

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201810134

胶结充填体应变率与声发射特征响应规律

程爱平^{1,2}, 张玉山¹, 王 平¹, 戴顺意¹, 董福松¹

(1. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室(武汉大学), 武汉 430081;
2. 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室(北京科技大学), 北京 100083)

摘 要: 应变率是影响胶结充填体力学特性和声发射特征的重要因素. 为研究胶结充填体应变率与声发射特征响应规律, 文中进行了单轴压缩条件下胶结充填体的声发射试验, 研究了应变率、声发射在加载过程中的时序特征, 探讨了应变率与声发射时序特征之间的相关性, 以及两者变化趋势之间的内在联系, 进一步揭示了荷载作用下胶结充填体的裂纹演化规律. 结果表明: 胶结充填体应变率、振铃计数率在变形全过程均表现出“升→降→稳→升”的变化趋势和阶段性特征, 两者相关性较高; 胶结充填体内部破裂是由骨料之间的摩擦以及胶结材料的断裂演化造成, 应变率对声发射特征在一定程度上起到了支配作用; 基于应变率在塑性屈服和失稳破坏阶段表现出明显的突变性, 可为胶结充填体破裂预测提供有效的前兆信息; 结合声发射振铃计数率、平静期以及扩容现象可更加全面的反映胶结充填体破裂情况. 研究结果可为胶结充填体力学特性研究奠定理论基础.

关键词: 胶结充填体; 单轴压缩; 应变率; 声发射; 预测

中图分类号: TD853 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)10-0130-07

Strain rate and acoustic emission characteristic response law of cemented backfill

CHENG Aiping^{1,2}, ZHANG Yushan¹, WANG Ping¹, DAI Shunyi¹, DONG Fusong¹

(1. Key Laboratory of Hubei Province for High-Efficient Use of Metallurgical Mineral Resources and Agglomeration (Wuhan University of Science and Technology), Wuhan 430081, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education of China for Efficient Mining and Safety of Metal Mines (University of Science and Technology Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Strain rate is an important factor affecting the mechanical properties and acoustic emission characteristics of cemented backfill. In order to study the strain rate and the acoustic emission response of cemented backfill, the acoustic emission test of cemented backfill under uniaxial compression was carried out. The strain rate and the timing characteristics of acoustic emission during loading were studied. The correlation between strain rate and acoustic emission timing characteristics as well as the intrinsic relationship between the two trends were discussed, which further revealed the crack evolution law of the cemented backfill under load. Results show that the strain rate and ringing count rate of cemented fillings had the variation trend and phase characteristics of “up→down→steady→up” in the whole process of deformation, and the correlation between them was high. The internal rupture of the cemented backfill was caused by the friction between the aggregate and the fracture evolution of the cemented material. The strain rate played a dominant role in the acoustic emission characteristics. The strain rate in the stage of plastic yield and instability, showed obvious abruptness, which could provide effective precursor information for the prediction of cemented backfill fracture. The combination of acoustic emission ringing count rate, quiet period, and expansion could better reflect the rupture of cemented backfill. The research results can lay a theoretical foundation for the study of mechanical properties of cemented backfill.

Keywords: cemented backfill; uniaxial compression; strain rate; acoustic emission; prediction

胶结充填体在两步骤回采中作为人工矿柱, 其稳定性至关重要. 随着矿山开采深度的增加, 胶结充填体在采场高应力作用下, 其下沉量增大, 导致采场

地压显现显著^[1]. 在爆破震动、顶板荷载以及外部环境等因素的影响下, 胶结充填体应力和应变特征变化复杂. 胶结充填体在荷载作用下的变形、破坏等力学特性是进行其稳定性控制的关键, 而应变率是影响其力学性质的重要因素. 因此, 研究应变率对胶结充填体力学特征的影响具有重要意义.

目前, 国内外学者针对应变率对材料力学特性的影响主要集中在岩石与类岩石材料. 文献[2-4]

收稿日期: 2018-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(51604195); 湖北省自然科学基金(2018CFC818); 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室开放基金(ustbmslab201704)

作者简介: 程爱平(1986—), 男, 副教授

通信作者: 程爱平, chengaipeng@wust.edu.cn

分别研究了页岩、红砂岩及珊瑚礁灰岩在不同应变率条件下其变形破坏特性;文献[5-6]分别研究了荷载作用下应变率对岩石裂纹扩展演化规律的影响;曹安业等^[7]研究了不同应变率条件下岩石声发射参数的变化特征;王伟超等^[8]进行了声发射定位试验,研究了不同应变率下盐岩的声发射时空演化规律;高祥等^[9]进行了双轴加载试验,研究了应变率对岩石声发射参数的影响.胶结充填体属于人工合成材料,物理化学性质复杂^[10],与岩石及类岩石材料的力学特性存在较大的差异.学者针对荷载作用下应变率对胶结充填体力学特性的影响开展了相关试验研究.文献[11-13]分别研究了高应变率下胶结充填体的软化速率加快、动态参数也随之增大,同时也分析了不同应变率下胶结充填体破坏程度以及破坏模式;文献[14-15]分别研究了动载条件下充填体破坏变形程度和裂纹演化规律;文献[16-17]分别研究了不同加载速率下胶结充填体变形特性及强度参数变化规律.随着矿山监测技术的发展,声发射(微震)技术的使用越来越广泛^[18-19].龚函等^[20]研究了胶结充填体声发射参数与裂纹演化之间的关系;胡京涛^[21]定性的研究了尾砂胶结充填体声发射率、能率与加载速率之间的关系.还有部分学者通过应变率、声发射对胶结充填体力学特性和裂纹演化等方面做了部分研究,但是缺乏应变率与声发射特征的响应规律研究.

基于此,本文通过单轴压缩条件下胶结充填体的声发射试验,研究应变率与声发射参数的时序演化规律,探讨胶结充填体应变率与声发射参数特征相关性及两者变化趋势之间的关系,进一步揭示胶结充填体裂纹演化规律,为回采过程中胶结充填体人工矿柱稳定性评判提供理论依据.

1 试验设计

1.1 试样制作与养护

本次试验骨料选用程潮铁矿选矿全尾砂,尾砂颗粒直径组成见表 1.胶结剂为 32.5[#]普通硅酸盐水泥,试验模具采用直径(D)50 mm×高度(H)100 mm的标准圆柱体(试样及模具如图 1 所示);24 h脱模后使用 YH-40B 型标准恒温养护箱养护 28 d,养护期间湿度控制在 96% 以上.

表 1 胶结充填体粒径组成

Tab.1 Particle size composition of the cemented backfill				
粒径 d/mm	$d>2.0$	$1.5<d<2.0$	$1.0<d<1.5$	$d<1.0$
小于某粒径的质量分数	3.85	5.25	10.65	80.25

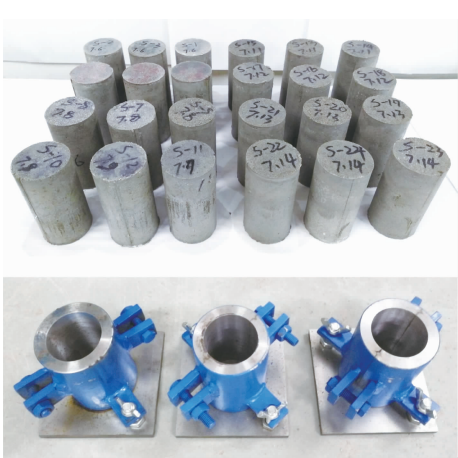


图 1 不同配比胶结充填体试样

Fig. 1 Cemented backfill samples with different proportions

1.2 试验设备与加载

加载设备采用 WAW-300 微机电液伺服万能试验系统(如图 2 所示),试验采用先位移后荷载控制的加载方式,即先使用位移加载使得加载台与试样完全接触,当荷载达到 0.1 kN 时,再使用荷载控制(0.02 kN/s)加载,直至试样破坏.此试验机可以进行破坏力学全过程试验,并在加载过程中实时记录应力、荷载、应变和位移,同步绘制应力-应变、时间-荷载、位移-荷载、时间-位移曲线,为实验结果分析提供便利条件;声发射监测设备采用 DS2 系列全信息监测系统(如图 2 所示),该系统具有 100 kHz~10 MHz 的采样速率,在力学试验加载过程中同步进行数据采集及分析.

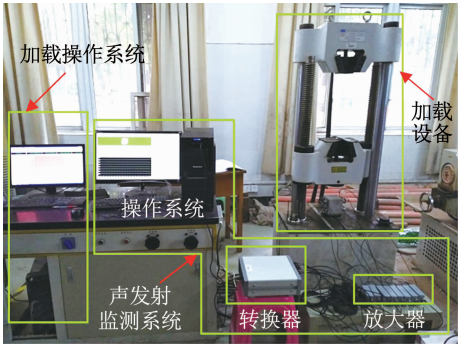


图 2 胶结充填体声发射定位系统

Fig. 2 Cemented backfill acoustic emission positioning system

文中胶结充填体试样定位使用 6 个声发射探头,其空间布置图如图 3 所示.为了消除在加载过程中试样与加载台的端部效应,接触位置涂抹凡士林.试验时,声发射阈值值设为 40 mV,采样频率 3 MHz;为保证加载与声发射监测同步进行,要确保两设备系统采集时间的同步性.

在加载过程中,单轴压缩试验机可以记录加载过程中每个时刻所对应的力和位移等原始试验数据.因此,应变率也可通过原始试验数据计算求得.

应变率是指单位时间内应变增量值,即应变对时间的导数^[9].文中通过分析试验得到的离散数据,对时间求差分获得.因此,应变率的计算公式为

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (1)$$

式中: ε_i 、 ε_{i-1} 分别为 t_i 、 t_{i-1} 时刻的应变值; t_i 、 t_{i-1} 分别为第 i 、 $i-1$ 个采样点的加载时间,文中试验采样点的时间间隔相同.

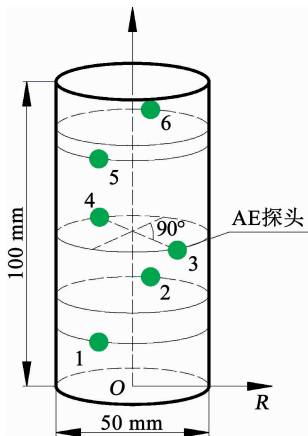


图 3 胶结充填体试样探头空间定位图

Fig. 3 Spatial positioning diagram of the probe for cemented backfill sample

2 试验结果及评价

本次试验分析以灰砂比为 1:4 为例,探讨单轴压缩条件下胶结充填体应变率与声发射特征响应规律. S-1、S-2、S-3 试样中 S-1、S-3 的试验结果较为典型,共性特征明显,文中选取各试样 2 号探头数据进行重点分析.

2.1 试样加载过程中应变率变化特征

图 4 为胶结充填体在单轴压缩变形全过程中应力、应变率-时间曲线. 根据应力及应变率随着时间的变化曲线的阶段性特征将试样变形过程分为初始压密阶段、弹性阶段、塑性屈服阶段以及失稳破坏阶段. 各阶段特征如下.

1) 初始压密阶段 (S-1: 0 ~ 245 s; S-3: 0 ~ 286 s): 应变率在初始压密阶段表现出“上升→下降”的变化规律, 试样 S-1、S-3 应变率在初始压密出现峰值的时间分别为: 167、205 s; 孔隙的闭合必然伴随着试样内部胶结材料的断裂, 致使胶结充填体内部微裂纹的产生.

2) 弹性阶段 (S-1: 245 ~ 410 s; S-3: 286 ~ 500 s): 在弹性变形阶段应变率变化稳定, 几乎呈现一条直线, 各试样均表现出较长的稳定期, 试样内部微裂纹在初始压密阶段的基础上稳定发展. 试样 S-1、S-3 弹性阶段占全变形过程的比例分别为:

30.4%、33.6%, 试样 S-1 与 S-3 的差异性较小. 由于此阶段应变率的稳定发展, 可将此阶段作为胶结充填体发生破裂的前兆信息之一.

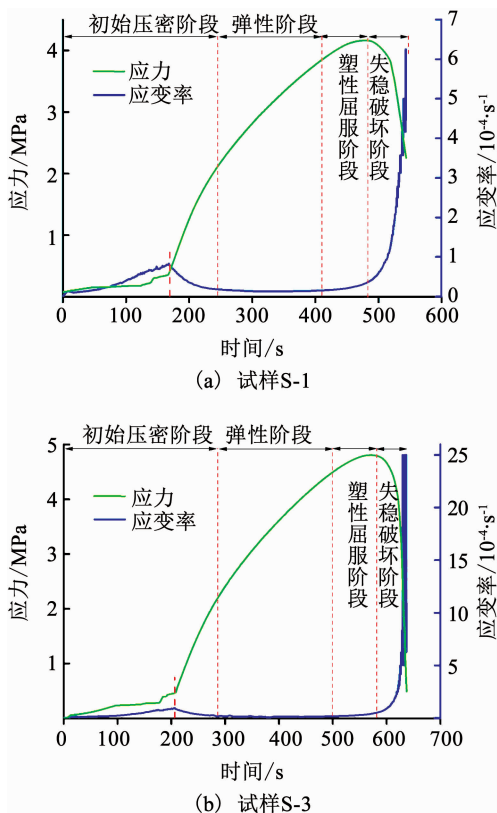


图 4 典型试样变形全过程应变率变化曲线

Fig. 4 Strain rate curve of typical specimen deformation process

3) 塑性屈服阶段 (S-1: 410 ~ 480 s; S-3: 500 ~ 569 s): 将应力峰值阶段前、弹性阶段后称为塑性屈服阶段, 应变率开始较缓慢的增长, 这是由于胶结充填体在荷载作用下萌生新鲜裂纹, 局部位置应力集中导致应变值增加速率加快, 进而导致应变率增长.

4) 失稳破坏阶段 (S-1: 480 ~ 543 s; S-3: 569 ~ 637 s): 胶结充填体试样在峰值应力处局部裂纹贯穿, 在峰值应力后贯穿裂纹进一步扩展和演化, 应变率在此阶段发生突变, 最终导致胶结充填体整体失稳破坏.

2.2 试样加载过程中振铃计数率变化特征

振铃计数率是声发射参数中的一个重要衡量指标, 曹吉胜等^[22]通过振铃计数率研究了节理岩体损伤破裂机理; 刘永涛^[23]研究了不同龄期胶结充填体振铃计数的变化规律, 并揭示了其裂纹演化规律. 因此, 振铃计数率 (振铃计数) 能较好的反应加载变形全过程中胶结充填体力学特性. 如图 5 所示, 试样 S-1 声发射振铃计数率在 175.6、534.9 s 出现极值, 分别为 2.48、15.85 次/s, 在 259 ~ 417 s (158 s) 时间内几乎为 0; 试样 S-3 声发射振铃计数率在 179.5、631.9 s 出现极值, 分别为 1.36、0.97 次/s, 在 401 ~

541 s(140 s) 几乎为 0,不同试样表现出几乎相同的变化规律. 基于此,在加载变形全过程中,试样 S-1 与 S-3 声发射振铃计数率及振铃计数表现出如下共性:

1)振铃计数率及振铃计数随着时间变化的曲线具有阶段性. 根据振铃计数的阶段性特征,将声发射参数在变形全过程分为上升期(振铃计数表现出明显的上升趋势)、平静期(振铃计数率趋近于 0,振铃计数曲线接近平直)和活跃期(振铃计数率变化活跃,振铃计数出现突增). 声发射振铃计数率分别对应于应变率的初始压密阶段、弹性阶段以及塑性屈服-失稳破坏阶段.

2)声发射振铃计数率在变形全过程表现出趋势性和波动性,呈“升→降→静→升”的变化趋势. 在上升期,试样内部存在蓄能和释能过程;试样发生破坏前,振铃计数均存在较长时间的平静期;在塑性屈服阶段,振铃计数的变化趋势开始明显增加,在试样达到峰值应力时,试样内部局部破坏;在峰值应力后,声发射振铃计数率非常活跃,这表明在失稳破坏阶段,试样是由局部失稳向整体失稳演化.

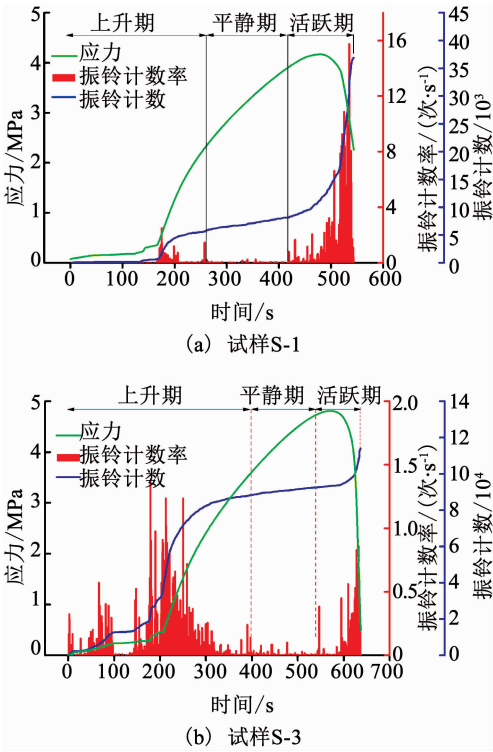


图 5 试样声发射振铃计数率、应力与时间之间的关系
Fig. 5 Relationship between the sound emission ringing count rate, stress, and time of the sample

2.3 试样加载过程中应变率与振铃计数率之间的响应关系

由图 5 可知,胶结充填体振铃计数率和振铃计数在变形全过程表现出较明显的阶段性和突变性.

为了进一步解释应变率与声发射参数的响应关系和内在联系,文中选取典型试样 S-3 绘制了应变率与振铃计数随时间变化规律图(如图 6 所示)以及振铃计数率-应变率关系图(如图 7 所示),并结合声发射各时期进行分析.

应变率与振铃计数率在变形全过程均表现出“升→降→静(稳)→升”的变化趋势,这表明两者之间存在较好的相关性. 振铃计数反应了振铃计数率的变化趋势,在声发射活跃期(对应应变率塑性屈服-失稳破坏阶段)两者有较高的相关性,都表现出“稳(静)→升”的趋势,两者的突变性有较好的一致性(如图 6 所示). 应变率在最后阶段出现了大幅度的波动,这是由于在失稳破坏阶段胶结充填体内部裂纹已贯穿,且试样还没有整体失稳,也体现了试样内部破坏各组分之间寻求应力平衡的结果.

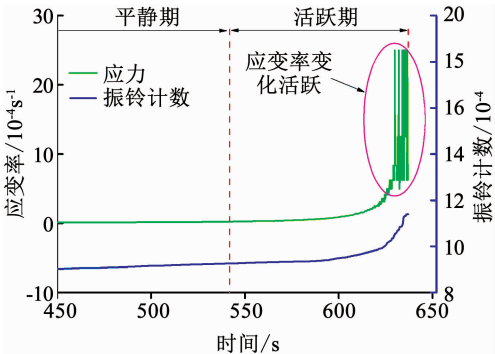


图 6 试样 S-3 活跃期振铃计数与应变率变化规律
Fig. 6 Variation of ringing count and strain rate in the active period of sample S-3

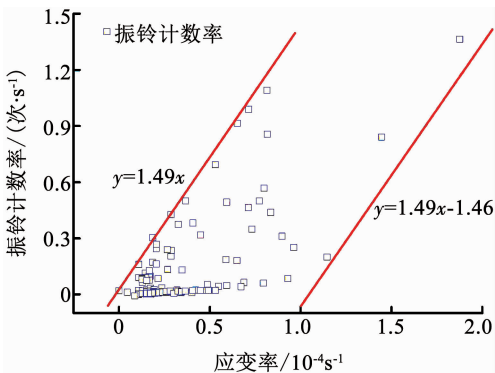


图 7 试样 S-3 变形全过程振铃计数率-应变率曲线
Fig. 7 Ringing count rate-strain rate curve of sample S-3 deformation process

图 7 是为了进一步表征胶结充填体应变率与振铃计数率之间的内在联系,两者之间在变形全过程中表现出正相关关系. 振铃计数率(y)随着应变率(x)的增加呈现增加趋势,且变化范围控制在 $y = 1.49x$ 与 $y = 1.49x - 1.46$ 范围之间,两者的相关性较高.

3 讨 论

3.1 应变率在初始压密阶段出现异常现象解释

为了解释胶结充填体在初始压密阶段出现“升→降”的变化趋势,需从细观角度入手. 因此,孔隙在荷载作用下的变形特性是解决此问题的关键因素之一. 通过提取胶结充填体内部一小部位作为典型结构单元,进而研究该结构单元中的孔隙在荷载作用下的变形特性. 假定:胶结充填体内部孔隙理想化为球形,每个球形单元包含一个孔隙且均匀分布在胶结充填体中,则孔隙在荷载作用下的变化规律示意如图 8 所示. 没有施加荷载之前,内部孔隙分布如图 8(a)所示,均匀分布在胶结充填体内,且孔隙的大小形状均不一. 在加载过程中,孔隙处在逐渐压密过程,形状逐渐变小、闭合或者破裂形成微裂纹;并伴随有胶结材料的断裂(如图 8(b)所示);压密阶段结束后孔隙几乎被完全压密(如图 8(c)所示).

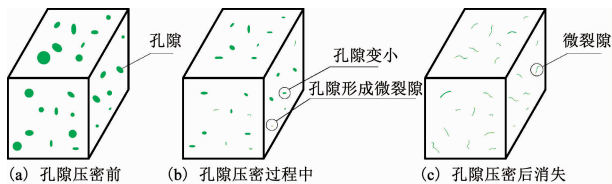


图 8 孔隙在加载过程中变形示意图

Fig. 8 Schematic diagram of pore deformation during loading

在上述孔隙变形特性分析基础上,以典型试样 S-3 为例,绘制了初始压密阶段刚度-时间以及应变率-时间曲线图(如图 9、10 所示);刚度为试验机施加荷载对位移求差分:

$$K = \frac{\Delta F}{\Delta s} = \frac{F_i - F_{i-1}}{s_i - s_{i-1}}, \quad (2)$$

式中 F_i 、 F_{i-1} 分别是位移为 s_i 、 s_{i-1} 时的试验力.

根据初始压密阶段应变率的“升→降”的变化趋势,将初始压密阶段分为 I、II 两个阶段(以 205 s 为两阶段分界点),286 s 后为弹性阶段. 文中通过曲线拟合可判定刚度、应变率在初始压密阶段也表现出明显的阶段性特征. 阶段 I 刚度波动性较大,但仍然保持上升的趋势;阶段 II 刚度的变化不是影响应变率上升的主导因素,而是由于外加荷载致使应变率上升;即在荷载作用下,试样内部孔隙变化活跃,在单位时间内变形或压碎的孔隙数量增加,进而导致应变率呈上升趋势. 阶段 II 刚度增加率几乎保持一致,这是由于在此阶段孔隙的活跃程度降低,都逐渐趋于闭合;因此在此阶段刚度支配应变率的变化,使得应变率的变化趋势与刚度的相反. 在弹性阶段刚度趋于稳定,也致使应变率趋于稳定.

3.2 胶结充填体应变率与声发射特征响应规律

胶结充填体在加载变形全过程中根据声发射参

数的阶段性特征,将试样变形过程分为上升期、平静期和活跃期. 不同阶段声发射源的产生方式和位置不同,归纳总结以往研究成果,针对类岩石材料声发射源产生的因素有:1)在荷载作用下试样内部裂纹的萌生、演化和扩展;2)材料、胶结物质以及杂物的断裂;3)存在缺陷(孔隙、裂隙等)的汇集或者闭合;4)材料骨料颗粒表面的不平整,致使骨料之间相互摩擦,以及产生的相对位错和滑移带^[24]. 由于应变率与声发射参数存在内在联系,因此,声发射参数不同演化时期,胶结充填体应变率与声发射特征响应规律有所差异. 文中对每个时期响应规律进行分析如下.

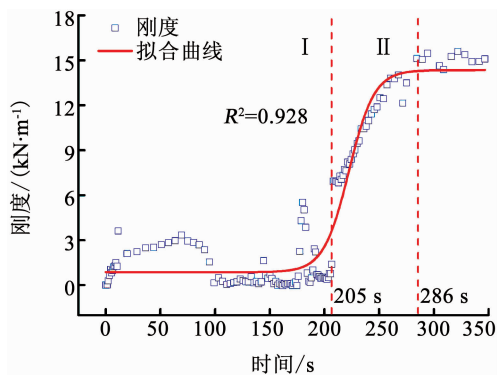


图 9 试样 S-3 初始压密阶段刚度-时间曲线

Fig. 9 Stiffness-time curve of sample S-3 in initial tight phase

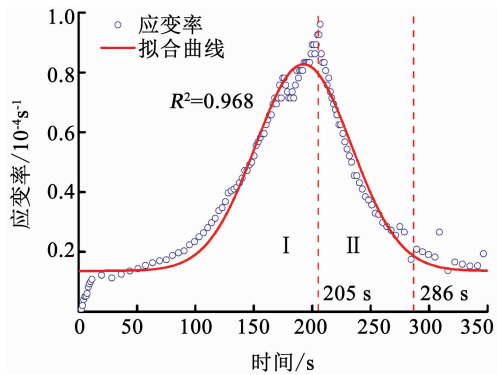


图 10 试样 S-3 初始压密阶段应变率-时间曲线

Fig. 10 Strain rate-time curve of sample S-3 in initial compaction stage

3.2.1 上升期

声发射振铃计数率随着应变的变化而变化,两者的相关性较高,应变率对振铃计数率的变化有支配作用. 因此,在此阶段的应变率对声发射的响应规律为:应变率的变化程度控制着孔隙的变形,以及骨料之间的轻微摩擦,进而决定了声发射振铃计数率的变化趋势.

3.2.2 平静期

声发射振铃计数率和应变在此阶段都保持平稳的变化趋势,振铃计数率有小范围内的波动,这是由于在上升期已经形成的微裂纹在此阶段进一步扩展,并伴随有新鲜微裂纹的产生,致使振铃计数率出

现小范围的波动. 应变率与振铃计数率相关性较高, 但应变率对振铃计数的支配性较低.

3.2.3 活跃期

由图 5~7 可知, 应变率与振铃计数率有较高的相关性, 且振铃计数率随着应变率的变化在一定范围内线性增长. 经过声发射平静期的蓄能, 应变率的变化程度控制着微裂纹的演化扩展和贯通, 以及胶结充填体内部出现应力集中, 最终致使试样整体失稳破坏. 在此阶段应变率支配着声发射振铃计数率的变化趋势.

3.3 胶结充填体破裂前兆信息研究

学者对于胶结充填体破裂前兆信息的研究较少, 在岩石和类岩石材料研究较多, 但是确定破裂前兆信息的因素比较单一. 本文结合应变率、声发射平静期、声发射振铃计数率、扩容现象进行胶结充填体破裂前兆信息多因素对比分析.

胶结充填体在单轴压缩过程中应变率表现出明显的初始压密阶段、弹性阶段、塑性屈服阶段和失稳破坏阶段 4 阶段性特征, 应变率稳定阶段过后则出现突变和峰值, 因此可将应变率开始发生突变作为胶结充填体破裂的前兆信息.

孙光华等^[25-26]研究了胶结充填声发射特征, 声发射参数(振铃计数率和能率均出现了)在破裂前均出现了平静期; 平静期过后声发射活动剧烈, 声发射参数均出现了峰值, 试样内部裂纹急速扩展, 最终形成贯穿裂纹, 试样破坏. 因此可以通过声发射振铃计数将胶结充填体破裂前出现的平静期作为破裂前兆信息. 并结合振铃计数率的变化规律进一步判断胶结充填体的破裂.

扩容是岩石及类岩石材料在破裂前会出现的固有现象^[27]. 因此, 可以将扩容现象作为胶结充填体破裂的前兆信息. 扩容现象是指在荷载作用下胶结充填体内部产生裂纹, 裂纹在扩展和贯穿的过程中出现的非弹性体积膨胀. 在单轴压缩条件下, 扩容现象主要与最小主应力有关, 且扩容方向与最小主应力方向一致.

在单轴压缩过程中, 应变率、振铃计数率对胶结充填体破裂的反应最直接, 声发射平静期较为次之, 其次是扩容点. 即应变率、声发射振铃计数由平静转向活跃, 并在在活跃后期伴随有扩容现象的发生, 则预示着胶结充填体将要失稳.

4 结 论

1) 胶结充填体在单轴压缩变形全过程中的应变率及声发射振铃计数率均表现出“升→降→稳→升”的变化趋势和阶段性特征, 两者相关性较高.

2) 胶结充填体内部破裂是由骨料之间的摩擦

以及胶结材料的断裂造成, 应变率在一定程度上对声发射特征起到了支配作用.

3) 针对应变率在初始压密阶段出现的“升→降”的变化趋势, 文中通过孔隙的变形特征以及刚度的变化规律得出: 上升趋势是由于外部荷载作用使得试样内部孔隙活跃, 应变率上升; 下降趋势则是由于刚度达到一定程度之后, 刚度支配了应变率的变化, 应变率下降.

4) 基于应变率在塑性屈服和失稳破坏阶段表现出明显的突变性, 可为胶结充填体破裂预测提供有效的前兆信息; 结合声发射振铃计数率变化规律、平静期以及扩容现象可更加全面的反映胶结充填体破裂情况.

参考文献

- [1] 张吉雄, 张强, 巨峰, 等. 深部煤炭资源采选充绿色化开采理论与技术[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 377
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, JU Feng, et al. Theory and technique of greening mining integrating mining, separating and backfilling in deep coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 377. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.4102
- [2] 刘俊新, 张可, 刘伟, 等. 不同围压及应变速率下页岩变形及破坏特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(s1): 43
LIU Junxin, ZHANG Ke, LIU Wei, et al. Experimental study of mechanical behaviours of shale under different confining pressures and different strain rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(s1): 43. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.S1.005
- [3] 杨阳, 王建国, 杨仁树, 等. 高应变率下饱水冻结红砂岩变形破坏分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(s2): 4016
YANG Yang, WANG Jianguo, YANG Renshu, et al. Analysis of deformation and fracture of the saturated frozen red sandstone under high strain rate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(s2): 4016 - 4026. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0467
- [4] 孟庆山, 范超, 曾卫星, 等. 南沙群岛珊瑚礁灰岩的动态力学性能试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 183
MENG Qingshan, FAN Chao, ZENG Weixing, et al. Tests on dynamic properties of coral-reef limestone in South China Seas[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 183. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1271
- [5] 潘红宇, 葛迪, 张天军, 等. 应变率对岩石裂隙扩展规律的影响[J]. 煤炭学报, 2018, 43(3): 675
PAN Hongyu, GE Di, ZHANG Tianjun, et al. Influence of strain rate on the rock fracture propagation law[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3): 675. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.1145
- [6] GAGAR D, FOOTE P, IRVING P E. Effects of loading and sample geometry on acoustic emission generation during fatigue crack growth: Implications for structural health monitoring[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 81: 117. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.07.024
- [7] 曹安业, 井广成, 窦林名, 等. 不同加载速率下岩样损伤演化的声发射特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(6): 923
CAO Anye, JING Guangcheng, DOU Linming, et al. Damage evolution law based on acoustic emission of sandy mudstone under different uniaxial loading rate[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(6): 923. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.

2015.06.009

- [8] 王伟超, 刘希亮, 张五交. 不同应变率下的盐岩损伤声发射时空演化[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 491
WANG Weichao, LIU Xiliang, ZHANG Wujiao. Space-time evolution rules of acoustic emission locations of salt rock under different strain rate [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2015, 36(4): 491. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2015.04.022
- [9] 高祥, 刘善军, 黄建伟, 等. 应变率对岩石变形过程声发射特征的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(4): 887
GAO Xiang, LIU Shanjun, HUANG Jianwei, et al. The influence of strain rate on AE characteristics during rock deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(4): 887. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0939
- [10] 刘志祥, 李夕兵, 张义平. 基于混沌优化的后阶段充填体可靠性分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 348
LIU Zhixiang, LI Xibing, ZHANG Yiping. Reliability analysis of high level backfill based on chaotic optimization[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 348. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2006.03.013
- [11] 杨伟, 陶明, 李夕兵, 等. 高应变率下灰砂比对全尾胶结充填体力学性能影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(11): 1659
YANG Wei, TAO Ming, LI Xibing, et al. Mechanical properties of the total tailing cemented backfilling impacted by cement-sand ratio under high strain rate [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2017, 38(11): 1659-1663. DOI: 10.12068/j.issn.1005-3026.2017.11.028
- [12] 杨伟, 张钦礼, 杨珊, 等. 动载下高浓度全尾砂胶结充填体的力学特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(1): 156
YANG Wei, ZHANG Qinli, YANG Shan, et al. Mechanical property of high concentration total tailing cemented backfilling under dynamic loading [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(1): 156. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2017.01.022
- [13] HUANG Sheng, XIA Kaiwen, QIAO L. Dynamic tests of cemented paste backfill: effects of strain rate, curing time, and cement content on compressive strength[J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(15): 5165. DOI: 10.1007/s10853-011-5449-0
- [14] ZHANG Yunhai, WANG Xinmin, WEI Chong, et al. Dynamic mechanical properties and instability behavior of layered backfill under intermediate strain rates[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(7): 1608. DOI: 10.1016/S1003-6326(17): 60183-3
- [15] 朱鹏瑞, 宋卫东, 徐琳慧, 等. 冲击荷载作用下胶结充填体的力学特性研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(12): 131
ZHU Pengrui, SONG Weidong, XU Linhui, et al. A study on mechanical properties of cemented backfills under impact compressive loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(12): 131. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.12.020
- [16] 李雅阁, 金龙哲, 谭昊, 等. 胶结充填体力学特性的加载速率效应试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(9): 49
LI Yage, JIN Longzhe, TAN Hao, et al. Experiment of loading rate effect on mechanical characteristics of cemented filling body [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(9): 49. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.09.009
- [17] 甘德清, 韩亮, 刘志义, 等. 加载速率对充填体强度特性影响的试验研究[J]. 金属矿山, 2016(12): 150
GAN Deqing, HAN Liang, LIU Zhiyi, et al. Experimental study of the effect of loading rate on strength performance of filling body [J]. Metal Mine, 2016(12): 150
- [18] 陈世万, 杨春和, 王贵宾, 等. 北山坑探设施开挖损伤区现场声发射监测试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(s2): 349
CHEN Shiwan, YANG Chunhe, WANG Guibin, et al. Experimental study of acoustic emission monitoring in situ excavation damage zone of Beishan exploration tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(s2): 349. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.S2.048
- [19] FENG Xiating, LIU Jianbo, CHEN Bingrui, et al. Monitoring, warning, and control of rockburst in deep metal mines [J]. Engineering, 2017(3): 538. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.04.013
- [20] 龚鹳, 李长洪, 赵奎. 加卸荷条件下胶结充填体声发射 b 值特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(5): 788
GONG Cong, LI Changhong, ZHAO Kui. Experimental study on b-value characteristics of acoustic emission of cemented filling body under loading and unloading test [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(5): 788. DOI: 10.13545/j.issn1673-3363.2014.05.020
- [21] 胡京涛. 尾砂胶结充填体声发射特性试验研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2011
HU Jingtao. Experimental study on acoustic emission characteristics of tailings cemented backfill [D]. Ganzhou: University of Science and Technology, 2011
- [22] 曹吉胜, 戴前伟, 马德鹏. 预制节理岩体卸荷损伤破坏机理及声发射特征试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(6): 1465
CAO Jisheng, DAI Qianwei, MA Depeng. Experiment research on damage mechanism and acoustic emission characteristics of rock mass with prefabricated joints under unloading condition [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(6): 1465. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2018.06.020
- [23] 刘永涛. 不同龄期尾砂胶结充填体单轴压缩破坏的声发射及断口分形特征[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018
LIU Yongtao. Acoustic emission and fractal characteristics of cemented tailings backfill in different age under uniaxial compression [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018.
- [24] 赵洪宝, 杨胜利, 仲淑娟. 突出煤样声发射特性及发射源试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 543
ZHAO Hongbao, YANG Shengli, ZHONG Shuheng. Analysis on the AE characteristics of outburst-hazardous coal under different loading mode [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 543. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3363.2010.04.018
- [25] 孙光华, 魏莎莎, 刘祥鑫. 基于声发射特征的充填体损伤演化研究[J]. 实验力学, 2017, 32(1): 137
SUN Guanghua, WEI Shasha, LIU Xiangxin. On the damage evolution of fillings based on acoustic emission characteristic [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(1): 137. DOI: 10.7520/1001-4888-16-171
- [26] 李杨, 孙光华, 叶洪涛, 等. 单轴加载下充填体声发射特征研究[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(3): 109
LI Yang, SUN Guanghua, YE Hongtao, et al. Study on acoustic emission properties of filling body under uniaxial loading [J]. Mining Research and Development, 2018, 38(3): 109
- [27] 李安强, 张茹, 艾婷, 等. 花岗岩单轴压缩全过程声发射时空演化行为及破坏前兆研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(s2): 306
LI Anqiang, ZHANG Ru, AI Ting, et al. Acoustic emission space-time evolution rules and failure precursors of granite under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(s2): 306. DOI: 10.11779/CJGE2016S2050