



火力发电厂节能技术丛书

中国电力企业联合会科技服务中心 合编
华中科技大学能源与动力工程学院

锅炉机组节能



火力发电厂节能技术丛书

中国电力企业联合会科技服务中心 合编
华中科技大学能源与动力工程学院

锅炉机组节能



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内
容
提
要

本书是《火力发电厂节能技术丛书》之一。

全书共六章,主要讲述了锅炉节能经济运行基本原理、煤粉炉节能燃烧技术、锅炉运行节能技术、循环流化床锅炉优化运行节能技术、锅炉辅机及系统节能技术、锅炉运行故障及其防治等。

本书可供从事锅炉设计、热工、电厂运行和检修工作的工程技术人员培训使用,也可供大专院校热能动力类和电力工程类专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

锅炉机组节能/中国电力企业联合会科技服务中心,华中科技大学能源与动力工程学院合编. —北京:中国电力出版社,2008

(火力发电厂节能技术丛书)

ISBN 978-7-5083-6841-2

I. 锅… II. ①中…②华… III. 火力发电-锅炉-节能
IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 036531 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 4 月第一版 2008 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 378 千字

印数 0001—3000 册 定价 45.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

火力发电厂节能技术丛书

编 审 委 员 会

主任委员：李玉生

副主任委员：(按姓氏笔画为序)

刘传柱 刘建民 安洪光 祁智明 何 勇
周怀春 侯国立 赵 平 韩大伟 靳东来

委 员：(按姓氏笔画为序)

马国林 王彤音 石朝夕 毕诗方 吴玉鹏
李文学 陈 刚 陈汉平 罗发青 席志红
郭云高 陶洪才 高 伟 黄树红 曾汉才

主 编：周怀春

副 主 编：(按姓氏笔画为序)

王 坤 张小平 张燕平 杨 涛

参 编：(按姓氏笔画为序)

于 斐 马洪波 叶 涛 吴立增 张兴营
张春伟 张聘亭 李永生 李建兰 李昱彤
汪致远 陈汉平 陈 刚 陈 兵 岳 乔
姚斯亮 祝 宪 贺国强 席志红 郭云高
高 伟 黄树红 曾汉才

审 稿：(按姓氏笔画为序)

马永真 周世祥 雍双春 靖长财

“建设节约型社会,实现可持续发展”已经被明确为我国的基本国策。资源与环境的压力,迫切要求各领域(尤其是产能和耗能单位)落实国家既定的发展目标。随着一次能源转换为电能的比重、电能占终端能源消费量的比重不断提高,电力行业固有的资源密集型、资源紧缺性的特点,使电力行业成为我国环境资源工作的关键所在,建设节约型电力企业的重任摆在了所有电力工作者的面前。

电力工业是技术密集型工业,能量的转换和传输是一个关联性强、比较复杂的系统,因而节能工作实施的效果往往不能通过单独的一个环节来认定,也不能片面强调节约而忽略安全。之前电力企业在某些节能工作方面的“谨慎”态度,一定程度上也说明了推动电力行业节能的工作的艰巨性和复杂性。因此,电力行业节能工作应该遵循科学、系统、实践、推广的规律,既不能畏难不前,也不能求快冒进。

为了有效地配合电力企业节能工作的开展,发挥电力行业技术服务部门的作用,中国电力企业联合会科技服务中心在认真分析了电力企业节能工作特点的基础上,联合华中科技大学,有针对性地组织编写了《火力发电厂节能技术丛书》(以下简称《丛书》),分为《锅炉机组节能》、《汽轮机设备与系统节能》、《热力系统节能》、《节能与控制》四个分册。《丛书》突出强调三个方面:

1. 实用性:强调应用、借鉴和参考价值。建立以电力企业生产过程中涉及的能量转换原理、能量传输过程为依据,以节能分析为展开线索,以节能手段为落脚点的三重结构。
2. 开放性:强调聚集全行业的智慧和经验。《丛书》的编写不局限于某几个人的思路,而是面向电力行业所有相关人员,并长期向电力行业开展电力节能案例征集工作。
3. 长期性:强调在完善总结的基础上,与时俱进地跟踪反映电力节能技术的发展。随着认识水平的提升、技术的进步,会产生很多新的、实用的节能措施和手段,《丛书》将根据电力行业的节能技术的进展情况适时再版。

相信在大家的关注和支持下,随着时间的推进、认识的加深、经验的积累,《丛书》一定会为电力企业的节能工作发挥积极的作用。

《丛书》的编写得到了各电力集团公司和发电企业的大力支持和指导,在此表示衷心的感谢!

由于水平所限、时间仓促,又加上电力节能技术是一个围绕实践、应用发展起来的跨专业、跨学科的技术汇总和研究,因而《丛书》疏漏、错误之处在所难免,敬请广大读者批评指正!

《火力发电厂节能技术丛书》编委会

2008年1月

分册前言

煤炭是我国的基本能源, 约占总能耗的 75%, 预计到 21 世纪中叶仍会占到 50% 以上。在“十五”计划内, 我国在煤炭开发和节能两个方面均取得了显著成绩。根据“十一五”规划, 我国单位国内生产总值能源消耗比“十五”期末要降低 20% 左右, 任务十分艰巨。随着节能工作的深入, 节能的难度越来越大, 因此, 必须依靠科学技术进步来完成。

我国电力工业中, 以燃煤火电机组为主, 约占总装机容量的 74%, 火电耗煤约占原煤总产量的 30%。目前, 我国火电煤耗偏高, 平均煤耗比国外先进水平高 $77 \sim 102 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 如果能将火电煤耗降低 $60 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 其节能效益是非常巨大的, 这无疑对实现“十一五”规划中节能减排的目标具有重要的意义。燃煤发电节能, 可以从改进传统技术、利用现有技术、开发高新技术等几个方面同时进行。

基于上述背景, 中国电力企业联合会科技服务中心联合华中科技大学能源与动力工程学院, 编写了《火电厂节能技术丛书 锅炉机组节能》。本书适合于有关工程技术人员、现场生产人员对节能知识的需求和技术培训的要求, 并便于大专院校热能动力类和电力工程类专业师生参考。

本书由华中科技大学张小平、陈汉平、周怀春合编, 张小平编写第一~三、五、六章), 陈汉平编写第四章。

本书在编写过程中参阅了相关的教材及火电厂、锅炉制造厂、电力设计院及研究所的有关资料、文献。曾汉才教授为本书提出了许多建议, 并对部分章节内容进行了修改、完善。华能北京热电有限责任公司雍双春等专家对本书进行了审阅并提出了很好的建议。书中引用了不少同行的资料和经验。在此一并致谢!

由于水平所限, 书中缺点和错误难免, 恳请读者批评指正。

编者

2008 年 3 月

目 录

前言

分册前言

第一章 锅炉节能经济运行基本原理	1
第一节 煤种成分及其对燃烧与运行的影响	1
第二节 煤的燃烧特性指标及混煤最佳掺烧比的确定	6
第三节 煤的燃烧着火过程及其强化措施	11
第四节 锅炉热效率的影响因素与提高途径	16
第五节 大型锅炉燃烧方式及炉膛热力特性参数	19
第六节 锅炉炉内传热及受热面对流传热及其强化	25
第七节 高效低 NO_x 优化燃烧的原理及方法	26
第二章 煤粉炉节能燃烧技术	31
第一节 直流式煤粉燃烧器稳燃节能技术	31
第二节 旋流煤粉燃烧器稳燃节能技术	35
第三节 四角切圆燃烧和对冲燃烧锅炉燃烧优化调整技术	45
第四节 W 型火焰锅炉燃烧优化调整技术	59
第五节 等离子无油点火燃烧器	65
第三章 锅炉运行节能技术	71
第一节 入炉煤质特性在线检测优化燃烧技术	71
第二节 锅炉风粉燃烧监测与优化运行	76
第三节 锅炉炉内燃烧在线检测优化燃烧技术	79
第四节 锅炉燃烧智能控制软件辅助运行	90
第五节 锅炉灰污在线检测及吹灰优化运行	97
第六节 飞灰可燃物的在线监测	104
第七节 降低锅炉排烟温度的节能技术	106
第八节 蒸汽温度调节控制与过热器热偏差的消除	125
第九节 多台锅炉负荷分配及其调整	131
第四章 循环流化床锅炉优化运行节能技术	136
第一节 循环流化床锅炉点火启动及节能措施	136
第二节 循环流化床锅炉燃烧优化调整与节能	146
第三节 循环流化床锅炉辅助系统的优化运行与节能	162
第五章 锅炉辅机及系统节能技术	173

第一节	锅炉风机节能技术.....	173
第二节	锅炉水泵节能技术.....	177
第三节	制粉系统节能技术.....	186
第四节	锅炉水处理系统节能技术.....	199
第五节	锅炉除尘设备及系统节能.....	215
第六章	锅炉运行故障及其防治	221
第一节	锅炉运行可靠性及其节能效益.....	221
第二节	锅炉炉膛安全保护技术.....	226
第三节	“四管爆漏”及其防治.....	229
第四节	炉内结渣及其防治.....	240
第五节	烟气腐蚀及其防治.....	249
第六节	受热面积灰及其防治.....	253
第七节	受热面磨损及其防治.....	257
参考文献		259

锅炉节能经济运行基本原理

第一节 煤种成分及其对燃烧与运行的影响

燃料是经燃烧可大量放热的物质,分核燃料和有机燃料两类。电站锅炉大都燃用有机燃料。为了合理利用能源,电站锅炉应优先燃用劣质煤(挥发分低或水分、灰分含量高、发热量低易结渣)。

一、煤的组成成分及特性

煤是古代植物在地壳发生变化后深埋地下,长期受高温、高压及地下水的作用,经过复杂的化学作用及细菌作用而形成的,所以植物的成分碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)便是煤的主要成分。另外,在煤的形成、开采及运输过程中,还有水分(M)及其他矿物质(A)的加入。经过分析,煤的成分包括C、H、S、O、N、M、A等。除M、A外,其余都是元素。其中C、H、S是可燃元素,C的含量最多,是发热量的主要来源,一部分碳与 H_2 、 O_2 、 N_2 等结合成挥发性有机化合物(挥发分),其余部分呈单质状态,称为固定碳。固定碳的着火温度高,不易燃尽,故含碳量高的煤着火、燃烧均较困难。H是煤中最有利的元素,发热量高且极易着火、燃烧,但在煤中的含量很少。S的发热量低且含量少,它的燃烧产物 SO_2 、 SO_3 对尾部受热面产生低温腐蚀、堵灰,并造成大气污染。O、N是煤中的不可燃元素,N在燃烧中还会生成 NO_x ,污染环境。M、A是煤中的杂质,不仅影响煤的着火、燃烧,还会造成受热面的积灰结渣、腐蚀与污染。

煤的组成成分通常用煤的元素分析成分和工业分析成分表示。

二、煤的常规特性对燃烧与运行的影响

1. 挥发分(V)

挥发分(V)是在燃料加热过程中形成的。挥发分主要由各种碳氢化合物、氢、一氧化碳、硫化氢等可燃气体及少量氧、二氧化碳、氮等不可燃气体组成。不同种类的煤,挥发分的含量及燃烧特性各不相同。一般来说,随着煤的地质年代增长,炭化程度提高,由于自然干馏作用,煤中挥发分含量减少,挥发分中氧含量也相应减少,从而使挥发分中的可燃成分增加,热值提高;但挥发分开始析出的温度提高(可达 $400^{\circ}C$),煤的着火温度也相应较高,如无烟煤。地质年代短、挥发分含量高的褐煤则在较低的温度(小于 $200^{\circ}C$)便可迅速析出挥发分,但挥发分发热量较低。由此可见,挥发分含量大的煤容易

着火燃烧，而且挥发分析出后的焦炭空隙率增大，与助燃空气接触面积相应增大，因而这种煤易于燃尽。挥发分（V）是煤的重要特性，对煤的燃烧过程影响很大。

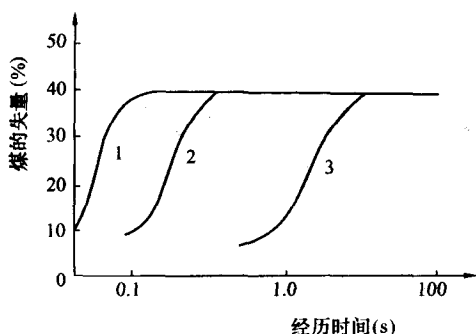


图 1-1 煤中挥发分的析出过程

1—加热速度为 10000℃/s；2—加热速度为 3000℃/s；
3—加热速度为 1000℃/s

此外，煤中挥发分（V）的成分和含量还与煤的加热速度和加热温度有关。在现代煤粉炉中，煤粉颗粒很小，炉内高温，加热速度很高，可达 10^4 ℃/s。因此，挥发分的成分、含量可能与常规的工业分析方法得出的结果不同。不同加热速度下，煤中挥发分的析出过程见图 1-1。

2. 水分

燃煤中的水分对锅炉工作的影响很大。如燃煤中的水分多，则燃烧时放出的有效热量便减少，会降低炉内燃烧温度，推迟着火，甚至会使得着火发生困难；燃料燃烧后，燃料中的水分吸热变成水蒸气，并随烟气排入大气，增加烟气量，不仅使排烟热损失增大，降低锅炉热效率，而且使引风机电耗增大；水分多，也给低温受热面的积灰和腐蚀创造了外部条件；水分增大，会对过热汽温造成影响，一般情况下，水分每增加 1%，过热汽温会升高 1.5℃。此外，原煤中过多的水分会给煤粉制备增加困难，水分多会造成原煤仓、给煤机和落煤管中黏结堵塞及磨煤机出力下降等不良后果。

3. 灰分

燃料中的灰分不但不能燃烧，而且会降低燃料的发热量，除妨碍可燃质与氧的接触，增加燃料着火和燃烧的困难外，还会使燃烧损失增加。燃料中的灰分增加，用于加热灰分的热量消耗随之增加，从而会使炉内火焰温度降低。煤的发热量越低，水分含量越大，灰分增加而引起的温度下降幅度就越大。

高灰分煤因为着火推迟，燃烧温度下降，燃烧的稳定性就较差，所以要求较高的预热空气温度及其他改善着火条件的措施。灰分含量增加，会使煤粉燃尽度变差，机械未完全燃烧热损失和灰渣物理热损失也随之增加。

燃煤灰分的增减也会影响过热汽温，一般情况下，灰分每变化 $\pm 10\%$ ，过热温度就相应地变化 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。

从运行安全性来看，燃料灰分越多，受热面的沾污就越严重。炉膛水冷壁受热面的沾污常引起结渣及过热器超温爆管，从而威胁锅炉运行的安全性；过热器和再热器的沾污常引起高温积灰和高温腐蚀；而尾部受热面的沾污则会导致排烟温度的显著上升，从而降低运行的经济性。灰分增多，会引起对流受热面，特别是尾部受热面的严重磨损；还会引起尾部受热面的积灰和低温腐蚀。因此，燃用高灰分燃料的锅炉炉膛及对流受热面都应装有有效的吹灰装置，并限制烟气流速，以及采取有效的防磨、防腐措施。此外，燃料的灰分增加，会增加磨制煤粉的困难。灰分是造成大气和环境污染的根源。因此，对于一般的固态除渣煤粉炉，从燃烧的稳定性考虑，燃煤灰分不宜超过 40%。

4. 煤灰的熔融特性

灰的熔融特性对锅炉的设计和运行有很大的影响。灰分是燃料中的不可燃杂质，各种燃料的灰分含量相差很大。劣质煤的含灰量可达 50%，灰分含量高的燃料不仅发热量减少，而且影响燃料的着火、燃烧。对于固态排渣煤粉炉，火焰中心温度很高，灰粒一般呈熔化或软化状态，这种具有黏性的熔化灰粒如果接触到受热面或炉墙，就会黏结在上面，出现所谓的沾污和结渣现象，使炉内的燃烧工况恶化，甚至会有大块渣块落下，砸坏冷灰斗的水冷壁，使锅炉被迫停炉，严重影响锅炉运行的安全性和经济性。

煤灰没有确定的熔化温度，它是在一定的高温区间内逐渐熔化的，煤灰的这种熔融性目前都用角锥法试验来确定。将灰样制成底为等边三角形的锥体，底边长 7mm，锥高 20mm。逐渐加热灰样，根据灰锥的状态变化，即可确定表征煤的熔融性的三个特征温度，见图 1-2。

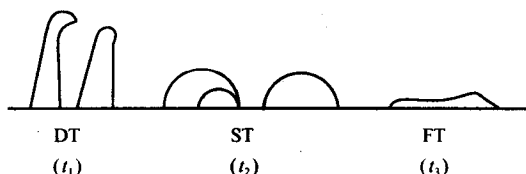


图 1-2 灰锥的变形情况

DT—变形温度；ST—软化温度；FT—流动温度

- (1) 变形温度 DT (旧称 t_1)，是指锥顶开始变圆或开始倾斜的温度；
- (2) 软化温度 ST (旧称 t_2)，是指锥顶弯至锥底或萎缩成球形的温度；
- (3) 流动温度 FT (旧称 t_3)，是指锥体呈液体状态并能沿平面流动的温度。

煤灰的熔融性的影响因素很多，很复杂，主要影响因素有煤灰的组成成分及其周围高温介质的气氛，且两者之间又相互影响。一般认为，煤灰中 SiO_2 、 Al_2O_3 等酸性氧化物能提高灰熔点，而煤灰中的碱性氧化物（如 CaO 、 MgO 等）则会使灰熔点下降。燃料实际燃烧生成的灰分往往是组成成分的共晶体，它们的熔化温度要比纯净氧化物低得多。此外，煤灰中的铁在不同的高温介质气氛中具有不同的形态，如在氧化介质中，铁呈 Fe_2O_3 状态，熔点较高，而在还原电介质中， Fe_2O_3 迅速还原成 FeO ，灰熔点随含铁量的增加而迅速下降。

实践表明，对固态排渣炉，当燃煤的软化温度大于 1350°C 时，一般不会发生炉内结渣，因此，为避免炉膛出口处对流受热面结渣，应使炉膛出口烟气温度小于软化温度，并留有 $50\sim 100^\circ\text{C}$ 的余量。

5. 硫分

硫在燃烧后生成 SO_2 ，并有一部分再氧化成 SO_3 。 SO_3 随烟气流动，并与烟气中的水蒸气进一步结合成硫酸汽。当低温烟道内受热面的壁温较低时，硫酸汽便凝结成硫酸，使低温受热面受到腐蚀。煤中硫的含量越多，这种腐蚀就越严重。当燃料燃烧时，其中的一些硫分在高温火焰核心区局部严重缺氧的条件下会生成硫化氢气体。这些硫化氢气体对高温区水冷壁会产生严重的腐蚀。烟气中的氧化硫在一定条件下会对过热器管子产生腐蚀；燃料中的硫化铁，质地坚硬，不易研磨，在煤粉制备过程中会加剧磨煤机部件的磨损，因此，通常应在燃料进入磨煤机之前或在煤粉制备过程中设法将硫化铁分离出去。此外，含有氧化硫的烟气排入大气，会形成酸雨，对人和动植物都有严重的危害。

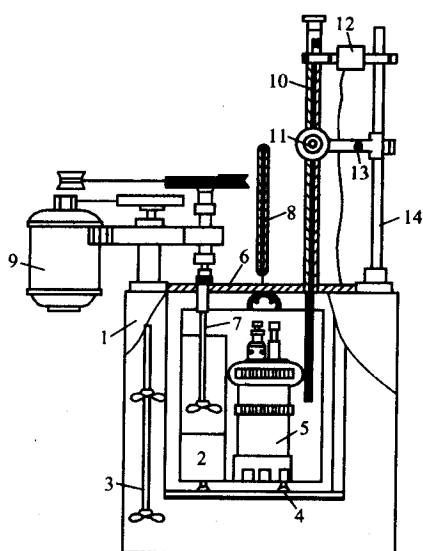


图 1-3 氧弹式测热计

1—外筒；2—内筒；3—外筒搅拌器；4—绝缘支柱；5—氧弹；6—盖子；7—内筒搅拌器；8—普通温度计；9—电动机；10—贝克里温度计；11—放大镜；12—推动器；13—计时指示灯；14—导杆

6. 煤的发热量

煤的发热量是指单位质量的煤在完全燃烧时所释放的热量，单位是 kJ/kg 。煤的发热量是煤的重要特性之一。煤的发热量有两种定义：计入燃烧产生的水蒸气汽化潜热的发热量称为高位发热量 (Q_{gr})；不计入的称为低位发热量 (Q_{net})。因为锅炉实际运行的排烟温度较高 ($110\sim 160^\circ\text{C}$)，烟气中的水蒸气不能凝结而排出炉外，所以锅炉设计计算中均采用低位发热量。

煤的发热量可用氧弹式测热计测定，如图 1-3 所示。

测定方法是约 1g 的空气干燥基煤样置于氧弹中，氧弹内充满压力为 $2.6\sim 3\text{MPa}$ 的氧气，点火燃烧，使燃烧产物冷却到煤的原始温度 (约 $20\sim 25^\circ\text{C}$)。在此条件下，单位质量的煤所放出的热量即为弹筒发热量。此时，煤样中的碳完全燃烧生成二氧化碳；氢燃烧并经冷却生成液态水；硫和氧在氧弹内瞬时燃烧温度达 1500°C 左右，与过剩氮作用生成 SO_3 和 NO_x ，并溶于事先置于氧弹

内的水中而形成硝酸。生成硝酸的反应要放出热量，因而弹筒发热量要比在锅炉实际燃烧中煤释放的热量要高，煤在氧弹内燃烧时产生的热量 (即弹筒发热量 $Q_{\text{ad},b}$) 减去硫和氮生成酸的校正值得到的热量即为煤的高位发热量，即

$$Q_{\text{gr,ad}} = Q_{\text{ad},b} - (95S_{\text{ad},b} + \alpha Q_{\text{ad},b}) \quad (1-1)$$

式中 $Q_{\text{gr,ad}}$ ——分析试样的空气干燥基高位发热量， kJ/kg ；

$Q_{\text{ad},b}$ ——分析试样的空气干燥基弹筒发热量， kJ/kg ；

$S_{\text{ad},b}$ ——由弹筒洗液测得的空气干燥基含硫量，%。

α 值与 $Q_{\text{ad},b}$ 有关，当 $Q_{\text{ad},b} < 16700\text{kJ/kg}$ 时， $\alpha = 0.001$ ；当 $16700\text{kJ/kg} < Q_{\text{ad},b} \leq 25100\text{kJ/kg}$ 时， $\alpha = 0.0012$ ；当 $Q_{\text{ad},b} > 25100\text{kJ/kg}$ 时， $\alpha = 0.0016$ 。

在无测热计的情况下，可根据煤的元素分析成分，用经验公式近似计算确定发热量，即

$$Q_{\text{net,ar}} = 4.19(81C_{\text{ar}} + 300H_{\text{ar}} + 26S_{\text{ar}} - 26O_{\text{ar}}) \quad (1-2)$$

燃料的各种成分可以用不同的基准表示，不同基准的燃料就有不同的发热量。不同基准发热量之间以及高、低位发热量之间可以进行换算。

煤的收到基高位发热量与低位发热量之间的关系为

$$Q_{\text{net,ar}} = Q_{\text{gr,ar}} - r\left(9\frac{H_{\text{ar}}}{100} + \frac{M_{\text{ar}}}{100}\right) = Q_{\text{gr,ar}} - 25.1(9H_{\text{ar}} + M_{\text{ar}}) \quad (1-3)$$

式中 $9\frac{H_{\text{ar}}}{100}$ —— 1kg 煤中的氢燃烧生成的水分， kg/kg ；

$\frac{M_{ar}}{100}$ ——1kg 煤所含水分, kg/kg。

其他三种基准的高、低位发热量之间的关系为

$$Q_{net,ad} = Q_{gr,ad} - 25.1(9H_{ad} + M_{ad}) \quad (1-4)$$

$$Q_{net,d} = Q_{gr,d} - 226H_d \quad (1-5)$$

$$Q_{net,daf} = Q_{gr,daf} - 226H_{ad} \quad (1-6)$$

对于高位发热量来说,燃料中的水分只是占据了部分质量而使其发热量降低;而对低位发热量来说,燃料中的水分还要吸收汽化潜热,再度减少发热量。因此,各种基准的高位发热量之间可以直接运用表 1-1 中的换算系数。对于低位发热量,则必须考虑汽化潜热,先运用上述式子换算成相同基准的高位发热量后,再用换算系数进行计算。

表 1-1 煤的成分基准换算系数

所求已知	收到基	空气干燥基	干燥基	干燥无灰基
收到基	1	$\frac{100-M_{ad}}{100-M_{ar}}$	$\frac{100}{100-M_{ar}}$	$\frac{100}{100-M_{ar}-A_{ar}}$
空气干燥基	$\frac{100-M_{ar}}{100-M_{ad}}$	1	$\frac{100}{100-M_{ad}}$	$\frac{100}{100-M_{ar}-A_{ar}}$
干燥基	$\frac{100-M_{ar}}{100}$	$\frac{100-M_{ad}}{100}$	1	$\frac{100}{100-A_d}$
干燥无灰基	$\frac{100-M_{ar}-A_{ar}}{100}$	$\frac{100-M_{ad}-A_{ad}}{100}$	$\frac{100-A_d}{100}$	1

为了比较煤中有害成分(水分、灰分及硫分)对锅炉工作的影响,引入折算成分的概念,规定把相对于每 4182kJ/kg 收到基低位发热量的煤中所含的收到基水分、灰分和硫分,分别称为折算水分($M_{ar,zs}$)、折算灰分($A_{ar,zs}$)和折算硫分($S_{ar,zs}$),其计算公式为

$$M_{ar,zs} = \left(\frac{M_{ar}}{Q_{net,ar}} \right) \times 4182 \quad (1-7)$$

$$A_{ar,zs} = \left(\frac{A_{ar}}{Q_{net,ar}} \right) \times 4182 \quad (1-8)$$

$$S_{ar,zs} = \left(\frac{S_{ar}}{Q_{net,ar}} \right) \times 4182 \quad (1-9)$$

折算成分 $M_{ar,zs} > 8\%$, $S_{ar,zs} > 0.2\%$ 和 $A_{ar,zs} > 4\%$ 的燃料,分别称为高水分、高硫分及高灰分燃料。

各种煤的发热量相差很大,为了核算企业对能源的消耗量,且便于比较和管理,需统一计算标准。规定以低位发热量为 29310kJ/kg 的煤作为标准煤。电厂煤耗常常以标准煤计算,如对于 $Q_{net,ar} = 14655\text{kJ/kg}$ 的煤,将其 2kg 折合为标准煤 1kg。

7. 焦炭特性

焦炭特性又称为煤的焦结性，是煤的重要特性之一。不同的煤种具有不同的焦结性，一般高挥发分煤的焦结性差。随着 V_{daf} 含量的减少，焦结性增加，但当 V_{daf} 含量过少时，煤的焦结性又会有所降低。焦炭的特性对火床炉的燃烧过程影响较大，焦结性过弱或过强的煤将增大燃料的不完全燃烧热损失或使燃烧过程恶化。

焦炭的外形特征与煤种有关，可作为煤炭分类的一项参考指标。一般把焦炭特征分为 8 类，用来初步鉴定煤的黏结性、熔融性和膨胀性。

(1) 粉状。焦炭全部成粉末状，无黏着的颗粒。

(2) 黏着状。以手指轻压即碎成粉状，或基本上是粉状。

(3) 弱黏结。以手指轻压即碎成小块。

(4) 不熔融黏结。以手指用力压，才裂成小块，焦炭上表面无光泽，下表面稍有银白色光泽。

(5) 不膨胀熔融黏结。焦炭成扁平的饼状，炭粒界限不清，上表面有明显的银白色金属光泽，下表面尤为明显。

(6) 微膨胀熔融黏结。用手指压不碎，在焦炭上、下表面均有银白色金属光泽，但在上表面有微小的膨胀泡。

(7) 膨胀熔融黏结。焦炭上、下表面均有银白色金属光泽，且明显膨胀，但膨胀高度不超过 15mm。

(8) 强膨胀熔融黏结。焦炭上、下表面均有银白色金属光泽，膨胀高度大于 15mm。

第二节 煤的燃烧特性指标及混煤最佳掺烧比的确定

一、煤的燃烧特性指标

煤是极其复杂的混合物，不但有复杂的各种多聚体和官能团，而且有极复杂的无机化合物，这就决定了评价煤燃烧特性的复杂性。近年来，经过科研机构的研究，特别是一些先进手段和测试方法的采用，已经有可能用一些能直接反映燃烧状况的专项性能指标来预报燃烧情况，改善燃烧设备的性能。

根据传统的概念，煤的燃烧特性是依据其挥发分含量的多少进行分析的，即认为挥发分含量越高，煤的着火与燃尽性能就越好。这一评价方法在一般情况下被认为是允许的。但有时与实际运行情况会有较大出入，特别是对挥发分相近的劣质煤。这是因为除了有化学因素影响之外，还有物理因素的影响，并且有挥发分释放特性及其质量的影响。

煤的燃烧特性包括许多方面，如反应指数、着火特性、挥发分释放特性、燃尽特性、热解特性、表面及孔隙特性、膨胀特性、污染特性、结焦特性、积灰及磨损特性等，其中对锅炉安全经济运行最重要的是着火稳定性、燃尽特性和结焦特性。

1. 反应指数 T_{15}

反应指数 T_{15} 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, 越难着火和燃烧。反应指数 T_{15} 与干燥无灰基挥发分 V_{daf} 的关系见图 1-4。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_{daf} 在 (20~40)% 的范围内变化时, T_{15} 变化不大; 而用于无烟煤范畴的燃料, 挥发物的质量较高, V_{daf} 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特性进行判断, 比用挥发分更合理。

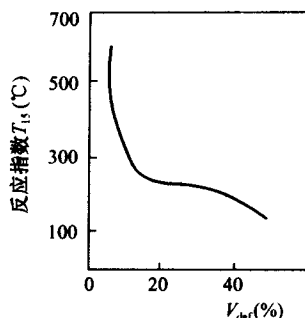


图 1-4 煤的反应指数

煤的着火稳定性是燃烧安全经济的基础, 过去是根据煤中干燥无灰基挥发分的大小来衡量的, 但不够全面。近年来, 中国引进一些先进的研究手段, 如热重分析仪、热显微镜、X 射线衍射仪、色谱质谱红外光谱联用仪、激光全息仪、扫描电镜等, 通过实验研究得到了一些新的参数, 如挥发分初析温度、着火温度、固定碳燃烧速度、着火指数、700℃前着火温升等。这些参数从不同角度反映了燃料的热力特性。用以下方法来分析各种煤的着火特性。

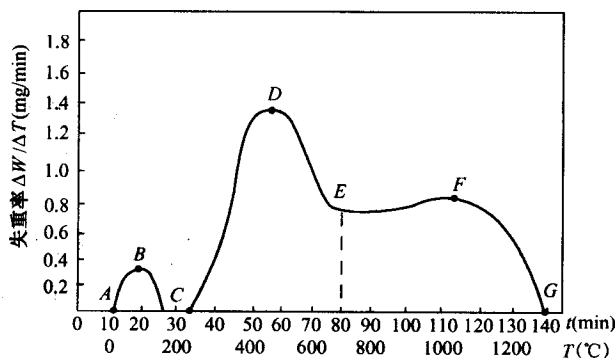


图 1-5 挥发分释放特性曲线

(1) 挥发分释放特性指数 D 。

图 1-5 为某煤种的挥发分释放特性曲线 (即热分解 DTGA 曲线)。图 1-5 中各个特征点的意义为: A 点表示水分开始蒸发, B 点对应水分最大失重率, C 点表示挥发分开始析出, D 点对应挥发分最大失重率及其相应温度, E 点表示特定温度 (700℃) 下挥发分的失重率。在此温度之前, 可燃物失重为

ΔW_{700} , F 点对应固定碳最大失重, G 点表示煤已燃尽。曲线上对应的特征参数有:

- 1) 挥发分着火温度 T_i , °C;
- 2) 挥发分最大释放速度峰值 $(dw/dt)_{max}$, mg/min;
- 3) 对应于 $(dw/dt)_{max}$ 的温度 T_{1max} , °C;
- 4) $(dw/dt) / (dw/dt)_{max} = 1/3$ 对应的温度区间 $\Delta T_{1/3}$, °C。

显然, $(dw/dt)_{max}$ 越大, 挥发分释放得越强烈; T_{1max} 越低, $\Delta T_{1/3}$ 越小, 挥发分的释放高峰出现得越早、越集中, 对着火越有利; 反之, 对着火越不利。

综合上述几个参数, 得到挥发分释放特性指数 D , 其值可定义为

$$D = \frac{(dw/dt)_{max}}{T_{1max} \Delta T_{1/3}} \quad (1-10)$$

用 D 可以判别出不同煤种的挥发分释放特性。很显然, D 值越大, 着火性能越好。

(2) 着火性能指数 F_z 。 F_z 能较好地表征煤的焦活性, 表达式为

$$F_z = 2(V_{ad} + M_{ad}) \times C_{ad} \times 100 \quad (1-11)$$

式中 V_{ad} 、 M_{ad} 、 C_{ad} ——空气干燥基挥发分、水分、固定碳。

F_z 是与煤质有关的一个无因次参数。 F_z 越大,着火性能越好。挥发分和内在水分析出后在碳粒内部形成的空隙度较大,有利于着火。可以看出,煤的内在水分 M_{ad} 的析出与挥发分 V_{ad} 的析出对反应性的影响有同样的效果。当挥发分较低时,在同样的 V_{ad} 下, M_{ad} 较大的煤可能还容易着火;而碳含量 C_{ad} 较大时,化学反应放热较大,也有利于着火。式 (1-10) 和式 (1-11) 也改变了长期以来只用 V_{ad} 来判断煤的着火特性的传统观点。

3. 煤焦燃尽特性分析

煤焦的燃尽时间一般占整个燃烧时间的 90% 左右,燃尽特性的好坏直接影响到燃烧的稳定性 and 锅炉的经济性,用燃尽特性指数 F_B 表示

$$F_B = \frac{10}{X_1 G + X_2 T_{2max} + X_3 \tau + X_4 \tau'} \quad (1-12)$$

式中 G ——燃烧后期的燃烧量, mg;

T_{2max} ——煤焦燃烧最大速度时的对应温度, °C;

τ ——煤的燃尽时间, min;

τ' ——煤焦的燃尽时间, min;

X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 ——因煤种而不同的计算常数。

分析 F_B 可知,燃尽时间越短,后期燃烧量越少,说明煤粉越容易烧完,燃尽性能越好。燃尽指数 F_B 越大,煤的燃尽性能越佳。

4. 结渣特性指数 F_S

影响煤灰结渣特性的煤质特性主要包括煤灰的化学组成、煤灰的熔融特性及熔灰的黏度特性。国内外的相关研究表明:任何一项指数都有相当可靠性,但没有任何一项单一的指数可以完全正确地预报结渣倾向。

综合考虑上述各种因素的影响后,可以用煤的结渣特性指数 F_S 来表示,定义如下

$$F_S = xC_{12} + y(C_{B/A} - C_G) + zC_{S/A} \quad (1-13)$$

式中的 x 、 y 、 z 是计算常数,随煤种的不同而不同,可通过煤种特性试验,由回归分析方法获取。

$$C_{12} = 12 - 0.007ST; C_{B/A} = 0.45 + 5.2B/A; C_G = 22.5 - 0.29G; C_{S/A} = 1.25/A - 0.9$$

$$\text{其中 碱酸比 } \frac{B}{A} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$$

$$\text{硅铝比 } \frac{S}{A} = \frac{SiO_2}{Al_2O_3}$$

$$\text{硅比 } G = \left(\frac{100SiO_2}{SiO_2 + CaO + MgO + Fe_2O_3} \right)$$

分析表明, F_S 越大,煤结渣性越强。

5. 煤的燃烧特性指数判别标准

式 (1-10) ~ 式 (1-13) 是通过大量的实验,并运用回归分析方法获取的经验公式,指数的大小反映了煤的各种燃烧特性,见表 1-2 ~ 表 1-4。

表 1-2

着火稳定性

程度	极易着火	易着火	中等易着火	难着火	极难着火
D		$>2.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5} \sim 2.0 \times 10^{-5}$	$<1.0 \times 10^{-5}$	
F_z	>2.0	$1.5 \sim 2.0$	$1.0 \sim 1.5$	$0.5 \sim 1.0$	<0.5

表 1-3

燃尽特性

程度	极易着火	易着火	中等易着火	难着火	极难着火
F_B	>5.7	$4.4 \sim 5.7$	$3.0 \sim 4.4$	$2.5 \sim 3.0$	<2.5

表 1-4

结渣特性

程 度	轻 微	中 等	严 重
ST ($^{\circ}\text{C}$)	>1390	$1260 \sim 1390$	<1260
B/A	<0.206	$0.206 \sim 0.4$	>0.4
S/A	<1.87	$1.87 \sim 2.65$	>2.65
G	>78.8	$66.1 \sim 78.8$	<66.1
F_s	<1.5	$1.5 \sim 2.0$	>2.0

二、混煤最佳掺烧比例的确定

电站锅炉设计是按某种煤作为设计煤种，同时采用电厂近、中期可能燃用的较差煤种作为校核煤种进行设计的。随着我国电力工业改革的深化以及煤炭市场的放开，加上煤矿分布不均匀等因素，各电厂燃用的煤种发生了较大的变化。许多电厂既燃用本地设计煤种，也燃用外来煤种。因煤种复杂，煤质下降，超出了锅炉的适应能力范围，给电厂锅炉运行带来了极大困难，如制粉系统出力不足、着火困难、燃烧不稳定、飞灰含碳量高、炉内结渣严重、沾污、腐蚀等问题。因此，燃用多种煤的电厂，应充分考虑燃煤成分对锅炉燃烧的影响，根据供应的煤种进行适当混配，以保证入炉煤质符合锅炉的设计要求，提高锅炉燃烧的稳定性和经济性，减少事故的发生。

通常认为，混煤是煤的机械混合，其燃烧特性应是两种煤质特性的加权平均值，然而实际运行并非如此。虽然混煤的元素成分和发热量与原煤的加权平均值相符，但是燃用混煤的炉内过程（如着火稳定性、燃尽性和结渣特性等）与加权平均结果有较大差距。

根据燃煤的组成、对燃煤煤质的具体要求，确定最佳混煤配比方法如下。

（一）掺混煤种的选择

一种情况是为了稳定入炉煤质，在掺混煤种的选择时，应根据电厂实际来煤状况（矿源、煤质、吨位、单价），选择其中煤质较好、来源稳定的一种或几种煤作为基准煤种，其他来煤与之掺混；另一种情况为了降低 SO_2 排放，此时应选择一种或几种来源稳定的低硫煤作为基准煤种，与高硫煤依一定配比掺混。

（二）混煤煤质指标的确定

混煤煤质指标的确定应根据设计煤质和校核煤质确定，并规定允许煤质的变化范围，