

基于全息多反馈工具研发解决方案快速研制压裂工具

张玉广¹, 张宏岩¹, 马梓涵¹, 尚进²

1. 中国石油大庆油田有限责任公司采油工程研究院 黑龙江大庆 163453

2. 吉林市旭峰激光科技有限责任公司 吉林吉林 132013

通讯作者: Email: zhy6944@163.com

项目支持: 国家科技重大专项项目“大型油气田及煤层气开发-松辽盆地致密油开发示范工程”(2017ZX05071)

引用: 张玉广, 张宏岩, 马梓涵, 等. 基于全息多反馈工具研发解决方案快速研制压裂工具[J]. 油气井测试, 2018, 27(6): 57-62.

Cite: ZHANG Yuguang, ZHANG Hongyan, MA Zihan, et al. Rapid development of fracturing tools based on holographic multi-feedback tool development solutions [J]. Well Testing, 2018, 27(6): 57-62.

摘要 针对现有井下压裂工具研发周期长、设计效率低的问题,提出了全息多反馈工具研发解决方案(FIMS)。该方案是一整套完善的全生命周期辅助研发解决方案,综合应用三维模型生成、计算机模拟装配、流场分析、应力分析、计算机模拟、激光快速成型(3D打印)、计算机远程控制等多项高端技术,实现了CAD/CAE/CAM和生产配套系统的集成。该技术实现了套管固井试油压裂滑套设计一次性成功,达到了缩短开发周期的预期目标,降低研发成本。设计研制的压裂滑套在低渗透致密油水平井应用8口井,开关性能稳定。结果表明,FIMS方法对压裂工具的研发可提供强有力的支持,对提高企业自动化水平将发挥重要作用。

关键词 压裂工具; 工具研发; 3D打印; 计算机模拟; 三维模型; 滑套; 设计效率; 试油

中图分类号: TE357 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.06.010

Rapid development of fracturing tools based on holographic multi-feedback tool development solutions

ZHANG Yuguang¹, ZHANG Hongyan¹, MA Zihan¹, SHANG Jin²

1. Oil Production Engineering Research Institute of PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163453, China

2. Jilin Xufeng Laser Technology Co., Ltd., Jilin, Jilin 132013, China

Abstract: In view of the long development cycle and low design efficiency of the existing downhole fracturing tools, a holographic multi-feedback tool development solution (FIMS) was proposed. The solution, as a complete set of full life cycle assisting R&D solution, integrates 3D model generation, computer simulation assembly, flow field analysis, stress analysis, computer simulation, laser rapid prototyping (3D printing) and computer remote control, which realizes the integration of CAD/CAE/CAM and manufacturing supporting system. The technology realizes the one-time success of the cased hole testing fracturing sliding sleeve design, shortens the development cycle and reduces the research and development cost. The designed fracturing sliding sleeves were applied in 8 horizontal wells of low-permeability tight oil reservoir and presented stable switching performance. The results show that the FIMS method can provide strong support for the development of fracturing tools and will play an important role in improving the automation level of enterprise.

Keywords: fracturing tools; tool development; 3D printing; computer simulation; 3D model; sliding sleeve; design efficiency; well testing

低渗透致密油气储层已逐渐成为勘探开发的主要领域,储层具有纵向不集中、横向不连续、砂体物性变化大、含油程度差异大等特点,压裂增产改造技术是实现其有效动用的主要技术手段,压裂理念上已从单一缝向体积缝转变,单层动用向多层立体动用转变。压裂工艺向低成本、高效、环保转变,近年来形成了速钻桥塞、水力喷射、滑套

分段等多项压裂工艺技术,并大规模推广应用^[1]。其中滑套分段压裂工艺作为代表技术之一,各油田及科研院所均开展了相关研究与应用,如投球压裂滑套、固井可重复开关滑套、无线射频识别滑套等。

针对苏里格气田压裂提产,韩永亮等^[2]研制了水平井分段压裂滑套,包括压差式开启滑套和投球

式喷砂滑套,与悬挂封隔器、裸眼封隔器、坐封球座等配合使用,该技术操作简便、打开稳定,提高了苏里格气田单井产量,但需要继续对球座尺寸进行改进,以满足对水平段的更多级压裂。为满足一趟管柱分层试油联作及选择性投产作业工艺中的技术需求,渤海钻探工程公司研制了一种新型可反复开关投球滑,解决了现有试油联作技术只能局限于对于某一特定层位进行试油联作的技术难题,但可反复开关投球滑套有多个活动部件与油管连通,因此不适用于压裂施工,需进一步开展研究^[3]。为进一步提高压裂段数,同时实现井筒压后全通畅,胜利油田和川庆钻探工程公司均研发了可开关的固井滑套,通过下入专用开关工具实现滑套的开关以完成分段压裂,压裂级数不受限制,现场应用取得了较好的效果^[4-5]。在应用时出现了小排量进液时,地层很难被压裂出有效裂缝,需要对滑套的结构进一步优化。

中石化开展了射频滑套的研究,射频识别技术(RFID)是利用射频信号通过空间耦合实现无接触信息传递并通过所传递的信息达到识别目的的技术。RFID 滑套工具结构无级差,实现了管柱全通畅,只需更新标签及滑套控制器代码便能够实现工具间的互换,管柱结构更加灵活,提高施工效率,节省施工成本。在研发过程中,设计人员考虑了当 RFID 滑套通过电子标签打开或关闭失败时,可通过专有工具打开或关闭滑套,保证施工能够继续进行^[6]。但是目前该项技术还不够成熟,尤其在固井完井条件下易无法正常开启,影响滑套开关成功率,因此现场应用未见成功报道,需要进一步提高工艺可靠性。

但在井下压裂工具设计方法方面,仍主要采用传统设计方法,通过结构设计、样机反复试制、结构完善最终形成产品^[7],其中试制与完善经常会多次进行才能达到最终设计目标,效率相对较低。为进一步提高滑套分段压裂试油工艺及工具的性能,提高施工效率和成功率,研发了套管固井试油压裂滑套。同时,为加快工具研制步伐,突破传统理念,提出了全息多反馈产品研发解决方案 FIMS(Full Information & Multi-feedback Product R&D Solution),FIMS 是一项具有颠覆传统试油井下工具设备研发的革命性改变的快速研制方法,提供了一整套以缩短研发周期为目的的井下压裂工具全生命周期的设备辅助研发解决方案。

1 FIMS 基本思想

FIMS 是一整套完善的全生命周期的设备辅助研发解决方案,它是基于多项高端科研成果的综合应用(图 1),包括三维模型生成、计算机模拟装配、流场分析、应力分析、计算机模拟工作、激光快速成型技术(3D 打印)、计算机远程控制等。



图 1 FIMS 概念模型

Fig.1 FIMS conceptual model

FIMS 在整个辅助研发过程对于设计人员是信息完全公开、透明、开放的。研发人员可以与相关人员通过网络实现实时交流沟通,及时反馈每一个阶段性成果和问题。方便保障在最短时间内得到所研发的设备是否能达到预期要求,并且可以及时更正研发中存在的问题或增减设备相应指标和功能。从而达到以集合倍数提高研发者的工作效率、缩短研发周期和研发费用。FIMS 是一项具有颠覆传统机械设备研发工艺的革命性改变的项目。

2 FIMS 特点

作为一种井下工具研制的方法论,它是从井下工具设计、制造的角度,重构产品开发制造过程,在产品阶段就考虑到满足制造过程的所有因素,以提高井下工具设计制造的一次成功率,从而达到缩短产品开发周期、降低成本、增强企业竞争力的目的。FIMS 的特点如下:

(1)数字化:就是将许多复杂多变的信息转变为可以度量的数字、数据,再以这些数字、数据建立起适当的数字化模型^[8-9]。在井下工具设计中大量地使用计算机工具,生成大量的设计和制造数据。

(2)集成化:指优选井下工具设计中各种技术和产品,将信息、过程、资源、人员、技术等分离的子

系统连接成为一个完整可靠的经济和有效的整体,并使之能彼此协调工作,发挥整体效益^[10-11]。FIMS 中的集成化目的是使设计过程和成果能以最快的速度转入制造过程。

(3)并行性:主要是指同时性或并发性^[12-13]。FIMS 中的并行化是指是一种平行地处理产品设计、制造及其相关过程的系统方法,它要求设计开发者一开始就考虑产品制造过程中的所有因素。

(4)网络化:指计算机在工程设计中的大量应用迫切要求建立计算机网络来实现信息交换,资源共享^[14-15]。

(5)智能化:是指利用通信技术和计算机技术,把分布在不同地点的计算机及各类电子终端设备互联起来,按照一定的网络协议相互通信,以达到所有用户都可以共享软件、硬件和数据资源的目的^[16-17]。

3 FIMS 实施模式及关键技术

FIMS 设计方法实施模式基于需求、条件、信息交互的方式,采用三维模型仿真、计算机模拟装配、结构分析、快速成型、计算机远程控制等技术,并实现系统集成,以提高设计效率。

3.1 FIMS 实施模式

基于 FIMS 的井下工具设计模式如图 2 所示。在井下工具设计阶段,根据井下工具的功能要求和使用条件,通过设计方案的三维建模、数字模拟、有限元分析等方式验证井下工具设计,并不断向工艺部门和生产部门提供设计信息,并根据各部门反馈的信息,及时修改设计中的不合理之处,确保设计的一次成功率,从而有效缩短产品设计周期。

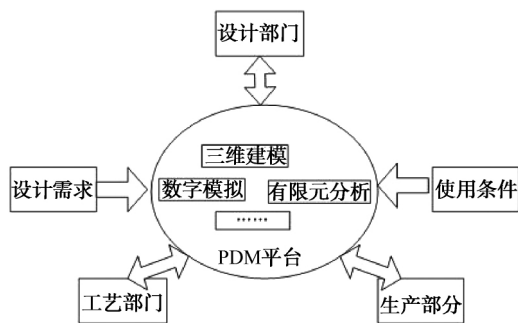


图 2 全寿命周期设计模式流程框图

Fig.2 Process diagram of the full life cycle design pattern

3.2 关键技术

基于全息多反馈工具研发解决方案的关键技

术主要包括三维数字化、面向制造的设计及系统集成。

3.2.1 三维数字化

设计中,习惯用二维图表达产品结构。一般人们设计思维中先构思的是三维实体,然后用二维图表达;在加工过程中要先想象出三维实体,再决定加工工艺。所以,二维图是人类思维方式的顺序颠倒,在二维图的绘制和阅读过程中,容易产生理解方面的偏差,影响产品开发速度。

三维数字化,就是运用三维工具(软件或仪器)来实现模型的虚拟创建、修改、完善、分析等一系列的数字化操作,从而达到用户的目的,是工具快速开发的基础。可以通过三维 CAD 软件建立物理实体的三维 CAD 数字模型。

3.2.2 面向制造的设计

面向制造的设计是指产品设计需要满足井下工具制造的要求,具有良好的可制造性,使得井下工具以最低的成本、最短的时间、最高的质量制造出来。在这种设计与工艺同步考虑的情况下,结合快速原型制造技术,很多隐含的问题都能及早暴露出来,避免了很多设计返工;而且通过对不同设计方案根据可制造性进行评估取舍,根据加工费进行优化,能显著降低成本,增强产品的竞争力。设计、制造和使用是产品生命周期中的三个重要环节。FIMS 最重要的是井下工具设计与制造设计的并行,在设计阶段就充分考虑产品的可制造性、可使用性是 FIMS 的优势所在。

3.2.3 系统集成

FIMS 的集成主要体现在以下几个方面:

(1)信息集成指设计信息采用统一的标准,规范和编码,实现全系统信息共享,进而可实现相关用户软件间的交互和有序工作。

(2)功能集成设计环节不仅要为制造环节提供热工艺规程,还要对可制造性、可装配性进行综合分析评价,为后期的设计修改减少必要的反馈。

(3)过程集成在产品前期,能够从产品全制造的角度出发设计产品及其相关过程(包括制造过程和支持过程)。

(4)人员集成在优化和重组产品开发过程的同时,实现多学科、多领域专家群体的协同工作,形成一个集成产品开发团队。

4 设计案例

以井下压裂工具套管固井试油压裂滑套的研制为例,阐述 FIMS 在压裂试油工具设计方面的成功应用。

4.1 套管固井试油压裂滑套设计要求

套管固井压裂滑套要求具有完井压裂试油一体化,钻井后随套管下入后固井完井,无需射孔,待压裂时开启滑套进行压裂^[18-19]。与常规井下工具相比,研发难度有以下几点:(1)工具外径大,为常

规试油压裂工具 1.5 倍以上,强度不易保证;(2)工具尺寸大,试验样机机械加工周期长,若无法一次设计成功,反复修改试验效率低,成本高;(3)滑套内部全通畅,需可重复开关,满足压裂后试油要求^[20-21]。

4.2 基于 FIMS 的快速研制

传统方法主要采取二维或三维图纸设计,然后通过制造样机进行反复试验的方法,往往多次改型后才可达到使用要求过程(图 3),研发和生产完全独立,生产过程无信息反馈。

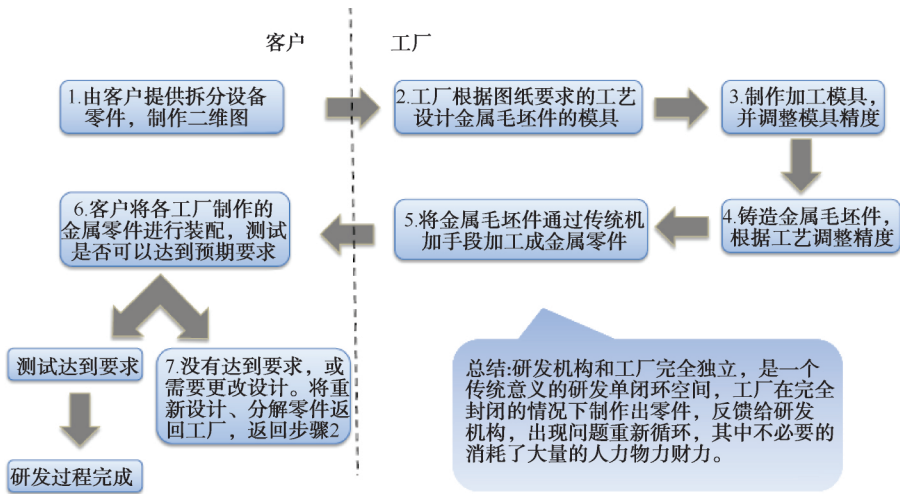


图 3 原有套管固井试油压裂滑套开发过程
Fig.3 Original development process of the cased hole testing fracturing sliding sleeve

利用 FIMS 改变套管固井压裂试油滑套设计流程(图 4):(1)通过 UG、ProE 等软件建立实体模型,并录制装配以及爆炸动画演示;(2)通过 CAE\CFD

模拟软件分析设备工作环境和工作参数;(3)通过快速成型技术实现虚拟制造(图 5);(4)通过互联网及远程控制软件 RGS 实现实时沟通。

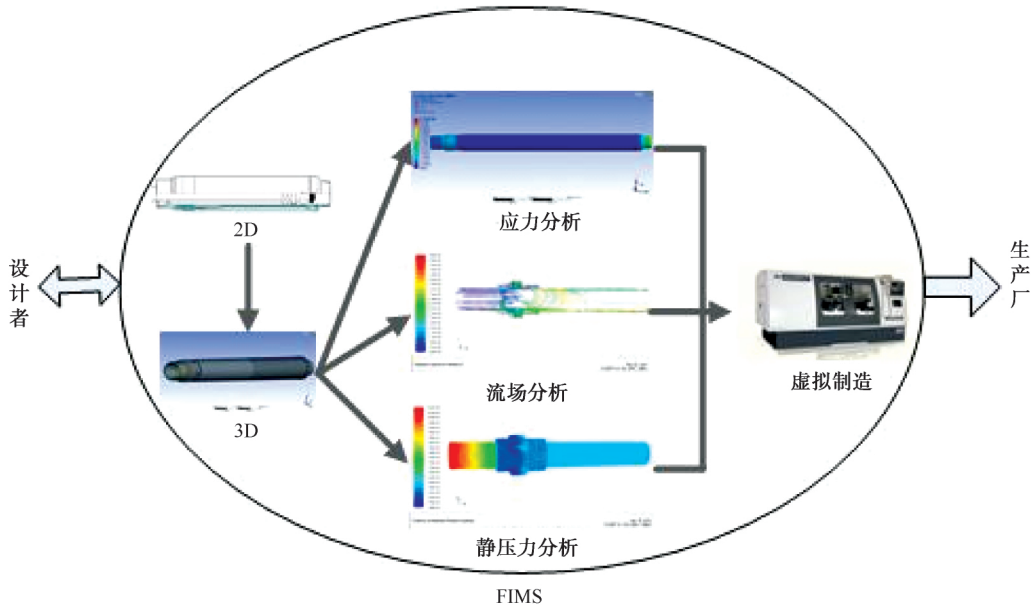


图 4 基于 FIMS 的套管固井试油压裂滑套开发过程
Fig.4 FIMS-based cased hole testing fracturing sliding sleeve development process



图 5 套管固井试油压裂滑套 3D 打印模型
Fig.5 3D printing model of cased hole testing fracturing sliding sleeve

通过 FIMS 方法的指导,实现了套管固井试油压裂滑套设计一次性成功(图 6),达到了缩短开发周期的预期目标。与传统开发周期相比,预计缩短研发周期两个月以上,同时降低了研发成本。



图 6 套管固井试油压裂滑套实物样机
Fig.6 Prototype cased hole testing fracturing sliding sleeve

4.3 现场应用

套管固井试油压裂滑套在低渗透致密油水平井应用了 8 口井。压裂后试油初期平均日产油 8.6 t,其中 5 口井在完井 1 年后压裂滑套均能正常开启,滑套开关性能稳定,应用效果见表 1。

表 1 现场试验应用效果列表
Table 1 Statistical table of site application effect

井号	滑套级数	滑套入井时间/d	开启情况	初期产油/(t·d ⁻¹)
GLN-P33	13	330	正常开启	13.2
Z56-P29	5	360	正常开启	11.6
Z37-P23	4	390	正常开启	10.2
G693-78-94	5	210	正常开启	7.3
G693-94-96	5	390	正常开启	6.5
G693-86-84	5	330	正常开启	7.2
G693-104-96	5	360	正常开启	6.9
G693-94-84	5	360	正常开启	6.2

压裂后每级滑套均可选择性开关,可以根据油藏评价和生产需求进行分段试油。在 G693-78-94 井选择了两级滑套进行了重复开关试验,滑套关闭后单独对该处进行了试压 30 MPa,稳压 15 min 后降压小于 1 MPa,现场判断滑套已成功关闭,进一步验证了开关动作的可靠性。

该滑套的应用实现了完井压裂试油一体化,无需射孔,施工效率高,还可满足后续测试、控水等生产措施调整需要。

5 结束语

FIMS 以快速开发井下压裂新工具,提高工具可靠性、制造性以及缩短工具研制周期为目标。具有以下优势:

(1)将工具的设计、制造过程并行起来,并且采用 CAD/CAE/CAM 和 PDM 技术的支持,形成了工具设计、原型制造、工艺设计、生产加工等过程并行模式,充分发挥产品数据管理的作用,大大缩短了工具开发周期。

(2)由于实现了 CAD/CAE/CAM 和生产配套系统的集成,工具设计、工艺设计、生产准备并行进行,设计工作一完成,各项准备工作就已基本完成,并且可以尽早发现设计中存在的问题,及时改进。

这种基于 FIMS 设计模式在缩短井下压裂工具研发周期、提高企业自动化水平、增强企业的市场应变能力和竞争力等方面必将发挥重要作用。

致谢:感谢大庆油田采油工程研究院和吉林市旭峰激光科技有限责任公司对该论文的完成给予的理论、技术以及实验方面的大力支持;本论文通过了大庆油田有限责任公司的保密审查。

参考文献

[1] 丁庆新,侯世红,杜鑫芳,等.国内水平井压裂技术研究进展[J].石油机械,2016,44(12):78-82.
DING Qingxin, HOU Shihong, DU Xinfang, et al. Advance of horizontal well fracturing technology in China [J]. China Petroleum Machinery, 2016,44(12):78-82.

[2] 韩永亮,刘志斌,程智远,等.水平井分段压裂滑套的研制与应用[J].石油机械,2011,39(2):64-65.
HAN Yongliang, LIU Zhibin, CHENG Zhiyuan, et al. The development and application of the sectional fracture sliding sleeve in horizontal wells [J]. China Petroleum Machinery, 2011,39(2):64-65.

[3] 马金良,平恩顺,李金凤.可反复开关投球滑套的研制[J].油气井测试,2017,26(3):49-53.
MA Jinliang, PING Enshun, LI Jinfeng. Development of throw slip sleeve with repeatable switch [J]. Well Testing, 2017,26(3):49-53.

[4] 唐欣,李斌,张毅超,等.可重复关闭套管滑套的研制[J].钻采工艺,2018,41(4):83-85.
TANG Xin, LI Bin, ZHANG Yichao, et al. Development of casing sliding sleeve [J]. Drilling & Production Technology, 2018,41(4):83-85.

[5] 赵小龙,董建国,伊西锋,等.固井开关滑套多级分段压裂完井工艺技术分析[J].特种油气藏,2014,21(4):145-147.
ZHAO Xiaolong, DONG Jianguo, YI Xifeng, et al. Technical analysis of multi-stage fracturing completion technology

- of cementing switch sliding sleeve [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(4): 145-147.
- [6] 李光泉, 戴文潮. 无线射频识别滑套关键技术研究[J]. 石油机械, 2013, 41(5): 73-75.
LI Guangquan, DAI Wenchao. Research on key technology for RFID sliding sleeve [J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(5): 73-75.
- [7] 郭思文, 桂捷, 赵粉霞, 等. 分层压裂多孔滑套设计与室内试验[J]. 石油机械, 2014, 42(1): 112-114.
GUO Siwen, GUI Jie, ZHAO Fenxia, et al. Design and laboratory test of multi-hole sliding sleeve for separate layer fracture [J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(1): 112-114.
- [8] 王连生. 三维数字化设计在装备制造企业中的应用[J]. 机械工程与自动化, 2014(1): 218-219.
WANG Liansheng. Application of 3D digital design technique in complete equipment manufacturing enterprises [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2014(1): 218-219.
- [9] 何永堂. 浅谈企业三维设计标准的建立[J]. CAD/CAM与制造业信息化, 2012(3): 84-86.
HE Yongtang. On the establishment of enterprise 3D design standards [J]. CAD/CAM and Manufacturing Information, 2012(3): 84-86.
- [10] 李鹏程. 转台 CAD/CAE 集成化设计系统的研究与开发[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
LI Pengcheng. Research and development of CAD/CAE integrated design system for turntable [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [11] 李华川. 基于 UG 的三维 CAD 同步建模技术研究[J]. 机械研究与应用, 2010, 23(4): 102-104.
LI Huachuan. Study on three-dimension CAD synchronous modeling based on UG [J]. Mechanical Research & Application, 2010, 23(4): 102-104.
- [12] 杨建中, 王艺颖, 杨曦, 等. 并行设计技术分析及其在产品研发中的应用[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2013, 15(3): 111-114.
YANG Jianzhong, WANG Yiyang, YANG Xi, et al. The discussion and application on concurrent design for product development [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2013, 15(3): 111-114.
- [13] 吴学鹏. 面向装配的设计(DFA)技术研究[J]. 机械研究与应用, 2008, 21(3): 22-23.
WU Xuepeng. Discussion of design for assembly technology [J]. Mechanical Research & Application, 2008, 21(3): 22-23.
- [14] 李海滨. 异地协同网络化设计与制造平台的构建[D]. 南京: 南京林业大学, 2005.
LI Haibin. The construction of collaborative network design and manufacturing platform in different places [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2005.
- [15] 张文盛, 杨建华. 基于多重身份授权检查机制的操作系统安全模型[J]. 安徽广播电视大学学报, 2008(1): 125-128.
ZHANG Wensheng, YANG Jianhua. An operating system security model based on multi-identities authorizing and inspecting mechanism [J]. Journal of Anhui Radio & TV University, 2008(1): 125-128.
- [16] 时永鹏. 船舶主要要素的智能化设计系统开发[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
SHI Yongpeng. Development of intelligent design system of ship main elements [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [17] 侯磊. 基于多目标粒子群算法的船舶主尺度优化设计研究[J]. 船舶力学, 2011, 15(7): 784-790.
HOU Lei. Application of multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) in study of ship's principal parameters [J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(7): 784-790.
- [18] 赵铭, 王伟佳, 刘洪彬, 等. 国外页岩气井连续油管固井滑套压裂完井方式研究[J]. 钻采工艺, 2017, 40(2): 59-62.
ZHAO Ming, WANG Weijia, LIU Hongbin, et al. Study on well completion by coiled-tubing fracturing and cementing sliding sleeves in shale gas wells [J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(2): 59-62.
- [19] 申贝贝. 致密砂岩气藏水平井固井滑套分段压裂工艺[J]. 天然气勘探与开发, 2016, 39(4): 59-63.
SHEN Beibei. Staged fracturing using cementing sliding sleeve for horizontal wells in tight sandstone gas reservoirs [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2016, 39(4): 59-63.
- [20] 胡顺渠, 戚斌, 侯治民, 等. 全通径无级滑套研制及应用[J]. 钻采工艺, 2018, 41(4): 73-76.
HU Shunqu, QI Bin, HOU Zhimin, et al. Development of full bore infinite sliding sleeve and application [J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(4): 73-76.
- [21] 王伟佳. 页岩气井无限极固井滑套压裂技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(5): 37-41.
WANG Weijia. Infinite-stage cementing sleeve fracturing technology for shale gas wells [J]. Well Testing, 2018, 27(5): 37-41.

编辑 刘振庆

第一作者简介: 张玉广, 男, 1961 年出生, 博士, 教授级高工, 2011 年毕业于东北石油大学石油与天然气工程专业, 现从事油气藏增产改造技术研究工作。电话: 0459-5968067, 13936793858; Email: zhangyuguang@petrochina.com.cn。通信地址: 黑龙江省大庆市让胡路区西宾路 9 号大庆油田有限责任公司采油工程研究院, 邮政编码: 163453。