

问题探讨

农村生活垃圾生物质热解和燃烧气相数值模拟

杨俊峰,杨明山

(广东人峰实业有限公司,广东 广州 510220)

摘要:为模拟周围湍流气体中生物质颗粒的热化学转化和交互作用,提出了生物质热解和燃烧的数值模拟方法。反应混合气模拟气相质量、动量和能量交换的气体粒子交互作用包括在双向耦合项中。通过双向耦合对生物质颗粒转化时间影响的分析发现:颗粒体积分数大于 10^{-5} 。在恒定体积分数下,由于在较小颗粒的情况下总热交换面积较高,双向耦合的影响随着颗粒尺寸的减小而增加。由于较高的气体温度,DNS 模型包含的气相均相反应而减少了生物质热解时间。相反,包括气相反应由于颗粒表面氧浓度较低而增加了生物质的燃烧时间。

关键词:农村生活垃圾;热解;燃烧;数值模拟

中图分类号:X705

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2019)02-0041-05

GAS PHASE NUMERICAL SIMULATION OF PYROLYSIS AND COMBUSTION OF RURAL DOMESTIC WASTE BIOMASS

YANG Jun-feng, YANG Ming-shan

(Guangdong Renfeng Industrial Co., Ltd., Guangzhou 510220, China)

Abstract: A numerical simulation method was proposed towards the pyrolysis and combustion process of biomass in order to simulate the thermochemical conversion and interaction effect between biomass particles in turbulent channels. Gas particle interactions, involving mass, momentum and energy exchange, were included in a bi-directional coupling term. The volume fraction of particles was found to be higher than 10^{-5} by analyzing the effect of bi-directional coupling on the transformation time of biomass particles. At a constant volume fraction, the effect of bi-directional coupling increased with the decrease of particle size due to the high total heat exchange area in the case of small particles. In DNS model, homogeneous gas phase reactions reduce the pyrolysis time of biomass due to high gas temperature. On the contrary, in the gas phase reaction, the combustion time of biomass increased due to the low oxygen concentration on the surface of particles.

Key words: Rural domestic waste; Pyrolysis; Combustion; Numerical simulation.

生物质燃料是实现能源可持续清洁生产目标的主要方向之一^[1]。为了提高人们对生物质能转化过程的认识,国内外学者对单颗粒生物质热

解、燃烧与气化进行了深入研究^[2-5]。更深入地了解并应用生物质颗粒与周围湍流气体的交互作用有助于实现化工单元的快速设计。同时,开发湍流气体中生物质转化的 DNS 模型有助于更好地理解裂解炉内部物理化学反应过程^[6,7]。本文提

收稿日期:2018-12-21

第一作者简介:杨俊峰(1983-),男,江西赣州人。

出了开发DNS模型的框架,该框架涉及化学反应粒子与气体的双向交互作用。

为了模拟周围湍流气体中生物质颗粒的热化学转化和交互作用,DNS模型需要与生物质的单粒子化学模型相结合。模拟大量颗粒的生物质热解和燃烧,需要简化模型来减少计算量。根据颗粒表面温度、挥发物释放量以及颗粒在热解和燃烧过程中的转化时间等关键参数,开发了简化模型。通过考虑与气相的双向交互作用,建立了颗粒跟踪和模拟3D湍流颗粒载流通道的模型。本文通过添加固气非均相燃烧反应和气相均相反应扩展了上述模型的应用范围。

1 方法论

1.1 气体模型

该模型基于欧拉-拉格朗日方程,其中气相和颗粒相以不同的方式处理^[7]。由于此过程涉及的温度范围很宽,导致了质量密度变化明显;气相由可压缩Navier-Stokes方程描述。控制方程基于质量守恒、动量守恒、总能量守恒和物种质量守恒;这种守恒性质在数值模型中应用了氮体积法^[8]。气体的控制方程可写为守恒定律在任意体积(V)上的积分,其边界为S由式(1)表示。

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_S \rho \phi \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dS = \int_V \rho \dot{\phi} dV + \int_S \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{n} dS \quad (1)$$

上式中 $w(x,t)=[\rho u, \rho v, \rho w, \rho, e, \rho_{O_2}, \rho_{CO_2}, \rho_{CO}]^T$ 是各因变量的向量。 ρ 是气体的总质量密度; u, v, w 是速度矢量的笛卡尔分量; e 是总能量密度; $[\rho_{O_2}, \rho_{CO_2}, \rho_{CO}]$ 是单个气体种类的质量密度, t 表示时间, $X=[x; y; z]^T$ 是笛卡尔坐标向量。体积V中w的变化率是由对流通量(f_c),扩散通量(f_v)和解释粒子存在的双向耦合项(L_{2way})来确定。驱动力F加到流向动量方程中,使得总质量在流向上的速率保持恒定。

气相控制方程中的双向耦合项解释了气体和粒子之间的质量,动量和能量的传递。解释了模型的离散相和连续相之间的转移^[9]。假设所有这些双向耦合项作为气相守恒定律中的点源。粒子所在的控制体积可以根据粒子中心的坐标来确定。因此,由这个粒子产生的耦合项将只包含在此控制体积的气体方程中。

气体物质之间的反应作为气体物质平衡方程源项的动力学速率定律来模拟。目前,该模型包括

6种气体: $O_2, CO_2, CO, H_2O, H_2, N_2$ 。均相气相反应包括CO和H₂的燃烧以及水气变换反应^[10]。

1.2 生物质颗粒模型

每个生物质颗粒视为质点。图1显示了生物质转化过程中的步骤。模拟生物质颗粒热解过程,在该模型中,求解颗粒内焦炭前沿和温度分布的方程组。热解结束后,下一阶段是焦炭的燃烧。在本模型中,热解和燃烧反应依次发生而不是同时发生。

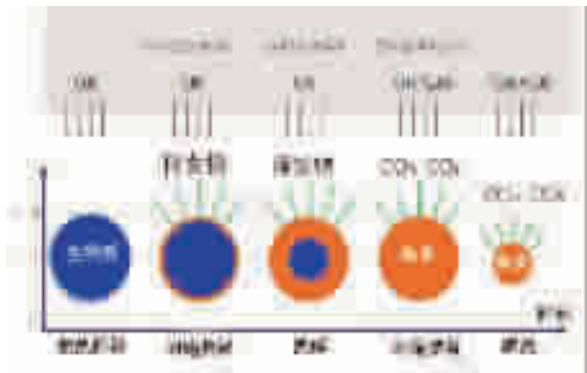
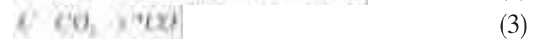


图1 生物质转化过程的各个阶段热解和燃烧示意

图1中, T_g 和 Y_{O_2} 分别是气体温度和氧浓度; R 是生物质颗粒的半径。热解之后是燃烧。为简单起见,将热解后得到的焦炭作为纯碳处理。考虑模型中两个最相关的非均相反应炭化氧化和焦炭气化。



燃烧反应(2)中O₂的化学计量系数(ν)取决于基于颗粒表面温度。该模型是基于传统的收缩核近似而制定的。这意味着发生反应(2)和(3)的炭-气反应前沿开始于颗粒表面,然后随着燃烧的进行向中心移动,导致粒径减小。在整个转换过程中,收缩核心的密度保持不变。对于粒子跟踪,使用拉格朗日公式,对0到1000之间的粒子雷诺数有效,用于计算假定为球形粒子上阻力。颗粒在燃烧室内的小尺寸和很短的停留时间可忽略重力的作用^[11]。

1.3 数值模拟方法

所有气体和粒子的方程都是使用无量纲化的参考值。粒子方程是常微分方程的形式。基于二阶精确有限体积法,气体方程在空间离散后呈现这种形式^[12]。流向和后向的边界条件是周期性的。在壁法线方向上,通道的壁与邻近壁的细胞的边界重合。在所有三个速度分量的壁面上应用无滑移

边界条件。对于上、下壁均为恒能的节能方程,应用等温壁面条件。通过将气体物质浓度的梯度设置为 0。

所有的固气反应只发生在生物质颗粒表面^[13]。据观察,与热解相比,燃烧过程相当快。燃烧过程的快速性以方程组的形式表示。因为需要大量的小时间步长来实现稳定性,使用混合隐式显式法。为了降低模拟时间,降低数值算法的复杂度,将混合方案的显式部分用于气相方程和粒子跟踪和热解过程中。

1.4 仿真设置

通道内的气体-粒子系统,由两个平行的水平面界定(图 2)。反应范围表述为流向上的长度为 $4\pi H$,宽度为 $4\pi H$,其中 H 是通道高度的一半。用近似等于 $Re=150$ 的摩擦雷诺数进行仿真,改变颗粒的体积分数,使其始终小于 10^{-3} ,粒子间碰撞可忽略不计。

反应区域划分为 128^3 个控制单元。网格间距沿流线方向和跨线方向是均匀的,而在壁法线方向是不均匀的,网格点在壁附近聚集。初始氧摩尔分数为 $X_{O_2}=0.1$,其余为氮气。初始气体温度设定为 $1\ 400\ K$,并且粒子以 $300\ K$ 的恒定温度初始化。通道壁保持在 $1\ 400\ K$ 。最初,粒子随机且均匀地分布在通道上,粒子速度等于粒子位置处的气体速度。在这些初始条件下,模拟湍流通道中生物质颗粒的热解和燃烧。表 1 列出了模拟中使用的原始生物质性质和生物质热解后形成焦炭的性质。

表 1 模拟中使用的初始生物质和焦炭性质

	质量密度 (kg/m^3)	导热率 ($W/m\cdot K$)	热容 ($J/kg\cdot K$)
生物质	620	0.30	2 400
焦炭	200	0.16	1 250



图 2 具有随机分布粒子的通道的几何形状, z 为壁法向

2 结果与讨论

燃烧室设计的关键参数之一是燃料颗粒的转化时间。对于生物质颗粒,总转化时间(t_1)是原始生

物质在热解阶段转化为焦炭所需时间(t_2)与焦炭颗粒在燃烧阶段燃烧所需时间(t_3)之和。本文分析了双向耦合、粒径、气相反应对生物质颗粒转化时间的影响^[14-16]。

2.1 双向耦合效应

如果颗粒浓度较大,则颗粒的转化时间与单颗粒生物质转化模型的转化时间不同。颗粒与气体的双向交互作用影响周围气体温度和气体物质浓度,进而影响颗粒转化过程。本文提出 DNS 模型用于分析气体和粒子之间双向耦合对转换时间的影响。图 3 显示了双向耦合对生物质热解所用时间的影响。对于单向耦合,没有从粒子到气体的反馈,并且气体温度不受粒子转换过程的影响。因此,热解时间也没有变化。另一方面,通过双向耦合,粒子的存在影响气体温度。对于没有气相反应的双向耦合的情况,可以看出在体积分数 $\Phi > 10^{-3}$ 时双向耦合是明显的。

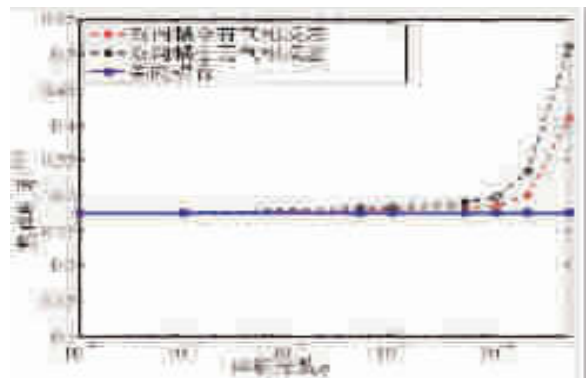


图 3 颗粒直径为 $0.7\ mm$ 不同体积分数下的热解时间

2.2 颗粒尺寸的影响

在热解过程中,对于较小的颗粒,气体和颗粒之间较高的对流换热会增加热解时间,因为颗粒会从气体中抽出更多的热量,从而降低气体的温度。相反,在燃烧阶段,由于相间表面积较大,更多的热量传递到气体中,因此与较大的颗粒相比,降低了颗粒温度。降低的温度降低了表面反应的动力学速率,从而增加了燃烧时间。在图 4 中,给出了从单粒子模型计算出的燃烧时间的相应值。单粒子模型具有恒定的周围气体温度和恒定的氧质量分数。从图 4 中可以看出,单粒子模型的转换时间最短。双向耦合、单向耦合和单粒子模型在燃烧时间上的相对偏差突出了双向耦合对燃烧阶段的重要性。

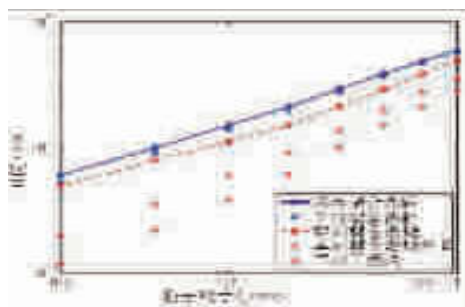


图4 单向和双向耦合的热解时间(t_2)和燃烧时间(t_3)与粒径(d_p)的关系

2.3 气相反应的影响

实验中,在 DNS 模型中包含气相反应在生物质转化的热解和燃烧阶段具有相反的结果。在热解过程中,挥发性气体燃烧会增加气体温度,从而减少热解时间。图 5 给出了在有和没有气体反应的情况下,不同粒径的生物质颗粒的热解时间。可以看出,气相反应对热解时间的影响较大。热解是由从气体传递到颗粒的热量控制的。对于较小的颗粒,较高的总热交换面积意味着更多的热量将传递给颗粒,从而减少了热解时间。同时也可以看出,对于较大的颗粒,气相反应的范围非常小。与之相反,热解反应包括气相反应增加了生物质颗粒的燃烧时间。由于挥发性气体与气相中的氧发生反应,消耗固体颗粒可用于焦炭燃烧的总氧气的一部分,降低颗粒表面的氧浓度,导致颗粒燃烧时间更长。在图 6 中,给出了不同粒径的燃烧时间。与热解过程不同,对于较大的颗粒,气相反应的效率更高。这是由于较大颗粒的燃烧过程持续时间较长。需要注意的是,在模型中的氧浓度和温度条件下,焦炭燃烧反应的速率远大于均相气相燃烧反应,焦炭燃烧过程的持续时间越长,气相反应中消耗的氧气分数就越高。因此,对于较大的颗粒,气相反应的要求更高。

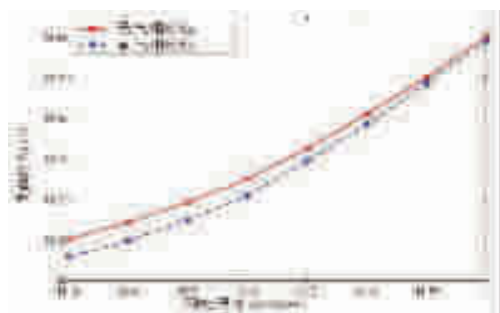


图5 气相反应热解时间(t_2)与粒径(d_p)的关系

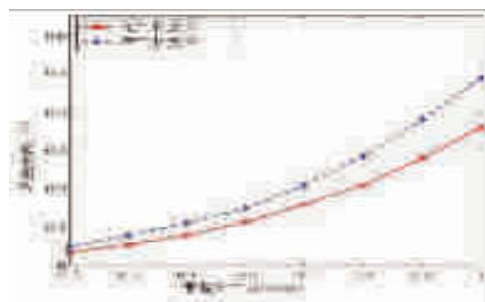


图6 气相反应燃烧时间(t_3)与粒径(d_p)的关系

3 结论

通过模拟包括非均相颗粒燃烧和均相气相反应,建立了生物质燃烧模型,该模型适用于大量质点粒子 DNS 实现。双向耦合项模拟气体和粒子之间的交互作用,DNS 模型中的气体反应由于较高的气体温度降低了生物质热解时间。相反,包括气相反应由于颗粒表面氧的可利用性较低而增加了生物质的燃烧时间。由于较高的热交换面积,对于较小的颗粒,气相反应对热解的影响较大。

参考文献

- [1]董楠航,王擎,刘荣厚.玉米秸秆鼓泡床内快速热解过程数值模拟研究[J].太阳能学报,2018,39(10):2869-2875.
- [2]孙琳.高温生物质气旋流燃烧特性的数值模拟研究[D].哈尔滨工业大学,2018.
- [3]乔旭.生物油雾化特性的数值研究[D].中国科学技术大学,2018.
- [4]马善为.生物质热解气建模与分级冷凝研究[D].中国科学技术大学,2018.
- [5]魏炫坤.新型生物质成型燃料热解气化装置结构及锅炉输出特性研究[D].华南理工大学,2018.
- [6]顾雅兰.生物质热裂解中的颗粒形变及形变机理研究[D].青岛科技大学,2018.
- [7]张政清.秸秆成型颗粒燃烧过程的模拟和实验[D].山东理工大学,2018.
- [8]刘雪娇.非球形颗粒喷动床流体动力学特性及放大规律研究[D].东南大学,2017.
- [9]王俊丽.低阶煤热解动力学特性及与生物质共热解、热解产物深加工试验研究[D].太原理工大学,2017.
- [10]方海林.可燃固体废弃物炉排炉燃烧数值模拟及其炉膛结构设计及优化运行[D].华南理工大学,2018.
- [11]李永玲.城市生活垃圾与棉秆成型燃料混合燃烧特性研究[D].合肥工业大学,2017.
- [12]李延吉.生活垃圾制备 RDF 及资源化利用研究[D].浙江大学,2018.
- [13]王茜.秸秆成型燃料提质及清洁燃烧特性研究[D].山东大学,2017.
- [14]王跃鹏.生物质快速热解双流化床反应器的流体动力学研究[D].郑州大学,2017.
- [15]薛腾.生物质燃料气流干燥及燃烧特性的模拟与实验研究[D].合肥工业大学,2017.
- [16]袁聪聪.生物质在 CO_2 下热解、气化的动力学研究[D].昆明理工大学,2017.