

海上油田含聚生产水旋流气浮装置试验研究

李永丰¹ 刘敏¹ 王晓飞¹ 吴应湘² 许晶禹²

摘要：旋流气浮装置是海洋石油平台含聚污水的处理装置。装置将管式旋流分离器与微孔气浮、溶气气浮技术相结合，结构紧凑，占地面积小，适用于海上采油平台。针对海上油田特点试制一套处理量为 15 m³/h 工业化样机，并进行油田现场试验。现场试验表明，该装置能将污水含油质量浓度从 494 mg/L 降到 46.3 mg/L，除油率为 90.6%；固体悬浮物质量浓度从 269 mg/L 降到 41 mg/L，除悬浮物能力为 84.5%。

关键词：旋流气浮；含聚污水；油水分离；现场试验

Doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2016.10.007

Cyclone Flotation Unit Test and Research on Produced Water Containing Polymer in Offshore Oilfield

Li Yongfeng, Liu Min, Wang Xiaofei, Wu Yingxiang, Xu Jingyu

Abstract: CFU (Cyclone Flotation Unit) is a specifically designed device for wastewater treatment in offshore field. Device using tubular cyclone separator with microporous air flotation and dissolved air flotation technology, the structure is compact, cover an area of an area small, apply to offshore oil platforms. Develop a capacity of 15 m³/h industrial prototype, and complete oil field test specially for offshore oilfield character. The oilfield pilot test shows that the device can reduce the oil content of sewage from 494 mg/L to 46.3 mg/L, and the oil removal rate is 90.6%; The concentration of suspended solids from 269 mg/L to 41 mg/L, the removal rate is 84.5%.

Key words: cyclone flotation; produced water containing polymer; oil-water separation; field test

聚合物驱油是三次采油的重要技术措施之一，渤海油田从 2003 年单井试注到目前已大规模应用该项技术。聚合物大量注入地层，不可避免地要随流体携带出。随着注聚规模的扩大，采出液中聚合物含量逐渐增多，聚合物的存在使采出液的黏度增大、水中油滴粒径减小，处理难度增大，油水沉降分离效果差^[1-2]。在聚驱采出液中 PAM 浓度一般小于 600 mg/L，其相对分子质量在 200 万~500 万之间^[3]，与常规采出液相比，聚合物驱采出液具有黏度大、矿化度高、乳化程度高、油珠粒径小、油珠浮升速度慢等特点^[4]。同时海上平台处理流程短，油水沉降时间仅为陆地油田的几十分之一，所以海上注聚油田的聚合物驱采出液处理难度很大。

本文针对较难处理的含聚污水，开发研制了管式高效油水分离系统和高效气浮处理装置，并根据海上

油田特点，设计出一种新型且具有自主知识产权的高效处理系统。油田现场试验表明，旋流气浮装置能够对含聚污水进行高效处理，且装置占地面积小，集成度高，适用于海上采油平台。

1 海上含聚污水高效分离工艺

目前海上油田污水处理系统一般采用三级处理工艺，即斜板除油器—加气浮选器—核桃壳过滤器，不同油田处理工艺略有差异。聚合物驱油田各级污水系统含油浓度为：斜板除油器入口 800~1 500 mg/L；加气浮选器入口 300~500 mg/L；核桃壳过滤器入口 150~80 mg/L。陆地聚驱油田污水处理系统停留时间一般超过 18 h，而海上油田污水处理系统停留时间仅为 30~50 min。

聚驱油田污水组成复杂，水中的油珠可分为悬浮油、分散油、乳化油和溶解油。悬浮油、分散油

¹中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司 ²中国科学院力学研究所

粒径 $\geq 10 \mu\text{m}$,这两种油通过离心分离即可上浮。乳化油粒径为 $0.1\sim 10 \mu\text{m}$,尤其是其中含有的聚丙烯酰胺高分子有机物,具有很强的表面活性,原油发生了高度的乳化,油水界面膜强度增大,界面电荷增强,导致该部分油珠具有很强的稳定性,单通过自然沉降不能使其分离。

针对海上油田空间小、油品性质复杂设计了旋流气浮装置分离工艺(图1)。

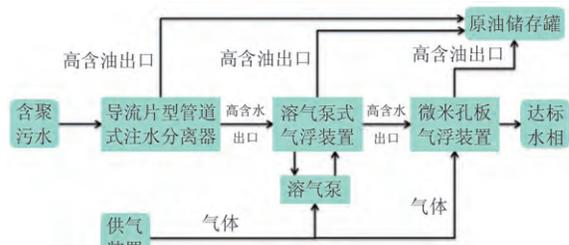


图1 旋流气浮装置分离工艺

来液首先从导流片型管道式分离器的入口进入,经旋流分离后,高含油混合液由分离器顶部出口流出,污水由切向布置的出水小孔分出,经4个同一旋转方向的管道进入溶气泵气浮罐体,在罐体内形成旋流场。同时溶气泵开始工作,对进入罐体内的液体进一步处理,处理后的水相由下出口进入下一级微米孔板气浮装置,高含油混合液由上出口流出污水处理系统。然后,微米孔板气浮罐对污水进行进一步处理,经处理后达标的水相由排水口直接进入污水深度处理系统,油相由出水口流出。最终3个高含油混合液管道汇集至储油罐。

2 管式旋流分离器试验

2.1 分离器性能的影响因素

(1) 切向速度。在管道式导流片型油水分离器的三维旋流运动中,切向速度决定了旋转所产生的离心加速度和离心力的大小,是油相分离的决定性因素。入口流量对切向速度分布的影响较大,切向速度分布的最大值与入口流量基本上呈线性关系(图2)。

(2) 轴向速度。轴向速度分布决定着油水两相能否通过一定的结构设计实现最终的分离。在旋流场中,油水由密度的差异实现径向上的分离,形成分布在中心区域的油核,又因为管中心区域流速大,即油核在管中心快速向前运动;水分布在管壁附近,由管壁附近的切向开孔作为水相出口。

2.2 分离器的分离性能

(1) 分流比对油水分离效果的影响。不同分流比时,随着分流比增大,管中油核逐渐变粗。当分流比较小时,大部分来液从出油口流出,上出口截

面的平均轴向速度大,管中油核的平均轴向速度较大,油核迅速从出油口流出分流器。当分流比增大到89.2%时,在入口来液工况不变的情况下,大部分来液从出水口流出,小部分来液从出油口流出,出油口的平均轴向速度减小,油核的平均轴向速度减小,停留在分离器中的油量增加,因而油核变粗。当油核变粗后,油核中的油滴从锥段出水口流出的概率增大,使得出水口中的水中含油率增大;当分流比继续增大,出水口的水中含油率继续升高,直至达到入口含油率。

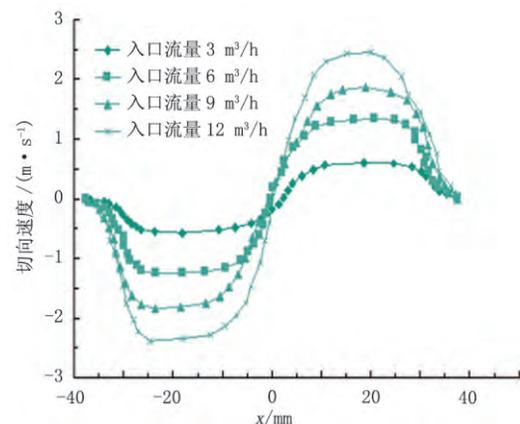


图2 入口流量对切向流速分布的影响

(2) 入口含油率对油水分离效果的影响。随着含油率的增大,分离器中油核普遍变粗,当油核粗到一定程度,使其从出水口中流出的概率增大,即分离器存在一定的入口含油率工作区间,应控制入口含油率 $< 15\%$ 。随着入口含油率的升高,出水口的含油率逐渐增高。入口含水率为97.9%时,可除去至少94%的含油浓度低于950 mg/L的水;入口含水率降低为82.9%时,可除去70%的含油浓度低于950 mg/L的水。

(3) 入口流速对油水分离效果的影响。同等管径下,当入口含水率为94.9%时,随着入口流速增大,出水口含油率先增大后减小;随着入口流速的增大,油相的平均油滴粒径越来越小,即油相的平均粒径逐渐变小。当入口流速增加不明显时,油水分离性能下降;最大稳定粒径与入口流速成反比,而分离效果与入口流速成正比。因此两者有一个转折点,在一定流速区间,入口流速对分离效果有促进作用;在另外一个流速区间,则起反作用(图3)。

(4) 导流片的安装角度对油水分离效果的影响。同样的入口条件下,导流片的角度越大,油滴从壁面附近运动到轴心所需的时间越长(径向迁移的路程等于径向速度乘以时间),径向迁移速度也就越小。通过试验可知,当入口流速低于0.87 m/s,

导流片的最优角度是大于 20° 且小于 30° ；当入口流速高于 0.87 m/s 时，导流片的最优角度是大于 30° 且小于 40° 。

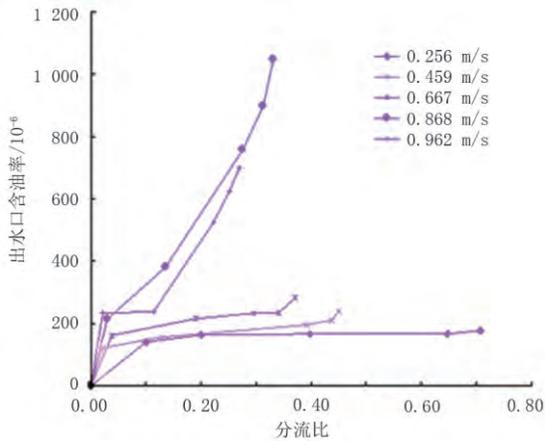


图3 入口流速对油水分离效果的影响

3 旋流气浮装置试验

气浮法是利用水中的微小气泡，使小气泡粘附颗粒并且形成气浮颗粒上浮至液面，从而达到污水净化效果的一种处理方法^[5]。气浮分离必须满足两个必要条件：①向水中提供足够数量的微小气泡；②使污染物呈悬浮状态或具有疏水的性质，从而附着于气泡上浮，实现分离。

本研究中，以微米孔板气浮技术和气液混合泵为基础，完善气浮在处理含聚污水中的应用方法。另一方面，结合管式高效离心分离系统，将多相分离和污水处理相结合，进一步提高两种分离技术的效率，实现对油田产液的高效、一体化处理，减小占地面积，降低生产成本。

3.1 微米孔板气泡发生装置

在厚度为 $0.6\sim 1\text{ mm}$ 的钢片上，采用一定强度的激光束打孔，孔径在 $10\sim 40\ \mu\text{m}$ 之间，按照不同的间隔制成不同的钢模。采用微米孔板可以产生非常均匀的微小气泡，可提高气浮处理污水的效率，其产生的气泡如图4所示。

通过初步试验可知，微米孔板产生气泡非常均匀。室内微米孔板试验采用SZ36-1油田的生产污水为试验介质，试验流程如图5所示。试验装置主要由污水储存罐、循环泵、流量计、微米孔板气浮装置、气体供给装置等组成。经过该气浮试验装置处理后的含聚污水含油浓度由原来的 600 mg/L 降至 80 mg/L 。

3.2 气液混合泵气泡发生装置

气液混合泵气泡发生装置是将泵内加压、叶轮搅拌等技术相结合，在进气口位置形成负压区，将气体引入泵内，然后经过加压溶解和叶轮的搅拌作

用，将难以相溶的水和气体进行高效混合溶解并进行压送，以连续稳定地发生微气泡。气泡粒径约 $20\sim 40\ \mu\text{m}$ ，不需要释放器，所以装置结构简单，操作方便。



图4 微米孔板生成微气泡结构

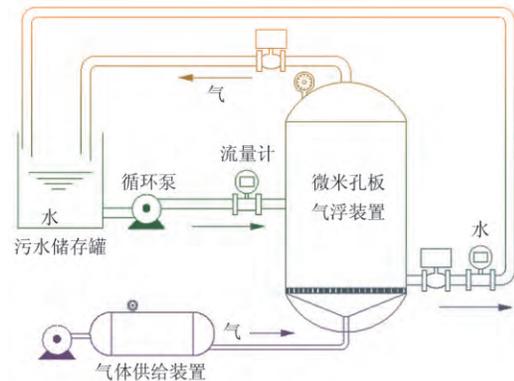


图5 微米孔板试验流程

但目前广泛应用的溶气泵气浮结构存在流体动量过大等问题，影响气浮罐体内的流场结构，不易于油滴等污染物与水的分离。因此，结合溶气泵形成气泡的机理，设计加工了不同种类的溶气泵出口结构（图6），并在透明罐体内进行试验。通过试验观察，5种结构中 90° 折弯管出口气泡分布最为均匀。

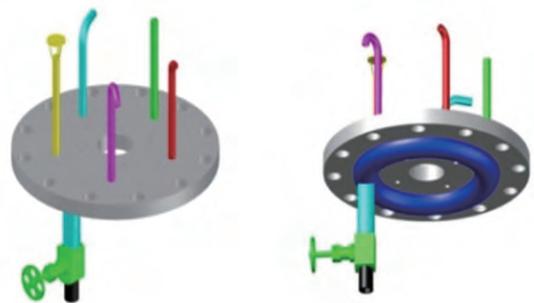


图6 溶气泵出口结构设计

4 样机试制及现场试验

工业样机按照海上油田应用要求建造，主要设备由旋流橇和气浮橇构成，整个设备采用电动阀门手动控制，样机设计参数见表1。

表1 样机设计参数

参数	数值	参数	数值
处理量/(m ³ ·h ⁻¹)	15	工作容积/m ³	1.5
设计压力/MPa	≤1.0	入口悬浮物浓度/(mg·L ⁻¹)	≤1 000
工作压力/MPa	0.8	出口悬浮物浓度/(mg·L ⁻¹)	≤100
设计温度/°C	110	入口含油浓度/(mg·L ⁻¹)	≤1 000
工作温度/°C	90~110	出口含油浓度/(mg·L ⁻¹)	≤50

注：介质为含油污水，设备材质为304不锈钢

高效分离工艺样机于2013年12月在油田现场进行试验，试验结果见表2。

表2 油田现场试验结果

入口 流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	含油质量浓度/(mg·L ⁻¹)				悬浮物质量浓度/(mg·L ⁻¹)		
	总 入口	一级 出口	二级 出口	油相 出口	总 入口	一级 出口	二级 出口
15	472	126	75	4 395	274	94	48
15	469	102	52	4 561	235	89	51
15	487	85	38	4 883	296	68	36
15	495	92	36	4 913	264	112	68
15	430	89	37	4 795	277	118	75
15	465	85	43	4 913	287	72	37
15	523	89	47	4 795	261	67	40
15	514	79	51	4 690	285	71	47
15	476	83	44	4 937	225	67	40

5 结论

旋流气浮工艺除油率达90.6%，除悬浮物能力达84.5%，该处理工艺较斜板除油器+气浮工艺水的停留时间缩短。旋流气浮分离工艺装置主要包括导流片型管道式分离器、气液混合气浮装置和微孔

(上接第21页)场作用的根源，而蜡分子聚集结构的存在使得磁场对蜡的取向作用足以克服热能壁垒，并发生旋转取向。此外，还对磁处理在蜡晶形核生长及交联凝胶过程中所起到的作用进行分析。磁取向作用能够产生三种效应，即减小蜡晶的粒度、取向排列及形成“有序流动”的油流等。这三个方面的共同作用会显著抑制蜡晶网络结构的生成，从而导致原油的胶凝温度降低及低温流动性增强，产生防蜡降黏的效果。

参考文献

- [1] 汪仲清. 液态流体的粘度与磁处理降粘作用的机理[J]. 石油学报, 1995, 16 (4): 154-160.
- [2] TAO R, XU X. Reducing the viscosity of crude oil by plused electric or magnetic field[J]. Energy & Fuels, 2006 (22): 2 693-2 706.
- [3] 汪仲清. 磁场对液态物质分子的作用机制[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1998, 22 (4): 116-119.
- [4] SHAO H, GANG H, SIROTA E. Magnetic-field induced orientation and anisotropic susceptibility of normal alkanes[J]. Physical Review E, 1998, 57 (6): 6 265-6 268.
- [5] KIMURA T, YAMATO M, KOSHIMIZU W, et al.

板气浮装置。该工艺采用重力分离、膨胀分离、离心分离等原理，具有处理效率高、体积小等优势，便于在平台上安装，可节约有限的空间。

参考文献

- [1] 吴迪, 艾广智, 李克顺, 等. 聚合物驱和三元复合驱采出水变性和采出液稳定性研究[J]. 日用化学品科学, 2000, 23 (1): 110-115.
- [2] 任广萌, 孙德智, 李成钢, 等. 聚合物驱采油废水深度处理工艺[J]. 化工环保, 2004 (24): 202-205.
- [3] 陆耀军. 液-液旋流分离技术综述[J]. 石油学报, 1997, 18 (1): 97-103.
- [4] 牡丹, 吴迪, 寇鹏鸣, 等. 聚合物驱采出水处理技术发展[J]. 辽宁化工, 2011 (6): 590-592.
- [5] 孙莹, 王振波, 苏慨然. 气浮法处理含油污水研究概况[J]. 过滤与分离, 2014, 24 (2): 46-48.
- [5] 戴赏菊. 高效加压溶气气浮工艺在炼油污水处理中的应用[J]. 石油化工环境保护, 2006, 29 (2): 26-27.

作者简介

李永丰：工程师，2003年毕业于河北工业大学化学工程与工艺专业，从事油田产出液处理技术应用与管理工

收稿日期 2015-07-23

(栏目编辑 杨军)

Magnetic-field induced orientation of paraffin[J]. Chemistry Letters, 1999 (10): 1 057-1 058.

- [6] RADLINSKI A, BARRÉ L, ESPINAT D. Aggregation of N- alkanes in organic solvents[J]. Journal of Molecular Structure, 1996, 383 (1-3): 51-56.
- [7] SAKURAI S. Progress in control of microdomain orientation in block copolymers: Efficiencies of Various External Fields[J]. Polymer, 2008 (49): 2 781-2 796.
- [8] INABA A, TOZAKIA K, HAYASHIA H, et al. Magnetic effect on the phase transitions of N-C₃₂H₆₆ measured by high resolution and super-sensitive DSC[J]. Physica B, 2002 (324): 63-71.
- [9] ROCHA N, GONZALEZ G, MARQUES L, et al. A preliminary study on the magnetic treatment of fluids[J]. Petroleum Science and Technology, 2000, 18 (1-2): 33-50.

作者简介

张伟伟：讲师，2012年毕业于哈尔滨工业大学，从事原油防蜡技术及机理研究工作，18203605752, vivid@zzu.edu.cn, 河南省郑州市郑州大学机械工程学院，450001。

收稿日期 2015-09-11

(栏目编辑 杨军)