

# 热力耦合作用下无烟煤煤体变形特征的试验研究

冯子军<sup>1</sup>, 万志军<sup>2</sup>, 赵阳升<sup>1</sup>, 李根威<sup>2</sup>, 张源<sup>2</sup>, 王冲<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学 采矿工艺研究所, 山西 太原 030024; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 利用自主研发的“600 °C 20 MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机”系统, 研究 $\phi 200$  mm $\times$ 400 mm 大尺寸无烟煤试样在恒定 500 m 原岩应力状态(轴压 12.5 MPa、围压 15 MPa), 以 10 °C/h 的升温速率从 20 °C 升至 600 °C 过程中的变形规律。试验结果表明: 随着温度的升高, 无烟煤煤体的变形可分为 3 个阶段, 即 20 °C~200 °C 热膨胀阶段、200 °C~400 °C 缓慢压缩阶段和 400 °C~600 °C 剧烈压缩阶段。其中, 400 °C~450 °C 为无烟煤煤体变形由脆性机制转变为韧性机制的临界温度范围, 温度和压力是影响无烟煤煤体变形脆-韧性转变的主要因素, 且具有明显的温压等效性, 即较高的临界温度所需转化压力较低。热力耦合作用和热解产气是影响煤体变形的关键因素, 尤其在高温阶段, 热解产气对变形起到主控作用。

**关键词:** 采矿工程; 温度; 压力; 无烟煤; 热解; 脆-韧性转变

**中图分类号:** TD 32

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)08 - 1624 - 07

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION INTO DEFORMATION CHARACTERISTICS OF ANTHRACITE UNDER THERMO-MECHANICAL COUPLING CONDITIONS

FENG Zijun<sup>1</sup>, WAN Zhijun<sup>2</sup>, ZHAO Yangsheng<sup>1</sup>, LI Genwei<sup>2</sup>, ZHANG Yuan<sup>2</sup>, WANG Chong<sup>2</sup>

(1. *Institute of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;*

2. *School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China*)

**Abstract:** By utilizing the self developed “600 °C 20 MN servo-controlled rock triaxial testing machine with high temperature and high pressure”, the investigation into deformation characteristics of anthracite specimen with 400 mm in length and 200 mm in diameter was carried out at constant stress corresponding to the in-situ stress at the depth of 500 m (axial pressure is 12.5 MPa and confining pressure is 15 MPa), increasing temperature from room temperature(20 °C) to 600 °C at a rate of 10 °C/h. The study results indicate that the process of temperature-dependent deformation of anthracite can be divided into three stages, i.e. thermal dilatation stage with temperature rising from room temperature to 200 °C, slow volume compression stage from 200 °C to 400 °C and serious volume compression stage from 400 °C to 600 °C. The critical temperature range of anthracite deformation mechanism transition from brittle to ductile is from 400 °C to 450 °C. Temperature and pressure are the main factors which influence the brittle-ductile transition of coal mass. The principle of transition condition is temperature-pressure equivalent, i.e. higher critical temperature needs lower transition pressure. The deformation of coal mass is significantly influenced by thermo-mechanical coupling and pyrolysis gas, while the main factor at a high temperature is pyrolysis gas.

**Key words:** mining engineering; temperature; pressure; anthracite; pyrolysis; brittle-ductile transition

**收稿日期:** 2009 - 12 - 06; **修回日期:** 2010 - 04 - 25

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(50534030); 国家自然科学基金资助项目(50874077, 50804033); 山西省重点实验室基金项目(2009011059 - 12)

**作者简介:** 冯子军(1983 -), 男, 2006年毕业于中国矿业大学(徐州)采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事原位溶浸采矿方法与高温高压岩石力学试验方面的研究工作。E-mail: fzj3893811@126.com

## 1 引言

煤是一种对温度、压力十分敏感的有机岩石。在煤炭地下气化和煤层气注热开采<sup>[1]</sup>等工程中, 煤层将受到温度和压力的耦合作用, 其物理力学特性与常规条件下的结果有很大的不同<sup>[2]</sup>。煤炭地下气化中气化通道的形成、分布以及发展与煤体的变形密切相关, 煤层气注热开采中高温蒸汽通道的形成也受到煤体变形的影响, 因此, 研究温度和压力耦合作用下煤体的变形特征对分析煤炭地下气化通道的稳定性及气化开采过程中气化工作面顶板稳定性、地表沉降和煤层气注热开采中热流通道的形成机制具有重要的意义。

关于温度 - 压力耦合作用下煤体的变形特征国内外学者研究的不多。国外 R. M. Bustin 等<sup>[3]</sup>为研究煤的光性组构问题曾进行了一种煤样 4 种样品的初步尝试。周建勋等<sup>[4~6]</sup>为研究煤的构造变形机制对 3 种原始镜质体最大反射率  $R_{o,max} = 0.67\%$ ,  $3.41\%$ ,  $4.90\%$  的煤样在  $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_c = 400 \sim 600\text{ MPa}$ ,  $\dot{\epsilon} = 3.63 \times 10^{-6} \sim 2.59 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$  的条件下进行试验研究。试验结果表明, 煤的塑性变形程度随着煤级的增高而降低并逐渐消失, 气体的存在是煤体强度急剧下降的原因, 并对煤的力学性质产生十分重要的影响。姜波等<sup>[7, 8]</sup>在同样的温度和压力条件下研究了中煤级的烟煤和高煤级的无烟煤高温高压下的变形特征, 指出温度、压力和煤体自身结构的差异性是影响煤变形的关键因素。中煤级阶段, 温度起到主导作用, 高煤级阶段在小变形阶段温度起主导作用, 但大变形阶段围压又成了主导因素, 煤中气体的产生和释放对煤的变形行为具有显著影响。刘俊来等<sup>[9~11]</sup>分别研究了沁水盆地中煤级煤的高煤化烟煤和高煤级煤的低级无烟煤在同步升温 ( $200\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 和升压 ( $200 \sim 500\text{ MPa}$ ) 条件下的变形特征, 得出不同的温度和压力条件下, 煤岩的强度有显著的变化, 温度对煤岩强度的影响要高于压力的效应; 并指出  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $200\text{ MPa}$  和  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $300\text{ MPa}$  是煤岩试验变形脆 - 韧性转换的温度和压力条件。

已有的关于煤高温高压下的变形试验研究主要是从煤的构造变形角度出发, 而且是针对小尺寸煤块 ( $\phi 25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ ) 在高温高围压下应力 - 应变曲

线特征。而煤炭地下气化和煤层气注热开采等地下工程的对象是煤体, 小试块煤样无法真实地反映煤体内固有的天然信息。此外, 上述工程中煤体所受到的原岩应力并不大, 但温度相对较高, 并且受热是一个缓慢过程, 如煤炭地下气化中工作面前方煤体随着燃烧工作面的推进逐渐升温, 同样煤层气注热开采工程中煤体内的热量传递也需要一定的时间, 因此必须考虑加热速率。为了能够真实地反映原位状态煤体的热变形特性, 利用中国矿业大学 211 工程建设项目“ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  20 MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机”系统, 研究了  $\phi 200\text{ mm} \times 400\text{ mm}$  大尺寸无烟煤试样在  $500\text{ m}$  原岩应力下 (轴压  $12.5\text{ MPa}$ 、围压  $15\text{ MPa}$ ), 以  $10\text{ }^{\circ}\text{C/h}$  的升温速率升温过程中的变形特征。

## 2 试验概况

### 2.1 试验设备

高温高压加载试验设备<sup>[12]</sup>: 主要采用中国矿业大学 211 工程重点建设项目自主研发的“ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  20 MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机”, 该试验机是目前国内唯一可应用于多种研究领域的多功能试验设备。试验机侧压采用固体传压方式, 轴压和侧压载荷独立控制加载, 采用光栅尺精确测量岩样变形, 其精度为  $5\text{ }^{\circ}\text{mm}$ , 并采用热电偶测定加热温度。试验机轴向最大荷载为  $10\text{ }000\text{ kN}$ , 侧向最大荷载为  $10\text{ }000\text{ kN}$ ; 试样最大轴向压力  $318\text{ MPa}$ , 最大侧向压力  $250\text{ MPa}$ ; 试样尺寸为  $\phi 200\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ ; 试样最高加热稳定温度  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 轴向压力和侧向压力保压时间为  $360\text{ h}$  以上, 轴压力、侧压力波动不大于  $\pm 0.3\%$ ; 高温三轴压力室具有高精度的温度稳定控制功能, 温度控制灵敏度不大于  $\pm 0.3\%$ ; 应力、变形、温度等参数全自动采集; 试验机总体刚度不小于  $14.81 \times 10^9\text{ N/m}$ 。

变形测量装置: 试样的变形通过测量主机轴压头和侧压头的位置来计算, 量测仪器为长春精密光学仪器仪表厂生产的光栅尺 (见图 1), 测读精度  $0.005\text{ mm}$ 。

由于侧向用  $\text{NaCl}$  作为传压介质, 因此, 侧向压头的位移实际上是传压介质的变形和试样侧向变形之和。 $\text{NaCl}$  变形的消除, 按万志军等<sup>[13]</sup>所述方法进行。

### 2.2 试样

试样为采自晋城矿区的无烟煤。从采煤工作面



图1 光栅尺  
Fig.1 Grating ruler

截取大块煤样，先经过专用石材加工机加工成圆柱形毛坯，再采用研磨精加工，达到试验规程要求。成品规格尺寸 $\phi 200\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 。煤样整体性良好，可见明显的裂隙，由于试样尺寸大，易出现缺角或坑洼，可用叶腊石粉加水玻璃调和补齐或者用充填料浆补齐。

### 2.3 试验步骤

(1) 在辅机系统上，按操作规程将试样安装在压力室内。

(2) 将压力室推入主机系统的加压平台上，操作主机压力控制系统，将压力加至 500 m 原岩应力状态(轴压 12.5 MPa、围压 15 MPa)。

(3) 保持 500 m 原岩应力状态不变，以手动方式将温度从 20 °C 以 10 °C/h 的升温速率升至试验终温 600 °C。变形数据及温度由试验机控制系统自动采集。

由于煤体在高温下产生热解气体，因此在剧烈产气的温度点保温一段时间，并测量热解产气量以研究产气对变形的影响。

## 3 高温恒定三轴压力下无烟煤热变形特征

恒定 500 m 原岩应力状态，温度从 20 °C 以 10 °C/h 的速率升至 600 °C。升温过程中晋城无烟煤煤体升温过程中的变形规律如图 2 所示。

由图 2 可知，无烟煤煤体在 20 °C ~ 600 °C 升

温过程中，总体上在 450 °C 以前变形量较小，450 °C 以后轴向、侧向变形均迅速增加，说明煤体被剧烈压缩。根据升温过程中不同温度范围内煤体的变形

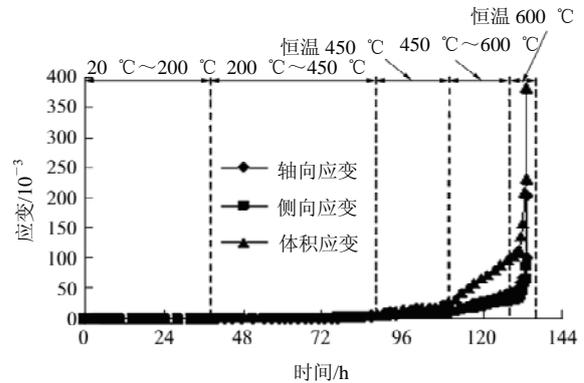
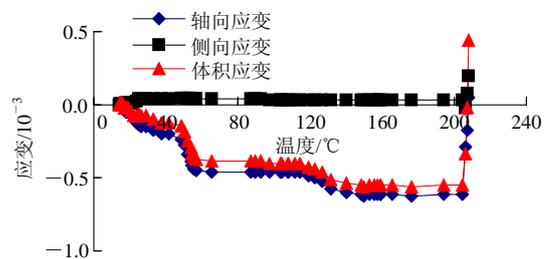


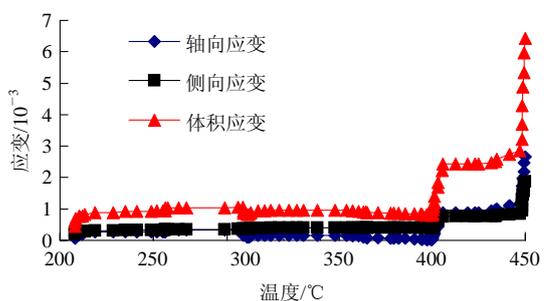
图2 无烟煤煤体升温过程中的变形规律  
Fig.2 Deformation law of anthracite during temperature rising

量大小和变形的剧烈程度可将无烟煤的热变形分为 5 个过程：

(1) 20 °C ~ 200 °C。如图 3(a)所示，在低于 200 °C 的温度范围内，煤体轴向发生热膨胀，侧向变形很小，整个煤体体积处于热膨胀状态。煤体在该阶段的变形规律与其他岩石(如花岗岩<sup>[13]</sup>)在温度作用下的变形规律相同，组成煤体的内部矿物热膨胀导致宏观上煤体的膨胀。从图 3(a)中可以看出，20 °C ~ 60 °C 时，煤体热膨胀速率较大；60 °C ~ 120 °C 时，热膨胀速率几乎不变；而到了 120 °C ~ 150 °C 时，热膨胀速率又增大一些，但数值上低于 20 °C 至 60 °C 阶段，150 °C 以后热膨胀速率较为稳定，一直持续到 200 °C。这是因为一方面，在温度作用下煤体的热膨胀系数也不再是常量，而是变成了温度的函数<sup>[14]</sup>，



(a) 20 °C ~ 200 °C



温度/°C

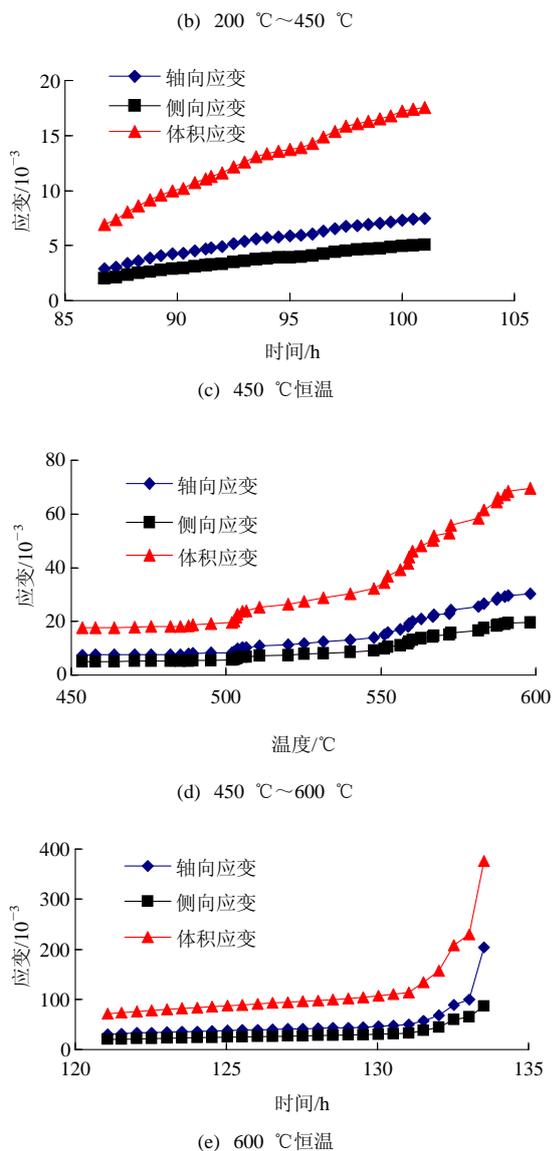


图 3 无烟煤煤体热变形规律

Fig.3 Thermal deformation law of anthracite

因而,不同温度段内热膨胀量亦有差异;另一方面,煤体在 120 °C 前要脱除自由水和孔隙裂隙中的气体,在围压作用下自由水和气体的原始占有空间被压缩,抵消一部分热膨胀变形,故 60 °C ~ 120 °C 时煤体热膨胀速率几乎不变。

(2) 200 °C ~ 450 °C。在加热温度超过 200 °C 以后,煤体变形由 200 °C 前的热膨胀状态迅速转变为压缩状态,如图 3(b)所示。

由图 3(a), (b)可知,煤体的体积变形由 200 °C 前的-0.06%增加到 200 °C 后的 0.05%,增加了 0.11%;轴向应变也由 200 °C 前的-0.07%增加为

200 °C 后的 0.02%;侧向应变在 200 °C 前变化很小,但 200 °C 后增大至 0.03%。因此,200 °C 后无烟煤煤体整体被迅速压缩,但从应变的量值来看变化量不大。此阶段又可划分为 2 个亚段:200 °C ~ 400 °C 为第一个亚段,煤体变形在该亚段内变化较小。轴向变形缓慢增加,侧向变形几乎不变,体积变形规律同轴向变形,整个煤体处于缓慢压缩状态,体积应变从 200 °C 后的 0.05%缓慢增加至 0.1%,仅增加了 0.05%;400 °C ~ 450 °C 为第二亚段。由图 3(b)可知,煤体的轴向、侧向和体积变形量在该亚段内均迅速增加。尤其 400 °C 和 450 °C 小温度范围内变形量激增,而在升温过程中变化量较平缓。这是因为 400 °C 和 450 °C 两温度点煤体热解产气较为剧烈。400 °C 和 450 °C 的产气量和产气速率均比升温阶段大。气体的迅速产出致使煤体在三轴压力作用下产生剧烈的压缩变形。

(3) 450 °C 恒温。450 °C 时无烟煤煤体内部开始发生较为剧烈的解聚缩聚反应<sup>[15, 16]</sup>,产生大量的热解气体,破坏了煤体的原有结构,在三轴压力作用下煤体固体“骨架”失稳并产生较剧烈的压缩变形。图 3(c)为 450 °C 恒温时无烟煤煤体变形规律。由图 3(c)可知,轴向和侧向变形同步呈线性增加,体积应变约增加了 1.1%,约为 400 °C 以前总变形量的 5 倍多。

(4) 450 °C ~ 600 °C。该温度范围内无烟煤煤体的轴向、侧向变形亦同步变化。如图 3(d)所示,体积应变从 450 °C 时的 2% 增加到 600 °C 时的 7%,并且变形速率不断增大,尤其在温度超过 550 °C 以后,煤样被剧烈地压缩,体积应变从 3% 迅速增加到 7%,增加了 4%,是 450 °C ~ 550 °C 时的 2 倍。通过曲线拟合发现,该阶段内轴向、侧向和体积应变与温度成明显的指数关系,相关系数均在 0.97 以上。

(5) 600 °C 恒温。当试验温度达到终温 600 °C 时,无烟煤内的热解反应更加剧烈,产生大量的热解气体。煤体介质活化程度进一步得到加强,煤体此时完全处于塑性流动状态。如图 3(e)所示,整个煤体的变形速率不断增大,尤其到试验结束前的 3 个小时内,变形量随时间按指数增加。体积应变从 7% 先线性增加至 10%,而后迅速增加至接近 40%。与 450 °C 恒温时相比,总体积应变增加量约为 450 °C 时的 30 倍。

由以上分析可知,在保持三轴压力不变,持续

升温过程中,无烟煤煤体的变形随温度增加呈现如下规律:20℃~200℃主要以体积膨胀为主体,为积膨胀阶段;200℃~400℃范围内煤体整体表现为压缩变形,但较为缓慢,为缓慢压缩阶段;400℃~600℃主要表现为变形的剧烈增加,为剧烈压缩阶段。在高温阶段的恒温恒压下,由于受到热解气体产出的影响,煤体变形亦十分剧烈。

#### 4 600℃无烟煤应力-应变特征

当试验进行至设定终温600℃时,待热解气体产出结束后,保持围压15MPa不变,以10kN/s(即0.32MPa/s)速率升高轴压进行应力-应变试验,其应力-应变特征曲线如图4所示。

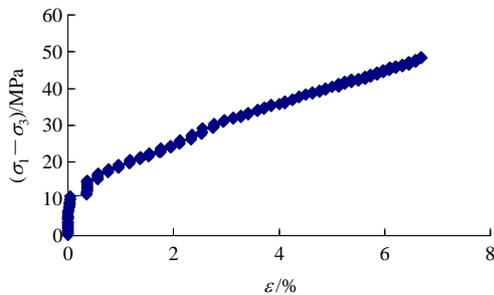


图4 600℃时无烟煤应力-应变特征曲线

Fig.4 Curve of anthracite stress-strain characteristics at 600℃

从图4可以看出,当差应力超过15MPa时,煤的变形量急剧增大,但差应力增加速率降低,在应变超过0.5%以后,应变几乎随应力线性增加,在整个试验过程中未出现常规试验中的弹性阶段和差应力峰值,在试验机额定行程范围内,最终轴向变形达7%,说明经历高温后煤样完全处于塑性流动状态。

### 5 讨论

#### (1) 无烟煤煤体脆-韧性变形机制转变的温压条件

岩石材料由于其结构和所处环境条件与其他材料不同<sup>[17]</sup>,其变形特征也与其他材料存在明显的差异性。岩石物理学研究表明在深入地表以下10~20km后,围压和温度都增加了,岩石表现出明显的延性和塑性性质。由此可见,温度和压力对岩石材料脆-韧性变形的转变起着重要作用。

所谓韧性是指弹性变形之后产生较大的塑性变

形而导致破坏或直接发展为延性流动<sup>[18]</sup>。恒定三轴应力条件下无烟煤煤体升温过程中的变形试验结果表明,煤体脆-韧性变形机制转变的临界温度范围为400℃~450℃。在临界温度之前,煤体变形主要受脆性变形机制控制。从图2可以看出,临界温度前煤体变形量和变形速率均较低。当温度超过临界温度,韧性变形机制对煤体变形起主导作用。从图3(d)可以看出,尤其在450℃以后煤体变形随温度呈指数趋势增长,煤体发生了剧烈的塑性变形。因此,在较低的围压作用和恒定三轴应力下,煤体脆-韧性变形机制的转变主要受到温度的影响。而压力对煤体变形机制转变的影响,由于试验设计条件的局限性,未进行不同恒定温度,不同围压下的试验。但刘俊来等<sup>[9]</sup>通过同步升温升压试验发现200℃,200MPa和300℃,300MPa是沁水盆地煤层脆-韧性转变的临界温度和压力。说明较低温度条件下,煤体脆-韧性转变的临界压力较高,反之亦然。因此,煤体脆-韧性变形机制的转变受温度和压力共同作用,并且临界温度越高,所要求的临界压力越低,具有显著的温压等效性。

#### (2) 无烟煤煤体变形的温度-压力耦合效应

温度的升高,导致岩石和流体介质的活化,促使岩石变形破坏机制发生变化,使其易于塑性流动;压力的增大,对岩石变形起着抑制张裂和强化摩擦作用,从另一方面为岩石变形活化提供条件<sup>[14]</sup>。在脆性变形阶段,随着温度的升高,煤体介质活化,强度降低,变形易于发生<sup>[7]</sup>;已有的研究证实,随着围压的增大,岩石的变形显著增大<sup>[19]</sup>,对煤亦然。但围压越高,煤体越难于发生变形,即产生相同的变形,高围压下,需要较大的差应力。无烟煤煤体在恒定500m原岩应力状态下,随着温度的升高,200℃以前变形以热膨胀为主,这说明脆性阶段,低围压下,温度对煤体的变形起主导作用。在韧性变形阶段,煤体以塑性流动为主,升高温度和提高围压均使煤体易于发生变形。因此,在温度和压力耦合作用下,煤体不仅易于发生变形,而且承受变形的能力也得到增强。

#### (3) 热解产气对无烟煤煤体变形的影响

煤作为一种特殊的有机岩石,在温度较高时将发生热解反应,热解气体的产出使得煤体内部结构发生改变,致使煤体更易于产生塑性变形。图5为各温度段无烟煤热解产气量与应变增加量关系。

由图 5 可知, 随着温度升高, 无烟煤煤体热解产气量增大, 相应煤样的变形也在不断增加, 并且变形的增加量和产气量随温度的变化呈现一致性。低于 400 °C~450 °C 的各温度范围内, 煤体产气量均较低, 产气较平缓, 最大产气量在 400 °C, 约为 37 L; 400 °C~450 °C 内有所降低, 但在 450 °C 时,

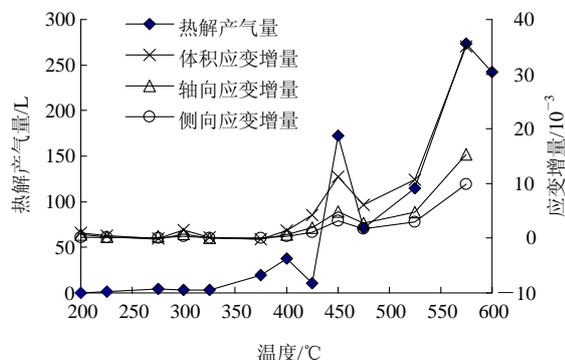


图 5 各温度段无烟煤热解产气量与应变增量关系

Fig.5 Relationship between pyrolysis gas and deformation increment of anthracite under different temperature ranges

产气量迅速升至 170 L; 高于 450 °C 各温度范围内, 产气量迅速增加, 在 550 °C~600 °C 范围内, 产气量达到最大值, 为 273 L, 600 °C 时尽管有所降低, 但仍在 250 L 左右。而煤体在各温度段内的变形增加量随温度的升高也呈现出与热解产气量相同的规律性。低于 400 °C~450 °C 各温度段内煤体变形增加量较小, 体积应变增量几乎保持在低于 1% 的水平。在 400 °C 时开始缓慢增加, 450 °C 时随着产气量达到最大值变形的增加量也达到最大值。高于 450 °C 各温度段内, 随着热解产气量的迅速增加, 煤体的轴向、侧向和体积变形增加量均明显增大。从体积应变来看, 450 °C 时的应变增量比 450 °C 以前的应变增量总和还要多, 450 °C 以后的变形增量几乎呈指数增加。这是因为高温时煤体内部有机结构发生较剧烈的解聚和缩聚反应, 挥发成分从煤体固体“骨架”中逸出, 产生了附加的孔隙和表面积, 当温度低于剧烈热解反应温度时, 煤体内孔隙以微孔和小孔为主, 大于该温度后以中孔和大孔为主, 煤样总孔隙率随温度呈指数增加<sup>[16]</sup>, 进而改变了煤体内部结构, 致使煤体“骨架”受到破坏, 其承载力大幅度下降, 在三轴压力作用下, 煤体被剧烈压缩。因此, 整体上看, 低于 400 °C~450 °C 各温度段内, 煤体的变形由于热解产气量和产气速率较小

而较为平缓; 400 °C~450 °C 以后, 煤体的变形随着热解产气量和产气速率的剧烈增加而变大, 热解产气对煤体的变形起着主控作用。

## 6 结 论

恒定 500 m(轴压 12.5 MPa、围压 15 MPa)原岩应力状态, 温度从 20 °C 以 10 °C/h 的升温速率升至 600 °C 过程中, 无烟煤煤体的变形呈现以下规律:

(1) 随着温度的升高, 煤体变形呈现出阶段性, 即 20 °C~200 °C 体积膨胀阶段、200 °C~400 °C 缓慢压缩阶段、400 °C~600 °C 剧烈压缩阶段。

(2) 煤体变形的脆-韧性机制的转变受温度和压力共同作用, 在较高的临界温度下, 转化压力较低, 反之亦然, 具有明显的温压等效性。试验结果表明, 无烟煤煤体在围压 15 MPa 时, 其临界温度范围为 400 °C~450 °C。

(3) 温度和压力对煤体变形发生的难易程度和变形量大小都有影响。脆性变形阶段, 升高温度促使煤体介质活化, 使煤体易于发生变形, 并能产生较大的变形; 而增大围压, 煤体难于发生变形, 但变形量较大。韧性变形阶段, 升高温度和增大围压均使煤体易于发生变形, 且变形量也较大。

(4) 热解产气对煤体变形起着主控作用, 尤其在高温阶段(450 °C 以后)。随着热解产气量的增加, 煤体即使在较小的围压下也能产生较大的永久变形。

## 参考文献(References):

- [1] 冯增朝, 赵阳升, 吕兆兴, 等. 加热煤层抽采煤层气的方法[P]. 中国: 200810079794.X, 2009 - 4 - 29.(FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng, LU Zhaoxing, et al. Method of extracting and mining coalbed gas by heating coalbed[P]. China: 200810079794.X, 2009 - 4 - 29.(in Chinese))
- [2] 郭文兵, 李小双. 深部煤岩体高温高压下力学性质的研究现状与展望[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2007, 26(1): 16 - 20.(GUO Wenbing, LI Xiaoshuang. Research status of deep coal and rock mass mechanic properties under high temperature and high confining pressure[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2007, 26(1): 16 - 20.(in Chinese))
- [3] BUSTIN R M, ROSS J V, MOFFAT I. Vitrinite anisotropy under

- differential stress and high confining pressure and temperature: preliminary observations[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1986, 6(4): 343 - 351
- [4] 周建勋. 煤的变形与光性组构的高温高压变形试验研究及煤田构造中石英的显微构造与组构[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 1991.(ZHOU Jianxun. The research of coal deformation and optical fabric by experimental deformation under high temperature and confining pressure-and quartz microstructures and fabrics in the structures of coal field[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 1991.(in Chinese))
- [5] 周建勋, 王桂梁, 邵震杰. 煤高温高压变形试验及其构造地质意义[J]. *地球物理学进展*, 1993, 8(4): 54 - 60.(ZHOU Jianxun, WANG Guiliang, SHAO Zhenjie. Coal deformation experiment under high temperature and confining pressure and its tectonic implications[J]. *Progress in Geophysics*, 1993, 8(4): 54 - 60.(in Chinese))
- [6] 周建勋, 王桂梁, 邵震杰. 煤的高温高压试验变形研究[J]. *煤炭学报*, 1994, 19(3): 324 - 332.(ZHOU Jianxun, WANG Guiliang, SHAO Zhenjie. Coal deformation under high temperature and confining pressure[J]. *Journal of China Coal Society*, 1994, 19(3): 324 - 332.(in Chinese))
- [7] 姜波, 秦勇, 金法礼. 煤变形的高温高压试验研究[J]. *煤炭学报*, 1997, 22(1): 80 - 85.(JIANG Bo, QIN Yong, JIN Fali. Coal deformation test under high temperature and confining pressure[J]. *Journal of China Coal Society*, 1997, 22(1): 80 - 85.(in Chinese))
- [8] 姜波, 秦勇, 金法礼. 高温高压下煤超微构造的变形特征[J]. *地质科学*, 1998, 33(1): 17 - 24.(JIANG Bo, QIN Yong, JIN Fali. Deformation characteristic of super-microstructures of coal under the condition of high temperature and confining pressure[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1998, 33(1): 17 - 24.(in Chinese))
- [9] 刘俊来, 杨光, 马瑞. 高温高压试验变形煤流动的宏观与微观力学表现[J]. *科学通报*, 2005, 50(增1): 56 - 63.(LIU Junlai, YANG Guang, MA Rui. Macro and microscopic mechanical behaviour of flow of coal samples experimentally deformed at high temperature and pressure[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(Supp.1): 56 - 63.(in Chinese))
- [10] 杨光, 刘俊来, 马瑞. 沁水盆地煤岩高温高压试验变形分析[J]. *天然气工业*, 2005, 25(1): 70 - 73.(YANG Guang, LIU Junlai, MA Rui. Deformation characteristic of coals from Qinshui Basin through high-temperature and confining pressure experiment[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(1): 70 - 73.(in Chinese))
- [11] 杨光, 刘俊来, 马瑞. 沁水盆地煤岩高温高压试验变形特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, 36(3): 346 - 350.(YANG Guang, LIU Junlai, MA Rui. Deformation characteristic of coals from Qinshui Basin through high-temperature and confining pressure experiment[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science)*, 2006, 36(3): 346 - 350.(in Chinese))
- [12] 赵阳升, 万志军, 张渊, 等. 20 MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机的研制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(1): 1 - 8.(ZHAO Yangsheng, WAN Zhijun, ZHANG Yuan, et al. Research and development of 20 MN servo-controlled rock triaxial testing system with high temperature and high pressure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(1): 1 - 8.(in Chinese))
- [13] 万志军, 赵阳升, 董付科, 等. 高温及三轴应力下花岗岩体力学特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(1): 72 - 77.(WAN Zhijun, ZHAO Yangsheng, DONG Fuke, et al. Experimental study of mechanical characteristics of granite under high temperatures and triaxial stresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(1): 72 - 77.(in Chinese))
- [14] 赵阳升, 万志军, 康建荣. 高温岩体地热开发导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.(ZHAO Yangsheng, WAN Zhijun, KANG Jianrong. Introduction of hot dry rock geothermal extraction[M]. Beijing: Science Press, 2004.(in Chinese))
- [15] 钟蕴英, 关梦缤, 崔开仁, 等. 煤化学[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1989.(ZHONG Yunying, GUAN Mengbin, CUI Kairen, et al. Coal chemistry[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 1989.(in Chinese))
- [16] 曲方. 原位状态煤体热解及力学特性的试验研究[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2007. (QU Fang. Experimental study on the coal mass pyrolysis and mechanical characteristics in simulative situ[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2007.(in Chinese))
- [17] 陈颀, 黄庭芳, 刘恩儒. 岩石物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.(CHENG Yong, HUANG Tingfang, LIU Enru. Rock physics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.(in Chinese))
- [18] 陈子光. 岩石力学性质与构造应力场[M]. 北京: 地质出版社, 1986.(CHEN Ziguang. Rock mechanics property and tectonic stress field[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986.(in Chinese))
- [19] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))