

低热值合成气燃烧产物中污染物分布规律研究

李鑫 信蕾 焦尚荣 郑秀明 方文武
华能(天津)煤气化发电有限公司 天津 300452

摘要: 低热值合成气由多种原料气化制成, 组分复杂、燃烧特性差, 燃烧时产生 NO_x 、 SO_x 等污染物。本文阐述其基础特性、污染物生成机理, 介绍实验测试、数值模拟等研究方法及评价指标。分析污染物空间、时间分布规律, 探讨不同工况及多污染物协同分布特性, 剖析影响机理, 提出优化燃烧工况等控制建议, 经可行性分析, 方案具备推广应用价值。

关键词: 低热值合成气; 污染物分布; 燃烧优化

引言: 在全球能源需求增长与环保要求提升的背景下, 低热值合成气作为新型能源, 因原料广泛受关注。但其组分复杂、可燃成分浓度低, 燃烧速度慢、稳定性差, 燃烧过程中会产生多种污染物, 对环境造成不良影响。深入研究低热值合成气燃烧产物中污染物的分布规律, 对于优化燃烧过程、减少污染物排放、实现清洁高效利用具有重要的理论意义和实际应用价值。

1 低热值合成气燃烧与污染物生成基础理论

1.1 低热值合成气基础特性

低热值合成气是由煤、生物质、工业固废等原料经气化工艺制备而成的混合气体, 其低位发热值通常低于 $12.5\text{MJ}/\text{m}^3$, 核心组分以 CO 、 H_2 为主, 同时含有 N_2 、 CO_2 、 CH_4 及少量焦油、粉尘等杂质。与常规天然气、柴油等燃料相比, 低热值合成气具有组分复杂、可燃成分浓度低、惰性气体占比高的显著特点, 这导致其燃烧速度慢、火焰温度低、点火难度大, 燃烧稳定性较差。其特性主要取决于原料种类、气化工艺及净化程度, 不同工况下组分波动较大, 例如煤基合成气中 CO 含量通常在20%~40%, H_2 含量在10%~25%, 而生物质基合成气中 H_2 含量相对较高, 焦油杂质占比更高^[1]。这些基础特性直接决定了其燃烧过程的复杂性, 也影响着污染物的生成类型与释放强度, 是研究其燃烧特性及污染物控制的前提与基础。

1.2 低热值合成气燃烧污染物生成机理

低热值合成气燃烧过程中产生的主要污染物包括 NO_x 、 SO_x 、颗粒物及少量VOCs, 其生成机理与燃料组分、燃烧温度、氧浓度、停留时间等因素密切相关。 NO_x 的生成主要分为热力型、燃料型和快速型, 其中热力型 NO_x 由空气中的 N_2 在高温(高于 1300°C)下与 O_2 反应生成, 因合成气燃烧温度较低, 此类 NO_x 生成量较少; 燃料型 NO_x 来自合成气中含氮杂质的氧化, 是其 NO_x 生成的主

要来源; 快速型 NO_x 生成量极少, 可忽略不计。 SO_x 主要由合成气中含硫化合物(如 H_2S)在燃烧过程中与 O_2 反应生成, 其生成量与含硫杂质含量正相关。颗粒物主要包括原料中未完全燃烧的碳颗粒、灰分及气化过程中残留的粉尘, 其粒径分布与燃烧充分程度、净化工艺相关。明确各类污染物的生成机理, 是掌握其分布规律、制定控制策略的核心依据。

1.3 污染物分布规律研究相关方法

低热值合成气燃烧污染物分布规律的研究方法主要分为实验测试法、数值模拟法及理论分析法, 三者相互补充、协同应用。实验测试法是最直接的研究手段, 主要通过搭建合成气燃烧实验台, 采用烟气分析仪、颗粒物采样器、红外热成像仪等设备, 实时检测燃烧过程中不同空间位置、不同时间节点的污染物浓度、温度分布等参数, 常用的实验系统包括固定床燃烧系统、对冲火焰燃烧系统等, 可直观获取污染物分布的实际数据。数值模拟法基于计算流体力学(CFD)理论, 结合燃烧动力学模型, 通过Fluent、ANSYS等软件模拟合成气燃烧过程, 预测污染物的空间分布、时间演化规律及不同工况的影响, 具有成本低、效率高、可模拟极端工况的优势。理论分析法则通过梳理燃烧反应动力学方程、污染物生成机理, 结合实验及模拟数据, 建立污染物分布的理论模型, 揭示污染物分布的内在规律, 为实验设计和模拟优化提供理论支撑。

1.4 污染物分布评价指标

为科学评价低热值合成气燃烧污染物的分布特性, 需建立一套系统、全面的评价指标体系, 涵盖污染物浓度分布、均匀性、峰值特征及时间稳定性等核心维度。浓度分布指标包括污染物的空间平均浓度、局部峰值浓度及浓度梯度, 其中平均浓度反映污染物的整体释放水平, 峰值浓度反映污染物的局部聚集程度, 浓度梯度反

映污染物在空间上的分布差异。均匀性指标采用变异系数、分布均匀度等参数,衡量污染物在燃烧空间内的分布均匀性,变异系数越小,表明污染物分布越均匀。时间稳定性指标包括污染物浓度的波动幅度、波动频率,反映污染物浓度随时间的变化规律,波动幅度越小,说明燃烧过程越稳定,污染物排放越可控。另外,还需结合污染物排放标准,设置达标率指标,评价污染物分布是否满足环保要求,为后续污染物控制方案的制定提供量化依据。

2 低热值合成气燃烧产物中污染物分布规律分析

2.1 污染物空间分布规律分析

低热值合成气燃烧产物中污染物的空间分布呈现显著的不均匀性,主要受燃烧火焰形态、气流运动、温度场分布等因素影响。在燃烧空间内,NO_x的空间分布与温度场高度相关,火焰核心区温度相对较高,NO_x浓度呈现峰值,随着距离火焰核心区距离的增加,温度逐渐降低,NO_x浓度也随之下降,在燃烧空间边缘区域达到最低值。SO_x的空间分布主要取决于合成气中含硫杂质的扩散速度及燃烧均匀性,通常在合成气喷射口附近浓度较高,随着气流扩散,SO_x浓度逐渐降低,且在水平方向上的分布差异小于垂直方向^[2]。颗粒物的空间分布与气流运动方向密切相关,在气流上升区域,颗粒物易随气流扩散,浓度相对较低,而在燃烧空间底部、死角区域,颗粒物易沉降聚集,浓度较高。总体而言,污染物在燃烧空间内呈现“核心区域浓度高、边缘区域浓度低,垂直方向差异大、水平方向相对均匀”的空间分布规律。

2.2 污染物时间分布规律分析

低热值合成气燃烧过程中所产生污染物的时序分布特征,主要受燃烧稳定性、合成气组分动态波动以及运行工况变化等多重因素影响,呈现出显著的阶段性与波动性规律。在燃烧启动阶段,合成气与空气的混合过程往往不够充分,燃烧区域温度相对较低,这使得燃烧反应处于不稳定状态,导致污染物浓度出现较大幅度的波动。此时,由于燃烧条件限制,NO_x、SO_x等气态污染物的生成量较少,浓度处于较低水平;而颗粒物因燃烧不充分,大量未燃尽的碳粒等物质形成较高浓度的颗粒物排放。随着燃烧过程的持续推进,当燃烧逐渐趋于稳定状态时,污染物浓度也随之逐渐平稳,波动幅度显著减小。进入稳定燃烧阶段,若合成气组分能够保持稳定,污染物浓度会维持在相对固定的范围内。其中,NO_x、SO_x浓度基本保持稳定不变;颗粒物浓度则会因粉尘在燃烧设备内的自然沉降作用而略有下降。然而,一旦合成气组分出现波动,污染物浓度便会随之发生相应变化。

在燃烧停止阶段,燃烧温度会快速下降,这使得NO_x、SO_x的生成反应受到抑制,生成量减少,浓度迅速降低。与此同时,部分未完全燃烧的颗粒物会随尾气排出,导致颗粒物浓度出现短暂升高,随后逐渐下降。整体而言,低热值合成气燃烧污染物浓度呈现出“启动阶段波动大、稳定阶段较平稳、停止阶段快速下降”的时间分布规律。

2.3 不同工况对污染物分布规律的影响

不同燃烧工况是影响低热值合成气燃烧污染物分布规律的关键因素,主要包括空燃比、燃烧温度、合成气组分、喷射速度等,各工况对污染物分布的影响具有显著差异。空燃比的影响最为显著,当空燃比过低时,燃烧不充分,颗粒物、CO浓度升高,NO_x浓度降低;当空燃比过高时,过量空气会导致NO_x浓度升高,同时颗粒物浓度降低,SO_x浓度基本不变。燃烧温度升高时,热型NO_x生成量增加,导致NO_x浓度升高,同时燃烧更充分,颗粒物浓度降低,SO_x浓度受温度影响较小^[3]。合成气组分中,CO、H₂浓度升高会提高燃烧温度,使NO_x浓度上升;含硫杂质浓度升高会直接导致SO_x浓度升高;惰性气体(N₂、CO₂)占比升高会降低燃烧温度,减少NO_x生成,同时降低燃烧稳定性,使颗粒物浓度升高。喷射速度增大时,合成气与空气混合更充分,燃烧更均匀,污染物空间分布更均匀,浓度波动减小。

2.4 多污染物协同分布特性分析

低热值合成气燃烧过程中,NO_x、SO_x、颗粒物等多污染物的分布并非相互独立,而是存在显著的协同关联特性,其协同分布主要受燃烧条件和反应机理的共同影响。NO_x与颗粒物的分布呈现负相关关系,当燃烧温度升高时,NO_x浓度升高,而颗粒物因燃烧充分浓度降低;当空燃比过低时,颗粒物浓度升高,NO_x浓度降低。SO_x与NO_x的分布关联性较弱,SO_x主要受含硫杂质含量影响,而NO_x主要受温度、空燃比影响,但在高温、高氧浓度工况下,两者浓度均会呈现上升趋势。颗粒物的分布会影响NO_x的生成,细小颗粒物表面会吸附部分氮氧化物,降低局部NO_x浓度。多污染物的协同分布特性表明,单一污染物的控制需考虑对其他污染物的影响,不能孤立施策,需基于协同分布规律,制定多污染物协同控制策略,才能实现污染物的高效控制。

3 污染物分布规律的影响机理与控制建议

3.1 污染物分布规律的核心影响机理剖析

低热值合成气燃烧污染物分布规律的核心影响机理可归结为燃烧反应动力学、流体力学及传热传质三大过程的协同作用,三者相互关联、相互影响,共同决定污

染物的生成与分布。从燃烧反应动力学来看,合成气中可燃组分(CO 、 H_2)的氧化反应速率、污染物生成反应(如 NO_x 、 SO_x 生成反应)的速率,直接决定了污染物的生成量及分布特征,反应速率受温度、氧浓度、组分浓度等因素调控,进而影响污染物在空间和时间上的分布。从流体力学来看,合成气与空气的混合过程、气流的流动状态(层流、湍流)、燃烧空间内的流场分布,决定了污染物的扩散速度和分布范围,流场不均匀会导致污染物局部聚集,形成浓度峰值。从传热传质来看,燃烧过程中的热量传递的均匀性、物质扩散的速率,影响燃烧温度场的分布和污染物的迁移扩散,温度场不均匀会导致污染物生成量的空间差异,物质扩散速率影响污染物的时间演化规律,三者的协同作用构成了污染物分布规律的核心影响机理。

3.2 基于分布规律的污染物控制初步建议

基于低热值合成气燃烧污染物的分布规律及影响机理,结合实际燃烧工况,提出以下初步控制建议,重点围绕优化燃烧过程、减少污染物生成、改善分布均匀性展开。一是优化燃烧工况参数,合理调控空燃比,将其控制在最佳范围,确保燃烧充分的同时,减少 NO_x 和颗粒物的生成;控制燃烧温度,避免局部高温区域的形成,降低热力型 NO_x 生成量。二是改善合成气与空气的混合效果,优化喷射结构,提高喷射速度的均匀性,促进合成气与空气充分混合,减少局部缺氧或过量空气区域,改善污染物空间分布均匀性。三是加强合成气净化预处理,降低原料中的含硫杂质、粉尘及焦油含量,从源头减少 SO_x 和颗粒物的生成。四是优化燃烧空间结构,减少燃烧死角,促进气流均匀流动,避免颗粒物沉降聚集,同时设置合理的尾气处理装置,对燃烧产物中的污染物进行进一步净化,确保达标排放。

3.3 控制方案可行性分析

对上述基于污染物分布规律提出的控制建议进行可行性分析,从技术、经济、环保三个维度论证其可实施性。技术层面,优化燃烧工况参数、改善混合效果、加

强合成气预处理及优化燃烧空间结构等措施,均基于成熟的燃烧理论和工程技术,现有实验设备和工业装置可实现相关参数的调控,喷射结构优化、净化预处理等技术已在工业燃烧领域广泛应用,技术成熟度较高,可有效实现污染物控制目标^[4]。经济层面,各项控制措施的投入成本相对较低,优化工况参数无需新增大量设备投资,仅需调整现有控制系统;合成气预处理和尾气处理装置的投资可通过减少污染物排放罚款、提高燃烧效率实现回收,长期运行成本可控,符合工业生产的经济性要求。环保层面,各项控制措施可有效降低 NO_x 、 SO_x 、颗粒物等污染物的排放浓度,改善污染物分布均匀性,确保燃烧产物排放满足国家环保标准,减少对环境的污染,具有显著的环保效益。综上,提出的污染物控制方案技术可行、经济合理、环保达标,可在实际工业生产中推广应用。

结束语

本研究围绕低热值合成气燃烧产物中污染物分布规律展开,深入剖析其基础特性、生成机理,运用多种方法分析污染物分布规律及影响因素,提出针对性控制建议并验证可行性。研究成果有助于优化低热值合成气燃烧过程,降低污染物排放,为其清洁高效利用提供理论支撑与技术指导,推动能源利用与环境保护协调发展,未来可进一步拓展研究深度与广度。

参考文献

- [1]韩绍博,任强强,杨少波,等. 200kW煤纯化-燃烧和宽负荷 NO_x 排放特性[J]. 煤炭学报,2024,49(10):4060-4070.
- [2]谭厚章,王肖肖,周必茂,等. 煤粉气流床气化炉预热燃烧特性及 NO_x 排放试验研究[J]. 煤炭学报,2023,48(11):4192-4204.
- [3]张波,穆延非,陈新明,等. 低热值合成气燃气轮机仿真系统的设计与验证[J]. 风机技术,2021,63(2):73-78.
- [4]张建府. IGCC机组低热值合成气燃气轮机燃烧器喷嘴改进[J]. 发电设备, 2023, 37(5):339-342.