

基于化学动力学的生物质颗粒燃烧排放NO特性模拟与验证

刘婷洁, 张学敏, 林超群, 李俊韬

(中国农业大学工学院, 北京100083)

摘要: 为研究生物质颗粒燃料燃烧NO排放规律及其生成机理, 采用CFD和ChemKin联合仿真, 建立试验锅炉燃烧筒CFD网络模型, 应用ChemKin接口导入简化的17组分58基元反应机理, 建立ChemKin-PSR反应模拟网络, 选用Reaction DesignC2_NOx详细机理, 对棉秆、玉米秸秆、木质3种生物质颗粒NO排放进行模拟。结果表明, NO生成量: 棉秆>玉米秸秆>木质; NO排放量随过量空气系数的增加先增大后减小, 在过量空气系数为1.7附近达到峰值。将模拟结果与试验结果进行比较, 证明了模型和化学反应机理的正确性, 为生物质燃料燃烧NO排放的预测与控制提供参考。

0引言

生物质能源因其对CO₂零贡献, 且挥发分较煤高, N、S、灰分和固定炭含量较煤低^[1], 作为替代化石燃料的可持续能源, 其应用日益广泛^[2-7]。但其巨大消耗量也会导致NO的排放剧增^[8]。NO会伤害人的呼吸器官, 造成酸雨, 破坏臭氧层等。因此, 针对生物质颗粒燃料的NO排放特性愈发成为研究热点。

国内外对生物质燃料NO排放试验研究工作开展较多, 赵欣等[9]在生物质燃烧试验平台上研究了3种生物质固体燃料在不同负荷和进气量下燃烧的NO排放, 结果发现, NO的排放量随负荷增加而增加, 随进气量增加而减少。Lunbo Duan等^[10]

^[11], 张鹤丰^[12], Maryori D í az-Ram í rez^[13], Murari MohonRoy^[14], Evelyn Cardozo^[15], Gerhard Stubenberger^[16], Takero Nakahara^[17]

等均针对不同生物质燃料NO排放进行了试验研究, 然而试验研究花费大、周期长, 且不能直接解释NO生成机理, 因此, 采用数值模拟方法研究生物质燃料燃烧NO排放规律及其生成机理显得十分必要^[18]。

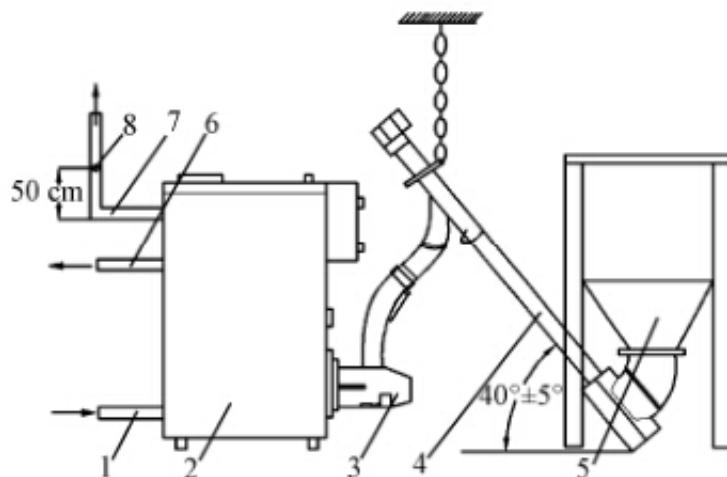
国内外有关燃料燃烧过程中NO转化机理的研究比较广泛^[19-25]

, 而针对生物质燃料燃烧的并不多。本文采用CFD和ChemKin联合仿真, 对生物质颗粒燃料NO排放特性和机理进行研究。ChemKin是由美国Sandia国家实验室开发的大型气相化学反应动力学软件, 是燃烧领域普遍使用的模拟计算工具[26]。本文首先对所选燃烧器在Fluent中进行网络建模, 结合化学反应机理得到燃烧器温度场和气流速度场, 然后根据相关参数在ChemKin中建立适当的反应器网络模型, 对3种生物质颗粒燃料燃烧的气相反应进行模拟仿真, 得到NO的排放规律, 并用试验结果加以验证。

1模型建立

1.1Fluent建模及网格划分

本文所采用的试验装置如图1所示, 燃料器选用Pellet Biocontrol20型生物质燃料器。



1.进水管 2.锅炉 3.燃烧器 4.进料机构 5.料仓 6.出水管 7.排烟管道
8.烟气/烟尘采样孔

1. Inlet pipe 2. Boiler 3. Burner 4. Feeding mechanism 5. Silo 6. Outlet
pipe 7. Exhaust pipe 8. Fume/dust sampling openings

图 1 试验装置

Fig.1 Test unit

试验所用燃烧器是一种顶置喂料式成型颗粒燃烧器，其额定燃烧功率在木质燃料工质下标定为20kW(满载)，通过风机来控制配风量。试验中采用木质颗粒、玉米秸秆颗粒、棉秆颗粒3种燃料。表1为3种生物质的挥发分组分的摩尔（体积）分数^[27]

³/h^[28]。各燃料工业分析、每千克各燃料完全燃烧所需的理论空气量TAV（theoretical air volume）和理论烟气量如表2所示，具体计算可参考文献[29]。

表 1 生物质挥发分组分
Table 1 Biomass volatile components

生物质 Biomass	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO ₂	CO
棉秆 Cotton stalk/%	35	9.5	3.7	0.1	23.7	28
玉米秸秆 Corn straw/%	24.2	16.2	5.4	0.5	19.3	34.4
木质 Wood/%	17.3	15.7	7	0.3	9.6	50

注：数据来源文献[27]。

Note: Data were cited from reference[27].

表 2 3 种燃料的理论烟气量
Table 2 Theoretical flue gas of three fuels

生物质 Biomass	C _{ad} /%	H _{ad} /%	O _{ad} /%	N _{ad} /%	S _{ad} /%	空气量 Theoretical air volume/ (m ³ ·kg ⁻¹)	理论烟气量 Theoretical flue gas volume/(N·m ³)
木质 Wood	49.35	7.98	33.75	0.13	0.42	5.38	5.73
玉米秸秆 Corn straw	40.47	7.00	32.18	0.92	0.43	4.39	4.76
棉秆 Cotton stalk	40.77	7.04	33.58	1.16	0.50	4.38	4.77

利用Fluent对燃烧筒结构进行三维建模、网格划分（如图2所示）及边界条件设置。在Mesh中划分三维模型的网格时，对流体区域分别选择四面体和六面体混合网格，通过Sweep、Patch、Conforming、Sizing、Inflation等方法来进行划分；在结构细小处，对网格进行加密以获得较好的网格质量。最终网格数为362782，节点数为65584，平均网格畸变度为0.233，最大网格畸变度为0.81，网格质量较好。求解设置EDC涡耗散有限速率化学反应模型，使用详细阿累尼乌斯化学动力学机理，燃烧过程湍流模拟采用Reynolds平均法（RANS）k-ε 双方程模型。组分输运模型选用species transport，该模型可以由用户自定义反应机理。

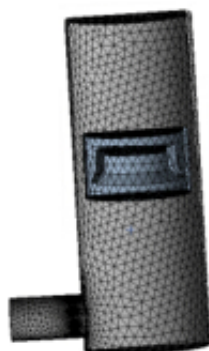


图 2 燃烧筒网格划分示意图

Fig.2 Combustion cylinder mesh division schematic

1.2 NO_x化学机理的选取

NO_x详细排放机理选用ChemKin中Reaction Design发展的C2_NO_x机理。C2_NO_x

压力相关机理

包括99个反应组分和694个

基元反应，在较宽反应域下详细描述了碳氢化合物的

氧化和NO_x

的机理。应用于CFD计算的化学反应机理要进行大量的简化，反应机理的简化要求对于给定的精度保证描述燃烧准确性，省略对燃烧过程没有明显影响的组分和基元反应，减少仿真运算量，因此采用敏感性分析法简化得到17组分58基元反应机理（见表3）。

表 3 17 组分 58 基元反应机理

Table 3 17 components and 58 primitive reactions mechanism

序号 No.	反应式 Chemical equation	指前因子 Pre-exponential factor	温度指数 Temperature exponent	活化能 Activation energy
1	$\text{CH}_3 + \text{H} + \text{M} = \text{CH}_4 + \text{M}$	8.00E+26	-3	0
2	$\text{CH}_4 + \text{O}_2 = \text{CH}_3 + \text{HO}_2$	7.90E+13	0	56 000
3	$\text{CH}_4 + \text{H} = \text{CH}_3 + \text{H}_2$	2.20E+04	3	8 750
4	$\text{CH}_4 + \text{O} = \text{CH}_3 + \text{OH}$	1.60E+06	2.4	7 400
5	$\text{CH}_4 + \text{OH} = \text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$	1.60E+06	2.1	2 460
6	$\text{CH}_3 + \text{O} = \text{CH}_2\text{O} + \text{H}$	6.80E+13	0	0
7	$\text{CH}_3 + \text{OH} = \text{CH}_2\text{O} + \text{H}_2$	1.00E+12	0	0
8	$\text{CH}_3 + \text{OH} = \text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	1.50E+13	0	5 000
9	$\text{CH}_3 + \text{H} = \text{CH}_2 + \text{H}_2$	9.00E+13	0	15 100
10	$\text{CH}_2 + \text{H} = \text{CH} + \text{H}_2$	1.40E+19	-2	0
11	$\text{CH}_2 + \text{OH} = \text{CH}_2\text{O} + \text{H}$	2.50E+13	0	0
12	$\text{CH}_2 + \text{OH} = \text{CH} + \text{H}_2\text{O}$	4.50E+13	0	3 000
13	$\text{CH} + \text{O}_2 = \text{HCO} + \text{O}$	3.30E+13	0	0
14	$\text{CH} + \text{O} = \text{CO} + \text{H}$	5.70E+13	0	0
15	$\text{CH} + \text{OH} = \text{HCO} + \text{H}$	3.00E+13	0	0
16	$\text{CH} + \text{CO}_2 = \text{HCO} + \text{CO}$	3.40E+12	0	690
17	$\text{CH}_2 + \text{CO}_2 = \text{CH}_2\text{O} + \text{CO}$	1.10E+11	0	1 000
18	$\text{CH}_2 + \text{O} = \text{CO} + \text{H} + \text{H}$	3.00E+13	0	0
19	$\text{CH}_2 + \text{O} = \text{CO} + \text{H}_2$	5.00E+13	0	0
20	$\text{CH}_2 + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{H} + \text{H}$	1.60E+12	0	1 000
21	$\text{CH}_2 + \text{O}_2 = \text{CH}_2\text{O} + \text{O}$	5.00E+13	0	9 000
22	$\text{CH}_2 + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{H}_2$	6.90E+11	0	500
23	$\text{CH}_2 + \text{O}_2 = \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	1.90E+10	0	-1 000
24	$\text{CH}_2 + \text{O}_2 = \text{CO} + \text{OH} + \text{H}$	8.60E+10	0	-500
25	$\text{CH}_2 + \text{O}_2 = \text{HCO} + \text{OH}$	4.30E+10	0	-500
26	$\text{CH}_2\text{O} + \text{OH} = \text{HCO} + \text{H}_2\text{O}$	3.43E+09	1.2	-447
27	$\text{CH}_2\text{O} + \text{H} = \text{HCO} + \text{H}_2$	2.19E+08	1.8	3 000
28	$\text{CH}_2\text{O} + \text{M} = \text{HCO} + \text{H} + \text{M}$	3.31E+16	0	81 000
29	$\text{CH}_2\text{O} + \text{O} = \text{HCO} + \text{OH}$	1.81E+13	0	3 082
30	$\text{HCO} + \text{OH} = \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	5.00E+12	0	0
31	$\text{HCO} + \text{M} = \text{H} + \text{CO} + \text{M}$	1.60E+14	0	14 700
32	$\text{HCO} + \text{H} = \text{CO} + \text{H}_2$	4.00E+13	0	0
33	$\text{HCO} + \text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}$	1.00E+13	0	0
34	$\text{HCO} + \text{O}_2 = \text{HO}_2 + \text{CO}$	3.30E+13	-0.4	0
35	$\text{CO} + \text{O} + \text{M} = \text{CO}_2 + \text{M}$	3.20E+13	0	-4 200
36	$\text{CO} + \text{OH} = \text{CO}_2 + \text{H}$	1.51E+07	1.3	-758
37	$\text{CO} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{O}$	1.60E+13	0	41 000
38	$\text{HO}_2 + \text{CO} = \text{CO}_2 + \text{OH}$	5.80E+13	0	22 934
39	$\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{OH}$	1.70E+13	0	47 780
40	$\text{OH} + \text{H}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	1.17E+09	1.3	3 626
41	$\text{H} + \text{O}_2 = \text{OH} + \text{O}$	5.13E+16	-0.8	16 507
42	$\text{O} + \text{H}_2 = \text{OH} + \text{H}$	1.80E+10	1	8 826
43	$\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} = \text{HO}_2 + \text{M}$	3.61E+17	-0.7	0
	H_2O	Enhanced	1.86E+01	
	CO_2	Enhanced	4.20E+00	
	H_2	Enhanced	2.86E+00	
	CO	Enhanced	2.11E+00	
	N_2	Enhanced	1.26E+00	
44	$\text{OH} + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	7.50E+12	0	0
45	$\text{H} + \text{HO}_2 = 2\text{OH}$	1.40E+14	0	1 073
46	$\text{O} + \text{HO}_2 = \text{O}_2 + \text{OH}$	1.40E+13	0	1 073
47	$2\text{OH} = \text{O} + \text{H}_2\text{O}$	6.00E+08	1.3	0
48	$\text{H} + \text{H} + \text{M} = \text{H}_2 + \text{M}$	1.00E+18	-1	0
49	$\text{H} + \text{H} + \text{H}_2 = \text{H}_2 + \text{H}_2$	9.20E+16	-0.6	0
50	$\text{H} + \text{H} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}$	6.00E+19	-1.2	0
51	$\text{H} + \text{H} + \text{CO}_2 = \text{H}_2 + \text{CO}_2$	5.49E+20	-2	0
52	$\text{H} + \text{OH} + \text{M} = \text{H}_2\text{O} + \text{M}$	1.60E+22	-2	0
	H_2O	Enhanced	5.00E+00	
53	$\text{H} + \text{O} + \text{M} = \text{OH} + \text{M}$	6.20E+16	-0.6	0
	H_2O	Enhanced	5.00E+00	
54	$\text{H} + \text{HO}_2 = \text{H}_2 + \text{O}_2$	1.25E+13	0	0
55	$\text{HO}_2 + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$	2.00E+12	0	0
56	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{M} = \text{OH} + \text{OH} + \text{M}$	1.30E+17	0	45 500
57	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H} = \text{HO}_2 + \text{H}_2$	1.60E+12	0	3 800
58	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH} = \text{H}_2\text{O} + \text{HO}_2$	1.00E+13	0	1 800

应用ChemKin接口将17组分骨架机理导入Fluent中，得到玉米秸秆在入口气流速度为6m/s时温度场的模拟结果如图3所示。

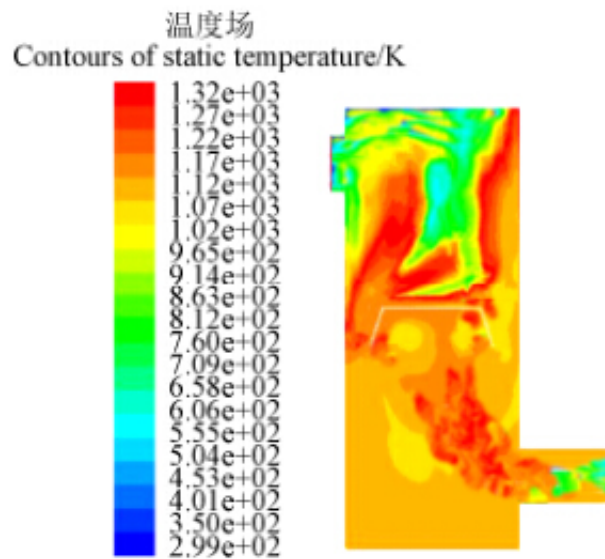


图 3 Fluent 模拟温度场云图

Fig.3 Temperature field cloud picture simulated by Fluent

图3表明整个温度场

最高温度为1320K，略高于试验测得燃烧器

出口的炉膛测试平均温度1293K^[28]

，但在可接受范围内，这与模型假设中忽略固定碳气化等吸热反应过程的模型设置有关。图中所示的温度场分布与实际情况相符，高温区主要集中于火帽下方火焰峰面，这是因为火帽的存在使得该处的压力较大，同时会产生回流也会使局部温度较高。将ChemKin中的反应机理导入Fluent中，求解计算得到的模拟结果在一定程度上体现了真实的燃烧情形。

1.3 ChemKin网络模拟仿真

通过DSMOKE模块导出CFD仿真结果的混合区体积和滞留时间参数，依据Fluent仿真得到的结果，将参数输入到ChemKin参数设置表中，作为机理反应模型的初始条件，具体参数见表4所示。问题类型选用Constrain Pressure and Solve Energy Equation (Default)，化学当量比为1.0、压力为1atm、温度为1400K。在ChemKin中建立简化的理想均相反应器网络，整个网络结构如图所示。

图中共有6个PSR (perfectly stirred reactor) 反应器，编号为1~6，1个一维柱塞流反应器PFR (plug flow reactor) 用来模拟排气管道。反应器1到6分别对应于燃烧筒的6个反应区域，如图4b所示，反应器1为入口区域，反应器2为固相混合区，反应器3为气相混合区域，反应器4为火帽上方燃烧区域，反应器5为火帽下方回流区域，反应器6为燃烧筒出口及其后方区域。

表 4 参数设置表

Table 4 Figure of parameter setting table

反应器特性 Reactor property	反应器 1 Reactor1	反应器 2 Reactor2	反应器 3 Reactor3	反应器 4 Reactor4	反应器 5 Reactor5	反应器 6 Reactor6
持续时间 Residence time/s	0.05	0.05	0.05	0.2	0.05	0.05
温度 Temperature/K	800	1050	1250	1400	1450	1200
压力 Pressure/atm	1.002	1.002	1.003	1.005	1.008	1.002

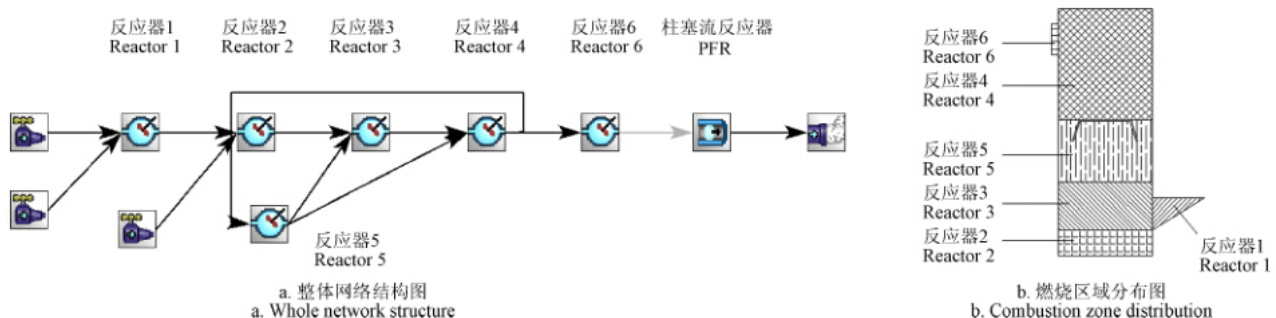


图 4 反应器网络结构图
Fig.4 Reactor network structure

2模拟结果分析

2.1各反应器的NO分布

图5a为在4kg/h进料速度、过量空气系数 $\lambda = 1.5$ ($25\text{m}^3/\text{h}$) 下的玉米秸秆组分输入，各PSR反应器的CO、O₂、CO₂组分摩尔分数

分布。O₂含量在反应器1、2

、3中一直处于高浓度水平，因为这些区域燃烧并不剧烈，O₂

消耗量较少，在区域3以后，燃烧反应充分，

O₂含量迅速下降，同时CO₂

量迅速增加，此时CO生成量在反应器中降到最低点。CO₂和O₂随后保持水平，达到动态平衡，是燃烧稳定的区域。

反应器网络NO的含量变化如图5b所示。在反应器1到3中，燃烧温度较低，气体挥发分的滞留时间较短，所以生成的NO量很少；而反应器4以后，燃烧充分，温度升高，O₂

被大量的消耗，使得NO浓度大幅度上升，但因为温度低于1500K，即热力型NO的生成条件，又由于快速型NO的权重在3种NO中较低，所以此时主要是O₂

与生物质燃料中的N元素发生氧化反应生成燃料型NO。从该曲线图中可以很好的预测NO生成的主要区域，为提出降低NO的措施提供了理论的依据。

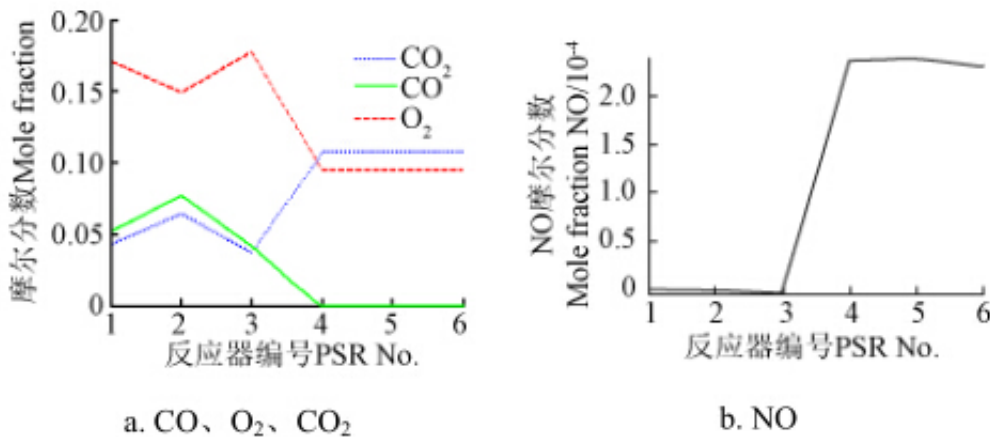


图 5 各反应器中 CO、O₂、CO₂、NO 的浓度分布
Fig.5 CO, O₂, CO₂, NO mole fraction of each reactor

2.2 不同燃料的NO排放对比

对玉米秸秆、棉

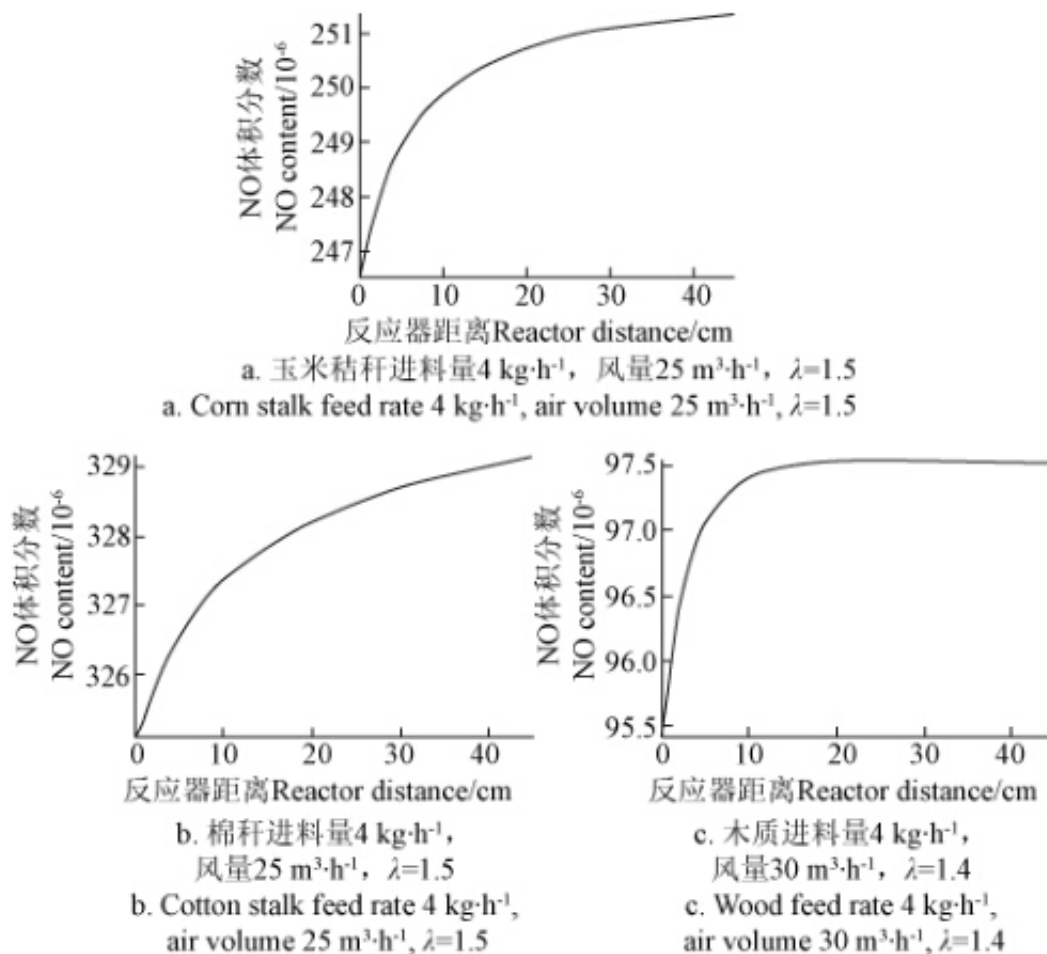
秆颗粒燃料在进料量为4kg/h、风量25

m³/h、过量空气系数为1.5，木质风量30m³

/h、过量空气系数为1.4三种工况下燃烧，对模拟烟气管道PFR反应器中NO排放模拟结果处理，得到的结果如图6所示。

对比3种颗粒燃料可以发现，木质燃料NO达到峰值的距离最短，速度最快，而棉秆最慢。在生成量方面，因为燃烧温度都在1500K以下，且空气量充足，所以生成的NO主要是燃料型NO，3种颗粒燃料的N元素含量由高到低以此为棉秆、玉米秸秆、木质颗粒，因此棉秆的生成量大于玉米秸秆大于木质颗粒。三者的工业分析数据显示，棉秆和玉米秸秆的灰分量较高^[27]

，导致其NO达到峰值速度相对较慢，但从生成量的变化量上来看，三者增值仅为5e-6左右，并不明显。



注： λ 为过量空气系数。

Note: λ is excess air coefficient.

图 6 3 种生物质颗粒的 NO 排放曲线

Fig.6 NO emissions curve of three biomass pellet fuels

图6的模拟结果与试验结果^[28]

进行对比，如表5所示。对比试验结果数据，其中玉米秸秆和木质的结果较为一致，但棉秆的预测结果有6%的偏差，这可能同燃料N中具体

的存在形式相关。在挥发分析出的过程中，挥

发分氮主要以HCN和 NH_3 形式析出，而本文参考Faravellie的研究用HCN替代燃料中的挥发分N。

表 5 3 种生物质颗粒燃料 NO 排放模拟值与试验值对比表
Table 5 Contrast table of simulation value and experiment value
of three biomass pellet fuels NO emissions

生物质 Biomass	过量空气系数 Excess air coefficient λ	NO 试验值 ^[28] Experiment value/ 10^{-6}	NO 模拟值 Simulation value/ 10^{-6}	相对误差 Relative error/%
玉米秸秆 Corn straw	1.5	258	251	2.7
棉秆 Cotton stalk	1.5	350	329	6.0
木质 Wood	1.4	96	98	2.1

由表5可知，在相同的燃烧器负荷和相同空气流速下3种燃料的NO平均排放值可以发现，木质颗粒的NO排放最低，棉秆颗粒的最高，玉米秸秆颗粒介于二者之间。

这是因为，在14

00K温度下HCN向NO的转化路径是

： $\text{HCN} + \text{M} \rightarrow \text{H} + \text{CN} + \text{M}$ 、 $\text{HCN} + \text{OH} \rightarrow \text{CN} + \text{H}_2\text{O}$

$\text{O} + \text{CN} \rightarrow \text{NO} + \text{C}$ 、 $\text{HCN} + \text{OH} \rightarrow \text{HOCN} + \text{H}$ 、 $\text{HNCO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NCO} + \text{HO}_2$

、 $\text{NCO} + \text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{CO}$ 、 $\text{HNC} + \text{O} \rightarrow \text{NH} + \text{CO}$ 等一系列反应。CO主要通过反应 $\text{NCO} + \text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{CO}$ 影响NO生成，从平衡常数判断，较低的CO浓度可促进反应向正方向进行； H_2 主要通过反应 $\text{H}_2 + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}$

$\text{O} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ 产生H基作用于 CH_2

$+ \text{NO} \rightarrow \text{H} + \text{HNCO}$ ，使得NO的上升；

N元素含量高以及高温也会导致高NO生成^[8]

。通过分析棉秆的输入组分，CO相对含量低， H_2

相对含量高，在自身元素分析中N的质量分数是三者中最高，而且与玉米秸秆颗粒相比较，棉秆颗粒的燃烧温度1283K要高于玉米秸秆的燃烧温度1259K，因此棉秆NO的排放量是3种燃料中最高的。

2.3不同风量的NO排放对比

对于玉米秸秆，在4kg/h进料速度的工况下，设置不同的过量空气系数（空气质量流率），范围为1.3~2.0，步长为0.1，得到反应网络系统出口处NO的分布。如图7所示，随着当量比的增加，NO的排放出现较快增长，在过量空气系数1.7附近，模型模拟值出现最高排放，随后NO的排放随过量空气系数的增加开始下降，过量空气系数的变化带来燃料过程中氧浓度的变化，在 $\lambda \leq 1.7$ 前对NO的生成有较明显促进，这之后对NO的影响不显著，同时过量空气的稀释效应一定程度降低了NO的体积分数，但对NO的绝对生成量无贡献。

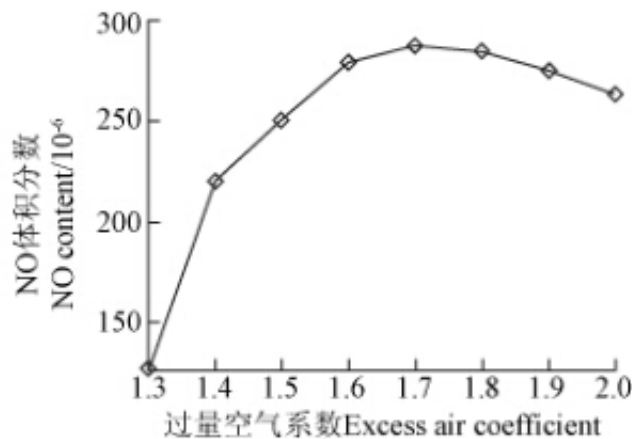


图 7 NO 排放随空气过量系数变化

Fig.7 NO emissions change with excess air coefficient

将模拟结果与已有试验结果^[28]进行对比，如表 6 所示，对于测定试验数据，模拟结果偏差均不大。

表 6 3 种过量空气系数下 NO 排放模拟值与试验值对比表

Table 6 Contrast table of simulation value and experiment value of NO emissions under three excess air coefficient

过量空气系数 Excess air coefficient λ	NO 试验值 ^[28] Experiment value/10 ⁻⁶	NO 模拟值 Simulation value/10 ⁻⁶	相对误差 Relative error/%
1.5	258	251	2.7
1.7	287	290	1.0
2.0	261	263	0.8

过量空气系数是通过进气量增加而增大的，当 λ 从 1.5 变为 1.7 时，燃烧更加充分，O₂ 随进气量而增多；再继续增大进气量，空气流速增加使得混合气体在炉膛内的滞留时间变短，同时对 NO 有所稀释，因而其浓度降低。

需要说明的是，不管模拟结果或是试验数据 NO 排放值均较高，这除了与燃料自身性质有关外，燃烧器的结构对其排放也有很大影响。张永亮^[30]

对包括本文研究的 PB-20 型燃烧器在内的 3 种燃烧器排放进行了测试，结果表明本文选用的燃烧器 NO 结果较高。燃烧器结构会影响燃烧参数，从而影响排放。利用本文机理结果，可针对不同的燃烧器进行模拟研究其排放，从而大大缩减燃烧器的设计和改进过程。这部分相关原理和模拟研究应成为今后研究方向。

3 结论

1) 根据 Fluent 对燃烧筒仿真结果在 ChemKin 中建立了 PSR 等离子体管流反应器模型，对 NO 排放的化学过程进行反应动力学模拟。

2) 结果显示各反应器 NO 浓度分布与温度分布和 CO、O₂、CO₂ 各组分分布有直接关系，NO 主要生成在反应器 4 之后，且为燃料型 NO。

3) 将不同生物质成型燃料 NO 排放的模拟结果与试验结果进行对比，两者得出相同的变化趋势，棉秆成型颗粒的结

果有6%的偏差, 玉米秸秆和木质的结果较为符合。

4) 不同过量空气系数下的玉米秸秆模拟结果表明: 在过量空气系数为1.7附近时, 燃烧产生的NO排放最高, 体积分数为 290×10^{-6} ; 模拟结果与试验结果较为吻合。

5) 验证了选用ReactionDesign的C2_NO_x机理进行CFD和ChemKin联合仿真, 可实现生物质颗粒燃料NO排放预测, 并具有较好的精确性。

[参考文献]

- [1]罗娟, 侯书林, 赵立欣, 等. 生物质颗粒燃料燃烧设备的研究进展[J]. 可再生能源, 2009, 27(12): 90 - 95.
- [2]田红, 廖正祝. 农业生物质燃烧特性及燃烧动力学[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 203 - 212.
- [3]张永亮, 赵立欣, 姚宗路, 等. 生物质固体成型燃料燃烧颗粒物的数量和质量分布特性[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 185 - 192.
- [4]Matti Parikka. Global biomass fuel resources[J]. Biomass and bioenergy, 2004, 27(6): 613 - 620.
- [5]陈汉平, 李斌, 杨海平, 等. 生物质燃烧技术现状与展望[J]. 工业锅炉, 2009(5): 1 - 7.
- [6]Demirbas A. Combustion characteristics of different biomass fuels[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(2): 219 - 230.
- [7]姚宗路, 吴同杰, 赵立欣, 等. 生物质成型燃料燃烧挥发性有机物排放特性试验[J]. 农业机械学报, 2015, 45(10): 135 - 240.
- [8]Williams A, Jones J M, Ma L, et al. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2012(38): 113 - 137.
- [9]赵欣, 李慧, 胡乃涛, 等. 生物质固体成型燃料燃烧的 NO 和 CO 排放研究[J]. 环境工程, 2015, 33(10): 50 - 54.
- [10]Lunbo Duan, Yuanqiang Duan, Changsui Zhao, et al. NO emission during co-firing coal and biomass in an oxy-fuel circulating fluidized bed combustor[J]. Fuel, 2015, 150(15): 8 - 13.
- [11]Winter F, Wartha C, Hofbauer H, et al. NO and N₂O formation during the combustion of wood, straw, malt waste and peat[J]. Bioresour Technol, 1999, 70(1): 39 - 49.
- [12]张鹤丰. 中国农作物秸秆燃烧排放气态、颗粒态污染物排放特征的实验室模拟[D]. 上海: 复旦大学, 2009.
- [13]Maryori D í az-Ram í rez, Fernando Sebasti á n, Javier Royo, et al. Influencing factors on NO_x emission level during grate conversion of three pelletized energy crops[J]. Appl Energy, 2014, 115(4): 360 - 373.
- [14]Murari Mohon Roy, Kenny W. Corcadden. An experimental study of combustion and emissions of biomass briquettes in a domestic wood stove[J]. Applied Energy, 2012, 99: 206 - 212.
- [15]Evelyn Cardozo, Catharina Erlich, Lucio Alejo, et al. Combustion of agricultural residues: An experimental study for small-scale applications[J]. Fuel, 2014, 115: 778 - 787.
- [16]Gerhard Stubenberger, Robert Scharler, Selma Zahirovic, et al. Experimental investigation of nitrogen species release from different solid biomass fuels as a basis for release models[J]. Fuel, 2008, 87: 793 - 806.
- [17]Takero Nakahara, Hui Yan, Hiroyuki Ito. Study on one-dimensional steady combustion of highly densified biomass briquette (bio-coke) in air flow[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35: 2415 - 2422.

[18]Capucine Dupont, Guillaume Boissonnet, Jean-Marie Seiler. Study about the kinetic processes of biomass steam gasification[J]. Fuel, 2007, 86: 32 - 40.

[19]徐德厚, 周月桂, 金旭东, 等. O₂/CO₂气氛下甲烷燃烧中NO_x转化过程的CHEMKIN模拟[J]. 锅炉技术, 2015, 46(3): 75 - 79.

[20]丛晶, 周月桂, 徐德厚, 等. O₂/CO₂气氛下煤粉燃烧中NO_x转化机理的CHEMKIN模拟[J]. 锅炉技术, 2015, 46(5): 63 - 67.

[21]赵然, 刘豪, 胡翰, 等. O₂/CO₂气氛下甲烷火焰中NO均相反应机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2009(20): 52 - 59.

[22]Hirotsu Watanabe, Jun-ichiro Yamamoto, Ken Okazaki, et al. NO_x formation and reduction mechanisms in staged O₂/CO₂ combustion[J]. Combustion and Flame, 2011, 158(7): 1255 - 1263.

[23]Okazaki K, Ando T. NO_x reduction mechanism in coal combustion with recycled CO₂ [J]. Energy, 1996, 22(2): 207 - 215.

[24]Zhao Ran, Liu Hao, Hu Han, Zhong Xiaojiao, et al. Experimental and modeling study of NO emission under high CO₂ concentration[J]. Science China, 2010, 53(12): 3275 - 3283.

[25]Vincent Fichet, Mohamed Kanniche, Pierre Plion, et al. A reactor network model for predicting NO_x emissions in gas turbines[J]. Fuel, 2010, 89: 2202 - 2210.

[26]董刚, 蒋勇, 陈义良, 等. 大型气相化学动力学软件包CHEMKIN及其在燃烧中的应用[J]. 火灾科学, 2000, 9(1): 27 - 33.

[27]Demirbas A. Biorefineries: current activities and future developments energy convers[J]. Manage, 2009, 50(11): 2782 - 2801.

[28]赵欣. 生物质成型燃料气态排放物特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.

[29]李鑫华. 生物质颗粒燃料燃烧炉的优化设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.

[30]张永亮. 生物质固体成型燃料颗粒物排放特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/107799.html>