

# Study of Thermal Calculation of Coal-Boiler Mixed Coke Oven Gas, Based on “Corrected Flue” Method

Haiguang Li<sup>1</sup>, Zengwu Zhao<sup>1</sup>, Zhongyi Yu<sup>2</sup>, Baowei Li<sup>1</sup>, Wenfei Wu<sup>1\*</sup>

1. School of Environment and Energy Inner Mongolia University of Science and Technology, BaoTou, China

2. Inner Mongolia BaoTou NO.1 Power Plant, BaoTou, China

1. lihaiguang@imust.cn, 2. Corresponding author: wwf@imust.cn

**Abstract:** The application of mixed coal and coke oven gas to burn in pulverized coal fired boiler, have already been widely accepted, but there are no uniform and normative calculations at present to thermal calculation methods of coal-boiler mixed with coke oven gas. Some problems in design and operation of the boiler appear to impact on the safe and economic operation of these boilers. This paper proposes an intelligent method named “corrected flue” for the thermal calculation, this method conveniently applies the uniform and normative calculations of coal-boiler to the calculation of coal-boiler mixed coke oven gas getting the problem be solved.

**Keywords:** coke oven gas; mixture combustion; coal-boiler; corrected flue

## 基于“折合燃料”法燃煤锅炉掺烧煤气燃烧计算的研究

李海广<sup>1</sup>, 赵增武<sup>1</sup>, 于忠义<sup>2</sup>, 李保卫<sup>1</sup>, 武文斐<sup>1\*</sup>

1. 内蒙古科技大学 内蒙古高效洁净燃烧重点实验室, 内蒙古包头, 中国, 014010

2. 内蒙古包头第一热电厂 内蒙古包头, 中国, 014030

1. lihaiguang@imust.cn, 2 Corresponding author: wwf@imust.cn

**摘要:** 在冶金、炼焦的生产过程中, 产生大量的高炉、焦炉煤气, 将其掺烧在燃煤电站锅炉中发电的技术, 得到了广泛的应用, 但关于煤气掺烧的燃烧计算还没有统一的计算规范, 以至于带来了一些设计和运行问题, 影响了锅炉安全经济生产。本文从掺烧计算的基本问题出发, 提出了“折合燃料”法的简单计算方法, 可以很方便的将纯燃煤的计算规范, 运用在掺烧煤气的计算中, 使问题得以解决。

**关键词:** 煤气; 掺烧; 煤粉锅炉; 折合燃料

### 1 引言

随着我国经济的高速发展, 能源与环境问题愈加突出, 钢铁厂、炼焦厂所产生的高炉煤气、焦炉煤气等副产品排放后, 不仅污染环境而且造成资源浪费, 近年来, 燃煤锅炉掺烧高炉煤气、焦炉煤气进行煤气燃烧利用的技术, 在全国已经得到了广泛的应用, 但是在发展过程中也存在着很多问题, 由于煤气产量的不稳定性, 常常偏离设计值, 锅炉在不同煤气掺烧量条件下运行, 造成锅炉受热面磨损<sup>[1,2]</sup>, 效率下降及热工参数异常等现象<sup>[3]</sup>, 给锅炉的安全经济运行带来了一定的影响, 产生这些问题的一个重要原因是, 对于

煤粉锅炉掺烧煤气的变工况运行, 缺乏详细、可靠的燃烧计算方法<sup>[4,5]</sup>, 缺乏对现场运行工况必要的预测支持。

本文中以内蒙古蒙南电厂 220t/h 煤粉锅炉掺烧焦炉煤气工程为背景, 首次提出并采用“折合燃料”法, 将煤气掺烧计算转化为燃煤纯烧计算, 进而可以利用成熟的煤粉燃烧计算方法、程序等<sup>[6-8]</sup>, 进行掺烧不同比例煤气时的设计、校核计算。

### 2 “折合燃料”燃烧计算原理及过程

#### 2.1 基本问题

一般来说, 对于单一燃料进行燃烧热力计算时, 按照标准方法是以燃料的单位质量 (kg) 或容积 (m<sup>3</sup>) 为基础的相对特性进行计算, 如煤燃烧的理论空气量

基金项目: 内蒙古自然科学基金重点项目 (20080404ZD07); 包头市科技项目 (2009J1003)

和理论烟气量可以按照式 (1), (2)<sup>[9]</sup>计算, 单位为:  $\text{Nm}^3/\text{kg}$ 。

$$V^0 = 0.0899(C^y + 0.375S^y) + 0.265H^y - 0.0333O^y \quad (1)$$

$$V_y^0 = 1.866 \frac{C^y}{100} + 0.7 \frac{S^y}{100} + 0.8 \frac{N^y}{100} + 0.79V^0 + 11.1 \frac{H^y}{100} + 1.24 \frac{M^y}{100} + 0.0161V^0 \quad (2)$$

而煤气燃烧产物理论烟气量可以按照式(3), (4)<sup>[10]</sup>计算, 单位为  $\text{Nm}^3/\text{Nm}^3$ :

$$V^0 = \frac{1}{21}[0.5H_2 + 0.5CO + 1.5H_2S + S(m + \frac{n}{4})C_mH_n - O_2] \quad (3)$$

$$V_y^0 = 0.01[CO_2 + CO + C_mH_n + H_2S] + 0.01[H_2 + H_2S + S \frac{n}{2}C_mH_n + 120(d_g + aV^0 d_a)] + 0.79V^0 + 0.01N_2 \quad (4)$$

上述两组公式的意义为: 1kg 煤完全燃烧所需多少  $\text{Nm}^3$  的空气, 产生多少  $\text{Nm}^3$  烟气; 1  $\text{Nm}^3$  的煤气完全燃烧所需多少  $\text{Nm}^3$  的空气, 产生多少  $\text{Nm}^3$  烟气。这样, 煤和煤气的相对特性计算基础分别为: 以单位质量计和单位体积计, 那么对于混烧情况, 如何进行计算是问题之一, 再者煤和煤气燃烧所释放的热量, 对工质进行热传递的介质是煤和煤气燃烧所产生的烟气, 那么第二个问题就是: 烟气在热交换时进行计算的单位是什么, 是  $\text{KJ}/\text{kg}$ , 还是  $\text{KJ}/\text{Nm}^3$ ,

针对上述两个问题, 已经有学者对其进行了研究和处理, 如国内学者湛志钢<sup>[11]</sup>、许松富<sup>[12]</sup>等用基于热量折算的方法, 如用  $\alpha$  来表示热量掺烧比, 混合燃烧理论空气量用式 (5) 表示, 单位为  $\text{Nm}^3/\text{kg}$ 。

$$V = (1 - a)V_y^0 + a \frac{Q_1}{Q_2} V_f^0 \quad (5)$$

式中  $Q_1$ 、 $Q_2$  分别指煤粉的低位发热量和煤气的低位发热量, 比值意义为相当于 1 kg 煤燃烧产生的热量的煤气量, 这种方法在设计计算中可以很方便的进行单位统一, 但在校核计算中, 由于煤气掺烧量、及煤种变化时, 很难直接反应出热量掺烧率  $\alpha$  来, 计算将受到限制; 本文所提出的“折算燃料”法, 是以单位质量为基础, 当煤气掺烧量发生变化时, 可以根据实际煤气量进行计算, 这样可以避免这样的限制。

## 2.2 计算原理及步骤

“折合燃料”法原理是将煤粉和煤气按一定的比例折合成一种新的燃料, 也可以这样理解, 将煤气成份作为燃煤的挥发份成份, 将煤气折算进煤的成份之中, 如图 1 表示: 进行计算时该燃料以单位质量计算, 计算系统沿用燃煤的燃烧计算系统。得出这种方法的思

路是: 锅炉的换热主要是通过烟气传递的, 在

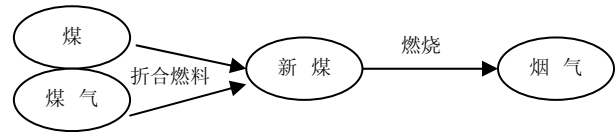


Figure 1. schematic diagram of “corrected flue”

图 1 “折合燃料”原理图

煤粉及煤气燃烧以后各自的烟气就混合在一起了, 没有必要再区分是何种燃料燃烧产生的, 全部认为是煤产生的, 进行热量交换计算。

“折合燃料”法的计算步骤如下:

- ① 通过焦炉煤气的成份算出其密度
- ② 按焦炉煤气掺烧量, 计算出焦炉煤气的单位质量消耗量
- ③ 计算出在掺烧焦炉煤气后煤粉的单位消耗量
- ④ 然后按质量比组成一种新的燃料, 具体操作是:

$$\text{令 } x_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}, \quad x_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2},$$

新的燃料成份计算为  $C_{cg} = x_1 C_c + x_2 C_g$

⑤ 烟气量和空气量的单位就统一成了  $\text{Nm}^3/\text{kg}$ , 烟气焓的单位就是  $\text{kJ}/\text{kg}$ ;

⑥ 最后进行燃烧热力计算

## 2.3 计算实例

蒙南电厂原有杭州锅炉集团制造的 220t/h 单汽包自然循环煤粉锅炉, 电厂周边的焦化厂可提供  $1.06 \times 10^9 \text{Nm}^3/\text{a}$  的焦炉煤气供电厂燃烧, 掺烧改造所用的燃煤和焦炉煤气成份见表 1。

Table 1. Ingredients of coal and coke oven gas

表 1. 燃煤和焦炉煤气的成分及含量

煤	含量 (%)	焦炉煤气	含量 (%)
碳	60.82	二氧化碳	2.4
氢	4.01	氢气	57.5
氧	7.65	甲烷	25.4
氮	1.11	一氧化碳	6.0
硫	0.67	碳氢化合物	2.2
灰份	19.74	氮气	4.0
水份	6.0	氧气	0.4
低位发热量	24300KJ/kg	热值	17920KJ/Nm <sup>3</sup>

设输入锅炉煤量为 24520 kg/h, 输入煤气量为

4.89 Nm<sup>3</sup>/h, 此时锅炉设计蒸发量为满负荷, 掺烧比按热量计为 50%, 表 2, 为混合燃料折算后新煤种成份, 表 3 为折算前后计算理论空气量和烟气体量。

**Table2. Ingredients of mix fuel after corrected flue**  
**表 2. 燃煤和燃气折合后混合燃料成份**

碳	氢	氧	氮	硫	灰份	水份	低位发热量
55.5	11.5	12.0	5.0	0.4	11.9	3.64	30283.9

**Table3. theoretical flue gas volume and theoretical air volume before/after corrected flue**  
**表 3. 混合燃料折算前后理论空气量和烟气体量**

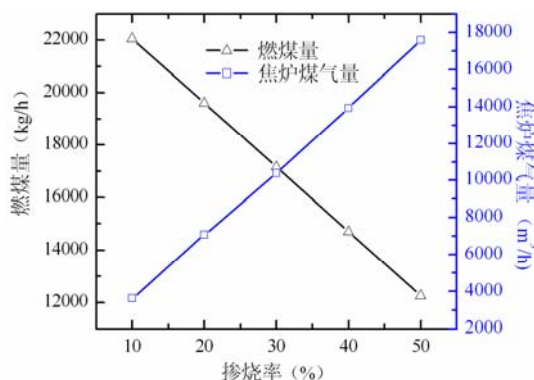
	煤 (1kg)		混合燃料 (1kg)
	m <sup>3</sup> /kg	Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>	Nm <sup>3</sup> /kg
理论空气量 V <sup>0</sup>	5.805	1.616	3.414
理论 CO <sub>2</sub> 、SO <sub>2</sub> 容积	1.082	0.368	0.673
理论 N <sub>2</sub> 容积计算	4.593	1.667	2.91
理论水蒸气容积	0.72	0.391	0.528
理论烟气体量	7.075	2.426	4.166

### 3 计算应用分析

在基于“折合燃料法”的基础上, 对蒙南电厂掺烧焦炉煤气的改造计算中, 分别对不同热量掺烧比的情况下, 进行了对锅炉燃烧效率、排烟温度等参数的计算, 了解掺烧率对于锅炉运行的影响。

#### 1) 掺烧率与煤粉、煤气量的关系

图 2 为不同热量掺烧比与煤气量和燃煤量关系曲线, 从曲线中很方便查到不同热力掺烧比下, 煤气与燃煤的数量, 可以供运行时参考。

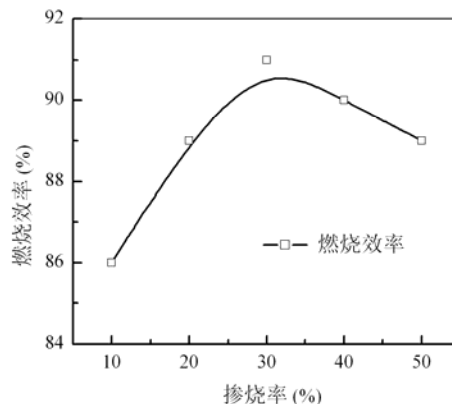


**Figure2. volume of coal and gas under the different mix proportion**

**图 2 不同热量掺烧比下的煤气和燃煤量**

#### 2) 掺烧率对锅炉效率的影响

图 3 为其他条件不变下, 计算得出来的掺烧率对锅炉效率的影响关系图, 从图中可以看出热量掺烧率在 30% 时, 锅炉效率最高。

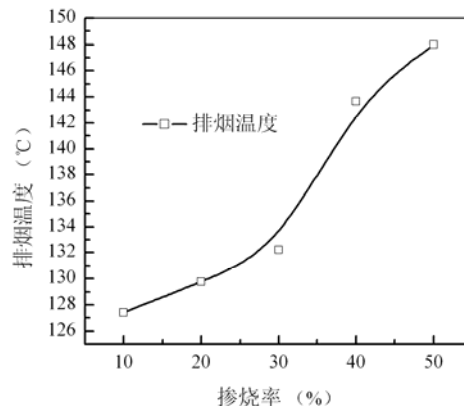


**Figure3. boiler efficiency versus mix proportion**

**图 3 锅炉效率与掺烧率关系曲线**

#### 3) 掺烧率对排烟温度的影响

图 4 为计算得到的排烟温度与热量掺烧比关系曲线, 从曲线中可以看出, 随掺烧率的增加, 排烟温度升高。



**Figure4. exhaust gas temperature versus mix proportion**

**图 4 锅炉排烟温度与掺烧率关系曲线**

### 4 结论

“折合燃料”法很方便的解决了燃煤锅炉掺烧焦炉煤气燃烧计算的基本问题, 通过简单的计算, 可以把煤气的成份折合到煤中, 形成新的煤中, 通过纯烧

煤的计算体系进行计算, 基于这种方法的可以方便的计算出重要的锅炉参数与掺烧率的关系, 通过蒙南电厂的工程应用, 可以证明该方法的实用价值, 保证了煤气代替燃煤燃烧工程的进行, 这样即解决污染排放问题, 又可以减少燃煤用量, 达到节约能源的目标, 该方法具有推广应用的价值。

## References (参考文献)

- [1] CHEN kuijie.[J].Electric Safety Technology,2009,(12),6-8.  
陈杰奎. 锅炉受热面磨损原因分析与防治对策[J]. 电力安全技术, 2009,(12),6-8.
- [2] HUANG Benyuan,ZHANG Lu-junStudy. On the Impact of Blending Blast Furnace Gas on the Wearing of Heating Surface of Boiler[J].HUBEI POWER,2006,(02),21-23.  
黄本元, 张鲁峻. 掺烧高炉煤气对锅炉受热面磨损影响的研究[J]. 湖北电力, 2006,(02). 21-23.
- [3] SHEN yuefen, CAO Zidong, ZHUANG ZhengningBritain. *et al.* B&W Coal-fired Boiler Modified to Burn Coal with Added Blast Furnace Gas—Its Impact on Thermodynamic Parameters[J]. Electric Power,1997,(04),59-61.  
沈月芬, 曹子栋, 庄正宁, 等. 英国 b&w 公司燃煤锅炉掺烧高炉煤气对热工参数的影响[J]. 中国电力, 1997,(04) ,59-61.
- [4] Industrial Boiler Design and Calculations National Standard[M]. China National Standard Press,2003,08  
工业锅炉设计计算标准方法 [M]. 中国标准出版社, 2003 年 08 月.
- [5] FENG Junkai. Principles and Calculation of Boiler[M].Science press,2003,01.  
冯俊凯. 锅炉原理及计算 [M]. 科学出版社, 2003 年 01 月
- [6] HUANG Lei, LIANG Shaohua1, LI Qiubai.et.al. Design characteristics and application of on-line boiler combustion optimization system [J]. Electric Power,2008,(01),60-62.  
黄磊, 梁绍华, 李秋白, et al. 锅炉在线燃烧优化系统设计特点及应用[J]. 中国电力, 2008,(01),60-62.
- [7] LIANG Ligang, MEN Yong, WU Shenglai.Study on Combustion Adjustment for Optimal Operation of a 1004 t/h Boiler[J], Power Equipment,2020,(01),16-20.  
梁立刚, 孟勇, 吴生来. 1004t/h 锅炉运行优化和燃烧调整试验研究[J]. 发电设备, 2010,(01),16-20.
- [8] WU Zhiqun, HUANG Tinghui1, HU Hong-hua. Study On Application Of Intelligent Combustion Optimizing Technology On Utility Boilers[J]. Thermal Power Generation, 2008, (09), 23-31.  
吴智群, 黄廷辉, 胡洪华, 等. 电站锅炉智能燃烧优化技术的应用研究[J]. 热力发电, 2008,(09),23-31.
- [9] SHEN Youting. Principles and Calculation of Boiler[M]. Science press,1979,09.  
沈幼庭. 锅炉原理及计算[M]. 科学出版社,1979 年 09 月
- [10] Beijing University of Civil Engineering and Architecture,combustion and Application Of The Flue Gas[M],China Architecture & Building Press,2000,12  
北京建筑工程学院编. 燃气燃烧与应用 (第三版) [M].中国建筑工业出版社,2000 年 12 月第 3 版:
- [11] ZHAN Zhigang, CHEN Gang. Influence of Pulverized Coal Combustion Boiler Adding Blast Furnace Gas on Coal Complete Combustion[J], Journal of Chinese Society of Power Engineering,2004,(02),179-182.  
湛志钢,陈刚. 煤粉锅炉掺烧高炉煤气对煤粉燃尽影响的研究 [J]. 动力工程, 2004,(02),179-182.
- [12] Xu Songful, Liao Huining. Simplified analysis on Working Condition of Combustion with Coal and BFG Mixture[J]. SOUTH-ERNIRONANDSTEEI,1998,(06),19-26.  
许松富,廖辉宁. 煤和高炉煤气混合燃烧工况的简化分析方法 [J]. 南方钢铁, 1998,(06),19-26.