

定向射孔技术

定向射孔可以在压裂作业过程中减小流动限制并降低摩擦压力,因此可以形成较宽的裂缝,允许使用较大尺寸和较高浓度的支撑剂,再结合使用粘度比较低且损害比较小的压裂液,可以改善裂缝导流能力。在固结比较差且应力差异比较大的地层中,选择在适当方向上射孔可以最大限度地增加地层中射孔孔道的稳定性,从而减少出砂量。

Jim Almaguer
Jorge Manrique
Saliya Wickramasuriya
美国得克萨斯州 Sugar Land

Ali Habbtar
沙特国家石油公司
沙特阿拉伯 Udhailiyah

Jorge López-de-Cárdenas
得克萨斯州 Rosharon

David May
Amerada Hess 公司
苏格兰阿伯丁

Alan C. McNally
Dominion 勘探开采公司
美国俄克拉何马州俄克拉何马城

Arturo Sulbarán
委内瑞拉国家石油公司(PDVSA)
委内瑞拉加拉加斯

在编写本文过程中得到以下人员的帮助,谨表谢意:美国得克萨斯州 Rosharon 的 Brad Hoffman, George Spencer 和 Mark Vella; 得克萨斯州 Sugar Land 的 James Garner, Dwight Peters 和 Lee Ramsey; 委内瑞拉加拉加斯的 Dale Logan; 以及苏格兰阿伯丁的 Mark Norris。

在本文中, ClearFRAC, CoilFRAC, DSI(偶极横波声波成像仪), FMI(全井眼地层微成像仪), FracCADE, GVR(GeoVision 电阻率), HSD(高射孔密度射孔枪系统), OrientXact, PowerFlow, PowerJet, PowerSTIM, PropNET, SPAN(斯伦贝谢射孔分析), UBI(超声波井眼成像仪)和 USI(超声波成像仪)是斯伦贝谢公司的商标。

作业者使用各种射孔方法来解决与油藏增产和防砂等有关的问题,或是以此来实现其它完井目的。优化的相位角度、孔眼间距和射孔方向有助于更好地进行压裂作业,并尽可能减小由于射孔通道坍塌而造成出砂的可能性。

开采公司也使用定向射孔来防止对井下完井设备造成损害,修补套管外的水泥塞槽,在压力控制作业中建立与救援井之间的连通,并在大斜度井中避免挤坏套管。

作业者采用最先进的地层评价和解释方法来进行综合油藏描述,以确保射孔作业取得成功。他们还利用在测井仪器、油管输送射孔(TCP)以及电缆系统等方面出现的新进展,来实现在特定方向上准确的定向射孔。

在优化增产处理作业的过程中,使用定向射孔技术可以提高开采作业的效率,减小处理作业失败的可能性并改善压裂效果。完井工程师还可制订相应的定向射孔方案,让射孔孔眼穿过天然裂缝或是穿过具有最小地层损害的井眼区域来实现防砂,并提高井的产能。

上覆岩层的最大和最小水平应力以及垂直应力决定了油气藏中的原地应力条件。水力压裂裂缝沿择优裂缝面(PFP)开始并向外传播,即沿阻力最小的路径传播,最小阻力是由于地层应力的方向和幅度的差异造成的。在大多数情况下,垂直方向的应力最大,因此PFP是垂直的,其方向沿着下一个最大应力(即最大水平应力)的方向。

在水力压裂处理过程中,如果射孔孔眼与最大应力方向不一致,则在近井眼处往往会产生复杂的流动路径。压裂液和支撑剂必须离开井眼,然后进入地层,并与PFP方向一致。这一“曲折路径”会引起额外的摩擦力和压降,从而增加泵送马力并限制裂缝的宽度,由于支撑剂桥堵而造成过早脱砂,使增产处理效果不佳。

定向射孔可以让完井工程师和开采公司集中精力设计增产作业和处理方法,从而优化裂缝的形成、传播、支撑剂的置入以及最终的裂缝几何形态(包括宽度、长度、高度和导流能力等),而不只是考虑近井眼处流体的流动。



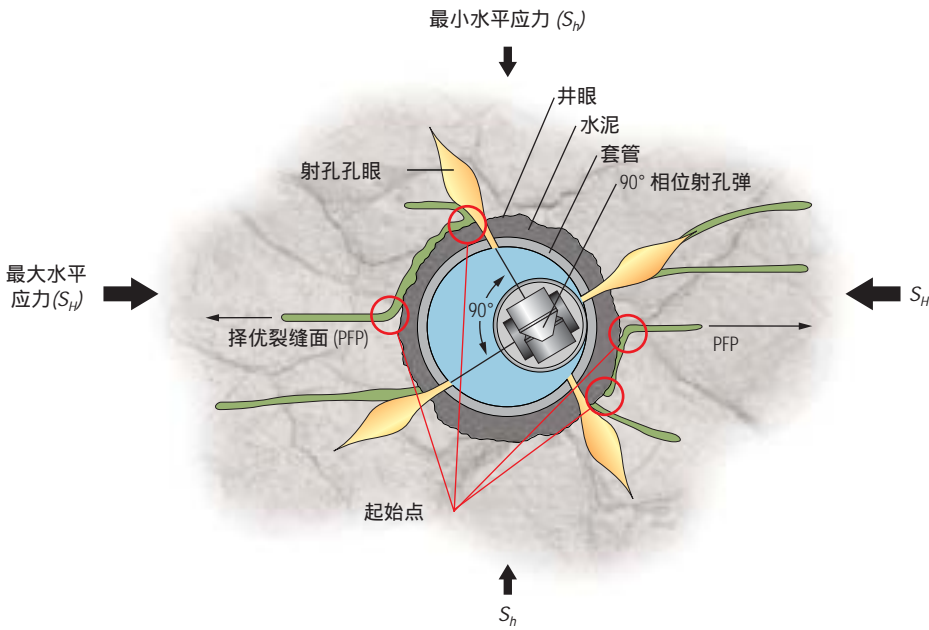
在某些固结比较弱的地层或是垂直与水平应力差异比较大的致密岩层中，射孔孔眼处地层的破裂可以引起出砂。此外，随着流体的采出以及孔隙压力的降低，储藏岩石必须支撑更大的上覆压力，因此，在地层压缩的过程中射孔孔道可能会破裂。沿应力差异最小的方向进行定向射孔可以减小压降，改变流动形态，在井眼周围形成更均匀的应力分布，从而可以减轻出砂。

在垂直井中，可以在任何方向上进行射孔，但基本上都是沿着水平方向。在大斜度井和水平井或是穿过很陡地层的垂直井中，目的层处射孔孔眼的方向可以是多样的，这取决于井眼的倾斜角和地层倾角。

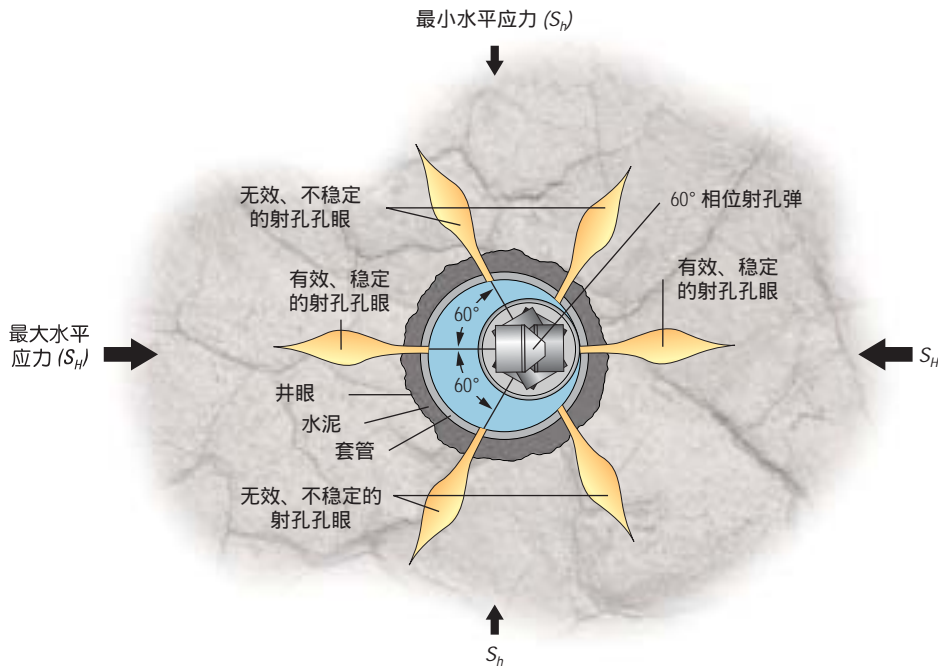
水平井中高端的射孔孔眼通常比较稳定，不大可能破裂或是被碎屑封堵。射孔孔眼的方向可以稍微偏离垂直方向，以优化射孔密度和间距，从而提高产能，减小压降并降低出砂量。出于同

样的原因，垂直井中射孔孔眼的方向也可以偏离 PFP 几度。

本文回顾了确定地层应力方向的方法，讨论了定向射孔中的 TCP 和电缆系统。在北美、北海、南美以及中东等地的实际应用表明，定向射孔在提高产量和防砂等方面取得了很好的效果。此外，还讨论了设备方面的进展以及促进开发新系统以提高射孔能力、缩短水力压裂作业或无筛管完井作业周期的因素等。



▲ 增产处理作业中要考虑的因素。如果射孔孔眼与择优裂缝面 (PFP) 或最大水平应力 (S_H) 不一致, 则在井眼周围许多随机点上会开始形成裂缝, 其结果会形成复杂的流动路径(或称曲折路径), 在水力压裂处理过程中会增加地层破裂压力和流体摩擦压力。靠近 PFP (最小阻力路径) 的射孔孔眼减小或消除了近井眼的阻碍。在与最小水平应力 (S_h) 垂直的方向上进行定向射孔, 对于优化增产作业和定向压裂作业而言十分重要。



▲ 防砂过程中要考虑的因素。在固结比较弱的地层以及由于复杂构造环境产生比较大的应力差异的地层中, 在井眼周围稳定区域沿最小应力平面进行定向射孔有助于减小或消除孔眼破裂和出砂。定向射孔可以最大限度提高射孔孔道的稳定性, 在无筛管防砂完井中起着关键的作用。

地应力

从岩石力学原理上讲, 我们知道水力压裂裂缝沿最大水平应力 (S_H) 方向传播。当射孔孔眼与最大应力不一致时, 裂缝从孔道底部或套管和水泥环的顶端传播, 在地层中又与 PFP 一致。重新改变方向会产生复杂的近井眼流动路径, 包括多个裂缝形成点, 某些裂缝可能延伸更远, 裂缝翼弯曲或与井眼和孔眼方向很不一致 (左图) 等。

在实验室进行的试验表明, 在固结比较弱的油藏或是应力差异比较大的地层中, 射孔孔道的破裂会造成出砂。^[1] 各种因素都可能引起出砂, 包括岩石强度、地层应力的方向和大小、流量的变化、压降或油藏衰竭造成的应力增加以及水的侵入等等。与最大地层应力相一致的射孔孔眼比井眼周围其它方向上的射孔孔眼更稳定 (左下图)。

通过确定原地应力的大小和方向, 完井工程师可以设计出优化的射孔方案, 沿优先裂缝传播方向进行定向压裂作业。在无筛管完井中, 主要是选择井眼周围具有较低应力差异的地层区域, 从而预防或延迟出砂。确定应力大小和方位的方法包括使用现有的岩石数据, 对井眼成像测井资料进行解释, 建立地质力学模型, 进行垂直地震剖面 (VSP) 测量 (参见“随钻地震测量”, 第 32 页)。

在交叉偶极模式下，DSI 通过探测横波的各向异性来确定 PFP 方位，各向异性通常是由最大和最小水平应力之间的差异引起的。声波各向异性可能是固有的，或者是由应力引起的。固有各向异性可能是由层理、微构造或天然裂缝等引起。应力诱发的各向异性是由于沉积条件和构造作用力引起的。井眼成像测井有助于区分固有和应力诱发的各向异性。^[3]

在导电性水基流体中，FMI 全井眼地层微成像仪对井壁进行环形电成像，提供定量分析裂缝的信息。工程师利用该仪器可以观察钻井诱发的裂缝和井眼破裂，并确定其方位（右图）。该 FMI 测井图表明，在图像的上部存在井眼破裂，在下部有钻井诱发的裂缝。^[4]

与 FMI 仪器一样，UBI 超声井眼成像仪提供环形井眼的图像。然而，由于该仪器给出的是声波而不是电图像，因此 UBI 仪器可以在非导电油基泥浆流体中进行测量，以描述钻井诱发的裂缝和井眼破裂情况（右下图）。定向四臂井径测量也提供井眼破裂方面的指示，但不能像 DSI、FMI 和 UBI 测井仪器那样提供环形井眼覆盖。GVR GeoVision 电阻率仪器可以在导电性流体中提供完整的随钻环形井眼电阻率图像。^[5]

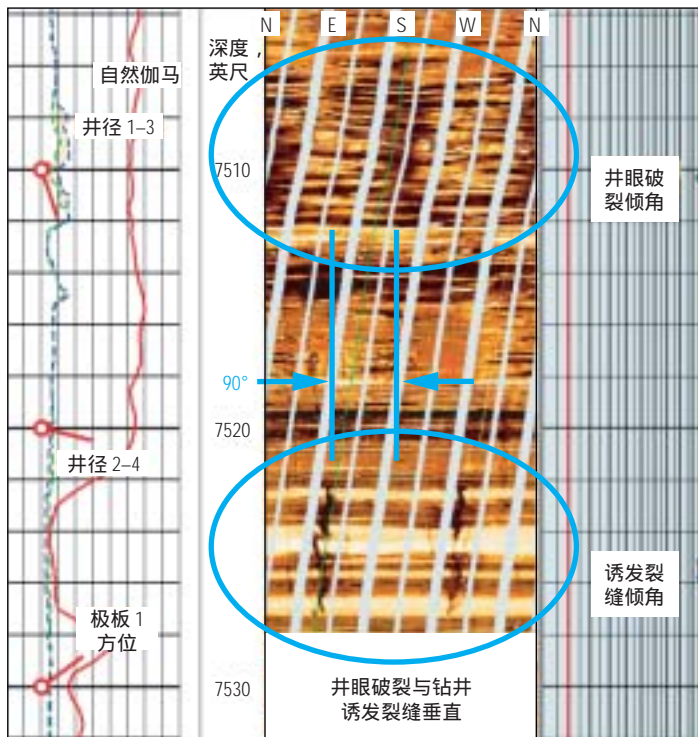
3. Armstrong P, Jreson D, Chmela B, Dodds K, Esmer soy C, Miller D, Hornby B, Sayers C, Schoenberg M, Leaney S 和 Lynn H: "The Promise of Elastic Anisotropy", 《油田新技术》, 6 卷, 第 4 期(1994 年 10 月): 36-47。

4. Serra O: *Formation MicroScanner Image Interpretation*, S M P 7028。美国得克萨斯州休斯敦: Schlumberger Educational Services, 1989 年。

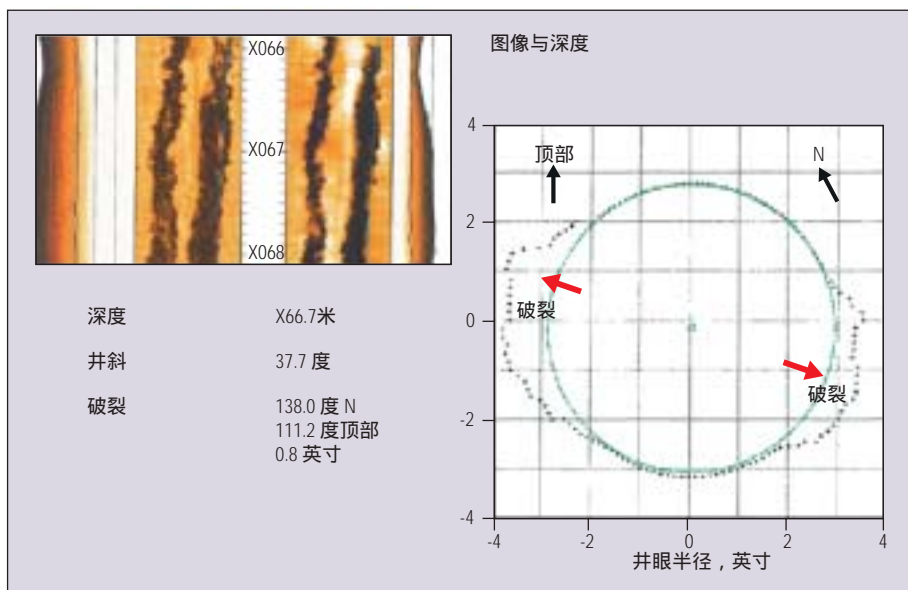
Peterson R, Warpinski N, Lorenz J, Garber M, Wolhart S 和 Steiger R: "Assessment of the Mounds Drill Cuttings Injection Disposal Domain", SPE 71378, 发表在 SPE 技术年会和展览会, 美国路易斯安那州新奥尔良, 2001 年 9 月 30 日-10 月 3 日。

5. Bonner S, Bagersh A, Clark B, Dajee G, Dennison M, Hall JS, Jundt J, Lovell J, Rosthal R 和 Allen D: "A New Generation of Electrode Resistivity Measurements for Formation Evaluation While Drilling", *SPWLA 第 35 届测井年会文集*, 美国俄克拉何马州 Tulsa, 1994 年 6 月 19-21 日, 00 篇。

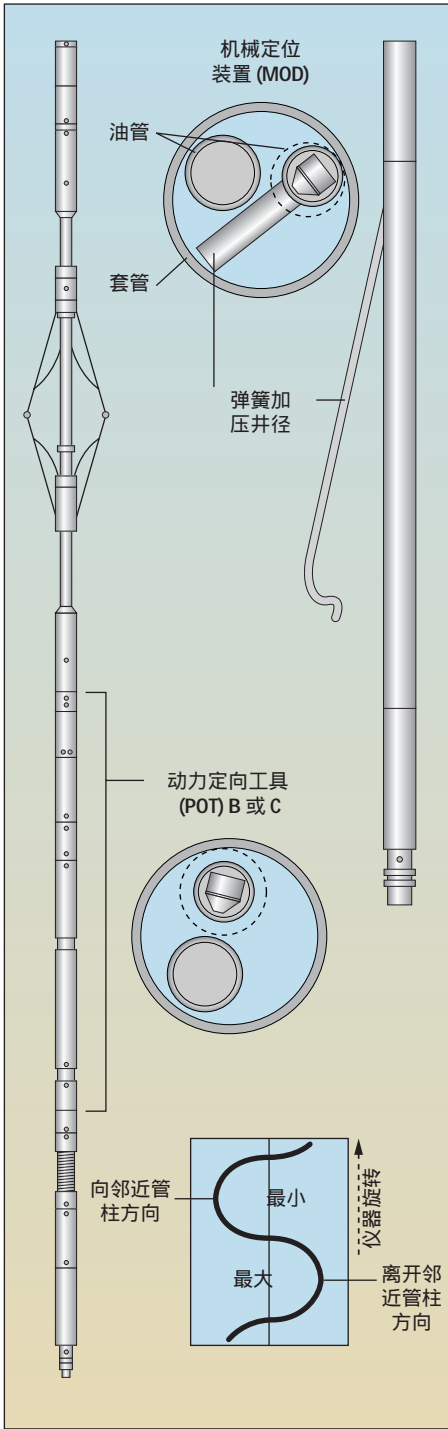
Bonner S, Fredette M, Lovell J, Montaron B, Rosthal R, Tabanou J, Wu P, Clark B, Mills R 和 Williams R: "Resistivity While Drilling — Images from the String", 《油田新技术》, 8 卷, 第 1 期(1996 年春季刊): 4-19。



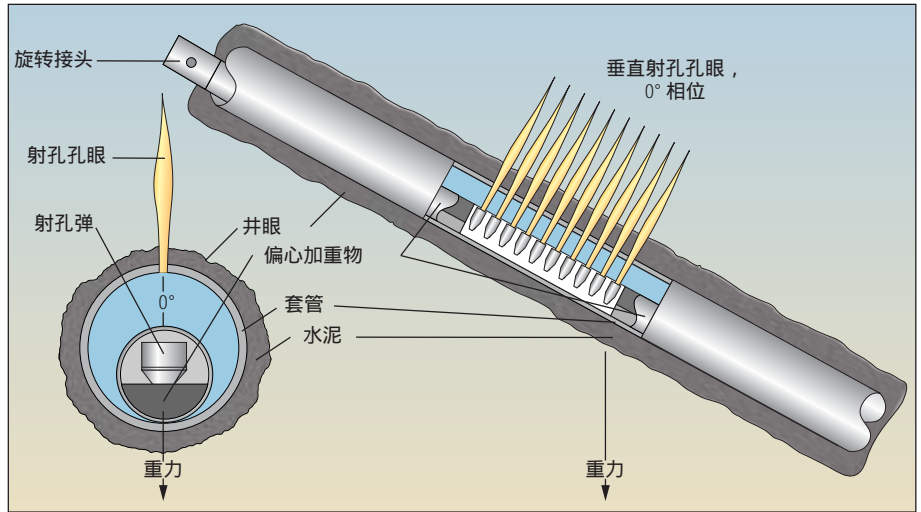
▲ 微电阻率成像。在导电性水基钻井液中，工程师使用 FMI 全井眼地层微成像仪图像来确定井眼变形(如破裂和诱发裂缝)的方位。该 FMI 测井实例表明了这两种情况产生的异常，显示为低电阻率或深褐色特征。上部表示的是南-北方位的井眼破裂，下部表示的是东-西方位的钻井诱发裂缝。正如预计的那样，这两者之间相差 90°。



▲ 声波成像。在非导电性油基钻井液中，UBI 超声井眼成像仪通过测量脉冲回波反射来提供高分辨率井眼尺寸和形状的图像（左）。井壁上挤压引起的破裂会在最小应力方向上形成椭圆井眼，即与最大垂直应力方向和择优裂缝面垂直的方向（右）。



定向技术。研制出的机械定向装置 (MOD) 和动力定向工具 (POT) 用于在双油管柱或多油管柱的井中进行射孔。作业者使用这些工具来确保下入某一油管柱内的射孔枪不会射穿井眼中的其它生产管柱。



重力定向。电缆、油管以及连续油管输送射孔的被动定向使用偏心的加重物，结合冲击转换和油管旋转接头，依靠重力将射孔枪定位在井眼低端。该技术需要对井的方向进行测量。

定向射孔

定向射孔首先在具有双油管柱或多油管柱的井中得到了应用。开发出的专用工具可以确保下入某一油管柱内的射孔枪不会射穿井眼中的其它生产管柱。直到最近，这些类型井中的电缆射孔方法还局限于斯伦贝谢的机械定向装置 (MOD) 和动力定向装置 (POT) 等系统。

就 MOD 系统而言，射孔时最好使用弹簧加压井径仪测量套管内径 (ID)。POT 系统是由马达提供动力的系统，随着射孔枪的旋转，传感器可实时提供数据。射孔弹的方向与井径仪呈 180°，或与某一特定传感器方向一致 (左图)。POT-B 包括一个屏蔽的伽马射线探测器，以确定与其它油管柱同时下入的放射源的位置。POT-C 利用电磁原理探测油管或套管柱附近的金属。开发 POT-C 的主要目的是探测单一裸眼井水泥胶结的邻近完井管柱的情况，但在具有两个油管柱的套管内也得到了成功的应用。

以前，作业者经常使用油管输送系统进行定向射孔。然而，与电缆输送相比，这些作业更复杂，且费用更高，尤

其在垂直井中，目的层段相对较短，射孔是在井眼静水条件与地层压力一样时进行的。对于大斜度井和水平井，电缆、油管和连续油管输送被动定向射孔系统使用偏心加重物和旋转接头将射孔枪对准井眼的低端，射孔弹朝上 (上图)。

新的技术可以在倾斜井眼中的长层段上准确地定位 TCP 射孔枪。该 OrientXact 系统包括被动定向加重物和枪体部分，通过滚柱轴承旋转接头进行连接。该系统可对超过 1000 英尺 (300 米) 的枪体部分进行定向，定向精度在预定方向的 10 度以内。新型的定向确认装置 (OCD) 可以以 1° 的精确度测量和记录射孔方向，可以在收回射孔枪后提供有关射孔方位的宝贵信息。

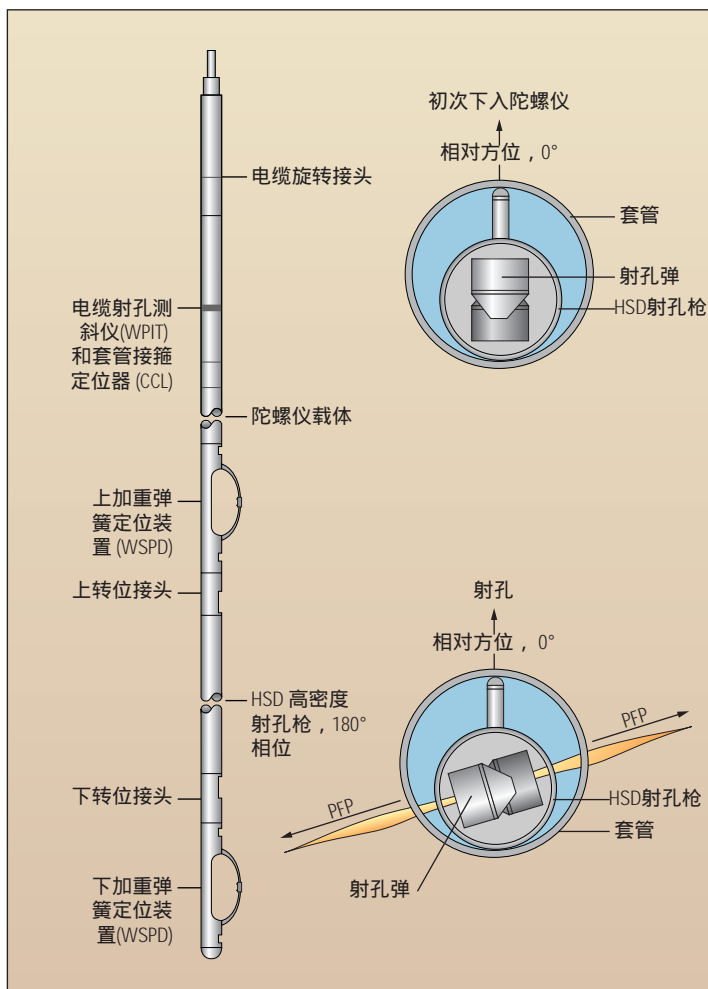
在垂直井中，TCP 使用陀螺仪而不是重力被动定位进行定向射孔。陀螺仪通过电缆下入油管，并坐落在定向剖面上。在地面将油管柱旋转到所需位置，并下入水力封隔器，以避免过多的旋转。在取出射孔枪之前，使用陀螺仪对射孔枪方位进行验证，以预防射孔冲击造成的损害。

当不知道应力方向或是不可能进行定向射孔时,使用高密度射孔枪和60°或120°相位有助于确保至少某些孔眼会落在最大应力方向的25到30°范围以内。然而,这一随机方法需要更多的聚能射孔弹,而且不能确保射孔孔眼与

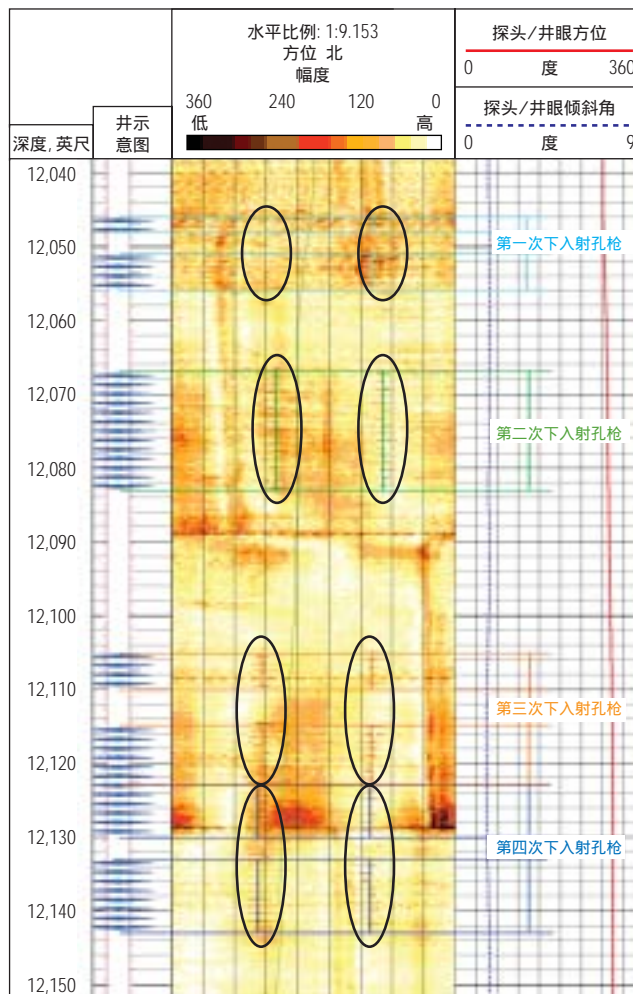
PFP或最小应力差异十分一致。

斯伦贝谢的电缆定向射孔仪(WOPT)可以在直井和斜井中使用,是定向电缆射孔最新的技术(左下图)。WOPT最初主要是用来进行定向压裂,还可以用来进行防砂射孔。该仪器在预

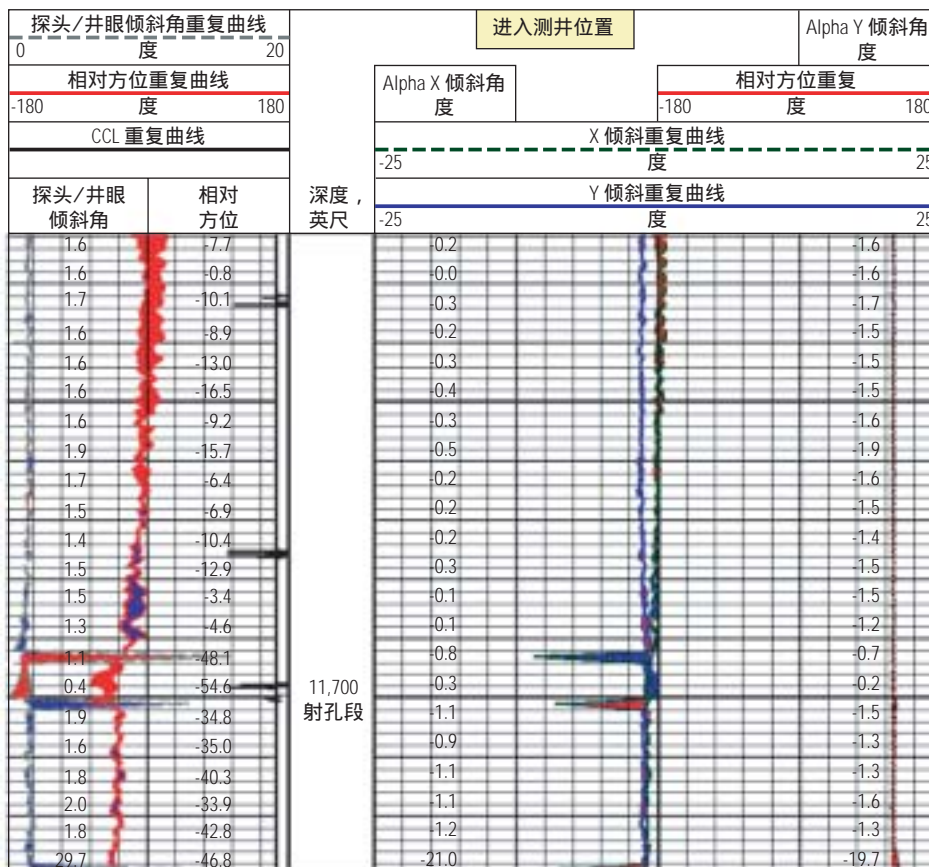
先确定的方向上用0°,180°或其它优化相位角度对HSD高密度射孔枪进行定位。射孔弹类型和射孔密度取决于完井要求,如控砂和防砂,还取决于压裂设计标准,如支撑剂尺寸,泵速,处理压力以及所需的生产流量等。^[6]



▲ 电缆定向射孔。典型的电缆定向射孔仪(WOPT)系统在标准的0°或180°相位射孔枪之上下配置有加重弹簧定位装置(WSPD)和转位接头(左)。仪器串包括陀螺仪,带有套管接箍定位器(CCL)的电缆射孔测斜仪(WPIT),以及电缆转换接头以消除电缆扭矩对仪器的影响。在最初下入空枪时,陀螺仪测量井斜角,井眼方位以及工具面相对于真北方向的方位(右上)。根据需要,可在不使用陀螺仪时,或是在地面旋转射孔枪或对其进行重新转位后进行射孔作业(右下)。WPIT始终保持在仪器串上,以单独测量仪器倾斜角和工具面相对方位,并确认仪器串会重复以前确定的方位。



▲ 验证射孔方位。射孔后,可以进行定向USI超声成像测井,以证实射孔孔眼在正确的位置上。在该USI图像中,由于测量比例的原因,射孔孔眼显示为很细的线(第3道)。所需的射孔深度显示在第2道井示意图上。使用180°相位和两孔/英尺(spf)的射孔密度在该井中四次下入射孔枪进行了射孔,共射了118个孔,方位在东北-西南方向。井斜角约为1.7°,以前在井斜角低至0.3°的井中成功地使用了WOPT。



▲ 验证射孔枪方位。在地面对射孔枪进行定位后，在不使用陀螺仪的情况下将 WOPT 系统下入井中。WPIT 保持在仪器串上，以记录实时的重复分析测量资料。如果后来测得的工具面相对方位（第 1 道）与第一次的一样，则说明仪器串正在重复以前确定的自然方位。如果由于井眼倾斜角太小而无法确定相对方位，则使用倾斜信号（第 3 道）。当仪器串方位不能重复时，则将射孔枪提出井眼并重新标定方位。

该方法是以如下事实为依据的，即在给定的深度上，当仪器串的参数（长度、重量、质量分布、电缆速度和方向）为常量时，电缆仪器在井眼中总是趋向于在某一特定的方位。旋转接头消除了电缆与射孔枪之间转距的影响，从而使仪器处于自然的位置上。该“自然位置”上观察到的重复性在研制 WOPT 仪器时是十分关键的。对于井斜仪小于 8° 的垂直井来说，WOPT 需要下入两次。在井斜角小于 1° 的井中进行射孔作业时需要格外小心，而且可能需要更多的时间才能完成射孔作业。

第一次下入的是空枪，包括使用陀螺仪来确定仪器串的自然方位（工具面方位和方向）。上、下加重弹簧定位装置（WSPD）有助于将仪器串向着井眼的低端旋转。

在每个方向上重复几次可以确保得到准确的方位数据，从而确定所需的射孔枪旋转角度，或称“转位角”以实施定向射孔。首次下入时，可以对单个层或多个层进行绘图。电缆射孔测斜仪（WPIT）是 WOPT 的组成部分，可以连续实时地测量仪器的倾斜角和工具面的方位，即相对于井眼高端的方位。

如果可以得到定向测量数据，而且目标层段也位于井斜角大于 8° 的井段内，则可以在不下入陀螺仪的情况下完成定向射孔。在这种情况下，井斜角测量结果十分准确，与井眼方位对比相当好。在确定了工具面方位后，使用射孔枪之上、下的转位接头，在地面以 5° 的增量来人工旋转射孔枪，使射孔弹对准所需方向。在射孔前将陀螺仪去掉，以避免射孔过程中的冲击损害。带有虚拟

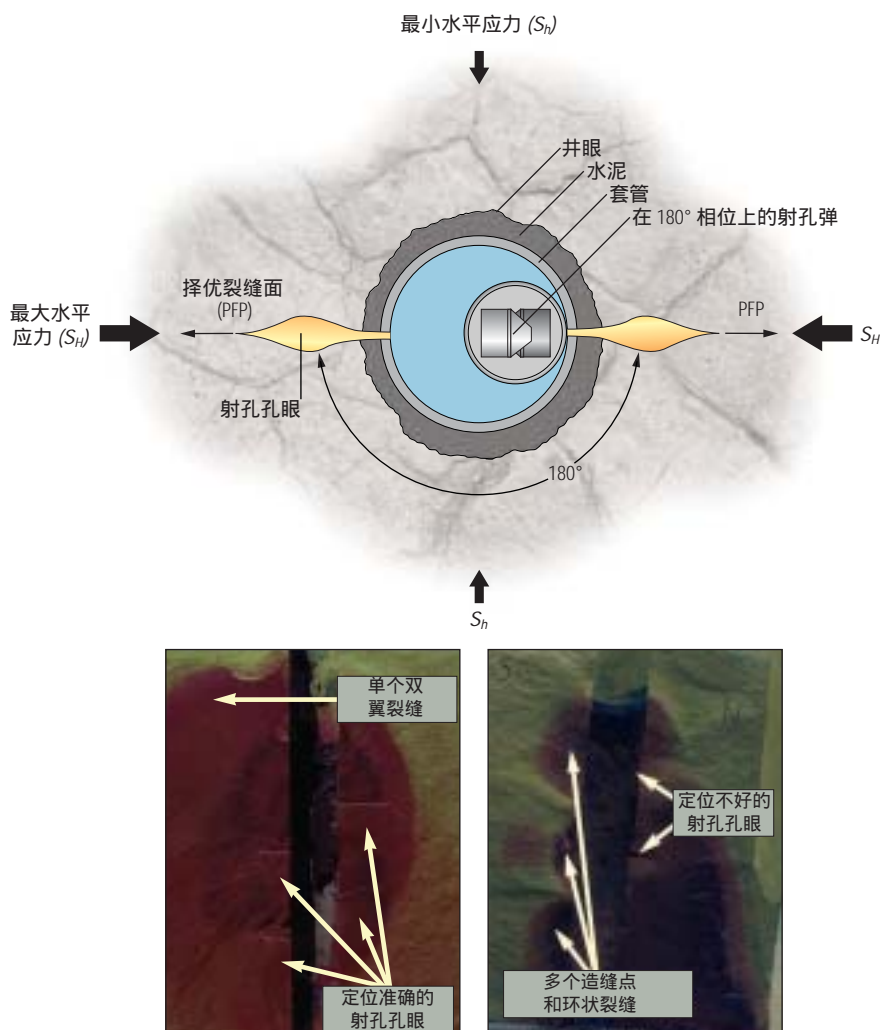
陀螺仪的载体和 WPIT 保持在 WOPT 系统上以维持仪器串的长度和质量。

然后，将 WOPT 射孔系统再次下入井中。由 WPIT 得到的相对相位数据可以验证仪器方位的重复性。一旦由重复分析测井资料验证了射孔枪的方位和深度后，可以开始射孔作业（上图）。WOPT 系统的定位精度在所需方位的 5° 以内。由于需要保持仪器串的参数不变，WOPT 系统目前的局限在于不能在一次下入过程中选择性地引爆一个以上的射孔枪。在垂直井中，射孔后的射孔枪会改变以前确定的仪器的自然方位。

作业者进行了 USI 超声成像仪测量，来证实射孔孔眼与所需的方向是完全一致的（前一页，右图）。射孔后进

6. Venkitaraman 等，参考文献 1。

Behrmann LA 和 Nolte KG：“Perforating Requirements for Fracture Stimulation”，SPE 39453，发表在 SPE 地层损害控制国际会议，美国路易斯安那州 Lafayette，1998 年 2 月 18-19 日。



▲ 优化水力压裂作业。在最大水平应力方向上进行定向射孔可以提高油藏增产处理作业的效率 and 效果。与 PFP 一致的射孔孔眼可以降低或消除近井眼的曲折流动路径或流动限制 (上)。在实验室对三轴应力下地层中的造缝情况进行了全比例实验测试, 结果表明, 在 PFP 方向上的射孔孔眼形成了单翼或双翼的裂缝, 具有最小的曲折度和降低的注入压力 (左下)。在相同的实验中, 定位不好的射孔孔眼在井眼半径的不同点上形成了多个裂缝, 并在水泥-地层界面周围传播 (右下)。

行的测量表明, 射孔孔眼在所要求方位的 10° 以内。WOPT 系统在倾斜角从 0.3° 到 58° 的井中成功地进行了射孔作业。作业者认识到定向射孔可以改善水力压裂效率和效果, 但在引入 WOPT 系统之前他们认为使用定向射孔方法是不切合实际的。^[7]

水力压裂

射孔作业非常重要, 但在水力压裂和酸化处理作业中常常被忽视。井眼尺

寸、射孔密度、穿透深度、射孔枪相位以及射孔方位等都是很重要的参数。忽视其中的任何一个参数都有可能导致脱砂, 对长期开采极为不利, 增加额外的钻机时间和设备来清洗井眼, 浪费昂贵的增产处理液和支撑剂, 从而增加完井成本。过早脱砂通常导致增产效果下降, 还有可能使未来的重新压裂作业更加困难。

无论是哪种情况, 生产情况通常不如预期的好, 主要是由于层段覆盖不完

整、裂缝长度较小以及裂缝传导能力差等原因造成的。为了更好地解决定位不好的射孔孔眼的摩擦压力以及近井眼流动阻碍等问题, 作业者常常通过提高泵速和压力, 使用损害性更大的压裂液, 增产作业前采用酸进行分解, 重新射孔以及在处理作业早期泵入支撑剂段塞等来消除阻碍。所有这些方法都会增加额外的费用, 而且根据现有井眼和地层条件情况的不同, 其最终效果如何也是一个问题。

地层应力控制着水力压裂裂缝的形成和传播。沿最大应力方向的射孔孔眼可以与水力压裂裂缝更好地连通,并且允许流体直接沿阻力最小的路径流动,因此可以优化压裂效果(前一页)。^[8]如果射孔孔眼在应力场中的方位不佳,曲折的流动路径会在泵送作业过程中增加形成裂缝所需的压力和流体摩擦压力。这些损耗会分散水力能量,从而限制了裂缝的几何形态并增加泵送增产处理液所需的动力。其结果可能会造成过早脱砂,降低支撑剂最终的浓度和体积,并且增加作业成本。

定向射孔和压力作业可以尽量减小或消除近井眼的压力损耗。压裂作业的设计和实施有助于形成宽大且导流能力好的裂缝,并且在近井眼区域有效输送支撑剂而不是流体流动。^[9]这也允许完井工程师设计更为大胆的压裂计划,即采用更高浓度和更大尺寸的支撑剂以及粘度更小的无损害压裂液(如ClearFRAC粘弹性体系),以改善裂缝导流能力和油井的产能。

当作业受到压力或泵速等的限制以及受到对压裂液和支撑剂体积的限制时,定向射孔还有助于优化增产处理作业。这些应用包括在具有较小尺寸油管以及连续油管输送CoilFRAC选择性增产作业的井中的应用。^[10]

定向射孔不但可以为利用连续油管进行压裂提供新的机会,而且还不需要把油管泵下和保护套管免受过大的注入压力,尤其是在由于高破裂压力而难于处理的地层中。在某些情况下,较低的裂缝形成压力和裂缝传播压力使得将套管泵下成为可能,通过采用高质量、高强度的油管可以降低压裂作业的成本和复杂性。

在2000年3月,Louis Dreyfus天然气公司(即现在的Dominion勘探开采公司)在美国新墨西哥州东南部钻了ETA-4井(右上图)。没有获得可用的压力数据,但在邻井中测量到了2000psi(13.8MPa)的井底压力。利用电缆测井资料在Morrow地层中识别出了一个厚度为10英尺(3米)的高质量均质层,孔隙度约为14%,

含水饱和度为20%。旋转井壁取心证实了这些数值。这样的层应该可以进行自然开采,但高渗透率和低压力使得地层容易受到钻井液和完井液损害的影响。电阻率曲线之间的离差比较大,说明侵入比较深,因此作业者希望进行压裂增产作业来消除损害的影响。^[11]

起初在该地层中使用水基流体进行了压裂增产作业,效果不是很好,因为这些含气砂岩的压力低,而且可能对水比较敏感,渗透率的变化范围很大。如果可能,都进行自然完井,不进行任何增产处理,但对于油藏中的低渗透率区域应进行水力压裂,效果通常也都一般。作业者对Morrow地层的增产处理进行了认真分析。为了解决水敏感问题并避免脱砂,采用了具有低支撑剂浓度的粘性较低的泡沫流体,从而得到窄的低导流能力裂缝。

研究结果表明,造成效果差的原因是水敏粘土和毛细管压力作用的结果,因为当地层暴露于压裂液时,这些影响会降低渗透率。低的油藏压力会加大毛细管的影响。通过泵入氮(N₂),或二氧化碳(CO₂)增能处理以及在压裂液中使用甲醇可以解决这些问题。然而,使用泡沫系统的增产处理作业效果不一。在较高渗透率地层中,使用泡沫的小型压裂处理能有效避开近井眼的损害,但在较低渗透率的地层中,裂缝长度对于优化产能是关键,使用泡沫系统得到的结果也不一致。

这些处理作业解决了水敏的问题,但高摩擦压力和对化学剂的要求会增加成本,并增加脱砂的可能性。较低的支撑剂浓度和频繁过早脱砂使得井的产能大大低于其最大潜在产能。需要制订能够产生适当宽度的水力裂缝,同时又能够携带较高浓度和较大体积支撑剂的压裂作业,以最大限度地提高产量。

两年前完井的ETA-3井的油藏质量与ETA-4井类似,但其产层厚度仅为后者的一半。使用4英寸传送管射孔枪对这一邻井进行了常规射孔,射孔密度为4孔/英尺(spfi),相位为60°,利用CO₂泡沫和高强度人造陶瓷支撑剂沿5英寸



▲Morrow压裂增产处理。在美国新墨西哥州东南部的Morrow含气砂岩储藏中尝试了多种不同的完井和压裂方案。

套管对地层进行压裂增产处理。地面处理压力为5000psi(34.4MPa),最大支撑剂浓度为4ppa。在作业临近结束时增加压力表明有可能脱砂。增产处理后的产量稳定在170万立方英尺/日(4.87万立方米/日),油管流压(FTP)为500psi(3.4MPa)。

7. Pearson CM, Bond AJ, Eck ME 和 Schmidt JH: "Results of Stress-Oriented and Aligned Perforating in Fracturing Deviated Wells", SPE 22836, 发表在SPE技术年会和展览会,美国得克萨斯州达拉斯,1992年10月6-9日。

Pospisl G, Carpenter CC 和 Pearson CM: "Impacts of Oriented Perforating on Fracture Stimulation Treatments: Kuparuk River Field, Alaska", SPE 29645, 发表在SPE西部地区会议,美国加利福尼亚州Bakersfield,1995年3月8-10日。

8. Behrmann 和 Nolte, 参考文献6。

9. Nelson DG, Klins MA, Manrique JF, Dozier GC 和 Minner WA: "Optimizing Hydraulic Fracture Design in the Diatomite Formation Lost Hills Field", SPE 36474, 发表在SPE技术年会和展览会,美国科罗拉多州丹佛,1996年10月6-9日。

Manrique JF, Bjornen K 和 Ehlig-Economides C: "Systematic Methodology for Effective Perforation and Fracturing Strategies", SPE 38630, 发表在SPE技术年会和展览会,美国得克萨斯州San Antonio,1997年10月5-8日。

Manrique JF 和 Venkataraman A: "Oriented Fracturing—A Practical Technique for Production Optimization", SPE 71652, 发表在SPE技术年会和展览会,美国路易斯安那州新奥尔良,2001年9月30日-10月3日。

10. 关于CoilFRAC油管输送选择性增产的详细内容,请参见:Degenhardt KF, Stevenson J, Gale B, Gonzalez D, Hall S, Marsh J 和 Zemlak W: "单个产层隔离和增产技术",《油田新技术》,13卷,第3期(2001年秋季刊):60-77。

11. Logan WD, Gordon JE, Mathis R, Castillo J 和 McNally AC: "Improving the Success of Morrow Stimulation the Old-Fashioned Way", SPE 67206, 发表在SPE开采作业会议,美国俄克拉何马州俄克拉何马城,2001年3月24-27日。

作业者决定使用斯伦贝谢WOPT系统将 $3\frac{3}{8}$ 英寸高密度射孔枪系统(6孔/英尺,相位为 180°)对准PFP进行射孔。根据FMI测井资料,工程师确定出了ETA-4井中的最大应力方向为西北-东南。由于定向射孔降低了近井眼曲折度引起过早脱砂的风险,因此,可以使用较高的支撑剂浓度(6ppa)来增加裂缝宽度。

由于该井中的油藏质量与ETA-3井一样,而且储层厚度为其两倍,因此作业者预期该井的产量应该不错,但射孔后的产量仅为50万立方英尺/日(1.43万立方米/日),FTP为220psi(1.5MPa)。该产量相当于完井损害非常严重(表皮因子为正45)时的产量。为充分利用油

藏质量好的特点,作业者希望使用更高浓度的支撑剂设计出更大导流能力的压裂裂缝。然而,邻井中的压裂处理压力表明,在4ppa时可能会出现脱砂,因此做到这一点也不容易。

在6ppa时,FracCADE模拟结果表明,裂缝半长度为300英尺(91米),宽度为0.15英寸(3.8毫米),是4ppa时裂缝宽度的两倍(下图)。该处理作业在设计上似乎有些过头,但当地的经验表明,考虑到裂缝闭合以及开始生产后可能造成裂缝导流能力的损害,需要300英尺的设计目标来获得200英尺(60米)有效导流裂缝。

处理压力强调了定向射孔对作业实施的正面效果(下一页,左上图)。两

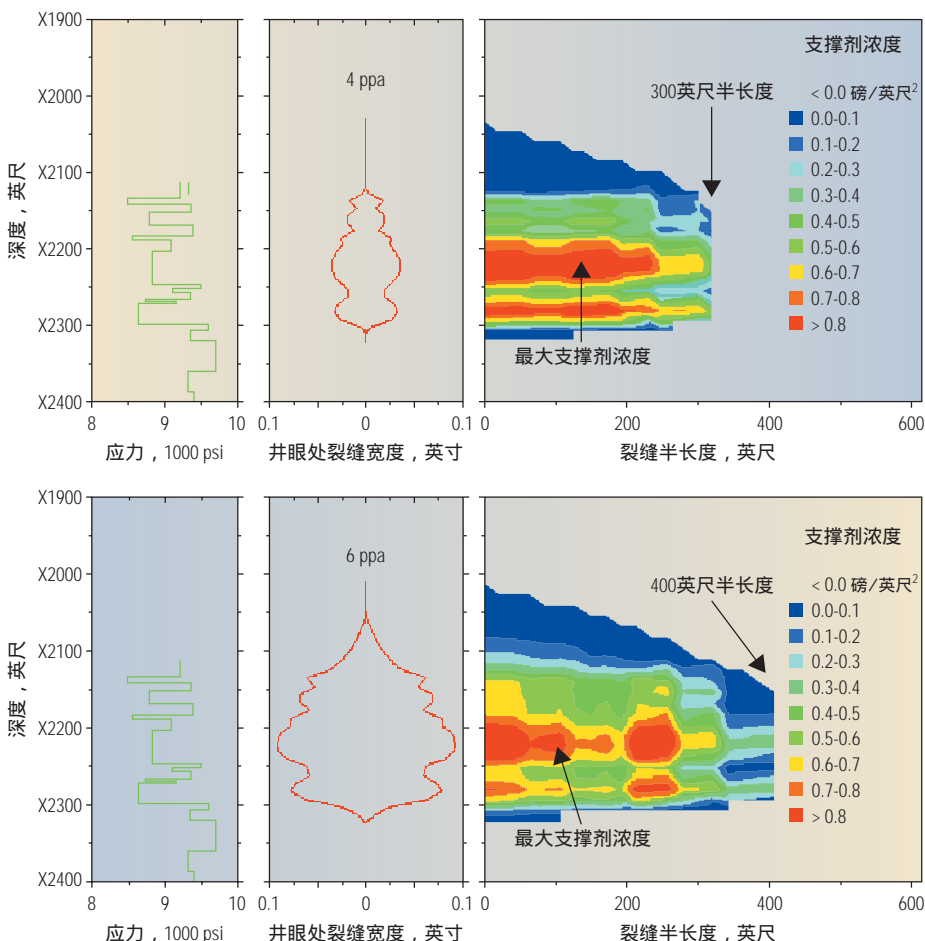
次增产处理的泵速是相同的,都是30桶/分(4.7立方米/分),但常规的压裂增产作业压力为5000psi,而定向压裂处压力的范围是3000到4000psi(20到27MPa)。

定向射孔的另外一个重要指示是泵送停止后的压力响应。对于常规作业而言,要用15分钟的时间压力才能达到3000psi,表明净压力在增加,该作业临近脱砂。对于定向压裂来说,压力几乎马上达到平衡,表明可能已经置入了较高浓度的支撑剂。

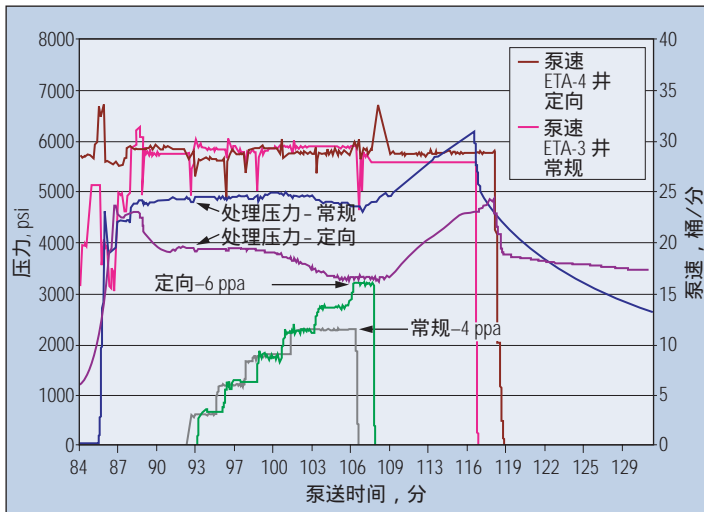
ETA-4井早期的生产史表明,增产处理是成功的。压裂后的产量为350万立方英尺/日(10万立方米/日),FTP为1280psi(8.9MPa),而增产作业前的产量为50万立方英尺/日,流动压力为220psi。目标是消除钻井造成的损害,因此表皮因子是衡量成功与否很好的指标。增产作业后的产量为350万立方英尺/日,表明表皮因子从45降低到了-4。

分析表明,当最大支撑剂浓度为4ppa,裂缝宽度为0.06英寸(1.5毫米)时,ETA-4井在FTP为1280psi时的产量应该为220万立方英尺/日。如果裂缝宽度为0.15英寸,FTP为1280psi时的产量增加到300万立方英尺/日(8.5万立方米/日)。该井的产量实际上比这一数值还要大,说明裂缝宽度稍宽一些。定向射孔允许使用较高浓度的支撑剂,同时还可以避免过早脱砂以及压裂后的清井作业。结果产量提高了130万立方英尺/日(3.4万立方米/日),三天就收回了射孔增加的成本。

在某些地区,采用压裂作业除提高产能外,还包括其它一些完井目的。位于北海英国海域中部的Scott油田的作业者是Amerada Hess公司,由于井中以及井眼附近的结垢和沥青质沉积而使产能受到影响。^[12]对油井进行了重新射孔,注入结垢溶解剂,使用炸药推进剂来产生短裂缝,但由于损害比较严重,这些作业都没有取得成功。压裂增产作业是唯一可供使用的消除地层损害的方法,而在海上进行这样的作业是很昂贵的。



▲ 裂缝导流能力。定向射孔有助于压裂作业的设计和和实施,产生更宽、导流能力更强的裂缝。ETA-4井的其它压裂设计方案具有类似的裂缝半长度和裂缝高度,但使用4ppa支撑剂浓度产生的裂缝宽度(上)是使用6ppa时的宽度(下)的一半。



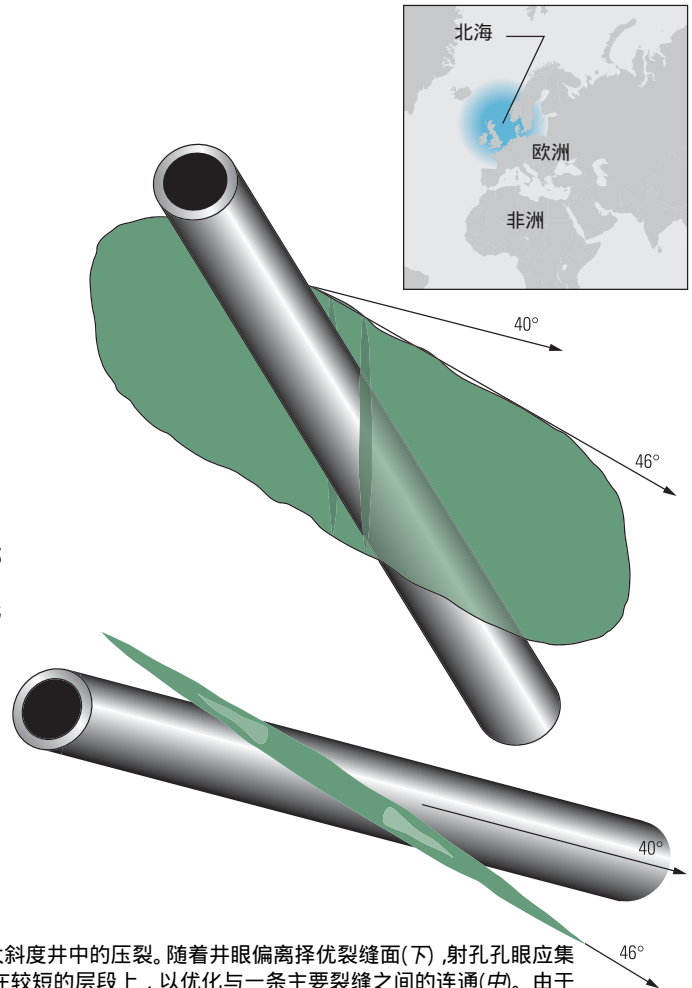
▲常规与定向压裂处理结果的比较。最大的改进表现在地面处理压力上。当邻井ETA-3中的支撑剂浓度从1增强到4ppa,ETA-4井中的支撑剂浓度从1增强到6ppa时,ETA-4井中的处理压力(紫色)比ETA-3井中的处理压力(蓝色)低很多。这一改进是由于把方位对准最大应力方向(PFP)进行定向射孔的结果。

然而,这一挑战促使人们进一步研究新的技术和方法来确保作业取得成功。根据当前产量以及潜在产能,泄油面积和邻井的压力支持等情况,Amerada Hess公司和斯伦贝谢公司组成的增产作业小组(PEG)选定了J9井作为压裂增产处理目标井。^[13]原油产量最高达到5700桶/日(906立方米/日),尽管油藏压力不断增加,产量还是平稳降低。在注水开始后,该断块中的压力从4000psi(27.6MPa)上升到9000psi(62MPa)。

生产测井流量测量和套管井径测量结果表明,产量主要来自上部的一个层,下部的射孔孔眼上有持水和结垢沉积。作业者怀疑在油田的其它部分也普遍存在硫酸盐结垢沉积,微粒运移以及沥青质沉积等。对整个层段进行重新射孔对产量没有产生任何影响。

水力压裂是唯一可以采用的实用方法。然而,由于断裂结构比较复杂,大地构造作用很强,有可能产生形成窄裂缝以及过早脱砂的条件。井眼斜度大更增加了近井眼处的限制,并使压裂作业复杂化。

使用WOPT系统对有限层段进行了重新射孔,将射孔枪对准最大应力方向(180°相位)以尽量减小由于裂缝曲折度造成的压力损失。从横波各向异性、



▲大斜度井中的压裂。随着井眼偏离择优裂缝面(下),射孔孔眼应集中在较短的层段上,以优化与一条主要裂缝之间的连通(中)。由于井眼方位是40°,PFP方位是46°,Amerada Hess决定选择上述方法对北海Scott油田J9井进行压裂增产处理(上),以减小近井眼处多个裂缝以及相应的窄裂缝造成脱砂的可能性。

裸眼井中的四臂井径测量以及井眼成像测井等资料得到的PFP相位为46°。作业者选用了大孔眼PowerFlow射孔弹(射孔密度为6孔/英尺),以减小射孔孔眼与PFP对准的不确定性,并尽量降低射孔摩擦力。这种选择还有助于确保获得最宽的裂缝,降低增产作业后进行开采时由于紊流引起的地层污染。

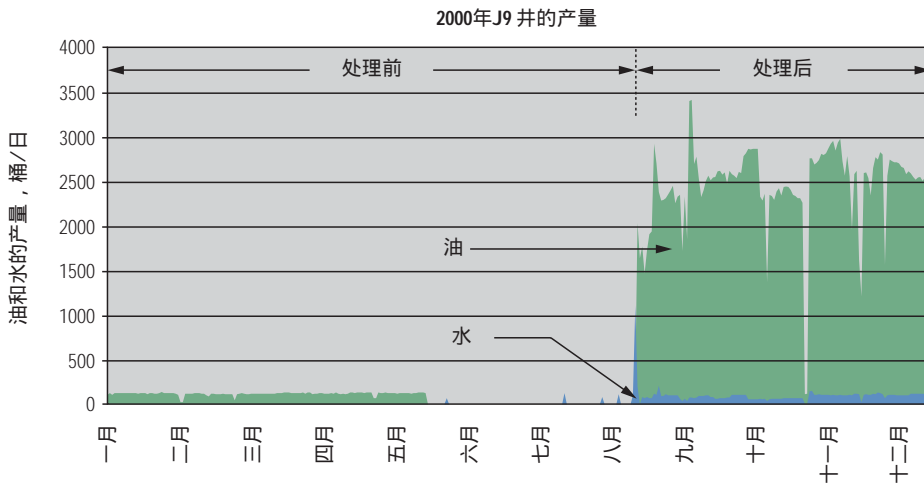
虽然井眼方位在整个层段上为40°,工程师认为水力压裂裂缝将沿着与井眼一致的方向传播。尽管井眼方位比较有利,但Amerada Hess公司还是决定降低由于窄裂缝或近井眼处的多个裂缝造成脱砂的可能性。通过仅重新射开10英尺井并进行回堵以减少注入层段厚度来达到上述目的,尽管这样做可能会在开采时形成紊流(右上图)。

由于在井眼内以及地层骨架中容易形成结垢沉积,因此比较关心的问题是

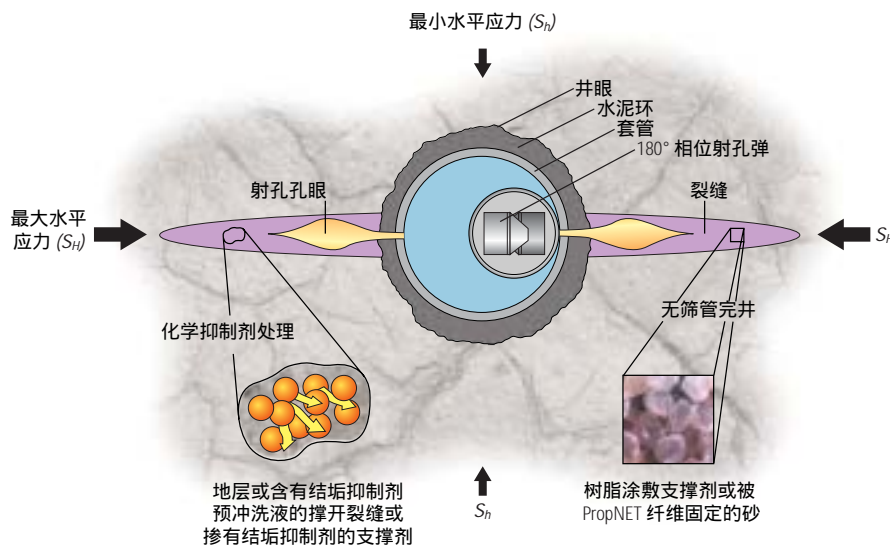
如何获得足够的裂缝导流能力并维持产能。水力压裂处理会降低开采过程中的压降,从而降低形成结垢沉积的可能性。此外,使用了一种特殊的掺入结垢抑制剂的支撑剂来提供对撑开裂缝以及井眼管柱的长期保护。在支撑剂中掺入抑制剂确保其进入地层深部,在回流以及清洗处理液的过程中减少抑制剂的损失。结垢抑制剂与压裂液不发生反应,它停留在支撑剂表面,只与地层水发生反应。

12. Norris MR, Gulrajani SN, Mathur AK, Price J 和 May D: "Hydraulic Fracturing for Reservoir Management: Production Enhancement, Scale Control and Asphaltine Prevention", SPE 71655, 发表在SPE技术年会和展览会,美国路易斯安那州新奥尔良,2001年9月30日-10月3日。

13. 有关增产作业小组(PEG)的详细情况,请参见: Bartz S, Mach JM, Saeedi J, Haskell J, Manrique J, Mukherjee H, Olsen T, Opsal S, Proano E, Semmelbeck M, Spalding G 和 Spath J: "从老井获取最大利益",《油田新技术》,9卷,第4期(1997年冬季刊):2-21。



▲北海增产作业成功实例。Amerada Hess 公司 Scott 油田 J9 井优化压裂处理后的产能得到提高, 优化处理作业包括对一有限层段进行定向射孔以及注入掺有结垢抑制剂的支撑剂等。产量从 120 桶/日 (19 立方米/日) 增加到 2500 桶/日 (397 立方米/日)。14 天内即收回了投资成本。



▲无筛管完井。当与定向射孔以及定向压裂方法结合时, 一些新的技术, 例如树脂涂敷和掺入结垢抑制剂的支撑剂 (左) 以及 PropNET 纤维 (右) 能够控制支撑剂返排和出砂, 从而在不使用井下机械筛管和砾石充填的情况下实现有效防砂。

压裂前进行的台阶状注入试验表明, 近井眼曲折度形成的摩擦力非常小, 压裂开始时只有 200 psi (1.4MPa)。支撑剂处理实际结果表明, 近井眼的影响可以忽略, 在注入前置液时不需要酸或支撑剂段塞来使地层破裂或冲蚀流动阻碍。这表明, 定向射孔消除了流动阻碍, 相对的裂缝翼与井眼很一致。

由于综合采用了定向射孔和压裂, 并在支撑剂中掺入结垢抑制剂, 使原油产量从 120 桶/日 (19 立方米/日) 增加到 2500 桶/日 (397 立方米/日), 提高了 20 倍 (右图)。压裂处理后的表皮因子为 -2, 而处理前为 80。掺入结垢抑制剂的支撑剂防止了该井产能的快速下降。持续高的产能使得在 14 天内就收回了作业成本。

由于 J9 井中的处理作业获得了成功, PEG 小组发起了识别候选井的计划, 以评价在 Scott 油田其它井中进行压裂增产处理的潜力。该计划正在帮助 Amerada Hess 公司控制该油田产量下降的局面并开采更多的储量。定向压裂技术和 WOPT 射孔技术在加拿大和墨西哥湾等地也得到了成功的应用。

防砂

尽管在许多完井中需要使用控砂方法, 但在高产能井中的流量限制可能使得机械筛管和砾石充填的控砂方法不实用或不经济。^[14] 在一些具有各向异性应力的弱固结油藏或地层中, 定向射孔和专门的无筛管完井技术能最大限度地提高射孔孔眼通道的稳定性, 在不限制油井产量的情况下减少或消除产砂 (左图)。通过确定原地应力大小和方向, 完井工程师把目标锁定在井眼周围具有最小应力差异的较稳定的地层区域, 并避开水平和垂直应力差异大的较不稳定的区域。

14. Carlson J, Gurley D, King G, Price-Smith C 和 Walters F: "Sand Control: Why and How?" 《油田新技术》, 4 卷, 第 4 期 (1991 年 10 月): 41-53。

Syed A, Dickerson R, Bennett C, Bixenman P, Parlar M, Price-Smith C, Cooper S, Desroches J, Foxenberg B, Godwin K, McPike T, Pitoni E, Ripa G, Steven B, Tiffin D 和 Troncoso J: "高产能水平井砾石充填", 《油田新技术》, 13 卷, 第 2 期 (2001 年夏季刊): 52-73。

15. Sulbaran AL, Carbone II RS 和 Lopez-de-Cardenas JE: "Oriented Perforating for Sand Prevention", SPE 57954, 发表在 SPE 欧洲地层损害会议, 荷兰海牙, 1999 年 5 月 31 日 - 6 月 1 日。

16. Solares JR, Bartko KM 和 Habbat AH: "Pushing the Envelope: Successful Hydraulic Fracturing for Sand Control Strategy in High Gas Rate Screenless Completions in the Jauf Reservoir, Saudi Arabia", SPE 73724, 发表在 SPE 地层损害控制国际会议和展览会, 美国路易斯安那州 Lafayette, 2002 年 2 月 20-21 日。

在弱固结地层中,采用较小直径射孔孔眼、较高的射孔密度、最优的射孔枪相位以及定向射孔等有助于防砂。当需要高射孔密度时,对射孔枪相位进行调整,使射孔孔眼稍微倾向于最小应力差异的方向,以使孔眼到孔眼之间的间距最大。这有助于优化井的产能,并在井的整个生命周期中防止或延迟产砂。地质力学模型以及实验室测试能够确定可接受的离开目标方位的倾斜角度,一般在 25° 到 30° 或是更小。

利用详细的地质力学分析得到的原地应力分布及方向,PDVSA采用了优化相位以及定向射孔技术来预防出砂。^[15]出砂是委内瑞拉马拉开波湖始新统C油藏的一个主要问题。该砂岩是致密的脆性砂岩,但由于经历了复杂的构造运动,最大水平应力远大于垂直应力,最大垂直应力与最小水平应力的大小相当。最大和最小应力之间的差异相当大,在垂直井中造成大量出砂。

在90年代,PDVSA采用了几种技术(包括水力压裂和大角度钻井)来减少出砂。每口井的平均产量为1500桶/日(240立方米/日),但每口井的出砂量保持在14磅/1000桶(4公斤/100立方米),认为出砂量过大。为解决这一问题,PDVSA决定在垂直井中采用定向射孔技术。

断层和构造作用对始新统C油藏的应力方向变化产生影响。PDVSA使用了井眼成像资料和实验室岩心测量数据来评估最大水平应力方向。研究人员还利用弹塑模型、有限元分析以及材料破裂标准等对单个射孔孔道的稳定性进行了评价。从孔道保持稳定处最大应力分析得到的临界角用来选取射孔枪相位和射孔孔眼方位。

根据PDVSA进行的地质力学分析以及在美国得克萨斯州Rosharon的斯伦贝谢油藏完井中心进行的试验,得出了下列射孔方案和建议:

确定应力大小和方向。

确定射孔孔眼稳定处的临界角。



	油田平均	1号井	2号井	3号井	4号井
初始油产量					
桶/日	1500	4000	2200	700	1100
米 ³ /日	240	635	350	111	175
稳定产砂量					
磅/1000桶	14	0.5	3	3	0.4
公斤/100米 ³	4	0.14	0.86	0.86	0.11

▲ 始新统C油藏使用定向射孔前后的产量对比。

选择适当的深穿透PowerJet射孔弹。使用足够的射孔密度以优化产能。使用能使孔眼到孔眼距离最大化的射孔相位。避免在射孔孔道较不稳定的方向射孔。

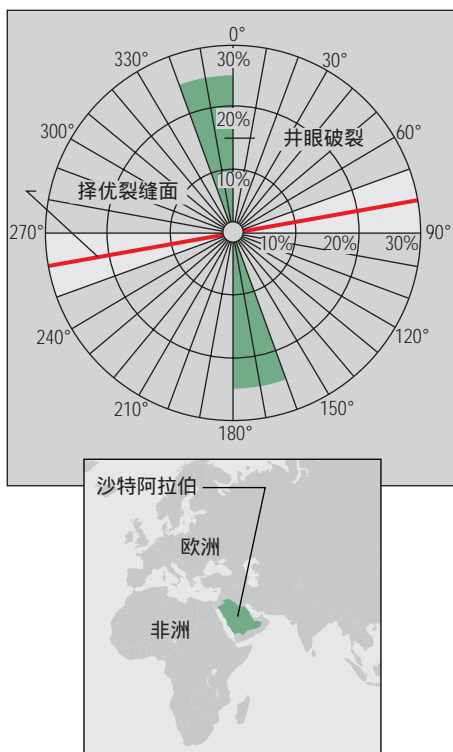
采用足够的负压进行射孔。开始时,使用定向油管输送射孔(TCP)技术进行了四次射孔作业。所有这些井中的出砂量与全油田的平均值(14磅/1000桶)相比大大减少(上图)。由于在这些始新统C油藏的井中防砂获得了成功,PDVSA使用TCP和WOPT系统在其它一些油田也进行了定向射孔作业。

射孔密度低于6孔/英尺(spf)时会降低产能。高于8spf时,产能基本上没有提高,但射孔失败以及出砂的风险却增加了。PDVSA选择了6到8spf,以满足上述所有条件。使用常规射孔枪以6spf的射孔密度对头三口井进行了射孔。使用特制的射孔枪对第四口井进行了射孔,射孔密度为8spf,同时满足最大孔眼到孔眼的距离以及在容许的射孔孔眼角度范围内孔眼比较均匀分布的要求。

在很多地区出砂都是一个比较严重的问题。在1995年,沙特国家石油公司开始大规模开发Ghawar气田的非伴生天然气储量。Jauf储藏是这一开发计划中的组成部分。^[16]该未固结砂岩从13500到14400英尺(4115到4390米)的深度生产无硫天然气,其渗透率为中等,在压力增加到8750psi(60MPa),温度增加到300°F(150°C)时极易出砂。

Jauf井的产量从1000万到6000万立方英尺/日(2.86万到17万立方米/日),但在不大量产砂的情况下实现如此高的产能极为困难。由于出砂的影响,不得不进行重复修井作业,清洗井眼,除掉集输管线内部的化学抑制剂,对管线造成了严重的腐蚀。

Ghawar气田中的某些井采用4.5英寸套管进行了完井,从而排除了使用砾石充填机械筛管的可能性。后来考虑使用压裂充填的方法,但从岩心分析和裸眼井试井资料得到的渗透率都很低,表明需要较长的高导流能力裂缝才能获得所需的产气量。因此,沙特国家石油公司决定在压裂增产作业中使用无筛管完井技术。



▲ Jauf 地层中典型的并眼破裂。FMI 测井对沙特 Jauf 地层的分析表明,大约有 25% 的并眼破裂发生在南-北方向上。这证实了最大应力大约在 80° 或 260° 的东-西方向上。射孔方案决定采用 180° 相位和 6 孔 / 英尺的射孔密度沿最优裂缝面进行定向射孔。该方案有助于减少出砂,并可降低压裂作业过程中的近井眼摩擦压力。

新建的 Hawiyah 气处理厂的处理能力为 16 亿立方英尺 / 日 (4600 万立方米 / 日), 需要从 Jauf 井中得到 4 亿立方英尺 / 日 (1150 万立方米 / 日) 的无砂脱硫天然气。然而, 1999 年和 2000 年进行的四次压裂增产作业没能防止出砂, 效果非常不好。由于当时离天然气处理厂投产还有不到一年的时间, 作业者组建了一支由岩石物理、地质、油藏工程和增产作业设计等方面专家构成的小组, 由沙特国家石油公司的一名经理和斯伦贝谢的一名协调员进行领导。该专家组与现场作业的代表一起工作, 来解决支撑剂返排和出砂等问题, 从而优化压裂作业并改善并眼清洗的方法。

该专家组选定了 10 口井作为无筛管完井的候选井。为了获得更好的效果, 实施了 PowerSTIM 油井优化作业, 将岩石物理、地层评价、油藏描述以及试井结果与增产作业设计、实施和处理后评价结果进行综合。^[17]除了更好地进

行地层评价和油藏描述外, 改善水力压裂增产作业的建议还包括采用定向射孔方法, 以降低处理压力并增加裂缝的宽度, 宽大的裂缝能够在开采期间减少紊流和非达西流动。沿 PFP 进行定向射孔还可以消除导致出砂的未被充填的通道。

利用 FMI 测井识别出的并眼破裂证实了 Jauf 地层中的最大应力方向为东-西方向, PFP 的方位大致为 80° 或 260° (左图)。修改后的完井方案避免了在由应力剖面识别出的较弱层段 10-20 英尺 (3-6 米) 以内进行射孔。射孔层段的厚度最低保持在 30 或 40 英尺 (9 或 12 米), 以确保在并眼处覆盖全部裂缝, 并避免未处理的连通射孔孔眼出砂的问题。在射孔作业过程中, 使用了 WOPT 系统和具有 180° 相位的射孔枪。

最初应用定向射孔技术时, 在进行增产处理之前该井的产量为 200 万立方英尺 / 日 (5.7 万立方米 / 日), 压力为 3800psi (26MPa)。在压裂处理前进行的注入试验证实了定向射孔技术的有效性。开始形成裂缝的摩擦压力是 300psi (2MPa), 远远小于以前利用常规射孔方法射孔井的平均值, 常规射孔的密度为 6spf, 相位为 60°。在增产处理后, 该井的产量为 3000 万立方英尺 / 日 (86 万立方米 / 日), 压力为 5200psi (36MPa), 但继续出砂。

在 PowerSTIM 联合作业小组的第一口井中采用了优化无筛管完井技术。为了防治支撑剂返排和出砂, 利用 WOPT 系统对一个厚度为 30 英尺的层段进行了射孔。工程师实施了尖端脱砂压裂, 并采用高温 PropNET 纤维来控制返排。射孔后, 该井的产量为 160 万立方英尺 / 日 (4.58 万立方米 / 日), 油管流压 (FTP) 为 550psi (3.8MPa)。曲折度影响形成的压力为 450psi (3.1MPa), 仍然是没有进行定向射孔井中水平的一半。压裂后的产量为 3700 万立方英尺 / 日 (100 万立方米 / 日), 仅在 11 天后就实现了无砂生产, 而以前的井平均需要在 47 天后才能实现无砂生产。

对该项目中其它 9 口井的无筛管完

井进行了优化。作业小组根据邻井的岩石心资料, 裸眼井测井资料以及压裂后的资料得出细化的岩石物理模型, 并引入了更为准确的模型来预测出砂。完井工程师利用斯伦贝谢射孔分析模拟软件 SPAN 来预测孔眼入口直径并优化支撑剂尺寸的选择。

在实施 PowerSTIM 计划之前, 这些井需要长达 55 天的时间才能实现无砂生产。优化无筛管完井技术和改进的返排方法使这一清洗过程降低到 3 到 5 天的时间。目前, 沙特国家石油公司在 Jauf 油藏的井中把有限射孔层段和定向射孔技术作为常规的技术来使用。到目前为止, 所有进行无筛管完井的井都实现了无砂生产。

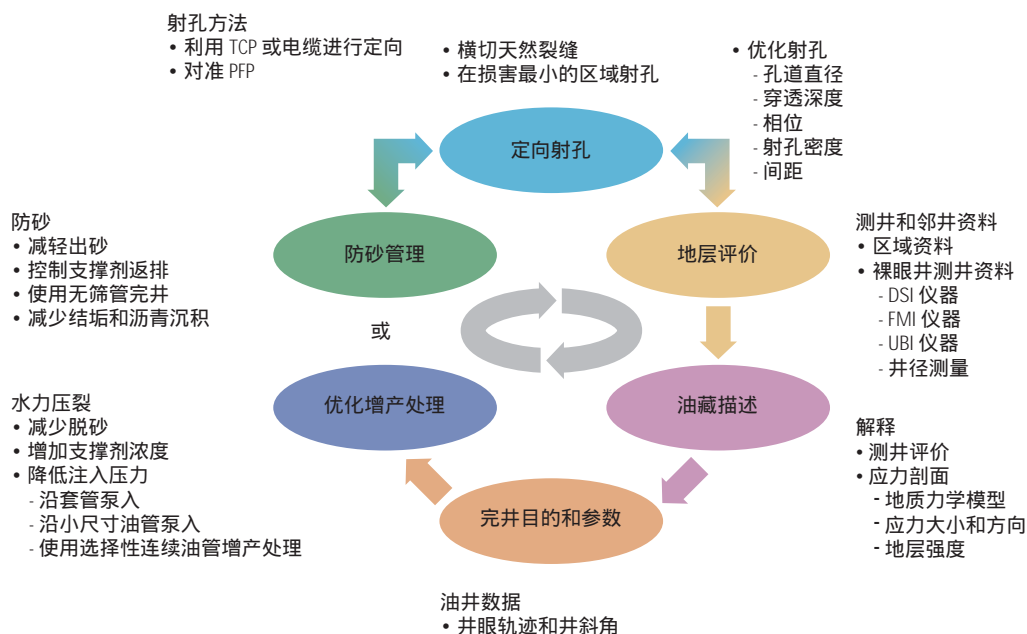
出砂问题如果得不到解决将会对油井和油藏的产能产生不利影响, 对未来的修井作业构成威胁并影响到油田的获利能力。确保在油井的整个寿命过程中射孔孔道以及周围地层的稳定性是实现防砂的关键。改进出砂模型, 进行风险评价并采用先进的射孔技术能够有效地解决这一问题, 更好地实现防砂、控砂管理。

其它应用和进展

压裂增产处理过程中是否经常出现过早脱砂? 注入压力是否高于预计的数值? 处理速度或压力是否受到套管条件的限制, 或受到使用连续油管对单个层进行选择增产处理的限制? 是否应该使用损害较小的流体? 最终支撑剂浓度是否太低? 油井有无出砂或支撑剂返排的问题? 是否有结垢或沥青的沉积? 如果对上述任何问题的回答是肯定的, 那么定向射孔很可能是解决这些问题的关键。

17. 有关 PowerSTIM 增产和完井优化的详细内容, 请参见: Al-Qarni AO, Ault B, Heckman R, McClure S, Denoo S, Rowe W, Fairhurst D, Kaiser B, Logan D, McNally AC, Norville MA, Seim MR 和 Ramsey L: “从油藏细节到增产解决方案”, 《油田新技术》, 12 卷, 第 4 期 (2000/2001 年冬季刊): 42-60。

18. Morita N 和 McLeod HO: “Oriented Perforations to Prevent Casing Collapse for Highly Inclined Wells”, SPE 28556, 发表在 SPE 技术年会和展览会, 美国路易斯安那州新奥尔良, 1994 年 9 月 25-28 日。



▲ 定向射孔技术的计划和实施。为达到定向射孔、压裂和防砂管理的目的，首先需要识别问题，评价定向射孔的适用性，进行必要的测井，开发适当的地质力学模型并提前解决好完井作业方面的问题。准确确定问题的类型有助于在井的设计阶段对钻井、测井和完井计划进行修改，从而更好地实施定向射孔解决方案。

精心设计的定向射孔可以得到优化的结果，而且在大多数情况下，与带来的经济效益相比其成本的增加可以忽略。定向射孔的关键是进行详细分析并确定射孔方案（上图）。先进的测井技术和方法可以测量和评价钻井引起的地层损害以外的岩石特性，从而帮助优化射孔设计。这些测井技术和方法与综合油藏描述结果相结合，可以提供建立准确的地质力学模型所需的数据和输入参数，从而更好地对增产优化和防砂解决方案进行模拟、设计和评价，帮助油气公司提高产量。

定向射孔作业对技术的要求很高，与常规射孔方法相比需要更多的时间，尤其是在倾斜角很小的垂直井中。由于WOPT系统依赖于仪器串定位的重复性，因此在实施每一步作业时都应格外小心。此外，如果某次射孔时的方位有偏差，则应将射孔枪提出井口并重新进

行方位标定。

能够在井下旋转射孔枪的系统可以进一步改善定向射孔的总体效率。在倾斜角大于 3° 的井眼中进行井下重新定位尤为重要，在这样的井眼中，井下的倾斜角测量结果比较可靠。此外，还可以选择性地引爆一个以上的起爆器，一次下井可使用几个射孔枪，从而大大减少了对大层段和多个层进行射孔所需的射孔枪的数量。在任何情况下，当没有方向测量资料时，都必须进行陀螺仪测量。

为了在复杂井眼中进行射孔而不损坏电缆、控制线和其它硬件，越来越多地使用电缆输送定向射孔。智能完井的数量预计将以每年约30%的速度增加。在越来越多的井中都安装了光纤系统，以使作业者监测井下动态并评价增产处理的效果。能够探测并确定井下完井部件位置的技术以及在射孔过程中监测射

孔枪方位的方法将有助于满足上述需要。

定向射孔技术的其它应用包括横穿天然裂缝或地层损害最小的井眼区域，以提高油井产能，修补套管外水泥环内的窜槽，以及在压力控制作业过程中激活救援井。采用定向射孔还可以避免套管承受过大的应力作用，从而在大斜度井以及在构造活动比较活跃的地区钻的井中防止套管破裂。^[18]该技术在未来还会在断裂比较复杂的地质构造地区得到应用，这些地区的原地应力条件使压裂设计、处理实施以及增产效果复杂化。

这些需要以及越来越苛刻的完井要求正在促使开发新一代射孔系统和方法，旨在提高井场效率并减少射孔作业所需的时间。这样的射孔工具投入商业应用后，将会进一步增加定向射孔技术的效果和灵活性。

—MET