

## 深水压裂充填完井管柱设计及应用

程 仲<sup>1</sup>, 张俊斌<sup>2</sup>, 刘正礼<sup>2</sup>, 牟小军<sup>1</sup>, 程 昆<sup>3</sup>

(1. 中海油能源发展股份有限公司监督监理技术公司, 广东深圳 518067; 2. 中国海油深圳分公司钻完井部, 广东深圳 518067; 3. 得克萨斯农业与机械大学石油工程学院, 美国得克萨斯 77843)

**摘 要:** 为了提高中国深水油气田的开采效率、降低深水完井的作业风险, 研究并推广应用了深水压裂充填完井技术。在介绍深水压裂充填完井技术工艺特点、分析完井管柱设计原理的基础上, 结合深水井的井况和特点, 对深水完井作业准备及施工措施进行了优化, 形成了一套完善的深水下部完井作业技术, 包括优化平台布局、完井液管理、井筒一趟式清洗、射孔及压裂充填联作、精细施工等措施。利用该技术在南海某深水区块施工 8 口井, 单井平均作业时间 12.53 d, 防砂成功率 100%, 后期地面测试表明, 各井含砂量及产量均达到投产要求。现场应用表明, 该技术防砂及增产效果明显, 可以有效提高作业效率, 特别适用于钻井作业结束后快速、批量完井作业。

**关键词:** 深水 完井 射孔 压裂 砾石充填

**中图分类号:** TE257<sup>+</sup>.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2012)06-0051-05

## Design and Application of Frac-Pack Completion String for Deep-Water Wells

Cheng Zhong<sup>1</sup>, Zhang Junbin<sup>2</sup>, Liu Zhengli<sup>2</sup>, Mou Xiaojun<sup>1</sup>, Cheng Kun<sup>3</sup>

(1. Energy Technology & Services Ltd. Supervision & Technology Co., CNOOC, Shenzhen, Guangdong, 518067, China; 2. Drilling and Completion Department, Shenzhen Branch Company, CNOOC, Shenzhen, Guangdong, 518067, China; 3. School of Petroleum Engineering, Texas Agricultural & Mechanical University, Texas, 77843, United States)

**Abstract:** In order to improve the recovery efficiency of deepwater oil and gas fields in China and reduce risk in deep-water completion, we developed and promoted the application of deep-water frac-pack completion. This paper gives a brief introduction of features of the technique and the design principles of the completion string, then presents the optimization of preparation and execution of deep-water completion according to the conditions and characteristics of deep-water wells. A complete set of techniques for lower section completion for deep water wells are formed including optimization of platform layout, completion fluid management, one trip wellbore cleaning, the joint operation of perforation and frac-pack, and precise operation, etc. This technology has been used in 8 wells in the eastern South China Sea deep-water cooperation blocks. With an average operating time of 12.53 d, it reached 100% success ratio in sand control. The data of well test shows that sand content and production of all the wells meets the requirement on commissioning. The technique fills the gap in deep-water well completion in eastern region of the South China Sea. Field application shows that the technique works well in sand control and production improvement, and can improve operation efficiency considerably. It is especially suited for fast and batch completion operations after drilling.

**Key words:** deep water; completion; perforation; fracturing; gravel packing

常规的海上完井作业由于受技术思路狭窄、工具能力有限以及完井管柱功能单一等原因的限制, 完井作业过程中需要频繁起下不同功能的作业管柱, 极易因工具故障而发生井下复杂情况。陆地以及浅水作业成本相对较低, 常规的海上完井工艺对

**收稿日期:** 2012-05-21; **改回日期:** 2012-10-12。

**作者简介:** 程仲(1982—), 男, 河南洛阳人, 2005年毕业于西南石油大学电气工程及其自动化专业, 2008年获西南石油大学油气井工程专业硕士学位, 工程师, 现主要从事海上石油钻采技术监督管理工作。

**联系方式:** (0755)26022046, cz820715@yahoo.com.cn。

施工时效的影响不很明显,但是深水完井作业对油气勘探开发技术和装备能力极限的要求很高,且具有作业风险高、难度大、成本高等特点。从作业时效方面考虑,传统完井工艺技术时效低的缺点会导致作业成本大幅上涨。因此,只有应用适合深水作业安全、高效的完井新技术,才能有效提高海上作业时效、降低作业难度、节省深水完井作业费用。

为了保证深水大位移井压裂充填完井作业成功,将压裂技术与胶液充填技术相结合:采用陶粒作为压裂充填材料;使用砾石充填适用筛管;作业时利用端部脱砂来控制裂缝长、宽和高,按优化的设计进度泵注支撑剂,获得最优的裂缝支撑剂浓度剖面,然后在一次泵注作业中对套管筛管之间的环形空间进行压裂充填施工。

经过筛选工具,选用 Weatherford 公司的隔水管-套管旋转刮管洗井工具和 Schlumberger 公司的射孔压裂充填一趟作业工具进行深水完井防砂作业,现场施工效果良好,保证了后续深水上部完井作业的顺利开展。该技术的成功应用,拓宽了深水完井作业思路,为今后同类型区块油井防砂及科学开发提供了技术借鉴。

## 1 技术原理及特点

根据海洋石油钻完井作业时效规定,深水压裂充填下部完井作业划分为迁装作业、压裂充填完井作业和拆迁作业。其中,迁装作业和拆迁作业包括深水钻完井平台移位、隔水管和防喷器组的拆装以及水下井口工具的迁装,平台拖航作业以及水下井口对接程序与深水钻井的相关作业工序一致<sup>[1]</sup>。

深水压裂充填下部完井作业刮管洗井采用 Weatherford 刮管洗井工具,在工具入井的过程中连续对 $\phi 488.95$  mm隔水管、水下井口、防喷器组内腔、 $\phi 273.1$  mm套管和 $\phi 244.5$  mm套管进行清刮、冲洗;采用 Schlumberger 公司射孔压裂充填一趟完井管柱进行防砂,校深后射孔作业的同时实现自动丢射孔枪,再将管柱上的绕丝筛管部件下入到产层井段,通过沉砂封隔器将绕丝筛管对准油层并悬挂、锚定,然后坐封顶部封隔器,脱手服务工具,打开充填通道,采用端部脱砂压裂充填防砂方式由平台压裂设备在达到地层破裂压力、压开产层的条件下将砾石挤压充填到裂缝中,形成新的渗滤带<sup>[2]</sup>。

刮管洗井工具和压裂充填完井工具均采用一趟作业模式,相对常规完井作业模式省去了多趟清刮、单独下射孔枪、射孔、起甩射孔枪等作业工序,有效节省了作业时间;正压射孔作业避免了射孔后工具砂卡的风险;压裂充填施工配套绕丝筛管完井,可以有效清除正压射孔产生的近井筒完井液污染带,实现产层增孔增渗,改善开发效果<sup>[3]</sup>。下部完井压裂充填技术特别适用于大斜度、储层分布相对集中且处于同一压力系统的油气井开发。

## 2 完井管柱设计

钻井作业完成后的临时弃井井身结构如图 1 所示。

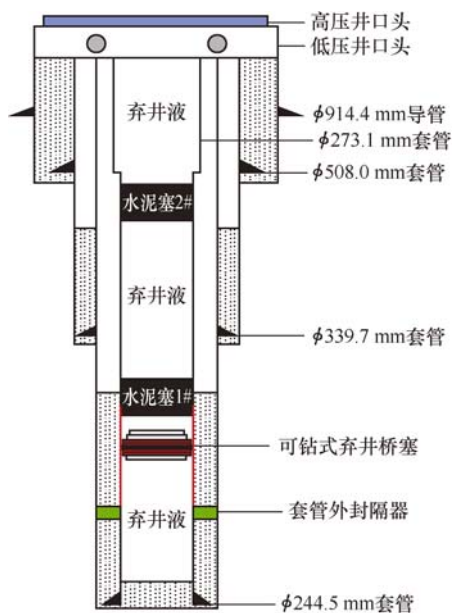


图 1 完井作业前井身结构示意图

Fig. 1 Casing program schematic diagram before completion operation

为了满足以上井况要求,需要设计、使用合适的刮管洗井管柱和压裂充填完井管柱。选用的刮管洗井管柱主要由钻头、旋转式刮管器、磁性除屑器、过滤器、井口冲洗器和隔水管清刮器组成。刮管洗井作业时需要清刮的位置包括隔水管内壁、生产封隔器坐封位置、防砂封隔器坐封位置、沉砂封隔器坐封位置、射孔对应套管段和临时弃井桥塞坐封位置。因此,使用 Weatherford 公司 $\phi 533.4$  mm隔水管、 $\phi 273.1$  mm套管、 $\phi 244.5$  mm套管一趟可转式刮管洗井工具完成刮管洗井作业,工具组成如图 2 所示。



图 2 刮管洗井管柱组成

Fig. 2 Schematic diagram of wellbore cleanout string

其中,过滤器在起钻过程中过滤井筒内完井液含有的碎屑。过滤器由上滑套、过滤短节及下滑套组成。在钻进过程中受液体阻力影响,滑套处于上位,分别关闭了过滤短节的上下过滤孔。起钻时,滑套处于下位,过滤短节的上下过滤孔打开,完井液通

过过滤短节,杂质被过滤器内部的滤网除去。

循环短节作为水下井口冲洗工具,主要用来清洗防喷器内腔和井口。刮管洗井作业时,循环短节下至防喷器附近,通过投球打开其侧面的冲洗孔,将管柱短路,冲洗防喷器及井口。冲洗完成后,投球关闭冲洗孔,恢复管柱下行通路,继续刮管洗井作业。

压裂充填完井管柱由射孔压裂充填一趟式完井管柱及其服务管柱组成。射孔压裂充填一趟式完井管柱自下而上的工具顺序为射孔枪、自动丢枪机构、液压延迟点火头、沉砂封隔器、筛管、盲管、地层隔离阀和顶部封隔器(见图 3(a));完井服务管柱的结构包括引鞋、插入式密封单元、地层隔离阀开关工具、压力计、打砂孔滑套、顶部封隔器坐封工具、管外压力计、脉冲式液控循环阀和信号短节(见图 3(b))。

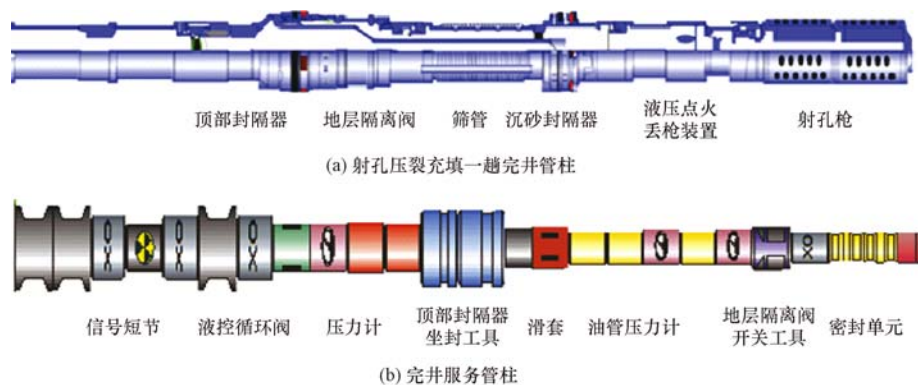


图 3 压裂充填管柱结构

Fig. 3 Schematic diagram of frac-pack completion string

其中,射孔压裂充填一趟完井管柱使用的是双液压点火头和自动丢射孔枪装置。射孔时,管柱内打压至点火液压(打压压力可调),压力传导至点火头连杆活塞下部,推动连杆上行,剪断剪切销钉,连杆推动油路活塞,由于稠油通过油嘴(油嘴可调)需要时间,实现延迟效果,延迟时间一般为 8~12 min。承托筒在连杆上行的带动下上行,直至承托球离开球座,释放撞针,下击雷管,点火射孔。导爆索爆燃,将丢枪装置释放卡瓦的 8 个支撑销炸断,卡瓦失去支撑后内径变小,不能与释放体的内螺纹继续啮合,在自重的作用下,随射孔后的点火头组件、射孔枪筒落至井底,完成射孔、丢枪作业。

沉砂封隔器为机械坐封封隔器,在射孔和压裂充填时使用。沉砂封隔器主要由封隔器本体、坐封解封机构和锚定机构组成,锚定机构在坐封位置可双向承压。坐封解封机构有 4 个 J 形槽,坐封行程

为 1.2 m,通过 3 次上提下压管柱实现坐封,保持上提状态封隔器解封。

完井作业使用 Schlumberger 公司的地层隔离阀作为井控防喷阀。进行完井作业时地层隔离阀能够保证降低漏失,在地层完全被隔离的情况下保证管柱顺利送入和回收。地层隔离阀是一种全开式机械球阀,使用时可以根据需要无限制地利用机械开关工具进行开关。开关工具可以安装在刮管洗井管柱、完井服务管柱或连续油管的末端。

射孔压裂充填一趟完井管柱服务工具中的脉冲式液控循环阀用来监测射孔后的井筒漏失情况。现场工具准备过程中,需要测试脉冲式液控循环阀的地层承压能力和脉冲信号接收能力。在工具入井前通过专用设备对其编程,对其预制脉冲控制指令。

在射孔校深时通过电缆伽马校深工具测定信号

短节的位置,确定筛管深度,完成校深。

### 3 施工措施

平台从作业准备开始至压裂充填完井作业,包括作业准备、钻水泥塞、刮管洗井、校深射孔、压裂充填以及临时弃井作业环节,具体的施工措施如下:

1) 作业准备。West Hercules 平台在完成钻井作业后,进入压裂充填下部完井作业施工阶段。首先优化、调整平台作业区域,对完井作业设备进行符合 West Hercules 平台作业要求的安装与调试。钻井液池、固井泵、泵送管线及地面管汇使用清洗液和海水进行全面清洗,将钻井用的油基钻井液临时储存在平台浮箱中,并对平台钻井液系统进行规划,以便于存储不同种类和不同用途的完井液。

2) 钻水泥塞。安装  $\phi 273.1$  mm 抗磨补心。组合钻塞钻具: $\phi 215.9$  mm PDC 钻头(无水眼)+钻头短节(可装浮阀)+ $\phi 149.2$  mm 加重钻杆 $\times 6$ + $\phi 177.8$  mm 震击器+ $\phi 149.2$  mm 加重钻杆 $\times 2$ 。作业步骤是:下钻,探塞;钻 1# 和 2# 水泥塞及可钻式临时弃井桥塞,循环清洗;起钻。

3) 刮管洗井。组合刮管洗井管柱、下钻;旋转刮管(在可回收桥塞、射孔段、沉砂封隔器位置上下刮 3 次);上提循环短节至井口位置,投球,冲洗井口和防喷器内腔;下钻至井底;按要求泵入洗井液:完井盐水+高黏隔离液+泡沫清洗液+高黏隔离液,大排量循环洗井,直至返出洗井液浊度值和固相含量符合设计要求;起钻。

4) 校深射孔。下完井管柱:射孔枪+筛管+冲管+沉砂封隔器+抛光密封筒+ $\phi 139.7$  mm 筛管+ $\phi 139.7$  mm 盲管+地层隔离阀+ $\phi 244.5$  mm 快速连接短节。作业步骤是:下入完井管柱服务工具;下入伽马+套管接箍测井电缆校深工具,校深;坐封沉砂封隔器,管柱内打压,触发点火头,射孔;发送钻井液脉冲信号,临时打开脉冲式液控循环阀,监测井筒漏速。

5) 压裂充填。解封沉砂封隔器,下放管柱,坐封沉砂封隔器和顶部封隔器;找服务工具循环位置和打砂位置,连接压裂头;找服务工具反循环位置;压裂充填地面管汇按设计要求试压;清洗服务工具,做小型压裂测试;根据小型压裂结果重新设计压裂参数,开始压裂充填(按设计泵入前置液、无砂携砂液,记录压力、排量,当排量稳定、压力达到或超过地

层破裂压力时开始加入陶砂,砂比由小到大逐渐提高,至设计砂量后继续进行憋压充填,直至诱导出现端部脱砂现象<sup>[4]</sup>并监测到)。反循环清洗服务工具,拆压裂头,向井筒替入低密度完井盐水,关井,对地层隔离阀做负压测试,合格后起、甩防砂服务工具。

6) 临时弃井。此时地层已和井筒连通,为了保证井下安全,在防砂封隔器上部分别下入 2 个临时弃井桥塞并坐封。

压裂充填下部完井作业环节完成后的井身结构如图 4 所示。平台移井位,转入下一口井的完井作业。

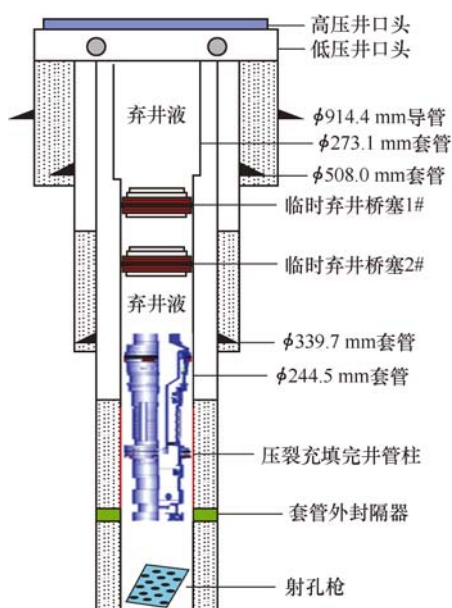


图 4 下部完井作业完成井身结构示意图

Fig. 4 Wellbore schematic diagram after lower section completion

### 4 现场应用

南海某区块某气田水深 1 500 m 左右,其上覆岩层压力低,成岩性差,储层胶结强度低,生产过程中可能出砂,因此需要进行防砂作业。通过优化压裂充填设计以及对现场作业工艺的有效管理,该气田 8 口井单层压裂充填防砂作业均取得成功。就压裂防砂效果而言,8 口井的单层压裂充填防砂充填系数均达到  $133.94 \text{ kg/m}^3$  以上,盲管外砂高均超过 1.75 m,达到或超过了设计要求(见表 1)。

其中,A2 井临时弃井作业期间使用钻杆送入工具下临时弃井桥塞,计划下至井深 3 942 m(井斜角  $65.07^\circ$ )处坐封。下钻至井深 3 501 m 处遇阻,多次活动钻柱,下压 100~300 kN 尝试通过,失败。上提

表 1 压裂充填完井作业施工效果统计  
Table 1 Statistics of frac-pack operation results

井号	施工排量/ (m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	半缝长/m	缝高/m	平均缝宽/ mm	砂浆质量浓度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	设计作业 时间/d	实际作业 时间/d
A1	1.90	36.40	25.50	3.76	59.9~719.2	10.30	11.50
A2	1.93	48.50	27.60	5.07	59.9~599.3	11.98	17.00
A3	2.01	27.00	26.10	7.62	59.9~719.2	13.01	13.33
A4	1.94	66.30	15.00	7.43	59.9~719.2	10.01	9.67
A5	1.89	30.20	28.40	2.87	59.9~599.6	10.88	10.92
A6	1.92	46.50	27.50	10.16	59.9~719.2	10.30	8.58
A7	1.91	14.50	19.60	6.35	59.9~719.2	10.30	9.76
A8	1.90	40.90	31.60	3.51	59.9~599.9	11.12	19.50

管柱至井深 3 491 m,尝试坐封临时弃井桥塞时压力泄漏,失败。起钻至井口,发现桥塞送入工具折断,桥塞及送入工具组件落井。后期共进行 6 趟打捞作业,打捞出全部落鱼。由于钻杆送入工具存在设计缺陷,为了保证井下安全,后续临时弃井作业时桥塞只通过电缆下入、坐封,且要求桥塞坐封位置不在大斜度井段。

A8 井在射孔作业时由于天气恶劣,自动丢枪装置失效,丢枪失败,导致该井后续作业采用常规完井作业程序完成,影响了该井作业时效。

5 结 论

1) 深水压裂充填完井技术采用联作作业模式,提高了作业时效、降低了作业风险。压裂充填作业改善了油气藏的渗流条件,减轻了地层的深部伤害,降低了油气流动阻力,增大了产层渗流面积,达到了增产目的。

2) 应根据压裂充填能力选择压裂充填工具,考虑差压速率、充填挤注、辅助工具的性能以及设备处理高速率、大排量陶粒支撑剂的能力等因素合理选择工具的作业深度。

3) 入井工具发生故障会导致深水作业成本增大,因此应对深水完井作业部分工具的可靠性进行

改进。

参 考 文 献  
References

[1] 陈彬,唐海雄,罗俊丰,等. 西方大力神深水钻井平台国内首次应用介绍[J]. 海洋工程,2010,28(1):125-131.  
Chen Bin, Tang Haixiong, Luo Junfeng, et al. The first application of West Hercules in China[J]. The Ocean Engineering, 2010,28(1):125-131.

[2] 刘北羿. 压裂防砂技术进展及存在问题[J]. 油气地质与采收率,2008,15(4):105-107.  
Liu Beiyi. Technology progress and issues of fracturing sand control[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2008, 15(4):105-107.

[3] 海上油气田完井手册编委会. 海上油气田完井手册[M]. 北京:石油工业出版社,1998:294-320.  
Offshore Well Completion Editorial Committee. Offshore well completion[M]. Beijing:Pestroleum Industry Press,1998:294-320.

[4] 万仁涛. 现代完井工程[M]. 2 版. 北京:石油工业出版社, 1996:49-53.  
Wan Renfu. Advanced well completion engineering[M]. 2nd ed. Beijing:Petroleum Industry Press,1996:49-53.

[5] 谢桂学. 端部脱砂压裂技术初探[J]. 油气采收率技术,1996,3 (1):54-58.  
Xie Guixue. Tip screenout fracturing technology[J]. Oil & Gas Recovery Technology,1996,3(1):54-58.



川庆钻探开发出电缆输送水平井泵送分簇射孔技术

川庆钻探公司通过整合泵送程序设计、一次下井多次点火、复合桥塞和选发射孔器等多项关键技术,自主开发出电缆输送水平井泵送分簇射孔技术。该技术在岳 101-78-H1 井和龙浅 3 井进行了试验应用。岳 101-78-H1 井是安岳区块的一口重点开发水平井,具有射孔簇数多、射孔段多和水平井段长等难点;而龙浅 3 井是位于龙岗构造的第一口水平探井,具有井口压力高、井筒原油黏度大等作业风险。电缆输送水平井泵送分簇射孔技术在 2 口井的试验应用均获成功,在岳 101-78-H1 井长达 1 047 m 的水平井段上,完成 9 次桥塞坐封和 27 簇射孔作业;在龙浅 3 井,井口压力达到 63 MPa、井深 4 215 m 处顺利完成施工。