◀油气田开发工程▶

新型气井控水采气AICD设计及其性能研究*

高素娟[1] 李 颖[1] 李海涛[1] 艾 莹[2] 聂 松[3] 崔小江[4]
（1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室 2. 华北油田勘探开发研究院
3. 浙江海洋大学 4. 成都北方石油勘探开发技术有限公司）

高素娟，李颖，李海涛，等. 新型气井控水采气AICD设计及其性能研究［J］. 石油机械，2025，53（10）：115-122.

Gao Sujuan，Li Ying，Li Haitao，et al. Design and performance evaluation of novel AICD for water control and gas production in gas wells［J］. China Petroleum Machinery，2025，53（10）：115-122.

摘要：气井产水问题严重制约气藏开发效率，导致开发成本增加。为阻止地层水流入井筒并延长无水或低水采气期，基于Y形、q形等几何结构在引导流体流动及流量控制中的作用，研发了一种可实现控水畅气功能的新型自主流入控制装置（AICD）。利用计算流体动力学（CFD）模拟软件，从流动规律、流体敏感性和流量敏感性3个方面探讨新型AICD的性能。研究结果表明：气体和水可以根据AICD结构及流体物性差异自动选择流道，从而使气体的压力损失远小于水的压力损失；气体和水的黏度与密度对新型AICD的敏感程度不同，黏度对工具性能基本无影响，密度则对工具性能影响较大；水的压降随密度线性变化，而气体的压降随密度非线性变化；水气流量比在1∶4（地层条件）以下时，新型AICD的控水效果更佳。对比水和气的数值模拟结果与试验结果，偏差分别为10.91%和11.85%，尽管存在偏差，但整体变化趋势保持一致，进一步证实了新型AICD具有一定的控水能力。研究结果可为气井控水采气工具性能及适应性研究提供参考。

关键词：气井；控水采气；自动流入控制装置；结构设计；数值模拟；敏感性分析
中图分类号：TE357 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202410011

Design and Performance Evaluation of Novel AICD for Water Control and Gas Production in Gas Wells

Gao Sujuan[1] Li Ying[1] Li Haitao[1] Ai Ying[2] Nie Song[3] Cui Xiaojiang[4]
（1. *State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation*, *Southwest Petroleum University*; 2. *Exploration and Development Research Institute*, *PetroChina Huabei Oilfield Company*; 3. *Zhejiang Ocean University*; 4. *Chengdu Northern Petroleum Exploration and Development Technology Co.*, *Ltd.*）

Abstract: The problem of water production in gas wells seriously restricts the development efficiency of gas reservoirs, leading to an increase in development costs. To prevent formation water from flowing into wellbore and prolong the water-free or low-water gas recovery period, based on the role of Y-shaped and q-shaped geometric structures in guiding fluid flow and flow control, a novel automatic inflow control device (AICD) with water-restriction and gas-enhancement functions was developed. Then, the computational fluid dynamics (CFD) simulation software was used to investigate the performance of the novel AICD from three aspects: flow characteristics, fluid sensitivity and flow rate sensitivity. The study results show that gas and water automatically select flow channels based on the differences in AICD structure and fluid properties, resulting in a much smaller pressure loss for

* 基金项目：国家自然科学基金面上项目“SNPs提升CO_2地质封存泥岩盖层封堵能力的作用机制研究”（42272176）。

gas than for water. The sensitivity of the viscosity and density of gas and water to the novel AICD varies: viscosity has little effect on tool performance, while density has a greater impact on tool performance. The pressure drop of water varies linearly with density, while that of gas varies nonlinearly with density. When the water-gas flow ratio is below 1∶4 (formation conditions), the novel AICD has better water control effect. A comparison between numerical simulation results and experimental data for water and gas shows deviations of 10.91% and 11.85%, respectively. Despite these deviations, the overall trends remain consistent, further confirming that the novel AICD has certain water control ability. The study results provide reference for the study of the performance and adaptability of water control and gas production tools in gas wells.

Keywords: gas well; water control and gas production; automatic inflow control device; structural design; numerical simulation; sensitivity analysis

0　引　言

非均质气藏开采面临层间和层内物性差异大、边底水突进等问题，这导致各层产气剖面差异显著，动用程度不均，极易造成气藏水侵或不同程度的水淹，严重影响了气藏的整体开发效果。对于层内非均质性强或存在高渗条带的水平井，更易出现局部点状出水，降低产能；对于层间非均质性强或存在边底水突进等问题的垂直井，单层突进的风险更大，这同样会极大影响高产出层段或主要产出层段产能，并进一步加剧层间矛盾，导致气井整体水侵或水淹。针对上述问题，现有排水采气工艺无法有效解决点状出水和单层突进等问题对其他产气层段造成的影响，通常只能开展井筒排液，以维持气藏在一定时间内的正常生产状态。

为此，笔者提出以“堵大水-排小水”为理念的气井智能分采与控水技术，该技术通过“分段/分层+AICD 控水+控制开关”的协同配合，可实现分层、分段或分采。不同于传统排水采气技术，该技术以“均衡生产控制”为目标，以“堵大水-排小水”为核心理念，对水平井进行分段开采，减少局部出水段出水或关闭出水段；对垂直井进行分层开采，延缓单层突进或关闭高出水层。该技术能够实现对不同储层特征及井型实施差异化管理，从而控制高渗层段的产水量、均衡产出剖面，减轻储层非均质性影响和水平井的跟趾效应，确保其他生产层段不受影响，达到延缓见水时间，提高波及效率，进而延长气井寿命并提高采收率的目的。该技术的核心组件包括封隔器类等区域隔离装置和气井用自动流入控制装置（automatic inflow control device，AICD）。其中封隔器类区域隔离装置可实现分层或分段，减少层间或层内干扰；气井 AICD 基于油井 AICD 的原理形成和发展，可在气藏见水前期，均衡产液剖面、延缓气井见水；在气藏见水初期，将少量水排出井筒，实现排水采气；在开采中后期，为高出水层段提供更高的流动阻力，限制水的产出，为产气贡献层段提供更长无水或少水采气期。

目前气井用 AICD 的研究和应用相对较少[1]，施卫平等[2]设计了气井控水用改进型 AICD，赵耀华[3]设计了出水气井用双入口 AICD，他们均采用计算流体力学软件对 AICD 进行模拟分析，证实 AICD 具有较好的阻水效果；但上述 2 种 AICD 模拟研究中，所设置的天然气密度分别为 0.55～0.90 kg/m^3 和 0.668 kg/m^3，黏度约为 0.100 0 和 0.108 7 mPa·s。而实际气藏开采过程中，采气控水工具需下至几千米的地层深度，天然气处于被压缩状态，且不同气藏的温度、压力、天然气压缩因子以及体积系数等参数也存在显著差异，导致模拟参数与实际差距较大，应用性不强。周朝等[4]分析了底水气藏流道型 AICD 的流动特性，并优化了控水完井技术，证明流道型 AICD 可以延长底水气藏低产水采气期，实现良好的控水效果。然而，他在 AICD 性能分析过程中，仅描述了相同体积流量条件下水气压降比可达数百倍，但未提供数值模拟及物理试验数据。基于上述问题，笔者设计了新型气井控水采气 AICD，并对其流场进行分析；同时，对气藏水和气的黏度及密度等物性参数进行敏感性分析，分析其流量适用范围；开展室内物理试验，对数值模拟结果进行验证，以期为气井控水采气工具性能及适用性研究提供参考。

1　结构设计

1.1　设计依据

目前，基于 Y 形流道的分流分相原理以及环形

流道或q形流道的旋流理论，在控水工具或其他流量控制类装置中已开展了大量的研究及应用。HONG K. C.[5]进行了两相流试验，验证了空气与普通水/变黏度水经过T形接头时会产生分流现象，证实了文献［6］中所提到的当一部分流体进入侧臂时，因气体方向的突然变化会产生向心力，并在90°弯管内形成一个欠压区域。此外，试验发现，分流比与气体流速、液体流速、水气体积分数、流体黏度、侧臂夹角以及T形结构的放置位置有关。林宗虎[7]总结了多国学者对三通管两相流的分配特性和阻力特性的研究成果，发现不论是T形三通管还是Y形三通管，无论是垂直放置还是水平放置，三通管内均存在明显的相分离现象，即两支管内的干度存在显著差异。王栋等[8]对不等径水平T形管进行气液两相流试验，发现两相流体在不等径水平三通管中同样会产生相分离现象，且气、液两相流体的惯性差异是相分离的最主要原因。曾泉树等[9]设计了自适应入流控制装置，该装置利用Y形结构进行导流，圆盘形结构进行限流。YANG M. J. 等[10]设计的相选择控制器用于抑制底水锥进油藏水突破后的产出，其结构依靠油、水黏度差异，使水在q形腔内高速旋流，而油基本不旋流，从而产生更大的水压降。李海涛等[11]对基于环形结构的AICD进行研究，发现其更适用于产液量较高的底水油藏水平井。目前，油井中使用的AICD，借助流道几何形状和流体特征，引导流体进入不同的流道，从而限制不期望的流体。典型AICD类型为流体二极管型AICD，M. FRIPP等[12]详细介绍了其工作原理，建立物理模型，开展CFD模拟，并将模拟数据与实测数据对比分析。文献［13-14］开展了单相实验室测试，文献［15-17］进行了案例分析，文献［18-19］研究了其在重质油田和轻质油田中的应用。此外，黄晓东等[20]基于特斯拉阀的无可动部件且单向导通的特性，开展了特斯拉阀型AICD的相关研究，为新型AICD的优化设计提供了新思路。

1.2　新型AICD结构与原理

新型气井控水采气AICD充分利用了Y形流道、环形流道及q形流道等基础结构在流量控制中发挥的作用，结构示意图如图1所示。其中，Y形结构与q形结构数量均为4个，Y形主流道与环形流道相切，且Y形主流道切入环形流道后由环形流道径向贯通；Y形支流道与q形流道中心轴线共线，且流道宽度相同；流道之间通过环形流道贯通衔接，q形流道的侧流道与内旋流腔室相切，4个q形流道共用1个内旋流腔室。此外，环形流道与q形流道之间形成的挡块阻隔了流入环形流道的气液流体与内旋流腔内的气液流体。

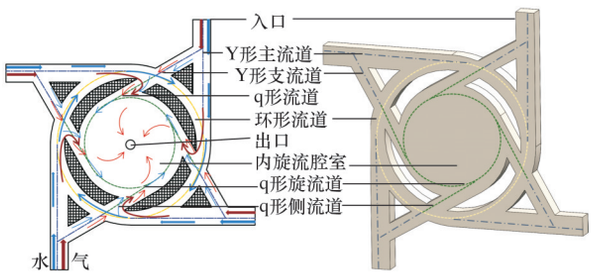


图1　新型气井控水采气AICD结构示意图

Fig. 1　Schematic structure of novel AICD for water control and gas production in gas wells

新型AICD利用气、水物性差异，通过Y形流道初步实现路径分离，分离后的气体和水进入环形流道。在环形流道中，水作为连续相充分发挥惯性力的主导作用，而气体作为分散相发挥黏滞力主导作用，从而实现水在环形流道内沿长路径旋流，进入内旋流腔室后继续多圈次旋流；气体则沿短路径进入内旋流腔室，少圈次旋流后流出。通过对新型AICD结构和工作原理的设计，最大程度地增强对水的控制，同时减轻对气体流动的限制，增加水的过阀压差，起到预期的阻水畅气效果。

2　基于CFD的新型AICD性能分析

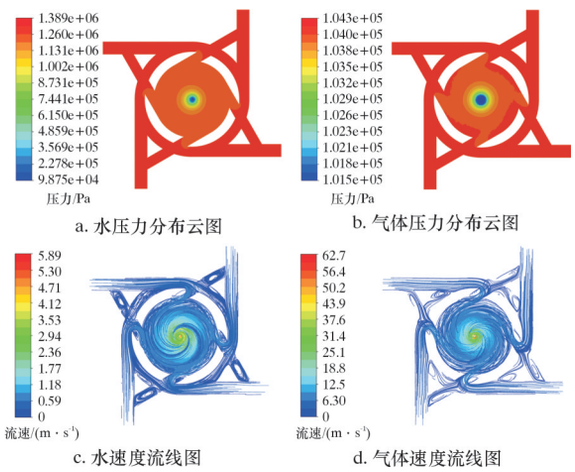
2.1　数值模拟边界条件设定

借助三维建模软件进行建模，通过CFD计算流体动力学软件进行数值计算，进而实施新型气井控水采气AICD流场分析。仿真过程中采用基于压力的隐式求解器，水流量5 m^3/d、气流量60 m^3/d，入口设置为速度入口（velocity-inlet），出口设置为压力出口（pressure-outlet），其他为壁面（wall），无滑移速度边界；模拟选用标准k-ε湍流模型，所有方程均采用二阶逆风以保证足够的精度。水密度为998.2 kg/m^3，黏度1 mPa·s；气密度为0.8 kg/m^3，黏度0.1 mPa·s。

2.2　流动规律研究

图2a和图2b展示了在定水量（5 m^3/d）、定气量（60 m^3/d）条件下，单相水和单相气的压力分布云图。由图2a和图2b可以看出：水经过工具时产生0～0.040 MPa的压力损失，经环形流道的过渡，在q形流道的侧流道与内旋流腔室相切处，压力由1.389 MPa降到约1.260 MPa，且在越靠近出口处，压力下降越快，最终降至0.099 MPa；气体

经过工具时产生 0 ~ 0. 003 MPa 的压力损失，压降主要产生于内旋流腔室，在内旋流腔室内部与 q 形流道切入口交汇处，初步产生小幅压力损失，由 0. 104 3 MPa 降至约 0. 104 0 MPa，其次是在靠近出口处，最终降至 0. 101 5 MPa。



a. 水压力分布云图　b. 气体压力分布云图

c. 水速度流线图　d. 气体速度流线图

图 2　水、气压力分布云图及速度流线图

Fig. 2　Pressure distribution nephograms and velocity streamline diagrams of water and gas

结合图 2c 和图 2d 的速度流线图可以观察到，水因较大的惯性，进入 Y 形结构后大量沿主流道流入，少量沿支流道流入，并在支流道中产生明显的涡流。沿主流道流入的水继续前进，逐渐分成 2 部分：一部分在惯性的作用下，与顺时针方向的下游 Y 形流道流体汇合后，继续沿环形流道前进，实现环形流道内的充分旋流；另一部分沿顺时针方向的下游 q 形流道切向进入内旋流腔室，实现在内旋流腔室的充分旋流，最终从出口流出。其他几个入口流入的水也产生相似的流动模式。气体通过 4 个入口进入 Y 形结构，由于气体扩散性更强，主要沿主流道流入，少量沿支流道流入。沿主流道的流体继续前进，并沿顺时针方向的下游 q 形流道切向进入内旋流腔室，旋流直至从出口流出。在环形流道内，气体产生明显的涡流，但基本不发生旋流。此外，内旋流腔室内气体的旋流圈数明显小于水。由上述观察可推断，水在环形流道内旋流、逐级分流以及在内旋流腔室内的充分旋流，是水的压降大于气体压降的重要原因。

2.3　流体敏感性分析

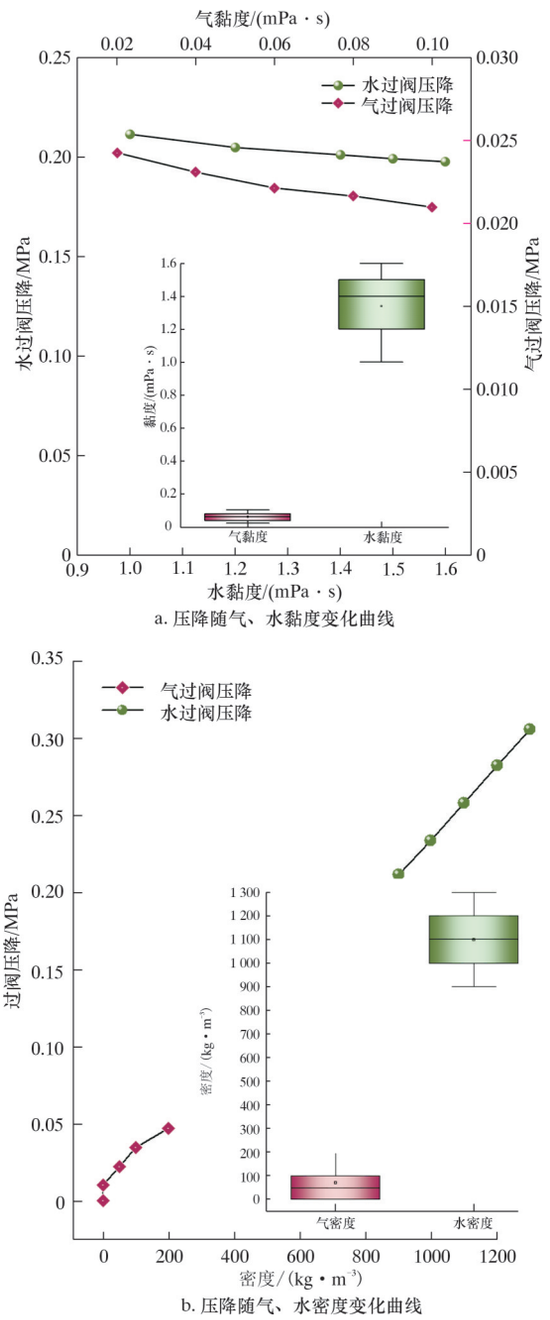
为研究新型 AICD 的适用性，选取适当范围内气体和水的黏度（μ_{gas}、μ_{water}）及密度（ρ_{gas}、ρ_{water}）进行流体敏感性分析。在标准状况下，天然气的相对密度介于 0. 55~0. 62 之间，ρ_{gas} 介于 0. 717 4~0. 800 0 kg/m³（比空气轻）。然而，由于天然气具有压缩性，易受气藏温度、压力等因素的影响，且部分天然气组分中含重组分，相对密度可能大于 1。这使得天然气的密度存在较宽的取值范围，结合气藏温度和压力，以及地面标准状况下相同数量的天然气所占体积，可根据压缩状态方程计算天然气在地层中的密度，可达到 400 kg/m³，甚至更高。该研究取 ρ_{gas} 在 0. 8~200. 0 kg/m³之间。地层水密度虽受矿化度变化的影响，同时也受地层温度、压力、气水比及盐与水的质量比等因素的影响[21]，但变化范围相对较小。根据 T. T. SCHOWALTER[22]确定的地层条件下水密度的诺谟图[22]，一般取 ρ_{water} 在 1 000~1 250 kg/m³之间[23]。为适当扩大水密度的取值范围，该研究选择地层 ρ_{water} 在 900~1 300 kg/m³之间。表 1 为流体敏感性分析的物性参数。

表 1　流体敏感性分析物性参数

Table 1　Physical parameters of fluid for sensitivity analysis

参数名称	取值				
气密度/(kg·m⁻³)	0.80	1.25	50.00	100.00	200.00
气黏度/(mPa·s)	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
水密度/(kg·m⁻³)	900	998	1 100	1 200	1 300
水黏度/(mPa·s)	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6

模拟相同流量下，不同黏度和密度值时气体和水的过阀流动，得图 3 所示流体敏感性分析图。图 3a 展示了黏度敏感性分析结果。根据黏度取值及范围，$\mu_{gas}<\mu_{water}$，且气体黏度范围相对较小。根据压降随黏度变化的趋势，水产生的过阀压降大于气体，且两者的过阀压降均随黏度的增加呈减小趋势，变化幅度较小。气体黏度的最大值与最小值所对应的过阀压降相差约 0. 006 MPa，而水黏度的最大值与最小值所对应的过阀压降相差约 0. 015 MPa。因此，气体和水的黏度变化对新型 AICD 压降影响较小。图 3b 展示了密度敏感性分析结果。根据密度的取值及范围，$\rho_{gas}<\rho_{water}$，气体的密度取值小但密度值变化范围大，而水则相反。根据压降随密度的变化趋势，水产生的过阀压降大于气体。两者的过阀压降都随着密度的增加而增大。然而，水的过阀压降随密度线性变化，变化趋势明显；气体的过阀压降随密度非线性变化，随着密度的增加，变化趋势先迅速增加后逐渐减缓。气体密度的最大值与最小值所对应的过阀压降相差约 0. 047 MPa，水的密度最大值与最小值所对应的过阀压降相差约 0. 094 MPa。因此，气体和水在新型 AICD 内的流动受密度影响较大，惯性力的主导作用更显著。



a. 压降随气、水黏度变化曲线

b. 压降随气、水密度变化曲线

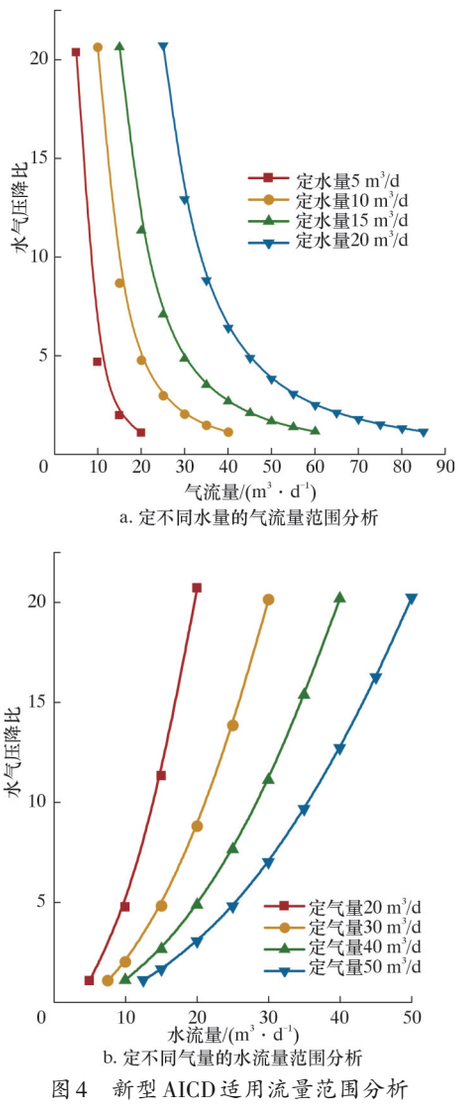
图 3　流体敏感性分析图

Fig. 3　Fluid sensitivity analysis

2.4　流量敏感性分析

流量与压降的关系是评价 AICD 性能的重要指标，通过开展新型 AICD 的流量敏感性分析，可以更清晰地了解工具在地层环境中所适用的水和气体流量范围，展现新型 AICD 实际应用价值。选用黏度 0.06 mPa·s、密度 50 kg/m³的天然气，黏度 1 mPa·s、密度 998.2 kg/m³的水进行流量适用范围分析。

水气压降比是水的过阀压降与气的过阀压降之比，也是作为评价 AICD 工具性能的重要指标，水气压降比越大，表明工具的控水效果越好。图 4 展示了将水气压降比控制在 1~20 的范围内，定不同水量和定不同气量时，水气压降比随气和水的流量变化关系。



a. 定不同水量的气流量范围分析

b. 定不同气量的水流量范围分析

图 4　新型 AICD 适用流量范围分析

Fig. 4　Analysis on applicable flow range of novel AICD

由图 4a 可知，水量（5、10、15、20 m³/d）固定时，水气压降比随着气流量的增加呈减小趋势，且气流量越大，水气压降比越小，说明气体的压降随气量的增加而增加。当水气压降比为 20 时气水流量比约 1∶1，水气压降比约为 1.15 时气水流量比约 4∶1，这表明该工具适用于此地层条件时的最大气水流量比为 4∶1。此外，将水气压降比控制在 1~20 的范围内，若定水量为 5 m³/d 时，则新型 AICD 的有效气体流量范围为 5~20 m³/d；若定水量为 20 m³/d 时，则新型 AICD 的有效气体流量范围增至 25~85 m³/d。这说明水流量越大，工具适用的气体流量范围越宽。由图 4b 可知，当气量（20、30、40、50 m³/d）固定时，水气压降比随着水流量的增加而增大，且水流量越大，水气压降比越

大。这表明水的压降随水流量的增加而增加。若定气量 20 m^3/d 时，水流量在 5~20 m^3/d 范围内，水流量为 5 m^3/d 时的水气压降比为 1.083，而水流量增加到 20 m^3/d 的水气压降比为 20.730。这表明在气量固定的情况下，水量越大工具的控水效果越好。

分析表明，新型 AICD 适用于水气流量比在 1∶4（地层条件）以下的情况，且水量越大，新型 AICD 的控水效果越显著。当储层内某一层段大量出水时，新型 AICD 可以对高出水层段的水产生更高的压力损失，从而阻止其流出，为井筒提供无水和少水环境，有利于其他层段的气体生产。

3　控水效果试验验证

通过室内试验验证新型 AICD 的控水能力，并将试验结果与模拟结果进行对比，以验证工具的有效性。首先，设计并制造新型 AICD，确保工具的参数与仿真模拟时的参数一致；其次，搭建试验装置，试验中包含的设备有储水罐、储油罐、气体压缩罐、往复式柱塞泵、气体压缩机、流量计、压力传感器及 AICD 等。图 5 为试验流程图。气体压缩机可将空气压缩至气体压缩罐，当罐内压力波动较大或流量较大时，可通过压力控制阀实现罐内稳压；在 AICD 试件上游安装节流阀，调节流量，并通过流量计测定气体流量，气体经过 AICD 试件后被排入大气。往复式柱塞泵可将回路中的水（或油）抽至 AICD 试件上游，上游流量由流量计测定后流经 AICD 试件，并返回至储罐。气、水（油）经过 AICD 试件上、下游时产生的压差由压力传感器传送至无纸记录仪，并由试验人员观测记录。

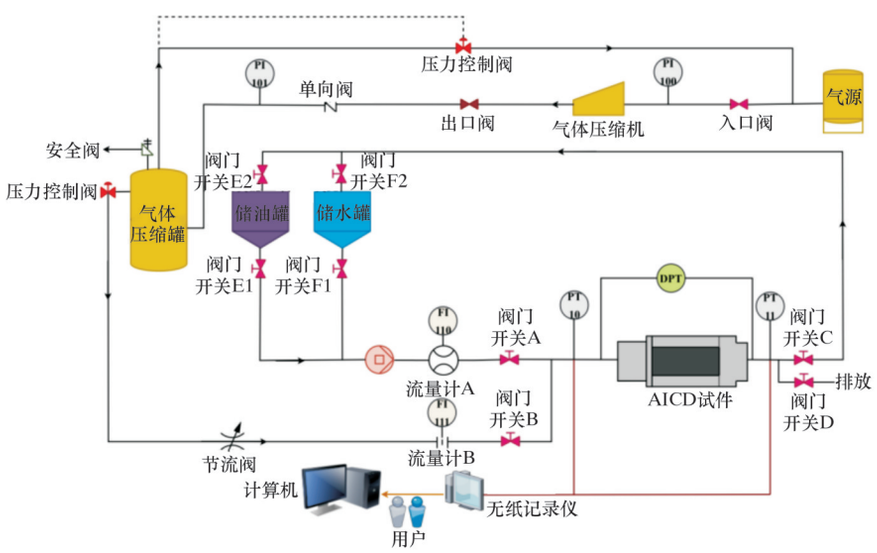


图 5　试验流程图

Fig. 5　Experimental flow chart

试验用水的黏度为 0.97 mPa·s，密度为 993.5 kg/m^3，气体源为空气。水测试试验所用往复式柱塞泵最大频率可调至 50 Hz，泵送水流量 17.8 m^3/d，因此将水的测试流量范围定为 0.0~17.8 m^3/d；气体测试所定气体的流量范围为 80~500 m^3/d。根据气体压缩罐的承压（2.5 MPa）及当地试验温度，空气能够被压缩至气体压缩罐的最大密度为 29 kg/m^3。实际操作过程中，调节气体压缩机排量，稳定气体压缩罐内被压缩空气密度为 15 kg/m^3，其他参数设置与数值模拟时相同。

将试验结果与数值模拟结果对比，结果如图 6 所示。从图 6 可以看出，单相水的试验结果与数值模拟结果基本相近，平均偏差 10.91%，呈现随水

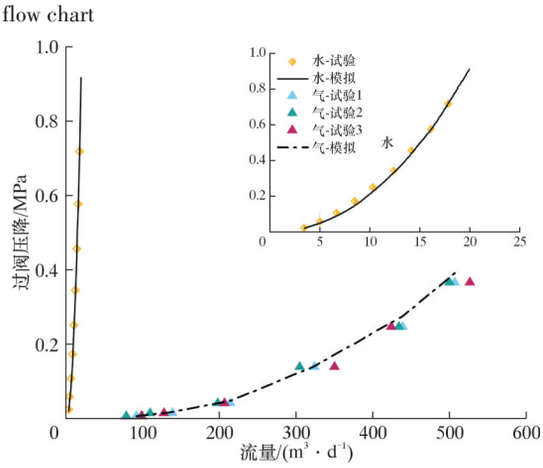


图 6　单相流试验结果与数值模拟结果对比图

Fig. 6　Comparison of single-phase flow test results and numerical simulation results

流量增大，过阀压降逐渐增大的趋势。单相气的试验结果与数值模拟结果存在一定偏差，模拟结果大于试验结果。这主要是因为试验过程中气体进入节流阀后与 AICD 测试件入口前，流量存在一定程度的波动。为此进行了多组试验，并取压力相对稳定时的压力值，分别为试验 1、试验 2、试验 3。通过对比试验结果与数值模拟结果可以看出，数值模拟结果平均高于试验结果约 11.85%，但两者的总体规律相符合，均呈现随着气量的增大，气体过阀压降逐渐增大的趋势。

4　结　论

（1）针对气藏产水问题，设计了新型气井控水采气 AICD。该结构基于 Y 形流道的分流分相原理以及环形流道或 q 形流道的旋流理论，利用气体和水的物性差异，充分发挥水受惯性力主导以及气体更易扩散的特性，实现自动识别流道功能，产生更大的水相流动压力损失，从而起到阻水畅气的效果。此外，借助 CFD 数值模拟气和水的流动特性，证实了新型 AICD 控水原理的可行性。

（2）黏度敏感性分析结果表明，气体和水的过阀压降都随黏度增加呈减小趋势，且变化幅度较小，对新型 AICD 性能基本无影响。密度敏感性分析结果表明，气体和水的过阀压降都随着密度的增加呈增大趋势，水的过阀压降随密度线性变化，气体的过阀压降随密度非线性变化，新型 AICD 对流体密度具有较强的敏感性。

（3）基于 CFD 数值模拟，通过设定不同水量和设定不同气量，开展流量敏感性分析，探究水气压降比随气体和水流量变化的关系，确定适用流量范围。结果表明，水气压降比随气流量增大而减小（定水量），随水量的增大而增大（定气量），说明气体和水的过阀压降均随流量的增加而增加。当水气压降比的值约为 1.15 时，气水流量比约 4∶1，表明新型 AICD 适用于水气流量比在 1∶4（地层条件）以下的情况，且水量越大，新型 AICD 的控水效果越好。

（4）开展物理试验验证新型 AICD 的控水特性，结果表明，单相水和单相气的试验结果与数值模拟结果存在一定偏差，分别为 10.91% 和 11.85%，但整体变化趋势一致，进一步证实了新型 AICD 具有一定的控水能力。

参　考　文　献

[1] AL K F T. Advanced sand-face completion design and application in gas and gas-condensate fields [C]//SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. Brisbane, Queensland, Australia: SPE, 2010: SPE 133603-MS.

[2] 施卫平，赵旭，胡兴军，等. 天然气开采阻水装置 AICD 的设计和数值模拟 [J]. 吉林大学学报（工学版），2019，49（6）：1986-1991.
SHI W P, ZHAO X, HU X J, et al. Design and numerical simulation of water restriction device AICD for natural gas exploitation [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49 (6): 1986-1991.

[3] 赵耀华. 井下控水装置的结构设计及数值模拟 [D]. 长春：吉林大学，2020.
ZHAO Y H. Structural design and numerical simulation of underground water control device [D]. Changchun: Journal of Jilin University, 2020.

[4] 周朝，赵旭，姚志良，等. 底水气藏水平井 AICD 控水完井技术优化 [J]. 新疆石油地质，2020，41（4）：444-449.
ZHOU C, ZHAO X, YAO Z L, et al. Optimization of AICD well completion technology in horizontal wells in gas reservoirs with bottom water [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41 (4): 444-449.

[5] HONG K C. Two-phase flow splitting at a pipe tee [J]. Journal of Petroleum Technology, 1978, 30 (2): 290-296.

[6] ORANJE L. Condensate behavior in gas pipelines is predicable [J]. Oil and Gas Journal, 1973, 71 (27): 39-44.

[7] 林宗虎. 管路内气液两相流特性及其工程应用 [M]. 西安：西安交通大学出版社，1992：125-163.
LIN Z H. Characteristics of gas-liquid two-phase flow in pipelines and their engineering applications [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1992: 125-163.

[8] 王栋，张修刚，林益，等. 不等径水平三通的相分离特性研究 [J]. 工程热物理学报，2003，24（2）：259-261.
WANG D, ZHANG X G, LIN Y, et al. The split of two-phase flow at horizontal T-junctions of unequal diameters [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24 (2): 259-261.

[9] 曾泉树，汪志明，王小秋，等. 一种新型 AICD 的设计及其数值模拟 [J]. 石油钻采工艺，2015，37（2）：101-106.
ZENG Q S, WANG Z M, WANG X Q, et al. A new type design of AICD and its numerical simulation [J].

Oil Drilling & Production Technology，2015，37（2）：101-106.

[10] YANG M J，LI H T，XIE J，et al. The theory of the automatic phase selection controller and its performance analysis [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering，2016，144：28-38.

[11] 李海涛，刘权，王楠，等. 水平井新型自动流入控制器的研发与流体敏感性分析 [J]. 中国海上油气，2019，31（1）：126-132.
LI H T，LIU Q，WANG N，et al. R & D of a new autonomous inflow control device for horizontal wells and fluid sensitivity analysis [J]. China Offshore Oil and Gas，2019，31（1）：126-132.

[12] FRIPP M，ZHAO L，LEAST B. The theory of a fluidic diode autonomous inflow control device [C]//SPE Middle East Intelligent Energy Conference and Exhibition. Manama，Bahrain：SPE，2013：SPE 167415-MS.

[13] LEAST B，GRECI S，BURKEY R，et al. Autonomous ICD single phase testing [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio，Texas：SPE，2012：SPE 160165-MS.

[14] LEAST B，GRECI S，WILEMAN A，et al. Autonomous ICD range 3B single - phase testing [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans，Louisiana，USA：SPE，2013：SPE 166285-MS.

[15] LEAST B，BONNER A，REGULACION R，et al. Autonomous ICD installation success in Ecuador heavy oil：a case study [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans，Louisiana，USA：SPE，2013：SPE 166495-MS.

[16] NOMAN S，CORONA G，MILLER B. Multilateral well construction with fluidic diode AICD completion technologies：case study，north West Shelf，Western Australia [C]//The Offshore Technology Conference Asia. Kuala Lumpur，Malaysia：OTC，2020：OTC 30445-MS.

[17] KALYANI T，CORONA G，ROSS K. Fluidic diode autonomous ICD selection criteria，design methodology，and performance analysis for multiple completion designs：case studies [C]//The SPE Conference at Oman Petroleum & Energy Show. Muscat，Oman：SPE，2022：SPE 200255-MS.

[18] CORONA G，FRIPP M，KALYANI T，et al. Fluidic diode autonomous inflow control device for heavy oil application [C]//SPE Heavy Oil Conference and Exhibition. Kuwait City，Kuwait：SPE，2016：SPE 184094-MS.

[19] CORONA G，FRIPP M，YIN W Q. Fluidic diode autonomous ICD multiphase performance in light-oil reservoirs [C]//SPE Heavy Oil Conference and Exhibition. Kuwait City，Kuwait：SPE，2017：SPE 184094-MS.

[20] 黄晓东，范煦，王小萌，等. 特斯拉阀型AICD控流原理及性能分析 [J]. 石油机械，2024，52（9）：106-114.
HUANG X D，FAN X，WANG X M，et al. Flow control principle and performance analysis of T-AICD [J]. China Petroleum Machinery，2024，52（9）：106-114.

[21] 康志勇，谢开宁. 计算地层水密度的S-K方程 [J]. 科学技术与工程，2012，12（1）：19-24.
KANG Z Y，XIE K N. S-K equations of calculating formatiom water density [J]. Science Technology and Engineering，2012，12（1）：19-24.

[22] SCHOWALTER T T. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment [J]. AAPG Bulletin，1979，63（5）：723-760.

[23] 付晓泰，王振平，祝孝华. 不同温度、矿化度条件下地层水的密度 [J]. 大庆石油学院学报，1998，22（2）：6-9.
FU X T，WANG Z P，ZHU X H. Study on the density of the formation water under different temperature and salinity [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute，1998，22（2）：6-9.

第一作者简介：高素娟，生于1991年，现为在读博士研究生，研究方向为油气井智能完井、控水稳油/采气理论与技术。地址：（610500）四川省成都市。电话：（028）83032308。email：1253499969@qq.com。

通信作者：李 颖，副教授。email：yingingli@163.com。

收稿日期：2024-10-08 **修改稿收到日期：**2025-01-06

（本文编辑 王刚庆）