

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.186>



岩石疲劳损伤及破坏前兆研究现状与展望

刘新锋^{1,2}, 赵英群³, 王晓睿², 于怀昌^{2*}

1. 河南交投平宛高速公路有限公司, 河南郑州 450045
2. 华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南郑州 450045
3. 郑州地铁集团, 河南郑州 450000

摘要: 疲劳是岩石的重要力学特性之一, 与工程的安全稳定密切相关. 在循环荷载作用下, 岩石初始损伤不断累积、加剧, 最终导致岩石的失稳破坏, 从而诱发工程灾变. 阐述了近年来基于声发射、红外辐射技术开展岩石疲劳损伤与破坏方面的研究进展. 首先论述了研究人员采用声发射时域参数、声发射空间演化以及 Felicity 比开展岩石疲劳损伤特性的研究进展. 进而, 针对研究人员采用声发射时域参数、损伤变量、分形维值、Felicity 比、加卸载响应比、RA 以及 b 值等参数开展岩石疲劳破坏前兆的研究进展进行讨论. 在此基础上, 论述了研究人员采用红外辐射技术开展岩石疲劳损伤与破坏前兆的研究进展. 最后, 提出了今后岩石疲劳损伤与破坏前兆研究中需要进一步深入解决的几点问题. 本文可对深入认识岩石疲劳损伤机理、破坏前兆特征起到积极的促进作用.

关键词: 疲劳损伤; 破坏; 声发射; 红外辐射; 岩土工程; 工程地质.

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2022)06-2190-09

收稿日期: 2021-08-10

Current Status and Prospects of Research on Fatigue Damage and Failure Precursors of Rocks

Liu Xinfeng^{1,2}, Zhao Yingqun³, Wang Xiaorui², Yu Huaichang^{2*}

1. Henan Jiaotou Pingwan Expressway Co., Ltd., Zhengzhou 450045, China
2. College of Geoscience and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China
3. Zhengzhou Metro Group, Zhengzhou 450000, China

Abstract: Fatigue is one of the important mechanical properties of rocks, which is closely related to the safety and stability of engineering. Under the action of circulating loads, the initial damage of the rock continues to accumulate and intensify, eventually leading to the instability and destruction of the rock, thus inducing engineering catastrophes. In this paper, it describes the research progress of rock fatigue damage and failure based on acoustic emission and infrared radiation technology in recent years. Firstly, it discusses the research progress of rock fatigue damage characteristics carried out by researchers using acoustic emission time-domain parameters, acoustic emission spatial evolution, and Felicity ratio. Then, it discusses the research progress of researchers using acoustic emission time-domain parameters, damage variables, fractal dimension values, Felicity ratio, loading/unloading response ratio, RA and b -value parameters to carry out the research progress of rock fatigue failure precursors. On this basis, it

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(No.51309100).

作者简介: 刘新锋(1966—), 男, 高级工程师, 主要从事环境地质灾害评价和高速公路建设管理及研究工作. E-mail: 1353272186@qq.com

* **通讯作者:** 于怀昌, 教授, 博士, 主要从事岩石力学及工程、城市地下空间结构等方面研究工作, E-mail: yuhuaichang@ncwu.edu.cn

引用格式: 刘新锋, 赵英群, 王晓睿, 于怀昌, 2022. 岩石疲劳损伤及破坏前兆研究现状与展望. 地球科学, 47(6): 2190-2198.

Citation: Liu Xinfeng, Zhao Yingqun, Wang Xiaorui, Yu Huaichang, 2022. Current Status and Prospects of Research on Fatigue Damage and Failure Precursors of Rocks. *Earth Science*, 47(6): 2190-2198.

also discusses the research progress of researchers using infrared radiation technology to develop rock fatigue damage and failure precursors. Finally, several issues that need to be further resolved in the future research on rock fatigue damage and failure precursors are put forward. This article can play a positive role in promoting the in-depth understanding of rock fatigue damage mechanism and failure precursor characteristics.

Key words: fatigue damage; failure; acoustic emission; infrared radiation; geotechnical engineering; engineering geology.

0 引言

疲劳是岩石重要的力学特性之一,与工程的安全稳定密切相关.在成岩过程中以及后期地质作用下,岩石内部产生微孔隙、微裂隙等初始损伤.爆破、冲击、地震等循环荷载作用下,岩石内部的微孔隙、微裂隙不断扩展贯通,产生疲劳损伤,且损伤不断累积、加剧,最终导致岩石失稳破坏,从而诱发崩塌、滑坡、塌陷等地质灾害(亢金涛等,2019;温韬等,2019;王江锋等,2020;王晓睿等,2022).准确识别岩石疲劳破坏前兆特征,可以有效避免工程灾害的发生,确保工程建设的顺利进行以及长期运营安全.因此,开展岩石疲劳损伤与破坏前兆的研究具有重要的理论意义与工程实践意义.

岩石受力变形破坏过程中,其内部微破裂的萌生、扩展和断裂会伴随产生弹性波、温度变化等物理现象.因此,可以采用声发射、红外辐射等技术手段研究岩石的失稳破坏特征.大量理论与试验表明,岩石在循环荷载作用下伴随着能量耗散或机械能与热能的转化.声发射与岩石内部微破裂(损伤)相关,红外辐射反映了岩石表面温度场的变化特征,声发射、红外辐射与岩石的损伤及破坏存在内在联系,可以采用声-热技术研究岩石的疲劳损伤与破坏前兆特征.

1 岩石疲劳损伤特性研究现状

研究人员采用声发射手段开展循环荷载下岩石损伤特性的研究,试验加载方式主要有等幅循环加卸载、增量循环加卸载等,涉及的岩石类型主要有花岗岩、大理岩、盐岩、砂岩、灰岩等.在声发射时域参数研究方面,任松等(2012)对盐岩疲劳损伤特征进行试验研究,声发射累计振铃计数曲线和累计应变曲线在反映盐岩疲劳损伤方面具有一致性.赵星光等(2014)基于声发射累计振铃计数和事件数的分布特征,研究三轴循环加、卸载下北山深部花岗岩的损伤和扩容特性. Meng *et al.* (2018)对红砂岩进行单轴循环加卸载试验,建立了不同加卸载速

率下岩石的应力、应变、AE活动,累积AE活动和持续时间之间的关系,AE事件的密度和强度直接反映了岩石的损伤程度. Zhao *et al.* (2018)开展钙质胶结砂岩循环荷载试验,从声发射能量的角度阐明水对岩石力学参数的损伤弱化机理. Wang *et al.* (2021a)以重庆地区典型砂岩为研究对象,进行了不同应力幅、不同加载频率、不同饱和度等试验条件下砂岩的声发射特性试验,得出岩石声发射的演变规律.初始阶段,变形较快,AE信号强;在等速阶段,变形发展缓慢,声发射信号也稳定;在加速阶段,变形急剧发展,AE信号也变得更加强烈.随着循环加载应力幅值的增加,或循环加载频率的降低,或岩样饱和度的降低,每个循环产生的声发射信号会更强. Meng *et al.* (2020)研究了动态加载频率对多级循环加载条件下预裂岩石样品中断裂演化行为的影响.研究表明,AE计数和能量输出都随着加载频率的增加而增加. AE谱频率分析揭示了6种裂纹模式.岩石在高频载荷作用下容易形成大尺度裂纹,表现为具有高频高幅信号特征的声发射信号减弱. Yang *et al.* (2020)对黄砂岩进行了一系列三轴单调循环试验,分析围压对砂岩力学参数的影响.根据三轴单调加载期间记录的P波速度和声发射计数来表征砂岩标本的内部损伤,并分析三轴循环加载下循环次数对AE行为的影响. Shen *et al.* (2020)对不同应力路径下的砂岩样品进行了循环加载和卸载试验,在第2和第3阶段,高循环应力下限加载和卸载产生的AE计数、主频信号和高幅度信号都比低循环应力下限加载和卸载产生的比例要小.低频和高幅度信号在低循环应力下限的第3阶段和加载阶段都出现. Feng *et al.* (2020)在3种类型的硬岩(花岗岩、大理岩和砂岩)上进行了三轴循环加载和卸载测试,以研究岩石性质随累积损伤的演变.除了应力和应变测量外,还监测了声发射信号.将声发射信号表征的裂纹发展的不同阶段,与力学强度参数演变的不同阶段关联. Li *et al.* (2021)为研究不同含水量下岩石的储能和声发射特性,利用RMT-150B岩石力学测试系统和DS5声学系统进行了单

轴压缩试验、循环加载、卸载测试和声发射测试。声发射测试表明,含水岩石的损伤能量很小。含水量越高,峰值损伤能越小。Zhang *et al.*(2020)用 RTX-1000 岩石三轴仪对煤样进行了不同应变率和不同围压卸荷速率下的三轴载荷破坏实验,并利用 Micro-II 声发射成像采集仪的声发射特征参数进行了试验,研究不同条件下煤的声发射特性和损伤变形规律。根据特征参数构建损伤模型,分析了煤样损伤规律。随着应变率的增加,煤样的声发射计数和 AE 能量降低,但 AE 峰值计数和 AE 峰值能量增加。王宇等(2021)为揭示疲劳加载频率对裂隙岩石破裂演化特征的影响,采用 GCTS RTR-2000 岩石力学试验系统、实时声发射监测和试验后 CT 扫描相结合的手段,对预制裂隙逼近角为 50° 的矿山岩石开展了增幅疲劳加载力学试验。声发射振铃数、声发射能量变化,以及裂纹扩展行为受控于加载频率。累计振铃计数和累计能量随加载频率的增加而增加。频谱分析揭示了 6 种典型的裂纹演化类型,裂纹大小与频率呈负相关规律,随加载频率的增加,高频高幅信号所占比例降低,说明较高加载频率易形成大尺寸裂纹。杨建明等(2020)以石灰岩作为研究对象,开展了石灰岩单轴循环加卸载声发射试验,获得了声发射信号特征随应力的变化特征,并具有一定的记忆特征;具体表现为地应力条件下,岩样内部微破裂活动较低,声发射信号强度较弱,而高应力条件下,岩样内部微破裂增多,声发射特征强度增强,表明声发射可有效获得岩石内部微裂纹发展的全过程。祝艳波等(2017)进行了循环荷载作用下石膏质岩疲劳试验,声发射振铃计数信息演化规律能够较好地揭示岩石疲劳损伤演化过程。Akdag *et al.*(2018)开展真三轴加卸载条件下脆性岩石声发射试验,采用 AE 累积能量和事件率对岩石损伤演化进行了量化。

在声发射空间演化研究方面, Ren *et al.*(2020)采用声发射定位技术和矩张量分析评估片岩在真三轴压缩和应变爆裂试验中微裂纹的时空演变和损伤。结果表明, AE 位置与真实三轴压缩的宏观裂纹重合,而它们在卸载应变爆裂试验中是分散的。剪切集中出现在顶出位置的底部,但拉伸区位于顶出块的断裂面。刘建锋等(2020)为研究拉伸循环荷载下杂质盐岩断裂力学行为及损伤演化规律,基于三点弯曲试验方法,开展了纯盐岩、含杂卤石盐岩及杂质盐岩拉伸加卸载及岩石损伤声发射监测试

验。杂质导致盐岩脆性提高,纯盐岩声发射事件覆盖区域远大于含杂卤石盐岩及杂质盐岩;三点弯曲加卸载下岩石内部声发射事件由切槽尖端逐渐向荷载点扩散,直至岩石完全断裂。李志成等(2018)对盐岩进行了三点弯曲循环加卸载试验,声发射源三维定位揭示了盐岩的损伤分布。另外,一些学者通过对盐岩、花岗岩、砂岩和大理岩进行单轴循环荷载试验,声发射事件空间演化直观显示了岩石变形破坏全过程裂纹的产生、扩展,揭示了岩石疲劳损伤特征(赵兴东等,2007;许江等,2008;Nejati *et al.*,2014;Zhao *et al.*,2018)。

循环荷载下岩石声发射活动存在 Felicity 效应, Tang *et al.*(2020)在循环加载下进行三点弯曲缺口花岗岩梁的断裂实验,岩石裂缝的声发射特征表明,当加载力达到其峰值的 70% 时, AE 特性表现出 Felicity 效应。研究人员采用 Felicity 比研究了岩石的疲劳损伤特性。李浩然等(2016)采用 Felicity 比表征单轴、三轴循环荷载下盐岩的损伤演化, Felicity 比变化与盐岩承载破坏特征较为一致,可以较好地反映盐岩的损伤破裂过程。陈宇龙等(2018)选取 3 种不同岩性的岩石,进行不同加载速率的单轴循环声发射试验, Felicity 比的变化趋势能充分反映岩石的损伤演化过程。Guo *et al.*(2018)对干燥和饱和火成岩进行了单轴循环荷载试验,通过 Felicity 比分析了不同含水量岩石的损伤特征。杨小彬等(2018)开展了花岗岩单轴循环加卸载声发射试验,随循环次数增加,非均匀变形程度与 Felicity 比呈负相关变化,即非均匀变形越大, Felicity 比越小,岩石损伤程度越大。Yang *et al.*(2020)为研究煤岩疲劳破坏过程中的声发射特性和 Felicity 效应,揭示疲劳损伤演化规律与声发射活动的内在联系,借助 MTS815.02 电液伺服岩石力学测试系统和 PCI-2 声发射检测分析系统,对煤样进行了三轴循环加载声发射测试。结果表明,上限应力越高,煤样引起的疲劳损伤程度越明显。不同应力水平范围内的声发射表现出不同程度的 Felicity 效应。相比之下,以主应力差为参数来研究煤在循环荷载下的 Felicity 效应更为合理。Li *et al.*(2021)进行了循环加载和卸载下的缺口花岗岩梁三点弯曲试验。采用声发射技术监测试样在断裂过程中的声发射事件。结果表明,花岗岩在循环加载和卸载下的断裂韧性低于静态加载下的断裂韧性。基于监测获得的声发射能量,分析了循环加载和卸载过程中的损伤演变。采用 RA 值—平均

频率相关法分析花岗岩样品的断裂方式,并且计算装载和卸载循环期间的Felicity比,以评估材料初始损坏的严重程度.Wang *et al.*(2021a)进行了循环加卸载砂岩样试验.结果表明,与单轴压缩试验相比,循环加载和卸载对试样的强度有一定的强化作用.以声发射信号为基础,根据波形的平均频率和上升角分析裂纹模式分类.随着应力水平的增加,Felicity比逐渐降低,呈现出累积损伤效应.

同时,研究人员采用红外热成像技术开展了岩石疲劳损伤的研究工作.何满潮等(2017)进行室内循环加卸载下花岗岩岩爆模拟试验研究,通过红外热成像技术能够量测试样在损伤演化阶段局部温度小幅升高.疲劳荷载作用下,岩石损伤过程中温度变幅较小.然而,采用红外热成像技术研究岩石的疲劳损伤特征方面的文献还相对较少.

2 岩石疲劳破坏前兆研究现状

研究人员在岩石疲劳损伤特性基础上,进一步开展了疲劳破坏声发射前兆方面的研究.在声发射时域参数研究方面,李庶林等(2010)对灰岩、辉绿岩进行单轴循环荷载试验,表明对于具有中压突增型声发射特性的岩样,均有峰值破坏前出现声发射相对平静期现象的特点.何俊等(2014)对煤岩进行三轴循环荷载声发射试验,在循环加卸载过程间隔出现声发射信息,其能量、计数和幅值变化趋势一致,声发射突变点在峰值应力的85%左右,可以作为判定煤岩破坏的前兆.Pei *et al.*(2020)使用GAW-2000电液刚性试验机对变辉长岩和花岗岩进行常规单轴加载和循环加载/卸载试验,以评估岩石的岩爆倾向,揭示不同岩爆倾向的岩石在加载过程中的能量演化和声发射特征.强岩爆岩(花岗岩)破坏过程中产生的声发射信号强度明显高于中度岩爆岩(变辉长岩).然而,峰值频带和幅度在故障前均明显增加.不同岩爆倾向岩的 b 值和记忆特征具有明显相似的变化规律.肖福坤等(2016)对循环荷载下煤岩能量转化规律和声发射特征开展研究,通过声发射能量突升和声发射幅值的突降来预判煤岩的失稳.Jiang *et al.*(2019)开展了单轴循环荷载作用下砂岩声发射能量分布的研究,声发射信号的能量分布与绝对能量之间可以通过幂定律表示,在破坏阶段幂指数随周期数的增加而急剧下降.

研究人员在声发射时域参数的基础上,构建损伤变量(许江等,2009)、分形维值(Li *et al.*,2019;Li-

ang *et al.*,2019)、Felicity(Li *et al.*,2019;李庶林等,2019)、加卸载响应比(赵毅鑫等,2018;李庶林等,2019)、RA(Wang *et al.*,2021b,2021d)以及 b 值(裴峰,2020;张鑫等,2020;Wang *et al.*,2021b)等参数,综合研究岩石疲劳破坏前兆信息特征.许江等(2009)通过砂岩疲劳破坏声发射试验,构建了基于声发射累计事件数的疲劳损伤变量,当损伤变量为0.4左右岩石进入失稳阶段.Liang *et al.*(2019)开展了砂岩疲劳损伤演化研究,等幅循环加载砂岩的分形维数大于变幅循环加载的分形维数,岩石的破坏过程呈现分形维数减小的趋势.Li *et al.*(2019)对花岗岩和大理岩进行了单轴循环加卸载试验,声发射振铃计数率,Felicity比和分形维数的组合可以用作岩石疲劳破坏预警信息.李庶林等(2019)对花岗闪长岩等岩石开展了循环加卸载试验,相对平静期、Felicity比和加卸载响应比等可作为预测岩石失稳破坏的参考依据.赵毅鑫等(2018)对煤岩开展单轴循环加卸载试验,声发射加卸载响应比 Y 值达到或接近1并在小范围内波动,可以作为岩石失稳破坏的前兆.Wang *et al.*(2021b)对大理石进行了0、20、40和60个循环冻融处理的多级循环加载实验.声发射参数分析方法结合 b 值分析能够识别裂纹事件模式和裂纹扩展.结果显示RA(上升时间与振幅的比率)和AF(AE计数与持续时间的比率)模式受先前冻融处理的强烈影响.此外, b 值揭示了不同循环级别的损伤传播,并在最后一个循环级别观察到最小 b 值. b 值的降低和RA值的增加为岩石破裂和岩体稳定性预测提供了早期预警.Wang *et al.*(2021c)采用多级循环加载-卸载单轴压缩测试结合实时声发射监测,研究互层大理石的各向异性裂纹扩展和裂纹分类类型.使用声发射RA和AF值对裂纹事件模式和传播特性进行分类,RA值和AF值的分布受到岩石结构的强烈影响,RA值的增加可作为岩石破坏的一种前兆信息.裴峰(2020)通过循环加卸载试验研究了不同赋存深度冲击性岩石加载过程中的不可逆性,得到了不同受力及变形阶段声发射信号变化特征及规律,揭示了岩石内部损伤程度的非线性加剧过程.同时探讨了加卸载过程中声发射 b 值演化规律,为进一步反演岩石损伤及破坏机制提供了理论依据.张鑫等(2020)为探索岩石破坏的前兆信息,开展了大理岩单轴循环加卸载试验,采用动态模糊聚类方法,研究单轴循环荷载下岩石破裂声发射、加卸载响应比及声发射 b 值等特征参量的

变化规律.结果表明:声发射能量及振铃计数、加卸载响应比、声发射 b 值等均有一定的局限性,但将三者结合起来综合分析,可以有效地提高预测岩石失稳的准确度.

研究人员采用红外热成像技术开展了岩石疲劳破坏前兆的研究工作.Sheinin *et al.*(2016)开展了单轴循环载荷下盐岩红外辐射试验,表明热力学效应对于识别循环荷载作用下盐岩的破坏前兆是有效的.Cao *et al.*(2021)在单轴循环加载和卸载下使用红外辐射(IR)测量岩石破坏的特征.加载卸载响应比(LURR)是根据平均红外辐射温度(AIRT)和红外辐射温度率(IRTR)等IR指标确定的.结果表明,基于AIRT的LURR揭示了上一个周期发生的整体上升趋势和突变,可以作为即将发生的岩石破坏的前兆.相比之下,基于IRTR的LURR在循环加载和卸载的中后期有明显的“突变快速下降”,可作为是岩石破坏的早期前兆.Huo *et al.*(2020)为研究梯度应力对岩爆过程中温度场演化特征的影响,采用梯度—液压—气动复合加载真三轴仪进行真三轴梯度加载下的岩爆试验.使用红外热像仪连续记录梯度加载下每个样品卸载面的温度数据,直到发生岩爆.针对温度场中的高温点,引入方差均值比(VMR),提出高温点相对平均温度(RAHPT)进行联合分析,量化温度场的演化特征.样品在不同应力梯度下岩爆前兆差异明显,卸荷面温度差异出现在岩爆前不久,伴随着高应力梯度下VMR和RAHPT曲线的突然增加.

3 研究展望

综上所述,研究人员采用声发射、红外辐射技术开展岩石疲劳损伤与破坏前兆研究,已取得较多研究成果,对深入认识岩石损伤机理、破坏机制起到了重要的促进作用.然而,采用单一的技术手段如声发射或红外辐射技术,研究岩石的疲劳损伤与破坏前兆特征,还存在指标单一,不易量化等问题.在今后的研究中,可在以下几方面进一步深入研究.

(1)联合采用实时CT、扫描电镜、声发射、红外辐射等技术,开展岩石疲劳损伤与破坏前兆的宏观、微观特征研究,建立岩石疲劳损伤与破坏的宏观、微观内在联系,可进一步从不同角度揭示岩石损伤破坏机制.

(2)实际工程往往赋存于复杂的应力场、渗流

场、化学场、温度场中,开展多场耦合作用下岩石疲劳损伤与破坏前兆特征方面的研究,将能够更深入认识岩石的力学特性.

(3)岩石工程中通常存在宏观节理、裂隙、断层等不连续结构面,结构面显著影响岩石的疲劳损伤与破坏特征.岩石的各向异性损伤破坏以及结构面对岩石疲劳损伤与破坏特征的影响作用,是需要进一步深入研究的重要内容.

4 结论

(1)从声发射时域参数、声发射空间演化以及Felicity比方面,阐述了岩石疲劳损伤特性的研究进展.

(2)从声发射时域参数、损伤变量、分形维值、Felicity比、加卸载响应比、RA以及 b 值等参数方面,阐述了岩石疲劳破坏前兆的研究进展.

(3)从红外辐射特征方面阐述了岩石疲劳损伤与破坏前兆的研究进展.

(4)提出了今后岩石疲劳损伤与破坏前兆研究中需要进一步深入解决的几点问题.

由于岩石的非均匀、离散性及各向异性等原因,目前岩石疲劳损伤与破坏前兆研究方面还存在一些不足之处.随着“一带一路”“长江经济带”等国家战略的实施,大型、超大型工程的不断出现,必将推动岩石疲劳损伤与破坏前兆研究的不断深入,从而为工程的安全稳定提供科学依据.

References

- Akdag, S., Karakus, M., Taheri, A., et al., 2018. Effects of Thermal Damage on Strain Burst Mechanism for Brittle Rocks under True-Triaxial Loading Conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(6): 1657–1682. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1415-3>
- Cao, K. W., Ma, L. Q., Wu, Y., et al., 2021. Cyclic Fatigue Characteristics of Rock Failure Using Infrared Radiation as Precursor to Violent Failure: Experimental Insights from Loading and Unloading Response. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 44(2): 584–594. <https://doi.org/10.1111/ffe.13362>
- Chen, Y. L., Zhang, Y., 2018. Influence of Loading Rate on the Kaiser Effect for Different Lithological Rocks. *Journal of China Coal Society*, 43(4): 959–966(in Chinese with English abstract).

- Feng, X. T., Gao, Y. H., Zhang, X. W., et al., 2020. Evolution of the Mechanical and Strength Parameters of Hard Rocks in the True Triaxial Cyclic Loading and Unloading Tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 131:104349. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104349>
- Guo, J., Feng, G. R., Qi, T. Y., et al., 2018. Dynamic Mechanical Behavior of Dry and Water Saturated Igneous Rock with Acoustic Emission Monitoring. *Shock and Vibration*, 2018: 1–14. <https://doi.org/10.1155/2018/2348394>
- He, J., Pan, J. N., Wang, A. H., 2014. Acoustic Emission Characteristics of Coal Specimen under Triaxial Cyclic Loading and Unloading. *Journal of China Coal Society*, 39(1): 84–90(in Chinese with English abstract).
- He, M. C., Ren, F. Q., Gong, W. L., et al., 2017. Temperature Characteristics during Physical Simulation Test of Strain Burst. *Journal of China University of Mining & Technology*, 46(4):692–698(in Chinese with English abstract).
- Huo, M. Z., Xia, Y. Y., Liu, X. Q., et al., 2020. Evolution Characteristics of Temperature Fields of Rockburst Samples under Different Stress Gradients. *Infrared Physics & Technology*, 109: 103425. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2020.103425>
- Jiang, D. Y., Xie, K. N., Chen, J., et al., 2019. Experimental Analysis of Sandstone under Uniaxial Cyclic Loading through Acoustic Emission Statistics. *Pure and Applied Geophysics*, 176(1): 265–277. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1960-4>
- Kang, J. T., Wu, Q., Tang, H. M., et al., 2019. Strength Degradation Mechanism of Soft and Hard Interbedded Rock Masses of Badong Formation Caused by Rock/Discontinuity Degradation. *Earth Science*, 44(11): 3950–3960 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. M., Liu, N., Liu, W. R., et al., 2021. Study on Characteristics of Energy Storage and Acoustic Emission of Rock under Different Moisture Content. *Sustainability*, 13(3): 1041. <https://doi.org/10.3390/su13031041>
- Li, D. X., Wang, E. Y., Kong, X. G., et al., 2019. Damage Precursor of Construction Rocks under Uniaxial Cyclic Loading Tests Analyzed by Acoustic Emission. *Construction and Building Materials*, 206: 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.074>
- Li, H. R., Yang, C. H., Li, B. L., et al., 2016. Damage Evolution and Characteristics of Ultrasonic Velocity and Acoustic Emission for Salt Rock under Triaxial Multilevel Loading Test. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(4): 682–691(in Chinese with English abstract).
- Li, S. L., Tang, H. Y., 2010. Acoustic Emission Characteristics in Failure Process of Rock under Different Uniaxial Compressive Loads. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 32(1): 147–152(in Chinese with English abstract).
- Li, S. L., Zhou, M. J., Gao, Z. P., et al., 2019. Experimental Study on Acoustic Emission Characteristics before the Peak Strength of Rocks under Incrementally Cyclic Loading - Unloading Methods. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 38(4): 724–735(in Chinese with English abstract).
- Li, X. J., He, P. J., Tang, J. H., et al., 2021. Experimental and Numerical Studies on Fracture Characteristics of Notched Granite Beams under Cyclic Loading and Unloading. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 56(1): 3–17.
- Li, Z. C., Liu, J. F., Deng, C. F., et al., 2018. Experimental Study on Deformation and Failure Characteristics of Salt Rock Three-Point-Bending Samples with Impurities. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 40(Suppl. 2): 101–106(in Chinese with English abstract).
- Liang, D. X., Zhang, N., Xie, L. X., et al., 2019. Damage and Fractal Evolution Trends of Sandstones under Constant-Amplitude and Tiered Cyclic Loading and Unloading Based on Acoustic Emission. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 15(7): 155014771986102. <https://doi.org/10.1177/1550147719861020>
- Liu, J. F., Ding, G. S., Zhang, Q. X., et al., 2020. Investigation on Fracture Mechanical Behavior of Salt Rock with Impurities under Bending Loading - Unloading Conditions. *Advanced Engineering Sciences*, 52(3): 107–114(in Chinese with English abstract).
- Meng, H. J., Wang, Y., Zhang, B., et al., 2020. Investigation on the Effect of Dynamic Frequency on Fracture Evolution in Preflawned Rock under Multistage Cyclic Loads: Insight from Acoustic Emission Monitoring. *Geofluids*, 2020: 8891395. <https://doi.org/10.1155/2020/8891395>
- Meng, Q. B., Zhang, M. W., Han, L. J., et al., 2018. Acoustic Emission Characteristics of Red Sandstone Specimens

- under Uniaxial Cyclic Loading and Unloading Compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(4):969—988. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1389-6>
- Nejati, H.R., Ghazvinian, A., 2014. Brittleness Effect on Rock Fatigue Damage Evolution. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(5): 1839—1848. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0486-4>
- Pei, F., 2020. Analysis and Control of Mechanical Properties and Surrounding Rock Stability of Deep Strata in Siling Gold Mine (Dissertation). University of Science and Technology Beijing, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Pei, F., Ji, H.G., Zhao, J.W., et al., 2020. Energy Evolution and AE Failure Precursory Characteristics of Rocks with Different Rockburst Proneness. *Advances in Civil Engineering*, (9): 8877901. <https://doi.org/10.1155/2020/8877901>
- Ren, F.Q., Zhu, C., He, M.C., 2020. Moment Tensor Analysis of Acoustic Emissions for Cracking Mechanisms during Schist Strain Burst. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(1): 153—170. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01897-3>
- Ren, S., Bai, Y.M., Jiang, D.Y., et al., 2012. Experimental Research on Acoustic Emission Property of Salt Rock under Cyclic Loading. *Rock and Soil Mechanics*, 33(6): 1613—1618, 1639 (in Chinese with English abstract).
- Sheinin, V.I., Blokhin, D.I., Maksimovich, I.B., et al., 2016. Experimental Research into Thermomechanical Effects at Linear and Nonlinear Deformation Stages in Rock Salt Specimens under Cyclic Loading. *Journal of Mining Science*, 52(6): 1039—1046. <https://doi.org/10.1134/s1062739116061575>
- Shen, R.X., Chen, T.Q., Li, T.X., et al., 2020. Study on the Effect of the Lower Limit of Cyclic Stress on the Mechanical Properties and Acoustic Emission of Sandstone under Cyclic Loading and Unloading. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 108: 102661. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102661>
- Tang, J.H., Chen, X.D., Dai, F., et al., 2020. Experimental Investigation of Fracture Damage of Notched Granite Beams under Cyclic Loading Using DIC and AE Techniques. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 43(7): 1583—1596. <https://doi.org/10.1111/ffe.13253>
- Wang, J.F., Yuan, W., He, K., et al., 2020. Influence of Stress History on Consolidation Coefficient of Saturated Soft Soil. *Earth Science*, 45(12): 4640—4648 (in Chinese with English abstract).
- Wang, K., Li, X., Huang, Z., et al., 2021a. Experimental Study on Acoustic Emission and Resistivity Response of Sandstone under Constant Amplitude Cyclic Loading. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021: 6637200. <https://doi.org/10.1155/2021/6637200>
- Wang, T.Z., Wang, C.L., Xue, F., et al., 2021b. Acoustic Emission Characteristics and Energy Evolution of Red Sandstone Samples under Cyclic Loading and Unloading. *Shock and Vibration*, (2): 8849137. <https://doi.org/10.1155/2021/8849137>
- Wang, X.R., Cai, S., Yang, W., et al., 2022. Influence of Existing Buildings on Construction of Earth Pressure Shield in Extremely Soft Rock Stratum. *Earth Science*, 47(4): 1483—1491 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Gao, S.H., Meng, H.J., et al., 2021. Investigation on Acoustic Emission Characteristics and Fracture Network Patterns of Pre-Flawed Granite Subjected to Increasing-Amplitude Fatigue Loads. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40(10): 1976—1989 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Meng, H.J., Long, D.Y., 2021d. Experimental Investigation of Fatigue Crack Propagation in Interbedded Marble under Multilevel Cyclic Uniaxial Compressive Loads. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 44(4): 933—951. <https://doi.org/10.1111/ffe.13404>
- Wang, Y., Zhang, B., Gao, S.H., et al., 2021c. Investigation on the Effect of Freeze-Thaw on Fracture Mode Classification in Marble Subjected to Multi-Level Cyclic Loads. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 111(6): 102847. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102847>
- Wen, T., Tang, H.M., Ma, J.W., et al., 2019. Deformation Simulation for Rock in Consideration of Initial Damage and Residual Strength. *Earth Science*, 44(2): 652—663 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, F.K., Liu, G., Shen, Z.L., et al., 2016. Energy Conversion and Acoustic Emission (AE) Characteristics of Coal Samples under Cyclic Loading. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(10): 1954—1964 (in Chinese with English abstract).

- Xu, J., Li, S.C., Tang, X.J., et al., 2009. Rock Fatigue Damage Evolution Based on Acoustic Emission. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 31(1): 19–24(in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Tang, X.J., Li, S.C., et al., 2008. Space-Time Evolution Rules Study of Acoustic Emission Locations in Rock under Cyclic Loading. *Journal of Chongqing University*, 31(6): 672–676(in Chinese with English abstract).
- Yang, J.M., 2020. Experimental Study on Acoustic Emission Signal Characteristics during Limestone Loading. *Anhui Architecture*, 27(6):167–169(in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Q., Huang, Y. H., Tang, J. Z., 2020. Mechanical, Acoustic, and Fracture Behaviors of Yellow Sandstone Specimens under Triaxial Monotonic and Cyclic Loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 130(7): 104268. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104268>
- Yang, X. B., Han, X. X., Liu, E. L., et al., 2018. Experimental Study on the Acoustic Emission Characteristics of Non-Uniform Deformation Evolution of Granite under Cyclic Loading and Unloading Test. *Rock and Soil Mechanics*, 39(8):2732–2739(in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. J., Xing, L. Y., 2020. Experimental Research on Acoustic Emission Characteristics and Felicity Effects during Coal Fatigue Failure under Cyclic Loading. *Advances in Materials Science and Engineering*, (10): 3453128. <https://doi.org/10.1155/2020/3453128>
- Zhang, M. B., Cui, L., Hu, W. J., et al., 2020. Acoustic Emission Experimental Research of the Damage Characteristics of Raw Coal under Different Loading and Unloading Rates. *Shock and Vibration*, (2020):9063929. <https://doi.org/10.1155/2020/9063929>
- Zhang, X., Zhou, Z. H., Zhang, J. Y., et al., 2020. Research on Acoustic Emission Precursors of Instability of Marble under Uniaxial Cyclic Loading and Unloading Conditions. *Industrial Minerals & Processing*, 49(6):1–6(in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. M., Wang, C., Liang, D. X., 2018. Comparative Experimental Studies of Acoustic Emission Characteristics of Sandstone and Mudstone under the Impacts of Cyclic Loading and Unloading. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 14(8): 155014771879555. <https://doi.org/10.1177/1550147718795555>
- Zhao, X. D., Li, Y. H., Yuan, R. F., et al., 2007. Experimental Verification/Analysis of Kaiser Effect in Granite. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 28(2): 254–257(in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. G., Li, P. F., Ma, L. K., et al., 2014. Damage and Dilation Characteristics of Deep Granite at Beishan under Cyclic Loading-Unloading Conditions. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(9): 1740–1748(in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. C., Yang, T. H., Xu, T., et al., 2018. Mechanical and Energy Release Characteristics of Different Water-Bearing Sandstones under Uniaxial Compression. *International Journal of Damage Mechanics*, 27(5):640–656. <https://doi.org/10.1177/1056789517697472>
- Zhao, Y. X., Gong, S., Teng, T., et al., 2018. Characteristics of the Load/Unload Response Ratio of Raw Coal under Uniaxial Multi-Level Cyclic Loading. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 37(5): 1096–1105(in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. B., Huang, X., Guo, J., et al., 2017. Experimental Study of Fatigue Characteristics of Gypsum Rock under Cyclic Loading. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36(4):940–952(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈宇龙, 张玉, 2018. 加载速率对不同岩性岩石 Kaiser 效应影响. *煤炭学报*, 43(4):959–966.
- 何俊, 潘结南, 王安虎, 2014. 三轴循环加卸载作用下煤样的声发射特征. *煤炭学报*, 39(1):84–90.
- 何满潮, 任富强, 宫伟力, 等, 2017. 应变型岩爆物理模拟实验过程的温度特征. *中国矿业大学学报*, 46(4):692–698.
- 亢金涛, 吴琼, 唐辉明, 等, 2019. 岩石/结构面劣化导致巴东组软硬互层岩体强度劣化的作用机制. *地球科学*, 44(11):3950–3960.
- 李浩然, 杨春和, 李佰林, 等, 2016. 三轴多级荷载下盐岩声波声发射特征与损伤演化规律研究. *岩石力学与工程学报*, 35(4):682–691.
- 李庶林, 唐海燕, 2010. 不同加载条件下岩石材料破裂过程的声发射特性研究. *岩土工程学报*, 32(1):147–152.
- 李庶林, 周梦婧, 高真平, 等, 2019. 增量循环加卸载下岩石峰值强度前声发射特性试验研究. *岩石力学与工程学报*, 38(4):724–735.

- 李志成, 刘建锋, 邓朝福, 等, 2018. 含杂质盐岩三点弯曲变形破坏特征试验研究. 岩土工程学报, 40(增刊 2): 101—106.
- 刘建锋, 丁国生, 张强星, 等, 2020. 弯曲加卸载下杂质盐岩断裂力学行为特征研究. 工程科学与技术, 52(3): 107—114.
- 裴峰, 2020. 纱岭金矿深部地层岩体力学性能与深竖井围岩稳定性分析及控制(博士论文). 北京: 北京科技大学.
- 任松, 白月明, 姜德义, 等, 2012. 周期荷载作用下盐岩声发射特征试验研究. 岩土力学, 33(6): 1613—1618, 1639.
- 王江锋, 袁威, 何况, 郑培信, 2020. 应力历史对饱和软土固结系数的影响. 地球科学, 45(12): 4640—4648.
- 王晓睿, 蔡松, 杨伟, 郑培信, 2022. 既有建筑对极软岩地层中土压盾构的施工影响. 地球科学, 47(4): 1483—1491.
- 王宇, 高少华, 孟华君, 等, 2021. 不同频率增幅疲劳荷载下双裂隙花岗岩破裂演化声发射特性与裂纹形态研究. 岩石力学与工程学报, 40(10): 1976—1989.
- 温韬, 唐辉明, 马俊伟, 等, 2019. 考虑初始损伤和残余强度的岩石变形过程模拟. 地球科学, 44(2): 652—663.
- 肖福坤, 刘刚, 申志亮, 等, 2016. 循环荷载作用下煤样能量转化规律和声发射变化特征. 岩石力学与工程学报, 35(10): 1954—1964.
- 许江, 李树春, 唐晓军, 等, 2009. 基于声发射的岩石疲劳损伤演化. 北京科技大学学报, 31(1): 19—24.
- 许江, 唐晓军, 李树春, 等, 2008. 循环荷载作用下岩石声发射时空演化规律. 重庆大学学报(自然科学版), 31(6): 672—676.
- 杨建明, 2020. 石灰岩加载过程中声发射信号特征试验研究. 安徽建筑, 27(6): 167—169.
- 杨小彬, 韩心星, 刘恩来, 等, 2018. 循环加卸载下花岗岩非均匀变形演化的声发射特征试验研究. 岩土力学, 39(8): 2732—2739.
- 张鑫, 周宗红, 张俊杨, 等, 2020. 大理岩单轴循环加卸载失稳声发射先兆研究. 化工矿物与加工, 49(6): 1—6.
- 赵兴东, 李元辉, 袁瑞甫, 等, 2007. 花岗岩 Kaiser 效应的实验验证与分析. 东北大学学报(自然科学版), 28(2): 254—257.
- 赵星光, 李鹏飞, 马利科, 等, 2014. 循环加、卸载条件下北山深部花岗岩损伤与扩容特性. 岩石力学与工程学报, 33(9): 1740—1748.
- 赵毅鑫, 龚爽, 滕腾, 等, 2018. 单轴多级循环加载下原煤加卸载响应比演化特征. 岩石力学与工程学报, 37(5): 1096—1105.
- 祝艳波, 黄兴, 郭杰, 等, 2017. 循环荷载作用下石膏质岩的疲劳特性试验研究. 岩石力学与工程学报, 36(4): 940—952.