

# O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下烟气物性参数对燃煤锅炉对流传热影响的模拟研究

张恬<sup>1</sup>, 闫凯<sup>2</sup>, 乌晓江<sup>2</sup>, 韩志江<sup>2</sup>, 周月桂<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 上海锅炉厂有限公司, 上海 200245)

**摘要:**新疆准东煤作为一种可开发利用前景广阔的高碱金属煤种, 易沾污结渣特性极大限制了其高效利用。前人大量研究了准东煤在常规气氛下的燃烧特性, 但鲜见其在富氧气氛下的燃烧和传热特性研究。为了研究富氧气氛下燃用准东煤对碱金属释放及换热器传热性能的影响, 运用化工流程分析软件 Aspen Plus 建立空气和富氧气氛下准东煤燃烧工艺流程模型并进行反应模拟。通过控制氧燃比恒定并调节 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 配比进行变工况分析, 使准东煤燃烧绝热火焰温度与空气气氛下较为接近, 对应工况下锅炉内具有相似的温度分布。借助吉布斯反应器模拟得出反应物系在满足相平衡和化学平衡的条件下所得产物组分及状态参数、Na 元素的赋存与转化规律, 为预测 Na 元素释放形式提供参考。由于富氧燃烧烟气富含高浓度 CO<sub>2</sub> 且水蒸气含量增加, 富氧燃烧方式下燃煤烟气的传热特性将发生显著差异。运用带有 Boston-Mathias  $\alpha$  函数的 Peng-Robinson 立方状态方程 (PR-BM 物性方法) 对准东煤在空气和富氧气氛下燃烧产生的烟气进行物性估算, 对比分析不同气氛下烟气密度、比热容、导热系数、黏度随温度的变化规律, 为分析空气及富氧气氛下准东煤燃烧烟气的对流传热特性差异提供更为准确的参数。采用外掠管束强制对流传热修正计算方法分析了不同燃烧气氛下锅炉烟道内各对流受热面的传热性能。并采用 CFD 软件对一束高温再热器管屏进行“烟气-管壁-蒸汽”流固耦合传热数值模拟, 对比空气及富氧气氛下燃煤烟气物性参数对换热器传热系数的影响。结果表明: 40% O<sub>2</sub>/60% CO<sub>2</sub> 气氛下, Na 元素释放规律与 21% O<sub>2</sub>/79% N<sub>2</sub> 基本一致。随着烟温的降低, Na 存在形式逐渐由 NaCl 和 NaOH 向 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 转变。但烟气再循环的富集作用会加剧准东煤灰沾污结渣。由于富氧燃煤烟气中三原子气体浓度增加, 物性参数发生变化使得对流传热性能增强, 各对流受热面传热系数为常规工况的 1.24~1.27 倍。在换热器结构和烟气及蒸汽入口流速、温度相同时, 富氧工况下再热器各管圈对流传热系数较常规工况增加约 21.43 W/(m<sup>2</sup>·K), 出口蒸汽平均温度提高约 11.32 K。

**关键词:** 准东煤; 富氧燃烧; 碱金属; 物性参数; 对流传热; 高温再热器

**中图分类号:** TQ53; TK114

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-6772(2019)01-0123-08

## Effect of flue gas physical properties on convective heat transfer of coal-fired boiler in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere

ZHANG Tian<sup>1</sup>, YAN Kai<sup>2</sup>, WU Xiaojiang<sup>2</sup>, HAN Zhijiang<sup>2</sup>, ZHOU Yuegui<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Boiler Works Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

**Abstract:** As a kind of high alkali metal coal with broad prospect of exploitation and utilization, Zhundong coal in Xinjiang is easy for slagging, which greatly limits its efficient utilization. Much research work has been done on its conventional combustion, but the research on

**收稿日期:** 2018-11-30; **责任编辑:** 白娅娜 **DOI:** 10.13226/j.issn.1006-6772.18113001

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51576128, 51761125011); 上海市青年科技启明星计划资助项目(17QB1400900)

**作者简介:** 张恬(1993—), 男, 江苏扬州人, 硕士研究生, 主要研究方向为富氧燃烧技术。E-mail: lucaszhang1993@163.com. 通讯作者: 周月桂, 教授, 博士, 主要研究方向为煤高效清洁燃烧。E-mail: ygzhou@sjtu.edu.cn

**引用格式:** 张恬, 闫凯, 乌晓江, 等. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下烟气物性参数对燃煤锅炉对流传热影响的模拟研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(1): 123-130.

ZHANG Tian, YAN Kai, WU Xiaojiang, et al. Effect of flue gas physical properties on convective heat transfer of coal-fired boiler in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(1): 123-130.



移动阅读

combustion and heat transfer characteristics in  $O_2/CO_2$  atmosphere is still insufficient. In order to study the effect of burning Zhundong coal in  $O_2/CO_2$  atmosphere on alkali metal release and heat transfer performance of heat exchanger, the chemical process analysis software Aspen Plus was used to establish the combustion process flow model of Zhundong coal under the atmosphere of air and  $O_2/CO_2$  for reaction simulation. By controlling the constant  $O_2$ /fuel ratio and adjusting the ratio of  $O_2/CO_2$ , the adiabatic flame temperature of burning Zhundong coal in  $O_2/CO_2$  is close to that in the air atmosphere. There is a similar temperature distribution in the boiler under these two working conditions. By Gibbs reactor, the product components and state parameters were obtained under the conditions of phase equilibrium and chemical equilibrium, and the occurrence and transformation of Na elements were obtained, which provided a reference for predicting the release form of Na. Due to the high concentration of  $CO_2$  and water vapor content in the oxy-coal combustion flue gas, the heat transfer characteristics of the coal-fired flue gas under the oxy-coal combustion mode will be significantly different. The PR-BM physical property method was used to estimate the physical properties of the flue gas produced by burning Zhundong coal in air and  $O_2/CO_2$  atmosphere, and the density and specific heat capacity of flue gas in different atmosphere were compared and analyzed. The variation of thermal conductivity and viscosity with temperature provides more accurate parameters for analyzing the difference of heat convection characteristics of coal combustion flue gas in air and  $O_2/CO_2$  atmosphere. The heat transfer performance of boiler convection heating surface was analyzed by combining heat transfer theory calculation with CFD analysis. With the decrease of smoke temperature, the existing form of Na gradually changed from NaCl and NaOH to  $Na_2SO_4$ . Oxygen-enriched/flue gas recirculation combustion increases the fouling and slagging of high alkali coal ash. Due to the increase of  $CO_2$  and  $H_2O$  concentration in oxy-coal combustion flue gas, the convection heat transfer performance is enhanced, and the heat transfer coefficients of each convective heating surface increases respectively. The heat transfer coefficient of each convection heating surface is about 1.24-1.27 times of that of conventional working conditions. The convective heat transfer coefficient of the high temperature reheater increases by  $24.8W/(m^2 \cdot K)$  and the steam temperature at the outlet of each pipe nearly increases by 11.32 K under the condition of oxy-coal combustion.

**Key words:** Zhundong coal; oxygen-enriched combustion; alkali metal; physical property parameter; convective heat transfer; high-temperature reheater

## 0 引言

富氧燃烧技术又称为空气分离/烟气再循环技术或氧燃料燃烧技术,组织燃料在  $O_2/CO_2$  混合气氛中燃烧,可大幅提高燃烧烟气中  $CO_2$  浓度,从而降低  $CO_2$  捕集与封存的难度及成本,并实现  $SO_x$ 、 $NO_x$ 、亚微米颗粒物及痕量元素的一体化协同脱除<sup>[1-2]</sup>。近年来,一些国家已建设了富氧燃烧电站示范工程并推动其商业化进程,如德国黑泵 30 MW<sub>th</sub> 示范工程、英国斗山 40 MW<sub>th</sub> 示范工程、澳大利亚卡利德 30 MW<sub>th</sub> 示范电站、西班牙 30 MW<sub>th</sub> 富氧流化床燃烧示范工程等<sup>[3-5]</sup>。

由于富氧燃烧烟气富含高浓度  $CO_2$ ,且水蒸气含量增加,烟气的物性与空气燃烧烟气差异较大,由此导致的锅炉受热面对流传热特性差异不可忽略。Kakaras 等<sup>[6]</sup>以希腊某 360 MW 常规电站热力系统为基准,进行了热力系统仿真及富氧燃烧改造,研究表明在给煤量相同时富氧燃烧可使机组发电量增加 46 MW。米翠丽等<sup>[7]</sup>使用流体外掠管束传热修正关联式对不同气氛下换热器对流传热系数进行理论计算时,发现燃煤烟气组分参数不具有煤种普适性,考虑了管间距、主流烟气与壁面的温差,但忽略了管排数目的影响。鉴于前人在富氧燃烧条件下对流传热研究不足且主要研究煤种为烟煤

和褐煤,而对于储量巨大,开发利用前景广阔的准东高碱煤则研究较少。本文采用化学工艺模拟(process simulation)和计算流体力学(CFD)耦合的方法建立准东煤燃烧与对流传热模型,可实现特定配气比例下准东煤燃烧时 Na 元素释放与传热性能的模拟,从而为预测受热面沾污倾向、传热性能、指导受热面设计提供参考依据。通过煤粉燃烧过程模拟、烟气物性估算为传热计算和数值模拟打下基础;采用流体外掠管束传热修正公式对不同气氛下各换热器进行理论计算;选择锅炉烟道内一束高温再热器管屏为典型,进行“烟气-管壁-蒸汽”流固耦合传热数值模拟,从而验证换热器对流传热理论计算的正确性。

## 1 准东煤空气及富氧燃烧过程模拟

### 1.1 准东煤空气及富氧燃烧模型

#### 1.1.1 模型描述

以某国产 315 MW 燃煤电站锅炉运行参数为基准,采用 Aspen Plus 软件基于以下简化假设建立五彩湾准东煤空气及富氧燃烧模型,以获取不同气氛下煤粉燃烧的排放特性,煤质分析见表 1。

燃烧模型假设如下:①煤粉燃烧工艺流程可分为干燥、热解、燃烧、碱金属反应 4 个步骤;②煤粉燃烧为稳态,所有模块的状态参数不随时间变

化;③ 助燃气体与煤粉在反应器中均匀混合;④ 煤热解过程中释放出挥发分, C 转化为焦炭, H、O、N 和 S 则蒸发为气相, 灰分为惰性组分, 不参与燃烧反

应;⑤ 给煤量为 36.55 kg/s, 氧气过量系数为 1.2, 系统漏风系数为 0.02;⑥ 焦炭燃尽率设为 98%, 未燃尽碳作为灰分处理。

表 1 五彩湾煤煤质分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of Wucaiwan coal

工业分析/%				元素分析/%					$Q_{net,ar}/$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )
$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$FC_{ad}$	$C_{ar}$	$H_{ar}$	$N_{ar}$	$O_{ar}$	$S_{ar}$	
9.08	6.95	28.01	55.96	55.53	3.41	0.95	6.01	0.66	19.26
灰成分分析/%									
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO <sub>2</sub>
19.13	8.44	7.67	34.34	9.37	5.45	0.68	13.72	0.53	0.074

图 1 为准东煤燃烧工艺流程, 包括煤粉干燥、热解、燃烧、碱金属反应等部分, 通过嵌入 Fortran 模块来控制煤粉干燥的脱水率、热解生成物产率、配风量和漏风系数等参数。通过调节给煤量和反应条件, 可模拟出准东煤在空气气氛和富氧气氛下的煤粉燃

烧及污染物排放特性。

试验研究表明, 采用占锅炉排烟体积 70% 的循环烟气与高纯度氧气混合作为助燃气体可改善煤粉的燃烧特性, 且锅炉燃烧传热特性与空气燃烧较接近<sup>[8]</sup>。

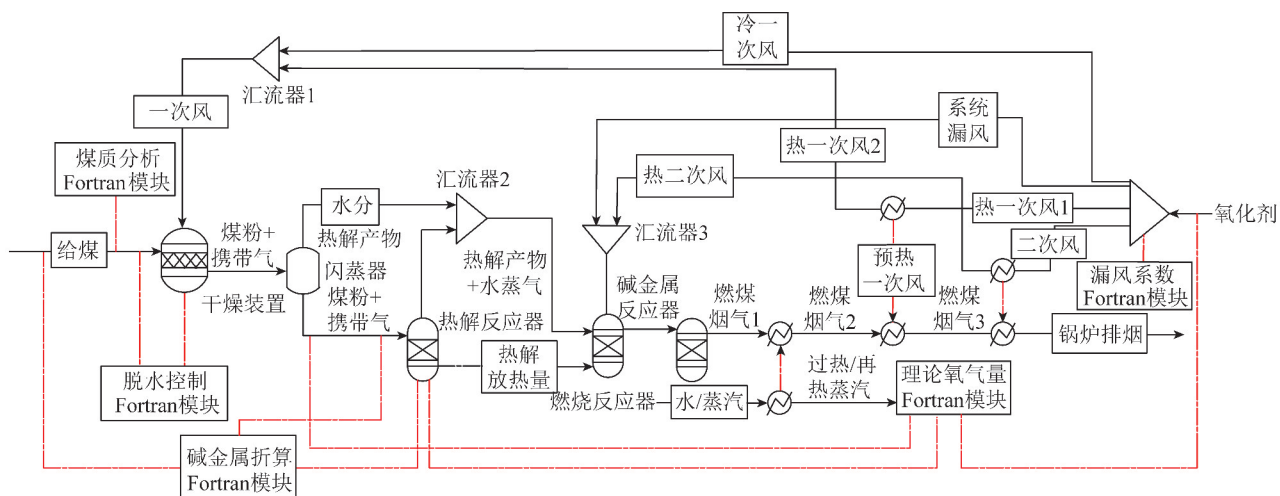


图 1 准东煤燃烧工艺流程

Fig. 1 Process flow of Zhundong coal combustion

首先, 煤粉进入煤粉干燥器 (RStoic, 化学计量反应器), 在磨煤机中被一次风干燥。一次风携带煤粉进入炉膛之前, 需经过闪蒸模块 (Flash2, 闪蒸分离器) 分离出水分。干燥后的煤粉进入热解反应器 (RYield, 收率反应器) 分解为 H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、S、Cl<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、焦炭、灰分。煤粉热解产物进入燃烧反应器 (RGibbs, 吉布斯反应器), 与二次风、系统漏风均匀混合并发生燃烧反应。燃烧反应器将包括反应物和生成物在内的反应体系的吉布斯自由能为最小时的混合物作为反应结束的产物。燃烧反应器工作条件为绝热, 反应产生的热能完全被燃烧产物所吸收, 反应产物温度即绝热火焰温度<sup>[9]</sup>。由于准东煤 Na 含量较高, 因此需考虑高温条件下碱金属化学反应, 碱

金属反应在另一个吉布斯反应器中进行。随后高温烟气为加热给水、预热一、二次风提供热量。

### 1.1.2 混合气氧浓度对准东煤燃烧的影响

本文对 21% O<sub>2</sub>/79% N<sub>2</sub>、21% O<sub>2</sub>/79% CO<sub>2</sub>、30% O<sub>2</sub>/70% CO<sub>2</sub>、35% O<sub>2</sub>/65% CO<sub>2</sub>、40% O<sub>2</sub>/60% CO<sub>2</sub>、50% O<sub>2</sub>/50% CO<sub>2</sub> 气氛下准东煤燃烧进行变工况分析, 得出与空气燃烧绝热火焰温度较接近时所对应的 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 配比, 具体如图 2、3 所示。富氧燃煤烟气氧浓度和绝热火焰温度随着初始配气氧浓度的升高而升高。对于准东煤而言, 40% O<sub>2</sub>/60% CO<sub>2</sub> 气氛下燃烧的绝热火焰温度与 21% O<sub>2</sub>/79% N<sub>2</sub> 相近, 炉膛燃烧温度分布特性与常规工况较接近。当氧气摩尔分数低于 40% 时, 富氧燃煤烟气

温度低于常规燃煤烟气,主要是由于相同给煤量的条件下,富氧燃烧烟气量小于空气燃烧,富氧气氛下烟气热容量大于空气燃烧烟气,各因素综合作用使得富氧燃烧烟气温度低于空气燃烧。2种气氛下准东煤燃烧烟气的组分种类基本一致,含 H<sub>2</sub>O、N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 等。21% O<sub>2</sub>/79% N<sub>2</sub>、40% O<sub>2</sub>/60% CO<sub>2</sub> 气氛下准东煤燃烧烟气参数见表 2。

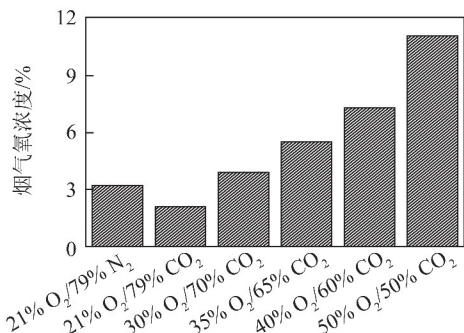


图2 不同气氛下燃煤烟气氧浓度

Fig. 2 Oxygen concentration of flue gas in different atmosphere

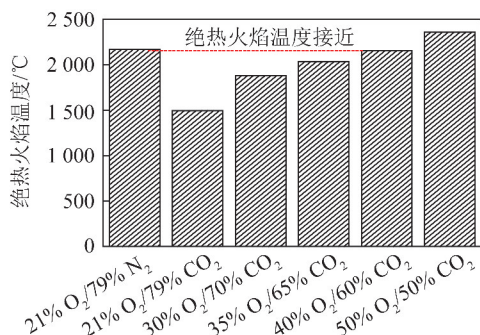


图3 不同气氛下煤粉燃烧绝热火焰温度

Fig. 2 Adiabatic flame temperature of coal combustion in different atmosphere

表2 绝热火焰温度相近时烟气参数

Table 2 Flue gas parameters with the similar adiabatic flame temperature

项目	21% O <sub>2</sub> /79% N <sub>2</sub>	40% O <sub>2</sub> /60% CO <sub>2</sub>
绝热火焰温度/℃	2 167.7	2 156.3
CO <sub>2</sub> 摩尔分数	0.137	0.762
CO 摩尔分数	0.020	0.069
H <sub>2</sub> O 摩尔分数	0.060	0.090
N <sub>2</sub> 摩尔分数	0.740	0.001
O <sub>2</sub> 摩尔分数	0.032	0.073
SO <sub>2</sub> 摩尔分数	980×10 <sup>-6</sup>	0.001

### 1.1.3 空气及富氧燃烧方式下 Na 元素释放规律

由于准东煤具有高碱金属含量和强沾污特性,若直接燃用准东高碱煤会导致过热器表面发生严重的沾污结渣问题(图 4)。造成准东煤易沾污结渣的

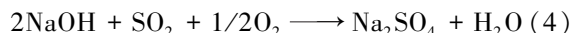
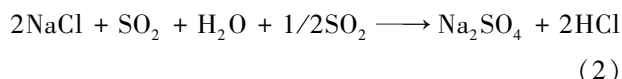
主要原因是含 Na、K 物质易升华、冷凝,高温区 SO<sub>3</sub> 易富集,使得冷凝在受热面的 Na、K 及其氧化物和氢氧化物等黏性物质能够捕捉烟气中的 SO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub> 和飞灰颗粒,并生成 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>。研究表明,烟温是影响高碱煤在炉内沾污、结渣的主要因素<sup>[10]</sup>。



图4 燃用准东煤过热器沾污结渣严重

Fig. 4 Serious fouling and slagging of superheater using Zhundong coal

本文采用吉布斯反应器对碱金属反应进行模拟,模拟出不同气氛和反应温度下的碱金属赋存形式。吉布斯反应器的基本原理为反应物与潜在产物组成的混合物体系在满足物质质量守恒和焓守恒的条件下,混合物的吉布斯自由能取最小值。由于五彩湾准东煤中 K 元素含量极低,因此在进行碱金属化合物的化学反应时,可忽略 K 元素的作用,重点考虑 Na 元素的赋存、转化、迁移。将碱金属反应器模块设为严格化学平衡,定义和 Na 相关的化学反应式如下:



不同气氛下 Na 转化规律如图 5 所示。由图 5 可知,随着烟气沿烟道温度逐渐降低,Na 的赋存形式由 NaCl、NaOH 逐渐转化为 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,此结论与张军等<sup>[11]</sup>研究所得规律相符。当给煤量、氧气流量、绝热火焰温度相同时,与 21% O<sub>2</sub>/79% N<sub>2</sub> 气氛相比,40% O<sub>2</sub>/60% CO<sub>2</sub> 气氛下 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的生成速率更高,富氧燃烧加剧了高碱煤灰的沾污结渣。由于一般富氧燃烧 CO<sub>2</sub> 来自再循环烟气,再循环作用使得碱金属化合物在炉内富集,烟气中碱金属的质量分数增加,颗粒聚团趋势更明显。因此,准东煤在富氧/烟气再循环燃烧下,烟气中 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的质量分数高于模拟工况,燃用准东高碱煤沾污结渣更严重,需掺烧高岭土等克服碱金属迁移所

造成的受热面沾污结渣问题。

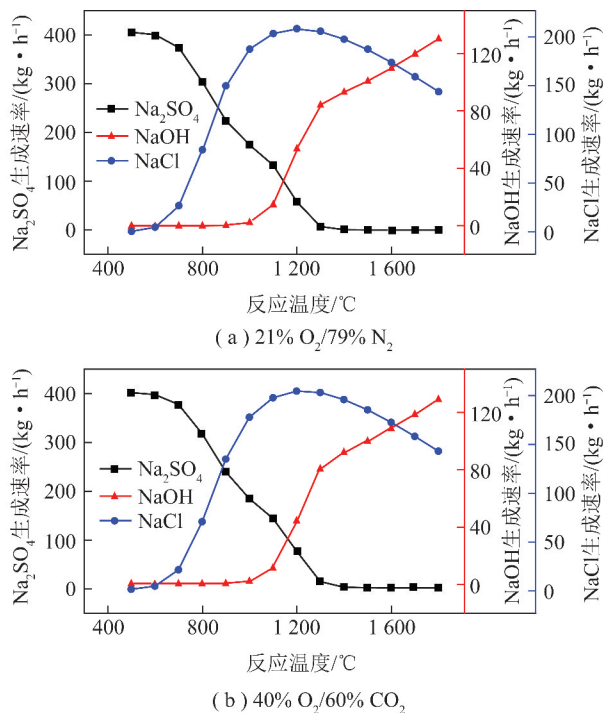


图 5 不同气氛下 Na 转化规律

Fig. 5 Na transformation rule in different atmosphere

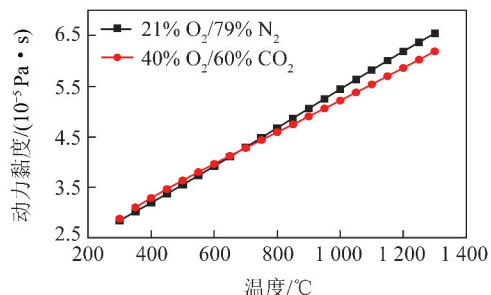
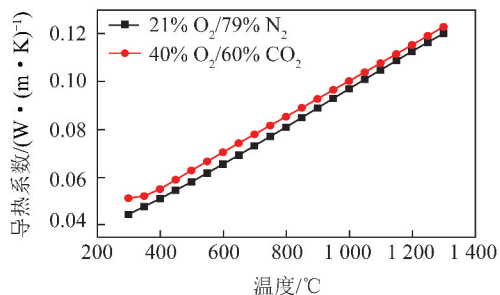
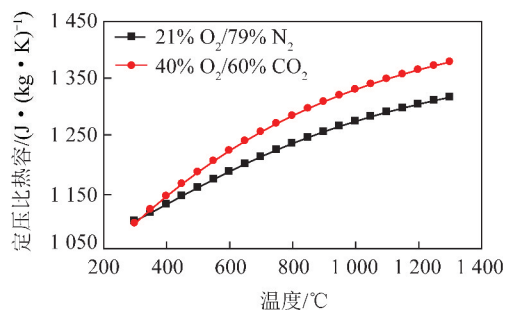
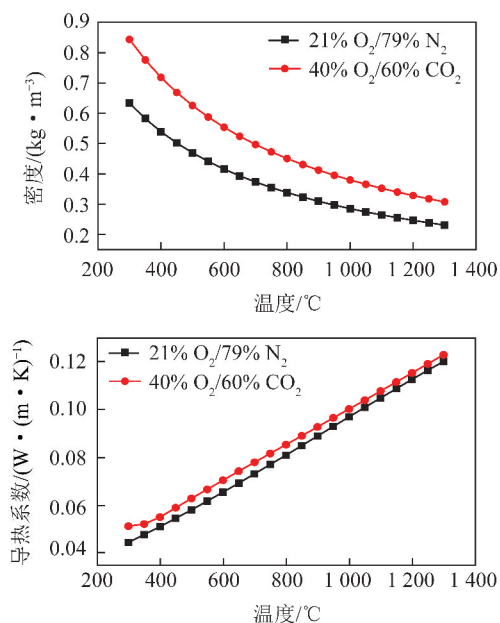


图 6 烟气物性参数与温度的关系

Fig. 6 Relationship between flue gas properties and temperature

## 2 锅炉对流受热面传热性能分析

过热器、再热器、省煤器是燃煤烟气向工质传递热量的主要设备,其主要换热形式为对流换热。在进行锅炉受热面开发时,确定对流受热面的换热量、传热系数和工质温度对于受热面的设计和校核具有重要意义。

## 1.2 燃煤烟气物性参数估算

烟气物性参数是计算对流换热器传热性能的前提。目前工程上广泛采用的《锅炉机组热力计算标准方法》<sup>[12]</sup>是基于理想气体假设,并参考水蒸气摩尔比(水蒸气、CO<sub>2</sub> 摩尔分数分别为 0.11 和 0.13),从而计算得到烟气相关物性参数。由于富氧燃烧烟气与空气燃烧烟气成分差异较大,烟气中水蒸气体积分数较常规空气燃烧时高得多,且 CO<sub>2</sub> 浓度剧增,物性参数发生明显变化。由于经验公式只针对常规燃煤烟气物性参数,在烟气物性修正系数方面只考虑了烟气中水蒸气含量差异,且真实烟气不宜抽象为理想气体<sup>[13]</sup>,故该方法不适用富氧条件下的燃煤烟气。于航<sup>[13]</sup>、马凯等<sup>[14]</sup>采用 Aspen Plus 的 PR-BM(带有 Boston-Mathias  $\alpha$  函数的 Peng Robinson 立方状态方程)模型对燃煤烟气进行物性估算,估算结果与采用实际气体维里方程计算烟气密度、通过焓差修正热容求解烟气定压比热容、采用 Chung 等方法求解烟气动力黏度和导热系数的计算值吻合较好。故本文采用 PR-BM 模型估算出 2 种气氛下燃煤烟气的部分物性参数随温度变化关系,如图 6 所示。

## 2.1 对流受热面传热性能计算

本文以某 315 MW 电站锅炉烟道内对流受热面为研究对象,该烟道由水平烟道和竖井组成,过热器、再热器、省煤器沿烟气流程布置。为确保绝热火焰温度基本一致,使富氧燃烧炉膛温度分布与常规锅炉较吻合,本文采用 40% O<sub>2</sub>/60% CO<sub>2</sub> 作为助燃气氛。在锅炉满负荷运行时,对准东煤在空气和富

氧气氛下燃烧的烟气冲刷换热面的传热性能进行理论计算。富氧燃烧条件下,若维持相同的锅炉整体结构,烟气量减少将导致烟气流速明显下降。为确保在相近流场分布条件下,换热器传热性能更具可比性,在分析不同燃烧气氛下锅炉受热面传热性能时,通过改变烟道截面积使2种工况具有相同的烟气流速和蒸汽入口参数。

茹卡乌斯卡斯针对流体外掠管束的强制对流换热总结了一套适用于较宽普朗特数  $Pr$  变化范围的试验关联式(式6)<sup>[15]</sup>。本文在使用流体外掠管束传热修正关联式对锅炉各对流受热面进行热力计算时,对前人的计算公式进一步修正<sup>[7]</sup>,引入了管排修正因子  $\varepsilon_n$ 、管间距修正因子  $k$  和温压对物性参数影响的物性修正因子  $(Pr_f/Pr_w)^p$ ,对锅炉换热器烟气侧  $Nu$  数进行计算,从而提高了对流传热系数的计算精度。

$$Nu = \varepsilon_n k Re^m Pr^n (Pr_f/Pr_w)^p \quad (6)$$

$$Re = \frac{ud}{\gamma} \quad (7)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (8)$$

$$k = \begin{cases} 0.35 \left( \frac{S_1}{S_2} \right), \frac{S_1}{S_2} < 2 \\ 0.4, \frac{S_1}{S_2} \geq 2 \end{cases} \quad (9)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} = \frac{4a}{9a - 5} \quad (10)$$

$$a = \frac{C_p}{C_v} \quad (11)$$

式中,  $\varepsilon_n$  为管排修正因子,仅适用于管排数目小于16的情况,当管排数目  $\geq 16$  时,默认取1;  $k$  为管间距修正因子,是管排横向节距  $S_1$  与纵向节距  $S_2$  之比的函数;  $u$  为最小截面上的烟气流速, m/s; 上标  $m, n, p$  为经验指数,在本文烟气雷诺数  $Re$  适用范围内 ( $10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^5$ ),  $m = 0.6, n = 0.36, p = 0.25$ ; 下标  $f$  和  $w$  分别表示定性温度取烟气进出口平均温度、烟气侧平均壁温;  $d$  为换热器管外径, m;  $\gamma$  为运动黏度,  $m^2/s$ ;  $\mu$  为动力黏度,  $Pa \cdot s$ ;  $\lambda$  为导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $a$  为比热容比;  $C_p$  为定压比热容,  $kJ/(kg \cdot K)$ ;  $C_v$  为定容比热容,  $kJ/(kg \cdot K)$ 。

根据换热器管排数目查得末级再热器、末级过热器、立式低温过热器、水平低温过热器及省煤器的传热关联式的管排修正因子(假定均为顺排布置)分别为0.992、0.965、0.987、0.987、0.965<sup>[15]</sup>。使用传热修正关联式计算得到2种燃烧气氛下各换热器

管束的烟气侧平均对流传热系数如图7所示。在几何结构、烟气和蒸汽流速相同时,  $O_2/CO_2$  气氛下燃烧准东煤产生的烟气增强了换热器的对流传热性能。由图7可知,烟道内各受热面对流传热系数呈增加趋势,富氧工况对流传热系数为空气工况的1.24~1.27倍,与王鹏等<sup>[16]</sup>、Kakaras等<sup>[6]</sup>、米翠丽等<sup>[7]</sup>研究结果吻合较好。

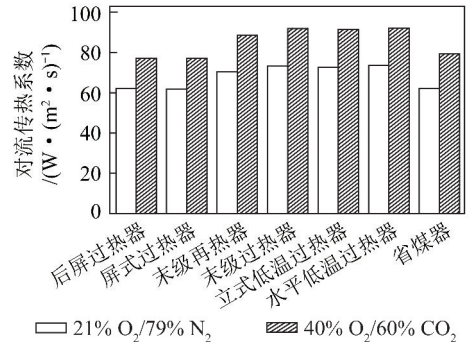


图7 不同燃烧气氛下受热面对流传热系数

Fig. 7 Convection heat transfer coefficient of each heating surface in different combustion atmosphere

## 2.2 高温再热器流固耦合传热数值模拟

采用 Fluent 软件对空气及富氧气氛下高温再热器管屏进行数值模拟,验证传热计算的合理性。在数值模拟中保留了“烟气-管壁-蒸汽”流固耦合传热应考虑的主要因素,忽略次要因素,简化传热问题。传热问题简化假设为:① 换热器工作状态为稳态;② 烟气与蒸汽为定常流动,烟气入口流速均匀分布;③ 烟气、蒸汽为常物性,烟气与蒸汽之间的换热方式为间壁式换热,管壁的热传导为稳态;④ 管壁材料密度、比热容、导热系数设为常数。

高温再热器管屏由7根U形管圈并联组成,圆管直径为  $\phi 63 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ,最外围管圈高度为5.2 m,水平方向长度为1.47 m,总长为12.05 m。沿烟气流动方向,共有14根圆管。该换热器管屏位于水平倾斜烟道内,烟气/蒸汽计算域关于管屏中心截面对称,烟道宽度为0.23 m,为降低管间热偏差采用顺流换热。根据锅炉换热器的结构和运行参数定义边界条件:① 烟气入口设定为速度入口条件,速度为13.5 m/s,进口烟气温度为1217 K;② 蒸汽入口设定为速度入口条件,速度为14 m/s,蒸汽总质量流量为2.47 kg/s,各管圈入口蒸汽质量流量为0.35 kg/s,入口压力为3.791 MPa,入口温度为763 K;③ 管壁材料为310S不锈钢(0Cr25Ni20),热力学边界类型为耦合。

中心剖面烟气/蒸汽速度分布云图如图8所示。烟气冲刷管屏时,烟气由左向右流动,二者中心剖面

烟气流速分布基本一致。由于烟气流道下壁面逐渐向上倾斜,在烟气出口下壁面附近流速较大。当烟气流经蒸汽管道时,管道对烟气侧流场产生扰动,迎风面附近流速小于主流速度。中心剖面烟气/蒸汽温度分布云图如图 9 所示。2 种工况下烟气侧的温度分布较为接近,烟气沿流动方向温度逐渐降低,蒸汽沿流动方向与烟气发生顺流换热,温度逐渐升高。由管屏中心剖面处蒸汽温度分布可以看出常规工况下管内过热蒸汽温度略低于富氧工况。

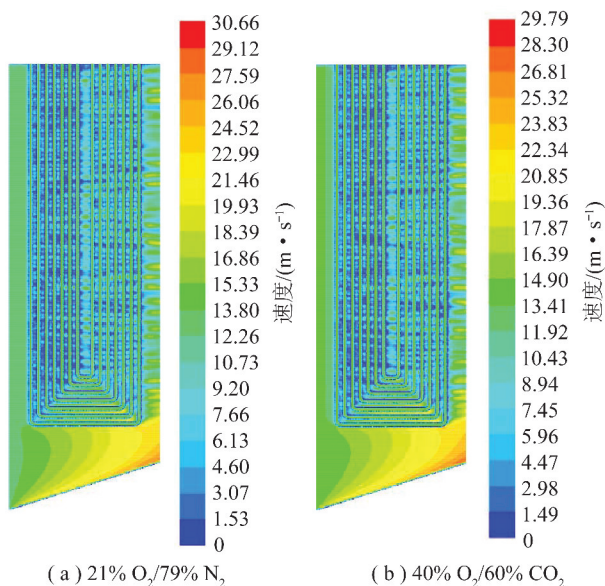


图 8 中心剖面烟气/蒸汽速度分布云图

Fig. 8 Velocity distribution of flue gas and steam on the central profile

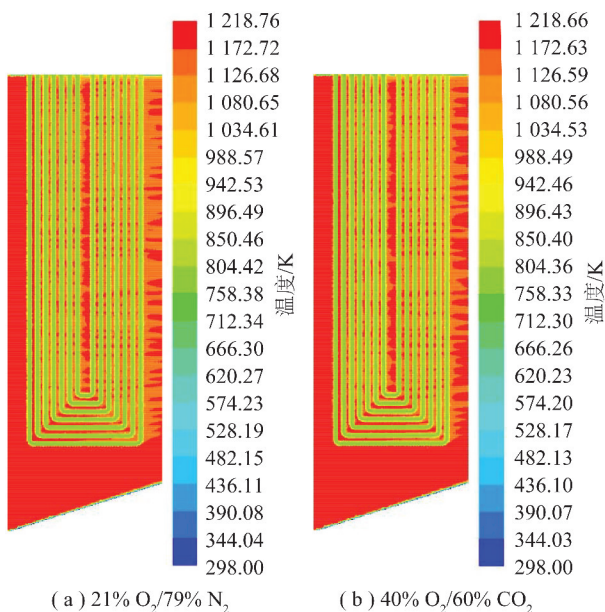


图 9 中心剖面烟气/蒸汽温度分布云图

Fig. 9 Temperature distribution of flue gas and steam on the central profile

由外向内各管圈烟气侧对流传热系数如图 10 所示。

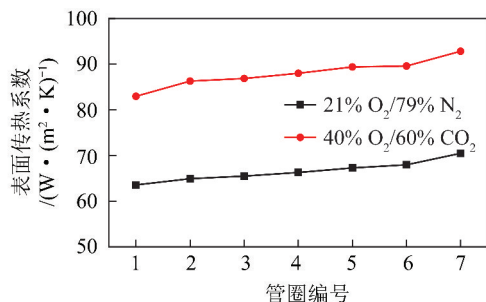


图 10 由外向内各管圈烟气侧对流传热系数

Fig. 10 Convective heat transfer coefficient of flue gas from outward to inner pipe

由图 10 可知,再热器烟气侧对流传热系数的模拟值与理论计算值相对偏差小于 5%,验证了传热计算的合理性。O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 工况下高温再热器管屏各管圈对流传热系数较常规工况,呈现出不同程度的增加,各管圈平均增加 21.43 W/(m<sup>2</sup>·K)。由于最外(内)层管圈附近流通截面变化急剧导致流速变化显著,因此 2 种工况下最外(内)围管圈的对流传热系数起伏较为陡峭。

沿烟气流程各管圈出口蒸汽温度如图 11 所示。可知,沿烟气流动方向各管段出口蒸汽温度逐渐升高,富氧工况蒸汽出口平均温度比常规空气工况高约 11.32 K。富氧燃烧烟气中三原子气体浓度增大,烟气的热容量、导热系数增大,在相同换热量条件下受热面钢材耗量减少,从而有效降低电站初始建设投资。

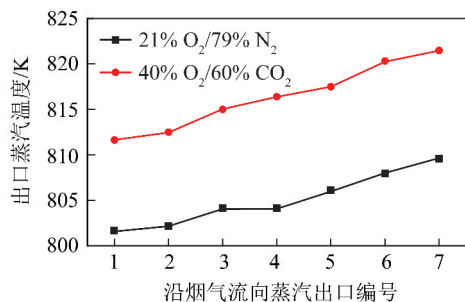


图 11 沿烟气流程各管圈出口蒸汽温度

Fig. 11 Steam temperature at the outlet of each pipe side on each pipe

### 3 结 论

1) 氧燃比一定时,通过调节 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 比例进行变工况分析,得出准东煤在 40% O<sub>2</sub>/60% CO<sub>2</sub> 的气氛下燃烧和常规空气燃烧条件下具有相近的绝热火焰温度,炉膛温度分布相似。

2) 40% O<sub>2</sub>/60% CO<sub>2</sub> 气氛下 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 生成速率

高于 21% O<sub>2</sub>/79% N<sub>2</sub> 气氛。富氧/烟气再循环使碱金属在炉内富集,加剧了准东煤灰沾污结渣行为。随着烟气温度降低,Na 的赋存形式由 NaCl、NaOH 逐渐转化为 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>。

3) 通过控制再热器烟气侧流通截面积使 2 种工况下烟气流速相同,40% O<sub>2</sub>/60% CO<sub>2</sub> 气氛下锅炉烟道内各受热面对流传热系数均不同程度增加,为 21% O<sub>2</sub>/79% N<sub>2</sub> 气氛下的 1.24~1.27 倍。

4) 换热器结构、烟气、蒸汽入口参数相同时,40% O<sub>2</sub>/60% CO<sub>2</sub> 气氛下高温再热器管屏各管圈对流传热系数和 21% O<sub>2</sub>/79% N<sub>2</sub> 气氛下的增加程度不同,平均增加了 21.43 W/(m<sup>2</sup>·K),前者蒸汽出口平均温度较后者高 11.32 K。

### 参考文献 (References):

- [1] 曹阳,林鹏云,罗永浩,等. 燃煤电站锅炉富氧燃烧技术研究进展综述[J]. 锅炉技术,2012,43(1):45-48.  
CAO Yang, LIN Xiyun, LUO Yonghao, et al. Research progress of Oxy-fuel combustion for coal-fired utility boilers[J]. Boiler Technology, 2012, 43(1):45-48.
- [2] ANDERSSON K, JOHNSON F. Process evaluation of an 865 MWe lignite fired O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> power plant[J]. Energy Conversion & Management, 2006, 47(18/19):3487-3498.
- [3] BUHRE B J P, ELLIOTT L K, SHENG C D. Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2005, 31(4):283-307.
- [4] 郑楚光,赵永椿,郭欣. 中国富氧燃烧技术研发进展[J]. 中国电机工程学报,2014,34(23):3856-3864.  
ZHENG Chuguang, ZHAO Yongchun, GUO Xin. Research and development of oxy-fuel combustion in China[J]. Proceedings of CSEE, 2014, 34(23):3856-3864.
- [5] BUHRE B J P, ELLIOTT L K, SHENG C D. Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2005, 31(4):283-307.
- [6] KAKARAS E, KOUMANAKOS A, DOUKELIS A, et al. Oxy-fuel boiler design in a lignite-fired power plant[J]. Fuel, 2007, 86(14):2144-2150.
- [7] 米翠丽,阎维平,李皓宇,等. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 燃烧方式下锅炉对流传热系数的修正算法和数值研究[J]. 动力工程,2009,29(5):417-421.  
MI Cuili, YAN Weiping, LI Haoyu, et al. Modified algorithm and numerical study of boiler convective heat transfer coefficient under O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> combustion mode[J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(5):417-421.
- [8] 易宝军,张立麒,黄芳,等. 不同粒径煤粉在 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下的燃烧特性[J]. 燃烧科学与技术,2013,19(3):248-253.  
YI Baojun, ZHANG Liqi, HUANG Fang, et al. Combustion characteristics of pulverized coal with different particle sizes in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19(3):248-253.
- [9] PEI X, HE B, YAN L, et al. Process simulation of oxy-fuel combustion for a 300 MW pulverized coal-fired power plant using Aspen Plus[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 76:581-587.
- [10] 张翔,乌晓江,陈楠. 新疆高碱煤沾污结渣特性中试试验研究[J]. 锅炉技术,2016,47(4):44-47.  
ZHANG Xiang, WU Xiaojiang, CHEN Nan. Experimental study on Xinjiang High-alkali Ash deposition and slagging behavior in a 2MW<sub>th</sub> Pilot-Scale test facility[J]. Boiler Technology, 2016, 47(4):44-47.
- [11] 张军,汉春利. 煤中碱金属及其在燃烧中的行为[J]. 热能动力工程,1999(2):83-85.  
ZHANG Jun, HAN Chunli. Alkali Metal in Coal and its behavior in Combustion[J]. Thermal Power Engineering, 1999(2):83-85.
- [12] 全苏热工研究所. 锅炉机组热力计算标准方法[M]. 北京: 锅炉厂译. 北京:机械工业出版社,1976:203.
- [13] 于航. 富氧燃烧条件下锅炉对流受热面动态特性研究[D]. 北京:华北电力大学,2014:18-20.
- [14] 马凯,阎维平,高正阳. 增压富氧燃烧烟气物性及对流传热系数的研究[J]. 动力工程学报,2011,31(11):861-868.  
MA Kai, YAN Weiping, GAO Zhengyang. Physical properties and convective heat-transfer coefficients of flue gas from pressurized oxy-fuel combustion[J]. Journal of Power Engineering, 2011, 31(11):861-868.
- [15] 茹卡乌斯卡斯 A A. 换热器内的对流换热[M]. 马昌文,居滋全,肖宏才译. 北京:科学出版社,1986:337-370.
- [16] 王鹏,柳朝晖,廖海燕,等. 200 MW 富氧燃煤锅炉传热特性研究[J]. 动力工程学报,2014,34(7):507-511.  
WANG Peng, LIU Zhaohui, LIAO Haiyan, et al. Study on heat-transfer characteristics of a 200 MW oxy-fuel coal-fired boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(7):507-511.