

文章编号: 1001-1986(2014)04-0021-04

受载含瓦斯原煤解吸规律实验研究

贾彦楠^{1,2}, 温志辉², 姚邦华²

(1. 中煤邯郸设计工程有限责任公司, 河北 邯郸 056031;
2. 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 依托自行研发的含瓦斯煤热-流-固-力耦合吸附/解吸实验系统, 测定了不同围压和孔隙压力组合条件下, 煤样加载破坏过程中不同加载阶段的瓦斯解吸量, 并对实验数据进行了拟合, 分析了轴压、围压和孔隙压力对含瓦斯原煤解吸规律的影响。结果表明: 在煤样整个加载破坏过程中, 受载原煤瓦斯解吸量呈现先减小后增加的“V”型变化趋势, 且最小出现在屈服强度阶段, 最大出现在脆性破坏阶段; 受载原煤瓦斯解吸量随围压的增大而减小, 随吸附平衡压力的增大而增大。

关 键 词: 受载; 含瓦斯原煤; 瓦斯解吸规律

中图分类号: P618.13; TD712 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2014.04.005

Experiment of the desorption law of loaded gas-filled raw coal

JIA Yannan^{1,2}, WEN Zihui², YAO Banghua²

(1. China Coal Handan Design Engineering Co., Ltd, Handan 056031, China;
2. College of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to study the desorption law of loaded gas-filled raw coal, relying on own developed gasfilled coal heat-flow-solid-mechanical coupled adsorption-desorption experiment system, experiment determined the gas desorption quantity of different loading stage under different confining pressure and pore pressure, the experimental data were fitted, the influence of axial compression, confining pressure and pore pressure on gas desorption of raw coal was analyzed. The results showed that the gas desorption quantity decreases and then increases with the increase of axial compression, showing a “V” shaped variation, the minimum appeared in the stage of yield strength, maximum in brittle failure stage; the gas desorption decreases with the increase of confining pressure, with the increase of adsorption equilibrium pressure, gas desorption quantity increase as a quadratic function.

Key words: loaded; gas filled raw coal; gas desorption law

煤的瓦斯解吸规律可以反映煤与瓦斯突出危险性, 指导煤层气开采, 是防治煤与瓦斯突出和煤层气开采的重要理论基础。在含瓦斯煤解吸规律研究方面, 国内外众多科研机构和学者依据解吸量与时间的关系提出了一系列瓦斯解吸规律经验公式^[1-2]。同时, 周世宁、杨其奎、王兆丰、陈昌国等在瓦斯解吸规律的影响因素、瓦斯解吸模型和瓦斯解吸机理方面也做了大量的实验和理论研究^[3-11]。但以上研究存在两点不足: 一是大多数研究以机械破坏筛分后的颗粒煤为实验煤样, 而颗粒煤在机械破坏筛分后, 其原始孔隙、裂隙结构已遭到破坏, 煤体吸附容积和瓦斯运移通道也发生了较大变化, 而煤体吸附容积和瓦斯运移通道是影响煤体瓦斯吸附、解吸、运移的重要因素, 因此颗粒

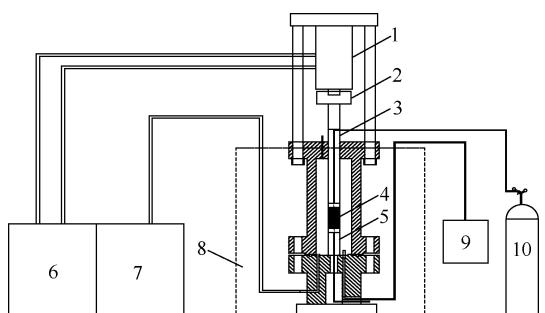
煤与原煤的瓦斯解吸规律是有差别的; 二是以往研究较少考虑应力场对含瓦斯煤解吸规律的影响, 由于实际煤储层尤其深部煤层中的煤体和瓦斯都处于高应力状态, 如果含瓦斯煤的解吸规律研究过程中不考虑应力影响, 其结果与实际情况可能会有较大的偏差。因此, 本文依托自行研发的含瓦斯煤热-流-固-力耦合吸附/解吸实验系统, 通过实验模拟高地应力和高瓦斯压力的煤储层条件, 进行受载含瓦斯原煤的解吸规律的实验研究。

1 实验设计

1.1 实验系统

实验采用自主研制的含瓦斯煤热-流-固-力耦合

实验系统。该系统主要由加载系统、三轴压力室、孔隙压力控制系统、温度控制系统和数据采集监控系统组成(图 1)。加载系统由轴压泵和围压泵分别提供轴压和围压;孔隙压力控制系统由瓦斯瓶、减压阀、缓冲罐和管路组成,瓦斯瓶供给纯度为 99.9% 的 CH_4 ,减压阀调节进气口气体压力;温度控制由一个大型特制的精密恒温水箱实现;数据采集监控系统由应力采集系统、位移采集系统、气体质量流量计和应变采集测试设备组成。实验全过程均在试验操作台上进行,由计算机及控制程序控制,确保实验数据准确可靠。



1—液压缸;2—应力传感器;3—上压头;4—煤样;5—下压头;
6—轴压加载系统;7—围压加载系统;8—恒温系统;
9—应力采集系统;10—高压气源

图 1 实验系统结构示意图

Fig.1 Structure of the experimental system

1.2 煤样采集与制备

实验煤样均取焦煤集团赵固二矿二₁煤层。将蜡封取样的原煤使用 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 岩心管钻取实验煤样,并用切割机将上下端面打磨光滑(平滑度不大于 0.02%)、平行,以保证加载时上下端面受力均匀。为了尽量避免试件内部结构差异和加工误差对实验结果造成较大影响,对由同一大煤块加工成的试件采用统计分类和表面裂纹的拍照观测方法,筛选出完整、密实、无明显裂隙的作为实验试件(图 2)。



图 2 原煤煤样

Fig.2 Raw coal samples

1.3 实验方案

进行恒定温度(30℃)条件下,不同围压(2 MPa、3 MPa、4 MPa)、不同孔隙压力(0.6 MPa、0.9 MPa、1.2 MPa、1.5 MPa)和不同轴压(煤样轴向加载破坏全过程)组合条件下的含瓦斯原煤吸附解吸实验。主要研究加载过程中含瓦斯原煤解吸规律。

1.4 实验步骤

a. 实验前准备。为排除水分对实验结果的影响,将实验煤样放入高温马弗炉里恒温干燥 12 h,冷却煤样后称重记录,之后对煤样进行贴应变片处理,之后将其装入三轴压力室内,连接好整个系统后检查实验系统气密性,检查完成后将三轴压力室和孔隙压力控制系统的缓冲罐放入恒温水箱中,以保证煤样及充入的 CH_4 气体温度恒定(30℃)。

b. 真空脱气。为排除煤样和系统中杂质气体对实验结果造成影响,用真空泵对整个实验系统脱气,使实验系统真空度达到实验要求,如果关闭真空泵后,系统真空度在 2 h 内一直保持稳定,即完成真空脱气。

c. 瓦斯吸附。打开注气系统,充入 99.9% 浓度的 CH_4 气体到缓冲罐,恒温后对三轴压力室充入预定孔隙压力。为达到充分吸附应保证吸附时间不低于 24 h。

d. 瓦斯解吸。煤样吸附平衡后,关闭进气阀,打开出气阀,利用排水法测定解吸量。每个加载阶段解吸完成后,增加轴向应力,重复 c、d 过程,直至煤样发生脆性破坏,试验结束。

e. 整理和分析数据。

2 实验结果分析

2.1 轴压对含瓦斯原煤解吸规律的影响

图 3a 是固定围压 3 MPa 时,不同吸附平衡压力条件下 1 h 瓦斯解吸累积量随轴压的变化曲线。图 3b 是固定吸附平衡压力 0.9 MPa 时,不同围压条件下 1 h 瓦斯解吸累积量随轴压的变化曲线。

由图 3 可看出,轴压对含瓦斯原煤解吸规律的影响如下:

a. 同时固定围压和吸附平衡压力条件下,煤样在不同轴压情况下的瓦斯解吸累积量各不相同。图 3a 中,围压 3 MPa—吸附平衡压力 0.6 MPa 条件下,煤样加载破坏过程中(图中为 8 个轴压条件),1 h 瓦斯解吸累积量的增长率是-18%、-7%、-7%、-9%、36%、26%、123%;图 3b 中,围压 4 MPa—吸附平衡压力 0.9 MPa 条件下,煤样加载破坏过程中(图中为 8 个轴压条件),1 h 瓦斯解吸累积量的增长率是-17%、-7%、-2%、-10%、29%、30%、147%。由

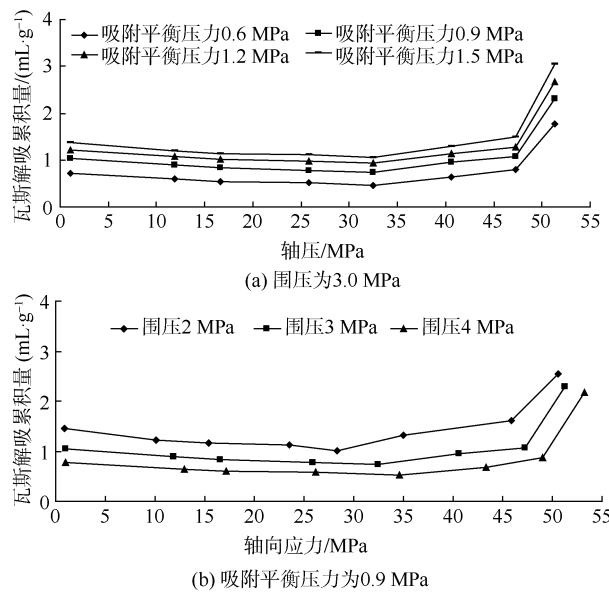


图3 瓦斯解吸量随轴压变化曲线

Fig.3 Variation of gas desorption with axial compression

此可看出,在整个加载过程中,瓦斯解吸累积量呈现先减小后增加的“V”型变化趋势。

b. 固定围压条件下,煤样加载过程中不同轴压情况下的瓦斯解吸累积量随吸附平衡压力的增大而增大;固定吸附平衡压力条件下,煤样加载过程中不同轴压情况下的瓦斯解吸累积量随围压的增大而减小。

根据已有的研究成果^[12-13],煤单轴压缩应力-应变曲线呈现密实阶段、弹性变形阶段、屈服强度阶段、峰值强度(脆性破坏)阶段和残余强度阶段5个阶段。
 a. 在密实阶段,煤体中的大量原生孔隙和裂隙在轴向压应力作用下被压密压实,随着应力的增加,煤样的吸附容积减小,瓦斯流动通道变窄,因而该阶段在解吸过程中表现为瓦斯解吸累积量减小;b. 在弹性变形阶段,随着应力的继续增加,试件原有的裂隙和孔隙在较大的压应力作用下继续闭合,煤样的吸附容积继续减小,瓦斯流动通道变得更窄甚至闭合,因而该阶段在解吸过程中表现为瓦斯解吸累积量持续减小;c. 在屈服强度阶段,当轴向载荷不断增加达到超过煤样屈服强度,煤样就会开始出现损伤,煤样内部开始产生新的孔隙和裂隙,此阶段煤样的吸附容积减小到最小后会有所增加,产生新的瓦斯流动通道,因此该阶段在解吸过程中表现为瓦斯解吸累积量减小到最小后会有所增加;d. 在峰值强度阶段,轴向应力继续增加达到峰值强度,煤样内部损伤不断快速发展,煤样内部新的裂隙也不断产生,煤样出现明显地变形,局部会变粗,会产生较为明显的裂隙,产生更多新的吸附容积和瓦斯流动通道,因此该阶段在解吸过程中表现为瓦斯解吸累积量的急剧增加;e. 在

残余强度阶段,煤样在发生脆性破坏后虽然产生了较大破损,但仍具有一定的残余强度。

2.2 围压对含瓦斯原煤解吸规律的影响

图4a是在固定轴压47 MPa时,不同吸附平衡压力下1 h瓦斯解吸累积量随围压的变化曲线;图4b是在固定吸附平衡压力0.9 MPa时,不同轴压(仅列举4个轴压)条件下1 h瓦斯解吸累积量随围压的变化曲线。

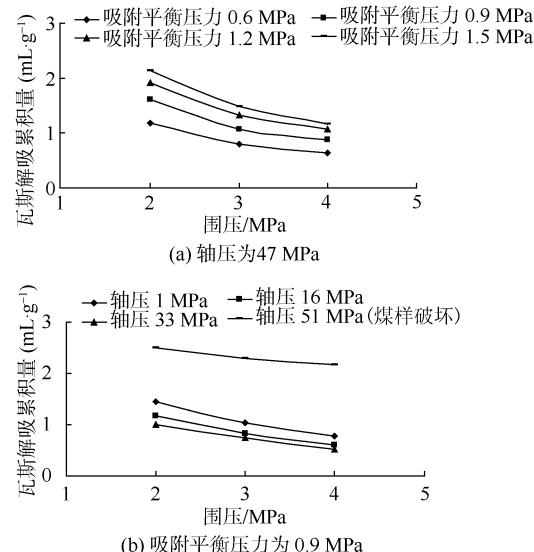


图4 瓦斯解吸量随围压变化曲线

Fig.4 Variation of gas desorption with confining pressure

由图4可看出,围压对含瓦斯原煤解吸规律的影响如下:

a. 在固定轴压和吸附平衡压力条件下,煤样在不同围压情况下的瓦斯解吸累积量各不相同,任意轴压和吸附平衡压力组合条件下的煤样瓦斯解吸累积量都随围压的增大而减小。

b. 固定轴压条件下,煤样在不同吸附平衡压力情况下的瓦斯解吸累积量随围压的增大而减小;固定吸附平衡压力的条件下,煤样加载过程中不同轴压情况下的瓦斯解吸累积量随围压的增大而减小。

关于围压对煤体内瓦斯流动和煤体力学性质的影响,李小双等^[14]和王吉渊^[15]研究表明,围压通过侧向压缩煤体侧壁,引起其内部结构变化而阻碍其内部的瓦斯流动,煤样的三轴抗压强度、弹性模量和峰值应变均随着围压的增加呈线性单调增加。

由此可以得到,围压的增大,一方面可迫使煤体内孔隙裂隙被压实压密,孔隙间连通结构被破坏甚至阻断;另一方面,围压增大也提高了煤体的屈服强度和峰值强度,不利于新的孔隙裂隙的产生和发展。对于含瓦斯煤解吸过程,围压的增大,不仅减小了煤体的吸附容积,也对瓦斯气体的解吸运移通道产生了

阻碍作用,同时不利于新通道的产生。于是,在实验中就会出现随着围压的增大,瓦斯解吸量会随之减小的现象。

2.3 孔隙压力对含瓦斯原煤解吸规律的影响

图 5a 为固定轴压 47 MPa 时不同围压条件下 1 h 瓦斯解吸累积量随吸附平衡压力的变化曲线;图 5b 为固定围压 3 MPa 时不同轴压(仅列举 4 个轴压)条件下 1 h 瓦斯解吸累积量随吸附平衡压力的变化曲线。

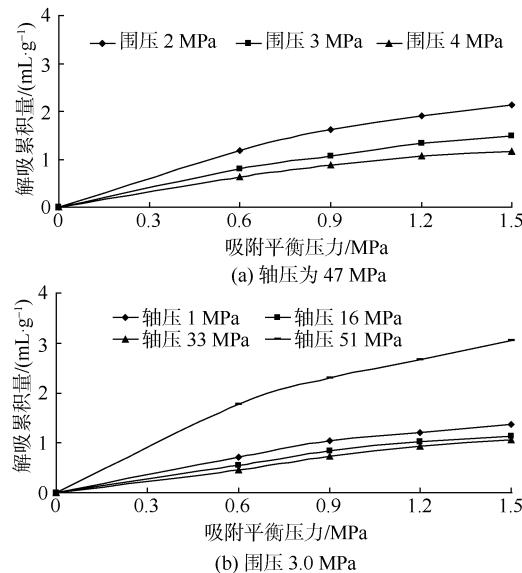


图 5 瓦斯解吸量随吸附平衡压力变化曲线

Fig.5 Variation of gas desorption with adsorption equilibrium pressure

由图 5 可看出吸附平衡压力对含瓦斯原煤解吸规律的影响如下:

a. 在同时固定轴压和围压条件下,煤样在不同吸附平衡压力下的瓦斯解吸累积量各不相同,任意轴压和围压条件下的瓦斯解吸累积量都随吸附平衡压力的增大而增大。

b. 固定轴压情况下,任意围压下的瓦斯解吸累积量随吸附平衡压力的增大而增大。在轴压与围压 3 种不同组合下,吸附平衡压力从 0.6 MPa 逐渐增至 1.5 MPa,其间的 4 个等级的瓦斯压力的平均瓦斯解吸累积量依次为 0.87 mL/g、1.19 mL/g、1.44 mL/g、1.6 mL/g,平均瓦斯解吸累积量增长率为 37%、21%、11%。因此可以看出,在固定轴压情况下,瓦斯解吸累积量随着吸附平衡压力的增大而增大,但增大量有减小趋势。

c. 固定围压情况下,任意轴压下的瓦斯解吸累积量随吸附平衡压力的增大而增大。在轴压与围压 4 种不同组合下,吸附平衡压力从 0.6 MPa 逐渐增至 1.5 MPa,其间的 4 个等级的瓦斯压力的平均瓦斯解

吸量依次为 0.76 mL/g、1.08 mL/g、1.29 mL/g、1.46 mL/g,平均瓦斯解吸量增长率为 43%、20%、13%。因此可以看出,在固定围压情况下,瓦斯解吸累积量随着吸附平衡压力的增大而增大,但增大量有减小趋势。

根据以上分析得出,瓦斯解吸累积量随着吸附平衡压力的增大而增大,但瓦斯解吸量与吸附平衡压力之间存在着非线性关系。通过对图 5 中 7 种条件下的试验数据进行拟合分析,可得出不同轴压、围压组合状态下的瓦斯解吸累积量与吸附平衡压力的关系(表 1)。

表 1 煤样实验数据拟合结果

Table 1 Fitting result of test data of coal samples

应力组合	拟合方程	相关系数
$\sigma_1=47 \text{ MPa}, \sigma_3=2 \text{ MPa}$	$Q=-0.5982P^2+2.3223P+0.0007$	0.9999
$\sigma_1=47 \text{ MPa}, \sigma_3=3 \text{ MPa}$	$Q=-0.3524P^2+1.5208P+0.0015$	0.9998
$\sigma_1=47 \text{ MPa}, \sigma_3=4 \text{ MPa}$	$Q=-0.3524P^2+1.2769P+0.0029$	0.9995
$\sigma_1=1 \text{ MPa}, \sigma_3=3 \text{ MPa}$	$Q=-0.3529P^2+1.4491P+0.0027$	0.9989
$\sigma_1=16 \text{ MPa}, \sigma_3=3 \text{ MPa}$	$Q=-0.2368P^2+1.1248P+0.0082$	0.9971
$\sigma_1=33 \text{ MPa}, \sigma_3=3 \text{ MPa}$	$Q=-0.1779P^2+1.0188P-0.0072$	0.9977
$\sigma_1=51 \text{ MPa}, \sigma_3=3 \text{ MPa}$	$Q=-0.9286P^2+3.3833P+0.0186$	0.9976

注: σ_1 —轴压; σ_3 —围压; Q —瓦斯解吸累积量; P —吸附平衡压力。

由表 1 可以看出,在轴压 47 MPa 和围压 3 MPa 的 7 种应力组合状态下,受载含瓦斯煤解吸累积量随吸附平衡压力的增加呈现出抛物线的关系增加,相关度都在 0.99 以上,进一步揭示出受载含瓦斯煤解吸累积量与吸附平衡压力的关系为二次多项式函数关系:

$$Q = \alpha P^2 + \beta P + \gamma$$

式中 α 、 β 、 γ 均为拟合系数。

3 结 论

依托含瓦斯煤热-流-固-力耦合吸附/解吸实验系统,着重探讨了轴压、围压和孔隙压力对受载含瓦斯煤解吸规律的影响,通过实验研究和理论分析,得出以下结论:

a. 在煤样整个加载破坏过程中,受载原煤瓦斯解吸量呈现先减小后增加的“V”型变化趋势,与煤单轴压缩应力-应变曲线的 5 个阶段相对应,最小瓦斯解吸量一般出现在屈服强度阶段,瓦斯解吸量最大则出现在煤样脆性破坏阶段。

b. 受载原煤瓦斯解吸累积量随着围压的增大而减小。

(下转第 30 页)

- 工业, 2004, 24(7): 15–18.
- [2] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641–653.
- [3] CAO Daiyong, LI Jing, WEI Yingcun, et al. Study on the forming conditions of shale gas in coal measure of Wuli area, Qinghai Province, China[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 295: 2770–2773.
- [4] 王庭斌. 中国含煤-含气(油)盆地的地质条件[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(2): 117–124.
- [5] 程爱国, 曹代勇, 袁同星. 煤炭资源潜力评价技术要求[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [6] 张丽霞, 姜呈馥, 郭超. 鄂尔多斯盆地东部上古生界页岩气勘探潜力分析[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2012, 27(1): 23–33.
- [7] 徐伦勋, 李建民, 李景义. 吐哈盆地台北凹陷侏罗系烃源岩特征[J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(2): 13–14.
- [8] 傅恒, 刘巧红, 杨树生. 陆相烃源岩的沉积环境及其对生烃潜力的影响—以准噶尔盆地侏罗系烃源岩为例[J]. 岩相古地理, 1996, 16(5): 31–37.
- [9] 方朝刚, 李凤杰, 孟立娜, 等. 柴达木盆地北缘红山断陷中侏罗统烃源岩评价[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(5): 856–861.
- [10] 黄文彪, 卢双舫, 江涛, 等. 长岭断陷深层烃源岩条件及勘探潜力评价[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(14): 3172–3177.
- [11] 蒋红丽, 张绍. 海拉尔盆地乌东斜坡带南屯组烃源岩评价[J]. 西部探矿工程, 2011(1): 98–100.
- [12] 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 150–155.
- [13] 朱如凯. 含煤岩系旋回模式及其层序地层特征[J]. 地学前缘, 1994(增刊 1): 40.
- [14] 戴金星, 戚厚发, 王少昌. 我国煤系气油地球化学特征、煤成气藏形成条件及资源评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [15] 姚素平, 张景荣, 胡文瑄, 等. 鄂尔多斯盆地中生界煤成烃潜力的实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(1): 24–28.
- [16] PETERSEN H I, ANDSBJERG J, BOJESEN-KOEFOED J A, et al. Coal generated oil: source rock evaluation and petroleum geochemistry of the Luita oil field Danish north sea[J]. Journal of Petroleum Geology, 2000, 23(1): 55–90.
- [17] 傅家漠, 刘德汉, 盛国英. 煤成烃地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [18] 庞雄奇, LERCHE I, 王雅春, 等. 煤系烃源岩排烃门限理论研究与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [19] BOWKER K A. Barnett shale gas production, Fort Worth basin: Issues and discussion [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523–533.
- [20] ROBERT G L, STEPHEN C R. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 579–601.
- [21] 曹代勇, 张守仁, 穆宣社, 等. 中国含煤岩系构造变形控制因素探讨[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(1): 25–28.
- [22] 戴金星, 王庭斌, 宋岩, 等. 中国大中型天然气田形成条件与分布规律[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [23] 李伟, 赵文智, 牛嘉玉, 等. 吐哈盆地煤系地层中烃类的独特运聚风格初探[J]. 石油学报, 1997, 18(2): 8–12.
- [24] 付广, 刘博, 吕延防. 泥岩盖层对各种相态天然气封闭能力综合评价方法[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(1): 16–20.

(上接第 24 页)

c. 受载原煤瓦斯解吸量随着吸附平衡压力的增大而增大, 受载含瓦斯煤样解吸累积量与吸附平衡压力的关系为二次多项式函数关系。

参考文献

- [1] 于不凡, 王佑安. 煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005.
- [2] 何学秋, 林柏泉, 程卫民, 等. 安全工程学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.
- [3] 苏现波, 吴昱, 夏大平, 等. 温度对低煤阶煤生物甲烷生成的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(5): 24–26.
- [4] 马东民, 温兴宏. 无烟煤对甲烷等温吸附解吸特性实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(2): 25–27.
- [5] 周世宁. 瓦斯在煤层中流动的机理[J]. 煤炭学报, 1990, 15(1): 15–24.
- [6] 蔡亚兵, 马东民, 刘钰辉, 等. 温度对煤吸附甲烷的影响实验[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(6): 24–28.
- [7] 杨其奎. 关于煤屑瓦斯放散规律的试验研究[J]. 煤矿安全, 1986, 18(2): 9–17.
- [8] 王兆丰. 空气、水和泥浆介质中煤的瓦斯解吸规律与应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2001.
- [9] 李相臣, 康毅力, 尹中山, 等. 川南煤层甲烷解吸动力学影响因素实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(4): 31–34.
- [10] 陈昌国. 煤的物理化学结构和吸附(解吸)甲烷机理的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1995.
- [11] 伊向艺, 吴红军, 卢渊, 等. 不同矿化度水对煤层气解吸-扩散影响的实验[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(5): 33–35.
- [12] 尹光志, 李广治, 赵洪宝, 等. 煤岩全应力-应变过程中瓦斯流动特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 170–175.
- [13] 裴柏林. 煤层气储层三维渗透率变化规律实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(4): 26–30.
- [14] 李小双, 尹光志, 赵洪宝, 等. 含瓦斯突出煤三轴压缩下力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 3350–3358.
- [15] 王吉渊. 围压对煤体力学性质影响的实验研究[J]. 煤矿安全, 2010, 41(12): 14–16.