

海洋生产平台管道式分离系统流场特性研究

张琳¹ 欧宇钧² 吴奇霖¹ 朱沫² 刘硕³ 张健³ 许晶禹^{3,4}

1.中海石油(中国)有限公司深圳分公司; 2.中海油能源发展装备技术有限公司深圳分公司;

3.中国科学院力学研究所; 4.中国科学院大学工程科学学院

摘要: 随着海洋油田开采时间延长,采出液分离难度逐渐增加。为满足分离速度和效果的需求,减小占地空间,结合南海某平台生产参数,对管道式分离系统流场特性开展数值模拟研究,并依据现场测试数据进行了验证。研究表明:采出液经管道式分离系统的 T 型管分离器处理后,能够基本实现游离气与液相的分离;下游油水混合液经过柱形旋流器处理后,水中的含油率可小于 30 mg/L。证实该技术满足平台油气水分离要求,表明了分离系统中的多相流场流动特征。

关键词: 管道式分离系统; 现场调试; 多相流模型; 流场分析

中图分类号: TE931 文献标识码: A

Research on Characteristics of Flow Field in Tubular Separation System of Offshore Production Platform

ZHANG Lin¹, OU Yujun², WU Qilin¹, ZHU Mo², LIU Shuo³, ZHANG Jian³, XU Jingyu^{3,4}

1.Shenzhen Branch of CNOOC, Ltd;

2.Shenzhen Branch of CNOOC Energy Development Equipment Technology Co., Ltd;

3.Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences;

4.School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences

Abstract: With the extension of offshore oilfield production time, the difficulty of producing fluid separation increases gradually. In order to satisfy the demand of separation speed and performance, and reduce the space, based on the production parameters of a platform in the South China Sea, the flow field characteristics of the pipeline separation system were numerically simulated and verified according to the field test data. Research shows that separated by T branch separators of the pipe separation system, free gas in the produced fluid can be basically separated from liquids. After the downstream oil-water mixture is treated by the cylindrical cyclone, the oil content of the water can be less than 30 mg/L, validating this technology can satisfy the demand of oil-gas-water separation of platform, and reveal the multiphase flow characteristic of the separation system.

Keywords: pipeline-type separation system; field test; multiphase flow model; flow field analysis

0 引言

在油气资源开采中,生产产物多以油气水三相混合液为主,为实现对最终合格产品的有效输出,油、水、气三相有效分离是油田油水分离和油气集输处理的关键技术^[1-2]。对于开采的中后期,采出液中的体积含水率不断增大,给已有的油气水多相分离技术和装置造成压力。为此,需要处理速度快、分离效果好

的多相分离技术对采出液进行预处理,降低后续工艺中的多相处理压力。

随着能源需求增长与边际油田开发,逐渐形成多种管道式分离技术^[3-5]。该类技术以物理方式为主,基于重力作用、浅池原理或旋流分离原理研发,相对传统重力分离技术具有结构简单、体积小、重量轻、压降损失小等优点,尤其适用于海洋平台、水下生产系统等对空间和重量有严格要求的环境^[4]。目前已出现 T 型管气液分离技术和旋流分离技术等,形成了丰

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(12102436)

收稿日期: 2022-12-15

富的理论和技術積累^[6-9]。其中T型管氣液分離技術的原理是當多相流動介質通過分岔管道時,通過重力作用及淺池原理導致各個管道內的相含率重新分配,實現初步分離。旋流分離技術通過創建旋流場,使離心加速度代替重力加速度,加速相分離。儘管這些技術較成熟,但單種技術的處理範圍有限,如果將多種管式分離技術組合,形成管道式分離系統,則可極大拓寬來液處理的流量和相含率分布範圍。目前,相關的組合技術仍在發展中,有待進一步完善。

為此,本文結合南海某生產平台的管式采出液預處理系統,以現場測試數據為基礎,開展流場數值模擬分析,研究管道式分離系統各個部件內部流場特徵及分離效果的影響因素,為海洋生產平台管式分離技術的改進和優化提供參考。

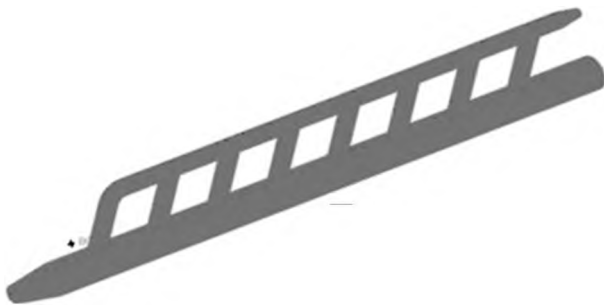
1 數值模擬設置

1.1 管道式分離系統構成及網格劃分

針對南海某平台生產參數,確定管道式分離系統包含T型管氣液分離器1套及柱形旋流器若干。圖1(a)給出了T型管氣液分離器內部流場幾何模型構造。T型管整體長度13 m,下層管道直徑800 mm,其他管道直徑400 mm。在ANSYS Workbench ICEM cfd 模塊中創建流場非結構化網格。為保證精度,採用分塊化網格劃分方案。經過劃分後,流場內共含500萬四面體網格(圖1(b))。該網格劃分方案既可滿足計算精度,又具有較高的計算效率,符合流場網格劃分要求。



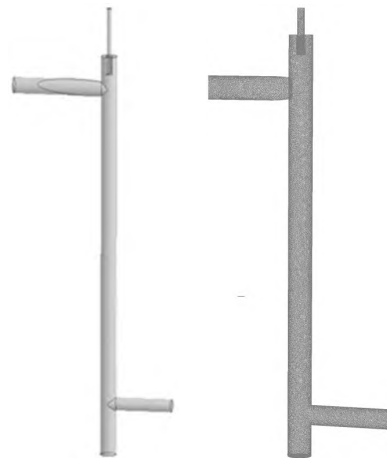
(a) 幾何模型



(b) 網格劃分

圖1 T型管分離器內部流場計算模型

管道式分離系統中的柱形旋流器組主要負責油水精細分離。如圖2(a)所示,系統中的柱形旋流器主管和入口內徑50 mm,底流口直徑40 mm。基於柱形旋流器流場幾何模型,在ANSYS Workbench Meshing 模塊中劃分網格。為保證計算精度,旋流器切向入口及溢流口處對網格局部加密,最終形成192萬網格的劃分方案(圖2(b))。該種方案可同時兼顧計算精度和計算效率。



(a) 幾何模型

(b) 網格劃分

圖2 柱形旋流器內部流場計算模型

1.2 現場參數測試

在目標平台現場管道式分離系統正常运行過程中,通過流量計測試混合流量,通過壓力表測試T型管氣液分離器及柱形旋流器的壓降,通過速閉閥取樣法測試管道式分離系統各個出口的各相含率。圖3給出了T型管分離器溢流口的取樣記錄,圖4給出了柱形旋流器溢流口和底流口取樣記錄。



圖3 T型管分離器溢流口取樣記錄

1.3 邊界條件及求解設置

在ANSYS Fluent 模塊中開展數值模擬工作。由於正常运行的管道式分離系統處於平穩運行狀態,因此採用定常分析。求解設置中採用混合多相流模型,



(a) 溢流口取样 (b) 底流口取样

图 4 柱形旋流器的取样记录

耦合 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。流场中由于水相含率较高, 因此设置水相为主相, 气相和油相设置为次相, 结合现场取样观测, 次相尺度在 mm 量级, 同时考虑相间速度滑移, 流场中同时施加重力作用。

求解设置方面, 速度压力耦合采用 SIMPLE 算法, 梯度离散采用 Least Squares Cell Based 格式离散, 压力离散采用 PRESTO! 格式, 力矩、湍动能、能量耗散率等参量采用高阶格式离散, 以保证计算精度。同时, 各个量的求解采用 10^{-6} 级别残差, 以提高求解精度。

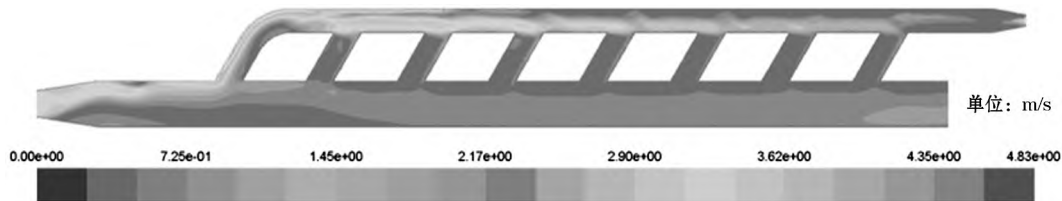
边界条件设置方面, 对 T 型管分离器和柱形旋流器, 入口均采用速度入口, 设置混合流速及各相含率, 基于入口流速估算入口湍流度; 出口均采用 outflow 出

口, 根据现场调试分流比定义各个出口分流比; 其余采用固定壁面边界条件。以现场测试数据为入口条件输入模型。T 型管气液分离器设置入口速度为 1.4 m/s , 入口含气率 20%, 出口分流比(溢流口:底流口)为 1:4。柱形旋流器入口流速 3 m/s , 入口含油率在 $0.005\% \sim 0.1\%$ 之间。

2 结果分析与讨论

2.1 T 型管速度压力分布

速度、压力分布特征决定 T 型管分离器的分离效果。图 5(a) 给出了 T 型管分离器中心截面处, 液相的速度分布情况。从图中可以看出, T 型管分离器的入口至第 1 根倾斜立管间, 液体的流速较高, 主要是由于气液混合液进入 T 型管分离器会产生快速膨胀, 进而将气体释放, 增大了流动的速度。同时, 从 T 型管分离器后面结构的速度分布可以看出, 液体经过前 5 根倾斜立管之后, 速度趋于平稳, 确保气液两相流动的稳定性, 促进气液分离。图 5(b) 给出了 T 型管分离器中心截面处压力的分布特征, 重力作用使得气体存在的区域压力值偏高。但是, 分离装置内部的整体压力值相差微小, 即气液混合液经过分离处理后, 产生的压降较低, 基本没有能量的消耗。



(a) 液相速度分布



(b) 压力分布

图 5 T 型管分离器中心截面处的计算结果

2.2 T 型管相分离特征

图 6 给出了 T 型管分离器运行过程中的气相分布情况。图 7 为 T 型管分离器中心截面处体积含气率数值的分布情况, 可以清晰看出气液两相的分离过程: 气液两相混合液由入口进入 T 型管分离器, 通过动态重力分离作用, 在管道内实现分离, 分离出来的

液相逐渐在下水平管道内聚集, 进而由液相出口流出, 同时, 分离出来的气相逐渐在上水平管聚集, 最终由气相出口流出, 实现气液两相的分离。在上述工作条件下, 液相出口的体积含气率为 1.82% , 气相出口的体积含液率为 1.71% 。

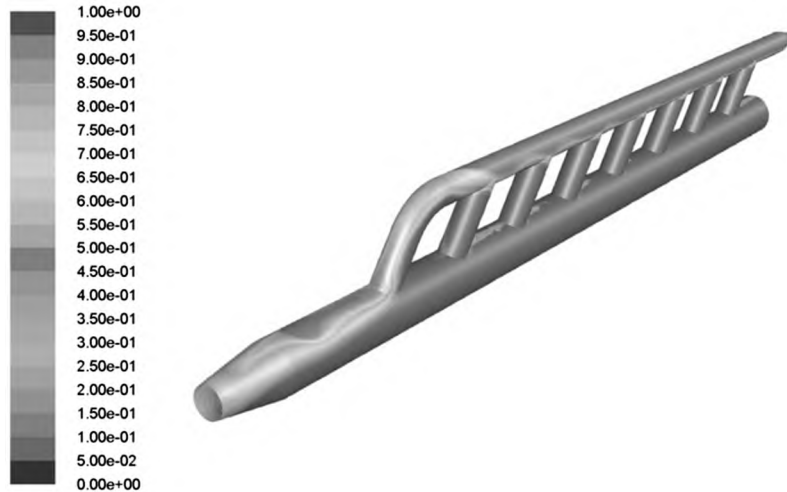


图6 T型管分离器整体的气相分布情况

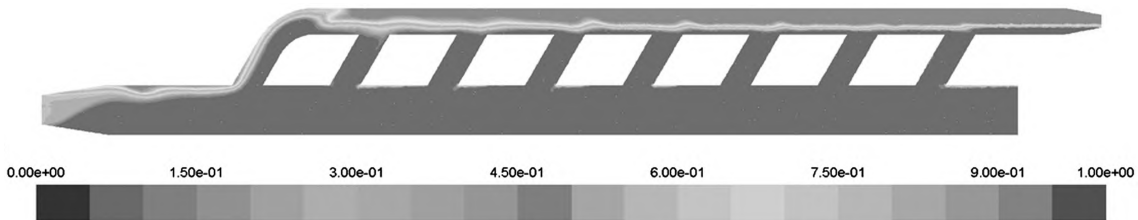
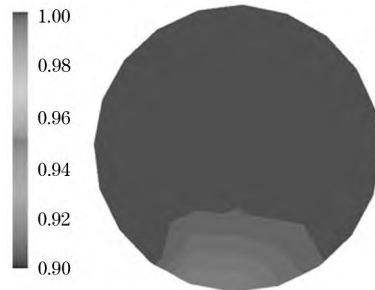


图7 T型管分离器中心截面处的体积含气率特征

2.3 数值模拟验证

为验证T型管分离器流场数值模拟的准确性,图8对比了溢流口气相含率的模拟值与测试结果。从图8(a)中明显可见,溢流口出口截面主要为气相,液相

含率小于2%。而在相同工况的现场测试中(图8(b)),发现溢流口几乎未见液体,而底流口几乎没有气泡,与数值模拟相符。现场测试与数值模拟可相互验证。



(a) 模拟结果



(b) 取样测试结果

图8 T型管溢流口模拟与测试对比

2.4 T型管分离器处理效果研究

此外,为研究T型管在不同入口条件下的分离效果,进行了入口混合流速分别为0.6、0.8、1.2、1.4、1.6 m/s的数值计算(如图9所示)。结果显示,当入口混合液流速为0.6 m/s时,T型管分离器可以快速实现气液分离,液相出口的体积含气率为0.228%,气相出口的体积含液率为0.05%。对于入口混合流速为0.8~1.6 m/s的工况,T型管分离器同样可以实现气液的

分离,分离后,液相出口的体积含气率小于3.0%,气相出口的体积含液率小于2.0%,分离效果理想。

2.5 柱形旋流器分离效果研究

表1列出了柱形旋流器的入口工况及模拟结果,研究选取了3组含油率和分流比工况,对柱形旋流器的分离效果进行分析。

图10给出了工况1条件下柱形旋流器内部压力

表1 柱形旋流器入口工况及模拟结果

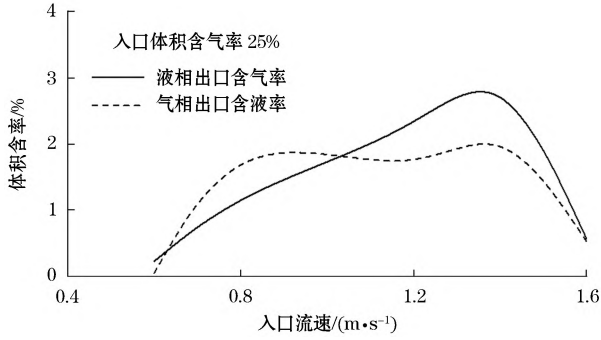


图 9 不同入口流速 T 型管分离器液相和气相出口体积含率变化规律

序号	入口工况		分流比	底流口含油率/%
	流速/(m·s ⁻¹)	含油率/%		
1	0.100	0.005	0.005	0.014 1
2	3.04	0.010	0.005	0.001 3
3		0.005	0.005	0.000 6

和相分布情况。可见旋流场中心出现了明显的低压区, 低压区的出现是螺旋运动导致的。经过单根柱形旋流器后, 压力降低大约 200 kPa, 能量损失较小。在该种压力和速度场作用下, 轻质油相向旋流器中心富集, 从上部溢流口排出, 重质水相则向旋流器壁面附近富集, 从下部底流口排出, 最终实现油水分离。进一步对比表 1 中的数据还可以发现, 随着入口含油率降低, 经过处理后的底流口含油率逐渐降低。

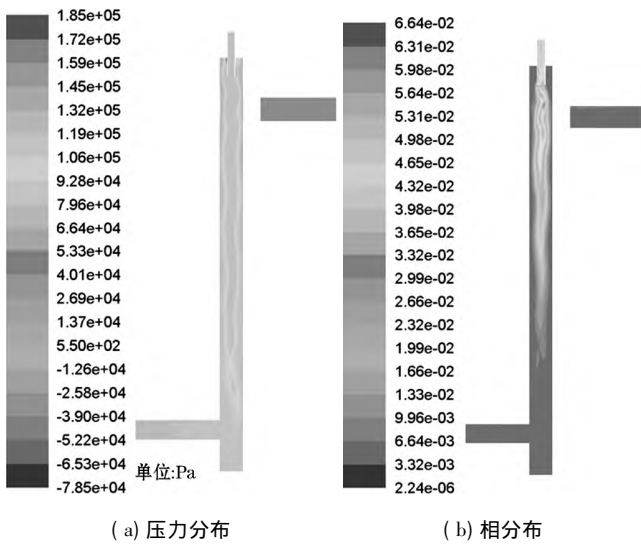


图 10 工况 1 柱形旋流器模拟结果

3 结论

针对国内油井采出液分离技术发展的需求和现状, 提出了新型管式采出液高效分离技术。依据目标平台配产参数开展了流场数值模拟工作, 结论如下:

- 1) 现场取样及测试数据表明, 数值模拟可准确反映 T 型管分离器和柱形旋流器内部流场特征;
- 2) 在设计工况条件下, 平台全部采出液经管道式分离系统处理后, 可实现游离气与液相的有效分离;
- 3) 在设计工况条件下, 经过柱形旋流器处理后的水中含油率可小于 30 mg/L, 满足平台分离要求;
- 4) 数值模拟结果显示, 管道式分离系统在运行过程中具有较小的压降, 均匀的压力分布能够确保管道式分离系统运行过程中的流动稳定性, 实现高效分离。

参考文献:

- [1] 林璐璐, 蒋国贤. 油气水三相分离器及其应用[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2022(2): 16-19.
- [2] 白洋, 张仁君. 浅析油气水三相分离器在油田中的应用[J]. 化工管理, 2020(12): 215-216.
- [3] 张军, 郑之初, 吴应湘, 等. 高效油气水分离器[J]. 中国造船, 2004, 45(增刊 1): 254-261.
- [4] 吴应湘, 许晶禹. 油水分离技术[J]. 力学进展, 2015, 45(1): 179-216.
- [5] 李晓刚. 海上平台油气水分离器的优化改造及效果分析[J]. 天津科技, 2022, 49(5): 22-24; 28.
- [6] 魏丛达, 许晶禹, 王立洋, 等. T 形管内油水两相流动规律及其应用[J]. 油气储运, 2012, 31(12): 923-926.
- [7] 宫逸飞. T 型微通道分离气液两相流研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [8] 马粤. 新型水力旋流器生产水处理效果数值模拟分析[J]. 管道技术与设备, 2018(1): 51-54.
- [9] 刘鑫. 基于 Fluent 的气旋浮分离器流场实验与分析[J]. 管道技术与设备, 2018(5): 23-26.

作者简介: 张琳(1982—), 工程师, 从事油田开发生产领域的研究工作。E-mail: 1356575110@qq.com

通信作者: 刘硕(1988—), 副研究员, 从事多相流及油气储运领域的研究工作。E-mail: liushuo@imech.ac.cn