

文章编号: 1001-4888(2017)01-0094-07

超临界 CO₂ 作用下煤体膨胀变形规律试验研究^{*}

孙可明, 李天舒, 辛利伟, 张树翠

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 为解决采用应变片对超临界 CO₂ 作用下煤体膨胀变形进行点测量时, 试验结果离散性大、超临界 CO₂ 作用导致应变片易脱离破损等问题, 自主研发了具有施加热流载荷功能的膨胀体积应变测量装置, 对不同温度、压力的超临界 CO₂ 作用下, 煤体膨胀体积变形规律进行研究。结果表明: 煤体膨胀体积应变随超临界 CO₂ 作用时间增加呈现先增大后趋于稳定的变化规律; 当孔隙压力不变时, 膨胀体积应变随超临界温度的升高而增加, 温度越高, 达到稳定膨胀变形所需时间越长; 当温度不变时, 随着超临界孔隙压力增加, 膨胀体积应变也随之增大, 但达到稳定膨胀变形所需时间随孔隙压力的升高呈先增加后减少的趋势; 超临界 CO₂ 作用下, 煤体体积应变随温度和孔隙压力均呈“S 型”Logistic 函数规律变化; 膨胀体积应变对超临界温度和孔隙压力的变化率具有分区性, 其变化率大小排序依次为: 近临界区 > 跨临界区 > 超临界区。

关键词: 超临界 CO₂; 膨胀变形; 体积应变; 温度; 孔隙压力

中图分类号: TE312

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-086

0 引言

面对能源短缺和空气污染严重等问题, 我国积极调整能源战略, 加强对新能源、清洁能源的开发与利用^[1,2]。煤层气作为储量丰富的优质高效清洁能源^[3], 开发前景广阔, 但我国煤层气藏“三低一高”^[4-6](低饱和度、低渗透性、低储层压力, 高变质程度)的特性导致了煤层气抽采率低、商业性开发困难。针对低渗透煤层气的开发, 国内外学者开展了大量提高煤层渗透率方法的研究工作, 但现阶段我国煤层气地面钻井抽采多套用常规油气开发方案和国外开发技术, 存在开发方案针对性不强、开发技术适应性差等问题^[7,8]。井下抽采主要通过卸压增透及在煤层中利用机械方式增加宏观通道的方法来提高煤层气的抽采率^[9], 对于低渗透煤层, 不管是地面开发还是井下抽采都仍面临着产能低的问题。因此, 寻找高效的低渗透煤层增透技术是提高我国低渗透煤层气开发水平的关键。

近年来, 利用注入超临界 CO₂ 对低渗透煤层增透, 从而提高煤层气采收率的技术得到广泛关注, 孙可明课题组^[10-12]通过实验证实了超临界 CO₂ 对提高煤层渗透性具有良好的效果。但煤体吸附 CO₂ 产生的膨胀变形却是降低煤层渗透性的重要因素^[13], 研究^[14-17]表明煤体吸附 N₂、CH₄ 和 CO₂ 后的膨胀量依次增加, CO₂ 的注入将引起煤体膨胀变形并降低储层渗透性, 使注入难以持续进行, 该问题在低渗透煤层尤为严重。对于煤体吸附 CO₂ 产生膨胀变形的规律研究, 目前国内外学者主要集中在非超临界 CO₂ 状态下的膨胀情况^[18-21]。煤体膨胀不仅由吸附气体产生, 煤体的膨胀变形量还受地应力等外部荷载条件的影响^[22,23]。CO₂ 进入超临界状态, 煤体在超临界温度下产生的热膨胀, 在超临界孔隙压力作用下产生的基质变形都将不同于非超临界状态下, 且超临界 CO₂ 具有似液非液、似气非气、对温压变化

^{*} 收稿日期: 2016-05-08; 修回日期: 2016-08-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51574137); 国家自然科学基金青年基金项目(No. 51504122)

通讯作者: 孙可明(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事多场耦合渗流理论及应用。Email: sskmm11@163.com

极敏感的特性,因此超临界 CO₂ 对煤体膨胀的影响比非超临界状态复杂。目前对超临界 CO₂ 作用下煤体膨胀变形规律的研究较少,理论依据、试验数据都很匮乏,膨胀变形试验集中于煤样贴应变片的方法来测量膨胀变形。

为分析超临界 CO₂ 作用下煤体膨胀变形规律,采用自主研发的膨胀变形测试装置,利用 ISCO 高压无脉冲计量双泵的恒压模式对煤体膨胀变形量进行测量。该试验装置有效地弥补了传统膨胀变形试验用应变片采集变形数据时只能进行点测量、测量范围小、试验结果离散性大、超临界 CO₂ 作用下应变片与煤体试件易脱离破损等不足,并可以进一步分析超临界 CO₂ 作用下煤体膨胀变形对渗透率的影响。

1 煤体膨胀变形试验

1.1 试验原理

超临界 CO₂ 作用下煤体产生膨胀变形的影响因素较多,温度变化导致的热膨胀、吸附超临界 CO₂ 产生的吸附膨胀、孔隙压力作用于煤体基质引起的变形等都会对膨胀变形量产生影响。为对比分析不同温压状态的超临界 CO₂ 作用下煤体膨胀体积应变的变化规律,将三轴压力室静置于恒温水浴,待煤体试件因超临界温度所产生的热膨胀充分完成即温度变化引起的膨胀变形全部完成再进行膨胀应变的测量,从而消除温度变化所导致的煤体温度应变差异。

对超临界 CO₂ 作用下煤体体积应变进行测量,在施加恒定孔隙压和轴压的情况下,煤体膨胀变形将引起围压改变,为保持围压稳定,计量泵的流量值将随之发生改变,因此计量泵内流量的改变量即可真实准确地反映煤体的体积变形量。体积应变测量原理如图 1 所示。

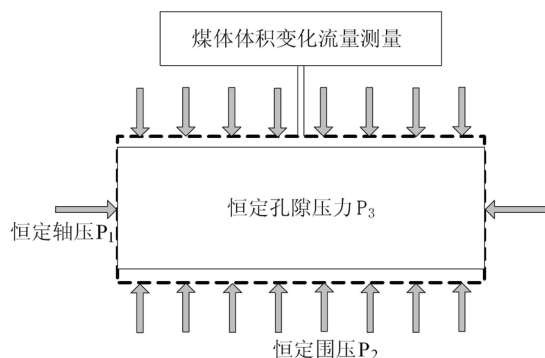


图 1 煤体膨胀体积应变测量原理图

Fig. 1 The measuring principle diagram of coal swelling volumetric strain

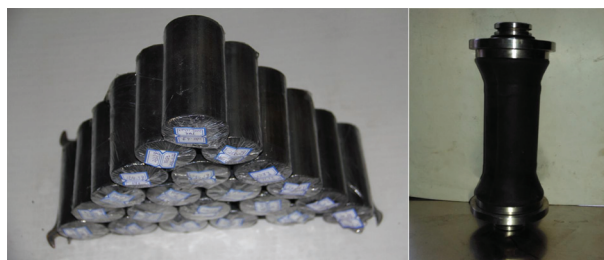


图 2 自制型煤试件

Fig. 2 The self-made briquette specimens

1.2 试样制备

不同温压状态超临界 CO₂ 作用下煤体膨胀变形规律研究,需要对多组试件结果对比分析。因原煤为非均质性材料,为尽可能减少非均质性差异对膨胀变形规律的影响,选用自制型煤作为试验试件。试验所用煤样取自辽宁阜新煤矿的煤块,使用 SP-100×100 颚式破碎机将煤块粉碎后筛选 60 目的微颗粒装入模具,用液压式压力试验机逐渐加压至 100MPa,并保持压力 20min 后,对试件进行脱模得到孔隙度相同的 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 标准试件,将标准试件放入烘干箱内干燥 48h,得到试验所需的型煤试件,如图 2 所示。

1.3 试验方法及装置

当温度高于临界温度(31.1℃)、压力超过临界压力(7.38MPa)时,CO₂ 进入超临界状态。试验采用恒温水浴系统可以安全有效地确保试验温度的恒定,并采用孔压控制系统为试验提供恒定的孔隙压力,保证试验过程中煤体试件始终精准恒定地处于同一温压条件的超临界 CO₂ 作用环境。通过加载系统对试验测量时的煤体试件施加载荷,可以更好地反映实际储层地应力条件对膨胀变形规律的影响。

煤体膨胀变形测量装置包括:由压力泵、空气压缩泵、高压 CO₂ 气瓶、压力釜等组成的注气注水加

载系统;三轴压力室;水浴恒温系统;由电磁阀、增压泵、数据记录仪等组成的孔压控制系统;由 ISCO 高压无脉冲计量双泵、数据记录仪组成的数据测量采集系统等试验仪器,试验装置示意图如图 3 所示。

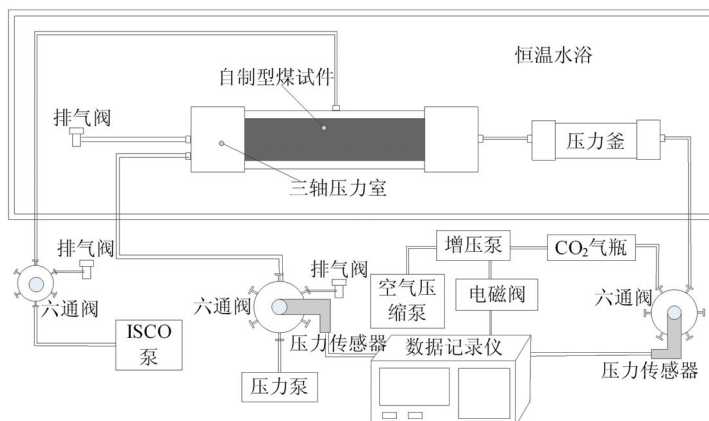


图 3 试验装置示意图

Fig. 3 Sketch of experimental equipment

1.4 试验步骤

- 1) 密封试件,按照图 3 所示连接试验仪器并检查各接口密闭性,确保试验装置正常工作。
- 2) 向三轴压力室施加荷载,通过压力控制阀使轴压和围压匀速地达到预定压力值。
- 3) 将 ISCO 高压无脉冲计量双泵设为恒压模式,通过伺服加载系统和孔压控制系统对型煤试件施加预定的孔隙压力,并确保孔隙压力值稳定。
- 4) 对试件进行抽真空并打开排气阀排气,排除型煤试件孔隙内残留空气,保证煤体孔隙内都充满超临界 CO_2 。
- 5) 将三轴压力室静置于预定温度的恒温水浴内,使煤体充分完成因受热产生的膨胀变形。
- 6) 记录 ISCO 高压无脉冲计量双泵流量值随时间变化情况,流量值不再改变后停止试验。
- 7) 改变试验温压条件,重复试验步骤 2)~6),测定不同温压情况下煤体的膨胀体积应变,各组试验温压值如表 1 所示。

表 1 温压参数表

Tab. 1 The parameter list of temperature and pressure

试件编号	温度(K)	围压(MPa)	轴压(MPa)	孔隙压(MPa)
1	308.15	8.5	8.0	8.0
2	313.15	8.5	8.0	8.0
3	318.15	8.5	8.0	8.0
4	323.15	8.5	8.0	8.0
5	313.15	8.0	7.5	7.5
6	313.15	9.0	8.5	8.5
7	313.15	9.5	9.0	9.0

2 试验结果与分析

按照表 1 的温压状态,对超临界 CO_2 作用下煤体体积应变进行测量,试验结果如表 2 所示。

图 4 为孔隙压力 $P=8.0\text{MPa}$ 时,不同超临界温度状态下煤体膨胀体积应变随时间的变化规律。图 5 为孔隙压力 $P=8.0\text{MPa}$ 时,煤体膨胀变形稳定后体积应变随温度的变化关系。试验结果表明:在孔隙压力等影响因素不变的条件下,煤体膨胀体积应变随超临界 CO_2 作用时间的增加呈现先增大后趋于稳定的规律。膨胀体积应变随超临界温度的升高而增加,温度越高,达到稳定膨胀变形所需时间越长。超临界 CO_2 作用下煤体体积应变随温度变化呈“S 型”Logistic 函数规律。根据 CO_2 的超临界程度

可基于试验数据大致将超临界 CO₂ 分为三个不同区域：跨临界区 ($304.15\text{K} \leq T < 310\text{K}$)，CO₂ 温度大于临界温度 T_c ，其超临界程度较弱；近临界区 ($310\text{K} \leq T < 320\text{K}$)，其温度仍接近临界值，超临界程度适中；高临界区 ($T \geq 320\text{K}$)，CO₂ 的温度值较高，超临界程度较强。随超临界温度的升高煤体膨胀体积应变增长率满足分区性，单位温度内煤体膨胀体积应变变化率排序依次为：近临界区 > 跨临界区 > 高临界区。

表 2 不同温压条件下煤体膨胀体积应变变量

Tab. 2 Volumetric strain of coal swelling under different temperature pressure conditions						
试件编号	温度(K)	孔隙压(MPa)	轴压(MPa)	围压(MPa)	体积应变	持续时间(min)
1	308.15	8.0	8.0	8.5	0.01775	1360
2	313.15	8.0	8.0	8.5	0.06912	1440
3	318.15	8.0	8.0	8.5	0.14388	2100
4	323.15	8.0	8.0	8.5	0.15764	2700
5	313.15	7.5	7.5	8.0	0.03958	1290
6	313.15	8.5	8.5	9.0	0.18037	2580
7	313.15	9.0	9.0	9.5	0.17847	1590

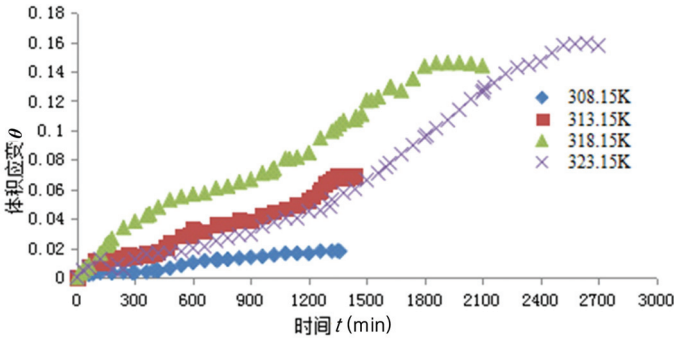


图 4 不同超临界温度下煤体体积应变时间历程曲线

Fig. 4 Coal swelling time history plot under different supercritical temperature conditions

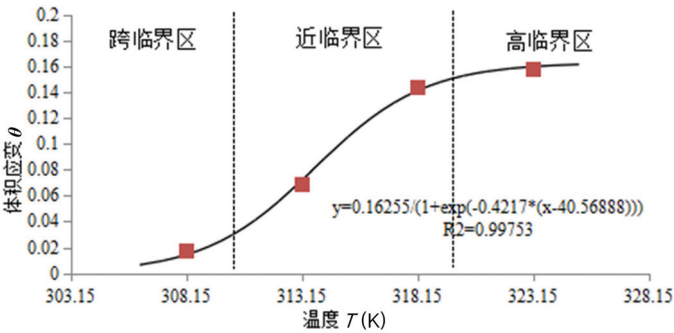


图 5 煤体体积应变随超临界温度的变化曲线

Fig. 5 The curve of coal volumetric strain changes with the supercritical temperature

图 6 为温度 $T=313.15\text{K}$ 时，不同超临界孔隙压力状态下煤体体积应变随时间的变化规律。图 7 为温度 $T=313.15\text{K}$ 时，煤体膨胀变形稳定后体积应变随孔隙压力的变化关系。试验结果表明：在温度等影响因素不变的条件下，煤体膨胀体积应变变量随超临界 CO₂ 作用时间的增长呈现先增加后趋于稳定的规律。随着超临界孔隙压力增加，体积应变也随之增大，但达到稳定膨胀变形所需时间随孔隙压力的升高呈现出先增加后减少的规律。超临界 CO₂ 作用下煤体体积应变随孔隙压力也呈“S 型”Logistic 函数规律变化。同样根据 CO₂ 超临界程度可基于试验数据大致将超临界 CO₂ 分为三个不同区域：跨临界区 ($7.38\text{MPa} \leq P < 7.75\text{MPa}$)，CO₂ 压强大于临界压强 P_c ，其超临界程度较弱；近临界区 ($7.75\text{MPa} \leq P$

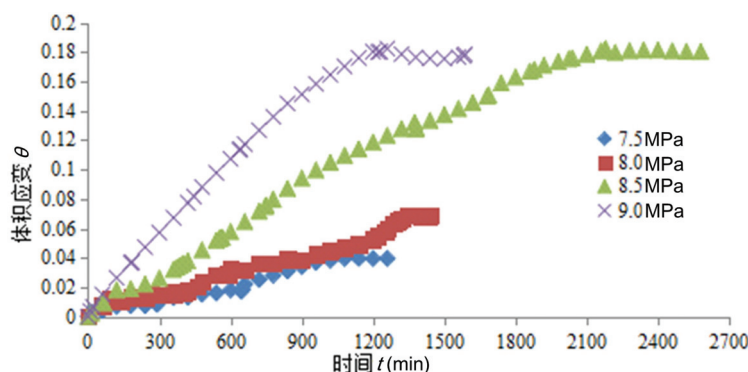


图 6 不同超临界孔隙压力下煤体体积应变时间历程曲线

Fig. 6 Coal swelling volumetric strain time history plot under different supercritical pore pressure conditions

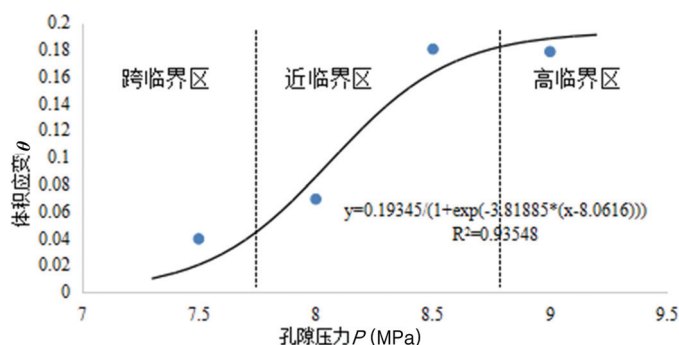


图 7 煤体体积应变随超临界孔隙压力的变化曲线

Fig. 7 The curve of coal volumetric strain changes with the supercritical pore pressure conditions

$< 8.85 \text{ MPa}$), 其压强仍接近临界值, 超临界程度适中; 高临界区 ($P \geq 8.85 \text{ MPa}$), CO_2 的压强值较高, 其超临界程度较强。随超临界孔隙压力的增加煤体膨胀体积应变增长率同样满足分区性, 单位孔隙压力下煤体膨胀体积应变变化率排序依次为: 近临界区 $>$ 跨临界区 $>$ 高临界区。

3 结论

利用自主研发的煤体膨胀变形测量装置, 对不同温压条件下超临界 CO_2 作用的煤体体积膨胀变形规律进行研究, 得出如下结论:

(1) 超临界 CO_2 作用型煤试件过程中, 煤体膨胀体积应变随作用时间的增加呈现出先增大后趋于稳定的变化规律。

(2) 孔隙压力不变时, 膨胀体积应变随超临界温度的升高而增加, 温度越高达到稳定膨胀变形所需时间越长; 温度不变时, 随超临界孔隙压力增加, 膨胀体积应变也随之增大, 但达到稳定膨胀变形所需时间随孔隙压力的升高呈现出先增加后减少的规律。

(3) 超临界 CO_2 作用下煤体体积应变在孔隙压力等影响因素不变的情况下, 随温度呈“S 型”Logistic 函数规律变化; 煤体体积应变在温度等影响因素不变的情况下, 随孔隙压力也呈“S 型”Logistic 函数规律变化。

(4) 煤体膨胀体积应变对超临界温度和孔隙压力的变化率具有分区性, 其变化率大小排序依次为: 近临界区 $>$ 跨临界区 $>$ 高临界区。

参考文献:

- [1] 邱中建, 邓松涛. 中国非常规天然气的战略地位[J]. 天然气工业, 2012, 32(1): 1-5 (QIU Zhongjian, DENG Songtao. Strategic position of unconventional natural gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(1): 1-5 (in Chinese))

- [2] 李建忠, 郑民, 张国生, 等. 中国常规与非常规天然气资源潜力及发展前景[J]. 石油学报, 2012, 33(S1):89—98 (LI Jianzhong, ZHENG Min, ZHANG Guosheng, et al. Potential and prospects of conventional and unconventional natural gas resource in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S1):89—98(in Chinese))
- [3] 穆福元, 仲伟志, 赵先良, 等. 中国煤层气产业发展战略思考[J]. 天然气工业, 2015, 35(6):110—116 (MU Fuyuan, ZHONG Weizhi, ZHAO Xianliang, et al. Strategies for the development of CBM gas industry in China [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(6):110—116(in Chinese))
- [4] 李元建. 中国煤层气产业开发利用现状与对策分析[J]. 中国矿业, 2010, 19(6):8—10 (LI Yuanjian. China coal bed methane industry exploration & utilization status and countermeasure analysis[J]. China Mining Magazine, 2010, 19(6):8—10(in Chinese))
- [5] 宋岩, 张新民, 柳少波, 等. 中国煤层气地质与开发基础理论[M]. 北京: 科学出版社, 2012 (SONG Yan, ZHANG Xinmin, LIU Shaobo, et al. The basic theory of geology and development of CBM in China[M]. Beijing: Science Press, 2012(in Chinese))
- [6] 孟召平, 刘翠丽, 纪懿明. 煤层气/页岩气开发地质条件及其对比分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5):728—736 (MENG Zhaoping, LIU Cuili, JI YiMing. Geological conditions of coalbed methane and shale gas exploitation and their comparison analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5):728—736(in Chinese))
- [7] 袁亮, 薛俊华, 张农, 等. 煤层气抽采和煤与瓦斯共采关键技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9):6—11 (YUAN Liang, XUE Junhua, ZHANG Nong, et al. Development orientation and status of key technology for mine underground coal bed methane drainage as well as coal and gas simultaneous mining[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9):6—11(in Chinese))
- [8] 姚国欣, 王建明. 国外煤层气生产概况及对加速我国煤层气产业发展的思考[J]. 中外能源, 2010, 15(4):24—33 (YAO Guoxin, WANG Jianming. A glimpse of coalbed methane production overseas and reflections on accelerating coalbed methane development in China[J]. Sino-Global Energy, 2010, 15(4):24—33(in Chinese))
- [9] 翟成, 林柏泉, 王力. 我国煤矿井下煤层气抽采利用现状及问题[J]. 天然气工业, 2008, 28(7):23—26 (ZHAI Cheng, LIN Boquan, WANG Li. Status and problems of drainage and utilization of downhole coal-bed methane in coal mines in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(7):23—26(in Chinese))
- [10] 孙可明, 任硕, 张树翠, 等. 超临界 CO₂ 在低渗透煤层中渗流规律的实验研究[J]. 实验力学, 2013, 28(1):117—120 (SUN Keming, REN Shuo, ZHANG Shucui, et al. Experimental study of supercritical carbon dioxide seepage flow in low permeability coal seam[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(1):117—120(in Chinese))
- [11] 任硕. 超临界 CO₂ 在低渗透煤层渗流规律研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2012 (REN Shuo. The research on seepage law of supercritical carbon dioxide in the low permeability coal seam[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2012(in Chinese))
- [12] 谈健. 低渗透煤层注入超临界 CO₂ 增透规律研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011 (TAN Jian. The study of increased permeability law with supercritical carbon dioxide injected into the low permeability coal seam[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2011(in Chinese))
- [13] 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(in Chinese))
- [14] Majewska Z, Majewski S, Zietek J. Swelling of coal induced by cyclic sorption/desorption of gas: experimental observations indicating changes in coal structure due to sorption of CO₂ and CH₄[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 83:475—483.
- [15] Masoudian M S, Airey D W, El-Zein A. Experimental investigations on the effect of CO₂ on mechanics of coal mechanics of coal[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 128-129:12—23.
- [16] 张群, 桑树勋. 煤层吸附特征及储气机理[M]. 北京: 科学出版社, 2013 (ZHANG Qun, SANG Shuxun. Characteristics of gas adsorption on and mechanism of gas storage of coalbed methane reservoirs[M]. Beijing: Science Press, 2013(in Chinese))
- [17] 张遵国, 曹树刚, 郭平, 等. 原煤和型煤吸附—解吸瓦斯变形特性对比研究[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(3):388—394 (ZHANG Zunguo, CAO Shugang, GUO Ping, et al. Comparison of the deformation characteristics

- of coal in gas adsorption-desorption process for raw and briquette coals[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(3):388—394(in Chinese))
- [18] Jasinge D, Ranjith P G, Choi X, et al. Investigation of the influence of coal swelling on permeability characteristics using natural brown coal and reconstituted brown coal specimens[J]. Energy, 2012, 39:303—309.
- [19] Renato B. Non-equilibrium phenomena in carbon dioxide expansion[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2014, 92:47—59.
- [20] 张帆, 周辉, 吕涛, 等. CO₂ 注入下岩层变形和流体运移分析(I):两相流—岩层耦合模型[J]. 岩土力学, 2014, 35(9):2549—2554 (ZHANG Fan, ZHU Hui, LV Tao, et al. Analysis of reservoir deformation and fluid transportation induced by injection of CO₂ into saline aquifer (I): two-phase flow-reservoir coupling model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9):2549—2554(in Chinese))
- [21] 李相方, 蒲云超, 孙长宇, 等. 煤层气与页岩气吸附/解吸的理论再认识[J]. 石油学报, 2014, 35(6):1113—1129 (LI Xiangfang, PU Yunchao, SUN Changyu, et al. Recognition of adsorption/desorption theory in coalbed methane reservoir and shale gas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(6):1113—1129(in Chinese))
- [22] 梁冰, 石迎爽, 孙维吉, 等. 考虑压力作用的煤吸附/解吸 CH₄ 变形试验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(2):215—222 (LIANG Bing, SHI Yingshuang, SUN Weiji, et al. Experimental study of coal deformation produced by CH₄ adsorption/desorption taking into account pressure influence[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(2):215—222(in Chinese))
- [23] 陶云奇. 含瓦斯煤 THM 耦合模型及煤与瓦斯突出模拟研究[D]. 重庆大学, 2009 (TAO Yunqi. Study on the gassy coal THM coupling model and coal and gas outburst simulation[D]. Chongqing University, 2009 (in Chinese))

Experimental Study of Coal Swelling Deformation under Supercritical Carbon Dioxide Action

SUN Ke-ming, LI Tian-shu, XIN Li-wei, ZHANG Shu-cui

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract: In experiment of coal swelling deformation under supercritical carbon dioxide action, strain gauge is a common device for point measurement. But obtained results are often scattered, meanwhile, strain gauge is easy to break out in experiment. To solve above problems, a volume expansion strain measurement device with heat flow loading function was developed by authors. Using this device, coal swelling volume deformation under supercritical carbon dioxide action can be experimentally studied at different temperature and under different pressure. Results show that the variation pattern of coal swelling volumetric strain is increasing first and then tending to stable with the increase of supercritical carbon dioxide action time. When the pore pressure is constant, the swelling volumetric strain increases with the increase of critical temperature, the higher the temperature is, the longer the required time to achieve stable expansion deformation. When the temperature is constant, swelling volumetric strain increases with the increase of supercritical pore pressure, but with the increase of pore pressure, the required time to reach steady expansion deformation is increasing first then decreasing. Under the action of supercritical carbon dioxide, the coal volumetric strain varies with the temperature and pore pressure and presents “S” type Logistic function pattern. The variation rate of swelling volumetric strain due to supercritical temperature and pore pressure has zoning characteristics, the order from low to high is: near critical area > cross critical area > high critical area.

Keywords: supercritical carbon dioxide; swelling deformation; volumetric strain; temperature; pore pressure