

DOI: 10.11779/CJGE201910009

层理方向对砂岩断裂模式及韧度的影响规律试验研究

李斌¹, 黄达^{1,2}, 姜清辉³, 陈国庆⁴

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 3. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072;
4. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 为了探索具有层理面的砂岩断裂力学性质的各向异性, 开展了具有不同层理方向的半圆形砂岩试样在不同切缝角度下的三点弯试验研究, 揭示了层理方向对砂岩应力强度因子、断裂韧度及破裂模式的影响规律。试验结果表明试样破裂模式受层理面与荷载方向夹角 θ 控制: $\theta=0^\circ$ 时, 沿层理面张裂破坏; $\theta=30^\circ$ 时, 沿层理面剪切破坏; $\theta=45^\circ, 60^\circ$ 时, 切层和沿层理面混合破裂; $\theta=90^\circ$ 时, 切层破坏。不同层理角度的试样测得的断裂韧度差异较大, 切缝角 $\alpha=0^\circ$ 时, $\theta=90^\circ$ 试样断裂韧度最大, $\theta=0^\circ$ 试样断裂韧度最小, 且 $K_{I\max}/K_{I\min}=2.36$ 。运用有限元计算了各试样的无量纲化应力强度因子, 结果表明切缝角 $\alpha=0^\circ$ 时, 无量纲化 II 型应力强度因子 Y_{II} 受层理面与荷载方向夹角 θ 影响显著: $\theta=0^\circ, 90^\circ$ 试样 $Y_{II}=0$, 呈现 I 型断裂; $\theta=45^\circ, 60^\circ$ 试样 $Y_{II}\neq 0$, 呈现出 I-II 复合型断裂; $\theta=30^\circ$ 试样 Y_{II} 最大, 以 II 型断裂为主导, 其余切缝角度下试样无量纲化 I 型应力强度因子与 II 型应力强度因子随层理角度 θ 的变化呈现不同的变化规律。通过扩展有限元 XFEM 计算出的试样起裂角、断裂韧度及断裂路径与试验结果吻合较好, 结果表明各试样的起裂角随层理面与荷载方向夹角 θ 及切缝角 α 的变化呈现一定的各向异性。试验所得规律有助于更全面理解具有层理面岩石的断裂特性, 并可作为对各向异性岩石断裂力学理论研究和数值计算的有益补充。

关键词: 半圆形砂岩试样; 层理方向; 三点弯试验; 应力强度因子; 断裂韧度; 破裂模式

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)10-1854-09

作者简介: 李斌(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事岩石力学与岩石边坡工程方面的研究工作。E-mail: 15683086591@163.com.

Fracture pattern and toughness of layered sandstone influenced by layer orientation

LI Bin¹, HUANG Da^{1,2}, JIANG Qing-hui³, CHEN Guo-qing⁴

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 3. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: In order to study the anisotropic properties of layered sandstone on fracture mechanics, the three-point bending tests on the semi-circular specimens with different layer orientations and crack angles are conducted. The variations of normalized stress intensity factors, fracture toughness and fracture patterns of these specimens with layer orientation are revealed. The results illustrate that the fracture pattern of the specimens is closely related to the angle θ between the layer orientation and the loading direction, that is, tensile splitting along the layer when $\theta=0^\circ$, shearing along the layer when $\theta=30^\circ$, tensile splitting across the layer when $\theta=90^\circ$ and composite shearing failure across and along the layer $\theta=45^\circ$ and 60° . The fracture toughness of the specimens with different layer orientations greatly differs with the angle between the layer orientation and the loading direction; when crack angle $\alpha=0^\circ$, the specimens with θ of 90° has the maximum fracture toughness; and when those with θ of 0° have the minimum one, the ratio equals 2.36. Modes I and II normalized stress intensity factors are calculated by using the finite element code ABAQUS. It is shown that the mode II normalized stress intensity factor of the specimens varies more evidently with the layer orientation when α equals 0° , that is, mode I fracture when $\theta=0^\circ$ and 90° , mixed mode when $\theta=45^\circ$ and 60° , and mode II dominated fracture when $\theta=30^\circ$. In addition, for the specimens with $\alpha=30^\circ\sim 60^\circ$, the mode I and mode II normalized stress intensity factors show different variations with the layer orientation. The crack initiation angle, mixed-mode fracture toughness and fracture trajectory of the specimens are calculated by using the extended finite element method, and are in good agreement with the experimental results. The results

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41672300)

收稿日期: 2018-12-04

*通讯作者 (E-mail: dahuang@hebut.edu.cn)

indicate that crack initiation angles are influenced by the layer orientation and crack angle. The findings prove to be helpful for understanding the fracture characteristics of the layered rock materials and enriching the researches on fracture mechanics and numerical simulation of anisotropic rock materials.

Key words: semi-circular sandstone specimen; layer orientation; three-point bending test; stress intensity factor; fracture toughness; fracture pattern

0 引 言

受层理或片理面的影响, 层状和片状沉积岩或变质岩的强度和变形特征往往表现出明显的各向异性, 这对边坡, 隧道等岩石工程的建设具有显著影响。目前, 国内外对各向异性岩石的强度特征和破裂模式进行了大量研究。Abbass 等^[1]、Chen 等^[2]、Debecker 等^[3]通过巴西劈裂试验研究了层理方向对层状岩体强度和破坏模式的影响。Cho 等^[4]通过单轴压缩和巴西圆盘劈裂试验, 得出了片麻岩、页岩和片岩的各向异性参数及强度随片理面倾斜角度的变化规律。刘运思等^[5]通过巴西圆盘劈裂试验, 研究了不同层理方位下板岩破坏模式、抗拉强度、弹性模量和泊松比的各向异性特征。衡帅等^[6]通过单轴和三轴压缩试验, 研究了页岩变形、强度和破裂模式的各向异性。刘胜利等^[7]开展了绿泥石片岩试样的单轴压缩和巴西圆盘劈裂试验, 揭示了其变形、破裂及力学参数特征。

断裂韧度表征材料抵抗裂纹起裂和扩展的能力, 是反映岩石材料力学行为的一个强度指标, 且已被大量研究表明适用于对岩石的切削, 水压致裂、爆破断裂等断裂问题的评价。开展各向异性岩石的断裂韧度的研究, 有助于更全面地掌握各向异性岩石的强度特征。Ke 等^[8]采用数值方法对各向异性岩石的断裂韧度进行了评价。Dutler 等^[9]、Kataoka 等^[10]和 Chandler^[11]则采用多种试验方法研究了各向异性岩石的断裂韧度, 明确了岩石断裂韧度存在各向异性。目前半圆形试件已被学者们^[12-17]广泛用于测试岩石的断裂韧度和断裂模式等研究, Chong 等^[18]进一步论证了采用半圆形试件测试层状岩石类材料的断裂韧度的可行性。

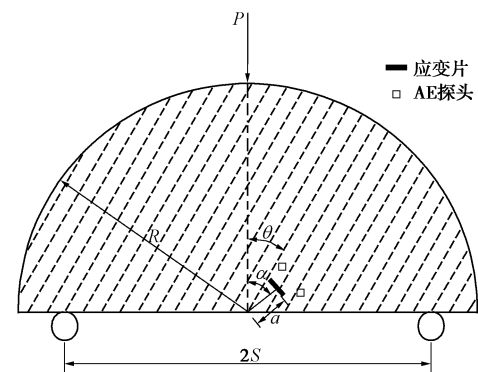
砂岩层是煤炭、石油及天然气等开采中常见的一类围岩, 也是分布最为广泛的一类沉积岩层。受沉积环境的影响, 较多砂岩内含有大量平行的层理面, 造成其岩石力学性质具有较强的各向异性。本文将层理发育的砂岩加工成具有不同层理方向的半圆形三点弯曲标准试件, 通过三点弯曲试验测试, 研究了层理面对砂岩断裂模式及强度的影响规律, 丰富了各向异性岩石的断裂力学理论。

1 试验方案

岩样取自重庆市某工程的青灰色砂岩, 平均密度约为 2.5 g/cm^3 , 该砂岩层理比较发育, 层理面间距约

为 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 。根据单轴压缩试验测试结果: 当荷载方向与层理面垂直时, 单轴抗压强度为 38 MPa , 弹性模量为 15 GPa , 泊松比为 0.12 ; 当荷载方向与层理面平行时, 单轴抗压强度为 30 MPa , 弹性模量为 30 GPa , 泊松比为 0.2 。将所取岩样加工成直径 $2R$ 为 100 mm , 厚 20 mm 的具有不同层理面角度的半圆形标准试样, 并将试件各个表面打磨平整。采用便携式金刚石锯片 (1 mm 厚) 预制切缝, 切缝宽度及长度 a 分别为 1.5 , 10 mm 。

如图 1 所示: 试样切缝与荷载方向夹角 α 为 0° , 30° , 50° 及 60° ; 层理面与荷载方向夹角 θ 为 0° , 30° , 45° , 60° 及 90° 。这两个角度组合为 20 个工况, 每个工况下制作 3 个试件, 共 60 个试件。加工完成后, 典型试件照片如图 2 所示。



a -预制切缝长度; R -试样半径; $2S$ -简支跨距; α -切缝与加载方向夹角; θ -层理面与加载方向夹角

图 1 试样几何特征、加载方式及测试方案

Fig. 1 Geometrical characteristics of specimens, loading type and layout of testing sensors

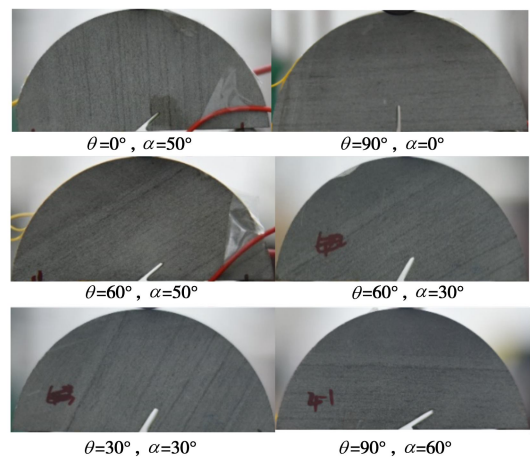


图 2 部分试样照片

Fig. 2 Photos of several specimens

表1 各层理角度试样的破裂模式

Table 1 Fracture patterns of specimens with various inclination angles

$\theta/^\circ$	试样破坏照片及素描图				破坏模式
	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=50^\circ$	$\alpha=60^\circ$	
0					裂缝沿层理面的张拉劈裂扩展, $\alpha=0^\circ$ 预制切缝尖端起裂, 其余未沿切缝尖端起裂
30					裂缝沿层理面的剪切滑移破坏, $\alpha=0^\circ$ 时沿切缝裂尖起裂, $\alpha=30^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ 时沿某薄弱层理面破坏, 不受切缝控制
45					裂缝呈现沿层理面剪切滑移和切层理面的张性劈裂的复合破坏, 均自切缝裂尖起裂且终止于加载点处。裂缝形态受 α 角影响较明显
60					裂缝呈现切层理面的张拉劈裂为主并伴有少量沿层理面剪切滑移的复合破坏, 均自切缝尖端起裂且终止于加载点处。裂缝形态受 α 角影响较明显
90					裂缝自切缝尖端起裂, 逐步切层理贯穿至加载点。裂缝与层理面呈大角度相交, 基本不沿层理面扩展。裂缝形态受 α 角影响较明显

试验时三点弯曲简支点间距 $2S$ 为 80 mm。试验在 MTS815 岩石力学试验系统上完成。试验前在试样预制切缝尖端附近预先粘贴胶基电阻应变片 (阻值: $120 \pm 0.1\% \Omega$, 灵敏系数: $2.0\% \pm 1\%$), 并安置声发射探头, 应变片和声发射探头位置见图 1。采用动态应变仪 DH5902 采集系统进行应变数据采集, 声发射信号采用美国物理声学公司生产的 PCI-2 多通道声发射监测系统采集 (前置放大器为 40 dB, 声发射采样阈值为 40 dB)。在试样和声发射探头之间涂抹耦合剂, 以减少声发射信号的衰减。试验加载控制方式为位移控制, 加载速率为 0.02 mm/min。

表 1 为各层理角度试样在不同初始切缝角下的破坏模式, 可见 $\alpha=30^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ 时, $\theta=30^\circ$ 和 $\theta=0^\circ$ 试样均未从切缝尖端起裂, 表明弱胶结层理面对裂缝起裂扩展具有较强的影响。加载过程中在荷载达到切缝起裂荷载前, 因试样中某一层理面切向剪应力 ($\theta=30^\circ$) 或法向拉应力 ($\theta=0^\circ$) 超过其抗剪、抗拉强度而沿层理面剪切 ($\theta=30^\circ$) 或张拉破坏 ($\theta=0^\circ$)。可见, 层理面的强度对砂岩的断裂力学行为存在较大的影响, 岩样取材时应考虑具有强胶结层理面的层状岩石以保证其层理面具有足够的强度以抵抗切缝起裂前层理面处的拉、剪应力。

根据裂缝扩展路径与层理面的相关性, 将试件的破裂模式可归纳为以下 4 种:

2 试验结果

2.1 破坏模式

(1) 切层破裂: 当层理与荷载方向夹角 $\theta=90^\circ$ 时, 破裂面与层理面呈大角度或近垂直相交, 破裂面基本不沿层理面扩展。切缝角度 $\alpha=0^\circ$ 时为 I 型裂缝, 其它切缝角度为 I-II 型混合断裂且随 α 增大 II 型裂缝特性越强。

(2) 切层和沿层理面混合破裂: $\theta=45^\circ$ 及 60° 时, 破裂面呈现贯穿层理的张拉和沿层理面剪切的复合破坏, 破裂面的形态受切缝角度 α 较明显。

(3) 沿层理面剪切破裂: $\theta=30^\circ$ 试样发生沿层理面的剪切滑移破坏, $\alpha=0^\circ$ 时沿切缝裂尖起裂, 其它切缝角度试件均沿某薄弱层理面破坏, 不受切缝控制。

(4) 沿层理面张拉破裂: $\theta=0^\circ$ 试样发生沿层理面的张拉破坏, 破裂面沿试件中部某一与切缝相交的层理面, 跟切缝角度 α 无关。

图 3 为 $\alpha=0^\circ$ 时不同层理角度试样的破裂路径, 可见, $\theta=0^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 时, 试样破裂路径最终基本都通过加载点; 而 $\theta=30^\circ$ 试样破裂路径偏离量 (d) 均大于 $0.05D$ ($D=2R$, 为试件直径), 因此认为 $\theta=30^\circ$ 试样的 I 型断裂试验无效^[15]。另外, 由表 1 所示的各试样断裂模式可见, $\alpha=30^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ 时, $\theta=0^\circ, 30^\circ$ 试样均未从切缝尖端起裂, 而是沿层理面发生了张拉或剪切破坏, 因此为断裂试验不成功试样 (即不能用于分析断裂力学参数)。

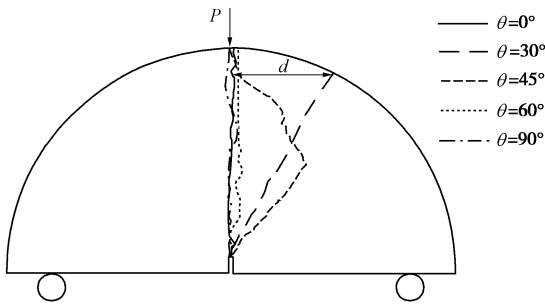


图 3 $\alpha=0^\circ$ 时不同层理方位试样的破裂路径

Fig. 3 Traces of fractures observed on specimens with various inclination angles when $\alpha=0^\circ$

由以上分析可判断: 切缝倾角 $\alpha=0^\circ$ 时, $\theta=0^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 试样断裂为 I 型断裂; $\alpha=30^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ 条件下, $\theta=45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 试样断裂模式为 I-II 复合型断裂。

2.2 强度

图 4 为各层理角度试样在不同切缝倾角下的破坏荷载, 可见, $\theta=0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内试样破坏荷载明显小于 $\theta=45^\circ \sim 90^\circ$ 试样的破坏荷载值; 图 5 为试验测得各层理角度试样沿层理方向的破裂长度占破裂总长度的比值, 可见 $\theta=0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内试样的断裂主

控因素为层理面, 以沿层理面的张拉或剪切破坏为主, 而 $\theta=60^\circ \sim 90^\circ$ 试样沿层理方向断裂长度要小于其他方向长度, 主要以贯穿层理的张拉破坏为主, 其强度主要受岩石强度的控制。 $\theta=45^\circ$ 时破裂面沿层理面断裂长度约占 40%~60%。而且从图 5 可发现, 当 $\theta \geq 45^\circ$ 时, 随着切缝与加载方向夹角 α 的增加, 裂缝沿层理方向的破裂长度占比越大。

综合分析图 4, 5 及表 1 可知, 试样的破坏荷载与试样的破裂模式存在一定关系, 沿层理方向断裂占主导的试样强度要小于以贯穿层理断裂占主导的试样强度。

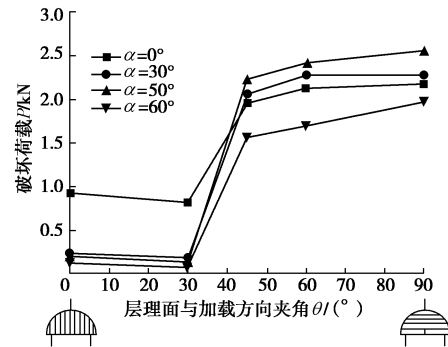


图 4 各试样的破坏荷载

Fig. 4 Failure loads for specimens with various inclination angles

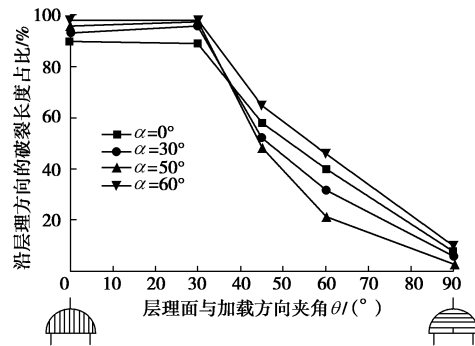


图 5 各试样沿层理方向的破裂长度

Fig. 5 Fracture lengths in weak direction

2.3 破裂过程分析

图 6 为 $\alpha=0^\circ$ 时不同层理角度试样荷载 - 应变 - 声发射累计事件数 - 时间曲线。 $\theta=0^\circ, 90^\circ$ 试样的荷载曲线峰后应力近垂直跌落 (见图 6(a) 和图 6(e)), 可见两者的脆性破坏特征较明显, 这是由于其破坏形式主要为穿切层理和岩石的张拉劈裂破坏。而其他层理角度的试样在荷载达到峰值后, 均沿层理面发生一定的滑动剪切破坏, 使得峰后荷载 - 时间曲线表现出一定的延性或波动现象 (见图 6(b), 6(c) 和图 6(d))。另外, $\theta=45^\circ$ 试样的荷载 - 时间曲线在达到峰值荷载前出现短暂的平缓段, 随后荷载继续增大至最大破坏荷载后出现骤降 (见图 6(c))。这是由于峰

值荷载前试样自切缝尖端起裂后沿层理面发生短时的剪切滑移,但并未贯穿整个层理面,而是向加载点处发生了偏转,进而继续加载至峰值荷载处试样完全破坏。结合图5和图6分析,可发现破裂面沿层理面扩展比重越多(即 θ 角越大,如图5),荷载达到峰值所需时间越长。

由各层理角度试样的应变监测可知,除 $\theta=45^\circ$ 试样应变片在沿层理面扩展阶段瞬间损坏,其它试件应变片在临近峰值时瞬间损坏(应变值瞬间跌落至0),表明试件临近完全贯通(峰值荷载)前,切缝尖端已出现较大的张开或剪切错动。

由声发射的监测结果知,在试样破裂之前的整个加载过程中,声发射事件数总体保持较低的水平,在破裂时累积声发射事件数陡增。对于 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 试样,试样发生脆性断裂后,断裂强度丧失,因此声发射数达到峰值后不再增加(见图6(a)和图6(e));而 $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 试样加载至峰值荷载后由于剪切滑移变形的存在而仍具有一定的残值强度,因而声发射数仍缓慢增长(见图6(b), 6(c), 6(d))。

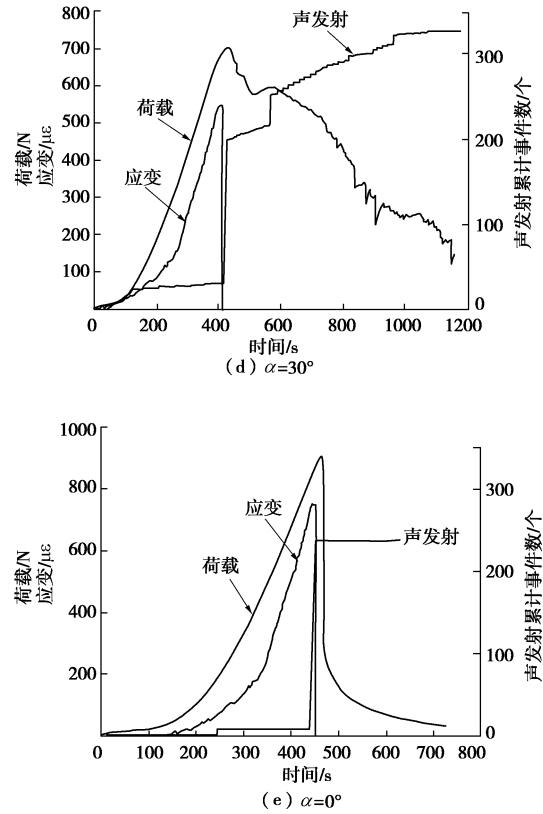
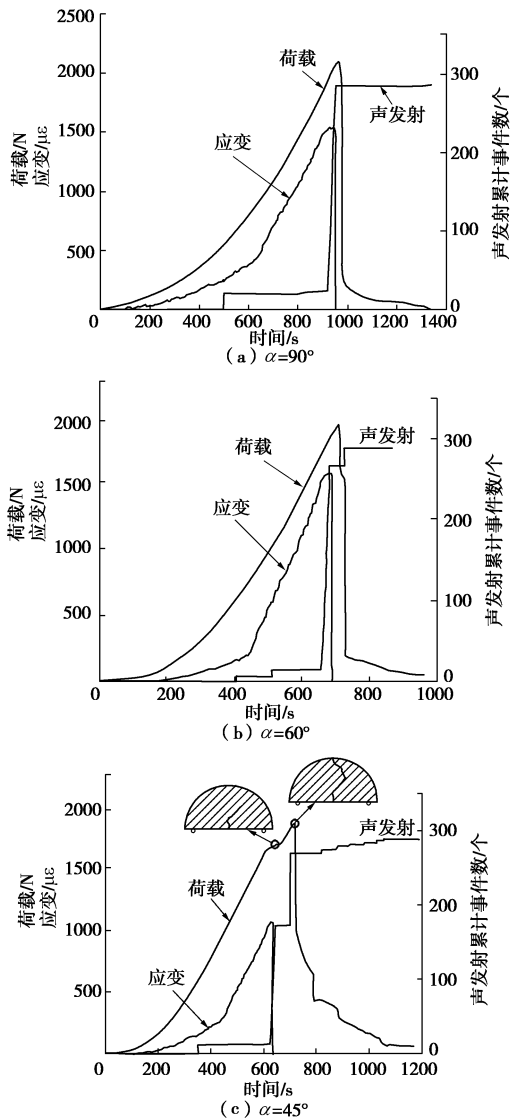


图6 $\alpha=0^\circ$ 时各层理角度试样的荷载-应变-声发射累计事件数的时间曲线

Fig. 6 Load-strain-cumulative AE counts vs. time when $\alpha=0^\circ$

2.4 断裂韧度

(1) I型断裂

针对切缝角度 $\alpha=0^\circ$ 时的I型断裂弯曲试验工况,由图6所示的荷载曲线确定试样的破坏荷载值,并根据Kuruppu等^[15]提出的断裂韧度的计算公式(1), (2)计算 $\theta=0^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 试样的I型断裂韧度值,计算结果见图7。

$$K_{Ic} = \frac{P_{max} \sqrt{\pi a}}{2Rt} Y_1 \quad (1)$$

$$Y_1 = -1.297 + 9.516 \frac{S}{R} - \left(0.47 + 16.457 \frac{S}{R} \right) \frac{a}{R} + \left(1.071 + 34.401 \frac{S}{R} \right) \left(\frac{a}{R} \right)^2 \quad (2)$$

式中, K_{Ic} 为I型断裂韧度, P_{max} 为试样发生断裂时的最大荷载, a 为预制切缝长度, R 为试样半径, t 为试样厚度, $2S$ 为简支跨距, Y_1 为无量纲化的I型应力强度因子。

为了评价层理角度对试样应力强度因子的影响,借助有限元软件ABAQUS,采用围线积分法^[19-21]计算切缝角 $\alpha=0^\circ$ 试样的应力强度因子,结合该岩样材料的横观各向同性力学参数,采用如图8所示数值计算模型并结合公式(3)计算无量纲化I型及II型断裂强

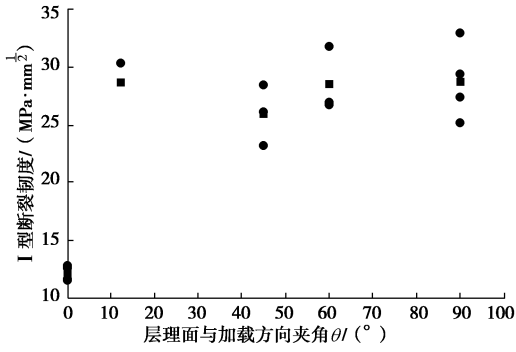


图 7 各层理角度试样的 I 型断裂韧度

Fig. 7 Test results of mode I fracture toughness

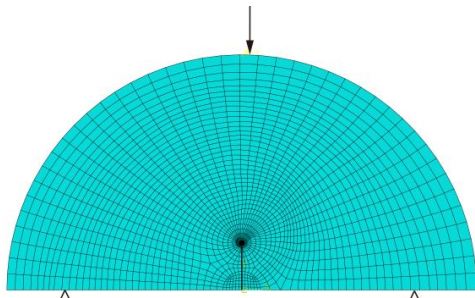


图 8 有限元模型

Fig. 8 Finite element mesh for SCB specimen

度因子 (Y_I 和 Y_{II}), 数值模型尺寸与试验中试样尺寸一致, 层理面间距做均匀化处理, 取 1.5 mm, 计算结果如表 2 所示。可见 $\theta=45^\circ, 60^\circ$ 试样的 $Y_{II} \neq 0$, 有 II 型断裂发生。而试验及数值模拟得到的 Y_I 基本一致 (试验值略大)。

$$Y_I = \frac{2RtK_I}{P\sqrt{\pi a}}, \quad Y_{II} = \frac{2RtK_{II}}{P\sqrt{\pi a}} \quad (3)$$

表 2 各层理角度试样 I 型断裂参数

Table 2 Mode I fracture parameters for specimens with various inclination angles of bedding planes

角度 $\theta/(^\circ)$	式 (2)	有限元计算结果	
	Y_I	Y_I	Y_{II}
0	4.732	4.689	0
45	4.732	4.562	0.534
60	4.732	4.674	0.529
90	4.732	4.705	0

由以上试验结果可知:

a) 采用各向异性弹性模型进行有限元计算结果表明, 对于 $\theta=0^\circ, 90^\circ$ 的试样, 当 $\alpha=0^\circ$ 时仍为 I 型断裂; 而对于 $\theta=45^\circ, 60^\circ$ 的试样, 经计算无量纲化的 II 型应力强度因子 $Y_{II} \neq 0, K_{II}/K_I=0.11$, 呈现出 I-II 混合型断裂模式, 这一点与 $\theta=45^\circ, 60^\circ$ 试样表现出的剪切与拉伸复合破坏现象是吻合的, 可见 $\theta=45^\circ$ 和 60° 试样计算得出的断裂韧度值并非 I 型断裂韧度值。

b) 裂纹垂直层理方向扩展时 ($\theta=90^\circ$) 试样的

断裂韧度最大, 而裂纹沿层理扩展时 ($\theta=0^\circ$) 试样的断裂韧度最小, 且 $K_{I\max}/K_{I\min}=2.36$, 可见层理方向对该类岩石的断裂韧度影响较明显。

(2) I-II 复合型断裂

结合试验测得各试样的临界荷载 (即峰值荷载), I-II 型断裂韧度测试结果见表 3。

表 3 I-II 型断裂韧度测试结果

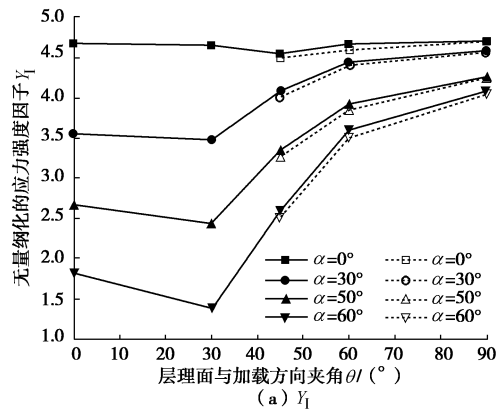
Table 3 Test results of mixed-mode fracture toughness

θ $(^\circ)$	α $(^\circ)$	P_{\max} /N	Y_I	Y_{II}	K_I	K_{II}
					$/(MPa \cdot mm^{1/2})$	$/(MPa \cdot mm^{1/2})$
45	0	1960	4.562	0.534	25.058	2.933
	30	2060	4.080	1.340	23.554	7.736
	50	2230	3.340	1.520	20.873	9.499
	60	1570	2.600	1.480	11.440	6.512
60	0	2110	4.674	0.500	27.639	2.957
	30	2180	4.450	1.202	27.187	7.343
	50	2420	3.920	1.392	26.585	9.441
	60	1630	3.600	1.376	16.445	6.286
90	0	2193	4.705	0	28.916	0.000
	30	1250	4.590	1.182	16.079	4.141
	50	2180	4.260	1.292	26.026	7.893
	60	1140	4.080	1.263	13.035	4.035

图 9 为采用上述有限元方法计算得到的不同层理角度下无量纲化应力强度因子及部分角度试样的试验结果。 Y_I 随层理角度变化曲线见图 9 (a)。 $\alpha=0^\circ$ 时各层理角度下 Y_I 大致相同, 其他切缝角度 α 时 Y_I 呈现先减小后增大的趋势, $\theta=30^\circ$ 时最小, 90° 时最大。另外发现随 α 值的增大 Y_I 受层理角度影响变化更显著。相同层理角度下 Y_I 随 α 的增大逐渐减小, 且在较小的层理角度范围内 Y_I 受 α 的变化影响较显著。

Y_{II} 随层理角度变化见图 9 (b)。 $\alpha=0^\circ$ 时, Y_{II} 随层理角度 θ 增大呈现先增大后减小的变化趋势, $\theta=30^\circ$ 时达到最大, 而 $\theta=0^\circ, 90^\circ$ 试样 Y_{II} 均等于零。 $\alpha=30^\circ \sim 60^\circ$ 时, Y_{II} 随层理角度 θ 增大整体呈减小趋势, 且在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 层理角度范围内变化较明显。

由计算结果知, 当 $\alpha=0^\circ$ 时, $\theta=0^\circ$ 和 90° 试样仍发生 I 型断裂, 而其余各试样均发生 I-II 复合型断裂, 且这些试样难以发生纯 II 型断裂。



(a) Y_I

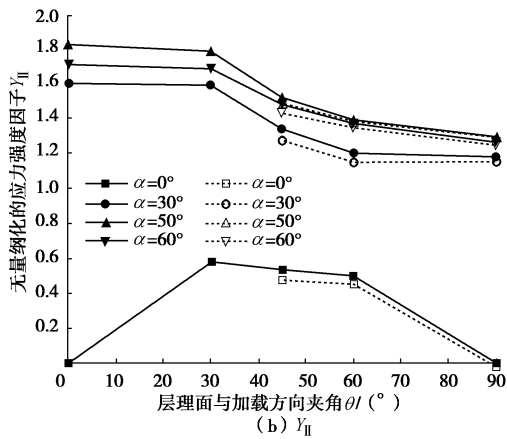


图9 不同层理角度下无量纲化的应力强度因子

Fig. 9 Variation of normalized stress intensity factors with inclination angle

2.5 起裂角

扩展有限元方法 (XFEM) 是一种基于单位分解思想的数值计算方法, 该方法在常规有限元法的基础上进行了重要改进, 基本思想是用扩充的带有不连续性质的形函数基来表示计算域内的强、间断, 相对于常规有限元方法其最大特点是裂缝扩展路径不受有限元网格划分的影响, 并能根据材料属性和破坏准则自行判断裂纹扩展方向, 可直观再现裂缝扩展过程。

Mohtarami 等^[22]提出了基于 XFEM 数值计算来预测各向异性岩石中裂纹起裂方向和裂纹扩展路径的方法, 借助该方法建立以上 I-II 复合型断裂试样的数值模型, 建模时对层理面处单元进行网格细化处理, 且层理面处材料强度参数要低于非层理面处材料强度参数, 通过不断调整数值试样的断裂能, 最大切应力及弹性模量等参数, 直至获得的 I-II 复合型断裂韧度与试验结果较吻合时为止, 然后将该组参数输入 XFEM 程序对试样的断裂路径和裂纹起裂角进行预测。XFEM 数值计算得到的断裂韧度与试验结果的比较见图 10。

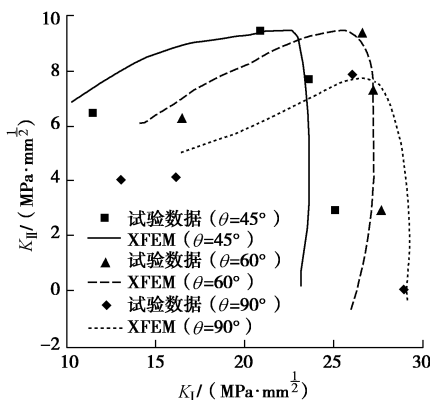


图 10 XFEM 计算得到的断裂韧度与试验结果的比较

Fig. 10 Comparison of fracture toughness between XFEM and experimental results

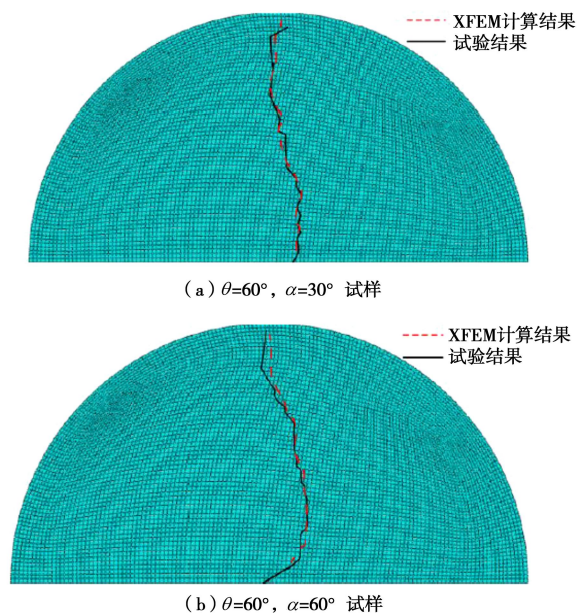
各层理角度试样起裂角的计算结果与试验结果见表 4。可见, 切缝角 $\alpha=0^\circ$ 时, 层理面与荷载方向夹角 $\theta=30^\circ$ 试样的起裂角最大, $\theta=45^\circ \sim 90^\circ$ 时, 起裂角随层理角度 θ 的增大而减小, $\theta=0^\circ, 90^\circ$ 试样的起裂角接近 0° ; 切缝角 $\alpha=30^\circ \sim 60^\circ$ 时, 相同层理角度试样的起裂角随 α 的增大而增大。

表 4 试验与数值方法测得的起裂角

Table 4 Comparison of crack initiation angles obtained from experiments and XFEM

层理面角度 $\theta/(^\circ)$	切缝倾角 $\alpha/(^\circ)$	试验结果 $/(^\circ)$	XFEM 计算结果 $/(^\circ)$
0	0	0	0
30	0	-28	-25.4
	0	10	8.0
45	30	-7	-3.2
	50	-18	-12.2
	60	-55	-46.3
60	0	7	4.9
	30	28	29.5
	50	43	38.8
	60	-10	-6.2
90	0	0	-0.5
	30	5	6.3
	50	8	6.8
	60	-50	-48.4

部分试样断裂路径的数值计算结果与试验结果见图 11, 对比分析可见, 基于 XFEM 方法的理论计算结果与试验结果吻合较好, 表明 I-II 复合型断裂模式下, 层理面方向对试样的断裂韧度、起裂角及断裂路径均有一定的影响。



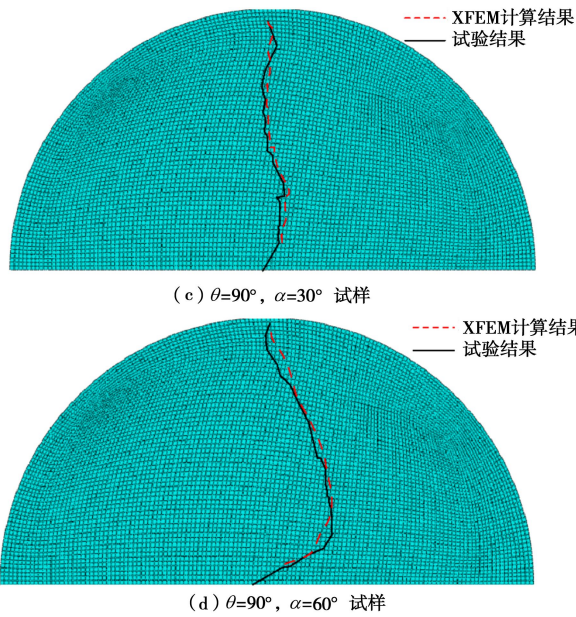


图 11 部分试样断裂路径的数值计算结果与试验结果比较
Fig. 11 Comparison of fracture trajectory obtained by numerical and experimental methods

3 结 论

(1) 三点弯试验条件下, 半圆形层理发育砂岩试样破裂模式受层理面与荷载方向夹角 θ 控制: $\theta=0^\circ$ 时, 沿层理面张裂破坏; $\theta=30^\circ$ 时, 沿层理面剪切破坏; $\theta=45^\circ$, 60° 时, 切层和沿层理面混合破坏; $\theta=90^\circ$ 时, 切层破坏。

(2) 层理发育砂岩的断裂荷载随层理角度变化具有明显的各向异性特征, 垂直层理方向断裂荷载较高, 平行层理方向断裂荷载较低。断裂荷载与破裂模式存在一定相关性, 沿层理方向破裂占主导的试样强度小于以切层破裂占主导的试样强度。

(3) 切缝角 $\alpha=0^\circ$ 时, 层理面与荷载方向夹角 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 试样均为 I 型断裂, 且 $\theta=90^\circ$ 试样的断裂韧度最大, $\theta=0^\circ$ 试样的断裂韧度最小, $K_{I\max}/K_{I\min}=2.36$, 可见层理方向对岩石的断裂韧度影响较明显。

(4) 各试样无量纲化应力强度因子 (Y_I , Y_{II}) 的计算结果表明: 相同试验条件下, 当切缝角 $\alpha=0^\circ$ 时, Y_{II} 受层理面与荷载方向夹角 θ 影响较大, $\theta=0^\circ$, 90° 试样 $Y_{II}=0$, 呈现 I 型断裂; $\theta=45^\circ$, 60° 试样 $Y_{II} \neq 0$, 呈现 I-II 复合型断裂; $\theta=30^\circ$ 试样 Y_{II} 值最大, 以 II 型断裂占主导; 当切缝角 $\alpha=30^\circ \sim 60^\circ$ 时, Y_I 随层理面与荷载方向夹角 θ 的增大先减小后增大, 且切缝角 α 值越大, Y_I 受层理角度影响越显著; Y_{II} 随层理面与荷载方向夹角 θ 增大整体呈减小趋势。

(5) 通过扩展有限元方法 (XFEM) 计算出自切

缝尖端起裂试样的断裂韧度, 起裂角及断裂路径与试验结果吻合较好, 结果表明各试样的起裂角与层理面与荷载方向夹角 θ 和切缝角 α 有关: 切缝角 $\alpha=0^\circ$ 时, $\theta=30^\circ$ 试样的起裂角最大, $\theta=0^\circ$, 90° 试样的起裂角接近 0° ; 切缝角 $\alpha=30^\circ \sim 60^\circ$ 时, 相同层理角度试样的起裂角随 α 的增大而增大。

参考文献:

- [1] ABBASS T, ANDRE V. Effect of layer orientation on the failure of layered sandstone under Brazilian test conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, **47**: 313 - 322.
- [2] CHEN C S, PAN E, AMADEI B. Determination of deformability and tensile strength of anisotropic rock using Brazilian tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, **35**(1): 43 - 61.
- [3] DEBECKER B, VERVOORT A. Experimental observation of fracture patterns in layered slate[J]. International Journal of Fracture, 2009, **159**(1): 51 - 62.
- [4] CHO J W, KIM H, JEON S, et al. Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, **50**: 158 - 169.
- [5] 刘运思, 付鹤林, 饶军应, 等. 不同层理方位影响下板岩各向异性巴西圆盘劈裂试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(4): 785 - 791. (LIU Yun-si, FU He-lin, RAO Jun-ying, et al. Research on Brazilian disc splitting tests for anisotropy of slate under influence of different bedding orientations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(4): 785 - 791. (in Chinese))
- [6] 衡 帅, 杨春和, 张保平, 等. 页岩各向异性特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(3): 609 - 616. (HENG Shuai, YANG Chun-he, ZHANG Bao-ping, et al. Experimental research on anisotropic properties of shale[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(3): 609 - 616. (in Chinese))
- [7] 刘胜利, 陈善雄, 余 飞, 等. 绿泥石片岩各向异性特性研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(12): 3616 - 3623. (LIU Sheng-li, CHEN Shan-xiong, YU Fei, et al. Anisotropic properties study of chlorite schist[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(12): 3616 - 3623. (in Chinese))
- [8] KE C C, CHEN C S, TU C H. Determination of fracture toughness of anisotropic rocks by boundary element method[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2008, **41**(4): 509 - 538.
- [9] DUTLER N, NEJATI M. On the link between fracture

- toughness, tensile strength, and fracture process zone in anisotropic rocks[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, **201**: 56 - 79.
- [10] KATAOKA M, OBARA Y, KURUPPU M. Estimation of fracture toughness of anisotropic rocks by semi-circular bend (SCB) tests under water vapor pressure[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, **48**(4): 1353 - 1367.
- [11] CHANDLER M R. Fracture toughness anisotropy in shale[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2016, **121**: 1 - 16.
- [12] CHONG K P, KURUPPU M D. New specimen for fracture toughness determination of rock and other materials[J]. *International Journal of Fracture*, 1984, **26**(2): 59 - 62.
- [13] LIM I L, JOHNSTON I W. Fracture testing of a soft rock with semi-circular specimens under three-point bending: part 1-mode I[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1994, **31**(3): 185 - 197.
- [14] LIM I L, JOHNSTON I W. Stress intensity factors for semi-circular specimens under three-point bending[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1993, **44**(3): 363 - 382.
- [15] KURUPPU M D, OBARA Y, AYATOLLAHI M R. ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, **47**: 267 - 274.
- [16] AYATOLLAHI M R, ALIHA M R M. Wide range data for crack tip parameters in two disc-type specimens under mixed mode loading[J]. *Computational Materials Science*, 2007, **38**(4): 660 - 670.
- [17] ALIHA M R M, SISTANINIA M. Geometry effects and statistical analysis of mode I fracture in giting limestone[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, **51**: 128 - 135.
- [18] CHONG K P, KURUPPU M D, KUSZMAUL J S. Fracture toughness determination of layered materials[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1987, **28**(1): 43 - 54.
- [19] WANG S S, YAU J F, CORTEN H T. A mixed-mode crack analysis of rectilinear anisotropic solids using conservation laws of elasticity[J]. *International Journal of Fracture*, 1980, **16**: 247 - 259.
- [20] BANKS-SILLS L, HERSHKOVITZ I, WAWRZYNEK P A, et al. Methods for calculating stress intensity factors in anisotropic materials: part I $z=0$ is a symmetric plane[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2005, **72**(15): 2328 - 2358.
- [21] BANKS-SILLS L, WAWRZYNEK P A, CARTER B, et al. Methods for calculating stress intensity factors in anisotropic materials: part II arbitrary geometry[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2007, **74**(8): 1293 - 1307.
- [22] MOHTARAMI E, BAGHBANAN A, HASHEMOLHOSSEINI H. Prediction of fracture trajectory in anisotropic rocks using modified maximum tangential stress criterion[J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, **92**: 108 - 120.