

脆性页岩网络裂缝中支撑剂的沉降特性

孙海成

(中国石化石油工程技术研究院,北京 100101)

摘要:与常规砂岩储层压裂形成的双翼平面裂缝不同,脆性页岩储层压裂形成的是网络裂缝。因影响网络裂缝与双翼裂缝中支撑剂沉降的因素不同,故通过理论公式推导、计算结果与现场数据验证的方式,研究了脆性页岩网络裂缝中支撑剂的沉降特性。结果表明,支撑剂颗粒沉降达到收尾速度的时间极短,网络裂缝中支撑剂的实际沉降幅度远远小于理论计算结果;网络裂缝中支撑剂沉降主要受网络裂缝复杂程度和页岩复合层理效应的影响,受携砂液体粘度的影响较小。在脆性页岩中,压裂后支撑剂回流是影响压裂缝高和裂缝导流能力的主要因素。压裂后,采用类似常规储层的快速放喷和强制闭合技术,会加大裂缝中支撑剂回流造成的导流能力损失,极端情况下甚至会使支撑剂全部回流,导致压裂裂缝闭合成为无效裂缝,最终影响脆性页岩储层压裂后的产量。长时间停泵可减少支撑剂回流,有利于保持裂缝的有效导流能力。

关键词:脆性页岩 网络裂缝 支撑剂沉降 收尾速度 支撑剂回流 停泵时间

中图分类号: TE357.12

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)05-0107-04

支撑剂沉降是影响压裂缝高和裂缝导流能力的主要因素。停泵后,支撑剂在水平方向的速度为0,而在垂直方向上,由于重力的作用继续沉降,最终以收尾速度作匀速沉降运动。理论上,如果缝高足够且未闭合,支撑剂沉降将持续下去。停泵时间和裂缝闭合所经历的时间越长,这种沉降现象越严重,对压裂缝高和裂缝导流能力的影响也越大。矿场实践及相关研究^[1-2]表明,压裂裂缝壁面的凹凸不平、水力裂缝有限的裂缝体积、裂缝壁面的非平面性及支撑剂回流等因素将会有效减缓支撑剂沉降。以往研究主要集中在支撑剂颗粒的沉降^[3-9]方面,裂缝形态描述主要采用与常规砂岩相关的双翼裂缝模型,但对于脆性页岩储层压裂形成的网络裂缝,支撑剂的沉降不再是影响缝高和裂缝导流能力的主要因素,为此,笔者将理论推导与矿场实践相结合,研究了网络裂缝中缝高和裂缝导流能力的主要影响因素,以期减缓支撑剂沉降。

1 单颗粒支撑剂运动特性

1.1 垂直方向运动特性

假设支撑剂颗粒为理想的球形,瞬时停泵时刻,裂缝缝口的支撑剂颗粒在垂直方向受到向下的

重力、向上的浮力和粘滞阻力的作用,粘滞阻力的受力方向与运动方向相反。根据牛顿第二定律,可得

$$G - f - f_n = ma_v \quad (1)$$

其中

$$G = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_s g \quad (2)$$

$$f = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g \quad (3)$$

$$f_n = \frac{\omega \pi r^2 \rho v^2}{2} \quad (4)$$

式中: G 为重力, N; f 为浮力, N; f_n 为粘滞阻力, N; m 为支撑剂质量, kg; a_v 为支撑剂颗粒在垂直方向上的加速度, m/s^2 ; r 为支撑剂颗粒半径, m; ρ_s 为支撑剂密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; ρ 为压裂液密度, kg/m^3 ; ω 为阻力系数; v 为支撑剂在压裂液中的运动速度, m/s 。

式(4)中的阻力系数与雷诺数 (Re) 有关, 雷诺数不同, 阻力系数不同, 其运动特性也不同, 当 $Re \leq 1$ 时, 属于 Stokes 沉降范围, 当 $1 < Re \leq 10^3$ 时属于 Allen 沉降范围, 当 $10^3 < Re \leq 10^5$ 时属于牛顿沉降范围。阻力系数的计算式^[10]为

$$\omega \approx \frac{24}{Re} + \frac{24}{1 + \sqrt{Re}} + 0.4 \quad (5)$$

收稿日期: 2013-07-04。

作者简介: 孙海成, 男, 工程师, 博士, 从事储层改造与油藏模拟方面的研究。联系电话: (010) 84988527, E-mail: shc0560@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发科技重大专项”子课题“复杂地层储层改造关键技术研究”(2011ZX05031-004-003)。

其中

$$Re = \frac{2rv\rho}{\mu} \quad (6)$$

式中: Re 为雷诺数; μ 为压裂液粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

当支撑剂颗粒在垂直方向的初速度为0, 粘滞阻力为0时, 受到的重力大于浮力, 因此支撑剂颗粒开始向下加速运动, 随着速度的增加, 受到的粘滞阻力增大; 当支撑剂颗粒受到的重力与浮力以及粘滞阻力的合力为0时, 加速度为0, 速度达到最大值, 该速度即为收尾速度, 此后支撑剂颗粒以该收尾速度匀速沉降。收尾速度的表达式为

$$v_T = \sqrt{\frac{8rg(\rho_s - \rho)}{3\omega\rho}} \quad (7)$$

式中: v_T 为收尾速度, m/s 。

将加速度用速度与时间的微分形式表示, 积分后得到的速度表达式为

$$v_V = \frac{\left[\exp \frac{4t \sqrt{\frac{\omega\pi^2 r^5 \rho g}{6}(\rho_s - \rho)}}{m} - 1 \right] \sqrt{\frac{8rg}{3\omega\rho}(\rho_s - \rho)}}{\exp \frac{4t \sqrt{\frac{\omega\pi^2 r^5 \rho g}{6}(\rho_s - \rho)}}{m} + 1} \quad (8)$$

式中: v_V 为支撑剂颗粒在垂直方向的运移速度, m/s ; t 为时间, s 。

当速度达到最大值时, 即 $v_T = v_V$ 时, 对比式(7)和式(8), 可得

$$\exp \frac{4T \sqrt{\frac{\omega\pi^2 r^5 \rho g}{6}(\rho_s - \rho)}}{m} - 1 = \exp \frac{4T \sqrt{\frac{\omega\pi^2 r^5 \rho g}{6}(\rho_s - \rho)}}{m} + 1 \quad (9)$$

式中: T 为速度达到最大时的时间, s 。

要使式(9)成立, 则需要 $\exp \frac{4T \sqrt{\frac{\omega\pi^2 r^5 \rho g}{6}(\rho_s - \rho)}}{m} \gg 1$,

即 $\frac{4T \sqrt{\frac{\omega\pi^2 r^5 \rho g}{6}(\rho_s - \rho)}}{m} \gg 1$ 。通过试算后可知

$\frac{4 \sqrt{\frac{\omega\pi^2 r^5 \rho g}{6}(\rho_s - \rho)}}{m} \gg 1$, 也就是说时间对该值影响

很小, 其内在含义为: 支撑剂颗粒在压裂液中很快达到收尾速度, 此后以该速度匀速沉降。故可以说, 支撑剂颗粒在实际沉降过程中, 从停泵时刻就以收尾速度匀速沉降。因此, 得到支撑剂颗粒在垂直方向的运动轨迹方程为

$$s_v = t \sqrt{\frac{8rg}{3\omega\rho}(\rho_s - \rho)} \quad (10)$$

式中: s_v 为支撑剂颗粒在垂直方向的沉降距离, m 。

1.2 水平方向运动特性

支撑剂颗粒在水平方向上受到的力只有粘滞阻力, 受力方向与支撑剂在水平方向的运动方向相反, 停泵后支撑剂受力可表示为

$$f_n = \frac{\omega\pi r^2 \rho v_0^2}{2} = -ma_h \quad (11)$$

式中: v_0 为支撑剂颗粒在水平方向上的初始速度, m/s ; a_h 为支撑剂颗粒在水平方向上的加速度, m/s^2 。

当 $t=0$ 时, 即瞬时停泵时刻, 支撑剂颗粒在水平方向上的速度为停泵前一刻支撑剂颗粒的输送速度, 即

$$v_h = v_0 = \frac{0.017Q}{2S} \quad (12)$$

式中: v_h 为支撑剂颗粒水平方向运动速度, m/s ; Q 为停泵前一刻的泵注排量, m^3/s ; S 为水力压裂裂缝横截面面积, m^2 。

依据垂直方向上速度的求解方法, 得到支撑剂颗粒在水平方向上的速度方程为

$$\frac{1}{v_h} = \frac{1}{v_0} + \frac{\omega\pi r^2 \rho t}{2} \quad (13)$$

将支撑剂颗粒在水平方向上的速度用水平方向上的位移与时间的微分形式表示, 积分后得到停泵后支撑剂颗粒在水平方向的运动轨迹方程为

$$s_h = \frac{2m}{\omega\pi r^2 \rho} \ln \left(\frac{\omega\pi r^2 \rho v_0 t}{2m} + 1 \right) \quad (14)$$

式中: s_h 为支撑剂颗粒在水平方向上的位移, m 。

2 理论计算结果及矿场实例

2.1 沉降位移理论计算结果

由理论推导可以看出, 压裂液粘度越大, 支撑剂沉降速度越慢, 单位时间内沉降距离越短。

笔者用文献[11]中的现场数据进行验证。基本数据包括: 压裂液采用滑溜水, 其粘度为 $5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 支撑剂密度为 2680 kg/m^3 , 压裂液密度为 1006 kg/m^3 , 支撑剂颗粒平均半径为 0.000327 m , 加砂压裂时排量为 $15 \text{ m}^3/\text{min}$, 压裂形成的有效缝高为 100 m , 缝宽为 0.003 m 。

室内实验测定支撑剂颗粒在滑溜水中的收尾速度为 0.06 m/s , 以此计算得到雷诺数为 39.48 , 说明在滑溜水中的支撑剂沉降属于 Allen 沉降。将所得数据代入式(10)和式(14), 即可计算出从停泵开始

支撑剂颗粒在垂直和水平方向的运移轨迹(图1)。

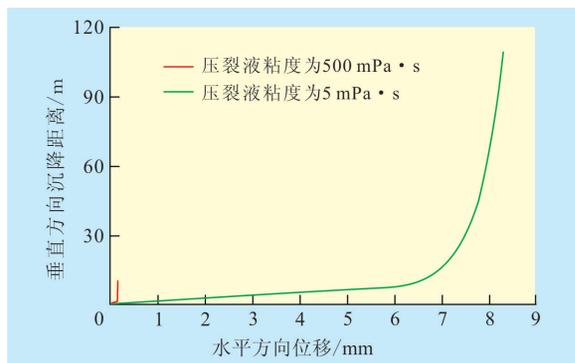


图1 停泵30 min后支撑剂颗粒的实际运移轨迹

分析支撑剂颗粒在垂直方向上的运移轨迹可见:当压裂液粘度为5 mPa·s时,支撑剂在停泵30 min后的理论沉降距离为109.2 m;当压裂液粘度为500 mPa·s时,支撑剂停泵30 min后的理论沉降距离为11.5 m,支撑剂沉降距离明显缩短(图1)。从支撑剂颗粒在水平方向上的位移可以看出,无论压裂液粘度高低,停泵后支撑剂在水平方向位移非常短,工程应用上可以认为在停泵时刻支撑剂在水平方向即停止运移。

支撑剂的沉降是绝对的,在裂缝闭合前,裂缝顶端不可能有支撑剂铺置,裂缝中的支撑剂铺置浓度从底部到顶部逐渐增大,在裂缝顶端某一位置处支撑剂的铺置浓度为0,该段裂缝中没有支撑剂,也就没有导流能力。除非在极端条件下,即停泵瞬间裂缝完全闭合,此时支撑剂沉降可以忽略。而在实际压裂时,裂缝不可能瞬间闭合,但可通过控制井口的放喷速度,使裂缝中的净压力在较短时间内降至0,促使裂缝快速闭合,从而降低支撑剂沉降造成的缝高和导流能力损失。

2.2 矿场实例

在常规砂岩储层中,通常使用冻胶压裂,压裂后形成的裂缝为双翼平面裂缝,需要控制放喷速度,使裂缝尽快闭合,以降低由于支撑剂沉降和回流导致的有效裂缝支撑高度和裂缝导流能力的损失。而在页岩储层中,尤其是脆性页岩中,由于压裂时形成的裂缝呈网络特征,裂缝高度非常有限,并且网络裂缝复杂程度越高,单条裂缝的高度越小,这在客观上阻止了裂缝中支撑剂的沉降。在天然微裂缝发育的地层中,这种现象更加明显。

水力裂缝扩展的复杂性可利用压裂后对目的层的回挖试验^[12]进行验证。通过回挖试验直接观测到页岩实际裂缝扩展延伸并不是理想的双翼平面模型,而是复杂的、纵横交错的网络缝(图2)。



图2 实际观测到的页岩裂缝扩展和支撑剂铺置特征

从HX1井寒武系页岩岩心应力释放后的潜在天然裂缝延伸特征(图3)可以看出,在脆性较高、水平层理发育的页岩储层中,页岩层理引起的复合层理效应非常明显,压裂后的网络裂缝非常复杂,每条裂缝的高度很小,甚至单一的缝高大多小于10 cm,这种裂缝结构客观上阻止了支撑剂的沉降。



图3 HX1井寒武系页岩储层岩心网络裂缝特征

3 支撑剂回流对缝高和裂缝导流能力的影响

在脆性页岩储层压裂后返排过程中,如果裂缝内的支撑剂回流,近井地带和近主裂缝地带的支撑剂则更容易回流,从而降低了缝高和裂缝导流能力,如果回流的支撑剂较多,由于页岩压裂本身支撑剂铺置浓度很低,可能会导致裂缝完全闭合。此时,即使远端的裂缝内填充有支撑剂,并保持一定的导流能力,但由于近井地带的裂缝闭合,使得远端的支撑剂与井筒间不能形成有效的渗流通道^[13-14],从而使得这些裂缝成为无效裂缝,对产能没有贡献。在该类地层中,即使使用滑溜水压裂并且保持较长的停泵时间,对有效支撑缝高的影响也很小;然而由于较长的关井时间减少了支撑剂回流,从而提高了裂缝的有效支撑高度和导流能力。

另外,支撑剂在沉降过程中,在裂缝底部将逐渐堆积支撑剂,限制了支撑剂的进一步沉降,同时支撑剂之间的相互干扰以及裂缝壁面的凹凸不平等也会阻止支撑剂的沉降。

4 结论

支撑剂在压裂液中找到收尾速度所需的时间极短,在现场应用中可以认为支撑剂从停泵开始在垂直方向上以收尾速度匀速沉降。

在脆性页岩储层中,复合层理效应更加明显,压裂后形成的复杂网络裂缝能够有效减小支撑剂在裂缝中的沉降。

脆性页岩储层压裂后,支撑剂回流可能会导致近井地带的支撑裂缝闭合,使得远端的支撑裂缝由于没有与井筒的有效渗流通道而成为无效裂缝。保持较长的关井时间有利于降低因支撑剂的回流引起的有效支撑缝高和裂缝导流能力的损失。

参考文献:

- [1] 温庆志,罗明良,李加娜,等.压裂支撑剂在裂缝中的沉降规律[J].油气地质与采收率,2009,16(3):100-103.
- [2] 王雷,张士诚.压裂液返排速度对支撑剂回流量及其在裂缝内分布的影响[J].油气地质与采收率,2008,15(1):101-102.
- [3] 温庆志,翟恒立,罗明良,等.页岩气藏压裂支撑剂沉降及运移规律实验研究[J].油气地质与采收率,2012,19(6):104-107.

- [4] 李天才,郭建春,赵金洲.压裂气井支撑剂回流及出砂控制研究及其应用[J].西安石油大学学报:自然科学版,2006,21(3):44-47.
- [5] 陈德春,李文静,李华,等.水力压裂水平裂缝支撑剂回采预测模型[J].油气地质与采收率,2008,15(5):92-94,97.
- [6] 付海江,陈文将.高强度压裂支撑剂室内评价研究[J].内蒙古石油化工,2011,20(13):13-15.
- [7] 刘让杰,张建涛,银本才,等.水力压裂支撑剂现状及展望[J].钻采工艺,2003,26(4):31-34.
- [8] 张毅,马兴芹,靳保军,等.压裂支撑剂长期导流能力试验[J].石油钻采工艺,2004,26(1):59-61.
- [9] 蒋建芳,张智勇,胥云.液测和气测支撑裂缝导流能力室内实验研究[J].石油钻采工艺,2008,30(1):67-70.
- [10] 谭天恩,窦梅.化工原理(上册)[M].北京:化学工业出版社,2011:90-95.
- [11] Coronado J A.Success of hybrid fracs in the basin [C].SPE 106758,2007.
- [12] Cipolla C L, Warpinski N R, Mayerhofer M J.Hydraulic fracture complexity: diagnosis, remediation and exploitation [C].SPE 115771,2008.
- [13] 孙海成,汤达祯,蒋廷学,等.页岩气储层裂缝系统影响产量的数值模拟研究[J].石油钻探技术,2011,39(5):63-67.
- [14] 孙海成,汤达祯,蒋廷学,等.页岩气储层压裂改造技术[J].油气地质与采收率,2011,18(4):90-93,97.

编辑 常迎梅

(上接第106页)

- [6] 罗燕,徐建礼,李兰竹,等.深层砂砾岩油藏机械举升工艺探讨[J].油气地质与采收率,2009,16(2):108-110.
- [7] 张鑫,张金亮.胜坨地区沙四上亚段砂砾岩油藏成岩作用研究[J].特种油气藏,2008,15(2):18-21.
- [8] 王世虎,张志昂,王磊,等.基于MATLAB的水力裂缝扩展数值模拟技术[J].油气地质与采收率,2012,19(2):98-101.
- [9] 李宗田,李凤霞,黄志文.水力压裂在油气田勘探开发中的关键作用[J].油气地质与采收率,2010,17(5):76-79.
- [10] 卢聪,郭建春,王建,等.义104-1侧井砂砾岩储层大型压裂技术研究与应用[J].油气地质与采收率,2012,19(4):103-105,110.
- [11] 赵益忠,曲连忠,王幸尊,等.不同岩性地层水力压裂裂缝扩展规律的模拟实验[J].中国石油大学学报:自然科学版,2007,31(3):63-66.
- [12] 孟庆民,张士诚,郭先敏,等.砂砾岩水力裂缝扩展规律初探

[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2010,32(8):119-123.

- [13] 王昊.砂砾岩油藏砾石对压裂裂缝延伸的影响研究[D].东营:中国石油大学(华东),2011.
- [14] 陈勉,金衍,张广清,等.石油工程岩石力学[M].北京:科学出版社,2008.
- [15] 劳恩.脆性固体断裂力学[M].龚江宏,译.2版.北京:高等教育出版社,2010.
- [16] Arash D T, Jon E O.Numerical modeling of multistranded hydraulic-fracture propagation: accounting for the interaction between induced and natural fractures[C].SPE 124884,2011.
- [17] 崔德渝,吴绍富,张行.复合型裂纹的能量释放率计算与断裂判据[J].北京航空航天大学学报,1990,35(3):43-48.

编辑 常迎梅