

赵洪宝,胡桂林,王飞虎,等.局部荷载下含中心孔洞煤体裂纹扩展特征量化分析[J].煤炭学报,2017,42(4):860-870. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0798

Zhao Hongbao, Hu Guilin, Wang Feihu, et al. Quantitative analysis of crack expansion in specimens of coal having a single pre-existing hole[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4):860-870. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0798

# 局部荷载下含中心孔洞煤体裂纹扩展特征量化分析

赵洪宝<sup>1,2</sup>, 胡桂林<sup>1</sup>, 王飞虎<sup>1</sup>, 琚楠松<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083; 2. 河南理工大学深井瓦斯抽采与围岩控制技术国家地方联合工程实验室,河南焦作 454000)

**摘要:**采用高清数码摄像机和红外热成像仪,对含中心孔洞煤体试件在局部荷载作用下的裂纹扩展规律进行系统的试验研究,研究分析煤体试件在不同加载面积作用下试件表面裂纹的萌生、扩展、贯通,直至形成宏观破坏的整个过程中表现出的特征与规律。试验结果表明:局部荷载作用下含中心孔洞煤体试件裂纹扩展是加载条件和宏观中心孔洞耦合作用结果,裂纹扩展路径受其主导作用,而由孔、裂隙系统引起的非均质性则占据从属地位;均布荷载条件下,孔洞周边形成拉、剪应力区,且裂纹由此起裂,孔洞是引起应力集中的主导因素,但随着加载面积的改变,孔洞的主导地位被颠覆,应力集中强弱顺序发生突转,起裂位置由孔洞周边转向荷载临界处;受载面积对含中心孔洞试件裂纹扩展的影响具有区域性特点,且明显集中出现于有载荷作用的区域;随局部荷载的增加,初始裂纹的尺度(裂纹宽度和长度)不断增加,且裂纹的发展方向出现明显的非平直化趋势。

**关键词:**煤体;局部荷载;裂纹扩展;量化分析;红外热成像

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)04-0860-11

## Quantitative analysis of crack expansion in specimens of coal having a single pre-existing hole

ZHAO Hong-bao<sup>1,2</sup>, HU Gui-lin<sup>1</sup>, WANG Fei-hu<sup>1</sup>, JU Nan-song<sup>1</sup>

(1. School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. State and Local Joint Engineering Laboratory for Gas Drainage & Ground Control of Deep Mines, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Experimental tests about the crack propagation of coal specimens having a central borehole under local load were conducted with high definition video camera, infrared thermal imaging instrument and relevant software. The characteristics in the whole process of crack initiation, propagation, coalescence under different local loads were analyzed. The results showed that the crack propagation in the specimens was caused by the coupling effect of load conditions and macro center borehole, and the route of crack was also dominated by it. However, the anisotropism rooted in micropores played a subordinate role. It would cause tensile or shear stress area around the borehole under uniform load, which was a key factor for crack propagation on that conditions. Macro center borehole was the main factor to cause stress concentration, but the dominate position of it would subvert with the change of load area, and the sequence of stress concentration occurred suddenly, the position of crack initiation was turned from peripheral borehole to the critical point of the load. The influence of load area on the crack propagation in the specimens having a central borehole had a regional characteristic, which occurred obviously in the region of load area. With local load increase, the scale of the initial crack (crack width and length) increase, and the crack direction showed the trend of non-straight.

收稿日期:2016-07-02 修回日期:2016-12-20 责任编辑:毕永华

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51474220);深井瓦斯抽采与围岩控制技术国家地方联合工程实验室开放基金资助项目(G201603);中央高校基本科研业务费资助项目(2009QZ03)

作者简介:赵洪宝(1980—),男,山东德州人,副教授,博士,博士生导师。E-mail:hongbaozhao@126.com

**Key words:** coal-mass; local load; crack propagation; quantitative analysis; infrared thermal imaging

煤体是一种非常重要的工程介质,由于其特殊的形成机制及后期地质构造作用,造成煤岩内部包含节理和孔隙、裂隙等不同宏、细观结构及其可能受到非均匀载荷作用,是造成煤体力学特性复杂及煤体巷道围岩控制困难的根本原因,基于此,煤体巷道围岩稳定性研究一直是采矿等行业研究的热点。煤体巷道围岩破坏可看成是在非均匀载荷条件下围岩裂纹萌生、扩展、贯通,最终造成围岩宏观破坏的过程。因此,研究非均匀载荷作用下的受开挖影响范围内的煤体的裂纹萌生及其演化规律,对于掌握煤体相关特性、指导现场工程实践均具有重要意义,同时也有助于建立可用于准确描述实际工程条件下煤体表现出的复杂力学特性的本构模型。

由于地质构造作用及组成成分特殊性,我国大部分煤体节理、裂隙、孔洞等宏细观结构发育较为充分,由天然煤体加工而成的原煤试样通常受到原煤样品采集、煤样人工加工等的二次扰动,由此造成的非均质性无疑是原煤试样的一条重要属性,是造成其在特定条件下的裂纹扩展特征及力学特性自身差异大并与均质岩石材料差异明显的重要原因,也是间接造成学界对原煤研究不充分、认识不清晰、把握不牢靠的重要原因,特别是在含有宏观孔洞条件下,这种劣势将更加明显。其中,尹光志等<sup>[1-2]</sup>、胡雄等<sup>[3]</sup>、曹树刚等<sup>[4]</sup>、张朝鹏等<sup>[5]</sup>、许江等<sup>[6]</sup>分析并讨论了不同瓦斯压力、加卸载条件、温度、应力及原煤的变质程度、孔隙特征对原煤渗透特性的影响;许江等<sup>[7]</sup>总结了原煤剪切破坏过程中原生裂纹的宏细观演化规律;宋义敏等<sup>[8]</sup>利用红外热成像仪,研究了原煤破坏过程中的温度演化特征及其与裂纹演化之间的关系;王云飞等<sup>[9]</sup>总结了原煤破坏过程的声发射和应变能变化规律,并结合煤岩损伤萌生、成核、扩展和贯通的全过程探讨了其损伤演化机制。考虑到煤体复杂的力学特性及其标准原煤试样加工的难易程度,业界广大学者的研究主要倾向于易于加工、成型规则且忽视自身宏细观结构的类煤体材料,其中型煤便是一种极具代表性的类煤体材料。程立朝等<sup>[10]</sup>、许江等<sup>[11]</sup>分别研究了黏结剂含量、不同黏结剂配比型煤的力学特性及渗透特性;彭守建等<sup>[12]</sup>研究了含瓦斯煤岩(原煤、型煤)在剪切破坏过程中的裂纹演化及分形特征。综上所述可知,学界对煤体的研究主要集中于完整原煤试样及型煤试样在不同条件下的渗透特性、力学特性、破坏模式等,并取得了较为理想的研究成果。但是,现有研究均未考虑到非均匀载荷及人工开挖对煤体裂纹扩

展的影响。对于实际工程而言,煤体自身的孔隙、裂隙介质属性造成的非均质性及其可能受到的非均匀载荷作用,是造成煤体力学特性、破坏模式与常规条件下不同的主要原因。

鉴于此,本文将在实验室条件下,以山西霍州煤电集团干河矿煤体为试验对象,对其进行局部加载来模拟其在真实条件下可能受到的非均匀载荷(局部载荷可以考虑为非均匀载荷的一种简单形式,在实验室也最易实现),借助相关试验设备来研究其在该非均匀载荷作用下裂纹(原生裂纹、次生裂纹)的扩展规律。

## 1 试验方案和试验设备

### 1.1 试验方案

本试验所选用煤样均取自山西霍州煤电集团干河矿,严格按照国际岩石力学学会试验建议方法的要求,采用湿式加工法将其加工成70 mm的标准方型试件。试验前,选取标准试样2组8个,并在其中心位置钻取直径8 mm的垂直贯穿孔洞,如图1(a)所示。

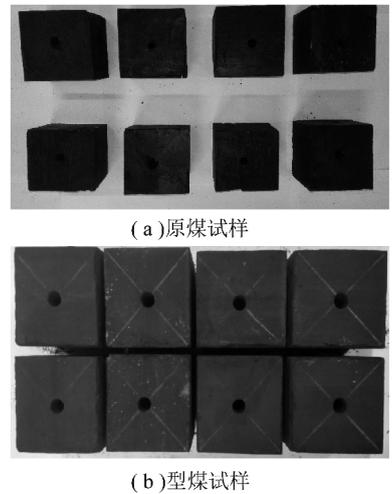


图1 试样

Fig. 1 Schematic of specimens

同时,为了验证型煤在局部载荷条件下的裂纹扩展特征能否表征原煤,本试验将文献[13]中所描述的能够作为原煤相似模拟材料的水泥黏结剂配比,并根据本课题组已获得的配比经验参数获得相关配比(煤粉:水泥:水=10:2.4:1.6),借助本课题组的型煤制备装置采用此配比制备70 mm的标准方型试件,选取标准方型型煤2组8个,并在其中心位置钻取直径8 mm的垂直贯穿孔洞,如图1(b)所示。

试验时,分别对原煤试样、型煤试样进行相对加载面积为 $S$ , $3S/4$ , $2S/4$ , $S/4$ 的局部加载试验,加载速率

控制在 0.5 MPa/s, 每组试验对 4 个试样展开试验, 共进行 4 组(原煤试样 2 组、型煤试样 2 组), 其加载示意如图 2 所示。

## 1.2 试验设备

本试验设备采用自行研制开发的局部荷载加载试验装置(图 3(a))与高清数字摄像机(图 3(b)), 结合红外热成像仪及其配套软件对试件表面微细结构及温度的演化进行实时观测。局部荷载加载试验装置通过加载机构设置一定加载面积后对试件进行加载, 以实现局部荷载加载的目的; 高清数字摄像机为索尼 HDR-PJ600 型, 动态摄影采用 HD 模式(1920×1080/50i(FX, FH)), 图像采集速率为 50 帧/s; 红外热成像仪为优利德生产的 uti-160A 型, 灵

敏度为 0.08, 辐射系数为 0.92。

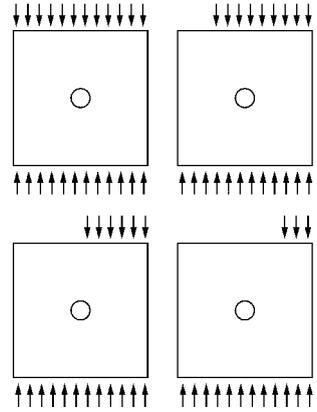


图 2 试件加载示意

Fig. 2 Schematic of loaded specimens

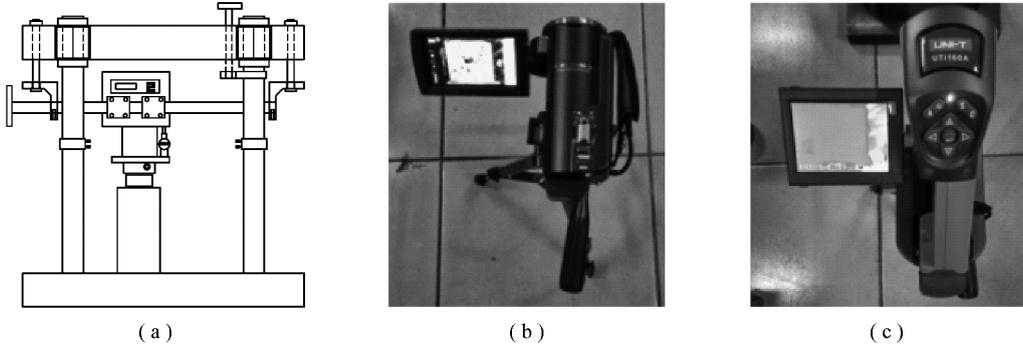


图 3 主要试验装置和观测装置

Fig. 3 Local load testing device and observation device

## 2 表面裂纹演化特征量化参数

煤体试件表面裂纹及温度场演化特征的量化是研究不同热力学环境下多煤体扩展规律的重要指标, 也是其重要组成部分, 其评价成功与否, 关键在于裂纹及温度场演化特征量化指标选取的科学性及量化的准确性。煤体试件的破坏可认为是在加载过程中内部裂纹的扩展、贯通造成的, 且煤体试件在加载过程中通常伴随有红外辐射现象。因此, 对煤体试件裂纹的直接观测及对表面温度场演化特征的间接观测, 将有助于通过量化指标来反映煤体的破坏程度及其力学特征。本文将引用参考文献[13]中表面裂纹有效贯通率、表面裂纹瞬时有效贯通速度、熵理论、方差和笔者设定的煤体试件裂纹起裂位置、煤体试件裂纹起裂应力这 6 个常用指标对其进行表征, 其中表面裂纹有效贯通率反映煤体试件的破损程度, 而表面裂纹瞬时有效贯通速度、基于熵理论及方差的表面温度演化特征反映煤体试件破损的剧烈程度, 煤体试件裂纹起裂位置、煤体起裂应力直接反映局部加载对煤体试件裂纹扩展的影响程度, 本文以期通过上述 6 个指标来对煤体试件破坏过程中表面裂纹扩展特征进行量

化分析。

### 2.1 表面裂纹瞬时有效贯通率

将  $t_i$  时刻裂纹瞬时有效表面裂纹贯通量  $a_i$  与多孔介质试件轴向长度  $b$  的比值的百分数定义为表面裂纹瞬时有效贯通率  $p_i$ :

$$p_i = \frac{a_i}{b} \times 100\% \quad (1)$$

### 2.2 表面裂纹瞬时有效贯通速度

将  $t_i$  时刻的瞬时有效表面裂纹贯通量与前一时刻  $t_{i-1}$  的瞬时有效表面裂纹贯通量之差与所经历的时间之比, 定义为表面裂纹瞬时有效贯通速度  $v_i$ :

$$v_i = \frac{a_i - a_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (2)$$

### 2.3 基于熵理论的表面温度场量化表征

熵通常用来表示任何一种能量在空间中的分布的均匀程度, 能量分布均匀程度和熵呈正相关能量分布越均匀, 熵值越大, 其表达式为

$$I = - \sum_{n=1}^N P_n \lg P_n \quad (3)$$

其中,  $I$  为熵值;  $N$  为系统的  $N$  个状态;  $P_n$  为对应状态下  $n$  事件的概率。对熵进行归一化处理, 并用  $H(H=$

0~1)表示,如式(4)所示:

$$H = I/I_g N \quad (4)$$

对试件加载某个时间对应热像根据温度的最高差值进行划分等级,计算该张热像在此等级下的熵值,不同加载条件可能会造成试件表面温度场的变化,在数值上主要体现在熵值的变化上,当局部荷载加载到一定程度时,可能会导致变形集中带内温度升高,红外热辐射场温度分布范围变广,试件表面能量差值变大,反映在数据上表现为熵值降低。

## 2.4 基于方差及方差分析的表面温度场量化表征

采用数理统计中方差的概念反映煤体试件表面任一点温度与数学期望的偏离程度,其表达式为

$$S_D^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_0)^2 \quad (5)$$

式中, $S_D^2$ 为方差; $X_i$ 为第*i*个像元(共*n*个像元)的辐射温度值; $X_0$ 为的 $X_i(i=1,2,3,\dots,n)$ 的平均值。

将不同加载面积看成是影响试验的单一因素,利用单因子方差分析考察其对试验指标的影响程度。

## 3 试验过程及试验结果

### 3.1 试验过程

为排除试件自身孔隙、裂隙系统复杂性造成的差异(特别是针对原煤试件),试验过程中,分别重复进行2组相关试验(分别编号YM-I, YM-II和XM-I, XM-II),以期总结加载条件、宏观中心孔洞对煤体裂纹扩展特征、煤体宏观破坏模式等的影响规律,并找到关于原煤裂纹扩展的普遍规律。试验时,依次进行相对加载面积为 $S, 3S/4, 2S/4, S/4$ 的局部荷载加载试验,并利用高清数字摄像机及红外热成像仪收集相关试验数据以便于进行后续分析。

在对原煤试样进行面积为 $S$ 的加载时,利用高清数字摄像机对其表面进行拍摄并对拍摄视频按帧提取图片,在获得的图片中并未观测到明显裂纹扩展,而是快速的突发式破坏(YM-I-1, YM-II-1均为破坏前一张图片),可能是高清摄像器帧数(最大帧数为50帧)较低造成的。而在 $3S/4, 2S/4, S/4$ 这3种不同加载面积加载条件下,裂纹(原煤试件主要是次生裂纹)扩展长度、裂纹数目、裂纹扩展尺度及扩展速度均随着荷载的增加而增加,裂纹的发展方向呈现明显的非平直化趋势,且形成的裂纹(原煤试件的次生裂纹)均出现在荷载作用范围内,试件表面裂纹扩展面较粗糙,部分区域裂纹扩展断断续续,与均质试件有较大区别。原煤试件在此条件下的破坏主要是由次生裂纹的贯通造成的,而原生裂纹通常体现在其扩展尺度上的微小变化,原生裂纹(数目、空间几

何状态等)在煤体裂纹扩展过程中占据次要地位,其影响程度明显低于加载条件、宏观中心孔洞。同时,从试样破坏的角度来看,原煤试件表现出明显的突发式的脆性破坏,而型煤试样和原煤试样并未保持一致,偏向于渐进式破坏。主要试件的裂纹扩展模式如图4所示。

### 3.2 试验结果

#### 3.2.1 起裂位置

煤体的孔隙、裂隙介质属性导致在非均匀载荷作用下研究裂纹扩展规律既要考虑原生裂纹,又要考虑次生裂纹(型煤只考虑次生裂纹),由于高清摄像机帧数限制,未能获取 $S$ 面积加载条件下裂纹(原生裂纹、次生裂纹)的扩展图像,后续分析将不再考虑此种加载情况,但在 $3S/4, 2S/4, S/4$ 面积局部荷载条件下,煤体的破坏通常是由次生裂纹的扩展造成的。在局部荷载加载条件下,相对加载面积对含中心孔洞煤体(型煤)试件裂纹的起裂位置影响显著,如图5所示,图中裂纹起裂位置的先后关系依次为a, b, c, d。单轴压缩条件( $S$ 面积加载条件下)下,如图5(b)(XM-I-1, XM-II-1)所示,次生裂纹1, 2均发育于孔洞周边,同时,加载过程中伴随有其他次生裂纹的萌生及扩展,如XM-I-1中裂纹3, XM-II-1中裂纹3和4,起裂位置c和c, d均处在试件顶端,并向下逐渐扩展,但试样最终破坏均是由发育于孔洞周边裂纹1和2的扩展造成的,裂纹3和4的扩展并不起主导作用,从而从侧面证明了在单轴加载条件下宏观中心孔洞对试样破坏产生的影响显著; $3S/4$ 加载条件下,原煤试件会产生2条裂纹贯道路径,其中1条不经过中心孔洞(图5(a)中YM-I-2, YM-II-2中裂纹2),裂纹起裂位置位于载荷加载临界处(b处),并先于另一条裂纹贯道路径造成试样贯通,另一条经过中心孔洞(图5(a)中YM-I-2, YM-II-2中裂纹1和3),裂纹起裂位置在孔洞周边或荷载临界处。而型煤试件只会产生1条裂纹贯道路径(图5(b)中XM-I-2, XM-II-2中裂纹1和2),裂纹最先起裂于荷载临界处(a点),并逐步向下扩展形成裂纹1,同时在孔洞周边产生裂纹起裂点b,并逐步向下扩展形成裂纹2,裂纹1和2的扩展、贯通最终造成试样的破坏; $2S/4$ 面积加载条件下,原煤试件裂纹扩展和型煤试件保持高度一致,裂纹最先起裂于荷载临界处(图5(a)中YM-I-3, YM-II-3, XM-I-3, XM-II-3中a点),并逐步向下扩展形成裂纹1,同时在孔洞周边产生裂纹起裂点b,并逐步向下扩展形成裂纹2,裂纹1和2的扩展、贯通最终造成原煤和型煤试样的破坏; $2S/4$ 加载条件下,型煤试样和原煤

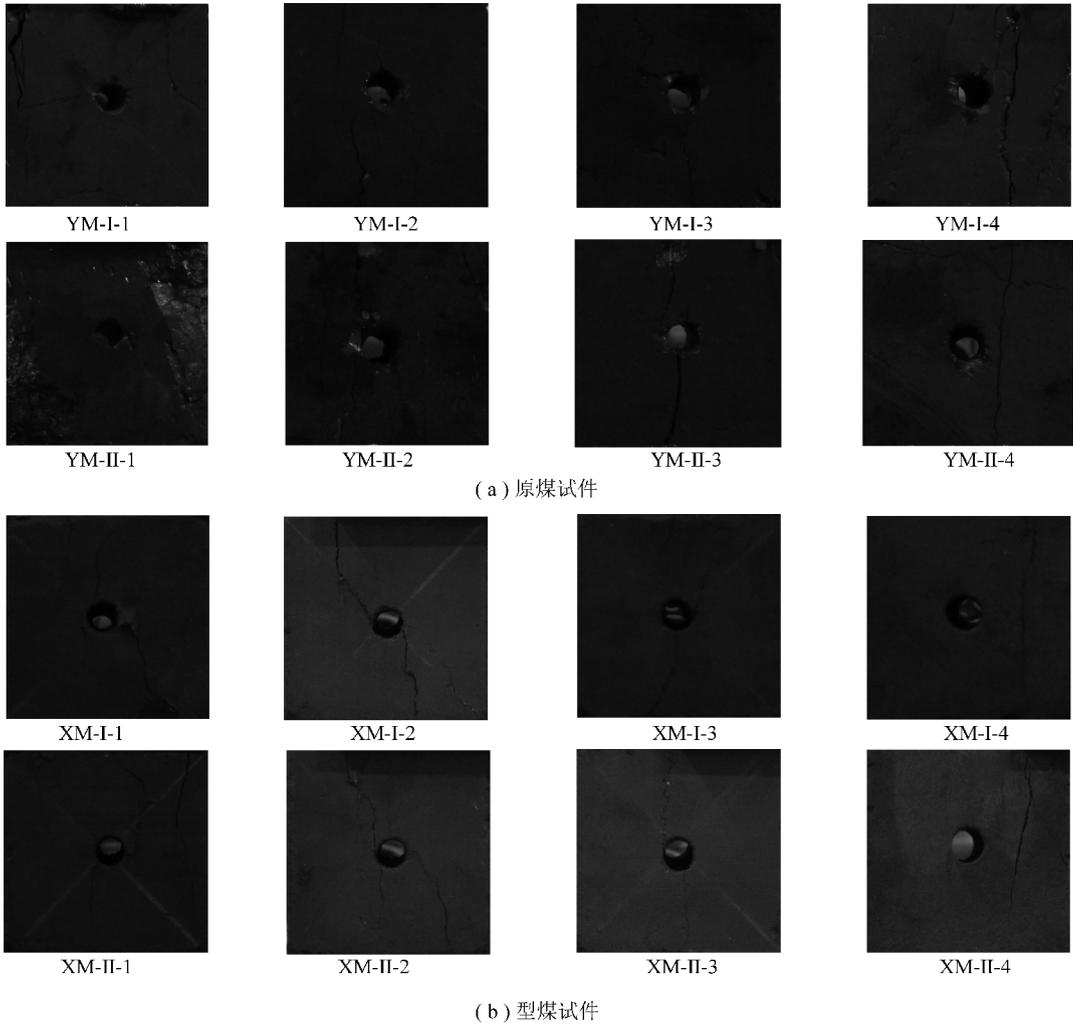


图 4 不同加载面积条件下试件的裂纹扩展模式

Fig. 4 Crack propagation model of specimens under the conditions of different load

试样裂纹扩展也保持高度一致,且只产生 1 条裂纹贯通路,裂纹萌生于荷载临界处(图 5(a)中 YM-I-4, YM-II-4, XM-I-4, XM-II-4 中 a 点),裂纹由上向下逐步扩展,但均不经过试样宏观中心孔洞,起裂位置(包括起裂顺序)是应力集中程度的 1 个重要考量指标,而应力集中程度承载的信息量丰富。在均布荷载条件下,孔洞周边形成拉、剪应力区,且裂纹由此起裂,孔洞是引起应力集中的主导因素,但随着加载面积的改变,孔洞的主导地位被颠覆,应力集中强弱顺序发生突转,起裂位置转向荷载临界处。由上可知,裂纹起裂位置受加载条件影响剧烈,局部荷载加载产生的应力集中明显大于孔洞引起的应力集中,并最终造成局部荷载临界处裂纹起裂早于孔洞周边裂纹起裂。

### 3.2.2 起裂应力

煤体材料破坏时,其内部细观裂纹起裂时的起裂应力与煤体的弹性模量关系密切。一般情况下,起裂应力会随着煤体材料弹性模量的增大而增大,表现出

正相关性,在本试验中,由于无法直接观察到煤体内部裂纹起裂,因此将试件表面裂纹起裂时所对应的应力定义为起裂应力,同时,考虑到加载面积对煤体材料起裂应力的影响,真实加载面积均取上下加载面积的平均值,以求更真实接近真实加载条件,其换算公式为

$$\sigma'_{ci} = \frac{2\sigma_{ci}}{1 + i/4} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

其中,  $\sigma'_{ci}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 为换算之后的起裂应力;  $\sigma_{ci}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 为采用底面积计算的起裂应力。

当采用底面积计算及换算面积加载时其加载条件与起裂应力之间变化曲线如图 6 所示(图中  $\sigma_{ci1}$ ,  $\sigma_{ci2}$ ,  $\sigma_{ci3}$  为采用底面积计算时 2 组试验的关系曲线,  $\sigma'_{ci1}$ ,  $\sigma'_{ci2}$ ,  $\sigma'_{ci3}$  为经过换算面积之后 2 组试验的关系曲线)。煤体可以看成是由煤、裂隙、孔洞、节理等组成的复杂裂隙系统介质,现有条件也很难对三维定位进行准确表征,因此,型煤在制作过程很难保持与原煤一致的复杂裂隙系统,更难以通过相似材料予以复

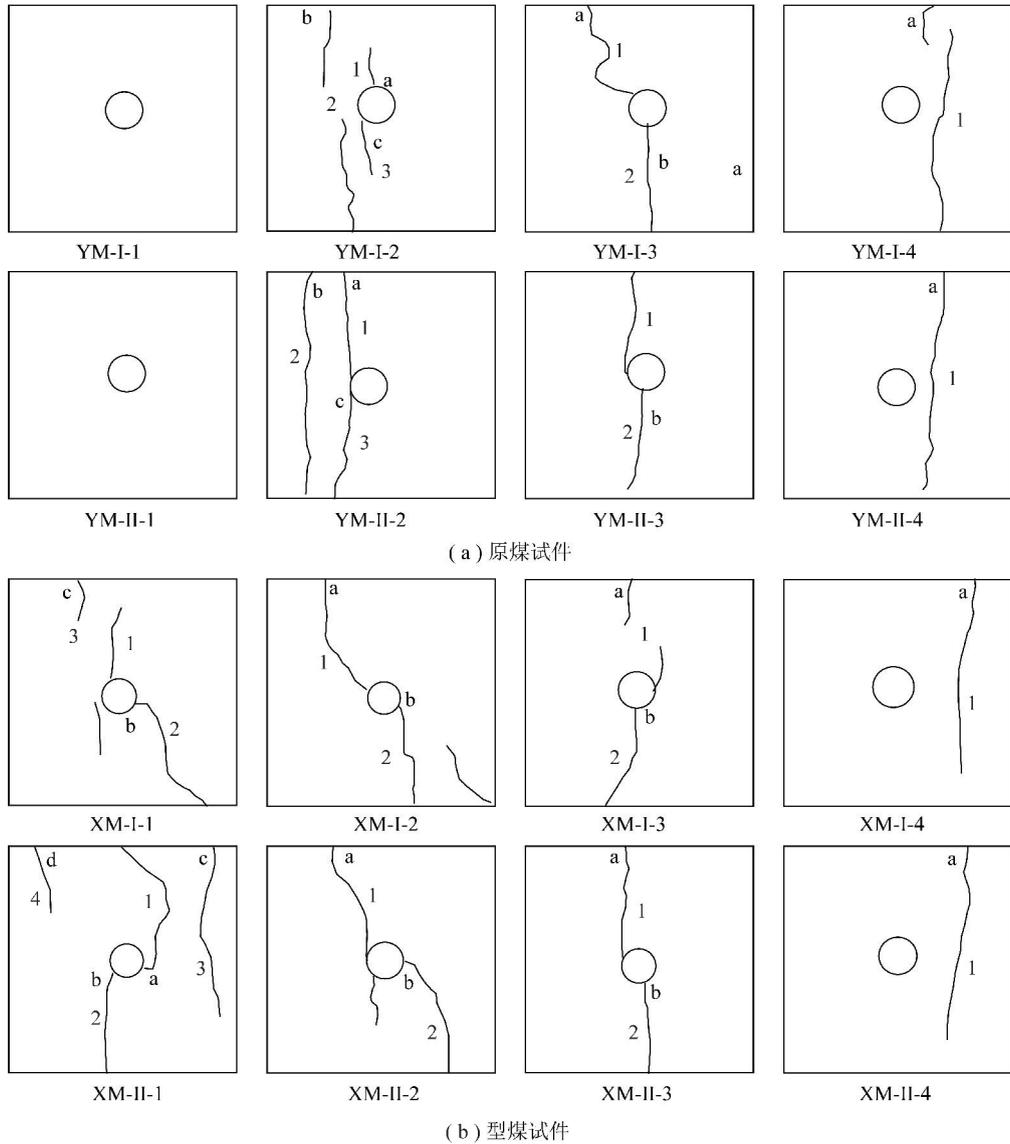


图 5 不同加载面积条件下试件描述

Fig. 5 Macroscopic fracture trace of specimens under the conditions of different load

制,人们在研究过程中往往忽略了这一裂隙系统(本文也未考虑对型煤预设复杂的裂隙系统)。从图中原煤的起裂应力数据可以看出,两组原煤起裂应力数据明显不具有—致性,其中—组甚至起伏不定,原煤试件组间差异明显较大,这也从侧面反映出原煤裂纹扩展规律的局部是无规律的,并不能从—组原煤起裂应力数据反映关于原煤的普遍规律。因此,本文对 2 组原煤起裂应力数据进行平均求值。而 2 组型煤起裂应力数据起伏不大,发展趋势也具有明显的—致性,说明型煤组间差异明显要小于原煤,同样,对 2 组数据进行平均求值。考虑到真实加载面积的原因,对原煤试件和型煤试件起裂应力进行换算(图 6(b))。从图中可以看出,在局部加载条件下,换算之后的裂纹起裂应力普遍高于换算之前的裂纹起裂应力,且这种差异随着相对加载面积的增加而减小,最终趋于—

致(S 面积加载条件下)。在换算与非换算条件下,随着相对加载面积的增加,裂纹的起裂应力呈增加的趋势,相对加载面积与起裂应力之间呈非线性关系。对于原煤试件和型煤试件,相对加载面积在 25% ~ 50%,裂纹的起裂应力变化相对急促;当加载面积在 50% ~ 75%,裂纹起裂应力变化相对缓和,超过 75% 之后,又变得急促;原煤试件和型煤试件中,相对加载面积与起裂应力之间均呈现明显的“倒 S”关系,只是这种关系的缓急变化程度有所不同,裂纹起裂应力随相对加载面积增大而增大的趋势并没有发生根本转变。

### 3.2.3 表面裂纹瞬时最大有效贯通率

煤体是一种典型的脆性材料,煤体试样表面裂纹扩展的时间点主要集中在峰值应力及以后,达到峰值应力之后,裂纹扩展速度极快,最终造成煤体试样的突发性破坏;而对于型煤试件,由于其内部裂隙、孔隙

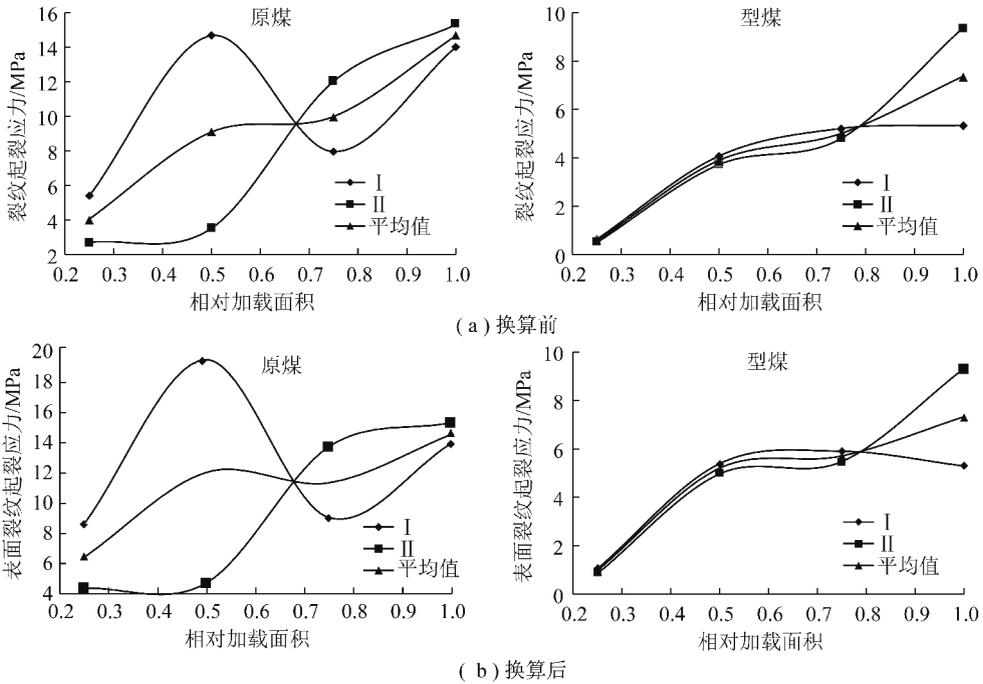


图6 相对加载面积与起裂应力之间关系曲线

Fig. 6 Curves between relative load area and crack initiation stress of coal and coal-like specimens

系统较为简单(通常未予以考虑),由孔隙、裂隙系统造成的应力集中程度往往较低,在达到峰值应力以前,裂纹已经开始扩展,型煤试样的破坏偏向于渐进式破坏。为比较加载条件对原煤、型煤试样裂纹扩展造成的差异,对高速相机拍摄的视频按每帧提取,获得每一时刻(间隔0.02 s)的高清图像,并根据图片对每一时刻的裂纹有效贯通尺寸进行测量,对获得数据进行处理,获得不同加载条件下每个时刻裂纹的有效贯通率,并选取瞬时最大有效贯通率,对数据进行整理得到表面瞬时最大有效贯通率与加载条件之间变化曲线,如图7所示。

从图7可以看出,在不同加载条件下,原煤试样和型煤试样相关曲线呈2种不同的形态,原煤试样的裂纹扩展通常与裂隙、孔隙系统、加载条件、宏观中心孔洞有关,而型煤试样裂纹扩展可看成只与加载条件、宏观中心孔洞有关。对于原煤试样,组间差异较为明显,但整体上(主要体现在平均值上)表面裂纹瞬时有效最大贯通率随相对加载面积呈先增大后平缓过渡到再急剧增大的“3段式”变化规律。笔者猜测在只考虑原煤试样裂隙、孔隙系统条件下,其表面裂纹瞬时有效最大贯通率随相对加载面积的增大而增大,而考虑到宏观中心孔洞时,存在1个影响范围( $[0.5S, 0.75S]$ ),在此范围内,宏观中心孔洞弱化了曲线继续增长趋势而呈现平缓过渡。而对于型煤试样,其自身裂隙、孔隙系统通常可以被忽略,因此,变面裂纹瞬时有效最大贯通率与加载条件、宏观中心

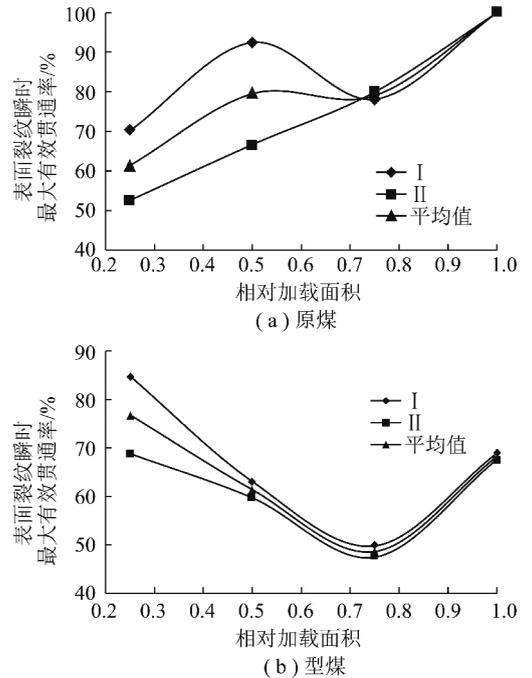


图7 表面裂纹瞬时最大有效贯通率与加载条件之间变化曲线

Fig. 7 Curves between instantaneous maximum effective penetration rate of surface crack and the conditions of different load hole density. 原煤试样裂纹扩展通常与裂隙、孔隙系统、加载条件、宏观中心孔洞密切相关,其表面裂纹瞬时有效最大贯通率随相对加载面积呈现先减小后增大的“2段式”变化规律,当相对加载面积小于某临界加载面积时,相对加载面积越小,试样表面裂纹瞬时贯通率越大,可以认为相对加载面积越小,造成试样应力集中程度越高,加载过程中能量快速集聚并瞬间释放从而造成裂纹快速

扩展。当相对加载面积继续增加时,相对加载面积造成的应力集中逐步弱化,宏观中心孔洞参与到试样的应力集中并逐步得到强化,但宏观中心孔洞造成应力集中占主导地位,造成此阶段试样表面裂纹瞬时有效最大贯通率随相对加载面积增大而增大。

### 3.2.4 表面裂纹瞬时有效最大贯通速度

表面裂纹瞬时有效贯通速度是衡量煤体试件破坏程度的1个重要指标,通常与加载条件密切相关,通常条件下,裂纹沿轴向加载方向扩展是造成试件破坏的直接原因。而试样表面裂纹瞬时有效最大贯通速度最能反映加载条件、宏观中心孔洞和裂隙、孔隙系统等对试样破坏产生的影响,由于试验设备帧数限制,本节只能对3.2.3节中相关数据进行处理,并根据式(2)计算出表面裂纹瞬时有效最大贯通速度,试验数据处理得到表面裂纹瞬时最大有效贯通速度和加载条件变化曲线如图8所示。从图中可以看出,原煤试样、型煤试样表面裂纹瞬时有效最大贯通速度与加载条件之间关系曲线与3.2.3节中保持一致,也从侧面印证3.2.3节中结论。在同一加载条件下,原煤试样表面裂纹瞬时有效最大贯通速度明显要高于型煤试样,这主要还是原煤试样自身的复杂特性造成的。从3.2.3节和本节数据可以看出,现有条件下型煤试件并不能完全真实表征原煤在局部加载条件下的裂纹扩展特征,关于型煤表征原煤的相关研究还需考虑更多因素。

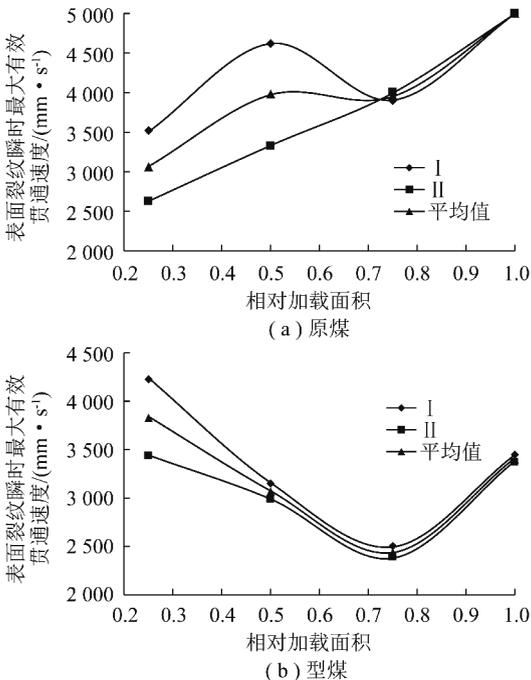


图8 表面裂纹瞬时最大有效贯通速度和加载条件之间变化曲线  
Fig. 8 Curves between instantaneous maximum effective penetration velocity of surface crack and the conditions of different load

### 3.3 试件表面温度演化规律

随着相关研究的深入,人们已经充分认识到岩石类材料的破坏源于其内部裂隙的萌生及扩展,而岩石在破坏过程中通常伴随有声、光、电、磁、热等现象。温度是多孔介质(煤、部分岩石、混凝土等)试件受力至破坏过程中的重要参考量,并与试件内部微裂隙的演化关系密切,其中国内外学者<sup>[14-21]</sup>利用热成像技术对岩石和混凝土等材料的损伤和破坏展开相关研究,但将红外热成像技术应用于局部荷载下煤体试件裂纹扩展研究的相关报道还很匮乏。因此,根据前人研究成果,本试验利用红外热成像仪采集在峰值应力条件下煤体试件表面瞬时温度数据,考虑到设备性能及试验时天气影响,笔者收集了原煤试件和型煤试件I,II组试件表面 $14 \times 14 = 196$ 个像元点的数据共16组,在不同温度区间分布个数见表1。由表1可知,在*i*S/4面积(*i*=1,2,3)加载条件下,其温度分布区间通常要广于*S*面积加载条件下,但3种加载条件下(局部荷载加载),其温度分布区间并无一致规律可循。这也可从温差(最高温度-最低温度)数值的大小来反映。同一加载条件下,原煤试件表面温度场温度要明显高于型煤试件,这主要由原煤试件自身裂隙、孔隙系统导致应力集中强烈造成的。局部荷载下,其温差数值普遍要大于单轴压缩条件下的温差数值,局部荷载加载造成试件表面温度分布区间及温差扩大,其根源在于局部加载造成应力集中并在短时间内产生明显的应力集中带,根据前人研究成果<sup>[17]</sup>,应力集中带内温度明显高于其他区域,应力集中程度越高,这种现象越显著。同时,由温度演化反馈出的应力集中带,通常也是裂纹扩展的潜在扩展区域。局部荷载有利于这种应力集中的快速生成,这种变化可在温度分布区间、温差2种参数上予以直观表达。

#### 3.3.1 基于熵的红外辐射温度场量化表征

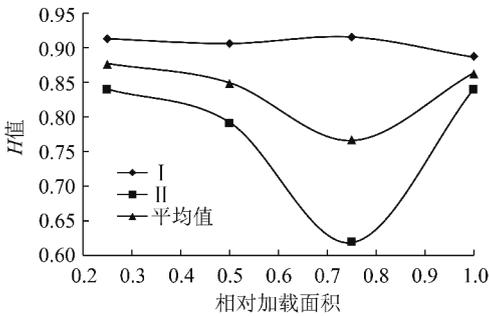
根据式(3)和式(4),对获取的原煤试件、型煤试件I,II组共16组数据的熵值进行归一化处理得到不同加载条件下的*H*值,并绘制加载条件与*H*值的关系,如图9所示。

通过归一化之后,*H*值的大小直接反映试件表面温度分布的均匀程度,从图9可以看出,原煤和型煤的*H*值曲线呈现两种不同趋势。原煤试件的*H*值(平均值)随相对加载面积的增大呈现“先减小,后增大”的“2段式”发展阶段,笔者认为宏观中心孔洞、加载条件对原煤试件表面温度分布影响剧烈,并占据主导地位;型煤试件的*H*值(平均值)随相对加载面积的增大呈现“先增大,后平缓过渡”的发展趋势,笔者同样认为加载条件、宏观中心孔洞对型煤试件表面

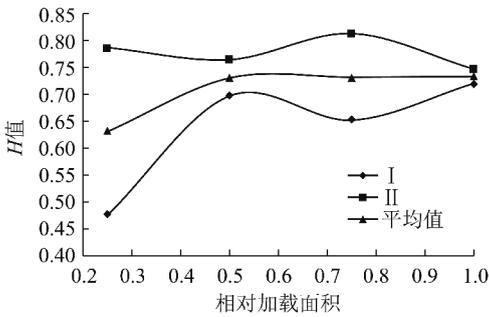
表 1 不同加载条件下不同温度区间像元点分布个数

Table 1 Number of pixels points in different temperature range under different load conditions

煤样	加载条件	温度区间/°C											温差/°C	
		7~7.5	7.5~8	8~8.5	8.5~9	9~9.5	9.5~10	10~10.5	10.5~11	11~11.5	11.5~12	12~12.5		12.5~13
原煤	S	—	—	5	13	11	17	39	46	35	27	3	—	4.810
	3S/4	—	—	—	5	10	14	32	35	42	33	20	5	4.820
	2S/4	—	1	1	16	39	41	38	37	18	3	2	—	4.490
型煤	S/4	1	4	15	24	38	19	18	27	17	24	7	2	5.500
	S	—	—	1	5	42	51	32	42	18	5	—	—	2.880
	3S/4	1	0	0	1	0	8	45	50	40	39	9	3	5.893
原煤	2S/4	—	—	1	1	21	41	40	39	38	12	2	1	4.450
	S/4	—	—	—	—	6	19	46	63	36	9	10	7	3.560
	S	—	—	—	—	1	4	45	93	41	12	—	—	2.530
型煤	3S/4	—	—	—	—	2	54	86	43	10	—	1	—	3.070
	2S/4	—	—	8	45	98	39	5	1	—	—	—	—	2.570
	S/4	—	12	100	68	11	4	—	—	—	—	—	1	5.240
原煤	S	3	57	94	34	8	—	—	—	—	—	—	—	1.990
	3S/4	4	24	57	79	21	11	—	—	—	—	—	—	2.780
	2S/4	8	10	54	72	31	7	4	—	—	—	—	—	3.310
	S/4	—	11	89	75	20	1	—	—	—	—	—	—	1.860



(a) 原煤



(b) 型煤

图 9 H 值和加载条件之间变化曲线

Fig. 9 Curves between H-value and the conditions of different load

温度分布影响剧烈,并占据主导地位。原煤试件、型煤试件 H 值变化的根源均在于加载条件和宏观中心孔洞耦合作用,其耦合作用强弱变化,导致了应力集中带的产生及温度的变化,由此反映在数值上的变

化,而二者 H 值产生两种不同变化趋势的主要原因在于加载条件、宏观中心孔洞耦合作用效果不一,最终造成二者发展趋势不一,但不可否认的是这种耦合作用的主导地位。同时,局部加载条件下原煤试件、型煤试件 H 值平均值要普遍小于 S 面积加载条件下,借此反映出局部荷载条件下原煤、型煤试件产生的应力集中显著,从而导致试件表面温度非均匀分布更加明显。

3.3.2 基于方差及方差分析的红外辐射温度场量化表征

对上述 I, II 组试验得到的数据运用数理统计知识进行分析,运用方差及方差分析对不同加载条件下试件表面红外辐射温度场进行量化表征,处理数据见表 2。

方差可以对加载过程中的试件表面辐射温度场的离散现象进行表征,方差越大,离散程度越大,加载条件对其影响程度较大,从表 2 可以看出,排除试验误差影响,局部荷载加载条件下其方差通常要比单轴压缩条件下方差大,这直接说明局部荷载加载造成加载过程中热像温度场偏离其均值的程度大,也说明了加载条件对试件热像温度场分布影响剧烈。经方差分析计算得到的 F 值(原煤  $F_I = 41.1452$ ,  $F_{II} = 53.4678$ ;型煤  $F_I = 1123.376$ ,  $F_{II} = 24.7823$ )均大于其临界值  $F_{crit} = 2.6163$ ,说明加载条件对试件表面

表2 不同加载条件下试件表面像元点温度方差分析结果

Table 2 Analysis of the variance of pixel temperature under the condition of different load

煤样	加载条件	方差	差异源	SS	df	MS	F	P	Fcrit	
原煤	I 组	S								
		3S/4	0.866 9							
		2S/4	0.942 1	组间	123.537 4	3	41.179 00	41.145 2	$1.09 \times 10^{-24}$	2.616 3
		S/4	0.650 3							
	II 组	S	1.543 9							
		3S/4	0.512 5							
		2S/4	0.554 1	组内	780.643 2	780	1.000 00	53.467 8	$1.97 \times 10^{-31}$	2.616 3
		S/4	0.612 2							
型煤	I 组	S								
		3S/4	0.182 4	组间	629.583 2	3	209.861 10			
		2S/4	0.193 3	组间	89.491 5	3	29.820 49	1 123.37 6	$1.5 \times 10^{-28}$	2.616 3
		S/4	0.151 9	组内	145.714 0	780	0.186 80			
	II 组	S	0.219 5							
		3S/4	0.152 4	组间	17.188 5	3	5.729 50			
		2S/4	0.281 7	组内	435.068 2	780	0.557 78	24.782 3	$2.53 \times 10^{-15}$	2.616 3
		S/4	0.361 4	组内	180.331 4	780	0.231 1			
		0.129 3								

注:SS为离均差平方和,也就是变量中每个数据点与变量均值新式的平方和;df为自由度;F为检验值;MS为均方,其值等于对应的SS除以df;P为在相应F值下的概率值;Fcrit为在相应显著水平下的F临界值。

热像温度场分布影响显著,是影响试件表面热像温度场分布的一个重要因素,与3.3.1节结论一致。

综合基于熵值、方差及方差分析的试件表面红外辐射温度场量化分析结果,局部加载导致试件表面温度分布非均匀化,偏离均值程度较大,温度分布的非均匀化通常与试件表面产生应力集中带有关,应力集中带往往与裂纹潜在扩展区域联系紧密,因此,试件表面红外辐射温度场演化特征很好的吻合了裂纹的扩展规律,得出的规律与由表1得出规律基本一致。

## 4 结 论

(1) 局部荷载作用下含中心孔洞煤体试件裂纹扩展是加载条件、宏观中心孔洞、孔隙系统、裂隙系统耦合作用结果。其中,加载条件、宏观中心孔洞在裂纹扩展路径中起主导作用,而由细观孔洞、原生裂纹等组构的孔隙、裂隙系统则据从属地位,且通常只能在裂纹潜在扩展区局部影响裂纹扩展(如原生裂纹尺度扩张、试件表面局部红外温度离散较大等),在整体上并未造成裂纹扩展规律的实质性改变。

(2) 均布荷载条件下,孔洞周边形成拉、剪应力区,且裂纹由此起裂,孔洞是引起应力集中的主导因素,但随着加载面积的改变,孔洞的主导地位被颠覆,应力集中强弱顺序发生突转,起裂位置由孔洞周边转向荷载临界处,并最终造成局部荷载临界处裂纹起裂早于孔洞周边裂纹起裂,这在煤体试件、原煤试件中均体现较为明显。

(3) 受载面积对含中心孔洞试件裂纹扩展的影响具有区域性特点,且表现出明显的集中出现于有载

荷作用的区域;随局部荷载的增加,初始裂纹的尺度(裂纹宽度和长度)不断增加,且裂纹的发展方向出现明显的非平直化趋势,试件受到的局部荷载作用越大,裂纹尺度发展越快、裂纹发展方向变化越剧烈。

(4) 局部荷载加载对含中心孔洞煤体试件裂纹扩展影响显著,可以通过裂纹扩展量化特征及试件表面热像温度场量化特征予以表征。但在部分规律上,原煤试件和型煤试件还存在差异,这主要是因为原煤中孔隙、裂隙系统难以预知,通过型煤难以对其进行三维重构。

## 参考文献(References):

- [1] 尹光志,李文璞,李铭辉,等. 加卸载条件下原煤渗透率与有效应力的规律[J]. 煤炭学报,2014,39(8):1497-1503.  
Yin Guangzhi, Li Wenpu, Li Minghui, et al. Permeability properties and effective stress of raw coal under loading-unloading conditions [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1497-1503.
- [2] 尹光志,李铭辉,李文璞,等. 瓦斯压力对卸荷原煤力学及渗透特性的影响[J]. 煤炭学报,2012,37(9):1499-1504.  
Yin Guangzhi, Li Minghui, Li Wenpu, et al. Influence of gas pressure on mechanical and seepage characteristics of coal under unloading condition [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1499-1504.
- [3] 胡雄,梁为,侯△靖,等. 温度与应力对原煤、型煤渗透特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(6):1222-1229.  
Hu Xiong, Liang Wei, Hou Sijing, et al. Experimental study of effect of temperature and stress on permeability characteristics of raw coal and shaped coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1222-1229.
- [4] 曹树刚,郭平,李勇,等. 瓦斯压力对原煤渗透特性的影响[J].

煤炭学报,2010,35(4):595-599.

Cao Shu, Guo Ping, Li Yong, et al. Effect of gas pressure on gas seepage of outburst coal [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4):595-599.

- [5] 张朝鹏,高明忠,张泽天,等.不同瓦斯压力原煤全应力应变过程中渗透特性研究[J].煤炭学报,2015,40(4):836-842.

Zhao Chaopeng, Gao Mingzhong, Zhang Zetian, et al. Research on permeability characteristics of raw coal in complete stress-strain process under different gas pressure [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4):836-842.

- [6] 许江,袁梅,李波波,等.煤的变质程度、孔隙特征与渗透率关系的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(4):681-687.

Xu Jiang, Yuan Mei, Li Bobo, et al. Experimental study of relationships between metamorphic grade, pore characteristics and permeability of coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4):681-687.

- [7] 许江,程立朝,谭皓月,等.原生裂纹对煤岩剪切破坏宏观演化规律的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(1):33-40.

Xu Jiang, Cheng Lichao, Tan Haoyue, et al. Effects of original cracks on macro-meso evolution law of coal shear failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1):33-40.

- [8] 宋义敏,杨小彬.煤破坏过程中的温度演化特征实验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(7):1344-1349.

Song Yimin, Yang Xiaobin. Experimental study of temperature evolution characteristics during deformation and destruction process of coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7):1344-1349.

- [9] 王云飞,黄正均,崔芳.煤岩破坏过程的细观力学损伤演化机制[J].煤炭学报,2014,39(2):2390-2396.

Wang Yunfei, Huang Zhengjun, Cui Fang. Damage evolution mechanism in the failure process of coal rock based on mesomechanics [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2):2390-2396.

- [10] 程立朝,许江,冯丹,等.黏结剂含量对含瓦斯剪切细观损伤力学特性影响的试验研究[J].岩土力学,2015,36(9):2467-2477.

Cheng Lichao, Xu Jiang, Feng Dan, et al. Effect of binder content on mesoscopic damage mechanical characteristics of gas-bearing coal subjected to shear load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9):2467-2477.

- [11] 许江,叶桂兵,李波波,等.不同黏结剂配比条件下型煤力学及渗透特性试验研究[J].岩土力学,2015,36(1):104-110.

Xu Jiang, Ye Guibin, Li Bobo, et al. Experimental study of mechanical and permeability characteristics of moulded coals with different binder ratios [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1):104-110.

- [12] 彭守建,许江,张超林,等.含瓦斯煤岩剪切破坏过程中裂纹演化及其分形特征[J].煤炭学报,2015,40(4):801-808.

Peng Shoujian, Xu Jiang, Zhang Chaolin, et al. Fractal characteristics of crack evolution in gas-bearing coal under shear loading [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4):801-808.

- [13] 程立朝,许江,冯丹,等.岩石剪切破坏裂纹演化特征量化分析

[J]. 岩石力学与工程,2015,34(1):31-39.

Cheng Lichao, Xu Jiang, Feng Dan, et al. Quantitative analysis on development of surface cracks of rocks upon shear failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1):31-39.

- [14] Luong M P. Infrared observation of failure process in plain concrete [A]. Proceeding of the Fourth International Conference on Durability of Building Materials and Components [C]. Oxford: Pergamon Press, 1987:870-878.

- [15] 耿乃光,崔承禹,邓明德.岩石破裂实验中的遥感观测与遥感岩石力学的开端[J].地震学报,1992(S1):645-652.

Geng Naiguang, Cui Chengyu, Deng Mingde. Remote sensing detection in rock fracture experiment and beginning of remote sensing rock mechanics [J]. Acta Seismologica Sinica, 1992(S1):645-652.

- [16] 董玉芬,于波,郝凤山,等.煤变形破裂过程中红外信息的实验研究[J].实验力学,2002,17(2):206-211.

Dong Yufen, Yu Bo, Hao Fengshan, et al. An experimental research on the infrared radiation in coal rupture [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(2):206-211.

- [17] Wu L X, Wang J Z. Features of infrared thermal image and radiation temperature of coal rock loaded [J]. Science in China Series D, 1998, 41(2):158-164.

- [18] 吴立新,刘善军,吴育华,等.遥感-岩石力学(IV)——岩石压剪破裂的红外辐射规律及地震前兆意义[J].岩石与力学工程学报,2004,23(4):539-544.

Wu Lixin, Liu Shanjun, Wu Yuhua, et al. Remote-sensing-rock mechanics(IV)-laws of thermal infrared radiation from compressively-sheared fracturing of rock and its meanings for earthquake omens [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4):539-544.

- [19] 刘善军,吴立新,张艳博,等.潮湿岩石受力过程红外辐射的变化特征[J].东北大学学报,2010,31(2):265-268.

Liu Shanjun, Wu Lixin, Zhang Yanbo, et al. Change feature of infrared radiation from loaded damp rock [J]. Journal of Northeastern University, 2010, 31(2):265-268.

- [20] 刘旭耀,胡才博,石耀霖.基于实验数据的岩石变形过程中温度场演化的数值模拟[J].中科院大学学报,2015,32(5):644-651.

Liu Xuyao, Hu Caibo, Shi Yaolin. Numerical simulation of temperature evolution during rock deformation process based on experiment data [J]. Journal of University of Chinese Academy of Science, 2015, 32(5):644-651.

- [21] 来兴平,孙欢,单鹏飞,等.急倾斜坚硬岩柱动态破裂“声-热”演化特征试验[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2285-2292.

Lai Xingping, Sun Huan, Shan Pengfei, et al. Acoustic emission and temperature variation in failure process of hard rock pillars sandwiched between thick coal seams extremely steep [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11):2285-2292.