生物质压缩颗粒的燃烧特性

王惺，李定凯，倪维斗，李政，张鹤丹

(清华大学热能工程系，北京100084)

摘要：采用TG－DTG热分析技术对麦秸、玉米秸、胶合板粉粒和松木粒4种生物质压缩颗粒的燃烧特性进行了实验研究，考察了其着火及燃尽特性，结合前人提出的综合燃烧特性指数，提出用相对失重速率进行计算。结果表明：生物质压缩颗粒与煤相比，其着火与燃尽温度均较低，燃烧迅速且集中；与生物质粉末相比，其固定碳的燃烧更平稳，燃烧时间延长。4种物质之中，松木粒综合燃烧特性最好，玉米秸最差。

工业化带来的资源枯竭问题已经引起了广泛关注和忧虑。作为可再生能源的一种，生物质能的利用已经受到国内外的高度重视[1－3]。

我国生物质资源丰富，在诸多利用途径中，生物质成型燃料被认为是一种方便、易操作的分布式利用方式而受到青睐。成型燃料的迅猛发展，势必会带动其燃烧设备等相关产品的研制工作，这又离不开对成型燃料燃烧特性的基础性研究。目前，国内外对生物质粉体燃烧特性研究较多[4－10]，而对生物质压缩成型燃料的燃烧特性研究还非常少，因此，有必要开展这类工作，为开发更合适的生物质颗粒燃烧炉做必要的准备。

1实验

1.1实验样品及其特性

实验选用了麦秸粒、玉米秸粒、松木粒和胶合板粉粒4种压缩颗粒来制备样品，4种颗粒的原料均采自北京地区。压缩颗粒的制备采用北京惠众实(High－zones)公司研发的“生物质冷压成型技术”。该技术将粉碎粒度10mm以下的生物质原材料，在常温、自然干燥(含水率15%～25%)条件下，压缩成直径6～7mm、长度约20mm、密度约1.1g/cm^{3}的成型颗粒。制备实验样品时，将上述颗粒截取成重约30mg的成型颗粒。各样品的工业分析和元素分析结果见表1。

表 1 样品及对比煤样的工业分析和元素分析 %

试样	工业分析				元素分析				
	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	$C_{F,ad}$	$w_{C,ad}$	$w_{H,ad}$	$w_{O,ad}$	$w_{N,ad}$	$w_{S,ad}$
麦秸粒	8.26	5.61	68.46	17.67	45.64	6.05	33.28	0.98	0.18
玉米秸粒	7.91	9.39	67.76	14.93	41.60	5.74	34.11	1.09	0.16
胶合板粉粒	8.06	1.87	73.21	16.87	45.68	6.23	36.23	1.76	0.17
松木粒	8.44	3.29	71.34	16.93	46.15	5.93	35.83	0.31	0.05
神华烟煤[13]	4.38	6.64	28.01	60.97	73.51	4.04	10.29	0.78	0.36
无烟煤[14]	1.50	3.54	8.75	86.21	88.05	3.06	3.04	0.74	0.07

1.2实验条件

实验采用美国HermoCahn公司的热重分析系统thermax500热重分析仪，工作气氛为空气，流量为200mL/min，常压，升温速率20℃/min，初始温度为温(约28℃)。样品为约30mg的成型颗粒。

1.3实验结果

4种样品颗粒的TG、DTG曲线如图1～图4所示。

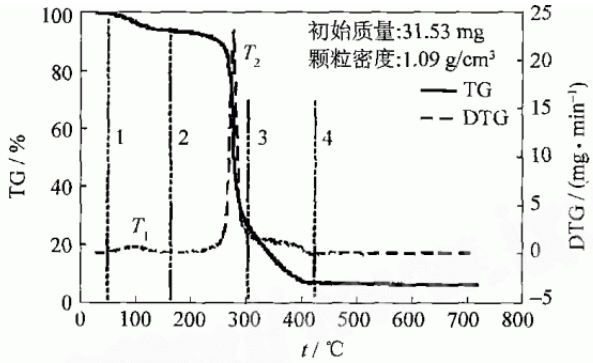

图 1　麦秸燃烧特性曲线

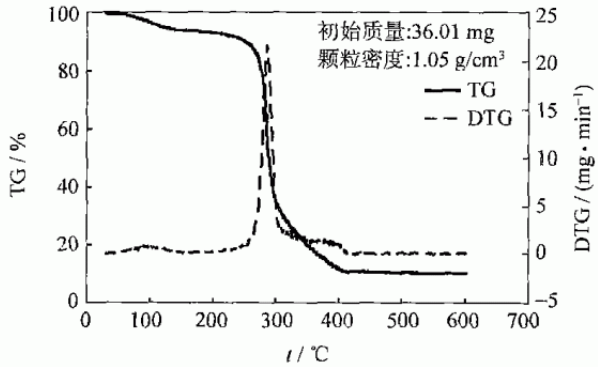

图 2　玉米秸燃烧特性曲线

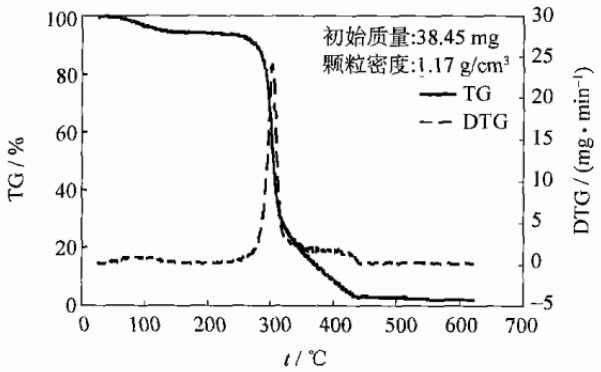

图 3　胶合板粉粒燃烧特性曲线

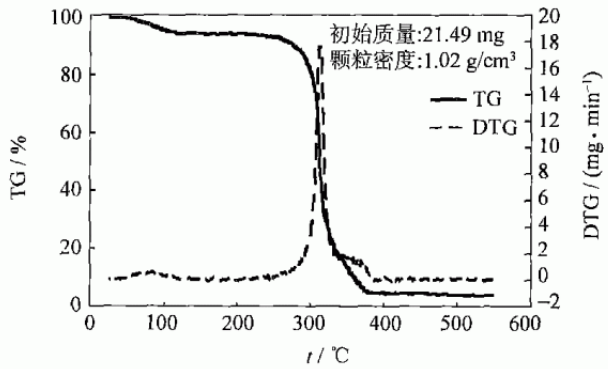

图 4　松木粒燃烧特性曲线

2分析与比较

2.1燃烧特性

从样品的工业分析和元素分析可见，生物质颗粒的组分特征是明显的，与煤样相比，其挥发分含量高，固定碳要少很多。这种组分结构也决定了其燃烧特性。

表 2　4种生物质颗粒燃烧特性参数

试样	W_1 /%	W_2 /%	W_3 /%	W_4 /%	t_1 /℃	t_2 /℃
麦秸	5.73	68.59	18.18	1.19	94.4	276.7
玉米秸	5.79	62.96	20.16	0.49	94.4	285.1
胶合板	5.37	70.82	20.47	0.88	91.5	302.9
松木	5.31	72.82	16.38	0.91	82.6	312.8

表2描述了4种生物质颗粒的燃烧特性参数。其中，W1～W4分别表示在燃烧的4个阶段失重百分率；t1和t2分别表示两个失重速率最大时刻的温度。图5和图6为4种样品的TG曲线和DTG曲线。

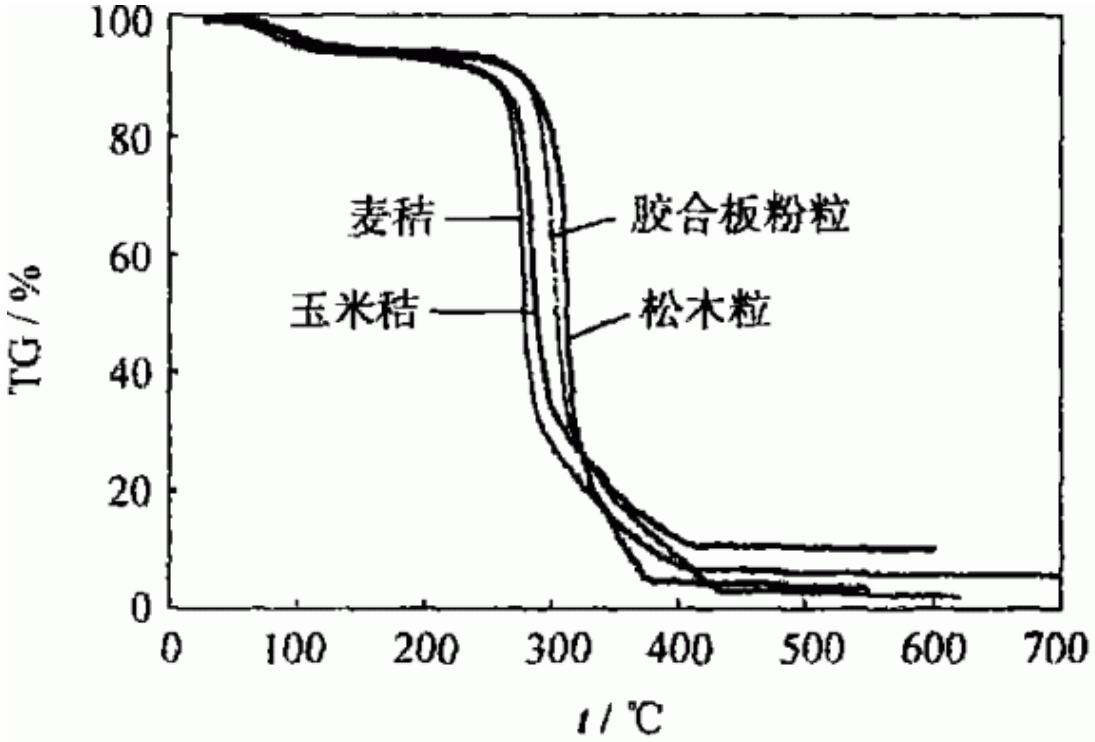

图 5　4种样品 TG曲线比较

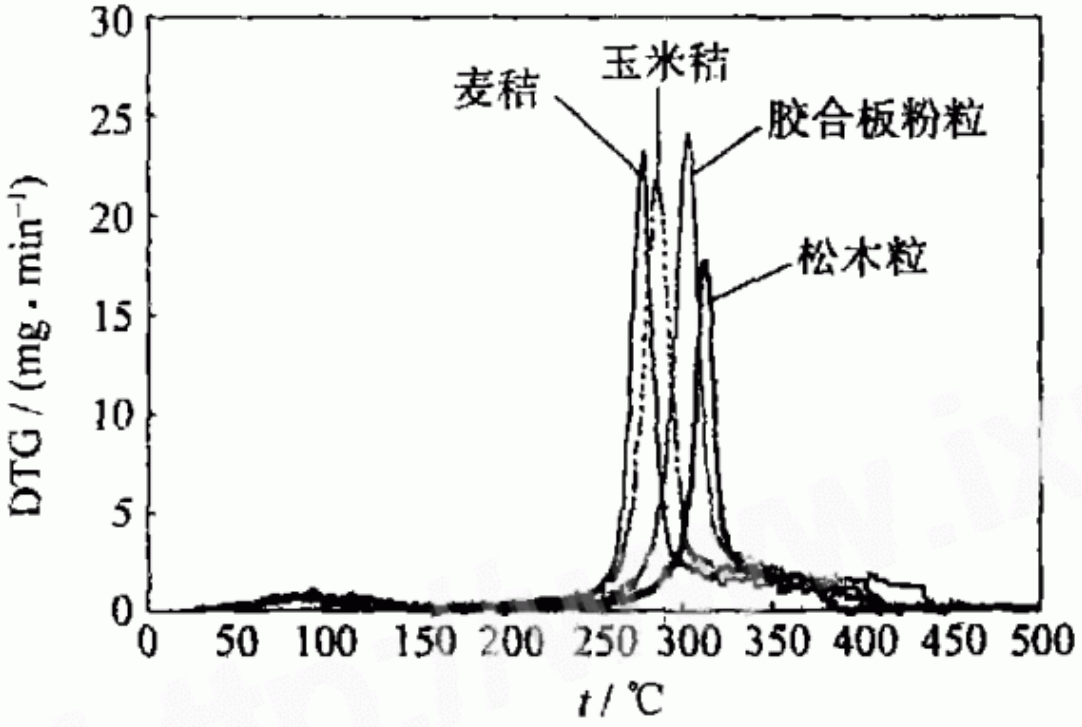

图 6　4种样品 DTG曲线比较

从表2及图5和图6可见，4种生物质颗粒的燃烧具有相同的特点。

(1)4种生物质颗粒燃烧特性曲线相似，均可以分为4段(图1)：水分析出，挥发分析出燃烧，固定碳燃烧，燃尽。这与文献中报道的生物质燃烧的4个阶段吻合[11－12]。

(2)水分含量差别不大，且水分析出时间集中。

(3)燃烧温度较低，4种生物质颗粒开始明显失重时刻的温度在250℃附近，这也大大低于一般煤的初始明显失重温度[13－14]。样品燃烧过程迅速且集中，失重主要在第2阶段，即挥发分的析出与燃烧阶段，这一阶段的失重占初始质量的70%左右，这也反映了生物质颗粒挥发分含量高的特点。

(4)第3阶段，即固定碳燃烧阶段，燃烧速率相对平稳且缓慢，4种颗粒均未出现燃烧速率的峰值，这点与一些文献报道的生物质粉体燃烧的第3阶段燃烧情况不尽一致[15]。除了样品的因素外，笔者认为颗粒大小及密度是一个原因。由于本实验中的样品均为压缩颗粒，质量较大，进入第3阶段固定碳燃烧时，紧密的结构使得样品内部的物质不能即时接触空气，从而使燃烧更趋于平稳。

(5)400～450℃，样品基本燃烧完毕，这样，温度比一般煤的燃尽温度低了很多[13－14]，反映出生物质颗粒的整个燃烧过程是迅速的。图5和图6亦反映了4种生物质颗粒燃烧特性的区别。可以看到，麦秸和玉米秸两种草本生物质的初始失重温度要明显低于胶合板粉粒和松木粒这两种木本生物质，失重峰值时的温度t2亦有此特点；其次，麦秸和玉米秸挥发分含量较另二者小，使得其固定碳燃烧时间相对后二者较长，且速率更缓慢；胶合板粉粒和松木粒可燃部分比例较大，燃烧更加集中而迅速，尤其松木粒，初始失重温度最高，但却最早燃尽，燃烧速率最快，燃烧持续性较差。

从样品的TG图和DTG图反映的特点来看，本实验中样品的燃烧特性和文献中报道的生物质粉体燃烧特性类似[11－12，16]，但第3阶段固定碳燃烧更加平稳。

2.2着火特性

着火特性主要由着火温度体现。热重分析中着火温度的定义有多种方法，本文中采用最常用的切线法来确定样品的着火温度，即把DTG曲线最高峰值点对应TG曲线上点的切线与初始失重时的基线交点定义为着火温度(见图7)。

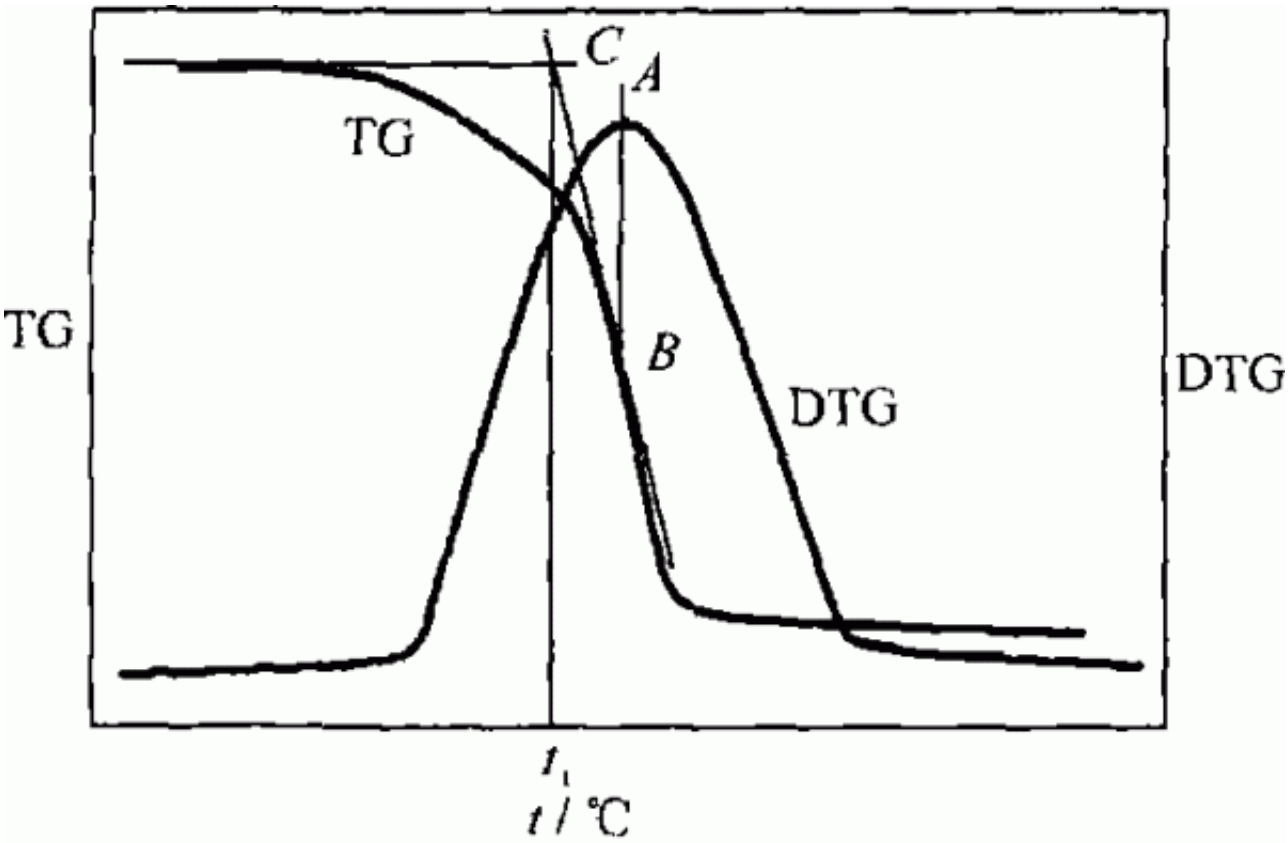

图 7 着火温度的定义

按照上述定义方法，将4种样品的着火温度ti列于表3.不难看出，4种生物质颗粒的着火温度除松木粒在304℃，其余均在300℃以下，说明生物质成型颗粒和生物质粉体一样，均具有较低的着火温度，与煤相比，更易着火燃烧。此外，和失重峰值温度t2一样，着火温度ti从低到高依次是麦秸、玉米秸、胶合板粉粒和松木粒，说明草本生物质更易着火，与其相比木本生物质则较难着火。

表 3 4种生物质颗粒及对比煤样的着火及燃尽特性

参数	麦秸	玉米秸	胶合板	松木	神华烟煤[13]	平朔烟煤[13]	无烟煤[14]	麦秸粉[14]	玉米芯粉[14]
t_i / ℃	273	281	293	304	411	442	471	264	281
t_{end} / ℃	422	415	444	385	654	800	590	324	321
R / %	5.63	9.99	1.97	3.53					

注：文献[13]中样品升温速率为20 ℃/min,粒度 <70 μm,质量 10 mg;文献[14]中样品升温速率为15 ℃/min,粒度 <0.2 mm,质量 10 mg

2.3燃尽特性

本文将DTG的值基本变为0时(第4阶段起始时)的温度定义为燃尽温度tend，4种生物质颗粒以及用来作对比的煤样、粉末生物质的燃尽温度和最终剩余物质的百分率R如表3所示。可以看到，4种生物质颗粒的燃尽温度均不高，都未超过450℃，松木粒最低，385℃即燃烧完全，这个温度甚至低于很多煤种的着火温度，说明生物质颗粒物燃烧均比较迅速，相对煤而言，其燃烧温度较低，持续性较差。但与文献[14]中报道的粉末生物质相比，生物质压缩颗粒的着火温度与其差别不大，但燃尽温度提高，说明压缩成颗粒后生物质燃烧持续性有所增加。同时，4种生物质颗粒之间的燃尽特性也有较大差异。比较得出，麦秸和胶合板粉粒燃烧过程最长，温度跨度为150℃左右；玉米秸其次；松木的燃烧过程最短，温度跨度仅81℃。再结合燃尽温度可以定性看出，松木的燃尽特性最好。

从剩余物百分率来看，玉米秸最大，其次是麦秸和松木，胶合板最小，与4种样品的灰分含量吻合，这也说明了在燃烧完全的情况下，胶合板燃烧后排渣较少。

总结燃尽特性可知：胶合板粉粒燃烧持续时间最长，较其他3种物质不易燃烧；松木粒由于其燃烧时间集中，燃烧迅速，因此较易燃烧。燃烧剩余物方面，胶合板粉粒最少，而两种草本生物质的燃烧剩余物较多，应注意排渣的清理。总体来看，生物质颗粒物燃尽温度低，燃烧较快，燃尽特性好于煤，与煤相比更容易燃烧。与生物质粉末相比，压缩后的颗粒燃烧持续性增加。

2.4综合燃烧特性

为了综合分析生物质颗粒的燃烧特性，诸多文献[11，16－18]采用综合燃烧特性指数S综合反映物质着火和燃尽特性，即

$$S = \frac{(\mathrm{d}W/\mathrm{d}t)_{\max} \cdot (\mathrm{d}W/\mathrm{d}t)_{\mathrm{mean}}}{t_i^2\, t_{\mathrm{end}}} \qquad (1)$$

式中：$(\mathrm{d}W/\mathrm{d}t)_{\max}$为最大燃烧速率；$(\mathrm{d}W/\mathrm{d}t)_{\mathrm{mean}}$为从着火开始至燃尽时平均燃烧速率；$t_i$为着火温度；$t_{\mathrm{end}}$为燃尽温度. 上式的推导过程可参见文献 [18].

从式(1)可见，燃烧速率的增大、着火温度和燃尽温度的减小均能使S增大，说明S越大，燃料燃尽越快，燃烧特性越好。值得注意的是，文献[17－18]中采用式(1)计算煤及生物质综合燃烧特性指数时，燃烧速率dW/dt直接采用DTG曲线上的值，即失重速率的绝对值。但是，此处采用相对失重速率更为妥当。

首先，从式(1)的推导过程可知，其来自于Arrhe-nius定律，公式中的dW/dt应为反应物浓度的变化率，对应燃烧特性实验中的样品而言，此dW/dt应为t时刻样品相对质量的变化率，即认为

$$dW/dt = \frac{dm/dt}{m_t}$$

$$(dW/dt)_{max} = \frac{(dm/dt)_{max}}{m_{max}}$$

$$(dW/dt)_{mean} = \left(\frac{dm/dt}{m_t}\right)_{mean}$$

其中 m_t 和 m_{max} 分别为样品在 t 时刻和失重速率最大时的质量.

其次,现实经验表明,质量不同的相同物质在同一时刻燃烧失重速率的绝对值不同. 对于同一种物质,在相同条件下,质量越大,其最大燃烧速率和平均燃烧速率都随之增大,但着火温度、燃尽温度及失重峰值温度差异不大[16]. 因此采用相对失重速率能更合理地比较不同物质在相同条件下燃烧速率的差异.

综上分析,为方便计算,本文中将式(1)等价化为

$$S = \frac{\frac{(dm/dt)_{max}}{m_{max}} \left(\frac{dm/dt}{m_t}\right)_{mean}}{t_i^2 \, t_{end}} \tag{2}$$

由式(2)计算得出 4种生物质颗粒的综合燃烧特性指数 S 列于表 4.

表 4 综合燃烧特性指数 S的计算

试样	t_i / ℃	t_{end} / ℃	$\frac{(dm/dt)_{max}}{m_{max}}$	$\left(\frac{dm/dt}{m_t}\right)_{mean}$	$S/10^8$
麦秸	273	422	1.287	0.324	1.33
玉米秸	281	415	1.000	0.288	0.88
胶合板	293	444	1.121	0.446	1.31
松木	304	385	1.702	0.717	3.43

按照修正后的计算方式，松木粒的最大燃烧速率和平均燃烧速率均为最大，直接导致使其S参数最大，综合燃烧特性最好。但不足之处在于，其着火温度较其他3种生物质颗粒高，较难着火。麦秸的综合燃烧特性指数较松木粒差，但却好于其他两种样品；其优点是着火温度最低，最容易着火。胶合板粉粒的综合燃烧特性指数接近麦秸，二者差异不大，后者的燃烧速率较前者快，但着火和燃尽温度都较前者高。玉米秸的综合燃烧特性指数为4种样品中的最低值，说明其综合燃烧特性最差。原因在于其最大燃烧速率和平均燃烧速率均小于其他3种样品。进一步地，通过对4种样品进行热解实验研究表明，玉米秸的挥发分释放速率最低，因此不难解释其平均燃烧速率小于其他3种物质。

3结论

(1)虽然4种生物质压缩颗粒的质量和密度都较大，但其燃烧特性依然明显地体现了生物质燃烧的特征，燃烧分为4个阶段：脱水，挥发分析出及燃烧，固定碳燃烧和燃尽阶段。

(2)4种压缩颗粒的着火特性不尽相同。麦秸最容易着火，玉米秸、胶合板其次，而松木粒最难。对于燃尽特性，胶合板粉粒燃尽温度最高，而松木粒最低，燃尽特性最好。此外，两种草本生物质(玉米秸、麦秸)的燃烧剩余物较多，设计燃烧设备时应注意排渣的清理。

(3)与煤相比，压缩颗粒的着火点与燃尽温度均较低，燃烧集中且迅速；与生物质粉体相比，燃烧第3阶段固定碳的燃烧速率没有峰值，更加稳定，且压缩后颗粒的燃烧持续时间延长。

(4)本文对综合燃烧特性指数S作了稍许修改，计算时采用“相对失重速率”，能更合理地比较不同物质间综合燃烧特性指数。按照这种计算方法，得出4种生物质颗粒按S值从大到小(综合燃烧特性从好到差)的排列顺序依次为松木粒、麦秸、胶合板粉粒和玉米秸。

参考文献：

[1]Demirbas A.Recent advances in biomass conversion tech-nologies[J].EnergyEducationScienceand Technology，2000，6：19-41.

[2]DemirbasA.Sustainable cofiring of biomass with coal[J].Energy ConversM anage，2003，44：1465-1479.

[3]RichardL B，Overend R P，Craig K R.Biomass-firedpower generation[J].FuelProcessing Technology，1998，54：1-16.

[4]Jenkins B M，Baxter L L，Miles T R，et al。Combustion properties of biomass[J].Fuel Processing Technology，1998，54：17-46.

[5]Zheng G，KozinskiJ A.Thermal events occurring during the combustion of biomassresidue[J].Fuel，2000，79：181-192.

[6]Haykm-Acma H.Combustion characteristics ofdifferent bio-massmaterials[J].Energy Convers M anage，2003，44：155-162.

[7]Ragland KW，AertsD J，BakerAJ.Properties ofwood for combustion analysis[J].B ioresource Technology，1991，37:161-168.

[8]SamiM，Annamalai K，WooldridgeM.Co-firing of coal and biomass fuel blends[J].Progress Energy Com bustionSci-ence，2001，27：171-214.

[9]DemirbasA.Fuel characteristics of olive husk and walnut，hazelnut，sunflower，andalmond shells[J].Energy Sources，2002，24：215-221.

[10]KanuryA M.Combustion characteristicsof biomass fuels[J].Com bustion Science and Technology，1994，97：469-491.

[11]闵凡飞，张明旭。生物质燃烧模式及燃烧特性的研究[J].煤炭学报，2005，30(1)：104-108.

[12]Ayhan Demirbas.Combustion characteristics of different biomass fuels[J].Progress in Energy and CombustionScience，2004，30:219-230.

[13]李永华，傅松，陈鸿伟，等。混煤热重试验研究[J].锅炉技术，2003，34(1)：8-10.

[14]闵凡飞，张明旭。生物质与不同变质程度煤混合燃烧特性研究[J].中国矿业大学学报，2005，34(2)：237-241.

[15]刘豪，邱建荣，董学文，等。生物质和煤混合燃烧实验[J].燃烧科学与技术，2002，8(4)：319-322.

[16]马孝琴。稻秆着火及燃烧特性的研究[J].河南农业大学学报，2002，36(1)：77-79.

[17]陈建原，孙学信。煤的挥发分释放特性指数及燃烧特性指数的确定[J].动力工程，1987，7(5)：13-18.

[18]孙学信。燃煤锅炉燃烧试验技术与方法[M].北京：中国电力出版社，2002.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/119374.html