

极正压射孔技术在中原油田的应用

张学恒¹, 李海涛², 王永清²

(1. 中原油田分公司开发事业部; 2. 西南石油学院)

摘 要:极正压射孔完井新技术特别适用于低渗、非均质严重或污染严重的油气层, 有利于提高一次完井有效率。本文从极正压射孔完井技术的技术背景分析出发, 阐述了极正压射孔工艺的类型和基本过程。在对极正压射孔设计理论模型分析的基础上, 提出了 EOP 工艺设计基本原则。在中原油田的现场应用表明该工艺对提高油井产能是十分有效的, 具有较好实际应用和推广价值。

关键词:完井; 射孔; 极正压射孔; 射孔完井; 射孔工艺

1 技术背景

1990 年, Orxy 能源公司的 P. J. Handren 等人在分析负压射孔完井油井产能时发现, 每口油井所显示的结果悬殊极大, 压力恢复分析表明综合表皮系数竟在 $-1.0 \sim +50$ 之间。将其转换为对产能有效的孔眼有效率, 最高达 120%, 最低到了小于 5%, 平均有效率低于 25%。换言之, 每四个孔眼中, 有效孔眼不到一个。于是他们便展开了探索这一出乎意料结果的原因, 目的在于最有效地提高一次完井的效率。事实上, 负压射孔出发点的关键在于利用射孔瞬间负压产生的高速回流冲洗孔眼, 运移由于射孔压实造成的孔眼堵塞物, 以期获得清洁无伤害的孔眼。显然, 孔眼的清洁程度与负压值的大小密切相关。遗憾的是, 由于孔眼清洗机理的复杂性, 目前仍无法定量描述负压值大小与孔眼清洁程度的关系。同时往往由于射孔层内纵向上和层间的非均质性, 使得每个孔眼邻近地层的渗透率有一定差异, 而渗透率的大小又严重影响着清洁该孔眼所需负压的大小。也就是说, 由于每个孔眼附近渗透率的差异, 造成每个孔眼完全清洁所需的负压也不一样。在同一负压下射孔, 必然造成孔眼清洗的程度不一。在非均质特别严重时, 有些孔眼可能得不到清洁, 这就导致了前面所述现象。

为了提高孔眼的流动效率和孔眼有效率, 九十年代以来, 国外公司在此基础上提出极正压正压射孔工艺 (Extreme Overbalance Perforating,

简称 EOP)。极正压正压射孔与常规正压射孔有本质的不同, 超正压射孔即是射孔的瞬间井底压力远大于地层破裂压力, 通过采用与储层配伍的优质工作液; 它不但不易伤害储层 (工期短, 与气层接触的工作流体量小), 而且通过利用射孔弹成孔后孔壁高度应力集中产生的微裂纹采用快速高压冲击延伸冲蚀微裂缝 (如辅以小型表皮解堵压裂更佳), 更能有利提高孔眼流动效率。并成功地在大量井上进行了实施, 效果很好。他们曾大胆预言, 低渗透油藏的射孔完井工艺技术将发生全方位转向, 即从人们普遍认为标准的也是最好的负压射孔工艺转到极正压正压射孔工艺。

2 极正压射孔的基本工艺过程

EOP 工艺操作可分为两大类: 一是射孔与冲击同时完成的工艺、二是 EOP 作为独立射孔后的泵注冲击工艺, 即分为使用于未射孔和已射孔的井的工艺。未射孔的井按射孔工艺还可分为三种, 即: 油管传输 EOP 工艺、过油管 EOP 工艺和电缆套管枪 EOP 工艺, 如图 1 所示。

不论是 TCP、WCG、TTP 工艺管柱, 最好使用有枪身射孔枪, 以便射孔后的碎渣留于射孔枪内。射孔前, 使用液体或氮气或混合气液柱向井筒加压, 使井底压力至少等于地层破裂压力。在射孔瞬间压缩气体的能量直接转化为作用于地层的压力, 加压液体以非常高的速度进入射孔孔眼, 由于射孔本身产生的上万兆帕高能冲击会使孔道壁面产生应力集中而出现大量裂纹地层压裂, 因而随

后高速的流体冲刷会使裂纹延伸扩展,形成有效地井底沟通。油管传输 EOP 工艺适用于复杂地层或高压地层,电缆传输 EOP 则适用于低压储层,过油管电缆传输 EOP 工艺适用于不动生产管柱的老井打开新层或补孔作业。

如图 1 中(4)为极高压冲击工艺的示意图,它关键是在油管的尾部装上易碎盘(可以是玻璃、陶瓷、铸铁或其他脆性材料做成),也可以安装阀门,

该阀门由油套环空压差操作打开(如 LPRN 阀或 APR 操作阀)。通过泵向油管中注入高压氮气加压,直到达到设计压力时。如果使用易碎盘,一般通过井口防喷盒释放撞击棒,通过油管撞击到易碎盘使之破裂。工作液在高压氮气的作用下,快速的冲刷已射的孔道,且延伸裂缝。同时,地面泵不断的泵入氮气或液体,使压力衰减变慢。此法是在压力强化增产前,流通孔眼的最好方法。

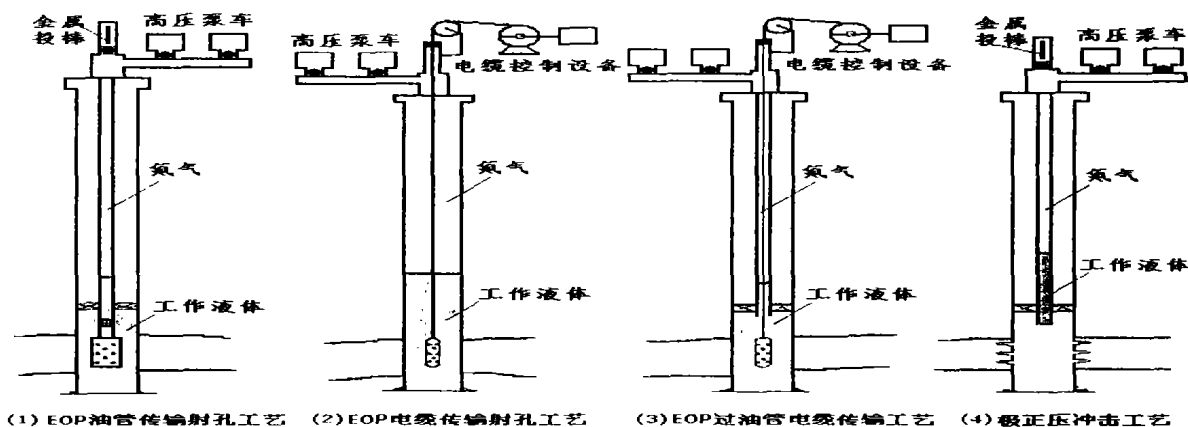


图 1 极正压射孔工艺管柱示意图

3 极正压射孔设计基本理论

极正压射孔设计主要包括两个方面,一是进行合理射孔参数设计,以有利于射孔后裂缝的延伸或酸化的作用面积;二是进行合理的操作参数设计,包括工艺类型选择、操作压力以及氮气和在工作液用量,这主要根据施工效果设计,通过井筒流动模拟和裂缝动态扩展模拟分析这些参数对施工效果的影响后得到。在超正压射孔过程中,流体在井筒中的流动是属于紊流的,因而在油管中的流动摩阻极大。这一流动过程又是非定常的,因而井筒流体流动模拟是超正压射孔动态分析和产能分析的基础。

油管中任意两点之间流体流动能量守恒定律有

$$\int_2^1 \frac{dp}{\rho} = g(z_2 - z_1)\cos\alpha + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + \int_2^1 \frac{f_1 v^2}{2D} dz \quad (1)$$

超正压射孔的压裂过程可以看作是一个介于爆炸地层和水力压裂的中间状态。许多实验和理论上的研究均指出这种裂缝的传播是一个准静态过程。在这一过程,炸药的大部分能量已被耗散,并且裂缝的延伸长度主要归结于气体的膨胀。与垂直井的水力压裂产生双翼缝不同的是将有 4—

6 条裂缝能在准静态阶段得以延伸,计算模型与水力压裂类似。不同是缝长模型。即

$$\int_0^1 (p(\theta) - \sigma) f\left(\theta, \frac{l}{R}\right) \frac{d\theta}{\sqrt{1-\theta^2}} = \frac{k_c}{2} \sqrt{\frac{\pi}{L}} \quad (2)$$

方程中的 f 取决于井筒半径 R 的几何尺寸

$$f\left(\theta, \frac{L}{R}\right) = \left[1 + 0.3(1 + \theta)\left(\frac{1}{1 + L/R}\right)^2\right] \cdot f_N \quad (3)$$

式中, f_N 是多条裂缝校正因子。通过求解井筒流动和裂缝扩展模型,可预测不同施工参数下的施工效果。

4 极正压射孔工艺参数设计原则

极正压射孔的影响主要是流体与管壁产生的摩阻影响,井深越大摩阻越大,摩阻损失将使传递到孔眼处的有效作用压力降低。因此井底压力是有要求的,典型的实用压力梯度是 2500 ~ 3000 KPa/m。

油管的直径和额定压力限制了气体的压力及其用量,因而也限制了传递到孔眼的压力能量。直径越大越好,能提供最大的直径和最大的强度当然最佳。作为底限,油管必须能承受 30 KPa/m 的压力梯度。同样,井口压力控制设备至少必须满足

油管额定压力要求,目的在于使油管串能够承受设计压力。

射孔参数如孔密、相位与射孔弹(深穿透或大孔径)的选择必须考虑裂缝的起裂问题,以及考虑 EOP 作为压裂先导作业的要求。因此参数优化是在一定的限制条件下进行的。

射孔弹类型可以极大地影响着施工效果,研究发现在不同情况下射孔弹屑的表现是不同的。在水力慢速升压过程中,孔眼弹屑表现为是可渗透的。但在高速超正压力冲击波作用下,弹屑又能表现为非渗透障碍物,最好选择无碎屑或低碎屑弹。射孔相位也起着相应的作用,射孔孔密在长射孔井段中变得十分重要,孔密太高可能导致过量滤失,孔密太低又可能导致油管串暴露于高压环境的时间过长,增加封隔器解封的风险,因此优化孔密是重要的。射孔液必须与储层具有良好的配伍性。

5 现场应用效果分析

现场试验在中原油田文 279 井进行,文 279 井位于位于东濮凹陷中央隆起带文留构造文西地垒带文 276 块东部,钻探目的是为了落实该区构造及沙二下、沙三段含油气性,为一口滚动评价井。该井估计平均孔隙度为 15%,估计打开层段地层压力为 32.8MPa,破裂压力为 52MPa,地层温度为 87 度。施工设计考虑了油井井身结构、钻遇油层岩性物性、试油方案、EOP 工艺参数、施工方案及步骤、工艺管柱等几大方面。从安全性和操作角度进行了严格要求,以保证施工顺利进行。设计方案为:采用 TCP 油管传输极正压射孔工艺,采用油管加压引爆,酸量 5 方,液氮 2 方,设计井

口压力 45MPa,井底压力 65MPa,射孔参数为 YD102 枪-90°相位-16 孔/米。施工后通过试井测试分析解释结果表明,该井实测表皮系数约为 -5,说明了工艺效果是十分明显的,井底附近的完善程序较高,达到了预期的目的。通过软件分析计算,文 279 井如果采用常规负压射孔,射孔参数采用 YD102 枪-90°相位-16 孔/米,射孔油井产率比 0.8912,油井总表皮系数为 0.8762,EOP 工艺产率比是常规负压射孔的 4 倍。

6 结论

6.1 分析了 EOP 工艺的技术背景,阐述了 EOP 工艺的基本工艺类型及适用条件;

6.2 在对极正压射孔设计理论以及求解模型分析的基础上,阐述了设计思路并提出了极正压射孔的参数设计原则。

6.3 现场试验结果表明,EOP 工艺对于提高油井产能的效果是明显的,工艺是成功的,具有很好应用价值。

参考文献

- [1] Handren, P. J., Jupp, T. B., and Dees, J. M.: "Overbalanced Perforating and Stimulation Method for Wells," SPE 26515 presented at the 1993 SPE Annual Technical Conference, Houston, TX.
- [2] 李海涛,王永清. 压裂施工井的射孔优化设计方法[J]. 天然气工业, 1999. 5.
- [3] 李海涛,王永清. 确定油井射孔最大付压的新方法研究[J]. 石油钻采工艺, 1997. 8.
- [4] 潘迎德等. 使油井产能最高的射孔参数优选[J]. 西南石油学院学报, 1990, 12(2): 27~36.

收稿日期:2003 年 10 月 15 日

The Application of Extreme Overbalance Perforating Technique in Zhongyuan Oil Field

By zhangxueheng Lihaitao Wangyongqing

Abstract: The New Completion Technique of Exetreme Overbalanced Perforating is Very Effective in Improving Oil Productivity for Wells in Low Permeable or Hihgly Heterogeneous or Badly Damaged Formations. The Types and Procedures of Exetreme Overbalanced Perforating Operations Have been Stated Based on the Investigation of Technical Background. The Theory of Modelling and Designing of EOP Operations Has been Carried Out. Accordingly, its Basic Idea of EOP Job Design Has also Been Brought Forword. Field Test in Zhongyuan Reached a Good Result and Shows Great Practical Importance.