

段利江,唐书恒,夏朝辉,等.煤吸附气体诱导的基质膨胀研究进展[J].地球科学进展,2012,27(3):262-267. [Duan Lijiang, Tang Shuheng, Xia Zhaohui, et al. A review on gas sorption-induced coal swelling[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(3): 262-267.]

煤吸附气体诱导的基质膨胀研究进展*

段利江^{1,2},唐书恒²,夏朝辉¹,张 铭¹

(1. 中国石油勘探开发研究院亚太研究所,北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083)

摘要:煤层渗透率变化是注气提高煤层气采收率过程中最为关注的问题之一,而煤的吸附膨胀是造成渗透率伤害的主控因素。系统总结了国内外有关煤吸附膨胀的研究成果,发现争议较多,认为其主要原因在于对膨胀机理的认识深度不够及研究方法不一。相对于膨胀计法和应力计法,光学法观测煤膨胀效应的精度较高,建议尽量采用大块的煤样,以增强对煤储层的代表性。在煤膨胀机理的研究中,建议重点分析煤大分子结构固有的力学性质,及CO₂对煤分子结构可能造成的影响。

关键词:煤;吸附;膨胀;CO₂

中图分类号:P618.11;TD845

文献标志码:A

文章编号:1001-8166(2012)03-0262-06

1 引言

向煤层中注入CO₂或N₂是提高煤层气采收率的一项新技术,目前美国、加拿大、中国和日本已经开展了这方面的先导试验^[1~5]。虽然注入CO₂和N₂都可以提高煤层气采收率,但二者的增产机理不同,CO₂主要靠竞争吸附将甲烷置换出来,N₂主要靠降低分压将甲烷剥离出来^[6]。煤吸附CO₂、CH₄和N₂后的膨胀量依次降低,因此CO₂的注入引起煤膨胀,降低了储层渗透性,使注入难以持续进行,对于低渗储层,这种问题尤为严重^[4,5]。N₂的注入引起煤收缩,提高了煤层渗透性,但对产出的甲烷气造成了污染,增加了净化成本^[2]。所以,注入烟道气(CO₂和N₂的混合气)是一个好的选择。为了确定注入气体的最佳比例,必须预先获取煤吸附CO₂、CH₄和N₂的膨胀量。

煤吸附气体膨胀量的获取途径主要有2种,即直接法和间接法。直接法是指通过实验直接测量煤的形变量,按照实验仪器的类别,可细分为膨胀计

法、应力计法和光学法。间接法是指在一定的假设条件下,通过测量其他参数或进行公式推导来获取煤的形变量。由于研究方法存在差异,得到的结论并不一致。本文分析该领域研究现状,并结合对煤膨胀机理的探讨,指出目前研究中存在的问题和下一步的研究方向。

2 直接法获取煤膨胀量

2.1 膨胀计法

该方法使用的较早,是通过将探针放在煤样顶端来探测样品的形变量。Briggs等^[7]研究了高挥发分烟煤和无烟煤吸附CH₄和CO₂后的线性膨胀量,发现2.07 MPa时测定值的变化范围分别为0.06%~0.30%和0.53%~0.58%,无烟煤的膨胀量大于高挥发分烟煤的膨胀量;同时发现膨胀呈非均质性的特点,即垂直层面方向上的膨胀量大于平行层面方向上的膨胀量。Reucroft等^[8]研究了3个地区煤样(煤阶分别为褐煤、亚烟煤和烟煤)吸附CO₂后的膨胀量,实验压力为0.15 MPa,发现最大体积膨胀

* 收稿日期:2011-11-29;修回日期:2012-01-15.

* 基金项目:国家自然科学基金项目“注气驱替煤层甲烷过程中煤基质差异膨胀效应实验研究”(编号:40772096)资助.

作者简介:段利江(1982-),男,河南商丘人,博士,工程师,主要从事煤层气勘探开发研究. E-mail:duanlj@petrochina.com.cn

量为1.3%,膨胀量的增加与碳含量成反比。Reucroft等^[9]进一步测试了上述地区煤样在更高压力下的膨胀量,发现膨胀量随压力的升高而增大,1.5 MPa时最大体积膨胀量分别为4.18%(褐煤)、3.11%(亚烟煤)和1.33%(烟煤)。Walker等^[10]通过连续3次测量中挥发分烟煤在吸附—解吸CO₂过程中的体积变化,实验压力0.1~3.4 MPa,发现每一次升压后的最大应变量和残余应变均高于前一次的值,即膨胀过程不可逆;同时,通过对更多样品(煤阶从褐煤到低挥发分烟煤)进行更高压力下的CO₂吸附膨胀实验,发现4.8 MPa时测定的体积应变随煤阶的降低而增高。

2.2 应力计法

该方法较为常用,是通过将应力计贴在煤样表面来监测样品长度的变化。Moffat等^[11]研究了低挥发分烟煤和半无烟煤吸附CH₄后的膨胀量,最高实验压力70 MPa,发现尽管不同煤阶样品的膨胀量不同,但膨胀量的变化遵循相同的趋势,都在约15 MPa时出现最大值,垂直层面方向上的膨胀量较大,降压后煤样没有回到原来的尺寸。Harpalani等^[12]研究了高挥发分烟煤吸附CH₄后的体积变化,最高压力6.9 MPa,发现膨胀量随压力的升高线性增加,最大体积膨胀量为0.5%,降压后煤样没回到原来的尺寸。Levine^[13]测试了高挥发分烟煤吸附CO₂和CH₄后的膨胀量,发现在3.1 MPa时煤吸附CO₂后的最大体积膨胀量为1.25%,5.17 MPa时煤吸附CH₄后的最大体积膨胀量为0.52%,垂直层面方向上的膨胀量较大,随压力升高,膨胀量(ε)的增大趋势先快后慢,可以用与Langmuir方程形式相似的公式来表示:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\max} P}{P + P_{50}} \quad (1)$$

式中: ε_{\max} 为理论最大膨胀量,小数; P 为实验压力(MPa); P_{50} 为煤样达到最大膨胀量一半时的压力(MPa)。

St George等^[14]研究了亚烟煤吸附CO₂、CH₄和N₂后的体积膨胀量,4 MPa时对应的值分别为2.1%、0.4%和0.2%。Cui等^[15]通过对不同煤阶煤样(从亚烟煤到中挥发分烟煤)进行测试,发现煤吸附CO₂、CH₄和N₂后的体积应变与压力的关系与Langmuir方程形式相似,最大膨胀量随煤阶升高而增大,降压后煤样恢复至原来的尺寸。Majewska等^[16]测试了烟煤吸附CO₂和CH₄后的膨胀量,发现垂直层面的膨胀量大于平行层面的膨胀量,第一次

升压过程中的膨胀量大于后2次的值,后2次的值几乎一致,4 MPa时对应的最大体积膨胀量分别为1.6%和0.3%。Zarebska等^[17]通过测定低阶煤样吸附CO₂、CH₄和二者混合气后的膨胀量,发现CO₂吸附造成的膨胀量是CH₄的2倍,混合气体造成的膨胀量接近CH₄的对应值,但低于CO₂的对应值。

林柏泉等^[18]通过测定不同煤阶样品(从气煤到无烟煤)吸附CO₂、CH₄和N₂后的线性膨胀量,最高压力7 MPa,发现膨胀量随压力的升高而增大,但增幅逐渐变缓,且趋于某一定值;煤吸附CO₂、CH₄和N₂后的膨胀量依次降低,在垂直层面和平行层面2个方向上的膨胀量大致相等。傅雪海等^[19]、陈金刚等^[20]通过对不同煤阶的样品(从瘦煤到无烟煤)进行煤吸附CO₂的膨胀实验,发现测定的膨胀量与压力的变化关系与Langmuir方程形式相似,据此计算出的最大膨胀量(ε_{\max})介于0.25%~1.34%之间。张小东等^[21]对比了肥煤干燥样和注水样吸附CO₂后的膨胀量,发现随含水率增大体积应变减小,平行层面方向的膨胀量大于垂直层面方向的膨胀量。方志明等^[22]利用自制仪器测量了瘦煤吸附CO₂后的应变,最高压力5 MPa,发现随压力升高膨胀量增大,增大趋势先慢后快,这与前人的研究结论都不一致,但并没有给出解释。

2.3 光学法

该方法是通过用高精度数码相机对透明高压仓内的煤样进行拍照来测量样品长度变化,近几年才被采用。Robertson等^[23]研究了烟煤和亚烟煤吸附CO₂、CH₄和N₂后的膨胀量,最高压力6.9 MPa,发现煤吸附这3种气体后的膨胀量依次降低,膨胀量的变化能用Langmuir形式的方程拟合,吸附膨胀量随煤阶的降低而升高。

Day等^[24]测试了烟煤吸附CO₂后的膨胀量,最高压力15 MPa,发现线性膨胀量随压力升高而增大,在8~10 MPa时达到最大值,随后略有降低,垂直层面方向上的膨胀量较大,并提出了高压时煤吸附CO₂后的膨胀量(S)拟合方程:

$$S = S_{\max} e^{-D[\ln(\rho_a/\rho_g)]^2} + k\rho_g \quad (2)$$

式中: S_{\max} 为理论最大膨胀量,小数; ρ_g 为实验温度、压力下CO₂密度(kg/m³); ρ_a 为CO₂吸附相密度,取定值1 000 kg/m³;k为与CO₂在煤中溶解度相关的常量,小数; D 为经验匹配参数,小数。

与Levine^[13]方程不同的是,Day等^[24]的拟合方程中有代表煤样最大膨胀量的参数(S_{\max}),另外横

坐标为气体密度而不是压力,通过拟合实测数据,发现该方程的拟合精度较高(图 1)。

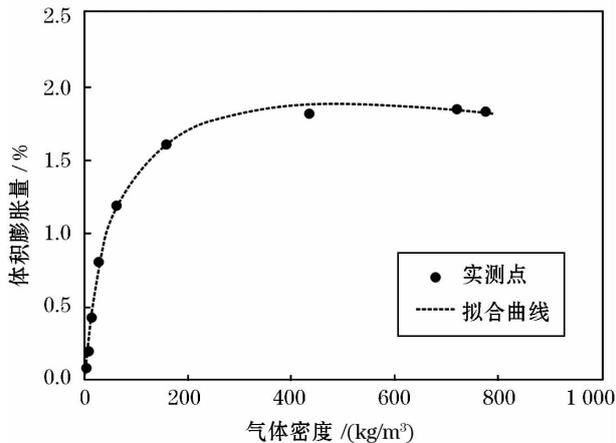


图 1 Bowen 盆地煤样体积膨胀量实测值与计算值对比^[24]

Fig. 1 Volumetric swelling of samples from Bowen Basin attained by measuring and calculating^[24]

Ottiger 等^[25]、Pini 等^[26]研究了高挥发分烟煤吸附气体后的膨胀量,最高压力 13 MPa,发现煤吸附 CO₂、CH₄和 N₂后的最大体积膨胀量依次降低,膨胀量的变化与压力的关系可用 Langmuir 形式的方程描述。Van Bergen 等^[27]测试了烟煤和亚烟煤吸附 CO₂后的膨胀量,最高压力 8 MPa,发现膨胀量和煤阶的关系不明显,平行层面方向上的膨胀量比其他方向的高;抽真空后,煤样没回到原来尺寸。Durucan 等^[28]测试了不同煤阶样品(从高挥发分烟煤到无烟煤)吸附 CO₂和 CH₄后的膨胀量,最高压力分别为 5.5 和 8 MPa,发现 CO₂引起的体积膨胀量是 CH₄对应值的 1.3 ~ 4 倍,CO₂膨胀量与煤阶成正比,CH₄膨胀量与煤阶的关系不明显。Day 等^[29]测定了烟煤和亚烟煤吸附 CO₂、CH₄和 N₂后的膨胀量,最高压力 16 MPa,发现垂直层面方向上的膨胀量比平行层面方向上的值大,膨胀量与煤阶整体呈负相关关系。

3 间接法获取煤膨胀量

Siemons 等^[30]研究了煤吸附 CO₂后的膨胀量,最高压力 20 MPa,但膨胀量是通过 CO₂吸附数据间接求得,即运用迭代方法通过调整自由体积来评估样品仓内体积的变化,以达到对吸附模型的最佳匹配度。结果表明,煤样体积膨胀量介于 3% ~ 13% 之间,并随煤性质的变化而变化,但这种方法评估的结果不仅包括煤本身的膨胀,还包括吸附相体积和高压下煤的压缩量。使用同样的方法, Romanov

等^[31]通过测定中挥发分烟煤的块状样和粉碎样吸附 CO₂后样品仓自由体积的变化来研究煤膨胀量,每个压力点下气体的吸附达到充分平衡,实验持续 9 个月,最高压力 14 MPa,发现二者最大体积膨胀量分别为 7% 和 8%。

Pan 等^[32]通过假定吸附引起的煤表面自由能改变等同于基质弹性性能变化、均质膨胀、膨胀量与吸附量线性相关,在同时考虑吸附膨胀和高压气体对煤基质压缩作用的前提下,利用等温吸附数据、煤密度、孔隙度、弹性模量和泊松比等参数推导出了煤吸附膨胀模型,并与 Moffat 等^[11]、Levine^[13]的实测数据进行对比,发现二者的一致性较强。

在国内,也有学者进行这方面的研究。吴世跃等^[33]、白冰等^[34]基于一定的假设条件各自推导了煤吸附膨胀模型,但没进行与实测数据的对比验证。周军平等^[35]基于吸附过程的热力学和能量守恒原理,建立了煤吸附应变的理论模型,并与 Cui 等^[15]的测定数据进行对比,一致性较强。

4 煤吸附膨胀机理

关于煤吸附 CO₂的膨胀机理,有以下 3 种解释:①气体在煤微孔内的吸附造成煤表面自由能降低,从而使煤发生体积膨胀^[32];②CO₂可以与煤形成氢键或发生电荷转移作用,降低煤结构的交联度^[10];③CO₂分子在高压条件下容易渗入煤基质内部,使煤的大分子网状结构发生溶胀^[36]。关于煤吸附 CH₄和 N₂的膨胀机理,目前的解释主要集中于第一种。

关于吸附膨胀量与煤阶的关系,争议较大。Reucroft 等^[8]、Reucroft 等^[9]、Walker 等^[10]、傅雪海等^[19]、陈金刚等^[20]、Robertson 等^[23]、Day 等^[24,29]的实验表明,随煤阶降低膨胀量增大。Reucroft 等^[9]认为,这是由于低阶煤的酸碱官能团较高阶煤多,更容易与 CO₂发生反应,而对 CH₄和 N₂,尚未见解释报道。Briggs 等^[7]、Cui 等^[15]的实验表明,随煤阶升高膨胀量增大。Briggs 等^[7]认为,这与高阶煤较大的吸附量有关。而 Van Bergen 等^[27]的实验表明,膨胀量与煤阶的关系不明显。

煤吸附气体后体积会发生改变,对此已达成共识,目前存在的争议在于此过程的可逆性。Walker 等^[10]、Moffat 等^[11]、Harpalani 等^[12]、Majewska 等^[16]、Van Bergen 等^[27]认为,此过程不可逆。对于 CO₂,主要有以下 2 种解释:①CO₂与煤无论是形成氢键还是发生电荷转移作用,都属于化学作用的范畴^[10];

②溶解在煤中的 CO_2 起到了增塑剂的作用,使煤结构发生重组^[36]。而 Levine^[13]、Cui 等^[15]、Day 等^[24]、Ottiger 等^[25]、Pini 等^[26] 认为,此过程是可逆的。Ceglarska-Stefańska 等^[37] 的解释如下:进入煤大分子结构内部的 CO_2 起到了润滑剂的作用,降压后 CO_2 可全部解吸出来。

一般认为,煤吸附气体后的膨胀呈现非均质性的特点,即垂直层面方向上的膨胀量较大。关于该问题,主要有 2 种解释:①地史时期垂直层面方向上受力较大,导致交联键的密度较大,吸附气体后的应变恢复程度也较大^[38,39];②由于煤分子结构具有定向性,分子间的距离比基本结构单元间的距离大,气体分子在垂直层面方向穿透碳物质时比在平行层面方向所遇到的阻力小,这造成煤在垂直层面上的吸附量大于平行层面上的吸附量,进而导致较大的膨胀量^[17]。

煤吸附 CO_2 、 CH_4 和 N_2 后的膨胀量依次降低,一般认为这和它们的吸附能力有关^[32]。

5 存在问题与研究方向

用直接法获取煤膨胀量,目前的测试手段都有不足之处。膨胀计法适用的压力较低,顶端探针的负荷对测量结果影响较大^[10]。应力计法的缺点是:它不能很好地贴在煤样表面,难以保证与煤样同步变形,平衡时间也较长^[13];优点是:它使用的煤样较大,对储层的代表性较强。光学法具有直观的优点,测量精度高、平衡时间短、测压范围大,但所用的样品较小,对储层的代表性较差^[40]。间接法采用的假设条件较多、误差大,不建议采用。在以后的研究中,建议尽量采用大块煤样进行光学法测试,以牺牲平衡时间换取对储层较好的代表性。

关于膨胀量与煤阶的关系、膨胀过程的可逆性、膨胀的非均质性等争议,除了与煤组成、实验方法和样品大小等因素相关外,最主要的是对煤吸附膨胀机理和影响因素的认识深度不够。 CH_4 和 N_2 与煤接触后,只能发生以色散力为主的物理吸附,这种吸附引起煤表面自由能降低,从而引起膨胀,对此已达成共识。目前争议较大的是 CO_2 的膨胀机理,在现有的 3 种解释中:第一种解释无疑是正确的,因为任何气体都能引起固体的膨胀,但一般认为这种因素引起的膨胀量较小^[10];第二种解释考虑了中低阶煤和 CO_2 都具有酸碱两性的特征,但对于以 π 电子体系为主的高阶煤^[41], CO_2 难以与其形成氢键或发生电荷转移作用,另外,目前尚未有文献报道过有关煤—

CO_2 分子规模相互作用的成果,这种解释推测的成分较大;第三种解释是基于煤和聚合物的相似性,即都具有网格结构,借鉴了聚合物中“溶胀”这一概念,但煤的化学结构和交联键类型都较聚合物复杂^[42,43],所以这种解释的合理性值得商榷。另外,不同煤岩成分的吸附膨胀响应也不相同。Karacan^[44] 利用双能 X 线 CT 观测了有效应力恒定情况下各煤岩成分吸附 CO_2 后的应变特征,发现镜质组表现出较程度的膨胀,而粘土和惰质组被压缩。

煤具有三维交联的大分子结构,非共价键是分子间的主要作用力^[45,46]。煤吸附气体后发生膨胀,表明其非共价键作用受到了破坏。作者认为,在煤膨胀机理的研究中,应重点分析煤大分子结构固有的力学性质,及 CO_2 对煤分子结构可能造成的影响。

参考文献(References):

- [1] Reeves S. Geologic Sequestration of CO_2 in Deep, Unmineable Coalbeds: An Integrated Research and Commercial-scale Field Demonstration Project[R]. Washington DC, U. S.: First National Carbon Sequestration Conference, 2001.
- [2] Reeves S, Oudinot A. The Tiffany Unit N_2 -ECBM Pilot: A Reservoir Modeling Study[R]. US: Topical Report. Department of Energy, DE-FC26-0NT40924, 2004.
- [3] Gunter W D, Mavor M J, Robinson J R. CO_2 Storage and Enhanced Methane Production: Field Testing at the Fenn-Big Valley, Alberta, Canada, with Application[R]. Vancouver, Canada; Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 2004.
- [4] Ye Jianping, Feng Sanli, Fan Zhiqiang, et al. Micro-pilot test for enhanced coalbed methane recovery by injecting carbon dioxide in south part of Qinshui Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(4): 77-80. [叶建平,冯三利,范志强,等.沁水盆地南部注二氧化碳提高煤层气采收率微型先导试验研究[J].石油学报, 2007, 28(4): 77-80.]
- [5] Shi J Q, Durucan S, Fujioka M. 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: 47-57.
- [6] Arri L E, Yee D, Morgan W D, et al. Modelling coalbed methane production with binary gas sorption[J]. *Society of Petroleum Engineers*, 1992, 76: 450-472.
- [7] Briggs H, Sinha R P. Expansion and contraction of coal caused respectively by the sorption and discharge of gas[J]. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 1933, 53: 48-53.
- [8] Reucroft P J, Patel H. Gas-induced swelling in coal[J]. *Fuel*, 1986, 65: 816-820.
- [9] Reucroft P J, Sethuraman A R. Effect of pressure on carbon dioxide induced coals swelling[J]. *Energy Fuels*, 1987, 1: 72-75.
- [10] Walker P L, Verma S K, Rivera-Utrilla J, et al. A direct meas-

- urement of expansion in coals and macerals induced by carbon dioxide and methanol[J]. *Fuel*, 1988, 67: 719-726.
- [11] Moffat D H, Weale K E. Sorption by coal of methane at high pressures[J]. *Fuel*, 1955, 34: 449-462.
- [12] Harpalani S, Schraufnagel R A. Shrinkage of coal matrix with release of gas and its impact on permeability of coal[J]. *Fuel*, 1990, 69: 551-556.
- [13] Levine J R. Model study of influence of matrix shrinkage on absolute permeability of coal bed reservoirs[C]//Gayer R, Harris I, eds. Coalbed Methane and Coal Geology. Geological Society Special Publication, 1996:197-212.
- [14] St George J D, Barakat M A. The change in effective stress associated with shrinkage from gas desorption in coal[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2001, 45: 105-113.
- [15] Cui X J, Bustin R M, Chikatarla L. Adsorption-induced coal swelling and stress: Implication for methane production and acid gas sequestration into coal seams[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: 1-16.
- [16] Majewska S, Zietek J. Change of acoustic emission and strain in hard coal during gas sorption-desorption cycles[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 70: 305-312.
- [17] Zarebska K, Celarska-Stefańska G. The change in effective stress associated with swelling during carbon dioxide sequestration on natural gas recovery[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 74: 167-174.
- [18] Lin Baiquan, Zhou Shining. Experimental investigation on the deformation law of coal body containing methane[J]. *Journal of China College of Mining & Technology*, 1986, 3: 9-16. [林柏泉, 周世宁. 含瓦斯煤体变形规律的实验研究[J]. 中国矿业学院学报, 1986, 3: 9-16.]
- [19] Fu Xuehai, Qin Yong, Jiang Bo, et al. Study on mechanics experiments of multiphase medium coal rocks[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2002, 8(4): 446-452. [傅雪海, 秦勇, 姜波, 等. 多相介质煤岩体力学实验研究[J]. 高校地质学报, 2002, 8(4): 446-452.]
- [20] Chen Jin'gang, Chen Qingfa. Control effect of coal mechanical property on its matrix self-regulating ability[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(2): 140-142. [陈金刚, 陈庆法. 煤岩力学性质对其基质自调节能力的控制效应[J]. 天然气工业, 2005, 25(2): 140-142.]
- [21] Zhang Xiaodong, Wang Lili, Zhang Zixu. Gas-adsorption-swelling characteristics after water injection to fat coal from the Malan Mine, the Gujiao coalfield of Shanxi province[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(10): 1 310-1 315. [张小东, 王利丽, 张子戌. 山西古交矿区马兰煤矿肥煤注水后煤体吸附膨胀行为[J]. 煤炭学报, 2009, 34(10): 1 310-1 315.]
- [22] Fang Zhiming, Li Xiaochun, Bai Bing, et al. Study of method for simultaneously measuring adsorption-deformation-permeability of coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(9): 1 828-1 933. [方志明, 李小春, 白冰, 等. 煤岩吸附量—变形—渗透系数同时测量方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1 828-1 933.]
- [23] Robertson E P, Christiansen R L. Measurement of Sorption-induced Strain[R]. Tuscaloosa, Alabama: Proceeding of the 2005 International Coalbed Methane Symposium, 2005.
- [24] Day S, Fry R, Sakurovs R. Swelling of Australian coals in supercritical CO₂[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 74: 41-52.
- [25] Ottiger S, Pini R, Storti G, et al. Competitive adsorption equilibria of CO₂ and CH₄ on a dry coal[J]. *Adsorption*, 2008, 14: 539-556.
- [26] Pini R, Ottiger S, Burlini L, et al. CO₂ storage through ECBM recovery: An experimental and modeling study[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1: 1 711-1 717.
- [27] Van Bergen F, Spiers C, Floor G, et al. Strain development in unconfined coals exposed to CO₂, CH₄ and Ar; Effect of moisture [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 77: 43-53.
- [28] Durucan S, Ahsan M, Shi J Q. Matrix shrinkage and swelling characteristics of European coals[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1: 3 055-3 062.
- [29] Day S, Fry R, Sakurovs R, et al. Swelling of coals by supercritical gases and its relationship to sorption [J]. *Energy Fuels*, 2010, 24: 2 777-2 783.
- [30] Siemons N, Busch A. Measurement and interpretation of supercritical CO₂ sorption on various coals[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 69: 229-242.
- [31] Romanov V, Soong Y. Long-term CO₂ sorption on Upper Freeport coal powder and lumps[J]. *Energy Fuels*, 2008, 22: 1 167-1 169.
- [32] Pan Z, Connell L D. A theoretical model for gas adsorption-induced coal swelling[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 69: 243-252.
- [33] Wu Shiyue, Zhao Wen. Analysis of effective stress in adsorbed methane-coal system[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(10): 1 674-1 678. [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): 1 674-1 678.]
- [34] Bai Bing, Li Xiaochun, Liu Yanfeng, et al. Preliminary theoretical study on impact on coal caused by interactions between CO₂ and coal[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(4): 823-826. [白冰, 李小春, 刘延锋, 等. CO₂-ECBM 中气固作用对煤体应力和强度的影响分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 823-826.]
- [35] Zhou Junping, Xian Xuefu, Jiang Yongdong, et al. A model of adsorption induced coal deformation based on thermodynamics approach[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(3): 468-472. [周军平, 鲜学福, 姜永东, 等. 基于热力学方法的煤岩吸附变形模型[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 468-472.]
- [36] Larsen J W. The effects of dissolved CO₂ on coal structure and properties[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004, 57: 63-70.
- [37] Ceglarska-Stefańska G, Czaplinski A. Correlation between sorption and dilatometric processes in hard coals[J]. *Fuel*, 1993, 72: 413-417.
- [38] Hou L, Hatcher P G, Botto R E. Diffusion of pyridine in Illinois

- No. 6 coal; Measuring the swelling and deswelling characteristics by combined methods of Nuclear Magnetic Resonance (NMRI) and Nuclear Resonance Imaging (NMRI) [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1996, 32: 167-189.
- [39] Larsen J W, Flowers R A, Hall P J. Structural rearrangement of strained coals[J]. *Energy Fuels*, 1997, 11: 998-1002.
- [40] Wang G X, Zhang X D, Wei X R, *et al.* A review on transport of coal seam gas and its impact on coalbed methane recovery[J]. *Frontal Chemical Science Engineering*, 2011, 5(2): 139-161.
- [41] White C M, Smith D H, Jones K L, *et al.* Sequestration of carbon dioxide in coal with enhanced coalbed methane recovery: A review[J]. *Energy Fuels*, 2005, 19(3): 659-724.
- [42] He Manjun, Zhang Hongdong, Chen Weixiao, *et al.* Macromolecule Physics[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2007: 34-37. [何曼君,张红东,陈维孝,等. 高分子物理[M]. 上海:复旦大学出版社, 2007: 34-37.]
- [43] Derbyshire F, Marzec A, Schulten H, *et al.* Molecular structure of coals: A debate[J]. *Fuel*, 1989, 68: 1091-1106.
- [44] Karacan C Ö. Swelling-induced volumetric strains internal to a stressed coal associated with CO₂ sorption[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 72: 209-220.
- [45] Gorbaty M L. Prominent frontiers of coal science: Past, present and future[J]. *Fuel*, 1994, 73(12): 1879-1828.
- [46] Qin Kuangzong, Guo Shaohui, Li Shuyuan. New concept on coal structure and new consideration for the generation mechanism of oil from coal[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(18): 2025-2035. [秦匡宗,郭绍辉,李术元. 煤结构的新概念与煤成油机理的再认识[J]. 科学通报,1998, 43(18): 2025-2035.]

A Review on Gas Sorption-induced Coal Swelling

Duan Lijiang^{1,2}, Tang Shuheng², Xia Zhaohui¹, Zhang Ming¹

(1. Asia-Pacific Department, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development,

Beijing 100083, China; 2. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The key issue of enhancing coalbed methane recovery by gas injection is reservoir permeability variation, which is controlled by gas-induced coal swelling. The research finding on coal swelling were collected and analyzed, and it was found that there exist disagreements, which is due to the lack of understanding about swelling mechanisms and different experimental methods. Compared with dilatometer and strain gauge, optical method is more accurate when measuring coal swelling. However, in future work, larger block should be adopted to represent coal reservoir more effectively. When conducting research on coal swelling mechanism, more attention should be paid to the original mechanical property of coal macromolecular structure and the impact on coal cross-linked network of CO₂.

Key words: Coal; Sorption; Swelling; CO₂.