



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

祁娟, 武建军, 刘咏菊. 生物质型煤制备参数优化及燃烧污染物释放特征[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(7): 197-202. doi: 10. 13199/j. cnki. cst. 2021. 07. 027

QI Juan, WU Jjianjun, LIU Yongju. Optimization of preparation parameters of biomass briquette and emission characteristics of combustion pollutants [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(7): 197-202. doi: 10. 13199/j. cnki. cst. 2021. 07. 027

## 生物质型煤制备参数优化及燃烧污染物释放特征

祁娟<sup>1,2</sup>, 武建军<sup>2</sup>, 刘咏菊<sup>1</sup>

(1. 徐州工业职业技术学院 化学工程学院, 江苏 徐州 221140; 2. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:**民用固体燃料低效燃烧产生了大量污染物。根据我国经济发展水平和各地现实情况, 消费适合农村和乡镇的清洁固体燃料是减少面源大气污染物排放的有效途径。用无烟煤分别与不同比例的生物质(小麦、玉米和水稻)秸秆混合、压制成型, 制备民用固体燃料, 通过正交试验研究优化无烟煤-秸秆生物质型煤的冷压成型工艺参数, 并在典型的民用灶具上对生物质型煤的燃烧热效率和主要污染物排放因子进行了测试和分析。结果表明, 在生物质质量分数 20%、粒度上限 1 mm、成型压力 25 MPa、粘结剂质量分数 10% 等优化的制备工艺参数下, 制得生物质型煤的抗压强度最高, 达到 15.98 kN/个, 对应的落下强度值为 99.87%; 秸秆生物质型煤热效率增加了 81%~137%,  $PM_{2.5}$  的排放因子降低了 90~98%, CO 的排放因子降低了 48%~92%,  $NO_2$  和  $SO_2$  以及  $PM_{2.5}$  颗粒物中有毒元素 As、Se、Pb 的排放因子也大幅度降低。生物质和无烟煤混合燃烧的协同作用是节能减排的重要原因, 生物质的加入, 降低了型煤的热解温度、着火点和燃尽温度, 其热解气体助燃无烟煤颗粒、燃尽后体积收缩且多孔又为无烟煤的进一步燃烧提供了发达的气体通道, 利于氧气与固相充分接触、燃烧, 热效率提高, 污染物的排放降低。

**关键词:** 生物质型煤; 排放因子; 燃烧; 污染物; 固体燃料

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2021)07-0197-06

### Optimization of preparation parameters of biomass briquette and emission characteristics of combustion pollutants

QI Juan<sup>1,2</sup>, WU Jjianjun<sup>2</sup>, LIU Yongju<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering, Xuzhou College of Industrial Technology, Xuzhou 221140, China; 2. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** A large number of pollutants are produced by the inefficient combustion of civil solid fuels. According to China's economic development level and the reality of various regions, the consumption of clean solid fuels suitable for rural areas and towns is an effective way to reduce the emission of non-point source air pollutants. Anthracite was mixed with different proportion of biomass (wheat, corn and rice) straw to prepare civil solid fuel. The process parameters of cold briquetting of anthracite-straw biomass briquette were optimized by orthogonal experiment. The combustion thermal efficiency and main pollutant emission factors of biomass briquette were tested and analyzed on typical civil stove. The experimental results show that the maximum compressive strength of briquette is 15.98 kN/pellet, and the corresponding drop strength is 99.87% under the optimized conditions of biomass dosage 20%, particle size upper limit 1 mm, molding pressure 25 MPa, binder 10%; The thermal efficiency of biomass briquette was increased by 81%~137%, the reductions of emission factors were 90~98% for  $PM_{2.5}$  and 48%~92% for CO, and the emission factors of  $NO_2$ ,  $SO_2$  and toxic elements As, Se and Pb in  $PM_{2.5}$  were greatly reduced as well. The synergistic effect of biomass and anthracite is an important reason for energy saving and emission reduction. The addition of biomass reduces the pyrolysis temperature, ignition point and burn out temperature of briquette. The pyrolysis gas of biomass supports the combustion of anthracite particles. Besides, the volume of biomass shrinks and is porous after burning out, which provides a developed gas channel for further combustion of anthracite. Due to the full contact between oxygen and solid phase, the combustion is full, the thermal efficiency is improved, and the emission of pollutants is reduced.

**Key words:** biomass briquette; emission factor; combustion; solid fuel; pollutant

收稿日期: 2020-12-25; 责任编辑: 郭鑫

基金项目: 江苏省大学生创业训练资助项目(210508867004); 江苏省大学生创业训练项目为江苏省教育厅资助项目(210508867004)

作者简介: 武建军(1964—), 男, 河南郑州人, 教授, 博士。Tel: 0516-83591115, E-mail: jjuw@163.com

## 0 引言

煤炭是我国最主要的一次能源,虽然近年来煤炭在能源结构中比例逐年下降,但 2019 年煤炭仍占我国能源消耗总量的 57.7%<sup>[1]</sup>。煤炭的大量使用是我国 PM<sub>2.5</sub>和 CO<sub>2</sub>人为排放的最主要原因<sup>[2-4]</sup>,而煤炭的清洁利用技术研发主要集中在大规模工业应用上<sup>[4-9]</sup>,民用散煤燃烧造成的面源大气污染问题有待解决。我国民用燃煤造成的 PM<sub>2.5</sub>排放量占有所有燃煤行业排放的 35.5%<sup>[10]</sup>,同时民用燃煤的黑炭(BC)排放量占据我国总 BC 排放量的 20.9%<sup>[11]</sup>。由于落后的燃烧条件和控制设施,居民在烹饪/取暖炉中燃烧原煤释放污染物高达燃料质量的 10%<sup>[12]</sup>。因此,应采取更有效的措施,消除燃煤对室内外空气质量的不利影响<sup>[13]</sup>。中国政府和联合国环境规划署均建议在家庭中使用型煤代替原煤块,燃烧型煤可以明显减少颗粒物和 BC 排放,是节能减排的有效方法<sup>[14]</sup>。与散烧生物质相比,生物质成型颗粒产生较少的污染物<sup>[15-16]</sup>,在改进民用炉具中热效率( $\eta_{th}$ )可达到 1.71~3.12 倍<sup>[17]</sup>。型煤技术可以通过工艺调整改变燃料的结构和组成。有学者研究发现,生物质和煤按一定配比混合,燃烧过程中,煤能够弥补单纯生物质燃烧能量密度低的弊端,生物质

可使煤获得更好的燃烬特性<sup>[18-20]</sup>。无烟煤是公认的低 PM<sub>2.5</sub>排放的洁净燃料,但由于其特殊的组成和结构,其燃烬率低和点火困难,限制了其应用<sup>[21-22]</sup>。国内外目前针对型煤的研究主要集中在煤或生物质单独成型后能量和污染物排放的变化情况,缺乏煤与生物质混合制型煤的能量和污染物排放机理研究,无烟煤-生物质混合型煤则可以彼此取长补短,将会是一种有前途的民用燃料,尤其是充分利用我国每年近 800 Mt 的农作物秸秆等固废作为民用型煤的基本原料,更具有现实意义。研究在无烟粉煤中掺入农作物秸秆冷压成型制型煤,用于民用固体燃料,旨在改变无烟煤的燃烧性能,整体提升无烟煤和秸秆的能量利用效率,减少污染物的排放,为改善民用煤散烧带来的大气污染提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验原料

选择晋城无烟煤和 3 种农作物(小麦、水稻和玉米)秸秆作为研究生物质型煤的原料,其组成和发热量见表 1。其中,工业分析检测参照标准 GBT 30732—2014《煤的工业分析仪器法》,元素分析检测参照 GBT 476—2001《煤的元素分析方法》,总硫通过红外线自动分析仪测得。

表 1 原料的工业分析、元素分析和发热量

Table 1 Proximate analysis,ultimaece analysis and calorific value of feed materials

原料	工业分析/%				元素分析/%					Q <sub>net,ar</sub> / (MJ·kg <sup>-1</sup> )
	M <sub>ad</sub>	A <sub>d</sub>	V <sub>daf</sub>	FC <sub>daf</sub>	C <sub>daf</sub>	H <sub>daf</sub>	O <sub>daf</sub>	N <sub>daf</sub>	S <sub>t,d</sub>	
小麦秸秆	5.68	8.97	81.34	18.66	49.76	7.17	42.00	0.71	0.33	14.90
水稻秸秆	6.36	10.38	82.92	17.08	49.18	7.40	42.30	0.81	0.28	13.42
玉米秸秆	5.44	5.03	84.85	15.15	48.66	7.08	42.86	1.00	0.37	15.04
无烟煤	4.77	13.10	7.19	92.81	89.70	3.50	5.11	1.29	0.35	28.79

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 秸秆生物质型煤的制作与检测方法

根据前人成果<sup>[21,23-26]</sup>,设计 1 组以秸秆生物质型煤的落下强度和抗压强度为评价指标的 4 因素 3 水平的正交试验,其中 4 因素包括生物质添加量、原料成型粒度上限、成型压力和黏土(黏结剂)添加量,见表 2。通过破碎机将无烟煤和生物质分别破碎到指定粒度后,按照试验方案设定比例将二者混合,并掺入黏结剂黏土,加适量的水润湿,混合均匀后按照不同的压力冷压成型,烘干后制得成品。

型煤抗压强度和落下强度的测试标准分别为:MT/T 748—2007《工业型煤冷压强度测试方法》和 MT/T 925—2004《工业型煤落下强度测试方法》。

表 2 秸秆生物质混合型煤正交试验方案

Table 2 Orthogonal experiment scheme of straw biomass briquette

水平	生物质/%	粒度/mm	成型压力/MPa	黏土质量分数/%
1	10	≤1	15	5
2	20	≤2	25	10
3	30	≤3	35	15

#### 1.2.2 测试系统

采用的秸秆生物质型煤燃烧测试系统和方法见文献[27]。试验用炉具为传统正烧炊事炉,将炉具置于密闭不锈钢箱体中,高效过滤后的空气通过引风机引入到箱体中,燃烧过程中释放的烟气被充分稀释后,通过炉具烟囱正上方的烟罩进入直径 22 cm 的稀释管道,稀释管道末端亦通过风机牵引出

风,进出口风机的气体流速均由变频器控制。燃料自然散堆于炉膛内,采用丙烷点火以防止其他污染物的引入,丙烷的气体流量为 3 L/min,燃料上方设置热电偶监测燃烧过程中温度的变化,在稀释管道上开孔,在线监测 CO 的变化,当热电偶监测温度小于 50 ℃,CO 监测数据小于 3 mg/L 时,断定燃烧结束。除点火外,整个燃烧过程属自然燃烧,无人干预。每组试验至少重复 3 次,以保证试验的可验证性。

1.2.3 炉具中热效率的测试方法

炉具中热效率的测量方法参照相关权威标准和方法:GB 4363—1984《民用柴炉、柴灶热性能测试方法》<sup>[28]</sup>、国际通用的煮水法<sup>[29]</sup>。研究根据试验需要进行修正,煮水产生的水蒸汽会干扰气态污染物和颗粒物的测量,故将水温上限设置为 90 ℃,热电偶监测到水温达到上限温度时,更换另 1 壶室温水继续煮,直至试验结束。

1.2.4 烟气污染物的测试方法

颗粒物采样采用平行采样法,通过 URG 公司生产的 URG-2000-30 EH 和 URG-2000-30 EHB 旋风切割头分别收集 PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>1.0</sub>,采样流量由质量流量计控制为 16.7 L/min;在稀释管道上开孔设置采样点,相同粒径颗粒物从不同采样口采集到石英膜和特氟龙膜上。石英膜收集烟气中的颗粒物用于称重,膜在使用前放在 550 ℃ 的马弗炉中烘烤 4 h 后,自然冷却至室温,然后放到恒温恒湿箱(温度和相对湿度控制在 25 ℃,40%)中 24 h,再放到精度为 10 μg 的天平上称量;采集 PM<sub>2.5</sub>样品后的特氟龙膜被直接放入 X 射线荧光光谱仪(NASI00)测量单位面积上有毒元素的浓度。总烟尘采样流量设置为 10 L/min。其他气态污染物 CO、NO<sub>2</sub>和 SO<sub>2</sub>在线监测和记录。

1.3 参数计算

在燃料入炉前称量燃料质量,燃烧后称量灰质

量,通过前后质量差计算污染物排放因子,结合研究所采用的国际通用的煮水法<sup>[29]</sup>,计算  $\eta_{th}$  和能量基排放因子,具体计算方法如下:

$$\eta_{th} = (M_w C_w \Delta T / M_c Q_c) \times 100\% \tag{1}$$

式中:  $M_w$  为壶中水的质量, kg;  $C_w$  为水的热容, kJ/(kg℃);  $\Delta T$  为水升温, ℃;  $M_c$  为每次燃烧燃料质量, kg;  $Q_c$  为收到基燃料净热值, kJ/kg。

$$EF_m = M_f F / M_c \tag{2}$$

式中:  $EF_m$  为颗粒物的质量基排放因子, mg/g;  $M_f$  为通过称量采样前后石英膜的质量来计算的颗粒物质量, mg;  $F$  为稀释管道的流量与切割头采样流量之比。

$$EF_m = \frac{Q_f \rho_s}{M_c} \int_{starttime}^{extinctiontime} C_s dt \tag{3}$$

式中:  $Q_f$  为稀释烟道中气体流量, m<sup>3</sup>/s;  $\rho_s$  为试验环境温度下纯气体的密度, g/cm<sup>3</sup>;  $C_s$  为实时浓度, mg/L。

$$EF_t = EF_m / (\eta_{th} Q_c) \tag{4}$$

式中:  $EF_t$  为能量基排放因子, mg/kJ。

$$EF_{b-c} = EF_b d + EF_c e \tag{5}$$

式中:  $EF_{b-c}$  是根据生物质和煤的质量比例在 100% 生物质和 100% 煤测量值之间的插值, 即质量加权平均值, mg/kJ;  $EF_b$  和  $EF_c$  分别代表纯生物质成型燃料和纯煤型煤的排放因子, mg/kJ;  $d$  和  $e$  分别是秸秆生物质型煤中秸秆和煤的混合比例, %。

2 结果与讨论

2.1 秸秆生物质型煤的制作与强度检测

经过正交试验检验,无烟煤和 3 种秸秆混合成型后的测试结果及变化趋势基本一致,现以小麦秸秆生物质型煤正交试验数据为例进行阐述,见表 3。

根据表 3 中各因素影响下的落下强度和抗压强

表 3 小麦秸秆生物质型煤正交试验数据

Table 3 Orthogonal experiment data for biomass briquette samples mixed with wheat straw

水平	A		B		C		D	
	落下强度/ %	抗压强度/ (kN · 个 <sup>-1</sup> )	落下强度/ %	抗压强度/ (kN · 个 <sup>-1</sup> )	落下强度/ %	抗压强度/ (kN · 个 <sup>-1</sup> )	落下强度/ %	抗压强度/ (kN · 个 <sup>-1</sup> )
1	98.44	13.91	98.65	14.29	95.23	13.74	97.63	14.19
2	98.9	15.19	95.81	14.00	98.49	14.88	98.55	14.22
3	94.71	12.90	97.59	13.71	98.33	13.37	95.87	13.59

注: A 为小麦秸秆质量分数(10%、20%和 30%), B 为粒度(1 mm、2 mm 和 3 mm), C 为成型压力(15 MPa、25 MPa 和 35 MPa), D 为黏土质量分数(5%、10%、15%), 表中的数值是每个水平的平均值。

度均值,做各因素的水平值对小麦秸秆生物质型煤落下强度和抗压强度的影响,如图 1 所示。

型煤的强度在小麦秸秆质量分数为 20%时效果较好,抗压强度随着粒度增加而降低,成型压力在

25 MPa 时效果较好,型煤在粘结剂黏土的质量分数为 10%时,落下强度和抗压强度均达到较大值。各因素的影响次序为:生物质添加量>成型压力>黏土添加量>粒度。试验结果表明较佳工艺条件是:生



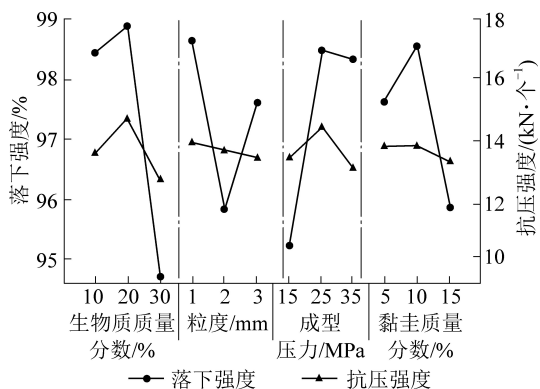


图1 各因素的水平值对小麦秸秆生物质型煤落下强度和抗压强度的影响

Fig.1 Effect of factors' levers on drop strength and compressive strength for biomass briquette samples mixed with wheat straw

物质质量分数 20%, 粒度  $\leq 1$  mm, 成型压力 25 MPa, 黏土质量分数 10%。按此工艺条件制作的型煤, 落下强度为 99.87%, 抗压强度为 15.98 kN/个。

## 2.2 秸秆生物质型煤的污染物排放

为检测该生物质型煤的  $\eta_{th}$  和研究其污染物排放特性, 研究还对比分析了不含生物质的纯无烟煤型煤(图 2a)、正交试验设计的秸秆生物质型煤(图 2b)和不含无烟煤的纯生物质成型燃料(图 2c)。



(a) 纯无烟煤型煤 (b) 秸秆生物质型煤 (c) 纯生物质成型燃料

图2 燃烧样品照片

Fig.2 Photograph of combustion samples

小麦秸秆生物质型煤、玉米秸秆生物质型煤和稻草生物质型煤的测量值分别缩写为 M-WS-C、M-MS-C 和 M-RS-C, 相对应的计算值(质量加权平均值, 根据无烟煤和生物质的质量分数在 100% 无烟煤和 100% 生物质测量值之间的插值)分别缩写为 C-WS-C、C-MS-C 和 C-RS-C。秸秆生物质型煤的颗粒物排放因子、热效率和计算的质量加权平均值如图 3 所示, 3 种型煤的  $\eta_{th}$  分布在 8.5% ~ 10.7%, 与质量加权平均值相比, 小麦秸秆生物质型煤、玉米秸秆生物质型煤、稻草生物质型煤分别增加了  $88.8\% \pm 11.8\%$ 、 $81.4\% \pm 17.7\%$  和  $136.7\% \pm 13.7\%$ 。PM<sub>2.5</sub> 排放因子分别是  $0.36 \pm 0.16$ 、 $0.34 \pm 0.07$  和  $0.30 \pm 0.01$  mg/kJ, 与质量加权平均值相比, 分别减少了  $93.3\% \pm 3.1\%$ 、 $90.4\% \pm 2.2\%$  和  $97.6\% \pm$

0.2%。在同等试验条件下测得, 无烟煤块的 PM<sub>2.5</sub> 的能量基排放因子为  $0.33 \pm 0.16$  mg/kJ,  $\eta_{th}$  为  $4.7 \pm 0.2\%$ , 该种型煤不仅 PM<sub>2.5</sub> 排放因子接近于无烟煤块,  $\eta_{th}$  还比无烟煤块高很多。

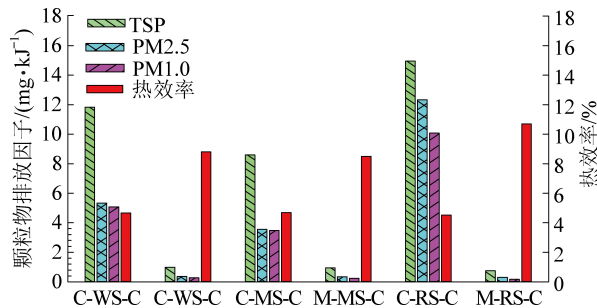


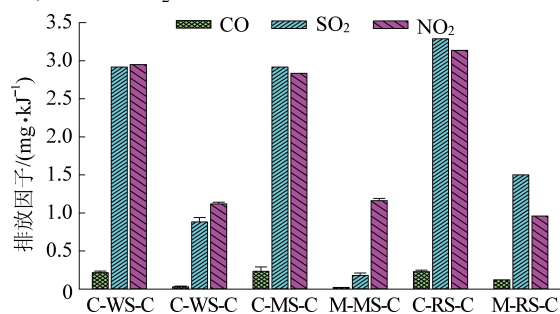
图3 秸秆生物质型煤的颗粒物排放因子、热效率和计算的质量加权平均值

Fig.3 PM EFs and  $\eta_{th}$  for straw biomass briquettes and corresponding mass weighted average ones

无烟煤和生物质在性能上的协同作用, 是导致秸秆生物质型煤  $\eta_{th}$  提升、颗粒物排放因子降低的重要原因。秸秆的热解温度低于无烟煤, 在燃烧开始阶段, 秸秆生物质型煤缺氧燃烧, 受热后, 秸秆较无烟煤先行热解释放出低着火点的可燃气, 这些可燃气体分布在整个型煤的内部, 温度达到着火点后, 热解气体燃烧, 为无烟煤颗粒提供充分的助燃作用, 使煤颗粒燃烧的更加充分。除此之外, 生物质的着火点为 200~300 °C, 燃尽温度约为 450 °C, 而无烟煤的着火点为 450~550 °C, 燃尽温度大于 700 °C, 低着火点、低燃尽温度的秸秆先于无烟煤颗粒燃烧, 秸秆燃尽后无烟煤颗粒才开始燃烧, 燃尽后的秸秆生成灰, 体积收缩且多孔<sup>[30]</sup>, 原先均匀散布在无烟煤颗粒间的秸秆形成了发达的气体通道, 使内部无烟煤颗粒在燃烧过程中因更为充分的氧气供给得以充分燃烧, 因此  $\eta_{th}$  提高, 这也在一定程度上解决了纯无烟煤型煤点火困难的问题。未燃尽挥发分是颗粒物的前驱物, 对颗粒物的形成具有积极的作用<sup>[27]</sup>, 根据以上分析, 秸秆对无烟煤颗粒的燃烧起到了助燃作用, 在整个过程中, 挥发分也得以充分燃烧, 使生成的 PM<sub>2.5</sub> 减少。

秸秆生物质型煤的 CO、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和计算的质量加权平均值对比情况如图 4 所示, 与质量加权平均值相比, 秸秆生物质型煤的 CO、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 的能量基排放因子明显降低。3 种秸秆生物质型煤的 CO 的能量基排放因子分别是  $0.03 \pm 0.01$ 、 $0.02 \pm 0.01$ 、 $0.12 \pm 0.04$  mg/kJ, 比质量加权平均值分别降低了  $86.1\% \pm 4.8\%$ 、 $91.5\% \pm 2\%$  和  $47.6\% \pm 18\%$ ; 3 种秸秆生物质型煤的 SO<sub>2</sub> 的能量基排放因子分别是  $0.88 \pm 0.06$ 、 $0.18$

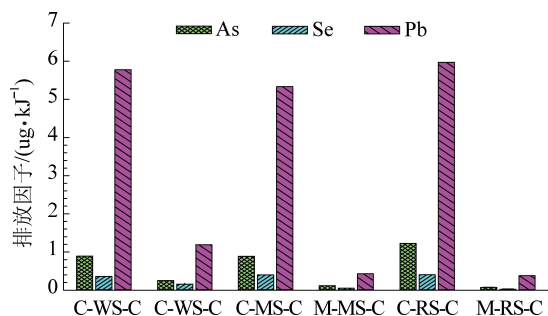
$\pm 0.03$  和  $1.5 \pm 0.1$  mg/kJ, 比质量加权平均值分别降低了  $69.8\% \pm 2.1\%$ 、 $93.8\% \pm 1\%$  和  $54.4\% \pm 3.1\%$ ; 3 种秸秆生物质型煤的  $\text{NO}_2$  的能量基排放因子分别是  $1.12 \pm 0.02$ 、 $1.16 \pm 0.03$  和  $0.96 \pm 0.1$  mg/kJ, 比质量加权平均值分别降低了  $62\% \pm 2\%$ 、 $59.1\% \pm 2.6\%$  和  $69.4\% \pm 3.5\%$ 。CO 的排放因子的降低表明秸秆在提高无烟煤的燃烧程度方面起到了积极作用, 更多的 C 元素得以充分燃烧生成了  $\text{CO}_2$ , 而非 CO。而  $\text{NO}_2$  排放因子的降低主要是由于秸秆先行燃烧后产生的多孔结构, 增加了氧气与固相的接触面积, 有利于中间产物 NO 在煤焦(C)的还原作用下生成  $\text{N}_2$ <sup>[31]</sup>, 还有部分 NO 可能被低温热解生成的热解气中的还原性物质(主要是 CO 和  $\text{CH}_4$  等)还原为  $\text{N}_2$ <sup>[32]</sup>。同时, 生物质中富含碱(土)金属, 形成碱(土)金属硫酸盐, 使更多的 S 留在灰中, 减少了  $\text{SO}_2$  的排放。

图4 秸秆生物质型煤的 CO、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和

计算的质量加权平均值

Fig.4 EFs of CO, SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> for straw biomass briquettes and corresponding mass weighted average ones

秸秆生物质型煤的  $\text{PM}_{2.5}$  颗粒物中 As、Se、Pb 的排放因子和计算的质量加权平均值的对比情况如图 5 所示, 与质量加权平均值相比, 3 种秸秆生物质型煤的  $\text{PM}_{2.5}$  颗粒中有毒元素 As、Se 和 Pb 的排放因子也明显降低。3 种秸秆生物质型煤  $\text{PM}_{2.5}$  颗粒中的 As 的能量基排放因子分别是  $0.25 \pm 0.02$ 、 $0.12 \pm 0$  和  $0.07 \pm 0.01$   $\mu\text{g}/\text{kJ}$ , 比质量加权平均值分别降低了  $71.9\% \pm 4\%$ 、 $86.4\% \pm 1.7\%$  和  $94.3\% \pm 1.2\%$ ; 3 种秸秆生物质型煤  $\text{PM}_{2.5}$  颗粒中的 Se 的能量基排放因子分别是  $0.16 \pm 0.02$ 、 $0.05 \pm 0$  和  $0.02 \pm 0.01$   $\mu\text{g}/\text{kJ}$ , 比质量加权平均值分别降低了  $55.3\% \pm 1.2\%$ 、 $87.5\% \pm 3.5\%$  和  $95\% \pm 2.7\%$ ; 3 种秸秆生物质型煤  $\text{PM}_{2.5}$  颗粒中的 Pb 的能量基排放因子分别是  $1.19 \pm 0.21$ 、 $0.43 \pm 0.34$  和  $0.38 \pm 0$   $\mu\text{g}/\text{kJ}$ , 比质量加权平均值分别降低了  $79.4\% \pm 3.7\%$ 、 $91.9\% \pm 6.4\%$  和  $93.6\% \pm 0.3\%$ 。秸秆生物质型煤在燃烧过程中形成的多孔结构, 发达的气体通道, 使有毒元素得以与更多的氧结合, 生成氧化物留在灰中, 因此排放因子降低。

图5 秸秆生物质型煤的  $\text{PM}_{2.5}$  颗粒物中

As、Se、Pb 的排放因子和计算的质量加权平均值

Fig.5 EFs of As, Se, and Pb in  $\text{PM}_{2.5}$  particles for straw biomass briquettes and corresponding mass weighted average ones

### 3 结 论

1) 将无烟煤和秸秆混合成型制生物质型煤用于民用炊事炉, 能够有效提高燃料的  $\eta_{\text{th}}$ , 降低烟气污染物的排放。 $\eta_{\text{th}}$  增加了 81~137%,  $\text{PM}_{2.5}$  的排放因子降低了 90%~98%, CO 的排放因子降低了 48%~92%,  $\text{NO}_2$  和  $\text{SO}_2$  以及  $\text{PM}_{2.5}$  颗粒物中有毒元素 As、Se、Pb 的排放因子也大幅度降低。

2) 根据以落下强度和抗压强度为考核指标的正交试验结果, 考察因素对秸秆生物质型煤强度的影响由大到小依次为: 生物质添加量、成型压力、黏土添加质量、粒度; 较优秸秆生物质型煤的制备参数为: 生物质质量分数 20%、粒度  $\leq 1$  mm、成型压力 25 MPa、黏土质量分数 10%。

3) 秸秆和无烟煤混合成型燃烧具有协同作用。一方面, 生物质的热解温度比无烟煤低, 缺氧条件下, 秸秆的热解气体对无烟煤颗粒起到了助燃作用; 另一方面, 生物质的着火点和燃烬温度较无烟煤亦低, 秸秆燃烬后体积收缩且多孔又为无烟煤的进一步燃烧提供了发达的气体通道, 利于空气进入到型煤内部, 与固相充分接触。

### 参考文献 (References):

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2019 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 国家统计局, 2020: 38.
- [2] SHEN Huizhong, CHEN Yilin, RUSSELL Armistead G, et al. Impacts of rural worker migration on ambient air quality and health in China: from the perspective of upgrading residential energy consumption[J]. Environment International, 2018, 113: 290-299.
- [3] KANT Y, SHAIK D S, MITRA D, et al. Black carbon aerosol quantification over north-west Himalayas: Seasonal heterogeneity, source apportionment and radiative forcing[J]. Environmental Pollution, 2020, 257: 113446.
- [4] 高天明, 张 艳. 中国煤炭资源高效清洁利用路径研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(7): 157-164.

GAO Tianming, ZHANG Yan. Study on high efficient and clean

- utilization ways of China's coal resource[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(7): 157–164.
- [5] 董斌琦,李初福,刘长磊,等.CO<sub>2</sub>近零排放的煤气化燃料电池发电技术及挑战[J].*煤炭科学技术*, 2019, 47(7): 189–193.  
DONG Binqi, LI Chufu, Liu Changlei, *et al.* Integrated gasification fuel cell power generation technology with CO<sub>2</sub> near zero emission and its challenges[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(7): 189–193.
  - [6] 于清航,徐振刚,李 婷,等.燃烧温度对粉煤灰理化特性及脱硫潜力的影响[J].*煤炭科学技术*, 2018, 46(3): 200–205.  
YU Qinghang, XU Zhengang, LI Ting, *et al.* Effect of combustion temperature on physico-chemical properties and desulphurization potentiality of fly ash[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(3): 200–205.
  - [7] FLORENTINO-MADIEDO L, DÍAZ-FAES E, BARRIOCANAL C. Reactivity of biomass containing briquettes for metallurgical coke production[J]. *Fuel Processing Technology*, 2019, 193: 212–220.
  - [8] KHAIRI L, BAHRI S, NURDIN A, *et al.* Effect of coal blended on the physical properties of iron ore briquette for direct reduction iron[J]. *Materials Science Forum*, 2020, 1000: 391–397.
  - [9] REN Xiaoping, LIU Fang, TANG Xintong, *et al.* Study on the slagging of biomass briquette combustion[J]. *E3S Web of Conferences*, 2020, 165: 03035.
  - [10] LI Qing, JIANG Jingkun, WANG Shuxiao, *et al.* Impacts of household coal and biomass combustion on indoor and ambient air quality in China: current status and implication[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 347–361.
  - [11] LU Yan, WANG Qin'geng, ZHANG Xiaohui, *et al.* China's black carbon emission from fossil fuel consumption in 2015, 2020, and 2030[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 212: 201–207.
  - [12] ZHANG J, SMITH K R. Household air pollution from coal and biomass fuels in China: measurements, health impacts, and interventions[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2007, 115(6): 848–855.
  - [13] 石缎花,王 杰,李惠民,等.中国散煤治理的政策执行机制研究[J].*煤炭工程*, 2019, 51(4): 127–133.  
SHI Duanhua, WANG Jie, LI Huimin, *et al.* China's policy implementation mechanism on reducing scattered coal consumption[J]. *Coal Engineering*, 2019, 51(4): 127–133.
  - [14] CHEN Yingjun, TIAN Chongguo, FENG Yanli, *et al.* Measurements of emission factors of PM<sub>2.5</sub>, OC, EC, and BC for household stoves of coal combustion in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 109: 190–196.
  - [15] RAVICHANDRAN Prabahar, CORSCADDEN Kenneth. Comparison of gaseous and particle emissions produced from leached and unleached agricultural biomass briquettes[J]. *Fuel Processing Technology*, 2014, 128: 359–366.
  - [16] SHEN Guofeng, TAO Shu, WEI Siye, *et al.* Reductions in emissions of carbonaceous particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons from combustion of biomass pellets in comparison with raw fuel burning[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46: 6409–6416.
  - [17] SHEN Guofeng, XUE Miao. Comparison of carbon monoxide and particulate matter emissions from residential burnings of pelletized biofuels and traditional solid fuels[J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28(6): 3933–3939.
  - [18] MARGANINGRUM D, ESTIATY L. Value increasing of reject coal with biomass adding as bio-coal briquette[J]. *Indonesian Journal Of Urban And Environmental Technology*, 2020, 3(2): 123–135.
  - [19] IKELLE Ikelle, EZE Olivia. Study on the combustion properties of bio-coal briquette blends of cassava stalk[J]. *ChemSearch Journal*, 2017, 8(2): 29–34.
  - [20] MANDASINI, SUNGKONO, SYARIF T. Biobriquette characteristics of mixture of coal-biomass solid waste agro[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 175(1): 012031.
  - [21] NWABUE F I, UNAH U, ITUMOH E J. Production and characterization of smokeless bio-coal briquettes incorporating plastic waste materials[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2017(8): 233–245.
  - [22] DONG Xianwei, WEN Zhichao, WANG Fusheng, *et al.* Law of gas production during coal heating oxidation[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 29(4): 95–98.
  - [23] 王亚杰,左海滨,赵 骏,等. Hypercoal 制备热压型煤的试验研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(S2): 535–540.  
WANG Yajie, ZUO Haibin, ZHAO Jun, *et al.* Experimental study on preparation of hot-pressed briquette by Hypercoal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(S2): 535–540.
  - [24] ASMARA S, LANYA B, TAMRIN, *et al.* The effect of various varieties of cassava stems waste and tapioca adhesive concentrations on the quality of bio-coal briquette[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 739(1): 012084.
  - [25] NOMURA S. Effect of coal briquette size on coke quality and coal bulk density in coke oven[J]. *ISIJ International*, 2019, 59: 1512–1518.
  - [26] FAIZAL Muhammad. Utilization biomass and coal mixture to produce alternative solid fuel for reducing emission of green house gas[J]. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 2017(7): 950.
  - [27] LI Qing, QI Juan, JIANG Jingkun, *et al.* Significant reduction in air pollutant emissions from household cooking stoves by replacing raw solid fuels with their carbonized products[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 650: 653–660.
  - [28] GB 4363—1984, 民用柴炉、柴灶热性能测试方法[S].
  - [29] ZHANG Junfeng, SMITH Kirk R. Emissions of carbonyl compounds from various cookstoves in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33(14): 2311–2320.
  - [30] WILLIAMS A, POURKASHANIAN M, JONES J M. The combustion of coal and some other solid fuels[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28(2): 2141–2162.
  - [31] YAO Mingyu, CHE Defu, LIU Yanhua, *et al.* Effect of volatile char interaction on the NO Emission from coal combustion[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(13): 4771–4776.
  - [32] 韩 健,刘新华,何京东,等.民用解耦燃煤炉中的NO<sub>x</sub>和CO同时减排[J]. *化工学报*, 2019, 70(5): 1991–1998.  
HAN Jian, LIU Xinhua, HE Jingdong, *et al.* Simultaneous reduction of NO<sub>x</sub> and CO emissions in domestic decoupling coal-fired stoves[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2019, 70(5): 1991–1998.