



页岩圆盘压裂的理论分析与试验研究

于俊红^①, 尚新春^{①②*}, 吴沛飞^②

① 北京科技大学应用力学系, 北京 100083;

② 北京科技大学国家材料服役安全科学中心, 北京 100083

* E-mail: shangxc@ustb.edu.cn

收稿日期: 2016-01-03; 接受日期: 2016-01-13; 网络出版日期: 2016-01-15

国家重点基础研究发展计划(编号: 2013CB228002)资助项目

摘要 结合我国南方海相页岩气藏的实际, 针对页岩储层岩石力学性质与一般致密砂岩、碳酸盐岩相比的特殊性, 对其进行了圆盘压裂试验和单轴压缩试验. 圆盘压裂是一种间接测量岩石抗拉强度和弹性模量的试验方法, 其理论基础是受压圆盘的应力和位移的弹性理论解. 对于接触载荷分别为均匀、余弦函数和线性分布三种情形, 给出了抗拉强度和弹性模量的计算公式. 再使用试验数据, 得到了页岩试样的抗拉强度和弹性模量. 分析表明接触载荷的分布形式对抗拉强度影响很小, 而对弹性模量值的影响较大. 此外, 还进行了取自相同深度岩芯的小圆柱试样单轴压缩试验, 测得了页岩的抗压强度值, 所得弹性模量与圆盘压裂试验相应结果基本一致, 从而佐证了本文理论分析和试验方法的正确性.

关键词 页岩, 圆盘压裂, 复函数方法, 解析解, 接触载荷

1 引言

随着油气藏开采技术的提高以及油气资源需求量的增加, 非常规油气资源正日益受到关注和重视. 页岩气以其分布范围广、资源量大、稳产周期长等特点, 成为当前油气勘探开发的热点^[1]. 页岩储层岩石具有基质致密, 微裂隙、层理面发育, 岩石性脆等非常规地质特征, 其力学性质与一般的致密砂岩、碳酸盐岩相比具有一定的特殊性^[2]. 本文对四川盆地龙马溪组页岩的抗拉强度、抗压强度和弹性模量进行了试验测定.

由于页岩属于典型脆性材料, 故采用直接拉伸

试验来确定其抗拉强度困难较大, 一般采用巴西劈裂试验^[3]来间接测定页岩的抗拉强度. Hertz 和 Michell 分别早在 1883 年和 1900 年就给出了圆盘对径受压的应力解^[4,5]; 1953 年, 穆尔海里什维里^[4]用复变函数方法给出了巴西劈裂试验问题的双极坐标形式的应力解, Timoshenko 和 Goodier^[6]基于半无限平面问题受集中力的 Boussinesq 解, 应用叠加方法也给出了同样的解答且与光弹性实验结果吻合很好. 但巴西劈裂试验在对试样施加对径压缩载荷时, 使得加载线附近由于强烈应力集中而发生压破坏, 违背了巴西劈裂试验中心起裂的假设, 从而使所测抗拉强度与真实值存在差异. 因而, 1978 年, ISRM^[7]给出

引用格式: 于俊红, 尚新春, 吴沛飞. 页岩圆盘压裂的理论分析与试验研究. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 135–141

Yu J H, Shang X C, Wu P F. Experimental study and theoretical analysis on shale strength (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 135–141, doi: 10.1360/N092016-00007

了利用圆弧形压头加载间接测定脆性材料拉伸强度的试验标准(图 1(a)). 2004 年, ASTM^[8]也给出了间接测定脆性材料拉伸强度的试验规范(图 1(b)). 1959 年 Hondros^[9]发展了巴西劈裂试验, 用作用在有限圆弧上的径向均布载荷来代替集中载荷, 给出了 Airy 应力函数三角级数解, 从而求出了受径向均布载荷作用下圆盘的应力解. 后来, 运用复变函数解法得到了其应力级数解答^[10]. Ma 和 Hung^[11]对此级数解答进行了求和, 得到了应力场和位移场的显示表达式. 文献[12~14]求得了巴西圆盘受抛物线型载荷下的应力和位移场, 并考虑了不同加载角度和载荷类型对圆盘内应力和位移分布的影响. 1978 年 Wijk^[15]通过修正二维情况下巴西圆盘对径受均布载荷时的应力解, 给出了三维理想条件下巴西圆盘对径受均布载荷时的应力解析解. 2013 年 Wei 和 Chau^[16]用位移函数展开的方法, 给出了三维情况下巴西圆盘在半椭圆分布载荷下的应力、位移半解析三角级数解.

在实际试验中, 由于压头与圆盘之间接触力的分布形式未知^[17], 前人多把接触力的分布形式假设为均匀分布、抛物分布或是半椭圆分布, 本文根据 ISRM 标准, 对页岩圆盘进行了压裂试验, 并对比了不同的接触力分布形式(均匀分布、余弦函数分布和线性分布)对圆盘内应力、位移以及抗拉强度值和弹性模量值测定的影响. 同时也进行了页岩单轴压缩试验, 得到了页岩的抗拉强度值和弹性模量值. 通过对比两试验测得的弹性模量值来相互印证两试验的正确性.

2 圆盘压劈试验的弹性理论分析

2.1 受压圆盘的应力和位移解

圆盘压劈试验是间接测定岩石抗拉强度的常用

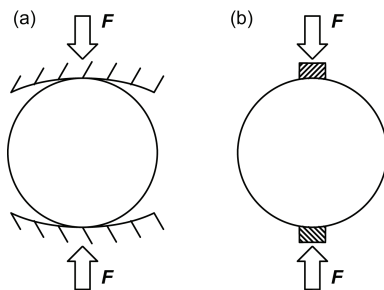


图 1 试验示意图
(a) ISRM 标准, (b) ASTM 标准

方法. 圆盘试件受到来自夹具接触力作用而发生弹性变形, 其内部应力和位移的确定对于试验测定岩石的抗拉强度和弹性模量至关重要. 这里假定接触力为均匀分布、线性分布和余弦函数曲线分布等 3 种情形下, 基于弹性平面问题的复变函数理论, 给出了受压圆盘内的应力解和位移解.

如图(2)所示, 取极坐标系(r, θ). 记圆盘半径为 R 、厚度为 t , 弹性模量为 E 、泊松比为 μ . 设作用在圆盘上的载荷合力为 F , 夹具与圆盘的法向接触分布力为 $q(\theta)$, 接触角度为 α , 并且不考虑切向摩擦力. 有:

$$F = Rt \int_{-\alpha}^{\alpha} q(\theta) \cos \theta d\theta. \quad (1)$$

圆盘内的应力和位移可由两个解析函数 $\Phi'(z)$ 和 $\Psi'(z)$ 表示.

$$\begin{aligned} \sigma_r + \sigma_\theta &= 4 \operatorname{Re} \Phi'(z), \\ \sigma_\theta - \sigma_r + 2i\tau_{r\theta} &= 2e^{2i\theta} [\bar{z}\Phi''(z) + \Psi''(z)], \end{aligned} \quad (2)$$

$$u_r - iu_\theta = \frac{e^{i\theta}}{2G} [(\kappa - 1)\bar{z}\Phi'(z) - \bar{z}\Phi'(z) - \Psi'(z)], \quad (3)$$

式中, $\kappa = 2(1 - \mu)/(1 + \mu)$, $G = E/(2 + 2\mu)$.

对于假设接触力载荷 $q(\theta)$ 分别是均匀分布、线性分布和余弦函数曲线分布情形. 首先, 将其展开成复形式的 Fourier 级数, 并且将函数 $\Phi'(z)$ 和 $\Psi'(z)$ 分别展开成幂级数的形式, 可以由应力和位移边界条件来确定出幂级数的系数, 最后再由(2)和(3)式给出应力场和位移场. 下面仅给出圆盘垂线($\theta=0$)上非零位移和应力的解析解结果, 分别表述如下.

(1) 情形 1, $q(\theta)$ 为均匀分布

$$q(\theta) = \frac{F}{2Rt \sin \alpha} = q_0, \text{ 常数}, \quad (4)$$

$$\sigma_r = -\frac{2q_0}{\pi} \left[\alpha + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R} \right)^{2n-2} \left(1 - \frac{n-1}{n} \frac{r^2}{R^2} \right) \sin 2n\alpha \right], \quad (5)$$

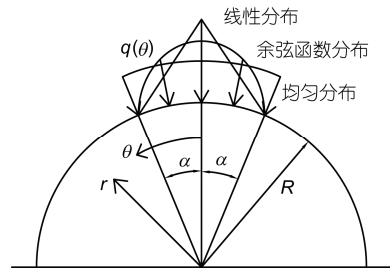


图 2 圆盘(对称部分)与接触载荷分布形式

$$\sigma_{\theta} = -\frac{2q_0}{\pi} \left[\alpha + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R} \right)^{2n-2} \left(-1 + \frac{n+1}{n} \frac{r^2}{R^2} \right) \sin 2n\alpha \right], \quad (6)$$

$$u_r = -\frac{q_0 r(1+\mu)}{\pi E} \cdot \left[\kappa\alpha + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R} \right)^{2n-2} \left(\frac{\kappa-2n}{n(2n+1)} \left(\frac{r}{R} \right)^2 - \frac{2}{2n-1} \right) \sin 2n\alpha \right]. \quad (7)$$

(2) 情形 2, $q(\theta)$ 为余弦函数分布

$$q(\theta) = q_0 \frac{\cos \theta - \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}, \quad q_0 = \frac{2F(1 - \cos \alpha)}{Rt(2\alpha - \sin 2\alpha)}, \quad (8)$$

$$\sigma_r = -\frac{2q_0}{\pi(1 - \cos \alpha)} \cdot \left[(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) + \sum_{n=1}^{\infty} D \left(\frac{r}{R} \right)^{2n-2} \left(n - (n-1) \frac{r^2}{R^2} \right) \right], \quad (9)$$

$$\sigma_{\theta} = -\frac{2q_0}{\pi(1 - \cos \alpha)} \cdot \left[(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R} \right)^{2n-2} D \left(-n + (n+1) \frac{r^2}{R^2} \right) \right], \quad (10)$$

$$u_r = -\frac{q_0 r(1+\mu)}{\pi(1 - \cos \alpha)E} \left[\kappa(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R} \right)^{2n-2} D \left(\frac{\kappa-2n}{(2n+1)} \left(\frac{r}{R} \right)^2 + \frac{2n}{2n-1} \right) \right], \quad (11)$$

式中,

$$D = \frac{\sin(2n+1)\alpha}{2n+1} + \frac{\sin(2n-1)\alpha}{2n-1} - \frac{\cos \alpha \sin 2n\alpha}{n}.$$

(3) 情形 3, $q(\theta)$ 为线性分布

$$q(\theta) = q_0 \left(1 - \frac{\theta}{\alpha} \right), \quad q_0 = \frac{F\alpha}{2Rt(1 - \cos \alpha)}, \quad (12)$$

$$\sigma_r = \frac{\alpha}{\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sin^2(n-1)\alpha}{\pi(n-1)^2\alpha} \left(\frac{r}{R} \right)^{2n-2} \left[n - (n-1) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right], \quad (13)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{\alpha}{\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sin^2(n-1)\alpha}{\pi(n-1)^2\alpha} \left(\frac{r}{R} \right)^{2n-2} \left[(n+1) \left(\frac{r}{R} \right)^2 - n \right], \quad (14)$$

$$u_r = \frac{q_0 r(1+\mu)}{E} \left\{ \frac{\kappa\alpha}{2\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\kappa-2n}{2n+1} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right. \right.$$

$$\left. + \frac{2n}{2n-1} \right] \frac{\sin^2(n-1)\alpha}{\pi(n-1)^2\alpha} \left(\frac{r}{R} \right)^{2n-2} \left. \right\}. \quad (15)$$

图 3 给出了受压圆盘垂线($\theta=0$)上的应力分布曲线

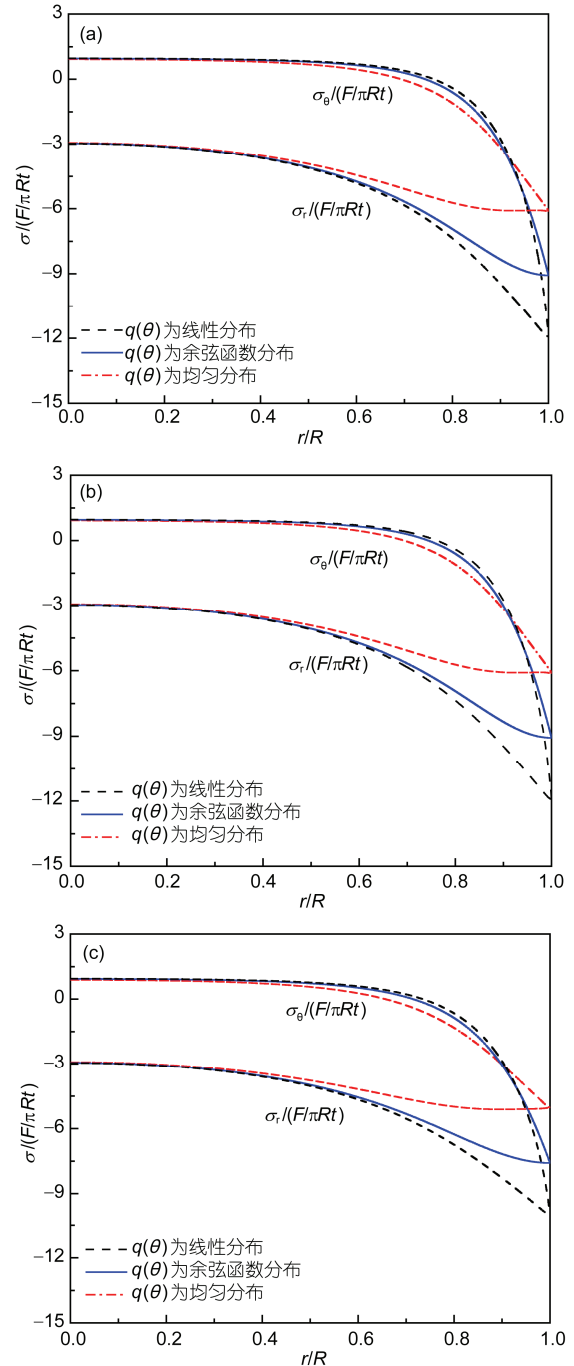


图 3 (网络版彩图)无量纲应力在垂直半径上的分布曲线
(a) 接触角度 $\alpha=12^\circ$ 情形; (b) 接触角度 $\alpha=15^\circ$ 情形; (c) 接触角度 $\alpha=18^\circ$ 情形

线. 可以看出: 3 种接触分布载荷对应的垂线上的应力分布, 在 $0 \leq r/R \leq 0.5$ 的范围内差别很小; 离圆盘边缘处越近差别越大, 而且接触角 α 越小, 这种影响将会变大.

2.2 受压页岩圆盘中心起裂的判据

应用 Griffith 强度准则来分析受压页岩圆盘中心起裂的条件. Griffith 等效应力由最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 来表示:

$$\sigma_G = \begin{cases} \sigma_1, & (3\sigma_1 + \sigma_3 > 0), \\ -\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{8(\sigma_1 + \sigma_3)}, & (3\sigma_1 + \sigma_3 \leq 0). \end{cases} \quad (16)$$

圆盘中心起裂的判据为

$$\sigma_G = \sigma_t, \quad (17)$$

式中, σ_t 是拉伸强度, 规定拉应力符号为正.

对于本文所分析的受压圆盘有 $\sigma_1 = \sigma_\theta$, $\sigma_3 = \sigma_r$, 由图 3(a)~(c) 中的曲线可以计算得知: 受压圆盘的应力状态满足条件 $3\sigma_1 + \sigma_3 \leq 0$. 图 4(a)~(c) 给出不同接触力分布情形下, Griffith 等效应力 σ_G 在垂直半径上的分布曲线, 可以看出: σ_G 的最大值位置不仅与接触力的分布形式有关而且还与接触角度的大小有关. 例如, 当接触角度等于 15° 时, σ_G 的最大值位置在圆盘中心处, 即圆盘在中心处起裂; 当接触角度等于 12° 时, 对于接触力为余弦函数分布或线性分布的情形, σ_G 的最大值位置偏离中心, 即在垂线上靠近边缘的点处起裂.

2.3 抗拉强度、抗压强度和弹性模量的计算

若接触角 $\alpha \geq 15^\circ$, 则受压圆盘会在中心处起裂. 可由圆盘压裂试验测得的载荷最大值 $F_{\max}$ 来确定页岩抗拉强度 σ_t , 并且由试验曲线的直线段来确定出页岩弹性模量 E , 计算公式如下.

(1) 情形 1, $q(\theta)$ 为均匀分布

$$\sigma_t = \frac{F_{\max} \sin^2 2\alpha}{4\pi R t \alpha \sin \alpha}, \quad (18)$$

$$E = -\frac{F}{2\pi t \delta} \left[\pi(1-\nu) \tan \frac{\alpha}{2} - 4 \ln \left(\tan \frac{\alpha}{2} \right) \right]. \quad (19)$$

(2) 情形 2, $q(\theta)$ 为余弦函数分布

$$\sigma_t = \frac{4F_{\max} \sin^6 \alpha}{9\pi R t (2\alpha - \sin 2\alpha)(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)}, \quad (20)$$

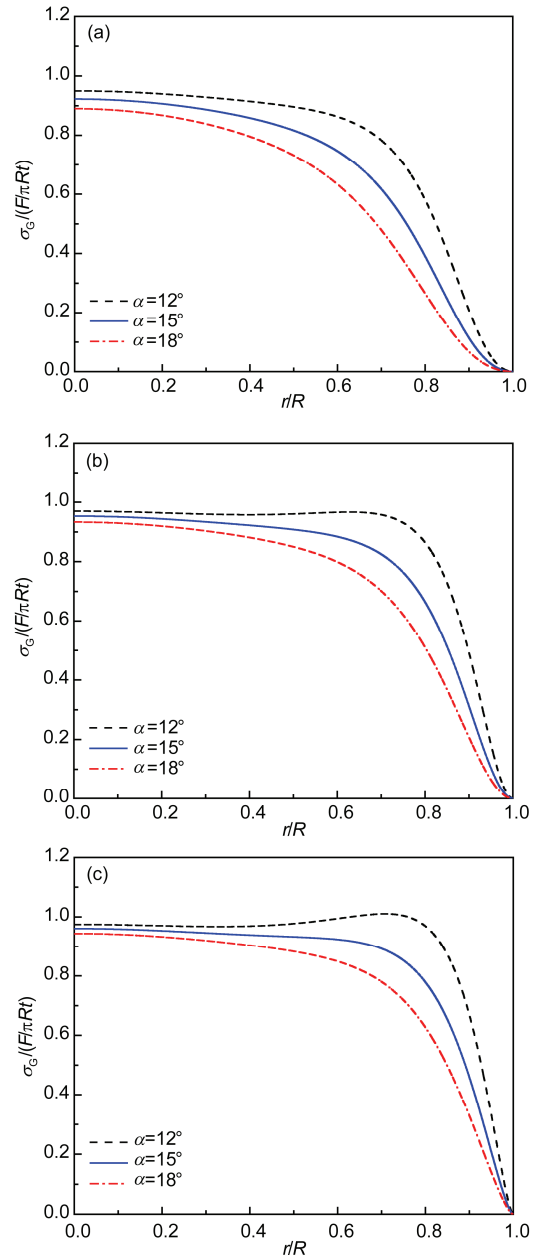


图 4 (网络版彩图) 无量纲 Griffith 等效应力在垂直半径上的分布曲线

(a) $q(\theta)$ 为均匀分布情形; (b) $q(\theta)$ 为余弦函数分布情形; (c) $q(\theta)$ 为线性分布情形

$$E = -\frac{4F}{\pi t \delta (2\alpha - \sin 2\alpha)} \left\{ 2 \left[L \left(\frac{\pi}{2} \right) - L \left(\frac{\alpha}{2} \right) - L \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} \right) \right] - \frac{\sin 2\alpha}{4} \ln \cot \frac{\alpha}{2} + \frac{\pi(1-\nu)(1-\cos \alpha)^2}{4} - \sin \alpha \right\}, \quad (21)$$

其中特殊函数定义为 $L(x) = -\int_0^x \ln \cos t dt$.

(3) 情形 3, $q(\theta)$ 为线性分布

$$\sigma_t = \frac{F_{\max} \sin^4 \alpha}{2\pi R t \alpha^2 (1 - \cos \alpha)}, \quad (22)$$

$$E = -\frac{F}{2t\delta(1 - \cos \alpha)} \left[(1 - \nu)(\alpha - \sin \alpha) + \frac{4}{\pi} \left(\ln \frac{2}{\sin \alpha} + \cos \alpha \ln \tan \frac{\alpha}{2} \right) \right], \quad (23)$$

式中, $\delta = u_r(R, 0)$.

另外, 可由单轴压缩试验曲线来测定抗压强度 σ_c 和弹性模量 E , 计算公式如下:

$$\sigma_c = \frac{4P_{\max}}{\pi d^2}, \quad E = \frac{4hk}{\pi d^2}, \quad (24)$$

式中, $P_{\max}$ 为测得的破坏载荷, d 和 h 分别是小圆柱试件的直径和高度, k 是压缩试验曲线中直线段的斜率, 可用试验数据由最小二乘法得到.

3 页岩强度测试及试验结果

为了确定页岩试样的抗拉强度、抗压强度和弹性模量, 实施了圆盘试样的压劈试验和小圆柱试样的单轴压缩试验.

3.1 页岩圆盘压裂试验

圆盘试样选用取自深度为 780 m 左右的龙马溪页岩岩芯加工而成. 圆盘试样两平行表面的平行度在 0.05 mm 以内, 各表面的平面度在 0.02 mm 以内. 三组圆盘试样的直径 D 均为 69 mm, 厚度 t 分别为 25, 27 和 27 mm. 另外制作了凹形铝合金压头一对, 其受压圆柱面的半径为 40 mm. 本文对龙马溪页岩试样 1~3 进行了圆盘压裂试验, 图 5 为试验现场照片. 试验是在电子万能试验机上实施的, 通过上下凹形圆柱面压头对页岩圆盘试样进行静态加载. 试验观察可知, 在接触角 $2\alpha=30^\circ$ 时页岩试样在其中心开裂, 并迅速沿垂向方向上下扩展, 形成一贯穿的垂直断裂面. 载荷位移试验曲线如图 6 所示. 在加载的初始阶段曲线呈现非线性, 这是由于页岩试样处于压实状态所造成的, 进一步加载呈现出直线段, 这表明页岩试样处于弹性变形阶段, 最后达到最大值而突然下降, 此时对应于圆盘试样的断裂扩展状态.

根据试验记录的载荷位移曲线及相关数据, 可

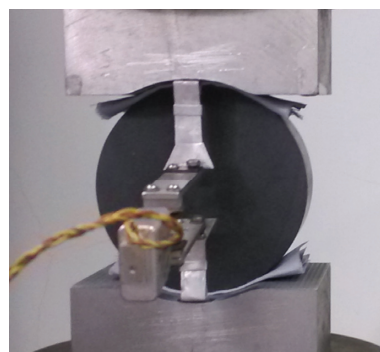


图 5 (网络版彩图)页岩圆盘压裂试样、压头和引伸计

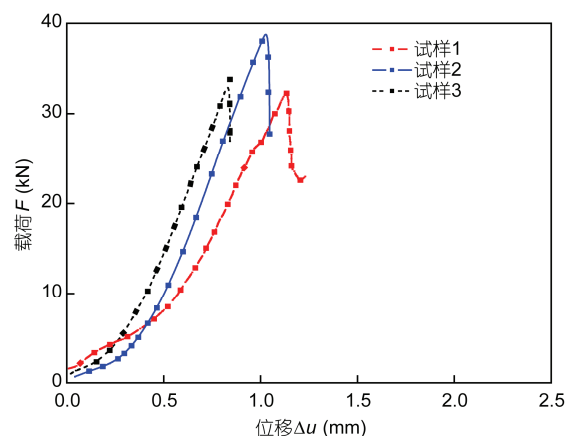


图 6 (网络版彩图)圆盘试验载荷-位移关系曲线

由(18), (20)和(22)式分别算出接触载荷为均匀、余弦函数和线性 3 种分布情形下的抗拉强度 σ_t , 相应结果列于表 1. 再由载荷位移曲线中的直线段的数据, 分别为(19), (21)和(23)式来计算出 3 种接触载荷情形下的弹性模量 E , 结果列于表 2. 从这些试验结果可以看出, 不同的接触力分布形式, 对页岩试样抗拉强度均值影响不大, 彼此相差不到 5%; 而对弹性模量均值影响较大, 最大可相差 20%.

3.2 单轴压缩试验

取同一地点和同一深度的页岩岩芯进行单轴压缩试验, 来间接测量页岩的弹性模量, 并与圆盘试验

表 1 抗拉强度 σ_t 试验值(单位: MPa)

试样编号	均布	余弦函数	直线
试样 1	10.0	10.3	10.4
试样 2	12.4	12.8	12.9
试样 3	10.5	10.8	10.9
均值	11.0	11.3	11.4

表 2 弹性模量 E 试验值(单位: GPa)

试样编号	均布	余弦函数	直线
试样 1	5.07	5.83	6.22
试样 2	5.46	6.28	6.70
试样 3	5.43	6.24	6.78
均值	5.32	6.12	6.53

测得的弹性模量对比, 从而验证圆盘试验和理论的有效性.

单轴压缩试验采用直径 d 和高度 h 分别均为 25 mm 和 40 mm 的小圆柱试样. 使用电子万能试验机对龙马溪页岩试样 4~6 进行了静态加载. 载荷位移曲线如图 7 所示, 在加载初始阶段曲线呈现出非线性, 这是由于试样还未压实造成的, 继续加载呈现直线段, 这表明试样已压实且处于弹性变形阶段, 直至达到峰值破坏.

根据试验记录的载荷位移曲线及相关数据, 可由(24)式计算出页岩的弹性模量和抗压强度. 相应结果列于表 3 中. 测得的抗压强度均值为 78 MPa. 另外, 从试验结果可以看出, 圆盘压裂试验测得的弹性模量与单轴压缩试验测得的弹性模量均为 6.0 MPa 左

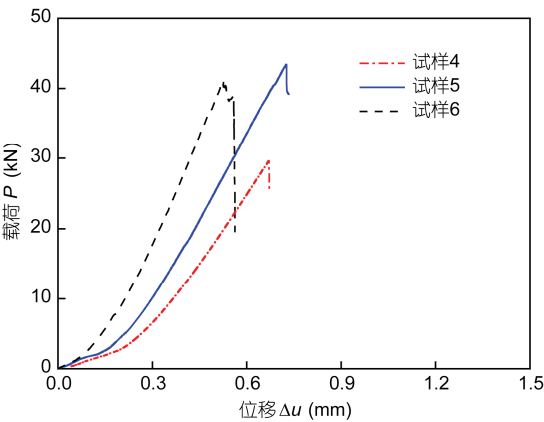


图 7 (网络版彩图)单轴力学试验力-位移关系曲线

表 3 弹性模量 E 和抗拉强度 σ_c 试验值

试样编号	E (MPa)	σ_c (MPa),
试样 4	5.21	60.3
试样 5	6.58	88.6
试样 6	8.00	84.0
均值	6.60	77.6

右, 两者相差不大, 这就佐证了圆盘压裂试验及相应理论分析的正确性.

4 结论

(1) 由于页岩脆性较大, 为避免页岩圆盘试样在载荷加载区域首先被压碎破坏, 制作了较软的铝合金压头来代替硬质刚性压头, 有利于圆盘试样在中心处开裂, 同时采用引伸计来测量圆盘试样变形, 也避免了由于压头变形所产生的误差.

(2) 圆盘压裂试验是间接测试抗拉强度和弹性模量的方法. 其理论基础是受压圆盘应力场和位移场的分布, 而受压圆盘所受接触载荷的分布形式是未知的. 本文基于弹性平面问题的复变函数理论, 假设接触载荷分别为均匀分布、余弦函数分布和线性分布三种情形, 分析给出了相应的抗拉强度及弹性模量的计算公式.

(3) 实施了页岩圆盘压裂试验, 并应用本文得到的理论计算公式和试验结果, 得到了页岩试样的抗拉强度均值为 11 MPa、弹性模量均值为 6.0 MPa. 分析表明接触载荷的分布形式对抗拉强度影响很小(约为 4%), 而对弹性模量值的影响较大(约为 20%). 此外, 还进行了相同岩芯小圆柱试样的单轴压缩试验, 测得了页岩的抗压强度均值为 78 MPa, 所得弹性模量与圆盘压裂试验相应结果基本一致, 从而佐证了本文理论分析和试验方法的正确性.

参考文献

- 1 姚军, 孙海, 黄朝琴, 等. 页岩气藏开发中的关键力学问题. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 1527-1547
- 2 杨建, 付永强, 陈鸿飞, 等. 页岩储层的岩石力学特性. 天然气工业, 2012, 32: 12-14
- 3 Fairbairn E M R, Ulm F J. A tribute to Fernando L L Carneiro (1913-2001) engineer and scientist who invented the Brazilian test. Smart Mater Struct, 2002, 35: 195-196
- 4 穆斯海里什维里. 数学弹性力学的几个基本问题. 赵惠元, 译. 北京: 科学出版社, 1958. 249-258
- 5 Love A E H. A treatise on the mathematical theory of elasticity. Cambridge: Cambridge University Press, 1920. 215-217

- 6 Timoshenko S P, Goodier J N. *Theory of Elasticity*. 3rd ed. Singapore: McGraw-Hill, 1982
- 7 ISRM. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1978, 15: 99–103
- 8 ASTM. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. Designation: C496/C496M-04, 2004, 1–5
- 9 Hondros G. The evaluation of Poisson's ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the Brazilian test. *Aust J Appl Sci* 1959, 10: 243–68
- 10 程昌钧. 弹性力学. 兰州: 兰州大学出版社, 1995. 460–464
- 11 Ma C C, Hung K M. Exact full-field analysis of strain and displacement for circular disks subjected to partially distributed compressions. *Int J Mech Sci* 2008, 50: 275–292
- 12 Kourkoulis S K, Markides C F, Chatzistergos P E. The Brazilian disc under parabolically varying load: Theoretical and experimental study of the displacement field. *Int J Solids Struct*, 2012, 49: 959–972
- 13 Markides C F, Kourkoulis S K. The stress field in a standardized Brazilian disc: The influence of the loading type acting on the actual contact length. *Rock Mech Rock Eng*, 2012, 45: 145–158
- 14 Kourkoulis S, Markides C F, Chatzistergos P E. The standardized Brazilian disc test as a contact problem. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2013, 57: 132–141
- 15 Wijk G. Some new theoretical aspects of indirect measurements of the tensile strength of rocks. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 1978, 15: 149–160
- 16 Wei X X, Chau K T. Three dimensional analytical solution for finite circular cylinders subjected to indirect tensile test. *Int J Solids Struct* 2013, 50: 2395–2406
- 17 Johnson K L. *Contact Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 84–105

Experimental study and theoretical analysis on shale strength

YU JunHong¹, SHANG XinChun^{1,2} & WU PeiFei²

¹ *Department of Applied Mechanics, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;*

² *National Center for Materials Service Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China*

According to the reality of the marine shale reservoirs in South China and the particularity of shale mechanics properties compared with sandstone and carbonate rocks, the disc fracture and the uniaxial compression tests were carried out. As an indirect method, the disc fracture test can measure the tensile strength and the elastic modulus of rock, which theoretical foundation is the elasticity solution of stress and displacement to the compressed disc. For the cases that distribution form of contact force is uniform, cosine and linear, respectively, the formulae to calculate the tensile strength and the elastic modulus were given. Then, by using data from the disc fracture test, the tensile strength and the elastic modulus were obtained. The results indicates that the different distributions form of contact load have a tiny influence on the tensile strength, but a large effect on the elastic modulus. In addition, the uniaxial compression test was conducted for little cylindrical specimens made of shale core at the same depth. The elastic modulus result from the uniaxial compression test is accordant with one from the disc fracture tests, this confirms the correctness of the presented theoretical analysis and methods of shale disc fracture test.

shale, disc fracture tests, complex function method, analytical solution, contact force

doi: 10.1360/N092016-00007