

深层岩石力学性质的试验方法

曾立新

摘要：采用美国MTS公司生产的三轴岩石力学试验机进行岩石强度特性和变形特性试验。岩样试验结果表明，由于岩石内弱面和充填物的影响，岩性相同的岩石变形特点并不相同，而不同岩性的岩石却有相似的应力/应变曲线。由于岩石非线性、赋存条件及结构特性的影响，应根据研究范围对试验结果进行相应的处理。

关键词：三轴；应力；应变；深层；岩石力学性质

分类号：TU455 **文献标识码**：B

LABORATORY TEST METHOD STUDY OF DEEP ROCK PHYSICAL MECHANICS

ZENG Lixin

SPA Drilling & Production Technology Research Institute, Guanghan Sichuan 618300

Abstract : Using the triaxial rock mechanics testing unit manufactured by American MTS Co, rock strength and deformation behavior are studied. The test results of core specimens show that rocks with the same lithologic properties indicate different deforming behavior while rocks with different lithologic properties similar curves of stress vs. strain due to the influence of weakness planes and filling on the rock, considering the influence of rock nonlinearity, reservoir condition and rock structure behavior, it is necessary to treat the test results based on the study range.

Key words : triaxial ; stress;strain;deep;rock physical mechanics

0 引言

水力压裂是油气井增产的一项有效措施。根据破裂理论,地层中水力裂缝的产生和延伸是施工压力克服了地应力和岩石抗张强度后,继续使岩石变形的结果。在水力压裂中,岩石力学在决定油气藏岩石的力学性质及地应力状态,计算由于施工所引起的岩石物质的变形和破裂,以及在决定裂缝的最终几何形状方面是很重要的[1]。水力压裂设计模型的目的是计算造一条达到设计大小和导流能力的裂缝所需要的压裂液和砂子的用量。为使压裂设计有效,必须对裂缝高度、宽度和长度进行合理的预测和计算。此外,裂缝的方位对优化井设计是重要的。所有这些裂缝几何参数都受应力状态和岩石性质的影响或控制[1]。岩石强度、弹性参数和地应力的研究对施工设计具有重大意义。

岩石在地层中不仅受到上覆岩层的压力、侧向围岩压力,而且受到孔隙流体、埋藏处温度和地应力的影响,其受力状态是三向的。试验表明岩石在三向应力状态下强度特性和变形特性明显不同于单轴应力状态。因此,只有三轴条件下的试验,才能较为真实地反映岩石在地层中的力学性质。

1 试验设备和试验方法

我们采用美国MTS公司生产的三轴等围压岩石力学试验机进行岩石的强度特性和变形特性试验。该套设备主要用于测量岩样在单/三轴抗压条件下的杨氏模量、泊松比、抗压强度。主要部件包括控制系统主机、数字控制器、加载架(提供2600kN上覆压力)及三轴室组件、围压增压器(140MPa)、温控器(200)、孔隙压力泵(140MPa)及其控制系统和轴向/径向应变仪,能在室内模拟岩样天然储藏状态下所受到的上覆压力、围压、孔隙流体压力及埋藏深度处的温度。软件控制系统设计基于IBM OS/2操作系统,采用先进的多通道并行控制技术,使我们在试验过程中,能同时控制或监视各参数的变化情况。MTS材料试验机加载构架采用高刚度设计,并且具有动态控制轴向加载速率的能力,具备进行全应力/应变试验性能,使其不仅能为石油工业中的压裂酸化施工设计,也能为隧道工程、采矿工程等提供所需的岩石力学参数。

MTS三轴等围压岩石力学试验机在进行岩石的强度特性和变形特性试验时,采用下列方法:

(1)ASTM D2938-86 原始岩样无侧限抗压强度标准试验方法(单轴);

(2)ASTM D2664-86 不加孔隙压力时,未驱替岩石试样三轴抗压强度标准试验方法。

进行三轴抗压强度试验时,将直径为25.4mm或50.8mm的圆柱状岩样(长度与直径比为2~1)套上热缩橡胶,将其放入三轴室内并固定在底座上,在岩样上安装轴向/径向应变仪、孔隙流体注入/排出盘管、热电偶,放下并固定三轴室,注入围向液压油,施加围压及相应的轴向压力、温度等,然后轴向连续加载,直至岩样破裂。

2 试验数据及结果

对泥岩、砂岩、灰岩、白云岩的试验结果表明,由于岩石内弱面和充填物的影响,岩性相同的岩样变形特点并不相同,而岩性不同的岩样却有相似的应力/应变曲线。在围压和温度的作用下,脆性的砂岩、灰岩及白云岩呈现较明显的塑性变形,但也有例外。在对白云岩的试验中,为研究孔隙内流体对岩石强度及变形特性的影响,我们将岩样分成两组,一组加孔隙压力,一组不加孔隙压力。结果加孔隙压力的岩样呈弹、塑性并存的特点(图1);而未加孔隙压力的岩样,破碎前几乎没有塑性变形阶段,整个变形过程中,应力/应变关系近似一条直线(图2)。

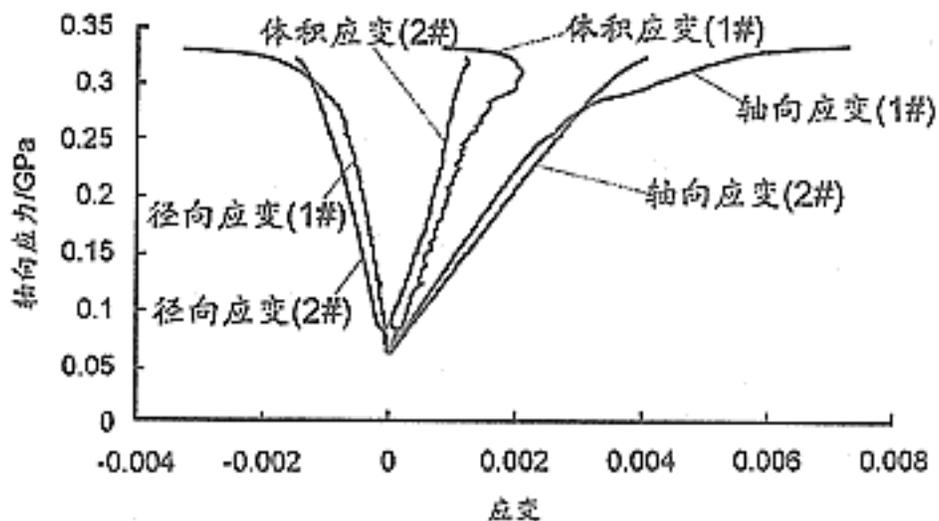


图1 白云岩岩样加孔隙压力时轴向应力与应变曲线

Fig.1 Stress/strain curves of dolomite samples with pore pressure

1#岩样：围压/70MPa，温度/80℃，孔压/45MPa，加载速率/16.3MPa/min；2#岩样：围压/70MPa，温度/80℃，孔压/45MPa，加载速率/16.8MPa/min

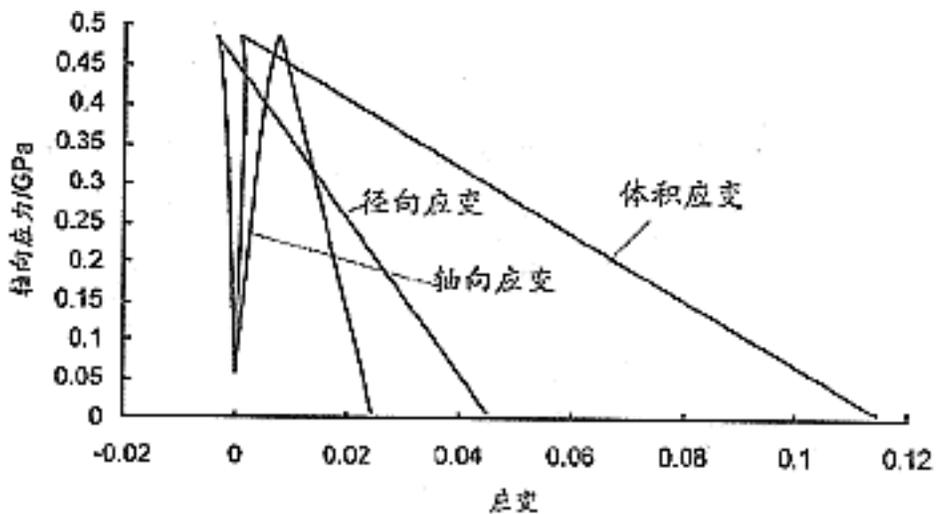


图2 白云岩岩样(3#)未加孔隙压力时的
轴向应力/应变曲线

Fig.2 Stress/strain curves of dolomite
samples(No.3) without pore pressure

围压/42.5MPa; 温度/80 ; 加载速率/16.8MPa/min

从应力/应变关系曲线看,岩性相同或不同的岩样,在变形过程中,裂缝压实阶段、弹性变形阶段和塑性流动阶段三者之间无明显界线,且弹性变形阶段内,应力与应变的关系是一条曲线。MTS分析软件依据ISRM的观点认为:岩样长度减小,对应的轴向应变为正;岩样直径增大,对应的径向应变为负;体积应变 = 轴向应变 + 2 × 径向应变,则体积应变曲线进入负应变区域对应着岩样体积增大。试验表明,对于弹性模量和泊松比为常量的岩样,其体积应变曲线在弹性变形阶段内随应力增加而呈线性减少^[2]。该理论可作为判定岩样弹性阶段的依据。岩样试验结果见表1。

我们对不同岩性试验岩样的应力/应变曲线进行分析后发现,对于致密的灰岩、白云岩等岩样,虽然弹性模量、泊松比不为常量,但在扩容阶段前,体积应变呈线性减少;而不同试验条件下进行的砂岩岩样试验,仅在变形的初期体积应变呈线性减少,在弹性变形阶段(常规分析使用的范围:25% ~ 75%)出现随应力增加,岩样体积几乎没有变化或已进入扩容阶段,即试样体积大幅度增加,且增长率越来越大(图3)。

表1 岩样试验分析数据
Table 1 Test data analytical sheet

岩 心 数 据				实 验 条 件				实 验 结 果		
岩样尺寸 D × L/cm	取心井段 (m)	孔隙度 (%)	渗透率 (10 ⁻³ μ m ²)	上覆压力 (MPa)	围压 (MPa)	孔压 (MPa)	温度 ()	弹性模量 (GPa)	泊松比	抗压强度 (GPa)
2.457 × 6.209	5005.80 ~ 5005.90	5.34	1.0 × 10 ⁻²	59	42.5	未加	80	66.51	0.340	0.4859
2.500 × 6.024	4999.23 ~ 4999.30	1.74	2.55 × 10 ⁻¹	59	70	45	80	77.37	0.253	0.3298
2.456 × 5.571	5005.40 ~ 5005.80	6.04	5.75 × 10 ⁻³	59	70	45	80	70.75	0.298	0.3208

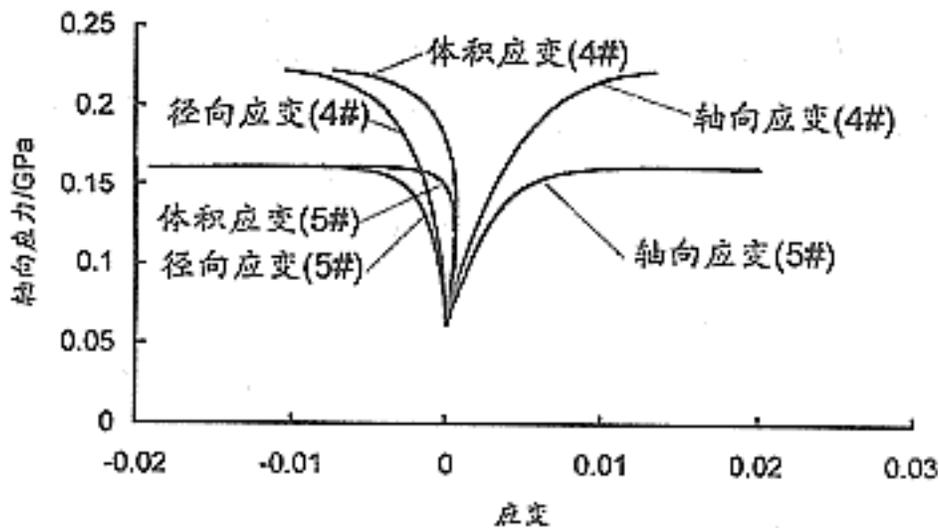


图3 砂岩在不同试验条件下的轴向应力/应变曲线

Fig.3 Stress/strain curves of sandstone at various conditions

4#岩样：围压/60MPa，温度/65，加载速率/17.1MPa/min；

5#岩样：围压/53.8MPa，温度/60，加载速率/4.1MPa/min

由于应力/应变曲线反映的是岩样在三轴条件下,轴向加载直至破裂期间,整个应力范围内应力和应变的关系,该曲线在弹性限内并无唯一的弹性模量及泊松比。因此,应针对要研究的应力范围作出一条最合适的直线。对水力压裂应用来说,在压裂过程中产生的压力只是稍微比原地应力(或围限压力)高些,所以,初始切线模量及泊松比也许更能代表压裂设计所需的模量及泊松比[1]。

在试验系统达到试验初始条件(埋藏深度处的上覆压力、围压、孔隙压力、温度)时,岩样内部的微裂缝并未完全闭合,只有当轴向连续加载至一定阶段时,裂缝完全压实,岩样开始进入连续变形阶段。在裂缝压实阶段,由于内部裂缝的不规律性,某一区域裂缝压实后,另一区域的裂缝仍然维持张开;有的岩样在压实阶段裂缝在应力/应变曲线上占有近1/2的区域(图4)。因此,在压裂酸化施工设计时,如果选用初始切线模量/泊松比应该十分谨慎。

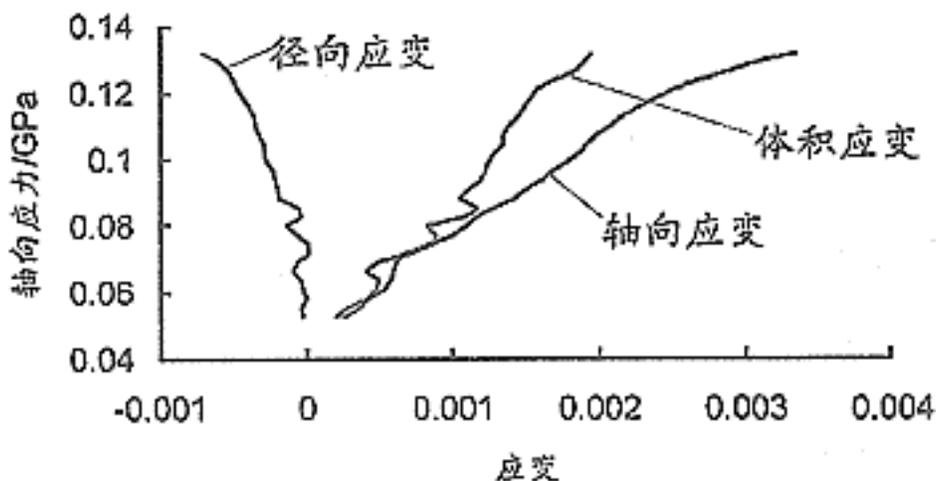


图4 灰岩岩样(6#)内部微裂缝较发育时的轴向应力/应变曲线

Fig.4 Stress/strain curves of limestone (No.6) when its interior micro-fracture is comparatively development

影响试验结果的几个主要问题:(1)是三轴等围压试验机忽略了中间主应力对岩石性质的影响;(2)是岩样的加工精度。如果岩样端面平整度差,将增大岩样表面与夹持端盖表面间的摩擦力,使岩样表面不但受轴向载荷,而且有剪应力。因此受力面不再是主平面,所施加的轴向力也不是主应力^[2];另外,岩样侧面的垂直度差,使岩样在垂直方向受剪切,上述因素也容易造成包裹岩样的热缩橡胶破裂;(3)是孔隙流体的饱和问题。由于岩样内部裂缝分布不规律,即使当出口端有孔隙流体渗出时,也无法确定孔隙流体对裂缝的覆盖率;(4)是热缩橡胶的破裂问题。由于三轴试验是在密闭的压力室内进行,无法观测试验过程中的岩样情况。如果热缩橡胶破裂,围向液压油将渗入岩样,试验结果将受到较大影响。

3 讨论

天然储藏状态下,岩石结构中的层理、节理或裂隙,都是岩石中的薄弱面。它们的存在,大大削弱了岩石的坚固性^[3]。由于试验机理基于岩样是线弹性的,认为是不含弱面的完整岩样,因此,试验结果会与受弱面影响的油气产层岩石性质有一定的差异。另外,岩样在等围压三轴试验仪上的破裂机理不同于压裂施工中岩石的破裂机理,现阶段还没有开展对压裂施工中压开裂缝所需的破裂压力、裂缝延伸压力、裂缝的形态及方位进行研究。

在压裂施工中,所有裂缝几何参数都受应力状态和岩石性质的影响或控制,国内外许多研究人员对二者的相对重要性进行了研究。Hubbert和Wills指出^[1],只有在三个主应力近乎相等的条件下,岩石结构才可能是控制裂缝增长的主要因素;Perkins和Kern, Harrison等人提出^[1],储层与边界层之间的应力差对遇到裂缝扩展有着重要的影响,他们的观点得到了理论、实践以及现场数据的支持。这些都表明地应力是控制裂缝高度的最重要的因素^[1]。因此,油气层和边界层原地应力研究应是压裂机理研究的重点。如果能利用现有设备能力,在室内模拟压裂施工过程,则对地应力研究、压裂施工都将有直接的指导意义。

此文在编写过程中,得到李联奎、杨川东同志的指导,在此一并致谢。

作者简介:曾立新(1966-),男,工程师,现从事油气开采研究工作。

作者单位:四川石油管理局钻采工艺技术研究院采气工艺研究所,四川广汉 618300

参考文献

- [1] [美] J.L. 吉德利著.水力压裂技术新发展 [M]. 蒋 阗, 单文文译.北京:石油工业出版社,1995.
- [2] 高 磊.矿山岩石力学(上册) [M]. 西安:西安冶金建筑学院,1983.

[3] 陶颂霖.爆破工程 [M] .北京 : 冶金工业出版社,1979.

收稿日期 : 1998-05-16