

典型生物质颗粒燃料燃烧特性试验

摘要：为研究生物质颗粒燃料的燃烧特性及污染物排放特性，该文以国外引进的生物质颗粒燃料燃烧器为试验装置，选择了8种典型的生物质颗粒燃料进行试验研究。试验结果表明，挥发份含量越高，含水率越低，生物质颗粒燃料所需的点火时间越短，SO₂、NO_x等污染物排放质量浓度远低于国家标准，但存在着部分生物质颗粒燃料灰分含量过大、结渣严重等问题。对大多数颗粒燃料来说，软化温度越高，结渣率越低，当软化温度超过1389~C时，不会发生结渣；Si元素、碱金属元素含量越高，越容易结渣，碱土金属元素含量越高，越抗结渣。玉米秸中Si的质量分数为27.70%，底灰结渣率达到48.84%，落叶松中Si的质量分数仅为9.76%，不结渣；使用添加剂后，玉米秸的底灰结渣率降低了22.77%。这将为设计适合中国国情的生物质颗粒燃料燃烧设备及改善燃料的燃烧性能提供依据。

0引言

生物质颗粒燃料是一种典型的生物质固体成型燃料，具有高效、洁净、点火容易、CO₂

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。中国的生物质资源产量丰富，其中农作物秸秆年产量约为6亿t，具有极大的发展潜力。但由于以秸秆等生物质为原料生产的生物质颗粒燃料的灰分、碱金属含量较高，使用时易出现结渣、碱金属及氯腐蚀、设备内飞灰严重等问题，对燃烧技术和设备提出了更高的要求。

目前，国内外对于生物质颗粒燃料的燃烧机理方面开展了一定的研究。盛奎川等对生物质燃料的物理品质进行了研究；王惺、王翠苹等采用TG、DTG热分析技术研究了生物质颗粒燃料的着火、燃尽等特性；马孝琴等研究了影响秸秆成型燃料燃烧速度的因素，侯中兰等研究了成型燃料点火性能的影响因素。GilbeC、JuanF、Gonzfilez分别研究了不同木质、秸秆类(包括能源作物等)成型燃料在家用炉具中结渣的形成与特征，BomanC、LindaS Johansson分别研究了木质燃料及成型燃料的燃烧特性，MariaOlssonvs研究了软木颗粒燃烧时污染物的排放量，J. Dias研究了4种不同颗粒燃料在家用炉具中的燃烧特性及污染物排放，GeorgBaemthaler。确定了生物质燃料中影响灰分形成的主要元素为Al、Ca、Fe、K、Mg等。

虽然中国也引进了部分燃烧设备，但是目前对生物质颗粒燃料的燃烧特性及污染物排放特性缺乏详细的研究。国外的情况与国内有较大差异，如国外多以木质原料为主，而中国主要以农作物秸秆为主。本文拟在国外引进的生物质颗粒燃烧器中对中国的生物质颗粒燃料开展燃烧试验，深入分析生物质颗粒燃料的点火特性、燃烧效率、污染物排放以及燃烧后的灰渣特性等，为设计适合中国国情的生物质颗粒燃料燃烧设备提供理论依据和技术支持。

1材料与方法

1.1试验原料

本试验所用生物质颗粒燃料均于2009年7月取自北京市大兴区某生物质颗粒燃料生产厂，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。试验选取了8种典型的生物质颗粒燃料，包括棉秆、麦秸、玉米秸、玉米秸(含添加剂)4种秸秆类颗粒燃料；落叶松、红松、混合木质(榆树、柳树、杨树、桃树和红松的混合物)3种木质颗粒燃料；以及1种木质与秸秆类的混合生物质颗粒燃料(木屑与花生壳混合，质量比为1:4)。所有颗粒燃料均压缩加工为圆柱型，直径8mm，长度10~30mm，颗粒密度约1.2g/cm³。8种典型生物质颗粒燃料的特性见表1。

表 1 8 种典型生物质颗粒燃料的工业分析、元素分析和发热量
Table 1 Proximate analysis, ultimate analysis and heat value of 8 kinds of biomass pellets

类型	原料	工业分析/%				元素分析%					低位发热量 (kJ·kg ⁻¹)
		水分	灰分	挥发分	固定碳	碳	氢	氧	氮	硫	
秸秆类	棉秆	8.42	21.69	62.33	7.56	38.33	4.74	24.98	1.55	0.29	13 147
	麦秸	8.79	9.95	72.01	9.25	43.46	5.66	31.12	0.74	0.28	15 225
	玉米秸	9.15	7.71	75.58	7.56	44.92	5.77	31.26	0.98	0.21	15 132
	玉米秸(含添加剂)	9.12	15.83	67.88	7.17	39.98	5.15	28.48	1.19	0.25	15 114
木质	落叶松	7.63	1.01	85.55	14.75	48.89	6.19	36.07	0.12	0.09	16 829
	红松	9.32	6.32	76.61	7.75	47.39	5.89	30.75	0.23	0.10	16 645
	混合木质	9.14	9.25	72.65	8.96	47.14	5.63	27.71	0.98	0.15	16 302
混合物	木屑+花生壳(1:4)	9.34	13.04	67.38	10.24	43.83	5.45	27.46	0.86	0.02	15 948

注：按照欧盟 CEN/TS 335 固体生物质燃料技术规范进行测定，表中数据均为质量分数，下同。

1.2 试验仪器和装置

1.2.1 试验仪器

试验仪器主要包括GJ-2密封式化验制样粉碎机(河南省鹤壁市天弘仪器有限公司)、XL-1箱型高温炉(河南省鹤壁市天弘仪器有限公司)、VarioEL元素分析仪(德国ELEMENTAR公司)、VISTA—MPX型等离子发射光谱仪(美国瓦里安公司)、BSA223S—CW型分析天平(赛多利斯科学仪器(北京)有限公司)、PL2002型电子天平(瑞士梅特勒·托利多公司)、SZ11-4型往复式自动振筛机(河南省鹤壁市天弘仪器有限公司)、KM9106型综合烟气分析仪(英国凯恩公司)、101.1 A型电热鼓风干燥箱(河南省鹤壁市天弘仪器有限公司)、ZDHW-5型微机全自动量热仪(河南省鹤壁市天弘仪器有限公司)、HR.A5型微机灰熔点测定仪(河南省鹤壁市天弘仪器有限公司)等。

1.2.2 试验装置

本试验所用的装置如图1所示，整个系统由料仓、螺旋输送机、燃烧器、热水锅炉、烟气分析系统和测量控制系统等组成。其中，燃烧系统选用从瑞典引进的PelleX生物质颗粒燃料自动燃烧器，热输出为10~25kw；燃烧效率约为90%；点火功率消耗约为400w；运行时功率消耗约为40w。该燃烧器的喂料方式为上进料式，具有燃烧器与料仓分离、回火危险小、可根据功率要求保证精确定量进料等优点。

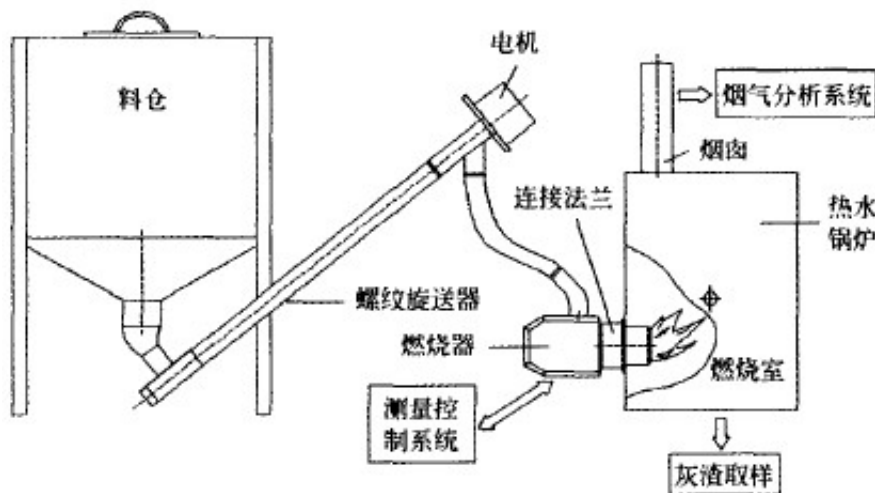


图 1 燃烧器试验系统示意图

Fig.1 Schematic of the experimental burning system

操作流程：启动时，首先使螺旋输送机中充满燃料，然后将其与燃烧器连接；打开操作开关，燃烧器启动，开始进料，当达到启动所需的燃料量时点火，当火焰传感器检测出火焰后，启动完成；鼓风机启动，燃料着火区域扩大，继续喂给燃料，当火焰稳定后，进入预运行阶段：待燃烧逐步稳定后，进入运行阶段，鼓风机全速运行，螺旋输送机按照设定值以规定速率进料，燃烧器全功率运行；当热水锅炉的出水温度低于设定温度约5℃时，燃烧器进入低功率运行状态，进料量为正常运行的65%，鼓风机速度降低；当锅炉温度达到设定值(或关闭开关)时，火焰逐渐熄灭，进料

停止，鼓风机继续运行一段时间后停止，进入等待模式。如果热水锅炉的出水温度低于设定温度，燃烧器将再次启动。

燃烧器设有控制器，可以自动监控燃烧器的工作过程，主要包括启动与停止燃烧器，调节启动时的燃料量、进料速度、进风量，以及设置不同的启动温度与停止温度。此外，控制器还可以显示燃烧器的各个工作阶段(包括启动、预运行、运行、等待/停止等)，燃烧过程中出现的过热保护、点火失败、故障等。

1.3 试验方法

试验前，对试验所有样品都取样，进行工业分析、元素分析及发热量等测定；试验结束后，称量底灰及渣块质量，并对灰渣进行取样，分析灰熔融特性和化学成分。燃烧器启动时的燃料量约为230~250g，进料速度为4.0~4.5kg/h；同一种燃料，至少重复试验3次，结果取平均值。

1) 点火特性。燃料的点火特性主要是测定燃料的点火时间，利用秒表记录自燃烧器启动开始至点火成功的时间。

2) 燃烧及污染物排放特性。采用综合烟气分析仪(KM9106)对烟气进行实时分析和记录，烟气的采样点在烟囱与热水锅炉相接的一端，且与锅炉相距200~250mm。

3) 底灰结渣率。测定及计算方法：取一种试验用生物质成型燃料，在燃烧器内燃烧，进料量、进风量等其他条件基本一致，待燃烧器停止后，冷却，将底灰全部取出，称质量并记为 m_1

筛分灰渣中粒度大于6mm的渣块，称质量并记为 m_2

，则粒度大于6mm的渣块占总灰渣质量的百分数，称为该试样的底灰结渣率 c ，即 $C=m_2/m_1 \times 100\%$ 。

2 结果与分析

2.1 点火特性

通过对8种生物质颗粒燃料进行试验，发现各种燃料的点火时间与挥发分、含水率密切相关。其中落叶松的挥发分含量最高，含水率最低(见表1)，点火时间最短，而棉秆的挥发分含量最低，含水率较高(参见表1)，点火时间最长。点火时间与挥发分大致呈线性关系，挥发分越高，点火时间越短，如图2a所示，这是因为生物质燃料中的挥发分中含有大量氢气、甲烷、不饱和烃(C_mH_n)、一氧化碳等可燃气体，挥发分含量越高，则生物质燃料越容易着火。而点火时间与含水率大致呈指数关系，含水率越高，点火时间越长，如图2b所示，这是因为生物质燃料中含水率越高，一方面延长了干燥时间，另一方面降低了最高燃烧温度(绝热燃烧温度)，从而使燃料所需的点火时间延长，同时，我们也可以发现，当含水率超过一定数值时，点火时间将会是无限长，即无法点燃。

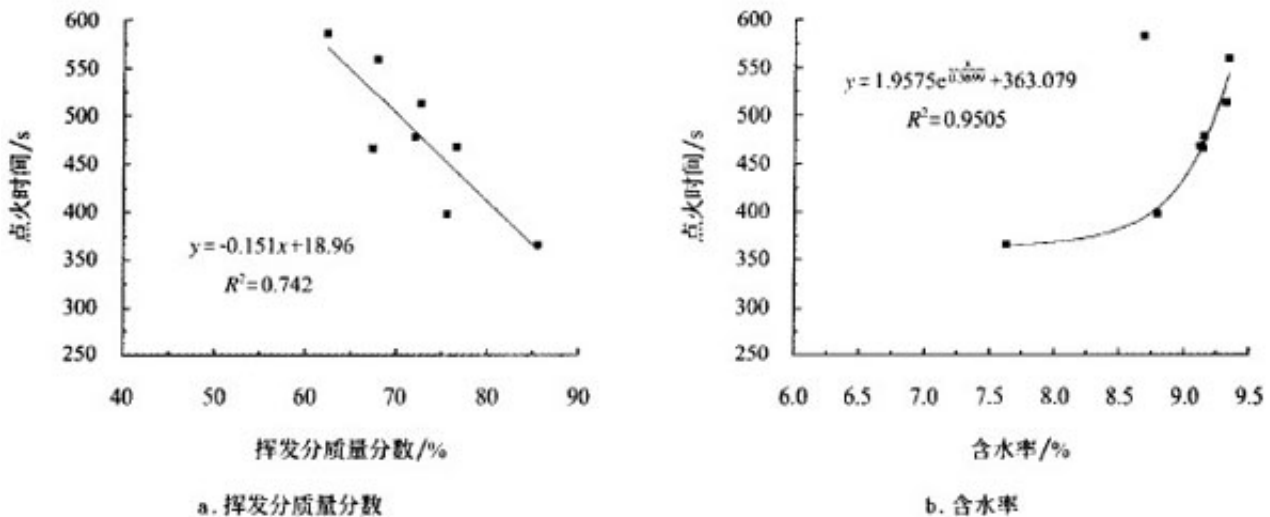


图2 挥发分质量分数、含水率对颗粒燃料的点火时间的影响

Fig.2 Effects of volatile matter and total moisture on ignition time of biomass pellet

2.2 燃烧特性

2.2.1 外观描述

经观察，8种颗粒燃料的燃烧过程均可分为启动、预运行、运行、停止4个阶段。启动阶段开始时，烟气呈白色，主要是由水蒸汽组成，烟气黑度较高；待点火成功后，火焰颜色较红且宽，温度较低，烟气黑度变淡，呈灰色或黑色，主要是由于燃烧过程中助燃空气不足造成的。预运行阶段，火焰变成了橘黄色，温度逐渐升高，烟气黑度更低。进入运行阶段后，火焰由橘黄色变成了浅黄色，烟气变成一缕淡淡的青烟。停止阶段，烟气黑度加大，火焰逐渐熄灭。

2.2.2 烟气中CO含量

燃烧器启动后，烟气中CO含量随燃烧的进行不断升高并达到最大；进入运行阶段后，其含量则大大降低(见图3)。经分析可知，在燃烧启动与预运行阶段，燃烧室温度较低、进风量较小而进料量已经达到预设值，此时生物质颗粒燃料燃烧不充分，CO排放浓度高。随着燃烧进入运行阶段，鼓风机全速运行，温度不断升高，燃烧逐渐稳定，生物质燃料能够充分燃烧，此时CO浓度排放值最小。当燃烧器停止或者关闭时，螺旋输送器和鼓风机停止工作，未燃尽的燃料不能充分燃烧，即出现图中CO浓度迅速上升的情况。

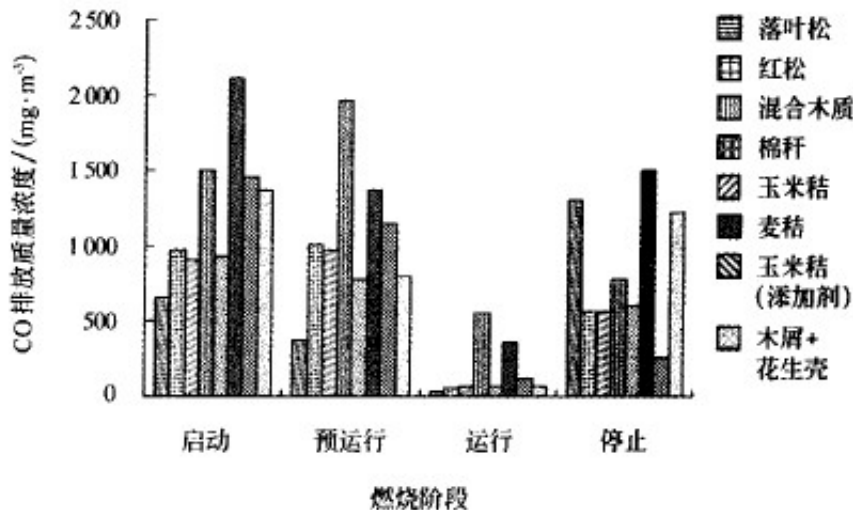


图3 各种生物质颗粒燃料燃烧时烟气中的CO排放质量浓度

Fig.3 CO concentrations of smoke of different kinds of biomass pellet

燃烧器正常运行时，8种生物质颗粒燃料的CO排放质量浓度由低到高依次为：落叶松、红松、玉米秸、木屑+花生壳、玉米秸(含添加剂)、混合木质、麦秸、棉秆，其排放质量浓度分别为29.18、51.19、59.06、63.09、65.25、120.00、365.94、555.37mg/m³

。由此可见，其中麦秸和棉秆的CO排放质量浓度较高，这可能是因为不同生物质颗粒燃料的c、H、O元素的含量不同，其所需的理论空气量也不同，而燃烧器的风量是一定的，造成了过量空气系数的不匹配。

2.3SO₂、NO排放

不同生物质颗粒燃料的烟气中SO₂、NO_x排放质量浓度如图4、图5所示。燃烧器的启动、预运行以及停止阶段，SO₂

排放浓度相对较高，这是由于不完全燃烧引起的；在运行阶段，绝大部分生物质燃料燃烧时SO₂

的排放浓度非常低，污染物排放水平较低，基本为零(见图4)，远远低于GB13271-2001锅炉大气污染物排放标准中规定的900mg/m³

的指标。这主要是由生物质中s含量较低

所决定的。棉秆则是一个例外，其SO₂

排放浓度远高于其他生物质燃料

，S含量与其处于同一数量级的其他秸秆类燃料的SO₂

排放浓度则低得多。这说明生物质燃烧时，其SO₂

生成机理的复杂性，不仅与s含量有关，而且与燃料种类和设备等因素有关。

8种典型生物质颗粒燃料燃烧时NO_x

的排放浓度见图5，正常运行时由低到高依次为：落叶松、混合木质、红松、木屑+花生壳、麦秸、玉米秸、棉秆、玉米秸(含添加剂)，其排放质量浓度分别为33.88、83.47、87.05、110.35、115.31、132.18、140.63、145.34mg/m³。结合表1可知，各种颗粒燃料的NO_x

排放质量浓度与其N含量基本成正比关系，N元素含

量高，其NO_x

排放质量浓度亦高。生物质颗粒燃料燃烧时的

温度较低(<1300)，NO_x的生成方式主要为燃料型反应机制，而非热力型反应机制。

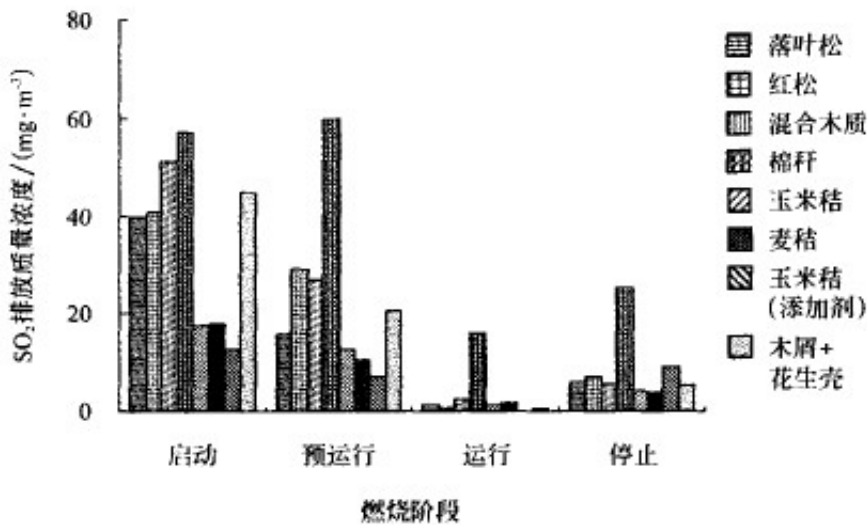


图4 各种生物质颗粒燃料 SO₂ 排放质量浓度

Fig.4 SO₂ concentrations of smoke of different kinds of biomass pellet

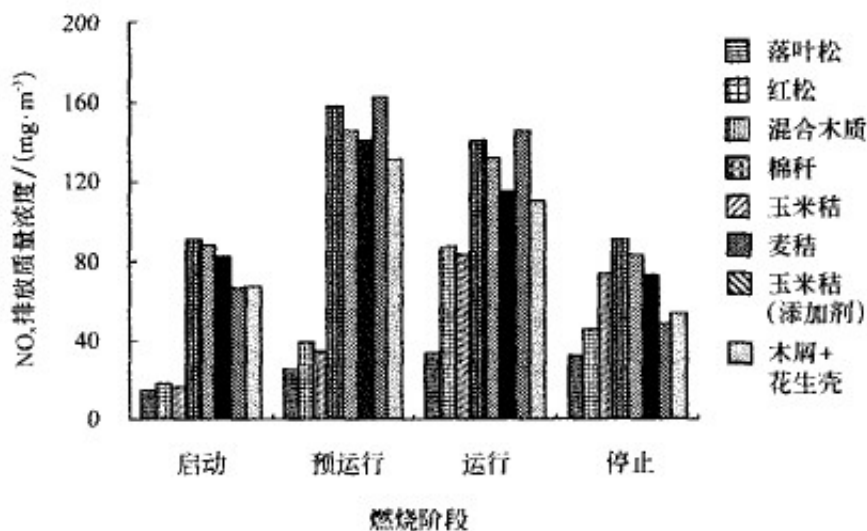


图5 各种生物质颗粒燃料 NO_x 排放质量浓度

Fig.5 NO_x concentrations of smoke of different kinds of biomass pellet

2.4 灰分对燃烧的影响

生物质颗粒的灰分含量对燃烧器的正常运行时间有显著影响，见表2。如果颗粒燃料的灰分含量过大，会导致燃烧器因无法及时排出灰分而难以持续运行，如棉秆的灰分质量分数最高(21.69%)，而底灰结渣率很低(24.13%)，但其正式运行时间最短(仅为7min)，同样的情形可见玉米秸秆(含添加剂)等。此外，底灰结渣率对燃烧器的正常运行时间也有较大影响，如红松、玉米秸，虽然其灰分含量较低(仅为6.32%、7.71%)，但结渣率达到57.81%、48.94%，严重的结渣造成了燃烧器的检测孔被堵，从而导致燃烧器受控停止，不能实现连续运行。可见国外的燃烧器并不适合中国，需要进行改造，否则难以连续运行。同时，我们还可以看出，生物质颗粒的灰分含量对燃料的结渣基本上没有趋势性影响。

表 2 灰分与燃料结渣率、运行时间的关系

Table 2 Relationship among ash content, clinkering rate and running time

燃料类型	灰分质量分数/%	底灰结渣率/%	正式运行时间/min
棉秆	21.69	24.13	7
玉米秸秆(含添加剂)	15.83	26.17	18
麦秸	9.95	36.57	22
木屑+花生壳	13.04	47.13	26
玉米秸	7.71	48.94	27
红松	6.32	57.81	49
混合木质	9.25	48.23	52
落叶松	1.01	0	连续运行

2.5 结渣特性

2.5.1 灰渣形貌

通过观察燃烧后的灰渣(见图6),可以发现,各种不同原料的生物质颗粒燃料燃烧后,其灰渣的外观形状、颜色、尺寸存在较大差异;木质类颗粒燃料之间、秸秆类颗粒燃料之间、木质类与秸秆类颗粒燃料之间,也有较大不同,大致可以分为3种类型:

1)不结渣。落叶松。该燃料在燃烧后的灰渣呈灰黑色的细小颗粒物,无块状的渣块产生,如图6a所示。

2)中度结渣。包括棉秆、玉米秸(含添加剂)。这两种燃料在燃烧后均出现轻微的结渣现象,但渣块尺寸较小,易碎。其中,棉秆燃烧后的灰渣呈灰黄色,粒度一般为8~10mm,如图6b所示;玉米秸(含添加剂)燃烧后的灰渣为与燃烧前形状类似的浅棕黄色颗粒,但直径与长度均较燃烧前减小,约为 $\varnothing 5.5\text{mm} \times 12.5\text{mm}$,如图6c所示。

3)严重结渣。其渣块尺寸由小到大依次为:麦秸、玉米秸、木屑+花生壳、混合木质、红松。这些燃料的结渣现象都很明显,渣块硬度较大,且尺寸和质量都很大。其中麦秸燃烧后其灰渣为深灰色,渣块最大尺寸约68.5mm,质量为9.14g,硬度相对较小;玉米秸燃烧后灰渣颜色较深,略呈深蓝色,色泽较亮,渣块尺寸最大能达到82.5mm,质量达20.03g;木屑+花生壳的混合燃料在燃烧后,灰渣尺寸最大能达到106mm,质量达105.46g,其颜色较浅,呈灰黄色;混合木质燃烧后的灰渣颜色偏暗,渣块最大尺寸约为112mm,质量为81.49g;红松燃烧后的灰渣颜色偏红,渣块尺寸最大能达到116mm,质量达133.41g,硬度非常大。如图6中d、e、f、g、h所示。

值得注意的是,当在玉米秸中加入添加剂后,其灰渣的形态与特性都发生了较大变化,如颜色由青黑色变为浅棕黄色,渣块粒度变小且呈较为规则的短圆柱状,更加易碎等,见图6中c、e,添加剂有益于改善燃料的结渣性能。

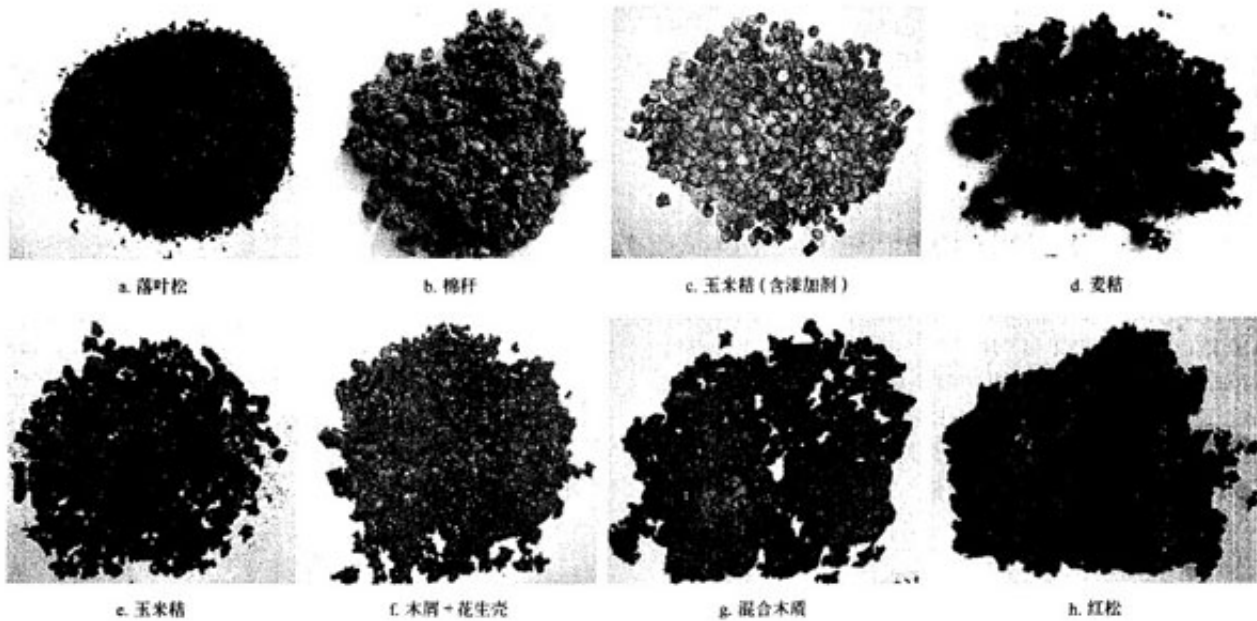


图6 各种生物质颗粒燃料灰渣形貌
Fig.6 Appearance of ash and slag of different kinds of biomass pellets

2.5.2 灰熔融性对结渣的影响

8种生物质颗粒燃料的底灰结渣率由小至大分别为：落叶松<棉秆<玉米秸(含添加剂)<麦秸<木屑+花生壳<混合木质<玉米秸<红松，见表3。可以发现，燃料的结渣率与其软化温度密切相关，软化温度越高，结渣率越低；当燃料的软化温度达到一定数值时(如落叶松的软化温度为1389)，则燃料将不会出现结渣现象。但对某些生物质颗粒燃料，灰熔融特性对底灰结渣率的影响却不明显，甚至有矛盾。如棉秆的软化温度为1211，低于玉米秸(含添加剂)，但底灰结渣率反而较低，仅为24.13%；同样，麦秸的软化温度为1201，低于木屑+花生壳，其底灰结渣率为36.57%。

表3 灰熔融性对燃料结渣的影响
Table 3 Effects of ash fusibility on clinkering rate of biomass pellets

燃料类型	灰熔融性/℃				底灰结渣率/%
	变形温度 T_D	软化温度 T_S	半球温度 T_H	流动温度 T_F	
落叶松	1332	1389	1394	1394	0
棉秆	1191	1211	1224	1262	24.13
玉米秸(含添加剂)	1224	1247	1252	1269	26.17
麦秸	1163	1201	1211	1229	36.57
木屑+花生壳(1:4)	1207	1217	1221	1251	47.13
混合木质	1196	1213	1217	1221	48.23
玉米秸	1167	1198	1215	1238	48.94
红松	1181	1196	1206	1254	57.81

注：参照 GB/T 219—1996 煤灰熔融性的测定方法进行测定，试验气氛为氧化性气氛。

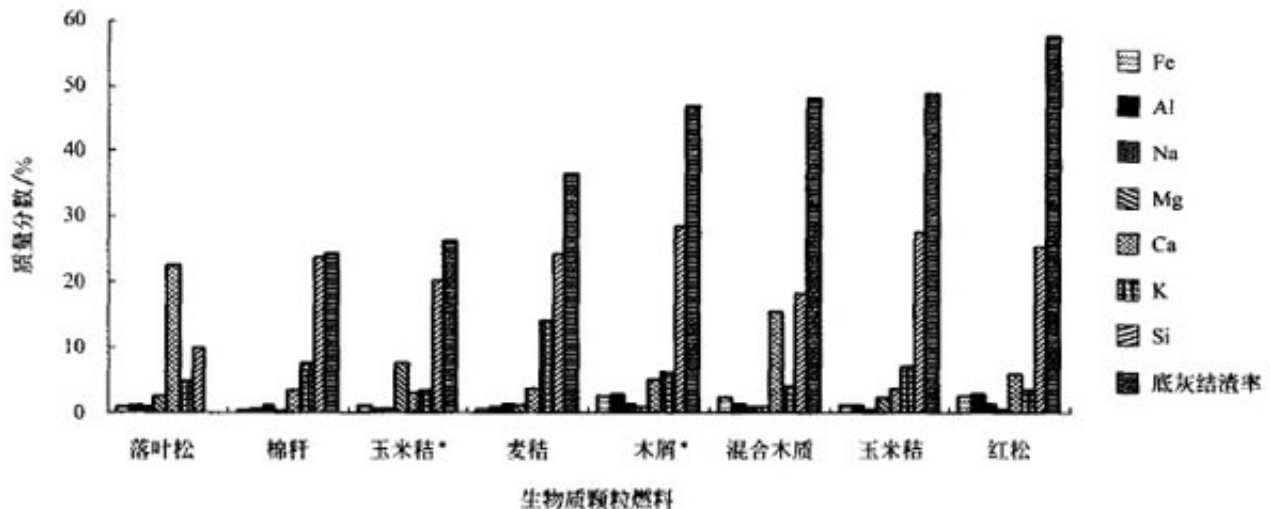
另外，在燃料中添加适当的添加剂，能够有效降低生物质颗粒燃料的结渣趋势，如试验中的玉米秸，未含添加剂其底灰结渣率为48.94%，使用添加剂后的底灰结渣率降低到26.17%，降低了22.77%。

2.5.3 灰渣化学组成的影响

生物质颗粒燃料的底灰结渣率与其化学组成密切相关，见图7，图中所示燃料的结渣率为依次增大。一般来说，燃

料中Si元素含量越高，结渣趋势越明显，如木屑+花生壳、玉米秸、红松、以及麦秸等，其si的质量分数基本在25%左右或更高，结渣率较高；反之，落叶松灰渣中的化学成分中si的质量分数最低，仅为9.76%，其结渣率也最低(不结渣)。

除Si元素外，碱金属元素(K、Na)及碱土金属元素(Ca、Mg)对底灰结渣率的影响也很大，如棉秆与麦秸，二者的Si元素含量大致相同，但二者的K元素含量相差很大，麦秸的K元素质量分数高达14.17%，而其底灰结渣率也比棉花秆高出许多；再如玉米秸(含添加剂)与玉米秸，可以发现前者Mg元素含量较高，比后者高出3倍多，K元素含量则较低，约是后者的1/2，而前者结渣率比后者降低了22.77%；再如混合木质与红松，前者的ca元素含量约是后者的3倍，其结渣率则降低了约10%。由此可知，碱金属元素含量越高，燃料结渣趋势越明显；碱土金属含量越高，燃料结渣趋势越小。



注：玉米秸*——含添加剂的玉米秸；木屑*——木屑+花生壳(1:4)

图7 灰渣的化学组成成分及底灰结渣率

Fig.7 Chemical components of ash, slag and clinkering rate of bottom ash

3结论与建议

- 1)生物质颗粒燃料所需的点火时间与燃料的挥发份、含水率密切相关，挥发分越高，含水率越低，点火时间越短。
- 2)生物质颗粒燃料在燃烧器中正常燃烧时的SO₂、NO_x等污染物排放浓度远低于国家标准，但存在着部分生物质颗粒燃料灰分含量过大、结渣严重等问题，从而导致燃烧器难以连续运行。
- 3)燃料的灰熔融特性对其结渣率有较大影响，对大多数燃料来说，软化温度越高，结渣率越低，当软化温度达到一定数值时，燃料不会发生结渣，如落叶松。
- 4)影响生物质颗粒燃料结渣趋势的元素主要有si、碱金属和碱土金属。其中，Si元素含量越高，碱金属含量越高，越易于结渣；碱土金属含量越大，越抗结渣。添加适当的添加剂，可有效改善燃料的结渣性能。

建议在生产生物质颗粒燃料时添加适当的添加剂，以降低燃料的结渣率，改善运行工况；同时，建议对国外引进的燃烧器进行优化改进，及时排出灰渣，保证其正常连续运行，以适应中国的国情。(罗娟，侯书林，赵立欣，孟海波，田宜水)

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/45203.html>