

# 重力沉降分离的数值模拟\*

龚道童 吴应湘 郑之初 郭军 张军 唐驰

(中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 采用商业软件 Fluent 程序对油水和油砂的重力沉降分离进行了数值模拟, 得到了与实验结果吻合较好的多种黏度、不同液滴和砂粒粒径情况下的重力沉降分离结果, 尤其是介质中包含多种粒径分布液滴的沉降分离结果。这对于确定油水和油砂重力沉降分离所需的时间和确定分离器容器的尺寸有很好的指导作用。

**关键词** 重力沉降, 油水分离, 液滴沉降, 颗粒沉降

## 1 引言

油气水分离和油气水砂分离是实现试验开采的重要工艺环节。目前油田使用的分离方法主要有重力沉降分离、离心分离、膨胀分离、静电分离等多种方式。重力沉降是最直接、最传统的分离方式。它具有操作简便、处理量大、消耗能源少等其他分离方式无法取代的优点, 因此虽然存在占地面积大、处理周期长等不足之处, 它仍然是油田上应用最为广泛的分离技术。

重力沉降分离是利用各相间密度相异的浮力作用来实现油水砂等多相介质的分离的。互不相溶的各相介质, 在重力作用下密度较大的逐渐向容器的底部移动, 密度较小的逐渐向容器的顶部运动而形成分层以达到分离的目的。重力沉降一般在沉降罐中进行, 其体积主要由处理量及重力分离速度决定。

油水两相重力沉降分离设备的设计最早是依据液滴按 Stokes 公式<sup>[1]</sup>的运动规律来确定的。该公式可以定性的说明液滴粒径、油水密度差、油的黏度等因素对沉降分离效率的影响, 但不能定量计算分离的确切效果。经过进一步的探索, 1904 年 Hazen 根据实践经验提出了“浅池理论”<sup>[2]</sup>, 他指出在重力沉降过程中, 分散而非结聚颗粒的沉降效果是颗粒的沉降速度和池子的面积的函数, 即重力沉降罐的处理能力仅仅与其底面积和混合液中液滴或是砂粒的沉降速度相关。随后关于重力沉降分离的研究也做了不少工作, 但大部分是围绕分离器部件的设计以及加工工艺的改进, 对重力沉降分离各参数影响的定量关系的研究还不够, 相关的数值模拟还没有较为成熟的结果。因此到目前为止设计重力沉降罐的准则主要还是依赖于实验和经验, 方法偏于保守, 设计尺寸偏大, 造成了不必要的材料和能量的消耗。因此, 有必要针对重力沉降分离各参数影响的定量关系进行深入细致的研究, 以便改变目前实际工程设计偏保守的落后状况。

---

中国科学院与中国海洋石油总公司科技合作项目; 中国科学院“十五”重大项目 (KJXC2-SW-L03)。

布以及黏度较大的稠油情况的油水和油砂重力沉降分离进行了系统的数值模拟，模拟中考虑了各相之间的相互作用以及油的不同黏度的影响。数值模拟得到的油水和油砂分离的计算结果与实验结果吻合较好。数值研究得到的油、砂的物性参数和沉降罐、砂粒的几何参数与分离效果的影响关系对确定重力沉降分离的速度，从而优化沉降罐的设计尺寸有着重要意义，特别是对设计用于承重有限、空间宝贵的海洋平台上的重力式分离器的意义尤为突出。还就导致输运、增压等设备工作效率严重下降的细微砂粒粒径范围和流动特性进行研究和分析，对防止这些砂粒的危害作用给出了合理建议。

## 2 基本方程

文中各符号含义如下：

$g$	——重力加速度	$\tau$	——颗粒迟豫时间
$\alpha$	——相含率	$d$	——粒子直径
$\rho$	——密度	$n$	——相的总数
$\bar{v}$	——速度	$v_{r,s}$	——末端速度
$\dot{m}_{pq}$	——p相到q相的质量传递	$e_{ls}$	——归还系数
$\tau_q$	——剪切应力张量	$C_{f,ls}$	——第l和第s相之间的摩擦系数
$\bar{F}$	——体积力	$g_{0,ls}$	——径向分布系数
$\bar{F}^{lift}$	——升力	下标 p	——液体相 p
$\bar{F}^{vm}$	——附加质量力	下标 q	——液体相 q
$K_{pq}$	——相间动量交换系数	下标 l	——液体相 l
$P$	——压力	下标 s	——固体相 s
$\bar{v}_{pq}$	——相间速度		

两相流基本方程如下：

### 2.1 连续方程

油水分离和油砂分离有着统一的连续方程。任意 q 相的连续方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \bar{v}_q) = \dot{m}_{pq} \quad (1)$$

### 2.2 液体—液体动量方程

油水分离中 q 相的动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \bar{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \bar{v}_q \bar{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \bar{g} + \alpha_q \rho_q (\bar{F}_q + \bar{F}_{lift,q} + \bar{F}_{vm,q}) + \sum_{p=1}^n (K_{pq}(\bar{v}_p - \bar{v}_q) + \dot{m}_{pq} \bar{v}_{pq}) \quad (2)$$

其中,  $p$  是各相共享的压力。 $\bar{v}_{pq}$  定义为: 如果  $\dot{m}_{pq} > 0$  (即  $p$  相的质量传递到  $q$  相), 则  $\bar{v}_{pq} = \bar{v}_p$ , 否则  $\bar{v}_{pq} = \bar{v}_q$ 。 $K_{pq}$  依赖于磨擦、压力、内聚力和其他的影响。对油水两相流, 假定第二项以液滴形式存在,  $K_{pq}$  可以写成如下形式:

$$K_{pq} = \alpha_p (\alpha_p \rho_p + \alpha_q \rho_q) f / \tau_{pq} \quad (3)$$

式中, 描述油滴或水滴迟豫时间的参数  $\tau_{pq}$  定义为

$$\tau_{pq} = \frac{(\alpha_p \rho_p + \alpha_q \rho_q) (d_p + d_q) / 2)^2}{18(\alpha_p \mu_p + \alpha_q \mu_q)} \quad (4)$$

参数  $f$  定义为:  $f = C_D Re / 24$ , 阻力系数  $C_D$  取为

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0.15 Re^{0.687}) / Re & Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases} \quad (5)$$

### 2.3 液体-固体动量方程

油砂分离中液体相动量方程同 (2), 固体相  $s$  的动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \bar{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \bar{v}_s \bar{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \bar{g} + \alpha_s \rho_s (\bar{F}_s + \bar{F}_{lift,s} + \bar{F}_{vm,s}) + \sum_{l=1}^n (K_{ls}(\bar{v}_l - \bar{v}_s) + \dot{m}_{ls} \bar{v}_{ls}) \quad (6)$$

油砂的交换系数  $K_{sl}$  表示为

$$K_{sl} = \frac{\alpha_s \rho_s C_D Re_s \alpha_l}{24 v_{r,s}^2 \tau_s} \quad (7)$$

其中, 颗粒的迟豫时间  $\tau_s$  定义为

$$\tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18 \mu_l} \quad (8)$$

曳力函数采用由 Dalla Valle<sup>[3]</sup> 给出的形式:

$$C_D = \left( 0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_s / v_{r,s}}} \right)^2 \quad (9)$$

这个模型是使用了体积分数和相对雷诺数的函数关系式<sup>[4]</sup>:

$$Re_s = \frac{\rho_l d_s |\bar{v}_s - \bar{v}_l|}{\mu_l} \quad (10)$$

砂粒之间的交换系数表示为<sup>[9]</sup>:

$$K_{ls} = \frac{3(1+e_{ls}) \left( \frac{\pi}{2} + C_{fr,ls} \frac{\pi^2}{8} \right) \alpha_s \rho_s \alpha_l \rho_l (d_l + d_s)^2 g_{o,ls}}{2\pi(\rho_l d_l^3 + \rho_s d_s^3)} |\bar{v}_l - \bar{v}_s| \quad (11)$$

式中, 对于固体相颗粒  $C_{fr,ls} = 0$ 。

## 2.4 湍流模型

重力沉降过程比较缓慢, 流场速度小于  $1.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$ , 黏性模型选择层流模式。

## 2.5 边界条件和初始条件

根据本文选定模型的特点, 流场边界设为固壁面边界条件, 即给定黏附条件, 速度和湍流度均为零。初始条件设为  $t=0$  时刻全流场各相混合均匀且速度为 0。

## 2.6 数值模型

油水分离和油砂分离均采用 Euler-Euler 法的 Eulerian 模型进行数值模拟。油水间相互作用选择 Symmetric 模型, 油砂间相互作用选择 Syamlal-O'Brien<sup>[6]</sup>模型。

# 3 数值模拟

## 3.1 计算模型

实验室收集油水混合液的容器是圆柱形有机玻璃桶, 每次实验流入桶内的液体高度约 0.4~0.5m (如图 1 所示)。为了与实验数据对比, 选取的计算模型是底面直径 1m 圆柱形容器, 容器内液面高度 0.41m。由于整个流场是轴对称的, 因此可以取一个轴截面进行计算, 将三维问题简化成二维问题。假设油水混合液中占多数体积的液体以连续介质的形式存在, 占少数体积的液体以液滴形式存在。本文选取了一系列的粒径进行计算。算例中选取的油水或是油砂体积比如图 2 所示。实际情况中含砂量一般低于 10%, 本文所取值为最大上限。

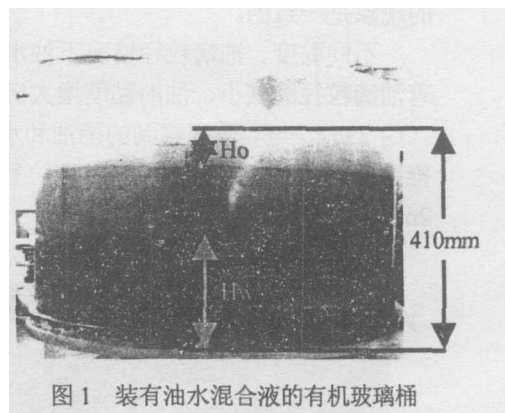


图 1 装有油水混合液的有机玻璃桶

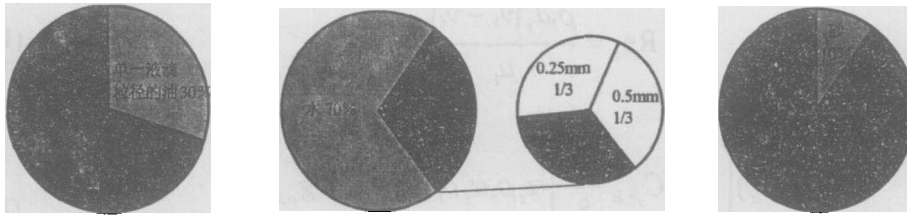


图2 混合液各相的体积分数

模型中各相物性参数如表1所示。

表1 各相物性参数

	水	油	砂
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	998.2	836	2580
黏度/( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )	1.003	31, 100, 300, 800	

### 3.2 数值计算方法

利用 Fluent 商用软件计算。该程序使用基于有限体积剖分的 SIMPLE 类算法<sup>[7]</sup>, 离散方程的求解采用 P-V 修正的分离求解算法<sup>[8]</sup>。

## 4 计算结果及分析

### 4.1 油水分离结果

计算结果显示, 容器中油水均匀混合物在重力作用下呈三层发展(如图3所示), 随着时间增长, 油层和水层的范围逐渐扩大, 过渡层逐渐缩小最终几乎消失。这与实验中观察到的现象是一致的。

不同黏度、油滴粒径情况下油水分离所需时间如表2所示。由表2的数据可以看出: 随着油滴粒径的减小、油的黏度增大沉降时间加长。表中最短时间为23s, 最长时间为82400s(约23h), 与实验观察到的稀油和水分离耗时几分钟, 稠油一天左右的时间相当, 据此可以推断重力沉降中绝大部分油滴粒径在0.15~2mm这个范围内。

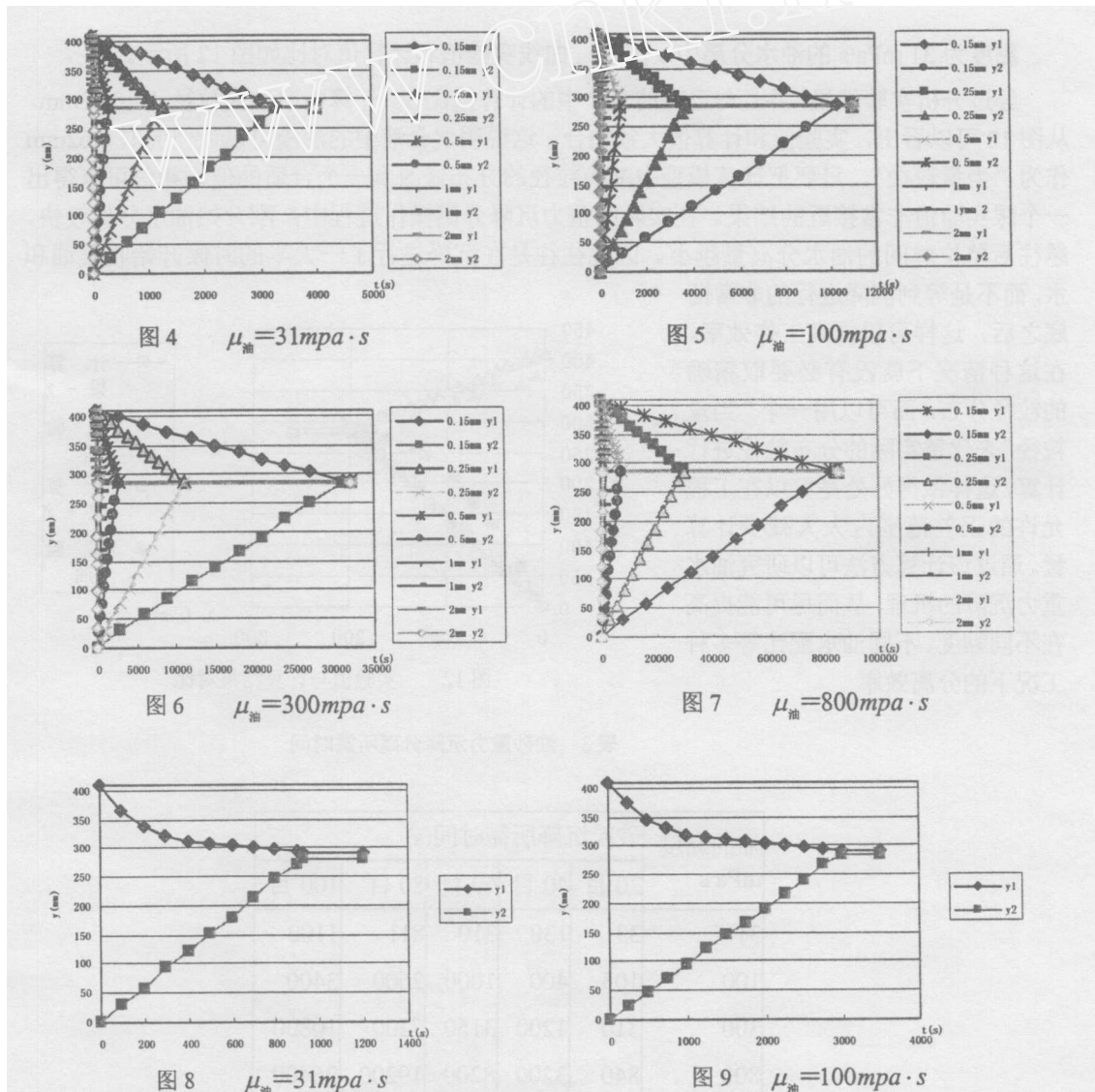
表2 油水重力沉降分离所需时间



图3 装有油水混合液的有机玻璃桶

黏度	完成分离所需时间(s)				
	$d=0.15\text{mm}$	$d=0.25\text{mm}$	$d=0.5\text{mm}$	$d=1\text{mm}$	$d=2\text{mm}$
31mPa·s	3300	1250	310	80	23
100 mPa·s	10300	3800	940	240	65
300 mPa·s	31200	11200	2800	720	180
800 mPa·s	82400	30000	7600	1860	475

油层和水层的纵坐标  $y_1$ 、 $y_2$  ( $y_1$ 、 $y_2$  定义如图 3 所示) 随时间  $t$  变化的曲线如图 4 至图 11 所示。图 4 至图 7 (所对应算例的油水配比如图 2 的第一幅图所示) 中  $y_1$ 、 $y_2$  随  $t$  呈线性变化, 图 8 至图 11 (所对应算例的油水配比如图 2 的第二幅图所示) 中  $y_1$ 、 $y_2$  曲线随着  $t$  增大逐渐变的平缓。实验中观察到的现象是: 随着时间加长油水的分离速度越来越慢, 最后很窄的过渡层彻底分层也需要很长的时间。显然图 8 至图 11 对应的沉降与实际情况更接近。这是因为实际的油水混合液中油滴的粒径肯定不是一个单一值而是一个分布, 图 8 至图 11 的算例中虽然只是比较粗略的取了一个分布, 也能在一定程度上反映出这种不均一的粒径对沉降结果的影响。



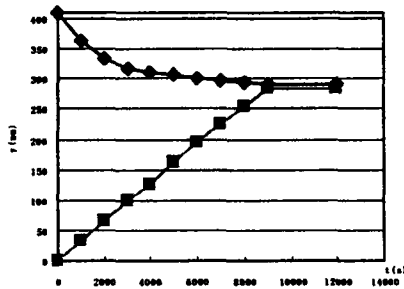


图 10  $\mu_{油}=300\text{mPa}\cdot\text{s}$

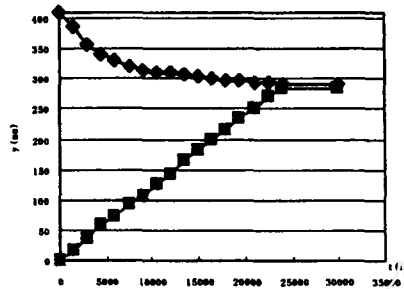


图 11  $\mu_{油}=800\text{mPa}\cdot\text{s}$

黏度为 31 mPa·s 的油水分离中  $y_1$ 、 $y_2$  曲线实验值和计算值对比如图 12 所示。

经过分析实验结果，并且与已有的表 2 中的计算值比较，计算中取油滴粒径  $d=0.62\text{mm}$ 。从图 12 可以看出，实验值和计算值大致吻合，这说明混合液中的油滴可以近似的取 0.62mm 作为“当量粒径”。只要把计算模型中油滴粒径的分布修改到一个合适的值，相信可以得出一个跟实验值非常接近的结果。在实际的重力沉降分离操作过程中，刚开始油水分离较快，越往后单位时间的油水分离量越小。因此往往是在沉降进行了一大半的时候开始收集油和水，而不是等到沉降进行的非常彻底之后，这样可以提高工作效率。在这种情况下就没有必要取精确的粒径分布，而可以用一个“当量粒径”来代替实际的分布粒径进行计算，这样做得好处是在工程允许的误差范围内大大减少计算量。通过该计算方法可以研究油水重力沉降的机理，从而尽可能提高在不同黏度、不同油水配比等多种工况下的分离效率

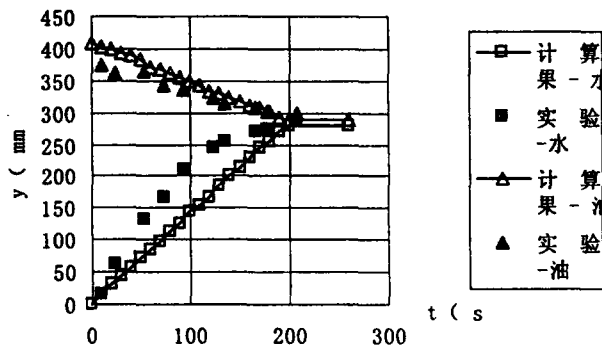


图 12 实验值与计算结果对比

表 3 油砂重力沉降分离所需时间

油的黏度 mPa·s	砂粒沉降所需时间(s)				
	20 目	40 目	60 目	80 目	100 目
31	33	130	310	811	1100
100	105	400	1000	2600	3400
300	310	1200	3150	7200	10800
800	840	3200	8200	19200	26400

## 4.2 油砂分离结果

油砂分离的情况和油水分离类似。不同之处在于过渡层不如油水分离的那么均一，特别是过渡层与上面的油层或是下面的砂粒堆积层界线范围比较大。沉降过程中砂粒浓度分布随时间变化如图 13 所示。不同粒径砂粒在多种黏度油中沉降分离所需时间如表 3 所示。表中的数据反映出砂粒粒径越小、油的黏度越大，沉降所需时间越长，反之越短。细微的砂粒在稠油中通过重力沉降分离比较困难，效率很低，应采用普析器等设备分离。

在除砂实验中观察到油砂混合液经过长时间静置后，液体表面仍然漂浮着一层很细小的砂粒，这些砂粒很难沉降下来，只有通过其他手段才能分离。在采油以及石油运输的过程中，这些细砂很容易在增压泵等部位产生淤积，从而加速设备的损坏并且严重影响设备的工作效率。根据油砂重力沉降的计算结果就可以推算出这些砂粒的粒径范围，从而在设备适当的环节采取相应的手段有效地清除这些细砂，提高工作效率，延长设备的寿命。

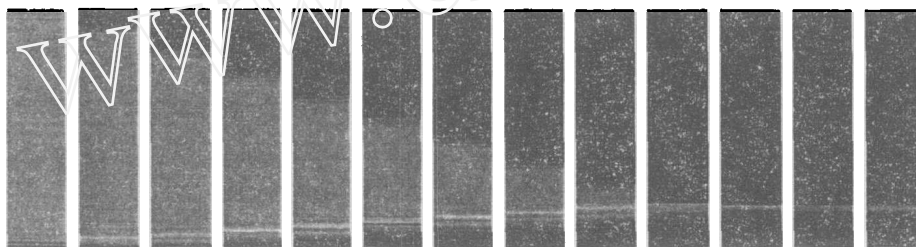


图 13 砂粒浓度分布随时间变化

## 5 结论

- (1) 本研究所用方法可以成功地模拟油水以及油砂在重力沉降原理下的分离现象。
- (2) 油的黏度越大、油滴或是砂粒的粒径越小分离所需时间越长，反之越短。
- (3) 对于粒径太小或是油的黏度较大的情况，重力沉降分离效率很低，应该考虑用其他手段分离。

将本研究的方法用于实际尺寸下的重力沉降计算，可实现对重力沉降罐的设计尺寸的指导作用。

## 参考文献

- 1 冯叔初等. 油气集输. 北京: 石油大学出版社, 1988.
- 2 王恩长. 玻纹斜板除油装置试验. 油田设计, 1979, 1-2: 61.
- 3 J. M. Dalla Valle. Micromeritics. Pitman, London, 1948.
- 4 J. R. Richardson and W. N. Zaki. Sedimentation and Fluidization: Part I. Trans. Inst. Chem. Eng., 1954, 32: 35-53.
- 5 M. Syamlal. The Particle-Particle Drag Term in a Multiparticle Model of Fluidization. National Technical Information Service, Springfield, VA, 1987. DOE/MC/21353-2373, NTIS/DE87006500
- 6 M. Syamlal and T. J. O'Brien. Computer Simulation of Bubbles in a Fluidized Bed. AIChE Symp. Series, 1989, 85: 22-31.
- 7 J.P. Vandoormaal, G.D. Raithby. Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows. Heat Transfer[M], 1984(7), 147-163.
- 8 J.L. Ferziger, M. Peric. Computational Methods for Fluid Dynamics[J]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.



# Numerical simulation of the separation of gravity settlement

Gong Dao-tong   Wu Ying-xiang   Zheng Zhi-chu

Guo Jun   Zhang Jun   Tang Chi

( Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080, China;

Email-gongdaotong@tsinghua.org.cn)

**Abstract:** The separation of oil-water and oil-sand gravity settlement was simulated numerically by the commercial software Fluent in this paper. The settlement results of different oil droplets and sand particles sizes especial some oil droplet size distributions with several viscosities were obtained, which agreed well with the experimental data. It is significant to judge the settling velocity and decide the proper projected dimension for separator.

**Key words:** gravity settlement; oil-water separation; droplet settlement; granulation settlement