

# 煤基清洁燃料替代民用散烧原煤的研究进展

陈鹏<sup>1</sup>, 杜文广<sup>1\*</sup>, 杨颂<sup>1</sup>, 上官炬<sup>1</sup>, 刘守军<sup>2</sup>, 樊惠玲<sup>1</sup>

(1. 煤科学与技术教育部和山西省重点实验室, 山西太原 030024;

2. 太原理工大学化学化工学院, 山西太原 030024)

**摘要:** 综述了民用型煤、民用兰炭、民用洁净焦炭 3 种煤基清洁燃料的燃烧特性和污染物排放的现状, 比较了 3 种清洁燃料代替散烧原煤的优劣势。同时指出用洁净焦炭代替民用散烧原煤是可行的。

**关键词:** 民用散烧原煤; 清洁燃料; 型煤; 洁净焦炭; 兰炭

**中图分类号:** TQ534.2; TQ534.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2017)06-0048-05

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.06.011

## Research progress on coal-based clean fuels replacing civil scattered burning coal

CHEN Peng<sup>1</sup>, DU Wen-guang<sup>1\*</sup>, YANG Song<sup>1</sup>, SHANGGUAN Ju<sup>1</sup>, LIU Shou-jun<sup>2</sup>, FAN Hui-ling<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Coal Science and Technology, the Ministry of Education and Shanxi Province,

Taiyuan 030024, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The combustion characteristics and pollutant emissions situation of three coal-based clean fuels including civil briquette, civil semi-coke and civil clean coke are reviewed. The advantages and disadvantages of these three kinds of clean fuels in replacing scattered burning raw coal are compared. Meanwhile, the feasibility of clean coke replacing scattered burning coal is proposed.

**Key words:** civil scattered burning coal; clean fuel; briquette; clean coke; semi-coke

据《BP 世界能源统计年鉴 2016》统计, 煤炭依然是我国能源消费的主体, 约占能源消费总量的 64%。2015 年我国煤炭消费总量约 36.5 亿 t, 其中动力用煤占 47.0%, 炼焦用煤占 16.4%, 建材用煤占 13.6%, 化工用煤占 6.5%, 散烧原煤及其他用煤约占 16.5%, 散烧煤主要用于农民生活、农业生产、中小型锅炉采暖等领域, 仅华北地区散煤消耗量就达 2 亿 t/a<sup>[1]</sup>。支国瑞等<sup>[2]</sup>在河北省保定市冬季采暖期(2013 年 11 月—2014 年 3 月)采用入村调查的方式对 5 个村庄 543 户村民调查测算发现, 2013 年采暖季保定地区农村民用散烧原煤用量超过 500 万 t, 排出的烟粉尘(PM)和 SO<sub>2</sub> 总量分别为 5.4 万 t 和 11.2 万 t, 这说明农村散烧煤的污染物排放量巨大。冬季北方雾霾多发与采暖季燃煤污染物排放量大有直接关系, 燃煤是中国雾霾形成的主要原因之一<sup>[3]</sup>。民用原煤散烧多为无组织低空排放, 燃煤消耗量大, 污染源分散, 污染面积广, 若采用“煤改气”、“煤改电”、集中供热等措施, 存在成本高、效率低等缺陷, 为了解决这一问题, 采用煤基清洁燃料(简称洁净燃料)替代散烧原煤被认为是一种有效

的污染治理手段。目前, 在技术上可行, 市场上成本低, 用户能认可的清洁燃料主要有 3 种: 民用型煤、民用兰炭、民用洁净焦炭。

## 1 民用散烧原煤的使用现状

民用散烧原煤主要指无烟煤和低阶烟煤, 有学者对京津冀地区散烧原煤的来源地进行了统计<sup>[4]</sup>, 详见表 1。

由表 1 可知, 大部分无烟煤挥发分和含硫量都较低, 都能达到环保对燃煤污染物的排放指标, 然而低阶劣质烟煤因具有价格低、易着火、燃烧效果好等特点, 所以其消耗量占民用散烧原煤的比重最大, 因其挥发分和含硫量均较高, 导致了其污染物排放量占民用燃煤污染物排放的绝大部分。由于民用采暖锅炉或炊事炉具燃烧效率低, 在民用原煤燃烧过程中, 会将大量的挥发性重金属、粉尘颗粒物(PM)及多环有机污染物(POPs)等释放到空气中, 对人的健康及环境造成很大的影响<sup>[5-8]</sup>, 可见, 烟煤燃烧后除了控制烟尘、SO<sub>2</sub> 等污染物排放量外, 对有机类污染物的排放量也不容小视。黄卫等<sup>[9]</sup>探讨了蜂窝煤

表1 京津冀民用原煤及煤质指标统计表

产地	煤种	灰分/%	挥发分/%	全硫/%	优势	劣势
京西	无烟煤	≤25	6~8	0.2~0.5	低硫、易成型	产量低
晋城	无烟煤	≤18	8~11	0.3~1.5	产量大,部分煤低硫	低硫煤不多
阳泉	无烟煤	≤21	9~12	1.0~2.5	产量高、运距短	硫分高
河南	无烟煤	≤20	8~11	0.5~1.5	产量高,部分煤低硫	低硫煤不多
宁夏	无烟煤	≤10	≤8	0.3~1.5	灰分低,硫分低	产量低,运距远
朝鲜	无烟煤	≤20	≤12	0.3~0.4	价格便宜	供应渠道不畅
鄂尔多斯	烟煤	6~8	≥38	0.3~0.6	低灰、低硫,产量大	挥发分高
陕西榆林	烟煤	6~8	≥38	0.3~0.6	低灰、低硫,产量大	挥发分高
山西	烟煤	10~20	30~38	0.5~1.5	热值高,运距短	高硫

燃烧排放颗粒物(PM)的化学组成认为,颗粒物(PM)组成与煤成熟度之间有一定关系,即无烟煤排放颗粒物(PM)的颗粒数远小于烟煤颗粒数,煤的成熟度对颗粒物(PM)、有机碳(OC)和元素碳(EC)的排放量影响很大。Wang等<sup>[10]</sup>检测了5种不同地质年代的煤,在燃烧过程中产生的芳香烃和含氧多环芳烃的总量,发现成熟度高的烟煤比成熟度低的烟煤排放量更大,且炉具的燃烧效率对有机化合物排放量的影响也很大。因此选择合适的清洁燃料代替民用散烧烟煤,不仅能满足居民的取暖需求,而且能治理分散性的污染源,同时又保护了环境,经济效益和社会效益都很显著。

## 2 可用于替代散烧原煤的煤基清洁燃料

### 2.1 民用型煤

型煤,是将粉煤与添加剂(固硫剂和黏结剂)按适当的比例混合均匀,经特定的工艺和设备成型,得到具有一定尺寸形状、一定机械强度和理化特性的人工“块煤”。传统型煤在替代民用散烧原煤时,存在着火延迟、燃尽度差、断火和燃烧不透等问题。生物质型煤作为型煤中的一种,是在无黏结剂成型的基础上,利用生物质(秸秆、稻壳、锯末等)自身的黏结性与粉煤共混成型。生物质型煤技术是一种节能、高效的洁净煤技术,其优势是不仅能够综合利用广泛的生物质,而且还能作为黏结剂或助燃剂提高型煤的燃烧效率,降低燃煤污染物的排放量<sup>[11-12]</sup>,尤其在燃烧特性方面的优势,受到国内外学者的普遍认可。

#### 2.1.1 生物质型煤的污染物排放情况

Wang等<sup>[13]</sup>通过比较生物质型煤、柳林原煤、柳林半焦三者的燃烧效率和污染物排放量发现,生物

质型煤比原煤的污染物排放量显著降低,且燃烧效率有所升高。Kazanc等<sup>[14]</sup>研究4种不同粉煤与不同生物质混合后发现,SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>释放量都有明显的降低,NO<sub>x</sub>为22%~39%,且SO<sub>2</sub>释放量随着钙含量的增加而降低。

文献[15]评估了尼泊尔生物质型煤的发展前景认为,像尼泊尔这样的发展中国家适合发展生物质型煤来充分利用其农业废弃物,生物质型煤不仅能提供充足的能源需求,而且还能对大量的生物质废物再利用,这也符合我国废物综合利用的发展理念。

#### 2.1.2 对生物质型煤燃烧特性的研究

生物质的纤维素含量较多,燃烧效率高,与煤混合后能够降低型煤的着火温度,提高燃尽率,从而改善型煤的燃烧特性,降低烟尘颗粒物的排放量,由此学者们对其燃烧的热稳定性和燃烧机理等进行了大量的实验研究<sup>[12,16-17]</sup>。通过对生物质型煤的燃烧特性的深入研究,有助于将其作为洁净燃料更好地应用到民用散烧原煤领域。有学者对生物质型煤燃烧机理进行了探讨,认为其实质是一个静态渗透式扩散的过程<sup>[12]</sup>,燃烧过程机理分析如图1。

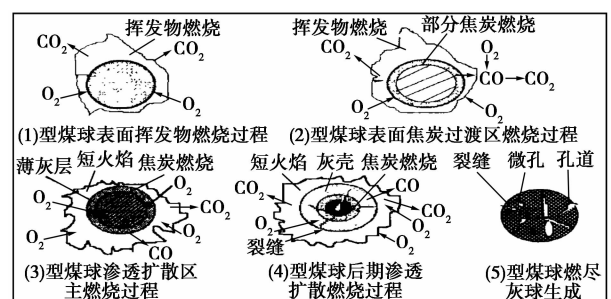


图1 生物质型煤燃烧机理示意图

同时部分学者针对传统型煤燃烧时存在的着火

延迟、热稳定性差、燃尽效率低等问题,对影响燃烧速率的因素进行了研究,如通风情况、燃烧温度、生物质添加量、几何尺寸等,发现在 800~950℃ 时,通风情况对燃烧速率的影响最大<sup>[18-19]</sup>。浮爱青等<sup>[20]</sup>考察了着火特性和燃尽特性,并提出生物质型煤燃烧效率的提高,其实质是改变了型煤的挥发分产率和孔隙结构,从而改善了型煤的燃烧性能。此外,燃料种类、固硫剂及其添加量等因素也会影响生物质型煤的燃烧速率。

### 2.1.3 生物质型煤存在的问题

生物质型煤技术的研究主要集中在降低烟尘排放、脱除 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 及改善燃烧特性等方面,并取得了丰硕的成果。但是,将其作为民用替代燃料,在机械强度和防水性能方面还不能满足要求。Blesa 等<sup>[21]</sup>采用蜜糖作黏合剂,橄榄石作生物质与褐煤混合,研究其固化温度对生物质型煤的影响发现,固化温度在 200℃,固化时间 2 h,生物质型煤具有最好的机械强度,同时也提高了型煤的防水性(形成羧酸基团)和稳定性(形成氢键)。这也说明生物质型煤在民用应用领域还有很多的问题需要解决,同时若要得到市场和用户的认可,在降低成本、提高产品质量、保护环境等方面还有很多工作要做。因此未来生物质型煤技术应该是面向市场,朝着成本低廉、工艺简单、废物利用、清洁高效的方向发展。

## 2.2 民用兰炭

兰炭是无黏结性或弱黏结性的高挥发分煤,经中、低温热解得到的固体炭质产品,因燃烧的火焰为蓝色,也称蓝炭,其具有固定碳高、比电阻高、化学活性高、含灰分低、铝低、硫低、磷低等特点,简称“三高四低”特性<sup>[22-23]</sup>。兰炭(半焦)主要用于生产电石、铁合金、化肥造气等行业的还原剂,在国家经济放缓,产业结构调整,煤炭行业产能过剩的背景下,为应对传统行业对兰炭需求锐减的不利局面,所以把兰炭作为一种洁净燃料替代民用散煤燃烧引起了学者们的极大关注。文献<sup>[24-26]</sup>提出,如果不考虑支出成本,用电能和天然气代替民用散烧原煤是理想的方式,但是经济性却是选择洁净燃料最重要的考虑因素,因而用兰炭代替原煤可使污染物排放量降低,燃烧效率提高,成本较低,同时国际煤炭价格下降对我国煤炭市场也会产生很大影响,因此我国煤炭的成本也会随之降低,若政府强力推广兰炭代替民用散烧原煤,完全能够解决散烧原煤污染治理的难题。

### 2.2.1 燃烧兰炭的污染物排放情况

兰炭是一种清洁的燃料,可利用其自身的低含硫结合中、低温热解后,使挥发分部分释放,与散烧原煤和型煤相比,在燃烧过程中,其烟尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 的排放浓度都很低,可以达到国家对煤基燃料污染物排放的要求。张鑫<sup>[27]</sup>考察了清洁燃料兰炭替代无烟煤的可行性,认为兰炭燃尽时间比无烟煤低,分别为 297.26 min 和 303.25 min;兰炭的残炭率、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 排放浓度比无烟煤都低,分别为无烟煤的 1/10、1/4、1/7,燃烧效率要高于无烟煤。侯吉礼等<sup>[28]</sup>选取神木兰炭、晋城无烟煤、宁夏无烟煤、神木烟煤 4 种煤,采用 3 种不同燃烧炉具,对比了不同煤种在同一炉具中的污染物排放差异,结果,在北京民用炉、陕北民用炉、炊事炉灶上,兰炭颗粒物 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 的排放量比其他原煤都低。Li 等<sup>[26]</sup>对兰炭、烟煤、无烟煤在 2 种不同锅炉上试烧实验,对比 3 种燃料的颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)、元素碳(EC)、有机碳(OC)和一氧化碳(CO)的排放量发现,兰炭排放量远比原煤的低。因此,用兰炭代替民用散烧原煤是可行的,在污染物排放方面也能达到环保对污染物排放要求,是一种较好的清洁燃料。

### 2.2.2 兰炭燃烧特性的研究

由于着火温度和燃尽温度是衡量燃料燃烧特性好坏的主要指标<sup>[22]</sup>,侯吉礼等<sup>[28]</sup>利用热重分析仪研究了兰炭的着火特性,结果,兰炭的着火温度、燃尽温度分别为 524、654℃,比宁夏汝箕沟无烟煤的 568、702℃ 和晋城无烟煤的 553、678℃ 都低,但是比神木烟煤的 413、500℃ 稍高。文献<sup>[29]</sup>采用热重分析仪对比 2 种兰炭、4 种无烟煤和 1 种烟煤的燃烧特性,也得到了兰炭的着火温度比无烟煤低的结论。刘典福等<sup>[30]</sup>认为半焦的性质与原煤有较大差别,半焦着火性能不如原煤,且燃尽较难,随着温度的增加半焦活化能增加,燃烧反应性下降,结论是挥发分、灰分、孔隙结构对半焦燃烧特性的影响很大。廖洪强等<sup>[31]</sup>建立了半焦燃烧动力学模型,通过求取表观活化能平均值认为,表观活化能的大小反映了燃烧反应活性的高低。对于半焦的燃烧特性的研究较少,对半焦燃烧特性起主导作用的是挥发分、灰分、孔隙率,还是活化能还不能完全确定,有待于进一步研究

### 2.2.3 兰炭用作民用燃料存在的问题

由上可知,兰炭代替民用散烧原煤在燃烧特性方面能够满足要求,在着火温度和燃尽率上,兰炭的表现比无烟煤更优越,比烟煤稍差一些,兰炭若要应

用到民用燃料领域,在经济性、机械强度(远距离运输)和产品粒度(炉具结构)等方面还有待于进一步研究。尽管如此,兰炭清洁燃料在代替民用散烧原煤方面仍是一种可选择的方案。

## 2.3 民用洁净焦炭

### 2.3.1 产生背景

2015年5月国家能源局发布了《煤炭清洁高效利用行动计划(2015—2020年)》<sup>[32]</sup>,制定煤炭清洁高效利用的7个任务,其中一条明确提出“加大民用散煤清洁化治理力度,减少煤炭分散直接燃烧”。山西省与京津冀一样,城中村和农村也是以散烧原煤为主要采暖能源。据统计,2014年底,山西太原市采暖涉煤的城中村和农村305个,采暖锅炉或火炉共10万多台,采暖季耗煤量约100万t,占市区采暖燃煤总量的47.6%,太原市采暖锅炉或火炉烟尘排放量达3.12万t/a,占分散式散烧煤总排量的82%,SO<sub>2</sub>排放量达2.4万t/a,占分散式散烧煤总排量的67%<sup>[33]</sup>。为了解决民用散烧原煤污染,同时解决山西省焦化产能过剩的问题,太原市政府委托太原理工大学科瑞康洁净能源有限公司与山西焦煤旗下西山五磷煤焦开发有限责任公司合作,通过将粉煤与固硫添加剂按照适当的配比混合,经捣固和高温干馏后得到了具有一定块度、一定的冷热强度的焦炭,也称洁净焦炭。同时在炼焦过程中,富产的焦炉煤气可用于合成甲醇、分离甲烷、氢气等工业和民用燃料,富产的焦油还可用于生产高附加值的化学产品,达到洁净、高效综合利用煤炭的目的。洁净焦炭具有高温固硫、催化助燃、自主补碳(增加焦炉煤气中CO的含量)等特点,其改变了冶金焦着火点高、燃烧效果差不能作民用燃料的现状,从而可以用洁净焦炭来替代燃烧原煤,降低了对环境造成的污染。

### 2.3.2 作为替代燃料的污染物排放情况

2014年11月—2015年9月冬季采暖季,洁净焦炭产品率先在太原市5个城中村(柴村、大东流村、董茹村、五府营村、彭村)进行实地试烧实验,燃煤主要污染物检测结果表明,与燃烧原煤相比,颗粒物(PM)、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>等排放浓度分别下降约94.6%、70.0%、55.0%,尤其在捅火或加料过程中基本无黑烟排出<sup>[33]</sup>。2016年1月国家环保局与环境监测中心对民用洁净焦炭与在京津冀三地广泛推广的民用型煤在链条炉上做燃烧排放对比,结果,与型煤燃烧相比,颗粒物(PM)、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>的排放浓度分别下降78.2%、69.8%、67.7%<sup>[1]</sup>,而且燃烧性能与型煤相

差不大。在京津冀、山东、山西等地推广使用洁净焦炭替代散烧原煤都取得了较理想的效果,且燃烧性能得到了用户的广泛认可。与燃烧型煤、兰炭和原煤相比,洁净焦炭污染物排放浓度比兰炭、型煤更低,燃烧特性效果较好,在替代民用散烧原煤方面具有很大的潜力。

### 2.3.3 洁净焦炭存在的问题

在试验燃烧和推广过程中,洁净焦炭存在着采暖锅炉局部温度过高(>150℃)时,固硫效率下降明显,且燃烧时存在着着火点比烟煤高,着火延迟,燃烧效果不如烟煤燃烧速率高等问题。与型煤燃烧特性的研究相似,着火温度和燃尽率对洁净焦炭在民用燃烧领域的应用也至关重要,谌伦建等<sup>[34]</sup>研究发现,型焦(与焦炭类似)的着火温度比型煤低的原因可能有3方面,一是型煤焦化后孔隙结构、孔容积和比表面积都增大,则反应活性点增多更有利于焦炭着火,二是某些矿物质的分解产物,在燃烧过程中具有催化促进作用,三是某些惰性添加剂在型煤焦化后起骨架支撑作用,使空气畅通进入焦炭内部,从而提高焦炭燃烧效率。此外,在热解过程中添加剂可能也会促进煤中有机物大分子、含硫/氮的大分子的释放,从而改变煤中有机质的结构,最终提高焦炭燃烧时的效率,对影响洁净焦炭燃烧特性的因素还有待于进一步研究。

## 2.4 对3种煤基洁净燃料替代民用散烧原煤的优劣对比

3种煤基洁净燃料都可以作为民用散烧煤替代燃料,与原煤燃烧相比,三者污染物排放和燃烧特性方面的优势更明显,但是在清洁燃料的成本、产品质量、行业成熟度、工业化应用和用户认可度等方面表现出了明显的差异,3种燃料的优劣对比详见表2。

表2 3种清洁燃料与燃烧原煤的优劣对比表

名称	着火温度	燃尽率	污染物排放量	产品质量	行业成熟度	工业化应用
原煤	最低	好	最大	无	无	无
生物质型煤	较低	较好	较大	差	不成熟	慢
民用兰炭	较高	较好	较少	较好	成熟	快速
洁净焦炭	较高	最好	最少	最好	成熟	快速

## 3 结论

治理散烧原煤污染最有效、成本最低的方式就是选择煤基清洁燃料代替散烧原煤。从燃烧特性的

方面看,三者的着火点和着火延迟性相差不多,3种燃料都比无烟煤好,比烟煤的燃烧效果稍差一些。从控制颗粒物排放方面来看,兰炭和洁净焦炭的颗粒物(PM)排放浓度比生物质型煤更低。但是,在行业规范和成熟度方面,生物质型煤不及兰炭和洁净焦炭行业的成熟度高,这也将影响到型煤的工业化发展。民用洁净焦炭一出现就表现出比其他煤基燃料更显著的优势,这也为治理散烧原煤的污染提供了一条新途径。

### 参考文献

- [1] 郑文华.利用过剩焦化产能生产民用洁净焦[J].燃料与化工,2016,(3):1-3.
- [2] 支国瑞,杨俊超,张涛,等.我国北方农村生活燃煤情况调查、排放估算及政策启示[J].环境科学研究,2015,28(8):1179-1185.
- [3] 张小曳,孙俊英,王亚强,等.我国雾-霾成因及其治理的思考[J].科学通报,2013,(13):1178-1187.
- [4] 麦方代,王东升,刘明锐,等.京津冀地区洁净型煤使用现状及建议[J].环境保护,2016,44(6):25-27.
- [5] Lee R G M, Coleman P, Jones J L, *et al.* Emission factors and importance of PCDD/Fs, PCBs, PCNs, PAHs and PM10 from the domestic burning of coal and wood in the UK[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(6): 1436-1447.
- [6] Zeedijk I H. Polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in smoke aerosol of domestic stoves burning wood and coal[J]. Journal of Aerosol Science, 1986, 17(3): 635-638.
- [7] Junninen H, Mønster J, Rey M, *et al.* Quantifying the impact of residential heating on the urban air quality in a typical European coal combustion region[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(20): 7964-7970.
- [8] Warnatz J, Maas U, Dibble R W, *et al.* Combustion [M]. Berlin: Springer, 2001.
- [9] 黄卫,毕新慧,张国华,等.民用蜂窝煤燃烧排放颗粒物的化学组成和稳定碳同位素特征[J].地球化学,2014,43(6):640-646.
- [10] Wang Y, Xu Y, Chen Y, *et al.* Influence of different types of coals and stoves on the emissions of parent and oxygenated PAHs from residential coal combustion in China[J]. Environmental Pollution, 2016, 212(14): 1-8.
- [11] Kim H J, Lu G Q, Naruse I, *et al.* Modeling on combustion characteristics of bio-coal-briquettes [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2001, 123(1): 214-227.
- [12] 刘伟军,王佐民.生物质型煤燃烧机理分析和燃烧速度试验研究[J].煤炭转化,1998,(4):52-57.
- [13] Wang J, Lou H, Yang F, *et al.* Development and performance evaluation of a clean-burning stove [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 134: 447-455.
- [14] Kazanc F, Khatami R, Crnkovic P M, *et al.* Emissions of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> from coals of various ranks, bagasse, and coal-bagasse blends burning in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> environments [J]. Energy Fuels, 2011, 25(7): 2850-2861.
- [15] Shakya G R, Shakya D I. Salient features of biomass briquetting in Nepal [J]. International Energy Journal, 2002, 3(2): 99-109.
- [16] Wongwuttanasatian T, Sakkampang C. Combustion characteristics and emission of briquette fuel from biomass mixed with glycerin [J]. Combustion Science and Technology, 2016, 188(6): 1011-1019.
- [17] Nakahara T, Yan H, Ito H, *et al.* Study on one-dimensional steady combustion of highly densified biomass briquette (bio-coke) in air flow [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(2): 2415-2422.
- [18] 张云利,刘坤,孙丽丽.生物质型煤燃烧特性的研究[J].煤炭技术,2003,22(6):114-115.
- [19] 张鸿波,张增贵,董平.生物质型煤燃烧特性的研究[J].洁净煤技术,2002,8(3):37-39.
- [20] 浮爱青,余泽宇,谌伦建.生物质型煤结构对其燃烧特性影响的研究[J].洁净煤技术,2008,14(3):38-40.
- [21] Blesa M J, Miranda J L, Izquierdo M T, *et al.* Curing temperature effect on mechanical strength of smokeless fuel briquettes prepared with molasses [J]. Fuel, 2003, 82(8): 943-947.
- [22] 梁建利.浅析大同市兰炭产业的发展[J].山西焦煤科技,2014,(9):48-50.
- [23] 李奎,祝伟,彭坚,等.神府地区兰炭企业现状与改进建议[J].中外能源,2016,21(3):21-30.
- [24] Yang C J, Xuan X, Jackson R B. China's coal price disturbances: Observations, explanations, and implications for global energy economies [J]. Energy Policy, 2012, 51: 720-727.
- [25] Smith K R. In praise of power [J]. Science, 2014, 345(6197): 603.
- [26] Li Q, Li X, Jiang J, *et al.* Semi-coke briquettes: Towards reducing emissions of primary PM<sub>2.5</sub>, particulate carbon, and carbon monoxide from household coal combustion in China [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 19306.
- [27] 张鑫.兰炭替代无烟煤高效清洁利用的研究[J].洁净煤技术,2015,(3):103-106.
- [28] 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.
- [29] 刘思远,张建良,王广伟,等.兰炭燃烧性能研究[C]//上海:宝钢学术年会,2015.
- [30] 刘典福,魏小林,盛宏至.半焦燃烧特性的热重试验研究[J].工程热物理学报,2007,28(S2):229-232.
- [31] 廖洪强,李保庆,孙成功.煤-焦炉气共热解半焦燃烧动力学特性研究—燃烧模型的建立及其表现活化能动态描述[J].燃料化学学报,1999,(3):246-250.
- [32] 国家能源局关于印发《煤炭清洁高效利用行动计划(2015—2020年)》的通知[Z/OL]. <http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto85/201505/t20150505-1917.htm>.
- [33] 齐伟.为什么要推广民用洁净焦炭?[J].环境经济,2015,(36):17.
- [34] 谌伦建,赵跃民.工业型煤燃烧与固硫[M].徐州:中国矿业大学出版社,2001.■