

基于变权模糊综合评判的 ICD 类型优选研究

赵麟, 汪志明*, 曾泉树

中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

* 通信作者, wellcompletion@126.com

收稿日期: 2017-04-06

中国石油大学(北京)科研基金(2462017YJRC058)、国家自然科学基金“水平井油气水砂多相复杂流动规律研究”(51474225)和国家自然科学基金创新研究群体“复杂油气井钻井与完井基础研究”(51221003)联合资助

摘要 长水平井易过早见水/气, 一旦油井发生水/气锥, 将在锥进处形成快速流动通道并抑制非锥进处的流动。在完井段上安装流入控制装置(ICD)可以有效延缓见水/气时间, 提高采收率。由于使用ICD的油井通常能生产5~20年, 装置的稳定性和ICD类型的选择对油井的开发十分重要。但是当前ICD类型的选择主要依赖于对ICD性能的定性认识, 缺乏科学的理论依据。本文基于数值模拟软件, 选取不同结构的ICD装置, 研究了装置的流体参数敏感性、抗冲蚀和防堵塞性。基于数值模拟结果, 结合模糊综合评判方法, 引入变权理论, 提出了一种科学的ICD优选方法。研究表明: ICD类型优选的主要考虑因素是黏度敏感性、流量大小和过流面积。通过比较ICD在不同黏度和流量下的优属度, 构建了ICD优选图版。利用该图版, 只要确定了储层条件, 即可快速得到最优ICD类型, 为油井的ICD选型提供科学的指导。

关键词 流入控制装置(ICD); 类型优选; 数值模拟; 模糊综合评判; 变权理论

0 引言

水平井的生产剖面通常难以均衡推进, 主要原因可以归结为“跟趾效应”^[1]、储层非均质性^[2]、储层各向异性^[3]和天然裂缝^[4]等因素的影响。由于水的黏度较低, 一旦发生水锥, 锥进处将形成快速通道, 从而抑制水平井产量。流入控制装置(ICD)能够产生附加压降来调节不同位置的生产压降, 从而保证整个水平段上的生产剖面均衡推进。

使用ICD的主要目的是控制油井在整个开发周期内的流入动态, 保证生产剖面均衡推进, 提高油井最终采收率。由于安装ICD的油井通常要生产5~20年, 装置的长期稳定性对油井的整体开发效果至关重要。在油井生产的不同阶段, ICD都须具备一些特定的性能^[5]。在钻完井阶段, ICD应具有较强的抗堵塞性

能^[6]。如果ICD的最小过流面积太小, 在钻采过程中容易发生堵塞。在稳产阶段, ICD应具有较强的抗冲蚀性能^[7]。如果ICD在高速携砂流体的冲击下发生冲蚀, 那么ICD将失效。在衰竭生产阶段, ICD应保持稳定的入流控制能力^[8-10]。如果多级ICD完井中有一个ICD不能有效控制入流, 将引起局部产量增加, 从而导致油井过早见水。然而, 现有的ICD都不能同时满足这些要求, 当前油田技术服务商主要基于对储层特性和ICD性能的定性认识优选ICD类型^[11-13]。

本文基于CFD数值模拟软件对ICD进行了数值模拟, 进行了150组数值计算, 综合考虑各ICD的流体参数敏感性、抗冲蚀和防堵塞性, 结合模糊综合评判方法, 提出了一种更加科学的ICD优选方法。为了更加准确地描述各评价指标在不同储层条件下的权重变化, 引入变权理论, 通过计算并比较不同ICD在不同

引用格式: 赵麟, 汪志明, 曾泉树. 基于变权模糊综合评判的ICD类型优选研究. 石油科学通报, 2018, 01: 74-82

ZHAO Lin, WANG Zhiming, ZENG Quanshu. Selection of inflow control devices based on dynamic weight fuzzy evaluation. Petroleum Science Bulletin, 2018, 01: 74-82. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.01.008

储层条件下的优属度，构建了ICD优选图版。

1 建模与分析

当前工业上主要应用3种ICD分别是喷嘴型^[14]、螺旋通道型^[15]和喷管型^[16]。3种ICD结构产生附加压降的机理也各不相同，其中喷嘴型ICD为限流机理，螺旋通道型ICD为摩阻机理，喷管型ICD则是结合了以上2种机理。为了更好地比较不同ICD的特征，通过调整喷嘴型ICD的喷嘴尺寸、螺旋通道型ICD的通道尺寸、喷管型ICD的喷管尺寸，将其流动阻力等级(FRR)都设置为0.8，各ICD的压降构成如图1所示。其中，FRR为流动阻力等级^[17]，数值上等于环空流量30 m³/d的水相(密度999.55 kg·m⁻³，黏度1 mPa·s)流过ICD结构所产生的压降，单位为Bar。

1.1 建模

本文使用专业建模软件SolidWorks生成3种ICD结构的几何模型，如图2所示。通过布尔运算得到其内部流动模型，并进行网格划分。为了准确描述流体在喷嘴、螺旋通道和喷管中的流动，在这些位置分区划分网格，并进行网格加密，如图3所示。

3种ICD结构均设有2个入口和1个出口，环空入口和中心管入口设为速度入口(Velocity-inlet)条件，出口设为出流(Outflow)条件，其他默认为壁面(Wall)条件。实际生产中，流体从中心管趾端向跟端流动，本文选取一节管道进行模拟，为了保证流体在中心管中的流向，中心管入口设置有5 m³/d的流量。当流体处于层流条件时，选用Laminar模型；当流体处于湍流条件时，选用标准 $\kappa-\varepsilon$ 模型。当流体为油水两相分散流时，选用Mixture模型；当流体为油水两相分层流

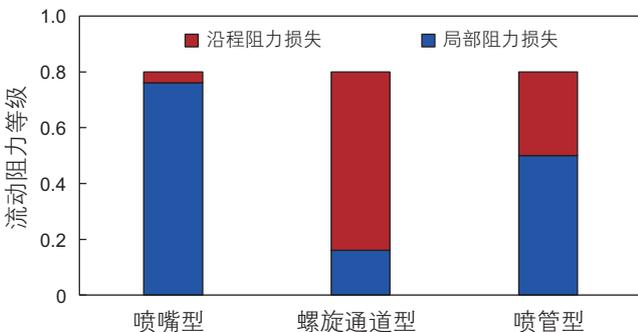


图1 不同ICD的压降构成

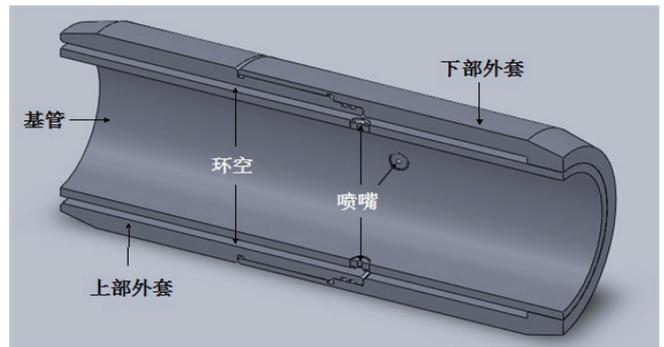
Fig. 1 Pressure drop composition of ICDs

时，选用VOF模型。由于ICD一般是水平放置的，本文还考虑了重力的影响。

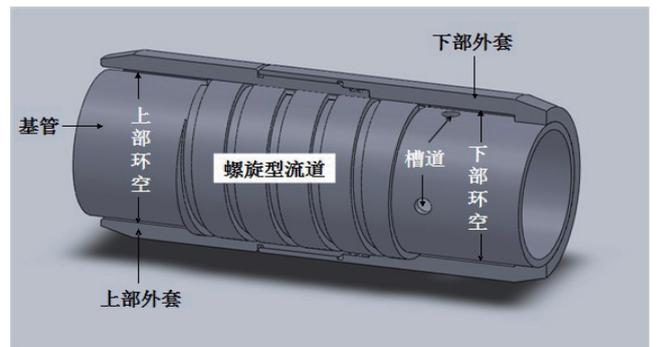
1.2 ICD特征描述

由于这3种ICD的压降构成不同，其限流结构差别很大，并将产生不同的流动特征。下面分别对这3种ICD产生压降的机理、结构和流动特征做简单的介绍。

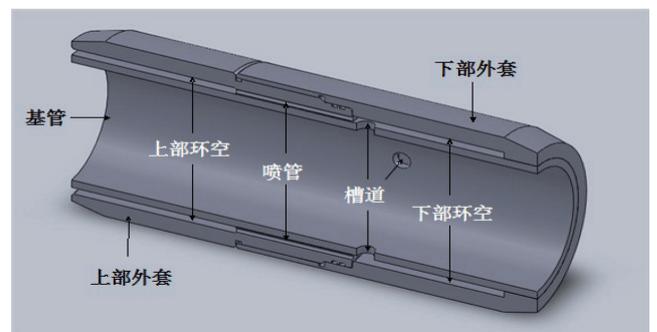
喷嘴型ICD利用流体通过喷嘴时的收缩来产生压降，以局部阻力损失为主，压力在喷嘴处急剧变化，该装置本质上利用了伯努利原理，如图4(a)和5所示(图5中横坐标“位置”表示x轴向上的空间坐标)。喷



(a) 喷嘴型ICD



(b) 螺旋通道型ICD



(c) 喷管型ICD

图2 不同ICD的机械结构示意图

Fig. 2 Mechanical structure diagrams of ICDs

嘴型ICD的优点是结构简单,易于调节,对黏度不敏感;缺点是产生压降的喷嘴尺寸很小,在泥浆返排阶段易被堵塞,且生产过程中易被冲蚀破坏。因此,喷嘴型ICD广泛应用于低流量的稠油油藏。

螺旋通道型ICD产生的附加压降以沿程阻力损失为主,压力在螺旋通道中逐渐降低,该ICD装置本质上利用了泊肃叶原理,如图4(b)和图5所示。螺旋通道型ICD的优点在于其过流面积较大,不容易被携砂流体冲蚀破坏,泥浆返排时也不容易发生堵塞;缺点是对黏度变化很敏感,当油相黏度较高时,其阻力可能大于水相阻力,从而限制油相的流动。因此,螺旋

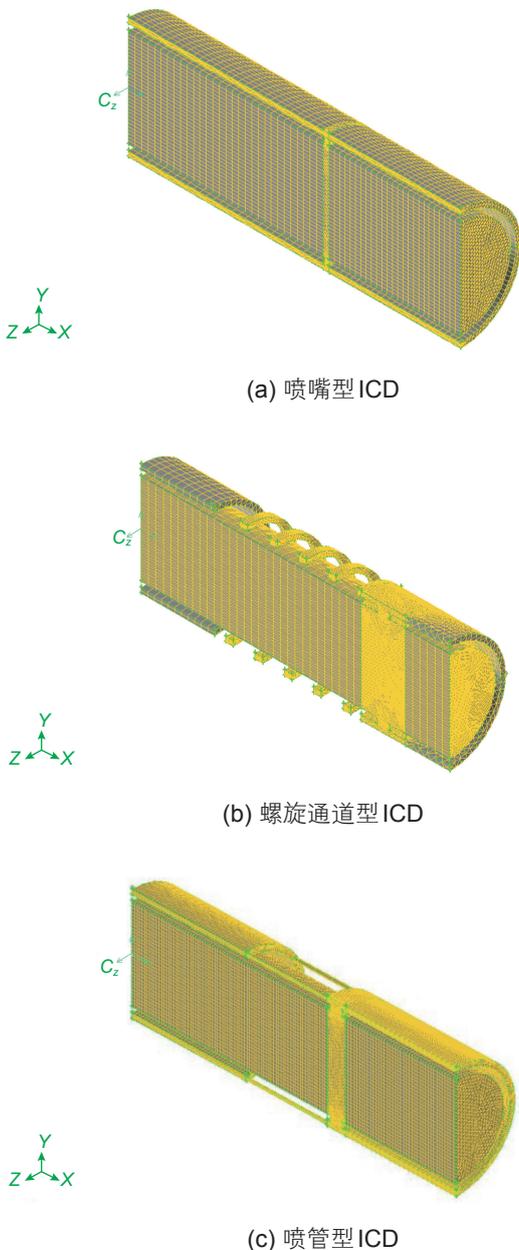


图3 不同ICD的计算网格示意图
Fig. 3 Computing grid diagrams of ICDs

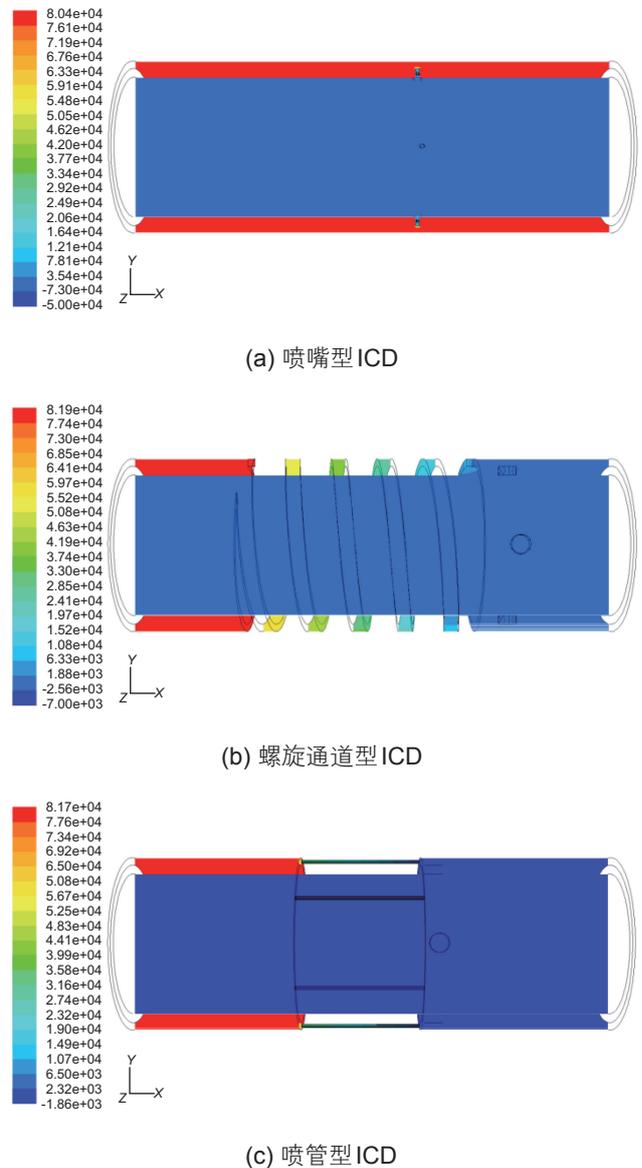


图4 不同ICD的压力分布云图
Fig. 4 Pressure contours of ICDs

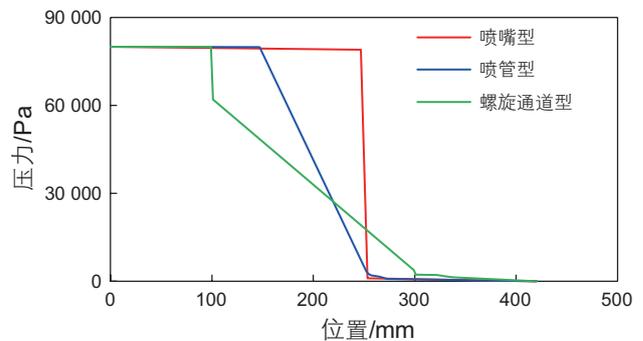


图5 不同ICD的压力分布曲线
Fig. 5 Pressure distribution graphs of ICDs

通道型 ICD 广泛应用于高流量的低黏油藏。

喷管型 ICD 利用流体通过长喷管时的收缩和表面摩擦来产生压降，综合了局部阻力和沿程阻力两种损失，压力随着流体通过长喷管逐渐降低，变化幅度小于喷嘴型 ICD，而大于螺旋通道型 ICD，如图 4(c) 和 5 所示。与喷嘴型 ICD 相比，喷管型 ICD 过流面积较大，生产过程中不易被携砂流体冲蚀破坏，泥浆返排阶段也不易发生堵塞；与螺旋通道型 ICD 相比，喷管型 ICD 对黏度较不敏感，油相黏度适用范围广。因此，喷管型 ICD 广泛应用于高流量的稠油油藏中。

为了更好地比较这 3 种 ICD 的性能，通过数值计算得到了这 3 种 ICD 在不同环空流量 (0~30 m³/d) 和流体黏度 (水相、4、30 和 200 mPa·s) 下的压降，如图 6 所示。

可以发现，流体性质显著影响 ICD 的节流压降。3 种 ICD 产生压降的原理可以归结为限流机理和/或摩阻机理，影响限流效果的主要因素是最小过流面积、流量大小和流体密度，而影响摩阻效果的主要因素是流道长度、流量大小和流体黏度。根据上述分析可知，影响节流压降的因素都可归结到流体性质和 ICD 的结构参数上。因此一旦流动阻力等级 (FRRs, Flow

Resistance Rate) 确定，ICD 的结构参数就能固定下来，ICD 结构的影响主要表征为抗冲蚀和防堵塞性能。

1.3 流体参数的敏感性分析

流体性质对 ICD 产生的节流压降影响很大，因此 ICD 类型优选时需着重考虑流体参数敏感性的影响。本文研究了环空流量、流体密度和黏度对 3 种 ICD 结构节流压降的影响，建立了以下 3 个方案 (见表 1)。

方案 1 针对 3 种 ICD 结构进行了环空流量敏感性分析，由于生产中通常采用多级 ICD 完井 (串联多个 ICD 进行生产)，故本文设计的环空流量 (m³/d) 取值如下：0、2.5、5、10、20、30。图 7 所示，喷嘴型 ICD 的节流压降随环空流量的增大呈平方增大，螺旋通道型 ICD 的节流压降基本随环空流量的增大而线性增大，喷管型 ICD 的节流压降与环空流量的关系介于上述两者之间。由于 3 种 ICD 的 FRR 均设计为 0.8，其流量敏感性差别不大。

方案 2 针对 3 种 ICD 结构进行了流体密度敏感性分析，油、水及其混合液的密度范围基本在 800~1000 kg/m³ 之间，因此对流体密度 (kg/m³) 取值：800、850、900、950、1000。如图 8 所示，3 种 ICD

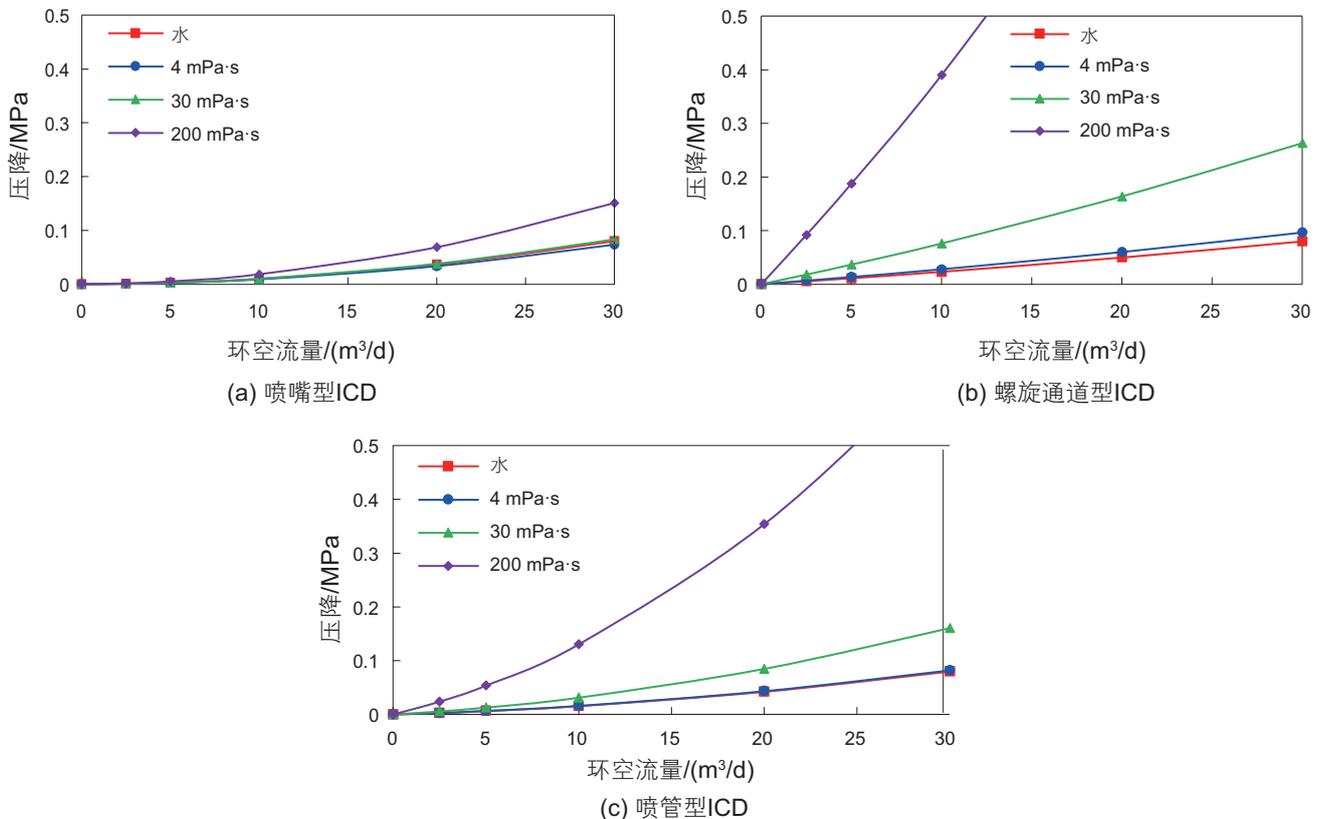


图 6 不同环空流量和黏度下流体通过不同 ICD 的压降数据

Fig. 6 Pressure loss data through ICDs with varying annular flow rates and fluid viscosities

表 1 流体性质敏感度方案

Table 1 Fluid properties sensitivity research projects

	环空流量 $Q/(m^3/d)$	流体密度 $\rho/(kg/m^3)$	流体黏度 $\mu/(mPa \cdot s)$
方案 1	0、2.5、5、10、20、30	1000	1
方案 2	30	800、850、900、950、1000	1
方案 3	30	870	1、2、4、10、20、30、50、100、150、200

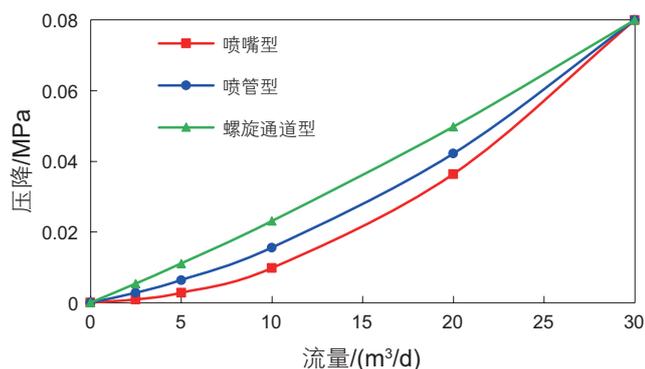


图 7 环空流量敏感性分析

Fig. 7 Sensitivity analysis of annular flow rate

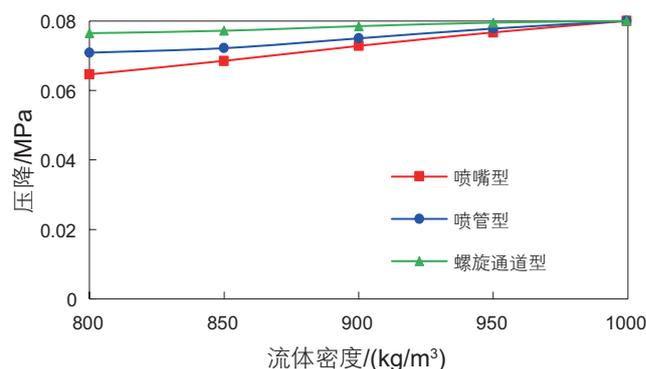


图 8 流体密度敏感性分析

Fig. 8 Sensitivity analysis of fluid density

的节流压降均随流体密度的增大而线性增大，且对流体密度的敏感性差别不大，喷嘴型ICD的压力变化幅度为 $78.15 \text{ Pa}/(\text{kg}/\text{m}^3)$ ，喷管型ICD为 $47.69 \text{ Pa}/(\text{kg}/\text{m}^3)$ ，而螺旋通道型ICD为 $18.64 \text{ Pa}/(\text{kg}/\text{m}^3)$ 。可以看出，这3种ICD对密度的敏感性差别不大，喷嘴型ICD最敏感。由于这3种ICD的FRR值都为0.8，低密度流体产生的压降最小，相对来说喷嘴型ICD的效果最好。

方案3针对3种ICD结构进行了流体黏度敏感性分析，由于常见的油、水及其混合液的黏度范围基本在 $1\sim 200 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 之间，为了准确描述这种变化，流体黏度 $(\text{mPa}\cdot\text{s})$ 取值：水相、4、10、20、30、50、100、150、200。如图9所示，3种ICD的节流压降均随着流体黏度的增大而线性增大。不同ICD的节流压降对黏度的敏感性差别很大，喷嘴型ICD的压力变化幅度为 $387.7 \text{ Pa}/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ ，喷管型ICD为 $2993.4 \text{ Pa}/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ ，而螺旋通道型ICD为 $6398.3 \text{ Pa}/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ 。可以看出，这3种ICD对黏度的敏感性差别很大，螺旋通道型ICD最敏感，高黏流体产生的压降最大，这将大大限制其适用范围，就这点而言，喷嘴型ICD的适用范围最广。

基于以上分析，这3种ICD对环空流量和流体密度的敏感性差别不大，而对黏度的敏感性差异很大，因此本文将黏度作为主要评价指标在模型优选中着重考虑。

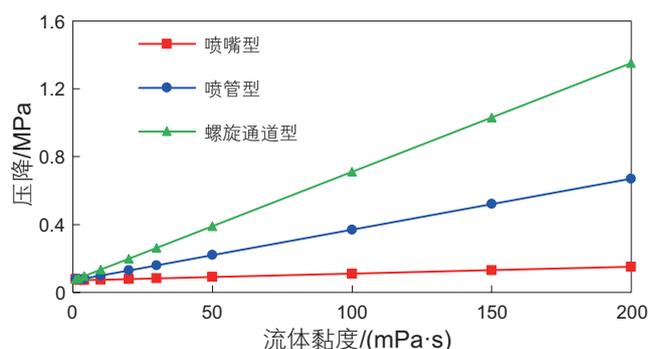


图 9 流体黏度敏感性分析

Fig. 9 Sensitivity analysis of fluid viscosity

1.4 抗冲蚀和防堵塞性能分析

抗冲蚀和防堵塞性能是进行ICD类型优选时需要考虑的另一个重要指标。生产过程中，携砂流体通过筛管后进入ICD，不论是颗粒尺寸太大还是ICD的流道面积太小，都可能导致ICD发生堵塞。同时，如果流速较大，这些固体颗粒还会冲蚀ICD。无论ICD发生堵塞或被严重冲蚀，都可导致ICD失效。堵塞概率和冲蚀速率主要取决于以下几个因素：颗粒大小、颗粒含量、流速和ICD的最小过流面积。前3个因素取决于井况，而最后1个因素取决于ICD的设计，因此在ICD设计时应尽可能保证其最小过流面积较大。

这 3 种 ICD 的最小过流面积和最大流速如图 10 所示。由于机理不同，这 3 种 ICD 的最小过流面积区别很大，并且同等流量下流体通过不同 ICD 的最大流速亦有很大区别。最小过流面积和最大流速都会影响堵塞概率和冲蚀速率，对于 ICD 类型优选影响很大。在同等流量下，最小过流面积越大，过流流速就会越小，发生堵塞和冲蚀的风险就越低。然而，一旦确定 ICD 的 FRR，其最小过流面积亦确定，而流量却是实时变化的，因此重点考虑流量对抗冲蚀和防堵塞的影响。

2 ICD 类型优选

由于喷嘴型 ICD 对黏度最不敏感，但其抗冲蚀和防堵塞性能最弱；螺旋通道型 ICD 抗冲蚀和防堵塞性能最强，但其对黏度最敏感；喷管型 ICD 则介于两者之间。因此，在特定的储层条件下，很难直接确定哪一种 ICD 性能最好。

为了更好地进行 ICD 类型优选，本文基于 CFD 数值模拟软件对 ICD 进行了数值模拟，综合考虑各 ICD 的流体参数敏感性、抗冲蚀和防堵塞性，结合模糊综合评判方法，并引入变权理论，提出了一种更加科学的 ICD 优选方法。通过计算并比较不同 ICD 在不同储层条件下的优属度，构建了 ICD 优选图版。

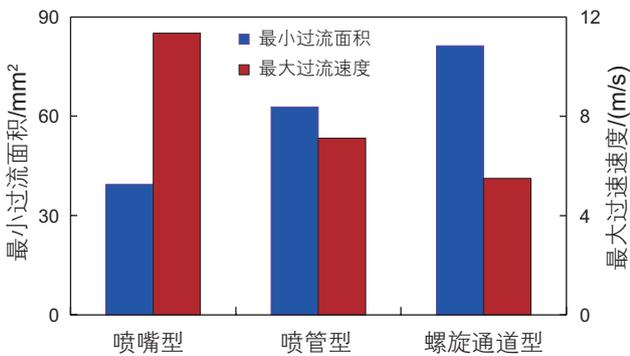


图 10 不同 ICD 的最小过流面积和最大过流速度
Fig. 10 Minimum flow areas and maximum flow velocities through ICDs

表 2 评价指标数据

Table 2 Evaluation index data

ICD 类型	密度敏感指标 $\Delta P_{\rho}/(\text{Pa})$	黏度敏感指标 $\Delta P_{\mu}/(\text{Pa})$	最小过流面积 $A_{\min}/(\text{mm}^2)$
喷嘴型	$78.15\rho+2195.5$	$387.7\mu+72\ 929$	39.37
螺旋通道型	$18.64\rho+61\ 568$	$6398.3\mu+71\ 706$	81.25
喷管型	$47.69\rho+32\ 268$	$2993.4\mu+71\ 497$	62.82

2.1 建立指标矩阵

设有 m 种 ICD 可选，每种 ICD 都有 n 项评价指标，则 m 种 ICD 的 n 项指标值构成指标矩阵：

$$A = (a_{ij})_{m \times n} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

式中， a_{ij} 表示第 i 种 ICD 的第 j 项指标值。

根据上文分析可知：ICD 类型包括喷嘴型、螺旋通道型和喷管型；评价指标包括最小过流面积、密度敏感性和黏度敏感性，数据如表 2 所示。

2.2 指标矩阵规范化

评价指标分为效益型指标和成本型指标 2 类。效益型指标的特征是指标值越大决策方案越好，而成本型指标的特征是指标值越小决策方案越好。因此，需要对指标进行规范化处理，其计算公式为：

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{a_{ij} - \min_i(a_{ij})}{\max_i(a_{ij}) - \min_i(a_{ij})} & j \text{ 为效益型指标时} \\ \frac{\max_i(a_{ij}) - a_{ij}}{\max_i(a_{ij}) - \min_i(a_{ij})} & j \text{ 为成本型指标时} \end{cases} \quad (2)$$

由式 (2) 可得规范化指标矩阵：

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \quad (3)$$

在 3 项指标中，密度敏感性和最小过流面积为效益型指标，而黏度敏感性为成本型指标。

2.3 确定动态权重矩阵

在多目标决策问题中，指标权重往往为常数形式^[18]，即权重不随指标值的变化而变化。然而，在不同的流量、密度和黏度情况下，流体参数敏感性、抗冲蚀和防堵塞性对 ICD 选型的影响程度不同。因此，本文在模糊评判模型中引入变权理论，基于密度敏感性越强，相应指标所占权重越大的思想，确定了各评价指标在不同储层条件下的权重，见式 (4)–(7)。

$$w_{pe} + w_s = 1 \quad (4)$$

$$w_{pe} = 0.6 - 0.2 \frac{Q_{max} - Q}{Q_{max} - Q_{min}} \quad (5)$$

$$w_{\rho} = \frac{a_{i1} \cdot R_{\rho}}{a_{i1} \cdot R_{\rho} + a_{i2} \cdot R_{\mu}} w_s \quad (6)$$

$$w_{\mu} = \frac{a_{i2} \cdot R_{\rho}}{a_{i1} \cdot R_{\rho} + a_{i2} \cdot R_{\mu}} w_s \quad (7)$$

式中, w_{pe} 为抗冲蚀和防堵塞性能的权重, w_s 为流体敏感性的权重, w_{ρ} 为密度敏感性的权重, w_{μ} 为黏度敏感性的权重, Q_{max} 为最大流量值, Q_{min} 为最小流量值。 R_{ρ} 为油水密度差值, R_{μ} 为油水黏度差值, 其中水黏度为 1.003 mPa·s, 密度为 998.2 kg/m³。

由于密度对压降的影响程度远小于黏度, 并且油和水的密度差异很小, 将 R_{ρ} 设置为油水密度最大差异值 200 kg/m³, Q_{max} 设置为 30 m³/d, Q_{min} 为 2.5 m³/d, 影响压降的各个因素的权重公式如表 3 所示。

2.4 决策方案优属度计算

利用加权平均法计算各决策方案的优属度, 如式(8)所示。根据最大隶属度原则, 优属度值越高, 方案越优, 即可优选出特定储层条件下的最优 ICD。

$$B = R_{i \times k} W_{k \times 1} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1k} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ik} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_k \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$= \begin{bmatrix} r_{11} \times w_1 + r_{12} \times w_2 + \cdots + r_{1k} \times w_k \\ r_{21} \times w_1 + r_{22} \times w_2 + \cdots + r_{2k} \times w_k \\ \cdots \\ r_{i1} \times w_1 + r_{i2} \times w_2 + \cdots + r_{ik} \times w_k \end{bmatrix}$$

以环空流量 10.25 m³/d 的情况为例, 这 3 种 ICD 在不同黏度下的优属度如图 11 所示。根据最大隶属度

原则, 当流体黏度小于 55 mPa·s 时, 螺旋通道型 ICD 是最佳的选择; 当流体黏度介于 55~130 mPa·s, 喷嘴型 ICD 是最佳的选择; 当流体黏度大于 130 mPa·s, 选择喷管型 ICD 最好。

因此, 通过比较这 3 种 ICD 在不同黏度和环空流量下的优属度, 可构建一个 ICD 优选图版, 如图 12 所

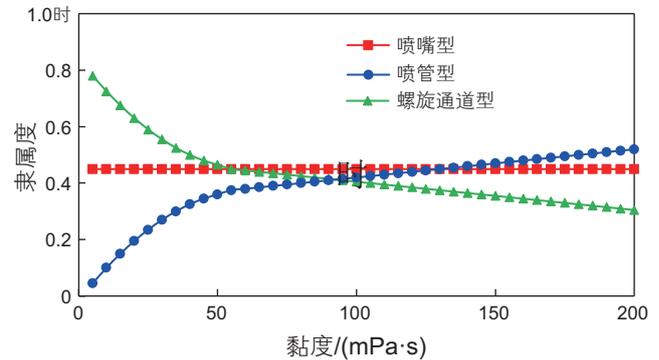


图 11 不同黏度下各 ICD 的隶属度对比图 (10.25 m³/d)

Fig. 11 Optimal membership degrees of ICDs with fluids at different viscosities (10.25 m³/d)

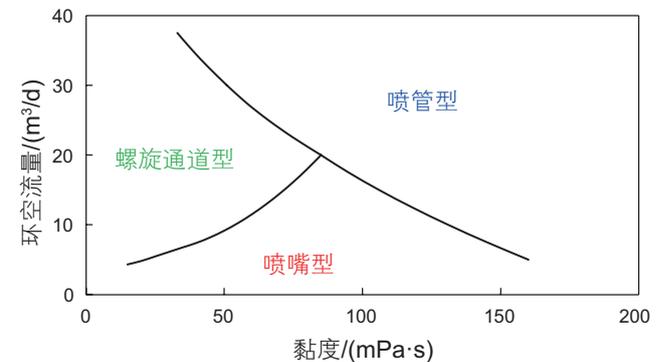


图 12 ICD 优选图版

Fig. 12 ICD selection diagram

表 3 评价指标权重

Table 3 Weight of different evaluation index data

ICD 类型	密度权重 w_{ρ}	黏度权重 w_{μ}	抗冲蚀和防堵塞权重 w_{pe}
喷嘴型	$w_{\rho} = \frac{78.15 \cdot R_{\rho}}{78.15 \cdot R_{\rho} + 387.7 \cdot R_{\mu}} w_s$	$w_{\mu} = \frac{387.7 \cdot R_{\mu}}{78.15 \cdot R_{\rho} + 387.7 \cdot R_{\mu}} w_s$	$w_{pe} = 0.6 - 0.2 \frac{30 - Q}{30 - 2.5}$
螺旋通道型	$w_{\rho} = \frac{18.64 \cdot R_{\rho}}{18.64 \cdot R_{\rho} + 6398.3 \cdot R_{\mu}} w_s$	$w_{\mu} = \frac{6398.3 \cdot R_{\mu}}{18.64 \cdot R_{\rho} + 6398.3 \cdot R_{\mu}} w_s$	$w_{pe} = 0.6 - 0.2 \frac{30 - Q}{30 - 2.5}$
喷管型	$w_{\rho} = \frac{47.69 \cdot R_{\rho}}{47.69 \cdot R_{\rho} + 2993.4 \cdot R_{\mu}} w_s$	$w_{\mu} = \frac{2993.4 \cdot R_{\mu}}{47.69 \cdot R_{\rho} + 2993.4 \cdot R_{\mu}} w_s$	$w_{pe} = 0.6 - 0.2 \frac{30 - Q}{30 - 2.5}$

示。喷嘴型 ICD 较适用于低流量的稠油油藏，螺旋通道型 ICD 较适用于高流量的低黏油藏，喷管型 ICD 较适用于高流量的稠油油藏。同时，对于 ICD 的 FRR 都为 0.8 的情况，一旦确定了地层条件，即可方便快速地确定最优 ICD 类型，使其黏度敏感性较小，且具有较好的抗冲蚀和防堵塞性。

3 结论

本文基于 CFD 数值模拟软件，进行了 150 组数值计算，综合考虑各 ICD 的流体参数敏感性、抗冲蚀和防堵塞性，结合模糊综合评判方法，并引入变权理论，

提出了一种更加科学的 ICD 优选方法。得出以下结论和建议。

(1) 优选 ICD 类型时需着重考虑流体参数敏感性、抗冲蚀和防堵塞性能的影响。

(2) 在同等 FRR 下，不同 ICD 的黏度敏感性差别最大，密度敏感性差别次之，流量敏感性最小。

(3) 喷嘴型 ICD 较适用于低流量的高黏油藏，螺旋通道型 ICD 较适用于高流量的低黏油藏，而喷管型 ICD 较适用于高流量的高黏油藏。

(4) 利用本文建立的 ICD 优选图版，一旦确定了储层条件，即可方便快速地优选出 ICD 类型，保证其黏度敏感性较小，且具有较好的抗冲蚀和防堵塞性。

参考文献

- [1] BIRCHENKO V M, MURADOV K M, DAVIES D R. Reduction of the horizontal well's heel-toe effect with inflow control devices[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, 75(1-2): 244-250.
- [2] BIRCHENKO V M, BEJAN A, USNICH A V, et al. Application of inflow control devices to heterogeneous reservoirs[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, 78(2): 534-541.
- [3] VASILY M B. Analytical modelling of wells with inflow control devices[D]. Edinburgh: Heriot-Watt University, 2010.
- [4] ARENAS E, DOLLE N. Smart waterflooding tight fractured reservoirs using inflow control valves[C]//SPE annual technical conference and exhibition. Colorado: Society of Petroleum Engineers, 2003.
- [5] DENNEY D. Analysis of inflow-control devices[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2009, 62(5): 52-54.
- [6] GRECI S, LEAST B, AITKEN L A, et al. Plugging testing confirms the reliability of the fluidic diode-type autonomous inflow control device[C]//SPE deepwater drilling and completions conference. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2014.
- [7] GRECI S, LEAST B, TAYLOE G. Testing results: Erosion testing confirms the reliability of the fluidic diode type autonomous inflow control device[C]//Abu Dhabi international petroleum exhibition and conference. Abu Dhabi: Society of Petroleum Engineers, 2014.
- [8] 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. Malaysia: International Petroleum Technology Conference, 2014.
- [9] ZENG Q S, WANG Z M, WANG X Q, et al. A novel autonomous inflow control device design and its performance prediction[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 126: 35-47.
- [10] BYBEE K. Production operations: Inflow-control devices[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2008, 60(3): 81-83.
- [11] AUGUSTINE J R, MATHIS S P, NGUYEN H T, et al. World's first gravel-packed inflow-control completion[J]. *SPE Drilling & Completion*, 2008, 23(1): 61-67.
- [12] HAY B, GARCIA G, CUI E. Inflow control device application in thin layered water drive reservoir to enhance oil recovery in China south sea[C]//SPE Kuwait oil and gas show and conference. Kuwait: Society of Petroleum Engineers, 2013.
- [13] OYEKA O, FELTEN F, LEAST B. Screen-inflow-design considerations with inflow control devices in heavy oil[C]//SPE heavy oil conference-Canada. Alberta: Society of Petroleum Engineers, 2014.
- [14] ABD-ELFATTAH M, AL-YATEEM K, QAHTANI H, et al. Variable nozzle-based inflow control device completion: Inflow distribution comparison, analysis, and evaluation[C]//International petroleum technology conference. Beijing: International Petroleum Technology Conference, 2013.
- [15] VISOSKY J M, CLEM N J, CORONADO M P, et al. Examining erosion potential of various inflow control devices to determine duration of performance[C]//SPE annual technical conference and exhibition. California: Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [16] 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[C]//SPE/IADC drilling conference and exhibition. Amsterdam: Society of Petroleum Engineers, 2011.
- [17] TARIK A A, SUDIPTYA B, GONZALO A G, et al. Effective use of passive inflow control devices to improve the field development plan[C]//SPE deepwater drilling and completions conference. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [18] ZENG Q S, WANG Z M, YANG G, et al. Selection and optimization study on passive inflow control devices by numerical simula-

tion[C]//SPE Middle East intelligent energy conference and exhibition. Manama: Society of Petroleum Engineers, 2013.

Selection of inflow control devices based on dynamic weight fuzzy evaluation

ZHAO Lin, WANG Zhiming, ZENG Quanshu

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

Abstract Early water or gas breakthrough is usually encountered due to an imbalanced production profile. Once water or gas coning occurs in horizontal wells, the flow rate in the coning zone will be high because of the low viscosity of water and gas and the flow in the other zone will be hindered. Inflow control devices (ICD) can enhance the reservoir sweep efficiency and oil recovery. Hence, ICD stability and selection is crucial for well production. However, current ICD selection for a specific reservoir mainly depends on the qualitative awareness of both the reservoir conditions and the ICD performance. Based on CFD simulation, this paper proposed an ICD selection method, which considers the fluid property sensitivity, plugging and erosion resistances and combines fuzzy evaluation and dynamic weight theory. The results show that ICD selection mainly depends on the viscosity sensitivity, flow rate, and cross section area of the ICDs. An ICD selection diagram is built with the comparison of optimal membership degrees of three designs at varying reservoir conditions. The optimal ICD can be selected immediately with the help of the ICD selection diagram once reservoir conditions are determined.

Keywords inflow control device (ICD); selection; numerical simulation; fuzzy evaluation; dynamic weight theory

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.01.008

(编辑 马桂霞)