

水 力 压 裂

(采80级选修课试用)

王 鸿 勋

华东石油学院北京研究生部

1983年10月

编写前言

这本讲义是为采油专业80级选修课编写的。学生在学习此课以前，已经学完了“采油工艺原理”。水力压裂的一些基本问题已在该教材的第四章中有所阐述。这个讲义是在那个基础上编写的。

这本讲义包括“采油工艺原理”压裂一章中应当编入但尚未编入的一些基本内容、还有一些有关水力压裂中进一步或更为广泛的内容以及近些年来一些新的发现。这些发现对估计压裂参数、认识地下裂缝的几何尺寸提供了比较实用的新的矿场方法。

由于编者的水平有限，时间仓促，错误之处在所难免，希读者提出批评意见，以便修改。

目 录

第一章 支撑剂在缝中的分布

- 一、垂直缝高粘度体
- 二、垂直缝低粘度体
- 三、综合加砂方法
- 四、水平缝中的砂分布

第二章 压力分析及应用

- 一、小型压裂测试
- 二、压裂过程中的压力分析
- 三、利用压降曲线确定压裂参数

第三章 压裂液及支撑剂

- 一、压裂液流变性的测试方法
- 二、影响压裂液流变性的温度因素
- 三、压裂液的滤失性
- 四、支撑剂的选用
- 五、压裂液对导流率的影响
- 六、环境及流动条件对导流率的作用

第四章 酸 压

- 一、理论基础
- 二、酸压有效距离预测
- 三、酸压导流率及效果预测

第五章 压力不稳定过程在水力压裂中的应用

- 一、确定表皮效应
- 二、确定缝长及缝导流率
- 三、曲线拟合方法的应用

第六章 压裂工艺技术

- 一、多层压裂技术
- 二、井温测试及其解释

文 献

第一章 支撑剂(砂子)在缝中分布

水力压裂是在地层中造出一定导流能力及一定长度的填砂裂缝,以此改变地层中流体的渗滤方式,提高向井底的供油(气)能力。裂缝的导流能力,在一定的条件下,由砂子在缝中的分布所确定,砂子没有填到的裂缝,很可能闭合就没有什么导流能力,填砂愈厚,层数愈多,导流能力就相对高些,所以砂子在缝中的分布在压裂设计和效果分析中是很重要的。

填砂裂缝导流能力的大小是由若干因素所决定的,在压裂施工中,如何加砂,首先应保证设计中的导流能力,因此在压裂设计中,常有一个加砂程序就是用来确保砂子在缝中的分布,以满足填砂裂缝的导流能力的要求。

支撑剂在缝中的分布随着裂缝的类型及压裂液的悬浮性能的不同,有所差别。现就完全悬浮型,沉降型压裂液及垂直缝及水平缝的情况分述于后。

一、垂直缝高粘压裂液

近年来出现了可使砂子完全悬浮的压裂液,裂缝闭合以前,裂缝中充满了悬浮着砂子的高粘携砂液。这种情况下控制最后裂缝导流能力的因素是液体中的砂浓度。

按一定砂浓度(砂比)进入裂缝的含砂液体在缝中向前流动的过程中,由于液体从缝壁的滤失,使缝内砂浓度(砂比)逐步提高。可以想象到停泵时,裂缝端部的砂浓度最高,井底附近则接近于地底砂比。

使于高粘压裂液作为携砂液的加砂程序,一是在计标缝内砂比沿缝长变化的基础上,找出满足设计要求的导流能力的加砂步骤,二避免在缝中出现砂比过高的砂卡现象。

1、计标方法

假设每注入 2m^3 的含砂液体为一个处理单元,时间 t 是注入此单元所需的时间。 t 时间内从此单元含砂液中滤失的体积百分数为

$$\text{滤失}\% = \frac{\text{滤失体积}}{\text{单元体积}(SV)}$$

滤失体积 = 滤失速度 × 面积 × 时间

$$= \frac{C}{\sqrt{t}} (SV \times \frac{1}{W} \times 2) \times t \quad \dots (1)$$

式中 C — 滤失系数 (综合), $M^3/\sqrt{min}$;

SV — 单元体积, m^3 ;

W — 缝宽, m

滤失百分数则为

$$\text{滤失}\% = \frac{SV \times \frac{1}{W} \times 2 \times \frac{C}{\sqrt{t}} \times t}{SV} = \frac{2}{W} \times \frac{C}{\sqrt{t}} \times t \quad \dots (2)$$

式(2)是在 t 时间后的滤失百分数, 按此方法, 可以计标示任意几个 t 后的剩余滤液体积。如果把单元体积 $2 m^3$, t 时后滤失百分数作为 i (相当于利率), 利用简单的利息公式, 就能给出剩余体积

$$F = \frac{P}{(1+i)} \quad (3)$$

式中 P — 现体积, m^3

F — 剩余体积, M^3

利用复合利息公式, 可标示几个时间 t 后的剩余体积

$$F = \frac{P}{(1+i)^n} \quad (4)$$

经滤失后的缝内砂浓度 C_s 为

$$C_s = \frac{P \times C_0}{\frac{P}{(1+i)^n}} = C_0 (1+i)^n \quad (5)$$

式中 C_0 与 C_s 为地层砂浓度与缝内几个 t 时的砂浓度, 由式(5)看出随着时间的增加, 缝内砂浓度也随之提高, 如果以注入单元体积数 S 代替 n , 式(5)可写为

$$C_s = \frac{C_0}{(1+i)^S} \quad (6)$$

式(6)表示在缝内保持一定的砂浓度 (相当于一定的导流能力) 时, 地层砂浓度随着注入单元体积的变化。由于常从缝的前端向井底进行计标, 所以以 $(S_T - S)$ 代替指数 S , 并将 i 以具体参数代入, 得到

$$C_0 = \frac{C_S}{\left(1 + \frac{2}{W} \times \frac{C}{\sqrt{t}} \times t\right)^{S_T - S_p}} \quad (7)$$

S_T 是总注入单元体积数

由于滤失速度 $C/\sqrt{t}$ 是随时间而变化的, 所以式(7)应为

$$C_0 = \frac{C_S}{\left(1 + \frac{2 \times C \times t}{W \sqrt{(S_T + S_p)t}}\right)^{S_T - S_p}} \quad (8)$$

式中 S_p 是与初滤失相当的单元值。

为了计标示在压泵时缝内液体体积, 从而进一步求出砂子支撑面积及缝的长度, 可以按平均滤失速度求出总滤失量, 压泵时缝内液体体积 V_F 为:

$$V_F = \frac{\sqrt{t}}{1 + \frac{2 \times C \times t \times S_T}{W \sqrt{(S_T/2 + S_p)t}}} \quad (9)$$

2. 设计步骤

现以具体井的实例来说明使用高粘完全悬浮液做为压裂液的加砂设计步骤:

地层有效厚度	24.38 米
渗透率	1 毫达西
闭合压力	140 公斤/厘米 ²
缝长	80.5 米
综合滤失系数	5.73×10^{-4} 米/分
总排量	2.25 方/分
平均缝宽	9.53×10^{-3} 米

以下是计标步骤:

1° 估计总用液量为 80 方, 其中 12 方为前置液, 因此携砂液为 68 方

2° 若以 2 方为一注入液体单元, 则

前置液单元数 $S_p = 12/2 = 6$

携砂液单元数 $S_T = 68/2 = 34$

3° 注入每液体单元需要的时间 t ,

$$t = \frac{2}{2.25} = 0.888 \text{ 分}$$

4° 打泵时缝内携砂液的体积

$$V_F = \frac{68}{1 + \frac{2 \times 5.73 \times 10^{-4} \times 0.888 \times 34}{9.53 \times 10^{-3} \sqrt{(34/2 + 6)} \times 0.888}} = 37.7 \text{ 方}$$

5° 填砂缝长 L

$$L = \frac{37.7}{9.53 \times 10^{-3} \times 2 \times 24.38} = 81.1 \text{ 米}$$

如果 L 与设计缝长不符，则应改变总液量、排量、滤失等参数，重新计算，直到相符为止。

6° 确定压裂缝需要的导流能力及砂浓度

使用麦克奎尔及西克拉曲线，若 $R_e = 200$ 米，则

$$\frac{L}{R_e} = 40\%$$

如果增产 6.6 倍， $(KW)_F/K$ 的最小导流能力应为 0.9 达西-米。由支撑剂导流能力曲线查得，在一定的粒径及闭合压力下，砂浓度为 2.44 公斤/米³ 时的导流能力略大于所需的值，考虑到填砂缝中各种可能的污染，此砂浓度仍可满足要求。

对于渗透率好的地层，难以达到预期的裂缝导流能力，这时可使用最大的可能得到的导流能力除以地层渗透率，在曲线上查得增产比将此值与其他填砂方法（沉砂法）的相比较，再决定采用何种加砂方法。

7° 求击打泵时缝中的砂浓度

$$C_s = \frac{1}{W} \times (\text{砂浓度, 公斤/米}^3) \\ = \frac{1}{9.53 \times 10^{-3}} \times 2.44 = 256 \text{ 公斤/米}^3$$

8° 计算出第一批加砂的砂浓度 ($S=1$)

$$C_{01} = \frac{256}{\left(1 + \frac{2 \times 5.73 \times 10^{-4} \times 0.888}{9.53 \times 10^{-3} \sqrt{(1+6)} \times 0.888}\right)^{34-1}} = 64 \text{ 公斤/米}^3$$

9° 顺序标示各批砂浓度

现在我们已经知道第一批的加砂浓度为64公斤/米³，最后一批的砂浓度为256公斤/米³，对其他各批砂浓度按同样的公式计算

$$C_{on} = \frac{256}{\left(1 + \frac{2 \times C \times t}{w \sqrt{(S_n + S_p)t}}\right)^{S_T - S_n}}$$

10° 确定施工中的加砂程序

从计算结果看到，两次注入单元之间的砂浓度增量相差不大，这虽然是希望的但实际施工中往往难以控制到如此准确。所以常将浓度增量调整到两次增量相差30或60公斤，这样作虽然方便了施工，但容易出现砂卡。

3. 方法的使用条件及优缺点

使用完全悬浮液体作为携砂液体，适合于低渗透率地层，在这里并不需要很高的填砂裂缝导流能力就能有较好的增产效果。因为岩石低渗透率，滤失液体也不会多。不会因为造成一定导流能力的填砂裂缝，在施工中难以实现所要求的加砂浓度。

虽然有时这种悬浮填砂受缝宽的限制，其导流能力不及沉降加砂缝宽的导流能力，但它的支撑面积很大，它能最大限度地支撑压开的面积全部支撑起来，这有很大的优越性。在一定条件下，如沉降下来的砂堤，虽然缝较宽，这是使导流能力增加的一个方法，但沉降缝往往由于填砂缝较短，填砂缝也不及悬浮式的，这样就需具体地加以比较，才能择优采用。

二. 垂直缝低粘压裂液

60年代曾对砂子在垂直裂缝中的分布进行了实验研究，其中巴布考克的方法，直到现在仍在被使用着，实验模型是用两块8英尺长，一英尺宽的平行安装的透明板，缝宽可以调节($\frac{3}{16}$ "到1")，使用的液体有牛顿液体(0.64~90厘泊)与非牛顿液体(胍胶溶液，视粘度约为1.5~900厘泊)。使用的支撑剂的比重变化范围从1.04到2.65，粒径为60/80, 20/40, 40/60, 10/20目，加砂浓度的范围在1.6到43.2%之间，上述

事故大致位于矿场压裂的范围之内。

分析多次实验结果，得出如下的规律：

1. 支撑剂在缝高度上的分布

混有砂子的液

体进入裂缝后，进入水平方向的流动，颗粒受有水平方向液体的携带力，垂向向下的重力及向上的浮力。使用低粘压裂液作为携砂液时，由于颗粒的重力大于浮力，所以具有很强的沉降

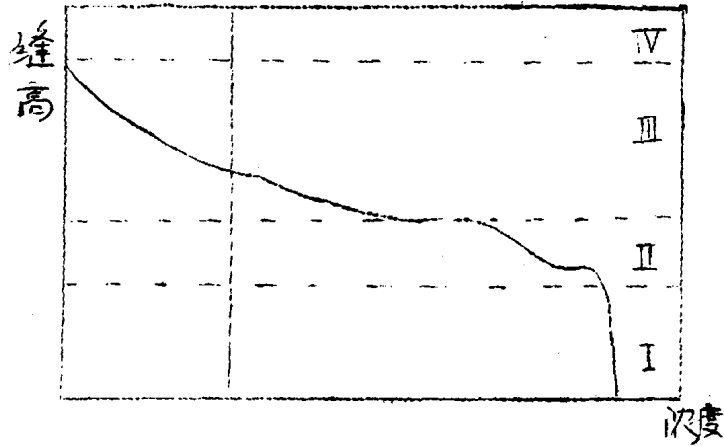


图1. 颗粒在缝高上的浓度分布

倾向，沉在缝底形成砂堤，砂堤减少了携砂液的过水断面，使流速提高，液体的流速逐渐达到使颗粒处于悬浮状态的能力，此时颗粒停止沉降，这种状态称为平衡状态。平衡时的流速称为平衡流速，平衡流速可定义为携带颗粒最小的流速，实际上是一种平衡流速，在此流速下，颗粒的沉积与卷起处于动平衡状态。

在平衡状态下，颗粒浓度的垂直剖面存在着差别，可以分为四个区域，见图。区I是沉积下来的砂堤，在平衡状态下砂堤的高度为平衡高度，区域II是在砂堤以上的颗粒滚流区，区域III则是悬浮区，虽颗粒都处于悬浮，但是不均质的，存在浓度梯度，最上面的IV区是无砂区。

在平衡状态下增加地层排量，则区II、IV与I均将变薄，区III则变厚，如果流速足够的大，I区可能完全消失。再进一步增加排量，缝内的浓度梯度剖面消失，成为均质的悬浮流。

2. 平衡流速

用低粘压裂液携带砂子时，有两个问题是很重要的，平衡流速的值，砂堤的堆积速度。

平衡流速定义为：

$$V_{EQ} = \frac{Q}{Wh_{EQ}} \quad (10)$$

式中: V_{EQ} —平衡流速 W —缝宽

h_{EQ} —平衡时流动断口的高度, 若缝高为 H_0 , 则

$$h_{EQ} = H_0 - H_{EQ}$$

H_{EQ} —砂堤的平衡高度

如果 V_{EQ} 表之以米/秒, W 毫米, h_{EQ} 米, Q 米³/分, 则:

$$V_{EQ} = \frac{16.67Q}{Wh_{EQ}} \quad (10-1)$$

从而平衡高度 H_{EQ} ,

$$H_{EQ} = H_0 - \frac{16.67Q}{WV_{EQ}} \quad (11)$$

巴布考克在解决平衡流速这一问题时, 采用了汤姆孙的解法, 汤姆孙利用颗粒自由沉降与速与阻力速度(摩擦速度剪应力速度)的比值 $U_p/(U_w)_{EQ}$, 先得到阻力速度 $(U_w)_{EQ}$, 然后再用此阻力速度求平衡流速 V_{EQ} , 在这里的阻力速度是平衡条件下的值。

阻力速度是用来分析流动分布的主要参数, 它定义为

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (12)$$

选用沉降与速与平衡时的阻力速度的无因次量, 是因为颗粒的沉降与速代表了重力作用的大小, 阻力速度则是反映了流体紊流的程度, 恰是这两个主要参数确定着颗粒是处于悬浮状态还是沉降下来。以两个速度的无因次值为纵坐标, 以颗粒的沉降雷诺数与其几何尺寸的乘积为横坐标处理实验数据, 对牛顿流体与非牛顿流体分别得到两条直线(图2)。

它们的方程式分别是:

$$\text{对牛顿流体} \quad \frac{U_p}{(U_w)_{EQ}} = 0.054 \left(\frac{U_p d_p \rho}{\mu} \sqrt{\frac{4R_h}{d_p}} \right)^{0.50} \quad (13)$$

$$\text{对非牛顿流体} \quad \frac{U_p}{(U_w)_{EQ}} = 0.041 \left(\frac{U_p d_p \rho}{\mu_a} \sqrt{\frac{4R_h}{d_p}} \right)^{0.71} \quad (14)$$

式中 U_p —颗粒沉降与速, 米/秒

$(U_w)_{EQ}$ — 平衡时的阻力速度, 米/秒
 d_p — 颗粒直径, 毫米
 μ — 液体粘度, 厘泊
 ρ — 液体密度, 公斤/米³
 R_h — 水力半径, 毫米

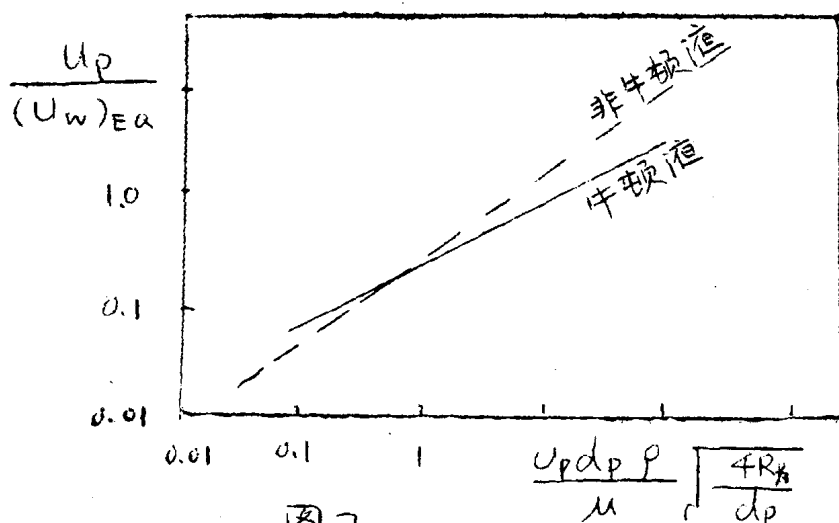


图 2

$$4R_h = 4 \frac{WH}{2(W+H)} = 2W \quad (14-1)$$

W — 缝宽, H — 缝高

根据缝壁上的剪应力 (τ_w) 的计标方法, 阻力流速可表之为

$$(U_w)_{EQ} = f(V_{EQ})^{\frac{1}{2}} = \frac{3.46 V_{EQ} (\rho_w / \rho_{se})^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{V_{EQ} \times 4R_h \times \rho_w}{\mu} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

$$\text{所以 } V_{EQ} = \left[\frac{(U_w)_{EQ}}{3.46} \right]^2 \left(\frac{\rho_{se} \times 4R_h}{\mu} \right) \quad (\text{层流}) \quad (15)$$

$$V_{EQ} = \left[\frac{(U_w)_{EQ}}{0.2} \right]^{2.143} \left(\frac{4R_h \rho}{\mu} \right)^{0.143} (\rho / \rho_{se})^{0.571} \quad (\text{紊流}) \quad (16)$$

$$\text{式中 } \rho_{se} = \frac{1000 + C_0}{1 + \frac{C_0}{2650}} \quad (16-1)$$

$C_0 = S \times 1720$ 公斤/米³, S = 以小数表示的砂比
 平衡高度 H_{EQ} 的计标

将得到的平衡流速 V_{EQ} 代入式 (11) 即可, 在使用此计

标式时，应注意 Q 的值。如垂直缝是以井轴为对称的两条相等的缝，则进入单翼缝中的流量，应为地面总排量的二分之一。

2. 砂堤的堆起速度

由于平衡流速 V_{EQ} 是携带砂子的最低流速，所以砂堤的堆起速度必然与缝中实际流速与平衡流速之间的速度差有关。当缝中流速达到或大于平衡流速时，砂堤停止增高，处于平衡状态。因之

$$\frac{dH}{dt} = K'(V_{EQ} - V) \quad (17-1)$$

式中， H 与 V 为缝中砂堤在任意时刻的高度与此时的缝内流速， K' 是比例系数

因为 $\frac{dQ}{dt} = -\frac{dH}{dt}$ ，及 $V = \frac{Q}{wh}$ ， $V_{EQ} = \frac{Q}{wh_{EQ}}$

代入(17-1)整理后得到

$$-\frac{h dh}{(h - h_{EQ})} = \frac{K'Q}{wh_{EQ}} dt \quad (17-2)$$

式中 $h = H_0 - H$ ， $h_{EQ} = H_0 - H_{EQ}$

积分(17-2)当 $t = 0$ 时， $h = H_0$ ， $t = t$ 时， $h = h$ ，整理后得

$$1 - u - z \ln u = Kt \quad (17-3)$$

式中 $u = \frac{h - h_{EQ}}{H_0 - h_{EQ}}$ ， $z = \frac{h_{EQ}}{H_{EQ}}$ ， $K = \frac{K'Q}{wh_{EQ}H_{EQ}}$

等式(17-3)的左端是 u 的函数，利用实测砂堤堆起高度与时间 t 的关系确定 K 值，再用 K 值求 K' 值

当以 K' 与 $(C)^{0.12} \left(\frac{P}{P_s - P}\right)^{0.45} \left(\frac{h_{EQ}}{H_{EQ}}\right)^{0.19} \left(\frac{U_P}{V_{EQ}}\right)^{0.86}$ 在双对数坐标上绘制示它们的函数关系时，是一条直线，直线的斜率为0.216，故

$$K' = 0.216 (C)^{0.12} \left(\frac{P}{P_s - P}\right)^{0.45} \left(\frac{h_{EQ}}{H_{EQ}}\right)^{0.19} \left(\frac{U_P}{V_{EQ}}\right)^{0.86} \quad (17-4)$$

式中的 C 值为砂子与压裂液的体积比(就是砂比 S)

至此，任意时间 t 所对应的砂堤高度 H ，可以利用式(17-1)或(17-3)解出。

在计算砂堤达到平衡高度 H_{EQ} 所需的时间 t_{EQ} 时作了一个假说，即砂堤达到平衡高度的95%，就认为已经达到平衡高

度, 此时, 式(17-3)中的 U 函数

$$U = \frac{h - h_{EQ}}{H_0 - h_{EQ}} = \frac{0.05 H_{EQ}}{H_{EQ}} = 0.05$$

故 $1 - 0.05 - Z(\ln 0.05) = K t_{EQ}$

$$\therefore t_{EQ} = \frac{0.95 + 3Z}{K} \quad (18)$$

下已给出一个例题以便得到一些量的概念。

压裂液的粘度, 2厘泊(牛顿液体), 砂子密度 2650 公斤/米³, 压裂液密度 1000 公斤/米³, 缝宽 4.76 毫米, 缝高 $H_0 = 4.6$ 米, 粒径 $d_p = 1.143$ 毫米, 砂比 = 9%, 排号 $Q = 0.8$ 米³/分 (两翼)

计标结果如下:

砂粒沉降匀速 $U_p = 0.14$ 米/秒

阻力速度 $(U_w)_{EQ} = 0.168$ 米/秒

平衡流速 $V_{EQ} = 2.93$ 米/秒

缝中雷诺数 $Re = 14.460$ $Re > 3000$ 故应按紊

流公式计标。

平衡时 $h_{EQ} = 0.48$ 米

平衡高度 $H_{EQ} = 4.12$ 米

系数 $K' = 0.0065$ $K = 0.117$

平衡时间 $t_{EQ} = 4.7$ 分

从这个例子看到, 当平衡时, 砂堤的高度已达缝高的90%以上, 由于携砂液的粘度低, 粒径大, 所以砂堤的堆起速度是很快, 不到5分钟就达到平衡状态。

不难看出, 砂子在沉积过程中, 填满了动裂缝宽度, 象本例题的情况, 填砂缝宽差不多在4毫米以上, 虽然闭合后, 缝宽要窄些, 按1/3计标, 还有3个多毫米, 一般说来, 要比悬浮携砂的宽度要大, 当前的压裂设计方法比例题要复杂, 因为裂缝的几何尺寸既是时间又是位置的函数, 再考虑液体的滤失, 缝内的流速也是时刻在变化的, 在这种情况下, 都编成计标机程序, 用数值解法得出答案。

三、综合加砂方法

这种加砂目的在于使用悬浮液将砂送至距井远处，以使压开的裂缝面积全部得到支撑，井底附近的裂缝里则使用低粘度液，砂子沉积以便于充分利用裂缝宽度。这样兼取高粘悬浮液及低粘沉降液两种加砂的优点，从而得到最好的裂缝导流能力及最长的填砂缝长。

使用悬浮液将第一批砂子加井中，砂比随加砂时间的延长而增，其计算可按等式(8)进行。

近井地带，在缝中欲形成砂堤且达到平衡高度，在施工应满足两个要求。

1° 在沉砂地区中，缝中液体流速要小于在这些条件下的平衡流速，这样才能使砂子沉积下来。

2° 在加砂的时间内，使沉砂区内的砂堤达到平衡高度，这样才能在有限的时间，保证最大的填砂高度。

现在我们研究满足这两个要求的作法

取地层排量的一半，下式得平衡缝中的平均流速

$$V_a = \frac{8.33Q}{HW} \quad (10-1)$$

单位见(10-1)，层流情况下，如为牛顿液体，则将式(13)代入式(15)中，得到平衡流速 V_{EQ}

$$V_{EQ} = \frac{U_p \rho_{se} \sqrt{w}}{2.474 \times 10^{-2} \rho \sqrt{\alpha_p}} \quad (19)$$

如满足 $V_{EQ} > V_a$ ，则得到

$$Q < \frac{U_p H_0 \rho_{se} \sqrt{w^3}}{0.206 \rho \sqrt{\alpha_p}} \quad (20)$$

不等式(20)右端颗粒沉降速度 U_p ，缝宽 w 都是粘度及其他参数的函数，在一定条件下，降低排量及减少粘度或增大粒径，都可使颗粒在规定的范围内沉降。

虽然调节参数可使颗粒沉降，但还要进一步要求颗粒在一定时间间隔内的沉积高度达到平衡状态。

利用式(18)
$$t_{EQ} = \frac{0.95 + 3Z}{K}$$

令规定的加砂时间 t 等于 t_{eq} ，调查 k 与 z 的有关参数即可使砂粒在规定的时间内所形成的砂堤达到平衡高度，经过计算发现，控制砂堤堆起速度的主要是液体的粘度，其次是排量，一般降低粘度减少排量能使一定粒径的砂粒缩短所需要的堆起时间。

由以上看来，为了争取较好的压缩效果，从压裂工艺来看，控制与调节支撑剂在缝中的分布，是很重要的，为使技术上有一定的灵活性，除了加砂程序外，还应当有一套与三相配合的压裂液程序以适应排量与液体粘度变化的要求。

使用这种方法显然要引起压裂工艺中有关环节的变革，最好使用连续配制压裂液的粉剂。井下封隔器及工具也应适应排量，压力变化的要求。

四、水平裂缝中砂分布

国外在50年代及60年代初期对于砂子在水平缝中的分布作了一些室内实验研究，但很快这项研究就停止了，因为随着压裂设备，压裂液的发展及压裂井愈来愈深，代之水平缝的是垂直缝。在我国，据各油田报道，压裂后产生水平缝的或部分水平缝的有大庆油区内部油田，延长油田，扶余油田及玉门油田，因此研究水平缝内砂分布规律仍是需要的，最近大庆油田井下工艺研究所研制了一台研究在水平缝内固液两相流的物理模型，它将成为研究及改善水平缝压裂的主要手段。

1. 三个流域

携带砂子的压裂液，进入水平缝中后，具有很大的沉降倾向，这一方面与垂直缝中的流动情况有相似之处，但水平缝中的流动，也有它特殊的一面。

1° 径向流动中，流速是距井底距离半径 r 的函数，离井愈远，该处流速愈低，考虑液体的滤失，流速就更低。

2° 存在固液流速差，即液体的流速大于固体的流速。

这种不同于垂直缝流动的特殊性，构成了水平缝中固液两相流的基本方面。

靠近井底的水平缝中，由于该处流速很大，所以砂粒处于悬浮流动状态（图区域I）图3是三个流域界线，纵坐标是流

速与液体粘度与 $V_f(\mu, C)$
 颗粒浓度函数的
 乘积，横坐标是颗
 粒浓度（磅/加仑）。
 液体粘度与颗粒浓
 度的函数 $f(\mu, C)$
 值为

$$f(\mu, C) = \mu^{(0.175C^{-0.41})}$$

在一定的液体粘度
 及颗粒浓度时，当
 流速时，颗粒运动
 处于悬浮状态，流
 速降低后，颗粒在
 缝壁上滚动（流域

II），速度进一步降低，颗粒则沉积于缝壁上，依此顺序三个流
 域分别为悬浮流，滚动流及沉积流。

2. 流域I中的颗粒运移

在此流域中，颗粒呈悬浮状的单粒流动，单粒运动速度 V_p
 与液体平均流速 V_f 之间的关系为：

$$\frac{V_p}{V_f} = 0.525 Re^{[0.072(1.75 - \frac{d_p}{W})]} \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1 \right)^{(-0.085)} \\
\text{Exp} \left[9.5(10^{-5}) \left(0.19 + \frac{d_p}{W} \right) (100 - y) \right] - 1.15 \left(0.7 - \frac{d_p}{W} \right) \\
\text{Exp} [0.096(S - 1.26)] - 0.761 V_t^{1.85} \quad (21)$$

式中 Re — 液体雷诺数 $Re = \frac{2WV_f\rho_f}{\mu}$

y — 非牛顿液体屈服值，磅/100英尺²

S — 颗粒形状系数 $S = \frac{d_{pmax}}{d_{pmin}}$

$$V_c = \frac{\text{颗粒沉降与速}}{\text{液体平均流速}} = \frac{\sin \theta}{V_f} \sqrt{\frac{3.58 d_p (\rho_p / \rho_f - 1)}{C_D}}$$

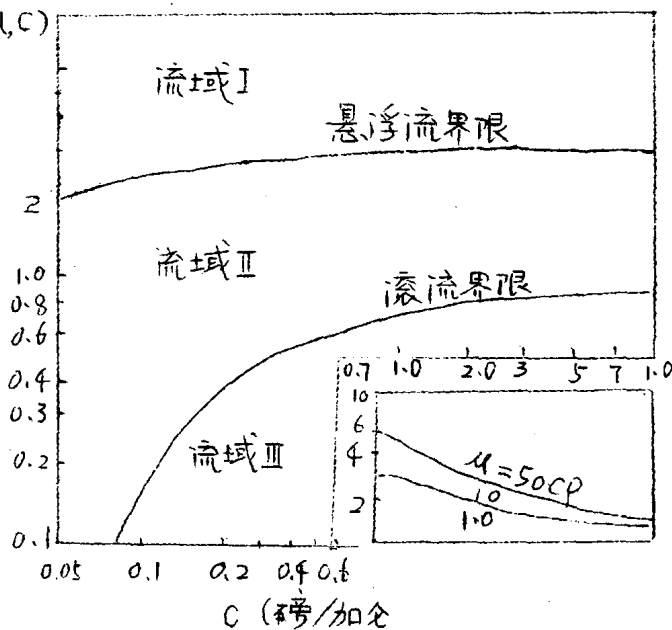


图3. 水平裂缝中的流域图

0 — 流动平舌与水平舌所形成的夹角。

式(28)是利用 650 个实验数据, 用非线性回归方法整理出来的, 除了 θ 值外, 其他都是无因次比值。

分析式(20)可以表示

1° 流速比 V_p/V_f 随着 Re 的增加而提高, 同样流速下随着液体粘度的增加而下降。

2° 同一雷诺数时, 流速比随颗粒密度的减轻而增加, 当粒径一定时, 随缝宽的增加而减少。

3° 其他值一定时, 流速比随颗粒形状系数的增加而增加。

4° θ 值愈大, 流速比愈小, 但当液体流速接近每秒 1 米时, θ 值变化所带来的差别, 逐渐减小, 接近 $\theta = 0$ 的流速比。

应当注意, 这里的流速比指的是颗粒速度与平均液体流速之比, V_f 是流量除以缝断面。颗粒的运动速度与它在缝中的位置很有关系, 举例来说, 颗粒位于中心线上, 那里的流速在层流条件下, 可能达到 V_f 的 1.5 倍, 这时 V_p 便很快, 流速比就大于一。但由于缝比较窄, 壁舌又很粗糙, 所以在水平缝中的固液流动中, 往往流速比小于一。

流速比的大小虽然是一种流动现象, 但它却对砂子在水平缝中的分布很有影响。

3. 区域Ⅱ中颗粒的运移

在区域Ⅱ中, 存在着颗粒之间的干扰现象, 流动中存在着几颗砂子粘附在一起的情况, 但如果式(20)中各参数都使用平均值, 则等式也可用作估计单颗粒的平均流速。因此, 流域Ⅰ与Ⅱ是逐渐过渡的。由于流速的降低, 砂粒滚动流的多起来了。总的说来单粒的运移规律对流域Ⅱ仍是适用的。

4. 区域Ⅲ. 沉积流

由于液体流速的降低, 或颗粒的浓度过高, 以致难以使那些相互干扰着的众多颗粒继续前进, 颗粒沉积下形成砂丘, 后来的砂粒则从砂丘上舌或旁边绕过, 然后沉积在砂丘的后舌, 在这里由于过水断面的增加流速较为缓和, 当砂丘舌的舌积很大之后, 液体就在砂丘中沿沟槽前进, 含砂液体冲开砂丘形成沟槽就成为指进流。它把前舌的高浓度砂子推向前进。高浓度