

# 油水分离浮选柱的旋流分离作用研究

徐宏祥<sup>1</sup>, 孙先凤<sup>1</sup>, 张立峰<sup>1</sup>, 黄根<sup>1</sup>, 李小兵<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 100083;  
2. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:**将一种结构独特的浮选柱运用到油水分离领域,油水分离浮选柱具有旋流分离和气浮分离作用的双重功效,以其有效分离粒度下限小、分离时间短、处理量大以及运行成本低等优点在含油污水处理领域,尤其在聚合物驱采油污水处理中体现了显著优势。本文研究了油水分离浮选柱的旋流分离作用机理,考察了给料速度、充气速率、循环压力、底流分流比起泡剂用量等因素对旋流分离作用过程及分离效率的影响,确定了最佳的操作参数:给料速度为 1.50 m<sup>3</sup>/h,充气速率为 2.50 m<sup>3</sup>/h,循环压力为 0.28 MPa,底流分流比为 95%,此时的旋流分离效率为 86.4%,最终出水含油量为 16.49 mg/L,分析了旋流分离机理并建立了旋流分离效率的数学模型。

**关键词:**油水分离浮选柱;微泡浮选;旋流分离;油水分离

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2017.04.006

中图分类号:TD989 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2017)04-0028-05

目前,我国有很多油田进入石油开采中后期的中、高甚至特高含水开采阶段,含油污水的处理已成为油田工业生产过程中的重大难题之一<sup>[1-4]</sup>。近年来,旋流分离技术与气浮技术都在油田地面工程中得到很广泛的应用,但是单独的旋流分离设备和气浮技术在处理含油污水时效果都不理想。为了发挥旋流分离与气浮分离的协同效应,以便提高油水分离效率。一种结构独特的油水分离浮选柱被引入到油水分离领域<sup>[5-7]</sup>。油水分离浮选柱的分离过程是将常规旋流分离和常规泡沫浮选分离结合起来的一个复合分离过程。在胜利孤岛油田进行的半工业试验研究证明,油水分离浮选柱在处理含油污水方面体现了较大的优势。

## 1 旋流分离过程

油水分离浮选柱是在常规的静态水力旋流器的基础上和浮选柱结合起来,通过浮选柱自吸式气泡发生器产生的微细气泡的携带作用形成的油-气复

合体将含油污水中的乳化细粒级油滴从旋流分离区运移至柱分离区,再通过柱分离区“狭长的”、具有“安静的”流体动力学环境的静态分离作用<sup>[8-10]</sup>,完成油水分离。分离性差的含油污水从浮选柱中下部通过循环泵加压后进入浮选柱内置旋流器,在离心力场作用下进一步进行旋流分离。

油水分离浮选柱将旋流分离技术与浮选分离技术结合起来,其多流态梯级强化分离作用,多种分离方式的协同效应有效地强化了分离效果,拓展了浮选分离含油污水中油分的粒级范围。所以该设备是一种高效的分离设备,具有旋流分离和浮选分离的双重功效,相对于常规水力旋流器和常规浮选柱处理效率更高,具有有效浮选粒度下限小,分离时间短,处理量大以及运行成本低等优点<sup>[11-13]</sup>。

## 2 试验

### 2.1 样品

试验用水样取自胜利孤岛油田第六联合站(以

收稿日期:2016-05-20;改回日期:2016-11-12

基金项目:矿物加工科学与技术国家重点实验室开放研究基金专项资助(No. BGRIMM-KJSKL-2015-03),国家自然科学基金-青年科学基金项目(No. 51604280)和国家大学生创新训练项目资助。

作者简介:徐宏祥(1986-),男,讲师,主要从事微细粒矿物分选方面的研究。

下简称孤六联合站)一次油、气、水分离罐。

含油污水水样进行水质分析(见表1)。可以看出孤六联合站含油污水水质较差,未沉降为黄褐色,

有大量分散油与悬浮物,且油含量高、悬浮物和聚合物含量也较高,从而造成孤六联合站含油污水乳状液较为稳定且难以处理。

表1 孤六联合站含油污水的水质分析结果

Table 1 Water quality analysis results of the oily sewage in No. 6 united station

pH 值	温度/°C	密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	粘度/(mPa · s)	含油量/(mg · L <sup>-1</sup> )	HPAM 含量/(mg · L <sup>-1</sup> )	固体悬浮物含量/(mg · L <sup>-1</sup> )
7.0 ~ 7.4	35 ~ 39	910 ~ 960	1.5238	2000 ~ 2500	150 ~ 300	500 ~ 680

## 2.2 装置

试验系统包括浮选柱分离系统、测量控制系统。分离系统由油水分离浮选柱、给料泵(进水、出水用)、循环泵、混合罐(加药搅拌)装置等组成。试验中使用油水分离浮选柱规格为直径400 mm,高4000 mm,材质为有机玻璃。测量控制系统包括气体流量计、液体流量计、电动调节阀、Pid 数显调节仪、气含率测定仪等。浮选柱的液位自动控制系统包括压力变送器、电子式直行程电动调节阀以及Pid 数显调节仪等组成。从一次分离罐来的含油污水首先进入搅拌桶并调节流量,进水经给料泵从浮选柱的中上部给入,出水经控制阀由浮选柱底部排出。充气速率通过阀门调节,循环压力通过循环泵出口阀门调节。

## 2.3 方法

试验中采用脱油效率来评价油水分离浮选柱旋流分离段油水分离效率。分别从切线给料口和底流净化出水口取样,测量两点的含油浓度分别为  $c_1$ 、 $c_2$ 。分离效率  $R$  即为:

$$R = 1 - \frac{c_2}{c_1}$$

式中, $c_1$ 为切线给入油水的含油浓度, $c_2$ 为底流出水的含油浓度。

影响旋流分离效果的因素主要有给料速度、循环压力、充气速率、溢流分流比等。给料速度通过流量计来控制。循环压力指的是浮选柱循环泵出口的压力,通过控制压力大小来控制切线给入的速度,给旋流分离提供不同能量。试验中通过变频器(0 ~ 50 Hz)来改变循环泵的转速来调节其出口压力。充气速率是指通过气泡发生器吸入浮选柱内的气体量,通过气体流量计可以测量并调节。

进入浮选柱内的含油污水分离后,一部分含油泡沫从溢流口排除,一部分从底流口排除,流量分别用  $q_1$  和  $q_2$  表示,对于除油设备,底流口流量与总入料量得比值称为底流分流比,即:

$$S = q_2 / (q_1 + q_2)$$

## 3 结果与讨论

### 3.1 处理量的影响

试验条件:循环压力  $P = 0.26$  MPa,吸气量  $I = 3.0$  m<sup>3</sup>/h,底流分流比 = 底流流量/给料流量 = 95%。处理量的影响结果见图1。

根据图1可知,随着处理量的增大,经过旋流分离后的出水含油浓度逐渐升高,脱油率先稍微有点上升后逐渐下降。当处理量过低时,油水在浮选柱旋流分离段的停留时间和分选时间太长,导致部分粒径较大的油滴破碎为更细小的油滴,同时使部分已经形成的油气复合体破裂,不利于旋流分离而且相对增加了处理成本;但是到后面处理量过大,使得油水聚结分离时间不够以及油滴与气泡的接触碰撞机率不够,同样也不利于油水分离,从而导致最后脱油率迅速下降以及出水含油量的迅速增大。因此浮选柱的处理量需要在一个合适的范围之内,出水含油量达到要求的情况下,尽可能增加处理量,确定较佳的处理量为 1.5 m<sup>3</sup>/h。

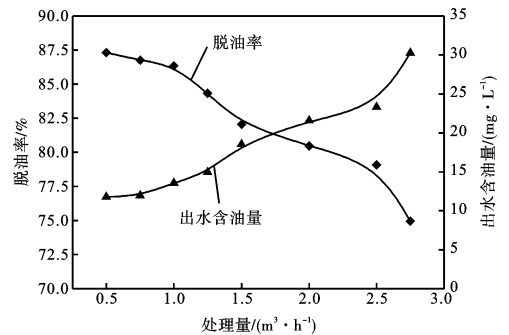


图1 处理量对脱油率及出水含油量的影响

Fig. 1 Influence of capacity to oil removal efficiency and effluent oil concentration efficiency

### 3.2 充气速率的影响

试验条件:处理量  $C = 1.5$  m<sup>3</sup>/h,循环压力  $P = 0.26$  MPa,底流分流比  $S = 95\%$ 。充气速率的影响结果见图2。

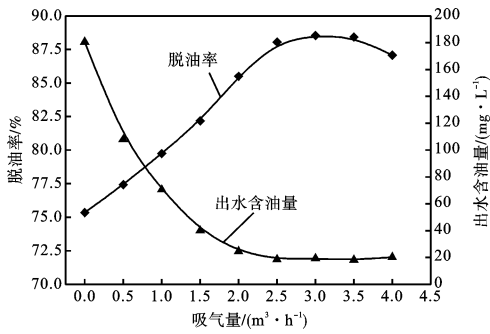


图3 吸气量对脱油率及出水含油量的影响

Fig. 2 Influence of air inflow to oil removal and effluent oil concentration efficiency

从图2中可以看出,旋流分离段的脱油率随着吸气量的增加而先增大后减小,出水含油量则随着吸气量的增大而先减小后趋于平稳。气流量较小时,气泡的数量较多,气泡的兼并现象不是很强烈,由于较小的气泡随着充气量的增大而增多,这样,油滴与油滴碰撞聚结成大油滴的机率以及气泡和油滴发生碰撞、黏附的机率增大,故浮选柱旋流分离段的脱油效率不断增大以及出水含油量减小。当充气量增大到一定程度,气泡互相兼并渐渐趋于剧烈,捕集油珠能力大的较小直径的气泡数量逐渐减少,同时,充气量增大,改变了浮选柱的混合特性,既减少了可使用的浮选表面积,又降低了气泡表面对油滴的捕集,从而使脱油效率下降。在油水分离过程中,为了减少油水中含有的氧气对设备的腐蚀,选择使用氮气作为吸气源,考虑到成本问题<sup>[14-15]</sup>,因此在出水含油量达到要求的条件下尽可能减少吸气量。确定最佳的吸气量为2.5 m³/h。

### 3.3 循环压力的影响

试验条件:处理量  $C = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,吸气量  $I = 2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,底流分流比  $S = 95\%$ 。循环压力的影响结果见图3。

由图3可知,随着循环压力的增大,出水含油浓度逐渐降低,脱油率逐渐提高。当循环压力达到一定数值后,脱油率达到最大值,继续增加压力,脱油率开始有所下降。在合适的压力范围内,压力越大,常压释放后产生的气泡尺寸越小,数量越多;同时可以给油滴和气泡碰撞提供一个合适有利于油气复合体的形成的能量。循环压力为0.30 MPa时,脱油率可达83.25%,出水含油量降低为17.39 mg/L。但是,当循环压力随着电机频率继续增大时,一方面离心强度加大,油滴受到更大的剪切力,被剪切破碎成

小油滴的概率增大,从而降低旋流分离效果,另一方面压力过大时浮选柱内会形成紊流,柱体内的流体产生强烈的扰动,破坏气泡与油滴已经形成的油气复合体,降低分选效果<sup>[16]</sup>。从而使得出水含油量有所上升,脱油率有所下降。从出水含油量要求、脱油效率以及动力成本的角度综合考虑,确定较佳的循环压力为0.28 MPa。

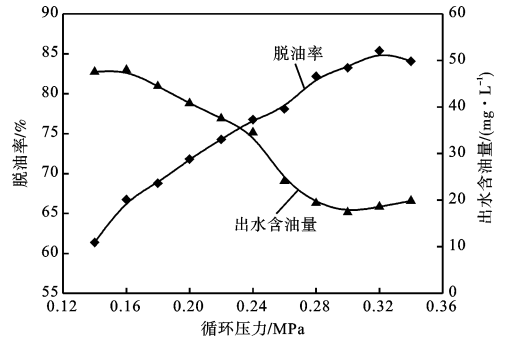


图3 循环压力对脱油率及出水含油量的影响

Fig. 3 Influence of circulating pressure to oil removal and effluent oil concentration efficiency

### 3.4 底流分流的影响

试验条件:处理量  $C = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,循环压力  $P = 0.26 \text{ MPa}$ ,吸气量  $I = 2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。底流分流比对旋流分离效果的影响见图4。

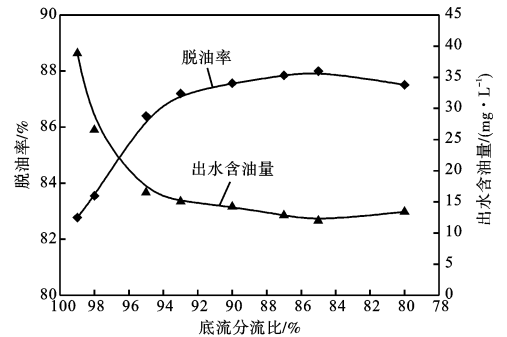


图4 底流分流比对脱油率及出水含油量的影响

Fig. 4 Influence of bottom flow diversion ratio to oil removal and effluent oil concentration efficiency

从图4可以看出,随着底流分流比的减小,旋流分离段的脱油率逐渐增大到最后有所下降,出水含油量则逐渐下降到最后有稍微上升。在满足出水含油量要求的情况下,尽量提高底流口净化出水流量,从而减少溢流浮油中含水量,进而减少溢流浮油二次净化或处理的成本。因此综合考虑出水要求、底流分流比以及脱油效率,确定较佳底流分流比为95%。

### 3.5 起泡剂用量的影响

试验条件:处理量  $C = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ , 循环压力  $P = 0.28 \text{ MPa}$ , 吸气量  $I = 2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ , 底流分流比  $S = 95\%$ , 试验结果见图5。

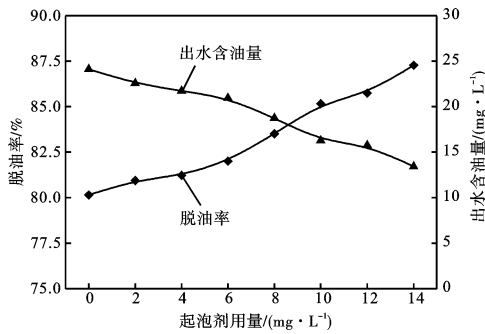


图5 起泡剂用量对脱油率及出水含油量的影响  
Fig.5 Influence of frother dosage to oil removal and effluent oil concentration efficiency

从图5可以看出,随着起泡剂用量增加,脱油率呈增加趋势,出水含油量呈减小趋势。因为起泡剂的加入,一方面使气泡的尺寸减小,数量增加,增加了气泡与油粒的碰撞几率;另一方面使油粒絮体的憎水基团增加,提高了气泡的粘附数量及牢度,从而提高浮选效果。实际工业应用中,一是因为聚合物采油过程中添加了很多聚丙烯酰胺等药剂,导致油水中含油大量的药剂,再添加药剂会使得含油污水更难处理;二是从起泡剂成本考虑,起泡剂价格较高。因此在满足出水条件的情况下尽可能的少添加或者不添加起泡剂。从试验结果来看,出水含油量都能符合要求,因此选择确定不添加起泡剂。

## 4 旋流分离作用分析

### 4.1 旋流分离数学模型

操作参数处理量  $C$ 、吸气量  $I$ 、循环压力  $P$ 、底流分流比  $S$  是影响旋流分离效果的主要因素,根据这些操作参数跟旋流分离效率即脱油率  $E$  的影响关系结果分析,建立拟合公式模型

$$E = X_1 (X_2 P^{X_3} + X_4 I^{X_5} + \frac{X_6}{X_7 S^{X_8} + X_9 C^{X_{10}}})^{X_{11}}$$

其中,  $X_1 \sim X_{11}$  为拟合函数待优化系数。

根据试验数据,用 MATLAB 进行非线性拟合,旋流分离效率跟处理量  $C$ 、吸气量  $I$ 、循环压力  $P$ 、底流分流比  $S$  存在如下关系即旋流分离模型为:

$$E = 6.2356(0.0385P^{-0.5413} + 0.0295I^{-0.1441} + \frac{0.02161}{4.4356S^{-0.3986} + 3.6250C^{-1.4617}})^{-1.1855}$$

根据上式旋流分离模型表明,旋流分离效率即脱油率  $R$  随着循环压力  $p$  和充气速率  $I$  的增加而先增加后减小,随着给料速率  $C$  和底流分流比  $S$  的增加而先减小后增大。

### 4.2 旋流分离作用分析

通过实验研究分析可知,合适的循环压力给浮选柱旋流分离段提供一个较佳的旋转流场,使流场中的油滴碰撞聚结、油滴与气泡碰撞形成油气复合体占主导地位;合适的吸气量,给旋流分离段提供数量足够的、直径尺寸较小的气泡,增加气泡与油滴的碰撞黏附概率;合适的处理量,在旋流分离段给油滴和气泡提供最佳的停留时间,增加油滴相互碰撞聚结成直径较大油滴的概率、增加油滴与气泡的碰撞黏附概率以及减少油滴的破碎概率,使油气复合体中油滴的脱附概率处于最佳的平衡值。起泡剂可以减小气泡直径大小,增加数量,增加气泡与油滴的碰撞黏附概率,并提高油滴与气泡的黏附牢固度<sup>[9]</sup>。

当旋流分离段的操作参数都处于较佳条件按时,大部分的油滴会与气泡碰撞黏附形成直径较大的油气复合体,部分油滴碰撞聚结形成直径较大的油滴,根据旋流理论分析可知,直径较大的油滴和油气复合体受到较大的向心浮力和向上浮力,产生沿径向向上和轴向向上的运动末速,从而沿径向向内和轴向向上运动,最终进入柱中心的泡沫柱并沿轴向向上经过柱浮选段后进入溢流排除,连续相介质水以及残留的油滴则沿径向向外和轴向向下运动,进入底流排除,从而实现油水有效分离,

## 5 结 论

(1) 试验确定的给料速度为  $1.50 \text{ m}^3/\text{h}$ , 充气速率为  $2.50 \text{ m}^3/\text{h}$ , 循环压力为  $0.28 \text{ MPa}$ , 底流分流比为  $95\%$ 。

(2) 起泡剂可以使气泡尺寸减小,数量增加,有利于油水分离,但同时增加了含油污水中药剂的含量,使含油污水更难处理,同时还有起泡剂成本价格较高,因此最终确定不添加起泡剂。

(3) 建立旋流分离效率即脱油率与处理量、吸气量、循环压力和底流分流之间的数学关系模型。

### 参考文献:

- [1] Mohammad. M. Emamjomeh, Muttucumar. Sivakumar. Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes [J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(5): 1663-1679.
- [2] Li Xiao-bing, Liu Jiong-tian, Wang Yong-tian, Wang Cun-ying, Zhou Xiao-hua. Separation of Oil from Wastewater by

- Column Flotation [J]. J. China Univ. of Mining&Tech., 2007, 17(4): 546-551, 577.
- [3] Capponi F., Sartori M., Souza M. L., Rubio J. Modified column flotation of adsorbing iron hydroxide colloidal precipitates International [J]. Journal of Mineral Processing, 2006, 79(3): 167-173.
- [4] Xu, H. X.; Liu, J. T.; Gao L. H.; Wang, Y. T.; Deng, X. W.; Li, X. B. Study of oil removal kinetics using cyclone-static microbubble flotation column [J]. Sep. Sci. Technol., 2014, 49(8): 1170-1177.
- [5] 马力强, 刘炯天, 岳广傲, 等. 旋流-静态微泡浮选柱净化含油废水试验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(4): 554-557.
- [6] Zheng Yuan-yang. Mathematical Model and Technological Design of Suction Flotation Purifier [J]. Journal of China University of Petroleum, 1990, 14(2): 68-73.
- [7] 刘海生. 油水分离旋流器分离性能及其优化设计软件研究 [D]. 成都: 西南石油大学. 2006.
- [8] Ran, J. C.; Liu, J. T.; Zhang, C. J.; Wang, D. Y.; Li, X. B. Experimental investigation and modeling of flotation column for treatment of oily wastewater. Int. J. Min. Sci. Technol., 2013, 23(5): 665-668.
- [9] Xu, H. X.; Liu, J. T.; Wang, Y. T.; Gen, C.; Deng, X. W.; Li, X. B. Oil removing efficiency in oil-water separation flotation column. Desalination and Water Treatment, 2015, 53(9): 2456-2463.
- [10] Xu Hongxiang, Liu Jiongtian, Li Xiaobing, Zhang Chunjuan, Wang Yongtian. The effect of bubble size on oil-water separation efficiency for a novel oil-water separation column [J], Separation Science and Technology, 2016, 51(1): 41-48.
- [11] Feris L. A., Rubio J., Schneider I. H. Remocao decorantes emefluentes dotingimento deagatas porflotac taode particulas adsorventes [C]. The Proceeding of 19th Congresso Brasileiro de Engenharia Sanit aria e Ambiental, Rio de Janeiro, 1999.
- [12] Park K. H.; Lee J. H.; Bae B. H. Use of hydrocyclone and flotation column for reducing the volume of contaminated dredged material [J]. Water Science and Technology, 2006, 53(7): 151-157
- [13] 冯鹏邦, 吴芳云, 王嘉麟, 等. 浮选柱用于油田回注水处理的研究 [J]. 油气田环境保护, 1994, 4(1): 1-7.
- [14] Zhi Tong-xiang. Research Situation and Application Prospect of Flotation Column [J]. China Coal, 1999, 25(6): 56-61.
- [15] Moruzzi R. B.; Reali M. A. P. Characterization of microbubble size distribution and flow configuration in DAF contact zone by a non-intrusive image analysis system and tracer tests [J]. Water Science and Technology, 2010, 61(1): 253-262.
- [16] Lee Byoung-Ho; Song Won-Chul; Kim Hye-Young, Enhanced separation of water quality parameters in the DAF (Dissolved Air Flotation) system using ozone [J]. Water Science and Technology 2007, 56(10): 149-155.
- [17] 李小兵, 刘炯天, 王兴涌, 等. 溶气析出式浮选柱处理含油废水的试验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 462-466.

## Research on Cyclonic Efficiency in Oil-water Separation Flotation Column

Xu Hongxiang<sup>1</sup>, Sun Xianfeng<sup>1</sup>, Zhang Lifeng<sup>1</sup>, Huang Gen<sup>1</sup>, Li Xiaobing<sup>2</sup>

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing),

State Key Laboratory of Mineral processing, Beijing, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu, China)

**Abstract:** An oil-water separation flotation column with a unique structure was used in oil-water separation fields. The function of an oil-water separation flotation column has the cyclonic separation and airflotation separation; there are many advantages in the oily sewage treatment field, such as the small lower limit of the effective separation size, short separation time, large handling capacity and low operating cost, especially the polymer-flooding-drive oily sewage treatment aspect. The paper will report the oil removal efficiency of the cyclonic section of the oil-water separation flotation column; In addition, several operating parameters which impact on separation were investigated, including feeding speed, aeration rate, circulating pressure, underflow split ratio and frother consumption. Based upon this study, it is found that the optimum operating parameters for the oil-water separation flotation column is as follows-the feeding speed is 1.50 m<sup>3</sup>/h, the aeration rate is 2.50 m<sup>3</sup>/h, the circulating pressure is 0.28 MPa, the bottom flow diversion ratio is 95%, final effluent oil content is 16.49 mg/L. Furthermore, the cyclonic section separation model is constructed.

**Keywords:** Oil-water separation flotation column; Airflotation section; Cyclonic section; Oil removing efficiency