

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2024.01.006

基于 CFD-PBM 含油污水沉降实验装置的数值模拟

马庆东

(大庆油田责任有限公司第九采油厂)

摘要 沉降是目前油田含油污水处理过程中重要处理方法之一,而含油污水的油水分离特性是影响油田含油污水沉降处理工艺效率的关键因素。文章设计并搭建了含油污水沉降实验装置,对装置中含油污水沉降分离过程进行 CFD-PBM 数值模拟。首先运用实验验证模拟方法的可靠性,然后分析了不同油水相黏度、配液含油量和温度对含油污水沉降过程的影响,获得了含油污水在沉降装置中的沉降分离特性:当其他条件一定时,含油污水静置沉降过程中,油水相黏度越小,配液含油量越大,温度越高,含油污水沉降分离速度越快,油滴更容易从含油污水中快速分离出来上浮至顶部,表现出良好的油水分离效果。研究结果可为油田含油污水沉降实验研究及沉降处理工艺的运行提供一定的理论支持。

关键词 含油污水; 沉降; 分离特性; PBM 模型; 数值模拟

中图分类号: X505; TE991

文献标识码: A

文章编号: 1005-3158(2024)01-0024-06

Numerical Simulation of Oily Sewage Settlement Experimental Device Based on CFD-PBM

Ma Qingdong

(The Ninth Oil Production Plant of Daqing Oilfield Co., Ltd.)

ABSTRACT Settlement is one of the important treatment methods in the treatment process in oil fields, and the oil-water separation characteristic of oily was the key factor affecting the efficiency of oily sewage settlement treatment process. An experimental device for oily sewage settlement was designed and built in this study, and the settlement and separation process of oily sewage was numerically simulated by CFD-PBM in the device. Firstly, the reliability of the simulation method was validated by experiments, and then the effects of different viscosity of oil-water phase, oil content of the preparation liquid, and temperature on the settlement process of oily sewage were analyzed, and the settlement and separation characteristics of oily sewage in the settlement device were obtained. When other conditions were constant during the static settlement process of oily sewage, the lower viscosity of oil-water phase was, the larger oil content of the preparation liquid was, the higher temperature was, the faster settlement and separation speed of oily sewage was, and the easier the oil droplets were to quickly separate from the oily sewage and float to the top, demonstrating a great oil-water separation effect. The research results could provide some theoretical support for the experimental study of oily sewage settlement and the operation of the oily sewage settlement treatment process in oilfield.

KEYWORDS oily sewage; settlement; separation characteristic; PBM model; numerical simulation

0 引言

随着油田的开采,国内绝大多数油田已进入中高含水阶段,油田采出液经过联合站处理后产生了大量的含油污水,同时含油污水的物性也变得更为复杂,

导致油水分离愈加困难,因此,进行含油污水沉降分离特性研究对于掌握含油污水的沉降分离规律、提高含油污水处理工艺效率至关重要^[1]。目前,重力沉降法在油田含油污水处理中发挥着不可替代的作用,其

利用含油污水中油、水两相密度差,使水中的油滴浮升而实现油、水分离^[2]。

目前,国内已有含油污水的沉降分离规律的研究,例如,任永良等^[3]利用COMSOL有限元软件对沉降实验装置进行建模与分析,发现经过一定时间的沉降,含油污水在罐体油水分离区域的流速较为稳定;整个罐体内部的油相浓度随高度的减小而减小。张菁等^[4]利用多相流混合模型对溶气气浮沉降罐中含油污水的沉降分离过程进行数值模拟,得出与普通重力沉降罐的油水分离特性对比,气浮选工艺可有效改善含油污水沉降分离效果的结论。董珂^[5]利用静置沉降分离装置对油井采出液进行油水分离特性实验研究,发现沉降相同的时间,高含水油井采出液含水率与游离水脱除率成正比。张杰等^[6]利用油水静沉降分离装置对高钙型三元采出水进行分离特性研究,发现随着沉降时间的延长,油水分离速度逐渐缓慢;装置内三元采出水的颜色由深黄色逐渐变浅,变成淡黄色,但变化速度逐渐缓慢。安杉等^[7]对T型管内的油、水两相流动情况和分离特性进行CFD-PBM数值模拟,并进行了室内实验以验证模拟结果的准确性。结果表明,T型管内油滴粒径随流体流动方向具有逐渐增大的趋势;增大来液中的油滴粒径分布可以有效提高油水分离效率,反之当来液中的油滴粒径较小时,油水两相在T型管内不易分离。然而,目前油水沉降分离相关的模拟研究主要集中在均匀的油滴粒径分布方面,鲜有文献涉及到非均匀颗粒尺寸。另外在实际生产过程中,油滴颗粒以不同直径分散,油滴相互碰撞以聚集,形成了更大的油滴直径。因此,针对这些问题,本文采用ANSYS软件对含油污水沉降实验装置进行建模与分析,为接近实际工程应用,结合Fluent提供的群落平衡模型(PBM模型)模拟了不同油水相黏度、配液含油量和温度参数条件下的含油污水沉降分离过程,得到了含油污水在沉降实验装置中的沉降分离特性,研究结果可为油田含油污水沉降处理工艺的运行提供理论支持。

1 模型建立

1.1 几何模型

含油污水沉降实验装置主要由有机玻璃柱、底座支架、进水管,排水管和取样口组成。有机玻璃柱体有效高度为2 000 mm,直径为120 mm,含油污水沉降实验装置结构如图1所示。根据实验装置绘制了二维几何模型见图2,并对模型进行网格划分,网格数为54 000。

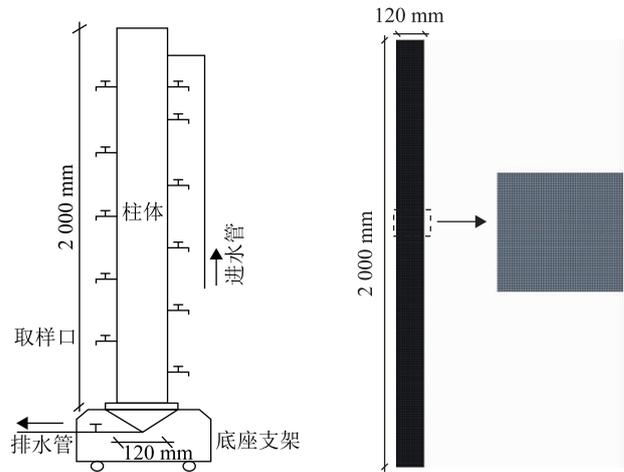


图1 实验装置结构示意图

图2 二维几何模型

1.2 数学模型

1.2.1 多相流模型

本文研究的介质为油水混合物,混合物中油相所占比例较少,以油相作为分散相,在油水沉降的过程中,油水并不能完全分离,同时两者之间互相掺杂,因此选取多相流模型中的Mixture模型^[8]来进行数值模拟。Mixture模型的基本控制方程见式(1)~(2)。

连续性方程如式(1)所示。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = \dot{m} \quad (1)$$

式中: \dot{m} 为混合物的质量变化率; \vec{v}_m 为混合物的质量平均速度,m/s; ρ_m 为混合物密度, $\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$,kg/m³; α_k 为第k相的体积分数;k为相数; ρ_k 为第k相的密度,kg/m³。

动量方程如式(2)所示。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m)) = -\nabla p + \nabla [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \vec{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \quad (2)$$

式中: \vec{F} 为体积力,N; n 为相数; μ_m 为混合物的黏度,Pa·s, $\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k$; $\vec{v}_{dr,k}$ 为第二相k的漂移速度, $\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m$,m/s; μ_k 为第k相的黏度,Pa·s; \vec{v}_k 为第k相的漂移速度,m/s; \vec{v}_m 混合物的漂移速度,m/s。

1.2.2 湍流模型

湍流模型主要有标准k-ε模型、RNG k-ε模型、Realizable k-ε模型和RSM模型等,以上模型均有各自的适用范围。陈丽娜^[9]通过将RNG k-ε模型与标准k-ε模型对比探究,认为与标准k-ε模型相比,RNG

k-ε 模型的模拟效果更好,因此本文湍流模型选用 RNG k-ε 模型,公式见式(3)~(4)。

湍流动能 k 方程见式(3)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \mu_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\epsilon} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

湍流耗散率 ε 方程见式(4)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon \mu_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_{\epsilon} \mu_{\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_{\epsilon} + S_{\epsilon} \quad (4)$$

式中:G_k 表示由于平均速度梯度引起的湍动能,G_b 表示由于平均速度梯度引起的湍动能;Y_M 是可压缩 6 湍流脉动膨胀对总耗散率产生的影响。α_k 和 α_ε 分别是 k 方程和 ε 方程的湍流普朗特(Prandtl)数。C_{1ε} = 1.422; C_{2ε} = 1.68; S_k 和 S_ε 是用户定义参数。

1.2.3 群落平衡模型

群落平衡模型^[10](Population Balance Model,PBM)是由 M. K. Fukushi 等基于分散相液滴聚并和破碎后液滴数量及质量守恒提出的一种基础理论模型,也是迄今研究分散相液滴群运移规律和碰撞效率最成熟也是应用最广泛的方法,其用来处理颗粒在变化过程中数量和粒径尺寸的变化情况,主要通过动量和能量守恒的基础上添加一个平衡方程来描述粒子的平衡,群落平衡模型的守恒方程见式(5)。

$$S(V, t) = \frac{\partial}{\partial t}[n(V, t)] + \nabla \times [\mu \times n(V, t)] \quad (5)$$

式中:V 为液滴体积,m³;t 为时间,s;n 为数密度,kg/m³;μ 为黏度,Pa·s;S(V, t)为液滴聚并和破碎的源项,常数;可以具体表示为式(6)~(10)。

$$S(V, t) = B_c(V, t) - D_c(V, t) + B_B(V, t) - D_B(V, t) \quad (6)$$

$$B_c(V, t) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} a(V - V', V', t) n(V - V', t) n(V', t) dV' \quad (7)$$

$$D_c(V, t) = \int_0^{\infty} a(V, V') n(V, t) n(V', t) dV' \quad (8)$$

$$B_B(V, t) = \int_0^{\infty} \rho g(V') \beta(V, V') n(V, t) n(V', t) dV' \quad (9)$$

$$D_B(V, t) = g(V) n(V, t) \quad (10)$$

式中:B_c(V, t) 项和 D_c(V, t) 项分别为聚并导致的液滴生成和破灭;B_B(V, t) 项和 D_B(V, t) 项分别代表破碎导致的液滴生成和破灭;B_c(V, t) 项和 D_c(V, t) 项

及 B_B(V, t) 项和 D_B(V, t) 项均为常数。

Ansys Fluent 中提供的求解群平衡方程的方法主要有离散法、非均匀离散法、标准矩法、正交矩法,本文采用离散法求解群平衡方程。借鉴东北石油大学刘洋^[11]通过马尔文激光粒度测量仪测定待分离的油水混合液的方法,得到 16 组油滴粒径范围大致为 0.03~0.20 mm 的油滴粒径分布及含量。在 PBM 模型内有多种颗粒聚并与破碎模型,本文聚并模型和破碎模型选用 Luo-model,表面张力系数均设为 0.4 N/m,相关参数设置如表 1 所示。

表 1 群落平衡模型中离散法的参数设置

因素	参数
颗粒体积系数/Kv	0.523 598 8
组数	16
比率指数	0.498 285 9
最小粒径/mm	0.035 566
最大粒径/mm	0.2

1.3 边界条件及初始条件

在含油污水沉降分离模拟研究中,对于含油污水沉降实验装置物理模型壁面边界考虑黏性的影响,壁面边界为静止状态;入口边界为速度入口,出口边界采用自由出流。参数设置如下:水的性质,密度 983 kg/m³,黏度 0.000 469 Pa·s;油的性质,密度 864 kg/m³,黏度 0.024 51 Pa·s;含油量 1 023 mg/L。

2 实验验证模拟方法的可靠性

为保证 CFD 数值模拟结果的准确性并尽可能减少计算量,首先进行室内含油污水沉降实验,含油污水从大庆油田某联合站提取。将取水口水排除一部分以确保实验水样中不包含取样口的死水,利用软管从取水口向沉降柱内输入水样,在输入过程中,从筒中取样两次,每次约 30 mL,此水样的含油量平均值即为实验水样的原始含油量;待含油污水上升到保护区(配液高度为 1.8 m)后,关紧沉降筒进水口阀门,记下沉降开始时间;静置观察沉降现象,每隔 10 min 从沉降筒上高度为 1.065 m 的监测口取样两次,每次约 30 mL,测定所取水样含油量,得到含油量随沉降时间变化趋势如图 3 所示。

对沉降实验装置内含油污水的分离效果进行数值模拟,本文几何模型是沉降柱模型,其壁面为静止状态,无液体出入口,因此 Fluent 软件默认设置为壁面边界条件。根据实际油田联合站污水成分的组成,

数值模拟可将此作为参照,从而进行相关的模拟分析,参数设置:水的密度为 983 kg/m^3 ,油的密度为 864 kg/m^3 ,水的黏度为 $0.0007085 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,油的黏度为 $1.00285 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,含油量为 1023 mg/L 。定义操作条件,考虑到重力因素,Y方向重力加速度为 9.8 m/s^2 ,工作压强为 101.325 kPa ,不考虑温度变化的影响,设置时间步长为 0.1 s ,时间步数为 18000 ,进行迭代计算,得到高度为 1.065 m 监测口的含油量随沉降时间的变化情况如图4所示。

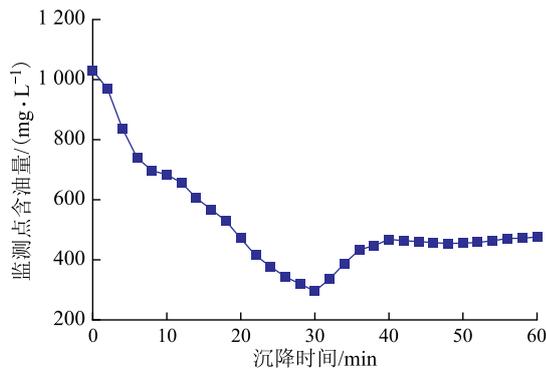


图3 监测点含油量的实验值变化曲线

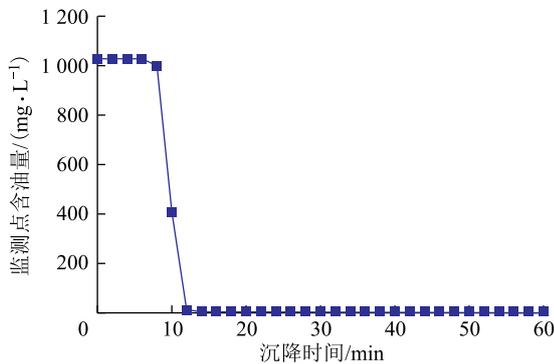


图4 监测点含油量的模拟值变化曲线

由图3可知,监测点含油量在沉降 $0\sim 30 \text{ min}$ 时间段内呈下降趋势,在 $30\sim 60 \text{ min}$ 时间段内略微提升而后趋于稳定。由图4可知,监测点含油量的模拟值随沉降时间的增加呈下降趋势,在 $0\sim 6 \text{ min}$ 时间段含油量略微降低,在 $6\sim 12 \text{ min}$ 时刻段变化尤为明显,在 $12\sim 60 \text{ min}$ 含油量趋于稳定。模拟值与实验值在 12 min 之后存在较大差异,其主要是由于在实际生产中,经联合站脱水处理后的含油污水含有固体悬浮物、分散油及浮油等多种成分,致使在这一空间发生了油滴聚集;同时考虑到在含油污水沉降过程中,配液温度下降,沉降筒壁附近发生液体对流现象,筒壁附近的油滴向下移动,移动的速度大于沉降筒中心部位油滴的上浮速度,因而监测口含油量存在略微上升现象;另外,在仿真模拟设置中,由于模拟条件的

简化,忽略了污水中的各种杂质、悬浮物及分散油等多种成分的影响。因此,忽略配液温度变化及污水中各种成分的影响,监测点含油量模拟值与实验值随沉降时间总体变化趋势基本一致,均呈逐渐下降趋势,因此本文研究内容选用PBM模型能够较为真实地描述室内沉降实验装置内油水沉降分离特性。

3 结果与分析

3.1 水相黏度影响

黏度是影响含油污水沉降分离效果的重要物性参数之一。在其他条件相同、不同水相黏度的情况下,分别对沉降实验装置内配液含油量为 10% 的分离效果进行数值模拟,得出了 6 min 时刻不同水相黏度下油相浓度分布情况,如图5所示;并绘制了不同水相黏度下高度为 1.665 m 监测点的含油量随沉降时间变化情况,如图6所示。

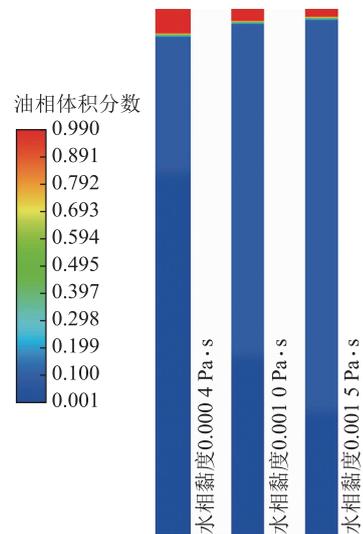


图5 6 min时刻不同水相黏度下油相浓度分布

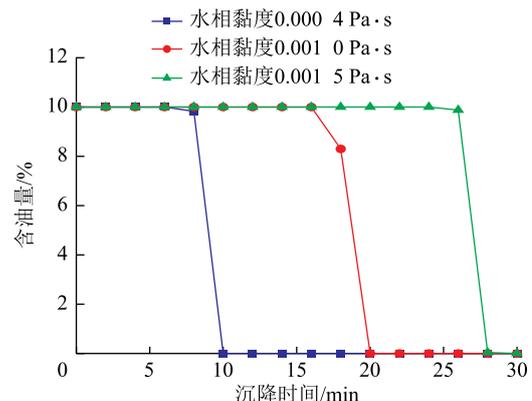


图6 不同水相黏度下监测点含油量变化

由图5可知,沉降时间 6 min 时,水相黏度越小

分离出的油层厚度更大,且油滴更容易从含油污水中分离出来上浮至顶部。由图 6 可知,沉降时间在 6 min 之前,监测点的含油量略微下降;沉降时间在 6 min 之后,在任意相同时刻,水相黏度越小,含油污水中油滴向上移动速度更快,优先完成了油水分离。由此可知,其他物性参数相同的条件下,含油污水静沉过程中,水相黏度低的含油污水沉降分离速度大于水相黏度高的含油污水沉降分离速度。

3.2 油相黏度影响

在其他条件相同,不同油相黏度下,分别对沉降实验装置内含油污水的分离效果进行数值模拟,得出了 6 min 时刻不同油相黏度下油相浓度分布情况,如图 7 所示;并绘制了不同油相黏度下高度为 1.665 m 监测点的含油量随沉降时间变化情况,如图 8 所示。

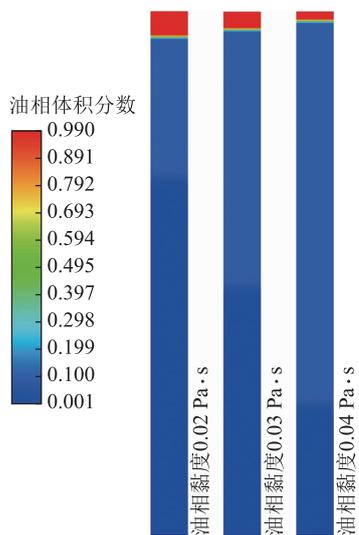


图 7 6 min 时刻不同油相黏度下油相浓度分布

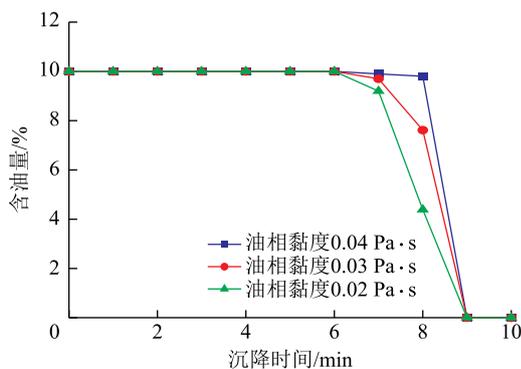


图 8 不同油相黏度下监测点含油量变化

由图 7 可知,沉降时间 6 min 时,油相黏度越小分离出的油层厚度更大,且油滴更容易从含油污水中分离出来上浮至顶部。由图 8 可知,沉降时间在 6 min 之

前,监测点的含油量无明显变化;沉降时间在 6~7 min 范围内,含油量略微变化;沉降时间在 6 min 之后,在任意相同时刻,油相黏度越小,含油污水中油滴向上移动速度更快,优先完成了油水分离。由此可知,其他物性参数相同的条件下,在含油污水静沉过程中,油相黏度低的含油污水沉降分离速度大于油相黏度高的含油污水沉降分离速度。

3.3 含油量影响

在其他条件相同,不同含油量的配液下,分别对沉降实验装置内含油污水的分离效果进行数值模拟,得出了 6 min 时刻不同含油量的配液下油相浓度分布情况,如图 9 所示;并绘制了不同含油量的配液下高度为 1.665 m 监测点的含油量随沉降时间变化情况,如图 10 所示。

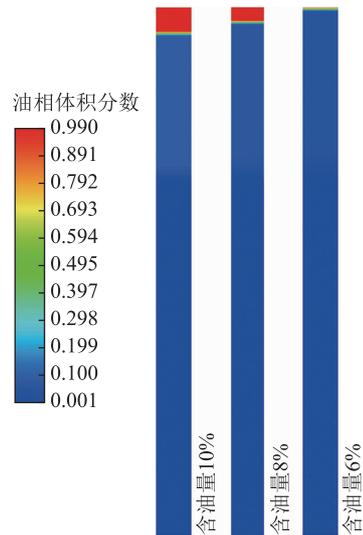


图 9 6 min 时刻不同含油量的配液下油相浓度分布

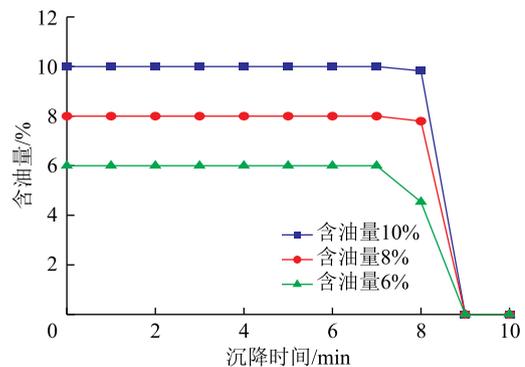


图 10 不同含油量的配液下监测点含油量变化

由图 9 可知,沉降时间 6 min 时,配液含油量越大分离出的油层厚度更大,且油滴更容易从含油污水中分离出来上浮至顶部。由图 10 可知,沉降时间在 7 min 之前,监测点的含油量基本保持不变;沉降时间在 7 min

之后,在任意相同时刻,配液的含油量越大,含油污水中油滴向上移动速度更快,优先完成了油水分离。由此可知,在其他物性参数相同的条件下,在静沉过程中,配液含油量大的含油污水沉降分离速度高于配液含油量小的含油污水沉降分离速度。

3.4 温度影响

在其他条件相同,不同温度下,分别对沉降实验装置内含油污水的分离效果进行数值模拟,得出了6 min时刻不同温度下油相浓度分布情况,如图11所示;并绘制了不同温度下高度为1.665 m监测点的含油量随沉降时间变化情况,如图12所示。

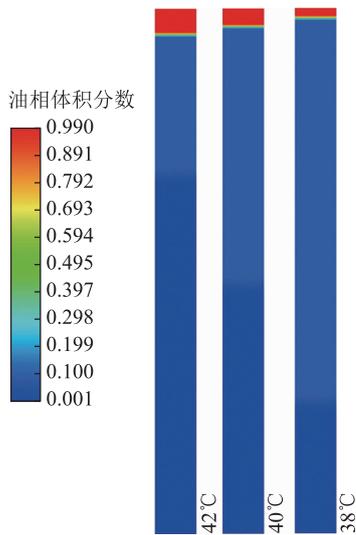


图11 6 min时刻不同温度下油相浓度分布

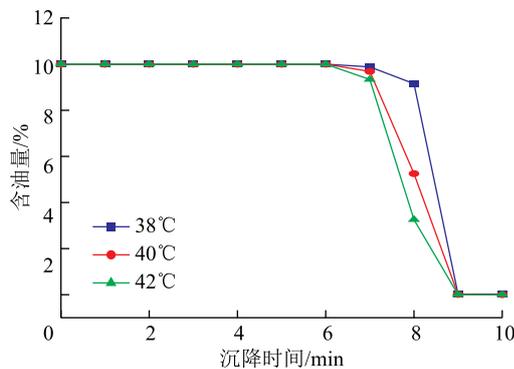


图12 不同温度下监测点含油量变化

由图11可知,沉降时间6 min时,温度越高分离出的油层厚度越大,且油滴更容易从含油污水中分离出来上浮至顶部。由图12可知,沉降时间在6 min之前,监测点的含油量无明显变化;沉降时间为6~7 min,含油量略微变化;沉降时间在7 min之后,在任意相同时刻,温度越高,含油污水中油滴向上移动速度更快,优先完成了油水分离。由此可知,在其他

物性参数相同的条件下,在含油污水静沉过程中,温度高的含油污水沉降分离速度大于温度低的含油污水的沉降分离速度。

4 结束语

本文设计搭建了含油污水沉降实验装置,运用Fluent软件,选用Mixture模型和RNG k- ϵ 模型基础上结合PBM模型,对含油污水沉降实验装置中含油污水的沉降分离过程进行数值模拟,通过室内沉降实验得到的含油量变化规律与数值模拟得到的基本保持一致,验证了模拟方法的可行性,并得到了油水沉降分离规律;当其他条件一定时,油水沉降分离速度与油水相黏度大小成反比,与配液的含油量及温度成正比。

参考文献

- [1] 杨显志.重力式油水分离器内部流场仿真及实验研究[J].科学技术与工程,2010,10(33):8230-8232.
- [2] 倪玲英,何利民.平行板油水沉降器中低雷诺数油滴运动模拟计算[J].化工机械,2009,36(5):459-462.
- [3] 任永良,张国鹏,高胜,等.油田含油污水沉降规律研究[J].化工机械,2021,48(3):349-354.
- [4] 张菁,庞艳萍,黎志敏,等.气浮选对含油污水沉降分离流场特性的影响[J].石油化工高等学校学报,2021,34(1):72-79.
- [5] 董珂.高含水油井采出液静置沉降分离装置[J].油气田地面工程,2014,33(2):95.
- [6] 张杰,胡海冰,魏利,等.高钙型三元采出水组成及静沉分离特性研究[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2014,30(4):430-433.
- [7] 安杉,陈家庆,蔡小垒,等.T型管内油水分离特性的CFD-PBM数值模拟[J].化工学报,2017,68(4):1326-1335.
- [8] 魏文礼,张泽伟,白朝伟,等.辐流式沉淀池进口挡板影响的液固两相流数值模拟[J].应用力学学报,2016,33(1):93-98.
- [9] 陈丽娜.立式沉降罐的流场模拟[D].青岛:中国石油大学(华东),2010:1-93.
- [10] WANG T, XIA Z, CHEN C. Coupled CFD-PBM simulation of bubble size distribution in a 2D gas-solid bubbling fluidized bed with a bubble coalescence and breakup model [J]. Chemical engineering science, 2019, 202: 208-221.
- [11] 刘洋.旋流-过滤耦合分离器的流场特性及油水分离机理研究[D].大庆:东北石油大学,2022:1-161.

(修回日期 2023-08-09)

(录用日期 2023-09-21)

(编辑 刘晓辉)