

文章编号:1001-4888(2021)01-0069-11

岩石断裂尺寸效应测试装置研制及实验研究^{*}

张安林¹, 张朝鹏², 李存宝², 刘洋², 艾婷², 任利², 郑良娟¹

(1. 四川大学 水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川成都 610065;

2. 四川大学 深地科学与工程教育部重点实验室, 四川成都 610065)

摘要: 面向岩石断裂尺寸效应研究的实验装置需求, 针对现有技术中三点弯曲装置对多组尺寸岩石试件适应性差、最小跨距的测试量程不足等问题, 研制了一种可灵活用于岩石断裂尺寸效应测试的三点弯曲装置。装置采用“两体分离式”的设计, 三种不同型号的滚子与压头体、支座体配合使用, 有效避免了不同尺寸试件采用同一直径滚子测试带来的实验精度问题; 同时, 装置实现了4mm~100mm不同实验跨距的设置, 可同时满足尺寸变化较大的多组试件开展断裂测试。借助该装置开展了页岩三点弯曲断裂尺寸效应测试, 并利用ABAQUS软件进行了相关数值计算。获得了不同尺寸页岩试件的Ⅰ型表观断裂韧度、名义强度等断裂参数, 结果显示: 尺寸对页岩的Ⅰ型表观断裂韧度和名义强度有显著影响。实验计算值与Bazant提出的尺度律模型(SEL)对比, 结果吻合良好, 借助SEL曲线可对页岩的断裂强度进行有效预测, 同时表明该装置具有实验高效、高精准性等优点。

关键词: 岩石; 尺寸效应; 三点弯曲装置; Ⅰ型断裂韧度; 名义强度; ABAQUS

中图分类号: TU45

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-20-062

0 引言

岩石内部随机分布着大量裂隙、孔洞、弱面等初始缺陷, 致使岩石材料存在明显的尺寸效应^[1,2]。大量研究表明, 不同尺寸岩样的变形破坏特征存在明显差异^[3,4], 尺寸对岩样的断裂韧度^[5,6]、强度^[7-9]、弹性参数^[10]、渗透率^[11]等力学参数有显著影响, 岩石尺寸效应问题备受关注。在土木工程领域, 时常发生由裂纹扩展导致的脆性或半脆性断裂破坏, 结构的安全性与耐久性受到严重威胁。断裂韧度作为材料的重要力学参数, 是结构强度设计的重要依据^[12]。同时, 在隧道开挖、煤矿开采, 尤其是页岩气等非常规油气资源开发的岩石力学工程中, 岩石断裂强度参数对于发展岩石“破裂技术”(如水力压裂技术)具有重要意义^[13-15]。目前, 普遍通过实验室尺度下岩石试件的断裂测试来获取工程岩体的断裂强度参数^[16,17], 然而现场岩体尺寸通常为几米到几十米, 甚至是几百米量级的大尺度, 尺寸效应影响下, 实验室尺度获取的断裂韧度等强度参数势必会与工程岩体的实际情况有所偏差, 直接应用于工程设计有失准确^[7]。系统开展岩石断裂尺寸效应研究, 对于提升工程设计参数的合理性、真正意义上实现室内测试结果指导工程实践具有重要科学价值。

开展不同尺寸岩石试件的三点弯曲实验并辅以相关力学计算是研究岩石断裂尺寸效应特征的有效手段, 需要借助一定量程和精度的加载设备及配套的三点弯曲装置。在加载设备方面, 岛津万能试验机 and MTS 815 岩石力学测试系统等高性能测试设备可为三点弯曲实验提供加载。在三点弯曲装置方面,

^{*} 收稿日期: 2020-04-06; 修回日期: 2020-08-18

基金项目: 国家自然科学基金委重点项目(U1965203); 四川省青年科技创新研究团队资助项目(2017TD0007)

通信作者: 张朝鹏(1989—), 男, 实验师, 博士, 主要研究方向: 岩土力学与工程。Email: zhangzp@scu.edu.cn

如图 1 所示,岛津万能试验机等加载设备的原配三点弯曲装置的支滚和压滚直径偏大且尺寸唯一,测试量程对小尺寸试件的适应性差;同时,现有技术中鲜见最小测试跨距小于 10mm 的三点弯曲装置,并且装置设计也多采用了单一直径的压滚与支滚^[18-22],导致开展不同尺寸岩石试件的断裂测试时,三点弯曲装置的支滚和压滚直径无法更改。然而已有研究表明,压滚与支滚的直径显著影响岩石试件的三点弯曲测试结果^[23,24],滚子直径过大或过小均会造成不同程度的测试误差。可见,利用现有三点弯曲装置开展不同尺寸岩石试件的断裂测试,会存在精准性不高、最小跨距的测试量程不足、对岩石尺寸变化的适用性不强等问题,难以有效满足岩石断裂尺寸效应研究的装置需求。亟需研制出一种高精度、高效率、适用性强的三点弯曲断裂尺寸效应测试装置。



图 1 岛津万能试验机及原配三点弯曲装置

Fig. 1 Shimadzu universal experimental machine and original three-point bending device

因此,面向岩石断裂尺寸效应研究的实验装置需求,针对现有三点弯曲装置的不足,本文研制了一种可灵活适用于岩石断裂尺寸效应测试的三点弯曲装置,并借助该装置开展页岩断裂尺寸效应实验研究。通过实验结果与经典理论模型对比,一方面验证装置的可行性、可靠性与精准性,另一方面探索尺寸对页岩断裂特性的影响规律以及经典理论模型对页岩尺寸效应特征的适用性,以期为室内的页岩断裂强度测试结果合理应用于工程设计提供实验研究手段和理论参考。

1 测试装置的研制

1.1 装置设计

图 2 显示了三一点弯曲断裂尺寸效应测试装置的整体图,该装置主要由压头部分和支承部分两部分组成,各部分结构组成及尺寸设计分述如下:

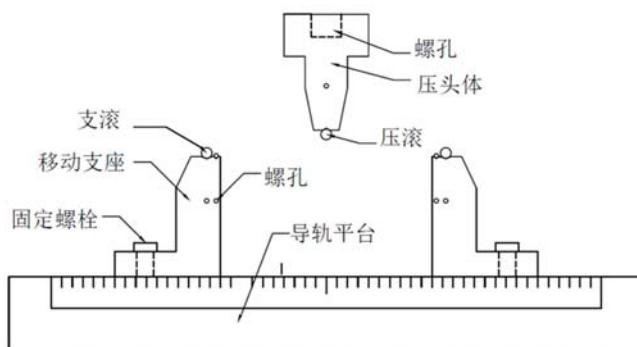


图 2 三点弯曲断裂尺寸效应测试装置的整体结构图

Fig. 2 Overall structure of three-point bending device for fracture size effect test

(1) 压头部分

压头部分与加载设备的荷载传感器直接相连,将荷载传递给试件。压头部分采用“两体分离式”设计,即由压头体与压滚两部分组成,压头结构及尺寸设计见图 3。如图 3(a)所示,压头体底部开一“V”型槽,用于放置压滚,两者通过张力弹簧连接,保证加载过程中压滚相对稳定。压滚可在槽中自由旋转,

减小了压滚与试件间的摩擦力。在压头体的顶部开一中心螺孔,螺孔内带螺纹,与加载设备传感器的自带螺杆相匹配,保证压头能均匀地传递荷载。如图 3(b)所示,压滚设计三种型号,可根据试件尺寸灵活选择,其形状与尺寸与支滚一致,并与支滚对应使用。

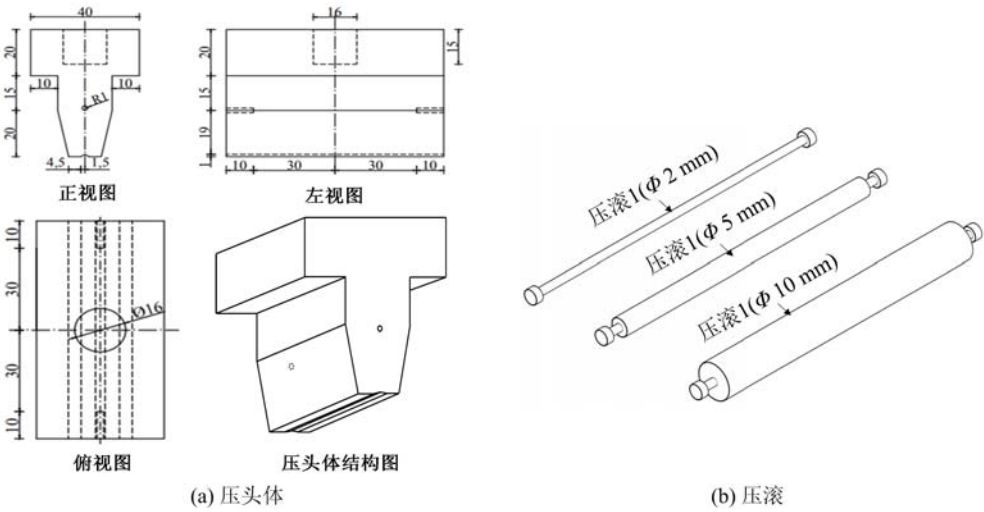


图 3 压头结构及尺寸设计(单位:mm)

Fig. 3 Structure and size design of indenter (unit: mm)

(2) 支承部分

支承部分用于承载上部荷载,由移动支座、导轨平台、底座、固定螺栓等组成,其整体结构见图 4。移动支座设计左右两个,导轨平台上设有凸形凹槽和刻度尺,利用底座与固定螺栓可使左右支座在导轨平台上稳定滑动和固定位置。左右支座具有相同的结构与尺寸,同样采用“两体分离式”的设计理念(见

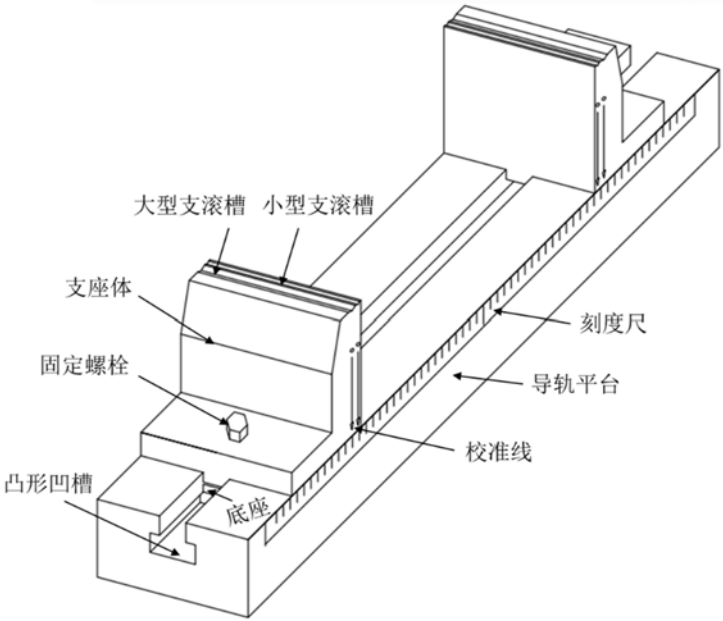


图 4 支承部分整体结构图

Fig. 4 The overall structure of the supporting part

图 5)。图 6 显示了支座体及支滚的结构与尺寸设计,支座体上设有大小支滚槽用于放置和固定支滚。支滚同样设计三种直径,根据试件的尺寸可对应选择相适配的支滚直径,并相应放置于合适大小的支滚槽内。支滚通过张力弹簧和螺栓与支座体进行连接,以此实现多组尺寸岩石试件分别采用不同直径的支滚来开展断裂测试。此外,支座体左右两侧设计了校准线,与导轨槽上的高精度刻度尺配合使用,可实现不同实验跨距的精准调整。第一条校准线距支座体边缘 2mm,并与支滚的竖向直径重合,可满足

最小跨距为 4mm 的三点弯曲测试,对于精细尺寸试件的三点弯曲测试适用性较强;刻度尺的最大量程为 100mm,可满足跨距为 100mm 的大尺寸试件测试。

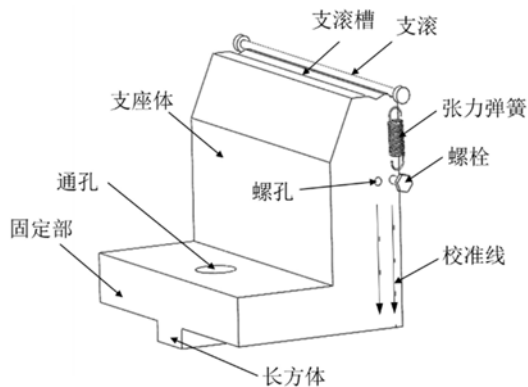


图 5 支座结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of support structure

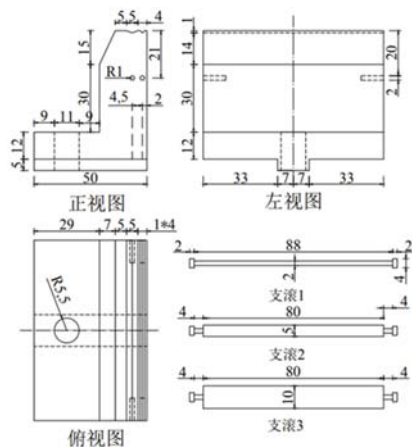


图 6 支座体及支滚尺寸设计(单位:mm)

Fig. 6 Size design of supporting body and rollers(unit: mm)

1.2 装置功能与特色

已有研究表明,压滚与支滚的直径显著影响岩石试件的三点弯曲测试结果^[23,24],滚子直径过大,滚子与试件接触位置处不易形成线性分布荷载,直径太小则容易造成局部应力集中。然而,目前的三点弯曲装置设计采用了单一直径的压滚与支滚^[18-22],利用同一三点弯曲夹具开展岩石断裂尺寸效应研究时将会引起实验精度问题;倘若考虑滚子直径对实验精度的影响,则需要频繁更换三点弯曲夹具,大量的装置拆卸工作会降低测试效率。同时,现有技术中也鲜见最小测试跨距小于 10mm 的三点弯曲装置^[18-22],难以满足长度小于 10mm 的精细岩石试件的断裂测试需求,从而无法真正地实现从小尺寸到大尺度去研究尺寸对岩石断裂特征的影响。

针对现有技术的不足,本文研制了一种可灵活应用于岩石断裂尺寸效应测试的三点弯曲装置。一方面,考虑到滚子直径对测试结果的影响,研制装置采用了“两体分离式”的设计,测试过程中可灵活选择与岩石试件尺寸相适配的滚子型号,有效避免了仅使用同一直径滚子进行测试所引起的实验精度问题,以及考虑实验误差后频繁更换夹具带来的操作麻烦,提高了断裂尺寸效应测试的精度与效率。另一方面,充分考虑了断裂尺寸效应测试时岩石试件的尺寸变化范围,研制装置设计的最小跨距为 4mm,最大跨距为 100mm,可满足 4~100mm 实验跨距的精准调整,量程精度高且范围大,尤其是对小尺寸精细试件同样具备较强的适用性。此外,若装置工作较长时长后,装置的支滚与压滚出现老化磨损,继续使用会造成较大实验误差,只需更换支滚与压滚,支座体与压头体仍可继续使用,且实验精度不变,极大地节约了材料,降低了成本费用。

2 页岩断裂尺寸效应的实验研究

为促进页岩气的有效开采,水力压裂技术备受关注。获取页岩断裂韧度等强度参数对于发展水力压裂技术,优化储层压裂设计至关重要^[13-15]。因此,开展页岩断裂尺寸效应实验研究,获取不同尺寸页岩试件的断裂强度特性,探明断裂强度与尺寸变化之间的规律,寻求有效的理论描述模型,有助于室内力学测试结果更好地服务于页岩气勘探开发工程的储层压裂设计需求。

2.1 试样与设备

本文测试采用的页岩试样取自重庆石柱地区的龙马溪组页岩露头,在实验室用钻机和车床加工磨具等加工机械,经过钻取、切割、粗磨、精磨和切缝等过程加工成三种尺寸的带切槽方形试件,尺寸分别为(长 $2W \times$ 厚 $B \times$ 宽 W): 10mm $\times$ 30mm $\times$ 5mm、20mm $\times$ 30mm $\times$ 10mm、40mm $\times$ 30mm $\times$ 20mm,切

槽长度分别为 2.5mm、5mm 和 10mm,加工好的三种尺寸页岩试件见图 7。

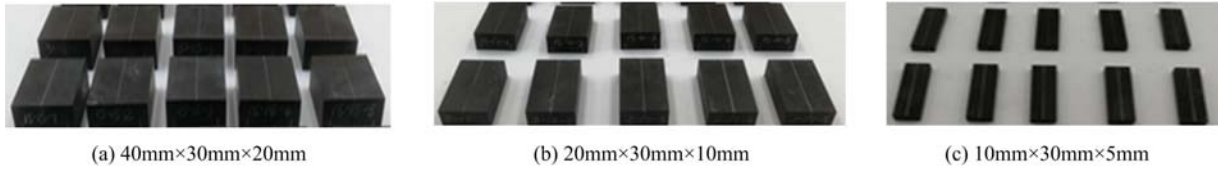


图 7 不同尺寸页岩试件

Fig. 7 Shale specimens with different sizes

测试加载设备采用岛津 AG-X 10kN 电子万能材料试验机,荷载量程为 10kN,传感器的精度级别为 0.5 级,即荷载为 100N 时,误差不超过 0.5N,保证了测试荷载具有较高的精准性。如图 8 所示,自主研发的三点弯曲装置与 AG-X 10kN 电子万能材料试验机可较好地匹配,两者联合使用可实现不同尺寸页岩试件断裂荷载的精准获取。

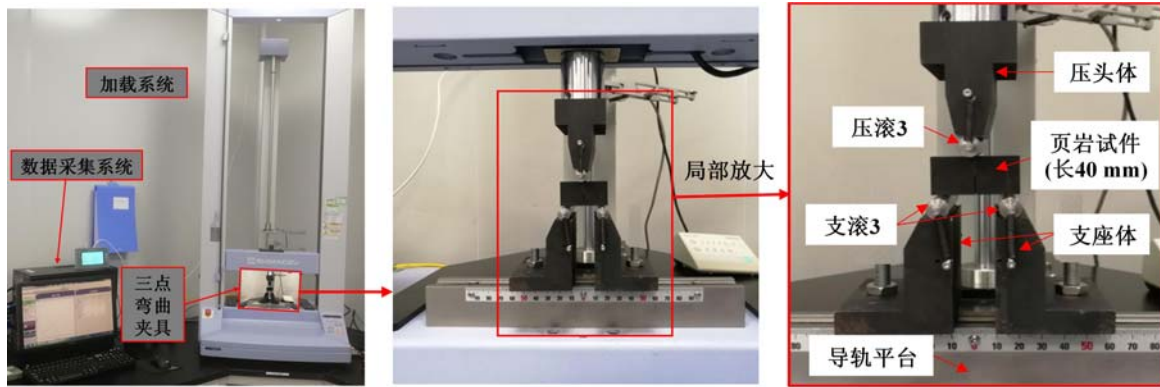


图 8 加载设备与自主研发的三点弯曲装置

Fig. 8 Loading equipment and self-developed three-point bending device

2.2 实验过程

(1) 以尺寸为 10mm×30mm×5mm 的页岩试件为例,考虑该组试件尺寸较小,实验时将支滚 1(直径为 2mm)放置于支座体的小型支滚槽内,将压滚 1(直径为 2mm)放置于压头体的 V 型槽内,用弹簧与螺栓对支滚和压滚进行固定。

(2) 将支承部分对中固定于试验机的操作平台上,压头和试验机传感器相连接。根据设定的实验跨距,利用小型支滚槽对应的校准线和导轨槽上的刻度线确定移动支座的位置,确定位置后,利用固定螺栓和底座将移动支座固定在导轨槽内。

(3) 将页岩试件对称放置于支滚上,缓慢向下降压头,当压头与试件上表面的距离为 1~2mm 时,调整压头方向,使压滚轴线与试件厚度 B 方向上的对称线重合,而后继续降低压头使两者轻微接触。

(4) 施加荷载,试验机实时记录实验过程中的荷载、位移等数据,直到页岩试件发生断裂破坏,实验结束。

开展 20mm×30mm×10mm 页岩试件的断裂测试时,选用支滚 2(直径为 5mm)和压滚 2(直径为 5mm)分别与支座体和压头体相连接;对于 40mm×30mm×20mm 页岩试件,选用支滚 3(直径为 10mm)和压滚 3(直径为 10mm)分别与支座体和压头体相连接,并根据设计的实验跨距重复步骤(1)至(4)。

2.3 数据分析原理

(1) 基于线弹性断裂力学理论(LEFM)的 K_{IcA} 计算方法
三点弯曲测试中,页岩试件的尺寸标识及受载情况见图 9。

页岩的 I 型表观断裂韧性 K_{IcA} 可表示为^[25,26]

$$K_{IcA} = \frac{P_u \sqrt{\pi a_0}}{2WB} Y_I \left(\frac{a_0}{W}, \frac{S}{W}, \theta, E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{23}, G_{12}, \beta_0 \right) \quad (1)$$

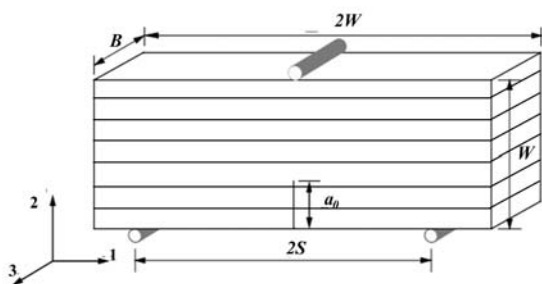


图 9 页岩试件的尺寸标识及加载情况

Fig. 9 Size identification and loading condition of shale specimen

式中: P_u 为峰值荷载; B 为试件厚度; W 为试件高度; θ 为层理倾角; β_0 为初始裂纹倾角, 此处均为 0° ; E_1 、 E_2 、 ν_{12} 、 ν_{23} 、 G_{12} 为页岩的 5 个弹性参数, 基于单轴压缩实验结果计算获得, 此处为: $E_1 = 18.84 \text{ GPa}$, $E_2 = 15.08 \text{ GPa}$, $\nu_{12} = 0.282$, $\nu_{13} = 0.255$, $G_{12} = 11.18 \text{ GPa}$; S 为支座半距, 此处 $S/W = 0.75$; a_0 为初始裂纹长度, 此处 $a_0/W = 0.5$; Y_I 为 I 型断裂无量纲应力强度因子, 通过数值标定获得。

(2) 页岩断裂尺寸效应分析的理论模型

Li 等^[5]在研究 Marcellus 页岩的准脆性

断裂尺寸效应特征时, 采用下式计算页岩的三点弯曲断裂名义强度 σ_N :

$$\sigma_N = \frac{1.5 SP}{W^2 B} \quad (2)$$

同时, 得到了页岩断裂强度与脆性数 β 之间的理论关系式, 本质上是 Bazant 等提出的尺度律模型 (Size Effect Law)^[27,28] 的另一表现形式:

$$\sigma_{Nu} = \frac{\sqrt{E^* G_{Ic}}}{\sqrt{W g_0 + c_f g'_0}} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{1 + \beta}} \quad (3)$$

$$\frac{K_{IcA}}{K_{Ic}} = \sqrt{\frac{W g_0}{W g_0 + c_f g'_0}} = \sqrt{\frac{\beta}{1 + \beta}} \quad (4)$$

式中: $\sigma_0 = [E^* G_{Ic} / (c_f g'_0)]^{1/2}$, $E^* = [(2E_1 E_2 \lambda^{1/2}) / (1 + \rho)]^{1/2}$, $\lambda = E_1 / E_2$, $\rho = 0.5(E_1 E_2)^{1/2} / G_{12} - (\nu_{12} \nu_{21})^{1/2}$; c_f 为有效断裂过程区 (FPZ) 的长度; G_{Ic} 为有效线弹性断裂能; β 为脆性数, $\beta = W/W_0$, $W_0 = c_f g'_0 / g_0$, $g_0 = g(\alpha_0)$, 即在无量纲裂纹长度 $\alpha = a_0/W$ 处的无量纲能量释放率 (a_0 为初始裂纹长度), 可由数值计算获得, $g'_0 = g'(\alpha_0)$; K_{IcA} 为页岩 I 型表观断裂韧性; K_{Ic} 为页岩 I 型断裂韧性, $K_{Ic} = (E^* G_{Ic})^{1/2}$ 。

2.4 实验结果与分析

试件采用宽度 W -序号的形式进行编号, 如: 5-1 代表了 $10 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 尺寸页岩试件的第一个试样。图 10 显示了三种尺寸下典型页岩试件的荷载—位移曲线, 可以看出, 不同尺寸页岩试件的变形过程未表现出明显差异, 最终破坏呈现出典型的脆性断裂特征。

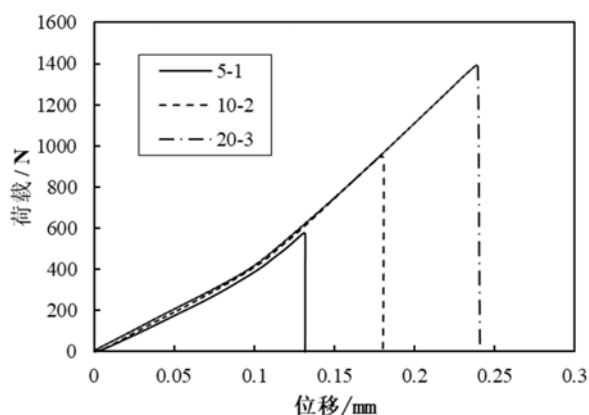


图 10 不同尺寸页岩试件的变形过程

Fig. 10 Deformation process of shale specimens with different sizes

对不同尺寸页岩试件变形过程的峰值荷载 P_u 进行了统计, 并基于式(1)借助 ABAQUS 软件对不同尺寸页岩试件的 I 型无量纲应力强度因子 Y_I 进行数值标定, 获得了三种尺寸页岩试件的 $Y_I =$

5.072 (数值模型中施加荷载 $P=1\text{kN}$),进而计算了不同尺寸页岩试件的 I 型表观断裂韧度 K_{IcA} ;同时基于式(3)计算了不同尺寸页岩试件的名义强度 σ_{Nu} ,计算结果如表 1 所示。

表 1 不同尺寸页岩试件的断裂强度

Tab.1 Fracture strength of shale specimens with different sizes

编号	P_u/N	σ_{Nu}/MPa	Y_I	$K_{IcA}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
5-1	508.471	7.561	5.702	0.856
5-2	577.229	8.598	5.702	0.972
5-3	598.552	8.851	5.702	1.008
10-1	847.589	6.294	5.702	1.010
10-2	947.589	7.055	5.702	1.129
10-3	915.359	6.799	5.702	1.090
20-1	1145.520	4.284	5.702	0.965
20-2	1491.250	5.562	5.702	1.256
20-3	1395.100	5.205	5.702	1.175

图 11 显示了三点弯曲测试中,页岩试件的名义强度与 I 型表观断裂韧度随尺寸的变化规律。由图可知,不同尺寸页岩试件的名义强度与 I 型表观断裂韧度存在显著差异,且随着尺寸增大,页岩名义强度呈减小趋势, I 型表观断裂韧度呈增大趋势,与已有研究结果的趋势相符合^[5]。这说明采用自主研发的三点弯曲装置开展页岩断裂尺寸效应研究,所获得的实验结果具有较强的可靠性;同时由于本文研究的页岩试件的尺寸更加精细(最小尺寸页岩试件的实验跨距为 5mm),说明自主研发的三点弯曲装置在保证获得可靠实验数据的基础上,还有效提高了断裂测试的最小测试量程。此外,实验结果显示出尺寸变化显著影响页岩断裂强度参数,说明实验室尺度下获取的页岩断裂强度特性与储层页岩的真实性质存在一定差异,有必要进一步探明页岩断裂强度的尺寸效应特征。

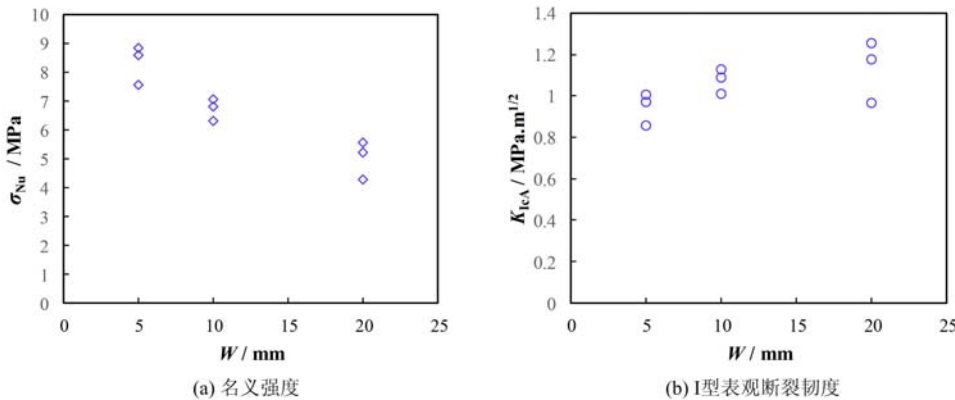


图 11 页岩名义强度与 I 型表观断裂韧度随尺寸变化规律

Fig. 11 The nominal strength and apparent fracture toughness of mode I of shale specimens vary with size

在前述基础上,借鉴 Li 等的研究方法^[5],本文利用 ABAQUS 软件对 20 种情况下(a_0/W 以 0.02 为增量,从 0.20 增加至 0.60)的无量纲能量释放率 g_0 进行数值计算。参照 Bazant 等^[29,30]的研究,利用 $g(\alpha)=\alpha P(\alpha)^2/[(1+2\alpha)^2(1-\alpha)^3]$ 对 g_0 进行插值, $P(\alpha)$ 为四次多项式,本文中 $P(\alpha)=3.1842\alpha^4-5.9067\alpha^3+5.2651\alpha^2-1.8634\alpha+1.7416$ (见图 12),进而计算 g'_0 。进一步,将式(3)做线性回归处理^[5],即变换为 $Y=AX+C$ ($X=g_0W/g'_0$, $Y=1/g_0\sigma_{Nu}^2$, $A=1/E^*G_{Ic}$, $C=c_f/E^*G_{Ic}$),得到 Y 与 X 之间的线性关系: $Y=0.00073039X+0.00029826$ ($R^2=0.76505269$)(如图 13 所示),进而计算得到页岩的断裂参数见表 2。

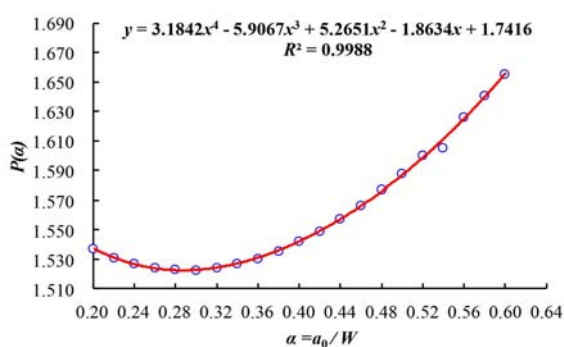
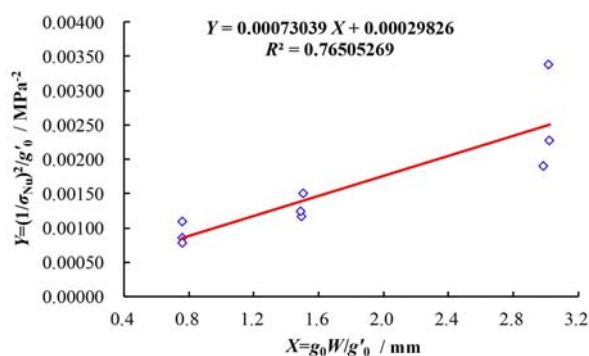
图 12 $P(\alpha)$ 多项式计算Fig. 12 Calculation of polynomial $P(\alpha)$ 

图 13 基于名义强度的线性回归拟合

Fig. 13 Linear regression fitting based on nominal strength

表 2 基于尺寸效应分析的断裂参数计算结果

Tab. 2 Calculation results of Fracture parameters based on size effect analysis

A	C	$G_{Ic}/(N \cdot m^{-1})$	c_f/mm	$K_{Ic}/(MPa \cdot m^{1/2})$
0.00073039	0.00029826	66.568	0.408	1.369

基于计算得到的页岩试件的断裂参数,将三点弯曲断裂尺寸效应测试得到的 σ_{Nu} 和 K_{IcA} 等实验值与上述的尺度律模型(SEL)进行对比分析。图 14(a)与图 14(b)分别显示了页岩名义强度和 I 型表观断裂韧度随脆性数 $\beta(\beta=W/W_0)$ 在双对数标度下的变化规律。可以看出,随着 β 无限增大, σ_{Nu}/σ_0 不断向 LEFM 渐近线逼近, K_{IcA}/K_{Ic} 不断增大并最终收敛于 1。说明只有当 β 足够大时($\beta>10$),即试件尺寸足够大时,采用经典 LEFM 理论方法计算的断裂强度参数才可靠,页岩的 I 型表观断裂韧度 K_{IcA} 才能近似地代替其真实的 I 型断裂 K_{Ic} 。整体来看,利用自主研发装置开展页岩断裂尺寸效应测试所获得的名义强度和 I 型表观断裂韧度与 Bazant 的尺度律模型吻合效果良好,说明可以采用 SEL 曲线来预测页岩的强度特性,借助该尺度律模型可为室内页岩断裂强度测试结果合理应用于工程设计提供参考。

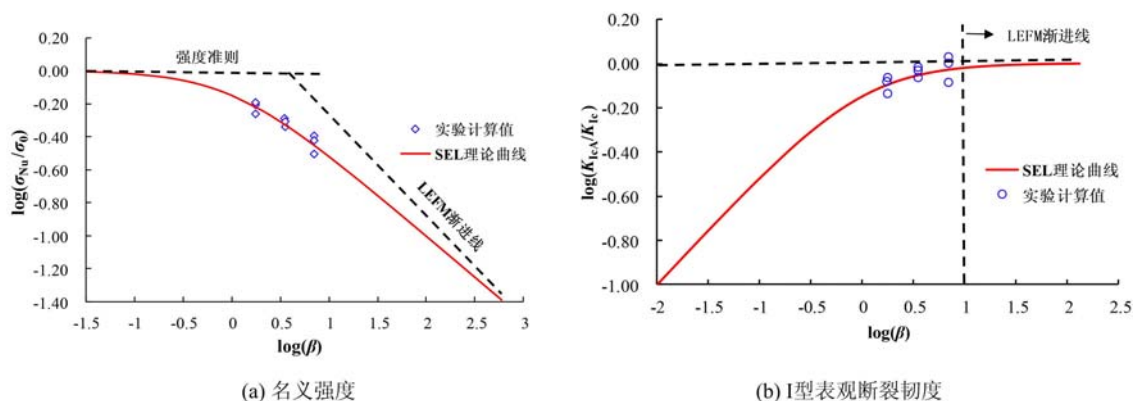


图 14 实验值与 SEL 理论曲线对比

Fig. 14 Comparison of experimental value and SEL theoretical curve

将基于自主研发装置所获得的实验数据与经典理论模型进行比较,结果吻合良好,进一步证明了该装置具有测试精度高的优点。同时,实验过程中针对不同尺寸的页岩试件开展断裂测试时,只需更换滚子的型号,避免了频繁拆卸夹具的麻烦和不必要的安装误差,提高了测试效率和适用性。可见,本文研制的三点弯曲装置具有良好的实验可靠性、精准性和高效性,能够有效地服务于岩石断裂尺寸效应测试的装置需求。

3 结论

本文研制了一种适用于岩石断裂尺寸效应测试的三点弯曲装置,借助该装置与 ABAQUS 有限元软件开展了页岩三点弯曲断裂尺寸效应实验研究,主要得到以下结论:

(1) 本文研制的实验装置主要优势在于:采用“两体分离式”的结构设计,三种不同型号的滚子与压头体、支座体配合使用,有效避免了不同尺寸岩石试件采用同一直径滚子开展断裂测试时所带来的实验精度问题,以及为了保证实验精度而频繁更换三点弯曲夹具所带来的拆卸麻烦,提高了岩石断裂尺寸效应测试的精度与效率;同时该装置可以实现最小实验跨距为 4mm、最大实验跨距为 100mm 的断裂测试,测试范围得到了有效提升,对大小尺寸或尺寸变化较大的各组岩石试件均有较强的适用性。此外,装置长期使用后若磨损老旧,只需更换滚子,支座体和压头体可继续使用且实验精度不变,极大地节约了加工材料与成本。

(2) 基于自主研制装置的页岩断裂尺寸效应实验结果表明:随着尺寸增大,页岩的名义强度呈减小趋势,Ⅰ型表观断裂韧度呈增大趋势,尺寸变化显著影响页岩的断裂强度参数。这与已有研究结果的趋势相符合,验证了本文研制装置的测试可靠性。

(3) 将不同尺寸页岩试件的名义强度和Ⅰ型表观断裂韧度实验值与经典尺度律模型(SEL)对比,结果吻合良好,说明 SEL 曲线可以对页岩断裂强度进行较好地预测,可为室内页岩断裂强度测试结果合理应用于工程设计提供理论依据,同时也进一步验证了本文实验装置具有良好的测试精准性与高效性。

参考文献:

- [1] Bazant Z P. Size effect[J]. International Journal of Solids & Structures, 2000, 37(s1-2):69—80.
- [2] Planas J, Guinea G V, Elices M. Generalized size effect equation for quasi-brittle materials[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010, 20(5):671—687.
- [3] 陈思顺. 岩石单轴压缩条件下的尺寸效应及声发射特征[D]. 太原理工大学, 2019 (CHEN Sishun. Size effect and acoustic emission characteristics of rock under uniaxial compression[D]. Taiyuan Institutes of Technology, 2019 (in Chinese))
- [4] 王东坤. 石灰岩断裂特性的加载率与尺寸效应试验研究[D]. 河南理工大学, 2018 (WANG Dongkun. Experimental study on loading rate and size effect of limestone fracture characteristics[D]. Henan Institutes of Technology, 2018(in Chinese))
- [5] Li W X, Jin Z F, Cusatis G. Size effect analysis for the characterization of marcellus shale quasi-brittle fracture properties[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2019, 52(1):1—18.
- [6] Wang Y S, Hu X Z. Determination of tensile strength and fracture toughness of granite using notched three-point-bend samples[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2017, 50(1):17—28.
- [7] 杨高升. 岩石材料尺寸效应的研究[D]. 兰州大学, 2018 (YANG Gaosheng. Study on the size effect of rock materials[D]. Lanzhou University, 2018(in Chinese))
- [8] 郭国潇, 陈世江. 基于颗粒流程序花岗岩单轴抗压强度的尺寸效应[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(29):33—38 (GUO Guoxiao, CHEN Shijiang. Size effect of uniaxial compressive strength of granite based on particle flow code [J]. Science Technology & Engineering, 2019, 19(29):33—38 (in Chinese))
- [9] 李地元, 肖鹏, 谢涛, 等. 动静态压缩下岩石试样的长径比效应研究[J]. 实验力学, 2018, 33(1):93—100 (LI Diyuan, XIAO Peng, XIE Tao, et al. On the effect of length to diameter ratio of rock specimen subjected to dynamic and static compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(1):93—100 (in Chinese))
- [10] 孔晓璇. 地下工程围岩稳定性分析 FDEM 方法中模型力学参数尺寸效应研究[D]. 武汉大学, 2018 (KONG Xiaoxuan. Study on size effect of model mechanical parameters in FDEM method for stability analysis of surrounding rock in underground engineering[D]. Wuhan University, 2018 (in Chinese))
- [11] 高超. 岩石裂隙渗透性尺寸效应的数值试验研究[D]. 绍兴文理学院, 2019 (GAO Chao. Numerical simulation on size effect of permeability of a single rock fracture[D]. Shaoxing College of Arts & Sciences, 2019 (in

- Chinese))
- [12] 李一凡, 董世明, 黎坤运, 等. 三点弯曲型试件 I / II 复合型断裂的数值与实验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(4):557—566 (LI Yifan, DONG Shiming, LI Kunyun, et al. Numerical simulation and experimental study of there-point bending specimen's I / II mixed mode fracture[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(4): 557—566 (in Chinese))
- [13] 梁天成, 付海峰, 刘云志, 等. 水力压裂裂缝扩展声发射破裂机制判定方法研究[J]. 实验力学, 2019, 34(2): 358—364 (LIANG Tiancheng, FU Haifeng, LIU Yunzhi, et al. On the determination method of rupture mechanism in acoustic emission[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(2):358—364 (in Chinese))
- [14] 唐巨鹏, 路江伟, 许鹏, 等. 预制裂缝对煤系页岩水力压裂效果影响的试验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(1): 150—158 (TANG Jupeng, LU Jiangwei, XU Peng, et al. Experimental investigation on the effect of prefabricated cracks on hydrofracture of coal measure shale[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(1):150—158 (in Chinese))
- [15] 韩强, 屈展, 叶正寅, 等. 基于微米力学实验的页岩 I 型断裂韧度表征[J]. 力学学报, 2019, 51(4):1245—1254 (HAN Qiang, QU Zhan, YE Zhengyin, et al. Study on fracture toughness of mode I of shale micro-mechanical test[J]. Chinese Journal of Theoretical Applied Mechanics, 2019, 51(4):1245—1254 (in Chinese))
- [16] 陈建国, 邓金根, 袁俊亮, 等. 页岩储层 I 型和 II 型断裂韧性评价方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015(6): 1101—1105 (CHEN Jianguo, DENG Jingen, YUAN Junliang, et al. Determination of fracture toughness of modes I and II of shale formation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2015(6):1101—1105 (in Chinese))
- [17] Chandler M R, Meredith P G, Brantut N, et al. Fracture toughness anisotropy in shale[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2016, 121(3):1706—1729.
- [18] 乔永乐, 李磊, 沈薇, 等. 一种三点弯曲试验装置[P]. 中国专利: CN105547828A, 2020-02-07 (QIAO Yongle, LI Lei, SHEN Wei, et al. A three-point bending test device[P]. Chinese Patent: CN105547828A, 2020-02-07 (in Chinese))
- [19] 李欣, 刘东海, 王文彬, 等. 一种三点弯曲试验装置[P]. 中国专利: CN205067241U, 2016-03-02 (LI Xin, LIU Donghai, WANG Wenbin, et al. A three-point bending test device[P]. Chinese Patent: CN205067241U, 2016-03-02 (in Chinese))
- [20] 张盛, 王东坤, 王千红, 等. 一种对半圆盘试样进行三点弯曲试验的装置[P]. 中国专利: CN206074368U, 2017-04-05 (ZHANG Sheng, WANG Dongkun, WANG Qianhong, et al. A device for performing three-point bending test on semi-circular disc sample[P]. Chinese Patent: CN206074368U, 2017-04-05 (in Chinese))
- [21] 倪维宇, 陈道炯, 姚胜卫, 等. 三点弯曲力学性能的测量装置及方法[P]. 中国专利: CN103149024A, 2013-06-12 (NI Weiyu, CHEN Daojiong, YAO Shengwei, et al. Device and method for measuring three-point bending mechanical properties[P]. Chinese Patent: CN103149024A, 2013-06-12 (in Chinese))
- [22] 陈静, 冯夏庭, 江权, 等. 新型岩石试样三点弯曲试验装置[P]. 中国专利: CN202485995U, 2012-10-10 (CHEN Jing, FENG Xiating, JIANG Quan, et al. New three-point bending test device for rock samples[P]. Chinese Patent: CN202485995U, 2012-10-10 (in Chinese))
- [23] 邓娇, 邓小环, 应秀梅, 等. 压头半径对复合材料三点弯曲试件的影响[C]. 北京力学学会学术年会, 2012 (DENG Jiao, DENG Xiaohuan, YING Xiumei, et al. Influence of indenter radius on three-point bending test specimens of composite materials[C]. Beijing Mechanical Society Academic Conference, 2012 (in Chinese))
- [24] 寇绍全, 张宗贤. 压头侵入引起的岩石断裂[J]. 岩石力学与工程学报, 1989, 8(4):275—285 (KOU Shaoquan, ZHANG Zongxian. Rock fracture caused by intrusion of indenter[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 1989, 8(4):275—285 (in Chinese))
- [25] Bao G, Ho S, Suo Z, et al. The role of material orthotropy in fracture specimens for composites[J]. International Journal of Solids & Structures, 1992, 29(9):1105—1116.
- [26] 罗毅, 任利, 谢凌志, 等. 岩石 I / II 复合断裂韧度测试的单边切槽深梁试件:数值分析与标定[J]. 岩石力学与工程学报, 2016(a02):3633—3643 (LUO Yi, REN Li, XIE Lingzhi, et al. Single edge notched deep beam specimen to test I / II mixed-mode fracture toughness of rocks: numerical analysis and calibration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2016(a02):3633—3643 (in Chinese))

- [27] Bazant Z P, Planas J. Fracture and size effect in concrete and other quasi-brittle materials[M]. Boca Raton: CRC Press, 1998.
- [28] Bazant Z P, Gettu R, Kazemi M T. Identification of nonlinear fracture properties from size effect tests and structural analysis based on geometry-dependent R-curves[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1991, 28(1):43—51.
- [29] Bazant Z P, Daniel I M, Li Z. Size effect and fracture characteristics of composite laminates[J]. Journal of Materials Science & Technology, 1996, 118(3):317—324.
- [30] Bazant Z P. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1984, 110(4):518—535.

The development of testing device and experimental study on size effect of rock fracture

ZHANG Anlin¹, ZHANG Zhaopeng², LI Cunbao², LIU Yang²,

AI Ting², REN Li², ZHENG Liangjuan¹

(1. College of Water Resource and Hydropower, State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Key Laboratory of Deep Earth Science and Engineering for Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To meet the needs of experimental equipment for the study of size effect of rock fracture, a three-point bending device which can be flexibly applied to the testing was developed, for solving the problems of poor adaptability of three-point bending device to multi-size rock specimens and insufficient testing range of minimum span in the existing technologies. The design of “two-body separation” was adopted for this device, and three different types of rollers were used in combination with the indenter body and the supporting body to avoid the test accuracy problems caused by using rollers with the same diameter for specimens with different sizes. At the same time, the device realized the setting of different experimental spans with 4 mm ~ 100 mm, which simultaneously satisfied the needs of fracture testing of multiple groups of specimens with large size changes. With the help of this device, three-point bending fracture tests and the relevant numerical calculation of shale specimens with different sizes were carried out. Fracture parameters such as apparent fracture toughness of mode I and nominal strength of shale specimens with different sizes were obtained. The study results indicated that the rock fracture size had a significant effect on apparent fracture toughness of mode I and nominal strength of shale. The calculated results were in good agreement with the Size Effect Law (SEL) proposed by Bazant. It can be concluded that the fracture strength of shale can be predicted effectively by SEL curve, and the device has the advantages of high experimental efficiency and high precision.

Keywords: rock; size effect; three-point bending device; fracture toughness of mode I; nominal strength; ABAQUS