

煤岩卸荷破坏声学特性及变形破坏机理

霍小旭*

(山西焦煤汾西矿业, 山西 孝义 032300)

摘要:我国很多工程建设逐渐向深部扩展,深部岩体复杂的结构和高应力等诸多因素对于工程安全提出了严峻的考验.本文以深部煤岩为研究对象,分别进行了单轴、三轴和三轴卸荷等试验下的声发射研究,得到以下结论:(1)单轴压缩下,声发射参数表现为前期平稳,塑性阶段后跳跃式发展.(2)三轴压缩下,试样整体更加稳定,声发射能量参数值先增后减再增,围压越大,试样出现相同破坏所需能量越大.(3)三轴卸荷与三轴压缩在卸荷之前声发射规律一致,卸荷后试样破坏加剧,声发射参数值增加.(4)分形维值 D 能很好地反应煤岩内部裂纹演变的规律.

关键词:深部岩体;卸荷;煤岩;声发射;分形维值

中图分类号:TD163 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2020)01-0065-04

Acoustic Characteristics of Unloading Failure and Deformation Failure Mechanism of Coal-rock

Huo Xiaoxu

(Shanxi Coking Coal Fenxi Mining, Xiaoyi 032300, China)

Abstract: Many engineering constructions in China are gradually extended to the deep, and many factors such as complex structure of deep rock mass and high stress have put forward severe test for engineering safety. In this paper, deep coal rocks are taken as research objects, and acoustic emission studies under uniaxial, triaxial and triaxial unloading tests are carried out respectively, and the following conclusions are obtained: (1) under uniaxial compression, acoustic emission parameters show a stable performance in the early stage and a leaping development after the plastic stage. (2) under triaxial compression, the overall sample is more stable, and the acoustic emission energy parameter value increases first, then decreases and then increases. The higher the confining pressure is, the more energy is required for the sample to have the same failure. (3) the acoustic emission law of triaxial unloading is consistent with that of triaxial compression before unloading. After unloading, the sample failure intensifies, and the acoustic emission parameter value increases. (4) fractal dimension value D can well reflect the law of crack evolution in coal and rock.

Keywords: deep rocks; unloading; coal rock; acoustic emission; fractal dimension value

随着我国经济水平和工程技术等方面的不断提升,加上一些自然因素,许多的工程建设如隧道、水电洞室以及采矿等都不断地向更深入的地方开展.但是在这个过程中,从工程项目安全的角度出发,考虑深部岩石在工程建设过程中的应力变化是工程安全的必要保证^[1,2].据相关数据表明,现在水电站中的引水隧洞埋深在 2 000 m 以上,在这种条件下,地应力能达到 20 MPa 以上^[3],而在矿业系统中,随着浅部资源的枯竭,向深部开发是必然趋势,无论是在国内还是国外,现在采矿深度都能达到 1 000 m,甚至更深^[4-6].

深部的岩石无论是结构还是应力状态都是很复杂的,在工程施工的过程中,会导致原有相对稳定的结

收稿日期:2019-11-04

* 通信作者, E-mail: huoquanxvc6356@163.com

构破坏和应力的重新分布,甚至直接造成整体破坏,加之深部环境的复杂性,可能在施工过程中会伴随大变形和涌水等工程灾害的发生,从而出现工程事故.从受力过程分析,地下深部施工对于岩体来说,实际上是一个加卸荷的过程,在这个过程中,原来高应力、复杂的岩体就会有一个释放能量的途径,从而危险系数较浅层岩体来说大大上升.加之现有的工程技术手段都是借鉴浅层岩石的一些规律和工程经验,施工的安全很难得到保证.因此与深部岩石强度紧密相关的卸荷破坏机理的研究是很有工程意义的.

1 试验设计及理论基础

1.1 试验基础

声发射来源于 Kaiser 效应,即岩石在破坏变形过程中会将应变能等以弹性波的形式释放出来^[7],声发射可以很好地监测岩石在破坏变形过程中内部裂隙发育的过程,为了研究岩石破坏的过程和机理,声发射是一个很好的手段.本次研究着眼于深部巷道,研究在掘进的过程中卸荷对于煤岩的影响,通过室内的试验为主要手段进行研究.图 1 是制作好的部分煤岩试样.

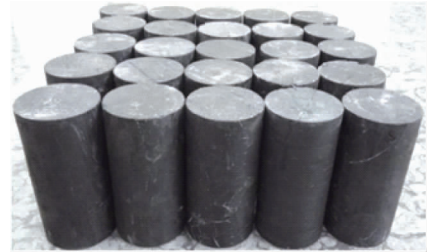


图 1 部分煤岩试样

煤岩与大部分岩石一样,体内含有大量的天然裂隙,在外力作用下,体内的裂隙缺陷发育扩展,最后形成宏观裂纹,通过声发射参数、应力应变与时间等数据,可以对裂纹的演化进行定性和定量的预测^[8-10].通过对煤岩试样在单轴、三轴和三轴卸荷等不同试验条件下进行声发射试验,从而得到煤岩试样的破坏机理.

1.2 分形维值计算理论

据相关研究发现分形也存在于声发射与时间之间^[11],分形维数中的关联维数作为最常用的参量可以用来表明岩石类材料内部裂纹动态变化的过程,而关联维数 D 常用的计算方法是 G-P 算法^[12],这种方法首次将一维的时间标量用来研究多维空间的矢量.通过将每个具体的声发射参数组成一个时间的序列,容量记为 n ,

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}. \quad (1)$$

通过一个自建的 m 维相空间,其中 $m < n$,从相空间内取并列的前 m 个数作为 m 维空间的一个相点

$$X_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}. \quad (2)$$

去掉 x_1 再构建第二个相点

$$X_2 = \{x_2, x_3, \dots, x_{m+1}\}. \quad (3)$$

如此循环,依次构成 $N = n - m + 1$ 个相点,则关联函数可以表示为

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_i^n \sum_j^n H[r - |X_i - X_j|]. \quad (4)$$

通过一些转化得到关联维数 D 与关联函数 $C(r)$ 和观测尺度 r 的关系,如式(5)所示.

$$D = \frac{\ln C(r)}{\ln r}. \quad (5)$$

2 试验结果分析

通过收集和整理煤岩试样在破坏过程中产生的声发射信号,以此推测煤岩内部裂纹的演化规律.声发射常用的参数有以下 3 种,分别是振铃计数、幅值和能量^[13].每种试验都只选取累计振铃计数与应力随加载时间变化的曲线图,以及分形维值 D 随时间变化的曲线图进行分析.

2.1 单轴压缩试验分析

图 2 选取的是单轴压缩试验条件下煤岩声发射的累计振铃计数变化规律,从图 2 中可以看出,累计振铃计数与煤岩的应力应变曲线存在明显的对应规律,即煤岩在孔隙压密阶段和弹性阶段,内部的孔隙没有扩展,此时声发射的参数几乎处于平稳发展阶段.但是当煤岩进入破坏阶段,随着孔隙的发展和破坏,声发射参数瞬间进入跳跃式发展,说明声发射参数能比较准确地反映试样的破坏情况.

运用 G-P 算法和 MATLAB 软件,编写程序将声发射得到的能量率计算出分形维数,图 3 是煤岩在单轴压缩条件下的能量与分形维值关系图,从图 3 中可以看出,相关系数在 0.95 左右,说明了声发射的能量

参数与其拟合线之间有很好的相关性,因此,亦可将声发射能量分形维数作为煤岩内部损伤和破坏演化的一种评价依据.

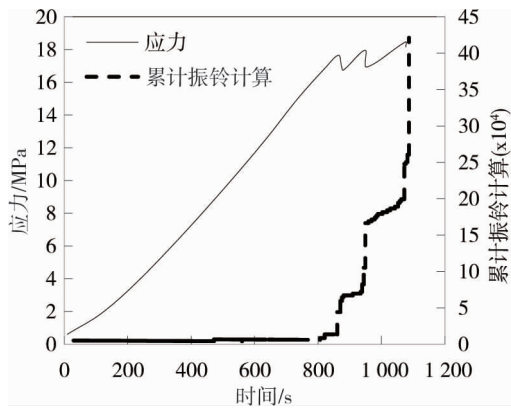


图 2 单轴压缩累计振铃计数

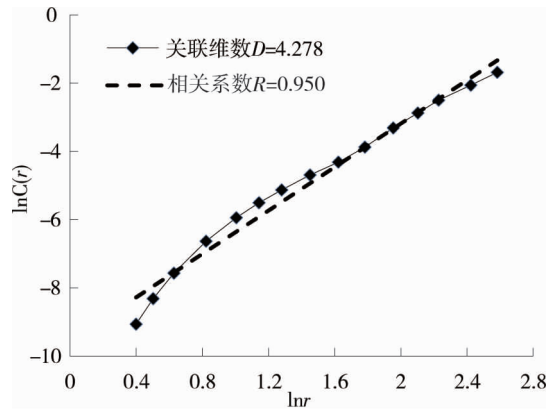


图 3 单轴压缩能量与分形维值 D

2.2 三轴压缩试验分析

图 4、图 5 和图 6 是在三轴压缩试验条件下,围压分别为 5, 15, 30 MPa 下累计能量示意图.从图中可以看出,煤岩与大部分岩石一样,应力应变曲线符合随着围压增大,强度增加的一般规律.当围压为 5 MPa 时,最大偏应力为 42 MPa;当围压为 15 MPa 时,最大偏应力为 64 MPa;当围压为 30 MPa 时,最大偏应力为 80 MPa.

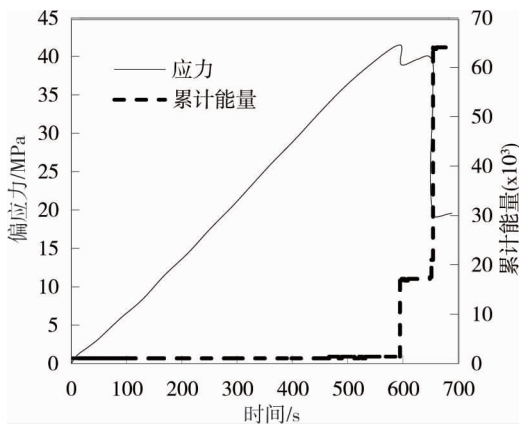


图 4 三轴压缩围压 5MPa 累计能量

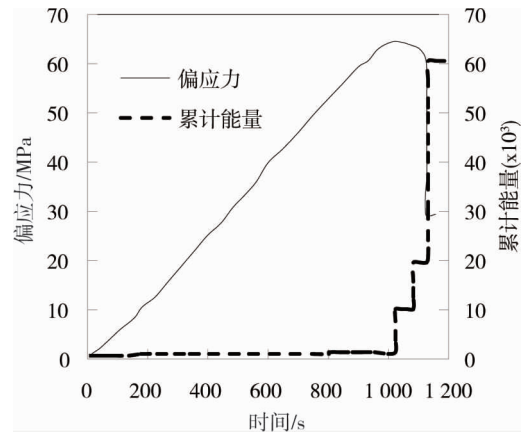


图 5 三轴压缩围压 15MPa 累计能量

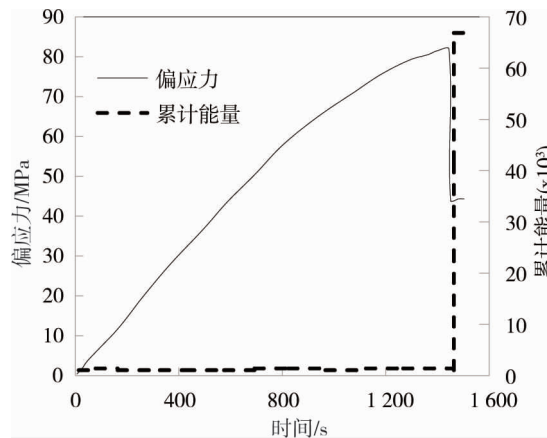


图 6 三轴压缩围压 30 MPa 累计能量

在三轴压缩条件下,无论围压多大,能量在前期规律都是一致的,及在进入塑性变形之前,能量几乎没有波动,这是因为当有围压存在时,会将煤岩内部的孔隙先压缩紧密,在破坏之前,内部几乎没有孔隙的发展破坏.当进入宏观破坏阶段时,围压较低时,能量存在跳跃,而高围压则不存在,这主要是因为煤岩相对于其他岩石而言,力学性质相对没有那么稳定,在低围压下,局部应力集中达到极限状态时就会出现能量

的突降,但是此时煤岩仍然具有承载力.直到出现明显的滑移导致完全破坏时,能量参数才达到一个稳定值.通过研究还发现,声发射能量参数与围压也有明显的对应关系,当围压较小时,声发射能量率只有3 800左右,但是当围压较大时,声发射能量率能达到6 500左右,主要原因是,在高围压条件下,试样被压缩的更加紧密,试样破坏更加困难,且破坏时产生的裂纹将会变得更多,所以当都发生宏观的滑移破坏时,高围压所产生的能量就会越大.

2.3 三轴卸荷试验分析

在卸荷围压过程中,声发射的规律与三轴压缩过程声发射的规律大同小异,即高围压会使得煤岩内部相对比较稳定,在卸荷的过程中,局部应力集中不那么明显,破坏也没那么明显,因此,围压越大,卸荷过程中产生相应的破坏能量会更多.选取不同围压卸荷过程破坏的分形维数,如图7所示,从图7中可以看出,不同围压下,分形维数整体均满足一定的规律性,即最开始在无裂纹产生和扩展时,分形维数较小,随着应力的增加,部分裂纹产生和扩展时,分形维数逐渐增加,当弹性阶段过渡到塑性阶段时,弹性波动导致分形维数减小,当应力比达到0.8,开始进行卸荷时,煤岩出现破坏,分形维数又开始有所增加.分形维数随着围压的变化处于波动的变化,无明显的对应关系,这主要是因为围压是对煤岩本身自带的裂纹扩展有着约束作用,而原始试样自带的微小裂纹无法定性,因此呈现出波动状态,说明分形维数与煤岩本身的性质有关.

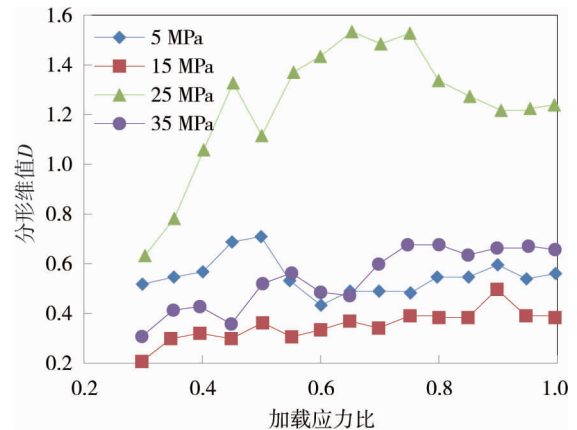


图7 加载应力比与分形维数关系

3 结论

- 1) 单轴压缩下,声发射参数表现为前期平稳,塑性阶段后跳跃式发展.
- 2) 三轴压缩下,试样整体更加稳定,声发射能量参数值先增后减再增,围压越大,试样出现相同破坏所需能量越大.
- 3) 三轴卸荷与三轴压缩在卸荷之前声发射规律一致,卸荷后试样破坏加剧,声发射参数值增加.
- 4) 分形维数 D 能很好地反应煤岩内部裂纹演变的规律.

参考文献:

- [1] 李建林,王乐华.节理岩体卸荷非线性力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2007(10):1968-1975.
- [2] 吴刚.工程岩体卸荷破坏机制研究的现状及展望[J].工程地质学报,2001(2):174-181.
- [3] 高速.不同加卸荷应力路径下大理岩破坏过程的能量演化机制与本构模型研究[D].青岛:青岛理工大学,2013.
- [4] Swansson S R, Brown W S. An observation of loading path independence of fracture in rock [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics,1971, 8(3):277-281.
- [5] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.
- [6] Lei X, Satoh T. Indicators of critical point behavior prior to rock failure inferred from pre-failure damage [J]. Tectonophysics, 2007,431(1):97-111.
- [7] 彭振明,马羽宽,何泽云.声发射技术及其应用[M].北京:机械工业出版社,1985.
- [8] 蒋宇,葛修润,任建喜.岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性[J].岩石力学与工程学报,2004,23(11):1810-1814.
- [9] Li C, Nordlund E. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 1993,26(4):333-351.
- [10] 龚函.分级加卸载条件下红砂岩蠕变破坏声发射特性研究[D].北京:北京科技大学,2015.
- [11] 丛宇.卸荷条件下岩石破坏宏观机理与地下工程设计计算方法研究[D].青岛:青岛理工大学,2014.
- [12] Lo T, Leung H, Litva J, et al. Fractal characterisation of sea-scattered signals and detection of sea-surface targets [J]. IEE Proceedings F-Radar and Signal Processing, 1993,140(4):243-250.
- [13] 薛熠.采动影响下损伤破裂煤岩体渗透性演化规律研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.