

文章编号: 1000-582X(2012)05-109-05

基质收缩效应对含瓦斯煤渗流影响的实验分析

彭守建, 许江, 尹光志, 蒋长宝, 杨红伟

(重庆大学 a. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室;
b. 复杂煤气层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400044)

摘要:以山西晋城煤业集团赵庄矿和寺河矿的 3[#] 煤层原煤为研究对象, 利用自主研发的含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流实验装置, 通过保持有效应力恒定以消除其引起的渗透率变化, 并同时考虑到滑脱效应对渗透率的影响, 进行了 He 和 CH₄ 在不同气体压力条件下煤渗透率的平行实验, 定量考察了煤基质收缩效应对煤岩渗透率的影响。实验结果表明: 1) 在低瓦斯压力条件下, 煤渗透率表现出较显著的滑脱效应, 且随着瓦斯压力的增加, 煤样的渗透率呈现出先减小后增大的趋势, 赵庄矿和寺河矿煤样的滑脱效应拐点均为 0.9 MPa 左右; 2) 当有效应力恒定时, 随着瓦斯压力增加, 由滑脱效应引起的煤渗透率变化量逐渐减小, 而由基质收缩效应引起的渗透率变化量逐渐增大; 3) 基质收缩效应与煤力学性质密切相关, 力学性能相对较弱的煤样, 其基质收缩效应相对较明显。

关键词: 含瓦斯煤; 渗透率; 煤基质; 收缩; 渗流

中图分类号: TD713

文献标志码: A

Experimental analysis of matrix shrinkage's influence on mechanical permeability of gas-filled coal

PENG Shou-jian, XU Jiang, YIN Guang-zhi, JIANG Chang-bao, YANG Hong-wei

(a. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control; b. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Based on the 3[#] coal seam of Zhao-zhuang coal mine and Si-he coal mine belong to Jin-cheng anthracite Mining Group in Shanxi province, by using the self-developed three-axial servo-controlled seepage equipment for hot-fluid-solid coupling of coal containing methane, parallel experiments for permeability of helium and methane under different gas pressures are carried out to quantitatively study the influence of Klinkenberg effects on the permeability of coal. Meanwhile, the problem of permeability decreasing caused by fluid pressure decreasing and gas desorption is eliminated by controlling the effective stress. The results show that the Klinkenberg effect is obvious under low gas pressure. With the increase of gas pressure, the permeability of coal decreases at first and then increases. The inflection points of gas pressure for Klinkenberg effect are about 0.9 MPa both for coal samples in Zhao-zhuang coal mine and Si-he

收稿日期: 2011-12-30

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(CDJZR12240055); 国家自然科学基金资助项目(50974141); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2011CB201203); 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05034-004); 重庆大学“211 工程”三期创新人才培养计划建设项目(S-10220)

作者简介: 彭守建(1983-), 男, 重庆大学博士, 主要从事煤矿瓦斯灾害发生机理及其控制方面的研究工作, (E-mail) sjpeng@cqu.edu.cn。

coal mine. When the effective stress is constant, with the increase of gas pressure, the permeability increment caused by Klinkenberg effect decreases, while permeability increment caused by coal matrix shrinkage increases. Coal matrix shrinkage has a close relationship with the mechanical properties of coal-rock mass. For the coal sample with a poor mechanical property, coal matrix shrinkage is more obvious.

Key words: gas-filled coal; mechanical permeability; coal matrix; shrinkage; seepage

在地面排水降压开发煤层气的过程中,随着水、气介质的排出,一方面由于煤储层内流体压力降低,有效应力增大,孔、裂隙被压缩,引起渗透率降低;另一方面由于煤基质收缩,孔、裂隙空间被扩大,导致渗透率增大。这种正、负效应在煤层气开发活动中同时存在,其综合作用效果是煤层气持续开发和经济评价所要考虑的重要因素之一。

对于有效应力和基质收缩效应究竟如何影响煤储层的渗透性能,国内外学者对此开展了卓有成效的相关研究。在国外,B. W. Gash^[1]、R. Purl 等^[2]、Harpalani S. 等^[3]分别研究了煤储层割理孔隙率、绝对渗透率及相渗透率等参数特征、相互关系及煤基质收缩率等因素对它们的影响,取得了大量数据和定量、半定量成果,且形成了一系列实验室分析测试技术。M. J. Mavor 等^[4]报道了美国 San Juan 盆地储层的现场绝对渗透率以及产能的动态情况,利用实测数据验证了“基质收缩理论”的正确性。I. Palmer 等^[5]从理论上推导出了应力和孔隙压力与渗透率的关系(称之为 P&M 理论),并分析指出,当基质收缩足够大时,随着孔隙压力降低,绝对渗透率会出现反弹现象(渗透率由原先的逐渐降低到逐渐上升),反弹压力与煤体的弹性模量,以及基质收缩常数有关。Cui X. 等^[6]从基质收缩(膨胀)、有效应力、渗透率三者之间的变化拟合关系,研究了不同煤级的煤在煤层气解吸过程中煤储层的渗透率随基质收缩和有效应力变化的关系。此外,研究者还结合实验数据及理论分析得到了有效应力、瓦斯压力、基质收缩等与煤岩渗透率之间的耦合关系式^[7-10]。在国内,傅雪海等^[11]和陈金刚等^[12]以实验研究为基础,分别得出煤基质收缩引起的渗透率变化情况和煤基质收缩能力与不同应力环境的关系。尹光志等^[13]和曹树刚等^[14]分别研究了瓦斯压力对型煤和原煤渗透性能的影响。隆清明等^[15]实验研究了吸附作用对煤的渗透率影响规律。此外,张先敏等^[16]、周军平等^[17]和周锋德等^[18]从理论上探讨了基质收缩对煤储层渗透率的影响,分别建立了煤基质收缩效应影响下的渗透率数学模型。

综上所述,尽管有不少学者在探讨煤基质收缩作用对煤储层渗透率影响方面进行过一些有益探

索,但关于煤基质收缩对渗透率影响的实验研究成果很少,煤基质收缩效应作用机制问题仍有待于深入探讨与揭示。笔者拟从实验研究角度,开展不同瓦斯压力条件下含瓦斯煤的渗透性实验,考察基质膨胀(收缩)效应对煤层渗透率的影响,探讨煤层气在煤储层中的渗流规律,为煤层气开发利用奠定实验基础。

1 实验方法

1.1 煤样采集与加工

煤样采自山西晋城煤业集团赵庄矿和寺河矿的 3[#] 煤层,其煤质为无烟煤。根据现场实测资料,其浅部的原始瓦斯压力为 0.32 MPa,原始瓦斯含量为 7.08 m³/t。

为保障煤岩的完整性,将采集的原始煤块采用保鲜膜密封好后置于木箱内,然后再用细骨科骨料混凝土进行浇灌,以填满煤块与木箱之间的间隙,待混凝土完全硬化后再用取芯机进行取芯。煤芯取出后,再利用磨床对其 2 个端面进行打磨及抛光,最终加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 圆柱体试件。

将加工好的试件置于温度恒定在 80 °C 下的烘箱内烘 24 h,烘干后的试件置于干燥箱内存放,以备实验时用。

1.2 实验装置

实验所用装置为自主研发的含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置^[19]。该装置主要由伺服加载系统、三轴压力室、水域恒温系统、孔压控制系统、数据测量系统和辅助系统等 6 个部分组成,具有测试不同温度、不同地应力状态(围压和轴压)和不同瓦斯压力等实验条件下的含瓦斯煤渗流特性及其变形特性的功能。

1.3 实验方法设计

在煤层气抽采过程中,有效应力效应、气体滑脱效应和煤基质收缩效应同时对储层渗透性产生影响^[20]。因此,要单独考察煤基质收缩的影响,则需消除或估算有效应力效应和气体滑脱效应对煤储层渗透性的影响程度。为消除有效应力对裂隙压缩的影响,实验中始终保持施加在煤试件上的有效应力不变,当瓦斯压力增减时,同时调整轴压和围压使有

效应力始终恒定同一水平。考虑到 He 是一种几乎不被煤体吸附的气体,He 的克氏渗透率即可视为煤样的绝对渗透率,为此,为估算气体滑脱效应对煤储层渗透性的影响,实验中还设计了一组 He 与 CH₄ 的平行渗流实验。

为探讨不同气体压力条件下含瓦斯煤渗透性的演化规律,考虑了 0.3,0.6,0.9,1.2,1.5 MPa 这 5 个等级的气体压力,并采用质量流量计测定每一级气体压力条件下通过试件的气体流量,其具体实验步骤参见文献[19]。

另一方面,由于所有实验均是在煤样的弹性变形阶段以下进行的,因此,煤岩的吸附膨胀效应对试件渗透率的影响可近似视为与煤基质收缩效应等效。

2 实验结果与数据处理

表 1 具体给出了 CH₄ 和 He 在不同气体压力条件下通过煤样的气体流量。

表 1 各级气体压力下所测定的流量 L/min

实验气体	煤样	气体压力/MPa				
		0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
CH ₄	赵庄矿	0.007	0.027	0.066	0.128	0.260
	寺河矿	0.001	0.003	0.006	0.013	0.025
He	赵庄矿	0.005	0.011	0.025	0.048	0.095
	寺河矿	0.001	0.002	0.003	0.006	0.011

煤的气体渗透率可由式(1)进行计算^[21],其计算结果参见表 2。

$$K_g = \frac{2qp_0\mu_g L}{A(p^2 - p_0^2)}, \quad (1)$$

式中: K_g 为每个气体压力点下的气相渗透率, m²; q_0 为气体流量, m³/s; μ_g 为在测定温度下气体的动力粘度, Pa·s; L 为煤样长度, m; A 为煤横截面面积, m²; p 为进气压力, MPa; p_0 为出气压力(即大气压), MPa。

表 2 各级气体压力下煤样的气相渗透率 mD

K_g	煤样	气体压力/MPa				
		0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
$K_{C,g}$	赵庄矿	1.745	1.539	1.646	1.785	2.315
	寺河矿	0.257	0.177	0.154	0.187	0.230
$K_{H,g}$	赵庄矿	2.250	1.131	1.125	1.208	1.527
	寺河矿	0.465	0.212	0.139	0.156	0.183

在有效应力一定时,煤的气相渗透率受绝对渗

透率、煤基质收缩效应和滑脱效应的影响控制,可表示为^[11]

$$K_g = K_0 + \Delta K_s + \Delta K_b, \quad (2)$$

式中: K_0 为煤样绝对渗透率, m²; ΔK_s 为由基质收缩效应引起的渗透率变化量, m²; ΔK_b 为由滑脱效应引起的渗透率变化量, m²。

考虑到滑脱效应影响,经 Klinkenberg 方法进行校正后的气相渗透率可表示为^[22]

$$K_g = K_b \left(1 + \frac{b}{p_{av}}\right), \quad (3)$$

式中: K_b 为克氏渗透率, b 为克林伯格系数, p_{av} 为平均气体压力, $p_{av} = (p + p_0)/2$ 。

将表 2 中 He 在每一个压力等级下的气相渗透率数据经式(3)回归分析可获得 He 的克氏渗透率 $K_{H,b}$ (该值即可视为煤样的绝对渗透率 K_0)及克林伯格系数 b_H 。当有效应力恒定时,CH₄ 的克林伯格系数 b_C 与 He 的克林伯格系数 b_H 满足如下关系^[22]:

$$b_C = \frac{\mu_C}{\mu_H} \frac{M_H}{M_C} b_H, \quad (4)$$

式中: μ_C, μ_H 分别为在测定温度下 CH₄ 和 He 的动力粘度, Pa·s; M 为气体分子量。将由式(4)求取的 CH₄ 的克林伯格系数 b_C 代入式(3)中,结合表 2 中 CH₄ 在每一个压力等级下的气相渗透率数据,即可求得 CH₄ 的克氏渗透率 $K_{C,b}$ 。

由式(3)可知,CH₄ 气体滑脱效应引起的渗透率变化量 ΔK_b 即为:

$$\Delta K_b = K_{C,g} - K_{C,b} = K_{C,b} \frac{b_C}{p_{av}}. \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)中,即可求取 CH₄ 在每一压力等级下由基质收缩效应引起的渗透率变化量:

$$\Delta K_s = K_g - K_{H,b} - K_{C,b} \frac{b_C}{p_{av}}. \quad (6)$$

经由式(3)-(6)计算所得的 CH₄ 下煤的绝对渗透率 K_0 、克林伯格系数 b_C 、克氏渗透率 $K_{C,b}$ 以及基质收缩效应影响下的煤渗透率变化量 ΔK_s 见表 3。

表 3 CH₄ 气体下煤渗透率参数计算结果

煤样	p /MPa	K_0 /mD	b_C /MPa	$K_{C,b}$ /mD	ΔK_s /mD
赵庄矿	0.3	0.842	0.079	1.251	0.410
	0.6	0.842	0.079	1.255	0.414
	0.9	0.842	0.079	1.421	0.579
	1.2	0.842	0.079	1.592	0.750
	1.5	0.842	0.079	2.107	1.266

续表

煤样	p/MPa	K_0/mD	b_c/MPa	$K_{c,b}/\text{mD}$	$\Delta K_s/\text{mD}$
寺河矿	0.3	0.021	1.095	0.040	0.019
	0.6	0.021	1.095	0.043	0.022
	0.9	0.021	1.095	0.048	0.027
	1.2	0.021	1.095	0.070	0.049
	1.5	0.021	1.095	0.097	0.076

3 实验结果分析与讨论

图 1 给出了瓦斯压力与煤样气相渗透率之间的关系曲线,从图上可以看出,尽管煤样取自 2 个不同的煤矿,但其气相渗透率随着瓦斯压力的升高均呈现分阶段的变化趋势,即当瓦斯压力小于 0.9 MPa 时,渗透率随着瓦斯压力的升高而减小,但当瓦斯压力大于 0.9 MPa 时,渗透率则是随着瓦斯压力的升高而增大。由此可见,2 个不同煤矿的煤样在不同瓦斯压力情况下均表现出了较为明显的滑脱效应。

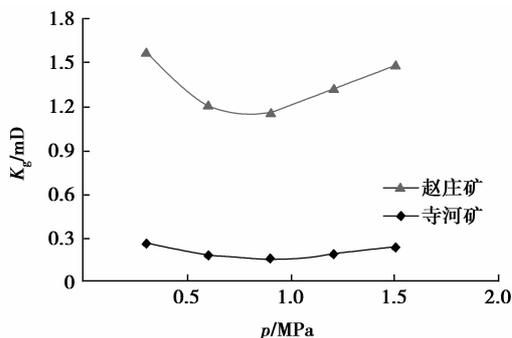


图 1 煤样渗透率与瓦斯压力的关系

图 2 则具体给出了 2 个不同煤矿的煤样在不同瓦斯压力条件下受滑脱效应影响的渗透率变化量。从图中可看出,随着瓦斯压力的升高,滑脱效应对渗透率的影响逐渐减弱,并趋于稳定值。这与滑脱效应只在低压情况下表现较明显^[23]的结论相吻合,随着瓦斯压力升高,滑脱效应将逐渐消失,则由其影响的渗透率变化也就逐渐减小。

通过消除滑脱效应影响后,不同瓦斯压力情况下基质吸附膨胀效应引起煤样渗透率的变化量如图 3 所示。从图中可看出,在瓦斯压力越大的情况下,基质膨胀效应对煤样渗透率的影响越强烈,且这种关系符合指数函数关系

$$\Delta K_s = a e^{bp}, \quad (7)$$

式中, a 和 b 均为拟合参数。基于瓦斯吸附-煤体膨

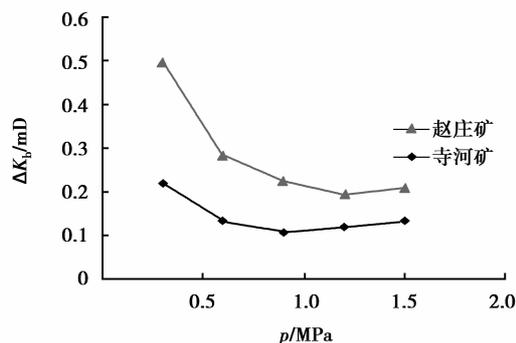


图 2 不同瓦斯压力下滑脱效应对渗透率的影响

胀与瓦斯解吸-煤基质收缩互为可逆过程,则在煤层气开采过程中,随着储层压力的降低,煤基质收缩效应对煤层渗透率的影响将越来越小,且基质收缩效应引起的渗透率变化量与瓦斯压力将呈负指数函数关系。

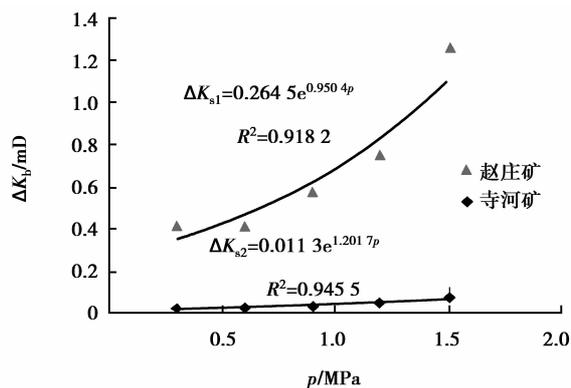


图 3 不同瓦斯压力下基质收缩效应对渗透率的影响

此外,从图 3 中还可以看到,在相同瓦斯压力情况下,基质收缩效应对赵庄矿煤样渗透率的影响较对寺河矿煤样的影响大,这是由于 2 个不同煤矿煤样的力学性质差异所致。在煤样吸附 CH_4 气体的过程中, CH_4 对与其直径相同或相近的微裂隙和微孔隙的楔开作用与煤体的力学性质密切相关^[15],对于具有较强力学性能的煤基质, CH_4 对其的楔开作用就相对较弱。由于煤样的膨胀量较小,则由膨胀效应引起的渗透率变化量也就较小。对于同一煤样而言,瓦斯压力越大,楔开作用效果将更加显著,由此吸附膨胀效应引起的渗透率变化越明显。相对应的,瓦斯压力越大,在解吸时煤基质的收缩变形量自然也相对较大,则由基质收缩效应引起的渗透率变化量也就较大。

4 结 论

1) 实验结果证实,当有效应力一定时,在低瓦斯压力条件下,煤渗透率表现出较显著的滑脱效应,即随着瓦斯压力的增加,煤样的渗透率呈现出先减小后增大的趋势,赵庄矿和寺河矿煤样的滑脱效应拐点均在 0.9 MPa 左右。

2) 当有效应力恒定时,瓦斯压力越小,滑脱效应越明显,由滑脱效应引起的煤样渗透率增量越大,随着瓦斯压力增大,滑脱效应对渗透率的影响逐渐减弱;瓦斯压力越大,则由瓦斯吸附/解吸引起的煤基质膨胀/收缩效应越明显,由此导致煤样渗透率的变化量也越大,瓦斯对煤样中与其直径相同或相近的微裂隙和微孔隙的楔开作用越显著。

3) 煤基质收缩效应对煤样渗透率的影响与煤样的力学性质密切相关,进一步进行这方面的研究将对我们深入认识基质收缩效应影响下的煤样渗透率变化规律有所帮助。

参考文献:

- [1] GASH B W. Measurement of the rock properties in coal-bed methane [C]//Society of Petroleum Engineers (US), Technical Conference and Exhibition, Proceedings of 1993 SPE Annual Technical Conference & Exhibition. Dallas, Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 1993: 221-230.
- [2] PURL R, EVANOFF J C, BRUGLER M L. Measurement of coal cleat porosity and relative permeability characteristics [C]//Society of Petroleum Engineers (US), Technical Conference and Exhibition, Proceedings of 1991 SPE Annual Technical Conference & Exhibition. Houston, Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 1991: 257-269.
- [3] HARPALANI S, PARITI U M. Study of coal sorption isotherm using a multi-component gas mixture [C]//1993 International Coal-bed Methane Symposium. Alabama: [s. n.], 1993: 321-337.
- [4] MAVOR M J, VAUGHN J E. Increasing coal absolute permeability in the San Juan Basin fruit land formation[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 1998, 1(3): 201-206.
- [5] PALMER I, MANSOORI J. How permeability depends on stress and pore pressure in coal-beds: A new model[J]. Soc Petrol Eng Res Eng, 1998, 12: 539-44.
- [6] CUI X, BUSTIN R M. Volumetric strain associated with methane desorption and its impact on coal-bed gas production from deep coal seams[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(9): 1181-1202.
- [7] WANG G X, MASSAROTTO P, RUDOLPH V. An improved permeability model of coal for coalbed methane recovery and CO₂ geosequestration [J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 77(1/2): 127-136.
- [8] CONNELL L D, LU M, PAN Z J. An analytical coal permeability model for tri-axial strain and stress conditions[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 84(2): 103-114.
- [9] JASINGE D, RANJITH P G, CHOI S K. Effects of effective coal[J]. Fuel, 2011, 90(3): 1292-1300.
- [10] MENG ZHAO-PING, ZHANG JIN-CAI, WANG RUI. In-situ stress, pore pressure and stress-dependent permeability in the Southern Qinshui Basin [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48(1): 122-131.
- [11] 傅雪海, 李大华, 秦勇, 等. 煤基质收缩对渗透率影响的实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(2): 129-137.
- FU XUE-HAI, LI DA-HUA, QIN YONG, et al. Experimental research of influence of coal matrix shrinkage on permeability [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(2): 129-137.
- [12] 陈金刚, 张世雄, 秦勇, 等. 煤基质收缩能力内在控制因素的试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(5): 26-28.
- CHEN JIN-GANG, ZHANG SHI-XIONG, QIN YONG, et al. Testing study on the internality controlling factors of coal matrix shrinkage ability[J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32(5): 26-28.
- [13] 尹光志, 李小双, 赵洪宝, 等. 瓦斯压力对突出煤瓦斯渗流影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 697-702.
- YIN GUANG-ZHI, LI XIAO-SHUANG, ZHAO HONG-BAO, et al. Experimental study of effect of gas pressure on gas seepage of outburst coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 697-702.
- [14] 曹树刚, 郭平, 李勇, 等. 瓦斯压力对原煤渗透特性的影响[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 595-599.
- CAO SHU-GANG, GUO PING, LI YONG, et al. Effect of gas pressure on gas seepage of outburst coal[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 595-599.
- [15] 隆清明, 赵旭生, 孙东玲, 等. 吸附作用对煤的渗透率影响规律试验研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(9): 1030-

1034.
LONG QING-MING, ZHAO XU-SHENG, SUN DONG-LING, et al. Experimental study on coal permeability by adsorption[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(9): 1030-1034.
- [16] 张先敏, 同登科. 考虑基质收缩影响的煤层气流动模型及应用[J]. 中国科学, 2008, 38(5): 790-796.
ZHANG XIAN-MIN, TONG DENG-KE. A coalbed gas flow model and its application considering matrix shrinkage [J]. Scientia Sinica Technologica, 2008, 38(5): 790-796.
- [17] 周军平, 鲜学福, 姜永东, 等. 考虑有效应力和煤基质收缩效应的渗透率模型[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(1): 4-8.
ZHOU JUN-PING, XIAN XUE-FU, JIANG YONG-DONG, et al. A permeability model considering the effective stress and coal matrix shrinking effect [J]. Journal Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2009, 31(1): 4-8.
- [18] 周锋德, 姚光庆, 唐仲华. 煤基质收缩和膨胀对甲烷开采和二氧化碳存储的影响[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(1): 150-156.
ZHOU FENG-DE, YAO GUANG-QING, TANG ZHOU-HUA. Influence of coal matrix shrinkage and swelling on coalbed methane production and CO₂ storage[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(1): 150-156.
- [19] 许江, 彭守建, 尹光志, 等. 含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 907-914.
XU JIANG, PENG SHOU-JIAN, YIN GUANG-ZHI, et al. Development and application of three-axial servo-controlled seepage equipment for hot-fluid-solid coupling of coal containing methane [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 907-914.
- [20] 钱凯, 赵庆波. 煤层甲烷气勘探开发理论与实验测试技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- [21] American Society for the Testing of Materials. ASTM Standard D4525 Standard test method for permeability of rocks by flowing air[S]. USA: ASTM, 1990.
- [22] KLINKENBERG L J. The permeability of porous media to liquids and gases[C]//Drilling and Production Practice. New York: American Petroleum Institute, 1941: 200-213.
- [23] WU Y S, PRUESS K, PERSOFF P. Gas flow in porous media with Klinkenberg effects[J]. Transport in Porous Media, 1998, 32(1): 117-137.
- (编辑 郑 洁)
-
- (上接第 108 页)
- [14] 陈锋, 杨海军, 杨春和. 盐岩储气库注气排卤期剩余可排卤水分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3602-3606.
CHEN FENG, YANG HAI-JUN, YANG CHUN-HE. Analysis of residual brine of salt rock gas storage during injecting gas to eject brine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3602-3606.
- [15] 万玉金. 在盐层中建设储气库的形状控制机理[J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 130-132.
WAN YU-JIN. Shape-controlling mechanism of gas storage building in salt beds[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(9): 130-132.
- [16] 赵志成, 朱维耀, 单文文, 等. 盐岩储气库水溶建腔数学模型研究[J]. 天然气工业, 2004, 42(9): 126-129.
ZHAO ZHI-CHENG, ZHU WEI-YAO, SHAN WEN-WEN, et al. Mathematical model of chamber building with water solution for gas storages in salt beds[J]. Natural Gas Industry, 2004, 42(9): 126-129.
- [17] 吴乘胜, 杨骏六. 单井对流法水溶采矿的数学模型[J]. 力学与实践, 2003, 25(1): 11-13.
WU CHENG-SHENG, YANG JUN-LIU. Mathematical model of solution mining with single well convection method[J]. Mechanics and Engineering, 2003, 25(1): 11-13.
- [18] 梅尔兹科奇 W. 流动显示[M]. 黄素逸, 王志国, 张浩然, 译. 北京: 科学出版社, 1991.
- [19] 江守一郎. 模型实验的理论与应用[M]. 郭廷伟, 李安定, 译. 北京: 科学出版社, 1986.
- (编辑 郑 洁)