

Pollutant Emission Simulation of Biomass Pellets Oxygen-Enriched Combustion Based on Aspen Plus

Ziyi Zhen¹, Imran Ali Shah²

¹School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin

²School of International Education, Hebei University of Technology, Tianjin

Email: xiaolinwudizhen@gmail.com

Received: Jun. 3rd, 2018; accepted: Jun. 23rd, 2018; published: Jul. 3rd, 2018

Abstract

This paper is proposed to study the effects of combustion atmosphere, oxygen concentration and excess oxygen coefficient on the NO and CO emission characteristics of a biomass hot water boiler during oxygen-enriched combustion. The simulation on biomass combustion under O₂/CO₂ and O₂/N₂ atmospheres was conducted based on Aspen Plus. The increase in oxygen concentration will increase the NO emission in the O₂/N₂ atmosphere first and then decrease, and the NO emission in the O₂/CO₂ atmosphere will continue to increase. Under the O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmospheres, CO emissions increase with the increase of oxygen concentration, and CO₂ decreases with the increase of oxygen concentration. Increasing the excess oxygen coefficient causes a trend of NO to increase first and then decrease under the two atmospheres, reaching the maximum around 1.2. In both atmospheres, the CO emissions decrease as the excess oxygen coefficient increases. With the increase of oxygen concentration, the proportion of CO₂ in the O₂/N₂ atmosphere increases with the increase of oxygen concentration. After the oxygen concentration exceeds 50%, the CO₂ share remains basically unchanged. However, under the O₂/CO₂ atmosphere, it gradually decreased, and when the oxygen concentration was 21%~50%, the CO₂ proportion did not decrease significantly. However, the proportion of CO₂ is not sensitive to the change of the excess oxygen coefficient, but it only decreases passively as the excess O₂ increases.

Keywords

Oxy Combustion, Biomass, NO Emission, CO Emission, Aspen Plus

基于Aspen Plus的生物质颗粒富氧燃烧污染物排放模拟

甄子毅¹, Imran Ali Shah²

¹河北工业大学能源与环境工程学院, 天津

²河北工业大学国际教育学院, 天津

Email: xiaolinwudizhen@gmail.com

收稿日期: 2018年6月3日; 录用日期: 2018年6月23日; 发布日期: 2018年7月3日

摘要

为了研究燃烧气氛、进口氧气浓度和过量氧气系数对生物质热水炉富氧燃烧过程中NO, CO排放特性的影响, 以生物质颗粒为燃料, 在Aspen Plus软件中进行了O₂/CO₂、O₂/N₂气氛下不同氧气浓度不同过量氧气系数的生物质燃烧模拟。模拟结果表明, 氧气浓度的增加会使O₂/N₂气氛下NO排放先增加后减少, O₂/CO₂气氛下NO排放持续升高。而在O₂/N₂和O₂/CO₂气氛下, CO的排放都会随着氧气浓度的增高而增高, CO₂却会随着氧气浓度的增高而降低。提高过量氧气系数会使NO在两种气氛下的排放有一个先增长后降低的趋势, 在1.2左右达到最高。两种气氛下, CO的排放则是随着过量氧气系数的增加而降低。随着氧气浓度的升高O₂/N₂气氛下CO₂占比随着氧气浓度升高而升高, 氧气浓度超过50%之后, CO₂占比基本不变。而在O₂/CO₂气氛下却是逐渐降低, 且在氧气浓度在21%~50%时, CO₂占比下降不明显。而CO₂占比对于过量氧气系数的变化并不敏感, 只是随着过剩的O₂增多而被动下降。

关键词

富氧燃烧, 生物质, NO排放, CO排放, Aspen Plus

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在国务院印发的“十三五”控制温室气体排放工作方案中要求到2020年, 单位国内生产总值二氧化碳碳排放比2015年下降18%, 碳排放总量得到有效控制[1]。2018年3月7日, 中国国家能源局发布《2018年能源工作指导意见》, 提出全国能源消费总量控制在45.5亿吨标准煤左右。非化石能源消费比重提高到14.3%左右, 天然气消费比重提高到7.5%左右, 煤炭消费比重下降到59%左右[2]。而在中国应对气候变化的政策与行动2017年度报告中表示2016年农业部继续采取综合措施减少温室气体排放, 推进农村沼气转型升级, 印发《关于下达2016年规模化大型沼气工程中央预算内投资计划的通知》。积极推广秸秆热解气化, 秸秆生物气化, 秸秆固化成型, 秸秆碳化等燃料化利用技术, 大力推广节能高效的省柴节煤炉灶、农村太阳能利用和小型光伏、小型风力、微型水力发电等[3]。

随着时间的发展, 低成本的制氧技术有了长足的进步, 比如渗透膜法和变压吸附法[4][5]。富氧燃烧技术也有了很大的发展和扩张。其原理是利用空气分离产生的O₂与部分再循环烟气混合代替空气进行燃烧, 产生的烟气中CO₂浓度能够达到90%以上。生物质是可再生能源, 生长过程中吸收CO₂, 将C和太阳能固定在体内, 生物质能利用具有CO₂低排放的特点[6]。选择生物质作为能源是降低对化石能源依赖又能减少温室气体排放的行之有效的办法[7]。

Aspen Plus是一种通用的化工模拟软件, 已广泛应用于煤、生物质及垃圾衍生燃料的燃烧、气化等

领域, 得到许多精确的模拟结果[8] [9] [10] [11] [12]。宋新南, 徐惠斌等[13]利用 Aspen Plus 软件建立了生物质燃烧模型, 对燃烧中 NO_x 的生成进行了模拟计算, 结果表明所建立的燃烧模型能够对生物质的燃烧产物分布进行比较准确的预测, 生物质燃烧过程中 NO_x 生成量随温度和过量空气系数的增加而快速增长。胡满银等[14]利用 CHEMKIN 软件对次烟煤的常规燃烧和富氧燃烧过程进行了模拟, 通过对 2 种燃烧方式下 NO_x 生成速率的比较, 分析了富氧燃烧方式下影响 NO_x 生成的因素。李英杰, 赵长遂等[15]利用 Aspen Plus 软件对 O_2/CO_2 气氛下煤的燃烧产物进行了热力学模拟计算, 研究在 O_2/CO_2 气氛下燃烧温度、过氧系数对煤燃烧产物的影响。Li J, Yang W, Blasiak W 等[16]利用 Aspen Plus 对生物质的再循环烟气富氧燃烧过程进行了模拟研究, 并提出了一种新的燃烧模型。

本文拟通过 Aspen Plus 软件对生物质颗粒的预干燥和富氧燃烧过程进行模拟计算, 研究燃烧气氛、氧气浓度对污染物排放的影响。

2. 生物质颗粒燃烧过程的模型建立

2.1. 模拟对象

模拟选取的生物质成型颗粒样品的工业分析、元素分析及热值见表 1。干燥后的煤样水分含量(w)为 2%。干燥介质为空气(79% N_2 /21% O_2), 压力为常压, 干燥介质温度为 120℃, 燃烧介质选取纯 O_2 、 O_2/N_2 和 O_2/CO_2 , 每种模拟工况的过量氧气系数为 1.1; 选取 O_2 浓度为 30 时, 模拟工况过量氧气系数为 1.0~1.5。

由于生物质是混合物没有固定的化学式且并不在 Aspen Plus 组分库中, 这里对生物质组分进行自定义为 Nonconventional 非常规固体组分。非常规组分是非均相体系, 不参与化学平衡或相平衡, 只参与计算的物性是自由焓值和密度。Aspen Plus 使用一系列必要的可识别的组分来表征非常规组分的物性参数。这里使用 HCOALGEN 和 DCOALIGT 模型计算生物质的焓值和密度, 如图 1 所示。HCOALGEN 模型中, 需要输入煤的组分属性包括 Proxanal 工业分析、Ultanal 元素分析、Sulfanal 硫分析。其中 Proxanal 工业分析, 包括水分、固定碳、挥发份、灰含量的工业分析; Ultanal 元素分析, 包括灰分、C、H、N、Cl、S、O; Sulfanal 硫分析, 包括硫化矿、硫酸盐及有机硫。HCOALGEN 可以根据这些数据与指定关联式计算煤的燃烧焓、生成焓、热熔、焓值基准等。Option Codes 区域 4 个 1 表示指定燃烧焓、生成焓等计算基准。固体组分的物性方法和常规组分的物性方法相同, 由于模拟流程中并不涉及到各种组分与 H_2O 的反应, 且流程包含 SO_2 、 N_2 、 O_2 等低压常规组分, 所以选择选 IDEAL 物性方法。

2.2. 预干燥模型

为了更简便地应用该软件描述生物质的燃烧过程, 给出以下假设:

- 燃烧处于稳定运行状态, 所有参数不随时间发生变化。
- 生物质燃烧时, 先热解释放出挥发份并产生焦炭, 再燃烧。

Table 1. Proximate analysis, ultimate analysis and lower heat value of biomass pellets

表 1. 生物质颗粒的工业分析、元素分析及热值

工业分析/wt%		元素分析/wt%	
低位热值(MJ/kg)	22.83	C	46.67
水分	6.21	H	6.14
挥发分	79.61	O	31.17
固定碳	12.17	N	0.14
灰分	2.01	S	0.26

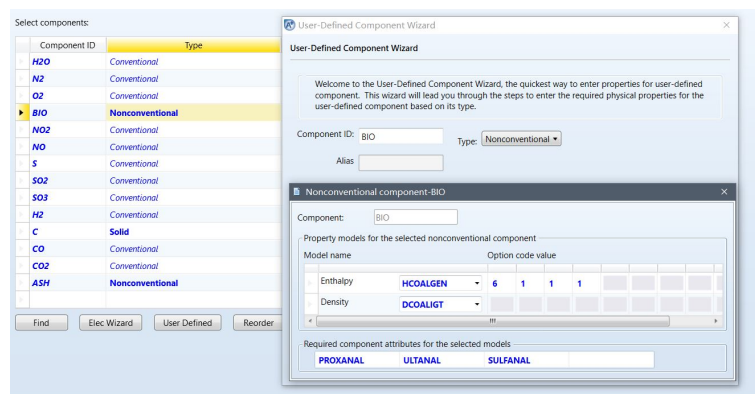


Figure 1. Biomass component model

图 1. 生物质组分物性模型

- 热解后的产物在炉内燃烧时反应温度唯一，即所有反应的反应温度相同。
- 燃烧过程中燃料和氧分布均匀。
- 生物质热解和燃烧均反应完全。
- 整个模拟过程中没有压力损失。
- 生物质燃料中的氮均转化为 HCN、NH₃ 和 NO；生物质燃料中的硫均转化为 SO₂、SO₃。
- 燃烧速度很快，只受化学反应速度控制，能够达到理想的化学平衡。
- 生物质中的灰分为惰性物质，在燃烧中不参与反应。

生物质预干燥流程包括水分蒸发和气固分离 2 个过程。用化学计量反应器 RSTOIC 模块模拟生物质水分蒸发过程，假设蒸发过程为绝热等压过程。根据水的物料平衡及总物料平衡得出干煤含水量的表达式，通过 Calculate 模块的 Fortran 语句规定干煤的含水量。用两相闪蒸器 FLASH2 模块模拟水分与干煤的分离过程。预干燥模型流程见图 2。

2.3. 燃烧模型

生物质燃烧流程包括预干燥、裂解、燃烧和分离等 4 个过程，模拟流程的物性方法选为理想模型。燃烧模型流程见图 3。用产率反应器 RYIELD 模块模拟生物质裂解过程，该过程是将生物质分解成单元素分子 H₂O、C、H₂、N₂、S、O₂ 和灰分(Ash)，并将裂解热导入下一模块。用吉布斯反应器 RGIBBS 模块模拟生物质燃烧过程，由于使用 RGIBBS 模块时不需要输入反应式，所以需要规定产物，产物包括：NO、NO₂、SO₂、SO₃、CO 和 CO₂。用子物流分离器 SSPLIT 模块模拟气固产物的分离。

3. 模拟结果及分析

3.1. 不同气氛对污染物排放的影响

模拟条件: 大气压为常压 101.325 kPa, 湿生物质颗粒为室温 27.3℃, 湿生物质颗粒进料量为 1800 kg/h, 参与模拟燃烧的气氛温度为室温 27.3℃, 过量空气系数 1.1, 燃烧反应完全。不同氧气浓度对 NO 生成量的关系见图 4, O₂/N₂ 气氛下不同氧气浓度对 CO 和 CO₂ 生成量的关系见图 5, O₂/N₂ 气氛下不同氧气浓度对 CO 和 CO₂ 生成量的关系见图 6。

由图 4 可以看到在 O₂/N₂ 气氛下时, NO 的释放随着氧气浓度的增加呈现先增加后减少的趋势, 这是因为在 O₂ 浓度在 21%~50%之间时随着氧气浓度的增加燃烧愈加剧烈, 出现了大量的热力型 NO_x, 而当氧气浓度在 60%~100%时, 参与燃烧的 N₂ 减少, 使得热力型 NO_x 的产生减少, 并且由于氧气浓度的增加,

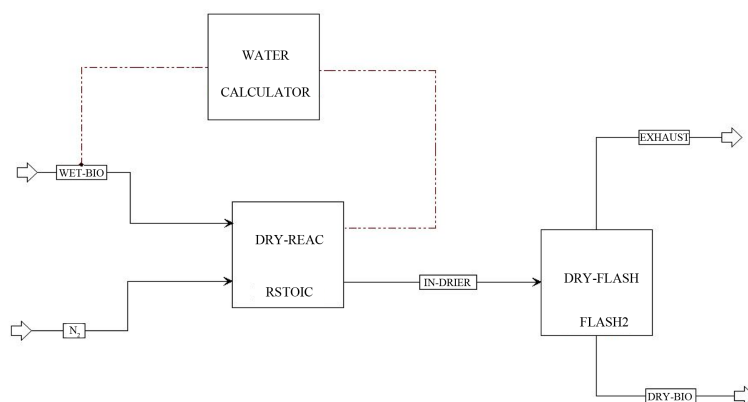


Figure 2. Flow sheet of pre-drying model
图 2. 预干燥模型流程图

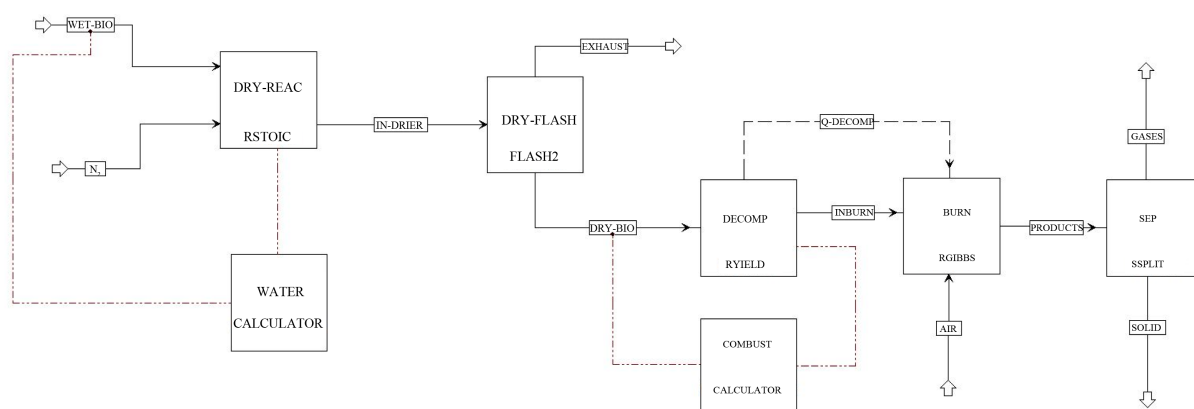


Figure 3. Flow sheet of burning model
图 3. 燃烧模型流程图

使得快速型 NO_x 的产量也在减少, 就出现了 NO 排放量下降的趋势。而在 O_2/CO_2 气氛时, NO 排放随着氧气浓度的增加而增加, 这里主要是热力型 NO 在增加, 随着 O_2 浓度的增加使燃烧更为剧烈, 燃烧温度更高。

由图 5 可以看到在 O_2/N_2 气氛下时, CO 的释放随着氧气浓度的增加而增加, 而 CO_2 则随着 O_2 浓度的增加而减少。这是因为随着 O_2 浓度的增加, 参与燃烧的 O_2 更多的是与热解产生的焦炭反应生成 CO , 而且随着氧气浓度增加, 反应更加剧烈, 还会有一部分 O_2 与 CO_2 反应生成 CO 。随着氧气浓度的增加 CO_2 下降及 CO 上升的幅度都开始减缓, 在氧气浓度小于 50% 之前减缓幅度不明显, 超过 50% 之后继续提升氧气浓度作用已经开始降低。

由图 6 可以看到在 O_2/CO_2 气氛下时, CO 的释放随着氧气浓度的增加而增加, 而 CO_2 则随着 O_2 浓度的增加而减少。这与 O_2/N_2 气氛下的原因相同。而且因为是有大量的 CO_2 参与燃烧使得 CO 的排放比 O_2/N_2 气氛下更多。在 O_2/CO_2 气氛下同样是在氧气浓度达到 50% 时开始显现出颓势, 综合上文就为之后的富氧燃烧实验提供依据, 氧气浓度超过 50%, 对污染物排放的影响已经减弱。

3.2. 过量氧气系数对污染物排放的影响

在富氧燃烧实验中由于 O_2 与生物质在燃烧时并不会充分混合完全燃烧, 因此实际实验时都会适当增加过量氧气系数。模拟条件: 大气压为常压 101.325 kPa, 湿生物质颗粒为室温 27.3℃, 湿生物质颗粒进

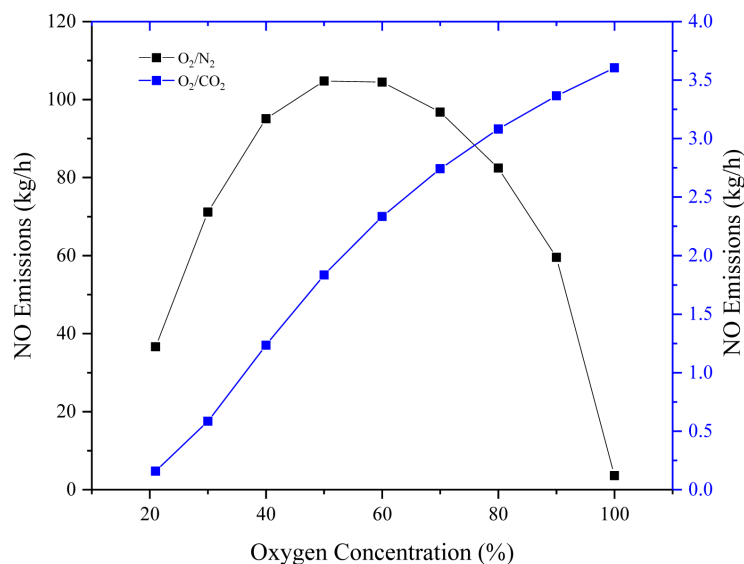


Figure 4. Effects of oxygen concentrations on NO emissions

图 4. 不同氧气浓度对 NO 排放的影响

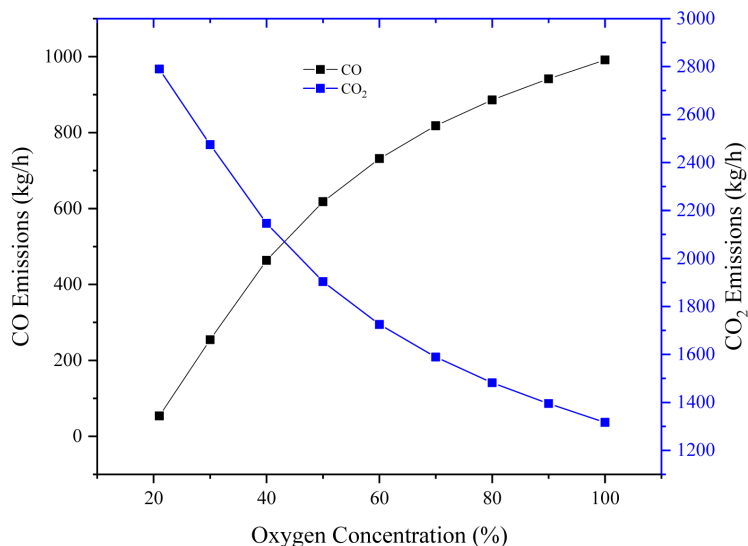


Figure 5. Effects of oxygen concentrations on CO emission in O₂/N₂ atmosphere

图 5. O₂/N₂ 气氛下不同氧气浓度对 CO 排放的影响

料量为 1800 kg/h, 参与模拟燃烧的气氛温度为室温 27.3℃, 氧气浓度为 30%, 过量空气系数 1.0~1.5, 燃烧反应完全。过量氧气系数对 NO 生成量的关系见图 7, 过量氧气系数对 CO 生成量的关系见图 8。

由图 7 可以看到, 随着过量氧气系数的增加, NO 的排放都呈现一个先增加后降低的趋势。这是因为随着过量氧气系数的增加, 会使 NO 更多的反应生成 NO₂。而在 O₂/CO₂ 气氛下, 由于不会有 N₂ 参与反应, 所以会有很少的燃料型 NO 生成。O₂/CO₂ 气氛时 NO 排放量在过量氧气系数在 1.2 达到最高, 而之后即使增加到 1.5, NO 的排放也只是下降到 1.1 时的水平。对于 O₂/N₂ 气氛而言, NO 排放最高峰出现在过量氧气系数为 1.3 时, 而过量氧气系数 1.1 时 NO 排放量比 1.5 时还略低, 这说明增加更多的氧气并不能减少 NO 的排放。

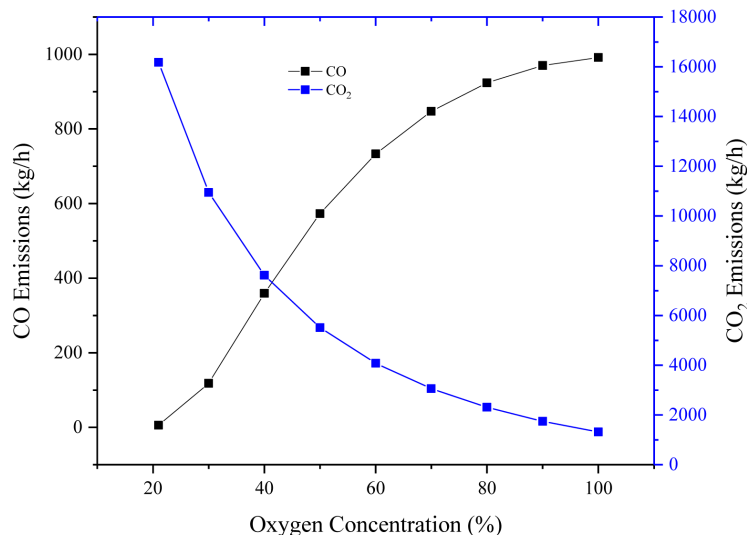


Figure 6. Effect of oxygen concentrations on CO emission in O₂/CO₂ atmosphere

图 6. O₂/CO₂ 气氛下不同氧气浓度对 CO 排放的影响

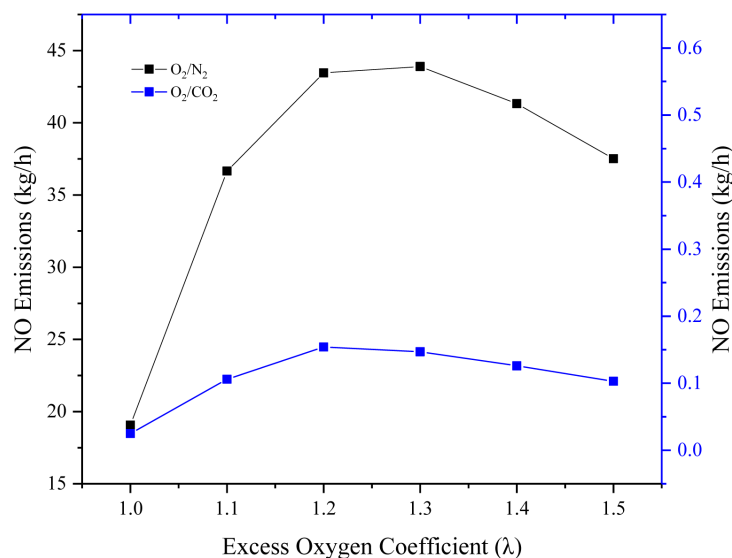


Figure 7. Effect of excess oxygen coefficient on NO emissions

图 7. 过量氧气系数对 NO 排放的影响

由图 8 可以看到, 随着过量氧气系数的增加, CO 的排放都呈现降低的趋势。这是因为随着过量氧气系数的增加, 燃烧更为充分, 会使生成的 CO 与 O₂ 反应, 降低烟气中 CO 的含量。在 O₂/CO₂ 气氛下, 当过量氧气系数从 1.0 升高到 1.1 时 CO 的排放出现了急剧下降, 在过量氧气系数增加到起及以上后, CO 排放量基本不变。而对于 O₂/N₂ 气氛时 CO 排放量也在过量氧气系数为 1.1 时大幅下降, 但是下降幅度要比 O₂/CO₂ 气氛下较小, 而且需要过量氧气系数高于 1.5 之后才出现 CO 排放量基本不变的趋势。主要是因为 CO₂ 对于 CO 有着比 N₂ 更为明显的抑制作用。结合上文过量氧气系数对 NO 排放的影响, O₂/N₂ 气氛下过量氧气系数为 1.1 较为合适, 而在 O₂/CO₂ 气氛时同样是过量氧气系数为 1.1 较为合适。这为之后生物质富氧燃烧实验过量氧气系数的选取提供了依据。

3.3. 烟气中 CO₂ 含量的变化趋势

富氧燃烧的一个重大应用就是结合碳捕捉和储存(Carbon Capture and Storage 即 CCS)对 CO₂ 的排放进行控制。而对空气(21% O₂~79% N₂)燃烧烟气中 CO₂ 进行收集时一个难点就是 N₂ 占总质量的 50%以上, 烟气成分较为复杂, 如图 10 所示。这里对各种工况下烟气中 CO₂ 的含量(质量分数)进行对比, 分析富氧燃烧的对 CCS 的有效作用。模拟条件为大气压为常压 101.325 kPa, 湿生物物质颗粒为室温 27.3℃, 湿生物物质颗粒进料量为 1800 kg/h, 参与模拟燃烧的气氛温度为室温 27.3℃, 氧气浓度为 30%, 过量空气系数 1.0~1.5, 燃烧反应完全。

由图 9 可知随着氧气浓度的增加 O₂/N₂ 气氛下 CO₂ 质量占比逐渐上升, N₂ 占比逐渐降低, 但由于烟气中 NO₂ 和 O₂ 占比的增长, 使得 CO₂ 占比升高并不明显。而且只有在氧气浓度在 21%~50%之间时 CO₂

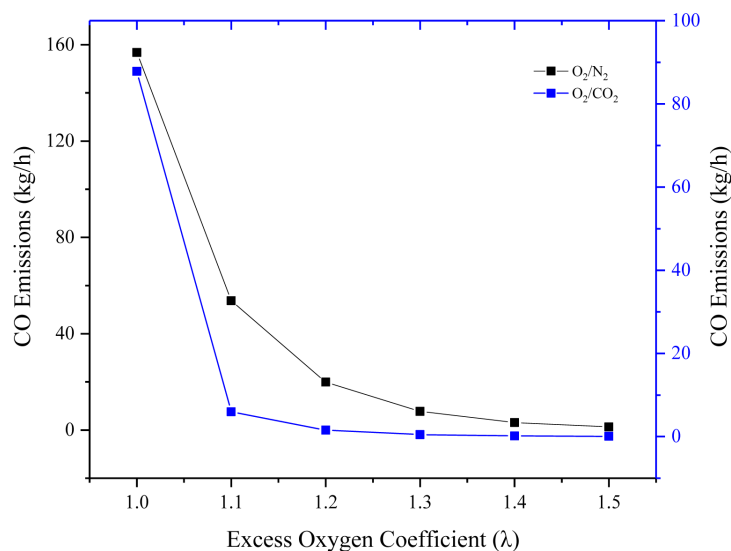


Figure 8. Effect of excess oxygen coefficient on CO emissions

图 8. 过量氧气系数对 CO 排放的影响

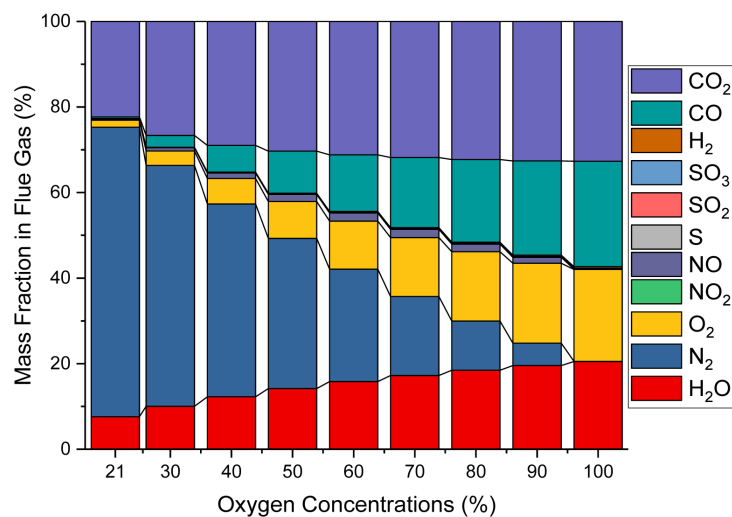


Figure 9. Change of substance mass fraction under O₂/N₂ atmosphere

图 9. O₂/N₂ 气氛下各物质质量分数变化图

占比变化才比较明显, 当氧气浓度超过 50%之后 CO_2 占比基本不变, 主要是其他成分在进行变化。

由图 10 可知在 O_2/CO_2 气氛下烟气中 CO_2 占比随着氧气浓度的提高而逐渐降低, 主要增高的有 CO 、 O_2 和 H_2O 。而当氧气浓度在 30%时, CO_2 占比下降并不明显, 在 50%时 CO_2 占比依然有 70%以上, 属于较高水平。结合上图可知在两种气氛下, 想获得更高的 CO_2 占比, 50%氧气浓度是一个适宜的选择。

由图 11 和图 12 可知在 O_2/N_2 气氛和 O_2/CO_2 气氛下烟气中 CO_2 占比随着过量氧气系数的提高而逐渐降低, 主要增高的只有 O_2 。但由于 CO_2 降低幅度并不大, 仅仅是因为氧气过剩而导致的被动降低, 但若是结合前文图 7 和图 8, 为了降低 NO 和 CO 的排放, 可以适当增加过量氧气系数到 1.1。

4. 结论

从上述模拟结果可以得出以下结论:

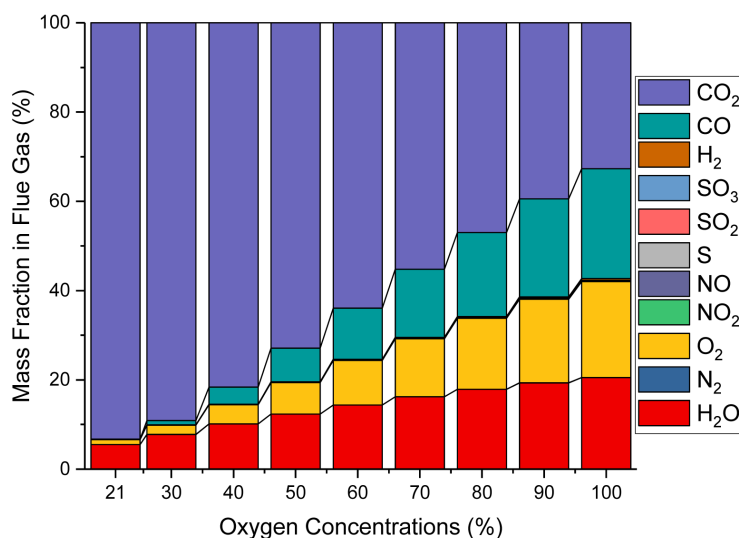


Figure 10. Change of substance mass fraction under O_2/N_2 atmosphere

图 10. O_2/CO_2 气氛下各物质质量分数变化图

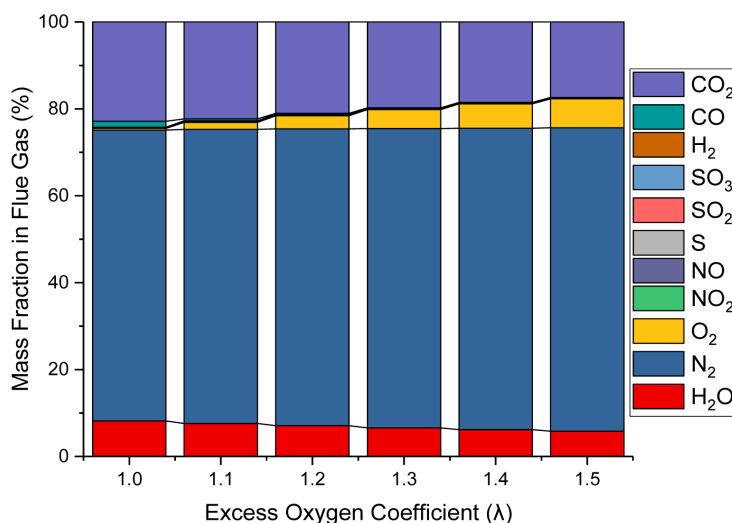


Figure 11. Change of substance mass fraction under O_2/N_2 atmosphere

图 11. O_2/N_2 气氛下各物质质量分数变化图

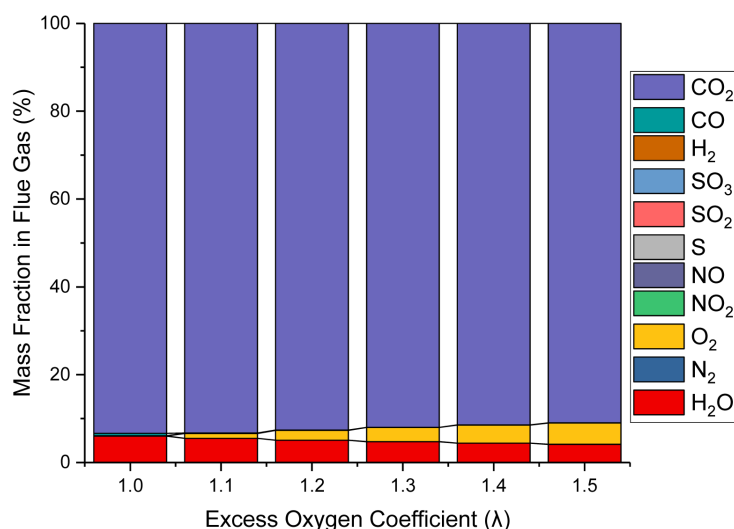


Figure 12. Change of substance mass fraction under O₂/N₂ atmosphere
图 12. O₂/CO₂ 气氛下各物质质量分数变化图

氧气浓度的增加会使 O₂/N₂ 气氛下 NO 排放先增加后减少, O₂/CO₂ 气氛下 NO 排放持续升高。而在 O₂/N₂ 和 O₂/CO₂ 气氛下, CO 的排放都会随着氧气浓度的增高而增高, CO₂ 却会随着氧气浓度的增高而降低。提高过量氧气系数会使 NO 在两种气氛下的排放有一个先增长后降低的趋势, 在 1.2 左右达到最高。两种气氛下, CO 的排放则是随着过量氧气系数的增加而降低。随着氧气浓度的升高 O₂/N₂ 气氛下 CO₂ 占比随着氧气浓度升高而升高, 氧气浓度超过 50% 之后, CO₂ 占比基本不变。而在 O₂/CO₂ 气氛下却是逐渐降低, 且在氧气浓度在 21%~50% 时, CO₂ 占比下降不明显。而 CO₂ 占比对于过量氧气系数的变化并不敏感, 只是随着过剩的 O₂ 增多而被动下降。

参考文献

- [1] 国务院. 国务院关于印发“十三五”控制温室气体排放工作方案的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-11/04/content_5128619.htm, 2016-11-04.
- [2] 国家能源局. 国家能源局关于印发 2018 年能源工作指导意见的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2018-03/09/content_5272569.htm, 2018-02-26.
- [3] 中国应对气候变化的政策与行动 2017 年度报告[EB/OL]. http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201710/t20171031_866090.html, 2017-10-31.
- [4] Purohit, P., Tripathi, A.K. and Kandpal, T.C. (2006) Energetics of Coal Substitution by Briquettes of Agricultural Residues. *Energy*, **31**, 1321-1331. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.06.004>
- [5] Kimura, S.G. (1986) Membrane Oxygen Enrichment. *Membrane Science*, **29**, 22-24. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(00\)82019-0](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(00)82019-0)
- [6] Jones, J.M., Lea-Langton, A.R., Ma, L., et al. (2014) Pollutants Generated by the Combustion of Solid Biomass Fuels. Springer-Verlag, Berlin, 99-104. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6437-1>
- [7] Saidur, R., Abdelaziz, E.A., Demirbas, A., Hossain, M.S. and Mekhilef, S. (2011) A Review on Biomass as a Fuel for Boilers. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **15**, 2262-2289. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>
- [8] Duan, L., Duan, Y., Zhao, C., et al. (2015) NO Emission during Co-Firing Coal and Biomass in an Oxy-Fuel Circulating Fluidized Bed Combustor. *Fuel*, **150**, 8-13. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.110>
- [9] 吕奇铮, 徐起翔, 张长森, 等. 基于生物质双流化床快速热解生产流程模拟的分析[J]. 化工进展, 2016, 35(3): 727-732.
- [10] 车德勇, 韩宁宁, 李少华, 等. 水蒸气对生物质和煤流化床共气化的影响模拟[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(32): 40-45.

- [11] 李先春, 任海飞, 余江龙. 等. 富氧燃煤电厂褐煤干燥过程的数值模拟[J]. 煤炭转化, 2014, 37(3): 38-41.
- [12] 王伟, 商玉坤, 武建军. 基于 Aspen Plus 的褐煤热解过程模拟[J]. 化学工业与工程, 2011, 28(3): 49-53.
- [13] 李延吉, 邹科威, 宋政刚, 等. 基于 Aspen Plus 模拟的垃圾衍生燃料富氧燃烧研究[J]. 热力发电, 2013, 42(10): 65-69.
- [14] 宋新南, 徐惠斌, 房仁君, 等. 基于 Aspen Plus 的生物质燃烧 NO_x 生成模拟[J]. 环境科学学报, 2009, 29(8): 1-5.
- [15] 李英杰, 赵长遂, 段伦博. O₂/CO₂ 气氛下煤燃烧产物的热力学分析[J]. 热能动力工程, 2007, 22(3): 1-5.
- [16] Li, J., Yang, W., Blasiak, W., *et al.* (2012) Volumetric Combustion of Biomass for CO₂ and NO_x Reduction in Coal-Fired Boilers. *Fuel*, **102**, 624-633. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.083>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7540, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sd@hanspub.org