

DOI: 10.11779/CJGE2018S2021

# 含杂质盐岩三点弯曲变形破坏特征试验研究

李志成, 刘建锋\*, 邓朝福, 曾寅

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:** 为探究盐岩在弯曲条件下的变形破坏特征及其所受杂质含量的影响, 利用四川大学 MTS815 岩石力学综合试验系统, 对两组杂质含量不同盐岩单边直裂纹弯曲试样(SENb)进行了三点弯曲循环加卸载试验及全过程声发射同步监测。试验研究表明, 含杂卤石杂质盐岩弯曲抗拉强度和弯曲弹模均高于纯盐岩, 杂质盐岩抵抗裂纹扩展能力强于纯盐岩; 盐岩的弯曲变形破坏可分为弹性变形的弹性阶段、塑性变形和裂纹起裂的屈服阶段、峰后裂纹稳定扩展阶段、残余阶段四个阶段; 杂质对盐岩弯曲塑性变形与断裂破坏有很大影响。基于能量率的声发射特征参数能够较好反映盐岩弯曲条件下的变形破坏, 与其变形破坏过程各阶段相对应, 声发射具有阶段性特征, 除弹性段外其他各阶段声发射均活跃; 相比纯盐岩, 由于杂质造成的摩擦以及杂质对塑性变形的弱化, 杂质盐岩三点弯曲变形声发射更为活跃; 声发射源三维定位揭示了盐岩三点弯曲下的损伤分布, 其分布存在与应力状态有关的声发射空白区, 其分布形态受杂质影响。

**关键词:** 盐岩; 三点弯曲; 断裂韧性; 变形破坏; 声发射 (AE)

**中图分类号:** TU452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)S2-0101-06

**作者简介:** 李志成(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石力学方面的试验研究。E-mail: 1252740532@qq.com。

## Experimental study on deformation and failure characteristics of salt rock three-point-bending samples with impurities

LI Zhi-cheng, LIU Jian-feng, DENG Chao-fu, ZENG Yin

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In order to investigate the deformation and failure characteristics of salt rock under bending conditions and the influences of impurity content, the loading-and-unloading three-point-bending tests as well as the synchronous acoustic emissions (AE) monitoring are performed on two groups of salt rock single edged notched beam (SENb) samples with different impurity contents using the rock mechanics test system MTS815 in Sichuan University. The test results show that the bending tensile strength and the bending elastic modulus of the impure salt rock with polyhalite are higher than those of pure salt rock, and the impure salt rock is better to resist the crack propagation than the pure salt rock. And the deformation and failure process of the bending salt rock consists of four stages, elastic deformation stage, yield stage with plastic deformation and crack initiation, crack propagation stage at post-peak and residual stage. Moreover, the impurity has a great influence on the plastic deformation and fracture failure of the bending salt rock. By selecting energy count rate as the AE characteristic parameter, the deformation and failure of the bending salt rock can be well reflected. Corresponding to the process of deformation and failure, AE presents the periodical characteristics at different stages, and the AE activities are active at every stage except the elastic deformation stage. Compared to those of the pure salt rock, the AE activities of the impure salt rock are more active because of the friction effect and the plastic deformation weakening effect caused by impurities. What's more, the AE source location in three dimensions well reveals the damage distribution of salt rock under the three-point-bending condition. And in the distribution, there are AE blank are asrelated to the stress state. For the distribution, its form is greatly affected by the impurities.

**Key words:** salt rock; there-point bending; fracture toughness; deformation and failure; account emission

## 0 引言

盐岩因其良好的力学性能与极低的渗透性等优点在国际上被公认为战略油气储库、压气蓄能储库等地

**基金项目:** 四川省科技计划资助项目(2017JQ0003); 国家自然科学基金项目(51874202)

**收稿日期:** 2018-07-22

**\*通讯作者 (E-mail: liujf@scu.edu.cn)**

下能源储库最理想的围岩介质<sup>[1-2]</sup>。基于盐岩巨大的工程应用背景,深入研究探讨盐岩变形破坏的损伤与力学特性具有重大的工程意义。

对于盐岩变形破坏的损伤与力学特性,已有较多研究。杨春和等<sup>[3]</sup>对盐岩单轴循环加卸载条件下的变形特性进行了研究;姜德义等<sup>[4]</sup>研究了盐岩单轴压缩不同应变率条件下的变形和声发射特征;刘江等<sup>[5]</sup>对盐岩单轴压缩、三轴压缩及巴西劈裂试验条件下的短期强度和变形特征进行了研究;邓朝福等<sup>[6]</sup>对盐岩单轴循环加卸载条件下的变形和声发射进行了研究;李志成等<sup>[7]</sup>对盐岩三轴循环加卸载下的声发射特征进行了研究;刘建锋等<sup>[8]</sup>对盐岩直接拉伸和间接拉伸试验条件的变形与力学特性及声发射特征进行了研究。

需要指出的是,以上研究多是盐岩单轴与压缩、直接与间接拉伸应力状态下的,对于弯曲条件下盐岩测试已是少见,对于弯曲条件下盐岩变形破坏及声发射的研究就更为少见。可见的盐岩弯曲测试中,文献[9]用三点弯曲法测试了盐岩的断裂韧度,文献[10]用 SEM 从微观上观察层状岩盐三点弯曲下裂缝的萌生和扩展。相比盐岩极为少见的弯曲测试,很早已有大量关于玄武岩<sup>[11]</sup>、砂岩<sup>[12-13]</sup>、花岗岩等<sup>[14]</sup>岩石的弯曲测试。因此有必要对盐岩进行弯曲测试,并探究盐岩弯曲条件下变形破坏过程及其声发射特征。

本文采用典型断裂韧度测试中的三点弯曲方法对盐岩进行弯曲测试,并探究不同杂质含量的两种盐岩在弯曲条件下变形破坏全过程特征及其声发射特征。

## 1 试验方案

### 1.1 试样制备

考虑到国内盐岩杂质分布不均且多夹层等诸多因素均影响盐岩变形破坏过程,从而弱化杂质的影响,本试验盐岩试样取自国外某深部盐矿,致密均匀,呈浅红或深红。典型试样的 XRD 测试表:浅红色样主要成分为 NaCl (大于 99%) 为纯盐岩;深红色样除 NaCl 外,还有  $K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2CaSO_4 \cdot 2H_2O$  (即杂卤石,含量在 30% 内),为含杂质盐岩。两种盐岩干法车切加工成美国材料与测试协会 ASTM 所提单边直裂纹三点弯曲梁试样 (SENB),如图 1 所示,长度  $L$  平均为 210 mm,高度  $W$  平均为 50 mm,厚度  $B$  平均为 100 mm,初始裂纹长  $a_0$  平均为 15 mm,编号为 B-1 到 B-6,其中 B-1~3 为纯盐岩组 I, B-4~6 为杂质盐岩组 II。

### 1.2 试验方法

三点弯曲试验利用四川大学 MTS815 岩石力学试验系统进行加载,并利用美国物理声学公司产 PCI-II 声发射系统同步监测试样变形破坏过程中的声发射。

图 1 为试样三点弯曲加载图。试样对中放置于 3 点弯曲辊轴支座上,跨距  $S$  为 160 mm。CMOD 传感器内嵌于两附加刀口之间,用于测量缺口张开位移 CMOD (Crack Mouth Opening Displacement)。两个 LVDT (线性位移传感器) 固定在特制支架上,对称布置于试样两侧,用于测量加载点位移 LPD (Load Point Displacement)。8 个 Micro30 型声发射探头分布于切口两边,用以接收 AE 信号,工作频率为 150 kHz,阈值值设为 30 dB,前置放大器增益为 40 dB。

三点弯曲试验时在 MTS 控制台预先设置加、卸载程序,加卸载循环手动操作,加载为 CMOD 控制,峰前循环加载速率为 0.05 mm/min,考虑盐岩大变形特点,峰后循环加载速率为 0.15 mm/min,卸载为力控制,每一循环卸载速率均为 30 kN/min,卸载到 0.1 kN 时停止卸载并重新加载。试验至荷载降至峰值 10% 停止。

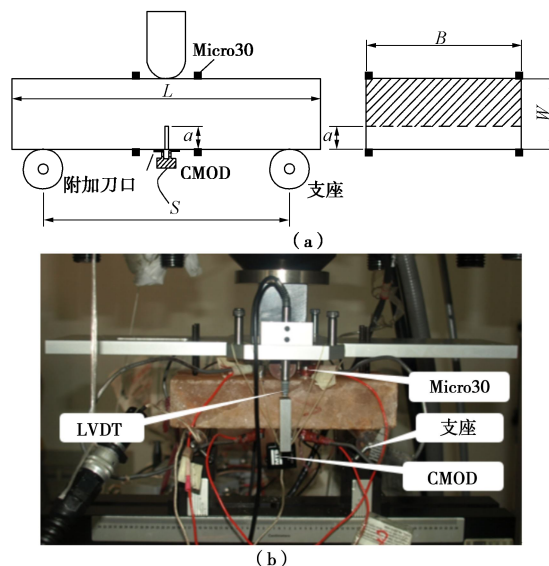


图 1 盐岩三点弯曲测试

Fig. 1 Three-point-bending tests on salt rock

## 2 试验结果分析

试验得到了两组盐岩三点弯曲变形破坏全过程荷载 ( $P$ ) 与变形 (CMOD、LPD) 变化过程及声发射演化。

### 2.1 强度特征

断裂韧度  $K$  是断裂力学里表征材料抵抗裂纹扩展能力的指标,但是现有的断裂韧性测试标准仍不成熟<sup>[15]</sup>。陈麓公式能够适于非标准缝高比  $a/W$  和跨高比  $m=S/W$  的断裂韧度计算<sup>[16]</sup>:

$$K_I B W^{3/2} / M_f = f_{pb}(a/W) - 4\phi(a/W)/m, \quad (1)$$

$$M_f = P_f S / 4, \quad (2)$$

式中,  $f_{pb}(a/W)$ ,  $\phi(a/W)$  为  $a/W$  的函数,  $P_f$  为开裂荷载。

断裂韧度的确定,关键在于确定开裂荷载  $P_f$ 。考虑裂纹尖端开裂过程区, Hillerborg 等提出黏性裂纹模

型, 认为开裂区仍然可传递应力且大小随裂纹宽度增大而减小。因此, 当裂纹开始扩展时, P-CMOD 曲线将由线性段转为非线性段, 则可确定开裂荷载  $P_f^{[13]}$ 。

按照材料力学理论, 假定截面应力线弹性分布, 可按矩形梁计算跨中位置的抗拉强度和弹性模量<sup>[12]</sup>:

$$\sigma_{t\max} = \frac{M}{W_z} = \frac{3P_{\max}S}{2B(W-a_0)^2} \quad , \quad (3)$$

$$E = \frac{P_f S^3}{48I\Delta} = \frac{P_f S^3}{4B(W-a_0)^3\Delta} \quad , \quad (4)$$

式中,  $P_{\max}$  为峰值荷载,  $\Delta$  即 LPD。

从数值上看, 盐岩三点弯条件下的抗拉强度与文献[8]间接拉伸抗拉强度相近, 弹模与文献[3]单轴加卸载下变形模量相近, 而断裂韧度远小于文献[14]中花岗岩断裂韧度一个量级。分析表 1, 发现弯曲条件下杂质盐岩的抗拉强度、弹模、断裂韧度均大于纯盐岩, 这说明杂质杂卤石提高了盐岩的抗拉强度以及弹性模量, 增强了盐岩抵抗裂纹扩展的能力, 原因可能是杂卤石强度高于 NaCl 且与 NaCl 晶体胶结强度较高。

表 1 两组盐岩计算结果比较

Table 1 Comparison of calculated results of two groups of salt rock

组	编号	$P_f$ /N	$P_{\max}$ /N	$\sigma_{t\max}$ /MPa	$E$ /GPa	$K_I$ /(MPa·m <sup>0.5</sup> )
I 纯	B-1	385.1	974.3	2.35	24.99	0.099
	B-2	587.6	1208.7	2.62	24.42	0.140
	B-3	697.6	1202.9	2.73	26.41	0.169
	均值	—	—	2.57	25.27	0.136
II 杂	B-4	949.3	1574.7	3.89	30.67	0.247
	B-5	964.1	1527.8	3.82	34.45	0.251
	B-6	702.3	1082.1	3.84	36.16	0.250
	均值	—	—	3.85	33.76	0.249

2.2 变形特征

本文以两组试样中典型试样 B-3 (纯盐岩) 和 B-6 (杂质盐岩) 为例探讨盐岩三点弯曲变形特性。

CMOD 和 LPD 这两种变形均能反映试样 3 点弯曲过程中变形特性, 考察两者关系, 如图 2 所示, 发现两者具有非常高的线性相关性, 这与文献[17]试验所得两者线性特征相一致, 这说明盐岩三点弯曲也是符合刚性转动假设的<sup>[18]</sup>。因此, 下面重点以 CMOD 为主探讨盐岩弯曲变形特征, 如图 3 所示。

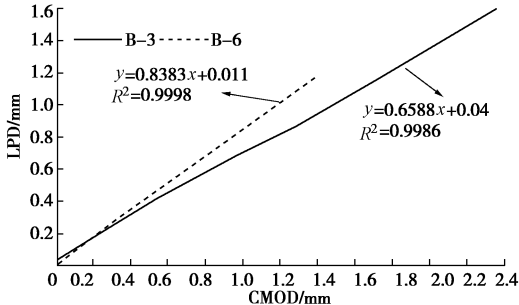


图 2 LPD 和 CMOD 的相关性

Fig. 2 Correlation between LPD and CMOD

三点弯曲条件下, 与盐岩单轴加卸载类似, 盐岩

表现出明显的记忆效应, P-CMOD 曲线外包络线反映了盐岩的弯曲变形特性, 变形可分为下述 4 个阶段。

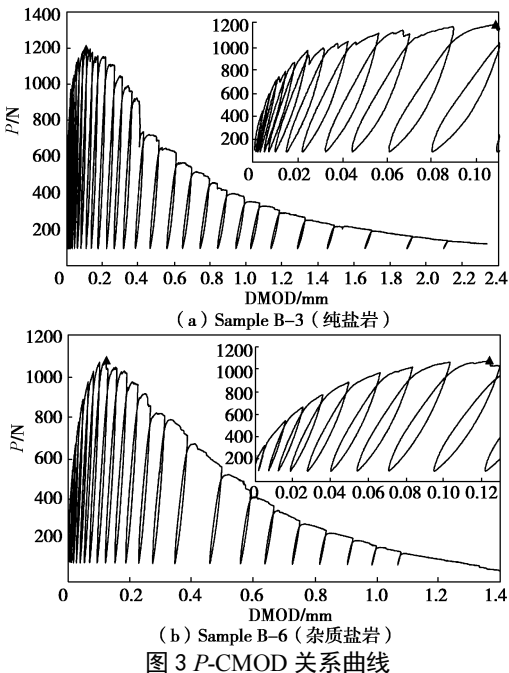


图 3 P-CMOD 关系曲线

Fig. 3 Relationship between load P and CMOD

加载初期的弹性变形阶段。弹性阶段, 韧带内应力线弹性分布, 裂纹尖端为拉应力分布且小于屈服应力; 试样弯曲产生的挠度变形和缺口变形是可恢复弹性变形。以再加载线初次发生偏折为界, 在此之前各循环中, 加载线、卸载线和再加载线(下一循环的加载线)均呈直线; 即使在弹性段卸载线也并未沿加载线卸载, 原因是材料在加载时微裂纹的压密在卸载时未及时张开; 再加载线和卸载线几乎重合, 表明弹性阶段加卸载对材料损伤很小。曲线外包络线呈直线且正的斜率最大, 表明此阶段模量为全过程的最大值。与盐岩单轴压缩类似, 盐岩三点弯曲过程弹性阶段也是较短且变形量很小, 约占峰值荷载所对应变形的 15%。

塑性变形和裂纹起裂的屈服阶段。再加载线偏折后, 尖端屈服, 微裂纹开始产生, 曲线外包络线变缓, 应变软化, 塑性变形加快。卸载线主要为直线段, 卸载线末端非线性化随循环级数增大而愈加明显, 这一现象与盐岩单轴加卸载类似<sup>[3]</sup>, 卸载线末端类似于压密的逆过程。相比加载线, 卸载线产生了明显的滞后, 且随循环级数增大而增大, 表明产生了明显的越来越大的塑性变形。卸载曲线与再加载曲线不再重合, 再加载线偏折前区段斜率明显低于卸载线, 表明该阶段加卸载损伤较大导致盐岩软化。与弹性阶段相比, 此阶段变形量要大得多, 变形除结构弹性变形外还有塑性变形以及微裂纹引起的变形, 但由于微裂纹张开量很小故其引起的变形很小, 每一级循环中塑性变形占比随循环级数而增大。B-6 相比 B-3 曲线更为平滑, 原因在于伺服控制下的 B-3 变形速率快于控制速率而

受到短暂卸载从而出现若干小幅应力降,这说明快速变形的塑性阶段,纯盐岩比含杂质盐岩变形更快。然而,由于纯盐岩较杂质盐岩断裂韧度更低,纯盐岩峰前变形略小于杂质盐岩。

荷载峰值后的裂纹稳定扩展阶段。峰值点处韧带下部达到拉应变极限从而裂纹产生并扩展。这一阶段,变形主要由裂纹扩展导致。该阶段,裂纹稳定扩展,试样承载力随变形沿斜直线下降,P-CMOD 外包线表现为近似直线。纯盐岩 B-3 几乎每一级循环均有应力降,而杂质盐岩 B-6 较少出现,另外,纯盐岩 B-3 承载力下降约 2/3 而变形约 0.7 mm,而杂质盐岩 B-6 下降约 1/2 而变形约 0.5 mm,原因是纯盐岩较杂质盐岩变形速率更快变形更大且抵抗裂纹扩展的能力更弱。

塑性变形为主而裂纹扩展减速的残余阶段。裂纹稳定扩展阶段后期,曲线外包络线偏离直线而逐渐变缓。原因是裂纹扩展至接近断面上表面时,由于跨中上表面两边(厚度方向)处于二维的平面应力状态,裂纹尖端产生更大的屈服区域,从而裂纹扩展受阻减缓。由于表层平面应力区对裂纹扩展的阻碍作用,残余阶段试样仍有一定的承载力,即使到试验结束跨中并未完全断裂开来。就残余阶段来看,纯盐岩 B-3 相比杂质盐岩 B-6 变形更大,分别达 1.6 和 0.8。考察各循环,发现变形中以塑性变形为主。由于上一阶段裂纹大量扩展加之残余阶段塑性区更大,这一阶段 CMOD 变形远前几阶段变形之和。

### 2.3 声发射特征

声发射是岩石变形破坏的伴生现象,其包含了岩石变形破坏的丰富信息。考虑岩石破坏的能量本质,本文选取能量计数为特征参数来探究两种不同杂质含量盐岩三点弯曲变形破坏过程基于声发射的损伤特征。

对于纯盐岩和杂质盐岩,与变形破坏各阶段对应,声发射能量计数具有不同阶段性特征,见图 4, 5。

弹性阶段,纯盐岩能量计数率曲线突发型信号稀疏且计数率很低,而能量计数累计曲线几乎水平,表明弹性阶段声发射极少,说明三点弯曲弹性变形过程盐岩几乎没有损伤。相比纯盐岩,杂质盐岩声发射相对更为活跃,原因在于杂质导致的颗粒摩擦。

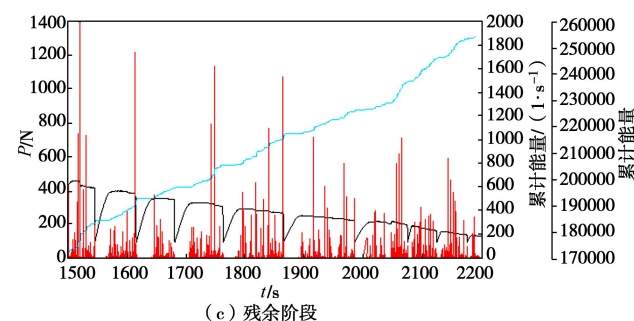
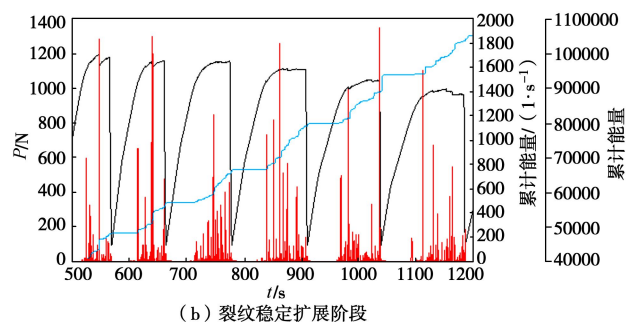
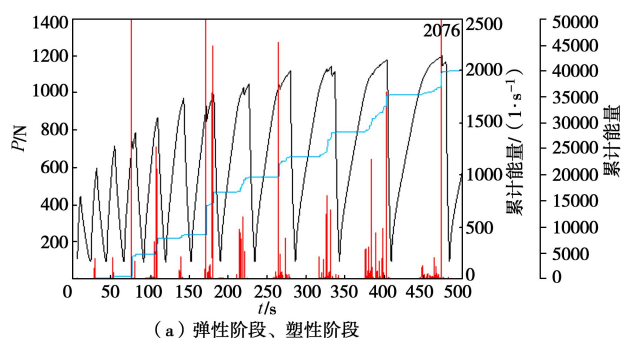


图 4 纯盐岩(B-3)力、能量率、累计能量计数变化图

Fig. 4 Variation of load  $P$ , energy rate and accumulative energy count for pure salt rock sample B-3

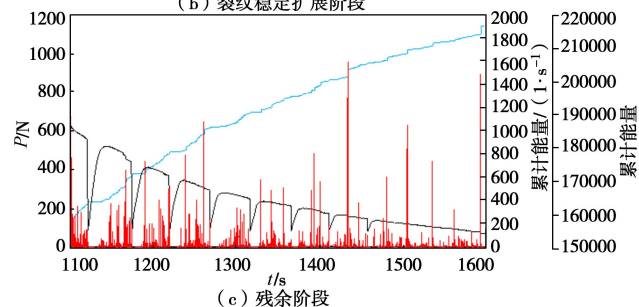
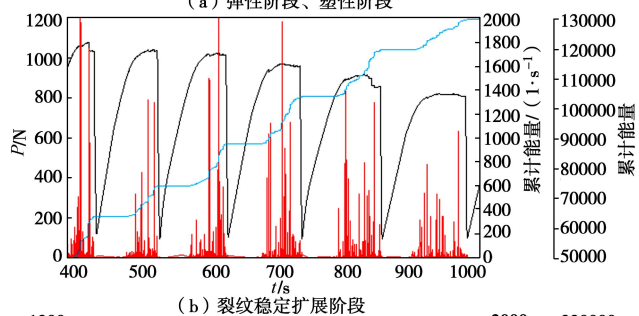
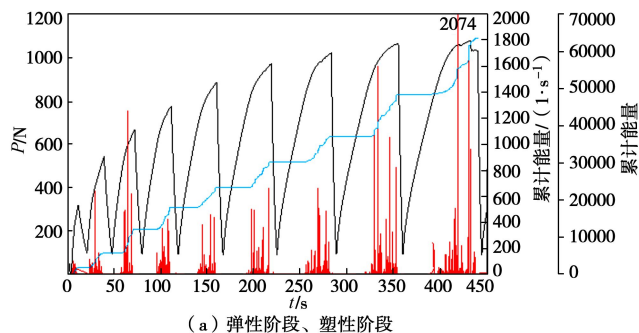


图 5 杂质盐岩(B-6)力、能量率、累计能量计数变化图

Fig. 5 Variation of load  $P$ , energy rate and accumulative energy count for impure salt rock sample B-6

进入塑性阶段,相比弹性阶段声发射要显著活跃,表现为能量计数率曲线突发型信号显著增多,累计能



量计数曲线出现多个上升台阶。对于纯盐岩, 台阶为直台阶, 原因在于塑性阶段塑性变形的大量产生与裂纹的起裂及 CMOD 变形伺服控制, 前者导致突发型信号多但能量率较低, 后者导致的突发型信号能率较高 (大于  $10^3$  次/s) 但差异性大。对于杂质盐岩, 台阶为斜台阶, 原因在于变形相比纯盐岩要慢, 而少量高能量率突发型信号主要为裂纹起裂所致。

峰值过后的裂纹稳定扩展阶段, 声发射仍然活跃, 突发型信号更多, 但其中高能量率信号能量率有所降低, 因而能量计数累计曲线上为斜台阶但台阶更高, 另一方面, 裂纹稳定扩展阶段, 各循环内能量率最高的信号能量率差异性较小, 表明裂纹稳定扩展过程能量释放相对稳定。相比纯盐岩, 该阶段杂质盐岩无论台阶高度还是各循环内最大能量率信号基本都更高, 可以推断杂质盐岩裂纹扩展穿晶而纯盐岩沿晶断裂, 这与前述杂质强度更高推断以及杂质盐岩断裂韧度计算结果更高是相一致的。

进入残余阶段, 承载力已经很低, 使得加载线上升段和卸载段占比较小, 几乎整个残余阶段声发射频繁。该阶段, 较高能量率 (大于  $10^3$  次/s) 信号已经很少但较低能量率的信号基本稳定, 这表明残余阶段裂纹扩展减慢而塑性变形大致稳定。与塑性阶段和裂纹稳定扩展阶段不同, 残余阶段累计能量曲线台阶已不明显。至结束时, 显然纯盐岩累计能量计数要高于杂质盐岩, 原因在于纯盐岩塑性更强变形量更大时间更久, 但从平均能量率 (能量计数总数/总时间) 来看, 杂质盐岩要更高, 反映出杂质盐岩三点弯曲变形声发射更为活跃。

变形破坏全过程来看, 盐岩三点弯曲变形各阶段除弹性段外声发射均活跃, 但特点不同: 塑性段在塑性变形速率较快和裂纹起裂时能量率很高但差异性大; 裂纹扩展阶段裂纹的扩展使得较高能量率信号能量率差异性小; 残余阶段受平面应力区阻碍, 裂纹扩展减慢, 塑性变形大且快, 高能量率信号能量率逐渐降低而低能量率信号基本稳定。相对于纯盐岩, 杂质盐岩弯曲变形声发射更为活跃, 但是具体到各阶段又有所差异: 弹性段由于杂质存在造成变形过程中的摩擦; 塑性阶段由于纯盐岩快速的塑性变形高能率突发型信号要多要强; 而裂纹稳定扩展阶段, 可能是杂质盐岩穿晶断裂而纯盐岩沿晶断裂因而杂质盐岩高能率突发型信号要强; 而残余阶段在于杂质弱化了盐岩的变形。

图 6 为声发射空间分布图, 从跨度分布看, B-3 集中分布在  $-30 \sim 30$  范围, 而 B-6 集中分布于  $-15 \sim 15$  范围, 这说明纯盐岩声发射源集中分布区要大于杂质盐岩, 原因在于纯盐岩裂纹扩展时塑性区更大, 可能

存在较多的亚裂纹扩展, 而杂质盐岩由于杂质弱化了塑性变形能力提高了脆性程度因而裂纹扩展更加平顺且塑性区更小。杂质盐岩在较广范围有声发射分布原因在于摩擦更为强烈。从断面分布看, 韧带上部两角存在声发射空白区, 正是上文所说的平面应力区。

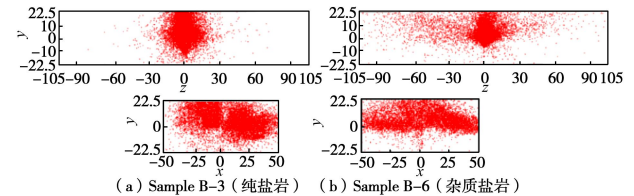


图 6 典型试样 B-3 与 B-6 声发射源定位图

Fig. 6 AE source location of typical samples B-3 and B-6

### 3 结 论

(1) 杂质杂卤石提高了盐岩的抗拉强度以及弹性模量, 增强了盐岩抵抗裂纹扩展的能力。

(2) 盐岩的弯曲变形破坏可分为弹性变形的弹性阶段、塑性变形和裂纹起裂的屈服阶段、峰后裂纹稳定扩展阶段、残余阶段 4 个阶段。杂质对盐岩弯曲塑性变形与断裂破坏有很大影响。

(3) 基于能量率的声发射特征参数能够较好反映盐岩三点弯曲下的变形破坏, 除弹性段外其他各阶段声发射均活跃, 声发射特征与其变形破坏过程相对应。

(4) 杂质盐岩三点弯曲变形声发射更活跃, 原因在于杂质造成的摩擦以及杂质弱化了试样的塑性变形。

(5) 声发射三维定位揭示了盐岩三点弯曲下的损伤分布, 其分布存在与应力状态有关的声发射空白区, 其分布形态因杂质影响而有所差异。

### 参考文献:

- [1] 杨春和, 梁卫国, 魏东吼, 等. 中国盐岩能源地下储存可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(24): 4409 - 4417. (YANG Chun-he, LIANG Wei-guo, WEI Dong-hou, et al. Investigation on possibility of energy storage in salt rock in china[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(24): 4409 - 4417. (in Chinese))
- [2] 徐新桥, 杨春和, 李银平. 国外压缩空气蓄能发电技术及其在湖北应用的可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(增刊 2): 3987 - 3992. (XU Xin-qiao, YANG Chun-he, LI Yin-ping. Review on compressed air energy storage abroad and its feasibility application to Hubei province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(S2): 3987 - 3992. (in Chinese))
- [3] 杨春和, 马洪岭, 刘建锋. 循环加、卸载下盐岩变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009(12): 3562 - 3568. (YANG

- Chun-he, MA Hong-ling, LIU Jian-feng. Study of deformation of rock salt under cycling loading and unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009(12): 3562 - 3568. (in Chinese))
- [4] 姜德义, 陈 结, 任 松, 等. 盐岩单轴应变率效应与声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012(2): 326 - 336. (JIANG Deyi, CHEN Jie, REN Song, et al. Experimental study of strain rate effect and acoustic emission characteristics of salt rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012(2): 326 - 336. (in Chinese))
- [5] 刘 江, 杨春和, 吴 文, 等. 盐岩短期强度和变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(增刊 1): 3104 - 3109. (LIU Jiang, YANG Chun-he, WU Wen, et al. Experiment study on short-term strength and deformation properties of rock salts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(S1): 3104 - 3109. (in Chinese))
- [6] 邓朝福, 刘建锋, 徐慧宁, 等. 单轴加卸载条件下岩盐变形过程能量和声发射特征研究[J]. 工程科学与技术, 2017(增刊 2): 150 - 156. (DENG Chao-fu, LIU Jian-feng, XU Hui-ning, et al. Study on the energy and acoustic emission characteristics of rock salt under uniaxial loading and unloading conditions[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017(S2): 150 - 156. (in Chinese))
- [7] 李志成, 刘建锋, 边 宇, 等. 三轴循环加卸载过程中盐岩声发射演化特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017(6): 1566 - 1572. (LI Zhi-cheng, LIU Jian-feng, BIAN Yu, et al. Characteristic analysis on rock salt account emission evaluation in the triaxial loading and unloading process[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017(6): 1566 - 1572. (in Chinese))
- [8] 刘建锋, 徐 进, 杨春和, 等. 盐岩拉伸破坏力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011(4): 580 - 586. (LIU Jian-feng, XU Jin, YANG Chun-he, et al. Mechanical characteristics of tensile failure of salt rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011(4): 580 - 586. (in Chinese))
- [9] 卢国胜, 陈 健, 张家达. 三点弯曲法测定岩盐的断裂韧度[J]. 四川冶金, 1998(2): 10 - 12. (LU Guo-sheng, CHEN Jian, ZHANG Jia-da. Determination of fracture toughness of rock salt by three-point bending method[J]. Sichuan Metallurgy, 1998(2): 10 - 12. (in Chinese))
- [10] DING Jing-yang, LIU Jia-dun, LI Chao, et al. Failure mechanism of layered salt rock in three-point bending test[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 12(256-259): 48 - 56.
- [11] 黄建安, 王思敬. 岩石断裂韧性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1982(2): 67 - 75. (HUANG Jian-an, WANG Si-jing. Experimental study of the fracture toughness of rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982(2): 67 - 75. (in Chinese))
- [12] 左建平, 周宏伟, 刘瑜杰. 不同温度下砂岩三点弯曲破坏的特征参量研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010(4): 705 - 712. (ZUO Jian-ping, ZHOU Hong-wei, LIU Yu-jie. Research on characteristic parameters of sandstone three-point bending failure under different temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010(4): 705 - 712. (in Chinese))
- [13] 张 君, 刘 骞. 基于三点弯曲实验的混凝土抗拉软化关系的求解方法[J]. 硅酸盐学报, 2007(3): 268 - 274. (ZHANG Jun, LIU Qian. A method to solve tension softening relationship of concrete from the three-point bending test[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2007(3): 268 - 274. (in Chinese))
- [14] 邓朝福, 刘建锋, 陈 亮, 等. 不同含水状态花岗岩断裂力学行为及声发射特征[J]. 岩土工程学报, 2017(8): 1538 - 1544. (DENG Chao-fu, LIU Jian-feng, CHEN Liang, et al. Mechanical behaviors and acoustic emission characteristics of fracture of granite under different moisture conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017(8): 1538 - 1544. (in Chinese))
- [15] 嵇 醒. 断裂力学判据的评述[J]. 力学学报, 2016, 48(4): 741 - 753. (JI Xing. A critical review on criteria of fracture mechanics[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(4): 741 - 753. (in Chinese))
- [16] 冶金工业部钢铁研究院断裂力学组. 单边裂纹梁横向力弯曲下的  $K_I$  和  $K_{II}$ [J]. 力学学报, 1977, 13(4): 308 - 313. (Fracture Mechanics Group Of Iron and Steel Research Institute.  $K_I$  and  $K_{II}$  of the single notched bending beam[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 1977, 13(4): 308 - 313. (in Chinese))
- [17] BARR B I G, LEE M M, de Place Hansen E J, et al. Round-robin analysis of the RILEM TC 162-TDF beam-bending test: Part 2—Approximation of  $\delta$  from the CMOD response[J]. Materials and Structures, 2003, 36(9): 621 - 630.
- [18] 尹双增. 断裂损伤理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992. (YIN Shuang-zeng. Fracture and damage theories and their application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992. (in Chinese))