

节理性地层的水力压裂

H. D. Murphy, M. C. Fehler
Los Alamos Natl. Laboratory

熊宏杰 译
任书泉 校

摘 要

新墨西哥州为了开发地热储集层,在Fenton Hill进行了北美最大的(按用液量计)水力压裂。在这次特大的作业中,将21,000米³的水注入到深3.5公里的节理性花岗岩地层中。用地震检波器和11个地面测震仪测量了这次由注水引起的微地震。地震检波器安放在钻入该地热层或非常接近该层的五口井内。这次微地震波及到巨大的岩石体积,这表明此种水力压裂机理与传统的压裂理论不同。传统的理论认为岩石在垂直于最小压缩应力的平面上产生裂缝。用岩石力学和流体流动这两个模型解释了这种机理。沿地层原有节理诱发剪切滑动要比导致一般的张力破裂更容易,特别是在最小和最大地应力相差较大、节理方位与主应力成30~60°角、且注入象水这样的低粘流体的时候,更是如此。剪切滑动导致局部应力的重新分布,使得与微地震区一致的树叉或树枝状的裂缝模式得以形成。这些结果在性质上类似于有争议的、名叫“Kiel”的压裂过程;在该过程中,为压成树枝状裂缝以增加油气采收率而重复进行注入和关井。我们认为,形成树枝状裂缝应该用原有节理的剪切滑动和应力的重新分布来解释,而不是用Kiel提出的支撑剂桥堵和流体的堵塞来解释。

一、引 言

多数岩层,尤其是结晶型岩石,都含有原先存在的裂缝,这些裂缝通常称为节理。在水力压裂过程中,当流体注进节理时,可能发生几种类型的节理变形。开始时,节理中的压力较小,不足以使节理真正张开;但是,有效闭合应力,即垂直于节理壁面的总地应力与流体压力之差被减小。如继续注液,节理中的压力达到一个较高的值,使得有效闭合应力提供的摩擦力不能抵抗平行作用在节理表面上的剪应力,此时节理就会以剪切模式滑动。如果这种滑动较大,一个粗糙缝面就“骑在”或架在另一个缝面上。因而,即使压力突然降低,节理也会保持张开状,渗透率也会改善,此即所谓的“剪切压裂”(“shear stimulation”)。如果注液速度适中,无须再增加压力,剪切压裂也能产生较高的渗透率。但如由剪切产生的地层空隙不足以容纳注入到岩石节理中的流体,压力将继续升高,直到等于垂直作用在节理上的地应力值。尔后,节理上两个相对的缝面就会分离。由于在节理分离中岩石不发生断裂,把这种现象称为压裂是不太恰当的;因而,我们称它为节理分裂。如果有目的地将支撑剂随流体一起注入,随着关井,支撑剂或者节理面破碎下来的碎片被嵌在节理中,这样节理将长期张

开, 即节理被“压开”。

参考图 1 所示的 Mohr 图, 可以建立剪切压裂的运动学论据。为简单起见, 本文只描述了一个二维应力状态。在此状态中, 最大和最小主压应力分别用 σ_{max} 和 σ_{min} 表示。其它面上的应力用连接这两个主应力的 Mohr 圆来表示 (Jaeger 和 Cook, 1979)。图 1 中给定了一个相当典型的应力状态, 其 σ_{max} 大约为 σ_{min} 的两倍。节理中的压力 p , 使有效闭合应力减小。最后, 当有效闭合应力为零或 $p = \sigma_{min}$ 的时候节理发生分裂。如图 1 所示, 起裂 (Lift-off) 需要 Mohr 圆完全移到左侧, 使它的左边与初始点相一致。换句话说, 剪切破坏只要求 Mohr 圆向左移动, 接触到 Coulomb-Mohr 破坏包络线。如果节理处于最佳方位, 那么 Mohr 圆刚接触破坏包络线就要破坏, 但即使不处在最佳方位, 大多数节理都会在它们分裂之前产生剪切滑动。

水力压裂理论中很少讨论剪切压裂。实际上, Lockner 和 Byerlee (1977) 在岩石力学室内实验中发现, 缓慢加压能够导致完整岩石而不只是节理性岩石产生剪切起裂。据此, 他们宣称: “在水力压裂的文献中, 出人意料地忽视了产生剪切裂缝而不是张力裂缝的可能性。” 后来, 曾有另外几篇文章 (Hast, 1979; 和 Solberg, Lockner 及 Byerlee, 1980) 支持可能产生剪切压裂的观点。

在流体压力低于节理分裂压力而节理产生剪切滑动时, 节理的张开或滑动和分裂的扩张性能有较大的差别, 如图 2 所示。随着压力的升高, Mohr 圆移到该图左侧。开始, 有效闭合压力降低, 引起较小的扩张, 随后发生剪切滑动。随着节理面的继续滑动, 会出现下述状态: 一个大的粗糙面“骑在”另一个面上。进一步的滑动会致使最粗糙的面在另一个面上来回滑动。然而, 人们希望这种剪切扩张有一个自然极限。这种剪切扩张的最大值一般有十分之几毫米 (Barton et al., 1985)。如果节理压力能增加到发生分裂, 那么由传统水力压裂理论取节理性岩石的抗张强度为零所得到的结果表明, 扩张值一般为几十毫米 (Perkins 和 Kern, 1961; Daneshy, 1973), 这个值为剪切扩张的许多倍。因此, 这就象 Lockner 和 Byerlee 所正确预见的那样, 认识压裂的关键不仅在于岩石力学, 而且还在于流体动力学。如果将一种低粘压裂液在足够低的速度下注入节理, 压裂液就会充填在由剪切滑动产生的小的扩张空隙中。即使节理的张开度和渗透率的增加值不如节理分裂时造成的那么大, 但渗透率的升高已足以维持低流速和低粘度而不会产生大的压力梯度, 并且也不需要把压力增高到使节理分裂的压力。

在实际水力压裂施工中, 似乎节理变形的所有模式都可能发生。一般在近井地带, 由于流体流通面积受到限制, 流体速度和压力梯度都大, 故发生节理分裂; 但在靠近节理尖端处的远井地带, 由于流速和压力梯度都大大下降, 从而发生剪切压裂。在大多数油藏的普通水力压裂中, 一般都用粘度较大的压裂液, 使用非常高的注液速度。因此, 节理分裂占优势。如果象在油层中常遇到的那样很少有节理存在, 那么实际上会发生完整岩石的破裂。然而, 在下面将要讲到的地热储集层压裂中, 由于岩石中多产生节理, 且井底高温使大多数增粘剂失去作用, 而常用水作压裂液, 因此剪切压裂占优势。

二、地热储集层水力压裂试验

在两个干热岩石 (HDR) 地热储集层中使用很好的仪器装备进行了水力压裂。第一个

是在Fenton Hill进行的，它位于美国新墨西哥州Jemez山脉的Valles休眠火山口西侧；第二个是在英格兰的Cornwall郡Rosemanowes Quarry。以上两处的储集层都是节理性的花岗岩。

干热岩地热储集层不同于我们熟悉的热液地热储集层。前一类储层，一般都必须用水力压裂才能产生渗透性和孔隙性；而在热液储集层中这些本身就已存在，并且实际上孔隙常被水或蒸汽所饱和。钻井后，可将水和蒸汽用作开采热能的工作液并可用来发电。在干热岩地热储层中基本上没有水，所以须将水注入地热储层。因此，在HDR的开发中，我们面临着技术困难的挑战。至少要有两口井钻至地温为200~300℃的地层深处，才适合用于发电。甚至在具有较高地温梯度的地区，这样高的温度也要在3~5公里的地层深处才能找到，此处地层的当地主应力约为35~100兆帕（5,000~15,000磅/英寸²）。为了使渗透率保持高值，流动阻力保持低值，必须用水力压裂压开岩层以连通各井，并使节理呈张开状。然后，用流动水充分地冲洗大面积的干热岩层，就能长期获得高热液体。

在Fenton Hill所做的早期试验证实了原始干热岩层可供开发。两口井钻至3,000米，并用水力压裂使之相互连通。从1978年到1980年断断续续的试验中，总共九个月内就生产了3~5兆瓦（MW）的地热能。由于流动阻力很低，把水注入地层直到从另一口井产出来所用的能量还不到所产热能的2%。与大多数地热流体相比，这样产出的水质量高、固体颗粒含量小，并且在压裂时产生的最大地震强度只达到里氏1.5级。更为详细的资料请参见Dash等的文献（1983年）。

这些早期的成功促使人们作出开发Fenton Hill地区更深、更热、更大储层的决定。开发这个大储层的目的是要作出一个HDR开发的工程模式。基于压裂层位近似垂直、大致北-南走向这一早期经验，在扇形体上钻了两口新井。在第一个扇形体上，从0~2.5公里的深度，两口井近于垂直钻进，但在较深的扇形体上，朝东定向钻井，最后与垂向井身成35°的角。图3给出了一个透视图。上面的EE-3井打算用作生产井，按斜向间隔，它位于下部注水井EE-2井以上300米。3,000米深处的地温为200℃，4,400千米深处为325℃。图3还表明了一口钻在早期开发储层中的井，现在此井中安装了地震检波器探头。这个检波器以及安放在其它井中的检波器用来探测水力压裂引起的微地震并确定其位置（House, et al., 1985年）。

为了利用水力压裂将两口新井连通起来，首先在较低的一口井接近井底的井段施工，但由于井底高压和高温环境中的应力腐蚀（压力为90兆帕或13,000磅/英寸²）而遇到了困难。突破点只好沿井身上移。1983年12月进行了一次巨型水力压裂，在较低一口井3,500米深处，该处地层压力为83兆帕，以平均泵速0.1米³/秒（40桶/分）注入了21,000米³的水（5,600,000加仑），详细资料参见Dreesen和Nicholson（1985年）的文献。图4给出了某些诱发的微地震的位置。由于井下地震检波器异常灵敏，故能探测到的外推的里氏体地震波低至-5，但图4只标出了850个高质量的较高数量级（-3到0）的波点。注意，微地震并没有形成一个象传统水力压裂理论（Hubbert和Willis, 1957年）所预测的平面裂缝，而是引起了一个800米高、在南北方向800米宽、约250米厚的巨大岩体的破裂。地震检波器对微地震的定位精度为30米，所以地震破裂岩体的厚度250米并非是人工的测量误差。破裂体的体积是注入水体积的4,000倍。House et al.（1985年）还由地面测震仪指示的微地震和断层面破碎的第一次运动得出结论：剪切滑移可能沿原先存在的岩石节理发生。这表明，如果只是发生张力裂缝的话，只能产生非常微弱的地震信号，地面测震仪是探测不到的。

图5给出了井下地震波检测器记录的一个典型微地震的波形。注意，剪切波的振幅大于

压缩波的振幅，这与剪切滑动机理相符。图6画出了图5中地震波曲线的压缩波光谱。由图可知，在低频率时，振幅较平；随后，振幅随频率的三次方而下降。这个特性与常用构造地震力学中观测到的波形光谱，即与发生剪切滑动时的光谱一致。据Brune（1970年）的原始机理模型，每次剪切滑移可以移动的岩石表面特性尺寸为10米的数量级，这可以和测井中观测到的大多数节理间距大小相比。

总之，上述结果表明，存在一种与传统水力压裂理论不同的压裂机理，而传统理论认为岩石的张力破裂引起单个裂缝的延伸。但我们的结果与Lockner和Byerlee在低速注液下岩石样品的剪切破坏实验结果一致。我们的结论在英国的Cornwall干热岩储层得到了进一步证实，在这个干热岩储层中观测到（Pine和Batchlor，1984年），压裂形成了一个多裂缝带，且沿原先存在的节理的剪切滑动是产生地震的主要原因。

三、节理性地层岩石的剪切压裂模拟

以上提供的那些出人意料的施工结果说明，为进一步进行研究，需要一个详细体现节理内流体动力学和岩石力学的模型。从Cundall和Marti（1978年）计算方法所得的流体-岩石相互作用程序适合于这种用途。把原先存在的岩石节理分成规则的长方形网格，再把流体动力学和岩石应力及变形相互联系起来。例如，在一个计算循环过程中，一个单元上的过剩压力将导致该单元收缩和随之而来的节理张开（扩张），结果渗透率增加，压力重新分布。

在进行节理方向与主地应力方向重合的计算时，曾预测了一个等效于传统水力压裂的过程（但没考虑岩石强度）：在压力等于最小地应力时单个节理张开，并且张开节理的粗糙度和形状与传统水力压裂理论相符（Daneshy，1973）。但当原生节理的方位从主应力方向旋转 30° ，并且注入一种象水一样的低粘流体进行压裂时，那么两种类型的破裂模式都会出现。在图7所示的第一种类型中，当阻止剪切滑动的摩擦较小或者在剪切引起的扩张度较大时，只有单个节理发生破裂。示于图7，以后又示于图9的分解应力，是由于主地应力 2σ 以 30° 作用在节理上的缘故。为简单起见，省略了下标min，即 σ 是最小主应力，它垂直于最大主应力 2σ 。

在如图8所示的第二种剪切压裂中，伴随高剪阻力或小张开度，发生多节理破裂。沿节理的剪切滑动伴随着剪应力的下降，并且这些剪应力降与作用在节理上的地应力相互作用，导致节理垂直于最大主应力张开。这样就会发生树枝状和叉路状的节理破裂。这一节理破裂模式和计算出的剪应力降，解释了为什么早期的微地震图不是平面的而是椭圆形的，还解释了为什么所观察到的微地震的第一次运动能说明剪切机理。

为了更好地研究多节理破裂特性，可参看图9。主节理在剪切下发生滑动，且节理表面发生分裂。当两个缝面不再接触时，就不再有导致最初剪切的摩擦阻力，这时将产生应力降，并且在主节理中心和尖端间的区域内，y方向的垂直压应力发生变化，如图9的上、下两部分所示。在图右上方和左下方，初始垂直应力由 1.75σ 降到 1.25σ ，这就足以使横向节理发生分裂。这些横向节理很容易使水立即流入邻近或平行于主节理的其它节理中去，这些平行的节理开始张开，一直循环下去，直到产生图8所预测的椭圆形节理破裂模式为止。这与图4中的微地震模式近于一致。

与此相反，当剪阻力较低，剪切扩张度较大时，就象图7中的单个节理破裂情形一

样，流体很容易流入正在迅速扩张着的单个节理中，因而不会建立起造成横向节理破裂的压力。

四、讨 论

图 8 中所描绘的树枝状破裂模式，在油藏和地热开发工程中具有重要意义。正如图 10 所表明的那样，不论是碳氢化合物或是地热流体，体积泄油比面积泄油更有利。树枝状压裂最先由 Kiel (1977 年) 提出，他的“Kiel 过程”直到今天仍有争论。这个论点似乎是从观察油气田产量增加现象得出的。在这个过程中，反复用含支撑剂的压裂液压裂一口井。在描述力学机理时，Kiel 解释道：在增压的第一个周期，主裂缝破裂且自行支撑；在以后的周期中，压裂液中的支撑剂引起桥塞，因而压力升高，横向裂缝就垂直于主裂缝而延伸。当两个方向的主应力值近似相等时，这种机理可能说得通；但这不同于常遇到的两个主应力相差较大的情况，在此种情况下，被堵塞的主裂缝中压力升高只会简单地引起主裂缝进一步扩张，克服暂时的堵塞，从而继续延伸。

Kiel 忽视了树枝状压裂的关键在于剪切。剪切使得平行于主裂缝的地应力减少到允许横向节理张开。尽管与 Kiel 的力学机理解释不一致，但计算结果的确证实了他的假设，即在一定的条件下发生树枝状压裂。这些条件就是：大多数节理并不平行于主地应力，并且在节理内的流速和流体粘度都比较低，剪切扩张仍足以允许流体通过，而不产生很大的压力梯度。

五、结 论

地震监测提供了一个新的水力压裂情况，这种情况在本文所谈的如此深的井中用任何别的方法无法得到。本文中报道的地震观察结果与英国和一些岩石力学实验室提供的观察结果相符。这表明：当把低粘流体以低速注入节理性岩层时，剪切滑动引起多节理破裂，而不象传统理论所说的产生单个裂缝的张力破裂。一组岩石力学和流体力学模拟结果解释并证明了这些结果，这将促使人们进一步把树枝状压裂运用到那些节理与主应力不平行的地层中。

参 考 文 献

- Beeger, J.C. and Cook, N.G.W. Fundamentals of Rock Mechanics 3rd Ed., Chapman and Hall, London (1978).
- Lockner, D. and Byerlee, J.D. Hydrofracture in Heber sandstone at high confining pressure and differential stress J. Geophys. Res., 82, 2018-2026 (1977).
- Hast, N. "Limits of stress measurements in the earth's crust", Rock Mechanics, 11, 140-150 (1979).
- Solberg, P., Lockner, D., and Byerlee, J.D. "Hydraulic fracturing in granite under geothermal conditions", Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr., 17, 25-33 (1980).
- Barton, N.R., Bandis, S. and Bakhtar, K. "Strength, Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joints," Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 1985.
- Perkins, T.K. and Kern, L.R. "Widths of Hydraulic Fracture," J. Petr. Tech., 937-947, (Sept. 1961).
- Daneshy, A.A. "On the design of vertical hydraulic fractures." J. Petr. Tech., 83-97, (Jan. 1975).
- Dash, Z.V., Murphy, H.O., Aamodt, R.L., Aguilar, R.G., Brown, D.W., Counce, D.A., Fisher, H.N., Grigsby, C.O., Keppler, H., Laughlin, A.W., Potter, R.M., Tester, J.W., Trujillo, P.E. and Zylvoski, G.A., "Hot Dry Rock Geothermal Reservoir Testing: 1978 to 1980," J. Volcan. Geotherm. Res., 15, 59-99, (1983).
- House, L., Keppler, H. and Kaijeda, H. "Seismic Studies of a Massive Hydraulic Fracturing Experiment", Proc. of Geothermal Resources Council Annual Meeting, Kona, HA, (August 26-30, 1985)
- Dreesen, D.S. and Nicholson, R.W., "Well Completion and Operation for MHF of Fenton Hill HDR Well EE-2," Proc. of Geothermal Resources Council Annual Meeting, Kona, HA, (August 26-30, 1985).
- Hubbert, W.K. and Willis, D.G., "Mechanics of Hydraulic Fracturing," Trans. A.I.M.E., 210, 153-168, (1957).
- Brune, J.N., "Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes," J. Geophys. Res., 75, 4997-5009, (1970).
- Cundall, P.A. and Marti, J.M., "Computer Modeling of Jointed Rock Masses," Report H-78-4, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, (1978).
- Pine, R.J. and Batchelor, A.S., "Downward Growth of Hydraulic Stimulation by Shearing in Jointed Rock," Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., (1984).
- Kiel, O.M., "The Kiel Process - Reservoir Stimulation by Dendritic Fracturing," Paper SPE 6984, SPE-AIME 52nd conference, Denver, (1977).

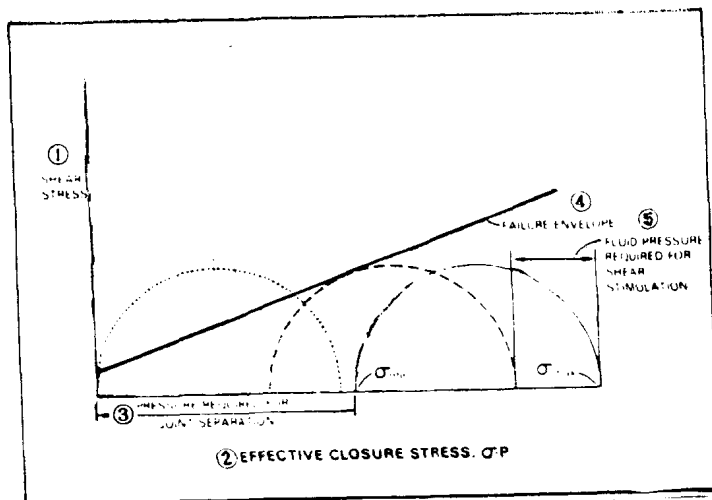


图 1 说明与节理分裂相比, 剪切压裂需要低流体压力的Mohr应力图

①剪切应力; ②有效闭合应力 σ_P ; ③产生节理分裂所需的压力; ④破坏线; ⑤产生剪切压裂所需的流体压力

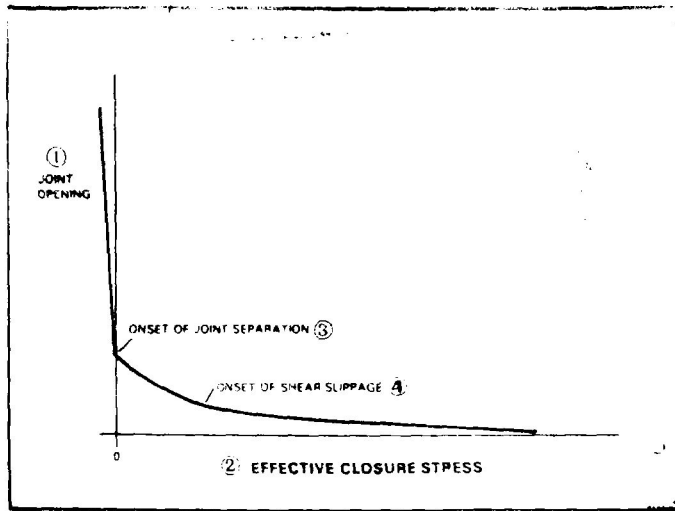


图 2 节理扩张特性

①节理张开度；②有效闭合应力；③节理开始分裂点；④开始剪切滑动点

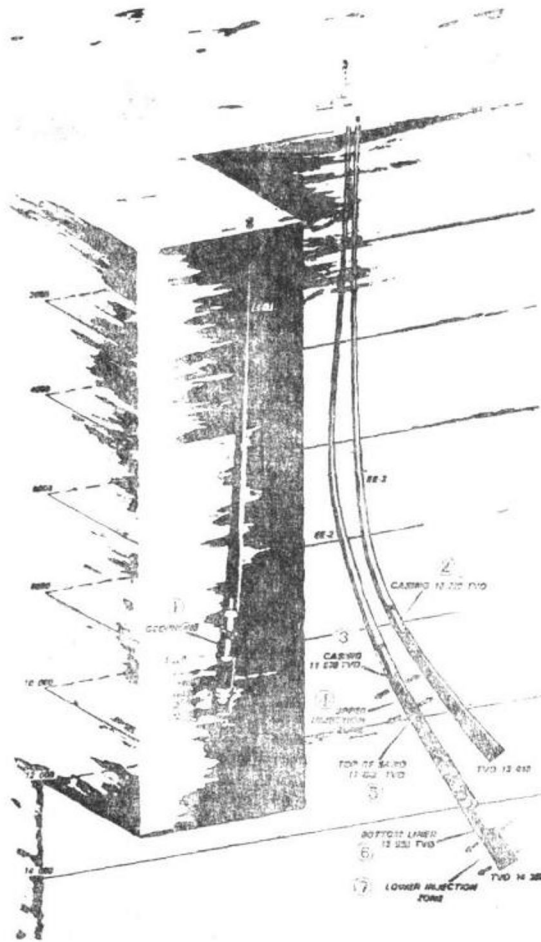


图 3 井的透视图和用于观测水力压裂引起的微地震的地震检波器

①地震检波器；②套管，真垂向井深10,250英尺；③套管，真垂向井深11,578英尺；④上注液层；⑤砂层顶部，真垂向井深11,820英尺；⑥尾管，真垂向井深13,578英尺；⑦下注液层

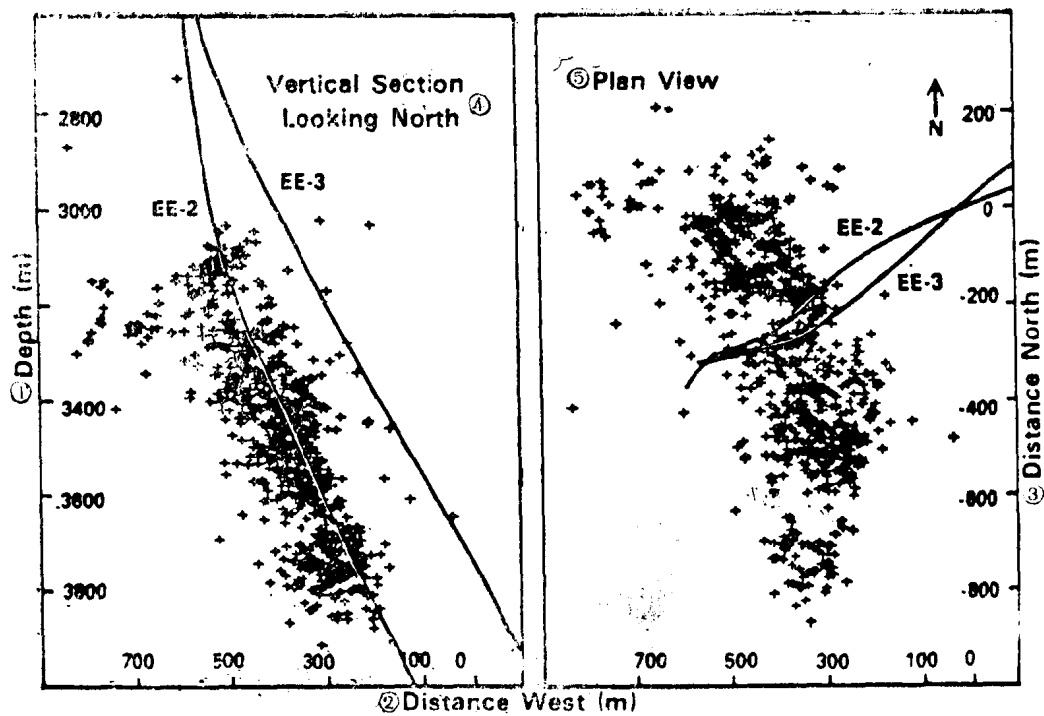


图 4 EE-2井巨型水力压裂引起的微地震的震源位置 (左边为正视图, 朝北; 右边为平视图, 朝下)
 ①深度,米; ②西侧距离,米; ③北侧距离,米; ④正视图; ⑤平视图

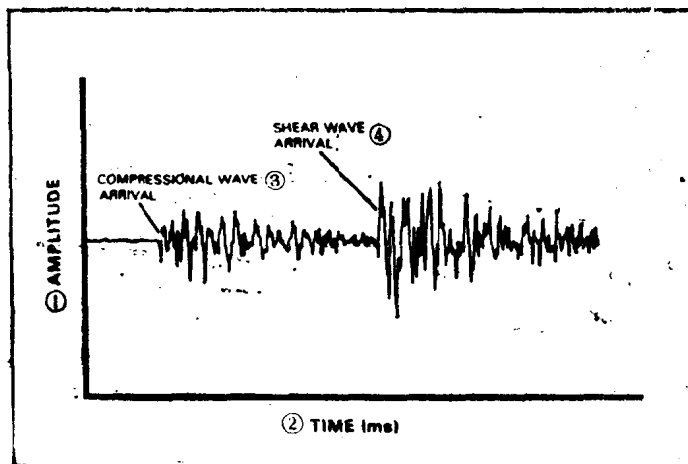


图 5 典型微地震地震波曲线
 ①振幅; ②时间,毫秒; ③压缩波至; ④剪切波至

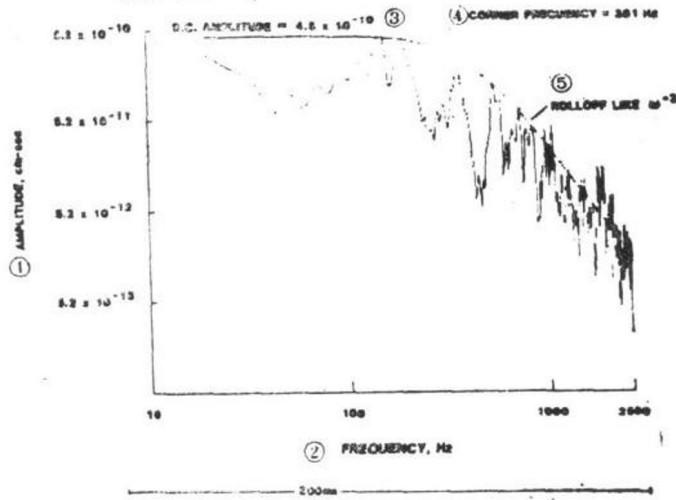


图 6 图5中的地震压缩波光谱 (时间: 1983年12月7日零点40分7秒, 光谱仪校正, $Q=1000$)

①振幅, 厘米-秒; ②频率, 赫兹; ③直流振幅= 4.5×10^{-10} ; ④角频率, 381赫兹; ⑤随频率的三次方下降

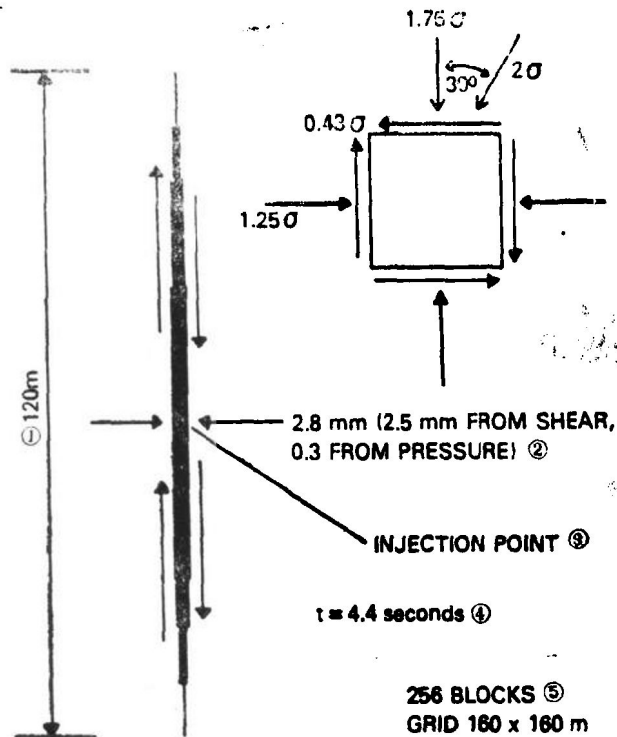


图 7 阻止剪切滑动的摩擦力较低或由于剪切滑动节理张开能力较高时, 剪切滑动引起的单个节理破裂

①120米; ②2.8毫米 (2.5毫米自剪切, 0.3毫米来自压力); ③注液点; ④ $t=4.4$ 秒; ⑤256单元, 网格为 160×160 米

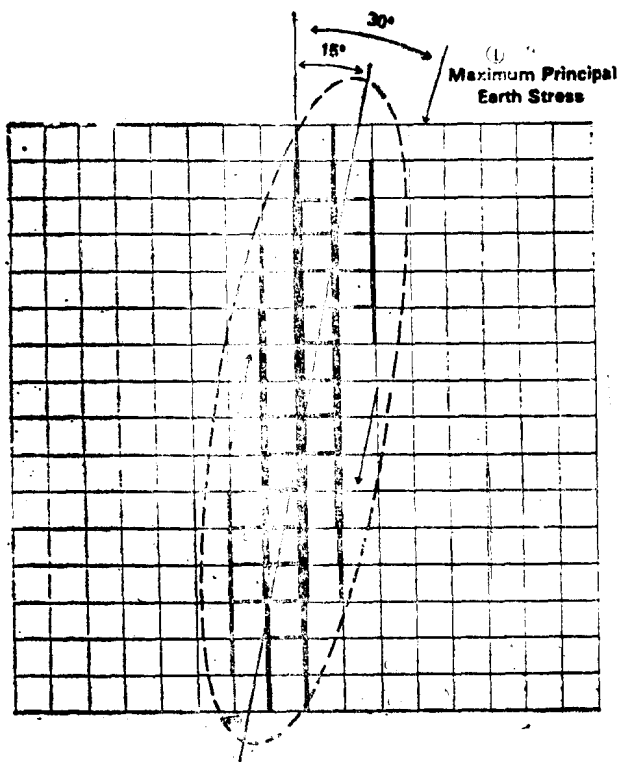


图 8 剪切阻力较高或剪切扩张度较低时发生的多节理剪切压裂
①最大主地应力

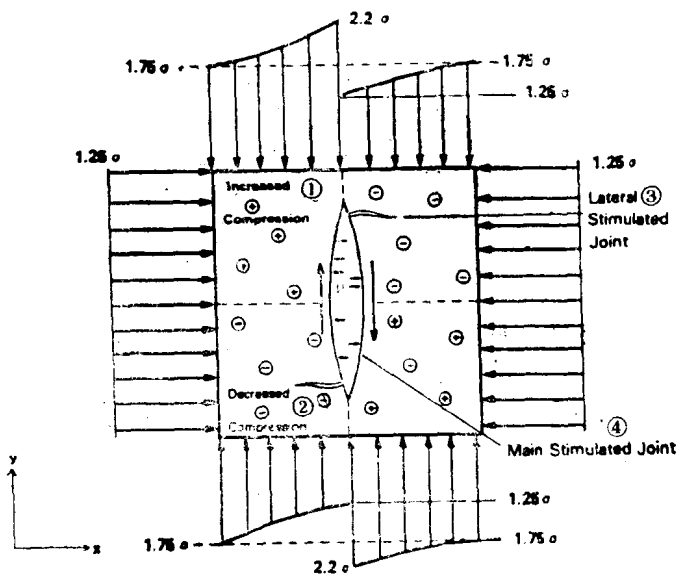


图 9 横向节理的破裂
①增压区；②减压区；③横向破裂的节理；④主破裂节理

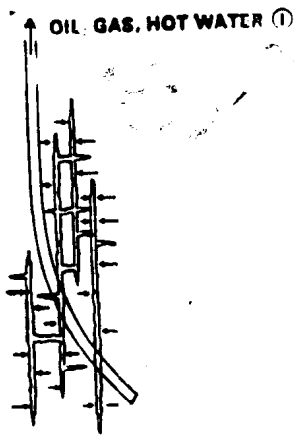
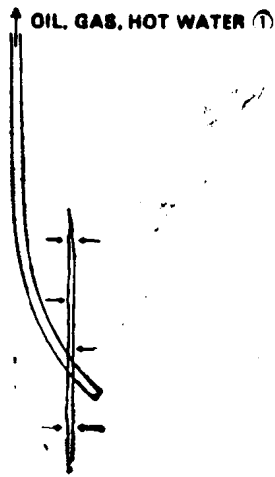


图 10 体积泄油比面积泄油更为有效

上图：传统压裂结果，面积泄油

①油、气、热水

下图：树枝状压裂结果，体积泄油

①油、气、热水