



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202301064 中图分类号 X742 文献标识码 A

刘杉, 葛传芹, 沈诣, 等. 制粒及工艺优化对工程化阴燃治理含油污泥的影响[J]. 环境工程学报, 2023, 17(6): 1978-1986. [LIU Shan, GE Chuanqin, SHEN Yi, et al. Effect of granulation and process optimization on the treatment of oil sludge by engineered smoldering[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(6): 1978-1986.]

# 制粒及工艺优化对工程化阴燃治理含油污泥的影响

刘杉, 葛传芹, 沈诣, 朱水清, 单晖峰<sup>✉</sup>

江苏大地益源环境修复有限公司, 南京 210012

**摘要** 针对含油污泥含水率高、含油率高、渗透性差导致应用工程化阴燃处置技术的适应性差、处置能力低等问题, 采用制粒手段强化含油污泥的预处理过程, 并对其阴燃点燃及推进方式加以调整, 旨在筛选出较优的预处理和阴燃工艺参数。通过小试实验探索了含水率对油泥制粒的影响, 以及含水率、制粒状态、辅助燃料、阴燃启动方式和推进方向对阴燃的影响。结果表明, 某含油废水治理产生的含油污泥可采用对辊挤出制粒的方式进行预处理, 含水率宜控制在 33%~35%; 油泥经脱水或制粒均可增强阴燃稳健性; 含水率较高时添加质量分数 5% 的稻壳, 点燃耗时可缩短约 40%, 阴燃蔓延速度提升约 70%; 采用木炭间接启动阴燃也可显著缩短点燃耗时。本研究结果可为工程化阴燃治理油泥的工艺和设备设计提供参考。

**关键词** 含油污泥; 预处理; 制粒; 工程化阴燃

油泥主要产于油气田勘探、开发、储运过程以及炼化企业生产储存、污水处理过程中, 主要包括落地油泥、罐底油泥、及炼化“三泥”。我国年产油泥约  $6.45 \times 10^6$  t, 存量规模庞大, 超过  $1.59 \times 10^8$  t<sup>[1]</sup>。油泥若不经处理就直接外排, 不仅会占用土地资源, 严重影响土壤的渗透性, 威胁生态安全, 油泥中含有的大量重金属和芳烃类剧毒物质, 还会对水、土壤和空气造成污染。因此, 对含油污泥进行合理处置问题亟待解决。

目前, 已开发的含油污泥处理、处置方法有焚烧法、萃取法、生物处理法、调制-机械分离法、热解法、蒸汽喷射法、化学热洗、电化学处理法、固化法等<sup>[2-9]</sup>。以调质-分离、化学热洗、热解法、焚烧法等为代表的多种处理方法, 均已应用于我国油气田及炼厂企业。其中, 调质-分离法工艺简单适合各类油泥, 但缺少标准化脱水机械设备和药剂组合系列, 处理规模小; 化学热洗法适用沙石为主的含油固废, 化学药剂的筛选和使用是关键, 反应条件要求较高, 操作复杂; 热解法适合含水率低、含油率适中的油泥, 对工艺、设备和安全要求较高; 焚烧法适用各类含油污泥, 是较彻底的治理技术, 但耗能大, 投资和运行费用高, 易产生二次污染。对于含油率在 0.1%~3% 的细粒含油污泥亟需一种绿色节能、效果彻底的处置技术。

工程化阴燃技术(此后简称阴燃)基于阴燃机理, 是一个以高效、可控、安全、节能的形式回

收稿日期: 2022-01-17; 录用日期: 2023-04-21

基金项目: 南京市六合区科技计划资助项目(LHCG2021002)

第一作者: 刘杉(1991—), 男, 硕士, 工程师, liushan@jsddb.com; ✉通信作者: 单晖峰(1973—), 男, 博士, 正高级工程师, shanhf@jsddb.com

收利用能量的自持燃烧过程<sup>[10]</sup>，主要用于治理低挥发性有机物或非水相液体 (NAPL) 污染的惰性多孔介质，包括但不限于土壤及各类油泥。阴燃技术最早于 2006 年由爱丁堡大学董事会提出<sup>[11]</sup>；2009 年 SWITZER 等<sup>[12]</sup>对惰性介质中煤焦油渣的阴燃修复研究；2011 年 PIRONI 等<sup>[13]</sup>对粗砂中 NAPL 阴燃处理效率的主要影响因素进行了研究，并得出了阴燃能够处理的污染物浓度、含水率范围等；2015 年 SCHOLLES 等<sup>[14]</sup>提出了第一个中试规模的原位阴燃实验装置，并成功应用于美国新泽西州煤焦油污染场地的修复；2017 年 YERMÁN 等<sup>[15]</sup>将阴燃成功应用于高含水率有机废物。2020 年成明锴等<sup>[16]</sup>对市政污泥开展了阴燃实验；同年，DUCHESNE 等<sup>[17]</sup>将阴燃应用于全氟烷基和多氟烷基物质 (PFASs) 污染的土壤。2021 年 GERHARD 等<sup>[18]</sup>对污水污泥混砂自持阴燃的实验规模进行扩大。2022 年葛传芹等<sup>[19]</sup>对石油烃重度污染土壤及油泥进行阴燃中试；同年，雷大鹏等<sup>[20]</sup>对国内首个阴燃技术治理含油污泥的示范工程进行了总结，并对装备和工艺方案、阴燃修复效果、经济指标等进行了分析。阴燃技术的研发过程中，还有诸多学者和机构对阴燃的影响因素进行实验、分析、模拟、总结。例如，SOLINGER 等<sup>[21]</sup>、GAN 等<sup>[22]</sup>、WYN 等<sup>[23]</sup>，这些研究成果均对阴燃用于油泥处置提供了重要的参考。但在上述研究中，阴燃料床多为渗透性较好的砂质污染土或有机质与砾状惰性介质混合物，而实际工程中面对种类繁多、含水率高、渗透性差的油泥，处置难度增加，混砂制备多孔料床又会导致修复效率急剧下降，其他阴燃预处理手段鲜有报道。因此，本研究针对渗透性差的低含油物料进行渗透性改善、热值提升(已申请专利<sup>[24-25]</sup>)及相应阴燃工艺的优化探索，包括油泥制粒、辅助燃料添加、加热方式、在反应器里的阴燃蔓延方向等，以便提升此类物料阴燃的稳健性，缩短阴燃启动耗时，提升阴燃蔓延速度，以期达到优化阴燃工艺的目的，对阴燃工程化的工艺选择提供重要参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验原料

实验选择某焦化厂搬迁场地存量含油污泥(以下简称油泥)为实验原料，油泥由遗留的含油废水“化学调质+板框压滤”工艺产生，经陈放外表已呈棕黑色且有一定硬度。实验中选择稻壳作为辅助燃料，选用速燃果木炭(以下简称木炭)作为优化加热启动阴燃的辅助措施/材料。其特性分别见表 1 所示。

表 1 油泥、稻壳、木炭特性

Table 1 Characteristics of sample sludge, rice husk and charcoal

供试物料	形状	含水率/%	TPH质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )	矿物油/(mg·kg <sup>-1</sup> )	低位热值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
油泥	粘结块状	36.7	8 625	2 198	433
稻壳	2 mm梭子壳状	0	—	—	16 000
木炭	10 cm×10 cm方块蜂窝状	0	—	—	26 000

### 1.2 实验装置

实验小试装置由预处理部分(对辊制粒机 2GL4035, 河南郑矿机器有限公司, 功率 7.5 kW)、供气设备、阴燃小试系统(自主研发, 内径 159 mm, 最高温度为 1 300 °C, 沿竖直方向设有 15 支间距 30 mm 的热电偶, 电加热启动功率 2.7 kW, 可装载木炭启动, 阴燃方向可调整)、尾气处理系统以及电控系统 5 部分组成。阴燃小试系统和尾气处理系统见图 1。

### 1.3 实验设计

将初始含水率 36.7% 的油泥, 部分晾晒风干至含水率 33.0%, 部分直接添加质量分数 5% 的稻壳使含水率降低至 33.9%, 然后将含水率为 33.0%、33.9%、36.7% 的试样分别开展对辊制粒实验。

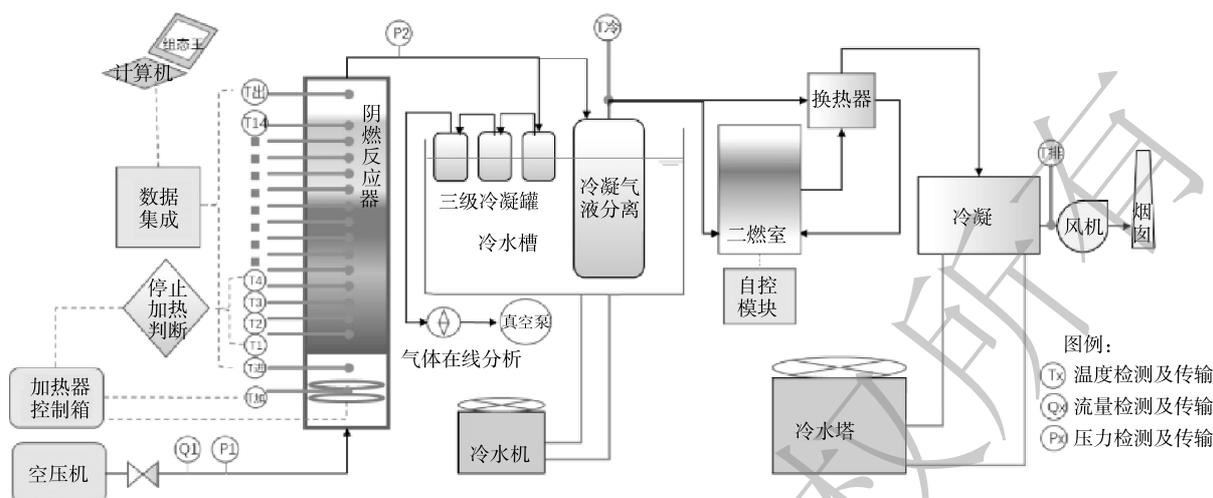


图1 阴燃小试及尾气系统工艺流程图

Fig. 1 Process diagram of lab-scale smoldering and off-gas treatment systems

完成预处理实验后,对含水率33.0%的未制粒物料和不同含水率的制粒产品分别开展正向阴燃实验,对含水率33.0%的制粒产品还进行反向阴燃实验。正向阴燃时,底部电加热启动并进风,顶部抽风,阴燃前锋自下而上蔓延;反向阴燃时,已燃木炭置于顶部加热,底部抽风,阴燃前锋自上而下蔓延。阴燃开始启动后,待物料第2~3层热电偶升温超过加热温度可停止外部供热,阴燃进程中微调达西空气流量,使得达到最佳阴燃效果。具体实验设计见表2。

表2 小试实验设计

Table 2 Experimental design of lab scale study

编号	物料	辅助燃料	制粒	预处理后含水率/%	阴燃方向	阴燃启动方式	点燃耗时*	启动阶段达西空气流量**/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	最大达西空气流量/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
S-1	油泥	无	否	33.0	正向	电加热	根据升温曲线调整	0.94	2.83
S-2	油泥	无	是	33.0	正向	电加热		0.94	3.77
S-3	油泥	无	是	36.7	正向	电加热		0.94	2.36
S-4	油泥	5%稻壳	是	33.9	正向	电加热		0.94	3.77
S-5	油泥	无	是	33.0	反向	木炭		2.83	3.77

注: \*点燃耗时是指从开始加热到停止外部供热所需的时长; \*\*达西空气流量是指单位时间垂直于气流方向单位横截面积上的空气体积(单位:  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )。

#### 1.4 分析方法

1) 含水率分析。油泥制粒前,采用快速含水率测定仪(LGD-805A, 昆山鹭工精密仪器有限公司)进行含水率检测。

2) 压力、流量、温度监测。阴燃小试系统的进风管路上设置在线流量计 $Q_1$ 监测进风量,进风管路上分别设置在线压力传感器 $P_1$ 、 $P_2$ 用于监测进风压力、排气压力,加热进风底座上设置2个热电偶 $T_{加}$ 、 $T_{进}$ 用于监测加热室温度和反应器进风温度,阴燃反应室自下而上设置15个热电偶, $T_1\sim T_{14}$ 和 $T_{出}$ 分别用于监测相应空间点位的温度,所有数据均上传到电脑端进行实时显示并记录。

4) 固体样品分析。物料反应前采样送第三方实验室检测总石油烃、矿物油质量分数和热值,分别依据《非卤代有机化合物的气相色谱分析》(USEPA 8015C-2007)<sup>[26]</sup>、《城市污水处理厂污泥

检验方法》(CJ/T 221-2005)<sup>[27]</sup>、《生活垃圾采样和分析方法》(CJ/T 313-2009)<sup>[28]</sup>。

5) 阴燃燃烧锋面蔓延速度的测定。阴燃的燃烧锋面蔓延在空间上是三维的, 本研究主要探究反应器内竖直轴线上的燃烧锋面的蔓延速度, 计算方法如式(1)所示。

$$V_f = \frac{L_t}{T_t} \quad (1)$$

式中:  $V_f$  为锋面竖直蔓延速度,  $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $L_t$  为竖直相邻热电偶间距,  $\text{cm}$ ;  $T_t$  为竖直相邻热电偶达到温度峰值的时间差,  $\text{min}$ 。

6) 液相“墙”<sup>[29]</sup>移动速度的测定。在阴燃燃烧锋面前方水汽遇冷凝结形成的液相“墙”, 温度曲线演替是规律的, 其移动速度可等同于阴燃燃烧锋面的移动速度。

7) 液相“墙”与阴燃燃烧锋面间距的测定。温度曲线即将陡升前的约  $90\text{ }^\circ\text{C}$  水平段视为液相“墙”最先停留位置, 温度曲线的峰顶视为阴燃燃烧锋面所在位置, 液相“墙”与阴燃燃烧锋面间距计算方法如式(2)所示。

$$L_{w,f} = V_w \cdot T_{w,f} = V_f \cdot T_{w,f} \quad (2)$$

式中:  $L_{w,f}$  为液相“墙”与阴燃燃烧锋面间距,  $\text{cm}$ ;  $V_w$  为液相“墙”移动速度,  $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $T_{w,f}$  为温度曲线自约  $90\text{ }^\circ\text{C}$  陡升至峰顶的时间差,  $\text{min}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 制粒结果与讨论

对辊制粒机适用于油泥制粒, 含水率为 33.0%、33.9%、36.7% 的试样均可制备出长度 15~20 mm, 直径 12~13 mm 的短棒状颗粒, 含水率控制在 33~35% 较为适宜。含水率 36.7% 的试样制备的颗粒容易粘连, 自身落下强度差, 堆积承压容易变形; 含水率 33.0% 的试样初次挤压制粒时, 颗粒自身裂隙较多, 2 次重复制粒可获得落下强度高、粒度均匀的颗粒; 含水率 33.9% 的试样进行对辊制粒时, 可以产出夹带稻壳、具有一定落下强度的短棒状颗粒, 稻壳分布均匀, 颗粒可承压堆积成疏松多孔的料床, 含水率 33.9% 的油泥试样制备的颗粒见图 2。



图 2 含水率为 33.9% 的油泥颗粒

Fig. 2 Sludge granules with 33.9% water content

### 2.2 阴燃结果与讨论

采用油泥试样开展的阴燃实验结果汇总于表 3。

表 3 阴燃小试结果汇总表  
Table 3 Smoldering results of lab study

编号	物料	辅助燃料	制粒	预处理后含水率/%	阴燃方向	阴燃启动方式	点燃耗时/min	启动阶段达西空气通量/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	最大达西空气通量/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	阴燃蔓延速度/ $(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	峰值温度/ $^\circ\text{C}$	修复效果
S-1	油泥	无	否	33.0	正向	电加热	136	0.94	2.83	0.375	800	一般
S-2	油泥	无	是	33.0	正向	电加热	67	0.94	3.77	0.44	750	很好
S-3	油泥	无	是	36.7	正向	电加热	246	0.94	2.36	0.375	570	一般
S-4	油泥	5%稻壳	是	33.9	正向	电加热	40	0.94	3.77	0.75	815	很好
S-5	油泥	无	是	33.0	反向	木炭	42	2.83	3.77	0.7	830	很好

1) 制粒对阴燃过程的影响。含水率 33.0% 的油泥制粒前后其 S-1、S-2 实验的温度曲线分别见图 3、图 4。对比 2 图可知, 油泥制粒后阴燃燃烧锋面蔓延速度更快, 锋面蔓延更稳健。

S-1、S-2 阴燃燃烧锋面的蔓延速度为  $0.375$ 、 $0.44 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ , 油泥制粒后阴燃蔓延速度略快于未

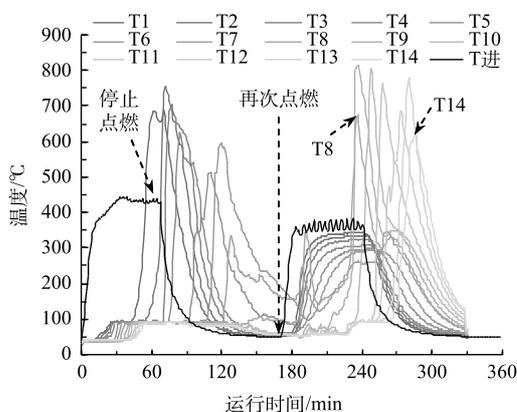


图 3 S-1 温度曲线随时间变化关系

Fig. 3 Temperature profiles of S-1 versus time

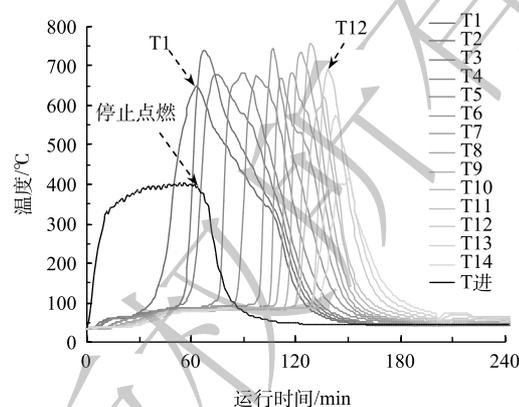


图 4 S-2 温度曲线随时间变化关系

Fig. 4 Temperature profiles of S-2 versus time

制粒; S-1 与 S-2 实验最大的区别在于, 图 3 中温度曲线演替发生了中断, 而制粒后阴燃燃烧锋面蔓延更稳健。可能的原因是制粒后粒度组成更均匀, 料层的透气性更好, 流体形成局部窜流或短路的概率更小, 料层的传热和传质能力更均一, 从而使阴燃推进更稳健, S-2 实验阴燃后物料图片见图 5。SOLINGER 等<sup>[21]</sup>也曾提出高度异质性堆积土壤的阴燃窜流可能非常显著, 对污染物的去除产生负面影响, 建议谨慎对待料床的非均一性。

2) 含水率对阴燃过程的影响。含水率为 33.0%、36.7% 的油泥颗粒的阴燃过程参数见表 3 中 S-2、S-3, S-3 温度曲线见图 6。与图 4 对比可知, 含水率对阴燃蔓延速度影响较小, 对阴燃稳健性和阴燃峰值温度有较大影响。

从图 6 可以看出, 阴燃峰值温度仅  $570 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 温度曲线未能呈现出规律演替, 即使维持外部供热, 温度曲线的演替也较难; 根据  $T_2 \sim T_4$  演替曲线, 计算出阴燃燃烧锋面的蔓延速度约为  $0.375 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。本次油泥试样的 TPH ( $8 \text{ 625 mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 质量分数较低, 含水率为

36.7% 时, 低位热值仅  $433 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。油泥阴燃所产生的热能可能无法维持系统升温 and 热损失, 从而难以维持阴燃自持推进, 阴燃的稳健性对含水率的波动表现的十分敏感。因此, 高含水率的物料只有在足够燃料的情况下才可以维持稳健的阴燃, 这与 YERMÁN 等<sup>[15]</sup>的研究结果是一致的。



图 5 S-2 阴燃后物料

Fig. 5 Material of S-2 after smoldering

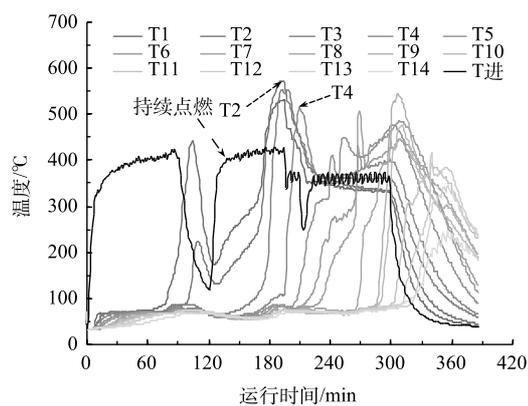


图 6 S-3 温度曲线随时间变化关系

Fig. 6 Temperature profiles of S-3 versus time

3) 辅助燃料对阴燃过程的影响。直接添加 5% 稻壳的油泥颗粒的阴燃实验 S-4 温度曲线见 图 7。与 图 6 对比可以看出, 无法自持阴燃的油泥 (含水率 36.7%) 中直接补充辅助燃料表现出良好的阴燃特性。

添加 5% 稻壳的油泥颗粒仅需电加热 40 min 即可启动点燃, 阴燃峰值温度为 815 °C, 阴燃燃烧锋面的蔓延速度为 0.75 cm·min<sup>-1</sup>; 相较 S-2 实验, 点燃耗时缩短了 27 min (40%), 蔓延速度提升了 0.31 cm·min<sup>-1</sup> (70%)。葛传芹等<sup>[19]</sup>、SALMAN 等<sup>[30]</sup>、FENG 等<sup>[31]</sup> 等研究向未能自持阴燃的物料中添加植物油或锯末, 也曾获得较好的阴燃实验结果。

稻壳自身具有 18%~20% 的灰分 (90% 以上为二氧化硅), 燃烧后可维持自身梭子壳形状; 稻壳的点燃温度仅 340 °C, 可显著降低物料整体的点燃温度, 便于阴燃启动; 稻壳还具备约 16 MJ·kg<sup>-1</sup> 的低位热值, 按添加 5% 的稻壳计算, 整个油泥的热值提升了 0.76 MJ·kg<sup>-1</sup>, 有助于阴燃推进。

稻壳的价格按 600 元·t<sup>-1</sup> 计算, 每吨油泥添加 5% 稻壳的成本为 30 元。煤、油等高热值物料也可作为辅助燃料, 电能持续供热也能起到同样效果。按照油泥提升 1 MJ·kg<sup>-1</sup> 热值计算, 每吨油泥所需不同燃料或能源的成本计算如 表 4 所示。对比可知, 稻壳是一种性价比较高的辅助燃料。

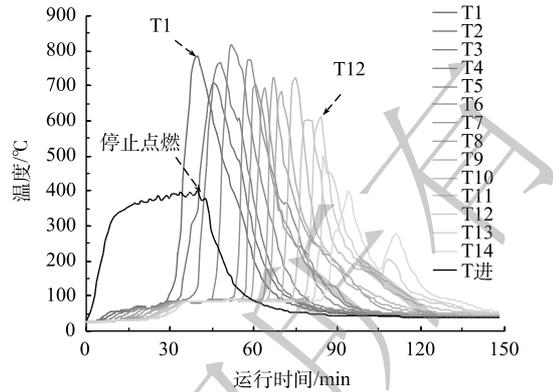


图 7 S-4 温度曲线随时间变化关系  
Fig. 7 Temperature profiles of S-4 versus time

表 4 不同燃料或能源的成本表

Table 4 Cost Schedule of different fuels or energies

燃料种类	平均低位发热量	单价	能量转化系数*	每吨油泥提升 1MJ·kg <sup>-1</sup> 热值的成本
稻壳	16 MJ·kg <sup>-1</sup>	600 元·t <sup>-1</sup>	1	38 元
动力煤	26 MJ·kg <sup>-1</sup>	1 500 元·t <sup>-1</sup>	1	58 元
原油	42 MJ·kg <sup>-1</sup>	4 400 元·t <sup>-1</sup>	1	105 元
地沟油	38 MJ·kg <sup>-1</sup>	3 250 元·t <sup>-1</sup>	1	86 元
电 (当量)	0.86 MJ·(kW·h) <sup>-1</sup>	0.6 元·(kW·h) <sup>-1</sup>	0.8	872 元

注: \*电加热由电能转化为热能的能量转化系数按 0.8 计算, 其他燃料由化学能转化为热能, 发热损失忽略不计, 能量转化系数按 1 计算。

4) 阴燃启动方式及推进方向对阴燃过程的影响。将已点燃的木炭置于料床顶部, 以热传导方式为主对物料实施加热, 底部抽风, 阴燃自上而下推进的 S-5 实验温度曲线见 图 8。从 图 8 可以看出, 已燃木炭可短时间内顺利启动阴燃, 阴燃自上而下推进表现出更快的蔓延速度。

S-5 实验中木炭为料床供热点燃耗时为 42 min, 而 S-2 实验中电加热点燃耗时为 67 min。可见, 木炭点燃可明显缩短阴燃启动时间。电加热的传热形式以热对流为主, 而已燃木炭直接与油泥接触, 加热方式以热传导为主, 结果显示这有助于加速阴燃启动; 同时, 木炭顺利启动阴燃可能还归因于具有充足的接触截面<sup>[32]</sup> (物料横截面积 176 cm<sup>2</sup>, 木炭横截面积 100 cm<sup>2</sup>)、供热时长 (可持续供热时间大于 1 h) 和能量供应<sup>[33]</sup>。S-5 实验中实际消耗木炭约 100 g, 为料床提供约 2 600 kJ 能量, S-2 实验中电加热功率为 2.7 kw, 为料床提供约 2 100 kJ 能量, 前者提供的能量更加充足。从成本角度分析, 实验用木炭价格为 9 元·kg<sup>-1</sup>, 木炭点燃约 0.9 元·次<sup>-1</sup>, 电价为 0.6 元·(kW·h)<sup>-1</sup>, 电加

热点燃约  $1.8 \text{元} \cdot \text{次}^{-1}$ ，木炭点燃仍具明显成本优势。

经过图形解析可知，S-5 实验的阴燃燃烧锋面蔓延速度为  $0.7 \text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，明显快于电加热的 S-2 实验 ( $0.44 \text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ )。这可能是由于木炭点燃初期，为促进其燃烧放热，提高了点燃时的达西空气通量，此时高风量强化了料床的热对流传热从而加快了阴燃燃烧锋面的蔓延速度<sup>[13,21,34]</sup>；同时，自上而下的阴燃方式对蔓延速度也可能起到促进作用。自下而上阴燃时，阴燃燃烧锋面与液相“墙”的间距为  $5.3 \text{cm}$ ，自上而下阴燃时为  $8.3 \text{cm}$ 。可见，阴燃自上而下推进时阴燃燃烧锋面与液相“墙”的间距更大(如示意图 9 所示)。这可能是因为，液相“墙”的移动无需再克服重力作用所致。阴燃出口温度数据同时表明，在接近阴燃末尾时，自上而下阴燃的尾气温度(约  $400 \text{℃}$ )显著高于自下而上阴燃的尾气温度(约  $190 \text{℃}$ )，这间接说明，自上而下阴燃更有利于液相的迁移和提前蒸发。综合可知，自上而下阴燃对燃烧锋面蔓延是有利的。但从节能的角度考虑，高温的尾气代表了阴燃体系中逃逸了更多能量，建议对尾气考虑余热回收利用。

### 3 结论

- 1) 含油污泥阴燃治理前可通过对辊制粒的方式制成颗粒状物料，含水率宜控制在  $33\% \sim 35\%$ 。
- 2) 对于热值较低的油泥，通过制粒改善渗透性和均质性对其阴燃的稳健性有利，对于含水率高导致无法自持阴燃的油泥，添加质量分数  $5\%$  的稻壳可有效改善阴燃的稳健性，可缩短点燃耗时  $40\%$ ，阴燃蔓延速度可提高  $70\%$ ，稻壳作为辅助燃料经济可行。
- 3) 使用点燃后温度可高达  $1300 \text{℃}$  的木炭作为加热介质更适用于油泥颗粒的加热点燃、阴燃启动，且具有明显的成本优势。自上而下的反向阴燃过程中，阴燃燃烧锋面与液相“墙”的间距更大，阴燃蔓延速度更快。

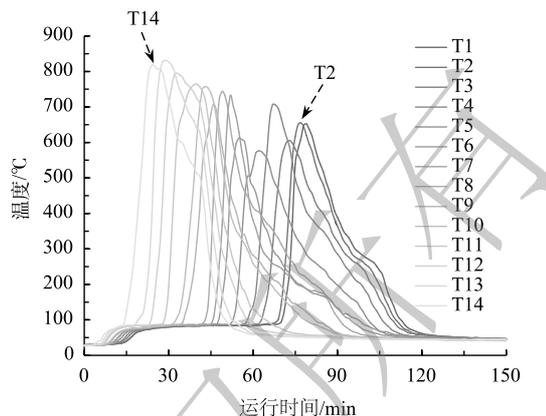


图 8 S-5 温度曲线随时间变化关系

Fig. 8 Temperature profiles of S-5 versus time

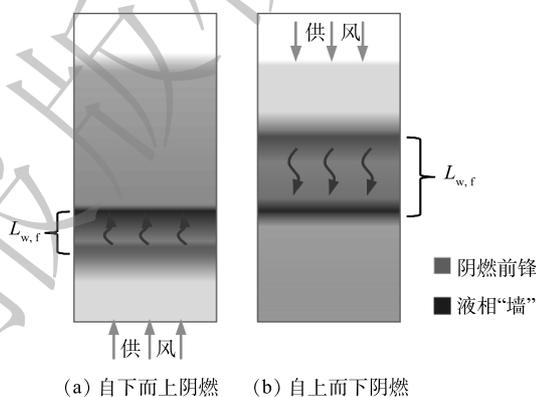


图 9 液相迁移示意图

Fig. 9 Schematic Diagram of Liquid Phase Migration

## 参考文献

- [1] 梁宏宝, 张全娟, 陈洪涛, 等. 含油污泥联合处理技术的应用现状与展望[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(1): 118-125.
- [2] 王浩英, 李铭, 王小红. 炼油厂“三泥”减量化处理的技术措施研究[J]. 给水排水, 2019, 45(12): 77-80.
- [3] 李彦林, 任恒昌, 龚亚军, 等. 炼化“三泥”在煤粉锅炉掺烧技术的应用研究[J]. 石油学报, 2010, 10(增): 71-76.
- [4] 张爱华, 周德峰, 卢运良. 热萃取技术在油泥处理中的应用[J]. 石油化工安全环保技术, 2010, 26(5): 56-59.
- [5] 李忠卫, 李朝廷. 含油污泥处理技术方案[J]. 油气田环境保护, 2020, 30(1): 40-43.
- [6] 王占生, 李春晓, 杨忠平, 等. 炼化“三泥”无害化处理技术及应用[J]. 石油科技论坛, 2011, 30(4): 57-58.
- [7] 肖立光, 龚朝兵, 李海华, 等. 炼化污水场三泥减量化处理的探讨[J]. 中外能源, 2017, 22(9): 85-90.
- [8] 王万福, 何银花, 谢陈鑫, 等. 含油污泥资源化技术综述[J]. 油气田环境保护, 2006, 16(3): 47-49.
- [9] 孙景欣, 刘晓艳, 毛国成, 等. 油田含油污泥处理技术研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2006, 24(6): 18-22.
- [10] TORERO J L, GERHARD J I, MARTINS M F, et al. Process defining smoldering combustion: Integrated review and synthesis[J]. *Process in Energy and Combustion Science*, 2020, 81: 100869.
- [11] PAOLO P, GUILLERMO R, CHRISTINE S, et al. Method and Apparatus for Remediating Contaminated Land: ZL200680052554. X[P]. 2006-12-08.
- [12] PIRONI P, SWITZER C, REIN G, et al. Small-scale forward smoldering experiments for remediation of coal tar in inert media[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 1957-1964.
- [13] PIRONI P, SWITZER C, REIN G. Self-sustaining smoldering combustion for NAPL remediation: laboratory evaluation of process sensitivity to key parameters[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(7): 2980-2986.
- [14] SCHOLES G C, GERHARD J I, GRANT G P, et al. Smoldering remediation of coal-tar-contaminated soil: pilot field tests of STAR[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(24): 14334-14342.
- [15] YERMÁN L, WALL H, TORERO J L. Experimental investigation on the destruction rates of organic waste with high moisture content by means of self-sustained smoldering combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 4419-4426.
- [16] 成明锴, 李琛, 付建红, 等. 污泥阴燃过程及残渣特性分析研究[J]. 清洁煤技术, 2020, 26(5): 166-172.
- [17] DUCHESNE A L, BROWN J K, PATCH D J, et al. Remediation of PFAS-contaminated soil and granular activated carbon by smoldering combustion[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(19): 12631-12640.
- [18] RASHWAN T L, FOURNIE T, TORERO J L, et al. Scaling up self-sustained smoldering of sewage sludge for waste-to-energy[J]. *Waste Management*, 2021, 135: 298-308.
- [19] 葛传芹, 雷大鹏, 刘杉, 等. 采用异位阴燃修复技术处理含油固废中试实验[J]. 环境工程学报, 2022, 16(2): 1-11.
- [20] 雷大鹏, 单晖峰, 杨登, 等. 工程化阴燃技术治理含油污泥工程示范[J]. 环境工程, 2022, 40(10): 150-155.
- [21] SOLINGER R, GRANT G P, SCHOLES G C, et al. STARx hotpad for smoldering treatment of waste oil sludge: Proof of concept and sensitivity to key design parameters[J]. *Waste Management & Research*, 2020, 38(5): 554-566.
- [22] GAN Z W, ZHAO C, LI Y Z, et al. Experimental investigation on smoldering combustion for oil sludge treatment: Influence of key parameters and product analysis[J]. *Fuel*, 2022, 316: 123354.
- [23] WYN H K, KONAROVA M, BELTRAMINI J, et al. Self-sustaining smoldering combustion of waste: A review on applications, key parameters and potential resource recovery[J]. *Fuel Processing Technology*, 2020, 205: 106425.
- [24] 刘杉, 葛传芹, 袁高洋, 等. 一种改善高温缺氧反应的预处理方法及装置: 202110876670. X [P]. 2021-07-31.
- [25] 刘杉, 郑开森, 葛传芹, 等. 自成本多孔料床的油泥颗粒制备方法及装置: 202210851956.7 [P]. 2022-07-20.
- [26] United States Environmental Protection Agency. Nonhalogenated Organics Using GC/FID: USEPA 8015C-2007[S].
- [27] 中华人民共和国建设部. 城市污水处理厂污水检验方法: CJ/T 221-2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 生活垃圾采样和分析方法: CJ/T 313-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [29] KINSMAN L, TORERO J L, GERHARD J I. Organic liquid mobility induced by smoldering remediation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 325: 101-112.
- [30] SALMAN M, GERHARD J I, MAJOR D W, et al. Remediation of trichloroethylene-contaminated soils by STAR technology using vegetable oil smoldering[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 285: 346-355.
- [31] FENG C, HUANG J C, YANG C H, et al. Smoldering combustion of sewage sludge: Volumetric scale-up, product characterization, and economic analysis[J]. *Fire*, 2021, 305: 121485.
- [32] LIN S R, WANG S Y, HUANG X Y. Modeling smoldering ignition by an irradiation spot[J]. *Fire Safety Journal*, 2022, 134: 103708.
- [33] URBAN J L, FERNANDEZ-PELLO A C. Encyclopedia of wildfires and wildland-urban interface (WUI) fires[M]. New York: Springer International Publishing AG, 2018: 1-9.
- [34] RASHWAN T L, GERHARD J I, GRANT G P. Application of self-sustaining smoldering combustion for the destruction of wastewater biosolids[J]. *Waste Management*, 2016, 50: 201-212.

(责任编辑: 金曙光)

## Effect of granulation and process optimization on the treatment of oil sludge by engineered smoldering

LIU Shan, GE Chuanqin, SHEN Yi, ZHU Shuiqing, SHAN Huifeng\*

Jiangsu DDBS Environmental Remediation Co., Ltd, Nanjing 210012, China

\*Corresponding author, E-mail: shanhf@jsddb.com

**Abstract** Aiming at the issues of poor applicability and treatment capacity of engineered smoldering caused by high water content, high oil content and low permeability of oil sludge, granulation was adopted to strengthen its pretreatment process, and its smoldering ignition and propulsion mode were adjusted in order to screen out better pretreatment and smoldering technical parameters. The influence of water content on sludge granulation was explored through lab-scale experiments, the water content, granulation state, auxiliary fuel, and smoldering initiation mode were explored as well. The results demonstrated that the oil sludge from a oily wastewater treatment process could be pretreated by roller extrusion granulation, and the water content should be controlled within 33%~35%; sludge dehydration or granulation could enhance the smoldering stability; ignition time could be shortened by about 40%, and the smoldering propagation velocity could be increased by about 70% after adding rice husk with a mass fraction of 5% into high moisture sludge, indirect initiation of smoldering using charcoal could also significantly shorten the ignition time. The experimental results provide guiding significance for the process and equipment design of engineering smoldering treatment of oil sludge.

**Keywords** oil sludge; pretreatment; granulation; engineered smoldering