

微波辐射稠油降粘脱水实验研究

付必伟¹ 艾志久¹ 胡坤¹ 孟璋劫¹ 钱惠杰^{1,2} 席燕卿³

¹ (西南石油大学机电工程学院 成都 610500)

² (中石化河南油建工程有限公司 濮阳 457000)

³ (中国石油吐哈油田公司鲁克沁采油厂 吐哈 838200)

摘要 针对稠油粘度大和脱水难等问题,利用微波辐射进行稠油破乳脱水实验研究,分析了微波功率和辐照时间对稠油脱水率的影响,并对比了微波脱水技术与水浴加热脱水技术的脱水效果。研究表明:微波作用后油样温度迅速升高,粘度降低;微波脱水技术与水浴加热脱水技术相比,脱水效果及速度有显著提高;微波功率越高,脱水效果越好,但超过 450 W 后微波功率对脱水率的影响较小;辐照时间约为 2 min 时,油样的降粘脱水效果较好;微波作用后油样重组分含量降低,轻组分含量增加,粘度发生不可逆的变化。研究表明微波技术在稠油降粘脱水领域具有很好的应用前景。

关键词 稠油,微波辐射,破乳脱水,脱水率

中图分类号 TQ203.9, TQ460.1, TL99

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2015.rj.33.030401

国内外研究表明,从地下采出的原油近 80%以油水乳状液的状态存在^[1-4],原油乳状液造成了原油储运管路堵塞以及加工设备腐蚀等严重危害。为提高老油井采油率,油田采用注水技术和其他强化采油技术使原油含水率和乳化现象更加严重^[5-7]。据统计,由于油水破乳脱水方法不佳带来的原油损耗高达原油总产量的 2%左右,造成了巨大的经济损失。因此开发一种高效、节能的原油破乳脱水技术对我国原油运输和加工具有重要的意义。

重力沉降法是油水分离最基本的方法,其符合 Stocks 定律。实践表明,重力沉降法的沉降速度低,存在脱水效率低,脱水效果差等问题^[8],因此,国内外许多学者提出了多种提高水滴沉降速度的方法和措施。这些方法主要分为热化学破乳脱水和电化学破乳脱水两类。这些方法提高了水珠沉降速度,但还存在一些不足^[9-11]: (1)加热法能耗大,并且脱水效率低,效果差; (2)化学破乳法主要是需要加破乳剂,费用高、沉渣多,并且污染环境; (3)电破乳法能耗大,设备安全要求高。

针对耗能高、污染大等问题,文中以微波破乳脱水作用原理为基础,结合微波辐照原油破乳脱水实验,分析了微波功率、辐照时间与脱水率之间的

关系,结果表明与常规加热脱水技术相比,微波辐照稠油破乳脱水技术具有高效、节能和环保等优势,具有很好的商业应用前景。

1 微波作用机理

1.1 微波特性

1.1.1 内加热特性

如图 1 所示,微波加热与一般加热不同,后者通过表面热辐射由表及里的传导加热,微波加热是材料在电磁场中由介质损失而引起的,加热由内到外。

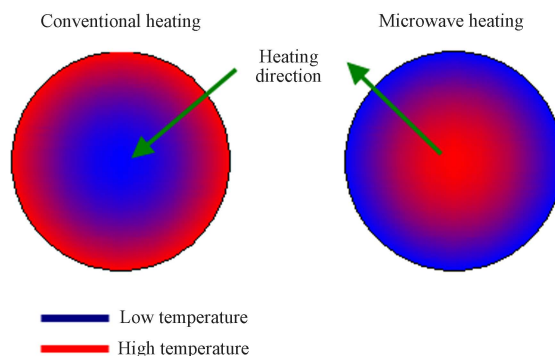


图 1 常规加热和微波加热
Fig.1 Conventional heating and microwave heating

第一作者: 付必伟, 男, 1988 年 11 月出生, 2013 年于西南石油大学获得工学硕士学位, 现为西南石油大学在读博士研究生, 主要从事采油技术研究, E-mail: 346296480@126.com

通讯作者: 艾志久, 博士生导师, E-mail: aizhijiu123@vip.sina.com

收稿日期: 初稿 2015-01-20; 修回 2015-03-25

1.1.2 选择加热特性

物质吸收微波能的能力取决于自身的介电性能,单位体积充填介质耗散吸收微波功率 P 的表达式为^[12]:

$$P = 2\pi f E^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r \tan \delta \quad (2)$$

式中, P 为介质吸收的微波功率, MW/m^3 ; f 为微波频率, MHz ; E 为电场强度, V/m ; ε_r 为介电常数, F/m ; ε_0 为真空绝对介电常数, F/m ; $\tan \delta$ 为介质损耗正切值, 无量纲。

1.1.3 非热效应

微波频率与微波场中极性分子的转动频率一致时,极性烃类大分子在微波场中发生共振,导致其化学键断裂分解成小分子。

1.2 微波破乳脱水机理

近些年,国内外对微波破乳脱水进行了许多研究,并获得了许多成果。Fang 等^[13-14]通过实验研究发现,在一定的条件下微波辐照原油的脱水率可以达到 80%。傅大放等^[15]通过实验发现微波具有较好的破乳效果。胡同亮等^[16]用微波辐照含水量为 30% 的原油,辐照时间为 7 min 和 11 min 时的脱水率分别为 95.28% 和 93.15%。刘惠玲^[17]通过对比重力沉降、加热脱水、化学脱水以及微波脱水等方法,得到微波脱水效率和效果最好的结论。Zhang 等^[18]通过推导得出一个温度分布和电磁场的三维数学模型,并用微波对传导率不同的物质进行加热实验。Ayappa 等^[19]在 Maxwell 方程的基础上,得到了一个类似性质的介质吸收微波能的表达式。

综上,微波辐照原油破乳脱水是一种非常有商业前景的方法,国内外对原油微波破乳脱水的相关机理和规律的研究还不够,所发挥的微波能效不够彻底,产生的作用效果也不近理想,还不能达到工业应用标准。通过对前人研究成果的学习和总结得到微波破乳脱水机理主要包括有 5 个方面:(1)微波场中极性分子高速旋转,使油水界面膜的 Zeta 电位被破坏;水分子失去 Zeta 电位后,向下沉降聚结成分子,促使油水分离。(2)水的介电常数比油的大很多,因此在微波辐照时水吸收的微波能远比油吸收的微波能多,水的体积膨胀要大于油相的体积膨胀,进而导致油水界面膜的强度减弱或破裂,使小液珠聚并成大的液珠,在重力作用下使油水分离。(3)微波加热使界面膜的溶解度增加,导致其机械强

度减弱,提高了水珠聚并的可能性。(4)非极性分子在微波场中被磁化,形成与油分子轴线成一定角度的涡旋电场。该电场减弱了分子之间的作用力,导致乳状液的粘度降低,使水珠的沉降速度增大,提高了油水分离效率。(5)微波的非热效应使原油中极性大分子变为小分子,总体上降低了极性大分子的浓度,进而使原油粘度发生不可逆的降低。

2 材料与方法

2.1 仪器

HAD-HQBX-2 原油含水测定仪、SYD-265H 运动粘度测定仪、原油乳化机、GC-MS (气相色谱-质谱联用仪)、温度计、带刻度烧杯、电子天平和微波实验装置等。

如图 2 所示微波实验装置包括:电源、微波发生器、微波能量控制器、微波网络分析仪、微波能级调节器和反应盒。

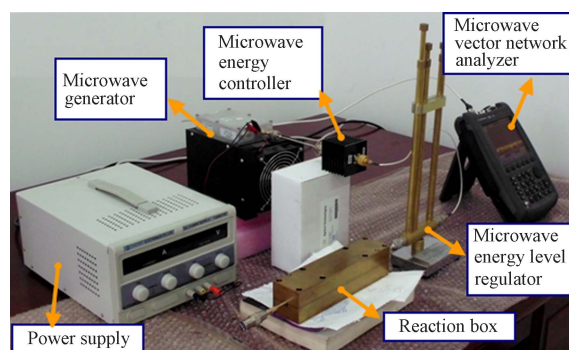


图 2 微波辐照实验装置
Fig.2 Microwave radiation experiment devices

2.2 方法

2.2.1 预处理油样

实验油样采用大港油田含水量为 33% 的原油。为保证实验油样的重现性和可比性,需对油样进行预处理,消除油样的各种差异。具体方法是:将原油装在密封容器内,水浴加温至 50 °C,恒温 2 h,搅拌 1 h。随后倒入微波反应盒内,静置至自然冷却,待温度降至 30 °C 时,采用转速为 200 r/min 的原油乳化机对油样进行均混搅拌,排除油样内的气体,确保反应器容积内的油样无气泡和多余间隙,完全充满反应器。静置 30 min 后,用 HAD-HQBX-2 原油含水测定仪和 SYD-265H 运动粘度测定仪测量油样含水率和粘度,确保油样性能的一致性。为防止实验误差,本实验进行多组油样重复性实验,得到

油样含水率误差为±0.47%，油样性质基本一致。因此通过该方法处理的油样可作为实验油样。

2.2.2 微波处理

采用 2450 MHz 频率的微波对含水率为 33% 的未脱水油样进行不同功率和不同辐照时间的微波破乳脱水处理。

2.2.3 微波破乳脱水率计量

将微波处理后的油样在室温下进行静置沉降，然后在一定时间后计量脱离出来的水量，并进行油样组分分析。

3 结果及分析

3.1 水浴加热脱水与微波脱水实验结果

表 1 为相同条件下微波处理和水浴加热的油样

脱水率数据，数据表明微波脱水效果比水浴加热脱水效果好。通过监测油样的温度变化，发现油样经微波处理时温度迅速上升至 65.6 ℃，这是微波内加热特性的体现。水分子的介电常数比油分子大得多，根据微波的选择加热特性，水分子吸收微波能的能力比油分子强，所以水分子体积膨胀速度大于油分子，同时温度升高，使油水界面膜的溶解度增大，在双重作用下油水界面膜机械强度大幅减弱，水珠聚并的可能性增大，使油样的脱水率大幅增加。

3.2 微波功率和辐照时间对脱水率的影响

油样脱水效果与微波功率、辐照时间有密切的关系，所以制定了微波工作参数对油样脱水率影响的实验方案，如表 2 所示。

表 1 脱水率数据
Table 1 Data of dehydration rate

实验方法	工作参数	脱水率 / %
Experimental method	Working parameters	Dehydration rate
微波处理	功率 600 W，频率 2450 MHz；辐照时间 2 min，恒温静置	81.8
Microwave processing	Power 600 W, frequency 2450 MHZ, radiation time 2 min, thermostatic incubation	
水浴加热	加热温度 80 ℃，恒温静置	34.8
Water bath heating	Heating temperature 80 ℃, thermostatic incubation	

表 2 实验方案
Table 2 Experimental scheme

方案	Scheme	1	2	3	4	5	6	7
微波功率	Radiation power / W	150	300	450	600	600	600	600
辐照时间	Radiation time / min	2	2	2	1	2	3	4

图 3 是实验方案 1-4 的油样脱水率随静置时间的变化曲线。由图 3 可知，油样脱水率随微波功率增大，其脱水量增长梯度逐渐减小。微波功率大于 450 W 后对脱水效果的影响较小，基于能量消耗最小化原则，其不可能无限制提升，因此应选取合理的微波功率进行稠油降粘脱水处理。油样静置时间达到 40 min 后脱水率增长微小，说明油水分离过程基本完成，这也表明微波辐照油样破乳脱水速度快。

图 4 是实验方案 4-7 油样脱水率随静置时间的变化曲线。由图 4 可知，辐照时间为 2 min 时，油样脱水效果最好，辐照时间过短或过长都不利于油样脱水。若果辐照时间过短，油样升温较小，导致水珠聚并缓慢，从而引起油水分离效率低。如果辐照时间太长则使油样温度过高，由此部分水珠汽化

重新分散到油相中，增大水珠聚并难度，使油样脱水率大幅下降。

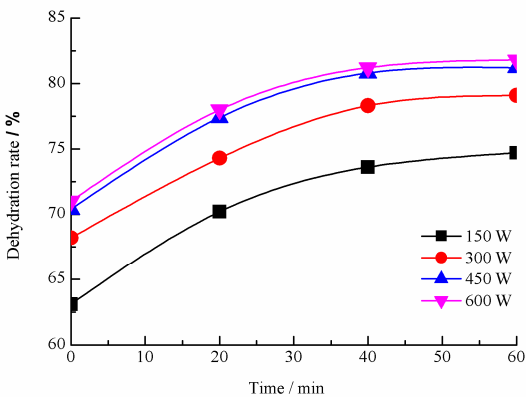


图 3 不同功率下脱水率变化曲线
Fig.3 Curves of dehydration rate under different power

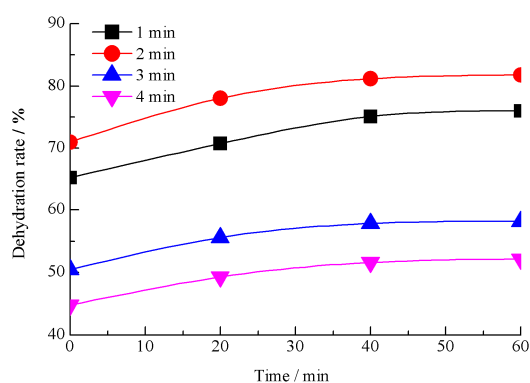


图4 不同辐照时间下脱水率的关系曲线
Fig.4 Curves of dehydration rate at different radiation time points

3.3 微波处理对油样粘度的影响

图5是微波功率600 W, 频率2450 Hz时, 不同微波辐照时间下的油样粘温曲线。图中显示微波处理后的油样在初始时粘度有显著降低, 随着温度升高油样粘度变化全部趋于同一个稳定值。在微波场中, 油样中的非极性分子被磁化后与油分子形成的涡旋电场使分子间的作用力减弱, 与未被辐照的油样相比粘度显著降低, 随着温度的升高, 油样粘度继续降低, 当分子间作用力很微弱时, 油样粘度值趋于稳定。同时微波作用2 min后, 继续增大微波辐照时间对油样粘度的改善作用不大, 由此表明稠油降粘的微波辐照时间只需要2 min。

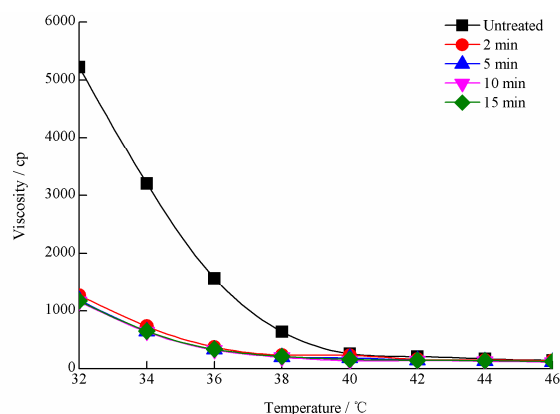


图5 不同辐照时间下油样的粘温曲线
Fig.5 Viscosity-temperature curves of sample at different radiation time points

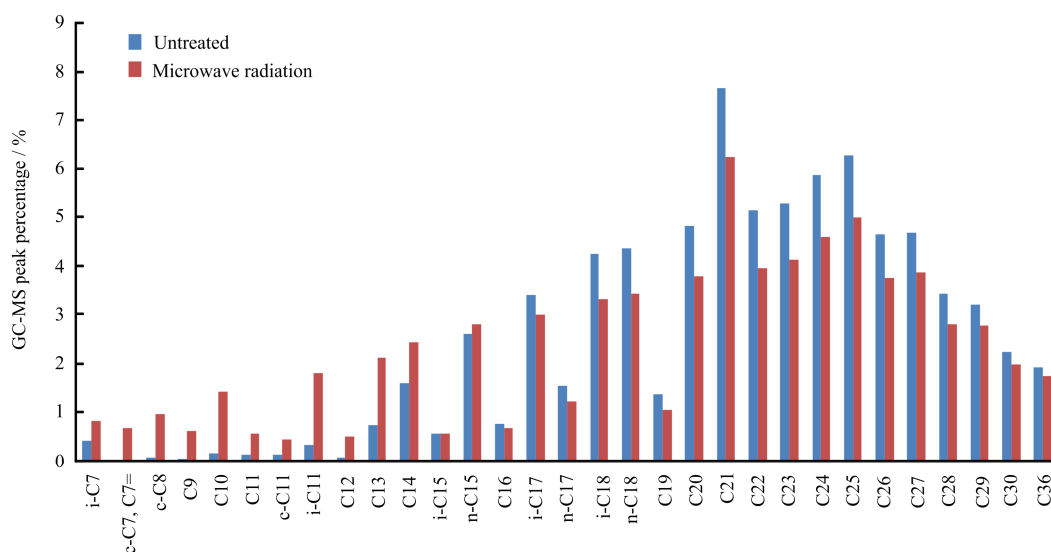


图6 微波辐照后油样组份变化
Fig.6 Changes of sample composition after microwave radiation

通过油样 GC-MS (气相色谱-质谱联用仪) 色谱图采用面积归一化法计算得到不同组分峰面积百分含量如图6所示。峰面积百分含量与组分含量成正比, 所以确定峰面积百分比, 即可确定组分含量。图中 i, c, n 在同素异构体中分别表示异构、正构和顺式, 同时可以看出微波处理后油样中 C16 以上的分子所占百分含量降低, C15 以下分子的百分含量升高。结果表明微波辐照能有效裂解重构长链饱和烃分子, 使大分子转化为小分子, 油样粘度降低。因此可推断微波非热效应使油样组份改变, 进而使油样粘度发生不可逆的变化。

4 结论

通过稠油降粘脱水实验研究表明,与常规加热降粘脱水技术相比,微波降粘脱水效率高、效果好。微波功率越高,脱水效果越好,但是超过 450 W 后对脱水率的影响较小。微波辐照时间太短或太长都会影响水珠聚并,使脱水效果不佳,微波最佳的辐照时间约为 2 min。当辐照时间超过 2 min 后,继续增大辐照时间对油样粘度影响较小。微波作用后油样中碳链长度较大的分子结构大量转化为轻组分,油样粘度降低,这体现了微波的非热效应。微波具有热效应和非热效应的独特优势,体现微波降粘脱水技术具有良好的发展前景。

参考文献

- 1 夏立新,曹国英,陆世维,等.原油乳状液稳定性和破乳研究进展[J].化学研究与应用,2002,14(6):623-627.
XIA Lixin, CAO Guoying, LU Shiwei, *et al.* Advances in stability and demulsification of crude oil-water emulsions [J]. Chemical Research and Application, 2002, 14(6): 623-627.
- 2 张帆,王福宾,张石兴.油水乳状液性质及其影响因素[J].油气田地面工程,2005,24(12):2-3.
ZHANG Fan, WANG Fubin, ZHANG Shixing. The properties and influence factors of oil-water emulsions [J]. Oil-gas Field Surface Engineering, 2005, 24(12): 2-3.
- 3 刘伟,刘琴,王坚.原油乳状液稳定性影响因素研究的新进展[J].油气田地面工程,2012,31(10):28-30.
LIU Wei, LIU Qin, WANG Jian. The new progress of crude oil emulsion stability in the study of influencing factors [J]. Oil-gas Field Surface Engineering, 2012, 31(10): 28-30.
- 4 杨小莉,陆婉珍.有关原油乳状液稳定性的研究[J].油田化学,1998,15(1):87-96.
YANG Xiaoli, LU Wanzhen. Advances in stabilization and destabilization of water-in-crude oil emulsions [J]. Oil Field Chemical, 1998, 15(1): 87-96.
- 5 李刚.超稠油低温破乳剂技术研究[D].成都.西南石油大学.2013.
LI Gang. The development of super heavy oil demulsifier in low temperature [D]. Chengdu. Southwest Petroleum University. 2013.
- 6 Arnold K, Stewart M. Surface production operations: design of oil-handling systems and facilities [M]. Amsterdam: Elsevier. 1999: 165-174.
- 7 梁文杰.重质油化学[M].东营:石油大学出版社,2000:53-65.
LIANG Wenjie. Heavy oil chemical [M]. Dongying: University of Petroleum Press, 2000: 53-65.
- 8 杨小刚.微波辐射原油破乳技术的研究[D].天津.天津大学.2006.
YANG Xiaogang. Study on demulsification of crude oil emulsions by microwave radiation [D]. Tianjin. Tianjin University. 2006.
- 9 李拥军.克拉玛依油田老化油回收实验研究[D].成都.西南石油大学.2008.
LI Yongjun. Karamay oilfield aging oil recovery experiment research [D]. Chengdu. Southwest Petroleum University. 2008.
- 10 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(江汉石油学院学报),2008,30(4):165-168.
XIAO Zhonghua. The research of crude oil emulsion demulsification mechanism and influencing factors [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(4): 165-168.
- 11 刘梦绯.油水乳状液微波破乳机理研究[D].北京.北京化工大学.2011.
LIU Mengfei. Mechanism research of oil-water microwave demulsification [D]. Beijing. Beijing University of Chemical Technology. 2011.
- 12 王绍林.微波加热原理及其应用[J].物理,1997,4:232-237.
WANG Shaolin. The microwave heating principle and its application [J]. Physical, 1997, 4: 232-237.
- 13 Fang C S, Chang B K L, Lai P M C, Klaila W J. Microwave demulsification [J]. Chemical Engineering Communications, 1988, 73(1): 227-239.
- 14 Fang C S, Lai P M C. Microwave heating and separation of water-in-oil emulsions [J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 1995, 30: 46-57.
- 15 傅大放,吴海锁.微波辐射破乳的实验研究[J].中国给水排水,1998,14(4):4-6.
FU Dafang, WU Haisuo. Laboratory test for microwave radiation demulsification [J]. China Water & Wastewater, 1998, 14(4): 4-6.
- 16 胡同亮,李萍,刘振志,等.微波辐射法原油脱水的研究[J].炼油技术与工程,2003,33(2):6-8.
HU Tongliang, LI Ping, LIU Zhenzhi, *et al.* Study on crude oil demulsification by microwave radiation [J]. Petroleum Refinery Engineering, 2003, 33(2): 6-8.
- 17 刘惠玲.微波脱水技术[J].油田地面工程,1992,11(4):

- 22-25. Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, **43**(12): 2141-2154.
- LIU Huiling. The technology of microwave dehydration [J]. Oil-gas Field Surface Engineering, 1992, **11**(4): 22-25.
- 18 Zhang Qiong, Tom H J, Aydin U. Numerical modeling of microwave induced natural convection [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1991, **46**(4): 1005-1016.

Experimental research on microwave demulsification and dehydration of heavy oil

FU Biwei¹ AI Zhijiu¹ HU Kun¹ MEN Zhangjie¹ Qian Huijie^{1,2} XI Yanqing³

¹(College of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

²(Sinopec Henan Petroleum Engineering Construction Co., Ltd., Puyang 457000, China)

³(Chinese Oil in Tuha Oilfield Lukeqing Production Plant, Tuha 838200, China)

ABSTRACT In view of the problem of high viscosity and difficult dehydration of the heavy oil, a heavy oil demulsification dehydration experiment was utilized to analyze the influence of the radiation power and radiation time of microwave on the dehydration rate of heavy oil, and compare the dehydration effect of microwave dehydration technology and water bath heating dehydration technology. The results showed that microwave radiation can make the temperature of the sample rise quickly for reducing viscosity. Comparing microwave dehydration technology with water bath heating dehydration technology, the dehydration effect and speed improved more significantly. The higher microwave power, the better the dehydration effect was, but it had less effect on the dehydration rate when microwave power was higher than 450 W. Sample viscosity dehydration effects were proved better by 2 min radiation. The heavy component of sample reduced and light component content increased after microwave radiation, and the viscosity of sample had irreversible changes. It is shown that microwave technology has a better application prospect in the field of reducing viscosity and dehydration of heavy oil.

KEYWORDS Heavy oil, Microwave radiation, Demulsification and dehydration, Dehydration rate

CLC TQ203.9, TQ460.1, TL99