

# 暂堵转向分层压裂工艺在薄互层油藏中的应用研究

金智荣<sup>1</sup>, 包敏新<sup>1</sup>, 李升芳<sup>2</sup>, 张华丽<sup>1</sup>, 杲 春<sup>1</sup>

(1. 中国石化江苏油田分公司石油工程技术研究院; 2. 中国石化江苏油田分公司勘探开发管理部, 江苏 扬州 225009)

**摘要:**针对因井筒条件或隔层封挡能力达不到机械分层压裂要求的薄互层油藏, 提出用暂堵转向分层压裂工艺来实现非均质油层逐层充分改造。建立了暂堵球坐落并有效封堵射孔孔眼的数学模型, 分析了暂堵球封堵不同压裂油层厚度所需的最低施工排量条件, 评价了Z-1型暂堵球封堵承压和溶解性能, 在W-55井实际应用中实现了两个非均质油层的逐层改造。

**关键词:**暂堵转向; 分层压裂; 暂堵球; 薄互层; 射孔炮眼

**中图分类号:**TE35

**文献标志码:**A

## Application of temporary plugging and diversion separate layer fracturing in thin interbedded reservoirs

JIN Zhirong<sup>1</sup>, BAO Minxin<sup>1</sup>, LI Shengfang<sup>2</sup>, ZHANG Huali<sup>1</sup>, GAO Chun<sup>1</sup>

(1. Petroleum Engineering Technology Research Institute of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou 25009, China;

2. Ministry of Exploration and Development of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou 25009, China)

**Abstract:** In order to effectively produce reserves of thin interbedded reservoirs, it was proposed to apply the temporary plugging and diversion separate layer fracturing for realizing the layer-by-layer stimulation of each layer when the mechanical separate conditions can not be met. Under the condition that the temporary plugging ball can effectively occupy the perforating blast hole and achieve the sealing and non-shedding construction, the Z-1 type temporary plugging material was optimized based on experiments to meet the requirements of sealing pressure in fracturing process and rapid dissolution after fracturing process. The successful application of well W-55 in the field has realized the goal of layer-by-layer stimulation of two heterogeneous oil layers.

**Key words:** temporary plugging and diversion; separate layer fracturing; temporary plugging ball; thin interbedded layers; perforating blast hole

江苏油田韦庄等区块属于中低渗油藏, 埋深较浅, 通常在1 000~1 300 m范围, 油层温度在40~50℃。纵向上油层呈现油水互层、层多层薄现象。条件允许时, 可通过机械分层压裂采用一趟管柱实现对各油层逐层改造。当井筒条件或隔层封挡能力不符合施工要求的情况下, 江苏油田尝试通过投蜡球来封堵已压裂层, 转而压开破裂压力高的层。但是蜡球封堵承压能力弱、难溶、施工过程易从射孔炮眼脱落。近年来, 在页岩气水平井中, 利用水溶性暂堵材料实现多段多簇缝网压裂的技术逐步成熟<sup>[1-2]</sup>, 该暂堵工艺也被引用到直井多油层逐层压裂改造作业中, 但是封堵失败的问题时有发生, 为

此, 对暂堵转向分层压裂工艺展开进一步研究。

### 1 暂堵转向压裂技术原理

暂堵转向分层压裂就是对物性好的低破裂压力油层实施加砂压裂后, 往井筒内投入一定数量和粒径的暂堵球, 随压裂液携带至预期已压裂层的射孔炮眼处对其封堵, 继续注液使井筒压力上升, 当压力

收稿日期: 2019-05-21; 改回日期: 2019-06-13。

第一作者简介: 金智荣(1982—), 副研究员, 现从事油井压裂增产工艺技术研究。E-mail: jinrz.jsyt@sinopec.com。

攻关项目: 江苏油田分公司“裂缝暂堵转向压裂工艺研究”(JS18016)。

达到物性差的油层破裂压力值时,该层被压开。反复此过程,实现改造多个油层的目的。

## 2 暂堵转向分层压裂排量选择

暂堵球随压裂液被携带入井筒中作紊流态流动,其受力如图1所示。若使暂堵球运移到射孔炮眼处,应满足  $F_T$  大于  $F_G$ 。

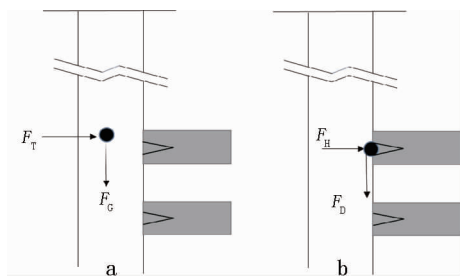


图1 暂堵球在井筒中运移和暂堵射孔炮眼过程受力变化

根据文献可知<sup>[3-4]</sup>:

$$F_G = 0.2619 \frac{\rho_B D^3}{d_c} (\mu_1 + \mu_2)^2 \quad (1)$$

$$\text{其中: } \mu_1 = 2.12 \times 10^{-2} Q/d_c^2 \quad (2)$$

$$\mu_a = \frac{3.165}{1 + D/(d_c - D)} \sqrt{\frac{(\rho_B - \rho)D}{\rho f_d}} \quad (3)$$

$$F_T = 4.41 \times 10^{-5} \frac{F_d D^2 Q^2}{n^2 D_p^4 C_d^2} \quad (4)$$

式中:  $F_T$  为流向射孔炮眼的压裂液对暂堵球的拖曳力, N;  $F_G$  为暂堵球受到的向下运动惯性力, N;  $\rho_B$ 、 $\rho$  分别为暂堵球密度和压裂液密度,  $\text{kg}/\text{cm}^3$ ;  $D$ 、 $D_p$  分别为暂堵球直径和射孔炮眼直径, m;  $\mu_1$ 、 $\mu_a$  分别为压裂液在井筒中流速和暂堵球颗粒在压裂液中沉降速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $f_d$  为摩阻系数, 无因次;  $C_d$  为阻力系数, 无因次;  $d_c$  为压裂油管直径, m;  $n$  为射孔炮眼数;  $Q$  为施工排量,  $\text{m}^3/\text{min}$ 。

当暂堵球坐落于预期已压裂油层射孔炮眼上, 其受力如图1b所示。要实现暂堵球对射孔炮眼有效封堵, 施工过程中不随排量波动而发生脱落, 应满足  $F_H$  大于  $F_D$ 。

$F_H$  为暂堵球在孔眼上所受到的附着力, N;  $F_D$  为压裂液流动对暂堵球的推力, N。

$$F_D = 0.3927 f_D \rho \mu^2 D^2 \quad (5)$$

$$F_H = 1.76 \times 10^{-4} \frac{\rho D_p^3}{\sqrt{D^2 - D_p^2}} \left( \frac{1.06 Q^2}{n^2 D_p^4 C_d^2} - \frac{Q^2}{d_c^4} \right) \quad (6)$$

综合以上分析: 暂堵球能够坐落并封堵射孔炮眼不发生脱落, 需同时满足的条件是:

$$\begin{cases} F_T \geq F_G \\ F_H \geq F_D \end{cases} \quad (7)$$

将预封堵层段相应参数代入式(7), 同时满足要求的排量即为对应的最低施工排量(见表1)。

表1 最小施工排量计算参数

参数	数值
压裂液密度 $\rho$ , $\text{kg}/\text{m}^3$	1 020
暂堵球粒径 $D$ , m	0.018
摩阻系数 $f_d$	0.2
阻力系数 $C_d$	0.82
暂堵球密度 $\rho_B$ , $\text{kg}/\text{m}^3$	1 100
射孔炮眼直径 $D_p$ , m	0.01
摩阻系数 $f_D$	0.47
油管直径 $d_c$ , m	0.062

暂堵球能够坐落射孔炮眼的最小排量:

$$Q_{\min} = \frac{0.046n^2 + 1.29n}{867 - 0.085n^2} \quad (8)$$

暂堵球能够封堵不脱落的最小排量:

$$Q_{\min} = \frac{0.36n^2 + 12n}{3779 - 0.352n^2} \quad (9)$$

当施工排量  $Q$  满足公式(8)、(9)即表示暂堵球能够有效坐落并封堵射孔炮眼。

图2是射孔炮眼数  $n$  转化为对应不同压裂油层厚度(每米油层对应射孔炮眼数为16)对暂堵转向分层压裂所需最低施工排量影响。可以看出, 暂堵球有效封堵射孔炮眼保持不脱落所需最低排量要大于暂堵球能够坐落于射孔炮眼所需排量, 因此在排量选择时只需满足暂堵球有效封堵不脱落最低排量即可。此外, 压裂油层厚度越大, 对应射孔炮眼数越多, 则暂堵球坐落并有效封堵的所需最低排量也明显增大, 表明暂堵球有效封堵射孔炮眼难度增加。

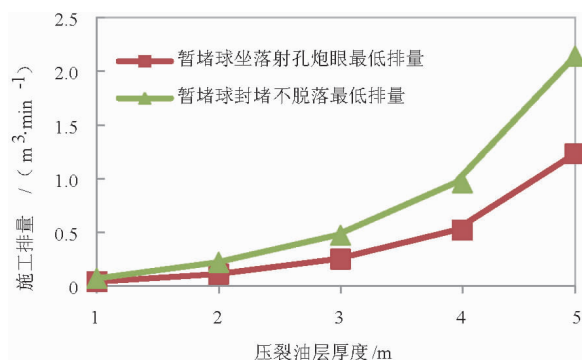


图2 不同压裂油层厚度下所需施工排量

在进行暂堵转向分层压裂施工排量选择时, 还需要综合考虑具体压裂油层深度、加砂规模等情况来进行优选。

### 3 暂堵材料性能优选

为了能够有效封堵射孔炮眼,选择的暂堵球必须具有一定承压能力,并且在施工结束后能够在低温条件下迅速降解,不影响后期压裂液返排及井筒内工具的起下作业。

优选合成树脂类 Z-1 型暂堵材料制成的暂堵球,该材料含有强亲水性基团,遇水能够起黏,并且兼具刚性特点,满足承压、水溶要求。

#### 3.1 承压性能

选用 18 mm 粒径 Z-1 型暂堵球颗粒,置于 10 mm 直径的模拟射孔炮眼装置上(见图 3),施加 30 MPa 压差,45℃ 条件下承压 4 h,压力基本未下降。取出暂堵球观察,球部分微变形未破碎,能够满足 30 MPa 压差条件的暂堵射孔炮眼施工。



图3 暂堵球在模拟射孔炮眼装置承压试验

#### 3.2 溶解性能

将承压试验后的 Z-1 型暂堵球颗粒放入清水中,45℃ 条件下,10 h 暂堵球颗粒表面部分软化溶解,溶液起黏,36 h 全部溶解,并且溶液均匀,有黏度(见图 4)。满足压裂下泵投产前全部溶解的要求,不会对井筒内工具和管柱造成影响。

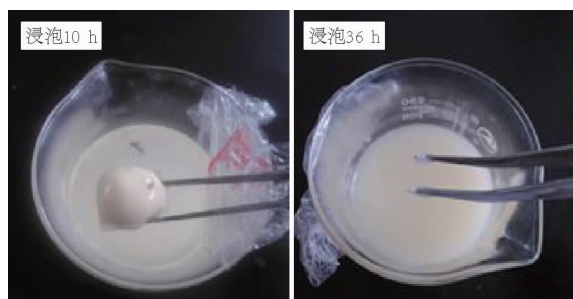


图4 Z-1 型暂堵球溶解状态

### 4 现场应用及效果

W-55 井压裂 10、14 号层,如表 2。考虑上下邻近射开油层情况,为实现两个非均质油层充分改造,采用暂堵转向分层压裂工艺。

表2 W-55 井压裂油层物性参数

层位	层号	井深/m	渗透率/ ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	测井解释
$E_1f_1^1$	5~9	1 140.8~1 170.3	32.34~508.33	干层/油层
	10	1 174.1~1 180.0	187.66	油层
$E_1f_1^2$	14	1 190.3~1 195.9	119.05	水淹层
	16~20	1 203.6~1 226.0	73.55~116.0	水淹层

根据压裂油层温度,考虑耐压和压后可溶要求,选择直径 18 mm、密度  $1.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  的 Z-1 型暂堵球。结合压裂模拟软件优化确定:①压裂 10 号层时排量  $2.0 \text{ m}^3/\text{min}$ ,加砂  $8 \text{ m}^3$ ;②投入 105 颗 Z-1 型暂堵球(暂堵球设计数量<sup>[5]</sup> = 射孔炮眼数  $\times$  1.1);③暂堵球坐落并封堵 10 号层,转向压裂 14 号层时排量根据图 2 研究结果确定为  $2.5 \text{ m}^3/\text{min}$ ,设计加砂  $8 \text{ m}^3$ 。

该井 2018 年 12 月压裂施工,按设计要求完成两个非均质油层逐层改造。该井压前日产液 7.3 t,日产油 0.9 t,压后投产日产液 14 t,日产油 2.3 t,增油效果明显优于邻井对应单层压裂。

### 5 结论及建议

(1)进行暂堵转向压裂施工排量选择时,要考虑暂堵球不仅能坐落射孔炮眼,还要保证暂堵球在施工过程中不脱落。

(2)压裂油层越厚,保证暂堵球有效封堵射孔炮眼所需排量越高,有效封堵的难度也越大。

(3)优选的 Z-1 型暂堵球能够满足低温溶解和封堵承压施工要求。

(4)W-55 井现场应用表明暂堵转向分层压裂施工可实现邻近非均质油层逐层压裂改造,压裂效果良好。

(5)暂堵转向分层压裂工艺可以作为机械分层压裂工艺的重要补充,为解决纵向上多个油层的逐层充分改造提供了更多的手段。

#### 参考文献:

- [1] 薛承瑾. 页岩气压裂技术现状及发展建议[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 24-29.
- [2] 刘敏, 康力, 李明, 等. 页岩气暂堵压裂技术在威远龙马溪组的应用[J]. 天然气技术与经济, 2018, 12(2): 45-47.
- [3] 王鸿勋, 张士诚. 水力压裂设计数值计算方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
- [4] 王兴文, 杨建英, 任山, 等. 堵塞球选择性分层压裂排量控制技术[J]. 钻采工艺, 2007, 30(1): 75-76.
- [5] 蒋廷学, 胥云, 李志平, 等. 新型前置投球选择性分压方法及其应用[J]. 天然气工业, 2009, 29(9): 88-90.

(编辑 韩 枫)