

新型低煤份生物质混合燃料燃烧特性实验

高佳佳¹, 覃建果², 魏小林³, 吴桂福¹

(1. 华电电力科学研究院, 浙江 杭州 310000;
2. 华东电力设计院有限公司, 上海 200000; 3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

[摘 要] 针对生物质在电厂应用中的诸多问题及困难, 提出了一种新型的低煤粉成分生物质混合燃料, 并通过实验研究了其燃烧特性, 建立了该燃料的污染物排放模型。结果表明: 该燃料最大燃烧速率发生在反应的前期, 其高挥发分和反应速率改善了燃料的燃烧、燃尽及污染物排放特性, 能有效减少 NO_x 排放; 建立的污染物排放模型可用于预测不同工况下污染物的排放量。该混合燃料加工形式及实验结果可为煤和生物质混燃在火力发电行业的应用提供参考和理论依据。

[关 键 词] 煤; 生物质; 混燃; 燃烧特性; 燃尽; 污染物排放; 低煤粉成分

[中图分类号] TK16 [文献标识码] A [文章编号] 1002-3364(2017)12-0061-07

[DOI 编号] 10.3969/j.issn.1002-3364.2017.12.061

Experimental study on combustion characteristics of a new biomass fuel blended with small proportion of pulverized coal

GAO Jiajia¹, QIN Jianguo², WEI Xiaolin³, WU Guifu¹

(1. Huadian Electric Power Research Institute, Hangzhou 310000, China;
2. East China Electric Power Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200000, China;
3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100190, China)

Abstract: In view of the problems and difficulties during biomass application in the power plants, a new kind of biomass fuel blended with small proportion of pulverized coal was put forward, and experiments were carried out to study the fuel's combustion characteristics. Moreover, the pollutant emission model of the fuel was also established. The results show that, the maximum combustion rate of the fuel occurred in early period of the combustion phase. The high volatile content and reaction rate of the fuel improved the combustion, burnout and pollutant emission characteristics, the NO_x emission concentration reduced dramatically. The established pollutant emission model can be used to predict the emissions under different combustion conditions. The experimental results can provide theoretical basis and reference for co-firing biomass and coals in thermal power units.

Key words: coal, biomass, co-firing, combustion characteristics, burnout, pollutant emission, low coal property

传统化石燃料如煤、石油、天然气等大量燃烧被认为是温室气体的主要来源。为了降低温室气体排放, 可持续能源的开发利用得到鼓励和发展。其中, 生物质燃料于 20 世纪 90 年代用于电力行业^[1]。然而, 由于生物质具有低密度、难成型和流动性差等特点, 加之其运输、存储困难, 所以纯生物质电厂的运行和管理存在诸多困难^[2-3]。因此, 除直接燃用生物质或生物质气外, 固体生物质与煤混燃将成为生物质应用中一种较为廉价和直接的方式^[4-5]。

关于煤和生物质的混燃, 国内外学者进行了一定的理论研究。其中, 主要以煤燃烧为主体, 通过掺混低比例的生物质 (最高不超过 50%), 以辅助

并改善煤的燃烧特性^[6]。另外, 还有学者对混烧后灰的烧结、熔融、黏温及荷电特性进行了研究^[7-9]。对此, 本文提出了一种新型的低煤粉成分生物质混合燃料, 并对其燃烧特性进行了实验研究。

1 实验内容

1.1 混合燃料

本文采用一种新型的加工设备, 将 75% 木屑、20% 烟煤和 5% 黏合剂 (黏土和植物油的混合物) 混合后, 在环境温度下通过 85~102 MPa 的压力压制平均直径为 25 mm、长为 30 mm 的混合燃料颗粒。该混合燃料颗粒中木屑的平均粒径为 3~5 mm,

收稿日期: 2017-04-13

第一作者简介: 高佳佳(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高效洁净燃烧技术, jiajia-gao@chder.com。

收到基水分为 10%；煤粉粒径为 125 μm，收到基水分为 7%。原料及成型混合燃料颗粒如图 1 所示，表 1 为其工业及元素分析。

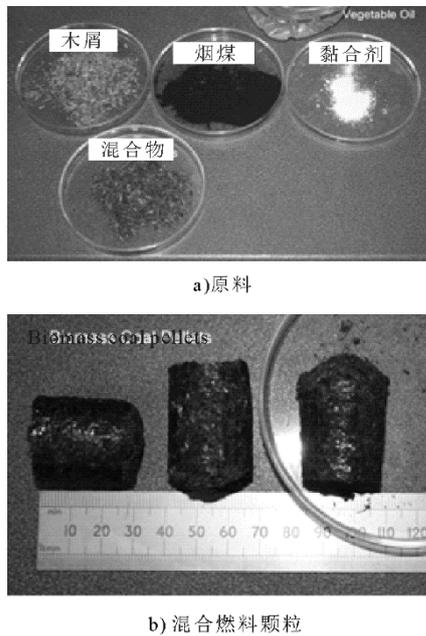


图 1 原材料及混合燃料

Fig.1 The raw material and the blended fuels

表 1 混合燃料工业分析及元素分析

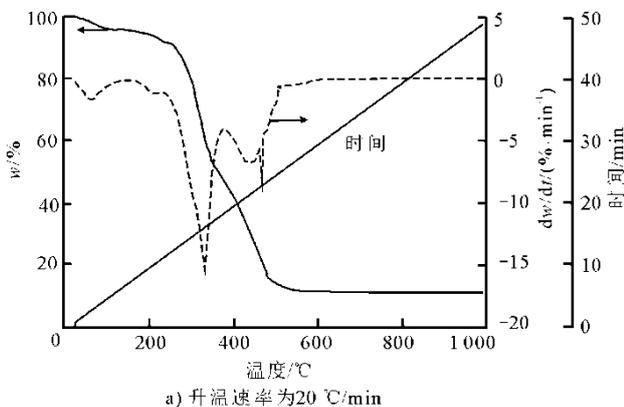
Table 1 Proximate and ultimate analysis results of the fuel

工业分析					元素分析				
W _{ar}	M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	FC _{ad}	H _{ad}	N _{ad}	C _{ad}	S _{ad}	O _{ad}
6.58	1.89	10.59	70.14	17.38	5.10	0.59	45.70	0.17	35.96

注：干燥基高位定容发热量 $Q_{ad, gross} = 19\ 030\ \text{kJ/kg}$ ；应用标准为《煤的工业分析法》(GB/T 212—2001) 和《煤的发热量测定方法》(GB/T 213—2003)；分析仪器为自动氧量热仪 (PARR1281)。

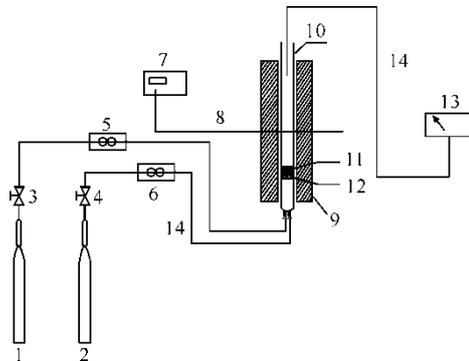
1.2 实验系统及方法

混合燃料燃烧特性及动力学分析采用美国 TA 公司生产的热综合分析仪，工作气氛为空气，流量为 100 mL/min，升温速率分别选取 20、40、60、80 °C/min，最终温度为 1 000 °C。



a) 升温速率为 20 °C/min

混合燃料燃烧污染物排放特性采用小型流化床实验台，如图 2 所示。实验台包括流量控制装置、温控加热系统、反应器及烟气取样分析系统。



1—氧气罐；2—氮气罐；3、4—减压阀；5、6—流量计；7—控温装置；8—热电极；9—电加热炉；10—石英管；11—床料；12—石英烧结板；13—烟气分析仪；14—管道。

图 2 小型流化床实验台示意

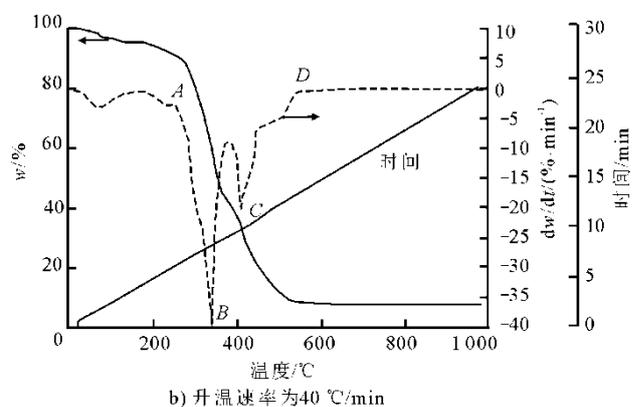
Fig.2 Schematic diagram of the small scale fluidized bed reactor system test bench

实验设定给料速率为 0.18 g/min，反应气采用氧气与氮气的混合气体，通气量为 4 L/min。本文对反应温度分别为 750、850、950、1 050 °C，含氧量 $R(\text{O}_2)$ (体积分数) 分别为 6%、9%、12%、15% 工况下，燃料燃烧效率及污染物排放特性进行了研究。相应工况下对应气体在装置内的停留时间分别为 0.456、0.493、0.537、0.589 s。

2 实验结果及分析

2.1 热重分析

采用热综合分析仪得到试样的 TG 曲线，并通过对 TG 曲线的失重数据及时间进行微分处理得到微分热重 DTG 曲线，即为试样失重率随时间的变化，实验得到不同升温速率下混合燃料 TG 和 DTG 曲线如图 3 所示。



b) 升温速率为 40 °C/min

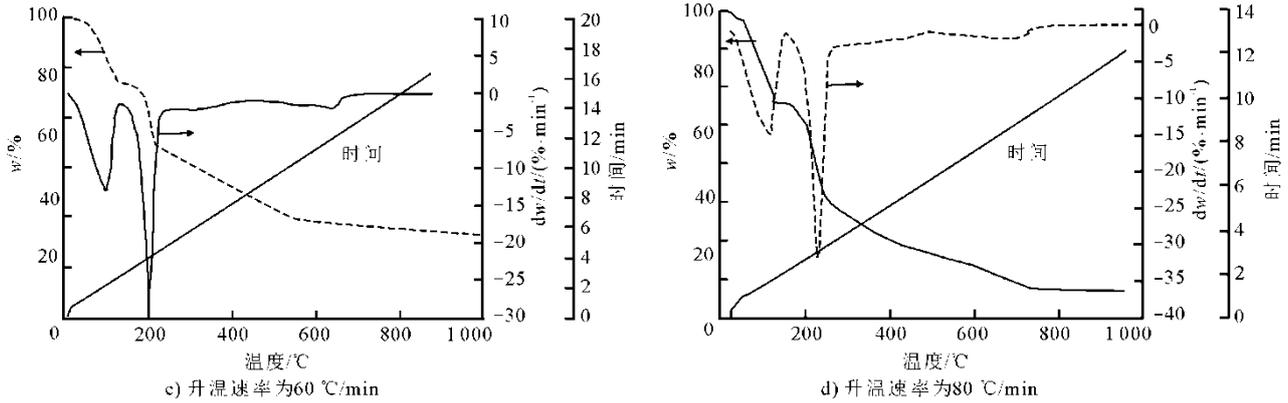


图 3 不同升温速率下混合燃料燃烧 TG、DTG 曲线
Fig.3 The TG and DTG curves of the blended fuel at different heating rates

由图 3a)和图 3b)中 DTG 曲线可见：反应开始阶段，DTG 曲线存在 1 个小峰值，这一过程主要是燃料中水分和其他吸附气体的析出造成样品的微量失重，此过程通常被称为干燥阶段，常用于测量样品的含水率；水分析出后继续加热，DTG 曲线存在 2 个较大的峰值，即存在 2 个不同的燃烧阶段。第 1 个峰值主要是由于燃料中挥发分的析出造成燃料的迅速失重，第 2 个峰值主要是燃料中煤焦燃烧导致燃料的迅速失重，第 1 个峰值远大于第 2 个峰值。这是由于生物质具有多孔性和碳结构无序性等特点，故其挥发分比煤易于析出，低温下挥发分就开始析出并释放集中。可见，混合燃料中挥发分较高，燃料最大燃烧速率发生在反应的前期。

由图 3c)和图 3d)可知：当升温速率增至 60 °C/min 和 80 °C/min 时，由于升温速率快且最终温度不变，故升温时间显著缩短；燃料失重速率依然存在 2 个峰值，第 1 个峰值主要是燃料中水

分及其他吸附气体的析出，第 2 个峰值主要是挥发分的析出；由于升温速率过快，燃料中煤焦还来不及反应，导致最终反应不完全，剩余燃料质量大于 60%。可见，升温速率过快不利于煤焦反应。

另外，由不同升温速率下的 DTG 曲线可以看出，增加升温速率会使燃料中水分的析出速率增大，挥发分的析出温度降低，最大速率对应一个最佳的升温速率值，即 40 °C/min。

为得到燃料燃烧特性，以升温速率为 40 °C/min 的热重分析结果为基础，计算得到燃料燃烧的主要特性参数见表 2。表 2 中：挥发分初始析出温度为 T_a ，对应时间为 t_a ；挥发分最大释放速率峰值为 $(dG/dt)_{max}^v$ ，对应的温度和时间为 T_{max}^v 、 t_{max}^v ；煤焦最大燃烧速率峰值 $(dG/dt)_{max}^c$ ，对应的温度和时间为 T_{max}^c 、 t_{max}^c ；燃料燃尽温度及时间为 T_e 、 t_e ；同时定义挥发分初始析出温度和时间即为燃料的着火温度和时间 T_z 、 t_z 。

表 2 燃料燃烧主要特性参数
Table 2 The main combustion characteristic parameters of the fuel

$T_a, T_z/^\circ\text{C}$	$T_a, T_z/\text{min}$	$(dG/dt)_{max}^v / (\% \cdot \text{min}^{-1})$	$T_{max}^v / ^\circ\text{C}$	t_{max}^v / min	$(dG/dt)_{max}^c / (\% \cdot \text{min}^{-1})$	$T_{max}^c / ^\circ\text{C}$	t_{max}^c / min	$T_e / ^\circ\text{C}$	t_e / min
251.2	6.22	-38.60	338.9	8.26	-19.62	410.8	9.91	546.8	13.57

2.2 差热分析

图 4 给出了不同升温速率下混合燃料的差热曲线。由图 4a)和图 b)可见：曲线上 A 点为燃料开始燃烧的分界点，B 点表示燃烧过程中放热峰的最大值；在燃料的加热初期，由于水分的蒸发吸热，使

曲线存在一个上升阶段；曲线上存在一个明显的拐点 A 和一个较大的放热峰 B，说明燃料中虽然含有较高的挥发分，但挥发分的发热量低，因此燃烧前期不能形成独立的放热峰^[7]，放热峰值集中在燃烧的后期即煤焦燃烧阶段。

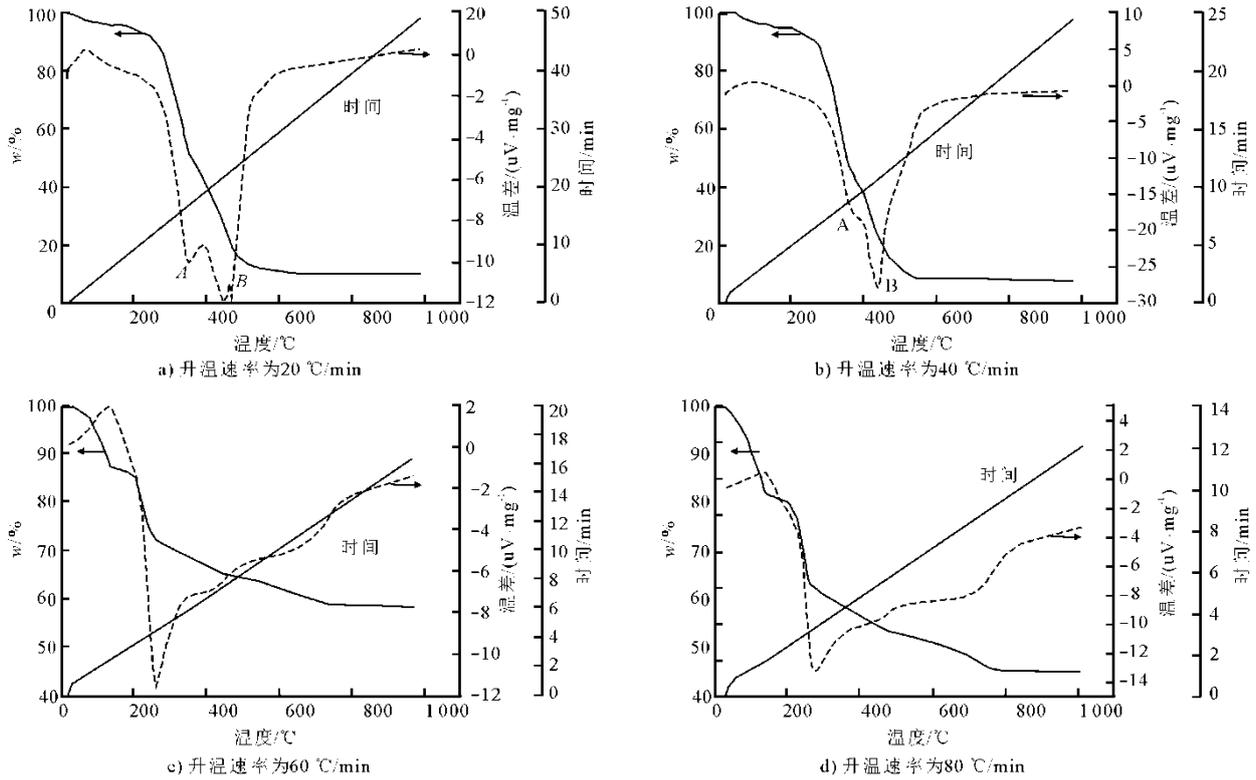


图4 不同升温速率下混合燃料差热曲线

Fig.4 The DSC curves of the fuel at different heating rates

由图 4c)和图 4d)可见, 当升温速率过快时, 由于煤焦来不及反应, 所以燃料的差热曲线只反映了水分蒸发吸热导致曲线的上升段和挥发分析出反应的放热峰。

对比不同升温速率下混合燃料的差热曲线可以看出, 升温速率为 40 °C/min 时燃料差热曲线的放热峰值最大, 燃料燃烧最完全。因此, 最佳升温速率为 40 °C/min, 这与前面得到的结果一致。

2.3 燃烧动力学分析

活化能及频率因子均能决定燃料的燃烧特性。基于升温速率为 40 °C/min 的 TG 曲线对燃料的燃烧动力学进行近似分析^[10-11], 设反应级数为 1^[12],

对混合燃料燃烧过程中的质量变化率等式进行变换整理, 最终得到如下形式^[10-11]:

$$y = a + bx \tag{1}$$

式中, $y = \ln\left[-\frac{\ln(1-a)}{T^2}\right]$, $a = \ln\left[\frac{AR}{\phi E}\right]$, $b = -\frac{E}{R}$,

$x = \frac{1}{T}$, T 为反应温度。

在升温速率为 40 °C/min 的 TG 曲线上取一系列点, 根据每一点的热参数可以求出对应的 y 、 x 值, 按线性回归分析法即可作一条直线, 该直线的斜率为 b , 截距为 a , 同时可求出反应活化能 E 和频率因子 A 。得到混合燃料线性回归分析曲线和燃烧动力学参数分别如图 5、表 3 所示。

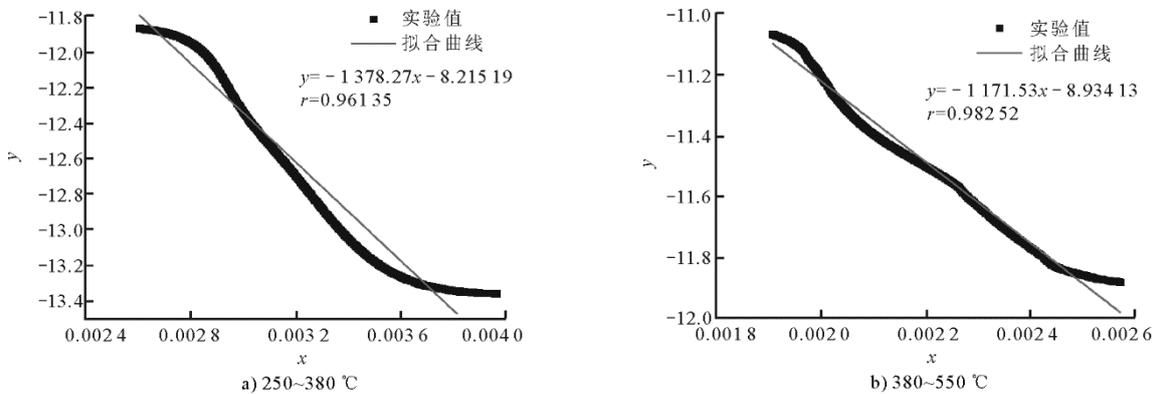


图5 混合燃料线性回归分析曲线

Fig.5 Linear regression analysis graph for the blended fuel

表 3 混合燃料燃烧动力学参数
Table 3 The combustion kinetic parameters of the fuel

温度区间/℃	参数计算结果				
	<i>a</i>	<i>b</i>	相关系数 <i>r</i>	频率因子 <i>A</i> /min ⁻¹	活化能 <i>E</i> /(K·mol ⁻¹)
250~380	-8.215 2	-1 378.27	0.961 35	14.91	11.46
380~550	-8.934 1	-1 171.53	0.982 52	6.18	9.74

2.4 污染物排放特性

2.4.1 CO 排放特性

通过烟气分析仪对燃烧器出口烟气进行取样分析,测得不同工况下烟气中 CO 体积分数如图 6 和图 7 所示。

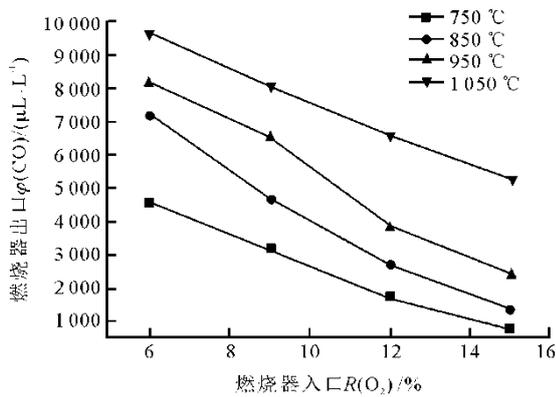


图 6 不同含氧量下燃烧器出口 CO 体积分数
Fig.6 The CO concentration at the reactor outlet with different oxygen concentrations

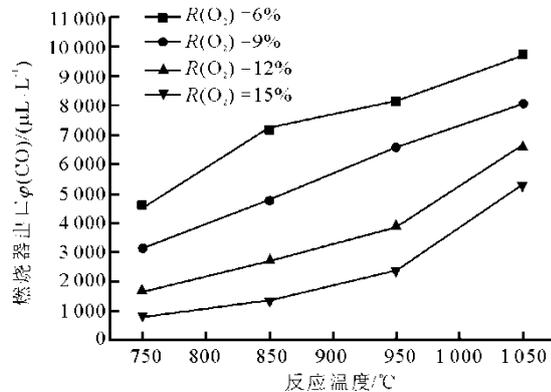


图 7 不同反应温度下燃烧器出口 CO 体积分数
Fig.7 The CO concentration at the reactor outlet at different reaction temperatures

由图 6 可见,温度不变而增加燃烧器入口含氧量时,燃烧器出口 CO 体积分数降低,说明增加含氧量有利于提高 CO 的燃烧效率,降低 CO 的排放。

由图 7 可见,保持燃烧器入口含氧量不变而提高反应温度时,CO 体积分数随温度的升高而增加。这主要是由于随着温度的升高,燃料在燃烧器内的停留时间缩短,从而不利于其燃尽。

综上,为提高该混合燃料的燃烧效率,建议:

- 1) 增加含氧量,并保证燃料与氧气充分接触混合;
- 2) 改造燃烧设备结构,保证燃料及 CO 在炉内的停留时间(可将燃烧炉设计成瘦高形);
- 3) 采用新型、特殊结构的燃烧炉(分层燃烧式链条炉、炉排炉等) [13-14]。

为进一步研究燃烧条件对 CO 排放特性的影响,根据实验结果建立了不同实验工况下 CO 的排放模型:

$$\begin{aligned} \varphi(\text{CO}) = & -5.057 \times 10^5 + 1\,580T + 1.136 \times \\ & 10^6 R(\text{O}_2) - 1.601T^2 - 2\,632TR(\text{O}_2) - \\ & 2.898 \times 10^5 R^2(\text{O}_2) + 5.419 \times 10^4 T^3 + \\ & 1.363T^2 R(\text{O}_2) + 636.4TR^2(\text{O}_2) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\varphi(\text{CO})$ 为 CO 体积分数。

图 8 为按照式(2)计算得到不同工况下 CO 的排放体积分数与实验测量值的对比。由图 8 可见,计算值与实验值之间具有良好的一致性,因此上述模型可用于该燃料在不同条件下燃烧 CO 排放体积分数的计算及预测。

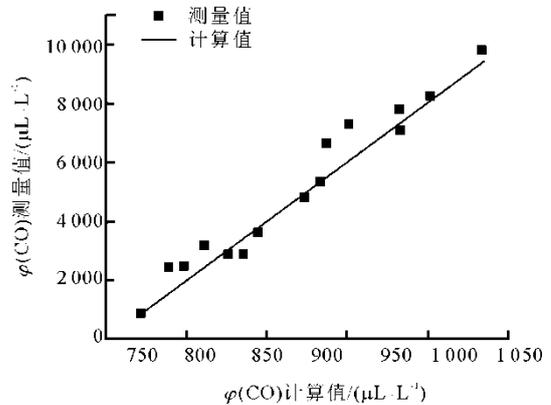


图 8 CO 体积分数计算值与实验测量值对比
Fig.8 The calculated and measured CO volume fractions

2.4.2 NO_x 排放特性

NO_x 生成机理可分为热力型、快速型和燃料型 [15-16]。炉内煤粉燃烧所生成的 NO_x 以燃料型 NO_x 为主,占 NO_x 总生成量的 60%~80%;热力型 NO_x 占 NO_x 总生成量的 20%;快速型 NO_x 生成量很小。本文实验温度为 750~1 050 °C,热力型 NO_x 生成量很小,故 NO_x 主要为燃料型 NO_x。

定义燃烧过程中 NO_x 转化率 C_R 为最终生成的 NO 质量浓度与燃料全部转化为 NO 的质量浓度之比。实验得到不同工况下燃料 NO_x 转化率如图 9 所示。

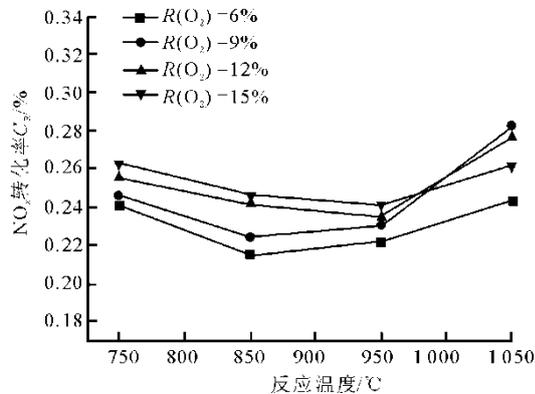


图 9 不同工况下燃料 NO_x 转化率

Fig.9 The conversion rate of NO_x in the fuel under different working conditions

由图 9 可见,混合燃料的 NO_x 转化率总体很低。这主要是因为: 1) 不完全燃烧反应生成 CO 的还原性气氛,降低了燃烧器出口 NO_x 的含量; 2) 生物质燃料氮以 NH_n 形式大量释放,将 NO_x 直接还原为 N_2 ,导致 NO_x 排放量减少^[17]; 3) 生物质析出的挥发分中,含有大量的还原剂,同时由于生物质秸秆是纤维结构,在挥发分析出后留有大量空隙,促进了生成的 NO_x 与焦炭发生还原反应; 4) 燃烧过程中产生的 C_xH_x 再燃还原 NO_x ,降低了 NO_x 的排放^[18]。

由图 9 还可看出:反应温度在 $950\text{ }^\circ\text{C}$ 以内, NO_x 转换率随含氧量的增加而增加,这和燃料型 NO_x 生成机理及影响因素一致;反应温度高于 $950\text{ }^\circ\text{C}$, NO_x 转换率随含氧量的增加先增加后降低; NO_x 转化率随温度的升高呈先降低再升高的趋势。

根据实验结果建立了 NO_x 在不同工况下的排放模型:

$$C_R = 12.47 - 0.0408T + 1.384R(\text{O}_2) + 4.364 \times 10^{-5}T^2 + 0.01332TR(\text{O}_2) - 53.13R^2(\text{O}_2) - 1.579 \times 10^{-8}T^3 + 6.714 \times 10^{-6}T^2R(\text{O}_2) - 0.13TR^2(\text{O}_2) + 493.4R^3(\text{O}_2) \quad (3)$$

式中 C_R 为 NO_x 转化率。

图 10 为按照式(3)计算得到的不同工况下 NO_x 转化率与实验测量值对比。由图 10 可见,计算值与实验值之间具有良好的一致性,上述模型可用于该燃料测量不同燃烧条件下 NO_x 转化率的计算及预测。

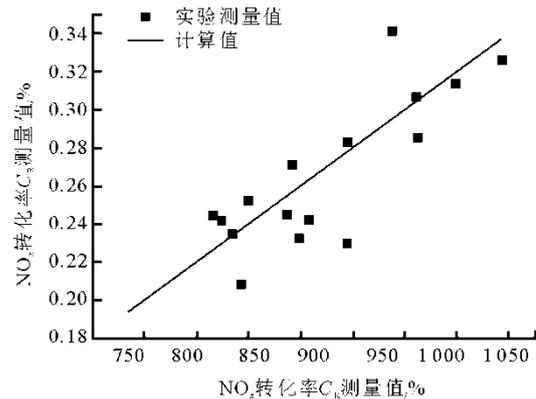


图 10 NO_x 转化率的计算值与实验测量值比较

Fig.10 The calculated and measured conversion rate of NO_x in the fuel

3 结 论

1) 通过在生物质中添加低成分煤粉和少量黏合剂制成一种新型混合燃料,该混合燃料弥补了纯生物质燃烧固有的缺点,便于生物质电厂的运行及管理。

2) 该混合燃料中挥发分较高,使其最大燃烧速率发生在反应前期,故改善了其燃烧及燃尽特性。

3) 该混合燃料燃烧,反应温度在 $950\text{ }^\circ\text{C}$ 以内, NO_x 转化率随含氧量的增加而增加,反应温度高于 $950\text{ }^\circ\text{C}$, NO_x 转化率随含氧量的增加先增加后降低;其燃烧产生的 NO_x 总量较小,在 NO_x 污染物的排放上具有较大的优势。

4) 实际燃烧过程中,建议通过增加含氧量并强化混合、保证燃烧时间和温度以及采用新型燃烧炉技术(如分层燃烧式链条炉、炉排炉等)等方式来提高燃料燃烧效率。

[参 考 文 献]

- [1] HEINIMÖ J, JUNGINGER H M. Production and trading of biomass for energy: an overview of the global status[J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33: 1310-1320.
- [2] KHAN N S. Handling characteristics of coal/biomass mixes: measurements and establishing benchmarks[D]. University of Greenwich, 2008: 39.
- [3] ZULFIQAR M, MOGHTADER B, WALL T F. Flow properties of biomass and coal blends[J]. Fuel Processing Technology. 2006, 87: 281-288.
- [4] AL-MANSOUR F, ZUWALA J. An evaluation of biomass co-firing in Europe[J]. Biomass and Bioenergy, 2010, 34: 620-629.
- [5] BERNDG G, HANSSON J, EGESKOG A, et al. Strategies for 2nd generation biofuels in EU-co-firing to stimulate feedstock supply development and process integration to improve energy efficiency and economic competitiveness[J]. Biomass & Bioenergy, 2010, 34(2): 227-236.
- [6] 程树仁, 刘亮. 生物质和煤混合燃烧实验研究[J]. 电站系统工程, 2009, 25(4): 9-12.

