

大牛地气田多簇压裂产能影响因素分析及裂缝参数优化

朱新春

(中国石化华北分公司工程技术研究院,河南 郑州 450006)

摘要:大牛地气田盒1层属于低孔低渗致密气藏,主要采用裸眼封隔器分段压裂工艺进行压裂投产,取得了较好的改造效果。为了充分动用低品位气藏储量,该气田进行了水平井分段多簇压裂工艺试验探索。通过建立水平井分段多簇压裂产能模型,利用Eclipse数值模拟软件分析了影响水平井产能的地质因素及裂缝因素,同时利用正交试验设计方法对产能影响因素进行权重分析,明确了主要影响因素,进而对压裂裂缝设计参数进行了优化。现场应用效果显示分段多簇压裂工艺能够显著提高单井产量。

关键词:大牛地;水平井;分段多簇压裂;产能影响因素

中图分类号:TE357 **文献标识码:**A

Analysis of productivity influencing factors and optimization of fracture parameters for multi-cluster fracturing

Zhu Xinchun

(Engineering Technology Research Institute of North China Company, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450006, China)

Abstract: The He-1 layer of Daniudi gas field belongs to the low porosity and low permeability gas reservoir. As for this, we mainly used the packer fracturing technology in the open hole, and achieved great results. In order to make full use of the low grade gas reservoirs, the horizontal wells of this gas field has been studied by the multi-cluster fracturing technology. By establishing the model of the horizontal wells productivity with the multi-cluster fracturing and using the Eclipse numerical simulation software, the geological factors and the fracture factors that affect the productivity of the horizontal wells were analyzed. Meanwhile, the orthogonal test design method was used to analyze the weight of the influence factors of the production capacity to determine the main influence factors and then optimize the design parameters of the fracturing. The application effect showed that the multi stage fracturing significantly improved the well production.

Key words: Daniudi, horizontal well, multi-cluster fracturing, productivity influencing factor

大牛地气田位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡北部,从上到下发育多套储层,其中主力开发层位为上古生界盒1层,储层埋深2 650 m,平均孔隙度8%,平均渗透率为 $0.43 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,压力系数0.91,属于典型的低孔低渗致密气藏^[1]。自然投产产量普遍较低,利用水平井压裂投产是其获得产能的主要手段。

大牛地气田盒1层水平井主要采用裸眼封隔器分段压裂工艺^[2]进行压裂投产,取得了较好的改造效

果,有效支撑了气田增储建产。随着勘探范围逐步扩大,气藏品位逐渐降低,常规压裂工艺改造效果逐渐变差,迫切需要探索新的压裂工艺,通过扩大压裂改造体积,提高单井产量。为此,大牛地气田进行了分段多簇压裂工艺现场试验,该工艺能够通过定点射孔针对性改造储层,配合大排量施工能够有效提高裂缝长度,同时,通过多簇射孔利用诱导应力能够形成复杂缝网,进而提高压裂改造体积。

收稿日期:2017-02-16。

作者简介:朱新春(1987—),男,硕士,助理研究员,储层改造研究。

基金项目:国家科技重大专项“低丰度致密低渗油气藏开发关键技术”(2016ZX05048)。

为了使多簇压裂后水平井产能达到最优^[3],需要对影响水平井产能因素进行分析,优化裂缝设计参数。利用数值模拟方法,建立了水平井分段多簇压裂产能模型,对影响水平井产能的地质及裂缝参数^[4]进行分析。利用正交试验设计及灰色关联方法^[5]明确了影响压裂水平井产能的主要因素。根据分析结果对裂缝参数进行了优化,并进行现场应用,有效提高了单井产量。

1 模型建立

水平井分段多簇压裂产能模型的基本假设:

- 1) 均质盒装气藏外边界为封闭边界;
- 2) 流体、基质均微可压缩;
- 3) 水力裂缝产生的主裂缝垂直于井筒,且关于井轴对称,簇与簇之间产生的次生裂缝垂直于主裂缝,形成相互交错的裂缝网络;
- 4) 根据水力压裂区域附近由薄弱点剪切破坏产生的微地震图的形状,假设压裂区域为椭球状^[6](图1);
- 5) 人工裂缝的高度等于气藏厚度。

其中单个椭圆体中裂缝网络的产量是通过计算所有椭圆环中产能的累加和得到:

$$Q_g = \sum_{k=1}^N (q_{gkx} A_{xk} + q_{gky} A_{yk}) \quad (1)$$

式中: Q_g 为致密砂岩储层椭圆体中裂缝网络的产能, m^3/s ; q_{gkx} 为第 k 个椭圆环内与 x 轴平行的裂缝内的产能, m^3/s ; q_{gky} 为第 k 个椭圆环内与 x 轴垂直的裂缝内的产能, m^3/s ; A_{xk} 为第 k 个椭圆环内与 y 轴平行的所有裂

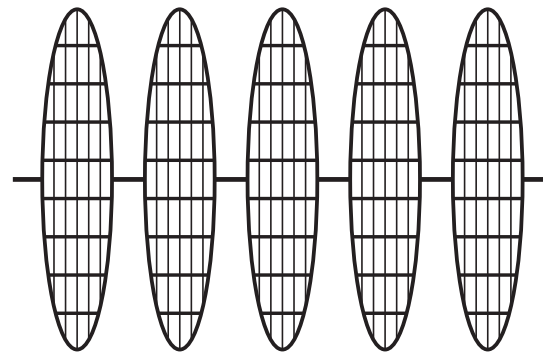


图1 水平井分段多簇压裂模型示意图

Fig. 1 Horizontal well segmented multi cluster fracture model diagram

缝的表面积, m^2 ; A_{yk} 为第 k 个椭圆环内与 y 轴垂直的所有裂缝的表面积, m^2 。

假设不考虑裂缝网络之间的相互干扰,基于裂缝产量叠加原理,大牛地盒1层致密砂岩气藏水平井分段多簇压裂产能可以通过计算所有椭圆体中产能进行累加得到:

$$Q_{\text{总}} = \sum_{i=1}^N Q_{gi} \quad (2)$$

式中: $Q_{\text{总}}$ 为致密砂岩储层水平井多簇压裂单井产能, m^3/s ; Q_{gi} 为第 i 个椭球体裂缝网络的产能, m^3/s 。

为了更好地表征次生裂缝的形态,采用 Eclipse 数值模拟软件局部网格加密方法可以精确地描述水平井分段多簇压裂后形成的裂缝形态^[7]。同时为了便于网格的划分,根据压裂后改造体积相等原则,即 $V_{\text{DFN}} = \text{带长} \times \text{带宽} \times \text{裂缝高度}$,将改造体积进行等效处理为长方体,结合地质参数(表1),最终可以建立水平井分段多簇压裂产能数值模型。

表1 盒1气层数值模拟参数

Table 1 Numerical simulation parameters of He 1 gas reservoir

储层厚度/ m	孔隙度, %	渗透率/ $10^{-3} \mu m^2$	水平井长度/ m	裂缝导流能力/ ($\mu m^2 \cdot cm$)	裂缝半长/ m	裂缝高度/ m	模拟生产时间/ 年
14	8	0.43	800	30	130	12	10

2 产能影响因素分析

影响致密砂岩气藏水平井分段多簇压裂产能的因素主要包括裂缝参数和地层参数^[8]。裂缝参数主要有裂缝级数、裂缝簇数、裂缝导流能力、裂缝长度等,这些参数均为可控参数;地层参数主要有地层渗透率、气层厚度等参数,这些参数为不可控参数。为

了定性了解各因素对水平井产能的影响,通过水平井分段多簇压裂产能模型对产能影响因素分别进行了分析。

2.1 地质参数

2.1.1 地层渗透率

通过模拟不同地层渗透率不同生产时间下的气

井产量(图2),可以看出地层渗透率对水平井产能的影响很大,随着地层渗透率的增加,水平井累计产气量同步增加。在相同生产时间内,当地层渗透率低于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,渗透率对产能影响较为明显,水平井的累计产气量的增幅较大,当地层渗透率高于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,渗透率对产能影响逐渐减弱,水平井累计产气量的增幅较小。对于盒1层致密砂岩气藏,储层渗透率多在 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下,分段多簇压裂时,选择渗透率较大的层段对提高压裂效果较为重要。

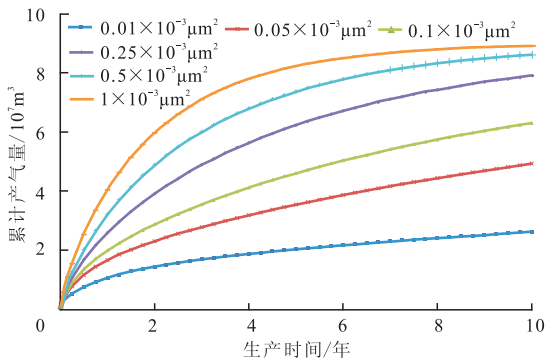


图2 不同地层渗透率下的累计产量曲线

Fig. 2 Cumulative production curve under different formation permeability

2.1.2 地层厚度

为了研究地层厚度对盒1组水平井产能的影响,分别模拟了不同地层厚度下的水平井产量进行对比分析(图3)。

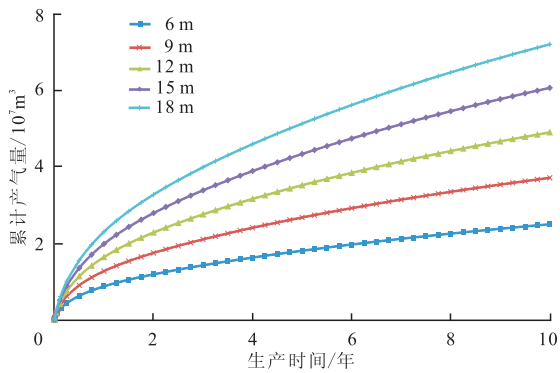


图3 不同地层厚度下的累计产量曲线

Fig. 3 Cumulative production curve under different thickness

由图3可知,地层厚度是影响盒1组水平井产能的重要因素,地层厚度越大,越有利于提高压裂后的累计产气量,压裂水平井产能越高,故而进行分段多簇压裂时,应尽可能选择厚气层。

2.2 裂缝参数

2.2.1 多簇裂缝参数

为了研究多段多簇缝对盒1组产能的影响,分别模拟了不同裂缝段间距不同簇数对产能的影响(图4),簇间距均为20 m。

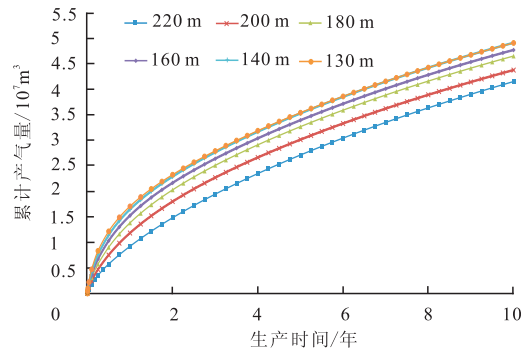


图4 段内2簇时不同段间距下的累计产气量

Fig. 4 Cumulative gas production at different separation distance with 2 clusters

裂缝段间距一定时,随着时间的增加,累计产气量也增加,但是增加的幅度是逐渐减小的。当生产时间一定时,累计产气量随着段间距的减小而增加,当段间距较大时,减小段间距可以大幅度提高产能,但当段间距减小至一定值(130 ~ 150 m)时,水平井的产能增加幅度则逐渐变缓。这是由于随着裂缝段数的增加,段与段之间的间距减小,各裂缝之间的相互干扰严重,地层压力下降幅度较大,使得每条裂缝的产量减小。

通过对比相同生产时间不同段间距及不同簇数条件下压裂水平井累计产气量可以看出(图5),增加

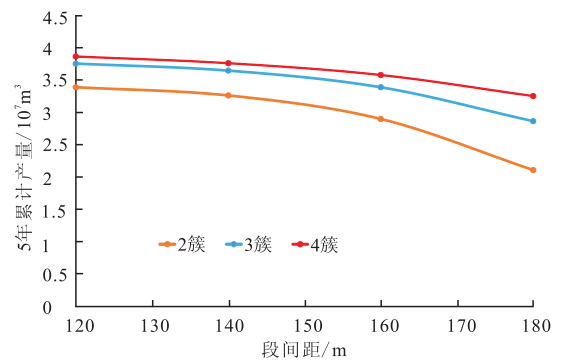


图5 不同簇数下5年累计产气量变化规律

Fig. 5 Variation of cumulative gas production during 5 years under different cluster numbers

簇数可以提高单井累计产量。在130~150 m段间距条件下,4簇仅仅比3簇的产能多出很少一部分,从经济角度考虑优选合理簇数为2~3簇。

2.2.2 裂缝长度

为了研究裂缝半长对产能的影响,分别模拟了一定段间距(140 m)、一定导流能力($30 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$)下不同裂缝半长时的产能,并进行对比分析。

在渗透率和导流能力一定时,日产量随着裂缝长度的增加而增加,但是增加的幅度是逐渐减缓的。对于渗透率较高地层,当裂缝半长较小时,日产量随裂缝半长增加而增加较为明显,但当裂缝半长增加至一定值(200~250 m)时,裂缝半长对日产量的影响逐渐减弱(图6)。

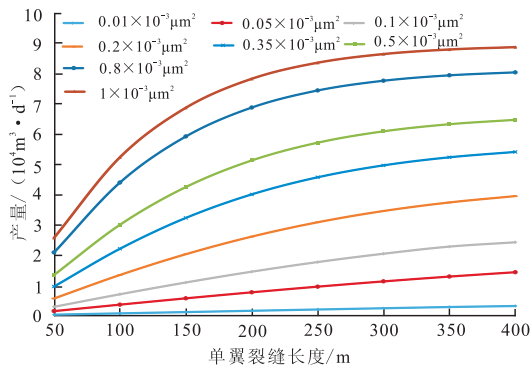


图6 不同裂缝长度下初期产量的变化

Fig. 6 Variation of initial production under different fracture length

2.2.3 导流能力

由不同裂缝导流能力条件下的累积产量变化图(图7)可以看出,随着导流能力的增加,气井产量逐渐增大。同时当导流能力小于 $30 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 时,导流能力对单井产量影响较为明显,而当导流能力大于40

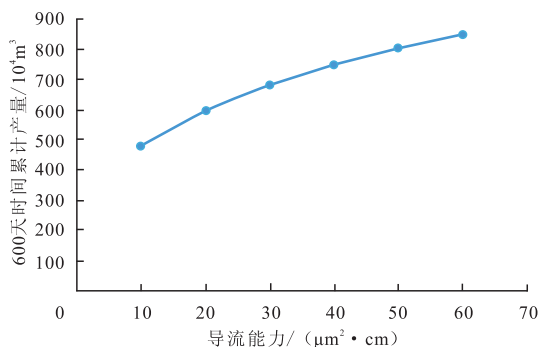


图7 不同导流能力下累计产气量变化

Fig. 7 Cumulative production curve under different conductivity

$\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 时,导流能力对单井产量影响逐渐减弱。裂缝导流能力达到 $30 \sim 40 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 时,能够较好地保持产量。

2.3 影响因素权重分析

通过模拟裂缝参数和地层参数对致密砂岩气藏水平井分段多簇压裂产能影响研究可知,不同因素均可以对水平井产能产生影响。为了研究多因素作用下对水平井产能的影响及影响程度的主次关系,利用正交试验设计方法科学安排多因素试验方案,定量确定各影响因素对累计产气量影响的主次顺序以及显著程度,并采用灰色关联法对其进行校验。

选取影响致密砂岩水平井分段多簇压裂产能的主要因素为地层厚度、地层渗透率、裂缝段间距、裂缝长度以及裂缝导流能力5个因素作为正交试验的因素,每个因素再选取4个水平,则正交试验因素水平设计见表2。

表2 影响累计产气量试验因素水平取值

Table 2 Influence factors of cumulative gas production test

参数水平	地层厚度/m	地层渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	裂缝段间距/m	裂缝半长/m	裂缝导流能力/ $(\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm})$
1	6	0.3	100	50	10
2	9	0.4	120	100	20
3	12	0.5	140	200	30
4	15	0.6	160	300	40

根据影响累计产气量因素水平取值,选取 $L_{16}(4^5)$ 正交表进行累计产气量的试验,考察各个因素对累计产气量的影响。

根据正交试验设计原理,极差反映了因子的水平变化对试验结果的影响,同时极差的大小也反映了因子的重要程度,极差越大,该因素对试验结果的影响就越大。表3可知,对水平井分段多簇压裂产能影响最大的因素是地层厚度和地层渗透率,这说明决定致密砂岩气藏产能的主要因素是地层的储集能力和渗流能力。对于人为可控因素,从表3中可以看出,影响致密气藏产能的主要因素是裂缝段间距,其

表3 正交试验设计结果(盒1层)

Table 3 Results of orthogonal test design(layer He-1)

指标	极差/ 10^7m^3	关联度, f
地层厚度	1.651	0.670 6
地层渗透率	1.427	0.655 1
裂缝段间距	0.797	0.652 4
裂缝半长	0.29	0.638 9
裂缝导流能力	0.106	0.627 4

次是裂缝半长,最后是裂缝导流能力。

为了检验该结果的正确性,进一步采用了灰色关联理论进行分析,以5年累计产气量作参考系列,其他5个因素作为比较系列,计算参考系列与比较系列之间的关联系数,再计算其平均值即可得到关联度,关联度的大小即可反映因素对5年累计产气量的影响程度。关联度越大,该因素对试验结果的影响就越大。由表3可知,对致密砂岩气藏水平井分段多簇压裂产能的影响程度排序为:地层厚度>地层渗透率>裂缝段间距>裂缝半长>裂缝导流能力。该方法计算出来的影响因素排序与正交试验设计方法的排序完全一致,验证了结果的正确性。

3 裂缝参数优化

依据裂缝因素对水平井分段多簇压裂产能影响分析可以得到,对于不同裂缝参数存在一定最优值,

既保证能够较大程度提高单井产能,同时能够满足经济成本要求。依据图4—图7,对裂缝参数进行优化^[9],可以确定合理的裂缝参数(表4)。

表4 裂缝参数优化结果

Table 4 Optimization results of fracture parameters

层位	段间距/m	簇数	裂缝导流能力/($\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$)	裂缝长度/m
盒1	130 ~ 150	2 ~ 3	30 ~ 40	200 ~ 250

4 现场应用

截至2016年7月底,水平井分段多簇压裂技术在大牛地气田共计应用2口井,为DNP1井及DNP5井。从钻遇显示来看,两口井与临井相当。压后,DNP1井无阻流量达 $12.47\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$,为临井的3~8倍;DNP5井无阻流量为 $13.7\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$,相比临井,产量提高了23%(表5)。水平井分段多簇压裂技术提产效果明显。

表5 分段多簇压裂效果与临井对比

Table 5 Comparison of effect of wells with segmented multi cluster fracturing and adjacent wells

井组	井名	水平段长/m	气厚/m	显示钻遇率,%	平均全烃,%	段数/簇数	单段加砂/ m^3	无阻流量/($10^4\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)
DN1	DNP1	1 200	541	45.1	11.6	8/15	49.5	12.47
	DNP2	1 201	672	56.0	34.9	7	40.4	4.17
	DNP3	1 200	630	52.5	28.4	9	40.3	1.61
	DNP4	800	192	24	22.8	7	31	2.45
	DNP5	1 106	439	39.7	47.2	7/11	51.94	13.7
DN5	DNP6	1 200	403	33.6	17.2	8	45.1	10.56
	DNP7	1 028	428	41.6	23.7	7	36.1	11.67

5 结论

1) 利用数值模拟方法建立了水平井分段多簇压裂产能模型,对影响水平井产能的地层渗透率、地层厚度、压裂段间距、裂缝长度、导流能力等参数进行了分析,明确了各因素影响程度:地层厚度>地层渗透率>裂缝段间距>裂缝半长>裂缝导流能力。

2) 通过数值模拟方法优化盒1层裂缝参数为:簇数2~3簇,段间距130~150 m,裂缝导流能力30~40 $\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$,裂缝长度200~250 m。

3) 通过现场应用证实大牛地气田水平井分段多簇压裂工艺提产效果明显。

参考文献

[1] 陈路原.大牛地气田盒1气藏水平井开发工程技术与实践[J].石油钻探技术,2015,43(1):44-51.

[2] 秦玉英.不动管柱分层压裂工艺技术在牛地气田的研究与应用[J].油气井测试,2008,17(1):53-55.
 [3] 梅显旺,罗梅,马威奇,等.致密油水平井多级压裂后产能影响因素分析[J].油气井测试,2016,25(4):29-32.
 [4] 赵正涛,罗惠芬,梁勇,等.水平井多段压裂产能研究分析[J].新疆石油科技,2014,24(4):17-20.
 [5] 李玉伟,艾池,胡超洋,等.应用模糊综合评判和灰色关联度分析评价水平井多级压裂效果[J].数字的实践与认识,2014,44(2):51-56.
 [6] 袁彬,苏玉亮,丰子泰.体积压裂水平井缝网渗流特征与产能分布研究[J].深圳大学学报(理工版),2013,30(5):545-550.
 [7] 王倩,应海玲,唐永亮,等.特低渗透油藏压裂水平井产能影响因素研究[J].新疆石油天然气,2013,9(3):62-65.
 [8] 王晓泉,张守良,吴奇,等.水平井分段压裂多段裂缝产能影响因素分析[J].石油钻采工艺,2009,31(1):73-76.
 [9] 徐创朝,陈存慧,王波,等.低渗致密油藏水平井缝网压裂裂缝参数优化[J].断块油气田,2014,21(6):823-827.

(编辑 尹淑容)