

玉米秸秆颗粒燃料抗结渣剂效果的比较

袁艳文^{1,2}, 赵立欣¹, 孟海波¹, 林 聪², 田宜水^{1*}

(1. 农业部规划设计研究院, 北京 100125; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘 要:为解决秸秆类生物质颗粒燃料的结渣问题, 通过在玉米秸秆中分别添加 4 种添加剂, 对其结渣率、灰熔融特性、燃料特性等开展试验研究, 并进行验证试验。结果表明, 添加质量分数 3% 的 MgCO_3 、 CaCO_3 、 Al_2O_3 添加剂均可有效改善结渣效果, 其中 MgCO_3 的抗结渣效果最好, 结渣率近似为零; CaCO_3 添加剂结渣率低于 10%, 抗结渣效果性价比最高。同时, 添加添加剂对燃料的燃烧性能无明显影响。这为解决玉米秸秆等生物质固体成型燃料的结渣问题提供了技术依据。

关键词: 秸秆, 生物质, 添加剂, 固体成型燃料, 结渣

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.043

中图分类号: TK6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0251-05

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 Yanwen, Zhao Lixin, Meng Haibo, et al. Effects comparison on anti-slagging additives of corn straw biomass pellet fuel[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 251—255. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

生物质固体成型燃料是指利用农作物秸秆等农业生产剩余物, 通过专用设备压缩成特定形状来增加其密度的固体燃料^[1]。使用时 CO_2 净排放量近似为零, NO_x , SO_2 排放量较低^[2]。不仅可有利于减少广大农村地区秸秆焚烧的现象, 改善大气环境; 而且改变中国农村地区延续几千年传统落后的燃烧模式, 提高农村居民的生活质量, 是生物质能利用的发展方向之一^[3]。但是, 由于秸秆等生物质固有的碱金属元素含量高等特点, 导致灰熔点低, 使用时结渣现象严重。这不仅降低了燃烧效率, 而且还对燃烧设备产生严重的腐蚀现象, 降低燃烧设备的性能和使用寿命^[4]。

目前, 国内外对生物质固体成型燃料的结渣现象高度重视, 主要从原料预处理、添加添加剂以及改进锅炉结构等方面寻求解决方法^[5]。其中, 添加添加剂具有工艺简单、无需调整燃烧设备、成本低等优点, 是研究的重点。国内外研究者采用石英砂 (SiO_2)、氢氧化铝 [$\text{Al}(\text{OH})_3$]、氧化铝 (Al_2O_3)^[6]、磷酸氢钙 ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、膨润土 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、高岭土 [$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$] 和方解石 (CaCO_3)、粉煤灰^[7]等作为添加剂, 结果表明, 添加适量的添加剂可有效避免生物质固体成型燃料在燃烧过程中的结渣问题, 马孝琴^[8]等针对

添加剂对秸秆燃烧过程中碱金属行为的影响进行了试验分析, 表明采用高岭土、燃煤飞灰和硅藻土等添加剂可以减少沉积物中水溶性 K 和 Cl 的含量, 进而减轻秸秆燃烧过程中的结渣腐蚀现象。但上述研究缺乏对添加不同添加剂生物质成型燃料结渣率的测定与比较, 也未考虑到燃烧性能和经济性等因素。

目前, 中国北方主要农作物品种为玉米, 因此本文拟以量大、面广的玉米秸秆为原料, 制取添加不同添加剂的玉米秸秆颗粒燃料, 对其抗结渣效果进行比较, 并进行经济分析, 以寻求抗结渣效果好、成本低的添加剂, 旨在解决玉米秸秆颗粒燃料的结渣问题。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试验用玉米秸秆取自北京市大兴区礼贤镇农村地区。具体玉米秸秆的燃料特性见表 1。

表 1 玉米秸秆的燃料特性
Table 1 Fuel characteristics of corn stalk

工业分析/%				元素分析/%				
水分	灰分	挥发分	固定碳	碳	氢	氧	氮	硫
3.51	13.66	72.06	10.77	42.70	5.47	33.26	1.18	0.22

注: 元素分析中各元素质量分数为空气干燥基的元素质量分数。测试标准采用欧盟 CEN/TS 14774-3, CEN/TS 14775, CEN/TS 15148, 等。

根据国内外研究成果, Mg、Ca、Al 等元素可有效改善生物质燃料的燃烧性能, 本文作者对添加剂抗结渣的效果以及在中国的易获得性等方面进行综合比较, 选取了 MgCO_3 、 CaCO_3 、 Al_2O_3 、高岭土 [$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$] 4 种添加剂。以上添加剂均为分析纯, 白色粉末状固体。Xiong^[9]等研究表明, 当添加比例为总质量的 1%、2% 和 3% 时, 随着添加比例的增加, 生物质固体成型燃料的抗

收稿日期: 2010-04-16 修订日期: 2010-04-26

基金项目: 农业部引进国际先进农业科学技术项目 (2008G2); 生物质固体成型燃料生产工艺与成套设备成果转化 (2008GB23260384)

作者简介: 袁艳文 (1983—), 女, 湖南新化人, 主要从事农业生物环境与能源工程方面技术研究。北京 农业部规划设计研究院, 100125。

Email: yew520@tom.com

*通信作者: 田宜水 (1972—), 男, 辽宁阜新人, 高级工程师, 主要从事节能与生物质能政策、资源和技术研究等项工作。北京 农业部规划设计研究院, 100125。Email: yishuit@yahoo.com

结渣效果越好；但考虑到添加比例高于 3% 时，灰分也随之增加。因此，本试验选取了 3% 的添加比例。

1.2 试验仪器

试验仪器包括：吉林省华光生态工程技术研究所生产的 ZLJ-300 生物质固体燃料成型机^[10]；河南省鹤壁市天弘仪器有限公司生产的 CP-2 密封锤式破碎机、GJ-2 试验筛密封式化验制样粉碎机、JZX-2 结渣性测定仪、SZ11-4 标准自动振筛机、XL-1 箱型高温炉、101-1A 电热鼓风干燥箱、HR-A5 微机灰熔点测定仪、ZDHW-5 型微机全自动量热仪；德国赛多利斯 BSA223S-CW 型分析天平；德国 Elementar 元素分析系统公司生产的 Vario EL 元素分析仪；美国瓦里安公司生产的 VISTA-MPX 型离子发射光谱仪以及瑞士梅特勒-托利多公司生产的 PL2002 型电子天平等。

1.3 样品制取方法

将玉米秸秆收获晾晒一段时间后，首先进行破碎处理，长度约为 1~2 cm，然后分别制取空白组以及添加添加剂的玉米秸秆颗粒燃料。其中，制取添加添加剂的颗粒燃料，其步骤是分别把不同添加剂按照添加比例称量后，均匀洒在破碎好的玉米物料堆上，搅拌均匀，使其与玉米秸秆均匀混合，然后送至成型机制粒成型，生产出的颗粒燃料平摊冷却待用。

1.4 试验方法

为了测定玉米秸秆及其添加添加剂颗粒燃料的结渣特性，本试验选取了结渣率和灰熔融特性 2 个参数进行测定。

1) 结渣率。结渣率作为评价燃料结渣特性的首要标准，提高燃料燃烧性能时，降低结渣率是一项十分重要的方法。测试方法：根据 GB/T 1572—2001《煤的结渣性测定方法》进行测定。将 3~6 mm 粒度的试样，装入结渣性测定仪气化装置中，用同样粒度的木炭引燃，在规定鼓风强度下使其气化（燃烧），待试样燃尽后停止鼓风，冷却，称量和筛分，从大于 6 mm 的渣块质量算出结渣率，表示成型燃料的结渣性。结渣率按下式计算

$$Clin = G_1 / G \times 100\%$$

式中， $Clin$ 为结渣率，%； G_1 为粒度大于 6 mm 渣块的质量，g； G 为总灰渣质量，g。

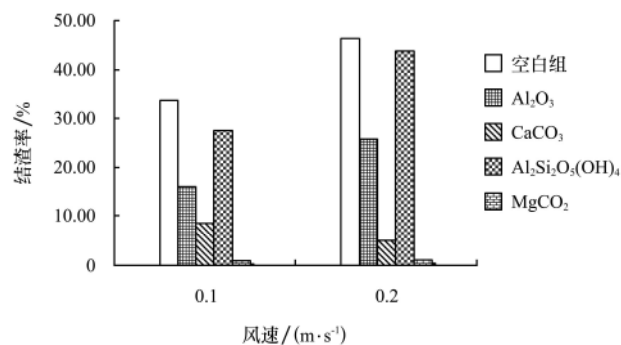
2) 灰熔融特性。当燃料燃烧达到一定温度时，灰分会全部或者部分发生熔化，形成玻璃状坚硬渣块，因此，灰熔融特征温度是判别燃料结渣倾向的重要指标之一。测试方法：根据 GB/T 219—1996《煤灰熔融性测定方法》进行测定。将生物质灰样制成高 20 mm，底边长 7 mm 的正三角锥，在一定的介质中（本试验为氧化气氛），900℃ 前以 15℃/min 的升温速度，900℃ 后以 5℃/min 的升温速度加热，观察灰锥在受热过程中的形态变化，观察并记录它的 4 个特征熔融温度：变形温度、软化温度、半球温度和流动温度。

2 结果与分析

2.1 不同添加剂对结渣率的影响

通过结渣性测定试验表明，添加添加剂的抗结渣效

果很显著，但不同添加剂的结渣率有明显的差别，如图 1。



注：每个试样均在 0.1、0.2 m/s 2 种鼓风强度下分别进行重复测定（对应于 0.1、0.2 m/s 流速的空气流量分别为 2、4 m³/h）

图 1 抗结渣试验结果分析
Fig.1 Analysis of anti-slagging test

玉米秸秆颗粒燃料（空白组）在风速 0.1 m/s 时，结渣率为 33.83%；风速 0.2 m/s 时，结渣率为 46.53%。参照煤的结渣性强度区域标准，空白组结渣率位于中度结渣区。

风速不同，燃料与空气接触面积与接触时间均不同，将影响结渣。在此，本试验暂不分析风速对燃料结渣率的影响。

当风速为 0.1 m/s 时，添加质量分数 3% 的 MgCO₃、CaCO₃、Al₂O₃、高岭土（Al₂Si₂O₅(OH)₄）添加剂的颗粒燃料结渣率分别为 0.93%、8.58%、16.15%、27.59%。当风速 0.2 m/s 时，添加质量分数 3% 的 MgCO₃、CaCO₃、Al₂O₃、高岭土（Al₂Si₂O₅(OH)₄）添加剂的颗粒燃料结渣率分别为 1.12%、5.07%、25.77%、43.94%。

通过上述试验发现，添加 MgCO₃、CaCO₃、Al₂O₃ 添加剂的颗粒燃料结渣率都位于低密度结渣区，其中 MgCO₃ 抗结渣效果最好，结渣率在 1% 左右。其次为 CaCO₃，结渣率小于 10%，抗结渣效果显著；添加 Al₂O₃ 添加剂后，结渣率同比空白组减少为 1/2，抗结渣效果较好。由此可以看出，Mg、Ca 元素具有很好的抗结渣的功

效，Al 元素抗结渣效果较好。添加高岭土（Al₂Si₂O₅(OH)₄）结渣率比较高，略低于空白组，位于中密度结渣区，抗结渣效果不理想。考虑到高岭土中本身含有 Si 元素有关，而 Si 元素可与秸秆中固有的碱金属元素生成低熔点化合物，进而影响了抗结渣效果，所以部分抵消了抗结渣效果。

通过以上抗结渣试验研究，可供选择的添加剂包括 MgCO₃、CaCO₃、Al₂O₃。

2.2 不同添加剂对灰熔融特性的影响

灰熔融特性是影响秸秆类颗粒燃料结渣现象的重要因素之一。本试验针对空白组和添加各种不同添加剂的玉米秸秆颗粒燃料测定其灰熔点温度，具体灰熔点测试结果见表 2。

燃料燃烧时，当燃烧器内局部温度达到灰的软化温度，这时灰粒就会软化，灰中的碱金属与硅、硫等氧化物反应形成一个黏性表面。随着燃烧温度继续升高，这些熔融盐类就形成一个共熔体冷却后形成渣块，因此一

般用燃料软化温度进行判断其结渣倾向。从表 2 可以得出，除添加 MgCO_3 添加剂的颗粒燃料软化温度明显提高（提高 128°C ）外，其余添加剂的颗粒燃料灰熔点提高并不明显，甚至有所下降，如添加 Al_2O_3 的颗粒燃料软化温度仅升高了 33°C ，高岭土的软化温度升高 23°C ，而 CaCO_3 则下降 21°C 。这可能与玉米秸秆在所属秸秆类中其灰熔点较高有关，比水稻秸秆软化温度高 200°C ，高粱秸高 130°C ，小麦秸高 115°C [11]。因此，玉米秸秆的灰熔点可能不是影响结渣的主要因素，添加添加剂对提高玉米秸秆颗粒燃料的灰熔点并不明显。灰熔点只能作为提供结渣倾向的粗略判别，具体结渣情况还需要结合其他方法进行判别与测定。

表 2 灰熔点测试结果

Table 2 Results of ash fusion test

添加种类	变形温度/ $^\circ\text{C}$	软化温度/ $^\circ\text{C}$	半球温度/ $^\circ\text{C}$	流动温度/ $^\circ\text{C}$
空白组	1 215	1 224	1 229	1 246
MgCO_3	1 245	1 352	1 363	1 452
CaCO_3	1 180	1 203	1 207	1 216
Al_2O_3	1 220	1 257	1 270	1 315
高岭土	1 224	1 247	1 252	1 269

注：灰熔点测试气氛为氧化气氛。

2.3 灰渣元素分析

通过上述结渣性试验研究的比较分析，添加不同的添加剂对玉米秸秆的结渣率分别产生了不同影响，本试验选取的 4 种添加剂都不同程度的降低了结渣率，抗结渣效果比较明显。为了更深一步的了解添加剂在燃烧过程中的抗结渣原理，本文选取了抗结渣效果比较典型的添加 MgCO_3 、 CaCO_3 添加剂的颗粒燃料气化（燃烧）完全后的渣块与空白组的渣块元素进行了对比分析，见图 2。

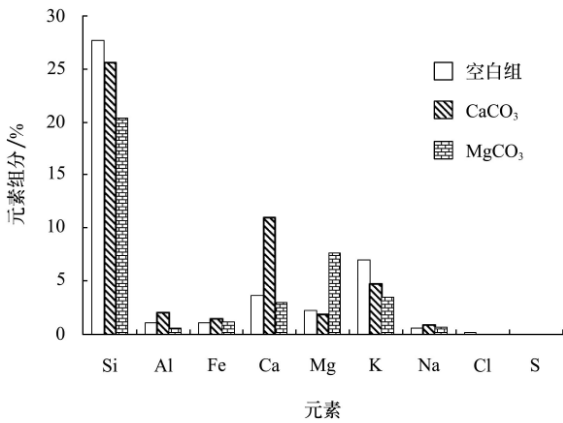


图 2 渣块元素对比分析

Fig.2 Comparative analysis of elemental composition in formed slag

由图 2 可见，抗结渣效果最好的 MgCO_3 添加剂，其颗粒燃料燃烧后渣块中的 Si 元素与 K 元素最低，其次为 CaCO_3 添加剂，添加添加剂的颗粒燃料燃烧后渣块中的 Si 元素与 K 元素明显低于空白组的颗粒燃料渣块。通过研究表明，碱金属在秸秆类生物质中无论以何种形态存

在，在燃烧过程当中，都将与 Si 的氧化物结合生成低熔点的共晶体，生物质灰的主要成分是二氧化硅和碱金属氧化物 [12]。渣块主要元素为 Si、K、Mg、Ca、Al，推测其生成物为各种硅酸盐。玉米秸秆及其渣块中都含有高 K、高 Si，燃烧时生成了低熔点的化合物，导致结渣严重。当添加适量的添加剂时，其结渣率降低，这可能是添加剂中有关元素与秸秆中的 K、Si 元素生成了高熔点不易成渣的 Mg_2SiO_4 、 $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ 、 $\text{Ca}_{14}\text{Mg}_2(\text{SiO}_4)_8$ 、 KAlSi_2O_6 等有关 [9]。其结渣率降低，抗结渣效果显著，与上述抗结渣试验相符。

2.4 不同添加剂对燃烧特性的影响

燃料的工业分析以及热值是评价燃料性能的重要指标 [13]，空白组以及各添加添加剂的成型燃料热值见表 3。

表 3 含不同添加剂的颗粒燃料特性

Table 3 Characteristics of pellet fuel with different additives

添加种类	工业分析/%				热值	
	水分质量分数	灰分质量分数	挥发份质量分数	固定碳质量分数	高位发热量/ $(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	变化幅度/%
空白组	3.51	13.66	72.07	10.77	15.61	
MgCO_3	3.92	11.44	74.63	10.01	15.51	-0.59
CaCO_3	3.96	12.69	74.09	9.26	16.21	3.84
Al_2O_3	4.90	14.40	72.33	8.37	15.60	0.06
高岭土	3.35	15.88	71.59	9.19	15.63	0.13

注：添加剂的添加量为 3%；* 热值变化幅度以空白组为参照对比。

从表 3 可以看出，添加质量分数 3% 添加剂的颗粒燃料工业分析与空白组并无明显差异，添加添加剂对燃料水分、灰分、挥发分影响不大。添加添加剂对热值的影响也不明显，变化幅度仅为 $-0.59\% \sim 3.84\%$ 。考虑到由于在秸秆粉碎制粒过程中，秸秆根、茎、叶分布不是很均匀，各部分热值不尽相同，上述变化是在允许范围之内。这说明了添加适量的添加剂对生物质颗粒燃料的燃料性能无明显影响。

2.5 不同添加剂的经济性评价

秸秆固体成型燃料未来的发展趋势是部分替代煤炭等能源，广泛应用于工厂规模化燃烧供暖以及农村居民家庭炊事和取暖用能 [14]，因此，需要考虑大规模推广时添加剂的成本，按目前市场生物质成型燃料平均价格 450 元/t 的成本计算（玉米秸秆 150 元/t），要求添加添加剂而增加成型燃料的成本尽可能的小。按照添加剂的目前市场价格，可以计算出添加质量分数 3% 的添加剂时，每吨成型燃料成本的增加量，具体见表 4。

表 4 添加剂成本

Table 4 Cost of additives

种 类	市场价格/ $(\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$	添加比例/%	添加添加剂增加成本/ $(\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$
高岭土	1 200	3	31.5
CaCO_3	590	3	13.2
MgCO_3	3 800	3	109.5
Al_2O_3	2 300	3	64.5

从表 4 可以得出,以 3% 的添加比例,按经济性比较可得,成本从高到低, $\text{MgCO}_3 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{高岭土} > \text{CaCO}_3$ 。每吨玉米秸秆颗粒燃料添加添加剂成本增加量最低为 CaCO_3 ,按目前 CaCO_3 的市场价格为 590 元/t 计算,玉米秸秆颗粒燃料中添加剂成本为 13.2 元/t,但其抗结渣效果比 MgCO_3 稍差; MgCO_3 虽然抗结渣效果最佳,但其成本太高,成型燃料中添加剂成本为 109.5 元/t,不宜大规模生产应用。因此,通过以上抗结渣试验结果分析以及经济性综合比较,可知 CaCO_3 的抗结渣效果性价比最高。

3 验证性试验

为了验证添加添加剂的玉米秸秆颗粒燃料在实际燃烧中同比空白组的抗结渣效果,本试验在锅炉中对抗结渣效果比较明显的 MgCO_3 、 CaCO_3 、 Al_2O_3 3 种添加剂进行测试,添加质量分数为 3%。

测定及计算方法:取一种试验用生物质成型燃料,在锅炉内燃烧(该系统为从瑞典引进的 pellex 生物质颗粒燃料自动燃烧器^[15]配套热水锅炉),待锅炉停止后,冷却,将底灰全部取出,计算该试样的底灰结渣率。

由表 5 可以看出,空白组的结渣率为 36.80%,添加 MgCO_3 结渣率为 0,完全不结渣,抗结渣效果非常好;添加 CaCO_3 结渣率为 2.25%,抗结渣效果也很显著, Al_2O_3 结渣率为 11.56%,抗结渣效果较好。由于在实际锅炉中燃烧工况的控制与试验条件不完全一致,因此结渣率也不完全相同,但通过验证性试验表明,添加质量分数 3% 的 MgCO_3 , CaCO_3 , Al_2O_3 添加剂均有明显的抗结渣效果,与上述抗结渣试验结论相符。

表 5 底灰结渣率
Table 5 Slagging rates of bottom ash

种 类	底灰/g	渣块/g	底灰结渣率/%
空白组	151.10	55.60	36.80
MgCO_3	151.08	0	0
CaCO_3	151.10	3.40	2.25
Al_2O_3	151.11	17.47	11.56

4 结论与讨论

本文以玉米秸秆颗粒燃料为研究对象,添加不同的添加剂,对结渣特性以及燃烧特性进行试验研究,并进行经济评价,得出以下结论:

1) 针对添加剂 MgCO_3 、 CaCO_3 、 Al_2O_3 、高岭土($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) 的结渣特性试验,添加质量分数 3% 的 MgCO_3 抗结渣效果最佳,几乎不结渣;其次为 CaCO_3 ,其结渣率低于 10%,抗结渣效果显著;添加 Al_2O_3 结渣率降低一半,抗结渣效果较好;添加高岭土 $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$,结渣率略低于空白组,抗结渣效果不理想。

2) 添加添加剂提高玉米秸秆颗粒燃料的灰熔点来抗结渣可能是原因之一,但不是主要的影响因素。同时添加添加剂对燃料的工业分析与热值等燃烧性能无明显影响。

3) MgCO_3 抗结渣效果最好,但成本较高; CaCO_3 添加剂结渣率低于 10%,抗结渣效果性价比最高。

目前,对生物质固体成型燃料的结渣特性分析大部分沿用的是煤炭的测定标准,煤炭与生物质在燃烧特性上有很大相似性,但其结构和成分还是有很大差异,建议尽快制定专门的生物质固体成型的结渣特性分析方法。

志谢:在本文研究过程中,中国农业大学研究生欧阳双平协助做了大量工作,同时姚宗路、罗娟、霍丽丽、张中波在试验过程中也给予了协助,在此一并表示感谢!

[参 考 文 献]

[1] 姚向君,田宜水. 生物质能资源清洁转化利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

[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析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 276—282. Wang Jiuchen, Dai Lin, Tian Yishui, et al. Analysis of the development status and trends of biomass energy industry in China[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 276—282. (in Chinese with English abstract)

[3] 赵立欣,田宜水. 农村绿色能源技术[M]. 北京: 农业科技出版社, 2007.

[4] 田宜水,姚向君. 生物质燃烧与混合燃烧技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.

[5] 袁艳文,林聪,赵立欣,等. 生物质固体成型燃料抗结渣特性研究进展[J]. 可再生能源, 2009, 27(5): 48—51. Yuan Yanwen, Lin Cong, Zhao Lixin, et al. The research process of anti-slagging for biomass pellet fuel[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(5): 48—51. (in Chinese with English abstract)

[6] Bhattacharya S P, Harttig M. Control of agglomeration and defluidization burning high-alkali, high-sulfur lignites in a small fluidized bed combustors effect of additive size and type and the role of calcium[J]. Energy and Fuels, 2003, 17: 1014—1021.

[7] Vamvuka D, Kakaras E, Kastanaki E, et al. Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass residuals mixtures with lignite[J]. Fuel, 2003, 82: 1949—1960.

[8] 马孝琴,骆仲泱,方梦祥,等. 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, 2006, 40(4): 599—604. Ma Xiaoqin, Luo Zhongyang, Fang Mengxiang, et al. Effect of additives on behavior of alkali metals during straw combustion[J]. Journal of Zhejiang University, 2006, 40(4): 599—604. (in Chinese with English abstract)

[9] Xiong Shaojun, Jan Burvall, Rberg Håkan Ö. Slagging characteristics during combustion of corn stovers with and without kaolin and calcite[J]. Energy and Fuels, 2008, 22: 3465—3470.

[10] 霍丽丽,侯书林,孟海波. 等. 生物质固体成型燃料技术及设备研究进展[J]. 安全与环境学报, 2009, 9(6): 27—31. Huo lili, Hou shulin, Meng Haibo, et al. Overview of the

- research advancements of solid biofuel-preparation technology and the corresponding facilities needed[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2009, 9(6): 27—31. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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 Xiaoqian, Wang Jingjing. Study on the ash characteristics of stalks[J]. *Renewable Energy Resources*, 2007, 25(4): 25—28. (in Chinese with English abstract)
- [12] Jenkins B M, Baxter L L, Miles T R, et al. Combustion properties of biomass[J]. *Fuel Processing Technology*, 1998, 54: 17—46.
- [13] 范志林, 张军, 林晓芬, 等. 关于生物质基本性质分析的问题[J]. *东南大学学报*, 2004, 34(3): 352—355.
- Fan Zhilin, Zhang Jun, Lin Xiaofen, et al. Problems on analysis of basic property of biomass[J]. *Journal of Southeast University*, 2004, 34(3): 352—355. (in Chinese with English abstract)
- [14] Serdar Yaman. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45: 651—671.
- [15] 罗娟, 侯书林, 赵立欣, 等. 生物质颗粒燃料燃烧设备的研究进展[J]. *可再生能源*, 2009, (6): 90—95.
Luo Juan, Hou Shulin, Zhao Lixin, et al. The research progress of pellet burning equipments[J]. *Renewable Energy Resources*, 2009, (6): 90—95. (in Chinese with English abstract)

Effects comparison on anti-slagging additives of corn straw biomass pellet fuel

Yuan Yanwen^{1,2}, Zhao Lixin¹, Meng Haibo¹, Lin Cong², Tian Yishui^{1*}

(1. *Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China;*

2. *College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)*

Abstract: In order to solve the slagging problems of the stalks-based biomass pellet fuel, through adding four kinds of additives into corn stalks, the experimental research of the slagging percentage, ash melting and fuel characteristics, together with the validation tests were conducted in this paper. The results showed that 3% of MgCO_3 , CaCO_3 and Al_2O_3 could change slagging effectively, among which MgCO_3 had the best effects, the slagging rate was approximately zero; CaCO_3 could result in the highest efficiency in anti-slagging. The slagging rate was less than 10%. Adding additives had no apparent influence on the fuel combustion characteristics. The results can provide a basis for solving the slagging problems of the corn stalks-based solid fuel.

Key words: stalkstraw, biomass, additives, solid bio-fuels, slagging