复杂裂缝内支撑剂输送的关键参数及算法

侯磊^{1,2,3*}, 蒋廷学^{1,3}, 李根生^{2*}, 曾义金^{1,3}, 程轶妍⁴

1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101;
2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249;
3. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100101;
4. 中国石化华东油气分公司勘探开发研究院, 南京 210011

* 联系人, E-mail: wto511@126.com; ligs@cup.edu.cn

2016-07-24 收稿, 2016-12-06 修回, 2016-12-09 接受, 2017-06-06 网络版发表

国家自然科学基金重大项目(51490653, U1562212, 51521063)资助

摘要 复杂裂缝内的支撑剂输送是压裂现场急需改善的关键问题之一, 通过提高支撑剂在分支缝内的充填效率, 能够显著提高油气增产效果. 目前, 复杂裂缝内的支撑剂输送研究还处于室内实验探索阶段, 鲜有成熟的理论研究报道. 本文总结了国内外最新研究进展, 提出压裂液分流量和支撑剂转向条件是复杂裂缝携砂的两个关键参数, 并将复杂裂缝系统抽象成单元化物理模型, 分别开展了分流量和转向条件研究. 借鉴限流压裂中压裂液分流量的计算方法和建模思路, 分别建立了复杂裂缝单元模型中的压裂液分流量算法和改进算法, 采用Fluent进行了分流量模拟和对比验证, 结果表明, 改进的算法与Fluent模拟结果相对误差为-2.76%, 计算结果较准确. 提出由砂堤表层支撑剂起动的临界流速表征支撑剂向分支缝转向输送的临界条件, 并给出了临界转向条件的算法, 将算法的计算结果与Colorado School of Mines的实验结果进行对比分析, 平均误差为8.18%, 表明该算法能够较好地预测支撑剂转向临界流速. 综合压裂液分流量和支撑剂转向条件算法, 在Katherine Thomas Technology Center的实验条件下, 预测了不同粒径支撑剂在分支缝内的输送情况, 结果与实验结论一致, 从而为改善复杂裂缝内的支撑剂输送提供了理论和方法依据.

关键词 复杂裂缝, 支撑剂输送, 单元模型, 压裂液分流量, 支撑剂转向条件

随着石油行业对压裂裂缝认识的深入以及页岩气等非常规油气藏开发的需要, 复杂裂缝压裂技术成为当前压裂工艺发展中最具代表性的革新之一^[1~3]. 以往研究主要集中在储层精细评价、复杂裂缝造缝工艺等领域, 针对支撑剂的输送研究还相对较少^[4~6]. 现场施工过程中, 压裂液排量、支撑剂类型、用量等泵注参数, 主要凭经验确定, 缺乏理论依据, 导致现场出现加砂困难, 分支缝支撑不足, 压后产能递减迅速, 从而使压裂的改造效果事倍功半^[7,8], 因此, 急需改善复杂裂缝内的支撑剂输送效率问题.

目前, 国内鲜有关于复杂裂缝内的支撑剂输送研究的报道, 而美国已有研究机构相继开展了复杂裂缝携砂的室内实验研究, 得到了初步结论, 但也处于起步阶段, 还未形成通用的理论和计算方法. 因此, 本文在美国实验研究的基础上, 进一步研究了关键参数和相应的计算方法, 为改善复杂裂缝内的支撑剂输送提供了理论和方法依据.

1 复杂裂缝内支撑剂输送关键参数

美国的Katherine Thomas Technology Center和

引用格式: 侯磊, 蒋廷学, 李根生, 等. 复杂裂缝内支撑剂输送的关键参数及算法. 科学通报, 2017, 62: 3112-3120

Hou L, Jiang T X, Li G S, et al. The key parameters of proppant transport in complex fractures (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3112-3120, doi: 10.1360/N972016-00814

Colorado School of Mines^[9~11],是最早开展复杂裂缝内支撑剂输送实验的研究机构,两者采用了相似的研究方法,通过室内实验模型,开展了小型化的机理实验,定性描述了支撑剂在复杂裂缝内输送的主要机理.本文在两者研究成果的基础上,提出了复杂裂缝内支撑剂输送的两个关键参数:压裂液分流量和支撑剂转向条件.通过建立压裂液分流量模型和支撑剂转向条件算法,以这两个参数为依据,对以往实验条件下的支撑剂转向输送情况进行了计算和判断,评价结果与实验结果吻合.

1.1 压裂液分流量

压裂设计时,常用低黏压裂液(如滑溜水、清水等)提高造缝的复杂程度,并且分支缝缝宽较小,流动阻力较大,低黏压裂液更有利于携砂进入分支缝. Kern等人^[12]和Novotny^[13]对于低黏压裂液携砂的研究结果表明,低黏压裂液主要通过提高流速来提高支撑剂的携带能力,因此,压裂液在分支缝内的分流量情况决定了分支缝内支撑剂的运移形式、输送距离以及能否继续向下一级分支缝进一步转向输送等,是复杂裂缝内支撑剂输送的关键参数之一.以往的研究认为,压裂裂缝为两条对称的主裂缝,因此,业内尚未见有针对压裂液在复杂裂缝内的分流量研究.

1.2 支撑剂转向条件

Rakshit和Msalli等人^[10,11]采用Colorado School of Mines的实验设备进行模拟,定性描述了支撑剂转向输送的两个机理:表层堆积支撑剂在重力作用下的自然滑落和临界流速下的压裂液携带作用.但研究没有给出相应的支撑转向条件计算方法.在重力作用落入分支缝的支撑剂量十分有限,并且只能落入裂缝入口端部,难以形成有效的支撑,因此,本次研究以临界流速作为支撑剂转向输送的条件,在Rakshit和Jennifer^[10,11]实验研究结论的基础上,提出支撑剂由主裂缝向分支缝转向输送的条件是复杂裂缝输砂的另一个关键参数,并进一步给出了支撑剂转向条件算法,将计算结果与Rakshit和Jennifer^[10]以及Katherine Thomas Technology Center^[9]的实验结果进行了对比验证,结果吻合.

2 复杂裂缝物理模型的抽象

参考 Katherine Thomas Technology Center 和

Colorado School of Mines的室内实验模型,以及以往研究者关于复杂裂缝形态的研究成果^[14,15],将复杂裂缝形态进行抽象,得到简化的物理模型,如图1所示.模型假设主缝和支缝均为垂直缝,且主缝与支缝夹角为90°.将相邻的次级缝与上级缝划归同一个裂缝单元进行研究,图1的模型中可以划分出主裂缝与二级缝、二级缝与三级缝、三级缝与四级缝等不同的裂缝单元,每个单元具有相同的构成,从而将复杂裂缝系统简化为若干个具有相同构架的裂缝单元的集合,因此,以一个裂缝单元(如主裂缝与二级缝单元)为研究对象,研究压裂液和支撑剂的流动规律,将结果作为下一级裂缝单元(如二级缝与三级缝单元)的初始条件,同样的方法研究下一级裂缝单元的携砂流动规律,依次类推,就可以得到复杂裂缝系统内的支撑剂输送规律.

采用上述的裂缝单元概念,将图1的复杂物理模型作进一步简化,得到如图2所示的上级缝与次级缝组成的复杂裂缝单元模型,从而将复杂裂缝系统单元化处理,降低了数值模拟的难度.将单元模型与限流法压裂技术的物理模型进行对比^[16,17],发现两者的流体分流方式相同,因此,可以借鉴限流法压裂的分流量计算方法,研究复杂裂缝单元模型内的压裂液分流量情况.

3 压裂液分流量模型的建立

3.1 参照限流法压裂,建立压裂液分流量模型

限流法压裂分流量模型仿照了并联电路中的电流分流原理,每个小层相当于一个并联的支路,单层的分流量相当于支路的电流,而各小层的注入量与地应力、裂缝几何参数以及压裂液参数等因素有关^[18]:

$$q_i \propto (p_f - \delta)^{\frac{2n'+3}{n'+1}} w^3 E'^{-2} \eta^{-\frac{1}{n'+1}}, \quad (1)$$

其中, q_i 为第 i 个小层的注入量(m^3/min); p_f 为该层的破裂压力(MPa); δ 为该层的最小主应力(MPa); n' 为压裂液流变指数,无量纲; w 为缝宽(m); E' 为平面应变模量(MPa); η 为压裂液效率,无量纲.

因此,各层的分流量比可以表示为

$$\frac{q_i}{q_j} = \left(\frac{p_{fi} - \delta_i}{p_{fj} - \delta_j} \right)^{\frac{2n'+3}{n'+1}} \left(\frac{w_i}{w_j} \right)^3 \left(\frac{E_i}{E_j} \right)^{-2} \left(\frac{\eta_i}{\eta_j} \right)^{-\frac{1}{n'+1}}. \quad (2)$$

图1 (网络版彩色)抽象的复杂裂缝物理模型

Figure 1 (Color online) The abstracted model of complex fractures

图2 (网络版彩色)复杂裂缝单元模型对比限流法压裂原理图

Figure 2 (Color online) Comparison of complex fracture unit model and limited entry fracturing model

与限流法压裂相比,压裂液在复杂裂缝中的分流量具有其特殊性:(1)压裂液主流道不同.限流压裂中,压裂液的主流道为井筒;复杂裂缝系统中,压裂液的主流道为上级裂缝;(2)压裂液分流道的层系特性不同.限流压裂中,分流裂缝处于不同的地层,其岩性特征等不同;复杂裂缝系统中,所有流道处于同一地层,储层特性相同;(3)压裂液在分流处的摩阻不同.限流压裂中,压裂液在分流处的摩阻为炮眼摩阻;复杂裂缝系统中,压裂液在分流处的摩阻为流

道变窄并转向的摩阻;(4)压裂液的主流道为横向,与纵向的井筒相比,可以忽略压裂液静压力的影响.

鉴于以上不同,对于复杂裂缝而言,各分支缝的地应力、压裂液参数均相同,分流量比仅与裂缝的几何尺寸有关(本文研究理想裂缝条件下的支撑剂输送,忽略压裂液滤失对支撑剂输送的影响).此外,假设复杂裂缝系统中,压裂液只向各个支缝分流,即各支缝的分流量总和等于主缝的总排量,因此,参照限流法压裂建立的复杂裂缝分流量模型为

$$\begin{cases} Q = \sum_{i=1}^n q_i, \\ \frac{q_i}{q_j} = \left(\frac{w_i}{w_j} \right)^3, \end{cases} \quad (3)$$

其中, Q 为施工排量 (m^3/min). 由模型式(3)可知, 各分支缝的分流量与缝宽的3次方成正比.

3.2 改进的压裂液分流量模型

参照限流压裂法建立的复杂裂缝分流量模型式(3), 只考虑了缝宽因素对分流量的影响, 计算精度有待验证. 为了进一步提高模型精度, 本次研究仿照并联电路中, 电流分流特点, 建立改进的压裂液分流量模型.

对于并联电路而言, 各支路的电流与各支路的电阻呈反比. 同理, 在地层参数、压裂液参数均相同的情况下, 分支缝的分流量与压裂液进入分支缝的阻力呈反比. 分析压裂液在复杂裂缝中的流动阻力包括裂缝的壁面摩阻和裂缝转向处的摩阻(在理想模型中, 假设裂缝已经形成, 忽略裂缝的延伸阻力), 其中裂缝转向处的摩阻为压裂液流动的主要阻力. 目前, 裂缝转向处的摩阻还没有针对性的研究, 也没有现成的理论或经验公式. 在此, 参考限流压裂中炮眼摩阻的计算公式, 裂缝转向处的摩阻应与压裂液排量、压裂液密度以及裂缝几何尺寸等因素有关:

$$\Delta P_{\text{cf}} \propto \frac{\rho_f Q^2}{H^2 w^2 C_p^2}, \quad (4)$$

其中, ΔP_{cf} 为裂缝转向摩阻 (MPa); ρ_f 为压裂液密度 (kg/m^3); H 为分支缝缝高 (m); C_p 为流量系数, 无量纲.

将转向摩阻设定为压裂液分流的主要阻力, 而分支缝的分流量与转向摩阻呈反比, 即

$$\frac{q_i}{q_j} = \left(\frac{q_j^2}{H_j^2 w_j^2} \right) / \left(\frac{q_i^2}{H_i^2 w_i^2} \right), \quad (5)$$

从而得到改进的复杂裂缝分流量模型:

$$\begin{cases} Q = \sum_{i=1}^n q_i, \\ \frac{q_i}{q_j} = \sqrt[3]{\frac{H_i^2 w_i^2}{H_j^2 w_j^2}}, \end{cases} \quad (6)$$

分流量算法的意义在于得到各分支缝内压裂液的流量情况, 根据流量情况, 可以判别支撑剂在分支缝内的运移形式、运移距离以及能否继续向下一级裂缝转

向输送等. 分支缝分流量是复杂裂缝携砂最基础、最关键的参数之一, 分流量的算法也是复杂裂缝携砂模拟的基础算法之一.

3.3 分流量的Fluent模拟与模型对比

为了对比并验证模型式(3)和(6)的计算结果, 采用Fluent软件模拟裂缝单元模型中的压裂液分流量情况. 由1条主裂缝和3条垂直于主裂缝的分支缝组成的复杂裂缝物理模型(理想裂缝条件下, 忽略裂缝壁面的滤失情况), 其中主裂缝宽1 cm、高5 m、长10 m, 3条分支缝T1, T2, T3沿主裂缝开裂方向分布, 每条分支缝的长和高相同, 依次为5, 4, 3 m, 缝宽依次为5, 4, 3 mm, 压裂液选用清水. 复杂裂缝的几何模型以及网格划分如图3所示, 主裂缝的一端设为入口, 另一端设为边界, 3个分支缝的端面设为出口, 因此, 压裂液由主裂缝流入, 由3个分支缝流出. 此外, 在支缝与主缝的3个连接处进行了网格的局部加密.

在求解设置中, 本次模拟选用 κ - ε 双方程模型, 计算方法选择瞬态情况下的SIMPLEC算法, 在迭代计算过程中, 选用较小的松弛因子和时间步长(时间步长选为0.001 s, 计算时间为20 s), 以提高计算精度. 计算结束后, 输出3个分支缝出口界面的质量流量参数, 并换算为分支缝的分流量数据.

图4表示的是压裂液在复杂裂缝内的速度云图, 通过数据的后处理, 得到3个分支缝出口的质量流量分别为71.7333, 48.6523, 29.5167 kg/s, 相应的体积流量分别为4.304, 2.929, 1.771 m^3/min . 采用同样的方法, 分别模拟主裂缝入口排量为7, 5, 3 m^3/min 条件

图3 (网络版彩色)复杂裂缝几何模型及网格划分

Figure 3 (Color online) Geometry model and mesh generation of complex fracture

图4 (网络版彩色)主裂缝入口速度为3 m/s时的压裂液流速云图

Figure 4 (Color online) Velocity distribution nephogram in complex fracture under the condition of 3 m/s

下的分流量情况,并通过后处理得到分支缝出口的分流量数据.同时,应用模型式(3)和模型式(6)分别计算相同裂缝和排量条件下,分支缝的分流量情况,并将模型计算的结果与Fluent模拟的结果进行对比分析.

为了对比清晰,将3条分支缝(T1, T2和T3)的模拟结果和计算结果分别绘图,结果如图5所示.对于T1支缝而言,模型式(3)和式(6)的计算结果小于Fluent的模拟结果,对于T3支缝而言,模型式(3)和式(6)的计算结果大于Fluent的模拟结果,三者都在T2支缝的分流量计算中,结果最为接近.以Fluent模拟结果为标准,模型式(3)计算结果的相对误差为11.36%,

绝对误差为21.58%,模型式(6)计算结果的相对误差为-2.76%,绝对误差为10.54%.因此,改进的模型式(6)对于复杂裂缝分流量的计算结果更为准确,可用于预测分支缝的分流量情况.

4 支撑剂转向输送条件的算法

关于临界转向流速的判定方法, Rakshit和Jennifer等人^[10]在实验条件下,测量得到的临界流速介于0.10~0.23 m/s,此外未见其他相关的数值和实验研究结果.分析支撑剂在复杂裂缝中的输送特点,携砂液进入主裂缝后,支撑剂先发生沉降,并堆积形成砂堤,使裂缝的过流断面减小,携砂液的流速增加,当达到某

图5 (网络版彩色)分支缝分流量的Fluent模拟结果与模型计算结果对比. (a) T1 支缝; (b) T2 支缝; (c) T3 支缝

Figure 5 (Color online) Comparison of fluent simulation results and models calculation results of the fractional flow. (a) T1 fractional flow; (b) T2 fractional flow; (c) T3 fractional flow

一临界流速时,支撑剂在压裂液的携带下,开始向分支缝转向运移^[19]。分析认为,支撑剂的转向输送条件与支撑剂的起动条件接近,因此,本课题组将表层堆积支撑剂的临界起动流速作为支撑剂转向输送的条件,即当主裂缝内的流速达到临界起动流速时,支撑剂开始转向输送至分支缝。

支撑剂起动条件的算法,可以通过Shields准数进行推导。颗粒在流体携带作用下,由静止产生运动的判别准数Shields数一般表示为^[20,21]

$$S = \frac{\tau_c}{(\rho_p - \rho_f)gd}, \quad (7)$$

其中, S 为Shields数,无量纲,表征颗粒起动的难易程度; τ_c 为流体流动剪切力(Pa); d 为起动颗粒粒径(m); ρ_p 为支撑剂的密度(kg/m^3); ρ_f 为流体的密度(kg/m^3)。

对于支撑剂而言,黏结力的影响较小,可以认为是散体的颗粒起动情况,在这种情况下,流动流体的拖拽力是颗粒起动的主要因素,对于裂缝中的堆积支撑剂而言,能够使表层颗粒起动的流体流动剪切力为

$$\tau_c = \mu\dot{\gamma}, \quad (8)$$

其中, μ 为流体黏度(cp); $\dot{\gamma}$ 为流体剪切速率(s^{-1})。

对于裂缝中的流体,剪切速度可以表示为

$$\dot{\gamma} = \frac{8Q}{w^2(H-h)}, \quad (9)$$

其中, Q 是缝内压裂液排量(m^3/s); w 为裂缝缝宽(m); H 为裂缝高度(m); h 为堆积支撑剂高度(m)。

通过推导,得到了裂缝流动环境中,支撑剂起动临界Shields数的表达式:

$$S = \frac{8\mu Q}{(\rho_p - \rho_f)gdw^2(H-h)}, \quad (10)$$

其中,Shields数的数值与流体物性有关,对于水而言,Shields数可取0.05^[22,23]。

将式(8)进一步变形,就可以得到支撑剂的临界起动流速表达式,即支撑剂向分支缝转向输送的临界流速计算公式:

$$v = 0.00625 \frac{(\rho_p - \rho_f)gdw}{\mu}. \quad (11)$$

应用式(9),在Rakshit和Jennifer等人^[10]的实验条件下(如表1所示),计算支撑剂向分支缝转向输送的临界流速为0.077~0.28 m/s,平均值为0.1785 m/s,而Rakshit和Jennifer等人^[10]实验测量的临界转向流速为0.10~0.23 m/s,平均值为0.165 m/s,以实验平均值为准,式(9)的误差为8.18%,由此说明,支撑剂的临界起动流速能够较好地表征支撑剂的临界转向输送流速。

支撑剂转向的判别计算是复杂裂缝内支撑剂输送研究的核心之一,此前只有Colorado School of Mines的研究者开展了室内的实验测量工作。本次研究进一步提出了理论算法,并通过实验结果进行了检验。支撑剂转向输送判别算法(式(11))的意义在于判断支撑剂能否继续向下一级裂缝转向运移,从而判断支撑剂对各级分支缝的支撑剂情况。作为主要的判别依据,支撑剂转向条件算法是复杂裂缝携砂模拟的关键和基础。

5 应用实例

综合压裂液分流量算法和支撑剂转向条件算法,可以预测支撑剂能否进入分支缝,以及能够进入几级分支缝。以Katherine Thomas Technology Center^[9]的实验为例,应用分流量模型式(6)和支撑剂转向判别算法式(11),对实验条件下的支撑剂输送情况进行预测,并与实验结果进行对比分析。需要说明的是,Katherine Thomas Technology Center的实验模型中,支缝与主缝呈不规则夹角,且没有针对压裂液的分流量和支撑剂的转向条件给出定量实验结论。因此,本文只针对支撑剂能否进入分支缝的定性结果进行对比。

已知实验采用的支撑剂密度范围为2960~3760 kg/m^3 ,粒径选用100目和20/40目两种,分别为0.15和0.38~0.83 mm,液体选用密度为1000 kg/m^3 ,黏度小

表1 Colorado School of Mines实验条件及结果对比

Table 1 Experimental condition and results comparison of Colorado School of Mines

裂缝条件				支撑剂条件		压裂液条件		实验结果		计算结果	
缝长(m)	1.22	缝宽	0.51	粒径(mm)	0.15~0.55	密度(kg/m^3)	1000	实测转向	0.10~0.23	预测转向	0.077~0.28
缝高(m)	0.61	(mm)		密度(kg/m^3)	2650	黏度(cp)	1	流速(m/s)		流速(m/s)	

于10 cp的滑溜水,主缝和各支缝高均为11.5 cm,主缝宽6.35 mm,二级缝宽3.18 mm,三级和四级缝宽均为1.59 mm,实验过程中,排量介于1~10 GPM,约合 $(0.63\sim6.3)\times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{min}$. 实验结果表明,100目支撑剂能够进入二级、三级以及四级缝,而20/40目支撑剂很难进入二级分支缝.

应用支撑剂转向条件算法(式(11)),在上述实验条件下,计算得到100目和20/40目支撑剂转向所需的临界流速分别为0.161和0.890 m/s. 应用压裂液分流量算法(式(6)),在上述裂缝条件下,分别计算主缝、二级缝、三级缝以及四级缝内的压裂液流速,结果如图6所示.

其中左侧虚线为100目支撑剂的转向临界流速值(0.161 m/s),当缝内流速大于该流速值时,100目支撑剂可以向下一级裂缝转向输送;右侧虚线为20/40目支撑剂的转向临界流速值(0.890 m/s),当缝内流速大于该流速值时,20/40目支撑剂可以向下一级裂缝转向输送. 根据图6中各级缝流速范围和两种支撑剂转向条件的关系,可以清晰地看出,20/40目支撑剂的临界转向流速大于各级缝的最大流速,因此,20/40目支撑剂很难进入分支缝;100目支撑剂的临界转向流速小于主缝、二级缝以及三级缝的最大流速,因此,100目支撑剂能够进入二级、三级以及四级分支缝. 这与 Katherine Thomas Technology Center的实验结论一致,从而说明,综合压裂液分流量算法和支撑剂转向条件算法,可以预测支撑剂能否进入分支缝,以及能够进入几级分支缝. 此外,在图6中,四级缝的最大流速已经小于100目支撑剂的临界转向流速,因此可

以预测,若实验增加第五级分支缝,那么即便100目的支撑剂也很难进入其中.

通过Katherine Thomas Technology Center实验结果验证了以分流量和转向条件为关键参数,可以计算支撑剂在复杂裂缝内的输送情况,从而将复杂裂缝内支撑剂输送研究由单一的实验模拟向理论计算推进,为进一步优化支撑剂输送提供了理论参考.

6 结论

(1) 提出了压裂液分流量和支撑剂转向条件是复杂裂缝携砂的两个关键参数. 建立了压裂液分流量模型和支撑剂转向条件算法,本文以这两个参数为依据,对以往实验条件下的支撑剂转向输送情况进行了计算和判断,评价结果与实验结果吻合. (2) 抽象出了复杂裂缝物理模型,并将物理模型进一步简化为上级缝和次级缝的基本单元模型,从而将复杂裂缝模型单元化,便于数值模拟. 将复杂裂缝单元模型与限流压裂物理模型进行了对比,分析了两者在流体流动、地层条件、摩阻损耗等方面的异同,并参照限流压裂各层吸液比算法,建立了基于限流压裂法的分流量模型;进一步参照电流在并联电路中的分流情况,建立了改进的复杂裂缝分流量模型,并采用Fluent建立复杂裂缝单元模型,将压裂液分流量模拟结果与模型的计算结果进行了对比分析. 结果表明,改进的分流量模型比基于限流压裂法的分流量模型计算结果更准确,可以用于分支缝分流量的计算. (3) 提出了一种支撑剂向分支缝转向输送的临界条件算法. 以支撑剂起动的临界流速表征支撑剂向分支缝转向输送的临界条件,并推导出了转向条件的计算公式. 将该方法的计算结果与Colorado School of Mines实测的临界转向流速进行对比分析,平均误差为8.18%,表明该算法能够较好地反映支撑剂的临界转向条件. (4) 综合压裂液分流量和支撑剂转向条件算法,在 Katherine Thomas Technology Center实验条件下,预测了不同粒径支撑剂在分支缝内的输送情况,结果与实验结论一致,从而为提高复杂裂缝内的支撑剂输送效率提供了理论和方法依据. 应用压裂液分流量和支撑剂转向条件算法,可以优化支撑剂类型和施工排量的匹配,使支撑剂尽可能地流向低一级分支缝输送,提高分支缝的支撑效率,最终使压裂作业事半功倍.

图6 (网络版彩色)各级缝的流速与支撑剂临界转向流速的关系
Figure 6 (Color online) Comparison of flowing rates in branch fractures and the critical rates of proppant diversion

参考文献

- 1 Cipolla C, Warpinski N, Mayerhofer M, et al. The relationship between fracture complexity, reservoir properties, and fracture treatment design. In: Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver, Society of Petroleum Engineering, 2008
- 2 Li G S, Sheng M, Tian S C, et al. Key issues and investigation of horizontal well drilling and multistage fracturing in shale gas reservoir (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2883–2890 [李根生, 盛茂, 田守增, 等. 页岩气储层水平井与压裂工程基础问题探索. 科学通报, 2016, 61: 2883–2890]
- 3 Jiang T X, Jia C G, Sun H C. Study on network fracturing design method in shale gas (in Chinese). Petrol Drill Tech, 2011, 39: 36–40 [蒋廷学, 贾长贵, 孙海成, 等. 页岩气网络压裂设计方法研究. 石油钻探技术, 2011, 39: 36–40]
- 4 Jiang T X. The fracture complexity index of horizontal wells in shale oil and gas reservoirs (in Chinese). Petrol Drill Tech, 2013, 41: 7–12 [蒋廷学. 页岩油气水平井压裂裂缝复杂性指数研究及应用进展. 石油钻探技术, 2013, 41: 7–12]
- 5 Mayerhofer M, Lolon E, Warpinski N, et al. What is stimulated reservoir volume. SPE Prod Oper, 2010, 25: 89–98
- 6 Meyer B, Bazan L, Jacot R, et al. Optimization of multiple transverse hydraulic fractures in horizontal wellbores. In: Proceedings of the SPE Unconventional Gas Conference. Pittsburgh: Society of Petroleum Engineering, 2010
- 7 Wu K, Olson J E. Numerical investigation of complex hydraulic-fracture development in naturally fractured reservoirs. Soc Petrol Eng J, 2016, 31: 1–10
- 8 Li J B, Bai J W, Zhu L A, et al. Volume fracturing and its practices in Sulige tight sandstone gas reservoirs, Ordos Basin (in Chinese). Nat Gas Ind, 2013, 33: 65–69 [李进步, 白建文, 朱李安, 等. 苏里格气田致密砂岩气藏体积压裂技术与实践. 天然气工业, 2013, 33: 65–69]
- 9 Klingensmith B C. Considering far-field fracture connectivity in stimulation treatment designs in the Permian Basin. In: Proceedings of Unconventional Resources Technology Conference. San Antonio: Society of Petroleum Engineering, 2015
- 10 Rakshit S, Jennifer M, Karen E O. Laboratory results of proppant transport in complex fracture systems. In: Proceedings of the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. Woodlands: Society of Petroleum Engineering, 2014
- 11 Msalli A, Jennifer M. Slickwater proppant transport in complex fractures: New experimental findings & scalable correlation. In: Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston: Society of Petroleum Engineering, 2015
- 12 Kern L, Perkins T, Wyant R. The mechanics of sand movement in fracturing. J Petrol Technol, 1959, 11: 55–57
- 13 Novotny E. Proppant transport. Soc Petrol Eng J, 1977, doi: 10.2118/6813-MS
- 14 Zhao J Z, Li Y M, Wang S, et al. Simulation of a complex fracture network influenced by natural fractures (in Chinese). Nat Gas Ind, 2014, 34: 68–73 [赵金洲, 李勇明, 王松, 等. 天然裂缝影响下的复杂压裂裂缝网络模拟. 天然气工业, 2014, 34: 68–73]
- 15 Cheng Y F, Li Y Z, Shi X, et al. Analysis and application of fracture network models of volume fracturing in shale gas reservoirs (in Chinese). Nat Gas Ind, 2013, 33: 53–59 [程远方, 李友志, 时贤, 等. 页岩气体积压裂网模型分析及应用. 天然气工业, 2013, 33: 53–59]
- 16 Wang Q, Zhang S C, Chen H D. The technological study of limited-entry fracturing (in Chinese). J Chongqing Inst Tech (Nat Sci Ed), 2009, 11: 41–44 [王琴, 张士诚, 陈浩东. 限流压裂工艺技术研究. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2009, 11: 41–44]
- 17 Xie F M, Jin H, Wang C L, et al. Limited entry fracturing design and numerical simulation studies (in Chinese). Petrol Drill Tech, 2007, 35: 62–66 [谢风猛, 金花, 王昌龄, 等. 限流压裂设计和数值模拟方法研究. 石油钻探技术, 2007, 35: 62–66]
- 18 Wang H X, Zhang S C. Numerical Calculation Method of Hydraulic Fracturing Design (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 1998 [王鸿勋, 张士诚. 水力压裂设计数值计算方法. 北京: 石油工业出版社, 1998]
- 19 Zhang R J. River Sediment Dynamics (in Chinese). Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1998 [张瑞瑾. 河流泥沙动力学. 北京: 中国水利水电出版社, 1998]
- 20 Kennedy J F. The Albert Shields story. J Hydr Eng, 1995, 121: 766–772
- 21 Cao Z X, Pender G, Meng J. Explicit formulation of the Shields diagram for incipient motion of sediment. J Hydr Eng, 2006, 132: 1097–1099
- 22 Wuhan Institute of Hydraulic and Electric Engineering, Teaching and Research Section of River Sediment Engineering. River Sediment Engineering (I) (in Chinese). Beijing: Water Conservancy Press, 1980 [武汉水利电力学院河流泥沙工程学教研室. 河流泥沙工程学(上册). 北京: 水利出版社, 1980]
- 23 Ouriemi M, Aussillous P, Medale M, et al. Determination of the critical shields number for particle erosion in laminar flow. Phys Fluids, 2007, 19: 061706

Summary for “复杂裂缝内支撑剂输送的关键参数及算法”

The key parameters of proppant transport in complex fractures

HOU Lei^{1,2,3*}, JIANG TingXue^{1,3}, LI GenSheng^{2*}, ZENG YiJin^{1,3} & CHENG YiYan⁴¹ Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China;² School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;³ State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100101, China;⁴ Sinopec East China Branch of Oil and Gas Exploration and Development Research Institute, Nanjing 210011, China

* Corresponding authors, E-mail: wto511@126.com; ligs@cup.edu.cn

The proppant transport in complex fracture has been a hot area of research. Via optimizing the pumping parameters, like pump rate and proppant type, the proppant packing efficiency will be improved in the branch fractures, by which the stimulation results will be enhanced. The research work on proppant transportation has just started, and the laboratory physical simulation experiments are the main methods. The researchers from Katherine Thomas Technology Center and Colorado School of Mines have carried out proppant transporting experiments in complex fractures separately. The major finding is the mechanism that the proppant flows from the main fracture turning into the branches: (1) the gravity effects of the proppant bed; (2) the fluid drag effect under the critical flow rate. However, only the descriptive results were obtained from the experiments. The further numerical models and calculations based on the experimental findings still can't be found in the current reports. This paper was aimed to reveal the proppant transporting in complex fractures using numerical methods. By literature surveys, the fractional flow of fracturing fluid and critical condition of proppant diversion were proposed to be the key parameters of proppant transport in complex fractures. The calculations of fluid fractional flow in complex fractures and the critical condition of proppant diversion were derived and verified in this paper.

The fracture unit model was abstracted and used to describe the complex fractures, by using which the complex fractures could be simplified into the combination of superior fracture and sub-fracture. The fracture unit model was compared with the model of limited entry fracturing for the fluid flow, formation condition, flow friction, etc. A calculation of fracturing fluid fractional flow in complex fractures was built referring to the calculation of limited entry fracturing. Furthermore, an improved calculation of fracturing fluid fractional flow in complex fractures was derived based on the electricity flow principle in the parallel circuit, which was also the mechanism of the limited entry fracturing. The calculation results were verified by the fluent simulation results. The improved calculation was proved to be more accurate, which had the error of -2.76% . Hence, the improved calculation will be used for the fluid distribution in the proppant transport in the complex fractures.

Based on the fractional flow calculation, the critical flow rate of proppant initiation was proposed to represent the critical condition of proppant diversion. The calculation of critical velocity of proppant diversion has been derived. The calculation results were tested by the Colorado School of Mines experimental results. The average error was 8.18% , which indicated that the calculation could predict the critical velocity of proppant diversion.

By synthesizing the fractional flow calculation and the proppant diversion calculation, the proppant transport in branch fractures was predicted. Using the calculation results, a chart was drawn, in which the critical proppant diversion conditions were compared with the branch fracture flow rates intuitively under the experimental conditions of Katherine Thomas Technology Center. The 100 mesh proppant was able to enter the secondary and tertiary fractures. The 20/40 mesh proppant needed higher flow rate in the main fracture to be transported into the secondary fracture. The predicted results were in accordance with the Katherine Thomas Technology Center experimental results. Therefore, the key parameters theory and their calculations have been verified and could be used for further studies and as the theoretical foundation of the fracture design.

complex fracture, proppant transport, complex fracture unit model, fractional flow, proppant diversion

doi: 10.1360/N972016-00814