**白云岩的单轴压缩力学特性及声发射特性研究**

刘汉香1,2[[1]](#footnote-0)\*，别鹏飞1，邓叶林1，李欣1 ，张群3

（1.成都理工大学 ，成都610059 2.地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室，成都 610059

3.四川省国土空间生态修复与地质灾害防治院，成都610059）

**摘 要**：对从青川县东河口滑坡区采集的白云岩进行了单轴压缩试验，测得了白云岩的单轴抗压强度、弹性模量等力学参数，并在单轴压缩试验的全过程运用了声发射测试技术，研究了岩石损伤破坏过程中的声发射参数（振铃计数、能量）演化规律及其与岩石的应力响应之间的相关性，并尝试对岩石损伤破坏前兆的声发射特征点进行了分析。研究结果体现了白云岩的初始缺陷对其力学特性及声发射特性会产生较大的影响。分析表明：①白云岩的变形破坏过程大致可分为五个阶段，且不同阶段出现了与之相对应的声发射信号特征；②白云岩的声发射振铃计数和能量在反映岩石损伤演化过程方面有较高的一致性。明显的声发射活动主要出现在岩石加载的中后期，在岩石进入裂纹非稳定扩展阶段后出现振铃计数和能量激增的现象，在临近破坏阶段，个别岩样进入声发射活动的相对平静期；③对比声发射特征点和应力屈服点出现的时刻，两者的差值与岩样的初始缺陷密切相关。但无论是累计振铃计数还是累计能量，基于两者识别出的特征点时间都是超前于或接近应力屈服点出现的时刻。基于本次研究结果，如果作为岩石破坏前兆信息识别，选用累计能量参数会使得安全储备更充足。

**关键词**：白云岩；单轴压缩试验；力学特性；声发射特性

**中图法分类号** P 64； **文献标志码** A

**Research on mechanical properties and acoustic emission characteristics under uniaxial compression test of dolomite**

Liu Hanxiang1,2[[2]](#footnote-1)\*, Bie Pengfei1, Deng Yelin1, Li Xin1,Zhang Qun3

（1.Chengdu University of Technology,Chengdu 610059, China 2.State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu 610059, China 3.Sichuan Institute of Land and Space Ecological Restoration and Geological Hazard Prevention,Chengdu 610059 , China ）

**Abstract**: Based on the uniaxial compression test on dolomite rock samples from the Donghekou landslide area in Qingchuan County, Sichuan, China, the compressive strength and elasticity modulus of dolomite were obtained. At the same time, the acoustic emission testing technology was used during the compression process to study the relationship between the acoustic emission (AE) parameter (i.e. ringing count, energy) and stress response of dolomite. An attempt was made to analyze the AE feature indicating the rock damage precursor. The results show that the initial defects of dolomite have great influence on its mechanical properties and AE characteristics. The analysis shows that: ① the deformation and failure process of dolomite can be basically divided into five stages, and there are corresponding AE signal characteristics in different stages; ②the AE ringing count and energy of the dolomite have a high consistency in reflecting the damage evolution process of the rock. Obvious AE activities mainly occur in the middle and late stage of rock loading, and the ringing count and energy sharply increase when the rock enters the unstable crack growth stage. In the near failure stage, some rock samples enter the relative quiet period of AE activities; ③ comparing the moments when AE characteristic point and stress yield point occur in a rock sample, the difference between them is closely related to the initial defect of rock sample. However, whether it is the cumulative ringing count or the cumulative energy, the AE characteristic point identified based on both of them occurs earlier than or close to the stress yield point. According to the present study, it seems that the safety reserve will be more sufficient if the cumulative energy parameter is chosen as the precursor of rock damage.

**Keywords:** dolomite; uniaxial compression test; mechanical property; acoustic emission characteristics

**0 引言**

白云岩是一种以白云石矿物为主要成分的碳酸盐岩，常混入石英、长石、方解石和黏土矿物等。白云岩在我国分布较为广泛，在岩土工程建设中属于比较常见的工程地质体，由于碳酸盐岩遇水后容易被侵蚀，从而在岩体内部产生溶蚀孔洞和裂隙，再加上地质历史时期的构造作用，大部分白云岩结构不均匀，存在的微裂隙长度、走向、数量不尽相同且分布随机，致使其应力状态变得更为复杂，对白云岩的力学特性及破坏特性产生了显著的影响。目前专门针对白云岩力学特性开展的研究并不多。吴勇通过理论研究、室内试验及本构模拟等方法，对白云岩在不同含水率下的力学特性进行了较为系统的研究[1]。李向星通过对含原生微裂隙白云岩进行室内单轴压缩试验，探讨了原生裂隙对岩石强度和变形特性的影响规律[2]。周宗红等人为了研究白云岩的力学特性和破坏模式，利用改进的三维 SHPB 动静组合加载试验装置，对白云岩进行了三维加载、轴向冲击试验，分析了轴压、围压和应变率对白云岩强度、变形模量、能量吸收等的影响，探讨了岩石动静组合加载的应变率效应[3]。陈俊也以白云岩作为研究对象，探讨了含天然微裂隙岩石的裂隙扩展规律、破坏过程及强度特征[4]。由此可见，有关白云岩方面的研究，主要集中于白云岩的裂隙性和水理特性对白云岩力学特性的影响，很少涉及白云岩在荷载作用下的损伤破裂过程。

岩石的声发射现象是指岩石受到外界荷载的作用时，内部新旧裂纹萌发、扩展、贯通等，从而使岩石发生弹性、塑性变形，当外界压力超过岩石能承受的极限时，岩石内部存储的能量便以弹性波的形式释放出来的现象。声发射的各参数之中蕴含着大量的岩石损伤破裂信息，因此，深度挖掘声发射的各特征参数，对于研究岩石损伤演化特征、理解岩石破裂机制、预测预报岩体失稳等方面具有重大意义。而研究单轴压缩条件下岩石声发射的数量、大小、频率等参数，可以进一步了解岩石变形破坏的过程。目前，声发射测试已被广泛应用于岩石和岩体工程中，尤其是利用声发射信号反演岩石在不同变形阶段的损伤破裂过程和获取岩石的破坏前兆信息方面的应用，凸显了重要的理论价值和工程实践意义[5-15]。

2008年汶川地震在青川县东河口村诱发了一个巨型岩质滑坡，该滑坡具有高位抛射、高速、远程和碎屑流运动特征，致使4个村庄和1所小学被埋，约780人死亡，造成的经济损失高达5000多万元[16]。该滑坡的形成机理和运动机理非常复杂，而组成滑坡体和滑床的地层岩性及结构是诱发本次滑坡的一个关键因素。东河口滑坡所在地层为典型的层状复合岩体结构，根据已有的研究成果，滑坡区主要发育有白云岩、千枚岩、砂岩、灰岩和碳质板岩，且滑动面位于薄弱的碳质板岩岩层中。不少学者基于工程地质理论分析方法和数值模拟方法对东河口滑坡的地震诱发机制开展了研究[17-19]，但大多数都是将边坡地层结构进行了简化，其中的原因之一，就是对滑坡区发育的岩体特性缺乏足够的了解，而岩体特性恰恰是控制滑坡形成的关键因素。在这一背景下，笔者在对该滑坡进行了详细野外踏勘的基础上，采集了各类岩体的试验样本，在室内开展了各项物理和力学特性试验，主要目的是为了完善和补充东河口滑坡区发育岩体的物理力学特性，为深入研究该滑坡的发生机制提供基础参数。由于篇幅限制，本文仅选取白云岩为研究对象，详细阐述白云岩在单轴压缩条件下的静力学特性和声发射试验结果。白云岩的动力学特性以及其它几种岩性的力学特性将另外撰文论述。

**1 试验过程概述**

**1.1 试件准备**

岩样均取自四川省广元市青川县东河口滑坡区。按照《工程岩体试验方法标准》（GBT 50266-2013）将岩样加工成标准圆柱体试样（Ф50mm×100mm），并对其两端及侧面进行了仔细研磨，不平行度和不垂直度均小于0.02 mm。为了尽量保持各试样特性的一致性，同一组试样都是从同一岩块中钻取而得，如图1所示。经过DX-2700X射线衍射仪分析，白云岩成分主要为白云石（82%）、粘土质（15%）、云母（<1%）和磁铁矿（1-2%）。5个试样表面均发育有一些细小孔洞，孔径小于1.0 mm，同时还可见多条不等宽的微裂隙和细脉，脉内主要充填石英：D01试样侧面有少量细小孔洞，发育较多条岩脉；D02试样顶部和中部有小块破损，发育一条斜向裂隙，岩脉数量较少；D03试样斜向发育一条较宽岩脉，将顶部和中部贯通，同时内部发育多条细小、不连续岩脉；D04试样岩脉交错不连续，在竖向发育的一条较宽岩脉中分布有数个孔洞；D05试样岩脉数量较少，侧面有2处较短裂隙。由此可见，尽管5个试样均取自同一岩块，但它们在初始状态上的不同必然导致力学特性上的差异性。经密度测试后得白云岩的平均密度为2648.3kg/m3。

|  |
| --- |
| 图1.JPG  **D02**  **D05**  **D04**  **D03**  **D01** |
| 图1 白云岩试样  Fig. 1 Test specimens of dolomite |

**1.2 测试设备**

试验在成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室内完成。试验中所需设备主要有单轴加载系统和声发射监测系统。加载系统采用MTS815 电液压伺服材料试验系统，该设备可用于进行岩石和混凝土等材料的单轴压缩、三轴压缩、卸荷试验、高温试验以及疲劳试验等。该试验机最大可提供4600kN的轴压；最大围压可达140MPa；最高温度可达 200℃，可同时记录荷载、应力、位移和应变值等。声发射试验采用北京声华兴业科技有限公司 SAEU2S 测试系统，传感器型号采用 Soundwel SR150N 型，其工作频率为 22 KHz-220 KHz。为使检波器（探头）与试件接触良好，采用凡士林作为检波器与岩石的耦合剂，并用橡胶圈将传感器固定于试件中央。

**1.3 测试方案**

试验加载方式采用单轴加载，在开始阶段采用应力控制，加载速率为5 kN/min，加载至15 kN后改用位移控制，加载速率为 0.1 mm/min，直接加载至试样破坏。试验过程中采集运行时间、荷载、轴向位移和轴向应力共4个参数。在单轴压缩全过程试验的同时进行实时声发射监测，提取并记录声发射波形到达时间、幅度、振铃计数、能量、上升时间、RMS、ASL 等基本参数。在采集声发射参数时，根据试验环境将声发射采集门槛值设为40 dB。在加载过程中，随时关注并记录试样的变形情况，包括裂纹的生成和扩展过程，以期为试样的损伤演化过程分析提供一定的参考。

**2. 试验结果分析**

**2.1 单轴压缩条件下的力学特性分析**

由于岩样D01和D03在试验中出现故障，未完成整个加载过程，故不能用于本次分析。因此，本研究仅分析岩样D02、D04和D05的试验结果。图2为3个岩样的轴向应力应变关系曲线图。对比分析这3条曲线，有以下相似特征：①裂纹压密阶段：应力水平约为峰值强度的25%左右，该阶段的应力-应变曲线呈上凹型，岩体中原有结构面、裂隙在压应力作用下逐渐闭合，填充物不断被压缩，岩体的刚度持续加大；②线性变形阶段：该阶段应力随应变成近似线性变化，岩体内部不产生不可逆破裂，能量在此阶段积聚，过程长短主要由岩石坚硬强度决定；③裂纹稳定扩展的非线性变形阶段：该阶段岩样的应变不变，但是应力突然略微降低，然后又近线性上升，岩体内部开始出现微破裂，形成新的裂纹，岩体结构逐渐遭到破坏，如岩样D04和D05；④裂纹加速扩展直至岩石破裂阶段：该阶段应力逐步达到峰值强度，然后陡然下降，裂纹在试件某些部位密集、搭接、相连，形成宏观裂缝，裂缝不断扩展变大并逐渐连通，形成有强烈应变集中的裂缝带，并不断向试件端部伸长，岩体的抗压能力不断减弱，直至块体开始剥落，岩体破坏，破裂过程中的应力集中现象显著；⑤破裂后残余强度阶段，该阶段应力下降到一定值之后就稳定不变，虽然有块体逐渐脱落，但是岩体破坏后并没有完全失去承载能力，还存在残余抗压强度，如岩样D02和D05。从曲线中读取3个岩样的峰值抗压强度并计算弹性模量，得到D02的和*E*分别为19.9 Mpa和5.7 GPa，D04的和*E*分别为32.5 Mpa和6.9 GPa，D05的和*E*分别为45.9 Mpa和8.2 GPa。由此可见，即使是取自同一岩块的3个白云岩试样，由于岩样的初始状态不同，最终表现出来的力学特性也有明显差异。岩样D05由于岩脉和裂隙发育较少，结构较完整，抗压强度和弹性模量均高于其余2个岩样的相应值。同时还会发现，这些取自东河口滑坡区的白云岩样的力学参数均低于白云岩力学参数的常见范围值，这与该区白云岩长期遭受风化侵蚀和多期构造应力作用而导致岩体结构不完整有关。

图3~5分别为3个岩样加载前后的对比图。在单轴压缩条件下，岩样都出现了一条或多条贯通岩体上下端面的主裂缝，呈现拉张破坏模式。

图2.tif

图2 白云岩试样的轴向应力-应变曲线图

Fig. 2 Axial stress-strain curves of dolomite specimens

|  |  |
| --- | --- |
| 说明: F:\University\毕业论文设计\A 邓叶林\A 邓叶林\单轴压缩试验\单轴压缩试验照片\实验过程照片\实验照片\白云岩\H02-1(初始状态).JPG | 说明: F:\University\毕业论文设计\A 邓叶林\A 邓叶林\单轴压缩试验\单轴压缩试验照片\实验过程照片\实验照片\白云岩\H02-3(裂隙进一步发展).JPG |
| (a)破坏前 | (b)破坏后 |
| 图3 试样D02加载前后对比图  Fig. 3 Comparison of specimen D02 before and after loading | |
| 说明: F:\University\毕业论文设计\A 邓叶林\A 邓叶林\单轴压缩试验\单轴压缩试验照片\实验过程照片\实验照片\白云岩\H04-1（初始状态）.JPG | 说明: F:\University\毕业论文设计\A 邓叶林\A 邓叶林\单轴压缩试验\单轴压缩试验照片\实验过程照片\实验照片\白云岩\H04-4（正面前期出现的裂隙进一步延伸扩张，同时与其相交的一条裂隙快速发展）.JPG |
| (a)破坏前 | (b)破坏后 |
| 图4 试样D04加载前后对比图  Fig. 4 Comparison of specimen D04 before and after loading | |
| 说明: F:\University\毕业论文设计\A 邓叶林\A 邓叶林\单轴压缩试验\单轴压缩试验照片\实验过程照片\实验照片\白云岩\H05-1（初始状态）.JPG | 说明: F:\University\毕业论文设计\A 邓叶林\A 邓叶林\单轴压缩试验\单轴压缩试验照片\实验过程照片\实验照片\白云岩\H05-3（背面有两条近似平行的裂隙出现）.JPG |
| (a)破坏前 | (b)破坏后 |
| 图5 试样D05加载前后对比图  Fig. 5 Comparison of specimen D05 before and after loading | |

**2.2 声发射特征分析**

**2.2.1 振铃、能量、应力和时间的关系**

已有的研究表明，在众多类型的声发射参数中，振铃计数和能量对于材料的断裂及损伤程度的评价具有重要意义，在材料的声发射特征分析中最常被使用[5-15]。因此，本研究选取振铃计数、累计振铃计数、能量、累计能量作为声发射参数进行白云岩样在单轴加载过程中的声发射特征分析，同时结合轴向应力-时间曲线，可以获得岩样在不同加载阶段的声发射和应力响应之间的对应性，从宏观和微观上共同揭示岩样的损伤演化过程。图6为白云岩样声发射的振铃计数、累计振铃计数、应力与时间的关系，图7为白云岩样声发射的能量、累计能量、应力与时间的关系。由图可知，白云岩岩样的振铃和能量参数与加载过程中的不同阶段具有较好的对应性，总体表现出以下几个特点：（1）在初期加载的裂纹压密阶段和弹性变形阶段，出现的声发射振铃计数较小，甚至没有，发生一次声发射事件的振铃计数基本在200次以内。表明该阶段岩石的损伤小或无损伤，声发射事件的产生主要与白云岩原生裂隙及填充物压密、孔隙闭合等有关。闭合过程、闭合后部分粗糙面的破坏及闭合裂纹表面之间的滑移将产生少量的声发射，但能量较低，对于D04和D05岩样，累计能量-时间曲线近乎水平。该阶段对应的轴向应力-时间曲线光滑；（2）在裂纹稳定扩展的变形阶段，岩石因外力的不断增加，使得岩体内部开始出现新的微裂纹，并逐渐扩展延伸。但此时声发射活动仍然非常弱，振铃计数和能量值都很低，累计曲线近似水平或缓慢上升，应力-时间曲线也比较光滑；（3）在裂纹非稳定扩展阶段，声发射活动明显增强，振铃计数和能量突然增加，累计振铃计数曲线和累计能量曲线陡然上升。从应力-时间曲线上看，当D04岩样加载至24 MPa，D05岩样加载至30 MPa时，均出现了应力的明显跌落然后再回升的情况，这一时刻正好对应了声发射振铃计数和能量激增的时刻，表明了岩样发生了局部破坏，但整体仍然稳定；（4）在裂纹加速扩展至破坏阶段，声发射活动再次增强。D02岩样在到达峰值应力前，集中出现了一次声发射事件，但是释放的能量并不大，在峰后仍然出现了声发射活动，并且释放出大量的能量。D04岩样在前一阶段释放出部分能量后，声发射活动进入相对平静期，直至峰值应力阶段才再次出现较强的声发射活动。D05岩样自进入前一变形阶段以来，声发射活动异常活跃，应力-时间曲线出现多次“跌落-回升”的情况，每一次跌落都对应了一次较强的声发射活动，表明该岩样的破裂呈渐进性发展。不论是哪一个岩样，在该阶段，裂纹都开始相互连接、贯通，具有明显的应力集中特点，一些宏观裂缝也在该阶段形成。这些宏观裂缝不断扩大，向岩石两端延伸，导致试件破裂，相应地，声发射事件也异常活跃；（5）峰后残余应力阶段，由于岩石破裂面之间的摩擦、错动，旧裂纹的扩大以及新裂纹的产生，声发射振铃计数和能量仍然比较高，声发射事件仍比较活跃。综合以上分析，白云岩由于初始缺陷的存在，初始状态不同的岩石将表现出不同的声发射过程和特征。初始结构越完整的岩石，声发射活动更可能在加载的中后期才出现增强的现象，如D05岩样。而初始缺陷较多的岩石，声发射活动可能出现在加载过程中的各个阶段，能量将逐渐被释放，在临近破坏阶段，声发射活动反而不那么活跃，如D02和D04岩样。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) D02岩样 | (a) D02岩样 |
|  |  |
| (b) D04岩样 | (b) D04岩样 |
|  |  |
| (c) D05岩样 | (c) D05岩样 |
| 图6 白云岩试样的声发射振铃参数特征  Fig. 6 Acoustic emission ringing parameter characteristics of the dolomite specimens | 图7 白云岩试样的声发射能量参数特征  Fig. 7 Acoustic emission energy parameter characteristics of dolomite specimens |

**2.2.2 岩石破坏前兆的声发射特征**

在工程实践中，我们不仅关心岩石是如何一步步走向破坏的，而且更加关心岩石在什么时候会破坏，也即关于岩石破坏前兆的问题。已有的研究表明，研究岩石声发射过程和应力响应过程的关系，能够间接反映岩石的内部损伤过程，并可基于两者的关系识别出与岩石破坏前兆相关的声发射信息。文献[11, 20]在这方面做了一些工作，他们基于裂纹体应变模型法和声发射参数分析法，找到了不同变形阶段的应力门槛值，给出了起裂强度和损伤强度以及与这两个特征点相对应的声发射参数特征。起裂强度是指岩石弹性变形阶段结束后，被压密的原生裂纹开始扩张，并伴随新裂纹产生时对应的应力值。损伤强度则是岩石进入裂纹非稳定扩展阶段，也即进入屈服阶段时对应的应力。根据他们的研究成果，对不同类型的岩石，即使是同一类型岩石的不同试件而言，由于岩石成分、初始结构和构造不同，在起裂强度和损伤强度点对应的声发射参数值的选取上也会有所不同，从而给岩石破坏前兆信息的提取增加了难度。本研究借鉴以上方法，尝试通过分析白云岩样的声发射累计振铃计数和累计能量与应力之间的关系来给出岩石的破坏前兆特征识别点。需要指出的是，由于在单轴加载试验中，应变只采集了轴向的，因此不能采用裂纹体应变模型法事先识别出不同变形阶段的应力特征点，主要依据应力-应变曲线的特征进行判断，带有一定的主观性。同时，由于单轴加载试验和声发射试验数据的采集是相互独立的，采样时间间隔不同，在本研究中无法作出与文献[11]中类似的声发射参数和应力随应变增加的曲线。因此，本研究仅采用声发射参数和应力随时间增加的曲线，进行岩石破坏前兆特征（损伤强度特征点或应力屈服点）的初步识别。

图8为3个白云岩样的应力-时间曲线和累计振铃计数-时间曲线。D02试样的累计振铃计数曲线在整个加载过程中呈多级阶梯式上升，前期、中期和后期都有声发射活动出现，如图6(a)和图7(a)所示。曲线没有出现明显的激增点，反而在临近破坏前出现了一次较强的声发射活动后进入了声发射的相对平静期，目前这一现象已被多项研究揭示[15]。在此阶段岩石处于一种似稳定的临界结构状态，应力稍有增加，结构状态就发生改变，进而出现试样的整体性破坏。对于这一类型岩石，参照文献[20]可将临破坏前声发射平静期的起点当作为岩石即将进入破坏阶段的声发射信号特征点，如图中点S1所示，并将应力拐点作为损伤强度特征点，如图中点B1所示。D04试样和D05试样的累计振铃计数曲线在前期和中期都为水平线，表明这两个试样在该阶段没有声发射活动或者非常弱。在加载后期，两个试样都出现了累计计数的激振点，如点S2和S3所示。本研究将这个激增点作为两个岩样进入裂纹不稳定扩展阶段的标志。与此相对应的是，D04出现激振点后约4s左右，应力出现了一次较明显的跌落，跌落幅值约5MPa，随即又回升。本研究将此刻对应的应力作为损伤强度值，记为B2。与此类似，将D05中应力出现明显跌落时刻的应力值作为损伤强度，记为B3。B3和S3出现的时刻非常接近。

图9为3个白云岩样的应力-时间曲线和累计能量-时间曲线。从图像上看，累计能量曲线较累计振铃计数曲线的拐点进一步的“锐化”，即拐点更分明。表1给出了分别基于累计振铃计数和累计能量识别出的岩石进入裂纹不稳定扩展阶段的时刻，发现对于D02和D05试样，两种参数识别出的时刻近乎一致，对于D04试样，能量参数识别出的特征点时间提前了。如果作为前兆信息使用，会使得安全储备更充足。此外，从表1可以得出，无论是累计振铃计数还是能量计数，基于两者识别出的特征点时间都是超前于或接近损伤强度出现的时刻。

|  |
| --- |
|  |
| 图8 应力和累计振铃计数曲线特征点取值图  Fig. 8 Values of characteristic points of stress and cumulative ringing count curves |
|  |
| 图9 应力和累计能量曲线特征点取值图  Fig. 9 Values of characteristic points of stress and cumulative energy curves |

表1 白云岩样特征点出现的时刻（单位：s）

Table 1 Occurrence time of characteristic points of dolomite specimens (unit :s)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 特征点 | D02岩样 | D04岩样 | D05岩样 |
| 应力屈服点B | 487.97 | 553.08 | 550.51 |
| 振铃计数特征点S | 479.36 | 529.13 | 549.23 |
| 能量特征点S | 479.36 | 516.69 | 549.73 |

**3 结束语**

通过对白云岩开展单轴压缩试验和声发射试验，主要得到以下认识：

（1）依据白云岩在单轴压缩试验下的应力-应变曲线，可将白云岩的变形破坏过程大致分为五个阶段，且不同阶段出现了与之相对应的声发射信号特征。在岩石的压密阶段和弹性变形阶段，岩石的声发射振铃计数和能量都很小，甚至没有。在裂纹稳定扩展的非线性变形阶段，声发射活动仍然很弱。但初始缺陷较多的岩样，从加载后不久就出现了较明显的声发射。在进入裂纹加速扩展阶段，累计振铃计数曲线和累计能量曲线出现激增的拐点。在临近破坏阶段以及峰后阶段，累计振铃计数曲线和累计能量曲线则表现出了与岩石初始结构和构造相关的变化特征。

（2）通过分析岩石的声发射特征参数曲线和岩石的应力-时间曲线的关系，对岩石的破坏前兆声发射特征进行了较为初步的探讨。基于声发射参数特征点所识别出的岩石进入裂纹非稳定扩展时刻，对不同的岩样，得到了不同的结果，与岩样的初始缺陷密切相关。但无论是累计振铃计数还是累计能量，基于两者识别出的特征点时间都是超前于或接近损伤强度出现的时刻。如果作为前兆信息识别，选用累计能量参数会使得安全储备更充足。

**参考文献**

1. 吴勇. 不同含水条件下白云岩力学特性试验研究[D]. 昆明理工大学硕士学位论文，2012.

WU Yong. Experimental research on mechanical characteristics of dolomite in different water conditions[D]. Master Degree Thesis of Kunming University of Science and Technology, 2012.

1. 李向星. 单轴压缩条件下原生微裂隙对白云岩力学铅性的影响规律研究[D]. 昆明理工大学硕士学位论文，2015.

LI Xiangxing. Study on the influence of primary microcracks on mechanical lead of dolomite under uniaxial compression[D]. Master Degree Thesis of Kunming University of Science and Technology, 2015.

1. 周宗红，章雅琦，杨安国，等. 白云岩三维动静组合加载力学特性试验研究［J］．煤炭学报，2015，40( 5): 1030 - 1036．

ZHOU Zonghong, ZHANG Yaqi, YANG Anguo, et al. Experimental study on mechanical characteristics of dolomite under three-dimensional coupled static-dynamic loading［J]. Journal Of China Coal Society, 2015, 40(5): 1030 - 1036．

1. 陈俊. 微裂隙对白云岩力学特性的影响试验研究[D]. 贵州大学硕士学位论文，2018.

CHEN Jun. Experimental study on the mechanical properties of cracked dolomite[D]. Master Degree Thesis of Guizhou University, 2018.

1. 李楠, 王恩元, 赵恩来,等. 岩石循环加载和分级加载损伤破坏声发射实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7):1099-1103.

LI Nan, WANG Enyuan, ZHAO Enlai, et al. Experiment on acoustic emission of rock damage and fracture under cyclic loading and multi-stage loading[J]. Joural Of China Coal Society, 2010, 35(7):1099-1103.

1. KIM J S, LEE K S, CHO W J, et al. A Comparative evaluation of stress–Strain and acoustic emission methods for quantitative damage assessments of brittle rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(2):495-508.
2. CYRUS K, JIM H, RICK C. Damage quantification of intact rocks using acoustic emission energies recorded during uniaxial compression test and discrete element modeling[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 67(1):94-102.
3. AGIOUTANTIS Z, KAKLIS K, MAVRIGINNAKIS S, et al. Potential of acoustic emissions from three point bending tests as rock failure precursors[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(1):155-160.
4. ZHANG J , PENG W , LIU F , et al. Monitoring Rock Failure Processes Using the Hilbert–Huang Transform of Acoustic Emission Signals[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(2):427-442.
5. MENG Q B , ZHANG M W , HAN L J , et al. Effects of Acoustic Emission and Energy Evolution of Rock Specimens Under the Uniaxial Cyclic Loading and Unloading Compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(10):3873-3886.
6. 沈忠, 付小敏, 宾婷婷, 等. 不同地质时期砂岩的声发射特性试验研究[J]. 中国测试，2016, 42（4）：9-14.

SHEN Zhong, FU Xiaomin, BIN Tingting, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of sandstones in different geological periods[J]. China Measurement & Test,2016, 42（4）：9-14.

1. 沈忠, 付小敏, 黄兴建, 等. 软岩声发射序列分形特征研究[J]. 中国测试, 2016，42(6): 9-13.

SHEN Zhong, FU Xiaomin, HUANG Jian-jian, et al.Study on the fractal characteristics of acoustic emission sequence of soft rock[J]. China Measurement & Test, 2016，42(6): 9-13.

1. SU G , SHI Y , FENG X , et al. True-Triaxial Experimental Study of the Evolutionary Features of the Acoustic Emissions and Sounds of Rockburst Processes[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017.
2. 张国凯, 李海波, 夏祥, 等. 单轴加载条件下花岗岩声发射及波传播特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, (05):97-108.

ZHANG Guokai, LI Haibo, XIA Xiang, et al. Experiment study on acoustic emission and wave propagation in granite under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2017, (05):97-108.

1. 蒋军军，邓志刚，欧阳振华，等．不同尺寸煤体失稳破坏的前兆声发射特征研究[J]．煤矿安全，2017，48(12): 37-40.

JIANG Junjun, DENG Zhigang, OUYANG Zhenhua, et al. Study on precursory characteristics of acoustic emission of instable failure coal body with different sizes[J]. Safety in Coal Mines, 2017,48(12): 37-40.

1. 孙萍, 殷跃平, 吴树仁, 等. 东河口滑坡岩石微观结构及力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 29(S1): 2872-2878.

SUN Ping, YIN Yueping, WU Shuren, et al. Experimental study of microstructure and mechanical properties of rocks from Donghekou landslide [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2009, 29(S1): 2872-2878.

1. ZHOU J W, CUI P, YANG X G. Dynamic process analysis for the initiation and movement of the Donghekou landslide-debris flow triggered by the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Asian Earth Sciences，2013，76：70-84.
2. ZHANG Y B，WANG J M，XU Q，et al. DDA validation of the mobility of earthquake-induced landslides[J]. Engineering Geology, 2015, 194: 38-51.
3. YUAN R M, TANG C L, DENG Q H. Effect of the acceleration component normal to the sliding surface on earthquake-induced landslide triggering[J]. Landslides，2015，12: 335-344.
4. 李期森. 单轴压缩条件下红砂岩特征强度点声发射特性试验研究[D]. 江西理工大学硕士学位论文，2018.

LI Qisen. Experimental research on characteristic stress acoustic emission characteristic of red sandstone under uniaxial compression[D]. Master Degree Thesis of Jiangxi University of Science and Technology, 2018.

1. [↑](#footnote-ref-0)
2. \***收稿日期：**

   **资助项目：**国家自然科学基金青年基金(41702316);地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题(SKLGP2018Z015);中国国家重点研发项目(2018YFC1505205)

   **第一作者简介**: 刘汉香，女，籍贯福建省，博士，讲师，岩土工程，主要从事跟斜坡或岩体地震动力问题相关的研究工作。E-mail: hxliu\_86@163.com [↑](#footnote-ref-1)