

四川盆地龙马溪组页岩声波特性 与断裂韧性实验研究

石长有¹, 刘向君¹, 张茜², 熊健¹, 梁利喜¹, 魏晓琛¹

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610500;

2. 东方地球物理公司物探技术研究中心成都分中心, 四川成都 610500)

摘要:为更好地指导四川盆地页岩气的开发, 以四川盆地东南部下志留统龙马溪组页岩为对象, 研究其声波特性和断裂韧性, 其中, 纵横波速度测定所采用的是透射法, 断裂韧性测定所采用的是 ISRM 推荐的人字形切槽巴西圆盘 (CCNBD) 法。研究表明, 页岩的断裂韧性为 $0.4744 \sim 0.8752 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$, 表明其显著的各向异性特征; 页岩的纵横波速度之间呈较好的正相关; 页岩声波速度随着其体积密度的增大而增大, 呈正相关; 声波频率与声波速度和衰减系数均呈正相关; 断裂韧性与声波速度和波阻抗呈正相关, 与衰减系数呈负相关。

关键词:龙马溪组页岩; 断裂韧性; 声波速度; 衰减系数; 波阻抗

中图分类号: TE125.1

文献标识码: A

Acoustic characteristics and fracture toughness of shale in Longmaxi formation

SHI Changyou¹, LIU Xiangjun¹, ZHANG Qian², XIONG Jian¹, LIANG Lixi¹, WEI Xiaochen¹

(1. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Technology Development Center, Southwest Branch of Eastern Geophysical Corporation, Chengdu, 610500, China)

Abstract: In order to better guide the development of shale gas in the Sichuan basin, taking the shale from Silurian Longmaxi formation in southern Sichuan as the research object, the acoustic characteristics and fracture toughness were studied. Among them, the transmission method is used to measure P-wave and S-wave velocities, and the fracture toughness method is the Cracked Chevron Notched Brazilian Disc (CCNBD) recommended by ISRM. The results show that the fracture toughness is $0.4744 \sim 0.8752 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$, which has significant anisotropic characteristics; the vertical and transverse wave velocity of shale shows a good positive correlation. The acoustic velocity of shale increases with the increase of its volume density, showing a positive correlation. The frequency of acoustic wave is positively correlated with the velocity and attenuation coefficient of acoustic wave. Fracture toughness is positively correlated with acoustic velocity and impedance, and negatively correlated with attenuation coefficient.

Key words: shale in Longmaxi formation; fracture toughness; acoustic velocity; attenuation coefficient; wave impedance

近年来, 随着我国的能源结构不断进行调整, 各种环境问题凸显出来, 天然气作为一种清洁的非常规油气资源受到越来越多的重视^[1-5]。在北美地区, 页岩气的迅速发展使得人们逐渐认识到页岩气资源重要的战略地位^[6]。在我国, 作为地质资源的页岩气, 其储量为 $134 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 其中技术可采储量为 $25 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 表明其具有巨大的开发潜力^[7-8]。国内外的学者针对不同岩石的声波影响因素和力学特性进行了研究, 陈治喜等^[9]对岩石断裂韧性与声波速度的相

关性进行了研究, 孟召平等^[10]对煤系岩石声波速度

收稿日期: 2018-12-07

作者简介: 石长有, 在读硕士研究生, 1992年生, 2017年毕业于河南理工大学水文与水资源工程专业, 现从事油气勘探与地质工程研究。

基金项目: 国家自然科学基金项目“复杂储层地震岩石物理分析及应用研究”(2016A-3301)、“富有机质硬脆性页岩水化机理基础研究”(41772151)。

及其影响因素进行了分析研究,孟庆山等^[11]对碳酸盐岩的声波特性进行了分析研究。页岩作为页岩气的储层,其声波特性是评价岩体质量的重要指标,在这一方面的研究和报道却较少^[12-15]。断裂韧性作为判别材料稳定的一项重要指标,可以表征材料抵抗裂纹扩展的性能^[16-20]。在压裂的过程中,断裂韧性对裂缝的起裂及延伸都会产生影响,只有当裂缝尖端的应力强度因子大于断裂韧性时,裂缝才会扩展。水平井和分段压裂等是保证页岩气能够被高效开发利用的技术,对于页岩储层的可压性评价,断裂韧性是一项重要的评价参数。目前国内外对于页岩力学性质的研究主要集中在抗张强度和抗压强度等方面,对页岩断裂韧性的研究报道却不多见^[21-26]。

本文在前人研究成果的基础上,对四川盆地龙马溪组页岩的声波特性进行研究,建立物理参数与声波特性的关系,采用人字形切槽巴西圆盘试样,测试页岩的I型断裂韧性值 K_{IC} ,研究该岩样的断裂力学特性,并建立其与声波特性的关系,为进一步认识页岩储层的声波特性和断裂韧性提供实验基础。

1 样品与实验方法

研究中所采用页岩样品为古生界下志留统龙马

表1 基础物性及断裂韧性测试结果

编号	直径/mm	厚度/mm	重量/g	密度/($g \cdot cm^{-3}$)	K_{IC} /($MPa \cdot m^{0.5}$)
L1	74.12	30.22	310.22	2.35	0.667 1
L2	74.12	30.23	311.37	2.36	0.800 8
L3	74.12	30.09	309.60	2.36	0.744 8
L4	74.24	29.96	317.16	2.42	0.678 3
L5	74.19	30.14	321.65	2.44	0.803 3
L6	74.22	30.53	327.21	2.45	0.677 2
L7	74.19	30.31	326.99	2.46	0.875 2
L8	74.08	30.22	322.78	2.45	0.561 9
L9	74.02	30.16	321.88	2.45	0.474 4

2 结果与分析

2.1 载荷-位移曲线

实验时,在试样的两端沿平行切槽的方向进行加载,加载过程中,轴向的压缩变形会引起横向上产生相应的拉伸变形,最终使得弹性应变能在韧带区不断积聚,并转化为横向拉张应力作用。裂纹在人字形裂纹端部的拉张应力达到岩石最大抗拉强度时开始起裂,弹性应变能在裂缝起裂后迅速释放并导致裂纹面的急剧扩展,最后岩石破裂。利用巴西圆盘的方法进行测试所得到的部分载荷-位移曲线如图1所示。对图1中曲线观察可知,整个过程可

大致分成三个阶段,在初始加载阶段,由于页岩不断地被压实,其曲线呈现非线性变形;第二阶段加载过程中,岩样发生弹性变形,此时曲线基本上表现为线性发展,反映出岩样在加载过程中其微裂隙

溪组,采样地区位于四川盆地东南部。声波测试所采用的方法为透射法,使用仪器为西南石油大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室的承压型声波换能器。在常温(20℃)、轴压恒定为0.3 MPa的条件下进行测试,所采用的激发频率分别为25,50,100,260 kHz的纵波探头以及260 kHz的横波探头。

对于所采岩样,根据有关标准及ISRM(国际岩石力学学会)推荐测试断裂韧性的方法——人字形切槽巴西圆盘法,按照垂直层理的方向钻取直径为74 mm,厚度为30 mm的巴西圆盘试样9块。试样的加载方式为沿平行人字形切槽方向在两端施加集中荷载,采用恒定位移控制对试样进行加载。根据ISRM建议测试方法,CCNBD(人字形切槽巴西圆盘)试样断裂韧性计算公式为:

$$K_{IC} = \frac{P_{max}}{B\sqrt{D}} Y_{min}^* \quad (1)$$

式中: K_{IC} 为I型断裂韧性值, $MPa \cdot m^{0.5}$; P_{max} 为最大破坏载荷值,kN; D 为试样直径,cm; B 为试样厚度,cm; Y_{min}^* 为无量纲临界应力强度因子,仅由岩样的几何参数 α_0 、 α_1 和 α_B 决定。

实验测试及计算得到的圆盘岩样基础物性和断裂韧性见表1。由表可知,所测试的断裂韧性值为0.4744~0.8752 $MPa \cdot m^{0.5}$,平均值为0.6981 $MPa \cdot m^{0.5}$ 。

大致分成三个阶段,在初始加载阶段,由于页岩不断地被压实,其曲线呈现非线性变形;第二阶段加载过程中,岩样发生弹性变形,此时曲线基本上表现为线性发展,反映出岩样在加载过程中其微裂隙

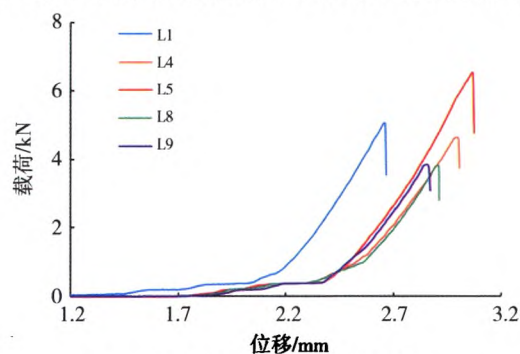


图1 部分岩样载荷-位移关系曲线

进行稳定的扩展并逐渐发展成核; 第三阶段的曲线是非线性的, 在该过程中, 所施加载荷在达到峰值后急剧下降, 岩样中主裂纹急剧扩展贯通直至破裂, 并伴随有大的破碎声响, 同时部分岩样碎块崩裂, 这一阶段的曲线反映出岩样主裂纹的贯通失稳过程。整个曲线显示出岩心被破坏前呈弹性变形, 达到载荷最大值后急剧降低的脆性特征^[9]。

2.2 纵波与横波速度的关系

近年来, 很多学者在岩石的纵横波速度测量与分析上进行了大量实验研究, 获取了不同岩性的纵横波速度关系。张守伟等对砂岩、泥岩以及白云岩的纵横波速度关系进行了研究, 得出其关系均呈正相关, 相关系数均在 0.720 以上; 曾葫等对煤岩的纵横波速度关系进行研究, 得出其关系呈正相关, 相关系数为 0.940; 马中高等对砂岩、泥岩、生物灰岩和火成岩的纵横波速度关系进行研究, 得出其关系均呈正相关, 相关系数分别为 0.955, 0.960, 0.971, 0.970。本文对四川盆地龙马溪组页岩样品的纵波与横波进行数据统计与分析。龙马溪组页岩样品纵波与横波速度呈正相关关系(图 2), 其纵波与横波之间的关系与煤岩、火成岩、砂岩和泥岩等是类似的, 然而对于页岩来说, 由于其非均质性强且层理发育, 因此, 其相关系数相对其它岩石而言较低。

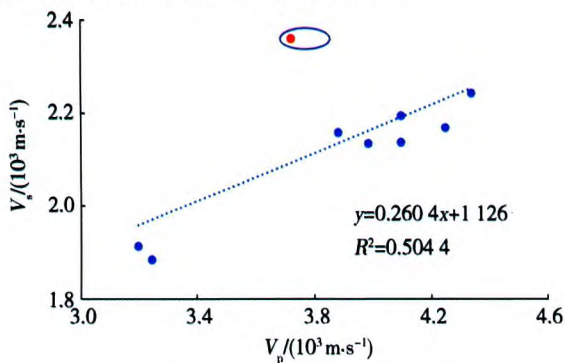


图 2 纵波与横波速度的关系

2.3 页岩密度对声波速度的影响

在岩石物理学中, 对影响密度的因素进行研究, 建立密度和速度等岩石参数间的关系是研究的重点。由于岩石物理性质具有复杂性的特点, 密度和速度之间的关系在不同地区具有差异性, 因此, 直接将前人研究所得到的经验关系应用到其他地区是不合适的。为了能更好地指导四川盆地地区页岩气的开发, 研究龙马溪组页岩的密度和声波速度之间的关系是十分重要的。研究表明, 随着密度的增大, 页岩声波速度总体的变化趋势也随着增大, 这说明页岩发育的密实程度与纵波波速有一定的关系, 即所测得的声波速度越大, 岩石的密实程度越高。

2.4 频率与声波特性的关系

针对所选取的页岩样品, 选用纵波频率分别为 25, 50, 100, 260 kHz, 横波频率为 260 kHz 的探头进行超声波的透射实验, 以研究频率与声波特性的关系。部分试样声波速度与频率的关系见图 3, 从图中可知, 随着声波频率的增大, 声波速度总体上的趋势也是增大的, 且相关性较好, 频散现象明显; 声波的衰减系数与测试频率也呈正相关。在储层评价中, 该结果对声波参数的选择具有一定的指导意义。

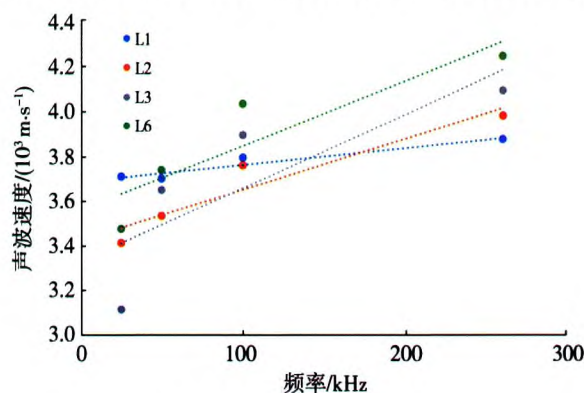


图 3 声波速度与频率的关系

2.5 断裂韧性与声波属性的关系

断裂韧性与声波速度的关系见图 4, 由图可知, 断裂韧性与声波速度具有显著的正相关性。波阻抗反映的是声波在地质体中的传播速度与地质体密度的信息, 可对地质体进行物性描述, 通过对所采岩样断裂韧性与波阻抗的关系进行分析, 可得其关系为正相关。断裂韧性与衰减系数的关系见图 5, 由图可知, 断裂韧性与衰减系数呈负相关。通过对实验数据进行分析, 当波速增大时, 可判断样品的压实程度高且微裂隙不发育, 这就导致了在相同的载荷条件下, 样品断裂韧性值的增加; 同时, 断裂韧性增加即岩样的密实程度变大, 相同频率的声波通过岩样时衰减就会减少。该实验结果在断裂韧性的预测方面具有一定的意义, 在油气藏的勘探和开发中具有一定的参考价值。

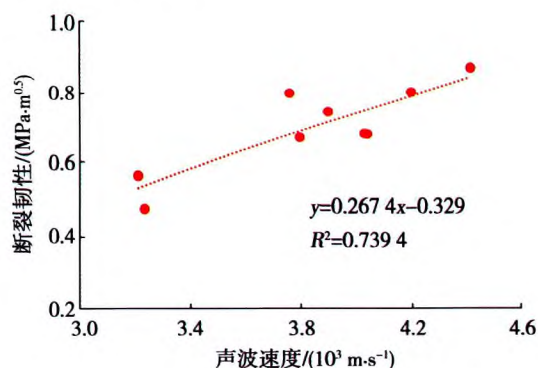


图 4 断裂韧性与声波速度的关系

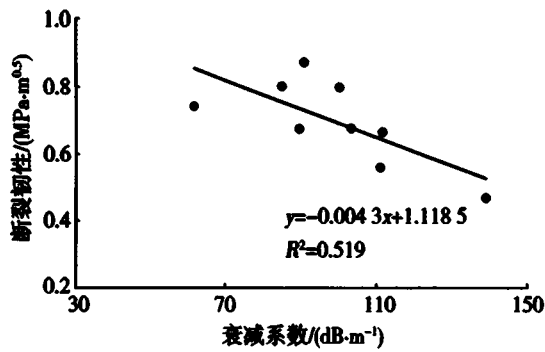


图5 断裂韧性与衰减系数的关系

3 结论

用透射法对四川盆地东南部下志留统龙马溪组页岩进行声波速度测定, 采用人字形切槽巴西圆盘法测试其断裂韧性, 测得断裂韧性为 $0.474\ 4\sim 0.875\ 2\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$, 说明其具有显著的各向异性; 页岩纵横波速度之间呈正相关性, 声波速度与密度、测试频率以及衰减系数均呈正相关性; 断裂韧性与声波速度和波阻抗呈正相关性, 与衰减系数呈负相关性。

参考文献

- [1] 邹才能, 董大忠, 杨桦, 等. 中国页岩气形成条件及勘探实践[J]. 天然气工业, 2011, 31(12): 26-39.
- [2] 赵鹏大, 李桂范, 张金川. 基于地质异常理论的页岩气有利区块圈定与定量评价——以渝东南地区下志留统龙马溪组为例[J]. 天然气工业, 2012, 32(6): 1-8.
- [3] 王玉满, 董大忠, 李建忠, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩气储层特征[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 551-561.
- [4] 聂海宽, 张金川. 页岩气储层类型和特征研究——以四川盆地及其周缘下古生界为例[J]. 石油地质, 2011, 33(3): 219-225.
- [5] 龙鹏宇, 张金川, 李玉喜, 等. 重庆及其周缘地区下古生界页岩气成藏条件及有利区预测[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 221-233.
- [6] 黄金亮, 邹才能, 李建忠. 川南志留系龙马溪组页岩气形成条件与有利区分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 782-787.
- [7] 闫存章, 黄玉珍, 葛春梅. 页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 1-6.
- [8] 蒋裕强, 董大忠, 漆麟, 等. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 7-12.
- [9] 陈治喜, 陈勉. 岩石断裂韧性与声波速度相关性的试验研究[J]. 石油钻采工艺, 1997, 19(5): 56-60.
- [10] 孟召平, 刘常青, 贺小黑, 等. 煤系岩石声波速度及其影响因素实验分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(4): 389-393.
- [11] 孟庆山, 汪稔. 碳酸盐岩的声波特性研究及其应用[J]. 中国岩溶, 2005, 24(4): 344-348.
- [12] 左建平, 周宏伟, 谢和平. 不同温度影响下砂岩的断裂特性研究[J]. 工程力学, 2008, 25(5): 124-130.
- [13] 张守伟, 孙建孟, 苏俊磊. 东营北带砂砾岩密度与纵横波速度的规律研究[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(4): 251-253.
- [14] 孟召平, 张吉昌. 煤系岩石物理力学参数与声波速度之间的关系[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1505-1510.
- [15] 曾葫, 吕玉增, 汤小明, 等. 寺河矿区煤岩纵横波速度及密度的关系[J]. 煤炭技术, 2017, 36(8): 101-103.
- [16] 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, 4(2): 67-75.
- [17] 郑雨天, 张兴, 石海鱼. 岩石断裂韧度测定的研究[J]. 水利学报, 1984, 29(9): 19-28.
- [18] 楼一册, 陈勉, 史明义, 等. 岩石 I、II 型断裂韧性的测试及其影响因素分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, 31(4): 85-89.
- [19] 梁利喜, 何顺平, 张安东. CCNBD 试样测试页岩 I 型断裂韧性[J]. 西部探矿工程, 2016, 28(11): 41-43.
- [20] 孙建孟, 韩志磊, 秦瑞宝, 等. 致密气储层可压裂性测井评价方法[J]. 石油学报, 2015, 36(1): 74-80.
- [21] 李根生, 盛茂, 田守嶂, 等. 页岩气储层水平井与压裂工程基础问题探讨[J]. 科学通报, 2016, 61(26): 2883-2890.
- [22] 翟勇. 渤南洼陷低孔隙度低渗透率地层岩石力学参数测井计算方法[J]. 测井技术, 2013, 37(4): 432-435.
- [23] 高艳霞, 单钰铭, 刘维国, 等. 川西坳陷深层岩石力学特征及其影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2007, 6(14): 23-25.
- [24] 葛善良, 周文, 谢润成, 等. 复杂构造变形地区致密岩石力学性质实验分析[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(1): 59-64.
- [25] 牟春国, 李达, 吕杨, 等. 苏里格气田西区储层岩石力学性质及其应用研究[J]. 天然气勘探与开发, 2015, 38(2): 51-55.
- [26] 崔振东, 刘大安, 安光明, 等. 岩石 I 型断裂韧度测试方法研究进展[J]. 测试技术学报, 2009, 23(3): 189-196.

编辑: 蒲洪果