

# 水压致裂法测定岩石的断裂韧性\*

陈治喜 陈勉 金衍 黄荣樽

(石油大学 北京 102200)

**提要** 提出了一个利用液体压力对空心厚壁圆柱形岩样进行压裂而测定岩石断裂韧性的简单方法,在自行设计加工的岩样制备和断裂韧性测试装置上,对部分砂、页岩试样进行了测试。通过对岩样破裂面和声发射曲线的分析,对水力压裂过程中岩石破裂的有关机理进行了探讨。

**关键词** 断裂韧性,水力压裂,声发射

## 1 引言

水力压裂所形成的裂缝能有效地改善油气井周围地层的渗透性,提高油气井的产量,因而已被广泛应用于现代石油工业中。为了提高压裂效果,应对裂缝的几何形态进行有效地控制,尽可能地让裂缝在储层中延伸,并防止裂缝穿透水层和低压渗透层。这需要在掌握裂缝延伸规律的基础上,通过优选合适的作业参数来实现。因此,裂缝几何形态的预测是水力压裂设计中的一个重要任务。建立裂缝延伸模型首先要研究解决以下几个问题:(1)在原地应力条件和压裂液压力作用下岩石的三维变形;(2)压裂液通过裂缝的三维流动及向地层扩散的规律;(3)裂缝扩展准则。其中,对裂缝扩展准则的研究目前还存在较大的困难,体现在地层深处岩石所处条件的复杂性及岩石本身物理、力学性质的不确定性。现阶段普遍采用线弹性断裂力学理论来建立水压裂缝的扩展准则。应用最为广泛的是  $K$  判据,即

$$K_I = K_{Ic} \quad (1)$$

式中,  $K_I$  是 I 型裂纹断裂强度因子,它反映了裂尖应力奇异性的强度,与材料和裂缝的尺寸及所受载荷有关;  $K_{Ic}$  叫做断裂韧性,是材料对裂缝扩展阻力的一种度量,它是一个通过实验确定的材料常数。

大量研究表明,岩石的断裂韧性  $K_{Ic}$  对水压裂缝几何形态和作业压力有重要影响。Yew<sup>[1]</sup>采用 GDK 模型对不同应力差条件下  $K_{Ic}$  对裂缝形态的影响进行了模拟研究,结果表明,高的  $K_{Ic}$  值要求高的净压力来扩展裂缝,缝长和缝高也发生了明显的变化。Thiercelin, Jeffrey<sup>[2]</sup>的研究表明产层与隔层之间的断裂韧性差对裂缝还存在止裂作用。而在石油生产中由于井眼尺寸的限制,地层深部的岩样只能通过钻井取芯获得,不仅尺寸小,而且很难得到大段完整的岩样,往往难于采用常规的方法测定其断裂韧性。因此开发

1995年2月8日收到初稿,1995年5月22日收到修改稿。

\* 国家自然科学基金资助项目

简单而有效的测试深部地层岩石断裂韧性的方法是水力压裂的一项重要任务。本文在分析比较现有的测试方法的基础上，采用了 Clifton<sup>[3]</sup>提出的受内压厚壁空心圆柱形岩样测定断裂韧性的方法，并对试验方案进行了改进，采用了先进的加压设备和测试仪器，使得测试操作更加简便可靠。

## 2 理论依据

Bowie 和 Freese<sup>[4]</sup>采用修正的映射配点(modified mapping collocation)法得到了具有径向裂纹的圆环承受均匀外部拉伸应力时应力强度因子的理论解。这个解也适用于圆环承受均匀内压的情况。但该文仅考虑了圆环外径与内径之比小于 2 的条件，后来 Bowie 和 Clifton<sup>[3]</sup>对 Bowie 的结果进行了扩充，得到了适用于壁厚更大的圆环的结果。设空心圆柱体内半径为  $a$ ，外半径为  $b$ ，裂纹深度为  $L$ ，内压为  $p$ ，并设外径与内径之比为  $W$ ，则裂尖应力强度因子为：

$$K_I = K^* (P \sqrt{\pi a}) \tag{2}$$

式中， $K^*$  为无量纲修正系数，它是  $L/(b-a)$  和  $W = b/a$  的函数。Clifton<sup>[3]</sup>给出了内置衬套的空心圆柱形岩样承受均匀内压时  $K^*$  随  $L/(b-a)$  和  $W$  变化的关系曲线，如图 1、图 2 所示。图 1 是岩样内壁仅有一条径向裂纹的情况，图 2 是岩样内壁有两条对称的径向裂纹的情况。

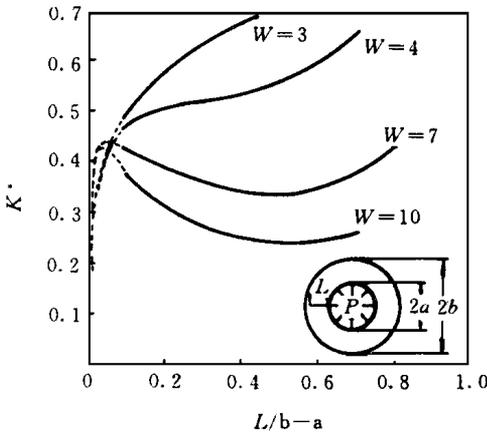


图 1 内置衬套单裂纹圆柱体的强度因子  
Fig 1 Stress intensity factor for jacketed cylinder with one radial crack

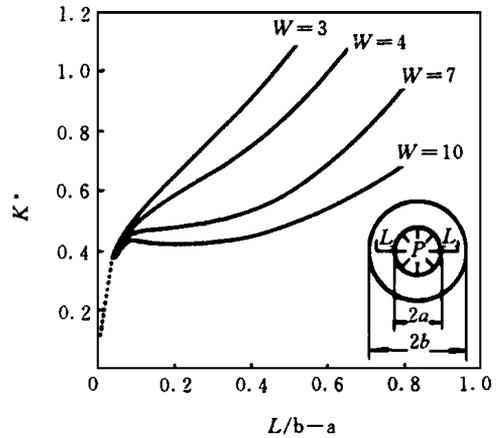


图 2 内置衬套双裂纹圆柱体的应力强度因子  
Fig 2 Stress intensity factor for jacketed cylinder with two radial cracks

从图中可以看出，当外径与内径之比大于一定值后(如单裂纹时大于 7，双裂纹时大于 10)， $K^*$  不是无量纲缝长  $L/(b-a)$  的单调增函数，而是存在着一个负增长的区域。在该区域内，随着裂纹的扩展应力强度因子减小，这时必须提高压力才能使裂纹进一步向前延伸。这说明在该区域内裂纹处于稳定的扩展过程。当内压达到一定值后，裂纹超出了稳定

区而出现失稳破坏, 此时对应于  $K^*$  的极小值点。这样只需记录试样发生破坏时的最高压力便可计算出临界应力强度因子, 亦即岩样的断裂韧性, 而不必测量裂缝的具体尺寸。

这里顺便指出, 如果试样内不加衬套, 则液体压力将同时作用于孔壁和裂缝面。在这种情况下,  $K^*$  将是  $L/(b-a)$  的单调增函数, 不存在裂缝稳定扩展区, 从而不便于测定岩样的断裂韧性。

### 3 试验方法

将钻井所取出的岩芯切成长约 40 至 60 mm 的岩芯段, 两端车平, 外部车圆, 在岩样中心钻出直径为 10 mm 左右的圆孔, 然后在内孔壁上沿径向制成与岩样内孔中心轴线平行的预裂纹。为了保证试验过程中裂缝的稳定扩展, 对单裂纹试样保证  $w > 7$ , 对双裂纹试样  $w > 10$ 。预裂纹深度的选取原则是使得初始裂纹长度处于稳定扩展区内。试样制备中加工预裂纹是一个难点, 为此设计加工了一套专用装置, 采用直径小于 0.2 mm 的钢丝用切割的方式加工预裂纹。本文所用的试样外径 100 mm 左右, 预裂纹深度 3 mm 左右。试样尺寸见表 1。

表 1 岩样尺寸和实验结果

Table 1 Rock sample size and experiment results

岩样编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
岩性	砂岩	砂岩	粉砂岩	砂岩	粉砂岩	页岩	砂岩	粉砂岩	砂岩	页岩
外径 $2b$ (mm)	128.4	130.2	102.7	100.8	100.8	100.0	101.4	98.8	101.2	100.3
内径 $2a$ (mm)	10.6	11.2	10.3	10.2	9.9	10.2	11.4	9.4	9.7	10.2
高度 $h$ (mm)	42.0	40.1	41.4	46.7	52.3	55.1	53.2	51.6	52.7	38.0
裂缝深度 $L$ (mm)	2.8	2.8	2.5	2.5	2.3	2.2	3.0	2.2	3.0	2.2
$w = b/a$	12.0	11.6	10.0	9.9	10.2	9.8	9.0	10.5	10.4	9.8
$L/(b-a)$	0.048	0.047	0.054	0.055	0.051	0.049	0.067	0.05	0.066	0.05
破裂压力 $P$ (MPa)	5.2	5.4	6.5	6.7	8.7	4.6	7.8	14.3	14.8	20.9
$K^*$	0.37	0.38	0.42	0.42	0.41	0.43	0.45	0.41	0.41	0.25
$(\text{MPa} \sqrt{\frac{K_{Ic}}{m}})$	0.25	0.27	0.35	0.36	0.45	0.25	0.47	0.71	0.75	0.66

注: 第 10 号岩样为单裂缝, 其余为双裂缝。

试验所采用的测试装置如图 3 所示。将外径 9 mm, 内径 6 mm 的橡胶管作为衬套置于岩样内孔中, 上下端分别用枣核形密封塞与金属端帽密封, 以避免液体进入裂缝表面。上下压盖经垫片与岩样两端面接触, 并通过上下端帽施加约 0.5 MPa 的轴向压力, 以防止衬套在岩样端面处破损。Abou-Sayed<sup>[5]</sup>的试验表明, 轴向压力的大小对断裂韧性测试结果

无明显影响。为了尽量减少端部效应，在岩样两端涂有一层润滑脂。测试装置的下端帽开有一通孔，供高压液体进入衬套，并向岩样内孔孔壁加压。高压液体是由 MTS286 伺服增压器提供的。试验中通过增压器控制器缓慢提高压力(每分钟 2 MPa)，直到岩样破裂，同时由增压器数据采集系统自动记录压力，注入液体体积等参数。试验过程中同时采用 LO-CAN - AT14 型声发射仪对裂纹扩展过程进行监测。声发射仪的两个探头对称粘贴于岩样外柱面上，以检测出岩样破裂过程中发出的声波信号。

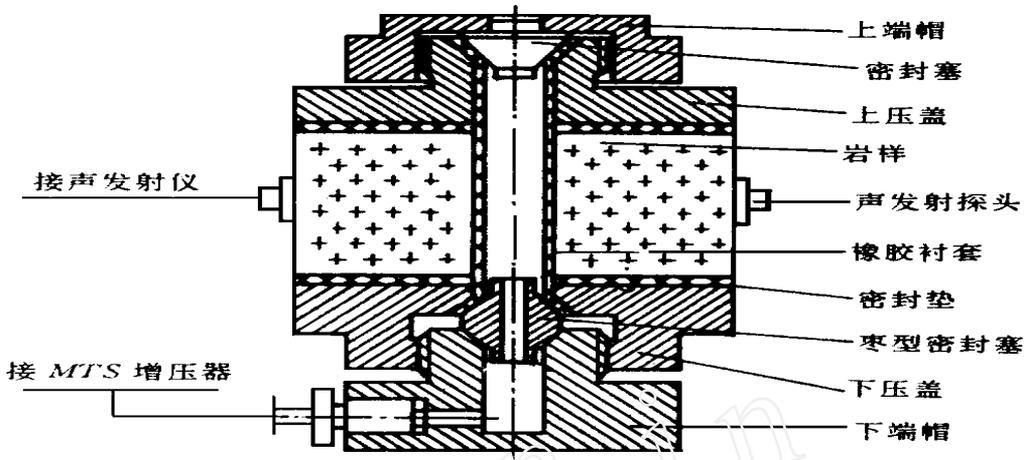


图 3 岩石断裂韧性测试装置

Fig 3 Fracture toughness measurement apparatus

### 4 试验结果与分析

对来自大港油田和塔里木油田的岩芯加工出 10 块岩样，其中砂岩 5 块，粉砂岩 3 块，页岩 2 块。除 10 号页岩岩样制成单裂缝外，其余均制成双裂缝。试验是在室温和大气压条件下进行的，其试验结果列于表 1 中。表中的  $K^*$  是根据岩样尺寸从图 1 和图 2 中经插值得到的， $K_{1c}$  是根据实验获得的岩样破裂压力，按式 (2) 及 (1) 计算得到的。由所得结果看出，与金属材料不同，岩石断裂韧性的变化范围较大，即使同一类岩石也取值各异，因而不能象金属材料那样获得某类材料有代表性的断裂韧性值。这主要是由岩石内部结构特征，如微裂隙、微节理发育，晶粒粗大，组成成份复杂等因素造成的。观察岩样破裂面发现，页岩内部富含微裂隙、层理等弱面，6 号页岩岩样不是从所加工的预裂缝面开裂的，而是沿天然裂缝开裂。天然裂缝的存在无疑降低了岩石抵抗裂缝扩展的阻力。由于室内试验所用岩样尺寸较小，天然裂缝的影响就相对更为突出。现场水力压裂作业是在某一井段进行的，为了得到较为可靠的断裂韧性值，应从作业井段取出多块岩样进行试验，以统计方法得到该井段的断裂韧性值。

观察破裂面的形态还发现，水力压裂所形成的裂缝大体沿径向对称发展，但裂缝面不是平直的，而是粗糙、弯曲的，这种现象在页岩岩样中更为明显，如图 4 所示。这将增加压裂液通过裂缝面流动的阻力，造成作业压力升高。另外，在破裂面上发现有许多已经脱离了基体的小岩块，这说明在主裂缝周围存在着一个微裂缝发育区。可以推测，主裂缝的形

成是裂尖微裂缝产生和发展的结果。微裂缝的产生将消耗一定的能量, 而且在地层深部高温高压条件下, 这个微裂缝层会表现出一定的塑性, 使得岩石的表观断裂韧性增大, 这也将造成作业压力的升高。以上两种情况可以在一定程度上解释现场施工压力比理论模型模拟结果要高的现象。

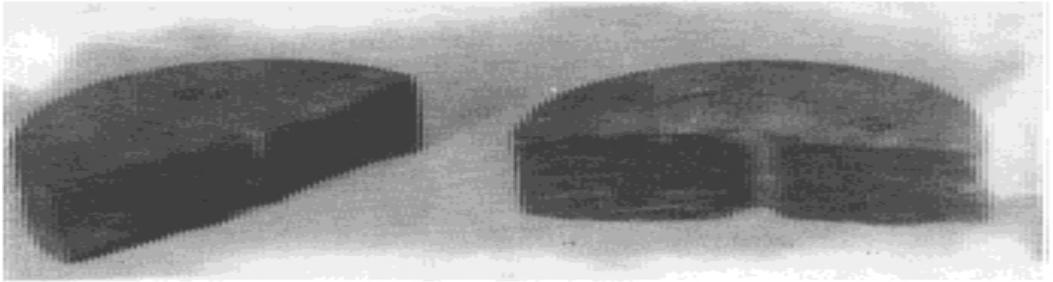


图 4 岩样破裂面形态(10号)

Fig. 4 Forms of fracture face(No. 10)

试验中记录的典型声发射曲线如图 5, 图 6 所示。图 5 是声发射能量与时间的关系曲线, 图 6 是累计声发射能量与时间的关系曲线。它们反映了水压裂缝扩展过程中的声发射特征。从图中可以看出, 在施加压力的初始阶段, 声发射活动较为平静, 这说明裂尖应力强度因子未达到岩样的断裂韧性, 裂缝没有扩展(A 区); 此后声发射活动明显增加, 但增加的速度较慢, 这是裂缝稳定扩展的特征(B 区); 最后声发射活动急剧增大, 对应于岩样的失稳破坏(C 区)。声发射监测的结果说明, 岩样在发生最终失稳破坏前有一个裂缝稳定扩展区, 这与理论分析结果是吻合的。因此, 采用声发射方法可以有效地监测裂缝扩展过程。

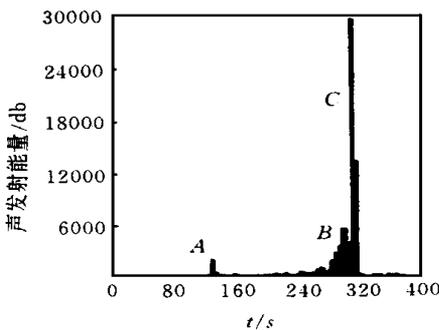


图 5 声发射能量

Fig. 5 Energy of acoustic emission

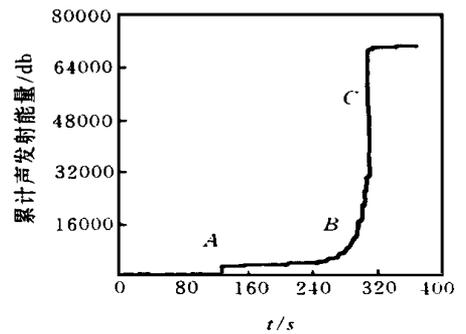


图 6 累计声发射能量

Fig. 6 Accumulative energy of acoustic emission

## 5 结论

(1) 本文提出的水压致裂法测定岩石的断裂韧性的试验方案是一种测定岩石断裂韧性

的简单可靠的方法。

(2) 试验中观察到的粗糙弯曲的裂缝面特征和在主裂缝面周围存在的一个微裂缝发育区的现象,可以在一定程度上解释水力压裂作业中作业压力高于理论计算值的原因。

(3) 岩石中存在的弱面,如天然微裂隙、层理面等对岩石的断裂韧性有着很大的影响,因此,对水力压裂井段,应取多块岩样进行测试。

(4) 从试验得到的声发射曲线可以看出,岩样在发生最终失稳破裂以前有一个裂缝稳定扩展区,这与理论分析结果是吻合的,因此采用声发射方法可以有效地监测裂缝扩展的过程。

(5) 岩石的水力压裂是一个十分复杂的裂缝形成与延伸过程,地层深部温度压力条件的影响是很重要的,因此还需继续进行这方面的研究。

### 参 考 文 献

- 1 Yew C H, L in G F. Fracture tip and critical stress intensity factor of a hydraulically induced fracture. SPE Production & Facilities, Aug. 1993, 171—177
- 2 Thiercelin M, Jeffrey R G. Influence of fracture toughness on the geometry of hydraulic fractures. SPE Production Engineering, Nov. 1989, 435—442
- 3 Clifton R J, Simonson E R, Jone A H, Green S J. Determination of the critical stress intensity factor  $K_{Ic}$  from internally pressured thick-walled vessels. Experimental Mechanics, June 1976, 233—238
- 4 Bowie O L, Freeze C E. Elastic analysis for a radial crack in a circular ring. Eng. Frac. Mech., 1972, 4(2): 315—321
- 5 Abou-Sayed A S. Fracture toughness of triaxially loaded Indiana limestone. In: 17th Proc. U.S. Symp. Rock Mech. (Keystone), 1977, 2A3.1—2A3.8

## DETERMINATION OF ROCK FRACTURE TOUGHNESS WITH HYDRAULIC FRACTURING METHOD

Chen Zhixi Chen Mian Jin Yan Huang Rongzun

(University of Petroleum, Beijing 102200)

**Abstract** Fracture toughness is a very important parameter for studying the geometry of hydraulic fractures. In this paper, a simple hydraulic fracturing technique is proposed for determining the fracture toughness of rock, which consists of fracturing prenotched thick wall cylinders with internal hydraulic pressure. A preliminary set of experiments has been performed on sandstone and shale. The mechanism of hydraulic fracturing is discussed by analyzing the fracture surface and acoustic emission activity.

**Key words** fracture toughness, hydraulic fracturing, acoustic emission