

水平井压裂裂缝监测与分析

刘建中¹, 张传绪², 赵艳波², 蒋玉双³, 宋健兴³

(1. 石油勘探开发科学研究院采油所, 北京 100083; 2. 大庆油田第九采油厂, 黑龙江大庆 163853;

3. 吐哈油田丘东采油厂, 新疆维吾尔自治区鄯善 838202)

[摘要] 水平井可以在不太厚的油层中增大钻井过油层范围, 实现高速注、采, 提高产量。有些水平井需要压裂, 因此常常需要了解并控制人工裂缝形态、方位。通过微地震人工裂缝监测, 研究已有的水平井压裂结果, 特别是钻井水平段大体沿最大水平主应力方向的水平井压裂, 了解压裂裂缝形成的机制及控制方式。通过比较, 进一步提高水平井钻井水平及控缝理论。

[关键词] 水平井; 压裂裂缝; 微地震监测

[中图分类号] TE357.1⁺4 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)04-0060-05

1 水平井压裂裂缝形成与扩展理论

钻孔过程中会形成井壁应力集中, 后期套管完井仅对继续变形形成支撑作用, 不可能使地层恢复到钻井前的应力状态, 钻孔壁一次应力集中是存在的。钻井水平段上的一次应力集中可以表示为^[1]

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_n + \sigma_v}{2} \left[1 + \frac{R^2}{r^2} \right] - \frac{\sigma_n - \sigma_v}{2} \left[1 + \frac{3R^4}{r^4} \right] \cos 2\theta \quad (1)$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_H + \sigma_k}{2} + \frac{\sigma_H - \sigma_k}{2} \cos 2\alpha \quad (2)$$

式中, r 是矢径, R 是钻孔半径; σ_H, σ_h 分别是最大、最小有效水平主应力; σ_n, σ_v 分别是和钻孔水平段走向垂直的水平有效主应力、垂向主应力; α 是最小水平主应力方向与钻孔水平段走向的夹角, θ 是从水平方向起算的圆周角, σ_{θ} 是钻孔壁周向有效应力集中, $r=R$ 时得出射孔根部周向应力, 记为 $\sigma_{\theta 2}$, 见图 1(a)。

套管射孔后, 作用在射孔壁的三向有效应力见图 1(b), 可以表示为:

$$\sigma_{n1} = \left[\frac{\sigma_H + \sigma_k}{2} + \frac{\sigma_H - \sigma_k}{2} \cos 2\alpha \right] \sin^2 \theta + \sigma_v \cos^2 \theta \quad (3)$$

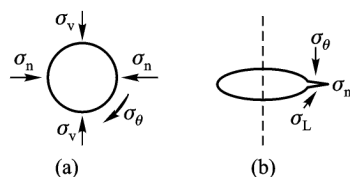


图 1 水平井钻孔壁和套管射孔的应力集中示意图

Fig. 1 The schematic of concentrative stress on well wall and perforation

$$\sigma_{\theta 1} = \frac{1}{R_0 - R} \int_R^{R_0} \sigma_{\theta} dr = \frac{\sigma_n + \sigma_v}{2} \frac{R_0 + R}{R_0} - \frac{\sigma_n - \sigma_v}{2} \frac{R_0^3 + R_0 R^2 + R R_0^2 + R^3}{R_0^3} \cos 2\theta \quad (4)$$

$$\sigma_{L1} = \frac{\sigma_H + \sigma_k}{2} + \frac{\sigma_H - \sigma_k}{2} \cos 2\theta \quad (5)$$

$\sigma_{L1}, \sigma_{\theta 1}$ 是垂直于射孔轴的二向有效应力 (见图 1b), 其中, $\sigma_{\theta 1}$ 是作用在射孔壁上的平均周向有效应力; σ_{L1} 是沿钻孔水平段走向的原地有效应力, σ_{n1} 是沿射孔轴的原地有效应力; R 是钻孔半径, R_0 是射孔尖端到钻孔轴的长度。

一般可把钻孔直径估计为 15 cm, 水平井射孔深度较浅, 平均深度为 40 cm, R/R_0 约为 0.19^[1]。把上述数值代入式(4)中得:

$$\sigma_{\theta 1} = 0.6 [(\sigma_n + \sigma_v) - (\sigma_n - \sigma_v) \cos 2\theta] \quad (6)$$

[收稿日期] 2007-03-05

[作者简介] 刘建中(1947-), 男, 吉林吉林市人, 石油勘探开发科学研究院高级工程师

沿射孔壁发生初裂缝的形态、方向取决于 $\sigma_{\theta 1}$ 、 $\sigma_{\theta 2}$ 和 σ_L 的相对大小。在指定的压裂深度和钻孔水平段走向,可以认为 σ_L 是一常量,随着射孔位置不同,作用在射孔上的平均周向应力 $\sigma_{\theta 1}$,射孔根部周向应力 $\sigma_{\theta 2}$ 有所不同,初裂缝形态、方位也会有所不同。

在 $\sigma_{\theta 1}$ 显著大于 σ_L ,或二者接近,但射孔根部周向应力 $\sigma_{\theta 2}$ 大于 σ_L 时,人工初裂缝是垂直于钻孔水平段的直立裂缝,随后转向裂缝面垂直于最小主应力方向。从式(6)可以看出, θ 越小, $\sigma_{\theta 1}$ 越大,在 $\theta < 60^\circ$ 时,可能存在 $\sigma_{\theta 1} > \sigma_L$;或二者接近,射孔根部周向应力 $\sigma_{\theta 2}$ 大于 σ_L 。从而出现垂直钻孔水平段的直立裂缝。

在 $\theta > 60^\circ$ 时,可能出现 $\sigma_{\theta 1}$ 显著小于 σ_L ,人工初裂缝是沿着钻孔水平段、平行射孔轴的裂缝,随后转向裂缝面垂直于最小主应力方向,初裂缝形态受到射孔轴取向的影响。

2 南 232 - 平 255 井压裂微地震监测

2.1 南 232 - 平 255 井的位置与参数

南 232 - 平 255 井是大庆油田九厂的压裂井,图 2 给出水平井的位置与钻孔水平段走向,水平段东西走向,长度 548 m。

南 232 - 平 255 井有 4 个射孔段,每段 0.5 m,射 5 孔。射孔位置在竖直向上为 0° 的圆周上,射孔位置取在 $120^\circ, 150^\circ$ 方向,与水平轴向下夹角为 30° 处,分别为 2 孔或 3 孔(表 1)。

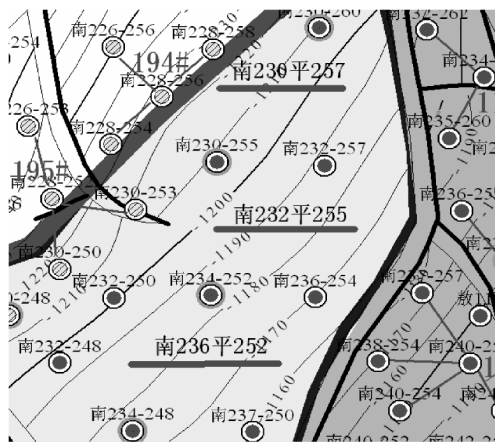


图 2 南 236 - 平 255 井的监测井位置及钻孔水平段走向

Fig. 2 The position of monitored well and orientation of horizontal section of Nan 236-Ping 255 well

表 1 压裂射孔井段

Table 1 The fracture and perforated zone

层位	小层编号	射孔井段/m	长度/m	枪型	孔径/mm	孔密/(孔·m ⁻¹)	总孔数	射孔方向
PI	1	1 535—1 535.5	0.5	DP36RDX - 1	8.8	10	5	水平向下 120°
PI	2	1 710—1 710.5	0.5					
PI	2	1 882—1 882.5	0.5					
PI	2	2 070—2 070.5	0.5					

水平段在井口西侧,表 2 给出其参数。

表 2 射孔井段的斜深、垂深、水平位移及平移方位

Table 2 The slanted depth, vertical depth, horizontal displacement and direction of deviation of perforated zone

斜深	垂深	水平位移	平移方位
/m	/m	/m	/($^\circ$)
1 529.4	1 323.2	308.95	269.77
1 708.69	1 331.1	487.95	269.62
1 888.38	1 336.22	667.38	270.2
2 059.45	1 342.98	838.21	270.5
2 068.86	1 343.85	847.58	270.49
2 078.29	1 344.71	856.97	270.47

2.2 南 232 - 平 255 井监测结果

图 3 是微地震方法监测结果平面图,按表 2 的参数标出井口位置和射孔段位置^[2,3]。图中,大圆

点是监测台站位置,小点是监测到的微地震。可以看到,每一个射孔段都对应一组裂缝。裂缝发育程度自井口由大到小依次为第一、三、四、二射孔段,第二个射孔段裂缝最不发育。近井人工裂缝,大体垂直于射孔水平段走向;第一、二个射孔的人工裂缝方向是北北东向,第三、四个射孔的人工裂缝方向是北北西向;远井裂缝有明显的转向北东东方向的最大水平主应力方向的趋势。受人工裂缝方向差异和转向趋势的影响,使得第二、三射孔的人工裂缝在南翼出现相互扰动,连成一片,难以判断一些微地震点的归属。

图 4 是监测结果的立体图,其中,4 条裂缝清晰可见,与平面分析结果一致。

图 5 中,上侧图是压裂施工曲线,下侧图是微地

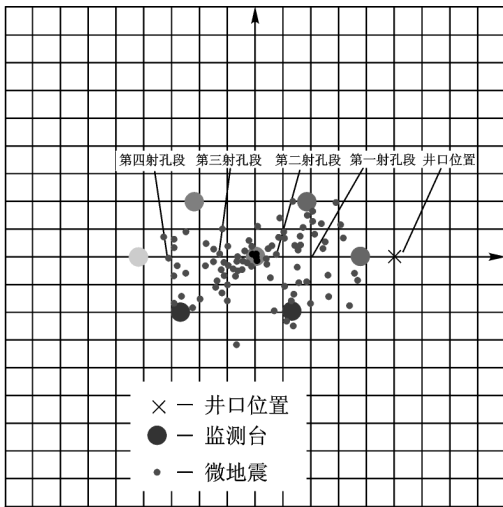


图3 南232-平255井监测结果平面图
Fig.3 The plane figure of monitored result of Nan 236-Ping 255 well

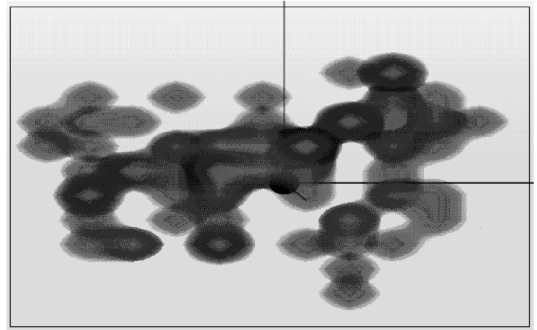


图4 南232-平255井监测结果的立体图
Fig.4 The cube figure of monitored result of Nan 236-Ping 255 well

震时间-频度图。该次压裂,分二段进行:第一段是试压裂;第二段是正式压裂。监测自13:07开始,14:40结束。把二者的时间轴对齐,以比较施工过

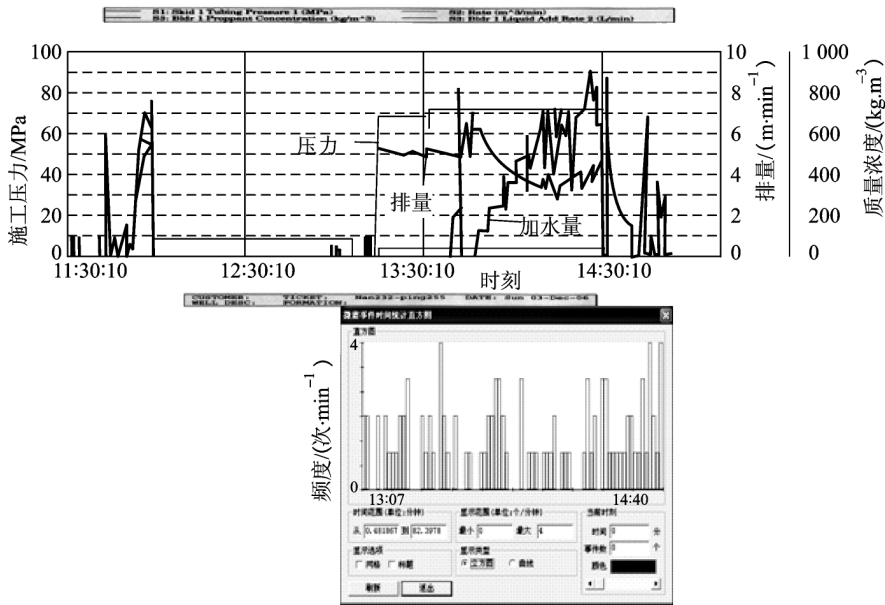


图5 压裂施工曲线与微地震时间-频度图

Fig.5 The fracture construction curve and time-frequency of the microseism

程与微地震频度。可以看到,在开始加压、加砂时及关井时,均出现频度较高的微地震。

3 监测结果分析

大庆油田外围的应力测量结果如下^[4]:

$$\begin{aligned}\sigma_H &= -1.2 + 0.0197H \\ \sigma_h &= -0.124 + 0.0105H \\ \sigma_v &= 0.013H\end{aligned}$$

$\sigma_H, \sigma_h, \sigma_v$ 分别是大庆油田外围的最大、最小有效水平主应力、垂向有效水平主应力; H 是深度,为1350 m。

据来自大庆油田的大量的人工裂缝监测结果,大庆油田平均最大水平主应力方向为北东60°,对于近东西向的钻孔水平段,与最大水平主应力方向的夹角 α 约30°。

据射孔位置、方向,以竖直向上方向为0°的圆周角 θ 为120°,与水平轴夹角30°。

把应力测试结果及夹角 α , 圆周角 θ 代入式(3)至式(6)中, 可以计算出作用在射孔上的三向应力值。进而分析水平井人工裂缝形态和方位。

作用在射孔上的三向应力值为:

$$\begin{aligned}\sigma_{n1} &= 17.64 \text{ MPa} \\ \sigma_{01} &= 20.67 \text{ MPa} \\ \sigma_L &= 22.48 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (7)$$

由公式(7)可以看出, σ_{01} 与 σ_L 相近, 形成二种裂缝均有可能。应考虑其它因素的影响, 特别是射孔根部应力集中的影响。

据式(1), 在射孔根部, $r = R$, 可以计算出:

$$\sigma_{02} = 2\sigma_v = 35.1 \text{ MPa}$$

由于 σ_{02} 远大于 σ_L , 在射孔根部出现压裂裂缝, 仅需较小的压裂压力, 人工裂缝与 σ_{02}, σ_{01} 平行。

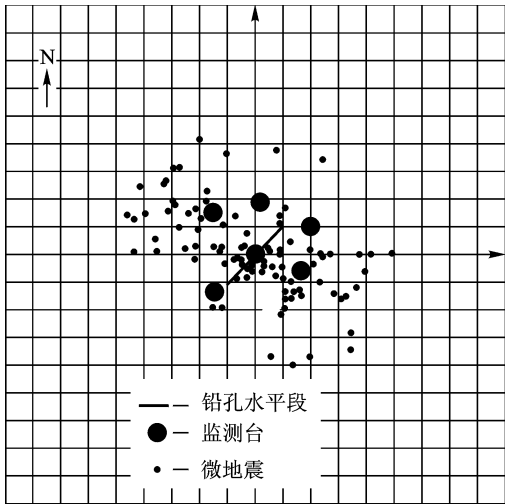


图6 红2-17井压裂监测结果平面图

Fig. 6 The plane figure of monitored result of Hong 2-17 well

压裂液首先经过射孔根部, 出现沿射孔轴的直立裂缝, σ_{01} 又与 σ_L 相近, 不会对裂缝的形成有明显阻力, 使初裂缝形成规模。在裂缝延伸过程中, 转向裂缝面垂直最小主应力方向。这一结果表明, 即使钻孔水平段大体沿着最大水平主应力方向, 由于钻孔上的应力集中, 多数人工裂缝仍然垂直钻孔水平段, 近井出现多条裂缝。以前多认为若钻孔水平段沿最大水平主应力方向, 则人工裂缝应该大体与水平段平行。由于钻孔壁的应力集中, 实际裂缝方位与以往判断不同, 而与水平段大体垂直。

这一结论与多数监测结果一致, 在大庆油田七厂的南220-平331井、南214-平324井、新疆吐哈油田的红2-17井均监测到类似的结果。

红2-17井压裂是近年来少有的大型压裂, 使用二个压裂队, 注液近千立方米。

根据气藏分布, 红2-17井设计裂缝方向沿钻孔水平段走向, 日产气 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$; 监测到的人工裂缝方向大体垂直钻孔水平段走向(见图6), 日产气 $2.3 \times 10^4 \text{ m}^3$, 远低于设计产量。

因此, 通过理论分析与计算, 对压裂裂缝进行预测与控制是很有必要的。据上述计算过程, 可以通过控制射孔位置、方向、深度来预测、控制压裂裂缝方位、形态, 从而提高压裂效果。

参考文献

- [1] 刘建中, 王秀娟, 孙玉玲, 等. 人工压裂形成多裂缝的可能性研究[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(3): 103-106
- [2] 刘建中, 王春耘, 刘继民, 等. 用微地震法监测油田生产动态[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 71-73
- [3] 齐铁新, 刘建中, 秦贵林, 等. 井下裂缝连通技术在安棚碱矿的应用[J]. 中国工程科学, 2006, 8(7): 63-67
- [4] 刘建中, 张金珠, 张雪. 油田应力测量[M]. 北京: 地震出版社, 1993

Monitoring and Analyzing on Fracturing Fracture from Horizontal Well

Liu Jianzhong¹, Zhang Chuanxu², Zhao Yanbo²,
Jiang Yushuang³, Song Jianxing³

(1. CNPC Exploration and Production Institute, Beijing 100083, China; 2. CNPC Daqing
Oilfield No. 9 Oil Production Plant, Daqing, Heilongjiang 163853, China;
3. CNPC Tuha Oilfield Qiudong Oil production Plant, Shanshan, Xinjiang 838202, China)

[**Abstract**] The horizontal well is a new format of oil production in the technology of drilled well development. It increases the range of drilling well crossing oil layer in a thin oil-bearing formation, carrying out high speed water flooding and oil extraction and improving production. Some horizontal wells need fracturing, therefore the shape and orientation of the man-made fracture is often expected to be understood and controlled. The microseism monitoring of man-made fracture can understand the shape and orientation of fracturing fracture. By researching already fractured result of horizontal well, in particular the horizontal section of drilling well along the orientation of maximum horizontal principal stress, the forming mechanism and controlling pattern. Thus the drilling well level of horizontal well and controlling fracture theory can be improved.

[**Key words**] horizontal well; fracturing fracture; microseism monitor