3 Change of driven out of the mixed gas flow with injection time

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 N₂ 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 N₂ 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 N₂ 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.

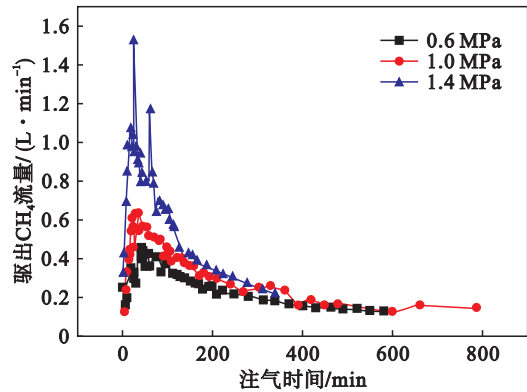


图 4 驱出 CH₄ 流量随注气时间的变化
Fig. 4 Change of driven out of the CH₄ flow with injection time

由图 4 中可以看出:

- 1) 驱出 CH₄ 流量先上升后下降. 当注气压力为 0.6 MPa 时,注气 35 min 时 CH₄ 流量由 0.25 L/min 迅速上升到 0.46 L/min,之后随着 N₂ 的持续注入,CH₄ 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 CH₄ 流量由 0.14 L/min 迅速上升到 0.64 L/min,之后随着 N₂ 的持续注入,CH₄ 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 CH₄ 流量由 0.33 L/min 迅速上升到 1.07 L/min,之后随着 N₂ 的持续注入,CH₄ 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 CH₄ 流量变化幅度越大.

2.3 驱替压力越高,驱出 CH₄ 体积越大

注 N₂ 驱替煤层 CH₄ 实验中驱出 CH₄ 体积变化规律如图 5 所示.

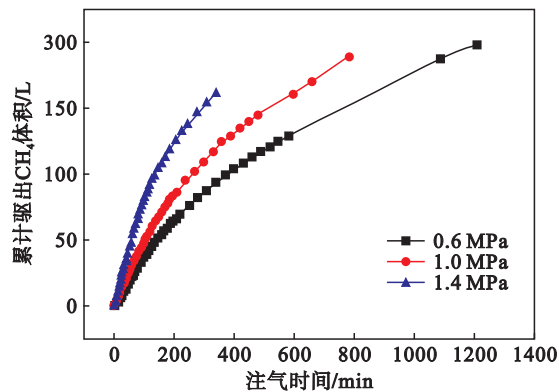


图 5 驱出 CH₄ 体积随注气时间的变化
Fig. 5 Change of driven out of the CH₄ volume with injection time

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。而在此次实验中,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, m³/t; a_1, b_1 为 CH₄ 的吸附常数, m³/t, 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, Sevkett 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.