

工业分解炉生物质木煤和重油混合燃烧的数值模拟研究

毛 娅,郑 欢,江 智

(武汉理工大学 机电工程学院,湖北 武汉 430070)

摘 要:以生物质燃料木煤和重油混合燃烧为研究对象,利用欧拉-拉格朗日方法中的DPM模型模拟燃料颗粒运动燃烧过程,欧拉-欧拉方法中的欧拉(Eulerian)多相流模型模拟气相反应与生料分解反应,将两种模型耦合应用于分解炉的燃烧模拟中。在其他因素不变的前提下,分别对比了不同木煤掺混比例(0、15%、30%)、入口高度(11、13和15 m)和颗粒粒径(1、3和5 mm)3种情况下,分解炉生物质燃尽率、生料分解率以及出口NO排放量。研究表明:木煤颗粒入口的合理位置应位于第一个缩口与三次风入口之间,木煤颗粒粒径和掺混比例对生料分解率的影响较小,而出口NO排放量随木煤颗粒粒径增大而增大,随木煤掺混比例的增加而降低。

关 键 词:生物质燃料;分解炉;入口高度;粒径

中图分类号:TK6

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2020.03.030

[引用本文格式]毛 娅,郑 欢,江 智.工业分解炉生物质木煤和重油混合燃烧的数值模拟研究[J].热能动力工程,2020,35(3):207-213. MAO Ya,ZHENG Huan,JIANG Zhi. Numerical simulation study on mixed combustion of biomass wood coal and heavy oil in industrial decomposition furnace[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2020,35(3):207-213.

Numerical Simulation Study on Mixed Combustion of Biomass Wood Coal and Heavy Oil in Industrial Decomposition Furnace

MAO Ya,ZHENG Huan,JIANG Zhi

(School of Mechanical and Electronic Engineering,Wuhan University of Technology,Wuhan,China,Post Code: 430070)

Abstract: In this paper,the mixed combustion of biomass fuel wood coal and heavy oil is taken as the research object. The DPM model in the Euler-Lagrang method is used to simulate the combustion process of fuel particles. The Eulerian multiphase in the Euler-Eulerian method is used. The flow model simulates the gas phase reaction and the raw meal decomposition reaction,and the two models are coupled to the combustion simulation of the decomposition furnace. Under the premise that other factors are unchanged,the effects of different proportions of wood coals (0,15%,30%),inlet height (11 m,13 m,15 m),and particle size (1 mm,3 mm,5 mm) on biomass burnout rate,raw material decomposition rate and export NO emission are investigated. The results indicate that the reasonable position of the wood coal particle inlet should be located in between the first shrinkage and the tertiary air inlet. The effect of the blending ratio on the decomposition rate of raw meal has a small decrease trend,while the NO emission increases with the particle size of wood coal,and decreases with the increase of the proportion of wood coal.

Key words: biomass fuel,decomposing furnace,inlet height,particle size

引 言

生物质燃料大多燃烧热值低于化石燃料,且含水量较高,使用量过大时,结渣风险较高,生成的大量烟气导致炉内温度分布不均。因此,实际生产多采用传统燃料和生物质燃料混合燃烧。

目前,国内生物质燃料混合燃烧研究取得了一定成果,王晶红^[1],沈伯雄^[2]的研究可知,生物质与化石燃料混合燃烧时,生物质中 NH_3 、分解成的 NH_2 与 NH 和生物质燃料燃烧形成的多孔性焦炭,都有利于 N_2O 和 NO_x 的分解。在刘豪^[3]针对生物质与煤以质量比为 1:1 混合燃烧的污染物研究中发现,燃料 SO_x 排放降低了 10% ~ 17%, NO_x 排放降低了 2% ~ 33%。

朱茂葵等人^[4]研究了高热值燃气生物质气化炉,蒸气入口高度、空气入口速度及水蒸气入口流量、速度对 CO 、 H_2 和 CH_4 的体积浓度和燃气热值影响。杨国峰^[5]着重研究了生物质成型燃料的物理特性,发现了不同生物质成型燃料结构中的不同特点,分析了影响生物质燃料燃烧过程的几种因素。

Arafat A 等人^[6]测试比较了生物质颗粒质量分数在不同比例时和煤粉混合燃烧的温度分布、组分分布以及 CO_2 分布。L. J. R. Nunes 等人^[7]分析了在当前使用的燃烧模型下对混合的生物质颗粒的燃烧过程,并对比了混合生物质颗粒在不同燃烧过程中的表现。

Ghenai^[8]研究了麦秆的掺混比例在 5% ~ 20% 的燃烧效果,比较了气相与颗粒的温度分布、 CO_2 与 NO_x 的排放量,得出在该掺混比例下,随着生物质颗粒掺混比例的增加污染物的排放量降低的结论。

在水泥工业中,分解炉需要大量热完成 CaCO_3 的分解,生物质能源是可以广泛使用的能源形式。本文针对木煤这一生物质燃料在入射口为 13 m,生物质木煤粒径为 1 mm 的前提下,对木煤掺混比例为 0、15%、30% 3 种情况下的分解炉分解反应阶段做了对比分析。并且在木煤这一生物质燃料掺混比例为 30% 的前提下做了另两组对比分析;在生物质颗粒粒径为 3 mm 时,选定 11、13 和 15 m 3 组不同的生物质入射口高度作对比;在生物质入射口高度为 13 m 时,选定 1、3 和 5 mm 3 组不同的粒径的生物质作对比。

1 建立分析模型和划分网格

1.1 分解炉分析模型建立

图 1 为分解炉几何模型,从回转窑窑尾排出的高温烟气由分解炉底部缩口进入分解炉,上方对称布置 2 个三次风入口 1、2,三次风入口 1、2 上方布置 2 个对称的撒料箱与 4 个以圆周向分布的燃烧器,在经过分解炉第一个缩口后布置有两个对称的撒料箱,撒料箱上方布置三次风入口 3。

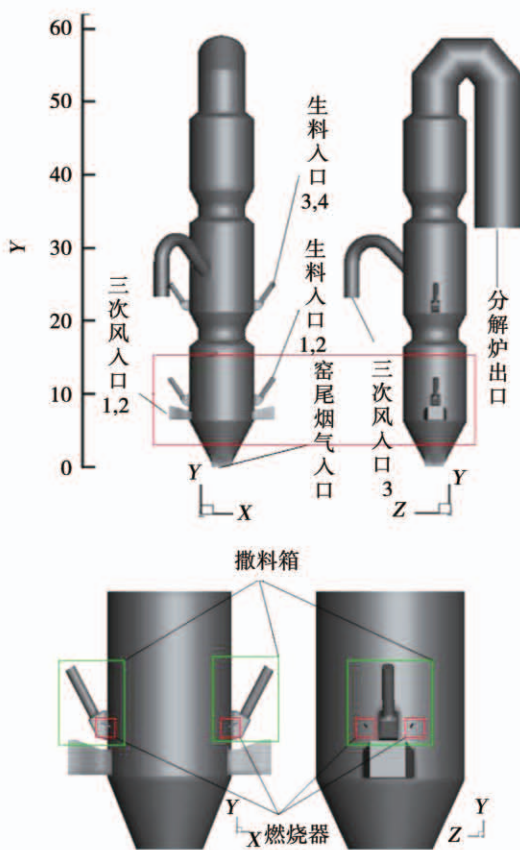


图 1 分解炉几何模型及局部放大图

Fig. 1 Geometric model of the decomposition furnace flow field and partial enlargement

1.2 网格划分

如图 2 所示,三次风入口 3 与炉体部分采用网格分块技术,在不同的网格块中,由于节点和尺寸存在差别,通过在两个网格域间建立共同边界的方式实现域与域之间数据的传递,而针对是圆面的窑尾烟气入口、三次风入口和撒料箱入口处,为了使网格块更贴近几何模型,需要采用 O-block 技术进行处理,提高圆面处的网格质量。为了进一步使模拟结果精确,对分解炉下部反应剧烈区域与入料的关键

部位进行网格加密处理。然而在保证计算结果的前提下,考虑到计算机性能以及计算时间等问题,又应尽量减少网格的数量以减少计算时间,最终计算网格数量为 40.05 万。

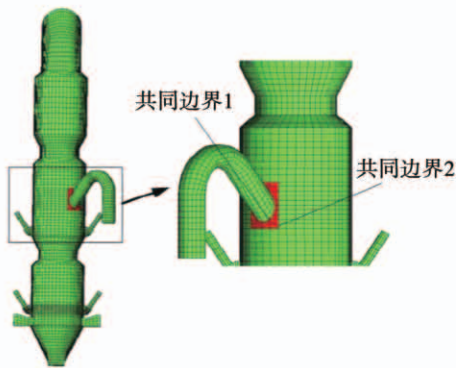


图2 全局网格及共同边界技术

Fig.2 Global grid and interface technology

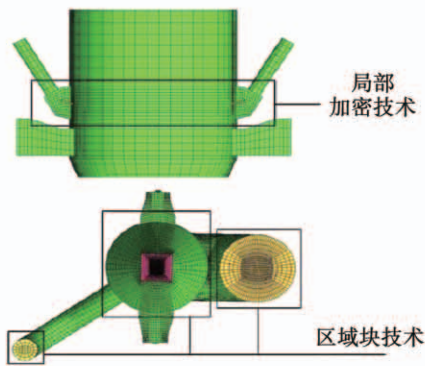


图3 局部加密及区域块技术

Fig.3 Local encryption and O-black technology

1.3 计算模型

分解炉流场中,包括了重油颗粒相、生料颗粒相和气相之间的耦合,属于十分复杂的流场。经过对比各模型的适用范围和要求,最终选择的模型为:湍流模型选择 $k-\varepsilon$ Standard 模型;对重油燃料采用液体燃烧模型,应用挥发分析出模型和组分传输模型模拟燃烧过程;对生物质燃料,加入焦炭反应模型模拟焦炭的燃烧过程;炉内辐射传热模型选择 P-1 辐射模型且假设炉壁与外界绝热;分解炉内部 NO_x 只考虑燃料型 NO_x 与窑尾烟气中的 NO_x 。燃料型 NO_x 采用 De'Soete^[9] 提出的燃料 NO_x 生成机理模型;燃烧过程中产生的 CO 形成还原气氛,对烟气中的 NO 产生还原反应。 NO_x 的生成、还原反应和 CaCO_3 分解反应均采用有限速率反应模型。

目前,针对多相流问题的研究中主要有欧拉-拉格朗日方法和欧拉-欧拉方法两种。欧拉-拉格朗日方法存在离散相体积分数要小于 10% 的限制,适用于燃料颗粒;对于体量较大的生料颗粒则采用欧拉-欧拉方法^[10]。

1.4 边界条件及数值求解

根据研究对象分解炉工况数据,其中窑尾烟气流量为 $569\,638\text{ m}^3/\text{h}$,三次风流量为 $650\,377\text{ m}^3/\text{h}$,生料喂料量为 408 t/h ,由于本分解炉采用了分级燃烧,三次风入口 3 的风量占总三次风量的 30%。根据每千克熟料的热耗为 $3\,150\text{ kJ}$ (其中 60% 由分解炉内燃料燃烧提供),日产 $6\,000\text{ t}$ 的产量以及模型中各出入口尺寸参数,得出窑尾烟气、三次风入口 1、2、3 的气体喷入速度、物料入口进料量、重油的用量,最终边界条件如表 1 所示,其中水力直径的计算式为:

$$d_h = 4A/P \tag{1}$$

式中: A —边界截面积; P —边界周长。

木煤的物理和化学特征通过美国测试和材料协会 (ASTM) 标准来测试,表 2 为木煤的工业分析。木煤的元素组成使用德国制 vario EL III 元素分析仪,结果如表 3 所示。燃烧重油元素分析和燃料属性如表 4 和表 5 所示。窑尾烟气与三次风中的组分组成如表 6 与表 7 所示。

表 1 边界条件设置

Tab.1 Boundary condition setting

边界名称	边界类型	水力直径/m	速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	质量流量/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	温度/K
窑尾烟气入口	速度入口	2.24	31.5	—	1 380
三次风入口 1、2	速度入口	1.85	18.5	—	1 208
三次风入口 3	速度入口	1.85	21.0	—	1 208
燃料入口 1、2、3、4	DPM 入口	—	22.0	0.733	353
生料入口 1、2	质量流量入口	0.65	—	23.900	1 068
生料入口 3、4	质量流量入口	0.65	—	19.600	1 068
分解炉出口	压力出口	5.54	—	—	—

表 2 木煤的工业分析

Tab.2 Industrial analysis of wood coal

挥发分/%	水分/%	灰分/%	固定碳/%	热值/ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
72.48	9.02	1.85	16.65	18.95

表 3 木煤的元素分析

Tab.3 Elemental analysis of wood coal

元素成分	质量分数/%
C	46.40
H	6.50
O	46.50
N	0.20
S	0

表 4 重油燃料元素分析

Tab.4 Element analysis of heavy oil fuel

元素成分	质量分数/%
C	88.21
H	11.61
O	0
N	0.18

表 5 重油燃料性质

Tab.5 Heavy oil fuel properties

密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	比热容/ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	潜热/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	热值/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	挥发分质 量分数/%
960	1 880	124 000	10 000	99.6

表 6 窑尾烟气组分组成

Tab.6 Composition of kiln flue gas components

组分	体积分数/%
CO_2	0.105
O_2	0.035
H_2O	0.14
N_2	0.72
NO	0.000 56

表 7 三次风组分组成

Tab.7 Composition of the third wind component

组分	体积分数/%
O_2	0.21
N_2	0.79

2 计算结果分析

2.1 木煤掺混比例

为了研究木煤掺混比例对燃烧的影响,选定木

煤掺混比例为 0、15% 和 30%,木煤入射口高度为 13 m,颗粒粒径为 1 mm。

根据式(2)计算,可得 3 种木煤掺混比例下木煤颗粒燃尽率分别为 87.9%、86.8% 和 82.12%。由此可见,木煤燃尽率随木煤掺混比例的增加而降低。

$$\eta = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100\%$$
 (2)

式中: m_i —生物质入口质量; m_f —生物质出口质量; η —生物质燃尽率。

从图 4 中可以看出,在不同的掺混比例下,分解炉内的生料分解反应速率分布相似,但反应速率随着掺混比例的增加而逐渐降低,可以认为生物质燃料的掺混比例将对生料分解效果产生一定的影响。

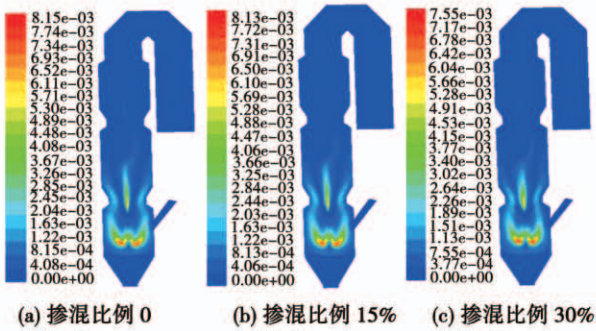


图 4 不同掺混比例下生料分解反应速率
($\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$) 云图

Fig.4 The decomposition rate of raw meal decomposition
($\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$) under different mixing ratios

由图 5 可知,随着生物质掺混比例的增加,生料分解率和出口 NO 排放量都处于下降趋势。由于生物质掺混比例的增加,分解炉炉内的温度降低,由于生料分解反应主要发生区温度降低,导致分解炉内的生料分解率降低。木煤比重油更清洁,所以 NO 排放量也处于下降趋势。木煤掺混比例在 15% 前生料分解率变化较小而 NO 的排放量的变化较大;而当木煤掺混比例在 15% ~ 30% 之间时,生料分解率变化较大而 NO 的排放量变化较小;木煤掺混比例在 15% 时,生料分解率相比全重油时几乎不变,而出口 NO 排放量却降低较多。由此可见,掺混适量生物质木煤燃料并不会影响生料分解率,还会降低分解炉出口 NO 排放量。

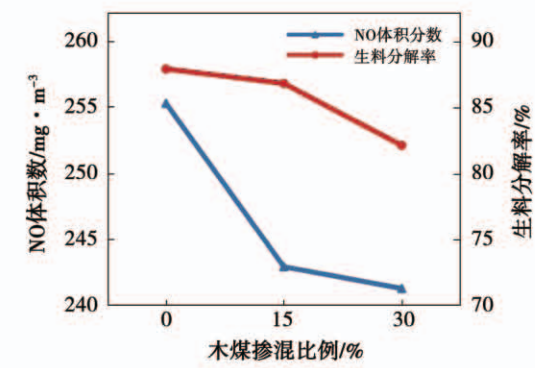


图5 分解炉内 NO 体积分数和生料分解率曲线

Fig.5 The volume fraction of NO in the decomposition furnace and the decomposition rate of raw meal

2.2 木煤颗粒入口位置

选定木煤燃料的掺混比例为 30%,木煤粒径为 3 mm,分别对木煤颗粒入口高度在 11、13 和 15 m 3 种情况进行模拟,如图 6 所示。

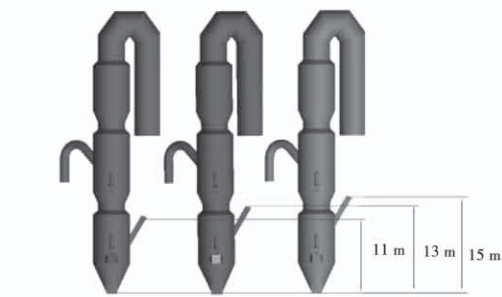


图6 木煤燃烧颗粒入口高度示意图

Fig.6 Schematic diagram of the entrance height of wood coal combustion particles

根据木煤颗粒进出口的流量计算可得 3 种入口高度下木煤颗粒燃尽率分别为 75.6%、88.5% 和 72.5%,由此可见,3 种高度的设置下木煤颗粒的燃尽率在 13 m 时相比入口在 11 和 15 m 时要好很多,入口在 11 和 15 m 时两者相差不明显。

由图 7 可知,木煤颗粒入口在 11 和 13 m 时,入射位置相对较低,颗粒速度一定时,可以克服底部缩口烟气向上速度到达底部,在底部停留时间较长,有利于燃烧。而入口在 15 m 时,正好和入口在 11 和 13 m 时相反,颗粒入射向下的速度被底部缩口烟气向上的速度同化,无法到达底部,燃烧时间相对较差,木煤燃烧情况相对前两种也低。这一结果和前面计算的木煤颗粒燃尽率是一致的。木煤颗粒入口在 13 m 时燃尽率最高,是因为颗粒集中在燃烧器燃

烧区,而入口在 11 m 时,颗粒相对较分散,所以入口在 13 m 处木煤燃尽率相对入口在 11 m 处更高。

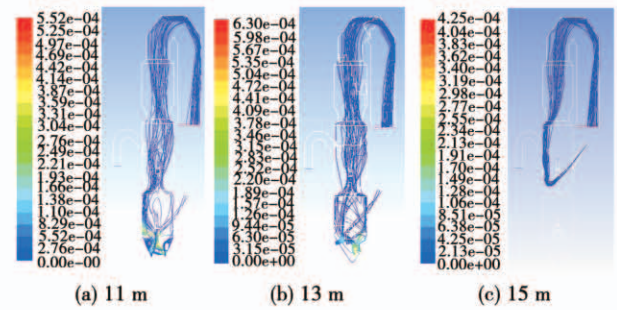


图7 不同入口高度下木煤燃烧反应速率 (kmol/(m³·s)) 流线图

Fig.7 Streamline diagram of wood coal combustion reaction rate (kmol/m³·s) at different inlet heights

图 8 为不同入口高度下生料分解速率云图,木煤入口高度在 11、13 和 15 m 时生料分解反应分布相似,入口在 11 和 15 m 时,生料分解反应对称分布,入口在 11 m 处生料分解速率比入口在 15 m 处更大。而入口在 13 m 处,生料分解反应略有向右倾斜,其生料分解反应速率相对入口在 11 m 处进一步增大。一定条件下生料分解速率随温度上升而增加,而温度和木煤燃尽率正相关,所以最终生料分解速率与木煤反应速率结果也吻合。

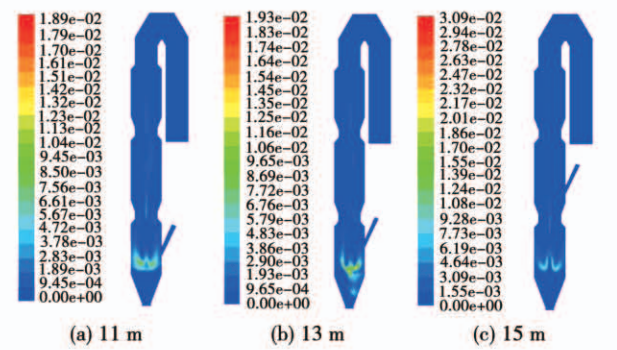


图8 不同入口高度下生料分解反应速率 (kmol/(m³·s)) 云图

Fig.8 Contour of biomass decomposition reaction rate (kmol/(m³·s)) at different inlet heights

图 9 为分解炉内 NO 体积分数和生料分解率曲线图。由图可以看出,木煤入口高度在 11 ~ 13 m 时,生料分解率和出口 NO 的体积分数都是上升的趋势。木煤入口高度对生料分解率有较大影响,当入口高为 13 m 时,分解率达到 88.5%,但出口 NO

浓度值亦最大,为 328.68 mg/m³。当木煤入口在 13~15 m 时,出口 NO 体积分数和生料分解率都呈下降趋势,但是 NO 体积分数下降的程度不如分解率显著。

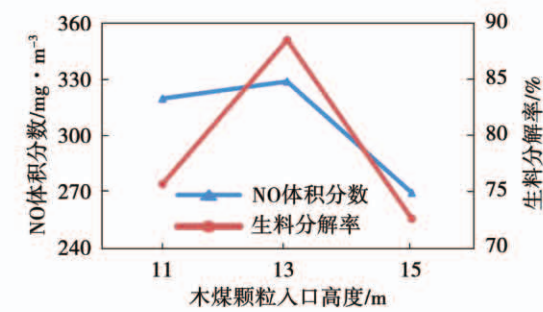


图9 分解炉内 NO 体积分数和生料分解率曲线
Fig.9 The volume fraction of NO in the decomposition furnace and the decomposition rate of biomass

2.3 木煤颗粒粒径

将木煤颗粒粒径作为研究对象,当木煤燃料颗粒入口在 13 m,木煤颗粒掺混比例为 30% 的条件下,比较木煤颗粒粒径在 1、3 和 5 mm 的燃烧过程。

根据式(2)可计算出 3 种颗粒粒径在入射口高度为 13 m 时的燃尽率分别为 75.3%、73.0% 和 72.6%。由此可得出,木煤颗粒粒径的增大对颗粒的燃尽率有一定的影响,粒径越大,燃烧率越低,说明燃烧越不充分。

由图 10 可得出,随着木煤颗粒粒径的增加,木煤颗粒的体积与质量增加,木煤颗粒的燃烧位置也由缩口附近移动至分解炉的底部附近。同时可以发现,颗粒粒径较大时,颗粒在分解炉内的分布也更为集中,这对燃料的充分燃烧是不利的。

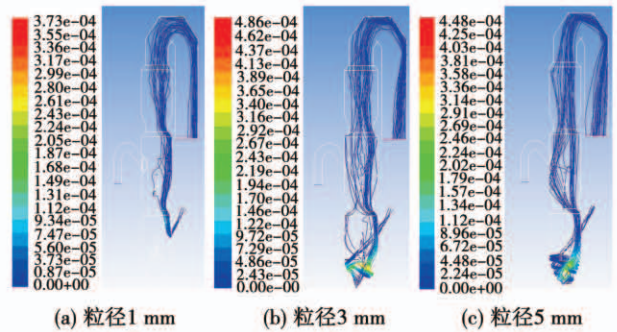


图 10 不同木煤颗粒粒径燃烧反应速率
(kmol/(m³·s)) 流线图
Fig.10 Flow chart of combustion reaction rate
(kmol/(m³·s)) of different wood coal particles

图 11 为不同木煤颗粒粒径下生料分解反应速率(kmol/m³·s)云图。由图可看出,随着木煤颗粒粒径的增大,虽然生料分解反应速率略有增长,但同时分解反应在分解炉内却趋于非对称分布,在木煤粒径为 5 mm 时,分解反应的速率分布相对分解炉已不对称,这一现象是不利于实际生产的。

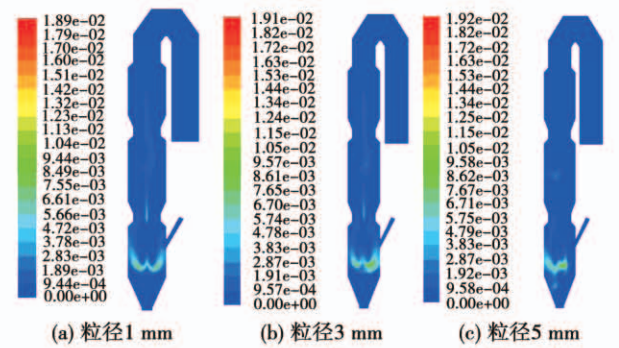


图 11 不同木煤颗粒粒径下生料分解反应速率
(kmol/(m³·s)) 云图
Fig.11 Biomass decomposition reaction rate(kmol/m³·s)
under different particle sizes of wood coal

图 12 为分解炉内 NO 体积分数和生料分解率分布曲线图。由图可以看出,当木煤粒径在 0.001~0.003 m 时,分解率呈下降趋势,而出口 NO 体积分数值呈现明显上升趋势,在 0.003~0.005 m 之间略有下降。由此可见:木煤颗粒粒径在 0.001~0.003 m 对 NO 的排放量的影响较大,而对生料分解率的影响较小;当木煤粒径在 0.003~0.005 m 时,生料分解率和出口 NO 体积分数都呈微小下降趋势。颗粒粒径为 0.001 m 时,生料分解率最高,而出口 NO 体积分数亦最低,为 280.15 mg/m³。

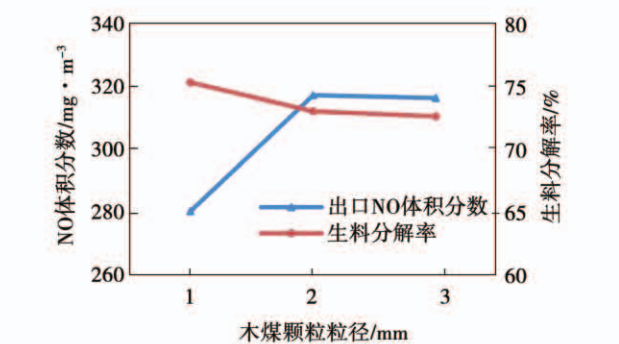


图 12 分解炉内 NO 体积分数和生料分解率曲线
Fig.12 The volume fraction of NO in the decomposition furnace and the decomposition rate of biomass

3 结 论

(1) 分解炉内生料分解率和 NO 的排放量随着木煤掺混比例的增加而下降,掺混比例适量时生料分解率变化很小,但是较大程度降低了 NO 的排放。实际生产在满足生料分解率的前提下,可以增大木煤掺混比例来降低出口 NO 的排放量。

(2) 分解炉内木煤颗粒入口高度对 NO 的排放量和生料的分解率都有较大影响,随着木煤颗粒入口高度的增加,NO 的排放和生料的分解率都先增后减。所以在实际生产中,需要根据工业分解率要求及 NO 排放允许量,选择合理位置,根据模拟数据,木煤颗粒入口应位于第一个缩口与三次风入口之间偏中间位置。

(3) 木煤颗粒粒径对 NO 的排放量有一定影响,在一定粒径值内,NO 排放量随粒径增大增长很快,但木煤颗粒粒径对分解炉生料分解率的影响较小。

参考文献:

- [1] 王晶红,刘 皓,陆继东,等. 生物质燃料与煤混燃时 $\text{NO}_x/\text{N}_2\text{O}$ 排放的研究[J]. 华中科技大学学报,1998(1):72-74.
WANG Jing-hong, LIU Hao, LU Ji-dong, et al. Study on $\text{NO}_x/\text{N}_2\text{O}$ emissions from biomass fuel and coal mixed combustion[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1998(1): 72-74.
- [2] 沈伯雄,姚 强,刘德昌. 流化床中煤和生物质混烧 N_2O 和 NO_x 排放规律研究[J]. 电站系统工程,2002,18(2):51-52.
SHEN Bo-xiong, YAO Qiang, LIU De-chang. Study on N_2O and NO_x emissions from coal and biomass mixed burning in fluidized bed[J]. Power System Engineering, 2002, 18(2): 51-52.
- [3] 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.
LIU Hao, QIU Jian-rong, WU Hao, et al. Emission characteristics of biomass and coal mixed combustion pollutants[J]. Journal of Environmental Science, 2002, 22(4): 484-488.
- [4] 朱茂葵,卿德藩,陈爱瑞,等. 高热值生物质燃气气化炉的数值模拟[J]. 南华大学学报,2015(2):71-76.
ZHU Mao-kui, QING De-fan, CHEN Ai-rui, et al. Numerical simulation of high calorific value biomass gasification gasifier[J]. Journal of Nanhua University, 2015(2): 71-76.
- [5] 杨国峰. 生物质成型燃料燃烧机理研究[D]. 郑州:河南农业大学,2010.
YANG Guo-feng. Study on combustion mechanism of biomass forming fuel[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2010.
- [6] BHUIYANA A, NASER J. Numerical modeling of biomass co-combustion with pulverized coal in a small scale furnace[J]. Procedia Engineering, 2015, 105: 504-511.
- [7] NUNES J R, MATIAS J C O, CATALÃO J P S. Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models[J]. Applied Energy, 2014, 127(127): 135-140.
- [8] GHENAIC, JANAJREH I. CFD analysis of the effects of co-firing biomass with coal. [J]. Energy Conversion & Management, 2010, 51(8): 1694-1701.
- [9] SOETEG G D. Overall reaction rates of NO and N_2 formation from fuel nitrogen [J]. Symposium on Combustion, 1975(1): 1093-1102.
- [10] 刘 宁. 6000TPD 分解炉分级燃烧降低 NO_x 的数值模拟研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2017.
LIU Ning. Numerical simulation of NO_x reduction by staged combustion of 6000TPD decomposition furnace[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.

(丛 敏 编辑)