

文章编号:1001-4888(2019)06-1053-08

充填体声发射分形特征及损伤演化试验研究^{*}

李杨^{1,2}, 孙光华^{1,2}, 刘祥鑫^{1,2}, 徐晓冬^{1,2}, 梁学健^{1,2}

(1. 华北理工大学矿业工程学院, 河北唐山 063210; 2. 河北省矿业开发与安全技术重点实验室, 河北唐山 063210)

摘要: 为探究不同配比胶结充填体声发射分形特征与损伤演化间的耦合关系, 量化分析充填体损伤度, 本文开展了胶结充填体试样的单轴压缩声发射试验。通过对比剖析声发射信号分形特征, 归纳出各配比充填体的破坏形式, 并拟合各破坏类型充填体的声发射累计能率曲线, 推导其与应变的耦合关系, 借助连续损伤力学及数理统计理论建立基于累计声发射能率的损伤本构方程, 并对其进行验证。研究表明, 充填体的声发射特征与应力—应变力学响应具有密切联系, 其损伤破坏都是从整体无序逐渐向局部有序发展的。随着灰砂比不断减小, 充填体的破坏模式逐渐从脆性向延性转化发展。通过试验验证, 不同破坏类型充填体分别建立的损伤本构方程准确度较高, 可实现充填体的损伤量化计算。

关键词: 声发射; 损伤演化; 分形特征; 破坏模式; 本构方程

中图分类号: TD315 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-152

0 引言

充填体作为充填采矿技术的关键单元^[1,2], 受载后的损伤演化特征十分复杂。应用声发射序列的分形特征能较好地表征损伤过程^[3], 基于此, 学者们对声发射特征序列的分形特征进行了大量研究。张黎明^[4]等分析了大理岩卸围压变形破坏全过程的声发射特征及其分形特征, 得出分形维数陡增为岩石破坏前兆的结论。丛宇^[5]等开展不同路径下大理岩加、卸荷载试验, 结合分形理论, 揭示了不同路径下大理岩破坏前兆的变化规律。高保彬^[6]等研究了含水煤样破裂过程声发射分形特征, 得出了含水煤岩破坏前声发射分形维数的变化规律。沈忠^[7]等对泥岩、粉砂岩、页岩开展了单轴压缩声发射试验, 分析得出三类岩石分形维数的演化表现为“波动—上升—有起伏的整体下降”的链式模式。

声发射现象的产生意味着材料内部某单元发生了损坏^[8], 充填体声发射特征参数与其损伤演化本构方程必然存在某种联系, 为得到两者联系, 孙光华^[9]等结合损伤力学理论, 引入有效损伤率, 推导出基于声发射累计事件率的损伤本构方程。邱景平^[10]等利用损伤力学建立了充填体峰值前的损伤本构方程。刘志祥^[11]等分析了不同灰砂比充填体的变形破坏特征并建立了损伤本构方程。目前, 对于充填体损伤研究仍集中于不同加载方向、加载手段及声发射特征参数对应力学参量构建本构关系等方面, 对于模型建立后基于配比变化产生的充填体的脆-延性特征变化研究尚不多见。

本文以胶结充填体为研究对象, 制备灰砂比为 1:6、1:10、1:15 的充填体试样, 开展单轴压缩试验, 同时采集加载过程中应力、应变及声发射特征参数。通过对比不同配比充填体声发射能率分形特征, 分析出不同配比充填体脆性与延性的损伤破坏类型, 并推导了不同破坏类型充填体声发射累计能率

^{*} 收稿日期: 2018-06-26; 修回日期: 2018-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51604117); 河北省自然科学基金项目(E2016209224); 华北理工大学研究生创新项目(2017S19)

通讯作者: 孙光华(1977—), 男, 博士, 教授。主要从事采矿工艺与技术、矿山岩石力学方向研究。Email: czsgh110@163.com

与应力及损伤变量本构关系,归纳了不同配比充填体的损伤演化规律。

1 单轴加载下充填体声发射试验

试验采用标准条件下养护 28 天的尾砂充填体试样,其基本信息如表 1 所示。为保证加载过程中试样受载均匀,试验前利用砂纸对试验表面进行打磨保证其平整。试样侧面各安装 2 个声发射传感器,采用凡士林作耦合剂排除空气,试验装置如图 1。采用美国物理声学公司生产的 PCI-2 型声发射系统与 TAW-3000 伺服压力试验机,并保证声发射采集系统与加载系统同步运行,实时采集加载过程中声发射特征参数。

表 1 充填体基本信息表

Tab. 1 Basic information table of filling body

配比	编号	尺寸/mm	加载方式	加载速率/(mm/min)
1 : 6	1 : 6-1 [#]	200.0×200.6×199.3	等位移	0.15
	1 : 6-2 [#]	200.5×199.3×200.6	等位移	0.15
	1 : 6-3 [#]	199.8×200.2×200.2	等位移	0.15
1 : 10	1 : 10-1 [#]	200.4×200.0×199.8	等位移	0.15
	1 : 10-2 [#]	199.5×200.5×200.0	等位移	0.15
	1 : 10-3 [#]	199.5×200.6×200.3	等位移	0.15
1 : 15	1 : 15-1 [#]	200.1×200.0×200.1	等位移	0.15
	1 : 15-2 [#]	200.2×199.8×200.5	等位移	0.15
	1 : 15-3 [#]	200.2×199.8×199.6	等位移	0.15

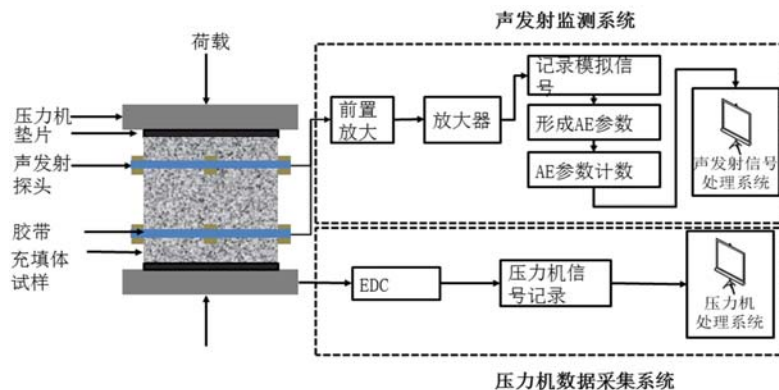


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test device

2 声发射能率分形特征研究

2.1 分形维数的计算方法

声发射能率序列对应着一个容量为 n 的序列集,根据序列集构成一个 m 维的相空间($m < n$),之后移取 m 个数,以此构建 $N = n - m + 1$ 维向量,关联维数的计算公式如下:

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} (\ln C(r) / \ln r) \quad (1)$$

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i \neq j}^N H(r - |x_i - x_j|) \quad (2)$$

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$r = k \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^N |x_i - x_j| \quad (4)$$

式中, D 为分形维数; $C(r)$ 为关联函数; $H(x)$ 为跳跃函数; $|x_i - x_j|$ 为相空间内两向量的距离; r 为量测尺度; k 为比例系数。

由文献[12]可知, 当比例系数 $k \leq 0.1$ 时, 声发射特征序列的分形特征不明显。取 $k = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ 计算相应的量测尺度之后通过函数 $\ln C(r) = D \ln r + b$ 来拟合这些离散点确定最后的分形维数 D 。

2.2 相空间维数的确定

相空间维数 m 对关联维数具有一定的影响, 若想探究不同配比充填体声发射能率分形特征的异同, 需选取一致的相空间维数进行分析, 如图 2 所示。由图可知随着相空间维数的增大, 分形维数的变化呈现出一种先线性增长后趋于稳定的趋势, 当相空间维数 $m \in [2, 9]$ 时, 分形维数呈线性增长, 因此本文选取 $m = 6$ 来进行不同配比充填体损伤全过程分形特征的分析。

2.3 不同配比充填体破坏全过程声发射能率分形特征

由文献[13]可知, 相同配比充填体的损伤演化模式、声发射特征及其分形特征基本相似, 限于篇幅, 本文选取编号为 $1:6-2^\#$ 、 $1:10-3^\#$ 及 $1:15-2^\#$ 的充填体试样数据进行分析, 并探究不同配比充填体分形维数的差异, 揭示灰砂比与充填体损伤形式的关系。试样声发射能率的分形曲线如图 3 所示, 由图可知不同配比充填体分形曲线存在差异, 但其变化趋势具有一定的类似性, 分形曲线整体上经历下降—上升—下降—小幅波动的过程, 峰值对应分维值的最小值。

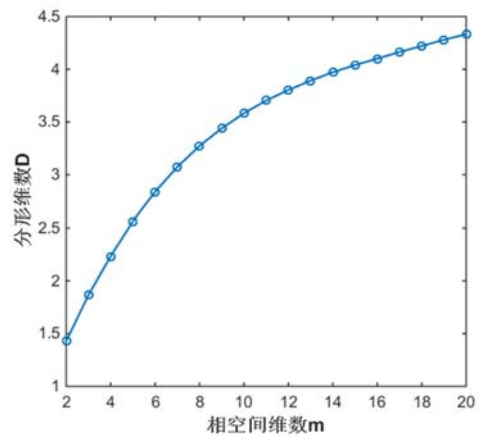


图 2 相空间维数与分形维数关系图

Fig. 2 Relationship between phase space dimension and fractal dimension

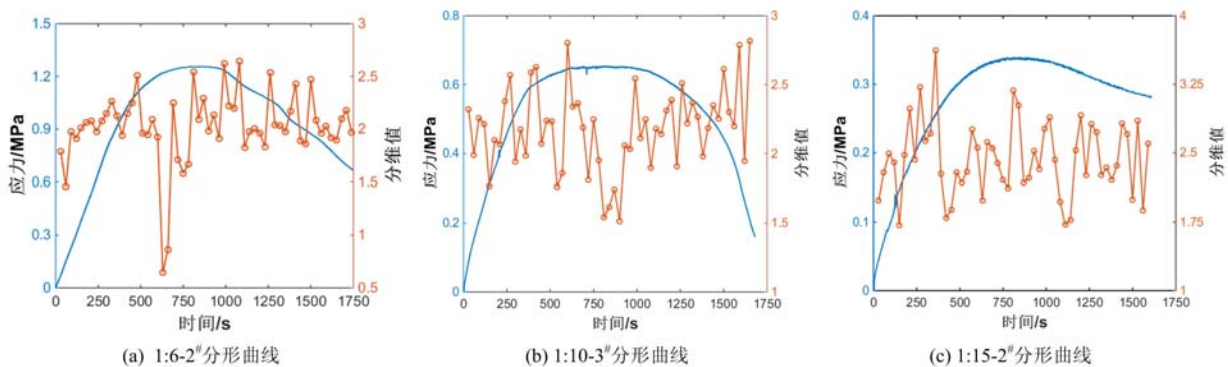


图 3 不同配比充填体破坏全过程分形曲线

Fig. 3 The fractal process of different proportions of filling body fracture process

分维值侧面表征着试样内部损伤复杂度。初始压密期, 试样内部裂隙主要以闭合为主, 损伤逐渐减小并呈现简单化, 试样分形维数呈下降趋势; 弹性-塑性阶段前期, 内部裂隙萌生、发展, 基于各向异性试样单元承载能力不同, 引起内部多重裂隙呈均匀分布, 因此损伤呈现出一种整体无序性, 分形维数逐渐增大; 塑性-峰后破坏期, 试样损伤以内部裂隙汇集和贯通为主, 裂隙逐步向某一条主裂隙汇集, 呈现局部有序性, 峰值期裂隙实现贯通, 形成主破裂带, 分维值达到最小值; 残余期, 试样内部损伤以裂隙相互挤压碰撞为主, 分形曲线呈波动性, 试样最终完全失稳破坏。

随着灰砂比减小, 分维值呈上升趋势, 但峰值应力附近分维值骤降现象并不明显, 表明不同配比充填体的损伤破坏形式存在着一定差异。灰砂比 $1:6$ 的充填体强度大, 受载过程中呈脆性破坏, 且峰值应力时裂隙汇集贯通迅速, 分维值出现大幅度下降, 试样内部损伤形式简单, 分维值较小; 灰砂比 $1:10$

的充填体强度较大,在受载过程中呈脆-延性破坏,峰值应力时分维值无骤减现象,随着加载时间的推移,分维值下降并保持较大数值,试样损伤较复杂;灰砂比 1 : 15 的充填体强度较小,在受载过程中呈延性损伤,在峰值应力时,分维值达到极小值,随加载时间的延长呈波动下降趋势。最小分维值的延后性代表着试样损伤的延后性,分维值较大,内部损伤复杂。

根据声发射能率的分形特征可知,不同配比充填体的损伤破坏特征不同,依据各损伤破坏特征研究充填体损伤演化规律具有一定的理论意义。

3 基于累计能率的充填体本构方程研究

3.1 声发射能率与应变耦合关系

采用等位移加载方式,应变和加载时间成正比例关系,即应变与时间的关系满足下式:

$$\varepsilon = kt \quad (5)$$

式中, ε 为应变; k 为应变率,根据应变的物理意义、充填体的几何特征及加载速率可得出应变率 $k = 1.25 \times 10^{-5}$ 。

拟合充填体声发射累计能率与时间试验数据可知,不同配比下的试样累计声发射能率与时间之间的函数关系不同,以试样 1 : 6 -2[#]、1 : 10 -3[#] 及 1 : 15 -2[#] 为例分析不同破坏类型下充填体累计声发射能率—时间变化,如图 4。

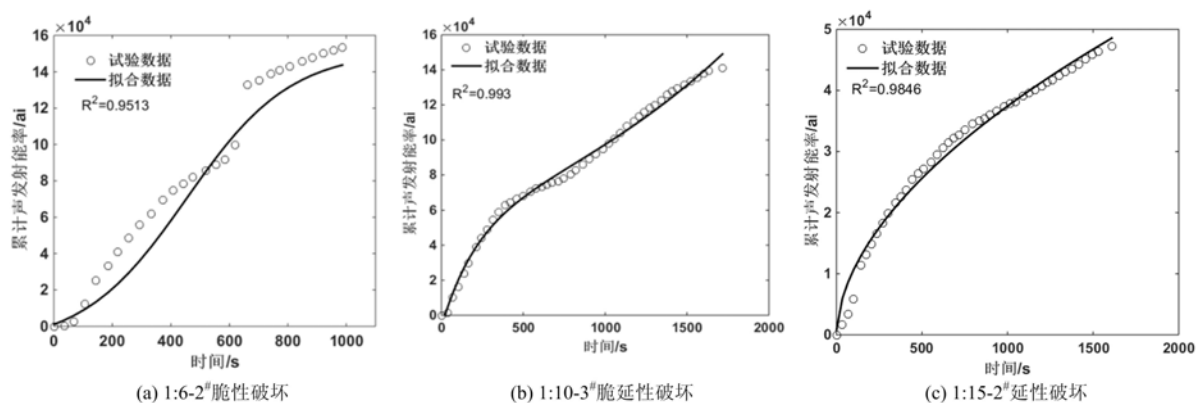


图 4 不同破坏类型充填体累计声发射能率随时间变化曲线

Fig. 4 Cumulative acoustic emission energy rate of different failure types of filling body changing curve with time

对于不同配比的充填体试块,其累计声发射能率与时间的函数关系可分为三类:

(1) 灰砂比为 1 : 6 时,充填体的破坏属于脆性破坏,对试验采集数据进行拟合可知,累计声发射能率与时间的关系可用 S 型增长函数表示:

$$N = \frac{a}{1 + ((a/b) - 1) \times \exp(-c \times \varepsilon/k)} + d \quad (6)$$

(2) 灰砂比为 1 : 10 时,充填体的破坏处于由脆性破坏向延性破坏的过渡阶段,充填体损伤演化过程较为复杂,累计声发射能率与时间的关系可用二阶指数函数表示,其关系式为

$$N = a \times \exp(b \times t) + c \times \exp(d \times t) \quad (7)$$

(3) 灰砂比为 1 : 15 时,充填体破坏属于延性破坏,比对图 4(c)可得声发射累计能率与时间的演化关系为

$$N = a \times t^b \quad (8)$$

式(6)~(8)中, a 、 b 、 c 、 d 均为与充填体声发射特征相关的常量。将式(5)与式(6)~(8)结合可得不同破坏类型充填体累计声发射能率与应变的耦合关系如表 2 所示。

3.2 累计声发射能率与应力、损伤变量耦合关系

损伤变量 D 反映材料损伤程度,Ohtsu^[14]曾提出连续损伤力学并建立了相应模型,如下式:

$$\sigma = E\varepsilon(1 - D) \quad (9)$$

式中, σ 为应力; ϵ 为应变; D 为损伤变量; E 为材料的弹性模量。

表2 不同破坏类型充填体累计声发射能率与应变的耦合关系

Tab. 2 Coupling relationship between cumulative acoustic emission rate and strain of different failure types

灰砂比	破坏类型	累计声发射能率与应变的耦合关系
1:6	脆性破坏	$N = \frac{a}{1 + ((a/b) - 1) \times \exp(-c \times \epsilon/k)} + d$
1:10	脆延性破坏	$N = a \times \exp(b \times \epsilon/k) + c \times \exp(d \times \epsilon/k)$
1:15	延性破坏	$N = a \times (\epsilon/k)^b$

徐涛^[15]等认为岩石微元强度服从 Weibull 分布, 即

$$f(\epsilon) = \frac{p}{q} \epsilon^{q-1} \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{q}\right)^p\right] \quad (10)$$

式中, p 和 q 是与材料几何和物理属性相关的常数。

充填料损伤程度与内部各微元损伤概率密度有关, 损伤变量 D 与微元失效密度函数满足下式:

$$D = \int_0^\epsilon f(\epsilon) d\epsilon = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{q}\right)^p\right] \quad (11)$$

综合式(9)和式(11), 可得材料应力—应变本构方程

$$\sigma = E \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{q}\right)^p\right] \quad (12)$$

谢星^[16]等建立单轴应力状态下材料损伤本构模型参数确定的方法, 即 p 、 q 满足下式:

$$p = \frac{1}{\ln(E \epsilon_p / \sigma_c)}, \quad q = \frac{\epsilon_p}{\sqrt[p]{1/p}} \quad (13)$$

式中, ϵ_p 为峰值应变; σ_c 为峰值应力。

将式(12)及式(13)分别和表2所示不同破坏类型的累计声发射能率与应变的耦合关系结合, 得出基于累计声发射能率不同破坏类型的充填体损伤本构模型如下, 由于脆-延性破坏较为复杂且二阶指数函数的解不唯一, 无法形成通式, 这里不做讨论。

(1) 脆性破坏

$$\sigma = E \frac{k}{c} \ln \frac{(a-b)(N-d)}{ab-b(N-d)} \exp\left[-\left(\frac{\frac{k}{c} \ln \frac{(a-b)(N-d)}{ab-b(N-d)}}{q}\right)^p\right] \quad (14)$$

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\frac{k}{c} \ln \frac{(a-b)(N-d)}{ab-b(N-d)}}{q}\right)^p\right] \quad (15)$$

(2) 延性破坏

$$\sigma = Ek \times \sqrt[b]{\frac{N}{a}} \exp\left[-\left(\frac{k \times \sqrt[b]{\frac{N}{a}}}{q}\right)^p\right] \quad (16)$$

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{k \times \sqrt[b]{\frac{N}{a}}}{q}\right)^p\right] \quad (17)$$

3.3 模型讨论与验证

为验证模型合理性, 将试验中充填体力学特征信息带入本构方程求出拟合参数及威布尔分布参数如表3, 并对不同破坏类型应力及损伤度与累计声发射能率试验与模型进行比对, 如图5和图6所示。

(1) 脆性破坏: 由图5(a), 脆性破坏下充填体应力—累计能率试验曲线和模型曲线趋势基本一致, 且模型计算出的损伤度与试验所得损伤度的趋势具有较好的一致性, 比对图6(a)可知充填体损伤度演化符合指数增长。原因是充填体试样强度较大, 受载后裂隙间相互错动、挤压不断扩大内部损伤规模, 使得其内部损伤增长速度不断变大, 试样损伤演化过程呈现脆性特点, 因此该模型具有合理性。

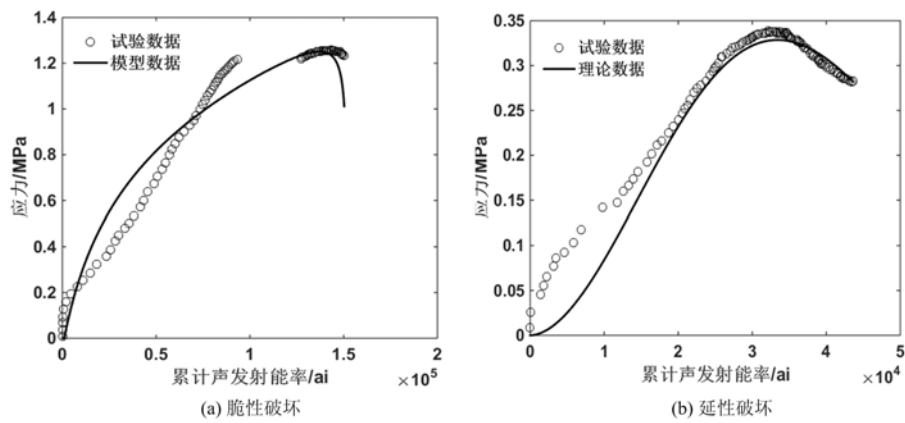


图 5 不同破坏类型下累计声发射能率与应力模型结果与试验结果对比图
Fig. 5 Comparison of cumulative acoustic emission energy rate and stress model results with experimental results under different failure types

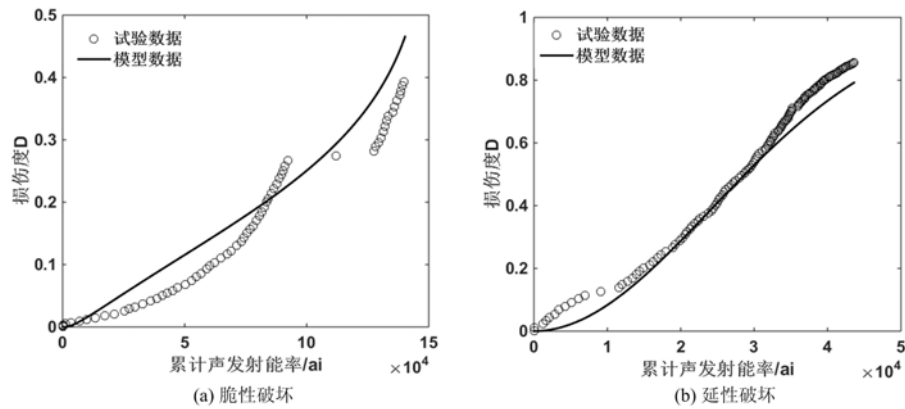


图 6 不同破坏类型下累计声发射能率与损伤度模型结果与试验结果对比图
Fig. 6 Comparison of model results of cumulative acoustic emission energy rate and damage degree with experimental results under different failure types

(2) 延性破坏:由图 5(b)及图 6(b)可见,延性破坏下充填体的应力—累计能率曲线及损伤度—累计能率曲线与试验曲线趋势一致且吻合度较高,整体发展过程呈现先加速后减速趋势。原因是灰砂比较小,充填体试样强度与承载力较弱。加载至峰值前,试样内部损伤主要由裂隙的萌生、扩展主导,基于内部非均匀性和各向异性引起裂隙均匀分布;峰值应力时,试样内部裂隙愈发汇集,相互作用力愈强。但试样强度较低,裂隙相互挤压碰撞需要一定的时间才可实现损伤的扩大,因此导致损伤演化速率逐渐下降,呈现明显延性特征,该模型能准确合理地描述延性破坏充填体的损伤演化过程。

根据声发射序列的分形特征划分材料破坏的类型,对不同破坏类型的充填体建立不同的损伤本构方程能以量化的方式描述充填体的损伤过程,利用本构模型计算出的充填体损伤度及应力与试验数据基本吻合,且能表征出充填体的破坏类型,模型具有较高的合理性和准确性。

表 3 不同配比充填体本构方程参数表

配比	编号	威布尔分布参数		拟合参数			
		p	q	a	b	c	d
1 : 6	1 : 6-2 [#]	1.756546	0.014973	1.621×10^5	1.17×10^4	0.005624	-1.069×10^4
1 : 10	1 : 10-3 [#]	1.169922	0.01155	5.256×10^4	0.006102	6.92×10^4	-0.05463
1 : 15	1 : 15-2 [#]	1.074529	0.010852	856.9	0.5468	—	—

4 结论

(1) 声发射序列分形特征表明, 充填体损伤演化过程呈现整体无序向局部有序发展, 分维数骤降表征主破裂形成。胶结充填体破坏变形实质为荷载引起的裂隙萌生、错动挤压及再分布的汇集发展过程。

(2) 灰砂比由 1:6 递减至 1:10、1:15 时, 胶结充填体损伤破坏形式逐渐从脆性向延性递进转变。配比 1:10 时, 充填体表现出较强的脆-延性过渡期不稳定性, 损伤演化特征复杂, 无法得到量化通论。

(3) 利用试验所得数据, 通过拟合的方式获取不同破坏类型充填体累计振铃计数与应变的映射关系, 并将其与连续损伤力学、微破裂失效服从 Weibull 假设相结合, 推导出不同破坏形式充填体的损伤本构关系。通过验证可知脆性与延性模型具有较高精度, 可实现充填体在外荷载作用下的损伤演化过程的量化计算。

参考文献:

- [1] 徐恒, 王贻明, 吴爱祥, 等. 缓倾斜破碎矿床上向上进路膏体充填采矿技术[J]. 金属矿山, 2016(8):12—18 (XU Heng, WANG Yiming, WU Aixiang, et al. Upward drift paste backfill mining technique in the gently inclined and broken ore deposit[J]. Metal Mine, 2016(8):12—18 (in Chinese))
- [2] 徐恒, 王贻明, 吴爱祥, 等. 基于尖点突变理论的充填体下采空区安全顶板厚度计算模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3):579—586 (XU Heng, WANG Yiming, WU Aixiang, et al. A computational model of safe thickness of roof under filling body based on cusp catastrophe theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3):579—586 (in Chinese))
- [3] 高保彬, 李回贵, 李林, 等. 同组软硬煤煤样声发射及分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2):3498—3504 (GAO Baobin, LI Huigui, LI Lin, et al. Study of acoustic emission and fractal characteristics of soft and hard coal samples with same group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2):3498—3504 (in Chinese))
- [4] 张黎明, 任明远, 马绍琼, 等. 大理岩卸围压破坏全过程的声发射及分形特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1):2862—2867 (ZHANG Liming, REN Mingyuan, MA Shaoqiong, et al. Acoustic emission and fractal characteristics of marble during unloading failure process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1):2862—2867 (in Chinese))
- [5] 丛宇, 冯夏庭, 郑颖人, 等. 不同应力路径大理岩声发射破坏前兆的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7):1193—1201 (CONG Yu, FENG Xiating, ZHENG Yingren, et al. Experimental study on acoustic emission failure precursors of marble under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 38(7):1193—1201 (in Chinese))
- [6] 高保彬, 李回贵, 李化敏, 等. 含水煤样破裂过程中的声发射及分形特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(4):665—670, 676 (GAO Baobin, LI Huigui, LI Huamin, et al. Acoustic emission and fractal characteristics of saturated coal samples in the failure process[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(4):665—670, 676 (in Chinese))
- [7] 沈忠, 付小敏, 黄兴建, 等. 软岩声发射序列分形特征研究[J]. 中国测试, 2016, 42(6):9—13 (SHEN Zhong, FU Xiaomin, HUANG Xingjian, et al. Study on the fractal characteristics of acoustic emission sequence of soft rock[J]. China Measurement & Test, 2016, 42(6):9—13 (in Chinese))
- [8] 李浩然, 杨春和, 赵维刚, 等. 盐岩三轴压缩破坏与声波声发射特征试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(9):2458—2466, 2476 (LI Haoran, YANG Chunhe, ZHAO Weigang, et al. Experimental studies of failure characteristics and evolution laws of ultrasonic velocity and acoustic emission for salt rock under triaxial loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9):2458—2466, 2476 (in Chinese))
- [9] 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—144 (SUN Guanghua, WEI Shasha, LIU Xiangxin. On the damage evolution of fillings based on acoustic emission characteristics[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(1):137—144 (in Chinese))
- [10] 邱景平, 杨蕾, 邢军, 等. 充填体损伤本构模型的建立及其强度的确定方法[J]. 金属矿山, 2016(5):48—51

- (QIU Jingping, YANG Lei, XING Jun, et al. Establishment of backfill's damage constitutive model and its strength determination[J]. Metal Mine, 2016(5):48—51 (in Chinese))
- [11] Zhixiang LIU, Ming LAN, Siyou XIAO. Damage failure of cemented backfill and its reasonable match with rock mass[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(3):954—959.
- [12] 吴贤振, 刘祥鑫, 梁正召, 等. 不同岩石破裂全过程的声发射序列分形特征试验研究[J]. 岩土力学, 2012(12): 3561—3569 (WU Xianzhen, LIU Xiangxin, LIANG Zhengzhao, et al. Experimental study of fractal dimension of AE serials of different rocks under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012(12):3561—3569 (in Chinese))
- [13] 谢勇. 单轴压缩与劈裂破坏过程中充填体声发射特性研究[D]. 江西理工大学, 2015 (XIE Yong. Research on acoustic emission characteristics of backfill with uniaxial compression and splitting failure process[D]. Jiangxi University of Science and Technology, 2015 (in Chinese))
- [14] Ohtsu M. Acoustic emission characteristics in concrete and diagnostic application[J]. Acoustic Emission, 1987, 6 (2):100—107.
- [15] 徐涛, 唐春安, 张哲, 等. 单轴压缩条件下脆性岩石变形破坏的理论、试验与数值模拟[J]. 东北大学学报, 2003 (1):87—90 (XU Tao, TANG Chunan, ZHANG Zhe, et al. Theoretical, experimental and numerical studies on deformation and failure of brittle rock in uniaxial compression[J]. Journal of Northeastern University, 2003(1):87—90 (in Chinese))
- [16] 谢星, 王东红, 赵法锁. 基于 Weibull 分布的黄土状土的单轴损伤模型[J]. 工程地质学报, 2013, 21(2):317—323 (XIE Xing, WANG Donghong, ZHAO Fasuo. Weibull random distribution based damage constitution model of loessial soils under uniaxial compression[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(2):317—323 (in Chinese))

Experimental study on fractal characteristics and damage evolution of filling acoustic emission

LI Yang^{1,2}, SUN Guang-hua^{1,2}, LIU Xiang-xin^{1,2}, XU Xiao-dong^{1,2}, LIANG Xue-jian^{1,2}

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;

2. Hebei Province Key Laboratory of Mining Development and Safety Technique, Tangshan 063210, China)

Abstract: In order to study the coupling relationship between the fractal characteristics and the damage evolution of acoustic emission for cemented filling body with different ratio of tailings, and to quantitatively analyze the damage degree of filling body, the uniaxial compression acoustic emission test of stope filling sample has been carried out. By comparing and analyzing the fractal characteristics of acoustic emission signals, the failure forms of each proportion filling body are summed up, the curve of acoustical emission accumulative energy rate of each failure type filling body is fitted, and the coupling relation with strain is deduced. Based on the theory of continuous damage mechanics and mathematical statistics, the damage constitutive equation based on accumulative acoustic emission rate is established and verified. The results show that the acoustic emission characteristics of stope filling body are closely related to the stress-strain response, and the damage of the stope filling body develops from the global disorder to the local order gradually. With the decrease of the ratio of ash to sand, the failure mode of the filling body gradually changes from brittleness to ductility. The experimental results verify that the damage constitutive equations established by different failure types of backfill are accurate and can be used to calculate the damage of backfill and provide a theoretical basis for damage assessment of backfill.

Keywords: acoustic emission; damage evolution; fractal feature; failure mode; constitutive equations