第22卷 第5期
2017年10月

哈尔滨理工大学学报
JOURNAL OF HARBIN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Vol. 22 No. 5
Oct. 2017

分层注聚节流阀芯结构优化设计

尤 波[1]， 邹天洋[1]， 贾德利[2]

(1. 哈尔滨理工大学 自动化学院，黑龙江 哈尔滨 150080；2. 中国石油勘探开发研究院，北京 100083)

摘 要: 为了解决分层注聚中聚驱试剂井下低剪切配注问题，提高聚驱试剂驱油效果，本文综合比较了三种阀芯结构，进行了阀芯室内水利特性试验，并进行了阀芯网格划分，流场动力学仿真，得出了流线型降压槽结构对聚驱试剂剪切率低、限流阻力大、粘度损失小且减少了更换频率。运用 FLUENT 软件模拟出流线型降压槽结构不同槽数的阀芯对粘度损失率和节流压差的影响，有效控制注入量为 120 m^3/d，可产生控制压差为 3.0 MPa，粘度损失率为 <12%。提高了产油量，为聚驱分注工具统一奠定了基础，对注聚区的稳定开发提供技术支撑。

关键词: 流线型降压槽；流场仿真；粘度损失率；网格划分；阀芯性能；水利特性试验

DOI: 10.15938/j.jhust.2017.05.003

中图分类号: TE938 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2017)05-0013-05

Layered Polymer Injection Throttle Valve Core Structure Optimization Design

YOU Bo[1]， *ZOU Tian-yang*[1]， *JIA De-li*[2]

(1. School of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. Exploration and Development Research Institute of China National Petroleum Corp, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the separate layer polymer injection in polymer underground low shear injection allocation problem and improve the oil displacement effect of polymer, this paper compares the three kinds of valve structure, spool indoor test, and a valve core grid partition, dynamic simulation of flow field. It is concluded that the streamlined pressure relief groove structure of polymer shear rate is low, the current limiting resistance, viscosity loss small, cast fishing success rate is high. Injection allocation device resistance flow section adopts the streamline relief groove structure, using FLUENT software to simulate the aerodynamic pressure relief groove structure and different numbers of slots in the spool to the viscosity loss rate and the throttle pressure difference effect, when the flow in the range of 25 ~ 170 m^3/d can produce pressure 1.6 MPa, shear degradation rate of less than 6.5%. To improve the oil production, Increase oil production, which laid a foundation for polymer separate injection tools and unified, the stability of polymer injection development to provide technical support.

Keywords: streamlined step-down slot; flow simulation; viscosity loss rate; mesh generation; valve core performance; water conservancy characteristic test

---

收稿日期: 2016-03-10
基金项目: 黑龙江省青年科学基金(15008002-11121)；哈尔滨市青年基金(2014RFQXJ165).
作者简介: 尤 波(1962—)，男，教授，博士研究生导师；
邹天洋(1991—)，男，硕士研究生；E-mail: 374789127@qq.com；
贾德利(1980—)，男，博士研究生，教授.

0 引 言

伴随着我国传统的水驱的方式不能满足现有的采油环境，三次采油技术逐渐成为我国石油技术革新的重要环节，聚驱试剂驱油方式就是技术革新的重点。为了达到分层注聚的高效测调，偏心配注器阻流段节流阀芯的结构设计直接影响了聚驱试剂的驱油效果，因此，在传统的节流阀芯的基础上，对其结构进行优化设计，成为了三次采油的关键技术。由于阀芯机械构造的多变性，流经配注器的聚驱试剂受到机械剪切力作用，会使其粘度降低，由于聚驱试剂是假塑性非牛顿流体，粘度的降低会削弱聚驱采油效果。近几年，油井中广泛应用的偏心配注器节流阀芯存在着反复更换，不能连续测调，聚驱试剂剪切降解严重等问题[1]，造成采油率降低。因此，对阀芯三种不同结构，设计了室内水利特性试验，分别分析了其对粘度损失率和压差的影响，并对其中油田中常用的三种阀芯进行了流场动力学仿真和现场的水利特性试验。得到了三种阀芯结构在配注量相同时对节流压差和粘度损失率的影响规律，用FLUENT软件拟合出了流线型降压槽的不同槽数对粘度损失率及压差的影响，为注聚连续可调工艺提供了理论依据，实现了不同配注量、不同层段注聚的要求。

1 阀芯结构对比分析及优化

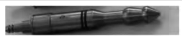
1.1 技术指标

有效控制注入量120 m^3/d，控制压差3.0 MPa，粘度损失率＜12%。

1.2 结构对比

为了得到最适合注聚区提高采油产量的阀芯结构，集各种分注工具[2]之所长，形成一套适用于聚驱试剂驱的分注工具，早日形成井筒标准化模式，提升整体分注水平。本文对比了相同内通径，长度相近的锥状梭形杆、梭形杆、流线型降压槽三种不同阀芯结构，三种阀芯结构及实物对比如表1所示：

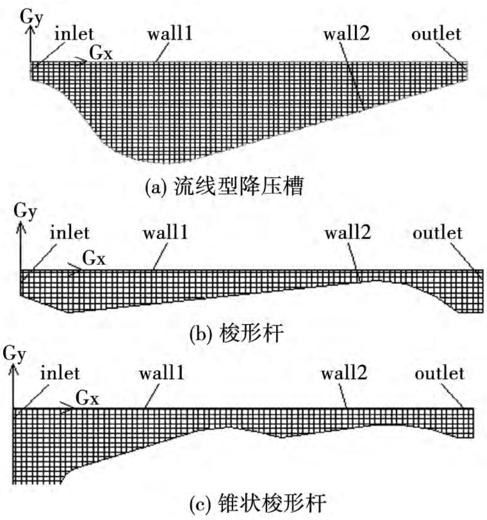
表1 阀芯结构对比分析表

序号	工具结构	技术参数		实物
		偏心配注器/mm	节流元件/mm	
1	锥状型梭型杆	长度：1160；内通径：46；偏孔内径：25	外径：15－18.5；球距：24	
2	梭型杆	长度：1750；内通径：46；偏孔内径：20	外径：18；球距：38	
3	流线型降压槽	长度：1640；内通径：46；偏孔内径：20	外径：17－18.3；槽距：11	

1.3 有限元分析

1.3.1 网格划分

将三种阀芯内部作为求解区域，用有限的小方格划分成简单的子区域，将阀芯内部复杂的连续体等效成有限个单元的组合。分别对锥状梭形杆、梭形杆、流线型降压槽进行网格划分，由于阀芯形状的对称性，我们截取半个阀芯结构进行网格划分。选择表1所示的三种阀芯尺寸建立流道模型，入口用inlet标定，出口用outlet标定，利用二维坐标系，将三维立体阀芯结构转化成二维分析[3]。每节阀芯的网格数在12 000～20 000之间，如图所示：(a)为流线型降压槽流场网格图，(b)为梭形杆流场网格图(c)为锥状梭形杆网格图。



(a) 流线型降压槽

(b) 梭形杆

(c) 锥状梭形杆

图1 三种阀芯网格划分

1.3.2　计算解析

通过控制幂律非牛顿流体内部分子量及浓度调节聚驱试剂的粘度损失率，降低阀芯的剪切力，由此给出聚驱试剂的广义雷诺数:

$$\mathrm{Re} = \frac{D_h^n v^{2-n} \rho}{K 8^{n-1}} = 317.3 \tag{1}$$

式中: μ 为聚驱试剂的运动粘度($\mathrm{m^2/s}$) ; η 为聚驱试剂的动力粘度(mpas) ; ρ 为聚驱试剂的密度($\mathrm{kg/m^3}$) ; Re 为聚驱试剂的广义雷诺数。

摩阻系数 λ 计算公式:

$$\lambda = -0.0235\ln(\mathrm{Re}) + 0.2886, \mathrm{Re} \leqslant 2000 \tag{2}$$

$$\lambda = -0.0897\ln(\mathrm{Re}) + 0.7918, \mathrm{Re} \geqslant 2000$$

求节流压差:

$$\Delta p = \frac{2\lambda n L_0 \rho v^2}{(D_0 - D_1)} \tag{3}$$

式中: Δp 为节流压差，单位 MPa; L_0 为节流芯子长度，单位 mm。

通过计算得出了三种阀芯结构节流压差[3]，为 FLUENT 仿真提供数据统计，得到图 2 所示的流线型降压槽仿真速度云图。

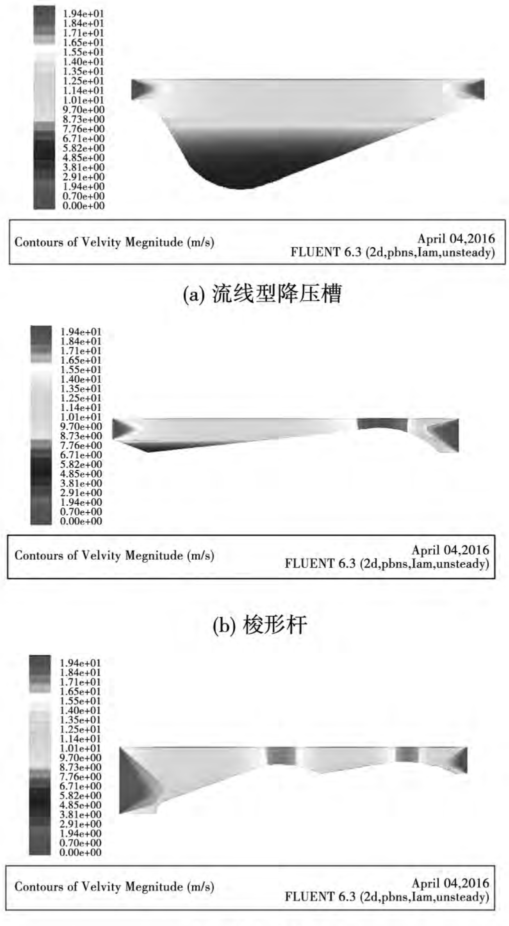
1.3.3　内部流场分析

利用 FLUENT 软件分析出三种阀芯单个槽内流场的速度分布，如下图 2 所示。从图 2 仿真结果来看，当聚驱试剂流经流线型降压槽，槽内底部缓冲区流线较稀少，阀芯内部流速较慢，流体对阀芯冲击较小，能够很大程度保持节流压差，缓冲作用明显，保证了节流阀芯可以在井下长期使用，减少了投捞次数。而梭形杆内部空间狭小，聚驱试剂经过，流速比较快，粘度损失比较大，锥状梭形杆弥补了梭形杆的空间问题，但是空间利用率比较低且易产生回流现象。另外，增加注入的压力，流线型降压槽节流压差增加越快，节流效果越好，更加适合作为注聚阀芯结构。

1.4　室内水利特性试验

对 3 种不同分注工具进行室内水利特性试验，试验要求: 聚驱试剂注入量为 30 $\mathrm{m^3/d}$，配注浓度为 2 500 mg/L，聚驱试剂的分子量为2 500万; 注入压力为 40 MPa; 配注量为 80 $\mathrm{m^3/d}$。选择槽数固定的投捞试凑法，投捞 10 次，检测投捞成功率[3]。粘度计选择旋转粘度计，将通过节流阀芯前后的粘度差计为粘度损失。

图 3 所示为试验原理，将泵内注入聚驱试剂并



(a) 流线型降压槽

(b) 梭形杆

(c) 锥状梭形杆

图 2　三种阀芯速度等值图

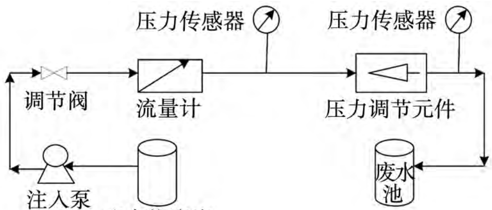


图 3　室内水利特性试验过程图

打到配注机械装置里，聚驱试剂流经 ZDRO-16P 型调节阀，IFC100W 型流量计(量程为 0 ~ 60 $\mathrm{m^3/h}$，精确度 0.1) 和 CEMPX213 型(量程为 0 ~ 1 MPa，精确度为 0.2) 压力传感器装置，最后到达废水池中，聚驱试剂流通期间，通过控制调节阀控制流量，经过涡街流量计测出流量，压力传感器测试前后压力，将未经过试验的溶液作为粘度测试的母液，流过压力调节元件之后的溶液即为剪切后的溶液，每个阀芯进行 10 组实验，取其平均值进行记录并计算结果如图 4 所示:

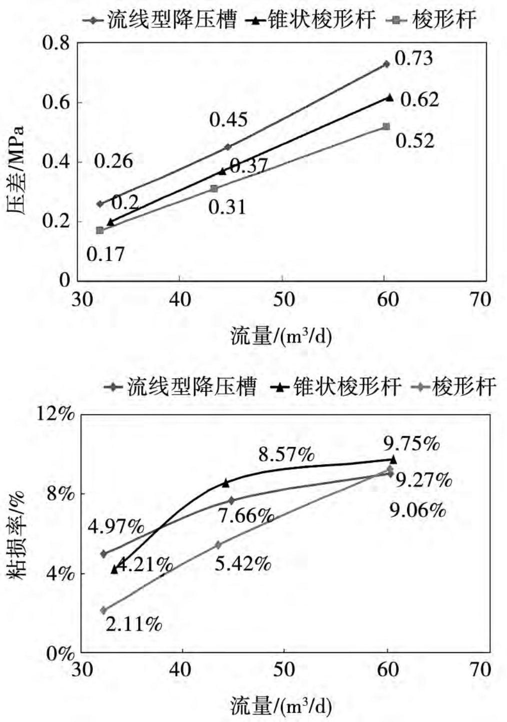


图4　3种分注工具水力特性对比结果

从室内水利特性试验中看，我们可以分析出当聚驱试剂流经流线型降压槽阀芯时，整个流场面积会发生变化，使得分子受到压缩和拉伸[4]，分子形变产生了巨大的节流压差，从而降低了粘度损失，符合对阀芯流场分析中得出的结论。

表2　油田3种分注工具室内对比评价结果

工艺类型	一次投捞成功率/%	节流压差/MPa	粘损率/%
锥状梭形杆	87	0.05	
梭形杆	18	1.12	12
流线型降压槽	100	1.30	7.9

在表2所示的3种分注工具室内对比评价结果中可以得出，从室内投捞成功率来看，锥状梭形杆和流线型降压槽成功率较高；从室内水力特性得到，梭形杆和流线型降压槽性能较好。

2　流线型降压槽阀芯槽数优化

2.1　流线型降压槽阀芯槽数对粘度损失率的影响

利用FLUENT仿真软件模拟不同槽数的流线型降压槽在不同的注入流量下粘度损失率[5]的变化。横坐标为仿真测得的粘度损失，纵坐标为流量变化，绘制不同槽数这两个因素的变化关系曲线如图4所示：

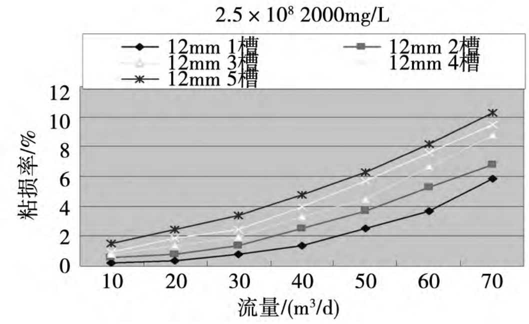


图5　粘度损失率随阀芯槽数和流量的变化系列版图

从图5可以看出，不同槽数的阀芯粘度损失率不一样，不同流量相同槽数的的阀芯粘度损失率也不同，粘度损失率随着槽流压差的增加近似成正比关系，这说明聚驱试剂通过了更多节流部位，造成了更多的粘度损失，当槽数为5时，粘损率达到峰值，接近10%，不超过12%的性能指标，符合阀芯的优化设计要求。

2.2　流线型降压槽阀芯槽数对节流压差的影响

运用FLUENT仿真软件分析槽数不同的阀芯流量与节流压差的流场，得到压差分布曲线如图5所示：

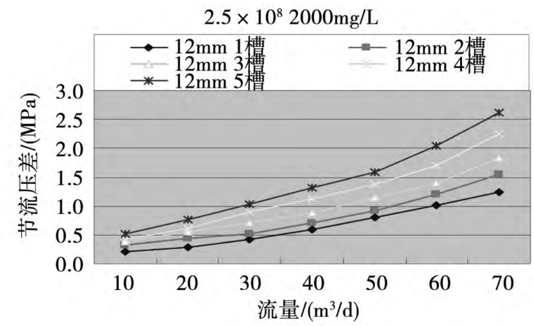


图6　节流压差随阀槽数和流量的变化系列版图

从图6可以看出，节流压差随着阀芯槽数的增加而增加，近似呈乘幂关系，说明在不同槽数下，聚驱试剂流经更多的节流阀芯时，节流压差不断增加。

控制恒定流量时，随着阀芯槽数的增加，聚驱试剂的剪切次数增多，导致了节流压差的增大。从图4中可以看出来，在阀芯槽数为4个或5个、流量达到60 m^3/d时，节流压差达到峰值接近2.6 MPa，但是不超过3.0 MPa的性能指标，这也验证了阀芯设计的合理性。

3　现场水利特性试验

建立 8 种不同分子量、不同浓度聚驱试剂流量 - 节流压差 - 粘损率关系系列化表格，基本涵盖目前聚驱在用配方通过采集井下压力数据，由函数关系求到实际注入量，并通过井上采集的电压信号连续控制阀芯开度调节流量至 50 m^3/d，测试井下控制设备运行正常，注入压力为 40 MPa，配注量为 80 m^3/d，聚驱试剂母液注入量为 28 m^3/d，注入浓度为 2 500 mg/L。计算每次测试的压差和粘度损失率，整理如表 3 所示。

表 3　可调分压配注器水力特性试验数据表

溶液类型	流量/(m^3/d)	节流压差/MPa	粘损率/%
2 500 万 2 000 mg/L	50	1.60	6.2
2 500 万 1 600 mg/L	50	1.54	4.8
2 500 万 1 200 mg/L	50	1.38	5.4
1 600 万 1 650 mg/L	50	1.10	5.2
1 600 万 1 000 mg/L	50	1.47	5.4
1 600 万 800 mg/L	50	1.42	5.1
1 400 万 1 000 mg/L	50	1.51	6.1
1 200 万 800 mg/L	50	1.41	5.8

达到的性能指标: 控制流量为 50 m^3/d，节流压差最大达到 1.60 MPa，粘损率 6.2%，符合阀芯设计的要求。图 7 所示为现场水利特性试验试验井现场图。

图 7　X6-1-SE26 试验井现场情况

4　结　论

本文探究了三种阀芯结构对于节流压差及粘损率的影响，从阀芯的结构选择及阀芯的槽数两方面对阀芯进行了优化设计。

1) 对三种阀芯结构进行了有限元分析，运用软件 FLUENT 进行流场仿真，分析出三种阀芯内部流体速度云图; 进行了室内水利特性试验，得到了不同流量下阀芯的粘度损失率关系曲线，验证了流线型降压槽的优势。

2) 对流线型降压槽进行单独试验，分析了假塑性非牛顿流体在流经阀芯时，通过不同的槽数产生的压差不同，致使粘度损失率不同。并进行了现场水利特性试验，控制误差在 6% 以内，符合设计要求。

参 考 文 献:

[1] 贾德利，赵常江，姚洪田，等．新型分层注水工艺高效测调技术的研究[J]．哈尔滨理工大学学报，2011，16(4)：90－94.

[2] 唐高峰．空心单管分层注聚工艺优化及其在胜利油田的应用[J]．复杂油气藏，2015(3)：80－83.

[3] 万荣晖．二类油藏分层注聚措施优选[J]．当代化工，2015(7)：1531－1533.

[4] 李继友．注聚驱试剂井的分层测调技术研究(学术型)[D]．哈尔滨: 哈尔滨工业大学，2012.

[5] 崔金哲，李波．聚驱梭形杆偏心分注技术的研究与应用[J]．石油机械，2011，39(1)：67－79.

[6] 牟善军．聚合物驱技术在孤岛油田的研究与应用[D]．长沙: 中南大学，2007.

[7] 王育水．液压挖掘机多路阀动臂回路流场与阀口特性分析[D]．西安: 长安大学，2013.

[8] 郑伟林．单泵同心双管分层注聚工艺的理论分析及应用[J]．西安石油大学学报: 自然科学版，2010，25(3)：41－45.

[9] DARIPA P，PAŞA G. An Optimal Viscosity Profile in Enhanced Oil Recovery by Polymer Flooding[J]. International Journal of Engineering Science，2004，42(19)：2029－2039.

[10] 孟令尊，崔海清，崔金哲，等．非牛顿流体在配注器波纹杆环空中流动的数值模拟[J]．大庆石油学院学报，2006，30(3)：30－33.

[11] 张振．农田低压管道输水灌溉系统定额配水装置的研制[D]．扬州: 扬州大学，2009.

(编辑: 关　毅)