

综合洗井系统: 提高效率降低风险

砂粒和固相在井内堆积会严重影响油气生产。事实上, 近50%的连续油管作业其目的都是为了洗井清砂。将硬件设备、软件、洗井液体系和处理监测方法等进行综合利用, 有助于降低洗井作业成本和作业风险, 并使油气井以更快速度恢复生产。

Azhar Ali
PETRONAS Carigali Sdn Bhd (PCSB)
马来西亚 Kerteh

Curtis G. Blount
康菲石油公司
美国阿拉斯加州安克雷奇

Stephen Hill
Jai Pokhriyal
Xiaowei Weng
美国得克萨斯州 Sugar Land

M. J. Loveland
康菲石油公司
阿拉斯加州 Kuparuk

Shahril Mokhtar
马来西亚 Kemaman

Jessica Pedota
阿拉斯加州普拉德霍湾

Mads Rødsjø
BP 挪威公司
挪威斯塔万格

Radovan Rolovic
英国 Stonehouse

周 玮
中国北京

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 Sugar Land 的 Marc Allcorn 和挪威卑尔根的 Markus Andre Karlsen。

CoilCADE 和 PowerCLEAN 是斯伦贝谢公司的商标。

砂粒运移和岩屑堆积会对流体流动造成严重影响。在地面, 河流会沉积大量淤泥而阻碍其流动、改变流向, 甚至可能会淹没农田和社区。同样, 井下砂粒堆积也会影响或阻止原油从油藏流入井筒。

砂埋和岩屑堆积并不是什么新出现的井筒问题。几代油田工程师一直都面临着保持井筒清洁的挑战。1901年, Jennings石油公司在美国路易斯安那州西南部的 Clement 1 号井起初以大约 7000 桶/日 (1113 米³/日) 的产量自喷^[1]。但不幸的是, 对于这些早期的石油先驱来说, 成功是短暂的。在生产 7 个小时之后, 地层砂堵塞了 1000 英尺 (305 米) 长的套管, 使产油井停止生产, 同时也使人们的发财治富之梦破灭。将砂子从井筒内清除的努力最终也以失败告终, 不得不放弃对这一远景区的开发。

大约在同一时期, 得克萨斯州的石油开采人员采用一种新技术防止产油量的下降—鱼雷^[2]。鱼雷作业人员小心地将大量炸药下入井下, 一旦装有炸药的容器达到预定位置, 就将一个重物投到井中, 引发一连串爆炸, 如果运气好的

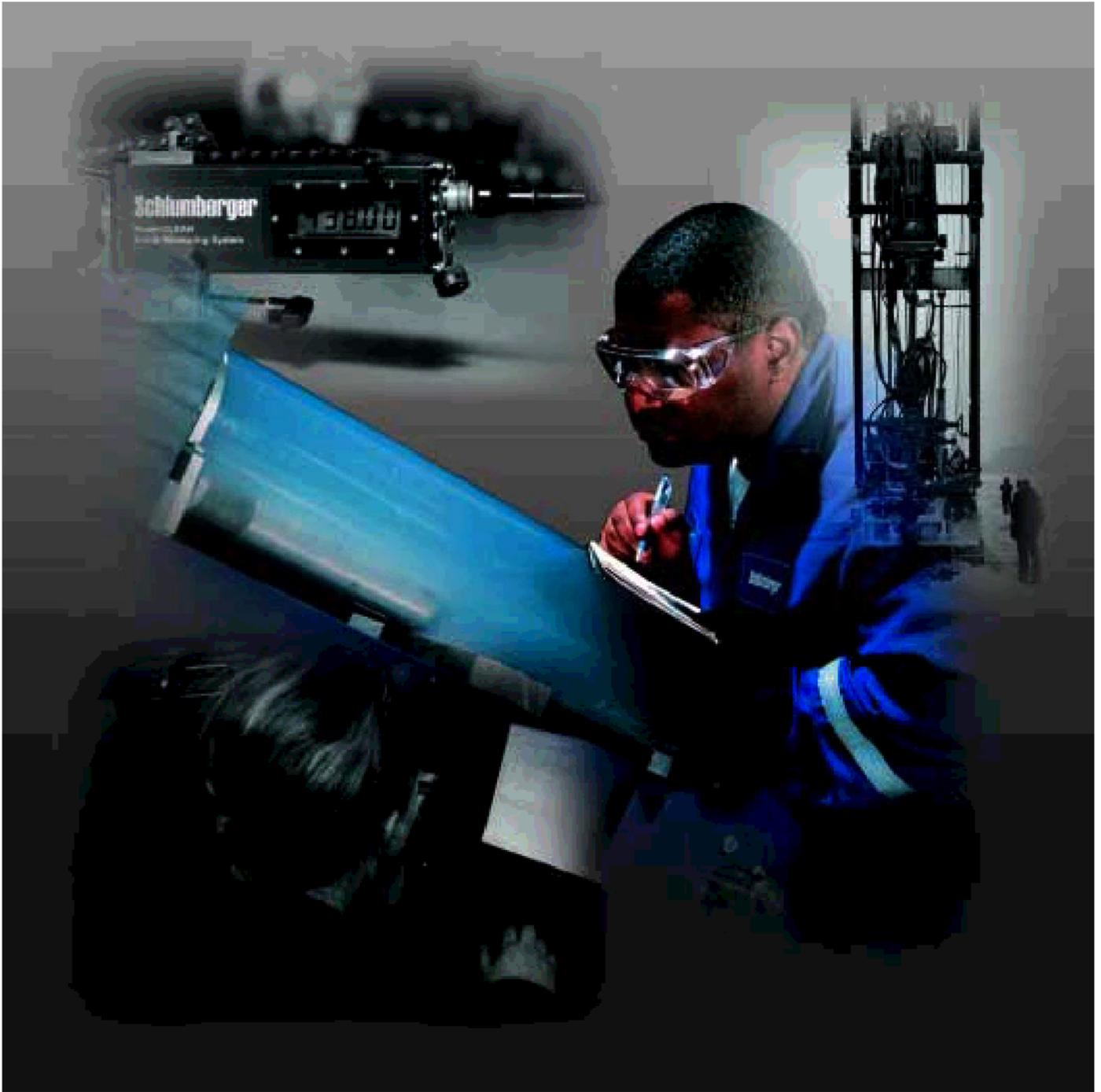
话, 就会重新激活油井, 将岩屑从井内清除, 并使原油重新开始流动。

现在, 工程师们采用更安全、更有效的方法清除井内的砂粒和其它碎屑物质。本文通过北美、北海和马来西亚等地的实例, 来说明经过精心设计的综合洗井方法是如何节省作业时间、降低成本和风险、提高作业效率并使作业者生产更多原油的。

清除井筒中的固相物质

井眼堵塞是全球作业者普遍关注的一个重要问题。通常通过连续油管 (CT) 作业解决此类问题。但是, 随着井筒和完井变得越来越复杂以及油藏开采条件越来越困难, 在一些情况下, 常规连续油管洗井技术就不足以有效地清除井筒堵塞。

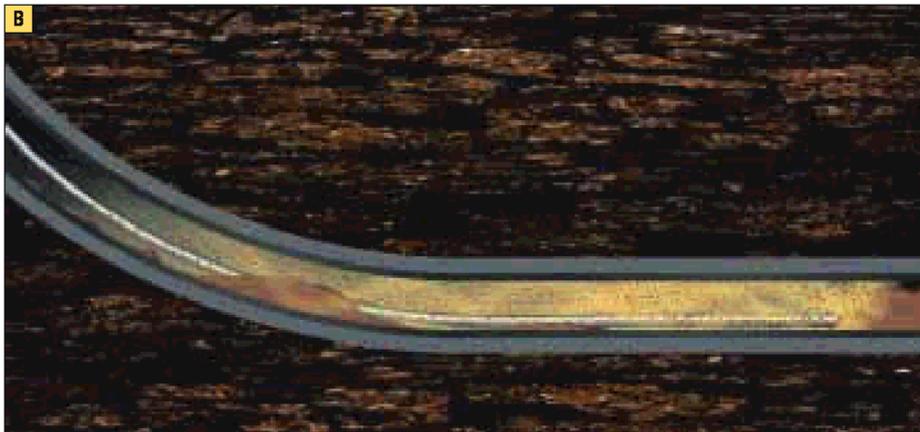
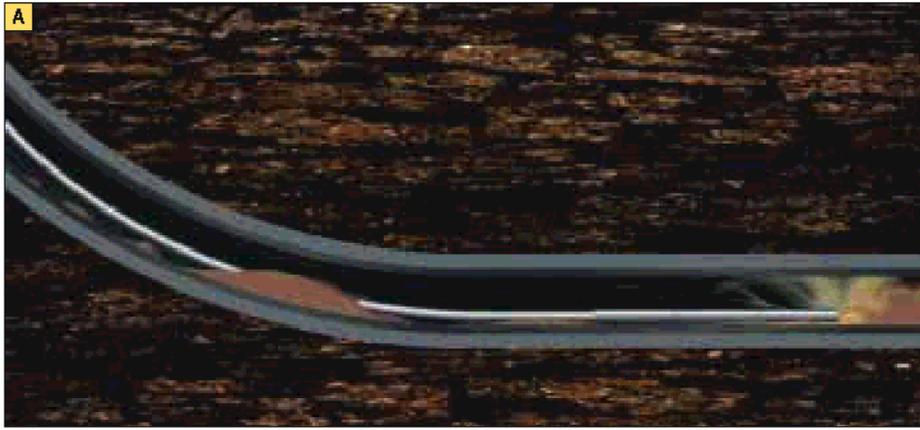
连续油管作业服务最初就应用于洗井作业中。据估计, 全球有近50%的连续油管作业是为了清除固体颗粒和碎屑物质, 如地层产出砂或水力压裂处理残留的支撑剂^[3]。连续油管传送系统的不断发展基本上能保证作业者跟上并深不断增加、井眼更加弯曲以及井下条件更加复杂的作业要求^[4]。



斜井最常用的洗井技术是采用连续油管传送下井的喷射工具。在将洗井液泵入油管的过程中,喷射工具被冲入砂粒或其它碎屑物质(常称堵塞物)中。在吃入堵塞物一定深度后,就停止下放。在继续循环洗井液的同时,以驱

扫的方式慢慢将喷射工具上拉一定距离。吃入多深和工具上拉多远取决于许多参数,包括流量、堵塞物类别、油管和套管尺寸、采用的清洗液、喷嘴设计、井底压力以及井眼轨迹等。有时候,可能要一直进行驱扫,将工具上拉到地面后再进行下一次吃入。

1. 根据 Shelia Esthay 的文章整理, *Jennings Daily News*, <http://www.dnr.state.la.us/cons/first-well.ssi> (2005年3月2日浏览)。
2. Olien RM: "The Oil Field Shooters", <http://www.texancultures.utsa.edu/hiddenhistory/pages1/OilenOilShooter.htm> (2005年3月2日浏览)。
3. Rolovic R, Weng X, Hill S, Robinson G, Zemlak K 和 Najafov J: "An Integrated System Approach to Wellbore Cleanouts with Coiled Tubing", SPE 89333, 发表于 SPE/ICoTA 连续油管大会暨展览会上, 美国得克萨斯州 Woodlands, 2004年3月23-24日。
4. 有关连续油管更多的信息, 请参见: Afghoul AC, Amaravadi S, Boumali A, Calmeto JCN, Lima J, Lovell J, Tinkham S, Zemlak K 和 Staal T: "连续油管: 新一代技术", 《油田新技术》, 16卷, 第1期 (2004年春季刊): 38-57。



一旦堵塞物被驱扫到预定深度后，工具重新返回井下，再一次吃入堵塞物。不断重复该过程，直到所有堵塞物都被搅动并从井筒中清除出来(左图)。

喷射工具或冲洗喷嘴的设计可使流体产生紊流，以便搅动并悬浮固体颗粒。但对于斜井，随着离喷嘴距离的增加，紊流减弱，并且随着固相物质从悬浮物中下沉，在井眼低端形成砂床。随着砂床高度的增加，流动截面减小，砂床表面上的流体流速增加，直到达到临界启动流速。一旦达到临界速度，部分或全部沉积物就分散开来，与洗井液重新混合，被携带到上部井段，在更上部井段形成新的砂床。

当喷射工具向新形成的砂床移动时，喷射产生的紊流也有助于搅动堵塞物，将淤塞物向上携带，直至其再次沉淀。该过程不断重复，随着连续油管沿井筒上拉，砂床不断向上移动。如果连续油管速度太快，或者喷嘴不合适，可能会绕过固相物质，造成固相物质沿井筒不均匀分布，导致只清洗出部分淤塞物，从而需要再次进行洗井。如果流量太低或洗井液设计不合理也可能产生这种问题。

< 洗井过程。典型的洗井过程包括几个步骤。首先，连续油管将洗井工具送到淤塞物上部 (A)。在 B 图中，工具进入淤塞物中，同时循环、冲洗搅动固相物质，并吃入淤塞物中。在 C 图中，已经达到预定的吃入深度，上提喷射工具至尾管顶部，开始驱扫过程。在 D 图中，井筒临界角 (40 到 65 度) 井段的淤塞物得到驱扫。通常，一旦固相物质被驱扫到尾管顶部后，就将喷嘴重新下入井底，进行下一轮吃入并重复该过程，直到将全部固相物质从井筒内清除。

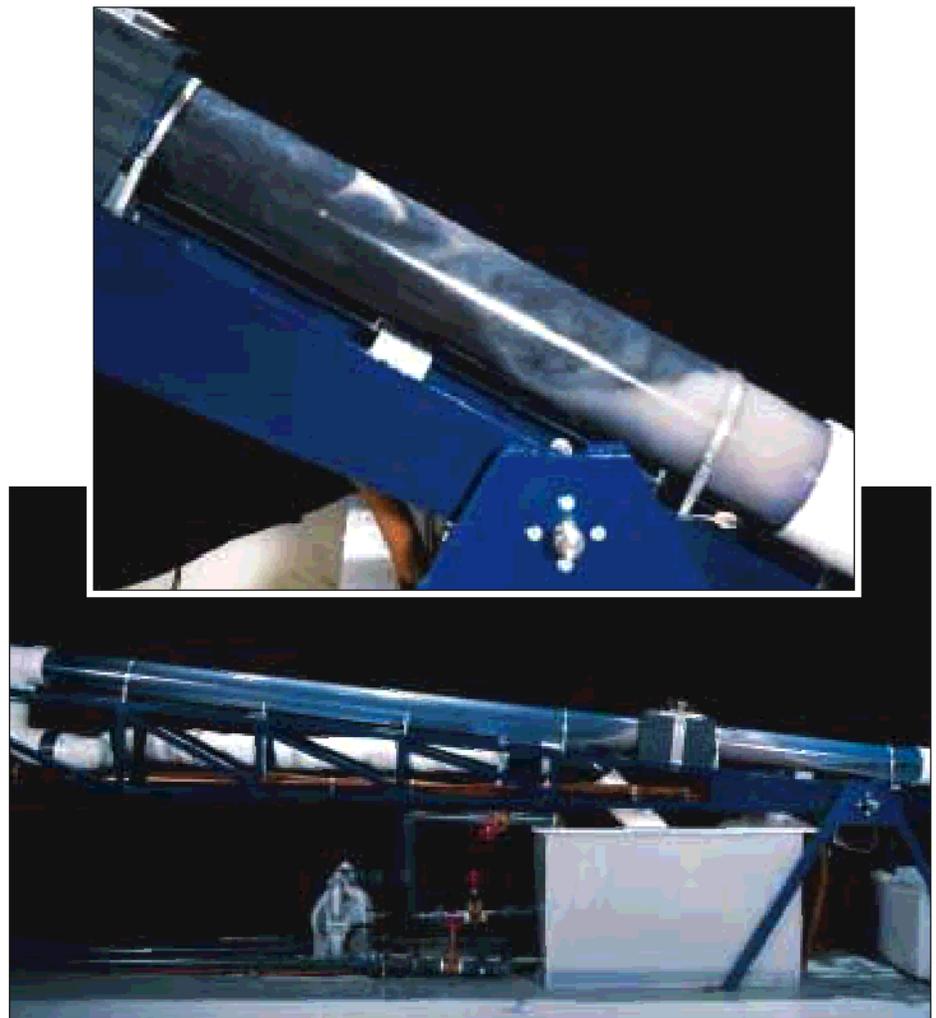
综合洗井系统

设计洗井作业时，工程师要考虑许多因素，包括完井结构、井斜、洗井液性质、流体流速、循环压力极限、井底压力和温度、要清除的固相类型以及固相物质需要输送的长度等。通常情况下，流速较高、完井尺寸较小、固相物质较轻且棱角较多、井斜和井底温度较低以及固相物质需要输送的距离较短时，洗井作业比较容易进行。但是，在 40 - 65 度的井段，井斜的影响会使任何洗井作业都非常困难^[5]。

斯伦贝谢于 2002 年在得克萨斯州 Sugar Land 的斯伦贝谢综合产能和传送中心 (IPC) 推出综合洗井系统。工程师首先采用流动环路实验数据验证并改进早期的理论模型和计算算法 (右图)。当认识到没有任何一个因素能够单独决定洗井的成败之后，工程师们转而考虑进行系统综合，开发出了 PowerCLEAN 堵塞物综合清除系统。将软件应用、洗井液、喷射工具和喷嘴设计以及固相清除监测综合到一个系统中，有助于工程师设计经济有效的洗井方案，包括在各种井眼条件下 (包括大尺寸套管、高温和复杂井眼轨迹) 清洗砂粒、陶粒和其它碎屑物质。现代连续油管洗井作业所采用的基本技术都很相似，真正的差别在于如何综合关键技术如软件、洗井液、喷嘴和固相监测等。

软件 - PowerCLEAN 作业设计软件是优化洗井作业的综合平台。在井眼和作业条件一定的情况下，软件可评估和优化清洗液的一系列变量，包括最大允许循环压力下的最大流速、井底压力极限、穿过堵塞物时的最大连续油管入井速度和吃入深度、砂床形成和与驱扫要求有关的特性、最佳连续油管驱扫上提速度以及进行下一次吃入前的驱扫长度等。

其它参数可以在设计软件中设定，以保证安全、有效地进行洗井作业。例如，软件能预测斜井低边形成的砂床的高度，通过调整作业程序，工程师可



▲ 大规模流动环路模拟实验。斯伦贝谢综合产能和传送中心 (IPC) 的工程师采用 7 英寸透明流动回路 (上) 和不同尺寸连续油管，评估井斜从 45 - 75 度情况下，不同流体和喷嘴组合的固相输送能力。在改变堵塞物类型、环空流速和固相量的同时，对净化效率进行评价。实验还有助于优化喷嘴设计，使吃入速度、微粒悬浮和驱扫速度最大化 (下)。

以确保砂床高度不超过预先确定的占井眼截面积的比例，从而减少摩阻和油管拉力、当量循环密度 (ECD)，降低卡油管风险^[6]。

洗井液 - 洗井作业所用的流体通常是用于其它油田作业如水力压裂和砾石充填而开发的。在连续油管作业中，洗井对流体体系要求较高。由于水力直径通常较小，就要求工程师平衡携砂效率和流体粘度与流速、井底温度和压力之间的关系。这使许多现有的洗井液不足以满足复杂井眼条件下的洗井要求。

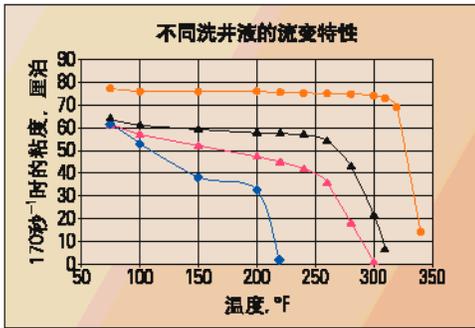
为解决这一关键问题，斯伦贝谢的工程师开发了 PowerCLEAN 洗井液体系。

工程师们充分考虑了热对粘度及相应的井眼净化效率的影响问题。尽管在动态情况下，速度在输送效率中起着更重要的作用，但增加流体粘度能预防静止时固相沉降^[7]。

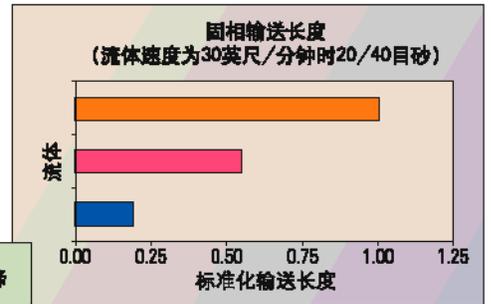
5. Rolovic 等人，参考文献 3。

6. 当量循环密度为循环流体作用在地层上的有效密度，考虑了环空中所研究点上部的压降。

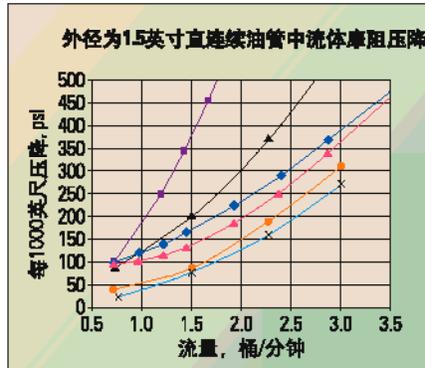
7. Rolovic 等人，参考文献 3。



● 0.5-加仑/桶 PowerCLEAN 凝胶
 ▲ 1.75-磅/桶 welan
 ▲ 1.75-磅/桶 黄原胶
 ● 1.75-磅/桶 瓜尔胶



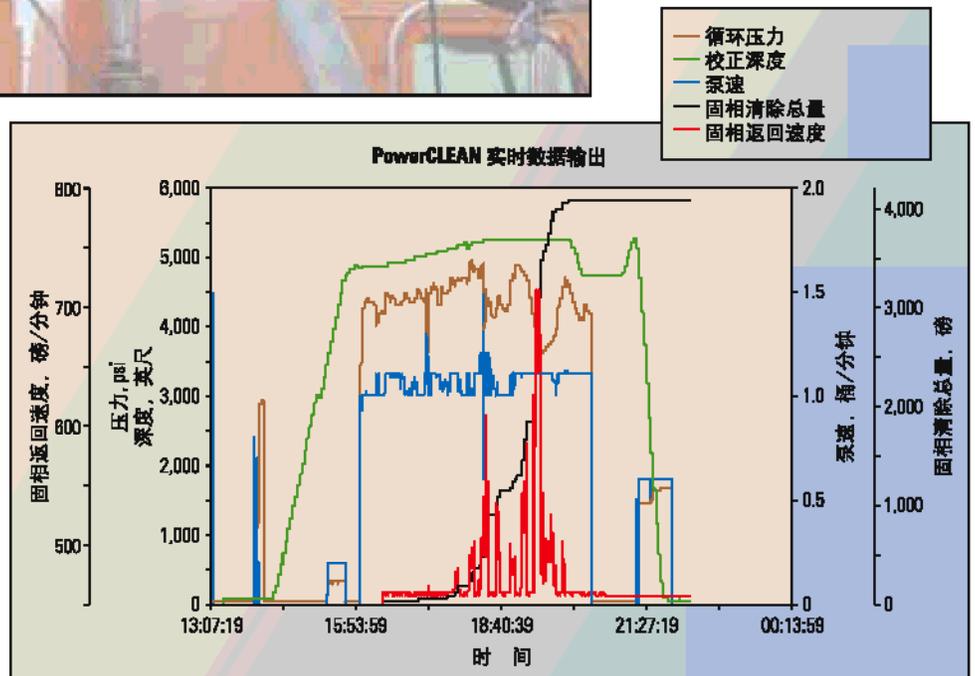
▲ 洗井液评价。实验室分析表明，PowerCLEAN 流体在温度低于 325°F 时具有热稳定性（橙色曲线左）。实验室实验表明，与普通洗井液相比，PowerCLEAN 凝胶（橙色）循环摩阻压降低（中）。在实验中，还用低摩阻水溶液和降阻剂进行了对比（浅蓝色曲线）。而且，与黄原胶基流体（粉红色）相比，PowerCLEAN 流体（橙色）在较低的浓度下携带效率能提高 100%（右）。



● 0.25-加仑/桶 PowerCLEAN 凝胶
 ▲ 1.75-磅/桶 黄原胶
 ● 1.75-磅/桶 瓜尔胶
 ● 水
 ▲ 1.75-磅/桶 welan
 ● 1.75-磅/桶 瓜尔胶
 ▲ 1.75-磅/桶 黄原胶
 ● 0.5-加仑/桶 PowerCLEAN 凝胶
 ● 1.05-加仑/桶 降阻剂



▲ 监测井筒固相物质的清除情况。固相监测系统采用声信号监测从井中清出的固相量。测量装置为非侵入式，连接至井口的返回管线上（左上和右）。整个作业中用计算机界面对测量装置进行监测。输出数据（右）表明了固相返回速度随时间的变化（红色）和估算的固相清除总量（黑色）。数据异常变化可以警告工程师作业中的潜在问题。



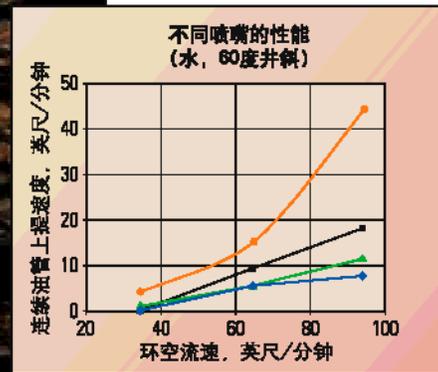
较高的粘度会增加摩擦压降、降低流速，并损害洗井效率。热对聚合物流体有很大的危害作用，能降低流体粘度和静止悬浮能力（前一页，上图）。

斯伦贝谢综合产能和传送中心（IPC）的工程师采用水平流动环路研究不同流动条件下的微粒沉降速度。含有PowerCLEAN凝胶的一种溶液的粘度剖面表现出很好的剪切稀释性。进一步的实验研究表明，在温度达到325°F（163℃）的情况下，该体系仍有合适的粘度。

在一些情况下，不需要使用先进的流体体系，常规的流体如水、瓜尔胶、羟乙基纤维素（HEC）、黄原胶、welan和粘弹性表面活性剂基流体可以与PowerCLEAN体系一起有效使用。在该过程中一个重要的因素就是为给定的应用选择合适的流体，满足流速要求、喷嘴设计和井筒条件等。

喷嘴— 现有设计包括前后喷射的喷嘴、只向前喷射的喷嘴、只向后喷射的喷嘴和能够根据要求在向前喷射和向后喷射之间转换的喷嘴。所有这些都包含径向涡流诱发特征。斯伦贝谢综合产能和传送中心（IPC）的工程师通过理论研究和在3.5英寸和7英寸的流动环路中的洗井实验经验设计了新的喷嘴。设计的喷嘴要确保在大多数井身结构情况下，采用从水到稠化洗井液等不同流体时，全面有效地清除固相物质。

PowerCLEAN喷嘴没有运动部件，能提供连续喷射产生涡流效应。喷嘴的中心、方向、尺寸和间距等都经过特殊设计，保证清除井筒中的未固结堵塞物并优化举升和悬浮微粒的流体能量（右上图）。经过PowerCLEAN喷嘴的压降相对较低小，在流量为1-3桶/分钟（159-477升/分钟）时，压降一般为100-400 psi（689到2758 kPa）。经过喷嘴的压降小就可以使井内的流量和流速较大，这是有效清除井内堵塞物的关键。



▲ 冲洗井内堵塞物。PowerCLEAN喷嘴（右下）优于其它喷嘴设计。用7.5英寸流动环路进行室内实验时，通过喷嘴设计达到的较高泵速和环空流速加上涡流效应（左），有助于使固体更长时间地处于悬浮状态，使连续油管能以更快的速度上提，从而节省时间并提高了效率（右上）。

固相监测— 成功作业的关键是确保固相以预计速度从井内清除。PowerCLEAN系统的一个重要组成部分是固相监测装置，即一种声传感器，用于测量与固相碰撞管道内表面有关的能量（前一页，下图）。对该能量进行处理，以探测通过传感器位置的固相量随时间的变化情况。观察洗井作业过程中固相返出地面的趋势能证实PowerCLEAN系统的性能。可以对可能出现的问题进行预测，并采取相应的补救措施。

阿拉斯加波纹状井筒的洗井作业

综合洗井系统使工程师能成功地清除先前被认为是太复杂而无法洗井的井筒或修井作业被认为是不经济的井筒固相和碎屑物质。

8. Loveland MJ 和 Pedota J: "Case History: Efficient Coiled-Tubing Sand Cleanout in a High-Angle Well Using a Complete Integrated Cleaning System", SPE 94179, 发表在 SPE/ICoTA 连续油管大会暨展览会上, 美国得克萨斯州 Woodlands, 2005 年 4 月 12-13 日。

康菲石油公司在美国阿拉斯加北坡 Kuparuk River 单元的油井通常在开采的某一阶段发生井筒堵塞, 既妨碍生产又增加了作业费用^[8]。井眼轨迹非常曲折, 在一些情况下, 从高点到低点的波动达 140 英尺 (43 米), 使除砂作业非常困难 (右图)。

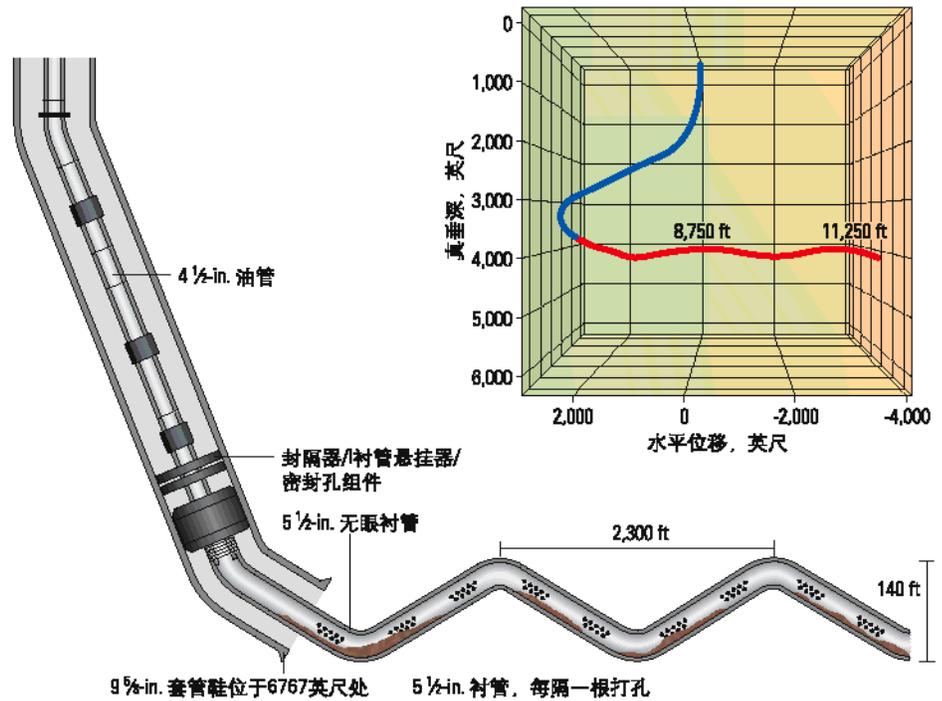
2003 年初, 井队在低压力的 West Sak 砂岩 5000 英尺 (1524 米) 的水平段完成了一口井。在喷射泵的帮助下, 油井初始产量达 660 桶/日 (105 米³/日)。

2003 年 9 月, 关井并替换人工举升系统。在修井作业中, 钢丝在靠近衬管顶部 6580 英尺 (2006 米) 处遇到了堵塞物。10 月, 斯伦贝谢的现场专家将连续油管下入井中, 探测到堵塞物位于连续油管测深 (CTMD) 8775 英尺 (2675 米) 处。尽管通过连续油管泵入了润滑水和生物聚合物凝胶段塞以及润滑柴油与胶凝柴油段塞清除井内碎屑, 但清除到地面的固相物并不多^[9]。随后对下入负荷测量资料进行分析, 结果表明连续油管并没有探到砂, 而是达到了其滑动摩擦极限, 或称螺旋锁定。

2003 年 11 月, 采用更大外径的连续油管再次进行洗井。在连续油管下放过程中, 现场专家遇到了比正常阻力要大的阻力, 表明沿井筒长度堵塞有砂粒。在衬管上部, 连续油管测深 (CTMD) 6521 英尺 (1987 米) 处探测到砂堵。通过连续油管以 2.1 桶/分钟 (333.8 升/分钟) 的速度泵入柴油基洗井液, 并在驱扫到生产油管底部 (或油管尾部) 前吃入 100 英尺 (30.5 米)。在 7449 英尺 (2270 米) 处, 不再有返出, 立刻将连续油管拉出了井筒。

在将连续油管提出地面时, 现场专家注意到连续油管超载提升, 表明一些固相物质仍滞留在井筒中, 并沿油管下滑。但是, 当喷射工具接近地面时, 又恢复了返出, 工程师观察到大量被胶凝柴油润湿的砂砾返出地面。在洗井之后, 油井生产了约一个月后又被砂堵。

康菲石油公司和斯伦贝谢的工程师们设计了第三次洗井。这一次, 他们采用了 PowerCLEAN 综合洗井系统。CoilCADE 连续油管设计和评估软件中的



▲ 阿拉斯加一口复杂井眼轨迹的油井。阿拉斯加 Kuparuk River 单元 West Sak 砂岩多目标砂层高度分层的特点, 使康菲石油公司采用非常曲折和波状的轨迹钻了 IC-172 井 (右上)。在测深 6521 英尺 (真垂深 3930 英尺 (1198 米)) 处, 下入 5 1/2 英尺打孔衬管, 下到 11970 英尺 (3648 米)。井筒的波状特点使其很容易形成大量砂床, 并使洗井作业非常困难。

洗井设计模块使工程师们能对几种现有的洗井液, 包括 2% 的氯化钾、welan 基、黄原胶基、柴油、凝胶柴油和 PowerCLEAN 凝胶体系进行评价。由于井底压力低, 不管使用何种可选液体, 都需要气举, 可采用天然气或氮气进行气举。由于该井结构波状起伏, 因而不知道堵塞物聚集的确切位置。

为了对比液体用量, 工程师们假设从 6521 英尺测深开始, 以 500 英尺 (152 米) 的增量进行清洗。单趟驱扫洗井模拟预测表明, 采用 PowerCLEAN 凝胶, 洗井作业可在 6 个小时内完成, 使用 1000 桶 (159 米³) 液体和 22 万英尺³ (6230 米³) 氮气。采用黄原胶需要作业 24 小时, 使用 5200 桶 (826 米³) 液体和 74 万英尺³ (20956 米³) 氮气。而采用 welan 则需要作业 29 小时, 使用 5200 桶液体和 92 万英尺³ (26054 米³) 氮气。如果采用柴油基液体, 则单趟驱扫所需时间和液体用量太高, 因此, 此方案不予考虑。

在达到生产衬管之前, 首先从生产油管中清除了气体水合物和多个砂桥^[10]。PowerCLEAN 软件模型推荐通过优化喷嘴的液体流量为 4.6 桶/分钟 (731

升/分钟), 氮气量为 900 英尺³/分钟 (25.5 米³/分钟)。模型还预计, 单趟驱扫的可能吃入速度为 7.2 英尺/分钟 (2.2 米/分钟), 吃入深度为 124 英尺 (37.8 米)。每趟吃入都需要循环 14 分钟才能进行下一次吃入。

在作业中意外出现井口压力升高的情况。为了防止出现漏失, 康菲石油公司和斯伦贝谢的工程师们再次对作业设计进行了评价, 将流量降到 3 桶/分钟。根据该新流量进行的重新设计将氮气流量降到 800 英尺³/分钟 (22.6 米³/分钟), 吃入速度降到 7 英尺/分钟 (2.1 米/分钟), 吃入深度降到 120 英尺 (36.6 米)。降低流量就不能再采用单趟驱扫循环洗井, 因此, 工程师转而采用多趟驱扫, 每趟驱扫都达到衬管顶部。

在整个作业中, 斯伦贝谢的现场工程师都利用固相监测系统来监测固相清除速度, 验证了 PowerCLEAN 系统洗井设计的有效性和固相携带能力。与先前的常规洗井体系不同, 在喷射最后 1000 英尺时未发现很大的砂负荷。对返出流体定期进行人工取样分析, 结果也证实了自动固相监测系统的准确性。

总计泵入了约 3000 桶 (477 米³) PowerCLEAN 液体, 11120 加仑 (42 米³) 氮气和约 500 桶 (79 米³) 柴油。地面液体处理设备处理氮气的能力有限, 因此 PowerCLEAN 不能重复循环, 实际要求的液体用量比预计的多。在将来的作业中改进脱气方法将能大大降低 PowerCLEAN 液体用量。洗井作业后, CoilCADE 模型预测的连续油管下入力与实际测量值非常接近, 表明洗井后的衬管内已经没有了沉砂。

斯伦贝谢的工程师利用与康菲石油公司在阿拉斯加一起作业的经验对 PowerCLEAN 软件模块进行了适度调整, 使其能更准确地模拟和设计整个井筒的洗井过程。作业后该井的初期原油产量约为 1000 桶/日, 之后稳定在

500 桶/日 (79 米³/日)。综合洗井系统成功地用在了井底压力低、完井装置内径大、井眼轨迹波状复杂的长水平井中。康菲石油公司和斯伦贝谢计划继续采用该系统来提高 Kupa-ruk River 单元其它复杂井的洗井效率。

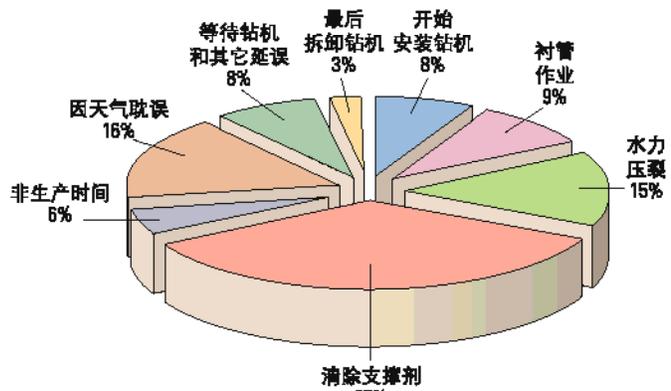
提高增产处理后的洗井效率

随着作业者对更多低渗透率油藏的开发, 大斜度和其它复杂水平井的水力压裂增产处理已经成为常用方法。但压裂后, 一些支撑剂残留在井下, 在开始生产前必须将其清除 (请参见“用于水力压裂的新型纤维”, 第 34 页)。

从 1996 年开始, 在挪威海上的 Valhall 油田进行水力压裂已经成为作业者 BP 公司 (以前的阿莫科公司) 的首

选增产处理方法。在北海, 连续油管作业费用很高, 通常需要一个增产处理作业船和 20 多人的完井和作业专家队伍。由于支撑剂清除作业占 Valhall 油田连续油管使用时间的 35%, 提高洗井作业效率不仅能降低费用, 还能使井更快地投产, 增加生产收益 (下图)^[11]。

9. 润滑水指含添加剂的水基流体, 用来降低摩阻压力。润滑柴油指含降阻添加剂的油基流体。
10. 天然气水合物指由水组成的固态结晶体, 而气体分子则呈冰笼状结构。水分子形成适合各种类型的气体分子的晶格结构。除氢气和氦气外, 大多数气体都能形成水合物。
11. Zhou W, Amaravadi S 和 Roedsjoe M: “Valhall Field Coiled Tubing Post-Frac Proppant Cleanout Process Optimization”, SPE 94131, 发表在 SPE/CoTA 连续油管大会暨展览会上, 美国得克萨斯州 Woodlands, 2005 年 4 月 12-13 日。



▲ 北海地区清除支撑剂。位于挪威、丹麦、德国和英国中间的北海 Valhall 油田 (右下), BP 工程师约三分之一的时间 (上) 用于进行增产处理后的洗井作业。

2004年，BP和斯伦贝谢的工程师建立了一个数据库，记录了在4次完井29次入井的连续油管洗井作业过程。洗井作业的每一步都用24个参数进行了标记，包括支撑剂性质、起始深度、吃入速度和吃入量、驱扫范围深度、循环速度、在井底的时间、起出井眼(POOH)的速度和每步所用时间等。在这些参数中，工程师们将重点集中在优化总有效时间(TET)，即吃入时间、循环上返时间和从井底冲洗到井口的时间之和。

工程师应用PowerCLEAN软件模块对先前的洗井作业进行了分析，确定了提高效率的可能途径。需要特别注意的是，工程师发现残留压裂支撑剂以不同的分布方式出现在井筒中，因此，需要对每个具体井段的所有设计因素进行优化。

作为优化步骤的一部分，工程师证实，经常使用的海水洗井液能为单趟洗井提供足够的携带能力。通过采用PowerCLEAN软件模块进一步分析模

拟，提出了当吃入堵塞物或开始清除堵塞物时使连续油管速度最大化的建议。一些具体参数，如固相物质是否在井眼低边形成砂床、最有效的堵塞物吃入深度等，都有助于确定喷嘴选择、确定流量和流体流变特性要求等。

新设计和建议有助于工程师优化每次作业的循环速度和选择合适的喷嘴，还能用于确定对洗井液流变特性的要求、计算下入速度和吃入量以及减少或消除上返的井底循环时间。当上返驱扫过程中，在衬管和油管段的速度可达20米/分钟(66英尺/分钟)。

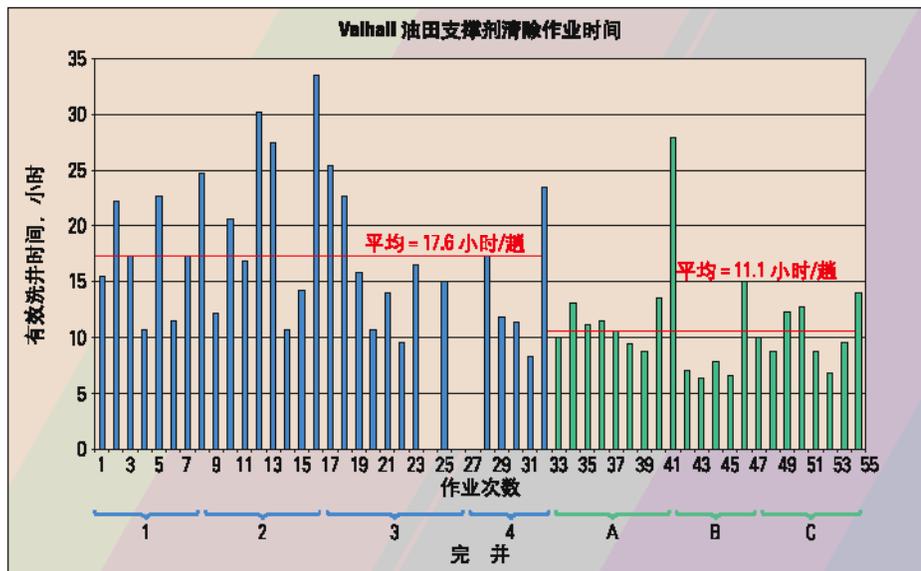
对BP而言，Valhall油田支撑剂清除优化项目通过提高作业效率和可靠性、降低卡钻风险而达到了预期目标。采用PowerCLEAN综合洗井系统在三次完井中总计进行了22趟作业，平均总有效时间从17.6小时/趟降低到11.1小时/趟(下图)。每趟作业节省6.5小时，相当于平均有效洗井时间缩短了37.2%，作业效果和效率大大提高。

提高老油田的洗井效率

位于中国南海马来西亚海上Terengganu甘马挽东北约170公里(105.6英里)的Dulang油田于20世纪80年代初期投产。该油田的作业公司是马来西亚国家石油公司(PETRONAS)，包括四个平台，每个平台有15到22口井。正如其它许多老油田一样，稳定Dulang油田的产量也是一个令人头疼的任务。

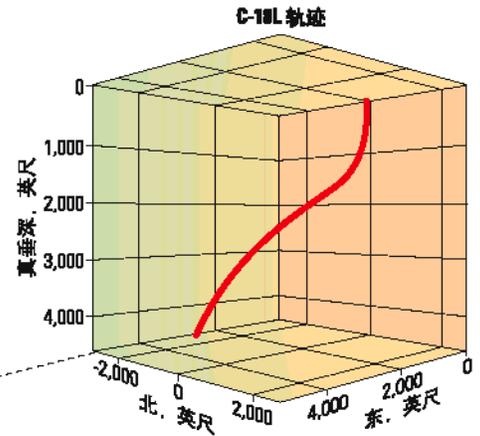
尽管Dulang油田的油气井也存在结蜡、结垢和高含水等问题，但出砂仍是产量下降的主要原因。2004年，至少有8口井因为砂堵停产，同时，其它许多井的产量也逐渐下降。由于出砂，Dulang油田的井一般每隔3到6个月就要进行修井。对PETRONAS而言，洗井作业的速度和效率直接影响着油田的产量、收益和投资回报等。

套管尺寸大、井斜大、温度高、油藏压力低以及平台空间限制等，都对洗井作业效率产生不利影响。2004年初，PETRONAS和斯伦贝谢的工程师采用PowerCLEAN综合系统对8口井的除砂和清蜡进行了评估(下一页图)。



▲ 提高洗井效率。Valhall油田4次完井(1、2、3、4)的连续油管洗井作业评估结果(蓝色)表明，平均每趟作业时间为17.6小时。采用PowerCLEAN综合系统后，后来三次完井(A、B、C)的平均每趟作业时间降到11.1小时(绿色)，为BP公司节约了大量时间和费用，并使油气井更快地恢复了生产。

序号	井号	处理	堵塞物 顶深, 英尺	井斜, 度	入井 次数	油管, 英寸	套管, 英寸
1	B-22L	清砂	2,986	71	1	2 1/2	9%
2	B-11L	清砂	6,108	80	1	2 1/2	9%
3	B-16	除蜡	无资料	80	1	2 1/2	
4	C-22L	清砂	3,035	75	2	2 1/2	9%
5	C-9L	清砂	4,954	50	1	2 1/2	9%
6	C-17S	清砂	7,888	70	1	3 1/2	
7	C-18L	清砂	6,677	63	1	2 1/2	9%
8	D09L	清砂	6,309	50	1	2 1/2	9%



▲ 提高老油田的洗井效率。马来西亚国家石油公司对南中国海的 Dulang 油田开发已经有 25 年之多。平均井斜角为 65 度, 使洗井作业非常困难。对与 C-18L 井 (右) 井眼轨迹类似的 8 口井进行了评价, 并作为采用 PowerCLEAN 综合系统提高效率的候选井 (左)。

采用 CoilCADE 洗井模块, 工程师对这 8 口井的每一口井都提出了具体的处理方案。根据具体的井眼条件和井身结构, 设计的洗井液从凝胶和水到硝化海水和蜡溶剂混合物等。

为恢复和提高油井产量, 工程师需要清除井内的砂和碎屑物, 以便顺利下入油藏评价仪器, 这样, 就可以对每口井进行评价。在必要时, 对油井进行增产处理, 然后在最短的时间内投入生产。

该油田的多数井都比较类似, 井斜角约为 63°, 井底温度 (BHT) 180 – 250°F (82 – 121°C)。根据设计要求, 工程师通过选择两种不同的洗井液体系 – HEC 基液体用于油管洗井, PowerCLEAN 体系用于清除较大的、更难清洗的套管/油管环空中的沉砂 – 对几口井的洗井液费用进行了优化。

除了 C-22L 井, 所有洗井作业都一趟完成。每次处理都进行了评价, 以验证清砂效果。在几口井中, 工程师对设计进行了修改, 选用硝化泡沫液减少

循环漏失和完井油管渗漏。

通过优化泵速、确定吃入深度和速度、合理选择喷嘴以便有效搅动和悬浮砂粒以及准确估计化学剂消耗量, 综合作业设计提高了作业效率, 减少了连续油管在井下的时间。8 口井中有 7 口井处理后立刻恢复了生产, 另外一口井经过酸化处理后也恢复了生产。

平均而言, PowerCLEAN 综合系统使洗井井下时间缩短 75%, 每次处理的作业时间从两天减少到一天半, 从而为作业者节省了时间, 提高了投资回报, 使井以更快的速度恢复了生产, 使产油量每天增加了 900 桶 (143 米³)。

多学科综合提高效率

效率对优化难于开采的老油田和油藏的生产非常重要。在深刻了解处理过程各个因素之间的相互关系和协同作用潜力的基础上, 各种新技术不断出现, 帮助作业者以更快速度恢复油气井的生产。随着非生产时间的降低, 费用也会降低, 油田的产出就会增加。

了解关键过程因素并非易事, 通常需要各领域专家的参与。例如, 化学工程师通常负责开发洗井液, 而机械工程师和流体力学专家则负责设计喷嘴; PowerCLEAN 综合洗井系统充分体现了这种多学科的协作。

有了软件工具和计算机支持, 工程师就能对多数井眼条件和要求进行快速模拟、迭代计算并优化洗井系统性能。洗井过程的成功综合有助于作业者保持油田的稳定开采。对各过程之间相互关系的深刻了解可使勘探开发行业进一步提高效率。

— DW