

石油技术

压裂施工曲线诊断方法

曲冠政¹ 曲占庆^{1*} 岳艳如²

(中国石大学(华东)¹, 青岛 266555; 胜利油田胜利采油厂², 东营 257000)

摘要 水力压裂施工曲线分析是评价压裂效果的重要手段。通过对小型压裂施工曲线的分析, 可以获得一些重要的地层参数, 为大型压裂的施工设计提供必要的依据。采用施工曲线分析的方法, 对转换后的施工曲线进行分析, 判断施工过程中裂缝的延伸情况, 指导压裂施工。应用施工曲线诊断软件, 对一口井压裂施工各个阶段进行诊断分析, 结果表明, 诊断可靠, 保证了压裂施工各阶段的顺利进行。

关键词 压裂 施工曲线 双对数 诊断
中图法分类号 TE357.13; **文献标志码** A

施工过程中井底压力随时间的变化, 在一定程度上反映了裂缝的延伸发展状况。施工曲线分析是施工状况诊断、压后效果评价的重要工具, 它直接影响着压裂施工的设计以及压裂成败^[1-3]。1979年 Nolte 首次提出了压裂压力分析解释技术后, 经 Nolte、Martins^[4,5] 等人的不断改进, 分别提出了不同裂缝模型的分析解释方法, 为压裂施工、评价提供了依据。

1 施工曲线特点分析

裂缝的净压力随时间呈幂率变化, 通过综合物质方程、流体流动方程以及裂缝弹性形变的基本关系, 得出净压力与时间表达式:

$$p_{net} = p_w - p_c = At^b$$

(1)

对于在压裂施工期间测量的压力数据, 斜率 b 决定于裂缝开启时间的选择和闭合压力。方程两边求导, 可得:

$$\frac{d(p_w - p_c)}{dt} = \frac{dp_w}{dt} = Abt^{b-1}$$

(2)

根据施工数据, 在双对数坐标系中绘制压力及

其对时间导数的曲线, 再根据压力曲线、导数曲线的斜率的变化, 对压裂施工进行判断分析。但是, 在实际应用中判断初始施工时间, 存在的误差较大, 且直接影响施工开始阶段的压力分析, 为此对方程进行改进, 得:

$$t \frac{dp_w}{dt} = Abt^b$$

(3)

根据导数曲线进行判断, 主要有以下几种情况。

1.1 正常压力的变化

根据方程式, 有以下三种基本模型:

$$\begin{cases} \frac{1}{4(n'+1)} < b < \frac{1}{2n'+3}, & \text{PKN} \\ \frac{-n'}{n'+2} < b < \frac{-n'}{2(n'+1)}, & \text{KGD} \\ \frac{-n'}{n'+2} < b < \frac{-3n'}{8(n'+1)}, & \text{径向} \end{cases}$$

(4)

如图 1 中, 在第 1 段中无论是径向模型还是 KGD 模型, 净压力会随着连续的泵入而降低。压力的下降反映为随着阻力下降裂缝优先增长, 且随着裂缝的扩张裂缝进入非限制区。阶段 1 可能发生在相对小的层或施工层厚度很大时裂缝起裂的短时间内。在双对数曲线上斜率表现为 $-1/8 \sim -1/4$ 。

当产层上下隔层的地应力大于产层的应力时, 在第 1 段后裂缝高度的增长被限制, 在这些条件下, 裂缝再按圆形扩展, 裂缝的长度延伸严重, 随着缝

长大于缝高会造成压力升高,此时按照 PKN 型模型延伸。在双对数曲线上斜率表现为 $1/4 \sim 1/6$,如图 1 中所示的 2 段。

裂缝高度受限具有在双对数坐标系下斜率为正的特征,这发生在压裂净压力接近于一个值之前,此值近似于隔储层应力差值 $\Delta\sigma$ 的一半。在此量级下,压裂压力随着裂缝的穿透继续增加,这种条件的裂缝延伸如图 1 中的第 3 段。

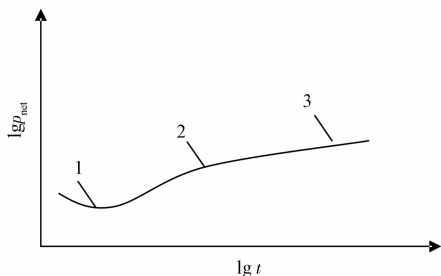


图 1 泵注中裂缝几何形状和压力的变化

1.2 施工过程中压力升高

压力升高主要分为三种情况:

①压力与时间双对数曲线的斜率大于 1:

- a) 裂缝宽度太小,支撑剂在裂缝内发生桥塞;
- b) 持续高压,可能多裂缝延伸,裂缝条数增加;
- c) 地层应力场变化,缝端进入高应力区。

②压力对时间双对数曲线的斜率趋向于 1:

由于前置液大量滤失,缝端砂比较大,限制裂缝的延伸,产生尖端脱砂。

③在天然裂缝性油藏中,压力急速上升有可能是由于在缝端出现裂缝条数增加造成的。

1.3 压力降落

压力降落主要是压裂液的漏失和缝高不稳定增长所致,结合地层应力可分为以下几种情况:

$$\gamma = \frac{\text{压裂最高净压力} - \text{遮挡层最小主应力}}{\text{压裂最高净压力} - \text{目的层最小主应力}}$$

① $\gamma < 0.4$: 裂缝在高度方向没有延伸;

② $\gamma < 0.65$: 遮挡层厚度必须大于油层厚度的一半;

③ $\gamma < 0.8$: 遮挡层厚度与油层厚度相等;

④ $\Delta p > \Delta\sigma/(1-2\nu)$: 地层附近有天然裂缝存在。

当不满足条件②或③时,认为裂缝在高度上延

伸,并突破了应力层,导致压裂液的漏失;当满足条件④时,认为压裂层中的天然裂缝张开,导致压裂液的漏失。对非限制的裂缝增长和天然裂缝存在的情况单独讨论。

①非限制的裂缝高度增长

它具有压力下降的特征,如图 2 中 a 点所示。而对于受限的缝高增长,则通常造成净压力变化速率的下降。

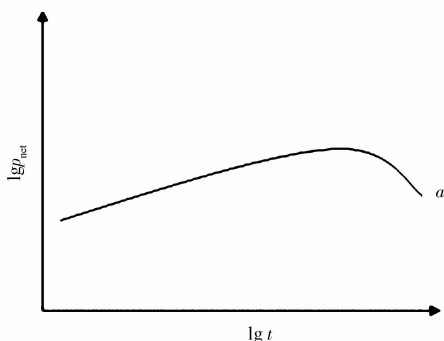


图 2 无限制的裂缝延伸

②天然裂缝的滤失

要使天然裂缝张开的井筒净压力为:

$$p_{net,fo} = \frac{\sigma_{H,max} - \sigma_{H,min}}{(1 - 2\nu)} \quad (5)$$

式(5)中: $\sigma_{H,max}$ — 远场最大水平主应力, MPa;

$\sigma_{H,min}$ — 远场最小水平主应力, MPa;

ν — 地层泊松比, 小数。

天然裂缝系统的方向性很强,表示为单轴方向性。由于裂缝的分支,天然裂缝会产生复杂的裂缝特征,增加沿缝长方向的液体摩阻,产生第二个裂缝数。

1.4 定常压力

$$\text{①天然微裂缝展开: } p_{net,fo} > \frac{\sigma_{H,max} - \sigma_{H,min}}{(1 - 2\nu)} \quad (6)$$

②高度稳定延伸:

控制缝高的增长决定于 p_{net} 和 $\Delta\sigma$ 之比。对比率为 0.4 时,可忽略缝高延伸的发生;对比率为 0.65 时,总缝高是初始缝高的两倍,且每一遮挡层的厚度必须至少是产层厚度的一半以上,以确保连续控制缝高的增长。对比率为 0.8 时,需要遮挡层的厚度至少等于油藏厚度。

2 施工曲线的分析方法

这里主要采用压力导数分析方法,即采用净压力与时间的曲线及净压力与时间的双对数曲线对施工状况进行综合判断。根据 Nottle-Smith 的研究有:

$$p_w - p_c = At^b \tag{7}$$

方程两边求导,可得:

$$\frac{d(p_w - p_c)}{dt} = \frac{dp_w}{dt} = Abt^{b-1} \tag{8}$$

两边取对数, $\lg(tdp_w/dt) = \lg Ab + b\lg t$;

$\lg t + \lg dp_w/dt = \lg Ab + b\lg t$;

令 $y = \lg t + \lg dp_w/dt, x = \lg t$, 所以

$$y = bx + \lg Ab \tag{9}$$

两者的斜率相等。

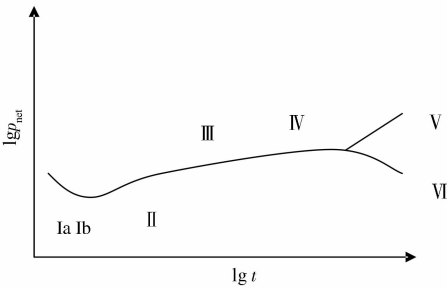


图3 不同裂缝延伸模型下双对数解释图

从图3中可以得到:

Ia段:斜率约在-1/6~ -1/5之间,延伸模式为KGD型裂缝延伸。

Ib段:斜率约在-1/8~ -1/5之间,延伸模式为径向裂缝延伸。

II段:斜率约在1/6~ 1/4之间,延伸模式为PKN型裂缝延伸。

III段:斜率在II的基础上下降,解释为裂缝缝高的受限延伸或者是应力敏感裂隙;

IV段:斜率基本为0,解释为:

- (1)裂缝高度延伸通过尖点;
- (2)裂缝的扩张;
- (3)形成了T型裂缝。

V段:斜率≥1,解释为:

- (1)裂缝宽度太小,支撑剂在裂缝内发生桥塞;
- (2)持续高压,可能多裂缝延伸,裂缝条数

增加;

(3)地层应力场变化,缝端进入高应力区;

(4)产生尖端脱砂。

VI段:在VI段后变为负值,说明缝高延伸失控。

3 现场应用

以樊142—3—X7井为例,应用施工曲线诊断软件,对压裂施工的各个阶段进行诊断分析:

3.1 压力的转换

把井口套压转换为井底的净压力,结果如下:

表1 樊142—3—X7井井底净压力数据

时间/ min	压力/ MPa	排量/ (m ³ ·min ⁻¹)	时间/ min	压力/ MPa	排量/ (m ³ ·min ⁻¹)
8	10.697	4.95	32	15.055	5.02
12	10.685	4.97	36	15.001	4.95
16	10.684	4.93	40	15.634	4.99
20	10.597	5.02	44	15.523	4.99
24	12.58	5.02	48	16.414	4.83
28	13.296	5.00	52	8.64	5.02

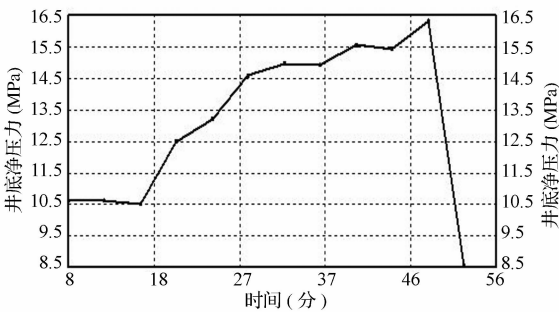


图4 净压力与时间曲线图

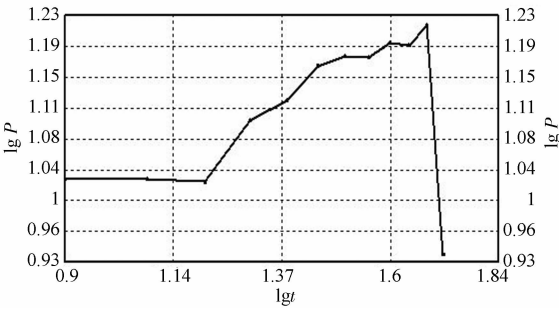


图5 净压力与时间的双对数曲线

3.2 诊断分析结果

表 2 诊断分析表

区间	拟合方程	结论	校正
[1. 02,1. 14]	$y = -2. 14x + 3. 34$	遇到天然微裂缝,裂缝直接开启,或人工裂缝突破应力遮挡层,缝高不稳定增长	遇到天然微裂缝,裂缝直接开启
[10. 46,13. 60]			
[1. 14,1. 27]	$y = 1. 05x - 0. 24$	裂缝端部受阻,或缝内砂比增加,或遇到高应力遮挡层,可能将发生缝内堵塞,应合理控制施工砂比以免发生井筒砂卡	遇到高应力遮挡层
[13. 60,18. 47]			
[1. 27,1. 37]	$y = -1. 25x + 2. 73$	遇到天然微裂缝,裂缝直接开启,或人工裂缝突破应力遮挡层,缝高不稳定增长	人工裂缝突破应力遮挡层
[18. 47,23. 30]			
[1. 37,1. 49]	$y = 0. 64x + 0. 25$	裂缝端部受阻,或缝内砂比增加,或遇到高应力遮挡层,可能将发生缝内堵塞,应合理控制施工砂比以免发生井筒砂卡	裂缝端部受阻,或缝内砂比增加
[23. 30,31. 19]			
[1. 49,1. 61]	$y = 0. 16x + 0. 93$	人工裂缝按 PKN 模型正常延伸	人工裂缝按 PKN 模型正常延伸
[31. 19,40. 34]			

3.3 优化设计

①通过对压裂施工曲线进行分析,发现储层天然裂缝发育,人工裂缝遇到天然裂缝后,天然裂缝直接开启,这就导致了压裂液滤失增大。因此,在压裂模拟设计时,要及时修正滤失系数,通过本软件反演计算的滤失系数为 $2. 20 \times 10^{-4} \text{ m/min}^{1/2}$ 。

②缝高控制方面,上部遮挡层与油层的地层应力差值较小,在 0.3 MPa—1.5 MPa 左右。施工进行到 18.47—23.30 min,人工裂缝突破应力遮挡层,导致缝高增加。该井需要进一步通过优化施工排量和添加转向剂来控制缝高。

③原设计中模拟支撑缝长 182.5 mm,平均支撑缝宽 2.1 mm。通过施工曲线反演计算的缝长为 134 m,缝宽为 4 mm。和原设计相比较,两者有一定差异,原因主要是设计中所使用的参数、尤其是一些关键参数不是很准确,如滤失系数等。

4 结论

通过采用压力导数分析的方法,对压裂施工曲线进行诊断分析,得出以下结论:

(1)在应用施工曲线诊断方法分析时,主要通

过计算净压力和时间的双对数曲线斜率的大小,来判断施工过程中裂缝的延伸情况,从而指导压裂施工的设计;

(2)通过施工曲线分析,遮挡层突破分析,在压裂施工过程可采取有效的缝高控制和降低天然裂缝滤失技术,确保裂缝真实几何尺寸和模拟的结果相吻合,提高储层压裂的成功率。

(3)现场应用表明,所建立的模型准确可靠,计算方法科学合理,可以用来指导低渗透油藏的压裂改造。

参 考 文 献

1 王鸿勋,张士诚. 水利压裂设计数值计算方法. 北京:石油工业出版社,1998:231—235

2 黄月明. 水力压裂加砂施工曲线形态剖析. 河南石油,2002;16(5):51—53

3 郭淑芬,李 晖,曹学军. 加砂压裂压力分析及应用. 油气井测试,2001;10(2):56—59

4 Nolte K G, Smith M B. Interpretation of fracturing pressures. SPE, 1981;SPE8297;131—140

5 Martins J P. Fracturing without proppant. SPE/DOE,SPE13858.1985

2 王启民,冀宝发,隋 军,等. 大庆油田三次采油技术的实践与认识. 大庆石油地质与开发, 2001;20(2):1—8

3 张力诣. 聚驱后提高采收率技术. 油气田地面工程, 2010;29(7):52—53

4 刘 合. 大庆油田聚合物驱后采油技术现状及展望. 石油钻采工艺, 2008;30(3):1—6

5 刘雅馨,张用德,吕古贤,等. 数值模拟在低渗裂缝油藏调剖中的研究应用. 西南石油大学学报(自然科学版), 2011;33(1):111—114

6 付雅观,钱 杰,原观军,等. 大庆油田二类油层聚合物驱前调剖深度探讨. 西南石油大学学报, 2007;29(4):122—124

7 王业飞,何 龙,崔志昆,等. 聚合物驱后深部调剖提高采收率的实验研究. 油田化学, 2005;22(4):349—353

8 陈福明,李 颖,牛金刚. 大庆油田聚合物驱深度调剖技术综述. 大庆石油地质与开发, 2004;23(7):97—99

9 雷光伦,陈月明,李爱芬,等. 聚合物驱深度调剖技术研究. 油气地质与采收率, 2001;8(3):54—57

10 王正欣,王优先,赵心红. 双河油田 I 5 II 1—3 层系聚驱后整体调剖研究及应用. 长江大学学报(自科版)理工卷, 2007;4(2):190—192

11 姜汉桥,刘 伟,袁 谋,等. 多轮次调剖数值模拟研究. 石油钻采工艺, 2003;25(5):63—66

12 袁 谋,王业飞,赵福麟. 多轮次调剖的室内实验研究与现场应用. 油田化学, 2005;22(2):143—146

The Parameter Optimal Design of Whole Block Water-plug and Profile Control after Polymer Flooding

YIN Xiang-wen, WANG Lu-shan, JIN Yan-xin, YI Zhe, FU Chen
(Oil Production Technology Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC,
Dongying 257000, P. R. China)

[Abstract] In order to raise the effect of whole block water shut-off and profile control after polymer flooding, it needs to analyze all kinds of affecting factors, especially such as the deep, occasion and the round of profile control, and optimise appropriate parameter value. Some concept model analysis is done to the deep, occasion and the round of profile control applying reservoir simulation means. The preliminary result indicates that it does the best while the deep of profile control is equal to the strong water flush radius and the occasion is at the moment of the valley bottom of the water cut hopper. And it can yet make the preferable effect to develop the second round or the third at the appropriate occasion after the first round whole block profile controlling.

[Key words] after polymer flooding whole block profile control deep of profile control occasion of profile control round of profile control optimal design

(上接第 1284 页)

The Diagnosis Method of Fracturing Curve

QU Guan-zheng¹, QU Zhan-qing^{1*}, YUE Yan-ru²
(China University of Petroleum¹, Qingdao 266555, P. R. China;
Shengli Oil Production Factory, SINOPEC², Dongying 257000, P. R. China)

[Abstract] Hydraulic fracturing construction curve analysis is the important means of appraising the fracturing effect, through the analysis of small-scale fracturing construction curve, it can get some important formation parameters, provides the essential basis for the large-scale fracturing construction. Using the method of construction curve analysis, the construction curve converted to determine the extension of cracks in the process of construction is analyzed, guide the fracturing construction. Construction curve diagnostic software application on a well fracturing operation in various stages of diagnosis. The results showed that the diagnosis is reliable, and ensure various stages of fracturing construction implements successfully.

[Key words] fracturing construction curve diagnosis double-logarithmic