龙马溪页岩各向异性变形破坏特征及其机理研究

何柏^{1,2}, 谢凌志^{1,2*}, 李凤霞³, 赵鹏^{1,4}, 张瑶^{1,4}

1. 四川大学能源工程安全与灾害力学教育部重点实验室, 成都 610065;

2. 四川大学新能源与低碳技术研究院, 成都 610207;

3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100038;

4. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065

*联系人, E-mail: xielingzhi@scu.edu.cn

收稿日期: 2016-12-22; 接受日期: 2017-02-28; 网络出版日期: 2017-08-10

四川省科技支撑计划(编号: 2012FZ0124)和四川省科技计划项目-应用基础计划(编号: 2015JY0280)资助

摘要 页岩是由硬物质与软物质相互嵌混沉积成具有复杂薄层状结构的岩石, 其页理面内、面外的性质差异明显, 具有复杂的变形、破坏机理. 通过对川渝地区龙马溪组露头页岩开展室内宏观力学行为研究, 系统地分析了页岩体积变形规律, 得到了页岩在压缩应力作用下的4个变形阶段, 为研究页岩复杂的破坏规律奠定了基础, 同时探讨了不同加载方向与页理面法线方向的夹角对页岩强度、脆性、各向异性等的影响. 研究结果表明龙马溪组页岩是一种脆性较高、低孔隙度的岩石, 具有各向异性特征但并非十分显著. 所得研究结果进一步丰富了页岩数据库, 为全面认识页岩的室内力学性质提供了支撑, 其相关参数也可作为储层压裂改造设计提供参考.

关键词 页岩, 力学, 变形, 各向异性

PACS: 62.20.F-, 88.05.Ec, 83.60.-a, 91.60.-x

1 引言

页岩气作为一种高效清洁的非常规天然气, 其在全球范围内分布较广, 且储量巨大($456.23 \times 10^{12} \text{ m}^3$)^[1]. 但由于页岩性质复杂、渗透率极低($\approx 10^{-21} \text{ m}^2$), 按常规天然气开采方式对其进行商业化开采极其困难^[2,3]. 近年来, 随着水力压裂技术的日益成熟, 页岩气产量得以急剧增长, 美国页岩气产量已占其天然气总产量的8%^[4], 并于2009年接近 $1 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 超过我国当年常规天然气产量. 页岩气开发过程中, 页岩的物理力学性质和变形特征具有重要的影响. 首先, 实施水力压裂技

术进行储层改造, 裂缝起裂和扩展与页岩的力学性能密切相关; 其次, 页岩气储层多位于地表2000m以下^[5], 在实施储层改造增渗过程中需要钻入长度2.5km以上的垂直/水平井, 钻井过程中90%的井壁稳定性问题出现在页岩层^[6], 因此研究页岩的力学行为对发展页岩气开采技术具有重要作用.

大量的研究表明, 构成页岩的物质成分繁多, 既含有相对较软的黏土、油母质等, 也含有相对较硬的石英、方解石等^[7,8], 这些硬物质与软物质相互嵌混沉积成具有复杂薄片层状结构的页岩, 其页理面内、面外的性质差异明显, 在实际工程应用或研究中往往

引用格式: 何柏, 谢凌志, 李凤霞, 等. 龙马溪页岩各向异性变形破坏特征及其机理研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 114611
He B, Xie L Z, Li F X, et al. Anisotropic mechanism and characteristics of deformation and failure of Longmaxi shale (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 114611, doi: 10.1360/SSPMA2016-00534

将其作为横观各向同性材料处理^[9]. 因此, 页岩的强度、变形及其破坏模式不仅与温度^[9,10]、围压^[11-13]、加载速率^[14]、矿物含量^[8,15]等因素有关; 而且由于存在典型的页理结构, 使得其与加载方向和页理面法线方向的夹角密切相关, 是一种受多因素影响的岩石. 一般而言, 页岩在间接拉伸(巴西劈裂)作用下主要表现出3种破坏形式, 且当加载方向与页理面法线方向的夹角为 0° 时其间接拉伸强度最大, 当夹角逐渐增大至 90° 时其拉伸强度逐渐降低^[5,16,17]; 但页岩的弹性模量的变化规律正好与间接拉伸强度相反, 即当夹角由 0° 逐渐增加至 90° 时, 其弹性模量随夹角单调递增^[18](文献^[19]与之相反); 然而页岩强度却不呈简单的单调关系变化, 通常夹角为 0° 和 90° 时的强度差异较小, 而在夹角为 $60^\circ \pm 15^\circ$ 时最低^[20,21].

尽管在过去的几十年里, 学者们对页岩的物理力学性质展开了多方面的讨论, 并获得了不少有益的结论; 然而调研发现不同地区页岩的物理力学性质差异明显, 如北海页岩的弹性模量仅为 $0.8\text{--}1.9\text{GPa}$ ^[13], 而Barnett地区页岩的弹性模量却高达 46.4GPa ^[14], 两者相差20倍以上. 因此不同地区的页岩参数难以直接借鉴或应用, 我们仍需要深入探讨不同地区页岩的物理力学性质, 以进一步丰富页岩数据库, 指导工程实践. 页岩的峰后软化损伤特性对页岩气开采有着重要的影响^[22], 然而页岩在经历峰值后与常规的均质砂岩形成一条单一的剪切带明显不同, 由于页理结构的影响使得其破坏模式极其复杂, Niandou等人^[21]将页岩在压缩荷载作用下的破坏模式归纳成3类, 即张性与页理面滑动破坏模式、滑动破坏模式、剪切带破坏模式, 然而这仅代表着页岩的破坏现象, 不能解释页岩复杂的破坏机理, 因此我们仍需要系统分析页岩峰前变形特征, 以进一步深入认识页岩的破坏机理.

本文通过对川渝地区龙马溪组页岩开展室内宏观力学特征研究, 探讨了不同加载方向与页理面法线方向的夹角对页岩压缩强度、各向异性等的影响, 系统地分析了页岩复杂的变形破坏机理, 为全面认识龙马溪组页岩的室内力学性质提供了支撑, 得到的相关参数也可作为储层压裂改造设计提供参考.

2 页岩物理性质与实验方法

页岩气储层地质埋藏较深, 钻取储层原位页岩成本高昂, 且有效岩心较少, 而系统全面地开展页岩力学性能研究所需页岩样本量巨大, 钻取岩心将是一项巨大的开销. 刘江涛等人^[23]研究表明, 川渝地区志留系龙马溪组露头页岩的物质成分及含量与该地区深部储层页岩相近, 说明该地区露头页岩可在一定程度上反映储层页岩的性质. 因此, 本文系列实验的页岩全部取自川渝地区志留系龙马溪组的页岩露头, 该区域为灰黑色的页岩, 页理面清晰可见, 呈波痕状发育. XRD测试结果显示本文所用页岩 SiO_2 含量为46%、硅铝酸盐含量23%、云母质含量31%. 由图1可知, 龙马溪组页岩是由“Stiff”部分与“Soft”部分相互嵌混叠合在一起, 且“Stiff”部分中无明显孔隙结构存在, 几乎所有孔隙均位于“Soft”部分中, 结合MIP (Mercury Intrusion Porosimetry, 如图2所示)和NMR (Nuclear Magnetic Resonance, 如图3所示)的结果, 龙马溪页岩孔隙孔喉集中在 $6\text{--}15\text{nm}$ 附近, 且孔隙度为4.7%–5.2%.

为了讨论页岩的各向异性特征, 我们定义试样加载方向与页理面法线方向的夹角为倾角 θ , 如图4所示. 室内采用干钻法和干切法对页岩进行加工, 标准试件尺寸为 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$, 直径和高度允许偏差小于 0.2mm , 端面平整度小于 0.05mm , 考虑7个不同页理

图1 (网络版彩图)龙马溪页岩电子显微镜照片
Figure 1 (Color online) SEM photomicrograph of longmaxi shale.

图2 (网络版彩图)龙马溪页岩孔径分布图

Figure 2 (Color online) Pore size distribution of longmaxi shale determined from MIP.

倾角的试样, 即 $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$. 本次实验在四川大学MTS815 Flex Test GT岩石综合实验系统上完成, 同时考虑不同围压对页岩力学性质的影响, 围压分别为0 MPa (Uniaxial Test), 10, 30, 45, 60 MPa; 每

组实验两个试样, 若两个试样的峰值强度差异明显 ($>15\%$), 则另行补做一个试样. 为了得到页岩的全应力应变曲线, 实验中围压以3 MPa/min的速度加载至预定值; 待稳定围压5–10 min后开始增加轴压, 其加载方式为: 以30 kN/min的速度加载至40–50 kN, 然后以环向引伸计为控制方式, 其加载速率为0.04 mm/min. 然而龙马溪组页岩的脆性很强, 大都以突发性的脆性破坏方式为主, 实验结果并未得到完整的页岩峰后软化特性, 其实验类型及页岩破坏模式如表1所示.

3 实验结果

3.1 页岩三轴变形特征

图5为典型的的不同倾角页岩在围压分别为10, 30, 45, 60 MPa时偏应力与轴向应变、径向应变、体积应变的关系曲线, 图中以压缩为正. 其变形特征与Colorado^[10]、Posidonia^[14]等地区的页岩显著不同, 该

图3 (网络版彩色)龙马溪页岩核磁共振T₂分布图

Figure 3 (Color online) T₂ relaxation distribution of longmaxi shale determined from NMR.

图4 (网络版彩图)试样制样过程示意图
Figure 4 (Color online) Techniques for sample preparation.

地区页岩具有明显的峰后软化特征, 其延性较强. 由图5可知, 不同倾角页岩随着围压的增加, 应力-应变曲线曲率逐渐降低, 表明围压使得页岩的延性逐渐增加, 但遗憾的是即便围压为60 MPa时页岩仍未表现

出很好的延性, 仍属于突发性的脆性破坏. 其表现为页岩在峰值强度后迅速丧失承载能力, 应力快速下跌, 由于实验设备刚度并非无限大, 以及伺服阀响应速率的问题, 页岩在峰后均经历了不同程度的加卸载过程 ($\theta=60^\circ$ 和 75° 除外), 进而呈现出典型的II类曲线特征 (岩石破坏过程中应变随应力减小而减小). 而 $\theta=60^\circ$ 和 75° 只有个别试件呈现出II类曲线特征, 大部分仍属于I类曲线, 这主要是由于这两个角度的页岩破坏面主要沿着它们的薄弱面(即页理面)发生, 即便设备轴向加载系统进行快速的回油卸载, 也难以抵消其承载力的快速损失, 故而仍呈现I类曲线特征. 另一方面, 除极个别试件外, 大部分页岩均未能获得其残余强度, 这主要是由于页岩峰值强度较高, 临近破坏时所积蓄的能量较高, 且页岩的破坏方式表现为突发性的脆性

表1 不同倾角页岩在不同围压作用下的破坏模式
Table 1 Failure modes of shale with different inclination angles under different confining pressure

围压	页理倾角						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
10 MPa							
30 MPa							
45 MPa							
60 MPa

图 5 (网络版彩图)龙马溪页岩偏应力与轴向应变、径向应变、体积应变曲线
Figure 5 (Color online) Relationship of deviator stress vs axial strain, lateral strain, volume strain.

破坏, 设备与试件之间在极短的时间内快速的相互作用, 设备难以快速响应或者位移传感器超量程等原因导致实验被迫停止, 因此未能获得剪切面形成后上下两块楔形体沿剪切面滑移的摩擦强度, 即残余强度。

对比图5不同倾角的页岩偏应力-径向应变曲线可知, 当偏应力低于100 MPa时, 页岩的径向应变几乎不

受围压和倾角的影响, 即此阶段内不同倾角的页岩在不同围压作用下径向应变的变化规律及数值均大致相同, 且径向应变显著小于轴向应变, 表明偏应力较低时, 页岩主要发生轴向的压缩变形, 而对径向影响较小。随着偏应力水平逐渐增高, 围压与倾角对页岩的径向变形的作用逐渐显现, 相同偏应力水平下, 由

于围压越低时其抵抗内部产生微缺陷的能力较弱, 故而径向变形越大, 与砂岩等均质类岩石相似; 同一围压作用下, 当倾角低于 60° 时, 页岩的径向变形随着倾角增加而逐渐减小, 但倾角大于 60° 后, 其径向变形随着倾角增加而逐渐增大, 呈U型分布, 与页岩的压缩强度分布模态相似. 比较有意思的是, 除 $\theta=60^\circ$ 和 $\theta=75^\circ$ 的页岩没有明显的体积扩容点(体积扩容点定义见4.1节)外, 其余倾角的页岩均具有明显的体积扩容点, 但几乎不受围压的影响. 另一方面, 相同倾角页岩的峰值强度与围压仍表现出较好的线性关系, 即随着围压的增加, 页岩的峰值强度大致呈线性增加, 我们可以认为不同倾角页岩在一定程度上仍然大致服从基本的摩尔-库仑准则. 结合图6可知, 相同倾角页岩的峰值应变随围压的增加大致呈线性增长, 围压60 MPa时页岩的峰值应变大约比10 MPa时增加约60%. 而相同围压下, 页岩的峰值强度随倾角的变化规律与峰值强度相似, 呈U型分布, 且在 $\theta=60^\circ$ 附近达到最低值.

3.2 页岩的峰值强度与弹性模量

页岩在不同围压下的峰值强度(偏应力)与弹性模量随倾角的变化情况分别如图7和8所示, 页岩的峰值强度与弹性模量在围压作用下仍表现出明显的各向异性特征, 且均与单轴压缩时的变化规律相似. 相同倾角页岩的峰值强度与弹性模量均随着围压升高而逐渐增加, 与常规的均质类岩石相似. 由图7可知, 同一围压作用下, 页岩的峰值强度随倾角的增加呈先减小后增大的趋势, 大致呈U型分布, 且在 $\theta=60^\circ$ 附近时

图6 (网络版彩图) 不同倾角龙马溪页岩在不同围压作用下的峰值应变
Figure 6 (Color online) Peak strain of longmaxi shale with different inclination angles under different confining pressure.

图7 (网络版彩图) 不同倾角的龙马溪页岩在不同围压作用下的峰值强度
Figure 7 (Color online) Peak strength of longmaxi shale with different inclination angles under different confining pressure.

图8 (网络版彩图) 不同倾角的龙马溪页岩在不同围压作用下的弹性模量
Figure 8 (Color online) Young's Modulus of longmaxi shale with different inclination angles under different confining pressure.

峰值强度达到最低, $\theta=90^\circ$ 时的峰值强度略大于 $\theta=0^\circ$ 的页岩.

由图8可知, 随着围压增加各个角度页岩的弹性模量均随之增加, 均高于单轴压缩时的弹性模量, 表明页岩内部微缺陷在围压作用下逐渐闭合或压密. 除围压60 MPa外, 其余围压下的页岩弹性模量随倾角的增量与单轴压缩时相近, 但随着围压的增高, 弹性模量的增量逐渐放缓, 这可能是由于围压作用下微缺陷闭合或压实过程主要首先集中在页理间的薄弱层, 当围压为60 MPa时, 页理面间的薄弱层已基本被压实, 因此弹性模量随倾角增加的幅度显著下降, 亦即由页理面造成的各向异性特征逐渐被高围压所抵消.

4 讨论

4.1 龙马溪页岩变形特征分析

三轴压缩时定义体积压缩量最大的点为体积扩容点^[24], 亦即图5中偏应力-体积应变曲线中的拐点. 图9为不同倾角页岩在不同围压下扩容点所对应的体积应变, 如果没有发生扩容现象则取峰值强度所对应的体积应变. 由图9可知, 同一围压下页岩的体积扩容点随倾角的增加仅有少量下降(10%以内), 相同倾角页岩的体积扩容点随围压增加也仅有少量上升(10%以内); 以61个有效样本为基数我们发现, 页岩的体积扩容点为0.39, 在0.39附近偏差不超过10%的样本有35个, 约为总数的57.4%; 而在0.39附近偏差不超过20%的样本有57个, 约为总数的93.4%. 考虑到数据离散性以及实验误差的影响, 我们可以认为页岩的体积扩容点几乎不受围压和倾角的影响, 而保持常值约为0.39%.

与体积扩容点不同, 页岩峰值强度所对应的体积应变则明显受到围压和倾角的影响, 由图10可知, 当 $\theta=0^\circ$ 或 15° 时, 随着围压升高峰值应力对应的体积变形明显减小, 亦即该倾角下的页岩在围压作用下延性得到提高, 而其他角度下的页岩的峰值应力对应的体积变形随围压的增加不具有简单的关系, 这主要是由于高倾角下的页岩体积变形受到页理面和应力作用产生的剪切面共同作用所导致. 整体来看, 页岩在倾角为 60° 和 75° 时所对应的体积压缩量最大, 表明这两种角度下的页岩主要发生体积收缩变形, 而径向膨胀量较小. 图11为体积扩容点所对应的偏应力与峰值强度的比值 F_{ratio} , 当 $F_{\text{ratio}}=100\%$ 时表明该组试件在整个加载过程中一直处于压缩状态, 没有扩容现象发生. 不难发现 $F_{\text{ratio}}=100\%$ 的情况主要发生在 $\theta=60^\circ$ 或 75° 的页岩, 且相比其他倾角的页岩, 这两个角度的页岩更难发生扩容现象. 而其他角度的 F_{ratio} 多为85%–90%, 亦即只有当偏应力达到峰值强度的85%–90%时, 页岩才会由体积压缩变形为主转变为体积扩容为主; 且这一现象在低围压下表现更为明显, 表明围压会抵消部分页理面的影响.

我们考虑一种简单的模型, 如图12所示. 即在一定的偏应力水平下(试件未产生宏观剪切面前), 我们认为试件变形主要由页理面间薄弱层与基质压缩变形以及沿薄弱层错动变形构成; 虽然这并不能完全代表页岩复杂的变形机理, 但却可帮助我们定性地理

图9 (网络版彩图)不同倾角的龙马溪页岩在不同围压作用下的扩容点

Figure 9 (Color online) Dilatation volume strain of longmaxi shale for various confining pressure.

图10 (网络版彩图)不同倾角的龙马溪页岩在不同围压作用下的峰值强度对应的体积应变

Figure 10 (Color online) Volume strain of longmaxi shale at peak strength for various confining pressure.

图11 (网络版彩色)扩容点与峰值强度对应体积应变的比值

Figure 11 (Color online) Ratio of dilatation volume strain and volume strain at peak strength.

图 12 (网络版彩图)试样沿页理面错动示意图^[10]
Figure 12 (Color online) Sliding schematization of sample along the bedding-plane [10].

页岩的变形过程. 假设此过程中页岩内部的微缺陷已完全被压密, 且新的微缺陷并未形成, 此时的变形主要为沿着页理面的错动, 假设偏应力增加 $\Delta\sigma$ 后, 岩石发生如图12所示的变形, 试样径向由圆形逐渐变成椭圆, 且该椭圆长轴为 $2r + \delta x$, 近似认为椭圆短轴为 $2r$, 得到试样的轴向、径向应变增量如下式:

$$\Delta\varepsilon_1 = \frac{\delta y}{L_0}, \quad \Delta\varepsilon_r = \frac{\delta x}{\pi r_0}, \quad (1)$$

$$\Delta\varepsilon_v = \Delta\varepsilon_1 - 2\Delta\varepsilon_r = \left(\tan\theta - \frac{8}{\pi} \right) \frac{\delta x}{4r_0}, \quad (2)$$

式中, L_0 为试样初始长度, r_0 为试样初始半径, θ 为页理面倾角. 由式(2)可知, 在此阶段内 θ 越低, 单位偏应力增量所引起的体积膨胀量大, 故而试样更易发生体积膨胀变形, 当 $\theta \geq 68.6^\circ$ 时, $\Delta\varepsilon_v$ 恒为正, 即试样将会一直处于体积压缩变形, 不会发生体积膨胀($\theta = 90^\circ$ 时除外), 这与整个实验结果较为吻合. 因此, 我们可以得出页岩在变形过程中主要经历了4个阶段(如图13所示). 第I阶段, 即偏应力低于100 MPa时, 页岩在偏应力作用下主要为页理间薄弱层及基质压缩为主, 很显然 θ 越小轴向压缩量也越大; 第II阶段, 偏应力位于100 MPa和体积扩容点所对应的偏应力之间, 此阶段内为基质与薄弱层压缩和沿页理面错动综合作用, 且轴向压缩量被页理面错动引起的体变所抵消, 所以各个倾角下页岩体积扩容点的体积应变大致相当; 第III阶段, 偏应力位于体积扩容点所对应的偏应力和峰值强度之间, 此阶段内主要是沿页理面错动为主, 并在试样内部形成少量的竖向微缺陷, 表现为体积扩容点后, 倾角越小, 单位偏应力增量引起的体积应变减小量也越大, 试件体积发生膨胀变形. 第IV阶段, 偏应力达到峰

图 13 (网络版彩色)页岩在偏应力作用下4阶段变形示意图

Figure 13 (Color online) Forth-stage deformation of longmaxi shale under deviator stress.

值强度后, 试件的宏观剪切面形成并迅速引起页岩脆性破坏. 值得注意的是, 当 θ 较小时, 虽然试样沿着页理面错动, 但由于 θ 较低时页理面所受的剪应力较小, 并不能使页岩沿页理面破坏; 当 θ 较大时, 页理面所受到的剪应力也较大, 从而更容易达到页理面的抗力造成试样破坏. 综上所述, 当 θ 较小时($0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$), 低围压下试样受到围压和页理面的共同作用, 页岩的破坏形态十分复杂, 高围压时页理面的影响逐渐被围压所抵消, 进而形成贯穿基质与薄弱面的宏观剪切裂缝; 当 θ 较大时($60^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$), 较大的剪应力达到页理面的抗剪强度, 导致试样沿页理面发生剪切滑移破坏; 当 $\theta = 90^\circ$ 时, 在低围压下主要沿页理面发生张拉破坏, 而在高围压下则形成贯穿基质与薄弱层的宏观剪切破坏带; 与表1所示的页岩破坏形态吻合较好.

4.2 龙马溪页岩的脆性

页岩的脆性是页岩气储层压裂改造所需要考虑的重要参数指标, 同时对井壁稳定性影响较大, 一般认为页岩的脆性越高越难确保井壁的稳定性^[25], 但却更易被压裂, 越难以形成常规的双翼裂缝, 其裂缝的几何形态越复杂, 储层压裂改造的效果也就越好^[26]. 利用脆性指数 B_1 作为评价龙马溪页岩的脆性指标, 即 $B_1 = \varepsilon_{el} / \varepsilon_{total}$, 式中 ε_{el} 为弹性应变, ε_{total} 为试样总应变. 由图14可知, 倾角对页岩的脆性指数影响较小, 相同围压下, 页岩的脆性指数随倾角的变化低于10%. 与常规岩石相似, 围压的增加会使页岩的延性得到增强, 围压为10, 30, 45, 60 MPa时页岩的平均脆性指数分别为0.7962, 0.7012, 0.6596, 0.6224, 大致随围压增加呈线性减小. 由图5可知, 尽管围压60 MPa时, 脆性指数相比10 MPa时下降了

图 14 (网络版彩图)不同倾角的龙马溪页岩在不同围压作用下的脆性

Figure 14 (Color online) Brittleness of longmaxi shale with different confining pressure and inclination angles.

20%, 但页岩仍然属于脆性破坏.

4.3 龙马溪页岩黏聚力与内摩擦角

由前文可知, 相同倾角页岩的峰值强度与围压之间仍表现出很好的线性相关性, 而黏聚力(c)与内摩擦角(φ)是岩石的两个非常重要的参数, 对于相同倾角页岩我们仍按常规均质类岩石的方法计算 c , φ , 即以 σ_3 为自变量, σ_1 为变量, 利用最小二乘法得回归方程 $\sigma_1 = a + b\sigma_3$, 常数 a , b 和 c , φ 的关系如式(3)所示.

$$\begin{aligned} \sin\varphi &= (b - 1) / (b + 1), \\ c &= a(1 - \sin\varphi) / 2\cos\varphi. \end{aligned} \quad (3)$$

页岩黏聚力与内摩擦角计算结果如图15所示. 对于60°或75°页岩, 由于其破坏面大致沿页理面滑动, 我们可以认为60°或75°页岩计算得到的 c , φ 值为弱面的黏聚力和内摩擦角, 而其余角度为页岩综合的黏聚力和内摩擦角. 由图15可知, 不同倾角的页岩内摩擦角差异较小为 $30.3^\circ \pm 2.4^\circ$. 当倾角在 $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 时, 页岩的黏聚力随倾角呈先增大后减小的趋势, 但差异较小(10%以内). 然而 $\theta=90^\circ$ 时黏聚力最大为46.85 MPa, 而 $\theta=75^\circ$ 时最小为33.64 MPa, 约为最大值的71.8%. 因此, 我们可以认为龙马溪页岩基质与薄弱面的区别主要体现在黏聚力的差异, 而内摩擦角基本一致为 30.3° .

4.4 龙马溪页岩的各向异性特征

根据文献[21]的方法, 利用式(4)计算页岩不同力学参数下的各向异性度, 如图16所示.

$$k_2 = \frac{(\text{parameter})_{\max}}{(\text{parameter})_{\min}}, \quad (4)$$

图 15 (网络版彩图)不同倾角的龙马溪页岩的黏聚力与内摩擦角

Figure 15 (Color online) Friction angle and Cohesion of longmaxi shale with various inclination angles.

图 16 (网络版彩图)根据不同参数计算得到的龙马溪页岩各向异性度

Figure 16 (Color online) Variation of anisotropy degree parameters of various mechanics parameters under different confining pressure.

式中 $parameter$ 分别为页岩的峰值强度、弹性模量、峰值应变、脆性、黏聚力与内摩擦角; 由图16可知, 以峰值应变和脆性指数计算得到的各向异性度离散性较大, 难以用来描述页岩的各向异性. 以峰值强度计算得到的各向异性度随着试样由单轴转向三轴时急剧下降, 而随着围压的增加变化不大, 表现出与实验类型很大的相关性. 而以弹性模量计算得到的各向异性度与试样几乎不受实验类型的影响, 仅与试样所处的应力状态相关, 当围压从0.1 MPa增加至60 MPa时, 页岩各向异性度由1.36单调降低至1.16, 与真实情况较为吻合. 另一方面, 以 c , φ 值计算的各向异性度几乎包络了以其他参数计算的各向异性度, 其各向异性度分别为1.39和1.14, 属于低各向异性岩石^[27]. 龙马溪组页岩的各向异性度略低于Tournemire页岩($k_2=1.5$), 而与Green River页岩($k_2=1.37$)相似^[28]. 因此, 我们建议使

表 2 龙马溪页岩与其他地区页岩各项力学指标对比汇总表**Table 2** Comparison of mechanical properties between longmaxi shale and other shale reservoirs

页岩地区	杨氏模量 (GPa)	峰值强度 (MPa)	峰值应变 (%)	体积扩容 点 (%)	脆性指 数 B_1	黏聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)	各向异性度	文献
龙马溪	17.9–35.0	81.64–291.57	0.50–1.74	0.28–0.53	0.55–0.85	33.64–46.85	28.63–32.70	1.16–1.36	–
Tournemire	8–40	20–110	约0.7–3.0	0.22–0.78	–	–	–	1.5	[9,21]
Colorado	2.1–39.9	5–20	0.55–1.0	0.1–0.4	–	–	28.8	1.70–2.19	[10,32,33]
Norwegian Sea	9–11	8–105	约0.6–3	–	–	16.24	17.20	–	[11]
Barnett	39–72	160–220	1.00	–	0.4–0.85	–	–	–	[14,30,31]
Woodford	9.25–23.47	43.50–124	约1.8–3.2	–	–	12.51	14	–	[29]

用弹性模量衡量页岩的各向异性度, c , ϕ 值计算得到的各向异性度可以作为页岩各向异性的上下包络线.

4.5 不同地区页岩的力学特征的对比

龙马溪页岩与其他地区页岩的各项力学参数对比汇总如表2^[9–11,14,21,29–33]所示, 龙马溪页岩的杨氏模量和峰值强度均介于其他地区页岩之间, 但龙马溪页岩的峰值应变相对更低, 且脆性指数更高, 相对其他地区页岩表现出更明显的脆性特征, 有利于水力压裂技术的应用. 另一方面, 龙马溪页岩的各向异性度相对于其他地区页岩较低, 尤其是当围压超过60 MPa后, 其各向异性度已低至1.16(以弹性模量衡量), 因此当工程面向的页岩气储层所处地应力水平超过60 MPa后, 可在一定程度上忽略由页理面引起的各向异性力学特征, 此时页岩气储层的各向异性力学特征主要由页岩中的裂隙或软弱地层等因素造成. 由于龙马溪页岩的峰值强度和黏聚力较高, 因此利用水力压裂技术对储层进行增渗改造时, 相对其他地区的页岩可能需要输入更高的能量.

5 结论

本文通过对川渝地区龙马溪组露头页岩系统性

的开展室内宏观力学实验, 可以得到以下有益结论.

(1) 龙马溪页岩是一种脆性较高、低孔隙度的岩石, 其脆性指数约为0.55–0.85, 孔隙度约为4.7%–5.2%, 且以纳米孔居多.

(2) 受到页理面的影响, 龙马溪页岩具有一定的各向异性特征, 其各向异性度为1.16–1.36, 与全球范围内常见页岩气田的页岩相比各向异性度较弱, 属于存在各向异性特征但不显著, 但仍基本符合横观各向同性材料的特征.

(3) 龙马溪页岩的变形破坏机制复杂, 通过系统地分析页岩体积变形得到了页岩在加载过程中主要经历的4个变形阶段, 第 I 阶段(偏应力 ≤ 100 MPa): 页理面间薄弱层与基质轴向压缩; 第 II 阶段($100 \text{ MPa} < \text{偏应力} \leq \text{扩容点对应的偏应力}$): 轴向压缩与沿页理面错动, 且页理面错动变形抵消掉部分轴向压缩, 表现出不同倾角页岩的扩容点相同; 第 III 阶段(扩容点对应的偏应力 $< \text{偏应力} < \text{峰值强度}$): 页岩主要沿页理面错动; 第 IV 阶段(峰值强度后), 页岩在应力作用下形成宏观剪切面并发生突发性的脆性破坏.

(4) 龙马溪页岩在一定程度上仍然大致服从基本的摩尔-库仑准则, 其页理间薄弱层的内摩擦角与页岩基质基本一致为 30.3° , 但黏聚力差异明显, 薄弱层的黏聚力约为基质的71.8%.

参考文献

- Zhang H X. Shale gas: New bright point of the exploitation of the global oil-gas resources—the present status and key problems of the exploitation of shale gas (in Chinese). Bull Chin Acad Sci, 2010, 25: 406–410 [张鸿翔. 页岩气: 全球油气资源开发的新亮点——我国页岩气开发的现状与关键问题. 中国科学院院刊, 2010, 25: 406–410]
- Gensterblum Y, Ghanizadeh A, Cuss R J, et al. Gas transport and storage capacity in shale gas reservoirs—A review. Part A: Transport processes.

- [J Unconventional Oil Gas Resources](#), 2015, 12: 87–122
- 3 Yao J, Sun H, Huang Z Q, et al. Key mechanical problems in the development of shale gas reservoirs (in Chinese). [Sci Sin-Phys Mech Astron](#), 2013, 43: 1527–1547 [姚军, 孙海, 黄朝琴, 等. 页岩气藏开发中的关键力学问题. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 1527–1547]
 - 4 Warlick D. Gas shale and CBM development in North America. [Oil Gas Financial J](#), 2006, 3: 1–5
 - 5 Wang J, Xie L, Xie H, et al. Effect of layer orientation on acoustic emission characteristics of anisotropic shale in Brazilian tests. [J Nat Gas Sci Eng](#), 2016, 36: 1120–1129
 - 6 Gao Q, Hu J, Tao J, et al. Experimental characterization of the anisotropic behaviors of shale rock. In: *Proceedings of Geo-Congress 2014 Technical Papers: Geo-characterization and modeling for sustainability*. Reston: American Society of Civil Engineers, 2014. 563–571
 - 7 Matzar L A, Gamwell C G. Understanding shale failure from laboratory analysis to field operations. In: *Proceedings of 47th US rock mechanics/geomechanics symposium*. Houston: American Rock Mechanics Association, 2013
 - 8 Sone H, Zoback M D. Mechanical properties of shale-gas reservoir rocks—Part 1: Static and dynamic elastic properties and anisotropy. [Geophysics](#), 2013, 78: D381–D392
 - 9 Masri M, Sibai M, Shao J F, et al. Experimental investigation of the effect of temperature on the mechanical behavior of Tournemire shale. [Int J Rock Mech Mining Sci](#), 2014, 70: 185–191
 - 10 Mohamadi M, Wan R G. Strength and post-peak response of Colorado shale at high pressure and temperature. [Int J Rock Mech Mining Sci](#), 2016, 84: 34–46
 - 11 Josh M, Esteban L, Delle Piane C, et al. Laboratory characterisation of shale properties. [J Pet Sci Eng](#), 2012, 88–89: 107–124
 - 12 Dewhurst D N, Bungler A, Josh M, et al. Mechanics, physics, chemistry and shale rock properties. In: *Proceedings of 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. Houston: American Rock Mechanics Association, 2013
 - 13 Horsrud P, Sønstebo E F, Bøe R. Mechanical and petrophysical properties of North Sea shales. [Int J Rock Mech Mining Sci](#), 1998, 35: 1009–1020
 - 14 Rybacki E, Reinicke A, Meier T, et al. What controls the mechanical properties of shale rocks?—Part I: Strength and Young's modulus. [J Pet Sci Eng](#), 2015, 135: 702–722
 - 15 Sone H. Mechanical Properties of Shale Gas Reservoir Rocks, and Its Relation to the *In-situ* Stress Variation Observed in Shale Gas Reservoirs. Dissertation for Doctoral Degree. Palo Alto: Stanford University, 2012
 - 16 Yang Z P, He B, Xie L Z, et al. Strength and failure modes of shale based on Brazilian test (in Chinese). [Rock Soil Mech](#), 2015, 36: 3447–3455 [杨志鹏, 何柏, 谢凌志, 等. 基于巴西劈裂试验的页岩强度与破坏模式研究. 岩土力学, 2015, 36: 3447–3455]
 - 17 Sierra R, Tran M H, Abousleiman Y N, et al. Woodford Shale mechanical properties and the impacts of lithofacies. In: *Proceedings of 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th US-Canada Rock Mechanics Symposium*. Houston: American Rock Mechanics Association, 2010
 - 18 Jia C G, Chen J H, Guo Y T, et al. Research on mechanical behaviors and failure modes of layer shale (in Chinese). [Rock Soil Mech](#), 2013, 34: 57–61 [贾长贵, 陈军海, 郭印同, 等. 层状页岩力学特性及其破坏模式研究. 岩土力学, 2013, 34: 57–61]
 - 19 Lyu Q, Pg R, Long X, et al. Effects of coring directions on the mechanical properties of Chinese shale. [Arab J Geosci](#), 2015, 8: 10289–10299
 - 20 Fjær E, Nes O M. Strength anisotropy of Mancos shale. In: *Proceedings of 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. Houston: American Rock Mechanics Association, 2013
 - 21 Niandou H, Shao J F, Henry J P, et al. Laboratory investigation of the mechanical behaviour of Tournemire shale. [Int J Rock Mech Mining Sci](#), 1997, 34: 3–16
 - 22 Bažant Z P, Salviato M, Chau V T, et al. Why fracking works. [J Appl Mech](#), 2014, 81: 101010
 - 23 Liu J T, Liu S L, Li Y J, et al. Geochemistry characteristics and its geological significance of shale in the Ordovician Wufeng Formation and Silurian Longmaxi Formation, Jiaoshiba area (in Chinese). [Pet Geol Recovery Efficiency](#), 2016, 23: 53–57 [刘江涛, 刘双莲, 李永杰, 等. 焦石坝地区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩地球化学特征及地质意义. 油气地质与采收率, 2016, 23: 53–57]
 - 24 Xie L Z. Research on Salt Caverns for CO₂ Sequestration Geotechnical Engineering (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Chengdu: Sichuan University, 2012 [谢凌志. 盐穴CO₂封存库的基础研究. 博士学位论文. 成都: 四川大学, 2012]
 - 25 Holt R M, Fjær E, Stenebråten J F, et al. Brittleness of shales: Relevance to borehole collapse and hydraulic fracturing. [J Pet Sci Eng](#), 2015, 131: 200–209
 - 26 Rickman R, Mullen M J, Petre J E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett Shale. In: *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver: Society of Petroleum Engineers, 2008
 - 27 Ismael M A, Imam H F, El-Shayeb Y. A simplified approach to directly consider intact rock anisotropy in Hoek-Brown failure criterion. [J Rock Mech Geotech Eng](#), 2014, 6: 486–492
 - 28 McLamore R, Gray K E. The mechanical behavior of anisotropic sedimentary rocks. [J Eng Indus](#), 1967, 89: 62–73
 - 29 Abousleiman Y N, Tran M H, Hoang S, et al. Geomechanics field and laboratory characterization of the Woodford Shale: The next gas play. In:

- Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2007
- 30 Li Q H, Chen M, Jin Y, et al. Experimental research on failure modes and mechanical behaviors of gas-bearing shale (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2012, 31: 3763–3771 [李庆辉, 陈勉, 金衍. 含气页岩破坏模式及力学特性的试验研究. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31: 3763–3771]
- 31 Kumar V, Sondergeld C H, Rai C S. Nano to macro mechanical characterization of shale. In: *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2012
- 32 Chong K P, Uenishi K, Smith J W, et al. Non-linear three dimensional mechanical characterization of Colorado oil shale. *Int J Rock Mech Mining Sci Geomech Abstr*, 1980, 17: 339–347
- 33 Gautam R, Wong R C. Transversely isotropic stiffness parameters and their measurement in Colorado shale. *Can Geotech J*, 2006, 43: 1290–1305

Anisotropic mechanism and characteristics of deformation and failure of Longmaxi shale

HE Bo^{1,2}, XIE LingZhi^{1,2*}, LI FengXia³, ZHAO Peng^{1,4} & ZHANG Yao^{1,4}

¹ Key Laboratory of Energy Engineering Safety and Disaster Mechanics, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

² Institute of New Energy and Low-Carbon Technology, Sichuan University, Chengdu 610207, China;

³ Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100038, China;

⁴ College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China

Although spectacular advances in shale gas reservoir stimulation, i.e., hydraulic fracturing, the deformation behavior and failure mechanism of shale are not understood well enough. The basic reason is that shale contains stratified structure named bedding plane and its complicated petrophysical properties. The mechanical behavior of shale as the loading direction is parallel to the bedding plane is significantly different from that as the loading direction is perpendicular to the bedding plane. This work is devoted to characterization of the Longmaxi shale deformation and failure mechanism through experiments, from which 4 different deformation stages are obtained and volumetric strain deformation behavior is analyzed systematically. Then the effects of confinement as well as bedding layer orientation, which is defined as the angle between the loading direction and normal direction of bedding plane, on the elastic modulus, peak strength, and cohesion of shale are investigated. The analytical results illustrate that the volumetric strain dilatation is a constant, which is independent on the confining pressure and bedding layer orientation; its brittleness is high (0.55–0.85, B_1) and porosity is small (4.7%–5.2%). It is also found that the anisotropic degree of shale is better to be described by Young's modulus than to be characterized by peak strength. As the confining pressure increases from 0.1 MPa to 60 MPa, the anisotropy degree decreases from 1.36 to 1.16, which declare that the Longmaxi shale belongs to low anisotropy rock according to the standard introduced by Ismael. These results not only enrich experimental database of shale, but also provide references for reservoir hydraulic fracturing design. Moreover, these results will help us to further understand shale laboratory mechanical properties.

shale, mechanical, deformation, anisotropy

PACS: 62.20.F-, 88.05.Ec, 83.60.-a, 91.60.-x

doi: [10.1360/SSPMA2016-00534](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00534)