

国外石油勘探译文选

压裂

57.1

石油工业出版社

TE357.1

1=2

国外石油勘探译文选

压 裂

6201.6



石油工业出版社

B 189185

内 容 提 要

近年来, 油层水力压裂技术发展很快, 已成为世界公认的一种有效的油气井增产措施。为了配合我国各油气田更好地开展油层水力压裂工作, 我们选译了国外油层水力压裂方面的文章共10篇, 供广大石油工作者参考, 以了解国外技术动态。这10篇文章中有三篇(水力压裂支撑剂、压裂液和各种添加剂、水力压裂的机械设备)译自美国1970年出版的《水力压裂》一书, 其余各篇均选自国外各有关技术杂志。

本书可供石油矿场采油工程技术人员及广大石油工作者参考。

国外石油勘探译文选 压 裂

*

(根据原燃料化学工业出版社纸重印)

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

中国青年出版社印刷厂排版

北京顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

•

787×1092毫米32开本 5 $\frac{1}{4}$ 印张 114千字 印1—7,200

1984年3月北京新1版 1984年6月北京第1次印刷

书号: 15037·2516 定价: 0.43元

目 录

水力压裂支撑剂·····	1
压裂液和各种添加剂·····	42
分流剂的发展及其应用·····	60
油（气）井增产措施及完井作业所用的化学剂·····	67
宽裂缝水基压裂液·····	72
“水环”压裂·····	79
压裂及酸化效果温度测井·····	87
用 KMI-500 水溶液作压裂液·····	94
根据支撑裂缝面积设计水平压裂·····	100
水力压裂的机械设备·····	121

水力压裂支撑剂

一、引言

过去在浅井试验时即发现已压开的裂缝如不填充支撑剂，裂缝很快闭合，增产效果也迅速消失。如果填砂后，增产效果持久，因此在裂缝内应填入支撑剂。

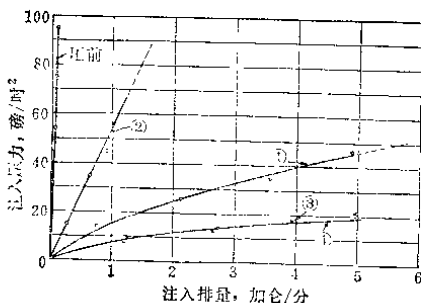


图1 地而浅井加砂与不加砂压裂对比

- ①—不加砂压裂后的曲线；
- ②—不加砂压裂2个月后试注曲线；
- ③—加砂压裂后的曲线；
- ④—加砂压裂2个月后的试注曲线

为了进一步证实，在浅井先做不加砂压裂，随即试注水（图1曲线①），二个月后注入能力即下降（曲线②）。接着进行加砂压裂并试注（曲线③），二个月后注入能力基本不降（曲线④与③重合）。进一步说明填充支撑剂是必要的。

长期积累的经验证明，支撑剂的类型，颗粒大小，填充密度都影响压裂效果和有效期，因此应当进行深入研究。

二、支撑剂与裂缝通过量关系的理论探讨

支撑剂用量及其在裂缝内的排列方式与裂缝通过量有直接定量关系。计算证明，裂缝渗透率常介于空裂缝（即不加支撑剂缝子又不密合时）和填满了单层或多层支撑剂缝子渗透率之间。

空裂缝渗透率与通过量

$$k = \frac{10^8 W_f^3}{12} \quad (1)$$

$$k_{wf} = 4.47 \times 10^8 W_f^3 \quad (2)$$

式中 k ——裂缝渗透率；
 k_{wf} ——裂缝通过量，毫达西-呎；
 W_f ——裂缝宽度。

填满了支撑剂的裂缝的渗透率与通过量

当裂缝被多层支撑剂填实后的渗透率为：

$$k = C_K \frac{\phi^3}{S^3 (1 - \phi)^3} \quad (3)$$

式中 ϕ ——孔隙度；
 C_K ——常数；
 S ——裂缝单位体积内支撑剂的表面积。

根据文献

$$C_K = C_0 \left(\frac{L_c}{L_B} \right)^3 \quad (4)$$

式中 C_0 ——载体流动时函数，取决于颗粒形状，圆球体的

C_0 值为 2.5;

L_B —— 孔隙介质长度;

L —— 流体穿过 L_B 长度时的流过距离。

文献指出 $(L/L_B)^2$ 取决于岩层, 在疏松介质内为 2.0, 如 C_0 为 2.5, 则 $C_K=5$, 当 W_f 及 S 用时表示时, 裂缝通过量 (毫达西-呎) 为:

$$k_{wf} = 1.1 \times 10^{10} \frac{W_f}{S^2} (1 - \phi)^2 \quad (5)$$

裂缝内部分地填充了单层支撑剂时的情况

公式 (2) 和 (5) 只反应了两种极端情况, 压裂实际过程是处于中间状态的, 即支撑剂只是部分地填充在裂缝内的。对这种情况应具体研究。

当支撑剂(以下简称砂粒)进入裂缝而水力压力下降后, 地层闭合压力将砂粒嵌入裂缝面一部分, 此时仍暴露的裂缝面积 A_s 和不加砂及全部充满砂子的裂缝面积显然不同, A_s 值与砂粒多少, 砂粒直径及砂粒嵌入裂缝面深度有关 (详见图 2),

此时:

$$A_s = 2 - \frac{n_{pa} - \pi d_i^2}{2} \quad (6)$$

式中 A_s —— 嵌入砂子后仍出露的裂缝面积 (单面计);

n_{pa} —— 在每平方吋裂缝面积上的砂粒数;

d_i —— 砂粒嵌入裂缝在接触面上的直径。

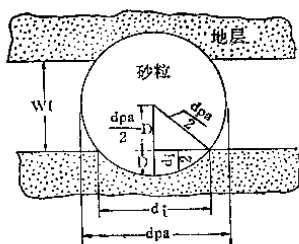


图 2 砂粒嵌入裂缝面几何尺寸

此时仍暴露在裂缝内的单位砂粒表面积与公式 (3) 的 S 值也不相同, 应为:

$$A_{pa} = n_{pa} (\pi d_{pa}^2 - \epsilon \pi D d_{pa}) \quad (7)$$

式中 A_{pa} —— 在裂缝内出露的砂粒表面积,

d_{pa} —— 砂粒直径。

而

$$D = \frac{d_{pa} W_f}{2} \quad (8)$$

将 (8) 代入 (7) 式得出:

$$A_{pa} = n_{pa} \pi W_f d_{pa} \quad (9)$$

每平方吋裂缝面积上出露的裂缝及砂粒面积为 (6) 式与 (9) 式之和, 故:

$$A_{wt} = 2 - \frac{n_{pa} \pi d_{pa}^2}{2} + n_{pa} \pi W_f d_{pa} \quad (10)$$

从图 2 中看出:

$$V_p = \frac{\pi d_{pa}^3}{6} - \pi D^2 (d_{pa} - \frac{2}{3} D) \quad (11)$$

式中 V_p —— 单个砂粒出露在裂缝面间的体积;

D —— 砂粒嵌入裂缝面深度。

则单位裂缝面 (单面) 上的砂粒体积为:

$$V_p = \frac{n_{pa} \pi}{6} (d_{pa}^3 - \epsilon d_{pa} D^2 - 4 D^3) \quad (12)$$

在裂缝面间单位体积砂粒的出露表面积 S_p 为:

$$S_p = \frac{A_{wt}}{V_p} \quad (13)$$

式中 A_{wt} ——每平方吋裂缝面上出露的裂缝及砂粒面积(见公式(6), (10))。

因此在裂缝内填充砂子后的裂缝孔隙度(ϕ_p)为:

$$\phi_p = \frac{W_t - V_p}{W_t} \quad (14)$$

将(13)及(14)代入公式(5)

$$K_{wt} = 1.1 \times 10^{10} \frac{W_t}{S_l^2} \times \frac{\phi_p^3}{(1 - \phi_p)^2} \quad (15)$$

通过室内做嵌砂试验得出 D 、 d_i 、 W_t 、 d_{pa} 各值即可用公式(15)计算各种不同尺寸及单层排列砂子后的裂缝通过量。

文献给出了砂子嵌入裂缝深度(d_i)与砂径(d_{pa})的关系为:

$$\frac{d_i}{d_{pa}} = B \left[\frac{W_p}{(d_{pa})^2} \right]^{m/2} \quad (16)$$

式中 B ——地层特性常数;

m ——地层特性常数;

W_p ——作用于单个砂粒上的负荷。

为了确定以上数值,文献还介绍了在室内用“球珠插入仪”的试验方法,在下一节将详加叙述。从图2看出砂粒与裂缝接触面的直径为:

$$d_i = 2(Dd_{pa} - D^2)^{1/2} \quad (17)$$

常数 m 及 B 可以从“球珠插入仪”试验时所得到的 d_i/d_{pa} 及 W_p/d_{pa}^2 关系曲线中求得。

根据文献介绍的裂缝宽度计算方法为:

$$W_t - d_p \left[1 - B \left(\frac{W_p}{d_{pa}^2} \right)^m \right]^{1/2} \quad (18)$$

如果将 W_r 值以盖层压力 (磅/平方吋) 被砂粒数 n_p 来除的值代替时, 则可变为下式:

$$W_t = d_{pa} \left\{ 1 - B \left[\frac{P_{OBe}}{(n_{pa} d_{pa})^2} \right]^m \right\}^{1/2} \quad (19)$$

式中: P_{OBe} ——岩石实际盖层压力。

公式 (15) 及公式 (19) 是一般计算裂缝通过量和宽度的常用公式。

三、岩层嵌砂压力 (下文称嵌入压力)

砂子嵌入裂缝面才能支撑住缝子使不闭合。砂粒嵌入裂缝面深度由岩石盖层负荷大小、岩层硬度、砂粒圆度、硬度及密度等因素所决定, 关系很复杂, 不可能计算, 需用试验方法解决。

试验仪器及方法都很简单, 如图 3 所示, 仪器顶盖带一个 0.05 吋直径的高速钢球形针 (球珠), 仪器底座上放一 $3\frac{1}{2}$ 吋直径 6 吋长的岩心试样 (如没有长岩心, 也可用短的代用)。试验时用液力压下顶盖, 球珠即压入岩心顶面。

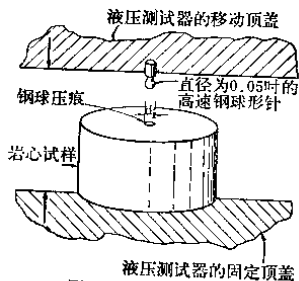


图 3 嵌入压力试验

嵌入深度为 0.0125 吋, 同时读出指示压力 W_p 值。做完一次后移动岩心位置继续做第二次第三次, 每次移动距离至少半吋或更多些。然后用放大镜检查并量测岩心面上凹痕直径, 取平均值用以计算嵌入压力。

$$\text{嵌入压力} \bullet \text{ (磅/平方吋)} = \frac{4W_p}{\pi d_i^2} \quad (20)$$

室内试验得出油层岩样的嵌入压力，其上下值从 527,000~13,000 磅/吋² (37,000~9,000 大气压)。当地层嵌入压力小时，硬的支撑剂嵌入过深增大了对裂缝的支撑面积，如果嵌入压力大时，硬支撑剂进入裂缝后只呈端点接触。试验证明，在同一盖层压力 (W_p) 下，硬而脆的支撑剂 (如砂子) 对于嵌入压力大的岩样，当受压后，砂子被压得粉碎，裂缝通过量甚至降为零；而强度极大的支撑剂 (如钢珠子) 进入硬岩层 (嵌入压力高) 则不受影响。因此砂子用于较软 (即嵌入压力低) 的岩层才能得到较大的裂缝通过量。

中等强度支撑剂，如核桃壳或硬塑料球，进入岩心后只是略微压扁了以增加它承受负荷的能力，亦即使支撑剂与裂缝接触面积增加了。如果所用的这种支撑剂分布密度较高而颗粒分布又不均匀时，则扁平的核桃壳粒将相互挤压成堆，必将影响或降低裂缝内的通过量。因此正确选用支撑剂使能在特定的岩层裂缝内承受住压力负荷而不严重变形是十分重要的，也只有如此，才能使被压开的裂缝增产。同时要求支撑剂颗粒应尽量均匀。

如果盖层负荷超过了核桃壳耐压强度时，就要选用高强度玻璃珠、铝或钢球做支撑剂，在极大负荷压力下，金属支撑剂也会变形，但不会被压扁而挤在一起堵死裂缝通道。

四、裂缝通过量

裂缝通过量比值 (也可以称做裂缝传导能力比值) 是裂

① 嵌入压力为 *embedment pressure* 的直译，意为岩层的耐受嵌入压力，此处从简译为嵌入压力。——译者

缝流过液体的能力（毫达西-呎）与整个油层段流过液体能力（毫达西-呎）的比值。一口井压裂增产效果与裂缝通过量及所压成裂缝的面积及裂缝通过量比值直接成正比。当储层厚度及渗透率不变时，裂缝通过量比值与裂缝通过量也是成正比关系的。

为了便于与裂缝通过量区分，以下将裂缝通过量比值简译为裂缝效率。

图4画出在不同裂缝深度时裂缝效率与增产关系曲线。

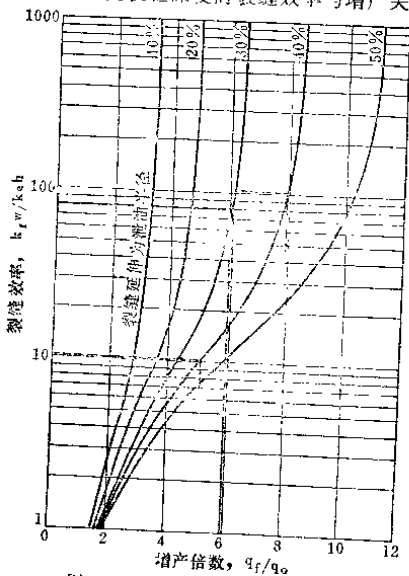


图4 裂缝效率与增产关系曲线
 q_f —压裂后产量； q_0 —压裂前产量； h —储层净厚； K_e —水平渗透率； $K_f W$ —裂缝

例如当裂缝延伸至井的泄油半径 40% 时，裂缝效率为 10，增产 5 倍。再如裂缝深度相同时，裂缝效率为 100，则增产 8 倍。当裂缝效率超过 100 以后，则增产不显著。

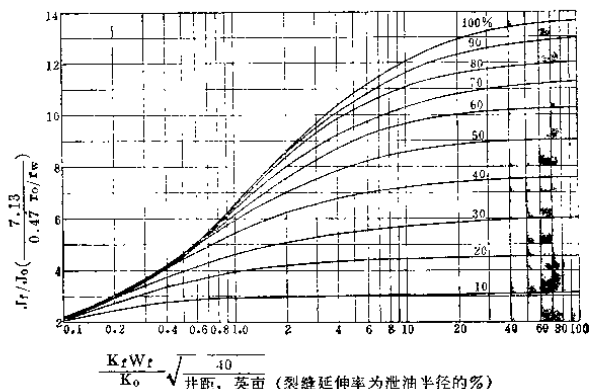


图 4 A 压裂后预计增产量 (水平裂缝)

$$\frac{J_f}{J} = \frac{\text{压裂后的产量}}{\text{压裂前的产量}}$$

$$\frac{K_f W_f}{(K_h)_0} = \frac{\text{裂缝通过量 达西-呎}}{\text{储层通过量 达西-呎}}$$

$$r_e = 167 \text{ 呎 (20 英亩)}; r_w = 0.25 \text{ 呎}$$

裂缝通过量由裂缝宽度，支撑剂分布情况及其加入浓度三个因素所决定。裂缝宽度又与支撑剂直径与强度、岩性、井深有关。支撑剂分布情况则难以控制。支撑剂浓度可以用“伪装球”加以控制，以下简称隔离球。

为了使支撑剂浓度及分布尽可能合理，隔离球作成与支撑剂外形比重完全一样，只是当进入裂缝后，可以迅速被储

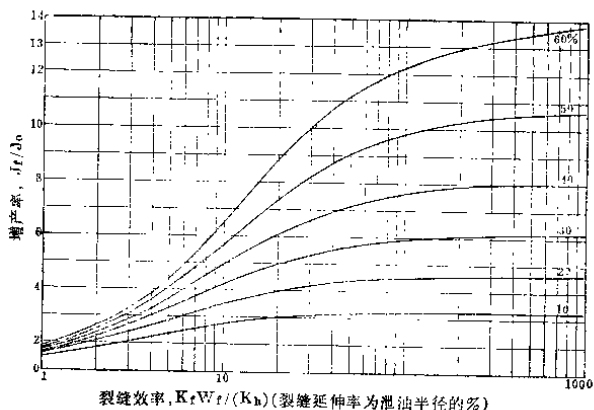


图 4 B 压裂后预计增产量 (垂直裂缝)

$K_r W_r$ —裂缝通过量, 达西-呎; K_o —有效水平渗透率, 千分达西; J_f —压裂后的生产指数; J_0 —压裂前的生产指数; $(\frac{7.13}{0.472r})$ —井径和井距校正系数;
 r_o —泄油半径, 呎; r_w —井眼半径, 呎

层内流体所溶解, 在裂缝内就留出了空间, 以免支撑剂堵塞裂缝通道。

裂缝通过量的室内试验方法

室内试验装置如图 5。

不同类型支撑剂在裂缝内对通过量的影响都可以用图 5 的装置进行试验。仪器主体是个分为两半的圆柱体钢罐, 将一个 $3\frac{1}{2}$ 吋直径 2 吋长的岩心放入罐内, 用可控制熔点的合金将岩心与罐的间隙浇铸起来。在岩心正中心钻孔, 同时在岩心面上嵌入待试验的支撑剂, 再将两半个岩心罐对在一起。

在上半个罐侧外缘 1/2 处钻 3/16 吋小孔直穿过岩心中心，并连接出口管线做为模拟井。试验时用水压机加压在两个半体岩心上使压紧支撑剂，为了模拟油层温度，将整个试验筒放在保温箱内。以后即将氮气通过岩心经过模拟的裂缝流出后进行计量以测定裂缝通过量，流程见图 6。

上述试验分为短期长期两种。

短期试验是将支撑剂照预定要求排列到裂缝面上后，即分级加压，每加压一次均测氮气通过量，目的是为了选择合适的支撑剂。这种试验几个小时即可得出结果。

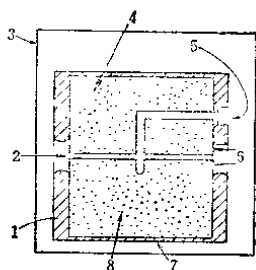


图 5 试验裂缝通过量的模拟装置

1—密封合金；2—试验的支撑剂；3—加热箱；4—上半个岩心；5—氮气流出口；6—模拟的裂缝；7—钢管；8—下半个岩心

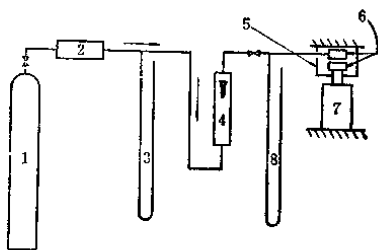


图 6 测量裂缝通过量的试验装置流程

1—氮气瓶；2—调节器；3—水银压力计；4—浮子流量计；5—加热箱；6—模拟装置；7—水压机；8—水压计（U形管）

长期试验是为了研究压裂增产有效期，观察一定时期后裂缝通过量的变化情况。将支撑剂排列到裂缝面上并加压到预定岩石盖层压力后至少维持30天，中间每星期至少测定一次氮气通过量。

支撑剂排列方式对通过量的影响

制订压裂措施时不仅要计算裂缝面积，还应考虑裂缝通过量。试验证明只要支撑剂强度够大而浓度又允许在裂缝内呈单层部分排列（不是填满了）时，通过量最大。但实际施工中很难使支撑剂达到单层部分排列，常出现不均匀的“孤岛”分布情况。这些“孤岛”有的地方排了一层支撑剂，有的是多层，这完全取决于排量大小，裂缝位置和施工方法。有时施工中途停泵使支撑剂在靠近井壁附近的裂缝中沉积，反而加宽了这一带的裂缝宽度。

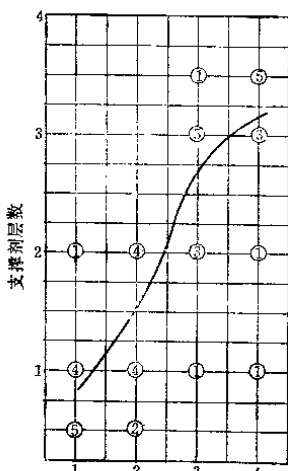


图7 水平裂缝内支撑剂浓度及层数关系
○—试验次数

在垂向裂缝内支撑剂常沉积在裂缝底部，有时甚至堆积多层，而上部反而没有。沉积的层数由支撑剂颗粒，形状，浓度，液体排量及所形成裂缝的宽度而定。

压裂结束后裂缝即趋向闭合。填砂闭合后的裂

缝宽度取决于施工结束前的宽度及盖层负荷。裂缝通过量的大小完全由闭合后的裂缝宽度及填入支撑剂的有效渗透率来决定。

曾试验了浅井中水平及垂向裂缝的通过量，证明在替置支撑剂时裂缝宽度与排量及压裂液漏失量有关。在大排量、低漏失量和高粘度情况下常易压成宽裂缝，支撑剂分布也较均匀。支撑剂浓度高（大于3磅/加仑（0.5公斤/升）时，趋向于在水平裂缝内呈多层排列。试验结果见图7，在水平裂缝中，当一切条件都有利时，支撑剂的排列也不超过三层。而垂直裂缝的支撑剂排列层数与压裂液粘度及前置液量的关系比支撑剂的浓度及排量还重要。

为了研究多层支撑剂对通过量的影响，进行了一系列长期试验（见上节），试验结果见表1，只要支撑剂不被压碎或严重变形时，通过量就可以增加，当层数达到三、四层时，便超过单层部分排列的通过量。

表1 多层支撑剂长期试验的通过量

井深 米	支撑剂 类型	支撑剂 尺寸 毫米	不同层数的通过量，毫达西-呎					
			1/4	1/2	1	2	3	4
600	砂	0.2~0.9	—	2,500	2,000	2,300	3,700	1,100
1,200	砂	0.2~0.9	—	1,250	750	1,100	1,800	2,000
1,200	玻璃珠	0.9~2.0	—	26,000	14,200	25,500	31,000	33,000
1,800	玻璃珠	0.9~2.0	—	17,200	9,100	11,000	15,000	15,500
2,400	玻璃珠	0.9~2.0	—	9,500	6,100	9,000	10,000	11,000
3,000	玻璃珠	0.9~2.0	—	5,100	4,100	5,600	7,800	8,500
3,000	金属	1.2~1.7	25,000	—	3,700	5,800	7,400	8,000
3,600	金属	1.2~1.7	19,000	—	3,200	4,200	6,000	7,200
4,200	金属	1.2~1.7	18,100	—	1,200	1,800	2,200	3,000

注：支撑剂承压压力10,500~17,500大气压