

# SDPSO 深水平台储卸油过程数值模拟

孙涛, 彭耀, 万德成

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

**摘要:** SDPSO 深水平台是一种集钻采储运为一体的新型深水立柱式 Spar 钻井生产储卸油平台, 利用油水置换技术进行深水储卸油。本文应用基于开源平台 OpenFOAM 开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器——naoe-FOAM-SJTU, 对模型尺度 SDPSO 深水平台的储卸油过程进行数值模拟。文中给出了 SDPSO 深水平台储卸油过程的油水界面, 温度场和压力场的变化规律。

**关键词:** SDPSO; 油水置换; naoe-FOAM-SJTU 求解器; 模型尺度

SDPSO (Spar Drilling Production Storage Offloading) 深水平台是一种集钻采储运为一体的新型深水立柱式 Spar 钻井生产储卸油平台, 能够极大提高深水工程技术解决方案的灵活度和降低深水油田开发的总成本<sup>[1]</sup>。SDPSO 在工作状态, 储油舱始终充满液体, 通过油水置换技术, 即水和原油的交替注入及二者的密度差来实现储油卸油。

国内对油水置换技术进行了相关研究。大连理工大学通过对大庆原油小试、中试的温度场测试研究, 论证了水下储存高凝原油的可行性<sup>[2]</sup>; 陈毓琛等对混凝土储油罐油水界面的传热规律进行研究, 证实采用油水接触的方式进行水下高凝原油存储可行<sup>[3]</sup>; 赵雅芝等通过对含水原油的静态、动态沉降模拟实验研究, 论证了“油水置换”工艺的可行性<sup>[4]</sup>; 卢佩琼等结合我国高凝原油的特点进行试验研究, 论证了我国生产高凝原油采用油水置换工艺的可行性<sup>[5]</sup>。

本文在前人油水置换可行性研究的基础上, 采用上海交通大学自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器数值模拟模型尺度 SDPSO 油水置换过程, 重点分析了油水界面的位置和厚度变化情况、温度场和压力场的变化情况, 其中 SDPSO 与实际尺度比为 1:50。数值模拟结果可以为实验提供预报和参考。

## 1 数值方法

对于不可压、黏性流体, 其控制方程为:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho (\mathbf{U} - \mathbf{U}_g) \mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U}) \quad (2)$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \Phi + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{U}_g$  分别表示流场速度和网格节点速度;  $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$  为流场动压力, 等于总压力减去静水压力;  $\mathbf{g}$ ,  $\rho$  和  $\mu$  分别为重力加速度、流体的密度和动力黏性系数;  $C_p$ 、 $T$  和  $k$  分别为流体的比热容、温度和普朗特数, 其中将源项  $\Phi$  简化为 0。

计算中, 采用有限体积法 (FVM) 对控制方程进行离散; 应用 PISO 算法处理速度、压力耦合; 对于自由面的捕捉, 采用流体体积法 (VOF)<sup>[6]</sup>。

## 2 计算模型

### 2.1 SDPSO 模型参数

如图 3-1 所示, 进油时油从上部正方形入口处均匀进入, 初温度为油温 65℃, 水从下部正方形出口处均匀流出, 舱内水初温度为外部海水温度 15℃, 当油占储油舱容积的 95% 时, 此时停止进油, 卸油过程

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51379125, 51490675, 11432009, 51411130131), 长江学者奖励计划(2014099), 上海高校特聘教授(东方学者)岗位跟踪计划(2013022), 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB036103), 工信部高技术船舶科研项目的资助项目

**作者简介:** 万德成, 男, 教授, 博士生导师。主要从事船舶与海洋工程水动力学, 计算流体力学研究工作。  
E-mail: dcwan@sztu.edu.cn

始进行。出油时油从上部正方形出口处均匀流出，水从下部正方形入口处均匀进入，当水占储油舱容积的 95%时，停止出油，进油过程开始进行。连续的一次储卸油过程为 1 个循环，本文数值模拟连续的 9 次循环过程，并分为储油舱壁绝热和非绝热两种情况。

数值计算分为实尺度计算和模型尺度计算，利用相似理论分析可以得到两种尺度之间的参数关系。实尺度模型下，一次进油过程为 10 天，一次出油过程为 1 天，一次储卸油循环为 11 天。如图 1 所示，储油舱的高度  $h$  和直径  $d$  决定了储油舱的储油总量。原油流入入口的面积  $S=a^2$  和进油口油流速  $v$  决定了单位时间流量；另外，影响流动的因素还有重力加速度  $g$ 、动力学粘度  $\nu$  和密度  $\rho$ 。

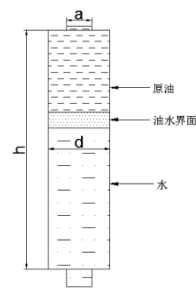


图 1 相似性分析模型

对于每一个参数所对应的量纲见表 1。

表 1 工况参数量纲

参数	$a$	$h$	$d$	$v$	$\rho$	$\nu$	$g$
量纲	L	L	L	ML <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup>	ML <sup>-3</sup>	LT <sup>-1</sup>	LT <sup>-2</sup>

涉及的基本量纲为 L、M 和 T。取一组独立变量  $h、v、\rho$ 。另外四个参数的影响可以用无量纲数  $\pi_1、\pi_2、\pi_3$  和  $\pi_4$  表示。由  $\pi$  定理，计算出  $\pi$  如下： $\pi_1 = \frac{a}{l}$ （边长影响）， $\pi_2 = \frac{d}{l}$ （直径影响）， $\pi_3 = \frac{\nu}{lv\rho}$ （粘性影响）， $\pi_4 = \frac{lg}{v^2}$ （重力影响）

$$f\left(\frac{a}{l}, \frac{d}{l}, \frac{\nu}{lv\rho}, \frac{lg}{v^2}\right) = 0。$$

由于材料中尺度相似比 1:50 已经给定，如果要满足全面相似，还需要  $\pi_3$  和  $\pi_4$  相等，经计算会推出矛盾，故只能局部相似。考虑计算实际储油时入口流速为  $6.2407 \times 10^{-4}$  m/s，速度很慢，可以估计模型试验时入口流速也很慢，因而重力的影响相对远大于粘性的影响，

可以设  $\pi_4$  为主要相似准则数，使  $\pi_4$  相等，推出  $v_{模} = \frac{v_{实}}{\sqrt{50}} = 8.82567 \times 10^{-5}$  m/s，模型储油一次时间为： $t = \frac{t_{实}}{\sqrt{50}} = 33.94$  h；同理，卸油一次时间为： $t_x = 3.394$  h(出油时间为进油时间的 1/10)。由此得到表 2 计算中所涉及的参数：

表 2 储油舱模拟参数

参数	实物	模型
直径 $d$	31.14 m	0.622 8 m
入口边长 $a$	12.8 m	0.256 m
模型高度 $h$	122.1 m	2.442 m
储油过程模拟时间 $t$	240 h	33.94 h
卸油过程模拟时间 $t$	24 h	3.394 h

### 2.2 模型网格划分

在数值计算的过程中，将复杂的平台模型简化为简单的数值计算模型，该计算模型仅包括油沉箱、储油舱（单舱壁）和水沉箱。如图 2 所示。其中储油舱为圆柱体，油沉箱和水沉箱为长方体。油沉箱的入口为正方形，实际尺度下，其对角线长度为 12.8 m，油沉箱高度为 2 m。水沉箱高度为 9.1 m，其出水口和油沉箱的进油口尺寸相同。储油舱的横截面直径为 31.14 m。高度为 122.1 m。模型尺度与实际尺度之比为 1:50。模型尺度下，入油口对角线长度为 0.256 m，油沉箱高度为 0.04 m。水沉箱高度为 0.182 m，出水口和油沉箱的进油口尺寸相同。储油舱的横截面直径为 0.622 8 m，高度为 2.442 m。

其中三维网格划分如图 3，网格量为 30 万左右。

由于三维平台是一个轴对称圆柱体，因此将其简化为二维模型对其所揭示的现象并没有本质的区别，基本可以达到数值模拟的要求，同时大大缩减了三维数值模拟所要消耗的大量时间和人力成本。在 pointwise

中建立数值计算几何模型并划分结构化网格，二维模型网格总数约为 1 万，相对于三维模型的 30 万网格，大大减少了模型的网格量（图 4）。

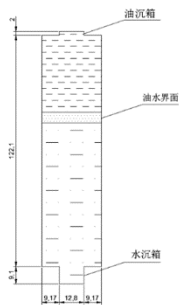


图 2 SDPSO 简化模型示意

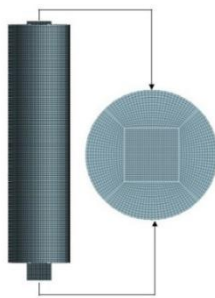


图 3 SDPSO 三维模型网格划分示意



图 4 SDPSO 二维模型网格示意

### 3 计算结果

#### 3.1 物性参数设置

非绝热舱壁的导热系数为  $0.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，对流换热系数为  $7 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，周围环境海水温度为  $15^\circ\text{C}$ ，重力加速度取  $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$ ，原油和海水的物性参数如表 3 所示。

表 3 原油和水的物性参数表

物性参数	单位	15℃水	40℃原油
密度	$\text{kg}/\text{m}^3$	999	910
比热容	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	4 187	1.34E-04
运动粘度	$\text{m}^2/\text{s}$	1.16E-06	0.121 94
普朗特数	/	8.27	1 846.62
热传导系数	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	0.587	0.126

#### 3.2 油水界面

本节主要研究在模型尺度模拟油水置换过程中，油水界面在多次进油和卸油过程中的变化情况，分析油水界面特性，特别是油水界面厚度和形状。选取第一次进油过程、第九次出油过程二个典型工况，比较油水界面厚度的变化情况。由于我们自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器温度场求解模块中并没有考虑温度对运动的影响，故无论模拟过程中储油舱壁面绝热与否，都不会影响结果，所以讨论时并没有把舱壁绝热与舱壁非绝热工况分开。

入油和卸油均保持 5% 的空间裕度作为保护层高度。在下图中  $\alpha$  是 VOF 方法中的体积分数， $\alpha$  值等于 1 代表该区域是油，而  $\alpha$  值等于 0 代表该区域是水， $\alpha$  值在 0 到 1 之间的部分代表油与水的体积分数差值，是数学意义上油与水的混合区域，也指油水分离界面。在本章中，我们所选取的油水界面即  $\alpha$  值介于 0.1 到 0.9 之间的区域。

由表 4 和图 5 我们可以看出，油水界面的形状在第一次进油过程中基本上一直保持为一条直线，而其平均厚度值几乎保持不变，在 0.58 m 左右，在数值上有一定波动。

由表 5 和图 6 我们可以看出，油水界面的形状在第一次进油过程中基本上一直保持为一条直线，而其平均厚度值几乎保持不变，在 0.58 m 左右，在数值上有一定波动。

第一次进油和第九次出油的典型工况下油水界面形状和厚度基本一致，表明经过多次的油水置换过程，油水界面保持稳定，并未遭到破坏，论证了油水置换的可行性。

表 4 第一次进油过程油水界面






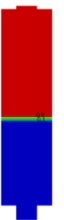






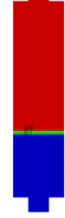
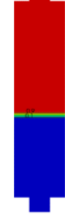
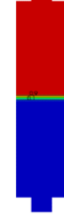
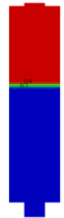




进油 1/10	进油 2/10	进油 3/10	进油 4/10	进油 5/10
				
$\delta=0.057\text{ m}$	$\delta=0.058\text{ 4 m}$	$\delta=0.058\text{ 6 m}$	$\delta=0.057\text{ 2 m}$	$\delta=0.056\text{ 9 m}$
进油 6/10	进油 7/10	进油 8/10	进油 9/10	进油 10/10
				
$\delta=0.057\text{ 5 m}$	$\delta=0.058\text{ 4 m}$	$\delta=0.058\text{ 2 m}$	$\delta=0.057\text{ 8 m}$	$\delta=0.057\text{ 2 m}$

表 5 第九次出油过程油水界面

出油 1/10	出油 2/10	出油 3/10	出油 4/10	出油 5/10
				
$\delta=0.056\text{ 7 m}$	$\delta=0.056\text{ 5 m}$	$\delta=0.057\text{ 9 m}$	$\delta=0.058\text{ 2 m}$	$\delta=0.057\text{ 2 m}$
出油 6/10	出油 7/10	出油 8/10	出油 9/10	出油 10/10
				
$\delta=0.057\text{ 0 m}$	$\delta=0.058\text{ 0 m}$	$\delta=0.057\text{ 1 m}$	$\delta=0.056\text{ 7 m}$	$\delta=0.056\text{ 5 m}$

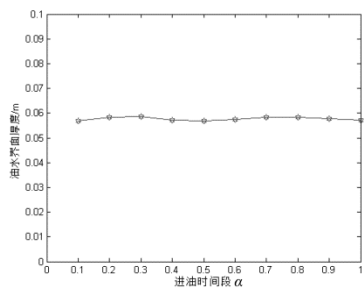


图 5 第一次进油油水界面厚度变化

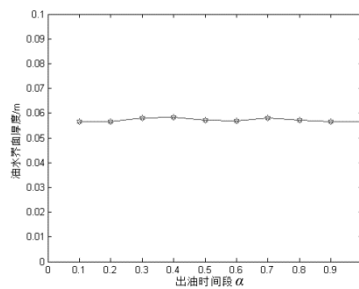


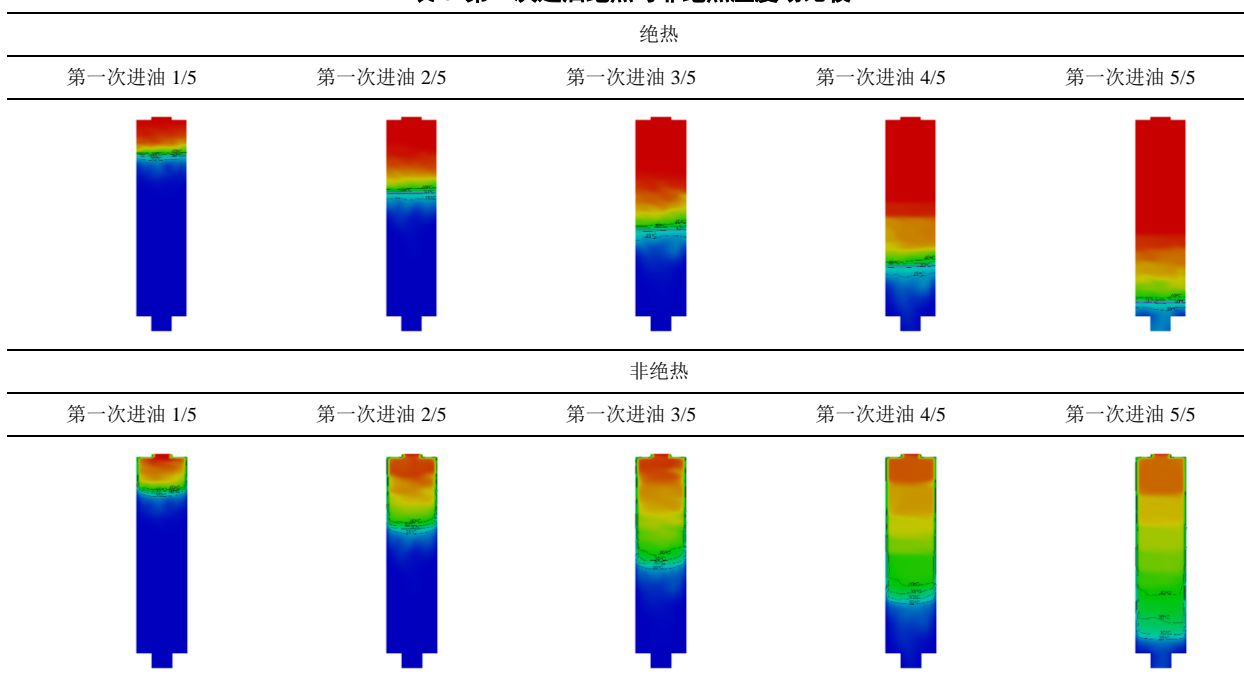
图 6 第九次出油油水界面厚度变化

### 3.3 温度场变化

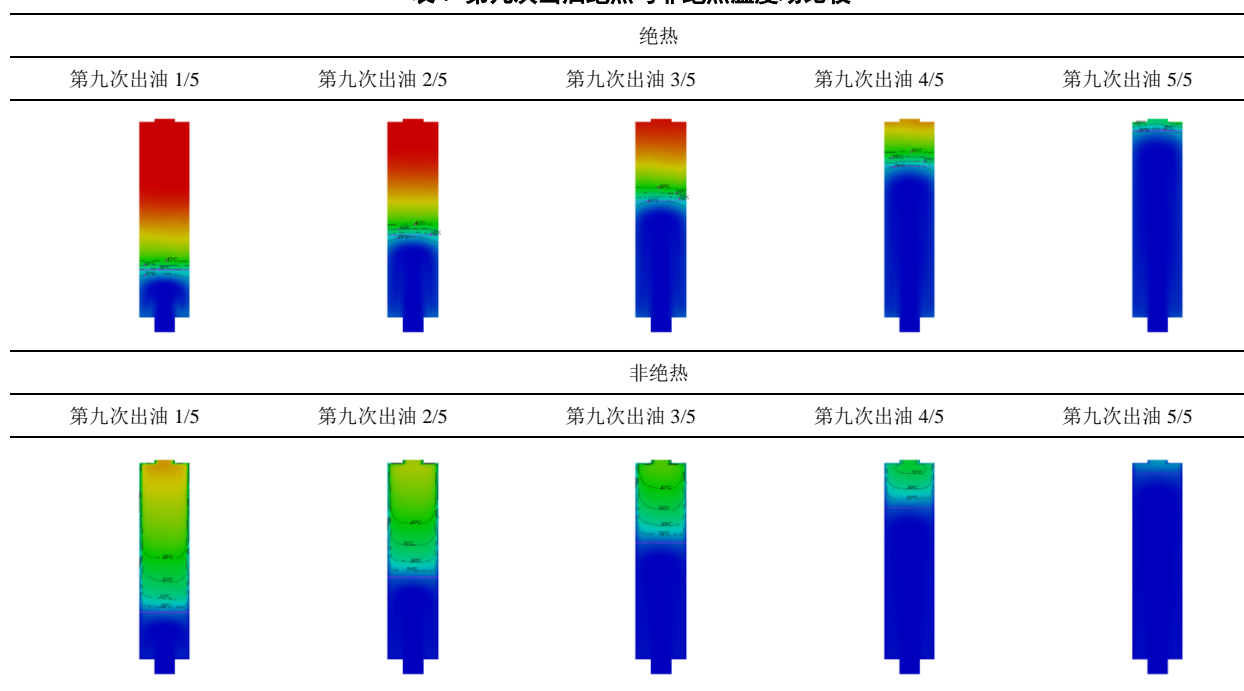
油水置换过程的温度场变化受到储油舱壁的隔热性能影响，本节探讨储油舱壁绝热和非绝热两种情形，并对这两种情况进行了对比分析，选取第一次进油和第九次出游两种典型工况。

在这两种典型工况下，当储油舱壁绝热时，由于储油舱并未向外部海水传递热量，因此储油舱内的温度变化明显快于舱壁非绝热的情况。其中 24℃~40℃ 是原油物理性质变化最明显的温度范围，一般而言，原油的析蜡点和凝固点都在此温度范围内，把握油水置换过程中的原油等温线分布和变化情况，有助于我们解决实际情况下的原油储存和运输问题（表 6—表 7）。

**表 6 第一次进油绝热与非绝热温度场比较**



**表 7 第九次出油绝热与非绝热温度场比较**



### 3.4 压力场变化与理论验证

进油过程中上端压力总是大于下端压力，且随着进油过程地推进逐渐增加。由于储油罐下端与外界水域连通，所以该处压力与外界水域该水深处压力一致，保持不变，而上端压力是人工可控的，为了使进油过程平稳顺利进行，我们必须逐步提高上端口压力，将油压入储油罐中。

本节将上表各时刻的储油舱入口压力与利用伯努利定理的理论估算压力进行比较，如图 7 所示。理论估算的压力值与数值模拟的压力值吻合很好，从侧面验证了数值模拟过程的可靠性（表 8）。

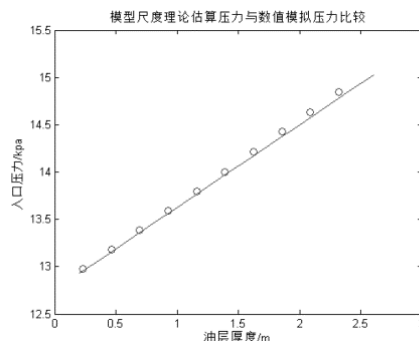
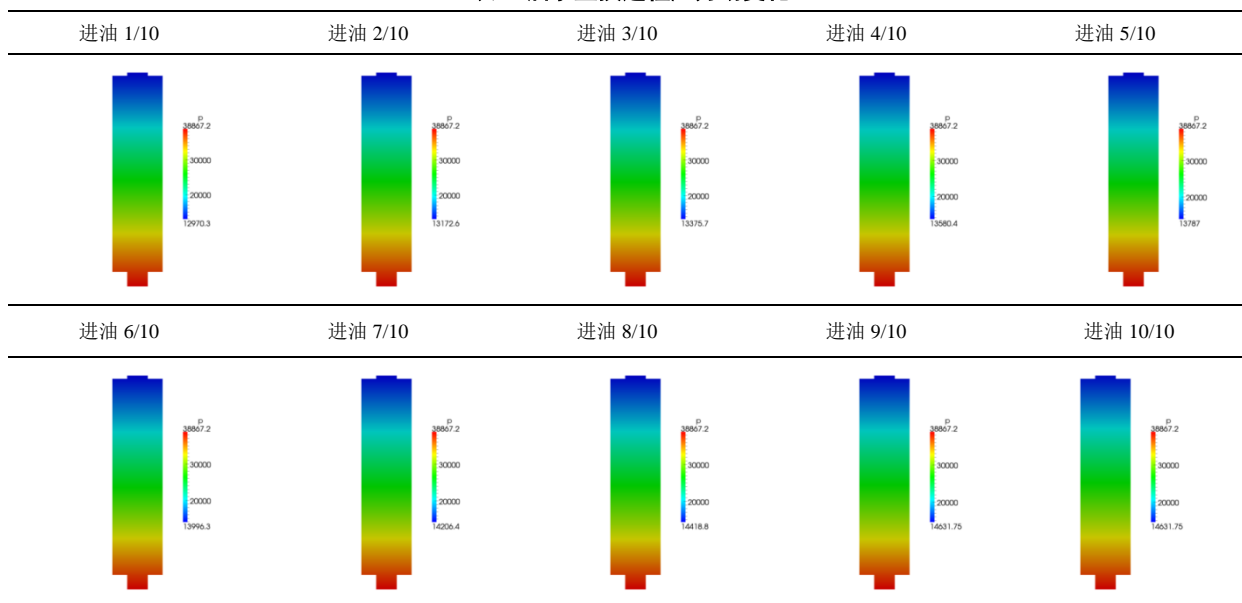


图 7 模型尺度模拟入口压力与理论估算比较

表 8 油水置换过程压力场变化



## 4 结语

本文应用基于开源平台 OpenFOAM 开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器——naoe-FOAM-SJTU，数值模拟了 SDPSO 模型尺度油水置换过程，在油水置换过程中，油水界面形状和厚度保持稳定；储油舱壁绝热情况下的舱内温度传播明显快于非绝热情况下的舱内温度传播；储油舱入口压力动态变化实现储卸油过程，其中进油过程入口压力增加，卸油过程入口压力降低。本文数值模拟的结果可以为真实工况下的模型试验提供参考和帮助，具有一定的工程实际意义。

## 参考文献

- 王晋等. 深水 Spar 钻采储运平台系泊系统研究[C]//中国海洋工程技术年会论文集. 2013,11: 46-48.
- 卢佩琼. 水下储存易凝原油的传热规律研究[J]. 油气储运, 1997(8)16, 4~9, 18.
- 陈毓琛, 冯旅平. 混凝土水下油罐的传热分析与数模计算[J]. 石油学报, 1988, 9(2): 117-126.
- 赵雅芝等. 水下贮油技术——“油水置换”工艺模拟试验[J]. 中国海洋平台, 1999, 14(1): 18-21.
- 卢佩琼. 高凝原油油水置换工业试验研究[J]. 大连理工大学学报, 1990, 1: 022.
- Shen Z, Cao H, Ye H, et al. The manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows:naoe-FOAM-SJTU[R]. Shanghai Jiao Tong University, 2012.