

SDBS 微乳液制备及其对石油污染土壤 清洗效果研究

牛明芬¹, 荣鑫^{1,2}, 徐丽¹, 李刚^{2,3}

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016; 3. 污染土壤生物-物化协同修复技术国家地方联合工程实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要 目的 利用阴离子型表面活性剂、助表面活性剂、无机电解质、有机相与去离子水配制微乳液, 研究微乳液的稳定性, 利用配置的微乳液对石油污染土壤进行清洗, 探究方法可行性以及最佳参数条件。方法 采用 Shah 法, 以十二烷基苯磺酸钠为表面活性剂、分别以正丁醇、NaCl、Na₂CO₃、Na₂SiO₃、有机相正庚烷为助表面活性剂制备微乳液, 通过绘制拟三元相图研究微乳液体系稳定性; 分析该微乳液对石油污染土壤的洗脱率。结果 配制的微乳液Ⅲ对含油量为 10.6% 的石油污染土壤去除率达到 90.47%, 清洗后的土壤含油率为 1.01%, 对比单一表面活性剂 SDBS 的石油烃脱附效率提高了 32.31%。结论 该微乳液脱附效率显著高于单一或其他复配溶液药剂, 可作为高浓度石油污染土壤修复的主要备选技术。

关键词 微乳液; 表面活性剂; 石油污染土壤; 化学清洗; SDBS

中图分类号 X703.1

文献标志码 A

Preparation of Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate Microemulsion and its Cleaning Effect on Oil-contaminated Soil

NIU Mingfen¹, RONG Xin^{1,2}, XU Li¹, LI Gang^{2,3}

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, China, 110016; 3. National-local Joint Engineering Laboratory of Contaminated Soil Remediation by Bio-physicochemical Synergistic Process, Shenyang, China, 110016)

Abstract: The stability of the prepared microemulsion was investigated to explore the feasibility and optimal parameters of microemulsion cleaning of petroleum contaminated soil, to optimize the optimal group allocation ratio of microemulsion and the preparation conditions. The organic phase containing surfactant sodium dodecylbenzenesulfonate (SDBS), cosurfactant nbutanol, inorganic

收稿日期: 2020-09-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1801900)

作者简介: 牛明芬(1967—), 女, 教授, 主要从事污染控制与治理技术、固体废弃物处理等方面研究。

salts NaCl , Na_2CO_3 , Na_2SiO_3 , and n-heptane were selected as the main component to prepare a microemulsion by Shah method, which was used to clean up oil contaminated soil with oil content 10.6%. Microemulsion system stability was characterized by plotting pseudo ternary phase diagrams. The elution rates of oil from contaminated soils by different types of detergents, such as microemulsion with single SDBS surfactant wash, SDBS complex inorganic salt wash, and n-heptane wash at the same mass fraction, were compared. The cleaned soil had an oil content of 1.01% and removal reached 90.47%, which resulted in a 32.31% increase in oil hydrocarbon desorption efficiency compared to the single surfactant SDBS. So the microemulsions are used for oil contaminated soil cleaning, and the desorption effect is significantly improved over that of single surfactant SDBS and so on, which can be used as the main alternative technique for the remediation of highly concentrated contaminated soils.

Key words: microemulsion; surfactant; oil-contaminated soil; chemical cleaning; SDBS

石油污染土壤产生于石油开采和运输等环节^[1]。由于石油污染物在土壤中经历了挥发、迁移、氧化、降解等物理化学过程,多数表现为油土结合程度强、脱附分离困难等特征。现阶段石油污染土壤常规修复手段有热脱附法^[2]、萃取法^[3]、化学清洗法^[4]、裂解法^[5]等,其中化学清洗法因清洗设备一般较简单,更加经济便利^[6],具有广泛的工业化应用前景。清洗液的稳定性以及对石油的洗脱效果是清洗剂制备的关键指标。微乳液是将表面活性剂与有机相正庚烷及助表面活性剂按一定比例混合形成的化学清洗剂^[7]。微乳液界面结构和相态会连续、自发形成,同时产生较多形态,根据其各种组分比例的不同,将会形成不同的动态稳定系统^[8]。王龙等^[9]以 SDBS 配制微乳液对原油污染土壤进行应急处理并回收原油。袁影影等^[10]以生物柴油基微乳液对钢铁厂多环芳烃污染土壤进行修复。与表面活性剂溶液相比,微乳液具有更高的稳定性,即表面活性剂不易析出,同时具有更强的破乳能力,且不易吸附在固体表面,这些特点能使微乳液避免表面活性剂清洗石油污染土壤中存在匹配难度大、洗脱效率不稳定等导致的清洗体系适用性受限问题^[11]。王琦等^[12]针对特定污染土壤的油污组成和化学特性,通过配制匹配型复合清洗剂来提高洗脱效率。

基于此,笔者采用 Shah 法,以十二烷基

苯磺酸钠(SDBS)为表面活性剂、分别以正丁醇、NaCl 等无机盐、有机相正庚烷为助表面活性剂制备微乳液,探究微乳液清洗石油污染土壤的可行性及最佳参数,优化微乳液最佳组分配比及制备条件,结果表明,微乳液脱附效果比单一表面活性剂 SDBS 等有显著提高,可作为高浓度污染土壤修复的主要备选技术。

1 试验

1.1 试验材料

微乳液制备材料:表面活性剂为十二烷基苯磺酸钠(SDBS);助表面活性剂为正丙醇、正戊醇、正丁醇;无机盐为 NaCl, Na_2CO_3 , Na_2SiO_3 ;正庚烷为有机相。土壤样品为某油田积存约 4 a 的落地石油污染土壤,土壤样品放置于通风橱内风干,测得其含油量为 10.06%。

1.2 仪器与试剂

试验仪器:JJ—4B 六联电动, XMTD—8222 水浴锅, SH—3 加热磁力搅拌器。

试验试剂:阴离子型表面活性剂 SDBS, 购自源叶生物科技有限公司;三种无机电解质包括 NaCl、 Na_2CO_3 、 Na_2SiO_3 , 均购自鲁诚生物科技有限公司。

1.3 试验方法

采用 Shah 法制备微乳液,将表面活性剂 SDBS 与助表面活性剂按不同质量比混合配

制混合表面活性剂。把混合表面活性剂与有机相正庚烷分别按 9:1、8:2、7:3、6:4、5:5、4:6、3:7、2:8、1:9 不同质量比混合,配制成 9 组混合溶液。用滴定管向混合溶液中滴加去离子水,每滴加一定体积水后,用磁力搅拌器搅拌均匀后静置,继续滴加去离子水,直到溶液由清澈透明变为浑浊时,表示溶液由微乳相过渡到乳液相,记录此时滴加去离子水的质量,绘制出对应的拟三元相图^[10]。连接拟三元相图中表示由微乳相过渡到乳液相的点形成一条曲线,曲线将拟三元相图分为两部分,上面的部分用 M 表示,为微乳相,下面的区域用 E 表示,代表乳液相,微乳相面积越大,表明微乳体系越稳定(见图 1)。

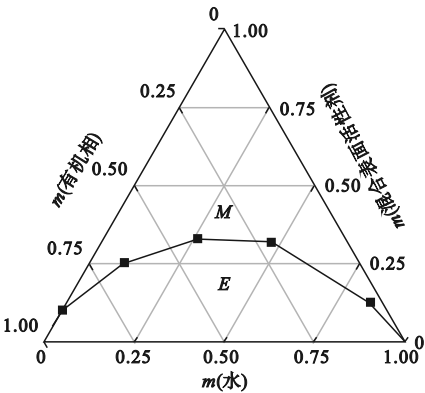


图 1 有机相、水、混合表面活性剂拟三元相图

Fig. 1 Quasi ternary phase diagram of oil water mixed surfactant system

1.4 分析方法

每组清洗试验重复做 3 次,记录试验数据并加以分析。采用重量法测定土壤中的油污含量^[13]。向离心管土样中加入 15 mL 三氯甲烷,振荡提取及水浴处理各 30 min,合并提取液,移至烧杯中,共提取 3 次。用三氯甲烷清洗过滤用漏斗至无油渍,一并收集清洗液至前述提取液烧杯中,将烧杯放置通风厨中风干。计算土壤样品含油率 R :

$$R = \frac{M_1 - M_0}{M} \times 100\% . \tag{1}$$

式中: M_0 为烧杯质量, g; M_1 为风干后总质量, g; M 为单次样品量,取 4 g。

2 微乳液稳定性的影响因素

2.1 助表面活性剂与表面活性剂的质量比

醇的含量对微乳液稳定性影响的本质在于其质量比。 K_m 为助表面活性剂与表面活性剂的质量比,在恒温 20 ℃ 条件下,取 K_m 值为 0.5、1.0、1.5、2.0,以阴离子表面活性剂 SDBS、有机相正庚烷、去离子水等与确定后的助表面活性剂,分别制备微乳液,同时计算各组分所占质量分数。图 2 为 K_m 值对微乳液体系稳定性的影响。

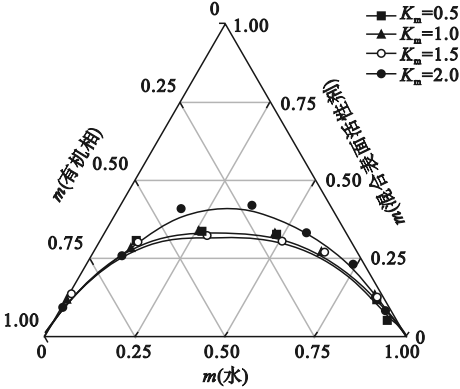


图 2 助表面活性剂与表面活性剂质量比对微乳液性质的影响

Fig. 2 Effect of mass ratio K_m of cosurfactant to surfactant on the properties of microemulsion

由拟三元相图可见,当 $K_m = 0.5$ 、 $K_m = 1.0$ 时,微乳区 M 的面积随 K_m 的增大而增大,呈正比趋势。此时加入醇起到与表面活性剂协同作用,随着醇在体系中的不断增加,渗透到界面膜中的醇使得界面膜的柔性与强度都有所增大,进而微乳液的稳定性得到提升。当 $K_m = 2.0$ 时,拟三元相图微乳区 M 的面积随 K_m 的增大而减小,呈现反比趋势。产生这种现象是由于此时界面膜上的醇已处于饱和状态,继续加入的醇不再与表面活性剂分子起协同作用,反而会降低表面活性剂的相对浓度,使得表面活性剂不能继续维持较低界面张力。此外,醇的过量添加造成插入到表面活性剂分子中的醇分子增多,使界面的流动性增强,产生微粒间排斥力小于吸

引力的现象^[15],使得微粒间的碰撞机率大大增加,造成油水两相相互渗透,致使界面膜的平衡进一步遭到破坏,表现为微乳体系稳定性降低。当 $K_m=1.5$ 时,微乳区 M 在拟三元相图中所占面积比最大。其原因是此时界面膜上醇的量刚好为与表面活性剂协同作用的容载量上限。通过面积占比可以看出,此时微乳液体系的溶水性能与增溶性能更优异。

2.2 助表面活性剂确定

用离子型表面活性剂配制微乳体系时,醇类不仅具有降低微乳体系界面张力的功能^[16],还可以改变油相与水相当中表面活性剂的分布。醇类可以参与到表面活性剂形成胶束的过程,通过自身水溶或油溶的特性来调整水和油的极性,同时使界面膜的柔性和强度得到增强^[14]。

在室温 20℃、 K_m 为 1.5 条件下,选择 3 种不同的助表面活性剂正丙醇、正丁醇、正戊醇与阴离子表面活性剂 SDBS、有机相正庚烷、去离子水等制备微乳液,同时计算各组分所占质量分数,绘制 3 种助表面活性剂各自对应的拟三元相图,如图 3 所示。根据各自拟三元相图中 M 与 E 所对应的面积占比,比较助表面活性剂种类对微乳体系的稳定性。

从图 3 中可看出,助表面活性剂为正丙醇、有机相与混合表面活性剂质量比为 2:8 时,其溶水量仅为 51.43%,远小于正丁醇的 78.12%。当有机相与混合表面活性剂质量比为 7:3 时,溶水量为 4.12%,远小于正丙醇溶水量 8.13%,及正丁醇溶水量 10.21%。正丙醇因其碳链较短、分子较小,可以穿插进胶束当中与胶束起协同作用,表现为亲水性较强,与此同时在水相中分布更多。正戊醇与之相反,因其碳链较长、分子较大,表现为亲油性较强,所以会更多地分布到有机相中。由于正丙醇与正戊醇的特性,使得醇在界面膜上的量降低,而连续相中的表面活性剂的量会增加,使界面膜的强度和稳定性降低^[10]。而正丁醇在水和有机相中溶解度都

相对较低,因而在界面膜中的保留量最多,溶水量最大,所以选择正丁醇作为最佳助表面活性剂。

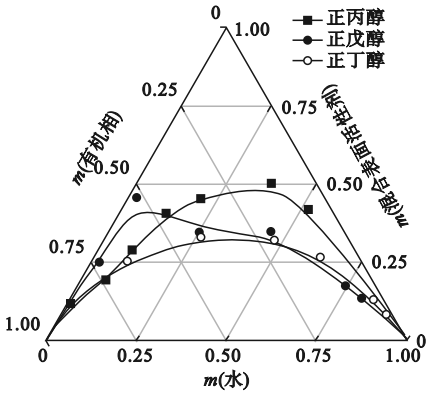
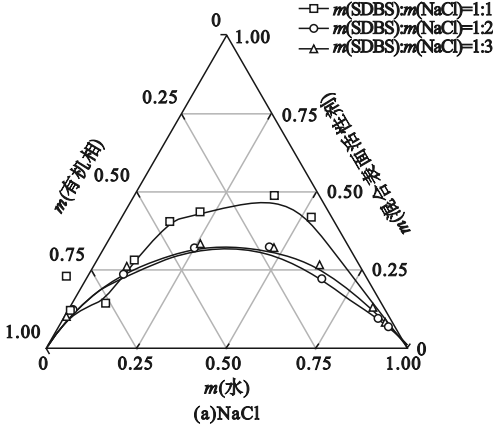


图 3 助表面活性剂种类对微乳体系的影响
Fig. 3 Effect of cosurfactant types on microemulsion systems

2.3 无机电解质与表面活性剂配比

将 SDBS 与助表面活性剂按 $K_m=1.5$ 配成混合表面活性剂溶液,选择阴离子表面活性剂 SDBS 与 3 种无机电解质 NaCl, Na_2CO_3 , Na_2SiO_3 分别按照质量比为 1:1、1:2、1:3 复配形成微乳体系,并绘制拟三元相图,如图 4 所示。

从图 4 中看出,离子型表面活性剂配成的微乳体系受无机盐的影响较大^[16],阴离子表面活性剂 SDBS 与 3 种无机电解质的质量配比为 1:1 时形成微乳区面积均小于质量配比为 1:2,而配比增加到 1:3 时,微乳区面积则无明显增加,这是因为无机盐对离子型



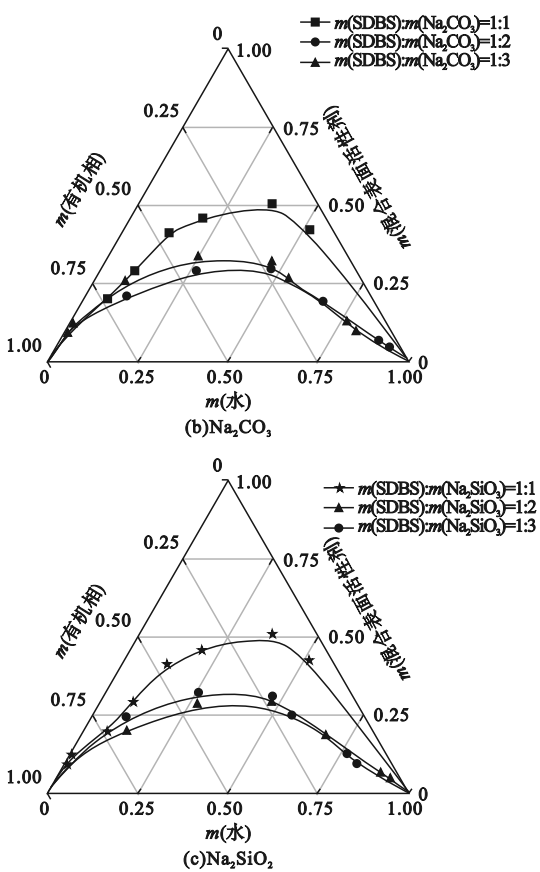


图4 SDBS 与无机电解质质量比对微乳体系的影响

Fig. 4 Effect of mass ratio of SDBS to tuorgnic electrolgte chloride on microemulsion system

表面活性剂产生影响是通过作用于表面活性剂离子中的反离子来实现的^[17],故无机盐中对阴离子表面活性剂微乳液体系相态影响较大的为阳离子,3种无机盐的阳离子均为Na⁺,所以质量比图像趋势和微乳区M的形成面积都基本一致。因此阴离子表面活性剂SDBS与3种无机盐的质量比均选择1:2。

2.4 无机电解质种类对稳定性的影响

将阴离子表面活性剂SDBS与3种无机盐NaCl、Na₂CO₃、Na₂SiO₃按照最佳复配比1:2进行复配,混合表面活性剂溶液按K_m=1.5进行配制,并计算各组分所占质量分数。绘制3种无机盐各自对应的拟三元相图(见图5)。由图5可知,3种无机电解质NaCl、Na₂CO₃、a₂SiO₃在微乳液体系的拟三元相图中所形成的微乳区面积区域大小接近,说明

钠盐体系阴离子改变对微乳液体系增溶能力的影响较小^[17],3种无机电解质NaCl、Na₂CO₃、Na₂SiO₃对微乳体系的稳定性影响较小,说明3种无机电解质与表面活性剂复配的微乳液体系均具有较好的稳定性。

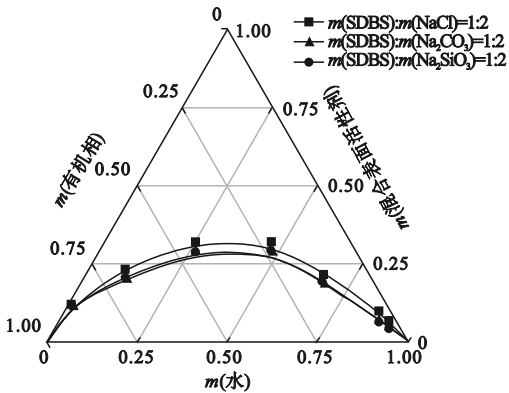


图5 无机电解质种类对微乳体系的影响

Fig. 5 Effects of inorganic electrolyte types on microemulsion systems

2.5 温度对稳定性的影响

确定上述最佳配比,在此基础上分别以温度为40℃、45℃、50℃、55℃、60℃、65℃制备微乳液,并绘制拟三元相图,比较不同温度对微乳液体系形成的影响,如图6所示。

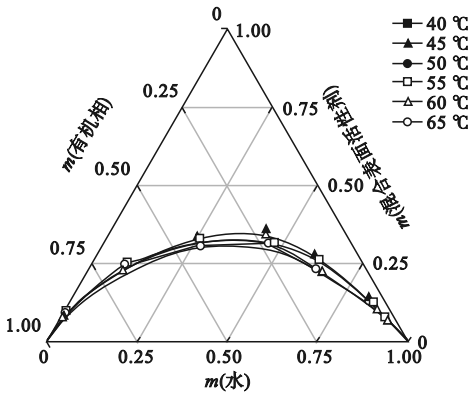


图6 温度对微乳液体系稳定性的影响

Fig. 6 Effect of temperature on stability of microemulsion system

由图6可知,微乳区域面积并未受温度改变而产生明显变化,说明在一个较宽的温度范围内,微乳相都比较稳定。其原因主要为该微乳液配方中所选择的离子型表面活性剂受温度影响较小。离子型表面活性剂上的

亲水基会随着温度升高而增大离子间的负斥力,表现为亲水能力增强。与此同时,其亲油基的亲油性变弱,界面膜所受推动力减小^[9]。在亲水基与亲油基的双重作用下,该微乳液体系最终表现为对温度变化不敏感,微乳液呈现较好的热力学稳定性。

3 微乳液清洗影响因素分析

综合经济性因素考虑,以3种无机盐NaCl、Na₂CO₃、Na₂SiO₃按照最佳复配比配制出3种微乳液。配方:0.45%的SDBS,0.90%的无机电解质,2.03%正丁醇,6.75%正庚烷有机相;其中,微乳液I的无机电解质为NaCl、微乳液II的为Na₂CO₃、微乳液III的为Na₂SiO₃。

用微乳液I、微乳液II、微乳液III分别清洗试验土壤,利用控制变量法对清洗过程中的温度、清洗时间、固液比等进行单因素优化。参照王琦等^[12]的参数研究,结合笔者预试验中参数探索,将3个因素都设置为最大值,开展最优参数探索。初始条件设定为:清洗温度80℃,清洗时间80min,固液比为1:7,以石油洗脱率作为清洗优化指标,探究微乳液对污染土壤中石油洗脱率的影响。

3.1 清洗温度对微乳液清洗效果的影响

保持其他清洗条件不变,设定清洗温度分别为30、40、50、60、70、80℃,清洗温度对微乳液洗脱效果影响如图7所示。在30℃条件时,清洗效率大小顺序依次为微乳液III、微乳液I、微乳液II;当温度为40℃时,微乳液I、III的清洗效率分别达到72.12%和73.26%,相较于在同温度下微乳液II的65.23%有显著提高。随着清洗温度升高,微乳液I、II、III的油污洗脱率均逐渐升高;在50℃时,油污的洗脱率达到最大;继续提高清洗温度,洗脱率无明显提高。较高温度会使助表面活性剂醇类及有机相挥发,从而降低了微乳液中的有效成分。综合经济性和安全性等因素,选择50℃作为较佳的清洗温

度条件。

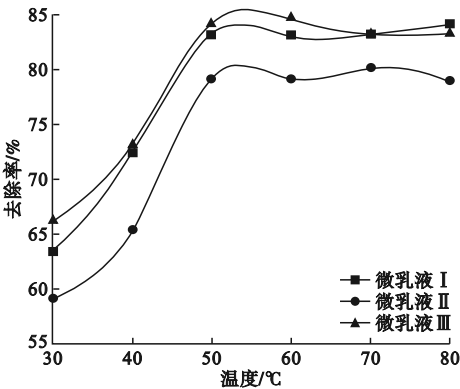


图7 温度对微乳液洗脱效率的影响

Fig.7 Effect of temperature on elution efficiency of microemulsion

3.2 清洗时间对微乳液清洗效果的影响

保持其他清洗条件不变,分别设定清洗时间为30、40、50、60、70、80min,清洗时间对油污洗脱效果影响如图8所示。清洗时间为30min时,微乳液I、II、III的清洗效率分别达到73.15%、71.21%、75.87%。可以明显看出清洗效率由小到大的顺序为微乳液II、微乳液I、微乳液III。随着清洗时间增加,微乳液I、II、III的油污洗脱率均逐渐升高。在清洗时间为60min时,洗脱率达到最高,微乳液II、微乳液I、微乳液III的清洗效率分别达到83.45%、85.23%、86.32%,由此确定最佳的清洗时间60min。

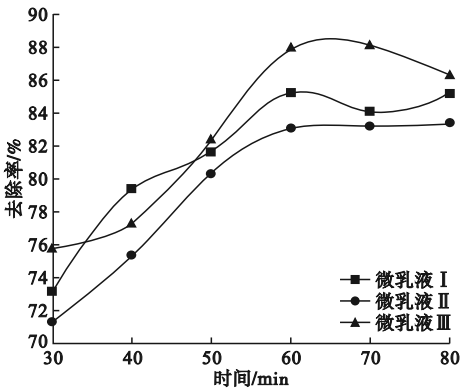


图8 时间对微乳液洗脱效率的影响

Fig.8 Effect of time on elution efficiency of microemulsion

3.3 固液比对微乳液清洗效果的影响

保持其他清洗条件与试验土壤质量不变,改变试验土壤与清洗剂溶液的施加比例,固液比分别为 1:2、1:3、1:4、1:5、1:6、1:7,油污洗脱效果如图 9 所示。随着固液比的增加,表面活性剂对石油的洗脱率逐渐上升,当固液比达到 1:5 时,微乳液 I、II、III 得洗脱率均出现拐点。因此,最佳的固液比确定为 1:5。

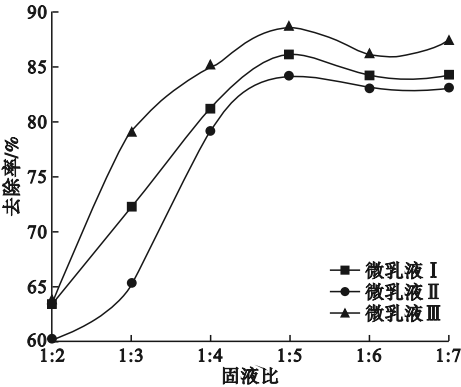


图 9 固液比对微乳液洗脱效率的影响

Fig. 9 Effect of solid-liquid ratio on elution efficiency of microemulsion

3.4 微乳液洗脱效果评价与分析

为分析配制的微乳液体系对石油污染土壤的清洗效果,将微乳液 I、II、III 与不同类型表面活性剂与助剂配比的清洗剂的洗脱效果进行对比。相同质量浓度的其他 5 种类型清洗剂为:SDBS、SDBS 与无机盐的复配剂 NaCl、Na₂CO₃、Na₂SiO₃、正庚烷。清洗条件设定为:清洗温度 50 ℃、清洗时间 60 min、固液比 1:5。

在 100 mL 锥形瓶中,将洗液与 10 g 油污土壤混合,并置于水浴加热搅拌器中按照最佳清洗条件清洗,用离心机对清洗后的混合液以 4 500 r/min 转速进行固液分离,持续 6 min,弃去上层含油上清液,取下层土壤放置于通风橱中风干,称取 5 g 干燥土壤进行含油量测定。每种做 3 次平行试验。

8 种不同类型清洗剂的效果如图 10 所示。从图 10 可以看出,微乳液 III 对土壤中石

油污染物脱附效率显著高于单一或其他复配溶液药剂,对土壤中石油去除率高达 90.47%。

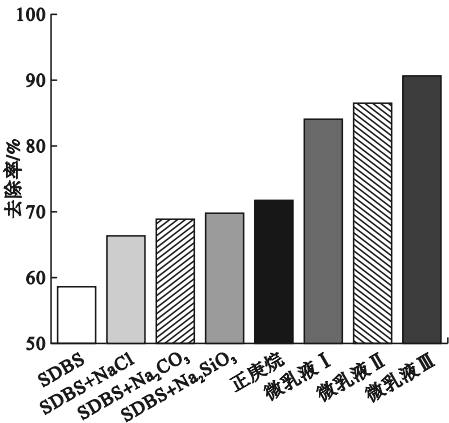


图 10 不同清洗剂的洗脱效率

Fig. 10 The elution efficiency of different cleaning agents

4 结 论

(1)当 K_m 为 1.5,表面活性剂与无机电解质质量比为 1:2 时,微乳液体系溶水量最大,微乳液体系稳定性较为理想。选择 0.45% SDBS、0.90% Na₂SiO₃、2.03% 正丁醇、6.75% 正庚烷 4 种单剂配制的微乳液稳定性最佳。

(2)针对石油污染土壤清洗,微乳液最佳清洗条件为清洗温度 50 ℃、清洗时间 60 min、固液比 1:5。

(3)微乳液 III 对土壤中石油污染物脱附效率显著高于单一或其他复配溶液药剂,对土壤中石油类去除率高达 90.47%,适宜清洗条件下,微乳液清洗技术能够对石油污染土壤具有显著清洗效果。

参考文献

[1] XU Y J, ZHANG Y D, LIU X F, et al. Retrieving oil and recycling surfactant in surfactant-enhanced soil washing [J]. ACS sustainable chemistry & engineering, 2018, 6 (4):4981-4986.

[2] 勾立争,刘长波,刘诗诚,等.热脱附法修复多环芳烃和汞复合污染土壤实验研究[J].环境工程,2018,36(2):184-187.

(GOU Lizheng, LIU Changbo, LIU Shicheng,

- et al. Experimental research on thermal desorption to repair soil with polycyclic aromatic hydrocarbons mercury compound contamination [J]. *Environmental engineering*, 2018, 36(2): 184 – 187.)
- [3] JING G L, CHEN T T, LUAN M M. Studying oily sludge treatment by thermo chemistry [J]. *Arabian journal of chemistry*, 2016, 9: 457 – 460.
- [4] 祝红, 张焕贞, 毕璐莎, 等. 表面活性剂修复石油类污染土壤研究进展[J]. *环境工程*, 2016, 34(增刊1): 1012 – 1015.
(ZHU Hong, ZHANG Huanzhen, BI Lusha, et al. Review on the remediation of petroleum contaminated soil by surfactants [J]. *Environmental engineering*, 2016, 34 (S1): 1012 – 1015.)
- [5] 王飞飞, 杨鹏辉, 鱼涛, 等. 含油污泥催化热解工艺的优化及热解产物分析[J]. *环境工程*, 2019, 37(9): 171 – 176.
(WANG Feifei, YANG Penghui, YU Tao, et al. Study on catalytic pyrolysis process of oily sludge and analysis of pyrolysis products [J]. *Environmental engineering*, 2019, 37 (9): 171 – 176.)
- [6] 黄昭露, 陈泉源. 五种表面活性剂对柴油污染土壤清洗效果的比较[J]. *环境工程*, 2015, 33(2): 168 – 172.
(HUANG Zhaolu, CHEN Quanyuan. Comparison of the effect of washing diesel soil-contaminated soil by five kinds of surfactants [J]. *Environmental engineering*, 2015, 33 (2): 168 – 172.)
- [7] 杨哲, 郭爽, 张永民. 微乳液的基本理论及应用[J]. *中国洗涤用品工业*, 2020(8): 81 – 89.
(YANG Zhe, GUO Shuang, ZHANG Yongmin. Basic theories and applications of microemulsions [J]. *China cleaning industry*, 2020(8): 81 – 89.)
- [8] 王军. 乳化与微乳技术[M]. 2版. 北京: 北京化学出版社, 2012.
(WANG Jun. *Emulsification and Microemulsification Technology* [M]. 2nd ed. Beijing: Beijing Chemical Press, 2012.)
- [9] 王龙, 刘会娥, 刘宇童, 等. 微乳液法用于落地原油应急处理及资源回收的研究[J]. *化工学报*, 2019, 70(7): 2699 – 2707.
(WANG Long, LIU Hui'e, LIU Yutong, et al. Emergency treatment of crude oil contaminated soil and resource recovery using microemulsion [J]. *CIESC journal*, 2019, 70 (7): 2699 – 2707.)
- [10] 袁影影, 李晓军, 贾春云, 等. 生物柴油基微乳液的制备及其对钢铁厂多环芳烃污染土壤的修复性能[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(12): 3505 – 3514.
(YUAN Yingying, LI Xiaojun, JIA Chunyun, et al. Preparation of biodiesel-based microemulsion and its performance on the remediation of a steelworks soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Chinese journal of environmental engineering*, 2020, 14(12): 3505 – 3514.)
- [11] 牛明芬, 殷智慧, 李刚. 石油污染土壤清洗药剂筛选及效果评价[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(7): 2302 – 2308.
(NIU Mingfen, YIN Zhihui, LI Gang. Selection of cleansing agents for petroleum-contaminated soil and assessment of their efficiency [J]. *Chinese journal of ecology*, 2020, 39 (7): 2302 – 2308.)
- [12] 王琦, 郭书海, 李刚, 等. 表面活性剂 – 无机电解质 – 石油烃的匹配性与石油污染土壤清洗性能[J]. *环境工程*, 2021, 39(3): 195 – 203.
(WANG Qi, GUO Shuhai, LI Gang, et al. Petroleum contaminated soil cleaning: surfactant-inorganic electrolyte-petroleum hydrocarbon matching [J]. *Environmental engineering*, 2021, 39(3): 195 – 203.)
- [13] GARTI N, YAGHMUR A, LESER M E, et al. Improved oil solubilization in oil/water food grade microemulsions in the presence of polyols and ethanol [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2001, 49 (5): 2552 – 2562.
- [14] 周冰灵. 微乳液的制备及其驱油效果评价[D]. 大庆: 东北石油大学, 2016.
(ZHOU Bingling. *The preparation of microemulsion and evaluation on oil displacement effect* [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.)
- [15] 周平平, 刘会娥, 陈爽, 等. 无机盐对十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)微乳液相行为的影响[J]. *化工进展*, 2018, 37(8): 2942 – 2947.
(ZHOU Pingping, LIU Hui'e, CHEN Shuang, et al. Effects of inorganic salts on phase behavior of CTAB microemulsion [J]. *Chemical industry and engineering progress*, 2018, 37(8): 2942 – 2947.)
- [16] 袁迎, 刘会娥, 徐明明, 等. 十二烷基苯磺酸钠微乳液体系中无机盐的作用规律[J]. *化工学报*, 2014, 65(10): 4025 – 4031.
(YUAN Ying, LIU Hui'e, XU Mingming, et al. Influence of inorganic salts on sodium dodecyl benzene sulfonate microemulsion system [J]. *CIECS journal*, 2014, 65 (10): 4025 – 4031.)
- [17] 邹耀洪, 鱼维洁. 温度、氯化钠及乙醇对离子型表面活性剂临界胶束浓度的影响[J]. *常熟理工学院学报*, 2003, 17(4): 45 – 49.
(ZOU Yaohong, YU Weijie. The influence of temperature, NaCl and ethanol on CMC of ionic type surfactants in aqueous solution [J]. *Journal of Changshu college*, 2003, 17 (4): 45 – 49.)
- [18] 伍志波, 余林, 孙明. 生物柴油基吸收剂净化甲苯废气[J]. *精细化工*, 2013, 30(9): 1052 – 1506.
(WU Zhibo, YU Lin, SUN Ming. Removal of waste gas containing toluene by biodiesel-based microemulsion [J]. *Fine chemicals*, 2013, 30 (9): 1052 – 1506.)

(责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)