

新型煤粉燃烧器

XINXING MEIFEN
RANSHAOQI

胡荫平 贾鸿祥 编

西安交通大学出版社

封面设计 方 黎



ISBN7-5605-0615-1/TK · 49

定价: 9.80 元

新型煤粉燃烧器

胡荫平 贾鸿祥 编

西安交通大学出版社

内容提要

本书从煤的着火和燃烧特性出发,较详细地介绍了浓淡燃烧器、钝体燃烧器、火焰稳定器、旋流燃烧器、预燃室燃烧器及其它新型煤粉燃烧器的结构、工作原理和设计、运行及试验研究方面的经验。本书可作为锅炉制造、电厂热能动力等专业本科和专科学生的选修课教材,也可供燃煤火力发电厂和燃烧设备制造厂从事设计和运行维修的工程技术人员以及有关试验研究单位的科研人员参考。

(陕)新登字 007 号

新型煤粉燃烧器

胡荫平 贾鸿祥 编

责任编辑 马晓士 早雪

*

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路 28 号 邮政编码 710049)

西安市凯色林印刷厂印装

陕西省新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 9.875 字数:236 千字

1993 年 12 月第 1 版 1994 年 4 月第 1 次印刷

印数:1—2000

ISBN7-5605-0615-1/TK·49 定价:9.80 元

前 言

近年来,我国出现了多种新型煤粉燃烧器。它们对于稳定燃烧、扩大电站锅炉的煤种适用范围、增大电网的调峰能力、减少锅炉启动和低负荷稳燃用油、降低 NO_x 排放量,都有一定效果。从国外引进的发电设备中,也有若干先进的燃烧设备,消化和吸收这些技术,将有助于提高我国电站锅炉的制造和运行水平。

本书除了介绍新型煤粉燃烧器的结构外,对于它们的工作原理、使用情况及存在问题也作了阐述。为了增强实用性,书中尽量减少繁琐的描述和复杂的理论推导,读者只需具有锅炉原理的基本知识,就不难理解本书的内容。

本书 § 1-4 和第六章由西安交通大学贾鸿祥编写,其余由沈阳电力高等专科学校胡荫平编写。贾鸿祥对全书作了修改和润色。

电力部西安热工研究所教授级高级工程师许传凯同志担任本书主审,编者对他提出的宝贵意见,表示衷心感谢。

除书末所附参考文献外,作者在编写时还参考了一些资料,恕难一一详列,在此谨向有关专家致谢。

限于编者水平,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

1993. 8. 12.

目 录

前言

第一章 绪论

§ 1-1 煤的着火和燃烧特性	(1)
§ 1-2 劣质煤的种类	(9)
§ 1-3 煤粉气流的着火	(10)
§ 1-4 新型煤粉燃烧器的种类及应用情况	(13)

第二章 浓淡燃烧器

§ 2-1 浓淡燃烧器的工作原理	(17)
§ 2-2 WR 燃烧器	(20)
§ 2-3 PM 燃烧器	(27)
§ 2-4 W 型火焰燃烧技术	(30)
§ 2-5 旋流叶片煤粉浓缩燃烧器	(42)

第三章 钝体燃烧器

§ 3-1 钝体稳燃火焰的机理	(49)
§ 3-2 钝体燃烧器的结构	(53)
§ 3-3 钝体燃烧器的运行	(60)

第四章 火焰稳定船燃烧器

§ 4-1 结构和工作原理	(66)
§ 4-2 火焰稳定船燃烧器的应用	(70)

第五章 夹心风燃烧器

§ 5-1 夹心风燃烧器的工作原理	(72)
§ 5-2 夹心风燃烧器的空气动力参数和结构参数	(77)
§ 5-3 夹心风燃烧器的应用情况	(79)

第六章 预燃室燃烧器

§ 6-1 带扩展段烟煤预燃室燃烧器	(83)
§ 6-2 带根部风烟煤预燃室燃烧器	(92)
§ 6-3 渐扩型烟煤预燃室燃烧器	(97)
§ 6-4 全直流型烟煤预燃室燃烧器	(100)
§ 6-5 可调旋流烟煤预燃室燃烧器	(103)

§ 6-6 其它类型烟煤预燃室燃烧器	(104)
§ 6-7 贫煤、劣质烟煤预燃室燃烧器	(107)
§ 6-8 无烟煤预燃室燃烧器	(118)
§ 6-9 预燃室燃烧器的设计与应用	(120)

第七章 其它类型燃烧器

§ 7-1 大速差射流燃烧器	(124)
§ 7-2 扁平射流燃烧器	(131)
§ 7-3 犁形燃烧器	(137)
§ 7-4 分流型驻涡燃烧器	(140)
§ 7-5 偏置射流燃烧器	(141)
§ 7-6 PAX 型燃烧器	(145)

主要参考文献

第一章 绪 论

§ 1-1 煤的着火和燃烧特性

煤的着火和燃烧特性是煤的燃烧化学反应能力的表征。除了影响煤粉气流的着火快慢之外,它还在很大程度上决定了煤粉颗粒在炉膛内的燃烬程度,即飞灰中可燃物含量的大小。

煤的着火及燃烧特性可用常规特性指标和非常规实验室指标来表示。前者包括挥发分、水分、灰分、发热量、焦渣特性及灰熔点等。这些指标反映了煤的基本性质,也是发电厂的常规煤质分析指标。它们对煤粉着火与燃烧过程的影响是大家公认的。后者包括反应指数、熄火温度、可燃性指数等等。它们可以更直接地反映煤的燃烧性能。但是,对这些指标进行分析是很费时的的工作,使用的设备也较复杂,而且它们的规范性很强,只有在相同的条件下使用同样的方法、甚至只有在同一实验室中得出的结果才有可比意义,这就使它们的使用范围受到很大限制。

一、 常规特性指标

1. 挥发分

挥发分是煤在加热过程中释放出来的气态物质,它在较低的温度下就能着火燃烧。挥发分燃烧释放的热量对焦炭进行加热,使后者随之着火燃烧。此外,挥发分析出后,固态残留物——焦炭变得疏松多孔,增大了反应面积,使之更易于燃尽。

为了避免因燃料灰分和水分变动而影响挥发分的量值,常用可燃基含量 $V^r(\%)$ 的数值来表示挥发分的大小。 V^r 随着燃料煤化程度的提高而降低,这一点正是各国对煤进行分类的重要依据。煤化程度越深,燃料的可燃基挥发分 $V^r(\%)$ 越小,含碳量 $C^r(\%)$ 越高。 V^r 与 C^r 的关系可用下式近似表示:

$$V^r = -33 + 3.8C^r - 0.036(C^r)^2, \% \quad (1-1)$$

表 1-1 我国煤种的挥发分发热量

煤 种	应用基挥发分 $V^a, \%$	煤的应用基低位发热量 $Q_{dw}^a, \text{MJ/kg}$	挥发分发热量 $Q_a, \text{MJ/kg}$	挥发分的应用基发热量 $Q_{dw}^a, \text{MJ/kg 煤}$	$\frac{Q_a^v}{Q_{dw}^a}, \%$
褐 煤	21.48	12.0	23.4	5.1	42.5
烟 煤	18.54	18.1	38.6	7.2	39.8
劣质烟煤	13.06	13.5	41.0	5.4	40.0
贫 煤	7.94	18.8	47.6	3.8	20.2
无 烟 煤	5.60	27.2	58.9	3.3	12.1

挥发分产率不仅与煤种有关,还与热分解时的加热速率、最终温度、加热时间、环境气氛等因素有关。一般来说,快速加热和较高的加热终温以及加热的持续时间长,得到的挥发分产率就较高。GB-212-77 规定,取 1g 分析煤样置于规定的坩埚内,在温度 $900 \pm 10^\circ\text{C}$ 的炉子里隔

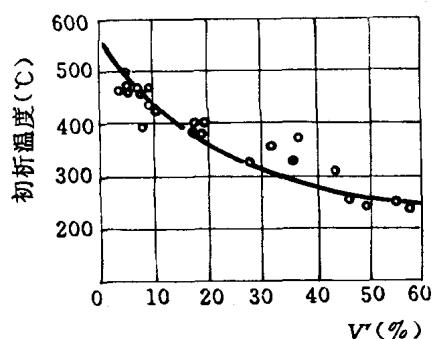


图 1-1 挥发分初析温度与可燃基挥发分的关系

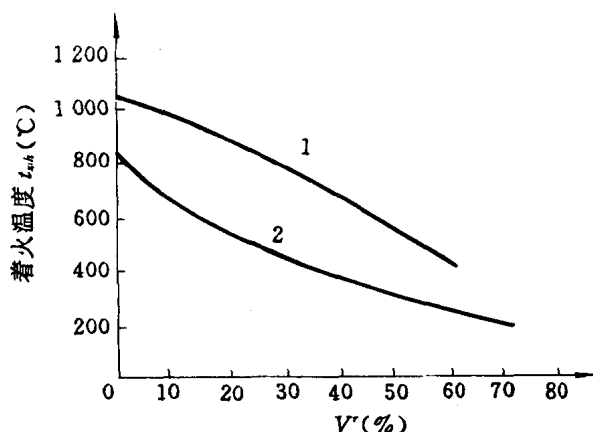


图 1-2 煤粉着火温度与可燃基挥发分的关系

1—煤粉燃烧器出口;2—马弗炉

绝空气加热 7min,从失去的质量中扣除水分后,即可求出分析基挥发分 V' (%) 的含量。

挥发分燃烧产生的热量,不仅与挥发分的数量而且与其组成成分有关。挥发分的主要组分有 CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 , C_3H_6 和 C_3H_8 , 此外还有少量环烃 C_mH_n 以及 N_2 和水蒸气等。煤化程度较低的燃料,挥发分中 CO_2 和 CO 所占比例较大,可达 60%; 碳氢化合物则较少,只占 20 ~ 25%, 因此单位质量挥发分的发热量较低。煤化程度越高,热解产物中高热值气体的比例越大,挥发分的发热量也就越高。我国各种煤的挥发分发热量见表 1-1。

煤的挥发分含量越高,开始析出挥发分的温度也越低(见图 1-1), 因此着火温度也越低(图 1-2)。例如,褐煤的着火温度为(250 ~ 450)°C, 烟煤为(400 ~ 500)°C, 无烟煤则为(700 ~ 800)°C。

炉内火焰是形状不规则的湍流火焰,可看作是一些连续和孤立的火焰小岛。火焰传播速度表示火焰沿法线方向向这些小岛所包围的未燃混合物传播的速度,可看作着火速度或燃烧速度。由图 1-3 可见,当其它条件不变时,火焰传播速度随着挥发分的增加而变大。这是因为挥发分增加时,相应于每公斤煤的挥发分发热量 Q_{flv} 也增大(参看表 1-1),使煤粒附近的介质温度升高,故燃烧速度随着温度的升高呈指数规律上升。

燃料挥发分含量增加时,热解形成的焦炭疏松多孔,参与燃烧的比表面积增大,再加上温度升高的影响,使焦炭易于燃尽。如图 1-4 所示。在周围烟气温度的 1130°C、含氧量为 21% 时,若燃料的可燃基挥发分含量 V' 从 5% 增加到 60%, 则直径 0.5mm 焦炭颗粒的燃尽时间就从 6s 减少到 1s。因此, V' 增加时,

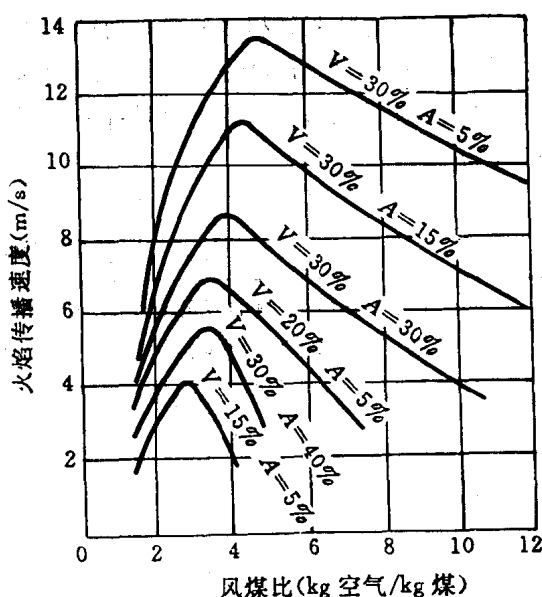


图 1-3 空气煤粉混合物的风煤比对火焰传播速度的影响

固体未完全燃烧热损失降低。图 1-5 是根据我国电厂运行统计结果而绘制的,它也充分反映出这个趋势。

2. 灰分

灰分对煤燃烧过程的影响比较复杂。首先,灰分过高会妨碍挥发物的析出,使挥发分的初析温度和着火温度提高。例如,高灰分的广西合山烟煤和东罗烟煤,其挥发分的初析温度与京西无烟煤差不多,实测的着火温度也接近于无烟煤。

其次,燃料的发热量随着灰分(A^v)的增加而减少,理论燃烧温度(见图 1-6)及炉膛温度亦随之降低。此外,在煤粒加热、热解和矿物质逐渐转变为灰的过程中,矿物质会释放出 CO_2 、 CO 和 H_2O 等成分,会使挥发分的发热量降低;再加上挥发分析出速率下降的影响,火焰传播速度将变小,如图 1-3 和图 1-7 所示。因此,燃料的灰分增加会使着火推迟,燃烧稳定性变差。例如,当某种煤的干燥基灰分含量 A^v 从 41% 增加到 59% 时,炉膛内火焰中心离旋流燃烧器出口截面的距离几乎增加了一倍。着火延迟使得用于焦炭的燃烧时间缩短。

另外,灰分在焦炭外侧形成的覆盖层增大了燃烧产物及氧化剂的扩散阻力,致使焦炭的燃烧速度下降,导致固体未完全燃烧热损失 q_4 增加(见图 1-5)。当灰分熔融而裹住未燃尽的炭粒时, q_4 会显著增大。运行情况统计表明,应用基灰分 A^v 不超过 45% 时,灰分增加的影响主要体现在经济性方面,有时还影响燃烧的稳定性;如果灰分更高,将使灭火事故增加,设备可用率下降。

3. 水分

燃料中的水分进入炉膛后,吸收热量进行加热、汽化和过热,从而降低了炉内的烟气温度。由图 1-6 可见,水分增加对理论燃烧温度的影响比灰分还大。炉温降低导致煤粉气流卷吸的烟气热量以及火焰对煤粉气流的辐射传热量都减少,火焰传播速度下降(见图 1-7),这对燃料着火是极为不利的。褐煤虽然是挥发分含量很高的煤种,但若其水分过高,也要采取措施以维持煤粉气流稳定着火。

4. 发热量

燃料的发热量降低时,理论燃烧温度和炉内的实际温度水平也随之下降,火焰传播速度变

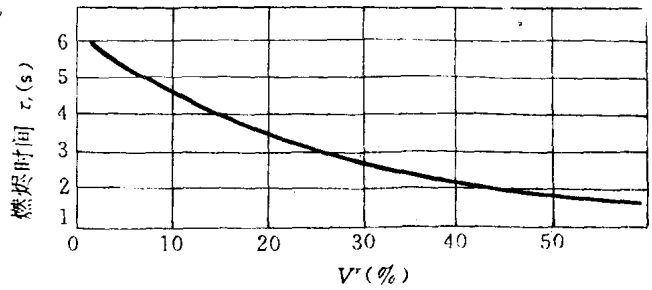


图 1-4 焦炭颗粒的燃尽时间与原煤挥发分的关系
($T_y = 1400\text{K}$, $\text{O}_2 = 21\%$, $\delta = 0.5\text{mm}$)

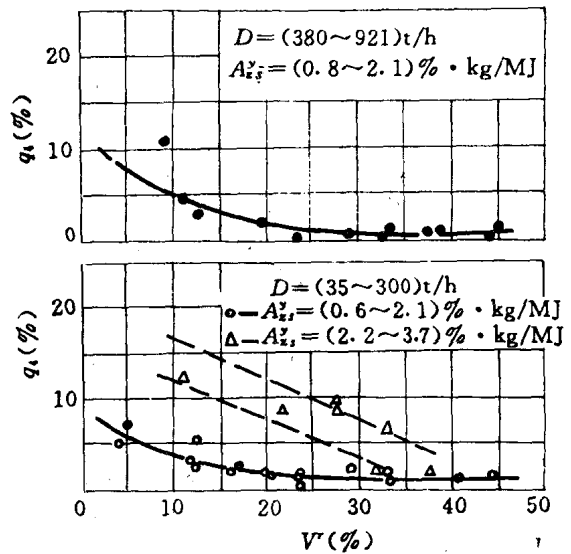


图 1-5 固体未完全燃烧热损失与煤的可燃基挥发分的关系

小,导致固体未完全燃烧热损失增加,经济性变差。发热量降低到一定程度后会引起燃烧不稳,灭火“放炮”事故增加,必须投油助燃。图 1-8 是西安热工研究所根据运行统计资料绘制的煤质低限曲线。可见随着燃料分析基低位发热量 Q_{dw} 的降低,燃烧稳定区缩小,即要求燃料可燃基挥发分 V^r 含量有更高的值才能使燃烧稳定。

根据国内燃煤锅炉的运行经验,在煤粉锅炉不投油助燃而能保持燃烧稳定的前提下,应用基低位发热量 Q_{dw} 的最低限如下:

$V^r = (16 \sim 40)\%$ 的烟煤、贫煤,为 $(11.7 \sim 12.6)\text{MJ/kg}$;

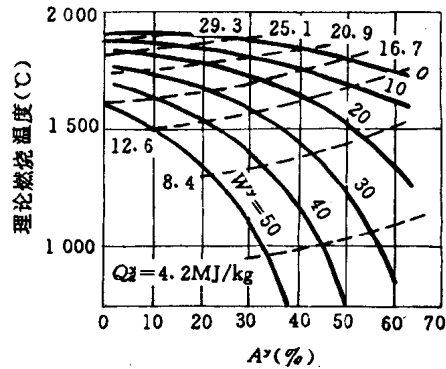


图 1-6 煤的灰分、水分含量对理论燃烧温度的影响

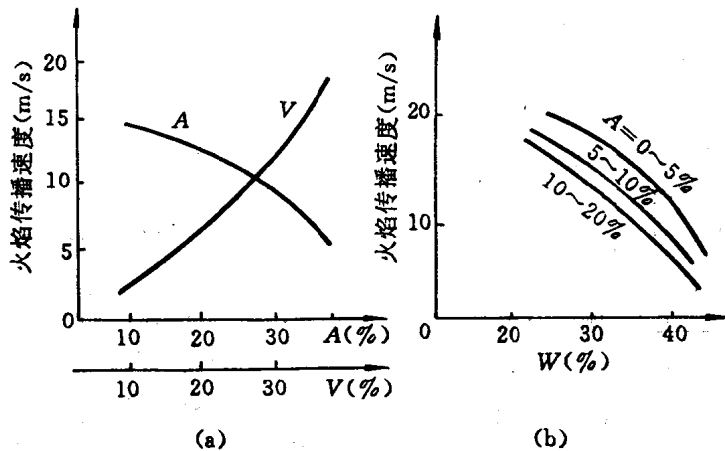


图 1-7 水分、灰分和挥发分对火焰传播速度的影响
(a) 烟煤、无烟煤; (b) 褐煤

$V^r = 15\%$ 的无烟煤、贫煤,为 $(16.8 \sim 18.8)\text{MJ/kg}$;

高水分褐煤,为 $(7.5 \sim 8.0)\text{MJ/kg}$ 。

二、 非常规实验室指标

1. 反应指数

反应指数是指煤样在氧气流中加热,其温升速率达到 $15^\circ\text{C}/\text{min}$ 时所需要的加热温度,用 T_{15} 表示。显然,燃料的反应指数越高,表示它越难着火和燃烧。

反应指数 T_{15} 与可燃基挥发分 V^r 的关系见图 1-9。由图可见, V^r 和 T_{15} 之间有某种内在联系。但是,燃料的挥发物并非都是可燃组分,各组分的发热量也不相同,所以 V^r 在 $(20 \sim 40)\%$ 的范围内变化时, T_{15} 变化不大;而属于无烟煤范畴的燃料,挥发物的质量较高, V^r 稍有变化 T_{15} 就有较大变动。从这个意义上说,用反应指数对煤的燃烧

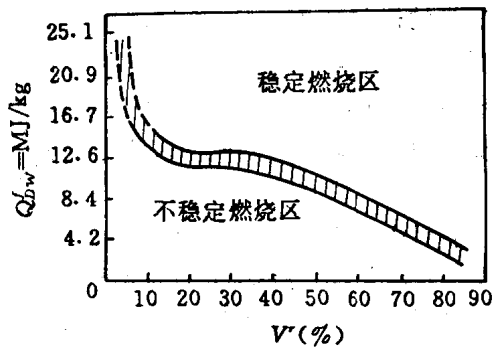


图 1-8 无油助燃时燃煤发热量的界限值

特性进行判断,较之用挥发分更为合理。

国内的研究表明,将煤样置于空气流中加热较之放在氧气流中加热所获得的反应指数,分辨率更高。

2. 熄火温度

将一定细度的煤粉试样加热到着火温度后停止加热,温度逐渐降低直至灭火,此时测得的温度称熄火温度。由此可知,熄火温度反映了燃料着火后继续燃烧的稳定性。图 1-10 表明燃料挥发分越高,熄火温度越低,即燃烧越稳定。这是由于挥发分燃烧释放出来的热量能维持燃烧继续进行下去之故。

3. 燃烧分布曲线

在示差热天平中,测定煤样由于受热而发生的质量变化,得到热失重随时间变化的曲线,即热失重分析(TG)曲线。对 TG 曲线进行微分处理就得到微分热失重(DTG)曲线,这就是试样失重率 $dW/d\tau$ 随温度变化的曲线,如图 1-11 所示,也称之为燃烧分布曲线或燃烧图。

一般说,燃烧分布曲线有两个峰。曲线前部的小峰是水分析出峰,峰下包围的面积是燃料的水分含量;曲线后部的高峰是挥发分和固定炭燃烧峰,峰下的面积是煤的可燃质份额。燃烧峰越靠近左边,且燃烧速度 $dW/d\tau$ 越高,则燃料的反应能力越强;燃烧峰的后段越陡,煤就越容易燃烬。

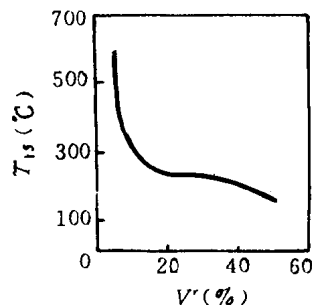


图 1-9 煤的反应指数与挥发分的关系

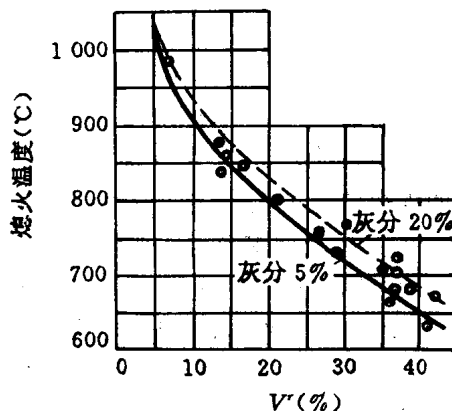


图 1-10 煤粉熄火温度与挥发分的关系

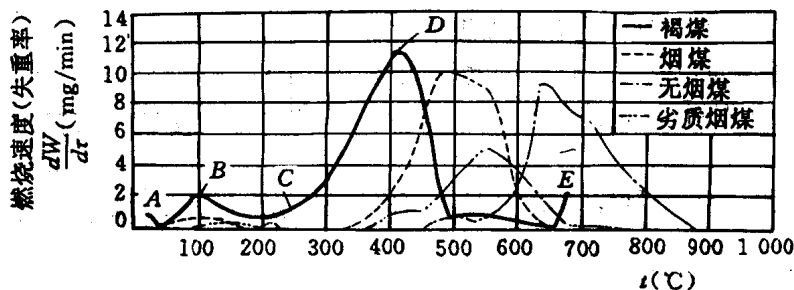


图 1-11 煤的燃烧分布曲线

升温速度: $20^{\circ}\text{C}/\text{s}$; 试样粒度: 0.425mm 以下; 试样质量: 100mg ;
空气通入量: $280\text{l}/\text{h}$; A—水分开始析出; B—水分最大失重率处;
C—挥发分开始析出; D—挥发分最大失重率处; E—燃尽

由煤的燃烧分布曲线,可得到如下几个燃烧特性参数。

(1) 着火温度 t_{zh}

在加热过程中,煤样由吸热转为放热的瞬间所对应的温度称为着火温度,用 t_{zh} 表示。 t_{zh} 的确定方法很多,例如可将燃烧分布曲线上的 C 点(参看图 1-11)所对应的温度规定为着火温度($^{\circ}\text{C}$)。着火温度越低,燃料就越容易着火。

按上述方法确定的着火温度 t_{zh} 与燃料试样的含氧量 $O_2(\%)$ 有关:

$$t_{zh} = 538 - 14O_2, ^\circ\text{C} \quad (1-2)$$

试验确定,随着燃料分析基灰分 A^f 的增加,着火温度线性升高。(见图 1-16)

(2) 可燃性指数 C

在燃烧分布曲线上找到最高燃烧速度区,该区域的始末间隔定为 80°C ,并规定该区域开始与结束时的燃烧速度 $dW/d\tau$ 相等,求出全区的平均燃烧速率并记为 $[dW/d\tau]_{80}$,则可燃性指数 C 可按下列经验公式确定:

$t_{zh} < 500^\circ\text{C}$ 时

$$C = \left[\frac{dW}{d\tau} \right]_{80} / T_{zh}^2, \quad \text{mg}/(\text{min} \cdot \text{K}^2) \quad (1-3)$$

$t_{zh} > 500^\circ\text{C}$ 时

$$C = \left[\frac{dW}{d\tau} \right]_{80} / T_{zh}^{(2 + \frac{t_{zh} - 500}{1000})}, \quad \text{mg}/(\text{min} \cdot \text{K}^2) \quad (1-4)$$

式中: T_{zh} ——燃料的着火温度, K 。

由上列公式可知,若燃烧速率 $[dW/d\tau]_{80}$ 小,或着火温度 T_{zh} 高,则可燃性指数 C 值小,表征煤的可燃性能差。由于可燃性指数综合了煤的着火、着火后继续燃烧和燃烬的性能,故用它表示的煤燃烧性能与在实际锅炉中的燃烧情况比较相符,即分辨率较高。对于可燃基挥发分 V^r 相近的某些无烟煤和劣质烟煤尤其如此。例如,福建陆家地无烟煤 $V^r = 4.4\%$,加福无烟煤 $V^r = 5.20\%$,仅从挥发分数量看,后者的燃烧性能似乎还要强一些,但在锅炉上的试烧结果却相反,前者燃烧较稳定,后者火焰拖长并经常灭火。用可燃性指数来表示,就容易解释这个差别。陆家地煤 $C = (0.7 \times 10^{-6}) \text{mg}/(\text{min} \cdot \text{K}^2)$,加福煤 $C = (0.52 \times 10^{-6}) \text{mg}/(\text{min} \cdot \text{K}^2)$,前者的可燃性指数比后者大,所以燃烧性能较好。

当然,用可燃性指数判断,也有个别煤种与实际情况不符。除了测量误差的影响之外,也可能是煤的其它特性在起作用,这也是各种判别方法都存在的问题。

由图 1-12 可见,对于可燃基挥发分 $V^r = (31 \sim 39)\%$ 的烟煤,可燃性指数随着燃料灰分含量的增大而近似地呈线性减小。

对于我国的各种煤,可燃性指数 C 的范围如下:

褐煤	$(1.4 \sim 3.9) \times 10^{-6} \text{mg}/(\text{min} \cdot \text{K}^2)$
烟煤	$(1.3 \sim 2.3) \times 10^{-6} \text{mg}/(\text{min} \cdot \text{K}^2)$
劣质烟煤	$(0.6 \sim 1.5) \times 10^{-6} \text{mg}/(\text{min} \cdot \text{K}^2)$
贫煤	$(1.3 \sim 2.1) \times 10^{-6} \text{mg}/(\text{min} \cdot \text{K}^2)$
无烟煤	$(0.4 \sim 1.5) \times 10^{-6} \text{mg}/(\text{min} \cdot \text{K}^2)$

(3) 可燃质平均燃烧速度 W_{Pj}

100mg 煤样中可燃质的质量与其总燃烧时间之比,称为可燃质的平均燃烧速度,用 $W_{Pj}(\text{mg}/\text{min})$ 表示。它综合考虑了煤的反应性能及灰分、水分含量的影响,可用来评价燃料的

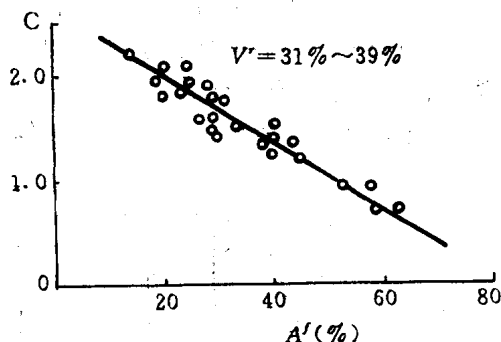


图 1-12 可燃性指数与灰分的关系

燃尽性能。

(4) 燃烧特性指数 S

如上所述,可燃性指数 C 反映了燃烧的稳定性,而可燃质平均燃烧速度 W_{pj} 反映了燃料的燃尽性能。此外,燃料的燃尽温度 $T_{rj}(K)$ 愈低,燃料的燃烧性能也愈好。用燃烧特性指数 S 将这几个指标综合在一起:

$$S = \frac{CW_{pj}}{T_{rj}}, \quad \text{mg}^2/(\text{min} \cdot \text{K}^2) \quad (1-5)$$

因此, S 是反映燃料着火、燃尽性能的综合指标。 S 值越大,表明煤的燃烧特性越好。一般来说,从褐煤到无烟煤,着火和燃尽是由易到难, S 值也相应地由大变小。 S 值相差较大的煤种,燃烧性能差异也大, S 值相近的煤种,燃烧性能也比较接近。

(5) 挥发分释放特性指数 D

图 1-13 是几种典型煤种的挥发分释放特性曲线,它是在纯惰性气氛中加热燃料所得到的 DTG 曲线。曲线上最明显的特征参数有:

挥发分初析温度 $t_c(^\circ\text{C})$;

挥发分最大释放速度峰值 $(dW/d\tau)_{\max}^A(\text{mg}/\text{min})$

对应于 $(dW/d\tau)_{\max}^A$ 的温度

$t_{\max}(^\circ\text{C})$;

挥发分释放速度 $(dW/d\tau)^A =$

$\frac{1}{3}(dW/d\tau)_{\max}^A$ 所对应的温度区间 $\Delta t_{1/3}(^\circ\text{C})$ 。

显然, $(dW/d\tau)_{\max}^A$ 越大,挥发分释放就越强烈; $t_{\max}$ 越低, $\Delta t_{1/3}$ 就越小,意味着挥发分释放高峰出现得越早、越集中,对燃料的着火就越有利。

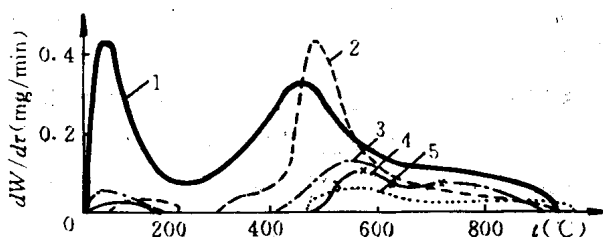


图 1-13 挥发分释放特性曲线

1—扎赉诺尔褐煤; 2—平顶山烟煤; 3—合山劣质烟煤;
4—枣庄贫煤; 5—金竹山无烟煤

华中理工大学综合上述几个参数,提出了挥发分特性指数,用 D 表示,它用来判断不同煤种的挥发分释放特性。

$$D = \frac{(dW/d\tau)_{\max}^A}{t_{\max} \Delta t_{1/3}}, \quad \text{mg}/(\text{min} \cdot \text{K}^2) \quad (1-6)$$

当 $D > (2 \times 10^{-6}) \text{mg}/(\text{min} \cdot \text{K}^2)$ 时,燃料的着火性能较好,一般不存在着火困难;当 $D < (2 \times 10^{-6}) \text{mg}/(\text{min} \cdot \text{K}^2)$ 时,表征燃料的着火温度比较高,实践中应采取措施强化着火过程。

4. 燃料比 R

燃料燃烧时释放的热量来自挥发分和固定碳的燃烧析热。但挥发分比固定碳容易燃烧。因此,美国和日本常用燃料比

$$R = \frac{C_{gd}}{V} \quad (1-7)$$

作为判别煤可燃性的指标,式中, C_{gd} 为固定碳; V 为挥发分。它比单纯用挥发分作判据的分辨率要高。这里 C_{gd} 和 V 应是同一基准。

利用燃料比 R 判别燃料的可燃性,有如下关系:

$R < 4$	易燃
$R = 4 \sim 9$	中等
$R > 9$	难燃

例如,通常褐煤 $R = 0.6 \sim 1.5$,挥发分 $V^r > 30\%$ 的烟煤 R 也不超过 2,它们都是极易燃烧的煤种;而无烟煤 $R > 9$,是难燃煤种。

图 1-14 是飞灰中可燃物含量 $C_A(\%)$ 与燃料比的关系。由图可见, C_A 随着 R 的增加而增大,即固体未完全燃烧热损失增加,这是燃料可燃性随燃料比增加而降低的结果。

5. 比表面积 S_b

包括微孔在内、单位质量燃料的表面积称为比表面积,用 S_b 表示,单位为 m^2/g 。 S_b 越大,则煤粉越容易被加热到着火温度,焦炭越易于燃尽。 S_b 对焦炭燃尽的影响较之对煤粉着火的影响更大些。由于煤粉在热分解过程中比表面积会发生变化,有的甚至会增大一个数量级。所以为了判断对燃尽程度的影响,采用焦炭的比表面积显然更合理。

因为挥发分析出后会留下孔隙,所以高挥发分烟煤和褐煤的比表面积较大,无烟煤的比表面积较小;两者相差可达 100 倍。可参考下列判据判断焦炭的燃尽特性:

$S_b < 20m^2/g$,	难燃尽;
$S_b = (20 \sim 60)m^2/g$	中等;
$S_b > 100m^2/g$,	易燃尽。

6. 活化能 E

根据分子物理学的概念,要进行反应就必须使燃料和氧化剂的分子发生碰撞。但是,并非所有的碰撞都是有效的,只有那些能量比分子平均动能高出一定程度(这个差值称为活化能,用 E 表示)的分子碰撞才能破坏反应物的分子键,形成新的分子键。因此,活化能越小,燃料的反应能力越强。这意味着它不仅易于着火,而且也易于在较低的温度下燃尽;反之,若煤的活化能越大,其反应能力就越差。此时不仅难于着火,而且还要求在较高的温度下耗费较长的时间才能燃尽。就活化能从小到大的排列顺序而言,依次为褐煤、烟煤和无烟煤。例如,王家矿褐煤 $E = 20kJ/mol$,而加福无烟煤 $E = 175.7kJ/mol$,两者相差将近 7 倍。

7. 反应性指数 I_r

它与前面介绍过的反应指数 T_{15} 虽只一字之差,但反映的却是燃料两种不同的燃烧性能。 T_{15} 主要反映燃料着火的难易程度,而反应性指数 I_r 则描述碳的氧化反应性能,即燃料是否易于燃尽。

对于非粘结性煤,碳的反应性指数包括两个因子,一个是与煤热解期间比表面积变化有关的固有水分;另一个是与所需反应时间有关的固定碳的数量。对于粘结性煤,还必须考虑燃料比表面积差异与其水分有关这一因素。所以,碳的反应性指数为:

$$I_r = a(W^a)^*(C_{fd}^b)^b - c(W^a)^c \quad (1-8)$$

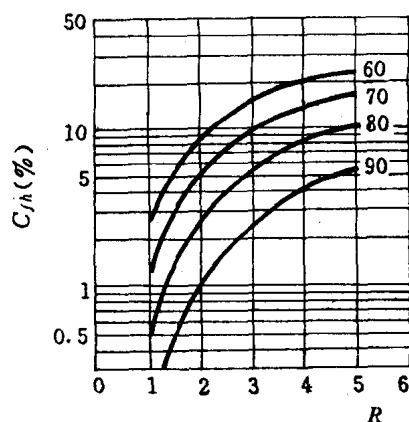


图 1-14 飞灰中可燃物含量与燃料比的关系
(图中数字表示通过 200 目筛子的煤粉颗粒百分数)

式中： W^a, C_{ad}^a ——燃料分析基水分和固定碳，(%)；

$a, c, \alpha, \beta, \gamma$ ——由实验确定的常数。

日本试验过的 18 种煤，其值如下：

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.605 \times 10^6 \\ \begin{cases} c = 0 & \text{对非粘结性煤} \\ c = 0.968 & \text{对粘结性煤} \end{cases} \\ \alpha &= 0.44, \beta = 3.6, \gamma = 1.5. \end{aligned}$$

温度在 600℃ 以下时，碳的反应速率与反应性指数成正比。图 1-15 是 600MW 和 33MW 锅炉中飞灰可燃物含量 C_{fA} 与反应性指数 I_c 之间的关系，可见它们大体上成反比，即反应性指数越大，燃料越容易燃尽。

§ 1-2 劣质煤的种类

所谓劣质煤，主要是指发热量低、着火困难的煤种。由于它们的燃烧特性差，所以燃用这些煤种的锅炉，运行中经常出现着火延迟、燃烧不稳定、热效率下降和出力不足等问题。此外，由于入炉灰量增加，会加剧受热面的结渣、沾污和磨损，使设备的可用率下降。当前，我国电站锅炉每年燃用的劣质煤，折合成标准煤约为 (800 ~ 1 000) 万 t，占发电用煤 10% 以上。其中应用基低位发热量 $Q_{hw} < 16.7 \text{ MJ/kg}$ 的劣质烟煤占 80% 左右。

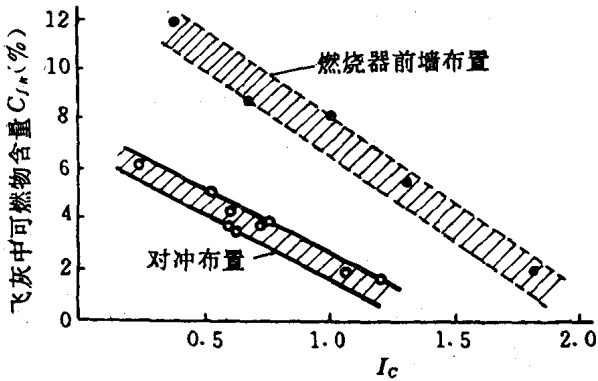


图 1-15 飞灰中可燃物含量与反应指数的关系

一、低发热量燃料

这是指水分或灰分高，可燃基挥发分也高，但发热量低的那些燃料。例如劣质烟煤、洗中煤、石煤、煤矸石、褐煤和油页岩等。表 1-2 是我国低发热量燃料的分类及其主要特性。

表 1-2 我国低发热量燃料的分类及其主要特性

燃料特性	燃 料 名 称					
	劣质烟煤	洗中煤	石 煤	油页岩	褐 煤	煤矸石
挥发分 $V\%$	>16	>20	>20	~ 80	42~55	——
水分 $W\%$	≤ 12	≤ 18	≤ 12	10~23	20~45	——
灰分 $A\%$	35~55	30~50	50~65	>60	20~30	——
发热量 $Q_{hw} \text{ MJ/kg}$	10.5~14.7	8.4~15.9	4.2~8.4	<6.3	8.4~14.7	2.1~4.2
特 点	灰分高，发热量低	灰分高，水分高，发热量低	灰分很高，发热量很低	挥发分很高，灰分很高，水分高，发热量很低	挥发分高，水分高，灰熔点低，发热量低	发热量很低
典型产地	合山、资兴	马头、平顶山	安门、湖门	茂名	扎 诺尔	

劣质烟煤以及性质和它相近的洗中煤、石煤,虽然可燃基挥发分在烟煤的范畴内,但由于灰分高、发热量低,燃烧性能和普通烟煤有较大区别,有的甚至接近于无烟煤。

除云阳宗海地区褐煤属于高水分软褐煤之外,我国褐煤大多是硬褐煤。硬褐煤的特点是可燃基挥发分高,着火容易,燃烧稳定,但灰分高,灰熔点较低,容易引起炉膛结渣,所以硬褐煤适于采用低温燃烧技术。

对于水分达(40~75)%的软褐煤,要采取特殊措施以稳定煤粉的着火和燃烧。

二、着火困难的煤

无烟煤是煤化程度最高的煤种。它们的挥发分低、析出温度高,因而着火困难,不易燃尽,飞灰可燃物高,属于低反应能力的燃料。对于可燃基挥发分 $V^r \leq 5\%$ 的无烟煤或挥发物中氢含量较低的无烟煤,燃烧更为困难。

多数无烟煤和贫煤的发热量在 20.9MJ/kg 以上;但有些灰分在 30% 以上的煤,发热量仅 19MJ/kg 左右。此外,还有相当一部分无烟煤和贫煤的灰熔点较低,变形温度 $t_1 < 1200^\circ\text{C}$, 熔化温度 $t_3 < 1300^\circ\text{C}$ 。

因此,燃用这些无烟煤和贫煤时,要采取措施保证煤粉气流稳定着火,提高燃尽度以降低飞灰可燃物,同时还要防止炉膛结渣。

§ 1-3 煤粉气流的着火

煤粉气流在炉内的停留时间仅(1~2)秒,要在这么短的时间内完全燃烧,关键是保证及时、稳定地着火。稳定着火又是维持稳定燃烧的重要条件,且对延长燃尽时间和提高燃烧效率 $(100 - q_3 - q_4)$ 也有至关重要的作用。煤粉气流一般应在离燃烧器喷口(300~500)mm 距离处着火。距离过小会烧坏喷口,并可能在燃烧器附近的壁面上结渣;距离过大则易灭火,使得用于焦炭燃尽的时间减少,飞灰可燃物增加,燃烧效率降低。

一、着火热

将煤粉气流加热到着火温度所需要的热量称为着火热,用 Q_{zh} 表示。着火热包括用于加热煤粉和一次风所需的热量,以及使煤粉中水分蒸发与过热所需的热量,乏气送粉时可按下式估算:

$$Q_{zh} = B_r \left\{ (V^0 \alpha_r r_{1k} C_k \frac{100 - q_4}{100} + C_r \frac{100 - W_r}{100} + \Delta W C_q)(t_{zh} - t_1) + (\frac{W_r}{100} - \Delta W)[4.19(100 - t_1) + 2510 + C_q(t_{zh} - 100)] \right\}, \text{ kW} \quad (1-9)$$

式中: B_r ——每只燃烧器的燃煤量,kg(煤)/s;

V^0 ——理论空气量, m^3/kg ;

α_r ——燃烧器出口截面处的过量空气系数;

r_{1k} ——一次风率;

C_k ——空气比热, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;

q_4 ——固体未完全燃料热损失,%;