

声发射预测冲击地压技术研究

李秋林, 吕贵春

(煤炭科学研究总院重庆研究院, 重庆 400037)

摘要:根据声发射机理,利用岩石损伤学的原理,研究了声发射与冲击地压之间的内在联系,从而得出声发射技术用于预测冲击地压的可行性,并在冲击地压比较严重的老虎台煤矿进行了声发射技术试验。现场试验过程中,工作面发生的5次冲击地压均被声发射仪器监测到,证明了声发射技术可用于预测冲击地压。

关键词:声发射;冲击地压;预测

中图分类号:TD713

文献标识码:A

文章编号:1008-4495(2007)05-0004-03

井下煤岩体是一种应力介质,当其受力破坏时,将发生能量释放,声发射(AE)是这种能量释放过程的物理效应之一。冲击地压是煤岩体在达到极限应力平衡状态时,产生局部破裂,并产生大量的声发射信号;另一方面,冲击地压的孕育和发生是以煤岩体大量积蓄和急剧释放能量为前提,而声发射与煤岩体积蓄能量过程相对应。因此,声发射活动的时空变化动态包含有冲击地压的前兆信息。现场观测及实验室试验均表明,声发射现象贯穿煤岩体破坏全过程。作为煤岩体变形破坏过程中的一种物理效应,声发射信号的变化过程与煤岩的破坏过程密切相关^[1],可以作为一种观测手段,来监测煤岩体的应力状态。

1 声发射与煤岩体损伤破坏的关系

损伤是指存在于材料内部的各种缺陷。损伤力学就是利用宏观变量来研究微观变化对材料性质的影响。岩石是一种复杂的自然地质体,在各种外界载荷和外界环境的作用下,内部含有各种各样的缺陷。在力的作用下这些缺陷将发生成核、扩展、贯通甚至闭合。声发射是材料变形时,局部微破裂产生的一种应力波,必然与材料内部的缺陷及这些缺陷

的繁衍过程有关^[2]。冲击地压发生的过程,本质上是煤岩内部缺陷损伤演化到发生大规模突然破坏的过程。利用损伤力学的观点和声发射技术分析冲击地压的孕育过程,将有助于人们对冲击地压发生机理的认识^[3]。

煤岩体声发射是煤岩体破裂过程中产生的弹性波,与煤岩体内部的微裂隙或缺陷有直接的关系。而损伤是煤岩体内部微裂隙或缺陷生长与扩展的结果,因而它与煤岩体内部缺陷的演化关系和生长直接相关。因此,损伤与声发射之间有着必然的因果关系。又由于监测到的声发射分布是一种统计分布,因此,可以建立起损伤与声发射的关系。

若单位面积微元破坏时的声发射率用 η 表示,则单位面积 dA 破坏时的声发射事件数 $d\Omega$ 为

$$d\Omega = \eta dA \quad (1)$$

又当整个截面 A_0 破坏时声发射累积量为 Ω_0 , 则 η 可表示为

$$\eta = \Omega_0 / A_0 \quad (2)$$

将产生应变 $d\epsilon$ 时所对应的破坏截面 dA 表示为

$$dA = A_0 \varphi(\epsilon) d\epsilon \quad (3)$$

式(3)中 $\varphi(\epsilon)$ 为微元强度的统计分布函数——Weibull 分布形式,即:

$$\varphi(\epsilon) = \frac{m}{\alpha} \epsilon^{m-1} \exp\left(-\frac{\epsilon^m}{\alpha}\right) \quad (4)$$

式中 m 和 α 均为常数。

将式(2)、(3)、(4)代入式(1)并积分得:

$$\begin{aligned} \Omega / \Omega_m &= \frac{m}{\epsilon_0} \int \left[\left(\frac{x}{\epsilon_0} \right)^{m-1} \exp\left(-\frac{x^m}{\epsilon_0}\right) \right] dx \\ &= 1 - \exp\left(-\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^m = D \end{aligned} \quad (5)$$

从而可以得到由声发射累积 Ω 值表示的煤岩体

收稿日期:2007-03-02;2007-08-14 修回

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2005CB221505);国家自然科学基金重点项目(50534080/E041503);河南省煤矿瓦斯与火灾防治重点实验室资助项目(HKLG200508)

作者简介:李秋林(1964—),男,四川南充人,高级工程师,主要从事煤矿瓦斯灾害防治技术研究工作。电话:023-65239307。

损伤:

$$\sigma = E\varepsilon(1 - \Omega/\Omega_0) \quad (6)$$

式(6)表明,声发射累积是煤岩体损伤程度的直接反映。换言之,可以通过监测到的声发射特征来推断岩石破坏演化的类型。而对一个既定的煤岩系统来说,声发射能量水平的高低及其变化规律往往对应着煤岩的不同破坏类型。由此可见,煤岩体在采掘活动的影响下产生不同的声发射类型,与煤岩体的破坏和运动形式有着密切的关系。

2 声发射与冲击地压危险性的关系

冲击地压是煤岩体破坏时的一种动力现象。从破坏现象来说,声发射是煤岩微观破裂的一种显现,冲击地压是煤岩体宏观破裂的一种显现,是井下采场遭到明显可见的突然破裂的现象。构造运动和采掘影响而形成高度应力增高和弹性变形能的储存,是冲击地压发生的根本原因。因此,在没有采取适当的释放应力和能量情况下,在应力增高采掘工作面,就可能诱发冲击地压。

冲击地压发生的应力、能量准则和冲击倾向性准则如下:

1) 应力准则

$$\sigma \geq \sigma_c \quad (7)$$

式中: σ 为煤体应力; σ_c 为单轴抗压强度。

2) 能量准则

按以下两式分别计算煤层由于体积变化和形状变化而形成的单位体积的弹性能:

$$W_v = \frac{(1 - 2\mu)(1 + \mu)^2}{6E(1 - \mu)^2} (\gamma H)^2 \quad (8)$$

$$W_s = \frac{(1 - 2\mu)^2}{6G(1 - \mu)^2} (\gamma H)^2 \quad (9)$$

如果仅考虑重力作用,那么位于深度 H 处的单位煤体的总能量 W 即为 W_v 与 W_s 之和,即:

$$W = \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{2E(1 - \mu)} (\gamma H)^2 \quad (10)$$

再考虑支承压力区的应力增高系数 K ,则式(10)可以写成:

$$W = \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{2E(1 - \mu)} (K\gamma H)^2 \quad (11)$$

破碎煤岩体单位体积能量 U_2 为

$$U_2 = k_0 \frac{\sigma_c^2}{2E} \quad (k_0 > 1) \quad (12)$$

按冲击地压能量条件则有:

$$W > U_2 \quad (13)$$

3) 冲击倾向性准则

$$\frac{K_E}{K_E^*} \geq 1 \quad (14)$$

式中: K_E 为煤岩体或围岩的冲击倾向性指数; K_E^* 为冲击倾向性指数极限值。

煤岩体的破坏准则、能量准则和冲击倾向性准则是煤岩体脆性破坏的准则。煤岩体的脆性破坏过程实质上是裂隙的扩展过程,而声发射是这种扩展过程中的声学效应,声发射信号的强弱反映了煤岩体破坏时的能量释放程度,同时声发射的强弱也是评价煤岩体脆性破坏倾向性(即冲击倾向性)的信息和指标。

综上所述,声发射与冲击地压有着密切的联系,煤岩体的声发射信号的特点是出现在煤岩体破坏的初期。因此,利用声发射可以预测煤岩体的破坏,或者说利用声发射预测冲击地压是可行的。

3 试验地点及安装工艺

试验地点选定在老虎台煤矿发生冲击地压比较频繁、危险的 83001* 二期工作面,监测地点定在该工作面回风巷,距回采工作面 66 m 处(孔底传感器)、30 m 处(波导杆传感器)。图 1 为 2 种传感器的安装位置和安装方式示意图。

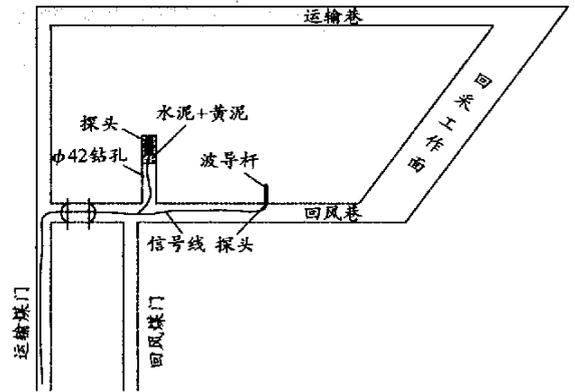


图1 传感器安装示意图

孔底传感器采用水泥加黄泥孔底封孔的安装方式,孔径42 mm,孔深12.0 m,仰角 $2^\circ \sim 3^\circ$,方位与回风巷垂直,封孔深度1.0 m。经过短时间内煤体压实,使传感器与实体煤牢固接触。波导杆传感器主要采用矿用标准锚杆、特制锚杆帽携带传感器进行安装。

4 灾变前后 AE 指标分析

试验期间,老虎台煤矿 83001* 二期工作面共发生有记录的冲击地压 5 次,并且日常生产过程中频繁出现响煤炮现象。

通过选择合理的 AE 指标及统计时间单位,绘制了冲击地压前后 AE 指标变化曲线,在此随机选择 2 次冲击地压前后的 AE 指标变化曲线进行说明,如图 2、图 3 所示。

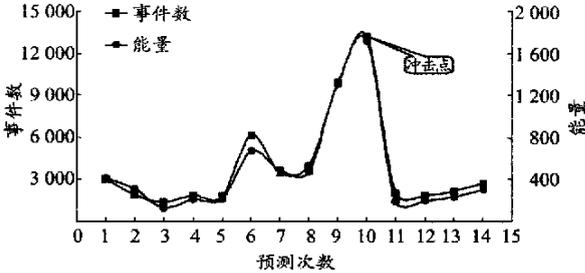


图2 冲击地压前后 AE 指标变化曲线 I

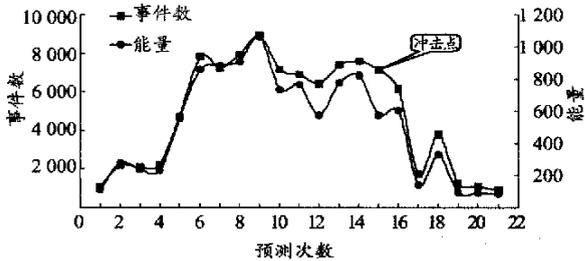


图3 冲击地压前后 AE 指标变化曲线 II

从图 2、图 3 分析可以得出灾变的前兆特征:

- 1)灾变前,AE 指标变化趋势明显;
- 2)灾变前,AE 指标出现 2~3 次波动;
- 3)灾变前,AE 指标呈现上升趋势,且上升后皆处于较高水平;

(上接第 3 页)

逐渐增加,当转速调到 3 000 r/min 时,进、出噪声达到最佳,分别为 83,83,84,85 dB(A)。

3)不同转速条件下,当喷雾压力为 1 MPa 时,除尘器脱水效率相对较高,最低为 89.4%,最高为 96.5%,平均为 93.48%。

4)不同喷雾压力和转速条件下,除尘器的除尘效率最低为 92.86%,最高为 98.22%,平均为 95.54%;当喷雾压力为 2 MPa 时,除尘器的除尘效率最佳,最大为 98.22%,最小为 96.8%,平均为 97.5%。

5)现场应用表明,通过调节供给液动除尘器的高压油量,能方便地实现无极调速功能;由于其体积小、质量轻,在掘进机上安装方便;总粉尘除尘率达到 91.6%,取得了较好的降尘效果。

参考文献:

[1] 李德文. 粉尘防治技术的最新进展[J]. 矿业安全与环保,

4)灾变点位于指标曲线的峰值或临近峰值的下降段。

综合以上分析可知,声发射技术预测预报冲击地压动力灾害效果明显。

5 结论

1)利用损伤力学、声发射与冲击地压危险性的关系,说明了声发射技术监测冲击地压动力灾害的可行性;

2)通过对试验工作面布置及冲击地压危险地点的分析,合理布置了传感器及其安装工艺;

3)利用煤炭科学研究总院重庆研究院多年研究成果——AEF2 型声发射系统,对试验工作面冲击地压动力灾害进行 24 h 连续监测,获得了试验期间发生的全部冲击地压前后的 AE 信号;

4)通过对统计方法及统计时间单位的研究与分析,对冲击地压前后 AE 指标进行了统计处理,获得了冲击地压前后 AE 指标变化曲线,监测效果明显,具有较高的预测准确率。

参考文献:

- [1] 邹银辉. 煤岩声发射机理初探[J]. 矿业安全与环保, 2004,31(1):31-33.
- [2] 唐绍辉,吴壮军. 岩石声发射活动规律的理论与试验研究[J]. 矿业研究与开发,2000,20(1):16-18.
- [3] 潘一山,李志华,章梦涛. 我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(11):1844-1851.

(责任编辑:熊云威)

2000,27(1):10-12.

- [2] 王树德. 新型湿式旋流除尘器的试验研究[J]. 矿业安全与环保,2001,29(增刊):102-103.
- [3] 蒋仲安,陈立武,单占会,等. 新型湿式除尘器的研制[J]. 煤炭科学技术,1992,27(2):4-6.
- [4] 蒋仲安,金龙哲,陈立武,等. 掘进巷道粉尘控制技术的研究[J]. 中国安全科学,1999,9(1):11-15.
- [5] 蒋仲安,陈立武. 新型湿式除尘器在机掘工作面中的应用[J]. 金属矿山,1998(7):38-44.
- [6] 煤炭工业标准汇编编委会. 煤炭工业标准汇编—煤矿安全卷 2[M]. 北京:中国标准出版社,1999.
- [7] 罗茂蜀,张设计,王晋育,等. CYC 型采煤机机载液动高效除尘器的研究[J]. 煤炭工程师,1998(6):18-23.
- [8] 李如明,郭胜均,许学成,等. 综掘工作面综合防尘技术的实践及应用[J]. 矿业安全与环保,2005,32(5):64-65.
- [9] 樊志斌,王蓬,张设计. 玉华煤矿综合防尘技术及其效果[J]. 矿业安全与环保,2004,31(2):59-60.

(责任编辑:李 琴)

声发射预测冲击地压技术研究

作者: [李秋林](#), [吕贵春](#), [LI Qiu-lin](#), [LU Gui-chun](#)
 作者单位: [煤炭科学研究总院重庆研究院, 重庆, 400037](#)
 刊名: [矿业安全与环保](#) **PKU**
 英文刊名: [MINING SAFETY & ENVIRONMENTAL PROTECTION](#)
 年, 卷(期): 2007, 34(5)
 引用次数: 1次

参考文献(3条)

1. [邹银辉](#). [煤岩声发射机理初探](#)[期刊论文]-[矿业安全与环保](#) 2004(01)
2. [唐绍辉](#), [吴壮军](#). [岩石声发射活动规律的理论与试验研究](#)[期刊论文]-[矿业研究与开发](#) 2000(01)
3. [潘一山](#), [李忠华](#), [章梦涛](#). [我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2003(11)

相似文献(10条)

1. 期刊论文 [谭云亮](#), [周辉](#), [韩宪军](#), [李芳成](#). [冲击地压声发射前兆模式初步研究](#) -[岩石力学与工程学报](#)2000, 19(4)
 从讨论声发射与岩石材料损伤关系出发, 论证了用声发射监测冲击地压的科学性。基于现场实测研究, 提出了冲击地压的声发射四种前兆模式: “单一突跃型”、“波动型”、“指数上升型”和“频繁低能量前兆型”, 还分析了松动爆破对防治冲击地压的效果, 这对冲击地压的预测预报, 具有重要应用价值。
2. 学位论文 [李兴伟](#). [工作面冲击地压声发射模式与应用](#) 2004
 本文主要从工作面冲击地压形成机理、工作面煤体受力状态出发建立了冲击地压数值计算模型。应用RPPA软件对不同顶底板条件, 不同均质度煤体的声发射模式进行了数值模拟, 对工作面煤体声发射进行了分析研究, 将其分为三种类型: 分布型、波动型和持续稳定型。分析研究了煤层均质度对工作面声发射模式的影响, 应用夹持理论研究不同均质度煤体在夹持状态下的支承压力分布形式, 研究了煤体的均质度对支承压力的影响。结合灰色建模理论, 建立了声发射参数预测冲击地压的尖点突变模型, 对分布型声发射模式进行了突变分析, 得到了与数值计算相吻合的结果。最后用突变理论分析了华丰矿3406(1)工作面的地音监测结果, 准确的预测了3月10日的冲击地压危险性, 得到了较好的应用效果。
3. 会议论文 [邹银辉](#), [吕贵春](#), [胡千庭](#). [声发射预测冲击地压危险性判识方法研究](#) 2007
 采用何种方法对危险性进行判识是决定声发射(AE)预测冲击地压准确与否的关键。声发射(AE)技术以实时、动态、连续监测等优点成为了极具发展前景的煤矿冲击地压灾害预测预报技术。通过声发射全波形信号指标统计, 分析了指标临界值危险性判识方法, 将冲击地压危险性划分为3个等级, 同时探讨了指标上升幅值危险性动态判识方法, 建立了关键点指标分布简化模型及判识标准。通过两种判识方法的对比剖析, 最终确定了以“指标上升幅值法为主、指标临界值法为辅”的冲击地压危险性判识方法。
4. 期刊论文 [李文](#), [纪洪广](#), [武玉梁](#), [LI Wen](#), [JI Hong-guang](#), [WU Yu-liang](#). [深井冲击地压发生机理分析及预测方法研究](#) -[中国矿业](#)2007, 16(7)
 本文在总结深井冲击地压的特征和规律的基础上, 对深井冲击地压的发生机理, 如强度理论、冲击倾向性理论、刚度理论、能量理论、失稳理论等分别进行了分析, 指出了上述各种理论的不足, 结合淮北某矿顶板砂岩试验, 提出了利用应变法和声发射法来预测深井冲击地压的发生, 取得了较好的效果。
5. 学位论文 [黄滚](#). [岩石断裂失稳破坏与冲击地压的分叉和混沌特征研究](#) 2007
 不同应力状态下岩石材料的失稳断裂破坏一直是岩石力学与工程研究的重点。本文在对岩石进行平面应变、常规三轴和声发射实验及煤岩CT实验的基础上, 采用非线性分叉理论、混沌理论对岩石在断裂失稳过程中的局部化分叉与混沌特征以及冲击地压的混沌特性进行了研究。本文的主要研究成果如下:
 ①根据许多岩石工程处于平面应变状态的实际情况, 自行研制了岩石平面应变仪, 进行了岩石平面应变实验, 并将平面应变实验结果和常规三轴实验结果进行了比较。结果表明, 不同应力状态下岩石的失稳断裂表现出不同的本构特性, 简单地将常规三轴实验结果应用到处于平面应变状态的实际工程将导致很大的误差甚至得到错误的结论。
 ②为研究岩石材料弹性模量的应力敏感性, 进行了不同围压和不同应力水平下岩石的加卸荷循环实验。实验结果分析表明, 岩石材料的弹性模量表现出较强的压硬性特点, 同时与塑性变形耦合, 表现出强烈的非线性性质。
 ③处于平面应变和常规三轴条件下的岩石在中低围压(<40MPa)下均表现为剪切局部化破坏的特征。对破坏后试件剪切面倾角的测量结果显示, 在常规三轴情况下, 剪切面倾角有随围压增加而降低的趋势; 而平面应变情况下试件倾角表现出相对的稳定性, 不随围压的变化而变化。
 ④根据岩石的平面应变和常规三轴实验结果, 建立了不同应力状态下岩石非关联弹塑性本构模型, 应用变形分叉理论的声张量法推导了不同应力状态下的分叉条件。对不同应力条件下岩石分叉的计算结果和实验结果的分析表明, 常规三轴条件下, 岩石的分叉发生在材料的应变软化即峰值应力出现之后, 而平面应变条件下, 岩石的分叉发生在应变硬化区, 即峰值应力出现之前。
 ⑤在煤岩CT实验的基础上, 通过研究煤岩CT数在不同应力水平时的变化, 建立了煤岩CT数演化的混沌模型。对该模型的分析表明, 煤岩在断裂失稳过程具有混沌分叉的特点。
 ⑥在岩石声发射实验基础上, 根据混沌理论的非线性时间序列分析方法, 对岩石的声发射参数时间序列进行了相空间重构、关联维分析和最大Lyapunov指数的计算。结果表明, 岩石声发射时间序列具有混沌特性, 描述不同围压下岩石声发射参数演化的最小因子数大于16, 说明岩石变形失稳断裂过程是一个极其复杂的非线性动力系统。
 ⑦在煤岩CT数混沌模型和声发射时间序列混沌分析的基础上, 结合损伤力学和耗散结构理论初步提出了混沌损伤的概念, 认为岩石变形失稳断裂过程是一个混沌损伤的过程。
 ⑧结合对煤矿冲击地压发生条件和影响因素的分析, 引入单滑块单状态本构模型、双状态本构模型和双滑块模型对煤矿冲击地压的发生机理从非线性动力学的角度进行了研究, 分析了不同模型的动力学演化行为, 探讨了模型的适用条件。
6. 期刊论文 [刘京红](#), [姜耀东](#), [赵毅鑫](#), [Liu Jinghong](#), [Jiang Yaodong](#), [Zhao Yixin](#). [声发射及CT在煤岩体裂纹扩展实验中的应用进展](#) -[金属矿山](#)2008, ""(10)
 声发射技术和CT扫描技术是监测煤岩体裂纹扩展的重要手段。概述了声发射及CT扫描实验在煤岩体领域的发展历程和应用现状。结合声发射技术与CT扫描实验的优点, 提出声发射与CT相结合进行煤岩体实验的研究方向, 以便于有效结合煤岩体内部裂纹变化情况进行煤岩体裂纹扩展机理的研究, 为进一步研究煤矿冲击地压的发生机理提供理论依据。

7. 会议论文 [滕学军, 吴耀](#) [地音监测原理及其应用](#) 1987

地音是指在矿山条件下, 煤岩体在受力变形过程中, 以应力波形式释放变形能所产生的声学效应。地音信号可以通过空间域、时间域、幅值域及频率域的图形函数加以描述, 同时地音现象又是一种随机瞬态过程, 可以用数理统计的方法按时间序列加以描述。该文结合波兰SAK-3型地音监测系统在门头沟矿冲击地压监测中的应用, 讨论了地音监测冲击地压的原理、监测实施要点和冲击地压发生前的地音前兆信息。结果表明, 采用地音方法监测冲击地压是可行。(本刊录)

8. 期刊论文 [刘卫东, 孟晓静, 丁恩杰, LIU Wei-dong, MENG Xiao-jing, DING En-jie](#) [岩体声发射监测系统的设计与实现](#) -[煤炭科学技术](#)2007, 35(5)

针对目前矿井冲击频繁发生的问题, 开发一种岩体声发射监测系统, 该系统采用LabView软件设计人机界面, 而其中的算法实现则采用Matlab软件。实现了谱分析、参数分析、模式识别、神经网络训练及实际预测等功能。并充分利用LabView软件的网络功能, 实现了系统的远程监测。

9. 学位论文 [袁瑞甫](#) [岩石破坏过程中的声发射分布规律及其分形特征](#) 2006

岩石是典型的具有非均匀性的脆性材料, 内部富含各种缺陷(微裂纹、孔隙、节理裂隙等), 在受载破坏过程中会产生大量的声发射信号。由于声发射信号产生于岩石内部微裂纹的萌生或扩展, 因此每个声发射信号都包含了岩石内部结构变化的丰富信息。研究和分析这些声发射信号的特征参数对于进一步认识岩石破坏过程中内部裂纹的扩展规律以及预测预报矿山现场的冲击地压(岩爆)具有重要的价值。

本文通过室内声发射实验, 监测不同岩性试样受载破坏过程中的声发射事件, 并基于分形理论, 建立了描述声发射空间分布特征的分维模型(数目-半径法和计盒维数法), 重点对岩石试样不同破坏阶段的声发射空间分布分维值的变化特征进行了分析, 得到了以下一些结论:

(1) 不同岩性试样破坏过程中声发射事件的空间分布反映了内部裂纹萌生和扩展规律。岩石试样破坏前在中间形成的声发射事件相对较少的“空白区”蕴含了岩石宏观裂纹扩展的趋势, 此结果对开展冲击地压(岩爆)预测预报研究具有重要的理论价值。

(2) 岩石试样破坏过程中声发射的空间分布具有分形特征。随着载荷增加, 试样内部破坏程度增加, 声发射分布的分维值持续降低, 到试样临近破坏时, 分维值降到最低。

(3) 岩石破坏过程中声发射分维值持续降低, 说明岩石内部裂纹是从最初的不规则分布, 渐渐向某个或某几个破裂面汇合(即相对比较规则)的一个过程。

(4) 对于同一岩性的岩石试样, 临近破坏前的计盒分维值会降低到一个“临界值”以下, 此“临界值”可以被当做岩石试样即将破坏的标志。这一结论对于矿山现场冲击地压(岩爆)的预测预报具有重要的参考价值。

10. 期刊论文 [赵毅鑫, 姜耀东, 韩志茹, ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, HAN Zhiru](#) [冲击倾向性煤体破坏过程声热效应的试验研究](#) -[岩石力学与工程学报](#)2007, 26(5)

介绍自行设计的多系统、同步监测试验机构, 并对冲击倾向性煤体分别进行单向加载和循环加载破坏试验。利用系统所具有的红外热像、声发射、应变等监测方式, 分析两种加载条件下, 冲击倾向性煤体破坏过程的声、热效应及破坏前的异常信息特征。对比研究不同监测方式下, 冲击倾向性煤体中同一破坏事件的响应速度以及各自响应的灵敏度; 获得冲击倾向性煤体的固有物理力学特性, 并发现强冲击倾向性和非冲击倾向性煤体单轴压缩时的最终破坏前兆点分别为0.9和0.7个荷载强度比, 也说明强冲击倾向性煤体的失稳破坏更突然、更难于预测。

引证文献(1条)

1. [李天和, 李玲, 王进选](#) [巷道施工中弧线上任意点中线标定方法模型](#) [期刊论文] -[西安科技大学学报](#) 2009(1)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_kyaqyhb200705002.aspx

下载时间: 2010年5月31日