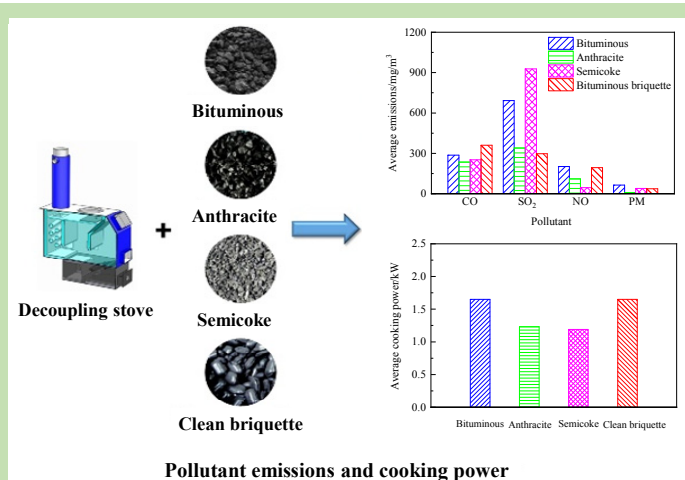


# Experimental study on the combustion of typical coal fuels in domestic decoupling stoves

Jian HAN<sup>1,2</sup>, Xinhua LIU<sup>1\*</sup>, Jingdong HE<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Multiphase Complicated Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. School of Chemical Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China

**Abstract:** Burning bituminous coal, anthracite or semicoke in traditional domestic coal-fired stoves generally suffers from low thermal efficiency and large pollutant emissions, thus causing serious environmental problems. Decoupling combustion technology invented by the Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences combines the advantages of both traditional updraft and downdraft combustion modes, which can be used to suppress the emissions of multiple pollutants simultaneously and realize high-efficiency heating and cooking. In this work, in order to clarify the



adaptability of domestic decoupling stoves to various civil coal fuels, the pollutant emissions and cooking power of a tested domestic decoupling stove were experimentally investigated by burning several kinds of civil coal fuels such as bituminous lump coal, anthracite lump coal, lump semicoke and bituminous briquettes. Further, the characteristic size of bituminous briquettes was optimized according to the pollutant emissions and cooking power of the tested domestic decoupling stove. The experimental results indicated that the decoupling combustion could facilitate the simultaneous suppression of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and carbon monoxide (CO) emissions because of the unique stove structure and draft type, as well as the reduction of sulfur oxide (SO<sub>2</sub>) and particulate matter (PM) by using clean briquettes from bituminous coal as the fuels. Briquette size had significant effects on the pollutant emissions of domestic decoupling stoves. With burning bituminous briquettes with optimized sizes in domestic decoupling stoves, the average NO, SO<sub>2</sub>, CO and PM emission concentrations at the baseline oxygen content of 9vol% were lower than 190, 300, 380 and 30 mg/m<sup>3</sup> respectively, and the cooking power was high up to 1.65 kW.

**Keywords:** decoupling stove; coal combustion; pollutant emission; cooking power

收稿: 2019-07-17, 修回: 2019-10-12, 网络发表: 2019-11-11, Received: 2019-07-17, Revised: 2019-10-12, Published online: 2019-11-11

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项(编号: XDA21040400)

作者简介: 韩健(1993-), 男, 辽宁省辽阳县人, 博士研究生, 化学工程专业, E-mail: hanjian@ipe.ac.cn; 刘新华, 通讯联系人, E-mail: xhliu@ipe.ac.cn.

**引用格式:** 韩健, 刘新华, 何京东. 典型煤炭燃料在民用解耦炉中的燃烧实验研究. 过程工程学报, 2020, 20(6): 728-736.

Han J, Liu X H, He J D. Experimental study on the combustion of typical coal fuels in domestic decoupling stoves (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(6): 728-736, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219258.

# 典型煤炭燃料在民用解耦炉中的燃烧实验研究

韩健<sup>1,2</sup>, 刘新华<sup>1\*</sup>, 何京东<sup>3</sup>

1. 中国科学院过程工程研究所多相复杂系统国家重点实验室, 北京 100190

2. 中国科学院大学化学工程学院, 北京 100049

3. 中国科学院, 北京 100864

**摘要:** 实验对比研究了烟煤块状半焦及烟煤型煤等煤炭燃料在民用解耦炉中燃烧时的污染物排放特性和炊事能力, 并基于解耦测试炉对烟煤型煤的特征尺寸进行优化, 验证了解耦炉具对不同种类民用煤炭燃料的适应性。结果表明, 民用解耦燃煤炉特有的结构特征和通风方式有利于  $\text{NO}_x$  和  $\text{CO}$  的同时减排。若在解耦炉中燃烧烟煤洁净型煤, 可进一步实现对  $\text{SO}_2$  和颗粒物(PM)的有效控制。型煤尺寸对炉具污染物排放影响显著, 尺寸优化后的烟煤洁净型煤在解耦炉中稳定燃烧时  $\text{NO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$  和 PM 的平均排放浓度按基准氧含量 9vol%折算后, 分别低于 190, 300, 380 和 30  $\text{mg/m}^3$ , 炊事功率可达 1.65 kW。

**关键词:** 解耦炉具; 煤燃烧; 污染物排放; 炊事功率

中图分类号: TQ534

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2020)06-0728-09

## 1 前言

我国民用燃煤所消耗的煤炭虽仅占煤炭终端消耗量的约 10%, 但其排放的污染物却占燃煤污染物排放总量的 30%~50%<sup>[1]</sup>, 是造成北方地区冬季严重灰霾天气的重要原因之一<sup>[2-4]</sup>。受资源、地理、经济、习惯等条件限制, 许多地区无法实现大规模煤改气/电<sup>[5-7]</sup>, 因此, 使用高效环保民用燃煤炉在未来一段时间内仍是满足城郊或农村偏远地区居民冬季取暖的经济有效的途径<sup>[8]</sup>。

传统民用燃煤炉的质量与性能参差不齐, 热效率低、污染物排放量大, 且普遍存在燃料性质与炉具设计不匹配问题<sup>[1]</sup>。常用的民用煤炭燃料包括烟煤、无烟煤及半焦(或兰炭)等。烟煤具有资源丰富、价格低廉、易于着火、火力强度大等优点, 但在传统直燃炉中燃烧易冒烟, 在反烧炉中燃烧时  $\text{NO}_x$  排放量较高。无烟煤和半焦类燃料主要用于正烧直燃类炉具, 但火力强度不足, 且价格较高、难于点火和燃尽, 不利于民用<sup>[9,10]</sup>。

解耦燃烧技术通过使煤炭先后经历热解区低温还原条件下煤炭热解过程及燃烧区高温氧化条件下热解气和半焦的燃烧与燃尽过程, 从而利用还原性热解气和高温半焦抑制  $\text{NO}_x$  的生成或还原已生成的  $\text{NO}_x$ , 通过再燃方式大幅减少烟煤燃烧时  $\text{CO}$  和黑烟的排放<sup>[11-15]</sup>。由于充分利用了高温半焦对  $\text{NO}_x$  的还原性, 解耦燃烧技术也适用于无烟煤或兰炭等低挥发分燃料的高效低氮燃烧。若利用烟煤制成洁净型煤与高效环保解耦炉具匹配使用, 可兼顾在传统正/反烧炉中燃烧中、低挥发分燃料的优点, 实现对包括  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  和颗粒物(PM)等多污

染物的同时控制, 并实现高效取暖和炊事<sup>[16-19]</sup>。

本工作通过在一种典型民用解耦暖炊炉中燃烧块状烟煤、无烟煤和半焦, 测试了炉具的综合污染物排放和炊事功率, 验证了解耦炉对目前市场上典型煤炭燃料的适应性。通过燃烧不同尺寸的烟煤型煤, 对适用于典型民用解耦炉具的型煤尺寸进行优选。

## 2 实验

实验使用的燃料为烟煤、无烟煤、半焦 3 种典型块煤及两种烟煤型煤 A 和 B。各种燃料的相关性质如表 1 所示。其中型煤 A 是以表 1 中的烟煤块煤为原料, 经破碎加压成型后制得的椭球形烟煤型煤, 共 3 种尺寸。型煤 B 为椭球形改性烟煤洁净型煤(兖矿集团有限公司)。表中尺寸数据  $a \times b \times c$  分别为椭球体三个轴的长度。

实验研究在自行搭建的解耦燃烧综合实验平台上进行, 该平台由 10 kW 解耦暖炊两用测试炉系统、AO2020 型在线烟气分析系统[ABB(中国)有限公司]和计算机数据自动采集与控制系统组成, 具体参考文献[17]。经改进的 3012H 型自动烟尘测试仪(青岛崂应环境科技有限公司)测试烟气中颗粒物浓度。解耦暖炊两用炉典型结构见图 1, 中隔墙将炉膛分为左侧的挥发分燃烧区(8)和右侧及其下部的煤炭热解及半焦燃烧区(3)。洁净型煤从上方加煤口(1)加入并自由堆积于热解区内, 空气从下方炉排(5)引入。在热解区中下部和燃烧区火口处分别设置调节风 I(4)和 II(7), 灵活调节各区域进风量。在高温燃烧区和低温热解区之间设置炊事区(10), 通过移动调节挡板(11)的位置实现炊事/供暖模式切换。

表 1 煤炭燃料性质  
Table 1 Properties of coal fuels

Fuel type	Fuel size/mm	Proximate analysis (Ar)/wt%				Ultimate analysis (Ar)/wt%					Low calorific value (Ar)/(MJ/kg)
		Moisture	Volatile	Fixed carbon	Ash	C	H	O	N	S	
Bituminous lump coal	10~30	4.01	39.26	44.20	12.53	68.24	4.52	8.79	1.34	0.57	28.27
Anthracite lump coal	10~30	2.53	7.21	80.88	9.38	81.73	2.78	2.00	1.26	0.32	31.10
Lump semicoke	10~30	2.49	8.46	65.50	23.55	71.74	0.64	0.32	0.78	0.48	23.86
Briquette A	Small	2.43	39.42	44.73	13.42	67.91	4.65	9.84	1.31	0.44	27.72
	Medium										
	Large										
Briquette B	45×35×20	1.45	33.26	42.39	22.90	61.27	3.91	8.87	1.17	0.43	23.27

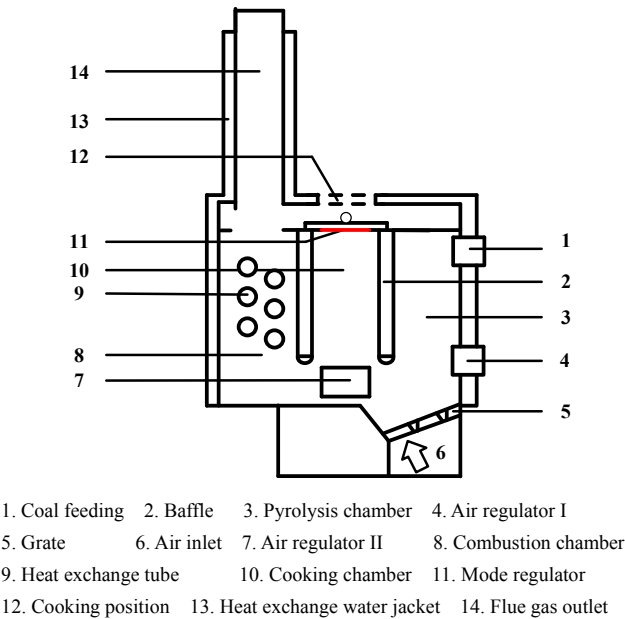


图 1 民用解耦暖炊炉典型结构示意图

Fig.1 Typical structural diagram of civil decoupling and cooking heating stove

由于煤炭层燃烧过程中燃料型 NO 排放量超过了 NO<sub>x</sub> 总生成量的 90%<sup>[20]</sup>, 因此本研究中利用 NO 的生成和排放情况表征 NO<sub>x</sub> 的生成和排放。通过合理配风调节测试炉在额定功率状态下稳定运行, 在烟囱高度约 1 m 处测量污染物排放。烟气中的 O<sub>2</sub>, NO, SO<sub>2</sub> 和 CO 等气体的浓度均采用 AO2020 型烟气分析仪在线分析, PM 浓度用改进的 3012H 型烟尘测试仪采样离线分析。所有污染物排放浓度数据均按基准氧含量 9vol% 进行折算, 使不同工况数据之间具有可比性。

炉具的炊事功率采用标准民用水暖炉热性能实验方法测试<sup>[21]</sup>。调节挡板切换至炊事模式, 将盛有 3 kg 水的铝制水壶放置在炉具炊事台上进行炊事操作, 直至水沸腾, 炊事功率可计算为

$$P_{\text{cooking}} = \frac{3 \times 4.18 \times (T_{\text{cooking}} - T_{\text{initial}})}{t_{\text{cooking}}} \quad (1)$$

式中,  $P_{\text{cooking}}$  为炊事功率(kW),  $T_{\text{cooking}}$  为沸腾水温(℃),  $T_{\text{initial}}$  为初始水温(℃),  $t_{\text{cooking}}$  为水沸腾所需时间(s)。

3 结果与讨论

3.1 不同种类块煤燃烧时污染物排放及炊事功率

通过在解耦炉中燃烧烟煤块煤、无烟煤块煤和块状半焦三种燃料考察解耦炉对目前市场上典型煤炭燃料的适应性。图 2 为三种块煤稳定燃烧时污染物的排放量。

无烟煤和半焦在传统正/反烧炉中燃烧时容易因氧气不足而生成大量 CO, 其排放浓度甚至高于 10000 mg/m<sup>3</sup><sup>[22,23]</sup>。如图 2(a)所示, CO 排放浓度因受燃烧火口区域氧气浓度和温度变化的影响在一定范围内波动, 但三种块煤在解耦炉内燃烧时的 CO 平均排放浓度均低于 300 mg/m<sup>3</sup>, 远优于相关行业标准<sup>[1]</sup>。这是由于解耦炉特有的倾斜炉排结构可在保证燃烧火口区域温度足够高的情况下使该处供风充足, 从而使包括 CO 在内的可燃物充分燃尽<sup>[15,17]</sup>。

由图 2(b)可知, 三种燃料在解耦炉中燃烧时, 半焦的平均 SO<sub>2</sub> 排放浓度最高, 烟煤次之, 无烟煤最低。通常情况下, 煤炭燃烧时 SO<sub>2</sub> 排放量与其硫含量直接相关<sup>[24]</sup>, 但煤灰的自固硫作用使烟煤和无烟煤燃烧时平均 SO<sub>2</sub> 排放浓度均低于其理论排放浓度<sup>[25,26]</sup>。虽然半焦的硫含量介于烟煤和无烟煤之间, 但其燃烧时平均 SO<sub>2</sub> 排放浓度最高, 可能是由于半焦在生产制备过程中比表面积和孔隙度显著增大, 空气可较容易地进入半焦内部, 接触面积增加从而增强半焦燃烧反应活性和反应速率, 导致半焦燃烧时局部温度过高, 促进了硫的释放<sup>[27-29]</sup>。实验表明, 烟煤燃烧时核心区焦炭层平均温度约 1000 ℃, 而半焦燃烧时核心区焦炭层平均温度可达 1100~1200 ℃, 进一步促进半焦燃烧时硫向 SO<sub>2</sub> 的转化。

无烟煤和半焦燃烧时平均 NO 排放浓度分别低至约 100 和 50 mg/m<sup>3</sup>, 而烟煤燃烧时平均 NO 排放浓度约为 200 mg/m<sup>3</sup>。一方面是因为无烟煤和半焦的氮含量比烟煤低; 另一方面是因为无烟煤和半焦具有较高的碳含

量,有利于形成稳定的半焦层,而解耦炉的倾斜炉排结构及下部通风的方式可使部分半焦燃烧烟气在热解室形成涡状流动,进而与热解气混合并一同穿过半焦层,从而充分利用还原性热解气和高温半抑制NO的生成或

还原已生成的NO<sup>[16,17]</sup>。所以,解耦炉在燃烧三种不同种类的煤炭时NO的排放均显著降低。与传统正/反烧炉相比,解耦炉在燃用不同种类的典型民用煤炭燃料时,均可实现NO<sub>x</sub>和CO的同时大幅减排。

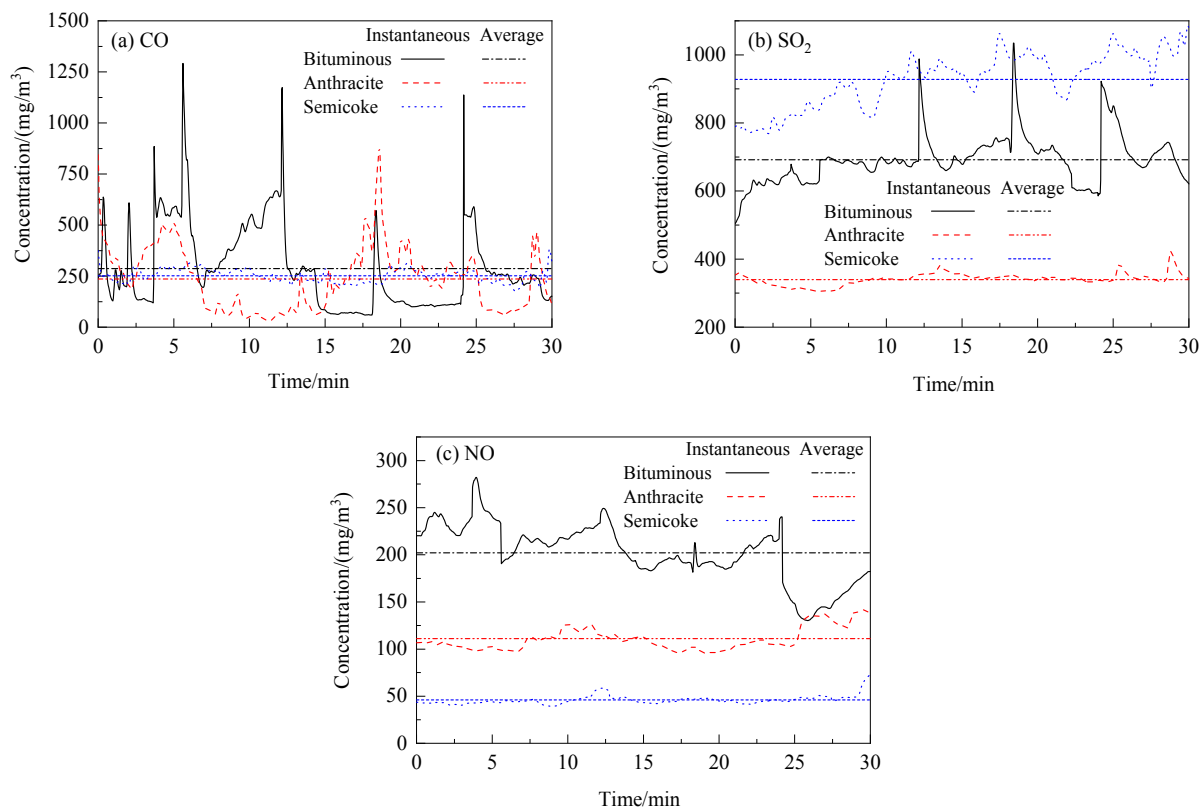


图2 三种块煤解耦燃烧稳定时污染物排放浓度的变化

Fig.2 Changes of pollutant emission concentrations during the stable decoupling combustion of three kinds of lump coals

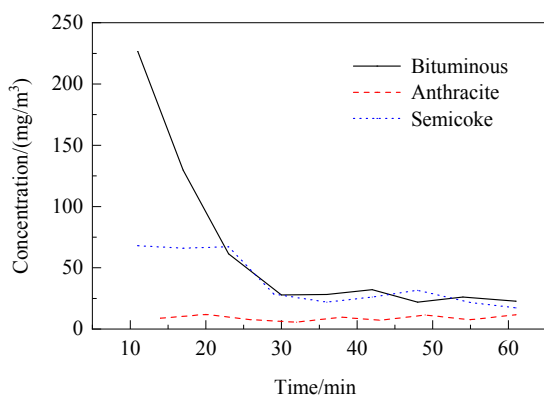


图3 三种块煤燃烧时颗粒物排放浓度的变化

Fig.3 Changes of particulate matter emission concentrations during combustion of three kinds of lump coals

图3为不同种类块煤在解耦炉中燃烧时的颗粒物排放浓度变化。烟煤的挥发分含量高达39.26wt%,其燃烧初期释放的颗粒物浓度较高。但约30min后,其稳定燃烧时颗粒物排放浓度下降,并与半焦燃烧时的颗粒物排

放浓度相近,均低至约30mg/m<sup>3</sup>。无烟煤的挥发分含量只有7.21vol%,燃烧速度也很慢,在解耦炉中燃烧时颗粒物排放浓度始终保持在较低水平,一般不超过10mg/m<sup>3</sup>。半焦的挥发分含量也只有8.46vol%,但其燃烧初期仍会有少量颗粒物生成,原因是其热值相对较低,炭粒、烟黑等可燃物在燃烧初期未能完全燃烧所致,燃烧达到相对稳定的状态后,其颗粒物排放浓度即可下降至较低水平。可能是因为民用解耦炉具的多炉膛结构使烟气在炉内多回程流动,且稳定的半焦层对热解气及部分循环烟气起到一定过滤效果,因而对不同种类煤炭燃料燃烧时颗粒物排放均具有较好的减排效果。

根据实验测试结果并按式(1)计算,三种块煤稳定燃烧时的炊事功率如图4所示。无烟煤和半焦的挥发分含量较低,火焰较短,主要靠辐射给水壶传递热量,水壶底部区域温度一般不高于650℃,因而火力强度相对较小,稳定燃烧时平均炊事功率约为1.2kW。烟煤由于其燃烧速率高、挥发分含量大,水壶底部区域温度可达

750℃以上,火焰较长并可与锅底充分接触,因而火力强度较大,稳定燃烧时平均炊事功率可达1.65 kW。

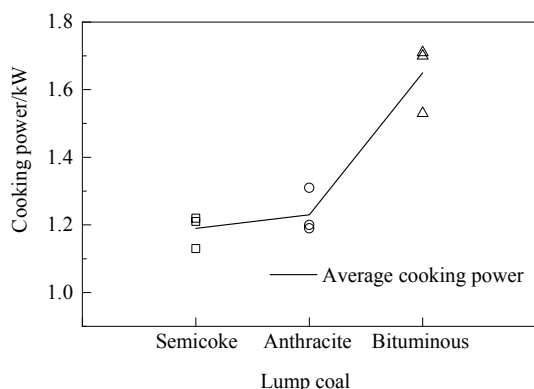


图4 三种块煤稳定燃烧时的炊事功率

Fig.4 Cooking power during the stable combustion of three kinds of lump coals

以上研究表明,解耦炉通过合理的结构优化和换热面设计,在燃烧不同种类的块状煤炭燃料时可高效供暖,且在切换到炊事状态时,其功率也可达到传统正烧炉的水平,满足相关行业标准所规定的不同燃料燃烧时的炊事功率要求<sup>[1]</sup>。

### 3.2 不同尺寸烟煤型煤燃烧时污染物排放及炊事功率

以表1中的烟煤为原料加压成型制得三种不同尺寸的椭球型烟煤型煤A,并以此为燃料在测试炉上进行实验。由于型煤尺寸不同,因而其在炉膛内自由堆积时的空隙率有差别。如尺寸为55 mm×35 mm×15 mm和40 mm×25 mm×15 mm的两种椭球形型煤在解耦炉内的自由填充空隙率分别为0.51和0.46<sup>[30]</sup>。型煤尺寸越小,自由堆积空隙率就越小,虽然有利于燃尽,但会显著增加气体流动阻力,降低自然通风效果,并进一步对民用解耦炉的污染物排放和炊事功率产生影响。

如图5(a)所示,小号型煤A(35 mm×20 mm×15 mm)在炉内堆积紧密,空隙率较小,炉内通风阻力相对较大,半焦不完全燃烧导致CO生成量增大,且CO燃烧相对不充分,导致燃烧时平均CO排放浓度略高。当型煤尺寸增大时,燃烧中号型煤A(40 mm×25 mm×15 mm)时,炉内通风阻力减小,有助于CO燃尽,平均CO排放浓度可降至400 mg/m<sup>3</sup>以下。但当燃烧大号型煤A(55 mm×35 mm×15 mm)时,火口区域温度随过量新鲜空气的进入而显著下降,甚至低于CO的燃点使其不能有效燃尽,此时平均CO出口浓度略有上升。

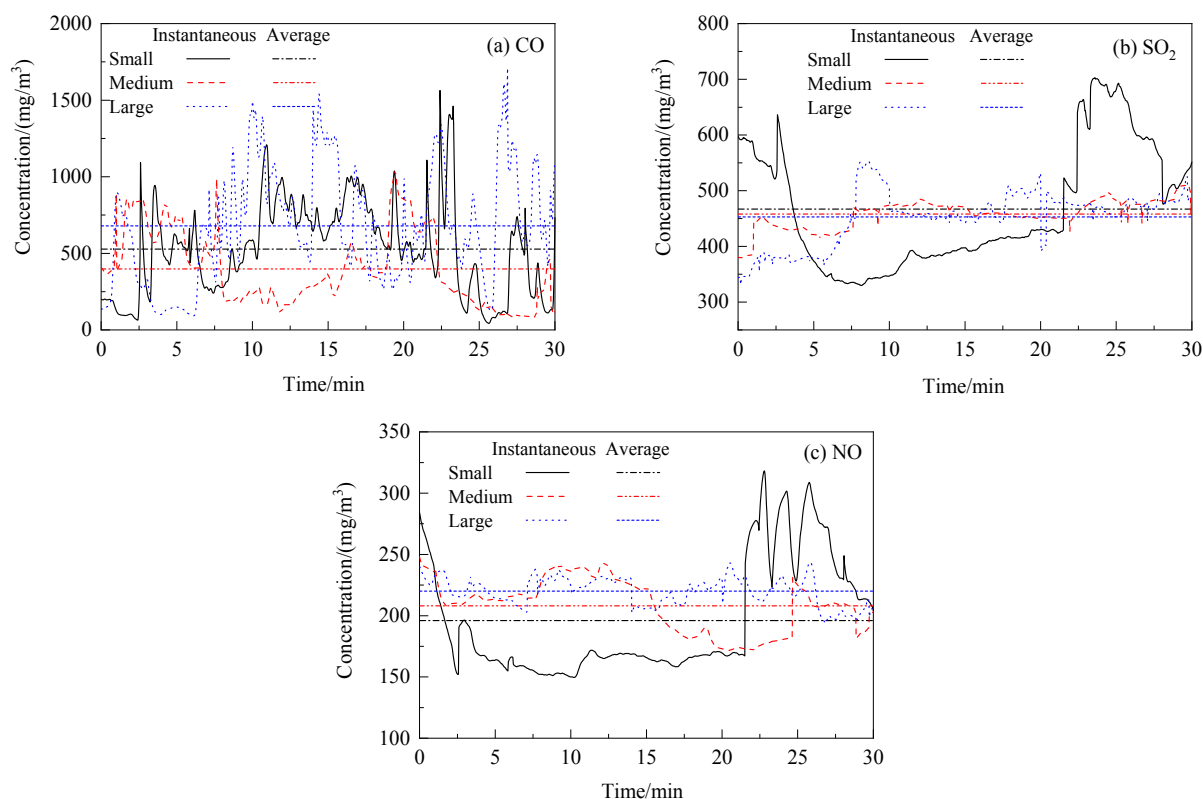


图5 型煤尺寸对污染物排放浓度的影响

Fig.5 Effects of briquette sizes on pollutant emission concentrations



由于型煤 A 中混入了一定量的固硫剂, 所以相对于烟煤块煤在解耦炉中的燃烧, 三种尺寸的烟煤型煤 A 燃烧时的  $\text{SO}_2$  排放浓度均显著降低, 如图 5(b) 所示。随型煤 A 尺寸增大, 过量的空气可能进入炉内造成炉内温度下降, 炉内还原气氛随之减弱, 导致平均  $\text{NO}$  排放浓度随型煤尺寸增大而略有上升<sup>[31,32]</sup> [图 5(c)], 但平均  $\text{SO}_2$  排放浓度稍有降低<sup>[33]</sup>。

图 6 是不同尺寸烟煤型煤 A 在解耦炉中燃烧时颗粒物排放浓度的变化。小号型煤 A 由于堆积比较紧密, 通风不良, 导致炭黑等可燃物燃烧不完全, 与另外两种尺寸较大的烟煤型煤 A 的燃烧相比, 颗粒物排放浓度相对较高<sup>[34]</sup>。与中号型煤 A 相比, 大号型煤 A 颗粒物排放浓度并无明显下降。与烟煤块煤在解耦炉中燃烧时相比, 不同尺寸型煤 A 燃烧时颗粒物排放浓度在起火阶段显著降低, 在稳定燃烧阶段也略有降低, 表明将烟煤制成型煤再燃烧有利于固灰降尘。

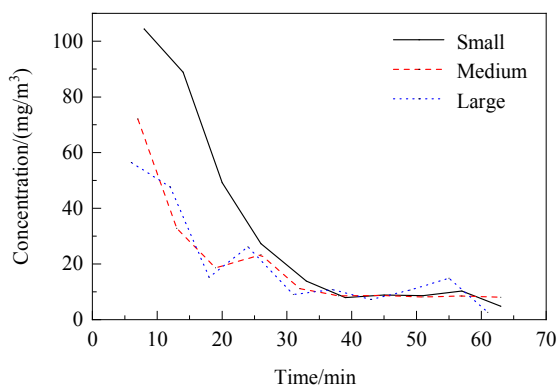


图 6 三种尺寸的型煤 A 燃烧时颗粒物排放浓度的变化  
Fig.6 Changes of particulate matter emission concentrations during combustion of three sizes of briquette coal A

三种尺寸烟煤型煤 A 在解耦炉中稳定燃烧时的炊事功率如图 7 所示。小号型煤 A 因其在炉内堆积紧密, 散热不良, 尽管热值略低于块状烟煤, 但炉内平均温度和水壶底部区域温度均有所升高, 有利于增强烟气与水壶间的传热, 导致炊事功率相对较高。因此, 实验测得的炊事功率随型煤 A 尺寸增大而略有下降, 但三种尺寸的型煤 A 在解耦炉内燃烧时的平均炊事功率均接近甚至高于 1.60 kW。

### 3.3 典型烟煤洁净型煤燃烧时污染物排放及炊事功率

以上实验结果表明, 型煤尺寸会影响其在解耦炉中燃烧时的综合污染物排放和热工性能。型煤尺寸较小时, 炉内通风阻力较大, 不利于  $\text{CO}$ 、 $\text{SO}_2$  和颗粒物的减排; 而型煤尺寸过大, 则会对  $\text{NO}$  的减排和热工性能产生不利影响。因而, 通过综合比较与尺寸优选, 兖矿集

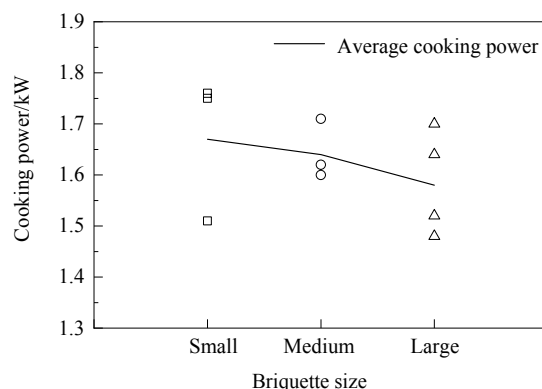


图 7 三种尺寸的型煤 A 稳定燃烧时的炊事功率  
Fig.7 Cooking power during the stable combustion of three sizes of briquette coal A

团有限公司优化出用于大规模推广应用示范的椭球型改性烟煤洁净型煤 B (45 mm×35 mm×20 mm), 其尺寸处于中、大号型煤 A 尺寸之间。

由于烟煤在正烧炉中燃烧时极易产生黑烟, 为验证解耦炉的优越性, 本研究将洁净型煤 B 分别在解耦模式 (Decoupling mode) 和反烧模式 (Downdraft mode) 下进行对比燃烧实验。解耦燃烧的操作和配风方式见 2.2 节所述, 反烧实验在相同测试炉中模拟进行。打开测试炉加煤口, 关闭图 1 中所示的原进风口 6 的所有风门, 使空气从热解室顶部进入炉内后依次穿过煤炭热解和半焦燃烧层, 最后在烟囱拔力作用下流出。

图 8 为洁净型煤 B 在两种模式下稳定燃烧时的污染物排放浓度对比。如图 8(a) 所示, 洁净型煤 B 在解耦暖炊炉中稳定燃烧时平均  $\text{CO}$  排放浓度低于 380  $\text{mg/m}^3$ , 平均  $\text{SO}_2$  排放浓度低于 300  $\text{mg/m}^3$ , 平均  $\text{NO}$  排放浓度约为 190  $\text{mg/m}^3$ 。由图 8(b) 可知, 洁净型煤 B 在反烧模式下稳定燃烧时平均  $\text{CO}$  排放浓度约为 627  $\text{mg/m}^3$ , 平均  $\text{SO}_2$  排放浓度高于 400  $\text{mg/m}^3$ , 平均  $\text{NO}$  排放浓度约为 260  $\text{mg/m}^3$ 。在反烧模式下, 炉内气体很难在热解室形成涡状循环以有效激活  $\text{NO}_x$  的两种还原机制, 造成燃烧室下方火口区域  $\text{O}_2$  供应相对不足而导致  $\text{CO}$  燃烧不充分, 同时炉内的局部高温也影响了洁净型煤中固硫剂的固硫效果。

为进一步考察不同燃烧方式下颗粒物的减排效果, 分别测量了解耦炉中以解耦模式和反烧模式燃烧洁净型煤 B 时的烟气颗粒物浓度, 并对比了相同功率下传统正烧炉中燃烧洁净型煤 B 时的颗粒物排放。如图 9 所示, 正烧模式 (Updraft mode) 因直燃直排导致挥发分及炭黑等可燃性物质未经充分燃烧便直接排放, 点火初期颗粒物浓度约为 471  $\text{mg/m}^3$ , 稳定燃烧时颗粒物排放浓度约为 50  $\text{mg/m}^3$ 。

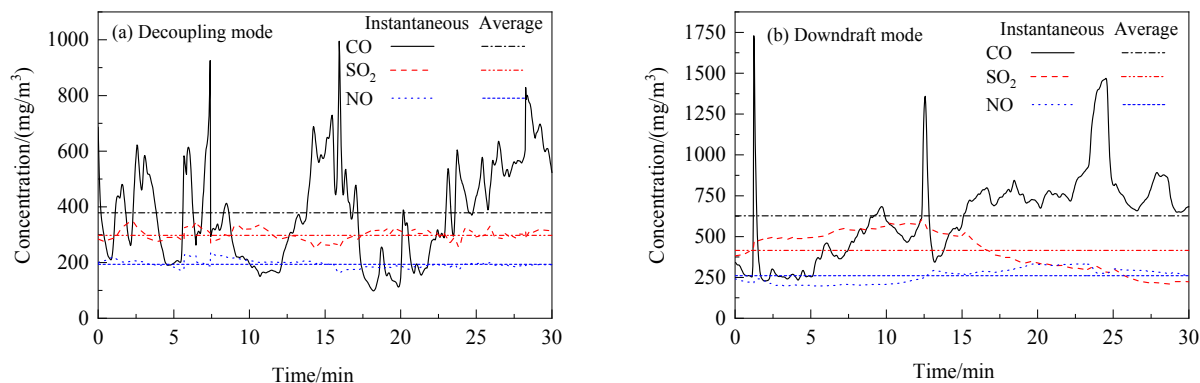


图8 洁净型煤B在解耦模式和反烧模式下稳定燃烧时的污染物排放浓度的变化

Fig.8 Changes of pollutant emission concentrations of clean briquette coal B during the stable combustion in decoupling mode and downdraft mode

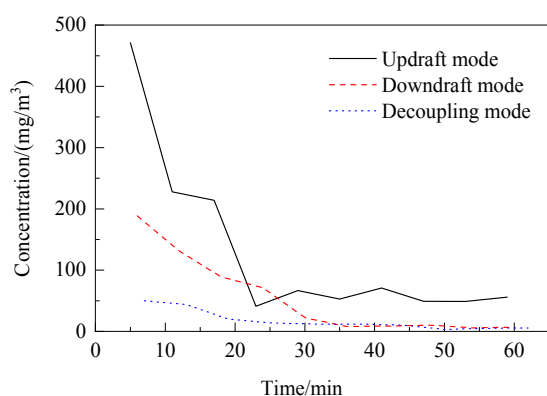


图9 洁净型煤B在不同燃烧模式下颗粒物排放浓度变化

Fig.9 Changes of particulate matter emission concentrations of clean briquette coal B in different combustion modes

表2 洁净型煤B在不同燃烧模式下的取暖功率和炊事功率  
Table 2 Heating and cooking power of clean briquette coal B in different combustion modes

Combustion mode	Heating power/kW	Cooking power/kW
Decoupling mode	12.6	1.65
Downdraft mode	10.5	1.10

在模拟反烧模式下,从热解室上部进入的空气需下行与下部的焦炭层反应并穿透焦炭层后才能与包括CO在内的可燃物混合燃烧,这虽然解决了燃烧烟煤产生黑烟的问题,但大量由半焦不完全燃烧产生的气固可燃物由于后期氧气不足而依然无法完全燃烧,因此在反烧模式初期,颗粒物排放浓度依然较高。在解耦燃烧模式下,空气从底部倾斜炉排进入炉内后,部分空气、半焦烟气及热解气在热解区内形成涡状循环后再穿过半焦层,这样不仅有效消除黑烟,而且保证燃烧区可燃物的充分燃烧,因此解耦燃烧在从开始点火到稳定燃烧阶段的颗粒物排放浓度都处于较低水平。反烧模式后期的颗粒物排放浓度与解耦燃烧相当,均低于 $30 \text{ mg/m}^3$ ,这是由于二

者均利用了半焦层对烟尘的过滤作用。由于大量可燃物在反烧模式下依旧燃烧不充分,因此反烧模式下的有效供暖功率及炊事功率相比于解耦燃烧模式均明显降低。表2为洁净型煤B在不同燃烧模式下取暖功率和炊事功率的实验测试情况。实验结果表明,解耦燃烧的取暖功率及炊事功率均远优于反烧模式。

以上结果表明,优选后的充矿改性烟煤洁净型煤B与民用解耦炉匹配使用,可获得较好的综合污染物减排效果和热工性能,同时可满足广大用户的供暖与炊事需求。

## 4 结论

通过对典型煤炭燃料在民用解耦炉内燃烧时的污染物排放特性和炊事功率进行实验对比研究,并基于解耦测试炉对烟煤型煤的特征尺寸进行优化,得到以下结论:

(1) 解耦燃烧对烟煤、无烟煤和半焦等典型民用煤炭燃料均具有较好的适应性,可同时实现 $\text{NO}_x$ 和CO的大幅减排。

(2) 燃烧型煤有利于固硫降尘,但型煤尺寸会影响炉具的污染物排放和热工性能,本研究中的中号型煤A在解耦炉中燃烧时的污染物排放和炊事功率综合效果最优。

(3) 在解耦炉中燃烧优选出的改性洁净烟煤型煤B, $\text{NO}_x$ ,CO及 $\text{SO}_2$ 等污染物的排放相对于传统反烧显著降低,同时还可提供良好的炊事能力。

## 参考文献

- [1] 中国农村能源行业协会炉具专业委员会. 中国供暖炉具行业发展报告2016[R]. 北京: 北京华媒至信文化发展有限公司, 2016: 8-35.

Stove Professional Committee of the China Association of Rural

- Energy Industry. Report on the development of heating stoves [R]. Beijing: Beijing Huamei Zhixin Cultural Development Co., Ltd., 2016: 8–35.
- [2] 霍沫霖, 赵佳, 徐朝, 等. 中国散烧煤消费地图及影响因素研究 [J]. 中国电力, 2017, 50(1): 1–8.  
Huo M L, Zhao J, Xu Z, et al. China scattered coal consumption map and influence factors [J]. Electric Power, 2017, 50(1): 1–8.
- [3] 毛健雄, 毛健全, 赵树民. 煤的清洁燃烧 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 8–13.  
Mao J X, Mao J Q, Zhao S M. Clean combustion of coal [M]. Beijing: Science Press, 1998: 8–13.
- [4] Li Q, Jiang J K, Qi J, et al. Improving the energy efficiency of stoves to reduce pollutant emissions from household solid fuel combustion in China [J]. Environment Science Technology Letter, 2016, (3): 369–374.
- [5] 刘虹. “煤改气”工程, 且行且慎重—基于北京市“煤改气”工程的调研分析 [J]. 宏观经济研究, 2015, (4): 9–13.  
Liu H. The project of coal to gas, be cautious—based on the investigation and analysis of the project of coal to gas in Beijing city [J]. Macroeconomic Research, 2015, (4): 9–13.
- [6] 刘江涛, 高慧明, 刘建伟, 等. 北京市农村“煤改气”燃气供应相关技术研究 [J]. 煤气与热力, 2016, 36(9): 27–32.  
Liu J T, Gao H M, Liu J W, et al. Study on related technologies of gas supply for coal to gas in rural area of Beijing city [J]. Gas & Heat, 2016, 36(9): 27–32.
- [7] 刘艳茹, 杨卫红, 王基, 等. “煤改气”工程实施前后农网负荷特性分析 [J]. 电气技术, 2017, (4): 110–115.  
Liu Y R, Yang W H, Wang J, et al. Load characteristic analysis of rural network before and after the coal-to-electricity project [J]. Electrical Engineering, 2017, (4): 110–115.
- [8] 程芳琴, 彭皓, 吴海滨, 等. 小型家用炉技术现状及检测评价方法 [J]. 洁净煤技术, 2017, 24(1): 19–25.  
Cheng F Q, Peng H, Wu H B, et al. Performance evaluation and technical status of the small coal furnace [J]. Clean Coal Technology, 2017, 24(1): 19–25.
- [9] 许传凯, 许云松. 我国低挥发分煤燃烧技术的发展 [J]. 热力发电, 2001, (5): 2–6.  
Xu C K, Xu Y S. Development of combustion technology for low volatile coals in China [J]. Thermal Power Generation, 2001, (5): 2–6.
- [10] 张锦萍, 王长安, 贾晓威, 等. 半焦-烟煤混燃特性及动力学分析 [J]. 化工学报, 2018, 69(8): 3611–3618.  
Zhang J P, Wang C A, Jia X W, et al. Co-combustion characteristics and kinetic analysis of semi-coke and bituminous coal [J]. CIESC Journal, 2018, 69(8): 3611–3618.
- [11] 李静海, 许光文, 杨励丹, 等. 一种抑制氮氧化物的无烟燃煤方法及燃煤炉: CN 95102081.1 [P]. 1995–10–25.  
Li J H, Xu G W, Yang L D, et al. A  $\text{NO}_x$ -suppressed smokeless coal-fired method as well as corresponding stove: CN 95102081.1 [P]. 1995–10–25.
- [12] 徐有宁. 抑制氮氧化物无烟燃煤技术及其应用 [D]. 北京: 中国科学院化工冶金研究所, 2000: 41–43.  
Xu Y N.  $\text{NO}_x$ -suppressed and smokeless coal combustion technology and its application [D]. Beijing: Institute of Chemical Metallurgy, Chinese Academy of Sciences, 2000: 41–43.
- [13] He J D, Song W L, Gao S Q, et al. Experimental study of the reduction mechanisms of  $\text{NO}$  emission in decoupling combustion [J]. Fuel Processing Technology, 2006, 87: 803–810.
- [14] 何京东. 煤炭解耦燃烧  $\text{NO}$  抑制机理实验研究 [D]. 北京: 中国科学院过程工程研究所, 2006: 66–70.  
He J D. Experimental study of the reduction mechanisms on  $\text{NO}$  emission in decoupling combustion of coal [D]. Beijing: Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2006: 66–70.
- [15] 刘新华, 郝江平, 张楠, 等. 一种解耦燃烧装置及燃烧方法: CN 2017105112563.2 [P]. 2017–06–29.  
Liu X H, Hao J P, Zhang N, et al. A decoupling combustion appliance as well as decoupling combustion method: CN 2017105112563.2 [P]. 2017–06–29.
- [16] Li H L, Han J, Zhang N, et al. Effects of high-temperature char layer and pyrolysis gas on  $\text{NO}_x$  reduction in a typical decoupling combustion coal-fired stoves [J]. Journal of Thermal Sciences, 2019, 28(1): 40–50.
- [17] 韩健, 刘新华, 何京东, 等. 民用解耦燃煤炉中的  $\text{NO}_x$  和  $\text{CO}$  同时减排 [J]. 化工学报, 2019, 70(5): 1990–1997.  
Han J, Liu X H, He J D, et al. Simultaneous reduction of  $\text{NO}_x$  and  $\text{CO}$  emissions in domestic decoupling coal-fired stoves [J]. CIESC Journal, 2019, 70(5): 1990–1997.
- [18] 李虹麟. 民用解耦燃煤炉的数值模拟 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018: 39–44.  
Li H L. Numerical simulation of domestic coal-fired stoves [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018: 39–44.
- [19] 刘新华, 韩健, 张楠, 等. 中国分散式民用供热技术现状 [J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 401–408.  
Liu X H, Han J, Zhang N, et al. Status of decentralized civil heating technology in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 401–408.
- [20] Burchill P, Welch L S. Variation of nitrogen content and functionality with rank for some UK bituminous coals [J]. Fuel, 1989, 68(1): 100–104.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 民用水暖煤炉热性能试验方法: GB/T 16155-2005 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1–6.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for heating performance of civil water heating coal stove: GB/T 16155-2005 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 1–6.
- [22] 张鑫. 兰炭代替无烟煤高效清洁利用的研究 [J]. 洁净煤技术, 2015, 21(3): 103–106.  
Zhang X. Feasibility on semicoke substitute for anthracite in energy conservation on emissions reduction [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(3): 103–106.
- [23] 侯吉礼, 尚文智, 刘军利, 等. 兰炭(半焦)替代原煤清洁燃烧的排放对比研究 [J]. 煤炭技术, 2016, 35(8): 287–289.  
Hou J L, Shang W Z, Liu J L, et al. Comparison of emission from lantan (semi-coke) instead of raw coal for clean and efficient combustion [J]. Coal Technology, 2016, 35(8): 287–289.
- [24] 郝吉明, 王书肖, 陆永琪. 燃煤二氧化硫污染控制技术手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 104–111.  
Hao J M, Wang S X, Lu Y Q. Handbook of sulfur dioxide pollution control in coal combustion [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 104–111.
- [25] Karaca S. Desulfurization of a Turkish lignite at various gas atmospheres by pyrolysis effect of mineral matter [J]. Fuel, 2003, 82(12): 1509–1516.
- [26] 景晓霞, 常丽萍. 矿物质对煤中硫氮在热解气化过程中迁移变



- 化的催化作用 [J]. 工业催化, 2004, 12(10): 13–17.
- Jing X X, Chang L P. The catalytic effects of minerals in coal on transition of nitrogen and sulfur during coal pyrolysis and gasification [J]. Industrial Catalysis, 2004, 12(10): 13–17.
- [27] 陈鹏, 杜文广, 杨颂, 等. 煤基清洁燃料替代民用散烧原煤的研究进展 [J]. 现代化工, 2017, 37(6): 48–52.
- Chen P, Du W G, Yang S, et al. Research progress on coal-based clean fuels replacing civil scattered burning coal [J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(6): 48–52.
- [28] Tian J, Ni H Y, Han Y M, et al. Primary PM<sub>2.5</sub> and trace gas emissions from residential coal combustion: assessing semi-coke briquette for emission reduction in the Beijing–Tianjin–Hebei region, China [J]. Atmospheric Environment, 2018, 191: 378–386.
- [29] 杜文广. 民用洁净焦炭制备和煤气组成调制关键技术研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2017: 53.
- Du W G. Study on the key technologies for the preparation of civil clean coke and adjustment of coke oven gas composition [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017: 53.
- [30] 张楠. 民用解耦燃煤炉型煤堆积研究报告 [Internal Report]. 2018.
- Zhang N. Report on briquette accumulation in domestic decoupling coal-fired stoves [Internal Report]. 2018.
- [31] 王正华, 周昊, 池作和, 等. 不同煤种高温燃烧时 NO<sub>x</sub> 排放特性的沿程分析 [J]. 电站系统工程, 2003, 19(2): 19–20.
- Wang Z H, Zhou H, Chi Z H, et al. Study on the formation of NO<sub>x</sub> along boiler with different coal in HT combustion [J]. Power System Engineering, 2003, 19(2): 19–20.
- [32] Garijo E G, Jensen A D, Glarborg P. Reactivity of coal char in reducing NO [J]. Combustion and Flame, 2004, 136(3): 249–252.
- [33] 刘军强, 李瑞扬. 型煤燃烧全硫析出规律的试验研究 [J]. 节能技术, 2004, 22(5): 10–11.
- Liu J Q, Li R Y. Experimental study on the release of sulfur in the combustion of mould coal [J]. Energy Conservation Technology, 2004, 22(5): 10–11.
- [34] Li Q, Jiang J K, Zhang Q, et al. Influences of coal size, volatile matter content, and additive on primary particulate matter emissions from household stove combustion [J]. Fuel, 2016, 182: 780–787.