

357888

基本語彙

油、气田开发译文集

油层水力压裂

石油工业部编辑室编辑



1

122
30

中国工业出版社

油、气田开发译文集

①

油层水力压裂

石油工业部编辑室编辑

中国工业出版社

本书包括油层水力压裂方面的文章12篇，除“油层水力压裂的理论基础”一篇是苏联在第五届国际石油会议上的报告外，其它都是选自美国各石油技术杂志和年鉴。通过本书选译的文章可了解国外进行油层水力压裂处理设计计算、选择压裂液和支撑剂、分析评价压裂效果等的方法，以及进行水力压裂技术研究的方法和成果。

本书可供采油工程技术人员、研究人员及石油院校有关师生参考。

油、气田开发论文集(1)

油层水力压裂

石油工业部编辑室编辑 (北京北部六环路石油工业部)

中国工业出版社出版 (北京朝阳门内大街10号)

北京市书刊出版业营业登记证出字第111号

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $59/16$ ·插页1·字数 139,000

1964年9月北京第一版·1964年9月北京第一次印刷

印数001—990·定价(科七) 0.95元

统一书号: 15165·3047 (石油-176)

目 录

油层水力压裂的理论基础.....	1
油层水力压裂设计的计算.....	11
在压裂处理设计中应当考虑的因素.....	29
油层水力压裂时最优的流体特点.....	38
压裂处理的評價和控制的工程方法.....	58
压裂时注入砂的运动机理.....	76
水力压裂时裂缝的流动容量与油井产率的关系.....	85
油层压裂时的压力量测.....	100
压裂支撑剂的評價和选择.....	112
压裂液的选择.....	128
选择性压裂用橡皮球封堵射孔.....	134
寇密特、切雷苛克和庇考斯河谷三个油田 注水措施中的水力压裂.....	156

油层水力压裂的理論基础

С.А. 赫里斯基安諾維奇 Ю.П. 茹尔托夫
Г.И. 巴林布拉特 Г.К. 馬克西莫維奇

基本的物理概念

正确地了解油层水力压裂的物理机理概念，对解决油层水力压裂的实际問題非常重要。

近几年来，在某些很简单的物理假說的基础上，利用弹性理論方法，在解决油层水力压裂时裂縫产生与扩展的一系列問題上作了嘗試。

有一种颇为流行的意見认为，在裂縫的形成与分布上，油层岩石抗裂强度的影响是主要的。但在我們看来，这种意見是錯誤的。只要存在一个很小的裂縫雛形，其进一步的扩展实际上与岩石的强度无关。因为在裂縫末端产生的应力非常大，是任何一种脆性物质都承受不了的。压裂液的作用，犹如自古以来人們破裂大石块时利用的楔形凿子一般。我們认为，在裂縫的扩展与分布上，起决定性作用的是岩层压力、岩石弹性和压裂液的渗透性质。

地下深处的地层，承受着上复岩层的重量，因之，无论纵向或横向，均处于压缩状态（承受着垂向岩层压力和横向岩层压力）。

在具有可塑性的岩层中，压力的分布情况逐渐会变得和液体中一样，因之，岩层的侧压力等于垂直压力。但是在其它岩石中，侧向压力可能与垂向压力的差别很大。所谓垂向压力，在地层呈水平状态的情况下，等于岩石的平均比重 γ 与地层深度 H 的乘积。在地层中能造成垂向断裂的构造运动，同样会促成上述压

力上的差别。

油层水力压裂时，裂缝究竟是怎样形成的呢？在自然界中，岩石里永远存在着各种方向的裂缝（岩石断裂）系统。在岩层压力作用之下，这些裂缝的两壁紧闭在一起。

现在让我们研究一下，自然垂直裂缝，原先在岩石压力的作用下，两壁紧闭在一起，而在液体压力的作用下，又是怎样扩大的过程。我们要指出，所谓垂直裂缝，并不一定要在一个垂直面上，它可以具有任何方向，它的明显的特征是依靠两壁的水平变形而形成。

当提高井筒和地层中液体的压力差时，就会使紧压裂缝两壁的应力减小。而当井筒和地层中的液体压力差等于井筒附近的局部岩层压力时，应力就开始完全被液体所接受，于是，裂缝就张开了。由此可见，当井筒与地层中液体压力差达到最低限度时，自然垂直裂缝就会开始张开。这种最低压力差等于局部岩层压力。

这种情况，在打开水平自然裂缝时就能观察得到。假设有一个孔隙地层，上部和下部是不渗透的可塑性泥质岩层。

假定地层孔隙中是水，其所承受的压力小于岩层压力。这时，上复岩层的重量，有一部份成为紧压地层岩体的力量，另一部份是压在液体上的力量。

油层水力压裂时，当液体压力超过垂向岩层压力后，地层岩体就完全失去垂直压缩应力，这时，水平的自然裂缝就张开了。油层水力压裂的实际经验表明，能够压开裂缝的液体压力，在大多数情况下小于（有时大于）垂向岩层压力。垂向岩层压力等于 rH 的乘积。那末就应当承认，或者是由于侧向岩层压力小于垂向岩层压力，所以在上面提到的各种情况下都产生了垂直裂缝，或者是由于油井的存在，降低了油井附近的岩层压力。

油井是否能改变岩层的压力呢？我们认为，这是可能的。产油层上面复盖着不渗透的可塑性泥质页岩或粘土，这些地层不渗透，正是与它们的不坚固性和可塑性有关。在产油层中，也会见

到粘土夹层。在钻井过程中，这些地层的粘土，大量的被挤压下来，带出井口。我們知道，这时，往往形成很大的孔洞。由于上述现象，油井附近粘土夹层的压力下降。因之，粘土层下面的产油层，在其靠近井身的部份就減輕了一部份岩层压力。减压区半径大致等于（1）

$$r_* = r_0 \exp\left(\frac{rH - P_{\text{мун}} - k}{2k}\right), \quad (1)$$

井身附近的岩层压力等于

$$q = rH - 2k \ln \frac{r_*}{r} \quad (2)$$

式中 k ——粘土层可塑系数；

r_0 ——孔洞半径（确切地说，是粘土层失去坚固性的范围半径）；

$P_{\text{мун}}$ ——钻井冲洗液的压力。

井身附近岩层压力不下降时如何形成裂缝

首先研究一下如何利用不渗滤液体造成裂缝的过程，因为在这种情况下，能最简单最清楚地了解油层压裂过程的实质。

当井身周围的岩层压力保持不变时，水平裂缝和垂直裂缝的形成过程在原则上是一样的。

假定有一个裂缝雛形，我們来看看它的扩张过程。在高于岩层压力的压力下，把液体注入裂缝。那末裂缝是靠什么作用扩张呢？我們认为，裂缝是靠岩层受到液体压力后发生的弹性变形而扩张的。液体的作用就如同一个压进弹性体的模压器一样。裂缝的长度取决于什么因素呢？在每一时刻，裂缝的长度都取决于液体压力与岩层压力的平衡关系。平衡时，裂缝末端的应力等于零，裂缝两壁吻合在一起，不形成尖角形状。在液体施加的压力之下，依靠液体在裂缝两壁的摩擦力，就能使裂缝中液体的压力超过岩层压力。我們知道，粘性液体在狭窄的缝道中流动时，其摩擦力等于狭缝宽度的立方。

由于裂缝末端的宽度很快就减小为零，所以靠近裂缝末端的阻力很大，于是在这里就产生巨大的压力差，正因为如此，在裂缝中能保持高压。

研究结果表明，裂缝末端收缩的非常快，所以这里永远有一个末端部分，其压力等于地层中原始液体压力。裂缝的体积取决于注入的液体量。

这样看来，裂缝的形成过程是一个动力过程。如果停止注液体，关闭井口，地层中的压力会逐渐减小，这时，长度增大了的裂缝，实际上就闭合了起来。为了使裂缝中的压力保持不变，必需不断的增加液体量。如果注入裂缝的液体量保持不变，裂缝中的压力就会逐渐下降，渐渐接近岩层压力。裂缝的长度增加了，其靠近井身的宽度也会加大。

在论文〔1, 3〕中，根据上述原理，利用弹性理论方法，解决了垂直裂缝和水平裂缝在最简单的情况下的分布问题。在这几篇文章中，对裂缝的大小、不渗滤液体耗量的变化和井底压力进行了计算。图1和图2中表示了计算求得的裂缝形状(w/w_0 比，式中 w ——离井身任何距离内的裂缝宽度， w_0 ——井身附近裂缝宽度)和相应的压力图表。

水平裂缝的半径 R 和其最大宽度 w_0 用下列方程式计算：

$$V = 5(1 - \nu^2) \frac{p - p_0}{E} R^3, \quad (3)$$

$$w_0 = 0.513 \frac{V}{R^2}, \quad (4)$$

式中 V ——注入裂缝的液体量；

p ——岩层压力；

E ——油层岩石的杨氏模数；

ν ——油层岩石的普氏系数 (коэффициент Пуассона)；

p_0 ——液体井底压力。

垂直裂缝的相应公式为：

$$V = \frac{0.35}{1+\nu^2} \cdot \frac{q}{E} \cdot \left(\frac{\Delta p_c}{q} - 1 \right) h l^2, \quad (5)$$

$$w_0 = 1.43 \frac{V}{h l}, \quad (6)$$

式中 l —— 裂缝长度;

h —— 地层厚度;

$\Delta p_c = p - p_k$ (p_k —— 地层压力)。

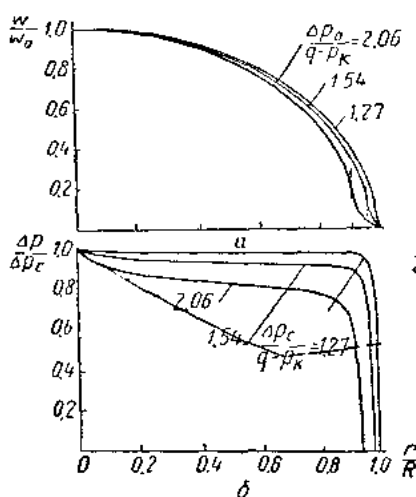


图 1 a, б 水平裂缝形状和作用于裂缝两壁的液体压力图表

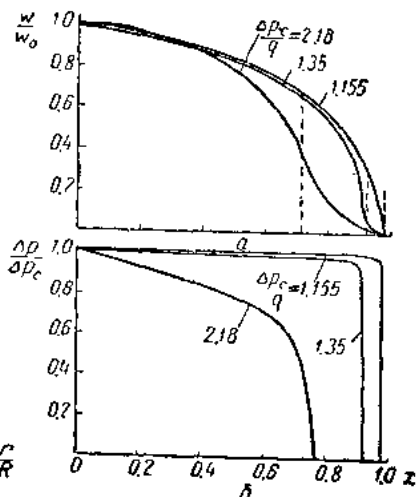


图 2 a, б 垂直裂缝形状和作用于裂缝两壁的液体压力图表

现在我们研究一下, 当压裂液体量 Q 保持不变时裂缝的形成过程。这时, 利用下列公式就能确定出 Δp_c 的变化:

对于水平裂缝

$$\frac{p-q}{\Delta p_c} \left(\frac{p-q}{E} \right)^3 = 0.0463 \frac{(1+\nu^2)^2}{E} \cdot \frac{Q\mu}{Q_0 + \tau}, \quad (7)$$

对于垂直裂缝

$$\frac{\Delta p_c}{q} \left(\frac{\Delta p_c}{q} - 1 \right) = 84 \frac{(1+\nu^2)^2}{q} \left(\frac{E}{q} \right)^2 \cdot \frac{Q\mu}{Q_0 + \tau}, \quad (8)$$

式中 τ ——注入裂缝的液体原始体积。

例举 假设岩石的侧压小于垂直压力，等于 $q=100$ 公斤/分米²。地层的液体压力 $p_k=200$ 公斤/分米²。岩石的杨氏模数 $E=10^5$ 公斤/分米²， $\nu=0.2$ 。地层厚度等于 10 米。地层是用不渗滤的液体压裂的，液体的粘度 $\mu=100$ 厘泊，注液量保持为 $Q=100$ 米³/日， $\tau=0$ 。

在这种情况下，形成的是垂直裂缝，开始注液 13.5 分钟后， $\frac{\Delta p_c}{q}=1.1$ ， $V=9.4$ 米³，裂缝全长 $l=167$ 米，最大宽度 $w_0=0.8$ 分米。

研究一下利用实际工作中常用的不渗滤液体进行油层压裂的过程，是有很大的意义的。

这里，裂缝的形成，不是由于液体直接施加在裂缝两壁的压力，

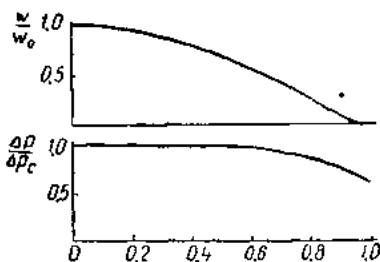


图 3 用渗滤液体在地层中造成的垂直裂缝的形状和裂缝中液体压力的图表

而是由于渗滤液体施加在地层岩体上的压力。利用渗滤液体造成裂缝时，裂缝的体积已不取决于注入液体量，而只取决于注入液体的速度。而且，如果裂缝用渗滤液体造成，液体的注入量保持不变，则裂缝的大小不会因时间而发生变化。这时，全部裂缝将处于压裂液

的影响之下。如何用粘度和地层液体相同的液体造成垂直裂缝的问题，见论文〔4〕所述。

图 3 表示了上述情况下的裂缝形状和压力沿裂缝分布情况。

井身附近岩层压力下降时，如何形成水平裂缝

如果在钻井过程中油层上面复盖的地层中的可塑性岩层被冲落，井身附近的岩层压力因而下降时，裂缝形成的过程将与上述

情况根本不同。

現在我們研究一下，当井壁附近岩层压力下降时，用不渗透液体压裂地层的机理。这时井身附近的局部岩层压力最小，离开井身逐渐增加，一直增加到离井身 r_* 距离范围内的正常岩层压力为止。

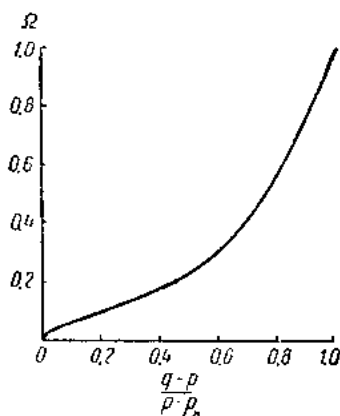


图 4 井身附近岩层压力下降时，注入水平裂缝的不渗透液体量与液体压力之间的关系

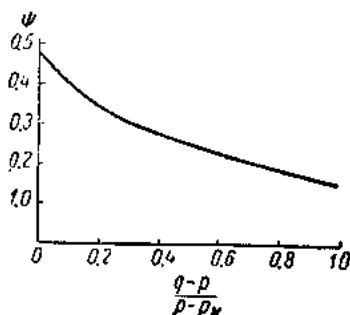


图 5 井身附近岩层压力下降时，用不渗透液体造成的水平裂缝最大宽度与液体压力之间的关系

当井底液体压力达到井壁附近岩层压力的最低值时，就开始形成裂缝。

在注入裂缝的液体量与井中压力之间将是同等的关系。如果在某种压力下停止注液体，并把井口密封起来，则裂缝中的压力不会随时间而发生变化。它沿裂缝的半径也是保持不变的。这种裂缝的形成在论文〔2, 3〕中作了研究。图 4 和图 5 中表示的关系，是说明在产层与上复可塑层的接触面上直接形成裂缝的情况。利用这种关系，可以求出在每一种井底液体压力值情况下的液体量和裂缝的最大宽度。

$$\psi = \psi\left(\frac{p-q}{p-p_k}\right) \text{ 和 } \Omega = \Omega\left(\frac{p-q}{p-p_k}\right),$$

式中

$$\psi = \frac{Ee}{k(1-\nu^2)} - \frac{\frac{\gamma H - p_{\text{fluid}}}{2k}}{\frac{w_0}{r_0}},$$

$$\Omega = \frac{(1-\nu^2)ke}{E} \frac{\frac{3(\gamma H - p_{\text{fluid}})}{2k}}{V} - \frac{r_0^3}{V},$$

由此可以看出，如果压裂液是不渗滤的液体，则根据压力与压裂液注入量的变化就能分辨出，井身附近的岩层压力是保持未变，还是有所下降。

对模拟裂缝形成过程的某些认识

由于完成了〔1-5〕研究工作，产生了一系列关于地层压裂机理的一般概念。在这些概念的基础上，可以对岩石中裂缝分布情况进行模拟试验。

研究表明，当用不渗透液体制造裂缝时，裂缝的分布过程永远是独具特点的。因之，在这种情况下，不存在任何相似标准。只需用下列公式计算出时间 t 即可

$$t_m = \frac{q_p^3}{q_m^3} - \frac{\mu_m}{\mu_p} \frac{E_m^2}{E_p^2} t_p, \quad (9)$$

式中 $t_m, t_p, q_m, q_p, \dots$ ——分别代表模型和自然界的相应参数。

当用渗滤液体制造裂缝时，只存在一个相似标准。要在模型和自然界中保持这个标准的条件，可用下列关系式表示

$$\frac{Q_p \mu_p}{q_p k_p} = \frac{Q_m \mu_m}{q_m k_m}, \quad (10)$$

式中 k_m, k_p ——分别表示模型和自然岩层的渗透率。

造成关系(9)和(10)的条件，就能制造出一种地层压裂的模型，它既适于研究用渗滤液体制造裂缝的过程，也适于研究用不渗滤液体制造裂缝的过程。

苏联利用油层水力压裂法的情况

油层水力压裂法在苏联的发展，具有许多特点。

苏联的油田，特别是战后发现的油田，都是含油面积广阔、石油储量丰富的大油田。虽然油层厚度不大，一般不超过8—12米，单井产量却很高，介于50—100吨/日。这是由于广泛采用边外和边内注水方法的结果。苏联原油总产量的65%以上是采用保持油层压力方法开发的油田生产的。这就解决了提高采油速度的问题，采取的措施是提高油层注水压力，把大油田切割成若干开发区，在每个开发区中进行边缘注水，此外，还有其它能对整个油层产生影响的类似措施。

在上述的油田开发条件下，油层压裂方法最好首先用来提高注水井的吸水能力，而不要用来改善原油从油层中流入井中的条件。但有人曾经担心，在渗透率较高的岩层中（300—1000千分达西），油层水力压裂会不会得到预期的效果。

可是实际试验证明，注水井中进行压裂能成倍地提高吸水性。应当指出，许多油田上油层试注水遇到了严重困难。

采用压裂法之后，完全解决了注水井的试注问题，而且，现在注水量达到这样高的数量（53万吨/日），主要是由于采用这种方法的结果。依我们来看，在高产量的注水井中压裂法的效果这样高，与采用渗透极低的（接近于零）压裂液有关。这种液体采用的是纤维造纸工业的废液。液体的渗透作用低，能够以不太高的注水速度（10公升/秒）和较少的注液量（50米³）扩展油层深处分布的裂缝。

在油井中利用油层水力压裂法方面，同样应当认为，在保持油层压力开发的油田上的高产井中，也应当能得到最大的效果。在这些油田中，水力压裂能够显著地减少水驱油时的压力损耗，能够延长油井寿命，并且能够防止天然气从原油的溶液中分离出来。

参 考 文 献

[1] Баренблатт Г.Н. О некоторых задачах теории упругости, возникающих при исследовании механизма гидравлического разрыва нефтеносного пласта. Прикл. матем. и мех., Т. XX, вып. 4, 1956.

[2] Баренблатт Г.Н. Об образовании горизонтальных трещин при гидравлическом разрыве нефтеносного пласта. Изв. АН СССР, № 9, ОТИ, 1956.

[3] Желтов Ю.П., Христианович С.А. О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта. Изв. АН СССР, № 5, ОТИ, 1955.

[4] Желтов Ю.П. Об образовании вертикальных трещин в пласте при помощи фильтрующей жидкости. Изв. АН СССР, № 8, ОТИ, 1957.

[5] Максимович Г.К. Гидравлический разрыв нефтяных пластов. Ростехиздат, М., 1957.

(李国玉 译自第五屆国际石油會議報告論文集第二卷 86—92頁)

油层水力压裂设计的计算

D.D.亨特与H.R.克劳福德合著

摘要 本文介绍计算压裂面积的方法。作者从探讨压裂液漏失率入手,说明了压裂处理的效果,然后将计算压裂面积公式作成诺模图,以表示各种因素所起的作用。

引 言

为了提高原油采收率,近来大家十分重视水力压裂操作设计的研究。除去估计在操作过程中应用的压力、液流速度,以及确定采取适当堵塞措施(如用橡皮球等)外,还需要找出最有效的压裂液、注入量、注入速度和要加的砂子量。

本文介绍一种简易的现场压裂操作的计算方法。文中提出的数学公式,都是由一些很容易证明的假设推导出来的。根据油田上通常都可以获得的数据,用这种方法就可以进行压裂效果的估计。一般说法,压裂液用得愈多、流体的损失量愈小、砂子用得愈多、注入速度愈高,则压裂效果愈好。但是,这种说法忽视了许多物理上的和经济上的因素,而且也没有说明,一定的增量到底能产生多大的好处。如果用这样的态度来制订压裂设计,其结果必然会造成巨大的浪费。所以,我们必须根据具体的物理及经济条件进行设计,才能收最好的效果。

裂缝面积的计算

要设计出一套最好的压裂方案,必须先有一个衡量压裂处理后所形成的裂缝面积的尺度。这就需要一种可靠的估计裂缝径向大小,即裂缝面积的方法,只有这样才有可能去研究各个影响压裂范围或裂缝面积的因素。

解决这个问题的途径

在这里，从定性的观点来考虑在压裂过程中所发生的各种情况是十分重要的。当产生一个裂缝时，就有流体从地面通过油管或套管注入其中。这时，流体有两条出路。一条出路是，由于裂缝的壁面是有渗透性的，注入的流体可以通过壁面流入油层，从压裂观点来讲，这种流体是损失掉的。另一条出路是，注入的流体留在裂缝里，从而增加了压裂的体积。假定，裂缝的宽度是不变的，增加压裂体积就是扩大裂缝的分布范围或分布面积。

到底有多少流体是真正漏失掉的和有多少留在裂缝里呢？只需要计算一下留在裂缝里的流体量就可以知道。

简单地分析一下上述机理，我们就可以查明影响压裂面积的几个一般因素。注入流体的速度和时间，这两个因素决定发生漏失的时间。另外就是裂缝的间隙或宽度，这是把压裂体积和裂缝分布面积联系起来的因素。第四个因素是流体处理量，这可以从流体注入速度和注入时间表示出来。最后一个因素是流体漏失率。

要计算漏失率，最简单的办法是采用压裂流体系数 C ，这个系数包含好几个控制漏失率的变数，它是衡量漏失率的尺度，它的定义下面再详细交代。

计算裂缝面积的公式

在开始压裂处理时，裂缝的表面面积是很小的，从裂缝中漏失的流体数量也是很小的。但是，随着压裂过程的进展，可能发生漏失流体的表面面积就越来越大。在这种情况下，要准确地计算任一时段的漏失面积并不是没有可能，但是所得出的公式将比较复杂。下面是根据 R.D. 卡特公式导出的估计压裂面积的方程式：

$$A = -\frac{QW}{4\pi C^2} \left[e^{x^2} \cdot \operatorname{erfc}(x) + \frac{2x}{\sqrt{\pi}} - 1 \right],$$

$$\text{式中 } x = \frac{2C\sqrt{\pi t}}{W}.$$

A ——裂缝一面的总面积，呎²；

Q ——压裂处理时不变的注入速度，呎³/分，或每分钟注入桶数乘以 5.614；

t ——总注入时间，分钟；

W ——不变的裂缝宽度，呎；

C ——是个常数，以衡量压裂过程中漏入地层的流体流动的阻力；

$\text{erfc}(x)$ —— x 的补差函数。

这样，只要知道了这些因素，就可以很准确地计算压裂处理所造成的裂缝分布面积。注入流体的速度和时间是很容易计算的；在一般情况下，裂缝的宽度是需要假设的（关于假设裂缝宽度的效果，以后还要谈到）。现在先来探讨一下常数 C ，即压裂流体系数的值。

压裂流体系数 C

上面已经谈过， C 是衡量漏失率的尺度。在计算流体漏失面积的方程式中， C 是唯一能反映各种地层的差别和各种流体的差别的因素。根据分析油层和所用各种流体性质的结果，表明系数 C 包含三种流体作用。换言之， C 实际上是三种作用的综合。第一，涉及压裂流体的粘度；第二，主要与油层中有限压缩性流体的饱和度有关；第三，涉及防漏添加剂的作用。下面我们用 C_I 、 C_H 和 C_M 来分别代表这三种作用。现在，让我们分别地来探讨一下这三种作用。

压裂流体的粘度

如果使用的压裂流体的粘度比油层中流体的粘度高得多，计算流体漏失系数 C_I 的方程式如下：

$$C_I = 0.0469 \sqrt{\frac{k\phi\Delta P}{\mu}}, \text{呎}/\sqrt{\text{分钟}}$$

式中： k ——地层的渗透率；

ϕ ——地层的孔隙度；

ΔP ——裂缝中流体和地层中流体的压差；

μ ——压裂流体的粘度。