



适用于复杂试验条件下的声发射 传感器布置装置设计

肖 坤¹, 张朝鹏^{2,3}, 刘 洋^{2,3}, 艾 婷^{2,3}, 李安强⁴, 任 利^{2,3}, 张 茹^{1,2}, 覃 黎¹

(1. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065;

2. 四川大学 深地科学与工程教育部重点实验室, 成都 610065;

3. 四川大学 建筑与环境学院, 成都 610065;

4. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 成都 610081)

摘要: 在岩石声发射实验中, 合理布置声发射传感器至关重要。声发射传感器一般在夹具夹持情况下通过凡士林紧密贴合在岩样表面, 常规方法操作比较繁琐, 并且裸露在外的声发射传感器及其数据传输线很可能对其他实验和操作造成干扰。针对这一问题, 研制了一套适用于多种试样尺寸的声发射传感器布置安装系统, 并开展了相应的岩石直剪声发射试验和单轴压缩声发射试验, 能够实现方便快捷地安装声发射传感器, 使声发射传感器隐藏且非对称地稳定布置在试样表面, 同时又不干扰加载和非接触表面应变测量等其他同时进行的测试项目, 为复杂试验条件下的岩石力学测试创造了条件, 最终试验结果也符合实际岩石力学特性。因此, 利用该套声发射传感器布置装置, 能有效满足试样在岩石剪切试验机上开展多种复杂测试条件下的声发射测试。

关 键 词: 声发射; 传感器; 传感器布置; 岩石剪切试验机

中图分类号: TU45

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20200035

Design of Acoustic Emission Sensor Arrangement Device for Complex Test Conditions

XIAO Kun¹, ZHANG Zhaopeng^{2,3}, LIU Yang^{2,3}, AI Ting^{2,3}, LI Anqiang⁴, REN Li^{2,3}, ZHANG Ru^{1,2}, QIN Li¹

(1. College of Hydraulic and Hydropower Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. MOE Key Laboratory of Underground Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

4. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610081, China)

Abstract: In rock acoustic emission experiment, the reasonable arrangement of acoustic emission sensors is very important. Acoustic emission sensors are usually clamped to adhere to the surface of rock samples through Vaseline. Conventional methods are complicated to operate, and exposed acoustic emission sensors and data transmission lines may interfere with other experiments and operations. In order to solve this problem, a set of installation system of acoustic emission sensors has been developed for various sample sizes. And the rock direct shear AE test and uniaxial compression AE test were carried out, which could realize the installation of AE sensors conveniently and quickly. The acoustic emission sensors are hidden and asymmetrically arranged on the surface of the sample, without affecting loading and other simultaneous tests such as non-contact surface strain measurement, which creates conditions for rock mechanics test under complex test conditions, and the final test results also conform to the actual rock mechanical properties. Therefore, using the acoustic emission sensor placement device can effectively meet the requirements of acoustic emission tests under various complex testing conditions on rock shear testing machine.

Key words: acoustic emission; sensor; sensor arrangement; rock shear testing machine

收稿日期: 2020-01-19; 修回日期: 2020-10-12

基金项目: 四川省科技计划项目(2019YFG0047); 中铁二院研究开发项目(KYY2019003); 四川省青年科技创新研究团队资助项目(2017TD0007)。

作者简介: 肖坤(1997-), 男, 硕士生, 主要从事岩土工程方面的研究。

通信作者: 张朝鹏(1989-), 男, 博士, 实验师, 主要从事岩石力学与工程方面的研究。E-mail: zhangzp@scu.edu.cn

声发射是材料或岩石受力作用产生变形、断裂,或内部应力超过屈服极限而进入不可逆的塑性变形阶段,以瞬态弹性波形式释放应变能的现象。这种弹性波以声波的形式存在,若释放的应变能足够大,就可产生人耳听得见的声音^[1-2]。因此,岩石声发射作为岩石破坏过程中的一种伴生现象,蕴含着岩石内部破坏过程的许多信息^[3]。对于岩土工程中诸多同破坏有关的问题,人们所关心的不仅是峰值强度,同时破裂前兆信息也是岩石力学所研究的重要问题^[4],而声发射是目前应用最广泛的、非常重要的监测技术手段之一。

岩石声发射技术是理论落后于实际应用的少数学科之一,在岩石声发射机理、理论研究、试验设备等方面均不够系统和完善^[5-6]。因此反映岩石损伤演化特征的声发射基础理论、试验研究及工程应用的探索工作,显得非常有必要并具有深远意义^[7]。目前声发射技术广泛应用于岩石力学领域,近年来国内外许多科学家和工程技术人员开展了大量的基础试验工作,进行声发射理论研究。韩放等^[8]对岩石试样进行了单轴加卸载试验,试验表明,声发射技术能够有效地动态观测岩石损伤的演化和扩展的过程。李浩然等^[9]研究了单轴加载及循环荷载状态下花岗岩的声波、声发射特性,发现花岗岩的声发射事件数量与应力应变曲线具有良好的对应关系。李楠等^[10]研究了循环加载和分级加载条件下岩石损伤破坏全过程的声发射规律和频谱特性,并揭示了声发射与载荷变化或岩体变形破裂的密切关系。范雷等^[11]通过现场岩体直剪破坏过程中声发射特征参数与频谱特性研究,揭示了节理岩体破坏机制,深化了对岩体破坏机理的认识。Z.A. Moradian 等^[12]对不同类型的节理(岩石、岩石-混凝土和混凝土)在直接剪切试验中产生的声发射信号进行了分析,研究表明声发射有足够精度可以监测节理的剪切性能并服务于现场。纪洪广等^[13]通过对常规三轴压缩下花岗岩声发射特征及其主破裂前兆信息研究,得出了判断岩石临界主破裂的依据。

但上述岩石声发射测试中,声发射传感器布置均比较繁琐低效,对其他同步进行的测试干扰较大,在复杂受力条件下的布置会存在一定问题。本文针对这些问题,根据实验室现有的岩石剪切机研制了一套声发射传感器定位系统,能够更好地开展系统的岩石声发射试验研究,提高了岩石声发射试验的效率以及可靠性,揭示岩石受

力破坏全过程的声发射演化规律,进一步认识岩石的破坏机理。

1 设计背景

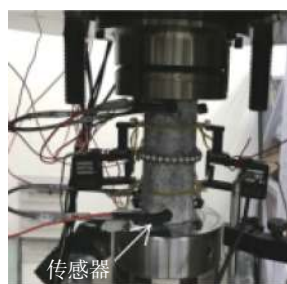
由 MTS 公司生产的岩石 TEST60 剪切试验机如图 1 所示,主要用于岩石和混凝土等材料的剪切试验,同时也能开展岩石单轴压缩、拉伸试验,其加载控制和数据记录精度高。操作人员还可以实时查看垂直载荷、水平荷载、机器位移、试样变形等相互的关系曲线。其主要技术参数为双向加载,其中,竖向荷载 1000 kN,水平荷载 2500 kN。声发射监测设备为 PAC 公司最新研制的高性能声发射系统,主要包括声发射传感器(若干个)、放大器和采集分析系统。其中 Nano-30 型声发射传感器主频范围在 125~750 kHz 间,满足岩石声发射测试要求。



图1 岩石 TEST60 剪切试验机

在岩石声发射试验中,条件允许情况下声发射传感器最好与试样表面紧密贴合接触,以便试样内部微破裂时产生的应力波信息能有效地被声发射传感器接收捕获,从而被声发射系统实时采集,因此声发射传感器的安装和布置,对于岩石变形破坏过程中声发射信号的采集有着极大的影响^[14-17]。对于声发射传感器的安装,如图 2 所示,一般情况下通过标记确定声发射传感器在试样表面安装的位置,通过夹持装置将声发射传感器固定在试样表面的相应位置,并在传感器与试样表面接触处涂抹适量凡士林,填补之间的空隙,有助于声发射信号的有效接收。此类声发射传感器布置方法虽然能保证声发射传感器准确放置在预定位置上非对称分布,也能使声发射传感器和试样表面粘结在一起;但缺点是操作比较繁

琐,且声发射传感器与试样的贴合不太稳定,受操作人员熟练度影响较大。另外,非对称布置点需通过每次测量确定,标记的位置和声发射试验软件上预设的位置可能存在较大的偏差。另一方面,通过这种方式粘结的传感器,必定会裸露在试样表面,传感器及其数据传输线会对试样表面有一定的遮挡。对同一岩石试样同时开展多种测试项目(比如岩石双向加载或岩石表面非接触应变测量)时,裸露在外的声发射传感器及其传输线很可能对其他测试项目造成干扰。



(a) 圆柱形试样安装示意图



(b) 方形试样安装示意图

图2 未改进前声发射传感器安装示意图

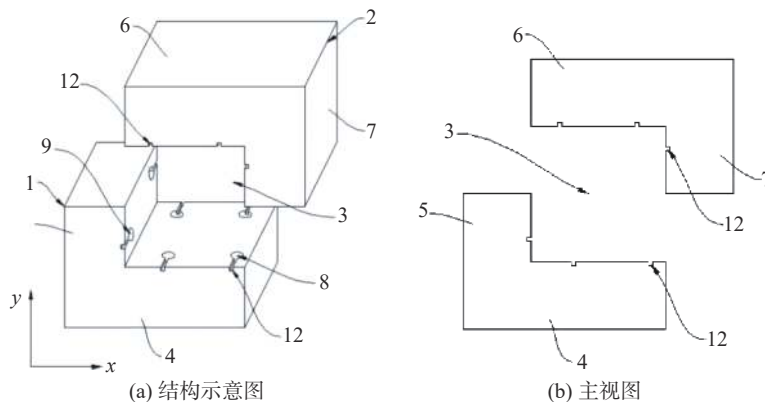
在单轴压缩实验中,能够通过试样左右两侧布置传感器的方法避免传感器对于观察试样正面裂隙发育的影响。但是对于双向加载的直剪试验,目前并无有效声发射传感器布置方式能避免对其他测试项目的干扰,又能实现声发射传感器快捷且稳固的非对称布置。因此,有必要开发一

套声发射传感器布置装置,有效满足复杂试验条件下(比如岩石直剪试验或非接触应变测试等)声发射传感器快捷稳固的非对称布置,保障整个岩石力学测试顺利进行。

2 装置开发

2.1 声发射传感器布置系统

本文所开发的一套声发射传感器布置系统,如图3所示。主体结构为相对放置的相同结构的一对高刚度金属垫块,垫块采用高强度实心钢材制作,使用模具整体浇注而成,并在表面镀锌以防生锈。两个垫块将与试样接触,呈中心对称布置方式围成一非闭合的测试区,每个垫块包括相互连接的主体部和突出部,主体部与主体部上下相对,突出部与突出部左右错位相对。主体部内侧设有4个传感器放置孔,突出部内侧设有2个传感器放置孔,所述传感器放置孔均用于容置声发射传感器,如图3(a)所示。两个垫块在使用时,上方的若干个传感器放置孔与下方的若干个传感器放置孔在 x 轴方向上的投影点各自不相互重合,左右的传感器放置孔在 y 轴方向上的投影点也各自不相互重合,如图3(b)所示。主体部上的4个传感器放置孔呈平行四边形的形状分布,如图3(c)所示。突出部上的2个传感器放置孔竖向存在高度差、横向存在距离差;下部垫块的上侧面与上部垫块的下侧面处于同一水平面。所述传感器放置孔内均设有弹性构件和磁性连接垫片,弹性构件与磁性连接垫片固定相连,磁性连接垫片用于快速吸附住声发射传感器,确保声发射传感器在安置过程中不易脱落,方便操作安装,如图3(d)所示。传感器放置孔均连通并设有接线槽,用于将连接在声发射传感器上的数据传输线连接至垫块外部的放大器上。



(a) 结构示意图

(b) 主视图

图3 声发射传感器布置系统

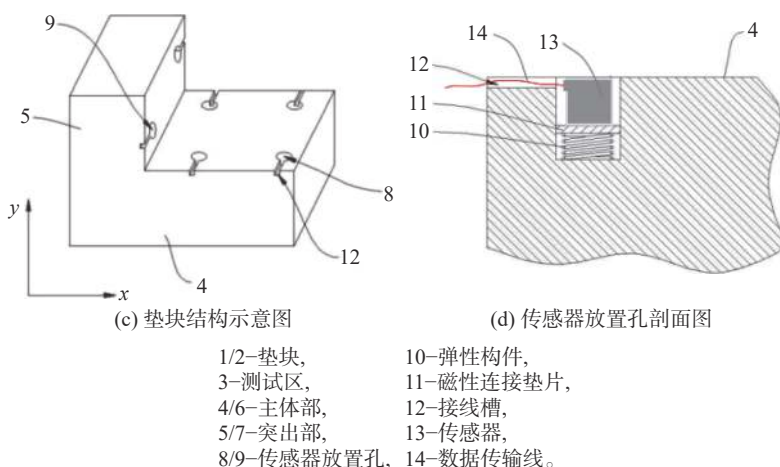


图3(续)

2.2 试验方法

在现有的岩石剪切试验机 TEST60 基础上, 使用这套声发射传感器布置装置, 如图 4 所示, 使上部垫块顶部与岩石剪切试验机的竖向加载压头接触, 下部垫块底部与竖向基座接触, 左边与可移动的水平加载压头相接触, 右边与水平基座相接触。

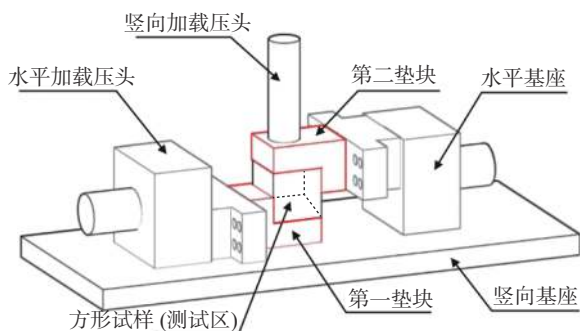


图4 声发射传感器布置装置(红色部件)在岩石剪切试验机上的应用示意图

传感器放置孔的直径均稍大于声发射传感器的直径(声发射传感器的直径为 7.91 mm), 深度大于声发射传感器的高度(声发射传感器的高度为 7.3 mm), 进而使声发射传感器成功放入放置孔里。其中, 连接垫片为磁性垫片, 可通过连接垫片对声发射传感器起到吸附作用, 防止声发射传感器掉落。弹性构件可以采用长度为 2.0 mm 的弹簧或其他具有弹力的装置, 焊接在传感器放置孔底部。声发射传感器将吸附在连接垫片上, 而弹性构件可以确保声发射传感器与被测试样的端面紧密接触, 从而达到安装方便、稳定可靠的效果。

第一垫块和第二垫块上下相对, 在将试样放置于测试区后, 若只通过竖向加载压头对第二垫块进行竖向施力, 便可对岩石进行单轴压缩试验测试; 或者施加法向荷载后, 同时对第一垫块进

行横向施力, 由于左右突出部上下方向上存在错位, 便可进行岩石的直剪试验测试。

3 结果与分析

3.1 试验分析

直剪声发射试验选用立方砂岩试样(50 mm×50 mm×50 mm)在岩石 TEST60 剪切试验机上进行。法向应力采用应力控制方式, 加载速率为 12.5 kN/min, 直至加载到 25 kN, 即法向应力为 10 MPa 时开始施加剪切荷载; 切向荷载采用位移控制方式, 剪切速率为 0.1 mm/min。声发射测试采用 PAC 公司最新研制高性能声发射系统和研制的声发射传感器布置装置, 改进后的声发射传感器布置如图 5(a)所示。



(a) 砂岩直剪试验



(b) 页岩单轴压缩试验

图5 改进后的声发射传感器布置示意图

单轴压缩声发射试验选择切割好的长方体页岩 (50 mm×50 mm×100 mm), 采用竖向位移控制方式进行加载, 加载速率为 0.06 mm/min, 直至岩样破坏结束试验, 改进后的声发射传感器布置如图 5(b) 所示。

岩石的变形破坏过程与其内部原生裂隙和新裂隙的扩展、贯通等演化过程密切相关。声发射信息蕴含着丰富的岩石损伤破坏信息^[14], 声发射振铃率表示单位时间内产生的声发射振铃计数, 反映了声发射活动的强弱。如图 6 所示, 从岩石直剪、单轴压缩的声发射试验结果可以看出: 砂岩剪切应力-位移曲线塑性特征更加明显, 10 MPa 法向应力下的抗剪强度为 16.4 MPa; 而页岩应力-应变曲线峰前更为线性, 脆性相比砂岩更为明显, 其单轴抗压强度为 102.9 MPa。两种岩石声发射特征相同之处在于, 岩石损伤破坏的过程中存在两个声发射活跃期, 第一个在岩石非弹性变形阶段开始出现较多的新裂隙, 第二个在峰后阶段, 岩石积聚的能量瞬间释放, 裂隙贯通、试样破坏; 峰后声发射活动强烈、采集到的事件数骤增, 在岩样整个变形损伤过程中达到高峰。不同之处在于, 砂岩声发射活动相对均匀平稳, 而页岩声发射活动起伏较大。

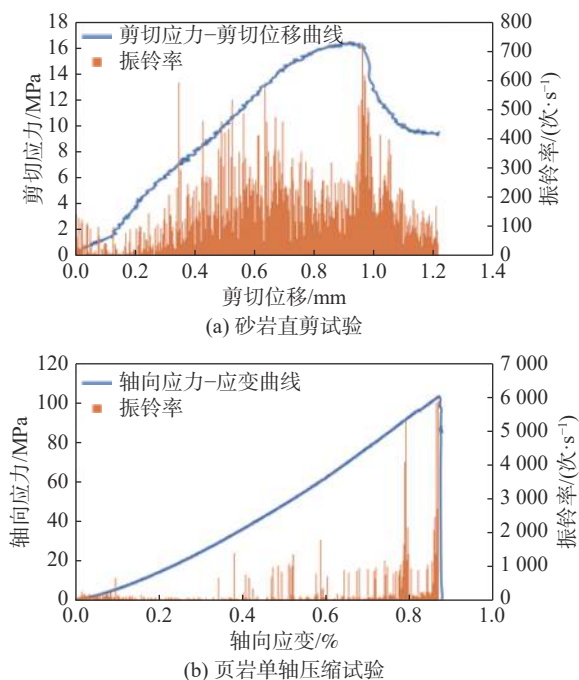


图 6 岩石变形破坏曲线及其声发射信号变化

此次试验结果中, 应力应变曲线峰值与声发射振铃率峰值的准确吻合, 两种岩石的试验结果

符合实际岩石力学特性, 验证了本文所开发的声发射传感器布置系统的有效性和适用性, 且声发射传感器隐藏在受压面, 留有更多的试样区域以供其他监测设备使用, 为复杂试验条件下的岩石力学测试创造了条件。

3.2 装置功能与效果

1) 目前通过夹持器布置声发射传感器的传统实验手段和技术无法满足快捷稳固地非对称布置声发射传感器, 而本文所开发的声发射传感器布置系统可以形成非对称的若干个传感器放置孔, 可通过固定在里面的声发射传感器, 对被测试样的端面进行声发射试验, 操作方便简单, 可以克服声发射传感器非对称安装的不便利性和不稳定性。还可以避免在同时进行声发射实验和 DIC 散斑测试时, 布置在待测试样表面的声发射传感器及其数据传输线对摄像机捕捉试样表面散斑的位移产生较大的干扰。

2) 由于主体部上 4 个传感器放置孔呈平行四边形布置, 上下共 8 个声发射传感器对被测试样的不同且非对称的位置进行声发射检测, 可以使得检测效果更好。左右共 4 个声发射传感器非对称的布置在被测试样的侧面, 进而实现直剪试验时在试样受压面进行声发射传感器的非对称布置。

3) 每个传感器放置孔均连通并设有接线槽, 设置接线槽具体用于将连接在声发射传感器上的传输线连接至垫块外部的放大器上, 从而避免导线影响其他实验对于被测试样表面的监测。

4) 测试区可以根据不同被测试样的形状改变第一垫块和第二垫块的形状, 进而适配更多尺寸的试样。例如, 当测试方形试样时, 左右突出部可按照试样边长制作形成一个立方形测试区; 当测试圆柱形试样时, 左右突出部则可制作成高度 100 mm、半径 50 mm 的圆弧形, 形成一个圆柱形测试区。

4 结束语

声发射技术已成为岩石力学测试分析的一种有力工具, 但是现有布置安装设备和方法存在某些功能的欠缺或不足, 所以有必要自行设计或改进试验装置以更好地满足岩石力学试验需求。本文设计的声发射传感器布置系统除了适用于简单试验条件下的岩石力学测试(比如岩石单轴压缩测

(下转第 154 页)