第18卷 第2期 2018年1月
1671—1815(2018)002-0227-05

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 18 No. 2 Jan. 2018

引用格式:赵 麟, 汪志明, 曾泉树, 等. 多级限流 AICD 装置的结构设计及性能测试[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 227—231
Zhao Lin, Wang Zhiming, Zeng Quanshu, et al. A novel design and its performance test of new type AICD[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 227—231

多级限流 AICD 装置的结构设计及性能测试

赵 麟 汪志明* 曾泉树 毕洁夫
(中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102200)

摘 要 长水平井生产剖面难以均衡推进,易过早见水。传统流入控制装置(ICD)存在见水后失效的问题。本文提出一种新型自适应流入控制装置(AICD),该装置基于多级限流原理,结合遇水膨胀材料,根据含水率自动改变流动阻力等级,以达到控水稳油的目的。设计了全尺寸物理模拟试验装置,与国际上主要应用的 AICD 进行了对比试验。结果表明,该装置结构简单,防堵能力强,具有卓越的性能,对流体黏度、密度不敏感,在中高含水情况下,控水稳油效果显著。

关键词 自适应流入控制装置 结构设计 物理模拟试验 性能分析
中图法分类号 TE257; **文献标志码** A

在底水油藏、薄层油藏、海洋浅水和深水油气藏等开采过程中,水平井及大位移井与直井相比具有巨大的优势,因此中国水平井在不同类型的油气藏开发过程中越来越多的被应用[1—3]。但是长水平井的生产剖面通常难以均衡推进,易在油井高渗层段、裂缝处过早见水。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中国底水油藏水平井开发的主要难题[4—11]。

为了解决该问题,国内外研发了多种结构的流入控制装置(ICD)[12—15],包括喷嘴型、迷宫型、螺旋通道型等结构,被动式 ICD 存在流动阻力等级恒定、见水/气后失效等问题。目前中国的大部分油田进入中高含水期,传统 ICD 难以满足实际需求。

自适应流入控制装置(AICD)流动阻力非恒定,一旦见水/气,将产生更大的流动阻力,限制水/气的流动,从而延长油气井生产寿命。现在国际上主要应用的 AICD 包括平衡片 AICD[16]、流道式 AICD[17]和浮动圆盘式 AICD[18]。这些结构存在结构复杂、适用范围小等缺点,限制了该技术的大规模推广应用。

基于自膨胀材料及多级限流原理,提出并设计了一种新型 AICD,并基于井筒复杂流动实验装置设计了全尺寸 AICD 流动测试装置,对 AICD 进行了流动分析及性能测试。本文研究内容对国内 AICD 完井技术的完善具有一定的指导意义。

1 新型 AICD 结构设计

基于多级限流原理,并结合遇水膨胀橡胶(WSR),本文提出了一种 AICD,如图 1 所示。可以观察到,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。每个隔板上开有两个呈 180°对称的流动狭槽。遇水膨胀材料安装在狭槽沿周向的两个端面。

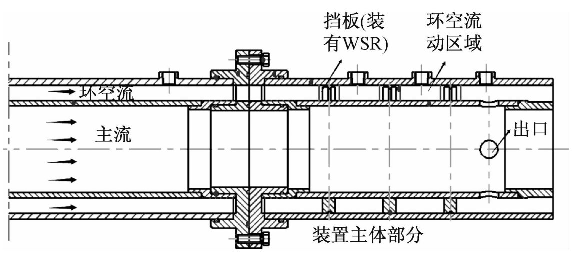

图 1 基于遇水膨胀材料的 AICD 设计的结构设计图
Fig. 1 Structure diagram of novel AICD based on WSR

一旦发生见水,挡板末端的遇水膨胀橡胶将膨胀,膨胀度根据含水率(S_w)大小自动调整,如图 2 所示,从而改变装置的最小过流面积和流动阻力等级(FRR)。这种自适应功能使得油井能够更好地稳油控水。具体来说,当含水率较低时,遇水膨胀橡胶的膨胀度受限,此时的最小过流面积最大;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;当含水率较高时,遇水膨胀橡胶充分膨胀,此时最小过流面积最小。

由于这种设计产生压降的主要机理为限流,其

2017 年 5 月 29 日收到 国家科技重大专项(2011ZX05009-005)资助
第一作者简介:赵 麟(1986—),博士研究生。研究方向:智能完井。E-mail:2012312022@ student. cup. edu. cn。
* 通信作者简介:汪志明。E-mail: wellcompletion@ 126. com。

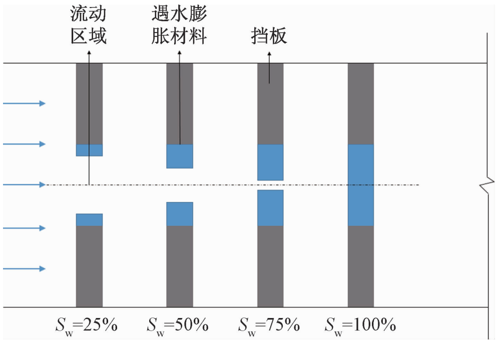

图 2 不同含水率下所对应的最小过流面积示意图

Fig. 2 Diagram of minimum flow area for different water cut

FRR 主要取决于最小过流面积的大小,且最小过流面积与含水率的关系如前所述。与传统 PICD 相比,新结构的 FRR 不是一个定值,会随着含水率的增大而增大,如图 3 所示。与纯油情况相比,当纯水通过该装置时,装置的 FRR 将增大 40 倍。其中,FRR 为流动阻力等级,数值上等于环空流量 30 m^3/D的水相(密度 999.55 kg/m^3,黏度1 MPa·s)流过 ICDs 结构所产生的压降大小,单位为 bar (1 bar = 10^5 Pa)。

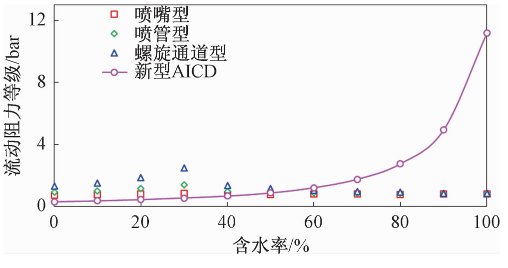

图 3 含水率对流动阻力等级的影响

Fig. 3 FRR versus water cut

2 新型 AICD 性能测试

2.1 遇水膨胀材料性能试验

为了进一步了解遇水膨胀材料的特性,本文设计并开展了该试验用材料在不同油相黏度、不同含水率条件下的膨胀实验,如图 4 所示。实验选取 19 mP·s 和132 mP·s 的原油,分别配成含水率 0 ~ 90% 的油水混合物,室温条件下,放入形状体积相同的遇水膨胀材料进行实验,每隔一小时测定一次膨胀材料的体积,直至膨胀材料体积趋于稳定。由于在实验条件下,随着含水率的升高,油水混合物的黏度存在反向现象,因此针对反向点前后的含水率进行了加密实验,19 MPa·s 的原油的反向点为 S_w = 0.25,132 MPa·s 的原油的反向点为 S_w = 0.13。

如图 5 所示,对于黏度 132 MPa·s 的原油,当含水率在 13% 以下时,随着时间的推移遇水膨胀材料并不发生明显的膨胀,当含水率继续提升,遇水膨胀

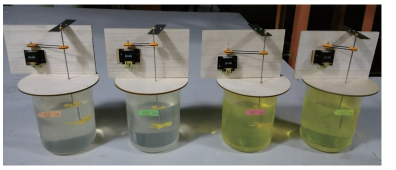

图 4 遇水膨胀材料性能试验

Fig. 4 Performance test of WSR

材料开始膨胀,膨胀体积随时间推移逐渐增大,膨胀体积在实验后 12 h 趋于稳定。含水率大小决定该遇水膨胀材料的最终膨胀体积。

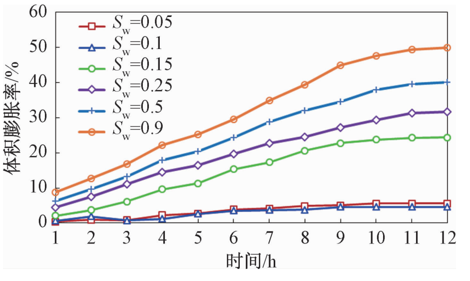

图 5 装置 WSR 材料膨胀规律(132 MPa·s)

Fig. 5 Expansion test of WSR(132 MPa·s)

第二组实验的原油黏度为 19 MPa·s,如图 6 所示,随着时间的推移遇水膨胀材料在不同含水率下均发生了明显的膨胀,膨胀体积随时间推移逐渐增大,膨胀体积在实验后 12 h 趋于稳定。同样地,含水率大小决定该遇水膨胀材料的最终膨胀体积。

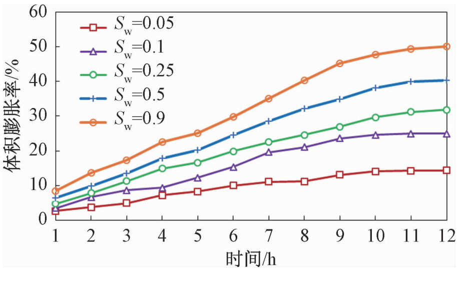

图 6 装置 WSR 材料膨胀规律(19 MPa·s)

Fig. 6 Expansion test of WSR(19 MPa·s)

由上述的研究可以看出,在实验条件下,影响遇水膨胀材料膨胀速度和膨胀程度的主要因素是含水率,当油相黏度较大时,遇水膨胀材料膨胀速度和膨胀程度除了受含水率影响之外,还受油水两相混合物相态影响,当处于油包水状态时,材料膨胀程度基本不发生变化。该膨胀材料的膨胀性能能够达到新型 AICD 的设计需求。

2.2 试验装置设计

试验选取了两种类型的 AICD 装置,如图 7 所示,分别是哈里伯顿的 Equiflow AICD 以及设计研制的新型 AICD。该试验主要基于中国石油大学(北京)井筒复杂流动与完井实验室的全尺寸 AICD 流

动测试装置进行,如图 8 所示,主要包括 AICD 试验观察段、试验流体供给及控制系统、压力采集及处理系统。

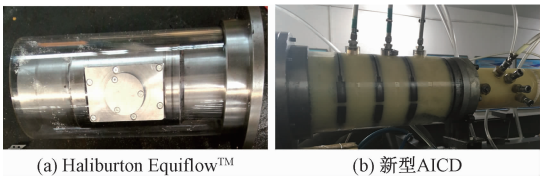

图 7　AICD 试验装置

Fig. 7　AICD testing apparatus

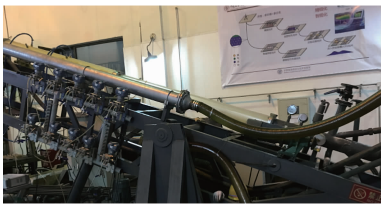

图 8　全尺寸 AICD 流动试验装置

Fig. 8　Full-scale flow experiment device

该测试装置试验段主要由模拟井筒流动的中心管和模拟储层流入 AICD 的壁面入流管组成,分别采用全尺寸 5.2 inch 和 6.5 inch 的有机玻璃管,试验段可分为 3 个部分:壁面入流稳定段 1.5 m,AICD 试验段 0.5 m,混合流出段 2 m。试验段前后及试验段每级挡板前均布有测压点,与压力采集系统连接,能够实时测量试验装置各测压点的压力。试验段采用透明有机玻璃管可以直观的观察井筒内流体流动规律。

试验流体供给与控制系统主要包括两台螺杆泵以及两个控制箱、蓄水罐、储油罐。该系统的主要功能是给试验管路提供流体以及控制流体流量、流体速度和提供一定压力使之通过试验管路。蓄水罐和储油罐是为了使流体实现循环利用。

压降采集与处理系统主要包括测压表和一台装有压降采集和处理软件的电脑。试验段两端的测压点的压力通过压差传感器以一定的频率连续输出到接收端并在电脑上以直观的曲线图表示出来,并且可以通过处理软件直接读取导出保存。

2.3　试验方案设计

试验设计方案主要是试验参数的设定,包括井筒 AICD 结构、主流流量以及壁面支流流量、原油黏度、含水率等参数。试验模拟 1 000 m 水平段布置 20 个 AICD 结构,油井产量为 200 ~ 800 m^3/d,因此试验过程中井筒主流流量选取范围为 0.2 ~ 32 m^3/h,壁面支流流量选取范围为 0.2 ~ 0.8 m^3/h。试验过程中的含水率主要取值为 0、5%、10%、15%、20%、30%、50%、70%、90%,针对流体混合黏度存在反向的现象进行了加密试验。白油黏度选取 132 MPa·s 和19 MPa·s。

2.4　试验步骤

图 9 所示是试验装置及流程示意图。

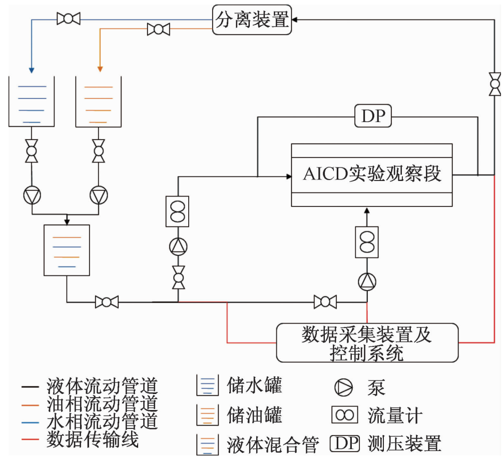

图 9　试验流程示意图

Fig. 9　Schematic of multiphase flow test

具体试验步骤为:

(1)选取新型 AICD 结构,组装试验装置,检查装置密封性及校准压力表。

(2)取 132 MPa·s 的白油10 m^3,加入 0.526 m^3 的自来水,配成含水率为 5% 的液相混合液;调节主流流量为 0.2 ~ 0.32 m^3/h。

(3)主流量一定,稳定运行 8 ~ 12 h,待系统稳定后,调节壁面入流量为 0.2 ~ 0.8 m^3/h,使主流流量与壁面入流流量成一定的比例,观察 AICD 结构装置流型变化并记录各测验点压力。

(4)分别选取不同种类的 AICD 结构,重复步骤(1) ~ 步骤(4)。

(5)配置含水率分别为 0 ~ 90% 的油水混合物,重复步骤(1) ~ 步骤(5)。

(6)选取 32 MPa·s 的白油,重复步骤(1) ~ 步骤(5)。

3　试验结果分析

3.1　AICD 装置压降比

如图 10 所示,在油相黏度 132 MPa·s,壁面入流量0.8 m^3/h 的情况下,对 3 种 AICD 进行了测试。Halliburton Equiflow AICD 和 Y 型 AICD 的水油压降比最大为 5,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,这大大限制了该技术的推广应用。新设计的 AICD,在所研究的试验条件下其水油压降比最可达 38,即使含水率差异不大,其压降差别亦

较大。特别地,在高含水情况下,其压降随含水率变化更加敏感,该装置特别适用于高含水油井。

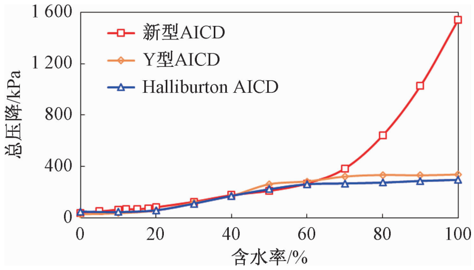

图 10 含水率对压降的影响

Fig. 10 FRR versus water cut

3.2 壁面入流量对压降的影响

如图 11、图 12 所示,对 Halliburton Equiflow AICD 来说,壁面入流量越大,其水油压降比越大,然而,其严重依赖于油水的流型差异,在低入流量下,其水油压降比较小,不能有效控水;对新型 AICD 来说,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 ~ 38 之间,能够有效控水。

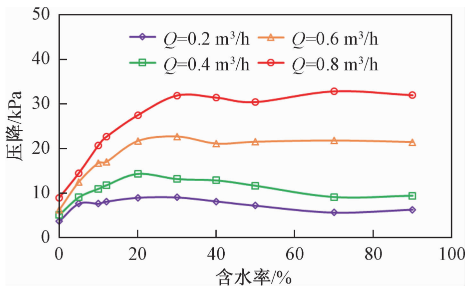

图 11 含水率对 Equiflow AICD 压降的影响

Fig. 11 FRR of Equiflow AICD versus water cut

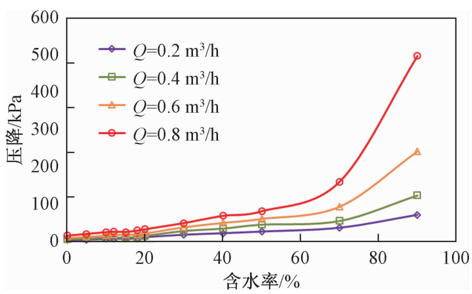

图 12 含水率对新型 AICD 压降的影响

Fig. 12 FRR of novel AICD versus water cut

3.3 主流量对压降的影响

如图 13、图 14 所示,对 Equiflow AICD 来说,由于主流流量的改变对 AICD 性能影响很大,在 AICD 完井过程中必须要考虑 AICD 布置位置以及各段流量来设计 AICD;对新型 AICD 来说,主流量大小对压降几乎没有影响,在开展 AICD 布置优化过程中,并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。

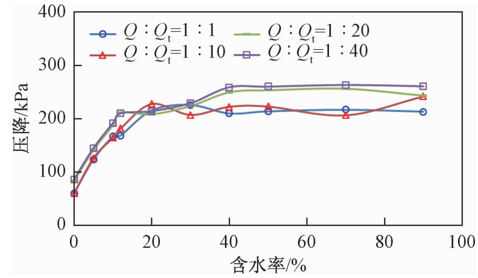

图 13 主流流量对 Equiflow AICD 压降的影响

Fig. 13 FRR of Equiflow AICD versus inflow rates

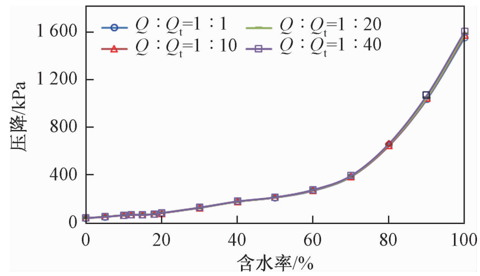

图 14 主流流量对新型 AICD 压降的影响

Fig. 14 FRR of novel AICD versus inflow rates

4 结论

设计一种新型 AICD,并设计了全尺寸物理模拟试验装置。对不同种类 AICD 装置性能进行了试验研究,基于试验结果得出以下结论。

(1)该新型 AICD 结构简单,防堵性能好,流动阻力易于调整。

(2)该新型 ACID 与传统 AICD 相比,水油压差提升明显,最高可达 38。

(3)该新型 AICD 对流体流量不敏感,适用范围较广。

(4)当进行完井参数优化时,相比于“跟趾效应”,应更多考虑储层非均质性的影响。

参 考 文 献

1 汪志明. 油气井流体力学与工程. 北京:石油工业出版社,2008
Wang Zhiming. Fluid mechanics in petroleum engineering. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008

2 汪志明. 复杂结构井完井优化理论及应用. 北京:石油工业出版社,2010
Wang Zhiming. Theory and application of complex structure well completion optimization. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010

3 周丛丛. 水平井流入动态分析. 北京:中国地质大学(北京),2009
Zhou Congcong. Inflow performance analysis of horizontal well. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009

4 Karp J C, Lowe D K, Marusov N. Horizontal barriers for controlling water coning. Journal of Petroleum Technology, 1962; 14(7):

783—790

5 Friedman R H. Method for controlling bottom water coning in a producing oil well: U. S. Patent 4 662 449. 1987-05-05

6 Richardson J G, Blackwell R J. Use of simple mathematical models for predicting reservoir behavior. Journal of Petroleum Technology, 1971; 23(9): 1145—1154

7 Smith C R, Prison S J. Water coning control in oil wells by fluid injection. Society of Petroleum Engineers Journal, 1963; 3(4): 314—326

8 戴彩丽, 路建国, 任　熵, 等. 薄层底水油藏底水锥进控制可视化研究. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006; 30(3): 72—76
Dai Caili, Lu Jiangguo, Ren Shang, *et al*. Visual studies on controlling water coning in thin oil reservoir with bottom water. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006; 30(3): 72—76

9 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. 钻采工艺, 2003; 26(4): 86—88
Fan Fengying, Han Wei, Guo Donghua, *et al*. Chemical gel barrier blocking bottom water coning test. Drilling & Production Technology, 2003; 26(4):86—88

10 李宇乡, 刘双成. 我国油田化学堵水调剖剂开发和应用现状. 油田化学, 1995; 12(1): 88—94
Li Yuxiang, Liu Shangcheng. Development and application of chemical water plugging and profile control agent in oilfield. Oilfield Chemistry, 1995; 12(1):88—94

11 王金忠, 肖国华. 水平井管内分段调流控水技术研究与应用. 石油机械, 2011;39(1):60—61
Wang Jinzhong, Xiao Guohua. Pipe segment flow control research and application of water technology in horizontal wells. China Petroleum Machinery, 2011;39(1):60—61

12 Marzouqi AARA, Hamdy H, keshka A S, *et al*. Wellbore segmentation using inflow control devices: design and optimization process. Society of Petroleum Engineers, 2010; SPE 137992

13 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. Society of Petroleum Engineers, 2005; SPE 10177

14 Knut H H, Eli I G, Jody R A. Case Study: The application of inflow control devices in the troll field. Society of Petroleum Engineers, 2006; SPE 100308

15 Faisal T A, David R D. Inflow control devices: application and value quantification of a developing technology. Society of Petroleum Engineers, 2007; SPE 108700

16 Stephen L C, Martin P C, Rustom K M. Means for passive inflow control upon gas breakthrough. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, 24—27 Sep, SPE-102208

17 Wileman A, Least B, Greci S, *et al*. Fluidic diode autonomous inflow control device range 3B-oil, water, and gas flow performance testing. SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference, 8—10 Oct, SPE-167379

18 Aakre H, Halvorsen B, *et al*. Smart well with autonomous inflow control valve technology. SPE Middle East Oiland Gas Show and Conference, Manama. Bahrain, 10—13 March, SPE-164348

A Novel Design and Its Performance Test of New Type AICD

ZHAO Lin, WANG Zhi-ming*, ZENG Quan-shu, BI Jie-fu
(Petroleum Engineering College, China University of Petroleum, Beijing 102200, China)

[**Abstract**] The production profile of the long horizontal wells is difficult to promote evenly which occurs water breakthrough easily. Traditional ICD structures will be disabled when water break through occurs. Combining continuous jet principle and WSR, an autonomous inflow control device design was proposed which can adjust its water resist level responding to water cut change, thus achieving the purpose of stabilizing oil production and water control. Comparing the mainly applied AICDs by the full-scale experiment, experimental results show that the device is insensitive to viscosity or density and have simple structure. The device has excellent performance in stabilizing oil production and water control in medium or high water cut stage.

[**Key words**] autonomous inflow control device　structure design　physical simulation experiment　performance analysis