

# 基于“旋流+亲油疏水膜”工艺的 井下油水分离实验研究

王瑶<sup>1</sup>, 罗昌华<sup>1</sup>, 詹敏<sup>1</sup>, 郭沛文<sup>1</sup>, 史仕荧<sup>2</sup>, 张译<sup>3</sup>

(1.中海油能源发展股份有限公司 工程技术分公司,天津 300452;2.中国科学院 力学研究所,北京 100190;

3.中海石油(中国)有限公司 深圳分公司,广东 深圳 518000)

**摘要:**文中综合旋流+膜分离技术于一体,设计了一种井下“旋流+亲油疏水膜”分离装置。对这种装置进行了样机实验和相关性能研究,确定了膜的最优结构形式、膜与旋流复合的最优形式。研究表明:当将亲油疏水膜与旋流耦合时,膜外不用安装罩时油水分离效果更优;当将旋流油水分离的出油口与膜分离后的出油口连接在一起时,在出水口分流比较小时膜的存在对于促进油水分离效果较明显,出水口分流比较大时膜对于促进油水分离效果较不明显。

**关键词:**旋流+亲油疏水膜;井下;油水分离;实验研究

中图分类号:TE 3

文献标志码:A

文章编号:1002-2333(2023)04-0088-03

## Experimental Study on Downhole Oil-water Separation

### by "Swirl Flow+Oil-Hydrophobic Membrane" Technology

WANG Yao<sup>1</sup>, LUO Changhua<sup>1</sup>, ZHAN Min<sup>1</sup>, GUO Peiwen<sup>1</sup>, SHI Shiyong<sup>2</sup>, ZHANG Yi<sup>3</sup>

(1. Engineering Technology Branch, CNOOC Energy Development Co., Ltd., Tianjin 300452, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science Beijing 100190, China; 3. CNOOC Shenzhen Branch, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** This paper designs a separation device of "cyclone + hydrophilic and hydrophobic film" by integrating cyclone+ membrane separation technology. The prototype test and related performance research of the device are carried out, and the optimal structure form of membrane and the optimal combination form of membrane and cyclone are determined. The results show that when the hydrophilic membrane is coupled with cyclone, the oil-water separation effect is better without a cover installed outside the membrane. When the outlet of swirling oil-water separation is connected with the outlet of membrane separation, the effect of membrane on oil-water separation is more obvious when the outlet shunt ratio is small, but less obvious when the outlet shunt ratio is large.

**Keywords:** swirl flow+oil-hydrophobic membrane; downhole; oil-water separation; experimental study

## 0 引言

随着油田开采进入高含水开采期,采出液含水率逐年升高,生产成本逐渐增大,为了解决这个问题,20世纪90年代提出井下油水分离,即DOWS技术,在井底将产出水与油气分离,并将分离出的水回注到废层,分离后的油气被泵回地面<sup>[1]</sup>。根据DOWS分离效率、成本、复杂性、出现故障的频率及对控制系统的要求,已经使用过的井下分离系统主要分为两类,一种为重力分离,一种为旋流井下油水分离。此外还有一种为膜分离技术,这种分离技术仍然在研究中<sup>[2-3]</sup>。在井下油水分离系统的应用中,单一旋流往往很难达到注水指标要求,为了提高处理效果,本文研究将旋流与膜技术联合使用,探究其对于促进井下油水分离性能方面的可行性<sup>[4]</sup>。

泡沫镍是一种具有互相贯通的多孔隙海绵体,具有密度低、比表面积大、孔隙率高等优点,可以吸收一定体积的液体并储存在孔隙中,并有很好的耐蚀性与稳定性,可以用于具有腐蚀性的液体中。且泡沫镍易于加工成不同形式,满足不同的应用场合,近些年不少学者将其进行

改性并用于制作亲油疏水膜<sup>[5]</sup>。故“旋流+亲油疏水膜”中的亲油疏水膜采用改性泡沫镍作为原材料,研究将其结合已经在现场应用过的井下导流片型旋流油水分离器的分离性能,为现场应用提供指导<sup>[6]</sup>。

### 1 “旋流+亲油疏水膜”实验装置

经过表面改性的泡沫镍片能够使得油滴与之接触角达到150°,实现亲油特性。每个片可焊接成长度为10 cm、外径为3.18 cm的卷,将卷与卷之间焊接成一个长筒,然后固定多孔管的外面,固定连接在底部法兰端面上,所制成的改性泡沫镍样机如图1所示。

制作好的改性泡沫镍(即亲油膜)放置在轴入流线型旋流油水分离器的左

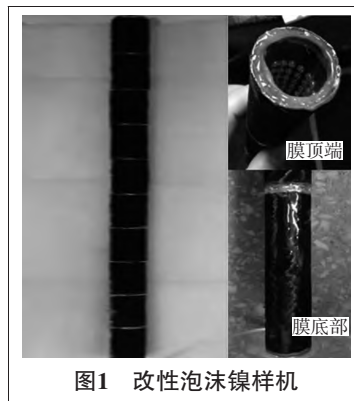


图1 改性泡沫镍样机

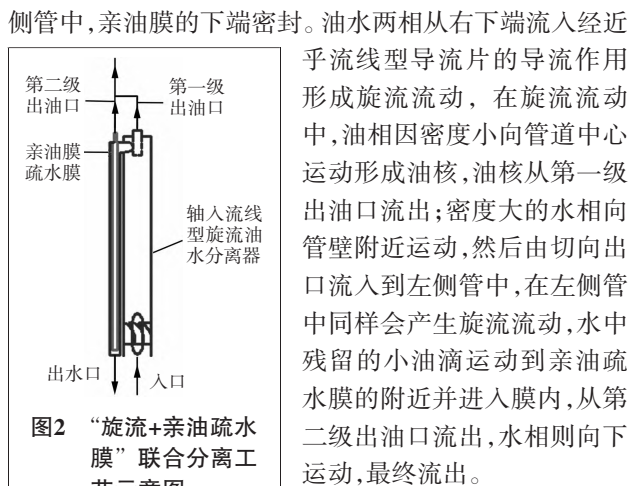


图2 “旋流+亲油疏水膜”联合分离工艺示意图

2 实验流程和实验介质

2.1 实验流程

为了对前述设计的旋流+亲油疏水膜的性能进行测试,在实验室搭建的实验系统如图3所示,油、水两相分别通过计量后混合流入轴入流线型旋流油水分离器,经过旋流器的初步分离,水进入侧管,由亲油膜进一步分离。由于有两级出油口的流体流入取样桶,出水口的流体经过计量后进入重力沉降分离罐,3路出口均有阀门调节流量。通过计量各路流量来得到每路的分流比(支路与入口总流量之比)。

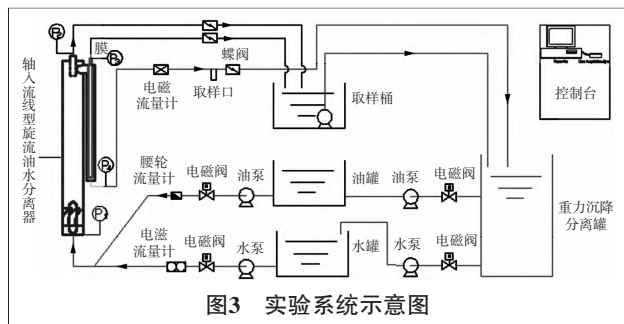


图3 实验系统示意图

2.2 实验介质

实验时,温度控制在20℃左右,实验介质为LP-14白油和水,其中,LP-14白油为牛顿流体。在20℃、常压下,水相的物性参数为:密度 $\rho_w=998.2 \text{ kg/m}^3$ ;动力黏度 $\mu_w=0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。油相的物性参数为:密度 $\rho_o=839 \text{ kg/m}^3$ ;动力黏度 $\mu_o=0.00215 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;油水界面张力 $\sigma=0.045 \text{ N/m}$ 。

3 实验结果及分析

3.1 膜外有带孔玻璃罩的分离效果

当膜外侧罩有有机玻璃罩时,由于有机玻璃罩与膜不贴合,造成流体与膜之间有空间,流体可以在这里面贯穿流动,这种情况对外侧流场会有影响。在这种工况下,首先对两个出油口分开流出进行了实验,然后合并在一起测试实验结果。

通过实验观察,发现油滴在流过这种有机玻璃罩反而会被阻挡在外侧,为了定量地研究其对油水分离的影响,对比了有无第二级膜对油水分离性能的影响。当入口流量为3.95 m<sup>3</sup>/h时,入口含油率约为5%,保持出水口分流比为65%,变化膜出口的分流比为35%、27%和10%,表1

和图4显示了分离的结果。从实验结果可以看出,当出水口分流比一定时,膜出油口打开的效果更差,通过仔细观察发现,存在有机玻璃罩时,由于孔不是切向开设的,油滴在周围环绕,但是相对于水更难进入到膜中。当出水口分流比一致时,增大膜出口分流比,则轴入式旋流油水分离器的出油口分流比减小,则部分油滴无法通过第一级旋流分离掉,进入除水管侧,除水管侧虽然形成了旋流,油滴围绕着膜外侧的有机玻璃罩运动,但是不能有效地进入膜内,从而出水口中的水中含油率增大。这主要是由于孔没有切向开设,破坏了流场。

表1 实验结果对比

膜出口分流比/%	出油口分流比/%	出水口含油率	膜内外压差/kPa	对应图号
0	35	0.003 554	9.24	图4(a)
27	8	0.005 313	10.12	图4(b)
10	20	0.005 621	9.67	图4(c)

3.2 膜外无带孔玻璃罩的分离效果

为了测试有机玻璃罩是否对膜的分离性能产生了不利的影响,敲掉膜外层的有机玻璃保护罩,并开展了相关的实验。实验观察表明,油滴在膜外旋转,但是需要设计测试对比,才能得知油滴能否更顺利地进去。通过测试可以看出,当入口流量为4 m<sup>3</sup>/h、阀门打开45°时,膜内的含油率高于膜外出水口含油率,但是当阀门开度为90°时,所有的数据又呈现相同的规律,即膜内的含油率低于膜外的含油率。分析发现,当第二级出油口阀门开度为45°时,流体在第二级膜出油口内可能发生了串流,即第一级出油口的流体串流进入第二级内,然后流回第二级膜并从出水口侧流出,油滴在通过第二级膜的时候被阻挡。

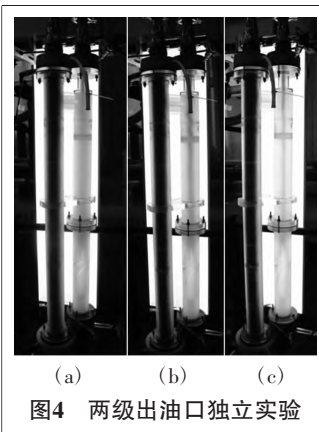


图4 两级出油口独立实验

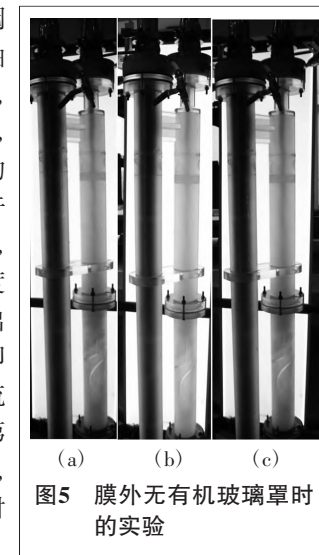


图5 膜外无有机玻璃罩时的实验

表2 实验结果

入口含油率/%	出水口含油率	膜内外压差/kPa	膜内水中含油率	对应图号
5.0	0.003 275	9.88	0.003 680 (阀门开45°)	图5(a)
5.0	0.002 370	9.81	0.001 633 (阀门开90°)	图5(b)
8.6	0.006 420	9.98	0.000 756 (阀门开90°)	图5(c)

3.3 两级出油口合并一路时的分离效果

为了真实地模拟井下这种膜+旋流器的工作状态,即

(下转第92页)

常缺陷信号,并且因该缺陷的阻挡而导致右侧下半部分螺纹齿信号出现较大面积的异常。



图9 检测现场发现一个存在裂纹的螺栓

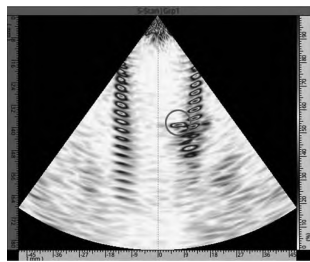


图10 螺栓端面正负角度扇扫实际缺陷信号图像

#### 2.4 可靠性验证

为了验证超声相控阵检测的可靠性,将该螺栓取出,用磁粉检测对该螺栓进行复验。磁粉机的线圈直径为300 mm,故选择低充填因数线圈法进行磁化,偏心放置时磁化电流选择为210 A,用A1-30/100 μm试片灵敏度检验合格,螺栓的检测结果如图11所示,黄绿色裂纹清晰可见<sup>[6]</sup>。用钢尺测量缺陷位置及尺寸,与超声相控阵检测结果进行对比,误差不超过0.5 mm,试验结果得到有效验证。

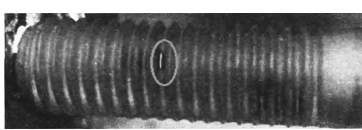


图11 缺陷螺栓荧光磁粉检测裂纹显示

### 3 结论

通过试验分析,得出如下结论:1)与常规超声相比,超声相控阵检测技术的缺陷信号图像显示具有形象直观

(上接第89页)



图6 两级出水口合并时的分离效果

井下无法调控两个出水口的分流比,因此将分离器的两个出水口合并成一路,并保持出水口分流比为65%,由此可以看出,膜出水口打开后,膜内的含油率仍然低于出水口的含油率,即膜没有发挥应有的作用,和前面的实验结果一致。

表3 实验结果

入口含油率/%	出水口含油率	膜内外压差/kPa	膜内水中含油率	对应图号
5.0	0.010 296	9.30	0.005 114	图6(a)
5.0	0.005 889	9.24	膜侧出水口关闭	图6(b)
8.6	0.011 455	9.46	0.007 155	图6(c)
8.6	0.012 798	9.20	膜侧出水口关闭	图6(d)

### 4 结论

当膜外有有机玻璃罩时,罩的存在不利于油滴进入罩内从而被膜吸附,此时除水管侧加膜的效果还不如不加膜的分离效果;罩有有机玻璃罩时,通过膜分离后的出

等特点,避免由于操作人员经验不足导致的缺陷信号误判和严重安全事故;2)超声相控阵检测扇扫描技术的应用使得声束可以在预期位置得到聚焦,提高了检测分辨力和信噪比,增加检测灵敏度;3)采用超声相控阵检测技术可以对在役螺栓进行不拆卸检测,具有较高的缺陷检出准确性,在保证安全生产的基础上,降低企业的运行成本,并且提高了企业的经济效益。该技术对广泛应用于风电机组及其他行业的在役螺栓检测、排除安全隐患有很大的帮助<sup>[7]</sup>。

#### [参考文献]

- [1] 吕建,陈利新.港口机械在役螺栓的相控阵超声检测[J].无损检测,2019,41(12):54-56,60.
- [2] 卢超,钟德煌.超声相控阵检测技术及应用[M].北京:机械工业出版社,2021:51-52.
- [3] 薛利杰,刘晴岩,方雨,等.特种设备在役螺栓超声相控阵检测成像影响因素[J].无损检测,2016,38(7):6-10.
- [4] 付检平,陈新中,潘晴川,等.典型高温紧固螺栓不拆卸相控阵检测技术研究[J].中国特种设备安全,2021,37(4):56-60,113.
- [5] 宋远,张洋,于达.在役螺栓的相控阵检测工艺[J].无损检测,2019,41(12):21-24.
- [6] 陈士华.制动盘螺栓横向疲劳裂纹磁粉检测[J].轨道交通装备与技术,2017(5):50-51.
- [7] 潘强华,张君娇,杨齐,等.火电厂紧固螺栓的相控阵检测的应用[C]//远东无损检测新技术论坛,2016:100-106.

(编辑 邵明涛)

作者简介:魏宁(1989—),男,学士,实验师,主要从事无损检测技术的研究与应用工作。

收稿日期:2022-06-27

油口水中含油率比出水口略有增加,说明膜的效果不明显;当将两路合成一路时,有膜的分离性能更差;当敲掉有机玻璃罩后,相对于有有机玻璃罩时油水分离效果更优,说明有机玻璃罩对二级旋流分油有阻碍作用;当出水口分流比较小,有膜的出水口含油率更低,当分流比较大,没有膜的分离效果更优,说明膜适用在出水口分流比相对较小的情况。

#### [参考文献]

- [1] VEIL J A. Interest Revives in Downhole Oil-water Separators [J].Oil & Gas Journal,2001,99(9):47-56.
- [2] 邵建萍,牛宝荣,张兴平.井下油水分离技术综述[J].国外油田工程,2006,22(9):16-17.
- [3] WIGGINS M L,牛宝荣,徐军林.井下油水分离技术综述[J].吐哈油气,2006(2):195-196.
- [4] 蒋明虎,芦存财,张勇.井下油水分离系统串联结构设计[J].石油矿场机械,2007,36(12):59-62.
- [5] 张皎圆.超疏水超亲油材料的制备及其油水分离性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
- [6] 刘伟男,朱成杰,杨朝忠,等.基于超疏水金属微孔薄板的油水分离数值模拟[J].广东化工,2021,48(8):60-62,68.

(编辑 邵明涛)

作者简介:王瑶(1985—),女,硕士,工程师,主要研究方向为采油工艺技术。

收稿日期:2022-07-27