

文章编号: 1001-1986(2015)05-0086-04

# 含瓦斯煤岩卸围压声发射特性及能量特征分析

秦 虎<sup>1</sup>, 黄 滚<sup>2</sup>, 贾泉敏<sup>3</sup>

(1. 河西学院土木工程学院, 甘肃 张掖 734000; 2. 重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400030;  
3. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039)

**摘要:** 利用自主研发的含瓦斯煤岩热流固耦合三轴伺服渗流装置配合声发射监测系统对不同围压作用下含瓦斯煤岩进行了卸围压试验, 试验结果表明: 不同围压作用下含瓦斯煤岩声发射事件率、累积振铃计数与应力曲线具有较好的对应关系, 振幅总体分布在[42,60]dB 之间, 随着振幅的增加, 声发射事件率呈现出递减的趋势; 含瓦斯煤岩失稳破坏时声发射事件率与围压呈线性关系, 而声发射累积振铃计数与围压呈指数函数关系; 不同围压下含瓦斯煤岩卸围压实验中轴向应力加载阶段和围压卸载阶段能量特征是不同的, 随着围压的增大, 煤岩加载阶段吸收的能量明显增大, 卸载阶段释放的能量也相应的增大, 加载阶段和卸载阶段能量变化与初始围压均呈对数关系。

**关键词:** 岩石力学; 卸围压; 声发射特性; 能量特征

**中图分类号:** TD315 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2015.05.020

## Analysis of characteristics of acoustic emission and energy of of gas-bearing coal during unloading confining pressure

QIN Hu<sup>1</sup>, HUANG Gun<sup>2</sup>, JIA Quanmin<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hexi University, Zhangye 734000, China; 2. College of Resource and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 3. Chongqing Research Institute, China Coal Technology Engineering Group, Chongqing 400039, China)

**Abstract:** A series of confinement unloading tests have been performed on coal specimens containing gas by using a servo-controlled triaxial stress thermal-device and acoustic emission (AE) monitoring system, test results show that AE rate and accumulative counts have a good corresponding relationship with stress curve under different confining pressures, the amplitude is between [42,60]dB, with amplitude increasing, the rate of AE event decreases; when failure, rate of AE event and confining pressure show linear relationship, and AE cumulative count and confining pressure is an exponential function; during axial stress loading stage and unloading stage of confining pressure, energy feature is different, with the increase of confining pressure, during absorbed energy coal loading stage increases, during released energy the unloading stage increases, the energy change and during the initial loading stage and unloading confining pressure there is a logarithmic relationship.

**Key words:** rock mechanics; unloading confining pressure; AE characteristics; energy characteristics

煤岩是煤炭工程的主要介质, 由于煤炭工程中特殊的应力赋存环境和工程地质条件, 人为的采掘活动对含瓦斯煤岩有采动卸荷效应, 石门揭煤、工作面开采扰动了初始应力场, 从而引起了原岩应力的重新分布, 使得处于原岩应力状态的含瓦斯煤岩卸荷。因此卸围压条件下含瓦斯煤岩破坏过程的研

究对于分析煤炭工程中石门揭煤、工作面开采等人

为采掘活动对煤层卸荷作用的影响具有极为重要的意义, 因而得到人们越来越多的关注。

国内外学者在卸围压条件下一般岩石力学性质方面的实验研究, 已经取得了不少有益的成果<sup>[1-7]</sup>, 而对于卸围压条件下含瓦斯煤岩的实验研究还处在

收稿日期: 2014-05-24

基金项目: 甘肃省高等学校科研项目(2013B-82); 河西学院校长基金项目(XZ2014-19)

作者简介: 秦虎(1985—), 男, 甘肃张掖人, 博士, 副教授, 从事矿业工程与岩石力学等方面的教学与科研工作。

E-mail: hxqin\_hu@163.com

引用格式: 秦虎, 黄滚, 贾泉敏. 含瓦斯煤岩卸围压声发射特性及能量特征分析[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(5): 86-89.

起步阶段, 尹光志等<sup>[8]</sup>进行了卸围压速度对含瓦斯煤岩力学和瓦斯渗流特性的试验研究, 蒋长宝等<sup>[9]</sup>进行了含瓦斯煤岩卸围压变形特征及瓦斯渗流试验的研究, 黄启翔等<sup>[10]</sup>进行了地应力场中煤岩卸围压过程力学特性及瓦斯渗流特性的研究, 而对于卸围压条件下含瓦斯煤岩声发射特性和能量特征方面的研究至今鲜有报道, 因此开展不同围压下含瓦斯煤岩卸围压声发射特性与能量特征方面的实验研究, 对于揭示卸围压条件下含瓦斯煤岩力学特性与声发射特征的联系, 从能量的角度分析围压对含瓦斯煤岩卸围压失稳破坏的内在属性, 从而进一步加深人们对卸围压条件下含瓦斯煤岩失稳破坏机理的认识具有重要的意义。

## 1 实验描述

### 1.1 实验设备及煤样制备

本文实验是在重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自主研发的含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置配合美国物理声学公司 PAC (Physical Acoustic Corporation)生产的 DISP 系列 2 通道/卡 PCI-2 全数字化声发射监测系统上进行的。

实验所需煤样取自重庆煤电有限责任公司松藻煤矿  $K_2^b$  弱突出煤层, 煤种为无烟煤, 属高灰富硫中等发热量煤, 普氏系数  $f=2$ , 煤层位于煤系地层下部, 层位稳定, 煤层厚度 1.20~0.22 m, 平均 0.59 m, 结构较简单, 局部含夹矸一层, 煤层原始瓦斯含量为 10.14 m<sup>3</sup>/t, 实测瓦斯压力为 0.96~1.72 MPa, 煤层实测孔隙率 8.05%~9.04%, 根据中煤科工集团重庆研究院鉴定结论煤层的煤尘均无爆炸危险性, 属于不易自燃煤层。将所取煤样加工成  $\phi 50$  mm  $\times$  100 mm 的圆柱型标准试件, 试件精度满足常规岩石力学实验要求。

### 1.2 煤样安装

试验过程中, 严格按照试验步骤进行操作, 首先是煤样涂抹硅胶, 为了保证瓦斯气体压力作用在煤样内, 先用 704 硅橡胶将煤样试件侧面密封(保留两个端面通气)。然后用热缩管包裹, 目的是防止围压油浸入煤样内部, 最后安装引伸计并连接传感器数据线进行实验, 整个煤样安装过程如图 1 所示。

### 1.3 实验方案

根据煤层实测原始瓦斯压力为 0.96~1.72 MPa, 选定本文实验设定的瓦斯压力为  $P=1$  MPa, 为了考察在预设围压  $\sigma_3$  为 3 MPa、5 MPa、7 MPa, 瓦斯压力  $P=1$  MPa 条件下, 不同围压对含瓦斯煤岩卸围压过程中声发射特性以及能量特征的影响, 首先进行

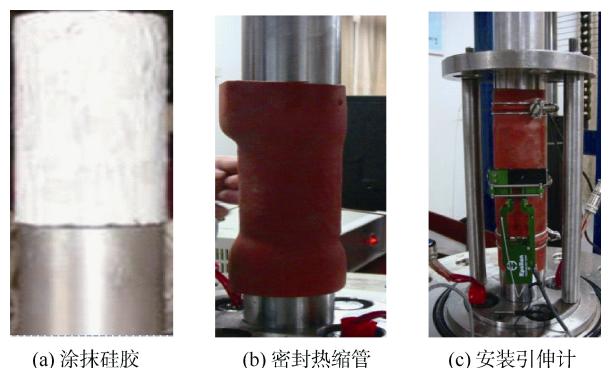


图1 煤样安装过程

Fig.1 Specimen installation process

了 5 组同等围压下含瓦斯煤岩常规三轴压缩破坏实验, 用实验所得每组煤岩的峰值强度与整组试件所得峰值强度的平均值比较, 选取离散系数最小一组的峰值强度作为卸围压实验方案的设计依据, 并以该峰值强度的 80%作为同等条件下卸围压实验起点对应的初始应力条件。

试验采用增大主应力差( $\sigma_1-\sigma_3$ )的应力控制方式进行, 即保持轴向应力恒定, 同时卸载围压的方式。首先按静水压力条件施加轴压  $\sigma_1=\sigma_3$  至 3、5、7 MPa, 接着充入瓦斯压力为 1 MPa, 待瓦斯吸附平衡后, 保持  $\sigma_3$  为 3、5、7 MPa 不变, 并以 0.01 MPa/s 的速度连续施加轴向荷载至煤岩峰值强度的 80%, 然后保持  $\sigma$  不变, 根据张凯等<sup>[11]</sup>的研究, 当卸载围压速率是常规加载轴压速率的 0.2~0.3 倍时, 加荷和卸荷条件下的强度比较接近, 即应力路径对强度没有影响, 因此本文选定  $v=0.002$  MPa/s 的速度卸载围压至煤岩失稳破坏, 直到围压下降到目标值后停止实验, 同步进行瓦斯渗透特性试验和声发射监测。

## 2 实验结果分析

### 2.1 围压对含瓦斯煤岩卸围压声发射的影响

煤岩作为一种特殊的工程软岩, 属于脆性材料, 其在受荷载变形过程中内部裂纹扩展会引起弹性波释放, 从而产生声发射现象。根据含瓦斯煤岩卸围压实验结果, 首先采用声发射信号经历分析方法, 对试验得到的声发射事件率、累计振铃计数信号参数随应变变化进行分析, 然后采用声发射信号分布分析方法, 将声发射振幅的大小进行统计分析, 分别以应变和振幅为参照变量, 绘制得到围压  $\sigma_3$  为 3、5、7 MPa, 瓦斯压力  $P=1$  MPa, 卸围压速率  $v=0.002$  MPa/s 条件下含瓦斯煤岩轴压加载阶段和围压卸载阶段应力-应变与声发射事件率、声发射累积振铃计数关系曲线, 声发射事件率与振幅关系曲线, 如图 2 所示。

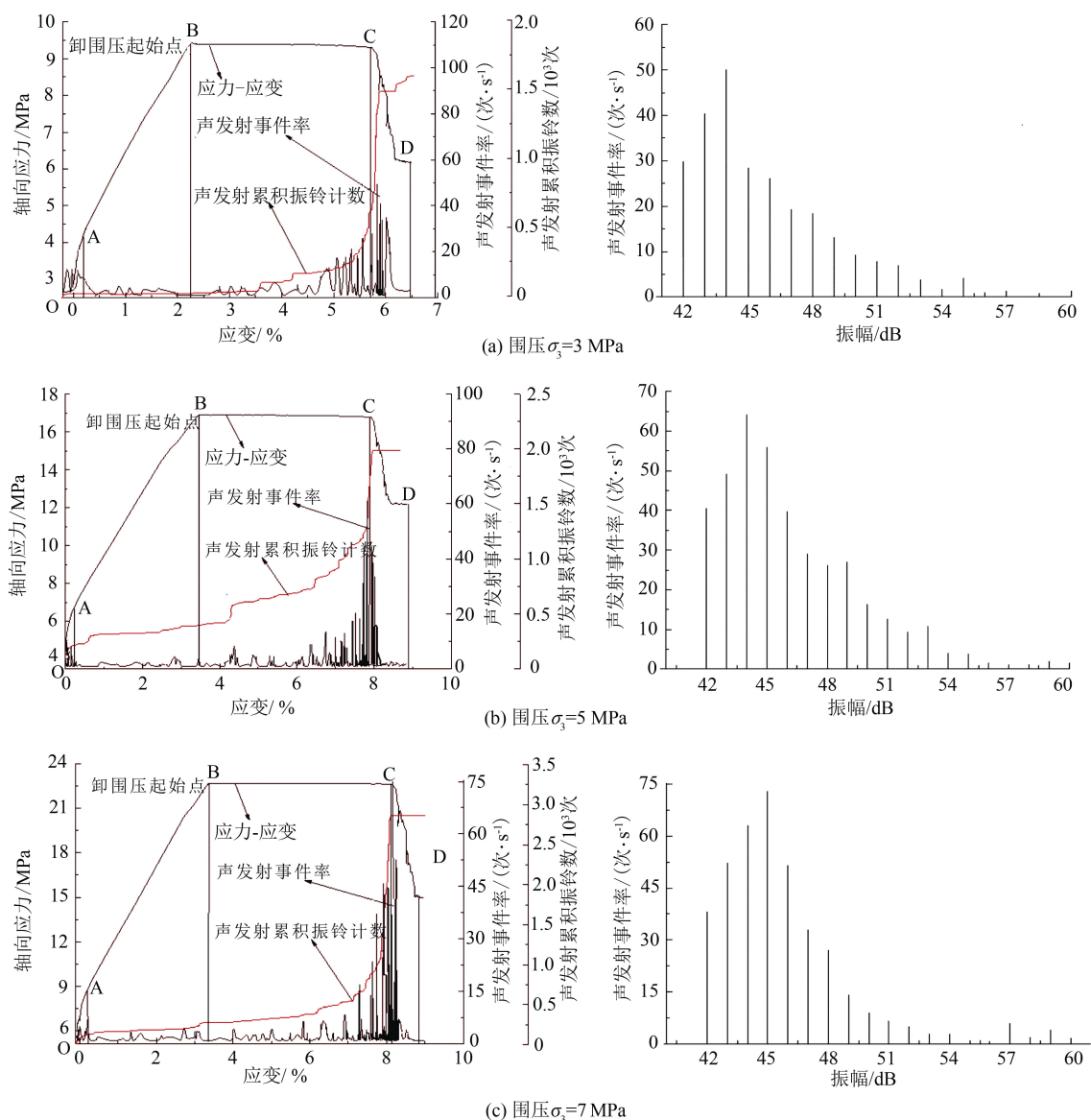


图 2 不同围压下应力-应变与声发射特征参数关系曲线

Fig.2 Curves of stress-strain and AE characteristics under different confining pressures

从图 2 可以看出,不同围压作用下含瓦斯煤岩声发射事件率、累积振铃计数与应力曲线具有较好的对应关系,振幅总体分布在 $[42,60]$ dB 之间,随着振幅的增加,声发射事件率呈现出递减的趋势。卸围压破坏过程中含瓦斯煤岩声发射信号存在突变应力点,当围压卸载至含瓦斯煤岩失稳破坏点 C 点时,声发射信号会突然增大。根据应力应变与声发射曲线变化规律,将不同围压下含瓦斯煤岩破坏全过程可以分为以下几个阶段进行分析。

第一阶段(OA):声发射初始增加阶段,该阶段与全应力-应变曲线的密实阶段相对应,声发射信号的产生代表了含瓦斯煤岩内部损伤的产生,其强弱代表损伤的程度,由于含瓦斯煤岩内部原始裂纹被压密而产生的初始损伤。

第二阶段(AB):声发射平稳阶段,该阶段与全应力应变曲线的弹性阶段相对应,声发射事件率和累积振铃计数皆处于较低水平,且表现为平稳的特点。

第三阶段(BC):声发射间歇性增长阶段,该阶段与应力应变曲线的平台阶段相对应,也就是与卸围压失稳破坏前的阶段对应,由于从卸围压起始点 B 点开始,煤岩发生屈服,声发射事件率和累积振铃计数随着应变的增加呈间歇性递增的趋势,煤岩在突然失稳破坏的瞬间声发射信号达到最大值。

第四阶段(CD):声发射减小并趋于稳定阶段,该阶段与应力应变曲线的失稳破坏后阶段相对应,煤岩从 C 点失稳破坏后,应力与声发射信号同时减少并趋于稳定。

不同围压下含瓦斯煤岩卸围压实验曲线也存在

一些不同之处, 围压  $\sigma_3=3$  MPa 条件下, 含瓦斯煤岩失稳破坏时的声发射事件率为 50 次/s, 累积振铃计数为  $1.6 \times 10^3$  次, 围压  $\sigma_3=5$  MPa 条件下声发射事件率为 62 次/s, 累积振铃计数为  $1.9 \times 10^3$  次, 围压  $\sigma_3=7$  MPa 条件下声发射事件率为 73 次/s, 累积振铃计数为  $2.7 \times 10^3$  次, 声发射事件率是单位时间内声发射参数的数量, 体现了煤岩内部释放能量的大小, 声发射事件率越高表明内部损伤越严重, 声发射累积振铃计数体现的是煤岩在失稳破坏过程中累积损伤的变化情况, 对比实验数据发现, 在瓦斯压力和卸围压速率相同的情况下, 围压  $\sigma_3=7$  MPa 条件下含瓦斯煤岩失稳破坏时的声发射事件率和累积振铃计数最大, 说明围压越大煤岩内裂隙的演化、发展和应力的传播时间越充分, 相应的损伤积累的时间也越充分, 因此  $\sigma_3=7$  MPa 条件下含瓦斯煤岩失稳破坏时的内部损伤最为严重, 由图 3 可以看出, 煤岩失稳破坏时声发射事件率与围压呈线性关系, 可近似用  $f=A\sigma_3+B$  表示, 而声发射累积振铃计数与围压呈指数函数关系, 可近似用  $f=Ae^{B\sigma_3}$  表示, 其中  $A$  和  $B$  为拟合常数。

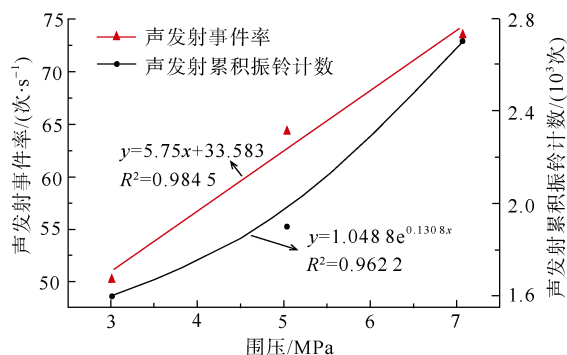


图3 声发射参数与围压关系曲线

Fig.3 Curves of AE parameters and confining pressure

## 2.2 围压对含瓦斯煤岩卸围压能量的影响

煤岩从受力直至失稳破坏的整个过程中, 始终和外界进行能量的交换, 或将外部的机械能转变为自身的内能, 或将内部的应变能以一定的方式释放到外界, 因此, 煤岩的失稳破坏本质是能量驱动下的一种失稳状态现象。

根据本文的实验方案, 轴向应力恒定, 逐步卸载围压, 在这种卸围压过程中, 三轴伺服试验机持续对煤岩做功, 同时煤岩侧向膨胀对液压油做功, 因此在主应力空间上含瓦斯煤岩的总能量可以表示为<sup>[12]</sup>:

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int_0^{\varepsilon_2} \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (3)$$

式中  $\sigma_1$ 、 $\varepsilon_1$  分别为轴向应力和应变;  $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  均为侧向应力;  $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$  均为侧向应变。

表1 能量变化表

Table 1 Diagram of energy change

围压/MPa	加载能量/( $10^{-3}$ MJ·m $^{-3}$ )	卸载能量/( $10^{-3}$ MJ·m $^{-3}$ )
3	21.832	-19.524
5	47.745	-42.976
7	61.552	-54.863

从表 1 可以看出, 不同围压下含瓦斯煤岩卸围压实验中轴向应力加载阶段和围压卸载阶段能量特征是不同的, 加载阶段是能量吸收的过程, 卸载阶段是能量释放的过程, 加载阶段煤岩吸收的能量为卸载阶段煤岩的失稳破坏提供动力, 加载阶段和卸载阶段均具有围压效应, 随着围压的增大, 煤岩加载阶段吸收的能量明显增大, 卸载阶段释放的能量也相应的增大。加载阶段和卸载阶段能量变化与初始围压的关系曲线如图 4 所示, 均呈对数关系, 可近似用  $E=a\ln(\sigma_3)+b$  表示, 其中  $a$  和  $b$  为拟合常数,  $a$  表示围压对煤岩加载阶段和卸载阶段的影响系数。通过对不同围压下含瓦斯煤岩卸围压实验的加载(卸载)能量与初始围压的关系曲线分析可知, 在瓦斯压力和加载速率相同时, 随着初始围压的增大, 试验机对含瓦斯煤岩做的机械功越大, 机械能转化为煤岩的能量越大, 在瓦斯压力和卸围压速率相同的情况下, 随着初始围压的增大, 含瓦斯煤岩卸围压过程中, 煤岩内裂隙的演化发展和应力的转移时间越充分, 产生的破裂面多, 相应释放的能量也越大。

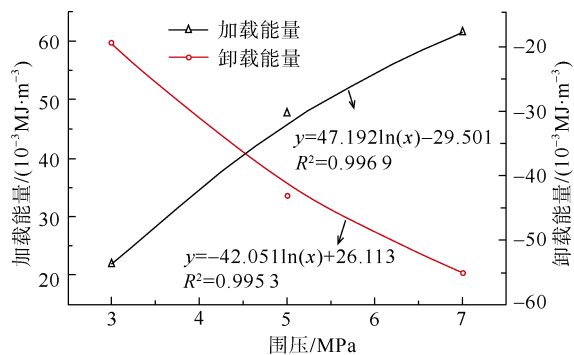


图4 加载能量和卸载能量与围压关系曲线

Fig.4 Curves of loading energy, unloading energy and confining pressure

研究不同围压下含瓦斯煤岩卸围压失稳破坏过程中能量的变化规律, 将有利于从能量的角度更好的反映围压对含瓦斯煤岩卸围压失稳破坏的内在属性, 研究成果对于分析煤炭工程中石门揭煤、工作面开采等人为采掘活动对煤层卸荷作用而引起的煤岩动力灾害的发生机理具有重要的意义。

(下转第 94 页)

## 4 结 论

a. 等效源反演成像简化了传统反演方法步骤, 加快了计算速度, 同时减少因模型选取带来的误差或错误, 提高解释的准确性。

b. 在对多体模型的反演中, 反演出密度体质量分布的横向分辨率很高。

c. 等效源反演成像的应用效果在实际资料中得到了证实。在实际资料中, 重力异常往往是由多个形状复杂、密度分布不均匀的密度体引起的。运用等效源反演成像时, 在有异常分布的区域设置等效源, 其位置固定, 根据需要可灵活给定大小形状。根据反演后的质量分布可以很好的拟合密度体的形状, 数值的大小也可以反映地质体的质量分布情况。在反演中先在  $xz$  或  $yz$  剖面上确定密度体深度, 再进行固定深度反演平面质量分布时, 就会减少反演参量的个数, 从而减少了多解性。这两步的结合可以比较准确地确定密度体的空间分布情况。

(上接第 89 页)

## 3 结 论

a. 不同围压作用下含瓦斯煤岩声发射事件率、累积振铃计数与应力曲线具有较好的对应关系, 可以分为声发射初始增加阶段、声发射平稳阶段、声发射间歇性增长阶段和声发射减小并趋于稳定 4 个阶段, 振幅总体分布在  $[42, 60]$  dB 之间, 随着振幅的增加, 声发射事件率呈现出递减的趋势。

b. 不同围压下含瓦斯煤岩卸围压实验曲线也存在一些不同之处, 在瓦斯压力和卸围压速率相同的情况下, 围压  $\sigma_3=7$  MPa 条件下含瓦斯煤岩失稳破坏时的声发射事件率和累积振铃计数最大, 含瓦斯煤岩失稳破坏时声发射事件率与围压呈线性关系, 可近似用  $f=A\sigma_3+B$  表示, 而声发射累积振铃计数与围压呈指数函数关系, 可近似用  $f=Ae^{B\sigma_3}$  表示, 其中  $A$  和  $B$  为拟合常数。

c. 不同围压下含瓦斯煤岩卸围压实验中轴向应力加载阶段和围压卸载阶段能量特征是不同的, 加载阶段和卸载阶段均具有围压效应, 随着围压的增大, 煤岩加载阶段吸收的能量明显增大, 卸载阶段释放的能量也相应的增大。加载阶段和卸载阶段能量变化与初始围压均呈对数关系。

## 参考文献

- [1] 黄润秋, 黄达. 荷载条件下岩石变形特征及本构模型研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 441-447.

## 参考文献

- [1] 曾华霖, 闾筱玲, 谢婷婷, 等. 重磁勘探反演问题[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.
- [2] 陈佩良, 江玉乐. 重力学教程[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [3] 江玉乐, 雷宛. 地球物理数据处理教程[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 44-48.
- [4] EMILIA D A. Equivalent source used as an analytic base for processing total magnetic field profiles[J]. Geophysics, 1973, 38(2): 339-348.
- [5] 冯敬英, 周熙襄. 等效源模型反演方法的效果[J]. 成都地质学院学报. 1986, 10(3): 54-56.
- [6] SKEELS D C. Ambiguity in gravity interpretation[J]. Geophysics, 1947, 12(1): 45-46.
- [7] 钟本善, 周熙襄, 沙椿. 等效源法在重磁异常解释中应用的进一步探讨[J]. 物探与化探, 1986, 10(3): 201-204.
- [8] 艾瑛. 等效源重力反演成像的研究与应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [9] 黄翼坚, 王万银. 等效源法三维随机点位场数据处理和转换[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 95-101.
- [10] 王京, 张昌达. 反演地壳磁化强度等效源法的模型验证及实际资料试算[J]. 物探与化探, 1993, 17(3): 201-208.

(责任编辑 宋震炎)

- [2] 周小平, 哈秋聆, 张永兴, 等. 峰前围压卸荷条件下岩石的应力-应变全过程分析和变形局部化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3236-3245.
- [3] 郭印同, 杨春和, 付建军. 盐岩三轴卸荷力学特性实验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 725-730.
- [4] 李建林, 王瑞红, 蒋昱州, 等. 砂岩三轴卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2034-2041.
- [5] 吕颖慧, 刘泉声, 江浩. 基于高应力下花岗岩卸荷试验的力学变形特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 337-344.
- [6] 陈卫忠, 吕森鹏, 郭小红, 等. 脆性岩石卸围压实验与岩爆机理研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 963-969.
- [7] 黄润秋, 黄达. 荷载条件下岩石变形特征及本构模型研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 441-447.
- [8] 尹光志, 蒋长宝, 王围忠, 等. 不同卸围压速度对含瓦斯煤岩力学和瓦斯渗流特性影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 68-76.
- [9] 蒋长宝, 尹光志, 黄启翔, 等. 含瓦斯煤岩卸围压变形特征及瓦斯渗流实验[J]. 煤炭学报, 2011, 36(5): 802-807.
- [10] 黄启翔, 尹光志, 姜永东. 地应力场中煤岩卸围压过程力学特性实验研究及瓦斯渗流特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1639-1648.
- [11] 张凯, 周辉, 潘鹏志, 等. 不同卸荷速率下岩石强度特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2072-2078.
- [12] 陈卫忠, 吕森鹏, 郭小红, 等. 基于能量原理的卸围压试验与岩爆判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1530-1540.

(责任编辑 张宏)