

# 连续油管钻磨复合桥塞作业参数优化

邹先雄 叶登胜 卢秀德

中国石油川庆钻探工程公司井下作业公司

邹先雄等.连续油管钻磨复合桥塞作业参数优化.天然气工业,2014,34(增刊1):31-34.

**摘 要** 多级储层改造技术的产生促进了封隔桥塞的应用,油气井投产前要求桥塞能够快速地被钻磨掉。使用连续油管和容积式马达钻磨复合桥塞是油气田开发中最常用和最有效的技术之一,而这项技术的优化常常受到各种可变参数的制约。通过对连续油管可控变量参数的总结、分析和研究,重点介绍了连续油管钻磨复合桥塞作业技术的优化过程,并认为钻塞工具、钻磨液体流体排量、马达失速停转、钻磨进尺速率和最佳井口压力是影响钻磨桥塞效率的 5 个关键因素。还通过对现场施工作业数据的分析,得到了钻磨进尺速率和最佳井口压力是优化的关键与提高作业效率的结论。

**关键词** 连续油管 钻磨 复合桥塞 参数优化 页岩气 效率 排量

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2014.s1.008

为了探寻更加经济开发油气田的方式,促进了使用复合型压裂桥塞进行多级压裂技术的发展。尽管有的复合桥塞允许部分油气流体通过,但是仅当所有复合桥塞从井筒中钻磨掉后,复合桥塞的最大优点才显示出来。由于多方面原因,通过连续油管传送螺杆马达和磨鞋钻磨复合桥塞是使用最广泛的技术。与修井机钻磨桥塞相比,连续油管设备更加灵活,在井筒中的起下速度比修井机连接油管起下速度快得多,除此之外,连续油管在现场安装拆卸时间比修井机更短,这可以缩短现场总的施工作业时间。最重要的是,连续油管可以安全用于带压环境中,能够减少作业人员和设备的数量。如果没有必要压井,可以提供一个清洁的产层,这特别适用于低压或敏感性储层。

钻磨桥塞过程中遇到的难题是许多变量必须予以考虑,包括泵压、连续油管内的摩阻、流体排量、连续油管设备、马达类型、磨鞋规格、井底压力、井底温度、完井情况和地面设备情况,同时还包括整个系统的不可预见性。

从现场来看,流体压缩性影响更大。在使用连续油管进行钻磨作业时,主要依靠泵压表和油管悬重表指示来分析马达在井下的作业情况。压缩流体可以使压力监测系统压力减小滞后;当马达在载荷条件下(例如:钻磨过程中施加扭矩),马达压力上升,其值

与流体经过马达的量有关。与使用不可压缩流体相反,马达压力上升不会按比例立即传递到地面,但会出现较严重的时间延迟和较低程度的压力上升。如果马达压力增加到一定程度,作用于桥塞的马达扭矩不再增加,马达将停止转动,工具组合必须上提脱离桥塞面。这样的延迟和压力上升,如果没有正确给予考虑,会增加马达失速停转次数,延长施工时间,加大流体使用量和连续油管疲劳强度,最终导致连续油管作业成本较高、效率降低。

优化钻磨复合桥塞作业过程,研究选取了一系列可变参数。这些参数的优化都是为了减少流体的使用量,降低流体的影响,提高钻磨速度。这些可变参数包括:①流体排量;②钻进速率;③井口压力。

作业的重复性允许将上述参数与其他参数区分开。钻磨过程中,下列参数看作常量,即连续油管尺寸、连续油管平均长度、连续油管材质、连续油管构造、连续油管设备、流体泵注设备、连续油管接头、钻磨井下工具(单流阀、震击器、马达、磨鞋)、复合桥塞类型、套管尺寸、套管材质、地面返排设备等。

## 1 流体排量最优化

采用迭代的方式最优化流体排量:①利用已作业过井的施工方案设计,基于井底压力和井底温度数据,

使用专门的连续油管模拟软件,获得流体的初始排量;  
②实时监测地面数据,利用已知地面参数反推井底压力的实际数据,再通过专业的连续油管模拟软件重新计算获得最优排量;③测试最优化排量并进行评价;  
④持续监测泵注压力和井口压力变化。

### 1.1 优化原理

依据基础数据估计井底压力,通过连续油管模拟软件计算液体初始预期排量。在该排量下,预计泵压、井口压力和通过螺杆马达的体积流量。调整连续油管仿真模拟软件井底参数后,重新计算最优化排量,可以确定这个排量稍有一点偏高,但是仍然控制在安全范围内。虽然大排量导致高泵压,但是只要控制在安全作业范围内就不会有问题。高排量导致通过马达的体积流量增加。

### 1.2 优化效果分析

更大流体排量能够加快钻磨速度。同样,高的马达体积流量,经过计算优化后,能获得高的马达转速。利用连续油管仿真模拟软件进行设计阶段必须仔细考虑。同样重要的是,必须重视在作业现场,利用现场作业数据重新计算最优化排量。

最优化过程是快速高效的,优化的施工排量可以迅速得到并立即得以应用于现场。作业过程的同一性使得基于已作业井施工数据优化的“初始排量”更精确,并通过进一步反复优化这些“初始排量”,使之成为同一区块标准的最优化施工排量。这项技术引进到钻磨复合桥塞过程中,避免了必须在现场通过试验和错误来获取最优化的施工排量。

## 2 钻磨速度最优化

当系统流速改变时,流体需要更长的时间来趋于稳定(达到一个稳定状态)。因此,在连续油管及其外侧面流体流速发生改变后,地面压力随之做出改变或调整前,流体进行重新分配,保证整个体系有足够的时间跟上这个变化是十分必要的。利用连续油管仿真程序包可以预测这个响应时间。

在实际应用中,井底压力的预测,方案设计很有必要。可以钻磨前从现场压裂改造施工数据中获得。

### 2.1 最佳钻速

在钻磨过程中获得最佳钻速是靠经验、操作手的观察和作业后的分析:①监测钻磨复合桥塞的下钻速度;②持续监测连续油管悬重,保持稳定在最小值;③作业后对钻速数据进行分析,总结作业规律和经验。

### 2.2 优化原理

为了分析钻磨过程中钻速的变化情况,仔细研究

连续油管操作室数据采集系统获取的钻磨深度和时间的关系数据。测井曲线、前期工作信息、连续油管仿真模拟软件都可以帮助进行优化。将每一个桥塞钻磨过程中的钻磨深度和时间关系均绘成曲线。值得注意的是,钻磨复合桥塞时马达可能失速停转,所以要上提连续油管脱离复合桥塞,然后再下放继续进行钻磨作业。反复起下油管的时间不算在有效的钻磨时间内。图1显示了钻进深度和时间的关系。

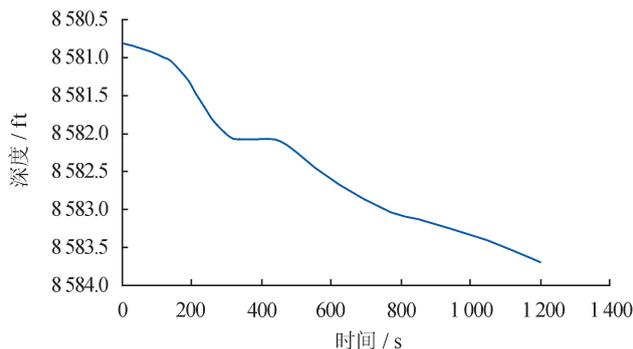


图1 复合桥塞钻进深度和时间关系曲线图

(1 ft=0.304 8 mm,下同)

### 2.3 优化效果分析

一般来说,在接近复合桥塞顶部时钻速变化比较大。这主要是因为复合桥塞顶部有砂。在钻磨开始前这些沉积起来的砂应该清除掉。但是,存在这样一个有利事实:由于桥塞顶部有砂,一些砂侵入桥塞上部,这对加快桥塞钻磨速度是有利的,这类砂粒能被“冲洗掉”,而不是“钻磨掉”。这对于马达和磨鞋靠近桥塞区域高速运行致使其失速停转的次数减少是有利的。

分析钻进深度—时间曲线得出的另外一个结论是从桥塞顶部开始钻磨,从顶部复合型材料部分开始到金属卡瓦为止,钻磨速度相当快。

进一步对钻进深度—时间曲线进行分析表明,在钻磨整个复合桥塞过程中,有两个区域钻磨速度下降明显,曲线下滑趋势变缓,图2用两条红线标出低钻速位置。将图3所示复合桥塞饼图和图4所示钻深—时间曲线叠加起来可得出明显的结论。两条红线位置(低钻速区),正是复合桥塞的金属卡瓦位置,变化趋势在钻进深度—时间曲线大部分区域可以观察到。图4所示为叠加后的图,称为“钻磨曲线图”。

这个发现的重要性体现在根据钻磨作业本身的特点找出了进行优化的切入点。从现场情况来看,许多马达失速停转是因为对钻磨作业错误的认识没有改变或在钻磨过程中没有作任何优化。当出现没有进尺的

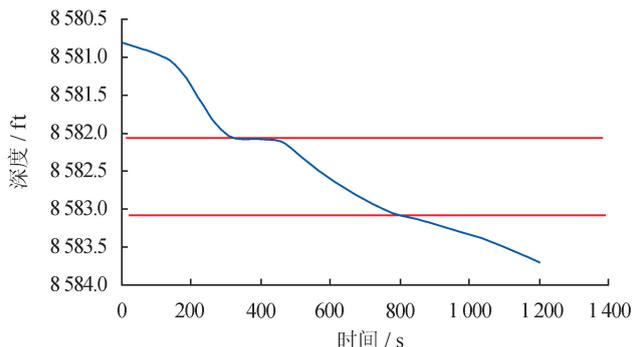


图 2 钻深—时间关系曲线图



图 3 复合桥塞样图

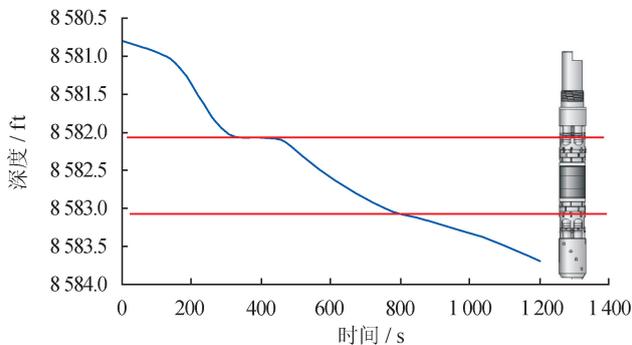


图 4 钻磨曲线图

时候,常常可能尝试加大钻压,通过磨鞋施加到桥塞上来加快钻磨速度。增加到马达上的负荷可能导致马达后续的停转,从而需要花费更多的时间。另一方面,如果对钻磨桥塞过程中下钻速度在不同位置大幅下降引起了足够的注意,就可以理解导致进尺停滞是因为有一个更坚硬的阻塞物必须钻磨掉,需要更大的钻压,从

而导致马达停转。研究结论有:使用疲劳寿命较高的连续油管 and 由熟练操作手进行快速钻磨可以获得更高的作业效率。

依照统计学观点,从国外文献调研情况来看,并从超过 100 个复合桥塞钻磨作业中分析得出:50%的作业中钻磨底部卡瓦块的时间比顶部的时间更长,25%的作业中钻磨顶部卡瓦块时间比底部时间更长,25%的作业中钻磨上下卡瓦块时间相当;96%的钻磨作业中,在同一口井中钻磨复合桥塞顶部要比其余部分快。

分析钻磨作业时间,比较前 25%和后面 75%操作时间,目的是为了确定由于采用了最优化排量 and 钻速所发生的明显变化或钻磨效率的提高。在 25%的钻磨作业时间中,有 52%用于实际钻磨中,另外 48%用于停转、将磨鞋从桥塞面脱离和重新下入加钻压到桥塞上。相反,在后面 75%的作业时间中,有 74%时间用于钻磨,只有 26%用于停止钻磨和起下工具。事实证明最优化可以提高效率,每口井节约 43%的作业时间。

### 3 最佳井口压力优化

在磨鞋接近桥塞顶部时,由于桥塞顶部可能沉砂,过快地下入连续油管可能导致马达提前停钻。另外,钻磨至复合桥塞卡瓦滑块时钻速会迅速减小。

#### 3.1 监测和优化井口压力变化

优化井口压力具有更大难度。如果系统发生变化,井口压力需要的稳定时间最长。当流速改变,首先会影响所有地面设备,连续油管、井下工具管串、连续油管和套管之间的环空,最后才是井口压力。如果是压缩流体,井口压力变化延迟将更明显。无论如何,在优化过程中,将磨鞋接近桥塞前确保钻磨系统尽可能稳定大有益处。磨鞋靠近复合桥塞前、钻磨过程中及钻磨完后,均要仔细监视井口压力。

#### 3.2 优化原理

井口压力监测可以直接反映结果,总体趋势是:到达复合桥塞顶部前,井口压力趋于稳定。一个较可信的解释是由于到达复合桥塞顶部前流体系统稳定,流体动力没有改变,所以井口压力没有明显变化。

开始钻磨作业后,井口压力出现一个较为平缓的下降。复合桥塞顶部的砂粒和碎屑被冲洗混入泵注流体,从连续油管和套管之间的环空被举出,这可以解释井口压力有平缓下降趋势的原因。液柱内固体颗粒额外增加的重量使得井口压力下降缓慢,同时,进一步的钻磨桥塞,加大了这种影响。

一旦复合桥塞被完全钻磨掉,井口压力逐渐趋于稳定,但比初始井口压力低。钻磨完后短时间内,砂粒

和碎屑在返排液柱中短暂性的出现可以解释这种影响。在更长时间范围内,由于液柱体积的增加以及前隔离产层液体排出,将使得这种影响继续得以保持,即连续油管在井筒内向着下一个桥塞或者人工井底运行过程中,环空移动的液柱高度将增加,且与井筒内流体类型无关(气体、液体,或者气水混合)。下面的桥塞对上一个射孔层段起到一个单流阀的作用,钻磨后该层段完全敞开,将开始排液,但也有一些例外,如射孔层段和上一个射孔段压力梯度相近。

### 3.3 优化效果分析

下一层段比上一层段的压力梯度可能更高。这种情况下,根据地层条件,钻磨掉桥塞后会导致短暂或者长时间的返排液量加大。过平衡下成功钻磨掉桥塞将依赖于液体返排的能力。在现场发现,钻磨过程中的井口压力比设计略低时有益于避免突然的压力升高,导致马达超压停泵情况发生。

降低流体泵注排量,环空静水柱压力增加,井口压力会下降。问题在于井口压力将降多少。国外现场经验证实实际操作要比设计低 30%~40%,称为“最优化钻磨压力”。这个降低压力的重要性在于当井口压力突然上升时能够给连续油管操作手更多的反应时间。操作中采用低的井口压力能够使连续油管操作手在超压停泵发生前采取正确的措施。例如,以 15 MPa 的井口压力钻磨桥塞,井口压力突然开始上升(钻磨掉复合桥塞后),连续油管操作手可能不会立即注意到这个变化或者没有足够的时间做出反应(起出油管,降低流体泵注排量等)。如果用 13.5 MPa 或者更低的压力作业,压力变化更明显,有更多的反应时间,可以避免超压停泵或者潜在的卡钻事故。由于不需要重新建立循环,避免超压停泵有利于保护马达,从而将总的施工时间缩减到最短。但始终必须确保井口压力低于开井压力或开始钻塞前的稳定压力。

## 4 施工效率的提高

在施工作业中注意其他方面的作业效率,包括在

同一井场多口井的钻磨作业中使用大吊车。如果没有空间局限,定好第一口井大吊车位置后,不需要再移动吊车位置,连续油管设备从一个井口移到另一个井口需要的时间将大不相同。移动整个地面设备(注入头、防喷管、防喷器、管线)需要使用大型吊车。

与甲方以及协作配合方之间的沟通交流也相当重要。例如,作业期间,排液流程管理方应该和连续油管队时时沟通。换言之,安装排液管线时不能影响连续油管设备,这样可以节约安装和拆卸管线时间。

施工前了解井况。在有多口井的井场,常发现 2~3 口不同井的桥塞下至相同深度。事先了解井况,有利于制订割除连续油管前端的计划,确保连续油管工作性能,保证连续油管疲劳程度处于最低状态。

## 5 结论

1)利用连续油管仿真模拟软件进行方案设计阶段,各方面均需要仔细考虑,并确保输入数据准确可靠,优质的输入数据产生优质的输出结果。在现场基于实际作业数据重新优化流体排量也相当重要。

2)为避免马达失速停钻,高效进行钻磨桥塞作业时需对流体性质有充分地了解。高效的钻磨作业要求对流体排量进行仔细的研究和优化。

3)选择合适的螺杆马达和磨鞋进行钻磨,可以保证钻磨作业更高效率地顺利完成。如果选择的马达不正确,将需要更长的钻磨时间,还需要进行额外的起下连续油管更换工具。

4)由于排量的改变对马达性能影响很大,高效的螺杆马达作业要求流体排量最优化。

5)对复合桥塞深入的了解有助于现场预测和理解钻磨速度。

6)各方面共同协作参与钻磨作业,可以加快和提高作业效率。

(收稿日期 2014-03-07 编辑 韩晓渝)