

文章编号:1673-5005(2006)03-0089-04

## 泡沫流体携砂能力的数值模拟

杨肖曦<sup>1</sup>, 李松岩<sup>1</sup>, 林日亿<sup>1</sup>, 孙茂盛<sup>2</sup>, 张立<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中石化 胜利油田有限公司, 山东 东营 257060)

**摘要:**泡沫流体广泛应用于油井的冲砂洗井作业中, 携砂能力是衡量其性能的一项重要指标。利用 FLUENT 软件中的分散相模型对泡沫流体的携砂能力进行了数值模拟, 得到了不同直径的砂粒在泡沫流体中的携砂率和停留时间随环空管道倾角的变化关系, 与相同条件下水的携砂性能进行了比较, 并进行了定性分析。从模拟结果可以看出泡沫流体具有良好的携砂能力, 而且更适合于水平井的冲砂洗井。

**关键词:**泡沫流体; 冲砂洗井; 数值模拟; 携砂率; 停留时间; 水平井

**中图分类号:** TE 358 **文献标识码:** A

## Numerical simulation for prop-carrying capacity of foam fluid

YANG Xiao-xi<sup>1</sup>, LI Song-yan<sup>1</sup>, LIN Ri-yi<sup>1</sup>, SUN Mao-sheng<sup>2</sup>, ZHANG Li<sup>2</sup>

(1. College of Transport & Storage and Civil Engineering in China University of Petroleum,

Dongying 257061, Shandong Province, China;

2. Shengli Oilfield Limited Company in China Petrochemical Corporation, Dongying 257060, Shandong Province, China)

**Abstract:** Foam fluid is widely used in sand-flushing operations in oilfield, and prop-carrying capacity of foam fluid is very important. Numerical simulation for prop-carrying capacity of foam fluid was conducted using discrete phase model in FLUENT. The relations of sand carrying rate and residence time in foam fluid to inclination angle of annular pipe were given. The prop-carrying capacity of foam fluid was compared with that of water on the same condition, and qualitative analyses were provided. The results show that prop-carrying capacity of foam fluid is much better, and it is especially suitable for sand-flushing of horizontal well.

**Key words:** foam fluid; sand-flushing; numerical simulation; sand carrying rate; residence time; horizontal well

泡沫流体由于具有密度小、滤失量小、携砂性能好、助排能力强、对地层伤害小等优良特性, 广泛应用于低压、漏失和水敏性地层的钻井、完井、修井和油气井增产措施<sup>[1-2]</sup>。在国外泡沫流体应用于油田施工已有 40 多年的历史, 我国油田近年来在泡沫流体应用方面也积累了一定的经验。在泡沫流体的应用中, 携砂能力是衡量其性能的一项重要指标。有的学者从建立多相流模型入手对泡沫流体的携砂能力进行了研究<sup>[3-4]</sup>, 有的则进行了实验研究<sup>[5]</sup>, 但前人的研究结果与工程实际应用相差较远。笔者利用流体力学数值计算软件 FLUENT 对泡沫流体的携砂能力进行数值模拟, 以期得到一些可以指导工程应用的结果。

### 1 水平井冲砂洗井技术工艺流程

水平井冲砂洗井分正循环和反循环两种工艺流程, 本文中对冲砂洗井的正循环工艺进行分析, 其流程如图 1 所示。冲砂液从井口的油管注入, 到达井底后携带砂粒从环空返回, 达到清除井底出砂的目的。

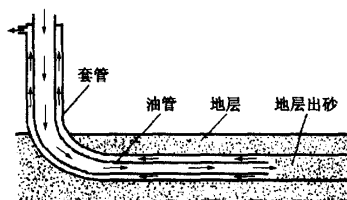


图 1 水平井冲砂洗井正循环流程

收稿日期: 2005-12-01

作者简介: 杨肖曦(1963-), 女(汉族), 江苏海门人, 副教授, 硕士, 从事锅炉和节能方面的教学及科研工作。

## 2 物理模型

建立了如图2所示的环空管道流动模型,其内径0.076 m,外径0.128 m,长度10 m。环空管道横断面划分的网格数为6 666,体网格数为166 650。环空的倾角可以在0~90°任意改变,当环空管道水平放置时,倾角为0°;当环空管道竖直放置时,倾角为90°。环空入口边界设定为速度入口,出口边界设定为自由出流边界,壁面处采用无滑移边界条件。计算砂粒在泡沫中的运动规律采用了离散相模型,入口时砂粒的体积分数为3%,砂粒均匀分布在入口截面上。泡沫流体采用幂律非牛顿流体模型,根据实验测得其稠度系数 $K=1.355 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ ,幂律指数 $n=0.324$ 。

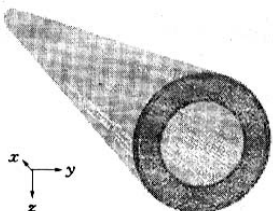


图2 物理模型

## 3 数学模型

对于所有的流动,FLUENT软件都是解质量守恒和动量守恒方程<sup>[6]</sup>。对于包括热传导或可压缩性的流动,需要解能量守恒的附加方程。对于包括组分混合和反应的流动,需要解组分守恒方程或者使用PDF模型来解混合分数的守恒方程及其方差。当流动是湍流时,还要解附加的输运方程。

### 3.1 质量守恒方程

质量守恒方程又称连续性方程,其形式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m.$$

该方程是质量守恒方程的一般形式,它适用于可压缩流动和不可压缩流动。源项 $S_m$ 是从分散相中加入到连续相的质量,也可以是任何的自定义源项。

### 3.2 动量守恒方程

在惯性(非加速)坐标系中 $i$ 方向上的动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i.$$

式中, $p$ 为静压力,Pa; $\tau_{ij}$ 为应力张量, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$ ; $\rho g_i$ 和 $F_i$ 分别为 $i$ 方向上的重力体积力和外部体积

力, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}^2)$ 。 $F_i$ 包含了其他的模型相关源项,如多孔介质和自定义源项。

### 3.3 幂律流体的本构方程

通常把泡沫流体当作幂律非牛顿流体,其本构方程<sup>[7]</sup>为

$$\tau = K \dot{\gamma}^n.$$

### 3.4 颗粒的作用力平衡方程

FLUENT中通过积分拉氏坐标系下的颗粒作用力微分方程来求解离散相颗粒(液滴或气泡)的轨迹。颗粒的作用力平衡方程表示为颗粒惯性力等于作用在颗粒上的各种力之和的形式, $x$ 方向的方程为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x.$$

式中, $u$ 和 $u_p$ 分别为流体速度和颗粒速度, $\text{m/s}$ ; $\rho$ 和 $\rho_p$ 分别为流体密度和颗粒密度, $\text{kg/m}^3$ 。

## 4 计算结果及其分析

### 4.1 砂粒在泡沫流体和水中的携砂率及停留时间

携砂率 $\eta$ 是指流体携带出环空管道的砂粒质量与环空入口砂粒总质量之比,它表示出了流体的携砂性能。停留时间 $t$ 是指可以被流体携带出环空管道的砂粒从环空管道入口运动到出口所经历的时间,它表示了砂粒的运动速度。以流体入口平均速度为0.3 m/s为例进行计算,结果如图3( $d$ 为砂粒直径)所示。

从图3可以看出,直径小于0.5 mm的砂粒,携砂率随倾角变化不大;直径为0.6~1.0 mm的砂粒,携砂率随倾角的增大而增大;直径为1.2~1.8 mm的砂粒,携砂率随倾角的增大先减小后增大,倾角在45°左右时携砂率最小。在相同倾角情况下,大直径砂粒的携砂率小于小直径砂粒的携砂率,即砂粒直径越大,越不容易被携带。

当砂粒直径很小时( $d < 0.5 \text{ mm}$ ),砂粒基本上可以悬浮在泡沫中并随泡沫一起运动,所以环空倾角对携砂率基本上没有影响;当砂粒直径较大( $0.6 \text{ mm} < d < 1.0 \text{ mm}$ )时,砂粒会沉在环空底侧,与壁面产生一定的摩擦,倾角小时,重力在垂直壁面方向的分力大,摩擦力大,倾角大时,重力在垂直壁面方向的分力小,摩擦力小,所以携砂率会随倾角的增大而增大;当砂粒直径大到一定程度( $1.2 \text{ mm} < d < 1.8 \text{ mm}$ ),倾角为45°左右时,如果泡沫流体不能将砂粒携带出环空管道,砂粒会沿环空底部向下滑,使得45°时砂粒最不容易被携带,携砂率最低,这与文献[5]中的结论一致。

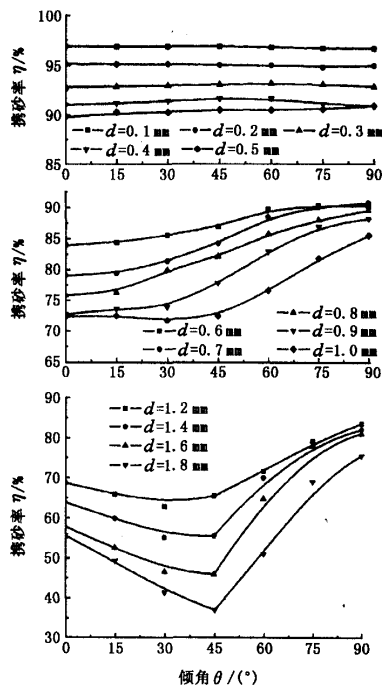


图3 泡沫流体的携砂率

图4为砂粒在泡沫流体中的停留时间曲线。从图4可以看出,直径小于0.8 mm的砂粒,在环空管道中的停留时间随倾角的变化不大;直径为0.9~1.8 mm的砂粒,在环空管道中的停留时间随倾角的增大而减小。对于相同的倾角,直径大的砂粒的停留时间大于直径小的砂粒的停留时间。这是由于直径较小的砂粒可以较好地悬浮在泡沫中,随泡沫一起运动,所以停留时间随环空管道倾角的变化不大。直径较大的砂粒,在接近水平的环空管道中会沉积在管道底侧,与壁面产生摩擦力,使得运动速度减慢,停留时间变长;而在接近竖直的环空管道中,不会出现沉积在管道底侧的现象,不会与壁面产生摩擦力,运动速度较快,停留时间较短。

图5和图6分别为水的携砂率曲线和砂粒在水中的停留时间曲线。从图5,6可以看出,对直径很小的砂粒( $d < 0.2$  mm)而言,水的携砂率随倾角的增大而增大;直径大于0.5 mm的砂粒,在倾角较小时水的携砂率为零,当倾角大于某一个角度时,携砂率迅速增加。直径小于0.2 mm的砂粒,在水中的停留时间随倾角的变化不大,但要大于相同条件下在泡沫流体中的停留时间。这是因为与泡沫流体相比,水的悬浮能力较差,在环空倾角较小时,砂粒会沉积在环空底侧,而水的粘度较小,对砂粒的曳力不

足以克服砂粒与壁面之间的摩擦力,使得携砂率较小,甚至为零。当倾角大于某一值时,水对砂粒的曳力可以克服砂粒与壁面之间的摩擦力,携砂率会迅速增大。

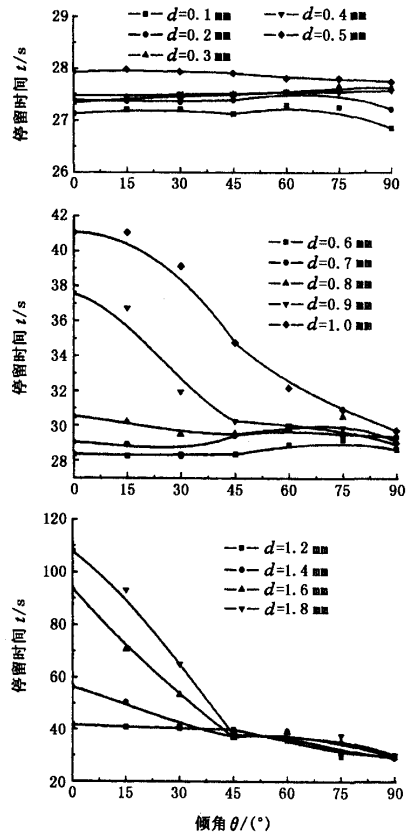


图4 砂粒在泡沫流体中的停留时间

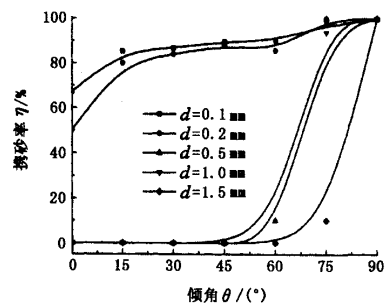


图5 水的携砂率

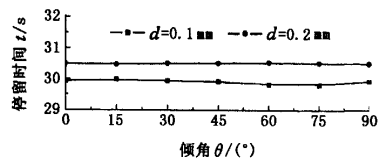


图6 砂粒在水中的停留时间

## 4.2 砂粒在泡沫和水中的携砂性能对比

通过比较泡沫流体和水在环空管道中的携砂性能(图7)可以看出,在接近水平的环空管道(倾角小于 $60^\circ$ )中,泡沫流体的携砂性能远远大于水的携砂性能;而在接近竖直的环空管道(倾角大于 $60^\circ$ )中,水的携砂性能稍大于泡沫流体的携砂性能。水平段的差别是由于泡沫流体比水具有较高的粘度和较强的悬浮能力,在水平段砂粒能较好地悬浮在泡沫流体中,随泡沫一起运动,而在水中砂粒会很快沉积在

管道底侧,与壁面产生摩擦,难于被携带。在竖直段水的携砂率稍大于泡沫流体的携砂率,这是由流态不同造成的。泡沫流体粘度较大,流速为 $0.3\text{ m/s}$ 时处于层流状态,具有较厚的速度边界层,边界层内流速较小,携砂率较小;而水处于紊流状态,边界层较薄,边界层的存在对携砂率的影响较小。这表明泡沫流体更适用于水平井冲砂洗井,与文献[5]中结果一致。

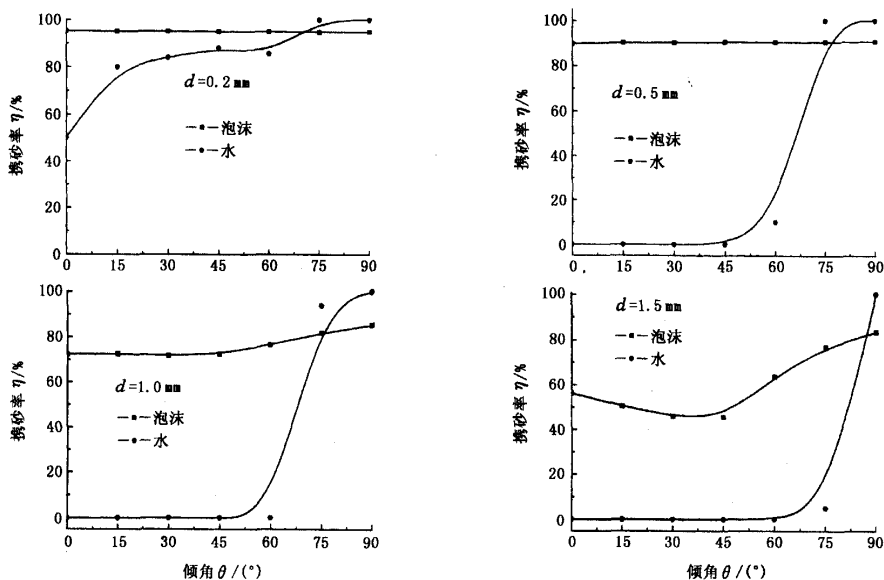


图7 泡沫和水的携砂性能对比

## 5 结论

(1)泡沫流体对不同直径的砂粒的携砂率随环空倾角有着不同的变化关系,直径较小( $d < 0.5\text{ mm}$ )的砂粒,携砂率随倾角变化不大;中等直径( $0.6\text{ mm} < d < 1.0\text{ mm}$ )的砂粒,携砂率随倾角的增大而增大;直径较大( $1.2\text{ mm} < d < 1.8\text{ mm}$ )的砂粒,携砂率随倾角的增大先减小后增大,倾角在 $45^\circ$ 左右时携砂率最小。相同倾角下,直径大的砂粒的携砂率小于直径小的砂粒的携砂率,即砂粒直径越大,越不容易被携带。

(2)直径较小( $d < 0.8\text{ mm}$ )的砂粒在泡沫流体中的停留时间随环空倾角的变化不大,直径较大( $0.9\text{ mm} < d < 1.8\text{ mm}$ )的砂粒,停留时间随环空倾角的增大而减小。

(3)在接近水平的环空管道,泡沫流体的携砂能力远远大于水的携砂能力;而在接近竖直的环空管

道中,水的携砂能力稍大于泡沫流体的携砂能力,泡沫流体更适合于水平井的冲砂洗井。

## 参考文献:

- [1] 李治龙,钱武鼎.我国油田泡沫流体应用综述[J].石油钻采工艺,1993,11(1):1-5.  
LI Zhi-long, QIAN Wu-ding. Survey on the application of foam fluid in China oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1993,11(1):1-5.
- [2] 刘伟,董胜祥,曹子龙.泡沫洗井工艺的研究及应用[J].钻采工艺,2002,25(2):45-49.  
LIU Wei, DONG Sheng-xiang, CAO Zi-long. Research and application of foam well flushing technology[J]. Drilling & Production Technology, 2002,25(2):45-49.
- [3] EVREN M, OZBAYOGLU, STEFAN Z, et al. Cuttings transport with foam in horizontal & highly-inclined wellbores[R]. SPE 79856, 2003.

(下转第96页)

体平均碳含量的0.64倍以下时,贫碳区先共析扩散相变模型获得比类珠光体方式转变更大的相变驱动力,且随着奥氏体贫碳区碳含量的降低两者相差更大。AF在奥氏体贫碳区先共析扩散转变在热力学上是完全可能的。

(3)为研究方便,本文中只是从扩散角度分析了针状铁素体在奥氏体贫碳区的热力学可能性,至于切变转变的可能性及两者间的联系还有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 雷毅,余圣甫,许晓锋.微米级超细晶粒钢细化技术的研究进展[J].兵器材料科学与工程,2005,28(2):62-66.  
LEI Yi, YU Sheng-fu, XU Xiao-feng. Research progress of fining technology for micro-scale ultra-fine grain steel [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 28(2):62-66.
- [2] 余圣甫,雷毅,黄安国,等.氧化物冶金技术及其应用[J].材料导报,2004,18(8):50-52.  
YU Sheng-fu, LEI Yi, HUANG An-guo, et al. Oxides metallurgy technology and its application [J]. Materials Review, 2004, 18(8):50-52.
- [3] 张国栋,李志远,王永生,等.低合金高强度钢焊缝针状铁素体转变动力学及其仿真[J].电焊机,2002,32(6):9-12.  
ZHANG Guo-dong, LI Zhi-yuan, WANG Yong-sheng, et al. Calculation and simulation of AF transformation kinetics in HSLA steel weld [J]. Electric Welding Machine, 2002, 32(6):9-12.
- [4] 张德勤,雷毅,刘志义.微合金钢焊缝金属中的针状铁素体[J].石油大学学报:自然科学版,2003,27(4):141-145.  
ZHANG De-qin, LEI Yi, LIU Zhi-yi. Acicular ferrite in weld metal of micro-alloy steel [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27(4):141-145.
- [5] 贾虎生,康沐狂.贝氏体预转变研究[J].金属热处理学报,1998,19(2):6-10.  
JIA Hu-sheng, KANG Mo-kuang. Study on pre-bainitic transformation [J]. Transactions of Metal Heat Treatment, 1998, 19(2):6-10.
- [6] 方鸿生,王家军,杨志刚,等.贝氏体相变[M].北京:科学出版社,1999:321-323.
- [7] 徐祖耀.相变原理[M].北京:科学出版社,1988:90-91.
- [8] DARKEN L S, GURRY R W. Physical chemistry of metals[M]. New York: McGraw-Hill, 1953:397, 401.
- [9] 韩顺昌.针状铁素体的物理冶金学[J].材料开发与应用,1995,10(5):2-7.  
HAN Shun-chang. Physical metallurgy of acicular ferrite [J]. Development and Application of Material, 1995, 10(5):2-7.

(编辑 修荣荣)

(上接第92页)

- [4] CLARK R K, BICKHAM K L. A mechanistic model for cuttings transport[R]. SPE 28306, 1994.
- [5] STEPHANE Saintpere, YANNICK Marcillat. Hole cleaning capabilities of foams compared to conventional fluids [R]. SPE 63049, 2000.
- [6] 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M].北京:北京理工大学出版社,2004.
- [7] 李兆敏,蔡国琰.非牛顿流体力学[M].东营:石油大学出版社,2001.

(编辑 沈玉英)

## 中国石油大学(华东)“分支井钻井完井设计技术研究”通过验收

由中国石油大学(华东)孙宝江教授主持完成的中石油“十五”科技攻关项目“分支井钻井完井设计技术研究”,日前通过了中石油辽河油田组织的验收。科研人员在对国内外分支井钻井完井技术广泛调研基础上,根据辽河油田的地质特征,研究得到了符合辽河油田地质和油藏特征的分支井轨迹设计方法、分支井最佳的开窗位置;研究了分支井特有的钻井工艺所需要的钻具组合,设计了能满足工程实际需要的钻具和分支井完井管柱方案;用有限元理论给出了分支井弯曲井段套管径向变形计算方法;完成了分支井钻井完井设计软件的开发。

(摘自中国石油大学(华东)校园网)