第 49 卷第 11 期
2021 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 11
November，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210101

不同灰砂配比胶结材料组合体声发射特性

赵 康[1,2,3]，何志伟[1]，宁富金[1]，周 昀[1]，严雅静[1]，王彦龙[3]，王军强[3]

(1. 江西理工大学土木与测绘工程学院，江西 赣州 341000；2. 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心，北京 100029；
3. 灵宝金源矿业股份有限公司，河南 灵宝 472500)

摘 要：充填体是多相复合水泥基材料，被广泛应用于矿山采空区充填。为研究充填体在覆岩作用下的破坏规律，利用单轴压缩声发射试验研究不同灰砂配比的组合充填体受压条件下的声发射特性和材料裂隙演化。结果表明：尾砂占比对组合充填体的声发射特性存在显著影响，在破坏过程中组合充填体的声发射活动由冷缝及软弱面主导，并在试样 79%~88%应力峰值时，声发射参数具有显著下降趋势；组合充填体在应力峰值前，声发射能量波动剧烈，*b* 值平稳上升；应力峰值过后，声发射能量降低，*b* 值迅速上升且剧烈地上下波动。利用声发射参数的变化规律可为充填体的破坏进行预测。

关键词：水泥基材料；裂隙演化；胶结材料组合体；声发射
中图分类号：TD 32　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)11–2462–08
网络出版时间：2021–10–11



Acoustic Emission Characteristics of Cementitious Material with Different Cement-Tailing Ratio

ZHAO Kang[1,2,3], *HE Zhiwei*[1], *NING Fujin*[1], *ZHOU Yun*[1], *YAN Yajing*[1], *WANG Yanlong*[3], *WANG Junqiang*[3]

(1. School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 2. Solids Waste and Chemicals Management Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China; 3. Lingbao Jinyuan Mining Company Limited, Lingbao 472500, Henan , China)

Abstract: As a multi-phase composite cement-based material, filling body is widely used in goaf filling. Therefore, the acoustic emission characteristics and material fracture evolution of the combined backfill with different cement-tailing ratios under compression were investigated *via* uniaxial compression acoustic emission (AE) tests to clarify the failure law of the backfill under the action of overburden. The results show that the proportion of tailings has an effect on the acoustic emission characteristics of the composite backfill. During the failure process, the acoustic emission characteristics of the composite backfill are dominated by cold joints and weak surfaces, and the stress is 79%–88% in the specimen. At the peak stress, the acoustic emission parameters show a downward trend. Before the stress peak, the AE energy fluctuates violently, and the *b* value increases steadily. After the stress peak, the AE energy decreases, and the *b* value increases rapidly and fluctuates violently. The evolution of acoustic emission parameters can be used to predict the damage of the backfill.

Keywords: cement-based material; cracks evolution; cementing material combination; acoustic emission

矿产资源是人类社会赖以生存和发展的基础，绝大部分金属矿赋存于地下，地下开采会导致采空区覆岩移动、地表沉陷等一系列安全隐患[1–2]。另一方面地下矿山开采直接或间接导致的生态环境问题也越来越严重；选矿后的固废物排放量巨大，影响地表植被、占用耕地等一系列问题逐渐凸现[3]。

胶结充填技术作为安全、先进的绿色开采技术，对地下矿山安全开采、实现矿产资源可持续发展具

收稿日期：2021–02–02。　修订日期：2021–02–21。
基金项目：国家自然科学基金项目(51764013)；江西省主要学科学术和技术带头人培养计划领军人才项目(20204BCJ22005)；江西省自然科学青年重点基金项目(20192ACBL21014)；中国博士后科学基金资助项目(2019M652277)。
第一作者：赵 康(1980—)，男，博士，教授。

Received date: 2021–02–02.　**Revised date:** 2021–02–21.
First author: ZHAO Kang (1980–), male, Ph. D., Professor.
E-mail: zhaok_666666@163.com

有重要意义[4]。将尾砂制成充填体填充至矿山采空区，不仅为采矿作业提供安全保障，还能减少尾矿污染，在深部采矿作业中得到了广泛的应用[5–8]。然而充填体作为一种水泥基材料，其力学性能及破坏机理非常复杂，如何准确地把握充填体裂隙发育、预判充填体破坏前兆，对评价地下采空区稳定性和安全性具有重大意义。为此，相关学者基于不同方法对充填体进行了大量的研究：赵康等[9]、侯永强等[10]和周科平等[11]探究了胶结充填体在单轴压缩下的力学性能及损伤演化；Gu 等[12]、Cao 等[13]讨论了不同加载速率下充填体的破坏规律；徐文斌等[14]研究了充填体在三轴压缩下的能量耗散特征；宋卫东等[15]、冯萧等[16]、王志国等[17]研究了充填体加-卸载条件下的破坏特征。

大量研究表明：充填体的破坏是由遍布材料内部与所施加压力平行的拉伸裂隙扩展所造成的，所以材料的裂隙发育扩展与充填体的破坏特征密切相关。声发射技术(AE)是研究材料内部裂隙扩展演化的重要工具。声发射是充填体、陶瓷等材料在受力变形或材料破裂过程中以弹性波形式向外部释放应变能的伴随现象，能够反映材料内部裂隙扩展情况[18–19]。通过分析这些声发射信号便能了解材料内部裂隙扩展演化规律。

近年来，国内外学者利用声发射技术对充填体或水泥基材料的破坏特征及损伤演化进行了系列研究[20–21]并取得了大量研究成果。郭伟等[22]评价了混凝土材料的声发射分形特征，表明水泥基材料在不同破坏阶段中存在不同的声发射特征。程爱平等[23]监测了充填体在单轴压缩过程中声发射活动，通过分析声发射参数时空演化规律，结合尖点突变理论，进行了胶结充填体的破裂预测。Zhao 等[24–25]通过对不同配比的胶结充填体进行单轴压缩声发射实验，研究了受载条件下尾砂胶结材料损伤规律及声发射特性关系。

在室内试验中，通过在试样表面布置声发射探头采集声发射信号，并进行处理分析。所采集的声发射信号来源一部分是裂隙扩展产生、另一部分则是试样内部骨料摩擦所释放的声发射信号，因此不同灰砂配比的充填体试样，其声发射现象也不尽相同。目前国内外对不同灰砂配比组合充填体试样在荷载作用下的声发射特性研究较少，尤其是缺乏充填体内部骨料含量对声发射现象影响的系统分析，因而有必要加深对该方面的探讨。

在实际工程中，矿房回采完成后形成的采空区空间较大，出于投资经济成本和现场技术限制等因素，往往需要不同灰砂配比的胶结充填体分层充填。因此研究不同灰砂配比充填体在不同组合下的破坏规律具有重要意义，目前针对不同灰砂配比胶结材料组合体的研究成果较少。本工作通过室内试验，利用研究不同配比组合充填体的声发射变化特征，揭示不同组合充填体内部损伤动态演化规律。

1　实验

制作的充填体骨料选自江西某钽铌矿分级尾砂，胶凝材料为 P·O32.5 普通硅酸盐水泥，根据矿山胶结充填体的常用参数，配制了灰砂配比分别为 1:4、1:8、1:10，料浆浓度为 68%的充填体试样。单个充填体试样尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm (长×宽×高)。试样采用恒温、恒湿养护箱进行养护，温度为(20±2) ℃，相对湿度为(90%±2%)，养护时长为 28 d。胶结材料组合体为单个胶结充填试样两两叠加组合而成(图 1)。

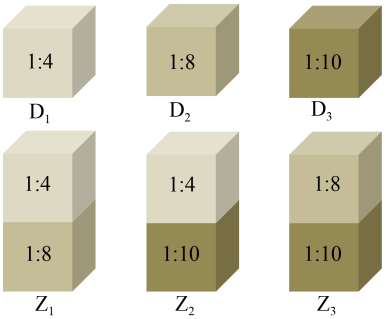


图 1　不同灰砂配比单个充填体与组合体试样编号

Fig. 1　Specimen number of single backfill and combination with different cement-tailing ratios

加载系统采用 RMT-150C 型液压伺服控制系统；声发射监测系统为 PCI-Ⅱ声发射系统，该系统有多通道，能实时采集声发射信号，为了更好的采集声发射信号，声发射门槛值及前放增益设置为 40 dB，模拟滤波器的上下限分别为 100 MHz 和 3 MHz，采样率为 1 MSPS，采样长度为 2 K。

试验开始前先对试验设备进行预热准备工作，保证每个试样加载稳定，声发射信号采集准确。连接试验所需设备，设置好加载系统及声发射监测系统的相关参数，在胶结充填体试样与声发射探头接触面上涂抹适量的耦合剂，确保试样与声发射探头接触面充分耦合。试验开始时，注意同时启动加载系统及声发射监测系统，以保证声发射信号采集与试样加载同步进行。采用位移控制加载方式对试样

进行压缩，加载速率为 0.001 mm/s，连续加载至试样破坏。

2 结果与讨论

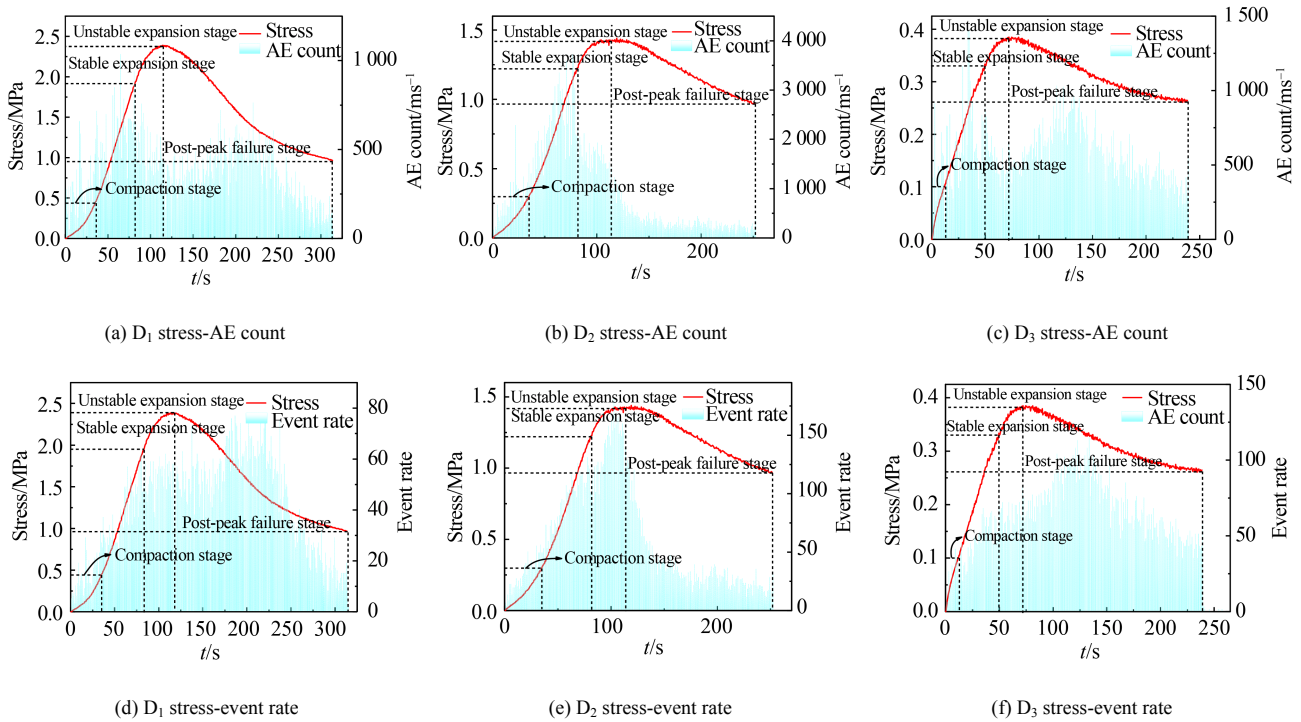
通过单轴压缩试验，不同灰砂配比的单个充填体(D_1 为灰砂配比 1:4、D_2 为灰砂配比 1:8、D_3 为灰砂配比 1:10)的抗压均值强度：D_1 为 2.236 MPa、D_2 为 1.297 MPa、D_3 为 0.402 MPa；不同灰砂配比组合体(Z_1 为灰砂配比 1:4 和 1:8 组合体、Z_2 为灰砂配比 1:4 和 1:10 组合体、Z_3 为灰砂配比 1:8 和 1:10 组合体)的抗压均值强度：Z_1 为 0.918 MPa、Z_2 为 0.460 MPa、Z_3 为 0.366 MPa。通过分析可知试样抗压强度随着灰砂配比的降低而减小，符合水泥基材料的力学特点。

2.1 声发射参数特征

大量研究表明，充填体结构的损伤与破坏过程实质上就是裂隙萌生与发育的过程。在充填体破坏全过程中，内部裂隙扩展具有明显的阶段性，不同配比的充填体在不同阶段，其声发射反应也不尽相同。如图 2、图 3 所示，将单轴压缩下单个、组合充填体的裂隙扩展演化分为几个阶段：裂隙压密阶段、裂隙稳定扩展阶段、裂隙非稳定扩展阶段、峰后破坏阶段。

在裂隙压密阶段，初始裂隙在荷载作用下逐渐闭合，试样刚度一定程度上得到了增强。在充填体单轴压缩应力–时间曲线上，靠近原点位置常呈现出轻度下凹形，即是这种微裂隙闭合的反映；在裂隙稳定扩展阶段，随着荷载的增加，微裂隙不断地产生或闭合，尾砂与水泥结合面上的作用力为压–剪复合应力，且水泥与尾砂沿着开裂面开始滑移，裂隙向基体扩展。在这样的过程中，众多孤立的微裂隙开始缓慢、稳定地扩展，逐渐蔓延贯通，发展成一个广泛连续的裂隙体系；在非稳定扩展阶段，荷载持续增加，已贯通的裂缝体系持续扩展，且裂隙扩展更为迅速，直至形成宏观破裂带，致使充填体发生失稳破坏；试样进入峰后破坏阶段后，此阶段充填体贯通破裂带已经形成，但试样仍然具有一定的承载能力，承载能力主要来源于充填体的残余应力及破裂带两边的摩擦力。

随着裂隙不同阶段的演化，对应的声发射也呈现出不同的阶段性特征。裂隙压密阶段及稳定扩展阶段，单个、组合充填体声发射参数均随着荷载增大而增大，反映的是充填体试样内部裂隙闭合及产生的现象；在裂隙非稳定扩展阶段，大约在 64%~77%应力峰值时，D_1、D_2 试样声发射参数均呈现明显的下降趋势，这是诸多微裂隙汇聚成宏观

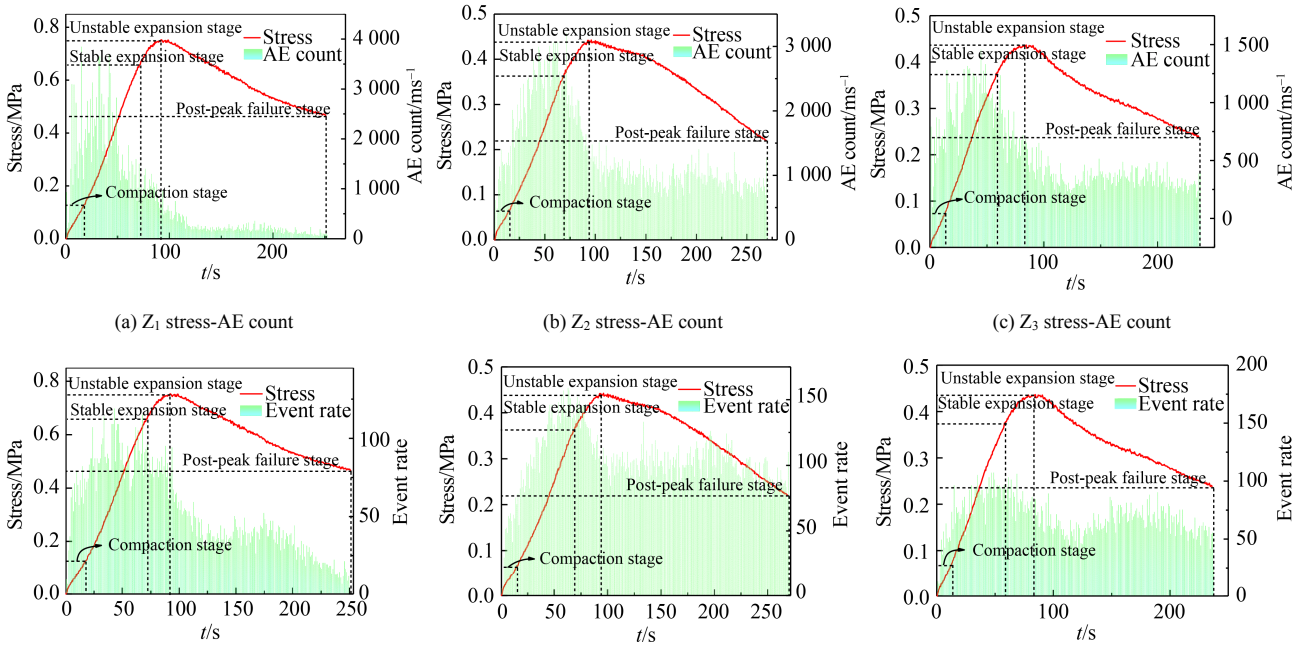


(a) D_1 stress-AE count (b) D_2 stress-AE count (c) D_3 stress-AE count

(d) D_1 stress-event rate (e) D_2 stress-event rate (f) D_3 stress-event rate

图 2 单个充填体声发射参数曲线

Fig. 2 Acoustic emission (AE) parameter curve of single filling body



(a) Z_1 stress-AE count　(b) Z_2 stress-AE count　(c) Z_3 stress-AE count

(d) Z_1 stress-event rate　(e) Z_2 stress-event rate　(f) Z_3 stress-event rate

图 3　组合充填体声发射参数曲线

Fig. 3　AE parameter curve of composite filling body

破裂带的声发射反映，微裂隙萌生减少、大尺度裂隙扩展迅速，振铃计数率及声发射事件率下降；在峰后破坏阶段，D_1 试样由于灰砂配比较大、水泥占比高、胶结力较强，在应力峰值后仍具有较高的承载能力，因此峰后充填体结构尚未破坏的部分，裂隙继续发展，声发射参数出现回升。D_3 试样灰砂配比小、尾砂占比较高、应力峰值后声发射回升的原因主要是破裂带相互摩擦、错位滑移，大规模尾砂–水泥开裂事件发生，释放大量 AE 信号。

由上述分析及图 2 可知：在裂隙非稳定扩展阶段，D_1、D_2 试样声发射参数出现显著的下降趋势；D_3 试样由于内部尾砂占比较高，在破坏全过程中，材料内部尾砂错位摩擦或与水泥脱离开裂，导致声发射参数一直处于较高水平，破坏前声发射参数下降现象相对不显著。

对于 Z_1、Z_2、Z_3 组合试样而言，不同配比的组合试样的振铃计数率与声发射事件率变化规律表现出较高的一致性：在达到应力峰值前的一段时间内，声发射参数逐步增加，直到外荷载达到应力峰值前某一数值时，声发射参数才开始逐渐降低。

在实际工程中，由于考虑经济成本、采场条件及充填工艺等原因，对采空区进行充填时，常采用不同灰砂配比的充填料进行分层分次充填，待一次充填到设计尺寸后充填体初凝，而后进行二次不同灰砂配比的材料充填，则在前后充填体连接处出现一个软弱的结合面，即冷缝。

一般而言，冷缝缝隙规模远大于材料内部裂隙，当外部荷载作用在组合充填体上，冷缝闭合，边缘软弱面发生破坏，从而释放大量声发射信号，导致组合试样声发射参数整体高于单个充填体试样。

压密阶段及裂隙稳定扩展阶段，声发射参数随着应力上升到较高水平(图 3)，在这个过程中，不仅冷缝闭合，上下充填体原生孔隙也在逐渐闭合，但充填体内部裂隙规模远小于冷缝规模，尾砂-水泥开裂释放的 AE 信号强度低于软弱面破坏所释放的强度，因此试验中采集的 AE 信号中，占据主导地位的主要是冷缝闭合及软弱面破坏产生的。

在裂隙非稳定扩展阶段，79%~88%应力峰值时，冷缝闭合及软弱面破坏基本结束，组合充填体试样整体性大幅提升，上下充填体内部裂隙逐步扩展形成宏观破裂带，声发射参数呈现明显的下降趋势。这是因为在组合充填体试样中，AE 信号最主要来源于冷缝闭合及软弱面破坏，受内部尾砂占比影响较少。因此 Z_1、Z_2、Z_3 组合试样在峰值应力前，声发射参数均出现明显下降。

经上述分析可知，单轴压缩下，不同灰砂配比的单个和组合充填体的不同破坏阶段，其裂隙扩展存在显著的区别，从而导致各个破坏阶段的声发射参数具有不同的特征。其中，单个充填体声发射参

数受灰砂配比影响较大；而组合试样的声发射参数变化特征主要由冷缝及其边缘软弱面主导。在裂隙压密阶段和稳定扩展阶段，充填体内部裂隙稳定的闭合和萌生发育，声发射信号逐步上升。当充填体应力增大到一定水平时(单个充填体的应力达到64%~77%应力峰值；组合充填体的应力达到79%~88%应力峰值)，试样进入裂隙非稳定扩展阶段，内部微裂隙联结形成宏观裂隙，声发射信号呈现显著的下降趋势，可将这一规律作为矿山现场声发射监测充填体失稳破坏的前兆。

2.2 *b* 值特征

声发射是在外部荷载作用下，材料裂隙扩展的表现形式，*b* 值则是声发射相对震级分布的函数，同时也是材料裂隙扩展尺度分布的函数。因此声发射 *b* 值的波动能够反映出材料内部裂隙不同尺度的变化，通过分析 *b* 值的变化特征能够得出材料裂隙尺度的动态演化规律，揭示材料失稳破坏的前兆特征。其计算结果如下[26–28]：

基于 G-R 关系式(1)以最小二次乘法进行计算：

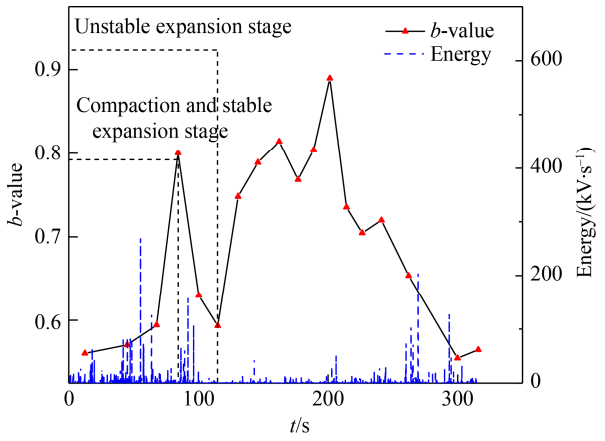
$$\lg N = a_1 - a_2 M \tag{1}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{m} M_i \sum_{i=1}^{m} \lg N_i - m\sum_{i=1}^{m} \lg N_i}{m\sum_{i=1}^{m} M_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{m} M_i\right)^2} \tag{2}$$

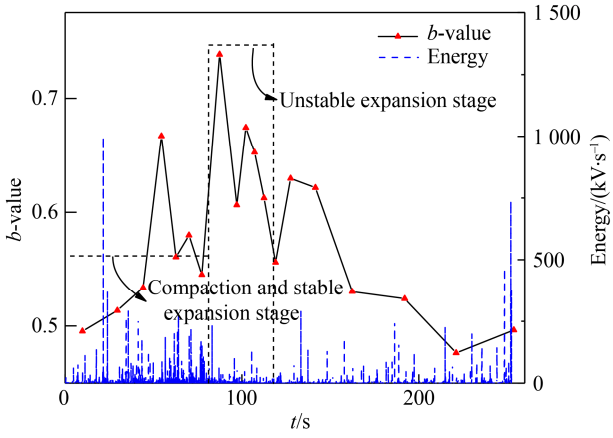
式中：N 地震频度；M 为震级；a_1、a_2 为常数；m 为声发射参数分档总数；N_i 为 i 档声发射事件数；M_i 为 i 档声发射 AE 事件中参数的中值。根据试验中声发射监测系统信号采集的频率，选取 500 个声发射数据作为 1 组采样窗口，并以 100 个数据作为步长，设定分档间隔为 0.1，按时间顺序滑动取样计算。

由 *b* 值的定义及其计算原理可知，*b* 值表征着材料内部微裂隙不同尺度的变化。*b* 值上升说明材料内部主要是小尺度的微裂隙破坏；*b* 值相对稳定则表示不同尺度的微裂隙分布均匀；*b* 值显著下降则意味着材料内部出现了大尺度的裂隙。因此 *b* 值可以解释为材料微破裂数目和微破裂尺度之间的标度关系，其物理意义是裂隙扩展演化的量度[29–31]。

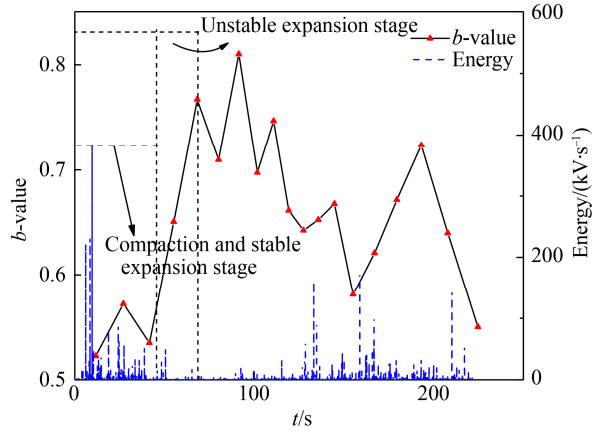
由图 4 可知，D_1、D_2 试样在裂隙压密阶段及稳定扩展阶段，内部破坏主要为小尺度的初始裂隙、新裂隙的闭合与扩展，众多裂隙演化的同时释放较多的弹性能，导致此阶段 *b* 值梯次上升，AE 能量波动较大；在裂隙非稳定扩展阶段，D_1、D_2 试样 *b* 值显著地下降，分别下降了 25%、26%，能量也相对降低，这是因为小尺度裂隙逐渐联结成大尺度裂隙，大尺度裂隙蓄能进一步扩展成宏观裂隙，蓄能的结果即是能量降低的反映；在峰后破坏阶段，宏观破裂带摩擦、错位滑移，尾砂–水泥



(a) D_1 energy-*b* value



(b) D_2 energy-*b* value



(c) D_3 energy-*b* value

图 4 单个试样能量-*b* 值曲线

Fig. 4 Energy-*b* value curve of single specimen

开裂事件随着配比降低而增多，释放较多弹性能，导致此阶段 D_1、D_2、D_3 的 b 值剧烈演化，能量曲线波动。

与上述规律不同的是 D_3 试样(图 4c)，其灰砂配比为 1:10，砂占比较高。在荷载的作用下，内部集料摩擦、胶凝材料开裂、原生孔隙闭合等原因导致试样内部小尺度的微裂隙规模逐渐增多，因此在峰值应力前，b 值一直处于波动上升状态，并未出现像 D_1、D_2 试样在裂隙非稳定扩展阶段 b 值呈现下降趋势的这一规律；且在峰后破坏阶段，D_3 的 b 值波动剧烈程度也明显大于 D_1、D_2 试样。

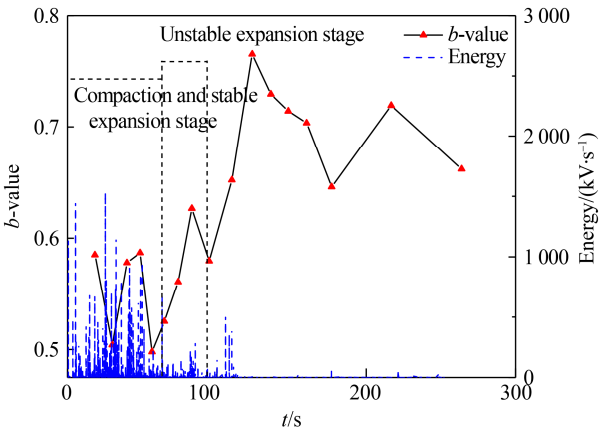
由此可知，1:4、1:8 配比的充填体试样在裂隙非稳定扩展阶段，b 值呈现明显的下降；低配比的充填体由于大量的尾砂–水泥开裂事件，显著地影响 b 值的波动。

图 5 为组合试样能量-b 值曲线图，与单个充填体不同，Z_1、Z_2、Z_3 试样的 b 值在破坏全过程中整体处于显著的上升趋势。其中在应力峰值前，b 值处于稳定上升趋势，反映出此阶段组合试样内部小尺度裂隙规模逐渐增多，由上述分析可知主要是由冷缝闭合及软弱面破坏主导；在应力峰值后，b 值上升迅速，且在破坏后期剧烈波动，最大波动幅度达到 36.7%，说明后期裂隙演化激烈，内部常有突发性宏观破坏发生。

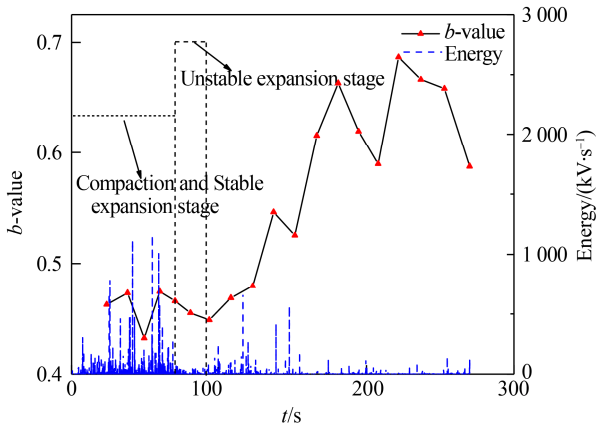
另外，组合试样的 AE 能量绝大部分集中出现在应力峰值前的破坏阶段，这与组合试样声发射参数反映的原因一致(图 3)，在应力峰值前，冷缝闭合及软弱面的破坏释放了大量的 AE 能量。其中，在非稳定扩展阶段，Z_1、Z_2、Z_3 试样的 AE 能量显著下降，为内部宏观裂隙的扩展做储能准备。

综上所述，组合试样在应力峰值前 AE 能量波动剧烈，b 值平稳上升；应力峰值过后，AE 能量降低，b 值迅速上升且剧烈地上下波动。

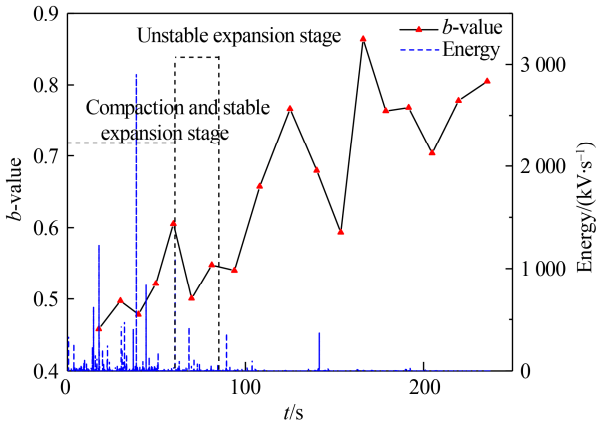
基于声发射振铃计数和事件率计算的 b 值，能够反映矿山采空区中充填体裂隙尺度的动态演化规律。灰砂配比较大的单个充填体在进入破坏阶段前，微裂隙联结形成贯穿的宏观裂隙，导致 b 值显著地下降，AE 能量显著降低；组合充填体因冷缝和软弱面的影响，b 值在破坏全过程中整体处于上升趋势，但在临近在破坏前，AE 能量也呈现明显的下降趋势。因此在实际矿山采空区充填体声发射监测中，可将上述规律作为单个充填体及组合充填体的破坏前兆，为充填体的稳定性预测提供理论参考。



(a) Z_1 energy-b value



(b) Z_2 energy-b value



(c) Z_3 energy-b value

图 5　组合试样能量-b 值曲线

Fig. 5　Energy-b value curves of combined specimen

3　结论

1) 充填体的声发射特性受内部尾砂含量的影响，D_1、D_2 试样在 64%~77%应力峰值时，振铃计数率和声发射事件率均呈现明显下降趋势，D_3 试样

内部由于尾砂含量较多，声发射下降现象较不明显。D_1、D_3 试样由于内部水泥和尾砂含量因素，导致声发射参数在峰后破坏阶段后期出现回升。

2) 组合充填体在破坏过程中，声发射特性主要由冷缝及软弱面主导。整体声发射参数保持在较高水平，在 79%~88%应力峰值时，Z_1、Z_2、Z_3 试样的振铃计数率和声发射事件率均呈现下降趋势。

3) 1:4、1:8 配比的充填体试样在裂隙非稳定扩展阶段，b 值呈现明显的下降；低配比的充填体由于大量的尾砂–水泥开裂事件，导致 b 值大幅度波动。

4) 组合试样在应力峰值前，由于冷缝闭合及软弱面破坏，释放大量 AE 信号，导致 AE 能量波动剧烈，b 值平稳上升；应力峰值过后，内部主要为突发性的宏观破坏，AE 能量降低，b 值迅速上升且剧烈地上下波动。

5) 在实际矿山采空区充填体声发射监测中，可结合声发射参数和 b 值显著下降，以及 AE 能量降低等规律作为不同配比和不同组合形式的充填体失稳破坏的判据，以此对充填体稳定性进行评估。

参考文献:

[1] 何季麟. 钽铌工业的进步与展望[J]. 稀有金属, 2003(1): 23–27.
HE Jiling. Chin J Rare Metals (in Chinese), 2003(1): 23–27.

[2] 赵康, 朱胜唐, 周科平, 等. 钽铌矿尾砂胶结充填体力学特性及损伤规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(2): 413–419.
ZHAO Kang, ZHU Shengtang, ZHOU Keping，et al. J Min Safety Eng (in Chinese), 2019, 36(2): 413–419.

[3] 陈维铅, 高淑雅, 董亚琼, 等. 烧结法制备金矿尾砂 CaO-Al_2O_3-SiO_2 微晶玻璃及其性能研究[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(1): 95–100.
CHEN Weiqian, GAO Shuya, DONG Yaqiong, et al. J Chin Ceram Soc, 2014, 42(1): 95–100.

[4] ZHANG S Y, ZHAO Y L, DING H X, et al. Effect of sodium chloride concentration and pre-curing time on the properties of cemented paste backfill in a sub-zero environment[J]. J Cleaner Prod, 2021, 283: 125310.

[5] 贺桂成, 刘永, 丁德馨, 等. 废石胶结充填体强度特性及其应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(1): 74–79.
HE Guicheng, LIU Yong, DING Dexin, et al. J Min Safety Eng (in Chinese), 2013, 30(1): 74–79.

[6] 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. J China Coal Soc (in Chinese), 2010, 35(1): 1–6.

[7] RANKINE R, PACHECO M, SIVAKUGAN N. Underground mining with backfills[J]. Soils Rocks, 2007, 30(2): 93–101.

[8] 王明旭. 胶结充填体与围岩复合体的力学特性[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 445–453.
WANG Mingxu. J China Coal Soc (in Chinese), 2019, 44(2): 445–453.

[9] 赵康, 朱胜唐, 周科平, 等. 不同配比及浓度条件下钽铌矿尾砂胶结充填体力学性能研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(4): 833–842.
ZHAO Kang, ZHU Shengtang, ZHOU Keping, et al. J Basic Sci Eng (in Chinese), 2020, 28(4): 833–842.

[10] 侯永强, 尹升华, 曹永, 等. 单轴压缩下不同养护龄期尾砂胶结充填体损伤特性及能量耗散分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(7): 1955–1965.
HOU Yongqiang, YIN Shenghua, CAO Yong, et al. J Central South Univ: Sci Technol (in Chinese), 2020, 51(7): 1955–1965.

[11] 周科平, 刘维, 周彦龙, 等. 不同渗透力的类充填体力学特性及损伤软化本构模型研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3724–3732.
ZHOU Keping, LIU Wei, ZHOU Yanlong, et al. Rock Soil Mech (in Chinese), 2019, 40(10): 3724–3732.

[12] GU Q H, TAN Y L, JIA Z C, et al. Acoustic emission characteristics and damage model of cement mortar under uniaxial compression[J]. Constr Build Mater, 2019, 213: 377–385.

[13] CAO S, YILMAZ E, SONG W D, et al. Loading rate effect on uniaxial compressive strength behavior and acoustic emission properties of cemented tailings backfill[J]. Constr Build Mater, 2019, 231: 313–324.

[14] 徐文彬, 宋卫东, 王东旭, 等. 胶结充填体三轴压缩变形破坏及能量耗散特征分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3421–3429.
XU Wenbin, SONG Weidong, WANG Dongxu, et al. Rock Soil Mech (in Chinese), 2014, 35(12): 3421–3429.

[15] 宋卫东, 汪杰, 谭玉叶, 等. 三轴加-卸载下分层充填体能耗及损伤特性[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(5): 1050–1057.
SONG Weidong, WANG Jie, TAN Yuye, et al. J China Univ Min Technol (in Chinese), 2017, 46(5): 1050–1057.

[16] 冯萧, 曹世荣, 卓毓龙, 等. 块石胶结充填体循环加卸载损伤特性研究[J]. 有色金属工程, 2016, 6(6): 82–86, 95.
FENG Xiao, CAO Shirong, ZHUO Yulong, et al. Nonferrous Metals Eng (in Chinese), 2016, 6(6): 82–86, 95.

[17] 王志国, 李柱营, 李跃龙. 基于场应变的充填体与围岩组合模型循环加卸载试验研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(1): 88–94, 101.
WANG Zhiguo, LI Zhuying, LI Yuelong. J Yangtze River Scient Res Instit (in Chinese), 2019, 36(1): 88–94, 101.

[18] 王亚雱, 墨洪磊, 孙玉利, 等. 基于微米划痕实验的单晶硅去除机制研究[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(10): 1509–1514.
WANG Yaji, MO Honglei, SUN Yuli, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(10): 1509–1514.

[19] 龚囱, 李长洪, 赵奎. 红砂岩短时蠕变声发射 b 值特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S1): 85–92.
GONG Cong, LI Chang-hong, ZHAO Kui. J China Coal Soc (in Chinese), 2015, 40(S1): 85–92.

[20] CARPINTERI A, LACIDOGNA G, ACCORNERO F. Influence of damage in the acoustic emission parameters[J]. Cem Concr Compos, 2013, 44: 9–16.

[21] OTHTSU M. Acoustic emission characteristics in concrete and diagnostic application [J]. J Acous Emiss, 1987(2): 99–108.

[22] 郭伟, 秦鸿根, 陈惠苏, 等. 分形理论及其在混凝土材料研究中的应用[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(7): 1362–1368.
GUO Wei, QIN Honggen, CHEN Huisu, et al. J Chin Ceram Soc, 2010, 38(7): 1362–1368.

[23] 程爱平, 张玉山, 戴顺意, 等. 单轴压缩胶结充填体声发射参数时空演化规律及破裂预测[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 2965–2974.
CHENG Aiping, ZHANG Yushan, DAI Shunyi, et al. Rock Soil Mech

(in Chinese), 2019, 40(8): 2965–2974.

[24] ZHAO K, YU X, ZHU S T, et al. Acoustic emission investigation of cemented paste backfill prepared with tantalum–niobium tailings[J]. Constr Build Mater, 2020, 237: 117523.

[25] ZHAO K, YU X, ZHU S T, et al. Acoustic emission fractal characteristics and mechanical damage mechanism of cemented paste backfill prepared with tantalum niobium mine tailings[J]. Constr Build Mater, 2020, 258: 119720.

[26] LIU Q S, XU J, LIU X W, et al. The role of flaws on crack growth in rock-like material assessed by AE technique[J]. Int J Fract, 2015, 193(2): 99–115.

[27] GRASSBERGER P, PROCACCIA I. Characterization of strange attractors[J]. Phys Rev Lett, 1983, 50(5): 346–353.

[28] 蒋军军, 邓志刚, 欧阳振华, 等. 不同尺寸冲击倾向性煤样声发射 *b* 值特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 120–124.
JIANG Junjun, DENG Zhigang, OUYANG Zhenhua, et al. Coal Sci Technol (in Chinese), 2019, 47(3): 120–124.

[29] 张黎明, 马绍琼, 任明远, 等. 围压下岩石破坏过程的声发射频率及 b 值特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2057–2063.
ZHANG Liming, MA Shaoqiong, REN Mingyuan, et al. Chin J Rock Mech Eng (in Chinese), 2015, 34(10): 2057–2063.

[30] RAO M, LAKSHMI K J P, Analysis of *b*-value and improved b-value of acoustic emissions accompanying rock fracture[J]. Curr Sci, 2005, 89(9): 1577–1582.

[31] 刘希灵, 刘周, 李夕兵, 等. 单轴压缩与劈裂荷载下灰岩声发射 *b* 值特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(S1): 267–274.
LIU Xiling, LIU Zhou, LI Xibing, et al. Rock Soil Mech (in Chinese), 2019, 40(S1): 267–274.