

文章编号: 1001-1986(2007)03-0032-04

# 深埋泥岩地层的最小主应力测定方法探讨

张 林<sup>1,2</sup>, 刘池洋<sup>1</sup>, 赵 勇<sup>2</sup>, 楼一珊<sup>3</sup>, 吴增智<sup>2</sup>, 孙 虎<sup>2</sup>

(1. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西北大学含油气盆地研究所, 陕西 西安 710069;  
2. 长庆石油勘探局工程技术研究院, 陕西 西安 710021; 3. 江汉石油学院, 湖北 荆州 434000)

**摘要:** 结合理论分析与实际资料统计, 根据泥岩地层在水力压裂垂直裂缝剖面中所占的比例大小和瞬时停泵压力的变化趋势, 获得了鄂尔多斯盆地西峰地区长 8 层(2 100 m)和靖边地区盒 8 地层(3 000 m)的泥岩最小主应力, 这可为油气钻采、压裂设计以及测井、地震资料解释提供参考依据。间接证据表明, 利用该方法求取的泥岩地层地应力更符合实际情况。

**关键词:** 泥岩地层; 最小主应力; 瞬时停泵压力

**中图分类号:** P618.11; TD311 **文献标识码:** A

## Investigation of minimum principal stresses within deeply buried mudstone strata

ZHANG Lin<sup>1,2</sup>, LIU Chi-yang<sup>1</sup>, ZHAO Yong<sup>2</sup>, LOU Yi-shan<sup>3</sup>, WU Zeng-zhi<sup>2</sup>, SUN Hu<sup>2</sup>

(1. National Key Laboratory for Continental Dynamics, Oil-gas-bearing Basin Institute in NorthWest University, Xi'an 710069, China; 2. ChangQing Petroleum Exploring Bureau, Xi'an 710021, China;  
3. Yangtze University, Jingzhou 434000, China)

**Abstract:** A new method has been introduced, based on theoretical analysis and actual data analysis. By analyzing percentage of mudstone in the hydraulic fracture profile and statistical trend that ISIP changes among selected wells, minimum principal stress inside buried mudstone strata(layers of Chang 8 at 2 100 m, Xifeng oil field and He 8 at 3 000 m, Jinbian gas field in Ordos Basin, China, are cited respectively) can be obtained. Final results indicated that the new way is more appropriate.

**Key words:** mudstone strata; minimum principal stress; ISIP

泥岩是地层剖面的主要组成部分, 也是水力压裂改造施工中的主要隔层。弄清泥岩地层的最小主应力, 对油气钻采工程、压裂设计以及测井、地震资料解释都具有重要的意义。

由于泥岩的内在结构特点, 决定了其在围压下易于塑性变形的特性<sup>[1-3]</sup>(钙质、硅质等非粘土矿物胶结的泥岩除外<sup>[2]</sup>)。正是由于这一特征, 使深埋地层条件下的泥岩呈近似水静力平衡状态<sup>[4]</sup>, 其地应

收稿日期: 2006-11-20

作者简介: 张 林(1970—), 男, 甘肃会宁人, 博士研究生, 长期从事试油压裂工作。

区煤层气资源量, 绝大部分赋存于 1 000 m 深度以浅, 煤层埋深 1 500~2 000 m 的资源量只占很少比例, 这有利于对资源的开发利用。

## 3 结论

运用煤层气含量(体积)法和损失分析法, 首次计算了我国褐煤主要分布区(包括海拉尔盆地群、二连盆地群、依兰—伊通裂谷、敦化—梅河盆地、辽河拗陷、黄县盆地、昭通地区、百色盆地)的煤层气资源量。结果显示, 煤层气原地资源量和技术可采资源量分别为  $13\,954.65 \times 10^8 \text{ m}^3$  和  $7\,408.55 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

通过对全国褐煤分布区煤层气地质条件的系统分析研究, 结合“全国煤层气资源评价”<sup>[3]</sup>成果, 可完整地预测出我国陆上煤田(包括褐煤、烟煤、无烟煤 3 号和无烟煤 2 号)埋深 2 000 m 以浅的煤层气原地

资源量为  $32.86 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 从而完善了我国煤层气资源量预测成果。

致谢

本项目在执行过程中, 得到中国石油天然气股份有限公司石油勘探开发研究院、大雁煤业公司、扎莱诺尔煤业公司和中国煤炭地质总局等单位的协助和支持, 在此, 对相关单位、领导和专家们的帮助表示衷心的感谢!

## 参考文献

- [1] 毛节华, 许惠龙. 中国煤炭资源预测与评价[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [2] 张新民, 韩宝山, 李建武. 褐煤煤层气储集特征及气含量确定方法[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(3): 28—30
- [3] 张新民, 庄军, 张遂安. 中国煤层气地质与资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

力值也普遍大于具有较高强度的邻近砂岩地层。

## 1 现有地应力测量方法的局限性

目前, 对于埋藏几千 m 的地层而言, 常用的岩石地应力测量方法<sup>[5-11]</sup>主要有以下几种:

**声发射凯塞尔效应法** 该方法是通过岩石中微破裂面的响应来还原岩石遭受过的最大应力。从测量原理看, 该方法对构造历史比较简单的砂岩等弹性材料具科学性, 但对泥岩等围压下呈塑性的岩石来说, 存在以下不足:**a.** 泥岩在地下进入塑性屈服后, 成为一个连续的变形过程, 很难形成微破裂面并保存下来;**b.** 泥岩岩心随应力释放, 体内的高压水分等膨胀蒸发, 容易使泥岩改变力学性质, 并产生内部裂缝, 这对采样以及分析造成了许多困难。

**长源距测井资料算法** 这是一种间接方法, 目前计算模型还不尽完善, 需要借助其他方法求取常数项, 其准确性往往取决于人们对地应力的认识程度。

**小型测试压裂法** 水力压裂被认为是目前唯一可靠的测量一定深度地应力的方法<sup>[4]</sup>。它是通过向井内泵入少量低粘度液体使地层破裂, 然后停泵测瞬时停泵压力(读取时要注意排除液柱弹性能与岩石弹性能的影响), 此值即被认为是最小地应力。

这种方法在测量厚层砂岩的最小主应力方面比较成熟, 但鲜见针对泥岩地层进行小型压裂测试的例子。这主要是因为泥岩地应力高, 属非渗透层, 起裂时的裂缝系统复杂, 压裂时破裂压力高, 施工要求高, 而且泥岩压裂也缺乏经济上的回报。

## 2 泥岩地层最小主应力的测定方法

### 2.1 理论分析

相对于小型测试压裂, 常规水力压裂一般形成了主导的裂缝系统。因此, *ISIP* 数据更加稳定和有意义<sup>[4, 12-13]</sup>。在常规水力压裂过程中, 如果砂岩不太厚, 裂缝在垂向延伸过程中必然要突破砂岩的界限, 进入相邻的高应力泥岩隔层。停泵后, 缝内液体上承受的瞬时停泵压力 *ISIP* 也必然受砂、泥岩最小主应力的综合影响。随着压后时间的延伸和缝内液体的滤失, 高地应力的泥岩首先闭合, 低应力的砂岩稍后闭合, 这是一个逐渐完成的不均衡过程, 也是一个压力逐渐降低的过程, 可在压裂施工曲线上清楚地看出(图 1)。由此可知, 压降过程中监测到的 *ISIP* 是砂、泥岩最小主应力的综合反映。如果砂岩层厚度逐渐变薄或裂缝高度增大, 则随泥岩在裂缝中所占比例的增大, *ISIP* 将越能代表泥岩的最小主

应力。假设砂岩厚度变薄为 0, 则 *ISIP* 反映的就是泥岩的最小主应力。所以, 利用常规压裂的 *ISIP* 值可推断泥岩地层的最小主应力。

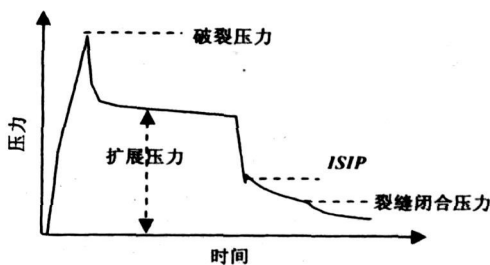


图 1 典型压裂施工曲线示意图<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Typical hydraulic fracturing curve

为了说明泥岩隔层对瞬时停泵压力 *ISIP* 的贡献, 可引入如下数学解释: 假设砂岩顶、底界的泥岩地应力相等(图 2), Simonson 等人给出了单个方程<sup>[14]</sup>:

$$\frac{\sigma_2 - p}{\sigma_2 - \sigma_1} = -\frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left( \frac{h/2}{h + h_s} \right) + \frac{K_{ic}}{\sqrt{\pi(h/2 + h_s)(\sigma_2 - \sigma_1)}}$$

式中  $p$  为缝内压力;  $h$  为砂层厚度;  $h_s$  为裂缝突入泥岩的厚度;  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  分别为砂岩和泥岩的最小主应力;  $K_{ic}$  为应力强度因子。根据以上公式可推出: 在同一  $K_{ic}$  下,  $\frac{\sigma_2 - p}{\sigma_2 - \sigma_1}$  与  $h_s/h$  成正相关关系<sup>[1]</sup>。这意味着, 在  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  恒定、 $p$  保持稳定或增大的情况下, 随砂层厚度  $h$  的减小, 裂缝突入泥岩的厚度  $h_s$  必然要增大。

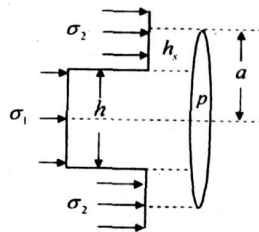


图 2 应力分层介质中的裂缝

Fig. 2 Fractures within different stress layers

Cleary<sup>[15]</sup> 给出了裂缝垂向增长和侧向延伸关系的时间常数模型。从该模型可以得出, 在  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  和  $h$  恒定,  $p$  稳定的情况下, 随水力压裂裂缝长度的增加, 裂缝高度相应增加, 裂缝突入高应力隔层的程度也相应增加, 如下式所示:

$$\frac{dL}{da} \propto \left( \frac{\tau_c^H}{\tau_c^L} \right)^{n'} = \left( \frac{\gamma_2 p - \sigma_1}{\Gamma_2 p - \sigma_2} \right)^{n'+2}$$

式中  $a$  为裂缝高度,  $\tau_c^H$ 、 $\tau_c^L$  分别为高度和长度增长的函数, 相当于  $\frac{dL}{da}$ ;  $\Gamma_2$ 、 $\gamma_2$  为 Cleary 模型参数;  $p$  为缝内压力;  $n'$  为幂率液体的流动稠度指数。

以上两种情况都会造成泥岩在裂缝剖面中所占的比例增大,这一点在施工实践中已得到认同。所以,可从以下两种情形进行研究:

a.  $\sigma_2 - \sigma_1$  保持恒定,施工参数不变,但砂层厚度  $h$  变小。由于砂层厚度变薄,受高围压的影响,裂缝必然变窄,缝内压力升高,反过来就造成裂缝进入泥岩的厚度  $h_s$  增大的趋势(图 3)。

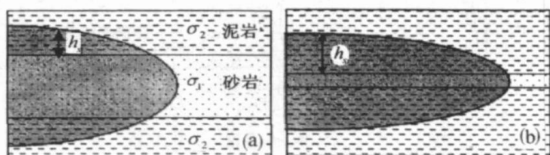


图 3 随砂层厚度变薄裂缝在泥岩中的比例增长情况

Fig. 3 Fracture proportion in mudstone increases as sandstone thickness thins

a——砂层变薄前;b——砂层变薄后

b.  $\sigma_2 - \sigma_1$  和砂层厚度  $h$  保持不变,但压裂液量增加(实际情形下,一般随液量增大,排量也相应增大),裂缝高度  $a$  增加,裂缝进入泥岩的厚度  $h_s$  也相应增加(图 4)。

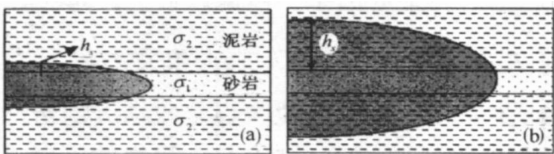


图 4 随液量增大裂缝在泥岩中的比例增长情况

Fig. 4 Fracture proportion in mudstone increases as fracturing fluid volume increases

a——压裂液量增大前;b——压裂液量增大后

## 2.2 实例剖析

目前,大部分低渗透油、气田都积累了非常丰富的水力压裂资料,这为按照前面两个假设进行选井选层提供了可能。井层选取要从地层和施工两方面入手:

a. 对地层来说,不管砂岩层厚薄,选择块状泥岩中夹整段均质砂岩为最佳层。应避开多层或韵律层,以免受到复合层效应的干扰。并选择同一地区同一层段(区域地应力相近)、砂岩的泥质含量相近(岩性及力学性质相近)的井层。

b. 从施工角度而言,要选择同一时期完成的压裂施工井进行研究,因为这些井具有类似的压裂液参数、施工规范与数据监测系统。

### 2.2.1 砂层厚度变薄情况

以长庆油田西峰地区 2005—2006 年压裂井为例,通过统计压裂地层——延长组长 8 层(平均埋深 2 100 m)与压裂施工参数(除厚度外,其他参数尽量

接近),选取砂岩泥质质量分数为 6%~8%、压裂施工排量为 1.8~2.0 m<sup>3</sup>/min、液量为 95~120 m<sup>3</sup> 的井层,绘制了砂层厚度与停泵压力 ISIP 的关系图(图 5)。从图中可以看出,随砂层厚度减小,ISIP 值增大,沿着数据变化的趋势,减小砂层厚度为 0,则纯泥岩地层的 ISIP 大约为 22 MPa,纯砂岩的 ISIP 为 12 MPa,加上静水柱压力,则泥岩和砂岩地层的最小主应力分别为 43 MPa、33 MPa,二者之差在 10 MPa 以上。

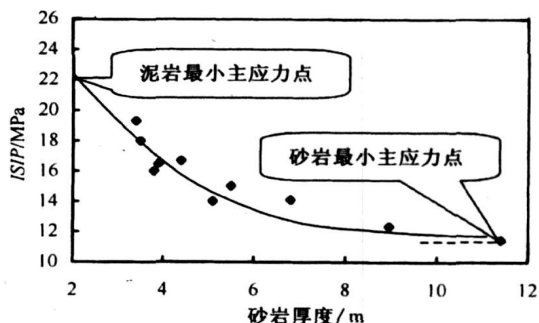


图 5 西峰地区长 8 层砂岩厚度与停泵压力 ISIP 的关系

Fig. 5 Relation between sandstone thickness and ISIP of Chang 8 in Xifeng area

类似地,还研究了长庆油田靖边地区石盒子组盒 8 层(埋深 3 000 m 左右)砂岩厚度与停泵压力 ISIP 的关系。研究结果显示,泥岩的最小主应力为 68 MPa 左右,而砂岩的最小主应力为 52 MPa 以下,二者之差在 16 MPa 以上。

### 2.2.2 压裂液量增大情况

同样以长庆油田西峰地区 2005—2006 年压裂井为例,通过统计压裂地层——延长组长 8 层(平均埋深 2 100 m)与压裂施工参数(除液量外,其他参数尽量接近),选取砂层厚度 2.8~3.5 m、砂岩泥质质量分数为 5%~8%、压裂施工液量 40~100 m<sup>3</sup>、排量为 1.8~2.1 m<sup>3</sup>/min 的井层,绘制了液量与停泵压力 ISIP 之间的关系图(图 6)。由图可看出,随液量增

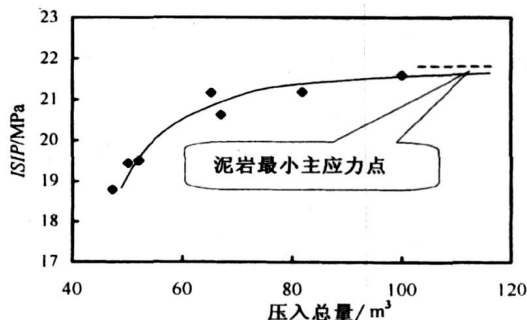


图 6 西峰地区长 8 层压裂液量与停泵压力 ISIP 关系

Fig. 6 Relationship between fracturing fluid volume and ISIP of layer Chang 8 in Xifeng area

表 1 3 种方法测定地应力的结果比较

MPa

Table 1 Minimal stress of mudstone obtained by 3 different methods

地点、层位、埋深	岩性	长源距测井法测定 结果(平均值(井数))	声发射凯塞尔效应法测定 结果(平均值(样品数))	瞬时停泵压力法 测定结果
鄂尔多斯盆地西峰地区	砂岩	32.6(1)	33.5(7)	33.0
长 8 层 埋深约 2 100 m	泥岩	39.4(1)	40.0(2)	43.0
鄂尔多斯盆地靖边地区	砂岩	51.6(2)	50.1(3)	52.0
盒 8 层 埋深约 3 000 m	泥岩	60.2(2)	61.4(2)	68.0

加, *ISIP* 增大, 但变化的趋势减缓, 极限也在 22 MPa 之内(加上静水柱压力为 43 MPa 左右)。

2.3 结果分析

如同绝对零温度的外推确定一样, *ISIP* 资料统计法对泥岩的地应力也是由外推得到的。目前, 由于缺乏测量深埋泥岩地应力的其他手段, 无法对上述结果的准确性进行直接验证。但是, 可以通过其他方法进行间接验证。

钻井过程中的泥岩段井眼崩塌、井径扩大, 薄层压裂过程中的高施工压力, 油水井套管在地下泥岩段的损坏变形等, 这些都说明了地下深埋泥岩的塑性特征, 也同样反映了其高应力特征。

表 1 是长源距测井、声发射凯塞尔效应及本方法求取的砂泥岩最小主应力的结果比较。可以看出, 对砂岩而言, 3 种方法的测量结果比较接近, 但对于泥岩, 瞬时停泵压力 *ISIP* 法得到的地应力值要比前两种方法得到的大很多。在相同施工参数与地层条件下, 将不同方法测得的地应力输入压裂设计软件后, 瞬时停泵压力法得到的裂缝高度更符合井温测井解释的结果(图 7), 预测得到的施工压力、瞬时停泵压力 *ISIP* 也更符合实际情况, 这些都说明了利用本方法求取深埋泥岩地层地应力的合理性。

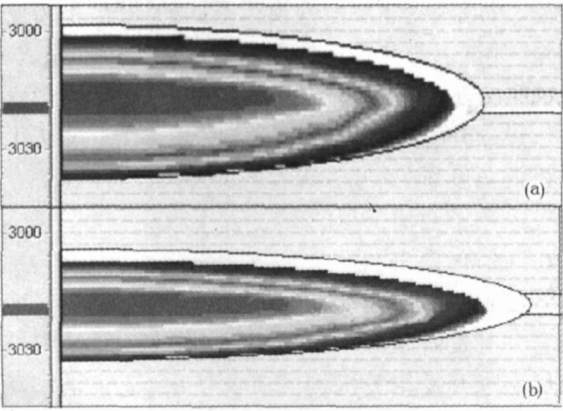


图 7 靖边××井盒 8 层不同方法的泥岩地应力裂缝(剖面)模拟结果对比图

Fig. 7 Simulation comparison between results of stress by different methods of He 8 in Jingbian area  
a——声发射凯塞尔效应法结果; b——瞬时停泵压力法结果  
注: 图边纵向数字表示井深(m)。

3 结语

通过理论分析与实际资料统计证实, 随砂岩地层厚度的变薄或压裂液量的增大, 在水力压裂裂缝剖面中, 作为遮挡层的高地应力泥岩所占比例越来越大, 压裂施工的瞬时停泵压力 *ISIP* 与泥岩地层地应力的关系也愈来愈密切。统计同一区块同一层位多井的 *ISIP* 资料, 并顺延其趋势至砂岩厚度为 0 或压裂液量至无穷大, 则可得到泥岩地层的最小主应力。间接证据表明, 利用本方法求取的泥岩应力值更符合实际情况。作为一套比较准确的、低成本的求取深埋泥岩地层最小主应力的新方法, 可为油、气钻采、压裂设计及测井、地震资料解释提供参考依据。

参考文献

[1] 楼一珊, 金业权. 岩石力学与石油工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.

[2] 孙如华, 李文平, 李小琴. 深部粘性土的微观结构与力学性质试验研究分析[J]. 江苏地质, 2002, 26(3): 171—173.

[3] 李志明, 张金珠. 地应力与油气勘探开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.

[4] J-L. 吉得利. 水力压裂技术新进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.

[5] 王越之, 李自俊. 地应力在石油工业中的研究现状[J]. 大自然探索, 1996, 15(57): 72—75.

[6] 王连俊. 岩石 Kaiser 效应测定地应力的几个问题及其在油田中的应用[J]. 土工基础, 2000, 10(3): 43—48.

[7] 丁健民, 译. 地壳水平应力与垂直应力随深度的变化[M]. 北京: 国家地震局, 1996.

[8] VERNON W P. Closure stress calculations in anisotropic formation[J]. SPE 29398, 1995: 19—22.

[9] WALLS J D. Measured and calculated horizontal stress in the Travis Peak Formation[J]. SPE 21843, 1994: 259—263.

[10] 陈子龙. 岩石力学与构造应力场[M]. 北京: 地质出版社, 1986.

[11] 李太浩, 张金珠. 用岩心实验方法测定野外应力[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(6): 98—103.

[12] 刘建中, 高龙生. 对水压致裂法测得的应力结果之重新估价[J]. 地球物理学报, 1989, 32(5): 528—537.

[13] 蒋廷学, 王欣. 由瞬时停泵压力估算裂缝闭合压力的现场方法研究[J]. 大庆石油地质与开发, 1999, 18(3): 42—46.

[14] SIMONSON, E. R. Containment of massive hydraulic fractures[J]. SPE 6089—PA, 1978: 27—32.

[15] CLEARY M. P. Analysis of mechanisms and procedures for producing favorable shapes of hydraulic fractures[J]. SPE 9259, 1980: 21—24.