



移动扫码阅读

姚立荣,陈慧娴,张大山,等.微波-超声法预处理油泥浮渣试验研究[J].能源环境保护,2022,36(1):29-35.

YAO Lirong, CHEN Huixian, ZHANG Dashan, et al. Experimental study on pretreatment of oil sludge scum by microwave-ultrasonic method[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(1): 29-35.

微波-超声法预处理油泥浮渣试验研究

姚立荣¹, 陈慧娴², 张大山², 毛林强², 张文艺^{2,*}

(1. 中冶生态环保集团有限公司, 江苏 南京 210019; 2. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要:针对炼油厂油泥浮渣处理难题,采用微波-超声工艺对油泥浮渣进行预处理,并对反应产物进行分析。通过 $L_{25}(5^2)$ 和 $L_{16}(4^3)$ 正交试验分析了微波-超声共同作用对油泥浮渣去除率的影响,优化了微波时间、微波功率、超声时间、超声温度、超声功率等工艺参数。结果表明:微波-超声对油泥浮渣中石油类的去除率较高,在微波时间为4 min、微波功率为252 W、超声时间为40 min、超声温度为70 ℃、超声功率为50 W的条件下,除油率和回收率分别达到53.23%和31.03%;温度、时间、功率等参数对油泥浮渣中原油去除率的影响依次递减;经微波-超声处理后的油泥浮渣泥颗粒之间的空隙变大,污泥表面变粗糙,质地变松散,油泥紧密黏合的状态被打破,石油烃组分 C_{12} - C_{37} 的含量均明显下降。

关键词:浮渣污泥;超声波;微波辐射;正交试验;扫描电镜;气相色谱

中图分类号:X705

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)01-0029-07

Experimental study on pretreatment of oil sludge scum by microwave-ultrasonic method

YAO Lirong¹, CHEN Huixian², ZHANG Dashan², MAO Linqiang², ZHANG Wenyi^{2,*}

(1. MCC Eco-Environmental Protection Group Co., Ltd., Nanjing 210019, China; 2. School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: In order to solve the difficult problem of oil sludge scum treatment in a refinery, the microwave-ultrasonic method was used to pretreat the oil sludge scum and the reaction products were analyzed. The influence of microwave and ultrasonic on the removal rate of oil sludge scum was analyzed by $L_{25}(5^2)$ and $L_{16}(4^3)$ orthogonal tests. The process parameters such as microwave time, microwave power, ultrasonic time, ultrasonic temperature and ultrasonic power were optimized. The results showed that the removal rate of petroleum substances in oil sludge scum by microwave-ultrasonic method was high. The removal rate and recovery rate of petroleum substances were 53.23% and 31.03% respectively when the microwave time was 4 min, the microwave power was 252 W, the ultrasonic time was 40 min, the ultrasonic temperature was 70 ℃ and the ultrasonic power was 50 W. The effects of temperature, time and power on the removal rate of crude oil of oil sludge scum decreased in turn. After microwave-ultrasonic treatment, the space between sludge particles of oil sludge scum increased, the sludge surface became rough, the texture became loose, the tight adhesion state of oil sludge was broken, and the contents of petroleum hydrocarbon components C_{12} - C_{37} decreased obviously.

Key Words: Slag sludge; Ultrasonic; Microwave radiation; Orthogonal test; Scanning electron microscope; Gas chromatography

收稿日期:2021-09-14;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:中国石油化工股份有限公司科技计划项目(318024-5)

第一作者简介:姚立荣(1986-),男,江苏射阳人,高工,硕士,主要研究方向为污染控制与生态修复。E-mail:326664395@qq.com

通讯作者简介:张文艺(1968-),男,安徽池州人,教授,博士,主要研究方向为污染控制与生态修复。E-mail:zwy@cczu.edu.cn

0 引言

随着石油化工产业的迅速发展,石油成为当今社会最重要的能源。目前我国国内的原油来源以进口为主,主要用于工业生产,在原油的开采和储运过程中会产生大量油泥浮渣。油泥浮渣是由油、水、泥等混合组成的体系,此类污泥如果处理不当,会对环境产生严重污染,现已被列入《国家危险废物名录》HW08类危险废物^[1],我国每年产生含油污泥约3 000万 t/a,而且还在以每年3%以上的速度增长。因此妥善处理油泥浮渣是现在亟需要解决的问题。脱水后的油泥浮渣中含油量大概为300~600 g/kg,若能对油泥浮渣中的油分进行回收将具有很高的经济价值与环境价值。

目前,常用于处理油泥浮渣的方法有焚烧法^[2]、热解法^[3]、焦化法^[4]、生物法^[5]等。热解法、焚烧法、焦化法在处理过程中需消耗大量能源,且会产生废气污染环境;生物法处理彻底,但其周期长,对环境要求苛刻^[6-7]。而超声法基于机械振动、声空化和热效应能增强油泥浮渣的洗脱效果,在整个超声过程中,无化学药品的添加,属于物理作用,无二次污染^[8-9]。超声波导致的高频机械振荡使水相产生大量小气泡,同时又随周围介质的振动不断运动、长大或破裂,可以产生强大的射流、高温和高压,且产生的射流束可以使团状的污泥分散成小颗粒,使油从污泥颗粒表面剥离^[10],促成油分和固体的分散,导致油、水、泥三相分离。Gao等^[11]通过试验表明在表面活性剂辅助的超声清洗后,油分的去除率为82%~90%,能有效去除油组分;王誉霖^[12]以超声辐照和生物降解复合工艺处理油田油泥浮渣,污泥中COD去除率比未经辐照的去除率增加85.7%,除油率增幅为66.7%。

微波热解可以使污泥中的油水破乳,将泥中包裹的油脂从油泥中解离出来,从而实现油、水、泥三相分离,具有处理效率高、能量利用充分等特点^[13]。微波可以增强水滴在乳液中的沉降速度、降低油水界面膜强度、减少油水界面张力和油的黏度^[14-15]。油泥浮渣中含有大量大分子有机物,当微波对其进行加热时,它们吸收微波的能量发生裂解反应,形成小分子的烃类化合物^[16]。在微波辐射处理浮渣污泥的过程中温度升高,水滴吸收能量后膨胀,使得水油界面膜强度降低,另外在微波辐射的作用下会形成高频变化的电磁场,极

性分子高速旋转导致水滴之间的相互静电斥力减小^[17],从而使得液滴间聚并力增大,达到油水分离的效果。微波过程中由于水温急剧上升,产生的大量气泡将油泥中的油分从油泥浮渣中剥离出来,从而达到三相分离的目的。吕旭^[18]通过试验证明微波加热同时存在热效应和非热效应,油泥破乳效率提高了25.4%,最佳破乳条件下油品回收率为38.3%;Hu Luo^[19]等试验开发了低温微波辅助技术处理石油污染土壤,在250~300℃下,经过20 min处理后,91.6%的油被回收,主要为C₁₁-C₃₀碳氢化合物。受此启发,本文在预处理油泥浮渣过程中将两种不同工艺结合,希望将两种工艺的优势都发挥出来,以期达到更好的去除效果。

本课题组前期研究发现超声处理油泥浮渣除油率可达32.46%^[20],但回收率仅16.05%。为此本研究以除油率和回收率为目标,考察了微波-超声、超声-微波组合工艺对油泥浮渣处理效果,优化了微波时间及功率、超声时间、温度、功率工艺参数。

1 试验部分

1.1 试验仪器及试剂

试验样品油泥浮渣取自金陵石化某炼油厂,含水率为35.14%(质量比,下同),含油率为32.64%(脱水后的油泥含油量为503.2 g/kg),含固率为32.22%,pH值8.13,黑棕色固体,呈粘稠状,并带有刺鼻气味。

试验使用的试剂为二氯甲烷(分析纯)、石油醚(60~90℃,分析纯)、四氯化碳(分析纯)。

试验使用的仪器为F-0型电子分析天平(余姚金诺)、TGL-16C型离心机(国华仪器)、150 mL索式提取器(江苏汇达)、紫外分光光度计UV-1800(日本岛津)、G70F20N2L-DG(S0)型微波炉(广东格兰仕)、SB-5200D型超声波清洗机(昆山超声波)、DHG-9620A型鼓风干燥箱(浙江上虞)、气相色谱仪7820A(上海安捷伦科技有限公司)、SU8010型扫描电镜(日本日立)。

1.2 试验方法

1.2.1 除油率及回收率的测定

油泥浮渣中的含油率测定采用的是索式提取-紫外法^[21]。

$$\text{除油率} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\% \quad \text{式(1)}$$

式(1)中, M_1 为处理前油泥的含油量,g; M_2 为处理后油泥的含油量,g。

油泥浮渣处理后回收率的测定采用溶剂萃取,将处理后的上层油相及水相倒出,采用四氯化碳分液萃取。

$$\text{回收率} = \frac{m_1}{M_1} \times 100\% \quad \text{式(2)}$$

式(2)中, M_1 为处理前油泥的含油量,g; m_1 为处理后萃取的上层油相,g。

1.2.2 样品中石油烃($C_{10} \sim C_{40}$)成分分析

本文对油泥浮渣石油烃成分测定参考《土壤和沉积物石油烃($C_{10} \sim C_{40}$)的测定气相色谱法》(HJ 1021—2019)。

1.2.3 超声-微波处理浮渣中石油类物质

超声-微波处理油泥浮渣试验:在本课题组得到的最优条件下,先进行超声波处理,静置至室温。将烧杯放入微波炉进行微波辐射脱油,处理后倒出上层油/水相,将烧杯放入烘箱烘干至恒重,测定含油率。

正交试验设计:选择 $L_{25}(5^2)$ 正交试验表安排试验(表1)。以石油类物质去除率为探究标准,考察因素A、B分别是微波时间(min)和微波功率(W),每个因素设置5个水平,进行2因素5水平正交试验。

表1 $L_{25}(5^2)$ 正交试验因素水平表

Table 1 $L_{25}(5^2)$ orthogonal test factor level table

水平	时间(A)/min	功率(B)/W
1	2	126
2	3	252
3	4	406
4	5	567
5	6	700

1.2.4 微波-超声处理浮渣中石油类物质

微波-超声处理油泥浮渣试验:在已得到的微波最优条件下,先进行微波处理,静置降到室温。将装有样品的烧杯放入超声波清洗器中超声,处理后静置倒出上层油/水相,将烧杯放入烘箱烘干至恒重,测定含油率。

正交试验设计:选择 $L_{16}(4^3)$ 正交试验表安排试验(表2)。以石油类物质去除率为探究标准,超声波频率为40 kHz,探究因素A、B、C分别是超声时间(min)、超声温度(℃)和超声功率(W),每个因素设置4个水平,进行3因素4水平正交试验。

表2 $L_{16}(4^3)$ 正交试验因素水平表

Table 2 $L_{16}(4^3)$ orthogonal test factor level table

水平	时间(A)/min	温度(B)/℃	功率(C)/W
1	10	40	50
2	20	50	60
3	30	60	70
4	40	70	80

2 结果与讨论

2.1 微波对油泥浮渣处理的效果影响

本试验采用单因素探究微波处理油泥浮渣的效果,首先探究微波功率即功率的影响,称取油泥浮渣30 g,加入40 mL水,微波时间为4 min,改变微波功率,结果如图1(a)。当从126 W上升至252 W时,石油类物质的去除率从29.76%上升至35.46%。当微波功率进一步增加,油泥除油率变化不大,且能耗上升,考虑节能增效,选择252 W为最佳微波功率。

为进一步探究时间的影响,微波功率为252 W,改变微波时间,结果如图1(b)。随着微波时间增加,油泥浮渣的去除率呈缓慢增长趋势,在4 min时,除油率最高,为35.41%,当时间大于4 min时,油泥浮渣中石油类物质的去除率没有变化,因此选择4 min为最佳微波时间。

当微波时间为4 min,微波功率为252 W时,单微波对浮渣油泥中油脂的去除率最高,达到35.46%,此时油分回收率为20.27%。

2.2 超声-微波对油泥浮渣处理的效果影响

超声-微波的不同因素及水平的正交试验结果见表3。

表3中, K_i 表示第*i*个因素下的除油率均值, R_i 表示极差,均值越大,效果越好。在已得出的超声最优条件下,结合表1和表3,由 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 、 K_5 ,最佳处理条件为 A_5B_5 ,即微波时间6 min,微波功率为700 W,除油率为45.76%。其中 $R_A > R_B$,表明微波温度是影响超声-微波处理油泥浮渣能力主要因素,其次是微波功率。

利用SPSS对 $L_{25}(5^2)$ 正交试验进行方差分析。主体间效果检验结果见表4,以不同条件下石油类物质的去除率为指标,超声-微波正交试验中考察因素的主效应均具有显著性($P < 0.05$)^[22]。由第Ⅲ类平方和比较可知,因素的影响顺序为 $A > B$,即微波时间、微波功率由强到弱影响超声-微波处理油泥浮渣的能力。

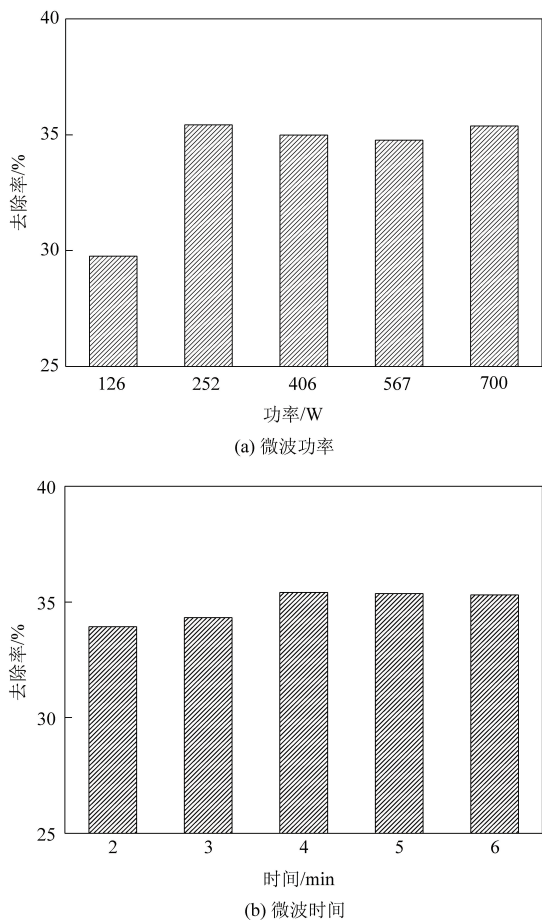


图 1 微波单因素对油泥浮渣中石油类物质去除率的影响

Fig.1 The influence of microwave single factor on the removal rate of petroleum substances in sludge scum

当超声时间为 15 min,超声温度为 55 ℃,超声功率为 70 W,微波时间为 6 min,微波功率为 700 W 时,最高除油率为 45.76%,此时油分回收率为 24.00%。

表 3 $L_{25}(5^2)$ 正交试验结果Table 3 $L_{25}(5^2)$ orthogonal test results

序号	微波时间/min	功率/W	除油率/%
1	2	126	33.40
2	2	252	33.91
3	2	406	34.23
4	2	567	34.67
5	2	700	35.94
6	3	126	33.76
7	3	252	34.45
8	3	406	35.90
9	3	567	35.95
10	3	700	36.31
11	4	126	35.01
12	4	252	37.62

续表

序号	微波时间/min	功率/W	除油率/%
13	4	406	37.33
14	4	567	38.28
15	4	700	41.94
16	5	126	40.44
17	5	252	39.34
18	5	406	41.89
19	5	567	43.29
20	5	700	45.09
21	6	126	42.45
22	6	252	42.67
23	6	406	43.87
24	6	567	44.21
25	6	700	45.76
K_1	34.43	37.01	/
K_2	35.27	37.60	/
K_3	38.04	38.64	/
K_4	42.01	39.28	/
K_5	43.79	41.01	/
R_j	9.36	4.00	/

表 4 主体间效果检验

Table 4 Inter subjective effect test

来源	第Ⅲ类平方和	df	平均值平方	F	显著性
修正的模型	385.126 ^a	8	48.141	59.576	0.000
截距	37 458.506	1	37 458.506	46 356.152	0.000
A	336.477	4	84.119	104.101	0.000
B	48.649	4	12.162	15.051	0.000
误差	12.929	16	0.808	/	/
统计	37 856.561	25	/	/	/
校正后总数	398.055	24	/	/	/

注:因变量:除油率;a: $R^2=0.968$ (调整后 $R^2=0.951$)

2.3 微波-超声对油泥浮渣处理的效果影响

微波-超声的不同因素及水平的正交试验结果见表 5。

表 5 中,在已得出的微波最优条件下,结合表 2 和表 5,由 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 显示,最佳处理条件为 $A_4B_4C_1$,即超声时间为 40 min、超声温度为 70 ℃、超声功率为 50 W,此时除油率达到 53.23%。由 $R_B > R_A > R_C$,说明超声温度是影响微波-超声处理油泥浮渣能力的主要因素,其次是超声时间和超声功率。

表 5 L₁₆(4³) 正交试验结果
Table 5 L₁₆(4³) orthogonal test results

序号	超声时间/min	温度/℃	功率/W	除油率/%
1	10	40	50	43.11
2	20	40	60	43.45
3	30	40	70	44.73
4	40	40	80	45.61
5	10	50	60	41.90
6	20	50	50	44.85
7	30	50	80	43.77
8	40	50	70	47.62
9	10	60	70	46.04
10	20	60	80	46.29
11	30	60	50	46.55
12	40	60	60	49.76
13	10	70	80	48.97
14	20	70	70	47.52
15	30	70	60	49.49
16	40	70	50	53.23
K ₁	45.01	44.23	46.94	/
K ₂	45.53	44.54	46.15	/
K ₃	46.14	47.16	46.48	/
K ₄	49.06	49.80	46.16	/
R _j	4.05	5.57	0.78	/

表 6 主体间效果检验
Table 6 Inter subjective effect test

来源	第Ⅲ类平方和	df	平均值平方	F	显著性
修正的模型	122.364 ^a	9	13.596	11.444	0.004
截距	34 492.847	1	34 492.847	29 033.416	0.000
A	39.291	3	13.097	11.024	0.007
B	81.439	3	27.146	22.850	0.001
C	1.634	3	0.545	0.459	0.721
误差	7.128	6	1.188	/	/
统计	34 622.340	16	/	/	/
校正后总数	129.492	15	/	/	/

注:因变量:除油率;a:R² = 0.945(调整后 R² = 0.862)

利用 SPSS 对 L₁₆(4³) 正交试验进行方差分析。主体间效果检验结果见表 6,以不同条件下石油类物质的去除率为指标,微波-超声正交试验中考察因素 A、B、C 显著性分别为 0.007、0.001、0.721,可见超声时间、超声温度具有显著性($P < 0.05$)^[22]。由第Ⅲ类平方和比较可知,因素的影响顺序由大到小排列为 B>A>C,即超声温度、超

声时间、超声功率由强到弱影响微波-超声处理油泥浮渣的能力。

当微波时间为 4 min,微波功率为 252 W,超声时间为 40 min,超声温度为 70 ℃,超声功率为 50 W 时,最高除油率为 53.23%,此时油分回收率为 31.03%。

2.4 超声、微波及其组合处理工艺比较

超声、微波、超声-微波和微波-超声 4 种工艺对油泥浮渣的除油效果及油分回收率对比结果如表 7。由该表可以看出,超声-微波、微波-超声组合工艺对油泥浮渣中石油类物质的去除率及油分回收率普遍高于超声微波单独的处理效果。其中,微波-超声对油泥浮渣的除油效果优于超声-微波,可见处理工艺的顺序对处理效果有较大影响。微波辐射处理油泥浮渣时,温度升高,水滴吸收能量膨胀,油水界面膜强度降低,产生的微波磁场使非极性油分子磁化,形成涡旋电场,电场减弱分子间引力,降低油分黏度,增大油水密度差^[23],有利于水滴高速运动洗脱油泥浮渣中的油分。再进行超声处理,能充分发挥超声波的机械效应与空化作用,高频的机械振荡使得原本溶于油泥中的气体过于饱和而溢出形成大量小气泡,随着周围介质的振动,气泡不断运动、长大、破裂,产生的强射流、高温和高压冲击油泥表面,在固体表面产生腐蚀作用^[10],这种冲击波可以将团状的污泥分散成小颗粒,使油脂类物质从污泥颗粒表面剥离。而进行超声-微波时,初始油泥浮渣含油量大、黏度高,超声波的机械效应与空化作用不能完全发挥作用,成团的油泥浮渣无法分散成小颗粒,污泥孔隙中的油分不能脱离,因此降低了油/水/泥三相分离效果,减弱了超声-微波的除油效果。

表 7 不同工艺处理油泥浮渣结果对比

Table 7 Comparison of the results of oil sludge scum treatment by different processes

处理工艺	除油率/%	回收率/%	单位能耗/(kJ · kg ⁻¹)
超声	32.46	16.05	9.45×10 ³
微波	35.46	20.27	1.85×10 ³
超声-微波	45.76	24.00	10.50×10 ³
微波-超声	53.23	31.03	6.05×10 ³

注:单位能耗=输入功率(kW)×辐射时间(s)÷油泥浮渣样品质量(kg)

图 2 为微波-超声处理前后油泥浮渣的扫描电镜图像。由图 2(a)可以看出,“微波-超声”处

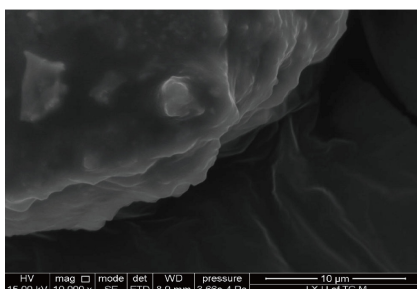
理前的油泥浮渣表面呈光滑圆润状态,油分包裹着泥颗粒成一个整体,油泥紧密黏连在一起。图2(b)表明,微波处理后,微波辐射使得温度升高,水油界面强度降低,水滴带走泥中油分,伴随着泥中油分减少,油分黏度降低,油泥紧密黏合的状态被打破。污泥中仍有未能处理的油分,继续进行超声处理后如图2(c),超声波的机械效应和空化作用充分发挥作用,高频振动进一步使泥颗粒分散

开,泥颗粒之间的空隙变大,污泥表面变粗糙,质地变松散。

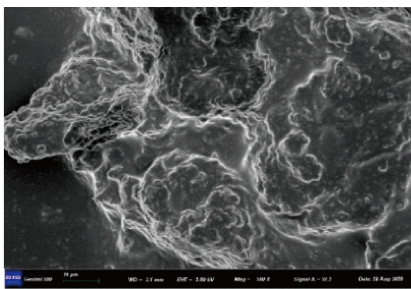
将微波与超声波联合作用于油泥浮渣,能更大程度的发挥两者的优势,先微波后超声将微波处理不完全的油分通过超声波处理后进一步使得油分与污泥分开,从而充分达到三相分离的目的。

2.5 油泥浮渣处理前后碳链组分分析

浮渣污泥处理前后的石油烃组分详见图3。



(a) 处理前



(b) 微波处理后



(c) 微波-超声处理后

图2 油泥浮渣微波-超声处理前后扫描电镜图像

Fig.2 SEM images of oil sludge scum before and after microwave-ultrasonic treatment

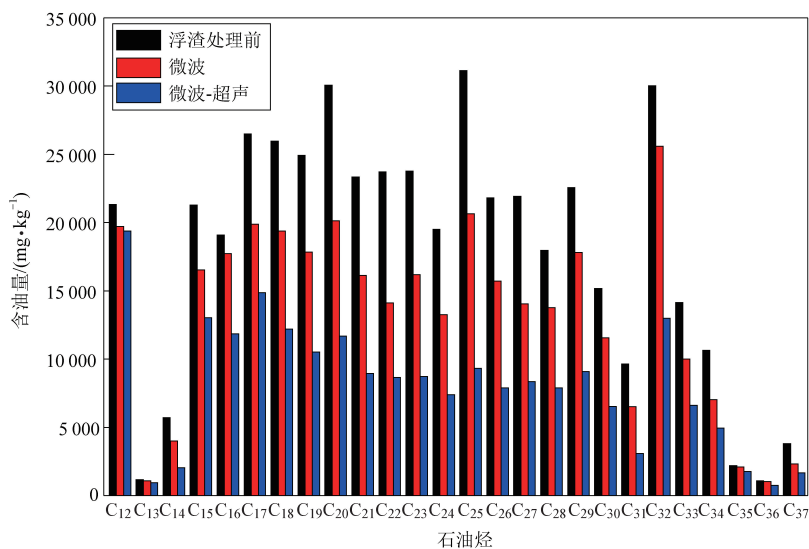


图3 油泥浮渣处理前后的石油烃组分

Fig.3 Petroleum hydrocarbon components of oil sludge scum before and after treatment

由图3可看出,本试验中使用的浮渣的石油烃成分主要集中在 C_{12} 至 C_{37} 。经处理后, C_{12} 至 C_{37} 处理后的石油烃成分含量均有降低,可见“微波”、“微波-超声”处理油泥浮渣是有明显效果的。从图中可以看出石油烃较短碳链组分(C_{12} — C_{20})处理效果普遍低于中长碳链组分处理效果,这可能是由于经过微波、超声处理,中长碳链组分裂解成短碳链。“微波-超声”后的石油烃含量趋势与“微波”处理后相同,说明“微波-超声”能在“微波”的基础上进一步去除石油类物质。微波可对大分子石油烃进行加热,大分子石油烃吸收微

波能量发生裂解反应,变成小分子的烃类化合物。再进行超声处理,超声波的机械振荡会产生强大的射流,这种射流束冲击油泥表面,对油泥表面产生腐蚀作用,将原本微波处理后未完全松散的污泥分散开,使油与泥脱离,进一步处理微波未能完全脱出的油分,最大程度实现三相分离的目的。

3 结 论

本文采用采用微波、超声结合的方法对油泥浮渣进行预处理试验,正交试验表明:

(1) 超声-微波、微波-超声组合处理工艺均

能有效去除浮渣油泥中的油脂,微波-超声较超声-微波处理效果更好。

(2)在已得出的微波最优条件下,超声温度、超声时间、超声功率三因素由强到弱影响超声波对油泥浮渣中石油类物质的去除率,微波-超声的最优处理条件是微波时间 4 min,微波功率为 252 W,超声时间为 40 min,超声温度为 70 ℃,超声功率为 50 W,石油类物质去除率达到 53.23%,油分回收率为 31.03%。

(3)经微波-超声处理后的油泥浮渣泥颗粒之间空隙变大,污泥表面变粗糙,质地变松散,油泥浮渣紧密黏合的状态被打破;微波-超声方法联合能有效去除浮渣中的石油类物质,石油烃中 C_{12} - C_{37} 组分含量均匀明显降低。

参考文献

- [1] 苏碧云,黄力,李善建,等. 化学-微波-超声复合调质处理气田高乳化含油污泥 [J]. 天然气工业, 2018, 38 (12): 134-139.
- [2] 任蕊,苏华,李丛妮,等. 含油污泥资源化处理技术研究进展 [J]. 应用化工, 2021, 50 (4): 1044-1048.
- [3] Krishnasamy S, Perumal T, Shaikh M, et al. Process optimization for the recovery of oil from tank bottom sludge using microwave pyrolysis [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 148: 392-399.
- [4] 李建,毛晓明,胡德生. 焦化工艺协同处置轧钢含油污泥的基础研究 [J]. 宝钢技术, 2018 (2): 39-45.
- [5] Yu K C, Ling Q F, Gang Y Z, et al. Bioremediation of oily sludge by solid complex bacterial agent with a combined two-step process [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 208: 111673.
- [6] 刘向阳,卞卫国,许洁,等. 油气田含油污泥微波处理技术研究 [J]. 清洗世界, 2018, 34 (11): 57-58+62.
- [7] 王新强,杨志刚,谢娟. 超声处理含油污泥除油实验研究 [J]. 石油与天然气化工, 2006 (3): 239-241+168.
- [8] 毕延超. 超声波石油钻采含油污泥处理技术试验研究 [J]. 低碳世界, 2019, 9 (3): 16-17.
- [9] 李帅,大庆油田含油污泥超声波预处理-厌氧产甲烷的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 78-83.
- [10] Sivagami K, Anand D, Divyapriya G, et al. Treatment of petroleum oil spill sludge using the combined ultrasound and Fenton oxidation process [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 51 (5): 340-349.
- [11] Gao YX, Ding R, Chen X, et al. Ultrasonic washing for oily sludge treatment in pilot scale [J]. Ultrasonics, 2018, 90: 1-4.
- [12] 王誉霖. 超声波预处理-生物降解复合工艺处理含油污泥 [J]. 环境科学与管理, 2011, 36 (8): 108-110+113.
- [13] 蔡凌云,潘一,邵鲁华,等. 含油污泥物化法处理研究进展 [J]. 油气田环境保护, 2013, 23 (3): 59-62+75.
- [14] Binner E R, Robinson J P, Silvester S A, et al. Investigation into the mechanisms by which microwave heating enhances separation of water-in-oil emulsions [J]. Fuel, 2014, 116 (1): 516-521.
- [15] Guzman-Lucero D, Flores P, Rojo T, et al. Ionic liquids as demulsifiers of water-in-crude oil emulsions: study of the microwave effect [J]. Energy & Fuels, 2010, 24 (6): 3610-3615.
- [16] 郑思佳. 含油污泥微波处理效果影响因素分析实验 [J]. 辽宁化工, 2011, 40 (4): 362-365.
- [17] Hansaem J, Ryang L J, Jin K S, et al. Concerns and breakthroughs of combining ionic liquids with microwave irradiation for the synthesis of Ru nanoparticles via decarbonylation [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 599: 828-836.
- [18] 吕旭. 微波强化炼厂含油污泥破乳脱水试验研究 [D]. 济南: 山东大学, 2020: 86-87.
- [19] Hu L, Hao W, Lingzhao K, et al. Insights into oil recovery, soil rehabilitation and low temperature behaviors of microwave-assisted petroleum-contaminated soil remediation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 377: 341-348.
- [20] 于鑫娅,吴凌云,邢献杰,等. 超声波预处理炼油厂浮渣油泥试验研究 [J]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2021, 43 (12): 20-26.
- [21] 姜勇,赵萍,董铁有,等. 含油污泥油含量测定方法 [J]. 环境科学与管理, 2008, 33 (2): 115-117.
- [22] 王李婷,王向根,李星,等. 正交试验优选木姜叶柯中三叶苷提取工艺 [J]. 中国药业, 2020, 29 (1): 26-28.
- [23] 王轩轩,孙娜娜,李伟,等. 无机盐浓度促进微波破乳的机理分析 [J]. 广东化工, 2013, 40 (13): 21-22.