

生物质与煤混烧的燃烧特性研究

刘 豪, 邱建荣, 董学文, 熊方丽

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 在 STA 409C 型热综合分析仪上对一种煤和两种生物质以及它们以不同的比例所得的混合试样进行燃烧特性分析。结果表明, 在煤中加入生物质后, 燃烧明显分成两个阶段, 着火提前, 同时可以获得更好的燃尽特性; 生物质和煤混合后, 发热量增加, 提高了生物质的利用价值。此外, 通过热重(TG)、差式扫描量热(DSC)曲线的深入分析, 对上述几种试样的有关燃烧动力学参数进行了研究。

关键词: 生物质; 煤; 燃烧特性; 热分析

中图分类号: TQ517 文献标识码: A

1 引言

作为清洁的可再生能源, 生物质能的利用已成为全世界的共识^[1]。我国生物质资源丰富, 生物质占一次能源总量的 33%, 是仅次于煤的第二大能源。同时, 我国又是一个由于烧煤而引起的污染排放很严重的发展中国家, 因此发展生物质与煤混合燃烧这种既能脱除污染, 又能利用再生能源的廉价技术是非常适合中国国情的^[2]。本文在工业分析、元素分析的基础上, 结合热分析技术, 对两种生物质、一种煤以及两者以不同比例所组成的混合燃料的燃烧特性进行初步研究, 为在锅炉中混烧煤和生物质提供参考依据。

2 试验设备及试验说明

将采集到的树叶和树枝以及煤样经过自然干燥后用密封式制样粉碎机制成标准试样, 应用 MAC-500 工业分析仪、Vario EL 型元素分析仪对上述三种燃料分别进行工业分析、元素分析, 分析数据见表 1。在本节试验中, 将树叶和树枝按照 1:1 和 1:3 的比例(以质量计)分别和煤粉混合成四个试样进行热重试验。为了更好地研究生物质和煤混烧时的燃烧

特性, 同时还做了单一煤样和生物质试样的热重分析作为参照。

在 STA 409C 型热综合分析仪上对各试样进行燃烧特性试验, 工作气氛为 N₂ 和 O₂, 流量分别为 80 ml/min、20 ml/min, 升温速率为 30 °C/min, 温度变化范围为 20~1 200 °C。每个试样重量约为 5.0 mg。

表 1 工业分析及元素分析 (%)

燃料	工业分析					元素分析		
	M _{ad}	V _{ad}	A _{ad}	FC _{ad}	C _{ad}	H _{ad}	N _{ad}	S _{ad}
煤	1.09	31.58	24.64	42.69	57.12	2.91	0.98	0.82
枝	7.81	78.16	2.39	11.64	42.15	6.27	0.04	0.26
叶	6.18	69.83	10.02	13.97	43.18	5.52	0.05	0.41

3 试验结果及分析

3.1 热重分析曲线

从图 1(a)~(d)可以看出, 单一生物质、生物质与煤混烧的情况下, 燃烧明显的分成两个阶段。对于单纯生物质来说, 燃烧主要集中在前期温度较低的阶段; 在煤和同一种生物质混合燃烧的情况下, 随着煤粉的混合比例增加, 燃烧逐渐集中于后期阶段。而对于单一的煤燃烧来说, 在 DTGA 曲线上只有一个大的尖峰区域。这是由于生物质中含有大量的挥发分, 燃烧前期的强度很高, 后期阶段相对较弱; 而煤粉则相反; 当煤和生物质混烧时, 则平衡了整个燃烧过程。

3.2 着火特性分析

从图 1(a)~(d)可以看出, 最初的 DTGA 曲线有正增长的趋势, 这是由于表观增重所引起的。随后, DTGA 曲线在零值附近不断波动, 但尚未着火。着火应当表现为迅速失重。因此, 将 DTGA 曲线上迅速失重的开始点作为着火点, 以该点对应的温度作为热分析的着火温度, 热分析着火温度越高, 说明着火越困难。

收稿日期: 2001-11-15; 修订日期: 2002-02-05

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(98J071)

作者简介: 刘豪(1978-)男, 湖北南漳人, 华中科技大学博士研究生

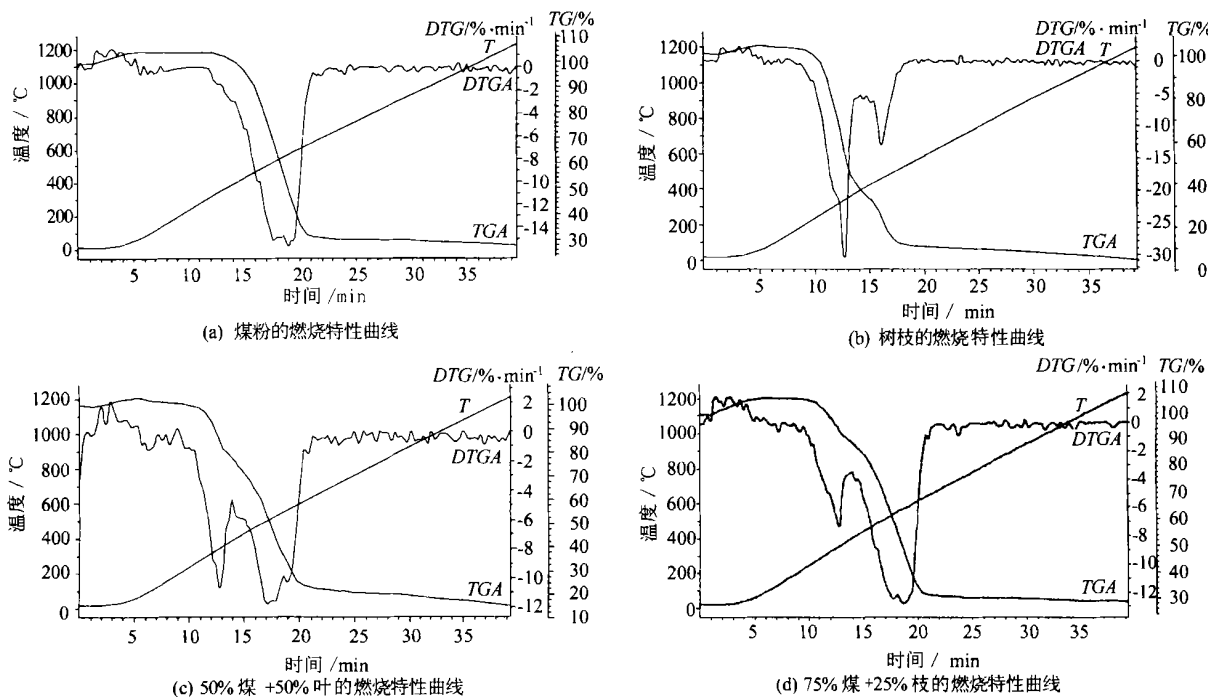


图1 部分试样的 TGA、DTGA 热重分析曲线

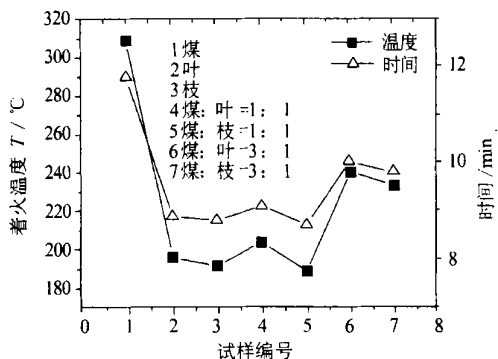


图2 各种试样的着火温度与相应的时间

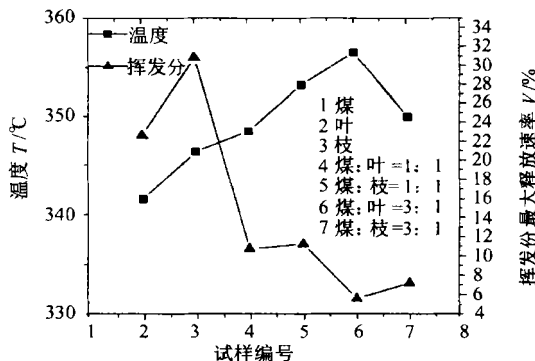


图3 各种试样的挥发分释放率最大值和相应的温度

从图2中各试样着火温度曲线可以看出,单纯的煤粉着火温度比单一的生物质燃烧时约高出100℃;而在生物质和煤(质量比为1:1)混烧时,着火温度近似于单纯生物质燃烧时的着火温度;随着煤粉的比例增大(质量比为3:1),着火温度大约比单独生物质燃烧时高出30℃,但是比单纯的煤燃烧时要低60~70℃。在燃料燃烧的过程中,挥发分的析出特性直接影响燃料的着火燃烧。从图3挥发分释放最大值曲线可以看出,单纯的生物质以及生物质和煤混烧时在较低温度下(约350℃)即可剧烈的释放挥发分。同时从DTGA曲线可以看出,燃烧前期,单一生物质燃烧时的曲线峰狭长,表明其挥发分释放剧烈集中,而单独的煤燃烧时并无明显的峰值;

但在混烧时所形成的曲线峰类似于单独的生物质燃烧时的情况,只是峰值较低。通常情况下,煤的着火点随着煤炭中挥发分的增高而降低,由于生物质含有大量的挥发分,并且挥发分在较低的温度下即可快速析出,所以生物质和煤混烧时的着火温度降低较大。因此,在实际锅炉混烧煤和生物质时,着火较容易。

3.3 燃尽特性分析

从TGA和DTGA曲线可以看出,对于单纯的生物质来说,在600℃以后,TGA曲线趋于平直,DTGA曲线波动于零值附近,为便于进行比较,本文以树枝的初始燃尽温度565℃作为参比温度,用f表示燃尽率。

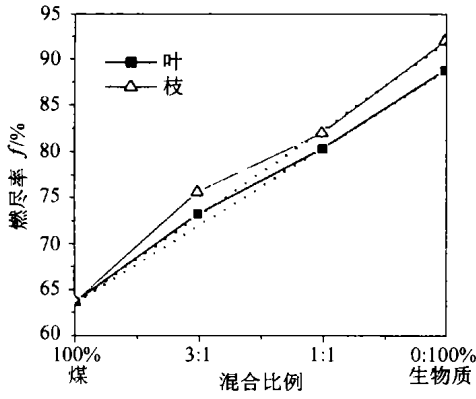


图 4 各种试样的燃尽曲线

从图 4 给出的温度为 565 °C 时的各种试样的燃尽率来看, 在煤中加入生物质后, 在较低的温度下即可获得较好的燃尽性, 混合燃料的燃尽率高于两种单一燃料的加权平均值。这是因为在煤中加入生物质后, 燃烧的最大速率有前移的趋势, 因此燃尽所需的时间较煤来说缩短, 所处的温度降低。图 5 中给出了各种试样的最大燃烧速率和相应的温度曲线, 对于单一的生物质来说, 燃烧的最大速率出现在燃烧前期, 所处的温度低于 350 °C; 而对于单一的煤来说, 燃烧的最大速率出现的时间较晚, 所处的温度较

高, 大于 550 °C。生物质和煤混烧的情形介于两者之间, 随着煤粉混合的比例增大, 燃烧的最大速率出现的时间和温度后移。

3.4 差热(DSC)曲线

图 6(a) ~ (d) 分别给出了部分试样的 DSC 试验曲线。

图 6(a) ~ (d) 中 A 表示燃烧的两个阶段的分界点, B 表示燃烧过程中放热峰极值最大值点。

从图 6(a) ~ (d) 可以看出, 除了图 6(b) 树枝的 DSC 曲线出现较为明显的两个放热峰以外, 其它的各个 DSC 图中均只是出现一个较为明显的拐点和

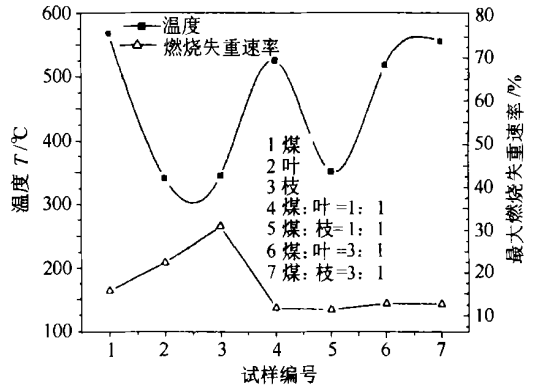
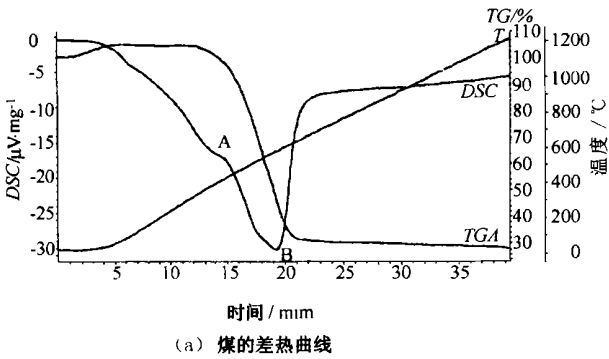
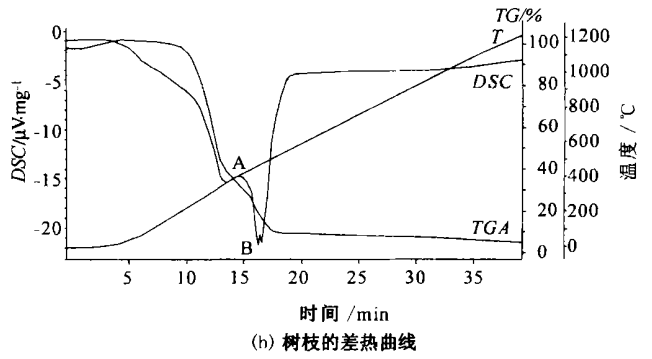


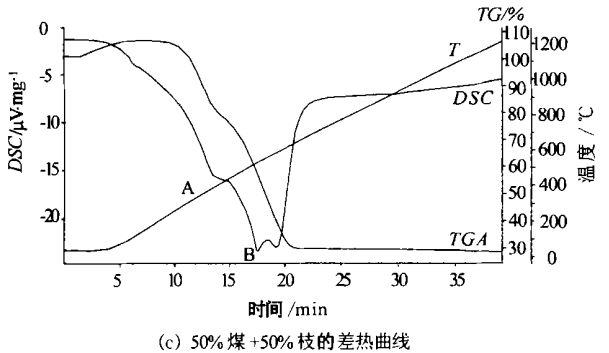
图 5 各种试样最大燃烧失重速率和相应的温度



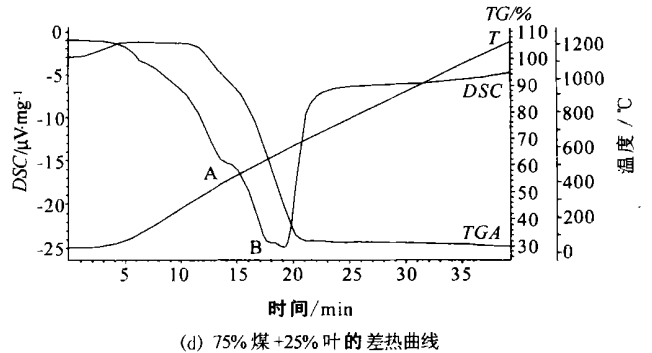
(a) 煤的差热曲线



(b) 树枝的差热曲线



(c) 50%煤+50%枝的差热曲线



(d) 75%煤+25%叶的差热曲线

图 6 部分试样的差热试验曲线

一个较大的放热峰, 表征燃烧放热的阶段性。对于生物质来说, 挥发分含量高, 但发热量低, 燃烧的两个阶段放热较为均匀, 但总的放热量低; 当煤和生物质混烧时, 燃烧放热分布介于两者之间, 放热量增加, 放热时间延长, 可提高生物质的利用率。而对于单纯煤粉来说, 燃烧放热几乎全部集中于燃烧后期。这说明在煤中加入生物质后, 可以改善燃烧放热的分布状况, 对于燃烧前期的放热有增进作用。

4 生物质和煤混烧的动力学分析

根据质量作用定律, 试验升温速率恒定, 反应速率常数与温度的关系遵循 arrhenius 公式, 可得: 升温速率:

$$\varphi = dT/dt \tag{1}$$

在本实验中升温速率为 30 K/min。

反应速度常数:

$$k = Ae^{-E/RT} \tag{2}$$

则在燃烧过程中试样重量变化率对时间的导数可表示为:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\varphi} e^{-E/RT} (1 - \alpha)^n \tag{3}$$

试样燃烧重量变化率 α 可由 TG 曲线求得:

$$\alpha = \frac{W_0 - W_t}{W_0 - W_f} \tag{4}$$

式(1) ~ 式(4)中:

T —绝对温度; t —反应时间; A —频率因子; E —活化能; R —气体常数; n —反应级数; W_0 —试样的初始重量; W_t —时间为 t 时的重量; W_f —最大始失重的残余重量。

根据经验选择 $n = 1$, 对式(3)积分整理得到如下近似解:

$$\ln\left[-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2}\right] = \ln\left[\frac{AR}{\varphi E}\left(1 - \frac{2RT}{E}\right)\right] - \frac{E}{RT} \tag{5}$$

在式(5)中, 令 $y = \ln\left[-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2}\right]$, $a = \ln\left[\frac{AR}{\varphi E}\left(1 - \frac{2RT}{E}\right)\right]$, $b = -\frac{E}{R}$, $x = \frac{1}{T}$, 在本实验条件下, 温度较低时 a 可视为常数, 则上式可简化为 $y = a + bx$ 的直线形式。在 TG 曲线上取一系列点, 根据每一点的热参数即可求出一组 y 、 x 的值, 按线性回归分析法即可作出斜率为 b , 截据为 a 的直线, 同时可求出活化能 E 和频率因子 A 。计算结果见表 2。

表 2 几种燃料的燃烧动力学参数

燃 料	温度范围 / °C	a	b	频率因子 / min ⁻¹	活化能 / kJ · mol ⁻¹
煤	425 ~ 645	-1.966	-9 647.54	48 523.373	80.212
叶	270 ~ 408	-7.206	-4 214.23	132.431	35.037
枝	408 ~ 520	-9.323	-2 770.91	14.621	23.037
	280 ~ 380	-5.423	-4 954.56	874.648	41.192
50%煤+	380 ~ 510	-10.440	-1 730.31	7.002	14.386
	300 ~ 460	-8.460	-3 799.46	35.877	31.589
50%叶	460 ~ 605	-6.401	-5 527.95	382.899	45.959
50%煤+	260 ~ 415	-9.403	-3 301.48	13.165	27.448
50%枝	415 ~ 610	-7.765	-4 709.29	90.089	39.153
75%煤+	300 ~ 460	0.067	-10 247.30	374 625.800	85.196
25%叶	460 ~ 610	-4.855	-7 167.71	2 152.418	59.592
75%煤+	290 ~ 480	-5.213	-6 601.06	1 328.970	54.881
25%枝	480 ~ 610	-5.293	-6 816.51	1 343.801	56.672

5 结论

(1) 单一生物质燃烧主要集中于燃烧前期; 单一煤燃烧主要集中于燃烧后期。在生物质与煤混烧的情况下, 燃烧过程明显地分成两个燃烧阶段, 随着煤的混合比重加大, 燃烧过程逐渐集中于燃烧后期。

(2) 生物质的挥发分初析温度要远低于煤的挥发分初析温度, 使得着火燃烧提前。在煤中掺入生物质后, 可以改善煤的着火性能。在煤和生物质混烧时, 最大燃烧速率有前移的趋势, 同时可以获得更好的燃尽特性。

(3) 生物质的发热量低, 在燃烧的过程中放热比较均匀, 单一煤燃烧放热几乎全部集中于燃烧后期。在煤中加入生物质后, 可以改善燃烧放热的分布状况, 对于燃烧前期的放热有增进作用, 可以提高生物质的利用率。

(4) 生物质和煤混烧的燃烧反应服从燃烧动力学的基本方程表征的规律, 即 $da/dT = Ae^{-E/RT}(1-a)$; 对于不同的温度阶段可用不同的一级反应来描述。

参考文献:

[1] 龚云淮, 陈惠泉, 尹士恩. 生物质能源的开发前景[J]. 云南华工, 1995(1): 23-26.
 [2] 刘雅琴. 大力开发工业锅炉生物质燃烧技术前景分析[J]. 工业锅炉, 1999(3): 2-3.
 [3] 陈冠益, 方梦祥. 生物质固定床热解特性的试验研究与分析[J]. 太阳能学报, 1999, 20(2): 122-129.
 [4] 刘伟军, 王佐民. 生物质型煤燃烧机理分析和燃烧速度试验研究[J]. 煤炭转化, 1998, 21(4): 52-57.
 [5] 刘伟军, 孙庆滨. 生物质型煤固硫规律的研究[J]. 动力工程, 1999, 19(5): 410-413.

(渠 源 编辑)

生物质与煤混烧的燃烧特性研究 = **A Study of the Combustion Characteristics of Biomass and coal Mixed Firing** [刊, 汉] / LIU Hao, QIU Jian-rong, DONG Xue-wen, et al (National Key Laboratory of Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 451 ~ 454

With the help of an integrated thermoanalyzer of the type STA 409C the characteristics of combustion were analyzed with respect to a mixed sample consisting of one type of coal and two kinds of biomass as well as a sample of the above items mixed in different proportions. The results of this analysis show that after the adding of biomass in the coal the combustion process can be viewed as distinctly divided into two stages with an ignition being realized ahead of the designated time. Meanwhile, better burn-off characteristics were obtained. As a result of the mixing of biomass and coal there emerged an increase in heat generation rate coupled with an enhanced utilization rate of the biomass. Moreover, through an in-depth analysis of thermogravimetric and differential-scanning calorimetry curves the combustion kinetic parameters of the above-cited samples were investigated. **Key words:** biomass, coal combustion characteristics, thermal analysis

煤粒燃烧表面灰层氧气质扩散系数试验研究 = **Experimental Study of Oxygen Mass-transfer Coefficient in a Surface Ash Layer during the Burning of Pulverized Coal** [刊, 汉] / ZHU Qun-yi, QIN Yu-kun, WU Shao-hua (School of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 455 ~ 457

Through the use of a thermal analysis technique an experimental study is conducted of the effect of ash layer porosity on oxygen mass-transfer characteristics. A formula has been derived for calculating the oxygen mass-transfer coefficient in a surface ash layer during the burning of pulverized coal. **Key words:** thermal analysis, ash layer porosity, oxygen mass-transfer coefficient

煤质成分在线检测技术的最新进展 = **Recent Advances in the On-line Detection Technology of Coal Elemental Composition** [刊, 汉] / SONG Zhao-long (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), JIN Jian (Nanjing Continental Zhongdian Science & Technology Co. Ltd., Nanjing, China, Post Code: 211100) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 458 ~ 461

The emergence of long-life and low-cost neutron tube products of electron-impulse type has played a significant role in the further advancement of a new-generation on-line analytical technology for coal elemental composition. By using the analytical technology of fast thermal neutron elements of the impulse type coupled with the application of multifarious nuclear reactions it is possible to analyze the coal elemental composition with a better accuracy. Moreover, the apparatus used also features a higher safety. After an exposition of the analytical theory of fast thermal neutron elements of the impulse type the authors describe two kinds of on-line detection system for the coal elemental composition, namely, the chute type and the belt type. **Key words:** fast neutron inelastic scattering, fast neutron capture, coal elemental composition

原煤可磨性与磨煤机最大出力探讨 = **Exploratory Investigation of Raw Coal Grindability and Coal Pulverizer Maximum Capacity** [刊, 汉] / SHEN Yue-liang (Guangdong Provincial Electric Power Testing Institute, Guangzhou, China, Post Code: 510600), LIN Zhi-ning (Guangzhou Zhujiang Power Plant, Guangzhou, China, Post Code: 511458), ZHAO Xiao-feng (Guangdong Zhanjiang Power Plant, Zhanjiang, China, Post Code: 524099) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 462 ~ 464

The maximum grinding capacity test results of a model RP783 race pulverizer installed at Zhujiang Power Plant was investigated along with those of a model DTM350/700 ball mill installed at Zhanjiang Power Plant. It has been found that the grindability index of some kinds of coal does not fully reflect their actual grinding capacity. After the cause of the low