文章编号:1674-2869(2024)04-0363-07

基于不同工艺的高凝原油脱水技术实验研究

曲 虎,杨佳朋,林俊岭,宋义伟,刘 静
中国石油工程建设有限公司华北分公司,河北 任丘 062552

摘 要:为了研究不同脱水工艺对高凝原油的处理效果,以巴彦油田高凝原油为研究对象,对自然沉降脱水、热化学脱水、电化学脱水、高频脉冲脱水、超声波脱水及微波脱水等脱水工艺效果进行实验研究,通过实验数据可得,BC-018K破乳剂对巴彦原油脱水效果最佳,最佳加药量为120 mg/L。在60 ℃温度和加药量120 mg/L条件下,针对含水率≤20%的巴彦原油,应用热化学沉降脱水至合格时间为2 h;应用电场强度≥1 000 V/cm的电化学脱水工艺时,脱水合格时间为20 min;应用频率为2.5 kHz、脉宽比为80的高频脉冲脱水工艺时,脱水合格时间为40 min;应用频率20 kHz、功率60 W、超声作用时间30 s的超声波脱水工艺时,脱水合格时间为1 h;微波脱水与热化学沉降脱水效果相当;脱水效果由好到差的顺序为电化学脱水,高频脉冲脱水,超声波脱水,热化学沉降脱水和微波脱水,自然沉降;针对巴彦油田的高凝原油,应优先选用电化学脱水工艺。

关键词:高凝原油;脱水;电化学;破乳剂
中图分类号:TE39 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202310027

Experimental study on high pour point crude oil dehydration technology based on different processes

QU Hu, *YANG Jiapeng*, *LIN Junling*, *SONG Yiwei*, *LIU Jing*
China Petroleum Engineering &Construction Corp.Nroth China Company, Renqiu 062552, China

Abstract: To evaluate the treatment effectiveness of different dehydration processes on high pour point crude oil, with Bayan Oilfield's high pour point crude oil as the research object, experimental investigations were conducted on the dehydration process effects of natural sedimentation dehydration, thermochemical dehydration, electrochemical dehydration, high-frequency pulse dehydration, ultrasonic dehydration, and microwave dehydration. Experimental data revealed that BC-018K demulsifier exhibited the most optimal dehydration effect on Bayan crude oil, with an ideal dosage of 120 mg/L. For Bayan crude oil with a water content of ≤ 20%, under the temperature of 60 ℃ and a dosage of 120 mg/L, the qualified time for thermochemical sedimentation is 2 hours. Employing an electrochemical dehydration process with an electric field strength of ≥ 1 000 V/cm, the time toreach dehydration standard(TDS) is 20 min. Similarly, utilizing the high-frequency pulse dewatering process with a frequency of 2.5 kHz and a pulse width ratio of 80 results in a TDS of 40 minutes. When applying the ultrasonic dehydration process with a frequency of 20 kHz, power of 60 W, and ultrasonic action time of 30 s, the TDS is 1 h. The microwave dehydration effect is comparable to that of thermochemical precipitation dehydration. The order of dehydration effect from best to worst is electrochemical dehydration, high-frequency pulse dehydration, ultrasonic dehydration, thermochemical

收稿日期:2023-10-28
基金项目:中国石油工程建设有限公司科技项目(2022HBKJ01)
作者简介:曲 虎,硕士,高级工程师。Email:qh915gf1@163.com
引文格式:曲虎,杨佳朋,林俊岭,等. 基于不同工艺的高凝原油脱水技术实验研究[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(4):363-369.

sedimentation dehydration and microwave dehydration, natural sedimentation. For high pour point crude oil in Bayan Oilfield, it is recommended to prioritize the electrochemical dehydration process.

Keywords: high pour point crude oil; dehydration; electrochemistry; demulsifier

近年来,随着三次采油、深层稠油、高凝油田的开发,油田采出液的成分越来越复杂,脱水难度也越来越大[1-3],除了常规的自然沉降脱水、热化学沉降脱水、电化学脱水、旋流脱水工艺,一些新型的脱水工艺如高频脉冲脱水、超声波脱水、微波脱水、纤维膜脱水、生物法脱水也在各油田尝试和推广应用,其中自然沉降脱水和旋流脱水对于原油深度脱水效果较差,多用于一段的低温预脱水处理,一般将30%以上含水原油脱水至20%以下再进入二段脱水;热化学沉降脱水是国内外油田最常用的二段脱水工艺,配合破乳剂的加注,一般轻质和中质原油采用热化学沉降脱水均可在4 h内将原油脱水至质量分数0.5%以下,但热化学沉降工艺对稠油和重质原油脱水效率较低,需要沉降时间长,部分稠油和重质原油的脱水沉降时间达48 h,需要的沉降设备容积大,投资高,在应用于稠油和重质原油处理时,一般采用大罐沉降工艺;电化学脱水工艺由于其高效的脱水效率,成为国内外油田处理中质原油、重质原油和稠油的主要脱水工艺,在华北、大庆、胜利等油田应用广泛。近年来,随着原油脱水技术的发展,国内油田逐步在尝试一些新的脱水工艺,例如高频脉冲脱水工艺、超声波脱水工艺和微波脱水工艺,高频脉冲脱水工艺已经在华北、吐哈和新疆等地区油田应用,超声波脱水工艺和微波脱水工艺也逐步在进行工业化应用;纤维膜脱水和生物法脱水工艺在原油脱水领域工业化应用较少,目前还处于研究阶段[4-9]。

巴彦油田位于内蒙古河套盆地,原油埋藏深,原油凝点接近50 ℃,蜡含量及胶质沥青质含量高达45%以上,原油脱水难度大,为了优选脱水工艺,在实验室进行了自然沉降脱水、热化学脱水、电化学脱水、高频脉冲脱水、超声波脱水及微波脱水等脱水效果研究,以确定最佳的脱水工艺,为油田集中脱水工艺提供依据。

1 实验部分

1.1 原油物性

巴彦油田原油物性见表1所示,凝点高达48 ℃,蜡含量及胶质沥青质含量高达45%以上。为高凝石蜡基原油。

1.2 方 法

在55 ℃温度条件下,将初始含水率1%的巴彦原油加自来水,将其乳化成含水率40%的原油乳状液。在55 ℃条件下进行药剂筛选实验,在筛选出最佳破乳剂后,使用最佳破乳剂进行不同投药量的筛选实验。由于巴彦油田混合原油初始含水率较低,无法直接进行脱水率测试,在室内55 ℃下加自来水将其人工手摇乳化成不同含水率的原油乳状液进行不同工艺的脱水实验,脱后油含水率达到0.5%为合格原油[10-11]。

2 结果与分析

2.1 破乳剂筛选

将混合原油(含水率1%)在55 ℃下加自来水将其乳化成含水40%的原油乳状液。在55 ℃条件下进行药剂筛选实验,加药质量比100 mg/kg,实验结果见表2。

通过实验数据可知,在原油含水40%,沉降温度55 ℃的条件下,破乳剂BC-018K在90 min脱水率达到了92.7%,为所选药剂中最优。

在温度55 ℃的条件下,使用破乳剂BC-018K进行不同投药量的筛选实验,实验结果见表3。

通过表3数据可以得出,破乳剂BC-018K投药量在20~200 mg/kg范围内,原油的脱水率随着投药量的增加而增加。但投药量在120~200 mg/kg时,脱水率增幅较小,所以推荐最佳投药浓度为120 mg/kg。

2.2 热化学沉降脱水实验

热化学沉降脱水机理是通过加热和加入化学

表1 原油物性

Tab. 1 Physical property of crude oil

项目	20 ℃时密度 / (g/cm³)	50 ℃时密度 / (g/cm³)	55 ℃时黏度 / (mPa·s)	凝点 / ℃	ω(蜡) / %	ω(胶质+沥青) / %	析蜡点 / ℃
指标	0.873	0.853	20.59	48	21.78	24.41	51

表2　混合原油乳状液破乳剂筛选实验数据表

Tab. 2　Experimental data for screening demulsifiers in mixed crude oil emulsions

序号	破乳剂名称	不同沉降时间脱水率 / %				20 mL原油脱水中间层体积 / mL	界面状态	污水水质
		12 min	30 min	60 min	90 min			
1	HJ-709	81.9	84.4	89.2	91.7	0.0	挂壁	清
2	HJ-710	74.6	77.0	79.2	81.9	0.0	挂壁	清
3	HJ-711	77.0	77.0	79.2	79.2	0.0	挂壁	清
4	HP-91-1	83.4	84.5	89.7	91.2	0.0	挂壁	清
5	HP-91-2	84.7	84.5	89.2	91.7	0.0	挂壁	清
6	XST-1	28.3	22.7	79.2	84.4	0.0	挂壁	清
7	XST-2	33.1	73.2	77.0	81.9	0.0	挂壁	清
8	XST-3	10.0	38.0	20.0	70.0	0.0	齐	清
9	XST-4	83.9	84.5	87.3	91.7	0.0	挂壁	清
10	XST-5	81.9	84.5	89.2	91.7	0.0	挂壁	清
11	BC-018H	81.0	84.5	89.2	89.2	0.0	挂壁	清
12	BC-018K	87.0	92.7	92.7	92.7	0.0	齐	清
13	ZH-31	23.7	80.2	82.9	82.9	0.0	挂壁	清
14	30071K	83.1	87.2	89.4	89.4	0.0	挂壁	清
12	ZH-06	73.2	77.8	80.2	80.2	0.0	挂壁	清
16	ZH-112	70.8	78.2	78.2	78.2	0.0	挂壁	清
17	018K	44.0	48.3	60.2	68.2	0.0	挂壁	清
18	2121T	44.5	22.0	63.4	78.1	0.0	挂壁	清
19	JY-PR02	28.0	68.3	72.6	74.5	0.0	齐	清
20	JY-PR08	24.5	68.0	74.2	74.2	0.0	齐	清
21	JY-P101	64.9	81.1	81.1	81.1	0.0	挂壁	清
22	JY-P102	68.0	78.3	82.6	84.5	1.0	挂壁	清
23	JY-P103	70.3	84.5	83.8	84.5	2.0	挂壁	清
24	202	48.0	28.3	62.6	74.5	1.0	挂壁	清
22	30K	74.5	79.2	79.2	79.2	1.0	挂壁	清
26	TEF401	71.1	74.5	74.5	81.9	0.0	挂壁	清
27	ZHF-11	63.2	70.3	77.7	82.7	0.0	挂壁	清
28	ZHF-14	68.0	78.3	82.6	84.5	1.0	齐	清
29	ZHF-16	63.2	70.3	74.7	72.7	0.2	挂壁	清
30	ZHF-32	78.0	78.3	82.6	84.5	1.0	齐	清
31	空白	0	0	0	0	/	/	/

表3　破乳剂最佳投药量筛选脱水实验数据表

Tab. 3　Experimental data for optimal dosage screening of demulsifiers in dehydration

温度 / ℃	投药质量浓度 /（mg/kg）	不同沉降时间原油脱水率 / %				20 mL原油脱水中间层体积 / mL	界面状态	污水水质
		12 min	30 min	60 min	90 min			
60	20	47.8	22.7	77.0	81.9	0.0	齐	清
	80	27.2	67.3	79.2	84.4	0.0	齐	清
	100	83.2	91.7	94.6	94.6	0.0	齐	清
	100	87.7	93.1	93.3	92.8	0.0	齐	清
	120	90.1	93.2	93.2	94.6	0.0	齐	清
	150	90.7	93.2	93.8	96.2	0.0	齐	清
	200	91.1	93.4	94.7	97.7	0.0	齐	清
空白	0	0	0	0	0	/	/	/

药剂降低或削弱油水界面膜的强度，降低外相的黏度，增加水滴的碰撞机会，从而破坏乳状液的稳定性，加速油水分离。影响热化学沉降效果的因素主要是加热温度和加药量[12]。

将巴彦原油乳化成含水20%和50%的原油乳状液。在不加破乳剂（自然沉降）和加破乳剂质量浓度120 mg/kg条件下对巴彦原油进行不同含水率和温度下的模拟沉降脱水实验，结果见图1。

由图1(a)可知，随着温度的上升和沉降时间的延长，脱水效果越来越好，这是因为提高温度，一方面可以降低原油乳状液外相的黏度，增加了分子的热运动，有利于液珠的聚结，另一方面温度升高可以降低油水界面的张力，水滴受热膨胀，使乳化液膜减弱，有利于破乳和聚结，所以升温有利于破乳[13]。同时，由图1(a)可知，在温度低于55 ℃的自然沉降条件下，原油在48 h之内不能脱水合格，在温度高于55~60 ℃时，原油在12 h可以脱水合格，脱后油含水率达到0.37%；同时可以看出，20%含水率原油比50%含水率原油脱水困难，50%含水率原油在12 h时脱后油含水率达到0.31%，这是因为对于原油乳状液，含水率越高，原油中小水珠相互碰撞聚结成大水珠的概率越大，沉降效果越好。

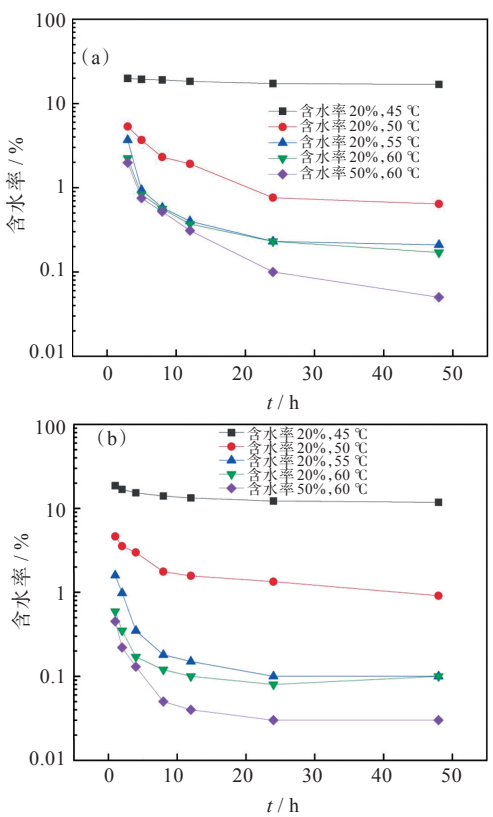

图1 脱后油含水率和沉降时间的关系曲线：(a)自然沉降，(b)热化学沉降

Fig. 1 Relationship between water content and settling time of dehydrated oil: (a) natural settlement detachment, (b) thermochemical deposition

由图1(b)可知，BC-018K破乳剂对巴彦原油脱水效果增强明显，这是因为破乳剂是一种表面活性剂，它可以降低原油乳状液的界面张力和界面膜强度，破坏W/O型乳状液的稳定结构，从而加快油水分离。同时还可以看出，20%和50%含水率原油在55~60 ℃时用2 h可脱水合格，脱后油含水率达0.35%，50%含水率原油较20%含水率原油脱水容易，在60 ℃时用2 h时，可使脱后油含水率达0.22%。

2.3 电化学脱水实验

电脱水的作用机理是通过电场对水滴的作用，使水滴发生变形和产生静电力，从而削弱乳化膜的机械强度，增大水滴的运动速度，促进水滴互相碰撞，彼此聚结成粒径较大的水滴，在原油中沉降分离出来[14]。

将巴彦原油乳化成含水5%和20%的原油乳状液，研究不同含水率、不同电场强度和脱水时间下的脱水实验效果，脱水温度：60 ℃；破乳剂质量浓度为120 mg/kg；电场强度：1 000、1 500、2 000、4 000 V/cm；脱水时间：10、15、20、25 min，结果见图2。

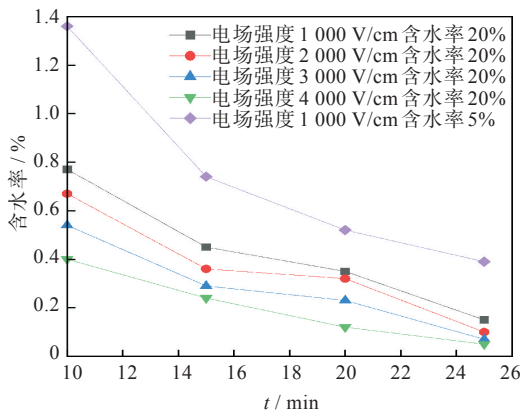

图2 不同含水原油电化学沉降脱后含水率曲线图

Fig. 2 Water content of crude oil with different water contents after electrochemical sedimentation and dehydration

由图2可知，随着电场强度或原油含水率的升高，脱水效果越好，这是因为根据水滴在电场中的运动机理，分散相水滴之间偶极聚结力跟其所处电场场强的二次方成正比，因此场强越大脱水效果越明显。在60 ℃时，含水率20%的原油在电场强度1 000、2 000、3 000、4 000 V/cm条件下脱水合格时间分别为20、15、15、10 min，脱水后油含水率分别达到0.35%、0.36%、0.29%、0.40%；含水率5%

的原油脱水效果稍差，但仍可在20 min内脱水合格；相对于热化学沉降，电化学脱水效率是其3倍以上，这是因为与热化学沉降相比，电化学工艺的电场作用可以增大水滴的运动速度，加快小水滴的聚结频率，从而大幅度提高脱水效果。

2.4　高频脉冲脱水实验

高频脉冲具有高频脉冲破乳和高频电场聚结两方面加快脱水的机理，一方面，高频脉冲电磁场使乳化小水珠在电场中产生振动、变形。当外加电场频率接近界面膜谐振频率时两者形成共振，界面膜因振动、变形幅度增大而破裂，实现破乳；另一方面，根据电介质（原油乳状液）的击穿伏秒特性，建立起稳定的高频高压电场，使油中小水珠在电场作用下产生变形、振动，相互碰撞快速聚结成大水珠，通过重力沉降分离[15]。

将巴彦原油乳化成含水5%、10%和20%的原油乳状液，研究不同含水率、不同脱水时间下的脱水实验效果，脱水温度为60、65 ℃；破乳剂质量浓度为120 mg/kg；脉冲频率为2.5 kHz，脉宽比80，电场强度为650 V/cm，结果见图3。

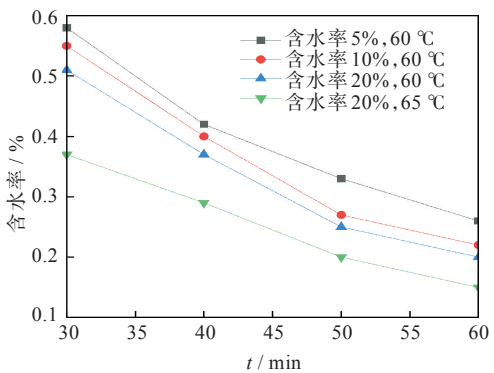

图3　不同含水率及温度原油高频脉冲脱后含水率曲线图

Fig. 3　Water content of crude oil after high-frequency pulse dehydration at different temperatures and water contents

由图3可知，随着原油含水率的增加或温度的升高，脱水效果越好；在频率为2.5 kHz、脉宽比为80、电场强度在650 V/cm、含水率5%~20%的原油，在40 min内可脱水合格，脱后油含水率达0.37%，相对于热化学沉降，高频脉冲脱水效率是其1.5倍以上。

2.5　超声波脱水实验

超声波破乳的机理主要是机械振动作用和热作用，机械振动作用使水粒子与原油介质一起振动，水粒子互碰撞、黏合，实现水相沉降分离。热作用一方面是机械振动产生的边界摩擦使油水分界处温度升高，另一方面是原油吸收部分声能转化成热能，热作用可降低油水界面膜强度和原油黏度，有利于水粒子的沉降分离。超声波破乳的主要影响因素有超声波频率、超声波功率和超声时间[16]。

将巴彦原油乳化成含水20%的原油乳状液，在室内进行超声波脱水实验，研究超声波频率、功率、处理时间3种变量对原油脱水效果的影响。

研究含水率20%的巴彦原油在不同超声波频率下的脱水效果，实验温度为60 ℃，功率为122 W，超声处理时间为1 min，破乳剂加药量为120 mg/kg，超声频率20、28、40 kHz。实验结果见图4。

由图4（a）可知，超声频率越高，原油脱水效

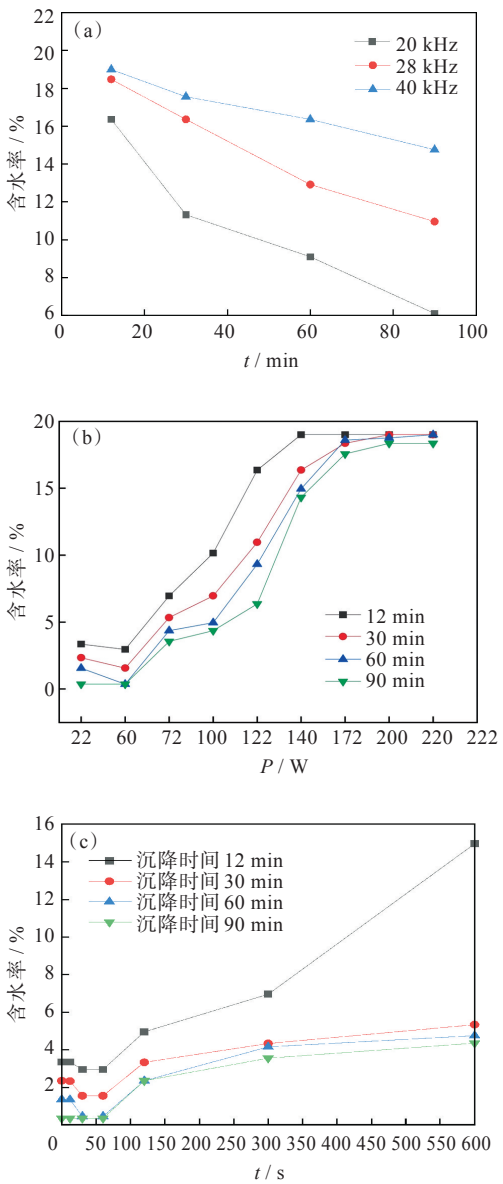

图4　不同条件下的脱后油含水率：（a）频率，（b）功率，（c）作用时间

Fig. 4　Water content of the removed oil under different conditions: (a) frequency, (b) power, (c) action time

率越低，在20、28和40 kHz 3种处理频率下，20 kHz脱水效果最好。这是因为超声波的衰减与频率的平方成正比，其频率越低，幅度递减越弱，声场也越均匀，在相同的功率条件下，低频率可增加破乳的有效距离，提高水粒子位移振幅大小，加快水粒子的凝聚[17]。

研究含水率20%的巴彦原油在不同超声波功率下的脱水效果，实验温度60 ℃，频率为20 kHz，超声处理时间为1 min，破乳剂加药量为120 mg/kg，功率22~220 W，实验结果如图4(b)所示，随着超声波功率的增大，脱后油含水率先降低后增大，最佳破乳功率为60 W。当超声功率大于72 W后，原油脱水效果急剧变差，超声波对原油破乳起抑制作用，当超声波功率大于120 W后，原油很难脱水，超声波由破乳作用变为乳化作用。这是因为超声波功率在一定范围内，可以使原油中的水珠产生位移效应，加快破乳，但当功率过某一临界值时，有空化现象产生，反而促使油水乳化，增加破乳难度[18]。

研究含水率20%的巴彦原油在不同超声波处理时间下的脱水效果，频率为20 kHz、功率为60 W，实验结果如图4(c)所示，随着超声处理时间的增大，脱后油含水率先降低后升高，超声处理30 s效果比较明显，沉降60 min条件下脱后油含水率可达0.46%，当超声时间大于1 min后，超声波破乳作用效果逐渐变差，超声最佳处理时间选择30 s；不经超声处理原油在90 min脱水至含水率0.38%，相较热化学沉降脱水，超声脱水效率可提升30%以上。

2.6 微波脱水实验

微波辐射脱水的机理是由于微波辐射时形成高频变化的电磁场，使极性分子高速旋转，破坏油水界面膜，降低油的黏度，使得水分子能有效地碰撞聚结，从而达到破乳脱水的目的。微波破乳脱水效果的影响因素主要有微波功率和微波处理温度[19]。

研究含水率20%的巴彦原油在不同微波辐射功率下的脱水效果，实验功率分别为160、320、480、640、800 W，原油达到不同温度的时间见表4。

利用不同功率的微波辐射含水20%的巴彦原油，分别达到60、62 ℃，加入破乳剂120 mg/kg进行脱水实验，实验结果见图5。

由图5(a)可知，随着微波功率的升高，脱后油含水率先降低后升高，在功率320 W时脱水效果最好，这是因为施加在乳化液上的微波功率越大，

表4 不同微波功率下乳状液达到不同温度所需时间

Tab. 4 Time required for emulsion to reach different temperatures under different microwave powers

处理温度 / ℃	微波辐射时间 / s				
	160 W	320 W	480 W	640 W	800 W
60	20	18	17	14	12
62	27	22	23	21	19

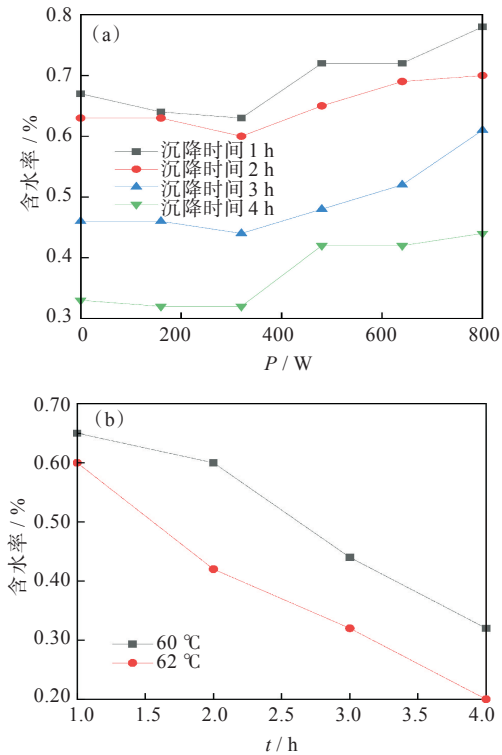

图5 不同条件下的脱后油含水率：(a)功率，(b)作用时间

Fig. 5 Water content of the removed oil under different conditions: (a) power, (b) action time

会使极性分子旋转速度加快，加速破坏油水界面膜的表面电荷平衡，导致电中和，从而降低Zeta电位，促进分子碰撞凝聚，有利于水滴直径的增大，加快油水分离。但是如果微波功率过大，乳化液升温速度太快，分子的热运动加剧，反而破坏了分散相的聚集和凝并，同时，有可能使水分产生汽化现象，脱离乳化液体系，使破乳的效果降低[20]。

由图5可知，2 h可将原油脱水至0.42%，与同时间不加持微波辐射的热化学沉降进行对比(脱后油含水率0.45%)，脱水效果无明显差别，微波辐射与热化学沉降相比优势不明显。

3 结 论

本文对巴彦高凝油田原油脱水工艺进行室内实验研究，对不同脱水工艺的脱水效果和技术可行性进行对比，为巴彦油田脱水工艺现场应用提

供依据，通过研究分析可得：

（1）BC-018K破乳剂对巴彦油田高凝原油脱水效果最佳，90 min脱水率达到92%以上，最佳加药量为120 mg/kg。

（2）热化学沉降工艺比自然沉降工艺脱水效果明显，脱水至含水率低于0.5%的时间是自然沉降工艺脱水时间的1/6。

（3）随着电场强度和原油含水率的升高，脱水效果越来越好；电场强度为1 000~4 000 V/cm时，脱水10~20 min可达到含水率0.5%以下，与其他脱水工艺相比效果最好。

（4）在频率为2.5 kHz、脉宽比为80、电场强度在650 V/cm条件下，采用高频脉冲脱水40 min，可将含水率5%~20%的原油脱水至含水率＜0.5%，脱水效果介于电化学脱水和热化学脱水之间。

（5）超声波脱水的最佳条件为频率20 kHz、功率60 W、超声时间30 s；超声波脱水效果相较于传统热化学沉降效果明显，脱水效率可提升30%以上。

（6）微波脱水的最佳功率为320 W，与热化学沉降进行相比，微波辐射脱水优势不明显。

（7）同等脱水温度和时间条件下，脱水效果由好到差的顺序为电化学脱水，高频脉冲脱水，超声波脱水，热化学沉降和微波脱水，自然沉降，针对巴彦油田的高凝原油，应优先选用电化学脱水工艺。

参考文献

[1] 王鹏，王潇祎，范俊强，等.巴彦油田试油测试关键技术[J].油气井测试，2023，32(3)：27-30.

[2] 张司达.油田稠油开采末期高含水原油的处理方法[J].山东工业技术，2016(16)：59.

[3] 孙霖，孙灵念.稠油脱水处理系统工艺的优化[J].天然气与石油，2016，34(5)：21-24，7.

[4] 陈思奇，张嘉兴，李欣洋，等.原油脱水方法综述[J].当代化工，2016，45(8)：1860-1862，1866.

[5] 赵志明，赵宁.原油脱水工艺的进展研究[J].当代化工，2021，50(3)：703-706.

[6] 艾志久，孟璋劼，艾雨，等.微波辐射对稠油脱水降粘的影响及其工艺研究[J].微波学报，2016，32(1)：92-96.

[7] 王泽.一种原油脱水新技术的研究与应用[J].化工管理，2017(13)：91.

[8] 宋菁.原油脱水技术研究进展[J].化工技术与开发，2019，48(6)：33-37.

[9] 祁强，李萍，张起凯，等.原油脱水新技术研究进展[J].石化技术与应用，2009，27(6)：559-565.

[10] 吴应湘，许晶禹.油水分离技术[J].力学进展，2015，45：179-216.

[11] 曹鹏.原油脱水技术研究[J].石化技术，2017，24(4)：86.

[12] 杨海，黄新，林子增，等.油包水型原油乳状液破乳技术研究进展[J].应用化工，2018，47(12)：2734-2738，2743.

[13] 肖中华.原油乳状液破乳机理及影响因素研究[J].石油天然气学报，2008，30(4)：165-168，178.

[14] 张岩.原油电脱水参数优化[D].西安：西安石油大学，2017.

[15] 冯小刚，黄大勇，叶俊华，等.高频脉冲原油脱水技术在页岩油处理中的应用[J].油气田地面工程，2021，40(10)：29-34.

[16] 杨伟，付秀勇.超声波破乳脱水技术在塔河油田的应用[J].天然气与石油，2014，32(2)：23-24，31，5.

[17] 张鹏.超声波对西峰油田原油破乳脱水的实验研究[J].辽宁化工，2011，40(10)：1026-1028，1059.

[18] 付秀勇.塔河油田含酸稠油超声波脱水工艺技术研究[D].成都：西南石油大学，2014.

[19] 于兴智，张学军，李季，等.国外微波能在原油脱水过程中的工程化应用[J].真空电子技术，2013(6)：80-82.

[20] 黄莉，袁宗明，蒋华义，等.微波作用下原油脱水规律的实验研究[J].吉林化工学院学报，2005，22(3)：14-16.

本文编辑：张　瑞