

常子磐, 郭加汛, 赵耕毛, 等. 新型菊芋秸秆-烟煤混合固体燃料添加剂的选择与燃烧性能分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1610–1615.
CHANG Zi-pan, GUO Jia-xun, ZHAO Geng-mao, et al. Selecting additives for optimum combustion performance of a new-type Jerusalem artichoke-bituminous coal solid biofuel pellets[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8): 1610–1615.

新型菊芋秸秆-烟煤混合固体燃料添加剂的选择与燃烧性能分析

常子磐, 郭加汛, 赵耕毛*, 王长海

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要:在研制新型菊芋秸秆-烟煤混合固体燃料的基础上, 筛选不同添加剂[MgCO₃、CaCO₃、Al₂O₃、Al₂Si₂O₅(OH)₅]优化燃料, 以提高生物质混合固体燃料的燃烧性能。将四种添加剂以 3% 比例(质量比)与菊芋秸秆-烟煤混合固体燃料混合, 比较了不同添加剂对混合固体燃料的灰分、结渣率、放热量、烟黑、灰熔点、烟气成分等的影响。结果表明: 四种添加剂对酸性气体有明显的吸附作用, 且能有效降低混合固体燃料的结渣率, 其中 CaCO₃ 添加剂使混合固体燃料的灰分含量、烟黑的林格曼指数下降最为明显。这表明, CaCO₃ 添加剂能有效缓解混合固体燃料中的灰分、烟黑、酸性气体的生成, 提高其燃烧性能, 是一种较为理想的新型菊芋秸秆-烟煤混合固体燃料添加剂。

关键词: 菊芋; 烟煤; 混合固体燃料; 添加剂; 燃烧性能

中图分类号: X712 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)08-1610-06 doi:10.11654/jaes.2015-0456

Selecting additives for optimum combustion performance of a new-type Jerusalem artichoke-bituminous coal solid biofuel pellets

CHANG Zi-pan, GUO Jia-xun, ZHAO Geng-mao*, WANG Chang-hai

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Jerusalem artichoke biomass has been used to produce biofuel and can also improve the combustion performance of bituminous coal after adding to the coal. However, Jerusalem artichoke-bituminous coal solid biofuel pellets (JAC pellets) still produce large amount of slag during combustion. Here we examined the combustion characteristics of JAC pellets after mixing with MgCO₃, CaCO₃, Al₂O₃ and Al₂Si₂O₅(OH)₅ at 3% (*m:m*) to select additives for optimum combustion performance of JAC pellets. Results showed that adding additives decreased slagging rates to a great extent, while absorbed acid gases effectively. Addition of CaCO₃ resulted in a significant reduction in ash content and Ringelman emittance. In summary, CaCO₃ improved the combustion performance of the JAC pellets and could be a promising additive for JAC pellets.

Keywords: Jerusalem artichoke; bituminous coal; solid biofuel pellet; additive; combustion characteristics

我国经济处于迅速发展的时期, 对煤炭的消耗也日益增加, 化石能源过度消耗不仅带来能源的危机, 而且带来日益严峻的环境污染问题^[1]。生物质能是一种对环境友好的可再生能源^[2-3], 在现有能源结构中, 可以直接、有效地缓解能源紧张的状况^[4]。

菊芋 (*Helianthus tuberosus*) 是一种菊科 (Asteraceae) 向日葵属多年生草本植物, 具有高产、耐盐、抗旱、耐贫瘠的特点, 目前广泛种植于我国山西、黑龙江、山东、江苏以及其他土壤贫瘠地区^[5]。菊芋作为能源植物具有独特的优势, 其优异的经济、环保和能源开发价值越来越受到国内外的重视^[6-8]。菊芋地上部分的秸秆高达 1~3 m, 生物量极大, 可作为生物质燃料加以利用^[9]。煤与菊芋秸秆混合燃烧, 能够改善煤的燃烧性能^[10], 但是菊芋秸秆生物质和烟煤在高温燃烧的情况下依然会产生挥发性气相碳物质, 使烟气中带有

收稿日期: 2015-04-07

基金项目: 江苏省自主创新项目 (CX(12)1005)

作者简介: 常子磐 (1988—), 男, 内蒙古兴安盟人, 硕士, 从事农作物秸秆高能利用研究。E-mail: czpcp01@163.com

* 通信作者: 赵耕毛 E-mail: seawater@njau.edu.cn

大量的飞灰和酸性气体。由于生物质混合燃料中的碱金属含量偏高,灰熔点较低易产生结渣^[11]。灰渣在燃料燃烧过程中影响放热量^[12-13]。灰渣的形成是对锅炉腐蚀的一个主要原因,也是影响放热量的一个主要原因。

目前国内外对生物质混合固体燃料的研究非常重视,对于其燃烧容易结渣问题,多选择从原料的源头进行处理^[14],即在原料内添加一些粉煤灰^[15]、高岭土^[16]、硅藻土^[17-18]和石英砂^[19]等,实验表明这些添加剂对缓解生物质燃料容易结渣有一定的效果^[20]。

本研究将菊芋秸秆与劣质烟煤按照一定质量比(菊芋:烟煤=2:3)混合,并在此基础上分别添加不同的添加剂制成菊芋-烟煤混合固体成型燃料,研究不同添加剂对混合固体燃料中灰分、结渣率、烟气成分、烟黑、放热量、灰熔点等的影响,为研制开发燃烧性能好、环保标准高、对燃具腐蚀性低的新型生物质燃料提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

实验所用的生物质原料南菊芋 1 号菊芋秸秆,收集于江苏大丰盐土大地工业园区周围的农田;大同烟煤采购于江苏大丰港。 MgCO_3 、 CaCO_3 、 Al_2O_3 、 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_5$ (高岭土)均为分析纯,采购于国药集团化学试剂公司。

1.2 试验方法

1.2.1 混合型生物质固体燃料生产工艺流程

经生物质固体燃料生产流程制备混合型固体燃料(图 1)。SG50 型秸秆粉碎机、沙克龙将菊芋秸秆粉碎至粒径为 0.3~0.4 mm(80~100 目)的生物质粉末,置于向阳通风干燥处自然干燥 5~8 h,将烟煤、 MgCO_3 、 CaCO_3 、 Al_2O_3 、高岭土等吸附原料粉碎至 0.3~0.4 mm 的粉末备用;将 40%的菊芋秸秆粉末(JAS)和 60%的大同烟煤粉末(BC)混合后再加入添加剂混合均匀(添加剂占总质量的 3%)。经螺旋提升机进料仓送至 SKJ300 秸秆颗粒机,生产出不同比例菊芋秸秆的混合型固体成型燃料。试验在盐城市海洋生物产业园固体成型燃料中试生产车间进行。

1.2.2 分析检测方法

(1)放热量测定:采用 ZDHW-2010B 型微机压缩制冷全自动量热仪测定添加不同添加剂的固体成型燃料放热量。

(2)烟气成分测定:用德国 Rbr 烟气分析仪分析

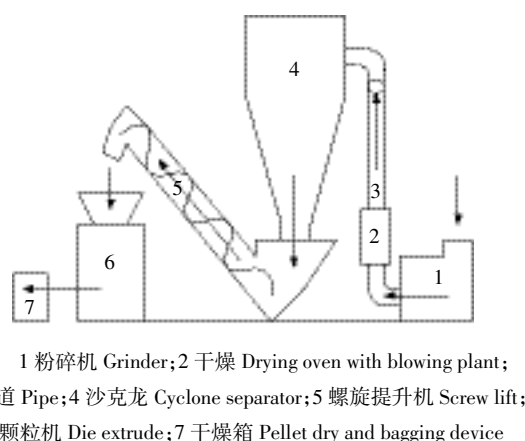


图 1 生物质固体燃料生产流程图

Figure 1 Scheme of manufacturing process for solid biofuel pellets

测定添加不同添加剂的固体成型燃料的烟气成分。

(3)烟黑测定:采用林格曼黑度测定比对的方法进行测定。将烟黑比色卡置于加热手柄控制的采样碳管的烟黑测定卡孔,开启烟黑测量泵,抽取 1.63 L 的样气,从加热槽中取出烟黑过滤片,对照烟黑对比卡,读出不透明的级别,重复该过程 3 次,取其平均值。

(4)灰分测定:温度设置为 $(550\pm 10)^\circ\text{C}$,通过计算添加不同添加剂的固体成型燃料在空气中加热后剩余物的质量占样品总质量的百分比来测定灰分。

(5)燃烧结渣情况测定:取 3~6 mm 粒度的添加不同添加剂的固体成型燃料和木炭,分别放入结渣性测定仪气化装置中,在恒定鼓风 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 情况下进行燃烧,待燃尽后冷却并筛选 6 mm 以上的渣块,称量计算结渣率。

(6)灰熔点测定:依据《煤灰熔融性的测定方法》(GB/T 219—2008)进行操作。

1.2.3 添加剂的选择

菊芋生物质秸秆和烟煤化学组成比较复杂,在其混合燃烧的过程中,添加氧化钙对二氧化硫有一定程度的吸收作用^[21],本实验选择具有常规吸附作用的 MgCO_3 、 CaCO_3 、 Al_2O_3 、高岭土为吸附原料。研究表明当添加剂用量在燃料中所占的比例为 1%、2%、3%时,随着添加剂用量的增加,吸附效果越好,因此本实验选取 3%的添加剂用量。空白组(CK)为不添加任何添加剂的 40%的菊芋秸秆和 60%大同烟煤的混合型生物质燃料。

1.3 数据统计分析

利用 Microsoft Excel 软件、SPSS18.0 软件进行单因素方差分析,采用 Origin8.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 添加剂对灰分的影响

空白组的灰分含量为 9.09%, 添加不同添加剂对燃料的灰分含量有一定的影响, CaCO_3 、 MgCO_3 使燃料的灰分含量降低, Al_2O_3 和高岭土使混合燃料中的灰分含量增加(图 2)。 MgCO_3 对菊芋秸秆-劣质烟煤混合固体成型燃料的灰分含量降低最为明显, 使其降低为 7.03%, 比混合燃料的灰分降低了 2.02%。添加 CaCO_3 对混合固体灰分含量较对照下降了 0.98% ($P < 0.05$)。 Al_2O_3 和高岭土使混合燃料中的灰分含量分别增加了 0.6% 和 1.01%。

2.2 添加剂对结渣率的影响

加入添加剂后对结渣效率有很大的影响, 空白组的混合燃料结渣率为 35%, 添加质量分数为 3% 的 Al_2O_3 、 CaCO_3 、高岭土、 MgCO_3 的混合燃料结渣率分别为 16%、8%、28%、2%(图 3)。 MgCO_3 对结渣率降低的影响最大, 降低了 33%, 表明其具有非常强的抗结渣能力; 其次, CaCO_3 对熔渣结渣率(8%)的降低量较明显, 比 CK 降低了 27% ($P < 0.01$), Al_2O_3 相对于空白组来说使结渣率下降了 19%; 添加高岭土较空白组来说结渣率仅下降了 7%。

2.3 添加剂对放热量的影响

添加剂对混合固体燃料的放热量的影响见图 4。空白组的放热量为 $20\,883.5\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$, 添加质量分数为 3% 的 Al_2O_3 、 MgCO_3 、高岭土后放热量分别为 $20\,875.7$ 、 $20\,787.4$ 、 $20\,905.9\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 。添加 CaCO_3 的混合固体燃料放热量($21\,043.2\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$)明显高于空白组, 但是多数添加剂对燃料燃烧放热量有降低的作用。

2.4 添加剂对烟气成分的影响

将添加不同添加剂的 40% 菊芋秸秆-烟煤混合

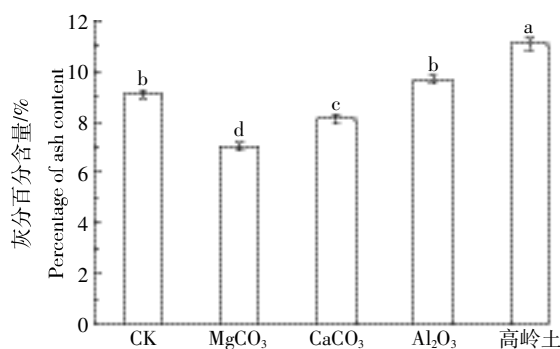


图 2 不同添加剂固体燃料的灰分

Figure 2 Ash content of solid biofuel pellets with different additives

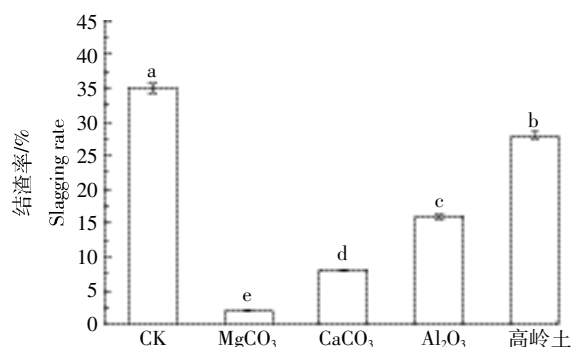


图 3 不同添加剂固体燃料的结渣率

Figure 3 Slagging rates of solid biofuel pellets with different additives

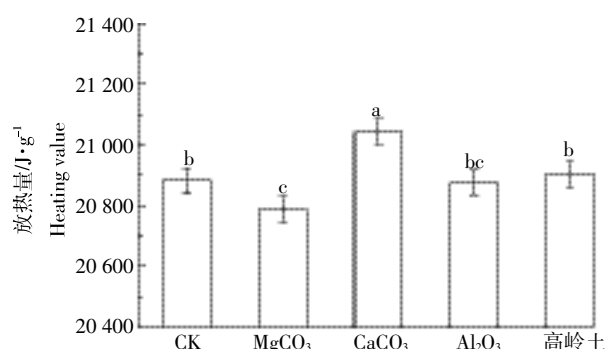


图 4 不同添加剂固体燃料的放热量

Figure 4 Heating values of solid biofuel pellets with different additives

固体成型燃料分别放入马弗炉内 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 充分燃烧, 并在排气口收集烟气进行检测, 结果见表 1。混合固体燃料充分燃烧后, 添加剂对燃料 CO_2 的排放量有所降低, 其中高岭土导致 CO_2 的排放量相对于空白组降低较为明显。 MgCO_3 、 CaCO_3 、高岭土添加剂均使烟温略有下降。

三类主要有毒酸性气体排放量方面, 空白组燃烧后 NO_2 、 SO_2 、 H_2S 的排放量分别为 56.4 、 351.5 、 $228.4\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 添加 Al_2O_3 对三类酸性气体的排放基本无影响。添加 MgCO_3 较空白组分别下降了 32.44% (NO_2)、30.71% (SO_2)、21.89% (H_2S), 添加 CaCO_3 较空白组分别下降了 35.46% (NO_2)、24.24% (SO_2)、27.01% (H_2S)。 MgCO_3 和 CaCO_3 对这三类酸性气体均具有显著的吸附效果。高岭土对这三类有毒气体的吸收也具有一定的作用, 分别下降了 22.87% (NO_2)、20.45% (SO_2)、16.9% (H_2S), 但低于添加 MgCO_3 、 CaCO_3 对有毒酸性气体的吸附能力。

2.5 添加剂对烟黑的影响

添加剂对混合燃料燃烧的烟黑有一定的影响, 从

表 1 不同添加剂的混合固体燃料烟气成分($\bar{X}\pm\text{SD}$)

Table 1 Composition of smoke produced from solid biofuel pellets with different additives($\bar{X}\pm\text{SD}$)

项目	烟温 Temperature/℃	氧气 O ₂ /%	二氧化氮 NO ₂ /mg·m ⁻³	二氧化硫 SO ₂ /mg·m ⁻³	硫化氢 H ₂ S/mg·m ⁻³	二氧化碳 CO ₂ /%
CK	114.2±2.80a	6.29±0.834b	56.4±4.55a	351.5±4.68a	228.4±4.26a	13.7±4.26a
Al ₂ O ₃	115.6±5.34a	6.28±0.533b	53.2±3.67a	348.9±5.42a	230.4±5.98a	13.3±3.55a
MgCO ₃	100.3±3.55c	6.23±0.898c	38.1±2.94c	243.4±3.57d	178.4±3.67b	12.4±4.63c
CaCO ₃	108.3±3.89b	6.25±0.464c	36.4±5.33c	266.3±6.34c	166.7±5.99c	12.2±3.54c
高岭土	105.6±2.64b	6.56±0.576a	43.5±4.57b	279.6±5.36b	189.6±4.56b	11.6±1.44b

注:表中数据为 3 个重复的平均值±标准差(SD);不同小写字母表示不同品种间差异显著($P<0.05$)。

Note: Each value was average ±SD of three replicates. Difference letters indicate significant difference at $P<0.05$.

标准烟黑比色卡可以看出(图 5),空白组的烟黑指数为 6,添加高岭土后烟黑指数为 5,添加剂为 Al₂O₃、CaCO₃ 的烟黑指数均为 4,添加 MgCO₃ 后的烟黑指数为 3。添加剂对烟黑有吸附作用,能降低烟黑指数,尤其是碳酸盐类的添加剂的吸附效果较好。不同添加剂对烟黑的吸附能力依次为 MgCO₃>Al₂O₃=CaCO₃>高岭土。

2.6 添加剂对灰熔点的影响

添加剂对燃料燃烧的灰熔点影响效果如图 6。添加 MgCO₃ 使燃料的变形温度明显降低,较空白组降低了 40℃;添加 CaCO₃ 的燃料变形温度也有一定程度的下降,较空白组下降了 32℃;添加 Al₂O₃ 的燃料较空白组略微下降了 17℃;添加高岭土的燃料在变形温度上有所上升,大约高出空白组 5℃。对于软化温度,添加 MgCO₃ 的燃料软化温度为 1343℃,高于空白组 19℃;添加 CaCO₃ 的燃料软化温度为 1321℃,略低于空白组;添加 Al₂O₃ 和高岭土的燃料较空白组的软化温度均有所提高,分别提高了 2℃和 7℃。软化温度到半球温度各组基本呈现平稳的升温趋势。对于流动温度,较高的依然是添加 MgCO₃ 的燃料,为 1375℃;其次是添加 Al₂O₃ 添加剂的燃料为 1363℃;添加高岭土的燃料和空白组流动温度相同;添加 CaCO₃ 的燃料流动温度为 1344℃,相对最低。

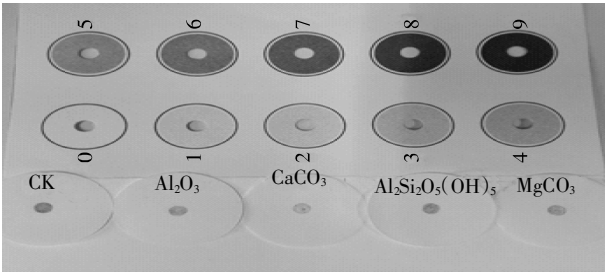


图 5 不同添加剂固体燃料的烟黑

Figure 5 Soot of solid biofuel pellets with different additives

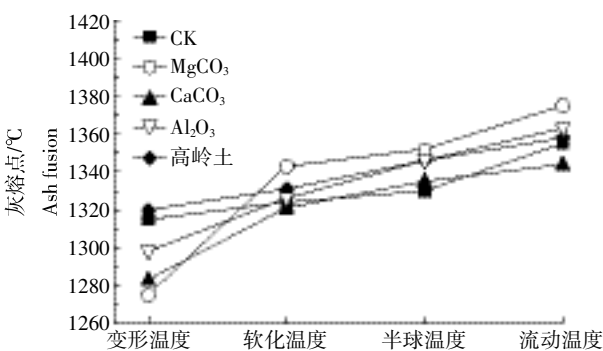


图 6 不同添加剂固体燃料的灰熔点

Figure 6 Ash fusion points of solid biofuel pellets with different additives

3 讨论

为探讨优化菊芋秸秆烟煤生物质混合固体燃料燃烧条件,选取不同添加剂均以 3%的比例添加至 40%菊芋秸秆和 60%烟煤混合的燃料中,分别从结渣率、灰分、放热量、烟气成分、烟黑、灰熔点等方面进行比较研究,探讨添加不同添加剂对燃料燃烧性能的影响,以寻求放热量高、烟气排放环保、抗结渣性能好的燃料,满足实际市场和环境保护对燃料的需求。

研究表明,以活泼的金属氧化物作为添加剂可以有效地降低灰分的比例,Ca 和 Mg 等元素对于灰分的分解和降低结渣率有显著的效果^[22],菊芋生物质秸秆中碱金属含量相对较高,若单独进行菊芋秸秆生物质的燃烧,其灰熔点会相对较低,易产生结渣并腐蚀受热面对燃炉的炉壁破坏较重,生物质、煤添加剂进行混合燃烧会降低灰渣的生成^[23]。这与国内外一些研究添加添加剂降低煤炭、玉米秸秆生物质固体燃料结渣结果一致。Ca 和 Mg 等元素的添加剂抗结渣性比袁艳文等^[24]在玉米秸秆中添加高岭土和方解石效果好,添加适量的添加剂可以在一定程度上降低结渣问题^[24]。尤其添加 MgCO₃ 的燃料结渣率几乎控制在

3%以内,其次添加 CaCO_3 的燃料结渣率也能控制在10%以内;添加高岭土的燃料在抗结渣率上仅略低于空白组,抗结渣能力不及添加 MgCO_3 和 CaCO_3 的燃料。可能是因为高岭土含有较多的 Si 元素,形成的灰分含量也较高, Si 元素和菊芋秸秆固有的碱金属或其他金属元素结合形成较低熔点的金属混合体,进而抵消了结渣能力。添加 Al_2O_3 对燃料的结渣性有一定的阻抗作用,但是效果不如添加 MgCO_3 和 CaCO_3 的燃料。

加入添加剂后对放热量略有影响,无任何添加剂的混合燃料的放热量为 $20\,883.5\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$, 添加 Al_2O_3 、 MgCO_3 、高岭土的放热量与空白组相比均出现放热量降低的现象,但添加 CaCO_3 的燃料其放热量比空白对照组上升了 $159.7\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 。这很可能是 CaCO_3 首先受热分解生成的 CaO 增加了煤炭表面的活性位数,并能改变燃料的活性, CaO 还有防止碳粒子生长和烃分子的聚向作用,从而提高了燃烧效率^[25]使放热量有所升高。

添加不同添加剂的菊芋秸秆-烟煤混合固体成型燃料充分燃烧后,在烟气排放方面 Al_2O_3 、 MgCO_3 、 CaCO_3 对 CO_2 的排放量有所降低,主要是加入混合燃料中的添加剂碳百分含量低于混合燃料含碳量所致。高岭土对 CO_2 的排放有较为明显的吸收现象,主要是高岭土显碱性在高温燃烧情况下可以和 CO_2 气体充分接触并发生反应吸收 CO_2 。添加 MgCO_3 、 CaCO_3 、高岭土的燃料燃烧过程均使烟温略有下降,由排烟带出的热量减少可以提升燃料的能源利用率。对于 NO_2 、 SO_2 、 H_2S 这三类有毒的酸性气体,除了添加 Al_2O_3 添加剂对其影响不大外,其他添加了 MgCO_3 、 CaCO_3 、高岭土的燃料对该三类有毒气体吸收较为显著。Sasaoka 等^[26]对钙基吸收剂研究发现脱除 SO_x 和 NO_x 有明显的吸附作用,本研究发现钙基添加剂对 H_2S 也有较好的吸附性。主要是添加剂分别与这三类酸性气体发生化学反应,产生硫酸盐或硝酸盐,因而对于大气环保有显著的效果。

烟黑和放热量以及燃烧烟气排放正相关,若燃烧不充分会生成部分没有充分燃烧的碳的小颗粒,不仅导致燃料燃烧放热量降低,还会伴随燃料燃烧产生粉尘或 $\text{PM}_{2.5}$ 过量排放的环境问题^[27-28]。添加剂能较为有效地缓解燃烧速度,吸收部分气体,使燃料燃烧更加充分平顺,减少未燃烧的颗粒碳进入烟气,尤其碳酸盐类的添加剂有较好的降低烟黑排放的作用。

燃料在充分燃烧的情况下,炉具的局部高温使燃料含有的部分金属高温熔融,再与燃料中的非金属类的硅硫等元素反应形成黏性表面,随着温度升

高进而熔融冷却形成结渣的渣块。灰熔点的四个特征温度是判别结渣倾向的重要指标。在还原性氛围中若变形温度大于 $1289\text{ }^\circ\text{C}$ 则不易于结渣,在 $1180\sim 1288\text{ }^\circ\text{C}$ 易于中度结渣,当变形温度小于 $1107\text{ }^\circ\text{C}$ 时为严重结渣。对比来看添加 MgCO_3 的燃料变形温度相对偏低,与空白组或其他几类添加剂相比较容易结渣。对于软化温度来说,在 $1260\text{ }^\circ\text{C}$ 以上时均不容易结渣,抗结渣能力较好的添加剂是 MgCO_3 、 CaCO_3 和高岭土,能够有效防止和减缓结渣。研究表明,与加入添加剂的燃料块中添加剂结合原燃料尤其是菊芋秸秆中的钾、硅元素形成高熔点不易结渣的 MgSiO_4 、 $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_8$ 、 KAlSiO_6 等硅酸盐有关。添加剂选取对灰渣的影响与上述结渣试验结果一致。

4 结论

(1)添加 MgCO_3 、 CaCO_3 使混合燃料燃烧灰分减少、结渣率降低,抗结渣效果好于其他两种添加剂。

(2)添加 MgCO_3 、 CaCO_3 对燃烧酸性烟气吸附和烟黑度降低效果明显,添加 Al_2O_3 为添加剂的燃料虽然对烟黑度有降低但是对烟气吸附作用不明显。

(3)添加 CaCO_3 的燃料对放热量有提高的作用,其他三种添加剂对混合燃料放热量影响不大。

(4)添加 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_3$ (高岭土)对灰熔点变形温度有所提升,其他三种添加剂对变形温度虽有降低但依然控制在中等结渣程度范围内。

综合考虑,以 3%的 CaCO_3 为添加剂加入混合燃料具有抗渣性好、烟气排放环保、放热高的效果,对化石能源合理使用和生态环境保护有重要意义。

参考文献:

- [1] 阎立峰,朱清时.以生物质为原材料的化学化工[J].化工学报,2004,55(12):1938-1943.
YAN Li-feng, ZHU Qing-shi. New chemical industry based on biomass[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2004, 55(12): 1938-1943.
- [2] 王久臣,戴林,田宜水,等.中国生物质能产业发展现状及趋势分布[J].农业工程学报,2007,23(9):276-282.
WANG Jiu-chen, DAI Lin, TIAN Yi-shui, et al. Analysis of the development status and trends of biomass energy industry in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(9): 276-282.
- [3] 肖亮,宋国华.生物质能发展现状及前景分析[J].中国环境管理干部学院学报,2008,18(4):35-39.
XIAO Liang, SONG Guo-hua. The status and prospects analysis on biomass energy[J]. *Journal of Environmental Management College of China*, 2008, 18(4): 35-39.

- [4] 党钾涛,温振华,杨 芊,等.用于中低温热解的低阶烟煤型煤的制备[J].黑龙江科技学院学报,2012,22(6):553-557.
DANG Jia-tao, WEN Zhen-hua, YANG Qian, et al. Preparation of briquette from low rank bituminous coal used for medium-low temperature pyrolysis[J]. *Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology*, 2012, 22(6):553-557.
- [5] 丁红梅,董 全,谭晓琼.菊芋的综合利用及发展前景[J].四川食品与发酵,2006,42(5):5-8.
DING Hong-mei, DONG Quan, TAN Xiao-qiong. Review on the application and prospect of Jerusalem artichoke[J]. *Sichuan Food & Fermentation*, 2006, 42(5):5-8.
- [6] Liu Z X, Han L P, Steinberger Y, et al. Genetic variation and yield performance of Jerusalem artichoke germplasm collected in China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(5):668-678.
- [7] Nakamura T, Ogata Y, Hamada S, et al. Ethanol production from Jerusalem artichoke tubers by *Aspergillus niger* and *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Journal of Fermentation & Bioengineering*, 1996, 81(6):564-566.
- [8] Long X H, Chi J, Liu L, et al. Effect of seawater stress on physiological and biochemical responses of five Jerusalem artichoke ecotypes[J]. *Pe-dosphere*, 2009, 19(2):208-216.
- [9] Xue X Y, Liu Z P. Antioxidant enzymes and physiological characteristics in two Jerusalem artichoke cultivars under salt stress[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2008, 55(6):776-781.
- [10] 黄海珍,陈海波,苏俊林,等.煤与生物质混合燃烧特性及动力学分析[J].节能技术,2007,25(1):26-29.
HUANG Hai-zhen, CHEN Hai-bo, SU Jun-lin, et al. Combustion characteristics and kinetic analysis of coal-biomass blends[J]. *Energy Conservation Technology*, 2007, 25(1):26-29.
- [11] Lindström E, Sandström M, Boström D, et al. Slagging characteristics during combustion of cereal grains rich in phosphorus[J]. *Energy & Fuels*, 2007, 21(2):710-717.
- [12] 宋新南,徐惠斌,房仁军,等.基于 Aspen Plus 的生物质燃烧 NO_x 生成模拟[J].环境科学学报,2009,29(8):1696-1700.
SONG Xin-nan, XU Hui-bin, FANG Ren-jun, et al. Simulation of the NO_x emissions during biomass combustion based on Aspen Plus[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(8):1696-1700.
- [13] 阎维平,陈吟颖. TK6 生物质燃料结渣特性分析与判别[J]. 华北电力大学学报,自然科学版,2007,34(1):49-54.
YAN Wei-ping, CHEN Yin-ying. Study on slagging characteristics of biomass fuels[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2007, 34(1):49-54.
- [14] 袁艳文,林 聪,赵立欣,等.生物质固体成型燃料抗结渣研究进展[J].可再生能源,2009,27(5):48-51.
YUAN Yan-wen, LIN Cong, ZHAO Li-xin, et al. The research process of anti-slagging for biomass pellet fuel[J]. *Renewable Energy Resources*, 2009, 27(5):48-51.
- [15] 陈彦广,陆 佳,韩洪晶,等.粉煤灰作为廉价吸附剂控制污染物排放的研究进展[J].化工进展,2013,32(8):1905-1913.
CHEN Yan-guang, LU Jia, HAN Hong-jing, et al. Research development of controlling air pollutions using fly ash as a low cost adsorbent[J]. *Chemical Industry & Engineering Progress*, 2013, 32(8):1905-1913.
- [16] 袁艳文,赵立欣,孟海波,等.玉米秸秆颗粒燃料抗结渣剂效果的比较[J].农业工程学报,2010,26(11):251-255.
YUAN Yan-wen, ZHAO Li-xin, MENG Hai-bo, et al. Effects comparison on anti-slagging additives of corn straw biomass pellet fuel[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(11):251-255.
- [17] Vamvuka D, Kakaras E, Kastanaki E, et al. Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass residuals mixtures with lignite[J]. *Fuel*, 2003, 82(15):1949-1960.
- [18] Demirbas A. Combustion characteristics of different biomass fuels[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30(2):219-230.
- [19] Bhattacharya S P, Hartig M. Control of agglomeration and defluidization burning high-alkali, high-sulfur lignites in a small fluidized bed combustor effect of additive size and type, and the role of calcium[J]. *Energy & Fuels*, 2003, 17(4):1014-1021.
- [20] 马孝琴. 添加剂对秸秆燃烧过程中碱金属行为的影响[J]. 浙江大学学报:工学版,2006,40(4):599-604.
MA Xiao-qin. Effect of additives on behavior of alkali metals during straw combustion[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2006, 40(4):599-604.
- [21] 韩奎华,赵建立,路春美,等.添加剂影响 CaO 固硫反应活性的动力学分析[J].环境科学,2006,27(2):219-223.
HAN Kui-hua, ZHAO Jian-li, LU Chun-mei, et al. Kinetic analysis of additive effect on desulfurization activity of CaO[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(2):219-223.
- [22] Xiong S, Burvall J, Öberg H, et al. Slagging characteristics during combustion of corn stovers with and without kaolin and calcite[J]. *Energy & Fuels*, 2008, 22(5):3465-3470.
- [23] Shen G, Tao S, Wei S, 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(11):6409-6416.
- [24] Wang M, Xia X, Chai Y, et al. Life cycle energy conservation and emissions reduction benefits of rural household biogas project[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(11):245-250.
- [25] 于丰阁. 燃煤固硫——助燃添加剂的实验研究[D]. 沈阳:东北大学,2009:54-56.
YU Feng-ge. Experimental study on effect of sulfur-retention and combustion-supporting additives during coal combustion[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009:54-56.
- [26] Sasaoka E, Azhar Uddin M, Nojima S. Novel preparation method of macro-porous lime from limestone for high-temperature desulfurization[J]. *Ind Eng Chem Res*, 1997, 36(9):3639-3646.
- [27] 郎 芳,马晓茜,王晶晶. 秸秆灰特性的研究[J]. 可再生能源,2007,25(4):25-28.
LANG Fang, MA Xiao-qian, WANG Jing-jing. Study on the ash characteristics of stalks[J]. *Renewable Energy Resources*, 2007, 25(4):25-28.
- [28] Vamvuka D, Zografos D. Predicting the behaviour of ash from agricultural wastes during combustion[J]. *Fuel*, 2004, 83(14):2051-2057.