

生物质颗粒度对燃烧特性影响

伊晓路，刘贞先，郭东彦，许敏，孙立

(山东省科学院能源研究所，山东济南250014)

摘要：以稻壳为例考察了不同稻壳粒径对热解及燃烧特性、传热系数、焦炭燃烧的影响，利用TG/DTG6200热重差热分析仪对不同颗粒度稻壳粉做了热解实验，得到了不同的TG、DTG、DTA曲线。结果表明，稻壳颗粒度越小，其挥发分析出温度越低，析出时间越短，传热系数增大，升温速率增大，有利于燃烧，但过小的颗粒度同时增大了散热损失，当粒径低于临界尺度时，易出现熄火现象。焦炭燃烧过程受粒径大小的影响，粒径减小，燃烧反应速率加快，燃烧时间缩短，有利于燃烧。

生物质是一种理想的可再生能源，由于它的广泛性、可再生性、清洁性而受到人们的关注^[1-8]

。生物质种类繁多，我国是农业大国，每年生物质秸秆的产量在6亿t左右，主要集中在玉米秸(28.7%)、麦秸(25.4%)和水稻秆(14.3%)^[9-10]，因此下面对生物质的研究也是针对农作物废弃物而言的。

目前对于生物质热解的研究很多，而对于生物质燃烧特性研究的报道不多。生物质的形状复杂，密度偏小，热值偏低，这使其应用变得困难。煤和生物质掺烧技术、生物质造粒燃烧技术等已经有了一些报道，而直接燃烧生物质的装置还少有报道。生物质直接燃烧主要是炉灶燃烧和锅炉燃烧。炉灶燃烧利用效率低，造成能源浪费；锅炉燃烧技术大大提高了燃烧效率，主要锅炉燃烧方式有流化床锅炉和层燃炉等，而流化床对于生物质燃料的适应性较好。

流化床燃烧与普通燃烧最大的区别在于原料颗粒燃烧时的状态，流化床颗粒是处于流态化的燃烧反应和热交换的过程。这种燃烧方式对生物质直接燃烧非常适合。本实验以稻壳为研究对象，通过研究总结出了生物质颗粒度对燃烧的影响，为流化床的设计提供依据，同时这对生物质能源的利用提供了有利的参考。

1 稻壳特性

1.1 物理特性

稻壳是一种表面粗糙、有细小毛刺的梭形状空心原料，长度一般在10mm左右，最大直径处有2~3mm。其主要的物理特性及其工业元素分析见表1和表2(工业分析所取稻壳产地为济南市郊区)。稻壳与其他秸秆的特性很类似，主要不同之处在于稻壳灰分中的成分基本上都是SiO₂，所以稻壳也是提取SiO₂的最佳生物质原料之一。

表1 稻壳物性参数

粒径范围/	当量直径/	自然堆积密度/	真实密度/
mm	mm	kg m ⁻³	kg m ⁻³
0~10	1.6	122.9	500

表2 稻壳元素分析与工业分析

C _d 质量 分数/ %	H _d 质量 分数/ %	O _d 质量 分数/ %	N _d 质量 分数/ %	S _d 质量 分数/ %
44.03	4.98	38.390	0.43	0.04
M _{ad} (质量 分数)/ %	A _d (质量 分数)/ %	V _d (质量 分数)/ %	Q _{dW} /MJ kg ⁻¹	
10.86	12.13	70.62	13.40	

注：M_{ad}为水分含量；A_d为灰分含量；V_d为挥发分含量；Q_{dW}为低位热值。

1.2化学特性

通过表1和表2中的数据可以看出，稻壳密度偏小，在稻壳成分中N、S的含量很低，对于燃烧烟气不需要考虑脱硫脱氮问题。稻壳挥发分含量高达70%以上，说明容易着火，同时也说明了稻壳燃烧释放的热量主要是来自挥发分燃烧，因此对于稻壳等生物质而言，挥发分的燃烧状况很大程度上直接影响到燃烧效率。稻壳的这一系列特性都要求对其利用时特别注意。

2颗粒度对燃烧特性影响研究

2.1颗粒度大小对热解影响

取3种颗粒度不同的稻壳，这里以长度来区别其颗粒度大小，稻壳a长度8~10mm，稻壳b长度0.5~2mm，稻壳c长度0.01~0.05mm。利用型号为TG/DTG6200热重差热分析仪，测温范围：室温~1100℃，质量灵敏度：0.2μg，加热速率为50℃/min，得出了稻壳a、b、c的TG、DTA与DTG曲线，如图1所示。通过曲线可以看出稻壳的燃烧大体分为3个阶段。

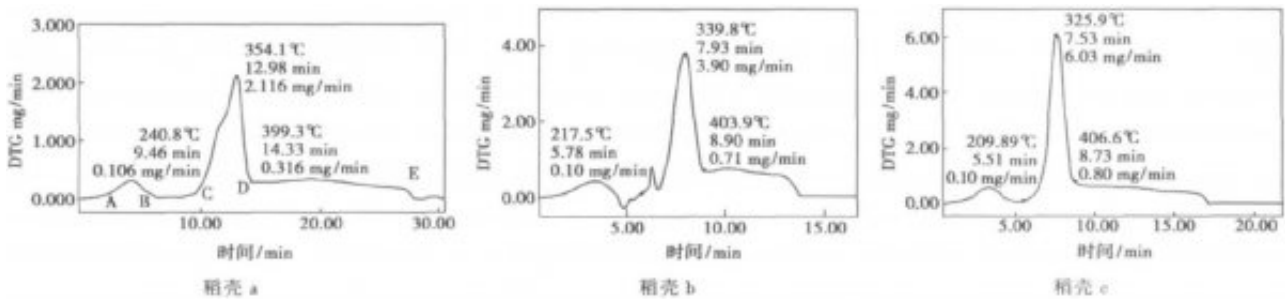


图1 稻壳热重分析曲线

水分析出阶段(AB)，这一阶段主要是水分析出阶段，且能看出在AB段之间有一个明显的波峰，代表着水分析出最大速率。挥发分析出及燃烧阶段(CD)，一般来讲，取DTG=0.1mg/min时的温度为挥发分析出温度，在氧气环境中析出的挥发分会很快燃烧。焦炭燃尽阶段(DE)，从图中可以看出，不管是TG还是DTG曲线在FG段的变化相对减弱，尤其DTG曲线更为明显，由此可见稻壳焦炭的燃烧比较缓慢。

从表3中的数据可以看出，3种稻壳挥发分析出温度及稻壳达到最高析出量时所需温度 $T_a > T_b > T_c$ ，也就是说随着颗粒度减小，稻壳挥发分析出温度降低，同时所需要的时间也减少；挥发分的燃烧可以分为析出和燃烧2个阶段，气体燃烧速率快，其燃烧所需时间要远远大于其析出时间，所以这里可以近似忽略燃烧时间。从表3中析出量数据看出稻壳a的挥发分析出时间是稻壳b的1.61倍，是稻壳c的1.64倍，这说明稻壳颗粒度对其挥发分析出时间影响较大，随着颗粒减小挥发分析出时间减少；稻壳c的温度最高，也是由于其颗粒度小的缘故。

表3 稻壳 a、b、c 热解与燃烧过程主要参数

	稻壳 a	稻壳 b	稻壳 c	稻壳 a + b	稻壳 a + c	稻壳 b + c
实验 1						
温度/ °C	240	217	209.8	23	30.2	7.8
析出量/ mg min^{-1}	0.10	0.10	0.10	0	0	0
时间/ min	9.40	5.78	5.51	3.62	3.89	0.27
实验 2						
温度/ °C	354	339.8	325.9	14.2	28.1	13.9
析出量/ mg min^{-1}	2.11	3.80	6.03	- 1.69	- 3.92	- 2.23
时间/ min	12.98	7.93	7.53	5.05	5.45	0.40
实验 3						
温度/ °C	399	403	406.6	- 4	- 7.6	- 3.6
析出量/ mg min^{-1}	0.31	0.71	0.80	- 0.40	- 0.49	- 0.09
时间/ min	14.33	8.90	8.73	- 5.43	- 5.60	- 0.17

稻壳b与c的参数基本相近，与稻壳a的参数相差却甚大，一方面是因为稻壳a的颗粒度较大，不利于燃烧进行；另一方面可以看出，当稻壳颗粒度小到一定程度时，再减小稻壳颗粒度对其热解或者燃烧的影响逐渐减弱，同时处理稻壳颗粒度越小将会需要消耗动力越大，现在处理到10~20mm粒径生物质消耗动力为5kW/t左右，如果处理到0.1mm以下，所需动力就要20kW/t左右。所以，对于稻壳燃烧也不是无限制的减小颗粒度，综合评价来选取合理的颗粒度。

为了全面评价生物质的燃烧情况，引入文献[11-12]燃烧特性指数P进行描述：

$$P = \frac{(dw/dt)_{\max} (dw/dt)_{\text{mean}}}{T_e^2 T_h} \quad (1)$$

式中, P 为燃烧特性指数; $(dw/dt)_{\max}$ 为最大燃烧速率, mg/min ; $(dw/dt)_{\text{mean}}$ 为平均燃烧速率, mg/min ; T_e 挥发分开始析出温度(着火温度), $^{\circ}\text{C}$; T_h 为燃尽温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

燃烧特性指数 P 是反映稻壳着火和燃尽的综合指标, P 值越大, 说明稻壳的燃烧特性越好。升温速度、样品粒度及样品质量的变化对

稻壳的燃烧特性指数均有一定的影响

。燃烧特性指数随着颗粒度的减小和而增大^[9]

。对3种稻壳分别计算其燃烧特性指数 P , 得出结果为 $P_a < P_b < P_c$ 。因此, 稻壳c的燃烧特性指数最大, 其燃烧性能也最好。与煤相比, 稻壳燃烧特性指数明显大于煤, 其值比煤大2个数量级^[13]。

2.2 颗粒度大小对换热的影响

从原料吸热方面来讲, 颗粒度减小, 原料换热面积增加, 有利于快速吸热而升温, 一般来说, 粒度小, 传热系数就大。当颗粒温度与环境温度之差衰减到初始值的1%时, 也就是说颗粒温度与环境温度基本上达到热平衡时所需要时间与粒度有如下关系式:

$$\tau_{99\%} = 0.77 c_{p,p} \rho_p \frac{d_p}{h_{gp}} \quad (2)$$

式(2)中, $\tau_{99\%}$ 为气体与颗粒间温度平衡到99%时所需时间, s ; $c_{p,p}$ 为颗粒定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ρ_p 为颗粒密度, kg/m^3 ; d_p 为颗粒直径, m ; h_{gp} 为气固间传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

所以粒度减小, 减少了颗

粒升温时间。同时颗粒度减小, 增大了传热系数, 根据

郑洽余^[14]

等在研究循环流化床时发现, 传热系数随小球探头直径的减小而增加。因此颗粒度的减小, 有利于原料的燃烧。

从原料处于自然工况(即热力着火工况)方面来讲, 颗粒度的减小对原料燃烧有其不利因素。粒径大小对放热量是没有影响的, 但是对流散热却随着直径的减少成反比的增加^[15]

, 从而使得原料温度降低, 不利于燃烧。对同种原料在固定床中燃烧来言, 颗粒度减小, 堆积密度增加, 空隙率减少, 阻力增加, 从而使得原料处于缺氧状态, 不利于燃烧, 其原理很简单, 不过多论述。这里重点讨论对流散热对燃烧的影响。通常对流放热系数与Nusselt准则有如下关系式:

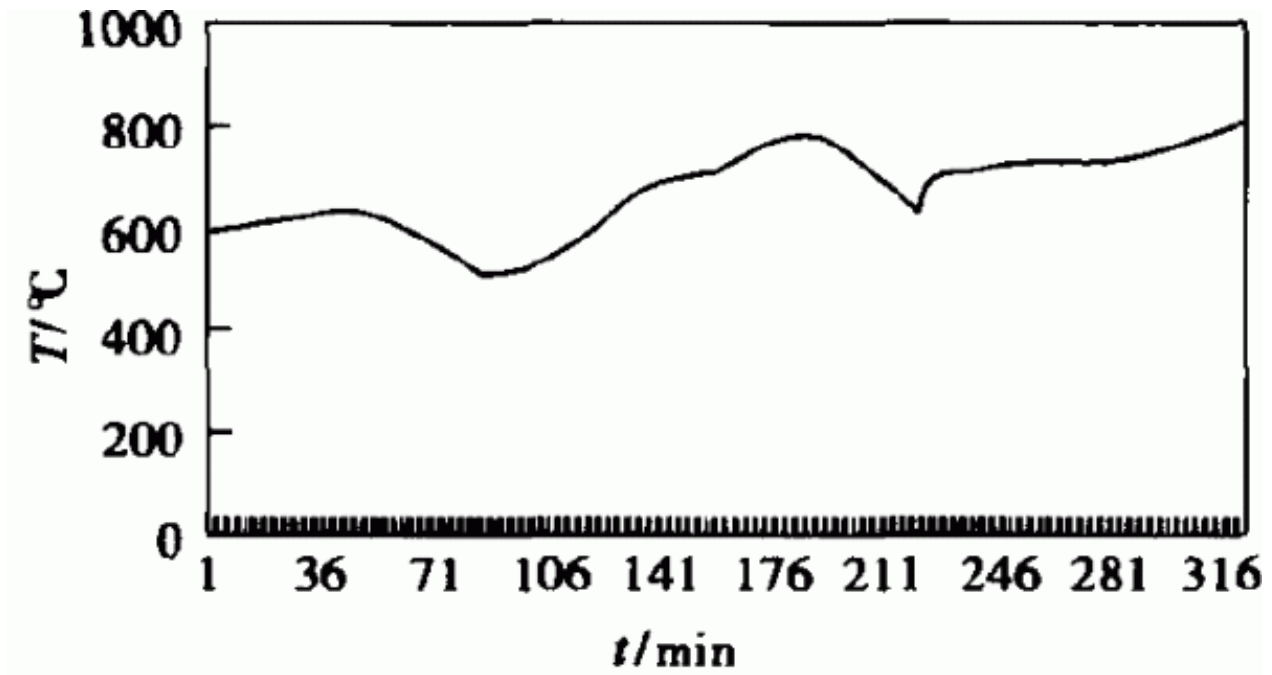
$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{d} \quad (3)$$

式(3)中, α 为对流换热系数, $W(m^2 \cdot K)$; Nu 为努塞
尔数; λ 为原料导热系数, $W(m^2 \cdot K)$; d 为颗粒直径。

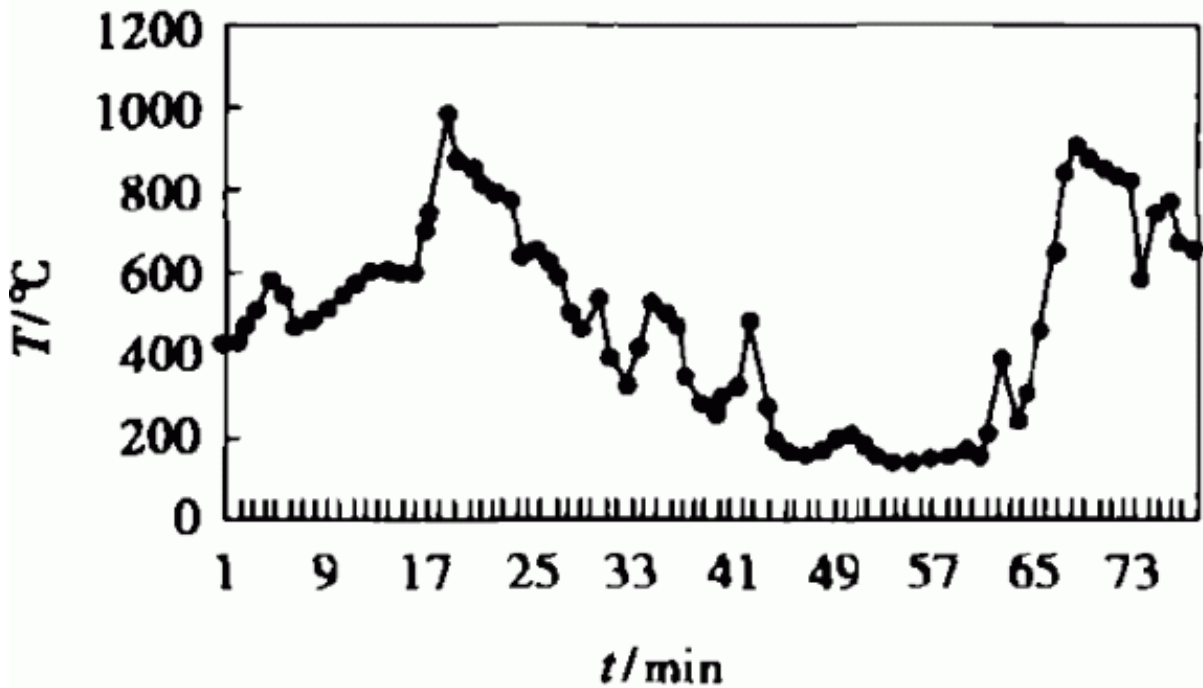
当原料粒径 d 减小时, Nu 降低不多, 为物性参数基本不变, 则 α 增加; 同时颗粒度的减小, 比表面积增大, 颗粒数增加, 增加了颗粒之间相互碰撞几率, 增强了换热, 所以当颗粒度减小时, 一方面有利于原料的燃烧, 释放热量 Q_f ; 另一方面原料本身与周围环境散热 Q_s , 当 $Q_f > Q_s$ 时, 原料燃烧释放出大量热, 温度上升; 当 $Q_f = Q_s$ 时, 原料燃烧释放热量与原料散热平衡, 此时处于一种相对稳定状态。

但当对流传热系数足够大时, 有 $Q_f < Q_s$, 原料释放热量不能满足原料的散热, 这样原料本身就会随着散热损失而逐渐降低温度, 如果没有得到合理的控制, 原料温度最终会降低到使其本身熄火。当 $Q_f = Q_s$ 时所确定的粒径称之为临界直径 $d_{临}$ 。上述自然工况理论是建立在热平衡的基础上, 其只能是适应既有放热过程又有散热过程的工况, 同时没有涉及热力着火达到平衡状态所需要时间, 用其可以定性解释一些燃烧技术问题^[15]。

生物质热值偏低, 单位质量释放热量比煤小得多, 在同样粒径下, 生物质所蓄备的热量只有标准煤的一半。当散热量较大时, 生物质更容易出现熄火现象。图2中是稻壳a与稻壳c在流化床中的燃烧温度曲线, 从图中可以看出, 稻壳a温度变化较小, 相对稳定; 而稻壳c虽然某一瞬间温度达到1000, 超过稻壳a最高温度, 但其温度变化大, 最低温度低于200, 已经处于熄火状态。从热解角度来看, 稻壳c热解速率大于稻壳a, 挥发分析出速率快, 从而使得稻壳c出现短时高温。综合来看, 稻壳a的燃烧工况要好于稻壳c。因此在实际燃烧设备中, 原料由冷态进入到高温燃烧炉堂内, 初期是高温烟气对原料的加热, 此时颗粒度越小, 加热时间就越短, 有利于原料快速的达到燃烧温度; 但是当原料燃烧继续提高温度时就变成原料向烟气散热, 颗粒度越小, 散热越多, 不利于原料完全燃烧, 增加了原料机械未完全燃烧损失。



稻壳 a



稻壳 b

图 2 稻壳燃烧温度曲线

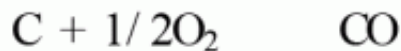
2.3颗粒度大小对焦炭燃烧影响

稻壳的燃烧过程可以分为挥发分燃烧和焦炭燃烧2个过程。气体燃烧速率远远大于固体燃烧速率，这样稻壳燃烧时间长短主要决定于焦炭的燃烧时间。稻壳挥发分含量高，析出快，短时间内完全燃烧需要足够的氧，挥发分析出后的焦炭被包裹在中间，阻滞其与氧的反应，因此稻壳焦炭的燃烧较为缓慢。碳与氧的反应有如下4种可能：

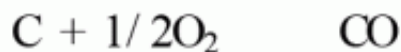
(1) 碳与氧气完全反应：



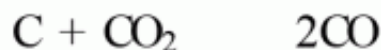
(2) 氧气在碳表面不足，生成 CO：



(3) 气体的燃烧速率很快，在反应 2 条件下，生成的 CO 在碳附近与氧迅速反应生成 CO₂：



(4) 氧受到阻滞，无法到达碳表面，在碳表面只有气相扩散过来的 CO₂，产生 C 与 CO₂ 的还原反应：



对这4种反应机理，Wicke和Wurzbacher提出这样结论，碳的燃烧按(4)反应机理。尤其在温度达到1100 以上时，反应4较为明显。在温度较低时，引入文献[15]中2种产物比例关系公式如下，当温度为457 ~ 897 时：

$$\frac{v(CO)}{v(CO_2)} = 2500 \exp(-6240/T) \quad (4)$$

这里取平均值677 ，该温度下不发生碳的还原反应。则计算得其比值为3.4，CO所占比例较大，由此看来碳燃烧反应主要是按反应(3)进行。稻壳灰熔点较低，在实际应用中的燃烧温度一般控制在800 ~ 900 ，其燃烧反应主要是按反应3进行。

原料颗粒度减小而比表面积大，单位质量的碳反应速率较大^[16]

。比表面积增大，单位体积内与氧的混合加强，接触面积增加，从而加强了碳的燃烧反应。氧在碳表面的扩散，一方面受可燃气体阻滞，另一方面受碳表面燃烧后灰的阻滞，原料颗粒减小，碳燃烧时形成的灰阻滞就小，有利于氧的扩散。细化碳粒，能提高氧扩散至碳表面的传质系数^[17]。所以原料颗粒度的减小，有利于焦炭的燃烧。

3结论

(1)通过对稻壳的热重分析可知，颗粒度越小，其挥发分析出温度越低，完成同量挥发分析出时间越短，燃烧速率也越快；对焦炭而言，颗粒度越小，其燃烧速率越快，原料燃烬时间也越短；颗粒度越小，传热系数就越大，原料升温速率就快，达到燃烧所需要的时间也越短；但是颗粒度减小同样会增大了原料散热量，当粒径减小到某一临界d临以下时，就会因散热过多而出现熄火现象。

(2)原料粒径的选择也应考虑到经济性。当原料需要处理到颗粒度很小时，其所需要消耗的动力也将很大，处理到10~20mm粒径生物质消耗动力为5kW/t左右，如果处理到0.1mm以下，所需动力就要20kW/t左右。因此对原料的粒径处理要结合其临界值的选择以及经济性来定。

参考文献

- [1]Corella J, Orio A, Toledo J M. Biomass gasification with air in fluidized reforming of the gas composition with commercial steam catalyst[J]. Ind Eng Chem Res, 1998, 37(12): 4617-4626.
- [2]Azbar M, Caballero M, Gil J, et al. Commercial steam reforming catalysis to improve biomass gasification with steam-oxygen mixtures[J]. Ind Eng Chem Res, 1998, 37(7): 2668-2680.
- [3]Scott D S, Diskorz J. The continuous ash pyrolysis of biomass[J]. Can J Chem Eng, 1984, 62: 404-412.
- [4]吕鹏梅, 常杰, 熊祖鸿, 等. 生物质在流化床中的空气-水蒸气气化研究[J]. 燃料化学学报, 2003, 31(4): 305-310.
- [5]王智微, 唐松涛, 苏学等. 流化床中生物质热解气化的模型研究[J]. 燃料化学学报, 2002, 30(4): 342-346.
- [6]郭建维, 宋晓锐, 崔英德. 流化床反应器中生物质的催化裂解气化研究[J]. 燃料化学学报, 2001, 29(4): 319-322.
- [7]Schuster G, Ldffler G. Biomass steam gasification: An extensive parametric modeling study[J]. Bioresource Technol, 2001, 77(1): 71-79.
- [8]Delgado J, Aznar M P, CORELLA J. Biomass gasification with steam in fluidized bed: effectiveness of CaO, MgO, and CaO-MgO for hot raw gas cleaning[J]. Ind Eng Chem Res, 1997, 36(5): 1534-1543.
- [9]马孝琴, 李保谦, 崔岩, 等. 稻秆燃烧过程动力学特性试验[J]. 太阳能学报, 2003, 24(2): 213-217.
- [10]戴林, 李景明. 中国生物质能转换技术发展评价[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [11]沈伯雄, 刘德昌, 陆继军. 石油着火和燃烧燃烬特性的影响[J]. 石油炼制与化工, 2000, 31(10): 60-64.
- [12]张全国, 刘圣勇. 燃烧理论及其应用[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1993.
- [13]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.
- [14]郑洽余, 王雪元. 循环流化床中对受热面的传热研究[C]//第五届全国流态化会议文集. 1990: 172-175.
- [15]岑可法, 姚强, 洛仲决, 等. 高等燃烧学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.
- [16]陈晓平, 谷小兵, 段钰峰, 等. 气化半焦加压着火特性及燃烧稳定性研究[J]. 热能动力工程, 2005, 20(3): 153-156.
- [17]常弘哲, 张永康, 沈际群. 燃料与燃烧[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1993.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/news/123860.html>