



# 单轴压缩下不同层理煤能量演化及红外辐射特征

张国宁 赵毅鑫 孙远东 宫智馨

## 引用本文：

张国宁, 赵毅鑫, 孙远东, 等. 单轴压缩下不同层理煤能量演化及红外辐射特征[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 48–59.  
ZHANG Guoning, ZHAO Yixin, SUN Yuandong. Energy evolution and infrared radiation characteristics of different bedded coal under uniaxial compression[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 48–59.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023-1639>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 煤损伤演化过程中的红外辐射响应特征研究

Characteristics of infrared radiation response during coal damage evolution

煤炭科学技术. 2022, 50(9): 67–74 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/25cf2866-08bc-4dd0-973c-9c1fd529f38c>

#### 不同冲击倾向性煤单轴压缩下能量演化与损伤特征

Energy evolution and damage characteristics of coal with different bursting liability under uniaxial compression

煤炭科学技术. 2021, 49(6): 111–118 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b1356989-ce5b-451c-a90b-d8c5f9180a2b>

#### 不同加载速率下煤岩声发射与红外辐射特征研究

Study on coal and rock acoustic emission and infrared radiation characteristics under different loading rates

煤炭科学技术. 2021, 49(7): 79–84 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ea7aa91e-b245-4bb9-b864-e9d98b13f723>

#### 单轴压缩下松软煤体波速演化与裂隙分布特征

Wave velocity evolution and fracture distribution of soft coal under uniaxial compression

煤炭科学技术. 2024, 52(4): 288–301 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1388>

#### 单轴压缩下煤岩细观结构参数表征及演化规律

Fracture evolution of coal under uniaxial compression based on X-ray microscopic imaging

煤炭科学技术. 2023, 51(4): 88–95 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0766>

#### 红外加热储层煤岩热损伤特征扫描电镜及增透试验研究

SEM and permeability enhancement experiment study on thermal damage characteristics of coal–rock under infrared radiation

煤炭科学技术. 2022, 50(7): 177–183 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d92001ba-d87c-4c48-b9cd-7d824743e16c>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张国宁,赵毅鑫,孙远东,等.单轴压缩下不同层理煤能量演化及红外辐射特征[J].煤炭科学技术,2024,52(12):48-59.

ZHANG Guoning, ZHAO Yixin, SUN Yuandong, et al. Energy evolution and infrared radiation characteristics of different bedded coal under uniaxial compression[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 48-59.

## 单轴压缩下不同层理煤能量演化及红外辐射特征

张国宁<sup>1,2</sup>,赵毅鑫<sup>1,2</sup>,孙远东<sup>1,2</sup>,官智馨<sup>1,2</sup>

(1.中国矿业大学(北京)共伴生能源精准开采北京市重点实验室,北京 100083; 2.中国矿业大学(北京)能源与矿业学院,北京 100083)

**摘要:**为了研究不同层理煤变形破坏过程中能量演化及红外辐射响应特征,以红庆河煤矿3-1煤层的煤样为研究对象,开展了4种不同层理角度( $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 及 $90^\circ$ )单轴压缩试验,并利用红外热成像仪监测煤样变形破坏过程中的红外温度场特征。试验结果表明:随着层理角度的增加,试样的抗压强度及应变能均呈“V”形变化趋势,60°时达到最小值,层理对峰前阶段的弹性应变能 $U^e$ 及峰后阶段的耗散能 $U^d$ 影响显著;不同层理角度煤样整体上表现为升温趋势,平均红外温度前兆点为 $0.84\sigma_p$ ;试样破坏模式导致温度变化范围不同, $0^\circ$ 和 $30^\circ$ 试样以张-剪破坏为主,升温幅度分别为 $1.12$ 、 $1.30$  °C,而 $60^\circ$ 试样以单一剪切破坏为主,升温幅度较低为 $0.46$  °C, $90^\circ$ 试样破坏以拉伸破坏为主,升温幅度最低为 $0.4$  °C;应变能与平均红外辐射温度呈正相关关系,相关程度排序为总应变能 $U$ <弹性应变能 $U^e$ <耗散能 $U^d$ 。研究结果可以为煤岩动力灾害预警提供参考。

**关键词:**单轴压缩;层理效应;能量演化;红外辐射;前兆特征

**中图分类号:**TD313    **文献标志码:**A    **文章编号:**0253-2336(2024)12-0048-12

## Energy evolution and infrared radiation characteristics of different bedded coal under uniaxial compression

ZHANG Guoning<sup>1,2</sup>, ZHAO Yixin<sup>1,2</sup>, SUN Yuandong<sup>1,2</sup>, GONG Zhixin<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Key Laboratory for Precise Mining of Intergrown Energy and Resources, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083;

2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to study the energy evolution and infrared radiation response characteristics during the deformation and failure process of coal with different bedding angles, uniaxial compression tests with four different bedding angles ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$ ) were carried out on a strong burst liability coal samples from 3-1 coal seam of Hongqinhe coal mine. The infrared temperature field characteristics of the coal samples during deformation and damage were monitored using an infrared thermal imaging camera. The test results show that as the bedding angle increases the compressive strength and strain energy of the sample show a “V” shaped trend, reaching the minimum value at  $60^\circ$ . The bedding has a significant impact on the elastic strain  $U^e$  in the pre-peak stage and dissipation energy  $U^d$  in the post-peak stage; The coal samples showed an overall warming trend with different bedding angles, with an average infrared temperature precursor point of  $0.84\sigma_p$ . The bedding structure seriously affects the infrared radiation temperature and the difference of failure patterns lead to different temperature ranges. The  $0^\circ$  and  $30^\circ$  specimens are dominated by shear-tension composite failure, with a high temperature rise of  $1.12$  and  $1.30$  °C, respectively, while the  $60^\circ$  specimen is dominated by single shear failure, with a low temperature rise of  $0.46$  °C. The failure of  $90^\circ$  specimen is tensile failure, and the temperature rise is the lowest  $0.4$  °C. The strain energy was positively correlated with the mean IR radiation temperature, and the correlation degree was ranked as  $U < U^e < U^d$ . The research results can provide reference for early warning of coal dynamic disasters.

**Key words:** uniaxial compression; bedding effect; energy evolution; infrared radiation; precursor characteristics

收稿日期:2023-11-08

策划编辑:朱恩光

责任编辑:钱小静

DOI: 10.12438/cst.2023-1639

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52225402)

作者简介:张国宁(1992—),男,内蒙古商都人,博士研究生。E-mail: zhang\_guoning@163.com

通讯作者:赵毅鑫(1977—),男,河南洛阳人,教授,博士生导师,博士。E-mail: zhaoyx@cumtb.edu.cn

## 0 引言

煤炭作为我国一次能源的重要组成部分,随着开采强度及深度逐渐增加,煤矿冲击地压发生频率和强度逐渐增加,对矿山的安全生产造成巨大威胁<sup>[1-2]</sup>。煤岩体自身物理力学性质是煤矿冲击地压事故发生的内因。煤作为一种沉积岩,在漫长的地质作用下,内部发育大量裂隙、层理等结构弱面<sup>[3]</sup>。其中,层理被认为是影响层状岩石强度、变形和破坏模式的主导因素<sup>[4-5]</sup>。针对煤在不同层理条件下力学行为的各向异性,众多学者开展了相应研究。牟宏伟等<sup>[6]</sup>开展了不同层理角度对煤声发射特征和力学特征影响的试验研究。郝宪杰等<sup>[7]</sup>开展了不同层理角度硬煤冲击倾向性特征与破坏模式的各向异性研究。SONG等<sup>[8-9]</sup>开展了不同层理角度煤单轴压缩试验,分别从声学特征、强度特征以及变形特征等方面研究了煤力学行为的各向异性,提出了各向异性强度模型。龚爽等<sup>[10]</sup>开展了不同层理煤样霍普金森压杆试验,分析了层理及加载速率对煤样裂纹扩展特征的影响。张朝鹏等<sup>[11]</sup>、刘晓辉等<sup>[12]</sup>、刘恺德等<sup>[13]</sup>分析了平行和垂直层理煤样的力学特性,结果均表现出较强的各向异性特征。

煤岩体在损伤破坏过程中,其内部积累的弹性应变能以声、热、电、磁等形式向外部释放<sup>[14]</sup>。红外热成像技术作为一种无损检测手段,近些年来被广泛应用到岩石类材料破坏过程的监测及预警中<sup>[15]</sup>。对于煤矿井下开采而言,煤矿地应力多集中于几兆帕到几十兆帕之间,大量的电磁辐射仍处于红外辐射波段<sup>[16]</sup>,因此通过红外成像技术研究煤岩体变形破坏过程中的红外辐射特征,成为研究煤岩体破坏前兆信息的有效手段。LUONG<sup>[17]</sup>首次利用红外热成像技术观测了岩石及混凝土损伤破坏过程中的红外辐射现象,将热能变化作为研究参数,从力-热耦合出发,进行疲劳强度评价。SHEN等<sup>[18]</sup>研究了不同含水率砂岩红外辐射特征,研究结果表明,砂岩表面红外辐射温度随着含水率的增加而降低,砂岩试样在加载过程中最大红外辐射温度(MIRT)的变化在不同阶段表现出不同特征。CAO等<sup>[19]</sup>研究了砂岩剪胀过程中平均红外辐射温度(AIRT)特征,发现在岩石破坏前红外辐射存在一个剪胀前兆点,且平均红外辐射温度与体积应变增量几乎呈线性相关。LI等<sup>[20]</sup>以预制不同角度裂隙砂岩为研究对象,研究了单轴加载过程中的红外辐射特征,并建立了基于平均红外辐射温度的损伤模型。赵毅鑫等<sup>[21]</sup>总结了煤体失稳破坏过程中的生热现象,发现了冲击倾向

性煤体表面温度随加载时间变化近似满足三次多项式关系,指出了煤体失稳破坏的“关键前兆”与“失稳前兆”。杨桢等<sup>[22]</sup>通过煤岩组合体的红外辐射观测试验,研究煤岩体受灾破裂过程中的红外辐射温度的变化规律,得到了红外辐射温度和应变、应力及温度线性拟合函数关系。徐子杰等<sup>[23]</sup>针对无、弱、强3种冲击倾向性煤样,开展了单轴压缩试验并监测变形破坏过程中的红外辐射特征,结果表明冲击倾向性对煤体红外辐射有显著影响,煤样冲击倾向性越强,加载破坏过程中煤样表面红外温度平均值越大,红外辐射高温区域分布范围越大。

综上所述,煤岩体变形破坏过程中引起的红外辐射特征与煤岩体的应力、能量及破坏模式有密切关系,正确认识煤岩体变形破坏过程中红外辐射的时空演化特征,对于预测煤岩体失稳破坏具有重要意义。针对煤岩体变形破坏过程中的红外辐射特征,大部分研究成果集中在不含层理条件下,针对含层理煤岩体的红外辐射特征研究较少。而层理等弱面的存在使得破坏往往从这些软弱结构处开始,且对煤岩体的强度及破坏模式有显著影响。因此,笔者针对不同层理煤样进行单轴压缩并进行实时红外辐射监测,研究不同层理煤岩在变形破坏过程中力学性质及红外特征,揭示了煤在变形破坏过程中的前兆信息及升温机理。研究结果能够为冲击地压预测、预警提供研究基础。

## 1 试验

### 1.1 试样制备

试验所用的煤取自内蒙古鄂尔多斯市新街矿区红庆河煤矿3-1煤层,煤层平均厚度为6.13 m,平均埋深704.5 m,煤种为不黏煤,以暗煤为主、亮煤次之,加之少量镜煤及丝碳,块状结构,参差状断口,节理裂隙发育,弱沥青光泽,含有少量黄铁矿结核,3-1煤层开采过程中多次发生动载现象,已有研究结果表明该煤层具有强冲击倾向性<sup>[24]</sup>。

为了制备不同层理角度的试样,首先将层理角度定义为试样层理面与水平面的夹角 $\theta$ 。取样时选取同一大块煤样上依次钻取 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 及 $90^\circ$ 共4种层理的煤样,煤样尺寸为 $\varnothing 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 。制备的试样需满足国际岩石力学学会规程要求<sup>[25]</sup>,上下端面误差小于 $\pm 0.05\text{ mm}$ ,垂直偏差度小于 $0.25^\circ$ 。制备完成的试样通过ZBL-U510型非金属超声检测仪进行筛选出波速相近的煤样进行试验,每组3个试样,共计12组试验。

## 1.2 试验设备及方案

试验加载系统采用 MTS E45.305 电子万能试验机, 试验机额定最大轴向载荷为 300 kN, 可实现加载速率为 0.001~250 mm/min, 加载精度为  $\pm 0.5\%$ 。红外监测系统采用加拿大 TOLOPS 公司生产的制冷型红外热像仪 FAST-IRM200, 最大分辨率为 640 pixel  $\times$  512 pixel, 热灵敏度为 0.000 1 °C, 量程可达 0~324 °C, 可根据试验具体需求调节分辨率, 最高采集帧率可达 5 600 Hz。同时配套软件 REVEAL-IR 可实时监测红外图像变化及调整相关参数, 实现在高帧频、高灵敏度和高图像解析度下进行高精度的温度测量。试验系统布置如图 1 所示。

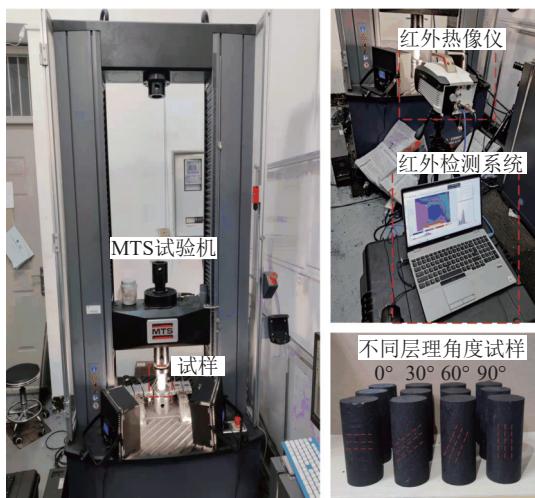


图 1 试验系统

Fig.1 Experimental system diagram

试验采用位移控制加载, 加载速率设定为 0.06 mm/min。试验前试验机压头上下放置隔热塑料膜(PET 膜), 防止试验机油泵高温传递到试样。红外热像仪置于试样正前方 1 m 处, 高度与试样平齐, 提前开机预热 10 min 以上, 采样窗口为 640 pixel  $\times$  512 pixel, 采样频率为 100 Hz, 采用自动曝光模式, 实时调节曝光时间。提前 48 h 将试样静置于实验室内适应实验室温度及湿度, 安装试样时, 操作人员需佩戴隔热手套, 避免手部温度造成试样局部温度异常。试样安装完毕后, 静置 10 min 以上, 待试样表面温度稳定且接近室温后再开始试验。

试验时压力机与红外热像监测系统同时开启, 保证各系统数据采集存储的同步性。实验过程中需关闭门窗, 拉上窗帘, 人员禁止走动, 尽可能减少实验室中的空气流动。

## 1.3 能量机制

岩石的破坏主要包括应变能的输入, 弹性应变

能的积聚与耗散能的释放这一复杂的能量演化过程, 如图 2 所示。

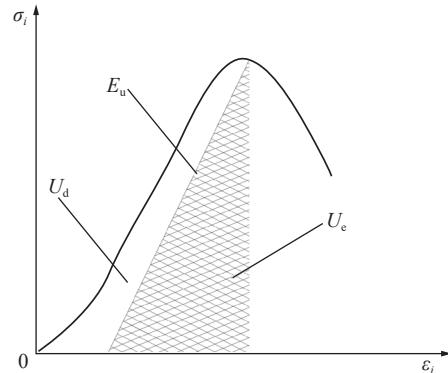


图 2 单轴压缩能量演化示意

Fig.2 Uniaxial compression energy evolution diagram

假设岩石在变形破坏过程中无能量损失, 始终处于封闭的能量系统内, 由热力学第 1 定律可得<sup>[26]</sup>:

$$U = U^e + U^d \quad (1)$$

式中:  $U$  为变形过程中的总应变能;  $U^e$  为弹性应变能;  $U^d$  为耗散能。

在单轴压缩下, 仅有轴向方向做功, 于是煤岩体总应变能、弹性应变能分别为

$$U = \int \sigma_i d\epsilon_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_{1(i)} + \sigma_{1(i+1)}) (\epsilon_{1(i)} + \epsilon_{1(i+1)}) \quad (2)$$

$$U^e = \frac{1}{2} \sigma_i \epsilon_i^e = \frac{\sigma_i^2}{2E_u} \quad (3)$$

其中,  $\sigma_{1(i)}$ ,  $\epsilon_{1(i)}$  分别为应力-应变曲线上  $i$  处对应的应力、应变;  $\sigma_{1(i+1)}$ ,  $\epsilon_{1(i+1)}$  为第  $i+1$  处的应力及应变;  $E_u$  为卸载模量。为方便计算, 可用弹性模量  $E$  近似替代卸载模量<sup>[27]</sup>, 因此弹性应变能可表示为

$$U^e = \frac{\sigma_i^2}{2E} \quad (4)$$

为了描述试样破坏前耗散能的变化趋势, 对耗散能曲线进行微分求解, 得到能量耗散率  $G_d$ , 表示为

$$G_d = \frac{dU^d}{dt} \quad (5)$$

## 2 试验结果与分析

### 2.1 层理对煤样力学特性的影响

经过测定煤样力学参数见表 1, 并绘制出不同层理角度单轴压缩应力-应变曲线, 如图 3 所示。可以看出, 煤样破坏过程分为初始压密阶段、弹性阶段、弹塑性阶段、峰后破坏阶段。随着轴向应变的增加, 试样首先进入压密阶段, 试样内部原有的裂隙或结构面闭合, 应力-应变曲线呈现上凹形。进入弹性阶

段后, 应力-应变曲线近似线性增加。当层理角度为0°、30°及90°时, 试样达到峰值应力后瞬间发生破坏, 应力迅速跌落, 呈现出明显的脆性破坏, 而60°试样由于在加载过程中试样局部发生剪切破坏, 产生新的微裂纹, 但宏观上裂纹未贯通, 因此发生了一定程度的应力跌落, 但试样仍具有一定的承载能力, 随着裂纹的进一步贯通, 最终发生破坏。

表1 不同层理角度试样力学参数测定结果

Table 1 Measurement results of mechanical parameters of samples with different bedding angles

编号	密度 $\rho$ / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	峰值强度 $\sigma_p$ / $\text{MPa}$	峰值应变 $\varepsilon_p$	弹性模量 $E$ / $\text{GPa}$
0°-1	1.27	34.66	0.0219	1.75
0°-2	1.29	28.20	0.0205	1.72
0°-3	1.29	33.51	0.0237	1.88
30°-1	1.28	33.33	0.0233	1.60
30°-2	1.28	31.01	0.0241	1.58
30°-3	1.28	26.03	0.0180	1.67
60°-1	1.24	14.16	0.0096	1.79
60°-2	1.24	14.32	0.0126	1.72
60°-3	1.24	13.41	0.0096	1.94
90°-1	1.29	20.17	0.0140	1.85
90°-2	1.28	13.95	0.0134	1.31
90°-3	1.27	17.17	0.0118	1.74

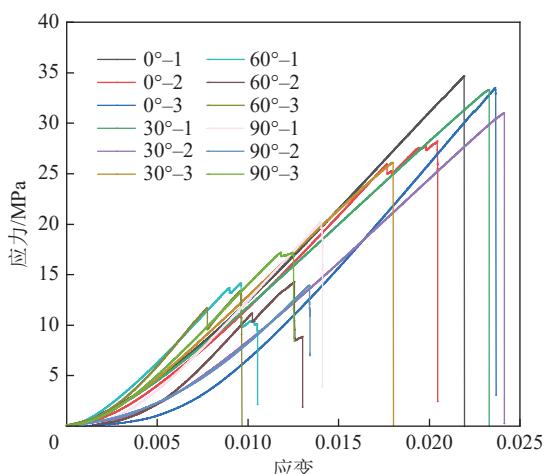


图3 不同层理角度试样应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of specimen with different bedding angles

不同层理角度煤样的变化规律如图4所示。0°、30°、60°及90°试样的平均单轴抗压强度分别为32.12、30.12、13.96及17.10 MPa。随着层理角度的增加, 单轴抗压强度呈现先减小后增加的V型变化趋势。层理角度为0°时, 平均单轴抗压强度最大为

32.12 MPa, 当层理角度增加至60°时, 平均单轴抗压强度降低为13.96 MPa, 降幅达到56.5%。而破坏模式方面, 随着层理角度的增加, 加载方向与试样层理面逐渐由垂直变为平行, 导致破坏模式由0°和30°的张-剪破坏, 再到60°时剪切破坏, 最终转变为90°时的张拉破坏, 其破坏模式与层理角度密切相关, 表现出了较强的各向异性。

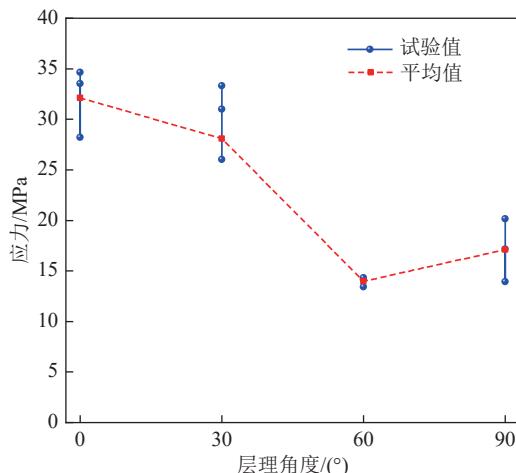


图4 单轴抗压强度随层理角度变化规律

Fig.4 Variations of uniaxial compressive strength with different bedding angles

## 2.2 层理对煤样能量演化特征的影响

根据式(1)—式(4)计算并绘制不同层理煤样变形破坏过程中总应变能 $U$ 、弹性应变能 $U^e$ 及耗散能 $U^d$ 的演化规律, 如图5所示。在应力-应变曲线的不同阶段内, 不同层理煤样的能量演化呈现出不同特点。初始压密阶段( $OA$ 段), 煤样内部的原生微孔隙与裂隙被压密, 内部气体排出, 消耗了少部分能量, 由于未产生新的裂隙, 耗散能 $U^d$ 与弹性应变能 $U^e$ 相当, 能量耗散率接近0; 弹性变形阶段( $AB$ 段), 煤样几乎不发生形变, 总应变能 $U$ 与弹性应变能 $U^e$ 同步增加, 外部输入的总应变能 $U$ 大部分以弹性应变能 $U^e$ 的形式储存在煤样中, 而耗散能曲线基本不变, 能量耗散率开始小幅增加; 塑性破坏阶段( $BC$ 段), 试样产生不可逆的塑性变形, 此阶段内部裂纹扩展和裂纹间摩擦增多, 能量耗散率开始大幅增加, 总应变能 $U$ 与弹性应变能 $U^e$ 继续增加, 但弹性应变能 $U^e$ 增速略大于总应变能 $U$ , 具体表现为两曲线相对距离逐渐缩短, 耗散能 $U^d$ 逐渐减小; 峰后破坏阶段( $CD$ 段), 煤样达到储能极限不能再吸收能量, 当达到峰值强度 $\sigma_p$ 后, 储存在煤样内部的弹性应变能 $U^e$ 转化为耗散能 $U^d$ 瞬时释放, 用于驱动煤样裂隙扩展与贯通, 此阶段能量耗散率突增。

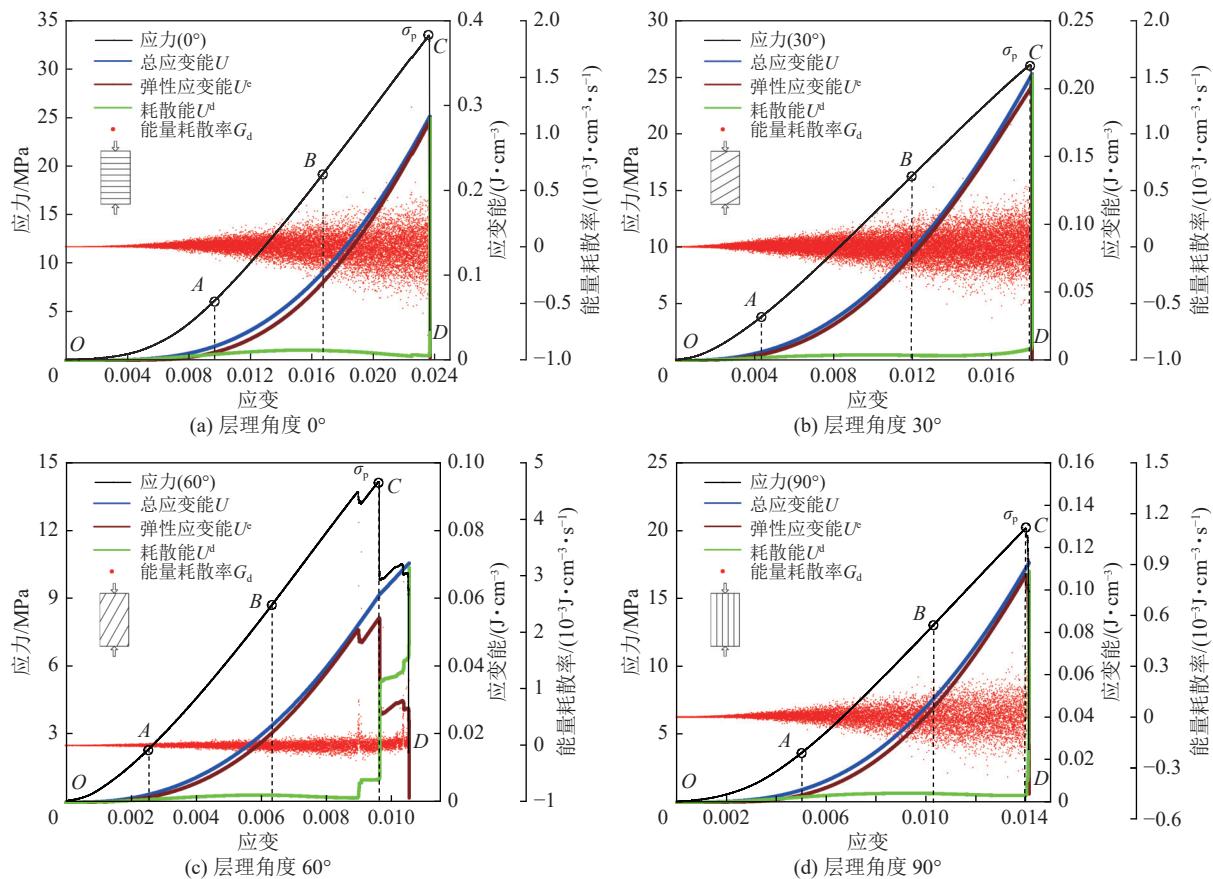


图5 不同层理试样应力及应变能变化曲线

Fig.5 Variation curves of stress and strain energy with different bedding specimens

不同层理角度试样在应力峰值及试样破坏时的能量指标见表2。试样内部储存的弹性应变能是引发煤样破坏的主要能量,当应力达到峰值后,煤样达到储能极限,弹性应变能越大表明试样越难发生破坏,不同层理煤样的应变能演化呈现出较强的各向异性。随着层理角度的增加,总应变能  $U$  和弹性应变能  $U^e$  先减小后增加的“V”型变化趋势,2者对层理敏感性较高,呈现出明显的各向异性。当层理角度为0°时,煤样的总应变能  $U$  和弹性应变能  $U^e$  达到最大,分别为0.3305、0.3164 J/cm<sup>3</sup>,当层理角度增加至60°时,总应变能  $U$  和弹性应变能  $U^e$  达到最小值分别为0.0611、0.0542 J/cm<sup>3</sup>,降幅分别为81.5%和82.8%。耗散能  $U^d$  的变化趋势接近水平,对层理的敏感性较低,无明显的各向异性特征,如图6a所示。

峰后阶段,峰前储存的  $U^e$  几乎全部转化为  $U^d$  用于煤样内部裂纹快速扩展及贯通,随着层理角度的增加,总应变能  $U$  与耗散能  $U^d$  的曲线几乎重叠,呈V型变化趋势,表现出明显的各向异性。当层理角度为0°时,试样破坏所需要的耗散能  $U^d$  最大,为0.3288 J/cm<sup>3</sup>,试样最难发生破坏。当层理角度为60°时,试样破坏所需要的耗散能  $U^d$  最小,为

0.0692 J/cm<sup>3</sup>,试样最容易发生破坏,如图6b所示。这与试样的破坏模式直接相关,60°试样破坏为沿层理面剪切滑移破坏,造成的能力损失最少,破坏最容易,而0°试样破坏以贯穿基质体和层理面的复合破坏为主,造成的能力损失较多,因此最难破坏。

### 2.3 层理对煤样红外辐射特征的影响

#### 2.3.1 平均红外辐射温度演化特征

图7为不同层理角度下煤样破坏过程中的平均红外辐射温度  $T_{\text{AIR}}$  及温差随加载时间的演化规律。可以看出随着加载时间的增加,煤样均呈升温趋势,在峰值应力处时,  $T_{\text{AIR}}$  达到最大值。 $T_{\text{AIR}}$  随着应力的增加表现出了良好的相关性。 $T_{\text{AIR}}$  曲线在峰值前存在某一转折点<sup>[19]</sup>,转折点前后  $T_{\text{AIR}}$  的变化速率会产生不同趋势,将这一转折点定义为试样破坏的红外温度前兆点,对这2段曲线分别进行线性拟合,求得斜率  $k_1$ 、 $k_2$  分别为转折点前后的温度变化率。 $0^\circ$ 试样的转折点为  $0.85\sigma_p$ ,温度变化率从  $2.85 \times 10^{-4}$  减小到  $1.53 \times 10^{-4}$  °C/s;  $30^\circ$ 试样的前兆点为  $0.87\sigma_p$ ,温度变化率从  $1.52 \times 10^{-4}$  °C/s 增加到  $3.39 \times 10^{-4}$  °C/s;  $60^\circ$ 试样的前兆点为  $0.86\sigma_p$ ,温度变化率从  $5.69 \times 10^{-4}$  °C/s 减小至  $-1.07 \times 10^{-3}$  °C/s;  $90^\circ$ 试样的前兆点为  $0.77\sigma_p$ ,

表2 不同层理角度试样峰值及破坏阶段应变能  
Table 2 Strain energy at peak stress and failure stage with different bedding angles

煤样编号	应力峰值阶段					破坏阶段				
	$U/$ ( $\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$U^e/$ ( $\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$U^d/$ ( $\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	能量积累率 $\frac{U^e}{U} / \%$	能量释放率 $\frac{U^d}{U} / \%$	$U/$ ( $\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$U^e/$ ( $\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$U^d/$ ( $\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	能量积累率 $\frac{U^e}{U} / \%$	能量释放率 $\frac{U^d}{U} / \%$
0°-1	0.330 5	0.316 4	0.014 3	95.72	4.28	0.331 1	0.002 2	0.328 8	0.67	99.33
0°-2	0.263 8	0.209 4	0.054 4	79.37	20.63	0.264 2	0.001 6	0.262 6	0.60	99.40
0°-3	0.286 2	0.280 7	0.005 5	98.09	1.91	0.286 9	0.002 4	0.284 6	0.83	99.17
30°-1	0.351 1	0.336 6	0.014 5	95.86	4.14	0.351 5	0.000 6	0.350 9	0.18	99.82
30°-2	0.307 1	0.291 5	0.015 6	94.92	5.08	0.307 2	0.000 1	0.307 1	0.01	99.99
30°-3	0.210 5	0.199 3	0.011 2	94.68	5.32	0.210 6	0.000 8	0.209 8	0.38	99.62
60°-1	0.061 1	0.054 2	0.006 9	88.74	11.26	0.070 4	0.001 2	0.069 2	1.73	98.22
60°-2	0.065 7	0.053 9	0.011 8	82.06	17.94	0.069 6	0.020 7	0.048 9	29.77	70.23
60°-3	0.056 7	0.045 1	0.011 8	79.29	20.71	0.057 6	0.000 1	0.057 5	0.02	99.98
90°-1	0.110 4	0.107 1	0.003 3	97.02	2.98	0.112 7	0.003 9	0.108 7	3.5	96.50
90°-2	0.066 9	0.057 2	0.009 7	85.55	14.45	0.067 2	0.014 3	0.052 9	21.27	78.73
90°-3	0.095 7	0.077 6	0.018 1	80.09	19.91	0.097 3	0.018 5	0.078 8	19.05	80.95

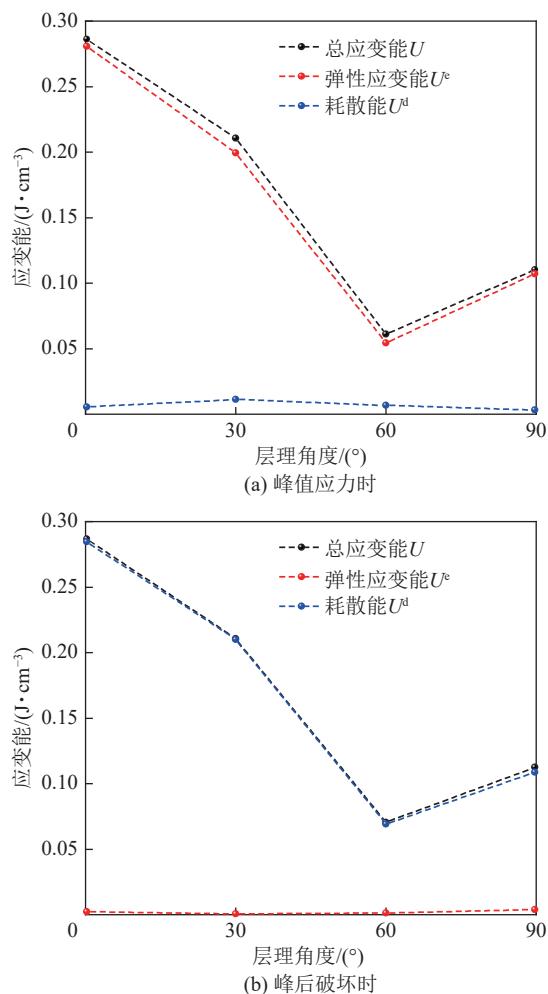


图6 不同应变能随层理角度变化规律  
Fig.6 Variation of strain energy with different bedding specimens

温度变化率从  $1.85 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  增加至  $3.15 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。不同层理试样的前兆点位于  $0.77\sigma_p \sim 0.87\sigma_p$ , 前兆点平均值为  $0.84\sigma_p$ 。

为了研究  $T_{\text{AIR}}$  在加载过程中的实时变化, 定义了不同时步的温差变化量  $\Delta t$  为

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i \quad (6)$$

式中:  $t_{i+1}$  为第  $i+1$  秒时的  $T_{\text{AIR}}$ ;  $t_i$  为第  $i$  秒时的  $T_{\text{AIR}}$ 。

不同层理试样变形破坏过程中  $\Delta t$  变化曲线如图 7 所示。可以看出不同试样温度变化量  $\Delta t$  变化趋势相近, 变形破坏过程中, 2 点之间的  $\Delta t$  主要集中在  $[-0.01, 0.01] \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 当试样加载至峰值应力阶段时,  $\Delta t$  出现绝对值大于  $0.01 \text{ }^{\circ}\text{C}$  的突增或突降, 例如  $0^\circ$  试样出现了  $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  的突增, 表明在此时出现了较大的温度突变。因此, 当  $\Delta t$  出现绝对值大于  $0.01 \text{ }^{\circ}\text{C}$  的突变时, 可以认为试样即将发生破坏。综合考虑, 将  $\Delta T = \pm 0.01 \text{ }^{\circ}\text{C}$  作为平均红外辐射温度的临界值, 可以视为煤样发生破坏的前兆点, 这与张艳博等<sup>[28]</sup>针对花岗岩的研究结果相似。

对加载过程中的温度变化量  $\Delta t$  累积求和, 得到试样的升温幅值  $\Delta T$ 。不同层理试样的升温幅度不同,  $0^\circ$  试样温度升高了  $1.12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $30^\circ$  试样温度升高了  $1.30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $60^\circ$  试样温度升高了  $0.46 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $90^\circ$  试样温度升高了  $0.41 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。分析其原因为试样宏观的破坏是能量释放与耗散的共通作用的结果, 煤岩体在变形过程中产生温度变化的组成<sup>[29-30]</sup>为

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 \quad (7)$$

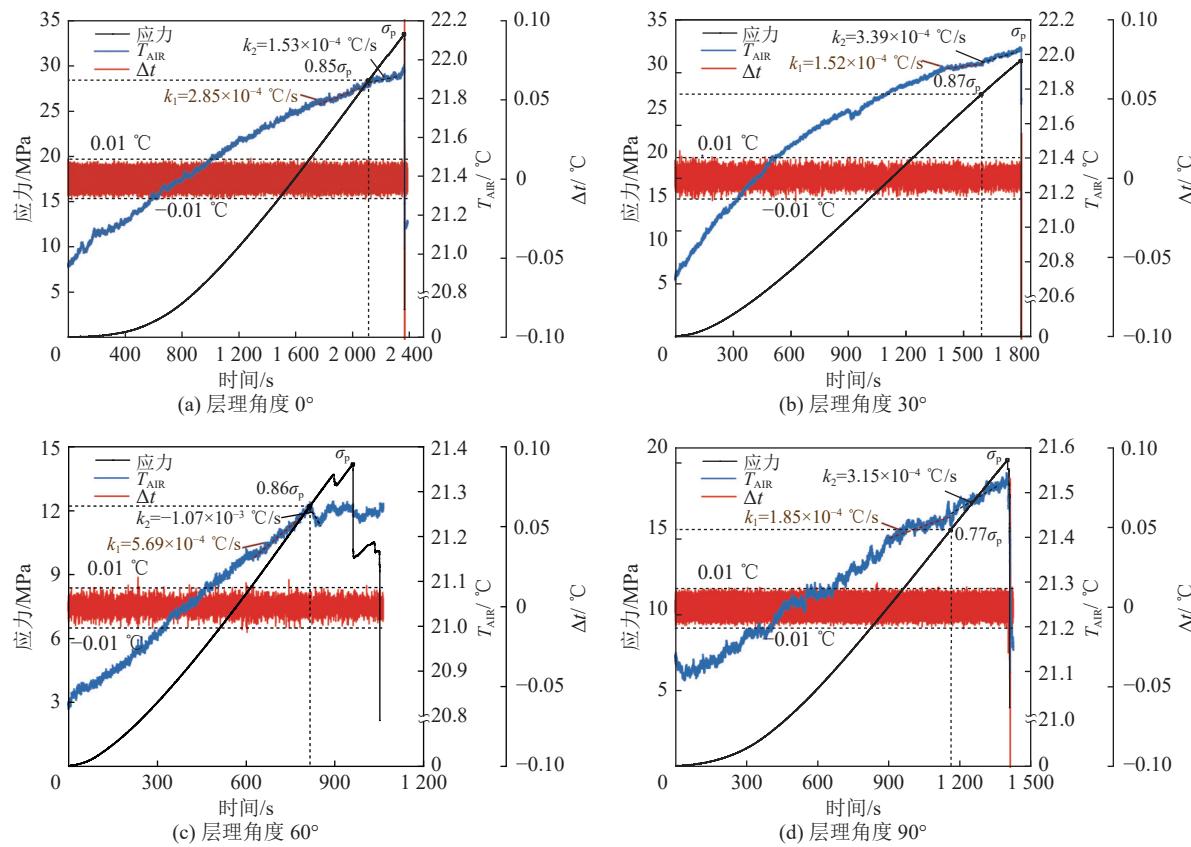


图7 不同层理试样平均红外辐射温度及温差演化规律

Fig.7 Evolution of the average infrared radiation temperature temperature difference with different bedding angle

式中:  $\Delta T_1$  为热弹效应产生的温度变化;  $\Delta T_2$  为微裂纹摩擦热效应产生的温度变化;  $\Delta T_3$  为裂纹扩展效应产生的温度变化。

多种效应的综合结果最终导致不同层理角度煤样的升温幅度产生了差异。煤样变形破坏的不同阶段导致了红外辐射信息的主因不同。压密阶段, 煤样的升温幅度较低, 煤样内部的裂纹闭合并短暂的经历了弹性阶段, 因此加载前期温度变化幅度较小。当进入弹性阶段时, 煤样温度变化由热弹效应主导, 升温幅度与煤样所受的主应力成正相关关系, 当煤样受到压应力时表现为升温, 受到拉应力时表现为降温。塑性阶段, 微裂纹的扩展是非平衡的不可逆热力学过程和能量耗散过程<sup>[31]</sup>。裂纹扩展过程中裂纹尖端附近的塑性区变形为过渡区, 这一过程伴随着能量的释放, 使得不断萌生的裂纹尖端位置呈高温状态<sup>[32-33]</sup>。加载后期, 煤样裂隙间的错动及破裂面之间摩擦生热成为热量的主要来源。而从能量释放过程来看, 煤岩体的红外辐射与能量的耗散与释放有关, 峰前积聚的能量越多, 破坏时释放出来的能量也就越多。0°及30°煤样强度大, 峰前阶段能量积聚最多, 破坏形式为复合破坏, 受热弹效应及摩擦效应共同作用下, 升温幅度较高, 而60°试样破坏形式

为沿层理面剪切破坏, 试样强度最低, 峰值时积聚的能量最小, 因此升温幅度低于0°试样。而90°试样破坏时沿层理面张拉破坏, 使得煤样体积扩张发生吸热效应, 使得张拉破裂面红外辐射温度降低。

此外煤样  $T_{\text{AIR}}$  变化也与煤的冲击倾向性呈正相关, 煤的冲击倾向性越强, 升温幅度越高<sup>[23]</sup>。煤作为一种层理异常发育的岩石, 其冲击倾向性深受层理影响。表3给出了不同层理煤样各冲击倾向性指标计算结果。将单轴抗压强度作为煤层的冲击倾向性判定指标时, 可以看出, 除60°与90°试样各有一组试样单轴抗压强度接近14 MPa, 其他试样单轴抗压强度均大于14 MPa, 属于强冲击倾向性煤样。同时也可看出层理角度对该指标影响明显, 当层理角度为0°时, 单轴抗压强度最大, 30°与90°次之, 60°时单轴抗压强度最小; 冲击能指数是指试样在单轴压缩状态下, 煤样峰前积聚的应变能与峰后损耗的应变能的比值。将冲击能指数  $K_E$  作为判定指标时, 所有层理角度煤样  $K_E$  大于规定的强冲击倾向性指标判定值( $K_E=5$ ), 因此可判定为强冲击倾向性煤; 动态破坏时间是指煤样在单轴压缩下, 从峰值强度到完全破坏所经历的时间。将动态破坏时间作为判定指标时, 可以看出0°、30°和90°试样的平均动态破坏时间

分别为 121、54 及 467 ms, 均处于 50~500 ms, 可判定为弱冲击倾向性。而 60°试样在峰后阶段出现了不同程度的台阶式跌落, 每次台阶跌落包括一段脆性垂直跌落和一段塑性变形, 由于峰后纯塑性变形的存在, 使得动态破坏时间大幅增加<sup>[7,34]</sup>, 远大于 500 ms, 因此判定为无冲击倾向性。

表 3 不同层理煤样冲击倾向性指标

Table 3 Impact tendency index of different bedding coal samples

煤样编号	判定指标		
	冲击能 $K_E$	峰值强度 $\sigma_p/\text{MPa}$	动态破坏时间 $T_D/\text{ms}$
0°-1	550	34.66	100
0°-2	659	28.20	74
0°-3	358	33.51	190
30°-1	877	33.33	82.2
30°-2	3 071	31.01	48
30°-3	2 105	26.03	32
60°-1	7	14.16	2 230
60°-2	17	14.32	3 000
60°-3	63	13.41	5 846
90°-1	48	20.17	340
90°-2	223	13.95	237
90°-3	7	17.17	823

综上所述, 根据 3 种判定指标可知不同层理角度试样均具有强冲击倾向性, 但其冲击倾向性程度受层理效应的作用明显。当层理角度为 0° 及 30° 时, 试样破坏剧烈, 冲击倾向性强, 而 60° 与 90° 试样冲击倾向性次之。因此, 0° 试样的升温幅度较大, 而 90° 试样升温幅度最小。

### 2.3.2 红外热像演化特征

红外热像图是红外温度场的可视化结果, 可以直观反映受载试样红外辐射强度及温度场的时空分布特征。为了减少环境噪声对热像图的影响, 将加载过程中的热像数据进行差值处理, 即将第 1 帧的红外热像图  $P_1$  中的各像素点温度作为基础帧, 加载后的某一帧  $P_i$  红外热像图中的各像素点温度减去基础帧  $P_1$  的各像素点温度, 计算并绘制出红外差值热像图, 处理过程如图 8 所示(其中,  $Q_{m \times n}$  为试样表面的温度矩阵;  $m$  为温度矩阵的行号;  $n$  为温度矩阵的列号)。

为了更好的描述岩石在变形过程各个阶段的红外辐射特征, 选择  $0.7\sigma_p$ 、 $0.8\sigma_p$ 、 $0.9\sigma_p$ 、 $\sigma_p$  及峰后破坏阶段共 5 个时刻的红外热像图进行对比分析, 如图 9

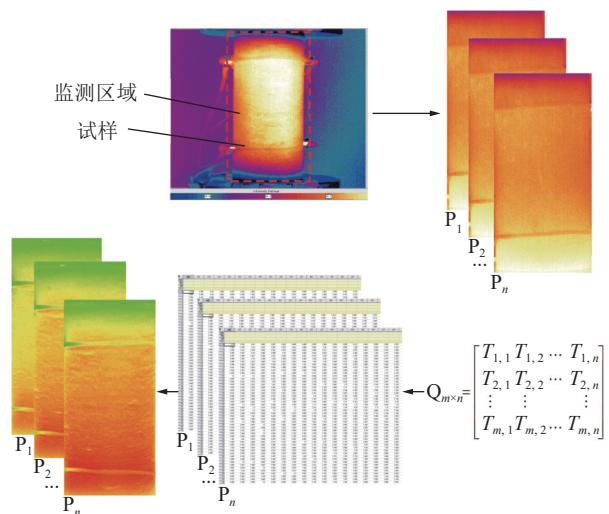


图 8 红外热像图处理方法

Fig.8 Infrared thermogram processing method

所示。可见, 试样表面的红外辐射温度场整体呈现升温趋势。0° 及 30° 试样出现沿层理面的高温条带; 60° 试样形成了沿剪切面的温度异常带; 90° 试样在图中首先在左上角出现了低温热像异常, 试样首先在此处发生了张拉破坏, 部分试样块体崩落, 随后载荷的增加, 试样整体形成沿层理面的渐进张拉破坏, 破裂面的温度远低于未破坏处。

对比红外温度与红外差值热像 2 种前兆信息, 发现红外差值热像前兆点距离煤样发生破坏的时间短, 其预警的前兆性较低; 而红外温度前兆点为  $0.84\sigma_p$ , 距离煤样发生破坏的时间较长, 其预警的前兆性较高。分析其原因, 由于 AIRT 的感应十分灵敏, 能够探测到煤样破坏过程中细微的温度变化, 而试样的破坏则是内部开始传递到表面, 引起红外热像产生异常需要煤样表面的温度变化量达到一定阈值, 因此 AIRT 的前兆点要早于红外热像的前兆点<sup>[35]</sup>。虽然红外差值热像预测煤样的破坏具有一定的劣势, 但是随着应力的增加高温点逐步聚集, 最终形成一个覆盖破裂面的温度异常区, 在空间上对煤样潜在破裂区域有良好的预警效果。

### 2.3.3 不同区域平均红外辐射温度演化特征

不同层理试样表面  $T_{\text{AIR}}$  表现出了一定的差异性, 试样表面  $T_{\text{AIR}}$  只能反映出试样的整体温度的变化趋势。因此为了研究试样表面不同区域的红外温度场变化规律, 在试样表面圈定了 3 个不同区域( $A$ 、 $B$ 、 $C$ ), 如图 10 所示。

图 11 为破坏过程中不同区域  $T_{\text{AIR}}$  随时间的变化规律。可以看出, 随着加载时间的增加, 区域  $A$  与试样整体的  $T_{\text{AIR}}$  变化趋势基本相似, 而区域  $B$  和  $C$

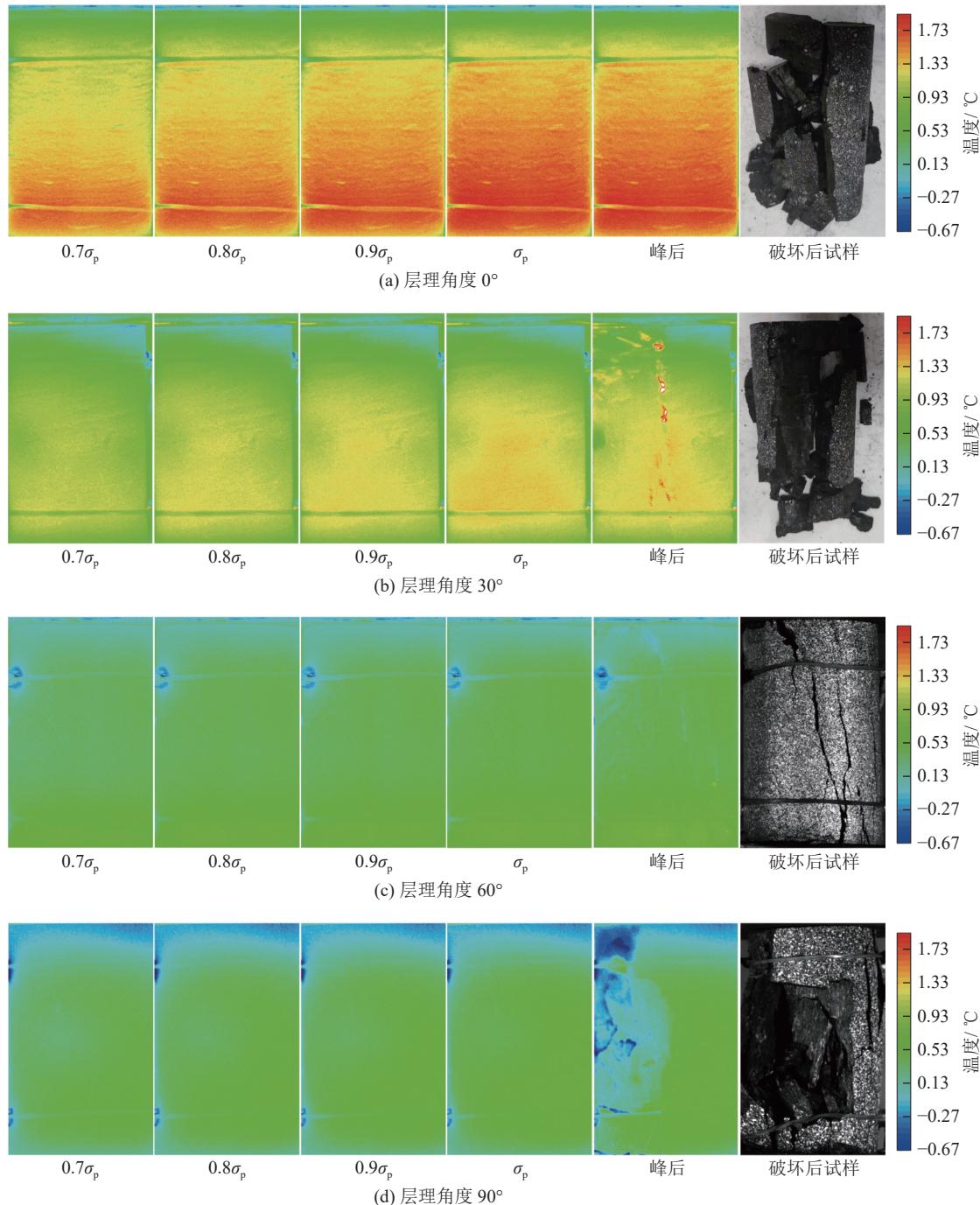


图9 不同层理角度红外差值热像演化过程

Fig.9 Evolution process of infrared differential thermal image with different bedding angles

的  $T_{\text{AIR}}$  变化趋势总体上保持一致。在加载前期, 由于试验机上压头做功施加力, 试样受端部效应的影响, 区域 A、B、C 的  $T_{\text{AIR}}$  分别为 21.05、20.83、20.80 °C, 区域 A 的  $T_{\text{AIR}}$  明显高于区域 B 和 C。当加载至峰值应力处时, 区域 A 的  $T_{\text{AIR}}$  由 21.05 增加至 21.89 °C, 增加了 0.84 °C, 而区域 B 由 20.83 增加至 22.07 °C, 增加了 1.24 °C, 区域 C 由 20.80 增加至 22.11 °C, 增加了 1.31 °C。整个加载过程, 区域 A、B、C 均呈升温趋势, 但区域 A 的升温幅度低于区域 B 和 C, 表明试

样的破坏主要集中于中下部, 这也符合红外热像图中的温度分布规律, 如图 9a 所示。

#### 2.4 应变能与红外辐射温度场相关关系

在岩石破坏过程中, 耗散能可分为内部结构的摩擦耗能和岩石发生破裂消耗的能量, 因此岩石破裂主要驱动能来自于耗散能<sup>[36]</sup>。本文引入皮尔逊相关系数  $\gamma$ , 定量研究煤变形破坏过程中各能量与平均红外辐射温度间的相关关系。皮尔逊相关系数是描述不同变量之间相关关系强弱程度的统计指标, 其

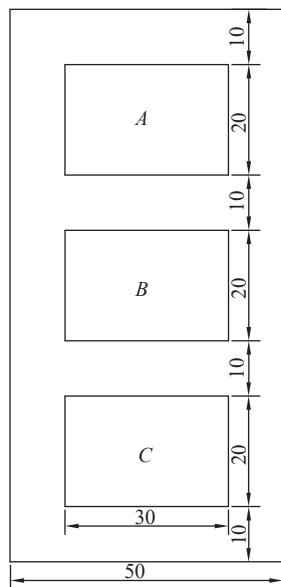


图 10 试样不同监测区域

Fig.10 Different monitoring areas of specimen

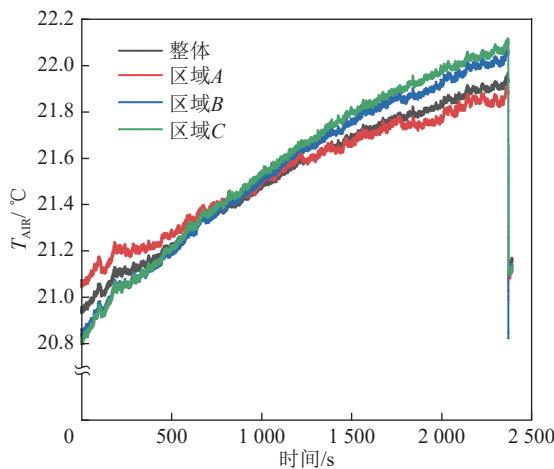


图 11 不同监测区域平均红外辐射温度(0°试样为例)

Fig.11 Average infrared radiation temperature in different monitoring areas(0° specimen as an example)

取值范围为  $[-1, 1]$ , 大于 0 时为正相关, 反之为负相关, 相应的计算公式为

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{U,i} - \bar{S}_U)(S_{T,i} - \bar{S}_T)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_{U,i} - \bar{S}_U)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_{T,i} - \bar{S}_T)^2}} \quad (8)$$

式中:  $n$  为时步总数;  $S_{U,i}$ 、 $S_{T,i}$  分别为某一点  $i$  的应变能和  $T_{\text{AIR}}$ ;  $\bar{S}_U$ 、 $\bar{S}_T$  分别为应变能和  $T_{\text{AIR}}$  的平均值, 即:

$$\bar{S}_U = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{U,i} \quad (9)$$

$$\bar{S}_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{T,i} \quad (10)$$

皮尔逊相关系数  $\gamma$  的绝对值反映了 2 个变量间的相关程度, 见表 4。

表 4 相关系数与相关强弱程度关系<sup>[37]</sup>Table 4 Relationships between correlation coefficient and degree of correlation<sup>[37]</sup>

相关系数绝对值	相关程度强弱
0	不相关
(0 ~ 0.3]	微弱
(0.3 ~ 0.5]	低度
(0.5 ~ 0.8]	显著
(0.8 ~ 1.0]	高度
1.0	完全

对 4 种不同层理的总应变能、弹性应变能及耗散能与红外辐射温度计算相应的相关系数, 计算结果见表 5, 可得不同层理煤样应变能与平均红外辐射温度间的相关系数分别为: 总应变能  $U$  的相关系数在  $0.555 \sim 0.863$ , 呈显著或高度正相关关系; 弹性应变能  $U^e$  的相关系数在  $0.789 \sim 0.877$ , 呈显著或高度正相关关系; 耗散能  $U^d$  的相关系数在  $0.885 \sim 0.970$ , 呈高度正相关关系。综合表明应变能与平均红外辐射温度均呈正相关关系, 且相关程度总应变能  $U <$  弹性应变能  $U^e <$  耗散能  $U^d$ 。

表 5 应变能与平均红外辐射温度之间相关系数计算结果

Table 5 Calculation results on correlation coefficient

between strain energy and average infrared radiation temperature

层理角度/(°)	能量类型	相关系数	相关程度
0	总应变能 $U$	0.835	高度
	弹性应变能 $U^e$	0.800	显著
	耗散能 $U^d$	0.970	高度
30	总应变能 $U$	0.818	高度
	弹性应变能 $U^e$	0.789	显著
	耗散能 $U^d$	0.886	高度
60	总应变能 $U$	0.863	高度
	弹性应变能 $U^e$	0.829	高度
	耗散能 $U^d$	0.930	高度
90	总应变能 $U$	0.555	显著
	弹性应变能 $U^e$	0.877	高度
	耗散能 $U^d$	0.885	高度

### 3 结 论

1) 随着层理角度的增加, 单轴抗压强度及应变能均呈先减小后增加的 V 型趋势, 试样为 60°时强度

最低。而应变能方面,峰前阶段层理对  $U^e$  影响显著,对  $U^d$  影响较小,峰后阶段层理对  $U^d$  影响显著,而对  $U^e$  的影响较小。

2)平均红外辐射温度与轴向应力表现出良好的正相关性,基于平均红外辐射温度的前兆点为  $0.84\sigma_p$ ,在时间尺度上红外温度的前兆信息具有明显优势,但红外差值热像图对煤样潜在破裂区域有良好的预警效果。

3)随着层理角度的增加,0°和30°试样发生张-剪破坏,升温幅度较高,分别为1.12和1.30 °C,而60°试样发生剪切破坏,升温幅度较低为0.46 °C,90°试样破坏以拉伸破坏为主,升温幅度最低为0.4 °C。同时,平均红外辐射温度变化也与煤的冲击倾向性呈正相关,煤的冲击倾向性越强,升温幅度越高。

4)应变能与平均红外辐射温度呈正相关,相关系数分别是:  $U$  为  $0.555 \sim 0.863$ ,  $U^e$  为  $0.789 \sim 0.877$ ,  $U^d$  为  $0.885 \sim 0.970$ 。综合表明,相关程度为  $U < U^e < U^d$ 。

#### 参考文献(References):

- [1] 齐庆新,李一哲,赵善坤,等.我国煤矿冲击地压发展70年:理论与技术体系的建立与思考[J].煤炭科学技术,2019,47(9):1-40.  
QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shunkun, et al. Seventy years development of coal mine rockburst in China: Establishment and consideration of theory and technology system[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 1-40.
- [2] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报,2014,39(2):205-213.  
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [3] 杨起,韩德馨.中国煤田地质学-上册-煤田地质基础理论[M].北京:煤炭工业出版社,1979:22-54.
- [4] TIEN Y M, KUO M C, JUANG C H. An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(8): 1163-1181.
- [5] YOUNG R P, NASSERI M H B, SEHIZADEH M. Mechanical and seismic anisotropy of rocks from the ONKALO underground rock characterization facility[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 126: 104190.
- [6] 卞宏伟,何学秋,宋大钊,等.不同节理夹角煤单轴压缩力学和声发射响应及影响机制[J].煤炭学报,2020,45(5):1726-1732.  
MU Hongwei, HE Xueqiu, SONG Dazhao, et al. Response characteristics and influence mechanism of uniaxial compression mechanics and AE of coal with different joint angles[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1726-1732.
- [7] 郝宪杰,袁亮,王少华,等.硬煤冲击倾向性的层理效应研究[J].煤炭科学技术,2018,46(5):1-7.  
HAO Xianjie, YUAN Liang, WANG Shaohua, et al. Study on bed-
- ding effect of bump tendency for hard coal[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(5): 1-7.
- [8] SONG H H, ZHAO Y X, ELSWORTH D, et al. Anisotropy of acoustic emission in coal under the uniaxial loading condition[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2020, 130: 109465.
- [9] SONG H H, ZHAO Y X, WANG J H, et al. Loading rates dependency of strength anisotropy in coal: based on the three-dimensional reconstruction modeling technology[J]. Energy Science & Engineering, 2021, 9(6): 855-864.
- [10] 龚爽,赵毅鑫,王震,等.层理对煤岩动态裂纹扩展分形特征的影响[J].煤炭学报,2021,46(8):2574-2582.  
GONG Shuang, ZHAO Yixin, WANG Zhen, et al. Effect of bedding on the fractal characteristics of dynamic crack propagation in coal rocks[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2574-2582.
- [11] 张朝鹏,张茹,张泽天,等.单轴受压煤岩声发射特征的层理效应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(4):770-778.  
ZHANG Zhaopeng, ZHANG Ru, ZHANG Zetian, et al. Experimental research on effects of bedding plane on coal acoustic emission under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 770-778.
- [12] 刘晓辉,戴峰,刘建峰,等.考虑层理方向煤岩的静动巴西劈裂试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(10):2098-2105.  
LIU Xiaohui, DAI Feng, LIU Jianfeng, et al. Brazilian splitting tests on coal rock considering bedding direction under static and dynamic loading rate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 2098-2105.
- [13] 刘恺德,刘泉声,朱元广,等.考虑层理方向效应煤岩巴西劈裂及单轴压缩试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(2):308-316.  
LIU Kaide, LIU Quansheng, ZHU Yuanguang, et al. Experimental study of coal considering directivity effect of bedding plane under Brazilian splitting and uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 308-316.
- [14] XIAO F K, HE J, LIU Z J, et al. Analysis on warning signs of damage of coal samples with different water contents and relevant damage evolution based on acoustic emission and infrared characterization[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 97: 287-299.
- [15] WANG C L, LU Z J, LIU L, et al. Predicting points of the infrared precursor for limestone failure under uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 88: 34-43.
- [16] 陈健民.地应力与岩体红外辐射现象理论初探[J].煤炭学报,1995,20(3):256-259.  
CHEN Jianmin. Theory of ground stress and infrared radiation of rockmass[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(3): 256-259.
- [17] LUONG Minh Phono. Infrared thermovision of damage processes in concrete and rock[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 35(1-3): 291-301.
- [18] SHEN R X, LI H R, WANG E Y, et al. Infrared radiation charac-

- teristics and fracture precursor information extraction of loaded sandstone samples with varying moisture contents[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 130: 104344.
- [19] CAO K W, MA L Q, ZHANG D S, et al. An experimental study of infrared radiation characteristics of sandstone in dilatancy process[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 136: 104503.
- [20] LI B, HE Y Z, LI L, et al. Damage evolution of rock containing prefabricated cracks based on infrared radiation and energy dissipation[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, 125: 103853.
- [21] 赵毅鑫, 姜耀东, 韩志茹. 冲击倾向性煤体破坏过程声热效应的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(5): 965–971.
- ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, HAN Zhiru. Experimental study on acoustic and thermal infrared characteristics of bump-prone coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 965–971.
- [22] 杨桢, 齐庆杰, 叶丹丹, 等. 复合煤岩受载破裂内部红外辐射温度变化规律[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(3): 618–624.
- YANG Zhen, QI Qingjie, YE Dandan, et al. Variation of internal infrared radiation temperature of composite coal-rock fractured under load[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(3): 618–624.
- [23] 徐子杰, 齐庆新, 李宏艳, 等. 冲击倾向性煤体加载破坏的红外辐射特征研究[J]. *中国安全科学学报*, 2013, 23(10): 121–125.
- XU Zijie, QI Qingxin, LI Hongyan, et al. Research on infrared radiation characteristics of outburst proneness coal's failure by loading[J]. *China Safety Science Journal*, 2013, 23(10): 121–125.
- [24] 刘斌, 赵毅鑫, 张汉, 等. 单轴压缩及劈裂试验下煤的声发射特征研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(3): 613–621.
- LIU Bin, ZHAO Yixin, ZHANG Han, et al. Acoustic emission characteristics of coal under uniaxial compression and Brazilian splitting[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(3): 613–621.
- [25] 国际岩石力学学会实验室和现场试验标准化委员会. 岩石力学试验建议方法—上集 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1982.
- [26] 腾腾, 高峰, 张志镇, 等. 含瓦斯原煤三轴压缩变形时的能量演化分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(4): 663–669.
- TENG Teng, GAO Feng, ZHANG Zhizhen, et al. Analysis of energy evolution on gas saturated raw coal under triaxial compression[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(4): 663–669.
- [27] LIANG C Y, WU S R, LI X, et al. Effects of strain rate on fracture characteristics and mesoscopic failure mechanisms of granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 76: 146–154.
- [28] 张艳博, 梁鹏, 刘祥鑫, 等. 基于多参量归一化的花岗岩巷道岩爆预测试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(1): 96–104.
- ZHANG Yanbo, LIANG Peng, LIU Xiangxin, et al. An experimental study of predicting rockburst in granitic roadway based on multiparameter normalization[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(1): 96–104.
- [29] 宋月歆, 任富强, 刘冬桥. 大理岩应变型岩爆红外前兆特征试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(3): 609–617.
- SONG Yuexin, REN Fuqiang, LIU Dongqiao. Experimental study on infrared precursors of marble strain burst[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(3): 609–617.
- [30] SUN X M, XU H C, HE M C, 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.
- [31] 杜园园, 孙海, 马立强, 等. 煤损伤演化过程中的红外辐射响应特征研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(9): 67–74.
- DU Yuanyuan, SUN Hai, MA Liqiang, et al. Characteristics of infrared radiation response during coal damage evolution[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(9): 67–74.
- [32] 汪懋骅. 快传播裂隙尖周围的温度场[J]. *应用数学和力学*, 1984, 5(6): 873–878.
- WANG Maohua. The temperature fields around the tip of a fast running crack[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 1984, 5(6): 873–878.
- [33] 张俊彦, 张淳源. 裂纹扩展条件及其温度场研究[J]. *湘潭大学自然科学学报*, 1996, 18(1): 102–105.
- ZHANG Junyan, ZHANG Chunyuan. Investigation on the conditions of a running crack and the temperature fields of the tip of a running crack[J]. *Natural Science Journal of Xiangtan University*, 1996, 18(1): 102–105.
- [34] 李磊, 李宏艳, 李凤明, 等. 层理角度对硬煤冲击倾向性影响的实验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(5): 987–994.
- LI Lei, LI Hongyan, LI Fengming, et al. Experimental study of the effect of bedding angle on hard coal bursting liability[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(5): 987–994.
- [35] 陈国庆, 张岩, 李阳, 等. 岩石真三轴加载破坏的热–声前兆信息链初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(9): 1764–1776.
- CHEN Guoqing, ZHANG Yan, LI Yang, et al. Thermal-acoustic precursor information chain of rock failure under true triaxial loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(9): 1764–1776.
- [36] JIN J, CAO P, CHEN Y, et al. Influence of single flaw on the failure process and energy mechanics of rock-like material[J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, 86: 150–162.
- [37] 张科, 李娜, 陈宇龙, 等. 裂隙砂岩变形破裂过程中应变场及红外辐射温度场演化特征研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(S1): 95–105.
- ZHANG Ke, LI Na, CHEN Yulong, et al. Evolution characteristics of strain field and infrared radiation temperature field during deformation and rupture process of fractured sandstone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(S1): 95–105.