文章编号:1673-5005(2016)03-0149-06 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2016.03.020

低强度旋流气浮处理含油污水实验研究

罗小明[1], 付 浩[1], 潘悦文[2], 何利民[1], 高国华[1]

(1. 中国石油大学储运与建筑工程学院,山东青岛 266580; 2. 中国石油天然气股份有限公司青海油田分公司,甘肃敦煌 736202)

摘要:低强度旋流气浮技术是基于弱离心力场的非常规气浮技术,利用离心力强化油滴与气泡的碰撞、黏附,可提高浮选效率。为了优化低强度旋流气浮的浮选性能,研究旋流强度、含油量、回流比和气泡注入方式(顺流、逆流)对浮选性能的影响。结果表明:旋流场处于低雷诺数湍流运动时,气泡与油滴能高效地完成碰撞、黏附、浮升,同时可避免湍流对气泡-油滴聚合体稳定性的破坏;低强度旋流浮选时,气浮筒对水力波动的适用能力强,且能有效地处理低含油量污水;气浮筒在顺流或逆流时具有不同的最优浮选区间,当入口旋流强度为 17.0 g(顺流)或 13.0 g(逆流)时,浮选效果最佳,当含油量为 500 mg/L,回流比为 20% ~35%(顺流)或 30% ~35%(逆流)时,除油效率不低于 75%。

关键词:含油污水; 水处理; 旋流气浮; 低强度旋流场; 射流器

中图分类号:TE 624 **文献标志码**:A

引用格式:罗小明,付浩,潘悦文,等. 低强度旋流气浮处理含油污水实验研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(3):149-154.

LUO Xiaoming, FU Hao, PAN Yuewen, et al. Experimental study of low intensity cyclone flotation on wastewater treatment [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2016,40(3):149-154.

Experimental study of low intensity cyclone flotation on wastewater treatment

LUO Xiaoming[1], FU Hao[1], PAN Yuewen[2], HE Limin[1], GAO Guohua[1]

(1. *College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266580, *China*;
2. *Qinghai Oilfield Company*, *CNPC*, *Dunhuang* 736202, *China*)

Abstract: Low intensity cyclone flotation is an unconventional flotation based on low intensity centrifugal force field, which uses centrifugal force to enhance the collision and adherence between oil droplet and bubble, and therefore improves the flotation efficiency. To optimize the separation performance of low intensity cyclone flotation, the influences of swirl intensity, oil content, reflux ratio, bubble injection method(downstream, upstream) on the flotation performance were studied. The results show that, when the swirl flow field is turbulent flow of low Reynolds number, the oil droplets can collide and adhere with the bubbles effectively, and then can avoid the destruction of the oil droplet-bubble polymer caused by the high intensity turbulent flow. The performance of downstream flotation is different from one of upstream flotation. The low intensity cyclone flotation unit has strong ability to adapt to hydraulic fluctuations, and can treat wastewater of low oil content effectively. The optimum operating condition of cyclone flotation unit is: when the inlet centrifugal acceleration is 17.0 g(downstream) or 13.0 g(upstream), oil content is 500 mg/L, reflux ratio is 20% -35%(downstream) or 30% -35% (upstream), the oil removal rate is not less than 75%.

Keywords: oily wastewater; water treatment; cyclone flotation; low intensity swirl field; jet device

气浮法指在污水中通入高度分散的微气泡,微气泡黏附微小油滴和悬浮颗粒后形成表观密度小于

收稿日期:2015-11-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51574273);山东省自然科学基金项目(ZR2014EEM045);中央高校基本科研业务费专项(15CX05006A)

作者简介:罗小明(1980-),男,副教授,博士,研究方向为多相流动与多相分离技术。E-mail:luo-xiaoming@163.com。

水的聚合体而上浮至水面,达到分离杂质、净化污水的目的。20 世纪 60 年代,壳牌公司率先将加压溶气气浮技术应用于油田污水处理后,气浮法成为油田含油污水处理的重要方法。将气浮技术与其他分离技术相结合是目前气浮技术发展的一个重要方向,如:旋流气浮、絮凝气浮、电化学气浮等[1]。低强度旋流气浮技术属于高负荷、紧凑型的第三代气浮技术[2],分离区的表面负荷率由第一代的 2 ~ 3 $m^3/(m^2 \cdot h)$、第二代的 5 ~ 7 $m^3/(m^2 \cdot h)$ 提升至 20 ~ 40 $m^3/(m^2 \cdot h)$[3]。由于低强度旋流气浮具有分离效率高、处理量大、结构紧凑等优势,挪威 EPCON[4-6]、美国 Natco[7-8] 与 CETCO[9-10]、英国 Cyclotech、法国 Veolia、德国 Siemens 等公司相继推出了低强度旋流气浮设备。国内因缺乏对分离机制等方面的基础性研究,在研发低强度旋流气浮设备上遇到了难题[11-13]。为了优化低强度旋流气浮性能,笔者对旋流强度、含油量、回流比和气泡注入方式(顺流、逆流)对浮选性能的影响进行研究。

1 旋流气浮机制

气浮分离过程包括:气泡与油滴的碰撞、黏附,气泡-油滴聚合体上浮。传统气浮分离过程是在重力场中进行的,气泡与油滴的碰撞具有随机性,导致气泡与油滴的碰撞效率较低。旋流气浮过程中,气泡与油滴在离心力作用下做定向运动(沿径向方向向中心运动)。向心运动过程中气泡与油滴存在密度差而产生定向、有序的碰撞,显著提高二者的碰撞效率,从而改善浮选性能[14]。另一方面,传统气浮工艺中,油滴(其密度小于水的密度)惯性较小,难以克服水相流动产生的惯性,无法脱离水相流线,如图 1 所示,因此难以与气泡碰撞。在旋流气浮工艺中,在离心力作用下油滴的惯性增强,摆脱流线束缚的能力随之提高,易与气泡碰撞。

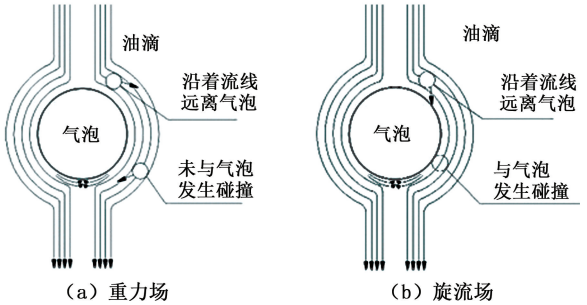


图 1 气泡与油滴的碰撞示意图

Fig. 1 Schematic diagram of collision between bubble and oil droplet

2 实验系统和方法

2.1 实验系统

实验系统包括旋流气浮筒、射流器、增压泵、回流泵、流量计等,如图 2 所示。污水罐中的污水经增压泵增压后,沿切向进入旋流气浮筒中(旋流气浮筒的结构见图 3),并产生低强度旋流运动。气泡由入口处的射流器或回流管路处的射流器制备。气泡和油滴在弱旋流场中碰撞、黏附,形成表观密度小于水的聚合体后上浮,由顶部出口排出,净化水由底部出口排出。部分净化水经过回流泵后,切向进入气浮筒,形成"二次旋流浮选"。气泡注入方式分为两种:顺流和逆流。顺流:使用入口处射流器,关闭回流管路处射流器;逆流:关闭入口处射流器,打开回流管路处射流器。

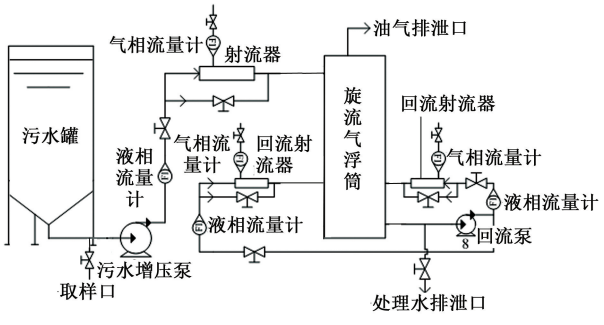


图 2 低强度旋流气浮实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system of low intensity cyclone flotation

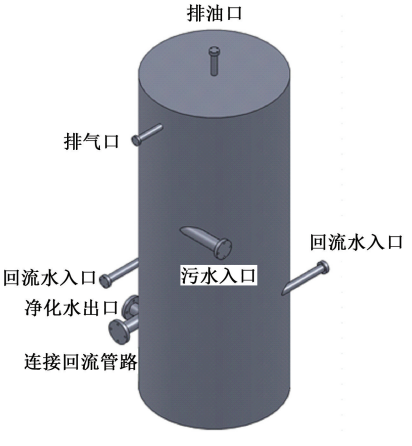


图 3 旋流气浮筒示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cyclone flotation unit

射流器是依据气-液射流引射原理设计的气泡发生装置,如图 4 所示。液相高速通过喷嘴后形成负压,同时抽吸空气。空气与液相在吸入室内初步混合,随后通过收缩管进入喉管。喉管内高速射流将空气进一步剪切,形成微气泡。微气泡经过扩散

管时被进一步压缩后释放。

污水入口射流器的处理量为 6 ~ 10 m^3/h,气液比为 6% ~15%。回流管路的两个射流器处按照流量分为 4 种:0.5 ~ 1.0、1.0 ~ 2.0、2.0 ~ 3.5、3.5 ~ 5.5 m^3/h,气液比为 6% ~15%,气泡粒径分布如图 5 所示,平均粒径为 62.31 μm。

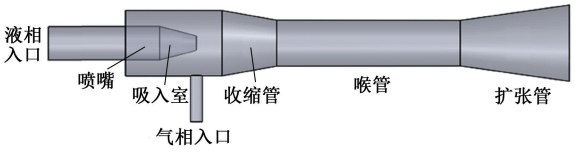


图 4　射流器示意图

Fig. 4　Schematic diagram of jet device

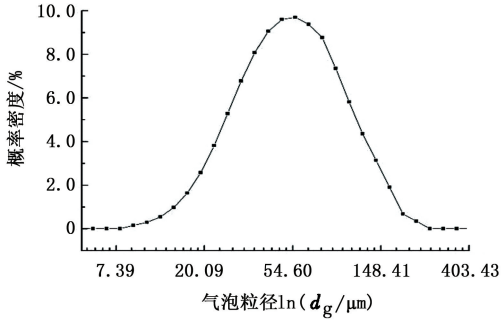


图 5　气泡的粒径分布

Fig. 5　Size distribution of bubbles

2.2　污水特性与实验参量

2.2.1　污水特性

污水制备方法:在 150 L 水中加入 750 g 十二烷基苯磺酸钠,经搅拌使其溶解。将 30 L 的柴油加入水中,并经过高速乳化机(IKA MK2000)乳化制备高含油量污水。依据实验对污水含油量的要求,将高含油量污水稀释。污水配置完成后,即刻采用激光粒度仪(Malven Mastersizer 2000)每隔 24 h 测定油滴粒径分布,如图 6 所示。油滴平均粒径依次为 3.86、4.11、4.54、4.59、6.22 μm。水中含油量由紫外可见分光光度计(岛津 UV-2600)测量。

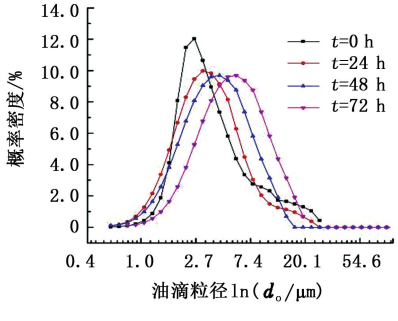


图 6　水中油滴的粒径分布

Fig. 6　Size distribution of oil droplets in water

2.2.2　实验参量

分别在顺流和逆流方式下对入口旋流强度 m(入口处离心加速度与重力加速度之比)、污水含油量 c_o 和回流比 R(回流管路中净化水量与污水处理量之比)进行实验研究。污水处理量 Q 与入口处旋流强度 m 和气浮筒入口雷诺数 Re 对应关系见表 1。为了研究低强度旋流场中的浮选行为,气浮筒入口旋流强度为 9.6 ~ 26.7 g,入口处的雷诺数低于 6 000。污水含油量 c_o 为 200 ~ 600 mg/L,回流比 R 为 10% ~50%。

表 1　处理量与入口旋流强度对应关系

Table 1　Correspondence between handling capacity and centrifugal intensity of inlet

Q/($m^3 \cdot h^{-1}$)	m/g	Re
6.0	9.6	3 528
7.0	13.0	4 115
8.0	17.0	4 703
9.0	21.6	5 291
10.0	26.7	5 879

3　实验结果及其讨论

3.1　旋流强度对浮选性能的影响

旋流强度是决定旋流浮选性能的关键因素。旋流强度较低时,离心力对气泡与油滴黏附的促进作用不明显;旋流强度过高时,高强度离心力剪切气泡-油滴聚合体,导致油滴由气泡表面脱附。同时,污水在旋流气浮筒中的停留时间取决于处理量。增大处理量,即增大入口旋流强度,缩短停留时间,气泡与油滴黏附的几率随之减小。同时,处理量过高,即入口旋流强度过高时,出口的排出速度过快,水相携带气泡至底部的排水管路,造成气泡的流失和底部含油量上升。在顺流和逆流两种方式下,在入口旋流强度 m 为 9.6 ~ 26.7 g 内进行旋流气浮实验,并分析气浮筒出口含油量 c_{out} 及除油效率 η,如图 7、8 所示。

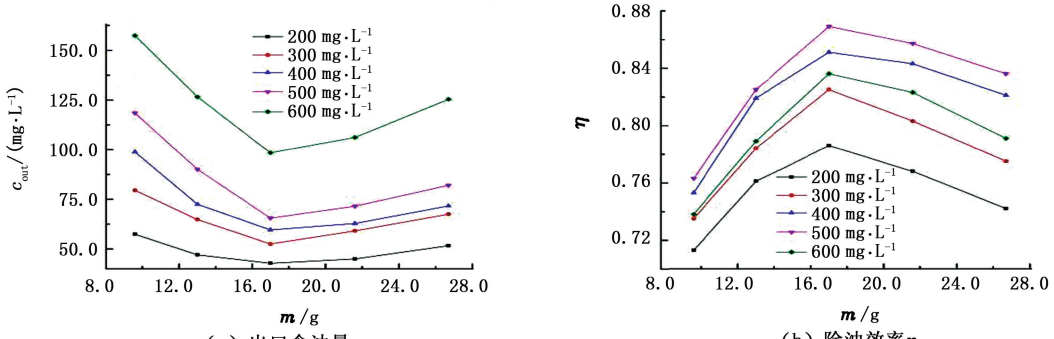
对于顺流或逆流,随着 Q 升高,入口处的 m 与 Re 随之升高,出口处 c_{out} 先下降后上升。当 m 达到 17.0 g(顺流)或 13.0 g(逆流)时,除油效果最佳。气浮筒对污水水力波动具有一定的适应能力。顺流时,对于不同 c_o 的污水,当 Q 为 7 ~ 9 m^3/h 时,η 不低于 76%。逆流时,对于所有的 Q,η 稳定在 63% ~75%。

顺流浮选的除油效果优于逆流浮选。尽管逆流浮选时,气浮筒内进行了上、下两次旋流浮选,但二次旋流中的气泡极易被上部的污水携带至底部的排水口,不利于上部污水中的油滴与气泡黏附;其次,与旋流气浮筒入口处射流器相比,安装在回流管路

的射流器制备气泡的能力相对较弱。

3.2 污水含油量对浮选性能的影响

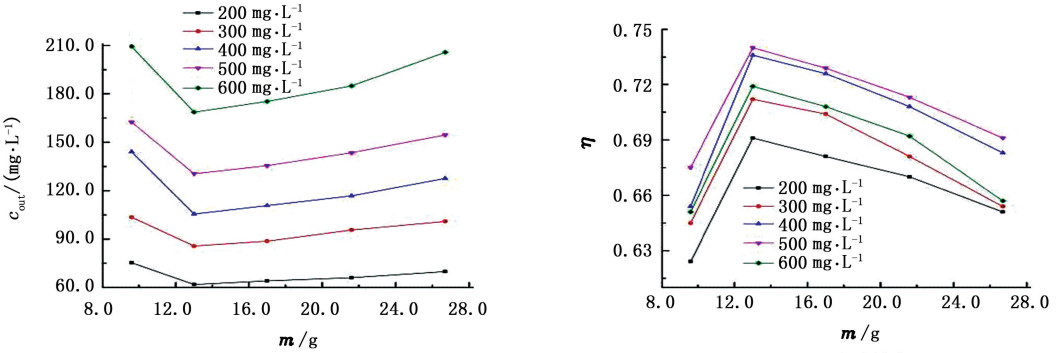
污水中油滴的分布状态与 c_o 密切相关。c_o 越高,油滴分布趋于密集、均匀。气泡与油滴做向心运动时,增加 c_o 可以提高气泡与油滴碰撞的几率。同时,c_o 增加后,气泡-油滴聚合体更易于捕获分散的油滴,促使聚合体壮大,并进一步捕获更多的气泡,如此循环往复使聚合体更加稳定。但 c_o 过高,超过气浮筒的浮选能力时,出口附近的液相内滞留大量油滴,除油性能恶化。在顺流和逆流两种方式下,对 200 ~ 600 mg/L 的污水在不同的处理量条件下进行了旋流气浮分离,并分析旋流气浮筒出口处含油量 c_{out} 及相应的除油效率 η,如图 9、10 所示。



(a) 出口含油量 c_{out}　　(b) 除油效率 η

图 7　顺流条件下出口含油量、分离效率与旋流强度的关系(R=0.3)

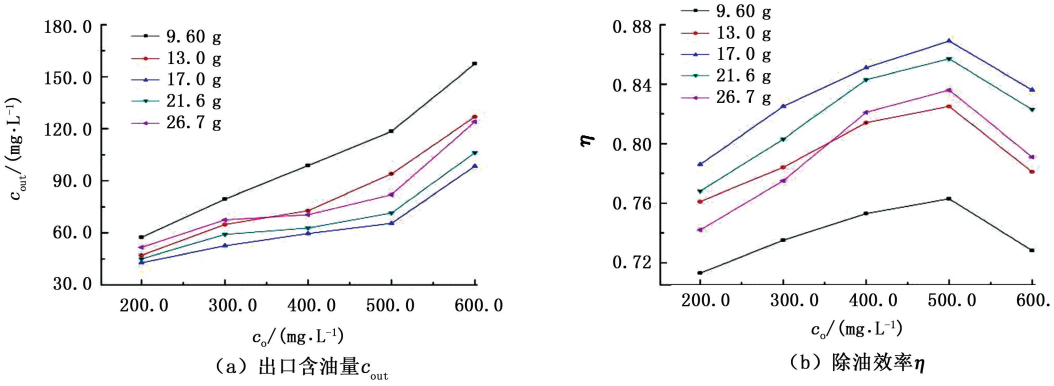
Fig. 7　Relationship of outlet oil content, separation efficiency and swirling intensity in downstream flow(R=0.3)



(a) 出口含油量 c_{out}　　(b) 除油效率 η

图 8　逆流条件下出口含油量、分离效率与旋流强度的关系(R=0.3)

Fig. 8　Relationship of outlet oil content, separation efficiency and swirling intensity in upstream flow(R=0.3)



(a) 出口含油量 c_{out}　　(b) 除油效率 η

图 9　顺流条件下出口含油量、分离效率与入口含油量的关系(R=0.3)

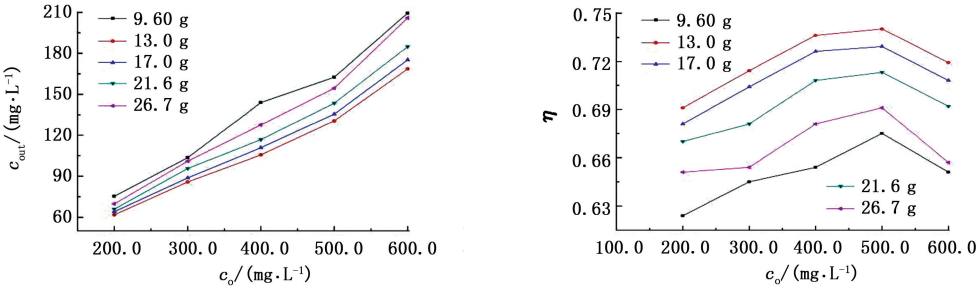
Fig. 9　Relationship of outlet oil content, separation efficiency and inlet oil content in downstream flow(R=0.3)

旋流气浮筒能够有效地处理低含油量污水。当入口含油量 c_o 为 600、200 mg/L 时,最低出口含油

量 c_{out} 分别为 100、40 mg/L(顺流)或 170、60 mg/L(逆流)。污水质量浓度低于 500 mg/L(顺流)或 300 mg/L(逆流)时,c_{out} 基本稳定在 100 mg/L 以下。

顺流浮选时,c_o 低于 500 mg/L 时,随着 c_o 增加,c_{out} 上升平缓;c_o 超过 500 mg/L 后,c_{out} 迅速上升。逆流浮选时,随着 c_o 升高,c_{out} 增长趋势一致。c_o 越高,η 对 m 的变化更加敏感。c_o 超过 500 mg/L(顺流)或 400 mg/L(逆流)后,c_{out} 随着 m 的波动明显增强。

当 m 不低于 9.6 g 时,气浮筒在 c_o 为 500 mg/L 的除油效果最佳。顺流时的除油效率稍高于逆流时的除油效率。c_o 为 300 ~500 mg/L,顺流时的 η 不低于 72%,逆流时的 η 不低于 64%。



(a) 出口含油量 c_{out}　　(b) 除油效率 η

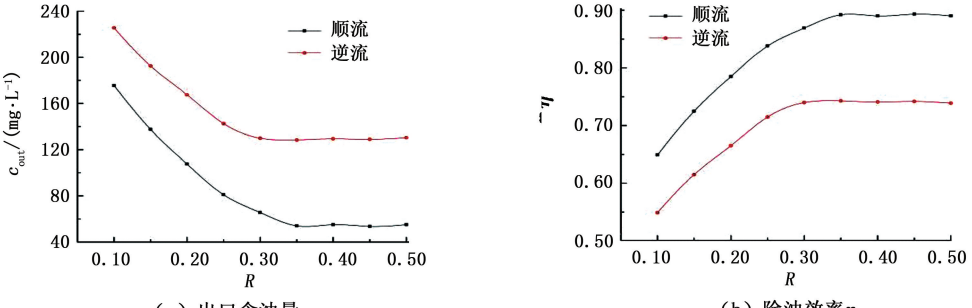
图 10　逆流条件下出口含油量、分离效率与入口含油量的关系(R=0.3)

Fig. 10　Relationship of outlet oil content, separation efficiency and inlet oil content in upstream flow(R=0.3)

3.3　回流比对浮选性能的影响

回流水在旋流气浮筒中下部形成二次旋流,强化该区域的旋流场,进一步促进气泡与油滴的碰撞、黏附。逆流浮选时,适当提高 R,增加射流器的气泡产量,有助于提升气泡与油滴的黏附效率。部分净化水通过回流为射流器提供水源,因此,射流器不需要额外供水。但过高的 R 增加了回流管路上的能耗,降低了净化水的产量,且对改善除油效果无益。

顺流浮选时,m 与 c_o 分别取 17.0 g 和 500 mg/L;逆流浮选时,m 与 c_o 分别取 13.0 g 和 500 mg/L。在顺流和逆流两种方式下,在 R 为 0.1 ~0.5 内进行旋流气浮实验,并分析旋流气浮筒出口处含油量 c_{out} 及相应的除油效率 η,如图 11 所示。



(a) 出口含油量 c_{out}　　(b) 除油效率 η

图 11　出口含油量、分离效率与回流比关系

Fig. 11　Relationship of outlet oil content, separation efficiency and reflux ratio

随着回流比 R 增加,除油效率 η 迅速上升,当 R 达到 35%(顺流)或 30%(逆流)时,η 趋于稳定。考虑回流管路的能耗,同时为了最大限度降低 c_{out},顺流浮选的最佳回流比为 20% ~35%,η 不低于 78%;逆流浮选的最佳回流比为 30% ~35%,η 不低于 75%。上述最佳回流比仅代表旋流浮选的一般规律,针对不同污水处理要求,须适当地调整回流比。

4　结　论

(1)低强度旋流浮选能够实现良好的油水分离效果。在弱旋流场(入口旋流加速度为 9.6 ~26.7 倍重力加速度)中,气泡与油滴能够高效地完成碰撞、黏附、浮升。对应固定的气浮筒结构与污水特性,存在最佳的旋流强度。本文中气浮筒顺流、逆流浮选的最佳旋流强度分别为 17.0 和 13.0 g,除油效率分别不低于 78% 和 70%。

(2)低强度旋流运动中,低雷诺数的湍流运动(入口雷诺数 Re 范围:3 528 ~5 879)避免了高强度湍流对气泡-油滴聚合体的剪切、破坏以及成功黏附气泡的油滴发生脱附。低强度旋流气浮能够有效

地处理含油污水,并减少浮选能耗。

(3)旋流气浮筒对处理量的波动具有一定的适应能力。处理量在 7 ~ 9 m^3/h 内(顺流)或 6 ~ 10 m^3/h(逆流),除油效率分别不低于 76%、63%。同时,旋流气浮筒能够有效地处理低含油量污水。污水含油量低于 500 mg/L(顺流)或 300 mg/L(逆流)时,出口含油量稳定在 100 mg/L 以下。选择回流比时,须考虑回流管路的能耗,同时保证最大限度地降低出口含油量。

参考文献:

[1] RUBIO J, SOUZA M L, SMITH R W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique[J]. Minerals Engineering, 2001,200(15):139-155.

[2] KIURU H J. Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest (third) one (DAF in turbulent flow conditions)[J]. Water Science and Technology, 2001,43(8):1-7.

[3] EDZWALD J K. Dissolved air flotation and me[J]. Water Research, 2010,44(7):2077-2106.

[4] STEIN E O. Separation of crude oil at the well head: 20070277967 A1[P]. 2007-12-06.

[5] STEIN E O. Combined degassing and flotation tank: 8440077 B2 [P]. 2003-02-06.

[6] JAHNSEN L, VIK E A. Field trials with Epcon technology for produced water treatment: the Produced Water Workshop[C]. Aberdeen: Scotland, 2003.

[7] FRANKIEWICZ T C, LEE C M. Vertical gas induced flotation cell: 7157007 B2[P]. 2007-01-02.

[8] FRANKIEWICZ T C, LEE C M, JUNIEL K. Compact induced gas flotation as an effective water treatment technology on deep water platforms: the 2005 Offshore Technology Conference[C]. Houston: TX, 2005.

[9] SMITH J J, DARLINGTON J W, OCCHIPINTI J, et al. Method and apparatus for removing hydrocarbons from water: 6749757 B2[P]. 2004-06-15.

[10] BRIDSON L, DARLINGTON J W, SMITH J J, et al. Field-trial results for produced-water polishing with new vertical units utilizing low centrifugal forces and induced gas flotation for compliance during produced-water operations: the 2005 SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference[C]. Galveston: Texas, 2005.

[11] 王波,陈家庆,翟战臏. EPCON 紧凑型气浮装置及其在采油废水处理中的应用[J]. 北京石油化工学院学报,2007,15(3):47-51.
WANG Bo, CHEN Jiaqing, ZHAI Zhanbin. EPCON compact flotation unit and its application in the treatment of produced water[J]. Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology, 2007,15(3):47-51.

[12] 陈家庆,韩旭,梁存珍,等. 海上油田含油污水旋流气浮一体化处理设备及其应用[J]. 环境工程学报,2012,6(1):87-93.
CHEN Jiaqing, HAN Xu, LIANG Cunzhen, et al. Compact flotation unit and its application in offshore produced water treatment[J]. Chinese Journal of Environment Engineering, 2012,6(1):87-93.

[13] 韩旭,陈家庆,李锐锋,等. 含油污水处理用旋流气浮一体化设备的 CFD 数值模拟[J]. 环境工程学报,2012,6(4):1087-1092.
HAN Xu, CHEN Jiaqing, LI Ruifeng, et al. CFD numerical simulation of integrated cyclonic and flotation unit used in produced water treatment[J]. Chinese Journal of Environment Engineering, 2012, 6(4): 1087-1092.

[14] NIEWIADOMSKI M, NGUYEN A V, HUPKA J, et al. Air bubble and oil droplet interactions in centrifugal fields during air-sparged hydrocyclone flotation[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2007, 30(2):313-331.

(编辑 沈玉英)