

水力裂缝模型的自动识别及动态监测技术*

王正茂 李治平 雷婉 李允

(西南石油学院)

王正茂等. 水力裂缝模型的自动识别及动态监测技术. 天然气工业, 2004; 24(6): 83~85

摘 要 在常规压裂井试井分析过程中所使用的数据主要是停泵后的压降数据, 而岩石发生破裂到停泵前这一段压裂施工压力数据则没有得到有效利用; 同时, 在压裂施工作业过程中也不能对裂缝的延伸状况进行动态监测。文章提出的水力裂缝模型的自动识别及动态监测技术, 可以对岩石发生破裂到停泵前这一段压裂施工压力数据进行准确分析, 自动确定裂缝模型并求取裂缝动态参数。这样就可以实时的知道裂缝发育、发展和闭合的情况, 对于正确指导压裂施工作业以及获得优质裂缝具有十分重要的意义。

主题词 裂缝模型 自动识别 压裂施工压力 动态监测 裂缝动态参数

在水力压裂过程中, 裂缝在长、宽、高 3 个方向破裂及延伸, 相应的流体也应有 3 个方向的流动。但是在具体地层条件下, 垂直缝的上下界往往受到盖底层的限制, 因此缝高在一个区块中可大体看成是一个常量, 也由于缝宽的扩展量较小, 可以忽略在缝横断面上的流动。这样一来就可以把问题简化成在缝长、缝宽上的二维破裂、在缝长上的一维流动。二维破裂、一维流动的设计简称二维设计(2D)。我国油气藏多属于陆相沉积, 油层相对较薄, 盖底层的应力一般也大于油层, 所以, 可试用二维设计方法。比较成熟的二维裂缝模型主要有 PKN、KGD 和 Penny(径向)模型^[1](见图 1)。本文采用二维裂缝模型分析原理。

理 论 基 础

1. 模型假设

- (1) 缝长各处都具有相同且固定的缝高。
- (2) 垂直于缝长的断面内, 液体压力是常数。
- (3) 缝长方向上压力降取决于缝内流动阻力。
- (4) 缝端流体压力等于垂直于缝面的就地应力。
- (5) 无滤失, 全部液体用于造缝。

2. 基本方程^[2](以 PKN 模型为例)

(1) 裂缝可塑性方程

$$\bar{W}(x, t) = \frac{\pi}{4} W_{\max}(x, t) = \frac{\pi H_f}{2E'} p_f(x, t) \quad (1)$$

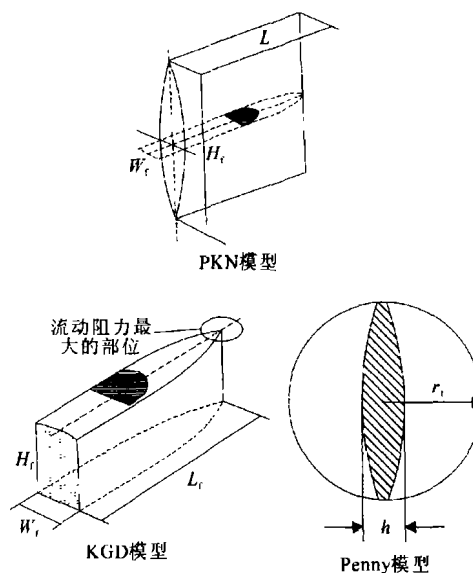


图 1 裂缝模型

(2) 流体渗流方程

$$\frac{dp_f}{dx} = -2K_a \left(\frac{6q}{H_f} \right)^n \frac{1}{W^{2n+1}} \quad (2)$$

(3) 物质平衡方程

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{2CH_f}{\sqrt{t-\tau(x)}} + \frac{\partial A(x, t)}{\partial t} \quad (3)$$

(4) 定解条件

$$\text{初始条件: } W(x, 0) = 0 \quad (4)$$

$$\text{边界条件: } W(x, t) = 0, x \geq L(t) \quad (5)$$

* 本文系 CNPC 创新基金资助项目“一种简单的新型现代试井测压方法与分析理论研究”(部基 377)成果。

作者简介: 王正茂, 1973 年生, 西南石油学院在读博士, 主要从事油气田开发研究工作。地址: (637001) 四川省南充市。电话: (0817) 2642936。

$$q(0,t)=Q(t), (\text{全缝长}) \quad (6)$$

$$q(0,t)=\frac{1}{2}Q(t), (\text{半缝长}) \quad (7)$$

3. 模型参数与井底净压力的关系

将上述方程联立求解可得模型参数与井底净压力的关系:

$$p_w(t) = \begin{cases} \alpha^{\frac{1}{2n+1}} \left(\frac{\pi}{2}\right)^{\frac{2n+1}{2n+2}} (KE'^{2n+1} q^n)^{\frac{1}{2n+2}} \left(\frac{L(t)}{H_f^{3n+1}}\right)^{\frac{1}{2n+2}} & \text{PKN} \\ \alpha^{\frac{1}{2n+2}} \left(\frac{\pi}{2}\right)^{\frac{2n+1}{2n+2}} (KE'^{2n+1} \frac{q^n}{H_f^n L^{2n}(t)})^{\frac{1}{2n+2}} & \text{KGD} \\ \alpha^{\frac{1}{2n+2}} \left(\frac{16}{3\pi}\right)^{\frac{2n+1}{2n+2}} (KE'^{2n+1} \frac{q}{r_f^{3n}})^{\frac{1}{2n+2}} & \text{Penny} \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{其中: } \alpha = 2 \left[\frac{2(2n+1)}{n} \right]^n \quad (9)$$

4. 井底净压力与时间的关系式

利用式(3),通过对裂缝延伸上限(压裂液效率 $n=1$,即没有滤失)和裂缝延伸下限(压裂液效率 $\eta=0$,即压裂液全部滤失)的分析,可以得出施工过程中井底净压力随时间的变化关系:

$$p_w(t) \propto t^e \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} \frac{1}{4(n+1)} < e < \frac{1}{2n+3} & \text{PKN} \\ \frac{-n}{n+2} < e < \frac{-n}{2(n+1)} & \text{KGD} \\ \frac{-n}{n+2} < e < \frac{-3n}{8(n+1)} & \text{Penny} \end{cases} \quad (11)$$

5. 裂缝动态参数的计算

(1) 裂缝动态长度(半径)的计算

根据式(8)可以求出裂缝的长度(半径)随施工时间的变化关系,具体表达式如下:

$$\begin{cases} L(t) = p_w^{2n+2}(t) H_f^{3n+1} \left(\frac{\pi}{2}\right)^{2n+1} / (aKE'^{2n+1} q^n) & \text{PKN} \\ L(t) = \alpha^{\frac{1}{2n}} \left(\frac{\pi}{2}\right)^{\frac{2n+1}{2n}} (KE'^{2n+1} q^n / H_f^n)^{\frac{1}{2n}} / p_w^{\frac{2n+2}{2n}}(t) & \text{KGD} \\ r_f(t) = \alpha^{\frac{1}{3n}} \left(\frac{3\pi}{16}\right)^{\frac{2n+1}{3n}} (KE'^{2n+1} q^n)^{\frac{1}{3n}} / p_w^{\frac{2n+2}{3n}}(t) & \text{Penny} \end{cases} \quad (12)$$

(2) 井底平均缝宽的计算

$$\bar{W}_w = \begin{cases} \left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)^{\frac{1}{2n+2}} \left(\frac{Kq^n}{E'}\right)^{\frac{1}{2n+2}} (H_f^{1-n} L(t))^{\frac{1}{2n+2}} & \text{PKN} \\ \left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)^{\frac{1}{2n+2}} \left(\frac{Kq^n}{E'}\right)^{\frac{1}{2n+2}} \left(\frac{L^2(t)}{H_f^n}\right)^{\frac{1}{2n+2}} & \text{KGD} \\ \left(\frac{16}{3\pi}\alpha\right)^{\frac{1}{2n+2}} \left(\frac{Kq^n}{E'}\right)^{\frac{1}{2n+2}} r_f^{\frac{2-n}{2n+2}} & \text{Penny} \end{cases} \quad (13)$$

裂缝模型自动识别技术

根据式(10)可知,若将井底净压力与时间的数据做成双对数图,无论当前的裂缝属于那种模型, $\log p_w - \log t$ 都将呈现直线关系,其斜率为 e 。又由式(11)可知,不同的模型对应于不同的直线斜率范围,因此,就可以根据 $\log p_w - \log t$ 图中不同的直线斜率值来判断当前裂缝属于哪种模型。图2为裂缝模型的诊断图(取 $n=0.8$)。

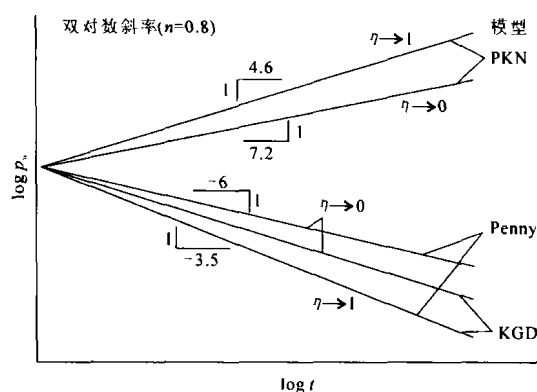


图2 裂缝模型的诊断图

由图2可以看出,KGD模型和Penny模型的部分斜率范围相同,此时要准确地确定裂缝模型就必须结合其它一些基本情况来共同判断。若压裂段全射开或裸眼完井,这种无限制流体入口情况,裂缝延伸属于KGD模型;若流体入口受到限制,即流体进入地层被限制在一个点源(射孔段长度较短),该模型最有可能是Penny模型。

裂缝动态监测技术

在众多的施工压力曲线中,虽然压力变化的形式有所差别,但一般可归纳为4种典型情况^[3],如图3,解释如下:

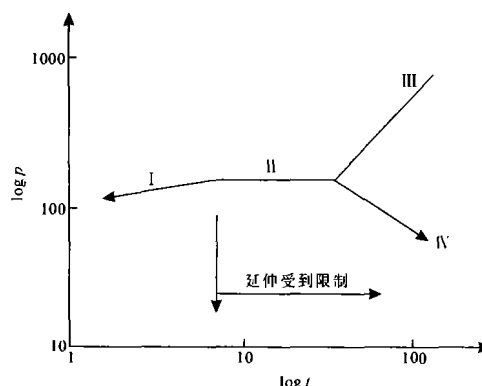


图3 4种典型压力曲线

第Ⅰ段:正斜率很小的线段(缓慢上升段)。当上下阻挡层限制裂缝径向发展时,裂缝长度将大于高度,导致井底压力上升,这时类似于 PKN 模型的裂缝延伸形式。此时,上下层的应力大于压裂层,由于高应力层的限制,裂缝在高度方向延伸受阻,施工压力将继续增加,裂缝向纵深延伸,这是正常的施工曲线。

第Ⅱ段:斜率为 0 的线段(水平段)。表示缝高稳定增长到应力遮挡层内,还有可能是地层内天然微裂隙(次生裂缝)张开,使得滤失量与注入量持平。次生裂缝发生在具有天然裂缝或具有交叉裂缝的地层内。这些裂缝一般具有比地层基岩相对较高的渗透率,且在流体压力几乎等于主裂缝压力下,流体将较深地侵入次生裂缝中。当流体压力超过作用于次生裂缝上的岩石应力时,次生裂缝将张开且开始起延伸裂缝的作用。当达到这种压力值时,自然张开的裂缝起到一个压力调节器的作用。

第Ⅲ段:斜率为 1 的线段(加速上升段)。表示裂缝端部受阻,缝内压力急剧上升;如果斜率大于 1 则表示裂缝内发生堵塞。这种情况下应合理控制施工砂比和排量,以保证施工顺利进行。而对于缝端脱砂压裂施工,则希望支撑剂在一定缝长时形成砂堵,然后通过控制排量和砂比,使裂缝完全填满。对常规压裂,出现斜率为 1 或大于 1 时,应立即采取措施,以免井筒内发生砂卡。

第Ⅳ段:斜率为负的线段(下降段)。表示裂缝穿过低应力层,缝高发生不稳定增长,直到遇到高应力层或加入支撑剂后压力曲线才变缓,另一种可能是沟通了天然裂缝,使滤失量大大增加,此结果会导致裂缝内砂堵,压力又将很快上升(如Ⅲ段),达到破裂低应力层,使缝高发生不稳定增长。对压裂施工压力的分析,需要了解压裂层段及相邻层的地应力大小分布,以及改造层的物性参数等,在压力曲线分析时,一般对 0 斜率段的出现比较关注,因为它说明裂缝的延伸速度将下降,随后有可能出现砂堵。

软件设计

本文利用上述理论在 Windows 系统下开发了一套压裂施工压力分析软件。该软件充分体现了压裂施工压力分析的特点,将裂缝参数随压裂施工过程的变化实时结合起来,通过集成压裂井的各类信息,提供了压裂井在压裂过程中裂缝发育、发展及其闭合的全过程动态监测方法。该软件具有如下功能:①压裂施工压力数据的前处理模块。包括数据的导入、筛选等功能。②分析计算核心模块。包括岩石破裂压力、闭合压力和延伸压力的计算,裂缝模型的自动诊断和裂缝参数的自动求取等功能。③后处理模块。提供图形、表格或报告等多种方式输出,并提供 Excel、Word

接口,方便用户对输出结果、图件等再加工。

实例分析

运用上述理论和方法,利用某油田一口井的实测压裂施工数据,对其裂缝模型和参数进行了计算机自动识别和计算。

该井的基本情况:压裂层位为 J_2x ,压裂井段为 2312~2315 m,井温 76.6℃,孔隙度 7.82%,渗透率 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,地层压力 20.774 MPa,破裂压力梯度 0.018 MPa/m,射孔厚度 3 m,孔密为 16 孔/m,射孔总数为 48 孔。通过计算机对裂缝模型的自动识别,确定该口井的水力裂缝模型为 PKN 模型,然后采用 PKN 模型裂缝动态参数的计算公式,可得到裂缝的缝长和缝宽在不同压裂施工时间点的值。随压裂施工时间的进行,裂缝的动态缝长、最大缝宽都逐渐增大,在停泵时,动态缝长达 81.63 m,动态最大缝宽达 14.47 mm。

结论

(1)压裂施工压力曲线反映了裂缝及地层的特性,根据其特征曲线可以确定裂缝延伸的几何模型,再通过反演可以求出有关裂缝的动态参数。

(2)所开发的压裂施工压力分析软件具功能强、操作方便等特点,具有根据压裂施工压力曲线自动诊断裂缝类型、计算裂缝长宽度随施工时间变化的功能,适合于矿场资料的实时分析,可以随时了解压裂裂缝的动态变化,更好地指导压裂施工作业。

(3)通过实例的计算表明,水力裂缝模型的自动识别和动态监测方法具有计算简单、实用等特点,为压裂井施工的动态监测提供了一种切实可行的方法。

符号说明

$\bar{W}$ 为裂缝内任一点的平均缝宽, m; $W_{\max}$ 为断面最大缝宽, m; H_f 为裂缝高度, m; $E = \frac{E}{1-\nu^2}$ 为平面应变弹性模量, MPa; p_i 为裂缝内净压力, MPa; K_0 为缝流稠度系数, $\text{mPa} \cdot \text{s}^n$; q 为缝长任意点的流量, m^3/s ; W 为裂缝内任一点的缝宽, m; C 为压裂液综合滤失系数, $\text{m}/\sqrt{\text{s}}$; A 为裂缝平均截面积, m^2 ; Q 为泵排量, m^3/s ; L 为裂缝长度, m; p_w 为井底净压力, MPa; n 为流变指数; K 为稠度系数, $\text{mPa} \cdot \text{s}^n$; r_i 为井眼到裂缝端部距离, m; $\bar{W}_w$ 为井底平均缝宽, m。

参考文献

- 1 万仁溥, 罗英俊. 压裂酸化工艺技术(采油技术手册第九分册). 北京: 石油工业出版社, 1998
- 2 王鸿勋等. 水力压裂设计数值计算方法. 北京: 石油工业出版社, 1998
- 3 J L 吉德利等. 水力压裂技术新发展. 北京: 石油工业出版社, 1995

(收稿日期 2003-11-28 编辑 钟水清)