

# 雾状流掺混下稠油流动的数值研究

徐文凯<sup>1,2</sup>, 顾成曦<sup>1,2</sup>, 许晶禹<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院大学工程科学学院, 北京, 100049;

<sup>2</sup>中国科学院力学研究所, 北京, 100190, Email: xujingyu@imech.ac.cn)

**摘要:** 世界上已探明的超稠油储量是传统轻质稠油的两倍多。在塔河油田, 掺稀降黏的开采效果不是很理想。为达到稀油较为均匀的分布效果, 本研究提出将一个压力旋流式雾化喷嘴安装在模型套筒一侧的方法, 使得稀油液滴雾化并与稠油进行掺混, 通过数值模拟的方法, 重点研究液滴在二次破碎雾化后的物理性质, 并模拟雾化的液滴与底部的稠油的掺混情况。数值模拟结果表明, 液滴尺寸增加, 液滴聚并现象明显, 在整个流场内形成较为均匀分布的液膜和液滴, 同时底部气液也有较好的搅动效果。验证了该方法的可行性和实用性。

**关键词:** 稀油雾化; 气液掺混; 数值模拟

## 1 引言

位于塔里木盆地的塔河油田碳酸盐岩油藏探明地质储量13.3亿t, 稠油储量约为7.54亿t, 占总储量的57%, 稠油占总产量的60%左右。由于稠油的超黏性质, 塔河油田面临资源禀赋大却难以开采的困境。虽然常规的SAGD、蒸汽热采等方法适用性很强<sup>[1-7]</sup>,

随着掺稀降黏工艺的推广应用, 塔河油田稠油掺稀生产面临着稀油资源供应不足的问题。为了缓解这些问题, 达到增加掺稀降黏幅度, 提高稀油利用率的目标, 急需对目前掺稀工艺进行合理优化<sup>[8]</sup>。

因此, 本研究提出稀油雾化的方法, 即把稀油通过喷嘴喷入井筒内, 使之成为雾状的小液滴, 到达底部后, 不会像连续柱状的稀油一样窜跳, 而是均匀地与底层的稠油掺混。通过数值模拟的方法, 探讨雾化液滴在套管内的流动特性以及混合液流动掺混和举升的情况。

## 2 数学方程

### 2.1 DPM 模型

平衡方程可以描述为:

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \frac{\mathbf{u} - \mathbf{u}_p}{\tau_r} + \frac{\mathbf{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \mathbf{F} \quad (1)$$

其中,  $\frac{\mathbf{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$  为重力项,  $\frac{\mathbf{u} - \mathbf{u}_p}{\tau_r}$  为单位质量颗粒的拖曳力 (气流阻力), 且有:

$$\tau_r = \frac{4\rho_p d_p^2}{3\mu C_d Re} \quad (2)$$

式中,  $\tau_r$  为液滴或者颗粒的松弛时间,  $\mathbf{u}$  为连续相的速度,  $\mathbf{u}_p$  为离散项速度,  $\mu$  为连续相动力黏度,  $\rho$  为连续相的密度,  $\rho_p$  为离散项的密度,  $\mathbf{g}$  为重力加速度,  $d_p$  为离散项直径。  $Re$  为相对雷诺数。

## 2.2 VOF 模型

连续性方程:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{u}) = 0 \quad (8)$$

动量方程:

通过求解整个区域内单一的动量方程, 得到速度场是由各相共同作用和共享的。动量方程取决于通过的  $\rho$  和  $\mu$  的体积比率, 方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}. \quad (9)$$

式中, 上式中的  $\rho$  和  $\mu$  为多项混合液的物性参数,  $p$  是压力,  $\mathbf{F}$  是界面的相互作用力。

## 3 数值方法

应用ICEM软件建立几何模型并生成网格, 利用FLUENT软件进行数值模拟。

### 3.1 数值模拟模型

为了减少计算量, 本研究模拟采用总高度为3m的套管, 套管的上方的一侧装配一个喷嘴通道, 具体的几何模型如图1所示。

### 3.2 网格生成和数值模拟方法

采用非结构网格。由于几何模型中管壁一侧附有喷嘴装置, 考虑到此非对称结构会导致内部产生旋流场, 因而采用RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型。压力项和动量项的离散分别采用PRESTO方式和QUICK方式, 其他项用二阶迎风格式离散以提高计算精度。压力和速度的耦合通过SIMPLE算法实现。液滴离散项采用DPM模型, 为了对气液掺混的界面进行捕捉, 采用VOF模型。另外, 在使用VOF模型时, 为了把Courant数控制在1以下, 计算时间步长设置为0.0001s。

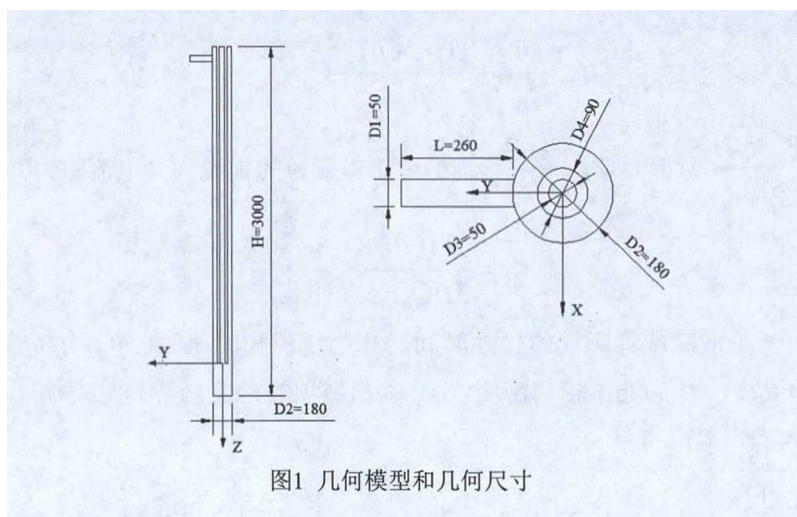


图1 几何模型和几何尺寸

## 4 数值模拟结果及分析

利用 Fluent 中的 pressure-swirl-atomizer 模型，其释放特性参数：质量流率为 0.01kg/s，喷洒角度为  $20^\circ$ 。流场内是的气体为天然气，稀油采用柴油，不考虑温度效应。考虑到液滴的破碎、聚并、和离散运动。同时，在底部 patch 一片区域使之充盈稠油。喷嘴的进口压力分别取 4MPa，8MPa，12MPa 三种工况。（在实际的生产过程中，由于井筒超长、埋藏超深，需要在入口另注入高压天然气）。

### 4.1 稀油雾化

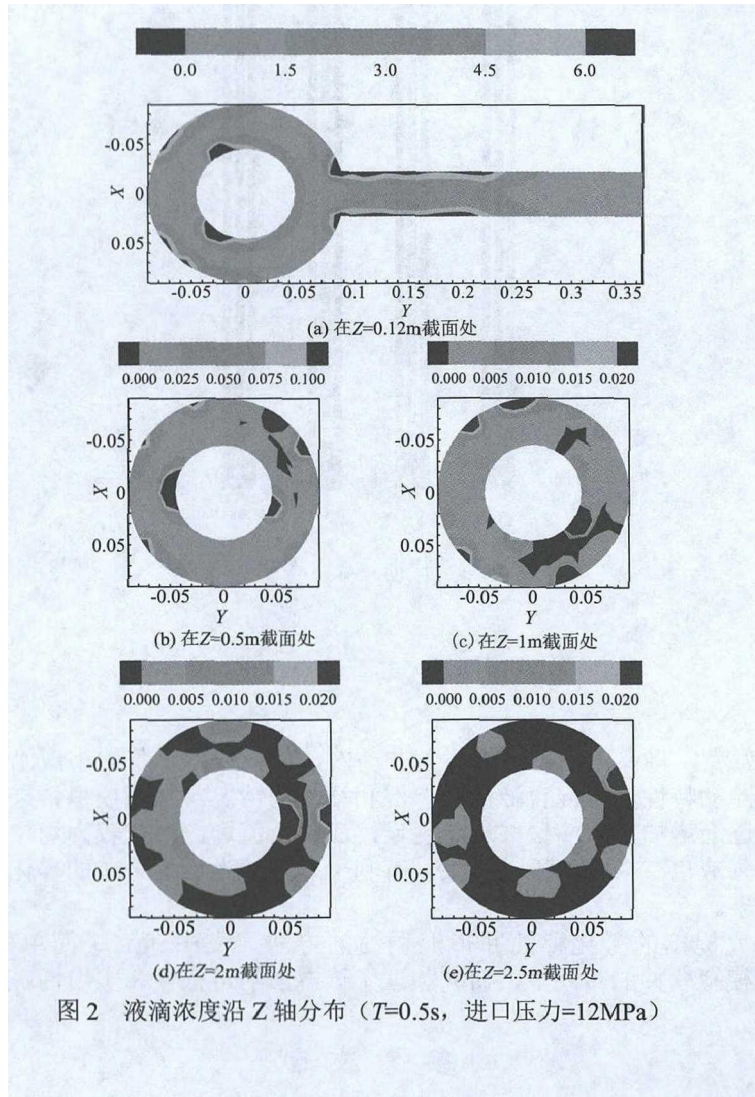
液滴在向下的过程中直径增加，发生了较大的液滴聚并情况。进口压力越小，压降越难以克服空气阻力，导致液滴速度越低，更易聚并。即使由于空气阻力的存在，液滴聚并的同时也在发生着破碎，不过，破碎后液滴的直径一般小于  $1\mu\text{m}$ ，难以捕捉测量，这里不作分析。由于模型结构的特殊性，液滴从入口喷射后，绕着环空管向下旋转流动，在此过程中，形成一定的旋流场。在空气阻力的作用下，速度降低，相较于破碎，聚并的现象更为明显。液滴速度降低聚并后，黏附在管壁上形成大小、厚度不一的液膜。图 2 描述了进口压力为 12MPa， $T=0.5\text{s}$  时液滴浓度沿 Z 方向 0.12m，0.5m，1m，2m，2.5m 截面处的分布情况，液滴浓度自上而下逐渐降低。值得注意的是，图 2 (a) 所在的截面包含了喷嘴通道的轴截面，水平喷射出的液滴在该段大量集聚，剧烈碰撞，液滴聚并程度大，液滴浓度最大达到  $6\text{kg}/\text{m}^3$ 。从图 2 (e) 中可以看出，在模型环空部分的底部，液滴浓度最低，形成的液膜也较少，但是液膜分布均匀。因此，在底部形成较为均匀分布的液滴和液膜，相较于直接注入连续液体的方法，能与底部的稠油段有更大的接触面积，提升了了掺混的效果。

### 4.2 气液掺混情况

实际上，掺稀降黏的前提要有气举工艺，即天然气气体与底部的稠油充分掺混，剧烈翻腾，这时在管内流场中较为均匀分布的向下运动的液滴和液膜，才能够在翻腾的稠油的裹挟下与之掺混，达到预期的掺混效果。

如图 3 所示，当  $T=0$  时，利用 patch 将底部铺满稠油，随着时间的推移，在压差的作

用下，底部的稠油逐渐被举升，通过内筒向上流动。由于旋流场的存在，所以气液分布不对称不均匀，翻腾剧烈，呈混沌状态，这也符合工程中的实际情况。当稠油液面低于内筒底口时，需要重新进行 patch，以模拟实际工况中不断补充的稠油来液。



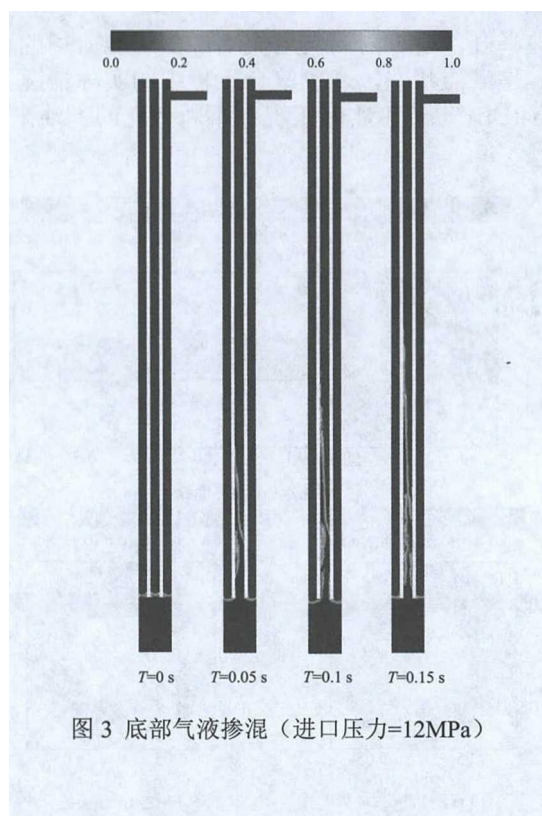


图3 底部气液掺混（进口压力=12MPa）

## 5 结论

利用雾化喷嘴，将稀油通过喷嘴喷入井筒内，使之成为雾状的小液滴，并研究雾化液滴在套管内的流动特性以及混合液流动掺混和举升的情况。数值模拟结果表明，液滴在运动过程中尺寸逐渐增加，液滴聚并现象明显，在整个流场内形成较为均匀分布的液膜和液滴，同时底部气液也有较好的搅动效果，有利于裹挟较为均匀分布的雾化稀油，达到更好的掺稀降黏效果。

基于本研究提出的雾化稀油并掺混稠油的方法，文中建立了简单的物理模型，在FLUENT数值模拟软件的帮助下，研究验证了该方法的可行性和实用性。

## 参考文献

- 1 Yuan J Y, Nugent D. Subcool, Fluid Productivity, and Liquid Level Above a SAGD Producer[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2012, 52(52):360-367.
- 2 Wei S, Cheng L, Huang W, et al. Prediction for steam chamber development and production performance in SAGD process[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2014, 19(7):303-310.
- 3 Knight B L, Rhudy J S. Recovery Of High-Viscosity Crudes By Polymer Flooding[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1977, 16(4):46-56.
- 4 Gao C H. Scientific research and field applications of polymer flooding in heavy oil recovery[J]. Journal of Petroleum Exploration & Production Technologies, 2011, 1(2-4):65-70.

- 5 Wu X, Xu A, Fan H. An integrated evaluation on factors affecting the performance of superheated steam huff and puff in heavy oil reservoirs[J]. Petroleum Exploration & Development, 2010, 37(5):608-613.
- 6 于连东. 世界稠油资源的分布及其开采技术的现状与展望[J]. 特种油气藏, 2001,(02):98-103.  
YU Lian-dong. Distribution of world heavy oil reserves and its recovery technologies and future[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2001,(02):98-103.
- 7 韩冰冰,程文龙,年永乐,等. 热采井注蒸汽与注多元热流体井筒流动与传热对比分析[J]. 工程热物理学报, 2016,37(09):1867-1874.  
HAN Bing-bing, Cheng Wen-long, NIAN Yong-le, WANG Chang-long, YANG Lei. Analysis for flow and heat transfer of thermal recovery well with steam and multiple thermal fluid injection[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016,37(09):1867-1874.
- 8 石在虹,石爽,韩冬深,等. 稠油掺稀多相流动规律及生产参数设计[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2012,27(03):284-292.  
SHI Zai-hong, SHI Shuang, HAN Dong-shen, et al. Multi-phase flowing law and production parameter design of heavy oil mixing with light oil[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012,27(03):284-292.

## Numerical study on the flow of heavy oil blended with light oil mist

XU Wen-kai<sup>1,2</sup>, GU Cheng-xi<sup>1,2</sup>, XU Jing-yu<sup>1,2</sup>

(1 School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The confirmed resources of heavy oil around the world are more than twice those of conventional light crude oil. The method for extraction, blending the crude oil with light hydrocarbons, has a low performance in Tahe oilfield. Blending the crude oil with light oil spray for a more uniform distribution is provided in this article. This paper will concentrate efforts on the drop properties after secondary breakup when the light oil is injected into a pipe by a detachable pressure-swirl atomizer connected with the whole experimental pipe. Meanwhile, the process, the static crude oil at the bottom of the pipe blended with the spray through the given tube, is also investigated by numerical simulation. The results of numerical simulation show that the drop size increases and the notable droplet coalescence in the dispersion forms the uniform distribution of droplets and liquid film in the whole flow field. Also, it has a good stirring effect between the gas and crude oil at the bottom. The feasibility and practicability of this method are verified.

**Key words:** light oil spray; gas-liquid mixing; numerical simulation