

含气页岩破坏模式及力学特性的试验研究

李庆辉^{1, 2}, 陈 勉¹, 金 衍¹, WANG F P²

(1. 中国石油大学 石油工程系, 北京 102249; 2. 德克萨斯州立大学 经济地质局, 奥斯汀 美国 78758)

摘要: 采用 MTS815 试验机对取自北美 Barnett, Haynesville, Eagle Ford 和中国南方下志留统龙马溪组含气页岩进行三轴压缩试验, 获得不同应力条件下含气页岩的破坏模式和力学行为, 并对比分析中美含气页岩力学特性上的差异。破坏模式上, 低围压测试时含气页岩破坏模式以劈裂式、双剪切破坏为主, 高围压测试时以单剪切破坏为主。页岩种类、天然埋深、取芯角度和测试围压与其力学特性关系明显; 矿物组成中脆性矿物含量越高, 脆性特征越显著, 碎裂越完全。页岩极限承载力与围压大小关系显著, 围压增加, 极限承载力升高, 弹性模量总体趋势为缓慢增加, 围压超过 30 MPa 后弹性模量迅速增加, 页岩的峰值强度与围压大致呈线性关系。Barnett 页岩的强度高于 Haynesville 页岩, 低于 Eagle Ford 页岩; 中国南方页岩与北美页岩相比强度和弹性模量更高, 泊松比更低, 脆性特征大致相当。

关键词: 岩石力学; 含气页岩; 围压; 破坏模式; 力学特性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)增 2 - 3763 - 09

EXPERIMENTAL RESEARCH ON FAILURE MODES AND MECHANICAL BEHAVIORS OF GAS-BEARING SHALE

LI Qinghui^{1, 2}, CHEN Mian¹, JIN Yan¹, WANG F P²

(1. *Department of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;*

2. *Bureau of Economic Geology, University of Texas, Austin, Texas 78758, USA*)

Abstract: Testing system MTS 815 is used to carry out triaxial compression tests for specimens from Barnett, Haynesville, Eagle Ford in North American, and Longmaxi shale in South China. Their failure modes and mechanical behaviors under different confining pressures are obtained correspondingly. The similarities and differences between them are analyzed in detail. Splitting failure and splitting-shear mixed failure modes are the main failure modes for shale samples under low confining pressures, while shear failure modes predominate under higher pressures. The types of shale, burial depth, coring direction and confining pressures are all factors affecting the mechanical behavior of specimens. More quartz and carbonate contained specimen tends to be more brittle. In addition, the peak strength and Young's modulus of shale are proportional with confining pressure, especially when the confining pressure is higher than 30 MPa. The peak strength of Barnett shale is higher than Haynesville, but lower than Eagle Ford. Shale samples from South China, compared with that from North America, have higher strength and Young's modulus, while lower Poisson's ratio. The brittleness characteristics of shale samples from China is similar to that from America.

Key words: rock mechanics; gas shale; confining pressure; failure modes; mechanical behaviors

收稿日期: 2011 - 11 - 25; **修回日期:** 2012 - 01 - 01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51074171)

作者简介: 李庆辉(1985 -), 男, 2008 年毕业于中国地质大学(北京)勘查技术与工程专业, 现为博士研究生, 主要从事页岩气钻完井过程中的岩石力学问题方面的研究工作。E-mail: liqinghui@sina.cn

1 引言

页岩气是我国未来能源的重要接替者。随着常规油气资源的减少,非常规能源(如页岩气、煤层气)开发的重要性日益突显,但由于不同的成藏和地下岩石力学环境差异,勘探开发中常面临各种复杂问题。中美页岩气藏在沉积环境、构造历史上存在显著差异,在引进成熟技术的同时,更应该立足特殊的地质和工程力学环境,探索适合中国页岩气开发的自主道路^[1-5]。

页岩气主体位于暗色(高碳)泥页岩中,以吸附和游离态为主,是天然气生成后在源岩内就近聚集、滞留、“原地”成藏的结果。含气页岩是页岩气的主要储集体,因其较高的有机质含量和成藏历史而具有特殊的力学性质。页岩的力学特征是影响页岩气开采全局的关键因素。例如,页岩的强度特性影响着井壁的稳定性和压裂的可行性,形变特征影响着井筒的完整性,脆性特征影响着压裂效果的好坏和人工裂缝闭合的时间效应等。而页岩的破坏模式和力学表现受到诸多因素影响,如页岩的种类、矿物组成、天然埋深和测试条件等。除上述的外在因素外,试样的破坏主要受自身裂隙结构面的控制,如天然裂缝和人工裂缝的富集程度、发育角度等。

中国南方黑色页岩分布范围广、沉积厚度大,但由于埋藏环境、沉积历史的差异,力学性质相差极大。早期勘探井钻探过程中,均在储层段出现过严重垮塌,严重者甚至达4~7次,上返岩屑颗粒大,形状不规则;后期压裂时,岩石破裂程度难以把握,主要原因在于页岩的压裂力学特征复杂。因此,开展含气页岩的力学试验分析其破坏机制和力学特性对于预防钻完井复杂问题和保障页岩多级压裂综合效果具有十分重要的意义。

国内外学者就岩石的破坏特征进行了诸多研究: M. S. Paterson 和 T. F. Wong^[6]对岩石的脆性破坏研究做了非常详细的总结,并认为岩石破坏有单剪切面破坏、双剪切面破坏和劈裂式破坏等多种形式。K. Mogi^[7]开展了三轴岩石力学试验,分析岩石破坏模式与应力条件及测试环境的关系。陈颀等^[8]从岩石物理学的角度系统研究了岩石的物理力学性状。中国石油大学岩石力学实验室多年来对岩石的破坏模式和变形特征进行了细致的试验和分析工作^[9-12]。

到目前为止,对含气页岩力学特征的研究尚未出现完全系统的成果。付永强等^[13]从常规压裂试验

评价入手,对页岩脆性和储层岩芯敏感性进行了初步评价,但未涉及页岩破坏的机制。黄荣樽和邓金根^[14]对常规非含气泥页岩的物理力学特性进行过详细的研究,但涉及含气页岩力学性质的研究成果鲜见报道。国外学者和石油公司在页岩开发过程中一直十分重视页岩力学特征的评价,相关实验室均拥有自主的研究团队和试验设备进行研究,但成果大多不予公开。

总之,国内外学者对岩石的破坏模式进行了较多探讨,而对含气页岩的破坏模式和力学特性方面的研究尚欠缺系统研究。本文采用 MTS815 试验机进行了大量试验,对取自北美和中国南方黑色页岩进行了不同加载条件下的破坏模式和力学行为研究,从而揭示含气页岩特殊的力学表现和破坏机制,为更好地预防钻完井复杂问题和提高压裂设计的针对性提供理论和实践指导。

2 含气页岩的矿物组成分析

为研究页岩矿物组分特征,共采集不同地区页岩产层段岩样 294 块。其中, Barnett 页岩 19 块, Haynesville 页岩 49 块, Woodford 页岩 11 块, Ohio 页岩 23 块,中国南方下志留统龙马溪组页岩 67 块,九老洞组页岩 125 块。进行矿物组分分析时,尽量保证样品采样间隔均匀。试验样品采集信息见表 1。

表 1 试验样品采集信息

Table 1 Sampling information for shale specimens

页岩种类	采样深度 H/m	采样个数	采样间距 d/m
Barnett	2 164~2 335	19	5.0
Woodford	2 377~2 856	11	10.0
Ohio	6 918~6 982	23	3.0
Haynesville	3 232~3 363	49	2.5
九老洞	2 626~2 777	125	2.0
龙马溪	1 378~1 503	64	2.0
露头龙马溪	近地表	3	2.0

X-衍射分析结果显示,北美页岩和中国南方页岩在三角图中分布情况相似(见图 1),说明中国和北美页岩在本质的组成上有一定相似性。以下逐一分析各页岩的矿物组成情况:

(1) 北美页岩矿物组成特征

Barnett 页岩矿物成分主要为石英、长石等陆源碎屑矿物,其次为碳酸盐矿物和黏土矿物,黄铁矿等化学沉淀类自生矿物含量 $<5\%$ 。石英、长石和黄

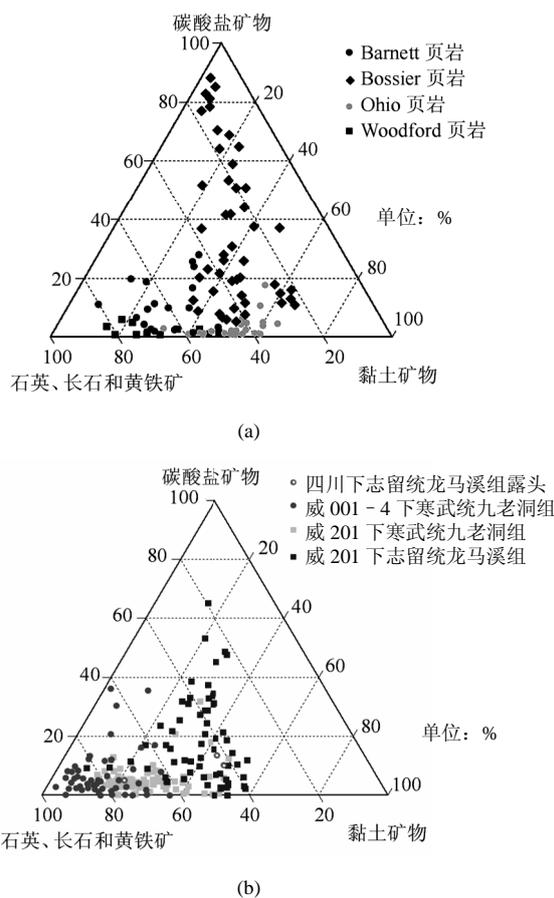


图 1 页岩试样矿物组分三角图
Fig.1 Mineral composition triangular diagram of shale samples

铁矿占 42.6%~80.2%，平均为 60.88%。碳酸盐矿物占 1.6%~27.9%，平均为 11.06%。黏土矿物含量为 8.7%~47.4%，平均为 28.06%。平均矿物组成中，脆性矿物(石英、长石和方解石类)占到总含量的 71.94%，利于储层后期增产和改造作业。

Haynesville 页岩矿物组成较不统一，不同深度处页岩组成差异较大。石英、长石和黄铁矿占矿物总含量的 9%~52.4%，平均为 29.02%。碳酸盐矿物占 5.2%~88.2%，平均为 34.90%。黏土类矿物占 2.8%~66.2%，平均为 36.08%。在平均矿物组成中，黏土矿物略占优势，脆性矿物含量(约 63.92%)低于 Barnett 页岩的含量(约 71.94%)。

Ohio 页岩矿物组成中石英、长石等陆源碎屑矿物占 28.2%~65.3%，平均为 44.39%。碳酸盐矿物含量为 0.8%~17.7%，平均为 3.53%。黏土类矿物含量较高，约 31.8%~61.0%，平均含量为 52.08%。Ohio 页岩比 Haynesville 页岩都是黏土矿物占优，但 Ohio 页岩的黏土含量更高，占到总矿物含量的 1/2 以上。

Woodford 页岩矿物成分主要以石英、长石类为主，占总含量的比例为 50.0%~81.6%，平均为 67.6%。碳酸盐矿物含量较少(为 0.9%~6.1%)，平均为 2.42%。黏土含量为 14.8%~48.5%，平均为 29.98%。脆性矿物总含量约 70.02%。虽然样品数目较少，只有 11 个样本，但总体矿物组成与 Barnett 页岩(约 71.94%)较为相似。

(2) 中国南方页岩矿物组成特征

下志留统龙马溪组页岩井下岩样与野外露头矿物组成大致相当。石英、长石和黄铁矿占 19.5%~82.5%，平均为 45.9%。碳酸盐矿物含量为 0.00~65.2%，平均为 17.8%。黏土矿物含量约为 8.4%~57.8%，平均为 36.3%。龙马溪组页岩所含脆性矿物约占总矿物组成的 63.7%，与 Haynesville 页岩(约 63.92%)大致相当，略低于 Woodford 页岩(约 70.02%)和 Barnett 页岩(约 71.94%)，但高于 Ohio 页岩(约 47.92%)。

下寒武统九老洞组页岩矿物组成在不同地区大致相同。石英、长石和黄铁矿占总矿物成分的比例为 22.6%~94.5%，平均为 73.9%。碳酸盐矿物含量为 0~47.6%，平均约 6.0%。黏土矿物含量为 1.9%~51.0%，平均为 20.1%。九老洞组页岩所含脆性矿物约占总矿物组成的 79.9%，高于北美各主要含气页岩的均值含量。单从矿物组分上讲，九老洞组页岩比龙马溪组页岩应该更加易于改造和实施增产措施。

3 标准页岩试样的加工制备

力学测试前，将取自井下的岩芯加工成标准圆柱试样。首先用金刚石钻头取芯；然后在磨平机上将页岩试样两端磨平，保证试样两端光滑、平行(平行度小于 0.01 mm)且与中轴垂直(角度偏差不大于 0.05°)。由于页岩加工时极易崩裂，取样时尽量采用低水量降温和润滑，低速平稳取芯，避免反复下钻造成的柱体不直和扰动破坏。试验共取得北美及中国页岩标准测试岩样 15 块，均表现完整，无肉眼可见裂缝。室内三轴力学试验结果见表 2。

4 试验设备与测试方法

试验设备采用的是石油大学(北京)岩石力学实验室设计组建的一套大尺寸真三轴模拟试验系统。该系统由大尺寸真三轴试验架、MTS 伺服增压泵、

表 2 室内三轴力学试验结果

Table 2 Results from triaxial mechanical testing

试样编号	深度 H/m	取芯方位	围压 σ_3 /MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	抗压强度 σ_c /MPa
H1	3 359.0	H - 0°	90	52.61	0.39	209.19
H2	3 393.7	H - 0°	60	41.40	0.31	171.92
H3	3 393.7	H - 0°	50	38.15	0.29	143.73
H4	3 233.0	H - 0°	10	23.73	0.29	42.30
H5	3 362.2	H - 0°	10	12.13	0.29	35.00
H6	3 359.0	H - 0°	10	25.43	0.35	42.49
H7	3 219.5	H - 0°	10	4.92	0.62	14.78
E8	4 163.1	V	50	34.74	0.27	214.09
E9	4 164.0	H - 0°	30	20.91	0.21	40.57
E10	4 164.0	H - 45°	20	19.56	0.48	40.56
E11	4 164.0	H - 90°	30	14.33	0.21	37.75
B12	2 171.6	V	60	70.40	0.41	391.25
L13	2 071.1	H - 0°	80	56.58	0.26	215.13
L14	2 123.4	H - 0°	60	48.84	0.19	210.17
L15	2 229.7	H - 0°	15	34.48	0.21	78.50

注: (1) 编号中 H, E, B 和 L 代表样品取自 Haynesville, Eagle ford, Barnett 和龙马溪组页岩, 如 H1 表示 1# 岩样, 为 Haynesville 页岩, 依此类推; (2) 取芯方位列首字符 H 代表水平向取芯, V 代表垂向取芯, 短线后的角度代表取芯方向与地磁正北的夹角, 如 H - 45° 代表水平 45° 方向取芯, 依此类推。

数据采集系统, 稳压源、油水分离器及其他辅助装置组成(见图 2)。该试验机轴向荷载最大 4 600 kN, 单轴引伸计横向量程 ±4 mm, 纵向量程 -0.25 ~ ±12.5 mm; 三轴纵向引伸计量程 -0.25 ~ +8 mm, 最高围压可到 140 MPa; 轴压、围压及渗透压力的振动频率可达 5 Hz 以上, 各测试传感器精度均为当前等比标定量程点的 0.5%, 试验系统如图 2 所示。

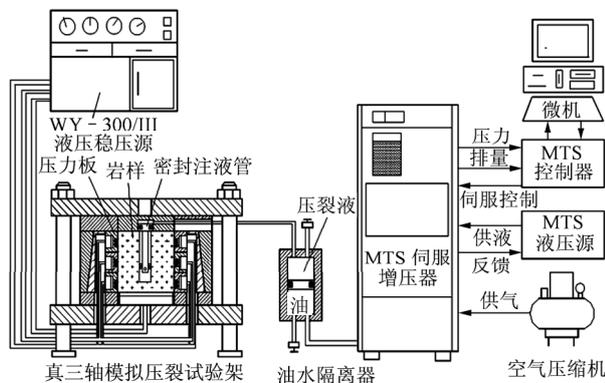


图 2 MTS815 三轴力学试验系统

Fig.2 MTS815 triaxial mechanical testing system

对于三轴测试试验则采用位移加载模式, 加载

速率为 10^{-3} mm/s。三轴压缩试验中围压加载速率为 3 MPa/min, 轴向加载方式采用位移加载控制, 破坏之前加载速率为 10^{-3} mm/s, 破坏之后加载速率为 0.1 mm/min。测试前主要监测轴向和径向应变, 径向应变片用专用测试环呈十字形分 2 组锁定于试样表面。同时, 为了监测破坏过程中微裂缝产生和扩展的细观过程, 采用 Kaiser 声发射探头进行探听。

5 不同围压下标准试样的破坏试验

页岩储层在地下均处于三向应力状态, 为了更加符合实际情况, 测试时通过控制围压下的三轴应变进行加载。加载时主要考虑试样的种类、天然埋深、取芯角度、测试围压等因素对力学性质的影响。测试的页岩种类有 Barnett, Haynesville, Eagle ford 和中国南方志留系龙马溪组页岩, 取样深度为 2 133.6~4 163.9 m, 取样角度分水平 0°, 45°, 90° 和垂直方向 4 种(见图 3), 测试围压为 10~90 MPa。

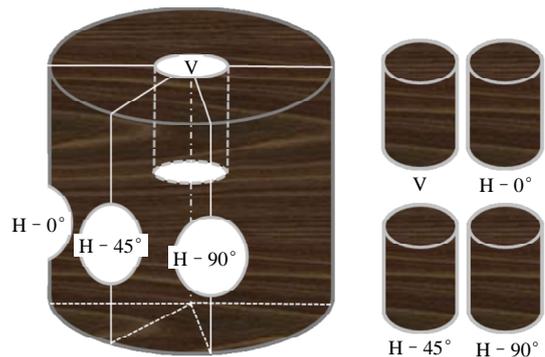


图 3 标准页岩试样示意图

Fig.3 Sketch of standard shale samples

对 15 块标准页岩试样($\phi 25$ mm × 50 mm)进行不同围压下的真三轴试验来获得各力学参数, 其中, 围压下的弹性模量采用割线弹性模量的选取方式, 即采用围压下应力为试样强度 1/2 时应力与应变的比值表示。试验全程用声发射探头探听试样声发射信号强度和密度。

5.1 含气页岩主要破坏模式及强度特征

围压下含气页岩的破坏模式主要有 3 类: 单剪切面破坏(B12, E8)、双剪切面破坏(E11)和劈裂式破坏(H5, H3, E10, H6, E9, E11, H1, H4, L15), 不同围压下页岩试样典型破坏模式及素描图见图 4。

含气页岩的破坏模式以劈裂式为主, 双剪切式和单剪切式较少, 这主要与页岩自身特点和加载条件有关。页岩本身层理面和微裂隙发育, 这些天然

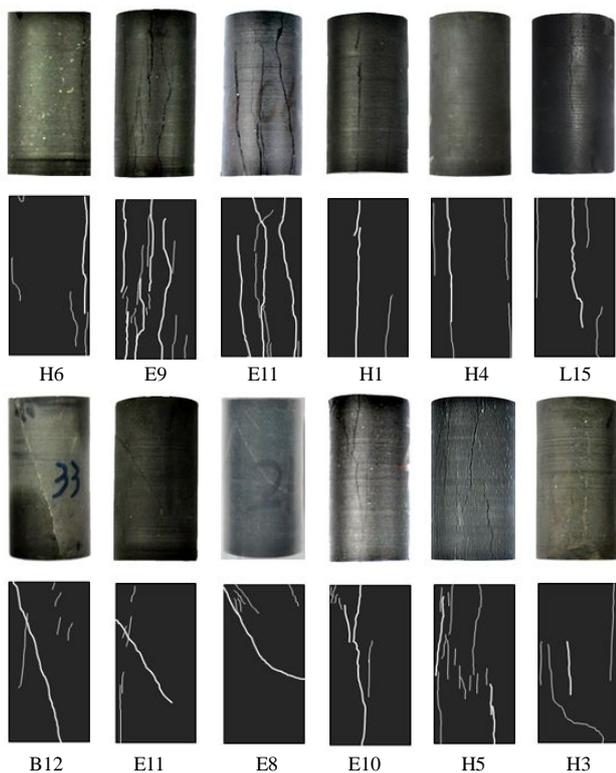


图 4 不同围压下页岩试样典型破坏模式及素描图
Fig.4 Typical failure modes of shale specimens under different confining pressures and their sketches

的薄弱面在测试时影响破坏结果，使裂纹面沿其萌发和表现，形成多重劈裂式破坏。低围压加载时含气页岩的劈裂式破坏较围压时更显著，这主要与围压抑制竖向裂缝张开，抑制多破裂面发育有关。

从裂纹数量看，劈裂式破坏和双剪切面破坏比单剪切破坏能够产生更多的裂纹。从体积应变看，劈裂式破坏和双剪切面破坏均出现较为显著的体积扩容现象，这与裂纹高密度发育和多破裂面分布关系密切。从应力 - 应变曲线上看，单剪切面破坏模式下试样的强度最大，高于其他 2 种破坏模式。从破坏效果看，劈裂式和双剪切面破坏模式下试样的碎裂更加完全。而要产生更多的破坏结构面岩石需具有一定强度，并且均质性较差。这是因为在外部荷载作用下试样内部非均匀变形越大，局部区域产生的微裂纹越多，微裂纹的产生导致局部的卸荷作用，导致岩块整体强度降低。反之，均质程度越高，试样抵抗变形能力越强，从而微裂隙发育越少，能量耗散变少，强度更高。含气页岩基本物理力学参数测试结果见表 2。

测试结果显示，北美与中国南方含气页岩的力学特征相似，对试验结果进行分析可得到以下结论：

(1) 含气页岩力学特性差异显著。就测试结果而言，标准岩样的力学参数范围较大。弹性模量为

4.92~70.40 GPa，泊松比为 0.19~0.95，抗压强度范围更大，为 14.78~391.25 MPa。

(2) 页岩种类、取芯深度、取芯方位和加载条件均影响页岩的力学表现(见图 5~8)。不同地区页岩在弹性模量、泊松比、抗压强度等力学参数上有较大差异(见图 5)；同种页岩不同深度取芯力学参数

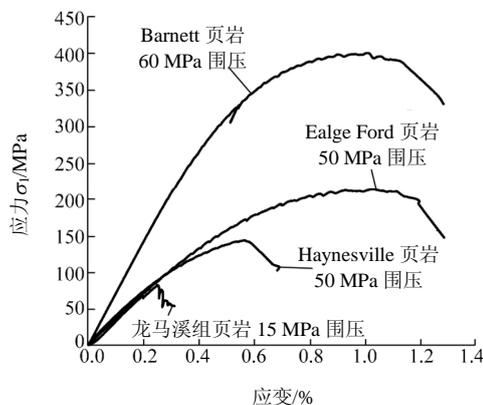


图 5 不同种类页岩的强度差异
Fig.5 Strength difference of different types of shale

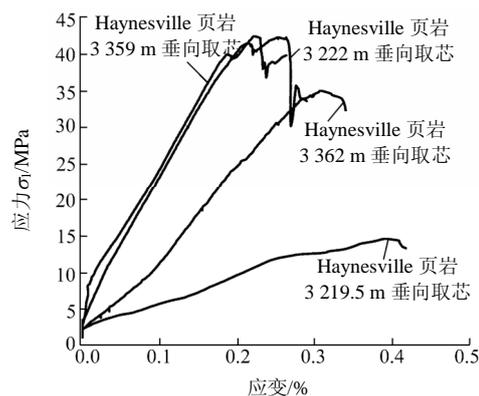


图 6 天然埋深对页岩强度的影响
Fig.6 Influence of depth on shale strength

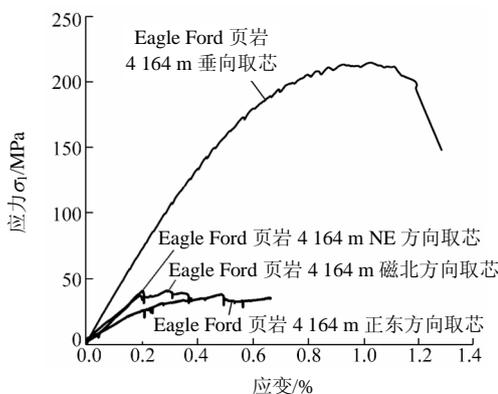


图 7 取芯角度对页岩强度的影响
Fig.7 Influence of drilling direction on shale strength

也有较大差异(见图 6)；相同深度取芯的同种页岩，取芯方位不同，力学参数也有明显差异(见图 7)；相

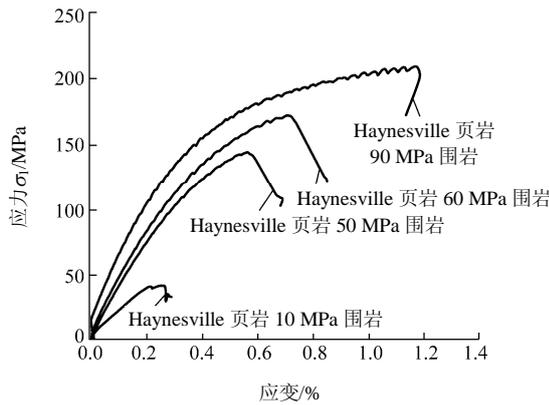


图 8 测试围压对页岩强度的影响

Fig.8 Influence of confining pressure on shale strength

同深度取芯的同种页岩，取芯方位也相同，加载条件不同，力学参数也会有显著差异(见图 8)。

(3) 单就页岩的强度特性讲，相同围压下，龙马溪组页岩的三轴抗压强度(210.17 MPa)低于 Barnett 页岩(391.25 MPa)，高于 Haynesville 页岩(171.92 MPa)，而 Eagle ford 页岩三轴抗压强度(37.75 MPa)最低(试样 H2, E11, B12, L14)。龙马溪组页岩的弹性模量(48.84 GPa)介于 Barnett 页岩(70.40 GPa)和 Haynesville 页岩(41.40 GPa)之间，Barnett 页岩弹性模量最大，Eagle ford 页岩(14.33 GPa)弹性模量最小。龙马溪组页岩的泊松比(0.19)最小，Barnett 页岩(0.41)最大，Haynesville 页岩(0.31)其次，Eagle ford 页岩的泊松比(0.21)第三，且略大于龙马溪组页岩。

(4) 围压越高，试样内部产生的微裂纹数量越少，极限抗压强度越高。主要原因在于围压的升高对微裂纹的扩展起到了抑制作用，围压越高这种抑制作用越明显。试验表明，低围压下岩石碎裂特征更加显著，劈裂破坏成为主导，高围压下剪切破坏机制为主。低围压下破裂面角度多大于 70°，高围压下角度迅速变小。

(5) 低围压下试样强度差异较大，高围压下强度趋同性显著。这是因为页岩节理面发育，低围压下大量随机裂纹的产生导致其强度表现的随机性明显。而高围压时侧向压力对裂纹离散扩展的限制作用降低了微细裂纹的能耗作用，更多能量集中在主裂缝发育上，使得试样表现出更加相似的破坏形态。

(6) 总体力学表现看，龙马溪组页岩的抗压强度、弹性模量、泊松比、曲线形态均与 Haynesville 页岩较为相似，但均质性强于 Haynesville 页岩(见

图 5)。龙马溪组页岩的强度低于 Barnett 页岩，但高于 Eagle ford 页岩。

(7) 页岩的各项异性特征显著。页岩的力学特征受多种因素共同影响。实际钻井和压裂工程中发现页岩横向和纵向差异较大，这主要与页岩的矿物组成、层理特征、沉积环境和构造历史有关。考虑页岩的各向异性能够解决许多现场问题，如钻井时存在优势方向，压裂设计则需选择有效压裂方案。

5.2 含气页岩的形变特征

本节主要结合三轴岩石力学测试的过程和结果，分析页岩发生力学破坏时的形变特征。

(1) 全应力 - 应变曲线分析

与常规砂岩相比，含气页岩的弹性模量较高，泊松比较大，脆性破坏特征明显，达到极限抗压强度后，往往很快破坏掉，塑性区域不明显。破坏时大多为碎裂形态，承载力在屈服后迅速降低，降低程度与页岩种类、加载条件关系密切，最高可达 50% 以上。

由于页岩节理、层理和纹理结构均较为发育，且不均质性明显，因此原生和次生的裂隙 - 损伤系统非常发育和复杂，多期天然裂缝和人工扰动缝线相互交迭导致含气页岩的物理力学性质具有显著的各项异性特征。表现在破坏形态上则为破裂面众多且不平行。

页岩在破裂发生之前内部多已产生许多微裂隙，主裂缝形成时多以张破裂为主，剪切破裂现象在高围压时表现明显，单轴及低围压时则不太显著。

通过对 15 组页岩岩样不同加载条件下变形特点分析研究，可发现轴向应力 - 应变曲线在达到峰值以前主要表现为直线型，主要特点为：

① 峰前：轴向应力 - 应变曲线不具有(或很少)压密段，曲线斜率一般较陡，弹性极限与屈服极限十分接近，且很快达到峰值。无压密阶段的主要原因在于初始围压不同，应力差控制着压密阶段的表现形式，应力差大于 0 时开始表现，相当于围压下轴压在达到同等强度时开始加载，这个阶段刚好可能是压密阶段，试验记录无法记载。

② 峰后：在应力 - 应变直线段卸载时，变形可完全(或绝大部分)恢复，在极限抗压强度以后卸载，可恢复形变占总应变比例的 60% 以上，卸载曲线往往以大斜率直线形式丧失较大程度承载能力。

③ 相同岩样(岩性、深度、取芯位置相同)应力-应变曲线形态与加载条件关系密切。高围压时上述脆性特征减弱，塑性表现增强；附加孔隙压力(饱和岩样不排水试验)时，页岩的脆性特征更加明显，塑性表现降低。

(2) 峰值特征分析

国外学者在研究岩石的脆性破坏过程时进行了大量的深入的研究，取得了许多成果。C. H. Hugh^[15]建议以岩石发生破坏或极限屈服时的形变量作为脆-塑性划分依据，并做了大量研究工作，G. David 和 H. John^[16]认为材料破裂不伴有(或少量)永久变形为脆性的，反之则称为延性的或韧性的，概括了岩石脆性和延性变形的试验结果。图 9 为岩石脆性变形、延性变形及脆性→延性过渡时岩石变形的形态特征。并总结了脆性和延性的不同特点。此外，国内陈颢等^[8]将峰值应变作为判断岩石脆性、脆塑性过渡区和塑性划分的标准。

类型	破裂前应变/%	压缩 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$	拉伸 $\sigma_3 < \sigma_1 = \sigma_2$	典型应力-应变曲线	备注
1	<1				脆性
2	1~5				
3	2~8				BD 区
4	5~10				延性
5	>10				

图 9 岩石由脆性向延性过渡时的破坏模式

Fig.9 Failure modes of rock transitioned from brittle to ductile

页岩试样在围压低于 50 MPa 时，表现出较强的脆性特征，整体破坏前峰值应变均小于 1%，围压高于 50 MPa 时，H1(Haynesville)，E8(Eagle ford) 和 B12(Barnett)表现出脆塑性转变的特征，峰值应变分别达到 1.21%，1.01% 和 1.00%。

由于围压等加载条件对页岩脆性的表现影响较

大^[15]，为便于比较选取加载条件相近的 H4，H5，H6，H7，E9，E10，L15 试样进行分析，可得到以下结论：

① 达到峰值强度时，含气页岩的应变均远低于相近加载条件下的灰岩和砂岩。页岩的峰值应变平均值为 0.28%，火山岩的峰值应变平均值为 1.01%，砂岩的峰值应变平均值为 0.96%。

② 达到峰值强度时，龙马溪组页岩(L15)的应变约 0.21% 左右，Haynesville 页岩(H4，H5，H6，H7)应变量的平均值为 0.31%，Eagle ford 页岩(E9，E10)应变量的平均值为 0.27%。相同加载速度(刚性伺服试验机)，龙马溪组页岩在测试过程中最先发生破坏，Eagle ford 页岩其次，Haynesville 页岩最后。

6 含气页岩标准岩样的破坏强度分析

从图 10~12 和表 1，2 可以看出，页岩的抗压强度、弹性模量和泊松比均与围压具有显著的相关关系。低围压下弹性模量差异大，同一围压(较高)时弹性模量差异在缩小。弹性模量随围压的升高整体上呈上升趋势，但 50 MPa 以上时上升的趋势逐渐变缓。泊松比随围压升高逐渐降低，降低速度逐

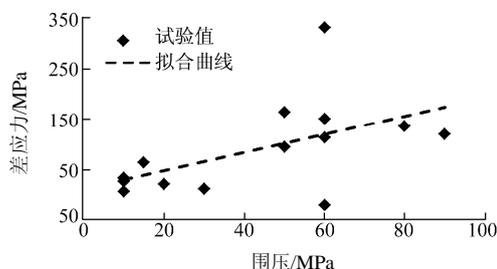


图 10 不同围压下含气页岩试样的峰值强度

Fig.10 Peak strength of shale specimens under different confining pressures

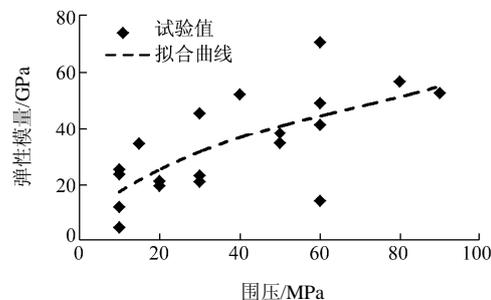


图 11 不同围压下含气页岩试样的弹性模量

Fig.11 Yong's modulus of shale specimens under different confining pressures

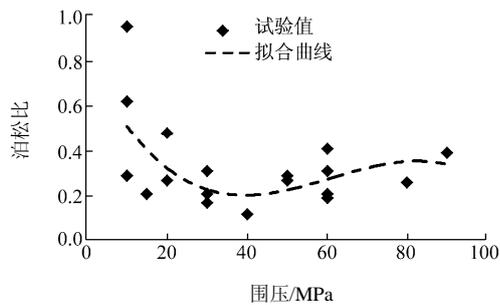


图 12 不同围压下含气页岩的泊松比

Fig.12 Poisson's ratio of shale specimens under different confining pressures

渐变缓。对于抗压强度，可以看出随围压的增加破坏强度也显著增加，围压和差应力的关系可用直线进行拟合，用以表征总体趋势，拟合曲线见图 10~12。

7 结 论

(1) 中国和北美页岩在矿物组成上具有相似性。龙马溪组页岩所含脆性矿物与 Haynesville 页岩大致相当，略低于 Woodford 页岩和 Barnett 页岩，但高于 Ohio 页岩。九老洞组页岩所含脆性矿物约占总矿物组成的 79.9%，高于北美各主要含气页岩的均值含量。中国南方页岩与北美页岩相比强度、弹性模量更高，泊松比更低，脆性特征大致相当。

(2) 实际测试条件对测试结果影响显著。含气页岩的力学特征受样品种类、天然埋深、取芯角度和测试围压等多种因素的影响。是否模拟实际地层条件下温度、压力状况对判断页岩力学、脆性特征影响显著。

(3) 总体来讲，中国南方页岩的力学性质与 Haynesville 页岩大致相似。抗压强度、弹性模量随测试围压升高而显著增加。单就页岩的强度特性讲，相同围压下，龙马溪组页岩的三轴抗压强度低于 Barnett 页岩，高于 Haynesville 页岩，而 Eagle ford 页岩三轴抗压强度最低。龙马溪组页岩的弹性模量介于 Barnett 页岩和 Haynesville 页岩之间，Barnett 页岩弹性模量最大，Eagle ford 页岩弹性模量最小。龙马溪组页岩的泊松比最小，Barnett 页岩最大，Haynesville 页岩其次，Eagle ford 页岩的泊松比第三，且略大于龙马溪组页岩。

(4) 页岩的破坏形式在低围压下表现为劈裂式和双剪切面破坏，围压升高单剪切面破坏逐渐占据

主要。低围压下破裂角多大于 70° ，高围压下破裂角明显变小。低围压下试样强度差异较大，高围压下强度趋同性显著。

(5) 变形特征方面，含气页岩轴向应力-应变曲线在峰值以前多为直线型，峰前无压密段，曲线斜率较陡，弹性极限与屈服极限十分接近，低围压下锯齿形特征较为显著。峰后承载能力急剧降低至很低水平。达到峰值强度时，龙马溪组页岩(L15)的应变约 0.21%，Haynesville 页岩应变平均值 0.31%，Eagle ford 页岩应变平均值 0.27%。

本文的研究表明，不同地区含气页岩在力学性质上有差异，不同的测试条件对试样破坏模式、抗压强度、弹性模量和泊松比均有较大影响。实际研究过程中不可全部照搬北美页岩气的开发经验，而是要立足实际，相互借鉴。面对工程和理论上的难题需要进行系统的、有针对性的扎实研究才能有所突破。本文的结论只是初步的研究成果，将来还会针对含气页岩的内在破坏机制、变形机制和脆性特征等问题展开进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 李庆辉, 陈 勉, FRED P W, 等. 工程因素对页岩气产量的影响——以北美 Haynesville 页岩气藏为例[J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 54 - 59. (LI Qinghui, CHEN Mian, FRED P W, et al. Influences of engineering factors on shale gas production—take the Haynesville shale play for example[J]. Journal of Natural Gas Industry, 2012, 32(4): 54 - 59. (in Chinese)).
- [2] GALE J F W, REED R M, HOLDER J. Natural fractures in the Barnett shale and their important for hydraulic fracture treatments[J]. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2007, 91(4): 603 - 622.
- [3] ROSS D J K, BUSTIN R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: application of an integrated formation evaluation[J]. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2008, 92(1): 87 - 125.
- [4] ZHAO H, GIVENS N B, CURTIS B. Thermal maturity of the Barnett Shale determined from well-log analysis[J]. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2007, 91(4): 535 - 549.
- [5] WANG F P, REED R M. Pore networks and fluid flow in gas

- shales[R]. [S.l.]: [s.n.], 2009.
- [6] PATERSON M S, WONG T F. Experimental rock deformation-the brittle field[M]. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 2005: 155 - 158.
- [7] MOGI K. Experimental rock mechanics[M]. Florida, USA: CRC Press, 2007: 1 172 - 1 176.
- [8] 陈 颀, 黄庭芳, 刘恩儒. 岩石物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 10 - 12.(CHEN Yong, HUANG Tingfang, LIU Enru. Rock physics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009: 10 - 12.(in Chinese))
- [9] 陈 勉. 我国深层岩石力学研究及在石油工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2 455 - 2 462.(CHEN Mian. Review of study on rock mechanics at great depth and its application to petroleum engineering of China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2 455 - 2 462.(in Chinese))
- [10] JIN Y, QI Z L, CHEN M. Time-sensitivity of the Kaiser effect of acoustic emission in limestone and its application to measurements of in-situ stress[J]. Petroleum Science, 2009, (6): 176 - 180.
- [11] HUANG R Z, ZHOU Z H, DENG J G. A study of viscoelastic-plastic behavior of rock salt and its application in petroleum engineering[C]// International Society for Rock Mechanics Symposium. Rotterdam: A. A. Balkema, 1999: 827 - 834.
- [12] 张广清, 陈 勉, 殷有泉. 射孔对地层破裂压力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 40 - 44.(ZHANG Guangqing, CHEN Mian, YIN Youquan. Influence of perforation on fracturing pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 40 - 44.(in Chinese))
- [13] 付永强, 马发明, 曾立新, 等. 页岩气储层压裂试验评价关键技术[J]. 天然气工业, 2011, 31(4): 1 - 4.(FU Yongqiang, MA Faming, ZENG Lixin, et al. Key techniques of experimental evaluation in the fracturing treatment for shale gas reservoir[J]. Journal of Natural Gas Industry, 2011, 31(4): 1 - 4.(in Chinese))
- [14] 黄荣樽, 邓金根. 石油工程岩石力学研究进展[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1993, 17(1): 1 - 12.(HUANG Rongzun, DENG Jingen. New progress in petroleum related rock mechanic study[J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science, 1993, 17(1): 1 - 12.(in Chinese))
- [15] HUGH C H. Rock deformation: chapter 7-transition from brittle fracture to ductile flow in Solenhofen limestone as a function of temperature, confining pressure, and interstitial fluid pressure[M]. New York: Geological Society of America, 1960: 193 - 226.
- [16] DAVID G, JOHN H. Rock deformation: a symposium[M]. New York: Geological Society of America, 1960: 66 - 67.