

## 670MW锅炉生物质气与煤耦合燃烧特性的数值模拟

魏子明, 王凯, 于洁, 孙路石

(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 武汉430074)

摘要: 以1台670MW四角切圆锅炉为研究对象, 应用数值模拟计算的方法, 研究了生物质气喷入位置对于燃烧过程及 $\text{NO}_x$ 的影响, 研究表明, 生物质气替换第1层一次风喷口的煤粉燃料比替换第2层有更好 $\text{NO}_x$ 排放降低效果。利用生物质气进行再燃的数值模拟研究, 对比前面的模拟数据, 生物质气再燃降低 $\text{NO}_x$ 排放效果非常明显, 质量浓度从原始的612mg/Nm<sup>3</sup>可以降低到402mg/Nm<sup>3</sup>, 降幅约为34%。为了对比生物质气和生物质的区别, 将同种生物质送入炉膛, 研究表明在生物质气燃烧工况下,  $\text{NO}_x$ 排放更低。本文的研究方法与结论对于大型燃煤锅炉生物质气与煤耦合燃烧的研究和应用具有一定的现实参考意义。

### 引言

从最新发布的《世界能源统计年鉴2018》的统计数据来看, 中国的能源增长率依旧保持全球第一, 煤炭等一次能源占比虽然在逐步减少, 但仍然超过60%<sup>[1]</sup>。这些发电成本相对较低的火电为我国经济发展输入了大量电力能源的同时, 也带来了严重的环保问题, 燃煤电厂排放了大气中大约1/2以上的 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 和烟尘等污染物<sup>[2]</sup>, 这些污染物会造成酸雨、光化学污染、大气污染等危害, 造成大量的经济损失的同时严重影响城市居民健康<sup>[3]</sup>。为了解决这些问题, 国家也制定了越来越严格的电厂污染物排放标准。在由国家发改委、国家能源局和环保部三部委联合发布的《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)》中提出 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 和烟尘等排放质量浓度(6%体积分数含氧量条件下)不得超过35、50以及10mg/m<sup>3</sup><sup>[4]</sup>。

煤燃烧过程中产生的 $\text{NO}_x$ 是 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 以及 $\text{N}_2\text{O}_5$ 等含氮化合物的合称, 其中 $\text{NO}_x$ 占体积分数90%以上,  $\text{NO}_2$ 占体积分数5%~10%。理论上, 根据 $\text{NO}_x$ 生成来源的不同, 燃煤中 $\text{NO}_x$ 的生成主要分为3个途径, 即热力型 $\text{NO}_x$ 、快速型 $\text{NO}_x$ 和燃料型 $\text{NO}_x$ <sup>[5-7]</sup>。热力型 $\text{NO}_x$ 是空气中的 $\text{N}_2$ 在高温条件下被氧化而生成的, 由原苏联科学家捷里多维奇(Zeldovich)提出, 其生成过程通常采用Zeldovich机制来描述。热力型 $\text{NO}_x$ 通常不会大量生成, 主要集中在火焰面下游的高温区。影响热力型 $\text{NO}_x$ 生成的主要因素包括燃烧温度、氧浓度以及煤粉在高温区的停留时间, 其中燃烧温度的影响最大, 与温度呈指数关系。燃料型 $\text{NO}_x$ 是燃料中含氮化合物在燃烧过程中进行热分解, 继而进一步氧化而生成的 $\text{NO}_x$ 。煤燃烧时有75%~90%的 $\text{NO}_x$ 为燃料型 $\text{NO}_x$ , 是燃煤电厂 $\text{NO}_x$ 排放的主要来源。煤粉燃烧过程燃料型 $\text{NO}_x$ 反应机制极为复杂, 其反应机制还未完全掌握, 包含了一系列的反应链。FENIMORE[8]研究认为, 燃料中的N在氧化过程的产物由2个互相竞争的过程决定, 燃料中N高温分解生成的含N基团, 如CN、HCN、NH等, 一方面会与O、OH、 $\text{O}_2$ 等发生氧化反应, 生成 $\text{NO}_x$ , 另一方面, 在缺氧的情况下, 则会还原 $\text{NO}_x$ , 生成 $\text{N}_2$ 。最终 $\text{NO}_x$ 的生成量由两者反应的综合结果决定。根据燃料型 $\text{NO}_x$ 的生成机制可以发现, 煤粉燃烧

过程的过量空气系数以及煤粉自身特性是燃料型 $\text{NO}_x$ 的生成量的主要影响因素, 温度对其影响不大<sup>[9-11]</sup>。快速型 $\text{NO}_x$ 由Femimore在1971年提出, 是由燃料中碳氢化合物在高温下分解生成的中间产物CH与空气中的 $\text{N}_2$ 反应生成HCN、 $\text{CN}^\cdot$ , 再被大量的O、OH等活性基团氧化生成。快速型 $\text{NO}_x$ 主要产生于燃烧初期的火焰面内, 且反应时间极短。快速型 $\text{NO}_x$ 的生成主要受过量空气系数的影响, 随过量空气系数增加而增加, 快速型 $\text{NO}_x$ 的含量低, 在煤的燃烧过程中, 其占氮氧化物排放总量的比例仅为0~5%<sup>[8,12]</sup>。

生物利用光合作用将太阳能转化为化学能, 并将其存储在生物质自身体内, 这种能量形式就是生物质能, 常见的生物质有农作物秸秆, 家禽粪便等<sup>[13-16]</sup>。生物质相比于煤炭等化石燃料, 有较短的再生周期, 而对比风能等其他可再生能源, 生物质有能够简单运输和大量储存的优点<sup>[17]</sup>。

。生

物质能最

突出的优点在于能

够实现生态意义上的低碳排放, 这是

因为生物质能来源于太阳能, 是能吸收 $\text{CO}_2$ 的光合作用的产物。PALLARES等<sup>[18]</sup>

利用CFD软件研究了生物质掺烧比例以及生物质喷口位置对1台350MW锅炉的影响, 选用的生物质是地中海蓟, 相比其他生物质热值更高, 水分更少。模拟研究结果表明了掺烧生物质会略微降低燃烧效率, 掺烧比例增大, 效率下降会更明显, 而当生物质喷口布置在低位时有

更高的燃烧效率。DROSATOS等<sup>[19]</sup>

利用数值模拟软件来研究预干燥处理的褐煤或生物质对于低负荷锅炉稳燃的作用。模拟结果表明, 2种燃料都能起到稳燃的作用, 相比之下生物质能更好的确保燃烧效率, 但是降氮效果和减轻壁面热负荷等会更依赖燃烧分级等措施。

LVAREZ等<sup>[20]</sup>

通

过数

值模拟研

究在实验室设备中

生物质与煤的耦合燃烧, 发现与生物

质耦合燃烧除了可以提高燃尽率, 降低 $\text{NO}_x$

排放外, 还可以降低温度峰值, 从而降低实际锅炉运行中的结渣可能。张小桃团队<sup>[21-24]</sup>利用Aspen Plus以及Fluent研究了四角切圆锅炉的生物质气耦合燃烧, 考察掺烧比例、生物质种类、生物质气温度以及负荷等因素对于燃烧的影响。模拟结果表明, 生物质气掺烧比例增加, 生物质气温度升高都能进一步降低 $\text{NO}_x$ 排放。

本文以某电站670MW锅炉为例, 其设计煤种为贫煤, 结合现场的实验数据分析锅炉自身的燃烧情形。然后选取一种生物质, 利用Aspen Plus对生物质进行气化模拟计算, 将得到的生物质气从不同位置的一次风喷口喷入, 来研究生物质气不同掺烧方式对于锅炉燃烧的影响, 从而对锅炉改造提供一定的指导作用。在此基础上进行生物质气再燃工况模拟, 并对生物质气与生物质的燃烧特性进行比较, 通过这些模拟工况对生物质气更好更高效的利用提供指导意见。

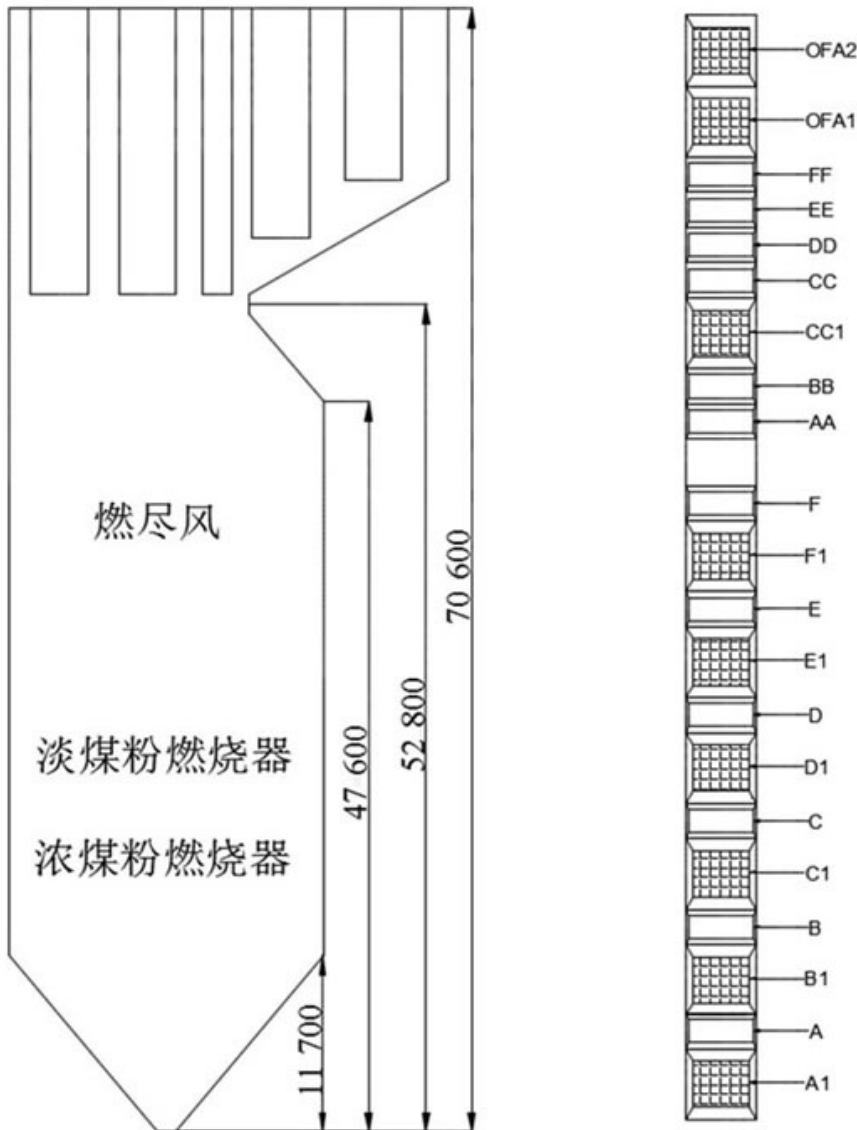
## 1 研究对象

本文研究对象为1台670MW超临界四角切圆锅炉, 本锅炉的燃烧系统为中速磨冷一次风直吹式制粉系统, 燃烧器采用垂直方向浓淡分级燃烧, 浓淡比为8:2。每根煤粉管道进口处装有煤粉浓淡分离装置, 主风箱下部布置有6层浓煤粉喷嘴, 自下而上依次为A、B、C、D、E、F, 每层浓煤粉喷嘴对应一层二次风喷嘴, 自下而上依次为A1、B1、C1、D1、E1、F1。上部布置6层淡煤粉喷嘴, 自下而上依次为AA、BB、CC、DD、EE、FF, 淡煤粉喷嘴上方还布置有2层OFA风喷嘴依次为OFA1

、OFA2。SOFA风箱布置有6层SOFA喷嘴, 在水冷壁

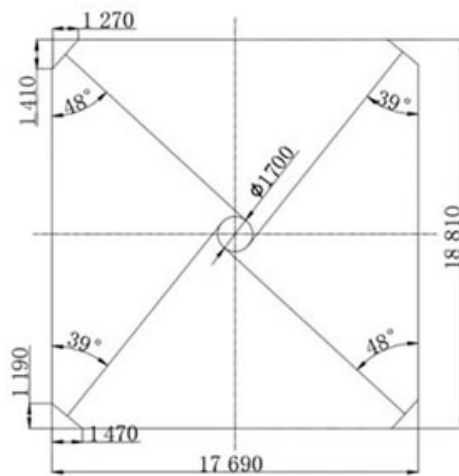
设计有402m<sup>2</sup>

的卫燃带。切圆直径为1700mm, 炉膛截面尺寸为17690mm×18810mm, 燃烧室高度为70600mm。锅炉总体布置图、浓淡燃烧器喷口布置图以及四角切圆示意图如图1所示。



(a) 锅炉总体布置图

(b) 浓淡燃烧器喷口布置图



(c) 四角切圆示意图

图 1 锅炉和燃烧器布置图 (单位: mm)

B-MCR工况下的设计煤种为山西晋中地区贫煤，煤质分析如表1所示。

表 1 煤质分析

| 元素分析                  |                       |                       |                       |                       | 工业分析                  |                       |                       |                        |                                                 |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------------------------|
| $\omega(\text{C})/\%$ | $\omega(\text{H})/\%$ | $\omega(\text{O})/\%$ | $\omega(\text{N})/\%$ | $\omega(\text{S})/\%$ | $\omega(\text{A})/\%$ | $\omega(\text{M})/\%$ | $\omega(\text{V})/\%$ | $\omega(\text{FC})/\%$ | $Q_{\text{net}}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$ |
| 59.29                 | 2.79                  | 2.95                  | 1.01                  | 1.40                  | 24.16                 | 8.40                  | 12.19                 | 55.25                  | 20 706                                          |

锅炉煤粉燃料煤耗量为72.42kg/s，过量空气系数为1.25，总风量为539.37Nm<sup>3</sup>，配风方式见表2。

表 2 锅炉配风方式

| 项目     | 风比 /% | 风速 /(m·s <sup>-1</sup> ) | 风温 /℃ |
|--------|-------|--------------------------|-------|
| 一次风(浓) | 7.22  | 21.5                     | 130   |
| 一次风(淡) | 10.83 | 41.0                     | 130   |
| 二次风    | 71.95 | 56.0                     | 348   |
| 周界风    | 10.00 | 56.0                     | 348   |

本文选用一种香柏木生物质，使用Aspen

Plus进行气化模拟计算，掺烧比例为热量的11%，生物质燃料的工业分析以及元素分析如表3所示。

表 3 生物质工业元素分析

| 元素分析                  |                       |                       |                       |                       | 工业分析                  |                       |                       |                        |                                                 |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------------------------|
| $\omega(\text{C})/\%$ | $\omega(\text{H})/\%$ | $\omega(\text{O})/\%$ | $\omega(\text{N})/\%$ | $\omega(\text{S})/\%$ | $\omega(\text{A})/\%$ | $\omega(\text{M})/\%$ | $\omega(\text{V})/\%$ | $\omega(\text{FC})/\%$ | $Q_{\text{net}}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$ |
| 47.01                 | 6.05                  | 4.11                  | 0.09                  | 0                     | 0.28                  | 5.40                  | 76.44                 | 17.88                  | 16 820                                          |

## 2数值模拟方法

炉内燃烧过程是一种复杂的化学物理过程，涉及到流动，传热以及化学反应等过程。经过大量学者研究，四角切圆锅炉燃烧模拟的子模型已经非常成熟。湍流模型采用可实现  $\kappa-\varepsilon$  模型，挥发分析出模型采用双步竞争速率模型，辐射换热模型采用P-1模型，气相燃烧模型采用混合分数/PDF模型，

焦炭燃烧模型采用动力/扩散控制反应速率模型，计算N

O<sub>x</sub>的生成有2种方法，一种是将NO<sub>x</sub>

反应机制耦合到燃烧氧化过程中，需要知道详细的反应机制，计算量巨大，不适用于工程实际，另一种便是通过后处理的方法来计算，这在工程

中得到广泛的应用。使用后处理方法计算时，由于快速

型NO<sub>x</sub>

生成量很小，不足总量的5%，计算中没有考虑快速型NO<sub>x</sub>的生成；热力型NO<sub>x</sub>

的产生采用Zeldovich机制，主要影响因素是温度；燃料

型NO<sub>x</sub>

生成过程极为复杂，本文采用总体反应速率模型，只需对中间产物HCN和NO的控制方程进行求解即可。文中假设煤挥发份中的N是以HCN和NH<sub>3</sub>的形式释放出来被氧化而生成NO，而焦炭中的N则直接反应生成NO<sup>[8-9]</sup>。

本文根据对象锅炉的实际尺寸进行三维建模，使用gambit软件对计算域进行网格划分。其中在主燃区利用pave方法

生成横截面区域的网格，保证网格线与流动方向一

致以减少伪扩散<sup>[25-28]</sup>

。另外，考虑到主燃区流场复杂，是化学反应最为剧烈的区域，需要进行局部网格加密，最终经过网格无关性验证后，主燃区网格约为110万。而其他区域则不需要加密，所以网格相对稀疏，总体网格约为200万，网格质量0.5~0.6的占比仅为0.08%，并且没有网格质量>0.6，满足燃烧计算的网格质量要求。

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 计算模型的验证

进行数值模拟之前，为了验证数值模拟中模型和参数选取的准确性，本文进行了相关的现场实验。由于测量条件有限，只得到折焰角处的烟温、炉膛出口氧量、NO<sub>x</sub>排放值和飞灰含碳量。表4为数值模拟与实验工况的特征参数比较，可以发现模拟工况数据与实验工况数据虽存在一定的偏差，但尚在可以接受的范围内，说明模拟所采用的模型有一定的可靠性。

表 4 实验工况与模拟工况比较

| 工况   | 折焰角<br>温度 /<br>K | 炉膛出口<br>氧量(体积<br>分数)/% | NO <sub>x</sub> 质量浓度<br>[φ(O <sub>2</sub> )6%]/<br>(mg·Nm <sup>-3</sup> ) | 飞灰含碳<br>量(质量<br>分数)/% |
|------|------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 实际工况 | 1 630            | 4.22                   | 570~620                                                                   | 4.11                  |
| 模拟工况 | 1 610            | 4.19                   | 612                                                                       | 3.91                  |

#### 3.2 生物质气耦合燃烧的影响

应用Aspen Plus进行气化模拟时，假设条件如下：生物质中的C、H、O、N和S等元素能够全部转化为气相，而灰分等惰性物质不参与反应；生物质在气化炉中能够得到充分反应，均处于稳定运行状态。基于上述假设，本文采用气化过程模拟流程如图2所示，通过化学计量反应器先将生物质分解为单质，最后送入吉布斯反应器发生气化反应。气化炉反应条件为压力1MPa，温度30益，空燃比0.3。最终反应产物如表5所示。

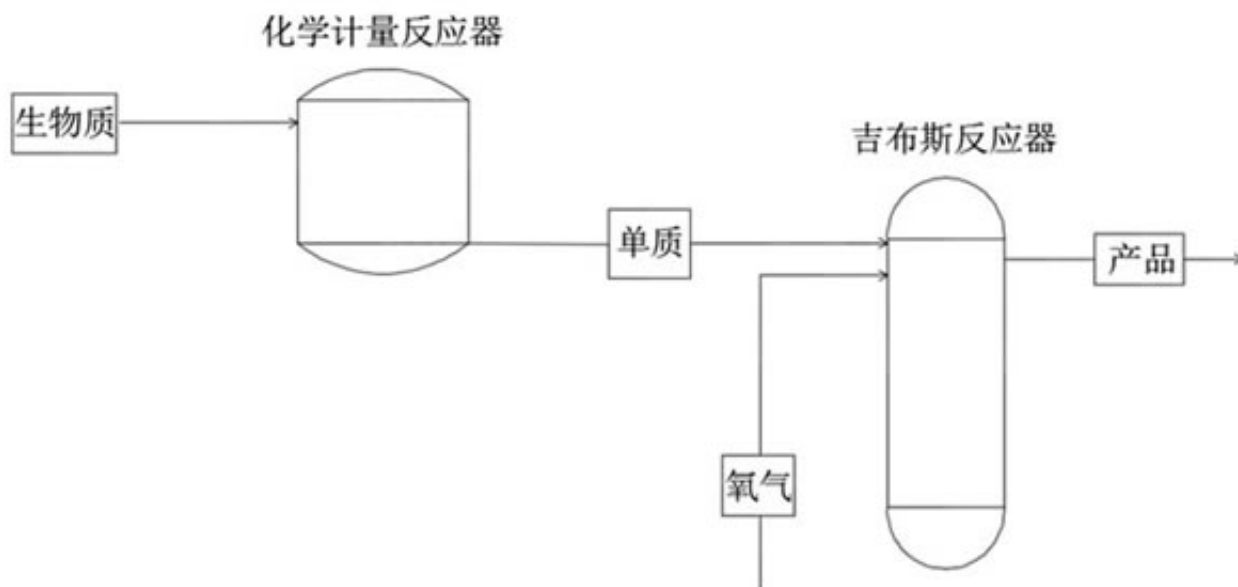


图2 生物质气化 Aspen Plus 流程图

表5 生物质气成分 %

| $\varphi(\text{H}_2)$ | $\varphi(\text{CO})$ | $\varphi(\text{N}_2)$ | $\varphi(\text{CO}_2)$ | $\varphi(\text{H}_2\text{O})$ |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------|
| 21.47                 | 22.23                | 35.41                 | 12.11                  | 8.78                          |

原始工况中原有的浓煤粉一次风风速为21.5m/s，按照四角切圆的推荐一次风表，参照烟煤的设计参数，考虑将生物质气喷口一次风风速提高到38m/s，以避免回火问题。此外，生物质气燃烧过量空气系数设置为1.05，则整体过量空气系

数为1.22

，其余边界条件

保持不变。生物质气耦合燃烧时

煤粉燃料煤耗量64.45kg/s，生物质气掺烧量42.10Nm<sup>3</sup>，总风量为527.33Nm<sup>3</sup>，配风方式如表6所示。

**表 6 锅炉配风方式**

| 项目       | 风比 /% | 风速 /(m·s <sup>-1</sup> ) | 风温 /℃ |
|----------|-------|--------------------------|-------|
| 生物质气一次风  | 5.38  | 38.0                     | 130   |
| 煤粉一次风(浓) | 6.57  | 21.5                     | 130   |
| 煤粉一次风(淡) | 9.86  | 41.0                     | 130   |
| 二次风      | 69.09 | 56.0                     | 348   |
| 周界风      | 9.10  | 56.0                     | 348   |

在研究过程中，为研究生物质气不同位置喷口对于生物质气耦合燃烧的影响，对比设置了2种生物质气喷口位置，生物质气分别替换第1层一次风喷口和第2层一次风喷口的煤粉燃料。表7是原始工况与生物质气在不同位置喷入工况的模拟结果，为了进一步解释上述结果，对各个工况下特征参数沿炉膛高度变化规律进行了研究，详细结果见图3。

**表 7 原始工况与生物质气在不同位置喷入工况的模拟结果（折焰角）**

| 工况          | $\varphi(\text{O}_2)/\%$ | $\text{NO}_x$ 质量浓度 [ $\varphi(\text{O}_2)$<br>6%]/(mg·Nm <sup>-3</sup> ) | 温度 /K |
|-------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------|
| 原始工况        | 4.19                     | 612                                                                      | 1 610 |
| 一次风<br>喷口喷入 | 第 1 层                    | 3.74                                                                     | 512   |
|             | 第 2 层                    | 3.59                                                                     | 560   |

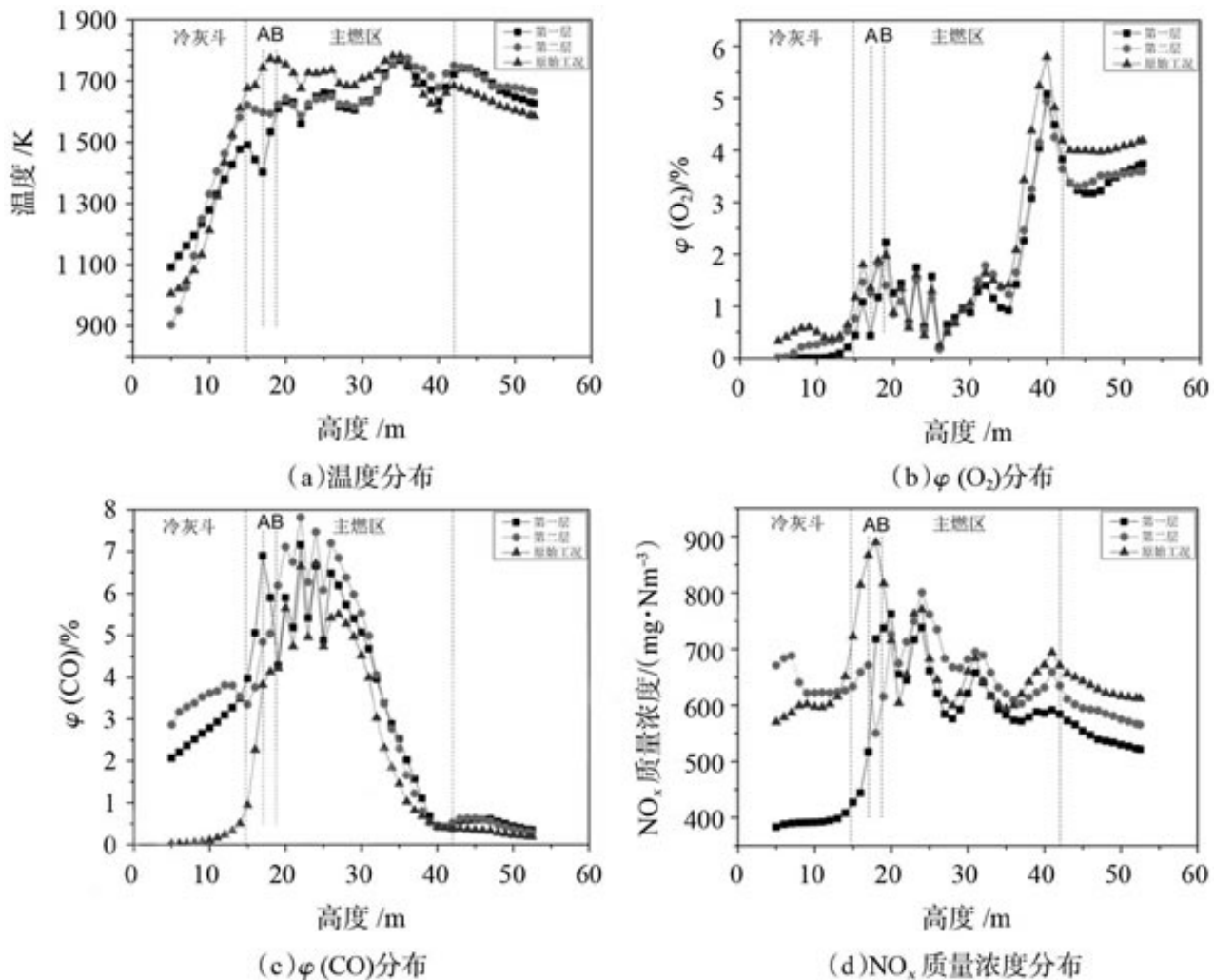


图3 原始工况与生物质气在不同位置喷入工况的特征参数沿炉膛高度曲线变化图

原始工况与生物质气在不同位置喷入工况的特征参数沿炉膛高度曲线变化见图3,从图3(a)中可以看出加入生物质气燃料后,温度曲线变化规律除了与原始工况类似外,在生物质气燃料喷入前,温度都呈现先下降再继续上升的趋势。在炉膛主燃区下部,生物质气混燃工况的温度略低于原始工况,而在炉膛主燃区上部,生物质气混燃工况的温度逐渐上升并超过原始工况,这可能是由于生物质气混燃工况时生物质气在主燃区炉膛下部消耗了煤粉燃烧所需要的氧气,推迟了煤粉燃烧,从而使火焰调度比原始工况的更高,导致炉膛出口温度更高。在图3(b)中,生物质气混燃的2种工况的氧含量都在生物质气喷入层明显下降,不同之处在于,生物质气第1层喷入时氧量在A、B之间要低于其他2种工况,表明生物质气迅速燃烧消耗氧气,这导致煤粉燃烧推迟。随着燃烧的推进,这些不同的燃烧过程的影响逐渐减少,氧含量曲线开始重合,在炉膛出口处体积分数数据分别为3.74%与3.59%。在图3(c)中,生物质气混燃时冷灰斗区域的CO含量有大幅上升,之后的变化规律与原始工况类似,直至炉膛出口, $\varphi(CO)$ 数值基本重合。在图3(d)中,在生物质气喷入后, $NO_x$

质量浓度有明

显下降,原因是生物质气的

氮含量远低于煤,生物质气混燃工况CO的大量生成抑

制了 $NO_x$

的生成。相比生物质气从第2层喷入,生物

质气从第1层喷入时炉膛出口 $NO_x$

质量浓度更低,这表明生物质气参与燃烧的时间越早,生物质气燃料释放的挥发分等成分产生的还原效果就会更好。

综上分析,同原始工况相比,掺烧生物质气后炉膛出口温度有所上升,氧含量有所下降,有一定的降氮效果。生物质气的喷入位置从第1层提高到第2层后,两者燃烧状况的差异集中在炉膛下部的第1、2层一次风喷口区域,随着燃烧的进行,两者的特征参数曲线基本重合,生物质气投入位置不同的影响基本消失。总体而言,生物质气从第1层喷入时,比从第2层喷入时的 $NO_x$

排放低，这表明生物质气参与燃烧的时间越早，生物质气燃料释放的挥发分等成分产生的还原效果就会更好。

### 3.3 生物质气再燃的影响

再燃喷口设置在距离最上层一次风喷口上方3.2m的位置，生物质气速度设置为42m/s，热量占比仍为11%，煤粉燃料煤耗量64.45kg/s，生物质气再燃量42.10Nm<sup>3</sup>，整体的过量空气系数与生物质气掺烧工况一样，锅炉配风比例同原始工况一样如表8所示，但是总风量下降至527.33 Nm<sup>3</sup>。

表 8 锅炉配风方式

| 项目     | 风比 /% | 风速 /(m·s <sup>-1</sup> ) | 风温 /℃ |
|--------|-------|--------------------------|-------|
| 一次风(浓) | 7.22  | 21.5                     | 130   |
| 一次风(淡) | 10.83 | 41.0                     | 130   |
| 二次风    | 71.95 | 56.0                     | 348   |
| 周界风    | 10.00 | 56.0                     | 348   |

表9为不同燃烧条件下的模拟结果，为了进一步解释上述结果，对各个工况下特征参数沿炉膛高度变化规律进行了详细研究，结果给出在图4中。

表 9 不同燃烧方式下模拟结果（折焰角）

| 工况                   | $\varphi(\text{O}_2)/\%$ | $\text{NO}_x$ 质量浓度 [ $\varphi(\text{O}_2)$<br>6%]/(mg·Nm <sup>-3</sup> ) | 温度 /K |
|----------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------|
| 原始工况                 | 4.19                     | 612                                                                      | 1 610 |
| 生物质气第 1 层<br>一次风喷口喷入 | 3.74                     | 512                                                                      | 1 626 |
| 生物质气再燃               | 3.57                     | 402                                                                      | 1 696 |

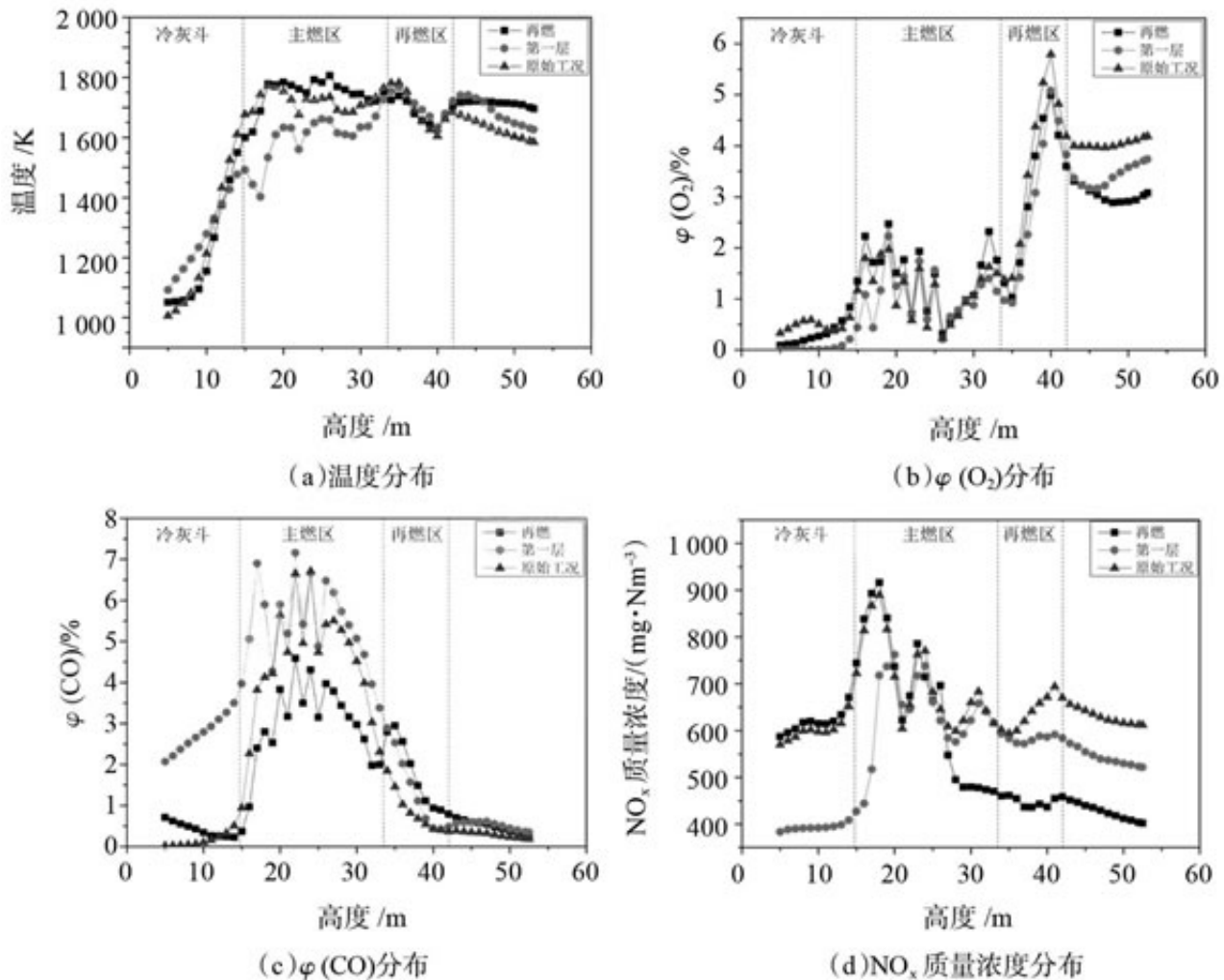


图4 不同燃烧方式条件下特征参数沿着炉膛高度变化曲线图

不同燃烧方式条件下特征参数沿着炉膛高度变化见图4。在图4(a)中,生物质气再燃工况在炉膛下部为纯煤燃烧,在冷灰斗和主燃区的变化规律和原始工况的相同,与掺烧生物质的变化有所不同,而在再燃区,两者曲线开始重合,离开再燃区后,相比生物质气从下层喷入工况,再燃工况的温度曲线基本不变,下降幅度不明显。图4(b)中,再燃工况的氧含量曲线在主燃区的炉膛下部明显高于其他工况,这是因为再燃工况的炉膛下部为纯煤的燃烧,相比从下层喷入的生物质气难以着火,所以再燃工况的煤粉燃烧前期相对不太剧烈。随着燃烧反应的进行,两者的曲线开始重合。在接近再燃区的位置,再燃工况的曲线先上升,远超过其他工况的上升幅度,随后骤降到与其他工况一样的水平,这是由于同样的生物质气量从炉膛下部移到再燃喷口,炉膛下部的耗氧量减少所导致的。最终在炉膛出口,再燃工况的数值略小于生物质气从第一层喷入工况的数值,出口氧体积分数为3.57%。在图4(c)中,再燃工况的CO体积分数在主燃区明显低于其他工况,然后在再燃区开始重合,说明了再燃工况下的煤粉在前期得到了完全燃烧。图4(d)中,可以看到生物质气利用方式的不同导致 $\text{NO}_x$ 分布产生了巨大的变化。再燃工况在冷灰斗的 $\text{NO}_x$ 浓度远高于生物质气混燃工况,略高于原始工况,在主燃区的炉膛下部,生物质气再燃曲线的波动情况更接近于原始工况。

造成这种现象的原因首先是再燃工况下炉膛温度有明显升高,因此热力型 $\text{NO}_x$ 生成量提高,此外氧含量也有提高,因此燃料型 $\text{NO}_x$ 的生成量提高,所以再燃工况在燃烧初期 $\text{NO}_x$ 浓度偏高。而在接近再燃区的位置,受到生物质气再燃的还原作用影响, $\text{NO}_x$ 质量浓度

度开始持  
续下降。最终在炉  
膛出口，再燃工况的数值明显低于其  
他工况，相应的炉膛出口数据为 $402\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，说明生物质气再燃有明显的降低 $\text{NO}_x$ 排放效果。

综合分析，生物质气的利用方式更换为再燃后，由于下部的燃料变为纯煤，主燃区炉膛下部的特征参数曲线与原始工况的情形类似。而在接近再燃区的位置，生物  
质气再燃工况的 $\text{NO}_x$   
曲线持续降低，最终在炉膛出口处质量浓度下降到 $402\text{mg}/\text{Nm}^3$

$\text{NO}_x$ 效果，可以认为生物质气降低 $\text{NO}_x$ 排放的最好方式是再燃。

### 3.4 生物质混烧影响

最后，为了进一步比较生物质气耦合燃烧和生物质耦合燃烧的特性，将气化前的生物质直接作为燃料喷入第一层一次风喷口进行计算模拟，生物质喷口一次风风速设为 $28\text{m}/\text{s}$ ，其余边界条件保持不变。煤粉燃料煤耗量 $64.45\text{kg}/\text{s}$ ，生物质掺烧量是 $13.28\text{kg}/\text{s}$ ，总风量为 $553.27\text{Nm}^3$ ，过量空气系数为 $1.25$ ，配风方式如表10所示。

表 10 锅炉配风方式

| 项目       | 风比 /% | 风速 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 风温 $/^\circ\text{C}$ |
|----------|-------|------------------------------------|----------------------|
| 生物质气一次风  | 2.39  | 28.0                               | 130                  |
| 煤粉一次风(浓) | 6.26  | 21.5                               | 130                  |
| 煤粉一次风(淡) | 9.40  | 41.0                               | 130                  |
| 二次风      | 73.28 | 56.0                               | 348                  |
| 周界风      | 8.67  | 56.0                               | 348                  |

表11为第1层一次风分别喷入生物质和生物质气工况下的模拟结果，为了进一步解释上述结果，对各个工况下特征参数沿炉膛高度变化规律进行了详细研究，结果给出在图5中。

表 11 从第 1 层分别喷入不同燃料下模拟结果（折焰角）

| 工况     | $\varphi(\text{O}_2)/\%$ | $\text{NO}_x$ 质量浓度 $[\varphi(\text{O}_2)$<br>$6\%]/(\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3})$ | 温度 /K |
|--------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 喷入生物质  | 4.25                     | 537                                                                                | 1 624 |
| 喷入生物质气 | 3.74                     | 512                                                                                | 1 626 |

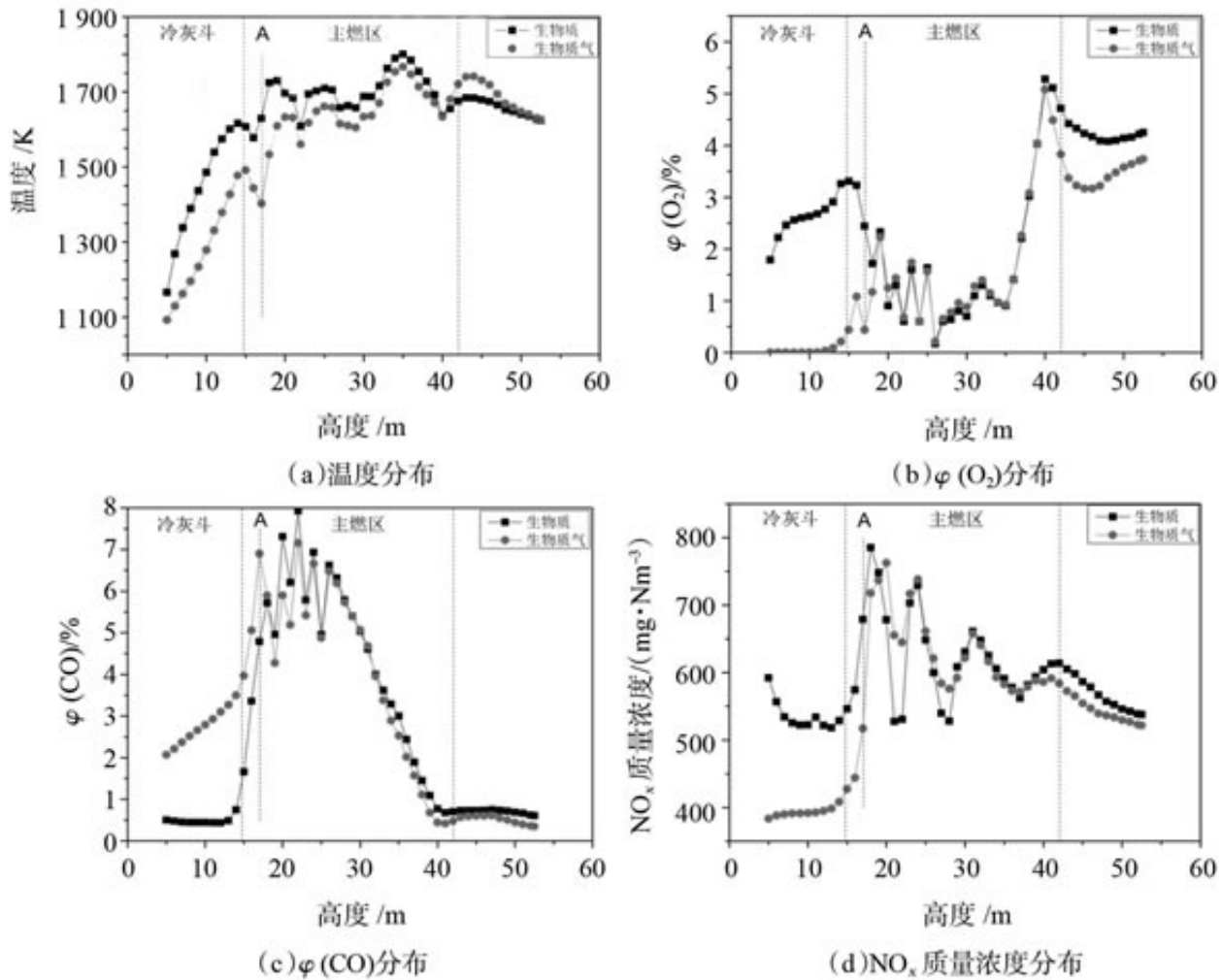


图5 不同燃料条件下特征参数沿炉膛高度方向变化曲线图

不同燃料条件下特征参数沿炉膛高度方向变化见图5。从图5(a)来看,掺烧燃料从生物质气变为生物质后,温度变化规律类似,但是生物质气工况的温度在冷灰斗和主燃区都低于生物质工况,只有在最后阶段大幅度超过,最后曲线重合。在图5(b)中,掺烧燃料更换的影响集中在冷灰斗区域,随着燃烧反应的进行,两者的曲线开始完全重合,而在炉膛出口处,生物质气工况的含氧量数据低于生物质工况,这是由于掺烧生物质气工况设置的过量空气系数低于生物质工况。同样的在图5(c)中也可以看到,两者的曲线变化规律类似,在主燃区的曲线也基本重合。最后在图5(d)中可以看出,更换掺烧燃料为生物质后,在掺烧燃料喷入层,  $\text{NO}_x$  浓度上升明显,燃烧前期  $\text{NO}_x$

$\text{NO}_x$  质量浓度从  $512\text{mg}/\text{Nm}^3$  略微上升到  $537\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

综合分析,掺烧燃料从生物质气变成生物质后,在掺烧燃料喷入层,温度,  $\text{NO}_x$  质量浓度等上升明显。整体而言炉膛下部的温度上升更加明显,随着燃烧反应的进行,生物质工况在炉膛上部燃烧情形与生物质气工况相差不大,有一定的降低  $\text{NO}_x$  排放效果。

#### 4结论

- 1) 使用生物质气掺烧后,有一定降低  $\text{NO}_x$  的效果。当生物质气从较低位置喷入时,能够尽快参与燃烧过程,生物质气还原  $\text{NO}_x$  效果更好。
- 2) 使用生物质气再燃时,主燃区炉膛下部的特征参数曲线变化规律与原始工况类似,而在接近再燃区的位置,生

物质气再燃工况的 $\text{NO}_x$

曲线持续降低，最终在炉膛出口处质量浓度下降到 $402\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，可以认为生物质气降低 $\text{NO}_x$ 排放的最好方式是再燃。

3) 使用生物质掺烧后，相比于生物质气掺烧工况，炉膛下部的温度更高，炉膛出口 $\text{NO}_x$ 质量浓度略微上升。

## 参考文献

- [1] 英国 BP 公司. 世界能源统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [2] CHEN Wenying, XU Ruina. Clean coal technology development in China[J]. Energy Policy, 2010, 38(5) :2123–2130.
- [3] 赵文昌. 空气污染对城市居民的健康风险与经济损失的研

- 究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [4] 中国机械工业联合会. 中国能源装备年鉴: 煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020 年)[M]. 北京: 经济管理出版社, 2014: 459–464.
- [5] 曾汉才. 燃烧与污染[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992: 26–50.
- [6] 岑可法, 姚 强, 骆仲泐, 等. 燃烧理论与污染控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 412–429.
- [7] KUROSE R, IKEDA M, MAKINO H, et al. Pulverized coal combustion characteristics of high-fuel-ratio coals [J]. *Fuel*, 2004, 83(13): 1777–1785
- [8] FENIMORE C P. Formation of nitric oxide from fuel nitrogen in ethylene flames[J]. *Combustion & Flame*, 1972, 19(2): 289–296
- [9] PERSHING D W, WENDT J O L. Relative contributions of volatile nitrogen and char nitrogen to  $\text{NO}_x$  emissions from pulverized coal flames [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1979, 18(1): 60–67.
- [10] KATO K, FUJII K, KURATA C, et al. Formation and control of nitric oxide from fuel nitrogen: 2nd report, formation and decomposition of fuel-NO in diffusion flames[J]. *Bulletin of Jsme*, 1976, 42(354): 592–602
- [11] 方庆艳. 低挥发分煤及其混煤燃烧数值模拟与试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [12] FENIMORE C P. Reactions of fuel-nitrogen in rich flame gases[J]. *Combustion & Flame*, 1976, 26(2): 249–256
- [13] 杨明娟. 生物质与煤混烧特性及数值模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [14] 原国栋. 生物质与煤混燃的数值模拟及实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [15] 韩娟娟. 600 MW 煤粉 / 生物质富氧燃烧锅炉热力特性分析及模拟[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- [16] 程宇婷. 煤粉与生物质混燃的数值模拟[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- [17] DEMIRBAS A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals[J]. *Energy Conversion And Management*, 2001, 42(11): 1357–1378.
- [18] PALLARES J, GIL A, CORTES C, et al. Numerical study of co-firing coal and *Cynara cardunculus* in a 350 MWe utility boiler[J]. *Fuel Processing Technology*, 2009, 90(10): 1207–1213.
- [19] DROSATOS P, NIKOLOPOULOS N, KARAMPINIS E, et al. Comparative investigation of a co-firing scheme in a lignite-fired boiler at very low thermal-load operation using either pre-dried lignite or biomass as supporting fuel[J]. *Fuel Processing Technology*, 2018, 180: 140–154.
- [20] ÁLVAREZ L, YIN C, RIAZA J, et al. Biomass co-firing under oxy-fuel conditions: A computational fluid dynamics

- modelling study and experimental validation[J]. Fuel Processing Technology, 2014,120:22–33.
- [21] 张小桃, 闻 猛, 丁全斌, 等. 煤粉和生物质气混燃锅炉燃烧特性数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 2017(3): 82–87.
- [22] 张小桃, 赵 伟, 闻 猛. 不同温度生物质气与煤粉混燃过程及污染物排放特性[J]. 热力发电, 2017(9): 47–52.
- [23] 张小桃, 刘 莹, 丁全斌. 生物质气与煤混燃锅炉燃烧性能模拟研究[J]. 热力发电, 2016(8): 14–19.
- [24] 张小桃, 卢 毅, 贾耀磊, 等. 生物质气与煤粉混燃过程数值模拟[J]. 热力发电, 2015(4): 67–72.
- [25] 王志刚, 嵇玉群, 陈昌和, 等. 四角切圆锅炉流场伪扩散效应网格的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007(5): 22–28.
- [26] XU Xuchang, WANG Zhigang, ZHUO Yuqun, et al. False diffusion in numerical simulation of combustion processes in tangential-fired furnace[J]. 2007,21(11):1828–1846.
- [27] 潘 维, 池作和, 斯东波, 等. 四角切圆燃烧锅炉炉膛网格生成方法的研究[J]. 动力工程, 2005(3): 359–363.
- [28] 刘向军, 徐旭常. 采用不同网格比较伪扩散对四角切圆型炉膛流场计算的影响[J]. 燃烧科学与技术, 1997(2): 3–9.

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/162900.html>