

\*

# 温度对井周煤岩力学特性影响的试验研究

梁永昌<sup>1,2</sup>, 李小龙<sup>3</sup>, 范翔宇<sup>2</sup>, 苏婷<sup>4</sup>, 张彬<sup>1</sup>

(1. 峨眉山市应急管理局, 四川 峨眉山 614200; 2. 西南石油大学, 成都 610500;

3. 古叙煤田开发股份有限公司, 四川 泸州 610500; 4. 峨眉山市职业技术学校 四川 峨眉山 614200)

**摘要:**煤层气钻采过程中, 井壁煤岩不仅受地应力重分的影响, 而且还会与钻井液发生热交换导致温度的变化, 使井壁煤岩的力学性质发生变化, 进而对煤层气井井壁的稳定产生影响。通过室内试验, 研究了地应力重分布过程中温度变化对煤岩力学性质的影响, 得出了随着温度的升高, 煤岩泊松比呈增大趋势, 且泊松比随轴压围压比的增大分为三个阶段: 非线性减小阶段、线性增大阶段及突变阶段, 且突变点随温度的增加不断前移; 随着温度的升高, 煤岩的变形模量降低, 变形模量随轴压围压比的增大分为三个阶段: 线性突变阶段、稳定阶段和突变减小阶段; 煤岩的抗压强度随着温度的升高呈降低趋势。研究结果对确保煤层气井井壁稳定具有实际意义。

**关键词:**煤层气; 温度; 井壁稳定; 试验研究; 地应力

中图分类号: TD84

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Experimental Study on the Influence of Temperature on the Mechanical Characteristic of Coal and Rock near Wellbore

LIANG Yongchang<sup>1,2</sup>, LI Xiaolong<sup>3</sup>, FAN Xiangyu<sup>2</sup>, SU Ting<sup>4</sup>, ZHANG Bin<sup>1</sup>

(1. Emergency Management Bureau of Emeishan City, Emeishan City 614200, China;

2. School of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

3. Sichuan Guxu Coal Development Co. Ltd., Luzhou 610500, China;

4. Emeishan Vocational Technical School, Emeishan City 614200, China)

**Abstract:** In the process of CBM drilling, the coal and rock near wellbore is not only affected by the redistribution of ground stress, but also undergoes heat exchanges with drilling fluid, causing changes in the temperature and mechanical properties, which affects the borehole stability of the CBM well. In this paper, laboratory experiments were conducted to study the influence of temperature on the mechanical properties of coal during the redistribution of ground stress. The study found that, with the increase of temperature, the Poisson's ratio of coal and rock showed an increasing trend and could be divided into three stages with the increase of the axial pressure confining pressure ratio, namely the non-linear decreasing stage, linear increasing stage, and mutation stage. In addition, the mutation point kept moving forward. With the increase of temperature, the deformation modulus of coal and rock decreased and could also be divided into three stages with the increase of axial pressure confining pressure ratio, namely the linear mutation stage, stable stage, and sudden decreasing stage. The compressive strength of the coal and rock showed a decreasing trend with the rising temperature. The study results have practical significance to

\* 收稿日期: 2020-11-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474185)

作者简介: 梁永昌(1989-), 男, 云南丽江人, 硕士, 从事矿山安全监管和岩石力学、煤层气开发等方面的研究工作, E-mail: lychequ@163.com

ensure the borehole stability in CBM wells.

**Key words:** CBM; temperature; borehole stability; experimental study; ground stress

煤岩的物理力学性质与温度有密切关系。张辛亥等<sup>[1]</sup>对低温条件下的煤样进行了单轴压缩实验,得到了煤岩相关力学性质与温度的关系;任晓龙等<sup>[2]</sup>对工程温度下,煤岩的力学特性进行了分析;杨光等<sup>[3]</sup>研究了沁水盆地煤岩在高温高压下的变形特性;杨兆中等<sup>[4]</sup>通过实验研究了低温对煤岩渗透率的影响;彭守建等<sup>[5]</sup>得出了瓦斯突出强度与温度变化的关系;谢建林等<sup>[6]</sup>研究了温度与煤岩渗透率的关系;杨伟等<sup>[7]</sup>研究了煤层厚度对煤岩体内部热流固耦合的传热的影响;赵洪宝等<sup>[8]</sup>研究了较低和较高两种温度条件下的煤岩渗透率;王公忠等<sup>[9]</sup>对持续变温条件下含瓦斯煤岩的渗流特性进行了数值模拟;孙光中等<sup>[10]</sup>对不同应力条件下含瓦斯构造煤原煤样的渗透率与温度变化进行了试验研究。

以上研究可以发现,温度对煤岩物理力学特性的研究主要是针对煤炭开采领域展开的,且主要是在恒定的围压条件下进行,而针对煤层气开采过程中地应力 redistribute 情况下温度与煤岩力学性质的关系研究相对较少。本文主要通过试验研究钻井过程中地应力 redistribute 条件下,钻井液与煤层气水平井井周围岩发生热交换作用对井壁煤岩力学性质的影响,研究结果将对实际钻井施工具有指导意义。

### 1 地应力 redistribute 条件下温度对水平井井周煤岩影响的力学试验方案及步骤

#### 1.1 地应力 redistribute 下的煤层气水平井井周煤岩受力分析

煤层气水平井沿最大水平主应力方向钻进,由于煤层气井断面尺寸较小,加之钻井液液柱压力对井壁的支撑作用,钻井过程中,对井周煤岩的损伤程度较小,煤岩结构较为完整。因此,钻井过程中井周围岩所受应力情况为:垂向应力方向经历了先增加后减小的过程;最小水平主应力方向,所受应力逐渐增大,如图 1 所示。

#### 1.2 基于地应力 redistribute 条件下温度变化的井周煤岩力学试验方案

本次试验煤样取自四川宜宾某一突出矿井的 8 号煤层,属于 3 号无烟煤。

目的用于研究煤层气井钻进过程中,地应力 redistribute (增加轴压、卸载围压)条件下,井壁煤岩与钻井液热交换对煤岩力学性质的影响。

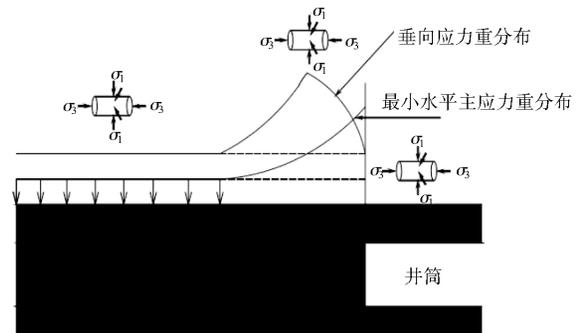


图 1 煤层气水平井地应力 redistribute 条件下井周围岩受力图  
Fig. 1 Force diagram of surrounding rock around wellbore under the redistribution of ground stress in a horizontal CBM well

具体方案如下:运用含瓦斯煤热流固三轴伺服渗流实验系统分别将轴压和围压加载到试验设定值,充入瓦斯气体,待煤样充分吸附后,根据前人<sup>[11]</sup>对钻井液温度的研究,将试样温度加热到设定值 ( $t_1, t_2, t_3$ );然后以 0.01 MPa/s 的加载速率加载轴压,同时以 0.01 MPa/s 的速度卸载围压,直至试件破坏时停止试验。试验方案如图 2 所示,其中 A、B、C 分别是温度为  $t_1, t_2$  和  $t_3$  时的试样加卸载路径。试验煤样如图 3 所示。

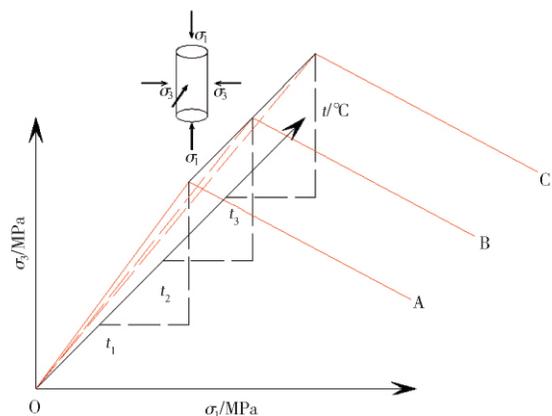


图 2 试验方案图  
Fig. 2 Testing plan



图 3 试验煤样图  
Fig. 3 Testing coal samples

### 1.3 基于地应力重分布条件下温度变化的井周煤岩力学试验步骤

1) 试验安装。将打磨好的煤岩试样,均匀的涂抹上硅胶,待硅胶自然风干后将试样放入试验装置的三轴压力室中,将试件安装好。

2) 进行试验。向三轴压力室充入液压油,然后以 0.05 MPa/s 的速度将轴压和围压分别加载到 20.0 MPa 和 30.0 MPa;向煤样充入压力为 3.0 MPa 的瓦斯气体,待煤样充分吸附后,以 0.01 MPa/s 的速度加载轴压的同时以相同的速度卸载围压。

3) 试验结束。待煤样破坏后,关闭瓦斯进气阀,打开瓦斯出气阀,卸载轴压和围压,然后停止试验,记录好相关数据。

## 2 试验结果及分析

地应力重分布(煤样加载卸载)试验过程中,由于轴压和围压的变化,将会导致泊松比和变形模量处于不断的变化过程中,根据前人的研究结果,本文采用如下公式计算泊松比和变形模量<sup>[12-13]</sup>。

$$\begin{cases} E = \frac{(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)}{\varepsilon_1} \\ B = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \\ \mu = \frac{(B\sigma_1 - \sigma_3)}{(2B-1)\sigma_3 - \sigma_1} \end{cases}$$

式中: $E$  为变形模量,MPa; $\sigma_1$  为轴向应力,MPa; $\sigma_3$  为径向应力,MPa; $\varepsilon_1$  为轴向应变,%; $\varepsilon_3$  为径向应变,%; $B$  为径向应变与轴向应变比; $\mu$  为泊松比。

### 2.1 地应力重分布条件下温度与含气煤样泊松比的关系分析

根据公式(1)计算得到不同温度下轴向应力( $\sigma_1$ )比围压( $\sigma_3$ )与泊松比的关系,如图 4 所示。

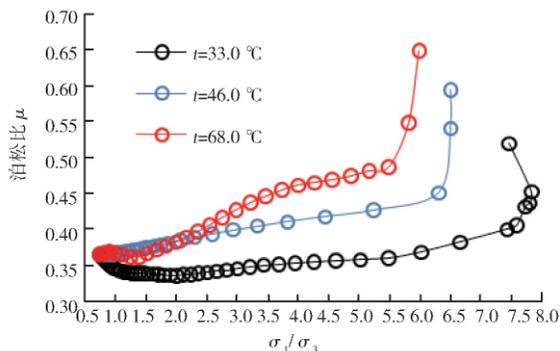


图 4 不同温度下围压与轴压比-泊松比关系图  
Fig. 4 Relationship between confining pressure/axial pressure ratio and Poisson's ratio at different temperatures

从图 4 中可以看出,试样温度为 33.0、46.0、

68.0℃时,随着  $\sigma_1/\sigma_3$  的增加,泊松比的变化可以分为三个阶段。

1) 非线性减小阶段。该阶段随着  $\sigma_1/\sigma_3$  的增加,泊松比整体呈减小趋势。该阶段泊松比处于 0.34~0.37 之间,随着温度的升高,该阶段泊松比整体呈增大趋势。原因是该阶段围压大于轴压,即  $(\sigma_1/\sigma_3) < 1$ ,煤样以径向压密为主,煤样变形以径向变形为主,导致径向应变大于轴向应变,表现出随着  $\sigma_1/\sigma_3$  的增加,泊松比呈减小的趋势。

2) 线性增长阶段。该阶段随着  $\sigma_1/\sigma_3$  的增加,泊松比整体呈线性增长趋势,泊松比分别增大到 0.41,0.45,0.49,且随着温度的升高,煤样的泊松比整体呈增大趋势。原因是由于该阶段轴压大于围压,即  $(\sigma_1/\sigma_3) \geq 1$ ,煤样在轴向方向上经历了压密、弹性变形和塑性变形阶段,该阶段煤样尚未破坏,表现出以轴向变形为主的特点,故泊松比呈线性增长趋势。

3) 非线性突变阶段。该阶段随着  $\sigma_1/\sigma_3$  的增加,泊松比迅速增大到 0.52,0.59,0.65,且随着温度的升高,突变点提前。表明该阶段泊松比已经超出了常规加载条件下泊松比的范围( $\mu < 0.5$ ),煤样经历了破裂发展到整体破坏的过程,煤样强度迅速降低,轴向变形及径向变形急剧变大,故表现出突变的特性。

### 2.2 地应力重分布条件下温度与含气煤样变形模量的关系分析

图 5 是不同温度下围压与轴压比-变形模量关系图。从图中可以看出,试样温度为 33.0、46.0、68.0℃时,随着  $\sigma_1/\sigma_3$  的增加,变形模量( $E$ )可以分为三个阶段。

1) 线性突变阶段。该阶段  $(\sigma_1/\sigma_3) \leq 1$ ,随着  $\sigma_1/\sigma_3$  的增加,在温度为 33.0、46.0、68.0℃时,变形模量分别从 8.3、18.0、2.5 MPa 突然增加到 47.0、43.0、29.5 MPa,增加量分别为 38.7、25.0、27.0 MPa。可以看出,随着温度的升高,变形模量在该阶段呈增大趋势。

2) 稳定发展阶段。该阶段随着  $\sigma_1/\sigma_3$  的增加,变形模量基本保持稳定,在温度为 33.0、46.0、68.0℃时,煤样的变形模量分别为 41.2、42.8、27.5 MPa。可以看出,该阶段温度为 33.0、46.0℃时,变形模量差别不明显,温度为 68.0℃时的变形模量与 33.0、46.0℃时的变形模量相差较大。

3) 突变减小阶段。该阶段随着  $\sigma_1/\sigma_3$  的增加,变形模量迅速减小,且煤样完全破坏时变形模量分

别为 34.3, 24.1, 19.0 MPa。原因是该阶段煤样经历了裂隙迅速扩展直至煤样完全破坏的过程。

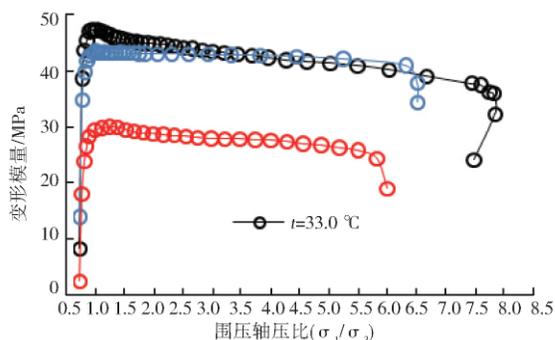


图5 不同温度下围压与轴压比-变形模量关系图

Fig. 5 Relationship between confining pressure axial pressure ratio and deformation modulus at different temperatures

### 2.3 地应力重分布条件下温度与含气煤样强度的关系分析

图6是煤样温度为33.0、46.0和68.0℃时,煤样强度关系曲线图。

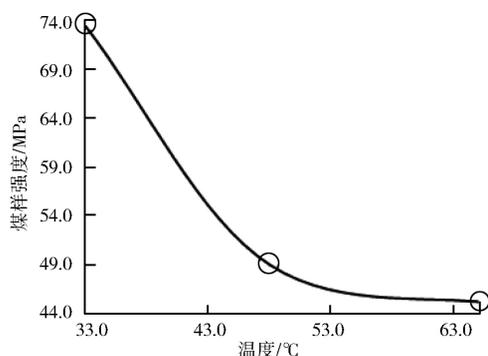


图6 温度-煤样强度关系图

Fig. 6 Relationship between temperature and coal sample strength

从图6中可以看出,随着温度的升高,煤样强度呈减小趋势,温度为33.0、46.0、68.0℃时,煤样抗压强度分别为73.6、49.0、44.8 MPa,分别依次降低

了24.6和4.2 MPa。随着温度的升高,煤样的抗压强度降低值减小。原因是由于温度的升高,煤样孔隙裂隙中气体分子的内能增加,分子热运动增强,煤样热膨胀变形增加,煤岩中原有孔隙不断贯通形成新的裂隙,原有裂隙不断发育、扩大,并贯穿煤样。且煤岩中含有其他矿物成分,在相同的温度条件下,各矿物成分的受热膨胀量不同,在膨胀过程中容易产生新的裂缝,使煤样结构发生破坏,从而降低了煤样的强度。

## 3 结论

通过研究地应力重分布条件下温度对煤层气水平井井周围岩煤样力学性质的影响,得出以下结论。

1)随着温度的升高,煤样泊松比呈增长趋势,且泊松比随轴压围压比的增加分为三个阶段:非线性减小阶段、线性增大阶段及突变阶段,突变点随温度的增加而不断前移。因此,在煤层气井钻井过程中,控制钻井液温度或者增加钻井液循环速度来降低井周围岩温度,对于减小井周围岩变形、确保井壁稳定具有积极意义。

2)随着温度的升高,煤样的变形模量降低,且变形模量随轴压围压比的增加分为三个阶段:线性突变阶段、稳定阶段和突变减小阶段。因此,控制好井周围岩温度,对于减小井眼变形具有重要作用。

3)随着温度的升高,煤样的抗压强度降低。因此,在煤层气水平井钻井过程中,选择较低温度的钻井液或者增加钻井液的循环速度,带走井周围岩的大量热量,对于提高井周围岩强度,减少井壁坍塌失稳具有实际意义。

### 参考文献:

- [1] 张辛亥,张康,丁峰,等. 低温下煤岩体力学特性实验研究[J]. 煤矿安全, 2016, 47(1): 41-43.  
ZHANG X H, ZHANG K, DING F, et al. Experimental study on mechanical properties of coal rock mass at low temperature [J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(1): 41-43.
- [2] 任晓龙,秦新展,张晓云. 工程温度下煤岩单轴力学特性研究及分析[J]. 煤矿安全, 2017, 48(1): 157-159, 163.  
REN X L, QIN X Z, ZHANG X Y. Study and analysis of uniaxial mechanics property of coal rock under engineering temperature condition [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(1): 157-159, 163.
- [3] 杨光,刘俊来,马瑞. 沁水盆地煤岩高温高压实验变形特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(3): 346-350.  
YANG G, LIU J L, MA R. Deformation characteristics of coals from qinshui basin through high-temperature and confining pressure experiment [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(3): 346-350.
- [4] 杨兆中,张云鹏,贾敏,等. 低温对煤岩渗透性影响试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 354-360.  
YANG Z Z, ZHANG Y P, JIA M, et al. Experimental research on influence of low temperature on coal permeability [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 354-360.
- [5] 彭守建,许江,尹光志,等. 煤岩破断与瓦斯运移耦合作用机理的试验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2024-2028.  
PENG S J, XU J, YIN G Z, et al. Experimental study on the coupling mechanism between coal fracture and gas migration [J].

- Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2024-2028.
- [6] 谢建林, 赵阳升. 随温度升高煤岩体渗透率减小或波动变化的微观机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 543-551.  
XIE J L, ZHAO Y S. Meso-mechanism of permeability decrease or fluctuation of coal and rock with the temperature increase [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 543-551.
- [7] 杨伟, 曹明, 赵柄翔, 等. 煤层厚度对煤岩体内热-流耦合传热的影响[J]. 热能动力工程, 2016, 31(5): 82-87, 153-154.  
YANG W, CAO M, ZHAO B X, et al. Study of the influence of the thickness of a coal bed on the heat-flow coupled heat transfer inside coal rock masses[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(5): 82-87, 153-154.
- [8] 赵洪宝, 李伟, 胡桂林. 煤层渗透特性影响因素的研究现状与思考[J]. 煤矿安全, 2016, 47(7): 177-181.  
ZHAO H B, LI W, HU G L. Research status and thinking of influence factors about seepage properties of coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(7): 177-181.
- [9] 王公忠, 徐星. 基于连续变温变件的含瓦斯煤渗流特性数值模拟[J]. 煤矿安全, 2016, 47(8): 1-4.  
WANG G Z, XU X. Numerical simulation on permeability properties of coal containing gas based on continuously variable temperature conditions[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(8): 1-4.
- [10] 孙光中, 王公忠, 张瑞林. 构造煤渗透率对温度变化响应规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1042-1048.  
SUN G Z, WANG G Z, ZHANG R L. An experimental study on response law of permeability of tectonic coal samples to temperature variation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 1042-1048.
- [11] 杨谋, 孟英峰, 李皋, 等. 钻井全过程井筒-地层瞬态传热模型[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 366-371.  
YANG M, MENG Y F, LI G, et al. A transient heat transfer model of wellbore and formation during the whole drilling process[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 366-371.
- [12] 高春玉, 徐进, 何鹏, 等. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 456-460.  
GAO C Y, XU J, HE P, et al. Study on mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 456-460.
- [13] 蒋长宝, 尹光志, 黄启翔, 等. 含瓦斯煤岩卸围压变形特征及瓦斯渗流试验[J]. 煤炭学报, 2011, 36(5): 802-807.  
JIANG C B, YIN G Z, HUANG Q X, et al. Experiment of deformation property and gas permeation of containing-gas coal under confining pressure unloading process[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(5): 802-807.

(编辑: 樊 敏)