



移动扫码阅读

冯小军, 丁增, 王恩元, 等. 预制裂纹煤体静载黏滑亚失稳及声电信号响应特征[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 72-81.

FENG Xiaojun, DING Zeng, WANG Enyuan, *et al.* Stick-slip meta-instability of coal under uniaxial loading and AE and EMR response characteristics[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 72-81.

预制裂纹煤体静载黏滑亚失稳及声电信号响应特征

冯小军^{1,2}, 丁增¹, 王恩元¹, 李德行¹, 张奇明¹

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 河南神火集团有限公司, 河南 永城 476600)

摘要: 亚失稳阶段是断层黏滑失稳过程中前兆信息最丰富、变化最激烈的阶段。为深入探索煤体黏滑亚失稳阶段显现特征及该过程的声电信号响应规律, 开展了不同预制裂纹倾角煤样单轴下的分级加载实验, 同步采集了试样的内部破裂源定位和表面位移场, 以及声发射和电磁辐射信号, 并对煤体亚失稳过程力学行为和声电特征进行了分析。结果表明: ① 预制裂纹倾角显著影响受载煤样内部应力分布, 及亚失稳阶段新生裂纹的拓展分布情况, 声发射计数和能量对应力和破坏响应明显, 临近黏滑亚失稳时, 声发射计数和能量同时出现激增, 信号占比接近 20%, 该响应特征可作为裂纹煤样进入黏滑亚失稳阶段的判断依据; ② 在进入亚失稳状态后, 电磁辐射活动最为剧烈, 与应力骤降的发生时间几乎相吻合, 主破裂发生前, 电磁辐射的能量和幅值急剧增高, 且峰值能量随裂纹倾角的增加呈先增后减小, 裂纹倾角 45° 的煤样在亚失稳状态时电磁辐射计数占失稳总过程的比例最大; ③ 亚失稳阶段煤样的破裂轮廓已经基本形成, 预制裂纹倾角对煤样亚失稳阶段时长影响显著, 倾角 45° 时亚失稳阶段时长占比最长, 倾角为 60° 时最短。研究成果可为断层亚失稳状态监测方案制定, 及断层构造区大型冲击地压演化及致灾机理研究提供理论支撑。

关键词: 声发射; 电磁辐射; 预制裂纹; 黏滑亚失稳; 冲击地压

中图分类号: TD324

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)05-0072-10

Stick-slip meta-instability of coal under uniaxial loading and AE and EMR response characteristics

FENG Xiaojun^{1,2}, DING Zeng¹, WANG Enyuan¹, LI Dexing¹, ZHANG Qiming¹

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Henan Shenhuo Grp Co., Ltd., Yongcheng 476600, China)

Abstract: Meta-instability stage is the most abundant precursory information and the most intense change stage in the process of fault stick-slip instability. In order to deeply explore the characteristics of coal meta-instability and the response law of acoustic and electrical signals in this process, the uniaxial graded loading experiments of coal samples with different prefabricated crack angles were carried out. The internal fracture source location, surface displacement field, acoustic emission and electromagnetic radiation signals of the samples were synchronously collected, and the mechanical behavior and acoustic and electrical characteristics of coal meta-instability were analyzed. The results show that: ① The inclination angle of the prefabricated crack significantly affects the internal stress distribution of the loaded coal sample, and even the expansion distribution of the new cracks in the meta-instability stage. The acoustic emission count and energy have obvious responses to stress and failure. When the meta-instability is near, the acoustic emission count and energy increase sharply at the same time, and the signal proportion is close to 20%. The response characteristics can be used as the basis for judging the crack coal sample entering the meta-instability stage. ② After entering the meta-instability state, the electromagnetic radiation activity is the most intense, which is almost consistent with the occurrence time of stress drop. Before the main fracture occurs, the energy and amplitude of electromagnetic radiation increase sharply, and the peak energy increases first and then decreases with the increase of crack dip angle.

收稿日期: 2022-05-10 责任编辑: 常琛 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-1015

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52004267); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20180644); 博士后基金资助项目(2020M672235)

作者简介: 冯小军(1987—), 男, 四川德阳人, 副教授, 硕士生导师, 博士。Tel: 0516-83884695, E-mail: xiaojun.feng@cumt.edu.cn

When the crack dip angle is 45° , the electromagnetic radiation count accounts for the largest proportion of the total instability process. ③ The fracture profile of the coal sample in the meta-instability stage has been basically formed. The inclination angle of the prefabricated crack has a significant impact on the duration of the meta-instability stage of the coal sample. When the inclination angle is 45° , the duration of the meta-instability stage is the longest, and when the inclination angle is 60° , the duration proportion is the shortest. The research results can be used to formulate the monitoring scheme of fault meta-instability, and the evolution and disaster of large-scale rock burst in fault structural area

Key words: acoustic emission; electromagnetic radiation; pre-existing flaw; stick-slip meta-instability; rock burst

0 引 言

冲击地压是煤矿井工开采中岩体弹性能剧烈释放,并伴随煤岩体突然、猛烈破坏的现象。其本质是地质构造和地层结构在采掘动态平衡过程中能量稳态积聚及非稳态释放的结果^[1-3]。随着煤矿逐步进入深部开采阶段,地应力增大,采场结构愈发复杂,冲击地压危险性不断升高。断层型冲击地压受构造应力、断层产状、围岩力学性质及开采扰动等因素综合影响,具有发生频次高、破坏强度大、机理复杂且防治难度大等特点,危险性最高,影响最大。如南非 Witwatersrand 金矿,受矿区内断层影响,多次发生冲击地压,最大震级达到 5 级。我国河南、辽宁、山东、黑龙江等矿区都发生过断层冲击地压,如义马千秋煤矿(2011-11-03)、山东龙郓煤业(2018-10-20)、山东新巨龙能源龙固煤矿(2020-02-22)等大型冲击地压事故均受矿区内大断层活化影响。学者们研究发现,断层黏滑亚失稳阶段是应力聚集过渡为能量释放的关键阶段,标志着断层进入不可逆变形过程,断层失稳已不可避免^[4],同时该阶段也是断层临失稳前兆信息最丰富、变化最激烈的阶段。根据应力时间曲线的趋势变化情况,断层黏滑失稳可划分为线性、强偏离线性、亚失稳及失稳 4 个阶段^[5-6]。

国内外学者对预制裂纹岩体破坏失稳开展了广泛研究,岩体受压载时原生裂隙压实后发生摩擦,尖端处根据受力情况形成张拉型或压剪型裂纹。岩体受到冲击时,会出现裂纹分叉,导致更为丰富多变的裂纹连接分布^[7-8]。王亚飞等^[9]采用含有不同偏置长度的预制裂纹花岗岩试件开展 3 点弯曲试验,随着预制裂纹偏置长度增大,岩石峰值荷载增加。马鹏飞^[10]等引入反映岩石类材料破坏特性的应变能密度准则,弥补了近场动力学方法在模拟岩石类材料裂纹扩展时无法反应岩石应变软化特性及异质性的不足。黄旭超等^[11]采用真三轴水力压裂试验系统,发现裂纹优先在强度软煤层中扩展,厚度较薄煤层在裂纹竞争扩展中占据优势。李清等^[12]发现在加载速率和试件缺陷特征的共同作用,预制孔洞尺寸存在

最优值,该值对裂纹再起裂的抑制作用和钝化作用最为明显。LIU 等^[13]研究水力压裂发现随着预制裂纹倾角的增大,破裂所需压力逐渐增大,裂缝拓展长度先增后减。CHEN 等^[14]利用尖点突变理论建立了具有一般走滑断层软化形式的尖点突变模型。KONSTANTINOVSKAYA 等^[15]应用 TOUGH-FLAC 耦合模型评价了高倾角正断层的剪切破坏潜力,以及盖层单元的拉伸破坏风险。

在煤岩破裂地球物理响应方面,WANG 等^[16]采用定量声发射技术对硬煤梁可控断裂试验中微裂纹的三维定位与表征进行了试验研究。HE 等^[17]研究揭示了岩石异质性和岩石强度对水力压裂重定向的影响。TRIPATHI 等^[18]认为矿井火灾热应力会导致微裂纹的发展、有机物质的蒸发以及矿物的脱水和热分解,并全面阐述了在特定温度范围内砂岩的热效应。LOTIDIS 等^[19]研究了钙质大理岩单轴压缩下声发射效应,发现拉伸声发射信号的来源在所研究的物理模型的压裂过程中占据主导地位。YU 等^[20]常规围压下煤样内部裂纹演化和声发射特性进行了模拟研究,发现随着围压的增加,煤样破坏时的总裂纹增加速率逐渐减小,煤样呈现出由拉伸破坏向剪切破坏的过渡趋势,声发射冲击计数最大值略滞后于峰值强度对应的时间点。艾迪昊等^[21]提出了一种煤体裂纹快速提取方法并计算了型煤裂纹面积的变化规律,型煤在单轴压缩过程中产生的微震、电磁辐射信号及裂纹面积在时域上具有良好同步性。

大型构造区冲击地压灾害,具有破坏范围大、影响因素复杂、前兆不明显等特点,其灾害演化及致灾机理尚未完全揭示,断层黏滑亚失稳模型的提出深入推进了对断层失稳前兆信息研究。BRACE 等^[22]在 1966 年岩石破裂实验中发现了摩擦滑动黏滑现象,并把摩擦效应引入断层黏滑失稳问题研究。马瑾等^[23]在 1995 年发现断层前期主要为应变积累阶段(线性和强偏离线性),当八瓣式和四象限式分布的应力增量场出现时,断层将进入不可逆转的孕震阶段,亚失稳概念初具雏形。马瑾团队在 2000 年震例分析中观测到川渝地区大地震前后板块边界断层呈现

显著的变形协同化过程,该发现提供了亚失稳理论的现场依据。随后,该团队在2012年得到了断层变形协同化的温度场响应特征,发现亚失稳阶段应力释放已占据优势,协同作用趋于完成,提出用整体应力应变场演化来评估亚失稳断层的地震危险性,意味着只要能探测识别出断层亚失稳阶段,就能显著提高地震预报准确率^[24],以此为基础形成了断层亚失稳力学模型^[25-27]。张淑亮等^[28]研究发现断层亚失稳阶段多点多物理场共性特征,地震震前多种地球物理场异常随时间推移显示出协同化的特点。张希等^[29]观测到震区附近断层反向异常增多增强,灰色关联度张压分量时序变化与亚失稳实验所得应力-时间过程相似,断层反向变化区域明显增多。李世念等^[30]发现伴随断层局部卸载而出现的应变局部化加速是进入亚失稳准静态阶段的近场判据,每个子阶段都存在短暂的准备期,有助于地震临震预测。

但是目前对断层亚失稳阶段显现特征及机理研究主要集中在花岗岩等坚硬岩石。由于煤系地层相对软弱,其断层黏滑亚失稳阶段的显现特征与坚硬岩石大有不同,因此,笔者基于静载作用下预制裂纹煤样破坏失稳实验,拟对不同预制裂纹倾角煤样黏滑亚失稳阶段显现特征及声电信号响应规律展开研究。研究成果可为断层亚失稳状态监测方案制定,及断层构造区大型冲击地压演化及致灾机理研究提

供理论支撑。

1 试样制备及试验系统

1.1 试样制备

煤样取自陕西省榆林市张明沟矿,通过钻取、切割和打磨加工制作成尺寸为50 mm×50 mm×100 mm的标准长方体试样,表面光滑,平整度小于0.02 mm,端面相互平行且垂直试样的中轴线,允许偏差角小于0.25°,试样加工完用保鲜膜封装防止风化。进行单一变量试验,预制裂纹为单裂纹,长度均为20 mm,宽度均为1.5 mm,深度均为50 mm(贯穿试样)。其中,预制裂纹倾角 α 定义为以试样中心为旋转中心,水平面绕试样中心逆时针方向旋转到达预制裂纹所需经过的旋转角度,见表1,从小到大依次为0°、30°、45°、60°、90°。如图1所示,在煤样表面喷涂白漆打底,再喷射随机黑色散斑,以便DIC观测。

表1 煤样裂纹试样倾角参数

Table 1 Crack angle parameters of coal samples

试样编号	裂纹倾角 / (°)
α_1	0
α_2	30
α_3	45
α_4	60
α_5	90

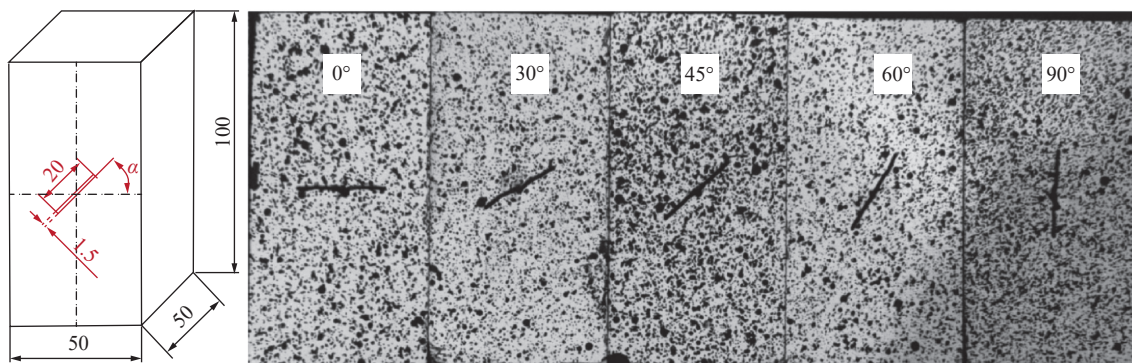


图1 预制裂纹煤样几何参数示意及散斑煤样

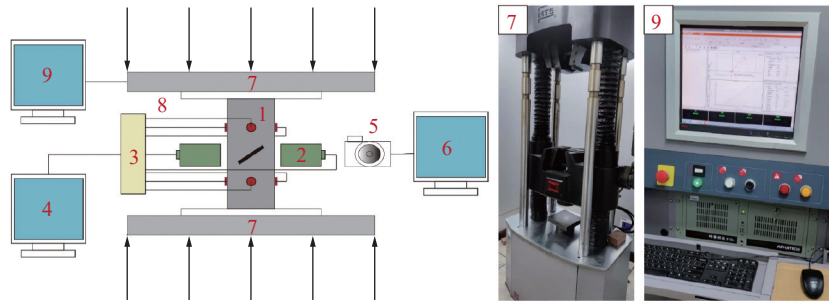
Fig.1 Schematic of geometric parameters of cracked specimens and static load test cracked specimens

1.2 试验系统及方案

如图2所示,试验系统主要包括加载控制系统(位移控分级加载模块)、声电监测系统和变形监测系统。加载系统为伺服压力机及其配套的加载控制台,支持力控、位移控、应变控等,支撑底座可作轻微调整,在试样与上压头做到充分接触后保持固定,降低试样表面不平整导致端部翘曲产生的局部应力集中效应。为了模拟工作面生产过程中矿压逐渐增加的

场景,采用位移控制分级加载方式:加载速率恒定0.2 mm/min,加载阶段持续1.5 min,位移保持阶段持续1 min。压头接触试样后,开启加载并启动各数据采集系统;通过伺服液压机对煤样进行分级加载实验,通过监测受载损伤直至失稳过程中的表面应变、声发射和电磁辐射信息。

声电监测系统记录预制裂纹煤样加载过程中的破裂源定位信息及声电参数,设置6个声发射探头,



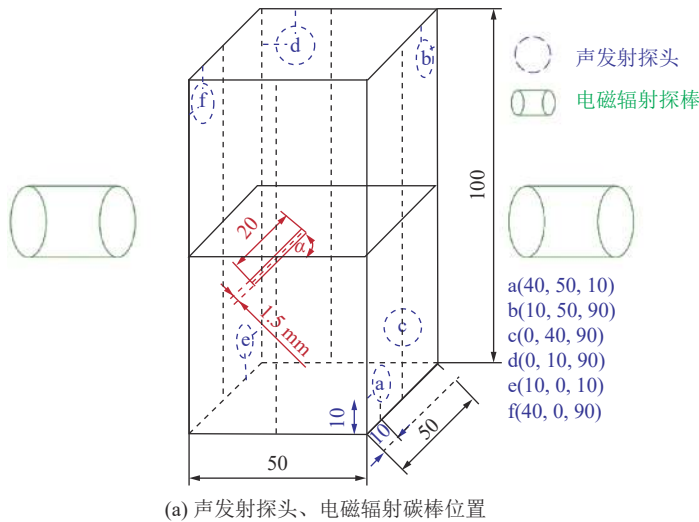
1—声发射探头；2—电磁辐射探头；3—前置放大器；4—声电采集系统；5—工业相机；6—相片采集系统；7—伺服压力机；8—绝缘垫片；9—压机加载控制系统

图 2 静载试验加载系统

Fig.2 Static load experiment system

2 个电磁辐射探棒,如图 3 所示。由于破坏所致电磁辐射信号相对容易受到环境电磁噪声的干扰,试验在电磁屏蔽室中进行,以降低了外界较强的环境电磁干扰。屏蔽室整体接地,加载系统、声电采集系统和变形演化监测系统均置于其中。

变形演化监测系统采用工业相机和数字图像相关方法 (DIC) 对试样表面进行录像,该系统可对裂隙煤样试验破坏过程进行位移场和裂隙场的实时动态观测。工业相机正对着试样,调整焦距和光圈,调节外接光源位置朝向,确保试样上的散斑清晰可见。



(a) 声发射探头、电磁辐射探棒位置



(b) 声发射及电磁辐射采集仪

图 3 声发射电磁辐射采集系统

Fig.3 Acoustic emission electromagnetic radiation collection system

2 结果分析

2.1 煤体破裂声发射特征及表面位移

试验中的声发射定位是通过定义一个三维立方体,预设各探头所在的空间坐标,探头根据接受破裂源发射出声信号所需的时间,结合试样测得的超声波波速,得出破裂源所在的三维坐标^[31-32]。亚失稳阶段时破裂源三维定位如图 4 所示。利用高速相机及 MatchID 软件,对预制裂纹煤样亚失稳阶段的表面垂直位移特性进行了分析,如图 5 所示,结合破裂源声发射定位结果(图 4),得到如下结果:在试样处于亚失稳阶段时,当预制裂纹倾角为 0°,即预制裂纹

处于水平轴线上,声发射定位主要是分布在裂纹上方,预制裂纹的 2 个端点处上方出现 2 个新生裂纹,在预制裂纹中心点处出现一条竖直向下的裂纹和一条斜向左延伸至试样左下角的裂纹。当预制裂纹倾角为 30°时,新生裂纹主要集中在预制裂纹的中心位置,向下延伸 2 道新生裂纹,在预制裂纹右上角则是出现一道向左上方延伸的裂纹,此外,试样右上端也发生破裂,出现倾角约为 75°的新裂纹。当预制裂纹倾角为 45°时,在预制裂纹的两端分别对称出现一对近乎与水平面垂直的新生裂纹。此外,试样的左下端部和右上端部也发生破裂。当预制裂纹倾角为 60°时,预制裂纹中心未出现裂纹,以预制裂纹两

端为起始点, 新生裂纹走向为先向中弯曲靠拢后向外侧拓展。此外, 试样右下端部破坏面积大且严重, 左侧上部也发生破坏。当预制裂纹倾角为 90° 时, 即预制裂纹处于竖直轴线上, 预制裂纹的 2 个端部出

现新生裂纹, 主要是在裂纹两侧发生劈裂破坏, 其中预制裂纹左侧破坏比右侧严重的多, 几乎从下延伸到试样上端, 而右侧则主要是发生在试样的中部和下部。

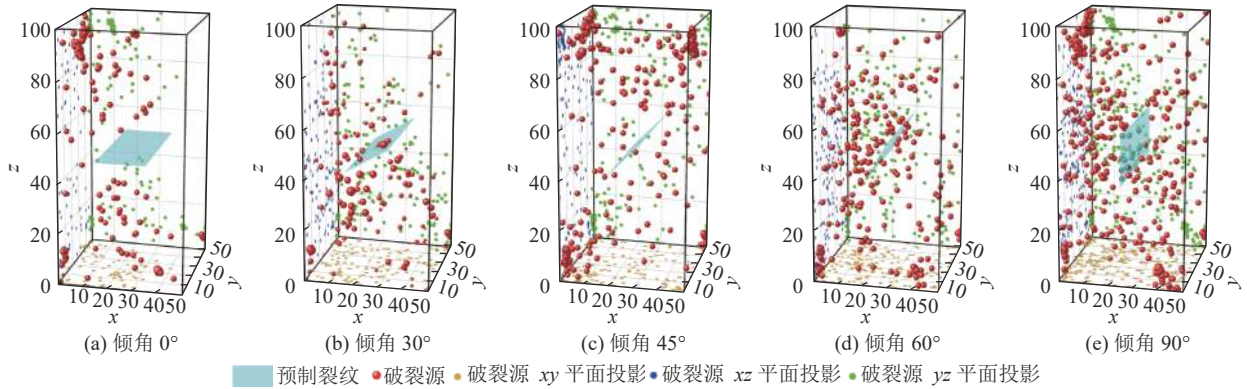


图 4 亚失稳阶段不同倾角预制裂纹的破裂源声发射定位

Fig.4 Acoustic emission location of fragmentation source of prefabricated cracks with different inclination angles

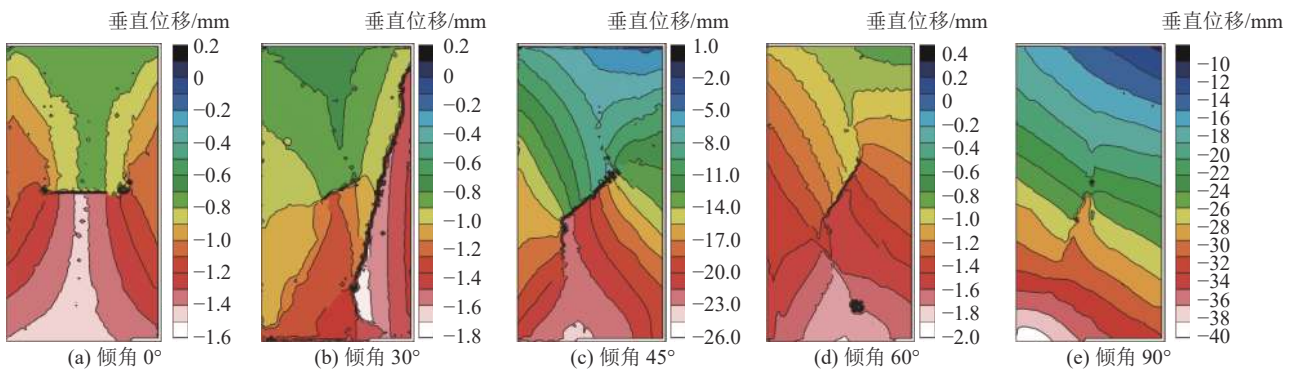


图 5 亚失稳阶段不同预制裂纹倾角垂直位移云图

Fig.5 Vertical displacement cloud diagram of different pre-crack inclination angles in the sub-instability stage

此处对试样 α_3 (倾角为 45°) 的应力-声发射计数-声发射进行分析, 由图 6 可以看出, 声发射能量和计数在位移控分级加载的条件下呈现明显的分级效应, 在每一级位移控开始加载到保持阶段, 都有明显的能量计数上升标志。此外, 试样发生局部破碎或应力发生小幅下降时, 声发射能量和计数出现急剧升高。在 577.6 ~ 594.2 s 时处于亚失稳阶段, 也是计数和能量上升最集中的时间段, 在此阶段声发射计数占总数 19.85%, 声发射能量占总数 18.9%。在应力峰值过后的第 1 次压力降出现时, 由于进入位移保持阶段, 载荷施加暂停, 使得能量和计数处于较低水平。由于前期承受到的载荷在亚失稳阶段煤样突破了强度极限, 出现许多新生裂纹, 导致试样抗压能力不断削减, 为失稳阶段最终破坏的发生埋下伏笔。在位移保持阶段结束后, 试样所受荷载增加, 使得试样内部应力重新分布, 所受应力逐渐超过其抗压强度, 最终发生破坏, 伴随着声发射能量和计数的同时

激增, 信号占比接近 20%, 该特征可作为煤进入黏滑亚失稳阶段的判断依据。

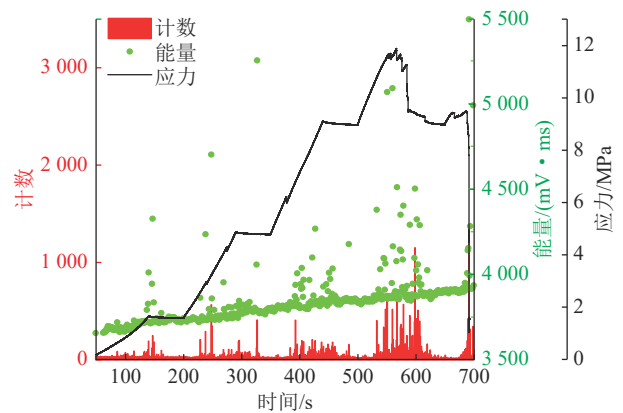


图 6 声发射计数-能量-应力-时间

Fig.6 Acoustic emission count-energy-stress-time

2.2 亚失稳阶段煤体电磁辐射特征

受载煤样发生破坏时会产生大量电磁辐射信号,

对工作面突出危险性、瓦斯地质及应力异常等响应较好,用于监测预测煤岩动力灾害前景良好^[33-34]。电磁辐射系统放大器设置 40 dB 档位,所用磁棒天线的中心频率为 100 kHz。不同预制裂纹倾角的电磁辐射的监测情况如图 7 所示。在正常加载时,电磁辐射幅值变化较小,在一定区间内上下小幅波动;当煤样进入亚失稳状态后,电磁辐射能量显著增强;当煤样所受应力临近峰值载荷时,主破裂发生,电磁辐射能量快速释放,幅值也急剧增加。尽管不同预制裂纹倾角煤样加载过程中的电磁辐射能量分布情况有所差异,但在主破裂发生时的能量变化则具有显著相似性,即在亚失稳阶段到主破裂发生时段,电磁辐射能量快速上升。

此外,在亚失稳状态下,预制裂纹倾角为 0°、30°的煤样电磁辐射能量变化不太明显,分布范围为 2 028 ~ 2 135 mV·ms; 预制裂纹倾角为 45°的煤样电磁辐射能量突增最为显著,峰值能量可达 2 225 mV·ms; 裂纹倾角为 60°和 90°的煤样峰值能量有所突增,但不太显著,其峰值分别仅为 1 693 mV·ms 和 1 768 mV·ms。峰值能量随裂纹倾角的增加呈先增后减的变化趋势,在 45°达到最大值,表明该裂纹倾角下试样内部裂纹扩展最充分,破坏也最为严重。和其他阶段相对比,亚失稳过程中电磁辐射能量和幅值响应最为突出,与应力骤降的发生时间几乎相吻合,表明亚失稳时试样失稳破坏程度达到极值,电磁辐射活动也最为剧烈。

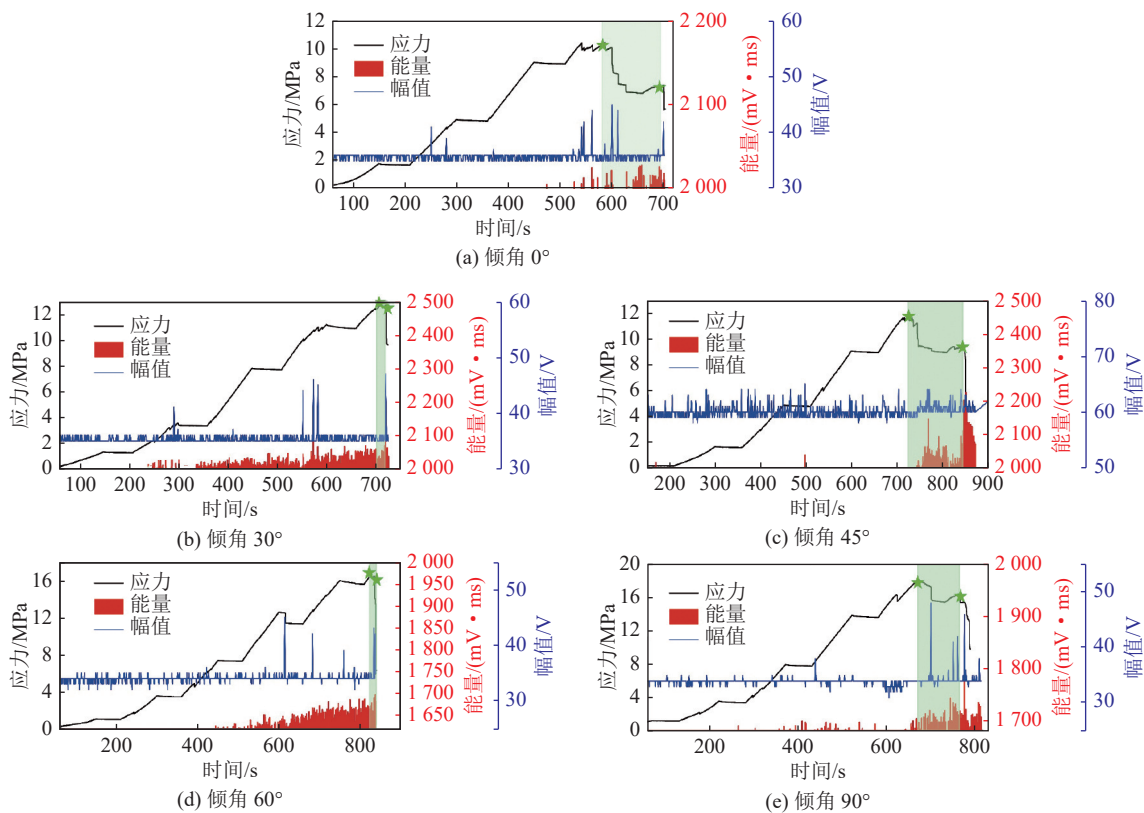


图 7 不同裂纹倾角下的电磁辐射监测情况

Fig.7 Electromagnetic radiation monitoring under different crack inclination angles

表 2 所示为不同预制裂纹倾角在亚失稳阶段对应的电磁辐射计数信息。可以看出,预制裂纹倾角为 45°的煤样在亚失稳状态时电磁辐射计数占失稳总过程的比例最大,与能量最大值相匹配,说明该倾角下试样破坏更趋于脆性变形,破坏时电磁辐射信号响应最为剧烈,进一步表明该条件下煤样的破坏产生最多的新生裂纹。

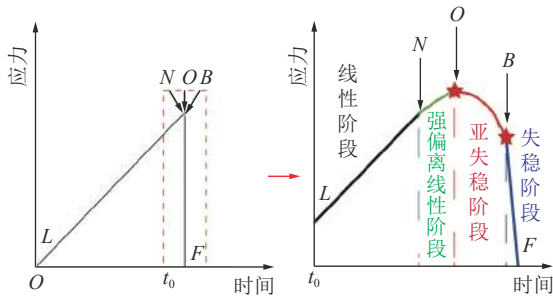
表 2 电磁辐射计数统计

Table 2 Electromagnetic radiation counting statistics

裂纹倾角/(°)	电磁辐射计数		亚失稳阶段占比/%
	亚失稳阶段	全程	
0	1 753 873	22 699 106	7.727
30	333 524	10 661 724	3.128
45	3 738 450	27 057 860	13.817
60	497 809	24 117 042	2.064
90	763 068	6 554 411	11.642

2.3 亚失稳阶段时长特征

断层黏滑失稳过程可划分为线性、强偏离线性、亚失稳及失稳4个阶段,如图8所示。其中,以试样到达应力峰值时刻为开始时间,以到达应力临界大幅骤降时刻为结束时间,该时间段为亚失稳阶段,即断层失稳前的最后阶段^[24, 35]。



LN—线性阶段; NO—强偏离线性阶段;
OB—亚失稳阶段; BF—失稳阶段

图8 亚失稳阶段定义

Fig.8 Definition of sub-instability stage

将煤样受到开始载荷的时刻记为0时刻,对于试样 α_3 ,预制裂纹倾角 45° ,分级加载速度 0.2 mm/min ,预制裂纹煤样失稳全过程历时 702.7 s ,在第5次梯形加载时煤样发生失稳破坏,如图9所示。由于煤本身为各向异性材料,加载过程中出现多次应力降抖动,说明有一部分细微裂纹出现,但煤样承载力依

然很高。具体到失稳各阶段起止时刻及占全过程时间比例见表3。

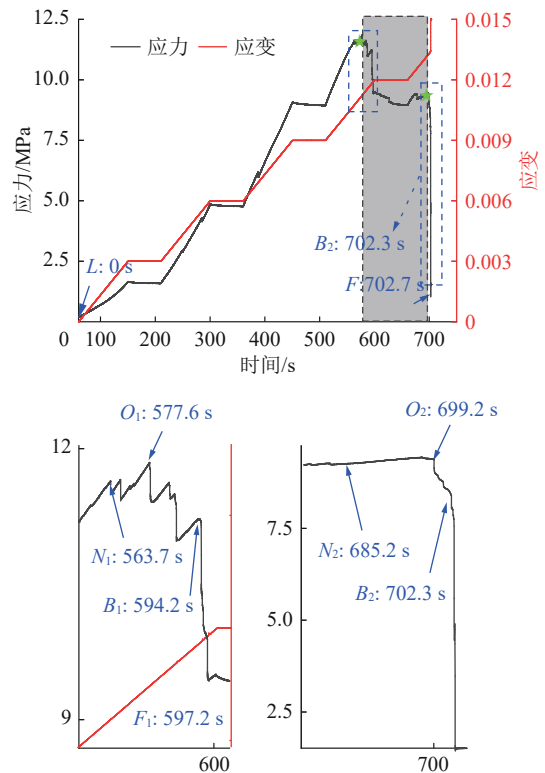


图9 黏滑亚失稳过程应力-应变随时间变化曲线

Fig.9 Stress-strain curve with time in the process of stick-slip meta-instability

表3 预制裂纹试样失稳全过程各阶段时间

Table 3 The time of each stage of instability of pre-cracked specimen

阶段	开始时间 /s	结束时间 /s	用时/s	用时占比 /%
线性阶段 $L-N_1$	0	563.7	563.7	80.22
强偏离线性阶段 N_1-O_1	563.7	577.6	13.9	1.97
黏滑亚失稳瞬态1 O_1-B_1	577.6	594.2	17.1	2.43
失稳阶段 B_1-F_1	594.2	597.2	3.0	0.043
分级加载控制阶段 F_1-N_2	597.2	685.2	88.0	12.5
强偏离线性阶段 N_2-O_2	685.2	699.2	14.0	1.99
黏滑亚失稳瞬态2 O_2-B_2	699.2	702.3	3.1	0.436
合计	577.6	702.3	124.7	17.7
失稳阶段 B_2-F	702.3	702.7	0.4	0.054

在第4次位移控加载时,应力波动增加,在 577.6 s 时应力达到峰值 11.83 MPa ,开始第1次亚失稳瞬态,然后出现较大的应力降。在 597.2 s 时开始进入位移保持状态,应力出现小幅下降,内部应力场重新分布。 $577.6\sim 702.3\text{ s}$ 为黏滑亚失稳过程,共计 127.7 s ,占

全过程用时比例为 17.7% ,虽然用时短,但由于亚失稳阶段是试样整体由应变积累逐渐向应变释放转变的过渡阶段,因此在生产实践中对于断层冲击地压的监测预警有重要参考价值。当煤样受载开始进入第5次分级阶段时,应力小幅上升后便迅速下降,煤

样彻底破坏,说明第1次应力降出现时破裂轮廓已经形成,只是由于处于分级加载位移保持恒定阶段,应力没有迅速降到最低点。当位移保持阶段结束后,只需增加少许压力煤样便承受不住,发生破坏,导致应变急剧突增。

不同预制裂纹倾角亚失稳阶段发生的时间见表4,

可见预制裂纹倾角对受载煤样的变形破坏时长特征具有重要影响,应力随时间变化曲线如图10所示。由结果可见,预制裂纹倾角为 0° 及 45° 时,亚失稳阶段占全过程的用时比例高,占失稳过程总时间16%~18%;预制裂纹倾角为 30° 及 60° 时,亚失稳阶段占全过程的用时比例较低,只占失稳过程总时间1%~2%。

表4 不同预制裂纹倾角试样下的亚失稳阶段具体时间

Table 4 Actual time of the meta-instability stage under different pre-crack inclination angle specimens

预制裂纹倾角 /($^\circ$)	亚失稳阶段用时 /s			全程用时 /s	亚失稳用时占比 /%
	开始时间	结束时间	用时		
0	586.7	699.8	113.1	703.6	16.07
30	712.5	725.3	12.8	725.6	1.76
45	577.6	702.3	124.7	702.7	17.75
60	828.2	836.9	8.7	840.9	1.03
90	751.2	842.2	91.0	868.5	10.48

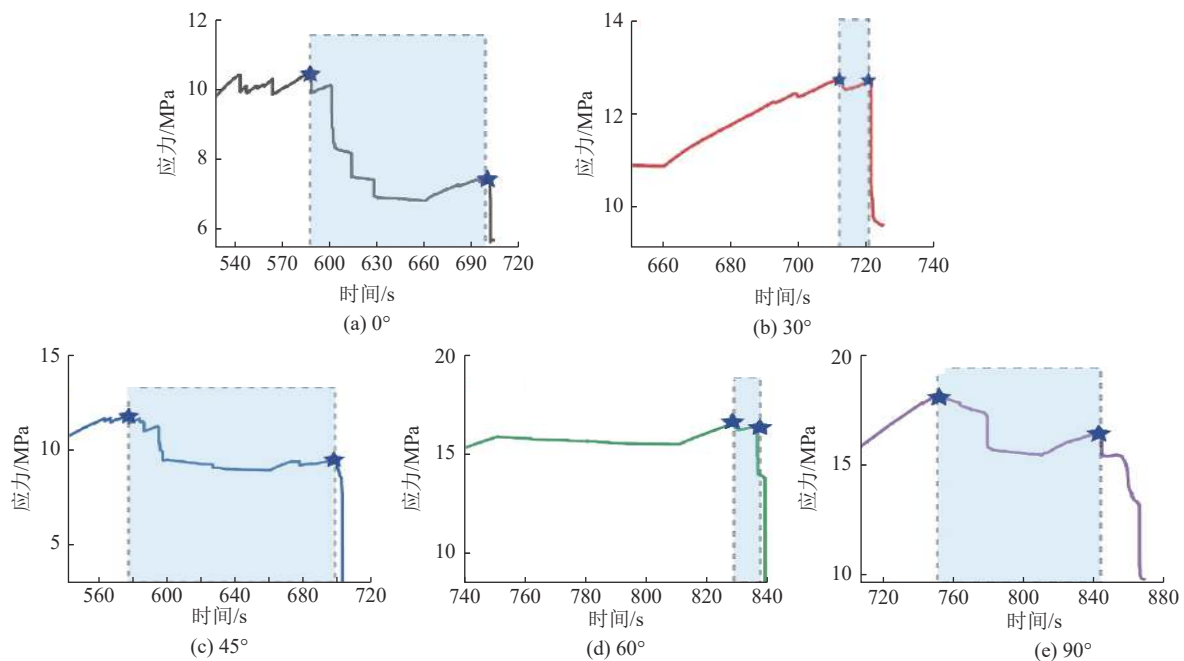


图10 不同预制裂纹倾角亚失稳阶段的时长特征

Fig.10 Stress-time under different pre-crack inclination angles at the meta-instability stage

3 结 论

1) 声发射计数和能量对应力和破坏响应明显,试样发生局部破碎或应力发生小幅下降时,声发射能量和计数出现急剧升高。临近黏滑亚失稳时,声发射计数和能量同时出现激增,信号占比接近20%,该响应特征可作为裂纹煤样进入黏滑亚失稳阶段的判断依据。

2) 在进入亚失稳状态后,电磁辐射幅值和能量

均显著增强,主破裂发生前,能量和幅值急剧增高,且峰值能量随裂纹倾角的增加呈先增后减小,裂纹倾角为 45° 的煤样在亚失稳状态时电磁辐射计数占失稳总过程的比例最大;和其他阶段相对比,亚失稳过程中电磁辐射能量和幅值响应最为突出,与应力骤降的发生时间几乎相吻合,表明亚失稳时试样失稳破坏程度达到极值,电磁辐射活动也最为剧烈。

3) 预制裂纹倾角对受载煤样的变形破坏时长特

征具有重要影响。预制裂纹倾角显著影响煤样亚失稳阶段占全过程的时长比例,倾角为 45° 时亚失稳阶段历时最长,倾角为 60° 时历时最短,该结论对于进一步理解断层冲击地压致灾过程、精确建立断层冲击地压模型具有指导意义。

参考文献(References):

- [1] 陈光波,滕鹏程,李 谭,等. 煤矿冲击地压评价模型及其应用[J]. 太原理工大学学报, 2021, 52(6): 966-973.
CHEN Guangbo, TENG Pengcheng, LI Tan, *et al.* Evaluation model of rock burst in coal mine and its application[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2021, 52(6): 966-973.
- [2] 朱小景,潘一山,李 祁,等. 巷道冲击地压软化区能量极值判别准则及试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(5): 975-982.
ZHU Xiaojing, PAN Yishan, LI Qi, *et al.* Determination criteria and experimental study on energy extreme value of rock burst softening zone in roadway[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2021, 50(5): 975-982.
- [3] 白俊杰. 基于地表沉降关键指标的冲击风险管控与实践[J]. 煤炭技术, 2021, 40(9): 135-138.
BAI Junjie. Impact risk control and practice based on key indicators of surface subsidence[J]. Coal Technology, 2021, 40(9): 135-138.
- [4] 任雅琼,马 瑾,刘培洵,等. 平直断层粘滑过程热场演化及失稳部位识别的实验研究[J]. 地震地质, 2016, 38(1): 65-76.
REN Yaqiong, MA Jin, LIU Peixun, *et al.* Experimental study on thermal field evolution and instability location identification in stick slip process of straight faults[J]. Seismogeology, 2016, 38(1): 65-76.
- [5] 鞠文君,卢志国,高富强,等. 煤岩冲击倾向性研究进展及综合定量评价指标探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1839-1856.
JU Wenjun, LU Zhiguo, GAO Fuqiang, *et al.* Research progress and comprehensive quantitative evaluation index of coal rock impact tendency[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1839-1856.
- [6] 王学滨,钱帅帅,薛承宇,等. 基于速率-状态依赖摩擦定律的平直走滑断层黏滑过程的连续-非连续方法模拟[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(1): 443-449.
WANG Xuebin, QIAN Shuashuai, XUE Chengyu, *et al.* Numerical simulation of the stick-slip of a straight strike-slip fault under biaxial compression based on the rate and state dependent friction law by use of the continuum-discontinuum method[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(1): 443-449.
- [7] 赵洪宝,刘一洪,张向阳,等. 双向静载约束条件下动力冲击对煤岩的损伤影响[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(1): 130-137, 145.
ZHAO Hongbao, LIU Yihong, ZHANG Xiangyang, *et al.* Damage effect of dynamic impact on coal and rock under bidirectional static load constraints[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2021, 38(1): 130-137, 145.
- [8] LI Yaohua, SONG Yan, JIANG Zhenxue, *et al.* Two episodes of structural fractures: Numerical simulation of Yanchang Oilfield in the Ordos basin, northern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 97: 223-240.
- [9] 王亚飞,柴文革,宋义敏. 拉剪作用下岩石变形破坏演化的声发射特征研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(2): 74-80.
WANG Yafei, CHAI Wenge, SONG Yimin. Study on acoustic emission characteristics of rock deformation and failure evolution under tension and shear[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(2): 74-80.
- [10] 马鹏飞,李树忱,袁 超,等. 基于SED准则的近场动力学及岩石类材料裂纹扩展模拟[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 1109-1117.
MA Pengfei, LI Shuchen, YUAN Chao, *et al.* Simulations of crack propagation in rock-like materials by peridynamics based on SED criterion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(6): 1109-1117.
- [11] 黄旭超. 多煤层压裂裂纹竞争起裂扩展特征分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(1): 184-191.
HUANG Xuchao. Characteristics of fracture propagation caused by fracture competition in multi-seam fracturing[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(1): 184-191.
- [12] 李 清,田 策,徐文龙,等. 含预制圆孔半圆盘的冲击动态断裂过程试验研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(3): 878-884.
LI Qing, TIAN Ce, XU Wenlong, *et al.* Experimental study on impact dynamic fracture process of half disc with prefabricated circular hole[J]. Science, Technology and Engineering, 2021, 21(3): 878-884.
- [13] LIU Zhenhe, WANG Shaohua, YE Hailong, *et al.* Experimental study on the effects of precracks, fracturing fluid, and rock mechanical characteristics on directional hydraulic fracturing with axial pre-cracks[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2021, 7: 1-14.
- [14] CHEN Zaitie, WANG Wei, LI Dayang. Instability analysis of strike-slip fault based on cusp catastrophe model[J]. Structural Durability & Health Monitoring, 2018, 12(1): 19.
- [15] KONSTANTINOYSKAYA E, RUTQVIST J, MALO M. CO₂ storage and potential fault instability in the St. Lawrence Lowlands sedimentary basin(Quebec, Canada): Insights from coupled reservoir-geomechanical modeling[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2014, 22: 88-110.
- [16] WANG Xiaoran, WANG Enyuan, LIU Xiaofei, *et al.* Micromechanisms of coal fracture: Insights from quantitative AE technique[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2021: 114-103000.
- [17] HE Qingyuan, ZHU Lei, LI Yinchun, *et al.* Simulating hydraulic fracture re-orientation in heterogeneous rocks with an improved discrete element method[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54: 2859-2879.
- [18] TRIPATHI A, GUPTA N, SINGH A K, *et al.* Effects of elevated temperatures on the microstructural, physico-mechanical and elastic properties of barakar sandstone: a study from one of the world's largest underground coalmine FIRE Region, Jharia, In-

- dia[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54: 1293–1314.
- [19] LOTIDIS M A, NOMIKOS P P. Acoustic emission location analysis and microcracks' nature determination of uniaxially compressed calcitic marble hollow plates[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2021, 7(2): 1–22.
- [20] YU Weibo, DUAN Huiqiang. Numerical simulation study on crack evolution characteristics of coal specimen subjected to conventional compression loading[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021, 39(7): 4893–4996.
- [21] 艾迪昊, 李成武, 赵越超, 等. 煤体静载破坏微震、电磁辐射及裂纹扩展特征研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(6): 2043–2051.
- AI Dihao, LI Chengwu, ZHAO Yuechao, *et al.* Study on microseismic, electromagnetic radiation and crack propagation characteristics of static load failure of coal[J]. *Geotechnical mechanics*, 2020, 41(6): 2043–2051.
- [22] BRACE W F, BYERLEE J D. Stick-slip as a mechanism for earthquakes[J]. *Science*, 1966, 153(3739): 990–992.
- [23] 马瑾, 马胜利, 刘力强. 地震前异常的阶段性及其空间分布特征[J]. *地震地质*, 1995(4): 363–371.
- MA Jin, MA Shengli, LIU Liqiang. Stages and spatial distribution characteristics of anomalies before earthquakes[J]. *Seismic Geology*, 1995(4): 363–371.
- [24] 马瑾, SHERMAN S I, 郭彦双. 地震前亚失稳应力状态的识别: 以5°拐折断层变形温度场演化的实验为例[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(5): 633–645.
- MA Jin, SHERMAN S I, GUO Yanshuang. The identification of sub-instability stress state before earthquake: taking the experiment of deformation temperature field evolution of 5° turning fault as an example[J]. *Chinese Science: Geoscience*, 2012, 42(5): 633–645.
- [25] 马瑾. 从“是否存在有助于预报的地震先兆”说起[J]. *科学通报*, 2016, 61(S1): 409–414.
- MA Jin. Let's start with “whether there are earthquake precursors that can help forecasting”?[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(S1): 409–414.
- [26] REN Yaqiong, MA Jin, LIU Peixun, *et al.* Experimental study of thermal field evolution in the short-impending stage earthquakes[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2018, 175(7): 2527–2539.
- [27] 宋春燕, 马瑾, 王海涛, 等. 强震前断裂亚失稳阶段及失稳部位的特征研究: 以新疆南天山西段为例[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(2): 604–615.
- SONG Chunyan, MA Jin, WANG Haitao, *et al.* Study on the characteristics of sub instability stage and instability position of faults before strong earthquakes: taking the western section of Nantian, Xinjiang as an example[J]. *Journal of Geophysics*, 2018, 61(2): 604–615.
- [28] 张淑亮, 王霞, 郭文峰, 等. 多种地球物理场观测数据中亚失稳现象[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(2): 571–583.
- ZHANG Shuliang, WANG Xia, GUO Wenfeng, *et al.* variety of geophysical field observation data instability phenomenon in Central Asia[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2021, 51(2): 571–583.
- [29] 张希, 刘峡, 秦姗兰, 等. 芦山Ms 7.0地震前的跨断层形变亚失稳前兆特征[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(11): 1669–1677.
- ZHANG Xi, LIU Xia, QIN Shanlan, *et al.* The precursor characteristics of trans-fault deformation before Lushan Ms 7.0 earthquake[J]. *Journal of Wuhan University(Information Science Edition)*, 2020, 45(11): 1669–1677.
- [30] 李世念, 马瑾, 汲云涛, 等. 亚失稳准动态及同震过程变形场时空演化特征: 实验与分析[J]. *地震地质*, 2021, 43(1): 1–19.
- LI Shinian, MA Jin, JI Yuntao, *et al.* Spatial and temporal evolution characteristics of deformation field during sub-instability quasi-dynamic and coseismic processes: experiment and analysis[J]. *Seismic geology*, 2021, 43(1): 1–19.
- [31] 王桂林, 欧阳啸天, 梁锋, 等. 基于改进灰狼算法的岩石声发射定位研究[J]. *工程地质学报*, 2021, 5: 1–9.
- WANG Guilin, OUYANG Xiaotian, LIANG Feng, *et al.* Study on rock acoustic emission location based on Improved Gray Wolf algorithm[J]. *Journal of engineering geology*, 2021, 5: 1–9.
- [32] KAWASAKI Y, UEDA K, IZUNO K. AE source location of debonding steel-rod inserted and adhered inside rubber[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 279(4): 122383.
- [33] 王恩元, 李忠辉, 李德行, 等. 电磁辐射监测技术装备在煤与瓦斯突出监测预警中的应用[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(10): 46–51.
- WANG Enyuan, LI Zhonghui, LI Dexing, *et al.* Application of electromagnetic radiation monitoring technology and equipment in coal and gas outburst monitoring and early warning[J]. *Coal Mine Safety*, 2020, 51(10): 46–51.
- [34] 刘成禹, 石俊杰, 罗洪林, 等. 隧道变形过程中电磁辐射强度参数的变化规律[J]. *岩土力学*, 2020, 41(8): 2722–2729.
- LIU Chengyu, SHI Junjie, LUO Honglin, *et al.* Variation law of electromagnetic radiation intensity parameters during tunnel deformation[J]. *Geotechnical Mechanics*, 2020, 41(8): 2722–2729.
- [35] 李世念. 断层失稳过程超动态变形时空模式的实验研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2017.
- LI Shinian. Experimental study on the space-time model of superdynamic deformation during fault instability[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2017.