

文章编号: 1673-1506(2023)05-0164-07

DOI:10. 11935/j. issn. 1673-1506. 2023. 05. 017

引用:王胜,刘敏,段铮,等. 海上油田大处理量井下油水分离技术研究及应用[J]. 中国海上油气,2023,35(5):164-170.

WANG Sheng, LIU Min, DUAN Zheng, et al. Research and application of downhole oil-water separation technology with large processing capacity in offshore oilfield[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(5):164-170.

海上油田大处理量井下油水分离技术研究及应用*

王胜^{1,2} 刘敏^{1,2} 段铮³ 万钧³ 郭沛文² 王瑶² 马喜超² 史仕荧⁴

(1. 海洋油气高效开发全国重点实验室 北京 102209; 2. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司 天津 300452;

3. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司 广东深圳 518067; 4. 中国科学院力学研究所 北京 100190)

摘要 海上油田部分生产井产液量大、含水高,导致平台水处理压力大、海管外输容量受限等问题,影响到油田提液稳产。针对油田减少产出水的需求开发了单级大排量管式井下油水分离器,以海上油田 H 井为例,开展了管式油水分离器油水分离性能的室内实验研究,并采用 Fluent 软件以数值模拟方法分析了管式井下分离器入口含油率、分流比和入口流量对分离性能的影响;结合 H 井注采参数设计要求,确定目标井的管式井下油水分离器结构参数,并设计与井况相适应的“采下注上”的罐装泵式工艺管柱,以解决海上油田大处理量工况需求。研究表明,管式井下油水分离器可实现高效油水分离,分离出的水中含油率低于 950 mg/L;罐装泵工艺结构紧凑、功能完善,能满足海上油田大处理量需求;现场试验中井下处理量最高达到 2 000 m³/d,并可将高含水油井产液中 60% 以上的含水直接在井下分离并回注,高峰期日减少产出水超 1 200 m³/d。本研究可为油水旋流分离技术在海上油田的应用及实践提供借鉴。

关键词 海上油田;大处理量;管式;井下油水分离;采下注上;罐装工艺

中图分类号:TE355

文献标识码:A

Research and application of downhole oil-water separation technology with large processing capacity in offshore oilfield

WANG Sheng^{1,2} LIU Min^{1,2} DUAN Zheng³ WAN Jun³ GUO Peiwen²

WANG Yao² MA Xichao² SHI Shiyang⁴

(1. National Key Laboratory of Offshore Oil and Gas Exploitation, Beijing 102209, China; 2. CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Tianjin 300452, China; 3. CNOOC China Limited, Shenzhen Branch, Shenzhen, Guangdong 518067, China; 4. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The large fluid production and high water cut of some production wells in offshore oilfields have led to problems such as high pressure on the platform water treatment and limited export capacity of the submarine pipelines, which have affected the stable oil extraction. A single-stage high-capacity tubular downhole oil-water separator has been developed to meet the demand for reducing produced water in oilfields. Taking the Well H in an offshore oilfield as an example, laboratory experiments were conducted to study the oil-water separation performance of tubular oil-water separators. The influence of oil content,

* 中国海洋石油集团有限公司“十三五”科技重大项目“海上高效采油新技术-井下油水分离技术产业化应用研究(编号:CNOOC-KJ135KJXM NFGJ 2017-01)”部分研究成果。

第一作者简介:王胜,男,高级工程师,主要从事海上油田采油工艺、提高采收率等研究工作。地址:天津市滨海新区塘沽渤海石油路滨海新村西区合作楼 209(邮编:300452)。E-mail:wangsheng5@cnooc.com.cn。

通信作者简介:史仕荧,女,副研究员,主要从事多相流动及分离研究工作。地址:北京市海淀区北四环西路 15 号(邮编:100190)。E-mail:shishiyang@imech.ac.cn。

flow split ratio, and inlet flow rate on separation performance was analyzed using numerical simulation method with Fluent software. Based on the design requirements for the injection and production parameters of Well H, the structural parameters of the tubular downhole oil-water separator for the target well were determined, and a “lower production and upper injection” canned pump-type process string adapted to the well conditions was designed to address the high-capacity processing requirements of offshore oilfields. Research has shown that the tubular downhole oil-water separator can achieve efficient oil-water separation, with the oil content in the separated water being less than 950 mg/L. The canned pump has a compact structure and complete functions, which can meet the large processing capacity requirements of offshore oilfields. In field tests, the maximum downhole treatment capacity reached 2 000 m³/d, and more than 60% of the water content in the high-water-cut oil well production fluid could be directly separated and re-injected downhole, reducing the daily output of produced water by more than 1 200 m³/d at peak periods. This study can provide a reference for the application and practice of oil-water cyclone separation technology in offshore oilfields.

Key words: offshore oilfields; large processing capacity; tubular; downhole oil-water separation; lower production and upper injection; canned pump type process

海上油田经过多年的高速开发逐渐进入高含水、特高含水期,因高含水油井产液量大、产液含水率高,油田濒临经济开采极限等问题^[1-3]。因此,针对中高含水期的海上油田,如何降低油井产水量、实现油田的稳产,同时降低水处理设施成本并减少油田生产水外排压力,已成为高含水油田开发面临的一个重要问题^[4-5]。井下油水分离与产出水回注技术可大幅降低井口产水量,尤其对于海上油田可减轻海管输送和平台水处理设备能力受限等方面的压力,有利于实现节能减排、降低生产运营成本^[6-8]。该技术由加拿大前沿工程技术研究中心于 1991 年提出并在随后开展了广泛的研究和现场实验^[9],发现井下水力旋流器存在可靠性的问题;不仅如此,因水力旋流器的结构不紧凑,将其应用在井下,单根处理量通常最大不到 200 m³/d,在井下应用时采用多根并联,结构和系统操控复杂,产液含砂等使得水力旋流器堵塞或将其磨损穿孔而失效,导致整个系统失效概率增大^[10]。国内现有技术大多针对陆地油田产液量较低、有杆泵举升方式等工况设计,因可靠性等问题国内各油田尚未有大规模应用,现场成熟应用案例也较少,同时也难于满足海上油田的工况需求^[11-14]。

海上油田具有产液量大、电潜泵举升使用率高等特点,因此海上油田油水旋流分离技术需要在紧凑性、高效性、可靠性等方面进优化^[15-18]。本文提出一种管式井下油水分离器,基于室内实验、数值模拟及

现场应用试验等,分析油水分离性能主要影响因素、现场工艺方案及应用效果等。本文研究可为油水旋流分离技术在海上油田的应用及实践提供借鉴。

1 管式井下油水分离器的室内实验研究

管式井下油水分离器原理见图 1,通过固定在管道内的流线型导流片诱导形成旋流场,油水两相在旋流场中因密度差异,油相向管道中心运动最后从管道中心的出油口流出,水相向管壁运动然后在惯性作用下从侧部出水口流出。

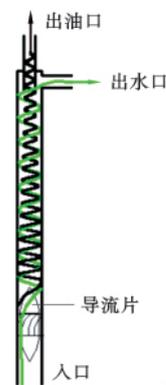


图 1 管式井下油水分离器原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tubular downhole oil-water separator principle

管式井下油水分离器相对于水力旋流器的切向入口起旋而言,其采用在管道中轴向安装的导流片形成旋流场结构紧凑,在相同的筒体直径下油滴迁

移到管道中心的平均距离更短,分离效率更高;除此之外,其采用直筒取代锥形结构,压降小,能够提高处理量而不带来大的压降,因此在井下单根能达到 $3\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ 的处理量,相对于需要多根并联的井下水力旋流器分离系统而言更可靠;轴向安装的导流片沿轴对称,导流后形成的油水分布也是沿管道轴向对称分布,改善了传统锥式分离器入口结构所带来的流场不对称的弊端,又进一步促进了油水分离的高效性,导流效果更优越、油核更稳定,更适合大排量井下油水分离^[19-22]。

1.1 室内实验系统

对管式油水分离器的油水分离性能开展室内实验验证。实验用管式井下油水分离器内通径 $50\ \text{mm}$,导流片角度 60° 。实验中油水两相分别通过油泵、水泵计量后混合进入分离器,分离后的油相进入重力沉降罐,分离后的水相经过计量和测试水中含油率后进入取样桶(图2)。水中含油率的测试采用OilTech121手持式测油仪,其采用荧光分析方法测试水中的含油率。

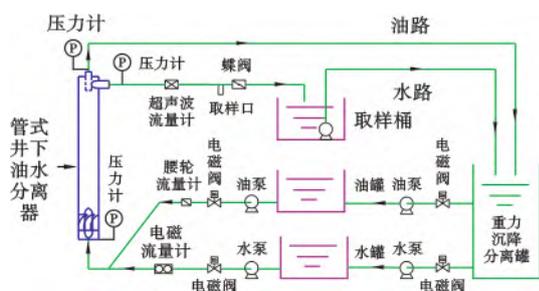


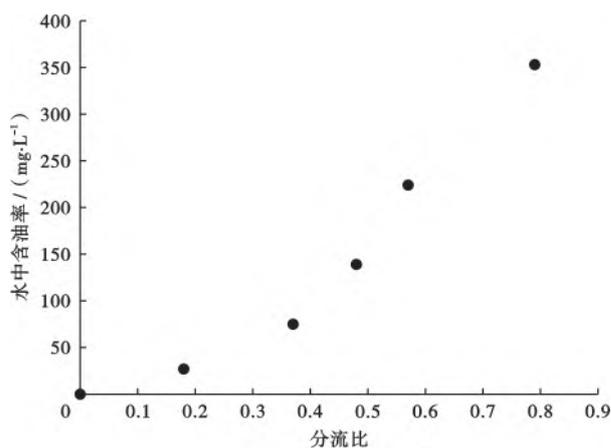
图2 管式井下油水分离器室内实验系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of indoor test system for tubular downhole oil-water separator

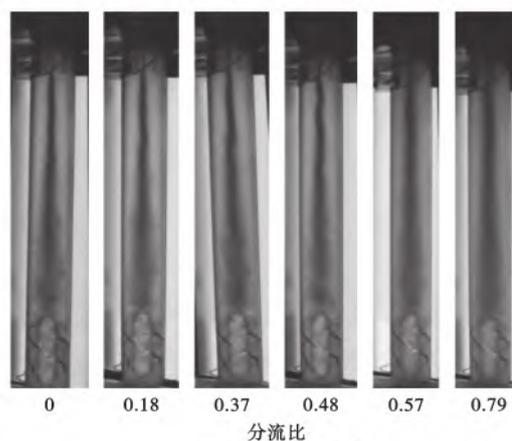
在 $20\ ^\circ\text{C}$ 常压下,实验中水相密度和动力黏度分别为 $998.2\ \text{kg}/\text{m}^3$ 和 $1.01\ \text{mPa}\cdot\text{s}$,油相密度和动力黏度分别为 $839\ \text{kg}/\text{m}^3$ 和 $2.15\ \text{mPa}\cdot\text{s}$,油水界面张力 $0.045\ \text{N}/\text{m}$ 。

1.2 实验结果及分析

管式油水分离器的入口流速为 $0.94\ \text{m}/\text{s}$ 、含油率为 5.6% 时,从分离器的油水分离效果(图3)可以看出,出水口含油率随分流比的增大而增加;当分流比低于 0.2 时,出水口的水中含油率低于 $30\ \text{mg}/\text{L}$;当分流比为 0.8 时,水中含油率达到 $350\ \text{mg}/\text{L}$,证明新设计的分离器能够有效的进行油水分离。也就是说,管式井下油水分离器采用流线型导流片起旋



(a) 油水分离效果图



(b) 油水分离实验照片

图3 管式井下油水分离器分离性能实验结果

Fig.3 Test results of separation performance of tubular downhole oil-water separator

形成旋流场,分散相油滴在旋流场中迁移运动到轴心区域形成油核,最后通过中心区域的单管分油设计是合理的。因此,管式井下油水分离器在井下应用时,可以通过调节出水口流量的方法来改变分流比,直至出水口水中含油率满足工程要求为止。

2 管式井下油水分离器的数值模拟研究

由于管式井下油水分离器应用于实际工况的复杂性,如流量大、不同油井油品密度不确定等,室内实验无法很好地开展实物性能预测。因此采用Fluent软件,模拟分析管式井下油水分离器内部流动的分布规律^[23],并结合目标井模拟实际工况参数对分离器油水分离的性能影响,评价管式井下油水分离器的设计效果及进行性能预测。

2.1 数值模型及目标井工艺参数设计

在管式井下油水分离器应用前需对其性能进行预测。利用 Gambit 软件建立管式井下油水分离器的数值计算物理模型(图 4),该模型将管式井下油水分离器划分为 3 个区域,分别为导流片处、中间柱体段、出水口和出油口部分,其中柱体段生成结构网格,其余 2 个区域形状较复杂处采用混合网格,并将网格扭曲率控制在 0.85 以内;3 个部分一共网格数为 101 万,网格大小平均为 3 mm×3 mm×3 mm,通过 Fluent 软件开展分离性能的数值模拟。以海上某油田 H 井的物性参数为模拟参数:原油密度 822 mg/cm³,黏度 3.68 mPa·s,油井无油层气,仅含微量溶解气,气油比 1.37 m³/m³,悬浮固体含量 4.8 mg/L,属于低黏、高饱和、高凝固点的石蜡基原油。H 井因海管输送能力受限而长期关停,关停前产液量约 1 800 m³/d,含水率约 97.5%,依据地质设计对 H 井开展井下油水分离及回注工艺数值模拟的注采参数设计见表 1。



图 4 管式井下油水分离器数值计算网格划分情况
Fig. 4 Grid division of numerical calculation for tubular downhole oil-water separator

表 1 H 井井下油水分离工艺设计参数

Table 1 Design of downhole oil-water separation process parameters of Well H

参数	数值
井下处理量(油层产液量)/(m ³ ·d ⁻¹)	1 700~2 300
分流比(回注水量/油层产液量)	0.6~0.8
回注水量/(m ³ ·d ⁻¹)	1 020~1 840
回注水中油含量/(mg·L ⁻¹)	≤950
井口产液量/(m ³ ·d ⁻¹)	340~920

2.2 数值模型可靠性验证

为了验证数值模型计算的可靠性,将数值模拟与室内实验结果进行对比(表 2),可以发现,两者结果误差在±20%以内,属于工程可接受的范围,表明本文数值模型可靠,能够进行管式井下油水分离器的流场模拟计算。

表 2 数值模拟与室内实验结果误差对比
(入口流速 0.94 m/s,含油率(体积)5.6%)

Table 2 Result errors comparison between numerical simulation and indoor experiments(inlet flow rate at 0.94 m/s, oil content at 5.6%)

分流比	含油率(质量)/(mg·L ⁻¹)		相对误差/ %
	实验	数值模拟	
0	0	0	0
0.18	27	32	18.5
0.37	75	86	14.7
0.48	139	164	18.0
0.57	224	268	19.6
0.79	353	422	19.5

2.3 油水分离性能主要影响因素模拟分析

管式井下分离器安装于井下后,影响其分离性能的主要因素为入口含油率、分流比和入口流量,各因素对分离性能影响结果见表 3。管式井下分离器

表 3 含油率、分流比、入口流量对分离性能影响模拟结果

Table 3 Simulation results of the effects of oil content, split ratio, and inlet flow rate on separation performance

流量/ (m ³ ·d ⁻¹)	入口		出水口		出油口	
	分流比	含油率(体积)/ %	压降/ kPa	含油率(质量)/ (mg·L ⁻¹)	压降/ kPa	含油率(体积)/ %
1 700	0.6	2	48.5	238	76.0	5.0
		4	48.4	325	76.1	10.0
		6	48.3	426	76.2	14.9
1 900	0.6		50.7	212	85.2	5.0
	0.7	2	73.9	553	65.9	6.5
1 700	0.6	2	90.0	827	45.3	9.7
				48.5	238	76.0
1 900			50.7	212	85.2	5.0
2 300			60.5	195	95.4	5.0

分离性能满足工艺设计标准且处于高效工作区的要求是:能够在实现分流比不低于0.6的同时,分离后水中含油率低于950 mg/L,分离器造成的压降在工程应用合理范围内。

1) 入口含油率对油水分离性能影响。设定入口流量1700 m³/d、分流比0.6,开展了含油率2%、4%、6%的油水旋流分离效果研究。随着入口含油率的增大,分离后的水中含油率逐渐增大,但是均在500 mg/L以内,因此在入口含油率低于6%范围内,分离器可处于高效工作区。

2) 分流比对油水分离性能影响。设定入口流量1900 m³/d、含油率2%,研究分流比0.6、0.7、0.8的管式井下油水分离器性能。当分流比在0.8时,分离后的水中含油率仍低于850 mg/L。分离器满足设计需求,能分离出至少80%的来液流量。

3) 入口流量对油水分离性能影响。设定入口含油率2%、分流比0.6,研究入口流量1700、1900、2300 m³/d的含油率分布。分离后的水流量随入口流量增大而逐渐增大,分离后的水中含油率逐渐降低。因此在上述处理量变化范围内,分离器的分离性能均处于高效工作区。

入口含油率、分流比和流量对分离性能影响的数值模拟结果表明,流量在1700~2300 m³/d时,分离器分离性能及效果满足H井现场工艺设计要求。

3 管式井下油水分离工艺现场试验

为恢复H井产能并解决大量产出水问题,同时验证管式分离器在高产液量油井的应用效果及可靠性,试制分离器样机并开展H井现场试验。结合管式井下油水分离器的分离机理与性能影响规律及H井工况参数,形成该井管式井下油水分离器起旋结构等详细设计参数:导流片的起旋角度32°,分离器主体柱体长度1600 mm,柱体内通径直径100 mm,出油和出水口直径分别为35、62 mm,导流片安装所在的中心棒直径50 mm。

3.1 管式井下油水分离系统工艺方案设计

H井在纵向上共6个层位(表4),其中L1、M1和M3三个层位为合采层,K1层为回注层位。结合H井层位分布及较大的注采量需求,设计了相配套的罐装泵式井下油水分离工艺管柱。

表4 H井层位数据

Table 4 Horizon data of Well H

层位	深度/m	压力/MPa
K1	2 060.0	19.76
L1	2 394.0	23.10
L2	2 420.0	23.38
M1	2 515.5	24.37
M2	2 580.0	24.98
M3	2 627.5	25.44

3.1.1 管柱工艺组成

管柱主体结构包括3部分(图5):上部的悬挂式油水分离器系统,用于实现产液中油、水分离;中间的罐装泵系统,可为产液举升和回注水注入提供动力;下部的分层注采系统,主要用于封隔注水层与产液层,并建立产液、回注水的独立流动通道。

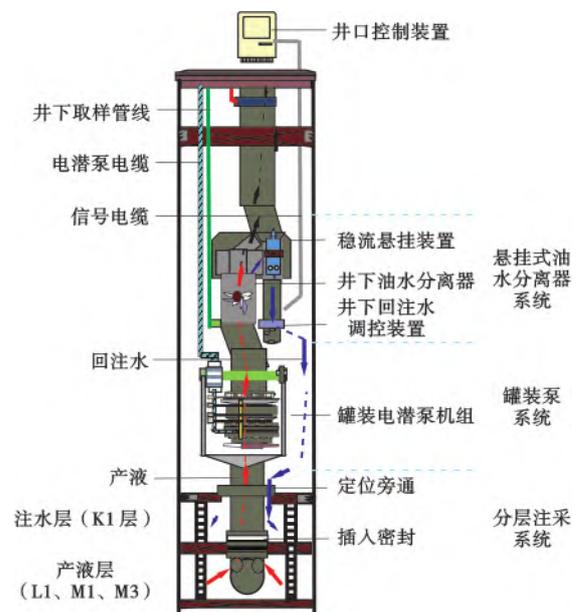


图5 罐装泵式管柱工艺

Fig. 5 Canned pump string process

工艺做了以下配套:①井下回注水调控装置和井口控制装置,可实现对井下注采参数的监控与调节;②井下取样管线,可实现对井下回注水质的取样与监测;③稳流悬挂装置结构,建立分离后油相、水相的单独大流量通道,配合防砂段的定位旁通等满足“采下注上”工艺需求。

3.1.2 现场工艺流程

产出液经防砂段中心油管依次进入泵吸入口和井下油水分离器,并在分离器中进行油、水两相分

离,分离后富含油的产液经油水分离器出油口、稳流悬挂装置上端的油管举升到地面,分离出的水依次流经油水分离器出水口、稳流悬挂装置内部通道、井下回注水调控装置进入回注通道(定位旁通上部油套环空),最终回注到 K1 层。通过井口控制装置实时读取井下回注水压力、流量等参数,结合井口计量产液量计算分流比情况,并通过井下取样检测评价分离效果。需调整工作制度时,通过联动调节井口油嘴开度、井下回注水调控装置水嘴开度及电泵频率,改变分流比等参数,直至满足工艺设计要求。

3.2 现场试验结果

井下油水分离工艺在 H 井的现场试验发现,井下油水分离系统顺利安装并可正常启泵运行,同时实现了井下参数监测及调控等功能。H 井重新投产后的数据表明,管式井下油水分离系统功能正常、运行平稳,井下处理量最高达 2 000 m³/d,分流比超过 0.6,井口产液含水率由 97.5% 降至 94.5%,回注水中含油率基本维持在 200~600 mg/L,与原常规工艺相比,可在产油量基本不变的条件下减少产出水 1 200 m³/d,因此该技术可大幅降低井口产水量,减少平台水处理压力及成本。

3.3 工艺特点及现场适用条件

罐装泵式油水分离管柱工艺主要基于海上油田大多采用电潜泵举升的工况而设计,其主要特点是可以释放产液及回注水通道限制,单管强度高、流道空间大,可在解决国内外同类技术的处理量受限、工艺复杂、成本较高、层位分布限制、井下实时调控等问题的同时,降低修井作业及风险。

罐装泵式油水分离管柱工艺适用于 $\phi 244.475$ mm 套管的油井,尤其适用于产液量 2 000 m³/d 以上的高含水油井控水需求(根据不同产液量可设计不同规格分离器结构);通过调整配套工艺可满足“采下注上”和“采上注下”等不同层位结构的需求。

4 结论

1) 管式井下油水分离器可通过控制流量等参数及调节分流比,根据目标井地质设计要求,实现满足设计要求的水中含油率。

2) 对于一定规格分离器设计,入口含油率的降低及入口流量的增大,均有利于降低分离出的水中含油率,因此目标井可优选高含水、大产液量的油井。

3) 罐装泵油水分离管柱工艺可满足 2 000 m³/d 以上高产液量工况需求,且功能完善、调节效率高,适用于海上高含水油井。

参 考 文 献

- [1] 曹砚锋,李汉兴,黄辉,等. 海上油田高效开发钻井关键技术新进展[J]. 中国海上油气, 2022, 34(6): 124-134. DOI:10.11935/j.issn.1673-1506.2022.06.013.
CAO Yanfeng, LI Hanxing, HUANG Hui, et al. Research progress on drilling and completion technology for efficient development of offshore oilfields[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(6): 124-134. DOI:10.11935/j.issn.1673-1506.2022.06.013.
- [2] 龚宁,马英文,李进,等. 渤海油田水平裸眼井控水工艺技术研究[J]. 中国海上油气, 2020, 32(3): 136-142. DOI:10.11935/j.issn.1673-1506.2020.03.017.
GONG Ning, MA Yingwen, LI Jin, et al. Study on the water control technology in horizontal openhole wells of Bohai oil-field[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(3): 136-142. DOI:10.11935/j.issn.1673-1506.2020.03.017.
- [3] 单彦魁,王丙刚,魏裕森,等. 控水防砂一体化工艺技术研究与应用[J]. 中国海上油气, 2022, 34(3): 133-138. DOI:10.11935/j.issn.1673-1506.2022.03.017.
SHAN Yankui, WANG Binggang, WEI Yusen, et al. Research and application of integrated water and sand control technology[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(3): 133-138. DOI:10.11935/j.issn.1673-1506.2022.03.017.
- [4] 程时清,段炼,于海洋,等. 水平井同井注采技术[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(4): 51-60.
CHENG Shiqing, DUAN Lian, YU Haiyang, et al. Injection-production technique for the same horizontal well[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(4): 51-60.
- [5] 丁文刚,刘琳,杜晓霞,等. 海上井下油水分离旋流器结构设计及优化研究[J]. 石油机械, 2020, 48(6): 69-76.
DING Wengang, LIU Lin, DU Xiaoxia, et al. Structure design and optimization of offshore downhole oil-water separation hydrocyclone[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(6): 69-76.
- [6] 王德民,王研,刘金堂,等. 同井注采井下油水分离器的研制及分离效果[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(5): 66-72.
WANG Demin, WANG Yan, LIU Jintang, et al. Development and separation effect of downhole oil/water separator in single-well injection and production[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2022, 46(5): 66-72.
- [7] 刘合,高扬,裴晓含,等. 旋流式井下油水分离同井注采技术发展现状及展望[J]. 石油学报, 2018, 39(4): 463-471.
LIU He, GAO Yang, PEI Xiaohan, et al. Progress and pros-

- pect of downhole cyclone oil-water separation with single-well injection-production technology [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(4): 463-471.
- [8] 陈家庆, 王强强, 肖建洪, 等. 高含水油井采出液预分水技术发展现状与展望[J]. *石油学报*, 2020, 41(11): 1434-1444.
CHEN Jiaqing, WANG Qiangqiang, XIAO Jianhong, et al. Development status and prospect of water pre-separation technology for produced liquid in high water-cut oil well[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(11): 1434-1444.
- [9] VEIL J A, LANGHUS B G, BELIEU S, et al. DOWS reduce produced water disposal costs[J]. *Oil & Gas Journal*, 1999, 97(12): 76-85.
- [10] BOWERS B E, BROWNLEE R F, SCHRENKEL P J. Development of a downhole oil/water separation and reinjection system for offshore application[J]. *SPE Production & Facilities*, 2000, 15(2): 115-122.
- [11] 邢雷, 蒋明虎, 张勇, 等. 轴入导锥式旋流器内油滴聚并破碎特性[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(2): 140-147.
XING Lei, JIANG Minghu, ZHANG Yong, et al. Analysis of droplet coalescence and breakage characteristics in axis-in hydrocyclone with diversion-cone[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2019, 43(2): 140-147.
- [12] 蒋明虎, 邢雷, 张勇. 采出液含砂对井下油水分离器壁面磨损的影响[J]. *石油机械*, 2018, 46(6): 63-69.
JIANG Minghu, XING Lei, ZHANG Yong. Effect of produced liquid sand content on wall wear of downhole oil-water separator[J]. *China Petroleum Machinery*, 2018, 46(6): 63-69.
- [13] 张勇, 尹存晓, 张艳, 等. 采出液含砂对轴入倒锥式水力旋流器性能的影响[J]. *石油机械*, 2020, 48(6): 91-97.
ZHANG Yong, YIN Cunxiao, ZHANG Yan, et al. Effect of sand content in produced liquid on separation performance of axis-in inverted cone hydrocyclone[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(6): 91-97.
- [14] 张金山, 姜伟, 刘庆, 等. 井下油水分离技术的现状与展望[J]. *化学工程师*, 2020, 34(7): 69-72.
ZHANG Jinshan, JIANG Wei, LIU Qing, et al. Present situation and prospect of downhole oil-water separation technology [J]. *Chemical Engineer*, 2020, 34(7): 69-72.
- [15] 敬加强, 黄婉妮, 宋兴华, 等. 基于 Fluent 的井下油水分离和润滑过程中新型润滑元件设计分析[J]. *化工进展*, 2021, 40(11): 5929-5938.
JING Jiaqiang, HUANG Wannan, SONG Xuehua, et al. Design and analysis of novel lubricating element in downhole oil-water separation and lubrication based on Fluent[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(11): 5929-5938.
- [16] 顾成曦, 刘硕, 侯林彤, 等. 导流片型旋流场内油滴聚并影响因素研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2020, 35(4): 420-427.
GU Chengxi, LIU Shuo, HOU Lintong, et al. Investigation into influence factors of oil droplet coalescence in swirling flow field of vane-type hydrocyclone[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2020, 35(4): 420-427.
- [17] 蒋明虎, 郑国兴, 王凤山, 等. 采出液黏度对旋流器性能影响的数值模拟[J]. *流体机械*, 2018, 46(11): 20-27.
JIANG Minghu, ZHENG Guoxing, WANG Fengshan, et al. Numerical simulation of effects of viscosity of produced fluid on performance of hydrocyclone[J]. *Fluid Machinery*, 2018, 46(11): 20-27.
- [18] 张继成, 卢光夫, 匡力, 等. 同井注采井本井提高采收率潜力研究[J]. *数学的实践与认识*, 2018, 48(23): 69-74.
ZHANG Jicheng, LU Guangfu, KUANG Li, et al. Study on improving recovery efficiency of the well injection and production well in the same well[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2018, 48(23): 69-74.
- [19] 郭沛文, 王瑶, 王胜, 等. 海上井下轴入式旋流油水分离器入口结构优化及应用[J]. *机械工程师*, 2021(5): 164-166.
GUO Peiwen, WANG Yao, WANG Sheng, et al. Inlet structure optimization of offshore downhole axial separator for oil-water separation and its industrial application[J]. *Mechanical Engineer*, 2021(5): 164-166.
- [20] 王胜, 史仕荧. 导流片型油水旋流分离器的入口结构优化[J]. *石油机械*, 2019, 47(4): 80-83, 89.
WANG Sheng, SHI Shiyong. Optimization of inlet structure of vane-type downhole oil-water cyclone separator[J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(4): 80-83, 89.
- [21] 史仕荧, 梁楚楚, 孟熙然, 等. 双同向旋流场中液液变质量流动压降特性研究[J]. *流体机械*, 2018, 46(4): 12-17.
SHI Shiyong, LIANG Chuchu, MENG Xiran, et al. Research on pressure drop characteristics of liquid-liquid variable mass flow in co-dual vortex field[J]. *Fluid Machinery*, 2018, 46(4): 12-17.
- [22] 王胜, 王伟, 史仕荧, 等. 轴流式旋流油水分离器分离性能影响研究[J]. *石油机械*, 2018, 46(5): 99-104.
WANG Sheng, WANG Wei, SHI Shiyong, et al. Study on separation performance of axial-flow hydrocyclone oil-water separator[J]. *China Petroleum Machinery*, 2018, 46(5): 99-104.
- [23] SHI Shiyong, WU Yingxiang, LI Hua, et al. Experimental and numerical studies of flow field in a vane-type pipe separator [C]// 10th International Conference on Hydrodynamics. St. Petersburg, Russia, 2012: 275-280.

收稿日期: 2023-06-05 改回日期: 2023-09-08

(编辑: 韩丹岫)