

# 小型家用炉技术现状及检测评价方法

程芳琴<sup>1,2</sup>, 彭皓<sup>1,2</sup>, 吴海滨<sup>1,3</sup>, 贾阳杰<sup>1,3</sup>, 杨凤玲<sup>1,2</sup>

(1. 山西大学 资源与环境工程研究所, 山西 太原 030006; 2. 国家环境保护煤炭废弃物资源化高效利用技术重点实验室, 山西 太原 030006; 3. 山西瑞恩泽科技有限公司, 山西 太原 030006)

**摘要:**为解决当前家用炉烟尘排放量大,热效率低,燃烧不完全等问题,论述了国内外小型燃煤采暖炉的结构、研究现状、应用情况及污染物评价方法。结合目前北方小型城镇和农村居民的生活习惯及经济情况,设计了NQ-18C民用采暖炉,并进行了NQ-18C小型采暖炉与市售普通型煤锅炉燃烧效果对比和污染物排放试验。结果表明,正常运行下,NQ-18C小型采暖炉供热能力是普通锅炉的1.89倍,热效率大于65%,排烟温度200℃,炉飞灰、炉渣含碳量6.4%,符合GB/T 16155—2005要求。在燃烧环保型煤时,NQ-18C小型采暖炉中SO<sub>2</sub>排放浓度小于200×10<sup>-6</sup>、NO<sub>x</sub>浓度小于300×10<sup>-6</sup>,燃烧效率高,可安全稳定运行。设计的NQ-18C环保节能型采暖炉能够抑制NO<sub>x</sub>生成、消除烟黑排放。

**关键词:**小型家用炉;炉膛结构;性能评价;烟气分析;环保节能

中图分类号:TK229.6 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2018)01-0019-07

## Performance evaluation and technical status of the small coal furnace

CHENG Fangqin<sup>1,2</sup>, PENG Hao<sup>1,2</sup>, WU Haibin<sup>1,3</sup>, JIA Yangjie<sup>1,3</sup>, YANG Fengling<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Resources and Environment Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Efficient Utilization Technology of Coal Waste Resources, Taiyuan 030006, China; 3. Shanxi Rui En Ze Technology Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** In order to solve problems from coal furnace like high pollution emissions, low thermal efficiency and incomplete combustion, the structure, research status, application and pollutant evaluation methods of small coal furnace at home and abroad were studied. In view of the current living habits and economic conditions of small towns and rural residents in northern China, a kind of environment-friendly coal furnace (NQ-18C) was designed, which was compared with ordinary boilers in combustion efficiency and pollutant emission. The results show that the heating capacity of NQ-18C is 1.89 times of that of ordinary boiler, the thermal efficiency is over 65%, the temperature of exhaust gas is 200℃, the fly ash and slag carbon content is 6.4%, which conforms to the national standard GB/T 16155—2005. When burning environment-friendly coal, SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions are less than 200×10<sup>-6</sup> and 300×10<sup>-6</sup> respectively with high combustion efficiency and safe and stable operation. NQ-18C can suppress NO<sub>x</sub> and eliminates black smoke emissions.

**Key words:** small coal furnace; furnace structure; performance evaluation; flue gas analysis; environmental protection and energy saving

## 0 引言

我国能源结构和经济发展情况决定了燃煤中小型锅炉将长期存在。城市主要采用集中供热,而涉及面广的北方小城镇和农村受经济、地理条件、生活

习惯限制还无法实现集中供暖<sup>[1]</sup>,采用小型民用煤炉进行家庭供暖及炊事是居民经济可承受的选择。但由于缺乏有效的技术和环保标准,现有的中小型燃煤锅炉热效率低,污染严重,燃烧产生的SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>污染环境,无法满足环保要求。近年来新设计的正

收稿日期:2017-12-19;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2018.01.004

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0211401);山西省科技重大专项资助项目(MD2015-05);国家科技惠民计划资助项目(2012GSI40202)

作者简介:程芳琴(1964—),女,山西临猗人,教授,从事煤洁净燃烧方向研究。E-mail:cfangqin@sxu.edu.cn

引用格式: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,2018,24(1):19-25.

CHENG Fangqin, PENG Hao, WU Haibin, et al. Performance evaluation and technical status of the small coal furnace[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(1): 19-25.

烧炉型也只考虑热效率,对污染物排放要求低,随着环保要求的日益严格,如何提高燃煤炉的燃烧效率,减少燃煤炉污染物排放,成为提高空气质量,解决民生问题的关键。降低污染物排放必须加强原料煤控制和使用洁净燃烧设备。针对燃煤,本课题组已研制出洁净环保型煤,可有效降低煤燃烧过程中污染物的排放。因此,下一步应设计优化小型家用炊暖两用炉,通过改变炉膛结构来降低污染物排放成为本文研究的重点。

## 1 国内外小型家用炊暖两用炉现状

### 1.1 国外小型家用炊暖两用炉

由于资源分布不同,国外对家用煤炉的研究较少,仅有少量用于野炊但无法取暖的小型炉灶。煤炭资源丰富的南非对小型炉灶进行了一些研究,主要是燃烧原理和烟气中粉尘、炭黑排放。Pemberton-pigott 等<sup>[2]</sup>提出了自上而下的上点火方式的简易炉设计,并在此基础上,设计出一种带有空气预热器的小型炉,同时提出了排放因子衡量燃烧性能的方法。通过燃烧比较,表明该结构炉具有节能减排效果,提高了南非的能源使用效率,改善了空气质量;约翰内斯堡大学的 Setar 中心研制出一系列下吸式燃烧煤炉(BLDD),解决 imbaula 炉存在的点火阶

段烟气排量大、CO 排放高、燃烧不充分、燃烧效率低等问题<sup>[3]</sup>。以上都是针对燃烧效率、CO 和烟尘进行的相关研究,鲜见小型煤炉烟气中污染物排放和炊暖两用炉的研究报道。

### 1.2 国内小型家用炊暖两用炉

国内容量较大的燃煤锅炉有较好的技术条件和管理措施进行烟气治理,而中小型燃煤锅炉的问题比较复杂,污染严重。王智展等<sup>[4]</sup>改进家用炉的燃烧热效率为 40% 左右。强福德等<sup>[5]</sup>研制的家用炊事水暖煤炉的燃烧热效率为 57% 左右。徐有宁等<sup>[6]</sup>研究了中小型煤炉燃烧情况,认为煤燃烧过程中降低  $\text{NO}_x$  排放需要低温缺氧条件,而降低烟黑的排放需要高温条件,因此,同时降低这 2 种产物排放有一定难度。何京东<sup>[7]</sup>、路春美等<sup>[8]</sup>研究了中型多功能解耦燃煤炉不同通风部位对  $\text{NO}_x$  和 CO 排放的影响,认为在煤气发生区和底部同时通风得到的烟气排放环保综合结果最佳,并提出了适于中小型燃煤锅炉低  $\text{NO}_x$  燃烧的解耦燃烧技术和热解气再燃烧技术<sup>[9]</sup>,设计了小型民用炉,消烟效果较好。集消烟、环保、能效为一体的小型两用炉鲜有报道,小型炉由于炉膛小,采用低氮燃烧设计还较少,处在示范阶段,没有大规模应用。目前国内几种炉型结构如图 1 所示。

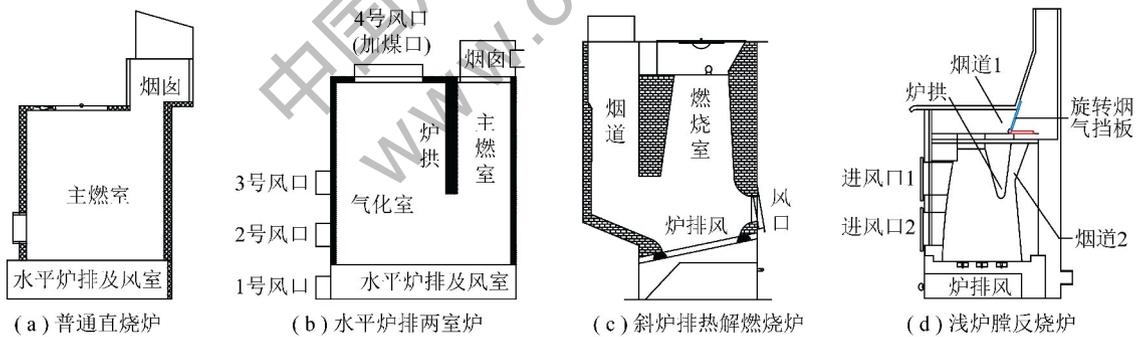


图 1 现有国内炉子结构

Fig. 1 Structure of coal furnace in China

### 1.3 国内新型环保小型炉的研究

随着环保形势的日益严峻,我国工业企业实现超低排放重点逐渐转向燃煤散烧污染物排放。近两年我国小型民用锅炉技术发展较快,市场流通的民用锅炉主要是炊暖两用反烧炉,其结构不断优化。设计改造锅炉炉膛与锅炉配风系统可大幅降低锅炉烟气污染物排放,提高锅炉热效率。锅炉由炉膛主体、烟道、水套构成,锅炉设置有正烧与逆向燃烧切换盖板,当使用炊事功能时,将盖板切换至正烧方

式;取暖过程中采用逆向燃烧,煤经干馏进入焦炭还原层充分燃烧后,烟气经换热水套流入烟箱,利用分级燃烧的原理,可以大幅降低污染物排放,提高锅炉热效率。烟道采用双回程烟道,具有较好的消烟效果,解决了锅炉以型煤为原料稳定燃烧产生的污染问题,起火时间较短,但起火初期会有烟尘排出。

针对起火阶段的冒烟问题,课题组将相变换热技术引入小型燃煤锅炉,设计的无烟相变锅炉采用逆向燃烧技术。锅炉中填充以换热效率较高的相变

材料,进行相变储热放热,在锅炉燃烧稳定过程中,将锅炉燃烧化学热量传递给相变材料,再由相变材料传递于水中进行流动散热。在炉膛内燃烧不稳定的起火阶段,相变材料储存的热量可以传递至炉膛,稳定炉膛内部燃烧,增加环保性能,即使用烟煤作为原料,燃烧污染物排放也能达到环保要求。

## 2 中小型炉燃煤方式及污染物排放限值

### 2.1 燃烧方式

煤炭燃烧过程非常复杂,分为煤干燥、煤热解、煤燃烧及气渣分离等阶段<sup>[10]</sup>,包括化学反应放热、燃料运动及传热传质、能量转化等物理化学过程。国外学者对我国黑碳排放量进行估算,认为燃煤排放的黑碳占全部排放量的52%,其中87%来自于家用燃煤<sup>[11]</sup>。陈建华等<sup>[12]</sup>通过问卷调查、台架试验、卫星片解析等方法研究了北京市民用小煤炉污染物排放特征,认为污染物年排放量由大到小的顺序为 $CO > C_m H_n > SO_2 > TSP > NO_x$ ,小煤炉排放 $PM_{10}$ 占TSP的比例为44%, $PM_{2.5}$ 占 $PM_{10}$ 的比例为32%。因此,民用小煤炉CO排放量极高。小煤炉污染源不

容忽视。不同工艺下,煤燃烧生成的产物不同,主要有 $CO_2$ 、 $SO_2$ 、水蒸气等<sup>[13]</sup>。对于大中型锅炉来说,不同燃烧方式燃烧粉煤的 $NO_x$ 排放情况见表1<sup>[10]</sup>。

表1 不同燃烧方式污染物排放

Table 1 Pollutant discharge of different combustion modes

燃烧方式	$NO_x$ 排放浓度/ $10^{-6}$
传统燃烧	400 ~ 600
空气分级燃烧	300 ~ 500
热解气再燃烧	200 ~ 400
部分气化气再燃烧	150 ~ 300
解耦燃烧	100 ~ 200

### 2.2 燃煤污染物排放限制

欧盟部分国家燃煤锅炉排放限值及型煤锅炉排放限值见表2。

目前国内大多数锅炉执行GB 13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》(表3),但对于小型炊暖炉还没有相应的标准,目前仅从燃煤原料进行控制,以解决小型燃煤锅炉的污染问题。

表2 欧盟部分国家燃煤锅炉排放限值

Table 2 Emission standard of pollutant discharge for coal-burning boiler in some EU members

国家	规模/MW	氧含量/%	$NO_x$ 排放值/ $(mg \cdot m^{-3})$		$SO_2$ 排放值/ $(mg \cdot m^{-3})$		PM 排放值/ $(mg \cdot m^{-3})$	
			低值	高值	低值	高值	低值	高值
法国	20 ~ 50	6	450	650	850	2 000	50	100
	<4	6	550	825	2 000	—	150	—
	4 ~ 10	6	550	825	2 000	—	100	—
芬兰	>10	6	550	825	2 000	—	100	—
	1 ~ 50	6	275	550	1 100	1 100	55	140
	<2.5	7	300	500	350	1 300	50	—
德国	<5	7	300	500	350	1 300	50	—
	>5	7	300	500	350	1 300	20	—
	>10	7	300	400	350	1 300	20	—
	型煤锅炉	7	198	—	44	—	18	—

表3 我国燃煤锅炉排放限值

Table 3 Emission standard of pollutant discharge for coal-burning boiler in China

项目	基准氧含量/%	$NO_x$ 排放值/ $(mg \cdot m^{-3})$		$SO_2$ 排放值/ $(mg \cdot m^{-3})$		PM 排放值/ $(mg \cdot m^{-3})$	
		低值	高值	低值	高值	低值	高值
在用锅炉	9	≤400	—	≤400	≤550	≤80	—
新建锅炉	9	≤300	—	≤300	—	≤50	—
特别地区锅炉	9	≤200	—	≤200	—	≤30	—

注:高值适用于广西壮族自治区、重庆市、四川省和贵州省等地区的燃煤锅炉。

### 3 小型家用炊暖炉热力及污染物评价方法

#### 3.1 热效率评价

国内锅炉标准都是针对大中型锅炉,小型家用炉由于价低、面广关注较少,如清华大学吴爱贞等<sup>[14]</sup>建立了家庭两用煤炉热效率试验方法,考虑建筑物热耗系数,规定了试验平台的标准规格,但还存在底火无法控制问题,影响了测试效果。现有产品都依照 GB/T 16154—2005《民用水暖煤炉通用技术条件》、GB/T 16155—2005《民用水暖煤炉热性能试验方法》进行生产和热性能试验;安红萍等<sup>[15]</sup>采用以上标准方法对民用炉进行试验考察,建立一套完善考察系统。

对于市场流通的额定供热量小于 50 kW 的水暖煤炉应满足 GB/T 16154—2005,规定了不带炊事与带炊事锅炉的热性能,包括热效率、封火能力、上火速度、炊事火力强度等指标(表 4)。

表 4 民用水暖煤炉热性能指标

Table 4 Calorific properties standard of coal furnace

指标	不具炊事功能	具有炊事功能
额定供热量	不小于标称值	不小于标称值
热效率/%	≥60	≥60
封火能力	≥10 h,封火后应能正常燃烧	
上火速度/(℃·min <sup>-1</sup> )	—	≥0.6
炊事火力强度/kW	—	≥0.7
排烟处空气过量系数	—	—
排烟温度	—	—
炉渣残碳量	—	—

##### 1) 上火速度

上火速度计算公式为

$$v_1 = \frac{T_{Cl} - T_{C0}}{9(t_1 - t_0)} \quad (1)$$

式中, $v_1$  为上火速度,℃/min; $T_{Cl}$  为锅水升至沸点的温度,℃; $T_{C0}$  为锅水起始温度,℃; $t_1$  为锅水温度升至沸点的时间,min; $t_0$  为锅水起始时间,min。

##### 2) 炊事火力强度

炊事火力强度计算公式为

$$P_c = \frac{(G_{C1} - G_{C2})r}{9(t_2 - t_1)} \quad (2)$$

式中, $P_c$  为炊事火力强度,kW; $G_{C1}$  为蒸发锅内初始水量,kg; $G_{C2}$  为蒸发停止后剩余锅水量,kg; $r$  为锅水在平均蒸发温度状态的平均汽化潜热,kJ/kg; $t_2$  为锅水蒸发停止的时间,min。

##### 3) 采暖火力强度

为了验证锅炉的采暖效果,进行了采暖火力强度试验,以  $P_n$  表示,计算公式为

$$P_n = \frac{G_{n2}(T_{n2} - T_{j2}) \times 4.18}{3\ 600} \quad (3)$$

式中, $G_{n2}$  为采暖火力强度试验期间总出水量,kg; $T_{n2}$  为平均出水温度,℃; $T_{j2}$  为平均进水温度,℃。

##### 4) 热效率

热效率计算公式为

$$\eta = \frac{G_{n2}(T_{n2} - T_{j2})150 \times 4.18}{G_r Q_{net,ar}} \quad (4)$$

式中, $\eta$  为热效率,%; $G_r$  为试验期间燃料消耗量,kg。

### 3.2 小型家用燃煤炉烟气评价方法

#### 3.2.1 国外小型家用燃煤炉评价方法

南非采用德国德图公司生产的 Testo-350XL 便携式烟气分析仪测量锅炉出口烟气排放浓度。其燃烧效果好坏参照 SABS 标准(CO 浓度 $\leq 3\ 800 \times 10^{-6}$ , CO 和 CO<sub>2</sub> 体积比 $\leq 2\%$ )。评价炉子燃烧性能时引入排放因子(EF)。排放因子至少考虑 2 种气体(CO 和 O<sub>2</sub>),以过量空气系数(EA)来修正 CO 的排放因子(CO<sub>EF</sub>)。

$$EA = [\varphi(O_2) + 1/2\varphi(CO)] / \{209\ 500 - [\varphi(O_2) + 1/2\varphi(CO)]\} \times 100\% \quad (5)$$

式中, $\varphi(O_2)$ 、 $\varphi(CO)$  为 O<sub>2</sub> 和 CO 的体积分数, $10^{-6}$ 。

$$\lambda = EA + 100\% \quad (6)$$

$$CO_{EF} = \lambda\varphi(CO) \quad (7)$$

式中, $\lambda$  为 Lambda 系数。

由于烟气瞬态的空气稀释对 EF 没影响,在稀释因素相对稳定,仪器响应时间大致相同的条件下,排放测试结果具有可比性,代表了燃烧过程本身。 $\lambda$  也可用于在同一时间烟气中其他气体和微粒的排放因子的计算。

#### 3.2.2 国内小型家用燃煤炉评价方法

烟气检测参照 GB 13271—2004《锅炉大气污染物排放标准》规定,在线检测烟气中的 O<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、NO、NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 含量。为解决空气稀释对烟气浓度的影响,国内引入 EA 评价炉子燃烧性能。排放因子考虑氧气浓度 O<sub>2</sub>,然后以 EA 和理论空气过量系数来修正 CO<sub>EF</sub>。

实测过量空气系数为

$$EA_a = 21 / (21 - O_2 \text{ 测量值}) \quad (8)$$

理论空气过量系数

$$EA_1 = 21 / (21 - O_2 \text{ 基准值}) \quad (9)$$

式中,  $O_2$  基准值根据炉型和燃料确定, 空气过量系数为 1.8 时,  $O_2$  基准浓度为 9.33%; GB 13271—2014 中空气过量系数为 1.8 时,  $O_2$  基准浓度为 9%。

污染物排放浓度折算值

$$\rho = \rho' EA_a / EA_1 \quad (10)$$

式中,  $\rho'$  为污染物排放实测值。

由于小型燃煤炉 CO 排放量大, 为大型锅炉的 10 倍, 对  $SO_2$ 、 $NO_x$  的检测影响较大, 无法比较。因此该方法不适用于小型锅炉, 需通过优化找到可行的方法。

## 4 小型家用炊暖两用炉评价试验

### 4.1 炉型结构及设计原则

针对小型炉炉膛小、煤量少及型煤挥发分低、型块强度高、难以燃尽等实际问题, 根据北方小城镇和农村居民的用火炊暖生活习惯及家庭经济条件, 结合洁净燃烧原理, 设计了新型环保 NQ-18C 小型炊暖炉。煤层在炉内缺氧的情况下干馏热解, 干馏气逆向进入燃烧区燃烧后随烟气排出。此种炉膛结构利用干馏气体还原性组分与高热量, 提高燃烧区燃烧温度, 降低燃烧区的氧化性, 从而降低燃烧区与干馏区  $NO_x$ 、CO 和烟黑的排放, 减少烟尘排放, 实现清洁燃烧。NQ-18C 小型炊暖炉结构如图 2 所示。

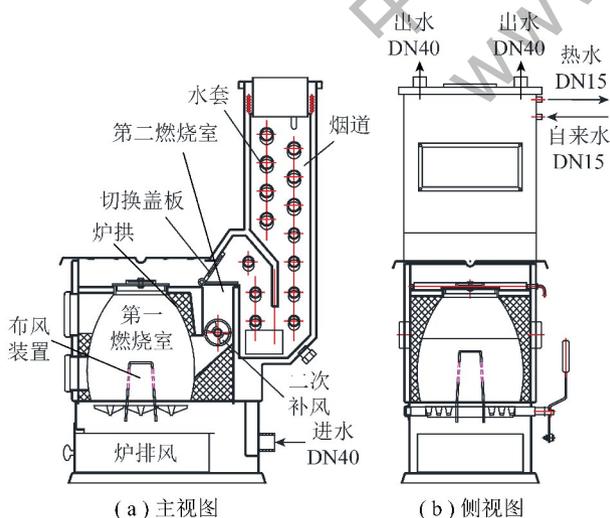


图 2 NQ-18C 小型炊暖炉结构

Fig. 2 Structure of NQ-18C coal furnace

### 4.2 试验装置及方法

试验所用炉子为设计的 NQ-18C 小型炊暖炉与普通市售锅炉; 炊事能力采用直径 10 cm 的节能

锅与普通锅, 温度测试热电偶和水银温度计; 烟气分析测试采用 TH-890B 和 testo350 红外烟气分析仪测量。包括 1 套完整的带供热系统试验装置。搭建试验装置及平台如图 3 所示。



图 3 烟气分析试验装置及平台

Fig. 3 Flue gas analysis test equipment and platform

试验参照 GB/T 16155—2005《民用水暖煤炉热性能试验方法》进行设计, 分为炊事部分与采暖部分, 步骤如下。

1) 点火期: 试验前检查锅炉系统, 确保锅炉系统内部水量充足; 点燃锅炉内引火物, 引燃原煤, 待锅炉燃烧及供热系统状态稳定后, 开始试验。

2) 炊事部分: 采用市面上流行的节能锅与普通锅对锅炉炊事能力进行测试, 在节能锅与普通锅中分别加水 10 kg, 测量水温  $T_1$ ; 分别将锅中水加热至沸腾, 记录时间及沸腾后温度。

3) 采暖部分: ① 炉体水温升至 75 °C 时, 打开阀门向水桶内放水。同时观察出水温度变化, 调节能限流阀门, 控制出水温度在 75 ~ 80 °C。当出水温度低于 75 °C 时, 关闭阀门停止放水。放水期间, 每隔 2 min 记录 1 次出水量和出水温度, 重复这一过程。

② 每隔 10 min 记录 1 次进水温度。③ 将煤炉调整至采暖稳定供热状态, 按 2) 过程, 进行 90 min 的额定供热量试验。计算此阶段总出水量与平均出水温度和平均进水温度。④ 重复①、②过程, 当水套水温在 10 min 内不能回升到 75 °C 时, 结束试验, 计算全过程的总出水、平均进出水温度。⑤ 试验前在烟囱距离锅炉 1 m 处开口, 便于烟气探针放入烟囱中心处, 试验全过程采用德图 testo350 测定锅炉烟囱中烟气, 得到不同阶段烟气污染物排放情况, 试验后按照 GB 13271—2014 换算成标准含氧量下污染物排放情况。

4) 封火试验: 采暖试验, 使其进入封火状态; 连续封火 10 h 后, 启封煤炉, 观察炉内状态, 确定锅炉未熄灭, 在不加入任何引火柴引火煤的情况下, 可以恢复正常燃烧。

5) 其他相关性能测试: 连续试验 3 个月, 测试锅炉使用的安全稳定性。

### 4.3 试验结果与分析

#### 4.3.1 NQ-18C 小型炊暖炉实用性试验

利用设计优化炉型,建设一个带负荷试验平台,平台采用新型炉供5组暖气,同时供 $3 \times 2 \text{ m}^2$ 水炕的示范锅炉房,分别采用原煤、冷压型煤和热解型煤进行试烧试验,室内温度可达 $18 \sim 23 \text{ }^\circ\text{C}$ 。采用逆燃方式消除加煤时冒黑烟的现象,达到烟气排放标准。

#### 4.3.2 NQ-18C 小型炊暖炉热工检测

不同原料的NQ-18C小型炊暖炉热性能对比见表5。

NQ-18C小型炊暖炉设计采用做饭正燃、取暖逆燃,多级供风的低氮燃烧形式,并设计均匀供风装置,设计结构紧凑,运行安全稳定。由表5可知,锅炉在燃用原煤、型煤时各项指标均符合GB/T 16155—2005《民用水暖炉热性能试验方法》要求。锅炉上火速度快,炊事火力强度大,额定供热量大,热效率高;排烟处空气过剩系数低,烟道处排烟温度符合要求;炉飞灰、炉渣含碳量低。

表5 不同原料的NQ-18C小型炊暖炉热性能对比

Table 5 Calorific properties comparison of NQ-18C coal furnace with different raw materials

指标	原煤	型煤
额定供热量/kW	19.18	18.1
热效率/%	67.4	66.81
封火能力/h	$\geq 10$	$\geq 10$
上火速度/ $(^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1})$	6.7	6.31
炊事火力强度/kW	2.59	2.54
排烟处空气过量系数	1.73	1.75
排烟温度	215.9	209.55
炉渣残碳量	6.4	5.3

#### 4.3.3 不同炉型供热性能检测

正常运行下,相同能力的2种锅炉分别使用不同的烧水锅,盛水4 kg,水的初始温度为 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ ,当地大气压下水的沸腾温度 $96 \text{ }^\circ\text{C}$ ,沸腾后维持30 min,不同炉型使用不同炊具的传热效果见表6。

表6 不同炉子的炊暖传热效果对比

Table 6 Comparison of cooking and heating heat transfer effect with different coal furnace

炉型	烧水锅型	燃料	蒸发水量/kg	吸收热量/kJ	传热速率/ $(\text{kJ} \cdot \text{min}^{-1})$	锅炉吸热能力 比(A:B)	烧水锅供热能 力比(C:D)
设计锅炉(A)	节能锅(C)	原煤	3.779	752.84	270.91	1.89	1.81
	普通锅(D)	型煤	2.300	6434.76	149.65	1.88	1.00
市售锅炉(B)	节能锅(C)	原煤	1.800	5314.56	143.64	1.00	1.80
	普通锅(D)	型煤	1.000	3508.80	79.75	1.00	1.00

由表6可知,用2种锅炉烧水,节能锅的吸热能力是普通锅的1.8倍左右,NQ-18C小型炊暖炉的供热能力是普通市售锅炉供热能力的1.89倍,因此,设计锅炉结构合理,实用性及炊事能力比市售锅炉效果好。

#### 4.3.4 NQ-18C 小型炊暖炉烟气检测

对NQ-18C小型炊暖炉和市售锅炉污染物排放进行测试,锅炉燃烧过程中排烟温度变化如图4所示。

由图4可知,NQ-18C小型炊暖炉燃烧过程中烟气温度控制比较好,整个阶段均处于 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下,而市售锅炉烟气温度不断升高,说明NQ-18C小型炊暖炉布风面及受热面布置合理,水路系统循环较快,热量可以迅速传递给锅炉水路系统,并稳定控制在一定范围内,大幅降低烟气带走的热量,达到节能

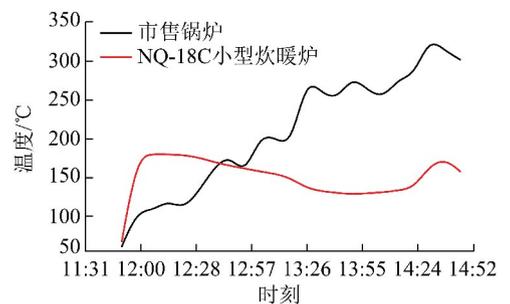


图4 锅炉燃烧过程中排烟温度变化

Fig. 4 Exhaust gas temperature change during boiler combustion

效果。

测试NQ-18C小型炊暖炉燃烧环保型煤时的污染物( $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ )排放情况如图5所示。

由图5可知,NQ-18C小型炊暖炉采用热解燃烧技术并优化了布风系统与换热系统,在燃烧环保

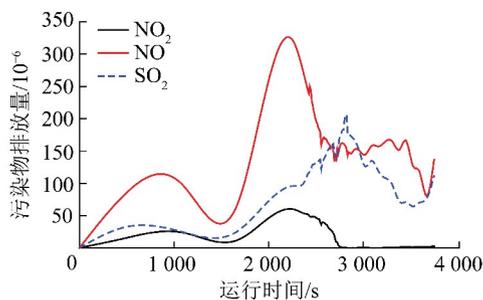
图5 锅炉烟气  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  排放情况

Fig. 5 Flue gas pollutant emissions of coal furnace

型煤过程中,污染物排放量较低,满足锅炉大气污染物新排放标准要求。

## 5 结 论

1) NQ-18C 小型炊暖炉设计采用做饭正燃、取暖逆燃,多级供风的低氮燃烧形式,并设计均匀供风装置,结构紧凑,运行安全稳定。在燃用原煤、型煤时热效率大于 65%,烟道处排烟温度 200℃,炉飞灰、炉渣含碳量 6.4%,符合 GB/T 16155—2005《民用水暖炉热性能试验方法》要求。

2) 用 NQ-18C 小型炊暖炉和普通市售锅炉烧水,节能锅的吸热能力均是普通锅的 1.8 倍左右, NQ-18C 小型炊暖炉的供热能力是普通市售锅炉的 1.89 倍,因此,设计锅炉结构合理,实用性及炊事能力比市售锅炉效果好。

3) NQ-18C 小型炊暖炉在燃烧环保型煤时,  $\text{SO}_2$  排放量小于  $200 \times 10^{-6}$ 、 $\text{NO}_x$  排放量小于  $300 \times 10^{-6}$ ,具有燃烧效率高、污染物排放低,可连续安全稳定运行等优点,是目前无法集中供暖的民用供暖最经济适用的方案。

### 参考文献 (References) :

[1] 于雅泽,李峥嵘.北方典型小城镇居住建筑供暖现状调研[J]. 煤气与热力,2006,26(12):58-61.  
YU Yaze, LI Zhengrong. Investigation and study on heating present states of residential buildings in Northern typical small towns [J]. Gas & Heat, 2006, 26(12): 58-61.

[2] PEMBERTON-PIGOTT C, ANNEGARN H, COOK C. Emissions reductions from domestic coal burning: Practical application of combustion principles [EB/OL]. (2009-04-20) [2017-12-19]. <http://blog.newdawnengineering.com/website/library/Papers+Articles/SeTAR/20090420%20DUE%20Emissions%20Reduction%20from%20domestic%20coal%20combustion%20Pemberton-Pigott%20Annegarn%20and%20Cook%20Final.pdf>.

[3] IBRAIMO M, ANNEGARN H J, PEMBERTON-PIGOTT C. Modelling of bottom-lit down-draft (BLDD) clean-burning coal stove [C]// Domestic Use of Energy. Cape Town; Domestic Use of Energy, 2014.

[4] 王智展,王晓黛.家用煤炉的改进原则和方法[J].河南农业,1996(3):22.

[5] 强福德,潘存忠,郭发森.家用炊事水暖煤炉的试验研制[J].机械研究与应用,1999,12(3):47-48.

[6] 徐有宁,张忠东,李静海,等.抑制氮氧化物无烟燃煤炉内煤气化过程[J].化工学报,2000,51(S1):122-125.  
XU Youning, ZHANG Zhongdong, LI Jinghai, et al. The gasification process of  $\text{NO}_x$ -suppressed and smokeless coal combustion stove [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2000, 51(S1): 122-125.

[7] 何京东.煤炭解耦燃烧 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.

[8] 路春美,王永征.煤燃烧理论与技术[M].北京:地震出版社,2001.

[9] 张慧明.谈应用固成型煤控制民用小煤炉大气二氧化硫的污染[J].陕西环境,1996(4):11-16.

[10] 尚校,高士秋,汪印,等.不同煤燃烧方式降低  $\text{NO}_x$  排放比较及解耦燃烧应用[J].燃料化学学报,2012,40(6):672-679.  
SHANG Xiao, GAO Shiqiu, WANG Yin, et al. Comparison of  $\text{NO}_x$  reduction among different coal combustion methods and the application of decoupling combustion [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(6): 672-679.

[11] 陈颖军.家用蜂窝煤燃烧烟气中碳颗粒物和三环芳烃的排放特征[D].广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所),2004.

[12] 陈建华,薄以匀,李培省,等.北京市民用小煤炉大气污染物排放特征研究[C]//第十届全国大气环境学术会议.南宁:[s.n.],2003.

[13] 李海洋,谢芳,史永永,等.煤燃烧过程分析与建模及其应用于 Texaco 气化炉模拟研究[J].现代化工,2012,32(7):98-101.  
LI Haiyang, XIE Fang, SHI Yongyong, et al. Analysis and modeling of coal burning process and its application simulation of Texaco gasifier [J]. Modern Chemical Industry, 2012, 32(7): 98-101.

[14] 吴爱贞,李元哲,蔡启林.家庭两用煤炉热效率实验方法[J].节能与环保,1988(1):14-17.

[15] 安洪萍,崔远勃,张鉴铭,等.家用炊事水暖煤炉热性能评价指标及其试验方法[J].农业工程学报,1998,14(1):148-152.  
AN Hongping, CUI Yuanbo, ZHANG Jianming, et al. Assessing indexes and testing method for thermal properties of household cooking and heating coal stoves [J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(1): 148-152.