

基于膨胀材料的新型 AICD 结构设计及其性能实验研究

王小秋¹, 汪志明^{1*}, 赵麟^{1,2}

1 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

2 胜利石油管理局博士后科研工作站, 东营 257001

* 通信作者, wellcompletion@126.com

收稿日期: 2017-02-21

国家自然科学基金面上项目“水平井油气水砂多相复杂流动规律研究”(编号: 51474225)和国家自然科学基金重点项目“深水油气钻采井筒压力控制基础研究”(编号: 51734010)联合资助

摘要 水平井易在高渗层段、裂缝处过早见水, 为了解决该问题国内外研发了多种流入控制装置(ICD)。传统 ICD 存在流动阻力等级恒定、见水后失效等问题, 而国际上主要应用的自适应式流入控制装置(AICD)存在结构复杂、适用范围小等缺点, 限制了其推广应用。本文基于多级限流原理, 结合遇水膨胀材料创新提出了一种 AICD 结构。利用数值模拟软件进行了结构参数优化及流体敏感性分析, 并进行了全尺寸物理模拟实验。研究结果表明, 该装置结构简单, 防堵能力强, 水油压差明显, 对流体黏度、密度不敏感, 装置应用范围广泛, 在油井的各个生产阶段都具有卓越的性能。

关键词 自适应式流入控制装置; 数值模拟; 全尺寸物理模拟实验

0 引言

水平井在开采过程中, 由于“跟趾效应”、储层非均质性和各向异性等因素的影响, 生产剖面通常难以持续均衡推进, 易在油井高渗层段、裂缝处过早见水^[1-4]。一旦发生底水锥进将大大缩短油藏的无水采油期, 并影响整个水平井其他位置的产油量。底水锥进问题已经成为了影响我国底水油藏水平井开发的主要难题^[5-12]。

为了缓解水平井生产过程中流入剖面不均匀的问题, 国内外研发了多种结构的 ICD 装置, 包括喷嘴型、迷宫型、螺旋通道型等^[13-17]。然而, 一旦油井见水, 这些装置并不能抑制, 甚至还可能促进水的流动, 致使完井失效。目前我国大部分油田进入中高含水期, 传统 ICD 装置难以满足实际需求, 为了有效解决这个问题, 有部分机构进一步研发了自适应流入控制装置(AICD), 其水相阻力远大于油相阻力, 显著抑制水相

流动, 从而达到稳油控水的目的。平衡片 AICD^[18]利用不同流体的密度差来控制平衡片的开启或关闭, 但由于油水密度差别不大, 该装置不能有效控制水锥。流道式 AICD^[19]利用流体惯性力和黏性力的平衡关系来控制流体通过装置时的流道和阻力, 但流量、流体性质适用范围受限, 且狭小的流道易被储层出砂堵塞。浮动圆盘式 AICD^[20]利用动压力和静压力的平衡关系来控制可动盘的位置, 并调整节流压降大小, 然而, 圆盘易被磨损、挤毁, 装置寿命短。这些 AICD 结构存在结构复杂、适用范围小等缺点, 限制了上述技术的大规模推广应用。

本文基于遇水膨胀材料和多级限流原理设计了一种新型 AICD 结构, 利用 Fluent 软件进行了结构参数优化以及流体敏感性分析; 为了进一步分析新型 AICD 的性能, 设计并进行了全尺寸物理模拟实验, 与 Halliburton EquiFlow AICD 以及 Y-shape AICD^[21]进行了比较。

引用格式: 王小秋, 汪志明, 赵麟. 基于膨胀材料的新型 AICD 结构设计及其性能实验研究. 石油科学通报, 2018, 03: 302-312

WANG Xiaoqiu, WANG Zhiming, ZHAO Lin. A novel AICD structure design and its performance analysis. Petroleum Science Bulletin, 2018, 03: 302-312. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.03.027

1 新型 AICD 设计

本文结合遇水膨胀橡胶(WSR)，基于多级限流原理，创新性地提出了一种自适应流入控制装置(AICD)。这种设计主要包含了一系列的环形隔板、狭槽和遇水膨胀材料，隔板上开有2个呈180°对称的流动狭槽。该结构利用流体连续通过多个流动狭槽的瞬间时压降来限制流体流动，因此，其对油相黏度不敏感，油相黏度适用范围广。单个流动狭槽对装置整体压降的贡献大致相当，通过改变隔板级数便能快速调整流动阻力等级。一旦油井见水，装在狭槽端面上的遇水膨胀橡胶将自动膨胀，膨胀度将根据含水率自动调节，从而可以调整装置的最小过流面积和流动阻力等级，如图1所示。具体来说，当含水率较低时，遇水膨胀橡胶的膨胀度受限，此时装置的最小过流面积最大，流动阻力等级最低；随着含水率增大，遇水膨胀橡胶开始膨胀，最小过流面积逐渐变小，流动阻力等级逐渐增大。

总的来说，新型AICD具有以下优点：(1)结构简单，流动阻力等级易于调整；(2)最小过流面积较大，不易因储层出砂发生堵塞；(3)装置对流量、油相流体性质不敏感，储层适用范围广；(4)装置对含水率极度敏感，应激反应快，水油压降比大，控水稳油效果显著。以本文的典型设计为例，其油水压降比可达40

倍，传统AICD则在4~8倍左右，该结构的控水稳油效果远超传统AICD结构。

2 建模与分析

利用数值模拟软件对油、水及其混合物通过该新型AICD结构的流动规律进行了分析，并对其进行了结构参数优化和流体性质敏感性分析。

2.1 建模

该装置在不同结构参数下的几何模型都是在专业建模软件中生成的，通过布尔运算得到其内部流动模型并进行网格划分。装置存在两个入口和一个出口，入口设置为velocity-inlet，出口设置为outflow，其它为wall。当模拟层流时，选用层流模型；当模拟湍流时，选用标准 $\kappa-\epsilon$ 模型。当流体为油水两相分散流时，选用混合模型；当流体为油水两相分层流时，选用VOF模型。由于ICDs一般是水平放置的，本文的模型还考虑了重力的影响。

2.2 流场分析

新型AICD在不同含水率条件下的总压分布云图见图2。可以看出，新型AICD产生压降的主要部位为隔板形成的流动腔室和流动狭槽，不同含水率条件下，二者的比例有所区别。对于油相流体来说，遇水膨胀

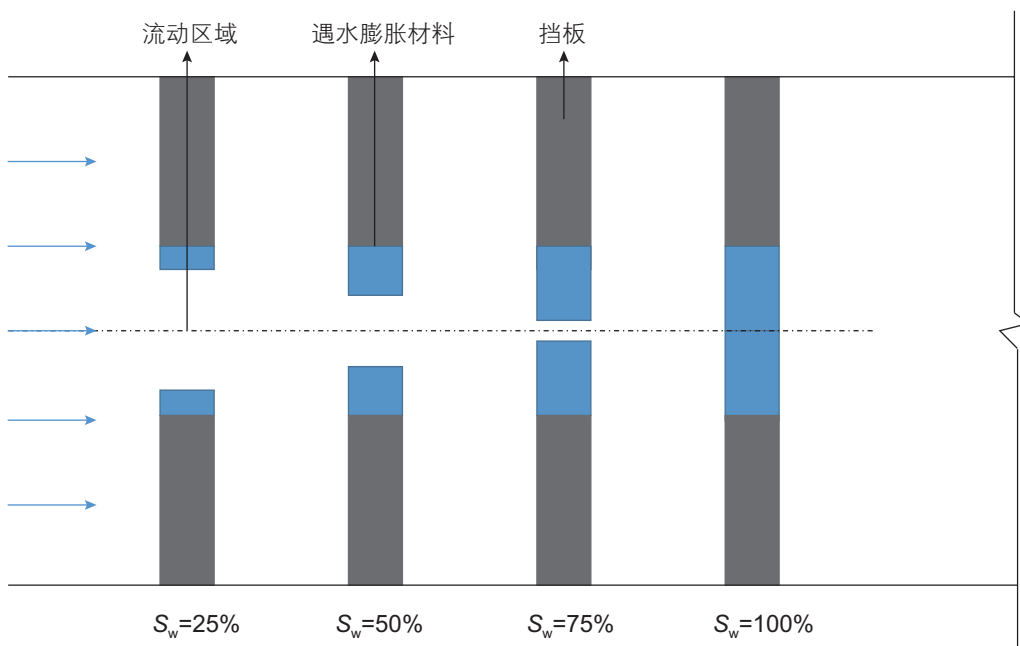


图1 不同含水率下所对应的最小过流面积示意图
 Fig. 1 Min. flow area for different water content

材料膨胀程度受限, 最小过流面积最大, 流动狭槽产生的局部阻力损失相对较小, 且流体黏度较大, 沿程阻力损失相对较大。随着含水率增大, 遇水膨胀材料发生膨胀, 最小过流面积减小, 流动狭槽产生的局部阻力损失急剧增大, 虽然混合流体的黏度随含水率增大先增大后减小, 但沿程阻力损失变化程度远小于局部水头损失的增幅。对于水相流体来说, 遇水膨胀材料充分膨胀, 最小过流面积最小, 局部阻力损失最大, 沿程阻力损失可忽略不计。

2.3 结构参数优化

为了进一步优化该装置的稳油控水性能, 需要分析不同结构参数对流动阻力等级的影响, 本文选取了工业上应用最广泛的喷嘴型ICD、螺旋通道型ICD和喷管型ICD作为参照。各种ICD的结构参数多种多样, 但其流动阻力等级的变化都可归结为最小过流面积(限流机理)和流道长度(摩擦机理)的变化。

流动阻力等级随最小过流面积的变化曲线见图3。

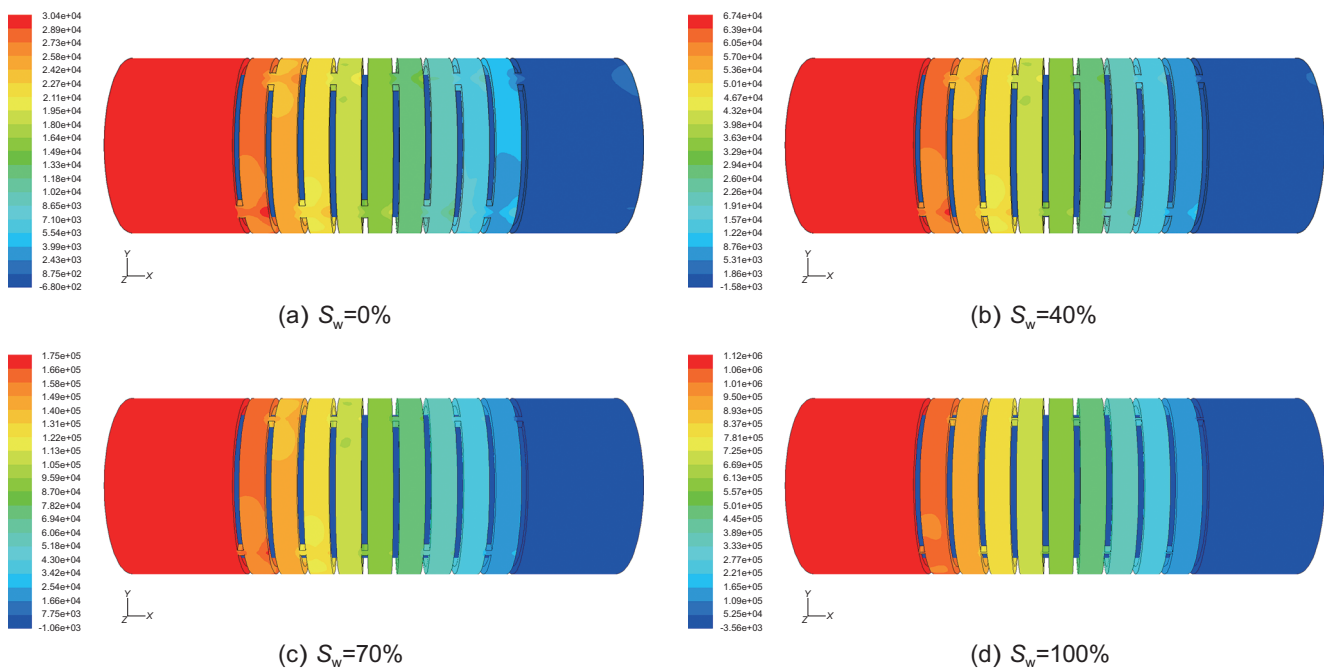


图2 新型AICD不同含水率压力分布云图
Fig. 2 Contour of static pressure of novel AICD

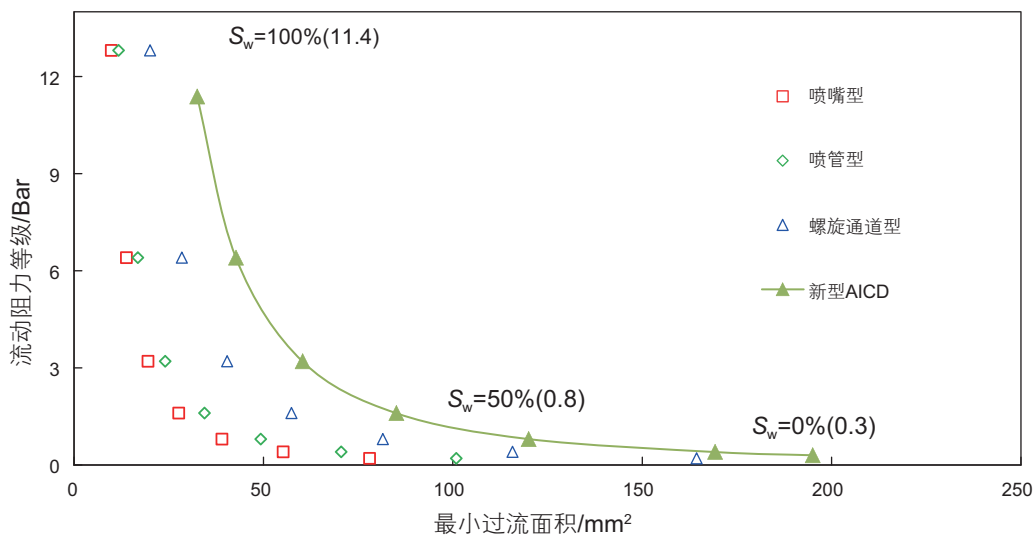


图3 最小过流面积对流动阻力等级的影响
Fig. 3 The influence of minimum flow area on FRR

可以看出, 4 种装置的流动阻力等级随着最小过流面积的减小而急剧增大。喷嘴型 ICD 利用限流机理、螺旋通道型 ICD 利用摩阻机理、喷嘴型 ICD 结合限流和摩阻机理, 因此在同等流动阻力等级下, 喷嘴型 ICD 的最小过流面积最小, 且最大过流速度也比流体通过喷嘴时的小得多。尽管新型 AICD 也主要利用限流机理, 但其是通过多级狭槽限流, 因此, 新型 AICD 最小过流面积最大。在各流动阻力级别下, 新型 AICD 的最小过流面积大约是喷嘴型(螺旋通道型、喷嘴型) ICD 的 3 倍(1.5 倍、2 倍)。特别地, 在油相条件下, 此时 $FRR=0.800$ Bar, 新型 AICD 的最小过流面积为 120.0 mm^2 , 而喷嘴型 ICD 的为 39.0 mm^2 , 喷嘴型 ICD 的为 49.3 mm^2 , 螺旋通道型 ICD 的为 81.5 mm^2 。由于最小过流面积差异显著影响其抗冲蚀和防堵塞性能, 因此, 在泥浆返排过程中新型 AICD 抗堵塞能力较强, 在稳产期抗颗粒冲蚀能力较强。新型 AICD 通过遇水膨胀材料随含水率的膨胀变化来调整最小过流面积, 从而调整装置流动阻力等级。对于本研究来说, 水相条件下的 $FRR=32.00$ Bar, 此时最小过流面积最小。

流动阻力等级随通道长度的变化曲线见图 4。可以看出, 4 种装置的流动阻力等级随通道长度的增加

而线性增大, 变化曲线与 Y 轴交于某一点, 该点的物理意义为沿程压降值为 0 时节流压降。喷嘴型 ICD 通过 Y 轴的点为 0.760 Bar, 喷嘴型 ICD 的为 0.527 Bar, 螺旋通道型 ICD 的为 0.035 Bar, 自膨胀型 AICD 在油相条件下为 0.043 Bar, 在含水率为 50% 情况下, 其交点为 0.177 Bar, 这进一步证实了新型 AICD 在油相条件下产生压降的主要方式为沿程阻力, 在水相条件下产生压降的主要方式为限流。新型 AICD 的总体压降随流动狭槽的增加而线性变化, 这说明可以通过增加或减少隔板数量快速调节其流动阻力等级。

2.4 流体参数敏感性分析

为进一步分析油、水及其混合物在该装置内的流动规律, 对含水率、油相密度和油相黏度进行了敏感性分析, 实验方案如表 1 所示。由于水相性质通常比较稳定, 文中并没有考虑水相性质的敏感性。

方案 1 研究了含水率敏感性, 4 种结构的节流压降随含水率的变化关系如图 5 所示。可以观察到, 传统 ICD 结构不能很好地识别含水率的变化, 一旦油井见水, ICD 结构将失效; 随着含水率的增加, 新型 AICD 装置的节流压降整体呈上升趋势, 且纯水条件

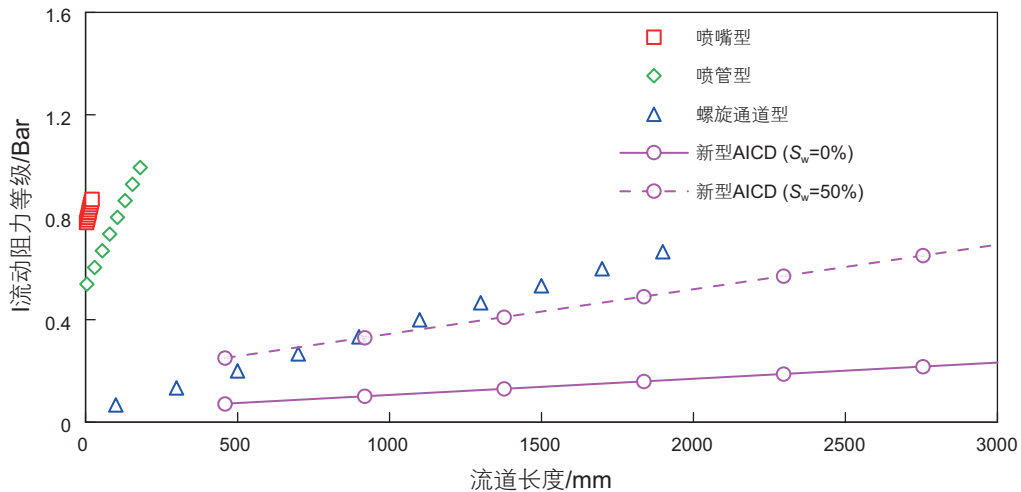


图 4 通道长度对流动阻力等级的影响

Fig. 4 The influence of flow length on FRR

表 1 实验方案

Table 1 Experimental scheme

	含水率/%	油相密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	油相黏度/cP
方案 1	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100	850	10
方案 2	0, 50	800, 850, 900, 950, 1000	1
方案 3	0, 50	850	1, 2, 4, 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200

下的节流压降约为纯油压降条件下的40倍,这充分保证了装置稳油控水的能力。

方案2研究了油相密度敏感性。由于油相的密度范围通常为 $800\sim 1000\text{ kg/m}^3$,因此密度(kg/m^3)取值如下:800、850、900、950、1000。不同含水率下压降随油相密度的变化关系如图6所示。可以观察到,4种结构的节流压降随油相密度的增加而线性增加,然而,增幅均较小。

方案3研究了油相黏度敏感性。由于油相黏度范围通常为 $1\sim 200\text{ cP}$,因此黏度(cP)取值如下:1、2、4、10、20、30、50、100、150和200。不同含水率下压降随油相黏度的变化关系如图7所示。可以观察到,螺旋通道型ICD与喷管型ICD的节流压降随油相黏度

的增大而线性增大,增幅较大;新型AICD和喷嘴型ICD的节流压降虽然随油相黏度的增大而线性增大,然而其增幅较小。

综上所述,该AICD对于流量、油相流体性质并不敏感,即使在重油条件下仍有较好的稳油控水能力,储层适用范围广。该装置对含水率极度敏感,应激反应快,一旦油井见水,该装置压降显著增大。

3 AICD性能分析

3.1 物理模拟实验装置

基于中国石油大学(北京)井筒复杂流动与完井工

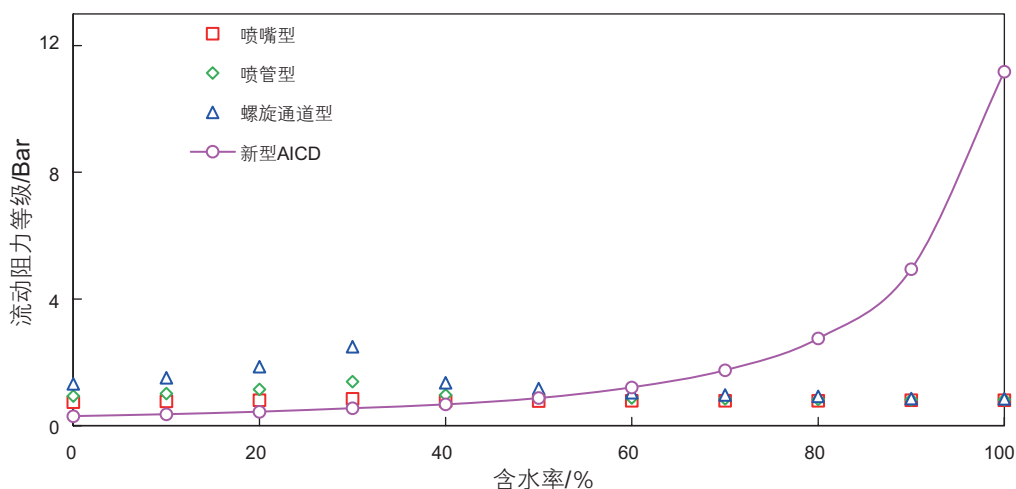


图5 含水率对流动阻力等级的影响

Fig. 5 The influence of water content on FRR

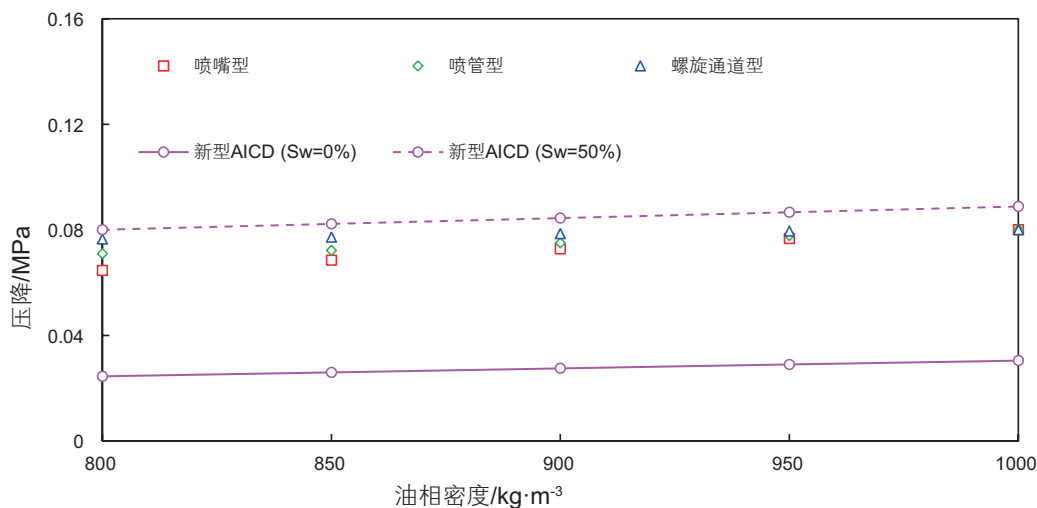


图6 油相密度对流动阻力等级的影响

Fig. 6 The influence of oil density on FRR

程实验室的全尺寸井筒流动测试实验装置(图 8), 对新型 AICD 开展了流动测试。

AICD 流动测试室内模拟实验的基础参数见表 2, 原油黏度根据渤海油田相关数据进行选取, 实验装置

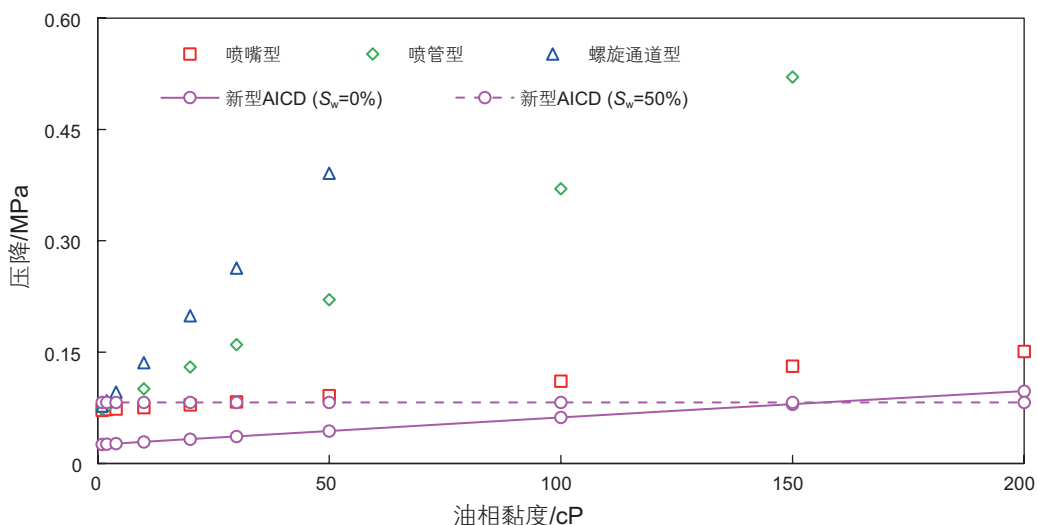


图 7 油相黏度对流动阻力等级的影响
Fig. 7 The influence of oil viscosity on FRR

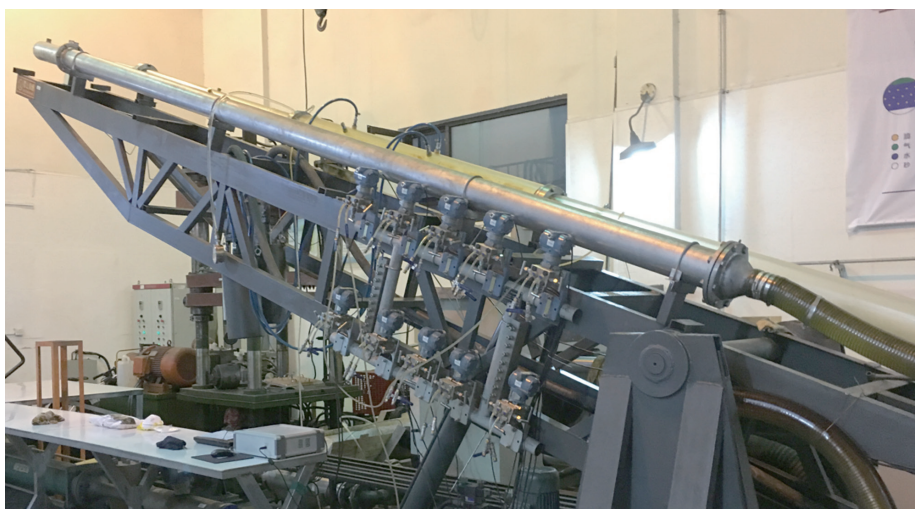


图 8 全尺寸井筒流动测试装置
Fig. 8 Full-scale wellbore flow test device

表 2 AICD 实验参数
Table 2 AICD test parameter

实验参数	数值	单位
壁面入流量	0.2~0.8	m ³ /h
主流流量	0.2~32	m ³ /h
油相黏度	19, 132	mPa·s
含水率	0~90	%
实验温度	25	℃
系统稳定时间	16	h

模拟在 1000 m 水平井段中包含 20 个 AICD 结构, 通过改变壁面注入流量和主流流量可以模拟不同位置水平段的入流情况。

3.2 测试流程

实验选取了 3 种类型的 AICD 装置进行测试, 分别是 Y 型 AICD、哈里伯顿的 Equiflow AICD 以及设计研制的新型 AICD。实验流程示意图见图 9。

实验步骤:

- (1) 首先调整实验环道至水平状态, 将液相支路缓冲罐上的软管与射孔段外层套管的注射孔对接;
- (2) 将油抽到罐中, 开启回流蝶阀, 保证实验正常循环, 调节其含水率至既定值;
- (3) 启动计算机, 开启差压计量系统和流量测试系统; 开启液相供给线的螺杆泵组, 调节液相的主路供

给排量至既定值;

(4) 依次调节液相支路供给排量, 待流动稳定后, 分别测定并保存实验数据;

(5) 重新调节液相的主路供给排量, 并重复上述步骤;

(6) 向储液罐中添加水, 重新调节液相体系的含水率, 并重复上述步骤。

3.3 实验结果分析

如图 10 所示, 在油相黏度 132 mPa·s, 壁面入流量 0.8 m³/h 的情况下, Y 型 AICD 与 Halliburton EquiFlow AICD 的水油压降比最大, 均为 6, 在这种情况下, 能够控制油井见水。然而, 实际生产过程中, 不同层段含水率差异通常介于 10%~30%, 不同含水率下的压降差别较小, 不能有效控制油井见水, 这大

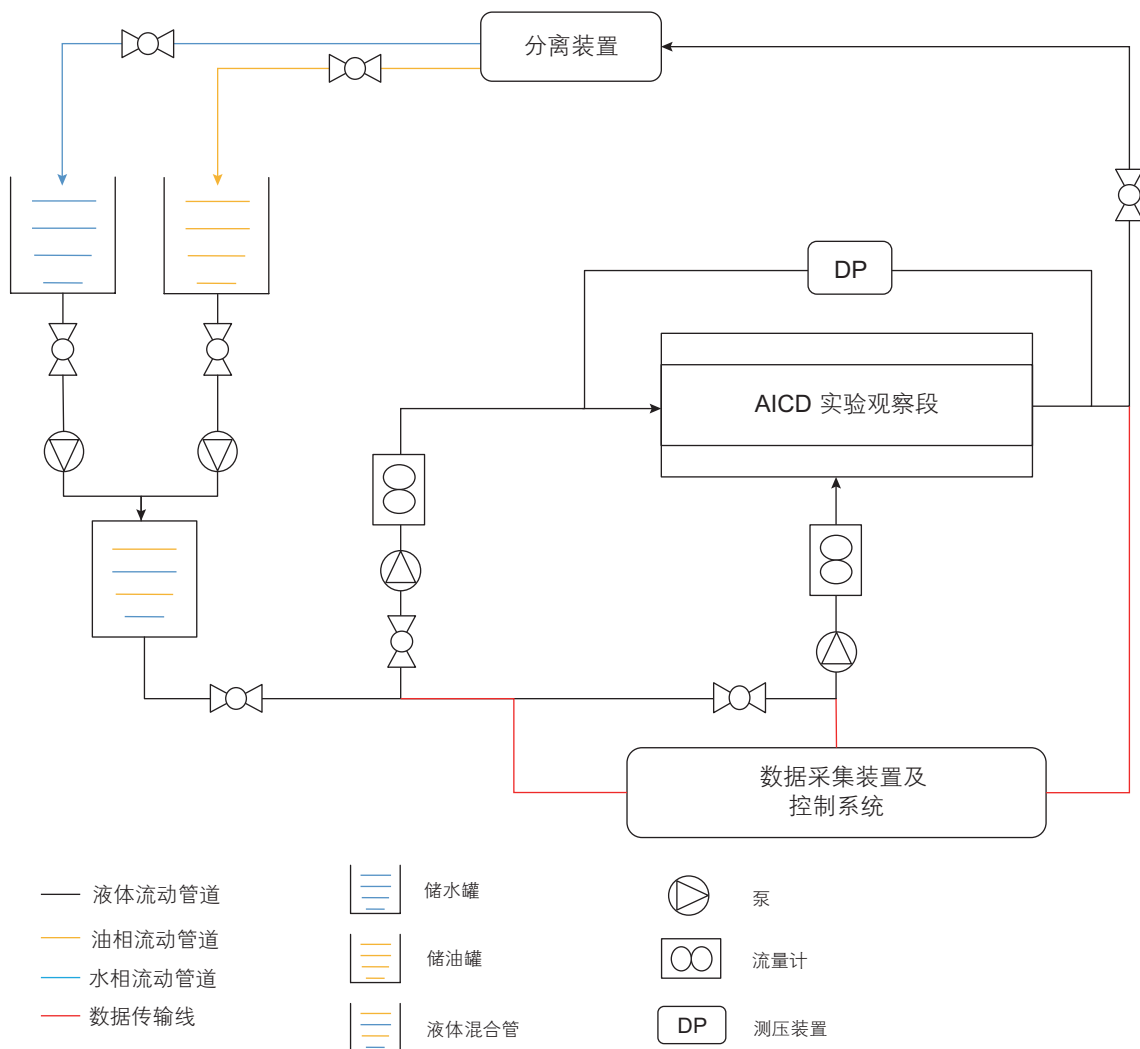


图 9 井筒流动测试实验示意图

Fig. 9 Schematic of wellbore flow test

大限制了该技术的推广应用。新型 AICD 在实验条件下水油压降比最高可达 36~40，即使含水率差异不大，其压降差别亦较大。在高含水情况下，其压降随含水率变化更加敏感，该装置特别适用于中高含水油井。

AICD 结构在不同壁面入流量下的性能测试结果如图 11、12、13 所示。对 EquiFlow AICD 和 Y 型 AICD 来说，壁面入流量越大，水油压降比越大，然而两种结构严重依赖于油水流型差异，在低入流量下水油压

降比较小，不能有效控水。新型 AICD 其水油压降比并不依赖于入流量大小，在所研究入流量范围内，水油压降比介于 36~40 之间，能够有效控水。

如图 14 所示，对新型 AICD 来说，改变主流流量，其节流压降几乎没有变化，这说明在开展 AICD 布置优化过程中，不需要专门考虑井筒位置对 AICD 布置的影响，而应更注重储层性质的影响。

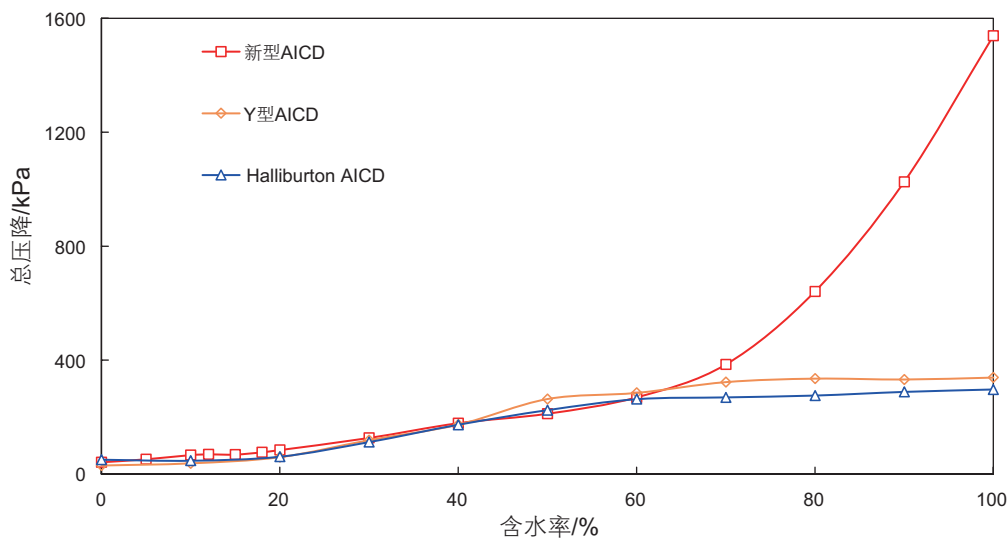


图 10 含水率对装置性能的影响

Fig. 10 Device performance with varying water contents

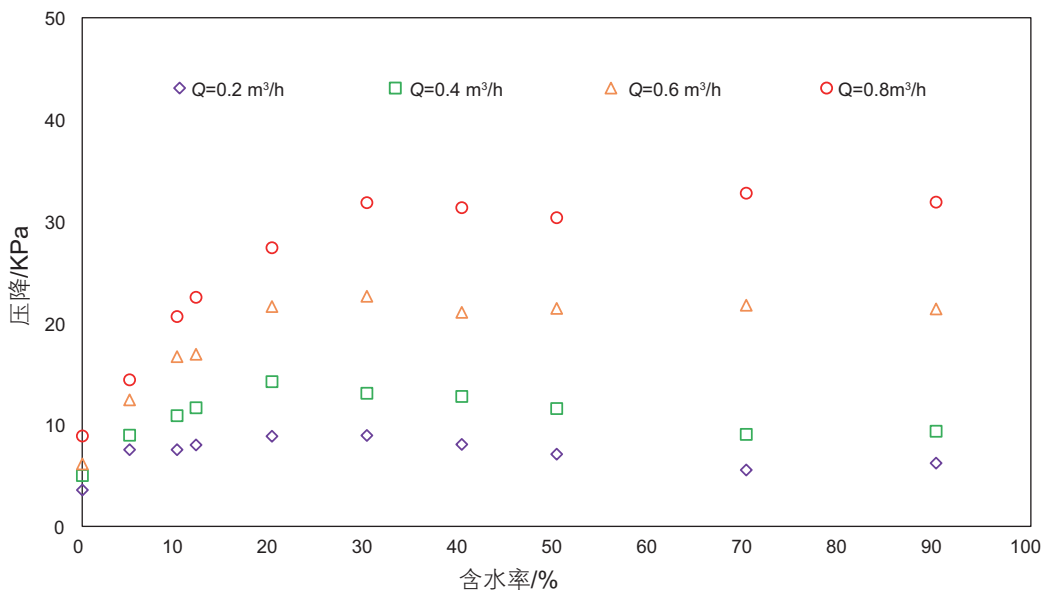


图 11 壁面入流量对 Equiflow AICD 性能的影响

Fig. 11 Equiflow AICD performance

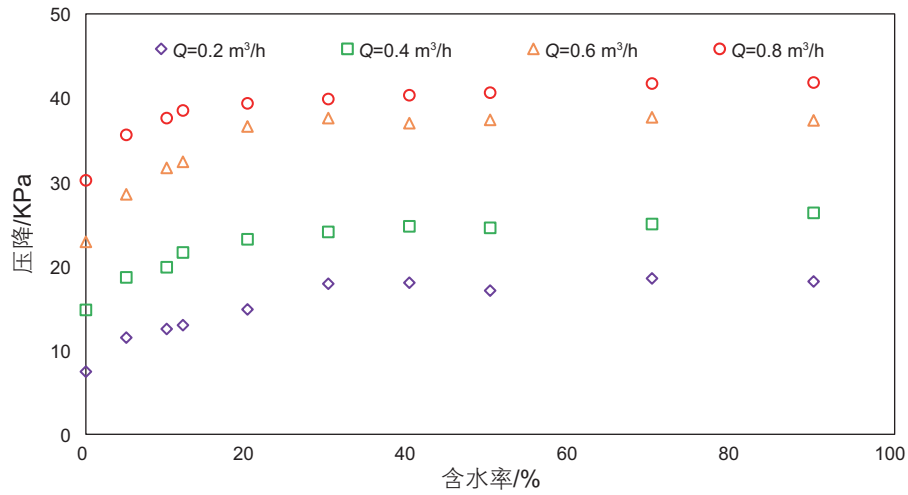


图 12 壁面入流量对Y型 AICD 性能的影响

Fig. 12 Y-shape AICD performance

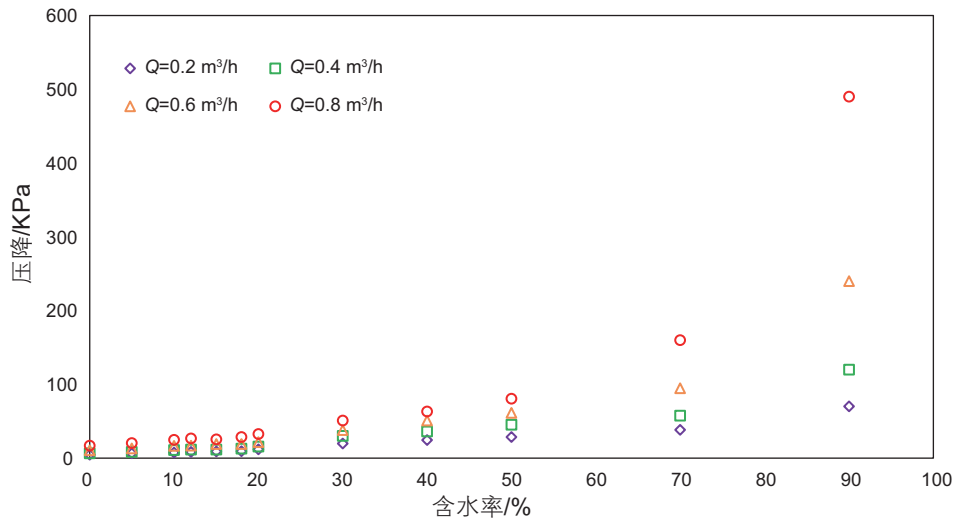


图 13 壁面入流量对新型 AICD 性能的影响

Fig. 13 Novel AICD performance

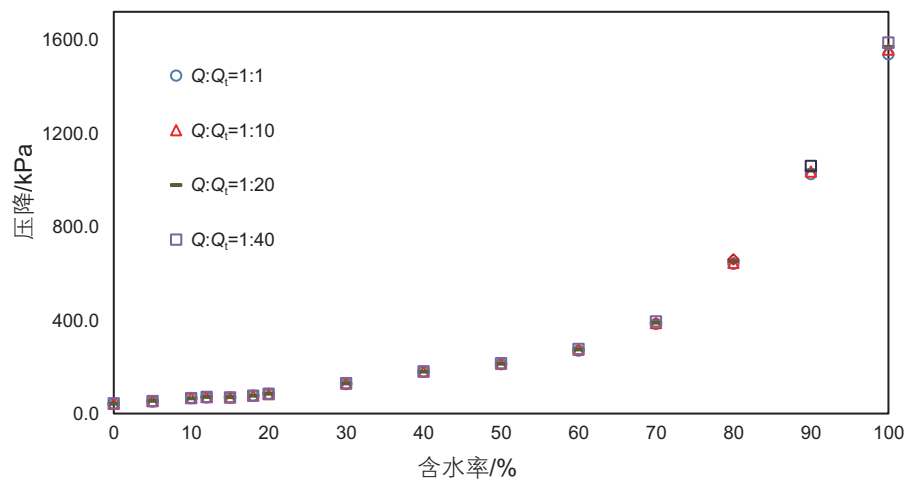


图 14 主流流量对新型 AICD 性能的影响

Fig. 14 Novel AICD performance with varying injection rate

4 结论

本文基于遇水膨胀材料和多级限流原理设计了一种新型 AICD 装置并针对不同种类 AICD 装置性能进行了实验研究, 基于实验结果得出以下结论:

(1) 新型 AICD 结构简单, 遇水后根据含水率自动

调整流动阻力, 防堵性能好。

(2) 新型 AICD 与传统 AICD 相比, 水油压差提升明显, 在油井不同生产阶段都具有卓越的性能, 由于其对流体流量和黏度不敏感, 适用范围广。

(3) 完井过程中, 该新型 AICD 可以简化完井设计难度, 不需要专门考虑井筒位置对 AICD 的影响, 可以更多的考虑储层非均质的影响。

参考文献

- [1] 汪志明. 油气井流体力学与工程[M]. 石油工业出版社, 2008. [WANG Z M. Fluid mechanics in petroleum engineering[M]. Petroleum Industry Press, 2008.]
- [2] 汪志明. 复杂结构井完井优化理论及应用[M]. 石油工业出版社, 2010. [WANG Z M. Theory and application of complex structure well completion optimization[M]. Petroleum Industry Press, 2010.]
- [3] 汪志明, 齐振林, 魏建光, 等. 裂缝参数对压裂水平井入流动态的影响[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(1): 73-78. [WANG Z M, QI Z L, WEI J G, et al. Influence of fracture parameters on inflow performance of fractured horizontal wells[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2010, 34(1): 73-78.]
- [4] 刘长生. 水平钻井将极大地提高勘探与开发的综合经济效益[N]. 国外油气新技术, 1990.5 [LIU C S. Horizontal drilling will greatly enhance the comprehensive economic benefits of exploration and development[N]. New foreign oil and Gas Technology, 1990.5.]
- [5] KARP J C, LOWE D K, MARUSOV N. Horizontal barriers for controlling water coning[J]. Journal of Petroleum Technology, 1962, 14(07): 783-790.
- [6] FRIEDMAN R H. Method for controlling bottom water coning in a producing oil well: US Patent 4, 662, 449[P]. 1987-5-5.
- [7] RICHARDSON J G, BLACKWELL R J. Use of simple mathematical models for predicting reservoir behavior[J]. Journal of Petroleum Technology, 1971, 23(09): 1145-1154.
- [8] SMITH C R, PRISON S J. Water coning control in oil wells by fluid injection[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1963, 3(04): 314-326.
- [9] 戴彩丽, 路建国, 任楠, 等. 薄层底水油藏底水锥进控制可视化研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(3): 72-76. [DAI C L, LU J G, REN S, et al. Visual studies on controlling water coning in thin oil reservoir with bottom water[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2006, 30(3): 72-76.]
- [10] 范凤英, 韩炜, 郭东华, 等. 化学凝胶隔板阻断底水锥进矿场试验[J]. 钻采工艺, 2003, 26(4): 86-88. [FAN F Y, HAN W, GUO D H, et al. Chemical gel barrier blocking bottom water coning test[J]. Drilling & Production Technology, 2003, 26(4): 86-88.]
- [11] 李宇乡, 刘双成. 我国油田化学堵水调剖剂开发和应用现状[J]. 油田化学, 1995, 12(1): 88-94. [LI Y X, LIU S C. Development and application of chemical water plugging and profile control agent in Oilfield[J]. Oilfield Chemistry, 1995, 12(1): 88-94.]
- [12] 王金忠, 肖国华. 水平井管内分段调流控水技术研究与应[J]. 石油机械, 2011. [WANG J Z, XIAO G H, et al. Pipe segment flow control research and application of water technology in horizontal wells[J]. China Petroleum Machinery, 2011.]
- [13] Ayesha A M, Hamdy H, et al. Wellbore segmentation using inflow control devices: design and optimization process[C]. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. Abu Dhabi: Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [14] EUGENE E R, JODY R A, BENN A V. New technology applications to increase oil recovery by creating uniform flow profiles in horizontal wells: case studies and technology overview[C]. International Petroleum Technology Conference. Doha: International Petroleum Technology Conference, 2005.
- [15] KNUT H H, ELI I G, JODY R A. Case study: the application of inflow control devices in the troll field[C]. SPE Europec/EAGE Annual Conference and Exhibition. Vienna: Society of Petroleum Engineers, 2006.
- [16] FAISAL T A, DAVID R D. Inflow control devices: application and value quantification of a developing technology[C]. International Oil Conference and Exhibition in Mexico. Veracruz: Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [17] ZENG Q S, WANG Z M, YANG G, et al. Selection and optimization study on passive inflow control devices by numerical simulation[C]. SPE Middle East Intelligent Energy Conference and Exhibition. Manama: Society of Petroleum Engineers, 2013.
- [18] STEPHEN L C, MARTIN P C, RUSTOM K M. Means for passive inflow control upon gas breakthrough[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2006.
- [19] WILEMAN A, LEAST B, GRECI S, et al. Fluidic diode autonomous inflow control device range 3B-oil, water, and gas flow performance testing[C]. SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference. Kuwait City: Society of Petroleum Engineers, 2013.

- [20] AAKRE H, HALVORSEN B, VIDAR M, et al. Smart well with autonomous inflow control valve technology[C]. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Manama: Society of Petroleum Engineers, 2013.
- [21] WANG X Q, WANG Z M, ZENG Q S. A novel autonomous inflow control device: design, structure optimization, and fluid sensitivity analysis[C]. International Petroleum Technology Conference, Kuala Lumpur: International Petroleum Technology Conference, 2014.

A novel AICD structure design and its performance analysis

WANG Xiaoqiu¹, WANG Zhiming¹, ZHAO Lin^{1,2}

1 Petroleum Engineering College, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 Post-Doctoral Research Station of Shengli Petroleum Administration Bureau, Dongying 257001, China

Abstract In long horizontal wells, bottom water breakthrough is usually encountered due to reservoir heterogeneity and anisotropy. Traditional inflow control device (ICD) structures have disadvantages such as possessing a permanent flow resist rate and being disabled when meeting water. The main application autonomous inflow control device (AICD) usually has a complex structure or narrow application ranges problems which limits its applicability. The paper raised an novel AICD structure design combining a continuous jet principle and water swelling rubber (WSR). Sensibilities testing and its structure advantages were studied based on numerical simulation and full-scale physical experiments. The result shows that the device has a simple structure which provides an outstanding anti-blocking property and is insensitive to viscosity or density. The structure has a wide application range and can maintain excellent performance in all production stages.

Keywords autonomous inflow control device; structure optimization; numerical simulation; full-scale experiment; performance analysis

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.03.027

(编辑 马桂霞)