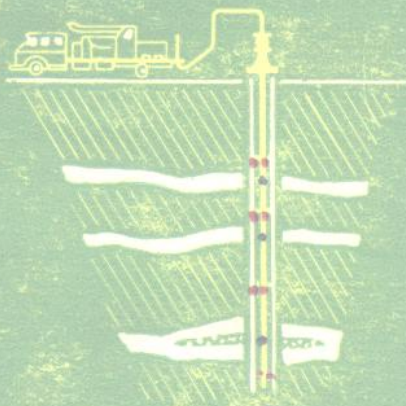


石油勘探与开发普及丛书



# 油层压裂

大庆油田《油层压裂》编写组



科学出版社

石油勘探与开发普及丛书

# 油 层 压 裂

大庆油田《油层压裂》编写组

科 学 出 版 社

1 9 7 5

## 内 容 简 介

“石油勘探与开发普及丛书”是大庆油田革委会主持编写的，是以石油战线上的工人为主要对象的科学技术读物，共约 25 种。

这套丛书力求反映大庆工人阶级在勘探、开发大庆油田过程中，坚决执行“独立自主、自力更生”的方针；坚持“两论”起家，发扬会战传统，认真学习并运用毛主席的光辉哲学思想指导实践；大力宣传辩证唯物论，批判唯心论的先验论和形而上学。

《油层压裂》是本书的一种。油层压裂是油田开发过程中的一项技术措施。它是通过地面高压泵，将具有一定粘度的液体挤入油层，迫使油层形成裂缝，并填入支撑剂，达到改造油层，增产石油的目的。

全书共分五部分，主要是介绍了油层压裂的意义、作用；压裂液的种类及性能；压裂支撑剂；压裂设备和工具以及压裂现场施工。

石油勘探与开发普及丛书

### 油 层 压 裂

大庆油田《油层压裂》编写组

\*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1975 年 7 月 第 一 版 开本：787×1092 1/32

1975 年 7 月 第一次印刷 印张：1 1/4

印数：0001—21,000 字数：22,000

统一书号：13031·380

本社书号：578·13—14

定 价： 0.11 元

## 前 言

在毛主席革命路线指引下，在党的社会主义建设总路线的光辉照耀下，我国石油工业战线广大职工发扬了独立自主，自力更生，艰苦奋斗的革命精神，赢得了石油工业的迅速发展。通过无产阶级文化大革命和批林批孔运动，特别是通过无产阶级专政理论的学习，石油战线形势越来越好。为满足广大石油工人、干部，尤其是青年工人迫切需要掌握科学技术的愿望，我们编写了“石油勘探与开发普及丛书”。

我们力求通过这套丛书反映大庆工人阶级坚持“两论”起家的会战传统，积极运用毛主席的光辉哲学思想指导斗争实践，努力学习无产阶级专政理论，大力宣传辩证唯物主义和历史唯物主义，批判唯心论的先验论和形而上学。丛书内容着重介绍基础科学知识，文字力求简明扼要，通俗易懂，深入浅出。

丛书是由战斗在生产第一线的工人、干部和技术人员组成的三结合小组进行编写的，并广泛征求了群众的意见。但是，在内容上，主要反映了大庆油田的特点，对于石油勘探开发的全局来说，还有较大的片面性；文字上，由于水平所限，仍然与广大工人的需要会有差距。恳切希望读者提出批评意见。

大 庆 油 田

“石油勘探与开发普及丛书”编写领导小组

一九七五年五月

# 目 录

## 前言

一、概述 .....	1
1. 为什么要压裂 .....	1
2. 压裂是怎么回事 .....	5
二、压裂液 .....	10
1. 压裂液的作用 .....	10
2. 压裂液的性能 .....	11
3. 压裂液的种类 .....	14
三、压裂支撑剂 .....	18
1. 压裂支撑剂的性能要求 .....	19
2. 压裂支撑剂——砂子的选择和处理 .....	20
四、压裂设备和工具 .....	22
1. 动力机械设备 .....	22
2. 井下压裂工具 .....	27
五、压裂现场施工 .....	30
1. 施工的方法 .....	30
2. 施工的步骤 .....	32

## 一、概 述

我国石油工业采用油层压裂技术，是从1952年开始的。二十多年来，我国广大石油工人和工程技术人员，在毛主席革命路线指引下，以《实践论》和《矛盾论》为锐利思想武器，坚持“独立自主、自力更生”的方针，通过生产实践，不断创新立异，促进了压裂工艺的发展。特别是无产阶级文化大革命以来，群众性的科学实验运动蓬勃发展，新成果多，在现场推广应用快。目前，使用我国自己创造的井下工具，可以在一口油井内不动管柱对油层进行分层压裂，使用我国自己设计制造的压裂车等设备，基本满足了油田压裂需要。最近试验成功的水基凝胶压裂液，成本低，性能好，增产效果显著。全国各油田的实践证明：油层压裂技术是改造油层、挖掘油井潜力的一项进攻性措施，是提高油层渗透率、扩大油层渗透面积、增产石油的一种有效方法。这一技术的应用，为我国石油工业的迅速发展作出了贡献。

### 1. 为什么要压裂

我们知道，石油是埋藏在地下几百米甚至几千米深的油层中。油层的岩石在颗粒组成、排列之间有许多孔隙、裂缝和孔洞，石油就储藏在这些孔隙、裂缝和孔洞中间。石油怎么能

够从岩石的孔隙、裂缝和孔洞中流向油井呢？一方面是由于存在着驱使石油流动的力；另一方面是由于油层岩石本身具有能使流体通过的性能，这种性能叫做渗透性。各种岩石的渗透性有很大的差别。我们在日常生活中知道，雨水落到砂土地上，很快就渗入地下；落到粘土地上，就不容易渗入地下。这就是说，砂土的渗透性比粘土的渗透性高。渗透性的高低，通常以渗透率来表示，它的单位是达西或毫达西（1达西 = 1000毫达西）。

如图 1 所示，对于边长为 1 厘米的正立方体岩样，如果进口与出口的压差为 1 个大气压，1 秒钟内流过的水量为 1 立方厘米，则这个岩样的渗透率为 1 达西。

毛主席教导我们：“马克思主义的哲学认为十分重要的问

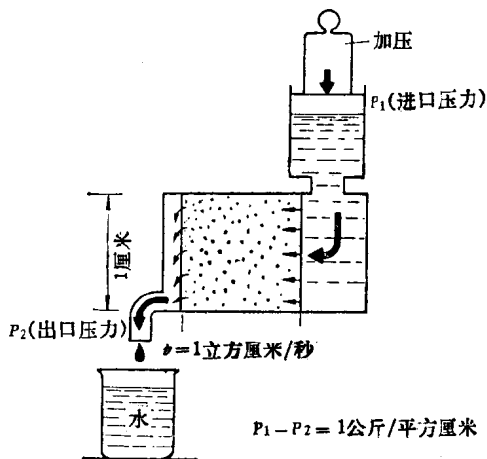


图 1 渗透率试验示意图

题,不在于懂得了客观世界的规律性,因而能够解释世界,而在于拿了这种对于客观规律性的认识去能动地改造世界。”人们在认识油层渗透性对石油生产关系的基础上,进一步能动地改造油层,提高石油的产量。油层压裂技术,对于解决油层渗透性问题,主要应用于以下三个方面。

(1) 改造渗透率低的油层 渗透率低的油层,油井的产量也低。例如我国有一个油田的油层岩石很致密,致密得象磨刀石那样,渗透率只有 0.1 毫达西左右,虽然地下石油储量较丰富,但采用一般方法很难开采出来。采用压裂技术,在油层中压开新裂缝,或者延伸和扩大原有的裂缝,并且在裂缝中填入一定数量的支撑剂(如砂子)。由于支撑剂之间的排列,要比经过千万年形成的岩石结构疏松得多,这样就提高了油井周围油层的渗透率,达到增产石油的目的,如图 2 所示。

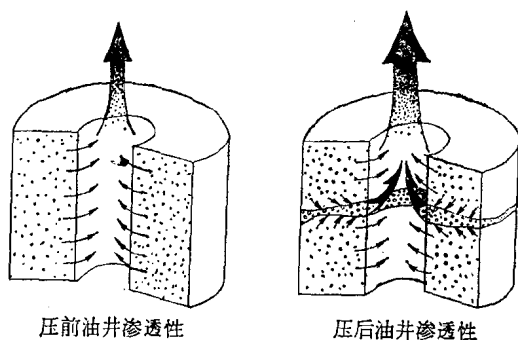


图 2 压裂前后渗透性的变化

(2) 解决各油层渗透率差别所造成的层间矛盾 大多数油田都是多油层的。在这些油层中,有的渗透率高,有的渗



透率低。油井生产时,渗透率高的出油就快,渗透率低的出油就慢,这样层与层之间形成了矛盾。另外在油田进行开采时,一部分石油从油层中采了出来,油层中的压力不断消耗,油井产量也随之降低。为了加快石油开采速度,使油田长期稳产、高产,广大石油工人用地面泵,不断往油层中注水(也有注气),迫使油层里面石油源源不断喷出地面。在长期注水、以水推油的生产过程中,渗透率高的油层注水多,渗透率低的油层注水少。同一口油井如果不采取措施,渗透率高的油层就会过早见水,影响渗透率低的油层出油。例如,象图3所示,一个油井开采甲、乙、丙三层。甲、乙两层渗透率高,丙层渗透率低。在注水时甲、乙两层受益大,见到明显的效果,地层压力高;而丙层受益小,地层压力低。这时甲、乙两层出油多,而丙层渗透率本来就差,现在又受甲、乙两层压力高的影响,出油更困难了。这样层与层之间也就产生了矛盾。

所以,用压裂的方法,除了在油井对丙层进行压裂之外,

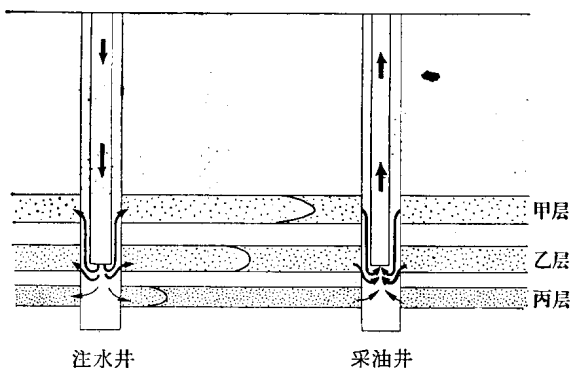


图3 层间矛盾示意图

也可以在水井对丙层进行压裂,提高丙层注水量,减少丙层和甲、乙两层的差别,以便不断加快丙层出油量,达到解决各油层渗透率差别所造成的矛盾,加快油田开发速度。

(3) 解除油井的堵塞现象 有的油井由于钻井过程中,泥浆比重过大,造成泥浆渗入油层,堵塞油层孔隙;或泥浆里面一些水进入油层,使油层内粘土颗粒膨胀,堵塞油层孔隙;有的因为泥浆粘附在井壁上,形成泥饼,堵塞油层。在修井过程中,由于技术措施不当,也会使泥浆(或其它压井液)进入油层,堵塞了油层的孔隙。这些堵塞现象,都可以用压裂技术加以解除。

## 2. 压裂是怎么回事

压裂就是通过地面高压泵,利用液体传递压力的能力,将具有一定粘度的液体挤入油层,迫使油层形成裂缝,并填入一定数量的支撑剂。比如,我们用斧子劈木头,会使木头产生裂缝;如果劈在木头原有的裂缝上,那么裂缝就会扩大。用锤子砸石头,也是这种情况。油层是埋在地下的含油岩石,要把油层压开裂缝,用力小了是不行的;只有当施加在油层上的压力达到一定的数值,才能压开油层,形成裂缝。人们把能够压开油层,使它形成裂缝的压力,叫做破裂压力。油层的破裂压力到底和哪些因素有关,到底多大,这留到后面再谈。

油层埋藏在地下几百米甚至几千米的深处,穿透油层的油井直径又只有 20 厘米左右。如何把地面上产生的压力施加到井下的油层上去? 对于这个问题,人们利用液体传递压

力的性能来解决。这就是在地面上用高压泵以较高的速度把液体(压裂液)泵入井内,利用液体能传递压力的性能,把高压泵形成的压力传递到油层。因为油层具有吸收液体的能力,所以,只有当泵入油层液体的速度超过油层的吸收速度,才会在井筒附近的油层上造成较高的压力。当这个压力超过油层的破裂压力时,就会使油层形成裂缝。继续向井内泵入液体,有一部分液体继续被油层吸收,其余的液体则会迫使裂缝延伸和扩张。在形成了裂缝以后,如果停止泵入液体,也就是说

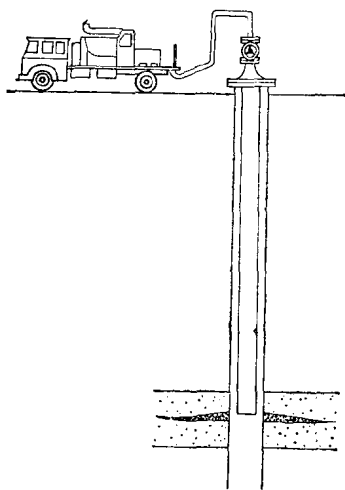


图4 油层压裂示意图

降低了液体对油层的压力,压开的裂缝就会重新闭合。

为了在停止泵入液体后,裂缝不至于闭合,人们在液体中混合入一定数量的支撑剂(如砂子等)。支撑剂就象插入木头裂缝中间的楔子一样,阻止裂缝闭合(如图4所示),这样形成了石油流向井底的良好通道,才算达到了压裂的要求。

在油层中,压裂形成的裂缝究竟是个什么样子呢?是水平的还是垂直的?是一条裂缝还是多条裂缝?裂缝到底有多宽多长呢?

这些问题都还在继续探讨和研究之中。一般认为,压裂形成的裂缝大多数是水平的,也有垂直的和倾斜的(图5)。这

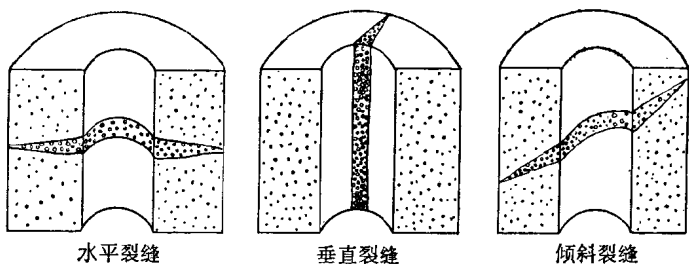


图 5 裂缝的状态

些裂缝往往是在岩石结构最薄弱的地方形成。例如在一个油层内,有一部分是结构致密的细砂岩,另一部分是结构疏松的粗砂岩,对这个油层进行压裂,

裂缝就首先在粗砂岩和细砂岩交界处形成(图 6)。

形成的裂缝可能是一条,也可能是几条,在后一种情况下,其中有一条是主要裂缝。

裂缝的宽度和长度,目前还无法精确地测量,只能根据

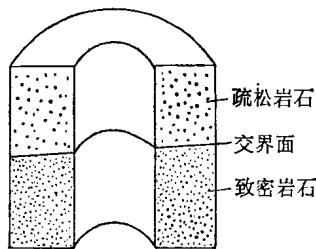


图 6 裂缝易在岩性变化交界面形成

实际压裂过程中挤入裂缝的支撑剂直径大小和支撑剂数量来加以估计。例如,一般认为裂缝的宽度相当于支撑剂的直径,或者稍大于支撑剂的直径,因为太窄了,支撑剂就挤不进去。这种判断看来是正确的。但是,裂缝的宽度是否可以几倍于支撑剂的直径,则说法不一,有待于进一步试验研究。

同志们可能还要问,既然油层离地面这么深,看不见,摸

不着，怎么会知道油层被压开了呢？会知道的。下面就来谈谈这个问题——油层的破裂压力。

在压裂施工中，用压裂车往井内泵入压裂液，并逐渐增加排量（排量就是单位时间内向井内泵入液体的量），当泵入液体的速度大于油层的吸收速度时，地面泵压力就逐渐升高，也就是施加于油层的压力在逐渐升高。但是，泵压升高到某一个数值时，泵压就会突然下降，表明油层已被压开，这是由于油层形成裂缝，使得油层吸入液体的速度显著增加，导致泵压的急剧下降。这个泵压最高值  $P_{\text{泵}}$  和当时油层所承受的最高压力，即油层破裂压力  $P$ ，有如下关系：

$$P_{\text{泵}} = P - \frac{H\gamma}{10} + P_{\text{摩阻}}$$

式中： $P_{\text{泵}}$ ——泵压，大气压；

$P$ ——油层破裂压力，大气压；

$H$ ——油层深度，米；

$\gamma$ ——压裂液比重；

$P_{\text{摩阻}}$ ——液体摩阻所损失的压力，大气压。

从上式中，也就是说从实际压裂施工中，我们可以知道油层的破裂压力。但是，在施工前我们怎样估计油层的破裂压力呢？

油层的破裂压力，主要和下列因素有关：

(1) 油层深度 一般情况下，油层离地面越深，破裂压力就越高，但不成正比例关系。

(2) 岩石比重 岩石比重大，就是密度大。密度大的

岩石,结构必然致密。压破致密岩石的破裂压力,一定比压破疏松岩石的破裂压力高,因此,岩石的比重犬,破裂压力也高。比如一口油井,井下有四个岩层,用同样大小的压力,对这四个层进行压裂时,疏松的砂岩层最易被压开,形成裂缝(图7)。

(3) 油层原有裂缝的发育程度 由于油层在形成过程中或者在地壳运动中造成了一些原始裂缝,有的裂缝比较发育,有的裂缝并不发育。压裂时,

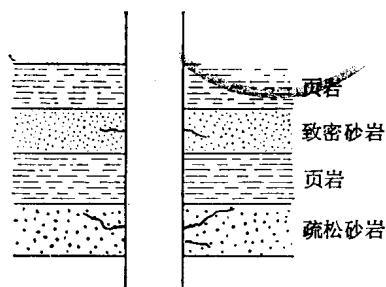


图7 在相同压力下疏松砂岩层最易压开

液体将压力首先传递给原有裂缝,使这些裂缝扩张和延伸。这样需要的破裂压力就小,因为扩张和延伸裂缝的力总是小于压开新裂缝所需要的压力。

(4) 油层原始渗透率 压入油层的液体总是先沿着渗透率高的地段渗滤。因而,首先在渗透率较高的地段形成裂缝。所以渗透率高的油层容易压开裂缝,破裂压力也就较小。

此外,还与油层的弹性有关。弹性大,不容易破裂,所需破裂压力就大;弹性小,破裂压力就小。油层的破裂压力与油层的抗裂强度也有关系。抗裂强度是指使物体破裂时所需要的极限作用力。例如,一块疏松砂岩,我们用锤子一打就会把它打碎,而一块致密砂岩,要打碎它,就得用较大的力气。同

样,油层的抗裂强度越大,压破它所需的破裂压力也就越大。

根据现场广大压裂工人和技术人员的多年经验,油层破裂压力 $P$ 可以表示为油层深度 $H$ 与油层破裂压力梯度 $\sigma$ 的乘积。即

$$P = \sigma H$$

其中 $P$ 的单位为大气压, $\sigma$ 的单位为大气压/米, $H$ 的单位为米。

## 二、压裂液

在整个油层压裂过程中,由于使用的液体所起的作用不同,分为前置液、携砂液和替挤液。这些液体平常统称为压裂液。压裂液性能的好坏,对于压裂施工的成功与失败,以及压裂后的增产效果,关系重大。近几年来,我国广大工人和科学技术人员,遵循毛主席关于“独立自主、自力更生”的教导,坚持科学研究为无产阶级政治服务,为工农兵服务,与生产劳动相结合的原则,大搞科学实验和技术革新,充分利用我国丰富的自然资源,试验成功了多种压裂液,为发展我国石油工业作出了贡献。

### 1. 压裂液的作用

**前置液** 这是从地面设备最先向油层高压注入的液体。它的作用是把地面设备所形成的高压传递到地下油层中去,从而劈开油层,使油层形成新的裂缝,或者扩大油层原有裂

缝。当然,作为前置液来说,也还起着在正式压裂前的“侦察”作用,通过前置液,可以了解管柱畅通情况及油层相互连通情况等。

**携砂液** 当从压力和排量的变化判断油层已被压开,裂缝已经形成时,就开始向油层泵送携砂液。携砂液携带一定数量的砂子进入油层,起着扩展和延伸裂缝的作用,其中的砂子还起着支撑裂缝,使它不致重新闭合的作用。

**替挤液** 加砂完了之后,还要继续向井内压入替挤液,把砂泵、地面管线、井筒内的携砂液全部挤入油层裂缝中去,以免由于残留的砂子而造成某些部位的砂堵、砂卡现象。

## 2. 压裂液的性能

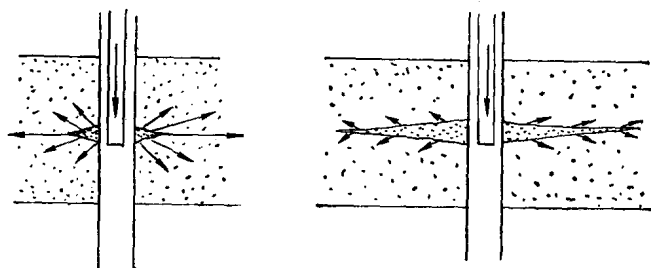
一般情况下,对于前置液和携砂液都要求:滤失量低,有利于扩展和延伸裂缝;粘度高,有利于压开宽裂缝;摩阻低,有利于降低泵压,延长设备的使用寿命。对于携砂液还要求悬浮性能好,以利于提高含砂比,并能携带大直径的砂子。对于替挤液一般没有什么特殊的技术要求。

什么是滤失量呢?我们先做个简单的小试验,拿一张滤纸,往这张滤纸上倒一碗清水,这碗清水很快就通过滤纸渗透下去。如果倒的不是清水,而是一碗稀浆糊,那么渗透就很慢。我们把单位时间内通过单位面积滤失掉的量叫做滤失量。因此可以说,清水的滤失量比稀浆糊的滤失量要大得多。

我们不难想象,如果选用滤失量很小的液体作压裂液,那么注入油层的绝大部分压裂液都顺着裂缝的延伸而向前流



动。这样，可以促使裂缝延伸得很远。如果用滤失量大的液体作压裂液，在液体顺着裂缝流动的过程中，大量液体在进入油层不远的地方就滤失到油层中去了。这样就不可能使裂缝延伸得更远，而携砂液所携带的砂子也会在进入裂缝不远的地方就沉淀下来，从而容易在裂缝进口处造成砂堵。如果所用压裂液的滤失量太大，甚至有可能压不开油层，无法形成裂缝(图8)。因此，应该尽量选用滤失量低的液体作前置液和携砂液。



滤失量大损耗多裂缝短小

滤失量小损耗少裂缝长大

图8 压裂液滤失量与压裂效果的关系

悬浮性能对于携砂液十分重要。比如，我们把一粒砂子投入水中，砂子很快就沉下去；如果把同样大小的一粒砂子投入稀浆糊中，这粒砂子就会悬浮在稀浆糊中间，即使下沉也很缓慢。这就表明，稀浆糊比水的悬浮性能好。携砂液的悬浮性能好，可以把砂子全部均匀地带到油层裂缝中去；悬浮性能差，砂子在液体中很快沉淀，不但不能将砂子全部带入裂缝，而且会沉淀在井筒或裂缝进口处，造成砂堵、砂卡等事故，致