

# 天然裂缝压裂液滤失模型

夏富国<sup>1</sup>, 郭建春<sup>2</sup>, 刘立宏<sup>1</sup>, 张冲<sup>1</sup>, 张新<sup>3</sup>

(1.中国石化东北油气分公司 工程技术研究院, 吉林 长春 130062; 2.西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500; 3.中国石化东北油气分公司 勘探开发研究院, 吉林 长春 130062)

**摘要:**在裂缝性储层水力压裂过程中,天然裂缝在水力裂缝的作用下产生剪切滑移或张开,使压裂液的滤失量显著增加,从而增大了施工风险。目前的压裂液滤失模型大多是针对均质储层的,不适用于裂缝性储层。为此,从天然裂缝内压裂液的动态滤失过程出发,描述了压裂液滤失的物理过程;根据压力连续及流体体积守恒原理,建立了天然裂缝压裂液滤失模型;结合模型求解思路和方法,编制了计算程序。研究表明,压裂液性质、天然裂缝性质和施工参数等对压裂液的滤失影响较大,重点模拟分析了充填带对滤失量的影响。天然裂缝压裂液滤失模型计算结果表明:当最大缝宽较窄时,存在最小滤失量的临界缝宽;当最大缝宽较大时,累积滤失量与临界缝宽成反比;增大充填物的体积浓度可减小压裂液滤失量;而增大充填带临界厚度会增大滤失量,但存在最佳临界厚度。

**关键词:** 裂缝性储层 天然裂缝 压裂液滤失模型 数值模拟 充填带

**中图分类号:** TE357.11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2013)04-0105-06

压裂液滤失量计算是压裂施工设计的重要组成部分。在压裂施工过程中,控制滤失量能够提高压裂液效率,改善压裂效果<sup>[1]</sup>。因此,很多学者对压裂液滤失机理进行了大量的研究并取得了丰硕成果<sup>[2-19]</sup>。Carter模型是最早的压裂液滤失模型,其基于常滤失系数理论,通过实验测定和油田小型压裂测试来确定各滤失参数<sup>[2]</sup>。Williams对Carter模型进行了修正,认为滤失速度与裂缝内流体净压力密切相关,进而提出了滤失三区域概念,得到了压裂液滤失系数与压裂液造壁性之间的关系<sup>[3]</sup>。此后众多学者从流体类型、滤失压降等多方面对经典滤失模型进行修正并提出了相应的滤失计算模型<sup>[4-7]</sup>。Fan等通过对高渗透储层的研究发现,该类储层缺少滤饼,故传统的滤失模型不能用于计算高渗透储层的滤失量,并提出了适用于高渗透储层的滤失计算模型<sup>[8-10]</sup>。大量油田实践证实,裂缝性储层较均质储层滤失更为严重,因此对于发育天然裂缝的储层,压裂液滤失研究更为重要<sup>[11]</sup>。Rodgers等指出天然裂缝是影响裂缝性储层压裂液滤失的重要因素<sup>[12]</sup>,并提出了工程评价滤失方法,但未建立滤失计算模型。Vinod等研究了天然裂缝滤失对地层伤害及天然裂缝地层的降滤工艺<sup>[13-14]</sup>,但对天然裂缝的滤失量只进行了相对简单的估算。李勇明等基于Warren-Root物理模型,建立了双孔单渗、双孔双

渗的压裂液滤失模型<sup>[15-17]</sup>,模型计算结果较均质储层滤失模型更为准确,但模型条件较为理想,工程实用性不强。为此,笔者从天然裂缝是裂缝性储层滤失的关键因素出发,根据裂缝性储层天然裂缝的实际滤失动态过程,建立了针对天然裂缝的压裂液滤失计算模型,以期对水力压裂施工参数优化、降滤失工艺优选及降滤失剂用量优化提供依据。

## 1 天然裂缝压裂液滤失过程描述

由于裂缝性储层中天然裂缝发育,水力裂缝在地层延伸必然会与天然裂缝相交,最终形成以水力裂缝为主的裂缝网络,该网络中存在水力裂缝、天然裂缝和基质孔隙3类渗滤介质。裂缝性储层一般岩性致密、基质孔渗性差,天然裂缝是油气储集流动的主要场所及通道。裂缝性储层与均质地层压裂液滤失的差异主要是由于天然裂缝的存在造成的。为此,笔者主要研究天然裂缝发育储层压裂液的滤失机理。天然裂缝的形态及分布是压裂液滤失的重要影响因素,它与天然裂缝的赋存方式和压裂施工参数密切相关。为了简化模型,只对单条天然裂缝进行研究。在压裂施工过程中,压裂液中的水不溶物、岩石脱落形成的固相颗粒及降滤失剂或支撑剂微粒会在天然裂缝内某个位置处堆积形成

充填带,其具体位置与固相颗粒的粒径和天然裂缝的缝宽有关。随着压裂液在天然裂缝中的不断滤失,充填带的厚度逐渐增加,至一定程度时,会有效阻止压裂液的滤失<sup>[18]</sup>。分析压裂液在天然裂缝内的滤失过程(图1a)可知,滤失初期存在2个水动力场,即压裂液沿天然裂缝壁面垂直向基质的渗滤以及压裂液沿天然裂缝的流动。研究表明<sup>[13-14]</sup>,天然

裂缝内的流体流速远大于裂缝面的滤失速率,天然裂缝面上不会形成滤饼,即使形成了滤饼也会在裂缝内流体的作用下不断被剥蚀而进入充填带;充填带形成后,天然裂缝内压裂液的滤失过程(图1b)显示,充填带使天然裂缝内压裂液的滤失过程变得更为复杂,会产生沿天然裂缝面的流体流动、垂直天然裂缝面的滤失及充填带渗滤3种滤失方式。

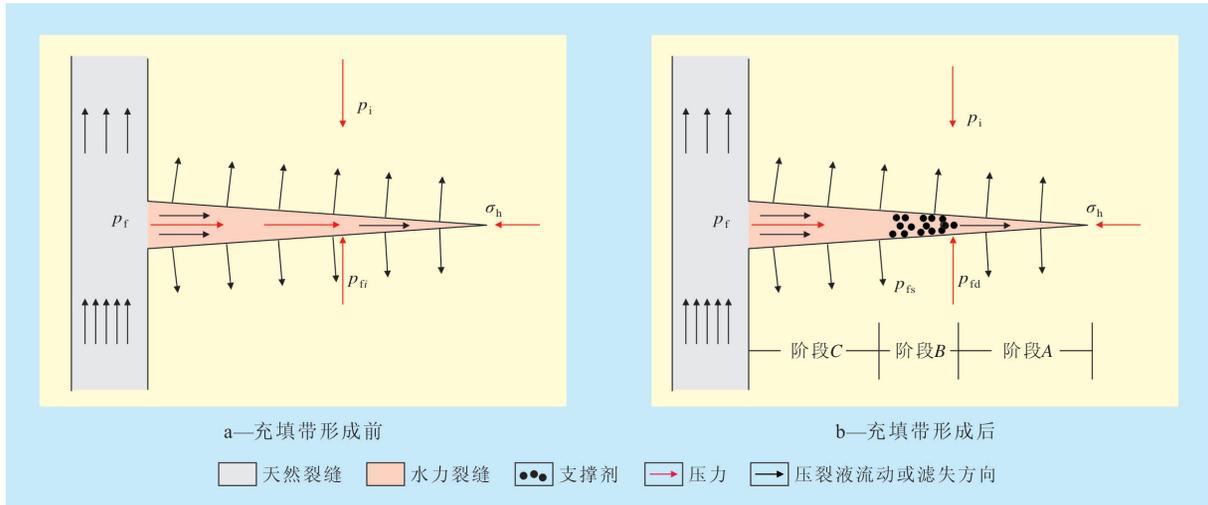


图1 充填带形成前后天然裂缝内压裂液滤失过程示意

$p_i$  为原始地层压力,MPa;  $p_f$  为天然裂缝缝口处的压力,MPa;  $p_{fi}$  为天然裂缝内任意断面处的压力,MPa;  $\sigma_h$  为地层水平最小主应力,MPa;  $p_{fs}$  为天然裂缝缝口一侧充填带界面压力,MPa;  $p_{fa}$  为天然裂缝缝尖一侧充填带界面压力,MPa

## 2 压裂液滤失模型

### 2.1 充填带形成前

充填带形成前的滤失分为垂直天然裂缝面的滤失和沿着天然裂缝面流体流动2部分。对其分别采用均质油藏模型及平行板流模型建立相关流体滤失模型,通过二者的耦合求解,得到充填带形成前的天然裂缝内压裂液滤失量及滤失速率。

天然裂缝面的滤失模型为

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \times \frac{\partial p}{\partial t} & x > 0, t > 0 \\ p = p_i & x = 0, t = 0 \\ p = p_f(t) & x = 0, t > 0 \\ p = p_i & x \rightarrow \infty, t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$a = \frac{K_m}{\phi_m \mu_{app} C_1} \quad (2)$$

$$\mu_{app} = n \mu_{eff} \left( \frac{1}{v_f} \right)^{1-n} \quad (3)$$

$$\mu_{eff} = \frac{K}{12} \left( 9 + \frac{3}{n} \right)^n (150 K_m \phi_m)^{\frac{1-n}{2}} \quad (4)$$

式中:  $p$  为距裂缝面  $x$  处的压力,MPa;  $x$  为地层中某点到裂缝面的距离,m;  $a$  为水力扩散系数,  $m^2/s$ ;  $t$  为滤失时间,s;  $K_m$  为基质渗透率,  $10^{-3} \mu m^2$ ;  $\phi_m$  为基质孔隙度;  $\mu_{app}$  为压裂液表观粘度,  $Pa \cdot s$ ;  $C_1$  为流体压缩系数,  $MPa^{-1}$ ;  $n$  为流性指数;  $\mu_{eff}$  为压裂液有效粘度,  $Pa \cdot s$ ;  $v_f$  为天然裂缝缝内流体速率,  $m/s$ ;  $K$  为幂律流体的稠度系数,  $Pa \cdot s^n$ 。

在平面应变条件下,沿裂缝面的正应力分布与天然裂缝缝宽的关系采用 England 与 Green 提出的通用公式<sup>[19]</sup>,即

$$w_y = \frac{4(1-\gamma)L_f}{\pi G} \left[ \int_{f_1}^1 \frac{f_2 df_2}{\sqrt{f_2^2 - f_1^2}} \int_0^{f_2} \frac{p(f_1) df_1}{\sqrt{f_2 - f_1}} \right] \quad (5)$$

$$0 \leq y \leq \frac{L_f}{2}$$

其中

$$f_1 = \frac{y}{L_f} \quad (6)$$

$$f_1 + f_2 = 1 \quad (7)$$

式中:  $w_y$  为断面  $y$  处的裂缝宽度,m;  $y$  为裂缝中某断面到裂缝尖端的距离,m;  $\gamma$  为岩石泊松比;  $L_f$  为天然裂缝长度,m;  $G$  为岩石剪切模量,MPa;  $f_1$

和  $f_2$  均为缝长系数。

当裂缝内的压力稍高于最小主应力时,则式(5)可简化为

$$w_y = \frac{2(1-\gamma)L_f(p_f - \sigma_h)}{G} \quad (8)$$

天然裂缝内流体流动的压降方程为

$$\frac{dp}{dy} = \frac{-2^{n+1}K}{w_y^{2n+1}} \left[ \frac{(2n+1)v_{fy}}{nH_f} \right]^n \quad (9)$$

式中:  $v_{fy}$  为流体在天然裂缝断面  $y$  处的流速, m/s;  $H_f$  为天然裂缝高度, m。

充填带的体积与压裂液滤失量成正比,假设充填带从裂缝宽度为  $w_f$  处的断面开始沉积,则充填带厚度可近似为

$$L_c = \frac{C_s}{(1-\phi_c)w_f H_f} \Delta V \quad (10)$$

式中:  $L_c$  为充填带厚度, m;  $C_s$  为压裂液中水不溶物的体积浓度,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $\phi_c$  为充填带孔隙度;  $w_f$  为充填带开始沉积时的裂缝宽度, m;  $\Delta V$  为压裂液滤失量,  $\text{m}^3$ 。

由式(1)得天然裂缝任一断面压力为

$$p_{fx} = p_i + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \times \frac{\phi_m \eta_x}{K_m} \times \left[ \mu_{\text{app}} \sqrt{a_1} e^{\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_1}}\right)^2} \operatorname{erf}\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_1}}\right) + \mu_r \sqrt{a_2} e^{\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_2}}\right)^2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_2}}\right) \right] \quad (11)$$

其中

$$a_1 = a \quad (12)$$

$$a_2 = \frac{K_m}{\phi_m \mu_r C_i} \quad (13)$$

式中:  $p_{fx}$  为断面  $x$  处的压力, MPa;  $\eta_x$  为界面常数;  $a_1$  和  $a_2$  为水力扩散系数;  $\mu_r$  为地层流体粘度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

流体在天然裂缝面上的滤失速率为

$$q_{wf} = -\frac{K_m}{\mu_{\text{eff}}} \times \frac{dp_{fx}}{dx} \Big|_{x=0} \quad (14)$$

式中:  $q_{wf}$  为压裂液在天然裂缝面上的滤失速率,  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

由式(9)得天然裂缝中断面  $y$  处的压力为

$$p_{fy} = \sigma_h + 2^{n+1} \left[ \frac{(2n+1)v_{fy}}{nH_f} \right]^n \frac{Ky}{w_y^{2n+1}} \quad (15)$$

式中:  $p_{fy}$  为断面  $y$  处的压力, MPa。

同一裂缝断面内压力相等,故由式(11)与式(15)可得

$$p_i + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \times \frac{\phi_m \eta_x}{K_m} \times \left\{ \mu_{\text{app}} \sqrt{a_1} e^{\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_1}}\right)^2} \operatorname{erf}\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_1}}\right) + \mu_r \sqrt{a_2} e^{\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_2}}\right)^2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_2}}\right) \right\} = \sigma_h + 2^{n+1} \left[ \frac{(2n+1)v_{fy}}{nH_f} \right]^n \frac{Ky}{w_y^{2n+1}} \quad (16)$$

忽略压裂液的压缩性,由液体体积守恒原理可得断面  $y$  处流体流速与裂缝面滤失速率的关系为

$$v_{fy} = \frac{2yq_{wf}}{w_y} \quad (17)$$

联立式(5)、式(11)、式(14)、式(15)和式(17),可求得充填带形成前天然裂缝内的滤失量及滤失速率。

## 2.2 充填带形成后

充填带厚度随着压裂液的不滤失逐渐增加,当达到一定值时,充填带能有效阻止压裂液的滤失,对于流体在充填带内的渗流可采用多孔介质的达西方程描述

$$v_c^n = \frac{a_u^n}{2K} \left( \frac{\phi_c n}{3n+1} \right)^n \left( \frac{8K_c}{\phi_c} \right)^{\frac{n+1}{2}} \frac{p_{fs} - p_{fd}}{L_c} \quad (18)$$

式中:  $v_c$  为充填带内流体的渗流速率, m/s;  $a_u$  为压降修正系数;  $K_c$  为充填带渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

将式(10)代入式(18),整理得到充填带压降方程为

$$p_{fs} - p_{fd} = \frac{2K}{a_u^n} \times \frac{C_s}{(1-C_s)} \left( \frac{3n+1}{n} \right)^n \frac{\phi_c^{-n}}{1-\phi_c} \left( \frac{\phi_c}{8K_c} \right)^{\frac{n+1}{2}} \Delta V v_c^n \quad (19)$$

充填带将天然裂缝分为 A、B 和 C 共 3 个阶段(图 1b)。这 3 阶段的压降分别采用平板流模型、多孔介质达西方程及天然裂缝面滤失模型耦合求解。利用压力不断试算、迭代,即可求出充填带形成后天然裂缝的滤失量以及滤失速率。

## 3 模型计算方法

将天然裂缝等分为  $m$  段,从天然裂缝缝尖开始反向计算压裂液滤失量,通过计算每个阶段的滤失

量,从而得出天然裂缝的压裂液总滤失量与滤失速率。主要分5个步骤计算天然裂缝中压裂液滤失

第1步,建立牛顿迭代函数。由式(11)可得

$$\eta_x = \frac{2(p_{fx} - p_i)K_m}{\phi_m \sqrt{\pi} \left[ \mu_{app} \sqrt{a_1} e^{\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_1}}\right)^2} \operatorname{erf}\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_1}}\right) + \mu_r \sqrt{a_2} e^{\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_2}}\right)^2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_2}}\right) \right]} \quad (20)$$

对  $\eta_x$  求导并整理得

$$\eta_x' = - \frac{2(p_{fx} - p_i)K_m \left[ \mu_{app} e^{\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_1}}\right)^2} \operatorname{erf}\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_1}}\right) \frac{\eta_x}{2\sqrt{a_1}} + \mu_{app} \frac{1}{\sqrt{\pi}} + \mu_r e^{\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_2}}\right)^2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_2}}\right) \frac{\eta_x}{2\sqrt{a_2}} - \mu_r \frac{1}{\sqrt{\pi}} \right]}{\left[ \sqrt{\pi} \phi_m \left[ \mu_{app} \sqrt{a_1} e^{\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_1}}\right)^2} \operatorname{erf}\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_1}}\right) + \mu_r \sqrt{a_2} e^{\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_2}}\right)^2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{4a_2}}\right) \right] \right]^2} \quad (21)$$

$\eta_x$  值的牛顿迭代式为

$$\eta_{x+1} = \eta_x - \frac{f(\eta_x)}{f'(\eta_x)} \quad (22)$$

第2步,计算第1微元段压裂液滤失速率。假设第1微元段入口断面单位时间的流量为  $Q_1$ , 滤失量为  $V_1$ , 末端的流量为0, 可知  $Q_1 = V_1$ 。

假设天然裂缝内压裂液流速为  $v_{f1}$ , 通过牛顿迭代求得  $\eta_x$ , 由式(14)求出第1微元段压裂液滤失速率, 式(17)可求出裂缝内流速  $v_{fy}$ 。比较  $v_{f1}$  与  $v_{fy}$  是否相等, 否则重新假设  $v_{f1}$  直到满足一定精度。

第3步, 无充填阶段滤失量计算。按照第1微元段的方法计算第2微元段的压裂液滤失量, 并对其校正, 其计算式为

$$v_{y2} = \frac{2q_{wf2}(L_{y2} - L_{y1}) + v_{y1}w_{y1}}{w_{y2}} \quad (23)$$

式中:  $v_{y2}$  为断面2处(第2微元段天然裂缝缝口一侧断面)的压裂液流速, m/s;  $q_{wf2}$  为第2微元段内天然裂缝面上压裂液的滤失速率,  $m^2/s$ ;  $L_{y2}$  为断面2处距天然裂缝缝尖端的长度, m;  $L_{y1}$  为断面1处距天然裂缝缝尖端的长度, m;  $v_{y1}$  为断面1处(第1微元段天然裂缝缝口一侧断面)的压裂液流速, m/s;  $w_{y1}$  为断面1处天然裂缝的宽度, m;  $w_{y2}$  为断面2处天然裂缝的宽度, m。

同理, 求出第  $m$  个微元段断面内的压裂液流量  $Q_m$  及各微元段内的压裂液滤失量, 从而计算出天然裂缝内压裂液的总滤失量。

第4步, 确定是否进入充填阶段。计算得到总滤失量后, 通过式(10)计算充填带厚度, 当厚度达临界值后, 计算充填带形成后的压裂液滤失量, 否则继续进入下一时间段的未形成充填带的压裂液滤失量计算。

第5步, 形成充填带后压裂液滤失量计算。充填带阶段 A 部分压降为

$$p_{fd} - \sigma_h = 2^{n+1} \left[ \frac{(2n+1)v_c}{nH_f} \right]^n \frac{K_c L_{cA}}{w_c^{2n+1}} \quad (24)$$

式中:  $L_{cA}$  为天然裂缝尖端到充填带的长度, m;  $w_c$  为充填段开始形成处裂缝断面处的宽度, m。

充填带阶段 C 部分压降为

$$p_f - p_{fs} = 2^{n+1} \left[ \frac{(2n+1)v_c}{nH_f} \right]^n \frac{K_c(L - L_c - L_{cA})}{w_c^{2n+1}} \quad (25)$$

充填带压降方程为式(19), 3个阶段的压降总和等于天然裂缝缝口与天然裂缝缝尖压力(最小主应力)之差。基于此原理, 不断迭代计算可求出天然裂缝内任意时间的压裂液滤失量及滤失速率。

## 4 应用分析

基于所建模型及求解方法, 编制VB计算程序, 参数包括: 最小水平主应力为12 MPa, 地层压缩系数为  $2.9 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ , 原始地层压力为10 MPa, 地层渗透率为  $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 地层流体粘度为1 mPa·s, 岩石剪切模量为8.75 GPa, 压裂液粘度为140 mPa·s, 天然裂缝缝高为15 m, 重力加速度为9.8 N/kg, 压裂液残渣浓度为  $1.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3$ , 流性指数为0.6, 稠度

系数为  $1.15 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ , 地层孔隙度为 0.08, 充填段渗透率为  $1\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 岩石泊松比为 0.2, 充填带临界长度为 0.1 m, 天然裂缝的长度为 1 m, 压裂液密度为  $1\ 010 \text{ kg/m}^3$ , 天然裂缝入口处的压力为 19 MPa, 充填带孔隙度为 0.01。代入各参数值, 计算并分析了裂缝净压力、压裂液粘度、临界缝宽、充填物体积浓度和充填带临界厚度等对滤失速率或滤失量的影响。

计算结果表明:天然裂缝滤失量随着裂缝净压力的增大而增加;随着压裂液粘度的增加,压裂液滤失量减小。这些结论与前人研究成果一致。笔者侧重描述临界缝宽、充填物体积浓度和充填带临界厚度等参数对压裂液滤失量的影响。

**临界缝宽** 临界缝宽是指充填带开始形成时天然裂缝的宽度。工程常采用  $150 \mu\text{m}$  粉陶降滤, 故以天然裂缝最大缝宽为  $500 \mu\text{m}$  为界, 研究其对滤失量的影响。当最大缝宽为  $180 \mu\text{m}$  时, 由不同滤失时间下的累积滤失量(图 2)可知:滤失初期(滤失 1 min), 临界缝宽对累积滤失量的影响不明显;但一段时间后, 滤失量随着临界缝宽增大呈先缓慢增加后逐渐减小再急剧增加的趋势, 而且时间越长, 趋势越明显;当临界缝宽为  $150 \sim 160 \mu\text{m}$  时, 累积滤失量出现拐点。当最大缝宽为  $730 \mu\text{m}$  时, 不同临界缝宽下的天然裂缝累积滤失量(图 3)表明:整体上, 在同一滤失时间下, 压裂液累积滤失量随着临界缝宽

的增大而增加;当临界缝宽较小时, 临界缝宽对累积滤失量影响较明显;当临界缝宽达到  $100 \mu\text{m}$  时, 临界缝宽对累积滤失量的影响相对较小。

**充填物体积浓度** 充填物体积浓度是指在地层裂缝条件下单位体积压裂液中水不溶物和残渣等固相微粒的体积。由不同充填物体积浓度的累积滤失量(图 4)可知:当充填物体积浓度为  $0.14 \text{ m}^3/\text{m}^3$  时, 累积滤失量减小程度变缓;当充填物体积浓度达到 0.84% 后, 累积滤失量几乎不变。表明随着充填物体积浓度的增大, 累积滤失量逐渐减小。研究还发现, 随着充填物体积浓度的增大, 压裂液对地层的伤害程度也增大<sup>[20]</sup>, 因此确定合理的充填物体积浓度对满足工程需要尤为重要。

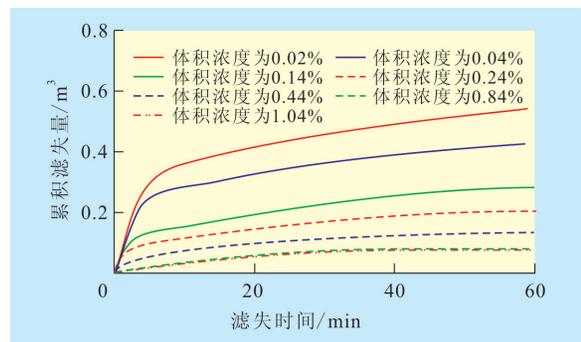


图4 不同充填物体积浓度下的累积滤失量

**充填带临界厚度** 充填带临界厚度是指地层裂缝条件下能有效阻止天然裂缝中流体流动的充填带厚度。分析不同充填带临界厚度下的累积滤失量(图 5)发现, 累积滤失量整体上随充填带临界厚度的增加而逐渐增加, 但在  $0.06 \sim 0.08 \text{ m}$  出现一段平稳区间, 平稳区间的出现可用于指导压裂优化设计。

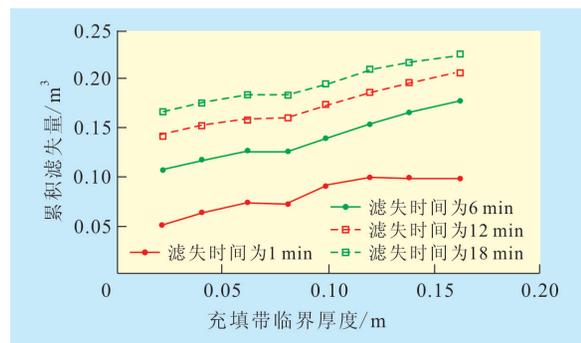


图5 不同充填带临界厚度下的累积滤失量

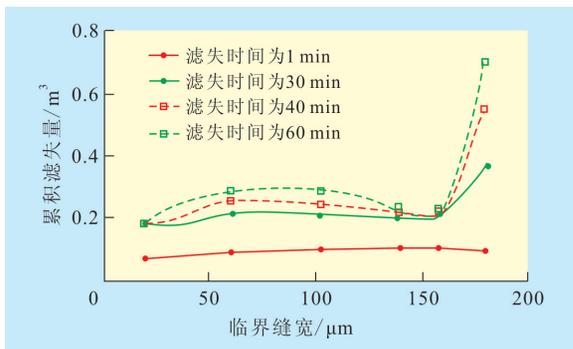


图2 最大缝宽为  $180 \mu\text{m}$  时不同滤失时间下的累积滤失量

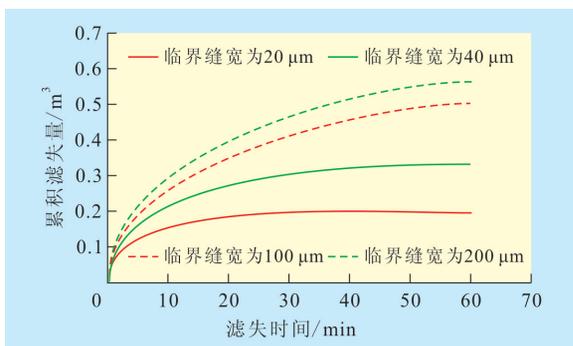


图3 最大缝宽为  $730 \mu\text{m}$  时不同临界缝宽下的累积滤失量

## 5 结论

根据天然裂缝的实际动态滤失过程, 描述了天然裂缝内压裂液滤失的物理过程; 根据压力连续以

及流体体积守恒原理,建立了天然裂缝内压裂液滤失计算模型;按照模型求解思路,编制模拟程序,计算分析了充填带性质对天然裂缝内压裂液滤失量的影响。计算结果显示,当天然裂缝的最大缝宽较窄时,存在最小滤失量的临界缝宽;当最大缝宽较大时,累积滤失量与临界缝宽成反比;充填物体积浓度的增加能减小压裂液的滤失量,但会增大地层伤害;充填带临界厚度的增加会增大压裂液的滤失量,但存在最佳临界厚度。天然裂缝压裂液滤失模型对充填带性质的研究可以用于指导工程降滤失剂粒径的选择、用量及压裂液参数的优化。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Mao Bai, Sidney Green.Effect of leakoff variation on fracturing efficiency for tight shale gas reservoirs[C].American Rock Mechanics Association,2005.
- [3] Williams B B.Fluid loss from hydraulically induced fractures[J].Journal of Petroleum Technology,1970,22(7):882-888.
- [4] Robert Ray McDaniel, Asoke Kumar Deysarkar.An improved method for measuring fluid loss at simulated fracture conditions[C].SPE 10259,1981.
- [5] Settari A.A new general model of fluid loss in hydraulic fracturing[C].SPE 11625,1985.
- [6] Settari A.General model of fluid flow (leakoff) from fractures induced in injection operations[C].SPE 18197,1988.
- [7] Norman R Warplnski.Dual leakoff behavior in hydraulic fracturing of tight, leaticular gas sands[C].SPE 18259,1990.
- [8] Fan Yong, Michael J Economides.Fracturing fluid leakoff and net pressure behavior in frac&pack stimulation[C].SPE 29988,1995.
- [9] Valko P P, Economides M J.Fluid-leakoff delineation in high-permeability fracturing[C].SPE 56135,1999.
- [10] Faruk Civan.Significance of the non-Darcy behavior on the fluid loss into high permeability formations[C].SPE 63054,2000.
- [11] 孙业恒.裂缝性低渗透砂岩油藏数值模拟历史拟合方法[J].油气地质与采收率,2010,17(2):87-90.
- [12] Rodgerson James L.Impact of natural fractures in hydraulic fracturing of tight gas sands[C].SPE 59540,2000.
- [13] Vinod P S, Flindt M L, Mitchell J P.Dynamic fluid-loss studies in low-permeability formations with natural fractures [C].SPE 37486,1997.
- [14] Salimi S, Alikarami R.Mechanism of fluid invasion in naturally fractured reservoirs: experimental study[C].SPE 98292,2006.
- [15] 李勇明,赵金洲,郭建春,等.天然裂缝性储层压裂液滤失模型的数值模拟研究[J].钻井液与完井液,2004,21(1):20-22.
- [16] 李勇明,郭建春,赵金洲,等.裂缝性气藏压裂液滤失模型的研究及应用[J].石油勘探与开发,2004,31(5):120-122.
- [17] 李勇明,翟锐,高瑞民,等.水平井多段压裂后压力递减分析[J].油气地质与采收率,2012,19(4):66-70.
- [18] Dirk Teeuw, Theodore Hesselink F.Power-law and hydrodynamic behaviour of biopolymer solutions in porous media[C].SPE 8982-PA,1980.
- [19] 李勇明,赵金洲,郭建春,等.裂缝-溶洞型碳酸盐岩气藏压裂液滤失计算新模型[J].天然气工业,2004,24(9):113-115.
- [20] 庄照锋,张士诚,李宗田,等.压裂液伤害程度表示方法探讨[J].油气地质与采收率,2010,17(5):108-110.

编辑 常迎梅

#### (上接第104页)

- [5] 虞建业,沈飞,顾庆宏,等.水平井射孔参数对压裂起裂压力的影响[J].油气地质与采收率,2011,18(1):105-107,110.
- [6] Nilson R H.An integral method for predicting hydraulic fracture propagation driven by gasses or liquids [J].International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,1986,10(2):191-211.
- [7] Petitjean L, Couet B.Modeling of gas - driven fracture propagation for oil and gas stimulation[C].SPE 28084,1994.
- [8] 蒲春生,孙志宇,王香增,等.多级脉冲气体加载压裂技术[J].石油勘探与开发,2008,35(5):636-639.
- [9] 孙志宇,李宗田,苏建政,等.地层参数对爆燃气体压裂裂缝扩展形态影响分析[J].油气地质与采收率,2011,18(1):101-104.
- [10] 陈莉静,李宁,王俊奇.高能复合射孔爆生气体作用下预存裂缝起裂扩展研究[J].石油勘探与开发,2005,32(6):91-94.
- [11] 西南石油大学应用数学教研室.数值计算方法[M].成都:四川科学技术出版社,2007.

编辑 常迎梅