油珠通过突缩喉道的力学机制研究

唐澍[1,2]，沈瑞[2,3]，孙杰文[2,3]，高伟航[2,3]

1.中国科学院大学 工程科学学院,北京 100049

2.中国科学院渗流流体力学研究所，河北 廊坊 065007

3.中国石油勘探开发研究院，北京 100083

简介

油珠在多孔介质中运移时，会在孔喉突缩处发生卡堵。卡堵的本质，是界面变形阻力与上游驱动力之间的竞争：驱动力不足则油珠停驻于喉道入口，驱动力过大则油珠破碎为更小液滴。

研究方法

本研究建立单突缩管的二维轴对称模型，上游大管与下游细管之间以突缩喉道相连，喉道半径约为大管半径的四分之一；油珠初始半径大于喉道半径，因此必须发生显著变形才能通过。模型采用层流与两相流相场耦合求解，界面由相场方程自然演化，可自动处理油珠的变形与拓扑变化。入口给定流速，出口设为零压并抑制回流，壁面设为无滑移润湿壁，对称轴采用轴对称条件。根据模型参数计算的无量纲数表明，本工况由界面张力主导，重力可忽略，流动处于层流状态，因此毛细力与宏观压力驱动力的竞争是决定油珠能否通过的核心。

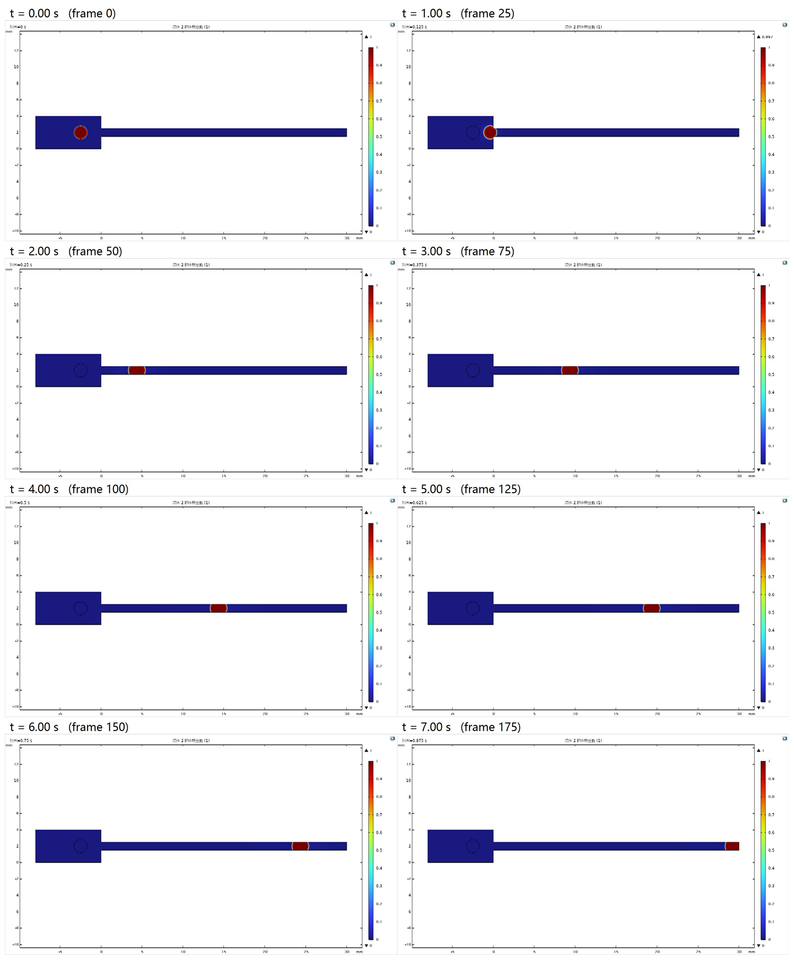


图2 油珠通过突缩喉道的全过程

针对这一问题，本研究采用 COMSOL 二维轴对称瞬态模拟，耦合层流与两相流相场方法，构建单突缩喉道模型，实现油珠从大管经突缩入口进入细管的全过程模拟，揭示突缩喉道对油珠运移的阻滞机制与临界通过条件。

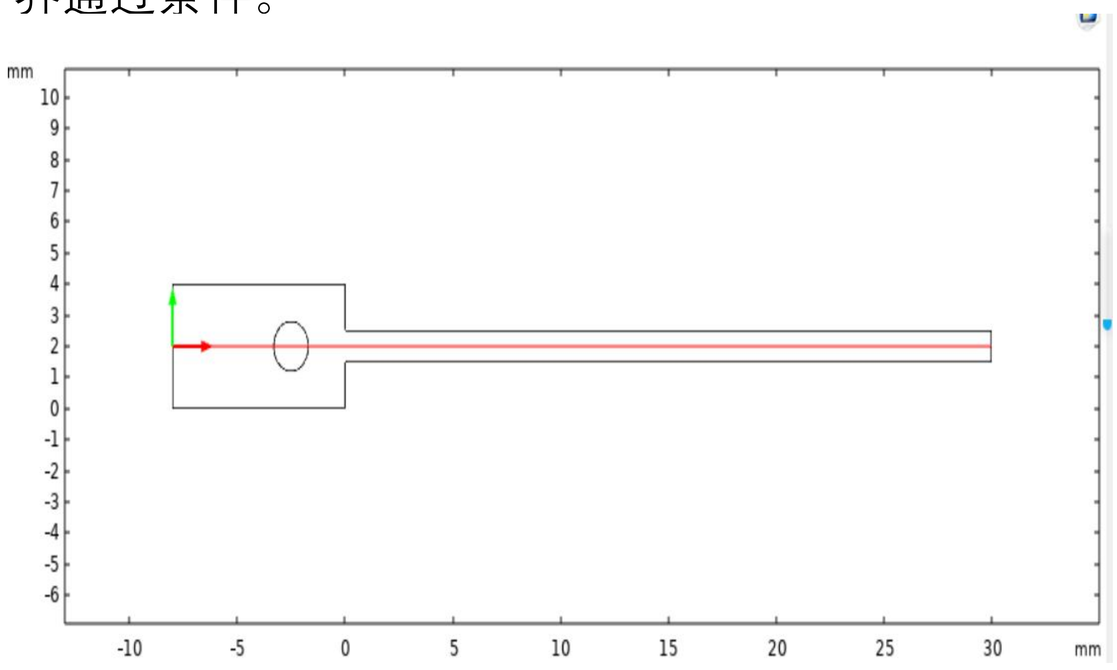


图1 单突缩管模型图

结果与讨论

结果：

模拟完整记录了油珠从上游大管经突缩入口进入细管的运移过程，相场分布清晰刻画了接近—变形挤入—通过三个阶段。接近阶段，油珠在上游大管中保持近球形运移，几乎不受壁面约束。变形挤入阶段，油珠前缘抵达突缩入口后，因喉道半径小于油珠半径而被迫变形——前缘向喉道内突出伸长，整体由球形拉长为椭球或子弹形，界面曲率急剧变化，界面变形能垒成为主要阻力来源。通过阶段，油珠主体进入喉道，与壁面间形成一层连续相液膜，被拉长成圆柱段推进，尾部离开突缩口后逐渐恢复形变。

讨论：

突缩喉道对油珠通过施加了两重阻力：一是界面变形能垒，油珠须克服毛细阻力才能挤入更细的喉道，界面张力越大阻滞越强；二是几何相容性限制，油珠与喉道尺寸之比超过临界值时变形能力不足，形成永久卡堵。工程上可通过降低界面张力、调节润湿性、提高注采压差三条路径解除卡堵。

参考文献

1. 刘先珊,孙梦,曹伊婷,等.基于相场法孔隙介质两相流体流动特性研究[J].岩石力学与工程学报,2026,45(5):1461-1476.
2. Tang S, Shen R, Xiong W, et al. Experimental Evaluation of Reducing Water Cut and Increasing Oil Recovery Using Multiphase Mixed Fluid[J]. ACS omega, 2026, 11(22): 33168.