



文章栏目：土壤热修复技术应用专题

DOI 10.12030/j.cjee.201906011

中图分类号 X53

文献标识码 A

许优, 顾海林, 詹明秀, 等. 有机污染土壤异位直接热脱附装置节能降耗方案[J]. 环境工程学报, 2019, 13(9): 2074-2082.

XU You, GU Hailin, ZHAN Mingxiu, et al. Energy-saving and consumption-reducing scheme for direct thermal desorption of organic contaminated soil[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(9): 2074-2082.

## 有机污染土壤异位直接热脱附装置节能降耗方案

许优<sup>1</sup>, 顾海林<sup>1,\*</sup>, 詹明秀<sup>1</sup>, 籍龙杰<sup>2,3,4</sup>, 王进卿<sup>1</sup>, 焦文涛<sup>4</sup>, 池作和<sup>1</sup>

1. 中国计量大学计量测试工程学院, 杭州 310018

2. 北京建工环境修复股份有限公司, 北京 100015

3. 污染场地安全修复技术国家工程实验室, 北京 100015

4. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域国家重点实验室, 北京 100085

第一作者: 许优(1995—), 男, 硕士研究生。研究方向: 燃气燃烧器。E-mail: 173232409@qq.com

\*通信作者: 顾海林(1990—), 男, 讲师。研究方向: 流动及传热传质。E-mail: hlgu@cjlu.edu.cn

**摘要** 以异位直接热脱附技术的原理、适用范围、工艺流程、优缺点等为基础, 建立了输入、输出能量平衡关系式并进行了热平衡计算; 针对该工艺能耗过高的问题, 分析了系统各部分能耗, 提出了节能降耗方案。通过烟气热回用装置, 将二燃室后高温烟气余热能量经循环管道输送给土壤预干燥装置, 将有机污染土壤含水率降低, 从而减少系统总能耗。结果表明: 经过热力计算, 土壤水分预干燥量越大, 系统节能效果越好; 烟气余热足够用于土壤预干燥减少 17% 左右土壤水分的要求。通过土壤预干燥装置将土壤水分从 20% 降低到 15%, 可使直接热脱附装置降低能耗 20% 以上。

**关键词** 土壤修复; 异位热脱附技术; 余热回用; 热平衡计算

随着“退城进园”和“退二进三”政策的逐步落实, 大批污染企业被迫改造或搬迁<sup>[1]</sup>。高污染工厂旧址土壤中遗留的有机污染物质, 会造成环境污染, 危害人体健康, 限制城市发展。在现有各种污染土壤修复技术中, 热脱附技术由于其具有修复彻底、快速高效、不引入新的污染物等优势而发展较迅速。该技术早在 30 年前就开始在发达国家应用, 但近年来才刚刚引入国内<sup>[2]</sup>。根据对美国超级基金 1 246 个项目进行的统计, 在发达国家, 污染土壤异位修复技术占比为 48%<sup>[3]</sup>。污染土壤热脱附在异位修复技术中占比 82%。从 2009 年异位热脱附技术引入到国内以来, 相关专利逐年上升, 并已在“十二五”“863”计划相关课题中得到应用<sup>[4]</sup>。异位热脱附技术在我国的应用已初具规模。

土壤异位热脱附技术发展至今, 主要的研发方向是修复更多的污染物类型, 以及不断改进尾气处理装置, 减少有害气体排放<sup>[5]</sup>。国外由于能源较为便宜, 所以在节能降耗方面的研究很少, 对于整个系统能耗的热平衡和高温烟气余热利用的装置研究也不够, 导致能耗较高。而我国天然气价格相比国外较高, 亟需研究和提出直接热脱附装备节能降耗方案<sup>[6-7]</sup>。针对该问题, 本研究通过对热脱附系统热平衡进行计算, 梳理了每部分设备的能耗情况, 找出了能耗较大且具有余热回收

收稿日期: 2019-06-03; 录用日期: 2019-07-12

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC1802102)

利用潜力的区域，有针对性地提出了热脱附系统节能降耗方案，为直接热脱附节能降耗装置的选择提供参考。

## 1 热脱附技术能耗分析

### 1.1 工艺简介

直接热脱附是火焰与污染土壤直接接触，且适用于挥发性、半挥发性有机污染物的处理方式。直接热脱附处理量大、传热效率高、能耗低，适合于大规模污染场地修复。该技术装置建造成本和运行维护成本低，污染土壤处理能力可达 $5\sim 100\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ ，一般要求水分低于25%。直接热脱附回转窑热脱附过程中产生的尾气温度高、流量大，处理要求相对较高。

直接热脱附回转窑中燃烧产生的高温烟气通过热辐射、热传导和对流换热等方式向污染土壤传递热量，将土壤加热到一定温度，使其中的有机污染物解析分离，析出的污染物气体送入后续废水及尾气处理单元进行后处理。热脱附过程一般分为2个阶段：土壤污染物解析阶段和废气处理阶段<sup>[8]</sup>。

图1为典型直接热脱附装置的工艺流程。污染土壤经过破碎、筛分、调节含水率(拌石灰)、磁选等预处理过程，由传送带输送至回转窑加热单元进行热处理，其中的有机污染物经加热后从土壤中挥发和分离。高温洁净土壤从回转窑出口排出，含有机污染物的烟气进入旋风除尘器。旋风除尘器的作用是去除烟气中携带的粉尘，以保证管道设备正常运行。除尘后的烟气进入二燃室，在近 $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温下，停留2 s以上。此过程可将烟气中的绝大多数有机污染物燃尽。急冷室将燃烧后的高温尾气温度迅速降低至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，以避免二燃室后高温尾气在缓慢冷却后重新生成二恶英等有毒物质<sup>[9]</sup>。急冷室排出的尾气经除尘装置和洗气装置净化达标后最终排入大气<sup>[10]</sup>。



图1 典型直接热脱附工艺流程

Fig. 1 Typical direct thermal desorption process

### 1.2 能耗现状及节能建议

现有工艺中能源浪费严重，故须针对系统各装置能耗进行分析。污染土壤所含水分被加热至 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上所吸收的能量是不必要的，可通过土壤预干燥减少土壤含水量来减少这部分能耗。土壤热脱附完成后，高温洁净土壤带走的热量理论上可以进行回收利用，但实际回收难度大。洁净土壤运输困难大，温度不够高，因而不利于异地回收；而就地采用热交换器利用余热又不具备经济性。系统散热损耗是不可避免的能源浪费。近 $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温烟气在急冷塔中，降温到 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的冷却过程中消耗大量热量，这部分热量可以通过烟气热回用装置再进行利用。排烟带走的能量可以通过烟气热回用装置利用余热，但因排烟温度很低，不具备回收价值。

利用热平衡公式对各部分系统中可回收利用能量进行定量计算，再对比各部分能量回收的难易程度和成本，最后综合考虑以上因素，可设计出热脱附装置节能降耗方案<sup>[11-12]</sup>。本研究提出了在

原有热脱附装备中加装烟气热回用模块和土壤预干燥模块,通过循环管道将二燃室烟气余热高效输送给土壤预干燥机作为干燥的热源,降低回转窑进口土壤的含水量,从而降低回转窑加热过程中土壤水分升温吸热,达到节能降耗的目的。

## 2 分析方法

通过建立各个单元的输入、输出能量平衡关系式,计算系统中每个单元每个部分的能量,整合系统能耗,分析系统各模块能耗占比。图2是热脱附系统热平衡图,计算时以20℃为基准温度。

在加热单元中,设定进口土壤含水率、土壤温度、出口土壤温度。能量输入端是回转窑消耗天然气热值,能量输出端是烟气焓值<sup>[13]</sup>、水蒸气焓值、出口高温土壤带走的热量。热平衡方程如式(1)所示。

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (1)$$

式中:  $Q_1$  为天然气燃烧热,  $\text{MJ}\cdot\text{t}^{-1}$ ;  $Q_2$  为水分吸热,  $\text{MJ}\cdot\text{t}^{-1}$ ;  $Q_3$  为烟气热焓,  $\text{MJ}\cdot\text{t}^{-1}$ 。  $Q_4$  为回转窑散热,  $\text{MJ}\cdot\text{t}^{-1}$ ;  $Q_5$  为洁净土壤热量,  $\text{MJ}\cdot\text{t}^{-1}$ 。

旋风除尘单元热平衡方程如式(2)所示。

$$Q_2 + Q_3 = Q_6 + Q_7 \quad (2)$$

式中:  $Q_6$  为旋风除尘散热损失,  $\text{MJ}\cdot\text{t}^{-1}$ ;  $Q_7$  为考虑旋风除尘器热损失后烟气和水蒸气的剩余热量,  $\text{MJ}\cdot\text{t}^{-1}$ 。

在二燃室中,高温烟气、过热蒸汽混合物进入燃烧室,经天然气为燃料的燃烧器加热<sup>[14]</sup>,由急冷塔将烟气温度迅速冷却。热平衡方程如式(3)所示。

$$Q_7 + Q_8 = Q_9 + Q_{10} \quad (3)$$

式中:  $Q_8$  为二燃室天然气燃烧热,  $\text{MJ}\cdot\text{t}^{-1}$ ;  $Q_9$  为二燃室热损耗,  $\text{MJ}\cdot\text{t}^{-1}$ ;  $Q_{10}$  为二燃室后烟气和水蒸气总热量,  $\text{MJ}\cdot\text{t}^{-1}$ 。

冷却室热平衡方程如式(4)所示。

$$Q_{10} = Q_{11} + Q_{12} \quad (4)$$

式中:  $Q_{11}$  为急冷损耗,  $\text{MJ}\cdot\text{t}^{-1}$ ;  $Q_{12}$  为排烟损耗,  $\text{MJ}\cdot\text{t}^{-1}$ 。

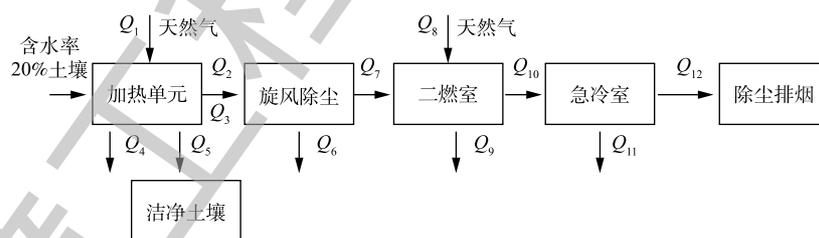


图2 直接热脱附热平衡图

Fig. 2 Balance diagram of direct thermal desorption heat

## 3 节能降耗工艺分析与方案的确定

### 3.1 现有工艺能耗分析

本研究以湘潭某典型土壤直接热脱附工程为例,对热脱附系统进行热平衡计算。选取具有代表性的工况作为计算条件,其中土壤初始含水量为20%,过量空气系数为1.2,系统漏风率为10%,二燃室温度为1000℃<sup>[15-16]</sup>。加热单元、旋风除尘单元、二燃室均考虑散热损失。由于土壤中不同污染物析出所需温度不同,故分别计算了清洁土壤温度为500℃和320℃的2种工况。根据式(1)和式(2),对于现有工艺进行了热平衡计算,求出系统各部分能耗及所占比例,绘制直接

热脱附能量占比计算图(如图3和图4所示)。在洁净土壤加热至500℃工况下,总能耗为3710 MJ·t<sup>-1</sup>。对于整个系统而言,能源输入端加热单元占比49%,二燃室占比51%,500℃洁净土壤系统能耗占比9.0%,急冷室系统能耗占比54.5%,除尘排烟系统能耗占比24.2%。在洁净土壤加热至320℃工况下,总能耗为3273 MJ·t<sup>-1</sup>。加热单元占总能量输入37%,二燃室占总能量输入63%,320℃洁净土壤系统能耗占比6.5%,急冷室系统能耗占比55.1%,除尘排烟系统能耗占比26.1%<sup>[17]</sup>。

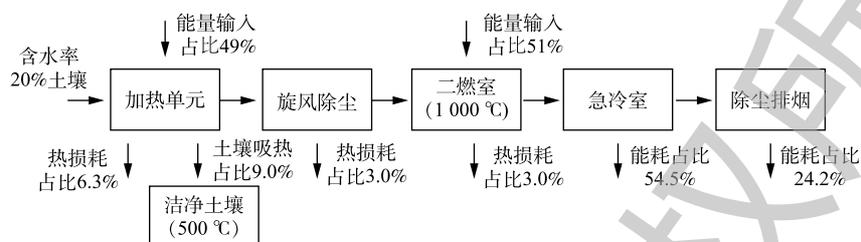


图3 直接热脱附能量占比(清洁土壤温度500℃,能耗3710 MJ·t<sup>-1</sup>)

Fig. 3 Energy ratio of direct thermal desorption (clean soil temperature of 500 °C, energy consumption of 3 710 MJ·t<sup>-1</sup>)

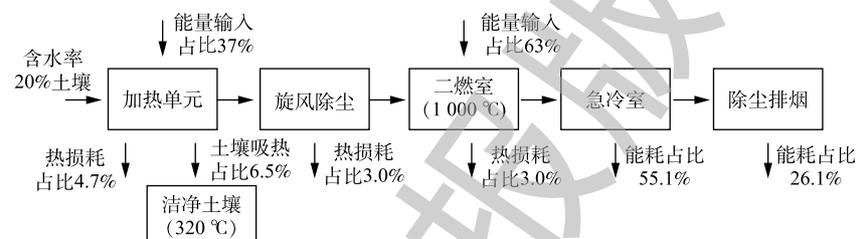


图4 直接热脱附能量占比(清洁土壤温度320℃,能耗3273 MJ·t<sup>-1</sup>)

Fig. 4 Energy ratio of direct thermal desorption (clean soil temperature of 320 °C, energy consumption of 3 273 MJ·t<sup>-1</sup>)

### 3.2 改进方案及能耗分析

通过分析热平衡计算结果<sup>[18]</sup>可发现,直接热脱附装置节能降耗空间较大。其中急冷室消耗整个系统55.1%的能量,是最主要的耗能单元,可将1000℃高温烟气冷却到200℃,前后温度差可达到800℃。将这部分热量利用起来,可极大地改善直接热脱附系统能源利用率,从而减小系统总能耗<sup>[19]</sup>。

在原有热脱附装备中加装烟气热回用模块和土壤预干燥模块,在二燃室末端加装热交换器,通过循环传热介质将烟气余热传送给土壤预干燥单元<sup>[20]</sup>。通过换热器将二燃室的末端烟气温度从1000℃降低到500℃左右,传热介质通过循环管道将热量输送给土壤预干燥机作为干燥的热源。将进入加热单元前的土壤加热至100℃以上,使土壤中的水分蒸发。由于水的比热容很大,故进入回转窑加热单元的土壤含水率下降就意味着土壤温度上升所需的热量大幅降低。干燥完成后的低温热水再回到水气换热器冷端水进口,通过循环管路实现了热量由二燃室到预干燥机的高效转移,保证了二燃室余热的高效利用<sup>[21]</sup>。为防止热水过热,在其输送管路上安装调温换热器对热水温度进行调控,冷却水来自急冷塔的急冷水箱。循环管道中的热水虽然是循环使用,但使用过程中由于管道密封不到位等问题会造成循环水损耗,因此,需要在管路上加装补充水箱,以保证循环管道的正常运行。盘式连续干燥机和回转窑干燥机都可以用于土壤预干燥,分别适用于不同工况。在使用盘式连续干燥机且换热介质为水的条件下,设计了如图5所示的具有余热利用模块的直接热脱附系统。

图6为加装节能装置后热脱附能量平衡图。计算条件为初始土壤含水量为20%,过量空气系数为1.2,二燃室温度为1000℃,清洁土壤温度为320℃。计算结果表明,加装节能降耗装置后,系统能耗可从3273 MJ·t<sup>-1</sup>降低到2610 MJ·t<sup>-1</sup>,节能效率达到了20%。

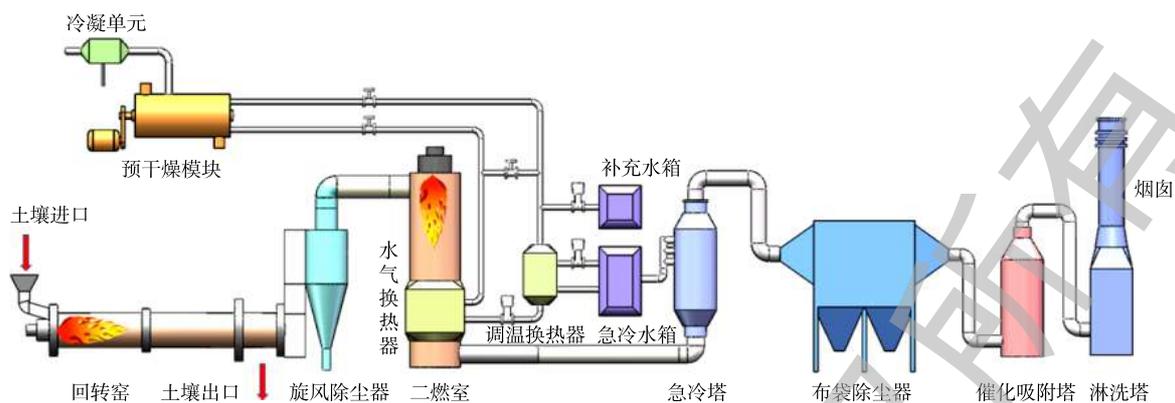
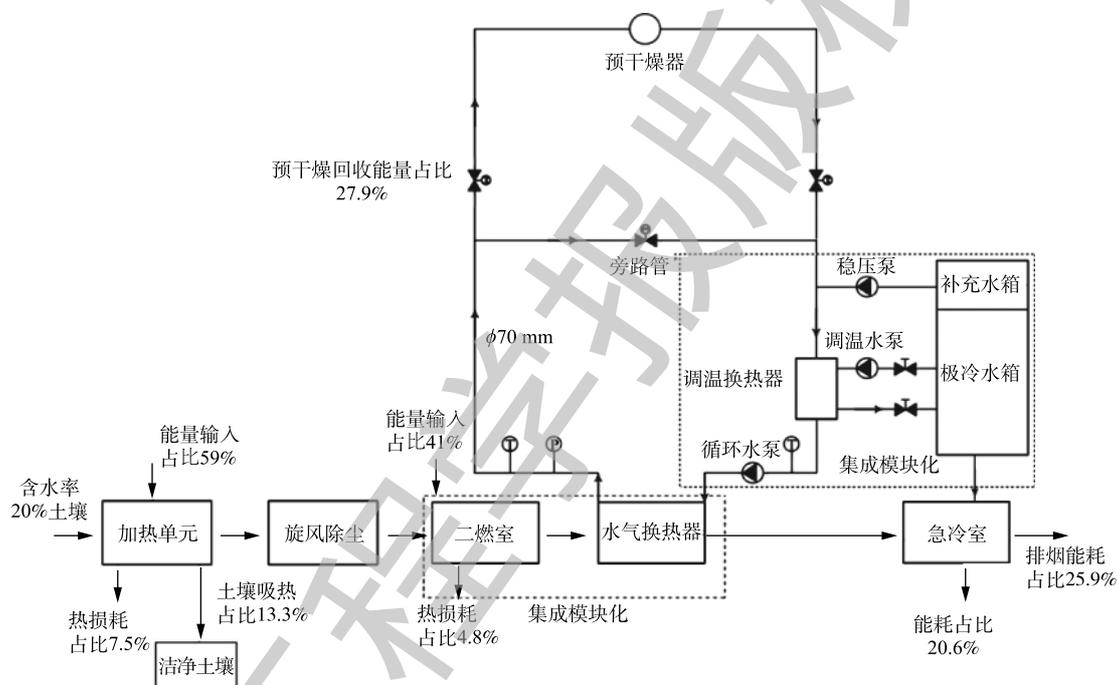


图5 加入节能降耗模块后的直接热脱附系统流程图

Fig. 5 Flow chart of direct thermal desorption system after energy-saving module addition

图6 加装节能装置后热脱附能量占比图(清洁土壤温度 $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 能耗 $2\ 610\ \text{MJ}\cdot\text{t}^{-1}$ )Fig. 6 Thermal desorption energy ratio after energy-saving devices installation (clean soil temperature of  $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ , energy consumption of  $2\ 610\ \text{MJ}\cdot\text{t}^{-1}$ )

### 3.3 节能降耗结果与分析

通过热平衡计算, 得出了不同含水率的土壤在不同出土温度下的能耗结果。不同含水率能耗对预干燥节能效果的影响见图7。可以看出, 随着土壤湿度从5%上升到25%, 系统能耗上升了2.5倍左右, 说明土壤含水率对热脱附加热单元能耗影响很大。如图8所示, 土壤预干燥装置将土壤水分从20%降低到15%时, 降低了20%总能耗。土壤预干燥装置将土壤水分从20%降到10%时, 可降低热脱附装置总能耗35%~42%, 节能效果非常显著。

二燃室后水气换热器余热占比与预干燥所需能量的关系见图9。可以看出, 土壤预干燥热效率为50%时, 二燃室后烟气余热足够用于减少10%左右的土壤水分。由于采用了热水循环干燥方式, 土壤干燥热效率可提高至85%~90%(只有散热损失), 烟气余热足够用于减少17%左右的土壤水分。当土壤处理速率为 $30\ \text{t}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 烟气余热远大于土壤进行预干燥去除5%土壤水分所需的热

量。在热源热量足够的情况下，需要考虑的问题就集中在选择合适的干燥机组将热量高效、稳定地传递给土壤以及选择合适的传热介质，安全、高效地完成烟气热回用装置和土壤预干燥装置间的循环热传导<sup>[22-23]</sup>。

对于连续处理土壤速率达到  $30 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$  的直接热脱附装置而言，考虑到干燥机体积、成本、连续工作稳定性，选择将湿度 20% 的污染土壤去除 5% 水分的预干燥方案，可带来 20% 左右的节能效果。

### 3.4 土壤预干燥模块的选型

预干燥工序要求土壤处理量为  $30 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ ，并且能使土壤含水量从 20% 降低到 15%。目前，国内干燥工艺成熟、种类多样，其中盘式连续干燥工艺和回转窑干燥工艺由于其对土壤处理量大，水分脱除效率高，基本可满足工况要求<sup>[24]</sup>。

#### 3.4.1 盘式连续干燥机预干燥模块

盘式干燥机可实现对土壤的预干燥，且具有水蒸气蒸发量大、设备集成度高、占地面积小、装置简单、现场安装要求低、能耗低、烟尘少的优点<sup>[25]</sup>。考虑到干燥机的运输难度和运行稳定性问题，干燥设备的干燥面积不宜大于  $300 \text{ m}^2$ ，设备重量不宜超过  $50 \text{ t}$ ，否则会增加运输和现场安装难度<sup>[26]</sup>。在满足干燥面积和设备重量的条件下，盘式干燥机处理速率约为  $15 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ 。因此，当土壤处理量较大时，至少需要 2 台干燥设备同时进行预干燥，设备投资较高。盘式干燥机对进料的要求较为苛刻<sup>[27]</sup>。盘式干燥机严格要求进料粒径控制在  $50 \text{ mm}$  以下。土壤粒径较大时容易导致设备干燥能力下降，土块在设备中堆积，最终堵塞设备。因此，采用盘式干燥机对土壤破碎筛分工艺要求较高<sup>[28]</sup>。

简言之，作为土壤预干燥设备，盘式干燥机适合土壤处理速率为  $15 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$  左右、土壤粒径小于  $50 \text{ mm}$  的工况。由于水-烟气换热器的换热系数大，采用水作为换热介质可大幅度降低换热器尺寸，便于实现装置的模块化和快速移动。

#### 3.4.2 回转窑干燥机预干燥模块

回转窑干燥机加热介质在回转窑中空的筒体内对筒内湿物料进行热传导<sup>[29]</sup>。物料进入窑体，在扬料板和筒体自身转动的作用下，不断被翻动的同时向窑头滚动前进<sup>[30]</sup>。回转窑内扬料板将湿物料扬起，不断翻转，从而增大湿物料与热空气的换热面积，使水分更容易蒸发，干燥后的物料在窑尾排出<sup>[31]</sup>。

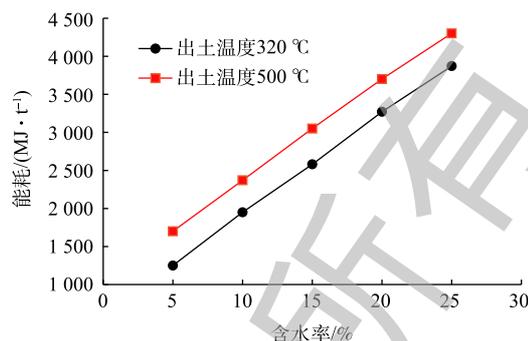


图7 不同含水率对土壤能耗的影响

Fig. 7 Effect of different water content on soil energy consumption

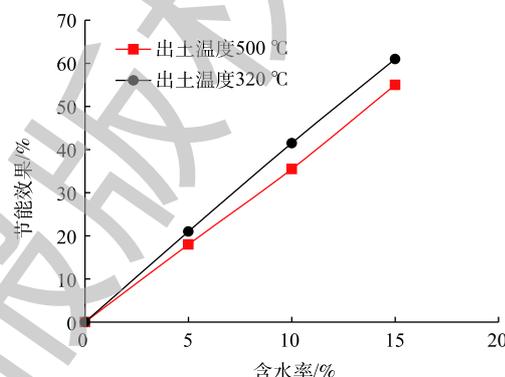


图8 预干燥节能效果

Fig. 8 Effect of pre-drying energy saving

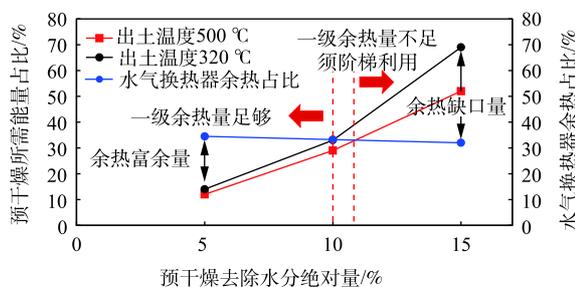


图9 二燃室后水气换热器余热占比与预干燥所需能量间关系

Fig. 9 Relationship between the residual heat ratio of the water-gas heat exchanger and the energy required for pre-drying after the second combustion chamber

回转窑干燥机对物料的适应性较强,但回转窑没有紧凑的换热面,换热介质只能选择传热效率低的空气,故传热效率较低,导致物料的干燥时间相对较长<sup>[32]</sup>。在干燥相同物料量时,设备体积相对庞大,不利于设备的模块化运输与组装。

#### 4 结论

1) 土壤预干燥工序可降低污染土壤所含水分被加热至 300 °C 以上所吸收的能量;烟气热回用装置可回收部分高温烟气,冷却过程消耗热量。

2) 利用烟气热回用装置将二燃室高温烟气余热能量通过循环传热管道输送给土壤预干燥装置,可达到余热利用的效果,提高能源利用率。通过对比二燃室后水气换热器余热能量与预干燥所需能量间关系,计算出在预干燥工序去除土壤水分 17% 以下时,烟气余热能量足够用于干燥土壤。与现有热脱附工艺相比,加入改进方案的热脱附工艺的能耗水平显著降低,节能效果达到 20%。

3) 在 2 种预干燥装置中,盘式干燥机传热效率高,但其结构复杂,长时间连续工作时有设备堵塞风险,要求土壤的粒径小于 50 mm,土壤处理量偏小。回转窑干燥机与盘式干燥机相比,干燥性能稍差,但其对土壤没有太苛刻的要求,可作为盘式连续干燥方案的备选。

#### 参考文献

- [1] 祁志福. 多氯联苯污染土壤热脱附过程关键影响因素的实验研究及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [2] ZHAO C, DONG Y, FENG Y, et al. Thermal desorption for remediation of contaminated soil: A review[J]. *Chemosphere*, 2019, 221: 841-855.
- [3] 白四红. 高浓度多氯联苯污染土壤热脱附特性实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [4] 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.
- [5] LIU J, ZHANG H, YAO Z, et al. Thermal desorption of PCBs contaminated soil with calcium hydroxide in a rotary kiln[J]. *Chemosphere*, 2019, 220: 1041-1046.
- [6] 高艳菲. 六六六和滴滴涕污染场地土壤的修复[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [7] 马福俊, 丛鑫, 张倩, 等. 模拟水泥窑工艺对污染土壤热解吸尾气中六氯苯的去除效果[J]. 环境科学研究, 2015, 28(8): 1311-1316.
- [8] O'BRIEN P L, DESUTTER T M, CASEY F X, et al. Implications of using thermal desorption to remediate contaminated agricultural soil: Physical characteristics and hydraulic processes[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(4): 1430-1432.
- [9] FRANTISEK K, PAVEL T, KAREL S, et al. Remediation of contaminated soils by thermal desorption: Effect of benzoyl peroxide addition[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 125: 309-313.
- [10] 王奕文, 马福俊, 张倩, 等. 热脱附尾气处理技术研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2017, 7(1): 52-58.
- [11] 傅海辉, 黄启飞, 朱晓华, 等. 温度和停留时间对十溴联苯醚在污染土壤中热脱附的影响[J]. 环境科学研究, 2012, 25(9):

981-986.

- [12] 于颖,周启星. 污染土壤化学修复技术研究与进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(7): 1-7.
- [13] 李玉双,胡晓钧,宋雪英,等. 城市工业污染场地土壤修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(10): 6119-6122.
- [14] 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.
- [15] 高国龙,蒋建国,李梦露. 有机物污染土壤热脱附技术研究与应用[J]. 环境工程, 2012, 30(1): 128-131.
- [16] 白四红,陈彤,祁志福,等. 载气流量及升温速率对污染土壤中多氯联苯热脱附的影响[J]. 化工学报, 2014, 65(6): 2256-2263.
- [17] 赵中华. 含氯有机污染土壤热脱附及联合处置研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [18] HOU D Y, GU Q B, MA F J, et al. Life cycle assessment comparison of thermal desorption and stabilization/solidification of mercury contaminated soil on agricultural land[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 139: 949-956.
- [19] XI H, HE Y L, WANG J H, et al. Transient response of waste heat recovery system for hydrogen production and other renewable energy utilization[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(30): 15985-15996.
- [20] 张群力,王明爽,矫育青,等. 喷淋式助燃空气加湿型烟气冷凝余热回收系统实验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(11): 123-129.
- [21] 于晓娟,阚德民,顾吉浩. 天津某燃气锅炉的烟气余热回收案例实测分析[J]. 河北工业大学学报, 2019, 48(2): 56-61.
- [22] LU D, CHEN G F, GONG M Q, et al. Thermodynamic and economic analysis of a gas-fired absorption heat pump for district heating with cascade recovery of flue gas waste heat[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 185: 87-100.
- [23] 徐廷万. 焦炉烟气SDS脱硫与余热回收的一体化应用[J]. 四川化工, 2019, 22(2): 25-27.
- [24] 李顺营,彭秋菊,韩晓静,等. 盐湖卤水制取电池级碳酸锂生产中盘式连续干燥器的应用[J]. 化学工程与装备, 2015(10): 182-184.
- [25] 郝万鹏. 盘式连续干燥机在聚天冬氨酸生产中的应用[J]. 化工管理, 2015(17): 18.
- [26] 张继军,杨大成,李俊茹. 盘式连续干燥器的耙叶设计探讨[J]. 化学工程, 2011, 39(3): 13-17.
- [27] 苏全卫,周航. 连续盘式热风干燥器干燥盘结构设计与传热分析[J]. 食品与机械, 2017, 33(1): 97-100.
- [28] 周镛,冯正茂,徐彦国. 盘式连续干燥器与回转窑干燥机干燥镍精矿的比较[J]. 化工机械, 2009, 36(3): 230-233.
- [29] 贺金森,唐永亮. 精矿预干燥回转窑作业管理及故障分析[J]. 铜业工程, 2017(5): 93-96.
- [30] 寇向上,郭鹏飞. 镍铁回转窑-干燥窑系统除尘工艺分析[J]. 中国环保产业, 2017(1): 42-44.
- [31] 赖栋文,王欢. 浅谈红土镍矿回转窑: 干燥窑系统电除尘器分析与应用[J]. 资源节约与环保, 2016(6): 52-54.
- [32] 魏博. 回转窑预干燥炉炉顶部位湿式喷补料的施工性[J]. 耐火与石灰, 2014, 39(5): 37-38.

(本文编辑: 张利田, 曲娜, 郑晓梅)

## Energy-saving and consumption-reducing scheme for direct thermal desorption of organic contaminated soil

XU You<sup>1</sup>, GU Hailin<sup>1,\*</sup>, ZHAN Mingxiu<sup>1</sup>, JI Longjie<sup>2,3,4</sup>, WANG Jinqing<sup>1</sup>, JIAO Wentao<sup>4</sup>, CHI Zuohe<sup>1</sup>

1. School of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

2. Beijing Construction Engineering Environmental Restoration Co. Ltd., Beijing 100015, China

3. National Engineering Laboratory for Site Remediation Technologies, Beijing 100015, China

4. State Key Laboratory of Urban and Regional Research, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

\*Corresponding author, E-mail: hlgu@cjlu.edu.cn

**Abstract** With the implementation of the policies ‘relocation of industrial enterprises in the old city to the suburbs’ and ‘re-planning of residential land for residential use’ in our country, the possible environmental health problems resulting from the organic pollution sites left during the relocation of high pollution chemical enterprises need to be resolved, it is urgent to carry out the contaminated soil remediation. Ex-situ direct thermal desorption is one of the main techniques for contaminated soil remediation. Based on the principles, application scope, process flow, advantages and disadvantages of the ex-situ direct thermal desorption technology, the input and output energy balance equations were established and the heat transfer balance was calculated. Aiming at the high energy consumption, the energy consumption of each part was analyzed and the energy saving plan was raised. The flue gas reusing device was used to transfer the waste heat energy from the high-temperature flue gas after the second combustion chamber to the soil pre-drying device through the circulating pipeline. The moisture content of the organic polluted soil decreased, and the total energy consumption of the system was significantly reduced. According to the thermodynamic calculation, the more moisture of the soil decreased, the more energy could be saved. Flue gas waste heat was enough to reduce soil moisture by about 17% for soil pre-drying. According to the analysis, due to the limited continuous drying capacity of soil, the reduction of soil moisture from 20% to 15% with the soil pre-drying device could reduce the energy consumption by more than 20% for the direct thermal desorption device. The feasibility, advantages and disadvantages, and application scope of the disc continuous dryer and the rotary kiln dryer as the soil pre-drying device were compared. This study provides the reference for the selection of direct thermal desorption and energy-saving devices.

**Keywords** soil remediation; thermal desorption technique; waste heat reuse; heat balance calculation