

油层压裂工人读本

大庆油田井下作业指挥部《油层压裂工人读本》编写组

石油工业出版社

油层压裂工人读本

大庆油田井下作业指挥部《油层压裂工人读本》编写组

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是为压裂工人而编写的。它结合现场实际，用通俗易懂，深入浅出文字，比较系统全面地阐述了油层压裂基本原理及压裂工艺、压裂支撑剂、压裂液、压裂设备及压裂工具等，并对压裂施工的具体操作及常见事故的预防和处理作了详细的介绍。

本书可作井下作业、采油工人技术学习用书。

油层压裂工人读本

大庆油田井下作业指挥部《油层压裂工人读本》编写组

(根据原石油化学工业出版社纸型重印)

*

石油工业出版社

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

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 6¹/₂ 印张 143 千字 印数 1-2,000

1982 年 8 月北京新 1 版 1982 年 8 月北京第 1 次印刷

书号：15037-2185 定价：0.46 元

目 录

第一章	油层水力压裂基本原理	1
第一节	油层水力压裂及其目的	1
第二节	裂缝的形成及其判断	7
第三节	压裂与增产的关系	15
第二章	压裂工艺	22
第一节	压裂选层与设计	22
第二节	压裂施工准备	34
第三节	压裂施工工序	49
第四节	施工中常见故障及处理	57
第五节	压裂井的管理	60
第三章	压裂液	64
第一节	压裂液的作用及性能要求	64
第二节	压裂液的种类	68
第三节	压裂液的选择	86
第四章	支撑剂	90
第一节	支撑剂作用与种类	90
第二节	支撑剂选择与压裂效果的关系	93
第三节	石英砂性能分析与处理	106
第五章	压裂工具	110
第一节	井下工具	110
第二节	压裂施工的井口装置	121
第六章	压裂设备	137
第一节	压裂车	138
第二节	混砂车	157

第三节	其他设备.....	167
第七章	压裂施工中的事故预防和处理.....	172
第一节	堵管柱的预防和处理.....	172
第二节	卡管柱的预防和处理.....	176
第三节	断管柱的预防和处理.....	184
第四节	常用打捞工具.....	186

第一章 油层水力压裂基本原理

油层水力压裂是改造油层的有效方法，是油、水井增产、增注的有效措施。随着石油工业的发展，油层水力压裂这项工艺技术已广泛地应用于油田勘探和开发中。为了在实际工作中更好地掌握和运用这项工艺技术，必须对油层水力压裂的基本原理加以了解。

第一节 油层水力压裂及其目的

油层水力压裂在一般情况下简称为油层压裂或压裂。顾名思义，就是利用水力传压的作用在油层中造成裂缝，以达到改造油层的目的。经过多年的研究与实践，水力压裂已形成一套完整的工艺技术。并广泛应用于油井增产和水井增注。

一、油层水力压裂工艺技术的由来

当各油田普遍使用油层水力压裂这项工艺技术的时候，要知道，这是人们在与油层作斗争中，经过多年的反复实践总结出来的成果。

以前油田在开发过程中，虽然采用了一些技术措施，但总归还是依靠油层的天然能量或人工抽吸方法，对油田进行开采。由于当时工艺技术状况的限制，油井一直不能发挥出应有的潜力，但是对于如何才能提高油井的产量，使油井多出油，却是现场人员所关心的问题。

在长期的劳动实践中，人们发现，对油层进行高压注水

时，油层的吸水量开始是随压力的上升而按一定比值增加的。可是当压力值突破某一限度时，就会出现吸水量成几倍或几十倍地增加，远远超出了原来的比值，不但在高压情况下是这样，而且当压力下降一些时仍然是这样。劳动实践中的这一偶然发现给人们以认识油层的新启示，即然油层通过高压作用能够提高注入量，那么，油层通过高压作用能不能提高产量呢？现场人员又经过多次的试验，证明油层通过高压作用不但可以提高产量，而且能较大幅度地提高产量。这又是什么道理呢？原来油井产量的提高是由于油层在高压作用下形成了裂缝，在油层中造成了良好的油流通道，从而使产量增加。

虽然当时的压裂工艺条件比较落后，但利用水力作用来改造油层，提高油井产量的这种方法却为油层水力压裂技术的发展打下了良好的基础。

二、什么叫油层水力压裂

前面已提到，对于埋藏在几百米或几千米的油层，利用水力的作用，使油层形成裂缝的方法叫油层水力压裂。

油层水力压裂的过程，一般是指在地面采用高压大排量的泵，利用液体传压的原理，将具有一定粘度的液体，以大于油层所能吸收的能力向油层注入（如图1—1），使井筒内压力逐渐增高。当压力增高到大于油层破裂所需要的压力时，油层就会形成一条或几条水平的或垂直的裂缝。当油层形成裂缝后，随着液体的不断注入，裂缝也会不断地延伸与扩展，直到液体所注入的速度与油层所能吸入的速度相等时，裂缝才会停止延伸与扩展。此时如果地面高压泵停止泵入液体，油层由于外来压力的消失，又会使裂缝重新闭合。

为了保持裂缝处于张开位置，随着压裂液的不间断注入，

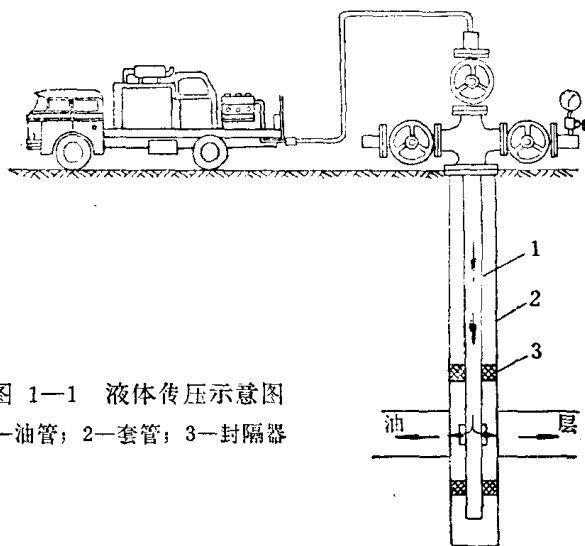


图 1—1 液体传压示意图

1—油管；2—套管；3—封隔器

同时在压裂液中混入较大直径的支撑剂（如石英砂、核桃壳等），使之沉淀在裂缝中，支撑已形成的裂缝。由于在地层中有了这样被支撑的裂缝（如图1—2所示），从而改善了井筒附近油层的液体流动通道，增大了排流面积，降低了液体流动阻力，使油井获得了增产的效果。

三、油层水力压裂的目的

在原始状态下，油层的结构和性质，除受到沉积韵律的影响外，一般是致密的，因而原油从油层向井筒内渗流时也是比较缓慢的。但是当对油层进行压裂后，由于裂缝的影响，改变了油层的物理结构和性质，从而也改善了原油从油层中向井筒中渗流的状况。

为了更清楚地说明问题，下面将压裂前后原油在油层中的流动状况做一比较，以帮助对问题的理解。

油层在没有形成裂缝的时候，原油穿过致密的岩层，顺

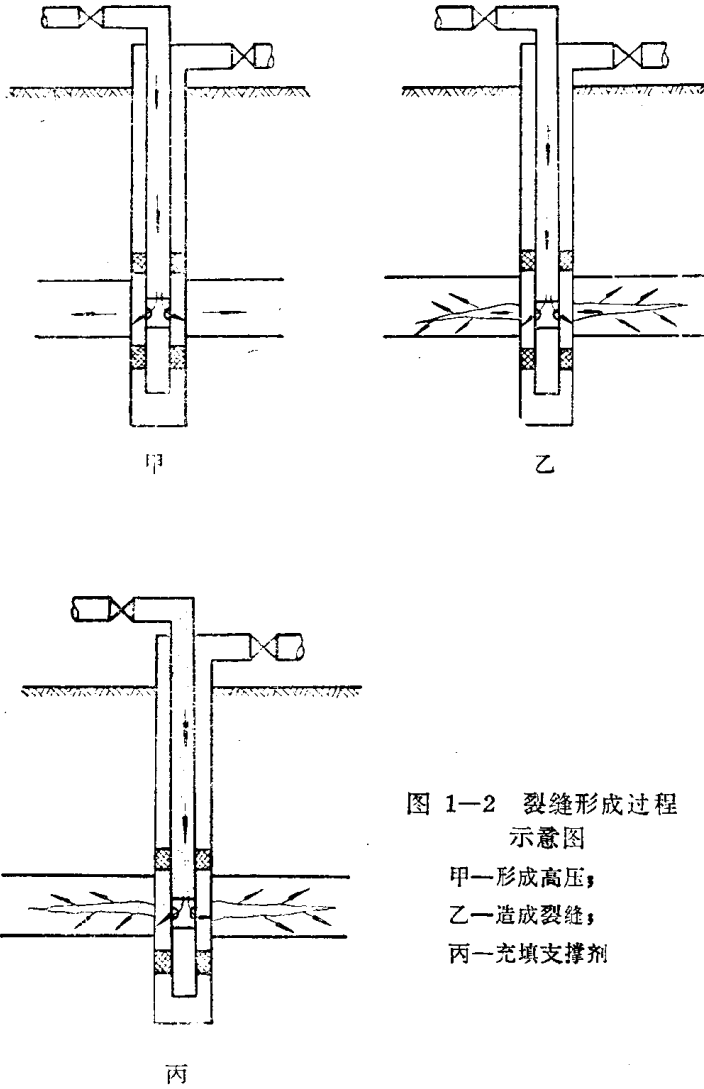


图 1-2 裂缝形成过程
示意图

甲—形成高压；

乙—造成裂缝；

丙—充填支撑剂

着岩层的孔隙或微裂缝向井筒内渗流，当原油从远处流向井筒时，原油的流动面积越来越小，最后只有井筒那么大了，如图 1—3。在远离井筒时其流通面积的直径是 ϕ ，但当流到井筒附近时其流通面积的直径只有 ϕ_1 ，那么小了。由于面积的缩小，原油在流动时所遇到的阻力也随之增大，从而原油在流动时的能量大部份都消耗在克服岩层的阻力上，而流到井筒的原油所具有的自喷能力已大大降低，甚至有的原油流到井筒后已不能自喷了。从图 1—4 中压力分布曲线即可看出压力的损耗情况。

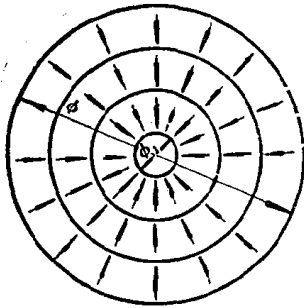


图 1—3 液体流动状况

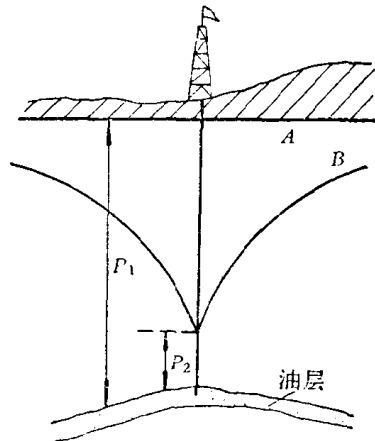


图 1—4 油层压力分布图

在压力传递过程中，油井周围造成压降漏斗，这种漏斗类似茶杯中快速转动勺子所形成的漏斗形。图 1—4 中 A 线表示地层未打开时的地层压力分布情况，B 线表示油井开采过程中压力分布情况，在这个曲线中可以看出油井附近压力梯度很大，绝大部份地层能量都消耗在井筒附近。

油层经过水力压裂后，由于形成了一条或几条人为的被

支撑剂所支撑的裂缝，从而改变了油层的原有结构在油层中形成一条或几条渗透率比油层高得多的良好通道，由于这些通道分布在油层里，所以原油向井筒流动时是通过裂缝的侧壁进入裂缝，再从渗透率很高的裂缝中很快流向井筒。从图

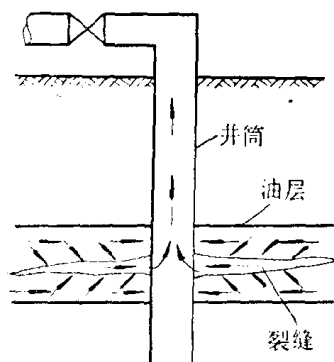


图 1—5 液体自裂缝流向井筒示意图

1—5可以看出，除了一小部份原油直接流向井筒处，绝大部分原油都是通过裂缝这条通道流向井筒的，这样一来，原油流向井筒时的阻力，即能量损耗大大地减少，使流向井筒的液体保持较高的能量。这就是油井通过水力压裂后，不仅油井产量增加，而且井的流动压力也增加，使油井能够保持旺盛的自喷能力的简单原理。

另外，油层经过水力压裂后，由于人工裂缝的作用，还可突破井筒附近油层中的堵塞物，恢复或增加油层的渗透率。通常在井筒附近的一个小范围内，油层由于受到堵塞而降低了渗透率，直接影响了原油向井筒的流动，使油井产量大幅度下降。造成这种堵塞的原因是：钻井或修井过程中泥浆的侵入，完井时水泥浆的影响，油层中原来的一些易膨胀的粘土作用，油井生产过程中原油在油层中流动时所携带的一些物质以及油井特殊作业后所形成的不溶盐类的沉淀或蜡质等。油层通过水力作用后，一方面可使裂缝穿过堵塞层的影响范围起到增产作用，另外，在压裂时由于高压液体的冲击，也可以将堵塞物冲到离井筒较远的地方，使井底附近的

油层渗透率大大恢复，从而使产量提高。

综上所述，油层水力压裂的目的在于改造油层的物理结构和性质，人为地在油层中形成一条或几条高渗透能力的通道，改善液体在油层中的流动状况，降低流动阻力，增大流动面积，使油井得到增产的效果，并获得旺盛的自喷能力。

第二节 裂缝的形成及其判断

从上节了解到，油井增产主要是因油层形成了裂缝，所以，在水力压裂中掌握裂缝的形成规律，可以更科学地指导施工和进行效果分析。同时，又可以对工艺的改进和提高提供可靠的依据。

一、裂缝是怎样形成的

1. 地层岩石的受力状况

在自然界中，埋藏在地下深处的岩石，由于具有弹性与脆性，因此在受到外界力量作用后首先可以发生弹性变形，而当这个外界力量超过一定限度时，岩石即可发生脆性断裂。

地下岩石由于埋藏在地下深处，所以在岩石上面承受着很厚的上覆岩层的重量，在岩石的四周又受到邻近岩石的推挤，因此，无论是纵向的，还是横向的，均处于压缩状态。通过图 1—6 的分析可以看出，这些作用在岩石上的力，大致可以分为三对相互垂直的轴应力，即一

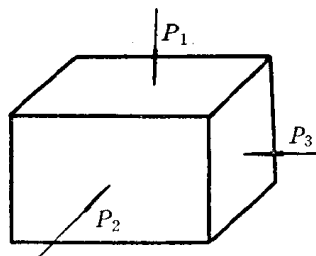


图 1—6 岩石轴应力分布图

对垂直力 P_1 ，两对水平力 P_2 及 P_3 。作为垂直力 P_1 的大小，就是该深度以上覆盖地层所形成的压力，一般用下式计算。

$$P_1 = H \cdot \gamma$$

式中 H ——油层深度；

γ ——上覆岩层平均比重。

而两对水平力 P_2 及 P_3 则是根据该地区的构造挤压力加以估计的。作用在岩石上的三对力的大小，是随地区和井深的变化而变化的。但由于是埋藏在地下深处，所以作用在岩石上的三对力处于相对的平衡状态。

作为油层可以看成是一个大范围的岩石体，它的受力状态与单体岩石受力状态大体相同，因此在研究裂缝形成的时候，对油层的受力状态就可以用单体岩石受力的状况为依据来进行分析与比较了。

2. 裂缝的形成

在分析了岩石受力状况之后，那么在水力作用下裂缝又是怎样形成的呢？

在地面用泵将具有一定粘度的液体以高压大排量向油层注入时，由于注入速度大于油层吸入速度，而在井筒内产生一个很高的压力，这个很高的压力实际上就是作用在油层上的外来力，油层由于受到这个外来力的作用，势必会使油层所受的三对轴向应力减少，而当这个力等于或超过某一方向的轴应力时，油层本身在这一方向所受的轴应力完全被液体所传导下来的外来力所克服，此时，随着外来力量的增加，在克服了油层本身破碎时所需要的力量后，油层就会在最薄弱的地方开始破损，然后液体就象利斧破石头一样从破损的地方将油层劈开而形成一条或几条裂缝。

油层在形成裂缝的时候，首先发生弹性变形，当超过这个弹性限度后，油层才开始发生脆性断裂。

通过上面分析可以看出，油层裂缝的形成，首先发生在

垂直于岩石轴应力最小的方向或油层最薄的地方。

3. 裂缝的种类

油层通过水力压裂后所形成的裂缝，一般可归纳为两类，即水平裂缝和垂直裂缝。

对于一个理想状态下的岩石，裂缝是在垂直于最小轴应力的面上扩展与延伸，也就是说最小轴应力如果是水平的，即 $P_2, P_3 < P_1$ 时，裂缝是沿着垂直于 P_2, P_3 方向展开，所形成的裂缝即为垂直裂缝如图1—7甲所示，最小轴应力如果是垂直的，即 $P_2, P_3 > P_1$ 时裂缝是沿着垂直于 P_1 方向展开。则所形成的裂缝为水平的，如图1—7乙所示。

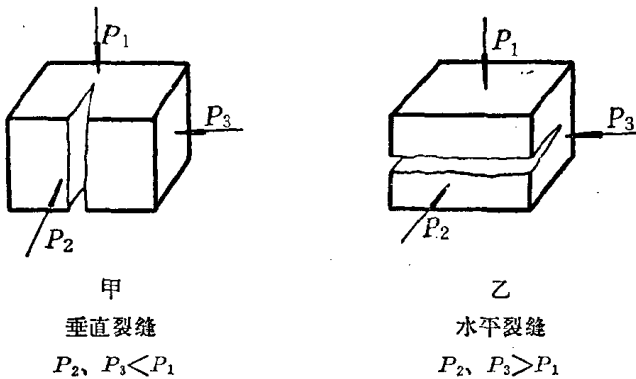


图 1—7 裂缝种类示意图

但是由于地壳运动的作用，油层不一定是水平的，而往往是带有一定倾斜角度的，所以在识别不同类型裂缝时，应以油层为基准来鉴别。一般认为与油层面相平行的裂缝叫做水平裂缝，与油层面相垂直的裂缝叫垂直裂缝。

4. 影响裂缝形成的因素

当油层进行水力压裂时，裂缝的形成受到多种因素的影

响，概括起来有两方面，一是地质因素，二是工艺因素。

地质因素，如油层埋藏的深度、油层污染状况、岩石的结构、岩石的原始渗透率、岩石的弹性强度、岩石的原始裂缝发育程度以及岩石的沉积规律等对裂缝的形成与裂缝的类型都有很大影响。

工艺因素，如射孔质量、预处理、压裂液类型、地面泵的能力等对裂缝形成的难易程度，对裂缝类型与大小都有很大的影响。

譬如，在采用同一种类型压裂液时，当油层裂缝已形成，裂缝的长短主要取决于地面泵能力的大小，当液体传下来的力与岩石破碎所需用的力相平衡时，裂缝不再延伸，如果要想裂缝继续延伸，就得不断地增大向裂缝内注入液体，以保持裂缝内有足够的外来力来克服岩石破碎时所需用的力，这样就要求地面泵具有较大的能量。

影响裂缝形成的因素是多方面的，对于具体问题应根据具体条件进行分析和判断，不过人们可以根据自己工作的经验，人为地改变某种因素，来影响裂缝的形成以达到预期的效果。

二、对裂缝形成规律的认识

分析了裂缝的形成、种类及影响因素之后，那么在水力压裂中对于裂缝形成的位置、宽度、长度、裂缝中的压力分布等是否有一定的规律性呢？为了认识这个问题，在某地选择了一个具有沉积层理、原始微裂缝及节理，埋藏深度为400米的煤层进行了压裂试验。同时为了了解裂缝内的压力变化，在试验井四周布局了若干观测井。

试验工艺与油层压裂工艺相同，采用0.5~0.8毫米的石英砂为支撑剂，清水作压裂液，排量为0.8米³/分，加砂时

压力为250大气压。

煤层通过压裂后，采用开拓巷道的方法，对裂缝进行了解剖观测。

1. 裂缝位置

进行水力压裂的处理层段一般都具有一定的厚度，因此，压裂后形成的裂缝的位置是在地层的上部，还是在地层的下部或是在地层的中部？根据试验的结果来看，裂缝的位置主要取决于地层本身。从试验中发现，裂缝一般是从最薄弱的地方展开，从图1—8可以看到，试验井在固井质量不好的情况下，通过水力压裂，固井水泥环首先被突破使石英砂从此处分布。

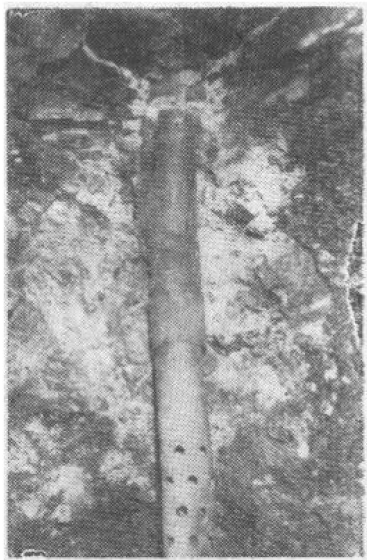


图 1—8 地层窜槽

但是当固井质量良好时，由于煤层的沉积作用，在煤层中大多有层理存在，在这种情况下，由于所形成的是水平裂缝，那么裂缝比较容易沿着层理展开。如图1—9所示。

尽管在煤层中存在着大量的原始微裂缝及节理，但是却并没有石英砂进入。这就说明煤层的沉积层理为形成裂缝创造了一个较好的条件。

2. 裂缝的宽度

裂缝宽度一般包括两个概念，即闭合宽度和压裂宽度。

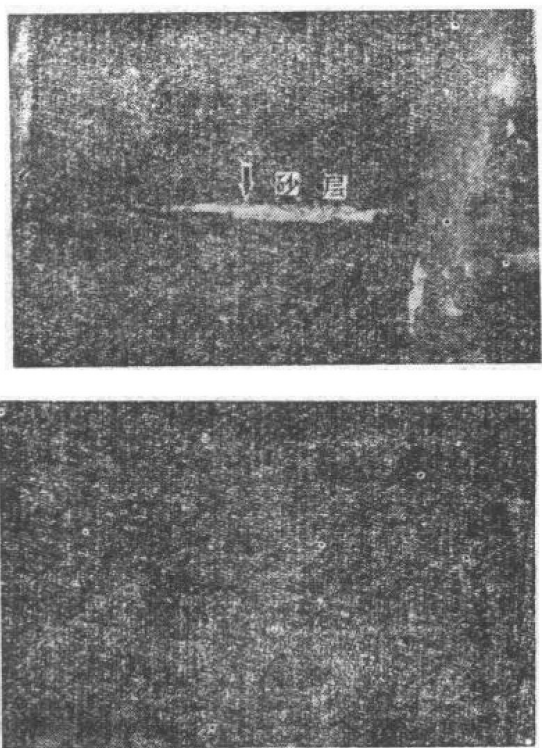


图 1—9 地层中裂缝分布

闭合宽度一般指的是地面外来压力消失后，裂缝闭合后的裂缝宽度。压裂宽度一般指的是压裂过程中裂缝张开的宽度。压裂宽度大于闭合宽度。

根据试验井裂缝解剖发现，裂缝的闭合宽度为3~5毫米左右，其分布是以井筒为中心，随着距井筒距离的增加，裂缝闭合宽度逐渐变小，如图1—10中第一个宽度为 h_1 ，第二个宽度为 h_2 ，则 $h_1 > h_2$ 。