

文章编号:1673-5005(2007)06-0082-05

绝缘紧凑型电破乳器中液滴聚结特性研究

张黎明, 何利民, 马华伟, 吕宇玲, 刘 青

(中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 东营 257061)

摘要:为了提高油包水乳状液在电脱水过程中的破乳效率,从静电聚结机理出发,推导出电极间距与电场强度的关系式;通过分析液滴在极板间距狭小的矩形聚结管道中的受力状况,同时考虑绝缘层以及层流流态对电场中液滴聚结作用的影响,设计出一种绝缘紧凑型电破乳器。改变所加电压和流量以调节破乳器中的电场强度和乳状液停留时间,利用激光粒度仪测量乳化物中水滴的体积平均直径。结果表明,缩小电极间距能产生高强电场;包覆绝缘层的电极板在小间距下能有效破乳并防止击穿,且电场强度越大停留时间越长,聚结效果越显著。该装置可提高油包水乳状液的聚结效率并节省大量空间。

关键词:电破乳;静电聚结;绝缘;电场;粒度

中图分类号:TE 624.1 **文献标识码:**A

Coalescence characteristics of droplets in insulated compact electric demulsifier

ZHANG Li-ming, HE Li-min, MA Hua-wei, LÜ Yu-ling, LIU Qing

(College of Transport & Storage and Civil Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China)

Abstract: In order to increase the demulsifying efficiency of water-in-oil emulsion, a new compact electrostatic coalescer was designed by analyzing the force summing condition of the droplets in the rectangle coalescing pipe and considering the effect of the insulate coat and laminar flow pattern on the coalescing process of droplets in electric field. The electric field intensity and residence time can be regulated by changing the applying voltage and flow rate. The volume mean diameter of droplets were measured by particle and droplet size analyzer. The data of the experiments indicate that the electric field intensity can be enhanced by decreasing the distance between the electrodes, and the electrode plates with insulate coat can effectively demulsify the emulsion and avoid puncturing when the distance between the plates are relatively small. The results show that a longer residence time and a stronger electric field intensity can result in enhanced coalescing efficiency of the droplets. The compact electrostatic coalescer can improve the coalescing efficiency of water-in-oil emulsion and reduce space substantially.

Key words: electrical demulsification; electrostatic coalescence; insulated; electric field; particle size

目前,很多油田已进入开发后期,采出的原油中一般含水率较高,导致集输过程中运费成本上升,更重要的是造成设备腐蚀,因此需要严格控制外发原油含水量。可利用破乳剂降低采出原油含水量^[1],电脱水因其能有效脱除原油中水分而成为外发原油处理工艺中一道重要工序^[2]。但电脱水器的体积普遍较大且大都采用裸电极,电场中液滴带电易形成水链造成极板击穿而严重损坏设备,采用包覆绝缘层的电极板可有效防止短路^[3]。交流电破乳时

随电极板极性的周期性变化水滴所带电荷极性也发生周期性变化,导致液滴变形,界面膜变薄,易与相近的液滴碰撞聚结成较大颗粒的水滴^[4-5]。很多研究都已证明电场强度的高低直接决定着液滴聚结的效率,改变极板间距能有效地增加场强^[6],减小极板间边缘效应^[7],极板间距较小时还可增加板间乳化物随机的速度波动^[8],影响油水界面张力^[9],促使水滴相互靠近、碰撞,提高聚结效果,降低能耗^[10]。因此,笔者基于静电聚结机理,研制出绝缘紧凑型电破乳

收稿日期:2007-06-08

基金项目:国家“863”项目(2006AA092302)

作者简介:张黎明(1982-),女(汉族),山东济南人,博士研究生,从事油气集输及多相流分离方面的研究。

器,并对其中的液滴聚结特性进行研究。

1 静电聚结理论

液滴在乳化物中的分离遵循 Stokes 方程式

$$U = \frac{2r^2 \Delta \rho g}{9\mu} \quad (1)$$

式中, U 为液滴沉降速率, m/s ; r 为液滴半径, m ; $\Delta \rho$ 为油水两相密度差, kg/m^3 ; μ 为连续相粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

由此可看出增大液滴和两相密度差,减小连续相粘度可以加快液滴沉降速度。密度差和粘度可由稀释和温度控制^[11],而液滴的大小可以由施加的电场控制。

在交流电场作用下,液滴的聚结以偶极聚结为主,两个相似球形微粒(液滴)间偶极聚结而产生的静电力 F 的表达式为

$$F = \frac{6\epsilon E^2 r^6}{d^4} = 6\epsilon E^2 r^2 \left(\frac{r}{d}\right)^4 \quad (2)$$

式中, ϵ 为原油乳化液的介电常数; E 为外加电场的电场强度, V/m ; d 为两液滴间中心距离, m ; r 为液滴半径, m 。

可知电场强度和液滴的大小直接影响着偶极力,从而决定破乳分离的效果。

两平行电极板间电场强度的计算公式为 $E = \frac{U}{L}$,减小极板间距可直接增大电场强度从而有效破乳,同时减少极板间的边缘效应以保证产生均匀的场强^[12]。电场强度过高可使电场中水滴排列成水链从而导致电极被击穿,在电极上覆盖绝缘材料可有效防止短路,但会降低施加在乳化物中的电场强度^[13]。

设极板间距为 L ,绝缘层厚度为 t (图1),在两极板施加电压时,可视为串联作用,即极板间电压等于作用到乳状液的电压和绝缘层上的电压之和。设乳状液间场强为 E_0 ,绝缘层间场强为 E_1 ,则两极板间电势差 U 表示为

$$U = E_0(L - 2t) + 2tE_1 \quad (3)$$

乳状液和绝缘层中的自由电荷密度分别为

$$\sigma_0 = E_0 \epsilon_0, \sigma_1 = E_1 \epsilon_1 \quad (4)$$

式中, σ 为极板间自由电荷密度, C/m^2 ; ϵ_0 为乳状液介电常数; ϵ_1 为绝缘层介电常数。

根据高斯定律可知 $\sigma_0 = \sigma_1 = \sigma$,于是有

$$U = \frac{(L - 2t)\epsilon_1 + 2t\epsilon_0}{\epsilon_1 \epsilon_0} \sigma \quad (5)$$

可得原油乳化液中电场强度 E_0 为

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{\epsilon_1 U}{L\epsilon_1 + 2t(\epsilon_0 - \epsilon_1)} = \frac{U}{L + 2t\left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_1} - 1\right)} \quad (6)$$

由式(6)可知,在给定的系统中,绝缘层厚度 t 和极板间距 L 决定了乳状液所分得的施加在极板间的电压。因此添加绝缘层的电极板间距较小时,必须考虑绝缘材料的介电常数和绝缘层厚度对电场强度的影响。

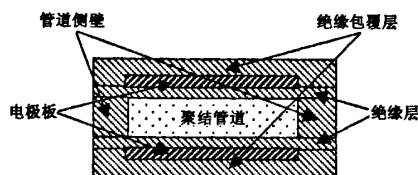


图1 聚结管道横截面示意图

2 实验

2.1 实验系统

绝缘紧凑型电破乳器实验装置由离心泵、涡轮流量计、聚结管道、乳化物储罐和变压器等设备组成。整个装置流程简图如图2所示。

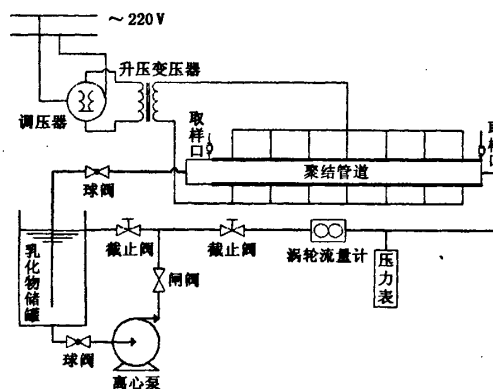


图2 乳化物聚结实验流程图

聚结管道横截面为矩形(图1),管道内壁宽为10 cm,高为2 cm,横截面面积为0.002 m²,整个聚结管道长度为3.8 m,其中覆盖有电极的长度为3.5 m,每块电极板长0.5 m,共7块。电极板的材质为紫铜,一个面打磨平滑,与聚结管道能紧密接触;另一个面焊接引线连接电源,采用聚甲基丙烯酸甲酯作为包覆电极的绝缘材料,厚度为3 mm,具有良好的介电特性和电绝缘性能,介电常数为3.2,绝缘层之间的流道宽为20 mm。

实验所用油品性质为:20℃条件下,密度868.1 kg/m³,粘度75.35 mPa·s,开口闪点212℃,倾点

-18℃, 中和值 0.006。按照质量分数 5% 和 10% 添加蒸馏水, 以 OP-10 为乳化剂, 搅拌均匀以形成稳定乳化物, 具体的实验参数通过计算如表 1 所示。

表 1 实验所用乳化物物性参数

含水率 $f_w/\%$	油的粘度 $\mu/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	乳化剂粘度 $\mu_0/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	乳化物密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	乳状液介电常数 ϵ_0
5	75.35	86.30	874.6	2.437
10	75.35	100.92	881.1	2.658

实验使用单相交流电, 交流电压有效值 $U' = U/\sqrt{2}$ 。

基础油和添加了 OP-10 乳化剂的水注入乳化物储罐混合, 离心泵把油和水从储罐中抽出, 经叶轮高速剪切形成乳化物。乳化物经离心泵和出口闸阀后分为两路, 一路回流至乳化物储罐, 一路经涡轮流量计流向水平放置的矩形聚结管道。调压器和升压变压器将 220 V, 50 Hz 交流电调整到所需的电压, 输送到聚结管道的电极板上。乳物流经聚结管道, 受到交变电场的作用, 油中的水滴发生聚结。乳化物流出矩形聚结管道后, 回流乳化物储罐。在矩形聚结管道进口处和出口处, 分别设有取样阀, 取得乳

化物样本, 利用激光粒度仪测量水滴的粒度, 取体积平均直径作为参考量。

2.2 实验结果及其分析

表 2 为根据式(6) 计算得出的极板间施加电压作用到乳化物上的电场强度值。从表中可以看出, 绝缘层的存在导致了极板间电压作用到乳化物上的电压降低, 但仍能产生高强度电场使水滴高效聚结, 整个实验中没有出现短路现象, 说明绝缘层能有效防止极板被击穿, 因此减小极板间距并包覆绝缘层可以在不影响破乳效果的前提下节省大量体积且安全性能得到提高。

表 2 板间电压与乳化物中电场强度

交流电压 U/kV	交流电压有效值 U'/kV	电场强度 $E_0/(\text{kV}\cdot\text{m}^{-1})$	
		$f_w = 5\%$	$f_w = 10\%$
2.0	1.41844	81.4	80
4.0	2.83688	162.8	160
6.0	4.25932	244.21	240
8.0	5.67376	325.61	320

图 3 为不同含水率时电场强度与乳化物中水滴平均直径的关系。

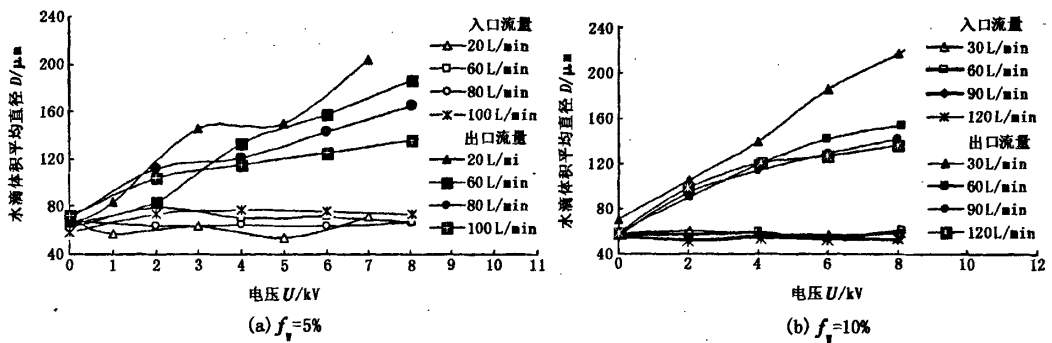


图 3 不同含水率乳化物中水滴平均直径与聚结管道施加电压的关系

由测得的数据可以看出, 在各流量下聚结管道入口处水滴体积平均直径波动很小, 基本都在 60 μm 左右。在电极板上施加电压后, 乳化物在电场力的作用下相互碰撞聚结, 体积平均直径明显增加, 且施加的电压越高, 聚结管道出口处水滴的体积平均直径 D 增大越显著。例如, 含水率为 10%、流量为 30 L/min 时, 入口处水滴的直径为 56 μm , 施加 2 kV 的电压, 乳化物在 80 kV/m 的电场强度作用下, 水滴的直径达到 106 μm , 增加近一倍, 而施加 8 kV 的电压时, 体积平均直径增加为入口处的 4 倍, 达到 217 μm 。这说明在电场的作用下, 乳化物中的水滴发生了明显的聚结, 且基本呈线性增长趋势。通过对比可发现, 在含水率为 10% 时乳化物中水滴的粒

度随电压升高变化较之含水率为 5% 时平稳, 这是由于当乳化物中含水率过小时, 液滴间距较大, 在电场力作用下发生碰撞继而聚结沉降的几率稍小造成的。在本实验中, 并没有出现电压升高而水滴的体积平均直径突然减小的现象, 可以推断出没有发生因电场强度过大而使乳化物中的水滴发生电分散从而导致破裂的现象, 说明实验所用电压均在有效破乳范围之内。

通过计算可知实验流量下的雷诺数均远小于 2000, 即实验中乳化物的流动状态均为层流流态。图 4 为不同含水率时流速与乳化物中水滴体积平均直径的关系曲线。通过观察可发现在没有电场作用时, 对比入口处, 聚结管道出口处水滴的体积平均直

径仅有不到 $10\ \mu\text{m}$ 的微小增加,这是由于层流状态下的各层液体流速不同,处于不同层的水滴发生碰撞,同时层流状态对水滴在管道径向上有剪切扩散作用,这两种作用使水滴相互碰撞并聚结,但作用的强度很弱,水滴的聚结效果很差。

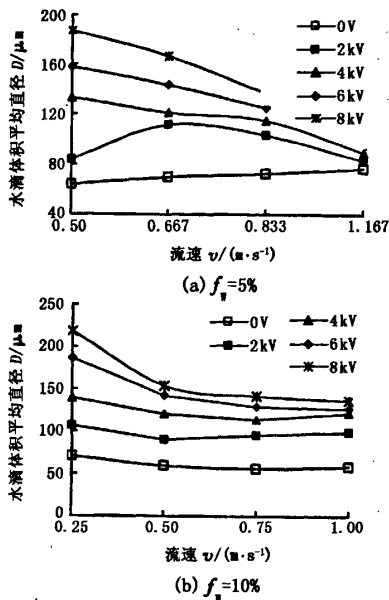


图4 不同含水率乳化物水滴直径随流速的变化

在相同的电压下,随乳化物流速的增加,水滴的体积平均直径减小。原因在于随着流速增加,乳化物在聚结管道中停留的时间变短,受电场力的作用减弱。含水率为10%施加的电压为8 kV,乳化物在流速为0.25 m/s (流量为30 L/min)时电场的停留时间为14 s,水滴的体积平均直径从58.32 μm 增大到217.89 μm ,为未施加电压时的4倍左右,而在1.00 m/s的流速(流量120 L/min)下,乳化物在电场中的停留时间为3.5 s,水滴的体积平均直径增大为原来的2.5倍左右。对比可发现,含水率较小时水滴的体积平均直径随流量增大,虽然总体呈下降趋势,但存在一定波动,原因在于随着流动速率的增加,聚结管道轴向及径向的相互作用变大,不同流层间的液滴碰撞几率也随之增大。

3 结论

(1)不施加电场的乳化物处于层流状态时,各流层间的相互影响很小,不足以使水滴颗粒明显增大从而有效破乳。

(2)对乳化物施加电场后,电场和流动的共同作用极大地破坏了乳化物的稳定性,加速了乳化物

中水滴的聚结,且聚结管道上施加的电压越高,管道内部的电场强度越大,对水滴的聚结作用越强;乳化物的流速越大,在电场中的停留时间变短,乳化物的聚结效果越差。

(3)在不同的含水率下,乳化物在电破乳器中的聚结效果稍有不同。

(4)实验中没有出现乳化物中的水滴由于电场过强而发生受电场力作用过大而破裂的现象,缩小电极间距可有效提升电场强度,同时恰当选择绝缘层可有效防止电极板被击穿。绝缘紧凑型电破乳器可以在保证聚结效果的前提下大幅减小所占体积并提高安全性能。

参考文献:

- [1] 张鸿仁. 油田原油脱水[M]. 北京:石油工业出版社, 1990.
- [2] 张铜耀, 范维玉, 南国枝, 等. 水包稠油乳液中稠油极性组分与乳化剂的相互作用研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2006, 30(5):101-105.
ZHANG Tong-yao, FAN Wei-yu, NAN Guo-zhi, et al. Study on interaction of heavy crude oil polar component and emulsifier in heavy crude oil-in-water emulsion[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(5):101-105.
- [3] JOHN S Eow, MOJTABA Ghadiri. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology[J]. Chemical Engineering Journal, 2002, 85:357-368.
- [4] 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, 36(4):19-22.
ZHU Yue-lin, HUANG Xin, XIONG Chang-jian, et al. Micromechanism of crude oil dehydration under high-voltage high-frequency electric field[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2005, 36(4):19-22.
- [5] ICHIKAWA Tsuneki, KEISUKE Itoh, YAMAMOTO Shigeki, et al. Rapid demulsification of dense oil-in-water emulsion by low external electric field I: experimental evidence [J]. Colloids and Surfaces A: Physico-chem Engineering Aspects, 2004, 242:21-26.
- [6] 黄万抚. 乳液液膜静电破乳器破乳机理研究[J]. 化学工程, 2003, 31(3):58-61.
HUANG Wan-fu. Principle of electrostatic broken emulsion in emulsion liquid membrane separation[J]. Chemical Engineering, 2003, 31(3):58-61.
- [7] JOHN S Eow, MOJTABA Ghadiri, ADEL O Sgarif, et al. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding[J].

- Chemical Engineering, 2001, 84:173-192.
- [8] URDAHL O, WILLIAMS T. Electrostatic destabilization of water-in-oil emulsions under conditions of turbulent flow[J]. Chem Eng Res Des, 1996, 74:158-165.
- [9] 丁德磐, 孙在春. 胜利原油与水的界面张力研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2001, 25(3): 39-41.
- DING De-pan, SUN Zai-chun. Study on interfacial tension between Shengli crude oil and water[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2001, 25(3): 39-41.
- [10] LEE C M, SAMS G W, WAGNER J P. Power consumption measurements for ac and pulsed dc for electrostatic coalescence of water-in-oil emulsions[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 53:1-24.
- [11] 冯叔初, 郭揆常, 王学敏. 油气集输[M]. 东营: 石油大学出版社, 2002.
- [12] 徐培瑜, 彭建萍. 电脱过程电能损耗及金属电极板绝缘改造[J]. 油气田地面工程, 2000, 19(7): 30-31.
- XU Pei-yu, PENG Jian-ping. Analysis to electric energy loss and metal electrode plate insulation remake in course of electric dehydration[J]. Oil-gas Surface Engineering, 2000, 19(7): 30-31.
- [13] CHRISTINE Noik, CHEN Jia-qing, DALMAZZONE Christine. Electrostatic demulsification on crude oil: a state-of-art review[R]. SPE 103808, 2006.

(编辑 沈玉英)

(上接第 81 页)

当气流经过翼前时, 首先在翼贴近壁面一侧产生旋流, 随后旋流强度开始增强, 在翼段出口处旋流区基本占满整个截面, 此时切向速度分布可看成是轴对称的。由于气流在尾翼的作用下产生极高的离心加速度, 翼后出现较强旋流场, 较高的切向速度将液体甩至管壁, 使液体在管壁形成液膜, 而管中心形成一个气体占主导的低压区。翼段出口旋流比达 0.22, 离心加速度达到 $(119\ 000 \sim 572\ 000) g$, 翼段出口截面平均离心加速度为 $370\ 138.2 g$, 翼段旋流效果理想。同时出口总压 $2.495\ 558\ \text{MPa}$, 为超声速分离器出口压力恢复到入口压力的 $60\% \sim 70\%$ 提供了可能。Brouwer 和 Okimoto 等人的研究结果表明^[1,2,7], 超声速旋流场离心加速度可达 $(300\ 000 \sim 600\ 000) g$, 与本文研究结果相吻合。

4 结 论

(1) 设计了用于超声速旋流分离器的三角薄板型超声速翼, 该翼型几何尺寸小, 易于加工, 具有较大的流通能力。

(2) 气流在超声速翼段始终保持超声速, 在翼段出口马赫数为 1.40, 翼前无激波产生。

(3) 气流首先在翼贴近壁面的一侧产生旋流, 旋流强度逐渐增强并向管中心靠拢, 在翼后旋流占满整个截面, 可看成是轴对称的。

(4) 气流在尾翼的作用下形成旋流场, 离心加速度达到 $(119\ 000 \sim 572\ 000) g$, 产生极高的离心力。在超声速翼尖处切向速度达到最大值 $170\ \text{m/s}$, 在翼后平均切向速度达到 $120\ \text{m/s}$ 。旋流效果理想, 可实现良好的超声速气液旋流分离。

参考文献:

- [1] OKIMOTO F T, BETTING M. Twister supersonic separator[C]. The Laurance Reid Gas Conference, Norman: Oklahoma, 2001.
- [2] OKIMOTO F T, BROUWER J M. Twister supersonic gas conditioning-studies: Applications and Results, GPA Paper[C]. San Antonio, 2003.
- [3] REUTHER J, ALONSOB J J, RIMLINGER M J, et al. Aerodynamic shape optimization of supersonic aircraft configurations via an adjoint formulation on distributed memory parallel computers[R]. AIAA Paper 96-4 045, 1999.
- [4] 曹学文. 超声速旋流天然气分离研究[D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2006.
- [5] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalized group analysis of turbulence I: basic theory[J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 3-5.
- [6] 彭维明. 切向旋流分离器内部流场的数值模拟及试验研究[J]. 农业机械学报, 2001, 32(4): 20-23.
- PENG Wei-ming. Numerical simulation and experimental research on the flow pattern in tangential inlet cyclone[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(4): 20-23.
- [7] BROUWER J M, EPSOM H D. Twister supersonic gas conditioning for unmanned platforms and subsea gas processing[R]. SPE 83977, 2003.

(编辑 沈玉英)