

文章编号: 1000-7598-(2014) 11-3093-08

不同应变速率下泥页岩力学特性试验研究

刘俊新^{1,2}, 刘 伟¹, 杨春和¹, 霍 亮³

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2.西南科技大学 土木与建筑工程学院, 四川 绵阳 621010; 3.重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 为了揭示泥页岩在不同应变速率下的力学特征, 为页岩气的开采提供科学指导, 分别在 $5 \times 10^{-4}/s$ 、 $1 \times 10^{-4}/s$ 、 $1 \times 10^{-5}/s$ 、 $1 \times 10^{-6}/s$ 四种不同应变速率下对页岩开展单轴压缩力学试验。研究表明, 应变速率对页岩的弹性模量、峰值强度、破裂形态等具有显著影响, 应变速率从高到低, 弹性模量和峰值强度都呈逐渐降低趋势, 但下降速度逐渐放缓, 两者与应变速率负对数大致呈幂函数关系, 而采用平均值拟合时则相关性较高, 相对而言, 弹性模量的应变率效应更显著; 应变速率对破裂形态的影响极为明显, 在高应变速率下页岩迅速劈裂为较少的大块, 整体构架丧失, 随着应变速率降低, 破裂过渡为劈裂为主, 伴随局部剪切破坏, 达到最低应变速率时主要呈劈裂破坏, 但同时形成较多横向分布裂纹, 即低应变速率下破坏均匀且形成纵横切割试样的网状裂纹, 页岩的应变速率在整体上对破裂方式影响最为显著, 主要表现为低应变速率下的破坏更均匀、更易形成裂纹网。因此, 该特性对于确立页岩力学参数及设计压裂方案具有重要启发作用。

关 键 词: 页岩; 应变速率; 力学特性; 弹性模量; 峰值强度; 破坏模式; 裂纹网

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Experimental research on effects of strain rate on mechanical properties of shale

LIU Jun-xin^{1,2}, LIU Wei¹, YANG Chun-he¹, HUO Liang²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 3. State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China.)

Abstract: To investigate the mechanical properties of shale under different strain rates, then to provide scientific guidance for the exploration of shale gas, the uniaxial compression experiments of shale samples have been conducted under strain rates of $5 \times 10^{-4}/s$, $1 \times 10^{-4}/s$, $1 \times 10^{-5}/s$ and $1 \times 10^{-6}/s$, respectively. The experimental results show that the strain rates affect obviously on elastic modulus, peak strength and fracture morphologies, etc. of shale. Elastic modulus and peak strength gradually decrease along with the inclining of strain rate from high to low, but the decreasing speed becomes gradually smaller and smaller. The fitting relationship of elastic modulus (also peak strength) versus minus logarithm of strain rate largely adapts to the power function, whereas a higher fitting degree occurs if the mean values are implemented. Relatively speaking, the elastic modulus has a higher strain rate reaction. The fracture modes are obviously affected by the strain rate: under high strain rate, sample rapidly split into several large pieces and the entire skeleton ruptured; with the decreasing of strain rate, the fracture mode gradually transfers to main splitting failure with local shear failure; under the lowest strain rate, the main fracture mode is still splitting fracture but with many transverse cracks inserting the lateral surface; that is to say, the fracture mode under lowest strain is characterized by occurrence of cracks-net. In a word, the strain-rates affect the fracture morphologies most obviously, which performs mainly the relatively mean fracture and cracks net. Thus, these features of strain rate effect can provide important enlightenment for the parameters determination and hydro-fracture plan-design of shale.

Key words: shale; strain rate; mechanical properties; elastic modulus; peak strength; fracture morphologies; cracks net

1 引 言

岩体在动力效应下(爆破、岩爆、动载)与其

在静力条件下(蠕变、构造运动)的力学特性具有极大的差异,这在唯象学上主要表现为力学参数(弹性模量、泊松比、峰值强度等)的不同,而其

收稿日期: 2013-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50774076, No. 50725414); 四川省科技支撑项目(No. 2013GZ0071)。

第一作者简介: 刘俊新,男,1976年生,博士,主要从事岩土工程研究。E-mail: ljx0614@126.com

通讯作者: 刘伟,男,1986年生,博士研究生,主要从事岩体渗透及层状岩体力学研究。E-mail: whrsmluwei@126.com

力学机制却反映了岩石内部在不同变形及加载速率下能量吸收/释放、微破裂孕育演化的响应特征。因此,时间尺度效应一定程度上反映了岩石本质属性的差异,认清这些特征,对于不同时间尺度下的工程建设、灾害治理及能源开发具有重要指导意义。

岩体的时间效应,一般通过应变速率试验加以研究,近年来,关于岩石应变速率方面的研究一直处于积极的探索之中,并已取得了一些有益的研究成果。朱瑞赓等^[1]开展了不同加载速率下的花岗岩力学试验,揭示了其强度随加载速率变化的规律,并建立了适用于花岗岩一类硬脆岩石的动力破坏判据。李永盛等^[2]研究了红砂岩在 9 级不同加载速率下的力学特征,系统地分析了不同应变速率下的强度、弹性模量、峰后等特性,同时给出了实测数据的经验公式。Liang 等^[3]开展了两种盐岩的单轴应变速率试验研究,重点从能量角度探讨了盐岩软岩的应变速率效应特征及其对溶腔稳定性的影响。纪文栋等^[4]开展了不同应变速率、不同围压下盐岩的三轴压缩试验,从破裂形态、强度及变形特性角度揭示了在围压与应变速率耦合效应下盐岩的力学特征,重点剖析了不同应变速率下盐岩裂纹的演化规律。张连英等^[5]开展了 200 ℃ 的高温下石灰岩的应变速率特性研究,指出了高温应变速率下岩石破裂特征与常温条件下的异同。周辉等^[6]开展了深部大理岩在不同应变速率的单轴拉伸试验,并从断口形貌学角度揭示了不同应变速率下破裂差异的微观机制,为应变速率研究开辟了新思路。

随着全球原油涨价以及能源危机加剧,以往仅作为盖层的页岩/泥页岩逐渐引起世界的关注。我国主要盆地和地区页岩气资源量约为 $15 \times 10^4 \sim 30 \times 10^4$ 亿 m^3 , 与美国 28.2×10^4 亿 m^3 大致相当,具有极大经济的潜力^[7],因此,页岩气一直被誉为可取代传统油气资源的最为重要的非常规能源。美国于 2000 年左右便实现了页岩气的工业开采,从此拉开了大力开发页岩气的序幕。与此同时,页岩中不但含气、也含有液态石油,页岩油探明储量约为传统石油的 1.5 倍^[8],因此美国目前在不放弃页岩气大力开采的前提下也将一部分开发重心转移到页岩油的开发利用上。基于当前的国际背景,国家在“十二五”规划中明确提出将页岩作为一种特殊的独立矿种,并要求大力加强对页岩油气资源的研究与开发^[9]。

我国目前对页岩的研究主要以开发页岩气为首要方向。页岩具有低渗透、低孔隙度、结构致密的特征,需要采用水力分段压裂一类人工造缝技术才能使得赋存于微小孔洞中的天然气流入井筒,进而

实现工业开采^[10]。一般页岩气井需要经过一次或多次反复、分段压裂才能逐渐实现增产增效目的,且页岩气井作业周期长达数十年^[11]。因此,页岩在压裂、开采等各个环节需要充分考虑页岩力学性质的时间特征。压裂的排量、速率都决定了产量和开采寿命,探明页岩在不同应变速率下的力学响应,就显得至关重要。

针对页岩的应变速率效应的研究成果非常缺乏,国外仅见 Chong 等^[12]提到过油页岩的应变速率效应研究。国内仅有陈勉等^[13]、王倩等^[14]开展过页岩的常规单三轴力学特性研究,页岩的应变速率效应是亟待开展的科研课题。本研究采用地表一定深度下的新鲜页岩试样,开展了不同应变速率下的单轴压缩力学试验,分析了弹性模量、峰值强度、破裂方式等对不同应变速率的响应特征,重点揭示了不同应变速率下的破裂特征,最后结合页岩气开发的相关背景开展了关于应用的探索与讨论。研究结果可为进一步认清页岩的破碎和压裂特征提供有益参考。

2 试验介绍

2.1 试样准备

试样均取自重庆市武隆县江口镇地表露头刚开挖的下志留统龙马溪组页岩,通过对该区段页岩的埋藏深度、厚度、有机碳含量、页岩气含量以及脆度的综合评判表明,该区段为页岩气勘探有利区段^[15],在现场钻取直径 49 mm 的长柱岩芯,然后迅速擦干蜡封编号,运至实验室妥善保管。待用试样时,选取从同一位置所取的岩芯进行加工。页岩属于典型层状岩体、层理较易裂开,为避免水力切割后造成节理失水开裂,试样均手工加工制得:首先,利用钢锯切出长度 102 mm 左右的试样,然后,利用专用夹具配合细砂纸分步打磨直至形成符合试验规程的标准试样。

本次试验所用试样的层理方向均为水平方向。为对试样有更深入地了解,加工试样中收集了岩芯粉末,用于开展成分分析。X-射线衍射分析(XRD)结果显示,各组分含量平均为:石英 49.48%,钠长石 13.93%,伊利石 12.97%,黄铁矿 13.17%,方解石 6.32%,绿泥石-蛇纹石 2.22%,铁白云石 1.91%,成分组成如图 1 所示饼状图。为避免试样本身差异过大,使得其本身力学特性的偏差覆盖了应变速率的偏差,对所用试样同时测定了密度、纵波速度 2 个参数,剔除了具有明显偏离的试样,此外还剔除了有缺口、残缺、矿脉充填的试样。试样有关信息见表 1。

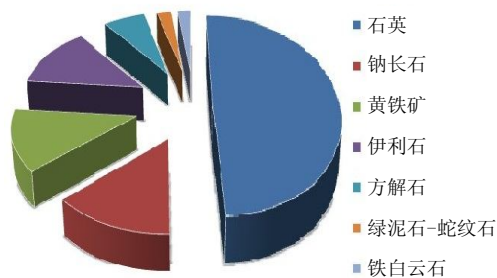


图 1 页岩成分组成饼状图 (XRD)

Fig.1 Pie chart of the shale compositions (XRD)

2.2 试样方案

周维恒^[16]对动、静加载的定义为：当加载速率（应变率）在 $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 的范围内时，认为静态加载；当加载速率高于 10^{-4} s^{-1} 时，则为动态加载。本文暂不涉及页岩动力特性研究，故所设计的应变加载速率均不高于 10^{-4} s^{-1} 。本次页岩单轴压缩应变速率试验在中国科学院武汉岩土力学研究所自主研发的 RMT-150B 岩石力学试验系统上开展，该试验系统的框架整体刚度达 $5.0 \times 10^9 \text{ N/m}$ ，加载应变率范围为 $10^{-2} \sim 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ，轴向位移采用一个量程为 5 mm 的 LVDT，环向变形采用 2 个量程为 2.5 mm 的 LVDT，轴向荷载采用 1 000 kN 的力传感器测量。试验过程中系统可自动采集记录试样的轴向载荷、轴向及环向位移，加载方式采用位移控制模式，本次页岩压缩试验设计的应变速率分别为 5×10^{-4} 、 1×10^{-4} 、 1×10^{-5} 、 $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ，每级应变速率试验针对 3 块试样开展。每块试样的试验参数见表 1，其中 $\dot{\epsilon}_i$ 为应变速率。

表 1 试样信息及试验方案
Table 1 Petrophysical information of the samples and testing plan

编号	长度 / mm	直径 / mm	密度 /(g/cm ³)	纵波速度 /(m/s)	应变率 / s ⁻¹
1142-1	98.44	47.82	2.52	3 288	5×10^{-4}
1142-18	95.75	47.80	2.49	3 307	5×10^{-4}
1142-19	98.35	47.70	2.54	3 235	5×10^{-4}
1142-30	100.10	17.80	2.52	3 315	5×10^{-4}
1142-4	94.88	47.90	2.47	3 331	1×10^{-4}
1142-7	100.32	48.51	2.51	3 296	1×10^{-4}
1142-23	101.56	48.24	2.47	3 217	1×10^{-4}
1142-34	99.20	48.10	2.49	3 307	1×10^{-4}
1142-6	101.16	47.96	2.55	3 272	1×10^{-4}
1142-27	97.85	48.00	2.55	3 262	1×10^{-5}
1142-31	100.75	48.00	2.48	3 358	1×10^{-5}
1142-36	101.54	47.92	2.53	3 385	1×10^{-5}
1142-2	96.10	47.20	2.54	3 392	1×10^{-6}
1142-11	99.52	47.60	2.53	3 245	1×10^{-6}
1142-32	97.45	48.06	2.50	3 164	1×10^{-6}
1142-33	100.00	47.86	2.51	3 322	1×10^{-6}

3 试验结果分析

3.1 应力-应变曲线分析

通过对单轴压缩试验记录的荷载、位移数据整理和分析，求得泥页岩在不同应变速率下的应力-应变全程曲线，并绘制于图 2（1142-31 指向与-19 重合）。为确保试验曲线的代表性，针对每组曲线，选取了基本位于平均值附近的那一条曲线并绘制在一起。对于其他试样的试验结果，表 2 中给出了所有相关参数的试验结果 4 个主要力学指标参数。

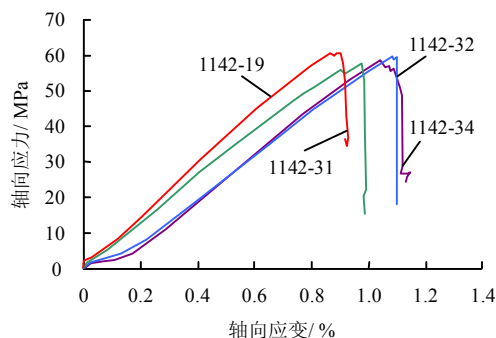


图 2 4 种不同应变率的应力与应变全程曲线

Fig.2 The entire stress-strain curves under four different strain-rates

表 2 不同应变速率下单轴压缩试验结果
Table 2 Uniaxial compression results under different strain-rates

试样编号	应变速率 / s ⁻¹	峰值强度 / MPa	峰值应变 / %	弹性模量 / GPa	泊松比
1142-1	5×10^{-4}	64.57	0.914	8.73	0.298
1142-18	5×10^{-4}	66.11	0.842	9.10	0.326
1142-19	5×10^{-4}	60.76	0.891	7.80	0.307
1142-30	5×10^{-4}	70.31	0.961	8.31	0.271
1142-4	1×10^{-4}	61.86	1.180	7.25	0.214
1142-7	1×10^{-4}	63.42	0.927	7.85	0.296
1142-23	1×10^{-4}	53.34	0.989	6.65	0.194
1142-34	1×10^{-4}	59.84	1.090	6.77	0.350
1142-6	1×10^{-5}	56.23	1.010	6.64	0.269
1142-27	1×10^{-5}	59.68	0.869	6.21	0.247
1142-31	1×10^{-5}	54.98	0.901	6.51	0.226
1142-36	1×10^{-5}	56.04	0.780	7.36	0.194
1142-2	1×10^{-6}	51.97	0.980	6.21	0.320
1142-11	1×10^{-6}	49.67	0.826	6.01	0.230
1142-32	1×10^{-6}	55.42	0.893	6.30	0.215
1142-33	1×10^{-6}	56.46	0.856	6.57	0.267

由图 2 可见，4 种不同应变速率下页岩试样的压密阶段、弹性变形阶段、弹塑性变形阶段及峰后脆性破坏阶段均较为明显。页岩属于典型的沉积类

层状岩体,由于沉积差异性,在层面一般有微孔隙、微裂隙、细小层理等微缺陷的存在,且本次所取试样位于地表附近,相对于深部受高压状态的页岩,应力卸载效应更加显著,因此,试验中出现了较为明显的压密阶段。一方面证明了岩芯层理中微缺陷的存在,另一方面也说明地表岩芯与深部地层页岩仍存在一定差异^[13]。通过对应力-应变曲线的汇总分析还可以看出,应变速率越低、压缩变形阶段越明显、其所占总应变的比例也更大,因为当应变速率越低时,发生变形的反应时间越充分;在较高的应变速率下岩体尚来不及发生塑性变形,较高的应力速率已经迫使岩体进入下一阶段的应力-应变状态之中,高应变速率下压缩变形阶段即迅速地结束,很快进入弹性阶段。页岩属于硬脆性岩石,从笔者所参与过的大量页岩力学试验来看,页岩所具备的弹性特性均较为明显,即应力-应变曲线出现明显的直线上升段。由图 1 还可见,当该直线阶段(弹性阶段)持续到约超过峰值强度 1/2 以后,曲线才逐渐发生微微偏转、斜率略微有所下降的现象,也表明此时试样内部微裂纹开始渐渐萌生、扩展,逐步弱化试样的刚度,但其程度仍远不及导致形成贯通型宏观裂纹的状态,表现为其刚度的下降并不如软岩一般显著,而是缓慢地下降到峰值处,然后发生突然的脆性断裂。仔细观察可以发现,峰值点附近部分的应力-应变曲线出现局部波动起伏,该现象在应变率越低时越明显。这种峰值附近应力波动的现象在层状岩体中时有发生,其原因应该是发生局部破坏后的结构自我调整,致使自身刚度和稳定性得到一定程度的恢复。很显然,应变速率越低,自身调整的时间越充分,继而出现应力下降又上升的现象也越明显、波动起伏的次数也可能越多。整体而言,无论应变速率高低,峰后应力都迅速跌落,脆性破坏特征极为显著,且所有试样的残余强度几乎都为 0。

3.2 破裂特征分析

较高应变速率下应力迅速达到峰值,且发生剧烈破坏,并伴随较大轰响,岩芯也在瞬间被劈裂成较大的竖直片状碎块,断面上有粉体状物质出现,说明破坏前断面发生过剧烈的摩擦。局部倾斜断口有明显撕裂痕迹,说明这些部位是被强行剪切破坏造成,表明在较高应变率下岩芯的破坏可能并非完全遵循于微裂纹的萌生、扩展、贯通,然后形成宏观裂纹这种经典模式。在快速加载作用下发生强力破坏,裂纹之间根本没有足够的时间萌生和贯通,试样内部应力因此(来不及)随着裂纹萌生扩展而

重新分布,只能迅速到达岩芯的强度,进而引起急剧破坏。此外观察也发现,裂纹是从上端面开始(轴压活塞从上往下加载)而后迅速引起整个试样的破坏,倾斜断面只是一般发生在试样的下半部分。

随着应变速率的降低,破坏也逐渐变得温和可控,试样不再碎成片块状;当达到较低应变率时,可以明显观察到试样表面裂纹逐渐形成与贯通,直到峰后脆性破坏,但试样仍未散落。这也是极易理解的,较低应变速率下试样的变形与裂纹发展有足够的反应时间,岩芯内部结构在产生局部破坏之后,也有充分的时间进行自由结构调整,进而使得整体上的破坏显得较为均匀。试验后发现:应变速率越低,断面上出现的粉末越少,剪切型倾斜断面也越少。当应变率位于 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 时,破坏以劈裂为主,但局部也产生剪切破坏,例如试样 1142-23:侧面被劈裂成多块竖直片块,但一端出现明显的对顶锥破裂面。当应变率进一步下降到 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时,破坏变得更加缓和,试样侧面出现多条劈裂缝,裂纹从上端发展到下端时也出现倾斜的情形,表现为一定的剪切破裂性质。随着应变率的进一步降低(达到 $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$),试样被多条纵向劈裂缝覆盖,横向裂纹的数量也随之逐渐增加。

整体而言,较高应变速率下岩体的破坏仍以单一的劈裂为主,破坏后主要碎裂成竖向的片块,局部倾斜破坏断面是峰后形成,与片块之间的相互作用有关,其作用机制类似于相连压杆失稳。随着应变率地下降,试样虽仍以劈裂破坏为主,但局部也伴随剪切破裂面的出现,且横向裂纹也随着应变速率的下降而逐渐增多,即破坏之后试样成为由较多纵横裂纹交错切割的裂纹网体系。贾长贵等^[17]指出, 90° 倾角的页岩在单轴压缩下(与本文页岩层理方向相同)以剪切-劈裂破坏为主,与本文所处应变率为 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的破裂结果相近,而 0° 倾角的页岩则以劈裂破坏为主,与本文应变速率为 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 时的结果较为相近。贾长贵等的研究表明,页岩是一种典型的横观各向同性材料,倾角是影响其力学特性的重要因素。本文的研究也认为应变率对破裂特征的影响非常明显,从破裂形态而言,其影响不亚于倾角的影响,因此仅从倾角方面是难以全面准确地揭示页岩的力学特征。

图 3 为 4 种不同应变速率下页岩试样破坏后的照片及破裂形态侧面展开图。1142-18 和 1142-23 已经破裂,无法绘制素描图,而 1142-36 和 1142-33 结构尚未溃散,但其横向裂纹较为细小,仅从照片中难以识别,故添加了线条绘制其纵横裂纹并将半

圆弧作了侧面展开, 可以帮助了解其详尽的纵横网状裂纹分布情形。从图中也可看出, 应变速率对页岩的破裂方式的影响是非常显著的。

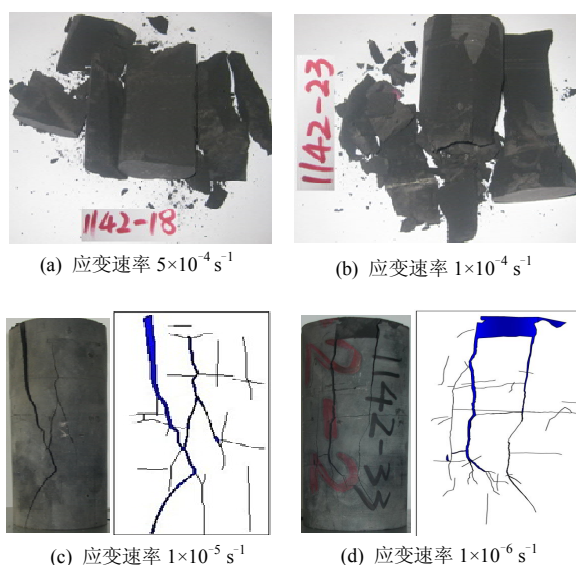


图 3 不同应变速率下的破坏形态及示意图

Fig.3 Fracture morphologies and sketches under different strain rates

需要指出的是, 通过压裂实现页岩气开采, 目标就是通过合理的压裂工艺(水平压裂、分段压裂)使页岩储集层中产生纵横交错的密集裂纹网。而本次页岩的应变速率试验显示, 加载速率对裂纹的破裂方式具有重要影响。因此, 密切关注页岩不同应变率下的强度及破损特征, 不仅对探明其力学特性有重要意义, 而且对工业增产、增效具有潜在的重要应用价值。

4 不同应变率力学特征分析

应变速率反映了岩体对于加载条件的力学响应特征。较快速的动力响应一般更为剧烈、突然、并伴随巨大的能量释放, 如岩爆、爆破、冲击荷载, 静力响应则一般较为平缓、持续时间长, 例如, 软岩的蠕变等。对于时间尺度下的力学响应特征, 其所试用的本构关系及破裂判据一般也有所区别^[18]。本文涉及的应变率 $\leq 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 尚属于准静态范畴。而页岩气/油在开发过程中, 压裂的时间较短, 一般持续时间几小时乃至几天, 但页岩气井具有长寿命的特征, 国外有人预测某些页岩气井的寿命可长达 80 年^[8], 因此, 研究从 $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 的页岩应变率效应更有工程背景意义, 也启示笔者在以后的研究中应该包含更广泛的应变速率。

应变率效应中弹性模量和峰值强度是影响最为重要的 2 个表征指标, 也是压裂方案设计时必须充分考虑的力学参数。考虑应变速率对页岩的物理力学参数的影响, 具有重要的使用价值。以下对此展开详细论述。

(1) 弹性模量

仅从应力-应变曲线比较难看出应变速率的显著影响, 将应变速率与弹性模量绘制在同一图中时有助于发现两者的相互关联。由于应变速率区间跳跃较大, 为了便于观察对应变率采用负对数坐标, 其坐标值越大, 表示应变率越低。从图 4 可见, 应变率负对数与弹性模量存在较为显著的相关关系, 即随着应变率的逐渐降低, 弹性模量呈下降趋势, 但下降的速度逐渐变缓, 整个应变率范围内弹性模量下降程度约为 31.3%。通过拟合关系发现, 可用指数函数来表征两者之间的关系:

$$E = 14.50v_t^{-0.48} \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量, 由应力-应变弹性段计算获取; v_t 为应变速率负对数, 等于 $-\lg(\dot{\epsilon}_t)$ 。

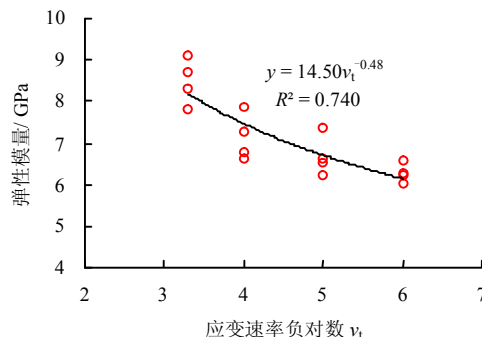


图 4 弹性模量与应变速率负对数的关系

Fig.4 Relationship of elastic modulus versus minus logarithm of strain rate

由图 4 可见, 弹性模量随着加载速率下降而缓慢降低, 表明加载速率对岩体具有一定的强化效应。一般而言, 加载速率越低, 弹性模量呈现下降趋势, 与李永盛等^[2]的研究成果较为接近。很明显, 加载速率越高岩体的变形越滞后于应力, 将导致部分变形来不及发生则应力已经达到较大的值, 进而表现出更高的弹性参数。

(2) 峰值应力

图 5 为峰值强度与应变速率之间的关系曲线。采用相同的处理方法, 应变率取负对数。16 块试样之间的强度差异不大, 单独分析难以找出较为明显

的规律,但其整体趋势较为明显,即应变率越低,峰值强度整体呈现下降趋势。由图 5 可见,峰值强度随着应变率增加呈缓慢下降趋势,在整个区间下降的幅度为 20.4%,其幅度低于弹性模量的下降范围,表明应变率对弹性模量的影响更显著。

对两者关系进行拟合,也较为符合幂函数关系:

$$R_C = 98.81v_t^{-0.35} \quad (2)$$

式中: R_C 为单轴抗压强度 (MPa); $v_t = -\lg(\dot{\epsilon}_t)$, 应变速率负对数。

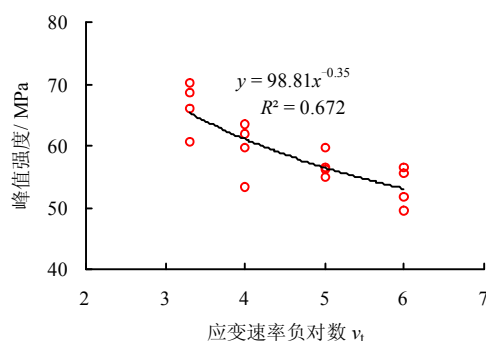


图 5 应变速率负对数与峰值强度关系
Fig.5 Relationship of minus logarithm of strain rate versus peak strength

综上可知,岩体属于典型的非均质、非连续、各向异性介质。尽管在试样选取时尽量排除各种可能的干扰因素,以使试样之间的差异降到最低,但也难以找到两块完全相同的岩样,仍需要开展大量的、重复的试验,才能更好地找到其符合统计意义上的规律。限于各种原因,本次试样采用的试样数量仅有 16 块,其统计的样本仍然较小,拟合数据时发现幂函数的拟合度不高。为了进一步分析岩样的应变率特征,本次对每组试验数据先求平均值,再用相同的公式进行拟合,得到关于弹性模量、峰值应力与应变率的关系,如图 6、7 所示。采用平均值进行拟合时发现拟合度均超过 0.9 时,峰值强度的拟合度还达到了 0.99,说明页岩应变速率对弹性模量和峰值强度的影响基本上符合本文给定的关系。当然,本文所取的应变率间隔较大,样本较少,在今后的试验中还需减小应变率间隔、增加试样数量,进一步揭示应变率对页岩力学特性的影响。此外,由采用平均值拟合的结果可以得到启发,对于诸如应变率这类较为符合统计规律的研究课题,开展大量的试验,从统计学的角度来进行力学特性的研究是必须的,也是必要的。

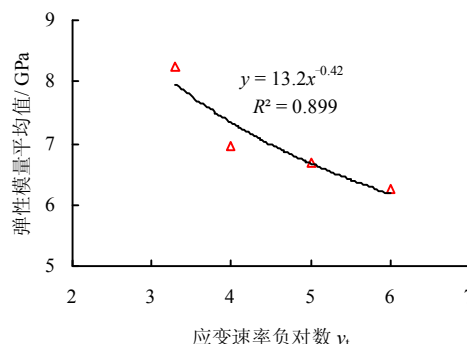


图 6 弹性模量平均值与应变速率负对数的关系
Fig.6 Relationship of minus logarithm of strain rate versus mean elastic modulus

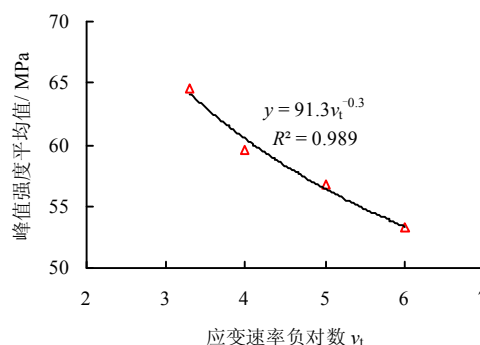


图 7 峰值强度平均值与应变率的关系
Fig.7 Relationship of minus logarithm of strain rate versus mean peak strength

5 讨论与应用

应变速率对强度特征如峰值强度、弹性模量的影响较为显著,对于确定页岩的基本力学参数,进而为水力压裂方案提供可靠的技术参数具有重要的实用意义。在页岩气的开发中,更为关注的是页岩的破裂特征对压裂增产具有显著影响。页岩属于生、储、盖自成一体的特殊储集层,其结构致密、渗透率低、微细孔隙发育,正因为如此,在以往页岩一直作为盖层而未被引起足够重视。而随着人类对于能源的需求增加,而常规油气资源又逐渐开采殆尽,才不得不把目光转移至难以开采的页岩气上来。页岩压裂工艺的目的是使页岩储层内部产生人造裂纹,以使内部微小孔洞中的天然气能够通过人为诱导裂缝流入井筒。

显然,开采的最佳目标是使页岩中形成纵横交错、密密麻麻分布的裂纹网,裂纹的密度直接决定了气井的产量和寿命。以往的研究主要将页岩作为一种横观各向同性介质,较多地关注角度对裂纹网形成的影响、关注不同方向的力学性质的差异,尤其关注于水平和竖直方向的断裂韧性的差异。从已有成果来看,一般认为,层理方向比垂直层理方向

更容易开裂起缝^[13-14, 17], 而鲜有加载应变速率对页岩破损特征及压裂特性的报道。本文研究结果表明, 应变率越低形成纵横裂纹的可能性也越大, 因为低应变率加载能有效促使能量均匀而缓慢地作用于岩石的破碎, 使裂纹能够相互沟通和串联。较高应变率虽然也能造成岩体的破坏, 但均形成较大的块体, 且有较多的能量已经转换为动能做功、最终耗散, 一定程度上降低了能量使用率。虽然水力压裂下实际地层的应力状态远比单轴压缩复杂, 但作为相同的页岩, 即使是最为简单的单向应力状态, 其物理性质也在一定程度揭示其可能的应力响应模式, 更是进一步开展试验的研究基础。笔者据此作出大胆假设: 采用水力压裂时, 压裂的速率对最终的压裂效果必然存在影响, 而且很可能遵从本文不同应变速率下的破裂模式, 即较高速率的压裂会使储层很快开裂, 但形成的是一些大的、数量有限的裂缝。较低速率下的压裂则很有可能让储层中形成更加细小、但数量更多、连通性更好的网状裂纹。

需要特别指出的是, 页岩是一种典型的横观各向同性介质, 正如贾长贵等^[17]认为, 角度对页岩的力学特性具有重要影响。本次中仅仅选取了水平层理的试样进行试验, 即便如此, 考虑到我国页岩研究及页岩气的开发尚处于起步阶段, 本文作为一项积极的探索和尝试, 已表明页岩属于一种具有较强应变速率的岩体, 在弹性模量和峰值强度上均表现出较为强烈的应变率效应, 破裂形态上更是受到应变速率的显著影响。

6 结 论

(1) 页岩属于典型的脆性岩体, 具有显著的应变率效应。不同应变速率下页岩的压密阶段、弹性参数和破裂方式均表现出较明显差异。

(2) 不同应变速率下破裂方式差别较大, 具体表现为较高应变率下以劈裂成大块为主, 随应变率降低, 逐渐过渡为“劈裂-剪切”破坏, 而在较低应变率时, 试样呈现纵横裂纹交错的破裂形态。

(3) 弹性模量和峰值强度均随应变速率的下降而下降, 但下降的速度逐渐放缓, 应变速率对页岩表现一定的强化效应。2 个参数的平均值与应变速率负对数都比较符合幂函数的关系, 且弹性模量的应变率效应更明显。

(4) 较低应变率下页岩破裂后形成纵横分布的裂纹网, 较低的压裂速率可能有助于在储层中形成纵横交错、细小密集的裂纹网。

应变率对页岩的力学特性的影响是不可忽略

的, 其重要性可能仅次于倾角的影响。因此, 在以后的工作中, 还会进一步加强不同倾角、不同应力状态(三轴压缩、压裂)以及更多应变速率的试验研究。

参 考 文 献

- [1] 朱瑞赓, 吴绵拔. 不同加载速率条件下花岗岩的破坏判据[J]. 爆破与冲击, 1984, 4(1): 1—9.
ZHU Rui-geng, WU Mian-bo. Failure criterion of granite at different loading rates[J]. **Explosion and Shock Waves**, 1984, 4(1): 1—9.
- [2] 李永盛. 加载速率对红砂岩力学效应的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1995, 23(3): 265—269.
LI Yong-sheng. Experimental analysis of the mechanical effects of loading rates on red sandstone[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 1995, 23(3): 265—269.
- [3] LIANG W G, ZHAO Y S, XU S G, et al. Effect of strain rate on the mechanical properties of salt rock[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 2011, 48: 161—167.
- [4] 纪文栋, 杨春和, 姚院峰, 等. 应变加载速率对盐岩力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2507—2513.
JI Wen-dong, YANG Chun-he, YAO Yuan-feng, et al. Effects of loading strain rate on mechanical performances of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(12): 2507—2513.
- [5] 张连英, 茅献彪. 高温状态下加载速率对石灰岩力学效应研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3511—3515.
ZHANG Lian-ying, MAO Xian-biao. Experimental study of the mechanical effects of loading rates on limestone at high temperature[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 31(11): 3511—3515.
- [6] 周辉, 杨艳霜, 肖海斌, 等. 硬脆性大理岩单轴抗拉强度特性的加载速率效应研究——试验特征与机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1868—1875.
ZHOU Hui, YANG Yan-shuang, XIAO Hai-bin, et al. Research on loading rate effect of tensile strength property of hard brittle marble—Test characteristics and mechanism[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(9): 1868—1875.
- [7] 黄玉珍, 黄金亮, 葛春梅, 等. 技术进步是推动美国页岩气快速发展的关键[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 7—10.
HUANG Yu-zhen, HUANG Jin-liang, GE Chun-mei, et al. A key factor promoting rapid development of shale gas in

- American: Technical progress[J]. **Natural Gas Industries**, 2009, 29(5): 7—10.
- [8] 罗承先. 页岩油开发可能改变世界石油形势[J]. 中外能源, 2011, 16(12): 22—26.
- LUO Cheng-xian. Shale oil development may change the landscape in the world's oil market[J]. **Sino-Global Energy**, 2011, 16(12): 22—26.
- [9] 国家发改委、财政部、国土资源部和能源局. 2011—2015 页岩气发展规划[M]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [10] 张金川, 姜生玲, 唐玄, 等. 我国页岩气富集类型及资源特点[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 109—114.
- ZHANG Jin-chuan, JIANG Sheng-lin, TANG Xuan, et al. Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China[J]. **Natural Gas Industries**, 2009, 29(12): 109—114.
- [11] 薛承瑾. 页岩气压裂技术现状及发展建议[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 24—29.
- XUE Cheng-jin. Technical advance and development proposals of shale gas fracturing[J]. **Petroleum Drilling Techniques**, 2011, 29(3): 24—29.
- [12] PENG K P, BOREST A P. Strain rate dependent mechanical properties of New Albany reference shale[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.**, 1990, 27(3): 199—205.
- [13] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 含气页岩破坏模式及力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 2): 3764—3772.
- LI Qing-hui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experimental research on failure modes and mechanical behaviors of gas-bearing shale[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Supp.2): 3764—3772.
- [14] 王倩, 王鹏, 项德贵, 等. 页岩力学参数各向异性研究[J]. 天然气工业, 2012, 32(12): 62—65.
- WANG Qian, WANG Peng, XIANG De-gui, et al. Anisotropic property of mechanical parameters of shale[J]. **Natural Gas Industries**, 2012, 32(12): 62—65.
- [15] 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.
- ZHAO Peng-da, LI Gui-fan, ZHANG Jing-chuang. Shale gas favorable blocks delineation and quantitative evaluation based on the geological anomaly theory: A case study of the Lower Silurian Longmaxi formation, the Southeastern area of Chongqing[J]. **Natural Gas Industries**, 2012, 32(6): 1—8.
- [16] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1990: 219.
- [17] 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[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 57—61.
- JIA Chang-gui, CHEN Hai-jun, GUO Yin-tong, et al. Research on mechanical behaviors and failure modes of layer shale[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Supp.2): 57—61.
- [18] 梁昌玉, 李晓, 李守定, 等. 岩石静态和准动态加载应变率的界限值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1156—1161.
- LIANG Chang-yu, LI Xiao, LI Shou-ding, et al. Study of strain rates threshold value between static loading and quasi-dynamic loading of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(6): 1156—1161.

海上风电机组地基基础设计理论与工程应用

著译者: 王伟 杨敏 版次: 第一版 出版时间: 2014—01 开本: 小 16 开 页数: 744

出版单位: 中国建筑工业出版社 标准书号: 978-7-112-15905-5 定价: 128.00 元

内容简介: 本书以海上风电场风电机组地基基础结构设计与研究为主题, 系统阐述了海上风电机组地基基础结构设计中涉及的主要内容、分析原理、设计体系和技术方法, 包括波浪理论、工程环境与荷载、设计工况与组合、桩基设计与结构布置、模态与动力分析、疲劳分析、冲刷与腐蚀等。详细介绍了我国最先研制开发的海上风电机组地基基础设计软件 FDOWN 的架构、相关功能和使用方法。最后给出了大量海上风电机组地基基础设计的案例对比分析和工程实例。本书可供从事海上风电领域以及地基基础工程、结构工程和近海工程等相关领域的技术人员、科研人员使用, 也可作为高等院校、科研院所相关专业本科高年级学生、研究生的参考书。

读者对象: 从事海上风电机组地基基础研究、设计的高等院校师生、工程设计人员和其他相关从业人员

(信息来源: 中国建筑书店网站)