

高压脉冲电场-旋流离心场联合破乳 脱水装置与试验

龚海峰^{1,2}, 戴飞^{1*}, 余保¹, 张贤明², 杨智君¹

(1. 重庆理工大学机械工程学院, 重庆 400054;

2. 重庆工商大学废油资源化技术与装备工程研究中心, 重庆 400067)

摘要: 鉴于单一物理手段难以实现乳化油的高效破乳脱水处理, 提出了一种高压脉冲电场-旋流离心场联合实现乳化油的破乳脱水工艺, 并利用三维建模设计了相应的双场联合破乳脱水装置。从非线性振动动力学理论的角度得到了高压脉冲电场单元的最佳工作电场参数, 并运用数值的方法, 确定了旋流离心场单元最佳工作参数。通过双场联合破乳脱水装置试验结果表明, 高压脉冲电场-旋流离心场联合作用能对废油乳化液进行高效破乳脱水, 破乳脱水效率要高于单一旋流离心场的脱水效率。

关键词: 脉冲电场; 离心场; 联合; 破乳脱水; 乳化油

中图分类号: TQ051

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2018)04-0178-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.04.041

Equipment and experiment for demulsification and dewatering by combining high voltage pulsed electric field with swirl centrifugal field

GONG Hai-feng^{1,2}, DAI Fei^{1*}, YU Bao¹, ZHANG Xian-ming², YANG Zhi-jun¹

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. Engineering Research Centre for Waster Oil Recovery Technology and Equipment,
Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: Considering that single physical method is difficult to realize efficiently demulsification and dewatering treatment of emulsified oil, the technology combining high voltage pulsed electric field with swirl centrifugal field is put forward to achieve demulsification and dewatering to emulsified oil. The corresponding equipment is designed by using three-dimensional modeling. The optimal working electrical field parameters for high voltage pulsed electric field unit are obtained from the perspective of the nonlinear vibration dynamic theory. The optimal operating parameters for the swirl centrifugal field unit are obtained by applying numerical method. The results of experiments performed on the two-field combined demulsification and dewatering equipment indicate that the combining action of these two fields can accomplish efficiently demulsification and dewatering to waste emulsified oil, with higher efficiency compared with that by swirl centrifugal field alone.

Key words: pulsed electric field; centrifugal field; combination; demulsification and dewatering; emulsified oil

润滑油在制造业、石油化工、国防等领域得到广泛应用。润滑油在运输、加注及使用过程中极易进水污染, 生成乳化油, 理化特性发生劣化, 润滑性能急速降低, 直至报废, 生成工业废油。工业废油资源化再利用对于缓解能源短缺、环境保护等问题, 具有十分重要的意义。工业废油资源化的首要关键环节是废油乳化液的破乳脱水处理^[1-2]。乳化油破乳目前仍然以热破乳、化学破乳和机械破乳为主, 诸如真空法、离心机法、化学法等, 但均存在不足^[3-5]。一般情况下, 单一工艺方法很难实现乳化油高效破乳脱水处理, 联合 2 种及以上的工艺方法或单元操作,

完成常规工艺难以适应的分离过程是破乳脱水技术发展的主流^[6]。

对于含水量普遍较高、成分复杂的 W/O 型工业废油, 仅应用最常用的真空加热法往往难以快速有效地完成破乳脱水处理^[7-8], 而高压脉冲电场法和旋流离心法却能够快速实现乳化油液滴结聚和分离。高压脉冲电场能够快速有效地实现乳化油中微小液滴的结聚增大, 旋流离心场针对液滴粒径较大的 W/O 型乳状液, 分离效果十分明显。

鉴于此, 本文中提出联合 2 种物理场来实现工业废油的高效破乳脱水处理, 设计了双场联合破乳

收稿日期: 2017-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(21676037); 重庆市民生创新专项(cstc2015shmszx90002); 教育部平台开放课题(KFJJ2016016)

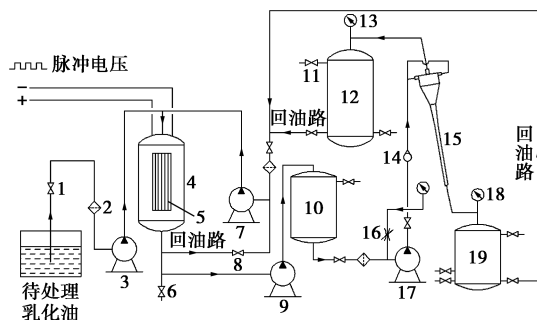
作者简介: 龚海峰(1979-), 男, 博士, 教授, 研究方向为废油再生技术与装置, 023-62563400, ghfpy@cqut.edu.cn; 戴飞(1993-), 男, 硕士生, 研究方向为废油再生技术与装置, 通讯联系人, df11136@163.com。

脱水工艺及其装置,并进行试验。

1 双场联合破乳脱水工艺流程

高压脉冲电场和旋流离心场联合破乳脱水的工艺设计构想是:首先利用高压脉冲电场将乳化油中小液滴结聚变大,然后结聚的大液滴在旋流离心场的作用下快速实现沉降分离,进而从整体上提高废油乳化液破乳脱水的速率和效率。

基于工艺设计构想,结合工艺的可操作性以及实用性,设计出废油双场联合破乳脱水装置的工艺流程如图1。



1—进油阀;2—粗滤器;3—液压泵 1;4—电破乳器;5—电极板;
6—取料阀;7—循环泵;8—回油阀;9—液压泵 2;10—缓冲罐;
11—放气阀;12—溢流罐;13—压力表;14—流量计;15—旋流器;
16—节流阀;17—单螺杆泵;18—压力表;19—底流罐

图1 双场联合破乳脱水工艺流程

如图1所示,工作时,通过液压泵1的运转,将待处理乳化油经过入口管道吸入,通过粗滤器滤掉固体杂质,然后将乳液注入电破乳器。利用电破乳器中的高压脉冲电场实现乳状液小水滴的结聚变大,通过液压泵2的运转,将电破乳器处理过的乳液注入缓冲罐。缓冲罐中的乳液通过单螺杆泵,分为2路高速射入旋流器,在旋流器中形成旋流离心场,结聚的大液滴在旋流离心场的作用下快速实现沉降分离,密度大的水通过旋流器的底流口流出,密度小的油液通过旋流器上部的溢流口溢出,分别流入底流罐和溢流罐后排出收集,从而完成整个脱水过程。另外,装置还设置有循环回路,其中电破乳器、溢流罐以及底流罐中脱水不合格的油液都可以通过循环泵输入电破乳器再次进行处理。

整个工艺的核心在于电破乳器中的高压脉冲电场破乳,以及旋流器中的旋流离心脱水。要使其分离效率达到最高,需确定高压脉冲电场最佳工作参数以及旋流器最佳操作参数。

2 高压脉冲电场最佳工作参数

在高压脉冲电场单元,随着电极板极性的周期性变化,油中液滴被极化,所带电荷极性也发生周期性变化,并发生拉伸变形振动,完成偶极结聚和液碰撞结聚,形成较大颗粒的水滴^[9]。研究表明,电场强度和电场频率对乳化油液滴结聚破乳效率会产生重要影响^[10]。

2.1 液滴振动动力学方程

假设一初始半径为 R 的乳化油液滴,在高压脉冲电场作用下发生伸缩变形振动。以液滴右半球作为研究对象,以液滴几何中心为坐标原点建立笛卡儿坐标系,如图2。

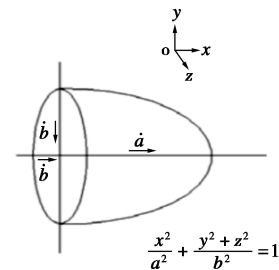


图2 液滴右半球振动变形

通过分析液滴变形振动的瞬时受力,可得液滴振动动力学方程^[11]:

$$d^2\chi/dt^2 + A\phi(\chi)(d\chi/dt) + Bf(\chi) - Gq(t)e(\chi) = 0 \quad (1)$$

式中 χ 为液滴变形率; $\phi(\chi)$ 、 $f(\chi)$ 、 $e(\chi)$ 为各受力项的非线性函数项。

2.2 最佳破乳电场参数

由液滴振动动力学方程,运用谐波平衡法^[12],得液滴在某一电场频率范围内发生共振时,脉冲电场破乳效果最佳,此时脉冲电场频率即为最佳结聚频率。同时,液滴发生共振时,共振振幅达到最大,且在一定范围内,共振振幅随着电场强度的增大而增大。研究表明^[11,13-14],油中振动液滴拉伸比 $\lambda \leq 1.9$ 是液滴共振振幅的控制条件。鉴于此,运用作图法可得最佳破乳电场参数计算曲线图^[11],如图3所示。

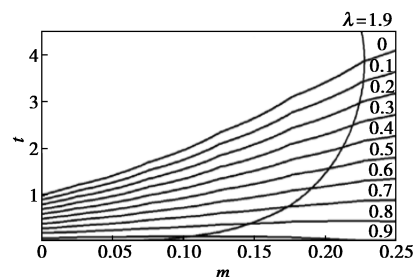


图3 最佳破乳电场参数计算曲线图

图 3 给出了 10 条共振频率曲线与液滴 $\lambda = 1.9$ 稳态振动曲线的交汇图。在已知液滴密度、液滴初始粒径、界面张应力以及油液黏度的情况下,可根据图 3 得到乳化油最佳破乳电场频率和电场强度的值。

本文中选用南充基础油作为实验油样,实验介质在 25℃ 时的相关物性参数见表 1。按照质量分数 10% 添加蒸馏水,以 Span-80 为乳化剂,搅拌均匀形成稳定乳化油油样。

表 1 试验介质相关参数

试验介质	$\rho/(t \cdot m^{-3})$	R/mm	ε_2	$\gamma/(mN \cdot m^{-1})$	$\mu/(Pa \cdot s)$
南充基础油	0.879	0.05	2.49	5	0.016
蒸馏水	0.998	—	81.00	—	—

根据南充基础油制备的乳化油油样相关系统参数,得最佳结聚电场参数为 $f=460$ Hz, $E=2\ 032$ kV/m。

3 旋流离心场最佳操作参数

旋流器在油水分离领域受到广泛关注^[15-17],但是,目前大多数研究主要集中在处理含油污水的脱油型旋流器,脱水型旋流器研究较少^[18-19]。因此,本节将通过数值的方法探究操作参数对脱水型旋流器分离效率的影响。

3.1 旋流离心场结构参数

脱水型旋流器是一双锥双入口旋流器,基本结构以及结构参数分别如图 4 与表 2^[20] 所示。

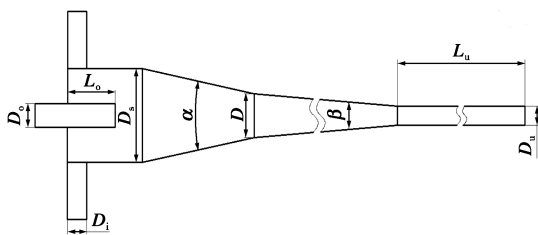


图 4 旋流器结构示意图

表 2 旋流器结构参数表

参数	D/mm	D_1/mm	D_2/mm	L_0/mm	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	D_u/mm	L_u/mm
尺寸	26	12	18	45	20	3	10	400

3.2 最佳入口流量

入口流量是脱水型旋流器最为重要的操作参数,其大小将直接决定旋流器的生产能力,以及油液在旋流器内部的停留时间与湍流强度。为了考察不

同入口流量对旋流器分离效率的影响,利用 Ansys 对入口流量分别取 4、6、8、10 m^3/h 进行数值仿真。

仿真结果表明,在入口流量 $Q_i=4$ m^3/h 与 $Q_i=6$ m^3/h 时,均有较多高含水液滴从溢流口流出,溢流口脱水率分别为 33.3%、57.3%,脱水效率较低;在入口流量 $Q_i=8$ m^3/h 与 $Q_i=10$ m^3/h 时,溢流口脱水率分别为 93.1%、92.3%,可见 $Q_i=8$ m^3/h 有更好的脱水效果。因此,该脱水型旋流器最佳入口流量取 $Q_i=8$ m^3/h 较为合理。

4 装置设计与试验分析

4.1 装置三维建模

由图 1 双场联合脱水工艺流程设计了双场联合破乳脱水装置,其三维模型如图 5 所示。装置的设计主要包括电破乳器、旋流器、粗滤器、缓冲罐、底流罐、溢流罐、控制柜以及管路连接与整体布局等内容,保证装置结构紧凑合理,能达到预期工作要求。

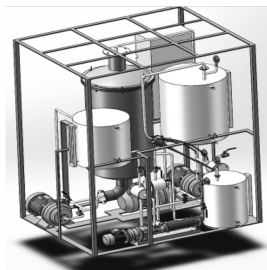


图 5 双场联合破乳脱水装置三维建模

4.2 装置参数与试验

基于装置三维模型,制造出废油乳化液双场联合破乳脱水装置,如图 6 所示,相关工作性能参数如表 3。



图 6 废油乳化液双场联合破乳脱水装置

表 3 装置工作性能参数

工作电压/V	电源频率/Hz	公称流量/($L \cdot min^{-1}$)	工作压力/MPa	总电功率/kW	油击穿电压/kV	过滤精度/ μm
380	50	0~150	≤ 6	24.5	≤ 55	10

试验所用油品为含水量为10%的南充基础油乳化油,相关物性参数见表1。在试验过程中,装置将以2种工作模式对乳化油进行破乳脱水处理。一是不开启电破乳器,即单一旋流离心场脱水,乳化油将不经过电场破乳处理直接进入旋流器中;二是开启电破乳器,即双场联合破乳脱水,乳化油将先进入高压脉冲电场中进行破乳处理,再进入旋流离心装置进行离心脱水。对比2种工作模式下旋流器溢流口的脱水率与底流口的脱油率。

4.3 试验结果与分析

在2种工作模式下,分别开展3次试验,结果见表4。从表4可以看出,乳化油试验油样经单一旋流离心场脱水后,溢流口脱水率与底流口脱油率的平均值分别为41.7%、24.7%,可见单一旋流离心场的脱水效果不理想。经高压脉冲电场与旋流离心场联合破乳脱水后,溢流口脱水率与底流口脱油率的平均值分别达到90.8%、66.6%,对比单一旋流离心场脱水,分离效率得到了显著提高。另外,从双场联合破乳脱水分离效率本身来看,溢流口脱水率均能达到90%以上,说明了双场联合脱水装置对乳化油的脱水效果显著,可达到对废油乳化液预处理的要求;底流口脱油率在66%左右,表明底流口排出水相中含有一定量的油,对于这部分油液可将其导入装置的循环回路,进行再次处理。

表4 试验结果 %

项目	单一旋流离心场脱水			
	试验1	试验2	试验3	平均值
溢流口脱水率	41.8	40.9	42.3	41.7
底流口脱油率	24.4	23.5	26.1	24.7
项目	双场联合破乳脱水			
	试验4	试验5	试验6	平均值
溢流口脱水率	90.6	91.5	90.3	90.8
底流口脱油率	66.5	67.4	65.9	66.6

5 结论

(1) 利用高压脉冲电场与旋流离心场联合破乳脱水,形成一种新型的针对废油乳化液破乳脱水工艺方法及装置。

(2) 双场联合破乳脱水装置可实现高压脉冲电场与旋流离心场在废油乳化液脱水过程中的优势互补,较单一旋流离心场脱水而言,能较大地提高废油乳化液的脱水效率,可用于实际生产中对废油乳

液进行预处理。

参考文献

- [1] Rincón J, Cañizares P. Regeneration of used lubricant oil by polar solvent extraction[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2005, 44: 4373-4379.
- [2] 顾国疆, 刘阁, 陈彬, 等. W/O型乳化液物理破乳技术及装置研究进展[J]. *化工进展*, 2015, 34(2): 319-324.
- [3] 张贤明, 吴峰平, 陈彬, 等. 油包水型乳化液破乳方法研究现状及展望[J]. *石化技术与应用*, 2010, 28(2): 159-163.
- [4] Sun L, Han P, Yang L, et al. The dewatering and demulsification of waste oil by ultrasound[J]. *Energy Sources Part A: Recovery, Utilization & Environmental Effects*, 2014, 36(17): 1843-1849.
- [5] Eow J S, Ghadiri M, Sharif A O, et al. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: A review of the technology[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2001, 84: 173-192.
- [6] 刘阁, 陈彬, 张贤明, 等. 物理破乳技术在废油处理中的应用[J]. *应用化工*, 2011, 40(2): 329-334.
- [7] 潘诗浪, 张贤明, 吴峰平. W/O乳化液破乳方法及机理研究[J]. *重庆工商大学学报: 自然科学版*, 2010, 27(2): 158-163.
- [8] Jseusa R, Pablo C, Maria T G. Improvement of the waste oil vacuum distillation recycling by continuous extraction with dense propane[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, 46(1): 266-272.
- [9] 朱岳麟, 黄欣, 熊常健, 等. 航空油品高频/高压电脱水微观机理[J]. *石油炼制与化工*, 2005, (4): 19-22.
- [10] Eow J S, Ghadiri M. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: A review of the current understanding[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2001, 84(3): 173-192.
- [11] 龚海峰, 杨智君, 彭焱, 等. 高压脉冲电场中乳化油最佳破乳电场参数[J]. *高校化学工程学报*, 2015, 39(1): 78-83.
- [12] 褚亦清. 非线性振动分析[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [13] 杨东海, 何利民, 罗小明, 等. 新型静电聚结器中水滴聚结特性研究[J]. *高校化学工程学报*, 2012, 26(2): 222-227.
- [14] Eow M Ghadiri. Motion, deformation and break-up of aqueous droplets in oils under high electric field strengths[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2003, 42: 259-272.
- [15] 姜雪梅, 董守平, 张红光. 液-液旋流器中分散相液滴破碎机理研究[J]. *石油天然气学报*, 2005, 27(1): 305-307.
- [16] 白志山, 汪华林. 油脱水型水力旋流器压力特性和分离性能[J]. *华东理工大学学报: 自然科学版*, 2006, 32(4): 488-491.
- [17] 严超宇, 周志国, 刘艳生, 等. 新型溢流结构柱段充气旋流器的分离性能[J]. *石油学报: 石油加工*, 2010, 26(6): 910-916.
- [18] 褚良银, 刘培坤, 方善如, 等. 除水型油水分离旋流器试验研究[J]. *石油机械*, 1998, 26(8): 10-13.
- [19] Young G A B, Wakley W D. Oil-water separation using hydrocyclones: An experimental search for optimum dimensions[J]. *Petroleum Science and Engineering*, 1994, 11: 37-50.
- [20] 杨智君. 乳化润滑油双场联合破乳装置参数优化设计[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2016. ■