

文章编号:1673-5005(2011)06-0105-07

新型电聚结器结构参数对液滴聚结特性的影响

何利民¹, 杨东海¹, 罗小明¹, 李德泉¹, 杨帆²

(1. 中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266555; 2. 山东胜利职业学院, 山东 东营 257097)

摘要:设计包覆绝缘层的高压电极并加工 4 种新型静电聚结器,采用水/原油乳状液为试验介质,利用显微高速摄像系统结合图像处理技术对水滴的聚结规律进行观察和分析,探索电极层数、电极间距和电场强度等因素对水滴聚结特性的影响。结果表明:包覆绝缘层的高压电极可有效防止电击穿现象的发生,增加电场强度,提高电场作用时间有助于油水分离,但高于临界场强后容易导致液滴破碎;电极层数不同时,只要达到一定的电场强度均能促进液滴聚结,但多层电极处理量大,经济效益显著;极板间距较小时,能耗低但电场畸变严重,在满足工作场强的前提下可以适当增加电极间距;能耗受含水率、电极层数和极板间距等条件影响,综合考虑各因素可降低能耗。

关键词:油包水;电聚结器;电场;电极;间距;层数

中图分类号:TE 624.1 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2011.06.017

Effects of structural parameters of new electrostatic coalescer on coalescence characteristics of water droplet

HE Li-min¹, YANG Dong-hai¹, LUO Xiao-ming¹, LI De-quan, YANG Fan²

(1. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;
2. Shandong Shengli Vocational College, Dongying 257097, China)

Abstract: The insulated high voltage electrode and four types of electrostatic coalescers were designed and made. By using the micro high-speed camera system and image processing technology, the coalescence characteristics of water droplets at AC electric field were studied with water in crude oil emulsion. The effects of electric field intensity, number of electrode layer and electrode spacing on water droplets coalescence were investigated. The results show that the insulated high voltage electrode can effectively prevent electric breakdown. High electric field intensity and long residence time are conducive to water droplets coalescence, but if the electric field intensity is higher than critical one, the water droplets will rupture. If the electric field intensity is high enough to promote droplet coalescence, the number of electrode layer is not important. But the coalescer with multielectrode can enhance the flow rate and more economical. When electrode spacing is small, the power consumption is low but the electric field is badly distorted. If the electric field can effectively promote water droplet coalescence, the electrode spacing can be increased to avoid adverse effect. The power consumption is affected by water content, number of electrode layer, electrode spacing and so on, and the power consumption should be decreased in consideration of the field condition and electrode structure.

Key words: water in oil; electrostatic coalescer; electric fields; electrode; spacing; number of electrode layer

中国绝大部分陆上油田的联合站目前使用的依然是传统电脱水器,但随着注聚开采的推广应用,油水分离质量变差,油中含水明显增加,造成电脱水器内的电场强度降低、脱水电流增大甚至造成击穿放

电,对油田生产造成极大影响^[1]。为解决该问题,张建等^[2]采用高频脉冲直流电场取代传统的交流电场,目的是防止液滴成链,以免发生电极击穿;张黎明^[3]研究了带有绝缘层的平板电极聚结器的

收稿日期:2011-03-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51006124,51106182);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(09CX04032A);中国石油大学(华东)研究生创新工程项目(CXZD11-13)

作者简介:何利民(1962-),男(汉族),山东郓城人,教授,博士,博士生导师,主要从事油气集输及多相流分离方面的研究。

聚结效果,探讨了流动参数对聚结效果的影响,并进行了现场试验^[4-5]。实际上,除了流动参数和电场参数,电极的几何形状对聚结器的性能也有很大影响。传统电脱水器大多采用平板电极^[6],以增加油水分离面积,而聚结器通常采用的是同轴圆柱电极的形式,虽然电极间的电场是非均匀电场,但在高场强作用下仍然具有显著的效果。同时竖直放置的电聚结器,可以减少占地面积,提高海洋平台的甲板利用率^[7]。影响聚结器效果的还有电极层数和极板间距。虽然单层电极加工简单,但多层电极可以增加流通面积,提高聚结器的处理量,相应地提高经济效益。传统电脱水器的极板间距较大,达到几十到几百毫米,而含有绝缘电极的静电聚结器中电极间距可以从几毫米到几十毫米,以增强电场,促进水滴聚结。笔者加工制作含有绝缘电极的 4 种新型同轴圆柱电聚结器,并通过试验研究极板间距、电极层数等结构参数对液滴聚结效果的影响。

1 试验系统、方法及介质

1.1 试验系统及方法

试验系统由重力分离器、水罐、油罐、旋涡泵、齿轮泵、流量计、剪切阀组、等动量取样器和静电聚结器等组成,系统流程如图 1 所示。试验时将原油和水分别加入罐中,然后启动旋涡泵与齿轮泵(通过变频调整转速),油水分别经过流量计计量后,利用

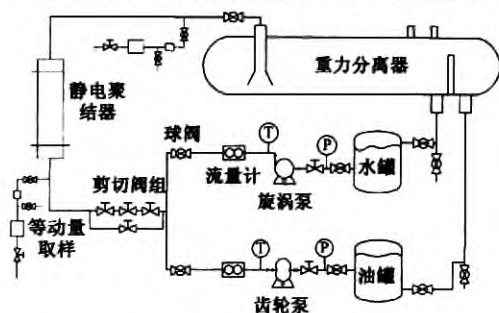


图 1 试验系统流程

Fig. 1 Flow diagram of experimental system

剪切阀组使油水混合均匀。在分离器入口设有等动量取样口,当分散相粒径达到试验要求时,就可以进行试验。静电聚结器与高压电源通过高压电缆相连,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(0~20 kV),施加到静电聚结器的电极间。乳化物流经静电聚结器,受到交流电场的作用,油中的水滴发生聚结,通过重力分离器进一步分离。在静电聚结器的入口和出口处,分别设有等动量取样口,取得的乳化物通过显微高速摄像系统进行拍摄并

通过图像处理得到乳化物中的水滴粒径。

静电聚结器的结构如图 2 所示。本研究共采用 4 种电极结构,分别是三层电极-电极间距 10 mm(1#),双层电极-电极间距 6 mm(2#)以及双层电极-电极间距 2 mm(3#),同时还有对 2#聚结器绝缘层增加了扰动构件的 4#聚结器。双层和三层电极的区别主要在于双层电极的高压电极只需在金属电极外层包覆一层绝缘层,而三层电极的高压电极需要在金属电极的内、外层均包覆绝缘层。其中 2#、3#和 4#的绝缘电极相同,4#在绝缘层表面又增加了相同材质、内径 42 mm、外径最大 46 mm 的规则螺旋型扰动构件。

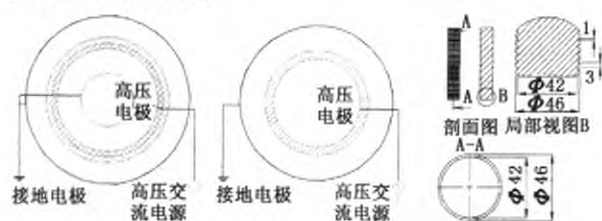


图 2 不同形式电极结构

Fig. 2 Different electrode structures

1.2 试验介质

试验介质为原油与自来水,配制含水率分别为 20%、30% 的油包水乳化物。根据相关公式^[8],计算得出 20 ℃、0.1 MPa 时乳化物的物性参数如表 1 所示。试验过程中通过改变流量来改变停留时间,改变输入电压改变电场强度。

表 1 油包水乳化物物性参数

Table 1 Physical properties of water in oil emulsions

含水率 $f_w/\%$	黏度 $\mu/(\text{mPa} \cdot \text{s})$	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	介电 常数 ϵ
20	40.17	909.2	4.41
30	59.47	918.7	6.75

1.3 电场计算

带有夹层同心圆柱体的电容^[9](图 3)为

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi\epsilon_1 l} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi\epsilon_2 l} = \frac{1}{2\pi l} \left[\left(\ln \frac{r_2}{r_1} \right) / \epsilon_1 + \left(\ln \frac{r_3}{r_2} \right) / \epsilon_2 \right]$$

式中, C 为电容; l 为电极长度; $r_1 \sim r_3$ 分别是第一至第 3 层介质的半径; ϵ 为介电常数。

因此,第一层介质中的电压为

$$U_1 = U \frac{C}{C_1} = U \frac{\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1}}{\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2}}$$

第一层介质中不同半径处($r_1 < r < r_2$)的场强为

$$E = \frac{U_1}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{U}{r \varepsilon_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)}, \quad (1)$$

第二层介质中不同半径处($r_2 < r < r_3$)的场强为

$$E = \frac{U_2}{r \ln \frac{r_3}{r_2}} = \frac{U}{r \varepsilon_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)}. \quad (2)$$

由于电场是非线性变化的,故电场强度取最大值与最小值的平均值进行计算。

相应的系统容抗为

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi f} \frac{1}{C}.$$

式中, f 为电场频率。通过容抗可以计算传导电流。

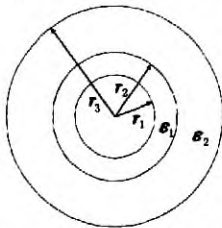


图 3 带有夹层的同心圆柱电容示意图
Fig. 3 Sketch map of concentric cylindrical capacitance with sandwich

2 试验结果讨论

在不同流量、不同电压下用显微高速摄像系统(图 4)观测出、入口液滴的大小并连续拍摄多幅照片进行记录,保证所统计的液滴数不小于 400。结合 ImageJ 图像处理软件分析液滴粒径变化以评价

静电聚结器对液滴的聚结效果。本文所拍照片像素为 1 280×1 024,实际尺寸与像素关系为 1280 pixel/1 520 μm。

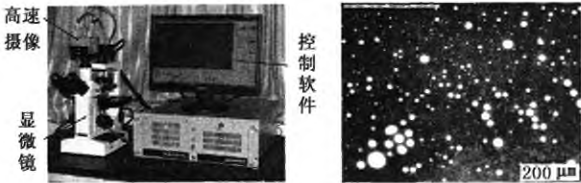


图 4 显微高速摄像系统
Fig. 4 Microscope and high speed camera system

粒径是宏观分离速度的微观反映,液滴粒径越大,油水分离速度越快。液滴粒径是通过图像处理得到的。常用的液滴粒径有算术平均直径 d ($d = \sum_{i=1}^n d_i / n$)、比表面积平均径 d_{32} 和体积平均径 d_{43} 。笔者使用算术平均粒径 d (μm) 来评价液滴聚结的效果。

2.1 电极层数的影响

图 5 是含水率 30% 时,1#和 3#电聚结器中液滴平均直径 d 在不同电场强度下的变化规律。可以发现,不同聚结器未加电场时(电场强度为 0)液滴粒径基本相同,随着电场强度增加液滴粒径均有增大的趋势,这与张黎明^[3,10]的试验结果相似。在交流电场中,液滴聚结主要以偶极聚结的形式发生。Waterman^[11]给出的两个液滴偶极-偶极吸引力的公式为

$$F_E = 3kE^2 R_1^3 R_2^3 (2\cos^2\beta - \sin^2\beta) / S^4. \quad (3)$$

式中, R_1, R_2 分别为液滴粒径; β 为液滴中心连线与电场线夹角; S 为液滴中心间距; k 为常数; E 为电场强度。

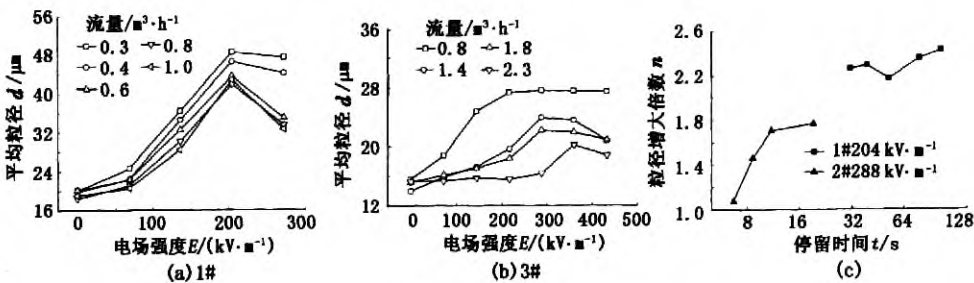


图 5 电极层数的影响
Fig. 5 Effect of number of electrode layer

式(3)表明电场强度越高,液滴所受电场力越大,液滴变形率越大,伸缩幅度越大,液膜也越容易破裂从而促进液滴聚结。随着流量增加,液滴粒径增长趋势渐趋缓慢,但即使流量较大在高压电场作用下液滴粒径依然增加明显。同时发现,流量较小

时,液滴混合不太激烈,并且碰撞不太频繁,更有助于电场力对液滴施加作用,因此将促进液滴的靠近与聚结,提高液滴聚结效果。如果流量继续增加,液滴碰撞加剧,运动更加无序,流场和电场将共同影响液滴的聚结,电场力的作用会相应削弱。

通过对比发现,1#聚结器不同流量时,电场强度为 $204 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 时效果较好,而3#聚结器在 $288 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 时效果较好。原因是施加一定的场强后液滴粒径增大,当电场强度超过临界场强时,液滴就发生破裂而形成更小的液滴,导致平均粒径变小,聚结效果变差。临界场强之所以不同,原因在于1#电极间距较大,乳化物在电场中停留时间长,更利于液滴发生聚结,即液滴粒径也会更大(这也可由图5(a)发现),由公式(3)可知,所受电场力更大,因此最优电场强度会下降。由图5(b)也可以发现,流量越大,效果较好的电场强度越高,原因是流量大时乳化物在电场中的停留时间变短,使得邻近水滴发生碰撞与聚结的时间很短,因此在较高的电场强度下才能达到较好的结果,这与1#、3#最优电场的试验结果也比较吻合。

将二者效果较好电场强度下、不同停留时间时的液滴粒径增大倍数进行对比(图5(c))可以发

现:在停留时间较长的情况下,液滴粒径增大倍数更大,这时起主要作用的是停留时间;3#电极平均停留时间较短,随停留时间增加,粒径增大倍数增大更明显;1#电极平均停留时间较长,所以停留时间对液滴粒径增大倍数的影响没有3#聚结器的那么明显。

图6是1#、2#和3#电极在含水率20%时,液滴粒径随电场强度的变化规律。由于含水率降低,液滴粒径变小,液滴间距变大,所以需要更大的电场强度促进液滴聚结,因此最优场强相较于含水率30%时要高。采用高压绝缘电极虽然会降低电场强度,但在高电压作用下依然会促进液滴聚结,并且能避免击穿现象的发生。

由以上分析可知,电极层数的影响对液滴聚结效果的影响不大,电极层数主要改变的是停留时间,只要达到一定的场强均能有效促进液滴聚结,但多层电极空间利用率高,处理量大,经济效益更为显著。

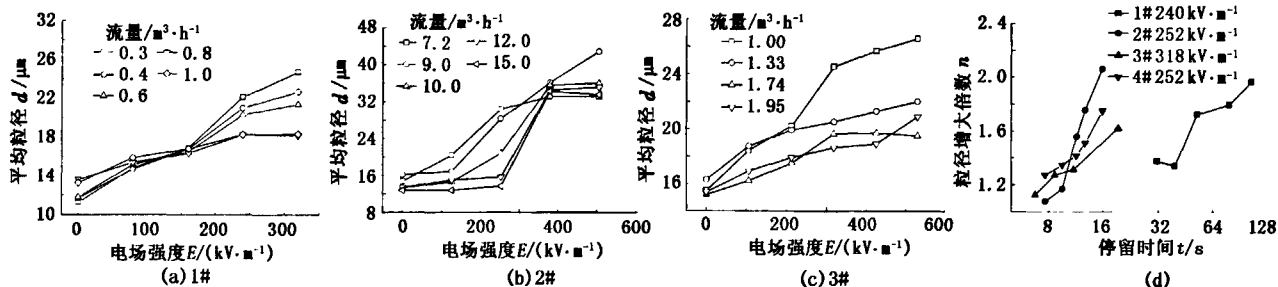


图6 不同聚结器对液滴粒径影响

Fig. 6 Effect of different coalescers on droplet diameter

2.2 电极间距的影响

2#和3#静电聚结器所用的绝缘电极是相同的,不同之处在于电极间距不同,分别为6 mm和2 mm。图6(b)和(c)对比的结果表明,液滴粒径均随电场强度增加而变大,2#电场强度达到 $378 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 后液滴粒径变化不大,3#电场强度达到 $424 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 后液滴粒径增大也不明显。实际上加了扰动构件的4#聚结器的电极间距是介于2#和3#之间的,考虑到入口处液滴粒径不尽相同,以聚结器出口与入口处的液滴平均粒径 d 之比为标准,对不同结构形式的聚结器在电场强度比较接近的情况下的液滴粒径增大倍数进行对比(图6(d)),结果发现,1#聚结器的液滴粒径增大倍数较大,原因是停留时间比较长,液滴混合不太激烈,并且碰撞不太频繁,有助于电场力对液滴施加作用。同时发现其余3种结构形式停留时间的影响不够明显。2#、3#和4#静电聚结器由于停留时间较短,液滴粒径增大倍数较1#

要小,但2#聚结器在停留时间较大时与1#的液滴粒径增大倍数基本一致,原因是电场强度略高于1#静电聚结器,停留时间较大时液滴也可以较充分地发生聚结,促进液滴粒径增大。3#聚结器电场强度虽然较高,但由于电极间距较小,电场分布更不均匀。根据公式(2)计算可知,10 kV时,2#聚结器每毫米电场强度变化是5.2 kV/m,而3#是15.6 kV/m,即虽然间距较小增加了电场强度,但会导致非均匀电场畸变更严重,反而不利于液滴聚结。同时根据公式(1),如果电极间距较小,也会使得绝缘层上的电场强度升高,在相同电压的条件下,更容易发生电场击穿。4#电极间距处于2#和3#之间,液滴增大倍数也处于2#和3#之间。这说明电极间距并非越小越好,要在达到现场所需电场强度的基础上,适当增加电极间距,弱化非均匀电场造成的影响,并避免施加到绝缘层上的电场强度过高导致击穿现象的发生。

2.3 扰动构件的影响

2#和4#聚结器电极尺寸一致,不同之处是4#聚结器增加了扰动构件,材质与绝缘层一致,设计的初衷是通过增加对液滴的扰动而促进液滴聚结。试验时,保证电场作用时间相一致,研究不同电场强度下液滴粒径变化规律。

通过图7可以发现入口和出口处未加电压时液滴粒径基本一致,施加电压2和4 kV时,停留时间较短情况下液滴粒径差别不大,停留时间较长时液滴粒径差别较大。但施加高电压(6和8 kV)后,未加扰流构件的液滴粒径明显大于加扰流构件的,而且停留时间较短时差别更大,这与较低电压时的现象是不同的。原因可能有两个:①加扰流构件后,相应增加了绝缘层的厚度,改变了电场,相同电压时乳化物中电场强度变小,在电压较低、停留时间短的情况下,液滴都没有充分聚结,因此差别不大,而停留时间较长,未加扰流构件的电场强度会高一些,液滴发生频繁碰撞

也更充分,所以液滴粒径差别较大。电压较高时(6和8 kV),高强电场加速了水滴的偶极聚结,但停留时间较短时并没有充分聚结,因此停留时间较短时停留时间起主要作用,此时液滴粒径差别不大,而停留时间较长时,液滴可以充分聚结,2#电场强度更高,液滴发生更为充分的碰撞聚结,液滴粒径也较大,此时起主要作用的是电场强度。②加扰流构件后,由于流速较低(小于1 m/s),在扰动构件附近并没有对液滴运动产生影响,这可以从数值模拟的结果(图8)看出,因此扰动构件并没有促进液滴的聚结。为增加对液滴的扰动,需要在高速状态下才能实现,但高速状态下,电场作用时间就会下降,液滴聚结受到影响。根据图7(e)和(f),当电场强度足够高时,电场作用时间较短依然可以促进液滴聚结。因此,研究高流速作用下电场与流场共同作用下液滴的聚结规律具有重要意义。

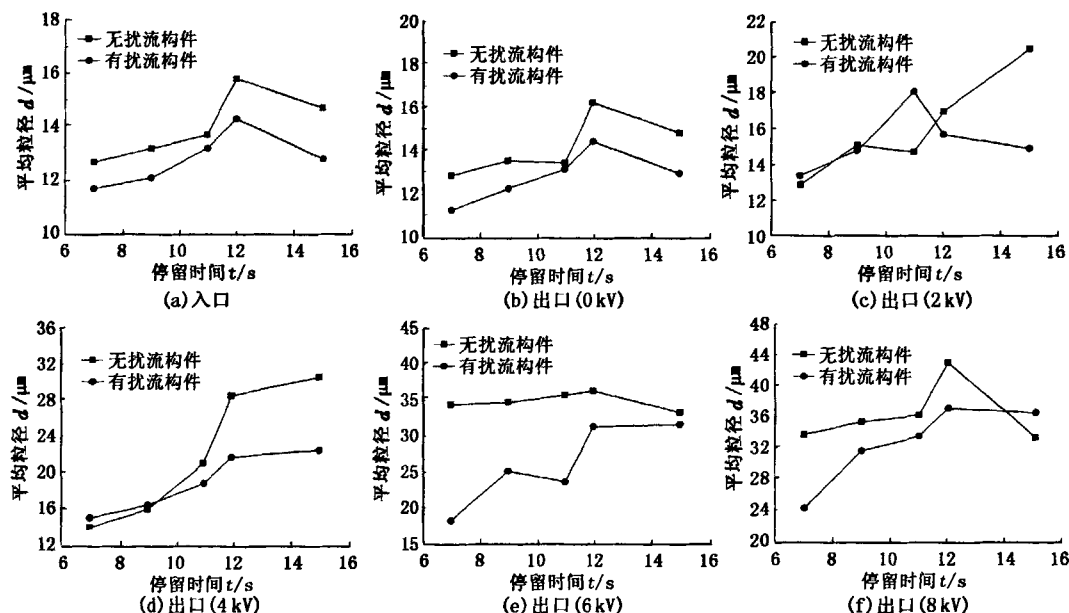


图7 加与未加扰流构件效果对比

Fig.7 Comparison between coalscrer with and without disturbance component

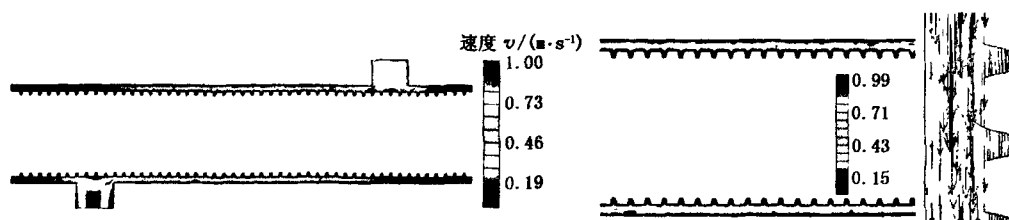


图8 加扰动构件后管截面速度分布

Fig.8 Velocity distribution of cross section with disturbance component

2.4 能耗对比

传统电脱水器采用裸电极,由于实际生产中原油

乳状液中含有酸、碱、盐等电解质,使原油乳状液的导电能力大大增强,又由于两极板所加电压上万伏,使

极板间由传导电流引起的能耗损失成为静电聚结器最主要的电能损耗^[11-12]。在交变电场中,使电介质反复极化所损耗的电场能才是唯一的有效损耗,即位移电流损耗^[13]。针对传统电脱水器由传导电流而引起的无效损耗及原油含水过多,传导电流过大,脱水器操作的稳定性及脱水效果下降等问题,考虑在金属电极板覆盖有一定技术要求的绝缘层来解决。

包覆绝缘层的电聚结器可以显著降低传导电流,虽然绝缘层会降低电场强度,但在施加高电压的情况下,如果绝缘层介电常数合适,依然可以达到所需的电场强度,有效促进液滴聚结,只要施加的电压适中,没有超过绝缘层的击穿场强就是安全的。对不同形式的聚结器在不同含水率时的电压与能耗的关系进行对比,结果见图9。可以发现,相同电压时,1#和2#能耗均大于含水率相同时3#聚结器的能耗,这表明电极层数越多,电极间距越大,聚结器的能耗越高。原因是聚结器可以等效为一个电容,电极层数越多、间距越大,电容越大,容抗越小,传导电流越大,使得相同电压下能耗越高。

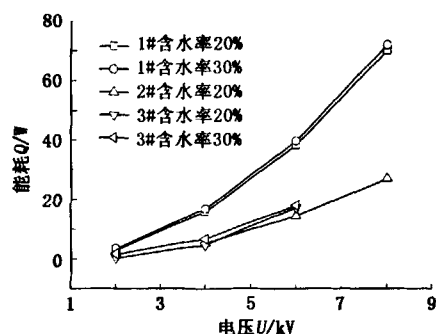


图9 不同聚结器能耗

Fig. 9 Power consumption of different coalescers

同时发现,同一聚结器中,含水率较高时能耗较高。原因是含水率越高,介电常数越大,使得电容增大,容抗减小,能耗升高。同时含水量增加,极板间距增大,液滴增多,发生极化作用所需的位移电流损耗也会增加。试验所用的2#聚结器含水20%时容抗为 $4.72 \times 10^6 \Omega$,相应的4、6和8 kV时的电流分别是70、105和140 mA,而实际的测量值是110、200和280 mA。这说明除了传导电流外,位移电流的影响也很大。

虽然间距较小的聚结器能耗较低,但施加在乳化物中的电场畸变会更加严重,影响液滴的聚结效果,同时增加绝缘层中的电场强度,容易发生击穿现象。在满足场强要求的情况下,适当增加电极间距有利于液滴聚结,也可以使能耗维持在相对较低的水平。

3 结 论

(1) 新型静电聚结器在高强电场作用下,液滴的聚结效果明显并能避免击穿现象的发生。

(2) 电极间距较小,能耗较低,但电场畸变严重,有可能破坏绝缘层,不利于液滴聚结,需要在满足聚结所需场强的基础上适当增加电极间距。

(3) 在不同的聚结器中,高强电场和较高的电场停留时间均有利于液滴聚结。多层电极聚结器空间利用率高,处理量大,单层电极能耗低。

(4) 扰动构件对层流状态下液滴聚结效果影响不大,需要探索湍流状态下扰动构件与电场强度共同作用对液滴聚结效果的影响。

参考文献:

- [1] 刘东杰. 胜利油田原油脱水现状探讨[J]. 胜利油田职工大学学报, 2009, 23(5): 67-68.
LIU Dong-jie. Discussion of crude oil dehydration in shengli oilfield[J]. Journal of Shengli Oilfield Staff University, 2009, 23(5): 67-68.
- [2] 甘琴容, 张建, 董守平. 高频脉冲电场下乳状液中液滴运动行为研究[J]. 油气田地面工程, 2006, 25(1): 5-6.
GAN Qin-rong, ZHANG Jian, DONG Shou-ping. Study of droplet motion of emulsion in high-frequency pulsating electrical field[J]. Oil-Gas field Surface Engineering, 2006, 25(1): 5-6.
- [3] 张黎明, 何利民, 吕宇玲. 高压静电聚结破乳技术[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 687-690.
ZHANG Li-ming, He Li-min, LÜ Yu-ling. Emulsion separation in high voltage electrostatic coalescer[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 687-690.
- [4] 张黎明, 何利民, 张晶, 等. 电极结构及绝缘层对静电聚结器的影响[J]. 油气田地面工程, 2010, 29(4): 18-20.
ZHANG Li-ming, HE Li-min, ZHANG Jing, et al. Effect of electrode structure and insulated layer on electrostatic coalescer[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2010, 29(4): 18-20.
- [5] 张黎明, 张凯, 何利民, 等. 高压静电聚结器设计、实验及现场应用[J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1797-1802.
ZHANG Li-ming, ZHANG Kai, HE Li-min, et al. Design, experiment and practical application of high voltage electrostatic coalescer[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7): 1797-1802.
- [6] 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(2/3):357-368.
- [7] NOIK Christine, CHEN Jiaqing. Electrostatic demulsification on crude oil: a state-of-the-art review[R]. SPE 103808, 2006.
- [8] 马华伟. 紧凑型静电聚结器的开发[D]. 东营: 中国石油大学储运与建筑工程学院, 2005.
Ma Hua-wei. The development of compact electrostatic coalescer[D]. Dongying: College of Pipeline and Civil Engineering of China University of Petroleum, 2005.
- [9] 刘其祖. 电气绝缘结构设计原理(中册): 绝缘结构总论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981: 12-13.
- [10] 张黎明, 何利民, 马华伟. 绝缘紧凑型电破乳器中液滴聚结特性研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(6): 82-86.
ZHANG Li-ming, HE Li-min, MA Hua-wei. Coalescence characteristics of droplets in insulated compact electric demulsifier[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31(6): 82-86.
- [11] WATERMAN L C. Electrical coalescers[J]. Chemical Engineering Progress, 1965, 61(10): 51-57.
- [12] 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): 1-24.
- [13] JOHN S Eow, MOJTABA Ghadiri, ADEL O Sharif, et al. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding[J]. Chemical Engineering Journal, 2001, 84(3): 173-192.
- (编辑 韩国良)
-
- (上接第98页)
- [5] 张贤松, 郭兰磊, 屈智坚, 等. 孤岛中一区聚合物驱油效果分析及驱油特征认识[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(6): 54-57.
ZHANG Xian-song, GUO Lan-lei, QU Zhi-jian, et al. The effectiveness evaluation and displacement characteristics analysis of polymer flooding pilot test in Zhong-1 unit of Gudao Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(6): 54-57.
- [6] 周守为. 中国海洋石油高新技术与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- [7] 周守为. 海上稠油高效开发新模式研究及应用[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(5): 1-4.
ZHOU Shou-wei. The study and application of new mode of effective development of offshore heavy oil field[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(5): 1-4.
- [8] 周守为. 海上油田高效开发技术探索与实践[J]. 中国工程科学, 2009, 11(10): 55-60.
ZHOU Shou-wei. Exploration and practice of offshore oil-field effective development technology[J]. Engineering Sciences, 2009, 11(10): 55-60.
- [9] 张贤松, 王海江, 唐恩高, 等. 渤海油区提高采收率技术油藏适应性及聚合物驱可行性研究[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(5): 56-59.
ZHANG Xian-song, WANG Hai-jiang, TANG En-gao, et al. Research on reservoir potential and polymer flooding feasibility for EOR technology in Bohai Offshore Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(5): 56-59.
- [10] 王宏申, 石勇, 周亚利, 等. 旅大10-1油田早期注聚可行性研究[J]. 海洋石油, 2006, 26(3): 40-45.
WANG Hong-shen, SHI Yong, ZHOU Ya-li, et al. Feasible study of injecting polymer early for LD10-1 Oilfield[J]. Offshore Oil, 2006, 26(3): 40-45.
- [11] 蒋珊珊, 杨俊茹, 孙福街, 等. 海上油田注聚合物时机研究及现场应用[J]. 海洋石油, 2009, 29(3): 37-42.
JIANG Shan-shan, YANG Jun-ru, SUN Fu-jie, et al. Research and application of early polymer flooding technology in offshore oil field[J]. Offshore Oil, 2009, 29(3): 37-42.
- [12] 姚光庆, 陶光辉, 邱坤态. 河南油田聚合物驱增油效果评价方法探讨[J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 2003, 18(3): 28-31.
YAO Guang-qing, TAO Guang-hui, QIU Kun-tai. Study on evaluation method of increasing oil production by polymer flooding in Henan Oilfield[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition), 2003, 18(3): 28-31.
- [13] 隋军, 廖广志, 牛金刚. 大庆油田聚合物驱油动态特征及驱油效果影响因素分析[J]. 大庆石油地质与开发, 1999, 18(5): 17-20.
SUI Jun, LIAO Guang-zhi, NIU Jin-gang. Dynamic performance and interference factor analysis of oil displacement result in polymer flooding of Daqing Oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1999, 18(5): 17-20.
- (编辑 李志芬)