

DOI: 10.11779/CJGE201810004

# 砂岩裂纹起裂损伤强度及脆性参数演化试验研究

刘泉声<sup>1, 2</sup>, 魏 莱<sup>1, 3</sup>, 雷广峰<sup>1, 3</sup>, 刘 琪<sup>2</sup>, 彭星新<sup>1, 3</sup>, 刘 鹤<sup>1, 3</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩石力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉大学岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 岩石起裂强度  $\sigma_{ci}$  及损伤强度  $\sigma_{ed}$  作为岩石重要的强度特征值, 其研究对于分析岩石的渐进破坏过程及预测隧洞脆性破坏有着重要意义。首先采用应变分析及声发射监测方法, 研究了两组硬质砂岩试样在单轴及三轴压缩过程中的裂纹演化特征。试验结果表明, 试样的侧向膨胀变形及声发射计数值可以较好地反映其内部的裂纹演化情况, 二者随着裂纹的萌生积累都表现出一致的阶段性变化规律。同时通过进一步分析应变及声发射曲线中的阶段性变化拐点, 确定了砂岩试样的起裂强度及损伤强度值。其中青砂岩平均起裂强度约为其峰值强度的 0.42 倍, 红砂岩平均起裂强度则约为其峰值强度的 0.48 倍。最后通过对比不同围压下的试验结果, 发现两组砂岩试样起裂阶段内摩擦角均小于其峰值阶段, 初始  $\varphi_0$  约为终值的 1/2。由此定义了可反映岩石脆性程度的起裂摩擦水平  $\varphi_0/\varphi$ , 并建立考虑摩擦作用的线性起裂准则。

**关键词:** 岩石力学; 裂纹演化; 裂纹起裂; 脆性参数; 声发射

**中图分类号:** TU45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2018)10-1782-08

**作者简介:** 刘泉声(1962-), 男, 博士, 1983年毕业于山东矿业学院矿山建设专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn。

## Experimental study on damage strength of crack initiation and evaluation of brittle parameters of sandstone

LIU Quan-sheng<sup>1, 2</sup>, WEI Lai<sup>1, 3</sup>, LEI Guang-feng<sup>1, 3</sup>, LIU Qi<sup>2</sup>, PENG Xing-xin<sup>1, 3</sup>, LIU He<sup>1, 3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory of Safety for Geotechnical and Structural Engineering of Hubei Province, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The strengths of crack initiation and damage are the important stress thresholds for their significance in analyzing the progressive failure process of rock, which can be applied in the prediction of brittle failure in tunnels. Firstly, the uniaxial and triaxial compression tests are conducted on two sets of hard sandstones, while their strain and acoustic emission (AE) characteristics are analyzed to study the evolution process of crack. The measured lateral dilation strains and the AE counts of rock samples can characterize their crack accumulation accurately according to the test results. And also, there is a consistent segmented transformation law in these two figures as the inner micro-cracks are accumulated. Thus the strengths of crack initiation and damage of the sandstone samples can be determined based on a detailed analysis on stage boundaries of the above curves. The average strength of crack initiation of green sandstone samples is 0.42 of its peak strength, while that of red sandstone samples is 0.48 of its peak strength. Furthermore the confinement influence on evolution process of crack is discussed by comparing different test results under varying confinements. It is found that the initial internal friction angle ( $\varphi_0$ ) of sandstone samples at the crack initiation stage is less than its ultimate value ( $\varphi$ ) when the peak load is applied. And the calculated initial  $\varphi_0$  is about 1/2 of the ultimate  $\varphi$ . As a result, the initial internal friction level  $\varphi_0/\varphi$  of rock is defined, which has an inverse relation with the ratio of uniaxial compressive strength to tensile strength  $\sigma_c/\sigma_t$ , and it can also reflect the brittleness of rock. And the linear strength threshold of crack initiation is established, while the slope of curve represents the influence of friction effects.

**Key words:** rock mechanics; crack evaluation; crack initiation; brittle parameter; acoustic emission

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2014CB046904, 2015CB058102); 国家自然科学基金青年基金项目(41602324)

**收稿日期:** 2017-08-05



## 0 引言

深埋隧洞由于所处高地应力等复杂赋存条件, 在其开挖过程中频发围岩脆性失稳破坏。这一过程中岩石内部伴随着裂纹的起裂萌生将发生应力集中, 并产生进一步局部断裂。同时颗粒间的黏聚力也将随裂纹的演化而迅速降低, 从而导致其宏观强度的脆性跌落。因此有必要充分研究岩石内部裂纹演化对其强度及变形性质的影响。根据岩石破坏过程中的裂纹扩展演化状态, 可以确定几个重要强度特征值, 即裂纹闭合强度  $\sigma_{cc}$ 、起裂强度  $\sigma_{ci}$  及损伤强度  $\sigma_{cd}$ 。其中裂纹起裂强度  $\sigma_{ci}$  表征着岩石内部微裂纹萌生起裂的开始; 损伤强度  $\sigma_{cd}$  则表征着岩石剪胀的开始, 此时裂纹逐渐扩展连通。

国内外许多学者都对以上岩石强度特征值进行了深入研究, 如 Martin 等<sup>[1-2]</sup>通过对 Lac Du Bonnet 花岗岩的试验分析, 发现岩石起裂强度  $\sigma_{ci}$  约为其单轴抗压强度的 0.4~0.5 倍, 并认为可利用  $\sigma_{ci}$  来预测隧洞围岩的脆性板裂破坏; Diederichs<sup>[3]</sup>也研究了岩石各强度阈值, 其中损伤强度  $\sigma_{cd}$  约为单轴抗压强度的 0.7~0.8 倍, 同时因  $\sigma_{cd}$  的取值受加载条件的影响较小, 可作为现场岩体长期强度的上限值; 候文诗等<sup>[4]</sup>认为可利用扩容起始点即损伤强度来预测岩石的长期抗压强度, 得出长期强度约为峰值强度的 70%; Nicksiar 等<sup>[5]</sup>则总结了多种基于岩石应变分析的起裂及损伤强度试验测试方法, 并提出了侧向应变差 (lateral strain response) 方法; 周辉等<sup>[6]</sup>通过分析单轴条件下硬岩声发射特征, 发现花岗岩在起裂阶段伴随着声发射撞击数的显著增加, 而在大理岩中撞击数的增加则出现在岩石起裂与损伤阶段之间; 刘泉声等<sup>[7]</sup>则利用花岗岩裂纹体积应变曲线结合线性回归技术确定多种围压下的起裂及损伤强度; 刘宁等<sup>[8]</sup>也利用裂纹体积应变方法对锦屏大理岩进行了起裂测试, 并利用起裂试验结果分析了深埋隧洞围岩损伤区应力状态; 彭俊等<sup>[9]</sup>则研究了不同水压下的岩石强度特征值, 试验中随围压升高起裂及损伤强度均逐渐增大, 而当两端水压增加其  $\sigma_{ci}$  逐渐增大,  $\sigma_{cd}$  则逐渐减小。

而在不同的裂纹演化阶段, 由于岩石细观结构不断变化, 其力学参数也必然随之不断调整。Hajiabdolmajid 等<sup>[10]</sup>认为岩石黏聚力  $c$  及内摩擦角  $\varphi$  并不是始终保持定值, 而是随着其微裂纹的积累而逐步演化, 并据此建立了针对隧洞围岩脆性破坏的 CWFS (黏聚力弱化-摩擦强化) 模型。卢兴利<sup>[11]</sup>等也通过砂岩卸荷试验得到了其扩容过程中力学参数的损伤劣化过程, 并提出了相应岩石损伤扩容模型。

砂岩作为典型脆性岩石, 岩性较为坚硬, 且在应力作用下张性裂隙发育, 易发生上述脆性破坏。本文将针对两组不同硬质砂岩试样, 利用应变分析及声发射方法测定其起裂强度  $\sigma_{ci}$  及损伤强度  $\sigma_{cd}$ , 并研究其在单轴及三轴压缩条件下的脆性破坏特征。同时还将利用测定的起裂及损伤试验结果, 分析不同裂纹演化阶段的岩石强度及变形参数演化规律, 探讨宏观脆性破坏机理。

## 1 试验试样及设备

本次试验中采用的两组岩石试样分别为重庆青砂岩及湖北红砂岩, 见图 1。试样依照岩石力学实验规范, 加工为了直径 50 mm, 高度 100 mm 的圆柱形标准试样。其中重庆青砂岩试样平均密度为 2.304 g/cm<sup>3</sup>, 平均纵波波速 4872 m/s, 属灰绿色岩屑砂岩, 为硅质胶结。湖北红砂岩试样平均密度为 2.235 g/cm<sup>3</sup>, 平均纵波波速 4649 m/s, 属砖红色长石砂岩, 为铁质胶结。



图 1 青砂岩及红砂岩试验试样

Fig. 1 Test samples of sandstones

试验是在中国科学院武汉岩土力学研究所 RMT150C 电液伺服岩石力学试验机上进行的。首先对两组砂岩试样进行了单轴压缩条件下的起裂测试, 加载采用轴向位移控制模式, 加载速率为 0.005 mm/s。同时, 通过应变引伸计测量了试样的轴向及侧向应变, 用以分析裂纹演化过程中岩石的变形规律。试验中还利用 PCI-2 型多通道 AE 检测仪及 NANO30 型 AE 传感器监测了砂岩试样内部微破裂所产生的声发射信号, 作为对应变分析方法的验证。其中滤波带宽为 100~400 kHz, 噪音阈值设定为 40 dB。随后对两组试样又进行了三轴压缩起裂测试, 加载速率为 0.002 mm/s, 其中青砂岩试样施加的围压范围为 0~24 MPa, 红砂岩试样施加的围压范围为 0~20 MPa, 通过应变分析方法确定各围压条件下试样的起裂及损伤强度。

## 2 砂岩裂纹演化特征

### 2.1 应变及声发射分析

岩石由于其非均质特性,在荷载作用下内部原生裂隙端部易产生应力集中。而当局部张拉应力超过颗粒间的连结强度后,将产生细观劈裂破坏,裂纹起裂萌生。由此将导致岩石刚度降低,其变形速率将明显加快。因此通过分析岩石的应变响应,可以反映出其内部裂纹的演化状态。同时随着裂纹的起裂萌生,局部积累的应变能也将迅速释放,激发瞬时应力波形成声发射信号。可通过测得的声发射撞击数来反映新生微裂纹的数量。图2为单轴压缩条件下青砂岩试样(GS-1)及红砂岩试样(RS-2)应力应变曲线与对应的声发射撞击数,可将其破坏过程分为以下4个阶段<sup>[12]</sup>:①裂隙闭合阶段;②弹性变形阶段;③裂纹稳定扩展阶段;④裂纹不稳定扩展阶段。

在加载初始阶段,试件中原有的微裂隙逐渐压密闭合。可以看到图2(a)青砂岩试样中对应测得了少量声发射撞击,且在应变曲线上也出现上凹段,轴向刚度逐渐增大。应变曲线上凹段终点即为试样的闭合强度 $\sigma_{cc}$ 。而在图2(b)红砂岩中,裂隙闭合阶段的声发射活动更为活跃,表明其内部含有更多的原生孔隙。在达到闭合强度后曲线进入弹性变形阶段,应变随荷载线性增长,声发射撞击信号也进入一段相对平静期<sup>[13]</sup>,即撞击数小于峰值的1/10。

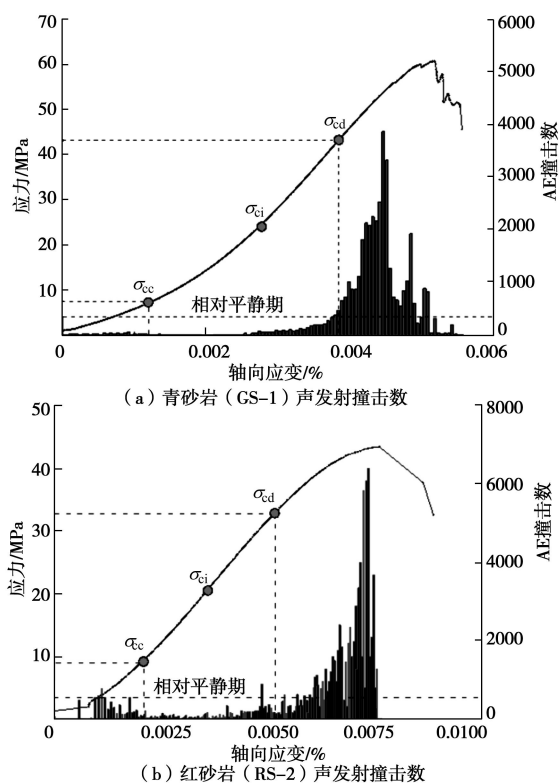


图2 砂岩单轴压缩条件下声发射撞击数

Fig. 2 AE hits of sandstones under uniaxial compression

当荷载达到岩石起裂强度 $\sigma_{ci}$ 后,其内部将出现新生微裂纹,对应着弹性变形阶段的结束,试样进入裂纹稳定扩展阶段。此时测得的声发射撞击开始随荷载的增加而再一次升高,反映出试样内部新生微裂纹的增长。但相比于裂纹演化后期,起裂阶段声发射活动还处于较低水平,仍未超过相对平静期,因此较难准确识别。而在应变特征上,由于新裂纹以沿轴向(主压应力方向)起裂的张性裂纹为主<sup>[14]</sup>,故此时岩石的侧向变形将出明显的膨胀趋势。因此可以利用岩石侧向应变或体积应变曲线来判断其裂纹起裂的出现。图3(a)为试验中测得的青砂岩试样(GS-1)单轴压缩下体积应变曲线。可以看到由于裂纹萌生而产生的侧向膨胀,达到起裂强度 $\sigma_{ci}$ 后岩石体积应变曲线出现拐点,脱离了原本线性变化段。曲线上的线性段终点即对应着 $\sigma_{ci}$ ,其可视作岩石的弹性极限。图3(b)则为围压24 MPa时青砂岩试样(GS-7)的体积应变曲线,其与单轴试验结果有着相似的变化特征。可以看到即使在较高围压的限制下,试样由于内部裂纹起裂而引起的侧向膨胀变形仍是十分显著的。

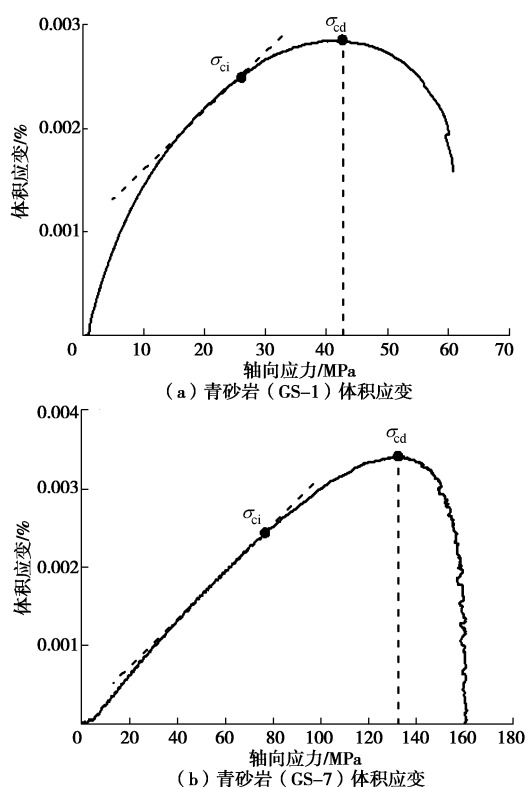


图3 青砂岩单轴及三轴压缩条件下体积应变曲线

Fig. 3 Volumetric strains of green sandstones under uniaxial and triaxial compressions

随着荷载的逐步升高,新生微裂纹保持稳定增长。而当荷载升至岩石损伤强度 $\sigma_{cd}$ 时,裂纹密度积累至临界值,其扩展出现了质的变化,进入失稳变化阶段。可以看到此时图2中对应的声发射撞击数显著增大,

超过了相对平静期, 大量裂纹起裂并贯通。而反映在应变曲线上则表现为图 2 中轴向应变曲线出现弯折; 图 3 中体积应变达到最大值, 并由压缩转为扩容。其中, 试样轴向应变曲线的变化, 可认为是由于荷载超过  $\sigma_{cd}$  后内部裂纹沿其倾斜破坏面产生的滑动变形而导致的。试样内部裂纹演化至此阶段后, 细观剪切带逐步形成, 并最终贯通成为宏观破坏面。

2.2 起裂及损伤强度测定

基于上述试验中的裂纹演化特征, 可以利用声发射及应变分析结果来准确测定岩石试样的强度特征值。下面将用以上两种方法确定砂岩起裂强度  $\sigma_{ci}$  及损伤强度  $\sigma_{cd}$ , 并作为相互验证。

图 4 为砂岩试样声发射总振铃计数与轴向应力的关系曲线, 该曲线能更为明晰地反映内部新生裂纹的积累情况。从图中可以看到在岩石破坏过程中, 计数曲线有着明显的阶段性特征。由上述分析可知, 曲线上各阶段拐点即对应着岩石各强度特征值。在裂纹闭合阶段, 振铃计数出现一小段曲线增长, 曲线段终点即对应闭合强度  $\sigma_{cc}$ 。而后计数进入线性增长阶段 ( $\sigma_{cc}$  至  $\sigma_{ci}$ ), 对应着试样的线弹性变形阶段。当荷载达到起裂强度  $\sigma_{ci}$  后, 由于微裂纹大量起裂萌生, 声发射事件速率明显变化, 振铃计数进入非线性增长阶段。图 4 (a) 为青砂岩试样 (GS-1) 声发射总振铃计数试验结果。利用线性辅助线可将破坏过程清晰的划分为不同阶段, 并确定曲线上的非线性段起点, 即试样的裂纹起裂点。如图可以得到该试样的起裂强度  $\sigma_{ci}$  为 26 MPa。随后裂纹随荷载升高而持续稳定增长, 试样内裂纹密度则不断积累, 并在达到损伤强度  $\sigma_{cd}$  后进入裂纹失稳扩展阶段。此时岩石内部结构剧烈破坏, 对应的声发射振铃计数曲线陡峭上升。此时, 可以利用振铃计数曲线上两线性段辅助线的延伸交点确定其损伤强度值<sup>[3]</sup>, 如图得到该试样的损伤强度  $\sigma_{cd}$  为 42 MPa。图 4 (b) 则为红砂岩试样 (RS-2) 声发射试验结果, 其总振铃计数也有着相同的变化规律。重复以上方法可以测得其起裂强度  $\sigma_{ci}$  为 16.3 MPa, 损伤强度  $\sigma_{cd}$  为 29 MPa。

通过分析试样的应变曲线, 同样也能确定砂岩强度特征值。如图 3 中, 试样的体积应变曲线也随内部裂纹演化而产生明显的拐点。在体积应变曲线上利用线性辅助线, 确定表征裂纹起裂的侧向膨胀变形起点, 则可得到对应起裂强度  $\sigma_{ci}$ 。同时通过体积应变曲线上的最大值点即扩容起点, 则可得到损伤强度。如图 3 (a) 中, 利用该方法测得青砂岩 (GS-1) 试样起裂强度  $\sigma_{ci}$  为 25 MPa, 损伤强度  $\sigma_{cd}$  为 43.25 MPa。对比两种方法在同一试样 (GS-1) 上的测量结果, 可以看到通过应变分析方法得到的结果与声发射结果较为一

致, 可以作为相互验证。

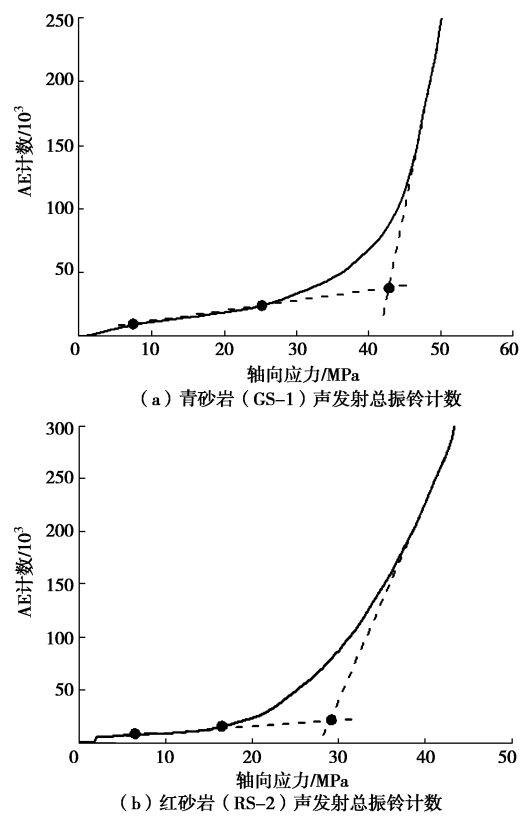


图 4 砂岩单轴压缩条件下声发射总振铃计数

Fig. 4 AE counts of sandstones under uniaxial compression

为减少主观误差, 这里采用侧向应变差 LSR<sup>[5]</sup>方法, 通过准确计算来判定曲线上的特征拐点, 即线性脱离点。试验中各国压条件下的砂岩试样都能通过以上应变分析方法确定其起裂强度, 得到的试验结果如表 1 及表 2 所示。其中青砂岩平均起裂强度  $\sigma_{ci}$  约为其峰值强度的 0.42 倍, 平均损伤强度  $\sigma_{cd}$  约为其峰值强度的 0.75 倍; 红砂岩平均起裂强度则约为其峰值强度的 0.48 倍, 平均损伤强度  $\sigma_{cd}$  约为其峰值强度的 0.78 倍。同时可以看到利用声发射方法测得的  $\sigma_{ci}$  大小与应变分析结果基本相同, 其中声发射方法测量值略小。在无法获得完整岩石变形数据的情况下, 声发射监测手段可以作为一种辅助方法来确定岩石的起裂强度。

表 1 砂岩单轴起裂测试结果

Table 1 Results of uniaxial tests on sandstones				
试样编号	起裂强度 $\sigma_{ci}$ /MPa		损伤强度 $\sigma_{cd}$ /MPa	峰值强度 $\sigma_c$ /MPa
	AE 方法			
	LSR			
青砂岩 GS-1	26.0	26.65	43.25	61.79
青砂岩 GS-2	28.0	29.39	47.51	71.31
青砂岩 GS-3	29.5	28.01	53.48	69.63
红砂岩 RS-1	19.5	21.21	35.74	44.46
红砂岩 RS-2	16.3	17.94	31.97	40.74
红砂岩 RS-3	22.0	21.42	32.88	43.38

表 2 砂岩三轴起裂测试结果

Table 2 Results of triaxial tests on sandstones

试样编号	围压 /MPa	起裂强度 $\sigma_{ci}$ /MPa	损伤强度 $\sigma_{cd}$ /MPa	峰值强度 $\sigma_c$ /MPa
青砂岩 GS-4	6	44.99	84.38	108.98
青砂岩 GS-5	12	52.64	99.68	135.57
青砂岩 GS-6	18	61.37	120.03	151.64
青砂岩 GS-7	24	74.95	131.95	161.01
红砂岩 RS-4	4	30.56	47.20	63.59
红砂岩 RS-5	8	43.40	65.87	88.91
红砂岩 RS-6	12	52.88	84.69	110.26
红砂岩 RS-7	16	53.14	87.53	109.18
红砂岩 RS-8	20	56.17	90.52	113.15

3 起裂参数演化分析

3.1 变形参数

利用以上试验数据，还可以对砂岩试样的变形参数进行分析。图 5 为红砂岩试样（RS-3）侧向应变及其侧向应变刚度曲线（轴向应力与侧向应变之比）。可以看到试样的侧向应变响应具有较强的非线性特征，但从其侧向刚度曲线上还是能发现在不同裂纹演化时期的阶段性变化。图中试样的侧向刚度随裂纹的起裂扩展而迅速跌落，由初始阶段约 300 GPa 降至损伤阶段时约 20 GPa。且在加载后期侧向膨胀变形显著，破坏阶段侧向变形量为起裂阶段的 5 倍左右。这一侧向膨胀是由岩石内部初期微裂纹张开变形及后期剪切破坏滑动而产生的，同时也是试样在宏观破坏前的重要变形特征之一。

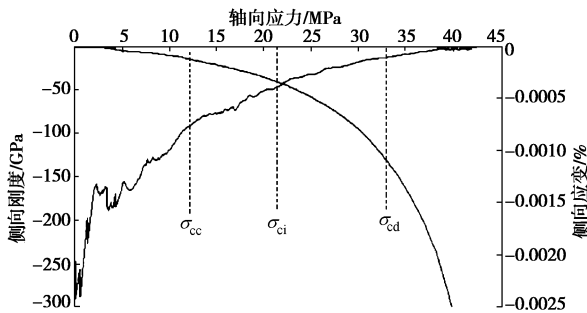


图 5 红砂岩（RS-3）侧向应变及侧向应变刚度

Fig. 5 Lateral strains and stiffnesses of lateral strain of red sandstone (RS-3)

图 6 则为红砂岩试样（RS-3）泊松比演化曲线及对应的声发射总振铃计数。如图当轴向应力达到  $\sigma_{ci}$  时，试样泊松比约为 0.18。而当轴向应力升至  $\sigma_{cd}$  时，泊松比达到 0.5，即达到岩石扩容起点。此后随内部裂纹的失稳扩展，泊松比持续升高。这说明岩石的变形参数是直接受控于其内部裂纹演化过程的。同时从图中还可以看到，试样泊松比的增长与测得的声发射总振铃计数具有很好的相关性。结合以上试验分析结果可以认为，试样中由裂纹演化引起的侧向膨胀及声发

射事件数量是具有规律变化规律的，二者都能较好地体现内部裂纹的积累。

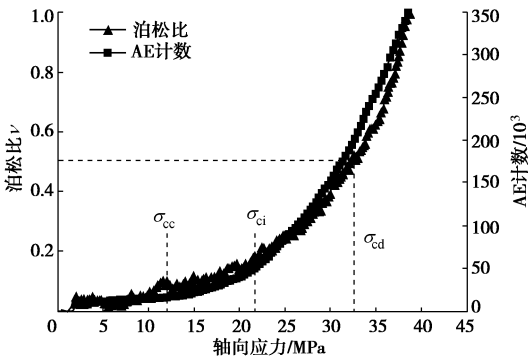


图 6 红砂岩（RS-3）泊松比及 AE 计数

Fig. 6 Poisson's ratios and AE counts of red sandstone (RS-3)

3.2 强度参数

利用以上试验中测得的不同围压条件下砂岩强度特征值，还可以对其不同裂纹演化阶段的强度参数进行定量分析。如图 7 所示，随着围压的增加两组试样的起裂强度  $\sigma_{ci}$  及损伤强度  $\sigma_{cd}$  都相应升高。许多学者<sup>[2-3, 15]</sup>为表征围压作用，一般采用简易线性准则来预测岩石强度特征值  $\sigma_{ci}$  及  $\sigma_{cd}$ 。如起裂强度： $\sigma_1 - \sigma_3 = A\sigma_c$ ，损伤强度： $\sigma_1 - \sigma_3 = B\sigma_c$ ，式中  $A, B$  为与岩石种类相关的参数。该准则中围压系数取为 1，即假定岩石在起裂阶段属于无摩擦材料 ( $\varphi=0$ )，这显然是不符合实际情况的。

对上述两组砂岩试验结果进行线性拟合，得到起裂及损伤强度表达式：

青砂岩 
$$\left. \begin{aligned} \text{起裂} \quad \sigma_1 - 1.92\sigma_3 &= 0.41\sigma_c, \\ \text{损伤} \quad \sigma_1 - 3.62\sigma_3 &= 0.75\sigma_c; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

红砂岩 
$$\left. \begin{aligned} \text{起裂} \quad \sigma_1 - 2.13\sigma_3 &= 0.47\sigma_c, \\ \text{损伤} \quad \sigma_1 - 3.36\sigma_3 &= 0.78\sigma_c. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

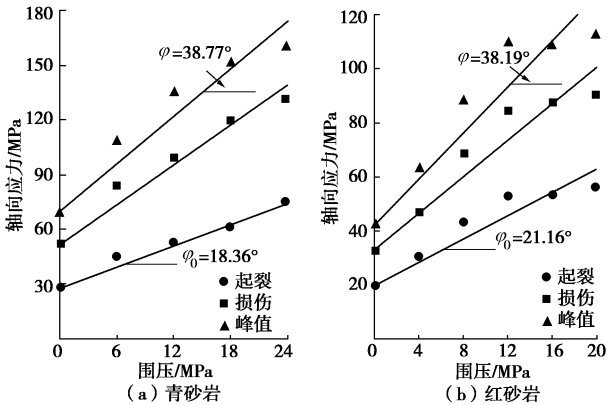


图 7 砂岩起裂强度及峰值强度

Fig. 7 Stresses of crack initiation and peak stresses of sandstones

可以看到上式中围压  $\sigma_3$  前的系数并不为 1。这是由于在围压作用下，岩石内部裂纹皆处于闭合状态，

新生微裂纹在起裂扩展前需克服接触面上的摩擦作用。故围压系数应与材料的摩擦性质相关, 且当其取值增大, 对应主应力空间中岩石强度特征值曲线的斜率也将升高。因此在分析围压条件下的裂纹演化过程中, 需要考虑上述摩擦影响。Hoek 等<sup>[16]</sup>在推导裂隙端部局部张拉起裂应力时, 考虑了摩擦影响, 得到裂隙细观起裂破坏准则:

$$\sigma_1(\sqrt{1+\mu^2}-\mu)-\sigma_3(\sqrt{1+\mu^2}+\mu)=4\sigma_t, \quad (3)$$

式中摩擦系数  $\mu=\tan\varphi$ , 而  $\varphi$  为岩石内摩擦角。对式(3)进行整理后得到其围压系数为

$$K=\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}, \quad (4)$$

可以看到起裂强度曲线的斜率可由岩石内摩擦角  $\varphi$  表示。

将试验拟合结果代入式(4)中, 即可得到砂岩试样起裂阶段岩石内摩擦角: 青砂岩  $\varphi_0=18.36^\circ$ ; 红砂岩  $\varphi_0=21.16^\circ$ 。同时利用 Mohr-Coulomb 准则, 则可换算出试样在峰值阶段内摩擦角: 青砂岩  $\varphi=38.77^\circ$ ; 红砂岩  $\varphi=38.19^\circ$ 。以上两组砂岩起裂阶段的内摩擦角  $\varphi_0$  都明显小于其峰值阶段的  $\varphi$ , 约为后者的 1/2。

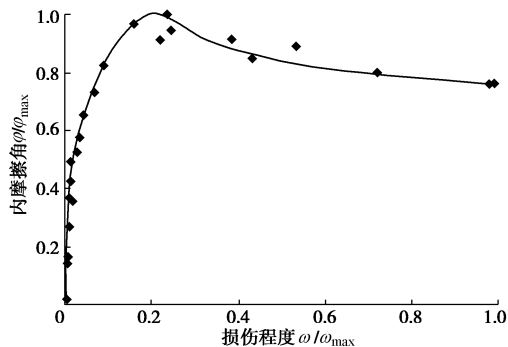


图 8 岩石内摩擦角损伤演化规律<sup>[17]</sup>

Fig. 8 Evolution laws of internal friction angle of rock<sup>[17]</sup>

这一结果与 Hajiabdolmajid 等<sup>[10]</sup>提出的脆性岩石 CWFS 模型(黏聚力弱化-摩擦强化)一致, 即岩石内摩擦角  $\varphi$  并不是始终不变的, 而是随着损伤积累逐步增加的。黄书岭<sup>[17]</sup>也通过锦屏深部大理岩加卸载试验中得到了相似内摩擦角演化规律, 如图 8 中  $\varphi$  值是随着损伤的积累而逐渐发挥, 初始阶段内摩擦角  $\varphi_0$  约为其最大值的 0.4 倍, 终值的 0.5 倍。

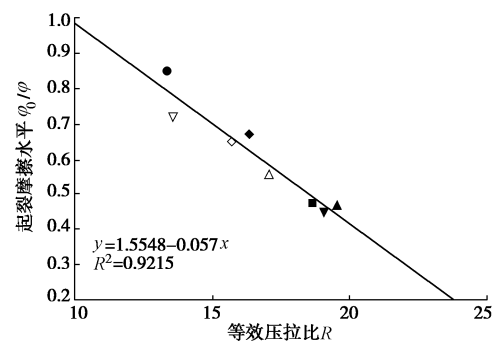
以上岩石内摩擦角  $\varphi$  的演化过程是脆性岩石中的基本现象, 可以从岩石细观结构上来解释这一现象。完整岩石由于内部结构较为致密, 矿物颗粒间难以产生相对滑动, 此时岩石强度主要依靠其黏聚力产生。因此在裂纹起裂前, 岩石的摩擦强度尚未完全发挥, 其内摩擦角  $\varphi$  较小。而随着局部张拉破坏的产生, 岩石微裂纹起裂扩展, 损伤逐步积累, 细观黏结结构遭

到破坏。岩石矿物颗粒间出现相对滑动趋势, 裂纹在进一步扩展时需要克服缝壁间的摩擦阻力。同时粗糙破裂裂纹的大量出现, 也进一步增大了有效摩擦阻力。此时岩石摩擦强度逐步发挥, 其内摩擦角  $\varphi$  也逐渐升高。

摩擦强度的这一演化过程同时也是岩石脆性破坏产生重要内在因素。裂纹损伤前由于岩石摩擦强度尚未发挥, 其强度主要由颗粒间的黏聚力  $c$  产生。而当荷载升高后, 微裂纹的萌生导致岩石颗粒黏结破坏, 其黏聚力  $c$  迅速降低。若此时摩擦强度的发挥滞后于黏聚强度的损失, 则岩石宏观强度将出现明显的跌落, 从而导致脆性破坏。因此岩石内摩擦角的演化过程将影响其脆性程度的大小。其初始  $\varphi_0$  越小, 内部微裂纹越容易萌生, 对应岩石脆性断裂趋势越强。

在深埋隧洞开挖中, 也常由于岩石初始  $\varphi_0$  的不完全发挥而引起围岩脆性破坏, 即在局部压应力未达到其抗压强度时产生的板裂剥落。在加拿大 URL 地下实验室<sup>[2]</sup>试验研究中发现, 开挖中由于围岩径向卸荷, 张拉裂纹将沿切向萌生, 并将围岩切割为板状进而产生剥落破坏。现场测得的岩体抗压强度约为 150~160 MPa, 而洞壁板裂破坏处最大切向压应力经计算则约为 120 MPa<sup>[15]</sup>, 仅为抗压强度的 80%。此时围岩仍处于裂纹稳定扩展阶段, 裂纹起裂后由于缺少围压限制将迅速发展。因此在剥落破坏产生时, 岩石的摩擦强度仍未充分发挥, 故而导致了上述脆性破坏中的强度折减。

基于以上分析, 可以定义岩石起裂摩擦水平  $\varphi_0/\varphi$  作为一种脆性指标, 即起裂阶段与峰值阶段内摩擦角之比。其取值越低, 对应岩石脆性程度越高。为了验证这一指标, 如图 9 中根据多组不同种类岩石起裂试验数据换算得到了  $\varphi_0/\varphi$  及其对应的等效岩石压拉比  $R$ <sup>[18]</sup>。由图中可以看到二组指标存在着明显的线性关



▲ 重庆青砂岩 ■ 锦屏大理岩<sup>[17]</sup> ▼ Darley Dale 砂岩<sup>[19]</sup> ● 加拿大花岗岩<sup>[20]</sup>  
△ 湖北红砂岩 ◆ 大岗山花岗岩<sup>[17]</sup> ◇ 北山花岗岩<sup>[21]</sup> ▽ Kuru 花岗岩<sup>[22]</sup>

图 9 起裂应力水平与起裂摩擦水平关系

Fig. 9 Relationship between stress level of crack initiation and level of initial internal friction



系,  $\varphi_0/\varphi$  越小则岩石压拉比越大, 其脆性也越强。脆性岩石中  $\varphi_0/\varphi$  一般分布在 0.2~0.9 之间, 由以上线性对应关系可得对应的岩石压拉比约为 12~24。

## 4 结论与建议

本文通过应变及声发射分析, 研究了两组硬质砂岩试样在单轴及三轴压缩条件下的裂纹演化特征, 测定了其起裂强度  $\sigma_{ci}$  及损伤强度  $\sigma_{cd}$ , 并探讨了不同裂纹演化阶段中岩石强度及变形参数演化规律, 得到了以下结论:

(1) 通过确定砂岩试样应变及声发射曲线上的阶段性变化拐点, 测得了单轴及三轴压缩条件下两组砂岩试样的起裂强度  $\sigma_{ci}$  及损伤强度  $\sigma_{cd}$ 。其中青砂岩试样起裂强度  $\sigma_{ci}$  平均约为其峰值强度的 0.42 倍, 损伤强度  $\sigma_{cd}$  平均约为其峰值强度的 0.75 倍; 红砂岩起裂强度平均约为其峰值强度的 0.48 倍, 损伤强度  $\sigma_{cd}$  平均约为其峰值强度的 0.78 倍。

(2) 通过分析试验加载过程中砂岩试样的应变及声发射特征, 总结了其随裂纹演化的阶段性变化规律。当岩石达到起裂强度  $\sigma_{ci}$  后, 由于内部张性裂纹起裂萌生, 试样将出现明显侧向膨胀变形。此时测得的声发射撞击也同步开始逐步增大。而当达到损伤强度  $\sigma_{cd}$  后, 裂纹进入非稳定扩展阶段, 试样体积应变转向扩容方向, 此时测得声发射信号也显著增大。

(3) 通过分析不同围压的起裂强度结果, 发现  $\sigma_{ci}$  随围压的增加而逐渐升高。进一步利用线性拟合公式, 换算得到起裂阶段砂岩内摩擦角  $\varphi_0$ , 其中青砂岩为  $18.36^\circ$ , 红砂岩为  $21.16^\circ$ , 约为终值的 1/2。这一岩石内摩擦角的演化过程将影响其脆性破坏趋势。当岩石裂纹萌生颗粒黏接断裂, 黏聚力  $c$  迅速降低, 此时较低的起裂内摩擦角  $\varphi_0$  将导致脆性破坏发生。定义岩石起裂摩擦水平  $\varphi_0/\varphi$ , 其大小与岩石压拉比呈反比关系, 可作为脆性指标反映岩石脆性程度。

## 参考文献:

- [1] MARTIN C D. The strength of massive Lac Du Bonnet granite around underground openings[D]. Manitoba, Canada: University of Manitoba, 1993.
- [2] MARTIN C D, CHRISTIANSSON R. Estimating the potential for spalling around a deep nuclear waste repository in crystalline rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, **46**(2): 219 - 228.
- [3] DIEDERICHS M S, KAISER P K, EBERHARDT E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, **41**(5): 785 - 812.
- [4] 侯文诗, 李守定, 李 晓, 等. 岩石扩容起始特性与峰值特性的比较[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(8): 1478 - 1485. (HOU Wen-shi, LI Shou-ding, LI Xiao, et al. Comparison between dilatancy onset and peak of different rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(8): 1478 - 1485. (in Chinese))
- [5] NICKSIAR M, MARTIN C D. Evaluation of methods for determining crack initiation in compression tests on low-porosity rocks[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2012, **45**(4): 607 - 617.
- [6] 周 辉, 孟凡震, 卢景景, 等. 硬岩裂纹起裂强度和损伤强度取值方法探讨[J]. 岩土力学, 2014, **35**(4): 913 - 920. (ZHOU Hui, MENG Fan-zhen, LU Jing-jing. Discussion on methods for calculating crack initiation strength and crack damage strength for hard rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(4): 913 - 920. (in Chinese))
- [7] 刘泉声, 胡云华, 刘 滨. 基于试验的花岗岩渐进破坏本构模型研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(2): 289 - 296. (LIU Quan-sheng, HU Yun-hua, LIU Bing. Progressive damage constitutive models of granite based on experimental results[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(2): 289 - 296. (in Chinese))
- [8] 刘 宁, 张春生, 褚卫江. 锦屏深埋大理岩破裂特征与损伤演化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(8): 1606 - 1613. (LIU Ning, ZHANG Chun-sheng, CHU Wei-jiang. Fracture characteristics and damage evolution law of Jinping deep marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(8): 1606 - 1613. (in Chinese))
- [9] 彭 俊, 荣 冠, 周创兵, 等. 水压影响岩石渐进破裂过程的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(4): 941 - 954. (PENG Jun, RONG Guan, ZHOU Chuang-bing, et al. Experimental study of effect of water pressure on progressive failure process of rocks under compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(4): 941 - 954. (in Chinese))
- [10] HAJIABDOLMAJID V, KAISER P K, MARTIN C D. Modelling brittle failure of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, **39**(6): 731 - 741.
- [11] 卢兴利, 刘泉声, 苏培芳. 考虑扩容碎胀特性的岩石本构模型研究与验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(9): 1886 - 1893. (LU Xing-li, LIU Quan-sheng, SU Pei-fang. Constitutive model of rocks considering dilatancy-bulking behaviour and its calibration[J]. Chinese Journal of Rock



- Mechanics and Engineering, 2013, **32**(9): 1886 – 1893. (in Chinese))
- [12] BRACE W F, PAULDING B W, SCHOLZ C. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks[J]. Journal of Geophysical Research, 1966, **71**(16): 3939 – 3953.
- [13] 李浩然, 杨春和, 刘玉刚, 等. 花岗岩破裂过程中声波与声发射变化特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(10): 1915 – 1923. (LI Hao-ran, YANG Chun-he, LIU Yu-gang, et al. Experimental research on ultrasonic velocity and acoustic emission properties of granite under failure process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(10): 1915 – 1923. (in Chinese))
- [14] 朱泽奇, 盛 谦, 冷先伦, 等. 三峡花岗岩起裂机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(12): 2570 – 2575. (ZHU Ze-qi, SHENG Qian, LENG Xian-lun, et al. Research on relationship between crack initiation stress level and brittleness indices for brittle rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(12): 2570 – 2575. (in Chinese))
- [15] CAI M, KAISER P K, TASAKA Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, **41**(5): 833 – 847.
- [16] HOEK E, BIENIAWSKI Z T. Brittle fracture propagation in rock under compression[J]. International Journal of Fracture, 1965, **1**(3): 137 – 155.
- [17] 黄书岭. 高应力下脆性岩石的力学模型与工程应用研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008. (HUANG Shu-ling. Study on mechanical model of brittle rock under high stress condition and its engineering applications[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese))
- [18] CAI M. Practical estimates of tensile strength and Hoek–Brown strength parameter  $m_i$  of brittle rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, **43**(2): 167 – 184.
- [19] PESTMAN B J, MUNSTER J G V. An acoustic emission study of damage development and stress-memory effects in sandstone[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1996, **33**(6): 585 – 593.
- [20] LAU JSO, GORSKI B. Uniaxial and triaxial compression tests on URL rock samples from boreholes 207-045-GC3 and 209-069-PH3[M]. Mining Research Laboratories, 1992.
- [21] ZHAO X G, CAI M, WANG J, et al. Damage stress and acoustic emission characteristics of the Beishan granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, **64**: 258 – 269.
- [22] LI C, NORDLUND E. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993, **26**(4): 333 – 351.