

# 烟煤与石油焦掺混燃烧特性研究

杨亚平, 蔡 崧

(东南大学 热能工程研究所, 江苏 南京 210018)

**摘 要:**以小型试验台上煤焦混粉燃烧试验为基础,对烟煤与石油焦的燃料特性,混合粉的着火性能、燃烧特性、以及煤粉细度,配风条件和热负荷强度对燃烧过程的影响进行了分析研究。

**关键词:**燃烧装置;混合粉;热解特性;燃烧特性

中图分类号:TK229.91 文献标识码:A

## 1 前言

目前在国内石化企业中把石油焦作为锅炉燃料加以利用的做法很普及,且多数是利用自身带有热电站的优势,将石油焦与原锅炉设计煤种混磨,并以混合粉燃料的形式投入煤粉锅炉中燃烧利用。由于这两种燃料的特性差别较大,它们掺混之后的燃烧特性如何呢?值得加以探索研究。

本文介绍了我们在小型燃烧试验装置上的一些研究成果。

## 2 试验使用的燃烧装置

图 1 所示的燃烧装置设计负荷每小时可烧 220 公斤石油焦,容积热负荷  $q_v = 2.52 \times 10^6 \text{ kJ/m}^3$ , 喷燃器中心断面热负荷  $q_F = 2.85 \times 10^7 \text{ kJ/m}^2$ 。图中燃烧室顶部由点火油喷嘴和煤粉燃烧器组成。燃烧室本体呈 L 形布置;由 5.49 m 垂直段和 5.8 m 水平段共同组成。一次风和二次风由罗茨风机经喷流式空气预

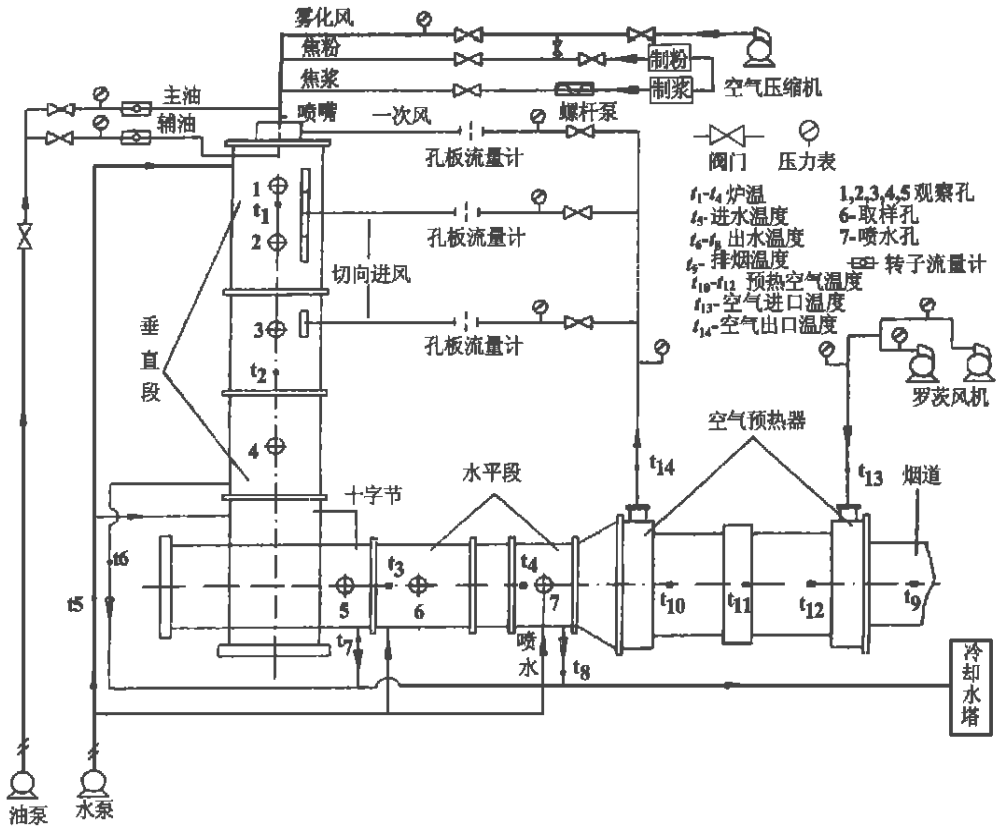


图 1 燃烧试验装置及测试系统

收稿日期: 2001-06-14; 修订日期: 2001-08-07

作者简介: 杨亚平(1952-),男,江苏南京人,东南大学副教授。

[3] 纪宏舜. 简易脱硫除尘一体化技术方案的研究及其应用[J]. 中国电力, 1999, 32(6): 55-60.

[4] MARK R SPOUFFER. An investigation of the mechanisms of flue gas desulfurization by in-duct dry sorbent injection[J]. Ind Eng Chem Res, 1989, 28(1): 20-27.

(何静芳 编辑)

热器预热后使用, 热风温度在小于 400 °C 范围内自由调节。混合粉在炉前与热风均匀掺合后入炉。

### 3 煤和石油焦的基本特性

试验用煤为大同混煤, 石油焦为扬子石化生产的。煤和焦的基本特性见表 1。

表 1 石油焦与煤的燃料特性

元素分析(分析基/%)			工业分析(分析基/%)		
项目	大同混煤	石油焦	项目	大同混煤	石油焦
空干水分	3.45	0.88	全水份	7.29	10.0
碳	52.81	89.78	灰份	28.43	0.59
氢	3.65	4.05	挥发份	26.59	12.57
氧	10.04	1.26	固定碳	41.53	85.96
氮	0.65	1.54	高位发热量/kj·kg <sup>-1</sup>	20 469	32 58
硫	0.97	1.90	低位发热量/kj·kg <sup>-1</sup>	19 590	31 642
灰分	28.43	0.59			
堆积密度/kg·m <sup>-3</sup>	750~800	473	可磨指数 K <sub>km</sub>	1.15	1.51
氧化气氛			还原气氛		
灰变形温度 DT	1 080 °C	1 190 °C	灰变形温度 DT	—	1 180 °C
灰软化温度 ST	1 110 °C	1 200 °C	灰软化温度 ST	—	1 210 °C
灰熔融温度 FT	1 130 °C	1 225 °C	灰熔融温度 FT	—	1 230 °C

石油焦的挥发份析出、着火和燃烧特性利用 Setaram TGDTA-92 型热重分析仪研究, 其结果见图 2 和图 3。实验结果表明, 石油焦的挥发份含量低, 在氮气气氛中, 230 °C 下开始脱挥发份, 且过程持续时间较长, 直至 1 100 °C 仍有挥发份缓慢析出, 可见其脱挥发份性能与无烟煤相近。在空气中, 挥发份在 330 °C 下开始着火, 而碳着火则为 660 °C, 燃烧特性又接近于贫煤。

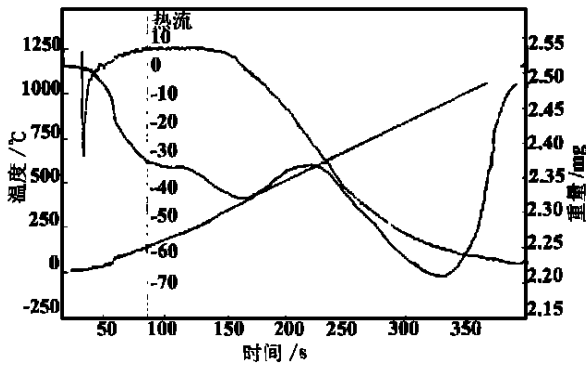


图 2 石油焦的脱挥发份分析曲线

### 4 焦煤混合粉燃烧特性

焦煤混合粉的燃烧试验研究由三种煤焦掺混比 (10:0, 8:2 和 7:3) 与两种混合粉细度 (细粉  $R_{88} =$

21%和粗粉  $R_{88} = 27%$ ) 进行逐一配对磨制, 组成不同的燃料特性条件, 分别试验。每次试验时, 以改变燃料供应量方式改变炉内热负荷, 每个负荷点下又多次改变供风量和供风方式, 以摸索其燃烧特性。

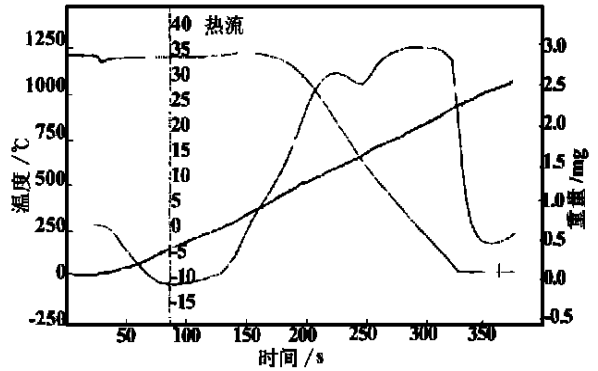


图 3 石油焦失重分析曲线

#### 4.1 着火与燃烧反应特性

与一般固体燃料相比, 石油焦的水份含量高, 挥发份含量少, 这对着火不利。有资料介绍试验测得的烟煤着火温度是 470 °C 左右, 从热解特性来看石油焦着火温度 400 °C ~ 600 °C<sup>[1]</sup>。而对于实际炉膛内煤粉火炬来讲, 一般高挥发份煤粉的着火温度约为 800 °C, 低挥发份煤粉的着火温度可能高达 1 100 °C。

我们在试验装置上采用是点火油枪建立初始着火条件, 热风温度保持在 160 °C ~ 170 °C。在所有的实际工况下, 均能保证煤粉入炉后瞬间迅速着火, 喷燃器喷嘴出口处看不到黑色未着火粉流段。在条件相近下, 试验所得的各种煤粉流的着火温度水平见表 2, 由表可见纯焦粉流的着火要比纯烟煤粉流差, 混合粉的着火性能介于两者之间, 焦煤混合粉流的着火条件与掺混比例有关, 掺混比高了之后着火温度提高。

石油焦的活化能约 151 ~ 167 kJ/mol, 比无烟煤略高些。其反应级数约为 0.6 ~ 1 级, 燃烧反应慢<sup>[1]</sup>; 按照燃烧理论应采用较高的燃烧温度来加速燃烧反应。由于试验装置条件限制, 为了防止炉膛内壁结渣, 我们在试验中炉温水平基本上控制在 1 300 °C ~ 1 550 °C 之间, 略显偏低, 但是在燃烧装置的炉膛内基本能够保证完成燃烧过程。燃烧火焰长度和燃烧中心位置情况见表 2。由表中可见在相同的热负荷强度和配风条件下, 纯烟煤粉流的火焰长度比焦煤混合粉流要短些, 对应燃烧中心也向喷燃器口靠近, 不论是纯煤粉流还是混合粉流中颗粒细度对燃烧中心影响很大, 煤粉越粗, 燃烧中心越靠后。

表 2 燃烧试验装置上各种燃料燃烧特性

煤焦比例(M:J)	纯石油焦粉		纯烟煤粉		8:2 混合粉		7:3 混合粉	
煤粉细度 $R_{90}/\%$	$R_{55}:25$	25	20	26	20	26	20	26
着火温度 / °C	1 020	1 000	935	820	970	920	920	858
炉膛负荷 $q_p/kJ \cdot m^{-3}$	$2.73 \times 10^7$	$2.68 \times 10^7$	$9.88 \times 10^6$	$1.0 \times 10^7$	$1.08 \times 10^7$	$9.46 \times 10^6$	$9.09 \times 10^6$	$9.42 \times 10^6$
炉膛负荷 $q_v/kJ \cdot m^{-3}$	$2.42 \times 10^6$	$2.37 \times 10^6$	$9.55 \times 10^5$	$8.88 \times 10^5$	$9.59 \times 10^5$	$8.33 \times 10^5$	$8.04 \times 10^5$	$8.33 \times 10^5$
炉膛出口过剩空气系统 $\alpha/\%$	1.15	1.07	1.25	1.17	1.15	1.24	1.12	1.14
炉温 $T_1/^\circ C$	1 433	1 470	1 300	—	—	—	—	1 080
炉温 $T_2/^\circ C$	1 521	1 561	1 270	1 250	1 385	1 180	1 260	1 270
炉温 $T_3/^\circ C$	1 312	1 466	1 130	1 260	1 355	1 340	1 120	1 275
炉温 $T_4/^\circ C$	1 114	1 155	850	900	960	935	820	920
$q_3$ 损失 / %	0.177	0.43	0.4	0.81	0.36	0	0.35	0
$Q_4$ 损失 / %	1.36	5.49	0.86	1.1	1.43	2.33	3.57	5.07
燃烧效率 $\eta/\%$	98.46	94.08	98.71	98.09	98.21	97.67	96.08	94.93
火焰长度 / m	5 ~ 6		4 ~ 5		5 ~ 5.5		5 ~ 6	

试验中所反映的上述这些现象很好地再现了燃烧时化学反应的速度  $W_m$  随燃烧温度和燃料活化能  $E$  的变化规律(即  $W_m \propto \exp \frac{E}{RT}$ ) 以及碳球燃尽时间  $t$  与碳球直径  $\delta$  平方成比例(即  $t = \frac{\delta^2}{k}$ ) 的燃烧反应规律<sup>[2]</sup>。

4.2 燃尽特性

由图 4、图 5 可见, 不论煤粉粗细都存在着飞灰含碳量随烟气中含氧量增加而降低的明显趋势; 而且石油焦掺混越多这种趋势越明显。不过当配风大到一定程度(烟气含氧量 4% ~ 5%) 这种趋势就已经不再明显了。

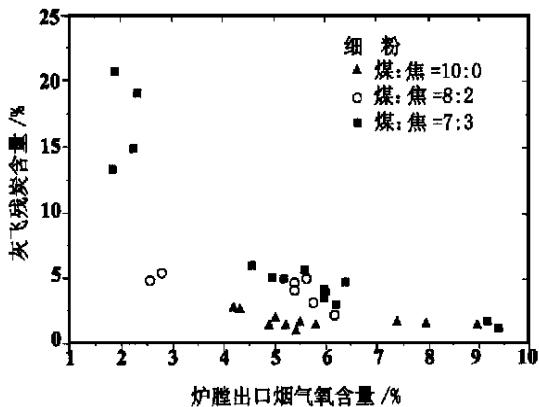


图 4

图中还表明包括纯煤粉在内所有焦煤比下, 粗粉的燃尽率要低于细粉, 两者的机械不完全燃烧损失  $q_4$  相差 0.5% ~ 1.2%。且随着石油焦掺混量的增加  $q_4$  几乎是成比例地增加。

图 6、图 7 是热负荷与  $q_4$  损失之间的关系, 其中

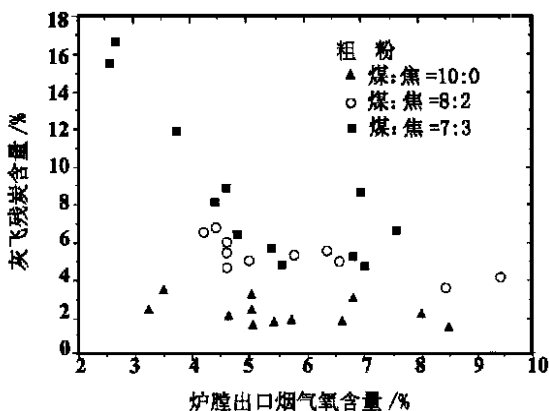


图 5

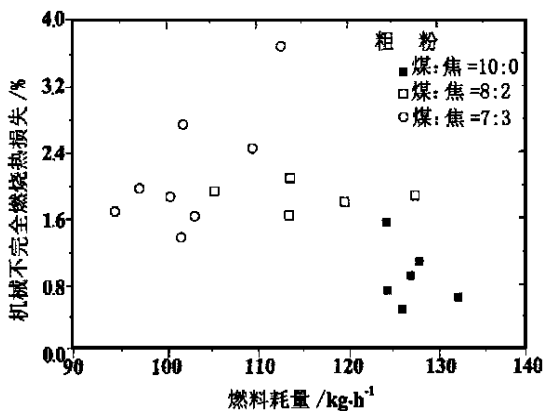


图 6

不同煤粉细度和焦煤比下  $q_4$  随热负荷的变化均不明显, 原因是一方面尽管燃料重量耗量在变化, 但是由于混煤的发热值会随着煤中掺混焦量的增加而增加, 同时试验中给粉量的调节变化不大, 因而使整个试验中炉膛的单位截面积发热强度基本不变, 致使

(下转第 631 页)

计成先由用户向事实输入对话框中输入“自动获取的初始征兆”及其置信度, 而后由用户从系统提供的供选征兆中选出“交互征兆及其置信度”, 系统接受征兆输入后即调用规则库进行推理, 并将推理结果(如图 4)显示给用户。

#### 4.2.5 解释

解释是专家系统的重要功能之一。在规则推理诊断中, 要通过回溯推理过程来帮助用户理解从证据到推论的来龙去脉。解释对话框在推理结论集列表框中列出了最近一次所有推理的结论, 点取某一故障, 如“炉墙出现结渣”, 则在右边的推理结果解释框中给解释, 包括推理过程中所使用的每条规则以及证据的来源和置信度。

## 5 结束语

结合循环流化床锅炉的实际特点和课题的需要, 开发了一套循环流化床锅炉计算机在线监测与状态诊断专家系统。该系统不仅能对锅炉的当前运

行情况进行实时显示、控制、分析, 还可对锅炉系统运行中设备的状态实行在线诊断。该系统已于 2000 年应用于油改煤循环流化床锅炉工程项目, 目前一切运行正常, 该系统为锅炉设备的安全、经济运行提供了强大的技术保障。

#### 参考文献:

- [1] 张光纯. 大型电站锅炉事故分析及预测措施[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [2] 林志杰, 刘德昌. 流化床燃烧锅炉[R]. 北京: 能源部农村能源及电气化司, 1992.
- [3] 刘德昌. 流化床燃烧技术的工业应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [4] 周如曼. 300 MW 火电发电机组故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [5] MUZIO L J, ESKINAZI D, GREEN S F. Acoustic pyrometry: new boiler diagnostic tool[J]. *Power Engineering*, 1989(11): 49-52.
- [6] 黄文虎, 夏松波, 刘瑞岩. 设备故障诊断原理、技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [7] TOM SWAN. Delphi 4 Bible[R]. IDG Books Worldwide Inc, 1999.

(复 编辑)

(上接第 614 页)

炉膛温度变化也很小, 因而燃烧的外部条件变化也不大, 但是随热负荷的增加,  $q_4$  减少的趋势还是比较明显的。且由表 2 可看出尽管纯石油焦粉难烧, 但是在炉膛热负荷强度增加 2~3 倍, 相应炉温提高了 200 °C~300 °C 条件下, 也能取得较高的燃烧效率。

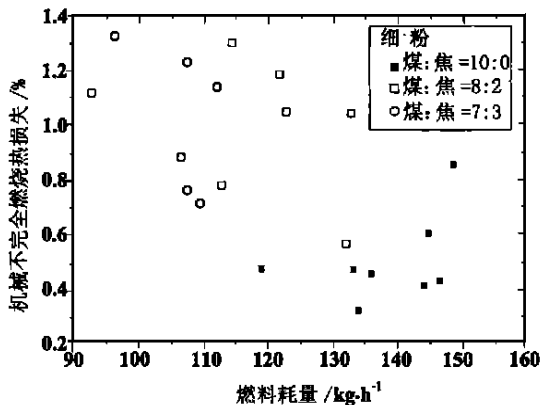


图 7

## 5 结论

在上述所讨论的试验条件下, 可知:

(1) 石油焦的热解特性似无烟煤, 燃烧特性似

贫煤。

(2) 焦煤混合粉着火性能介于纯焦粉和纯烟煤粉之间, 且随掺焦量的增加和煤粉细度的变粗, 着火性能变差, 各种煤粉流着火温度, 纯焦粉 1 000 °C~1 020 °C, 纯煤粉 820 °C~930 °C, 混合粉 860 °C~970 °C。

(3) 石油焦燃烧反应慢, 混合粉燃烧特性要差于纯烟煤粉, 也是随掺焦量的增加, 影响愈趋严重。改变煤粉细度和燃烧配风可以改变其燃尽率, 但在炉膛出口氧量达到  $O_2=4\% \sim 5\%$  之后, 影响就不明显了。

(4) 炉膛热负荷强度对混合粉的燃烧有影响, 在炉温提高时, 不完全燃烧损失  $q_4$  下降。

(5) 煤粉细度对混合粉的着火和燃尽性能影响明显。

值此论文发表之际, 谨向参加本试验的全体工作人员表示衷心的感谢。

#### 参考文献:

- [1] 沈伯雄. 石油焦燃烧及其循环流化床燃烧的技术[J]. 石油炼制与化工, 1999, 30(3): 25-28.
- [2] 徐通模. 燃烧学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.

(何静芳 编辑)

Sb, Co, Ni) have their quantity increased consecutively, depending on the content of bottom ash—fly ash—slag—fouling. Meanwhile, rare earth elements and radioactive element (U, Th) on the contrary assume an opposite tendency. In the fly ash of burned coal the content of many trace elements in iron particles happens to be higher than that of calcium and silicon-aluminum particles. The distribution characteristics of in-coal accompanying elements in the combustion products is related to the chemical properties and assigned state of the element itself. **Key words:** accompanying element in coal, fly ash, bottom ash, slag and fouling, iron micro-ball

**油水乳化液中长气泡漂移速度的研究 = A Study on the Drift Velocity of Long Bubbles in Oil-water Emulsion**

[刊, 汉] / WANG Yue-she, LIU Lei, ZHOU Fang-de (National Key Lab of Power Engineering Multi-phase Flow under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(6)—604~608

Set up was a momentum analysis model of the drift velocity in stagnant liquid of long bubbles in an annular tube. Taylor bubbles drift velocity at various rates of water content in stagnant oil-water emulsion and under a slug flow regime was measured with the use of a high-speed dynamic analyzer. In conjunction with available experimental data and on the basis of Wallis' flow classification criteria put forward is a semi-empirical formula for Taylor bubble drift in oil-water emulsion, which reveals the law of motion of long bubbles in liquids with different hydrodynamic characteristics. **Key words:** oil-water emulsion, Taylor bubble, drift velocity, study

**炉内喷钙脱硫技术的工业应用研究 = Industrial Applied Research of In-furnace Sorbent Injection-based Desulfurization Technology**

[刊, 汉] / WU Shu-zhi, ZHAO Chang-sui, DUAN Yu-feng, et al (Education Ministry Key Lab of Clean Coal-based Power Generation and Combustion Technology under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(6)—609~611

Presented is a desulfurization project undertaken on two 10 t/h chain grate stokers along with some relevant test results. The desulfurization system comprises two parts: 1. The injection of sorbent into a furnace in conjunction with four-corner vortex firing technology; and 2. The humidification and activation of desulfurization agents for a tail portion through the use of a Venturi nozzle and water-film dust collector. The test results indicate that the introduction of a four-corner vortex and secondary air techniques can markedly improve the mixed calcination of desulfurization agents in the furnace without affecting the boiler operation and is conducive to enhancing the desulfurization efficiency in the furnace. The use of Venturi water nozzle and a dust collector can lead to the activation of those calcium oxide particles, which have not undergone reaction, thus increasing the reaction speed of desulfurization. This makes it possible to realize a higher desulfurization efficiency at a relatively low Ca/S ratio. During the upgrading for environmental protection purposes of industrial boilers originally fitted with Venturi water nozzles and water-film dust collectors the technology of in-furnace sorbent injection with tail portion humidification and calcium oxide activation enjoys a significant techno-economic edge. **Key words:** desulfurization, upgrading, sorbent injection into a furnace, Venturi wet dust collector

**烟煤与石油焦掺混燃烧特性研究 = Research on the Combustion Characteristics of Burning Bituminous Coal Mixed with Petroleum Coke**

[刊, 汉] / YANG Ya-ping, CAI Song (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210018) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(6)—612~614, 631

Based on a combustion test of burning a mixture of petroleum coke and coal dust on a small-sized test rig an analytical study was conducted of the effect of various factors on the combustion process. These factors include: fuel characteristics of bituminous coal and petroleum coke, ignition performance of mixed fuel dust, combustion characteristics, pulverized coal fineness, air distribution conditions and thermal load intensity. **Key words:** combustion unit, mixed pulverized coal, pyrolytic characteristics, combustion characteristics