

水平井自适应调流控水装置研制与应用

赵崇镇

(中国石油化工股份有限公司油田勘探开发事业部,北京 100728)

摘要:针对边底水油藏水平井由于跟端趾端效应和水平段地层非均质性造成含水率快速升高的情况,在分析油水物性和调流控水筛管应用工艺的基础上,利用层流与紊流的流动特性,研制了一种能够根据产出流体的情况自动调节附加阻力的“主动式”自适应调流控水装置。流体动力学流场模拟及室内性能试验结果表明,油水流经自适应调流控水装置时,油相的摩阻低、水相的摩阻高,最大水油压降比可达10.0以上,具有自动调节油水附加阻力的功能。自适应调流控水装置在塔河油田底水油藏水平井A井进行了现场试验,与未应用调流控水装置的邻井相比,低含水采油期延长3个月以上。研究与试验表明,自适应调流控水装置可以根据产出流体的情况,自动对产出水进行节流,解决了边底水油藏水平井底水锥进的问题。

关键词:水平井;底水油藏;调流控水;节流控制器;现场试验;塔河油田

中图分类号:TE931⁺.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2016)03-0095-06

Development and Application of an Autonomous Inflow Control Device in Horizontal Wells

ZHAO Chongzhen

(Oilfield Exploration & Development Department, China Petroleum & Chemical Corporation, Beijing, 100728, China)

Abstract: For horizontal wells in oil reservoirs with edge water or bottom water, the heel and toe effect and the heterogeneity of horizontal section can lead to a rapid increase of water content. Through the analysis of oil/water properties and flow adjustment and water control screen pipe techniques, and a consideration of the features of laminar flow and turbulent flow, an “active” autonomous inflow control device (AICD) was developed which could automatically adjust additional resistance depending on fluids produced. The hydrodynamics flow field simulation and lab test showed low friction of oil and high friction of water when oil and water flow through the AICD, with the maximum water-oil pressure drop ratio up to 20 or more. Thus, the additional resistance of oil and water was adjusted automatically. A field test of AICD was conducted in Well A, while a horizontal well in oil reservoir with bottom water, Tahe Oilfield. Compared with adjacent wells with no AICD applied, the oil production period of Well A with low water content was postponed for 3 months or longer. The study and test revealed that the AICD could throttle the water produced automatically depending on the fluids produced, so as to avoid bottom water coning in oil reservoirs with edge water or bottom water.

Key words: horizontal well; oil reservoir with bottom water; flow adjustment and water control; throttle controller; field test; Tahe Oilfield

近年来,水平井在油气藏开发中的应用越来越多,但对于边底水油藏,由于水平井与储层的接触面积较大,沿程摩阻和储层物性变化往往导致水平井水平段各处产液量不均,底水易于向水平井跟部和物性较好的部位锥进,极大地影响了水平井的开采效果^[1-4]。为了控制底水锥进,实现水平井入流平衡,延长油井生产寿命,国内外研制应用了油井流入控制器(inflow control device,简称ICD)^[5-11],但传

统的ICD属于被动控水装置,使用时需要根据油藏物性、井眼轨迹、电测结果等资料对完井参数进行提

收稿日期:2015-08-31;改回日期:2016-04-11。

作者简介:赵崇镇(1968—),男,河南南阳人,1992年毕业于江汉石油学院钻井工程专业,高级工程师,主要从事采油(气)工程管理工作。E-mail: zhaocz@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“海相碳酸盐岩油气井井筒关键技术(二期)”(编号:2011ZX05005-006)资助。

前设置,一旦投入生产不能再进行调节,控水效果有限^[12-18]。为此,笔者在分析流体物性和调流控水筛管应用工艺的基础上,利用层流与紊流的流动特性,研制了一种能够根据产出流体的情况自动调节附加阻力的“主动式”自适应调流控水装置(autonomous inflow control device,简称 AICD),并在塔河油田底水油藏水平井 A 井进行了现场试验,获得较好的稳油控水效果,可以达到延迟水平井底水锥进、提高油气采收率的目的。

1 自适应调流控水装置的结构与工作原理

1.1 基本结构

自适应调流控水装置由基管、内嵌导流套、节流控制器、内保护盖及整体外保护套等部分组成(见图 1)。其中,基管主要用于连接筛管及输送流体;内嵌导流套用于导流、定位及节流控制器的固定;节流控制器是整套装置的核心部分,主要起到控水稳油的作用;内保护盖是节流控制器上盖,用于保证进入 AICD 的流体流入节流控制器;整体外保护套用于保护整套控水装置的内部结构不受井内环境的干扰,并保证由筛管内流出的流体流入自适应调流控水装置。该装置的尺寸与常规调流控水装置相同,便于现场应用。

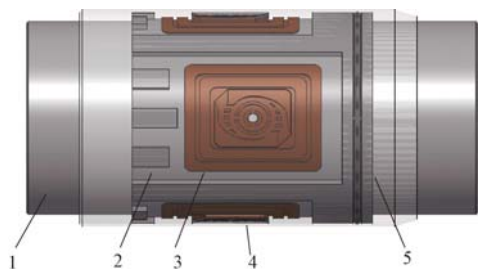


图 1 自适应调流控水装置的基本结构

Fig. 1 Structure of the AICD

1. 基管;2. 内嵌导流套;3. 节流控制器;4. 内保护盖;5. 整体外保护套

1.2 工作原理

自适应调流控水装置采用特殊几何流道设计,不含任何活动部件,其工作原理为:由于油与水的密度和黏度不同,在特殊几何流道流动时,油和水在旋流过程压力能与动能的转化过程中,能量损失不同,水的流动压降较大,而油的流动压降较小,这样就起到“节流”低黏度的水、“开源”高黏度油的作用。与传统的调流控水装置相比,自适应调流控水装置具

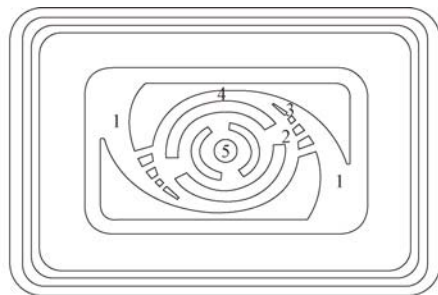
有“主动式”调流控水功能,能够根据产层产液的变化自动调整所产生的附加阻力,达到均衡产液剖面、控制底水锥进的目的。

2 自适应调流控水装置流场模拟与分析

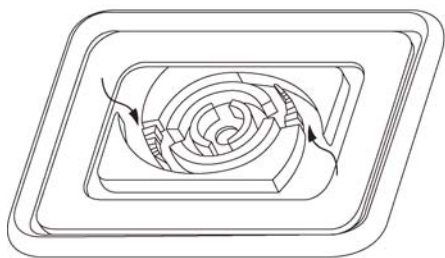
笔者借助 CFD 软件对自适应调流控水装置进行了流场模拟,分析了流线、压力、流速和流体动能等流体流动参数的分布情况、压降对流体黏度的敏感性以及流场变化情况,对自适应调流控水装置的可靠性进行了验证。

2.1 流动分析区域

节流控制器是自适应调流控水装置的核心部分,决定装置的控水效果,为此,进行了节流控制器对油水压力、流动速度、流线的研究。节流控制器主要包括入口通道、节流喷嘴、节流通道、导流通道和中心出口喷嘴(见图 2)。节流控制器有 2 个入口通道,主要功能是将进入控水装置的流体引入控制器;节流喷嘴利用局部摩阻效应起到进油阻水的作用;节流通道利用沿程摩阻效应起到进水阻油的作用;导流通道用来引导流体进行圆形流动;中心出口喷嘴是连接节流控制器与中心管的通道,用来将进入节流控制器中的流体引入到中心管,同时在生



(a)平面图



(b)三维图

图 2 节流控制器的基本结构

Fig. 2 Structure of the throttle controller

1. 入口通道;2. 节流喷嘴;3. 节流通道;4. 导流通道;5. 中心出口喷嘴

产压差大和流量较大时起到一定的节流作用。节流控制器的主体部分为圆形,可以促使密度相对较小的油在旋流过程中向中心流动,而密度较大的水在外侧旋转,其圆盘结构也进一步保证了整个节流控制器具有自适应调节的特点。

2.2 分析条件

左右入口通道边界为流动入口,根据塔河油田水平井日产液量约 $15 \sim 30 \text{ m}^3$ 、水平段长度多为 $150 \sim 300 \text{ m}$ 的情况,设定入口流速为 1 m/s ;中心出口喷嘴为流动出口,设定流体全部流出;固体壁面边界作无滑动边界处理,流动参数设置为零;选用标准 $\kappa-\epsilon$ 双方程湍流模型。

2.3 计算结果分析

2.3.1 流线分布

图 3 为通过 CFD 软件计算出的油水通过自适应调流控水装置节流控制器时的流线分布。

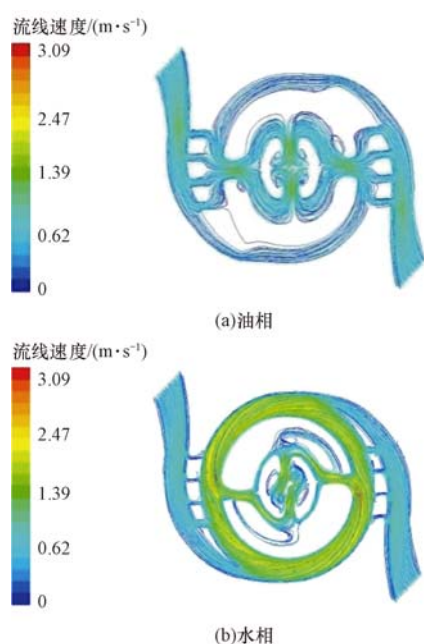


图 3 油水通过节流控制器时的流线分布

Fig. 3 Streamline distribution when oil/water flows through the throttle controller of the AICD

从图 3 可以看出:在流动过程中油水两相分别发生分支流动和汇集流动,油和水的流线有明显不同,当油通过节流控制器时,流线大部分通过节流喷嘴后汇聚,沿中心导流通道分叉后从中心出口喷嘴流出;而当水通过节流控制器时,流线大部分通过节流通道的圆形导流通道,并且在圆形导流通道中汇聚,进

入中心导流通道的流线较少。这种使不同流体不断进行再分配的过程,使油在流动过程中的压力损失相对较小,而水在流动过程中的压力损失相对较大。

2.3.2 压力分布

图 4 为通过 CFD 软件计算出的油水通过节流控制器后的压力分布云图。

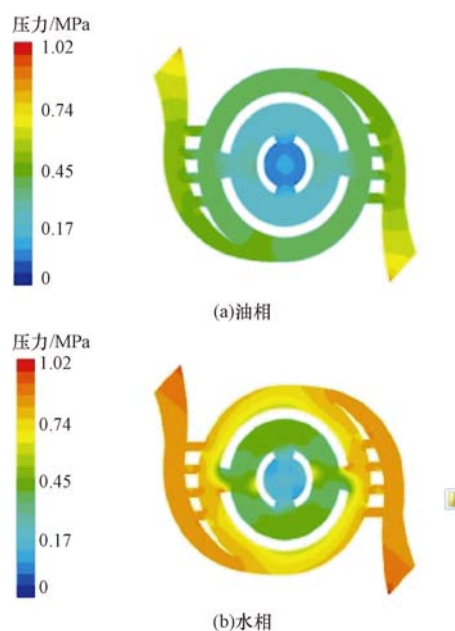


图 4 油水通过节流控制器时的压力分布

Fig. 4 Pressure distribution after oil/water flows through the throttle controller

从图 4 可以看出:油从入口通道流入节流控制器,然后进入节流喷嘴直至从中心出口喷嘴流出节流控制器,整个流动过程中其压力不断降低;油通过控水节流器后各部分的压力损失是比较均匀的,压力降低的过程较为平稳。这说明自适应调流控水装置具有平稳节流的作用,在油田现场应用中,能够起到均衡采液的作用,控制高渗段流体的快速产出。从图 4 还可以看出,水通过节流控制器时整个流动过程中的压力要明显高于油通过节流控制器时的压力,此外,水过节流控制器后在圆形导流通道处形成高压区,压力要高于流体入口处的压力,水的压力损失主要发生在圆形导流通道部分。这说明自适应调流控水装置对水有相对高的敏感性,能够促使低黏流体在圆形导流通道内快速旋转,形成压力峰值区域,从而产生较大的压降。

2.3.3 速度分布

图 5 为通过 CFD 软件计算出的油水通过自适

应调流控水装置节流控制器的速度分布云图。从图5可以看出:油经过节流控制器的过程中,流速变化较为平稳,主要在入口通道、节流喷嘴、内部圆环通道以及在中心出口喷嘴处流速较高且变化不大,而在主要产生附加摩阻的圆形导流通道处的速度较低,这说明节流控制器对油产生的压降是平稳的,未产生明显的高速区,油对节流控制器的冲蚀相对不大;与油相比,水经过节流控制器的过程中流速明显要高,流速在圆形导流通道处达到峰值,流体在圆形通道处的高速流动能够在节流控制器内产生较大的压降,从而实现对水的自适应控制。

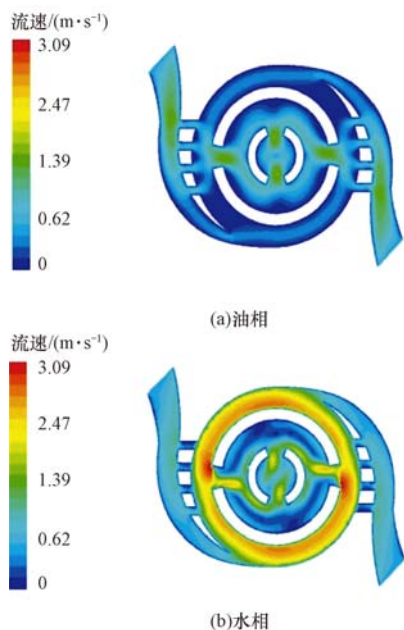


图5 油水通过节流控制器的速度分布

Fig. 5 Velocity distribution when oil/water flows through the throttle controller

通过上述节流控制器的流线、压力、速度分析可以看出,所研制的自适应调流控水装置能够自动调节油相、水相的流动状态,从而起到主动控水的作用,达到均衡产液剖面、自动阻水的目的。

3 性能测试及对比分析

3.1 控水稳油性能测试

为了进一步验证自适应调流控水装置的稳油阻水性能,采用地面模拟试验的方法对其性能进行了测试。在自适应调流控水装置的入口端和出口端安装压力传感器,将不同流量下的水(密度 $1\,000\text{ kg/m}^3$,黏度 $0.2\text{ mPa}\cdot\text{s}$)和油(密度 850 kg/m^3 ,黏度 $70\text{ mPa}\cdot\text{s}$)分别泵入出口直径为 3.0 mm 的自适应调流控水装

置,测量该装置对水和油所产生的节流压差,结果见图6。

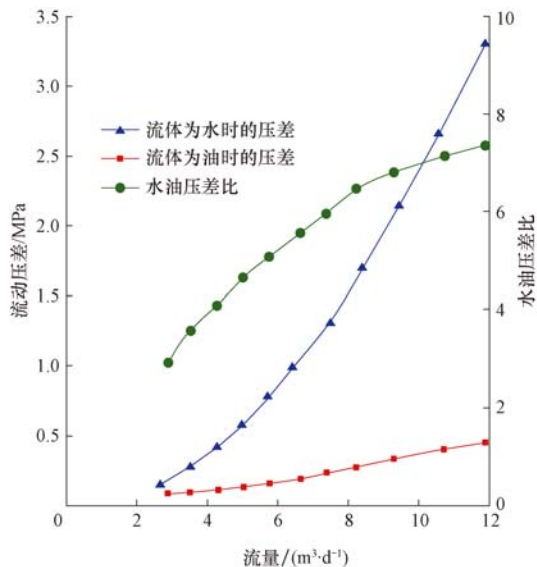


图6 自适应调流控水装置节流控水性能测试结果

Fig. 6 Test results of performance of the AICD

从图6可以看出:当自适应调流控水装置内的流体为纯油时,流动产生的流动压差始终保持在非常低的水平,随着流量增大,流动压差小幅度增加;而当通过流体为水时,流动产生的压差随流量增大而迅速增大。可见,自适应调流控水装置具有对水高敏感性而对油低敏感性的特性。采用自适应调流控水装置分段完井后,在水平井未见水前,原油流经该装置时产生一定的流动压差,通过合理配置各水平段的自适应调流控水装置参数,使各水平段内各位置处的生产压差基本一致,从而达到沿整个水平段自动均衡生产压差和产液剖面、延缓边底水突进、延长油井无水产油期目的;水平井见水后,自适应调流控水装置可以根据各个水平段产液含水率的变化自动调节地层产液流经时的压差,可有效降低高含水率井段的产水量,使整个水平段的油相入流剖面均衡,减小由于地层非均质性导致的死油区,提高产油量以及油井的最终采收率。

综上所述,自适应调流控水装置不仅可以有效地调整产液入流剖面,而且能根据各井段产水率的变化自动调节压差,从而实现均衡油相入流剖面的作用。

3.2 性能对比分析

为了进一步分析自适应调流控水装置与常规喷嘴型调流控水装置的性能差异,采用地面模拟试验装置,在流量 $5\text{ m}^3/\text{d}$ 、出口直径 3.0 mm 条件下,分

别进行了节流控水性能测试,结果见图 7。

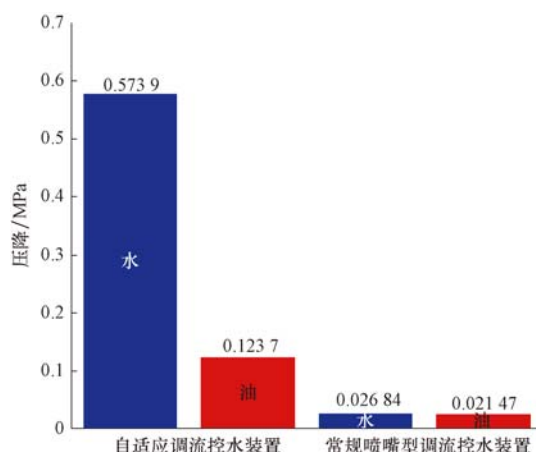


图 7 自适应调流控水装置与常规喷嘴型调流控水装置节流压降对比

Fig. 7 Comparison of throttling pressure drop between AICD and nozzle ICD

从图 7 可以看出:水和油流经常规喷嘴型调流控水装置时产生的节流压差基本相等,且都非常低,因此只能用于水平井见水前的产液剖面的调整,且调整能力一般;而水和油流经自适应调流控水装置时可以产生较大的节流压差,并且节流压差的差别非常大(含水率越高,节流压差越大),所以自适应调流控水装置在水平井见水前具有更强的产液剖面调整能力,而且水平井局部或全部见水后还可以调整水平井各段的油相入流剖面,从而有效降低油井的含水率。

4 现场试验

A 井是塔河油田井 9 区三叠系阿 4 段河道砂体岩性圈闭构造上的一口加密井,井深 4 981.07 m,油层厚度 2.5 m,油层下部为底水,水平段避水高度仅 0.75~1.20 m,4 口邻井平均产油量 5.4 t/d,平均含水率 90% 以上,均采用机械采油方式生产。

控制并治理底水、保证控水稳油生产是该井完井所面临的主要难题。为此,该井采用了水平井自适应调流控水装置进行完井,利用水平井自适应调流控水装置的阻水稳油特性达到控水稳油的目的,从而抑制底水的快速抬升和锥进,实现水平井产液剖面的均匀上升。根据该井水平段井眼轨迹、井径变化、渗透率、孔隙度和油水饱和度的变化情况,确定了该井自适应控水完井参数、分段段数及分段位置,该井的完井管柱见图 8。

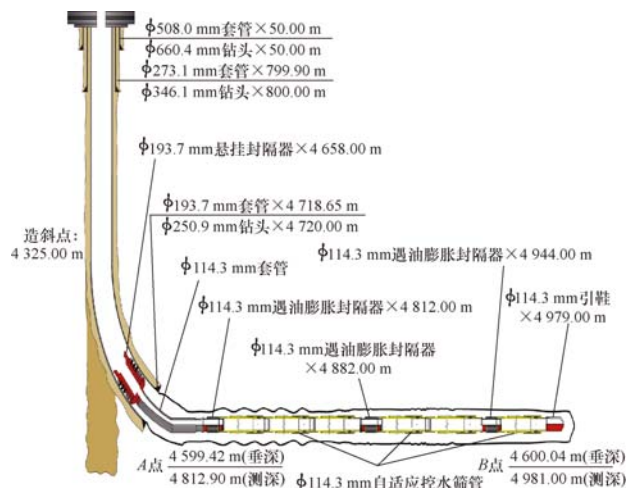


图 8 塔河油田 A 井自适应调流控水完井管柱

Fig. 8 Completion string of the AICD in Well A, Tahe Oilfield

该井开井后自喷生产,油压 10.5 MPa,套压 18.0 MPa。截至目前,已自喷生产 176 d,累计产油量 4 123 t,平均产油量 24.0 t/d,平均含水率在 5% 以下(见图 9),与 4 口邻井的生产情况相比,稳油控水的效果显著,表明该井采用的水平井自适应调流控水完井管柱设计合理、安全性高、工作可靠性强,体现了自适应调流控水完井的技术优势。

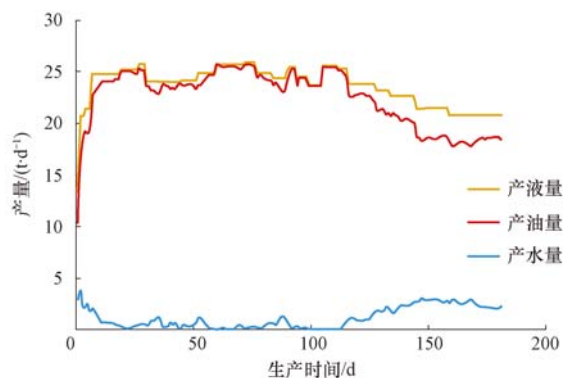


图 9 塔河油田 A 井自适应调流控水完井后生产情况

Fig. 9 Production curves after AICD completion of Well A, Tahe Oilfield

5 结 论

1) 水平井自适应调流控水装置利用流道自动调节油水阻力,油进入控水装置以近似“直线”的方式流出,而水在控水装置内快速旋转以“旋转”的方式流出。

2) CFD 分析和地面测试结果表明,自适应调流控水装置具有对水高敏感、对油低敏感的特点,能够根据过流流体的黏度自动调节产生的附加阻力,实

现自适应调流控水的功能。

3) 室内模拟试验及现场试验表明,自适应调流控水装置能均衡井筒油相入流剖面,选择性阻水,消除跟端和趾端效应,延迟底水锥进,提高油井的采收率。

参 考 文 献

References

- [1] 王金忠,肖国华,陈雷,等.水平井管内分段调流控水技术研究与应[J].石油机械,2011,39(1):60-61.
WANG Jinzhong, XIAO Guohua, CHEN Lei, et al. Research and application of the staged flow-regulating and water-control technology with screen or tubing in horizontal holes[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(1): 60-61.
- [2] 李良川,肖国华,王金忠,等.冀东油田水平井分段控水配套技术[J].断块油气田,2010,17(6):655-658.
LI Liangchuan, XIAO Guohua, WANG Jinzhong, et al. Sectionalized water control matching technology of horizontal well in Jidong Oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17(6): 655-658.
- [3] 王超,张军杰,刘广燕.水平井分段控水完井试油技术[J].石油天然气学报,2010,32(6):446-449.
WANG Chao, ZHANG Junjie, LIU Guangyan. Research on sectionalized water control well completion and oil testing technology of horizontal well[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(6): 446-449.
- [4] 强晓光,姜增所,宋颖智.调流控水筛管在冀东油田水平井的应用研究[J].石油矿场机械,2011,40(4):77-79.
QIANG Xiaoguang, JIANG Zengsuo, SONG Yingzhi. Research and application of water control screen pipe in Jidong Oilfield horizontal well[J]. Oil Field Equipment, 2011, 40(4): 77-79.
- [5] OUYANG Liangbiao. Practical consideration of an inflow-control device application for reducing water production[R]. SPE 124154, 2009.
- [6] AL ARFI S A, MOHAMED O Y, KESHKA A A, et al. Inflow control device an innovative completion solution from "extended wellbore to extended well life cycle" [R]. SPE 119599, 2008.
- [7] AUGUSTINE J R. An investigation of the economic benefit of inflow control devices on horizontal well completions using a reservoir-wellbore coupled model[R]. SPE 78293, 2002.
- [8] EDMUNDO D, ROBERO A, PAZ F, et al. First applications of inflow control devices (ICD) in open hole horizontal wells in Block 15, Ecuador[R]. SPE 123008, 2009.
- [9] 中国石油集团西部钻探工程有限公司.筛管控水装置:20101026-0028[P]. 2011-08-31.
CNPC Xibu Drilling Engineering Company Limited. Screen water control device: 201010260028[P]. 2011-08-31.
- [10] 淄博东森石油技术发展有限公司.调压控水防砂管:20112007-1460[P]. 2011-08-31.
Zibo Dongsan Petroleum Technology Development Company Limited. Adjusted water control screen pipe: 201120071460 [P]. 2011-08-31.
- [11] 周桂军,田继民,杨永超.一种可调式控水器:201020105465 [P]. 2010-10-06.
ZHOU Guijun, TIAN Jimin, YANG Yongchao. A adjustable water control device: 201020105465 [P]. 2010-10-06.
- [12] 徐鑫.水平井控流筛管完井技术研究及应用[J].石油钻探技术,2014,42(3):71-75.
XU Xin. Development and application of flow control screen completion for horizontal wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(3): 71-75.
- [13] 王庆,刘慧卿,张红玲,等.油藏耦合水平井调流控水筛管优选模型[J].石油学报,2011,32(2):346-349.
WANG Qing, LIU Huiqing, ZHANG Hongling, et al. An optimization model of completion strings with inner-located nozzle in horizontal wells coupled with reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 346-349.
- [14] OSTROWSKI L P, GALIMZYANOV A R, UELKER B. Advances in modeling of passive inflow control devices help optimizing horizontal well completions[R]. SPE 135998, 2010.
- [15] NEYLON K J, REISO E, HOLMES J A, et al. Modeling well inflow control with flow in both annulus and tubing[R]. SPE 118909, 2009.
- [16] RAFFN A G, ZEYBEK M, MOEN T, et al. Case histories of improved horizontal well cleanup and sweep efficiency with nozzle based inflow control devices in sandstone and carbonate reservoirs[R]. OTC 19172, 2008.
- [17] HENRIKSEN K H, GULE E I, AUGUSTINE J R. Case study: the application of inflow control devices in the troll field[R]. SPE 100308, 2006.
- [18] OUYANG Liangbiao, ARBABI S, AZIZ K. General wellbore flow model for horizontal, vertical, and slanted well completions[R]. SPE 36608, 1998.

[编辑 刘文臣]