

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.03.025

# 力学性能对矿柱体系破坏影响的三维数值分析

贾蓬, 张瑶, 姬万民, 赵爱成

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

**摘要:** 在深部高应力等复杂地质条件下开采时,由多个矿柱构成的矿柱体系的稳定性对矿山安全生产至关重要.利用 RFPA<sup>3D</sup>-Parallel 程序,研究了单轴抗压强度对串行和并行矿柱体系破裂过程的影响.结果表明,串行矿柱中强度较弱部分的失稳决定整个体系的稳定,对该段加固和监测有助于体系的稳定性控制;对并行布设的矿柱体系,其压力传递与柱的抗压强度密切相关,较弱柱先破坏,应力依次向强度较高的柱转移,直到矿柱系统失稳,可将声发射数的多峰现象或声发射累积增长阶梯型弧段作为矿柱体系中弱柱失稳破裂、应力向相邻强柱转移的依据.

**关键词:** 矿柱体系;力学性能;破坏机理;数值分析;声发射

中图分类号: TU 45 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2018)03-0431-06

## 3D Numerical Analysis for Effect of Mechanical Properties on Failure Process of Serial and Parallel Rock Pillar System

JIA Peng, ZHANG Yao, JI Wan-min, ZHAO Ai-cheng

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Yao, E-mail: 1078893795@qq.com)

**Abstract:** When mining in deep rock mass under high stress and complicated geological conditions, the stability of rock pillar system is quite important for safe-mining. A series of numerical simulations were conducted to evaluate the effect of uniaxial compressive strength on the failure processes of serial and parallel pillar systems by using the RFPA<sup>3D</sup>-Parallel code. Results show that the stability of the serial pillar system depends on pillar of lower uniaxial compressive strength, which means that monitoring and reinforcement of the relatively weak pillar in the serial pillar system is quite essential to the stability control of the serial pillar system. For the parallel pillar systems, the pressure-transfer is closely related to the compressive strength of the pillars, that is, stress will be transferred from the weak pillar to the strong pillar till the failure of the whole pillar system. It is also found that the multi-peak phenomenon of the acoustic emission (AE) counts or the step-curve of the accumulative AE counts can be deemed as the hint of stress transfer from the fractured weak pillar to the nearby strong pillars.

**Key words:** rock pillar system; mechanical property; failure mechanism; numerical analysis; acoustic emission(AE)

近年来,随着地下开采的持续进行,地下开采诱发的采场地表开裂、下沉,地面建筑物陷落、倒塌等灾害随之增多.随着开采持续向深部进行,地应力不断增大,矿柱的稳定性对矿山的安全生产至关重要,目前国内外学者针对深部矿山矿柱失稳破坏问题已经展开了大量研究. James<sup>[1]</sup>指出矿柱的强度主要取决于尺寸效应、矿柱宽高比和

矿柱材料力学性质 3 个方面. Tang 等<sup>[2]</sup>利用 RFPA<sup>2D</sup>模拟了顶底板刚度和强度对矿柱破坏的影响. Zhang 等<sup>[3]</sup>通过 PFC<sup>3D</sup>研究了不同节理裂隙对矿柱强度、破坏模式的影响. Wang 等<sup>[4]</sup>利用 RFPA<sup>2D</sup>模拟了串行和并行矿柱在各种力学参数影响下的破坏机理. 一些学者还从声发射特征角度,研究了在加载条件下岩石破裂过程中声发射

率、能量、定位等随时间的变化特征,希望对矿柱的失稳破裂的前兆特征加以分析和解读<sup>[5-8]</sup>.上述研究对于从宏、细观角度认识矿柱的破坏失稳机理具有重要的意义.然而在深部开采过程中,对稳定性起决定作用的往往是由几个或多个矿柱构成的矿柱体系的稳定性.此外,矿柱的分布方式以及矿柱裂纹萌生扩展是三维问题,采用平面问题假定,往往不能反映空间矿柱体系破裂失稳过程.因此,将几个彼此并行或串行的矿柱构成的系统作为研究对象来探讨该区域的稳定性更加具有实际意义.

此外,在实际工程中,构成矿柱体系的单个矿柱的力学性质往往不同,矿柱体系的排列方式也往往不同,如并行或串行排列.因此研究不同力学性质矿柱对矿柱体系破坏机制的影响有助于解释矿柱体系破裂失稳的机制,并深入认识矿柱体系破裂失稳的前兆特征.尽管矿柱体系的破裂失稳研究可以通过实验室试验完成,但是试验往往受到尺寸效应的限制,以及参数变换困难、试验周期长和费用高等因素的制约.因此,采用能够反映裂纹萌生、扩展和贯通的三维数值模拟方法,对矿柱系统的破裂失稳进行研究,不失为一种有效的研究手段.

本文使用 RFPA<sup>3D</sup> - Parallel 程序,通过不同单轴抗压强度矿柱对矿柱体系破坏机制的模拟,探讨矿柱力学性质对不同排列方式矿柱体系破坏过程的影响、破裂失稳机制及其与矿柱体系声发射特征的关系,以期对矿柱体系失稳破坏的预判提供理论依据.

## 1 三维数值模型的建立

为研究矿柱单轴抗压强度对矿柱体系破坏过程的影响,分别建立串行和并行矿柱两种体系,其示意图如图 1 所示.各矿柱体系相关力学参数见表 1.

本文中模拟试验都是在单轴压缩作用下进行的,采用位移逐步加载的方法,Z 方向每步位移增量为 0.006 mm.除 2.1 中模型外,其他模拟试验中,每个矿柱的试件尺寸均为 50 mm × 50 mm × 100 mm,划分的网格为 25 × 25 × 50,共 31 250 个单元.模拟中将顶底板的弹性模量和单轴抗压强度值设置为足够大,以确保顶底板有足够的刚度而在矿柱发生破坏时不会破坏.单轴抗拉强度为单轴抗压强度的 0.1 倍,残余强度系数取 0.1,内摩擦角取 30°<sup>[9]</sup>.

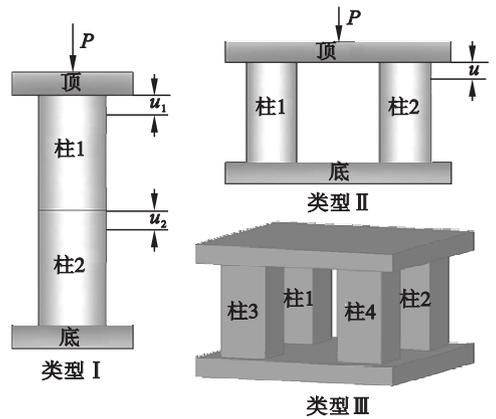


图 1 矿柱体系模型

Fig. 1 Rock pillar system model

表 1 矿柱体系各矿柱的力学参数

Table 1 Mechanical properties of rock pillar system

变量	矿柱	类型 I	类型 II	类型 III
弹性模量/ GPa	各柱	30	30	30
单轴抗压强度/ MPa	柱 1	100	100	80
单轴抗压强度/ MPa	柱 2	200	200	150
单轴抗压强度/ MPa	柱 3	—	—	250
单轴抗压强度/ MPa	柱 4	—	—	350
泊松比	各柱	0.25	0.25	0.25
均质度	各柱	3	3	3

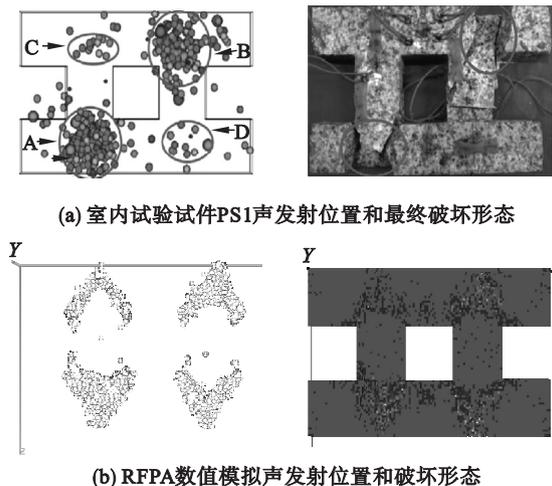
## 2 模拟结果讨论

### 2.1 力学性质相同矿柱组成的并行矿柱体系破坏模式

为了便于与室内试验对比,模拟矿柱力学参数的设定与 Xu 等<sup>[10]</sup>花岗岩试件的力学参数完全一致(见图 2a).模拟试样尺寸设为 250 mm × 150 mm × 50 mm.在单轴压缩条件下,矿柱与顶底板相接位置最容易产生应力集中出现声发射群集现象,两力学性质完全相同的矿柱同时在矿柱与顶底板相接的 4 个区域发生对称的宏观破坏,见图 2b.值得指出的是,由于室内试验试件制作材料的不均匀性和加载不均匀等原因,导致最终破坏形态和数值模拟的对称破坏形态并不完全一致,见图 2a, 2b,但总体破坏区都是矿柱与顶底板相接处.对模型进行单轴压缩加载后得到的声发射位置和破坏形态显示,破坏结果与室内试验基本一致,见图 2.

### 2.2 不同抗压强度矿柱组成的串行矿柱破坏模式

工程中在留设矿柱时,经常遇到矿柱上下两段的材料力学参数不一致的情况.为分析由 2 个



(a) 室内试验试件PS1声发射位置和最终破坏形态

(b) RFPA数值模拟声发射位置和破坏形态

图 2 数值模拟结果与单轴压缩试验<sup>[10]</sup>对比

Fig. 2 Comparison between numerical results and test results<sup>[10]</sup>

不同单轴抗压强度的矿柱所组成的串行矿柱的破坏过程,建立了上部强度弱于下部强度的串行矿柱,单轴压缩条件下的破坏过程(左)和对应的 Z 向位移图(右),如图 3 所示.图 3a~3h 分别给出了加载不同阶段对应的串行矿柱单轴压缩破裂损

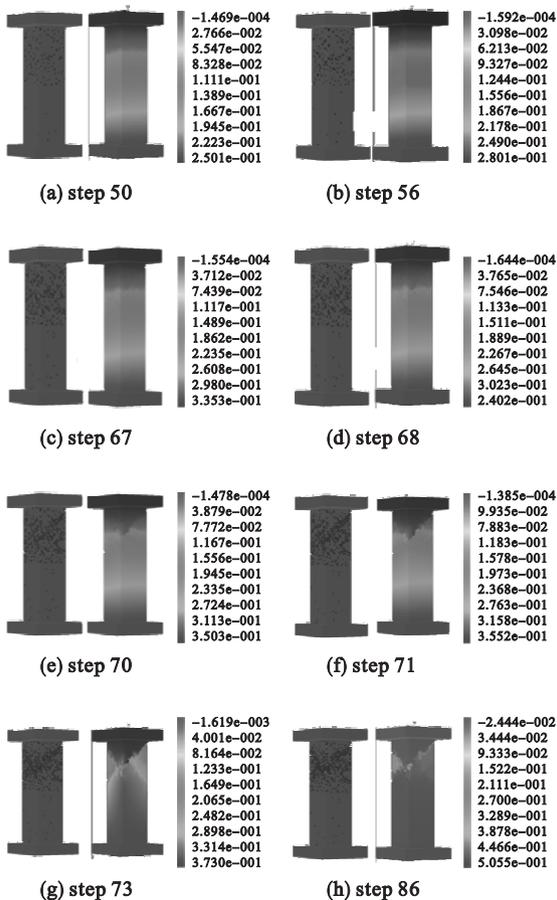


图 3 串行矿柱单轴压缩破裂损伤演化过程及相应位移云图

Fig. 3 Damage evaluation and displacement nephogram of the two-serial pillar system

伤演化过程及相应的位移云图.各阶段对应的加载应变分别为 0.06%, 0.096%, 0.126%, 0.15%, 0.165%, 0.18%, 0.198%, 0.258%.在图 3a~图 3d 阶段,损伤破坏单元主要集中在单轴抗压强度比较低的柱 1 中,柱 2 中只会出现极少部分的破坏单元.随着荷载的继续增加,裂纹首先在柱 1 的右上侧出现并且逐渐向下扩展(图 3e,图 3f 阶段),最终在矿柱 1 中形成一个与 X 轴成约 45°的贯通斜裂缝面(图 3g,图 3h 阶段).因此,在矿山开采留设矿柱时,应充分考虑上下层矿柱强度差异过大而导致矿柱失稳.

图 4,图 5 分别表示两串行矿柱的轴向应变和轴向应力、声发射数的关系曲线.由图 4 可知,该系统在 e 点处达到应力峰值,约 38 MPa. e 点为矿柱体系不稳定破坏的起点,从 e 点开始,轴向应力迅速下降,而在图 5 中 e~f 阶段,相应的声发射数目迅速大量增加,矿柱发生了宏观破裂并产生急剧应力降而很快失去承载能力.而在矿柱发生破坏前的 a 点以左阶段以及破坏后的 g~h 阶段声发射数目极少甚至几乎没有.在 a~d 阶段,声发射数目逐渐缓慢增加,并且在应力峰值 e 点开始,声发射数目急剧增加.

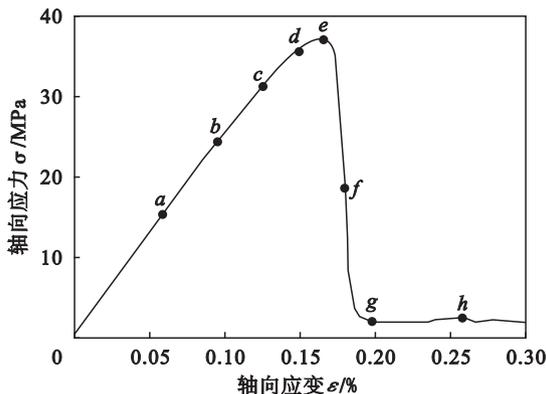


图 4 串行矿柱轴向应力与轴向应变的关系

Fig. 4 Axial stress vs. axial strain for the two-serial pillar system

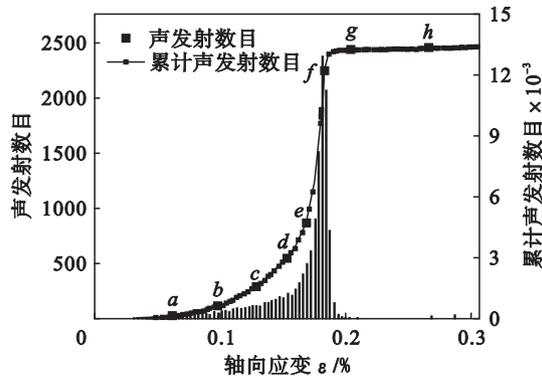


图 5 串行矿柱声发射数与应变的关系

Fig. 5 AE counts vs. axial strain for the two-serial pillar system

## 2.3 单轴抗压强度对两并行矿柱体系破坏模式的影响

对于串行矿柱,矿柱中较弱区域先破坏会导致矿柱的整体失稳.为讨论由 2 个不同抗压强度的矿柱所组成的并行矿柱的破坏模式,建立如图 6 所示的矿柱模型.图 6 为 2 个并行矿柱的单轴压缩破裂过程中的 Z 向位移图.图 7,图 8 分别表示相应的轴向应力-应变曲线、声发射数-轴向应变曲线图.

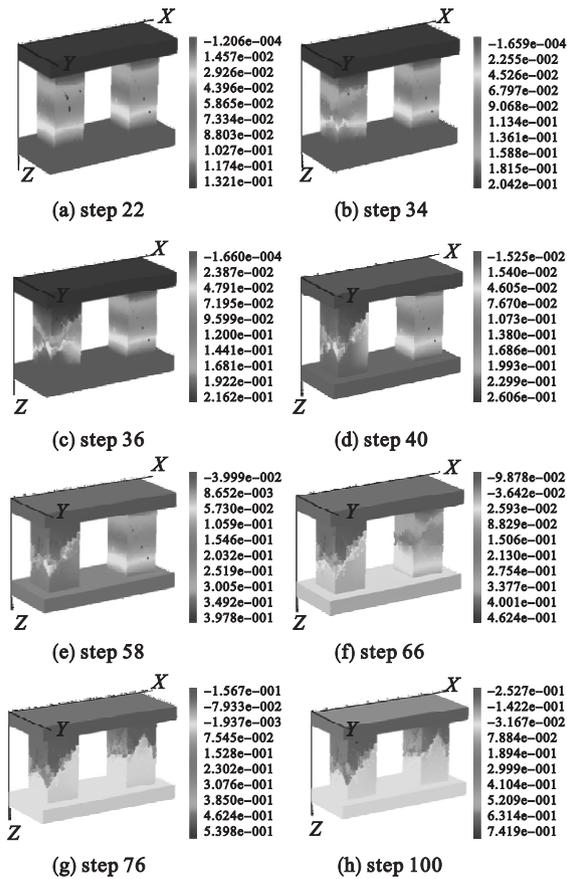


图 6 并行矿柱单轴压缩破裂过程

Fig. 6 Failure process of the two-parallel pillar system

图 6a ~ 图 6h 对应的加载应变分别为 0.132%, 0.198%, 0.216%, 0.246%, 0.348%, 0.396%, 0.456%, 0.6%. 最初破坏单元出现在单轴抗压强度较小的柱 1 (见图 6b, 图 6c), 图 7 中 *b* 点是柱 1 不稳定状态的起点, 在 *b* 点处开始, 裂纹不断在柱 1 中扩展, 应力逐步下降 (*bd* 阶段), 在图 8 中相应段的声发射数目显著增加. 最终柱 1 在 *cd* 段每个侧面形成斜向剪切破坏区域, 发生破坏. 在 *ad* 阶段, 柱 2 中几乎没有明显的破坏发生. 在柱 1 丧失承载力后, 应力转移到柱 2, 柱 2 开始逐步承受大部分荷载, 轴向应力又开始逐渐上升. 柱 2 开始出现裂纹 (*ef* 阶段), 裂缝逐渐扩展一直到 *g* 点贯通, 柱 2 彻底破坏, 在每个侧面形成倒 V

形的剪切破坏裂纹 (图 6g, 图 6h).

由图 8 可知, 在初期加载阶段柱 1 还未出现裂纹之前 (*a* 点以左阶段), 声发射数目极少. 在 *ab* 阶段声发射数目逐渐缓慢增加, 并在柱 1 主裂缝开始形成过程中, 声发射数急剧增加 (*bd* 阶段), 柱 1 发生宏观破裂, *d* 点应力大幅跌落而失去承载能力; 应力转移至柱 2 导致其内部裂纹形成并扩展; 在 *ef* 阶段, 声发射数目大量增加. 在柱 2 发生破坏后的 *gh* 阶段, 几乎没有声发射现象发生. 由此, 可将第一个声发射数峰值后出现的声发射累积数缓慢增长段作为应力转移并出现第二次峰值的前兆.

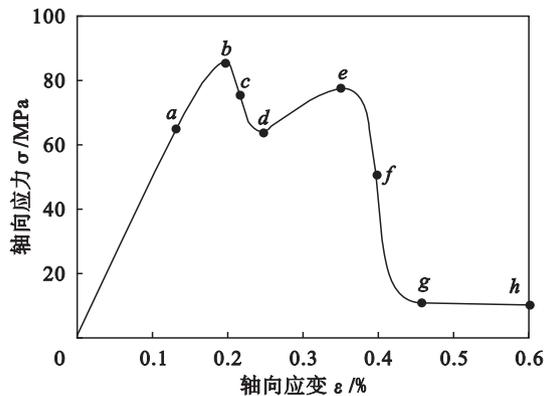


图 7 2 个并行矿柱轴向应力与轴向应变的关系

Fig. 7 Axial stress vs. axial strain for the two-parallel pillar system

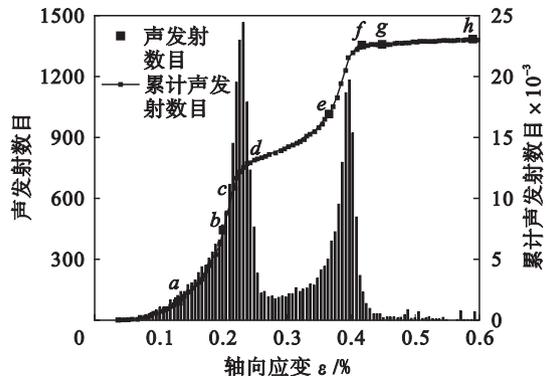


图 8 2 个并行矿柱声发射数与应变的关系

Fig. 8 AE counts vs. axial strain for the two-parallel pillar system

## 2.4 单轴抗压强度对四并行矿柱体系破坏模式影响

为探讨并行矿柱在空间上的布置方式及矿柱强度不同时矿柱体系的破裂失稳过程, 建立了如图 9 所示的数值模型, 即 4 个等尺寸矿柱在空间上并行布置. 图 9 为 4 个并行矿柱的单轴压缩破裂过程中的 Z 向位移图. 图 10, 图 11 分别表示相应的轴向应力-应变曲线、声发射数-轴向应变曲线图.

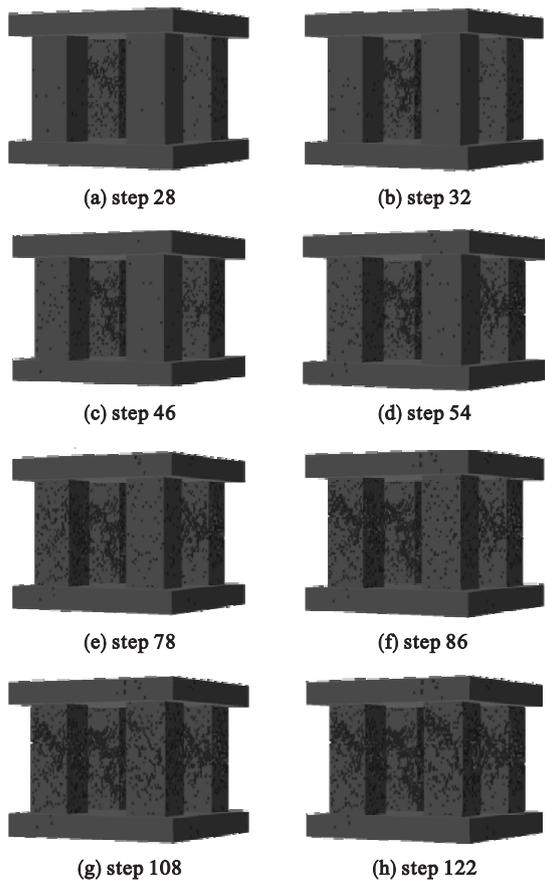


图9 4个并行矿柱单轴压缩破裂过程

Fig. 9 Failure process of the four-parallel pillar system

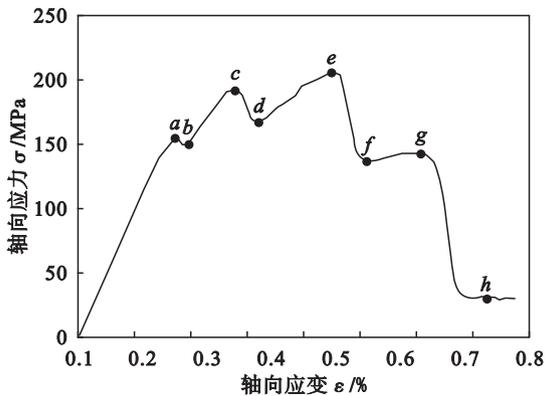


图10 4个并行矿柱轴向应力与轴向应变的关系

Fig. 10 Axial stress vs. axial strain for the four-parallel pillar system

图9a ~ 图9h对应的加载应变分别为0.168%, 0.192%, 0.276%, 0.318%, 0.45%, 0.51%, 0.606%, 0.726%。峰值点a, c, e, g分别是柱1、柱2、柱3、柱4不稳定破坏的起点。最终各矿柱分别在b, d, f, h点形成斜向剪切破坏裂纹。破坏首先发生在抗压强度值最小的柱1, 其承载力丧失后, 应力向抗压强度较大的柱2转移, 柱2开始逐步承受大部分荷载, 轴向应力又开始逐渐上升, 柱2出现裂缝逐渐扩展到d点贯通, 柱2彻

底破坏。紧接着应力转移到强度更大的柱3, 柱3破坏后应力转移到强度最大的柱4。由图10, 图11可知, 由于应力转移, 4个并行矿柱在整个破裂过程中有4次应力峰值、4个声发射数目峰值出现。而在每个矿柱破坏过程中, 声发射数目均急剧增加。

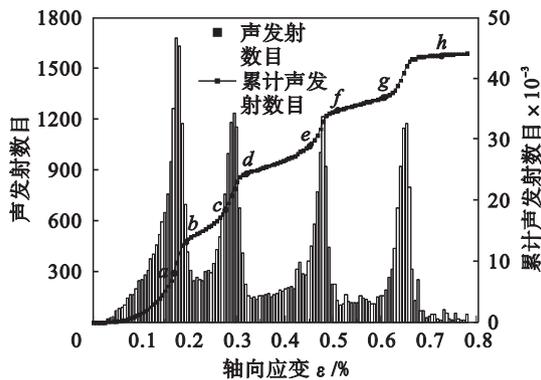


图11 4个并行矿柱声发射数与应变的关系

Fig. 11 AE counts vs. axial strain for the four-parallel pillar system

### 3 结 论

1) 对于串行矿柱, 裂缝首先出现在抗压强度较小的矿柱, 最终形成贯通的破裂面, 整个串行矿柱体系失稳破坏。因此对串行矿柱强度较弱段的加固和监测有助于整个串行矿柱体系的稳定性控制。

2) 对于两并行矿柱, 两柱抗压强度相同时, 破坏发生于矿柱与顶底板交接处; 两柱抗压强度不同时, 裂纹首先聚集在强度较小的柱, 直到扩展贯通后, 应力向强度高的柱转移并引起该柱的破坏, 整个矿柱体系失稳。可将第一个声发射数峰值后出现的声发射累积数缓慢增长段作为应力转移并出现第二次峰值的前兆。

3) 对于前后并行布设的四矿柱体系, 其压力传递与各柱的抗压强度有关。较弱的柱破坏后, 应力依次转移到强度较高的柱, 直到整个矿柱系统失稳。声发射数多峰的出现提示矿柱体系中的矿柱发生破坏, 应力向相邻强度更高的矿柱转移。

4) 矿柱失稳破坏是一个渐进性的过程, 对于多个矿柱并行的体系, 单个矿柱的破坏并不会导致整个体系的失稳, 通过监测获得应力转移特征, 如声发射数目多峰值或声发射累积增长阶梯型弧段等, 有助于对矿柱体系破坏失稳进行预判。

### 参考文献:

[1] James E R. Strength of mine pillars [C]//26<sup>th</sup> US Symposium on Rock Mechanics. Rapid City, 1985.