

文章编号:1004-4116(2021)02-0066-04

# 岩石蠕变声发射特性研究现状与展望

李玉山<sup>1</sup>,席伟<sup>2</sup>,张诏飞<sup>2</sup>,董堃<sup>2</sup>

(1. 甘肃省地矿局水文地质工程地质勘察院,甘肃 张掖 734000;

2. 廊坊市中铁物探勘察有限公司,河北 廊坊 065099)

**摘要:**蠕变是岩石一种重要的力学特性,与工程的长期安全稳定和安全密切相关。声发射技术作为一种无损检测手段,被广泛应用于岩石变形破坏研究领域。本文阐述了近年来基于声发射技术开展岩石蠕变特性方面的研究进展,主要包括不同岩性、加载方式、应力水平下岩石蠕变声发射特性,岩石蠕变破坏声发射前兆特征。在此基础上,提出了几点今后需要进一步深入研究的问题。

**关键词:**岩石;蠕变;声发射;现状;展望

**中图分类号:**P584

**文献标志码:**A

## 1 引言

蠕变是岩石重要的力学特性之一,与工程的长期稳定性和安全密切相关<sup>[1]</sup>。工程实践中,由于蠕变作用引起岩石变形破坏、引发工程失稳灾变的案例并不鲜见<sup>[2]</sup>。声发射(acoustic emission, AE)技术作为一种无损检测手段,被广泛应用于岩石变形破坏研究领域<sup>[3]</sup>。孙钧<sup>[4]</sup>指出:声发射的产生与岩石的蠕变有关,但尚缺乏建立二者之间的量化关系,如何更好地利用声发射信号对蠕变破坏行为进行研究,是一项当务之急。因此,开展岩石蠕变声发射特性的研究工作,具有重要的理论意义与工程实践意义。

## 2 岩性对岩石蠕变声发射特性影响研究

Tham<sup>[5]</sup>等对花岗岩和大理石制成的岩样进行单轴压缩蠕变声发射试验,根据声发射参数的变化,表明由于两种岩样成分不同而导致了不同的变形破坏口形状和不同的声发射数据特征。吕培苓<sup>[6]</sup>等对辉长岩和大理岩完整岩样进行单轴压缩蠕变声发射试验,分析讨论了两种岩样在蠕变三个阶段的声发射活动的不同变化特征。刘东燕<sup>[7]</sup>等对深部灰岩进行单轴压缩蠕变声发射试验,蠕变过程中的声发射活动很好的反映岩石在不同蠕变阶段的变形特征,有

效监测了岩石内部细裂纹的萌生扩展、宏观裂纹的贯通。陈伟强<sup>[8]</sup>对深井采集的砂质泥岩和砂岩进行单轴压缩蠕变声发射试验,基于微观力学分析内部结构胶结程度不同的两种岩样在蠕变过程中声发射信号的变化趋势。基于声发射事件三维定位,岩样内部颗粒胶结程度弱的砂质泥岩在恒定荷载作用下微观破坏趋于均匀化、扩散化。

## 3 加载方式对岩石蠕变声发射特性影响研究

陈康<sup>[9]</sup>等通过对红砂岩进行常规单轴压缩和蠕变试验,分析对比在两种加载状态下声发射特征,研究表明在两种状态下,声发射事件率大致接近一致。声发射幅值在常规单轴压缩条件下的加载前期数值较大,之后有所降低,在试样破坏前数值明显增大;幅值在蠕变的减速阶段,数值先增大后减小;在等速阶段,数值基本不变;在加速阶段,数值明显增大;在试样破坏前,数值骤然增大;幅值参数相较于声发射事件率更能作为岩样失稳破坏的判断依据。赵宝云<sup>[10]</sup>对灰岩进行了单轴和三轴压缩蠕变声发射试验,分析了岩石应力—应变全过程中声发射参数变化特性。研究表明声发射累积振铃计数—时间曲线与蠕变应变—时间曲线具有相同的变化趋势,总结了灰岩蠕变过程中蠕变应变与声发射特征参数之

收稿日期:2021-04-11

作者简介:李玉山(1978~),男,在职研究生学历,水工环高级工程师。主要从事水文地质、工程地质勘察方面的研究。

间联系。余斐<sup>[11]</sup>等通过声发射试验对砂岩试样进行单轴压缩蠕变试验,采用分级单调加载和循环加载二种方式,分析岩样在两种加载方式下的力学和声发射特征。许杨东<sup>[12-13]</sup>等通过对细砂岩试样进行单轴蠕变试验,研究在分级加载和分级加卸载两种加载方式下,声发射参数变化特征。结果表明在前几级应力水平下岩样蠕变过程中声发射参数变化较为一致;而在最后一级应力水平,在分级加载方式下,进入加速蠕变阶段前声发射参数变化较小处于相对平静稳定的状态,加速蠕变阶段时声发射参数突然剧增;而在分级加卸载方式下,进入加速蠕变阶段前声发射参数短暂的“突增”而后趋于平缓稳定,加速蠕变阶段声发射参数剧增。

#### 4 应力水平对岩石蠕变声发射特性影响研究

张黎明<sup>[14]</sup>等对大理岩试样进行单轴压缩蠕变声发射试验,研究表明随着应力水平的增加,试样声发射信号的频谱(频域)有明显的变化规律,声发射信号主频由低频带向高频带转移,主频幅值总体呈下降趋势,次主频现象经历从无到有的变化过程,逐渐发展成为主频。杨永杰<sup>[15]</sup>等对煤岩进行单轴压缩蠕变声发射试验,研究表明随着应力水平的增加,当加载应力没有达到蠕变的应力阈值,试样不会产生明显的蠕变变形;当应力水平超过阈值,则会发生明显的蠕变变形。在减速、等速、加速不同蠕变阶段,声发射活动呈现逐渐增强—趋于平稳—显著增强的变化特征。龚鹵<sup>[16-17]</sup>等对红砂岩试样进行单轴压缩蠕变声发射试验,研究在不同应力水平下和不同蠕变阶段,声发射事件率和能率的变化特征。结果表明随着应力水平的增加,声发射事件率和能率的下降幅度减小。在减速蠕变与等速蠕变过程中,随着时间的增长,声发射事件率与能率减小;加速蠕变过程中,声发射事件率与能率数值会大幅度的增大。岩石材料在受应力加载条件下表现出变形记忆特性,当岩样所受荷载超过上次最高荷载时才出现声发射现象,称为Kaiser效应;若岩样所受荷载小于上次最大荷载时就已经出现明显声发射现象,则称为Felicity效应<sup>[18-19]</sup>。王伟超<sup>[20]</sup>等通过对盐岩试样进行单轴压缩蠕变声发射试验,研究表明在低应力水平下,岩样声发射有明显的Kaiser效应,岩样损伤变形破坏程度小,很少有新生裂纹;当加载应力为峰值应力的70%时,通过卸载再加载,岩样声发射出现Felicity效应,

即在低应力水平下产生声发射事件,而在高应力水平下,岩样内部会萌生微裂纹以及裂纹扩展产生声发射事件。

#### 5 岩石蠕变破坏声发射前兆特征

岩石失稳破坏是在受荷载等作用下内部微裂纹萌生、扩展及相互贯通造成宏观破裂面的过程。声发射是常用的岩石变形监测方法,每一个声发射信号都包含着岩石内部损伤状态变化的丰富信息,通过分析声发射基本参数和特征参数的变化都可为岩石破坏前兆提供判断依据<sup>[21-22]</sup>。

声发射基本参数是声发射仪器直接从岩石变形破坏演化过程中得到的信息。例如,事件数、振铃计数、能量、幅值、累积计数参数、变化率参数等。Grgic D等<sup>[23]</sup>研究了岩样蠕变过程中的声发射累积事件数和累积能量的变化特征,发现声发射参数的变化与岩石的蠕变特性有着密切的联系。沈忠<sup>[24]</sup>通过对砂岩和花岗岩进行单轴压缩声发射试验,研究表明随着应力的增加,岩石发生压密闭合、弹性变形、加速破坏等不同变形阶段,声发射事件数、振铃计数、能量也随之增加。通过分析声发射参数演化曲线得知,声发射事件数曲线和能量累积曲线在岩石破坏前兆特征点表现不明显,但是累积振铃计数曲线能最直观的、有效的反映岩石损伤过程真实状态,可用于岩石破坏前兆的监测。林冠宇<sup>[25]</sup>通过对花岗岩进行三轴压缩声发射试验,研究表明在岩石失稳破坏过程中通过分析声发射的振铃计数、能量等基本参数随时间的变化规律,可将岩石破坏整个声发射活动划分为四个阶段:静默阶段、相对稳定阶段、稳定增长阶段、加速跃迁阶段,划分的阶段能够较好的与岩石失稳破坏的压密闭合阶段、弹性变形、塑性变形、临界破坏四个阶段相对应;声发射基本参数的变化反映了岩石变形破坏的特征。李安强<sup>[26]</sup>等通过对花岗岩进行单轴压缩蠕变声发射试验,试验表明岩石在减速蠕变、等速蠕变和加速蠕变三个阶段,声发射参数演化过程对应为上升期、平静期和波动期。随着加载应力的增加,岩石内部微裂纹萌生扩张乃至贯通导致破坏,声发射活动也随之增大,声发射率和能率也均有提高,保持一致性。在岩石破坏前兆,声发射活动突然剧增,声发射率和能率均提高,声发射率甚至达到峰值。因此,声发射率和能率等基本参数可以成为预测岩石破坏的指标,为岩体稳定性提供监测信息。

声发射特征参数是对基本参数进行分析、提取,经过数学方法或是有关理论定义再次构建的“再生式”的声发射参数。例如,声发射b值等。大量试验表明,在岩石破裂前,声发射b值会出现明显变化<sup>[27]</sup>,因此可将b值视为预示岩石失稳破坏的信息。张省军<sup>[28]</sup>等通过对花岗岩、大理岩和砂岩试样进行单轴压缩声发射试验,分析随着时间的增加,岩样应变、声发射事件数、能量计数、b值的变化规律,从中捕捉岩石失稳破坏的前兆信息。研究表明在应力加载初期的压密闭合阶段,声发射信号较少,事件数和能量计数较低;在弹性变形阶段后期和塑性变形阶段,声发射信号较多,事件数和能量计数增大;试样失稳破坏前,累积声发射事件数和累积能量迅速增加;b值出现快速下降现象,产生b值最小值。累积声发射事件数、累积能量、b值的变化特征都可以作为预示岩石失稳破坏的信息。龚囡<sup>[29]</sup>等通过对砂岩进行单轴压缩蠕变声发射试验,试验表明随着应力的增加,岩石在减速蠕变和等速蠕变阶段,b值随着蠕变时间的增大而增大;岩石在加速蠕变阶段,b值呈现出减小—增大—再减小的规律;在岩石破裂失稳前,b值快速减小。谢勇<sup>[30]</sup>等对水泥胶结充填体进行单轴压缩声发射试验,研究表明随着应力的增加,声发射活动也更加活跃;声发射b值有明显的波动性,b值增大意味着试样内部微破裂以小尺度为主,b值减小意味着微破裂以大尺度为主,随着b值持续减低,试样失稳破坏。因此,分析声发射b值在岩石蠕变各个阶段变化特征,能对岩石破坏进行一定的预测。

## 5 研究展望

研究人员在岩石蠕变声发射特性研究方面已取得较多的研究成果,对深入揭示岩石的变形破坏机理起到了重要的促进作用。今后,可在以下几方面开展进一步的深入研究。

(1)在声发射技术的基础上,可以联合采用红外辐射、电磁辐射、核磁共振、CT等技术手段,开展岩石蠕变声发射特性的研究,从而进一步揭示岩石的变形破坏机制。

(2)岩质工程往往处于复杂的温度场、应力场、渗流场中,开展多场耦合作用下岩石蠕变声发射特性方面的研究工作,可更深入揭示复杂条件下岩石的力学行为。

(3)岩质工程中广泛存在节理、裂隙、断层等不连续结构面,结构面对岩石变形破坏特征影响显著。

因此,开展含节理、裂隙岩体的蠕变声发射特性研究,是今后需要进一步深入研究的重要内容。

由于岩石的离散性、非均匀、各向异性以及受力状态复杂等原因,目前岩石蠕变声发射研究方面还存在一些不足之处。随着深埋超长隧道、能源地下储存、核废料深地处置等大型、超大型工程的建设,必将不断推动岩石蠕变声发射特性研究的深入,为工程的长期稳定和安全提供科学基础。

## 参 考 文 献

- [1] 杨文东,张强勇,陈芳,等.大岗山水电站坝区辉绿岩流变特性的三轴试验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2011,43(5):64-70
- [2] 王志俭,殷坤龙,简文星,等.三峡库区万州红层砂岩流变特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(4):840-847
- [3] 腾山邦久.声发射(AE)技术的应用[M].冯夏庭,译.北京:冶金工业出版社,1996
- [4] 孙钧.岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J].岩石力学与工程学报,2007,26(6):1081-1106
- [5] Tham L G, Liu H, Tang C A, et al. On Tension Failure of 2-D Rock Specimens and Associated Acoustic Emission [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2005, 38(1): 1-19
- [6] 吕培苓,吴开统,焦远碧,等.岩石蠕变过程中声发射活动的实验研究[J].地震学报,1991(01):104-112+130
- [7] 刘东燕,赵宝云,刘保县,等.深部灰岩单轴蠕变特性试验研究[J].土木建筑与环境工程,2010,32(04):33-37
- [8] 陈伟强.基于微细观力学的砂质泥岩蠕变破坏机理研究[D].中国矿业大学,2019
- [9] 陈康.红砂岩单轴压缩与短时蠕变破坏声发射试验[J].现代矿业,2016,32(03):186-188
- [10] 赵宝云.深部岩体的蠕变损伤特性研究[D].成都,西华大学,2008
- [11] 余斐.单轴压缩条件下岩石的声发射试验研究[D].中国地质大学(北京),2012
- [12] 许杨东.不同加载路径红砂岩蠕变声发射特性研究[D].江西理工大学,2016
- [13] 罗明迪.分级循环加卸载下细砂岩蠕变破坏声发射特性研究[D].华北水利水电大学,2018
- [14] 张黎明,王在泉,石磊,等.不同应力路径下大理岩破坏过程的声发射特性[J].岩石力学与工程学报,2012,31(06):1230-1236
- [15] 杨永杰,王德超,赵南南,等.煤岩蠕变声发射特征试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(01):159-166
- [16] 龚囡,李长洪,赵奎.不同应力水平下红砂岩短时蠕变声发射特征[J].东北大学学报(自然科学版),2015,36(09):1347-1352
- [17] 龚囡.分级加卸载条件下红砂岩蠕变破坏声发射特性研究[D].北京科技大学,2015
- [18] Kaiser E J. A study of acoustic phenomena in tensile test [D]. Munich, Germany; Technische Hochschule Munchen, 1953

- [19] Needleman A, Tvergaard V. Numerical modeling of the ductile–brittle transition [J]. *International Journal of Fracture*, 2000, 101: 73–97
- [20] 王伟超, 刘希亮, 张五交, 等. 不同应力路径下盐岩破坏声发射时序特征研究[J]. *实验力学*, 2015, 30(03): 348–354
- [21] LEIXL, S ATOHTS. Indicators of critical point behavior prior to rock failure inferred from pre–failure damage [J]. *Tectonophysics*, 2007, 431: 97–111
- [22] Blake W. *Microseismic applications forming—a practical guide* [R]. Washington Bureau of Mines, 1982
- [23] Grgic D, Amtrano D, et al. Creep of a porous rock and associated acoustic emission under different hydrous conditions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: B10201
- [24] 沈忠. 岩石声发射及分形特征试验研究 [D]. 成都理工大学, 2017
- [25] 林冠宇. 卸围压路径下斜长花岗岩声发射试验研究 [D]. 成都理工大学, 2018
- [26] 李安强, 张茹, 艾婷, 等. 花岗岩单轴压缩全过程声发射时空演化行为及破坏前兆研究 [J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(S2): 306–311
- [27] 孙文福, 顾浩鼎. 怎样正确计算b值 [J]. *东北地震研究*, 1992(04): 13–27
- [28] 张省军, 刘建坡, 石长岩, 等. 基于声发射实验岩石破坏前兆特征研究[J]. *金属矿山*, 2008(08): 65–68
- [29] 龚函, 李长洪, 赵奎. 红砂岩短时蠕变声发射b值特征[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(S1): 85–92
- [30] 谢勇, 何文, 朱志成, 等. 单轴压缩下充填体声发射特性及损伤演化研究[J]. *应用力学学报*, 2015, 32(04): 670–676+710

## CURRENT STATUS AND PROSPECT OF RESEARCH ON ACOUSTIC EMISSION CHARACTERISTICS OF ROCK CREEP

LI Yu-shan<sup>1</sup>, XI Wei<sup>2</sup>, ZHANG Zhao-fei<sup>2</sup>, DONG Kun<sup>2</sup>

(1. Institute of Hydrogeological and Engineering Geology, Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Zhangye 734000, China;

2. Langfang China Railway Geophysical Survey Co., Ltd., Langfang 065099, China)

**Abstract:** Creep is an important mechanical property of rock, which is closely related to the long-term safety, stability and safety of the project. Acoustic emission technology, as a non-destructive testing method, is widely used in the field of rock deformation and failure research. This paper describes the research progress of rock creep characteristics based on acoustic emission technology in recent years, mainly including the acoustic emission characteristics of rock creep under different lithology, loading methods, and stress levels, and the precursor characteristics of acoustic emission of rock creep failure. On this basis, several issues that need to be further studied in the future are put forward.

**Key words:** rock; creep; acoustic emission; current status; prospect