

Study on the Compressive Strength of Shale with Different Fracture Morphology Based on Jointed Rock Model

Zhiqiang Huang*, Zhichao Fan#

College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu Sichuan
Email: 2712108919@qq.com, #459703848@qq.com

Received: June 30th, 2019; accepted: July 15th, 2019; published: July 22nd, 2019

Abstract

As the main reservoir space and important migration channel of the shale gas, the fractures are frequently found in shale with a variety of distribution characteristics. The uniaxial and triaxial compression tests under different inclination angles of the non-fractured shale specimens were conducted, so as to obtain the shear strength parameters of foliation and matrix. Through the compression test data and previous literature data, it has shown that the Jointed Rock model is numerically suitable in calculating the rock which contains crack and foliation. The numerical simulation tests of different foliation dip angles and fracture inclination angle were conducted, it found that (1) for the different foliation angles, the influence of fracture angle on the compressive strength is similar, the influence of fracture inclination angle 0° , 15° , 90° on the compressive strength of shale can be neglected, the fracture inclination angles 30° , 45° , 60° , 75° have great influence on the compressive strength and the degree of influence is $60^\circ > 75^\circ > 45^\circ > 30^\circ$. (2) The weaken degree of same fracture inclination angle on shale foliation dip angle 0° , 90° compressive strength is approximately equal and influences slightly on 60° . (3) The fracture weakening degree on the compressive strength of the shale is two-times-function relation with the fracture inclination angle, and the linear-function relation with the ratio of the compressive strength of the rock under the same confining pressure.

Keywords

Fractured Shale, Compression Test, Numerical Simulation, Compressive Strength

基于Jointed Rock模型的不同裂隙形态页岩抗压强度研究

黄志强*, 范智超#

*第一作者。

#通讯作者。

四川大学建筑与环境学院, 四川 成都
Email: 2712108919@qq.com, #459703848@qq.com

收稿日期: 2019年6月30日; 录用日期: 2019年7月15日; 发布日期: 2019年7月22日

摘要

作为页岩气储集的主要空间和运移的重要通道, 天然裂隙在页岩中以多样的分布特征存在。针对不同层理倾角的无裂隙页岩试件开展了单轴及三轴压缩试验, 从而获得层理及基质的剪切强度参数。利用页岩压缩试验数据以及其他学者研究成果, 验证了Jointed Rock模型对包含裂隙及层理两类不同弱面岩石数值计算的适用性。在此基础上开展了不同层理倾角下, 天然裂隙对页岩强度影响的数值模拟试验, 研究发现: (1) 对不同层理倾角的页岩而言, 裂隙倾角对其抗压强度的影响规律近似, 倾角为 0° , 15° , 90° 的裂隙对页岩的抗压强度的影响可忽略, 倾角为 30° , 45° , 60° , 75° 的裂隙对页岩抗压强度影响较大, 且影响程度的大小依次为 $60^\circ > 45^\circ > 75^\circ > 30^\circ$; (2) 相同裂隙倾角对层理倾角为 0° , 90° 页岩抗压强度的削弱程度大致相等, 对 60° 削弱程度略小于前两者; (3) 数据拟合发现, 裂隙对页岩抗压强度的减弱程度和裂隙倾角成2次函数关系, 和围压与该围压下无裂隙页岩抗压强度的比率成线性函数关系。

关键词

裂隙页岩, 压缩试验, 数值模拟, 抗压强度

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着世界新兴经济体的涌现和全球格局的不断升华, 世界各国在能源方面的需求不断增加, 对诸如石油、煤炭、天然气等传统能源的争夺也日益加剧, 作为常规资源的有效补给, 页岩气已经受到全世界的广泛关注[1]。研究表明, 作为页岩气藏中储集的有效空间以及运移的主要通道, 裂隙发育程度是控制页岩气成藏的主要因素之一, 对页岩气产能起决定作用[2]。另外, 在对页岩气进行开采抽取时, 页岩中天然裂隙的形态、走向及密集度等对水力压裂技术的有效发挥也有着重要的影响[3]。因此, 深刻理解含裂隙页岩的各项物理及力学特征对于页岩气产能评估及勘探开发尤为重要。

目前, 国内外学者对含裂隙页岩有一定程度的研究。例如: ZHOU等[4]推导了含倾斜裂隙页岩介质等效弹性系数的计算公式, 研究了裂隙页岩介质中波传播特征; 魏元龙等[5]通过单轴循环加载的试验方法, 对含天然裂隙脆性页岩的变形及破裂特征开展了试验研究; 王怡[6]等借助泥浆化学等研究手段, 对含裂缝泥页岩的理化及力学特性进行了分析; 赵凯等[7]进行了不同角度下页岩的单轴压缩试验, 研究了层理裂隙对水平井稳定性的影响; 康志勤等[8]利用CT扫描技术对高温下的油页岩进行了微观观测和分析, 探究了油页岩热破裂裂隙的规律; 梁榜等[9]在调研总结国内外泥页岩研究成果的基础上, 分析了泥页岩中裂隙的发育特征以及裂隙对含气性的影响; 林永学等[10]采用多种手段评价和分析了龙马溪组页岩的强度, 认为微裂隙对页岩整体强度具有决定性的影响; SP Morgan[11]等对4组不同层理倾角页岩预设了裂隙缺陷, 对其开展了单轴压缩试验以研究层理方向对缝隙扩展及交汇的影响; K. Sun等[12]通过三轴

水力压裂测试系统对页岩水力压裂进程中天然层理方向对裂隙扩展的影响。以上研究大多集中于页岩裂隙的诱导扩展及气体在裂隙中的传输机制, 对含裂隙页岩力学特性的基础研究却比较少见, 考虑到裂隙在页岩气储存及开采中的重要作用, 因此有必要开展含不同裂隙形态页岩的力学特性研究。

在借助室内试验研究含裂隙页岩力学特性时, 采样及试件加工过程会对天然裂隙产生较大的扰动, 且比较容易诱发次生裂隙[10]。除此之外, 天然裂隙与层理的位置关系比较复杂, 室内试验的少量试样不足以体现裂隙的多样分布形式。针对以上室内试验研究的不足, 本文尝试采用数值方法研究天然裂隙对层状页岩强度特性的影响。在数值研究过程中, 首先通过页岩以及带裂隙模型材料的压缩试验数据验证 Jointed Rock 模型应用的可行性。然后利用 Jointed Rock 模型建立典型的含裂隙页岩数值模型, 并结合室内试验所得的力学及物理参数初步研究不同天然裂隙形态对页岩强度特性的影响。

2. 不同层理倾角下页岩压缩试验

所研究的页岩取自重庆彭水境内。现场用钢钎等工具选取规整形状的新鲜页岩露头, 然后将其小心移入室内进行钻样, 首先钻取直径为 50 mm, 层理倾角为 $\beta = 0^\circ$, 60° 及 90° (如图 1 所示, 规定 β 为钻进方向的法向与层理方向所成角度) 的圆柱, 然后将圆柱加工为高为 100 mm, 端面平行度上下限为 ± 0.02 mm, 误差上下限为 ± 0.05 mm 的标准圆柱试样。压缩试验通过四川大学 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统来完成, 该系统为全数字计算机自动控制系统, 轴向可加载至 4600 kN, 轴向位移 ± 50 mm, 轴向引伸计 ± 4 mm, 环向引伸计 $-2.5 \sim 12.5$ mm, 可实时记录荷载、应力、位移和应变值, 并同步绘制荷载-位移、应力-应变曲线。试验采用由 LVDT 调节的轴向位移控制方式, 加载速率为 0.05 mm/min。

试验前对加工好的试件进行编号记录, 同时测得页岩的平均密度为 2650 kg/m^3 。分别对各倾角下加工好的试件进行单轴压缩试验以及 4 种不同围压下的三轴压缩试验, 每种围压状态取 3 个试件, 最后计算 3 个试件平均值, 并以此代表该倾角及围压状态下的试验结果(表 1)。

Table 1. Mechanical parameters of different angles of the shale foliation

表 1. 不同层理角度下页岩的力学参数

层理倾角/ $^\circ$	围压/MPa	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
0	0	123.52	14.92	0.23
	10	169.50	22.85	0.23
	30	245.75	27.20	0.30
	45	289.00	29.05	0.34
	60	342.70	30.00	0.36
	60	0	83.10	16.14
10		152.20	27.60	0.20
30		207.10	33.40	0.30
45		250.60	31.60	0.34
60		302.95	33.10	0.36
90		0	121.31	18.49
	10	196.10	28.65	0.21
	30	258.80	32.20	0.30
	45	324.85	34.90	0.33
	60	348.45	34.60	0.36

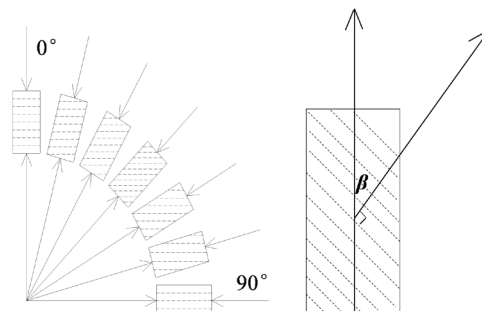


Figure 1. The definition of angle of foliation
图 1. 试件层理倾角定义

对破坏后的试件观察发现, 相同层理倾角试件在各围压下压缩破坏后的形态比较一致, 如图 2 所示。层理倾角为 0° 时, 试件主要发生贯穿基质的剪切破坏; 层理倾角为 60° 时, 试件发生沿层理的滑移破坏; 层理倾角为 90° 时, 试件发生沿层理的张拉劈裂破坏, 另外 0° 及 90° 都出现了共轭的破坏面。

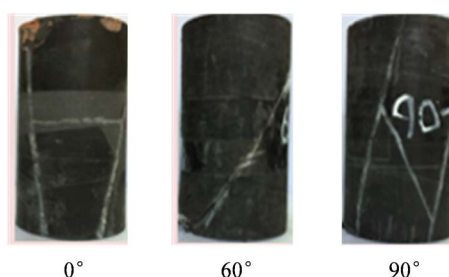


Figure 2. Typical failure modes of different angles of shale foliation
图 2. 不同页理倾角页岩典型破坏形式

Tien 和 Kuo 等[13] [14]借助层状岩石三轴试验数据给出了岩石弱面和基质的强度抗剪参数。同样, 鉴于试件破坏形式, 可以认为 0° 、 60° 试件的破坏分别受基质及层理的剪切强度控制。如图 3, 分别对 0° 、 60° 三轴压缩的抗压强度试验值进行线性拟合。

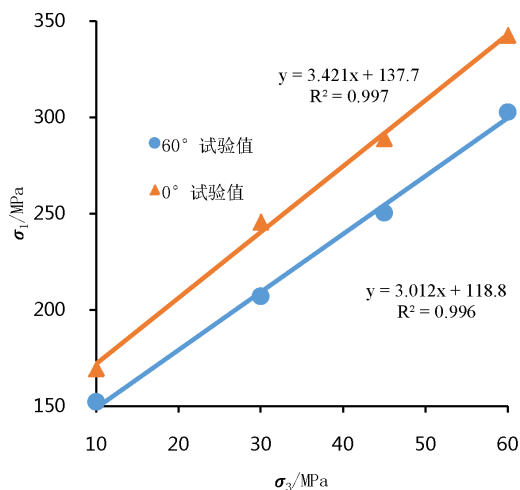


Figure 3. Shale matrix and bedding strength parameters fitting
图 3. 页岩基质及页理强度参数拟合

基质的剪切强度参数:

$$\sigma_{1,0^\circ} = b + m\sigma_3 = 137.72 + 3.421\sigma_3 \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_b &= \arcsin \frac{m-1}{m+1} = 33.20^\circ \\ c_b &= \frac{b(1-\sin\varphi)}{2\cos\varphi} = 37.23 \text{ MPa} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

层理剪切强度参数:

$$\sigma_{1,0^\circ} = b + m\sigma_3 = 118.85 + 3.012\sigma_3 \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_j &= \arcsin \frac{m-1}{m+1} = 30.25^\circ \\ c_j &= \frac{b(1-\sin\varphi)}{2\cos\varphi} = 34.14 \text{ MPa} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中, $\varphi_b(\varphi_j)$ 及 $c_b(c_j)$ 分别表示基质(层理)的摩擦角及基质(层理)的粘聚力; $\sigma_{1,0^\circ}$ 和 $\sigma_{1,60^\circ}$ 分别表示围压 σ_3 下 0° 、 60° 试件抗压强度。

3. Jointed Rock 模型应用验证

Jointed Rock 模型考虑了含弱面岩体非均匀力学特性效应, 该模型将含弱面岩体等价于各向同性岩石与各向异性面的组合, 弱面的破坏特征由带拉伸判据的各向异性 Mohr-Coulomb 准则决定。在 ANSYS17.0 中, 弱面位置是通过其法向量 \mathbf{w} 来定义的。假设最初弱面局部坐标系 $(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$ 与整体坐标系 $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ 吻合, 首先将弱面沿 z 轴旋转角度 α , 然后将弱面以当前坐标系下的 \mathbf{v} 轴旋转 γ , 弱面经过上述 2 次旋转可表示实际岩石中任意位置, 而旋转之后弱面的法线方向为,

$$\mathbf{w} = [\cos\alpha\sin\gamma \quad -\sin\alpha\sin\gamma \quad \cos\gamma]^\top \quad (5)$$

ANSYS17.0 中的 Jointed Rock 模型并不要求在试件的几何模型上对层理和基质进行区分, 而是在定义材料非线性力学特征的过程中独立设置两者的强度参数等信息[15]。该模型将页岩视为一种均匀各向异性材料, 不体现层理具体空间位置及厚度。层理及裂隙常常都被当作力学特性较弱的结构面统一对待, 事实上两者有一定区别: 层理与基质的区分主要表现在矿物的成分及排布方式上的差异, 两者方向一致交互叠加; 而天然裂隙与基质(层理)具有明显的分界线, 裂隙宽度 0.6~2 mm, 方向随机[16]。因此有必要分别对 Jointed Rock 模型在层理及裂隙岩石上的适用性加以验证。

3.1. Jointed Rock 模型在裂隙岩体中的应用验证

Ghazvinian 等[17]人开展了预制裂隙面的物理模型材料试验, 得到了多种工况下试件的抗压强度值。文献[17]中无裂隙试件的弹性模量及泊松比分别为 1.43 GPa 和 0.31; 无裂隙试件的粘结力及摩擦角分别为 1.6 MPa 和 39.5° 。对 4 组不同形态的含裂隙试件进行了 6 种不同围压(0.5 MPa, 1 MPa 等)下的压缩试验, 研究表明, 当裂隙倾角 θ 为 0° 时试件发生剪切及劈裂破坏, 30° 时试件发生裂隙滑移破坏, 15° 及 45° 时发生劈裂及扭转破坏。

在文献[17]研究成果的基础上选择具有代表性破坏模式的试件(0° , 15° , 30°)进行数值计算, 试验数据见表 2 所示。

Table 2. Compressive strength of different fracture angles under different confining pressures in Ref. [17]
表 2. 文献[17]中各围压下不同裂隙倾角抗压强度

围压/MPa	0.5	1	1.5	2	3	4
0°	8.18	10.96	12.10	14.09	19.76	24.33
15°	5.58	8.84	11.89	14.56	18.98	23.97
30°	3.05	6.09	8.56	11.58	15.94	20.52

同样, 裂隙面的强度参数(摩擦角, 粘聚力)通过表 2 中 30° 试验值的线性拟合得到。根据层理与裂隙关系可得如下关系式

$$\sigma_{1,30^\circ} = b + m\sigma_3 = 1.066 + 4.945\sigma_3 \quad (6)$$

于是, 裂隙面的摩擦角 φ_{30° 及粘聚力 c_{30° 分别为:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{30^\circ} &= \arcsin \frac{m-1}{m+1} = 41.58^\circ \\ c_{30^\circ} &= \frac{b(1-\sin\varphi)}{2\cos\varphi} = 0.24 \text{ MPa} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

借助 ANSYS17.0 Jointed Rock 模型建立 3 种不同裂隙面倾角 θ 的试件模型, 其中, 基质的强度参数与无裂隙试件相同, 裂隙面 Joint1 及 Joint2 的强度参数取为式(7), 两者位置由下式决定,

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \alpha_2 = 0 \\ \gamma_1 &= \theta \\ \gamma_2 &= 90^\circ + \theta \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中, θ 依次取值 0°, 15°, 30°。鉴于石膏的力学特性, 取基质与裂隙的张拉强度近似为 0, 各工况下的数值解列于表 3。

Table 3. Numerical solution of different confining pressures (/MPa) in Ref. [17]
表 3. 文献[17]中各裂隙倾角下不同围压的数值解(/MPa)

倾角/°	0.5	1	1.5	2	3	4
0	8.31	10.71	12.83	14.99	19.21	23.45
15MPa	5.30	7.97	10.53	13.10	18.07	23.15
30 MPa	3.63	6.18	8.73	11.26	16.27	21.30

对比表 2~3 发现, 大部分试验值与数值解的偏差率小于 5%, 证明 Jointed Rock 模型对含裂隙岩石的数值计算是合理的。

3.2. Jointed Rock 模型在无裂隙页岩中的应用验证

压缩试验的整个数值模型由底部压头、试件及顶部压头 3 部分构成, 试件与压头的高度/直径分别为 2 和 0.5, 且压头直径为试件直径的 2 倍。定义 2 组接触对来考虑试件与压头上下之间的接触关系, 同时分别选取 Contact170、174 作为目标面单元和接触面单元, 并将 170 单元摩擦系数设置为 0。加载前需要约束底部压头位移的(X、Y、Z)向, 试件位移的(X、Y)向以及顶部压头位移的(X、Y)向。本文是通过控制顶部压头上表面向下的位移进行加载的, 对于三轴压缩试验而言, 大小为 CofPres 的围压需要通过 2 步完成施加: 首先于试件外壁施加大小为 CofPres 的围压, 然后于顶部压头上表面施加大小 CofPres/4 的

围压(压头横截面积为试件横截面积的 4 倍)。

第 2 节页岩压缩试验给出了基质及层理的剪切强度参数, 由文献[18]可得相应的张拉强度, 各参数取值见表 5。将数值计算结果及偏差率列于表 4。由表 4 可得, 除 60°单轴压缩对应的值偏大以外, 其余数值解均与试验值比较接近。因此, Jointed Rock 模型对层状页岩抗压强度的计算是成功的。

Table 4. Numerical solution (MPa) and deviation (%) of shale compressive strength
表 4. 页岩抗压强度数值解(/MPa)及偏差率(%)

倾角	不同围压下的数值解(偏差率(%))				
	0	10MPa	30 MPa	45 MPa	60 MPa
0°	124.28 (0.6)	155.90 (8.0)	220.47 (10.3)	269.84 (6.6)	319.11 (6.8)
60°	108.40 (30.5)	137.06 (9.9)	194.71 (5.9)	238.55 (4.8)	283.16 (5.0)
90°	124.03 (2.2)	155.99 (20.5)	220.65 (14.7)	269.74 (16.9)	318.64 (8.6)

综上所述, 针对其他学者模型试验以及本文进行的页岩压缩试验, 利用 Jointed Rock 模型分别对预制裂隙及天然层理两种不同机理的弱面进行模拟, 计算发现试验值与数值解均有较好的吻合度, 因此 Jointed Rock 模型对含裂隙层状类岩石抗压强度的数值计算是可行的。

4. 不同裂隙倾角下页岩抗压强度的数值计算

如图 4 所示, 为了体现裂隙与层理关系的多样性, 设置 3 类共 21 组具有代表性的含裂隙页岩试件: 在层理倾角 $\beta = 0^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 试件下分别引入 7 组不同倾角的裂隙面, 倾角 θ 介于 $0^\circ \sim 90^\circ$, 梯度为 15° 。

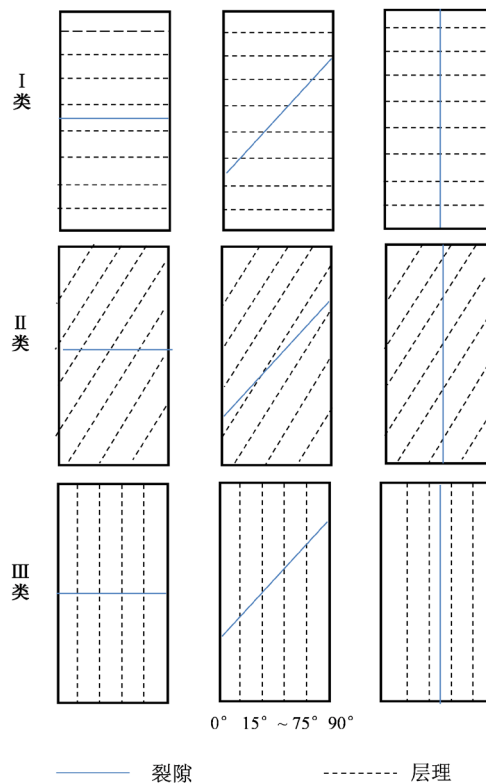


Figure 4. Typical configurations of bedding and fracture
图 4. 层理及裂隙面代表性构型

模型建立时所使用的基质、层理及裂隙面的强度参数见表 5: 采用 Joint1 模拟层理, Joint2 模拟裂隙面, 膨胀角及各残余强度值均是根据工程经验给出的。在与室内压缩试验对照的情况下, 选用 6 级围压 (0, 10 MPa, 20 MPa 等) 对各数值模型进行计算, 计算工况为 126 种。需要说明的是, 与室内试验相比, 数值试验增设了 20 MPa 围压, 其目的在于更合理归纳数值试验结果的规律。

Table 5. Numerical simulation of the strength parameters

表 5. 数值模拟所需强度参数

类别	摩擦角 $\varphi/^\circ$	粘结力 c/MPa	张拉强度 t/MPa	膨胀角 $d/^\circ$
基质	33.20	37.23	6	33
层理 Joint1	30.25	34.14	3	20
裂隙 Joint2	25	2.5	3	25

引进一个无量纲量 A_e 来表征倾角为 β 的裂隙对页岩强度的影响, A_e 的大小直接反应裂隙对页岩压缩强度削弱的强弱。

$$A_e = \frac{\sigma_{1,\beta} - \sigma_{1,\beta\theta}}{\sigma_{1,\beta}} \quad (9)$$

其中, $\sigma_{1,\beta}$ 为层理倾角为 β 的无裂隙页岩抗压强度, 0° , 60° , 90° 层理倾角对应 20 MPa 围压下的抗压强度值分别为 183.05, 165.79, 187.95 (MPa), 其余数值解见表 4; $\sigma_{1,\beta\theta}$ 为层理倾角为 β 、裂隙倾角为 θ 的页岩抗压强度。计算各工况下的 A_e 值将其列于表 6、表 7 和表 8。

Table 6. A_e (%) of Class I model under different calculation conditions

表 6. 不同计算工况下 I 类模型 A_e (%)

$\theta/^\circ$	0	15	30	45	60	75	90
0 MPa	0.2	0.3	4.7	92.9	94.1	65.3	2.3
10 MPa	0.0	1.0	2.7	77.0	79.8	50.5	1.0
20 MPa	0.0	0.1	2.1	66.8	70.4	40.6	0.1
30 MPa	0.0	0.2	0.8	59.3	59.4	35.7	0.0
45 MPa	0.3	0.2	0.8	51.7	56.8	29.6	0.0
60 MPa	0.3	0.3	0.2	46.4	51.9	25.5	0.1

Table 7. A_e (%) of Class II model under different calculation conditions

表 7. 不同计算工况下 II 类模型 A_e (%)

$\theta/^\circ$	0	15	30	45	60	75	90
0 MPa	0.1	0.1	1.8	91.9	93.3	60.1	0.4
10 MPa	0.0	0.1	1.0	74.1	77.3	43.8	0.8
20 MPa	0.1	0.3	1.0	62.6	66.8	34.3	0.1
30 MPa	0.0	0.1	0.6	54.1	59.6	28.1	0.3
45 MPa	0.1	0.1	0.1	45.5	51.5	22.6	0.1
60 MPa	0.0	0.0	0.2	39.6	46.9	18.8	0.0

Table 8. A_e (%) of Class III model under different calculation conditions
表 8. 不同计算工况下 III 类模型 A_e (%)

$\theta/^\circ$	0	15	30	45	60	75	90
0 MPa	0.0	0.0	4.4	92.9	94.0	65.6	0.3
10 MPa	0.0	0.0	2.7	77.0	79.7	50.6	0.9
20 MPa	0.0	0.1	2.0	66.8	70.4	41.6	0.0
30 MPa	0.1	0.1	0.8	59.4	64.2	36.1	0.1
45 MPa	0.1	0.2	0.8	51.8	57.1	30.4	0.2
60 MPa	0.2	0.1	0.1	46.4	52.1	25.9	0.1

对表 6 中 I 类模型的数值计算结果进行分析可知, 裂隙的存在对页岩的抗压强度有一定程度的影响, 由于裂隙强度参数较低, 试件整体抗压强度被削弱。不同倾角裂隙对页岩抗压强度的削弱程度不一: 0° , 15° , 90° 的 A_e 值接近 0, 其他倾角下 A_e 从大到小依次为 $60^\circ > 45^\circ > 75^\circ > 30^\circ$ 。

从数值模型结果可知, 裂隙角为 45° , 60° , 75° 时, 应变在裂隙方向局部化明显, 试件沿裂隙方向发生滑移破坏; 这与相同弱面倾角下其他层状类岩石的破坏模式类似[19]。

随着围压的增大, 相同裂隙倾角下的 A_e 逐渐减小, 这是由于围压下试件沿裂隙面的滑移破坏受到抑制, 裂隙对页岩抗压强度影响逐渐减弱。

已知 A_e 与 $\sigma_{1,\beta}$ 呈负相关, 与 σ_3 呈正相关。引入比率 $\sigma_3/\sigma_{1,\beta}$, 并分析 30° , 45° , 60° , 75° 裂隙倾角下该比率与 A_e 的关系, 如图 5, A_e 与 $\sigma_3/\sigma_{1,\beta}$ 关系近似线性, 且除 30° 外, 线性关系的斜率趋于一致。从图中也可以看出, $\sigma_3/\sigma_{1,\beta}$ 为零, 即单轴压缩时 A_e 最大, 裂隙对抗压强度影响最大。

A_e 随裂隙倾角 θ 的增大呈现先增后减的趋势, 并在 $\theta = 45^\circ \sim 60^\circ$ 内取得最大值, 将表 6 中数据进行拟合得图 6。

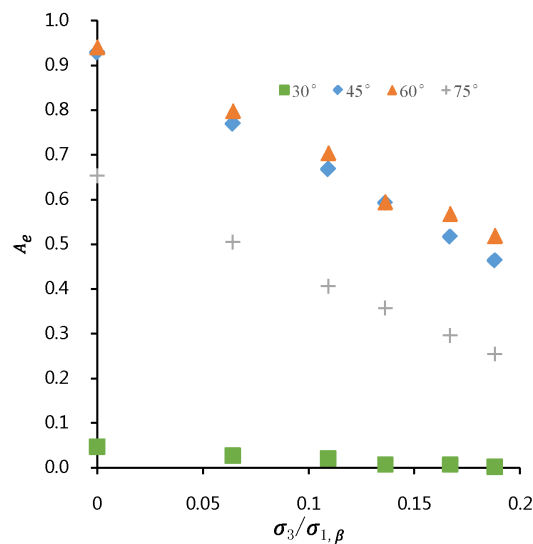


Figure 5. The relationship between A_e and $\sigma_3/\sigma_{1,\beta}$ in model I

图 5. I 类模型 A_e 与 $\sigma_3/\sigma_{1,\beta}$ 的关系

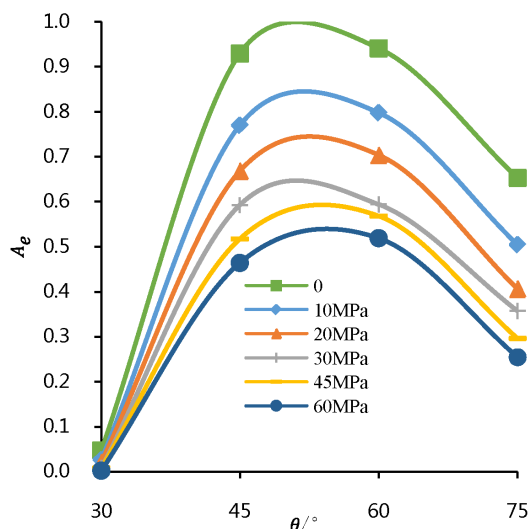


Figure 6. The relationship between A_e and θ in model I
图 6. I 类模型 A_e 与 θ 的关系

以 $\sigma_3/\sigma_{1,\beta}$ 和 θ 为变量对 A_e 进行拟合, 得到拟合关系式为式(10), 其调和确定系数 $R^2 = 0.9326$ 。

$$A_e = -1.729 \frac{\sigma_3}{\sigma_{1,\beta}} - 3.331\theta^2 + 6.567\theta - 2.299 \quad (10)$$

其中 θ 以弧度制表示。对所有取值的裂隙倾角有:

$$A_e = \begin{cases} -1.729 \frac{\sigma_3}{\sigma_{1,\beta}} - 3.331\theta^2 + 6.567\theta - 2.2993 & 0^\circ \leq \theta \leq 75^\circ \\ 0 & \theta \leq 30^\circ; 75^\circ \leq \theta \end{cases} \quad (11)$$

令:

$$\frac{\partial A_e}{\partial \theta} = -6.662\theta + 6.567 = 0 \quad (12)$$

有:

$$\theta = 56.56^\circ \quad (13)$$

因此, 同围压下裂隙倾角为 56.56° 时, 裂隙对 I 类模型抗压强度影响最大。

同理, 对表 7、表 8 中数据进行分析, 可以发现 II、III 类模型数值计算结果与 I 类模型有近似的结果。当 θ 为 0° , 15° , 90° 时, A_e 近似为 0; 其他角度下 A_e 与 $\sigma_3/\sigma_{1,\beta}$ 和 θ 的拟合关系的形式为式(14), 将 3 类不同计算模型拟合关系的参数结果列于表 9, 不同模型拟合公式中的参数 a、b、c 和 d 大体相当, 各模型的 A_e 在 57° 左右取得最大值。

$$A_e = a \frac{\sigma_3}{\sigma_{1,\beta}} + b\theta^2 + c\theta + d \quad (14)$$

比较表 6、表 7 和表 8 相同围压条件下裂隙倾角 30° , 45° , 60° , 75° 的 A_e 发现, I、III 类模型 A_e 比较接近, 而 II 类模型 A_e 比 I、III 类小。本文认为裂隙引入与否 II 类模型均易于发生层理(裂隙)主导的滑移破坏, 强度差异较小; 对于 I、III 类模型而言, 随着裂隙的引入, 破坏的主导因素由基质转向层理(裂隙), 强度差异较大。

Table 9. Summary of 3 kinds of model fitting parameter A_e
表 9. 3 类不同模型 A_e 拟合参数汇总

类别	a	b	c	d	$\theta _{A_{e,max}}$	R^2
I	-1.729	-3.331	6.567	-2.299	56.56°	0.9326
II	-1.672	-3.348	6.542	-2.281	58.64°	0.9424
III	-1.736	-3.339	6.594	-2.312	58.02°	0.9522

5. 结论

基于页岩压缩试验和其他学者研究资料, 验证了数值计算手段的可行性。通过对多种工况下数值模型的计算研究了不同裂隙形态对页岩抗压强度的影响, 最终得到以下结论:

(1) 室内试验难以对裂隙页岩进行系统研究, 借助 ANSYS17.0 Jointed Rock 模型可以对多种分布裂隙的页岩试件进行分析, 具有明显的优势。

(2) 裂隙对不同层理倾角页岩抗压强度的影响趋势一致, 57°左右的裂隙倾角对页岩抗压强度的削弱程度最明显, 之后向两边递减, 在 0°, 15°, 90°时裂隙对页岩抗压强度基本不存在影响。

(3) 相同条件下, 裂隙对 60°页岩的抗压强度影响较小, 对 0°、90°页岩的抗压强度影响较大, 而这主要与裂隙页岩的破坏形式有关。

(4) 围压越高, 围箍效应越明显, 裂隙页岩抗压强度越大。另外, 较高围压下试件沿裂隙方向的剪切滑移破坏难于发生, 从而表现为裂隙对页岩抗压强度的影响作用(A_e)削弱。

参考文献

- [1] 杨力行, 於文辉. “页岩气革命”为什么没有发生在中国[J]. 中国石油企业, 2013(3): 1-2.
- [2] 王祥, 刘玉华, 张敏, 等. 页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(2): 350-356.
- [3] 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]. 石油实验地质, 2011, 33(3): 219-225+232.
- [4] 周进举, 王德利. 含倾斜裂隙页岩介质地震波场传播特征研究[J]. 石油物探, 2014, 53(5): 501-508
- [5] 魏元龙, 杨春和, 郭印同, 等. 单轴循环荷载下含天然裂隙脆性页岩变形及破裂特征试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1649-1658.
- [6] 王怡, 徐江, 梅春桂, 等. 含裂缝的硬脆性泥页岩理化及力学特性研究[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(6): 104-108.
- [7] 赵凯, 袁俊亮, 邓金根, 等. 层理产状对页岩气水平井井壁稳定性的影响[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(3): 580-583.
- [8] 康志勤, 赵阳升, 杨栋. 油页岩热破裂规律分形理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 90-96.
- [9] 梁榜, 梦吟, 蔡进. 泥页岩裂缝发育特征及其对含气性的影响[J]. 江汉石油科技, 2013, 23(4): 1-5.
- [10] 林永学, 高书阳, 曾义金. 龙马溪组页岩强度评价与分析[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(5): 20-25.
- [11] Morgan, S.P. and Einstein, H.H. (2014) The Effect of Bedding Plane Orientation on Crack Propagation and Coalescence in Shale. In: *48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, Minneapolis, MN, 1-4 June 2014.
- [12] Sun, K., Zhang, S. and Xin, L. (2016) Impacts of Bedding Directions of Shale Gas Reservoirs on Hydraulically Induced Crack Propagation. *Natural Gas Industry B*, 3, 139-145. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2016.03.008>
- [13] Tien, Y.-M. and Kuo, M.-C. (2001) A Failure Criterion for Transversely Isotropic Rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 38, 399-412. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(01\)00007-7](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00007-7)
- [14] Kuo, M.-C., Tien, Y.-M. and Chu, C.A. (2004) Study of Failure Process and Failure Modes of Interstratified Rock Mass with an Emphasis on Specimen Preparation and Image Scanning. *Gulf Rocks 2004, the 6th North America Rock Mechanics Symposium (NARMS): Rock Mechanics across Borders and Disciplines*, Houston, TX, 5-9 June 2004, 1-12.
- [15] ANSYS (2015) ANSYS Mechanical APDL Theory Reference Release 17. ANSYS, Inc., Canonsburg, PA.

- [16] 张士诚, 郭天魁, 周彤,等. 天然页岩压裂裂缝扩展机理试验[J]. 石油学报, 2014, 35(3): 496-503.
- [17] Ghazvinian, A. and Hadei, M.R. (2012) Effect of Discontinuity Orientation and Confinement on the Strength of Jointed Anisotropic Rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **55**, 117-124.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.06.008>
- [18] 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[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3447-3455.
- [19] Yong, M.T., Ming, C.K. and Charng, H.J. (2006) An Experimental Investigation of the Failure Mechanism of Simulated Transversely Isotropic Rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **43**, 1163-1181.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.03.011>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org