

页岩变形过程中表面红外辐射演化规律探究*

杨少强¹, 杨栋¹, 王国营¹, 陈达常², 张洁莹¹

(1. 太原理工大学 采煤工艺研究所, 太原 030024; 2. 百色百矿集团有限公司, 广西 百色 533000)

摘要:为探寻含裂隙岩体变形失稳过程中表面红外辐射演化规律,对沉积类岩石油页岩内部原生孔隙裂隙进行CT扫描定位,以单轴压缩过程中红外监测实验为例证,探究其表面红外辐射温度演化规律,并以表面辐射最高温度、平均温度及变异系数三个统计量为指标进行分析。结果表明:(1)不同于花岗岩、大理岩、砂岩等完整岩石单轴压缩过程中表面温度随应力增加表现为上升现象,含孔隙、裂隙岩石油页岩表面温度随应力增加则表现为下降;但临近试件发生破坏,二者均会产生温度陡然升高的现象;(2)平均温度与最高温度曲线具有共性特征,随载荷增加,二者表现出明显的阶段性,即快速下降阶段-缓慢下降阶段-快速上升阶段,且最高温度曲线临近破坏具有更高的敏感性;(3)变异系数曲线可以较好地反应试件表面辐射温度离散程度,随应力增加,首先表现为快速增长,随后进入相对稳定期,临近破坏时刻再次出现快速增长;稳定期后变异系数曲线的快速增长预示岩石破坏;(4)油页岩变形失稳过程中表面温度下降与其内部气体逸出及孔隙、裂隙坍塌破坏相关。原生裂隙在加载初期表现为温度降低,临近破坏时该区域则转变为升温区。该研究为预测沉积类岩体特别是含有天然裂隙岩体变形失稳过程中表面红外辐射变化规律提供了新的内容。

关键词:页岩;红外辐射;变形失稳;单轴压缩

中图分类号:P84

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2019)01-0211-08

Study on the Evolution Law of Infrared Radiation on the Surface during Shale Deformation

Yang Shaoqiang¹, Yang Dong¹, Wang Guoying¹, Chen Dachang², Zhang Jieying¹

(1. Mining Technology Research Institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P.R. China;

2. Baise Baikuang Group Co. Ltd., Baise, Guangxi 533000, P.R. China)

Abstract: In order to explore the evolution of the surface infrared radiation during the deformation and instability of the fractured rock mass, the CT scanning of the primary pore fissure in the sedimentary rock oil shale was carried out. The infrared radiation temperature evolution law of the rock surface was investigated by the infrared monitoring experiment in the process of uniaxial compression, and three statistics of surface radiation maximum temperature, mean temperature and variation coefficient were used as indicators. The results show that: 1. Unlike granite, marble, sandstone and other intact rocks under uniaxial compression, the surface temperature increases with the increase of stress, while the surface temperature of oil shale with pores and fractures decreases with the increase of stress. However, when the specimen is nearby destroyed, the temperature rises sharply in both cases. 2. The average temperature and the highest temperature curves have common characteristics, the two show obvious stages characteristic with the increase of the load, that is, the rapid descent stage-the slow descent stage-the rapid rise stage.

* 收稿日期:2018-07-26(修改稿)

作者简介:杨少强(1989-),男,河北邢台人,博士生,主要从事油页岩热力耦合作用下破裂规律研究。

E-mail:875484998@qq.com

基金项目:国家自然科学基金(51704206, U1261102, 51374257)

The highest temperature curve has higher sensitivity the damage.3. The variation coefficient curve can better reflect the dispersion of surface radiation temperature of the specimen. With the increase of stress, it first shows rapid growth, then enters the relative stability period, and the rapid growth near the time of failure. The rapid growth of the variation coefficient curve after the stable period forebodes the rock destruction. 4. The decrease of surface temperature during the destabilization of oil shale is related to the internal gas escaping and the collapse of pores and fractures. The primary fracture appears to be a decreasing zone in loading, and it changes to a warming zone near failure. This study provides a new content for predicting the infrared radiation changes of sedimentary rock mass, especially in the process of deformation and instability of naturally fractured rock mass.

Keywords: shale; infrared radiation; deformed destabilization; uniaxial compression

0 引言

伴随着地壳运动以及人类地下工程活动的进行,由地应力显现所导致的各种地质破坏对人类生命及财产造成了巨大损失。由于地壳主要是岩体构成的,因此,针对岩体在地应力作用下的力学响应及岩体破裂前的前兆特征,成为了众多学者的主要研究方向。

岩石在外力作用下发生变形破坏,其实是内部能量积累与释放的过程。能量释放过程会以声发射、电磁辐射、RF 发射、光辐射的形式表现出来^[1],而在这些能量内部携带着丰富的有关岩石内部状态的信息,能否将这些信息准确提取并进行分析对于预测岩石破坏至关重要。基于热弹作用的相关理论,近年来众多学者开始利用红外热辐射预测岩石的变形破坏^[2-6],并得到岩石在破坏前普遍存在红外前兆。不同岩性的岩石,其红外前兆所对应的应力警戒值并不相同^[7-9]。岩石在变形破坏过程中,表面各点红外温度分布存在差异,在同一岩石试件不同部位的产热机理也存在差别^[10-13];对比不同岩性岩石在不同加载方式下表面红外辐射特征,得到红外辐射同时受加载方式及岩石性质二者影响^[14-18];通过对试件表面温度进行统计对比,利用统计量熵可以较好反映试件阶段特征,特征粗糙度与方差对于预测岩石破坏更具优势^[19-20]。现有研究所得结论均在一定程度上说明利用试件表面红外辐射随应力变化规律可以预测岩石变形破坏,并指导工程实践。

然而,以上研究主要是针对完整岩石在外部载荷作用下其表面红外辐射的变化规律,而对于含有天然层理、孔隙、裂隙及各向异性岩体的研究涉及较少。因此,本文选取油页岩作为实验对象,实验前利用 CT 对其内部孔隙、裂隙分布状况进行探测,在单轴压缩的加载方式下,研究表面平均辐射

温度、最高辐射温度及表面温度变异系数变化规律。

1 实验机理

由 Stefan-Boltzmann 定律指出,任何处于绝对零度以上的物体,都会向外界辐射电磁波,而其辐射强度与物体的温度满足以下公式^[21-22]:

$$J^* = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

式中: J^* 代表物体单位面积辐射出的总能量, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; ε 代表物体表面辐射率, $0 < \varepsilon < 1$; σ 代表 Stefan-Boltzmann 常量, $5.670\,373 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$; T 代表物体表面绝对温度, K 。

该定律可以很好地解释在常温状态下,物体表面将产生红外辐射,且辐射强度与物体的温度满足四次方的关系。

基于理想粘弹塑性材料与小扰动的假设以及速率无关各向同性或运动硬化塑性理论,得到热力耦合方程^[2]:

$$\rho C_v T_{,t} = \rho r + \text{div}(k \text{grad} T) - \left(\beta : \frac{4}{D} : E_{,t}^e \right) T + S : E_{,t}^f \quad (2)$$

式中: ρ 代表密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_v 代表恒定变形下的比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $T_{,t}$ 代表绝对温度对时间的导数, $\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$; r 代表热源; div 代表散度算子; k 代表热传导率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; grad 代表梯度算子; β 代表热膨胀矩阵系数, K^{-1} ;“:”代表标量乘积算子; $\frac{4}{D}$ 代表四阶弹性刚度张量; $E_{,t}^e$ 弹性应变张量的时间导数; S 代表第二 Piola-Kirchhoff 应力张量; $E_{,t}^f$ 非弹性应变张量对时间的导数; $\rho C_v = C$,代表体积比热容,含义是将单位体积材料升高 1 K 所需能量。

该模型从纯现象学入手分析,用来解释材料热弹塑性行为与能量之间的关系,将材料变形过程中

的热力耦合行为分为四类。等式右边第一项为热源,由于油页岩在单轴压缩过程中不涉及热源加热的过程,因此可以忽略;第二项为热传导,物体之间或者系统内存在温度差是发生热传导的必要条件,其速率决定于系统内温度差的分布状况,以及最终达到温度的平均分布状态。单轴压缩过程中,油页岩上下端面添加了石棉板,实验过程均是在油页岩温度与周围环境温度相同之后才进行的实验,因此由压力机端头与环境所引起热传导带来的红外辐射变化也可以忽略不计;第三项为热弹作用,在弹性范围内,物体经受拉伸或压缩过程中伴随着热力之间的可逆转换,在绝热环境下,温度与主应力之和满足线性关系^[23]:

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{\rho C_{\sigma}} TS \quad (3)$$

式中: ΔT 、 T 分别代表物体温度改变量和物体温度; α 代表线性热膨胀系数; ρ 代表密度; C_{σ} 代表恒定应力下比热系数; S 代表主应力之和。

单轴压缩条件下,油页岩只受轴向压力 σ_1 ,侧向压力 σ_2 为0,因此主应力的变化仅与 σ_1 有关。第四项代表材料内部耗散能量,在这一阶段为热弹塑综合效应,外力所做的功并非全部转化为材料内部热能,绝大部分消耗于内部微观结构改变的过程之中。塑性变形过程中的能量耗散与热能的转换是不可逆的,在这一过程中的能量消耗 ΔE 主要包括以下三部分^[17]:

$$\Delta E = \Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta E_3 \quad (4)$$

ΔE_1 为孔隙气体逸出过程所携带走的能量。几乎所有的岩石内部都存在孔隙,通过激光拉曼光谱分析技术已经证实包括沉积岩在内的相当一部分岩石内部孔隙存在气、液包裹体,以 CH_4 、 CO_2 、 CO 、 O_2 等气体居多^[18-19]。孔隙在未受到破坏之前,内部的气体以自由或者吸附状态存在于闭合孔隙内部或者表面。在外部载荷作用下,随着岩石的变形,孔隙会被压缩甚至破坏导致内部气体逸出,而在气体逸出过程必定会带走一部分能量,因此一般情况下 $\Delta E_1 < 0$ 。

ΔE_2 为岩石内部原生孔隙、裂隙、节理的扩展及新生裂隙产生过程中所消耗的能量。随着外部荷载的增加,内部的孔隙、裂隙、节理弱面首先会发生收缩、闭合,在进一步的挤压下,当应力达到一定程度时,孔隙会发生坍塌,原生的裂隙、节理会进一步扩展、贯通、合并,同时会有新的裂隙产生。在这

一过程中伴随着能量的消耗,因此 $\Delta E_2 < 0$ 。

ΔE_3 为摩擦生热所产生的能量。在岩石内部,沿各个方向发育的孔隙、裂隙、节理以及岩石颗粒之间都会发生摩擦行为。由物理学知识可知,影响摩擦生热过程的因素有两个,其一为接触面上的正压力,其二为摩擦系数。在摩擦系数一定的情况下,接触面上的正应力越大,摩擦力也会越大,在裂隙及颗粒滑移过程中克服摩擦力所做的功也会越多,消耗的能量也越多。值得注意的是,在此过程中所消耗的能量会由于摩擦生热的原因导致在接触面的温度升高,因此 $\Delta E_3 > 0$ 。

岩石试件内部存在一定量的开放型裂隙及封闭型孔隙、裂隙。在低应力状态下,开放型裂隙内部游离气体因裂隙挤压而不断逸出,在逸出过程中必将对气体做功消耗能量,从而导致裂隙处局部温度下降。因该过程气体逸出受岩石变形速率限制,因此在远红外热像图中温度下降较为缓慢。

在高应力状态下,岩石内部孔隙、密闭型裂隙在外力作用下将发生孔隙收缩、裂隙变形扩展甚至坍塌破坏等一系列塑形行为,这一过程必将消耗试件内部积累能量,引起温度降低。同时,内部气体在孔隙坍塌、裂隙扩展瞬间因体积膨胀而导致压力减小,从而吸收热量,致使该处局部温度下降。该过程中,孔隙坍塌破坏、裂隙扩展几乎是瞬间完成的,在远红外热像图中表现为局部温度瞬间下降。

2 实验设备与方法

油页岩属沉积类岩石,内部含有丰富的层理弱面、节理、裂隙以及富含有机质的孔隙结构。由于内部裂隙、孔隙结构分布的随机性,在加载过程中,油页岩试件表现出力学各向异性的特征。因此,有必要在实验前,针对油页岩试件内部孔隙、裂隙分布进行测试,从而更好地研究红外显现与岩体内部结构之间的关系。

2.1 实验设备

本实验所用仪器主要包括显微CT实验系统、电子万能试验机、红外热成像仪。CT扫描系统型号为 $\mu\text{CT}225\text{k VFCB}$ 型,数字平板探测器尺寸为:500 mm×367 mm×47 mm,成像窗口:406 mm×293 mm(3 200×2 304个探元),有效窗口:406 mm×282 mm(3 200×2 232个探元),探元尺寸:0.127 mm。放大倍数为1~400倍,转台旋转角度

分辨率为 655 360 step/rev, 重复定位精度小于 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ 。加载系统为 WDW-E 型微机控制电子万能试验机, 最大试验力为 200 kN, 试验力示值准确度为 $\pm 0.5\%$ 。红外热成像系统采用德国 Intratec 公司制造的便携式红外热像仪, 探测器类型为长波非制冷型, 光谱范围为 $7.5\sim 14\text{ }\mu\text{m}$, 热灵敏度可达 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$, 红外图像分辨率为 640×480 像素, 测温范围为 $-40\sim 1\text{ }200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 实验方法

实验中所采用样品来自中国辽宁省抚顺市抚顺西露天矿油页岩矿区, 实验所取油页岩试件共计 6 个, 编号为 $V_1\sim V_6$, 试件尺寸为 $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 长方体试件, 如图 1(a), 试件两端面进行处理使其平整度小于 0.05 mm , 各试件尺寸及峰值应力汇总表 1, 加载方向与层理面之间关系如图 1(b) 所示。为减少试件与压力机端头之间热传导作用, 试件两端分别有石棉垫进行隔热处理并置于盒子内部以减小空气流动所造成影响。实验采取恒速率加载方式, 加载速率设定为 0.08 mm/min , 其设备布置图如图 1(c) 所示。

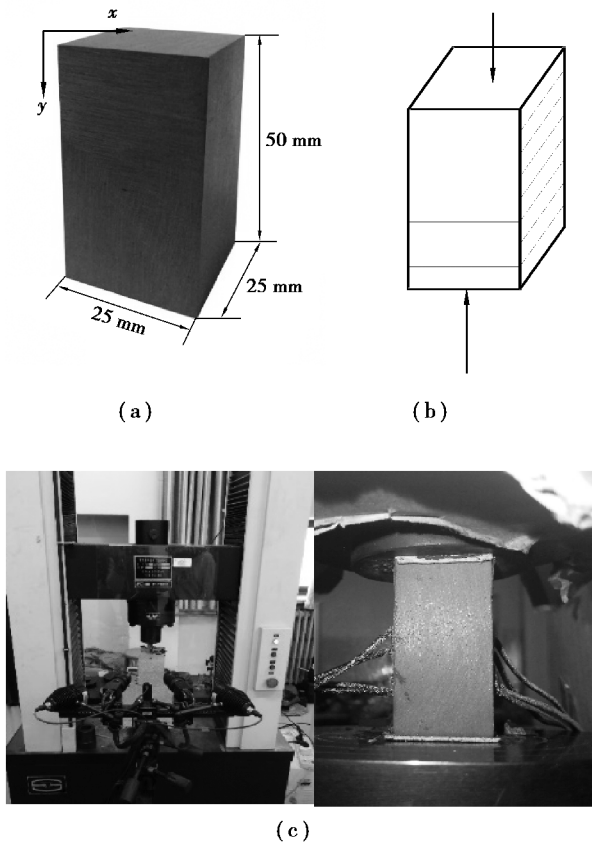


图 1 试件及设备布置图

Fig.1 Layout of specimen and equipment

表 1 试件尺寸及峰值应力

Table 1 Sample size and peak stress

编号	尺寸/mm	峰值应力/MPa
V_1	24.79×25.0×49.0	55.253 05
V_2	24.92×24.80×49.62	53.952 21
V_3	24.66×24.50×49.24	57.369 89
V_4	24.92×24.96×49.32	51.212 87
V_5	24.32×24.60×49.32	30.968 9
V_6	24.82×24.84×4.22	39.794 1

3 实验结果

因试件较多, 且限于篇幅仅选取 V_1 结果进行讨论。试件经 CT 扫描重建后切片如图 2 所示。本文主要针对油页岩内部宏观裂隙、孔隙对红外显现的影响, 因此对于微观孔隙不予分析。CT 结果经重建后利用 avizo 软件对孔隙、裂隙像素进行统计, 经换算得到孔隙尺度为 $1.809\text{ }5\text{ mm}\times 0.722\text{ mm}$, 裂隙宽度为 0.23 mm 左右。从平行层理切片可以看出, 油页岩同一层理面的不同部位, 矿物成分的密度并不相同。由垂直层理切片可以看出, 油页岩在成岩过程中由于沉积环境的差异, 层理之间存在着许多非贯通裂隙, 这些成岩过程中所造成的原生层理弱面、孔隙、裂隙等结构, 导致油页岩呈现各向异性特征。

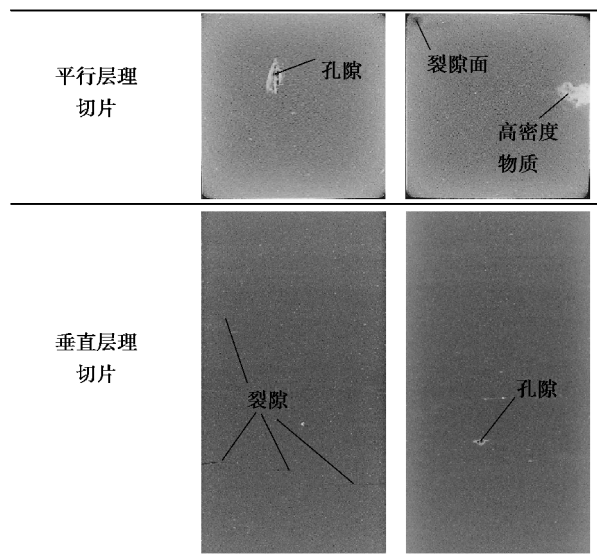


图 2 试件 CT 扫描切片图

Fig.2 CT scan slice of specimen

3.1 不同加载阶段试件表面温度变化特征

试件表面各点温度以矩阵形式存储,经提取后编写程序分别从试件表面辐射平均温度、最高温度以及变异系数(CV)3个统计量进行分析比较。如图3所示为试件表面红外辐射最高温度及平均温度与应力关系曲线图。由图可知,在试件发生破坏前,表面辐射最高温度与平均温度曲线变化规律大致相同,因此将整个加载过程分为4个阶段。

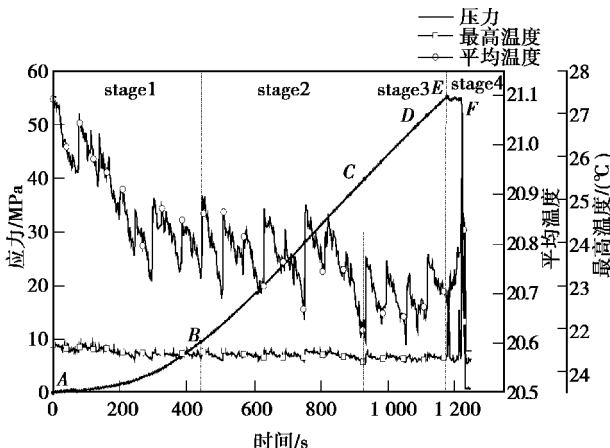


图3 表面温度与应力变化关系曲线

Fig. 3 Curves of the relationship between surface temperature and stress change

第1阶段:该阶段试件表面温度首先表现为急速下降,在296 s转变为缓慢下降,且相邻时刻的温度跳跃幅度较小,但下降的速率相对较快,试件表面平均温度从开始时刻至296 s,温度下降了0.3 °C左右,随后温度有所回升。由应力曲线呈现下凹形状,说明该阶段主要处于岩石变形的压密阶段,原始裂隙在外部载荷的作用下发生闭合,持续时长占据整个加载过程的三分之一,岩石内部应力值达到9.5 MPa,约为峰值应力的17.2% (峰值应力为55.25 MPa)。

第2阶段:自442 s试件两端应力随时间变化呈线性增加,说明该阶段试件进入岩石弹性应变阶段。自296~755 s试件表面平均辐射温度虽出现波动,但整体变化不大。而在755 s后表面辐射平均温度再次出现快速下降,下降温度约0.24 °C。此次温度快速下降时刻所对应的应力为28.05 MPa,为峰值应力的55.77%。

第3阶段:由试件两端应力曲线可知该阶段依旧处于弹性应变阶段。自755 s至1 113 s时间段内,试件表面平均辐射温度曲线表现为缓慢下降,下降了0.08 °C。随后至1 178 s,表面温度有所回转上升,但升温现象不甚明显。

第4阶段:该阶段为转折阶段,由图3可以看

出,试件两端所加载应力在1 178 s出现了下降,之后试件内部应力出现重新分布,应力曲线表现为不断波动。值得说明的是,在应力曲线发生波动的时刻,平均温度曲线开始由下降转变为上升,最高温度曲线则出现了陡增现象。在随后的应力曲线波动过程中,平均温度曲线及最高温度曲线均表现为上升,临近试件破坏时刻,二者均出现跳跃现象,最高温度曲线中上升幅度高达5.8 °C。

3.2 不同加载阶段试件表面温度变异系数变化特征

变异系数作为衡量数据离散程度的指标,具有规避数据度量单位的优势,忽视数值量级的影响。变异系数(Coefficient of Variation)简称 K_{CV} ,其计算方法见公式(5):

$$K_{CV} = \frac{\sigma}{\mu} \quad (5)$$

式中: σ 为试件表面辐射温度标准差; μ 为试件表面辐射平均温度值。

图4为试件表面温度分布的奇异值随应力变化曲线。相比于温度-时间曲线来说,CV曲线随应力增加并未出现多次阶段性变化。在0~296 s时间内,CV曲线表现为快速上升,由 8.34×10^{-3} 上升至 9.24×10^{-3} ,随后CV曲线上升速率有所下降,至压密阶段结束的442 s上升至 9.54×10^{-3} 。在弹性应变阶段内,CV曲线略有上升,但变化相对缓和,到达1 178 s应力开始出现下降时刻,CV曲线出现小幅度的突增现象,随后开始逐渐增加,并于破裂前开始快速增加,在破裂瞬间达到最大值0.016。

3.3 试件表面温度及应变时空演化特征

岩石的变形破坏是内部裂隙产生扩展损伤的过程,伴随着能量的积累与释放。实验过程中,利用红外热像仪记录下岩石表面红外辐射场分布状况。由于所保存图像较多,故选取具有代表意义的时刻进行分析。以下分别选取应力曲线上A~F点所对应时刻试件表面温度热像图进行研究。如图5所示,实验开始的A时刻,试件表面温度分布均匀,随着荷载增加到达B时刻,表面温度出现下降,值得注意的是对应于CT图像中所存在裂隙位置处温度明显低于试件表面其他部位,产生了条状的低温区域;C时刻,相比于B时刻试件表面温度图像试件表面温度明显降低,同时存在于B时刻试件中下部的低温条带区消失。试件表面温度分布开始出现不均匀现象,上下端头部位温度相对较低,同时在C时刻图中矩形框所示位置出现竖直低温条带区。随着应力的增加,到达D时刻,原本位于中部的低温条带开始一分为二,向两侧移动。同时,可以明显发现试件右侧边缘温度明显高于其

他部位; E 时刻, 应力达到峰值强度, 右侧的低温条带区进一步扩大, 并沿层理裂隙处产生贯穿试件端部的竖直张拉破坏区。此时所产生的张拉破裂面的接触面处出现小幅度温度升高, 远离张拉破裂面处温度相对较低, 而位于原生裂隙尖端部位出现局部高温现象。随着时间的推移, 在破裂前 0.5 s 所示温度图像中局部升温区温度开始下降, 此时张拉破坏区温度依旧相对较低, 且右上角低温区域尤为突出。值得说明的是, 此时试件中部如矩形框所示位置再次出现红外异常区域。随后的 F 时刻, 由红外异常区域开始, 产生沿 45° 方向高温红外异常区, 贯穿于试件顶端, 而试件其他部位此时均出现明显降温现象, 随后试件发生破坏破坏后照片如 6 所示。

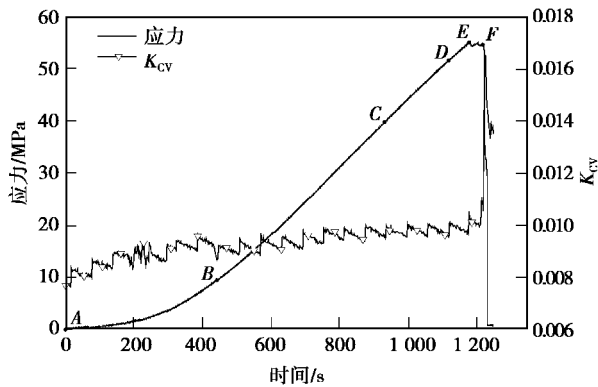


图 4 试件表面温度与应力变化 K_{CV} 统计关系

Fig. 4 CV statistical relation of surface temperature and stress change of specimen

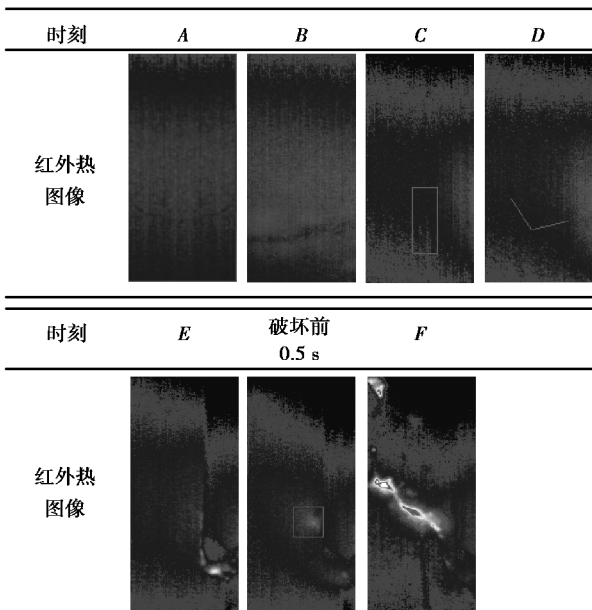


图 5 试件表面温度热像时空演化图

Fig. 5 Temporal and spatial evolution of temperature thermal image on the surface of a specimen

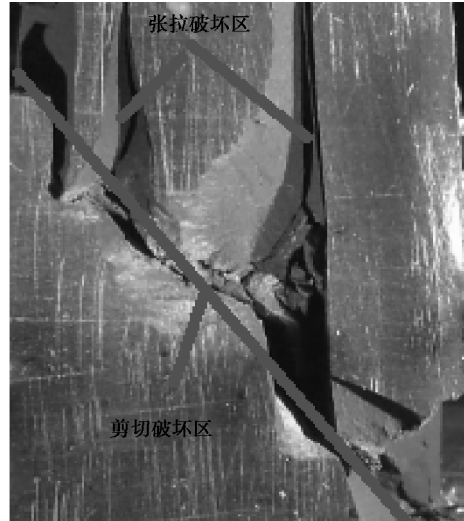


图 6 试件破坏后图像

Fig. 6 Image after the specimen destructed

4 讨论

岩石变形过程中表面红外辐射变化是大量物理力学、热弹作用、摩擦热作用的综合效应的结果^[18], 其表面温度的升高与降低, 伴随着能量的释放与积累^[4]。油页岩作为沉积类页岩, 其内部存在大量裂隙、节理、孔隙, 而这些孔隙裂隙包括开放型与封闭型。在沉积过程中, 其孔隙内部势必存在或多或少的气体、有机物等。在外力载荷作用下, 岩石内部应力不断增加的过程也是孔隙坍塌破坏、裂隙扩展贯通、岩石内部损伤的过程。

在实验加载过程中, 试件表面温度及 CV 曲线伴随着应力的增加呈现明显阶段性特征。在第一阶段, 由 A 到 B 时刻过程中, 平均温度曲线与最高温度曲线表现为快速下降, 接近该阶段末端时刻出现些许上升后又随之下落, 代表表面温度离散状况的 CV 曲线则快速上升, 之后出现多次波动, 红外热像图中在裂隙附近出现低温区域。说明在加载初期, 由于岩石内部存在一些非均匀分布的开放型裂隙, 岩石受力发生变形的过程中, 首先会使开放型裂隙发生闭合现象, 继而导致裂隙内部体积减小, 内部气体被迫逸出的过程中携带走一部分热量, 从而使得该处温度降低, 同时也导致试件表面温度分布不再均匀, CV 曲线因此上升。而临近 B 时刻, 最高温度曲线的突跳及 CV 曲线频繁的波动, 则是由于裂隙内部填充的颗粒矿物发生挤压、摩擦过程中伴随的能量释放所引起的温度升高所致。

第 2 阶段, B 时刻之后, 试件表面温度平稳发展, 到 820 s 出现突降现象, 在此过程中 CV 曲线略有上升, 但是变化不大, 此时图 5 所示表面温度图

像试件两端头及中部出现低温区域。这是因为在进入弹性阶段,应力不断增加使内部存在的孔隙、封闭型裂隙在外力作用下开始产生收缩变形,游离于内部的气体也因此开始不断逸出,此时由热弹作用所引起的温度上升与气体逸出所引起的温度降低达到动态平衡,温度曲线则产生平稳现象。当应力增加达到一定极限,孔隙发生坍塌破坏,孔隙内部压力降低使得吸附性气体发生解吸,孔隙的坍塌为气体的逸出创造了新的通道,因此温度出现了突降现象。

第3阶段,平均温度曲线先下降后上升,试件表面温度图中低温带由中部向两端移动,随后右侧裂隙处出现红外前兆,产生局部高温,到达 E 时刻,右侧低温条带区发生张性破坏。在该阶段,由热弹作用所引起的升温、坍塌孔隙面相互挤压摩擦所引起的摩擦生热、内部剩余气体逸出,3个过程在同时进行。进入该阶段前期,热弹作用及摩擦生热所产生的热量小于气体携带走热量时,试件表面平均温度曲线表现为继续降低;随后随着应力增加以及内部所含气体的减少,使得二者之和大于第三者,此时温度曲线开始升高,这便导致温度曲线出现由下降转为上升的现象。达到 D 时刻,随着应力的增加,内部原生孔隙、裂隙、节理,以及新萌生裂隙开始在长度及宽度上变大、扩展、贯通,由压力机输入的能量主要被裂纹扩展所消耗,导致 E 时刻试件表面温度图中张性破裂区域温度表现为下降现象,而裂隙压缩处则表现为温度上升。但由于下降区域面积明显高于上升区面积,因此 $D\sim E$ 过程中平均温度曲线上升幅度要低于最高温度曲线上升幅度。

第4阶段,当应力达到峰值时刻,内部微裂纹开始扩展、贯通,表现为在原生裂隙尖端由于切向应力作用产生张性破坏区,同时在裂隙的两个自由面产生相对位移,导致摩擦生热,因此造成裂隙处高温区和竖直低温带。局部破坏产生后,随着外部荷载增加,内部应力开始寻求新的平衡,微裂隙的扩展使得重新建立的内部平衡不断被打破,同时由于破裂面之间的矿物颗粒相互挤压、摩擦,内部能量不断积累再释放,从而表现为表面温度不断升高。但由于该过程中破坏的局部性,导致了 CV 曲线开始升高。当应力继续增加,内部裂隙不断扩展贯通,便形成了宏观裂纹,岩石此时发生剪切破坏,在破裂面处能量剧烈释放,因此温度明显升高。

5 结论

(1)不同于花岗岩、大理岩、砂岩等完整岩石

单轴压缩过程中,表面温度随应力增加表现为上升现象,含孔隙、裂隙岩石页岩表面温度随应力增加则表现为下降;但临近试件发生破坏,二者均会产生温度陡然升高的现象。

(2)油页岩变形破坏前,表面辐射平均温度与最高温度均具有阶段性,且二者规律相同。随应力增加,温度曲线由开始时刻的快速下降转变为缓慢下降,临近破坏失稳则转变为上升。失稳过程中,最高温度曲线多次出现陡增现象,具有更高的敏感性。

(3) CV 曲线可以较好地反映试件表面辐射温度离散程度。随应力增加,首先表现为快速增长,随后进入相对稳定期,临近破坏时刻再次出现快速增长;稳定期过后 CV 曲线的快速增长将预示岩石破坏。

(4)油页岩变形失稳过程中表面温度下降与其内部气体逸出及孔隙、裂隙坍塌破坏相关。红外显现异常多发生在原生孔隙、裂隙所存在的位置;低应力阶段表现为温度降低,临近试件破坏表现为温度升高。

参考文献(References)

- [1] Ma L, Sun H, Zhang Y, et al. Characteristics of infrared radiation of coal specimens under uniaxial loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(4):1567-1572.
- [2] Prendes-Gero M B, Suárez-Domínguez F J, González-Nicieza C, et al. Infrared thermography methodology applied to detect localized rockfalls in self-supporting underground mines[A]// EUROCK 2013 - The 2013 ISRM International Symposium - Rock Mechanics for Resources, Energy, and Environment [C]. 2013: 825-829.
- [3] Luong M P. Infrared observation of failure processes in plain concrete[A]// Durability of building materials and component[C]. 1987:870-878.
- [4] Ciliberto A, Cavaccini G, Salvetti O, et al. Porosity detection in composite aeronautical structures [J]. Infrared Physics and Technology, 2002, 43(3-5): 139-143.
- [5] Garnier C, Pastor M L, Eyma F, et al. The detection of aeronautical defects in situ on composite structures using non destructive testing[J]. Composite Structures, 2011, 93(5):1328-1336.
- [6] 邓明德, 钱家栋, 尹京苑, 等. 红外遥感用于大型混凝土工程稳定性监测和失稳预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 147-150. (Deng Mingde, Qian Jiadong, Yi Jingyuan, et al. Application

- of infrared remote sensing in stability monitoring and instability prediction of large concrete works [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2):147-150. (in Chinese))
- [7] Wu L, Wang J. Infrared radiation features of coal and rocks under loading [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(7):969-976.
- [8] Zhao Y, Jiang Y. Acoustic emission and thermal infrared precursors associated with bump-prone coal failure [J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 83(1):11-20.
- [9] Wu L, Liu S, Wu Y, et al. Changes in infrared radiation with rock deformation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(6):825-831.
- [10] Sheinin V I, Blokhin D I. Features of thermomechanical effects in rock salt samples under uniaxial compression [J]. Journal of Mining Science, 2012, 48(1):39-45.
- [11] Salami Y, Dano C, Hicher P Y. Infrared thermography of rock fracture [J]. Géotechnique Letters, 2017, 7(1):1-5.
- [12] Wu L, Liu S, Wu Y, et al. Precursors for rock fracturing and failure—Part II: IRR T-Curve abnormalities [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, 43(3):483-493.
- [13] 马立强, 张垚, 孙海, 等. 煤岩破裂过程中应力对红外辐射的控制效应试验[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1):140-147. (Ma Liqiang, Zhang Yao, Sun Hai, et al. Experimental study on dependence of infrared radiation on stress for coal fracturing process [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1):140-147. (in Chinese))
- [14] 刘善军, 吴立新, 吴焕萍, 等. 多暗色矿物类岩石单轴加载过程中红外辐射定量研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11):1585-1589. (Liu Shan-jun, Wu Lixin, Wu Huanping, et al. Quantitative study on infrared radiation of multi dark mineral rocks during uniaxial loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(11):1585-1589. (in Chinese))
- [15] Wu L X, Geng N G, Wang J H, et al. Remote sensing rock mechanics (RSRM) and associated experimental studies [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(6):879-888.
- [16] 刘善军, 吴立新, 王川婴, 等. 遥感-岩石力学(VIII)——论岩石破裂的热红外前兆[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10):1621-1627. (Liu Shan-jun, Wu Lixin, Wang Chuanying, et al. Remote sensing-rock mechanics (VIII)-trends of rock fracturing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10):1621-1627. (in Chinese))
- [17] 刘善军, 吴立新, 张艳博. 岩石破裂前红外热像的时空演化特征[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(7):1034-1038. (Liu Shan-jun, Wu Lixin, Zhang Yanbo. Temporal-spatial evolution features of infrared thermal images before rock failure [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2009, 30(7):1034-1038. (in Chinese))
- [18] Zhao Y, Jiang Y. Acoustic emission and thermal infrared precursors associated with bump-prone coal failure [J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 83(1):11-20.
- [19] 刘善军, 吴立新, 吴育华, 等. 受载岩石红外辐射的影响因素及机理分析[J]. 矿山测量, 2003(3):67-68. (Wu Lixin, Liu Shan-jun, Wu Yuhua, et al. Influence factors and mechanism analysis of infrared radiation of loaded rocks [J]. Mine Surveying, 2003(3):67-68. (in Chinese))
- [20] 刘善军, 魏嘉磊, 黄建伟, 等. 岩石加载过程中红外辐射温度场演化的定量分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增1):2968-2976. (Liu Shan-jun, Wei Jialei, Huang Jianwei, et al. Quantitative analysis methods of infrared radiation temperature field variation in rock loading process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Supp.1):2968-2976. (in Chinese))
- [21] Wu L X, Geng N G, Wang J H, et al. Remote sensing rock mechanics (RSRM) and associated experimental studies [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(6):879-888.
- [22] Sun X, Xu H, He M, et al. Experimental investigation of the occurrence of rockburst in a rock specimen through infrared thermography and acoustic emission [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 93:250-259.
- [23] Baker L R. Thermoelastic stress analysis [J]. OpticaActa International Journal of Optics, 1982, 29(4):555-563.
- [24] Yang X. Y. Compositions and implications of inclusions in the typical mantle rocks from east china [J]. Acta Petroli Sinica, 1999(1):19-23.
- [25] 葛良胜, 郭晓东. 试论地球内部流体与地质作用--现代地质科学研究思考[J]. 地球科学进展, 1998, 13(2):129-139. (Ge Liangsheng, Guo Xiaodong. On fluids and geological functions in the earth's interior-reflections on modern geological science [J]. Progress in Geosciences, 1998, 13(2):129-139. (in Chinese))