

不同比例生物柴油在工业锅炉中燃烧特性的数值模拟研究

吕岩岩¹, 张艳伟¹, 林欣¹, 任志远²

(1. 上海工业锅炉研究所有限公司, 上海 201114; 2. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要:为得到不同调和比例的生物柴油在炉膛内的燃烧过程、辐射换热能力、温度分布和燃烧后产物的浓度分布,并为研发新设备和优化已有的燃烧换热设备提供数据支撑,采用数值模拟的方法,针对生物柴油与石化柴油的混合燃料,在10%、30%、50%和100% 4种不同调和比例下研究了其在工业锅炉中的燃烧特性。计算结果表明:不同调和比例的生物柴油在炉膛内燃烧过程有明显的差异,随着生物柴油比例的升高,炉膛内燃烧中心的最高温度分别为2 093、1 970、1 622和1 704 K,火焰的形状有增大的趋势,火焰中心在炉膛内的相对位置也有向炉膛尾部移动的趋势,且B50和B100生物柴油的燃烧区域有不稳定燃烧现象的出现;烟气温度是影响炉膛内表面辐射换热能力的主要参数;不同调和比例生物柴油燃烧后对应的最高NO_x浓度分别为:132、18.8、0.62和4.95 mg/m³,提高生物柴油的调和比例可以有效地降低炉膛的NO_x的排放。

关键词:生物柴油;燃烧特性;数值模拟;工业锅炉

中图分类号:TK16 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.04.019

[引用本文格式]吕岩岩,张艳伟,林欣,等.不同比例生物柴油在工业锅炉中燃烧特性的数值模拟研究[J].热能动力工程,2022,37(4):137-143. LYU Yan-yan, ZHANG Yan-wei, LIN Xin, et al. Numerical simulation of combustion characteristics of biodiesel with different proportion in industrial boilers[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(4): 137-143.

Numerical Simulation of Combustion Characteristics of Biodiesel with Different Proportion in Industrial Boilers

LYU Yan-yan¹, ZHANG Yan-wei¹, LIN Xin¹, REN Zhi-yuan²

(1. Shanghai Industrial Boiler Research Institute Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 201114; 2. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: In order to obtain the combustion process, radiant heat transfer capacity, temperature distribution and concentration distribution of products after combustion of biodiesel with different blending ratios in the furnace, and provide data support for the development of new equipment and the optimization of existing combustion and heat exchange equipment, the combustion characteristics of the mixed fuel of biodiesel and petrochemical diesel in industrial boilers were studied by numerical simulation method under four different blending ratios of 10%, 30%, 50% and 100%. The calculation results show that there are obvious differences in the combustion process of biodiesel with different blending ratios in the furnace. With the increase of the proportion of biodiesel, the maximum temperature of the combustion center in the furnace is 2 093, 1 970, 1 622 and 1 704 K respectively. The shape of the flame tends to increase, and the relative position of the flame center in the furnace also tends to move to the tail of the furnace,

收稿日期:2021-06-11; 修订日期:2021-07-23

作者简介:吕岩岩(1985-),女,江苏邳州人,上海工业锅炉研究所有限公司高级工程师.

通讯作者:张艳伟(1984-),女,山东省菏泽人,上海工业锅炉研究所有限公司高级工程师.

moreover, there is unstable combustion in the combustion area of 50% and 100% biodiesel; flue gas temperature is the main parameter affecting the radiant heat transfer capacity of the inner surface of the furnace; the maximum NO_x volume fractions corresponding to the biodiesel with different blending ratios after the combustion are 132, 18.8, 0.62 and 4.95 mg/m^3 respectively. Increasing the blending ratio of biodiesel can effectively reduce the NO_x emission in the furnace.

Key words: biodiesel, combustion characteristics, numerical simulation, industrial boilers

引 言

生物柴油通常是以油料作物、动植物油脂或餐饮垃圾油为原料,通过酯交反应得到的可燃混合物,其粘度和石化柴油接近,燃烧特性和污染物的排放等方面优于石化柴油,具有良好的环保特性和可再生性^[1-2]。生物柴油同时还具有无毒、可降解的优点,已被广泛使用在欧洲等地的柴油机等动力装置上^[3]。目前,国内外对生物柴油的研究大多集中在生物柴油在内燃机上的应用,在工业锅炉上的应用研究较少,且在工业锅炉上的研究也多是低比例的混合燃料,对高比例混合燃料参考意义不大^[4-6]。由于生物柴油特有的优点和巨量的工业锅炉燃料需求,越来越多的学者将生物柴油或调和生物柴油代替石化柴油在工业锅炉上的使用作为研究的重点。

工业锅炉对燃料的燃烧特性以及污染物排放特性都有一定的要求。要将生物柴油应用于工业锅炉内,必须了解掌握其在炉内的燃烧特性,验证污染物排放能否达到标准^[6]。纯生物柴油在燃烧过程中会出现燃料品质的不稳定和燃烧参数的不匹配,会引起燃烧状态的波动,严重时还会发生燃烧器和炉膛的安全事故,影响锅炉的稳定安全运行^[1],因此现阶段大多是将生物柴油与石化柴油混合使用。林欣^[4]通过对比生物柴油和石化柴油在工业锅炉应用的安全性、经济性和可靠性,测试 4 种不同负荷条件下的燃烧状况和污染物排放,评估生物柴油是否可以代替石化柴油,结果表明,B10 生物柴油可以很好地代替石化柴油。生物柴油的原料来源广泛,不同原料制得的生物柴油在燃烧特性和炉膛内的传热方式与石化柴油存在明显的差异^[7-10]。生物柴油的来源不同,在应用时会得到不同结论。Pourhosei-

ni^[11]研究了调和的生物柴油和石化柴油在炉膛内的燃烧、传热和污染物的排放,结果表明,生物柴油燃烧后的火焰体积比石化柴油的大,辐射传热的热负荷明显增加,但是火焰的温度低于石化柴油的火焰温度,作者认为这是由生物柴油火焰中的中间颗粒浓度增加引起的。Navid 等人^[12]研究了石化柴油-生物柴油-乙醇混合燃料在圆形燃烧室内的燃烧和污染物的排放特性,结果表明,随着混合燃料中生物柴油含量的增加,燃烧后烟气的平均温度升高。虽然两者都研究生物柴油调和后燃烧和污染物排放特性,但上述两者的研究结果在生物柴油对燃烧后烟气温度的影响方面给出了相反的结论。因此,生物柴油调和后其燃烧特性或者污染物的排放会发生明显的变化。通过试验研究可以很好地获取生物柴油的燃烧和污染物排放等特性,但是由于生物柴油的来源广泛,燃料的热值和包含的元素量存在较大的差异,工作量巨大。除了实验研究,数值模拟计算也是研究燃烧、换热和污染物排放的有效方法,可以很好地模拟煤粉、生物固体颗粒和柴油等燃料在炉膛内的燃烧换热过程和污染物的排放,提供量化的燃烧传热和污染物排放数据,为研发新设备和优化已有的燃烧换热设备提供数据支撑^[13-15]。

本文使用的生物柴油是由餐厨废弃油脂(地沟油)所制,该生物柴油的应用不仅能减少石化柴油的使用还能避免地沟油再次流向餐桌,造成污染。现阶段对生物柴油的应用研究多数是生物柴油与石化柴油掺混后在工业锅炉上的应用,且生物柴油的占比较低,大多在 10% 以下,生物柴油不能大量应用。因此,高比例生物柴油的应用研究具有重要意义。本文在实炉上对前期研究的模拟模型进行了验证,结果表明,炉膛温度和 NO_x 体积分数的实验值和模拟值的平均相对误差分别为 0.35% 和

0.27%^[5],说明数值模拟的模型是正确的。在前期研究的基础上首次研究 4 种较高调和比例生物柴油在工业锅炉内燃烧传热和 NO_x 排放的特性。

1 计算模型

1.1 计算方法

本研究选取 Realized $k-\varepsilon$ 湍流模型,非预混燃烧模型 (Non-premixed Combustion Model) 为燃烧模型计算了生物柴油在炉膛内的燃烧过程。子模型为混合分数/概率密度函数模型 (Mixture Fraction/PDF);辐射模型选取 DO 模型,气体辐射模型采用灰气体加权和模型 (Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model)。采用 SIMPLE 算法,压力采用 PRESTO 函数,其他选项采用二阶迎风格式;生物柴油为液体燃料,雾滴颗粒的燃烧过程是气液两相的流动和燃烧过程,选取离散相中的液滴模型 (Droplet model) 扩散方式为实心锥 (Solid-cone),液滴直径选取罗辛-拉姆勒 (Rosin-rammler) 分布函数,运动方式为离散随机游动模型 (Discrete Random Walk Model);NO_x 生成模型选取通用模型,忽略快速型 NO_x 的生成。

近壁面采用无速度滑移和无质量渗透边界条件,颗粒边界条件根据具体的情况选取反射和逃逸边界条件,热边界采用温度边界条件,辐射受热面的黑度根据具体的位置和受热面的沾污系数在 0.71~0.85 范围内选取,给定出口处的环境压力为 -80 Pa。

1.2 几何条件和网格划分

图 1 为炉膛的几何结构和网格划分示意图。选取 WNS 型工业锅炉炉膛燃烧区作为计算区域,燃料通过燃油喷嘴进入圆柱形炉膛,助燃空气通过一次风和二次风的喷口进入,燃烧后由炉膛尾部出口排出,如图 1(a) 所示。图 1(b) 给出了炉膛的纵截面网格,其中 x 轴为烟气的水平流动方向, y 轴为炉膛宽度, z 轴为炉膛高度。计算区域采用结构化网格,在油喷嘴和炉膛的中心采用网格加密,喷嘴处的局部网格如图 1(c) 所示。结构化网格具有生成质量好,数据结构简单,计算速度快和容易收敛等优点。通过网格独立性检验表明,网格的变化对计算结果

的影响较小,优选的总网格数为 237 880。

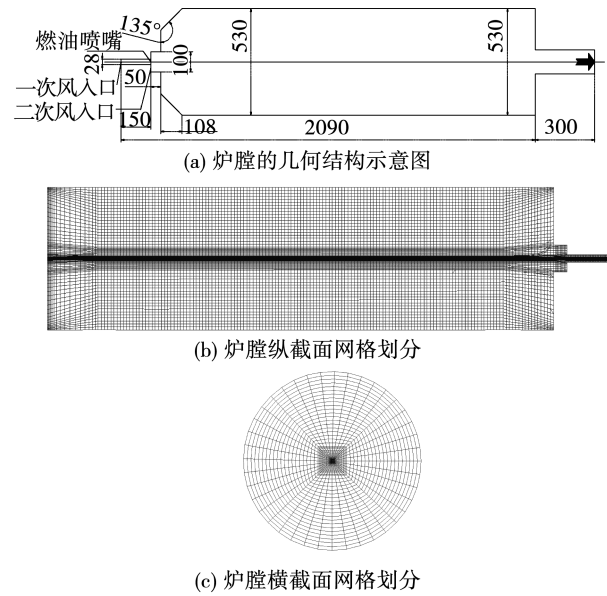


图 1 炉膛的几何结构和网格划分示意图 (mm)
Fig. 1 Schematic diagrams of furnace geometry and grid division (mm)

文献[5]给出本文采用的计算模型的验证结果,烟气温度和 NO_x 体积分数的实验值和模拟值的误差分别为 0.35% 和 0.27%,计算模型有很好的可靠性和准确性。

2 计算工况

本研究使用生物柴油和石化柴油的混合燃料,模拟研究工业锅炉燃用不同混合比生物柴油的燃烧特性和排放特性。试验使用的混合体积比 10%, 30%, 50% 和 100%,将燃料定义为 BXX,其中 XX 表示生物柴油在混合油中的所占的体积比。表 1 为不同调和比的生物柴油的工业分析和元素分析。由表 1 可知,油品中水分和灰分基本为零,可忽略不计。调和生物柴油中 C、H 两种元素为主要组成成份,由于生物柴油的来源不同,不同的生物柴油的元素分析和热值不会表现出明显的线性关系或者相关性。本文采用的生物柴油样品来源基本稳定,低位发热量与石化柴油的线性关系相对较好,样品的发热量均低于常规石化柴油的低位发热量(约 46.04 MJ/kg)。

表 1 不同调和比例生物柴油的工业分析和元素分析

Tab.1 Industrial analysis and elemental analysis of biodiesel with different blending ratios

燃料	工业分析/%		元素分析/%					$Q_{\text{net,a}}/$
	M_{t}	A_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
B10	0.00	0.01	86.47	10.92	2.34	0.26	0	42.76
B30	0.00	0.01	82.57	13.34	3.51	0.58	0	42.45
B50	0.00	0.01	84.33	14.11	1.05	0.51	0	40.58
B100	0.00	0.01	84.13	14.91	0.52	0.44	0	38.37

纯生物柴油较石化柴油的粘度大,随着纯生物柴油的比例增加,混合燃料的粘度会增加,粘度越大越不易雾化,因此所需的空气量会增加。计算工况选取生物柴油的燃油量为 25 L/h,燃油喷嘴的扩散角设定为 30°。表 2 为不同调和比例生物柴油的计算工况。计算过程中炉膛一次风和二次风入口的面积设为固定值,过量空气系数均选取1.15,通过计算得到不同计算工况条件下的一、二次风的风速。计算结果表明,随着生物柴油比例的提高,所需要的空气量逐渐增加。

表 2 不同调和比例生物柴油的计算工况

Tab.2 Working conditions of biodiesel with different blending ratios

工况	燃料	过量空气系数	一次风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	一次风 温/ $^{\circ}\text{C}$	二次风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	二次风 温/ $^{\circ}\text{C}$
1	B10	1.15	9.80	30	9.80	30
2	B30	1.15	9.83	30	9.83	30
3	B50	1.15	10.46	30	10.46	30
4	B100	1.15	11.03	30	11.03	30

3 结果与分析

3.1 不同调和比例生物柴油件下炉膛温度分布

炉膛内的温度分布是建立在燃料在炉膛内的流动、燃烧、化学反应和换热的基础上的能量平衡,受到燃料的低位发热量、过量空气系数和燃烧后烟气组分等因素的影响。当燃烧处于平衡状态后,会在炉膛区域形成明显的主燃烧区域或者高温区域,该区域的温度分布是表征炉膛内燃烧工况正常与否最直观的参数。图 2 为过量空气系数为 1.15 时不同调和比例生物柴油的炉膛内的温度云图。由图 2 可知燃烧中心最高温度分别为 2 093,1 970,1 622 和

1 704 K。烟气的温度云图可以表征出炉膛内燃烧区域和火焰的燃烧形状。计算结果表明随着生物柴油比例的增加,炉膛内燃烧中心的最高温度逐渐下降,火焰的形状会发生明显地变化,火焰的形状会有增大的趋势;燃烧中心在炉膛内的相对位置也会发生变化,有向炉膛尾部移动的趋势,且 B50 和 B100 生物柴油的燃烧区域会有不稳定燃烧现象的出现。

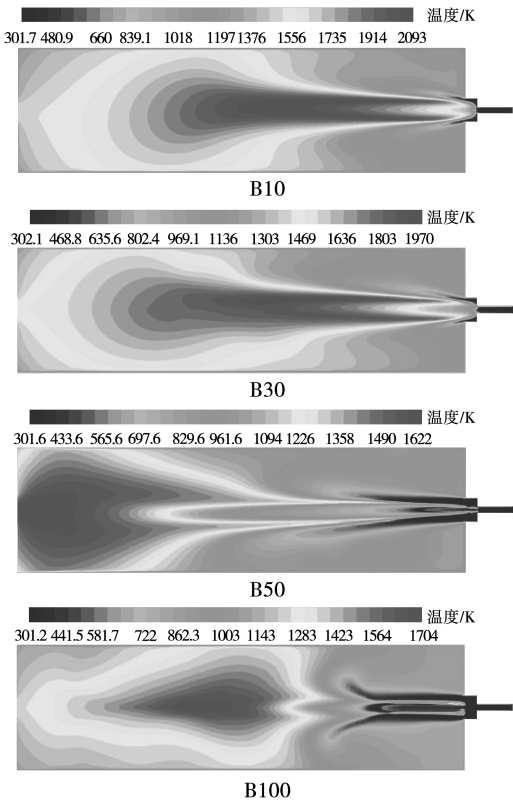


图 2 过量空气系数为 1.15 时不同调和比例生物柴油的炉膛内温度云图

Fig.2 Contours of temperatures for biodiesel with different blending ratios at excess air coefficient of 1.15 in furnace

为了深入研究生物柴油的燃烧特征,图 3(a)为过量空气系数为 1.15 时不同调和比例生物柴油在炉膛内的温度沿轴线的变化。通过对比可以发现,B10 和 B30 的温度变化曲线相一致,B50 和 B100 的烟气温度变化曲线相类似。其中,B10 和 B30 的燃烧中心均出现在炉膛中心线约 0.8 m 处;B50 和 B100 的燃烧曲线会在燃烧的初始阶段出现温度下降,然后温度逐渐上升。这表明随着生物柴油的比例升高,炉膛内的燃烧过程与石化柴油的燃烧过程不同。

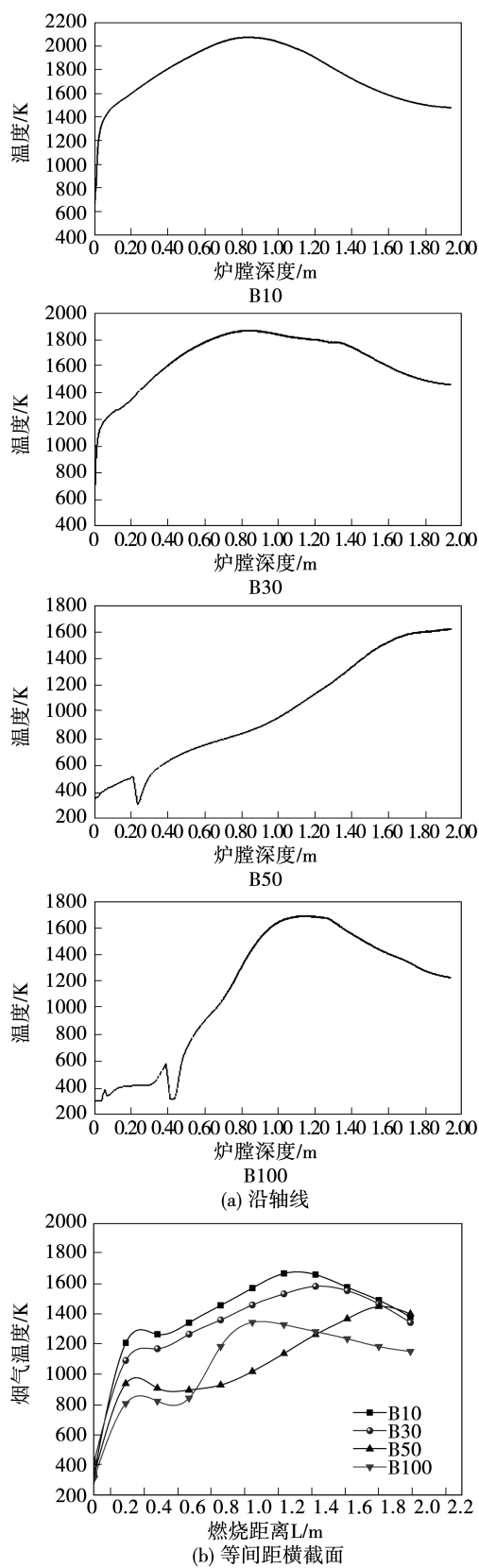


图 3 过量空气系数为 1.15 时不同调和比例生物柴油在炉膛内的温度变化

Fig.3 Temperature variations for biodiesel with different blending ratios at excess air coefficient of 1.15 in furnace

图 3(b) 为过量空气系数为 1.15 时不同调和比例生物柴油在炉膛内等间距 ($\Delta L = 0.189\text{ m}$) 横截面积上的烟气平均温度变化。该温度变化曲线表明, 在燃烧距离约 0.3 m 处均会出现平均温度下降, 随后随着燃烧温度逐渐升高。但是 B100 的烟气温度在出口处明显低于其他工况, 这是由于生物柴油的热值较低造成的。通过图 3(a) 和 (b) 的对比可知, 生物调和柴油的燃烧区域会随着生物柴油的比例的增加而变大, 在燃烧中心区域的反应为扩散控制区, 燃烧温度受氧气扩散体积分数的影响, 增加氧气的体积分数会提高燃烧区的烟气温度。根据不同生物柴油在炉膛内的燃烧表现, 推荐使用 B30 作为石化柴油的代替燃料。

3.2 炉膛内的辐射换热

图 4 为过量空气系数为 1.15 时不同调和比例生物柴油炉膛内的内辐射云图。由图 4 可知, 生物柴油 B10 的炉膛内辐射能力最强, B100 的内辐射能力最低, 不同计算工况的平均内辐射的值分别为 3.82×10^5 , 2.12×10^5 , 1.69×10^5 和 $1.60 \times 10^5\text{ W/m}^2$ 。同时, 对比炉膛内的烟气温度分布, 可以得知炉膛内表面的内辐射值和烟气温度在炉膛内的烟气温度变化相一致, 最高值出现在主燃烧区。

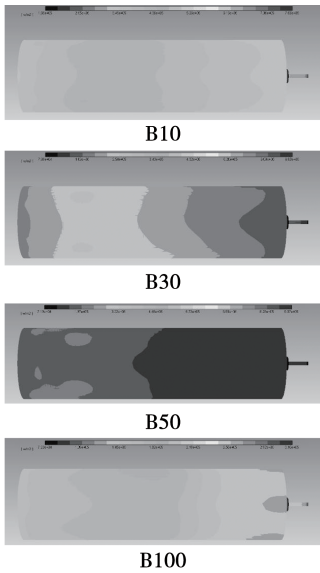


图 4 过量空气系数为 1.15 时不同调和比例生物柴油的炉膛内的辐射云图

Fig.4 Contours of radiation for biodiesel with different blending ratios at excess air coefficient of 1.15 in furnace

炉膛内影响烟气辐射能力的主要因素为烟气的温度、飞灰或者焦炭的体积分数和烟气的组分。通过表 1 的工业分析可知,生物柴油燃烧后烟气中飞灰的浓度基本为零。同时,由于燃烧过量空气系数选取1.15,燃烧较为充分。计算结果表明,烟气中焦炭的含量为痕量,其对烟气辐射的影响可以忽略不计。在烟气组分中, H_2O 和 CO_2 是影响辐射换热的主要气体。图 5 为不同调和比例生物柴油燃烧后生成物在炉膛内的云图。

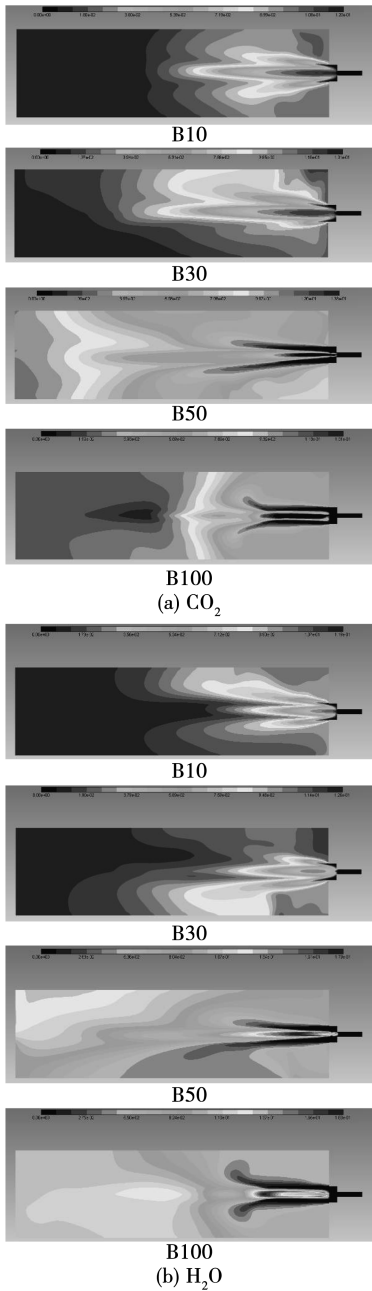


图 5 不同调和比例生物柴油燃烧后生成物在炉膛内的温度辐射云图

Fig. 5 Contours of temperature radiation for combustion products of biodiesel with different blending ratios in furnace

由图 5 可知,通过对比烟气辐射能力和烟气温度分布、燃烧后烟气组分体积分数的变化,可以得知烟气温度是影响炉膛内表面辐射换热的主要参数。

3.3 不同调和比例生物柴油燃烧后 NO_x 的排放

NO_x 是燃料在锅炉燃烧过程中产生的一种大气污染物,对环境的危害很大,是环保控制的重点对象。 NO_x 的生成主要为热力型、燃料型和快速型 3 种类型,根据燃料和燃烧方式的不同,上述三者生成的份额也不同^[16]。图 6 为不同调和比例生物柴油燃烧后生成物在炉膛内的 NO_x 云图。由图 6 可知,对应的最高 NO_x 体积分数分别为:132,18.8,0.62 和 4.95 mg/m^3 ,炉膛出口处的截面平均 NO_x 体积分数分别为:137.2,14.38,0.04 和 1.54 mg/m^3 。 NO_x 的排放浓度随着生物柴油的调和比例的升高会明显的下降,B50 所对应的 NO_x 的排放浓度最低。 NO_x 的排放浓度的顺序也和不同计算工况烟气温度的高低顺序相对应,这也与现有研究成果的结论相对应,钟伟^[17]认为的对于使用生物柴油的锅炉,其热力型 NO_x 在锅炉烟气排放中占主导地位,燃料型和快速型 NO_x 的生成量基本可以忽略不计。因此,通过提高生物柴油的调和比例可以有效地降低炉膛 NO_x 的排放。

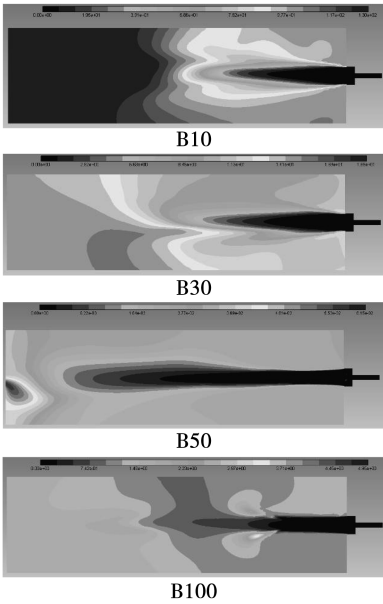


图 6 不同调和比例生物柴油燃烧后生成物在炉膛内的 NO_x 云图

Fig. 6 Contours of NO_x for combustion products of biodiesel with different blending ratios in furnace

4 结 论

利用数值模拟的方法,通过对比烟气的辐射能力和烟气温度分布、燃烧后烟气组分浓度的变化,研究4种较高调和比例生物柴油在工业锅炉内炉膛温度分布状况、燃烧传热和 NO_x 排放的特性,为高比例生物柴油在工业锅炉上应用提供理论依据:

(1) 随着生物柴油比例的增加,炉膛内燃烧中心的最高温度逐渐下降,火焰的长度有增加的趋势,燃烧中心在炉膛内的相对位置也会发生变化,有向炉膛尾部移动的趋势,且B50和B100生物柴油的燃烧区域会有不稳定燃烧现象出现,在不改变现有工业锅炉系统的情况下,推荐使用B30作为石化柴油的代替燃料,使用B50以上比例的生物柴油需对工业锅炉的炉膛进行改造;

(2) 通过对比烟气的辐射能力和烟气温度分布、燃烧后烟气组分浓度的变化,可以得知烟气温度是影响炉膛内表面辐射换热的主要参数,生物调和柴油的燃烧区域会随着生物柴油比例的增加而变大。

(3) 不同调和比例生物柴油燃烧后对应的最高 NO_x 体积分数分别为132, 18.8, 0.62和4.95 mg/m^3 ,炉膛出口处的截面平均 NO_x 体积分数分别为137.2, 14.38, 0.04和1.54 mg/m^3 。 NO_x 的排放浓度随着生物柴油的调和比例的升高会明显的下降,B50所对应的 NO_x 的排放浓度最低。通过提高生物柴油的调和比例可以有效地降低炉膛 NO_x 的排放。

参考文献:

- [1] 张学刚.生物柴油与工业锅炉的燃烧应用[J].中国特种设备安全,2008,24(9):79-80.
ZHANG Xue-gang. Biodiesel and combustion application of industrial boiler[J]. China Special Equipment Safety, 2008, 24(9): 79-80.
- [2] 蒋剑春,杨凯华,聂小安,等.生物柴油研究进展[J].中国能源,2006,28(2):36-39.
JIANG Jian-chun, YANG Kai-hua, NIE Xiao-an, et al. Research progress of biodiesel [J]. China Energy, 2006, 28(2): 36-39.
- [3] STEVEN L, LEE K T. Recent trends, opportunities and challenges of biodiesel in Malaysia; an overview[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 14(3): 938-954.
- [4] 林欣.生物柴油在工业锅炉上应用可行性分析[J].工业锅炉,2019(5):33-37.
LIN Xin. Feasibility analysis of the application of biodiesel in industrial boiler[J]. Industrial Boilers, 2019(5): 33-42.
- [5] 张艳伟,林欣,任志远.生物柴油在WNS型工业锅炉中的燃烧和氮氧化物浓度特性的数值模拟研究[J].工业锅炉,2020(4):23-28.
ZHANG Yan-wei, LIN Xin, REN Zhi-yuan. Numerical simulation of combustion and NO_x concentration characteristics of biodiesel in WNS industrial boiler [J]. Industrial Boiler, 2020(4): 23-28.
- [6] 姚燕,王树荣,王琦,等.生物油替代动力燃油的研究[J].动力工程,2007,27(3):458-462.
YAO Yan, WANG Shu-rong, WANG Qi, et al. Study on bio-oil replacing power fuel[J]. Power Engineering, 2007, 27(3): 458-462.
- [7] SOUZA D, SANTOS A, FERREIRA S L, et al. Evaluation of the performance of biodiesel from waste vegetable oil in a flame tube furnace [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 29(11): 2562-2566.
- [8] GHASSAN T, MOHAMAD I A W, ALI O A S. Combustion performance and emissions of ethyl ester of a waste vegetable oil in a water-cooled furnace[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(3): 285-293.
- [9] BAHAMIN B, AFSHIN G, AHMAD S. Combustion performance and emissions of petrodiesel and biodiesels based on various vegetable oils in a semi-industrial boiler [J]. Fuel, 2011, 90(10): 3078-3092.
- [10] CAO P, WANG Gong-liang, MÁRIO C. Combustion of biodiesel in a large-scale laboratory furnace [J]. Energy, 2014, 74: 950-955.
- [11] POURHOSEINI S H. A comparative exploration of thermal, radiative and pollutant emission characteristics of oil burner flame using palm oil biodiesel-diesel blend fuel and diesel fuel [J]. Energy, 2020, 217: 119338.
- [12] NAVID M, ALIREZA S. An experimental study of emission characteristics from cylindrical furnace; effects of using diesel-ethanol-biodiesel blends and air swirl [J]. Fuel, 2018, 221: 233-239.
- [13] CÉSAR A. BERMÚDEZ. Three-dimensional CFD simulation of a large-scale grate-fired biomass furnace [J]. Fuel Processing Technology, 2020, 198(C): 106219-106219.
- [14] HU Zhi-feng, JIANG En-chen, MA Xiao-qian. Numerical simulation on NO_x emissions in a municipal solid waste incinerator [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 650-664.
- [15] SHEN Jia-xu. Numerical investigation of air-staged combustion to reduce NO_x emissions from biodiesel combustion in industrial furnaces [J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92(3): 704-716.
- [16] 卜银坤.关于锅炉 NO_x 生成机理及科学超低排放的理论研究[J].工业锅炉,2016(4):8-16.
BU Yin-kun. Theoretical research on NO_x generation mechanism and scientific ultralow emission of boiler [J]. Industrial Boiler, 2016(4): 8-16.
- [17] 钟伟.生物柴油燃烧模型及火焰特性实验研究[D].湖南:中南大学,2013.
ZHONG Wei. Experimental study on combustion model and flame characteristics of biodiesel [D]. Hunan: Central South University, 2013.