



文章栏目: 土壤污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202010090

中图分类号 X53

文献标识码 A

沈远东, 詹明秀, 李绍华, 等. 污染土壤直接热脱附燃烧器低氮优化设计及数值模拟[J]. 环境工程学报, 2021, 15(10): 3279-3285.

SHEN Yuandong, ZHAN Mingxiu, LI Shaohua, et al. Low nitrogen optimization design and numerical simulation of burner for direct thermal desorption of contaminated soil[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(10): 3279-3285.

污染土壤直接热脱附燃烧器低氮优化设计及数值模拟

沈远东¹, 詹明秀¹, 李绍华², 岳勇², 许优³, 潜培豪⁴, 顾海林¹, 籍龙杰⁵, 焦文涛^{5,✉}, 池作和¹

1. 中国计量大学计量测试工程学院, 杭州 310018

2. 中化环境控股有限公司, 北京 100045

3. 浙江西子联合工程有限公司, 杭州 310021

4. 杭州鸿和能源环境科技有限公司, 杭州 310018

5. 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: 沈远东(1997—), 男, 硕士研究生。研究方向: 污染土壤热修复技术。E-mail: 787190150@qq.com

✉通信作者: 焦文涛(1978—), 男, 博士, 研究员。研究方向: 污染土壤热修复技术及效果评估。E-mail: wtjiao@rcees.ac.cn

摘要 为解决直接热脱附设备二燃室燃烧器氮氧化物排放高的问题, 利用热平衡计算方法建立其输入和输出能量平衡关系式, 得到二燃室温度维持 1 100 °C 时所需燃气量和助燃风量; 同时, 结合空气分级技术、燃料分级技术和部分预混燃烧技术对燃烧器进行优化设计, 并对其燃烧情况进行了数值模拟计算。热平衡计算结果表明, 维持二燃室燃烧温度 1 100 °C 所需的燃气量和助燃风量分别为 1 003 和 22 066 m³·h⁻¹。数值模拟结果表明, 增加燃气预混喷口可显著强化燃气/空气混合, 使燃烧更为迅速, 可防止滞后的火焰冲刷壁面, 也有助于分散火焰, 避免局部高温。增加二级空气通道可降低空气的出口流速, 防止出现脱火现象, 且利于燃气径向扩散, 避免火焰集中。以上 2 种方法均能有效降低氮氧化物排放量, 且采用燃气部分预混后二燃室出口处一氧化碳浓度大幅降低。在同时采用燃气预混喷口和二级空气通道后, NO_x 浓度稳定在 45 mg·m⁻³ 左右, 相比于现有燃烧器减少了 85%。该研究结果可为直接热脱附设备二燃室燃烧器的低氮设计提供参考。

关键词 土壤修复; 热脱附技术; 热平衡计算; 低氮燃烧

随着我国“退城进园”和“退二进三”政策的落实, 大批污染企业进行了厂区搬迁。这些搬迁场地中遗留的污染物不仅会对周边土壤、水和空气造成污染, 引起土壤板结和水体 COD、BOD 超标, 还会散发恶臭, 严重影响周边的环境安全和居民的身体健康。2019 年 1 月, 国家实施了《土壤污染防治法》, 从国家法律层面规范了污染土壤的修复方法^[1]; 同年 12 月, 为贯彻落实《土壤污染防治法》, 指导和规范建设用地土壤污染状况调查报告、土壤污染风险评估报告、风险管控效果评估报告及修复效果评估报告的评审工作, 生态环境部会同自然资源部研究制定了《建设用

收稿日期: 2020-10-19; 录用日期: 2021-10-05

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC1802102)

地土壤污染状况调查、风险评估、风险管控及修复效果评估报告评审指南》^[2]。2020年,中国环保产业协会发布团体标准《污染地块绿色可持续修复通则》,规定了污染地块绿色可持续修复的原则、评价方法、实施内容和技术要求^[3]。

热修复技术修复周期短、效率高,因而在有机污染场地土壤修复工程中得到了普遍应用^[4-7]。直接热脱附技术是热修复技术的一种,具有修复速度快、修复效率高、修复土壤种类多等优点,已被广泛运用于国内污染场地的修复中^[8-9]。直接热脱附装置的加热方式主要有燃煤、燃气和电加热。燃煤加热对环境污染相对最大;电加热污染较低但装置复杂、运行成本高。目前,直接热脱附系统使用最多的是较为清洁的燃气加热单元^[10-11]。为高效去除土壤中的污染物,直接热脱附设备往往存在能耗高、二次污染严重的问题。天然气燃烧产生的污染物主要为 NO_x ,将其直接排入大气会对环境造成污染。我国十分重视工业锅炉、窑炉的 NO_x 排放污染问题,但目前缺少针对直接热脱附装置的大气污染物排放标准,导致直接热脱附装置普遍没有采用低氮燃烧技术。

本研究通过热平衡计算得出燃气直接热脱附系统中二燃室燃烧器运行参数,利用数值模拟方法对燃烧器不同结构下的速度场、温度场、 NO_x 浓度场进行对比,得到其最优结构,为相关设备的研发设计提供参考。

1 低氮燃烧技术及设计目标

1.1 低氮燃烧技术

燃烧过程中生成的 NO_x 主要可分为燃料型、快速型和热力型。燃料型 NO_x 是含氮燃料在燃烧过程中生成 N 、 CN 和 HCN 等基团,进而被氧化为 NO_x ;快速型 NO_x 是有机物在燃烧过程中生成 CH 自由基,与空气中的氮气反应生成 HCN 和 N ,再进一步与氧气反应生成 NO_x ;热力型 NO_x 由空气中的氮气直接在高温下被氧化生成^[12]。天然气燃烧生成的 NO_x 主要以热力型 NO_x 为主,因此,燃烧温度是影响其 NO_x 排放的最关键因素。目前,低氮燃烧技术主要有分级燃烧(包括空气分级、燃料分级)和部分预混燃烧等。

1) 空气分级技术。空气分级是将助燃空气分成多股送入,部分空气与燃料在贫氧环境下燃烧,燃烧温度较低, NO_x 生成量较少,剩余空气作为燃尽风被送入炉膛内燃烧^[13-14]。由于降低了主燃区氧量与整体燃烧温度, NO_x 排放量可有效降低。其原理如图1所示。张向宇等^[15]的研究表明,当主燃区过量空气系数为0.9时, NO_x 排放可降低20%。事实上,一二次风配比、燃尽风量等因素都会影响空气分级燃烧的脱硝效率^[16]。

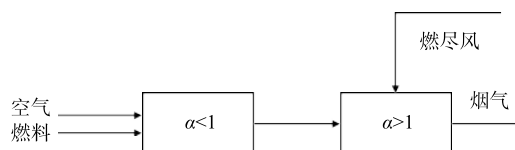


图1 空气分级原理

Fig. 1 Principle of air classification

2) 燃料分级技术。燃料分级技术是将燃烧域划分成主燃区、再燃区和燃尽区,将80%左右的燃气输送到主燃区,其余燃料输送到再燃区,在还原气氛下生成具有还原性的碳氢基团,与主燃区产生的 NO_x 发生还原反应,未燃尽的燃料进入燃尽区进一步燃烧至燃尽,以实现分级燃烧^[17-18]。随着二次燃料的增加, NO_x 排放量先增加后减少,在二次燃料比例为50%时存在峰值^[19]。

3) 部分预混技术。部分预混燃烧技术是将部分燃料与空气在燃烧之前预先混合,使燃烧温度分布更加均匀,避免产生局部高温,进而控制 NO_x 生成量^[20]。当预混度处于0~30%时, NO_x 排放量随预混度的增加而上升^[21]。

天然气燃烧过程中生成的氮氧化物主要为热力型氮氧化物,因此,天然气低氮燃烧的主要手段是降低燃烧温度并避免局部高温、降低高温区域停留时间以及控制氧量。现有二燃室燃烧器为追求燃烧稳定性,往往设计成单一燃气喷口并且使燃气向前喷射,因而使火焰过于集中,导致氮

氧化物大量形成。

1.2 燃烧器设计目标

由于回转窑出口烟气中有机污染物成分复杂, 为了使污染物彻底燃尽, 二燃室结构较为狭长, 以保证烟气停留时间大于 2 s; 同时, 焚烧温度较高, 平均温度达 1 000 ℃ 以上。而氮氧化物的排放量与炉膛温度、停留时间呈正相关, 这导致二燃室氮氧化物排放量居高不下。常规低氮燃烧器仅适用于炉膛内部存在换热面的情况, 而二燃室为绝热炉膛, 易形成局部高温, 这使得二燃室的低氮燃烧设计较普通锅炉更为复杂。

因此, 本研究自主研发适用于直接热脱附二燃室的新型低 NO_x 燃气燃烧器, 避免土壤热脱附过程中产生二次污染。具体设计目标为: 1) 燃烧器的设计需满足直接热脱附二燃室的工作环境, 能保证稳定、高效燃烧; 2) 使燃烧器具有良好的低氮性能, 出口氮氧化物质量浓度控制在 50 mg·m⁻³ 以下。

2 设计方法

本研究以污染土壤处理量 30 t·h⁻¹ 的直接热脱附设备作为对象, 对应二燃室功率为 10 MW。

2.1 燃气量及风量计算

1) 燃气量计算。根据二燃室功率直接计算燃气量(式(1))。

$$V_{\text{天然气}} = \frac{3\,600 \times P}{Q_{\text{天然气}}} = 3\,600 \times 10 \text{ MW} \div 35.88 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} = 1\,003.34 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \quad (1)$$

式中: $V_{\text{天然气}}$ 为天然气消耗量(标准状况下), m³·h⁻¹; P 为二燃室功率, MW; $Q_{\text{天然气}}$ 为天然气热值, MJ·m⁻³。

2) 空气量计算。设计二燃室温度为 1 100 ℃, 根据二燃室温度及功率计算空气量, 计算方法采用热平衡法(式(2)-式(6))。

$$h_{\text{热烟气焓值}} = h_{\text{燃料发热量}} + h_{\text{冷燃料焓值}} + h_{\text{冷空气焓值}} \quad (2)$$

$$h_{\text{热烟气}} = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 \quad (3)$$

$$h_{\text{燃料发热量}} = Q_{\text{天然气}} \times V_{\text{天然气}} \quad (4)$$

$$h_{\text{冷燃料焓值}} = T \times V_{\text{天然气}} \times C_{\text{天然气,p}} \quad (5)$$

$$h_{\text{冷空气焓值}} = T \times V_{\text{冷空气}} \times C_{\text{冷空气,p}} \quad (6)$$

式中: h_1 为烟气中过量空气焓值; h_2 为烟气中 RO₂ 焓值; h_3 为烟气中氮气焓值; h_4 为烟气中水蒸气焓值, $V_{\text{天然气}}$ 为天然气体积; $C_{\text{天然气,p}}$ 为天然气定压比热容; $C_{\text{冷空气,p}}$ 为冷空气定压比热容。计算方法如式(7)所示。

$$h_n = T \times V_n \times C_{n,p}, n \in [1, 2, 3, 4] \quad (7)$$

式中: T 为燃烧温度, ℃; V_n 为对应项的体积流量, m³·h⁻¹; $C_{n,p}$ 为对应项在温度 T 时的比热, kJ·(m³·h)⁻¹。

根据以上计算方法可得, 维持二燃室燃烧温度 1 100 ℃ 所需空气量为 22 066 m³·h⁻¹。

2.2 燃烧器设计

采取燃气分级、空气分级和部分预混结合的方式, 利用数值模拟方法评估燃烧情况, 获得燃烧器最优结构, 具体方式为: 1) 在燃气管上游开小孔, 使部分燃气在燃烧前混入助燃空气中, 降低燃烧温度并加强火焰稳定性和易点火性; 2) 通过在燃烧头位置增加缩口结构以提高流速, 适当增加火焰长度; 3) 利用燃料分级燃烧的思路将燃气从多个喷嘴喷出, 使燃烧分散, 避免局部高温的形成; 4) 采用空气分级的思路使空气从不同位置送入炉膛, 降低燃烧温度。

根据上述方式对燃烧器进行初步设计, 模型采用 SolidWorks 建立, 具体如图 2 所示。燃烧器

中心位置布置中心燃气管,燃气从中心燃气管道头部均匀布置的环形燃气小孔喷出,在燃烧器狭小的收口部分与高速空气混合,以形成细长火焰,设计小孔流速为 $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、缩口处空气流速为 $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,由空气量、燃气量以及设计流速得到燃烧器各部分尺寸。由于二燃室为长 20 m 的狭长回形结构,需要燃烧器出口流速较大,因此不采用旋流风设计。

为研究空气分级与燃气预混对燃烧效果的影响,在中心燃气管道上轴向开4个燃气预混喷口,使部分燃气从小孔流出,形成燃气/空气部分预混;在一级空气外侧周向布置8个二级空气通道,分级空气由二级空气通道送入,风量占总助燃风量的30%,风速选取为 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

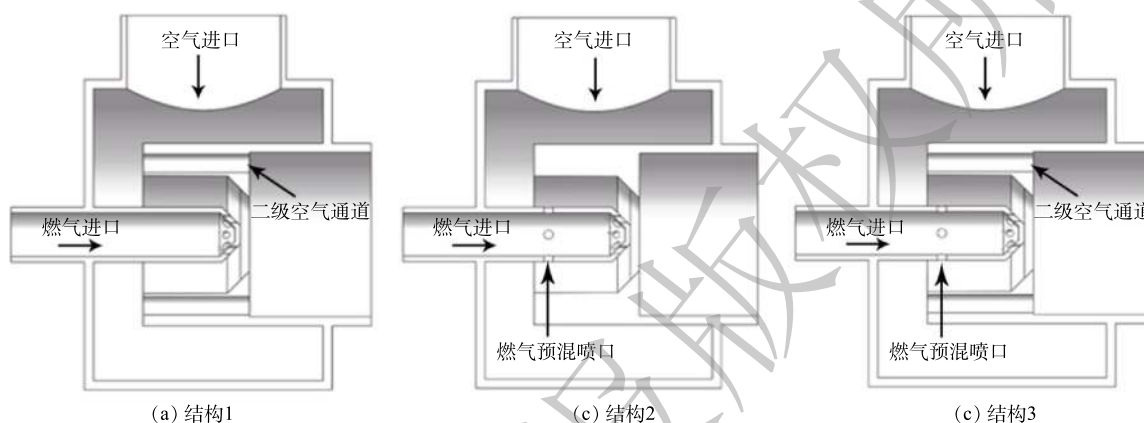


图2 燃烧器3种结构

Fig. 2 Three structures of burner

2.3 数值模拟

利用 Fluent 软件对3种不同结构的燃烧器进行数值模拟。由于燃烧器模型较为复杂,采用非结构化网格,对燃烧器及其出口部分进行了局部加密,网格数量为 200×10^4 ,并进行了网格无关性验证。利用组分输运模型模拟燃烧反应,湍流采用 realizable k-epsilon 模型,辐射采用 DO 模型,压力速度采用 SIMPLE 算法,离散格式为二阶迎风格式。设计燃气进口流速为 $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、空气进口流速 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,将燃气入口和空气入口设置为速度入口,燃烧域出口边界设置为压力出口,压力为 -50 Pa ,二燃室壁面定义为无滑移、绝热壁面。

3 结果与讨论

3.1 空气分级及部分预混设计对气流速度分布影响

图3为3种工况下截面的速度分布。由图可得,在工况一、工况三中,高速混合气流的长度较工况二更长,这说明增加二级空气通道可有效增强混合气流的刚度,利于提高火焰长度;对比工况一和工况三可发现,预混燃气喷口对于速度场影响较小;由于工况二没有二级空气通道,燃烧头出口速度明显大于另外2种工况,燃烧过程中可能出现脱火现象,不利于燃烧的稳定。

3.2 空气分级及部分预混设计对温度分布影响

图4为3种工况下的温度分布,将各个工况温度云图转化为相同温度梯度进行直观对比。由图可得,3种工况下最高温度均集中在 $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,而热力型氮氧化物生成的主要温度区间为 $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上,这说明3种燃烧器结构均能较好地控制燃烧温度,以避免热力型氮氧化物大量生成。出口温度均在 $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,与热平衡计算结果一致,符合二燃室温度高于 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 的设计要求。3种工况下的温度分布也存在明显差异,其中,工况一由于无燃气预混喷口,燃烧存在明显滞后,炉膛火焰高温区域远离燃烧头,且火焰范围较大,存在冲刷二燃室壁面的风险。工况二增加了燃气预混喷口,但无二级空气通道,燃烧所需空气全部由一次空气通道供给,过高的气流速度

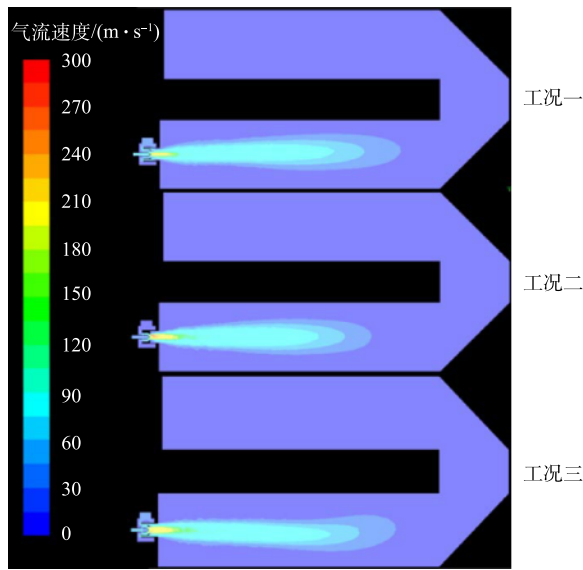


图 3 各工况下气流速度分布

Fig. 3 Velocity distribution in three working conditions

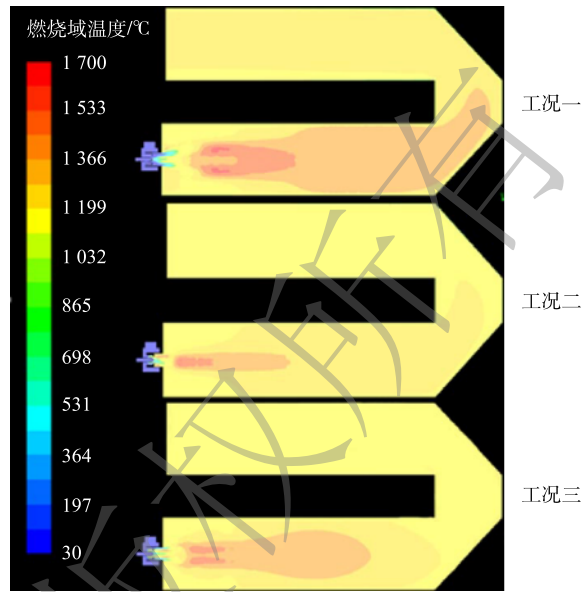


图 4 各工况下燃烧域温度分布

Fig. 4 Temperature distribution in three working conditions

导致火焰集中在燃气喷口中轴线附近，无法向四周扩散，这种较为集中的燃烧方式会导致该区域火焰锋面上氮氧化物大量生成。工况三同时设置了燃气预混喷口与二级空气通道，出口处的火焰较传统燃烧器更为分散，温度分布更为均匀。通过对比可发现，增加燃气预混喷口可显著强化燃气/空气混合，使燃烧更为迅速，防止滞后的火焰冲刷壁面。同时，也能在一定程度上分散火焰，避免局部高温，这与宋爽等^[2]的实验结果是一致的；增加二级空气通道可降低空气出口流速，防止出现脱火等现象，且利于燃气径向扩散，避免由于火焰集中而导致的局部高温。

3.3 各工况下 NO_x 分布情况

图 5 为 3 种工况下 NO_x 浓度云图，NO_x 生成的主要位置集中在燃烧器出口区域。这与图 5 燃烧域的温度分布结果一致，即氮氧化物主要生成在高温区，且温度越高，氮氧化物生成量越大。在工况一中，燃烧器出口处生成的 NO_x 在分级燃烧过程中得到部分还原，但由于高温区后移，导致二燃室中段依然处于高温，使得 NO_x 浓度经过短暂降低后重新上升。在工况二中，由于燃烧器结构没有采用空气分级，炉膛内 NO_x 在燃烧器出口附近大量生成，导致出口 NO_x 浓度较高。而在工况三中，NO_x 不仅在分级燃烧过程中得到部分还原，且该工况下整体温度较低，后续 NO_x 生成量较小。

表 1 为 3 种工况下二燃室出口一氧化碳与

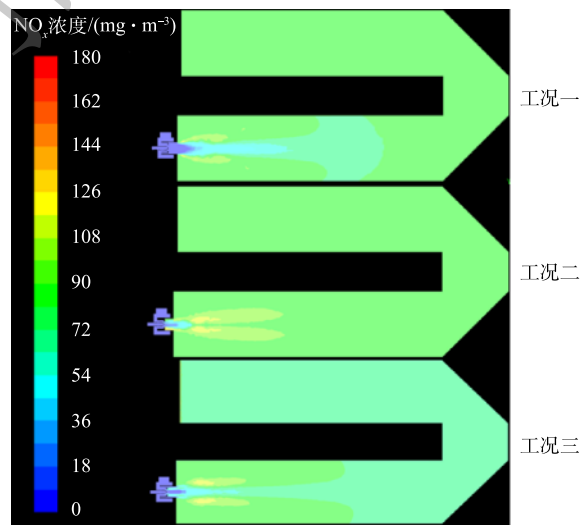


图 5 各工况下的氮氧化物分布

Fig. 5 NO_x distribution in three working conditions

表 1 3 种工况下二燃室出口一氧化碳与氮氧化物浓度
Table 1 Concentration of CO and NO_x at outlet of secondary combustion chamber under three working conditions

工况组别	尾气质量浓度/(mg·m ⁻³)	
	一氧化碳	氮氧化物
一	18	91
二	1	76
三	0	45

氮氧化物浓度排放值。结合表1可得,3种工况下CO排放量都在 $20\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,证明该燃烧器结构能保证燃烧较为充分。对比工况一、工况二、工况三可知,燃气部分预混可有效降低出口处一氧化碳浓度,而二次空气通道对一氧化碳浓度的影响不大。对比3种工况下氮氧化物浓度可看出,增加燃气预混喷口和二级空气通道均能有效降低氮氧化物排放量,且在同时采用2种布置后,二燃室出口位置 NO_x 质量浓度稳定在 $45\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,而现有燃烧器约为 $300\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, NO_x 排放浓度较现有燃烧器降低了85%。

4 结论

1) 增加燃气预混喷口可显著强化燃气/空气混合,使燃烧更为迅速,防止滞后的火焰冲刷壁面。同时也能在一定程度上分散火焰,避免局部高温;增加二级空气通道可降低空气出口流速,防止出现脱火等现象,且有利于燃气径向扩散,避免由于火焰集中而导致的局部高温。

2) 增加燃气预混喷口和二级空气通道均能有效降低氮氧化物排放量,且采用燃气预混喷口还可有效降低出口处一氧化碳质量浓度。在同时采用2种布置后,二燃室出口处 NO_x 质量浓度稳定在 $45\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,相比于现有的燃烧器降低了85%,满足直接热脱附低氮燃气燃烧器设计目标。

参考文献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国土壤污染防治法 [EB/OL]. [2020-10-11]. http://www.mee.gov.cn/ywqz/fgbz/fl/201809/t20180907_549845.shtml.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府. 关于印发《建设用土壤污染状况调查、风险评估、风险管控及修复效果评估报告评审指南》的通知 [EB/OL]. [2020-10-11]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-12/20/content_5462706.htm.
- [3] 中国环境保护产业协会. 关于发布《污染地块绿色可持续修复通则》(T/CAEPI 26-2020)的公告 [EB/OL]. [2020-10-11]. <http://www.caepi.org.cn/epasp/website/webgl/webglController/view?xh=1588125567041030281728>.
- [4] 沈宗泽,陈有鑑,李书鹏,等. 异位热脱附技术与设备在我国污染场地修复工程中的应用[J]. 环境工程学报, 2019, 13(9): 2060-2073.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] LIU J, ZHANG H, YAO Z. Thermal desorption of PCBs contaminated soil with calcium hydroxide in a rotary kiln[J]. Chemosphere, 2019, 220(4): 1041-1046.
- [8] 王开阳,刘龙杰,邵志鹏,等. 热脱附处理技术在石油污染土壤中的研究进展[J]. 山西化工, 2020, 40(4): 22-25.
- [9] 桑义敏,余望,籍龙杰,等. 土壤直接热脱附过程中二恶英生成特性和抑制机理研究进展[J]. 环境工程学报, 2020, 14(11): 2912-2923.
- [10] 刘宇程,王茂仁,吴建发,等. 油基岩屑热脱附处理技术研究进展[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 140-148.
- [11] 葛松,孟宪荣,许伟,等. 原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素[J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3822-3828.
- [12] 吴碧君. 燃烧过程中氮氧化物的生成机理[J]. 电力环境保护, 2003(4): 9-12.
- [13] WANG Y Q, ZHOU Y G, BAI N M, et al. Experimental investigation of the characteristics of NO_x emissions with multiple deep air-staged combustion of lean coal[J]. Fuel, 2020, 280: 118416.
- [14] 李慧,杨石,周建明. 半焦空气分级燃烧 NO_x 排放试验研究[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(2): 109-114.
- [15] 张向宇,白文刚,贾子秀,等. 空气分级对旋风燃烧液态排渣及 NO_x 排放的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2020, 26(4): 376-381.
- [16] MINER J, BOWMAN C. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 1990, 15(4): 287-338.
- [17] KHANAFER K, AITHAL S M. Fluid-dynamic and NO_x computation in swirl burners[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 23(54): 4807-4816.
- [18] 董勇,严响林,闵宏斌,等. 新型双分级低 NO_x 直流燃烧器的应用[J]. 热力发电, 2012, 41(3): 55-57.
- [19] 宋少鹏,卓建坤,李娜,等. 燃料分级与烟气再循环对天然气低氮燃烧特性影响机理[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6849-6858.
- [20] ZHAO S L, FAN Y X, TIAN T D, et al. Influence of injection scheme on flame characteristics in partially premixed combustion[J]. Energy, 2020, 205: 118058.
- [21] 宋在乐. 天然气扩散燃烧炭黑生成及与火焰辐射和 NO_x 排放相互作用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [22] 宋爽,孙明曦. 带稳焰的预混燃烧火焰离焰特性实验研究[J]. 煤气与热力, 2019, 39(10): 30-34.

(责任编辑:金曙光)

Low nitrogen optimization design and numerical simulation of burner for direct thermal desorption of contaminated soil

SHEN Yuandong¹, ZHAN Mingxiu¹, LI Shaohua², YUE Yong², XU You³, QIAN Peihao⁴, GU Hailin¹, JI Longjie⁵, JIAO Wentao^{5,*}, CHI Zuohe¹

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

2. Sinochem Environment Holdings Co., Ltd, Beijing 100045, China

3. Zhejiang XiZi United Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310021, China

4. Hangzhou HongHe Energy and Environment Technology Co., Ltd, Hangzhou 310018, China

5. 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: wtjiao@rcees.ac.cn

Abstract In order to solve the problem of high NO_x emission from the burner of the second combustion chamber of the direct thermal desorption equipment. The input and output energy balance equations were established by using the heat balance calculation method, and the required fuel and combustion supporting air volume when the temperature of the secondary combustion chamber was maintained at 1 100 °C were obtained. Combined with air classification technology, fuel classification technology and partial premixed combustion technology, the burner was optimized, and its combustion was numerically simulated. The heat balance calculation results showed that the fuel gas and combustion supporting air volume required to maintain the combustion temperature of the second combustion chamber at 1 100 °C were 1 003 and 22 066 m³·h⁻¹, respectively. The results showed that increasing the gas premixing nozzle can significantly strengthen the gas/air mixing, make the combustion more rapid, prevented the lagging flame from scouring the wall, dispersed the flame and avoided local high temperature. The addition of secondary air channel can reduce the outlet flow rate of air, prevent misfire, facilitate the radial diffusion of gas and avoid flame concentration. The above two methods can effectively reduce NO_x emissions, and partial premixing of gas can also effectively reduce the concentration of carbon monoxide at the outlet. After the gas premixing nozzle and secondary air channel were adopted at the same time, the NO_x concentration was stable at about 45 mg·m⁻³, and the NO_x emission was reduced by 85% compared with the existing burner. The research results can provide a reference for the low nitrogen design of the secondary combustion chamber burner of the direct thermal desorption equipment.

Keywords soil remediation; thermal desorption technique; heat balance calculation; low nitrogen combustion