

# 水力压裂求地应力在大庆油田的应用

刘子晋

(大庆石油管理局勘探开发研究院)

## 摘 要

本文把水力压裂施工曲线求地应力的原理和方法运用到大庆油田开发中去。研究了注水开发油田中地应力的变化。这时减少套管损坏,降低断层活动,确定合理的保持地层压力界限,判断压裂裂缝类型,有一定的实际意义。

水力压裂技术早在三十年代就开始用于改造油层,提高油井产油量,目前已成为油田开发中广泛采用的一门采油工艺,压裂设备的研制和机理的研究都发展到较高水平。七十年代初,美国学者B.C海姆森首次在油气田井中利用“水压致裂法”(即水力压裂法),进行原地应力测量。这种方法被用于地震地质学,研究地震机理、板块运动;在矿山地质、工程地质等领域中亦具有广阔的发展前景。目前地应力研究已经由浅层向深层发展。但在油田开发中对地应力的研究还不够多。随着油田开发,注水压力逐渐提高,注入水量越来越多,地下岩石物理性质不断发生变化,引起地层蠕变、断层复活,造成油、水井套管损失加剧。从岩石力学观点来看,与地应力的变化有直接关系。因此,研究注水开发油田中地应力的变化,对减少套管损坏,降低断层活动,确定合理的保持地层压力界限,判断压裂裂缝类型,有着重要的实际意义。作者把水力压裂施工曲线求地应力的原理和方法,运用到大庆油田开发中去,试图解决生产中的问题。

## 一、水力压裂施工曲线求地应力

### 1. 三个主应力的确定

一般认为地应力是由地壳岩石层的重力及构造应力两部分组成。岩石中任一点的应力可以分解成三个主应力分量:一个是垂直向的主应力,其余两个主应力是水平的,分别以 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 表示。理论及试验均表明,钻孔壁上的初始水力压裂裂缝,总是在垂直于最小水平主应力的平面内发展。三个主应力的计算,目前公认的方法是由海姆森和法尔赫斯特于1967、1970年提出的,计算三个原地应力(压应力为正)的公式如下:

$$S_2 = \rho g H \quad (1)$$

$$S_{H \min} = P_{isi} + P_H \quad (2)$$

$$S_{H \max} = T_S + 3S_{H \min} - (P_F + P_H) - P_R \quad (3)$$

$$= T_S + 3P_{isi} + 2P_H - P_F - P_R$$

式中

$S_z$ : 垂直向主应力,

$S_{Hmin}$ : 最小水平主应力,

$S_{Hmax}$ : 最大水平主应力,

$\rho$ : 岩石平均密度,

$H$ : 深度,

$P_{isi}$ : 瞬时停泵压力, 岩石形成裂缝后瞬时停泵, 裂缝保持张开所需的压力 (地面上测量的),

$P_F$ : 破裂压力, 水力压裂达到岩石形成裂缝的最高压力 (地面上测量的)。

$P_R$ : 压裂层孔隙水压 (静压),

$P_H$ : 压裂层中部深度静水柱压力,

$T_S$ : 岩石抗张强度, 由模拟试验确定或在压裂排量相同的条件下由破裂压力减去重张压力来确定它的近似值。

考虑到重复压裂层段及井筒摩阻损失压力 (未考虑咀损), 采用重张压力计算较为简便, 故将 (3) 式改为

$$\begin{aligned} S_{Hmax} &= 3S_{Hmin} - (P_{Fi} + P_H - P_{fr}) - P_R \\ &= 3P_{isi} + 2P_H - P_{Fi} + P_{fi} - P_R \end{aligned} \quad (4)$$

式中

$P_{fr}$ : 井筒摩阻损失压力,

$$P_{fr} = P_F - P_{is}$$

$P_{Fi}$ : 重张压力

$$\text{则: } S_{Hmax} = 3P_{isi} + 2P_H - P_{Fi} + (P_F - P_{isi}) - P_R \quad (5)$$

将 (5) 式进一步简化:

$$\begin{aligned} S_{Hmax} &= 2(P_{isi} + P_H) + T_S - P_R \\ &= 2S_{Hmin} + T_S - P_R \\ &= 2S_3 + T_S - P_R \end{aligned} \quad (6)$$

要注意上式的  $T_S$  必须是由同一条施工曲线确定的破裂压力  $P_F$ 、重张压力  $P_{Fi}$  来求得的, 否则不能使用 (6) 式。

经过简化整理即可计算出  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 。它们分别为最大主应力、中间主应力及最小主应力, 如果分别减去孔隙水压  $P_R$ , 得到有效主应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 。

## 2. 地应力测定结果

利用水力压裂施工曲线求地应力的技术关键, 是在施工中连续记录工作压力和排量, 在获得破裂压力之后, 保持排量不变, 瞬时停泵 2—3 次, 每次 3—5 分钟, 获得瞬时停泵压力。注意井下不要有截流器 (单流凡尔), 单层压裂最好。如图 1 是大庆油田 129 井水力压裂施工曲线, 由它可确定  $P_i$ 、 $P_{is}$ 、 $P_{Fi}$  的值, 表 1 为六个层段水力压裂施工曲线所给出的参数值。根据表 1 的参数计算出地应力值及预测岩石破裂的临界值列于表 2。

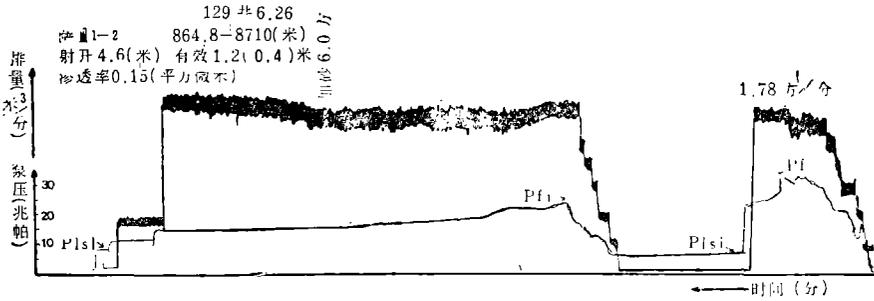


图 1 129井水力压裂施工曲线

表 1 大庆油田水力压裂施工曲线参数表

井号	压裂层位	H (m)	P <sub>R</sub> (MPa)	PF (MPa)	PFi (MPa)	Pisi (MPa)	Φ (°)	τ <sub>0</sub> (MPa)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )
30	萨 I <sub>a</sub>	1416.5	14.35	25.5	23	11	30	1.7	2300
129	萨 II <sub>1-2</sub>	867.9	9.78	33	23	7	30	1.7	2300
47	高 II <sub>2b-3</sub>	1172.0	10.75	21	19	9	30	1.7	2300
2688	高 I <sub>1a-2a</sub>	1170.2	12.19	28	26	14	30	1.7	2300
2688GI <sub>10</sub>	高 I <sub>10</sub>	1148.6	12.19	27	26	13	30	1.7	2300
2538	高 II <sub>1-3</sub>	1180.8	13.85	33	31	13	30	1.7	2300

表 2 根据水力压裂施工曲线参数求地应力成果汇总表

井号	S <sub>1</sub> (MPa)	S <sub>2</sub> (MPa)	S <sub>3</sub> (MPa)	S <sub>n</sub> (MPa)	T (MPa)	P <sub>RCT</sub> (MPa)	σ <sub>oCT</sub> (MPa)	S <sub>3</sub> /H (MPa/m)	T <sub>s</sub> (MPa)	注
30	38.48	32.58	25.17	26.72	1.28	19.31	7.41	0.0177	2.5	油层未见水
129	31.58	19.96	15.68	17.54	5.11	8.69	8.85	0.0181	10	油层已见水
47	32.69	26.96	20.72	22.12	3.85	15.40	6.66	0.0177	2	油层未见水
2688	41.21	26.91	25.70	27.52	4.99	18.88	8.64	0.0219	2	“
2688GI <sub>10</sub>	37.78	26.12	24.49	26.04	4.27	18.64	7.40	0.0213	1	“
2538	27.77	27.16	24.81	26.32	4.16	19.11	7.21	0.0210	2	“

## 二、地应力在油田注水开发中的应用

### 1. 岩石破裂地层压力临界值的确定

由莫尔——库仑破裂准则可知

$$\tau = \tau_0 + \sigma \tan \Phi \tag{7}$$

式中

τ<sub>0</sub>: 岩石初始强度,

Φ: 岩石的内摩擦角。

岩石 τ<sub>0</sub> 和 Φ 的值可以通过室内三轴试验获得。但通过压裂施工曲线及岩芯观察的方法

确定 $\tau_0$ 和 $\Phi$ ，更合适油田的具体情况。大庆油田通过数百米岩芯观察，发现岩芯中存在许多地层蠕变的痕迹，其蠕变摩擦角一般在 $30^\circ$ — $40^\circ$ 之间，主要出现在泥岩中，摩擦面光滑发亮，无填充物，有顺倾向的擦痕，与大型断裂面关系密切，接近断裂面的倾角较陡；远离断裂面的倾角较缓。

设通过岩层内已知点有一平面，该平面法线方向与通过此点的主应力 $S_3$ 夹角为 $\alpha$ ，则该点在此平面上的法向应力 $S_n$ 和剪应力 $T$ 与此点的主应力关系为<sup>〔1〕</sup>：

$$S_n = \frac{S_1 + S_3}{2} + \frac{S_1 - S_3}{2} \cos 2\alpha \quad (8)$$

$$T = \frac{S_1 - S_3}{2} \sin 2\alpha \quad (9)$$

考虑到孔隙水压 $P_R$ 的阻抗作用，则(8)、(9)式变为：

$$S' = \frac{(S_1 - P_R) + (S_3 - P_R)}{2} + \frac{(S_1 - P_R) - (S_3 - P_R)}{2} \cos 2\alpha \quad (10)$$

$$T' = \frac{(S_1 - P_R) - (S_3 - P_R)}{2} \sin 2\alpha \quad (11)$$

根据定义有

$$S_1 - P_R = \sigma_1, \quad S_3 - P_R = \sigma_3, \quad T' = T$$

法向应力和剪切应力变成：

$$S' = S_n - P_R = \sigma$$

$$T' = T = \tau$$

它表明岩体变形乃是由具有 $\sigma$ 和 $\tau$ 分量的应力引起的，在那里法向应力减小，而剪切应力仍然不变。岩体内孔隙水压的变化，主要引起法向应力的变化。注意这里的 $\sigma$ 、 $\tau$ 值就是公式(7)中的值，因此研究岩体破裂临界值，实际上就是研究孔隙水压的临界值，故将(7)式修改为：

$$\tau_{CT} = \tau_0 + (S_n - P_R) \tan \phi \quad (12)$$

当孔隙水压增大，正向应力减小，抗剪阻力减小，岩石容易破裂从而发生地层蠕变或断层作用。

将(12)式改为

$$P_{RCT} = S_n - \frac{\tau - \tau_0}{\tan \phi}$$

对于重张压力， $\tau_0$ 可以省略，简化为：

$$P_{RCT} = S_n - \frac{\tau}{\tan \phi} \quad (13)$$

此处 $P_{RCT}$ 为临界孔隙水压，则临界有效应力 $\sigma_{aCT}$ 为

$$\sigma_{aCT} = S_n - P_{RCT} \quad (14)$$

## 2. 用作图法确定孔隙水压临界值及角 $\alpha$

在一般情况下， $\alpha$ 夹角必须通过现场测量或室内试验来确定。在三轴实验中，剪破裂与

$\sigma_1$  方向呈小于  $45^\circ$  的夹角，最常见的是呈  $30^\circ$  左右。用作图法也可以求得  $P_{RCT}$  及  $\alpha$  角。设公式 (8)、(9) 中的平面为破裂面，根据公式 (9) 可画出破裂面的剪应力随角  $\alpha$  变化的图形，同理由公式 (8) 也可给出  $S_a$  随  $\alpha$  变化的图形，但对 (12) 式抗剪阻力随  $P_R$  而变，因此对于不同的  $P_R$  值， $S_a$  对于  $\alpha$  的变化代表了抗剪阻力随  $\alpha$  角的变化，图 2 给出了抗剪阻力和剪应力随角  $\alpha$  的变化曲线。抗剪阻力曲线 I、II、III 代表三种  $P_R$  值，曲线越往上相应  $P_R$  值越小，当抗剪阻力曲线与剪应力曲线相切于 P 点时，表示破裂发生，由 P 点对应的  $\alpha$  角，可求出“剪破裂方位与主应力方向”〔2〕。只要改变  $P_R$  值求得 P 点，即得孔隙水压临界值。图 2 是在大庆油田 129 井水力压裂施工曲线计算得出  $\sigma_1 = 21.8 MPa$ ，

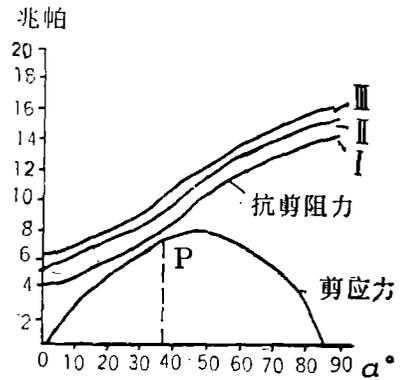


图 2 129 井破裂方位与主应力方向关系曲线

$\sigma_3 = 5.95 MPa$ ， $\tau_0 = 1.7 MPa$ ， $\Phi = 30^\circ$ 。这里抗剪阻力角为剪应力  $\alpha$  角的余角。通过 P 点的曲线 I 孔隙水压  $P_R = 10 MPa$ ，破裂面与最大主应力在水平面上夹角  $\alpha = 30^\circ - 35^\circ$ ；曲线 II、III  $P_R$  值分别为 8、7 MPa，它们与剪应力曲线不相交，这时岩石处于稳定状态，无破裂发生。

使用作图法预测孔隙水压临界值与公式 (13) 预测孔隙水压临界值完全一致。根据表 1、2 数据作出  $P_{RCT}$  与深度 H 关系图 3，直线回归得：

$$P_{RCT} = 0.02H - 6.55 \tag{15}$$

$$R = 0.838$$

方程 (15) 给出了油田不同深度的孔隙水压临界值 (即地层压力临界值)。

### 3. 地下应力随深度的变化

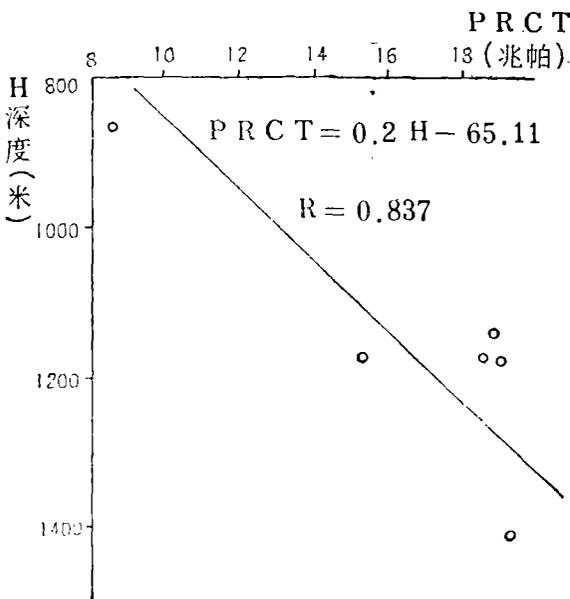


图 3 H 与  $P_{RCT}$  关系曲线

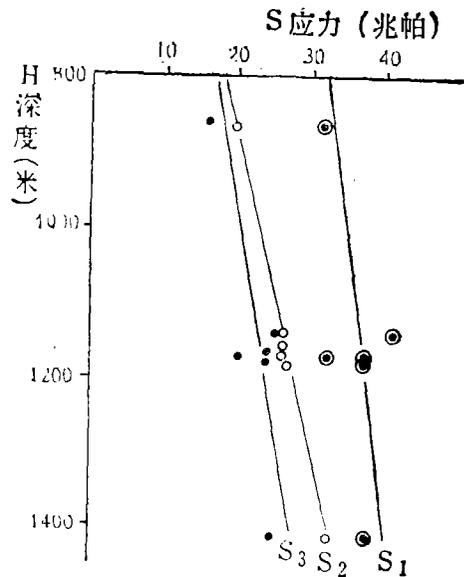


图 4 S 与 H 关系曲线

根据表 1、2 给出的地应力  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  数据与深度  $H$  作图 4。由图 4 看出,主应力随深度增加而增大,对数据作直线回归得到:

$$\begin{aligned}
 S_3 &= 2.245 + 0.0177H & R &= 0.791 \\
 S_2 &= 0.023H - 0.0062 & R &= 0.999 \\
 S_1 &= 22.197 + 0.0124H & R &= 0.587
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} S_3 \\ S_2 \\ S_1 \end{aligned}} \right\} (16)$$

从图 4 看出大庆油田垂直向主应力  $S_2$  值居中,  $S_1$ 、 $S_3$  为水平最大和最小主应力,在深度 425 米以上  $S_2$  将小于  $S_3$ 。

#### 4. 岩石法向应力及剪应力与孔隙水压关系

由  $S_n$ 、 $\tau$  与  $P_R$  关系曲线(图 5) 可看出,法向应力  $S_n$  随孔隙水压增高而增高有明显的变化;剪应力  $T$  与孔隙水压无明显变化,回归方程得:

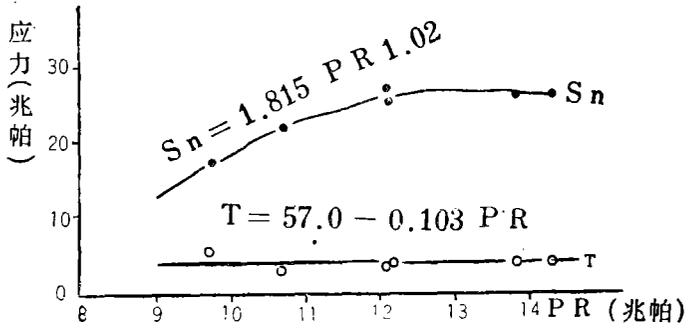


图 5  $S_n$ 、 $\tau$  与  $P_R$  关系曲线

$$S_n = 1.815 P_{R1.02} \quad R = 0.859 \quad (17)$$

$$T = 57.0 - 0.103 P_R \quad R = 0.36 \quad (18)$$

剪应力  $T$  与孔隙水压相关系数太低,实际上证实了公式 (11) 剪切应力  $T' = T = \tau$  不受孔隙水压的影响,测得数据只是在 5.11—4.16MPa 的范围内波动。

#### 5. 孔隙水压临界值 $P_{RCT}$ 及有效应力临界值 $\sigma_{nCT}$ 与孔隙水压关系

从图 6 可以看出,孔隙水压临界值  $P_{RCT}$  随孔隙水压增高而增高;有效应力临界值随孔隙水压增高而降低,这与莫尔——库仑破裂准则是一致的,回归方程得

$$P_{RCT} = 0.02762 P_{R1.809} \quad R = 0.842 \quad (19)$$

$$\sigma_{nCT} = 98.6 - 0.177 P_R \quad R = 0.36 \quad (20)$$

由于实测数据较少,有效应力临界值  $\sigma_{nCT}$  与孔隙水压相关系数较低,需要进一步取得定量解释。

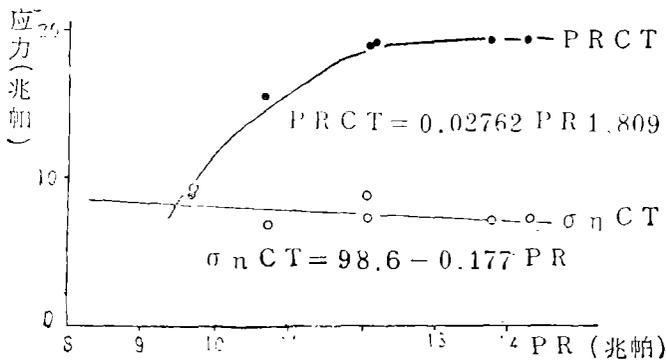


图 6  $P_{RCT}$ 、 $\sigma_{nCT}$  与  $P_R$  关系曲线

### 三、几点初步认识

1. 从图 5、6 看出，法向应力  $S_n$  及孔隙水压临界值  $P_{RCT}$  与孔隙水压增高而增高的关系，与油田保持了较高的地层压力以后，引起断层复活及地层蠕变关系是一致的；地层压力提高了相应的要求提高注水压力，当注水压力提高到某一界限时，将破坏岩体的稳定，为油、水井套管带来极大的破坏力。因此，需要研究油田上的合理注水压力及保持合理的地层压力界限。

2. 确定合理的注水井口压力临界值。在注水井中当高压流体压力达到或超过岩石最小主应力时，岩石将发生破裂或蠕变变形。因此，为了满足生产需要，应将注水井口压力控制在此界限以下，确定一个合理的注水井口压力。方程 (16) 中的  $S_3$  可得到合理的注水井口压力界限值为：

$$\begin{aligned} P_{WCT} &= 2.245 + 0.0177H - \left( \frac{H}{100} \right) \\ &= 2.245 + 0.0077H \end{aligned} \quad (21)$$

上式仅适用于  $H > 425$  米的情况，在此压力界限以下注水岩石将不破裂。

3. 通过图 3 及图 6 分析，孔隙水压临界值与深度  $H$  呈线性关系变化，但是孔隙水压临界值  $P_{RCT}$  与地层压力  $P_R$  呈非线性关系，因此，合理的保持地层压力界限应该考虑二者关系，将 (15) 与 (19) 式联立整理后得到：

$$P_R = (0.7241H - 237.15)_{0.5628} \quad (22)$$

为大庆油田保持合理的地层压力临界值。

在工作中曾得到国家地震局地球物理研究所李自强等同志的指导，在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] H·K 古普塔、B·K 拉斯托吉，水坝与地震，地震出版社，1980。
- [2] B·E 霍布斯、W·D 明斯、P·F 威廉斯，构造地质学纲要，石油工业部出版社，1982。

THE APPLICATION OF THE METHOD OF UNDERGROUND  
STRESS OBTAINED BY HYDROFRACTURE TO THE  
DEVELOPMENT OF DAQING OIL FIELD

Liu Zijin

(Exploration and Development Institute of Administration Bureau, Daqing Oil Field)

**Abstract**

In this paper, the author tried to apply the principle and the method of underground stress obtained by hydrofracture construction curve to the development of Daqing oil field. The author researched the variation of underground stress in the oil field developed by water injection. The work has some practical significance in reducing the damage of casing, diminishing fault activity, defining the reasonable demarcation for keeping layer pressure and determining the type of hydro-fracture crack.