

生活垃圾混烧秸秆类生物质颗粒CO和NO的排放特性

邢献军¹, 李永玲², 张静², 邢勇强², 张学飞², 马培勇^{1,2}, 许宝杰³

(1.合肥工业大学先进能源技术与装备研究院, 合肥230009; 2.合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥230009; 3.北京信息科技大学机电系统测控重点实验室, 北京100085)

摘要:选取典型秸秆类生物质颗粒掺混垃圾作为研究对象, 利用自制燃烧试验平台, 研究掺混比、温度、粒径及生物质种类等因素对垃圾掺混生物质颗粒燃烧过程中CO与NO释放规律的影响。试验结果表明: CO排放量随着混合燃料中棉花秆颗粒含量增加而减小; 混合燃料中垃圾掺混量高于棉花秆颗粒时, 焦炭氮燃烧峰值随棉花秆含量增加而增大, 掺混量低于棉花秆颗粒时, 焦炭氮燃烧峰值逐渐减小, 掺混比为5:5时NO生成量最低。燃烧温度为850 时CO生成量最低; NO峰值时间随温度升高向前偏移, 排放量呈先增大后减小趋势, 较高的反应温度有利于降低燃烧过程中NO生成量。

随着燃料粒径减小, CO峰值浓度降低; 存在粒径临界值(60~80目), 当粒径小于临界值时, NO生成量随粒径减小而减小, 大于临界值时, NO生成量随粒径增大而减小。垃圾混烧生物质颗粒后CO生成量显著降低; 掺混同质量分数生物质颗粒试样中, 生物质颗粒氮含量越高, 混合燃料燃烧NO生成量越大。该研究可为实际生产中城市生活垃圾混烧生物质颗粒技术及污染物排放控制提供参考依据。

0引言

“垃圾围城”现象给中国城市发展带来的环境污染问题日益严重, 焚烧已成为城市生活垃圾处理的主流方式。由于

[1]

。而生物质燃料是一种资源丰富、可再生利用的清洁能源, 将其与生活垃圾混烧可以实现2种固体废弃物的协同处理, 解决部分垃圾焚烧厂在运行中存在的垃圾量不足、垃圾热值偏低问题, 避免因生物质随意堆放、露天燃烧造成的环境污染和威胁城市交通安全等问题^[2-3]

。目前针对生活垃圾混烧生物质的研究普遍采用的是未经预处理的生物质, 但因其体积膨松, 能源密度低, 季节性强, 材料运输和储存成本高昂, 直接送入焚烧厂进行燃烧热效率仅为10%~15%; 且生物质本身含水率高, 导致生物质在长期运输储存过程中易出现发霉变质和积热自燃等问题, 降低焚烧炉内燃烧温度, 抑制燃烧过程的彻底进行, 并导致燃烧过程中湿烟气排放量增大^[4]。

生物质经干燥、粉碎、压缩成型后呈结构密实的颗粒状, 燃烧速度均匀适中, 燃烧所需的氧量与外界渗透扩散的氧量能够较好的匹配, 燃烧波动较小, 燃烧更趋于平稳^[5]

, 可解决上述问题的同时进一步提高混合燃料热值, 提高垃圾焚烧效率和燃烧稳定性。国内外生物质成型燃料燃烧研究表明: 成型燃料的燃烧特性和燃烧动力学与粉体燃料有一定的差异, 成型颗粒内外部传热传质过程对其燃烧产物的生成有密切联系^[6-7]

, 而生活垃圾混烧生物质成型颗粒的研究报道较少, 缺乏基础数据。因此, 本文选用典型秸秆类生物质颗粒掺混城市生活垃圾作

为研究对象, 从掺混比

、燃烧温度、粒径、生物质种类4个方面研究分

析燃烧过程中CO与NO_x

气体的排放特性, 以期对实际生产中城市生活垃圾混烧生物质颗粒技术及污染物排放控制提供参考依据。

1试验部分

1.1试验原料

试验用垃圾样品按合肥市生活垃圾典型可燃组分比例配比混合而成, 包括厨余、竹木、塑料、橡胶、废纸、织物, 各组分比例见表1。生物质燃料选用4种代表性柱状成型秸秆颗粒: 稻秆、棉花秆、玉米秆和玉米芯, 成型密度为1.1~1.2g/cm³, 直径10mm, 长度12~20mm。混合样中各燃料的工业分析及元素分析见表2。

生活垃圾混合样和秸秆颗粒先于干燥箱内105℃干燥12h后取出，分别由破碎机破碎，振筛机筛选成粒径分别为：30~40目、40~60目、60~80目、80~230目以及>230目，混合均匀后采用四分法取样以消除混合不均带来的影响。为保证试验的可对比性，每次试验样品都是在试验前单独配制，样品质量均配制为 (0.4 ± 0.001) g。

表 1 垃圾混合样品可燃组分比例分配

Table 1 Composition and its proportion of MSW sample					%
纸张 Paper	织物 Textiles and leather	橡胶 Rubber	塑料 Plastic	厨余 Food waste	竹木 Bamboo
8.79	4.89	3.14	25.80	54.49	2.90

表 2 试验样品元素分析和工业分析（干基）

Table 2 Ultimate and proximate analysis of test sample (Dry based)									
样品 Sample	工业分析 Industrial analysis/%				元素分析 Elemental analysis/%				
	水分 Moisture	灰分 Ash	挥发分 Volatile	固定碳 Fixed carbon	C	H	O	N	S
垃圾 Municipal solid waste A	10.87	11.02	68.14	9.97	39.98	8.45	33.26	0.98	1.36
棉花秆 Cotton straw B	3.78	5.84	79.65	10.73	40.16	5.03	35.64	1.27	0.25
玉米秆 Corn stalk C	4.74	7.69	76.48	11.09	42.28	5.48	38.71	1.43	0.21
玉米芯 Corn cob D	8.91	5.11	72.02	13.96	46.75	6.37	34.83	0.56	0.2
稻秆 Rice straw E	5.68	6.98	75.93	11.41	38.47	6.68	36.42	0.79	0.16

1.2试验装置及方案

试验系统如图1所示，主要由供气系统、管式炉反应器和数据采集系统3部分组成。其中管式炉为合肥科晶材料技术有限公司生产的OTF-1200X-70-II双温区管式炉，加热元件为掺钼铁铬铝电阻丝，最高工作温度1200℃，加热区总长度400mm，智能化30段可编程控制和超长加热区可为燃料提供充分的燃烧空间和稳定的燃烧环境温度。上海硅莱实业有限公司生产的GA-81X无油空气压缩机和LZB-6WB流量计可为试验提供恒定的反应气。试验前先向炉内通入恒定的空气量1L/min，当炉温达到设定温度时，用送样杆将载有试验材料的坩埚迅速推进反应器中心加热部分，燃烧产生的烟气由德国德图公司生产的testo350烟气分析仪进行实时监测，采样时间间隔为2s。为减少试验随机和偶然误差，所有试验均重复3次。

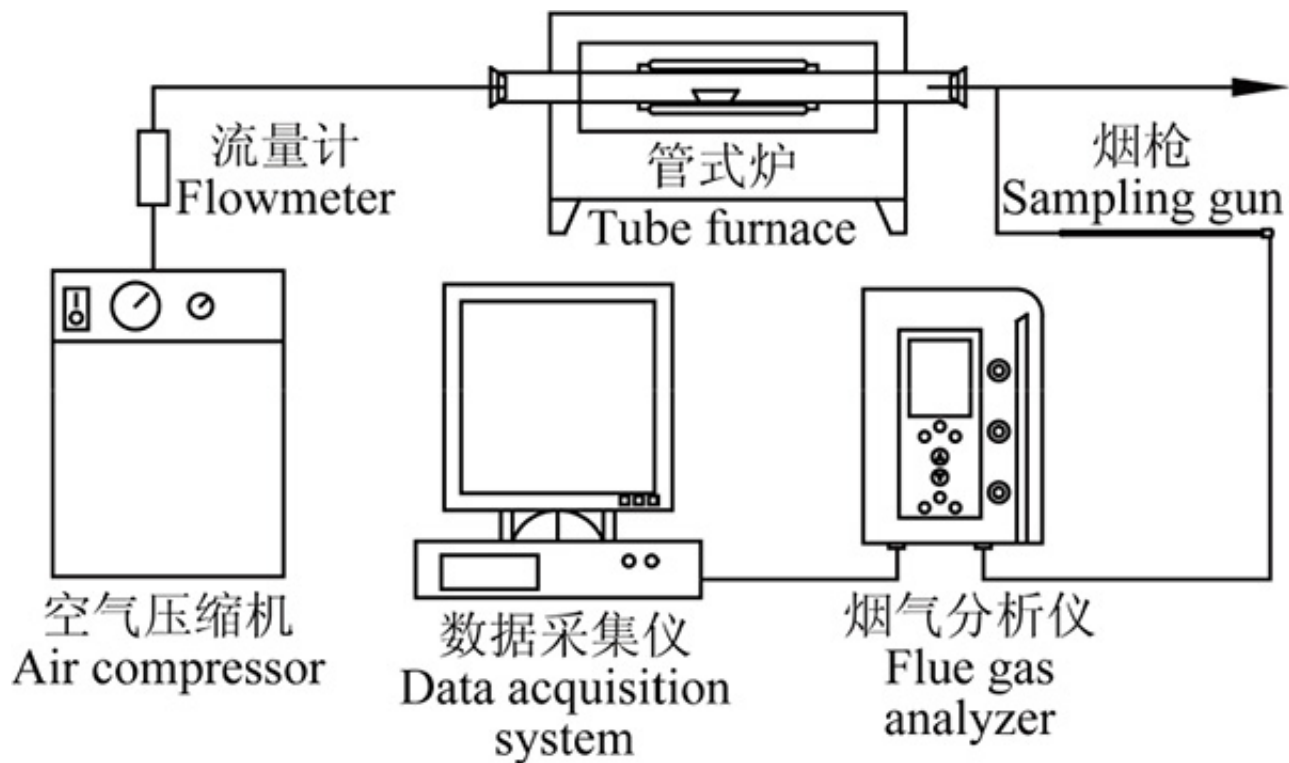


图 1 燃烧试验系统示意图

Fig.1 Combustion experimental system

1.3试验数据处理方法

为便于描述试验燃烧结果，引入

分析参数：峰值：烟气中气体浓度最大值， 10^{-6}

；峰值时间：气体浓度达到峰值时对应的时间，s；燃烬时间：试验约定，取氧气体积分数上升到20.95%的时间与CO浓度降为峰值5%的时间中较大者为燃烬时间，s。

对于混合燃料燃烧结果，通过对CO、NO_x气体浓度曲线积分计算累计时间段内其生成量

$$m = \frac{1}{22.4 \times 60 \times 10^3} \int_{t_0}^t C(t) \cdot V(t) \cdot M_g \cdot dt ,$$

式中 m 为 CO 或 NO_x 气体生成量，mg； t_0 为试验开始时间，s； t 为试验过程中某一时刻，s； $C(t)$ 为 t 时刻烟气中气体的体积分数， 10^{-6} ； $V(t)$ 为 t 时刻烟气流量，L/min； M_g 为气体的摩尔质量，g/mol。

2试验结果与讨论

2.1掺混比的影响

2.1.1不同掺混比下CO排放特性

烟气

中CO浓度

变化直接反映实际燃

烧情况，也可以此判断挥发分析出和燃烧

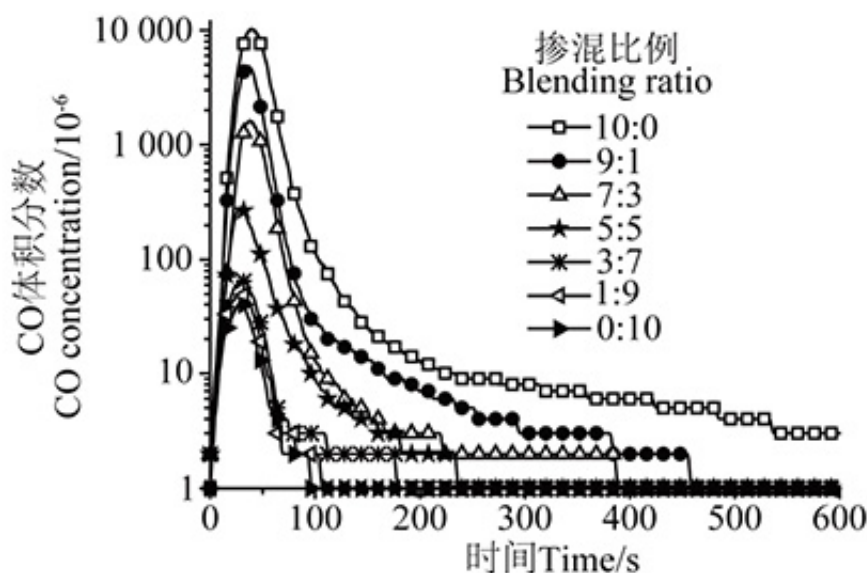
过程与其他燃烧产物互相影响程度^[8]

。本试验研究了生活垃圾混合样与棉花秆成型颗粒掺混比分别为10:0、9:1、7:3、5:5、3:7、1:9、0:10的7种试样，粒径均为80~230目，在850℃恒温条件下燃烧CO排放特性。由表2知，试验选用各燃料挥发分含量较高，固定碳含量较低，挥发分析出后迅速燃烧，消耗大量氧气，形成缺氧气氛后挥发分和固定碳不完全燃烧生成大量CO，造成气体不完全燃烧。

不同棉花秆颗粒掺混比下烟气中CO含量随时间的变化规律如图2所示，各掺混比下CO呈现单峰释放，均在开始燃烧后不久出现峰值，峰后CO释放比较缓慢，说明前期排放的CO主要来自于混合样燃烧析出的挥发分燃烧，后期由挥发分和固定

碳燃烧共同释放，由于

燃料突然置于恒定高温条件下时，挥发分与固定碳的燃烧过程存在重叠^[9]，故CO释放均呈现单峰分布。



注：进气流量为 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ，粒径为 80~230 目，燃烧温度为 850°C 。

Note: Intake air flow rate of $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, particle size from 80 to 230 mesh, and the combustion temperature at 850°C .

图 2 生活垃圾与棉花秆不同掺混比下燃烧 CO 排放特性

Fig.2 CO emission characteristics of MSW and cotton straw combustion at different blending ratios

随着棉花秆颗粒含量增加，CO峰后释放加快，CO析出峰逐渐变窄，峰值与到达峰值时间逐渐减少，燃烬时间提前。相比较于单独垃圾燃烧，棉花秆

颗粒与垃圾掺混比为5:5时，CO峰值从 10314×10^{-6} 下降到 286×10^{-6}

，燃烧时间缩短

了近50%，到达峰值时间也提前

了8s；当棉花秆颗粒单独燃烧时，CO峰值只有 42×10^{-6}

，燃烧时间只占垃圾独烧时约1/5，说明混合试样中棉花秆颗粒含量越高，燃烧越充分，CO排放浓度越低。由表2可知，棉花秆颗粒中挥发分含量高于垃圾混合样，在炉内温度 850°C 、进气流量为 1 L/min 的工况下，氧含量比较充分，

挥发分燃烧较为完全, 因此, 随着棉花秆颗粒含量升高, CO排放量降低, 混合试样燃烧过程逐渐缩短。

2.1.2 不同掺混比下NO排放特性

因生物质或生活垃圾燃烧过程中产生的NO_x中约95%为NO^[10]

, 本文重点分析NO排放特性。燃烧过程中燃料型NO生成量远大于快速型和热力型NO, 燃料型NO分别来自于挥发分氮和焦炭氮, 挥发分氮通过气相N形式, 先生成

NO前驱物(NH₃

和HCN等), 然后在氧化气氛下生成NO

, 或在还原性气氛中将NO还原为N₂; 焦炭氮主要通过氧化反应生成NO^[8], Fenimore^[11]

于1971年最早提出快速型NO_x很可能是形成于燃烧火焰前沿处, 而与温度基本无关。本试验温度较低, 热力型NO生成量极低, 文中不做考虑。

图3a给出了不同掺混比下烟气中NO随时间的变化规律, 不同于图2所示的CO排放规律, 各掺混比下NO排放曲线均呈现双峰结构, 主要为挥发分氮析出峰和焦炭氮燃烧峰, 焦炭氮燃烧峰值远高于挥发分氮析出峰值(掺混比5:5除外), 主要因为两者在形成方式和时间上不一致造成。随着棉花秆颗粒含量增加, 挥发分氮析出峰值和峰区间逐渐增大, 峰值出现点前移, 原因是燃烧

初期以挥发分燃烧为主, 挥发分中部分氮转化为NH₃

和HCN等, 棉花秆含量越高混合样中挥发分越多, 越

多的NH₃

和HCN被氧化成NO, NO析出量越大。燃烧中后期, 当垃圾掺混量高于棉花秆颗粒时, 焦炭氮燃烧峰值随着掺混比的增加而显著增加, 是由于棉

花秆中含有相对较多的K、Ca、Na碱金属离子的活性成分^[12]

, 作为反应活化

中心承担氧的载体作用, 携带更

充分的氧进入到固定氮发生反应生成NO, 解海卫等^[13]

研究的生活垃圾与生物质混烧发电中棉花秆百分含量对N

O_x

排放的影响, 也得到了类似结论。随着棉花秆颗粒含量进一步增加, 当垃圾掺混量低于棉花秆颗粒时, 焦炭氮燃烧峰值逐渐减小, 是因为成型后的棉花秆属于纤维结构, 当挥发分快速析出后形成大量的多孔性焦炭, 具有较高的孔隙率增加了反应比表面积, 能够促进NO与焦炭的还原反应。当掺混比为5:5时, 挥发分氮析出峰值反而略高于焦炭氮燃烧峰值, 挥发分氮析出峰值分别高于垃圾与棉花秆单独燃烧情况, 表明当棉花秆与垃圾等量燃烧时燃烧速率加快, 生活垃圾和棉花秆颗粒的燃烧是既独立又相互影响的。

结合图3b, 通过方差分析得出 $P < 0.01$, 可知生活垃圾与棉花秆在不同掺混比下燃烧NO生成量差异显著。垃圾掺混棉花秆颗粒后NO生

成量高于垃圾单独燃烧, 主要原因是由

于还原性气体CO能将部分NO还原成N₂

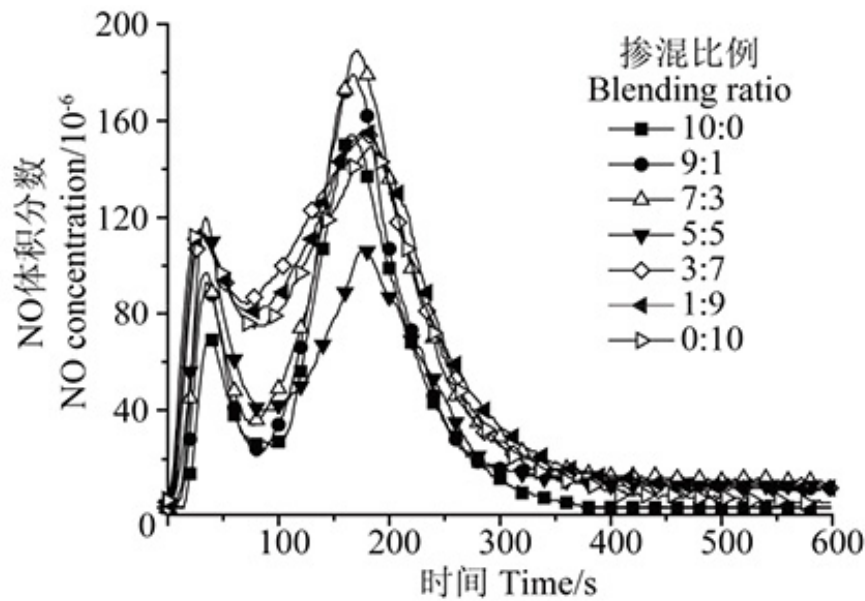
, 加入成型后的棉花秆颗粒后, 提高了燃烧效率, CO排放浓度显著降低, 抑制了NO的还原反应但促进了氧化反应生成NO。这与Laryea-Goldsmith等^[14]

的分析结果一致, 掺混生物质在一定程度上降

低CO排放, 但提高了NO_x

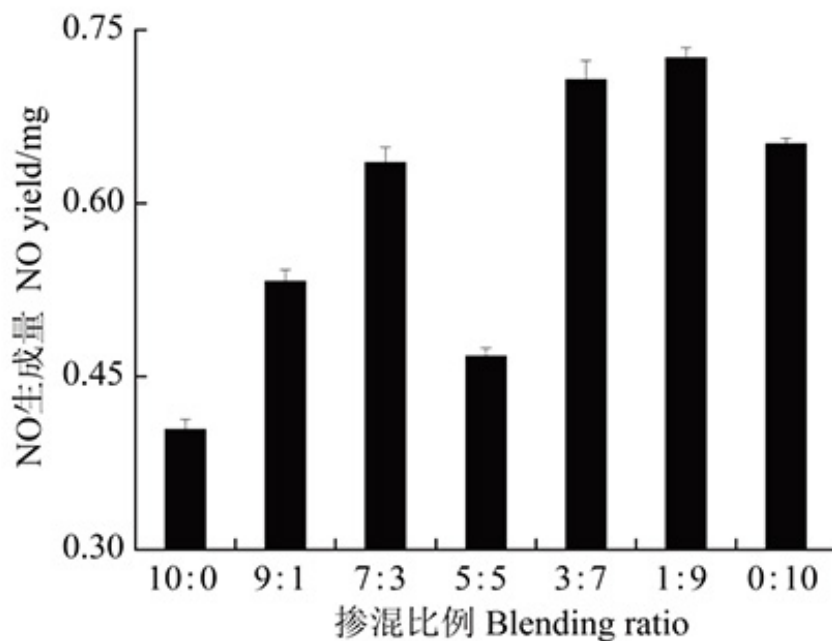
的排放。不同于垃圾混烧未经预处理的生物质^[15]

, 混烧成型后的棉花秆颗粒存在最佳掺混比5:5使得混合燃料NO生成量最低。



a. NO 排放特性

a. NO emission characteristics



b. NO 排放总量

b. NO yields

注: 进气流量为 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 粒径为 80~230 目, 燃烧温度为 850°C 。

Note: Intake air flow rate of $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, particle size from 80 to 230 mesh, and the combustion temperature at 850°C .

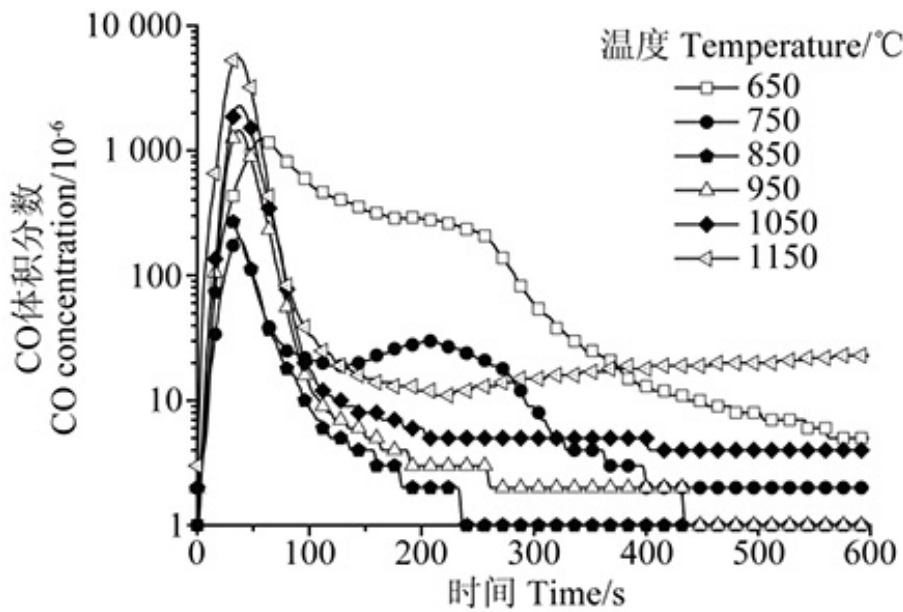
图3 生活垃圾与棉花秆不同掺混比下燃烧 NO 排放特性及总量

Fig.3 NO emission characteristics and yields of MSW and cotton straw combustion at different blending ratios

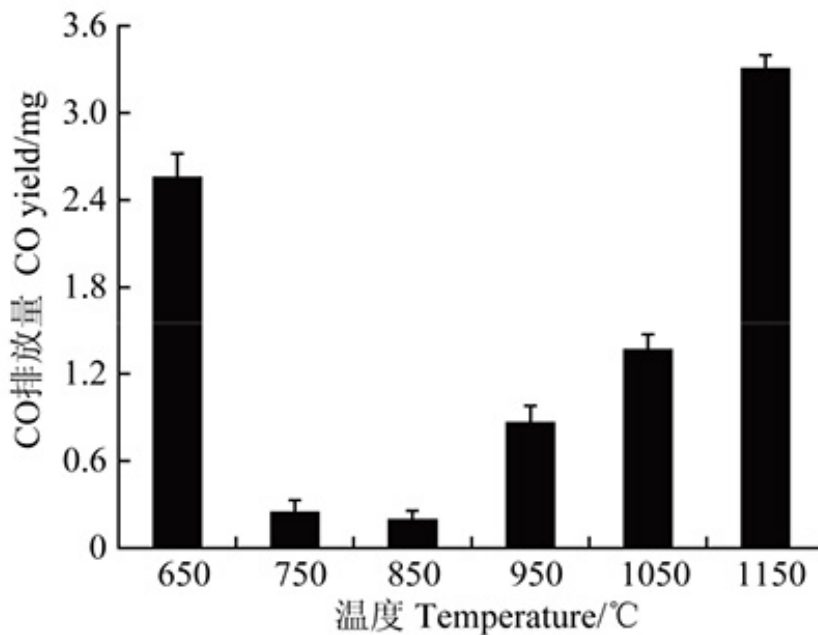
2.2温度的影响

2.2.1不同温度下CO排放特性

因炉膛燃烧温度直接影响到燃料的燃烧状况及污染物排放，本文研究了不同燃烧温度下生活垃圾与棉花秆颗粒等量混合燃烧CO排放特性曲线，如图4a所示。当燃烧温度为650和750℃时CO排放曲线均出现挥发分CO析出峰和固定碳燃烧CO析出峰，当燃烧温度升至850℃及以上时，CO呈单峰释放，峰值随着燃烧温度的升高先降低后升高，结合图4b，通过方差分析得出 $P < 0.01$ ，可知生活垃圾与棉花秆等量混合在不同温度下燃烧CO排放量差异显著。850℃时CO排放量最低，原因在于CO的生成量由热解速率和燃烧速率共同决定的，二者受温度影响变化不同，650℃温度条件下，垃圾和棉花秆的热解速率已经较大，随着温度的升高，燃烧反应速率显著增大。当温度低于850℃时，随着温度升高燃烧速率增大，大于热解速率，热解析出的挥发分有充足的时间与周围氧气混合，燃烧相对比较完全，CO排放浓度迅速下降。此外，混合样品由于目数大（粒径小），比表面积较大，在含CO挥发分析出不是特别多的情况下，氧气混合比较充分，燃烧化学反应控制因素起主要作用，所以，温度升高引起燃烧反应加剧，CO浓度随之降低。当温度高于850℃时，燃烧反应速率加快，此时燃烧反应速率取决于可燃气体与氧气的混合程度，随着温度升高，挥发分析出速度加剧，氧气瞬间消耗量增大，导致挥发分与周围空气中氧气混合不充分，致使CO排放浓度和排放量随之升高。



a. CO 排放特性
a. CO emission characteristics



b. CO 排放总量
b. CO yields

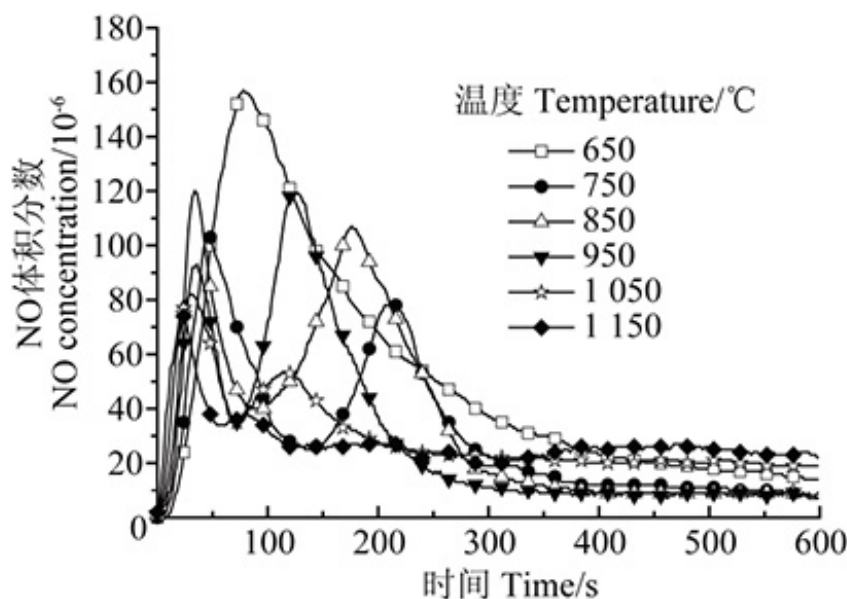
注: 进气流量为 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 生活垃圾与棉花秆掺混比为 5:5, 粒径为 80~230 目。
Note: Intake air flow rate of $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, the blending ratio of MSW and cotton straw of 5:5, and particle size from 80 to 230 mesh.

图 4 不同温度下混合样品燃烧 CO 排放特性及总量

Fig.4 CO emission characteristics and yields of mixed samples combustion at different temperatures

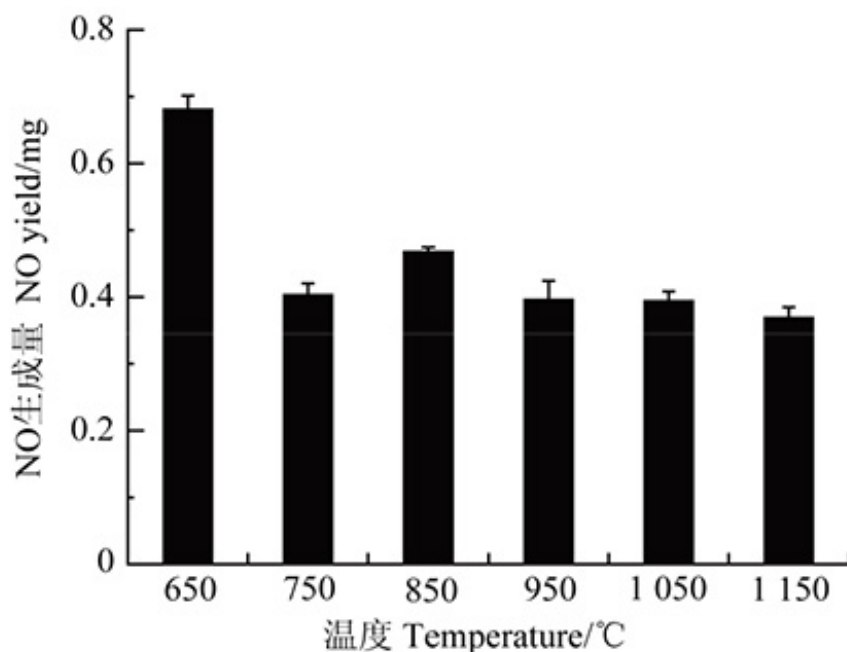
2.2.2不同温度下NO排放特性

生活垃圾混烧棉花籽颗粒在不同燃烧温度下NO浓度随时间的变化规律如图5a所示，除650℃温度下NO排放为单峰释放，其余试验温度条件下，NO排放曲线均呈现双峰分布，且第1峰值出现时间随着温度的升高向前偏移，NO释放区间逐渐缩小，说明高温条件可促使第2峰的快速到来，这是因为随着温度升高燃烧速率加快，挥发分析出和焦炭燃烧提前，烟气中反应基团浓度升高，促使了NO地更早生成，缩短了两峰的间距；由图5b可知，650℃工况下NO生成量较大，不同于林海^[16]研究得出的NO_x排放速度缓和，总排放量少的情况，分析原因可能是该温度条件下燃料热解速率较快产生大量的碳氢化合物，与空气中的N₂反应形成胺和氰化合物（如HCN等），进而反应生成快速型NO，加上生成的燃料型NO致使排放量较大。很多研究表明在低温、富燃料且停滞时间很短等燃烧环境中能够形成大量的快速型NO_x^[17]，这与陈姝等^[15]的研究结果一致。



a. NO 排放特性

a. NO emission characteristics



b. NO 排放总量

b. NO yields

注: 进气流量为 1 L·min⁻¹, 生活垃圾与棉花秆掺混比为 5:5, 粒径为 80~230 目。
Note: Intake air flow rate of 1 L·min⁻¹, the blending ratio of MSW and cotton straw of 5:5, and particle size from 80 to 230 mesh.

图 5 不同温度下混合样品燃烧 NO 排放特性及排放量

Fig.5 NO emission characteristics and yields of mixed samples combustion at different temperatures

结合图5b, 通过方差分析得出 $P < 0.01$, 可知随着燃烧温度升高, 生活垃圾与棉花秆等量混合燃烧NO排放量差异显著, 呈现出先增大

后减小的趋势, 主要是由于温度升高

导致挥发分燃烧速率迅速增大, 更多的 NH_3

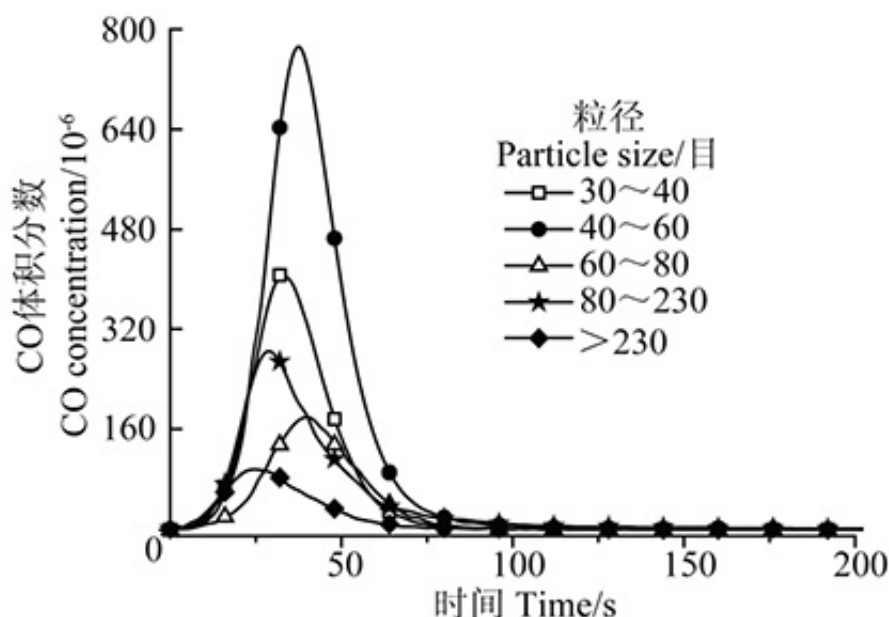
和HCN被氧化成NO, 使得燃料型NO生成量增大。当炉内温度达到850℃以上时, 燃烧速率急剧增加, 加速氧气消耗, 形成了还原性气氛, 导致后续燃烧过程中燃料氮燃烧不充分, 另外, 由图4可见, CO含量随温度升高显著增加, 使得生成的部分NO被还原成 N_2

, NO峰值和生成量逐渐下降。由上说明, 生活垃圾混烧棉花秆颗粒时, 较高的反应温度条件有利于降低燃烧过程中的 NO_x 排放量。

2.3粒径的影响

2.3.1不同粒径下CO排放特性

燃料颗粒粒径会影响到样品在燃烧过程中所需要的反应时间、挥发分的析出速度及传热传质过程等。850℃恒温条件下, 不同颗粒粒径的生活垃圾与棉花秆颗粒等量混合燃烧CO浓度随时间的变化规律如图6所示, CO排放均呈单峰释放, 原因是上述工况条件下, 炉内温度较高, 燃烧速率很大, 挥发分与固定碳的2个燃烧过程紧挨着进行, 相应形成的CO由于生成时间相近而组合成单独的大峰。随着粒径减小, CO峰值整体趋势降低, 是由于样品粒径减小, 颗粒比表面积增大, 单位体积内与氧气的接触面积增加; 与此同时, 燃料颗粒粒径减小, 碳燃烧时形成的灰阻滞就小, 有利于氧气扩散, 两者共同促进了碳燃烧充分反应, CO排放浓度降低。由热重分析结果可知[18], 颗粒粒径越小, 挥发分析出温度越低, 完成同量挥发分析出时间越短, 燃烧速率也越快; 对焦炭而言, 颗粒粒径越小, 其燃烧速率越快, 原料燃烬时间也越短, 因此, 随着粒径减少, CO燃烬时间提前, 燃料燃烧过程缩短。对于同种燃料以相同质量在管式炉内燃烧而言, 颗粒粒径减小, 燃料堆积密度增大, 空隙率减少, 氧气与可燃性物质无法充分混合, 燃烧阻力增大, 所以会出现40~60目和80~230目燃料燃烧CO排放浓度分别高于30~40目和60~80目的情况。



注: 进气流量为 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 生活垃圾与棉花秆掺混比为5:5, 燃烧温度为850℃。

Note: Intake air flow rate of $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, the blending ratio of MSW and cotton straw of 5:5, and combustion temperature at 850℃.

图6 不同粒径下混合样品燃烧CO排放特性

Fig.6 CO emission characteristics of mixed samples combustion at different partical sizes

2.3.2不同粒径下NO排放特性

图7a给出了5种粒径下生活垃圾与棉花秆颗粒混合燃烧，NO浓度随时间的变化规律，不同粒径下NO排放曲线均呈现双峰分布，随着粒径减小，第1峰值出现时间提前，峰值浓度逐渐增大，分析原因是第1峰值NO排放主要来自于挥发分氮析出的前驱物，经氧化反应生成。因颗粒物燃料燃烧时，外部氧气需要进入颗粒内部，同时挥发分等可燃气体也需要

需要

从颗粒内

部扩散到颗粒外表

面，且颗粒被引燃后，灰层在颗粒表

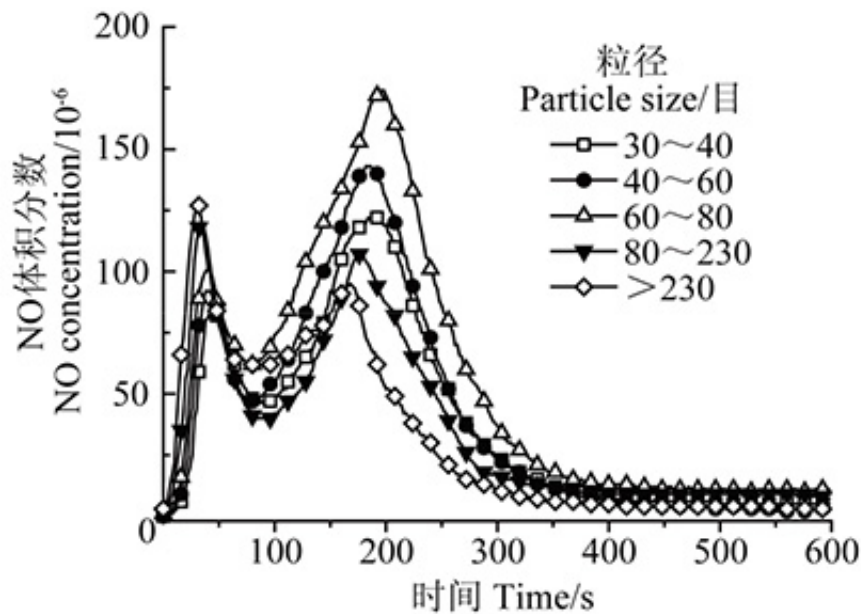
层逐步积累，阻碍颗粒内部焦炭的完全燃烧^[19]

，所以颗粒粒径较大（目数较小）时，气体扩散阻力较大，扩散到颗粒外表面的挥发分氮含量减少，NO峰值浓度降低。NO第2排放峰值随着粒径减小（目数增大）呈先增大后减小趋势，当粒径小于60~80目时，由于前述分析中小粒径颗粒相对于大颗粒析出较多的NO，焦炭氮含量减少，所以，随着粒径减小焦炭氮被氧化生成NO含量降低。又因NO排放是由NO生成和NO还原共同作用的结果，当粒径大于60~80目（目数减小），大颗粒从外部表面被加热时，因传热阻力较大，颗粒外部的加热速率远大于颗粒中心

的加热速率^[20]

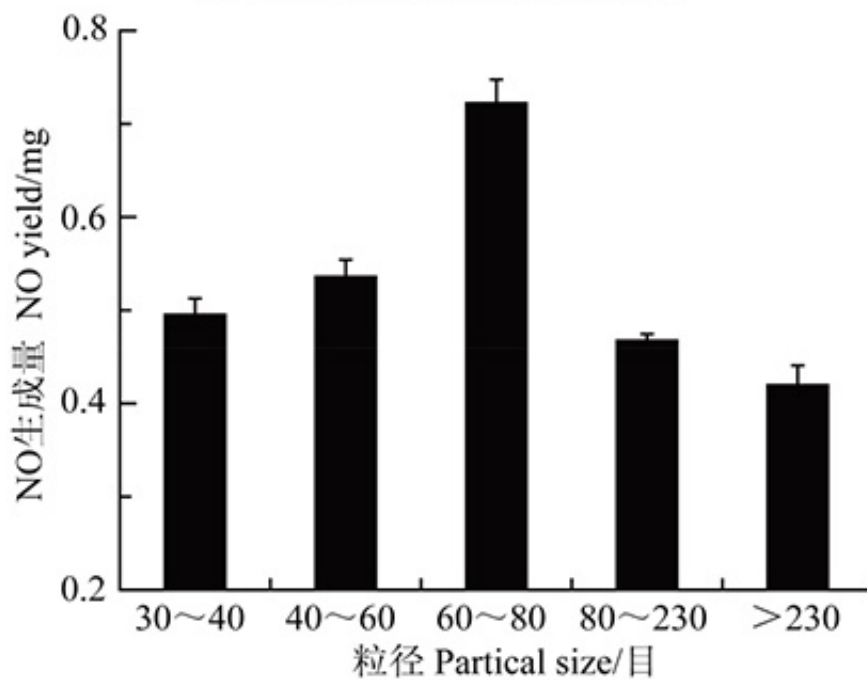
，颗粒中心发生低温热解生成大量还原性气体，由图6也可知，大粒径下CO排放浓度较高，NO还原反应速率增长迅速超过NO生成速率，更多的NO被还原成N₂，因此，NO的峰值浓度明显降低。

结合图7b，通过方差分析得出 $P < 0.01$ ，可知不同粒径下生活垃圾混烧棉花秆颗粒NO生成量差异显著，存在一个颗粒粒径的临界值，当粒径小于此临界值时，NO生成量随着粒径的减小而减小；当粒径大于此临界值时，NO生成量随着粒径的增大而减小。



a. NO 排放特性

a. NO emission characteristics



b. NO 排放总量

b. NO yields

注: 进气流量为 1 L·min⁻¹, 生活垃圾与棉花秆掺混比为 5:5, 燃烧温度为 850℃。

Note: Intake air flow rate of 1 L·min⁻¹, the blending ratio of MSW and cotton straw of 5:5, and combustion temperature at 850℃.

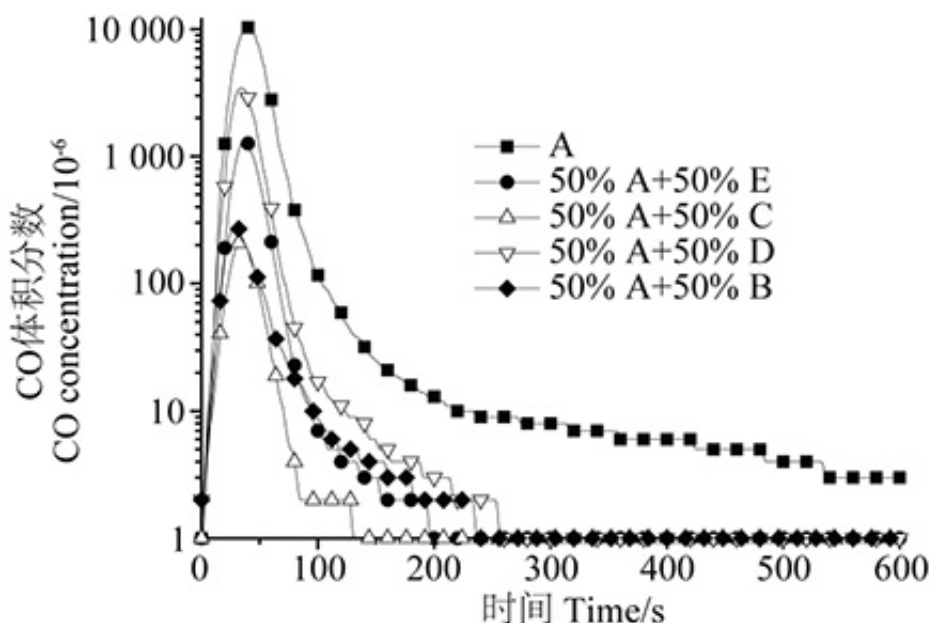
图 7 不同粒径下混合样品燃烧 NO 排放特性及排放量

Fig.7 NO emission characteristics and yields of mixed samples combustion at different partical sizes

2.4 生物质种类的影响

2.4.1 不同生物质种类下CO排放特性

不同生物质种类元素成分及挥发分含量等不同,对于垃圾混燃特性及CO/NO排放规律均存在一定的影响。图8给出了850℃恒温条件下,生活垃圾与5种典型生物质颗粒等量混合燃烧过程中CO的瞬时排放曲线(图中A、B、C、D、E所代表物料见表2所示),从图中可以看出垃圾掺混不同种类生物质颗粒燃烧时均有1个CO释放峰,且峰值都在燃烧初期出现,但混烧生物质颗粒的释放峰比垃圾独燃释放峰提前,峰值减小,释放区间变窄,由此说明垃圾和生物质燃烧的CO生成阶段主要在挥发分析出及燃烧初期,由表2可知,5种生物质颗粒的挥发分含量均高于垃圾,垃圾混烧生物质的燃烧速率加快,可燃气体燃烧更充分,CO的排放能很快达到峰值并下降,且相对于垃圾单独燃烧,CO峰值浓度显著降低,由此可知,垃圾混烧不同种类生物质排放的CO峰值大小主要受生物质中挥发分含量影响,一般掺混的生物质挥发分含量越高,燃烧排放的CO生成量越低。又因不同生物质颗粒的C、H、O元素的含量不同[21],燃烧所需要的理论空气量不同,而燃烧过程中供气量一定,会造成过量空气系数的不匹配,影响CO排放,因此出现垃圾混烧棉花秆颗粒的CO生成量略高于混烧玉米秆颗粒的CO生成量。



注: A、B、C、D、E 分别为垃圾、棉花秆、玉米秆、玉米芯、稻秆。进气流量为 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 粒径为 80~230 目, 燃烧温度为 850°C 。下同。

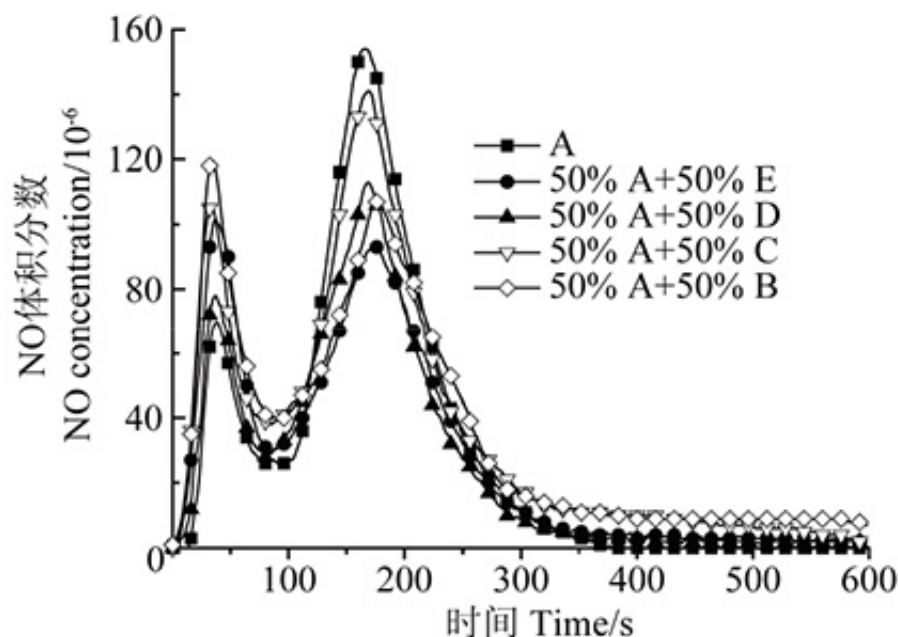
Note: A, B, C, D, E was MSW, cotton straw, corn stalk, corn cob, and rice straw respectively. Intake air flow rate of $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, particle size from 80 to 230 mesh, and the combustion temperature at 850°C . Same as below.

图 8 不同生物质种类下混合样品燃烧 CO 排放特性

Fig.8 CO emission characteristics of mixed samples combustion at different biomass

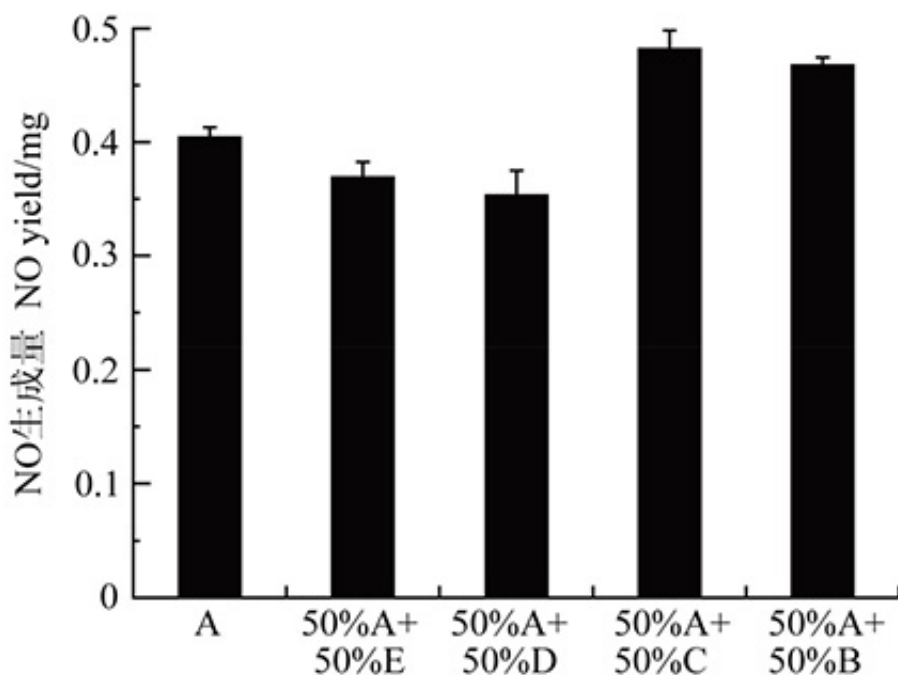
2.4.2 不同生物质种类下NO排放特性

生活垃圾与5种典型生物质颗粒等量混合燃烧过程中NO浓度随时间变化规律如图9a所示,混烧不同种类生物质颗粒的NO排放曲线均呈双峰分布,第1波峰主要为挥发分氮析出峰,受混合燃料中挥发分含量影响,由表2可知,垃圾混烧生物质颗粒中挥发分含量越高,燃烧时由NO前驱物氧化反应生成的NO浓度越高;第2波峰为焦炭氮燃烧峰,其峰值与焦炭氮含量成正比关系,但也受灰分含量影响,生物质灰易黏附于焦炭颗粒表面,灰含量越高越易阻塞焦炭孔隙,减少反应比表面积,阻滞其与氧气的反应,从而抑制NO的析出。



a. NO 排放特性

a. NO emission characteristics



b. NO 排放总量

b. NO yields

图 9 不同生物质种类下混合样品燃烧 NO 排放特性及排放量

Fig.9 NO emission characteristics and yields of mixed samples combustion under different biomass

结合图9b,通过方差分析得出 $P < 0.01$,可知生活垃圾混烧不同种类生物质的NO生成量差异显著,混烧玉米秆和棉花秆的NO生成量高于纯垃圾燃烧,而混烧同质量稻秆和玉米芯可以降低NO排放量。结合表2可以看出,掺混同质量分数生物质颗粒的试样中,生物质颗粒的含氮量越高,占混合样品中氮含量比例越大,其NO生成量也增大,进一步

验证了混合燃料燃烧温度较低时, NO生成方式主要为燃料型, 而非热力型。

3结论

- 1) 随着混合试样中棉花秆颗粒含量增大, CO析出峰逐渐变窄, 到达峰值的时间和燃烬时间提前, CO排放量降低; NO挥发分氮析出峰值和峰区间逐渐增大, 峰值出现点前移, 当垃圾掺混量高于棉花秆颗粒时, 焦炭氮燃烧峰值随着掺混比的增加而显著增加, 当垃圾掺混量低于棉花秆时, 焦炭氮燃烧峰值逐渐减小, 掺混比为5:5时NO生成量最低。
- 2) 燃烧温度为850 °C时CO生成量最低, 低于850 °C时, 随着温度升高CO排放浓度迅速下降, 高于850 °C时, CO排放量随之升高; NO析出峰出现时间随着温度升高向前偏移, 释放区间逐渐缩小, 排放量呈现出先增大后减小趋势, 较高的反应温度条件有利于控制燃烧过程中NO生成量。
- 3) 随着粒径减小, CO峰值浓度整体降低, 燃烬时间提前, 燃料燃烧过程缩短; 存在一个颗粒粒径的临界值(60~80目), 当粒径小于此临界值时, NO生成量随粒径的减小而减小; 当粒径大于此临界值时, NO生成量随粒径的增大而减小。
- 4) 垃圾混烧生物质颗粒CO释放峰比垃圾单独燃烧释放峰提前, 峰值减小, 释放区间变窄, CO峰值浓度显著降低; 混烧玉米秆或棉花秆的NO生成量高于单独垃圾燃烧, 而混烧同质量稻秆或玉米芯可以降低NO排放量, 混合燃料中生物质颗粒的含氮量越高, 混合燃料NO生成量越大。

[参考文献]

- [1] Henry R K, Zhao Y S, Dong J. Municipal solid waste management challenges in developing countries-Kenyan case study[J]. Waste Management, 2006, 26(1): 92 - 100.
- [2] 冯伟, 张利群, 庞中伟, 等. 中国秸秆废弃焚烧与资源化利用的经济与环境分析[J]. 中国农学通报, 2010, 27(6): 350 - 354.
- [3] Easterly J L, Burnham M. Overview of biomass and waste fuel resources for power production[J]. Biomass and Bioenergy, 1996, 10(2): 79 - 92.
- [4] 李保谦, 牛振华. 生物质成型燃料技术的研究现状与应用前景[C]//2009中国生物质能源利用与可持续发展研讨会, 2009: 75 - 78.
- [5] 刘圣勇. 生物质(秸秆)成型燃料燃烧设备研制及试验研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2004.
- [6] Houshfar E, Øyvind Skreiberg, Løvås T, et al. Effect of excess air ratio and temperature on NO_x emission from grate combustion of biomass in the staged air combustion scenario[J]. Energy & Fuels, 2011, 25(10): 4643 - 4654.
- [7] Knudsen J N, Jensen P A, Lin W, et al. Sulfur Transformations during Thermal Conversion of Herbaceous Biomass[J]. Energy & Fuels, 2004, 18(3): 810 - 819.
- [8] 陈国华, 李运泉, 彭浩斌, 等. 大颗粒木质成型燃料燃烧过程烟气排放特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 215 - 220.
- [9] 王春波, 王金星, 雷鸣. 恒温下煤粉/生物质混燃特性及NO释放规律[J]. 煤炭学报, 2013, 38(7): 1254 - 1259.
- [10] Rogaume T, Koulidiati J, Richard F, et al. A model of the chemical pathways leading to NO_x formation during combustion of mixtures of cellulosic and plastic materials[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006, 45(4): 359 - 366.
- [11] Fenimore C P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames [J]. Symposium (International) on Combustion, 1971, 13(1): 373 - 380.

- [12]刘豪, 邱建荣, 吴昊, 等. 生物质和煤混合燃烧污染物排放特性研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4): 484 - 488.
- [13]解海卫, 张艳, 张于峰. 生物质与城市生活垃圾混烧特性的试验研究[J]. 热能动力工程, 2010, 25(3): 340 - 343.
- [14]Laryea-Goldsmith R, Oakey J, Simms N J. Gaseous emissions during concurrent combustion of biomass and non-recyclable municipal solid waste[J]. Chemistry Central Journal, 2011, 5(2): 269 - 278.
- [15]陈姝. 城市生活垃圾干燥与燃烧气体排放特性试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [16]林海. 基于CFD的城市生活垃圾焚烧炉优化运行及烟气排放特性试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [17]Toftegaard M B, Brix J, Jensen P A, et al. Oxy-fuel combustion of solid fuels [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2010, 36(5): 581 - 625.
- [18]伊晓路, 刘贞先, 郭东彦, 等. 生物质颗粒径对燃烧特性影响[J]. 现代化工, 2006, 26(增2): 230 - 235.
- [19]杜海亮, 张品, 罗永浩, 等. 颗粒粒径对层燃炉煤层NO_x析出影响的研究[J]. 热能动力工程, 2014, 29(5): 554 - 560.
- [20]齐国利, 董芑, 张玉, 等. 大颗粒生物质高温热解模型的建立与数值模拟[J]. 太阳能学报, 2011, 32(7): 1058 - 1063.
- [21]罗娟, 侯书林, 赵立欣, 等. 典型生物质颗粒燃料燃烧特性试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 220 - 226.

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/108408.html>