



煤炭科学技术

煤炭科学研究院 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤升温过程中声发射信号变化及产生机制研究

孔彪 钟建辉 陆伟 胡相明 辛林 张斌 张晓龙 庄则栋

引用本文:

孔彪, 钟建辉, 陆伟, 等. 煤升温过程中声发射信号变化及产生机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 84-91.

KONG Biao, ZHONG Jianhui, LU Wei. Change pattern of acoustic emission signal and generation mechanism during coal heating and combustion process[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 84-91.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1851>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

声发射信号研究进展及其在煤温感知领域应用前景

Research progress of acoustic emission signal and its application prospect in coal temperature sensing field

煤炭科学技术. 2022, 50(11): 84-92 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/160a528d-e01c-4a35-b577-b362b67cbf7b>

冲击倾向性煤不同损伤程度声发射分形特征研究

Fractal characteristics of acoustic emission in different damage degrees of impact coal

煤炭科学技术. 2021, 49(9): 38-46 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b137ebb9-3dda-4059-b421-ee1fc0746db3>

单向卸载条件下组合煤岩力学特性及声发射演化规律

Mechanical properties and acoustic emission evolution of coal-rock combination under unidirectional unloading condition

煤炭科学技术. 2023, 51(11): 71-83 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2040>

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>

应力条件对受载煤体声发射活动特征的影响研究

Study on effect of stress condition on acoustic emission activity feature of loaded coal in failure process

煤炭科学技术. 2019(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/35d0922b-100f-4286-8451-afbd919bff49>

不同尺寸冲击倾向性煤样声发射 b 值特征研究

Study on acoustic emission b-value characteristics of bump-prone coal sample with different sizes

煤炭科学技术. 2019(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6f2bd3ba-8c10-4be9-a7f2-4c3e03a9c24f>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

孔彪, 钟建辉, 陆伟, 等. 煤升温过程中声发射信号变化及产生机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 84–91.

KONG Biao, ZHONG Jianhui, LU Wei, *et al.* Change pattern of acoustic emission signal and generation mechanism during coal heating and combustion process[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 84–91.

煤升温过程中声发射信号变化及产生机制研究

孔彪¹, 钟建辉¹, 陆伟², 胡相明¹, 辛林¹, 张斌³, 张晓龙¹, 庄则栋¹

(1. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232001;

3. 滕州市东大矿业有限责任公司, 山东 滕州 277500)

摘要:煤自燃预警存在火灾信息感知难的问题, 基于煤岩热损伤破坏产生的声发射信号能够进行温度感知, 进而预警煤自燃演化的状态。为研究煤在升温及燃烧过程中声发射信号变化, 探究煤自燃过程中不同温度阶段煤释放的声发射信号差异及时域、频域变化, 并研究声发射产生机制, 可为声发射信号反演煤体温度、监测煤自燃提供理论基础。构建了声发射信号测试系统, 选取东滩煤矿的烟煤进行试验, 测试煤在升温过程中的声发射信号, 分析煤在温度作用下变形破裂演化过程以及煤体成分变化, 探讨煤升温过程中的声发射信号产生机制。研究表明: 煤在升温过程中, 伴随产生声发射信号, 煤在升温直至燃烧过程中振铃计数呈阵发性增长, 通过线性拟合得到相关系数超过 0.87, 表明煤在升温过程中变形破裂的频次呈增大的趋势; 随着温度的升高, 煤体产生声发射信号振铃计数增长率与声发射平均频率(AF 值)在初始升温阶段较低, 在快速升温时数值较高; 累计损伤参数在煤温超过 80 ℃ 时出现拐点, 主要损伤模式由快速扩展损伤变为渐进式损伤。通过分析不同温度煤体结构和成分的宏微观变化可知, 随着温度升高, 煤中的矿物转化速率影响煤体内部主要损伤模式, 高矿物转化速率对应煤体内部快速扩展损伤, 促使煤体孔裂隙衍生扩展, 产生逐渐增大的声发射信号。

关键词:煤自燃; 声发射; 特征参数; 热损伤; 产生机制

中图分类号:TD76 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2023)S2-0084-08

Change pattern of acoustic emission signal and generation mechanism during coal heating and combustion process

KONG Biao¹, ZHONG Jianhui¹, LU Wei², HU Xiangming¹, XIN Lin¹, ZHANG Bin³,
ZHANG Xiaolong¹, ZHUANG Zedong¹

(1. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. Tengzhou Dongda Mining Co., Ltd., Tengzhou 277500, China)

Abstract: The early warning of coal spontaneous combustion is difficult to solve the perception of fire information. The acoustic emission (AE) signal generated by thermal damage and destruction on coal rock can perceive the temperature, and then issue a warning on the evolutionary state of coal spontaneous combustion. In order to study the change of AE signal in the process of coal heating and combustion, we explore the difference of and the time and frequency changes of the AE signals released by coal in different temperatures in the process of coal spontaneous combustion, and study the generation mechanism of the AE signal, so as to provide a theoretical basis for the inversion of coal temperature and for monitoring coal spontaneous combustion. The AE signal test system is constructed. By choosing the bituminous coal from Dongtan coal mine as the research subject, we test and analyze the change of the AE signal during coal heating process, analyze the evolutionary process of coal deformation and cracking under the influence of temperature and the change of coal composition, and examine the generation mechanism of AE signal in the process of coal heating. The results show that the ringing counts of coal increase

收稿日期: 2022-10-17 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1851

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51904172, 52374219); 山东省自然科学基金面上资助项目(ZR2023ME115)

作者简介: 孔彪(1988—), 男, 山东菏泽人, 教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: kongbiao8807@163.com

sporadically from heating to combustion, and the correlation coefficient exceeds 0.87 by linear fitting, indicating that the frequency of coal deformation and cracking increases during the heating process. With the increase of temperature, the growth rate of ringing counts and the average frequency (AF value) of AE signal generated by coal are lower in the initial heating stage, but are higher when the temperature rises rapidly. The cumulative damage parameters show an inflection point when the coal temperature exceeds 80°C, and the main damage mode changes from rapid expansion damage to progressive damage. By analyzing the macro- and microscopic changes of coal structure and composition at different temperatures, we find that the mineral conversion rate in coal affects the main damage mode inside the coal body with the increase of temperature, and that the high mineral conversion rate corresponds to the rapid expansion damage inside the coal body, which promotes the derivative expansion of coal pores and cracks, and produces gradually increasing AE signals.

Key words: spontaneous combustion of coal; acoustic emission(AE); characteristic parameters; thermal damage; generation mechanism

0 引 言

我国煤炭资源丰富,但煤炭开采、储存和运输过程中存在大量煤自燃现象。据统计^[1],2010—2020年,我国煤矿开采过程中由于自燃事故共导致166人死亡,70余人受伤。煤自燃不仅造成巨大经济损失,还会对生态环境造成严重破坏,因此提高煤自燃监测预警的高效性具有重要意义。

现阶段,煤自燃监测预警的方法主要有对气体、温度等进行监测,包括利用CO临界值、CO与CH₄形成速率以及各种气体比值^[2]对煤自燃进行预测;通过建立模型方程对煤温及指标气体进行拟合确定煤自燃风险等级^[3]。声发射技术早期应用于岩石材料破裂的研究^[4],对于不同岩石材料破裂演化,不同受载条件下岩石材料尺寸效应和声发射分形特征研究取得长足进展^[5-6]。

关于温度对煤岩声发射的影响,学者研究了温度对砂岩声发射信号^[7]、声发射源定位精度影响^[8],利用分形维数等方法对声发射信号特征参数进行分析,进而表征煤岩损伤信息^[9-10]。对温度作用下煤岩声发射产生机制进行探究,声发射信号与煤岩体内部破裂与微观结构的损伤破坏联系紧密,已有研究

探讨了不同温度处理后煤岩受载释放的声发射信号和破坏过程裂纹演化规律^[11],孔裂隙的产生是声发射信号主要来源之一,声发射技术能够表征煤岩裂缝的渐进损伤过程^[12]。

目前,声学法测温能够弥补传统测温的局限性,适用性更强,声学法测温主要有2种方法,一种是提取声发射信号,建立声信号和温度关系,另一种是基于被测试对象的声波特征构建声速与温度关系^[13]。已有研究基于声波在气体介质中传播速度与温度关系,来反映被测物体内部燃烧情况,在炉膛测温、粮食测温等方面得到应用^[14-15]。

基于声学法测温的优势,应用声发射技术进行煤自燃监测,从而实现地下隐蔽火源预警具有较好的前景,而煤升温过程中声发射信号变化特征还未有深入研究,对煤升温过程中的声发射产生机制还未有揭示。基于此,本文利用声发射技术监测煤在升温过程中产生的声波信号,通过提取声发射特征参数,分析不同温度阶段声发射信号时序特征、定量计算与温度相关性、损伤参数变化规律,最后基于煤岩微观孔裂隙变化特征探讨煤升温过程声发射信号产生机制,以期利用声发射技术监测预警煤自燃提供理论基础。

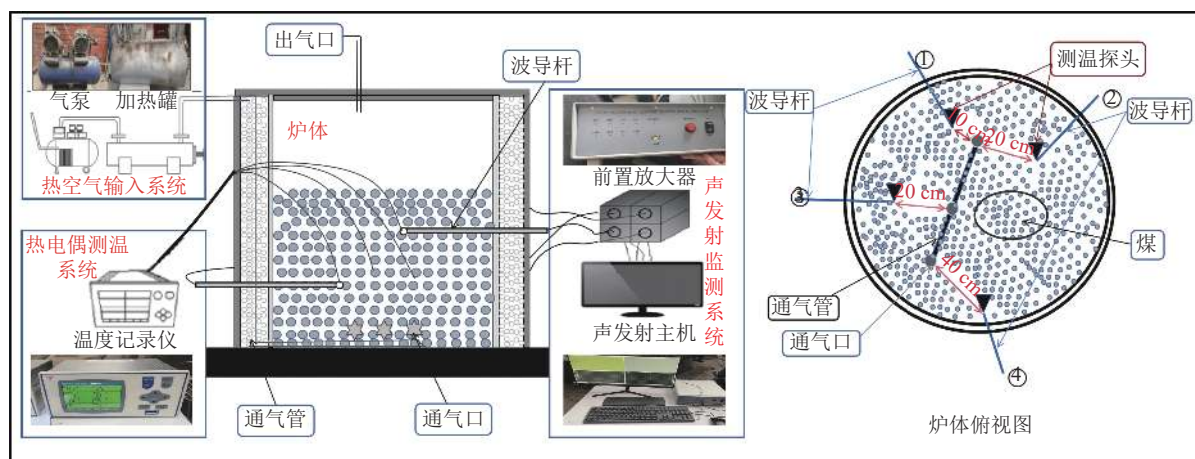


图1 试验系统

Fig.1 Experimental system diagram

1 测试系统搭建与试验步骤

1.1 声发射信号测试系统的搭建

建立了声发射信号测试系统,如图1所示。该系统由炉体、热空气输入系统、热电偶测温系统、声发射监测系统组成。整个炉体呈圆柱形,外径为3.7 m,内径为2.8 m,高为3 m,外部为金属外壳、内部为耐火砖层、聚氨酯隔热隔音层、水夹层等组成。热空气输入系统由气泵、加热罐、金属软管和温度调控箱组成。热电偶测温系统包含K型热电偶和温度记录仪2部分;声发射监测系统主要由声发射探头、声发射主机、前置放大器与波导杆组成。

1.2 试验步骤

本次试验所用煤样为东滩煤矿的烟煤,煤自燃倾向性属于Ⅱ类,工作面最短煤自燃周期为66 d。将所取得松散煤体筛选出粒径小于30 mm的煤样,筛选后得到3 t煤样进行试验。将筛选好的煤样置于炉体之中,盖上顶盖,并将顶盖周围用胶密闭,预留通气孔和排气孔、波导杆孔。用钢制波导杆作为声发射采集的“桥梁”,通过“断铅”试验进行声源校准检测灵敏度,铅笔伸长长度约为2.5 mm,与试件夹角成30°左右,响应幅值取3次以上的平均值。4根波导杆位于炉体的4个不同位置,并且记为通道1~4,波导杆距离最近的通气管口水平距离分别为10、20、20、40 cm,距离炉体底部分别为37、35、15、35 cm;利用凡士林作为耦合剂将声发射探头与波导杆连接,连接主机与声发射测试仪,监测煤样在升温过程中不同位置的声发射信号。4个热电偶测温探头布置在波导杆旁边,编号与波导杆1~4对应,测量该点处温度变化。

试验开始前首先测试加热管和气泵运行时产生的声发射信号,并调整阈值,将环境噪音过滤掉。利用热空气加热煤样,采用热电偶测温系统记录升温过程温度变化,煤体升温释放的声发射信号通过波导杆作传输介质传递到声发射主机,最终将波形保存到声发射主机。试验中设置声发射监测系统的前置放大倍数为40 dB,采样频率为200 kHz。

2 煤升温过程中声发射信号变化规律

2.1 煤升温过程中声发射信号规律特征

煤升温过程中,布置在4个测点的传感器均接收到声发射信号,分析发现声发射信号的变化趋势一致。为了分析煤升温过程中不同温度阶段声发射信号变化规律,本节选取1号测点的声发射信号进行分析。煤在25~95℃过程中声发射信号如图2所示。

由图2可得,随着煤体温度升高,声发射信号阵发性逐渐增大,此阶段煤处于低温氧化阶段,对应煤样产生声发射信号较低,高振铃计数事件较少,声发射信号较为稀疏;温度超过60℃后,能量释放较前期声发射信号平稳状态开始明显增强;当温度接近80℃时,温度不断提高,释放声发射能量增加,振铃计数个数总体也显著增多,高振铃计数变多,释放声发射信号更多。煤体温度升高到350℃时,声发射振铃计数与能量变化如图3所示。

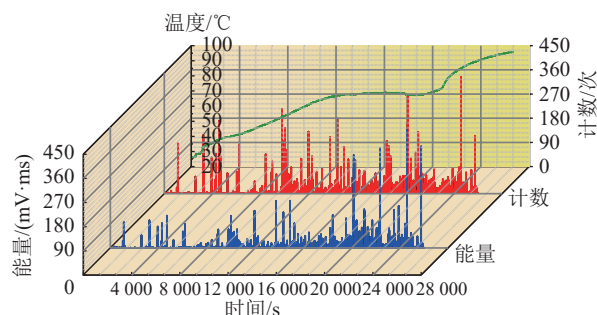


图2 煤升温前期声发射信号与温度关系

Fig.2 Relationship between acoustic emission signal and temperature in the early stage of coal heating

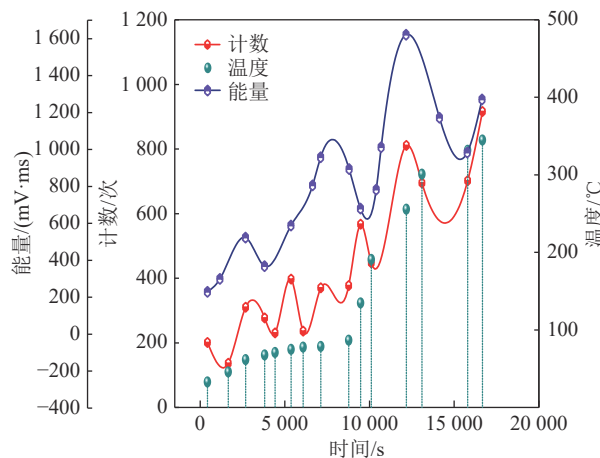


图3 煤升温全过程声发射信号与温度关系

Fig.3 Relationship between acoustic emission signal and temperature during the whole process of coal heating

由图3可知,随着温度升高,振铃计数与能量都有较大变化,温度25~350℃,随温度的升高,声发射信号呈现出逐渐增加的趋势。在60℃之前,由于温度较低,大部分振铃计数非常低;在60℃时振铃计数与能量释放都有一定的增强,结合声发射信号的整体变化情况,温度低于80℃时,能量增加仍较缓慢,80℃时能量和振铃计数剧烈增加,同时升温速率也大幅提高;在100℃前,振铃计数处于阵发性增加状态,但变化幅度较小;100℃之后,随温度的快速增加,振铃计数迅速上升。随着温度的升高,煤

体释放出的能量强度不断增大; 200 ~ 300 °C 声发射信号强度增势略微减缓, 但仍然呈现不断增长的趋势。

根据文献 [16], 煤温在 60 ~ 85 °C 时煤接近其临界温度, 当煤温在自热期温度超过自热临界值时, 煤温会急剧上升, 氧化速度加快。试验过程中煤温超过 80 °C 后煤温剧增, 温度上升有一个明显加速过程, 可确定试验中煤的临界温度在 80 °C 附近。

2.2 煤升温过程声发射与温度相关性分析

选取温度及对应的信号参数, 得到振铃计数与温度关系, 煤的声发射振铃计数 N 与温度 T 的关系式为:

$$N = 2.054\,52T + 129.847\,87 \quad (1)$$

线性拟合相关系数为 0.878 9, 煤升温及燃烧过程的声发射振铃计数与温度的变化特征如图 4 所示。

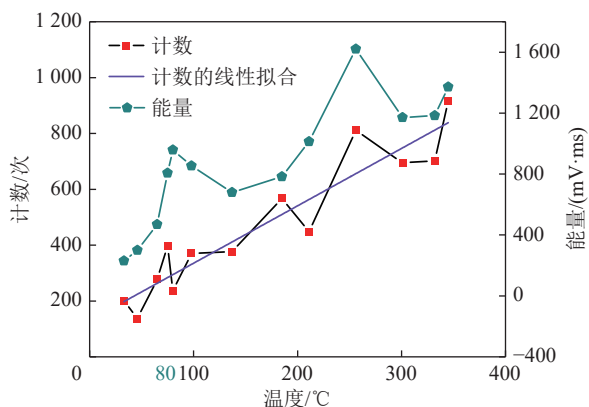


图 4 温度与振铃计数、能量关系

Fig.4 Temperature vs. ringing count, energy

煤温接近临界温度时, 煤体热量积蓄, 能量小幅度突增, 温度超过 150 °C 声发射能量随温度升高不断增大; 煤温 300 °C 时已经停止加热, 炉体余温使煤样温度缓升。煤样在升温过程中, 振铃计数阵发性提高, 且增长趋势与温度呈现良好的正相关关系, 振铃计数和温度线性增长趋势斜率大于 2, 线性相关系数超过 0.85。结合能量释放强度和振铃计数说明, 煤在升温过程中, 声发射信号强度随温度增加不断增强。

2.3 煤体热损伤参数分析

煤岩破坏是损伤积累的结果, 在外界载荷持续作用下, 煤岩内部裂隙损伤持续发展破坏, 使煤岩失去承载能力。采用声发射计数能够表征煤岩热损伤的演化过程, 损伤参数 D 一般表达式^[17]为:

$$D = \frac{A_d}{A} \quad (2)$$

式中: A_d 为缺陷损伤横截面积, cm^2 ; A 为无损状态下试件的横截面积, cm^2 。

现有研究^[18]基于声发射振铃计数定义煤岩在形变过程中损伤变量, 换算成声发射计数表示 i 阶段损伤参数, 对煤岩各阶段损伤参数进行累加得到煤样累计损伤参数计算公式:

$$D_m = \sum_{i=1}^m \frac{N_i}{N_a} \quad (3)$$

式中: D_m 为累计损伤参数; N_i 为 i 阶段声发射振铃计数个数; N_a 为热载全过程声发射振铃计数, 个; m 为全阶段。

煤在升温过程中累计损伤参数变化如图 5 所示, 随着温度的升高, 累计损伤参数增长速率呈阶段性变化, 利用最小二乘法对 2 部分累计损伤参数 D_m 进行线性拟合, 得到斜率拐点出现在煤温临界温度处, 前半部分拟合斜率为 0.094 2, 后半部分为 0.037 4。

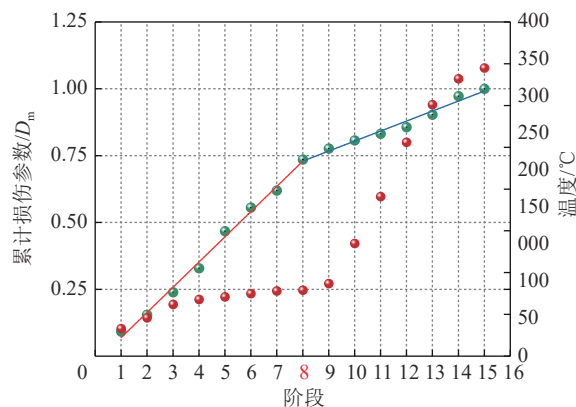


图 5 累计损伤参数

Fig.5 Cumulative damage parameters

结合煤升温声发射振铃计数、能量与温度关系可以得到以下规律:

1) 累计损伤参数变化趋势随着煤样温度升高出现明显拐点, 当煤温超过临界温度, D_m 斜率降低至临界温度前斜率的 2/5, 升温过程中煤体在到达临界温度前以快速扩展损伤为主, 越过临界温度限后以渐进式损伤为主。

2) 煤样内部损伤变化最快的阶段在 80 °C 之前, 此阶段煤温较低但声发射信号增强较快, 当煤温突破临界温度之后内部损伤速率变缓, 声发射信号增势短暂减缓, 但温度快速升高时声发射信号又进一步增强。

2.4 声发射信号时序特征

声发射平均频率 AF 值表示声发射事件中一个撞击对应的波形频率平均状况, 单位为 kHz, 是波形

频率分量的较好近似。

$$AF = \frac{N_i}{t_i} \quad (4)$$

式中: t_i 为持续时间, ms。振铃计数变化率 Δ 表示为:

$$\Delta = \frac{N_{i+1} - N_i}{N_i} \quad (5)$$

振铃计数变化率体现煤样释放的振铃计数增长情况, AF 值可以反映 AE 信号波动, 振铃计数变化率和声发射 AF 值能够协同表现煤升温及燃烧过程中声发射信号时序特征。选取每 2 500 s 内最大振铃计数变化率依次连接, 得到最大变化率变化情况, 如图 6 所示。

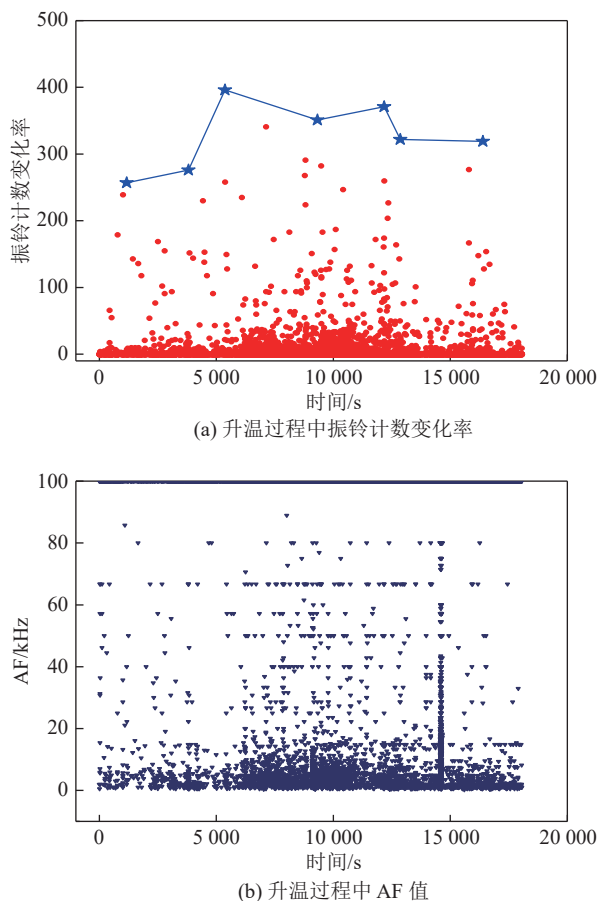


图 6 升温过程中煤样振铃计数变化率和 AF 值
Fig.6 Rate of change and AF value of coal sample ringing count during heating up

振铃计数变化率和 AF 值均呈现阶段分布, 第 1 阶段为试验前期煤样温度低于 70 ℃ (5 000 s 前), 第 2 阶段为煤样临界温度蓄热期至快速升温期 (5 000 ~ 15 000 s), 第 3 阶段为煤样加热完毕余热使煤温缓慢增加 (15 000 s 后), 其中第 1、3 阶段温度上升较为缓慢, 第二阶段为温度快速上升期。由图 6

可知, 第一阶段煤温较低时振铃计数变化率相对较低, AF 值也较稀疏且大部分集中分布于 20 kHz 以下, 此时煤样 AE 信号变化较小, 波形频率较低; 第二阶段振铃计数变化率为 3 个阶段中最高, AF 值越过 20 kHz 数量明显增多, 此时煤处于临界温度后温度快速上升时期, 煤样内部变化剧烈, 声发射信号变化波动较大, 声发射平均频率出现大量高频信号; 第三阶段停止对煤样加热后, 煤体温度变化趋于平稳, 煤样破裂速率减缓, 振铃计数变化率略微下降。

3 煤升温过程声发射信号产生机制

3.1 孔裂隙与声发射产生机制分析

煤在成型过程中受到各种因素影响, 造成其组分的不均匀分布, 且煤的不同组成部分的热膨胀系数不同, 受到温度载荷时, 内部薄弱处先达到强度极限出现结构破裂进而产生声发射信号。声发射信号变化能体现出煤岩内部结构变化过程, 反映煤岩在外力作用下裂纹的产生扩展、贯通及破坏, 通过煤样孔裂隙结构变化反向分析声发射信号产生机制。

采用型号为 Apreo S HiVac 的扫描电子显微镜对 4 组温度处理之后的试验煤样进行观察, 得到不同温度时期煤样孔裂隙结构情况。

电镜 8 000 倍放大尺度下煤表面图像如图 7 所示, 30 ℃ 时煤的孔隙几乎全部为自身原孔隙, 自然分布且孔隙微小, 孔径都在 10 μm 以下; 100 ℃ 处理后的煤样内部水分子和其他易挥发物质蒸发, 孔隙增多扩展, 开始出现宽度不超过 0.5 μm 的微裂隙; 200 ℃ 时煤样大量集中的孔隙延伸贯通成为宽度为 5 μm 左右的裂隙, 此温度下煤样裂隙边缘光滑, 出现更多的大小不一的孔隙; 300 ℃ 时煤样完整性被严重破坏, 表面裂隙宽度超过 5 μm 且内部及周边附着大量破碎的煤颗粒, 较多楔形孔隙呈区域分布。

试验表明, 煤样在升温过程中, 由于温度影响致使煤体内部结构的破裂, 煤体结构破裂时会向外界释放能量, 声发射信号就是该能量的形式之一, 煤体处于不同的温度段释放的能量不同, 其产生的声发射信号也不相同。学者利用不同温度处理后压汞试验得到孔隙特征参数, 对裂纹的宽度比重进行统计, 证实温度对煤岩产生热损伤, 煤岩裂隙不断发育产生热破裂, 温度越高煤岩破裂程度越大。通过高精度工业 CT 扫描能够对煤岩实时热损伤过程中裂隙演化进行描述, 根据文献 [19] 对褐煤热破裂的显微试验, 温度升高过程中, 煤的不同尺度裂隙数量都有不同程度的增加, 在常温至 100 ℃ 之间裂隙有较大

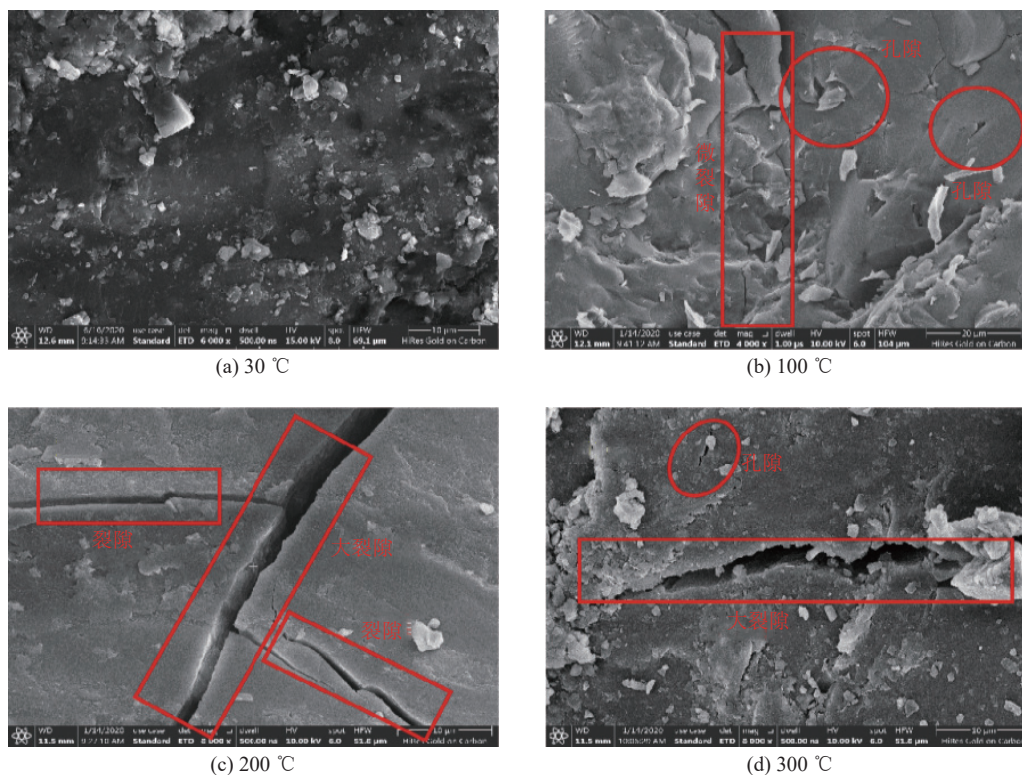


图 7 不同温度处理后煤样孔裂隙情况

Fig.7 Fractures of coal samples after treatment at different temperatures

增速,该阶段声发射在 80 °C 前后变化规律呈现较快增加的变化;100 ~ 200 °C 裂隙增速略微有所下降,此时声发射信号强度增速变慢;200 ~ 300 °C 裂隙增速都较快,声发射信号增强最快;300 °C 后煤样开始热解,不同尺度裂隙增量降到较低值。

综合不同尺度裂隙的演化规律与声发射信号测试试验结果,煤在升温过程中煤体孔裂隙的发育扩展与声发射信号强度增强变化具有一致性,煤内部孔裂隙的产生与扩展破裂是声发射信号产生的主要来源。

3.2 高含量矿物转化速率对孔裂隙变化的影响

煤受热时连接内部各物质的分子链在温度作用下断裂或重连,转化为更为稳定的结构。分析不同温度下煤中常见高含量矿物成分占比,探究煤在升温过程中矿物成分转化速率对声发射信号产生的影响。

高岭石、珍珠石与地开石差别在于内部晶体结构不同,埃洛石晶体结构与高岭石相似,但结构单元层之间有层间水存在,也被称为多水高岭石,温度的增加,4 种矿物相互转换,以高岭石、珍珠石、地开石、多水高岭石 4 种矿物为分析对象,通过 X 射线衍射 (XRD) 试验,获得不同温度下煤样内部 4 种矿物的百分含量^[20]。4 种矿物含量分数变化情况如图 8

所示。

如图 9 所示,4 种矿物的质量分数存在明显的变化,在第 1 阶段矿物转化速率最快,第 2 阶段转化速率显著降低,第 3 阶段转化速率介于第 1、2 阶段之间。

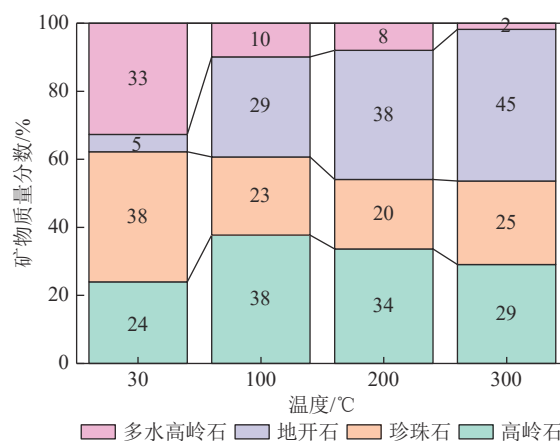


图 8 不同温度下矿物含量占比

Fig.8 Proportion of mineral content at different temperatures

结合煤升温过程中内部裂隙变化情况,不同阶段矿物转化速率对声发射信号变化的作用如下:在第 1 阶段煤体内部矿物含量转化速率最快,此时煤样以快速扩展损伤为主,总裂隙增长速率较快,此时声发射信号强度快速提高,在试验过程中温度相对

较低的情况下发射信号增长迅速;第 2 阶段煤体已转变为渐近扩展损伤,矿物转化速率变小,总裂隙增长速率显著降低,煤温已经超过 100 °C,温度继续升高声发射信号不断增强,但增速变缓;第 3 阶段温度较高,矿物转化速率升高,煤体内部总裂隙增长速度大幅提高,此状态下声发射信号进一步增强。

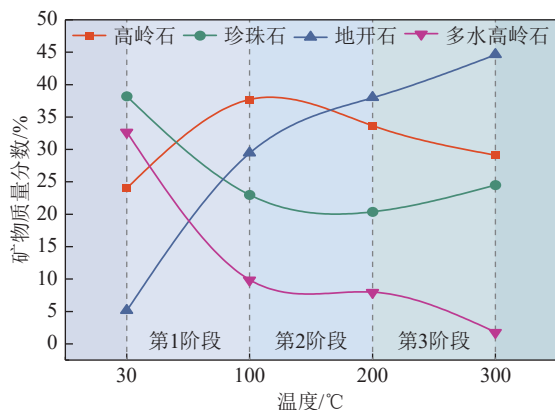


图 9 不同阶段矿物转化速率

Fig.9 Mineral conversion rates at different stages

以上研究得到矿物转化速率的变化是影响煤升温声发射信号产生的原因之一,但声发射信号的产生受到不同煤质、升温速率、周边环境的影响,因此,揭示煤自燃过程不同煤质声发射信号时空演化规律及传输衰减机制,是接下来应用声发射技术进行煤自燃监测预警的重点研究方向。

4 结 论

1)煤在升温过程中,能够产生明显的声发射信号。温度升高对煤的声发射信号的增强作用明显,煤在升温至燃烧过程中,声发射振铃计数呈阵发性增长,拟合得到振铃计数与温度满足关系式 $N = 2.054\,52T + 129.847\,87$,振铃计数与温度线性相关系数超过 0.87,温度的升高促使煤释放的声发射信号持续增强。

2)引入声发射损伤参数表征煤在升温及燃烧过程中损伤变化,煤样在 80 °C 前后累计损伤参数增长速率有明显的阶段性,后者速率降低至原 40%。临界温度前的煤样内部以快速扩展损伤为主,后以渐进式损伤为主。煤在初始升温时声发射平均频率和振铃计数变化率均较低,在煤快速升温又呈现显著增加的变化,声发射波形频率与温度变化对应性显著。

3)从微观角度讨论煤升温过程中声发射信号产生机制,温度升高促使煤体内部矿物进行转化,矿物

转化速率会影响煤体内部主要损伤模式,矿物高转化速率对应快速扩展损伤,帮助煤体内部孔裂隙衍生扩展,是促进煤体释放声发射信号的原因之一。

参考文献(References):

- [1] 秦波涛,仲晓星,王德明,等.煤自燃过程特性及防治技术研究进展[J].煤炭科学技术,2021,49(1):66-99.
QIN Botao, ZHONG Xiaoxing, WANG Deming, et al. Research progress on characteristics of coal spontaneous combustion process and prevention technology[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 66-99.
- [2] GUO J, WEN H, ZHENG X, et al. A method for evaluating the spontaneous combustion of coal by monitoring various gases[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 126: 223-231.
- [3] QING G, WANXING R, WEI L. Risk evaluation of coal spontaneous combustion from the statistical characteristics of index gases[J]. Thermochimica Acta, 2022, 715: 179287.
- [4] DEXING L, ENYUAN W, XIANGGUO K, et al. Damage precursor of construction rocks under uniaxial cyclic loading tests analyzed by acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2019, 206: 169-178.
- [5] KONG Biao, ZHUANG Zedong, ZHANG Xiaoying, et al. A study on fractal characteristics of acoustic emission under multiple heating and loading damage conditions[J]. Journal of Applied Geophysics, 2022, 197: 104532.
- [6] 何学秋,韦梦茜,宋大钊,等.煤岩电磁辐射理论与技术新进展[J].煤炭科学技术,2023,51(1):168-190.
HE Xueqiu, WEI Menghan, SONG Dazhao, et al. New progress in theory and technology of electromagnetic radiation in coal and rock[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 168-190.
- [7] 张胜寒,杨礼宁,冉琦,等.高温作用后砂岩的声发射特性研究[J].工程地球物理学报,2022,19(3):322-327.
ZHANG Shenghan, YANG Lining, RAN Qi, et al. Study on acoustic emission characteristics of sandstone after high temperature[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2022, 19(3): 322-327.
- [8] DONG L J, Tao Q, Qing-Chun H U. Influence of temperature on acoustic emission source location accuracy in underground structure[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(8): 2468-2478.
- [9] 张艳博,张行,梁鹏,等.花岗岩破裂过程声发射横、纵波时频特征实验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(S2):3554-3564.
ZHANG Yanbo, ZHANG Hang, LIANG Peng, et al. Experimental study on time-frequency characteristics of transverse and longitudinal waves of acoustic emission during granite fracture process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S2): 3554-3564.
- [10] 史宏财.高温预损伤下煤岩蠕变声发射及分形特征[J].煤田地质与勘探,2020,48(2):187-194.
SHI Hongcai. Creep acoustic emission and fractal characteristics of coal rock under high temperature predamage[J]. Coal Geo-

- logy & Exploration, 2020, 48(2): 187–194.
- [11] GAO L, ZHANG W, LU W, *et al.* Study on the effects of temperature and immersion on the acoustic emission and electromagnetic radiation signals of coal rock damage under load[J]. *Engineering Geology*, 2022, 297: 106503.
- [12] WANG Y, DENG H, DENG Y, *et al.* Study on crack dynamic evolution and damage-fracture mechanism of rock with pre-existing cracks based on acoustic emission location[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 201: 108420.
- [13] 郭 军, 王凯旋, 蔡国斌, 等. 声发射信号研究进展及其在煤温感知领域应用前景[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(11): 84–92.
GUO Jun, WANG Kaixuan, CAI Guobin, *et al.* Research progress of acoustic emission signal and its application prospect in the field of coal temperature perception[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(11): 84–92.
- [14] 孔 倩, 姜根山, 孙建浩, 等. 三维复杂温度场高精度声学测量方法[J]. *声学学报*, 2021, 46(5): 699–711.
KONG Qian, JIANG Genshan, SUN Jianhao, *et al.* High-precision acoustic measurement method for 3D complex temperature fields[J]. *Acta Acustica*, 2021, 46(5): 699–711.
- [15] YAN Hua, CHEN Guannan, ZHOU Yinggang, *et al.* Primary study of temperature distribution measurement in stored grain based on acoustic tomography[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, 42: 55–63.
- [16] QU L N. A study on the prediction method of coal spontaneous combustion development period based on critical temperature[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(35): 35748–35760.
- [17] SHEN R, LI H, WANG E, *et al.* Mechanical behavior and AE and EMR characteristics of natural and saturated coal samples in the indirect tensile process[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2019, 16(4): 753–763.
- [18] 郝以瑞, 吕嘉锟, 宁 杉. 常规压缩下砂岩的声发射与损伤演化[J]. *矿业研究与开发*, 2018, 38(7): 28–31.
HAO Yirui, LYU Jiakun, NING San. Acoustic emission and damage evolution of sandstone under conventional compression[J]. *Mining Research and Development*, 2018, 38(7): 28–31.
- [19] 孟巧荣, 赵阳升, 胡耀青, 等. 褐煤热破裂的显微 CT 实验[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(5): 855–860.
MENG Qiaorong, ZHAO Yangsheng, HU Yaoqing, *et al.* Micro-CT experiment of thermal rupture of lignite[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(5): 855–860.
- [20] LU W, ZHUANG Z, ZHANG W, *et al.* Study on the pore and crack change characteristics of bituminous coal and anthracite after different temperature gradient baking[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(23): 19448–19463.