

# 直流式低热值煤气燃烧器稳燃特性研究

赵振兴, 曹子栋, 常勇强

(西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘 要:** 对常规直流燃烧器和锥形半角不同的扩口直流燃烧器进行了低热值煤气的着火和稳燃试验。研究发现: 直流燃烧器内径小于 8 mm 时, 其淬熄作用严重影响火焰稳定; 提高 H<sub>2</sub> 浓度可以改善低热值煤气的稳燃特性; 对于低热值煤气, 扩口直流燃烧器的稳燃性能优于常规直流燃烧器; 扩口直流燃烧器的锥形半角大于 10° 时, 可产生双点火环, 提高脱火极限。

**关 键 词:** 稳燃特性; 燃烧器; 直流式; 同轴射流; 低热值煤气

中图分类号: TK223.2 文献标识码: A

## 引 言

石油化学和钢铁工业都会产生一些低热值气体, 由于这些低热值气体燃烧难以组织, 所以阻碍了其高效利用。实际应用中低热值燃烧器多采用旋流式燃烧器, 但由于直流燃烧器的简单性, 很多企业也在研究直流式燃烧器的稳定燃烧条件。低热值煤气不稳定燃烧的主要原因是: 脱火和回火现象<sup>[1-2]</sup>。本研究的目的是探讨直流低热值煤气燃烧器的稳定燃烧的条件, 以及如何通过改善直流式燃烧器的结构来改善低热值煤气的稳燃特性<sup>[3]</sup>。这对大力推广低热值煤气锅炉, 寻找合适的燃烧优化方案具有重要意义。

## 1 研究原理及方案

试验中, 通过用 H<sub>2</sub>、CO 和 N<sub>2</sub> 按浓度比例混合配置煤气模拟低热值煤气, 实验系统如图 1 所示。

低热值煤气是一种高着火点燃料, 燃烧组织困难, 火焰传播速度慢。当燃气速度较高时, 低热值煤气易脱火。低热值煤气的易脱火特性导致其无法被高效的利用, 因此需要设计一种可以提高低热值煤气脱火极限的燃烧器。本研究提出了扩口直流燃烧器, 如图 2(b) 所示。并对常规直流燃烧器和不同锥形半角 (8、12 和 35°) 的扩口直流燃烧器进行稳燃特性的试验研究。

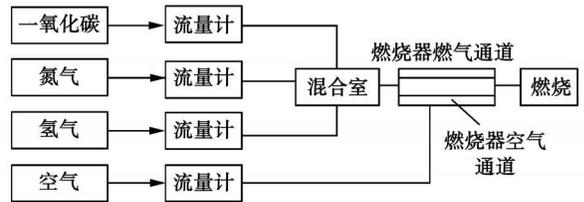


图 1 实验台系统

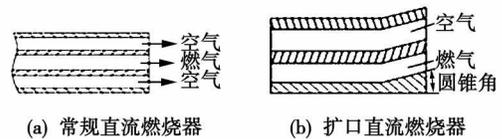


图 2 直流燃烧器

## 2 管径对稳燃特性的影响

低浓度低热值煤气燃烧时淬熄是影响煤气稳定燃烧的一个重要因素。在临近喷口壁只有数毫米的地方, 壁面的散热作用十分强烈, 以致火焰不能传播, 这种现象称为淬熄。目前对淬熄现象的研究依然大多停留在试验阶段, 基本可以确定的是它的影响因素主要为管径、材料导热系数以及火焰传播速度, 其中管径是最重要的因素。实验采用 4 种管径的常规直流燃烧器进行燃烧实验, 如图 2(a) 所示, 工况如表 1 所示。

表 1 直流燃烧器管径对燃烧实验的影响

直管内径 / mm	燃气速度 / m·s <sup>-1</sup>	结 果
4	2(4.6)	灭(灭、灭)
6	2(4.6)	灭(灭、灭)
8	2(4.6)	着(着、着)
10	2(4.6)	着(着、着)

表 1 表明, 在一些管径下形成的全扩散燃烧火

焰很不稳定,这主要是淬熄的影响。由以上的实验可以得出该低热值煤气的大致淬熄直径,并认为一旦燃烧器直径大于此直径则淬熄作用不会造成燃烧终止。因此,实验采用的燃烧器直径均大于 8 mm。

### 3 H<sub>2</sub> 浓度对低热值煤气稳燃特性的影响

实验主要目的是研究低热值煤气的脱火性能。在研究初期,采用常规直流燃烧器进行实验,发现低浓度 CO 燃气并不容易形成稳定的扩散火焰,只有 CO 体积浓度高于 30% 才可以形成稳定的扩散火焰,这个实验值远大于实际的低热值煤气的 CO 含量。

根据 CO 的燃烧理论,氢原子的活化性能对燃烧条件改善的影响非常大,氢气燃烧火焰传播速度也大大高于燃气稳定燃烧时的喷射速度。目前几乎所有低热值煤气的研究都忽视了低热值煤气中微量成分的作用,但实验表明,低热值煤气中的含氢量对燃烧的影响非常大,直接利用低浓度 CO 模拟的低热值煤气很难形成稳定的扩散火焰。

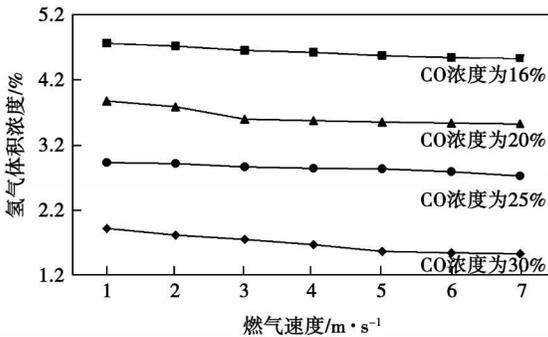


图 3 不同燃气流速下稳燃所需最低 H<sub>2</sub> 浓度

在图 3 中可以看出 H<sub>2</sub> 百分浓度对于低浓度 CO 的燃烧具有非常重要的作用<sup>[5]</sup>,原因是: H 和 H<sub>2</sub>O 对 CO 的燃烧反应具有触媒作用; H<sub>2</sub> 的火焰传播速度快,燃烧迅速,虽然 H<sub>2</sub> 和 CO 的发热量大体相似,但是在单位时间内 H<sub>2</sub> 更易燃烧并放出热量,从而供了更多的热量来加热并点燃后续燃气,进而改善了 CO 的着火条件。

实际的低热值煤气中并不存在着高达 4% ~ 5% 的 H<sub>2</sub>,但是却可以在常规直流燃烧器中燃烧,这是由于能形成活化中心的并不是只有 H<sub>2</sub>,还有在低热值煤气中含有的 CH<sub>4</sub> (0.2% ~ 0.5%), O<sub>2</sub> (0.2% ~ 0.4%) 以及微量的水蒸气,这些成分都可以形成 H<sub>2</sub>O 和 OH 等活化中心,进而减小反应所需要的活化能,并且 CH<sub>4</sub> 和 O<sub>2</sub> 都可以进行反应,而 CH<sub>4</sub> 的

热量更高于 CO 使得 CO 着火条件得到改善,低热值煤气中含有的 O<sub>2</sub> 则可以直接与 CO 进行反应,使得燃气有一部分成为预混,从而使得低热值煤气的着火温度降低,着火稳定性加强。

### 4 直流式燃烧器稳燃特性研究

#### 4.1 常规直流燃烧器

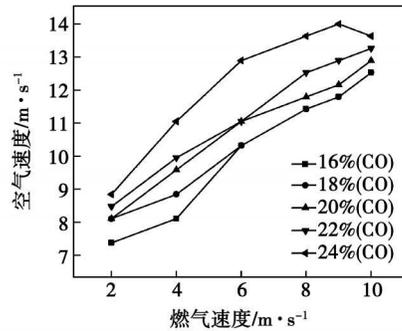


图 4 常规直流燃烧器、不同燃气组份下低热值煤气的稳燃特性

图 4 表明了不同燃气组份下常规直流燃烧器的稳燃区间,可自持燃烧,并且随着 CO 浓度和燃气流速的升高,外加空气的速度也随之升高。但当外侧空气流速增大至 14 m/s 时,燃烧无法稳定,点火环完全被吹离,形成脱火。由实验现象观察发现当空气流速高于 12 m/s 时,燃气与空气的交界面上的点火环开始不稳定,极易发生脱火。由于燃气流速与空气流速均无法提高,导致热功率无法满足实际生产的要求。所以常规直流燃烧器无法满足工业要求。

#### 4.2 扩口直流燃烧器

采用扩口直流燃烧器的理论依据:改善着火稳定性的关键在于点火环的稳定存在。采用扩口直流燃烧器时,当锥形角度大于一定值时,燃气射流不能闭合,理论上可以存在内、外圈两个点火环。当外圈空气流速不高时,内、外圈点火环同时存在。一般情况下,外圈空气速度远高于火焰传播速度,容易造成外圈点火环吹离,即外圈脱火。内圈由于卷吸回流的空气流速不高,不易造成脱火,故内圈点火环相对外圈点火环容易稳定存在,这对改善低热值煤气的火焰稳定性有很大帮助。下面通过试验来验证一下内圈点火环机理。

从射流扩展角理论可知,对于平面自由射流其外界边界扩展角大约为 10°,也就是说当锥形半角大于 10° 的时候,环形射流内边界不会闭合。

当射流的内边界线不闭合时 (即锥形半角大于  $10^\circ$ ) 由于回流卷吸作用, 喷嘴中心会回卷空气, 会在燃气的内外两边都形成一圈点火环。因此, 分别设计了喷嘴锥形角度为  $8^\circ$ 、 $12^\circ$  和  $35^\circ$  的扩口直流燃烧器进行实验研究, 扩口直流燃烧器如图 2 (b) 所示, 其具体结构参数如表 2 所示。

表 2 带扩口的环形燃烧器尺寸

锥形半角 / ( $^\circ$ )	锥头直径 / mm	内管直径 / mm	燃气通流面积 / $\text{mm}^2$	内管外径 / mm	外管内径 / mm	空气通流面积 / $\text{mm}^2$
8	9	11	31.4	13	15	43.96
12	10	12	34.54	14	16	47.1
35	13.6	16.6	71.121	19.2	21.3	66.76

实验时, 首先选定燃烧器和煤气各成分的比例, 然后每给定一个燃气速度, 寻找在此速度下达到脱火时的对应空气速度, 燃气速度加到其自身不能形成稳定火焰 (即不加空气就脱火) 为止。

4.2.1 锥形半角为  $8^\circ$

对锥形半角为  $8^\circ$  的扩口直流燃烧器进行分析, 由扩展角理论可知, 试验中采用的锥形半角是低于  $10^\circ$ , 所以射流应该是闭合的。

图 5 对比了不同燃烧器的稳燃特性, 在相同组分下, 随着燃气流速的提高, 扩口直流燃烧器外环空气可加的空气质量流速也逐渐提高, 这一点是与直流燃烧器一致的, 只是在相同的条件下, 空气质量流速的增长量并不相同。

锥形半角为  $8^\circ$  的扩口直流燃烧器与常规直流燃烧器相比, 其稳燃极限有明显的提高。相同流速下提高了近 30%, 而锥形半角为  $12^\circ$  和  $35^\circ$  的扩口直流燃烧器的提高更为明显。这是由于该燃烧器可以使部分空气被卷吸到中央的钝体处, 使燃气与空气的混合增强, 改善了反应的条件<sup>[7]</sup>, 提高了脱火极限。

由试验观察到, 在燃气流速不高 (燃气流速低于  $2 \text{ m/s}$ ) 的情况下, 火焰有明显的分层现象, 却并没有成型的内圈点火环。由于只存在外圈点火环, 外圈空气速度无法增大至实际工程应用的值 (大于  $20 \text{ m/s}$ )。

4.2.2 锥形半角为  $12^\circ$  和  $35^\circ$

在锥形角为  $8^\circ$  的扩口直流燃烧器实验中, 可以看出锥形半角是对火焰的稳定性有影响的, 但是由射流理论可知,  $8^\circ$  的锥形半角射流最终还是闭合的, 对于锥形半角增大到射流不闭合的情况, 通过对锥形半角为  $12^\circ$  和  $35^\circ$  扩口直流燃烧器进行燃烧实验来进行分析。

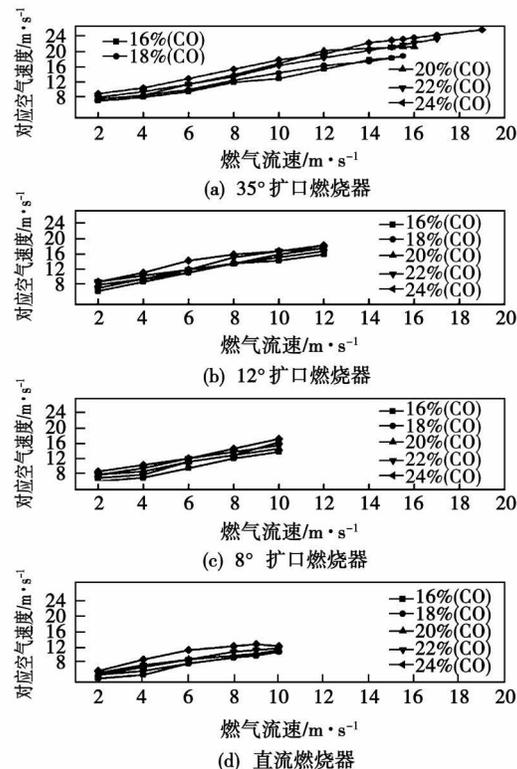


图 5 不同燃烧器, 不同燃气组分下低热值煤气的稳燃特性

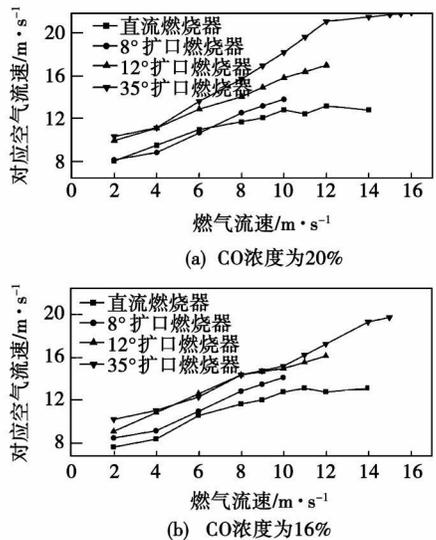


图 6 不同燃烧器、相同燃气组分下低热值煤气稳燃特性

图 6 为不同燃烧器、相同燃气组分下低热值煤气的稳燃特性。锥形角为  $12^\circ$  和  $35^\circ$  的扩口直流燃烧器对火焰稳定性的影响类似, 但从数值上来讲, 对

火焰脱火极限的提高,锥形半角为 12 和 35° 扩口直流燃烧器优于锥形半角为 8° 扩口直流燃烧器。通过观察火焰,当外圈空气流速不高时,可以看到明显的双点火环。当空气流速增大,外圈点火环被吹离,内圈点火环依然稳定存在。“双环”点火环的存在极大的改善了低热值煤气的燃烧稳定性。

锥形半角为 35° 扩口直流燃烧器的火焰稳定性最好。说明随着锥形半角的增加低热值煤气的稳燃特性有所改善。实验中所采用的燃烧器中出口设有扩流锥,类似于钝体,气流经过后,产生“脱流”,在它后面出现一个回流区。增加锥形半角可以使回流区加宽,增大回流区与高温烟气的接触面积。更重要的是,回流的过程中更多的空气氧化剂被卷吸到燃气的出口处,可以使燃烧器的内环形成稳定的点火环,这是“双环”点火环形成的必要条件。同时,燃气与空气的混合度增加,改善了反应的条件。扩流锥的位置可以伸缩,来调节燃气的出口速度和气流扩散角的大小,以适应不同的工作条件。

## 5 结 论

(1) 管径对于火焰稳定性有着重要的作用。当燃烧器内径小于 8 mm, 其淬熄作用严重影响火焰稳定。

(2)  $H_2$ 、 $CH_4$  等成分对于低热值煤气稳燃特性的有重要作用。

(3) 扩口直流燃烧器火焰的稳定性优于常规直流式燃烧器。锥形半角的角度大小对火焰的稳定起着重要作用。而随着锥形半角增大,火焰的稳定性增强。

(4) 提出了“双环”点火环机理:对于扩口同轴环形射流,当扩口锥形角度大于气流内圈扩展角度时,可以形成内、外双圈点火环。“双环”点火环可以有效地提高低热值煤气的脱火极限。

## 参考文献:

- [1] 高晔明. 高炉煤气联合循环发电在太钢的应用研究[J]. 冶金动力, 2009(5): 52-56
- [2] 匡国权, 房国凤. 低热值高炉煤气应用实践 SH20-2 45/400-AII 型燃煤锅炉改燃高炉煤气改造[J]. 工业锅炉, 2004(2): 44-46
- [3] 庄正宁, 曹子栋, 唐 桂, 等. 50 MW 高压锅炉全燃高炉煤气的研究[J]. 热能动力工程, 2001 16(3): 271-274.
- [4] COX IAN J. The effect of blast furnace gas quality and combustion controls on hot blast stove performance[J]. AISE Steel Technol 2003(5): 37-41.
- [5] 赵伶俐, 周强泰. 旋流燃烧器的稳燃性能分析[J]. 动力工程, 2005 25(3): 364-368.
- [6] SABNES DETMAR A FRANZW. Reducing ability of CO and  $H_2$  of gases formed in the lower part of the blast furnace by gas and oil injection[J]. ISIJ International 2006 46(7): 1006-1013
- [7] 徐通模, 金定安. 锅炉燃烧设备[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [8] 徐晓菊. 低热值气体燃料燃烧的强化[J]. 科技资讯, 2007 34 1

## 新技术、新工艺

# GE 第一个燃用低热值炼焦炉煤气的动力机组 将用于河南力源炼焦厂

据《Gas Turbine World》2009 年 9~10 月号报道, GE Energy 的航改型燃气轮机将作为燃用低热值煤气的机组用于河南力源炼焦厂。

根据来自该公司的订单, GE 将供应能有效燃烧 100% 低热值炼焦炉煤气的燃气轮机。该炼焦炉煤气是炼焦过程的废弃产物, 它将被用来生产供河南力源炼焦厂主要设备用电, 剩余的电力向市场销售。此外, 由于捕获和使用的炼焦炉煤气, 通常被当作废弃物被排放到大气中, 因此, 煤气的利用将明显减少工厂的排放并改善当地的环境状况。

位于河南省安阳市的炼焦厂自备电厂将使用具有标准的环形燃烧室和为了控制  $NO_x$  而使用喷水的 2 台 GE LM2500+ 航改型燃气轮机。喷水的 LM2500+ 被设计成生产 36 MW 输出功率, 效率接近 36.8%。

把废弃的炼焦炉煤气用作电厂的燃料, 预期可使工厂的  $CO_2$  排放每年减少 432 000 t,  $NO_x$  的排放将减少到低于 39 mg/kg。

(吉桂明 摘译)

循环流化床回料阀内气固两相流的实验研究 = Experimental Study of the Gas-solid Two-Phase Flow Inside the Material Return Valve of a Circulating Fluidized Bed [刊, 汉] / XIA Xiao-yu, LI Yuan, ZHU Tong (College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai, China, Post Code: 201804) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5), —510 ~513

A cold state test and a numerical simulation were performed of the gas-solid two-phase flow inside the material return valve of a circulating fluidized bed. According to the features of the gas-solid two-phase flow under discussion, the Euler model was used to simulate the foregoing two-phase flow with the configuration of the pressure field and the gas and solid phase flow field inside the return valve being analyzed. It has been found that the pressure difference in the vertical tube is in direct proportion to its material piling height. The configuration of the gas phase flow field inside the material return valve is similar to that of the solid phase one. The porosity rates inside the material distribution chamber are scattered in a range from 0.45 to 0.55 while those in the transmission chamber are distributed mostly in a range from 0.65 to 0.9. The gas phase velocity distribution exercises an important influence over the porosity rate distribution inside the material return valve. The greater the speed in the area, the greater the porosity rate and vice versa. Key words: circulating fluidized bed, material return valve, gas-solid two-phase flow

基于自抗扰控制的循环流化床锅炉床温系统的研究 = Study of the Bed Temperature System for a Circulating Fluidized Bed Boiler Based on a Self Disturbance-resistant Control [刊, 汉] / LI Yong-jun, GUAN Zhi-min, WANG Bing-shu (College of Control Science and Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003), PENG Gang (Hebei Provincial Electric Power Research Institute, Shijiazhuang, China, Post Code: 050021) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2009, 25(5), —514 ~516

The bed temperature is an important parameter for a CFB (circulating fluidized bed) boiler in a thermal power plant. On the basis of analyzing the dynamic characteristics of the objects controlled by the bed layer temperature of the boiler, proposed was a method for designing a two-order self disturbance-resistant bed temperature control system and compared were the simulation results with those obtained by use of the PID (proportional, integral and differential) control method. It has been found that the overshooting and regulation time duration of the self disturbance-resistant control (ADRC) are superior to those of the conventional PID method. Under various operating conditions and with an increase of disturbance from the outside, the ADRC version enjoys a good robustness and disturbance-resistant capability, thus solving the difficulties in controlling the time variation and long time delay of the system in question. Key words: circulating fluidized bed boiler, bed temperature system, ADRC (active disturbance-resistant control), non-linear, robustness

直流式低热值煤气燃烧器稳燃特性研究 = Study of the Combustion Stability Characteristics of a Direct flow Type Low-heating-value Coal Gas Burner [刊, 汉] / ZHAO Zhen-xing, CAO Zidong, CHANG Yong-qiang (College of Energy Source and Power Engineering, Xian Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5), —517 ~520

An ignition and combustion stability test of a low-heating value coal gas was performed respectively on a direct flow type burner and a flare type direct flow one with different cone semi angles. It has been found that when the direct flow burner has an inner diameter of less than 8 mm, its quenching effect will seriously affect the stability of the flames. An enhancement of  $H_2$  concentration can improve the combustion stability characteristics of the low-heating value coal gas. For the above coal gas, the combustion stability performance of the flare type direct flow burner is superior to that of a conventional one. When the cone semi angle of the flare type direct flow burner is greater than 10 degrees, it can produce a dual ignition ring and enhance the flame blow-off limits. Key words: combustion stability characteristics; burner; direct flow type; coaxial jet; low-heating value coal gas

两层多孔介质燃烧器的数值模拟 = Numerical Simulation of a Dual-layer Porous Medium Burner [刊, 汉] / SHI Jun-mei, XU Yaoning, XUE Zhi-jia (Shenyang City Key Laboratory on Circulating Fluidized Bed Combustion Technology, Shenyang Engineering College, Shenyang, China, Post Code: 110136), XIE Mao-zhao (College of Energy Source and Power, Dalian University of Science and Technology, Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 521 ~ 524

A one-dimensional numerical simulation was performed of the combustion characteristics of a premixed gas in a dual-layer porous medium burner. The superadiabatic combustion and stable flame zone in the burner under discussion were mainly studied. The research results show that the premixed gas can produce superadiabatic combustion to a certain extent inside the dual-layer porous medium and the lean combustion limits can be extended to 0.45. The dual-layer porous medium can stabilize the flame at the interface within a relatively wide flow speed range. The minimum and maximum flame propagation speeds obtained from a numerical prediction assume a same tendency as the test ones, which are at least three times higher than those in a free space. Key words: premixed gas; dual-layer porous medium burner; numerical simulation

我国动力用煤煤质与着火特性试验研究 = Experimental Study of the Quality and Ignition Characteristics of Coals for Use in Power Plants of China [刊, 汉] / XIE Ji-dong, JIANG Ying (Beijing Coal Chemical Research Institute, Chinese Academy of Coal Sciences, Beijing, China, Post Code: 100013) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 525 ~ 528

The coal quality characteristics constitute an important factor influencing its ignition ones. The authors have experimentally studied the ignition characteristics of coal for use in power plants in a one-dimensional combustion furnace and analyzed the coal quality characteristics influencing the ignition process of the pulverized coal. By utilizing the influence of the volatile, water, ash and fixed carbon content on the ignition characteristics of the coal, an ignition judgement index  $\delta$  was established and a method was proposed for calculating the index under discussion  $\delta$  by utilizing the coal quality analytic data of the coal, thereby judging the method of its ignition characteristics. In addition, a fitting was performed of the ignition temperatures calculated and those measured through the test, of which the correlation factor was assessed as 0.9571. This shows that the method under discussion is relatively precise and reliable. Key words: combustion; pulverized coal; coal quality characteristics; ignition characteristics; one-dimen-