

# 两种结构型式控流筛管内流动特性的数值研究

孙浩玉<sup>1,2</sup>, 李增亮<sup>1</sup>, 魏新芳<sup>2</sup>, 余金陵<sup>2</sup>, 徐 鑫<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学机电工程学院, 山东青岛 266580; 2. 胜利油田钻井工艺研究院, 山东东营 257000)

**摘要:**控流筛管可通过控制油井部分井段产出液流量实现水平段同时出水。以计算流体动力学为基础,分别对导流式控件和迷宫式控件流道内流体的流动特征进行数值模拟,并对两种控件的适用范围进行对比分析。数值计算结果表明,两种控件由流道入口到出口的流道压力均呈线性降低;导流式控件流道中的流动近似呈平推流,涡流和湍动不显著;低黏度条件下,迷宫式控件流道内存在明显的一次、二次涡流,过流阻力显著增加,控流效果显著。过流流体黏度为 25~1 000 mPa·s 时,导流式控件的性能较优;其他黏度范围内,迷宫式控件的性能较优。

**关键词:**控流筛管; 计算流体力学; 流动特性; 过流压降; 黏度

**中图分类号:**TE 925.3 **文献标志码:**A

**引用格式:**孙浩玉,李增亮,魏新芳,等. 两种结构型式控流筛管内流动特性的数值研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(4):138-142.

SUN Haoyu, LI Zengliang, WEI Xinfang, et al. Numerical study on flow performance of two types of inflow control devices [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(4): 138-142.

## Numerical study on flow performance of two types of inflow control devices

SUN Haoyu<sup>1,2</sup>, LI Zengliang<sup>1</sup>, WEI Xinfang<sup>2</sup>, YU Jinling<sup>2</sup>, XU Xin<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;  
2. Drilling Technology Research Institute of Shengli Oilfield, Dongying 257000, China)

**Abstract:** Inflow control device can efficiently get inflow in the horizontal part of oil well by controlling the liquid production of other part, and control unit is the core component of this tool. Flow characteristics of helical-flow-channel and labyrinth-flow-channel controllers were simulated based on computational fluid dynamics, and scopes comparative analysis of the two controllers was carried out. The numerical results show that channel pressure decreases linearly from channel inlet to the outlet for the two controllers. The flow pattern in helical-flow-channel approximates plug flow, swirl and turbulence are not significant. There are distinct primary and secondary vortices in labyrinth-flow-channel under the conditions of low viscosity, which results in large pressure drop. Helical-flow-channel controller has better performance when viscosities range from 25 to 1 000 mPa·s, while labyrinth-flow-channel controller has better performance in other viscosity ranges.

**Key words:** inflow control device; computational fluid dynamics; flow characteristics; flow pressure drop; viscosity

油气井投产后随着生产的进行出现了边底水锥进问题,导致大量井底原油无法采出,降低了油井综合经济效益。解决这个问题的出路在于在筛管分段基础上对可能出现边底水锥进的部分进行控流,确保油井产量最大化<sup>[1-3]</sup>。控流筛管是实现控流作用

的最简洁方式之一,它是在充分了解油井地质、油藏、工程参数基础上,在油井生产井段下入预先设计好参数的控流筛管,流体在进入管内之前,首先经过流道式控流结构,增加了液体的流动阻力,由此产生需要的附加压差,从而有针对性地控制部分井段的

产出速率,提高采收率。控流筛管采用 3 层结构:内层基管-中间节流喷嘴管+筛管-外层不锈钢保护套,通过优化喷嘴直径、布置位置、个数来实现统一均衡的流率剖面,而控流控件设计是实施这项技术的关键问题之一<sup>[4-7]</sup>。导流式控流筛管和迷宫式控流筛管均为常见的控流筛管。油井产出液流经外罩及过滤层,砂粒及岩屑等被挡在筛管外,液体流入后由径向流转变为沿中心管的轴向流流入过流控件。过流控件是控水筛管的关键部件,通过其结构参数的变化可达到控制产出速率的目的<sup>[8-12]</sup>。笔者在计算流体动力学基础上对导流式控流筛管及迷宫式控流筛管流道压力云图、速度矢量图及流线图进行研究,并对两种控件的适用范围进行对比分析。

# 1 过流控件建模及准确性验证

## 1.1 过流控件模型建立

采用 Solidworks 三维建模软件建立导流式及迷宫式控流筛管的物理模型,导入 Gambit 前处理软件进行网格划分,得到的三维模型及网格划分如图 1 所示。两种过流控件的外径为 196 mm,内径为 178 mm,长度为 313 mm。运用 Fluent 软件进行计算流体动力学分析,采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型对控流筛管内流体的流动特性进行模拟。

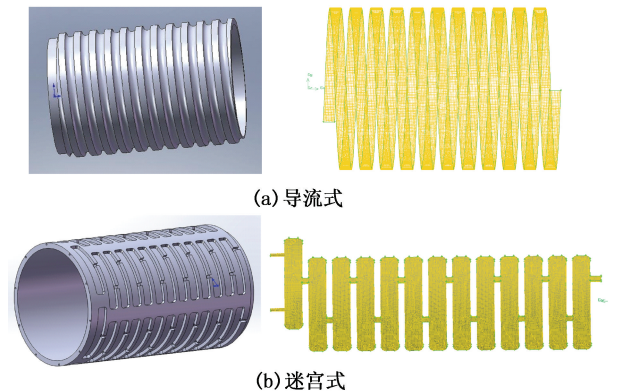


图 1 导流式、迷宫式控件流道三维模型及网格划分图  
Fig.1 3D model and meshing of helical-flow-channel and labyrinth-flow-channel controllers

数值计算过程中进、出口边界条件均采用压力入口边界条件,即给定控流筛管进、出口两侧的压差,计算设定压差下控流筛管的过流流量。控流筛管壁面处采用无滑移边界条件,壁面边界处湍流的处理采用标准壁面函数法。计算中,过流流体密度取  $0.9\text{ g/cm}^3$ ,流道进口压力为  $5.0\text{ MPa}$ 。

## 1.2 模型准确性验证

建立导流式控件测试实物模型并进行试验,

以验证数值模拟结果的准确性。试验装置由主体装置、柱塞泵、分流器、沉砂计量罐、储液罐、流量压力测量仪器、冲洗管路等组成,测试装置实物如图 2 所示。图 3 为不同黏度下导流式控件过流流量对比。由图 3 可知,试验结果与数值模拟结果基本一致,表明数值模拟结果具有较高的精度,满足工程需要。



图 2 导流式控件测试装置  
Fig.2 Test device of helical-flow-channel controller

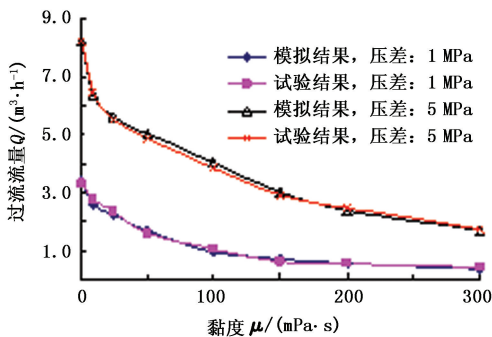


图 3 导流式控件数学模拟与试验结果对比  
Fig.3 Contrast between mathematic simulation and experiment results of helical-flow-channel controller

# 2 流道流动特性分析

## 2.1 导流式控件

图 4 为导流式控件流道压力分布云图及速度矢量图。由图 4 可知,不同流体黏度、不同进出口压差下,导流式控件流道的压力分布特点一致。由于黏性流体流动过程中与流道壁面产生摩擦损耗,且流体内部存在内摩擦损耗,由流道入口到出口,流道压力线性降低。

由流道速度矢量图可知,导流式控件流道的速度矢量分布特点也近似一致。流体在流道中的流动近似呈平推流,涡流和湍动不显著。由于流道的边壁效应,流体在近壁处速度较低,在流道中间区域速度较大。流速沿流动方向不衰减,即流动动能不衰减,其沿程阻力损失全部体现于沿流动方向流道压力逐渐降低。

2.2 迷宫式控件

迷宫式控件流道压力云图及速度矢量见图 5。由图 5 可知,与导流式控件类似,不同流体黏度、不同进出口压差下,迷宫式控件流道的压力分布特点基本一致。由于壁面摩擦损耗、流体内摩擦损耗及

涡旋和湍流损耗,由流道入口到出口,流道压力逐渐降低且近似呈线性。不同之处在于,沿流道内流动方向,迷宫式控件流动截面面积存在较大变化,流动过程中易出现涡流、涡旋及湍动状态,这使得流道压力梯度在小范围内存在微小变化。

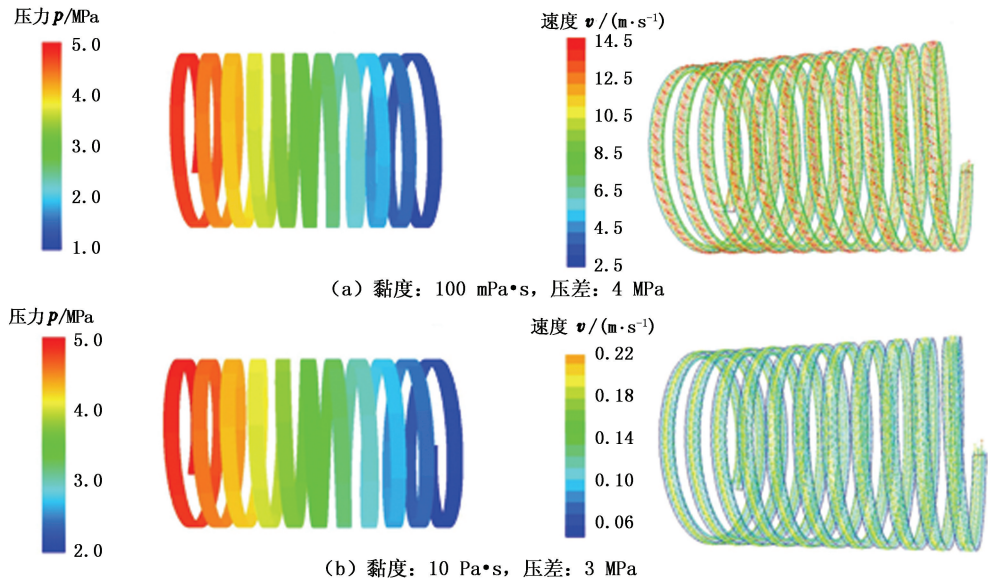


图 4 导流式控件流道压力云图及速度矢量图

Fig. 4 Pressure contours and velocity vectors of helical-flow-channel controller

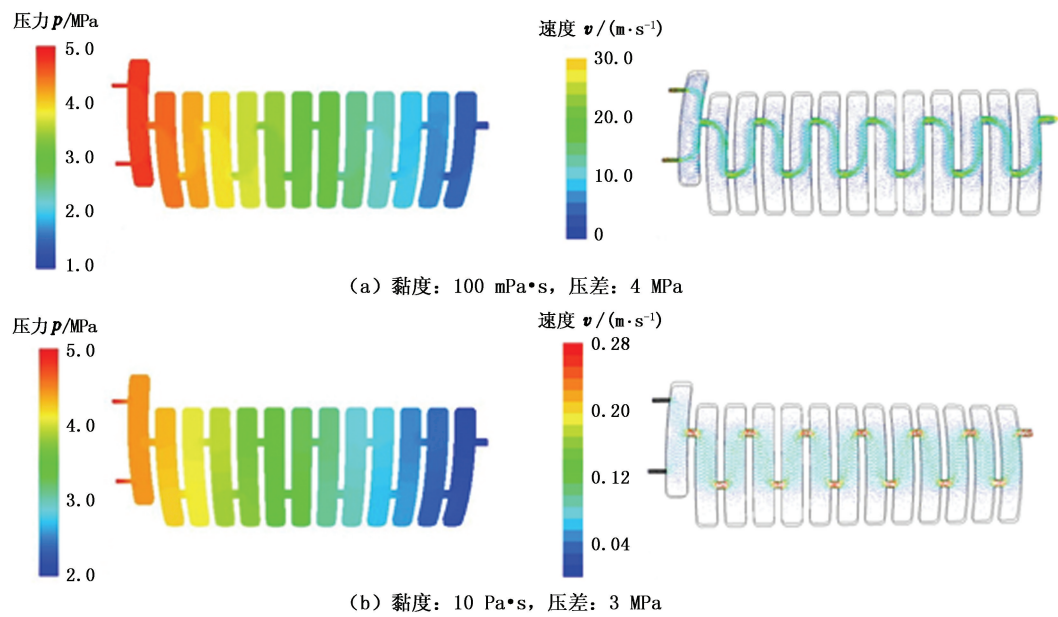


图 5 迷宫式控件流道压力云图及速度矢量图

Fig. 5 Pressure contours and velocity vectors of labyrinth-flow-channel controller

迷宫式控件流道中的流体存在明显的主流区(流道中心区域)及流动死区(流道两侧边壁)。低黏度条件下,主流区域速度矢量呈明显的蛇形分布,而流动死区不明显;随着黏度增大,由于黏性流体的内摩擦效应,主流区域流动趋于平稳,而流动死区范围逐渐增大。

图 6 为不同黏度条件下迷宫式流道内部流线图。由图 6 可知,低黏度时迷宫式流道内部存在明显的一次、二次涡流,流体湍流程度增大,流体内部质点加剧,过流阻力随之增加。随着流体黏度增大,一次、二次涡流受到抑制,涡流区域显著缩小。高黏度条件下,流体内摩擦力增加,流线呈蛇形分布,流

动死区有所扩大。黏度大于  $5\text{ Pa}\cdot\text{s}$  时,黏性力占主导,流体流动形态趋于稳定。

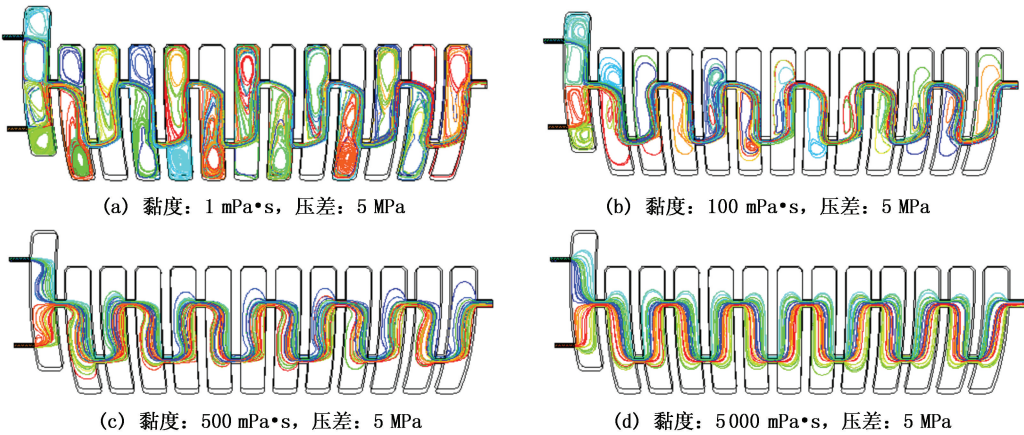


图 6 不同黏度条件下迷宫式流道内部流线图  
Fig.6 Flow charts in labyrinth path with different viscosities

3 导流式与迷宫式控件适用范围对比

图 7 给出了不同黏度时两种控件的流量-压差对比曲线(稀油:黏度小于  $50\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,普通油:黏度  $50\sim150\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,稠油:黏度  $150\sim10000\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,特稠、

超稠油:黏度大于等于  $10000\text{ mPa}\cdot\text{s}$ )。由图 7 可知,随着进出口压差增加,不同控件流道的压差-流量曲线近似呈幂曲线上升。随着黏度增加,曲线的直线度增加,黏性摩擦损耗增加,流道进出口压差随之增大。当黏度超过  $1\text{ Pa}\cdot\text{s}$  时,压差-流量曲线近似呈直线。

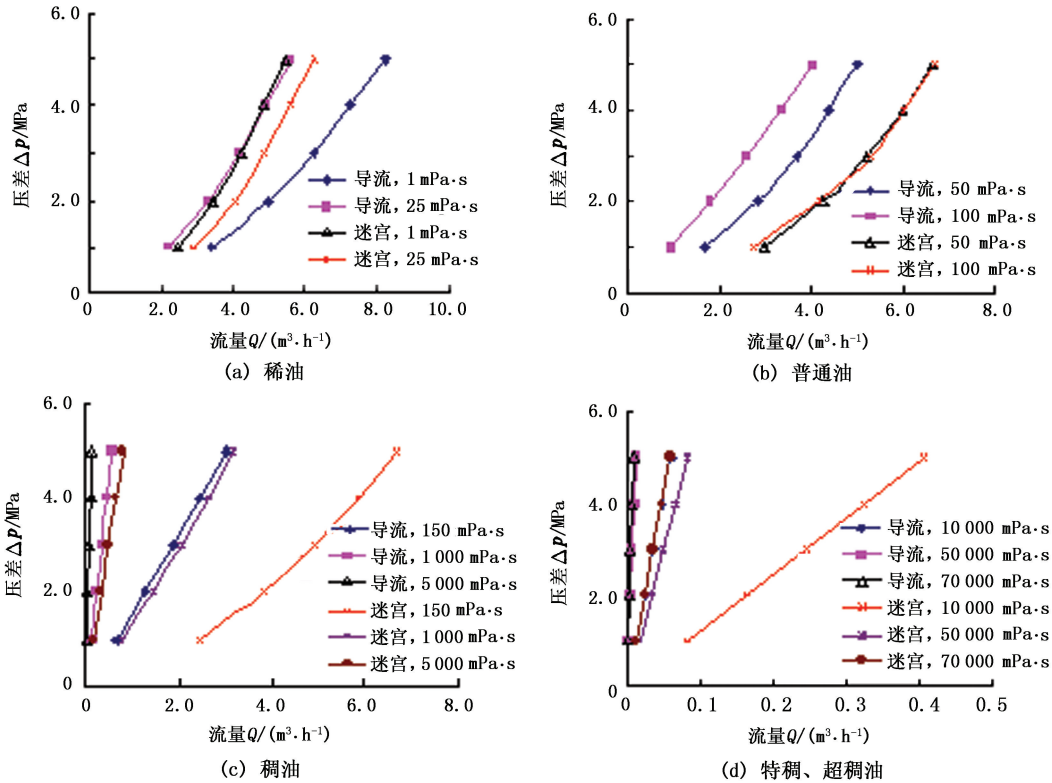


图 7 两种控件的流量-压差曲线对比  
Fig.7 Flow-pressure contrast curves of two controllers

过流流体黏度较低时,相同流量下流道压差较大的过流控件性能较优。由图 7(a)、(b)可知,当流体黏度较低时( $1\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ),相同流量下,迷宫式控件流道内流体流动过程中出现剧烈的一次、二次

涡流,产生较大的涡流损耗,过流压差较高,此时,迷宫式控件的性能较优。随着黏度进一步增大并超过  $25\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,黏性耗散效应加剧,导流式控件流道进出口压差有所增大,而迷宫式控件压差有所降低,此

时导流式控件的性能较优。

由图7(c)、(d)可知,稠油条件下,当黏度较低(黏度小于 $1\text{ Pa}\cdot\text{s}$ )时,流道的过流流量最大可达 $7\text{ m}^3/\text{h}$ ,相同流量下流道压差较大的导流式过流控件性能更优。随着流体黏度不断增大(黏度大于 $1\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ),流道过流流量急剧降低,为避免控件压降过大,通常需要并联使用控件,在较大流量条件下获得较为适宜的流道压差,而此时流道压降较小的控件的并联数量较少,成本相应较低。因此,此时相同流量下流道压差较小的迷宫式过流控件性能更优。

## 4 结 论

(1)不同流体黏度、进出口压差条件下,导流式控件和迷宫式流道的压力分布特点基本一致,由流道入口到出口的流道压力近似呈线性降低。

(2)流体在导流式控件流道中的流动近似呈平推流,涡流和湍动不显著;由于边壁效应,流体在近壁处速度较低,在流道中间区域速度较大,流速沿流动方向不衰减。

(3)迷宫式控件流道中的流体存在明显的主流区及流动死区;低黏度条件下,流道内存在明显的一次、二次涡流,主流呈蛇形分布;随流体黏度增大,涡流受到抑制,涡流区域显著缩小,主流趋于平稳,死区范围增大。

(4)过流流体黏度为 $25\sim 1\,000\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时,导流式控件的性能较优;流体黏度低于 $25\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、大于 $1\,000\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时,迷宫式控件的性能较优。

## 参考文献:

- [1] KIM S Y, WIDAYAT S, RHANDY R, et al. Passive inflow control devices and swellable packers control water production in fractured carbonate reservoir: a comparison with slotted liner completions[R]. SPE 140010, 2011.
- [2] MORRY I, MARTIN P C, WOULDWIJK R, et al. New inflow control device provides solid-liner functionality throughout installation and fluid loss control during completion[R]. SPE 134576, 2010.
- [3] ELMER R P, MARTIN P C, LUIS A G, et al. Well completion applications for the latest-generation low-viscosity sensitive passive inflow control device[R]. SPE 12841, 2010.
- [4] AYESHA A M, HAMDY H, ASHRAF K, et al. Well-bore segmentation using inflow control devices: design and optimization process[R]. SPE 137992, 2010.

- [5] HEMBLING D, ADEYINKA S, NEALE C et al. A case history: first real-time digital flow profiling of a passive inflow control device (ICD) completion [R]. SPE 122448, 2009.
- [6] 赵金洲, 赵金海, 杨海波, 等. 胜利油田水平井完井技术现状及研究展望[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(6): 4-7.  
ZHAO Jinzhou, ZHAO Jinhai, YANG Haibo, et al. Research status and prospect of horizontal well completion technology in Shengli Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(6): 4-7.
- [7] 张绍东, 张全胜, 孙国华. 胜利油田水平井完井技术现状及发展趋势[J]. 石油钻采工艺, 2001, 23(6): 33-36.  
ZHANG Shaodong, ZHANG Quansheng, SUN Guohua. Present state and developing trend of horizontal well completion technology in Shengli Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2001, 23(6): 33-36.
- [8] 王增林, 张全胜. 胜利油田水平井完井及采油配套技术[J]. 油气地质与采收率, 2008, 23(6): 1-5.  
WANG Zenglin, ZHANG Quansheng. Support technology of well completion and oil production for horizontal wells in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 23(6): 1-5.
- [9] 魏新芳, 徐鑫, 余金陵, 等. 水平井分段完井工具的室内试验及现场应用[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(2): 55-57.  
WEI Xinfang, XU Xin, YU Jinling, et al. Laboratory tests and field applications of horizontal segregated completion tools[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(2): 55-57.
- [10] 袁进平, 齐奉忠. 国内完井技术现状及研究方向建议[J]. 钻采工艺, 2007, 30(3): 3-6.  
YUAN Jinping, QI Fengzhong. Status and research direction of well completion technology in China[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(3): 3-6.
- [11] 熊友明, 罗东红, 唐海雄, 等. 延缓和控制底水锥进的水平井完井新方法[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(1): 103-106.  
XIONG Youming, LUO Donghong, TANG Haixiong, et al. New-type horizontal well completion method of delaying and controlling bottom water coning[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(1): 103-106.
- [12] 万仁溥. 现代完井工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 55-56.

(编辑 沈玉英)