

# 民用散煤污染治理(I) 不同炉具燃烧特性的对比试验研究

梁斌<sup>1,2</sup>, 宋华<sup>1,2</sup>, 白浩隆<sup>1,2</sup>, 武琼<sup>1,2</sup>, 柏奖枝<sup>1,2</sup>, 杨晓辉<sup>1,2</sup>, 蓝天<sup>1,2</sup>

(1. 兖矿集团有限公司, 山东 济宁 273599; 2. 兖矿科技有限公司, 山东 济南 250100)

**摘要:**为了提高市面上炉具的燃烧效率,降低民用煤散烧污染物排放,获取市面上不同燃烧方式民用炉具的燃烧特性,考察了兖矿集团研制的高效改性烟煤型煤在兖矿蓝天解耦燃烧炉具和市面上6种典型的民用炉具中的燃烧特性,包括上火速度、火力强度、烟气温度、热负荷、CO排放浓度等。根据燃烧方式可将炉具分为3类,分别是正烧类炉具、反烧类炉具及解耦燃烧炉具。结果表明,正烧类炉具具有较高的上火速度及火力强度,分别达到8℃/min和2kW以上,但使用过程中烟囱有大量黑烟冒出,烟气污染物排放浓度高,并且排烟温度较高,平均达到300℃左右,导致炉具热效率低,热负荷难以控制,需频繁加煤,导致炉具燃烧和污染物排放具有极强的周期性;反烧类炉具因其多回程的炉膛结构原因,大部分不具备炊事功能,炉具使用过程基本无烟,减少了PM<sub>2.5</sub>以及有机挥发分气体的排放,运行过程较为稳定,但由于其贯穿炉膛的送风及燃烧方式,导致料层容易烧穿,冒出大量黑烟。解耦炉具的上火速度与火力强度分别可达到6℃/min及2kW以上,具有较好的炊事能力,使用过程无烟,且平均烟气温度不超过250℃,热效率高,热负荷易于调节,加煤周期较长,燃烧、供热稳定。同时,解耦炉具通过合理的一、二次风配比,使型煤充分燃烧,CO排放浓度低于普通正烧及反烧类炉具。通过“煤炉匹配”在实现烟煤无烟化燃烧的同时,达到上火快,火力强,好使用的目的。

**关键词:**民用散煤;炉具;燃烧特性;污染治理

中图分类号:TQ534

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2017)04-0089-06

## Prevention and control of air pollution from the household coal combustion

### Part I: A comparative experimental on combustion characteristics of household coal stoves of different designs

Liang Bin<sup>1,2</sup>, Song Hua<sup>1,2</sup>, Bai Haolong<sup>1,2</sup>, Wu Qiong<sup>1,2</sup>, Bai Jiangzhi<sup>1,2</sup>, Yang Xiaohui<sup>1,2</sup>, Lan Tian<sup>1,2</sup>

(1. Yankuang Group Co. Ltd., Jining 273599, China; 2. Yankuang Technology Co. Ltd., Jinan 250100, China)

**Abstract:** In order to improve the combustion efficiency of the furnace on the market, and reduce the discharge of pollutants from civilian coal, and obtain different combustion patterns on the market of civil combustion characteristics, the combustion characteristics of chemical additives containing bituminous coal briquettes, developed by Yankuang Group Company, were experimentally investigated in newly developed staged pyrolysis-semi coke combustion stove and 6 other commercial household coal stoves. Water boiling speed, fire intensity, flue gas temperature, thermal power output, and CO emissions were measured and compared. The coal stoves were classified into 3 categories according to the air-flue gas flow mode, namely, updraft stove, downdraft stove and pyrolysis-semi coke combustion staged stove. Results demonstrate that the updraft stoves have higher water boiling speed and fire intensity, respectively at 8℃/min and over 2kW. But this type of stoves emit heavy black smokes from the stack, causing serious air pollution. The thermal efficiency of the updraft stoves is low, and it is

收稿日期:2017-05-30;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.04.014

基金项目:兖矿集团有限公司重大科技专项资助项目(YK2016ZD01-H05)

作者简介:梁斌(1988—),男,陕西西安人,工程师,硕士,从事煤炭净化利用及燃煤污染物排放治理的研究。E-mail:51912255@qq.com

引用格式:梁斌,宋华,白浩隆,等.民用散煤污染治理(I)不同炉具燃烧特性的对比试验研究[J].洁净煤技术,2017,23(4):89-94.

Liang Bin, Song Hua, Bai Haolong, et al. Prevention and control of air pollution from the household coal combustion Part I: A comparative experimental on combustion characteristics of household coal stoves of different designs[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 89-94.

difficult to control the thermal power output, primarily due to the high flue gas temperature, which is average as high as 300 °C, resulting in it is required frequent coal addition, and thus the furnace combustion and pollutant emissions have a strong cyclical. For the downdraft stoves, most of them cannot provide cooking functionality because of the multi-upward/downward flue gas flow path designs. The downdraft stoves can achieve smokeless combustion and emission, contributing to reduction in the PM<sub>2.5</sub> and VOCs emissions. The downdraft stoves require less frequent coal addition, and the combustion process is relatively stable. However, due to the air flows downward through the entire coal packed in the stove, the coal pack is easily burnt through, leading to emerging serious smoke. The decoupling stoves are designed by separation of air starving pyrolysis process and air-rich semi-coke combustion process, which leads to appreciable NO<sub>x</sub> reduction. The decoupling stoves can be characterized by higher fire speed and intensity (higher than 6 °C/min and 2 kW respectively), excellent cooking ability, stable heat supply and higher thermal efficiency as results of complete coal briquette combustion and lower flue gas temperature (less than 250 °C). Smokeless emission is achieved throughout the combustion process. The thermal power output is easy to adjust, and coal addition is much less frequent. Benefited by appropriate air staging supply, the complete coal combustion results in lower CO emission compared to other types of coal stoves. It can be concluded that by adapting the “coal-stove matching” principle, the combustion of bituminous coals can achieve smokeless, along with the features of high fire speed and intensity, ease to use and thus customer adoption.

**Key words:** household coal; stove; combustion characteristic; pollutant emission control

## 0 引 言

目前,全国民用散煤年消耗量2亿t左右,约占煤炭消耗量的4.7%,全年产生74.9万吨PM<sub>2.5</sub>排放,416.06万吨SO<sub>2</sub>排放,与占全国煤炭消费总量43.2%的电厂锅炉污染物排放水平基本相当(PM<sub>2.5</sub>为88.57万t,SO<sub>2</sub>为586.79万t),民用散煤污染已经成了雾霾形成的重要原因之一<sup>[1]</sup>。所以,从源头治理散煤污染,必须有与之配套的节能环保炉具,从而降低散煤消耗量并且实现散煤的清洁化利用。我国农村炊事取暖以低效高污染燃煤炉具为主,环保炉具使用率仅20%左右。低效炉具的使用不仅造成煤耗量增加,资源浪费,并且,低效炉具中由于煤炭的不完全燃烧造成的大气污染显著,颗粒污染物以及SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、VOCs等气态污染物排放量大,对大气污染严重。

针对上述情况,近年来,开发了各种不同类型的炉具,将炉具的热效率由不到10%提升到了50%左右<sup>[2]</sup>,即使如此,市面上的炉具质量依然参差不齐,并且大部分炉具需要配套使用成本昂贵的清洁燃料(无烟煤散煤、无烟煤型煤、兰炭、生物质燃料等),这些燃料在使用过程中同样存在一些(如上火速度慢、火力强度低、底渣含碳量高等)问题。多数情况下,这些环保炉具燃用无烟煤,虽然可以实现无烟排放,但并未真正解决导致雾霾形成的SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>以及CO、有毒重金属元素和多环芳烃等污染物的排放浓度<sup>[3-4]</sup>。所以,民用炉具的研发需要“以人为本”,在兼顾使用成本与习惯的条件下,通过技术创新,提升炉具燃烧效率、有效节能,同时有效降低烟尘、SO<sub>2</sub>、

NO<sub>x</sub>、CO等多污染物的排放。

国内外诸多文献考察了不同炉具的燃烧特性。其中,Ellison M Carter等<sup>[5]</sup>对比了4种中国气化炉及Phillips、StoveTec、Sampada等炉具的综合热效率(OTEs)及上火速度,结果表明,从冷态开始计算的2种中国气化炉热效率分别为27.5%和33.3%左右,低于Phillips炉具的36.2%与StoveTec炉具的35.4%,但是远高于原始三石火炉的13.7%,4种中国气化炉将常温水煮沸的时间在9.8~17.3 min。James Jetter等<sup>[6]</sup>研究了6种类型燃料在22种炉具中的燃烧特性及污染物排放特性,结果表明,炉具的综合热效率最高可达53%,而最低的热效率同样来自于三石火炉,仅有14%~15%,与Ellison M Carter等<sup>[5]</sup>研究结论一致,并且发现在相同炉具负荷下,将水煮沸的时间随水量增大(2 L升至5 L)而增加。Li Qing等<sup>[2]</sup>测试了6种不同燃料(半焦、无烟煤散煤、无烟煤型煤、烟煤散煤、褐煤散煤、生物质)在新型与传统2种炉具中燃烧的热效率,结果表明,新型炉具的平均热效率及改进燃烧效率均远高于传统炉具,不同燃料在新型炉具中的平均热效率均在80%左右,其中半焦超过90%,这与Ellison M Carter<sup>[5]</sup>和James Jetter<sup>[6]</sup>等研究结果不一致,这可能是由于热效率作为炉具负荷的函数,在燃烧过程中不同阶段都是在实时变化,所以单独选取一个时段的燃烧工况作为衡量热效率的标准是不够准确的<sup>[7]</sup>。郭前辉<sup>[8]</sup>设计了一种炉具热性能测试系统,利用一种优质无烟煤( $Q_{\text{net,ar}}=24\,430\text{ kJ/kg}$ ,  $V_{\text{ad}}=7.85\%$ )为原料,在新型节煤炉中进行炉具的热性能测试,结果表明将6 kg水煮沸所需时间为28 min,平均火力强度

与炉具热效率分别为 0.77 kW 和 45.6%,但试验过程中的原料煤仅有 0.8 kg,从点火到熄火的总时间不到 4 h,炉具效率的测试结果无法反应全天多个周期的运行情况。袁海荣<sup>[9]</sup>对于秸秆固化成型燃料在炉具中热效率的测试方法与文献[8]类似,即使锅水连续蒸发,直至原料燃尽,计算锅水升温与蒸发过程吸收的热量之和与投入炉内燃料发热量的比值,最终测得炉具热效率仅为 20%。Qi Juan 等<sup>[10]</sup>定义  $\eta_{th}$  为壶中水得到的热量与燃料热量的比值,测得无烟型煤的  $\eta_{th}$  为 4.7% 左右,比文献[5]、[11]、[12]报道的实测值均偏低。

针对民用炉具热性能的评价,国内通常使用 GB/T 16155—2005<sup>[13]</sup>,其中包括额定供热量(热负荷)、上火速度、火力强度、热效率等指标的测试方法,但对于供热量及热效率的计算,均未考虑到炉具全周期(点火阶段、旺火阶段、低负荷取暖阶段、炊事阶段、封火阶段)运行时实际操作条件对上述指标的影响。目前市面上一些新型炉具需频繁添加燃料,保持燃料一直填满炉膛,依靠重力的作用对主燃区实时补充燃料,此时实际的运行工况与测试方法不一致,故无法反映炉具全周期使用的热效率值。

为克服民用炉具热性能测试中的上述问题,应在 GB/T 16155—2005 的基础上,改进测试方法,综合考虑多种因素对炉具热性能的影响,减少其它条件的干扰,同时也应考虑模拟民用炉的实际使用情况,增加测试与计算的代表性。本研究设计并搭建了一套针对评估民用炉具热性能的测试系统,考察了兖矿集团研制的高效改性烟煤型煤在兖矿集团研发的蓝天解耦燃烧炉具与市面上 6 种典型的民用炉具中的燃烧特性,以此为民用炉具的改进及新一代节能环保炉具的研发提供技术支持。

## 1 试验方法

图 1 为试验系统的流程示意,其中包括循环水系统、民用炉具燃烧试验系统、烟气采样测试系统以及仪表测控系统。试验过程中测量的运行参数包括进、出水温度  $T_1$  和  $T_2$ ,进水流量  $F_1$ (通过电磁阀准确控制开度),烟气温度  $T_3$ ,烟囱压力  $P$  等,以上参数通过 PLC 测控系统集成在电脑中,通过控制进水流量调节出水温度、炉具运行负荷及烟气温度等参数。CO 测试方法利用奥地利 Madur photon 型号便携式红外烟气分析仪,配置烟气预处理

系统,该系统包括加热采样探针、全程保温加热管线、帕尔帖冷凝除水系统、烟气采样泵以及烟气成分分析单元,测量结果均折算为 9%  $O_2$  浓度下的 CO 体积分数。

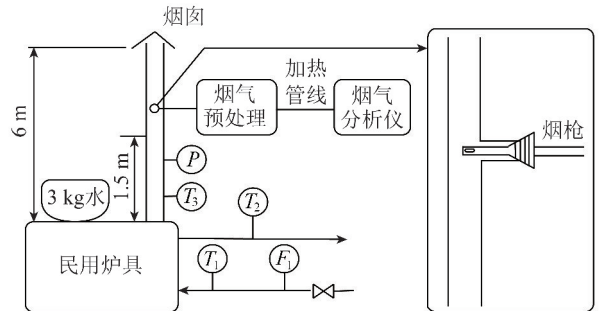


图 1 民用炉具热性能测试系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of thermal performance test system for civil stoves

利用丙烷气以下点火方式将炉内不同原料点燃。将原料点燃至旺火状态时,将盛有水的铝锅放置在炉具炊事台上,按 GB/T 16155—2005<sup>[13]</sup>所述方法测试炉具上火速度、火力强度。

兖矿洁净型煤以烟煤为原料,利用复合化学添加剂进行改性,通过干法无黏结剂免烘干压制成型,原料煤及洁净型煤煤质数据见表 1。

表 1 原料煤与洁净型煤煤质数据

Table 1 Quality data of raw coal and clean coal

煤种	$M_{ad}/\%$	$A_d/\%$	$V_{daf}/\%$	$FC_d/\%$	$Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$
原料煤	5.0	19.9	38.2	49.5	24.3
洁净型煤	2.8	28.2	43.5	39.5	20.3

本研究选取了 7 种市面上具有代表性的炉具进行实验,分别是齐昊、老万、鲁旺、多康、超能、多乐以及兖矿解耦炉,按燃烧方式将上述 7 种炉具分为 3 类,依次为正烧类炉具(老万、齐昊)、反烧类炉具(鲁旺、多康、超能、多乐)以及解耦燃烧类炉具(兖矿蓝天炉具)。对比了兖矿高效改性洁净型煤在 7 种炉具中燃烧时的上火速度、火力强度、烟气温度、热负荷、燃烧效率及 CO 排放浓度等参数,以此考察不同种类炉具与兖矿型煤匹配使用的燃烧特性以及不同种类燃烧方式炉具的运行特点。

## 2 试验结果

### 2.1 上火速度与火力强度

图 2 对比了兖矿洁净型煤在不同炉具中的上



火速度和火力强度,由于鲁旺反烧炉采用了多回程设计以提高燃尽程度,火焰距离炉台距离远,火力弱,不宜用于炊事。可以看出,兖矿洁净型煤在不同炉具中的上火速度与火力强度均超过4℃/min及1.5kW,远高于现行国家标准<sup>[14]</sup>,说明仅从使用性能方面考虑,兖矿洁净型煤具有良好的炉具适应性。

现无烟化燃烧,加煤时均有大量黑烟冒出。虽然反烧类与解耦燃烧类炉具的上火速度略低于正烧炉,但由于其炉膛和烟道结构以及二次补燃风的合理设计,延长了烟气的停留时间,使挥发分充分燃烧,实现了烟煤型煤的无烟化燃烧,即使进行加煤、排渣等操作也能够保持稳定燃烧,有效降低了PM<sub>2.5</sub>与有机挥发性气体的排放。所以从抑制污染物排放的角度考虑,反烧类及解耦燃烧类炉具具有更加优越的消烟性能。但是反烧类炉具由于其贯穿炉膛的送风方式,导致整个炉膛均参与燃烧,容易烧穿料层(燃烧方式即变为正烧),此时冒出大量黑烟。而由于解耦燃烧类炉具的主燃区区域较小、体积热负荷较低,分级配风,燃烧区仅在煤层前端进行,所以不受加煤的影响,燃烧过程稳定,料层不易烧穿。

### 2.2 炉具热负荷

图3为7种不同炉具全周期(包括点火、旺火、封火、起火等过程)热负荷的变化趋势,可以看出,图3(a)、(b)2种正烧类炉具的热负荷周期性极强,平均负荷10kW左右,相当于额定热负荷,说明正烧类炉具在运行过程中调节进风、加煤频繁,热负荷难以控制,无法长时间稳定在中低负荷运行,造成热量释放过度,不利于节煤。

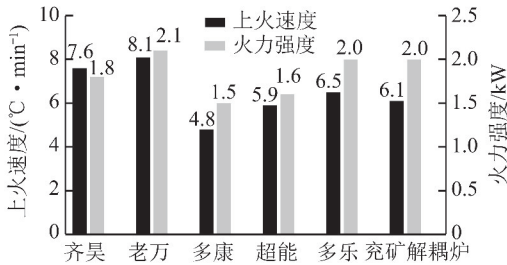
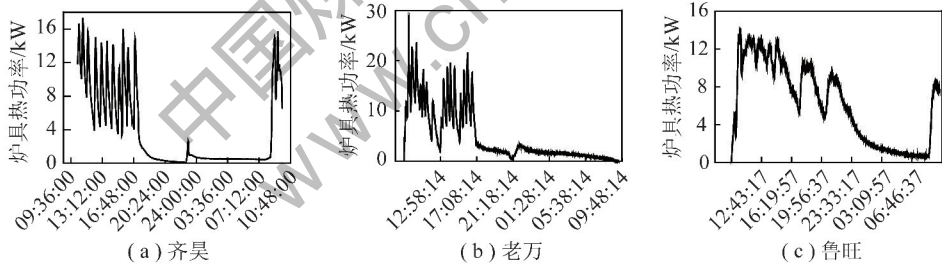


图2 Comparison of different stove fire speed and fire intensity

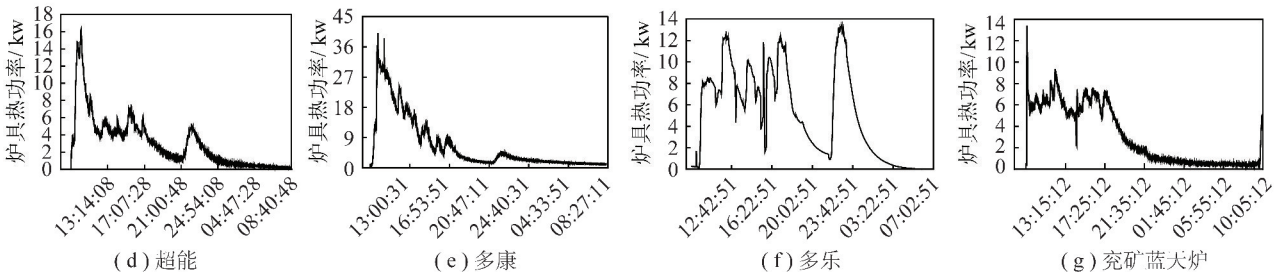
从图2还可以看出,正烧类炉具的上火速度(8℃/min左右)高于反烧与解耦燃烧类炉具(6℃/min左右),火力强度基本相当(2kW左右),但由于其直燃直排的特点,即使利用目前新型正烧炉的二次风设计,也无法在炊事过程中完全实



(a) 齐昊

(b) 老万

(c) 鲁旺



(d) 超能

(e) 多康

(f) 多乐

(g) 兖矿蓝天炉

图3 不同炉具热负荷变化趋势

Fig.3 Heat load trends of different stoves

图3(c)~(e)三种反烧类炉具热负荷相对比较稳定,均可长时间稳定在50%的额定负荷(分别是7、5、5kW左右)下运行,但从图3中看出,超能和多康2种炉具的热负荷随时间的变化均有一定程度的衰减,这是由于2种炉具均为中心筒式反烧设计,在

燃烧后期有大量洁净型煤的灰渣堵塞了中心筒下部,导致型煤无法与空气充分接触参与燃烧,使炉具热负荷持续下降,此时只能通过大量排渣使热负荷恢复正常,但会造成底渣碳含量大幅增加,降低型煤的燃尽率及炉具的热效率。

图3(f)中多乐炉具的热负荷也表现出明显的周期性。这是由于该炉具炉算子面积较大,覆盖了炉膛主燃区和炊事区的范围,加煤后主燃区下方的型煤被“挤压”至炊事区下方,相当于以半正烧的方式炊事,排渣后主燃区和炊事区的灰渣同时被排入灰斗,之后2个区域被重新补充进新的型煤并重新建立稳定的燃烧状态,在此过程中炉具的热负荷与正烧炉的变化趋势基本相同,故出现较强的周期性。

从图3(g)中可以看出,兖矿蓝天炉具的热负荷变化趋势较上述几种炉具更为平稳,无明显的周期性变化及衰减过程,炉具可稳定在6 kW左右运行,加煤间隔周期长,无需对炉具进行特殊操作,负荷易于调节,夜晚封火时间大于12 h,实现炉具的“半无人化”操作。

### 2.3 排烟温度

图4对比了炉具的平均排烟温度,由于排烟温度与洁净型煤的燃烧强度密切相关,而表征型煤燃烧强度的参数是实时变化的热负荷,所以,比较不同炉具的排烟温度应当以相同的燃烧强度为基准,即将炉具实时的排烟温度与热负荷作加权平均,最终获得不同炉具在同一燃烧强度下的排烟温度。可以看出,全周期加权平均排烟温度从高到低依次是:齐昊>多乐>老万>多康>鲁旺>超能>兖矿蓝天,即正烧或半正烧类炉具的排烟温度均高于反烧及解耦燃烧类炉具,说明正烧类炉具的排烟热损失较高,不利于提高炉具的热效率,从2种形式的排烟温度考虑,兖矿蓝天炉具与超能炉具均最低,说明这2种炉具的排烟热损失较低,炉具的热效率高。

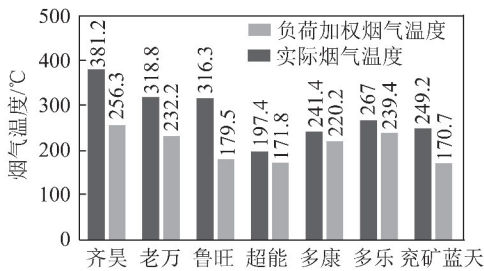


图4 不同炉具排烟温度对比

Fig. 4 Comparison of exhaust gas temperature of different stoves

### 2.4 CO 排放浓度与燃烧效率

图5对比了不同炉具的CO排放浓度与燃烧效率。洁净型煤在不同炉具中的燃烧效率取决于CO与CO<sub>2</sub>的排放浓度,CO与CO<sub>2</sub>的排放浓度又取决于洁净型煤燃烧的充分程度,型煤燃烧的越充分,则

炉具的热负荷越高,CO浓度越低。所以为了正确评价燃烧效率,将燃烧效率利用负荷进行加权平均,其结果如图5所示。可以看出,热负荷加权平均后的燃烧效率从高到低依次是:兖矿蓝天>老万>鲁旺>多康>超能>多乐>齐昊。结果表明,2种方式的燃烧效率,兖矿蓝天炉具、老万正烧炉与鲁旺反烧炉均最高,这得益于上述3种炉具的炉膛结构及二次补燃风设计,3种炉具的CO排放浓度均较其它炉具更低,并且,兖矿蓝天炉具将空气分级燃烧的理念运用在炉具设计中,通过合理的配比一、二次风,使其燃烧过程中的CO排放浓度最低,燃烧最充分。而其余反烧类炉具由于中心筒的存在,燃烧后期当型煤灰渣将中心筒风口堵塞后,CO排放浓度将大幅上涨,导致燃烧效率急剧下降。

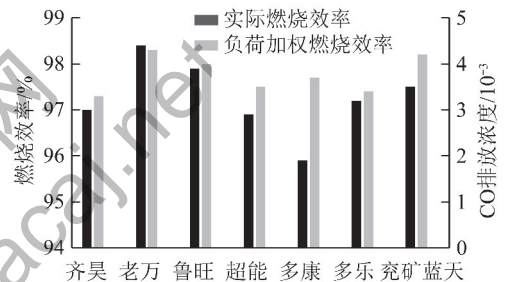


图5 不同炉具CO排放浓度与燃烧效率对比

Fig. 5 Comparison of CO emission concentration and combustion efficiency of different stoves

## 3 结 论

考察了兖矿集团高效改性烟煤型煤在兖矿蓝天燃烧炉具和市面上6种典型的民用炉具中的燃烧特性,并对比了兖矿洁净型煤在不同炉具中的上火速度、火力强度、炉具热负荷、排烟温度、CO排放浓度及燃烧效率,根据实验结果,可以看出兖矿洁净型煤与不同炉具匹配使用具有以下特点:

1) 正烧类炉具中的上火速度与火力强度略高于反烧类及解耦燃烧类炉具,但由于正烧炉具直燃直排的特点,每次加煤时均会有大量黑烟冒出,对环境造成极大危害;正烧类炉具同时表现出较强的燃烧周期性,加煤频繁,导致负荷不易调节,造成热量释放过度,不利于节煤,并且燃烧过程中CO排放浓度高,不利于节能环保;正烧类炉具排烟热损失和未完全燃烧热损失较高,热效率低。

2) 反烧类与解耦燃烧类炉具的上火速度略低于正烧炉,但2种炉具的炉膛和烟道结构以及二次补燃风的合理设计,延长了型煤燃烧产生的烟气在

烟道中的停留时间,使挥发分充分燃烧,实现了烟煤型煤的无烟化燃烧,有效降低了 $PM_{2.5}$ 与有机挥发性气体的排放;反烧类与解耦燃烧类炉具在采暖情况下均可稳定在炉具额定负荷的50%左右长时间运行,且加煤间隔较长,炉具运行稳定。但加入中心筒的反烧类炉具由于型煤燃烧后期堵塞中心筒下方通风口,导致进风不畅、型煤燃烧不充分,造成热负荷逐渐衰减,为稳定热负荷需进行大量排渣操作,则会使底渣含碳量增加,降低炉具热效率,并且CO排放浓度将大幅上涨,导致燃烧效率急剧下降;反烧类炉具由于其贯穿炉膛的送风方式,导致炉膛均参与燃烧,容易烧穿料层(燃烧方式即变为正烧),使烟囱冒出大量黑烟。

3) 充矿蓝天解耦燃烧炉具的主燃区区域较小、体积热负荷较低,分级配风,燃烧区仅在煤层前端进行,所以不受加煤的影响,燃烧过程稳定,料层不易烧穿,且加煤间隔较长,炉具运行稳定;充矿蓝天解耦燃烧炉具排烟温度较低,提升了炉具的热效率;充矿蓝天解耦燃烧炉具、老万正烧炉以及鲁旺反烧炉具有较高的燃烧效率,主要是由于3种炉具使用过程中CO排放浓度较低,这得益于上述3种炉具的炉膛结构及二次补燃风设计,并且,充矿蓝天炉具将空气分级燃烧的理念运用在炉具设计中,通过合理的配比一、二次风,使其燃烧过程中的CO排放浓度最低,燃烧最充分。

#### 参考文献(References):

[1] 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 Molin,Zhao Jia,Xu Zhao, et al. China scattered coal consumption map and influence factors[J]. Electric Power,2017,50(1):1-8.

[2] Li Qing, Jiang Jingkun, Qi Juan, et al. Improving the energy efficiency of stoves to reduce pollutant emissions from household solid

fuel combustion in China[J]. Environmental Science & Technology Letters,2016(3):369-374.

- [3] Chen Yingjun, Zhi Guorui, Feng Yanli, et al. Increase in polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emissions due to briquetting: A challenge to the coal briquetting policy[J]. Environmental Pollution, 2015, 204:58-63.
- [4] Zhang Wei, Tong Yindong, Wang Huanhuan, et al. Emission of metals from pelletized and uncompressed biomass fuels combustion in rural household stoves in China[J]. Sci. Rep., 2014(4):1-7.
- [5] Ellison M Carter, Shan Ming, Yang Xudong, et al. Pollutant emissions and energy efficiency of chinese gasifier cooking stoves and implication for future intervention studies[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48:6461-6467.
- [6] James Jetter, Zhao Yongxin, Kirk R Smith, et al. Pollutant emissions and energy efficiency under controlled conditions for household biomass cookstoves and implications for metrics useful in setting international test standards[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46:10827-10834.
- [7] Michael Johnson, Rufus Edwards, Victor Berrueta, et al. New approaches to performance testing of improved cookstoves[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44:368-374.
- [8] 郭前辉. 炉灶热性能测试系统设计[D]. 郑州:河南农业大学, 2009.
- [9] 袁海荣. 秸秆固化成型燃料助燃剂研制及燃烧特性试验与模拟研究[D]. 北京:北京化工大学, 2010.
- [10] Qi Juan, Li Qing, Wu Jianjun, et al. Biocoal briquettes combusted in a household cooking stove: improved thermal efficiencies and reduced pollutant emissions[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51:1886-1892.
- [11] Sinton Jonathan E, Smith Kirk R, Peabody John W, et al. An assessment of programs to promote improved household stoves in China[J]. Energy Sustainable Dev., 2014, 8(3):33-52.
- [12] Shen Guofeng, Chen Yuanchen, Xue Chunyu, et al. Pollutant emissions from improved coal-and wood-fuelled cookstoves in rural household[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(11):6590-6598.
- [13] GB/T 16155—2005, 民用水暖煤炉热性能试验方法[S].
- [14] GB/T 16154—2005, 民用水暖煤炉通用技术条件[S].