

文章编号: 1001-4888(2023)04-0496-11

充填体真三轴加卸荷全过程 声发射序列分形特征试验研究*

马春地^{1,2,3,4}, 孙光华^{1,3,4}, 冯禹凡⁵, 刘晨阳^{1,3,4}, 王玥^{1,3,4}

(1. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北唐山 063210; 2. 华北理工大学 以升创新教育基地, 河北唐山 063210; 3. 华北理工大学 河北省矿业开发与安全技术重点实验室, 河北唐山 063210; 4. 华北理工大学 河北省矿山绿色智能开采技术创新中心, 河北唐山 063210; 5. 中冶沈勘工程技术有限公司, 辽宁沈阳 110169)

摘要: 针对复杂应力条件下充填体因开采导致的瞬态裸露破坏失稳问题, 开展充填体真三轴加载单向卸荷试验, 并结合声发射监测手段及关联维数理论研究充填体因加-卸荷引起的内部损伤特征演化规律。研究结果如下: 在不同应力路径的真三轴条件下, 充填体均产生 X 型共轭剪切破坏, 且剪切破坏程度受应力载荷影响较大; 基于声发射振铃计数率的关联维数能够较好地描述试验过程中充填体内部结构演变过程, 且峰后卸荷时呈先增大后减小的规律; 当声发射振铃计数率进入平静期且关联维数进入快速下降阶段时, 充填体进入失稳阶段。本文研究成果可以为矿石崩落致使充填体侧面裸露时的破坏研究提供参考。

关键词: 真三轴; 单向卸荷; 声发射; 关联维数; 振铃计数率

中图分类号: TD315 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-188

0 引言

利用充填采矿技术将地表大量矿山尾废充填入井下采空区, 可有效解决地表尾废堆存难题, 同时也能处理井下空区、控制采场地压, 从而实现安全、高效、绿色开采^[1-3]。充填料浆注入空区沉降硬化后, 形成充填体-矿(岩)柱系统, 在矿岩的围压作用下, 矿柱及充填体均处于三向受力状态, 此时充填体将吸收矿柱储存的应变能, 可改善岩柱的承载环境, 提高矿柱承载能力, 从而保障采场的安全。然而, 随着矿体的回采, 因矿石崩落致使充填体因侧面瞬间裸露而产生卸荷, 极易诱发充填体破坏失稳, 并对采场的安全产生影响。因此, 准确描述三向受力状态下充填体侧面卸荷导致的变形及失稳破坏规律是安全、高效开采的有效理论保障。

众多学者在针对充填体单向载荷、动载荷、循环载荷等开展了大量研究^[4-9]。为模拟实际充填采场中充填体所受复杂应力情况, 徐文彬等^[10-11]对三轴条件下充填体应力应变及能量耗散特征进行了分析; Sun 等^[12]通过对不同配比充填体进行真三轴单面卸荷试验, 建立了单面卸荷充填体力学模型并进行了验证。由于在开采充填体相邻矿柱时会发生爆破、矿石搬运等, 进而导致围岩应力二次分布, 所以其过程可视对充填体进行不同方式的加-卸荷过程, 针对此问题部分学者也进行了相应研究。宋卫东等^[13]对分层充填体进行三轴循环加-卸荷, 并基于损伤理论探究了充填体各部分能量与填充次数之间的关系。张友锋等^[14]对充填体单轴压缩和先三轴后单轴压缩试验, 分析了其能耗特征及破坏模式。王

* 收稿日期: 2022-08-02; 修回日期: 2022-09-01

基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2016209224); 河北省级大学生创新训练计划项目(X2020050); 河北省大中学生科技创新能力培育专项(2021H020910)

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

明旭等^[15]对矿岩-充填体组合模型进行不同应力路径的类三轴加载,研究了其细观破坏形式,并通过数值模拟进行了验证;Liu等^[16]通过真三轴加载-单面卸荷试验建立了基于突变理论的充填体失稳前兆预警模型。然而在实际工程中,充填体处于三向应力状态,且由于工程作业的影响,其围岩应力变化大小及速率较为复杂,目前能量耗散及力学变化理论尚无法全部表征充填体稳定性演化趋势,故应对充填体进行更深层次的研究。

分形维数理论作为描述充填体内部演变过程的方法已被业界人士广泛使用^[17-20]。徐晓冬等^[21]通过分析充填体单轴压缩破坏过程的分形维数得出了其破坏前兆特征。张黎明等^[22]通过对大理岩进行真三轴声发射试验,分析了其卸围压破坏过程中的频率特征与声发射分形维数变化特征,认为当其分形维数陡增时,表明岩石即将发生破坏。李杨等^[23]基于充填体在破坏过程中分形值的变化归纳了不同配比下充填体的破坏形式。

综上所述,目前针对充填体单向应力或二向应力中充填体破坏特征及失稳前兆已开展了大量研究,在此基础上,开展三向应力状况下充填体破坏特征及内部演化规律研究显得尤为重要。本文对充填体进行真三轴不同应力路径的加-卸荷试验,并利用声发射监测技术、分形维数理论,通过对充填体内部结构特征演化开展系统论述,以探究三向应力下充填体卸荷破坏特征。

1 试验方案

1.1 充填体试件制备

本试验骨料为冀东地区铁尾砂,胶结剂为42.5#复合硅酸盐水泥,以灰砂比1:8、质量浓度75%配制充填料浆,浇筑于尺寸为150mm的方形模具中,24h脱模后放入恒湿恒温养护箱养护28d后制成充填体试块,进而开展系列加-卸荷试验。

1.2 试验设备

试验利用华北理工大学岩石力学实验室QKX-YB200真三轴岩石试验机(图1)开展,该设备由控制系统、载荷框架装置、压力室等部分组成,并搭载了数字电压伺服装置。声发射检测装置采用美国PCI-II型声发射三维定位实时监测系统,该系统具有较好的采样能力和信号处理精度。运用6个微型声发射传感器对试样加-卸荷全过程进行检测,工作频率为100kHz~600kHz,前置放大器触发和增益阈值为45dB。



图1 QKX-YB200真三轴岩石试验机

Fig. 1 QKX-YB200 true triaxial rock testing machine

1.3 试验方法

在实际工程中由于充填体所处环境不同,且受爆破、矿石运搬等影响,会导致其围压变化速率有较大差异,故本文主要研究充填体在峰前快速卸荷、峰前慢速卸荷、峰后快速卸荷、峰后慢速卸荷4种应力路径下的破坏机制,并结合声发射监测系统,对充填体内部破坏特征演化规律进行深入探索。

进行真三轴压缩试验以确定充填体峰值强度,以便进行后续真三轴加-卸荷试验。由三轴应力-应变曲线图(图2)可确定充填体峰值强度为8.5GPa。

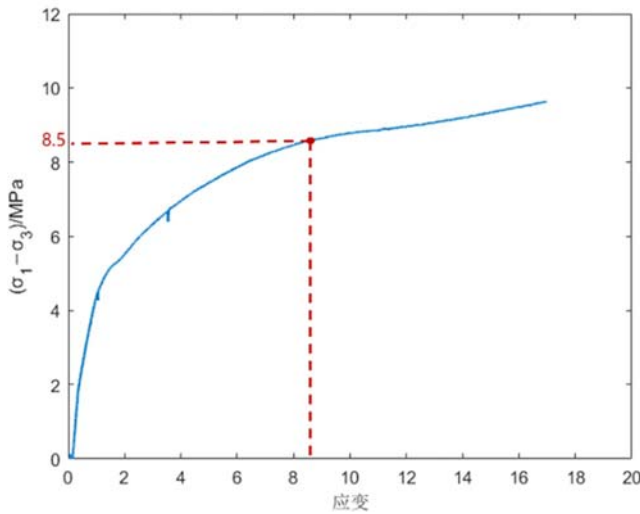


图2 三轴应力-应变曲线图

Fig. 2 Three-axis stress-strain curve

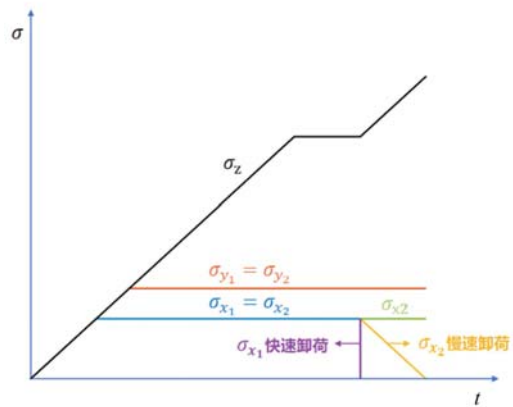


图3 应力路径图

Fig. 3 Stress path diagram

试验预设参数见表1,试验采用载荷控制加载,加载速率为5kN/s,将x方向、y方向和z方向应力(σ_x、σ_y、σ_z)加载至初始载荷后,继续加载σ_z到卸荷临界值,稳压5min,再分别对σ_x进行对应速度的单方向卸荷,应力路径图如图3所示。

表1 试验参数预设表

Tab. 1 Experimental parameter preset table

试样编号	z轴初始载荷/MPa	x轴初始压力/MPa	y轴初始压力/MPa	卸荷临界值/MPa	卸荷速度
Fq-q-8	0.01	0.89	1.33	7.5	50mm/s
Fq-s-8					0.05MPa/s
Fh-q-8				9.5	50mm/s
Fh-s-8					0.05MPa/s

表中:Fq代表峰前卸荷;Fh代表峰后卸荷;q代表快速卸荷,试验机采用距离控制卸荷方式;s代表慢速卸荷,试验机采用载荷控制卸荷方式。

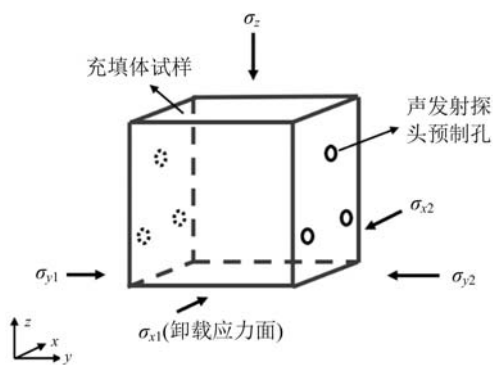


图4 声发射探头与试样位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of acoustic emission and specimen location

试验配备6个声发射探头对试样进行声发射监测,探头放置于岩爆机σ_y方向预制的钻孔内,为保证声发射信号的良好传送,试验前对试样两端进行打磨,使两端不平度在0.01mm之内,并在声发射探头上均匀涂抹凡士林,使试样与声发射探头充分接触,声发射探头与充填体的位置关系如图4所示。

2 试验数据分析

2.1 充填体力学分析

充填体真三轴压缩应力-应变曲线可以分为初始阶段、线弹性阶段、破坏阶段、应变软化阶段以及塑性阶段。其各阶段分布情况如图5所示。

初始阶段随着主应力的增大,充填体存在的空

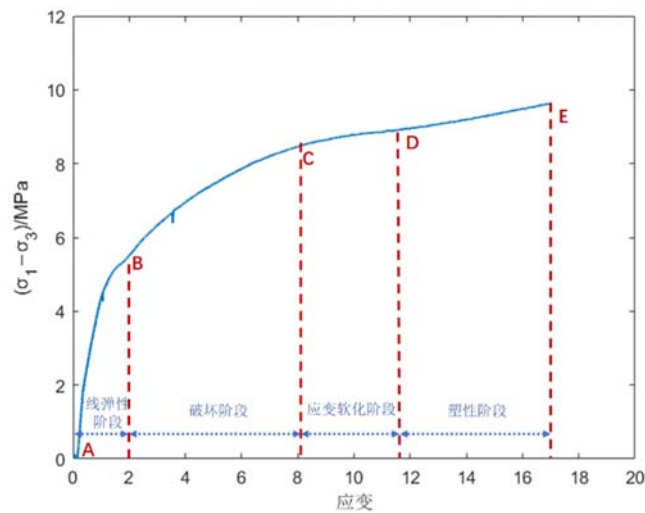


图 5 应力-应变阶段划分图

Fig. 5 Stress-strain phase division diagram

隙、裂隙不断被压密,充填体内部细小的尾砂颗粒位置发生变化,填补至相邻周边较大的空隙、空洞,其载荷能力不断增强,变形特征处于压密阶段^[10];随着主应力的进一步增大,应力-应变曲线呈线性关系(图 5 中 AB 段曲线);主应力的进一步增大使得充填体内部产生、发育,并累计新的裂隙裂纹,导致充填体载荷能力逐渐降低,产生塑性变形,充填体横向扩容明显(图 5 中 BC 段曲线);当外部载荷超过充填体峰值强度后,其内部裂隙逐渐汇通,充填体呈塑性破坏,应力-应变曲线增长趋势大幅减缓,呈现塑性流动状态(图 5 中 CD 段曲线);随着充填体的进一步形变,围压使得充填体载荷能力小幅提升,曲线斜率增大(图 5 中 DE 段曲线)。

由各试块的实际破坏图(图 6)可得,虽然应力路径不尽相同,但充填体试块的破坏表征形式均为 X 型共轭剪切破坏,且峰后卸荷的 X 型破坏特征显著强于峰前卸荷,说明不同阶段卸荷对充填体破坏特征具有一定影响。



图 6 各试块实际破坏图

Fig. 6 Each test block actually destroys the diagram

2.2 充填体声发射特性分析

振铃计数率是声发射中的一个重要指标,能够较好地反映加载变形全过程中胶结充填体力学特性及内部缺陷的演化规律^[24-28],因此本文将选用声发射振铃计数率进行分析,并对声发射事件进行三维定位。

由三维定位图(图7(a)、(c))可看出,充填体峰后卸荷声发射事件数显著大于峰前卸荷,表明峰后内部结构破坏更严重,且各试样声发射事件数均可看出明显X型,与实际破坏形式相符。限于文章篇幅,本文以峰前快速卸荷及峰后快速卸荷为例对声发射特性进行展示(图7)。

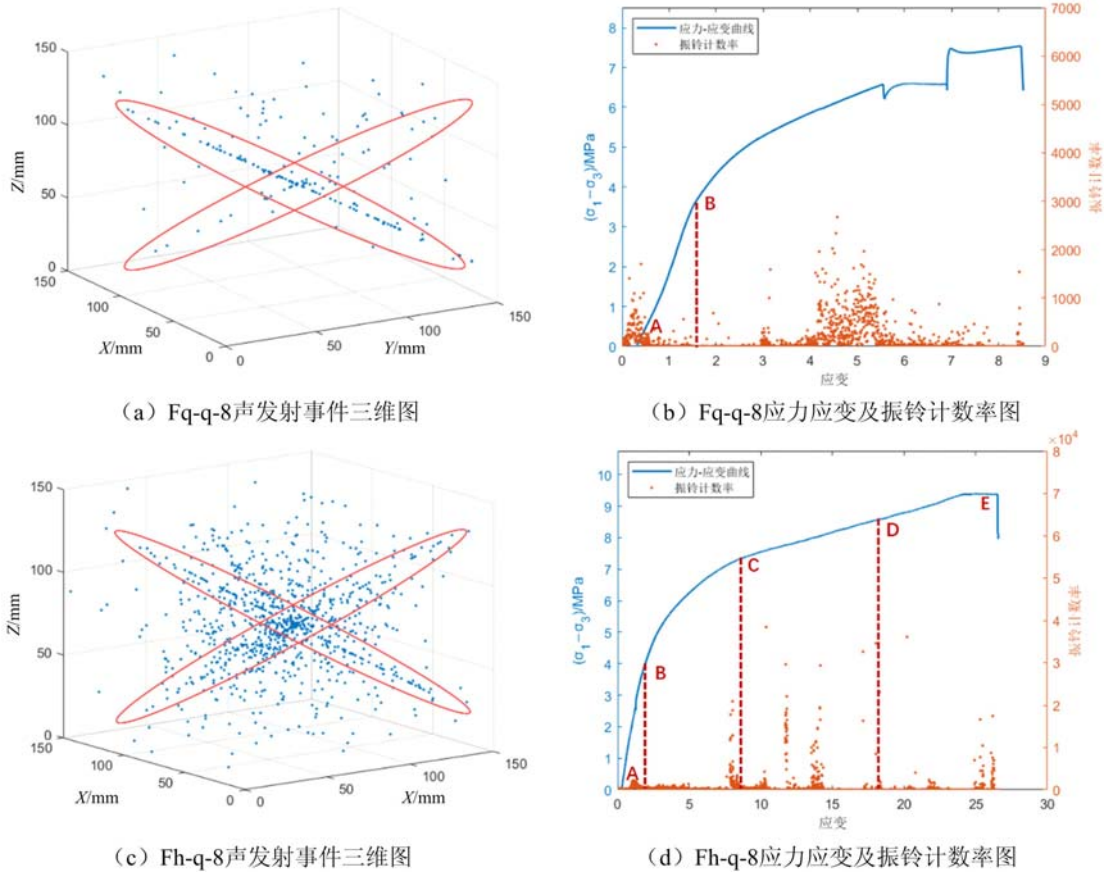


图7 应力声发射事件三维图与应力-应变曲线声发射振铃计数率图

Fig. 7 Three-dimensional diagram of stress acoustic emission events and stress-strain curve with acoustic emission ringing count rate plot

(1) 线弹性阶段(AB段曲线):试样内部的裂隙几乎被压实,该阶段应力-应变曲线近似线性关系,此时充填体内部声信号较少,表明内部变化不明显,宏观上试样体积仍不断减小。

(2) 破坏阶段(BC段曲线):进入此阶段后,试样内部微裂隙的发展发生了质的变化,微裂隙快速发育,产生较多声发射信号。宏观上试件由体积压缩转为体积扩张,轴向应变速率及体积应变速率迅速增大。峰前卸荷达到预设值后对试件进行 σ_x 方向卸荷,充填体垮塌速率较慢,振铃计数率显著提高,如图7(b)所示。

(3) 应变软化阶段(CD段曲线):此时试样达到峰值破坏强度,裂隙快速发展,交叉且相互联合成宏观断裂面,形成X形共轭剪切破坏,然而受围压影响,其载荷能力下降不明显,其声发射信号明显增大。

(4) 塑性阶段(DE段曲线):由于围压及主应力的影响,充填体载荷能力小幅提升,振铃计数率进入短暂平静期,此时峰后卸荷试块达到预设卸荷值,对 σ_x 方向进行卸荷,充填体快速垮塌,振铃计数率显著提高(图7(d))。

3 充填体声发射分形特征

3.1 分形维数概述

岩石受压损伤演化过程是一个非线性的过程,分形理论作为一门非线性的科学理论,能够揭示一些看起来毫不相关的自然现象中某些相同原则。声发射计数与岩石材料因裂隙扩展、潜在错位、摩擦、滑移运动等所释放的应变能相关,故充填体声发射计数必然存在一定的分形特征^[29]。考虑到充填体内部结构较为复杂,将声发射数据与分形原理相结合,有利于探寻充填体破坏全过程变化规律及判断失稳前兆,而由 Grassberger 和 Procaccia 根据嵌入理论和重构相空间思想所提出的 G-P 算法^[30]演变来的关联维数算法是最常用的分形理论之一,故本文采用声发射振铃计数率进行关联维数计算^[31-32]以进一步探寻充填体内部失稳特征。

声发射振铃计数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 ($m < n$),之后向后移取 m 个数,以此构建 $N = n - m + 1$ 维向量,关联函数的计算公式为

$$W(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H[r - |X_i - X_j|] \tag{1}$$

$$H(u) = \begin{cases} 0, & u < 0 \\ 1, & u \geq 0 \end{cases} \tag{2}$$

$$D = \frac{\log(W)}{\lg(r)} \tag{3}$$

$$r = k \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |X_i - X_j| \tag{4}$$

式中: r 为尺度; $|X_i - X_j|$ 为相空间内两向量的距离; D 为关联维数; $W(r)$ 为关联函数; $H(u)$ 为 Heaviside 函数。若 $\log(r)$ 与 $\log(W)$ 拟合结果为直线,则表明声发射振铃计数率序列在给定尺度范围内具有分形特征。考虑到 r 过大无法反映系统内部性质,一般应使:

$$r = k r_0 \tag{5}$$

当 $k \leq 0.1$ 时,分形特征不明显,故本文取 k 为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0 共 10 个值对 r 值进行计算分析。

3.2 充填体声发射参数的分形特征

相空间维数 m 对关联维数具有一定的影响,即进行试样破坏全过程关联维数 D 的计算时应选择合适的关联维数。本文选取相空间维数 m 为 $[2, 5]$,步长为 1,计算不同相空间维数 m 对关联维数的影响(图 8),由图 8 可知,随着相空间维数 m 增大,关联维数 D 先快速增长,并于 $m = 16$

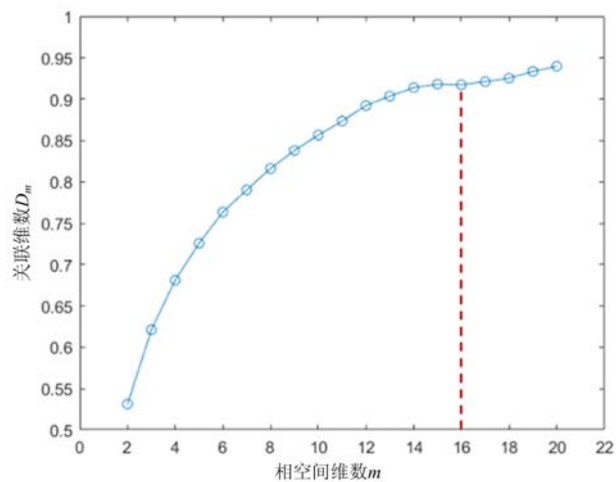


图 8 相空间维数 m 与关联维数 D 的关系曲线

Fig. 8 Phase space dimension m and associated dimension D relationship curve

时趋于稳定,即关联维数增加的梯度趋于稳定,故本文选取关联维数 $m = 16$ 进行试样关联维数的计算。

3.3 充填体破坏过程中声发射分形特征

通过对充填体的声发射振铃计数率序列进行一元线性拟合得到其 R^2 均大于 0.9(图 9),说明充填体的振铃计数率在时域上具有自相似性和分形特征。考虑到声发射振铃计数率随充填体应力状态变化而变化,且关联维数 D 与振铃计数率有着极高的正相关性,故在三向应力水平下由充填体声发射振铃计数率所建立的关联维数可作为反映充填体内在结构演化和宏观力学破坏的一种新指标。

为了获得充填体三轴破坏全过程关联维数变化特征,本文通过应力比对充填体声发射振铃数进行

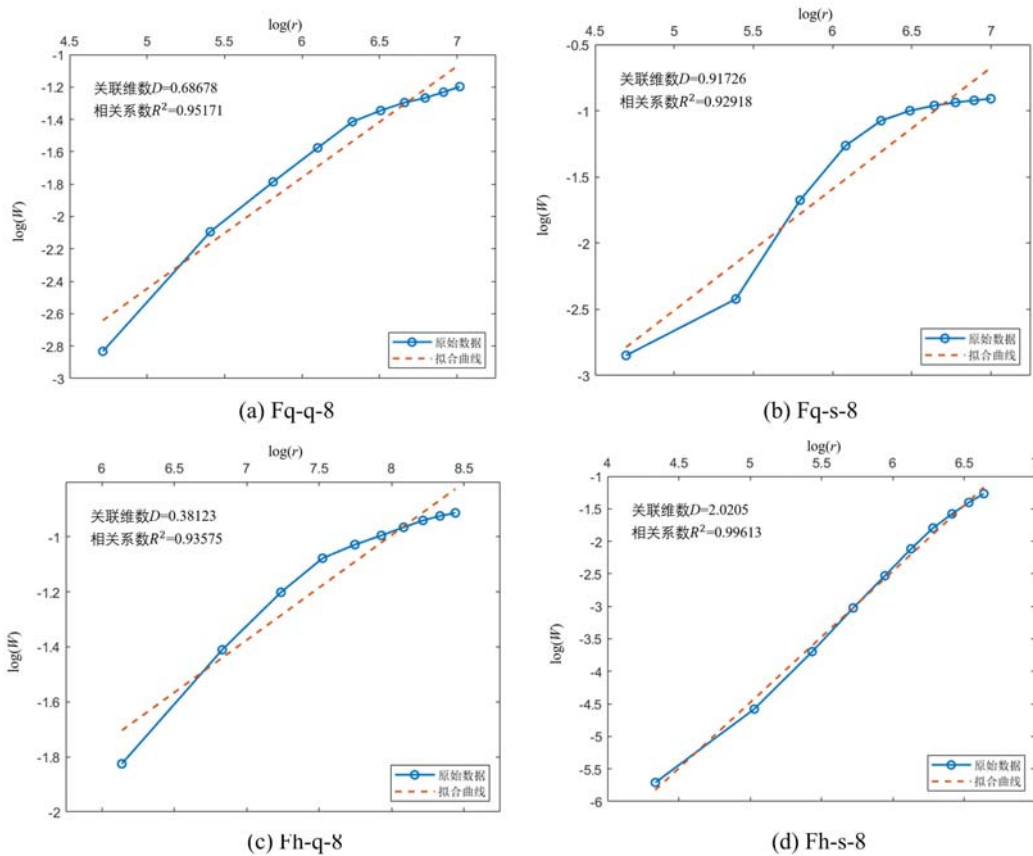


图9 关联维数拟合曲线

Fig.9 Associative dimension fitting curves

划分,计算对应区域关联维数,分维值变化的特征及数值如图10、表2所示。充填体在加载初期分维值较高,总体呈波动性,趋势为先增大后减小。

表2 不同加载应力比下的分维值表

Tab.2 Table of correlation digits under different loading stress ratios

加载应力比试验编号	20%	40%	60%	80%	100%	卸荷后
Fq-q-8	1.356	1.176	1.068	0.786	0.687	0.687
Fq-s-8	1.936	1.560	1.070	0.592	0.289	0.993
Fh-q-8	1.979	2.385	2.337	1.171	0.477	0.381
Fh-s-8	1.588	2.067	2.348	2.843	1.964	2.021

真三轴加-卸荷试验充填体振铃计数率的关联维数可以用于描述充填体破坏全过程,在应力加载初期,随着应力持续增加,其分维值亦随之增加,充填体内部损伤从无序状态转变成有序状态。试件处于初始阶段时,其内部裂隙在主应力 σ_1 的作用下逐渐减少,并随机发育部分裂隙,其损伤演化呈无序状态;随着应力继续加载,充填体进入线弹性阶段,其内部裂隙不断被压缩,同时发育微裂隙,其损伤在空间中逐渐沿着对角线方向发育,故分维值呈波动性;当充填体进入破坏阶段时,其内部裂隙产生速率逐渐加快且迅速发育,充填体内部损伤沿对角线方向进一步发育,故分维值逐渐降低;当充填体进入应变软化阶段及塑性阶段时,充填体横向扩容,但受围压影响,充填体仍能承受一定载荷,分维值快速下降;最后当充填体达到预期加载强度,进行单方面卸荷时,充填体裂隙快速发展,相互贯通,充填体进入失稳状态,形成宏观破裂面,分维值降到最低。

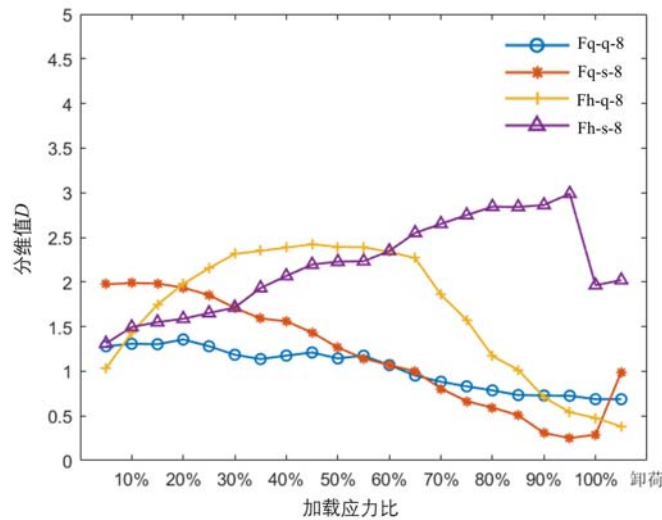


图10 真三轴破坏全过程分维值变化图

Fig. 10 True triaxial destruction of the whole process of the whole process of dimensional value change plot

4 讨论

三向应力下充填体的载荷能力明显强于单向应力^[33],即三向应力下的充填体有利于维持采场稳定性,其中围压在充填体失稳演化过程中起着重要的作用,在维持外部变形的同时抵抗内部结构劣化。当进行单向卸荷时,三向应力状态被破坏,充填体无法承受对应载荷,裂隙沿着充填体弱面急速发育,导致快速垮塌。

不同应力路径下的充填体分形特征存在差异,但其演化特征相似。分维值急速下降,表明试件内部破坏呈有序性,裂隙集中沿充填体对角线发展;分维值上升则表明内部破坏呈无序性,裂隙在充填体内部随机发育。在充填体破坏全过程中,峰后卸荷分维值普遍高于峰前卸荷,峰后卸荷加载后期分维值下降速率明显大于峰前卸荷,充填体经过峰值强度后,其载荷能力降低,内部结构快速劣化,裂隙发育沿上一阶段形成的主破裂带继续发展,内部结构破裂有序性逐渐增强。

对于充填体峰前卸荷、峰后卸荷而言,前者试件主要经过初始阶段、线弹性阶段、破坏阶段,声发射振铃计数率高数值的集中出现主要是由于充填体内部裂隙的压密以及充填体卸荷使充填体内部裂隙剧烈扩张导致的。充填体内部裂隙发育逐渐呈对角线分布,即破裂具有较强的自序性,分维值持续降低;对于峰后卸荷而言,则经过了应力-应变曲线的全部阶段,声发射集中于裂隙压密、破坏前后的塑性变形以及最后卸荷时充填体破坏。充填体内部裂隙先随机发育再沿着试样对角线集中发育,破裂损伤从无序向有序发展。随着主应力进一步增大,充填体发生破坏内部结构破坏严重,其应力高度集中于主破裂带周围,此时分维值最低。相比于峰前卸荷,峰后卸荷时充填体的分维值快速下降,充填体内部裂隙急速发育,即充填体即将失稳破坏。

对于充填体快速、慢速卸荷而言,其差异主要体现在充填体由三向应力状态转变为二向应力的速度,前者状态瞬间改变,导致在卸荷方向无应力支撑,其裂隙沿卸荷面方向急速发育,内部裂隙发育、融汇贯通形成破坏,分维值继续下降;后者可视为三向应力缓慢转变为二向应力,其载荷能力随着卸荷面应力的降低而减弱,内部裂纹仍在试样空间中随机发育,致使其分维值稍有增大。

5 结论

通过对不同应力路径下充填体声发射振铃计数及分形维数的分析,得出以下结论:

(1) 充填体真三轴试验中,虽然试验应力路径不尽相同,但试块在宏观上均产生X型共轭剪切破坏,且剪切破坏程度受应力载荷影响较大。

(2) 基于声发射振铃计数率的关联维数所拟合的相关系数均大于0.9,说明三向应力下的充填体具

有较好的分形特征,且峰后卸荷时呈先增大后减小的规律。

(3) 真三轴情况下分维值受应力路径影响,峰后卸荷的分维值普遍高于峰前卸荷,卸荷时慢速卸荷分维值增大。

(4) 当声发射振铃计数率进入平静期且关联维数进入快速下降阶段时,充填体进入失稳阶段。

参考文献:

- [1] 王湘桂,唐开元. 矿山充填采矿法综述[J]. 矿业快报, 2008(12):1-5 (WANG Xianggui, TANG Kaiyuan. Overview of cut and fill method for mines[J]. Express Information of Mining Industry, 2008(12):1-5 (in Chinese))
- [2] 万海涛,方勇,肖广哲,等. 充填采矿法的应用现状及发展方向[J]. 世界有色金属, 2009(8):26-28 (WAN Haitao, FANG Yong, XIAO Guangzhe, et al. Application status and development direction of infill mining method[J]. World Nonferrous Metals, 2009(8):26-28 (in Chinese))
- [3] 刘杰. 充填采矿法的应用现状及发展[J]. 当代化工研究, 2020(7):8-9 (LIU Jie. Application status and development of filling mining method[J]. Modern Chemical Research, 2020(7):8-9 (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 侯永强,尹升华,曹永,等. 不同加载速率下胶结充填体损伤特性与能量耗散特征分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(8):108-117 (HOU Yongqiang, YIN Shenghua, CAO Yong, et al. Research on damage and energy dissipation characteristics of cemented backfill under different loading rates [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2020, 47(8):108-117 (in Chinese))
- [6] 徐晓冬,孙光华,刘祥鑫,等. 充填体损伤演化量化研究[J]. 实验力学, 2019, 34(5):864-872 (XU Xiaodong, SUN Guanghua, LIU Xiangxin, et al. Quantitative study on damage evolution of filling body[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(5):864-872 (in Chinese))
- [7] 侯永强,尹升华,杨世兴,等. 冲击载荷下胶结充填体的力学性能及能耗特征[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(8):50-56 (HOU Yongqiang, YIN Shenghua, YANG Shixing, et al. Mechanical properties and energy consumption characteristics of cemented backfill under impact load[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2020, 48(8):50-56 (in Chinese))
- [8] 叶永飞,张雅楠,李士超,等. 循环载荷下胶结充填体损伤声发射表征[J]. 黄金科学技术, 2018, 26(6):819-825 (YE Yongfei, ZHANG Yanan, LI Shichao, et al. Acoustic emission characterization of damage of cemented filling under cyclic loading[J]. Gold Science and Technology, 2018, 26(6):819-825 (in Chinese))
- [9] 谭玉叶,汪杰,宋卫东,等. 循环冲击下胶结充填体动载力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(1):184-190, 197 (TAN Yuye, WANG Jie, SONG Weidong, et al. Experimental study on mechanical properties of cemented tailings backfill under cycle dynamic loading test [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2019, 36(1):184-190, 197 (in Chinese))
- [10] 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. Characteristic analysis of deformation failure and energy dissipation of cemented backfill body under triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12):3421-3429 (in Chinese))
- [11] Xu W B, Lin B, Wu W L. Strength and deformation behaviors of cemented tailings backfill under triaxial compression[J]. Journal of Central South University, 2021, 27(12):3531-3543.
- [12] Sun G, Feng Y, Yao X, et al. Mechanical properties of cemented tailings backfill under true triaxial loading condition[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022(15):1207.
- [13] 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. Energy consumption and damage characteristics of stratified backfill under triaxial loading and unloading[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(5):1050-1057 (in Chinese))
- [14] 张友锋,付玉华. 组合受力胶结充填体力学特性及能耗特征研究[J]. 有色金属工程, 2022, 12(1):107-114

- (ZHANG Youfeng, FU Yuhua. Study on mechanical properties and energy consumption characteristics of cemented backfill under combined loading[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2022, 12(1):107–114 (in Chinese))
- [15] 王明旭, 许梦国, 程爱平, 等. 不同加载形式的矿岩-充填体相互作用的力学变形特征分析[J]. *金属矿山*, 2018(2):19–26 (WANG Mingxu, XU Mengguo, CHENG Aiping, et al. Mechanical deformation characteristics of rock mass-filling under different loading modes[J]. *Metal Mine*, 2018(2):19–26 (in Chinese))
- [16] Liu C, Sun G, Liu X, et al. Construction of filling body instability failure warning model under single-side unloading condition[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022(55):4257–4269.
- [17] 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(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(2):78–82 (in Chinese))
- [18] 张洁, 苏国韶, 石焱炯, 等. 应变型岩爆过程的声发射特征研究[J]. *实验力学*, 2019, 34(1):79–87 (ZHANG Jie, SU Guoshao, SHI Yanjiong, et al. Experimental study of acoustic emission characteristics in strainburst process[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2019, 34(1):79–87 (in Chinese))
- [19] 高召宁. 颗粒物质的分形特征与其物理力学性质的关系探讨[J]. *实验力学*, 2011, 26(3):285–290 (GAO Zhaoning. Discussion of relationship between fractal feature and its physical mechanics characters of grain matter [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2011, 26(3):285–290 (in Chinese))
- [20] 王其胜, 李夕兵. 动静组合加载作用下花岗岩破碎的分形特征[J]. *实验力学*, 2009, 24(6):587–591 (WANG Qisheng, LI Xibing. Fractal property of granite failure under coupled static-dynamic load [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2009, 24(6):587–591 (in Chinese))
- [21] 徐晓冬, 孙光华, 张婕妤, 等. 基于小波去噪的充填体声发射序列分形特征研究[J]. *矿业研究与开发*, 2018, 38(2):20–24 (XU Xiaodong, SUN Guanghua, ZHANG Jieyu, et al. Study on fractal characteristics of acoustic emission sequence of filling body based on wavelet de-noising[J]. *Mining Research and Development*, 2018, 38(2):20–24 (in Chinese))
- [22] 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))
- [23] 李杨, 孙光华, 刘祥鑫, 等. 充填体声发射分形特征及损伤演化试验研究[J]. *实验力学*, 2019, 34(6):1053–1060 (LI Yang, SUN Guanghua, LIU Xiangxin, et al. Experimental study on fractal characteristics and damage evolution of filling acoustic emission[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2019, 34(6):1053–1060 (in Chinese))
- [24] 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(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(15):2499–2503 (in Chinese))
- [25] 赵康, 伍俊, 严雅静, 等. 尾砂胶结充填体裂纹演化多尺度特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(8):1626–1636 (ZHAO Kang, WU Jun, YAN Yajing, et al. Multi-scale characteristics of crack evolution of cemented tailings backfill[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(8):1626–1636 (in Chinese))
- [26] 程爱平, 张玉山, 王平, 等. 胶结充填体应变率与声发射特征响应规律[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(10):130–136 (CHENG Aiping, ZHANG Yushan, WANG Ping, et al. Strain rate and acoustic emission characteristic response law of cemented backfill[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(10):130–136 (in Chinese))
- [27] 宋义敏, 邓琳琳, 吕祥锋, 等. 岩石摩擦滑动变形演化及声发射特征研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(8):2899–2906, 2913 (SONG Yimin, DENG Linlin, LÜ Xiangfeng, et al. Study of acoustic emission characteristics and deformation evolution during rock frictional sliding[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(8):2899–2906, 2913 (in Chinese))

- [28] 张艳博, 孙林, 姚旭龙, 等. 花岗岩破裂过程声发射关键信号时频特征试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 157—165 (ZHANG Yanbo, SUN Lin, YAO Xulong, et al. Experimental study of time-frequency characteristics of acoustic emission key signals during granite fracture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1):157—165 (in Chinese))
- [29] 王伟, 汪涛, 熊德发, 等. 三轴循环加卸载下砂岩声发射分形特征试验[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(2):90—100 (WANG Wei, WANG Tao, XIONG Defa, et al. Experiment of fractal characteristics of acoustic emission of sandstone under triaxial cyclic loading and unloading[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(2):90—100 (in Chinese))
- [30] 谢和平, Pariseau W G. 岩爆的分形特征和机理[J]. 岩石力学与工程学报, 1993(1):28—37 (XIE Heping, Pariseau W G. Fractal character and mechanism of rock bursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993(1):28—37 (in Chinese))
- [31] 梁忠雨, 高峰, 蔺金太, 等. 单轴下岩石声发射参数的分形特征[J]. 力学与实践, 2009, 31(1):43—46 (LIANG Zhongyu, GAO Feng, LIN Jintai, et al. Fractal analysis of the process parameter of rock's acoustic emission under uniaxial compression[J]. Mechanics in Engineering, 2009, 31(1):43—46 (in Chinese))
- [32] 赵奎, 王更峰, 王晓军, 等. 岩石声发射 Kaiser 点信号频带能量分布和分形特征研究[J]. 岩土力学, 2008(11): 3082—3088 (ZHAO Kui, WANG Gengfeng, WANG Xiaojun, et al. Research on energy distributions and fractal characteristics of Kaiser signal of acoustic emission in rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(11):3082—3088 (in Chinese))
- [33] 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—112 (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—112 (in Chinese))

Experimental study on fractal characteristics of the acoustic emission sequence of the whole process of filling body true triaxial plus unloading

MA Chundi^{1,2,3,4}, SUN Guanghua^{1,3,4}, FENG Yufan⁵, LIU Chenyang^{1,3,4}, WANG Yue^{1,3,4}

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China; 2. College of Yisheng, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 3. Hebei Key Laboratory of Mining Development and Safety Technology, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 4. Green Intelligent Mining Technology Innovation Center of Hebei Province, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 5. Shen Kan Engineering & Technology Corporation, MCC, Shenyang 110169, Liaoning, China)

Abstract: To address the transient bare damage instability of the filler due to mining under complex stress conditions, a triaxial loading-unloading test was conducted to investigate the internal damage characteristics of the filler due to loading-unloading by combining acoustic emission monitoring means and correlation dimension theory. The results are as follows: under the true triaxial conditions with different stress paths, the filling body produces X-shaped conjugate shear damage, and the degree of shear damage is influenced by the stress load; the correlation dimension based on acoustic emission ring count rate can better describe the internal structural evolution of the filling body during the experiment, and the correlation dimension increases and then decreases when unloading after the peak; when the acoustic emission ring count rate enters the calm period and the correlation dimension enters the fast decreasing phase, the filling body enters the destabilization phase, and the research results can provide reference for the in-depth understanding of the filling body damage mechanism induced by the lateral exposure of the filling body.

Keywords: true triaxial; single unloading test; acoustic emission; association dimension; ring count rate