生物质颗粒燃料特性及其对燃烧的影响分析

姚宗路1，赵立欣1，Ronnback M2，孟海波1，罗娟1，田宜水1

（1、农业部规划设计研究院农村能源与环保研究所，北京100125；2、瑞典SP技术研究所能源部，瑞典布罗斯50115）

【摘要】采用欧盟生物质固体成型燃料标准（CEN/TC335）试验检测了中国和瑞典典型的10种生物质颗粒燃料，重点对中国的秸秆类颗粒燃料与瑞典的木质颗粒进行了对比，并分析其对燃烧特性的影响。结果表明中瑞两国的生物质颗粒燃料都能满足技术标准要求，瑞典木质颗粒具有较高的性能参数；中国的玉米秸秆颗粒燃料发热量比瑞典木质颗粒低20.9%，挥发分低，燃烧后灰渣中的硅含量高20%，灰熔点低，燃烧后灰分多，易结渣，对燃烧设备有较高的要求。

引言

生物质颗粒燃料具有高效、洁净、点火容易、CO2近似零排放等优点，可替代煤炭等化石燃料应用于炊事、供暖等民用领域和锅炉燃烧、发电等工业领域，近几年来在欧盟、北美、中国得到了迅速发展。尤其是在瑞典，颗粒燃料生产、消费一直呈上升趋势，每年以8%～10%的速度增加，2008年瑞典生物质颗粒燃料消耗量达到185万吨，颗粒燃料产业取得了巨大发展。我国自2006年以来，相继出台了一系列促进可再生能源发展的法律、政策、规划、标准等，促进了我国生物质成型燃料的发展，但相比欧盟国家，我国的生物质成型燃料刚刚进入市场化推广初级阶段。

生物质颗粒燃料的一大优点就是能够应用于小型生物质锅炉中，通过颗粒燃烧器能够实现连续自动燃烧。目前，在欧美等国家，一般居民家用的生物质颗粒燃料及配套的高效燃烧设备已经非常普及，但这些生物质颗粒燃料以木质颗粒燃料为主，具有热值高、灰分低、燃烧后不易结渣等优点，而我国的生物质成型燃料以农作物秸秆为主，与瑞典的木质颗粒燃料相比，在物理特性、化学组分方面有着较大差别，导致燃烧特性存在差异，因此对成型设备、燃烧设备的技术、工艺参数的要求也不同。

本文采用欧盟生物质固体成型燃料标准（CEN/TC335）试验分析中瑞两国10种不同生物质颗粒燃料的参数，包括颗粒燃料的物理特性以及燃烧后灰渣的化学组分等，同时重点对中国典型的秸秆类颗粒燃料与瑞典的木质颗粒进行对比，分析其对燃烧特性的影响。

1试验

选取瑞典生产的生物质颗粒燃料和中国生产的生物质颗粒燃料为试验燃料，分别在瑞典SP技术研究所生物质颗粒燃料检测中心和农业部规划设计研究院生物质颗粒燃料检测实验室进行试验。

1.1试验燃料

试验燃料包括瑞典和中国典型的10种生物质颗粒燃料。目前瑞典生物质颗粒燃料以林业剩余物为主，选择市场上常见的木质颗粒，主要是由刨花加工而成，同时选取油菜秆、藨草、麦秆以及树皮4种颗粒燃料作为对比分析，前3种颗粒燃料于2009年5月由瑞典农业大学生物质工程中心生产，树皮颗粒燃料由造纸工业用树皮加工而成。木质颗粒、树皮颗粒燃料来自瑞典SodraCell公司，颗粒燃料均压缩加工为圆柱型，直径8mm，长度10～30mm。

我国的生物质颗粒燃料主要以农作物秸秆为主，选择目前市场上常见的玉米秸秆颗粒燃料，同时选取棉秆、麦秆、落叶松、混合木质（杨树、桃树和红松的混合物）等作为对比分析，所用生物质颗粒燃料于2009年7月在北京大兴礼贤生物质颗粒燃料公司生产，由农业部规划设计研究院研制的485型生物质颗粒燃料成型机压制而成，颗粒燃料均压缩加工为圆柱型，直径8mm，长度10～30mm。

1.2试验仪器与方法

试验方法按照欧盟CEN/TC335固体生物质燃料技术规范进行测定，该规范主要针对木质颗粒燃料，并于2006年开始向欧盟标准转换。

主要试验仪器包括：GJ2型密封式化验制样粉碎机、XL1型箱式高温炉、电热鼓风干燥箱、VatioEL元素分析仪、ZDHW5型微机全自动量热仪、HRA5型微机灰熔点测定仪、VISTAMPX型离子发射光谱仪、SZ114型往复式自动振筛机

、BSA223SCW型分析天平、PL2002型电子天平等。

1.3测试参数

（1）堆积密度：根据单位标准体积的净质量来计算堆积密度。

（2）颗粒密度：称取一定量的生物质固体成型燃料样品，通过测定样品在空气中质量与在随后液体中测定质量的差值，来测定浮力，计算出样品的体积，再计算出生物质固体成型燃料的颗粒密度。

（3）全水分：将生物质固体成型燃料样品置于105℃的温度下干燥至质量恒定，然后根据样品质量损失并修正浮力作用计算出全水分。

（4）灰分：样品在（550±10）℃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）挥发分：样品在（900±10）℃隔绝空气的环境中加热7min，扣除水分质量损失后，样品质量损失占样品质量的百分数来计算挥发分。

（6）机械耐久性：通过可控的振动，在试验样品之间、样品与测试器内壁之间发生碰撞后，将已磨损和细小的颗粒分离出来，根据剩余的样品质量计算机械耐久性。

（7）热值：将样品在自动量热仪中燃烧测量其热值。

（8）灰熔融性：将生物质颗粒燃料放在高温炉中加热，根据灰锥形态变化确定软化温度（DT）、变形温度（ST）、半球温度（HT）和流动温度（FT）。一般用ST评定灰熔融性。

（9）元素分析：包括C、H、O、N、S、CL，其中C、H、O、N、CL测试是将生物质颗粒燃料燃烧后通过气体色谱仪进行分离，再通过元素分析仪分离检测其含量，S通过定硫仪检测。

（10）灰渣的化学组成成分：燃烧后测试灰分，同时测量其灰渣中化学组成成分，测试金属元素包括Si、Al、Fe、Ca、Mg、K、Na等。

2试验结果与分析

2.1物理特性

测试后的生物质颗粒燃料的物理特性如表1所示。

表 1　生物质颗粒燃料物理特性

Tab. 1　Physical characterization of biomass pellets

参数	瑞典生物质颗粒燃料					中国生物质颗粒燃料					SS187120 标准
	木质	树皮	油菜秆	蔺草	麦秆	玉米秸秆	棉秆	麦秆	落叶松	混合木质	参考值*
堆积密度/kg·m^{-3}	574	679	590	568	535	532	541	539	568	562	≥600/500**
颗粒密度/g·cm^{-3}	1.18	1.14	1.08	1.02	1.05	1.12	1.15	1.08	1.18	1.12	≥1.12
机械耐久性/%	97.8	97.2	96.4	96.8	95.9	97.5	98.1	96.5	97.5	97.1	>95
低位发热量/MJ·kg^{-1}	19.13	17.77	17.57	17.31	17.41	15.13	13.15	15.22	16.83	16.30	≥16.9
全水分/%	6.50	9.10	9.60	12.00	9.30	9.15	8.42	8.79	7.63	9.14	≤10
挥发分/%	85.10	73.20	78.90	76.00	75.20	75.58	62.33	72.01	85.55	72.65	
灰分/%	0.30	3.40	4.70	7.90	6.60	7.71	21.69	9.95	1.01	9.25	
固定碳/%	8.10	14.30	6.80	4.10	8.90	7.56	7.56	9.25	5.81	8.96	

注：* SS187120 标准仅仅针对木质颗粒；** SS187120 标准中规定堆积密度大于 600 kg/m^{3}的为一级颗粒，大于 500 kg/m^{3}为二级颗粒。

（1）密度

颗粒燃料的堆积密度能够影响能量密度，也影响生产者和消费者的运输成本和储藏成本。瑞典生物质颗粒燃料除树皮的堆积密度大于瑞典生物质颗粒燃料的标准（SS187120）一级颗粒的参考值（600Kg/m3）以外，其他的为535～590Kg/m3，但均满足二级颗粒燃料的标准要求（≥500Kg/m3），其中麦秆颗粒燃料的堆积密度最低。我国的生物质颗粒燃料的堆积密度为532～568Kg/m3，也均低于一级标准参考值，但都能满足二级标准要求。

生物质颗粒燃料的颗粒密度能够影响堆积密度和燃烧特性，颗粒密度越大，燃烧持续时间越长。瑞典木质颗粒燃料和树皮颗粒燃料的颗粒密度能够满足SS187120的参考值（＞1.12g/cm3）要求，分别为1.18和1.14g/cm3，其他3种均低于该标准参考值；我国的生物质颗粒燃料的颗粒密度除麦秆的为1.08g/cm3以外，其余均在1.12g/cm3以上。

（2）机械耐久性

机械耐久性是颗粒燃料非常重要的参数，因为在用户运输、储藏过程中，机械强度较低的颗粒燃料容易破碎，导致粉末增加，影响进料，同时在燃烧过程中，还影响烟气的排放。瑞典生物质颗粒燃料标准中要求颗粒燃料的机械耐久性大于95%，结果表明所有的颗粒燃料均能满足要求，瑞典的颗粒燃料中，木质颗粒机械耐久性最高，为97.8%，但其他几种颗粒燃料相差不大。我国的燃料也具有较高的机械耐久性，表明我国秸秆类颗粒燃料的成型技术已经能够满足要求。

（3）低位发热量

不同原料的颗粒燃料发热量差异较大，瑞典木质颗粒燃料的发热量为19.13MJ/Kg，而其他颗粒燃料的发热量均低于木质颗粒，但均高于标准的参考值16.9MJ/Kg。我国的木质颗粒燃料的发热量在13.15～16.83MJ/Kg之间，其中棉秆最低，为13.15MJ/Kg。相比瑞典木质燃料的发热量，我国玉米秸秆颗粒燃料的发热量要低20.9%。

（4）工业分析

工业分析包括全水分、挥发分、灰分和固定碳。从表1可知，除藨草颗粒燃料以外所有的颗粒燃料的水分都能够满足标准要求。尤其是瑞典木质颗粒最低，全水分为6.5%，相比木质颗粒，秸秆类颗粒燃料的全水分较高，尤其是瑞典藨草颗粒燃料，全水分为12%。这与成型工艺有关，锯末全水分较高，一般超过50%，因此在成型前需要进行干燥，含水率在8%～10%再进行挤压成型；而我国的秸秆原料经过预处理后，成型前含水率在10%～20%，但能够满足成型要求。

生物质颗粒燃料的挥发分通常是较高的，木质颗粒燃料的一般在76%～86%之间。瑞典木质颗粒燃料的挥发分为85.1%，而我国棉秆的挥发分仅为62.33%。

瑞典木质颗粒中的灰分最低，仅为0.3%，其次是树皮颗粒，为3.4%，其他的秸秆类颗粒燃料较高；而我国的棉秆颗粒燃料灰分最高，为21.69%，其次是麦秆，为9.95%，玉米秸秆颗粒燃料与瑞典的秸秆类颗粒燃料灰分相差不大。

对于颗粒燃料中的固定碳，瑞典树皮颗粒的较高（14.1%），而藨草的较低，为4.1%，其他的生物质颗粒燃料相差不大，在6%～9%之间。

2.2元素分析

生物质颗粒燃料C、H、O质量分数如表2所示，从表中可以看出，除我国的棉秆颗粒燃料C质量分数较低外，其他颗粒燃料相差不大，在45%～50%之间，瑞典木质颗粒燃料和树皮颗粒燃料的C质量分数最高，分别为50.6%和52.5%；对于H，所有颗粒燃料相差不大，基本保持在6%左右。对于O含量，所有颗粒燃料相差不大，保持在40%左右。

表 2　生物质颗粒燃料元素质量分数

Tab. 2　Ultimate analysis of biomass pellets　%

元素名称	瑞典生物质颗粒燃料					中国生物质颗粒燃料				
	木质	树皮	油菜秆	藨草	麦秆	玉米秆	棉秆	麦秆	落叶松	混合木质
O	43.0	37.8	41.3	39.4	40.2	41.0	39.0	40.0	43.0	41.0
H	6.00	5.90	6.00	5.90	5.70	5.77	4.74	5.66	6.19	5.63
C	50.60	52.50	47.20	45.90	46.00	44.92	38.33	43.46	48.89	47.14
S	0.01	0.03	0.13	0.11	0.13	0.21	0.29	0.28	0.09	0.15
Cl	0.01	0.01	0.18	0.04	0.71	1.30	1.50	1.10	0.35	0.60
N	0.10	0.40	0.50	0.90	0.70	0.98	1.55	0.74	0.12	0.98

对于不同颗粒燃料中的CL、S、N质量分数差异较大，从表2中可看出，木质燃料的CL、S、N要远低于秸秆类颗粒燃料，其中棉秆颗粒燃料最高，其次是玉米秸秆颗粒燃料。

瑞典木质颗粒燃料中N仅为0.1%，远低于其他颗粒燃料，藨草颗粒燃料最高，为0.59%；我国的棉秆颗粒燃料中的N最高，其次是玉米秸秆，分别为1.55%、0.98%。颗粒燃料中N较高，在燃烧过程中，将产生较高的NOx，这在Öhman M的试验中已经证明，由于藨草颗粒燃料中的N比木质颗粒高，导致燃烧后烟气中产生较多的NOx。

在瑞典木质、树皮颗粒燃料中的S、CL是较低的，低于0.01%，而油菜秆、藨草和麦秆是较高的，尤其是在麦秆中，CL为0.71%。而我国玉米秸秆中的S为0.21%，远高于瑞典木质颗粒。

2.3灰分、灰熔融性

由表3可知，瑞典木质颗粒燃料灰分最低，仅为0.3%，但藨草、麦秆类的灰分较高，与我国的玉米秸秆、麦秆相差不大，但我国的棉秆颗粒燃料灰分最高，为21.69%。

瑞典木质、树皮、油菜秆以及藨草颗粒燃料的变形温度在1340℃以上，其灰熔点已经达到作为燃料使用的要求，属于难熔性灰，尤其是木质颗粒的灰熔点达到了1550℃。因此在燃烧过程中难以结渣，而麦秆的变形温度仅为990℃，属于易熔性灰。

我国5种生物质颗粒燃料中除落叶松的灰熔点较高（1389℃）能够达到难熔性以外，其他的颗粒燃料灰熔点在1198～1213℃，属于可熔性灰，因此在燃烧过程中容易结渣，而且灰分也较高。

表 3　生物质颗粒燃料灰分与灰熔融性

Tab. 3　Ash content and ash fusibility of biomass pellets

参数	瑞典生物质颗粒燃料					中国生物质颗粒燃料				
	木质	树皮	油菜秆	藨草	麦秆	玉米秸秆	棉秆	麦秆	落叶松	混合木质
灰分/%	0.3	3.4	4.7	7.9	6.6	7.71	21.69	9.95	1.01	9.25
软化温度(DT)/℃	1 550	1 250	1 590	1 350	<980	1 167	1 191	1 163	1 332	1 196
变形温度(ST)/℃	1 550	1 340	1 590	1 530	990	1 198	1 211	1 201	1 389	1 213
半球温度(HT)/℃	1 550	1 400	1 590	1 580	1 100	1 215	1 224	1 211	1 394	1 217
流动温度(FT)/℃	1 550	1 420	1 590	1 590	1 190	1 238	1 262	1 229	1 394	1 221

2.4灰渣中化学成分

对各种生物质颗粒燃料燃烧后的灰渣以及灰分进行了分析，结果发现结渣最严重的是我国的玉米秸秆、麦秆、棉秆和瑞典的藨草颗粒燃料，其次是瑞典的麦秆和我国的混合木质颗粒燃料，而瑞典的木质颗粒燃料结渣现象最轻。

燃烧后瑞典生物质颗粒燃料灰渣中化学成分如图1所示。木质、树皮、油菜秆颗粒燃料灰渣的化学成分主要以Ca、K、Si为主，Ca最高，超过20%；木质、树皮颗粒Al较高，其中木质颗粒中Al为7.7%；藨草颗粒中Si最高，达到35%，其他化学成分较低；麦秆中主要以K、Si为主，Si达到13%。

我国生物质颗粒燃料灰渣中化学成分如图2所示。我国的落叶松、混合木质颗粒灰分也是以Ca、K、Si为主，与瑞典木质颗粒燃料相比，灰分中的Si较高；秸秆类颗粒燃料灰分中Si最高，基本在25%左右或更高，除Si元素外，秸秆类颗粒燃料中的碱金属元素（K）及碱土金属元素（Ca、Mg）也较高，尤其是麦秸的K元素高达14.17%。

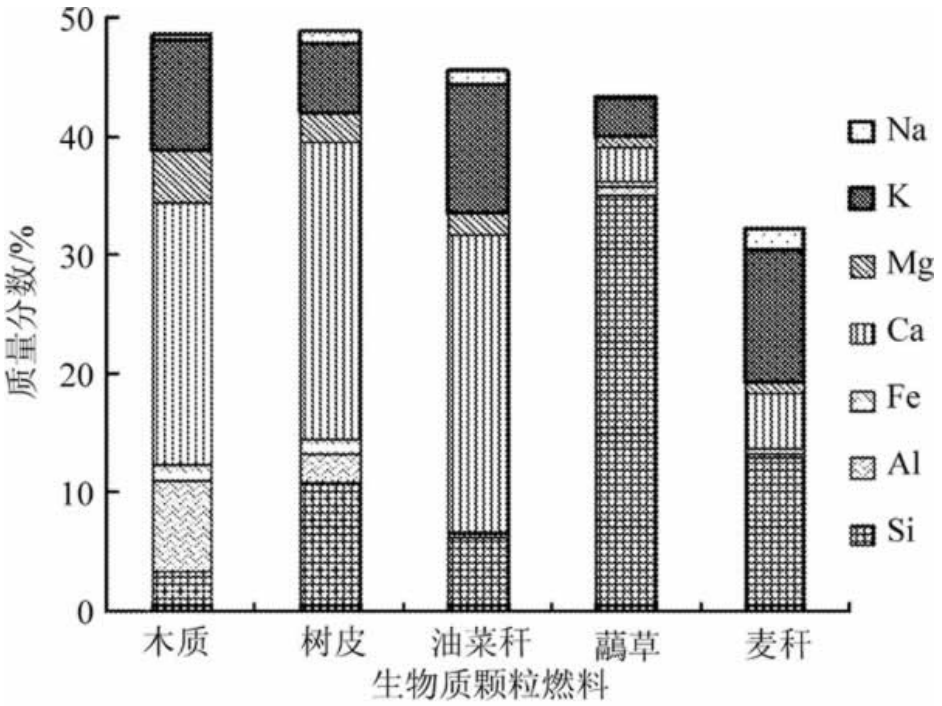

图 1　瑞典生物质颗粒燃料灰渣中化学成分含量

Fig. 1　Chemical components of slag or ash of biomass pellets in Sweden

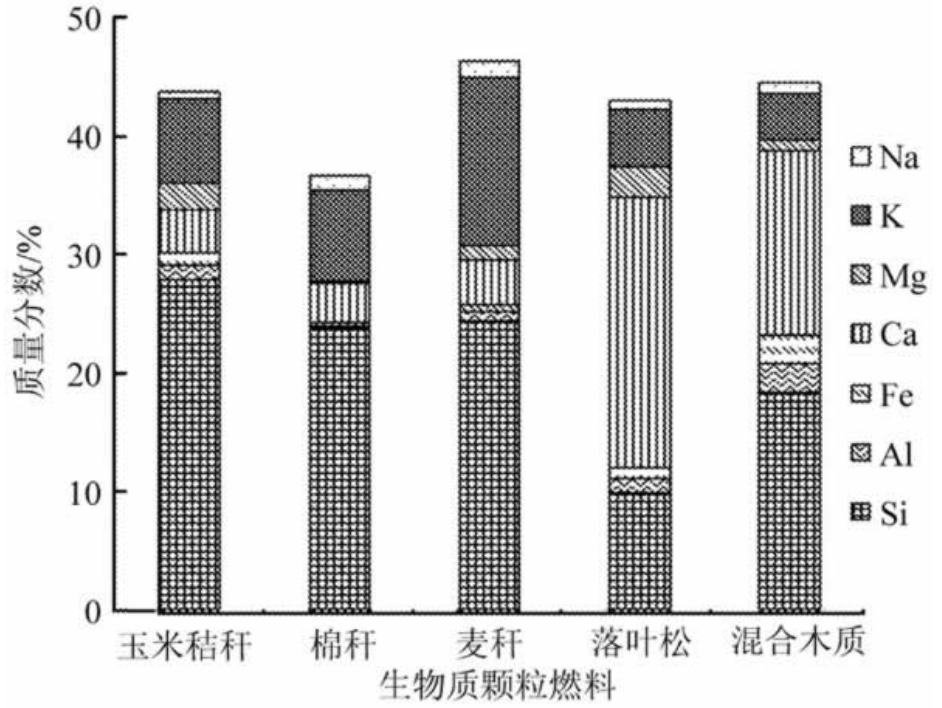

图 2　中国生物质颗粒燃料灰渣中化学成分含量

Fig. 2　Chemical components of slag or ash of biomass pellets in China

2.5讨论

试验结果表明，瑞典的木质、树皮颗粒燃料能够满足瑞典生物质颗粒燃料标准要求，我国的秸秆类颗粒燃料总体性能要低于瑞典颗粒燃料，但在堆积密度、颗粒密度、机械耐久性等物理特性方面相差不大，这说明我国在秸秆类颗粒燃料成型技术方面已经达到了国际水平，完全满足要求。

发热量方面，瑞典的木质颗粒燃料比其他树皮、油菜秆、蘸草、麦秆等颗粒燃料的发热量要高7%～10%。这主要是由于木材的物理特性要优于秸秆，木质颗粒燃料具有较高的挥发分和灰熔点，挥发分含量为85.1%。挥发分的含量将影响热分解和燃烧特性，在燃烧过程中挥发分将有利于生物质燃料的主要部分被蒸发，因此燃烧过程中易着火，且灰分少（0.3%），同时C和H作为颗粒燃料的重要组成部分，木质颗粒中的碳含量是较高的，分别为50.6%和52.5%，这也是其热值要比秸秆原料颗粒燃料高的原因。我国林业资源匮乏，目前我国的生物质颗粒燃料主要以玉米秸秆类为主，由于秸秆物理特性劣于木材，挥发分和灰熔点较低，燃烧后灰分较高，我国玉米秸秆颗粒燃料发热量较低，仅为15.13MJ/Kg，比瑞典木质颗粒燃料低20.9%。

通过对各种颗粒的元素分析可知，秸秆类颗粒燃料的CL、S、N含量较高，这可能导致燃烧后烟气中较高的NOx，同时可能导致对燃烧设备有侵蚀。

一般来说，燃料中Si元素含量越高，燃烧后结渣趋势越明显，另外碱金属元素（K、Na）含量越高，燃料结渣趋势越明显；碱土金属（Ca、Mg）含量越高，燃料结渣趋势越小。通过燃烧后对灰渣的化学成分分析可知，瑞典木质颗粒燃烧后灰渣主要以Ca、K、Si为主，其中Ca占45%，而Si占7%，因此燃烧后结渣现象不明显；而我国的玉米秸秆颗粒燃料燃烧后灰渣中的Si为27.7%，比瑞典木质颗粒高20%，另外相比瑞典木质颗粒燃料，秸秆类颗粒燃料的灰熔点较低，因此燃烧后也发现秸秆类颗粒燃料灰分较高、结渣严重。因此针对秸秆类颗粒燃料，在选择燃烧设备（如锅炉、燃烧器）时应充分考虑燃烧后的清渣装置。

3结论

（1）瑞典的木质颗粒燃料性能指标能够完全满足标准要求，发热量、挥发分较高，我国玉米秸秆颗粒燃料性能指标略低于瑞典木质颗粒燃料，但能满足标准要求。

（2）瑞典木质颗粒燃料发热量为19.13MJ/Kg，相比树皮、油菜秆、蘸草、麦秆等颗粒燃料高7%～10%。我国玉米秸秆颗粒燃料发热量为15.13MJ/Kg，比瑞典木质颗粒燃料低20.9%。

（3）瑞典木质颗粒灰熔点较高，燃烧后灰渣中的Ca占45%、Si占7%，而我国玉米秸秆颗粒燃料灰渣中Si为27.7%，因此瑞典木质颗粒燃烧后灰分少、灰渣少，我国的玉米秸秆颗粒燃料燃烧后灰分较高、结渣现象比较严重。

（4）针对秸秆类生物质颗粒燃料的特性，建议在生产过程中添加相关的抗结渣剂，以降低燃烧过程中的结渣现象、减少颗粒排放等，同时研究开发具有破渣、清灰机构的生物质颗粒燃烧器，以适应我国秸秆类生物质颗粒燃料。

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/105829.html