

文章编号: 1673-9469 (2019) 01-0084-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.01.018

单轴压缩下含层理加锚岩石声发射特征研究

刘永宏¹, 赵伏军^{1, 2}, 李玉¹, 王海帆¹, 章思平¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为了研究不同层理倾角加锚岩石变形破坏过程中的声发射特征, 加工制备了0°和90°两种层理的加锚试样, 利用RMT-150C岩石力学试验机和AEwin-USB型声发射信号采集系统, 进行了含层理加锚岩石声发射特征试验。研究表明: 单轴压缩条件下, 90°层理试样声发射累积振铃计数大于0°层理试样, 具有明显的层理效应; 加锚试样相比无锚试样, 在压密阶段就有较强声发射信号产生, 而且随着载荷的增加声发射信号越来越强, 加锚试样的累计振铃计数大于无锚试样; 声发射信号特征可以反映岩石内部裂隙扩展变化, 对于揭示层理加锚围岩破坏失稳机制具有一定的参考价值。

关键词: 加锚岩石; 层理效应; 力学特性; 声发射

中图分类号: TD872

文献标识码: A

Study on Acoustic Emission Characteristics of Rocks with Layered and Anchored under Uniaxial Compression

LIU Yonghong¹, ZHAO Fujun^{1, 2}, LI Yu¹, WANG Haifan¹, ZHANG Siping¹

(1. School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Hunan University of Science and Technology, Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the acoustic emission (AE) characteristics of different layered angle and anchored rock deformation and failure process, the anchored samples of 0° and 90° two layers were processed. The RMT-150C rock mechanic test machine and AEwin-USB AE signal acquisition system were used to test AE characteristics of the layered and anchored rock. The results show that under the condition of uniaxial compression, the AE cumulative ringing count of the 90° layered sample is greater than 0° layered sample, and it has a significant bedding effect. Compared with non-anchored sample, anchored sample have stronger AE signals during compaction stage, and the AE signals become stronger as the load increases. The cumulative ringing count of anchored sample is also greater than non-anchored sample. The characteristics of AE signals can reflect the variation of crack propagation inside the rock, which has certain reference value for revealing the failure mechanism of layered and anchored surrounding rock.

Key words: anchored rock; bedding effect; mechanical properties; acoustic emission(AE)

声发射技术^[1-2]作为一种动态无损伤监测技术, 能够连续、实时地监测岩石内部裂纹萌生和扩展, 预测地震灾害和煤岩动力灾害。国内外学者对岩石

破坏过程中声发射特性展开大量的研究^[3-12]。主要侧重于岩石破坏过程中声发射特征试验研究和数值模拟分析, 而对于含层理加锚岩石声发射特性方面

收稿日期: 2018-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474103; 51674116); 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ2082); 湖南省研究生科研创新项目(CX2017B646)

作者简介: 刘永宏(1991-), 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要从事岩石力学方面的研究。

的研究，还尚未报道^[13-15]。因此，本文从现场钻取 0° 和 90° 层理砂岩作为加锚基体，利用 RMT-150C 压力实验机对含层理加锚岩石进行单轴压缩试验，同时采用 AEwin-USB 型声发射仪采集试样受载过程中的声发射信号，对含层理加锚岩石力学特性、破坏特征及声发射特征进行研究，可为揭示裂隙加锚围岩破坏失稳机制及现场声发射监测围岩破坏提供借鉴和参考。

1 试验概况

1.1 试样制备

本次试验所选用的加锚基体为黄砂岩，从煤矿现场钻取 0° 和 90° 层理的标准试样，按照岩石力学试验性能测试要求，使用磨石机进行打磨，保证试样两端面的平整度小于 0.05 mm，平行度小于 0.02 mm。试样分类如表 1 所示。

表 1 试样分类列表
Tab.1 List of sample classification

试验名称	锚杆材质	层理方向	试件编号
单轴压缩	无锚	垂直层理	W1-1 ~ W1-3
		平行层理	W2-1 ~ W2-3
	钢丝	垂直层理	S1-1 ~ S1-3
		平行层理	S2-1 ~ S2-3
	楠竹	垂直层理	Z1-1 ~ Z1-3
		平行层理	Z2-1 ~ Z2-3

目前，实验室内常用钢丝、铝丝、楠竹等材料来模拟工程锚杆，而黏结剂主要选用水泥砂浆、化学浆液等材料。对比相关材料的力学性能，选取 45 号钢加工成的钢丝和楠竹为本次试验的锚杆，其力学性能参数见表 2。黏结剂选用重金石粉和松香酒精溶液的混合液。

为了能够较好地反映出工程实际情况，采用一定的几何相似比例来设计试样的加锚参数。考虑到实际工程钻孔直径常为 30 mm、锚杆直径为 20 mm，本次试验选取模拟孔径和锚杆直径分别为

3 mm 和 2 mm，即工程锚杆与模拟锚杆的相似比为 10 : 1。层理为 0° 和 90° 的锚杆布置方式如图 1 所示。钢丝、楠竹加锚试样如图 2 所示（左边 6 个试件为钢丝加锚，右边 6 个试件为楠竹加锚）。

1.2 试验系统

单轴压缩破坏试验由压力加载系统和声发射信号采集系统组成，如图 3 所示。试验加载系统采用 RMT-150C 压力试验机，加载方式采用位移控制，加载速度为 0.005 mm/s，声发射信号采集系统采用 AEwin-USB 型声发射监测系统，试验时声发射系统阈值值为 50 dB，采样频率设为 5 MSPS。

2 试验结果分析

2.1 试样应力 - 应变曲线

单轴压缩下的应力 - 应变曲线能够反映岩样受力后的应力 - 应变性质。根据试验结果，绘制了不同层理倾角无锚与加锚岩石的应力 - 应变曲线如图 4，并得出每组试样的平均抗压强度和弹性模量如表 3。

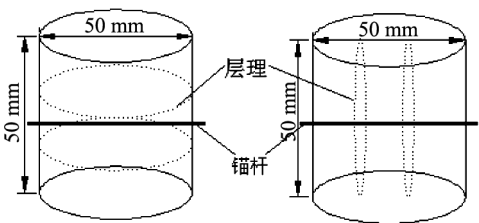


图 1 锚杆布置方式图
Fig.1 Schematic diagram of anchor arrangement

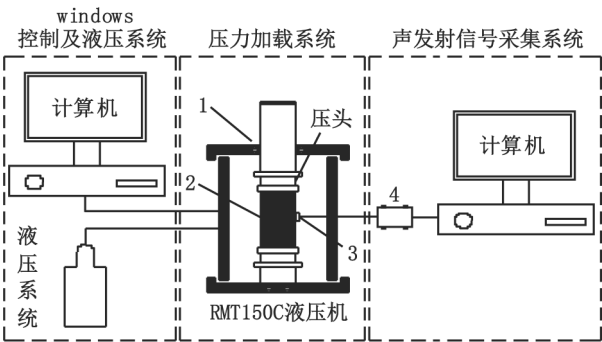


图 2 加锚试样
Fig.2 Anchored samples

表 2 工程锚杆、45 号钢丝及楠竹的力学参数

Tab.2 Mechanical parameters of Engineering Anchor, No. 45 steel wire and bamboo

材料	抗拉强度 /MPa	抗剪强度 /MPa	弹性模量 /GPa	锚固力 /MPa
锚杆	200 ~ 600	260 ~ 600	200	≥ 50
楠竹	150	110	20	30 ~ 40
钢丝	600	400	210	80



1 加载系统; 2 试样; 3 声发射传感器; 4 声发射采集主机

图 3 试验系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of test system

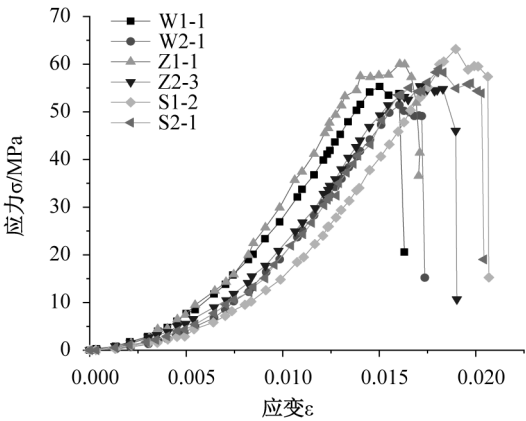


图 4 不同层理倾角无锚与加锚试样应力 - 应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of non-anchored and anchored samples with different layered angles

从图 4 可以看出, 单轴载荷压缩下不同层理角度无锚和加锚岩石破坏过程大致相同, 都经历了压密、弹性、屈服及破坏 4 个阶段。随着荷载增加, 试样被压密进入弹性阶段; 继续加载, 试样内部裂纹萌生、扩展, 进入塑性屈服阶段; 达到峰值应力后继续加载, 无锚岩石承载能力急剧下降, 呈现出脆性破坏, 而加锚岩石由于锚杆的锚固作用在一段时间内具有较强的承载能力, 呈现出塑性破坏。

由表 3 可知, 相比 90° 层理无锚岩石, 楠竹和钢丝加锚岩石抗压强度分别提高了 11.88% 和 16.87%, 且 0° 层理无锚岩石抗压强度提高了 8.0%。弹性模量也有着类似变化规律, 相比 90° 层理无锚岩石, 楠竹和钢丝加锚岩石弹性模量分别提

表 3 试样平均单轴抗压强度和弹性模量
Tab.3 Average uniaxial compressive strength and elastic modulus of samples

试样名称	平均单轴抗压强度 /MPa	平均弹性模量 /GPa
无锚 0° 层理	55.45	4.57
无锚 90° 层理	51.34	4.32
楠竹 0° 层理	60.87	4.98
楠竹 90° 层理	57.44	4.71
钢丝 0° 层理	63.39	5.18
钢丝 90° 层理	60.0	4.92

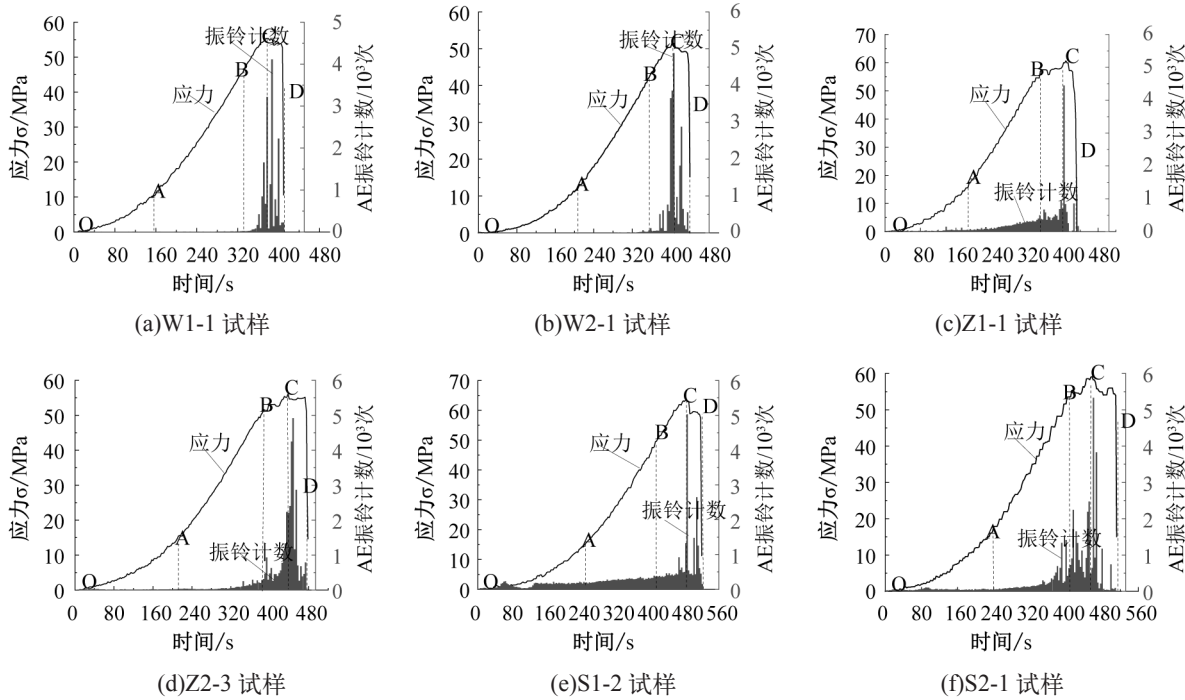


图 5 试样应力 - 时间 - 振铃计数变化曲线

Fig.5 Sample curve for stress and ringing count with time

高了 9.24% 和 13.4%，且 0° 层理无锚岩石弹性模量提高了 5.7%。说明加锚能提高岩石的抗压强度和变形能力，且钢丝加锚效果好于楠竹加锚；同时加锚岩石抗压强度具有明显的层理效应。

2.2 单轴压缩下岩样声发射特征对比分析

一般常用的声发射时间序列参数包括振铃计数、振铃计数率、能量及声发射振幅等。本文选取声发射特征参数中的声发射振铃计数和累积振铃计数作为岩石破坏特征参数。根据试验结果，绘制了不同层理倾角无锚与加锚岩石声发射振铃计数及应力随时间变化曲线和声发射累积振铃计数随时间变化曲线如图 5 和 6 所示，并得出 90° 层理加锚岩石声发射振铃计数统计表，如表 4 所示。

从反映声发射活动剧烈程度的振铃计数上看，单轴压缩下不同层理倾角无锚与加锚岩石破坏过程中声发射活动水平具有不同的特征：

从图 5 可知，单轴压缩下含层理加锚岩石的每个阶段具有不同的声发射特征。在压密阶段，岩石内部微裂隙被压实，此阶段声发射振铃计数很小几乎没有，但是由于加锚试样在此阶段变形较大，因此相应的声发射信号持续时间更长。进入弹性阶段，应力-应变曲线近似于直线，岩石内部原生裂隙已压实，声发射信号比较稳定，但加锚试样声发射振铃计数比无锚试样要大，可能是由于锚杆、锚固体与黏结剂之间产生了滑移的原因。随着载荷增加，在塑性阶段岩石内部微裂纹开始萌生和扩展，此阶段声发射振铃计数急剧增加。进入破坏阶段，试样内部大量微裂隙扩展汇合贯通至宏观破坏，此阶段试样声发射振铃计数达到峰值；而由于加锚提高了试样的强度，阻止了试样产生破坏，使得加锚试样声发射振铃计数会出现小幅度突增后降低。总的来

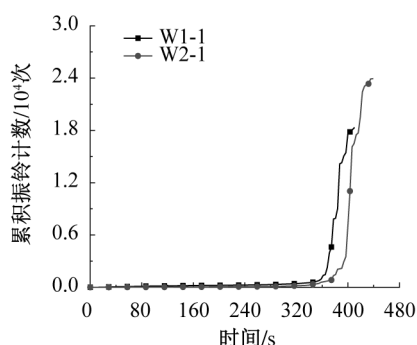
说，声发射振铃计数可以反映岩石裂隙发育失稳的变化规律。因此，声发射信号的变化特征对于揭示

表 4 90° 层理加锚试样声发射振铃计数统计
Tab.4 AE ringing count statistics of 90° layered and anchored samples

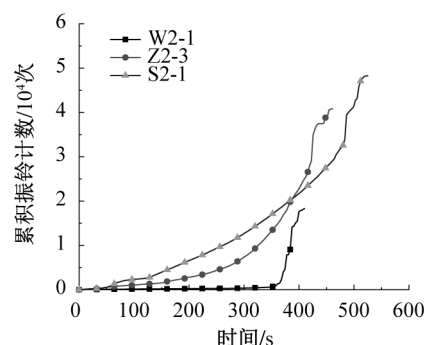
试样名称	AE 振铃计数比例 /%			
	压密阶段	弹性阶段	屈服阶段	破坏阶段
W2-1	0.3	14.4	28.5	69.8
Z2-3	3.1	16.4	36.7	43.8
S2-1	7.5	21.6	30.7	40.2

裂隙加锚围岩破坏失稳机制具有重要的参考价值。

从图 6(a) 中可知，单轴压缩过程中无锚 90° 层理试样声发射累积振铃计数增加更迅速，相比无锚 0° 层理试样提高了 31.0%，并且无锚 0° 层理试样发生剪切破坏，无锚 90° 层理试样发生的拉伸劈裂破坏，破坏产生的碎屑更多，这是因为单轴压缩过程中， 90° 层理试样的层理倾角与加载方向一致，导致岩石中岩桥所能承受的载荷较低，裂纹易于沿着层理方向进行大量扩展，而声发射信号与裂纹尺度有密切的正相关性，每一次微裂隙的扩展都对应着声发射信号的增加。由表 4 和图 6(b) 可以看出，钢丝加锚试样声发射累积振铃计数最大，楠竹加锚次之，无锚最小；单轴压缩下无锚试样声发射信号主要集中于应力-应变的破坏阶段，而加锚后试样在压密阶段就有较强声发射信号产生，该阶段楠竹和钢丝加锚试样是无锚试样的 10.3 和 25.0 倍，加锚试样声发射信号随着载荷的增加也越来越强，并且加锚试样的累积振铃计数大于无锚试样，其原因是，加锚试样在加载初期除了发生岩石内部裂纹闭合外，还有可能加锚试样产生滑移的缘故，而且随着加载的进行，由于锚固剂对岩体的粘结和锚杆锚固作用，



(a) 0° 和 90° 层理无锚试样



(b) 无锚与加锚试样

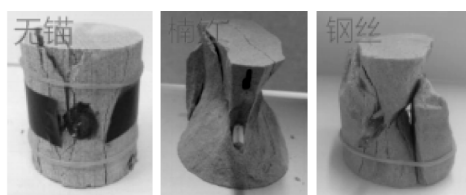
图 6 含层理加锚试样声发射累积振铃计数关系曲线

Fig.6 AE cumulative ringing count relation curve with layered and anchored samples

试样中部变形能力和抗剪能力得到提高,而端部强度变弱,这也导致加锚试样经常在软硬交界面处发生剪切错断破坏,而无锚试样在加载初期聚集能量,达到较高的应力水平才会产生大量微裂纹,所以加锚试样声发射累积振铃计数要大于无锚试样。



(a) 0°层理试样破坏形式



(b) 90°层理试样破坏形式

图7 不同层理倾角无锚与加锚试样破坏形式

Fig.7 Destructive forms of different bedding angles for non-anchored and anchored samples

3 结论

1) 加锚能提高岩石的单轴抗压强度和变形能力,且钢丝加锚锚固效果好于楠竹加锚;0°层理加锚岩石抗压强度和弹性模量大于90°层理,表现出明显的层理效应。

2) 不同层理倾角无锚与加锚试样声发射表现出不同的特征。90°层理试样声发射累积振铃计数大于0°层理试样,在整个加载过程中声发射活动水平更强;相对于无锚试样,加锚试样在压密阶段就有较强声发射信号产生,进入到弹性阶段加锚试样的声发射信号仍然活跃,无锚与加锚试样在屈服阶段声发射信号都出现突增,进入破坏阶段无锚与加锚试样声发射信号均达到最大值后减小,并且加锚试样的声发射累计振铃计数大于无锚试样。

3) 单轴压缩下含层理加锚岩石声发射振铃计数最大值出现在应力峰值附近,声发射振铃计数曲线可以反映岩石内部裂隙发育扩展变化。因此,声发射信号对于揭示裂隙加锚围岩破坏失稳机制具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 袁振明, 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.

[2] 陈宇龙, 魏作安, 许江, 等. 单轴压缩条件下岩石声发射特性的试验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S2): 237-240.

[3] MOGI K. Study of elastic cracks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthquake phenomena[J]. Bulletin of the Earthquake, Research, Institute, 1962, 40: 125-173.

[4] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(15): 2499-250.

[5] 刘保县, 黄敬林, 王泽云, 等. 单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 3234-3238.

[6] 赵伏军, 谢世勇, 潘建忠, 等. 动静组合载荷作用下岩石破碎数值模拟及试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1290-1295.

[7] 宿辉, 党承华, 李彦军. 考虑不均质度的岩石声发射数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1886-1890.

[8] 赵兴东, 李元辉, 袁瑞甫, 等. 基于声发射定位的岩石裂纹动态演化过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(5): 944-950.

[9] 秦虎, 黄滚, 王维忠. 不同含水率煤岩受压变形破坏全过程声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1115-1120.

[10] ZHAO F, LI Y, YE Z, et al. Research on Acoustic Emission and Electromagnetic Emission Characteristics of Rock Fragmentation at Different Loading Rates[J]. Shock and Vibration, 2018(5): 1-8.

[11] THAM L G, LIU H, TANG C A, et al. On Tension Failure of 2-D Rock Specimens and Associated Acoustic Emission[J]. Rock Mech Rock Engn, 2005, 38(1): 1-19.

[12] 李玉, 赵伏军, 王斌, 等. 刀具压入破岩声发射分形特征实验[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2018, 33(1): 10-15.

[13] 张东明, 白鑫, 尹光志, 等. 含层理岩石单轴损伤破坏声发射参数及能量耗散规律[J]. 煤炭学报, 2018, 43(3): 646-656.

[14] 邓博知, 康向涛, 李星, 等. 不同层理方向对原煤变形及渗流特性的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 888-894.

[15] 张朝鹏, 张茹, 张泽天, 等. 单轴受压煤岩声发射特征的层理效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 770-778.

(责任编辑 李新)