

油气井压后返排机理及工作制度优化方法研究

杜园园

河南油田分公司石油工程技术研究院 河南 南阳 473000

摘要: 在压裂施工中, 压裂液返排作为关键环节, 对整体的施工效果有着重要的影响^[1]。目前, 常规井压后返排一定程度上是通过经验法, 但是, 新勘探区块缺少相关经验, 放喷作业后出现支撑剂回流情况, 导致压裂施工效果下降。基于此, 本文系统的研究了压裂液的返排过程, 建立了支撑剂回流模型, 形成了适合河南油田的图版。该研究成果有助于现场压后返排的科学化和定量化, 能够为现场实际作业提供重要的理论支持。

关键词: 压后返排; 支撑剂; 图版; 回流模型

引言

水力压裂是提高油田产量的关键技术之一。压裂液返排作为压裂作业的关键环节, 直接影响施工效果^{[2][3]}。返排速率过快易引发支撑剂回流^[4], 既降低压裂效果又可能损害设备; 而返排过慢则会使压裂液滞留地层, 导致储层损害, 并可能延长裂缝闭合时间, 造成支撑剂分布不均。目前现场作业中, 返排制度多依赖操作人员经验, 缺乏系统性的理论依据^{[5][6]}。

基于此, 本研究对压裂液返排机理展开系统分析, 揭示了影响压裂液返排的关键因素。通过建立支撑剂在裂缝闭合前后的力学模型, 确定了临界流速的计算公式, 并建立了套管压裂下不同油嘴尺寸与返排流速、返排量的定量关系模型, 开发出适用于河南油田的图版。该图版实现了返排参数的快速计算和油嘴直径的优化选择, 有助于现场压后返排的科学化和定量化。最后通过现场数据验证, 证实了该图版具有较高的准确性和工程适用性。

1 油田压裂返排现状及影响因素

根据现场实践, 目前主要采用两种返排模式: 即时返排和焖井后返排^[7]。即时返排作为常规方法, 其优势在于操作经验丰富, 但无法依靠理论计算确定最佳的返排速率与放喷油嘴尺寸。焖井后返排是新兴工艺, 虽然能提升返排率, 但缺乏经验和理论依据。因此, 建立科学的返排理论模型以计算返排参数, 对提高生产效率具有重要意义。

然而压裂液返排过程涉及众多参数, 较为复杂。如放喷油嘴尺寸、地层渗透率、岩石压缩系数、岩石杨氏模量、岩石孔隙度等参数都会影响压裂液的返排, 但除了放喷油嘴尺寸外其他因素是油藏的固有参数, 无法改变, 因此本文主要研究放喷油嘴尺寸这一参数。

另外影响支撑剂返排的主要因素有四方面的因素:

(1) 支撑剂属性: 粒径会影响支撑剂拖拽力的大小, 密度会影响支撑剂的回流; (2) 压裂液返排速率: 越大, 支撑剂越容易发生回流; (3) 支撑剂受力情况: 包括拖拽力、上举力、支撑剂净重、粘结力等; (4) 压裂施工与地层条件: 裂缝越宽, 支撑剂越容易发生回流。闭合应力、粘度越大, 越不容易发生回流。

2 裂缝内支撑剂回流机理研究

压裂作业完成后, 地层中的压裂液会逐渐排出, 这一返排过程可能会导致支撑剂向井筒方向回流。为预防支撑剂回流问题, 本研究通过分析支撑剂颗粒在流体中的受力情况, 构建了临界回流速度计算模型, 从而为优化返排工作制度提供理论依据。

2.1 建立支撑剂回流模型

2.1.1 裂缝闭合前的回流启动模型

在压裂液返排初期, 裂缝尚未闭合, 支撑剂在裂缝中处于自由移动状态^[8]。此时作用于支撑剂的力包括流体对颗粒的拖拽力 F_x 、液体给支撑剂的向上的力 F_y 、支撑剂在流体中所受的净重 W_0 。

将支撑剂视为理想球体, 通过受力分析, 得到非粘性颗粒绕M点滚动的平衡方程为:

$$F_x L_1 + F_y L_2 = W_0 L_3$$

式中: L_1 —力 F_x 到M的力臂, m; L_2 —力 F_y 到M的力臂, m; L_3 —力 W_0 到M的力臂, m。

整理平衡方程可得:

当 $NRe \leq 2$ 时, 取 $k = 24$, $\tau = 1$, 则返排临界流速可表示为:

$$v_c = \frac{1}{18(\sqrt{3}+2)} \cdot \frac{d_s^2 g (\rho_s - \rho)}{\mu}$$

当 $2 < NRe \leq 500$ 时, 取 $k = 18.5$, $\tau = 0.6$, 则返排临界流速可表示为:

$$v_c = \left[\frac{8}{111(\sqrt{3}+2)} \cdot \frac{d_s^{1.6} g(\rho_s - \rho)}{\rho^{0.4} \mu^{0.6}} \right]^{\frac{5}{7}}$$

当 $NRe > 500$ 时, 取 $k = 0.44$, $\tau = 0$, 则压裂液返排临界流速为:

$$v_c = \left[\frac{1}{0.33(\sqrt{3}+2)} \cdot \frac{d_s g(\rho_s - \rho)}{\rho} \right]^{0.5}$$

式中: NRe — 雷诺数(无量纲), $NRe = \frac{\rho d_s v}{\mu}$; v_c — 返排临界流速, m/s; μ — 压裂液破胶后粘度, mPa.s; k — 支撑剂堆积面积率(无因次), $\frac{\pi}{4}$; τ — 无因次系数; d_s — 支撑剂直径, m; ρ — 压裂液密度, kg/m³; ρ_s — 支撑剂密度, kg/m³.

2.1.2 裂缝闭合后的回流启动模型

当压裂液返排进入后期阶段, 闭合压力达到与井底压力平衡的状态时, 裂缝被认为处于闭合状态。此时支撑剂受力情况发生变化, 颗粒间逐渐形成胶结作用, 从而产生颗粒间的粘结力 F_c 。同时, 液体对支撑剂施加向下的压力 F_p 。

根据受力分析得到裂缝闭合后的力矩平衡方程为:

$$F_x L_1 + F_y L_2 = W_0 L_3 + F_c L_4 + F_p L_5$$

式中: L_4 — 力 F_c 到 M 的力臂, m; L_5 — 力 F_p 到 M 的力臂, m

将各项表达式代入平衡方程并整理可得:

当 $NRe \leq 2$ 时, 取 $k = 24$, $\tau = 1$, 那么压裂液的返排临界流速可以表示为:

$$v_c = \frac{1}{18(\sqrt{3}+2)} \cdot \frac{d_s^2 g(\rho_s - \rho)}{\mu} + \frac{1}{96(\sqrt{3}+2)} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\mu} + \frac{\rho g h \delta}{\mu} \right)$$

当 $2 < NRe \leq 500$ 时, 取 $k = 18.5$, $\tau = 0.6$, 则压裂液返排临界流速为:

$$v_c = \left[\frac{8}{111(\sqrt{3}+2)} \cdot \frac{d_s^{1.6} g(\rho_s - \rho)}{\rho^{0.4} \mu^{0.6}} + \frac{1}{74(\sqrt{3}+2)} \left(\frac{\varepsilon}{d_s^{0.4} \rho^{0.4} \mu^{0.6}} + \frac{\rho^{0.6} g h \delta}{d_s^{0.4} \mu^{0.6}} \right) \right]^{\frac{5}{7}}$$

当 $NRe > 500$ 时, 取 $k = 0.44$, $\tau = 0$, 则压裂液返排临界流速为:

$$v_c = \left[\frac{1}{0.33(\sqrt{3}+2)} \cdot \frac{d_s g(\rho_s - \rho)}{\rho} + \frac{1}{1.76(\sqrt{3}+2)} \left(\frac{\varepsilon}{d_s \rho} + \frac{g h \delta}{d_s} \right) \right]^{0.5}$$

式中: ε — 粘结力系数; δ — 薄膜参数; h — 裂缝滤失高度, m。

临界流速受支撑剂特性和压裂液的共同影响。为分析各因素对临界流速的作用, 构建了适用于河南油田裂缝闭合前后的临界流速计算图版。该图版可实现压裂后

返排临界流速的快速计算, 有助于现场压后返排的科学化和量化。其中裂缝闭合后部分图版结果如下:

表2.1 闭合后图版

ε	d_s	ρ_s	ρ	g	δ	h	μ	V_c
dyn/cm	m	kg/m ³	kg/m ³	m/s ²	无量纲	m	Pa.s	m/s
2.56	0.0006	2650	1020	9.81	0.213*10 ⁻⁴	30	0.0015	0.064
2.56	0.000425	2650	1020	9.81	0.213*10 ⁻⁴	30	0.0015	0.062
2.56	0.000355	2650	1020	9.81	0.213*10 ⁻⁴	30	0.0015	0.063
2.56	0.0003	2650	1020	9.81	0.213*10 ⁻⁴	30	0.0015	0.064
2.56	0.00025	2650	1020	9.81	0.213*10 ⁻⁴	30	0.0015	0.066
2.56	0.000212	2650	1020	9.81	0.213*10 ⁻⁴	30	0.0015	0.068
2.56	0.00018	2650	1020	9.81	0.213*10 ⁻⁴	30	0.0015	0.071
2.56	0.00015	2650	1020	9.81	0.213*10 ⁻⁴	30	0.0015	0.074
2.56	0.000125	2650	1020	9.81	0.213*10 ⁻⁴	30	0.0015	0.077
2.56	0.000106	2650	1020	9.81	0.213*10 ⁻⁴	30	0.0015	0.081
2.56	0.00009	2650	1020	9.81	0.213*10 ⁻⁴	30	0.0015	0.084

根据裂缝闭合前后图版, 输入相关变量, 即可得到相对应的临界流速, 相比传统的理论公式更加方便快捷。

2.2 选择合理的放喷油嘴直径

在压裂井返排作业中, 防喷油嘴尺寸的选择至关重要。合理确定油嘴直径需同时考虑返排速率、地层特性及支撑剂防回流要求。

对井口放喷油嘴建立伯努利方程:

$$\frac{p(t)}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_0}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + \xi \frac{V^2}{2g}$$

由连续性方程:

$$V_1 \pi R^2 = V \pi r^2$$

得出:

$$\frac{V_1}{V} = \frac{r^2}{R^2}$$

结合以上公式, 即可得到井筒中流体的流速与油嘴直径的关系:

$$V_1 = 1.414 \times 10^3 \rho^{-0.5} \left[1 + \xi \frac{r^4}{R^4} \right]^{-0.5} [p(t) - 0.1]^{0.5} \frac{r^2}{R^2}$$

2.3 支撑剂回流的判别方法

通过对比返排流速和支撑剂临界流速的关系, 即可确定裂缝内的支撑剂是否存在回流现象。实际现场应用时还可用返排量判断支撑剂是否发生回流。由流体通过油嘴的流速 v 可得流量: $Q = \pi r^2 V$, 再结合: $\frac{V_1}{V} = \frac{r^2}{R^2}$

可得单位时间内井筒压裂液的流量为:

$$Q = \pi R^2 V_1$$

若单位时间内返排流量超过临界回流量时, 则会发生支撑剂的回流。若未超过临界回流量, 则不会发生回流。因此在实际现场应用时既可用返排流速又可用

返排量判断支撑剂是否发生回流。

2.4 套管压裂不同油嘴下流速和返排量图版

通过对前面的分析,得出在不同压力 and 不同油嘴下井筒压裂液的流速和流量的计算公式,本次研究分别对2mm、3mm、4mm、4.5mm、5mm、6mm、8mm的油嘴在0.2MPa-35MPa压力下的流速以及流量进行了计算,形成适合河南油田的图版。由于篇幅限制部分图版如下。

表2.2 不同油嘴下支撑剂流速

井口压力 (MPa)	不同油嘴下支撑剂流速 (m/s)					
	2mm	3mm	4mm	5mm	6mm	8mm
35.0	0.06	0.14	0.24	0.38	0.54	0.97
33.0	0.06	0.13	0.24	0.37	0.53	0.94
31.0	0.06	0.13	0.23	0.36	0.51	0.91
29.0	0.06	0.12	0.22	0.34	0.50	0.88
27.0	0.05	0.12	0.21	0.33	0.48	0.85
25.0	0.05	0.12	0.20	0.32	0.46	0.82
23.0	0.05	0.11	0.20	0.31	0.44	0.78
21.0	0.05	0.11	0.19	0.29	0.42	0.75
19.0	0.04	0.10	0.18	0.28	0.40	0.71
17.0	0.04	0.09	0.17	0.26	0.38	0.67
15.5	0.04	0.09	0.16	0.25	0.36	0.64

表2.3 不同油嘴下支撑剂返排量

井口压力 (MPa)	不同油嘴返排量 (m ³ /d)					
	2mm	3mm	4mm	5mm	6mm	8mm
35.0	57.94	130.36	231.75	293.31	521.44	927.01
33.0	56.25	126.57	225.01	284.78	506.28	900.05
31.0	54.52	122.66	218.07	275.99	490.65	872.27
29.0	52.72	118.63	210.89	266.91	474.50	843.57
27.0	50.87	114.45	203.46	257.51	457.79	813.85
25.0	48.94	110.11	195.75	247.75	440.44	783.01
23.0	46.93	105.60	187.73	237.59	422.38	750.91
21.0	44.84	100.88	179.34	226.98	403.52	717.37
19.0	42.64	95.93	170.54	215.85	383.73	682.18
17.5	40.91	92.05	163.64	207.10	368.18	654.55
17.0	40.32	90.71	161.27	204.11	362.86	645.08
16.5	39.72	89.36	158.87	201.06	357.45	635.47
16.0	39.11	87.99	156.42	197.98	351.96	625.70
15.5	38.49	86.59	153.95	194.84	346.38	615.79

3 支撑剂回流实例计算及分析

根据前面已经研究的支撑剂回流相关模型与公式,选取实例井进行计算,并对计算的结果进行分析。

ZY1井预测地层有效闭合压力约为41-43MPa。前置液优选采用70/140目石英砂降滤打磨,主压裂阶段优选40/70+30/40目石英砂支撑主裂缝。压后焖井

7-15天,当压力降落<0.1MPa时,用油嘴控制放喷。

放喷情况描述:23-24日解堵,400型泵车正挤热水后放喷,最高压力25MPa,反复多次无法解堵。2000型泵车解堵,最高打压至40MPa解堵成功,用8mm油嘴放喷压力升至22MPa,共挤入压裂返排液7.2m³,返出

砂0.88m³,未见桥塞碎块等其它大颗粒物质,判断地层出砂。

根据前面推导的计算公式,带入给定的数据,当 d_s 为0.000425m, ρ_s 为2650kg/m³, ρ 为1020kg/m³, h 为30m, μ 为0.002Pa.s时,反推 NRe 值,结果显示ZY1井适用于闭合后当 $2 < NRe \leq 500$ 时的临界流速闭合模型,此时取 $k = 18.5$, $\tau = 0.6$,计算临界流速 v_c 为0.059m/s。

由于ZY1井属于闭合后放喷,实际放喷过程中8mm油嘴放喷压力升至22MPa,对照图版发现超过闭合后临界流速,理论上出砂,与实际情况相符。

结论与认识

1、构建支撑剂回流力学模型,确定裂缝闭合前后临界流速的计算公式、套管压裂不同油嘴下支撑剂的流速及流量,形成一套压裂液返排工作制度优化方法。

2、推导井筒流体流速与油嘴尺寸的对应关系,可确定合适的放喷油嘴尺寸,有助于现场压后返排的科学化和定量化。

3、在压裂液返排工作制度优化方法的指导下,形成了适合河南油田的图版,应用图版完成了现场井压后返排制度分析,与实际吻合。下步应做好经验总结,指导推广应用。

参考文献

- [1]胡景宏.压裂液返排模型及应用研究[D]. 硕士学位论文. 西南石油大学.2007.
- [2]陈显辛;曲占庆;丁云宏;郭天魁;白羽;王继伟.多层段水力压裂压后统一返排模型[J].断块油气田,2020,27(04):484-488.
- [3]黄俊杰.致密砂岩储层压裂液返排工艺优化设计研究[D]. 西安:西安石油大学,2018.
- [4]司志梅.低渗透油藏压裂液滤失返排机理研究. 硕士学位论文. 中国石油大学(华东).2014.
- [5]张春辉.低渗透油田压裂液返排规律研究[D].大庆石油学院硕士学位论文,2008-02-25.
- [6]汪翔.裂缝闭合过程中压裂液返排机理研究与返排控制[D].河北廊坊:中国科学院渗流流体力学研究所,2004.
- [7]杨杰.致密油水平井压裂液返排参数优化方法及应用[D].中国石油大学(北京),2021.
- [8]牛白瑶.压裂返排优化理论与应用技术研究[D]. 硕士学位论文. 西安石油大学.2015.