

文章编号:2095-0411(2016)01-0054-06

油水混合物注气旋流分离试验研究

王永浩,赵会军,齐玉成

(江苏省油气储运技术重点实验室(常州大学),江苏 常州 213016)

摘要:为提升液液水力旋流器对小粒径油滴含油废水分离效果,采用先注气后旋流的处理方法。空气以气泡形式进入混合物中,对油水混合液流进行气浮旋流,在油相和水相之间形成气体隔层,减小油水混合的程度。同时,注气能够减小混合物密度,增加相对密度差,从而利于分离。以采出液样品为试验材料,改变注入混合液的空气量和进口雷诺数,研究不同工况下旋流器的分离效果。试验研究表明:当气液比为 1.5%,进口雷诺数在 14 000~17 000 范围时,旋流器溢流口压降比略有下降,溢流欧拉数明显下降,流体动能损失减少,分离效率从 77%(未注气)提升到 86%(气液比为 1.5%)。

关键词:气液混合;旋流器;油水处理;分离效率

中图分类号:TQ 316.334

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2016.01.011

Experimental Investigations on the Oil-Water Mixture Separation Using Hydrocyclones Enhanced by Gassing Injection

WANG Yonghao, ZHAO Huijun, QI Yucheng

(Jiangsu Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Technology, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

Abstract: In order to improve the separation efficiency of dispersed oil from water by hydrocyclones, a new process of utilizing air has been developed to enhance the separation efficiency. The air bubbles were enhanced into the mixture and enhance the impact of the cyclone according to forming a spacer between oil and water, which reduced the strength of oil-water incorporation. Meanwhile, the gas can reduce the density of mixture and increase density difference, thereby facilitating separation. Taking the produced fluid samples as materials that are needed, changing the amount of air flow and the Reynolds number of mixture the cyclone separation data in different conditions were obtained. Experimental studies have shown, when the gas-liquid ratio is 1.5%, the Reynolds number ranging at the 14 000—17 000, cyclone pressure ratio has decreased a little and Euler number has a good change which means the loss of kinetic energy reduced, the oil removal efficiency increased from 77%(air-liquid ratio 0%) to 86%(air-liquid ratio 1.5%).

Key words: gas-liquid mixture; hydrocyclone; oil-water separation; separation efficiency

现阶段,随着油田开采不断深入,对采出液和含油污水处理研究已成为当下油田研究的课题^[1]。其常用的处理技术包括静置、沉降、分层分离^[2]等。但

处理方式由于不同原因,不能满足处理要求。为提升油水处理效果,MARTIN T.^[3]设计制造了液液水力旋流器。YOUNG^[4]在 Southampton 型水力旋

收稿日期:2015-09-15。

作者简介:王永浩(1990—),男,河南周口人,硕士生。通讯联系人:赵会军(1965—),E-mail: zhj@cczu.edu.cn

流器基础上,设计开发了单锥双入口形式的水力旋流器,简化了旋流器结构。MILLER^[5]在液液水力旋流器基础上设计制造了充气水力旋流器(ASH)。余仁焕^[6]设计了上部呈双对称配制的切向进料充气旋流器。

在早期油田实际应用中,上述旋流器具有良好的适应性^[7]。随着油田采出液和含油污水中化学试剂增加,混合物乳化程度上升,加大了分离难度。为达到处理效果,常规水力旋流器在处理粘性油水混合物时,需经过加热处理,增加了能量消耗^[8]。充气水力旋流器由于注入气体的气浮作用,对于含油污水的处理有明显的改善。但是,针对处理油滴直径 $d_o < 20\mu\text{m}$,成分复杂的乳化含油废水问题,由于注气量无量化控制,气体在旋流腔中停留时间过短的原因,其处理效果并不理想^[9]。为了改善旋流器处理 $d_o < 20\mu\text{m}$,成分复杂的油水混合物,从提高旋流器分离效率,降低旋流处理能耗出发,提出将常规旋流器和气浮技术相耦合的处理方法。

1 油水混合旋流分离原理分析

气浮旋流分离技术是将旋流分离技术和气浮分离相耦合,将液液旋流器和气液混合泵相连接,在混合物进入旋流器前,进行注气处理^[10]。利用气液混合混合泵产生的直径 $d_a = 15 \sim 30\mu\text{m}$ 的空气泡,在与油水混合物充分接触后,悬浮油珠附着在气泡上形成气泡—油滴聚集体,通过旋流作用达到分离目的。其微观作用原理就是空气泡形式与油滴接触,碰撞,空气泡包裹携带油滴进行上浮^[11]。上浮过程中,空气泡与油滴接触,造成气泡与油滴的相互粘附。油滴因性质差异,造成微粒之间有电荷转移,油滴会受到气泡表面电场的吸引或排斥^[12]。因此,在惯性力,重力,离心力和电场力的共同作用下,油滴沿流线向气泡表面运动,从而达到与水相脱离的目的。

在旋流气浮耦合处理工艺中,影响分离效率的因素主要包括物性参数、运行参数和结构参数。结构参数数值的确定与常规旋流分流相同^[13];运行参数中主要选择适宜的进口压力和温度;工艺另外重要参数是气液比的大小,其数值将直接影响分离效果的优劣^[14]。本试验研究在于验证工艺的优越性,以及确定气液比大小对分离效果的具体影响。

2 试验装置及设备

2.1 试验设备介绍

液液水力旋流器的分离性能与其结构参数^[15],操作参数紧密相关。本试验选用的是双锥双柱型液液水力旋流器,其主要特征参数及评价依据如下。

1) 分流比

水力旋流器的分流比是溢流口或底流口流量与入口流量的比值。其计算公式为

$$F = \frac{Q_o}{Q_i} \times 100\%$$

式中: Q_o 为溢流口流量, m^3/h ; Q_i 为入口流量, m^3/h 。为确保空气泡与油相的充分结合上浮,减少流体回流造成的空气量损失,本文对于溢流分流比选择是35%。

2) 压降比

压力降是旋流器进料压力 p_i 与底流口压力 p_u 或溢流口压力 p_o 的差值。计算公式为

$$\Delta p_u = p_i - p_u$$

$$\Delta p_o = p_i - p_o$$

式中: p_i 为进料压力,MPa; p_u 为底流口压力,MPa; p_o 为溢流口压力,MPa; Δp_u 为底流口压力降; Δp_o 为溢流口压力降。

3) 雷诺数

旋流器中雷诺数的定义为

$$\text{Re} = \frac{\rho D v}{\mu}$$

式中: ρ 为原料液密度, kg/m^3 ; D 为旋流器入口直径,mm; v 为进料速度, m/s ; μ 为进料黏度, mm^2/s 。

4) 欧拉数

欧拉数的大小反应了流体动能能量损失多少。溢流欧拉数为

$$\text{Eu} = \frac{p_i - p_o}{\rho_o v^2 / 2}$$

式中: ρ_o 为溢流口处液体密度, kg/m^3 。

5) 气液比

气液比是空气流量与液体流量之比,公式为

$$Q_a = \frac{Q_g}{Q_l} \times 100\%$$

式中: Q_g 为标准状况下气体流量, m^3/h ; Q_l 为液体流量, m^3/h 。

6) 分离效率

对于油水分离旋流器,其计算式如下

$$E = (1 - \frac{\rho_u}{\rho_i}) \times 100\%$$

式中: ρ_u 为底流口排出物中油含量,mg/L; ρ_i 为进

料口物料中油含量,mg/L。

对于试验选用的 Thew 型液-液旋流器^[16],其具体数据如表 1 所示,取大小锥段结合处为 L , L 的取值为 35mm。具体结构参数如表 1 所示。

表 1 液液水力旋流器结构参数

Table 1 Liquid-liquid hydrocyclone structural parameters

锥段直径	圆柱段直径	溢流管直径	底流管直径	锥段长度	尾段长度	大锥角	小锥角
L	$1.5L$	$0.1L$	$0.6L$	$2.5L$	$15.5L$	15°	1.5°

试验用旋流器实物如图 1 所示。



图 1 液液水力旋流分离器

Fig.1 Liquid-liquid hydrocyclone

2.2 试验装置流程图

油水混合气浮旋流分离试验流程如图 2 所示。试验所选用的气液混合泵,其型号是 20GLMB-

1,功率为 0.55kW, pH 范围为 3~9,液体温度是 -15~20℃,最高环境温度:40℃,自吸高度为:9-NPSH(m)。水平向为吸入口、垂直向为排出口注气范围最大可达 1:9。在恒压 0.35MPa 下,空气经过泵混合后,以 20~30 μ m 空气泡形式与混合液结合,使得气泡能够裹挟油滴。利用气液两相表计量,使气液混合比例处于 0~3%范围。其样式如图 3。

3 注气旋流分离试验过程

3.1 试验物料介绍

试验采用的原料液为华东石油局洲城油田采出液,为 O/W 型乳状液,含有的主要助剂成分是聚丙烯酰胺(QXV7)。试验前,对样品进行初步处理,以满足实验要求。首先对原料液进行破乳,除去固体颗粒,并对其进行初步分离,借助于 PDPA 分析,使得样品所含油滴直径满足试验直径 d 。要求。最

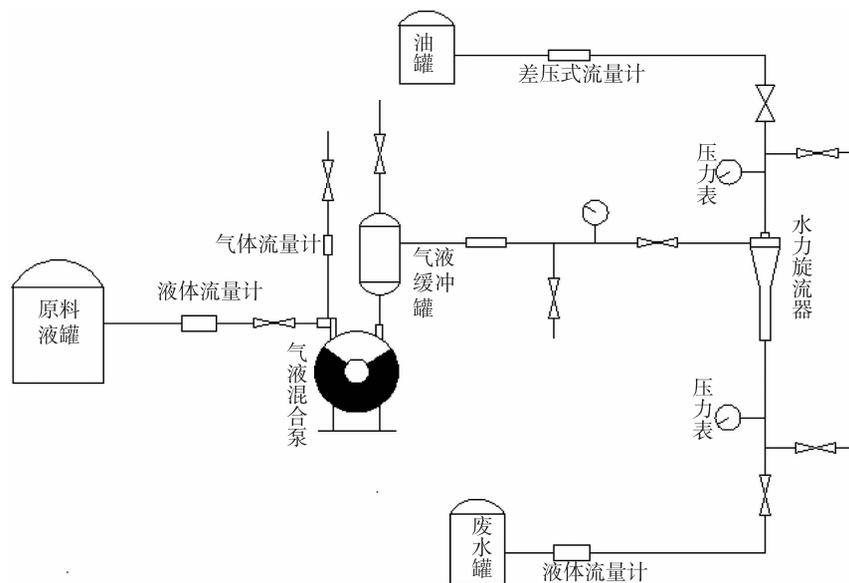


图 2 油水混合注气旋流分离试验流程

Fig.2 Processing of oil-water separation using hydrocyclones enhanced by air bubble



图 3 气液混合泵

Fig.3 Gas-liquid mixing pump

后适当搅拌混合,便得到油水混合液。经分离配置处理后,得到油水混合物原料液,其物理性质如表 2。

表 2 试验物料物理参数

Table 2 Physical parameters of experimental material

物料	体积比/ %	含油量/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	密度/ (kg/m^3)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	黏度/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
水	83.5	—	1 000	24	1
油	16.5	137.75	835	24	4.6

3.2 试验流程

试验前,利用 752PC 紫外/可见光分光光度计测量含油污水中的含油质量浓度,测量步骤主要包括:样品油敏感波长的选定,油样标准曲线的测量和选定抽滤待测水样。然后,选用自来水对装置进行试运行,利用差压式气液流量计和压力表来测定处理前后流体的流量和压力变化值,待运行 1h,经几次反复试验后,进行混合物试验。

调节气液混合泵前气体流量阀,对混合物进注空气。调节空气进入混合泵的流量,使得混合物的气液比依次为 0%,0.5%,1%,1.5%,2%,2.5%,3%。在每个气液比条件下,改变混合物进入旋流器的速率,即反映入口雷诺数的变化,混合物进入旋流器旋流中,其保持停留时间为 10s,使得空气泡与油滴充分碰撞结合。试验中,运行时间累计不少于 10h,启动运行 0.5h 后开始取样,试验期间每隔 5min 取样一次,装置的处理量为 $2\text{m}^3/\text{h}$,试验测试了不同气液比作用下的影响。

为确保试验数据的可靠性,每组试验进行 3 次,取其平均值作为最后的数据。为表现工艺的优劣性,拟在不同 Q_q 下,以旋流器进口 Re 变化反映液流进口速度和物料密度的动态变化,并对比处理前后油含量,来评定气浮旋流分离效果。

4 结果与分析

4.1 雷诺数与压降比 P_R 的关系

在分流比 $F = 35\%$,注气压力 $P_z = 0.35\text{MPa}$ 条件下,选用不同气液比 Q_q ,得到锥形旋流器溢流口压降比 P_R 变化如图 4 所示。

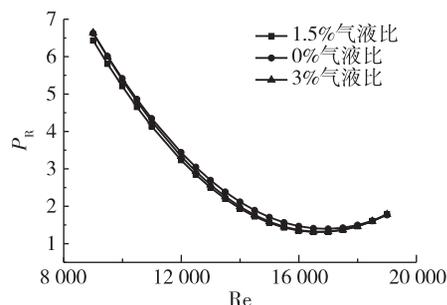


图 4 雷诺数与压降比关系

Fig. 4 Relationship between Reynolds number and Pressure drop ratio

由图 4 可见,在同一雷诺数下,注气处理后,旋流器的压降比略有下降,液流的摩擦损耗能量比有所减小,外部压力能量更多的转化为气液混合流体的动能,有利于气泡和液滴的冲撞分解,加快油水分离。同一雷诺数条件下,随着 P_R 的变化,旋流器的压降比均有逐渐变小的趋势;压力降的变化趋势随着雷诺数的增大逐渐变大。当 $Re > 18\ 000$ 时,3 种状态下压降比趋于一致,这是由于在此条件下,旋流器中流态处于湍流稳定区,瞬态变化不明显。特别的,当 $Q_q = 1.5\%$ 时压降比下降的最明显,表明在此条件下,旋流器对外部能源的利用效率最高,更多的将压力能转化为气液混合流的动能,使得气泡和油滴的上浮速率增加,有助于减小其停留时间和油水结合时间。根据图 4,对所处理的油水混合物进行注气处理,不会明显改变其流态特性,并促使混合流体向能源高效利用方向变化。

4.2 雷诺数与欧拉数 Eu 的关系

在分流比 $F = 5\%$,注气压力 $P_z = 0.35\text{MPa}$ 条件下,改变 Q_q ,得到不同流速下雷诺数 Re 与欧拉数 Eu 变化关系如图 5 所示。

据图 5,在相同 Re 条件下,当 Q_q 分别为 0%,1.5%,3% 时,旋流器溢流口液流的 Eu 变化明显,但是其数值变化趋势相近,均随着 Eu 的增大而逐渐增大,表明在此 Q_q 变化范围内,空气泡的存在不

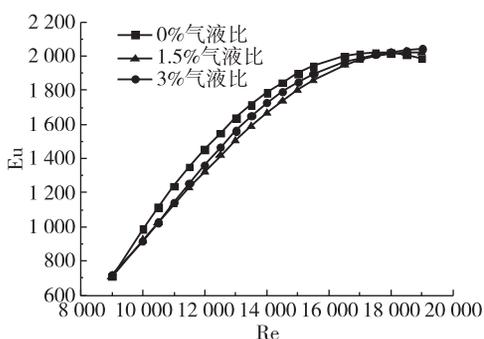


图5 雷诺数与欧拉数关系

Fig. 5 Relationship between Reynolds number and Euler number

会改变流体在旋流腔和溢流口处的切线流动形态。当 Re 一定时,当 $Q_q=0$ 时, Eu 高于注气条件下的数值,说明在空气泡的作用下,油滴在旋流过程中,其动能的损失量减小。又据图 5, Eu 并非随着流体中 Q_q 增大而连续减小。 Re 一定时, $Q_q=1.5\%$ 条件下, Eu 最小,表明在此气液比条件下,流体压动能损耗最小;当 $Q_q=3\%$ 时, Eu 增加,这是由于随着气泡量的增加,气相相对增加,影响油滴和气泡的碰撞效率,不能有效的形成油滴气泡碰撞携带作用。

4.3 雷诺数与分离效率的关系

在设定分流比 $F=35\%$ 、注气压力 $P_z=0.35\text{MPa}$ 的条件下,旋流液体的雷诺数与其分离效率的关系如图 6 所示。

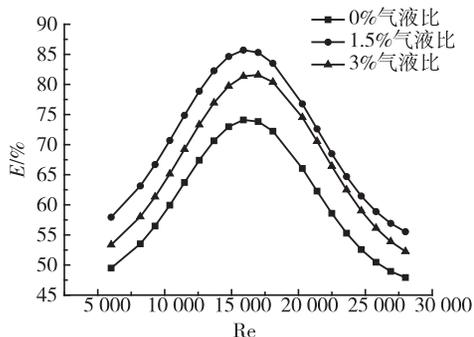


图6 雷诺数与分离效率关系

Fig.6 Relationship between Reynolds number and separation

由图 6,当气液比 Q_q 变化时, Re 与分离效率 E 的关系具有相同的变化趋势,表明在注气条件下,旋流器分离效率也是可控的。当 $5000 < Re < 15000$ 时,随着 Re 的增大,旋流器的分离效率逐渐增加,这表明适当增加入口速度有利于促进混合流体的分离。这是因为随着进口速度的提升,流体的流动能

提高,进入旋流腔后,对腔壁的撞击增强,有利于油水分离。此外,由于空气泡的提携作用,油水界面的分离更加的明显,油滴与空气泡的接触时间长,从而有利于油水分离。当 $Re > 15000$ 后,随着 Re 的增加分离效率反而下降。这是由于随着进口流体的速度进一步增加,混合液体的流态发生改变,破坏了油水相界面的结合。同时,随着流速的增加,空气泡在液体中的上浮时间减少,不能充分增大上浮,进而携带油滴,使得油水界面不能充分分离。根据图 6,当 $14000 < Re < 17000$ 时,旋流器处于高效分离工作状态。

4.4 气液比 Q_q 与旋流器分离效率的关系

在分流比 $F=35\%$ 、 $P_z=0.35\text{MPa}$ 条件下,据图 6 选择进口雷诺数 $Re=16000$,得到不同气液比 Q_q 条件下分离效率 E 的变化规律,结果如图 7 所示。

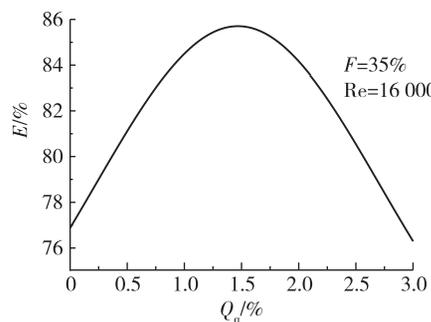


图7 气液比与分离效率关系

Fig.7 Relationship between Air-liquid ratio and Separation efficiency

由图 7 可知,当 $0 < Q_q < 1.5\%$ 时,随着气液比的增加,旋流器的分离效率逐渐上升;当 $Q_q > 1.5\%$ 时,再增加气液比会使得分离效率下降。这是因为在气液比很小的条件下,空气泡不足,不能够充分提携油滴,改变油水界面状态及液流密度,使得液流处于湍流稳定区,不利于油水分离;当气液比过大,空气泡会集聚,使得流态紊乱,在进入旋流器前,呈现气团流的特性,在旋流腔中,会使得分离不均匀,分离效率下降。为旋流器处于理想工作状态,则进料的气液比应控制在 1.5% 左右,从而将旋流器的分离效率由 77% 提升到 86% 以上。

5 结论

本次试验以气液混合泵和锥型水力旋流器为主

要实验设备,先对油滴直径小于 $20\mu\text{m}$ 的油水混合物注气,然后进行旋流分离来处理。从中可以得出以下结论:

1)对原料液进行注气处理不会明显改变其湍流状态,空气泡的存在有利于降低流体的压动能损耗量,提高旋流器的分离效率。

2)旋流器进口料液的雷诺数对旋流器的分离效率影响明显,当 Re 处于 $14\ 000\sim 17\ 000$ 范围内时,旋流器处于高效分离工作状态。

3)当原料液中气液比接近 1.5% 时,旋流器的分离效率提升最明显,其数值从 77% 提升至 86% 。

参考文献:

- [1]杜杰,沙宇,徐建蓉.绿色水处理技术的应用与发展[J].油气田环境保护,2013,17(2):47-51.
- [2]袁惠民.含油废水处理方法[J].化工环保,2008(18):146-149.
- [3]MARTIN T. Hydrocyclone redesign for liquid-liquid separation[J]. The Chemical Engineer,1986(7/8):17-23.
- [4]YOUNG G A, WAKLEY W D, TAGGART D L, et al. Oil-water separation using hydrocyclones: an experimental search for optimum dimensions[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,1994(11):37-50.
- [5]MILLER J D, KINNEBERG D J, VAN CAMP M C. Principles of swirl flotation in a centrifugal field with an air sparged hydrocyclone [C]// SME-AIME, Annual Meeting. Boston, Massachusetts:[s.n.],1982.
- [6]余仁焕,李新国.利用充气旋流器净化含油污水的研究[J].矿冶,2006,5(3):94-99.
- [7]LIU H F. Oil/water separation in a liquid-liquid cylindrical cyclone[J]. Journal of Hydrodynamics,2012,24(1):116-123.
- [8]RADMILA M Šečerov Sokolovič, Tatjana J Vulić Slobodan M Sokolovič. Effect of bed length on steady-state coalescence of oil-in-water emulsion[J]. Separation and Purification Technology,2007,56(1):79-84.
- [9]潘利祥,孙国刚.充气水力旋流器用于油水分离的试验研究[J].化工机械,2004,32(5):259-263.
- [10]王波,陈家庆,梁存珍,等.含油废水气浮旋流组合处理技术浅析[J].工业水处理,2008,28(4):87-92.
- [11]陈家庆,蔡小垒,尚超,等.旋流气浮一体化技术在低含油污水处理中的应用[J].石油机械,2013,41(9):62-66.
- [12]韩严和,陈家庆,桑义敏,等.旋流气浮中气泡颗粒碰撞效率影响因素理论分析[J].过程工程学报,2013,13(2):186-190.
- [13]鲁娣,袁惠新.旋流器操作和浮选性能影响因素的研究[J].过滤与分离,2011,21(1):9-11.
- [14]BAI Z S, WANG H L, TU S T. Oil-water separation using hydrocyclones enhanced by air bubbles[J]. Chemical Engineering Research and Design,2011,89:55-59.
- [15]邵悦,赵会军,王小兵.水力旋流器油水分离数值模拟与实验研究[J].常州大学学报(自然科学版),2013,25(2):51-55.
- [16]庞学诗.水力旋流技术与应用[M].北京:中国石化出版社,2010:19-21.

(责任编辑:殷丽莉)