



不同加载速率下胶结充填体声发射及裂纹演化特征

尹升华 周昀 杨晓炳 陈威 陈俊伟

引用本文:

尹升华, 周昀, 杨晓炳, 等. 不同加载速率下胶结充填体声发射及裂纹演化特征[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 250–262.
YIN Shenghua, ZHOU Yun, YANG Xiaobing. Acoustic emission and crack evolution characteristics of cemented tailings backfill under different loading rates[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 250–262.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0299>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

不同高径比煤样巴西劈裂声发射特征及能量演化机制研究

Study on acoustic emission characteristics and energy evolution of Brazilian splitting tests of coal samples with different height-diameter ratio

煤炭科学技术. 2024, 52(10): 63–77 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1288>

饱和煤样力学及损伤特征的加载速率微观作用机制研究

Microscopic mechanism of loading rate of saturated coal sample mechanics and damage characteristics

煤炭科学技术. 2023, 51(2): 130–142 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1750>

预制裂纹煤体静载黏滑亚失稳及声电信号响应特征

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

煤炭科学技术. 2023, 51(5): 72–81 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1015>

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>

基于离散元模拟的受载裂隙岩体地震学声发射响应特征

Characteristics of seismic acoustic emission of loaded rock containing pre-existing cracks based on the discrete element simulation

煤炭科学技术. 2024, 52(10): 54–62 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0208>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

尹升华, 周 昀, 杨晓炳, 等. 不同加载速率下胶结充填体声发射及裂纹演化特征[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 250–262.

YIN Shenghua, ZHOU Yun, YANG Xiaobing, *et al.* Acoustic emission and crack evolution characteristics of cemented tailings backfill under different loading rates[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 250–262.

不同加载速率下胶结充填体声发射及裂纹演化特征

尹升华^{1,2}, 周 昀^{1,2}, 杨晓炳^{1,2}, 陈 威^{1,2}, 陈俊伟^{1,2}

(1. 北京科技大学 资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 为探究加载速率 v 对胶结充填体裂纹演化机制的动态调控规律, 开展了 $v=0.002, 0.004, 0.008, 0.010$ mm/s 下的单轴压缩同步声发射试验。通过分析声发射振铃计数、平均频率(AF)、上升时间-幅值比(RA)及 r 值(RA/AF)的时变特征, 并结合高斯混合模型(GMM)与移动平均滤波算法对 RA-AF 数据集进行无监督聚类, 以识别裂纹类型及其演化规律。研究结果表明: ① 峰值应力(σ_f)附近, 充填体的声发射振铃计数呈现区间震荡现象, 随着 v 增大, 充填体的弹性变形及塑性屈服阶段的振铃计数波动率减小; ② v 从 0.002 增至 0.010 mm/s 时, AF 分布集中范围随速率增加由 0~150 kHz 压缩至 0~100 kHz, RA 分布集中范围由 0~5 ms/V 扩展至 0~10 ms/V, 且高 RA 信号集中于 AF<80 kHz 窄带; ③ v 增大对峰后破坏模式具有显著影响, 剪切裂纹比例由 19.11% ($v=0.002$ mm/s) 跃升至 64.23% ($v=0.010$ mm/s), 表明 v 增大会驱动破坏机制从拉伸破坏主导向拉伸-剪切复合型破坏转化; ④ 以加载应力阶段为界限, GMM 聚类分析可将充填体的裂纹演化分为拉伸裂纹主导(0~20% σ_f)、拉伸-剪切裂纹转化(20% σ_f ~80% σ_f)、剪切裂纹快速增长(80% σ_f ~100% σ_f)和剪切-拉伸裂纹共同主导(峰后破坏)4个阶段, 其中剪切裂纹在 80% σ_f ~100% σ_f 处的快速增长是充填体局部失稳破坏的前兆特征。研究可为充填体的稳定性分析与破坏预测提供理论支持。

关键词: 加载速率; 胶结充填体; 声发射; r 值特征; 裂纹演化

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)06-0250-13

Acoustic emission and crack evolution characteristics of cemented tailings backfill under different loading rates

YIN Shenghua^{1,2}, ZHOU Yun^{1,2}, YANG Xiaobing^{1,2}, CHEN Wei^{1,2}, CHEN Junwei^{1,2}

(1. School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Efficient Mining and Safety in Metal Mines, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To investigate the dynamic regulation mechanism of loading rate on crack evolution in cemented tailings backfill (CTB), uniaxial compression tests with acoustic emission (AE) monitoring were conducted at loading rates v of 0.002, 0.004, 0.008, and 0.010 mm/s. By analyzing the time-varying characteristics of AE parameters, including ring count, average frequency AF, rise time-amplitude ratio RA, and r -value (RA/AF), and applying unsupervised clustering to RA-AF datasets using Gaussian Mixture Model (GMM) combined with a moving average filter, crack types and their evolution patterns were identified. The results indicate that: ① Near peak stress, AE ring counts of CTB exhibit interval oscillations. With increasing loading rate, the fluctuation amplitude of ring counts during elastic and plastic yield stages decreases. ② As the loading rate increases from 0.002 to 0.010 mm/s, the concentrated range of AF distribution exhibited a progressive compression from 0–150 kHz to 0–100 kHz, while the RA distribution range expanded from 0–5 ms/V to 0–10 ms/V, with high-RA signals concentrated in the narrow band of AF < 80 kHz. ③ The increase in loading rate significantly affects the post-peak failure mode: the proportion of shear cracks rises sharply from 19.11% ($v=0.002$ mm/s) to 64.23% (0.010 mm/s), indicating a shift in fail-

收稿日期: 2025-03-11

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 钱小静

DOI: 10.12438/cst.2025-0299

基金项目: “十四五”国家重点研发计划资助项目(2022YFC2904103); 国家自然科学基金资助项目(52274108, 52404110)

作者简介: 尹升华(1981—), 男, 江西吉安人, 博士生导师。E-mail: csuysh@126.com

通讯作者: 周 昀(1996—), 男, 江西南昌人, 博士研究生。E-mail: zhouyun2816@163.com

ure mechanism from tensile-dominated to tensile-shear composite failure. ④ Based on stress stages, GMM clustering divides crack evolution into four phases: tensile crack dominance ($0 - 20\%\sigma_t$), tensile-shear crack transition ($20\%\sigma_t - 80\%\sigma_t$), rapid shear crack growth ($80\%\sigma_t - 100\%\sigma_t$), and tensile-shear co-dominance (post-peak failure). Among them, the rapid increase in shear cracks at $80\% - 100\%$ of peak stress is identified as a precursor to localized instability. This study provides theoretical support for stability analysis and failure prediction of CTB.

Key words: loading rate; cemented paste backfill; acoustic emission; r -value characteristics; crack evolution

0 引 言

充填开采技术在矿山采矿工程中得到了广泛应用,其核心目标是提高矿产资源回收率、控制地表沉降及优化采场稳定性^[1-3]。胶结充填体作为重要的矿山充填材料,其力学特性和稳定性直接影响采矿作业的安全性及经济性。胶结充填体的力学响应与破坏演化受诸多因素影响,其中加载速率 v 是决定充填体变形和裂纹扩展模式的重要因素之一。在实际工程中,充填体可能处于不同的应力加载环境,例如采动影响或矿体开采顺序调整,充填体可能经历不同速率的应力加载^[4-5]。因此,研究不同 v 下充填体的裂纹演化特征,对于理解其破坏机理、优化充填工艺及提升矿山安全性具有重要的理论价值和工程意义。

近年来,随着试验测试与数值模拟技术的发展,学者们对充填体的力学行为开展了大量研究^[6-7]。充填体的力学特性受其组分材料^[8]、胶结剂含量^[9]、养护时间^[10]及加载方式^[11]等因素的影响。许多研究表明,充填体在加载过程中会经历裂纹萌生、扩展及最终失稳破坏的全过程^[12-13]。LIU 等^[14]对不同养护温度下改性镁渣基充填材料的力学性能进行研究,发现随着养护温度的升高,拉伸裂纹随之增多;ZHANG 等^[15]研究了高含水率材料胶结充填体的力学性能及损伤演化特征,研究表明高含水率充填体在单轴压缩下表现出延性破坏,材料具有较高的残余强度,在达到峰值承载力后表现出良好的稳定性;侯永强等^[16]对胶结充填体的力学响应及能量损伤演化进行了研究,发现动载作用下充填体的受荷能量损伤演化过程划分为损伤稳定发展阶段、损伤加速阶段和损伤破坏阶段 3 个阶段。目前针对充填体裂纹演化的研究主要集中在单一 v 下的变形特征分析,尚缺乏系统性探讨 v 对裂纹演化路径及破坏机制的影响。因此,有必要开展不同 v 下充填体裂纹演化规律的研究,以进一步揭示其破坏模式,为工程实践提供指导。

裂纹的萌生与扩展是充填体破坏的主要形式,其本质上是能量积累与释放的过程。在此过程中,

声发射(AE)技术作为一种高灵敏度的非破坏性检测手段,被广泛应用于材料损伤演化研究。声发射信号可用于识别裂纹类型,并通过特征参数(如振铃计数、平均频率 AF 和上升时间-幅值比 RA 等)表征裂纹的时变特征^[17]。已有研究表明,拉伸裂纹和剪切裂纹在声发射信号特征上表现出明显差异,拉伸裂纹通常具有较高的 AF 和较低的 RA,而剪切裂纹则呈现相反的趋势^[18]。基于此,引入高斯混合模型理论,建立二维高斯混合模型,利用多个高斯概率密度分布来区分加载过程中胶结充填体的低声发射 AF 及高声发射 RA,进一步对高 RA 与低 AF 的数量特征进行统计,从而精准识别载荷作用下胶结充填体的裂纹类型与演化行为。

针对不同 v 下胶结充填体的裂纹演化特征展开研究,首先分析不同 v 下充填体声发射信号(振铃计数、RA、AF、RA/AF 等)的时变特征,探讨 v 对声发射参数变化趋势的影响;然后基于高斯混合模型(GMM)理论,结合移动平均滤波算法,对充填体声发射数据进行无监督聚类分析,以识别裂纹类型及其演化路径;最后探讨 v 对裂纹主导类型及破坏模式的影响,揭示充填体裂纹演化的阶段划分及其关键特征。以期充填体的稳定性分析与破坏预测提供理论支持,并为矿山充填体的优化设计提供科学依据。

1 试验方案及设备

1.1 试验试件

制备胶结充填体试样的材料:细骨料(金矿尾矿)、胶凝材料(复合硅酸盐水泥 P·C32.5)及普通自来水。利用激光粒度仪测定金矿尾矿的粒度分布(图 1)。尾矿粒径分布的结果为 $d_{10}=0.43\ \mu\text{m}$ 、 $d_{50}=3.15\ \mu\text{m}$ 、 $d_{60}=4.03\ \mu\text{m}$,其中尾砂的不均匀系数 $C_u=9.37$ 、曲率系数 $C_c=0.95$ 。试件料浆质量分数为 68%,水泥与尾砂比为 1:8。试样为直径 50 mm、高度 100 mm 的圆柱体,共分为 4 组,每组 3 个试样。试样的制备严格按照 JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》的要求进行^[19]。采用振捣方式使水、尾砂和水泥充分混合,搅拌均匀后倒入标准试模中,

静置 24 h 待凝固后脱模。随后,试样在温度 $(22\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $75\%\pm 5\%$ 的条件下自然养护 7 d 后进行试验,试样如图 2 所示。

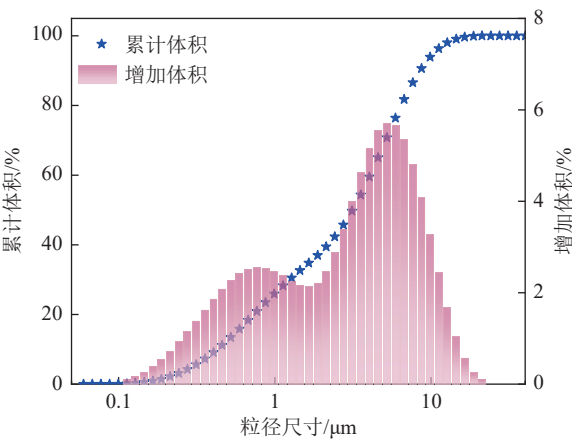


图 1 尾矿的粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of tailings



图 2 试样图片

Fig.2 Sample picture

1.2 试验设备及程序

采用美特斯微机控制电子万能试验机对胶结充填体进行了 $v=0.002, 0.004, 0.008, 0.010\text{ mm/s}$ 下的单轴压缩同步声发射试验。充填体试样的抗压强度结果见表 1。声发射试验采用设备为 Micro-II Express Digital AE System, 声发射监测系统的参数设置: 采样频率为 1 024 kHz、波形阈值为 35 dB、前置放大器增益为 40 dB、间隔参数为 50 μs 、采样点为 1 024 kHz 及触发方式为内部触发。限于篇幅,对每组的平行试样的应力、声发射数据进行处理后,在不改变数据规律趋势的前提下,取平行试样中最具代表性的试样数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 声发射基本参数特征

2.1.1 声发射振铃计数特征

图 3 显示了不同 v 下充填体的振铃计数与应力之间的关系。由图 3 可知,胶结充填体的应力阶段

表 1 充填体试样抗压强度结果

Table 1 Compressive strength results of CTB samples

$v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	试样编号	抗压强度/MPa	平均强度/MPa
0.002	A1	0.645	0.616
	A2	0.608	
	A3	0.595	
0.004	B1	0.692	0.673
	B2	0.680	
	B3	0.647	
0.008	C1	0.830	0.797
	C2	0.837	
	C3	0.724	
0.010	D1	0.653	0.598
	D2	0.563	
	D3	0.578	

主要由压密(OA)、弹性变形(AB)、塑性屈服(BC)及峰后破坏(CD)阶段组成。压密阶段,充填体内部的原生裂隙在载荷作用下逐渐闭合,裂隙面或颗粒的滑移和摩擦产生了一定数量的声发射信号。弹性变形阶段, v 增大使得该阶段的应变历程先减小后增大,弹性变形、塑性屈服阶段内的振铃计数波动率随 v 增大而减小。塑性屈服阶段,振铃计数总是由相对高位往相对低位震荡,这表明试件的振铃计数具有较明显的变异特征,这可能与试件内部的破坏形式发生转变有关。峰后破坏阶段,试件的振铃计数具有较为激烈的上下波动特征,可能是由于试件逐渐由局部的损伤破坏向整体失稳转变所导致的。

在低加载速率($v=0.002, 0.004\text{ mm/s}$)条件下,应力-应变曲线呈现平缓的峰后软化,表明充填体破坏以延性为主,且声发射振铃计数波动较小;中高加载速率($v=0.008, 0.010\text{ mm/s}$)条件下,随着 v 增大,峰后应力下降更陡峭,表明破坏模式趋于脆性。尤其在 $v=0.010\text{ mm/s}$ 时(图 3d),振铃计数峰值可达到 80 左右,反映剧烈的内部裂纹扩展。此外,低加载速率($v=0.002\text{ mm/s}$)下,加载时间长达 458 s 左右,达到峰值应力时所对应的应变为 0.007 7,峰后应变缓慢累积,而高加载速率($v=0.010\text{ mm/s}$)下,加载时间缩短至 142 s 左右,达到峰值应力时所对应的应变为 0.013 9,峰后应变迅速达到临界值并引发整体失稳破坏。

2.1.2 声发射 RA-AF 特征

拉伸裂纹的扩展释放的声发射能量主要由纵波(传播速度较快)携带,这通常导致高 AF 与低 RA 之

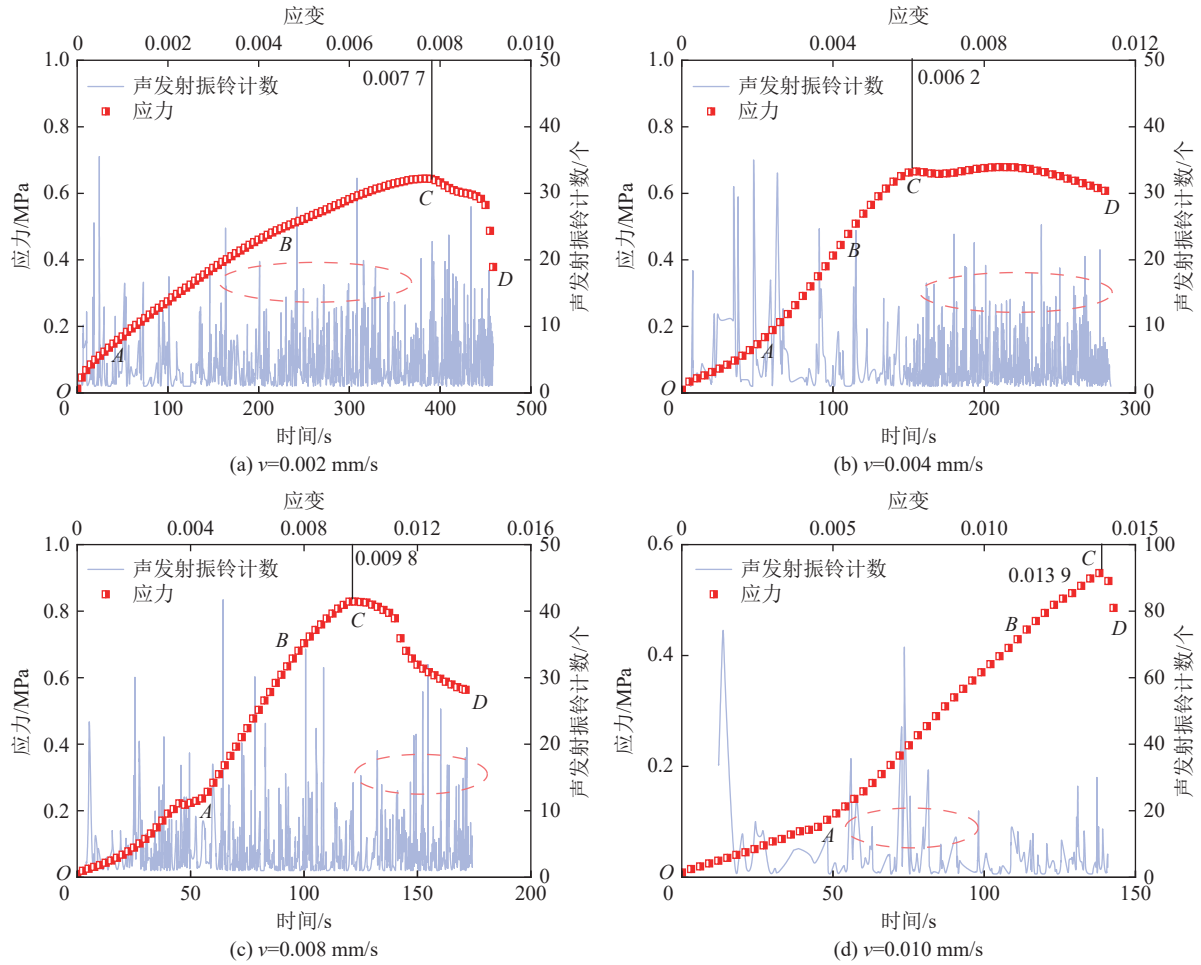
图3 不同 v 下充填体声发射振铃计数特征

Fig.3 Characteristics of acoustic emission ringing counts of CTB at different loading rates

间的关联;而剪切裂纹的扩展则伴随剪切波(传播速度较慢),从而使得低AF与高RA相对应。因此,胶结充填体破裂机制的演化可通过了解RA及AF的变化来探讨。不同 v 下试件的声发射RA及AF的二维核密度分布如图4所示。

如图4所示, $v=0.002, 0.004, 0.008, 0.010$ mm/s下,充填体的声发射AF及RA呈现显著分布差异:AF信号分布随加载速率增大逐渐向低频区偏移,分别集中于 $0 \sim 150$ 、 $0 \sim 125$ 、 $0 \sim 125$ 及 $0 \sim 100$ kHz范围;RA信号分布随加载速率的增大分别集中于 $0 \sim 5$ 、 $0 \sim 5$ 、 $0 \sim 5$ 及 $0 \sim 10$ ms/V。值得注意的是,声发射信号的高RA特征参数主要分布于 $AF < 100$ kHz区间,且该区间上限随 v 提升进一步压缩至更窄带(如 0.010 mm/s时 $AF < 80$ kHz)。由于高RA且低AF的声发射信号与剪切裂纹的产生密切相关,表明 v 增大显著促进了剪切型损伤的演化。此外,试验数据显示, v 从 0.002 增至 0.010 mm/s时,有效RA-AF数据点数量减少约71.5%,这可能与高速率下声发射信号瞬态特性增强(如信号重叠率提升)及

材料动态损伤的局部化效应有关^[4]。

2.1.3 声发射 r 值时序特征

声发射 r 值可以反映材料的破坏行为,当 r 值较大的信号增多时,说明试样破坏加剧。图5显示了不同 v 下充填体声发射 r 值与应力随时间的变化关系。

由图5可知,充填体的声发射 r 值在时间维度上呈现出显著的多峰分布特性。在低加载速率($v=0.002, 0.004$ mm/s)条件下,压密与弹性变形阶段的声发射 r 值信号密度较低,且相邻峰值间距明显。然而,在峰后应力阶段, r 值信号主要在 $0 \sim 0.5$ ms/(V·kHz)剧烈振荡,表明此阶段充填体内部发生非均匀损伤,伴随裂纹贯通及能量集中释放。值得注意的是,当 v 增至 0.010 mm/s时, r 值信号分布特征发生显著转变:压密阶段信号稀疏性增强,而弹性与塑性阶段信号密集度显著增大,且振幅波动范围为 $0 \sim 1$ ms/(V·kHz)。这种现象表明,较高加载速率条件下,充填体微裂纹成核与扩展的协同效应增强,导致 r 值剧烈波动现象由低加载速率条件下

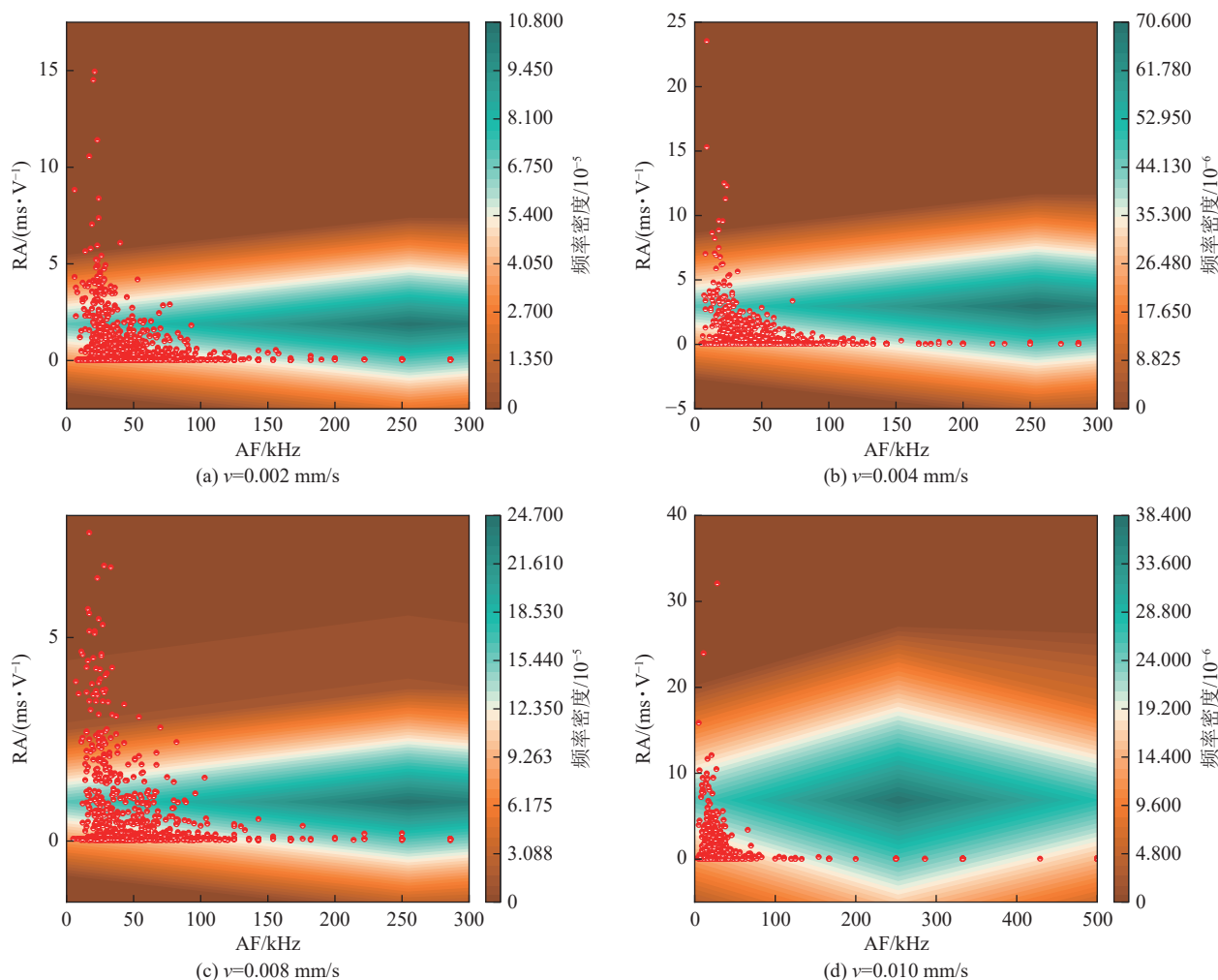
图 4 不同 v 下充填体声发射 AF-RA 特征

Fig.4 AF-RA characteristics of CTB at different loading rates

的峰后应力阶段提前至弹塑性加载阶段出现。

尽管声发射 r 值在一定程度上能够反映充填体试样的破坏程度,但在监测过程中,最大值的出现往往受到偶然因素的影响,某一声发射参数的瞬时增长并不能精准反映充填体内部破坏程度的加剧。因此,接下来将采用高斯混合模型与平均移动滤波方法相结合,提取 RA-AF 数据集的有用组分,以进一步揭示充填体的破裂演化规律。

2.2 基于高斯混合模型的数据处理方法

2.2.1 高斯混合模型

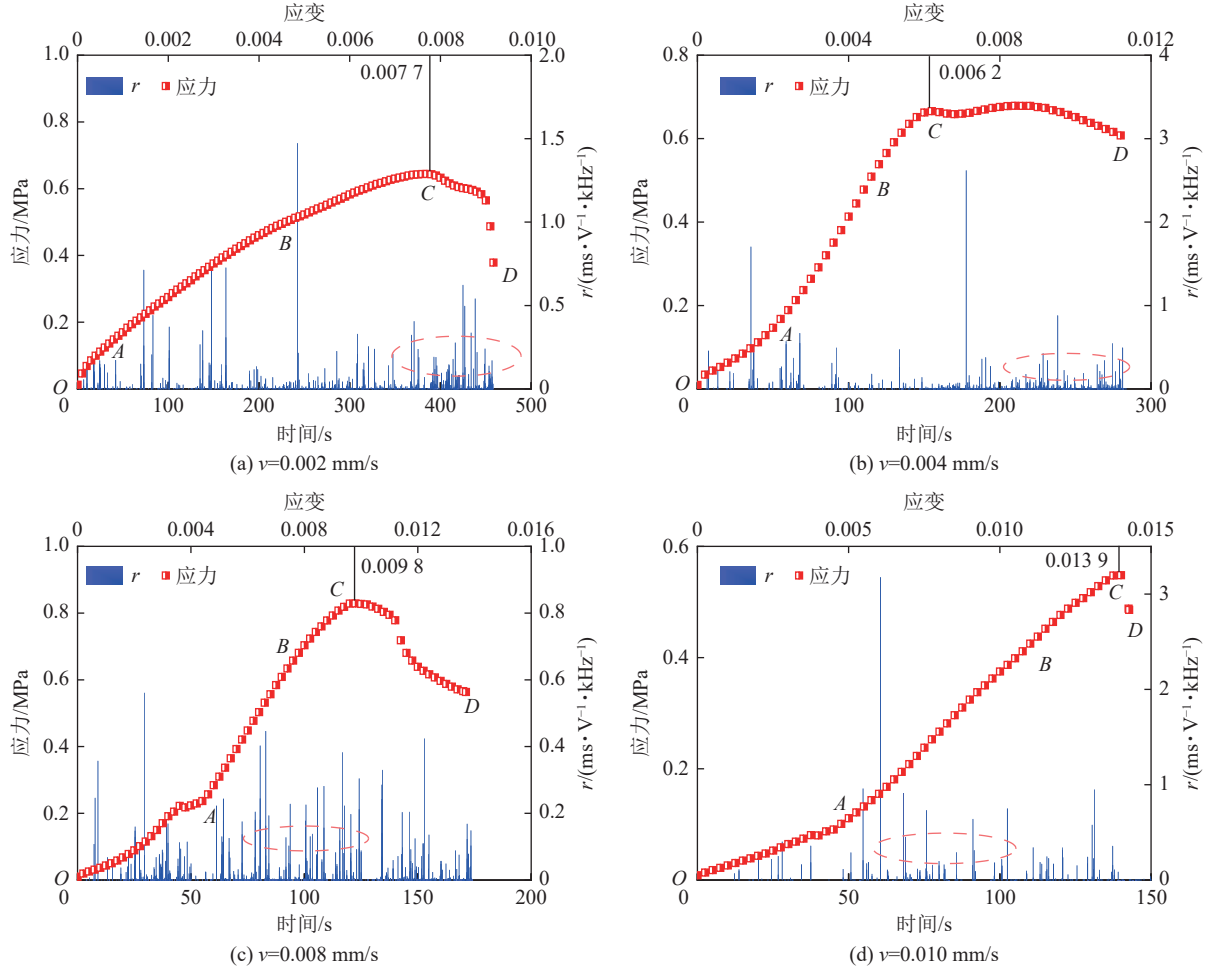
高斯混合模型(GMM)是一种常用于无监督聚类学习的有限混合模型算法^[20-21]。从几何视角来看,GMM 可视为多个加权二维高斯分布的叠加,其概率密度函数由多个高斯分布的线性组合构成;从统计学角度分析,GMM 由 k 个单高斯分布按照特定权重进行加权求和,其中 k 为混合分量的数量,即聚类数。其概率密度函数可表示为多个高斯分布的线性叠加^[22],即

$$p(x) = \sum_{i=1}^k p(i)p(x|i) = \sum_{i=1}^k \omega_i N(x|\mu_i, \Sigma_i) \quad (1)$$

式中: $p(x) = \sum_{i=1}^k p(i)p(x|i)$ 为第 i 个高斯分布的概率密度函数; μ 为均值向量; Σ_i 为协方差矩阵; $p(i) = \omega_i$ 为第 i 个高斯分布的权重。在一般情况下,GMM 进行概率密度估计的组数不应过多或者过少,组数过多会导致参数估计过程难以收敛,组数过小则会使得参数估计误差较大。

输入 M 维特征向量 x , k 个分量的加权总和可以被定义为混合密度。其中,混合分量权重因子 ω_i , 满足约束条件 $\sum_{i=1}^k \omega_i = 1$, 总概率归一化为 1^[23]。

下一步需要找到权重因子 ω_i 、均值向量 μ 及协方差矩阵 Σ_i 的最佳值,使得 $p(x)$ 可以最佳拟合所有的特征向量。可以利用期望最大化(EM)算法可以找到最优解。

图 5 不同 v 下充填体声发射 r 值特征Fig.5 Characteristics of r -value of acoustic emission of CTB at different loading rates

2.2.2 EM 算法

利用 EM 算法估计高斯混合模型的参数, 通常分为 2 步^[24]。

1) 求解当前给定参数的条件期望, 即 E 步; 每个数据点的分量 i 得出的训练数据点的期望值为

$$p_r(i | x, (\omega_i, \mu_i, \Sigma_i)^m) = \frac{\omega_i N(x_i | \mu_i^m, \Sigma_i^m)}{\sum_{i=j}^k \omega_i N(x_i | \mu_j^m, \Sigma_j^m)} \quad (2)$$

式中: m 为迭代次数。

2) 求解期望最大化时的参数, 即 M 步。此时, 模型参数可表示为

$$\omega_i^{m+1} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T p_r[i | x, (\omega_i, \mu_i, \Sigma_i)^m] \quad (3)$$

$$\mu_i^{m+1} = \frac{x \sum_{t=1}^T p_r[i | x, (\omega_i, \mu_i, \Sigma_i)^m]}{\sum_{t=1}^T p_r[i | x, (\omega_i, \mu_i, \Sigma_i)^m]} \quad (4)$$

$$\sum_j^{m+1} = \frac{\sum_{t=1}^T p_r[i | x, (\omega_i, \mu_i, \Sigma_i)^m] X(x_t - \mu_i^{m+1})(x_t - \mu_i^{m+1})^T}{\sum_{t=1}^T p_r[i | x, (\omega_i, \mu_i, \Sigma_i)^m]} \quad (5)$$

对模型的对数似然函数进行计算, 若收敛, 输出结果; 若不收敛, 则需重新对后验概率进行计算, 直至算法收敛。需要指出的是, 为减少输出数据的分散, 利用移动平均滤波算法对 RA-AF 数据集进行跨度与滞后为 70 次的移动平均滤波。其中, 使用贝叶斯准则(BIC)研究了所选择的 2 个主要聚类的充分性, 贝叶斯准则可表示为

$$\lambda = K \ln N - 2 \ln l \quad (6)$$

式中: λ 为 BIC 信息量; N 为观测值的数量; K 为需要估计的自由参数的数量; l 为似然函数的最大值。

2.2.3 模型运算步骤

声发射 RA 及 AF 是可识别材料裂纹演化的声发射特征参数。声发射 RA、AF 的时序演化规律及其相互关系, 可将裂纹划分为拉伸裂纹及剪切裂纹,

而不同的材料的声发射 RAAF 的阈值往往不同, 仅依据声发射 RA 及 AF 的二维时间序列难以划分拉伸与剪切裂纹的分界线。因此, 引入高斯混合模型对充填体的声发射 RA 及 AF 进行无监督聚类处理, 以划分充填体的裂纹类型并探明其裂纹演化行为。高斯混合模型的运算步骤如图 6^[13] 所示。

首先, 对声发射初始 RA 及 AF 数据进行初始化参数; 然后, 利用 EM 算法对数据进行训练; 最后, 输

出分模型参数, 在此基础上进行无监督聚类分析, 识别声发射数据中的低 RA、高 AF 信号, 以及高 RA、低 AF 信号, 并以此划分拉伸和剪切裂纹。其中, 为减少输出参数的数据分散现象, 利用移动平均滤波法对其进行跨度和滞后为 70 次点击的移动平均滤波, 最后可得到声发射 RA 与 AF 的 2 个聚类结果, 并更易于区分高斯混合模型输出的 2 个聚类椭圆。

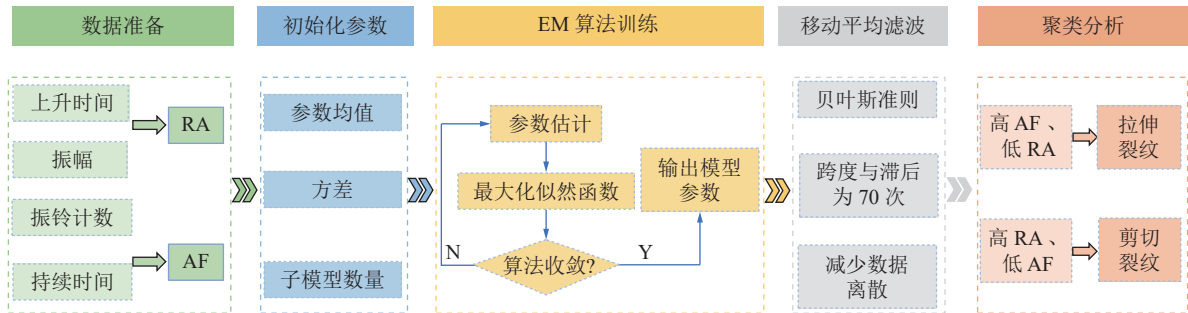


图 6 高斯混合模型运算步骤^[13]

Fig.6 Gaussian mixture model operation steps^[13]

2.3 基于高斯混合模型的充填体裂纹分类

2.3.1 聚类结果定性分析

为更好地分析充填体的应力阶段与裂纹演化之间的关系, 以峰值应力 σ_f 为单位, 将应力分为 $0 \sim 20\%\sigma_f$ 、 $20\%\sigma_f \sim 40\%\sigma_f$ 、 $40\%\sigma_f \sim 60\%\sigma_f$ 、 $60\%\sigma_f \sim 80\%\sigma_f$ 、 $80\%\sigma_f \sim 100\%\sigma_f$ 及峰后应力阶段 6 个部分。在此基础上, 分别对上述 6 个应力阶段的声发射 RA-AF 进行高斯混合模型聚类分析。图 7 显示了 $v=0.002, 0.004, 0.008, 0.010$ mm/s 的充填体在不同应力阶段内的聚类分析结果(每个子图的右边均配备了相应的 3D 聚类分析结果图像)。

基于高斯混合模型(GMM)的聚类分析结果如图 7 所示, 各子图均呈现双聚类椭圆分布, 其颜色梯度表征概率密度差异。此外, 当聚类椭圆更偏向于 AF 轴, 则代表着高 AF、低 RA 信号, 即发生拉伸破坏的概率更大; 当聚类椭圆更偏向于 RA 轴, 则代表着高 RA、低 AF 信号, 即发生剪切破坏的概率更大。

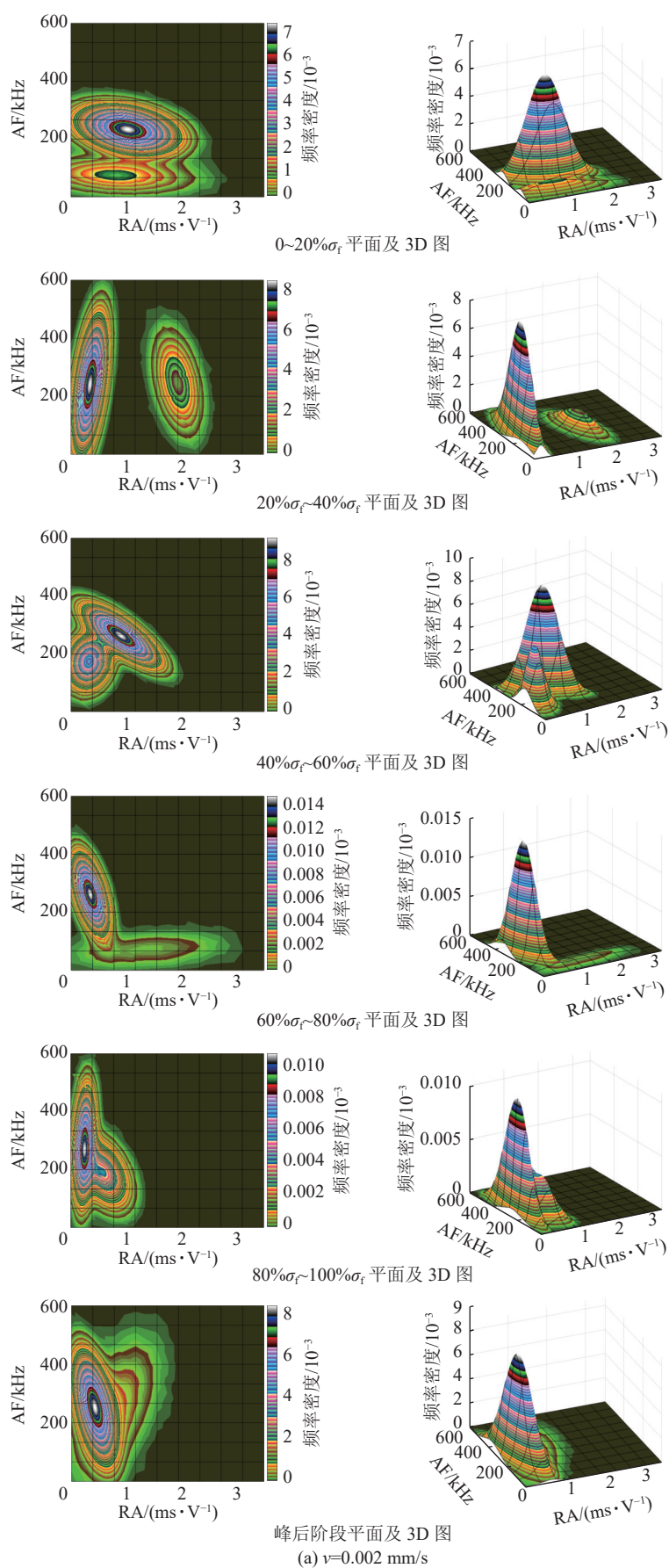
由图 7 可见, 充填体在整个加载过程中基本以张拉裂纹为主, 但在某一应力阶段内亦出现较多的剪切破坏。在加载初期, 声发射信号主要集中在 AF 纵轴一侧, 大部分信号的 RA 低于 5 ms/V, 平均频率主要分布在 $0 \sim 600$ kHz, 表现出较高的 AF 与较低的 RA, 表明此阶段以拉伸裂纹为主导。进入中间过渡阶段后, 张拉裂纹与剪切裂纹的相互转化逐渐增强, 二者原本分离的聚类簇开始出现交叉, 表明破裂

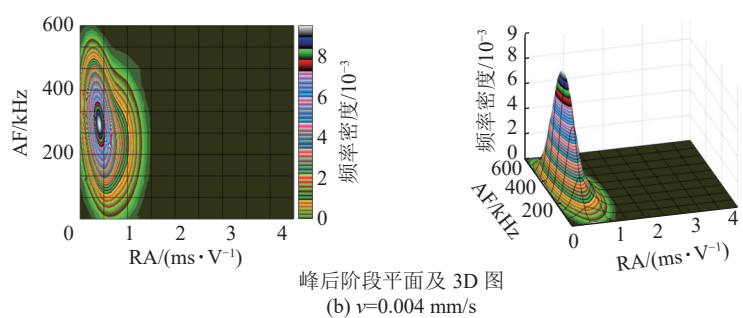
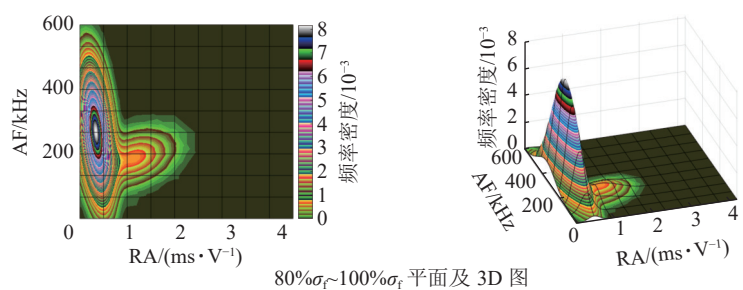
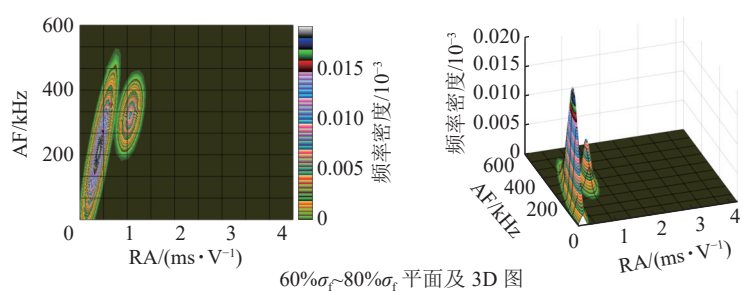
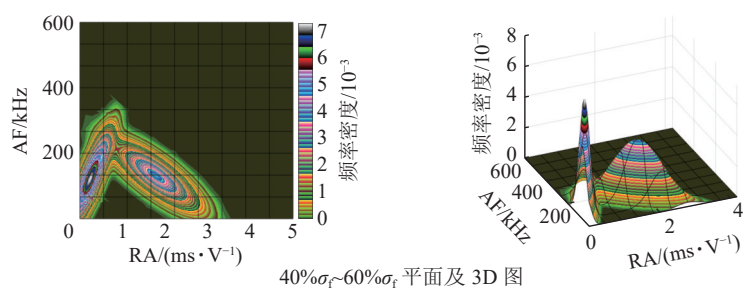
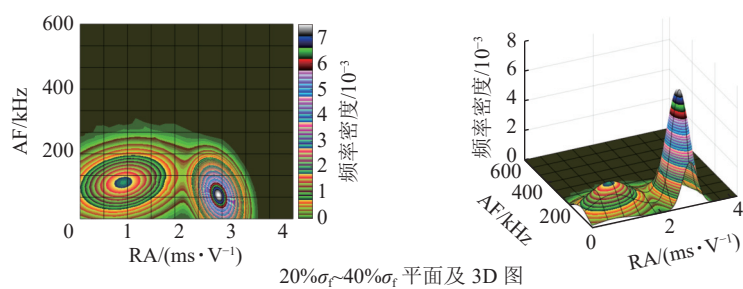
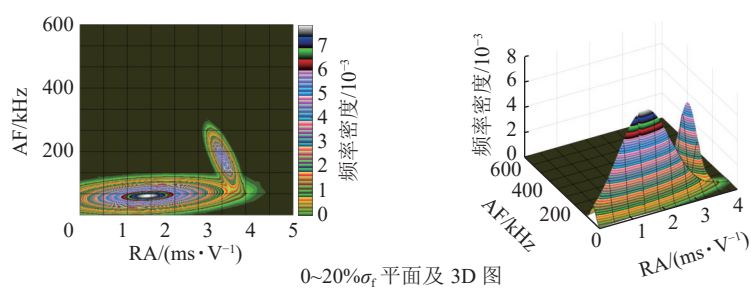
机制趋于复杂化。在局部失稳破坏及峰后破坏阶段, 声发射 RA 逐渐减小, 信号分布趋向 AF 轴一侧, 并呈现条带状分布特征。此时, 充填体的 AF 通常较高, 而 RA 在较小范围内波动, 同时张拉聚类的高概率区域逐渐向剪切聚类区域转移。随着 v 增大, 加载初期、中间过渡阶段及局部失稳破坏阶段的裂纹演化趋势并未发生显著变化, 而峰后阶段的剪切概率椭圆有逐渐增大的趋势, 表明产生较多的剪切破坏, 后续结合定量数据作进一步分析。

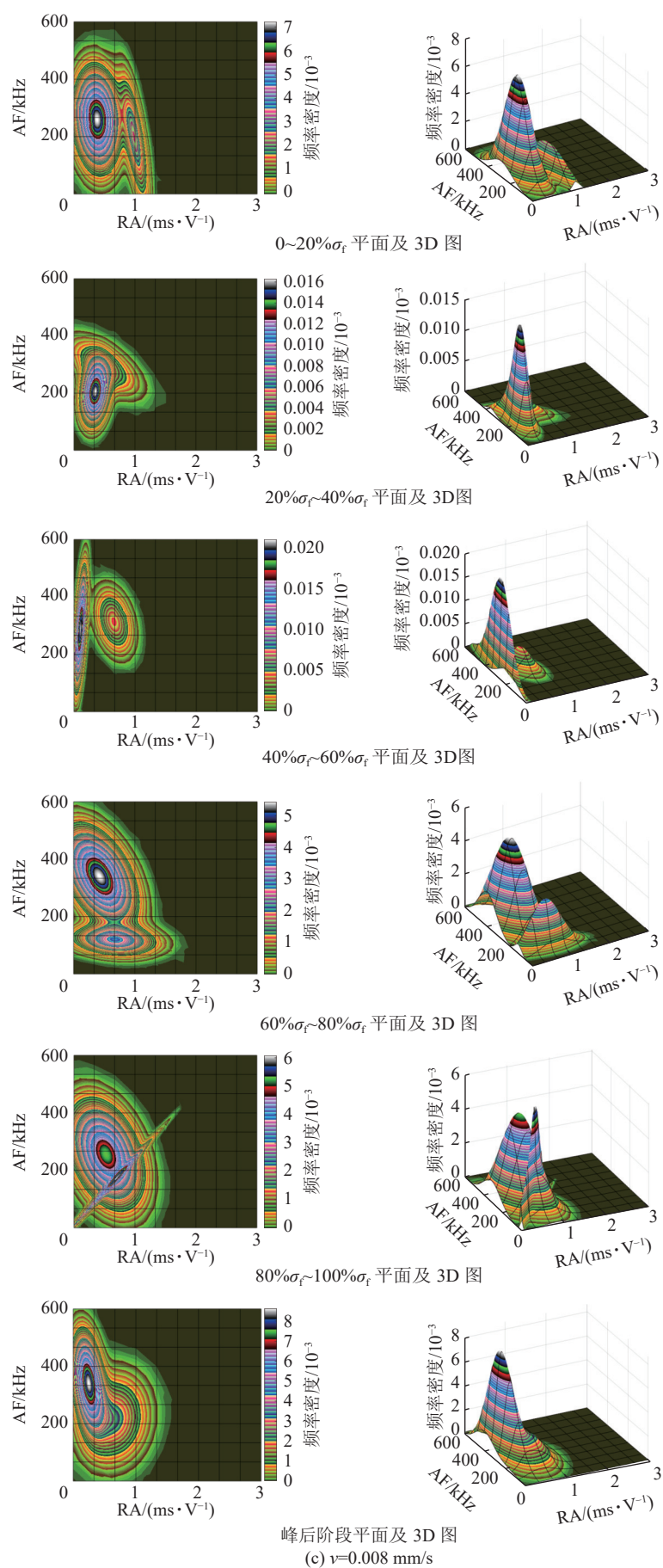
2.3.2 聚类结果定量分析

为定量讨论充填体的裂纹演化行为, 利用高斯混合模型聚类分析识别充填体在不同应力阶段内的裂纹类型及具体比例。图 8 展示了不同应力阶段的拉伸与剪切裂纹比例变化情况。表 2 则显示了高斯混合模型裂纹分类的量化结果。

由图 8 结合表 2 可知, $v=0.002$ mm/s 时, 在 $0 \sim 20\%\sigma_f$ 阶段, 拉伸、剪切裂纹比例分别为 86.12%、13.88%, 说明在此阶段内以拉伸破坏为主导; 在 $20\%\sigma_f \sim 80\%\sigma_f$ 阶段, 拉伸裂纹比例先由 83.51% 降至 64.23%, 后又增至 89.31%, 说明该阶段内主要发生拉伸与剪切裂纹的互相转化; 在 $80\%\sigma_f \sim 100\%\sigma_f$ 阶段, 剪切裂纹增至 61.84%, 表明此时剪切占据主导地位; 在峰后应力阶段, 拉伸裂纹比例增至 80.89%, 以拉伸破坏为主。当 v 分别增至 0.004、0.008 和 0.010 mm/s 时, 充填体峰前应力阶段的裂纹演化趋







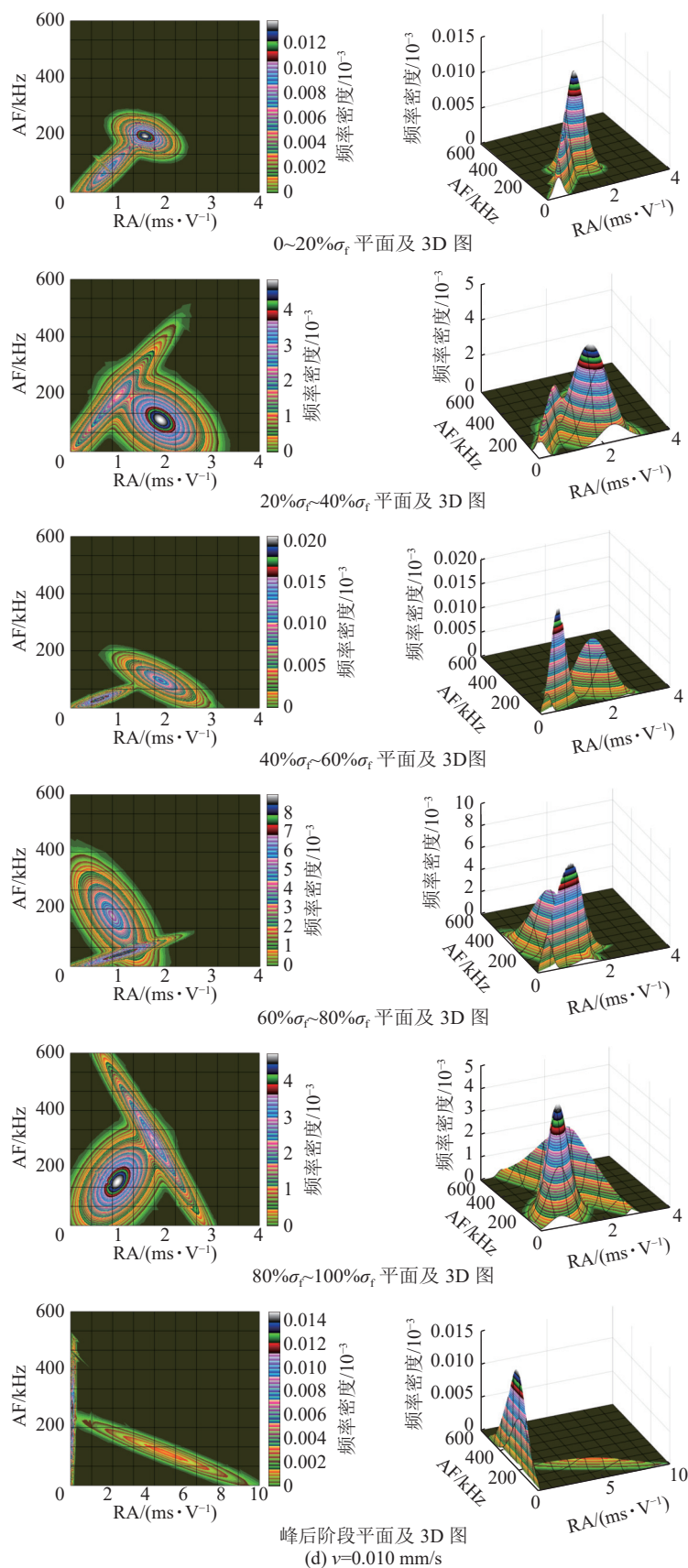
图 7 不同 v 下充填体声发射 RA-AF 聚类结果

Fig.7 RA-AF clustering results of CTB acoustic emission at different loading rates

势并未发生明显变化。而 v 增大对充填体峰后应力阶段的破坏具有显著影响, $v=0.002, 0.004, 0.008,$

0.010 mm/s 时在峰后阶段产生的剪切裂纹比例分别为 19.11%、68.82%、60.11% 和 64.23%, 可以看出 v

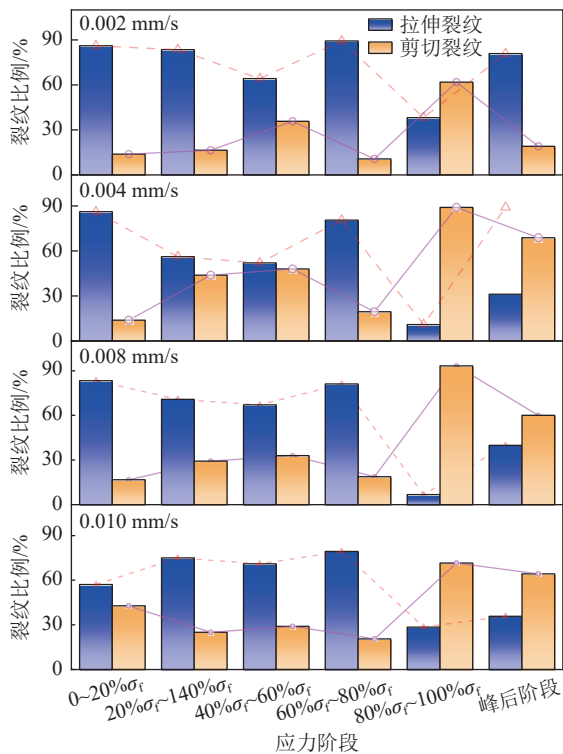


图 8 不同应力阶段充填体裂纹分类结果
Fig.8 Classification results of CTB cracks at different stress stages

表 2 高斯混合模型裂纹分类的量化结果

Table 2 Quantitative results of crack classification using Gaussian mixture model

应力阶段/ %σ _f	裂纹 类型	比例/%			
		ν=	ν=	ν=	ν=
		0.002 mm/s	0.004 mm/s	0.008 mm/s	0.010 mm/s
0 ~ 20	拉伸	86.12	86.17	83.28	57.14
	剪切	13.88	13.83	16.72	42.86
20 ~ 40	拉伸	83.51	56.16	70.77	74.97
	剪切	16.49	43.84	29.23	25.03
40 ~ 60	拉伸	64.23	52.00	67.03	71.06
	剪切	35.77	48.00	32.97	28.94
60 ~ 80	拉伸	89.31	80.56	81.17	79.37
	剪切	10.69	19.44	18.83	20.63
80 ~ 100	拉伸	38.16	10.94	6.78	28.45
	剪切	61.84	89.06	93.22	71.55
峰后阶段	拉伸	80.89	31.18	39.89	35.77
	剪切	19.11	68.82	60.11	64.23

增大使得试样由以拉伸破坏为主向拉伸-剪切复合型破坏转化。

通过以上分析,发现 GMM 聚类分析可将充填体裂纹演变行为主要划分为 4 个阶段:① 初始加载阶段(0 ~ 20%σ_f),在该阶段内以拉伸裂纹为主;② 过

渡阶段(20%σ_f ~ 80%σ_f),该阶段主要发生拉伸与剪切裂纹的互相转化;③ 局部失稳破坏阶段(80%σ_f ~ 100%σ_f),主要产生剪切裂纹导致充填体产生局部失稳破坏;④ 峰后破坏阶段,该阶段内拉伸裂纹有所增加,剪切-拉伸裂纹共同主导了充填体的整体失稳破坏。其中在 80%σ_f ~ 100%σ_f 处,产生较多的剪切裂纹(剪切裂纹比例 50% 以上)可作为充填体的局部失稳破坏前兆特征。

3 结 论

1)充填体的声发射振铃计数在峰值应力附近总是由相对高位向相对低位震荡,具有较为明显的变异特征。随着 ν 的增大,充填体弹性变形及塑性屈服阶段的振铃计数的波动率有所降低。

2) ν 由 0.002 增至 0.01 mm/s 时,充填体声发射 AF 分布集中范围由 0 ~ 150 压缩至 0 ~ 100 kHz, RA 分布集中范围由 0 ~ 5 ms/V 扩展至 0 ~ 10 ms/V,且高 RA 信号(剪切裂纹敏感指标)进一步集中于 AF<80 kHz 窄带。

3)随着 ν 从 0.002 增至 0.010 mm/s,充填体的峰前裂纹演化趋势保持稳定,但峰后破坏模式显著改变:剪切裂纹比例由 19.11%(0.002 mm/s)跃升至 64.23%(0.010 mm/s),表明 ν 增大会驱动破坏机制从拉伸破坏主导向拉伸-剪切复合型破坏转化。

4)通过 GMM 分析可知,以加载应力阶段为界限,可以将充填体裂纹演化分为拉伸裂纹主导(0 ~ 20%σ_f)、拉伸-剪切裂纹转化(20%σ_f ~ 80%σ_f)、剪切裂纹快速增长(80%σ_f ~ 100%σ_f)和剪切-拉伸裂纹共同主导(峰后破坏)4 个阶段。其中,剪切裂纹在 80%σ_f ~ 100%σ_f 处的快速增长是充填体局部失稳破坏的关键前兆特征。

参考文献(References):

[1] YIN S H, ZHOU Y, WANG L M, et al. Setting, bleeding, and hardening strength properties of coarse aggregate backfill slurry[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01667.

[2] 张吉雄,郭广礼. 综合机械化固体充填采煤方法与技术研究[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(1): 1-6.

ZHANG Jixiong, GUO Guangli. Study on waste-filling method and technology in fully-mechanized coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(1): 1-6.

[3] 郭利杰,刘光生,马青海,等. 金属矿山充填采矿技术应用研究进展[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4182-4200.

GUO Lijie, LIU Guangsheng, MA Qinghai, et al. Research progress on mining with backfill technology of underground metalli-

- ferous mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4182–4200.
- [4] ZHOU Y, YIN S H, ZHAO K, et al. Understanding the static rate dependence of early fracture behavior of cemented paste backfill using digital image correlation and acoustic emission techniques[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 283: 109209.
- [5] 赵兵朝, 王京滨, 张晴, 等. 充填体-散体胶结组合体力学特性试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(7): 298–309.
- ZHAO Bingchao, WANG Jingbin, ZHANG, Qing, et al. Experimental study on mechanical properties of filling-bulkce-menting combination body[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(7): 298–309.
- [6] XUE G L, YILMAZ E, FENG G R, et al. Reinforcement effect of polypropylene fiber on dynamic properties of cemented tailings backfill under SHPB impact loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 279: 122417.
- [7] WANG J, SONG W D, CAO S, et al. Mechanical properties and failure modes of stratified backfill under triaxial cyclic loading and unloading[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 29(5): 809–814.
- [8] LI J J, CAO S, SONG W D. Distribution development of pore/crack expansion and particle structure of cemented solid-waste composites based on CT and 3D reconstruction techniques[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 376: 130966.
- [9] YU S Q, JIANG H Q, XI Z Y, et al. Image analysis as a geometry-and integrity-independent tool for predicting strength of cemented tailings backfill using slag-based binder[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 444: 137867.
- [10] HE Y P, LV W Y, FANG Z Y, et al. The basic characteristics of paste backfill materials based on highly active mineral admixtures: Part I. Preliminary study on flow, mechanics, hydration and microscopic properties[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 187: 1366–1377.
- [11] YU X, TAN Y Y, QI S W, et al. Damage index correlation in massive granite-porous backfills under hydromechanical triaxial cyclic loading using acoustic emissions and X-ray computed tomography[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 33: 3659–3671.
- [12] 唐亚男, 付建新, 宋卫东, 等. 分层胶结充填体力学特性及裂纹演化规律[J]. *工程科学学报*, 2020, 42(10): 1286–1298.
- TANG Yanan, FU Jianxin, SONG Weidong, et al. Mechanical properties and crack evolution of interbedded cemented tailings backfill[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(10): 1286–1298.
- [13] ZHOU Y, YIN S H, et al. Strength, deformation and crack evolution behaviour of cemented tailings backfill composite structures with different strength ratios[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2025, 40(6): 2269–2289.
- [14] LIU L, DING X, TU B B, et al. Energy evolution and mechanical properties of modified magnesium slag-based backfill materials at different curing temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134555.
- [15] SUN K, ZHANG J X, HE M C, et al. Mechanical properties and damage evolution characteristics based on the acoustic emission of gangue and high-water-content materials based cemented paste backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 395: 132324.
- [16] 侯永强, 尹升华, 杨世兴, 等. 动态荷载下胶结充填体力学响应及能量损伤演化过程研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(S1): 145–156.
- HOU Yongqiang, YIN Shenghua, YANG Shixing, et al. Mechanical response and energy damage evolution process of cemented backfill under impact loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(S1): 145–156.
- [17] YIN S H, ZHOU Y, CHEN X, et al. A new acoustic emission characteristic parameter can be utilized to evaluate the failure of cemented paste backfill and rock combination[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 392: 132017.
- [18] FILIPUSSI D A, GUZMÁN C A, XARGAY H D, et al. Study of acoustic emission in a compression test of andesite rock[J]. *Procedia Materials Science*, 2015, 9: 292–297.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [20] WANG Y Z, SUN S Y. A rock fabric classification method based on the grey level co-occurrence matrix and the Gaussian mixture model[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 104: 104627.
- [21] HOUSHMAND N, ESMAEILI K, GOODFELLOW S, et al. Predicting rock hardness using Gaussian weighted moving average filter on borehole data and machine learning[J]. *Minerals Engineering*, 2023, 204: 108448.
- [22] YEO T, SHIGEMATSU N, KATORI T. Dynamically recrystallized grains identified via the application of Gaussian mixture model to EBSD data[J]. *Journal of Structural Geology*, 2023, 167: 104800.
- [23] ZHANG L L, OH S K, PEDRYCZ W, et al. Building fuzzy relationships between compressive strength and 3D microstructural image features for cement hydration using Gaussian mixture model-based polynomial radial basis function neural networks[J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 112: 107766.
- [24] YIN X, LIU Q S, HUANG X, et al. Perception model of surrounding rock geological conditions based on TBM operational big data and combined unsupervised-supervised learning[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 120: 104285.