

·油气钻采工程·

页岩气藏压裂支撑剂沉降及运移规律实验研究

温庆志^{1,2},翟恒立³,罗明良¹,胡蓝霄¹,黄越¹,黄波⁴,李佳琦⁴

(1.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛266580; 2.中国石油大学博士后流动站,北京102249; 3.中国石化集团胜利石油管理局井下作业公司,山东东营257000; 4.中国石油股份新疆油田分公司采油工艺研究院,新疆克拉玛依834000)

摘要:页岩气资源储量巨大,但由于页岩渗透率低,往往需要压裂才能有效开采。滑溜水压裂有利于形成复杂的裂缝网络,是中外页岩储层压裂改造首选的压裂液体系。由于滑溜水粘度低,携砂能力差,增加了滑溜水压裂的风险。中国在该领域的研究尚处于起步阶段,尤其对滑溜水携砂支撑剂沉降及运移规律的研究更少,同时缺乏必要的实验手段。为此,设计了裂缝模拟装置,通过实验模拟了施工排量、缝宽、支撑剂粒径、压裂液粘度和砂比等参数对裂缝内支撑剂沉降和运移规律的影响,获得不同参数下支撑剂的沉降速度和水平运移速度,分析了各因素的影响规律,并求解了各因素对支撑剂沉降速度和水平运移速度的修正系数。结果表明,随着缝内流速和压裂液粘度的增大,支撑剂沉降速度减小,水平运移速度增大;随着支撑剂粒径与缝宽比值和砂比的增大,支撑剂沉降速度和水平运移速度均减小。

关键词:页岩气 水力压裂 滑溜水 沉降规律 裂缝物理模型

中图分类号:TE357.12

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2012)06-0104-04

页岩气开发是一个系统的、庞杂的工程,其技术要求高,资金投入多。水平井开发和水力压裂是页岩气开发的核心技术^[1]。与常规胍胶压裂液相比,滑溜水有利于形成复杂的裂缝网络,极大地提高压裂增产效果。因此,页岩气藏压裂往往使用滑溜水作为压裂液,采用大排量、低粘度的施工方式。但由于滑溜水粘度低,携砂能力差,支撑剂沉降与运移规律不同于常规的胍胶压裂液。目前,中国关于页岩气藏压裂、支撑剂沉降规律等的研究侧重于理论方面^[2-5],施工工艺主要借鉴国外的做法,依靠经验或软件模拟,缺少有效的实验手段;特别是对滑溜水携砂支撑剂的沉降、运移规律的研究还处于起步阶段,缺少必要的室内实验和系统的理论来指导页岩气藏的压裂设计和施工。为此,笔者设计了裂缝模型装置,并通过该装置模拟滑溜水在裂缝中的携砂过程,研究了施工排量、缝宽、支撑剂粒径、压裂液粘度和砂比等参数对裂缝内支撑剂沉降和运移速度的影响,以期确立合理的施工参数提供参考依据。

1 支撑剂沉降速度的影响因素

1.1 牛顿流体中单颗粒自由沉降速度

单个支撑剂颗粒在静态、无边界的牛顿流体中沉降时,受重力、浮力和阻力的作用,支撑剂会一直加速沉降直到三者达到平衡。当达到动态平衡时,支撑剂匀速下沉,据此得到单个支撑剂颗粒在牛顿流体中的自由沉降速度表达式^[2]为

$$v_p = \left[\frac{4g(\rho_s - \rho)d_p}{3C_d\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: v_p 为单颗粒自由沉降速度,cm/s; g 为重力加速度, m/s^2 ,其值为9.8; ρ_s 为颗粒密度, g/cm^3 ; ρ 为地层流体密度, g/cm^3 ; d_p 为支撑剂颗粒直径,cm; C_d 为阻力系数。

由于阻力系数求解困难,式(1)的应用受到限制,诺沃特尼根据雷诺数,提出了单颗粒在3种雷诺数下的自由沉降速度计算式^[2],分别为

收稿日期:2012-09-07。

作者简介:温庆志,男,副教授,博士,从事低渗透油气藏增产机理方面的教学与科研工作。联系电话:13963368795,E-mail:wendingzhi@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“MES胶束/纳米TiO₂自组装体系流变动力学研究”(50904076),山东省自然科学基金“页岩气藏水平井滑溜水压裂支撑剂输送机理研究”(ZR2012EEM001),中国博士后科学基金“页岩储层滑溜水压裂支撑剂沉降及运移规律研究”(2012M510713)。

$$v_p = \frac{g(\rho_s - \rho)d_p^2}{18\mu} \quad Re \leq 1 \quad (2)$$

$$v_p = 0.2 \left[\frac{g(\rho_s - \rho)}{\rho} \right]^{0.72} \frac{d_p^{1.18}}{\left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{0.45}} \quad 1 < Re \leq 1000 \quad (3)$$

$$v_p = 1.74 \sqrt{\frac{g(\rho_s - \rho)d_p}{\rho}} \quad 1000 < Re < 20000 \quad (4)$$

式中： μ 为地层流体粘度，Pa·s； Re 为雷诺数。

1.2 影响因素

由于式(1)~式(4)仅适用于牛顿流体中单个支撑剂颗粒自由沉降速度的计算，而滑溜水不能完全等同于牛顿流体，而且滑溜水携砂过程中也不可能是单个支撑剂颗粒，因此，上述方法不能用于计算滑溜水携砂支撑剂在裂缝中的沉降及运移速度。在滑溜水压裂时，支撑剂在狭窄的人工裂缝中的沉降及运移规律与其在静态、无边界流体中不同，影响支撑剂沉降和运移规律的因素有：施工排量、缝宽、支撑剂粒径、压裂液粘度、砂比、裂缝壁面效应和颗粒形状等。其中施工排量、支撑剂粒径、砂比、压裂液粘度等属于可控因素，而缝宽、裂缝壁面的粗糙度和裂缝弯曲属于不可控因素。

对于可控因素，笔者利用自行设计的裂缝模拟装置，通过实验模拟了其对于支撑剂沉降和运移的影响；对于裂缝壁面粗糙度等不可控因素，则通过改善实验条件，使实验装置尽可能接近裂缝真实情况。

2 实验准备及方案

实验仪器 为了研究各可控因素对支撑剂在裂缝中沉降速度和运移速度的影响，设计了裂缝模拟装置。该装置由液体容器、泵、裂缝模型以及连接管线组成。其中裂缝模型是装置的主体部分，由2块平行放置的透明板组成，长度为2 m，高度为0.3 m，缝宽可调，本次试验缝宽为0.005 m。

实验材料 压裂液采用滑溜水，其粘度为2~10 mPa·s，支撑剂视密度为2 800 kg/m³，粒径为40~70目。

实验方案 在液体容器内将滑溜水与支撑剂混合搅拌均匀，在泵的作用下，混砂液进入裂缝模型，观察支撑剂在裂缝模型中的沉降和运移情况，通过精确计量和分析，可获得各因素对支撑剂沉降与运移速度的影响规律。实验方案包括3部分：①研究施工排量的影响。将缝内流速乘以裂缝横截面积，即可得到对应的施工排量。采用粘度为2 mPa·s的滑溜水，在砂比为4%、缝内流速分别为

0.05, 0.10, 0.15 和 0.20 m/s 的条件下，测试支撑剂的沉降速度和水平运移速度。②研究压裂液粘度、支撑剂粒径与缝宽比值的影响。压裂液粘度分别为2, 4, 6, 8 和 10 mPa·s，在砂比为4%、缝内流速为0.10 m/s 的条件下，采用不同粒径的支撑剂进行实验，测试支撑剂沉降速度及水平运移速度。③研究砂比的影响。采用粘度为2 mPa·s的滑溜水，缝内流速为0.10 m/s，在砂比为2%, 4%, 6%, 10%, 20%, 30%和40%的条件下，测试支撑剂沉降速度及水平运移速度。

3 实验结果分析

3.1 施工排量的影响

3.1.1 对支撑剂沉降速度的影响

施工排量影响实验显示，当缝内流速分别为0.05, 0.10, 0.15 和 0.20 m/s 时，测得支撑剂的沉降速度分别为0.031, 0.030 和 0.032 和 0.028 7。结果表明：在层流状态下，随着缝内流速的增大，颗粒在水平方向上受力增大，在垂直方向上所受浮力和重力未发生变化，因此层流状态下颗粒的沉降速度未发生变化；当缝内流速增大到一定程度后，即缝内流速达0.15 m/s 后，裂缝内流态变为紊流状态，并出现漩涡，此时支撑剂沉降阻力增大，颗粒的沉降速度变慢，此规律与Brucato等研究成果^[6]一致。

压裂液在裂缝内高速流动时，与裂缝壁面发生摩擦剪切作用，对于牛顿流体，压裂液粘度保持不变，而对于非牛顿流体，由于剪切的作用，压裂液粘度将大幅度下降，导致支撑剂的沉降速度增大。

3.1.2 对支撑剂水平运移速度的影响

以往的压裂设计，由于缺少必要的实验条件，通常认为支撑剂与液体速度相同，这与实际情况不符。通过实验对页岩储层压裂时支撑剂在滑溜水中的水平运移速度进行测定，分析缝内流速对水平运移速度的影响。

由支撑剂水平运移速度与缝内流速的关系(图1)可知：随着缝内流速的增大，支撑剂水平运移速

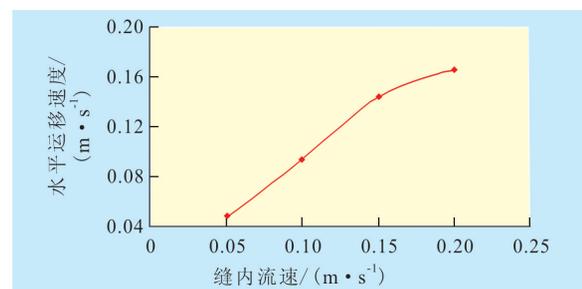


图1 缝内流速与支撑剂水平运移速度的关系

度增大,缝内流速较小时基本呈线性增大趋势,且曲线斜率略小于1,表明支撑剂的水平运移速度小于缝内流体的流速;当缝内流速增加到一定值时,由于支撑剂与裂缝壁面碰撞更加频繁,导致支撑剂水平运移速度减小,与缝内流速相比要小得多,因此曲线更加平缓。

通过回归,建立的支撑剂水平运移速度与缝内流速的关系式为

$$v_h = -2.65v_o^2 + 1.4815v_o - 0.0196 \quad (5)$$

式中: v_h 为支撑剂水平运移速度, m/s; v_o 为缝内流速, m/s。

3.2 压裂液粘度、支撑剂粒径及缝宽的影响

3.2.1 对支撑剂沉降速度的影响

由于缝宽较小,一般只有几毫米到十几毫米,支撑剂在裂缝内沉降时,裂缝壁面对颗粒产生拉拽效应而阻止其沉降。采用低粘度滑溜水压裂时,地层中会产生复杂的裂缝网络,导致主裂缝缝宽减小,其裂缝壁面效应对支撑剂沉降速度的影响更加明显^[7-8]。

许多学者的研究表明,支撑剂在裂缝中的沉降速度受裂缝壁面影响显著。从裂缝内中心线到壁面附近支撑剂沉降速度受影响越来越大^[9-13],在壁面附近影响最大。缝宽影响可用壁面效应修正系数来表示,其表达式为

$$f_w = \frac{v_w}{v_p} = 1 - 0.16\mu^{0.28} \frac{d_p}{w} \quad \frac{d_p}{w} < 0.9 \quad (6)$$

$$f_w = \frac{v_w}{v_p} = 8.26e^{-0.0061\mu} \left(1 - \frac{d_p}{w}\right) \quad \frac{d_p}{w} \geq 0.9 \quad (7)$$

式中: f_w 为壁面效应修正系数; v_w 为受缝宽影响的沉降速度, cm/s; w 为缝宽, m。

当缝宽一定时,支撑剂粒径越大,所受壁面效应的影响也越大(图2)。当支撑剂粒径为缝宽的10%时,壁面效应修正系数接近1,表明支撑剂沉降速度几乎没有受到影响;当压裂液粘度为2 mPa·s

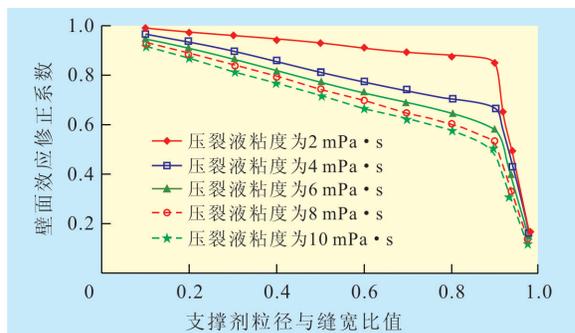


图2 不同压裂液粘度及裂缝条件下的壁面效应修正系数

时,支撑剂粒径由缝宽的90%增至95%后,壁面效应修正系数从0.8急剧降至0.2左右,支撑剂沉降速度下降了75%。这表明当支撑剂粒径增大至缝宽的90%以上时,支撑剂所受壁面效应的影响迅速增大,说明支撑剂粒径与缝宽比值对支撑剂沉降速度的影响很大。

随着压裂液粘度的增大,壁面效应修正系数越来越小,且曲线的间距越来越小,表明随着压裂液粘度增大,壁面效应的影响增大,但影响幅度减小。

3.2.2 对支撑剂水平运移速度的影响

由压裂液粘度、支撑剂粒径与缝宽的比值对支撑剂的水平运移速度的影响结果(图3)可知,随着支撑剂粒径与缝宽比值的不断减小,相当于支撑剂的运移通道越来越窄,支撑剂水平运移速度与缝内流速相比也越来越小。这是由于支撑剂与裂缝壁面的碰撞更加频繁,导致水平运移速度急剧下降。由图3亦可看出,压裂液粘度越大,壁面效应修正系数越大,水平运移速度也越大,这是由于压裂液粘度越大,对支撑剂的携带能力越强,有利于将支撑剂携带到更远的位置。

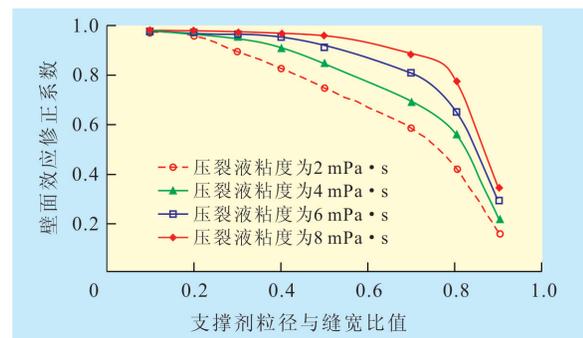


图3 支撑剂水平运移速度与缝内流速的关系

以压裂液粘度为2 mPa·s为例,通过回归可得壁面效应修正系数与支撑剂粒径和缝宽的关系式为

$$f_w = -1.1703 \left(\frac{d_p}{w}\right)^2 + 0.2197 \frac{d_p}{w} + 0.96 \quad (8)$$

3.3 砂比的影响

在压裂施工过程中,随着砂比的增大,裂缝内支撑剂浓度也增大,支撑剂颗粒之间的干扰和碰撞更加剧烈。多颗粒沉降的速度低于单颗粒的沉降速度,这种相互干扰作用包括2个方面:①单颗粒的沉降引发周围液体向上流动,使周围支撑剂颗粒受到影响,沉降时阻力增大,砂比越大,影响越大;②压裂液与支撑剂混合后,导致携砂液的密度和粘度增大,使支撑剂所受的浮力和沉降时的阻力增大,导致支撑剂颗粒沉降速度变慢。

3.3.1 对颗粒沉降速度的影响

浓度修正系数为支撑剂干扰沉降速度与自由沉降速度的比值,笔者用其来表征砂比对沉降速度的影响。通过实验,回归得到砂比对支撑剂沉降速度影响关系式为

$$f_c = \frac{v_c}{v_p} = 1.069 3e^{-4.242 7c} \quad (9)$$

式中: f_c 为浓度修正系数; v_c 为干扰沉降速度, cm/s; c 为砂比。

文献[2]中浓度修正系数的表达式为

$$f_c = (1 - c)^m \quad (10)$$

式中: m 为与雷诺数相关的经验常数。

式(10)中,根据雷诺数给 m 赋值,即:当 $Re \leq 2$ 时, $m = 5.5$; 当 $2 < Re < 500$ 时, $m = 3.5$; 当 $Re \geq 500$ 时, $m = 2$ 。

对比利用式(9)和式(10)计算得到的浓度修正系数(图4)发现,在不同砂比条件下,当 m 为3.5时,式(9)与式(10)的结果基本重合。这表明,当雷诺数为2~500时,实验结果与式(10)的计算结果基本一致。

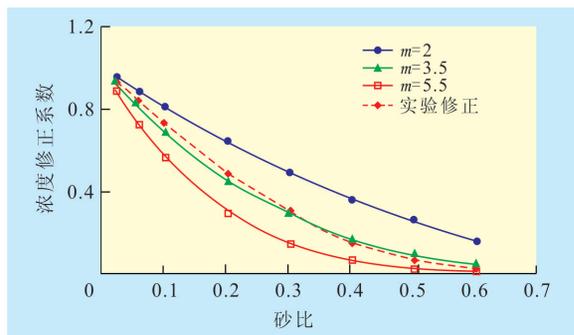


图4 砂比对支撑剂沉降速度的影响

3.3.2 对支撑剂水平运移速度的影响

由图5可知,随着砂比的增大,修正系数减小,支撑剂水平运移速度减小。这是由于,当保持缝宽不变,增加砂比时,裂缝内支撑剂浓度增大,支撑剂颗粒之间及支撑剂与裂缝壁面的碰撞更加频繁,导

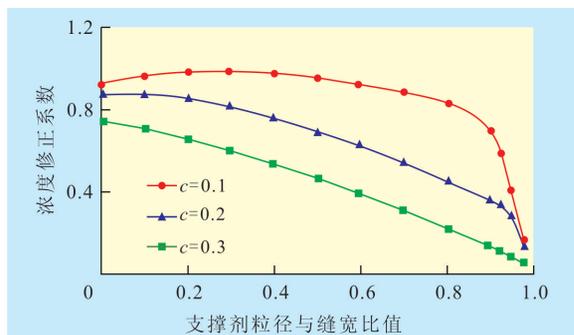


图5 砂比对支撑剂水平运移速度的影响

致支撑剂水平运移速度减小。

4 结论

通过室内实验,研究了施工排量(缝内流速)、缝宽、支撑剂粒径、压裂液粘度和砂比等参数对支撑剂沉降及水平运移速度的影响。随着缝内流速和压裂液粘度的增大,支撑剂沉降速度减小,水平运移速度增大;随着支撑剂粒径与缝宽比值和砂比的增大,支撑剂沉降速度和水平运移速度均减小。

通过实验结果,建立了缝内流速、支撑剂粒径与缝宽比值、压裂液粘度和砂比等因素对支撑剂沉降速度和水平运移速度的修正系数表达式。研究结果可用于计算支撑剂沉降和水平运移速度及分析砂堤形态,确定合理的施工参数,提高压裂的成功率。

参考文献:

- [1] Palisch T T, Vincent M C. Slickwater fracturing—food for thought [R]. SPE 115766, 2008.
- [2] 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: 51-60.
- [3] 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.
- [4] 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, 110.
- [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] Brucato A, Grisafi F, Montante G. Particle drag coefficients in turbulent fluids[J]. Chemical Engineering Science, 1998, 53(18): 3295-3314.
- [7] Medlin W L, Sexton J H, Zumwalt G L. Sand transport experiments in thin fluids[R]. SPE 14469, 1985.
- [8] Economides M J, Nolte K G. 油藏增产措施[M]. 张宝平, 蒋冀, 刘立云, 等, 译. 北京: 石油工业出版社, 2002: 372-375.
- [9] Liu Y, Sharma M M. Effect of fracture width and fluid rheology on proppant settling and retardation: an experimental study[R]. SPE 96208, 2005.
- [10] Adam Dayan, Shaun Stracener, Peter Clark. Proppant transport in slick-water fracturing of shale-gas formations [R]. SPE 125068, 2009.
- [11] Barree R D, Conway M W. Experimental and numerical modeling of convective proppant transport[R]. SPE 28564, 1995.
- [12] Gadde P B, Sharma M M. The impact of proppant retardation on propped fracture lengths[R]. SPE 97106, 2005.
- [13] Kirkby L L, Rockefeller H A. Proppant settling velocities in non-flowing slurries[R]. SPE 13906, 1985.