



文章栏目：土壤热修复技术应用专题

DOI 10.12030/j.cjee.201905135

中图分类号 X53

文献标识码 A

杨振, 柳林杉, 刘明杰, 等. 油浸泥土热脱附修复小试实验条件的探索[J]. 环境工程学报, 2019, 13(10): 2320-2327.

YANG Zhen, LIU Linshan, LIU Mingjie, et al. Exploration on small-scale experimental conditions in thermal desorption remediation of petroleum-contaminated soil[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(10): 2320-2327.

油浸泥土热脱附修复小试实验条件的探索

杨振¹, 柳林杉¹, 刘明杰², 刘亮亮³, 衣桂米¹, 靳青青¹, 鲁永蒲², 岳勇^{1,*}

1. 杰瑞环保科技有限公司, 烟台 264000

2. 中国石油新疆油田分公司, 克拉玛依 834000

3. 新疆维吾尔自治区固体废物管理中心, 克拉玛依 834000

第一作者: 杨振(1989—), 男, 硕士研究生。研究方向: 土壤污染与控制。E-mail: zhen.yang@jereh.com

*通信作者: 岳勇(1977—), 男, 博士, 高级工程师。研究方向: 土壤污染与控制。E-mail: yong.yue@jere.coml

摘要 针对油浸泥土中石油烃去除机制不清的问题, 利用自制热解炉小试装置, 研究了不同条件下油浸泥土中石油烃的处理效果, 通过调节加热温度、时间、初始含油率和初始含水率等参数, 模拟油浸泥土热脱附过程。结果表明: 利用小试装置, 当初始含油率为 11.3%、初始含水率为 20% 时, 热脱附温度 300 °C、热脱附时间 4 h 为最佳处理工艺, 处理后油浸泥土中的含油率可降低至 0.7%, 远低于《油气田含油污泥综合利用污染控制要求》(DB 65/T 3998-2017) 中 2% 的修复标准, 石油烃的去除率可达到 93.8%; 在常见油浸泥土含水率 20% 及最佳处理工艺下, 随着初始含油率的升高, 热脱附处理后的固相含油率逐渐升高, 但石油烃去除率基本保持不变。适中的油浸泥土含水率有利于热脱附处理, 最佳初始含水率为 10%~20%。

关键词 油浸泥土; 热脱附处理; 加热温度; 加热时间; 含水率; 含油率

油浸泥土主要来源于石油开采过程产生的落地原油和含油矿渣、污泥、垃圾的堆置, 以及采油废水滥排、石油泄露事件等^[1-2]。石油污染使土壤的通透性降低, 影响土壤中植物和微生物的生长。油浸泥土若不妥善处置, 将造成污染扩散, 影响周边环境和人体健康^[3]。油浸泥土内部的轻质油分挥发出来, 可进入到大气循环当中, 并且随着大气的运动, 造成污染扩散。油浸泥土中烃类可渗入地下水, 导致地下水水质恶化。因此, 油浸泥土已成为巨大的环境隐患, 针对其处理处置已引起广泛关注^[4-5]。

目前, 油浸泥土的处置技术主要包括萃取技术、生物处理技术和热脱附技术。热脱附技术是一项利用燃气或者电能等能源对污染土壤加热, 并对挥发后的污染物收集和处理的土壤修复技术, 热脱附技术对有机污染土壤具有较好的修复效果^[6-9]。根据修复方式, 热脱附技术分为异位热脱附和原位热脱附技术, 异位热脱附技术是将土壤开挖后进行处理, 不影响土地的再利用。而原位热脱附技术是一种在污染场地上进行原地修复的技术, 具有对土壤扰动小、二次污染可控、处理范围广等优点, 尤其是对土壤污染较深、渗透低、黏性强、开挖难度大、不利于异位开挖修复的场地, 原位热脱附技术优势更加明显^[10-11]。热脱附技术作为一种重要的非燃烧技术, 在有机污染土壤修复及含油污泥处置领域具有较好的应用前景。热脱附技术的影响因素较多, 如反应条件、

反应设备、土壤特性等^[1, 12-15]。关于此技术，国外已有较多的研究和应用，但在我国起步较晚，相关研究较少，且机理研究也不够深入。张学良等^[16]研究了热脱附技术对苯、氯苯等污染物的处理效果，热脱附对不同有机物的去除率均接近 100%，且发现温度、停留时间、含水率、孔隙率等因素均可影响热脱附效果。王锦淮^[17]开展了热脱附技术的中试实验，结果表明苯胺、氯苯、1, 2-二氯苯和 1, 4-二氯苯等污染物接近完全去除。BAKER 等^[18]的研究结果表明，在 300 °C 的加热温度下，热脱附处理苯、乙苯、萘烯、甲苯效果较好。截至目前，国内外关于热脱附技术的研究及应用主要集中于多环芳烃类及苯系物类污染土壤的处理上，很少应用于油浸泥土的修复，因此，开展针对热脱附技术应用于油浸泥土的影响因素的研究十分必要^[19]。

新疆油田是我国历史久远的大型采油区，石油开采后遗留大量油坑和油浸泥土。本研究在分析新疆某采油区油浸泥土性质的基础上，采用热解炉实验装置，对不同初始含油率(油浸泥土中的石油烃含量)、含水率的油浸泥土进行了热脱附模拟实验，通过测定不同加热温度和加热时间下的固相含油率、能耗等参数，研究了热脱附过程中加热温度、时间、初始含水率、含油率等对热修复效果的影响，为热脱附技术在油浸泥土修复领域的应用提供参考。

1 实验部分

1.1 实验材料与装置

油浸泥土样品来自中国西北新疆某油坑污染场地，采样深度 0~30 cm。油浸泥土呈黑色、黏稠、半流质状，称取 40 kg 油浸泥土，将油浸泥土中的树叶、树枝和石子等异物除去，将油浸泥土充分搅拌、混合均匀，放置于密封箱中保存。原始油浸泥土样品外观见图 1。理化性质如下：土壤质地为壤土，pH 7.5，含水率 20%，总有机碳 0.324 8 g·kg⁻¹，阳离子交换容量 23.5 cmol·kg⁻¹。

本研究装置为自制热解炉小试装置，热解炉主要由加热系统、冷凝系统、液体收集系统、气体收集系统 4 个系统组成，见图 2。

工艺流程如图 3 所示。将一定量的供试泥土置于热解炉中，不断通入氮气，使热解炉内保持无氧状态。采用燃气加热的方式对炉内油浸泥土加热，通过温度自动控制系统进行温度调控，使炉内油浸泥土的温度达到实验设定温度。经过一定的停留时间后，将油浸泥土从出料口取出，并进行含油率检测，挥发出的高温混合气体进入冷凝系统，收集到的油水混合物静置分层，分别取上层油相和下层水相用于制备不同含油率和含水率的供试油浸泥土。

1.2 实验方法

称取 500 g(干质量)供试油浸泥土，从进料口加入炉筒中，分别设定不同的加热温度(200、250、300、350、400 °C)和停留时间(0.5、



图 1 原始油浸泥土样品

Fig. 1 Raw soil sample



图 2 热解炉装置

Fig. 2 Diagram of pyrolysis furnace

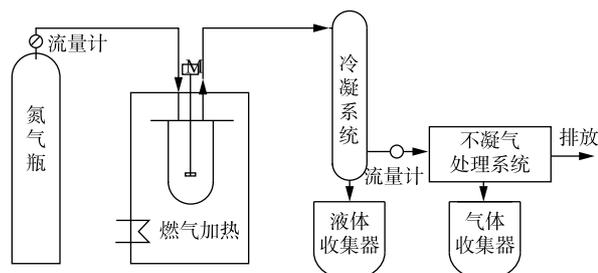


图 3 热解炉装置原理图

Fig. 3 Schematic diagram of pyrolysis furnace

1、2、3、4、5、6 h), 待出料冷却后, 利用红外分光光度法进行固相含油率检测。每次实验设3组平行样, 相对标准偏差控制在5%以内。

按照一定比例, 将热解炉小试装置回收的水、油添加于上述供试油浸泥土中, 制备不同含油率(5%、10%、15%、20%、25%、30%)和含水率(5%、10%、20%、30%、40%、50%)的供试油浸泥土。在本研究中, 设置加热温度300℃、停留时间4 h的工艺条件, 利用不同初始含油率和不同初始含水率的土壤进行热脱附处理, 利用红外分光光度法对处理后油浸泥土进行固相含油率检测。每次实验设3组平行样, 相对标准偏差控制在5%以内。

为研究加热温度对于油浸泥土热脱附处理效果的影响, 将供试油浸泥土(含油率11.3%, 含水率20%)置于热解炉中, 通过自动调温系统维持炉内油浸泥土温度为200、220、250、300、350、400℃, 停留4 h后卸料。待出料冷却后, 测定固相含油率。

为研究加热时间对于油浸泥土热脱附处理效果的影响, 将供试油浸泥土(含油率11.3%, 含水率20%)置于热解炉中, 通过自动调温系统维持炉内油浸泥土温度为300℃, 分别在停留0.5、1、2、3、4、5、6 h后卸料。待出料冷却后, 测定固相含油率。

为研究油浸泥土初始含油率对于热脱附处理效果的影响, 分别称取500 g(干质量)含水率为20%, 含油率分别为5%、10%、15%、20%、25%、30%的油浸泥土置于热解炉内, 通过自动调温系统维持炉内油浸泥土温度为300℃, 热脱附处理4 h后出料。待出料冷却后, 测定固相含油率。

为探究油浸泥土初始含水率对于油浸泥土热脱附处理效果和热脱附能耗的影响, 分别称取500 g(干质量)含油率均为11.3%, 含水率分别为5%、10%、20%、30%、40%、50%的油浸泥土置于热解炉内, 通过自动调温系统维持炉内油浸泥土温度为300℃, 热脱附处理4 h后出料。待出料冷却后, 测定固相含油率。

1.3 油浸泥土含油率的测定和数据处理

油浸泥土含油率的测定采用萃取结合红外测油仪测定的方法^[20]。称取10 g(干质量)样品于100 mL具塞磨口锥形瓶中, 加入10 g无水硫酸钠, 混合均匀, 加入25 mL四氯化碳, 盖好塞子轻轻摇匀。将锥形瓶置于50~60℃水浴中, 以50~60 r·min⁻¹振荡8 h, 然后静置1 h。将上清液倾倒入50 mL容量瓶中, 再向100 mL具塞磨口锥形瓶中加入20 mL四氯化碳, 以50~60 r·min⁻¹振荡8 h, 然后静置1 h; 再次将上清液倾倒入50 mL容量瓶中, 定容, 利用红外测油仪对上清液进行定量测定分析。

采用Excel 2010和Origin7.5软件对实验数据进行处理、数据分析、绘图。

石油烃去除率根据式(1)进行计算。

$$\eta = \frac{C_i - C_0}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为石油烃去除率; C_0 为油浸泥土初始含油率; C_i 为处理后油浸泥土含油率。

2 结果与讨论

2.1 加热温度对热脱附过程的影响

在不同温度条件下, 热脱附处理后样品的表观性状如图4所示。原始样品(如图1所示)由于含油率较高而呈黏结状态。油浸泥土的最大污染特征表现为土壤表里的贯通性, 石油烃灌满于一定面积、深度土壤中几乎所有孔隙, 堵塞绝大多数的土壤气孔; 同时由于石油烃的黏稠性, 将土壤中原本散状的土壤颗粒胶黏在一起, 改变了土壤原有的结构特征。经过4 h热处理后, 热脱附温度在250℃以下的油浸泥土仍呈现黏结块状, 从表观上来看仍还有一定量的石油烃。

在不同加热温度下, 经过热脱附处理后油浸泥土含油率的变化情况如图5所示。设置加热温度为200℃, 经过4 h处理后, 油浸泥土含油率降至2.7%; 在热脱附温度从200℃升高至300℃的过程中, 含油率可持续降低至0.7%。在此温度区间内, 升高加热温度, 石油烃的去除率增大,



图 4 不同加热温度下处理后土壤的表观性状

Fig. 4 Appearance properties of treated soil at different heating temperatures

处置后油浸泥土样品的含油率降低。当加热温度为 300 °C 时，含油率仅为 0.7%，石油烃去除率可达到 94%；继续升高温度 (>300 °C)，油浸泥土的含油率基本保持稳定 (含油率保持在 0.6% 左右)。综合考虑热脱附效果及资源消耗 2 个因素，该油浸泥土的最佳热脱附处理温度为 300 °C。

油浸泥土经过高温加热，土壤中的石油烃会热解吸挥发出来。并且当加热温度提高时，石油烃的 C—C 键和 C—H 键易断裂而发生裂解，石油烃链缩短，挥发性增强，从油浸泥土中解吸出来，实现油土分离^[17]。本研究结果表明，升高加热温度可以促进油浸泥土中石油烃

的去除。这是由于石油烃分子中的化学键在较高温度下更容易断裂，加热温度越高，产生裂解的石油烃种类越多。但当温度在 300 °C 以上时，油浸泥土含油率无显著变化，这说明在初始含油率保持不变的情况下，加热温度超过一定值时，对热脱附效果的影响有所减弱。王嫣云等^[21]研究了不同热解终温对石油烃去除率的影响，结果表明，随着温度升高，热解残渣的含油率逐渐降低，但当热解温度为 260 °C 时，继续升温，对油浸泥土含油率则无明显影响。LUNDIN 等^[22]的研究表明，高温热解有利于垃圾焚烧灰中多氯联苯和多氯联苯并呋喃的去除，热解温度从 300 °C 升高至 500 °C 时，热解后固态残渣污染物含量明显降低。热脱附温度的选择与污染物本身的特性有关。对于被苯等挥发性有机物污染的地块，温度上升至 100 °C，就有较好的修复效果；而对于多环芳烃、石油烃等半挥发性有机物分子，通常需要升温至 300~500 °C，才能达到相同的修复效果^[16, 23]。

2.2 加热时间对热解过程的影响

在不同加热时间下，油浸泥土热脱附处理后样品的表观性状如图 6 所示。加热时间 (0~1 h) 较

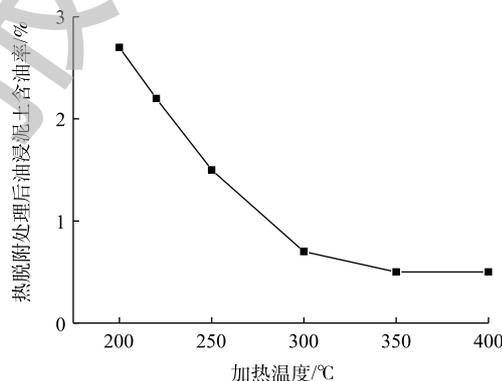


图 5 不同温度条件下热脱附处理后油浸泥土样品的含油率

Fig. 5 Petroleum content in treated soil at different heating temperatures

短时, 部分样品仍存在因石油烃的黏稠性而导致的黏结状态; 经过 4 h 热脱附处理后, 油浸泥土团聚现象消失, 松散程度高, 形成均匀细颗粒。



图 6 不同加热时间下处理后土壤的表观性状

Fig. 6 Appearance properties of treated soil at different heating times

对于不同的加热时间, 样品含油率检测结果如图 7 所示。在加热时间为 0~0.5 h 时, 样品中石油烃去除率较明显, 含油率从 11.3% 降至 2.6%, 这是因为样品中的轻质油挥发速度较快。从 0.5 h 继续延长加热时间至 4 h 的过程中, 样品含油率从 2.6% 降低至 0.7%; 在 4~6 h 的加热过程中, 样品含油率从 0.66% 降低至 0.56%, 这表明热脱附处理 4 h 后, 继续延长加热时间, 油浸泥土中的含油率基本保持不变, 因此, 在此时间范围内, 加热时间对于样品石油烃的去除效果影响较小。张攀等^[11]在进行热脱附处理硝基苯研究时也得到类似的结果, 硝基苯的热脱附效率随着热脱附时间的延长而增加, 但当加热时间超过 30 min 时, 热脱附效率不再有显著增加。LAM 等^[24]发现, 石油污染土壤含油率会随着加热时间的增加而明显降低, 但加热时间超过一定值时, 热脱附效果基本不再受加热时间的影响。加热时间对热脱附效果的影响也取决于热脱附温度, 较低的热脱附温度需要较长的加热时间才能达到相同的处理效果^[25]。综合考虑热脱附效果、资源消耗及运行成本等因素, 该油浸泥土的最佳热脱附加热时间为 4 h。

2.3 初始含油率对石油烃去除效果的影响

由图 8 可知, 在设置的 6 个油浸泥土初始含油率浓度梯度 (5%、10%、15%、20%、25%、30%) 下, 随初始含油率的升高, 处理后的油浸泥土固相含油率呈现升高趋势, 但石油烃去除率基本保持不变。因此, 在初始含油率为 5%~25% 时, 热脱附处理后, 油浸泥土固相含油率在 2% 以

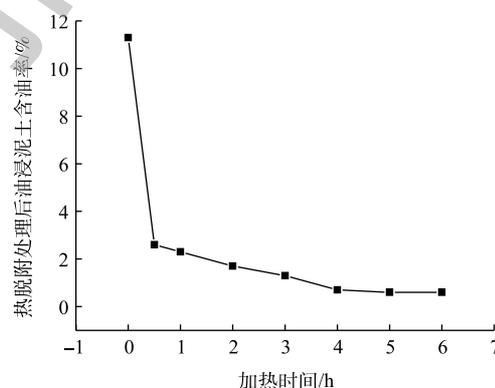


图 7 不同加热时间条件下热脱附处理后油浸泥土样品的含油率

Fig. 7 Petroleum content in treated soil at different heating times

下；但当初始含油率升高至 30% 时，石油烃去除率为 91%，处理后的样品含油率为 2.75%，尚未达到《油气田含油污泥综合利用污染控制要求》(DB 65/T 3998-2017) 的修复标准。

王嫣云等^[21]的研究表明，初始含油率对高温下石油烃去除率影响较小，且去除率于 300 °C 后保持稳定。这主要是由于初始含油率越高，轻质油含量越高，在较低温度下，有更多组分析出；含油土壤其他组分在温度升至较高时才逐渐析出，此时饱和去除率已较高，因此，石油烃组分去除率不再随初始含油率变化而变化。王瑛等^[26]的研究也表明，土壤中初始 DDT 含量对 DDT 的去除率没有显著影响。

2.4 初始含水率对石油烃去除效果的影响

在加热温度为 300 °C，加热时间为 4 h 的工艺条件下，初始含水率对供试油浸泥土(含油率 11.3%)热脱附效果和天然气用量的影响结果如图 9 所示。在初始含水率为 10%~50% 时，随着含水率的升高，石油烃去除率降低，经处理后，油浸泥土固相含油率有所升高。在油浸泥土初始含水率超过 40% 时，处理后含油率不能达到修复标准。由此可见，油浸泥土初始含水率过高或过低，均会影响热脱附处理效果。高含水率不利于热脱附处理，高含水率的油浸泥土中的水分会以水膜形式存在于油浸泥土表层，在热脱附过程中水脱离会吸收部分热能，这使石油烃得到的能量降低，导致石油烃热脱附效率降低。此外，含水率过高会造成油浸泥土黏结使其通透性降低，堵塞石油烃扩散的通道，影响石油烃的热脱附效果^[27]。油浸泥土含水率较低也不利于热脱附处理，油浸泥土中水分子作为极性分子相较于石油烃更容易与土壤上位点结合，占据更多的结合位点，含水率过低时，石油烃分子大量吸附于油浸泥土上，故导致热脱附处理效果较差^[28]。

如图 9 所示，天然气用量与油浸泥土初始含水率呈现反比关系，油浸泥土含水率影响热脱附能耗。初始含水率为 50% 时，天然气使用量为 72 m³·h⁻¹(标准状况)；当初始含水率降至 5% 时，天然气使用量降低至 20 m³·h⁻¹(标准状况)，高含水率的油浸泥土热脱附过程的耗能是低含水率油浸泥土的 3 倍之多。虽然过高含水率的油浸泥土热容量高，热损失较慢，但较高的含水率不利于其中污染物的脱附，且易消耗大量的能源，工程成本较高。因此，油浸泥土初始含水率是热脱附技术应用的重点考虑因素之一^[29]。

3 结论

1) 热脱附技术可以用于油浸泥土中石油烃污染物的去除，且热脱附的处理效果与加热温度、加热时间、土壤的初始含油率及含水率有关。

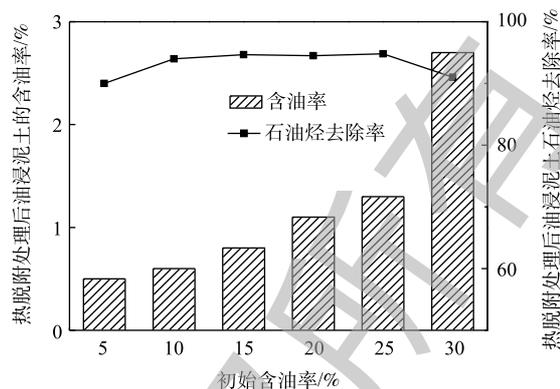


图 8 不同初始含油率条件下热脱附处理后油浸泥土样品的含油率及去除率

Fig. 8 Petroleum Content in treated soil and removal rate at different initial petroleum contents of soil

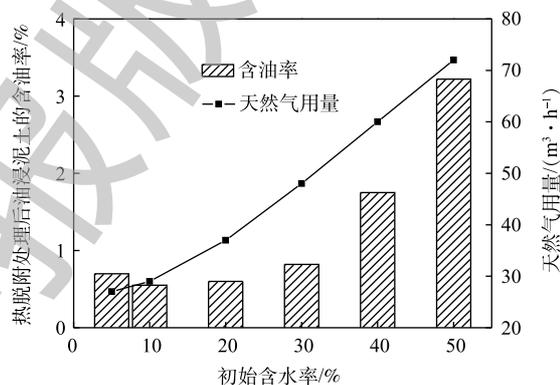


图 9 不同初始含水率条件下热脱附处理后油浸泥土样品的含油率及能耗

Fig. 9 Petroleum content and energy consumption of treated soil at different moisture contents

2) 利用本研究热解炉小试装置, 对于初始含油率为 11.3%、含水率为 20% 的油浸泥土, 综合考虑样品热脱附处理效果、资源消耗及运行成本, 加热温度 300 °C、加热时间 4 h 为最佳工艺处理条件。在此最佳条件下, 处理后的油浸泥土含油率仅为 0.7%, 符合油泥处置标准。

3) 油浸泥土初始含水率和含油率是决定是否采用热脱附技术的关键因素。在一定温度和时间范围内, 处理后油浸泥土的固相含油率随着初始含油率的升高而升高, 不达标的风险增大。适中的初始含水率 (10%~20%) 有利于热脱附处理, 当初始含水率超过 40% 时, 热脱附效果较差且能耗较高。

参考文献

- [1] 王万福, 金浩, 石丰, 等. 含油污泥热解技术[J]. *石油与天然气化工*, 2010, 39(2): 173-177.
- [2] 周浩, 汪根宝, 李蒙, 等. 含油钻屑的热解特性[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(12): 6421-6428.
- [3] MELE A R, CIBRIAN N M, SABATE M C, et al. Oil pollution in soils and sediments from the Northern Peruvian Amazon[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610-611: 1010-1019.
- [4] 张新建, 王茂仁. 浅谈石油烃污染土壤间接热脱附修复技术[J]. *化工管理*, 2018, 485(14): 113-114.
- [5] 周东美, 郝秀珍, 薛艳, 等. 污染土壤的修复技术研究进展[J]. *生态环境学报*, 2004, 13(2): 234-242.
- [6] 吴嘉茵, 方战强, 薛成杰, 等. 我国有机物污染场地土壤修复技术的专利计量分析[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(8): 2015-2024.
- [7] 杨振, 靳青青, 衣桂米, 等. 原地异位建堆热脱附技术和设备在石油污染土壤修复中的应用[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(9): 2083-2091.
- [8] LI D C, XU W F, MU Y, et al. Remediation of petroleum-contaminated soil and simultaneous recovery of oil by fast pyrolysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52: 5330-5338.
- [9] MECHATI F, ROTH E, RENAULT V, et al. Pilot scale and theoretical study of thermal remediation of soils[J]. *Environmental Engineering Science*, 2004, 21: 361-370.
- [10] 刘凯, 张瑞环, 王世杰. 污染地块修复原位热脱附技术的研究及应用进展[J]. *中国氯碱*, 2017(12): 31-37.
- [11] 张攀, 高彦征, 孔火良. 污染土壤中硝基苯热脱附研究[J]. *土壤*, 2012, 44(5): 801-806.
- [12] BEATTIE S D, LANGMI H W, MCGRADY G S. In situ thermal desorption of H₂ from LiNH₂-2LiH monitored by environmental SEM[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(1): 376-379.
- [13] LIANG H C, UDELL K S. Experimental and theoretical investigation of vaporization of liquid hydrocarbon mixtures in water-wetted porous media[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(3): 635-649.
- [14] FALCIGLIA P P, GIUSTRA M G, VAGLIASINDI F G A. Soil texture affects adsorption capacity and removal efficiency of contaminants in ex situ remediation by thermal desorption of diesel-contaminated soils[J]. *Chemistry & Ecology*, 2011, 27(1): 119-130.
- [15] PARK C M, KATZ L E, LILJESTRAND H M. Mercury speciation during in situ thermal desorption in soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 300: 624-632.
- [16] 张学良, 廖朋辉, 李群, 等. 复杂有机物污染地块原位热脱附修复技术的研究[J]. *土壤通报*, 2018, 49(4): 993-1000.
- [17] 王锦淮. 原位热脱附技术在某有机污染场地修复中试应用[J]. *化学世界*, 2018, 59(3): 182-186.
- [18] BAKER R S, LACHANCE J C. In situ thermal remediation of contaminated sites: A technique for the remediation source zones[R]. Fitchburg: Terra Therm Incorporation, 2006.
- [19] 刘昊, 张峰, 马烈. 有机污染场地原位热修复: 技术与应用[J]. *环境工程设计*, 2017(8): 93-98.
- [20] 赵永建, 李贺, 周丹华, 等. 红外法测定含油土壤(污泥)中石油类的研究[J]. *江西化工*, 2017(2): 38-39.
- [21] 王嫣云, 冯真, 周泽军, 等. 油污染场地土壤热解终温试验研究[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(6): 2287-2291.

- [22] LUNDIN L, AURELL J, MARKLUND S. The behavior of PCDD and PCDF during thermal treatment of waste incineration ash[J]. *Chemosphere*, 2011, 84(3): 305-310.
- [23] 王瑛, 李扬, 黄启飞, 等. 温度和停留时间对 DDT 污染土壤热脱附效果的影响[J]. *环境工程*, 2012, 30(1): 116-120.
- [24] LAM S S, RUSSELL A D, LEE C L, et al. Microwave-heated pyrolysis of waste automotive engine oil: Influence of operation parameters on the yield, composition, and fuel properties of pyrolysis oil[J]. *Fuel*, 2012, 92(1): 327-339.
- [25] ARESTA M, DIBENEDETTO A, FRAGALE C, et al. Thermal desorption of polychlorobiphenyls from contaminated soils and their hydrodechlorination using Pd- and Rh-supported catalysts[J]. *Chemosphere*, 2008, 70(6): 1052-1058.
- [26] 王瑛, 李扬, 黄启飞, 等. 污染物浓度与土壤粒径对热脱附修复 DDTs 污染土壤的影响[J]. *环境科学研究*, 2011, 24(9): 1016-1022.
- [27] 贺晓珍, 周友亚, 汪莉, 等. 土壤气相抽提法去除红壤中挥发性有机污染物的影响因素研究[J]. *环境工程学报*, 2008, 2(5): 679-683.
- [28] 孙磊, 蒋新, 周健民, 等. 五氯酚污染土壤的热修复初探[J]. *土壤学报*, 2004, 41(3): 462-465.
- [29] ZHAO C, DONG Y, FENG Y, et al. Thermal desorption for remediation of contaminated soil: A review[J]. *Chemosphere*, 2019, 221: 841-855.

(本文编辑: 张利田, 曲娜, 郑晓梅)

Exploration on small-scale experimental conditions in thermal desorption remediation of petroleum-contaminated soil

YANG Zhen¹, LIU Linshan¹, LIU Mingjie², LIU Liangliang³, YI Guimi¹, JIN Qingqing¹, LU Yongpu², YUE Yong^{1,*}

1. Jereh Environmental Protection Technology Co. Ltd., Yantai 264000, China

2. PetroChina Xinjiang Oilfield Branch Company, Kelamayi 834000, China

3. Xinjiang Uygur Autonomous Region Solid Waste Management Centre, Kelamayi 834000, China

*Corresponding author, E-mail: yong.yue@jereh.com

Abstract The mechanism of petroleum hydrocarbon removal in petroleum-contaminated soils is unclear. The self-dependent small-scale experimental device of pyrolysis furnace was used to investigate the petroleum hydrocarbon treatment effects in petroleum-contaminated soils under different conditions. Through adjusting the heating temperature, heating time, initial petroleum content and moisture content, the process of in-situ thermal remediation was simulated. The results showed that the optimum conditions for petroleum hydrocarbon remove were heating temperature of 300 °C and heating time of 4 h for petroleum-contaminated soils with initial petroleum content of 11.3% and initial water content of 20%. The petroleum content of treated soil decreased to 0.7%, which was far below the remediation standard value of 2% in the pollution control requirements for comprehensive utilization of oil and gas field oily sludge (DB 65/T 3998-2017). The removal rate of petroleum hydrocarbon in soils reached 93.8%. At the water content of 20% in petroleum-contaminated soils and optimum treatment conditions, with the increase of initial oil content, the oil content of solid phase after thermal desorption increases gradually, while the petroleum hydrocarbon removal rate almost unchanged. Moderate water content was benefit to the remediation, and the optimum initial moisture content was 10%~20%.

Keywords petroleum-contaminated soil; thermal remediation; heating temperature; heating time; water content; petroleum content