

生物质燃烧烟气排放特性与污染物控制

余有芳¹，尚鹏鹏²，盛奎川²

(1.浙江商业职业技术学院应用工程学院，杭州310053；2.浙江大学生物系统工程与食品科学学院，杭州310058)

摘要：生物质锅炉及颗粒燃烧器的烟气污染物排放已引起人们的重视。生物质燃烧产生的污染物主要有颗粒物、一氧化碳和氮氧化物等污染气体。综述了国内外关于生物质燃烧的烟气排放特性及影响因素，如不同生物质燃料种类及性能、进风系统和进料系统配置及参数等，着重介绍了进风系统中风量配比、过量空气系数、氧气浓度以及进气流速等因素对烟气污染物排放的影响，提出了生物质燃烧烟气排放特性和污染物控制研究中应注意的问题。

0引言

生物质是一种清洁可再生能源，具有总量大、来源广、污染小等优点，越来越受到人们的青睐。生物质锅炉及燃烧器是生物质燃料燃烧利用的主要设备，其烟气污染物排放涉及的影响因素较多。若结构设计和工况参数不合理，则生物质燃烧的烟气污染物排放会超出排放标准，造成环境污染和危害人体健康。

生物质由可燃质、无机物和水分组成，其元素以C、H、O为主，含有少量的N、S。诸多研究表明，生物质燃烧排放的烟气污染物以CO、NO_x和颗粒物为主，SO₂等物质仅占很少部分。因此，在生物质燃烧领域，CO、NO_x

以及颗粒物的污染排放与控制被广泛关注。众多研究成果表明，燃料种类及性质、进风系统以及进料系统的配置及参数是影响烟气污染物排放的主要因素。其中，进风系统主要包括风量配比、过量空气系数、氧气浓度和进气流速等，进料系统主要包括进料方式和进料量等因素。如不能合理控制这些影响因素，生物质燃烧排放的烟气污染物增多，从而制约锅炉及燃烧器的推广应用。本文综述了生物质燃烧的污染物排放特性和规律，旨在为生物质高效燃烧利用和烟气污染物控制提供参考。

1生物质燃料性质对烟气污染物排放的影响

1.1不同种类生物质燃料的影响

不同种类的生物质燃料直接影响烟气污染物的排放量。左朋莱等在生物质成型燃料锅炉中分别燃烧木屑、花生壳、棉花秆以及玉米秆，结果表明玉米秆成型燃料燃烧后的烟尘排放量最高，达到369.8mg / Nm³，花生壳成型燃料燃烧后的烟尘排放量最低，仅为99mg / Nm³

。关于CO排放量，在空气流速3L / min、炉温800 燃烧情况下，竹基成型燃料燃烧排放的CO浓度远大于木基成型燃料。玉米秆挥发分少，灰分含量多，结渣严重，导致局部混合气体浓度较大，形成缺氧燃烧环境，而木质颗粒松散不易结渣，故在相同的流速与进料速率下，玉米秆颗粒CO的排放量 > 棉秆颗粒CO的排放量 > 木质颗粒CO的排放量。在流化床中以相同实验条件燃烧桉树和松树，结果发现松树生成的CO含量更少。草制成型颗粒热值低、水分高，故燃烧时的炉温相对较低，排放出的CO浓度少。综上所述，不同种类生物质燃烧在烟尘排放量以及CO的生成量上有很大的差异。

不同种类生物质混合燃烧也可改变烟气污染物排放状况。与纯木屑成型燃料燃烧相比，麦秆加到木屑中混合燃烧排放的颗粒物质量浓度大幅增加(13倍)，但是草芦加入到木屑中混合燃烧却只是轻微增加了烟气中颗粒物的排放，此外麦秆与木屑混合燃烧生成的CO、SO₂等气体也大幅增加。不同种类的生物质与煤混合燃烧有不同的烟气排放特性，在富氧燃烧条件下SO₂生成量：玉米秆混煤 > 麦秆混煤 > 稻秆混煤，NO生成量：稻秆混煤 > 玉米秆混煤 > 麦秆混煤，随着生物质配比的提高，各试样SO₂与NO排放量以及转化率均降低。因此，为改善烟气污染物的排放，可适当考虑混合燃料燃烧的方法。

1.2 生物质燃料特性参数的影响

生物质燃料的性能参数如密度、含水率、颗粒大小和热值等都会对烟气排放产生较大影响。成型燃料致密性高,表面挥发分首先析出,然后内部挥发分缓慢释放,形成稳定的燃烧环境,所以一般使用压缩成型的颗粒燃料燃烧比生物质原料燃烧更加稳定。当生物质成型燃料尺寸增加时,燃料不充分燃烧现象更加明显,CO排放量上升。高热值的燃料生成更多的NO_x气体,因为其燃烧生成更多的热量从而升高燃烧温度,同时增加了燃气与空气的混合时间。Vicente ED等研究发现颗粒物的排放主要受燃料性质和燃烧工况的影响,高含水率燃料、低过量空气系数、燃烧器设计缺陷等都会造成颗粒物质量浓度的增加。

有学者研究表明,生物质中的灰分以及含水率对烟气排放影响不大。尽管草制成型燃料比木质成型燃料有着更高K和灰分含量,但在燃烧时并没有表现出更高的颗粒物排放。经过烘干处理的生物质不一定能改变烟气排放性能,Ndibe

C等在下降管反应器

中分别燃烧有烘焙过和没有烘焙过的生

物质,结果却发现两者有着相似的NO_x

排放以及近似的粒度分布。关于不同生物质灰分以及水分含量对烟气污染物排放的影响,这方面的文献报道相对较少,因此,可进一步探索。

生物质的N含量对NO_x

的排放有着复杂的作用效果。一般来说燃料中的N含量越大,生成的NO含量越多。与其他大部分生物质相比,干草成型燃料(N含量最丰富)生成的NO_x

最多。刘海泽研究了在炉温900℃,30%O₂

/70%CO,环境下烟气中NO的生成总量:甘蔗渣<木屑<稻壳<秸秆,其中燃料的N含量:甘蔗渣(0.21%)<木屑(0.46%)<稻壳(0.53%)<秸秆(0.64%),这说明燃料的N含量越高,NO的排放量也越高。赵欣等也做了相似的研究,在相同进料速率和空气流速情况下得出NO的排放量:木质颗粒<玉米秸秆颗粒<棉秆颗粒,原因是木质颗粒燃料的含N量比其他种低得多,而棉秆的N含量最高且燃烧时的温

度要高于另外两种。但是也有研究表明NO的生成量与生物质中的含氮量不是正相关关系,有研究发现含N量高的竹基成型燃料燃烧排放的NO含量并没有明显高于木基成型燃料。因此,有关燃料N含量与烟气污染物排放的关系还有待阐明。

2 进风系统对烟气污染物排放的影响

2.1 风量配比的影响

送风配置主要包括一二次进风口的位置排布以及二次风比例的设置。在送风位置排布上,一次风大部分是从燃烧室(炉膛)底部进入,提供生物质热解气化和固定碳燃烧所需要的氧气。二次风通常从距离炉排上方一定高度的二次进风口进入燃烧室,主要提供挥发分燃烧所需的氧气。在生物质颗粒燃烧器炉膛中部送二次风的情况最好,比炉膛尾端和燃烧器出口送风更能增加氧气流与火焰的混合扰动,CO的燃烧更加充分。Pawlak-

Kruczek H等研究富氧燃烧环境下生物质混煤烟气

排放特性,发现NO_x

的排放主要

受燃料中挥发分含量、

空气分布以及锅炉或燃烧器配置的影响。在富

氧燃烧环境OEA30(30%O₂/70%CO₂

)下研究生物质燃烧

烟气排放特性时发现当氧气加入到富

氧燃烧室的一次进风口时,产生更低的SO₂和NO_x

的排放量。当氧气

加入到富氧燃烧室的二次进风口时,

有更多的挥发分析出氧化,产生更多的SO₂和NO_x

排放量。因此针对不同燃烧器合理设计送风口的位置,对有效减少烟气污染物的排放十分重要。

二次风比例是指二次进风量与总风量的比值。二次风比例过大容易造成一次风不足,挥发分析出受到影响。如果比值过小,就会导致挥发分与二次风混合效果差,发生缺氧燃烧,同样会有污染。罗小金研究生物质颗粒燃烧时一、二

次风量配比率对烟气中CO浓度的影响, 结果表明: 随着一、二次风量配比率在30%~60%增加时, CO生成量先减少后增大, NO_x的生成量先增加后减少, 在配比率达到50%时, CO的生成量达到最小值505mg / Nm³, 此时的工况最佳, 氧量既能保证与燃料的充分燃烧又不降低炉内温度。杨国锋研究生物质颗粒燃烧烟气排放特性时发现随着二次风比例在0.3~0.7增加, CO浓度呈现先降低后增加的变化趋势, NO_x含量呈先降低后增加又降低再增加的“W”形变化趋势。在二次风比例为0.3时, CO含量出现最大值193mg / Nm³, 此时挥发分较多, 而通入风量较少, 含量严重不匹配。在二次风比例为0.7时, NO_x的含量达到最大值71.8mg / Nm³。在二次风比例达到0.4时, 烟气中CO含量波动最小并达到最小值65mg / Nm³, NO_x的含量也达到最小值9.2mg / Nm³。Kortelainen M等研究分批输送燃烧的锅炉时发现当二次风量减少, 不完全燃烧会加剧, CO排放量增加。在充分燃烧情况下, 增加二次风量同时减少一次风量会显著降低CO以及颗粒物的排放。总之, 二次风比例在适当范围内增加时有利于减少烟气中污染物的排放。

新型送风配置能有效减少烟气污染物的产生。Ndibe C等提出空气分级燃烧技术, 将下降管反应器分级送风, 将燃烧室分为富燃料区(缺氧)和贫燃料区(富氧)。在缺氧区, 析出的挥发分(NH₃、HCN)得不到充分的氧气而转变为N₂, 之后的富氧区充分燃烧未燃尽的碳氢化合物。Messerer A等提出了热回收燃烧技术, 从生物质燃烧废气中回收热量, 热量回收率有75%~90%, 而且微粒沉积效率达到95%, 有效地减少了烟气中颗粒物的排放。

2.2 过量空气系数的影响

过量空气系数是指燃烧过程中单位质量燃料实际消耗的空气量与理论需要消耗的空气量之比, 也是衡量总体燃烧效率的一个重要指标。过量空气会将燃烧堆中的热量带到燃烧室外, 如果过量空气系数过大, 不仅减低炉膛温度而且将大部分挥发分直接带人烟道导致烟气中污染物排放过高, 如果过量空气系数过小, 又会出现可燃气体不完全燃烧同样会增加污染物的排放。颗粒燃烧炉CO与NO的生成都明显受到过量空气的影响, 对于每一种燃烧器总能找到最优的过量空气区间范围以保证CO与NO的排放量最低。

Roy MM等研究发现CO的排放主要受燃烧器内混合气浓度、燃烧温度以及燃气在燃烧区滞留时间等影响, 过量空气系数越大, 缺氧燃烧现象越容易被改善, 生物质成型燃料燃烧排放的CO量越低。杨国锋在研究生物质颗粒燃料燃烧时发现, 随着过量空气系数在2.3~2.7增加, 烟气中CO的含量呈现先降低后增加的趋势, 当过量空气系数为2.6时, CO含量达到最小值107mg / Nm³, NO_x含量也达到最小值53mg / Nm³。但有学者研究发现烟气中NO_x含量随着过量空气系数的变化不大。Roy MM等发现过量空气对于草制成型燃料燃烧排放的NO_x量影响不大。在颗粒物的排放上, 张学敏等研究发现随着过量空气系数的改变, 玉米秆、棉秆、木质燃料的颗粒物数量浓度都呈现单峰分布, 质量浓度都呈现双峰分布。Johansson LS等在生物质成型燃料燃烧实验中, 得出颗粒物排放的质量浓度随着过量空气的增加而增加的结论。综上所述, 过量空气系数对CO的排放影响较为明确, 不宜过大或过小, 但是对NO_x以及颗粒物的排放影响还有待深入研究。

2.3 进气流速的影响

进气流速是指单位时间内通过燃烧室的空气体积大小。空气流速过大或过小都会引起烟气污染物含量的增加。空气流速增加, 挥发分和空气的混合时间减少且炉温降低, NO_x的排放量减小, 烟度也下降。但是过高的空气流速会夹带出底部的灰粒, 增加木质成型燃料燃烧排放的颗粒物质量浓度。有研究发现在较高温度(>900)环境下, 减少空气流速, 可明显降低NO的排放量。

空气流速和进料速率共同影响烟气中污染物的排放。赵欣等研究木质颗粒燃烧烟气排放特性时发现在小负荷(进料量3kg/h)下, 空气流速(7~8m/s)增加时, 挥发分和空气的混合时间减少且炉温降低, NO生成量减少, 但在高负荷(

5kg/h)下, NO的生成量均随空气流速的增加而增加。可见, 综合考虑空气流速与进料速率才能找到较优的工况。

2.4 氧气浓度的影响

氧气浓度对NO以及颗粒物的排放有很大影响。氧气浓度增加时, 燃烧气氛的氧化性更强, 使得挥发分N更容易向NO转变。刘海泽在富氧条件下燃烧稻壳和秸秆, 发现随着氧气体积分数的增多, 两种生物质颗粒的NO释放量也增加, 所以相对低的氧气体积分数有利于抑制NO的生成。陈国华等用工业锅炉使用较多的木质成型燃料作为研究对象, 结果表明在温度较高(> 900)时, 减少空气量的供给, 可明显降低NO排放量和燃料N转化率。Pawlak-Kruczek H等发现富氧燃烧环境下的氧气浓度越大, SO_2 的排放量越大。在烟气颗粒物的排放上, 高氧气浓度反而有利于减少烟气中的颗粒物含量。vi-cente ED等发现给流化床反应器提供高浓度的氧气能形成较低的PM2.5排放。因此, 一般情况下, 增大氧气浓度, NO排放量会增加, 而颗粒物的排放量会减少。

当使用混合燃料燃烧时发现, 氧气浓度过多或过小, 烟气中 NO_x 的排放量都会较低。谢敬思在炉温 900 的富氧燃烧环境下研究各生物质(稻秆、麦秆、玉米秆)与煤30%配比混合燃烧时发现, 随着氧气浓度在21%~50%范围提高, SO_2 与NO生成量以及转化率均增大。孙俊威等使用稻壳与松木屑混合燃烧时发现, 生成的 NO_x 排放量随着氧气浓度(2%—7%)的增加而增加。因此, 应在中间范围内寻找最少污染物排放量的氧气浓度。

氧化气氛对生物质燃烧烟气污染物(CO)排放也会产生影响。刘海泽研究炉温 900 环境下的木屑颗粒和稻壳颗粒燃烧烟气排放特性时发现 O_2/N_2 的气氛下几乎不生成CO, 而在 O_2/CO_2 的气氛下, 生成大量的CO, 但是 O_2/N_2 的气氛下NO释放总量远高于 O_2/CO_2 的气氛。所以采用 O_2/N_2 燃烧有助于减少烟气中CO的排放量, 采用 O_2/CO_2 气氛燃烧能有效减少NO的排放量。因此, 氧化气氛如何合理选择也需深入研究探讨。

2.5 炉温的影响

炉温受送风方式、过量空气系数以及空气流速等的综合影响。一般来说温度越高, 氧气消耗燃烧速率越快, CO、 NO_x 以及 SO_2 排放量越多。研究发现NO的生成与挥发分中 NH_3 和HCN随温度变化规律直接相关。在 $800 \sim 900$, NH_3 生成率达到稳定值, 而HCN的生成率随着温度的升高而增加, 故NO的排放量在该温度区间内上升。谢敬思研究了在富氧环境下燃烧生物质混煤30%配比时发现当炉温在 $750 \sim 900$ 范围升高时, SO_2 与NO生成量以及转化率均提高。Alattab KA等在中孔介质燃烧器中研究生物质成型燃料的烟气排放特性, 结果表明当空气—燃料混合燃烧的温度下降时, 生成的CO略有减少。在富氧燃烧环境下, 刘海泽发现稻壳和秸秆颗粒燃烧释放的NO总量随着温度($800 \sim 1000$)的升高而增加, 对于秸秆颗粒来说, 温度越高, NO释放总量的增长程度越大, 但对稻壳颗粒来说温度越高, 增长程度越小。但是高温对颗粒物的排放不一定是增加效应, Hosseini S等在缺氧燃烧器中研究生物质燃料时发现较低温颗粒物的排放量上升。总之, 要避免生物质在最高污染物排放量的炉温下燃烧。

3 进料系统对烟气污染物排放的影响

3.1 进料方式的影响

进料方式主要包括上进料、下进料、水平进料方式以及特殊进料方式等。张学敏等研究表明在颗粒物排放总量上: 上进料燃烧器 < 水平进料燃烧器 < 下进料燃烧器。不同燃烧器匹配不同的生物质燃料会有不同的排放效果, 就PM2.5所占颗粒物比例来说, 将玉米秸秆颗粒在下进料燃烧器中燃烧, 棉秆颗粒在水平进料燃烧器中燃烧, 木质颗粒在上进料燃烧器中燃烧, 产生的PM2.5最少。

进料方式影响颗粒物排放特性的原因在于其结构设计的差异。上进料燃烧器的筒形进料结构与水平进料燃烧器的V字型进料结构, 使得灰渣与原料有序横置排开, 而下进料燃烧器的结构设计使得灰渣覆盖在燃料上, 燃烧不充分, 颗粒物排放增多。还有一个原因在于, 上进料燃烧器的燃料直接进到高温的燃烧火焰上部, 燃烧充分, 而下进料燃烧器底部温度低, 燃烧缓慢。在其他进料方式上, 杨国锋副研制了一种间歇进料的方式, 最后通过实验得出当选用进2s停

19S的进料方式(平均进料速率为5.0kg/h)时,能够有效降低污染物的排放。

3.2 进料量的影响

进料量过大或过小都不利于燃烧。进料量过大导致供氧不足,烟气中CO等污染物的排放量大,污染环境。进料量过小又会因为供入空气量过多,导致可燃气体在炉膛内的停留时间太短而且降低炉膛温度,不利燃烧。杨国锋研究发现在氧气浓度不变的情况下,进料速率(从进2S停13s到进2s停21S)的减少使得挥发分与氧气混合更加充分,CO与NO的排放量均减少。诸多研究表明在合理的进料范围内,进料速率的增加对NO_x以及颗粒物的排放起到促进作用。Roy MM等副比较不同负荷下木质颗粒燃料燃烧情况,结果表明高负荷燃烧生成的NO排放量比低负荷增加20%左右。Johansson LS等叫在生物质锅炉中研究颗粒燃料燃烧时,发现随着锅炉负荷的增加,颗粒物质量浓度略有增加。

进料量对不同生物质燃烧烟气排放特性的影响差异很大。木质颗粒燃料燃烧排放的NO浓度随着进料量的增多而增大,而玉米秸秆、棉秆颗粒燃烧排放的NO浓度随着进料量的增加而先增大后减少,但是3种颗粒燃料的CO排放量均随着进料速率的增大而增大,当进料量增加到5kg/h时,CO₂的排放量最高,因为此过程灰渣量增多,空气量减少,颗粒燃烧不充分。

4 结束语

生物质燃料的合理选择、进料系统以及供风系统的合理设置能有效减少烟气污染物的排放,保证生物质的燃烧环保利用,从而促进生物质锅炉及燃烧器的实际运行。在生物质燃烧烟气污染物排放特性的研究中需注意5个问题。

不同生物质混合燃烧,烟气污染物排放情况有较大差异,在生物质混合燃料燃烧的污染物排放方面还有待深入研究。

不同学者研究生物质含氮量对烟气中NO_x

的影响呈现相互矛盾结果,有待进一步探

讨。过量空气系数对烟气中NO_x

以及颗粒物排放的影响效果尚未阐明,还需加强这方面的研究。不同生物质采用不同进料方式的燃烧器燃烧,烟气排放情况有很大差异,在实际运行过程中,如何匹配进料量等参数以减少烟气污染物生成有待探讨。综合考虑不同工况参数对烟气污染物中颗粒物排放的影响,也值得深入研究。综上所述,通过综合考量各个控制参数在烟气污染物排放中的影响,并经过试验研究确定最优的燃烧工况参数,使烟气污染物超低排放,能有效促进生物质锅炉及燃烧器的推广应用。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/140715.html>