

锅炉燃烧技术



电站锅炉行业技术情报组
上海锅炉厂研究所

一九七五年五月

试验所

目 录

1. 蒸汽锅炉及工业锅炉燃烧器的理论研究.....	1
2. 西班牙烧劣质煤的经验.....	14
3. 低过量空气重油燃烧器的研究.....	24
4. 燃油锅炉用的一种高效燃烧器的工业性运行试验.....	38
5. 具有角置切向燃烧器的炉膛.....	46
6. 过热器管的重油烟气高温腐蚀.....	58
7. 残渣油的燃烧问题及其解决方法.....	70
8. 叶片式旋流器的旋转射流——自由射流.....	78
9. 叶片式旋流器的旋转射流——有限射流.....	92
10. 大容量燃烧器作单层布置的炉膛运行经验.....	101
11. 燃油锅炉调风器的设计.....	108
12. 炉内技术的主要发展方向.....	124

蒸汽锅炉及工业锅炉燃烧器的理论研究

1. 引言

在锅炉和工业炉的有限容积炉膛里，单位时间内能燃烬多少燃料的问题是燃烧技术上极其重要的研究课题。

无论船用、工业用锅炉还是取暖用的锅炉都力求锅炉小型化，就必然要求很高的热负荷。然而由于种种条件的限制，即使在大容量锅炉里目前还不能取用太高的燃烧负荷。倘若能克服限制强化的各种障碍，能发展一种高负荷燃烧方式，则就有可能实现锅炉小型化。

表 1 示出锅炉燃烧负荷的几个实例。表中这些数值与燃气轮机、内燃机相比明显地低得多。然而在锅炉上使用的燃料主要是难以燃烧的重油和煤等，并且要求在低过量空气条件下把它烧好。随着单只燃烧器容量增大，燃烧条件变差，对于高负荷燃烧更是一个难题。

锅炉燃烧负荷的数值

表 1

项 目	陆 用 锅 炉 (重 油)					陆用锅炉(煤粉)		船用锅炉(重油)		
	60	135	710	860	1157	540	725	14	25	50
锅炉蒸发量 吨/时										
燃烧方式	水平燃烧	水平燃烧	水平燃烧	切向燃烧	水平燃烧	切向燃烧	切向燃烧	水平燃烧	水平燃烧	水平燃烧
燃烧器型式	蒸汽雾化	蒸汽雾化	蒸汽雾化	压力雾化	压力雾化	直 流 式	直 流 式	蒸油雾化	压力雾化	蒸汽雾化
燃烧负荷 大卡/米 ³ 时	306×10^3	281×10^3	258×10^4	189×10^3	248×10^3	125×10^3	132×10^3	782×10^3	800×10^3	815×10^3

本文主要是以锅炉燃烧器的火焰长度和燃烧负荷作为燃烧研究的基础。

2. 燃烧负荷

2.1 炉膛设计和燃烧负荷

首先，在考虑炉膛的燃烧负荷时，必须认真研究一下限制燃烧负荷的要素。以锅炉设计而言，因燃料燃烧方式不同多少有些差异。然而设计者不得不根据下述情况，适当地规定炉膛尺寸、形状及燃烧器布置方式。

- (1) 燃料在炉膛的燃烬；
- (2) 即使将燃料量降到 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{10}$ ，也能持续地稳定燃烧；
- (3) 火焰不冲刷炉壁；
- (4) 炉膛中排出的烟气不致使后受热面发生腐蚀和积垢；
- (5) 尽可能得到低的过量空气系数；
- (6) 尽可能采用小的炉膛。

为了满足上述各点，除了选择适当的燃烧方式和燃烧器之外，还必须考虑火焰在炉内停留时间、火焰温度以及燃烧负荷。

对于重油炉、固态煤粉炉、液态煤粉炉的燃烧负荷 O_R (大卡/米³时)和火焰在炉内平均停留时间 θ_a (秒)、炉膛有效利用率 ϕ 、炉膛容积 V (米³)、炉膛周界投影受热面积 F (米²)、炉膛出口烟气温度 T_g (°C)等的关系计算结果示于图 1—3。

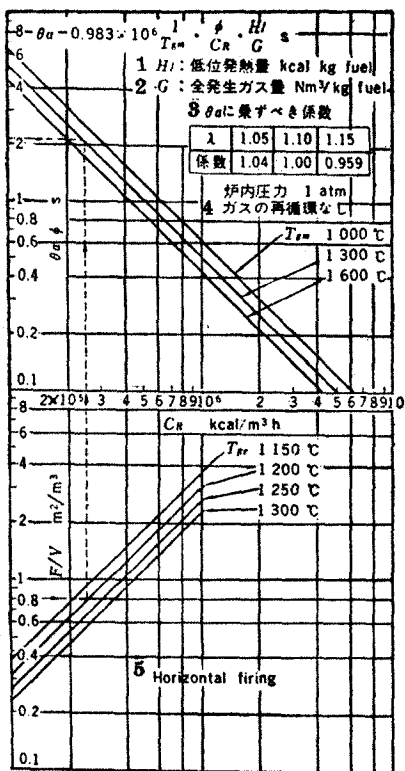


图1 燃油锅炉炉膛燃烧各因素的关系

1—低发热量； 2—燃烧烟气量； 3— θ_a 所乘的系数；
4—没有烟气再循环； 5—水平燃烧。

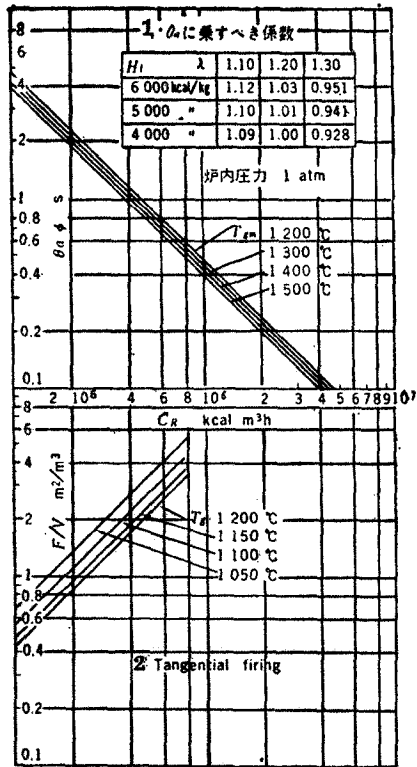


图2 固态煤粉锅炉炉膛燃烧各因素的关系

1— θ_a 所乘的系数； 2—切向燃烧。

由于锅炉蒸发量给定后，燃料量就可以知道。因此，假定了炉膛形状、大小，就可以决定 C_R 和炉膛形状系数 F/V ，再从图中查得 θ_a 和 T_{g0} 。对于固态煤粉炉， T_{g0} 应比煤中灰分软化温度低。相反，在液态煤粉炉， T_{g0} 要比灰的熔化温度高得多。且以燃烧重油而言，必须研究钒的高温腐蚀问题。又由于 T_{g0} 和炉壁的吸热负荷有密切的关系， T_{g0} 高，水冷壁管吸热也就高。为了不使炉管被烧坏， T_{g0} 应有一个上限值。小型锅炉的 T_{g0} 往往是低的，但 T_{g0} 值太低时，就难以持续良好地燃烧。 θ_a 的上限受燃料燃烬时间的限制。假如 T_{g0} 不成问题的话，则 θ_a 成了决定燃烧负荷的唯一因素。

经过如上 T_{g0} 、 θ_a 的分析研究，可以说炉膛设计的基本任务是选用适当的值来确定炉膛的形状和容积。

2.2 限制燃烧的因素

因燃烧烟气产生的积垢、腐蚀或水管被烧损的问题，可参阅各个专题研究报告或资料，这里仅从 θ_a 方面来简单地研究燃烧负荷的极限。

用于锅炉和工业炉燃烧器的燃烧有多种方式。图4所示的是一般比较常见的重油燃烧器燃烧的情况。燃烧反应将经过一个复杂的过程，然而，即使极简单设想，也还要考虑如图所示的各种现象。

燃烧空气先从火焰周围向火焰内扩散，最后浸入各个油粒表面。另一方面，燃料蒸汽从油

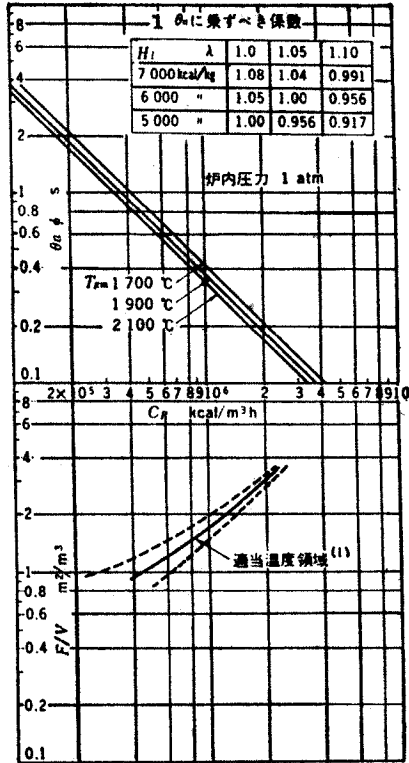


图3 液态煤粉锅炉膛燃烧各因素的关系

1-θ₀ 所乘的系数:

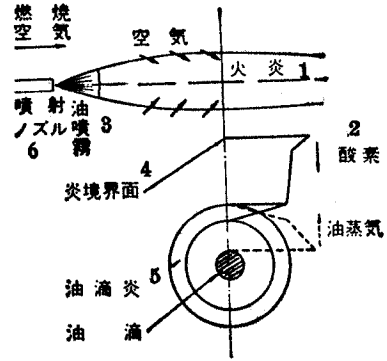


图4 油雾化的燃烧模型

1—火焰; 2—氧气; 3—油雾化; 4—火焰周界面; 5—油滴火焰; 6—喷嘴。

滴表面蒸发出来,空气和油气在混合比适当的地方按照化学反应速度进行燃烧。

如上所述,重油燃烧器的燃烧是各种现象的综合。它的燃烧过程和状况是受主要因素的相对速度的大小而大大地变化的。它的燃烬时间是受反应最迟纯的要素支配的。

2.2.1 化学反应时间

向高温空气中喷出各种液体燃料时的着火时间示于图5上。这个时间除空气流速、燃料空气比、液滴直径外,受燃料种类的影响甚微,因此,可以认为是化学反应所需要的时间,可用下式表示:

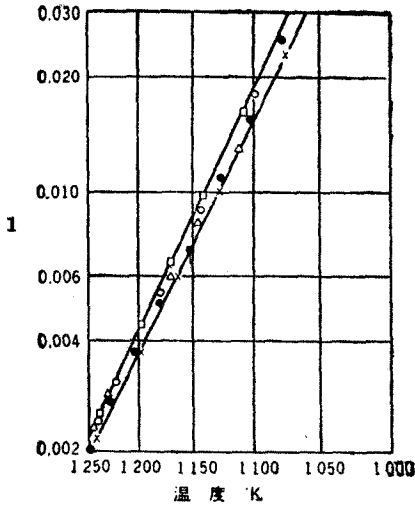
$$t_0 = 2.57 \times 10^{-8} \exp\left(\frac{22200}{T}\right) \text{ (千分之一秒)} \dots\dots\dots (1)$$

Mullins 把这个结果,同时计算液体燃料燃烧器燃烧所能达到的最大燃烧负荷为 3.9×10^9 英热单位/呎³时大气压(约 3.47×10^{10} 大卡/米³时大气压)。此外 Longwell 用他的有名的均匀搅拌器,燃烧效率 80% 时所得到的最大燃烧负荷为 4×10^8 英热单位/呎³时大气压^{1.8} (约 3.56×10^9 大卡/米³时大气压^{1.8})

由于化学反应时间极短,因此可以认为燃烧器的燃烧负荷几乎不受限制。

2.2.2 粒子的燃烧时间

对于悬浮在空气中的单一粒子的燃烧时间已有许多研究,图6、图7是其中的一例。单一粒子的燃烬时间,大致与初期粒径的二次方成比例。此时粒子的燃烬时间示为理论量的空气向粒子表面扩散所需要的时间或相当于燃料完全气化所需要的时间。以 300 微米(约 50 目)



着火时间与温度的关系	
空气流量	1474 公斤/时
燃料流量	14 公斤/时
燃料压力	45 公斤/时
直径	90 μ
炉内压力	大气压

- 煤油;
- △——四氯化苯;
- 液态氢;
- 橡胶溶剂;
- ×——合成汽油;
- 1——着火时间(秒)。

图5 化学反应时间

的粒子来看,碳粒子和煤粉粒子约1秒,轻质油为0.1~0.3秒,重油需要在炉内停留0.5秒。它们用燃烧负荷的数值来表示的话,分别为 4×10^5 、 2×10^6 、 10^8 大卡/米³时大气压。

2.2.3 紊流扩散时间

要计算空气从火焰周围向火焰中扩散进去所需要的时间是非常困难的。这里应用在静止空气中喷射高温空气的自由紊流温度扩散的规律来讨论这个问题。

在静止空气中喷射高温空气时,其射流轴心上的流速和温度变化情况如下式所示。

$$\frac{T_a - T_1}{T_n - T_1} = \frac{K}{2} \frac{1 + 2P_r}{3} \left(\frac{T_1}{T_n} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{d_n}{x} \dots \dots \dots (2)$$

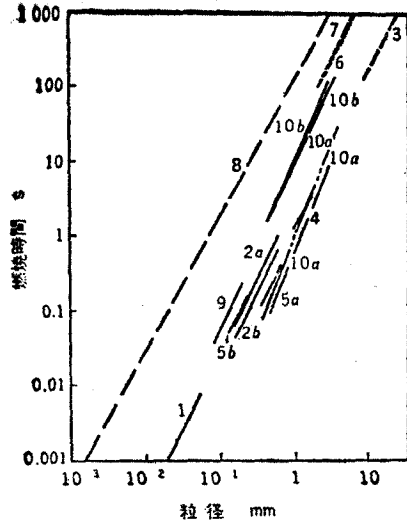
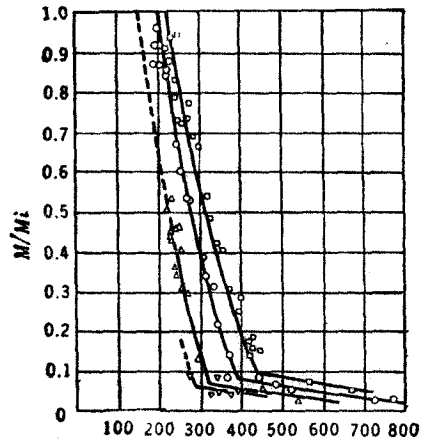


图6 单一粒子燃烬时间

- 1, 2a, 2b, 3, 4, 5a—液体燃料;
- 5b, 6, 7—固体燃料;
- 8, 9, 10a, 10b—煤粉燃料。



1 粒子炉内滞留时间 milli s

M_i (μgm)	D_i (μ)	ATM	
114.0	608	空气	□
64.2	502	空气	○
35.2	410	空气	△
23.5	358	空气	▽

图7 重油液滴的燃烧过程

1—粒子在炉内的停留时间(千分之一秒); D_i —原始粒径; M_i —粒子重量; M_t —原始粒子重量;
 T_f —火焰温度(1000 $^{\circ}$ C)。

$$\frac{u_n}{u_n} = \frac{K \left(\frac{T_1}{T_n} \right)^{\frac{1}{2}} d_n}{2 \left(\frac{T_1}{T_n} \right)^{\frac{1}{2}} x} \dots\dots\dots(3)$$

从公式(2)、(3)得知温度的时间变化,即

$$t = \frac{(1+2P_r)^2}{3b} K \left(\frac{T_1}{T_n} \right)^{\frac{1}{2}} u_n^{-1} \left(\frac{T_n - T_1}{T_a - T_1} \right)^2 d_n \dots\dots\dots(4)$$

若把温度的扩散和气流的扩散按同一规律来看待火焰的情况,则

$$\left(\frac{T_1}{T_n} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{\rho_{nf}}{\rho_{g0}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{T_g}{273} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{P_g} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{T_n - T_1}{T_a - T_1} = \frac{R + r}{R} \dots\dots\dots(6)$$

倘若上式成立的话,则

$$d_n = \sqrt{RW_F / \left(3600 \rho_{nf} \frac{\pi}{4} u_n \right)} \dots\dots\dots(7)$$

则求得火焰轴心上空气燃料比达到化学计量时的时间

$$t_i = \frac{K}{479} \left(\frac{R + r_i}{R} \right)^2 \left(\frac{1}{\rho_{g0}} \frac{T_g}{273} \frac{1}{P_g} \right)^{\frac{1}{2}} u_n^{-\frac{3}{2}} \sqrt{RW_F} \text{ (秒)} \dots\dots\dots(8)$$

式中,根据 Corsin 和 Uberoi 的资料,紊流时的当量普朗特准则数 P_r 取作 0.5。

把原先的高温喷射实验常数 $K \approx 15$ 代入公式(8)中,则

$$t_i = 3.13 \times 10^{-2} \left(\frac{R + r_i}{R} \right)^2 \left(\frac{1}{\rho_{g0}} \frac{T_g}{273} \frac{1}{P_g} \right)^{\frac{1}{2}} u_n^{-\frac{3}{2}} \sqrt{RW_F} \text{ (秒)} \dots\dots\dots(9)$$

此式中

- T ——温度 (°K)
- u ——流速 (米/秒)
- d_n ——喷嘴直径 (米)
- t ——时间 (秒)
- x ——射流喷出方向的距离 (米)
- ρ_{nf} ——从喷嘴喷出的流体密度 (公斤/米³)
- ρ_{g0} ——火焰中的烟气标准状态密度 (公斤/标米³)
- R ——从喷嘴喷出的空气和燃料之比 (公斤/公斤燃料)
- r ——每 1 公斤的扩散空气量 (公斤/公斤燃料)
- r_i ——空气燃料比达到化学计量时的所需的扩散空气量 (公斤/公斤燃料)
- W_F ——燃料流量 (公斤/时)
- t_i ——紊流扩散时间 (秒)
- T_g ——火焰的平均温度 (°K)
- P_g ——火焰的绝对压力 (大气压)
- P_r ——紊流时的当量普朗特准则数

注脚符号

- n ——喷嘴出口
- a ——射流轴心上
- 1 ——射流周围的空气

应用公式(9)时,就重油燃烧器而言, $R=1$, $\tau_i=13.5$; 就煤粉燃烧器而言, $R=3.0$, $\tau_i=4.56$, 且 $\rho_{g0}=1.3$ 公斤/标米³, $T_g=1473^\circ\text{K}$, $P_g=1$ 大气压, 计算 t_i 后, 作成图 8 那样的线图。在 $W_F=100\sim 1000$ 公斤/时的范围内, 重油的 $t_i=0.5\sim 1.7$ 秒左右, 煤粉的 $t_i=0.00\sim 0.29$ 秒。

上述情况的重油 $t_i=0.5\sim 1.7$ 秒与前面研究的单一粒子燃烬时间为 $0.3\sim 0.5$ 秒(原始滴径为 300 微米——约 50 目)比较相差太大。这里计算所用的例子空气流速很低, 除了特殊的工业炉, 一般是不用的。紊流扩散时间是支配粒子燃烧时间进而控制燃烧负荷的重要因素。

至于煤粉燃烧器, 除了 $W_F\cong 5000$ 公斤/时以上的燃烧器, 由于紊流扩散时间跟不上单一煤粉粒子(300 微米——约 50 目)的燃烧时间, 它就成了支配火焰燃烬程度的因素。

2.2.4 燃烧器燃烧时的燃烧负荷极限

从上述的情况来看, 锅炉及工业炉燃烧器的燃烧情况, 就重油或气体燃烧器而言, 燃料和空气的紊流扩散速度支配着燃烧负荷, 最初作为加快紊流扩散速度的方法, 是提高空气的流速, 但是由于调风器压损大, 空气流速不宜太高, 因此重油燃烧器、气体燃烧器的燃烧负荷与调风器压损有一定的关系。图 9 是按 Brown 得出的燃烧负荷与调风器压损的关系。燃烧负荷与调风器压损大致成比例关系。

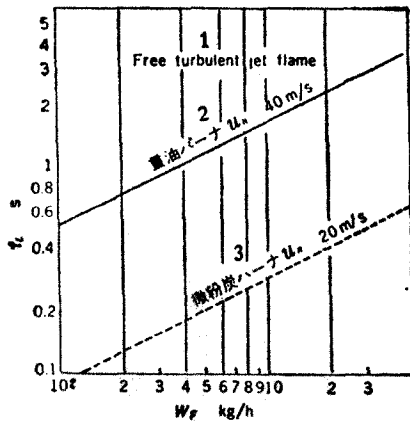


图 8 空气的紊流扩散时间
1—自由紊流喷射火焰; 2—重油燃烧器;
3—煤粉燃烧器。

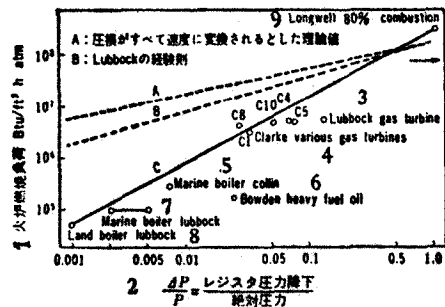


图 9 重油燃烧器的燃烧负荷与调风器压损的关系

1—炉膛燃烧负荷 英热单位/呎²时大气压; 2—调风器压降/绝对压力 = $\Delta P/P$; 3—Lubbock 燃气轮机; 4—Clarke 各种燃气轮机; 5—Collin 船用锅炉; 6—Bowden 重油; 7—Lubbock 船用锅炉; 8—Lubbock 陆用锅炉; 9—Longwell 80% 燃烧; A—压损随速度变化的理论值; B—Lubbock 的经验准则。

可以认为, 煤粉燃烧器的单一粒子的燃烧时间支配着燃烧负荷。若已知最大粒径的燃烧时间, 则就可由图 2 得出燃烧负荷的极限值。

3. 锅炉及工业炉燃烧器的燃烧

由于锅炉和工业炉燃烧器的布置及其形式繁多, 因此必须考虑一下各种燃烧机理的差异性。例如, 图 10 上所示的各种燃烧方式中 B 和 D 的空气和燃料的混合是在炉内依靠互相碰撞进行搅拌的。A 和 C 是依靠空气和燃料的紊流扩散进行混合的。可以认为前者的方式, 由于空气和燃料的混合很快, 重油及煤粉粒子可以看作悬浮在空气中进行燃烧的。而后者, 重油及气体的燃烧如上所述的那样, 紊流扩散速度是支配燃烧的因素, 因此属于紊流扩散火焰。

3.1 燃烧器燃烧的基础研究

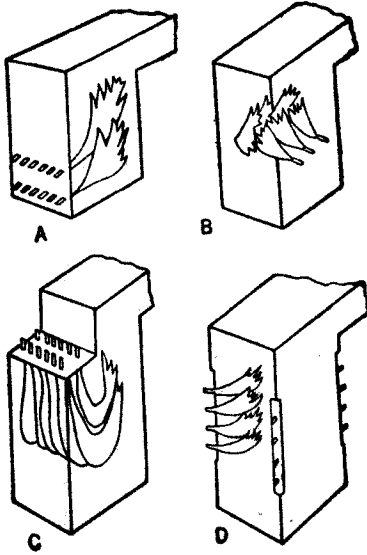


图10 燃烧方式

- A—水平燃烧;
- B—对冲燃烧;
- C—顶部燃烧;
- D—切向燃烧

由于多数学者把重油和气体的燃烧作为紊流扩散火焰来研究的。这里归纳一些研究结果，导出燃烧器燃烧的基本公式。

首先，在初始静止的大气中的紊流扩散火焰(即自由紊流喷射)的长度 \bar{L}_f 可从公式(3)和(8)求得：

$$\bar{L}_f = \frac{K}{1.59} \times 10^{-3} \left(\frac{R + r_1}{R} \right) \left(\frac{1}{\rho_{g0}} \frac{T_g}{273} \frac{1}{P_g} \right)^{\frac{1}{2}} u_n^{-\frac{1}{2}} \sqrt{RW_F} \text{ (米)} \dots\dots\dots (10)$$

或者，

$$\bar{L}_f = \frac{K}{2.98} \times 10^{-4} \left(\frac{1}{\rho_{g0}} \frac{T_g}{273} \frac{1}{P_g} \right)^{\frac{1}{2}} (R + r_1) \frac{W_F}{\sqrt{G}} \text{ (米)} \dots\dots\dots (11)$$

式中， G 是喷嘴喷出的射流推力 (公斤)。

从前沢和 Cude 的实验结果来看，公式(10)和(11)中的系数为：

$$\frac{K}{2.98} \left(\frac{1}{\rho_{g0}} \frac{T_g}{273} \right)^{\frac{1}{2}} \times 10^{-4} \approx 1.8 \times 10^{-3} \dots\dots\dots (12)$$

此值是适当的。再又 Szablewski 分析了 H. Rouse 等所使用的小火焰实验的结果， P_r 可取为1。以 $P_r=1$ 试算时，式(11)中的分母 2.98 改成 1.98，假定式(12)中 $K=15$ ， $\rho_{g0}=1.3$ 公斤/米³， $T_g=1773^\circ\text{K}$ 时，则左边数值为 1.7×10^{-3} 与前沢和 Cude 的实验数值基本上是一致的，因此 \bar{L}_f 可写成如下公式：

$$\bar{L}_f = 0.34 \left(\frac{R + r_1}{R} \right) \left(\frac{1}{P_g} \right)^{\frac{1}{2}} u_n^{-\frac{1}{2}} \sqrt{RW_F} \text{ (米)} \dots\dots\dots (13)$$

或者，

$$\bar{L}_f = 1.8 \times 10^3 (R + r_1) \left(\frac{1}{P_g} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{W_F}{\sqrt{G}} \text{ (米)} \dots\dots\dots (14)$$

其次，再来考虑火焰扩散角。关于公式(13)和(14)的情况，燃料是从圆筒形喷嘴直线喷出来的。它的扩散角约为 20° 。使用旋流式喷嘴或多孔喷嘴，燃料喷出后带有一定的扩散角。倘若

将火焰扩散角 θ 的影响与圆筒形喷嘴同样看待的话,则

$$\begin{aligned} \bar{L}_f &= 0.34 \frac{\sqrt{\pi \tan 10}}{\sqrt{\pi \tan \frac{\theta}{2}}} \left(\frac{R+r_l}{R} \right) \left(\frac{1}{P_g} \right)^{\frac{1}{2}} u_n^{-\frac{1}{2}} \sqrt{RW_F} \\ &= \frac{0.06}{\tan \frac{\theta}{2}} \left(\frac{R+r_l}{R} \right) \left(\frac{1}{P_g} \right)^{\frac{1}{2}} u_n^{-\frac{1}{2}} \sqrt{RW_F} \text{ (米)} \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

或者

$$\bar{L}_f = \frac{0.318 \times 10^{-3}}{\tan \frac{\theta}{2}} (R+r_l) \left(\frac{1}{P_g} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{W_F}{\sqrt{G}} \text{ (米)} \dots\dots\dots (16)$$

对锅炉和工业炉的燃烧器燃烧而言,也就是说在封闭炉膛中的火焰和在大气中喷出的火焰情况是不相同的,过量空气系数是限定的,且燃烧用空气以很高速度从燃烧器里旋转地喷出来。可是,有关这种情况的火焰长度的研究极少。但仅取用 Cude 的实验研究结果来推导火焰长度的计算公式。据 Cude 的研究,这种情况的火焰长度 L_f 和自由紊流喷射的火焰长度 \bar{L}_f 的关系以如下的实验式来表示。

$$\log \frac{L_f}{\bar{L}_f} = 0.4 \log \left(\frac{W_F u_n}{W_a u_a} \right) + 0.03 \pm 0.065 \dots\dots\dots (17)$$

但是, $\frac{W_F u_n}{W_a u_a} \leq 1$ 。

又如过量空气系数的影响如图 11 所示那样。则从公式(16)和(17)得到:

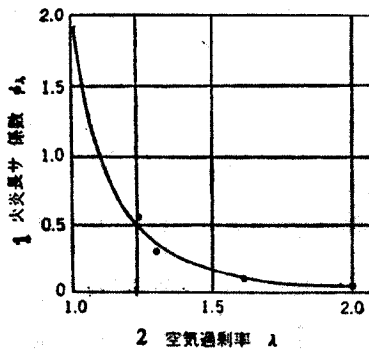


图 11 过量空气系数对火焰长度的影响
1—火焰长度系数 ϕ_λ ; 2—过量空气系数 λ 。

$$L_f \approx 0.06 \frac{1 + \phi_\lambda}{\tan \frac{\theta}{2}} \left(\frac{u_n}{M_a u_a} \right)^{0.4} \left(\frac{R+r_l}{R} \right) \left(\frac{1}{P_g} \right)^{\frac{1}{2}} u_n^{-\frac{1}{2}} \sqrt{RW_F} \text{ (米)} \dots\dots\dots (18)$$

或者

$$L_f \approx 0.318 \times 10^{-3} \frac{1 + \phi_\lambda}{\tan \frac{\theta}{2}} \left(\frac{u_n}{M_a u_a} \right)^{0.4} (R+r_l) \left(\frac{1}{P_g} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{W_F}{\sqrt{G}} \text{ (米)} \dots\dots\dots (19)$$

最后,还必须考虑空气旋转的影响。由于至今未曾看到有关这方面的资料,因此,用实验

系数 ξ 来表示,于是得到了如下公式:

$$L_f \approx 0.06 \xi \frac{1 + \phi_\lambda \left(\frac{u_n}{M_a u_a} \right)^{0.4} \left(\frac{R + r_i}{R} \right) \left(\frac{1}{P_g} \right)^{\frac{1}{2}} u_n^{-\frac{1}{2}} \sqrt{RW_F} \quad (\text{米}) \dots \dots \dots (20)$$

或者

$$L_f \approx 0.318 \times 10^{-3} \xi \frac{1 + \phi_\lambda \left(\frac{u_n}{M_a u_a} \right)^{0.4} (R + r_i) \left(\frac{1}{P_g} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{W_F}{\sqrt{G}} \quad (\text{米}) \dots \dots \dots (21)$$

但是, $\frac{u_n}{M_a u_a} \leq 1$ 。

[若 $\frac{u_n}{M_a u_a} > 1$ 时, $\left(\frac{u_n}{M_a u_a} \right)^{0.4}$ 这项为 1]。燃料从喷嘴喷出流速用 u_n 表示,喷射压力为 ΔP_f ,喷嘴的流量系数为 C_m ,收缩系数为 C_c ,中空系数为 K 。

$$u_n = \frac{C_m}{C_c} \sqrt{2g \frac{\Delta P_f}{\rho_{n,f}}} \times 10^4 \quad \text{或} \quad u_n = \frac{C_m}{1 - K^2} \sqrt{2g \frac{\Delta P_f}{\rho_{n,f}}} \times 10^4 \dots \dots \dots (22)$$

公式(10)~(22)的符号说明如下:

- L_f ——锅炉和工业炉紊流扩散火焰长度 (米)
- θ ——火焰着火区的扩散角 (度)
- u_n ——燃料从喷嘴喷出的速度 (米/秒)
- u_a ——空气喷出流速 (米/秒)
- R ——喷嘴喷出的空气与燃料之比 (公斤/公斤燃料)
- r_i ——空气燃料比达到化学计量时所必需的过量空气量 (公斤/公斤燃料)
- W_a ——从喷嘴周围喷出的空气量 (公斤/时)
- M_a ——每公斤燃料所需要的空气量 (公斤/公斤燃料)
- W_F ——燃料量 (公斤/时)
- G ——喷嘴喷出的射流推力 (公斤)
- P_g ——火焰的绝对压力 (大气压)
- ξ ——表示旋转气流的实验系数
- ϕ_λ ——由图 11 而得的过量空气系数影响的系数
- ΔP_f ——喷嘴的有效喷射压力 (公斤/厘米²)
- $\rho_{n,f}$ ——喷嘴喷出的流体密度 (公斤/米³)
- C_m ——喷嘴的流量系数
- C_c ——喷嘴的收缩系数
- K ——旋流式喷嘴的中空系数

对于重油燃烧器而言:

(1) 压力式喷嘴

旋涡式压力雾化, $K = 0.60, C_m = 0.405, R = 1, \Delta P_f = 20$ 公斤/厘米², $\rho_{n,f} = 900$ 公斤/米³。

(2) 燃烧用空气

$r_i = 13.5$ 公斤/公斤燃料, 过量空气系数 $\lambda = 1.1, \phi_\lambda \approx 1.0, M_a = 13.5 \times 1.1 \approx 15$ 公斤/公斤燃料, $u_a = 40$ 米/秒。

(3) 火焰扩散角

油雾化扩散角为 74° ，火焰扩散角约为 80° ($P_g = 1$ 大气压)。

以上述数据代入公式(20)中来计算时,则得

$$L_f = 0.111\xi\sqrt{W_F} \text{ (米)} \dots\dots\dots (23)$$

即使取 $\xi = 1$,如上所述,由公式(23)所得的值大致上是恰当的。因此,同时把公式(20)和(21)应用到燃烧器燃烧方面,可归纳成如下几点:

(1) 为了缩短火焰长度,可以采取增大 u_n, u_a 和火焰扩散角的方法。增大 u_n 的效果不明显,还是增大 u_a 有显著效果。单纯缩短火焰长度的效果是片面的,它还有增大火焰直径的作用。这样,火焰容积反而变大,不适宜于高负荷燃烧。

(2) 就单只燃烧器而言,借助降低压力来改变流量的办法,空气速度也要成比例地降低,而使火焰长度保持不变。然而,实际上考虑到着火稳定性,空气速度不能降得太低,所以火焰长度缩短了。

(3) u_n, u_a 在一定的条件下,火焰长度与燃烧器容量的平方根成比例。

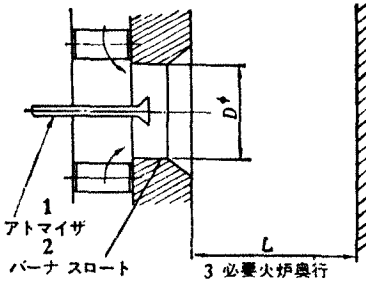


图12 重油燃烧器的结构示意图

- 1—雾化器; 2—燃烧器喉口;
- 3—必要的炉膛深度。

3.2 燃烧器燃烧的实例

3.2.1 调风器

就锅炉和工业炉燃烧器而言,怎样推定火焰长度是令人感兴趣的。水平布置的重油燃烧器的燃烧情况,其燃烧器结构形式一般如同图12所示的一样。对于这种燃烧器所必需的炉膛深度、喉口直径及燃烧器之间距离,把几家燃烧器制造厂的数据,在同样的条件下进行比较,所得到的数据见图13。此炉膛深度考虑了若干裕度,以便有些伸缩余地。按公式(23)计算得到的数值,逐点画在图上,与各厂家资料大致是相符合的。燃烧器喉口直径、燃烧器之间距离和喉口直径与各厂的数据相比也很接近。调风器压损一般取为150毫米水柱左右,所以喉口处的空气平均流速约为40米/秒。

由于 L 与 $B^{\frac{1}{2}}$ 成比例, D 与 $B^{\frac{1}{2}}$ 成比例,因此炉膛所需要的容积 V 与 $B^{\frac{3}{2}}$ 成比例。燃烧负荷 C_R 也就与 $B^{\frac{1}{2}}$ 成比例。这种燃烧器的燃烧情况(即受紊流扩散支配的燃烧负荷的极限)与单只燃烧器容量的平方根成比例地增加。所以,大容量锅炉和工业炉大多采用数量多而容量小的燃烧器,这样对于高负荷燃烧是有利的。

调风器的另一重要作用是稳定火焰的着

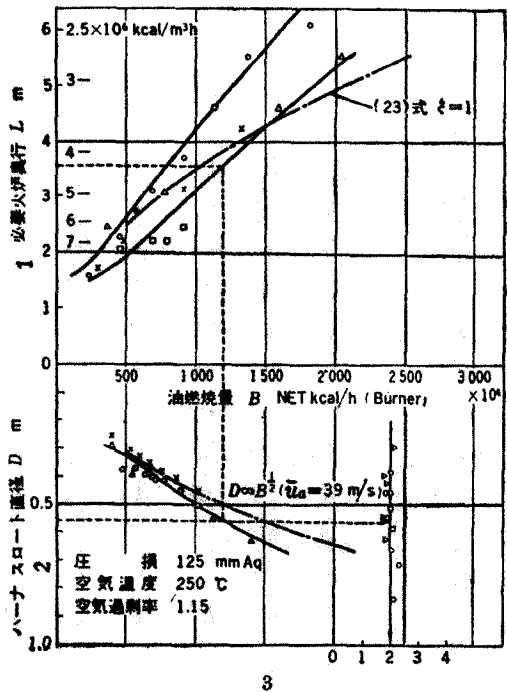


图13 重油燃烧器的燃烧特性曲线

- 1—必要的炉膛深度 L (米); 2—燃烧器喉口直径 D (米);
- 3—燃烧器间距 C / 燃烧器喉口直径 D 。

火。油雾的着火被认为是油雾中极细微的粒子或气化了油质和空气在混合比适当的地方开始着火。油质的火焰传播机理(即火焰传播速度)可以设想与气体火焰的情况相类似。由于重油从燃烧器喷出的速度与燃烧器周围的空气速度是以每秒多少米的高速喷出来的,比火焰传播速度快得多。因此为了得到稳定的着火面,显然要在着火区想些办法。首要的是降低火焰根部的喷射速度,或者,通常在着火区设置稳定的着火源。为此目的,重油燃烧器一般使用如图 14 所示那样的稳焰器,其装在靠近喷嘴的地方。一方面不使油雾直接受到高速空气流的冲刷;同时另一方面在着火区供给部分必要的低速空气。此外,还可借遮板或旋转叶片后面产生的涡流作为油雾着火的稳定源泉。因此,作为稳焰器的最主要的措施是组织有效的稳定涡流,特别是在低负荷时尤为重要。限制燃烧器使用下限的是调风器性能,而不是雾化器性能。在低负荷时,随着空气速度的降低,涡流消失,着火就显得不稳定,是其主要原因。为此,想把空气速度保持恒定,但由于结构复杂化,没有得到推扩。此外,防止折碳和火焰辐射热的措施,当然也是要求稳焰器来解决的重要事情。

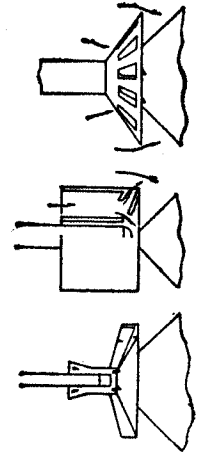


图 14 稳焰器实例

3.2.2 雾化器

要求重油燃烧器的雾化器性能不亚于调风器性能,当然是得到极细微的油粒,它的极限值并不是那样容易说得清楚的。作为雾化器的一个基准是它所产生的油粒所需要的燃烬时间和前述的向火焰供给空气的紊流扩散时间大致相同。以这样的观点来研究雾化器的性能。

由雾化器所产生的油雾粒径对压力雾化式而言,如下式所示:

$$S.M.D = K \cdot \Delta P_f^m (FN)^n \dots\dots\dots (24)$$

$$FN = \frac{Q}{\sqrt{\Delta P_f}} \propto C_m \left(\frac{\pi}{4} d_n^2 \right) \sqrt{\frac{2g}{\rho_{nf}}} \dots\dots\dots (25)$$

- $S.M.D$ ——索太尔平均直径 (微米)
- ΔP_f ——有效紊射压力 (磅/吋²), (公斤/厘米²)
- FN ——流量数 (加仑/小时/ $\sqrt{\text{磅/吋}^2}$)
- Q ——喷油量 (加仑/时——给定的)
- C_m ——喷嘴流量系数
- d_n ——喷孔直径 (吋)
- ρ_{nf} ——油密度 (磅/呎³)
- K, m, n ——试验常数

式中 K 是油粘度、表面张力等的函数, m, n 值不一定是常数。根据 J. S. Clarke 资料以 2~15 厘沱 (1.1~2.37°E) 粘度的油, $S.M.D$ 与 FN 的关系示于图 15。

但是,供给火焰的空气紊流扩散时间,考虑到火焰扩散角、过量空气系数、空气速度的影响,仅是图 8 上所示值的 $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{3}$ 。以雾化的最大粒径作为 $S.M.D$ 的二倍左右来计算它的燃烬时间。把两者相同的点,汇集到表 2 上。一方面,求得的喷射压力和喷油量、 FN 的关系示于图 15 上,对应于表 2 上各点连成一条线,根据此线就可以知道压力喷射式雾化器的使用下限。可以设想,作为雾化器的条件是尽量使粒径均匀,为方便起见,规定了最低的油压。

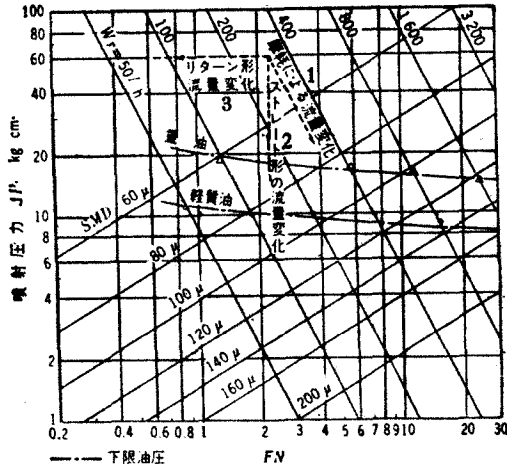


图 15 雾化器的特性曲线

1—磨损后的流量变化； 2—简单式的流量变化； 3—回流式的流量变化。

油雾化颗粒临界直径

表 2

喷油量	升/时	5	100	200	400	800	1600	3200
紊流扩散时间	微秒	61	86	120	170	240	350	500
索太尔临界平均直径 (轻油)	微米	68	81	96	110	140	160	190
索太尔临界平均直径 (重油)	微米	51	61	72	86	100	120	150

简单式的压力雾化、喷射压力和喷油量的关系是沿着 $FN = \text{常数}$ 变化的。回流式的压力雾化是随着 $\Delta P_r = \text{常数}$ 变化的。前者的调节范围是根据设计的最高油压规定的；相反，后者的调节范围是根据设计的最大油量规定的。

利用图 15 作为调换喷嘴磨损的基准时，自然取决于它所要求的调节范围。

4. 结论

明确了燃烧器燃烧的要点后，提出下述各点新的设想：

(1) 炉膛各因子的函数关系

注意了燃烧烟气在炉内平均停留时间、燃烧负荷、火焰温度、炉膛形状系数之间存在的函数关系。汇集了理论性研究和实际试验的调查结果。对重油炉、固态煤粉炉、液态煤粉炉提出合理地确定炉膛尺寸的特性线图。

(2) 火焰长度

为使炉膛尺寸和火焰长度相适宜，对火焰长度进行了分析，并把它应用于重油燃烧器。导出了折入试验值的实用性的火焰长度计算公式。此式说明重油火焰的空气和油雾的混合速率不如雾化粒子的蒸发速度快。根据多数学者的研究结果，基于喷射理论推导出来的公式，能够很好地说明实验结果，且能合理确定燃烧所需要的炉膛深度。

(3) 喷射压力

给出了压力雾化式重油雾化器喷射压力的合理决定方法。由于考虑到空气和油雾混合所需要的时间跟油雾粒子蒸发燃烧时间是大致相同的，因此决定了油雾的极限粒径，并提出它和

雾化器的雾化特性曲线,同时提出了不同容量所需要的喷射压力的特性线图。

以上是目下从基础理论性或实验性出发对燃烧研究并提出了一些大胆的假定,并探求把这两者联系有关的问题。

本文仅作炉膛燃烧的各个因素的研究的参考,但还是有局限性的。况且旋转气流对燃烧器燃烧情况的影响仍有待于研究。有关旋转气流和 $\tan\frac{\theta}{2}$ 关系的实验和分析可以参阅最近 Kerr 的实验。倘若 $\tan\frac{\theta}{2}$ 可取用推算的结果,则公式(20)更可以简化了。

此外,目前正在进行锅炉重油燃烧方面的实验研究,其结果将在今后继续发表结果。

(上海锅炉厂研究所 田子平、张雅蔚译自《Mitsubishi
Technical Bulletin》1966, No37)

西班牙烧劣质煤的经验

西班牙北部(Ouiedo 附近)的 Soto de Ribera 热电厂 1 号锅炉是由美国燃烧工程公司供应的。该锅炉设计能烧挥发物 6~19%，水份 14~22%，灰份 28.5~45% 的煤。锅炉正常满负荷出力约为 266 吨/时，过热器出口压力为 95 公斤/厘米²，温度为 535°C。锅炉装有四台燃烧工程公司的碗式磨煤机，每台磨煤机供四只立式燃烧器用的煤粉。立式燃烧器布置在前后拱上面(图 1)。

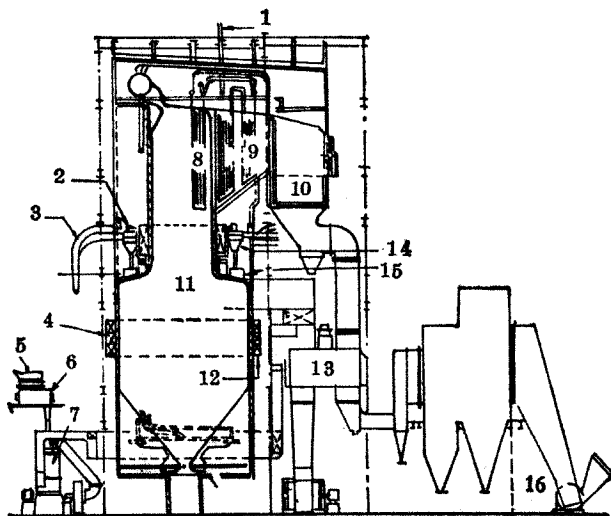


图 1 266 吨/时锅炉总剖面图

1—主蒸汽管； 2、14—旋风分离器； 3—煤粉管道； 4—前墙风室； 5—煤斗； 6—给煤机； 7—碗式磨煤机； 8—低温过热器； 9—高温过热器； 10—省煤器； 11—炉膛； 12—后墙风室； 13—空气预热器； 15—立式燃烧器； 16—引风机。

1 号机组在 1962 年开始运行。开始时需要烧很多种类的煤(表 1)。由于给煤机进口煤质无法控制而多变，造成锅炉及磨煤机的运行问题。

很清楚各种煤如能均匀混和就能改善这一情况。假使通过合理的混合，混煤能代表各种最好的性质，则必然可获得较好的运行结果。

燃煤时的锅炉参数

空气控制：一台锅炉如需成功地燃无烟煤，同时又能成功地燃烟煤，则进风量的控制必须是灵活的。因为煤粉进入炉膛内所需进风量，随煤质不同而异。与燃烧有关的进风量可分为五种：即输送风、一次风、旋风分离器排出风、二次风及三次风。

输送风：输送风将煤粉由磨煤机带至燃烧器，其速度不能低于 16 米/秒，否则即在管道内发生沉积，同时也不能大于 28 米/秒，否则管道即产生磨损。

煤 质

表 1

煤 种	A	B	C	D	E	F	G	H ₁	H ₂	I ₁	I ₂	I ₃	
颗 粒 度	0~12 毫米	细	细	粗	粗	0~12 毫米	粗	0~15 毫米	粗	0~20 毫米	0~12 毫米	粗	
取样日期	1958.10	1964.7	1964.7	1964.7	1964.7			1965.6	1963.8	1965.3	1958.11	1958.11	
工业分析%	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	
表面水份%	(1.6)	(2.95)	(1.59)	(1.36)	(0.95)	(1.05)	(1.24)	(1.09)	(1.17)	(1.06)	(1.42)	(1.82)	
灰 份	35	39.7	39.7	52	42	8.92	34.61		45.09	42.4	26.1	9.55	
挥 发 物	20	6.8	20.4	20.2	20.9	30.48	25.02		19.60	9.15	8.35	8.32	
固 定 碳	45	53.5	39.9	27.8	37.1	60.6	40.37		35.31	48.45	65.55	82.13	
元素分析%	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	
碳	51.5	54.53	46.3	36.08	45.5	78.13	52.99		49.9	49.60	64.28	81.09	
氢	3	1.20	3.48	3.08	3.22	4.87	3.55		3.02	2.10	2.74	2.96	
氮	1	0.33	0.86	0.68	0.85	1.52	1.03	0.95	0.96	0.70	0.93	1.00	
总合硫量	1.22	1.10	1:11	0.46	0.62	0.98	1.02	1.02	1.46	1.58	1.44	1.32	
氧	2.9	3.19	8.55	9.70	8.26	5.58	6.80		5.75	3.62	2.47	4.08	
辅助分析%	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	干燥基	
黄铁矿硫		0.49	0.20	0.17	0.46	0.33	0.59		0.99	1.02		0.54	
有 机 硫		0.59	0.34	0.25	0.31								
硫酸盐含硫		0.16	0.08			0.03	0.50		0.0108			0.02	
固 定 硫	0.26	0.26	0.041	0.02	0.14	0.15	0.18		0.18	0.36	0.55	0.76	
CO ₂	1.03	1.46			0.78	1.10			1.37		1.76	0.42	
Cl	0.113	0.013	0.033	0.04	0.032	0.211	0.11	0.08	0.051	0.06	0.026	0.20	
P		0.016	0.029	0.039	0.043	0.014	0.025		0.063	0.028		0.32	
As												0.061	
灰份分析													
总合硫量(SO ₂)%	2	1.60	2.42	0.12	0.75	4.2	1.30		1	2.10	5.55	10.99	
SiO ₂ %	50	44.56	50.35	51.98	50.45	38.20	48.47	50.88	49.22	52.2	45.16	26.15	
Al ₂ O ₃ %	31.5	33.12	31.34	35.35	38.85	32.13	31.66	31.91	31.23	26.51	27.60	16.67	
Fe ₂ O ₃ %	8.7	6.93	9.15	4.76	3.61	13.13	7.88	8.05	7.61	6.88	8.40	15.25	
CaO %	3.35	4.92	0.38	1.29	9.77	5.20	4.24	2.79	2.90	4.98	8.20	20.18	
MgO %	1.2	1.75	2.53	2.72	1.85	2.15	3.02		2.03	1.78	2.19	1.93	
T ₁ °C	1080	1130	1080	1170	1130	1080	1040	1000	1200	1050	1085	920	
T ₂ °C	1360	1240	1440	1430	1420	1240	1410	1400	1430	1340	1260	1060	
还原气氛T ₃ °C	1435	1420	1440	1430	1400	1390	1460	1500	1490	1400	1330	1090	
干燥基高发热量 卡/度	5473		4880	3700	4900	7860	5220	4900	4340	4617	6250	7500	
灰 {	膨胀指数	2.5	2.5			9	1						
	碱金属 N ₂ O	0.66	1.11	0.44	0.43	0.46		0.61	0.46	0.53	0.86	0.54	1.84
	K ₂ O	3.52	4.61	4.28	4.70	4.58		4.60	4.30	4.62	3.92	2.48	0.06

一次风：一次风是输送风的一部份。这部份风随同煤粉进入炉膛，一般占总风量的5~15%。

旋风分离器排出风：旋风分离器排出风是从空气——煤粉混合物中分离出来的。这样当燃挥发物小于12~14%的煤时，可使一次风煤粉含量浓一点。当燃挥发物大于12~14%的煤时，就不需要减少输送风。因为在这种情况下火焰推进速度(图2和图3)对正常的空气——燃料比来说是足够的快了(一次空气重量与燃料重量之比为1.5~4倍)。这种可调整的由旋风分离器排出的空气量当燃挥发物6%的煤时为最大。而当燃挥发物为12~14%的煤时，这一