

# 声发射技术在岩石力学领域的应用

孔德连 许凤旌

**摘要：**本文在综述国内数十家从事岩石力学声发射研究的现状，主要包括矿业、地质、石油勘探等行业的岩石力学的声发射研究与应用，包括地应力，单轴、多轴岩石力学研究等。总结声发射用于岩石力学研究的现状、特点，关注的问题及未来的发展动向。

材料中局域源快速释放能量产生瞬态弹性波的现象称为声发射(AE)，声发射是一种常见的物理现象，大多数材料变形和断裂时有声发射发生，但许多材料的声发射信号强度很弱，人耳不能直接听见，需要借助灵敏的电子仪器才能检测出来，用仪器探测、记录、分析声发射信号和利用声发射信号推断声发射源的技术称为声发射技术。在科学家发现受压作用下岩石结构内部有声发射活动存在后，声发射技术广泛应用于金属矿山、煤矿及隧道工程的掩体稳定性与安全性问题的监测与预报中。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大量信息，能很好的反映岩石内部损伤过程。国内外学者对岩石受理损伤过程中的声发射信号特征做了大量的研究，例如地应力的测量、单轴压缩条件下岩石声发射特征的研究、三轴加载条件下岩石声发射特征的研究等，下面对这些应用研究简单做介绍。

## 1. 地应力测试

材料被重新加载期间，在应力值达到上次加载最大载荷之前不产生明显的声发射信号，称之为凯赛尔效应，原理如图 1 所示。

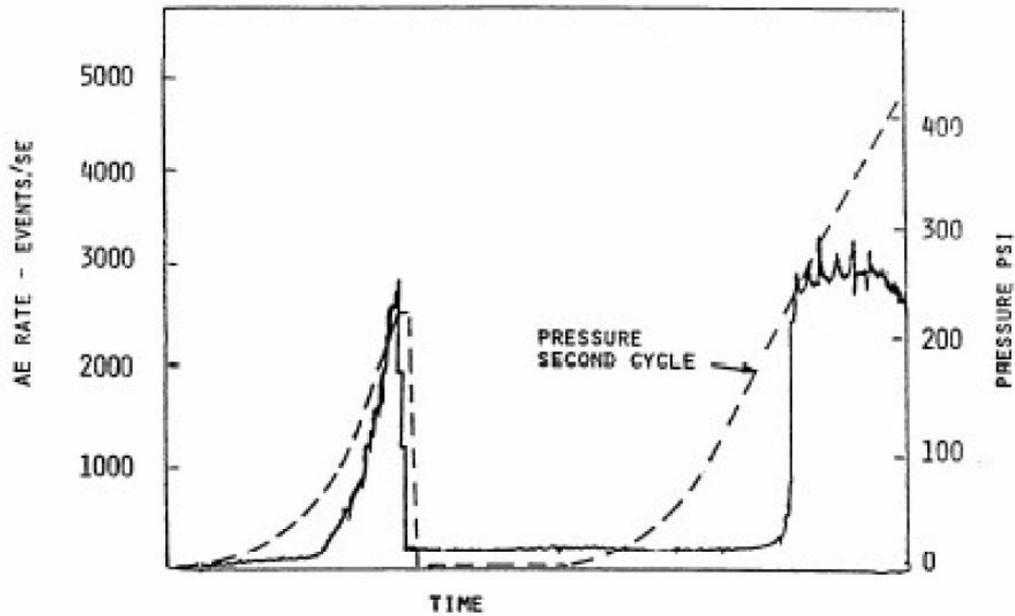


图 1 凯塞尔效应原理图

岩石的声发射活动能够“记忆”岩石所受过的最大应力，这种效应为凯塞尔效应。凯塞尔效应表明，声发射活动的频度或振幅与应力有一定的关系。在单调增加应力作用下，当应力达到过去已施加过的最大应力时，声发射明显增加。Kaiser 效应的物理机制可认为岩石受力后发生微断裂，微断裂发生的频度随应力增加而增加，断裂过程是不可逆的，但是由于已有破裂面上摩擦滑动也能产生声发射信号，这种摩擦滑动是可逆的。因而加载时应力低于已加过的最大应力也有声发射出现，它们就是那些可逆的摩擦滑动引起的声发射事件。当应力超过原来加过的最大应力时，又会有新的破裂产生，以致声发射活动频度突然提高。声发射凯塞尔效应实验可以测量野外曾经承受过的最大压应力。该类实验一般要在压机上测定单向应力。在加载过程中声发射率突然增大点对应的轴向应力是沿该岩样钻取方向曾经受过的最大压应力。

为了测定岩样在地下所受的三个主地应力（一个垂直方向，二个水平方向主地应力），可通过对岩样在不同方向取心进行试验来得到。一般要测得三个地应力，则至少应在四个方向（一个垂直方向，三个各相隔 45°角的水平方向）取出四个小岩心（图 2），然后通过声发射法测得该四个岩心在地下所受的正压力，并将其代入下式即可求得试样在地下所受的三个主地应力。

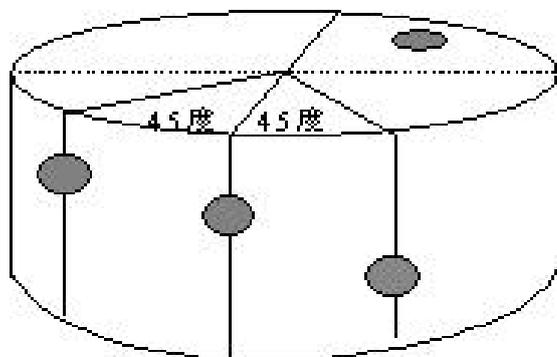


图 2 声发射取心示意图

## 2. 岩石在单轴加载情况下的声发射特征及定位分析

岩石是典型的非均匀脆性材料，其内部富含各种缺陷（微裂纹、空隙、节理裂隙等），再受载破坏过程中会产生大量的声发射信号。声发射技术是研究脆性材料失稳破裂演化过程的一个良好工具，因为它能连续、实时的检测纯粹性材料内部的微裂纹产生和扩展，病实现对其破坏位置的定位，这是其他实验方法都不具有的特点，已经被广泛应用于研究岩石、混凝土等脆性材料的破裂失稳机理研究。

对含不同预制裂纹及完整岩样进行单轴压缩实验，应用声发射仪器及各种定位算法对岩样破裂过程中的裂纹扩展过程进行实验验证。声发射定位是研究岩石声发射活动性及岩石微裂纹扩展的第一步，最早进行声发射三维定位研究的开展于1968年。目前对声发射事件定位方法主要有：Geiger定位法、Bayesian法、广义最小二乘法等。声发射定位主要是通过不同位置传感器拾取P波到达时间差来反演声发射事件位置。实验结果表明，在单轴压缩条件下，含预制裂纹的岩样发生剪切破坏；完整岩样发生劈裂破坏。声发射事件的高精度定位，可以很好的反映岩样内部微裂纹孕育、萌生、繁衍和扩展的三维定位演化模式，不论是含裂纹韩式完整试验的声发射定位结果与实际破坏模式非常吻合，这为研究岩石破裂失稳机理提供有力的工具。

下面案例所采用的岩样为带预制裂纹试样和完整试样两种。带预制裂纹岩样尺寸为70x70x150mm，所有预制裂纹的宽度为5mm的一条水平裂纹，预制裂纹的位置和尺寸如图3所示。完整岩石试样为黑云母片麻岩，其尺寸为70x70x150mm。

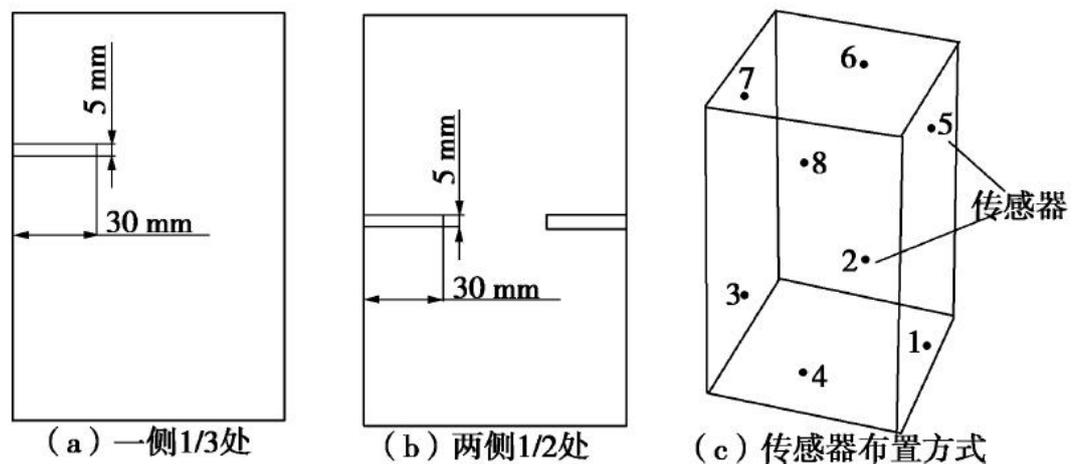


图3 预制测裂纹位置、、大小及传感器布置方式

图4-6 分别是单裂纹、双裂纹、完整岩样声发射事件定位图

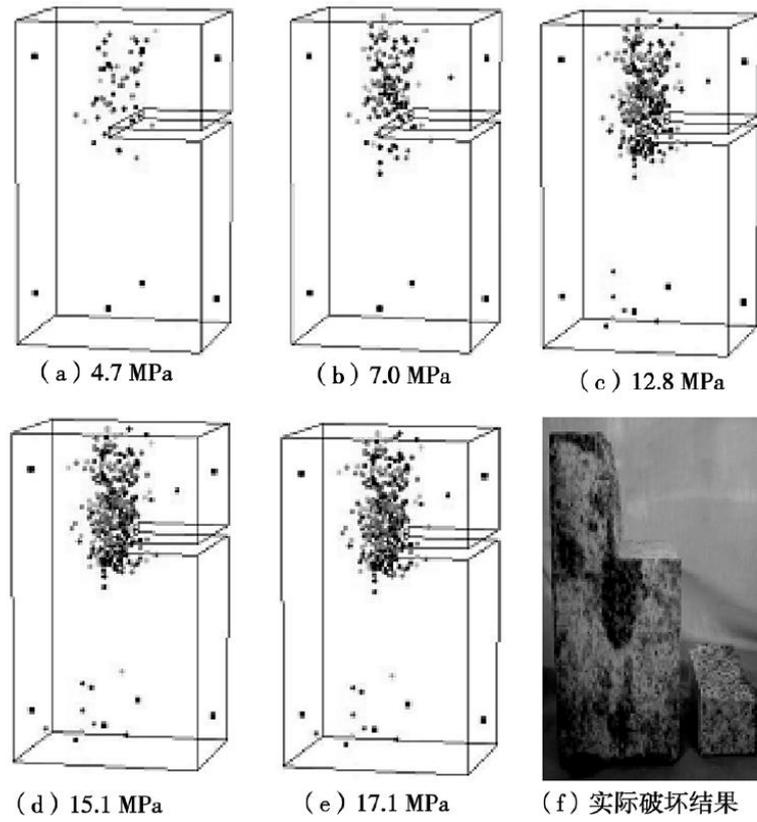


图 4 单裂纹岩样声发射定位验证

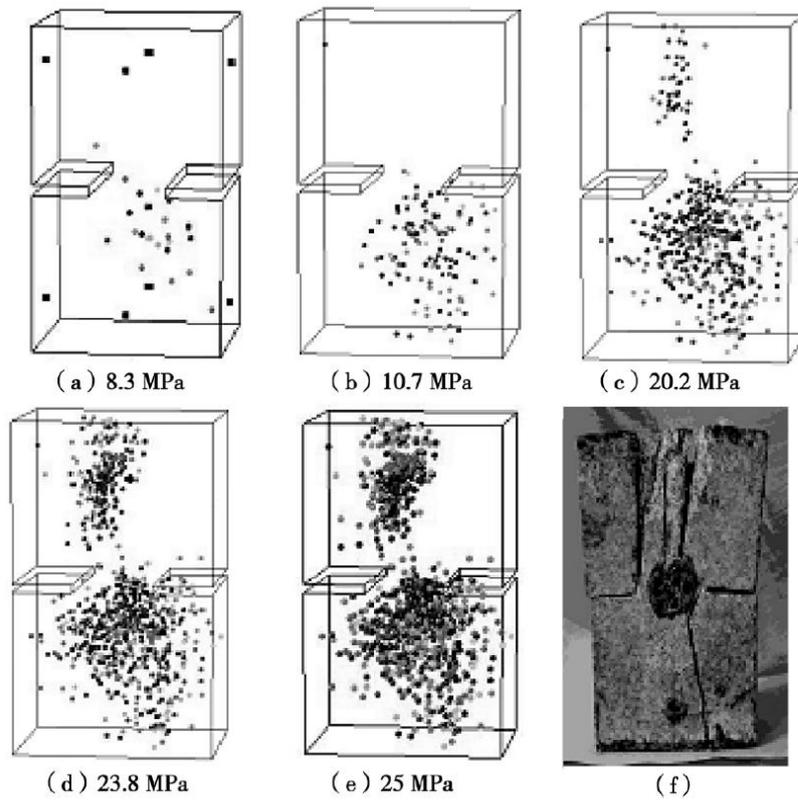


图 5 双裂纹岩样声发射定位验证

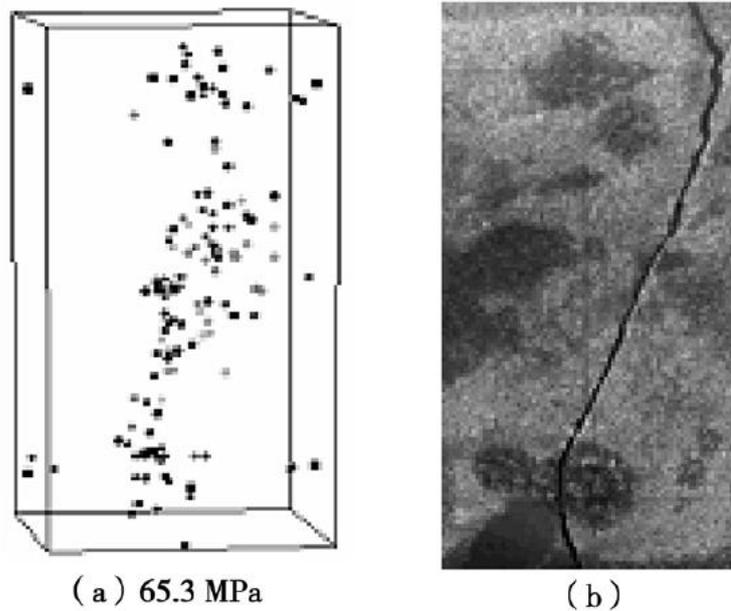


图 6 完整岩样声发射定位验证

从以上声发射试验中可看出

- (1) 不论是含裂纹还是完整试样的声发射定位结果与实际破坏模式非常吻合，对试样的定位过程很好的反映里试样的实际破裂过程，而且准确的对试样裂纹的初始、扩展和贯通过程进行的反演。
- (2) 加载初期，岩样的定位点数量非常少，而且零星分布于岩样的不同位置，当岩石被加载到峰值应力的 30%左右时，声发射事件定位开始在一个小的区域范围内集中，反映了岩石此时出现了初始裂纹。
- (3) 声发射定位算法对于岩石破裂声发射事件的定位已经到达较高的精度，直观反映了裂纹初始、扩展过程，这为研究岩石破裂失稳机制提供有力的工具。

### 3. 岩石在三轴加载时声波、声发射一体化试验

系统组成如图 7 所示，岩样上下 6 个探头用于两组横波和一组纵波波速的测量，侧面 4 个探头用于岩石加载过程中的三维定位。所有探头都可以承受 100MPa 的油压和 150°C 的高温。探头通过压力腔内的信号通道传递到压力腔外部。

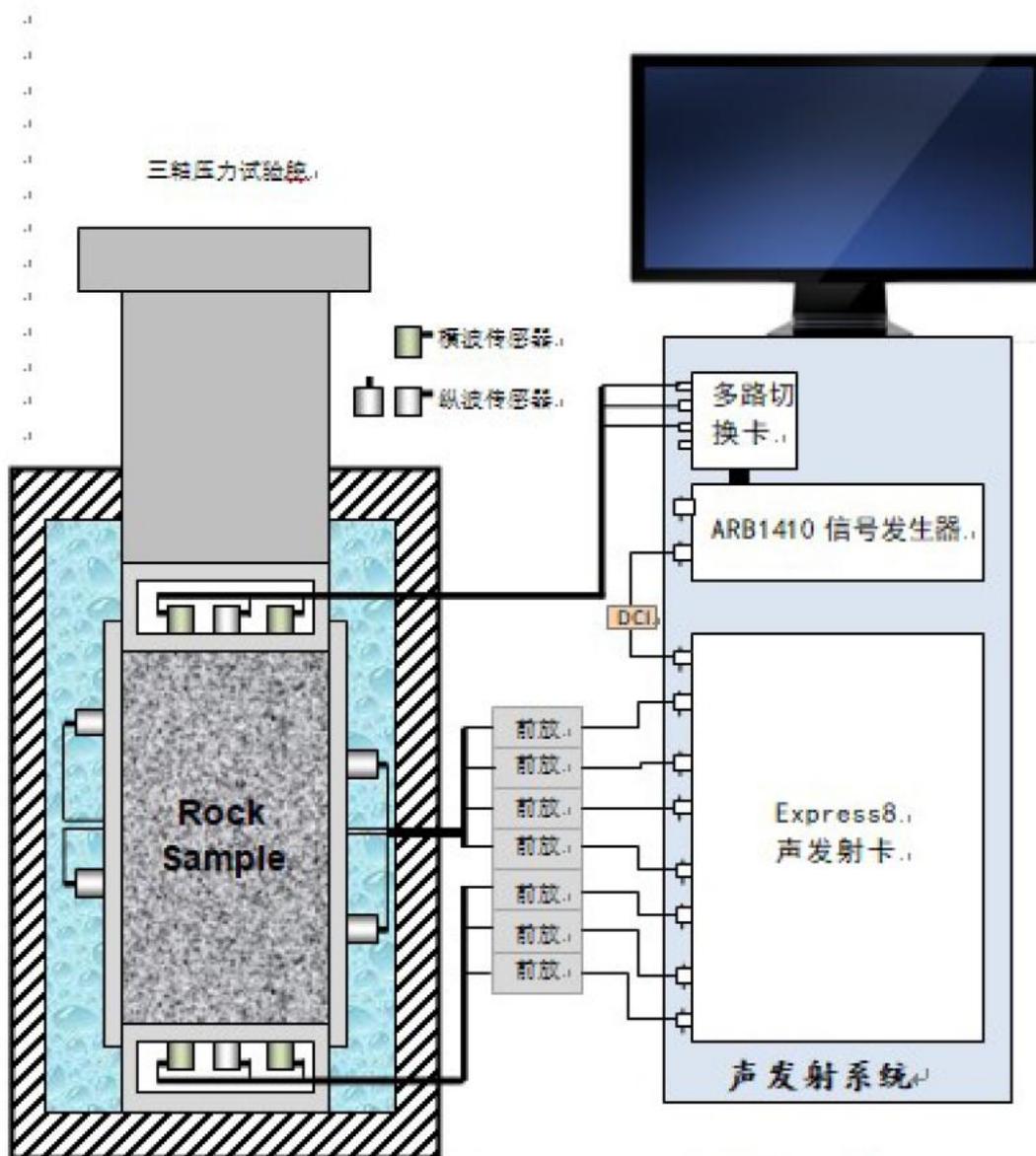


图 7 声波、声发射一体化系统的组成

以下是岩盐三轴测试时的实验结果。岩样尺寸直径 100mm，高度 200mm，围压 10MPa，加载方式为轴向应变控制，0.4mm/min。图 8 是纵横波波速、声发射信号量与轴向应变的关系；图 9 是加载时声发射事件定位图。

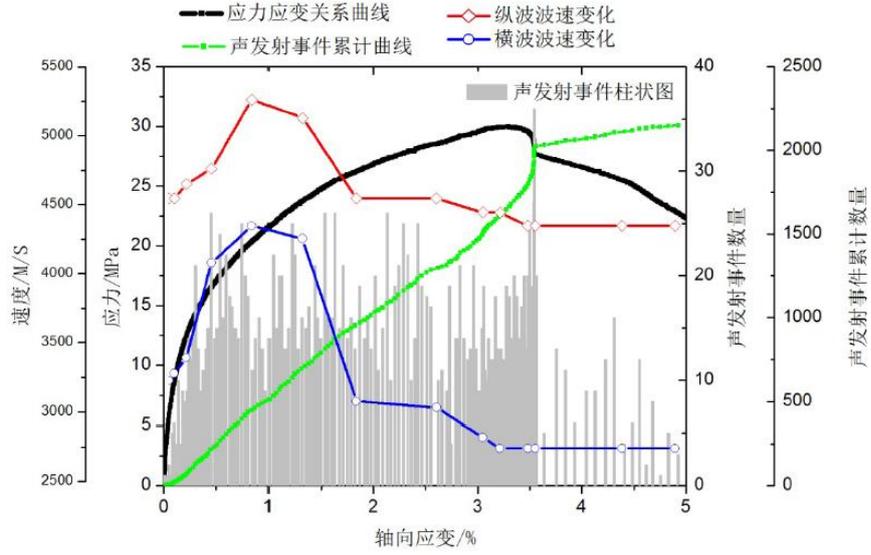


图 8

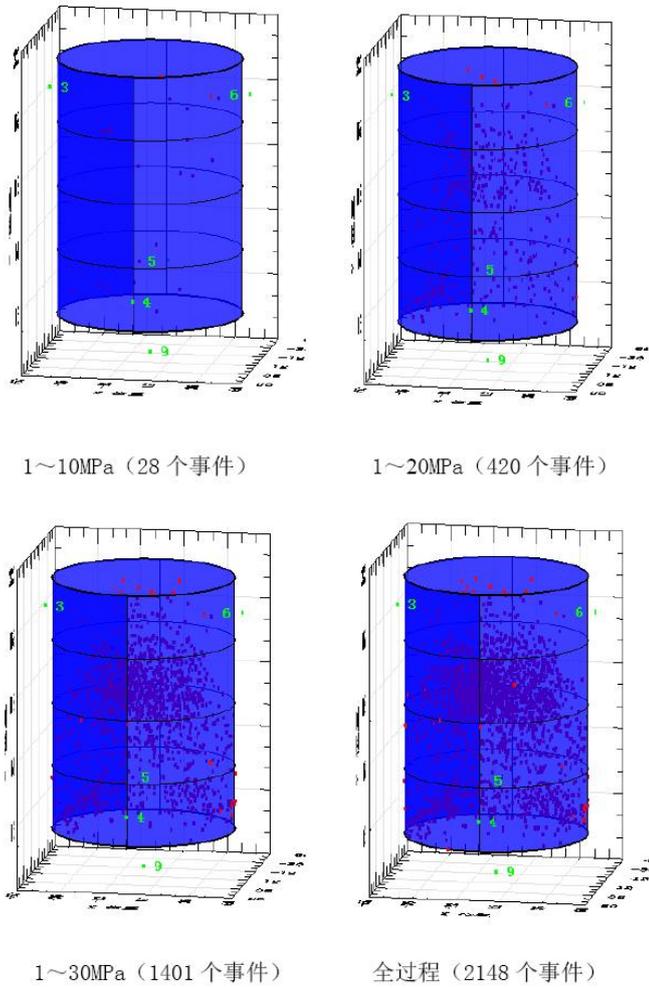


图 9

#### 4. 岩石在真三轴水压致裂过程的声发射监测

水力压裂模拟实验中，对水利裂缝的监测和识别是研究储层裂缝形态的基础。利用室内大尺寸真三轴水力压裂物理模拟装置对立方体页岩试样开展体积压裂实验，建立多通道声发射实验监测系统，采集实验过程中裂缝破裂时的声波信号，对裂缝缝网形成过程进行三维动态实时跟踪，可以明确水力裂缝起裂和裂缝扩展形态，再结合声发射计数曲线和泵压曲线可以实时监测水力裂缝不同扩展阶段，判别水力裂缝与天然裂缝相互贯通过程，为优化缝网压裂中的施工参数提供参考。

以下实验介绍的案例用到的岩样来自四川龙马溪组页岩储层中，尺寸为300x300x300mm，结合现场测试数据，采用相似准则模拟不同深度底层的压裂实验，采样模拟大排量压裂岩石至破裂，水力压裂实验采用的压裂液是现场所用的滑溜水压裂液体，包括降阻剂、破胶剂、杀菌剂和防水锁剂，其中添加少量跟踪剂。

实验采用的声发射设备是PAC公司的SAMOS声发射系统，探头型号是R6A。为保证探头和页岩紧密接触，在页岩试样与加载压力板之间放置预制孔眼的钢板，并在钢板上开有引线槽，如图10所示。



图 10 声发射探头布置

页岩储层网格裂缝扩展规模与天然裂缝发育特征、应力场、储层脆性和压裂施工参数等密切相关，实验结果显示，试样压裂后存在与最小水平地应力大致垂直的主裂缝，且在天然裂缝附件存在不同程度的扭曲和转向趋势。水力裂缝扩展形态为试样水力裂缝沟通天然裂缝后转向滑移，如图11所示。水力压裂泵曲线如图12所示，观察泵压曲线发现，页岩试样压裂过程中泵压在达到峰值压力前后曲线均会出线波动，这与水力裂缝是先压裂岩石本体还是压开天然裂缝等脆弱面相关。当压裂岩石本体后水力裂缝再贯通天然裂缝，泵压曲线会在达到峰值压力后出线压力波动现象，扩展过程中贯通的天然裂缝越多，压降曲线波形形态越复杂。

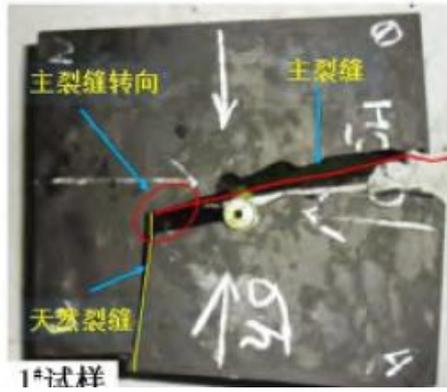


图 11 压裂后的页岩

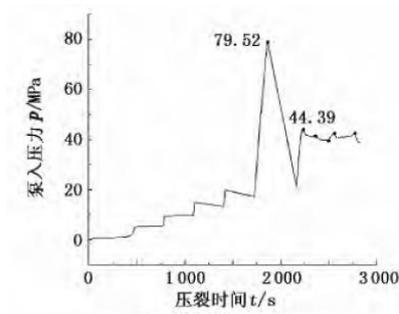


图 12 泵压曲线变化

结合声发射三维定位信息与试样压裂后跟踪剂分布形态，深入分析水力裂缝起裂扩展特征。声发射监测水力裂缝的结果如图 13 所示。主裂缝左侧扩展时遇到天然裂缝后直接沿着天然裂缝转向扩展，声发射定位点集中在主裂缝延伸方向，声发射事件密集，呈现窄椭圆条形带，表明在水力裂缝遭遇天然裂缝，发射转向扩展过程中，存在比较显著的摩擦、破坏，能量释放强烈。

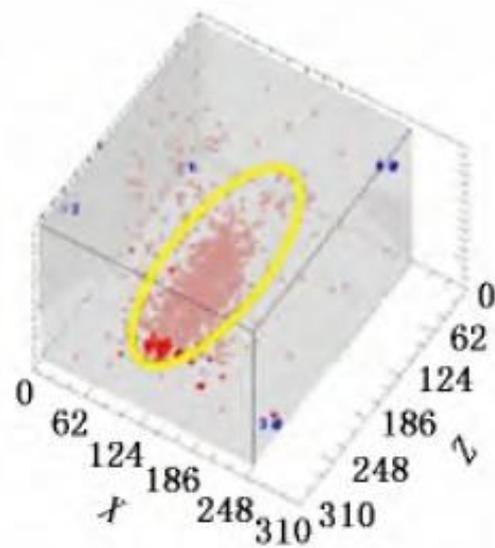


图 13

## 5. 岩石层析成像应用介绍

超声波速度结构反演-层析成像技术，是从医学中发展起来的一种崭新应用技术，其在地球内部科学研究中的应用，开始于 20 世纪 80 年代。由于地震层析成像震源和接收点分布的不均匀性，对地球内部采样也极不规则，在对局部区域进行研究不可能像医学 CT 那样得到全方位的采样，加之所依赖的地震波的实际路径并非直线，因此，地震层析成像需要用有限和不均匀的采样来重构地球内部的信息，所面临的问题要比医学方面复杂和困难的多。相比较而言，在实验室开展超声波层析成像观测要比野外的多。利用这个优势和实验室的实验条件，为研究岩石破裂过程中内部结构变化提供了一种高精度的手段。

根据超声波走时和衰减特征莫得岩石内部波速结构和品质因子的空间分布，最早的工作是德国地球物理学家在有机玻璃样品上完成的，由于当时超声采集器硬件条件限制，成像结果并不理想。最近几年，由于电子技术的飞速发展，高采样率的数据采集卡已经开发研制，多通道间时间精度都在纳秒级别，所以室内开展层析成像的工作多了起来，不论从观测方法还是成像质量都有了长足的进步。

以下介绍的案例用到的岩样是房山花岗岩，尺寸为 220x110x30mm，采用四面透射观测方法，在岩样四侧分布布置了 26 个探头，如图 14 所示。

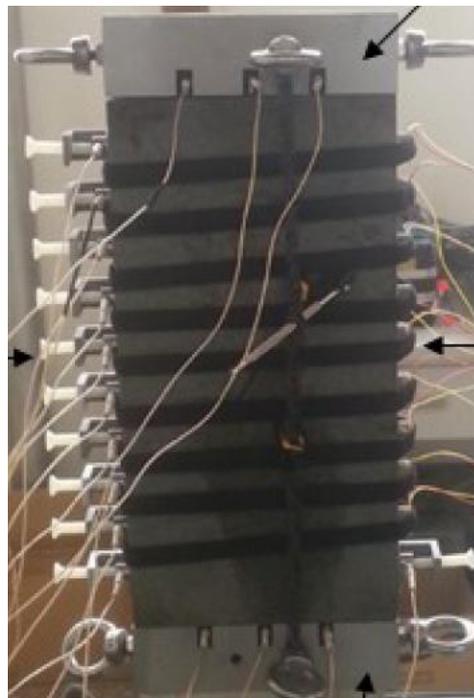


图 14 岩样及探头布置

层析成像网格剖分一半以射线密度和介质的非均匀程度为基础，在网格上赋以迭代速度初值，经过射线追踪后建立成像方程，采用 ART, DLSQR, SIRT 等算法求解方程，求取网格速度值并以图像形式输出。射线路径如图 15 所示

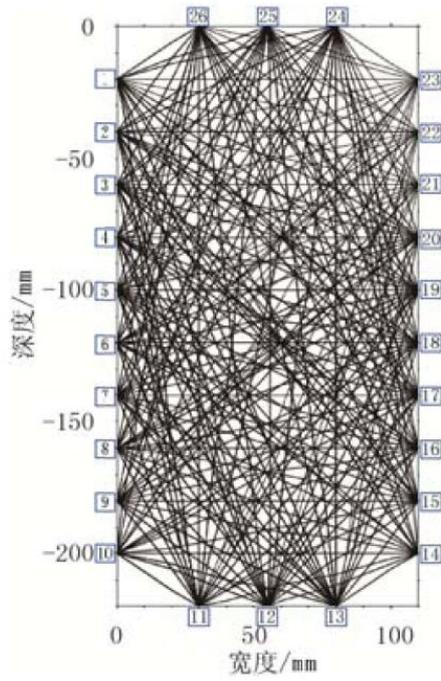


图 15 射线路径

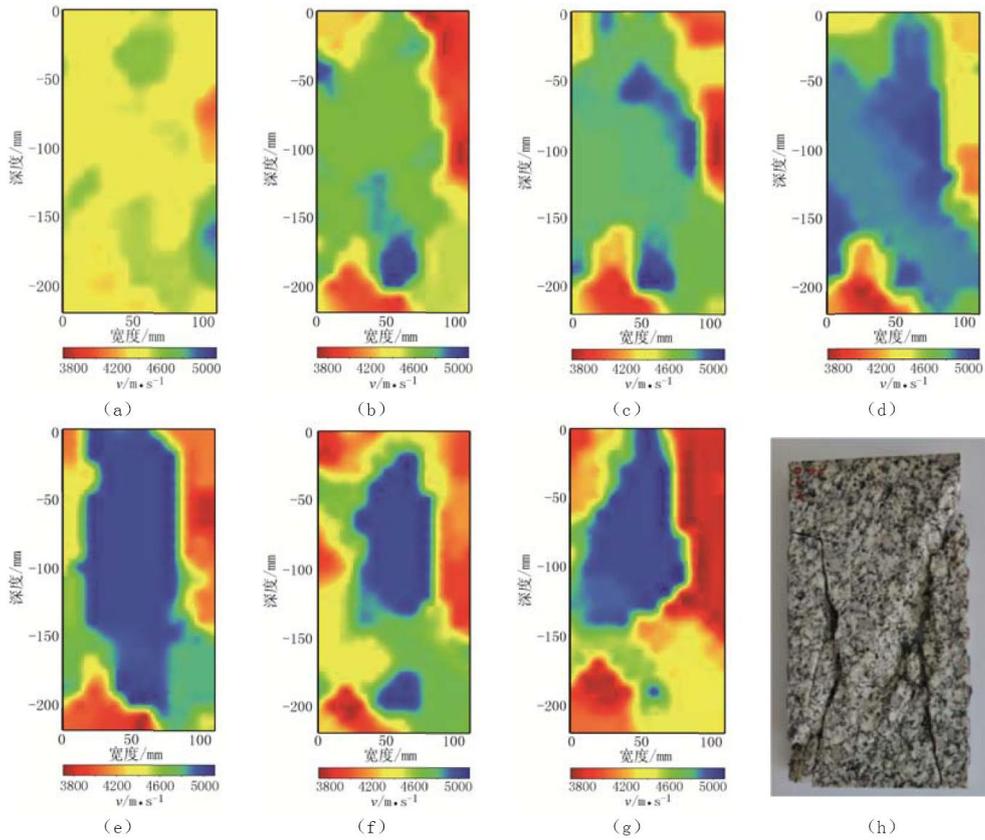


图 16 0/20/40/60/80/100/120MPa 应力时 P 波速度反演结果和岩样最终破裂后的图像