

文章编号: 1001-4888(2017)01-0137-08

基于声发射特征的充填体损伤演化研究^{*}

孙光华^{1,2}, 魏莎莎^{1,2}, 刘祥鑫^{1,2}

(1. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北唐山 063000; 2. 河北省矿业开发与安全技术重点实验室, 河北唐山 063000)

摘要: 为探究声发射信号与充填体细观破坏之间的关系, 研究声发射特征振铃计数、能率和应力随时间的变化规律, 进一步揭示充填体损伤演化过程, 进行了全尾砂胶结充填体声发射特性力学实验。基于损伤力学理论并引入有效损伤率, 得到基于声发射累积事件率的损伤变量, 然后构建了充填体损伤本构方程。研究结果表明, 声发射振铃计数和能率在不同受力阶段呈现不同变化, 与充填体内部孔隙及裂纹损伤演化过程有密切关系。振铃计数在弹性阶段前期达到最大, 屈服阶段逐渐降低至最小; 有效损伤率值与理论峰值应力呈负相关; 与实验峰值应力相比, 理论峰值应力出现于应变较大处; 充填体为高损伤介质, 当有效损伤率取值趋近于 1 时, 理论模型曲线与实验曲线变化趋势相同, 可以较好的描述充填体应力应变关系。

关键词: 充填体; 声发射; 损伤演化; 有效损伤率

中图分类号: TD315

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-171

0 引言

充填体是一种含有原始孔隙和裂隙的多相非均质材料, 力学性能复杂, 其宏观破坏现象是细观单元损伤相互作用并累计的结果^[1]。声发射是类岩石材料在受载条件下产生应变能并释放弹性波的现象, 声发射监测技术作为一种无损监测手段广泛应用于材料损伤特性的研究。声发射特征参数与力学参量之间的关系蕴含材料的损伤破坏信息, 声发射特征参数的变化表明材料的损伤演化过程^[2,3]。吴刚等^[4]研究砂岩的声发射累计振铃计数在不同受力阶段的特点, 分析得到了砂岩内部结构破坏特征。李庶林等^[5]进行岩石单轴受压试验研究, 探讨了岩石变形过程中声发射事件率在不同应力下的变化情况。刘保县等^[6]基于声发射振铃计数得到损伤变量并建立煤岩损伤模型, 通过研究声发射信息的变化情况得到煤岩内部损伤信息。杨永杰等^[7]开展三轴压缩条件下岩石声发射试验, 对声发射能量在岩石损伤演化过程中的变化情况进行了分析研究。夏冬等^[8]对饱水岩石在单轴条件下声发射累积数的变化规律进行研究, 发现其与岩样内部损伤演化规律具有一致性。纪洪广等^[9]探究了混凝土破裂过程中声发射信号在不同加载阶段的分布特征, 为预测混凝土破坏提供前兆信息。声发射蕴含的丰富信息将对深刻理解充填体等类岩石破坏机制及其损伤演化规律具有重要意义。

近年来, 学者们逐渐将声发射技术运用于充填体力学试验研究。胡京涛等^[10]对充填体的声发射基本参数序列进行了分形特征分析, 得出充填体的声发射维数在力学特性试验中的变化规律。龚函等^[11]研究了胶结充填体在加一卸载过程中声发射 b 值不同的表现特征, 结果表明在加卸载过程中微破裂处于动态演化之中。余乐兴^[12]以不同粒级全尾砂充填体为研究对象进行单轴压缩声发射试验, 发现平静期的应力百分比范围随着粒级的增大而增大。谢勇等^[13]通过数值模拟软件得到充填体抗拉破坏时声

^{*} 收稿日期: 2016-09-10; 修回日期: 2016-11-09

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2016209224); 河北省自然科学基金项目(E2014209093)

通讯作者: 孙光华(1977—), 男, 博士, 副教授, 从事矿山开采工艺与技术研究工作。Email: czsgh110 @163.com

发射的破坏规律,结果与室内试验的声发射试验具有很好的一致性。王晓军等^[14]综合分析了块石胶结充填体单轴载荷条件下声发射信号在各时间段的主频与次主频个数的比值的大小、上升与下降,并以此作为参考依据分析块石胶结充填体受力条件下的破坏特征。综上所述,声发射特征信号与应力之间具有一定的关系,因此通过分析声发射特征信号的变化规律,可以研究充填材料在受载条件下的损伤演化过程。

本文应用声发射监测系统接收声发射信号,对灰砂比 1:6、浓度 70% 的全尾砂胶结充填体进行单轴压缩条件下的力学特性试验。从充填体内部裂隙的演化过程和细观力学特性出发,结合损伤力学理论并引入有效损伤率,建立基于声发射特征的充填体损伤演化方程与本构方程,探究充填体基于声发射信号的损伤变量与应力应变之间的关系,讨论有效损伤率的取值及其对理论应力的影响,通过声发射特征参数的变化规律对充填体损伤演化机制进行分析研究。

1 充填体的声发射特性试验

1.1 试样制备

试验采用标准条件下养护 28 天的全尾砂胶结充填体试块,灰砂比为 1:6、浓度为 70%,试块规格为 100mm×100mm×100mm,试验标准充填体试块如图 1 所示。

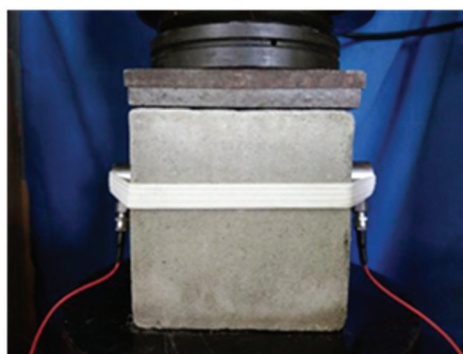


图 1 标准充填体试块

Fig. 1 The standard test block of backfill

1.2 试验方案

试验采用美国物理声学 PCI-2 声发射测试系统,可记录和存储声发射振铃计数、声发射能率和声发射事件率等参数,利用 TAW-3000 常规三轴试验机对标准充填体试块进行单轴压缩条件下声发射特性试验。声发射传感器置于充填体两侧,为保证传感器与充填体接触耦合,在接触面涂抹凡士林并用皮筋将其固定。试验采用等位移加载,加载速度为 0.3mm/min。需要注意试验过程中应保证压力机加载系统与声发射监测系统同步进行,直到试件破坏时视为试验结束。试验装置示意图如图 2 所示。

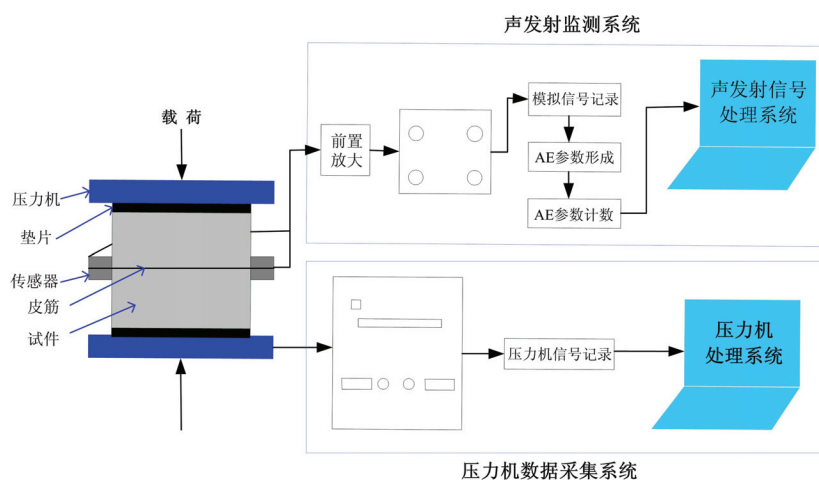


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test device

1.3 声发射试验及结果

试验制备了六组试件,分析结果发现声发射特征信号变化基本相同,限于篇幅,本文只对一组试件结果进行分析,充填体的应力—应变曲线见图 3。声发射振铃计数的变化反映试件内部结构变化,可表征试件细观裂隙演化的过程^[15];能率是反映试件材料破坏的重要参数,可以较好地预测材料失稳破

坏^[16],因此,将声发射振铃计数和声发射能率作为试验特征参数进行研究。充填体的声发射振铃计数和声发射能率与应力随时间的变化关系分别如图4、图5所示。

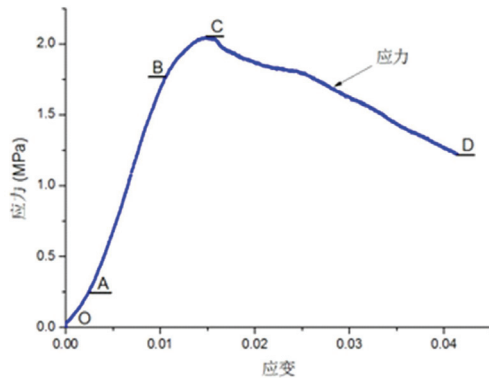


图3 单轴压缩条件下
充填体应力—应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of backfill
under uniaxial compressive

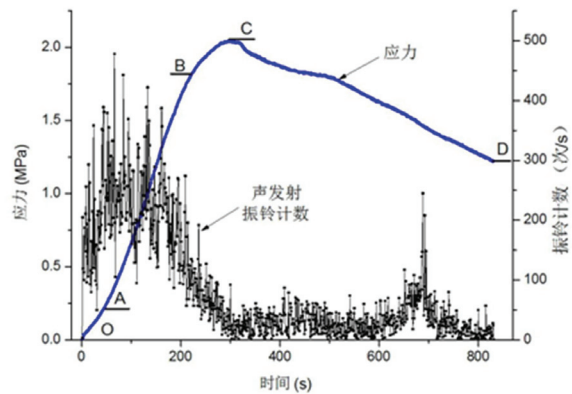


图4 单轴压缩条件下充填体应力、
AE振铃计数与时间关系曲线

Fig. 4 Stress-time curve and AE ringing counts-time
curve of backfill under uniaxial compressive

将充填体受力全过程划分为四个阶段:压密阶段、弹性变形阶段、屈服阶段及峰后破坏阶段,对单轴压缩条件下充填体声发射特性阶段分析如下:

(1) 压密阶段(OA),充填体加载初期,应力—应变曲线呈下凹状。加载初期声发射活动较多,且能率较高,充填体内部裂纹压密时产生声发射信号。

(2) 弹性变形阶段(AB),应力—应变曲线线性增长。载荷增加,充填体裂隙继续被压密实,使弹性波传播更为有利,表现为声发射振铃计数和能率较活跃并持续增加,声发射振铃计数在峰值应力的21%时达到最大值,声发射能率在峰值应力的32%时达到最大值。随着载荷继续增加,振铃计数与能率发生突降,在充填体内部裂纹继续被压实,裂纹、裂隙稳定发展同时产生新的破裂,影响声发射信号在充填体内部的传播,导致接收到的声发射信号减少,因此通过发射信号的变化可反映出充填体内部裂纹、裂隙演化规律。

(3) 屈服阶段(BC),应力—应变曲线呈上凸形,曲线斜率逐渐减小并降低至零。充填体达到屈服强度后产生塑性变形,同时原生裂纹和次生裂纹继续发展,裂纹之间的相互作用开始加剧,微裂纹发生聚合并贯通,直至试件完全破坏。声发射振铃计数和能率继续降低至最小值,由于充填体已出现较大破坏,弹性波在充填体中的传播受到限制,接收到的振铃计数和能率的数量降低。

(4) 峰后破坏阶段(CD),充填体在峰后破坏阶段的应力曲线斜率继续减小并降低为负值。试验结束时充填体仍具有承载能力,应力未降低为零。此阶段产生的声发射振铃计数较少、声发射能率低,但在试验峰后破坏阶段的后期出现声发射信号突然性增长的“小高峰”现象,此时试件发生局部破坏,产生大量的弹性波,使接收到的振铃计数和能率突然增加。

综上可知,试验过程中声发射信号随时发生变化,不同的力学阶段变化趋势有所不同,产生差异的

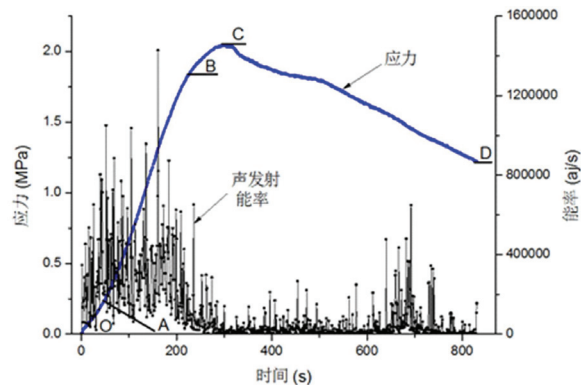


图5 单轴压缩条件下充填体应力、
AE能率与时间的关系曲线

Fig. 5 Stress-time curve and AE energy rate-time
curve of backfill under uniaxial compressive

原因是充填体的损伤演化是一个持续变化的过程,分析声发射信号可以反映充填体内部原生裂纹扩展及裂纹间相互贯通的演化规律。

2 基于声发射事件率的充填体损伤研究

2.1 损伤本构关系的建立

充填体局部发生的损伤破坏产生声发射信号,试验应用声发射监测手段探究充填体受力过程中的损伤特性,声发射事件率为单位时间内产生的声发射事件数,表明试件内部裂纹形成、扩展所造成的损伤^[17],累计事件率的大小代表了材料在受力作用下累计损伤的程度,因此,本文选取声发射事件率和累积事件率对充填体损伤特性进行描述。

基于损伤力学理论^[18],Kachanov 将损伤变量定义为:

$$D = \frac{A_d}{A} \quad (1)$$

式中, D 为损伤变量($0 \leq D \leq 1$),当 $D=0$ 时材料处于初始无损状态,当 $D=1$ 时材料处于损伤完全状态; A_d 为当材料处于某受损状态时承载横截面上微孔隙与裂隙的面积之和; A 为初始无损时的断面面积。

设当无损材料整个横截面 A 处于完全破坏状态时声发射累积事件率为 C_w ,微元的单位面积产生破坏的声发射事件率 C_0 为:

$$C_0 = \frac{C_w}{A} \quad (2)$$

此时不考虑各个声发射事件的大小,则当横截面损伤面积达 A_d 时,声发射累积事件率 C_d 为:

$$C_d = C_0 A_d = \frac{C_w}{A} A_d \quad (3)$$

联立式(1)~(3),得到基于声发射事件率与累积事件率的损伤变量 D ,即

$$D = \frac{C_d}{C_w} \quad (4)$$

在试验结束后,充填体并非完全破坏(充填体损伤未达到 1),仍然具有承载能力,引入有效损伤率 a ,此时损伤变量 D_0 为:

$$D_0 = aD = a \frac{C_d}{C_w} \quad (5)$$

同时根据 Lemaitre 应变等价原理得到应力计算公式,即

$$\sigma = E(1 - D_0)\epsilon \quad (6)$$

式中, σ 为充填体的应力; E 为充填体的弹性模量; D_0 为损伤变量; ϵ 为应变。

联立式(5)、式(6),得到充填体单轴压缩条件下基于声发射事件率的损伤本构模型:

$$\sigma = E(1 - a \frac{C_d}{C_w})\epsilon \quad (7)$$

2.2 损伤演化分析

通过式(6)、式(7)的损伤本构方程得到损伤变量与应变关系的曲线,有效损伤率取 0.8,此时理论峰值应力与试验峰值应力相等,取值原因将于讨论部分阐述。通过损伤—应变曲线将充填体损伤演化

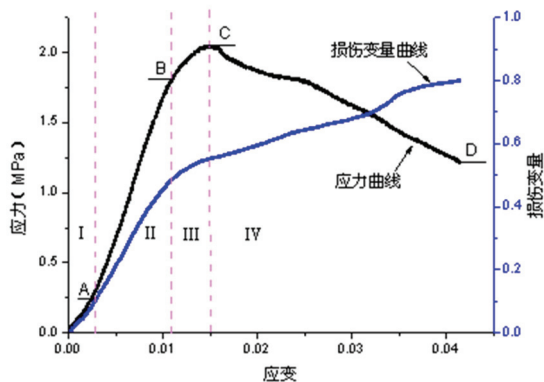


图 6 单轴压缩条件下充填体应力、损伤变量与应变的关系曲线

Fig. 6 Stress-strain curve and the damage variable-strain curve of backfill under uniaxial compressive

过程分为四个阶段,如图 6 所示,结合应力—应变曲线进行分段分析:

第 I 阶段为损伤初期阶段。应变在 $0 \sim 0.0026$ 之间变化,损伤曲线微凹,斜率增加,损伤变量达 0.1 左右,处于充填体的压密阶段,此阶段损伤的产生是初始裂纹被压密、压实的结果。

第 II 阶段为损伤弹性发展阶段。应变在 $0.0026 \sim 0.011$ 之间变化,损伤曲线近似直线,斜率迅速增大,对应充填体的弹性变形阶段,损伤变量迅速从 0.1 增长至 0.5。此阶段原生裂纹继续被压密,又有新的微裂纹出现,内部出现大量裂隙萌生、扩展、贯通等,损伤产生的原因增多,导致损伤变量值急剧增加。

第 III 阶段为损伤发展阶段。应变在 $0.011 \sim 0.015$ 之间变化,损伤曲线斜率随应力的增加逐渐减小,损伤变量增长至 0.57,处于充填体的塑性变形阶段,充填体内部产生了较大裂纹,导致声发射信号的传播介质破坏,声发射信号的接收受阻,表现为损伤变量增长速率降低。

第 IV 阶段为峰后损伤阶段。充填体达到峰值应力后,损伤变量曲线斜率基本保持不变,损伤变量持续增长至试验结束。此阶段充填体仍有裂隙产生和扩展,且较稳定,随着应力继续增大会出现局部破坏的现象,导致声发射信号突然增强,损伤变量曲线的斜率增加。

综上所述,充填体损伤变量在不同的损伤阶段有不同的变化,分析损伤变量可以了解充填体的损伤演化规律。

从图 6 可以看出基于声发射特性的损伤变量曲线在峰值应力前后均呈非线性,根据这个特点以峰值应力对应的应变处为分界点,对加载初期至压缩破坏全过程的损伤变量曲线进行分段拟合,得到单轴压缩条件下充填体的损伤演化方程:

$$\begin{cases} D_0 = -700.22\epsilon^2 + 50.017\epsilon & (0 \leq \epsilon \leq 0.015) \\ D_0 = 83.392\epsilon^2 + 5.2629\epsilon + 0.45576 & (0.015 \leq \epsilon \leq 0.041) \end{cases} \quad (8)$$

利用 MATLAB 将图 6 中充填体应力—应变曲线的弹性阶段进行拟合,并求解得到弹性模量 $E = 209.97 \text{ Pa}$,结合充填体损伤演化方程建立单声发射特性的损伤本构模型:

$$\begin{cases} \sigma = 533845.0047\epsilon^3 - 17663\epsilon^2 + 238.26\epsilon & (0 \leq \epsilon \leq 0.015) \\ \sigma = 10685\epsilon^3 - 3477.7\epsilon^2 + 177.88\epsilon - 0.53994 & (0.015 \leq \epsilon \leq 0.041) \end{cases} \quad (9)$$

3 有效损伤率对损伤模型的影响

3.1 有效损伤率取值

试验结束后充填体表现为仍具有承载能力,其损伤值并未达到 1,则引入有效损伤率 a 为:

$$A = 1 - \frac{\sigma_d}{\sigma_p} \quad (10)$$

式中, σ_p 为充填体实际试验的峰值应力; σ_d 为充填体实际试验结束后的残余应力。本文选取有效损伤率 a 分别为 0.4、0.7、0.8、0.86、0.9,得出应力—应变曲线如图 7 所示。在有效损伤率取值小于 0.8 时(a 取 0.4、0.7),理论峰值应力和残余应力均高于试验应力。有效损伤率取值大于 0.8 时(a 取 0.86、0.9),理论峰值应力均小于试验峰值应力。

(1) $a < 0.8$

以 $a = 0.4$ 为例,通过式(7)、式(10)带入损伤本构模型中进行计算并绘制应力—应变曲线,损伤模型的应力曲线大致呈线性增长,只是在应变 0.032 处应力曲线斜率稍有降低,经历小变形后曲线斜率随着应力增加继续增大。在相同应变下模型应力值比试验应力值大,只是在试验塑性变形的部分阶段,试验应力值高于理论应力值。此情况下,理论应力曲线与实际应力曲线差异较大,不适合本次试验。

当 $a = 0.7$ 时,损伤模型的峰值应力和残余终值应力均高于试验应力,理论峰值应力的出现滞后于试验峰值应力,理论曲线的趋势与试验应力曲线相同。

(2) $a \geq 0.8$

当 $a = 0.8$ 时,损伤模型的峰值应力与试验的峰值应力相等。在 $a > 0.8$ 的条件下,理论应力曲线的趋势表现一致,峰值应力出现在相同应变处,理论峰值应力均小于试验峰值应力。当 $a = 0.86$ 时,损伤

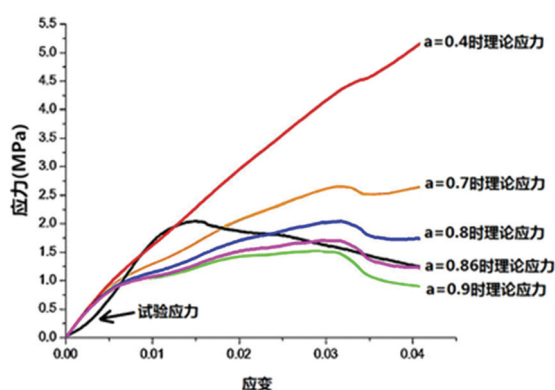


图 7 有效损伤率与理论应力的关系

Fig. 7 Relationship with the effective damage rate and the theoretical stress

因进行讨论。

(1) 在弹性变形阶段前,相同应变时理论应力值大于试验应力值,声发射传感器接收不到一些微小破裂且能量低的事件,导致理论损伤值比实际损伤值小,表现在本构方程中则是理论应力值比试验应力值大。

(2) 理论峰值应力滞后于试验峰值应力出现,即理论峰值应力出现在充填体应变较大处,充填体为低密度高损伤材料,原始损伤较多、孔隙较发育的介质,加载初期声发射信号在充填体介质中衰减较多,声发射信号被传感器接收并积累到一定量时,理论模型才会达到峰值应力,因此导致理论峰值应力出现在应变较大处。

(3) 有效损伤率值与理论曲线的峰值应力呈负相关,理论曲线的峰值应力随有效损伤率取值增大而减小,理论曲线的峰值应变不随有效损伤率的取值而改变。有效损伤率从 0 到 1 的取值不同,表明充填体处于不同的初始损伤状态,是由无损伤弹性体到完全损伤,承载能力逐渐降低,损伤增大理论应力整体逐渐降低。基于声发射特征信号得出的损伤本构模型为连续变化的函数,峰值应变不会随有效损伤率的变化而变化。

(4) 随着有效损伤率值增大,峰值应力前的理论应力曲线斜率减小。由于有效损伤率的大小可以体现试件损伤过程中弹塑性的变化程度,有效损伤率值大则试件的弹塑性增大,表现为理论应力—应变曲线在峰值应力前更加平缓。

4 结论

(1) 充填体不同破坏阶段中声发射信号的变化均不同,声发射信号的变化特点可以体现充填体损伤演化及裂隙萌生、发展、贯通的过程特征。试验中声发射振铃计数和能率的峰值均出现在充填体的弹性变形阶段。从弹性变形阶段到屈服阶段声发射信号逐渐减小,充填体内部出现较大裂纹,屈服阶段时声发射信号达到最小。通过声发射信号的变化可以推演出充填体损伤变化的情况,由此也可为声发射技术用于揭示充填体损伤演化机制提供理论依据。

(2) 将充填体损伤演化过程划分为损伤初期阶段、损伤弹性发展阶段、损伤发展阶段、峰后损伤阶段,损伤变量的变化趋势可以体现充填体在各个阶段损伤变化的情况。充填体损伤变化最快的阶段为损伤弹性发展阶段。

(3) 理论曲线峰值应力的出现滞后于试验曲线峰值应力,理论曲线的峰值应力和残余应力随着有效损伤率的增大而减小,理论峰值应变与试验峰值应变相同。

(4) 理论模型可以表征充填体在应力应变过程中损伤演化的变化,研究发现本文模型存在一定偏差,原因既有试验方面的影响,也有理论模型本身的不足。因此,需对理论模型进行改进,找到更合适的

模型的残余终值应力与试验终值应力近似相等。

综上所述,有效损伤率的取值在 0~1 之间,当趋于 0 时,其力学特性表征为一个线弹性体,此时弹性阶段贯穿于整个应力应变过程;当 a 为 1 时,表明充填体达到完全损伤; a 由 0 增加至 1 的过程中,充填体的损伤逐渐增加,理论曲线演化趋势逐步接近于试验曲线。由损伤本构模型可知,有效损伤率 a 取值不同,得到的理论应力值不同,本次试验当有效损伤率取值 0.8 时,理论峰值应力与试验峰值应力相等。

3.2 理论应力与试验应力产生差异的原因讨论

针对基于声发射特征信号的损伤本构方程,代入不同的有效损伤率则产生不同的理论曲线。下面对理论应力曲线与试验曲线产生差异的原

有效损伤率取值范围,同时提高声发射测试技术的精确度,建立更符合充填体实际损伤本构模型。

参考文献:

- [1] 孙光华,魏莎莎,刘祥鑫,等.胶结充填体受压性能的非均质细观损伤研究[J].化工矿物与加工,2015(5):41—44 (SUN Guanghua, WEI Shasha, LIU Xiangxin, et al. Study on heterogeneous micro-mechanics damage in compress performance of cemented filling body [J]. Industrial Minerals & Processing, 2015(5):41—44 (in Chinese))
- [2] 吴贤振,刘建伟,刘祥鑫,等.岩石声发射振铃累计计数与损伤本构模型的耦合关系探究[J].采矿与安全工程学报,2015(1):28—34,41(WU Xianzhen, LIU Jianwei, LIU Xiangxin, et al. Study on the coupled relationship between AE accumulative ring-down count and damage constitutive model of rock [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015(1):28—34,41(in Chinese))
- [3] 牛双建,冯文林,党元恒,等.单轴压缩条件下破裂岩样声发射及能耗特性试验研究[J].实验力学,2015,29(4):515—522 (NIU Shuangjian, FENG Wenlin, DANG Yuanheng, et al. Experiment study of acoustic emission and energy dissipation characteristics of cracked rock subjected to uniaxial compression [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 29(4):515—522 (in Chinese))
- [4] 吴刚,王德咏,翟松韬.单轴压缩下高温后砂岩的声发射特征[J].岩土力学,2012,11:3237—3242 (WU Gang, WANG Deyong, ZHAI Songtao. Acoustic emission characteristics of sandstone after high temperature under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 11:3237—3242(in Chinese))
- [5] 李庶林,尹贤刚,王泳嘉,等.单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(15):2499—2503 (LI Shulin, YIN Xiangang, WANG Yongjia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15):2499—2503(in Chinese))
- [6] 刘保县,黄敬林,王泽云,等.单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J].岩石力学与工程学报,2009(S1):3234—3238 (LIU Baoxian, HUANG Jinglin, WANG Zeyun, et al. Study on damage evolution and acoustic emission character of coal-rock under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009(S1):3234—3238(in Chinese))
- [7] 杨永杰,王德超,郭明福,等.基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究[J].岩石力学与工程学报,2014(1):98—104 (YANG Yongjie, WANG Dechao, GUO Mingfu, et al. Study of rock damage characteristics based on acoustic emission tests under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014(1):98—104(in Chinese))
- [8] 夏冬,杨天鸿,徐涛,等.浸水时间对饱水岩石损伤破坏过程中声发射特征影响的试验[J].煤炭学报,2015(S2):337—345 (XIA Dong, YANG Tianhong, XU Tao, et al. Experimental study on AE properties during the damage process of water-saturated rock specimens based on time effect[J]. Journal of China Coal Society, 2015 (S2):337—345(in Chinese))
- [9] 纪洪广,刘翔宇,曾鹏,等.高强混凝土单轴压缩声发射频率特征试验研究[J].应用声学,2016(3):248—254 (JI Hongguang, LIU Xiangyu, ZENG Peng, et al. Experimental studies of frequency characteristics of the acoustic emission of the high-strength concrete under the uniaxial compression process[J]. Journal of Applied Acoustics, 2016(3):248—254(in Chinese))
- [10] 胡京涛,赵奎,胡慧明,等.尾砂胶结充填体声发射特征的分形分析[J].有色金属科学与工程,2011(2):78—82 (HU Jingtao, ZHAO Kui, HU Huiming, et al. On the characteristics of acoustic emission of cemented tailings fill based on fractal theory[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2011(2):78—82(in Chinese))
- [11] 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(5):788—794 (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(5):788—794(in Chinese))
- [12] 余乐兴.不同粒级充填体单轴压缩条件下力学性能及声发射特性研究[D].江西理工大学,2015 (YU Lexing. The study on the mechanical properties and acoustic emission characteristics of different particle size under the condition of uniaxial compression[D]. Jiangxi University of Science and Technology, 2015(in Chinese))

- [13] 谢勇, 何文, 刘贤俊, 等. 拉伸试验中充填体声发射特性及数值模拟研究[J]. 有色金属科学与工程, 2015(3):94—99 (XIE Yong, HE Wen, LIU Xianjun, et al. Acoustic emission characteristics for filling body during tensile tests and its numerical simulation[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2015(3):94—99(in Chinese))
- [14] 王晓军, 卓毓龙, 陈辰, 等. 块石胶结充填体破坏过程主要破坏材料研究[J]. 矿业研究与开发, 2016(2):43—47 (WANG Xiaojun, ZHOU Yulong, CHEN Chen, et al. Study on the main harmful material under failure processes of blocky rock cemented filling body[J]. Mining Research and Development, 2016(2):43—47 (in Chinese))
- [15] 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(6):923—928, 935 (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(6):923—928, 935(in Chinese))
- [16] 樊军伟, 唐礼忠. 声发射率和能率在岩石失稳破坏预测中的应用[J]. 金属矿山, 2010(7):140—142 (FAN Junwei, TANG Lizhong. Application of acoustic emission rate and energy rate in rock failure[J]. Metal Mine, 2010(7):140—142 (in Chinese))
- [17] 秦虎, 黄滚, 王维忠. 不同含水率煤岩受压变形破坏全过程声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012(6):1115—1120 (QIN Hu, HUANG Gun, WANG Weizhong. Experimental study of acoustic emission characteristics of coal samples with different moisture contents in process of compression deformation and failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012(6):1115—1120 (in Chinese))
- [18] 倪金刚, 陶春虎 译. Lemaitre 损伤力学教程[M]. 北京: 科学出版社, 1996 (NI Jingang, TAO Chunhu, translation. Lemaitre damage mechanics tutorial [M]. Beijing: Science Press, 1996(in Chinese))

On the Damage Evolution of Fillings Based on Acoustic Emission Characteristics

SUN Guang-hua^{1,2}, WEI Sha-sha^{1,2}, LIU Xiang-xin^{1,2}

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063000, Hebei, China;

2. Hebei Province Key Laboratory of Mining Development and Safety Technique, Tangshan 063000, Hebei, China)

Abstract: In order to investigate the relation between acoustic emission signals and mesoscopic damage of fillings, to investigate characteristics of acoustic emission counts, energy and stress variation with time, to further reveal the damage evolution process of fillings, mechanical experiment of acoustic emission characteristics of unclassified tailing cemented fillings was carried out. Introducing damage mechanics theory and effective damage ratio, the damage variable was obtained based on cumulative event ratio of acoustic emission; then, the constitutive equation of fillings damage was established. Experimental results show that acoustic emission counts and energy ratio vary on different stages in evolution progress and are closely related with the inner porosity and crack damage evolution process. On the early elastic stage, emission counts reach the maximum value, and then gradually reduce to the minimum on yield stage. There is a negative relation between the value of effective damage ratio and theoretical peak stress. Comparing with experimental stress peak value, the theoretical stress peak value appears at the location, where the strain is bigger. Filling is a high damage medium, when effective damage ratio is approaching 1, variation trend of theoretical model curve and experimental curve is similar, which indicates that this model is able to better describe stress-strain relation of fillings.

Keywords: fillings; acoustic emission; damage evolution; effective damage ratio