

温度冲击下煤体裂隙结构演化的 显微 CT 实验研究

王登科^{1, 2, 3, 4}, 张平^{1, 3}, 浦海², 魏建平^{1, 3, 4}, 刘淑敏^{1, 3}, 于充^{1, 3}, 孙刘涛^{1, 3}

(1. 河南理工大学 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室 - 省部共建国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454000; 2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 4. 煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南 焦作 454000)

摘要: 为研究温度冲击下煤体裂隙结构演化特征, 以期从微细观方面揭示煤体对温度的响应机制。采用 SLX - 80 型高低温实验系统对原煤进行 4 种温差条件下的冷热冲击实验, 利用工业显微 CT 系统对温度冲击前后的煤样进行扫描和裂隙结构的三维立体重建, 基于 VGStudio MAX 图像分析系统建立煤样清晰的裂隙可视模型, 并对煤体裂隙结构演化特征进行量化表征, 运用非定常热应力理论分析温度冲击下的破煤机制。研究表明: 温度冲击促使煤体内部裂隙扩展加宽, 萌生新裂隙, 裂隙体积、壁厚、表面积均与温差呈正相关关系, 不同温差产生的热应力决定了煤样的损伤程度; 温度冲击过程中产生了大量的声发射信号, 声发射信号的产生主要集中在前 600 s, 且温差越大所产生的声发射能量越高; 温度冲击所产生的最大热应力位于煤样表面的切向方向, 热应力超过煤样抗拉强度是导致裂隙萌生、扩展和相互贯通的直接原因。研究结果可为煤层气高效开发和提高煤层瓦斯抽采率提供技术支持。

关键词: 岩石力学; 温度冲击; 显微 CT; 热应力; 裂隙结构; 破煤机制

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)10 - 2243 - 10

Experimental research on cracking process of coal under temperature variation with industrial micro-CT

WANG Dengke^{1, 2, 3, 4}, ZHANG Ping^{1, 3}, PU Hai², WEI Jianping^{1, 3, 4}, LIU Shumin^{1, 3},
YU Chong^{1, 3}, SUN Liutao^{1, 3}

(1. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116; 3. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 4. The Collaborative Innovation Center of Coal Safety Production of Henan, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: The mechanism and characteristics of coal cracking under temperature shock was studied with micro-CT. The high-low temperature test system SLX - 80 was used to exert the cold and heat shock on the raw coal with

收稿日期: 2018 - 04 - 19; **修回日期:** 2018 - 06 - 15

基金项目: 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDUK1814); 国家自然科学基金资助项目(51774118); 河南省教育厅高校重点科研项目(18A620001)

Supported by the State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology(Grant No. SKLGDUK1814), National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51774118) and Key Scientific Research Projects of Henan Provincial Education Department(Grant No. 18A620001)

作者简介: 王登科(1980 -), 男, 2003 年毕业于湖南科技大学采矿工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事安全科学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: wdk@hpu.edu.cn.

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0364

four temperature differences designated. The industrial micro-CT system was used to scan the coal samples before and after the temperature shock so that three-dimensional fracture structure of coal samples may be reconstructed with the image analysis system VG Studio MAX. The characteristics of cracking process were described quantitatively. The transient thermal stress theory was used to analyze the coal breaking mechanism under temperature shock. The results show that the temperature shock promotes the expansion and widening of cracks within the coal body and initiates new cracks. The crack volume, wall thickness and surface area are all positively correlated with the temperature difference, indicating that the thermal stress generated by different temperature differences determines the degree of damage of coal samples. A large number of acoustic emission signals were generated in the process of temperature shock and mainly concentrated in the first 600 s. The greater the temperature difference is, the higher the acoustic emission energy. The maximum thermal stress generated is tangential to the coal surface. The thermal stress exceeding the tensile strength of coal samples cause directly the initiation, propagation, and interpenetration of fissures.

Key words: rock mechanics; temperature shock; micro-CT; thermal stress; crack structure; coal broken mechanism

1 引言

随着人们对全球气候变暖及环境问题的持续关注, 新能源的开发和利用成为研究热点。然而, 对于世界各国, 特别是中国, 煤炭将在很长一段时间内仍作为其支柱能源。煤层气是煤炭伴生的清洁能源, 具有广阔的开发前景, 是推动能源生产和消费革命的重要载体^[1-2]。

煤是一种内部结构复杂的非均匀性天然多孔介质, 其内部的孔裂隙网络结构是煤层气渗流的主要通道, 因此煤层的渗透性是决定煤层气开采效果的关键因素。随着浅部资源日益枯竭, 煤炭开采不断走向深部, 煤层气储量和压力均增加, 而煤储层的透气性逐渐降低^[3-6]。因此, 增加煤储层的透气性是煤层气开发和瓦斯高效抽采的一项重大挑战。水力压裂是现阶段运用较多的煤层气增产措施, 常用的活性水压裂存在压裂液滤失严重、返排率低、压裂裂缝短而复杂、消耗大量水资源等问题^[7-9]。

近年来, 为了提高煤层气增产效果, 国内外很多学者开始探索和发展新的煤体原位增透改性技术, 采用高温或低温材料冲击煤体促使原煤孔裂隙结构发生改变, 从而达到增透的技术正在慢慢兴起。S. Coetzee 等^[10]利用液氮对煤储层进行冻胀压裂, 结果表明液氮可以有效促进煤储层微孔隙或裂缝的发展, 与传统的方法相比, 其产气效率提高了 8%。任韶然等^[11]的研究表明, 液氮的超低温作用能使煤岩基质收缩, 并产生热应力裂缝, 有助于增加煤岩的整体渗透率。张春会等^[12]开展了对原煤液氮溶浸致裂的机制研究, 结果表明液氮会引起煤内应力集中, 当应力集中超过煤岩的强度便可产生局部裂缝。

C. Zhai 等^[13]采用液氮冻融技术对煤样进行冻融处理, 并利用核磁共振实验系统检测了煤样的孔隙分布情况, 研究了冻融时间和冻融循环次数对煤样裂隙网络结构的影响, 定量分析了孔隙率随液氮冻融时间和冻融循环次数的变化规律。李和万等^[14-15]通过研究不同初始温度的煤样经液氮冻融的裂隙扩展程度, 得到了冻融前后煤样抗压强度的变化规律。

D. Wang 等^[16-17]等研究了循环温度冲击下煤体的渗透率变化及其增透机制, 发现煤体的非均质性和热应力的存在是温度冲击增透的主要内在机制。孟巧荣等^[18-23]利用自主研发的 μ CT225FCB 型工业显微 CT 实验系统分别研究了褐煤、瘦煤和气煤从常温~600 °C 细观结构的演化特征, 研究发现: 煤体的热破裂阈值为 300 °C 左右; 温度低于 300 °C 阶段, 裂纹的产生是由于煤中水分和自由气体的散失形成的; 温度高于 300 °C 阶段, 微裂隙和孔隙的产生主要是因为煤体发生了热解化学反应。

前人的上述研究得到了诸多有意义的研究成果, 但主要集中于高温或低温影响煤层内部孔隙裂隙结构及渗透特性等方面的研究, 对温度冲击下煤体内部裂隙结构演化规律等方面的研究还有待完善。本文为了探究温度冲击下煤体裂隙结构演化特征, 利用工业显微 CT 系统对不同温差温度冲击前后的河南焦作赵固二矿无烟煤煤样进行了扫描和裂隙结构三维立体重构, 基于 VGStudio MAX 图像分析系统建立了煤样清晰的裂隙可视模型, 并对裂隙的发育和分布特征进行了定性定量的描述。获得了煤样温度冲击前后的裂隙体积, 壁厚和表面积, 分析了热应力对煤体内部裂隙的影响, 从微细观方面揭示煤体对温度的响应机制。研究结论对煤体增透改性和煤层气开采理论完善具有一定的借鉴意义。

2 实验设备及方法

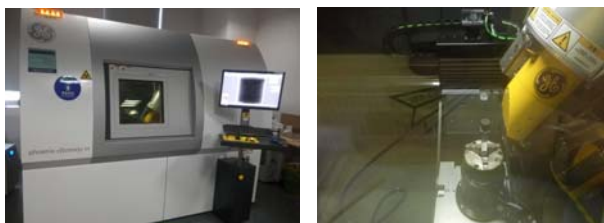
2.1 试样制备

本文实验所用煤样均取自河南焦作赵固二矿，煤质为中灰、低硫、高发热量、灰熔点高、块煤产率高的优质无烟煤，将井下采集到的大块煤样在河南理工大学实验室完成煤样加工，加工尺寸为直径 25 mm、高 25 mm 的圆柱体。加工完成后放入 60 °C 恒温干燥箱干燥 12 h 装入密封袋备用。用于 CT 扫描的试样尺寸为 $\phi 25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ ，原因是工业 CT 扫描的分辨率和试件的尺寸有关，由最长部位的长度决定，本文的 CT 扫描分辨率约为 12 μm ，即大于 12 μm 的裂隙更加容易提取，满足实验要求。

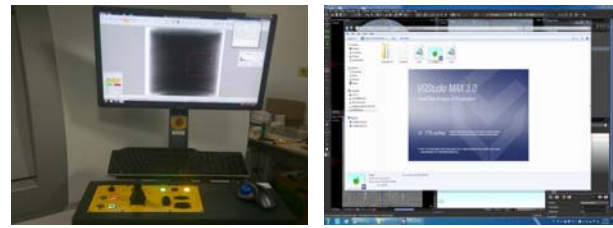
2.2 测试设备

工业显微 CT：本文所采用的 CT 扫描设备为 phoenix v|tome|x m(见图 1(a))，来自河南理工大学瓦斯地质与瓦斯治理国家重点实验室。该设备拥有高功率微米焦点和高分辨率纳米焦点的独特双射线管配置，微米焦点细节分辨能力： $\leq 2 \mu\text{m}$ ，纳米焦点细节分辨能力： $\leq 0.5 \mu\text{m}$ 。可以完整扫描的试样最大直径为 230 mm，高度为 420 mm，也可以实现对试样内部特定区域的高精度三维 CT 扫描。该系统主要用于煤岩材料样品的三维细观结构扫描，在不破坏样品状态的情况下完成对样品内部结构的描述，如缺陷、孔隙、裂缝分布和密度变化等等，能对样品进行综合描述分析。图 1(b)为扫描设备的内部，试样安装固定在夹持底座上，供 X 射线检测扫描。图 1(c)为计算机监视器，可以控制 CT 扫描的整个过程，并采集扫描图像数据，然后进行几何校正、数据体滤波(优化信噪比)、射束硬化调节和数据重建，最后将整个扫描数据使用 VGStudio MAX 软件打开(见图 1(d))，进行扫描图像的三维重构和图像分析，可以得到试样的尺寸、壁厚分布、裂隙体积、孔隙度、灰度值等。

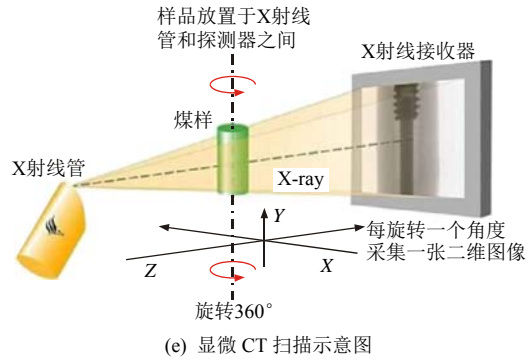
SLX - 80 型高低温实验系统：该高低温实验系统(见图 2)由深冷箱、控制箱、自增压液氮罐、真空输液管、计算机及控制软件组成。该系统可以提供



(a) CT 扫描设备 phoenix v|tome|x m (b) 试样安装及扫描过程



(c) 计算机监视器 (d) VGStudio MAX 软件



(e) 显微 CT 扫描示意图

图 1 CT 扫描实验系统

Fig.1 CT scanning system



图 2 SLX - 80 型高低温实验系统

Fig.2 High and low temperature test system SLX - 80

高温和低温的测试环境，并能保持良好的恒温状态。实验时，将试样放置在箱内，通过计算机编制工艺程序实现系统的自动运行和停止。无需人工干预，智能化程度高，操作方便，使用可靠。

高低温实验系统的主要技术参数如下：

- (1) 箱内有效空间：500 mm×400 mm×400 mm；
- (2) 最大装载量：150 kg；
- (3) 温度控制范围：-190 °C~180 °C；
- (4) 温度均匀度： $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ，温度平衡后 0.5 h；
- (5) 控温精度： $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ，温度平衡后 0.5 h；
- (6) 升/降温速度：0~10 °C/min 可调。

2.3 实验方案与步骤

具体实验步骤如下：

- (1) 原始煤样 CT 扫描

煤样编号分别为 M1, M2, M3, M4，依次对每个煤样的进行 360° 旋转全方位的 CT 扫描，并将

采集的初始扫描图像数据进行几何校正、数据体滤波(优化信噪比)、射束硬化调节和数据重建,然后使用 VGStudio MAX 软件提取裂纹并分析。

(2) 温度冲击

分别对煤样 M1, M2, M3, M4 进行 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-120\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-150\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-180\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度冲击。以煤样 M1 进行 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度冲击为例,启动第一台高低温实验系统,编制实验需要的控温程序,系统自动执行降温指令,直至高低温实验箱内部的温度达到实验所需低温($-90\text{ }^{\circ}\text{C}$);将煤样迅速放入高低温实验箱中,关闭箱盖,持续冷冲击 2 h,确保煤样温度完全达到实验温度($-90\text{ }^{\circ}\text{C}$);在煤样进行低温冲击的过程中,打开另一台高低温实验系统,编制实验需要的温度控制软件自动执行升温指令,直至控温程序设置的实验所需高温($+90\text{ }^{\circ}\text{C}$),执行保温指令,待低温冲击结束;将煤样从低温实验箱拿出迅速放入高温实验箱,此过程不超过 5 s,煤样在高温实验箱内持续热冲击 2 h,同样保证煤样温度完全达到相应高温温度($+90\text{ }^{\circ}\text{C}$);最后,让煤样自然风干恢复至常温以备后续实验使用。其他温差条件下的温度冲击同理。

(3) 二次 CT 扫描

对不同温差条件下温度冲击后的 4 个煤样进行二次 CT 扫描,得到每个煤样全方位的扫描图像数

据,步骤同(1)。

(4) CT 扫描结果对比

对比煤样温度冲击前后的显微 CT 扫描图像,观察裂纹发育扩展分布,分析温度冲击下煤体裂隙结构演化特征。

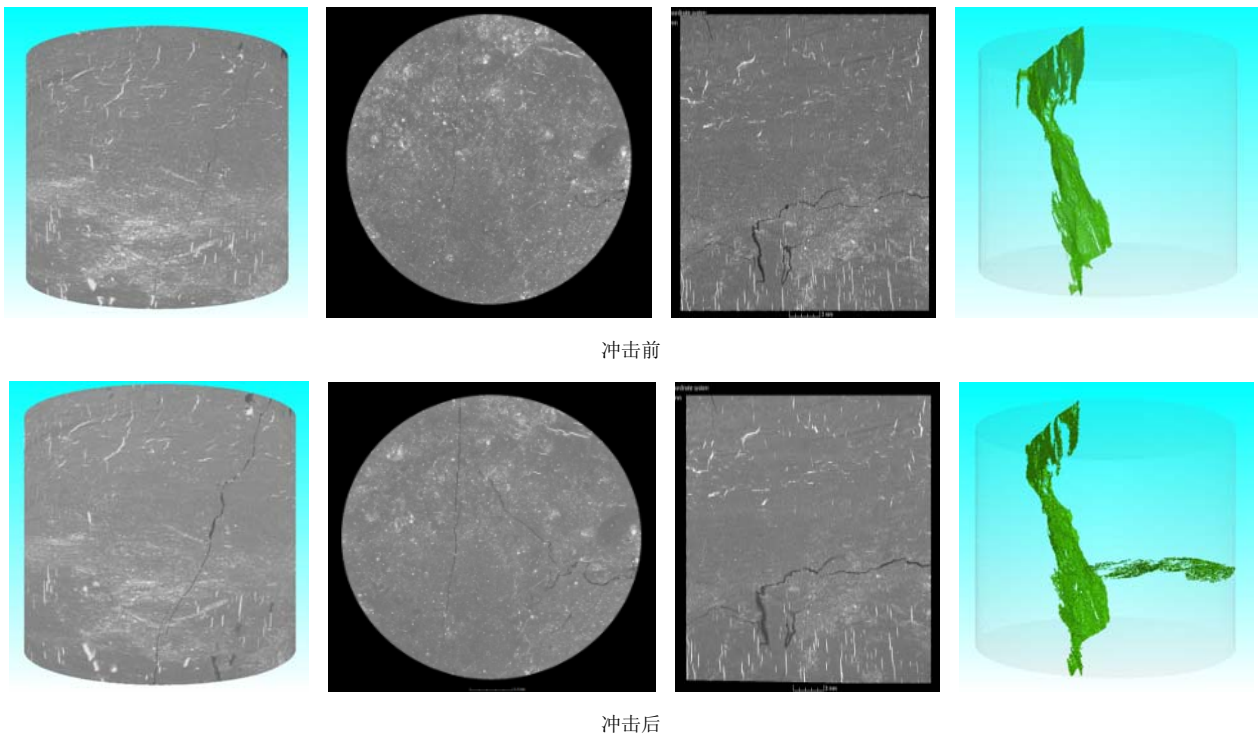
3 显微 CT 扫描结果分析

CT 扫描过程中 X 射线穿透物体,由于被测物体的吸收作用、射线强度成指数关系衰减,不同物质对 X 射线的吸收系数不同,利用 X 射线的衰减系数可以得知被测物质的密度。因此 CT 扫描的图像是密度图像,高密度区显示为白色,为矿物类物质,黑色说明裂隙比较发育。可以通过 CT 图像的变化,分析煤样在温度冲击下裂隙演化过程。

3.1 煤体裂隙结构演化

从 CT 扫描的表面特征(见图 3)来看,温度冲击确实对煤样造成了不同程度的破坏,为了进一步研究裂纹的扩展情况,对煤样表面、内部横切面和纵切面的 CT 扫描图像以及提取重建的三维裂隙模型进行了对比。为节约篇幅,仅以 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-180\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度冲击前后的 M1 和 M4 煤样的 CT 扫描结果给予展示并对裂隙特征加以阐述。

$-90\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度冲击:温度冲击后的煤样 M1,其上端面的裂纹明显变宽,可以预测该裂纹垂



(a) $-90\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度冲击

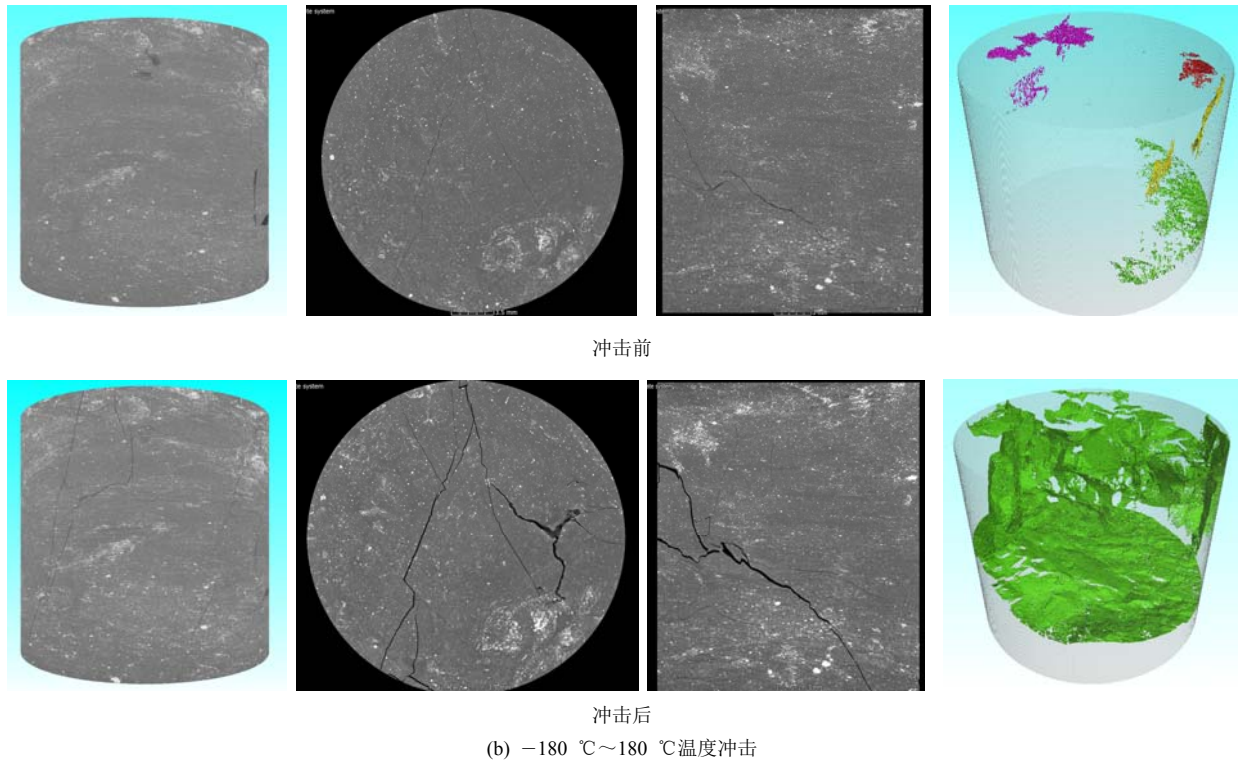


图 3 温度冲击前后煤样内部结构的 CT 扫描特征

Fig.3 CT scanned characteristics of fissures of coal sample before and after temperature shock

直层理贯穿煤样的内部，并且从侧面也能看到裂纹的黑色区域变深加宽，由上端面倾斜蜿蜒延伸至下端面，一方面斜裂纹将平行层理的裂纹搭接连通，一方面向平行层理方向扩展，不仅空间上形成网状裂纹系，而且有利于不同层间的瓦斯气体流动，改善煤层的增透效果，利于瓦斯抽采。煤样 M1 内部的初始裂隙变化并不是特别明显，只是略微的加宽。

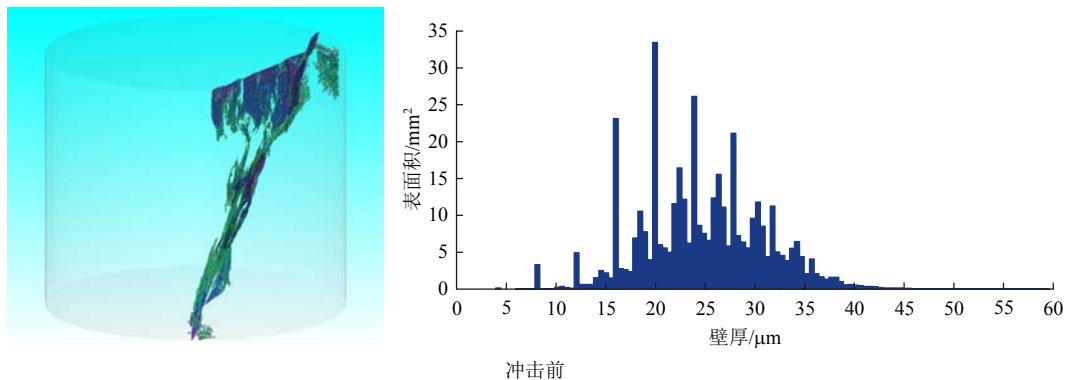
-180 °C~180 °C 温度冲击：随着温差的增加，温度冲击后的煤样 M4，其侧面的 2 条间隔一定距离的单一裂纹不仅扩展延伸，而且附近伴有多条次生裂隙，左侧单一裂纹新生了一条裂纹，并与原有裂纹交叉，新生裂纹的支裂纹搭接到右边的裂纹，裂纹的连通性较好。煤样 M4 内部，由于温差较高，

热应力较大，裂隙扩展为宽度较大的主裂纹，并衍生出多条支裂纹，交叉贯通，形成裂纹损伤区。

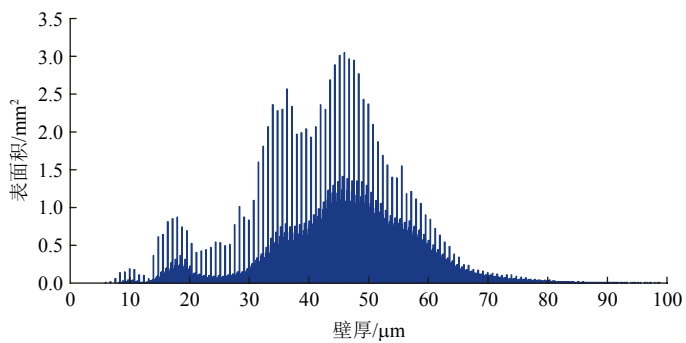
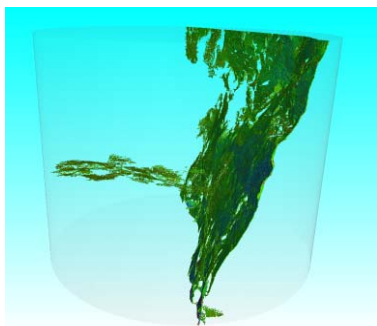
3.2 裂隙结构的定量表征

为了进一步探究温度冲击对裂隙结构的影响，对裂纹进行了提取，研究其在空间上的形态及其分布。由图 4 和表 1 可知：-90 °C~90 °C 温度冲击：温度冲击前、后煤样 M1 裂纹的体积分别为 13.730 和 23.628 mm³，体积增幅为 72.09%，壁厚(裂纹两壁面距离)主要集中在 15~40 和 15~70 μm，裂纹宽度明显增加。原始裂纹是一个倾斜大约 80° 片状裂纹，略微卷曲，热应力下，除了裂隙扩展外，煤样底部出现一个与横截面平行的裂纹，并与原裂纹连通。

-120 °C~120 °C 温度冲击：从提取的裂纹来看，煤样 M2 内部裂纹的确不甚发育，仅在煤样底

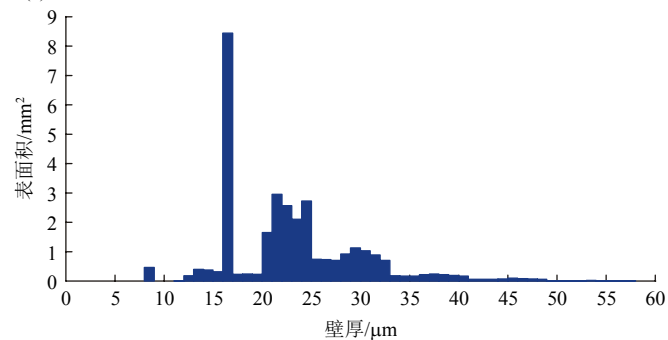


冲击前

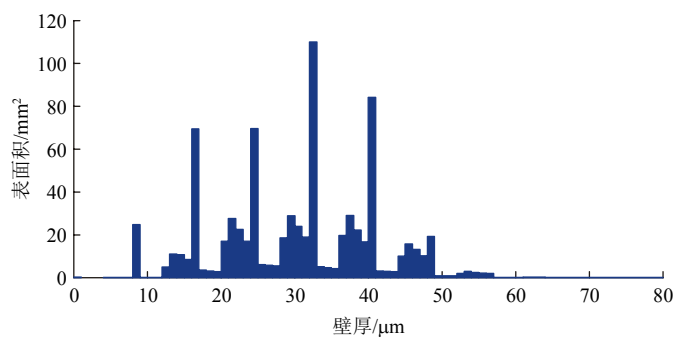
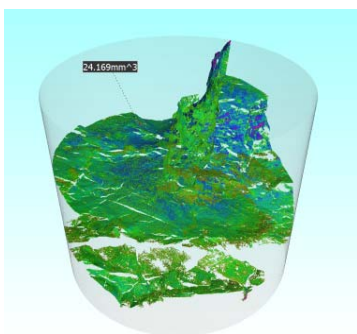


冲击后

(a) -90 °C~90 °C温度冲击

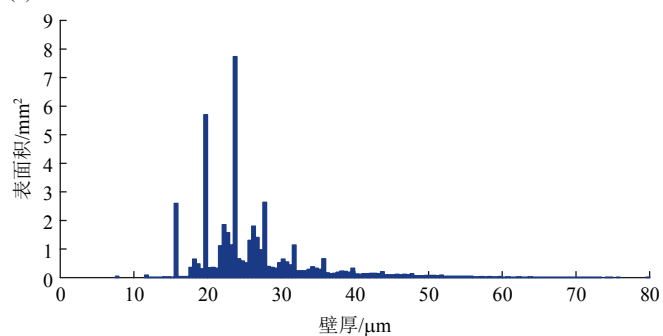
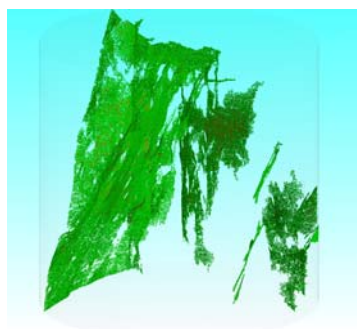


冲击前

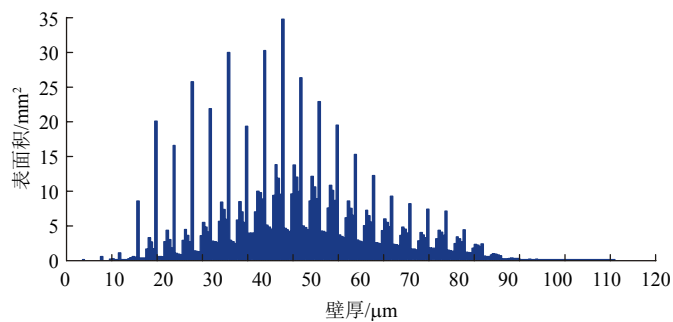
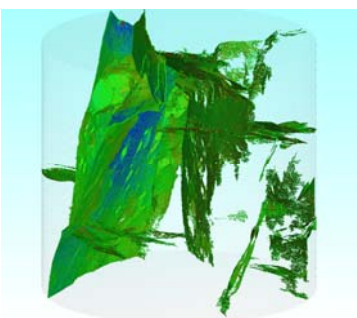


冲击后

(b) -120 °C~120 °C温度冲击



冲击前



冲击后

(c) -150 °C~150 °C温度冲击

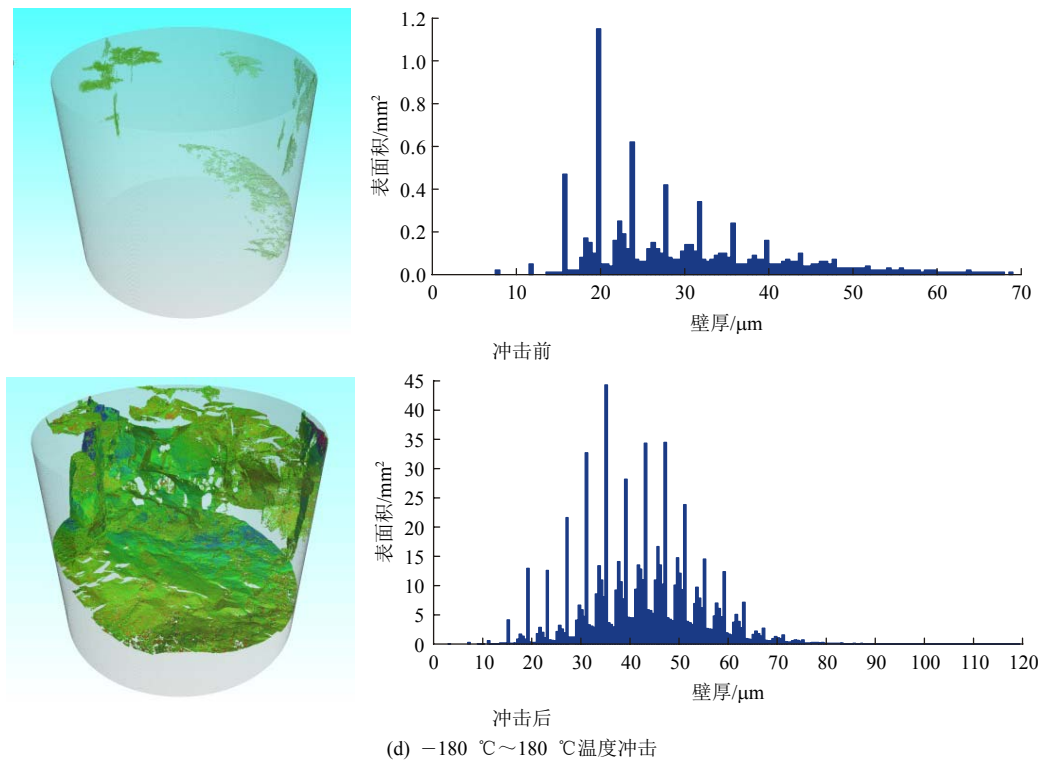


图 4 温度冲击前后裂隙壁厚分布情况

Fig.4 Distribution of wall thickness of cracks before and after temperature shock

表 1 温度冲击前后煤样裂隙体积测定结果

Table 1 Measured crack volume of the coal samples before and after temperature impact

煤样编号	温差/°C	裂隙体积/ mm ³		增幅/%
		温度冲击前	温度冲击后	
M1	-90~90	13.730	23.628	72.09
M2	-120~120	0.675	24.169	3 480.59
M3	-150~150	20.917	73.011	249.05
M4	-180~180	3.738	49.439	1 222.61

部观察到 3 条零星裂纹，体积 0.675 mm³，壁厚集中在 10~40 μm 范围，对应的面积为 3~9 mm²；在温度冲击下，形成一个“帽”式的裂纹，由竖向和横向裂纹拼接而成，竖向裂纹延展至上端面，横向裂纹几乎横切了整个煤样横截面，裂纹中嵌入的条形矿物和完整未破坏的煤体使得整个煤样没有破裂开，裂纹体积 24.169 mm³，增幅显著(原体积基数小的原因)，壁厚集中在 10~60 μm 范围，对应的面积为 30~120 mm²。

-150 °C~150 °C 温度冲击：处理前，煤样 M3 内部的裂纹，相对较为发育，由一个较大的倾斜主裂纹和一系列交错搭接的小裂纹构成，体积为 20.917 mm³，壁厚主要集中在 15~40 μm 范围，对应的面积为 0.1~8 mm²；而温度冲击后的煤样，各个裂纹之间贯通更加明显，壁厚宽度增加，形成一个立体“A”字型的裂纹系，体积增至 73.011 mm³，

增幅为 249.05%，壁厚主要集中在 15~90 μm 范围，对应的面积为 5~35 mm²。

-180 °C~180 °C 温度冲击：温度冲击前、后，煤样 M4 的体积分别为 3.738 和 49.439 mm³，增幅为 1 222.61%，壁厚主要集中在 15~50 和 15~70 μm 范围，对应的面积分别为 0.1~1.2 和 5~45 mm²；可以直观的看到，初始裂纹由几个相互独立的微小裂纹组成，在热应力作用下扩展并连通形成由一个平行层理的圆片状裂纹和 3 个近似垂直平行层理裂纹的裂纹系统，垂直层理的裂纹并不是完全连通的，呈絮状，增加了瓦斯的流动途径，对于瓦斯的抽放至关重要。

4 温度冲击下煤岩破坏机制分析

煤体是一种具有原生孔裂隙系统的非均质材

料, 在温度冲击载荷作用下, 原有的孔裂隙结构系统会发生变化。煤体在冷却和受热时, 不同矿物热胀冷缩程度的非等值和不协调引起了各种矿物之间的变形不均, 导致了矿物之间的相互约束和制约, 并最终在煤体中形成了热应力。当热应力达到或超过煤体的抗压或抗拉强度时, 就会导致裂纹扩展及煤体的破坏。

煤岩是抗拉强度低于抗压强度的脆性材料, 降温时产生压应力, 升温时产生拉应力。当热应力超过其能承受的最大抗拉强度时, 煤体内部结构发生破坏, 原生裂隙宽度增加, 并沿裂隙尖端萌生新裂隙, 这就是煤岩的热破坏现象, 热破坏过程如图 5 所示。

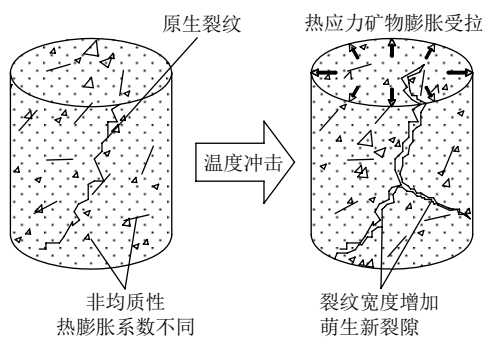
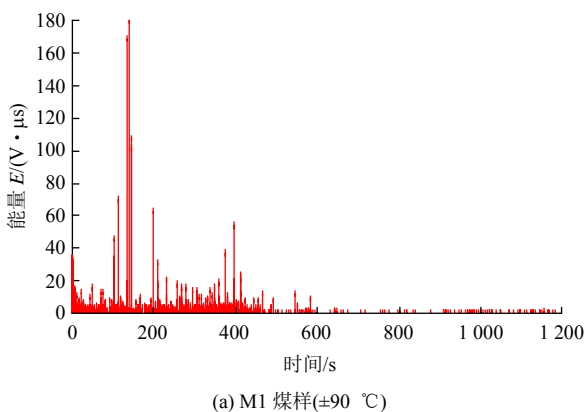


图 5 温度冲击下煤体热破坏示意图

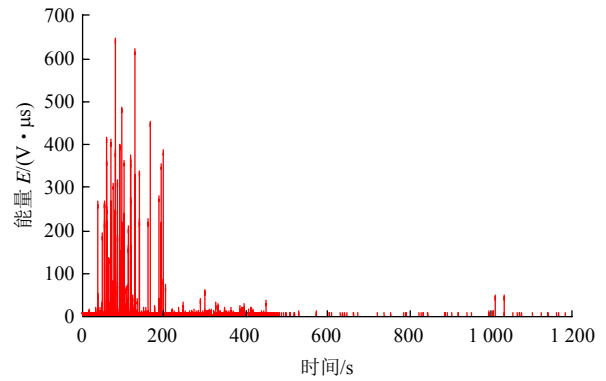
Fig.5 Thermal damage of coal under temperature shock

声发射信号是煤样内部裂缝起裂和扩展的间接反映^[24-25], 在此以 M1 和 M4 煤样的声发射信号来分析裂缝的扩展情况。

从图 6 可以看出, 温度冲击过程中观测到了强烈的声发射现象, 说明煤体在温度冲击过程中内部的确有微破裂产生, 且微裂隙的产生、扩展主要集中在前 600 s, 此阶段声发射异常活跃, 能量突变较大且单次释放的能量达到峰值; 600 s 后声发射能量开始衰减, 表明煤样内部变形破坏趋于稳定, 裂隙扩展停滞。根据声发射信号监测结果, M4 和 M1



(a) M1 煤样(±90 °C)



(b) M4 煤样(±180 °C)

图 6 煤样冷-热冲击过程中声发射能量变化

Fig.6 AE energy changes of coal samples in temperature shock process

煤样的声发射峰值能量分别为 650 和 180 V·μs, 峰值能量比为 3.6。在微裂隙扩展阶段, 煤样 M4 的平均声发射能量是煤样 M1 的平均声发射能量的 15 倍。声发射能量的高强度释放说明温度冲击下产生的热应力促使了煤体内部裂缝的形成和扩展。

根据热应力理论, 煤样的冷热冲击实验测试属于非正常热应力范畴。实验煤样在冷热冲击过程中所产生的热应力可以通过以下公式^[26-27]来计算:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\alpha E}{1-\mu} \frac{2h^2 \Delta T}{b^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\kappa g_n^2 t}}{(g_n^2 + h^2) g_n^2 J_1(g_n b)} \left[\frac{b}{r} J_1(g_n r) - J_1(g_n b) \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{\alpha E}{1-\mu} \frac{2h^2 \Delta T}{b^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\kappa g_n^2 t}}{(g_n^2 + h^2) g_n^2 J_1(g_n b)} \left[g_n b J_0(g_n r) - \frac{b}{r} J_1(g_n r) - J_1(g_n b) \right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ_r 为煤样中的径向方向的热应力; σ_θ 为煤样中与 σ_r 方向垂直的切向方向的热应力; E 为弹性模量; κ 为导温系数; b 为圆柱煤样的半径; μ 泊松比; α 为线膨胀系数; h 为放热系数; r 为煤样横截面内任一点到该横截面中心的距离 ($0 \leq r \leq b$); ΔT 为温差; $J_0(g_n r)$, $J_1(g_n r)$ 分别为第一种零阶贝塞尔函数和第一种一阶贝塞尔函数, g_n 为下式的正根:

$$g_n J_1(g_n r) - h J_0(g_n b) = 0 \quad (2)$$

联合式(1)和(2)可以得出煤样内部热应力的解:

$$\left. \begin{aligned} (\sigma_r)_{\max} &= 0.2356 \frac{\alpha E \Delta T}{1-\mu} \left(t = 0.0764 \frac{b^2}{\alpha} \right) \\ (\sigma_\theta)_{\max} &= -\frac{\alpha E \Delta T}{1-\mu} \quad (t=0) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: 负号表示拉应力。

由式(3)可知, 煤样内部所产生的热应力最大的为 σ_{θ} 。利用膨胀仪实验测得 $\alpha = 21 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 煤体弹性模量 E 通过三轴压缩实验测得为 3 386 MPa, μ 取 0.2, 代入式(3), 得到不同温差冲击条件下的热应力, 其中 $\pm 180^\circ\text{C}$ 温差下热应力最大, 为 32 MPa; $\pm 90^\circ\text{C}$ 温差下热应力最小, 为 16 MPa。

也就是说(以 $\pm 90^\circ\text{C}$ 温差为例), 在冷 - 热温度冲击过程中, 如果煤样不发生拉伸破坏的话, 最大可产生 16 MPa 的热应力。吴基文等^[28-30]的研究结果表明, 不同变质程度煤的抗拉强度为 0.28~2.35 MPa。根据岩石力学理论可知, 煤岩在载荷作用下发生形变, 当所受载荷超过抗压或抗拉强度时就会导致煤岩内部裂缝扩展和失稳破坏, 并同时卸压。声发射能量的高低变化, 说明裂纹扩展是间断进行的, 裂纹扩展一步, 将积蓄的能量释放出来, 导致裂纹尖端区域卸载^[31]。当裂纹扩展到临界量时, 煤岩开始快速失稳断裂, 产生更大的声发射能量, 这也是在进行温度冲击过程中人耳会听到噼啪声的原因。因此, 温度冲击实验过程中, 煤样内部并不会真正产生 16 MPa 的拉应力, 因为还未等到热应力升至 16 MPa, 煤样已经发生破坏并卸压了。

就本次的温度冲击实验测试而言, 温度冲击所产生的热应力达到并超过了煤样所能承受的抗拉强度, 所以就会在煤样内部产生如图 3 和 4 所示的新裂隙萌生和原有裂隙的伸长、分叉、断裂、裂缝宽度增加等现象^[32-33], 导致了煤样破裂的发生和发展, 增加了瓦斯渗流通道, 并最终有效提升了煤体渗透性^[16-17, 33]。

5 结 论

(1) 工业显微 CT 扫描结果显示, 温度冲击后煤体内部裂隙扩展伸长、加宽, 并萌生新裂隙, 裂隙宽度显著增加; 温度冲击对煤岩造成损伤, 不仅使煤体的表面出现新裂纹、裂隙扩展等破坏现象, 并且表面的裂纹通过持续扩展会转变成煤体内部裂纹。

(2) 通过对比重建的煤样裂隙结构三维立体模型和温度冲击前后的 CT 扫描特征发现, 温差较小时, 初始裂纹扩展加宽, 新生裂纹较少; 随着温差增加, 煤样损伤程度愈发严重, 裂纹不仅变宽, 而且扩展萌生新的裂纹, 主裂纹附近还会伴有多条新的次生裂隙, 出现的交叉裂纹将主裂纹互相连通;

说明不同温差产生的热应力决定了煤样的损伤程度, 增加了瓦斯的流动路径。

(3) 温度冲击过程中产生了大量的声发射信号, 声发射信号的产生主要集中在前 600 s, 且温差越大所产生的声发射能量越高; 计算结果表明, 温度冲击产生的热应力在煤样表面切线方向最大, 超过了煤样的抗拉强度, 导致了内部裂隙的扩展和贯通。煤岩内部矿物成分的不均匀性和热胀冷缩系数不同是产生热应力破煤的根本机制。

参考文献(References):

- [1] FENG Z, ZHOU D, ZHAO Y, et al. Study on microstructural changes of coal after methane adsorption[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 30(5): 28 - 37.
- [2] SUN W J, FENG Y Y, JIANG C F, et al. Fractal characterization and methane adsorption features of coal particles taken from shallow and deep coalmine layers[J]. Fuel, 2015, 155(9): 7 - 13.
- [3] MITRA A, HARPALANI S, LIU S M. Laboratory measurement and modeling of coal permeability with continued methane production: Part 1—Laboratory results[J]. Fuel, 2012, 94(1): 110 - 116.
- [4] 王登科, 彭明, 付启超, 等. 瓦斯抽采过程中的煤层透气性动态演化规律与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 704 - 712.(WANG Dengke, PENG Ming, FU Qichao, et al. Dynamic evolution laws of coal permeability and numerical simulation during gas drainage in coal seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 704 - 712.(in Chinese))
- [5] WANG D K, WEI J P, FU Q C, et al. Seepage law and permeability calculation of coal gas based on Klinkenberg effect[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(5): 1 973 - 1 978.
- [6] 魏建平, 秦恒洁, 王登科, 等. 含瓦斯煤渗透率动态演化模型[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1 555 - 1 561.(WEI Jianping, QIN Hengjie, WANG Dengke, et al. Dynamic permeability model for coal containing gas[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1 555 - 1 561.(in Chinese))
- [7] 孙赞东. 非常规油气勘探与开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 25 - 32.(SUN Zandong. Unconventional oil and gas exploration and development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 25 - 32.(in Chinese))
- [8] BRYANT J E, HAGGSTROM J. An environmental solution to help reduce freshwater demands and minimize chemical use[J]. SPE 153867, 2012: 1 - 10.
- [9] HOLTSCLOW J, LOVELESS D, SAINI R, et al. Environmentally focused crosslinked-gel system results in high retained proppant-pack conductivity[J]. SPE 153867, 2011: 2 803 - 2 815.
- [10] COETZEE S, NEOMAGUS H W J P, BUNT J R, et al. The transient swelling behavior of large(-20 + 16 mm) South African coal particles during low-temperature devolatilisation[J]. Fuel, 2014, 136(10): 79 - 88.
- [11] 任韶然, 范志坤, 张亮, 等. 液氮对煤岩的冷冲击作用机制及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增 2): 3 790 - 3 794.(REN Shaoran, FAN Zhikun, ZHANG Liang, et al. Mechanisms and experimental study of thermal-shock effect on coal-rock using liquid

- nitrogen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp.2): 3 790 - 3 794.(in Chinese))
- [12] 张春会, 李伟龙, 王锡朝, 等. 液氮溶浸煤致裂的机理研究[J]. 河北科技大学学报, 2015, 36(4): 425 - 430.(ZHANG Chunhui, LI Weilong, WANG Xichao, et al. Research of fracturing mechanism of coal subjected to liquid nitrogen cooling[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(4): 425 - 430.(in Chinese))
- [13] ZHAI C, QIN L, LIU S, et al. Pore structure in coal: pore evolution after cryogenic freezing with cyclic liquid nitrogen injection and its implication on coalbed methane extraction[J]. Energy and Fuels, 2016, 30(7): 6 009 - 6 020.
- [14] 李和万, 王来贵, 牛富民, 等. 冷热交替作用致煤样裂隙结构损伤试验[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(1): 40 - 43.(LI Hewan, WANG Laigui, NIU Fumin, et al. Experimental study on the structure crack damage of the coal samples via the abrupt temperature-changing cycles[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(1): 40 - 43.(in Chinese))
- [15] 李和万, 王来贵, 牛富民, 等. 液氮对不同温度煤裂隙冻融扩展作用研究[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(10): 121 - 126.(LI Hewan, WANG Laigui, NIU Fumin, et al. Study on effect of freeze-thaw cycle with liquid nitrogen on crack extension of coal at different initial temperatures[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(10): 121 - 126.(in Chinese))
- [16] WANG D, YAO B, GAO Y, et al. Effect of cyclic temperature impact on coal seam permeability[J]. Thermal Science, 2017, 21(Supp.1): 351 - 357.
- [17] 魏建平, 孙刘涛, 王登科, 等. 温度冲击作用下煤的渗透率变化规律与增透机制[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 1 919 - 1 925.(WEI Jianping, SUN Liutao, WANG Dengke, et al. Change law of permeability of coal under temperature impact and the mechanism of increasing permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 1 919 - 1 925.(in Chinese))
- [18] 孟巧荣, 赵阳升, 于艳梅, 等. 不同温度下褐煤裂隙演化的显微CT试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2 475 - 2 483.(MENG Qiaorong, ZHAO Yangsheng, YU Yanmei, et al. Micro-CT experimental study of crack evolution of lignite under different temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2 475 - 2 483.(in Chinese))
- [19] 孟巧荣, 赵阳升, 胡耀青, 等. 褐煤热破裂的显微CT实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(5): 855 - 860.(MENG Qiaorong, ZHAO Yangsheng, HU Yaoqing, et al. Micro-CT experimental of the thermal cracking of brown coal[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(5): 855 - 860.(in Chinese))
- [20] 于艳梅, 胡耀青, 梁卫国, 等. 应用CT技术研究瘦煤在不同温度下孔隙变化特征[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 637 - 644.(YU Yanmei, HU Yaoqing, LIANG Weiguó, et al. Study on pore characteristics of lean coal at different temperature by CT technology[J]. Chinese Journal of Geophys, 2012, 55(2): 637 - 644.(in Chinese))
- [21] 于艳梅, 胡耀青, 梁卫国, 等. 瘦煤热破裂规律显微CT试验[J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1 696 - 1 700.(YU Yanmei, HU Yaoqing, LIANG Weiguó, et al. Micro-CT experimental research of lean coal thermal cracking laws[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1 696 - 1 700.(in Chinese))
- [22] 于伟东, 梁卫国, 于艳梅, 等. 三轴等压条件下 400 °C 内褐煤变
- 形及结构衍化实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1 718 - 1 725.(YU Weidong, LIANG Weiguó, YU Yanmei, et al. Experiment investigation of lignite deformation and structure evolution under triaxial constant stress at temperature below 400 °C[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7): 1 718 - 1 725.(in Chinese))
- [23] 冯子军, 赵阳升. 煤的热解破裂过程——孔裂隙演化的显微CT微观特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 103 - 108.(FENG Zijun, ZHAO Yangsheng. Pyrolytic cracking in coal: meso-characteristics of pore and fissure evolution observed by micro-CT[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 103 - 108.(in Chinese))
- [24] 王笑然, 王恩元, 刘晓斐, 等. 裂隙砂岩裂纹扩展声发射响应及速率效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6): 1 446 - 1 458.(WANG Xiaoran, WANG Enyuan, LIU Xiaofei, et al. Macro-crack propagation process and corresponding AE behaviors of fractured sandstone under different loading rates[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(6): 1 446 - 1 458.(in Chinese))
- [25] 张国凯, 李海波, 夏祥, 等. 单轴加载条件下花岗岩声发射及波传播特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1 133 - 1 144.(ZHANG Guokai, LI Haibo, XIA Xiang, et al. Experiment study on acoustic emission and wave propagation in granite under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1 133 - 1 144.(in Chinese))
- [26] 严宗达, 王洪礼. 热应力[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993: 261 - 284.(YAN Zongda, WANG Hongli. Thermal stress[M]. Beijing: Higher Education Press, 1993: 261 - 284.(in Chinese))
- [27] 竹内洋一郎. 热应力[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 172 - 180.(TAKEUCHI Y. Thermal stress[M]. Beijing: Science Press, 1997: 172 - 180.(in Chinese))
- [28] 吴基文, 樊成. 煤块抗拉强度的套筒致裂法实验室测定[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(1): 19 - 21.(WU Jiwen, FAN Cheng. Laboratory test on tensile strength of coal piece by sleeve fracturing technique[J]. Coal Geology and Exploration, 2003, 31(1): 19 - 21.(in Chinese))
- [29] 齐庆新. 煤的直接单轴拉伸特性的试验研究[J]. 煤矿开采, 2001, (4): 15 - 18.(QI Qingxin. Study experimental on direct uniaxial tensile properties of coal[J]. Coal Mining Technology, 2001, (4): 15 - 18.(in Chinese))
- [30] OKUBO S, FUKUI K, QI Q. Uniaxial compression and tension tests of anthracite and loading rate dependence of peak strength[J]. International Journal of Coal Geology, 2006, 68(3/4): 196 - 204.
- [31] 袁振明, 马羽宽, 何泽云. 声发射技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985: 115 - 120.(YUAN Zhenming, MA Yukuan, HE Zeyun. Acoustic emission technology and its application[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1985: 115 - 120.(in Chinese))
- [32] 刘淑敏. 温度冲击下煤的力学特性与本构模型研究[硕士学位论文][D]. 焦作: 河南理工大学, 2017: 13 - 30.(LIU Shumin. Research on mechanical properties and constitutive model of coal under temperature impact[M. S. Thesis][D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2017: 13 - 30.(in Chinese))
- [33] 孙刘涛. 温度冲击下煤的微观结构变化与渗透性特性研究[硕士学位论文][D]. 焦作: 河南理工大学, 2017: 23 - 32.(SUN Liutao. Research on increasing-permeability and microstructure evolution law of coal under temperature shock[M. S. Thesis][D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2017: 23 - 32.(in Chinese))