工程科学学报
Chinese Journal of Engineering

基于声发射特征的不同高径比矸石胶结充填柱单轴压缩损伤演化

郑远翔 杜献杰 冯国瑞 巨峰 李晓磊 王广辉

Uniaxial compression damage evolution of gangue-cemented backfill columns with different height–diameter ratios based on acoustic emission characteristics

ZHENG Yuanxiang, DU Xianjie, FENG Guorui, JU Feng, LI Xiaolei, WANG Guanghui

引用本文:
郑远翔, 杜献杰, 冯国瑞, 巨峰, 李晓磊, 王广辉. 基于声发射特征的不同高径比矸石胶结充填柱单轴压缩损伤演化[J]. 北科大：工程科学学报, 2024, 46(8): 1370–1380. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2023.09.15.001
ZHENG Yuanxiang, DU Xianjie, FENG Guorui, JU Feng, LI Xiaolei, WANG Guanghui. Uniaxial compression damage evolution of gangue–cemented backfill columns with different height – diameter ratios based on acoustic emission characteristics[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(8): 1370–1380. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2023.09.15.001

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.09.15.001

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于全波形的煤样单轴压缩破坏声电时频特征

Time–frequency characteristics of acoustic–electric signals induced by coal fracture under uniaxial compression based on full–waveform

工程科学学报. 2019, 41(7): 874 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.07.005

基于声发射监测的316LN不锈钢的疲劳损伤评价

Fatigue damage evaluation of 316LN stainless steel using acoustic emission monitoring

工程科学学报. 2018, 40(4): 461 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.04.009

分层胶结充填体力学特性及裂纹演化规律

Mechanical properties and crack evolution of interbedded cemented tailings backfill

工程科学学报. 2020, 42(10): 1286 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.12.29.003

不同荷载条件下低孔隙率砂岩巴西劈裂试验的声发射特性

Acoustic emission characteristics of Brazilian test for low–porosity sandstone under different load conditions

工程科学学报. 2020, 42(8): 988 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.08.12.004

劈裂荷载下的岩石声发射及微观破裂特性

Acoustic emission and micro–rupture characteristics of rocks under Brazilian splitting load

工程科学学报. 2019, 41(11): 1422 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.11.29.005

初始损伤对混凝土硫酸盐腐蚀劣化性能的影响

Influence of initial damage on degradation and deterioration of concrete under sulfate attack

工程科学学报. 2017, 39(8): 1278 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.08.019

工程科学学报, 第 46 卷, 第 8 期: 1370−1380, 2024 年 8 月
Chinese Journal of Engineering, Vol. 46, No. 8: 1370−1380, August 2024
https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2023.09.15.001; http://cje.ustb.edu.cn

基于声发射特征的不同高径比矸石胶结充填柱单轴压缩损伤演化

郑远翔[1,2,3)], 杜献杰[1,2,3,4,5)✉], 冯国瑞[1,2,3,6)], 巨　峰[4)], 李晓磊[1,3)], 王广辉[5)]

1) 太原理工大学矿业工程学院, 太原 030024　2) 山西浙大新材料与化工研究院, 太原 030032　3) 矿山岩层控制及灾害防控山西省重点实验室, 太原 030024　4) 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 徐州 221116　5) 郑州煤炭工业(集团)有限责任公司, 郑州 450042　6) 山西能源学院, 晋中 030604
✉通信作者, E-mail: duxianjie@tyut.edu.cn

摘　要　为研究高径比对矸石胶结充填柱单轴压缩性能的影响, 本实验制备了高径比为 0.5 ~ 4.0 的 5 组圆柱体试件进行单轴压缩试验, 同时利用数字图像相关技术(DIC)和声发射进行监测, 探讨了不同高径比充填柱的破坏特征. 研究表明: 矸石胶结充填柱的峰值应力和峰值应变都会随着高径比的增大而减小, 并与高径比呈指数关系; 充填柱的破坏形式在高径比大于 2.0 后从整体破坏转为局部破坏, 局部应变大于 16% 可以导致充填柱整体失稳; 充填柱的高径比从 1.0 升高到 4.0, 损伤程度下降到 11%; 充填柱在累计振铃计数快速上升区中的破坏占总破坏的比例随高径比的增大从 22.6% 增加到 72.3%, 高径比大于 2.0 时该比例达到 40.9% 且上升速度加快, 破坏的集中程度较高; 声发射最终累积振铃计数先随着高径比增大而增大, 在高径比为 2.0 以后开始减小, 且高径比对振铃集中出现的位置有较大影响; 用声发射能量与振铃计数的比值(E/C)反应能量释放剧烈程度, 平均 E/C 随高径比增大从 1.26 增大到 2.76, 高径比大于 2.0 时峰后能量释放较为剧烈. 试验结果可以为结构充填开采中充填柱高径比的选取提供参考.

关键词　矸石胶结充填柱; 高径比; 表观应变; 累计振铃计数; 声发射能量
分类号　TD353

Uniaxial compression damage evolution of gangue-cemented backfill columns with different height–diameter ratios based on acoustic emission characteristics

ZHENG Yuanxiang[1,2,3)], *DU Xianjie*[1,2,3,4,5)✉], *FENG Guorui*[1,2,3,6)], *JU Feng*[4)], *LI Xiaolei*[1,3)], *WANG Guanghui*[5)]

1) College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China
2) Shanxi-zheda Institute of Advanced Materials and Chemical Engineering, Taiyuan 030032, China
3) Shanxi Key Laboratory of Mine Rock Strata Control and Disaster Prevention, Taiyuan 030024, China
4) State Key Laboratory of Deep Geotechnical Mechanics and Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
5) Zhengzhou Coal Industry (Group) Co. Ltd., Zhengzhou 450042, China
6) Shanxi Energy College, Jinzhong 030604, China
✉Corresponding author, DU Xianjie, E-mail: duxianjie@tyut.edu.cn

ABSTRACT　To study the effect of height–diameter ratio on the uniaxial compression performance of gangue-cemented backfill columns, five groups of cylindrical specimens with height–diameter ratios of 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, and 4.0 were prepared for uniaxial

收稿日期: 2023−09−15
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52004173, 51925402, 52334005); 山西浙大新材料与化工研究院科研项目(2022SX-TD008, 2021SX-TD001); 中国博士后科学基金 (2022M712922); 山西省科技重大专项项目(20201102004)

compression tests. At the same time, digital image correlation technology and acoustic emission were used for monitoring, and the stress curve, strain curve, apparent strain, acoustic emission ringing, energy, and impact number of the backfill column were recorded. The obtained data were processed and corresponded with each other with time to explore the failure characteristics of different height–diameter ratio backfill bodies. The results show that the peak stress and peak strain of gangue-cemented backfill decrease exponentially with increasing height–diameter ratio. The failure form of the backfill column changes from global failure to local failure when the height–diameter ratio is greater than 2.0, and a local strain of more than 16% can lead to the overall instability of the backfill column. When the height-to-diameter ratio of the backfill column increased from 1.0 to 4.0, the damage degree for the backfill column decreased to 11%. The proportion of damage of backfill bodies in the cumulative ringing count rapid rise region increased from 22.6% to 72.3% with increasing height–diameter ratio and reached 40.9% when the height–diameter ratio was greater than 2.0. The rising speed accelerated, and the concentration of damage was higher. The final cumulative ringing count of acoustic emission reached a maximum at a height–diameter ratio of 2.0, and the position of ringing concentration was greatly influenced by this ratio. The ratio of acoustic emission energy-to-ringing count (E/C) reacts to the intensity of energy release. The average E/C increases from 1.26 to 2.76 with increasing height–diameter ratio. Before the peak stress, the rising speed of E/C decreases above a height–diameter ratio of 2.0, and after the peak stress, the E/C rises faster above a height–diameter ratio of 2.0. Before the peak stress, the intensity of the failure of the backfill column reaches a maximum when the height–diameter ratio is 3.0, and after the peak stress, the failure process is more violent for the backfill column with a height–diameter ratio greater than 2.0. The test results provide a reference for selecting the height–diameter ratio of the backfill column in structural backfill mining.

KEY WORDS cemented gangue backfill column; height–diameter ratios; apparent strain; cumulative ring count; acoustic emission energy

充填开采是一种可以保护生态环境且回采率高的煤炭开采方法，但由于成本较高难以推广[1]. 有学者提出了结构充填的方法，将充填材料制成充填柱并在采空区关键位置进行有针对性的布置，从而在不影响充填效果的前提下降低充填率和成本，提高开采效率[2]. 同一结构充填采场中充填柱高度不变时其直径的变化，或其直径不变时不同采场高度的改变，都会导致其高径比发生改变[3–4]，这种情况下充填材料的尺寸效应会使不同高径比的充填柱在承压时具备不同的力学特性，合理的充填体尺寸可以使充填体的应力集中得到缓解，进而有利于充填开采的进行[5–7].

近年来，专家学者们对多种充填材料的尺寸效应进行了大量研究. 针对尾砂胶结充填体，程爱平等[8]对边长 50 ~ 100 mm 的立方体充填试件进行单轴压缩试验，发现其单轴抗压强度随着尺寸的增加先增大后减小，破坏形式由劈裂转为剪切；甘德清等[9]通过对边长 70.7 ~ 200 mm 的立方体充填试件单轴压缩试验与 DIC（Digital image correlation，数字图像相关技术）监测，发现充填体试块弹性模量和变形模量都随尺寸逐渐增大；赵奎等[10]对边长 40 ~ 150 mm 的立方体充填试件单轴压缩试验，发现充填体在峰值应力前以弹性应变能积蓄为主，峰值应力处的总输入应变能、弹性应变能和耗散能随尺寸增大均呈非线性下降趋势，试样弹性能耗比变化幅度随尺寸增大而增大；薛改利等[11]通过对边长 40 ~ 100 mm 立方体充填试件单轴压缩试验，发现充填体的强度随尺寸的增加逐渐降低，立方体试件的峰值应变和端部应变均大于圆柱体试件；徐淼斐等[12]通过建立 BP 神经网络模型，发现充填体直径和高度的变化对充填体抗压强度存在影响；常宝孟等[13]通过试验建立了摩擦充填体强度力学模型，发现充填体强度预测值在高度较大时增加幅度明显降低. 王奚等[14]通过对高径比 1 ~ 5 的高水材料充填试样进行单轴压缩试验，发现随高径比增大，支柱试样的峰值强度单轴抗压强度、轴向应变峰值逐渐降低，弹性模量逐渐增大. 张明磊等[15]通过压力试验得到了混凝土充填体试样的尺寸效应系数及其与高径比的近似线性相关关系式. 矸石胶结充填材料常被用于煤矿充填开采中[16–17]，部分研究发现矸石胶结充填体的单轴抗压强度随高度的增大而减小，声发射监测表明矸石胶结充填体破坏特征与尺寸或高径比具有一定关系[18–19].

以上研究包含了对多种充填材料的单轴压缩试验，分析了尺寸效应对充填体承载能力和破坏特征的影响. 但对不同高径比矸石胶结充填柱的影响机理还未能清晰的揭示. 因此本文通过对 5 组不同高径比的圆柱形矸石胶结充填柱试件进行单轴压缩试验，并利用 DIC 和声发射在加载过

程中进行同步监测，获得不同高径比矸石胶结充填柱的抗压强度及破坏形式；结合表观应变、振铃计数、撞击数及能量等参数分析不同高径比的矸石胶结充填柱受压破坏过程与机理，以期能为实际工程中矸石胶结充填柱高径比的选择提供参考.

1　单轴压缩试验设计

1.1　原材料与试件制备

本次试验所选用的矸石胶结充填柱由煤矸石、水泥、粉煤灰和水质量按照 1∶0.7∶0.3∶0.4 的配比均匀搅拌而成[20]. 其中煤矸石收集自汾西矿业集团新阳煤矿，经破碎、筛分处理，按照粒径分为 10 ~ 15 mm 的粗骨料、5 ~ 10 mm 的中骨料和 0 ~ 5 mm 的细骨料，参考课题组前期试验结果选择粗、中、细矸石骨料的质量比为 0.35∶0.35∶0.3[21−22]. ，水泥为太原狮头中联水泥有限公司生产的 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥，粉煤灰为太原晋阳粉煤灰综合利用有限公司的Ⅱ级粉煤灰，水为普通自来水. 参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2019)确定试件直径为 100 mm，将原材料机械拌和后，制备高度分别为 50、100、200、300、400 mm 的矸石胶结充填柱试件，每组 3 个. 浇筑 24 h 后脱模，将试件放入 SHBY-60B 型标准恒温恒湿养护箱中养护 28 d. 试件如图 1 所示.

图 1　不同高径比充填柱试件

Fig.1　Filling column specimens with different height–diameter ratios

1.2　试验设备及方法

试验测试系统由加载设备、DIC 及声发射监测设备组成. 加载设备采用 TAJW-2000 多场耦合微机控制电液伺服万能试验机，DIC 采用 XTOPDIC 系统，声发射监测设备采用 DS5-8B 声发射监测仪. 如图 2 所示. 刚性压力机加载速率设置为 0.6 mm·min^{-1}. 加载过程中 DIC 及声发射监测同时进行，并通过压力机采集并记录试件的荷载、位移等参数. 试验前对试样喷涂散斑，试验中相机记录散斑的位移并通过控制盒传输至 DIC 监测系统，采集触发间隔为 2 s，计算得到试件的应变云图. 4 个声发射探头对称布置，位于试件两对立面的中间位置和位于距离下端 0.1L 和 0.9L 的位置，其中 L 为试件的高度，声发射门槛值为 40 dB，采集频率为 2.5 MHz. 加载时记录声发射振铃计数、能量等参数.

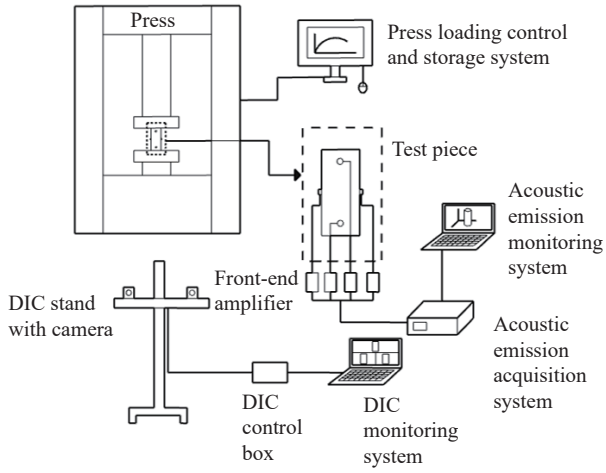

图 2　试验所用的压力机、DIC 及声发射设备示意图

Fig.2　Schematic of the presses, DIC, and acoustic emission equipment used in the test

2　不同高径比充填柱承载特征

2.1　承载能力

图 3(a) 为试件的峰值应力随高径比的变化曲线. 可以看出高径比变化对试件的峰值应力有着显著影响. 试件高径比分别为 0.5、1.0、2.0、3.0、4.0 时，每组试件平均的峰值应力分别为 28.9、15.15、14.7、11.5 和 11.55 MPa. 随着高径比的增大，充填柱承载能力逐渐减小，在高径比为 0.5 ~ 1 区间内降幅最大，高径比大于 1 后降幅变缓，高径比大于 2 后承载能力不再有显著变化. 图 3(b) 是峰值应变随试件高径比的变化曲线. 可以看出高径比变化对试件的峰值应变也有着显著影响. 高径比为 0.5 ~ 4.0 时，每组试件平均的峰值应变为 4.872%、2.186%、1.396%、0.706% 和 0.455%，其降幅分别为 55.13%、36.14%、49.43%、35.55%. 高径比在 0.5 ~ 1.0 时峰值应变的降幅最大，3.0 ~ 4.0 时峰值应变的降幅最低，仅为 0.5 ~ 1.0 时的 64.48%.

充填柱试件的峰值应力、应变与试件高径比之间可以采用以 e 为底的指数函数来表示，式中 X 为试件的高径比，σ 为试件的峰值应力，ε 为试件的峰值应变. 从两个拟合函数中可以看出，充填柱试件的峰值应力和峰值应变都随高径比的增大而减小，符合指数型函数变化特征. 其中，峰值应力和峰值应变分别在高径比大于 1.0、2.0 后变化趋于平缓.

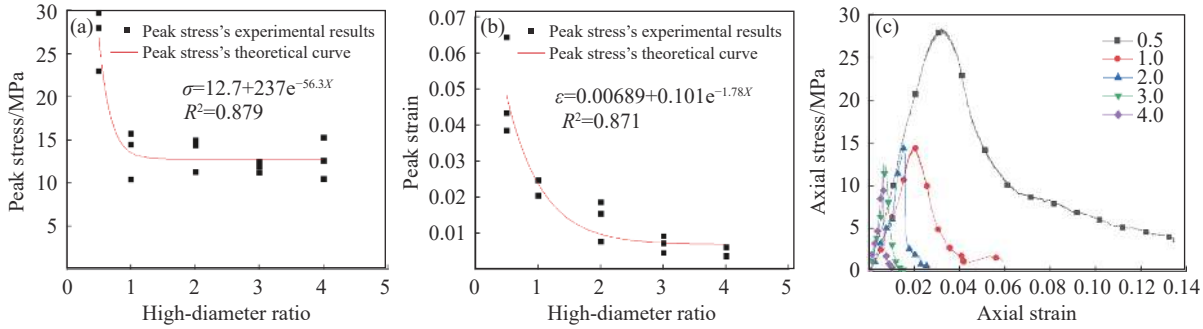

图 3 试件峰值应力、应变随高径比变化的值及其拟合曲线和应力–应变曲线. (a) 峰值应力; (b) 峰值应变; (c) 应力–应变曲线

Fig.3 Peak stress and strain values of the specimen as a function of the height–diameter ratio and their fitting curves and stress–strain curves: (a) peak stress; (b) peak strain; (c) stress–strain curves

图 3(c) 是不同高径比矸石胶结充填柱试件的应力–应变曲线. 可以看出, 矸石胶结充填柱试件在单轴压缩过程中分为初始压密、弹性压缩、塑性破坏和峰后破坏 4 个阶段. 高径比为 0.5 ~ 4.0 时, 峰后破坏阶段所占时间的比例不断下降, 分别为 76.3%、52.7%、39.3%、31.3%、28.0%. 高径比越小的充填柱试件峰值应变越大, 峰后应力的降速越缓慢, 试件表现出更强的稳定性.

由试验结果, 峰值应力的转折点在高径比 1.0 ~ 2.0 之间, 峰值应变的转折点在高径比 2.0 ~ 3.0 之间; 随着高径比的增加, 残余承载力的下降越来越快, 高径比在 0.5 ~ 1.0 的充填柱试件直到加载结束依然保留有一定的后期承载力. 说明实际工程中为使充填柱的承载能力充分发挥, 高径比不宜大于 2.0.

2.2 破坏形态

图 4 为不同高径比充填柱试件峰值应力时的表面应变云图及对应时刻的试件照片.

高径比为 0.5、1.0 的试件在加载过程中表面出现多条裂纹, 表面最大应变分别为 5.127% 和 5.708%, 与试件的平均应变(4.872%、2.186%)相比差别较小, 这说明此时试件以整体破坏为主, 试件的裂纹扩展方向大致平行于加载方向, 属于劈裂破坏. 高径比为 2.0 的试件裂纹数量由多条向 1 ~ 2 条转变, 且最大裂纹顶部的扩展方向与加载方向出现 30° ~ 40°的夹角, 代表出现了局部剪切破坏, 试件的表面最大应变增大到 13.354%, 与平均应变(1.396%)相差较大, 说明试件的局部破坏正在加剧. 高径比为 3.0 和 4.0 的试件表面裂纹长度局限在 15 ~ 20 mm, 无法贯穿整个试件, 试件端部出现扩展方向与加载方向有 30° ~ 40°夹角的裂纹, 代表试件的端部出现局部剪切破坏, 试件表面的最大应变为 16.383% 和 16.632%, 与平均应变(0.706%、0.455%)差值进一步增大. 此时试件表面最大应变达到最大, 说明即使试件的高径比继续增大, 16% 以上的局部应变也足以导致试件整体失稳进而失去承载能力.

高径比为 0.5 ~ 1.0、2.0、3.0 ~ 4.0 时试件的破

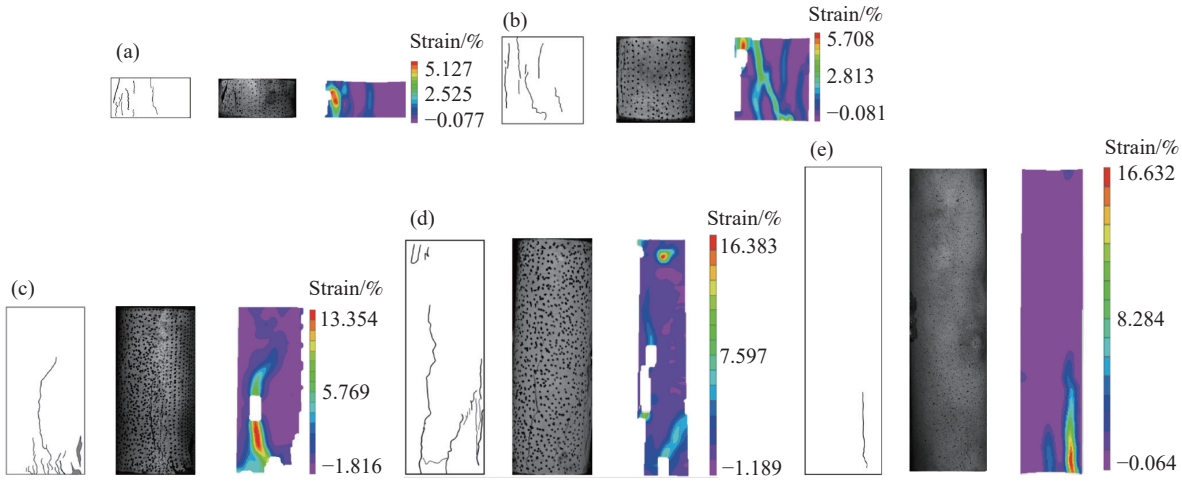

图 4 不同高径比充填柱峰值应力时的应变云图及对应试件. (a) 0.5; (b) 1.0; (c) 2.0; (d) 3.0; (e) 4.0

Fig.4 Strain cloud diagram and corresponding specimens at peak stress of backfill column elements with different height–diameter ratios: (a) 0.5; (b) 1.0; (c) 2.0; (d) 3.0; (e) 4.0

坏形式分别为劈裂破坏、裂纹顶部局部剪切破坏和位于试件端部的局部剪切破坏，表面最大应变分别为 5.708%、13.354%、16.632%. 试件破坏形式两次变化分别对应峰值应力、应变的转折点，说明破坏形式的变化依次影响试件的峰值应力和峰值应变；高径比为 4.0 时表面应变达到最大，峰值应变降到最小.

3　不同高径比充填柱损伤机理分析

3.1　损伤程度分析

不同高径比充填柱试件声发射的振铃计数、累计振铃计数与时间的关系如图 5(a) ~ (e) 所示. 试件高径比为 0.5 ~ 4.0 时的最终累计振铃计数分别为 233280、361385、422057、173396、159396，如图 5(f) 所示. 累积振铃计数呈现先增大后缩小的趋势，高径比 3.0、4.0 的试件最终累计振铃计数较为接近. 这项结果表明当试件可以完整破坏时（高径比为 0.5、1.0、2.0），随着高径比的增大声发射活动的总量和频度不断上升；当试件局部破坏导致失稳时（高径比为 3.0、4.0），累计振铃计数增长在峰值应力后趋于平缓，最终累计振铃计数较小. 当充填柱试件破坏程度相同时，不同高径比试件的最终累计振铃计数应当与充填柱试件的高径比成正比，可以据此得到充填柱试件内部的损伤程度. 由于高径比为 0.5 的充填柱试件在压缩过程中过于破碎，声发射探头未能检测到完整的最终累计振铃计数，故选取同样破碎程度较高、高径比为 1.0 的充填柱试件，将其损伤程度定义为 100%，根据相同体积内累计振铃计数密度之比求得高径比为 2.0、3.0、4.0 的充填柱试件的损伤程度分别为 58.4%、16.0%、11.0%. 可以看出高径比大于 2.0 时，充填柱试件内部的破坏程度较低，有大量区域在失去承载能力后依旧保持完整.

研究表明胶结充填体声发射参数活跃期持续时长占加载总时长比例平均为 10.51%[8]. 本试验中最长加载时间约为 600 s，考虑 10% 的误差并取整，将充填柱试件在加载过程中累计振铃计数上升速度最快的 70 s 作为累计振铃计数快速上升区（简称快速上升区），如图 5(a) ~ (e) 中绿色区域所示. 高径比为 0.5 ~ 4.0 的试件中，快速上升区中出现的累计振铃计数分别为 52823、83968、121918、70854、115292，分别相当于总累计振铃计数的 22.6%、23.2%、28.9%、40.9%、72.3%. 高径比为 0.5 和 1 时该百分比数值较低，仅相差 0.6%，高径比为 2.0 较 1.0 该百分比上升了 5.7%，而高径比为 3.0、4.0 较 2.0 分别上升了 12% 和 31.4%. 说明随着高径比增长，充填柱试件的破坏更加集中；高径比大于 2 时，集中程度上升加快，试件破坏具有突然性. 随着试件高径比增大，损伤程度降低的同时试件的破坏集中程度增大，说明高径比 0.5 ~ 2.0 的试件破坏进程较为均匀，高径比 3.0 ~ 4.0 的试件在进入累计振铃计数快速上升区前内部破坏较少，在累计振铃计数快速上升区中发生突然而集中的破坏.

3.2　裂隙演化过程分析

结合图 5 中快速上升区前后的应变云图，在快速上升区内充填柱试件的局部最大应变与裂纹的长度都有明显的增大. 图 5(a) 和 (b) 显示了高径比为 0.5 和 1.0 时，累计振铃计数快速上升区前后的应变云图，可以看到经过快速上升区的加载后，最大应变从分别 5.778% 升高到 13.436% 和 2.350% 升高到 10.721%，差值为 7.658% 和 8.371%，试件表面出现了新的破坏且呈现整体性，快速上升期位于应力峰值前，在此期间累计振铃计数均匀上升，峰后累计振铃计数曲线呈现阶梯型；图 5(c) 所示的是高径比为 2.0 时，累计振铃计数快速上升区前后的应变云图，可以看到最大应变从 12.714% 升高到 14.374%，差值为 1.660%，试件下方的独立裂纹在快速上升期内与应变最大的裂纹连通，计数快速上升期位于应力峰值处，表现为应力峰值处出现大量高强度的声发射信号，累计振铃计数在应力下降前快速上升；图 5(d)、(e) 所示的是高径比为 3.0、4.0 时，累计振铃计数及快速上升区前后的应变云图，可以看到计数快速上升期位于应力峰值及峰值后的一段时间内，快速上升期前后试件最大应变分别从 8.823% 上升到 15.950% 和 2.830% 上升到 17.572%，差值为 7.127% 和 14.742%，其后累计振铃计数曲线也趋于平缓，充填柱基本失去承载能力. 可以看出随着高径比的增加，试件的累计振铃计数快速上升区由应力峰值前移动到峰值应力后，快速上升区的应力增幅先减小后增大，高径比为 2.0 时最小，说明此时试件具有较好的稳定性.

为探究高径比对裂隙的影响，采用 $\sum N/\sum E$ 分析法[23] 来表示声发射事件的能量集中程度，其中：$\sum N$ 代表声发射累积撞击数，$\sum E$ 代表声发射累积能量. $\sum N/\sum E$ 减小代表高能量事件的发生，可能是初始断裂或拉伸导致的劈裂破坏；$\sum N/\sum E$ 增大时代表低能量事件的发生，代表微裂纹的发展或者是剪切破坏导致的[23]. 图 6 所示的是不同高径比充填柱试件声发射累积振铃计数与 $\sum N/\sum E$ 的关系.

由图 6 可以看出，高径比在 0.5 ~ 1.0 的试件在

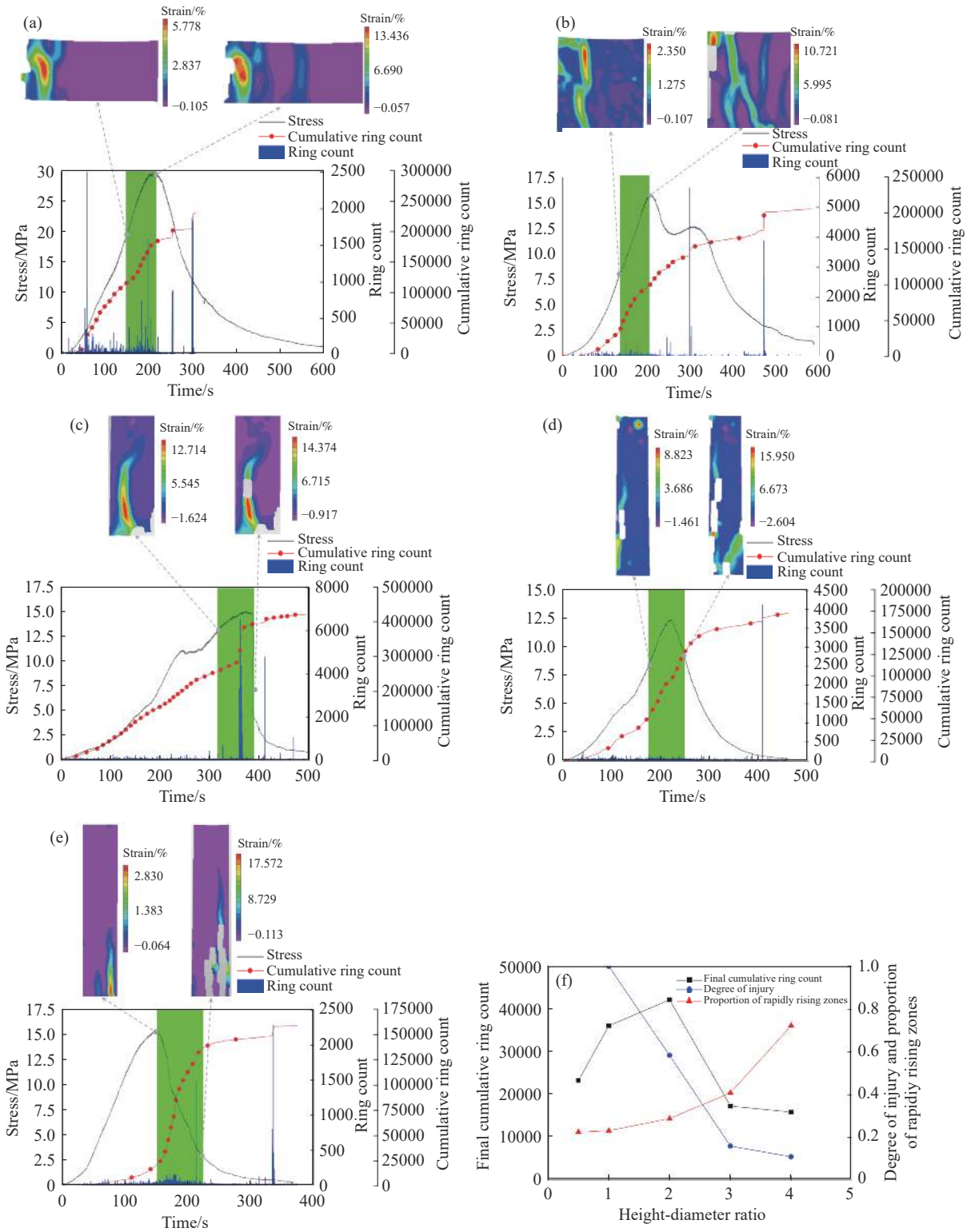

图 5 不同高径比充填柱表观应变图像及声发射的应力、振铃计数和累积振铃计数. (a) 0.5; (b) 1.0; (c) 2.0; (d) 3.0; (e) 4.0; (f) 不同高径比充填柱试件最终累计振铃计数

Fig.5 Apparent strain images of backfill columns with different height–diameter ratios and stress, ringing count, and cumulative ringing count of acoustic emission: (a) 0.5; (b) 1.0; (c) 2.0; (d) 3.0; (e) 4.0; (f) final cumulative ringing count of the backfill column specimens with different height–diameter ratios

累计振铃计数快速上升区前$\sum N/\sum E$都是持续稳定上升，说明此时试件内正在进行微裂纹发育；快速上升区内$\sum N/\sum E$上升的同时出现波动，说明此时试件内微裂纹发育的同时有少量微裂纹联通；快速上升区之后的$\sum N/\sum E$上升速度减缓，在振铃的上升阶梯处出现降低，说明这是大量微裂纹联通

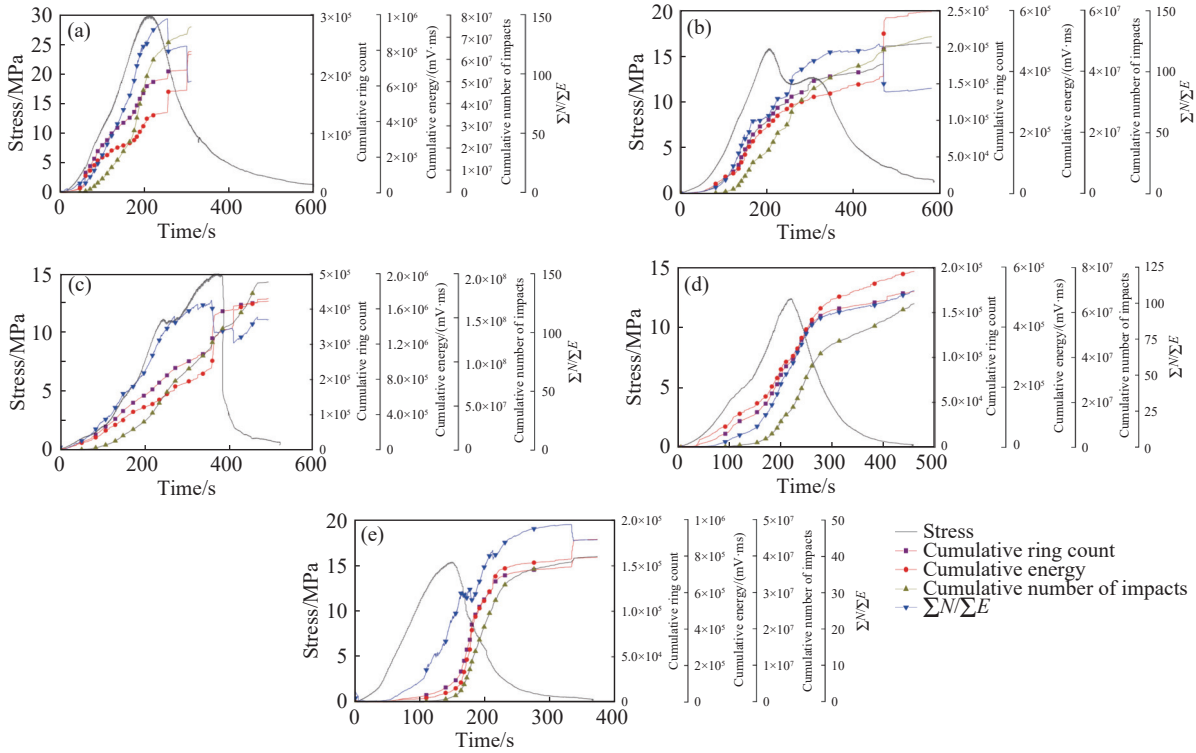

图 6　不同高径比充填柱试件应力–累积能量–累计撞击数–$\sum N/\sum E$ 与时间的关系. (a) 0.5; (b) 1.0; (c) 2.0; (d) 3.0; (e) 4.0

Fig.6　Relationship between stress–cumulative energy–cumulative impact–$\sum N/\sum E$ and time of backfill column specimens with different height–diameter ratios: (a) 0.5; (b) 1.0; (c) 2.0; (d) 3.0; (e) 4.0

导致的劈裂破坏. 高径比为 2.0 的试件$\sum N/\sum E$ 前中期与高径比 0.5 ~ 1.0 的试件相似，快速上升期后继续上升，试件破坏由劈裂向剪切转变. 高径比为 3.0 的试件$\sum N/\sum E$ 不断上升，且在累计振铃计数快速上升区$\sum N/\sum E$ 上升速度加快，结合图 4 中充填柱破坏形态判断高径比为 3.0 的试件发生了局部剪切破坏导致的整体失稳. 高径比为 4.0 的试件在开始承压时和累计振铃计数快速上升区内$\sum N/\sum E$ 同时出现快速上升和下降，说明开始承压时试件就出现了初始断裂，且伴随着剪切破坏，快速上升区内试件因局部剪切破坏而整体失稳并失去承载能力.

综合以上分析可以看出，充填体高径比在 0.5 ~ 1.0 时试件的破坏是微裂纹联通导致劈裂破坏，主要裂纹的宽度较小，试件破坏较为均匀，且主要集中在峰值应力前；高径比在 2.0 ~ 4.0 时试件的破坏以局部剪切破坏为主，主要裂纹的宽度较大，出现集中在峰值应力后.

3.3　能量释放烈度分析

在矸石胶结充填柱试件的加载过程中，其局部破坏对整体承载能力的影响程度与破坏时的能量释放烈度有关，烈度越大充填柱越容易因局部破坏而整体失去承载能力[24]. 从图 6 中可以看出在同一声发射试件中，累计能量曲线在峰值应力后的增长比累计振铃计数更加显著[25]，这表明峰值应力后声发射能量释放更加剧烈. 单个声发射事件的能量 E 为超出门槛电压的声发射信号包络线下的面积，振铃计数 C 是越过门槛信号的振荡次数[26−27]. 可以通过能量 (E) 与振铃计数 (C) 的比值 E/C 进一步研究能量的变化，E/C 代表的是一个声发射事件中单次越过门槛信号的振荡所含能量的平均值. 以 E/C 作为研究对象可以更好地表现试件 29 中每个振铃计数的幅度、包含的能量以及声发射事件中能量释放的剧烈程度，借此推测试件破坏时剧烈程度，E/C 越大说明试件在该位置的破坏程度越剧烈.

所有声发射事件的 E/C 与时间的关系如图 7(a) ~ (e) 所示，随着高径比的增大 E/C 在加载后半段的增长更为明显，不同高径比试件的平均 E/C、峰值应力前后的平均 E/C，如图 7(f) 所示.

由图 7(f) 可以看出随着高径比的增加，试件的平均 E/C 从 1.26 增大到 2.76，破坏更加剧烈，与前文中得出的结论一致；同时，E/C 在峰值应力后比峰值应力前的提升值呈现先减小后增加的趋势，高径比为 2.0 时最小，为 0.203，说明高径比为 2.0 时试件峰值应力前后的能量释放剧烈程度最为接近.

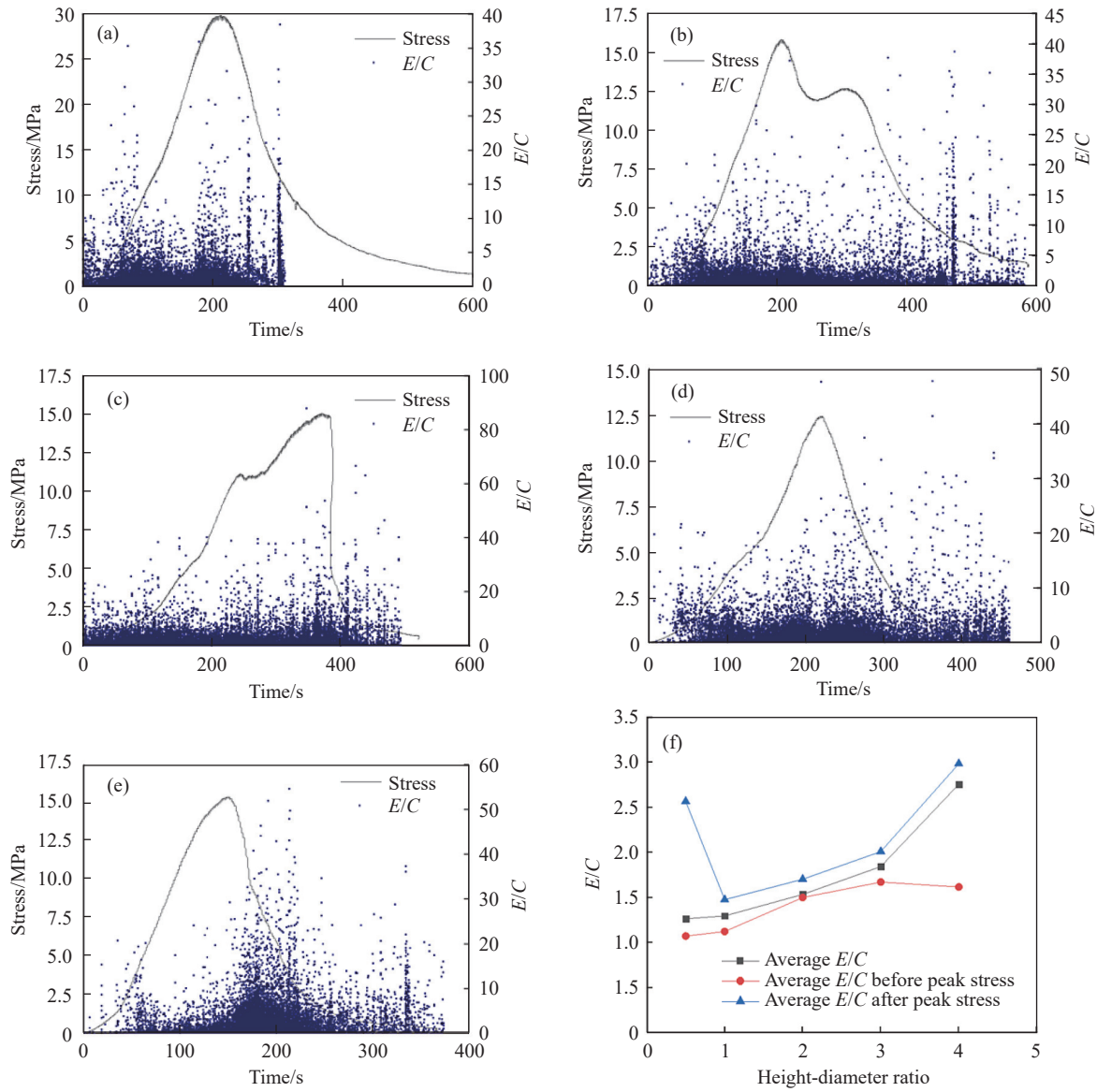

图 7 不同高径比充填柱试件声发射的 *E/C* 与应力和时间的关系及平均 *E/C* 随高径比变化曲线. (a) 0.5; (b) 1.0; (c) 2.0; (d) 3.0; (e) 4.0; (f) 平均 *E/C* 随高径比变化曲线

Fig.7 Relationship between *E/C* and stress and time of acoustic emission in specimens with different height–diameter ratios and the variation curve of average *E/C* with height–diameter ratio: (a) 0.5; (b) 1.0; (c) 2.0; (d) 3.0; (e) 4.0; (f) average *E/C* curves with the height to diameter ratio

试件达到峰值应力前的 *E/C* 从高径比为 0.5 的 1.07 上升到高径比为 3.0 的 1.67, 其中高径比 0.5 与 1.0 的 *E/C* 只相差 0.05, 说明在高径比较小的试件在达到峰值应力前声发射事件单次振铃所包含的能量同样较小, 以产生微小裂隙为主; 高径比为 1.0 ~ 3.0 时峰值前 *E/C* 不断增大, 说明单次振铃所包含的能量变大, 破坏变得剧烈; 高径比为 3.0 ~ 4.0 时峰值前 *E/C* 从 1.67 下降到 1.62, 变化幅度较小, 说明高径比在 3.0 ~ 4.0 的试件在到达峰值应力前单次事件中能量的激烈程度相近.

试件达到峰值应力后的 *E/C* 从高径比为 0.5 的 2.57 下降到高径比为 1 的 1.48, 且高径比为 0.5 时峰值应力后与峰值应力前 *E/C* 的差(1.49)大于高径比在 1 ~ 3 时的差(不大于 0.34), 这是因为高径比为 0.5 的充填柱试件在压缩过程中过于破碎, 声发射探头只监测到残余承载前能量释放较为激烈时的数据, 存在较大的误差; 但也可以看出峰值应力后的声发射事件在整体中所占比例较小且集中, 其集中的位置能量释放较为剧烈, 它们是微裂纹联通导致的能量释放.

随着充填柱试件的高径比从 1.0 提高到 4.0, 峰值应力后的 *E/C* 高径比为 1.0 的 1.48 上升到高径比为 4.0 的 2.98, 提升幅度从高径比 1.0 到 2.0 之间的 0.23 上升到高径比 3.0 到 4.0 之间的 0.97. 高径比从 2.0 上升到 3.0 的过程中峰值后 *E/C* 超过了 2. 说明试件在峰值应力后的破坏剧烈程度随高径

比增大而增强，这是由于期间快速上升期从峰值应力前向峰值应力后移动. 结合图 3(c) 可以看出随高径比增加，试件的残余应力在不断降低，且应力下降速度越来越快，说明试件的破坏越剧烈，残余承载能力就越差，充填柱内部的应力没有用来承载上部压力，而是对裂隙附近的区域产生冲击，表现为高径比在 3.0 ~ 4.0 的试件局部应变增长迅速. 这种激烈的能量冲击加速了充填柱的进一步失稳，使更多应力转而对试件产生破坏，陷入恶性循环，导致高径比越大的试件在峰值应力后破坏越剧烈，使 E/C 随高径比的增大而加速上升.

结合以上分析，可以认为在峰值应力前，试件的破坏的剧烈程度随着高径比的增大而增大，直到高径比大于 2.0 后增幅放缓并最终在接近 3.0 时停止增加，说明峰值应力前充填柱破坏的剧烈程度在高径比为 3.0 时达到最大，不宜选用高径比大于等于 3.0 的充填体；峰值应力后高径比大于 2.0 的充填柱破坏较为剧烈，更容易出现局部破坏导致的整体失稳，不利于承载压力. 实际工程中为防止充填柱在承载过程中出现大的破坏，其高径比不宜大于 2.0.

3.4　不同高径比充填柱尺寸效应成因分析

综合以上数据，可以从两方面对不同高径比充填柱破坏特征的变化原因进行分析. 首先，高径比较低的试件到达峰值应力前其内部处于较高的三向应力状态[18]，即使有个别局部破坏也不影响试件整体的承载能力和稳定性，微裂纹可以得到足够的发育；高径比越大，试件中部越接近于一维受力状态，横向变形越大. 对高径比为 0.5 的试件，当应力达到峰值后充填柱内部尚未发展的微裂纹已经极少，峰后应力下降使得新的微裂纹发育难以出现，所以到达峰值应力后累计振铃计数增长变缓；另一方面垂直应力下降使得端部摩擦力降低，端部效应失效，充填柱的侧向应变加剧，为微裂纹连通提供了条件，表现为峰后偶尔出现短暂而强烈的声发射信号和劈裂破坏. 高径比在 1.0 到 2.0 时充填柱的损伤程度下降，微裂纹发育不如高径比 0.5 时充分，但破坏过程相似.

其次，矸石胶结充填柱由一种人工制成的非均质材料制成，料浆的塑性黏度较低，浆骨密度差较大，易出现静态离析[28]. 硬化视觉稳定性指数法（HVSI）是一种通过技术人员视觉观察硬化混凝土剖面的粗骨料分布状况来判断混凝土拌合物的静态抗离析性能的方式[28]. 如图 8(a) ~ (e) 所示的是不同高径比充填柱破坏后看到的中粗矸石分布情况，为清晰展示大高径比试件顶底部的区别，对充填柱相同面积的区域进行放大并用黄色为符合标准的中粗矸石进行描边. 根据 HVSI 评价标准，从图 8(a) ~ (b) 中可知高径比 0.5 ~ 1.0 时黑色的矸石骨料在垂直方向上分布均匀，未发生明显的离析现象，符合 VSI 分级为 0 的状态，说明此时砂浆的稳定性较好. 图 8(c) 中高径比为 2.0 时，试件底部的矸石骨料分布密集、粒径较大，顶部矸石骨料分布不均匀、密度与粒径较小，试件顶部无明显的砂浆层，高度方向粗骨料分布稍不均匀，VSI 分级为 1，稳定性一般，有较为明显的离析现象. 图 8(d) 中高径比为 3.0 时试件底部的矸石比顶部粒径和密度更大，符合 VSI 分级为 1 的状态，有较为明显的离析现象. 图 8(e) 中高径比为 4.0 的充填柱破坏都集中于矸石集中的区域，破坏处的矸石粒径和密度与高径比为 2.0、3.0 时矸石集中区域相似，符合矸石骨料集中后的状态. 这种离析现象是由于在浇筑后的静置过程中，作为骨料的煤矸石会在重力的作用下向料浆底部沉降，导致不同高度位置处圆柱体试件的抗压强度不同，充填柱强度沿高度方向分布不均匀，进而导致充填柱的整体承载

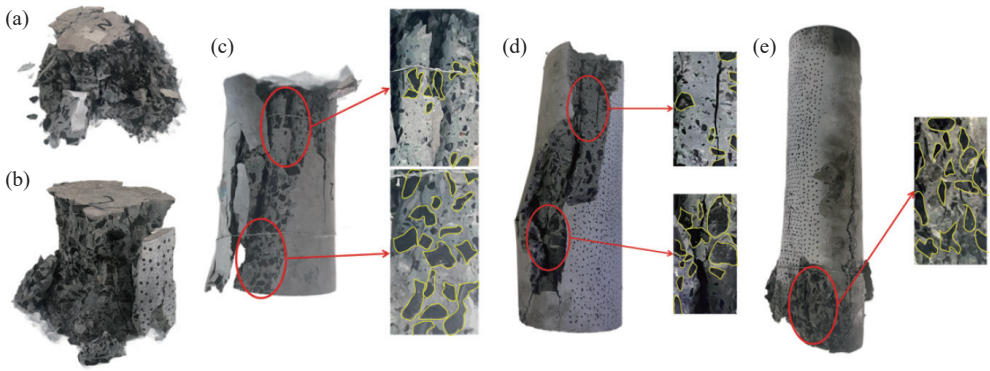

图 8　不同高径比充填柱试件内部矸石分布图. (a) 0.5; (b) 1.0; (c) 2.0; (d) 3.0; (e) 4.0

Fig.8　Distribution diagram of the internal gangue of backfill column specimens with different height–diameter ratios: (a) 0.5; (b) 1; (c) 2; (d) 3; (e) 4

力降低[28]. 充填柱高径比在 3.0 ~ 4.0 时静态离析现象较 0.5 ~ 2.0 时更明显，底部粗骨料集中的现象更严重，强度较低的煤矸石骨料导致试件的底部承载能力降低且易出现局部破坏并最终使试件整体失去承载能力，裂隙不会延伸到整个试件.

可以看出充填柱高径比的增加会导致端部效应影响减弱与离析导致的粗骨料聚集，使试件的中下部更容易受到破坏，对于高径比大于等于 2 的充填柱加固时可以优先加固其中下部.

4 结论

(1) 在单轴压缩状态下，充填柱的峰值应力和峰值应变随着高径比的增大而减小，充填柱峰值应力和峰值应变的变化分别在高径比大于 1.0 和 2.0 后趋于平缓. 随着高径比增大，充填柱的破坏形式从高径比为 0.5 ~ 2.0 时的整体破坏转为高径比 3.0 ~ 4.0 时的局部破坏，部分试件开始出现局部剪切破坏的特征. 16% 以上的局部应变可以导致试件整体失去承载能力.

(2) 声发射累积振铃计数随着高径比增大呈现先增大后缩小的趋势，高径比为 2.0、3.0、4.0 的充填柱试件的损伤程度分别为高径比为 1.0 时的 58.4%、16.0%、11.0%，高径比 3.0 ~ 4.0 的试件局部破坏导致的失稳会使损伤程度大幅降低，并使声发射信号较为集中. 结合 $\sum N/\sum E$ 发现高径比 0.5 ~ 1.0 的充填柱试件在应力峰值处内部微裂纹演化加剧并导致劈裂破坏；高径比 2.0 时试件破坏由劈裂向剪切转变；高径比 3.0 ~ 4.0 的充填柱试件出现了局部剪切破坏，使试件整体失稳并失去承载能力.

(3) 随着试件高径比从 0.5 增大 4.0，试件的平均 E/C 从 1.26 增大到 2.76，试件破坏的剧烈程度随高径比增大而增大. 充填柱峰值应力前的 E/C 先增大后平缓，峰值应力前充填柱破坏的剧烈程度存在上限，在高径比为 3.0 时达到最大；峰值应力后的 E/C 先减小后增加，峰值应力后高径比大于 2.0 的充填柱破坏的过程比较剧烈，容易出现局部破坏导致的整体失稳.

(4) 充填柱破坏特征随高径比变化主要有两方面原因：随着高径比增大，端部效应对试件中部的横向变形约束就越小，充填柱越接近一维受力状态；高径比越大静态离析现象的影响越大，容易导致试件的底部承载能力降低. 本研究结果为充填开采中充填柱高径比的选取提供了理论参考，工程中充填柱的高径比不宜大于 2.0，对高径比较大的充填柱可以优先加固其中下部.

参 考 文 献

[1] Wu A X, Yang Y, Cheng H Y, et al. Status and prospects of paste technology in China. *Chin J Eng*, 2018, 40(5): 517
(吴爱祥, 杨莹, 程海勇, 等. 中国膏体技术发展现状与趋势. 工程科学学报, 2018, 40(5): 517)

[2] Feng G R, Du X J, Guo Y X, et al. Basic theory of constructional backfill mining and the underground space utilization concept. *J China Coal Soc*, 2019, 44(1): 74
(冯国瑞, 杜献杰, 郭育霞, 等. 结构充填开采基础理论与地下空间利用构想. 煤炭学报, 2019, 44(1): 74)

[3] Feng G R, Liu W H, Du X J, et al. Crack evolution characteristics of cemented-gangue-fly-ash backfill with different proportions of fly ash and cement. *Constr Build Mater*, 2023, 385: 131498

[4] Du X J, Feng G R, Zhang M, et al. Influence of backfilling rate on the stability of the "backfilling body-immediate roof" cooperative bearing structure. *Int J Min Sci Technol*, 2022, 32(6): 1197

[5] Ye G X, Xie L K, Guo L J, et al. Study on the strength of packing specimens in different shape or size. *China Min Mag*, 2015, 24(10): 128
(叶光祥, 解联库, 郭利杰, 等. 不同形状尺寸充填试样强度研究. 中国矿业, 2015, 24(10): 128)

[6] Wu S C, Li T L, Cheng H Y, et al. Mechanical response and stability of horizontal pillar size evolution in high stress environment. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2021, 52(3): 1027
(吴顺川, 李天龙, 程海勇, 等. 高应力环境水平矿柱尺寸演变过程力学响应及稳定性. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(3): 1027)

[7] Tang Y N, Fu J X, Song W D, et al. Mechanical properties and crack evolution of interbedded cemented tailings backfill. *Chin J Eng*, 2020, 42(10): 1286
(唐亚男, 付建新, 宋卫东, 等. 分层胶结充填体力学特性及裂纹演化规律. 工程科学学报, 2020, 42(10): 1286)

[8] Cheng A P, Dai S Y, Zhang Y S, et al. Study on size effect of damage evolution of cemented backfill. *Chin J Rock Mech Eng*, 2019, 38(Sup 1): 3053
(程爱平, 戴顺意, 张玉山, 等. 胶结充填体损伤演化尺寸效应研究. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 1): 3053)

[9] Gan D Q, Han L, Liu Z Y, et al. Experimental study on the size effect of compressive strength of cemented filling body. *Met Mine*, 2018(1): 32
(甘德清, 韩亮, 刘志义, 等. 胶结充填体抗压强度尺寸效应的试验研究. 金属矿山, 2018(1): 32)

[10] Zhao K, Liu Z C, Zeng P, et al. Experimental study on energy damage evolution characteristics of filling specimens with different sizes under uniaxial compression. *Gold Sci Technol*, 2022, 30(4): 540
(赵奎, 刘周超, 曾鹏, 等. 单轴压缩下不同尺寸充填体能量损伤演化特征试验研究. 黄金科学技术, 2022, 30(4): 540)

[11] Xue G L, Yilmaz E, Song W D, et al. Fiber length effect on strength properties of polypropylene fiber reinforced cemented

tailings backfill specimens with different sizes. *Constr Build Mater*, 2020, 241: 118113

[12] Xu M F, Gao Y T, Jin A B, et al. Prediction of cemented backfill strength by ultrasonic pulse velocity and BP neural network. *Chin J Eng*, 2016, 38(8): 1059
(徐淼斐, 高永涛, 金爱兵, 等. 基于超声波波速及 BP 神经网络的胶结充填体强度预测. 工程科学学报, 2016, 38(8): 1059)

[13] Chang B M, Du C F, Wei D Y, et al. Strength mechanics model of filling body based on Coulomb tribology principle. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2020, 51(3): 777
(常宝孟, 杜翠凤, 魏丁一, 等. 基于库仑摩擦原理的充填体强度力学模型. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(3): 777)

[14] Wang Y, Xiong Z Q, Su C D. Analysis on size effect and failure characteristics of filling pillars with modified high-water material. *Coal Sci Technol*, 2021, 49(12): 82
(王奚, 熊祖强, 苏承东. 改性高水材料充填支柱尺寸效应及破坏特征分析. 煤炭科学技术, 2021, 49(12): 82)

[15] Zhang M L, Yang Y, Gao L S. A study on the geometric effects of a concrete filling body in remaining roadways with fully mechanised caving. *J Geophys Eng*, 2021, 18(5): 681

[16] Lin H, Yang R S, Li Y L, et al. Application of short-wall continuous mining and continuous backfilling cemented-fill mining technology. *Chin J Eng*, 2022, 44(6): 981
(林海, 杨仁树, 李永亮, 等. 短壁连采连充式胶结充填采煤技术应用研究. 工程科学学报, 2022, 44(6): 981)

[17] Liu D, Xu J C, Pu H. Experimental study on creep characteristics of gangue cemented fillers with different water content. *J Min Saf Eng*, 2021, 38(5): 1055
(刘鼎, 许军策, 浦海. 不同含水率下矸石胶结充填体蠕变特性试验研究. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(5): 1055)

[18] Zhao Y H, Ran H Y, Feng G R, et al. Damage evolution and failure characteristics of cemented gangue backfill body with different height-width ratios under uniaxial compression. *J Min Saf Eng*, 2022, 39(4): 674
(赵永辉, 冉洪宇, 冯国瑞, 等. 单轴压缩下不同高宽比矸石胶结充填体损伤演化及破坏特征研究. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(4): 674)

[19] Feng G R, Zhao Y H, Guo Y X, et al. Study on damage evolution and failure characteristics of backfill column under uniaxial compression. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2022, 53(10): 4012
(冯国瑞, 赵永辉, 郭育霞, 等. 柱式充填体单轴压缩损伤演化及破坏特征研究. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(10): 4012)

[20] Yin S H, Yan Z P, Chen X, et al. Effect of fly-ash as fine aggregate on the workability and mechanical properties of cemented paste backfill. *Case Stud Constr Mater*, 2022, 16: e01039

[21] Li D, Feng G R, Guo Y X, et al. Analysis on the strength increase law of filling material based on response surface method. *J China Coal Soc*, 2016, 41(2): 392
(李典, 冯国瑞, 郭育霞, 等. 基于响应面法的充填体强度增长规律分析. 煤炭学报, 2016, 41(2): 392)

[22] Guo X Y. *Experimental Study on Influencing Factors of Filling Paste Performance* [Dissertation]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013
(郭晓彦. 充填膏体性能影响因素试验研究[学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2013)

[23] Hall S A, Sanctis F, Viggiani G. Monitoring fracture propagation in a soft rock (neapolitan tuff) using acoustic emissions and digital images. *Pure Appl Geophys*, 2006, 163(10): 2171

[24] Gao L. *Study on Energy Evolution Mechanism and Catastrophe Characteristics during Rock Deformation and Failure* [Dissertation]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021
(高琳. 岩石变形破坏过程中的能量演化机制与灾变特征分析[学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2021)

[25] Lin M Q, Hu H P, Liang X, et al. Acoustic emission characteristics of rockburst inoculation of large-size specimen under gradient stress. *Met Mine*, 2022(3): 71
(吝曼卿, 胡会平, 梁潇, 等. 大尺寸试件在梯度应力作用下的岩爆孕育声发射特性. 金属矿山, 2022(3): 71)

[26] Zhu L, Zhang Y, Dong L, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of intermittent jointed rock mass under uniaxial compression. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*, 2019, 283(1): 012015

[27] Gao H, Zhang S Z, Xi Z, et al. Study on the parameters of dynamic friction-introduced acoustic emission of different materials. *Nondestruct Test*, 2009, 31(4): 273
(高宏, 张守苗, 席镇, 等. 基于不同材料的动态摩擦声发射特征参数研究. 无损检测, 2009, 31(4): 273)

[28] Li Q D. *Study on Static Anti-Segregation Performance of Coal Gangue Cemented Filling Material* [Dissertation]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019
(李庆东. 煤矸石胶结充填材料静态抗离析性能研究[学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2019)