

川西新场气田沙二段致密砂岩储层岩石力学性质^{*}

周文¹ 高雅琴¹ 单钰铭¹ 王世泽² 陶莹¹

(1.“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·成都理工大学 2.中国石化西南油气分公司工程技术研究院)

周文等.川西新场气田沙二段致密砂岩储层岩石力学性质.天然气工业,2008,28(2):34-37.

摘要 对川西新场地区侏罗系沙溪庙组二段致密储层样品所进行的岩石力学实验结果表明,岩石抗张及抗压强度随着岩石密度的增加而增大、岩石孔隙度的增加而减小,且随着岩石粒度的增加,抗张强度减小、抗压强度增大;砂岩的弹性模量明显高于泥岩,且随着岩石密度的增加而增加、孔隙度的增加而减小。与常温常压下相比,模拟地层条件下沙溪庙组泥岩饱和介质为气体时,抗压强度高3.2倍,弹性模量低2.35倍,泊松比高2倍;当砂岩饱和介质为水时,与饱和气体介质的砂岩相比,强度及弹性模量均降低,泊松比增大。这说明水介质对岩石有“软化效应”。进而在实验研究的基础上,应用测井、压裂资料计算了地层的岩石力学参数,通过对三种方法所得结果的对比分析,评价了地层条件下岩石力学参数,由此获得了较为合理、可信的地层岩石力学参数剖面。

关键词 新场气田 侏罗纪 致密砂岩 储集层 岩石力学性质 实验室试验 参数

岩石力学性质及其参数特征是进行油气井钻探设计、制定储层改造措施和方案设计的重要依据。目前,研究岩石力学性质参数的方法主要有3种:一是在实验室对岩样进行实测;二是用地球物理测井资料求取岩石力学参数^[1];三是水力压裂法计算^[2]。沙溪庙组气藏是川西新场气田的主力气藏,但该气藏存在储量动用程度不均、储产比不协调、气层单井自然产能低等问题。为此,基于川西新场气田沙溪庙组二段气藏实际开发状况,进行常温常压和模拟地层条件下的岩石力学试验,并以此为基础结合测井、压裂资料对岩石力学参数剖面进行计算,系统深入地研究了储层静、动态岩石力学特征,探讨了影响岩石力学性质的地质因素,以期为研究区气藏致密储层压裂改造措施的方案设计及工艺实施提供岩石力学性质方面的科学依据。

一、研究方法

1. 实验室试验法

(1) 单轴试验

1) 抗张试验

岩石抗张强度是岩样在单轴拉伸条件下达到破坏时的极限应力。利用巴西劈裂试验可以求取岩石的抗张强度。

2) 压缩试验

根据不同性质的岩石分别用环向应变、轴向应变、力、位移以及组合控制方式进行试验,由试验获得岩石在单轴加载条件下的应力—应变关系计算出相应的极限抗压强度、杨氏模量、泊松比。

(2) 三轴应力测试

三轴应力试验即是通过特殊的加载模式,模拟出深部地层的三向应力状态,即在水平的2个主应力方向上施加相等液体围压、纵向上单独施加机械的轴向压力的条件下进行岩石力学试验。成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室配备的“MTS岩石物理参数测试系统”可以在模拟地层条件(温度、压力、流体等)下,得到岩样测试数据并绘制出应力—应变曲线(图1),求取杨氏弹性模量、泊松比、抗压强度、内聚力和内摩擦角等岩石力学参数。

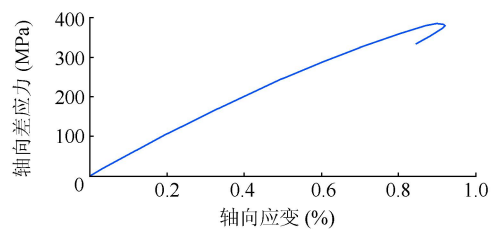


图1 三轴条件下岩样的应力—应变曲线图

^{*} 本文为国家“十五”科技攻关项目(编号:2001BA605A-05-02-04)部分成果。

作者简介:周文,1962年生,教授;研究方向为油气藏工程地质评价。地址:(610059)四川省成都市十里店成都理工大学能源学院。电话:(028)84078352。E-mail:zhouw62@cdut.edu.cn

2. 测井法

声波测井、密度测井及井径测井与岩石力学参数有着极为密切的关系^[3]。常规补偿声波测井可测得声波在岩石传播的纵波时差(Δt_p),岩石的横波时差(Δt_s)一般可以从全波测井中获得。但实际上很多油气井都没有进行全波测井,而只有补偿声波测井。为此,可利用常规纵波时差进行转换:

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t_p}{\left[1 - 1.15 \frac{(1/\rho) + (1/\rho)^3}{e^{1/t_p}}\right]^{3/2}} \quad (1)$$

此外,根据泥(页)岩的体积密度随深度的增加而增大的变化曲线,可得到泥岩的 $\Delta t_s/\Delta t_p$ 与密度(ρ_h)的关系式:

$$\Delta t_s/\Delta t_p = A - 0.8(\rho_h - 2.2)/(2.65 - 2.2) \quad (2)$$

$$A = \begin{cases} 2.5(\rho_h \leq 2.2 \text{ g/cm}^3) \\ 1.7(\rho_h \geq 2.65 \text{ g/cm}^3) \end{cases}$$

式中: ρ 表示岩石体积密度, g/cm^3 ; Δt_s 表示横波时差, $\mu\text{s/ft}$; Δt_p 表示纵波时差, $\mu\text{s/ft}$; ρ_h 表示泥岩的密度, g/cm^3 。

依据式(1)、(2),利用测井资料即可计算地层的泊松比、杨氏模量、剪切模量、体积模量值^[2]。

3. 水力压裂法

通过水力压裂施工压力—时间曲线,读取特征压力点值,根据岩石破裂准则,通过计算可以获得地层条件下岩石的抗张强度和三轴地应力值^[4]。

二、岩石力学性质及特征

基于上述岩石力学性质研究方法,通过16口取心井56个岩样测试、测井及压裂等资料,分别研究了常温常压条件下及模拟地层条件下(温度为70℃,有效围压为13~23 MPa)的地层岩石力学性质特征,探讨了影响岩石力学性质的地质因素,在岩心、压裂资料校正测井法计算结果的基础上,得到连续地层岩石力学剖面,结合压后测试资料对岩石力学剖面在压裂选层及效果预测方面进行了探讨。

1. 实验室测试结果分析

(1) 岩石密度、抗张及抗压强度

常温、常压条件下沙二段气藏致密砂岩储层抗张强度在2.0~5.0 MPa之间,平均3.21 MPa,抗压强度在31.50~68.1 MPa之间,平均42.62 MPa,随着岩石密度的增加,抗张、抗压强度均呈现增加的规律(图2),且泥岩和砂岩抗压强度均随着岩石孔隙度的增大而减小(图3)。

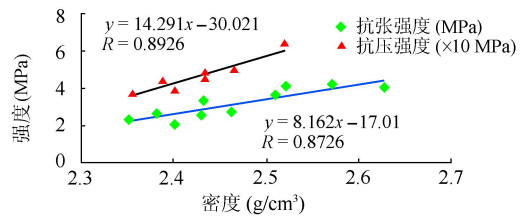


图2 岩心测试密度与抗张、抗压强度关系图

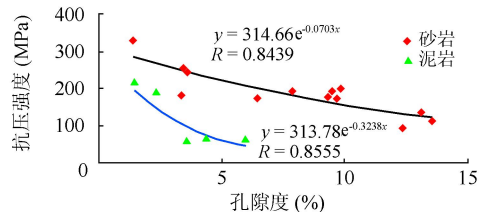


图3 不同岩性孔隙度与抗压强度关系图

从岩性来看,泥岩平均抗张强度为3.55 MPa、粉砂岩为3.35 MPa、细砂岩为3.18 MPa;泥岩平均抗压强度为38.4 MPa、粉砂岩为39.95 MPa、细砂岩为44.66 MPa。整体表现为随着岩石粒度的增加,抗张强度减小、抗压强度增大的趋势(图4)。

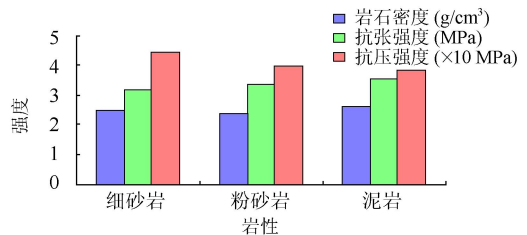


图4 岩性与抗张、抗压强度关系图

此外,模拟地层条件下沙溪庙组泥岩在饱和介质为气体时,抗压强度范围在61.77~218.62 MPa之间,平均值为124 MPa,比常温、常压下高3.2倍。

(2) 弹性模量、泊松比

常温、常压条件下测试结果表明砂岩泊松比在0.1~0.14之间,平均为0.12;弹性模量在 $6.19 \times 10^3 \sim 13.79 \times 10^3$ MPa之间,平均为 7.85×10^3 MPa。从岩性来看,砂岩的弹性模量明显高于泥岩,并且呈现出随岩石密度的增加而增加(图5)、随孔隙度的增加而减小的趋势(图6)。

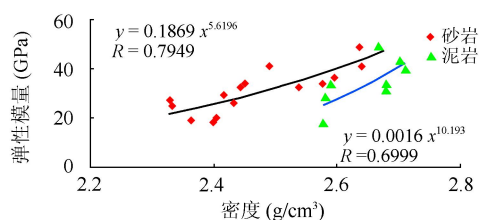


图5 不同岩性岩石密度与弹性模量关系图

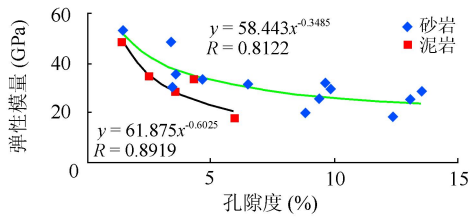


图6 不同岩性孔隙度与弹性模量关系图

模拟地层条件下泥岩弹性模量分布范围在 17.81~48.96 GPa 之间,平均值为 33.47 GPa,比常温、常压下低;泊松比值分布在 0.202~0.292,平均值为 0.239,比常温、常压下高 2 倍,说明地层条件下泥岩的塑性增强。对于砂岩,在饱和介质为气体时,抗压强度主要在 114.18~328.83 MPa 之间,平均值为 201.95 MPa;弹性模量在 25.96~53.27 GPa 之间,平均值为 33.82 GPa;泊松比值在 0.111~0.162,平均值为 0.13。与饱和相同流体介质的泥岩比较,砂岩抗压强度高得多,泊松比值则比泥岩小一半,但弹性模量平均值有所降低。当砂岩在饱和介质为水时,抗压强度主要在 50.04~254.05 MPa 之间,平均值为 135.92 MPa;弹性模量在 18.68~48.51 GPa 之间,平均值为 29.61 GPa;泊松比值在 0.208~0.327,平均值为 0.27。与饱和气体介质的砂岩相比,砂岩饱和水后,抗压强度及弹性模量均降低,泊松比增大,说明水介质对岩石有“软化效应”。

(3)内聚力、内摩擦角

沙溪庙组砂岩的内聚力主要分布在 6.25~25.36 MPa,平均为 12.20 MPa;内摩擦角大小在 21.67°~56.04°之间,平均 44.18°。

2. 结果对比分析

(1)岩心与测井

岩心测试所得的静力学参数与测井法得到的动力学参数通常都有明显差异^[5,6]。根据测井资料计算得到的岩石力学参数与岩心测试结果对比表明,泊松比值一般是岩心测定值的 1.82 倍、是弹性模量值的 1.58 倍(图 7)。原因是测井计算结果应为地层条件下的岩石(岩体)力学参数的近似值,而实验室

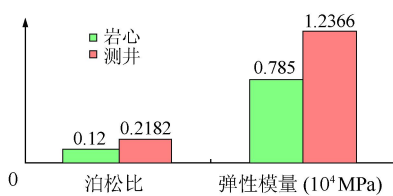


图7 岩心与测井测试结果对比图

测定值是岩石在常温、常压下的值,而在地层条件下,岩石塑性变强,泊松比和弹性模量都将会增大。

(2)岩心与压裂

利用岩心测试抗张强度(E_t)与压裂资料求取的地层条件下岩石抗张强度值(E_{tp})对比表明,压裂资料求取值平均为 8.71 MPa,与岩心测定结果值比(E_{tp}/E_t)为 2.71。压裂资料计算值比实验值大近 3 倍。由于实验室测试得到的是岩心的力学参数,压裂法计算的是岩体的力学参数,而岩体相对于岩心非均质性较强,故压裂法更接近于地层实际。

(3)压裂与测井

将压裂施工曲线资料求取的岩石抗张强度及三轴主地应力值与测井解释结果进行对比,由于压裂法计算的岩石力学参数为近地层条件下的值。因此以压裂法校正测井法,继而得到连续地层岩石力学剖面,为压裂选层提供参考。

相近条件下,压裂气层所处应力剖面位置不同,压裂效果差别很大。如果压裂气层处在低应力区,裂缝高度都将受隔层的遮挡作用,限制在低应力区内,而且气层在支撑缝中,压裂效果好。而当气层处在高低应力区交界处,高低应力区应力差较大时,裂缝高度在低应力区内,且气层在低应力区部分易压开,气层在高应力区部分不易压开,因而裂缝高度将首先在低应力区内,当气层在低应力区的下部时,压开的气层部分将在支撑剖面的下部,会有一定的增产效果;当气层在低应力区的上部时,压开的气层部分将在支撑剖面的上部,就不会有什么增产效果。如图 8-A 气层处于低应力区,压后稳定产气量达 $9.2854 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,增加产能 $11.3981 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;图 8-B 气层处于高低应力交界处,压后稳定产气量为 $1.3291 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,增产效果不理想。

三、结论与认识

通过对川西新场气田沙二段气藏地层岩石力学性质及其特征、影响因素、压裂选层及效果预测等的分析研究,得到了如下结论与认识。

(1)常温常压下,岩石抗张及抗压强度随着岩石密度的增加而增大,随着岩石孔隙度的增加而减小,并且随着岩石粒度的增加,抗张强度减小、抗压强度增大。砂岩的弹性模量明显高于泥岩,且随岩石密度的增加而增加、随孔隙度的增加而减小。

(2)模拟地层条件下沙溪庙组泥岩饱和介质为气体时,抗压强度比常温常压下高 3.2 倍,弹性模量比常温常压下低,泊松比比常温常压下高 2 倍,表明

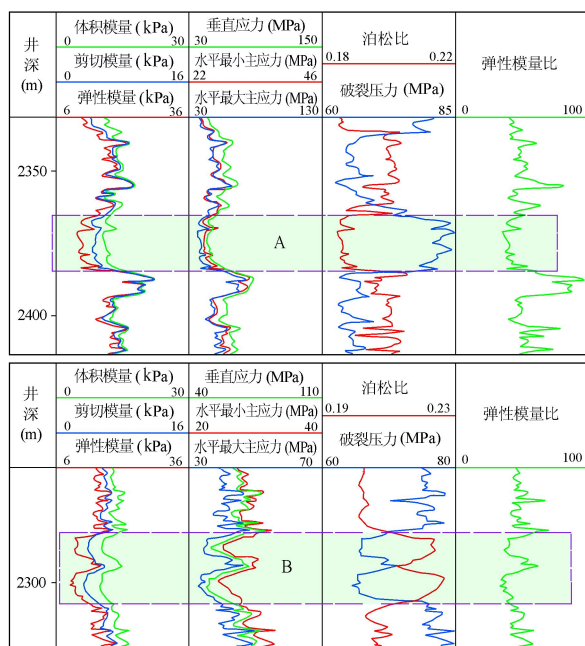


图8 地应力剖面与压裂选层关系图

地层条件下泥岩的塑性增强。对于砂岩,与饱和相同流体介质的泥岩比较,其抗压强度相对较高,泊松比则比泥岩小一半,弹性模量也有所降低。当砂岩饱和介质为水时,与饱和气体介质的砂岩相比,强度及弹性模量均降低,泊松比增大,表明水介质对岩石

有“软化效应”。

(3)在岩心测试及压裂计算校正测井法计算岩石力学参数的基础上,可获得连续地层岩石力学参数剖面。现场测试资料表明,岩石力学剖面特征在压裂选层方面具有重要的参考价值。

(4)该研究成果已应用于川西地区致密砂岩气藏开发,并取得了良好的现场效果。

参 考 文 献

- [1] 路保平,鲍洪志.岩石力学参数求取方法进展[J].石油勘探技术,2005,33(5):44-47.
- [2] 周文.裂缝性油气储层评价方法[M].成都:四川科学技术出版社,1998.
- [3] 楼一珊.利用声波测井计算岩石的力学参数[J].探矿工程,1998(3):47-48.
- [4] 蒋廷学,汪永利,丁云宏,等.由地面压裂施工压力资料反求储层岩石力学参数[J].岩石力学与工程学报,2004,23(14):2424-2429.
- [5] 曾立新.白马松华地区岩石动静参数的变化规律及相互关系[J].钻采工艺,2001,24(2):22-24.
- [6] 李志明.地应力与油层改造方案[J].石油钻采工艺,1998,20(6):47-52.

(修改回稿日期 2007-11-27 编辑 居维清)