

水下采油树流动保障分析

于小涛 赵兴义 段家明 张峰峰 王 凯
威飞海洋装备制造有限公司 山东 东营 257067

摘 要：本文基于某浅水油田水下采油树流动保障研究，系统探讨了节流阀尺寸验证、水合物与蜡风险评估、热管理、化学注入及侵蚀分析等关键问题。通过数据分析与模型计算，得出多项重要结论，为水下采油树设计与运营提供了科学依据。

关键词：水下采油树；流动保障；节流阀；水合物；蜡形成

1 引言

1.1 研究背景

随着全球能源需求增长，海洋油气开发日益重要。浅水油田作为中海油重点方向，其水下采油树设计与运行直接影响开发效率与安全。面对海水压力、海流冲刷及复杂生产流体，研究其流动保障问题对保障油田稳定高效生产具有重要意义。

1.2 研究目的

本文系统分析水下采油树流动保障关键问题，旨在为浅水油田设计与运营提供科学依据。研究内容包括节流阀尺寸验证、水合物与蜡风险评估、热管理策略分析、化学注入可行性评估及侵蚀分析等，力求为实际运行中的各类问题提供有效解决方案与预防措施。

2 分析基础

2.1 现场布置

海底管道设计充分考虑海水腐蚀、海流冲击和地质条件，采用高强度材料与先进铺设技术。配套建设了注水管道、电缆和化学脐带，分别用于维持油层压力、传输电力信号及输送化学药剂^[1]。水下采油树作为核心设备，其安装结合精准定位与可靠固定方式，确保系统在复杂海洋环境中稳定运行。

2.2 环境条件

根据勘探数据，海水温度随深度呈现明显的变化趋势。在表层，海水温度受季节和天气影响较大，夏季温度较高，冬季温度较低。随着深度增加，海水温度逐渐降低，但降低的幅度逐渐减小^[2]。海底温度相对稳定但较低，在冬季，海水温度可能降至-1.8℃。这种低温环境对水合物的形成和设备的保温性能提出了极高的要求。为了应对低温环境，水下采油树在设计和材料选择上采取了多种措施，如采用耐低温的材料、增加保温层等。

基金项目：山东省重点研发计划资（2021CXGC010706）

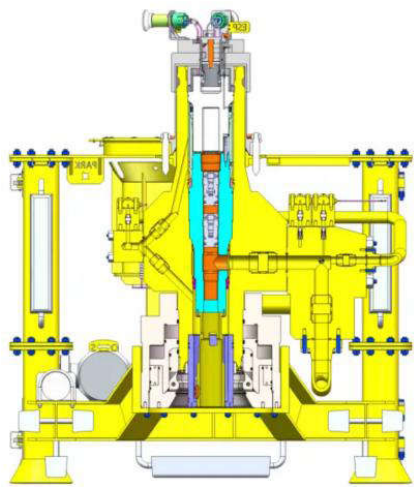


图1 水下采油树系统

2.3 生产液组成

油田的生产流体由油和气组成。气体成分中，甲烷占主导地位，同时含有一定量的氮气、二氧化碳等。这些气体成分的含量和比例对生产流体的物理性质和流动特性有着重要影响。通过调整黑油模型，可以精确模拟生产流体的物理性质，如密度、粘度、压缩因子等。在模拟过程中，对生产流体的各种成分进行了详细的分析和测量，确保模拟结果的准确性。这些物理性质数据为流动保障分析提供了坚实的基础，有助于准确评估水合物与蜡形成风险、计算管道压降等。

表1 生产液组成

	气体[mol%]	油[摩尔%]
N2	0.79	0.006
C1	71.98	0.433
C2	11.53	0.373
C3	8.11	0.434
iC4	1.67	0.262
nC4	3.04	0.564
iC5	1.00	0.571

续表:

	气体[mol%]	油[摩尔%]
nC5	0.90	0.779
C6	0.98	3.599
C7	-	8.415
C8	-	9.032
C9	-	8.861
C10-C11	-	15.286
C12-C13	-	11.889
C14-C15	-	9.148
C16-C17	-	7.029
C18-C19	-	5.401
C20-C22	-	5.848
C23-C26	-	4.942
C27-C33	-	4.29
C34-C80	-	2.825
二氧化碳	-	0.013

3 节流阀选择与尺寸验证

3.1 节流阀尺寸验证

本研究基于KKI提供的压力恢复系数和流体数据,验证了 $C_v = 20$ 节流阀在油田全生命周期内的适应性^[3]。通过流体动力学模拟与实际生产数据对比,结果显示该节流阀在预期流量范围内可稳定控制流量与压力,满足生产需求,并具备一定安全裕量。

3.2 节流阀操作评估

研究评估了节流阀下游因焦耳-汤姆逊效应引起的温降。结果表明,正常生产中液体含量高,冷却效应有限,不会形成水合物。但在长期关井等极端条件下,温度可能降至水合物生成区间。为此,提出预防措施,如关井前注入抑制剂、加强设备保温等,以保障系统安全运行。

4 热管理策略

4.1 热管理哲学

热管理是水下采油树流动保障的重要组成部分。本研究采用保温措施以降低设备冷却速度,确保在长时间停机期间设备温度不会降至水合物或蜡形成温度以下。在设计热管理策略时,充分考虑了设备的结构特点、环境温度变化以及生产操作要求等因素^[4]。通过合理的保温设计,能够有效减少热量散失,延长设备在低温环境下的正常运行时间。

4.2 水合物形成风险

通过PVTSim软件计算了生产气的水合物形成曲线,并与油田生命周期内的操作压力和温度进行了对比。结果表明,在正常操作条件下,形成水合物的风险极低。

然而,在长期关井期间,生产流体温度将明显降低,并可能进入水合物形成区域。因此,需采取相应的保温措施以降低水合物形成的风险。

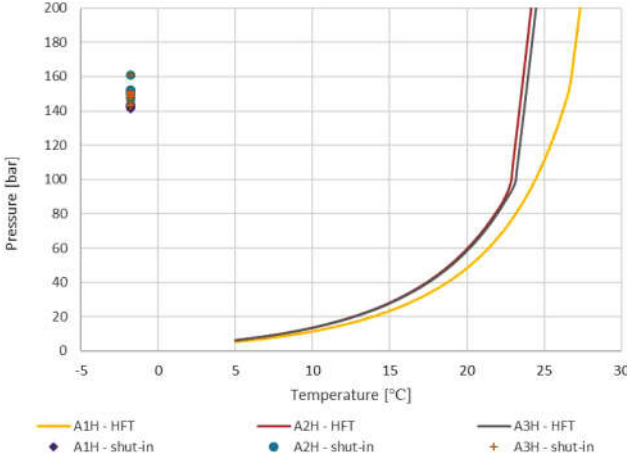


图2 长期关井期间的水合物形成曲线和操作点

4.3 蜡形成风险

本研究采用CNOOC参考油的“冰点”温度标准 26°C 作为蜡出现温度(WAT)。在正常操作条件下,生产流体温度将高于WAT,因此蜡形成的风险较低。然而,在长时间停机期间,设备可能迅速冷却至WAT以下,导致蜡沉积。因此,需关注停机期间的温度变化,并采取相应的预防措施。

4.4 保温层设计

为降低设备冷却速度,本研究开展保温层设计,采用一维瞬态径向热传递模型,分析不同厚度下的冷却时间与最终温度。结果显示,1.25英寸保温层能满足性能要求^[5]。同时考虑引入主动加热系统,如电加热或热流体循环,以提升极端低温环境下的设备运行可靠性。

5 化学注入系统评估

5.1 甲醇注入

本研究评估了甲醇注入系统在水合物抑制中的可行性,分析了注入量、速率及泵压等参数。结果表明,在关键阶段甲醇可按 $1.1\text{m}^3/\text{h}$ 速度注入,有效置换跳线及井口设备。为确保系统稳定运行,对管道、泵阀进行了选型设计,并制定了操作与维护方案。

5.2 柴油注入

柴油被视为甲醇的替代流体。然而,由于上部泵压力限制,柴油无法达到甲醇的输送速率。在评估过程中,对柴油的物理性质、泵的性能以及管道的阻力等因素进行了综合分析^[6]。因此,在关键保存程序阶段,甲醇是更优的选择。

6 侵蚀评估

6.1 沙子加载率假设

由于评估时缺乏砂的具体信息，本研究根据典型砂加载率和性质来评估套管抵抗侵蚀的能力。假设砂加载率较低，以保守估计侵蚀风险。在假设过程中，参考了类似油田的砂加载率数据和砂的物理性质，如砂的粒径、硬度、密度等。通过这种保守估计，能够确保套管在实际运行中具有足够的安全裕量。

6.2 侵蚀分析

采用DNVRP-O501标准进行沙粒侵蚀分析。分析结果表明，在预期流速下，侵蚀的可能性极低。在分析过程中，考虑了砂的颗粒特性、流体的流速和流向、套管的材料和结构等因素。即使考虑更高的沙子加载率，设计也能轻松承受。这是因为套管在设计 and 制造过程中，采用了高强度的材料和先进的防腐处理技术，能够有效抵抗砂粒的侵蚀。

表2 钻井计算流速及侵蚀量

年结尾	速度 [m/s]	A1H侵蚀 [$\times 10^{-3}\mu\text{m}/\text{yr}$]	累计腐蚀 [$\times 10^{-3}\mu\text{m}$]	速度 [m/s]	A2H侵蚀 [$\times 10^{-3}\mu\text{m}/\text{yr}$]	累计侵蚀 [$\times 10^{-3}\mu\text{m}$]	速度 [m/s]	A3H侵蚀 [$\times 10^{-3}\mu\text{m}/\text{yr}$]	累计腐蚀 [$\times 10^{-3}\mu\text{m}$]
2022	0.64			0.71	0.02	0.02	0.80		
2023	1.00	1.57	3.14	0.72			0.81	0.03	0.08
2024	1.41			0.78	0.03	0.12	0.79		
2025	1.15	5.19	13.51	0.72			0.67		
2026	0.76			0.50			0.59	0.01	0.11
2027	0.46	0.03	13.57	0.42			0.51		
2028	0.33			0.38	0.03	0.24	0.46		
2029	0.29			0.36			0.43	0.02	0.19
2030	0.26	0.01	13.61	0.35			0.39		
2031	0.25			0.34			0.37		
2032	0.24			0.33			0.35	0.01	0.22
2033	0.23			0.33			0.33		
2034	0.22	0.01	13.63	0.32	0.04	0.58	0.32		
2035	0.21			0.32			0.31		
2036	0.20			0.32			0.29		
2037	0.20			0.31			0.29		
2038	0.20	0.01	13.66	0.31			0.28	0.01	0.34
2039	0.20						0.24		
2040	0.64						0.20		
2041							0.16		

结语

本研究系统评估了某浅水油田水下采油树流动保障性能，结果表明 $C_v = 20$ 节流阀满足生产要求并具备安全裕量；常规工况下水合物与蜡风险较低，极端条件仍需防控；1.25英寸保温层结合热管理技术可有效提升低温适应性；甲醇注入能抑制水合物生成；流速与砂蚀风险可控。建议优化节流阀设计、引入智能调控、建立在线监测、完善热管理与新材料应用、提升化学注入精度，并落实定期维护，确保系统长期稳定运行。

参考文献

[1]刘致祥,王继良,王星,等.基于SimulationX的水下采油树液压控制系统仿真分析[J].化工自动化及仪表,2025,

52(02):269-275+318.

[2]李坤,许海洋,郑吟风,等.水下采油树出油口连接器承载能力分析[J].当代化工研究,2024,(24):188-190.DOI:10.20087/j.cnki.1672-8114.2024.24.062.

[3]QSUB000618-标准气体流量的尺寸计算, KosoKent Introl, 2020年12月3日

[4]ANSI/ISA-75.01.01 (2012), 工业过程控制阀——流量容量——安装条件下流体流量的尺寸计算公式

[5]DNVGL-RP-O501 (2015) 管理砂生产和侵蚀

[6]任冠龙,孟文波,王宇,等.水下采油树生产通道流动安全分析与应用[J].石油机械,2023,51(09):64-70.