

文章编号:1673-5005(2007)06-0055-05

端部脱砂压裂充填防砂设计及其在涩北气田的应用

张启汉^{1,2}, 张士诚¹, 黄晓东³

(1. 中国石油大学 石油天然气工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油 青海油田公司, 甘肃 敦煌 736200;
3. 中国海洋石油 QHD32-6/BZ25-1 作业分公司, 天津 300450)

摘要:介绍了端部脱砂压裂充填防砂机理, 考虑压裂增产比和挡砂效果, 研究了压裂充填防砂砾石尺寸的选择思路和方法。以实现端部脱砂从而产生短而宽的充填裂缝为目的, 对脱砂时间、脱砂浓度、加砂时间、加砂浓度以及施工泵注程序等压裂防砂施工参数进行了优化设计。该套防砂工艺及设计方法在涩北气田应用 13 井次, 防砂增产成功率为 85%, 防砂后产量平均增幅 41.9%, 防砂效果良好, 达到了防砂与增产的目的。

关键词:端部脱砂; 压裂防砂; 砾石尺寸; 涩北气田; 优化设计

中图分类号:TE 358.1

文献标识码:A

Systemic design for tip screen out frac-pack sand control and its application in Sebei Gasfield

ZHANG Qi-han^{1,2}, ZHANG Shi-cheng¹, HUANG Xiao-dong³

(1. Faculty of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang 736200, Gansu Province, China;
3. QHD32-6/BZ25-1 Working Branch Company, China Offshore Petroleum, Tianjin 300450, China)

Abstract: According to the basic mechanism of tip screen out (TSO) frac-pack sand control and considering the effect of well stimulation and sand control, the design optimization method for gravel size was developed. TSO is necessary for the creation of short and wide fracture for high permeable formation. In order to achieve TSO, a systemic design model was evolved, which involves sand-out time, sand-out concentration, sand-up time, sand-up concentration and corresponding pumping program. The model was applied to 13 wells in Sebei Gasfield and the results are very well with success percent of 85% and production rate increases 41.9%.

Key words: tip screen out; frac-pack sand control; gravel size; Sebei Gasfield; design optimization

端部脱砂压裂防砂技术是近年来逐步发展起来的一种防砂工艺技术, 大大拓展了水力压裂技术的应用范围, 成为中高渗透油气层和不稳定松软地层的有效增产和防砂措施^[1,4]。目前结合纤维在油气田中的应用, 又出现了纤维复合无筛管压裂防砂技术^[5,6], 使用纤维加固裂缝中的砾石层, 从而避免了在井筒中使用筛管。压裂防砂技术在涩北气田、胜利油田等部分现场试验, 也取得了良好的效果。但目前关于压裂防砂的施工参数设计缺乏系统的理论和方法, 主要依靠经验和摸索完成。笔者对端部脱砂压裂防砂的施工

参数设计进行系统的研究, 提出可行的设计方法, 并在涩北气田进行应用。

1 端部脱砂压裂充填防砂机理

压裂充填防砂是在疏松砂岩高渗透油气层中通过水力压裂产生短而宽的裂缝, 然后用砾石充填, 形成高导流能力的人工裂缝。其工艺技术核心是端部脱砂, 即当水力裂缝长度和高度达到预期值时, 大排量泵入低砂比砂浆, 以保证砾石进入裂缝后不产生沉降, 从而能够到达裂缝周边边缘后沉积(图1)。

收稿日期: 2007-09-30

基金项目: “十五”中油股份有限公司重点攻关课题

作者简介: 张启汉(1966-), 男(汉族), 安徽安庆人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事石油工程技术研究与管理工作。

砾石在裂缝周边的沉积可以减缓裂缝长度的增加,并增大了裂缝内压力,从而加强裂缝在宽度方向上增长,最终形成短而宽的裂缝。从增产的角度讲,对于高渗透地层,增加裂缝导流能力比增加缝长更有利于提高增产效果。在裂缝中充填砾石形成一条高导流能力的渗滤带,有效地将地层压力传至井底,从而降低了生产压差,减小了原油的渗流阻力,达到增产和防砂的目的。

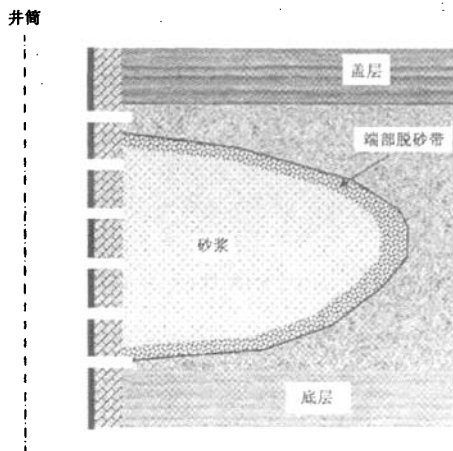


图1 端部脱砂原理

2 砾石支撑剂尺寸优选

进行端部脱砂压裂充填防砂设计时,首先要优选砾石支撑剂尺寸。支撑裂缝的主要特征参数包括支撑缝宽和裂缝的渗透率,两者的乘积为裂缝的导流能力。为了增加产量,要求裂缝的导流能力越大越好,而提高裂缝渗透率可以达到这一目的,即在支撑剂满足强度要求不发生破碎的情况下,粒径越大越好。但对于压裂防砂,裂缝中的砾石层还要起到阻挡地层砂的作用。因此,对于给定的裂缝尺寸,进行压裂充填支撑剂选择时,不但要考虑裂缝的导流能力,还要考虑支撑剂充填层的挡砂能力。

无因次裂缝导流能力定义为

$$C_{fd} = \frac{W_f k_f}{L_f k}$$

式中, C_{fd} 为无因次裂缝导流能力, $C_{fd} > 10$ 时可实现标准的双线性流; W_f 为裂缝宽度, m; L_f 为垂直裂缝半长, m; k_f, k 分别为裂缝和地层渗透率, μm^2 。

压裂充填井产能比可以使用麦克奎尔-希克拉曲线图版来计算^[1]。砾石层的孔喉结构、渗透率等参数通过孔喉结构模拟得到^[7]。

从挡砂角度考虑,砾石尺寸与地层砂粒度中值

之比应大体符合 Saucier 规则,即砾石的粒度中值 D_{50} 为地层砂粒度中值 d_{50} 的 5~6 倍。考虑到压裂充填防砂不同于普通的砾石充填,在高闭合压力下容易产生破碎,因此砾石尺寸应趋向于更小值。修正的 Saucier 方程为

$$D_{50} = (4 \sim 6) d_{50}$$

支撑剂尺寸选择方法和步骤为:(1)给定缝长、缝高、缝宽等裂缝几何尺寸参数;(2)给定一系列可行的砾石尺寸,计算其在给定闭合压力下的渗透率,并模拟其孔喉结构^[7],计算平均孔喉直径;(3)计算全部砾石尺寸的裂缝导流能力、无因次导流能力和增产比;(4)根据既能阻挡地层砂又能最大程度提高产量的原则,选择符合条件的砾石。

3 压裂充填防砂施工参数设计

压裂充填防砂施工参数设计步骤如下:

(1)开展脱砂前的裂缝正常延伸模拟。确定缝的长、宽、高、体积、造缝效率及井底压力等参数随时间的变化关系。

(2)根据油层改造需要和裂缝模拟结果中的缝长与缝高的关系选择缝长指标。

(3)使用常规设计方法估算获取缝长指标所需的时间及该时刻的压裂液效率,用这些数据确定脱砂开始时间 t_{so} 及对应的压裂液效率 η_{so} 。

(4)确定低含砂浓度开始泵注的时间 t_{ls} 。

(5)选择脱砂终止时间 t_{eo} 。算出 t_{eo} 时刻的压裂液效率 η_{eo} ,需要假设尖端脱砂时支撑剂回返堵塞的距离及因而暴露出可滤渗的面积。

(6)根据 η_{eo} ,计算泵注主力携砂液的开始时间 t_{ms} 。

(7)计算从 t_{ms} 到 t_{eo} 含砂浓度轮廓及充填期间加入的支撑剂量。

(8)估算脱砂期间可能出现的施工压力升高值。

(9)核对设计是否安全,如果需要,调整设计中的假设,重新进行计算。

3.1 压裂液滤失计算

受压裂液粘度、储层岩石和流体压缩性以及造壁性控制的滤失系数 C_I, C_{II}, C_{III} ^[1] 分别为

$$C_I = 5.4 \times 10^{-3} \left(\frac{k_f \Delta p \varphi}{\mu_f} \right)^{1/2}$$

$$C_{II} = 4.3 \times 10^{-3} \Delta p \left(\frac{k_f C_I \varphi}{\mu_f} \right)^{1/2}$$

$$C_{III} = \frac{0.005m}{A}$$

式中, Δp 为裂缝内外压力差, kPa; μ_f 为压裂液粘度, mPa·s; φ 为地层孔隙度, 小数; C_f 为油藏综合压缩系数, (kPa)⁻¹; m 为滤失实验得到的直线斜率; A 为滤失实验中的岩心断面面积, m²。

总滤失系数 C 为

$$C = \frac{C_I C_{II} C_{III}}{C_I C_{II} + C_I C_{III} + C_{II} C_{III}}$$

滤失速度 v 为

$$v = \frac{C}{\sqrt{t}}$$

式中, t 为滤失时间, min。

3.2 脱砂时间的计算

脱砂时间即达到要求的裂缝长度所需的时间。计算缝长与时间关系的吉尔兹玛方程^[3]为

$$L_f = \frac{1}{2\pi} \frac{Q\sqrt{t}}{H_f C}$$

$$W_f = 0.135 \left(\frac{\mu_f Q L_f^2}{G H_f} \right)^{0.25}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

则达到缝长 L_f 所需的时间 t_{so} 为

$$t_{so} = \left(\frac{2\pi H_f L_f C}{Q} \right)^2$$

式中, Q 为压裂液排量, m³/min; G 为岩石的剪切模量, Pa; H_f 为裂缝的高度, m; E 为岩石的弹性模量, Pa; ν 为岩石泊松比。

若不进行关于裂缝长度的系统优化, 压裂充填的裂缝半长一般为 15~30 m, 实际现场施工测量得到的缝长一般为 9~15 m。

根据 PKN 模型计算此时裂缝中的压力分布为

$$p_f(x) = p_c + \alpha \left[\frac{1}{60} \frac{\mu_f Q L_f E^3}{H_f^4 (1-\nu^2)^3} \right]^{1/4}$$

式中, p_c 为裂缝闭合压力, Pa; α 为常数, Q 取地面总排量时, $\alpha = 1.26$, 取地面排量的 1/2 时, $\alpha = 1.5$ 。

脱砂时刻的压裂液效率^[2] η_{so} 为

$$\eta_{so} = \frac{0.01 W_f}{0.01 W_f + 2V_{sp} + \sqrt{8t_{so} C}}$$

式中, V_{sp} 为压裂液的初滤失量, m³/m²。

3.3 脱砂时刻的携砂液量和前置液量的计算

从开始泵注到达到要求的缝长 L_f 所需要的总液量 V_{so} 为

$$V_{so} = Q t_{so}$$

前置液体积比 P_F 定义为前置液量与 t_{so} 时刻泵入的总液量的比值,

$$P_F = (1 - \eta_{so})^2 + S_F$$

前置液量为

$$V_{pad} = V_{so} P_F$$

式中, S_F 为安全因子, 对于高效率压裂液, S_F 取 0.05 左右, 对于低效率压裂液, S_F 取值更小; V_{pad} 为脱砂时刻总液量中的前置液量, m³。

3.4 脱砂终止时的压裂液效率的计算

对于恒定的泵注排量, 开始泵注低含砂浓度砂浆的开始时间 t_{so} 为

$$t_{so} = t_{so} P_F = t_{so} [(1 - \eta_{so})^2 + S_F]$$

一般脱砂时间在 10 min 左右, 则脱砂终止时间 t_{iso} 为 $(t_{so} + 10)$ 。脱砂终止时的裂缝体积 V_f 为

$$V_f = 2W_f H_f L_f$$

脱砂期间压裂液的滤失量 ΔV_L 为

$$\Delta V_L = C S_F (t_{iso} - t_{so})^{1/2}$$

此期间裂缝体积的变化为

$$\Delta V_f = Q(t_{iso} - t_{so}) - \Delta V_L$$

脱砂终止时刻对应的压裂液效率 η_{iso} 为

$$\eta_{iso} = \frac{Q t_{so} \eta_{so} + \Delta V_f}{Q t_{iso}}$$

3.5 脱砂期间压力升高值的确定

断裂韧性 S 定义为当裂缝面积 A_f 恒定时, 随着裂缝体积 V_f 的增加缝内压力升高的变化率, 即

$$S = \left(\frac{\partial p}{\partial V_f} \right)_{A_f}$$

对于 PKN 模型,

$$S = \frac{G}{\pi H_f^2 L_f}$$

3.6 泵注主力携砂液的开始时间及加砂浓度轮廓的确定

主力携砂液的开始泵注时间 t_{ms} 为

$$t_{ms} = t_{iso} [(1 - \eta_{iso})^2 + S_F]$$

主力携砂液加砂浓度变化为

$$C_s(i) = C_{smax}(i)^\alpha$$

其中

$$\alpha = 1 - \eta_{iso} - \frac{F_D}{\eta_{iso}}, \quad i = \frac{t - t_{ms}}{t_{iso} - t_{ms}}$$

式中, F_D 为压裂液的状态因数, 通常取 $F_D \leq S_F$; $C_s(i)$ 为 t 时刻的含砂浓度, kg/m³; C_{smax} 为泵入的最高含砂浓度, kg/m³。

3.7 加砂总量与铺砂浓度的计算

低含砂浓度时的加砂量 V_1 为

$$V_1 = 119.83(t_{ms} - t_{so})Q$$

逐步提高含砂浓度时的加砂量 V_2 为

$$V_2 = \frac{Q(t_{\text{iso}} - t_{\text{ms}})C_{\text{amax}}}{1 - \alpha}$$

总加砂量 V_{sand} 为

$$V_{\text{sand}} = V_1 + V_2$$

裂缝壁面上的平均铺砂浓度 C_p 为

$$C_p = \frac{V_{\text{sand}}}{2H_f L_f}$$

最终支撑缝宽 W_{f0} 为

$$W_{f0} = \frac{C_p}{(1 - \varphi_p)\rho_p}$$

式中, ρ_p 为支撑剂颗粒密度, kg/m^3 ; φ_p 为支撑剂充填层孔隙度, 小数。

3.8 缝宽和缝内压差关系的确定

缝宽主要受岩石力学性质、缝高及缝内压差的影响, 而压差与缝长、泵排量及液体性质等因素有关。缝宽与缝内压差 Δp 的关系为

$$W_f = \frac{2(1 - \nu^2)}{E} H_f \Delta p$$

对于既定油层来说, ν 和 E 一定; 当出现端部脱砂后, H_f 不再变化, 因此脱砂之后, W_f 和 Δp 的增长呈线性关系。

4 应用实例

涪北气田属于疏松砂岩气藏, 高粘土、高泥质、欠压实。气层极易出砂, 并且出砂为粉细砂, 经过多年的防砂先导性试验, 目前基本确定了以高压一次充填、压裂充填为主的防砂工艺技术体系。端部脱砂压裂充填防砂目前主要采用纤维复合无筛管压裂充填防砂工艺。

4.1 砾石尺寸设计

涪北气田的地层砂粒度中值为 $0.04 \sim 0.07 \text{ mm}$, 属于粉细砂, 根据砂砾孔喉匹配规则, 要达到挡砂要求, 支撑剂粒度中值应为 $0.24 \sim 0.42 \text{ mm}$, 采用软件模拟计算充填砾石的平均孔喉为 0.06 mm , 砾石层渗透率为 $53.74 \mu\text{m}^2$, 孔隙度为 33.1% 。

无筛管防砂主要目的是阻挡地层出砂并提高气井产能。因此, 对于纤维复合压裂充填防砂设计和施工, 应以提高裂缝宽度为主要目的进行支撑剂尺寸选择。通过计算得到不同充填砾石尺寸、不同压裂闭合压力下的裂缝导流能力和压后增产比的变化, 见图 2。

首先根据挡砂的要求, $0.2 \sim 0.4 \text{ mm}$ 砾石的砾砂粒度中值比为 4.63 , 而 $0.3 \sim 0.6 \text{ mm}$ 砾石的砾砂中值比为 6.95 , 两者在 20 MPa 的闭合压力下的增产比

别为 1.3 和 1.43 。从挡砂效果角度考虑, 应该选择 $0.2 \sim 0.4 \text{ mm}$ 的支撑剂, 但由于在高压条件下支撑剂有一定的破碎, 孔喉尺寸会有所减小, 因此为了得到较高的增产比, 选择 $0.3 \sim 0.6 \text{ mm}$ 的支撑剂。

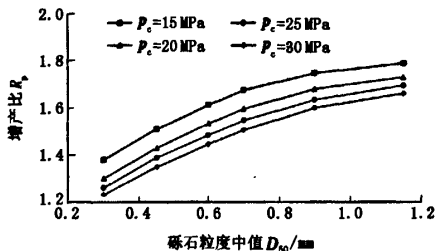


图 2 充填支撑剂尺寸选择

通过模拟计算, $0.3 \sim 0.6 \text{ mm}$ 的支撑剂的特性参数为: 平均粒度中值 0.45 mm , 原始孔隙度 34.5% , 原始渗透率 $75.41 \mu\text{m}^2$, 原始平均孔喉直径 0.069 mm , 砾砂粒度中值比 6.95 , 裂缝导流能力 $0.65 \text{ m} \cdot \mu\text{m}^2$, 增产比 1.5 。

4.2 防砂纤维的筛选

对于无筛管纤维复合压裂防砂, 纤维的选择是一项十分重要的工作。软纤维将储层的细粉砂通过电荷吸附, 固结为一定粒径的较大颗粒, 使细粉砂的临界流速增大, 即增加了细粉砂的启动速度。其次, 采用特制硬纤维的弯曲、卷曲和螺旋交叉, 互相勾结形成稳定的三维网状结构, 将砂粒束缚于其中, 形成较为牢固的过滤体, 达到与防砂筛管同样的挡砂目的。

综合考虑其在储层条件下的稳定性和强度以及纤维的材质、成本, 选用了特殊的 G 纤维, 并且对纤维的表面进行处理, 增加其与树脂的亲合能力, 保证纤维复合体的强度及良好的化学稳定性。通过大量的室内实验, 对特殊纤维抵抗酸、碱、地层水等介质的侵蚀能力以及抗温性能进行了评价, 最终选择 G 纤维中的 SC-20 为涪北气田防砂纤维。

实验确定的纤维复合体主要由 $0.3 \sim 0.6 \text{ mm}$ 树脂涂层砂 + $1\% \sim 2\%$ SC-20 防砂纤维构成。在闭合压力 20.68 MPa 条件下, 复合体渗透率稍低于石英砂, 可见围压对复合体的渗透率影响不大。

4.3 施工参数设计

以涪北气田涪 3-20 井为例, 进行纤维压裂复合防砂施工参数优化模拟计算。设计裂缝形态为垂直裂缝, 造缝半长 22.3 m , 缝高 23.5 m , 支撑剂量 15.6 m^3 , 压裂液用量 100 m^3 , 支撑缝半长 21.1 m , 平均缝宽 15.73 mm , 平均砂比 20.1% , 加砂模式为线性加砂。

根据设计模型中的泵注程序,加砂浓度轮廓为阶梯型变化(表 1)。

表 1 涩 3-20 井纤维压裂复合防砂施工泵注程序

序号	工序	排量 $Q/(m^3 \cdot min^{-1})$	砂比 $C_s/(kg \cdot m^{-3})$	总砂浆量 V/m^3	砂量 V_s/t	泵注时间 t/min
1	挤携砂液	1.5	0	49.5	0	33
2	端部脱砂	2.4	120	36.0	4.32	15
3	裂缝充填	1.5	200	10.5	2.1	7
4	裂缝充填	1.5	360	10.5	3.8	7
5	裂缝充填	1.5	360	10.5	3.8	7
6	裂缝充填	1.5	450	10.5	4.7	7
7	顶替液	1.0	0	5.7	0	5.7

该井实施端部脱砂压裂防砂施工后,井口不出砂,产量增幅 25%,防砂增产效果良好。

涩北气田复合纤维防砂试验 13 口井,防砂增产成功率 85%,防砂后平均单井产量保持在 $4.79 \times 10^4 m^3/d$,产量平均增幅 41.9%,最长有效期超过 3 a,防砂效果见表 2。

表 2 涩北气田压裂充填无筛管防砂效果统计

井号	防砂前产气量 $q_{前}/(10^4 m^3 \cdot d^{-1})$	防砂后产气量 $q_{后}/(10^4 m^3 \cdot d^{-1})$	增幅 $\Delta q/\%$
涩 3-18	4	9.12	128.0
涩 4-10	2.6	4.5	73.1
涩 4-16	2	3.85	92.5
涩 7-1-4	4.52	7.68	69.9
涩 5-1-4	5.41	7.85	45.1
涩 3-12	5.61	7.01	25.02
涩 3-20	7.1	5.07	-28.6
涩 1-1	2.1	2.62	24.8
涩 2-1	3.51	3.82	8.8
涩 2-23	2.9	4.21	45.2
涩 2-29	3.52	4.91	39.5
涩 3-24	2.49	3.7	48.6
涩 3-10	1.44	1.23	-14.6
平均	3.63	4.79	41.9

5 结束语

系统研究了端部脱砂压裂设计的理论与方法。采用无筛管纤维复合压裂防砂是涩北气田防砂技术的一次创新,防砂纤维和树脂涂层砂形成稳定的三维网状结构的过滤复合体,可实现无筛管防砂需要,便于后期处理和进行动态监测。该套工艺技术在涩北气田取得了良好的应用效果。

参考文献:

[1] 何生厚,张琪.油气井防砂理论及其应用[M].北京:中国石化出版社,2003.

[2] 谢桂学.端部脱砂压裂技术初探[J].油气采收率技术,1996,3(1):54-58.

XIE Gui-xue. Tip screenout fracturing technology[J]. Oil & Gas Recovery Technology,1996,3(1):54-58.

[3] 敖西川,郭建春,侯文波.高渗透油层端部脱砂压裂技术研究[J].钻采工艺,2003,26(4):25-27.

AO Xi-chuan, GUO Jian-chun, HOU Wen-bo. Study on tip screenout fracturing treatment in high permeability reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2003, 26 (4):25-27.

[4] WHITE D E, AIMAR A. Frac/pack modeling for high-permeability viscous oil reservoirs of the Duri Field, Indonesid[J]. SPE Production & Facilities,2001,16(3): 189-192.

[5] 李鹏,赵修太,邱广敏,等.防砂用纤维的筛选及其表面处理技术的研究[J].断块油气田,2005,3(2):60-62.

LI Peng, ZHAO Xiu-tai, QIU Guang-min, et al. The research and application of fibres as sand control in Gudong Oilfield[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2005,3(2): 60-62.

[6] 赵修太,李鹏,张国荣,等.孤东油田注水井纤维复合防砂新技术[J].油气地质与采收率,2005,12(6):71-73.

ZHAO Xiu-tai, LI Peng, ZHANG Guo-rong, et al. New technology of fibre compound sand control of the water injection well in Gudong Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005,12(6):71-73.

[7] 薄启炜,董长银,张琪,等.砾石充填层孔喉结构可视化模拟[J].石油勘探与开发,2003,30(4):108-110.

BO Qi-wei, DONG Chang-yin, ZHANG Qi, et al. Visual simulation of porous structure in packed gravels[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003,30(4):108-110.

(编辑 李志芬)