

黑色页岩力学特性及各向异性特性试验研究

陈天宇¹, 冯夏庭^{1,2}, 张希巍¹, 曹卫东¹, 付长剑¹

(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 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, 湖北 武汉 430071)

摘要: 为了研究黑色页岩的力学特性和各向异性特征, 对下寒武统牛蹄塘组黑色页岩行地化参数分析, 牛蹄塘组黑色页岩的脆性矿物成分高达 79.01%; 利用扫描电镜获得页岩的微观结构, 牛蹄塘组黑色页岩具有明显的层状沉积特征和层状薄片矿物结构。利用东北大学和长春朝阳试验仪器有限公司联合研制的 ROCKMAN207 系统对不同层理角度的黑色页岩试样进行三轴压缩试验, 获得黑色页岩试样的全应力-应变曲线和破坏模式, 并对对比分析围压和层理角度对黑色页岩力学行为和破坏模式的影响。结果表明: (1) 黑色页岩应力-应变曲线无明显的孔隙、裂隙压密阶段, 峰前应力-应变曲线近似为直线段。(2) 黑色页岩的破坏模式与围压条件和层理面角度有关, 低围压条件下, 黑色页岩破裂后易形成较为复杂的裂隙网络; 轴向加载方向与黑色页岩层理平行时, 易形成复杂的裂隙网络。(3) 黑色页岩具有波速和强度各向异性的特征, 随着层理角度 β 的增加, 黑色页岩的波速呈现降低的趋势, 黑色页岩各向异性强度特征曲线形状近似为 U 型; 黑色页岩的强度各向异性系数随着围压的增加逐渐降低。

关键词: 岩石力学; 黑色页岩; 力学特性; 破坏模式; 波速各向异性; 强度各向异性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2014)09-1772-08

EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL AND ANISOTROPIC PROPERTIES OF BLACK SHALE

CHEN Tianyu¹, FENG Xiating^{1,2}, ZHANG Xiwei¹, CAO Weidong¹, FU Changjian¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Geochemical parameters of lower Cambrian black shale at Niutitang were measured in order to study the mechanical and anisotropic properties of black shale. The brittle mineral content of the lower Cambrian black shale at Niutitang was found to be as high as 79.01%. The scanning electron microscopy was used to obtain the microscopic structure of the black shale. The layered sedimentary characteristics and the lamellar structure of alternating plates were observed to exist in the black shale. Series of triaxial compression experiments on the black shale samples with different angles of bedding were carried out with the testing system ROCKMAN207, which was developed by Northeastern University and Chaoyang testing instrument company at Changchun. The whole stress-strain curves and failure modes were obtained. The effects of confining pressure and the angle of bedding on the mechanical behavior and failure modes of shale were analyzed. The stress-strain curves of the black shale exhibited no obvious stage of compaction of fissures and pores, and were largely straight lines ahead of the peak point. The failure modes of the black shale were related to the confining pressure and the angle of bedding. Under

收稿日期: 2014-04-28; **修回日期:** 2014-05-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(11232014)

作者简介: 陈天宇(1986-), 女, 2007年毕业于辽宁工程技术大学灾害防治工程专业, 现为博士研究生, 主要从事与非常规天然气相关的试验及理论方面的研究工作。E-mail: chen_tianyu0526@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.09.006

the condition of low confining pressure, complex networks of fractures were formed easily after the failure of the rock sample. When the axial loading direction was parallel to the shale's bedding, the complex fracture networks were formed more easily. The wave velocity of the black shale samples decreases with the increase of the bedding angle. The anisotropic strength curve of the shale is U-shaped. The anisotropic coefficient of the black shale decreases with the increase of confining pressure.

Key words : rock mechanics ; black shale ; mechanical property ; failure modes ; velocity anisotropy ; strength anisotropy

1 引言

页岩气是一种重要的非常规战略性补充能源，下寒武统牛蹄塘组黑色页岩是我国未来页岩气勘探开发的主要层序之一^[1-2]。黑色页岩的力学试验是揭示其岩石力学行为的重要手段，可以为合理定向水平井、制定压裂方案、评估致裂裂隙走向等提供重要的力学参数^[3]。目前对页岩力学特征的研究主要集中在常规油气藏的盖层岩石^[4-5]，黑色页岩既是生成页岩气的源岩，同时又是页岩气的储层岩石和盖层岩石，黏土含量高，其岩石力学特征需利用试验进一步探索和研究。

由于沉积过程中矿物颗粒的择优取向，黑色页岩具有明显的层理结构特点^[6-7]；成藏后的复杂地质改造又使得其处于高埋深和复杂的地应力环境中；埋深、温度等因素作用下使得富含有机质页岩具有不同的成熟度，上述几个因素的共同作用使得黑色页岩具有各向异性特征^[2, 8]。

忽略黑色页岩的各向异性特征会使页岩气勘探开发中出现以下几个关键性问题：(1) 在勘探开发过程中会引起页岩气储层厚度、水饱和度的估算出现误差；(2) 会使得压裂方案制定中的闭合压力计算出现误差^[9]，进而引起水力压裂后页岩气储层裂隙的走向与分布无法达到预期设计目标，使页岩气井无法达到商业化的产量；(3) 由于页岩储层经历沉积和地质作用后，储层产状各异，忽略黑色页岩强度和变形各向异性会引起井壁坍塌，使得井壁稳定性问题不能得到及时控制。

国外学者对黑色页岩开展了大量的试验研究，但研究成果只有少数予以公开。L. Vernik 和 A. Nur^[7]研究了黑色有机页岩的波速各向异性特征，得出黑色页岩的各向异性主要由其自身微观结构引起；T. Lo 等^[10]研究了不同围压下 Chicopee 页岩弹性各向异性，证明了由于页岩内部的矿物颗粒排列，使得其在高围压下依然具有残余的各向异性特征；H. Niandou 等^[11]针对 Tournemire 页岩开展了常规三轴

试验和加、卸载试验研究，认为所研究的页岩样品具有明显的塑性特征和显著的各向异性塑性变形；U. Kuila 等^[12]研究了复杂应力环境引起的页岩各向异性特征，认为在高围压下所研究的页岩仍具有很高的固有各向异性特征。目前，我国黑色页岩仍处于勘探开发初期，国内学者对黑色页岩力学行为和各向异性特征方面的研究较少，李庆辉等^[13]对中国南方下志留统龙马溪组黑色页岩进行了三轴压缩试验研究，获得不同应力条件下黑色页岩的破坏模式和力学特性。

我国黑色页岩沉积环境复杂，沉积成因以及相应的矿物成分与国外黑色页岩均有所不同，因此，不能直接利用国外的相关试验数据设计我国的黑色页岩开发方案。此外，我国海相沉积黑色页岩和陆相沉积黑色页岩矿物成分差别较大，对应的力学特性也有所不同，因此，我国不同区块的黑色页岩力学特性也需要分别进行研究。

本文对下寒武统牛蹄塘组黑色页岩地化参数进行了测试，利用 SEM 观察了下寒武统牛蹄塘组黑色页岩的微观结构和层理特征，并利用东北大学和长春朝阳试验仪器有限公司联合研制的 ROCKMAN207 系统开展了不同围压、不同层理角度牛蹄塘组黑色页岩的力学试验研究，以揭示牛蹄塘组黑色页岩的力学行为和各向异性特性，为我国页岩气的勘探和开发提供基础数据。

2 试验样品及设备

2.1 试验样品

试验样品为下寒武统牛蹄塘组黑色页岩，所取黑色页岩试样具有明显的沉积层理。定义试样层理角度 β 为第一主应力加载方向与试样沉积层理面之间的夹角，分别沿 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 的方向制备出具备不同层理角度 β 的黑色页岩试样，制备的试样为直径 50 mm、高度 100 mm 的标准圆柱试样。制备好的试样如图 1 所示，图中虚线表示层理。加工后的试样满足：试样两端面平整度偏差在

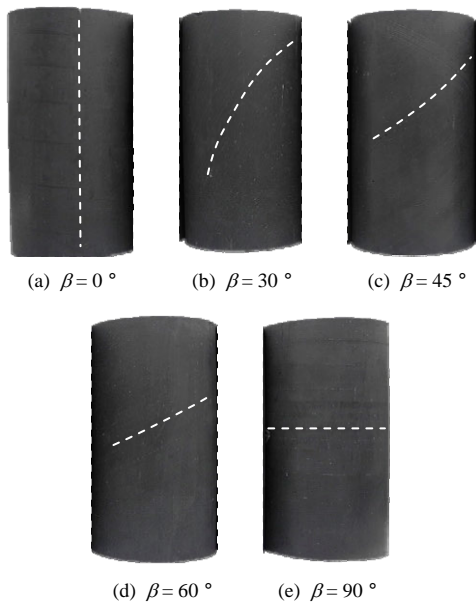


图 1 不同层理角度黑色页岩试样

Fig.1 Black shale samples with different angles of bedding

0.02 mm 内；沿高度方向试样直径误差不大于 0.1 mm；岩样侧面光滑、笔直，轴向角度偏差不超过 0.05°。加工好的试样在室内自然晾干，对试样进行波速测定，挑选无波速异常、完整、表观无裂隙和缺陷的黑色页岩试样开展岩石力学试验研究。

试样制备完成后，留取部分新鲜碎块黑色页岩进行地化参数试验分析和微观结构观察。

2.2 试验设备及试验方案

黑色页岩力学试验所用仪器为东北大学和长春朝阳试验仪器有限公司联合研制的 ROCKMAN207 试验系统(见图 2)，该系统由高刚度载荷框架、压力室、围压加载系统、轴压加载系统、数据采集和伺服控制系统组成，可以获得硬岩的全应力-应变破坏过程曲线，能够实现轴向变形控制、环向变形控制和负荷控制。轴向和环向变形的测量采用内置差动变压位移传感器完成，传感器的精度可达 0.1%。轴向位移传感器固定于试样中部，消除了端部摩擦效应对变形测试带来的影响，所测得的变形更为准确。

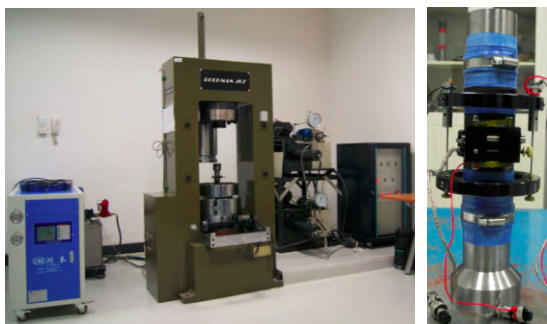


图 2 ROCKMAN207 试验系统及安装好的试样

Fig.2 Experiment system ROCKMAN207 and sample installed

分别对黑色页岩试样开展单轴和三轴条件下的岩石力学试验；在三轴试验中，分别设置 10, 20, 30, 40, 50 MPa 五级围压。试验前，将试样放置在上、下压头之间，用热塑套密封，以避免试验过程中围压油进入试样，影响试验结果。标定轴向和环向位移传感器的测试精度后，将轴向和环向位移传感器固定在试样上。将试样放入压力室内，首先对试样施加围压，围压加载速率为 2 MPa/min；围压稳定后对试样施加轴压，试验初期，轴向加载控制方式采用轴向应力控制，加载速率为 2 000 N/s；试样接近屈服时，为了获得全应力-应变曲线，轴向加载控制方式转为变形控制，变形加载速率为 0.05 mm/min。

3 黑色页岩地化参数及微观结构

黑色页岩地化参数和微观结构是其力学行为和各向异性特征的内因。

3.1 黑色页岩地化参数

利用 X 射线衍射对试验样品进行了全岩矿物成分分析，所取牛蹄塘组黑色页岩的脆性矿物成分较高，总量达 79.01%，其中石英含量为 59.16%，长石含量为 15.86%，黄铁矿含量为 3.99%。高脆性矿物含量的黑色页岩在压裂时易形成交错的裂隙网络，在开采过程中可以获得较高的页岩气产量。所取牛蹄塘组黑色页岩中黏土矿物主要为伊利石，含量为 20.99%。黏土矿物中包含了大量的孔隙，为页岩气的赋存提供了储集空间；在富含有机质页岩中，黏土矿物多和有机质包裹在一起，易在矿物成分中形成定向排列；同时黏土矿物多为片状结构，易使岩石材料具有各向异性特征。所取牛蹄塘组黑色页岩的平均有机碳含量为 7.39%，成熟度 R_o 为 2.8%。

3.2 黑色页岩微观结构

黑色页岩的微观结构不仅影响其渗透性能和封存气体的能力，还影响其在外部应力作用下的变形和强度等力学性能。利用 Quanta250 扫描电镜和 SSX-550 场发射扫描电镜对牛蹄塘组黑色页岩的微观结构进行了观察，并利用点扫描的方式，确定了黑色页岩的矿物成分。

用于微观结构观察的样品为试样中平行页岩层理方向的试样横截面的一部分，扫描部分见图 3(a) 中矩形框内，图 3(a) 中矩形框内虚线表示页岩沉积的层理。地层沉积方向断面的微观结构扫描结果如图 3 所示，由图 3(a) 中可以看出，牛蹄塘组黑色页岩具有明显的层状沉积特征，其内部存在成层黄铁矿颗粒沉积。图 3(b) 中，扫描面垂直于页岩沉积

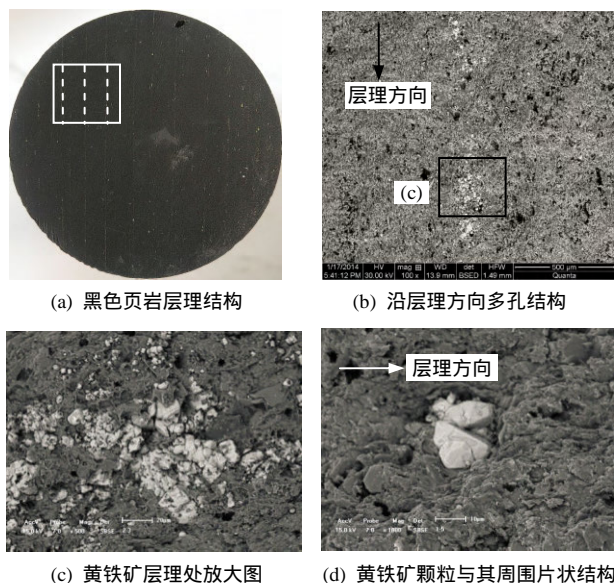


图 3 黑色页岩微观结构

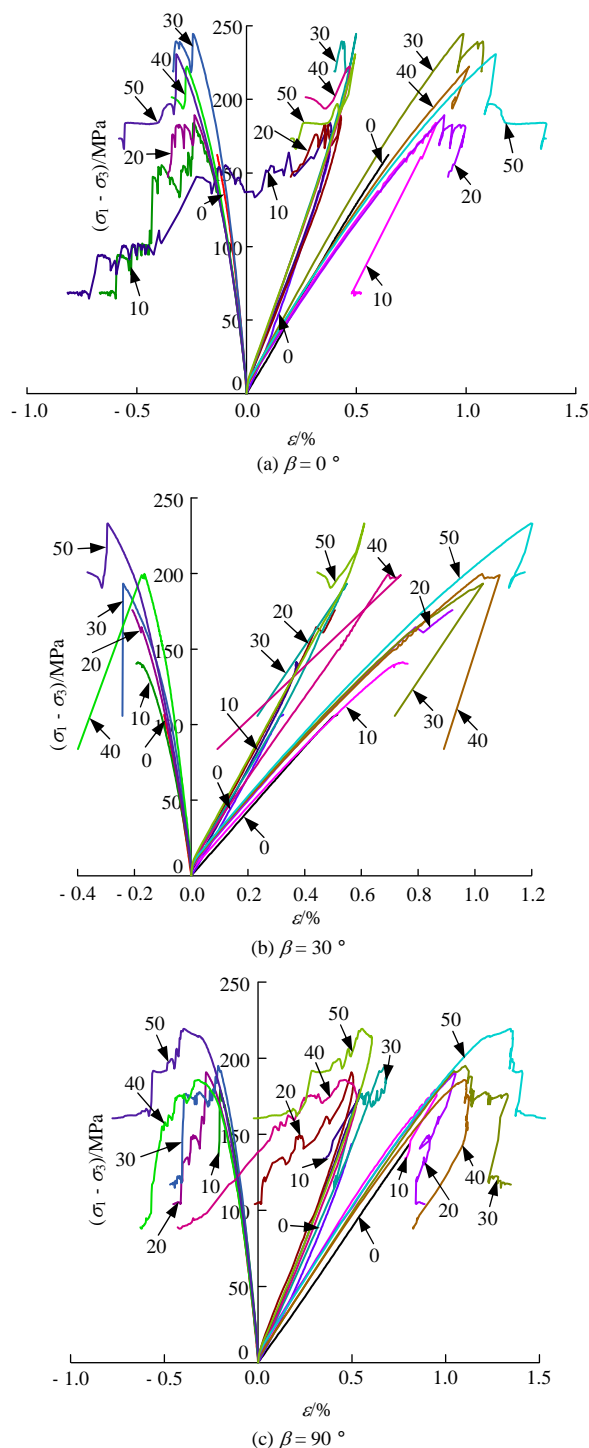
Fig.3 Microstructures of black shale

层理方向，主要扫描黄铁矿层理及其两侧的孔隙结构。可以看出，沿层理方向，存在很多明显的孔隙和微裂隙，这些孔隙和微裂隙既是页岩气赋存和运移的空间和通道，同时也构成了黑色页岩试样的原始缺陷。图 3(c)为黄铁矿层理处的放大图。图 3(d)中，扫描面垂直页岩沉积层理方向，可以看出，黄铁矿在黑色页岩中呈分散颗粒状嵌入，包裹在黑色页岩骨架颗粒中，黑色页岩具有坚硬颗粒和层状薄片交替存在的结构。层状沉积结构、层状薄片矿物的存在使得黑色页岩具有各向异性特征。由此可见，黑色页岩的各向异性是其本身固有的特性，主要与黑色页岩内沉积层理、层状薄片矿物、有机质的分布和排列有关。

4 黑色页岩力学特性及破坏模式

4.1 黑色页岩的力学特性

不同围压、不同层理角度黑色页岩试样的应力-应变曲线如图 4 所示。由于黑色页岩较为致密，不同层理角度黑色页岩试样在进入弹性变形阶段前，均无明显的孔隙、裂隙压密阶段，峰前应力-应变曲线近似为直线段。不同层理角度黑色页岩试样的轴向变形均大于环向变形。轴向加载初期阶段，黑色页岩体积应变随应力增加近似成线性关系，试样体积减小；随着应力的增加，体积应变曲线开始偏离直线段，试样体积开始膨胀；达到破坏强度后，裂隙快速发育形成宏观断裂面，试样迅速失去承载能力，产生破坏，破坏时常发出脆性破坏声响。试



图中 10~50 指围压(MPa), 0 表示单轴
 图 4 不同层理角度黑色页岩应力-应变曲线
 Fig.4 Stress-strain curves of black shale with different angles of bedding

验所采用的牛蹄塘组黑色页岩在围压 50 MPa 以内，峰值最大变形为 1.47%，根据岩石脆性和延性的划分标准^[14]，试验所采用的牛蹄塘组黑色页岩试样表现出很好的脆性特征。

下寒武统牛蹄塘组黑色页岩的抗压强度随围压的变化如图 5 所示，黑色页岩的抗压强度随围压的增加表现出较好的线性关系，图中，*m* 为围压与抗

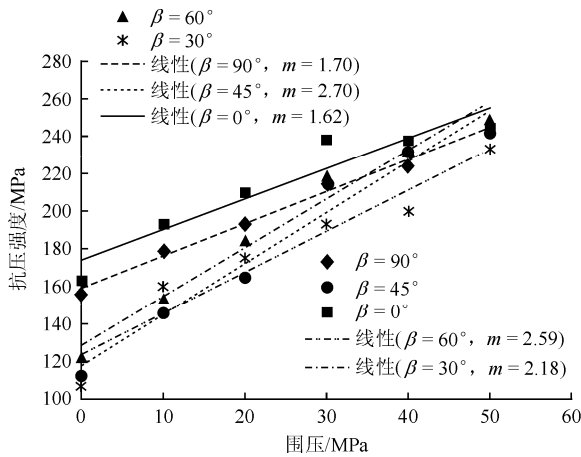


图5 不同围压下黑色页岩抗压强度

Fig.5 Compressive strengths of black shale under different confining pressures

压强度拟合直线的斜率。本文所研究的牛蹄塘组黑色页岩单轴抗压强度范围为 107 ~ 164 MPa，按照 T. Ramamurthy 和 V. K. Arora^[15]对岩石强度的划分标准，牛蹄塘组黑色页岩属于高强度岩石。随着围压的增加，黑色页岩层理变形和破坏受到抑制，其强度逐渐提高。

对比不同角度黑色页岩试样围压与抗压强度拟合直线的斜率 m 可以看出，随着围压增加，围压对黑色页岩试样的强度提高程度在 $\beta < 45^\circ$ 之前逐渐增加，在 $\beta > 45^\circ$ 之后逐渐减小。

4.2 黑色页岩的破坏模式

岩石破坏模式与其加载条件、岩性、内部结构等因素有关^[16]。试验应力条件是影响黑色页岩破坏模式的主要因素，同时其内部层理面的不同赋存状态也使得黑色页岩破坏模式存在较大的差异。试验中的黑色页岩试样破坏模式主要有劈裂破坏和剪切破坏 2 种。不同围压下， $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 和 90° 黑色页岩试样破坏模式如图 6 所示。

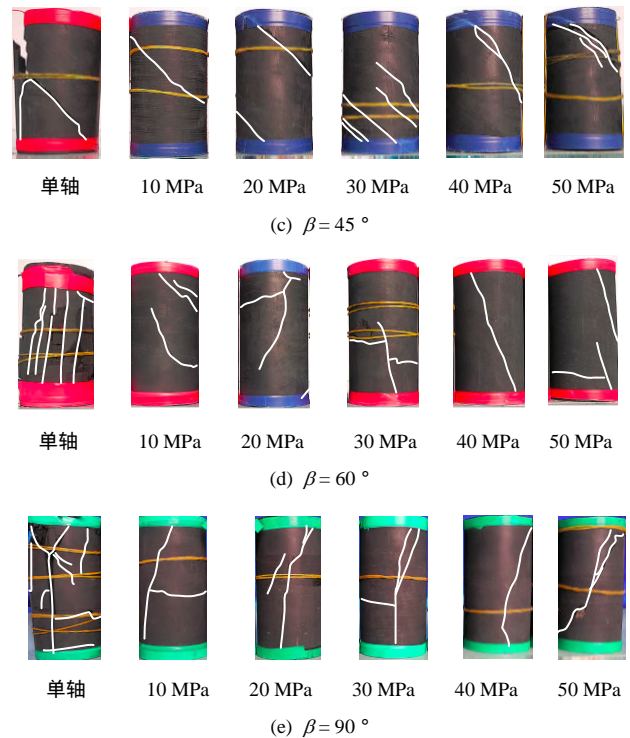
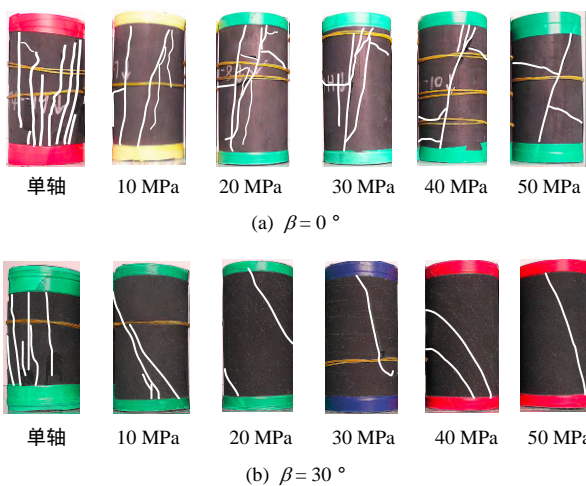


图6 不同围压下黑色页岩试样破坏模式

Fig.6 Failure modes of black shale samples under different confining pressures

$\beta = 0^\circ$ 的顺层理黑色页岩试样在单轴条件下，第一主应力加载方向平行作用于黑色页岩层理面，由于孔隙、裂隙等原始缺陷多平行层理面分布，在轴向荷载作用下，原始缺陷发育、扩展、相互贯通，形成沿多层理面的劈裂破坏。

在 10 ~ 30 MPa 围压下，黑色页岩试样的层理及层状薄片矿物之间被压密实，其沿层理的劈裂破坏受到抑制，劈裂破坏逐渐减少；在围压的限制下，黑色页岩骨架矿物颗粒由于应力集中产生剪切裂纹，进一步发育为贯穿多个层理面的剪切面；随着围压的增加，在 40, 50 MPa 围压下，层理及片状、薄片状矿物之间的压实程度更高，与其他矿物重新组构成结构体；与低围压相比，试样表现无复杂裂隙网络，黑色页岩试样的破坏面为单一剪切面。

$\beta = 30^\circ$ 黑色页岩试样在单轴条件下主要以劈裂和剪切混合破坏为主，在 10 ~ 40 MPa 围压下，试样沿层理面滑移，形成沿层理面的剪切破坏面。在 50 MPa 围压下，黑色页岩沿层理面的滑移受到限制，其骨架颗粒在应力集中下产生剪切裂纹，在第一主应力的继续作用下，裂纹继续扩展，最终表现为贯穿多层理面的剪切破坏。

$\beta = 45^\circ$ 黑色页岩试样在单轴条件下表现为 Y

型剪切破坏，在 10~30 MPa 围压下，试样沿层理面滑移，形成多个沿层理面的剪切破坏面。在 40, 50 MPa 围压下，其破坏模式为贯穿多层理面的剪切破坏。 $\beta = 30^\circ$ 和 $\beta = 45^\circ$ 黑色页岩试样破坏裂纹单一，表观未能形成复杂的裂隙网络。

$\beta = 60^\circ$ 黑色页岩试样在单轴条件下，劈裂和剪切破坏同时存在， $\beta = 90^\circ$ 黑色页岩试样在单轴条件下则表现为 Y 型破坏。在 10~30 MPa 围压下， $\beta = 60^\circ$ 黑色页岩试样与 $\beta = 90^\circ$ 黑色页岩试样破坏模式均表现为贯穿多个层理面的剪切破坏面。在 50 MPa 围压下，剪切破坏面贯穿层理的条数逐渐减少。

综上，低围压条件下，层理、沿层理方向的孔隙、微裂隙、层状薄片矿物间隙在岩样破坏过程中仍表现为弱面结构，易形成较为复杂的裂隙网络；高围压条件下，层理、微裂隙等原始缺陷被围压束缚，破裂后形成的破裂面较为单一，难以形成裂隙网络。第一主应力加载方向与黑色页岩层理平时，页岩破裂后易形成复杂的裂隙网络；第一主应力方向与黑色页岩层理成 30° 和 45° 角度时，易沿页岩层理剪切断裂；第一主应力方向与黑色页岩层理成 60° 和 90° 角度时，易产生贯穿多个层理的剪切破坏面。在高埋深的黑色页岩储层中，水力压裂的设计必须同时考虑地应力和黑色页岩各向异性的特征，以使得压裂后储层中可以形成原生裂隙与致裂裂隙纵横交错的裂隙网络，提高页岩气井的产量。

5 黑色页岩的各向异性特征

沉积环境和应力环境引起的黑色页岩各向异性特征使得其波速、强度均具有各向异性的特征。

5.1 黑色页岩的波速各向异性

不同层理角度黑色页岩的轴向波速测试数据见表 1。不同层理角度黑色页岩试样的平均波速如图 7 所示，黑色页岩试样内部层理的存在和矿物的定向排列使得不同层理角度的黑色页岩波速有所不同，随着层理角度 β 的增加，黑色页岩试样的平均波速呈现降低的趋势。

不同角度黑色页岩试样的波速变化规律表明，黑色页岩的各向异性是由其内部矿物和有机质排列所引起的固有各向异性，黄铁矿沉积层理及平行层理方向存在的孔隙、微裂隙，使得其固有各向异性更为显著。在勘探过程中，需考虑黑色页岩层理引起的波速各向特征，以获得准确的储层信息。

表 1 不同层理角度黑色页岩试样波速
Table 1 Wave velocities of black shale samples with different angles of bedding

$\beta(^{\circ})$	波速/(m · s ⁻¹)						
0	4 008	4 012	4 020	4 018	4 012	3 909	3 938
0	4 014	3 940	4 067	4 013	3 984	4 004	4 020
0	3 863	3 943	3 924	3 926	4 073	4 015	-
0	3 991	3 990	3 990	4 078	4 069	4 072	-
30	3 829	3 753	3 753	3 685	3 774	3 706	3 823
30	3 852	3 753	3 823	3 781	3 842	3 845	3 773
30	3 706	3 838	3 679	3 821	3 703	3 680	-
30	3 849	3 820	3 897	3 821	3 919	3 844	-
45	3 697	3 758	3 777	3 713	3 770	3 831	3 706
45	3 716	3 778	3 672	3 720	3 703	3 790	3 668
45	3 759	3 739	3 782	3 931	3 863	3 937	-
45	3 686	3 714	3 702	3 786	3 717	3 742	-
60	3 559	3 549	3 452	3 428	3 559	3 483	3 582
60	3 577	3 515	3 494	3 493	3 461	3 456	3 513
60	3 508	3 547	3 486	3 614	3 427	3 457	-
60	3 587	3 708	3 708	3 707	3 681	3 640	-
90	3 493	3 498	3 497	3 519	3 462	3 518	3 454
90	3 455	3 517	3 499	3 507	3 457	3 453	3 510
90	3 498	3 460	3 336	3 473	3 454	3 521	-
90	3 436	3 538	3 508	3 506	3 523	3 455	-

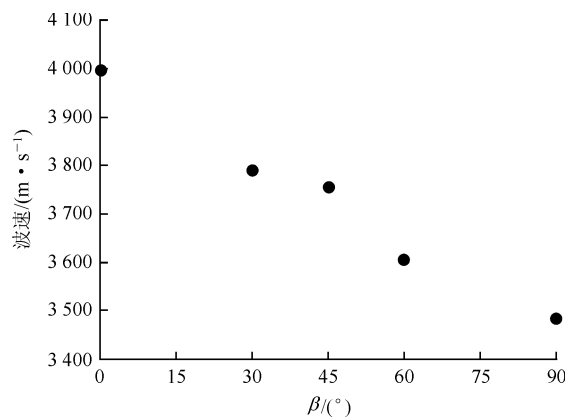


图 7 不同层理角度黑色页岩试样波速各向异性
Fig.7 Anisotropic wave velocities of black shale samples with different angles of bedding

5.2 黑色页岩的强度各向异性

黑色页岩试样单轴和三轴抗压强度随内部层理方向的改变而变化，具有强度各向异性特征。不同围压下黑色页岩试样的抗压强度和层理角度 β 之间的关系如图 8 所示，黑色页岩的抗压强度随层理面夹角 β 增加近似呈现 U 型。相同加载条件下，随着层理夹角 β 的增加，黑色页岩强度表现为先减小

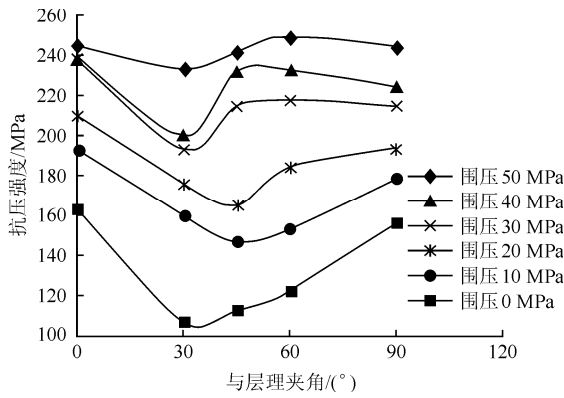


图8 不同层理角度黑色页岩强度各向异性

Fig.8 Anisotropic strengths of black shale with different angles of bedding

后增加的趋势。 $\beta = 0^\circ$ 黑色页岩试样的强度最高，其强度稍高于 $\beta = 90^\circ$ ，说明黑色页岩层理间的黏结条件相对较好；强度最低黑色页岩试样层理夹角为 $\beta = 30^\circ$ 或者 $\beta = 45^\circ$ 。单轴加载条件下，不同层理角度黑色页岩强度相差较大，随着围压的增加，不同层理角度黑色页岩强度的差别逐渐减小。

衡量岩石强度各向异性的指标为各向异性度 R_c ^[17]，其计算公式为

$$R_c = \sigma_{ci(90)} / \sigma_{ci(min)} \quad (1)$$

式中： $\sigma_{ci(90)}$ 为垂直沉积层理试样的抗压强度， $\sigma_{ci(min)}$ 为不同层理角度试样在相同测试条件下的最低抗压强度。

黑色页岩的各向异性度如图9所示，当围压条件存在时，黑色页岩强度依然存在各向异性特性，但层理面对页岩强度的影响随围压增加逐渐较小。与单轴受载条件相比，10 MPa围压下黑色页岩的各向异性度由1.39降低至1.12，围压大于10 MPa时，黑色页岩的各向异性度降低趋势较小，逐渐趋于恒定值。围压的存在降低了黑色页岩各向异性。

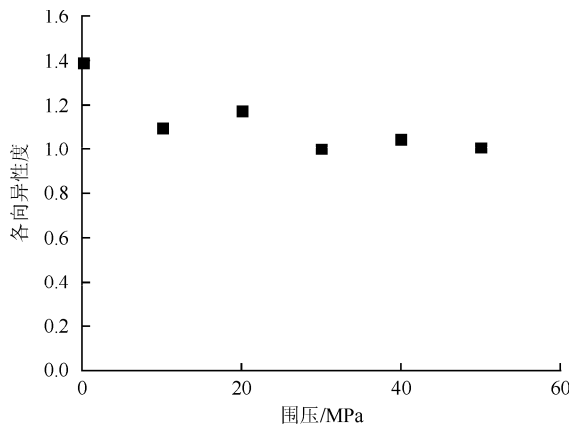


图9 不同围压下黑色页岩各向异性度

Fig.9 Degrees of anisotropy of black shale under different confining pressures

6 结 论

(1) 下寒武统牛蹄塘组黑色页岩脆性矿物成分较高，总量达79.01%，是黑色页岩脆性变形和脆性破坏的矿物成分内因；黏土矿物含量达20.99%，为页岩气富集提供了储集空间，同时也是黑色页岩各向异性的矿物成分内因。

(2) 牛蹄塘组黑色页岩内部存在成层黄铁矿颗粒沉积；沿层理方向存在很多明显的平行层理方向孔隙和微裂隙；具有坚硬颗粒和层状薄片交替存在的结构，这种矿物排列结构是含气页岩各向异性特征的结构内因。

(3) 黑色页岩应力-应变曲线无明显的孔隙、裂隙压密阶段，峰前应力-应变曲线近似为直线段。低围压条件下，易形成较为复杂的裂隙网络；高围压条件下，破裂后形成的破裂面单一，难以形成裂隙网络。第一主应力加载方向与黑色页岩层理平行时，页岩破裂后易形成复杂的裂隙网络；与黑色页岩层理成 30° 和 45° 角度时，易沿页岩层理剪切断裂；与黑色页岩层理成 60° 和 90° 角度时，易产生贯穿多个层理的剪切破坏面。

(4) 黑色页岩具有波速和强度各向异性特征。波速随层理面夹角 β 的增加逐渐降低。相同加载条件下，随着层理角度 β 的增加，黑色页岩强度表现为先减小后增加的趋势；黑色页岩的抗压强度随层理面角度 β 增加近似呈现U型，层理夹角为 $\beta = 30^\circ$ 或者 45° 的黑色页岩强度最低。

(5) 单轴条件下，黑色页岩各向异性度较高。当围压条件存在时，黑色页岩强度依然存在各向异性特性；随着围压的增加，黑色页岩的各向异性度降低趋势较小，逐渐趋于恒定值。

参考文献(References)：

[1] 王 阳,朱炎铭,陈尚斌,等. 湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气形成条件分析[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(4): 586-594.(WANG Yang ,ZHU Yanming ,CHEN Shangbin ,et al. Formation conditions of shale gas in lower Cambrian Niutitang formation , northwestern Hunan[J]. Journal of China University of Mining and Technology , 2013, 42(4) : 586-594.(in Chinese))

[2] 肖正辉,杨荣丰,冯 涛,等. 湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏条件及其勘探潜力分析[J]. 湖南科技大学学报:自然科学版, 2012, 27(1): 50-54.(XIAO Zhenghui, YANG Rongfeng, FENG Tao , et al. Reservoir-forming conditions and exploration potential of shale

- gas in lower Cambrian Niutitang formation , northwestern Hunan[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology : Natural Science , 2012 , 27(1) : 50 – 54.(in Chinese))
- [3] JOSH M , ESTEBAN L , DELLE PIANE C , et al. Laboratory characterisation of shale properties[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering , 2012 , (88/89) : 107 – 124.
- [4] DEWHURST D N , HENNIG A L. Geomechanical properties related to top seal leakage in the Carnarvon Basin , Northwest Shelf , Australia[J]. Petroleum Geoscience , 2003 , 9(3) : 255 – 263.
- [5] KATSUBE T J , MUDFORD B S , BEST M E. Petrophysical characteristics of shales from the Scotian shelf[J]. Geophysics , 1991 , 56(10) : 1 681 – 1 689.
- [6] JOHNSTON J E ,CHRISTENSEN N I. Seismic anisotropy of shales[J]. Journal of Geophysical Research : Solid Earth(1978 – 2012) , 1995 , 100(B4) : 5 991 – 6 003.
- [7] VERNIK L , NUR A. Ultrasonic velocity and anisotropy of hydrocarbon source rocks[J]. Geophysics , 1992 , 57(5) : 727 – 735.
- [8] VANORIO T ,MUKERJI T ,MAVKO G. Emerging methodologies to characterize the rock physics properties of organic-rich shales[J]. The Leading Edge , 2008 , 27(6) : 780 – 787.
- [9] SONDERGELD C H , NEWSHAM K E , COMISKY J T , et al. Petrophysical considerations in evaluating and producing shale gas resources[R]. SPE 131769 , 2010.
- [10] LO T ,COYNER K B ,TOKSÖZ M N. Experimental determination of elastic anisotropy of Berea sandstone ,Chicopee shale ,and Chelmsford granite[J]. Geophysics , 1986 , 51(1) : 164 – 171.
- [11] NIANDOU H ,SHAO J F ,HENRY J P ,et al. Laboratory investigation of the mechanical behaviour of Tournemire shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 1997 , 34(1) : 3 – 16.
- [12] KUILA U ,DEWHURST D N ,SIGGINS A F , et al. Stress anisotropy and velocity anisotropy in low porosity shale[J]. Tectonophysics , 2011 , 503(1) : 34 – 44.
- [13] 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[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(增2):3 763–3 771.(LI Qinghui , 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) : 3 763 – 3 771. (in Chinese))
- [14] 陈 颢,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))
- [15] RAMAMURTHY T , ARORA V K. A classification for intact and jointed rocks[C]// Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks. Rotterdam : A. A. Balkema , 1993 : 235 – 242.
- [16] 张学民. 岩石材料各向异性特征及其对隧道围岩稳定性影响研究[博士学位论文][D]. 长沙:中南大学,2007.(ZHANG Xuemin. Anisotropic characteristic of rock material and its effect on stability of tunnel surrounding rock[Ph. D. Thesis][D]. Changsha : Central South University , 2007.(in Chinese))
- [17] SAROGLU H , TSIAMBAOS G. A modified Hoek-Brown failure criterion for anisotropic intact rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2008 , 45(2) : 223 – 234.