

锅炉燃烧性能优化与 污染物减排技术

束继伟 李罡 金宏达 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

锅炉燃烧性能优化与 污染物减排技术

束继伟 李 罡 金宏达 编著
孟繁兵 李元开 吕 莹

常州大学图书馆
藏书章



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书从理论到实践对我国电站锅炉燃烧性能优化及氮氧化物排放等工作中的问题及研究成果进行了全面系统的总结,主要阐述了煤粉着火理论与应用、锅炉燃烧性能分析、锅炉燃烧存在的问题及治理、锅炉混煤掺烧技术、锅炉氮氧化物排放的控制以及火电机组深度调峰技术。

本书融合了多年来作者从事电站锅炉改造研究方面的经验和体会,并将国内外相关领域、研究成果与实际相结合。本书可供从事电站锅炉节能环保、科学研究、运行维护及相关单位的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

锅炉燃烧性能优化与污染物减排技术 / 束继伟等编著. —北京: 中国电力出版社, 2018. 3

ISBN 978-7-5198-1072-6

I. ① 锅… II. ① 束… III. ① 锅炉燃烧—污染物—总排污量控制—研究 IV. ① TK227.1
② X701.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 197064 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 郑艳蓉 (010-63412379) 柳 璐

责任校对: 王小鹏

装帧设计: 王红柳 赵姗姗

责任印制: 蔺义舟

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2018 年 3 月第一版

印 次: 2018 年 3 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米 × 1092 毫米 16 开本

印 张: 11.5

字 数: 286 千字

印 数: 0001—1500 册

定 价: 48.00 元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换



前言

锅炉燃烧性能（特别是大型燃煤锅炉）是决定锅炉运行性能的重要因素，燃烧性能的好坏在很大程度上影响锅炉运行的安全性、经济性和机组调峰灵活性，特别是在当前，火力发电厂锅炉实际燃用煤种严重偏离设计煤种的情况下，锅炉燃烧性能的好坏尤为重要。因此，有必要研究锅炉燃烧的机理、影响性能的设计及运行因素，从而找到提高和改进锅炉燃烧性能的措施。

锅炉的燃烧性能主要包括着火燃烧稳定性、燃尽性和煤灰的结渣性。

最近几年，人们又开始关注炉膛水冷壁的高温腐蚀、炉膛出口烟温偏差、炉内低 NO_x 的生成以及混煤燃烧等问题，随着我国火力发电企业装机由低参数、小容量向高参数、大容量的转变，特别是近年来一大批超临界、超超临界火力发电机组的投产运行，以及大量的可再生能源的并网运行，电网的备用容量越来越大。尤其是在冬季采暖季，风力发电弃风现象与大量的热电企业的并网需求，导致对锅炉的低负荷调峰性能要求越来越高。希望本书通过对影响锅炉稳定燃烧的各项因素进行深层次的全面分析，帮助各发电企业改善锅炉的燃烧性能，特别是锅炉低负荷稳燃性能以及调节性能，至于对流受热面的沾污、腐蚀、堵灰、磨损等，也与燃烧有一定的关系。

近十年来，随着国内煤炭市场的变化，在役运行锅炉实际燃用煤种已经严重偏离了设计煤种。特别是黑龙江省，在役运行锅炉原设计煤质比较单一（绝大多数电厂设计燃用省内烟煤，部分电厂设计燃用内蒙古扎赉诺尔及大雁褐煤），煤质相对较好。然而，发电企业从缓解企业经营压力角度出发，对绝大多数原设计燃用烟煤的锅炉进行了改造，以期适应煤种的变化，特别是对低质褐煤的利用。所以，近年来发电企业在运行期间出现的问题也多集中在锅炉方面。本书重点分析讨论炉内燃烧中的着火稳定性、燃尽性和煤灰结渣性，以及锅炉低负荷稳燃性能及近年来开展的锅炉低氮改造等方面的问题，对于高温腐蚀、炉膛出口烟温偏差等问题也略加分析。对流受热面的沾污、腐蚀、堵灰、磨损问题在运行中都可能遇到，由于不是本文的重点，故这里不加分析，需要时可参阅有关参考文献。

本书的编写目的在于总结成功的经验，分析影响锅炉安全、环保和经济运行的因素，找到改进措施，从而为锅炉的运行、调试提供参考和借鉴。本书也

为性能预诊提供必要的数据，使得预报结果更符合实际情况。

由于篇幅所限，有些内容可能不够细致，请参阅有关参考文献。由于时间及经验不足，书中难免存在不足之处，敬请同行批评指正。

编者

2017年12月

本书主要介绍如何运用气象学知识（包括气象学基本知识）进行性能预诊。全书共分五章。第一章介绍性能预诊的基本概念、性能预诊的目的和意义、性能预诊的方法和步骤。第二章介绍性能预诊的常用方法。第三章介绍性能预诊的常用工具。第四章介绍性能预诊的常用数据。第五章介绍性能预诊的常用案例。本书可作为从事性能预诊工作的工程技术人员、研究人员、管理人员、教学人员、培训人员的参考书，也可作为高等院校相关专业师生的参考书。



目 录

前言

第一章 煤粉着火理论与应用	1
第一节 着火及燃烧稳定性的影响因素	1
第二节 提高锅炉着火及燃烧稳定性	11
第二章 锅炉燃烧性能分析	65
第一节 煤的燃尽机理	65
第二节 影响燃尽的因素及提高燃尽的措施	67
第三节 排烟热损失的影响因素	74
第四节 提高锅炉燃尽性及降低排烟热损失的措施	80
第三章 锅炉燃烧存在的问题及治理	87
第一节 影响锅炉结渣的因素及防止结渣的措施	87
第二节 四角切向燃烧大容量电站锅炉炉膛出口烟温、汽温偏差及其治理	93
第三节 水冷壁外壁高温腐蚀的生成和防止	98
第四章 锅炉混煤掺烧技术	101
第一节 混煤掺烧方式	101
第二节 锅炉掺烧对其性能的影响	102
第三节 锅炉掺烧计算及改造实例	105
第四节 锅炉掺烧褐煤存在的问题及建议	119
第五章 锅炉氮氧化物排放的控制	121
第一节 NO_x 生成原理及影响因素	121
第二节 低氮燃烧技术	133
第三节 国内外主要低 NO_x 燃烧器形式及技术原理	147
第四节 低氮燃烧技术的应用	155
第六章 火电机组深度调峰技术	169
第一节 火电机组深度调峰的背景和意义	169
第二节 火电机组适应深度调峰的改造技术	171
第三节 火电机组灵活性改造整体解决方案	176
第四节 经济运行分析	177
参考文献	178



煤粉着火理论与应用

第一节 着火及燃烧稳定性的影响因素

一、着火机理

为了得到简明的概念,需假定一个简化的物理模型。

设有一个密闭的容器,容积为 V , 器内充满可燃的混合物,容器内各点的温度和浓度均匀,容器表面的温度为 T_0 , 并不随反应的进行而改变。

设反应的热效应为 q , 反应速度为 v , 反应初始温度为 T_0 , 则单位时间内反应发出的热量为

$$Q_1 = qvV = qVk_0C^n \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \quad (1-1)$$

式中 q 、 V 、 k_0 ——定值。

此外,在开始燃烧之前,即在着火过程中,假定反应物质的浓度不变,即 C 相当于可燃混合物的初始浓度,则式 (1-1) 可改写为

$$Q_1 = A \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \quad (1-2)$$

式中 A ——常数。

另外,由于化学反应的结果,容器内的温度升高到 T , 此时将由系统向外散失热量。设容器的表面积为 F , 由气体对外界的总放热系数为 α , 则单位时间内由体系向外散出的热量为

$$Q_2 = \alpha F(T - T_0) \quad (1-3)$$

假设 α 与温度无关,而 F 为定值,那么式 (1-3) 可改写为

$$Q_2 = B(T - T_0) \quad (1-4)$$

式中 B ——常数。

根据 Q_1 与 Q_2 的不同数值,可以讨论容器内进行化学反应时可能的混合物状态。为此,可将式 (1-2) 和式 (1-4) 画在 $Q-T$ 坐标上,如图 1-1~图 1-4 所示。 Q_1 与 T 为超越函数关系, Q_2 与 T 为直线关系, Q_1 的曲线称为发热曲线, Q_2 的曲线称为散热曲线。

图 1-1 表示 Q_1 与 Q_2 在低温区有一个交点的状态。在点 1 处 $Q_1 = Q_2$ 。即在点 1 之前 (温度低于点 1 处的温度), $Q_1 > Q_2$, 说明反应所发出的热量多于系统向外散失的热量。这时,系统便被加热,温度逐渐升

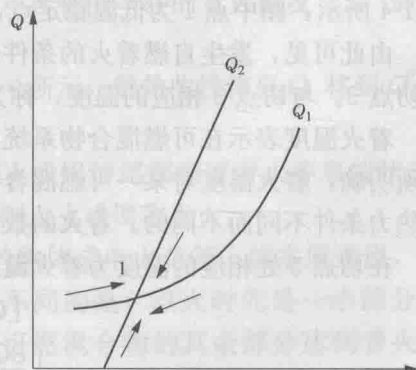


图 1-1 着火机理示意 1



高。到达点 1 时，热量达到平衡状态，过程即稳定下来，保持点 1 的温度。即使因某种外力使过程超过点 1，则因 $Q_2 > Q_1$ ，即散出热量大于发出热量，系统受到冷却将重新回到点 1，点 1 是低温区的稳定点。在这种情况下，自燃着火不可能发生。

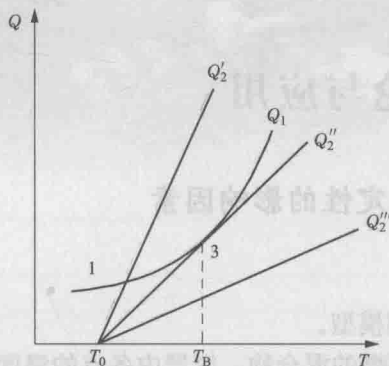


图 1-2 着火机理示意 2

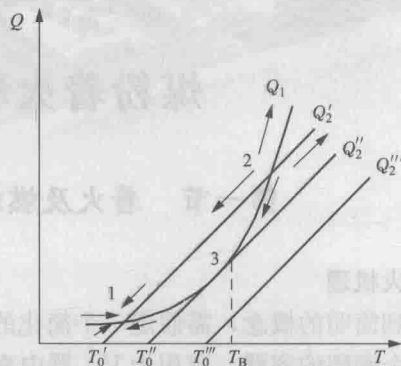


图 1-3 着火机理示意 3

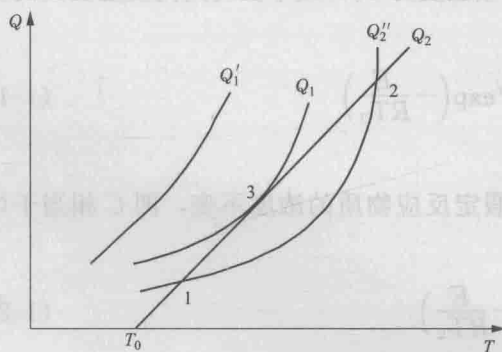


图 1-4 着火机理示意 4

如果改变散热条件，如改变容器表面积，即可得到不同斜率的散热曲线，如图 1-2 所示。 Q_2'' 是散热很弱的情况， Q_1 总是大于 Q_2 ，这时反应便自动加速，直到发生自燃。 Q_2' 是散热很强的情况，与图 1-1 相同，不会发生自燃。在 Q_2' 与 Q_2'' 之间存在 Q_2'' ，与 Q_1 有一个切点 3，反应便加速进行而引起自燃。因而 Q_2'' 是一个临界状态。

如果改变容器的初始壁温 T_0 ，则可以得到一组平行的散热曲线，如图 1-3 所示。此时

Q_2' 为临界状态，与 Q_1 有一切点 3。 Q_2' 与 Q_1 可有两个交点 1 和 2。点 1 为低温稳定点，点 2 为高温不稳定点，因为当过程稍向右移动时， $Q_1 > Q_2$ ，系统即可以自燃；当过程稍向左移动时， $Q_2 > Q_1$ ，系统便会被冷却而降到低温稳定点 1。

若散热曲线不变而改变发热曲线，如改变可燃混合物的成分，便得到几组发热曲线，如图 1-4 所示，图中点 1 为低温稳定点，点 2 为高温不稳定点，点 3 为临界点。

由此可见，发生自燃着火的条件是 $Q_1 > Q_2$ ，而临界条件（最低条件）是 Q_1 与 Q_2 有一个切点 3。与切点 3 相应的温度，称为着火温度或着火点。

着火温度表示在可燃混合物系统中化学反应可以自动加速而达到自燃着火的最低温度。必须明确，着火温度对某一可燃混合物来说，并不是一个化学常数或物理常数，而是随具体的热力条件不同而不同的。着火的数学表示法如下：

在切点 3 处相应的温度为着火温度 T_B ，则有 T_B 的条件为

$$[Q_1]_{T=T_B} = [Q_2]_{T=T_B} \quad (1-5)$$

$$\left[\frac{\partial Q_1}{\partial T} \right]_{T=T_B} = \left[\frac{\partial Q_2}{\partial T} \right]_{T=T_B} \quad (1-6)$$

将式 (1-2) 和式 (1-4) 代入, 可得

$$A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_B}\right) = B(T_B - T_0) \quad (1-7)$$

$$A \cdot \frac{E}{RT_B^2} \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_B}\right) = B \quad (1-8)$$

用式 (1-8) 除式 (1-7), 得

$$T_B - T_0 = \frac{RT_B^2}{E} \quad (1-9)$$

解此方程得

$$T_B = \frac{E}{2R} \pm \sqrt{\frac{E^2}{4R^2} - \frac{T_0 E}{R}} \quad (1-10)$$

式 (1-10) 中取“+”时, 将得到一个过高的、实际达不到的温度, 故应取“-”号。将根号展开为级数, 得

$$T_B = \frac{E}{2R} - \frac{E}{2R} \left[1 - \frac{2RT_0}{E} - \frac{2R^2 T_0^2}{E^2} - \frac{4R^3 T_0^3}{E^3} - \dots \right] \quad (1-11)$$

实际上, 一般 $E \gg T_0$, 故可以忽略 3 次方以后各项。由此得到着火温度为

$$T_B = T_0 + \frac{RT_0^2}{E} \quad (1-12)$$

或

$$T_B - T_0 = \frac{RT_0^2}{E} \quad (1-13)$$

式 (1-13) 表示在自燃着火的条件下气体的着火温度与器壁温度之间的关系。一般情况下, 若 $E = 30000 \sim 60000 \text{ kcal/mol}$ ($1 \text{ kcal} = 4.1868 \text{ kJ}$), 器壁温度为 1000 K 时, $T_B - T_0 \approx 34 \sim 67^\circ \text{C}$, 由此可知, T_B 与 T_0 相差很小。故有的试验中用 T_0 代表着火温度, 并不引起很大的误差。知道了 T_B 与 T_0 的关系就可以将式 (1-13) 及 $T_B \approx T_0$ 代入式 (1-7) 得

$$A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) = B \cdot \frac{RT_0^2}{E} \quad (1-14)$$

求解出 T_0 作为着火温度 T_{zh} , 这个着火温度 T_{zh} 将是 E/R 和 $aF/h_0 C^n$ 的函数, 即 $T_{zh} \propto E/R, aF/h_0 C^n$, 并且可以解释如下:

(1) 燃料的活性如果很强 (一般 E 小或者 h_0 很高) 如褐煤, 那么如图 1-5 所示, 它的反应发热曲线 Q'_1 就会比活性弱的燃料如贫煤 (曲线 Q_1) 具有低一些的着火温度 T'_{zh} , 即容易着火。

(2) 散热条件加强时 (式中 a 及 F 增大), 则如图 1-6 所示, 散热曲线将自 Q_1 移到 Q'_2 的位置, 因而着火温度 T'_{zh} 升高。

以上所讨论的是自燃着火情况, 适用于制粉系统着火或锅炉尾部烟道着火等事故状态。而在锅炉炉膛燃烧技术中使可燃物着火燃烧的方式是强制点火或简称点火。

用来点火的热源可以是小火焰、高温气体、炽热的物体或电火花等。就本质来说, 点火和自燃着火一样, 都有燃烧反应的自动加速过程。不同的是, 点火时先是一小部分可燃混合物着火, 然后靠燃烧 (火焰前沿) 的传播, 使可燃混合物的其余部分达到着火燃烧的状态。

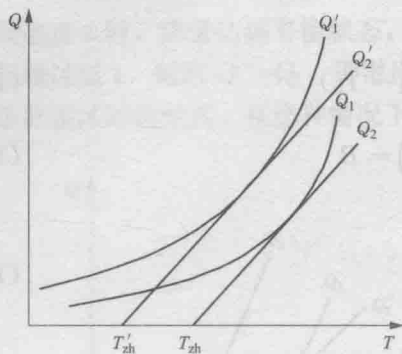


图 1-5 燃料活性对自然过程的影响

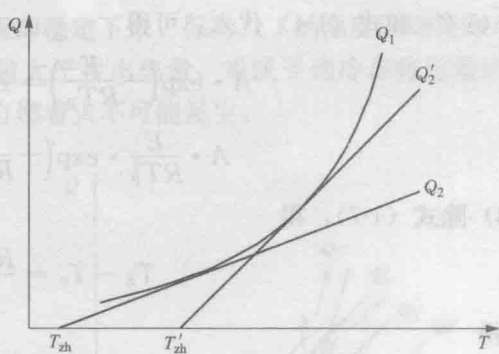


图 1-6 散热条件对自燃过程的影响

二、着火浓度界限

理论研究表明，不论是自燃着火还是强制点火，着火条件及火焰的稳定性都与可燃物的浓度有关，而可燃物的浓度又取决于体系的压力和可燃混合物的成分。因此，除了温度条件以外，着火也只有在一定的压力和成分条件下才能实现。

着火温度与压力和成分之间的关系见图 1-7。根据这两个曲线还可以做出图 1-8，表示在着火条件下，压力与成分的关系。

从图 1-8 中看出，在一定的压力下可燃物的浓度小于某一数量或大于某一数量都不可能发生自燃着火，这个浓度范围便称为“着火浓度界限”。同时，能实现着火的最小浓度称为“浓度下限”，能实现着火的最大浓度称为浓度上限，如图 1-8 中的 C_1 和 C_2 。不难理解：在强制点火过程也存在点火浓度界限，超过一定浓度范围点不着火。点火浓度界限还与惰性气体的含量有关。加入任何惰性气体，都会使浓度界限变窄。

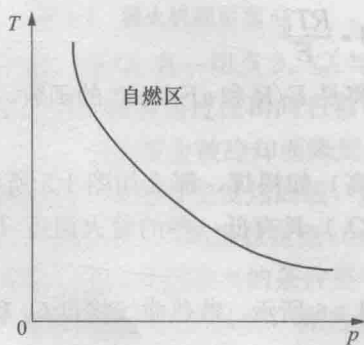


图 1-7 一定成分下着火温度与压力的关系图

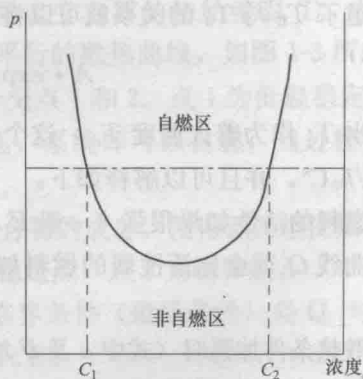


图 1-8 在一定温度下着火压力与成分关系

三、着火延迟期

下面进一步讨论着火的感应期或称着火延迟期。它的物理含义是指混合气体由开始发生反应到燃烧出现的一段时间。其更确切的定义是：在混合气体已达到着火的条件下，由初始

状态到温度骤升（相当于图 1-9 中 $T=T_c$ 的状态，这时温升由减速变成加速，也即由 $\frac{d^2T}{d\tau^2} \leq 0$ 变成 $\frac{d^2T}{d\tau^2} > 0$ ）的瞬间所需的时间。

自燃过程中的温度变化情况可以根据式 (1-1) 和式 (1-3) 来计算

$$Q_1 - Q_2 = V\rho c_v \frac{dT}{d\tau} \quad (1-15)$$

即根据 Q_1 与 Q_2 之差可以求出温度变化率 $\frac{dT}{d\tau}$ 。

由此可以求出着火延迟期 τ_{yc} 为

$$\tau_{yc} = \frac{RT_\infty^2 c_v \rho_\infty}{EQk_0 \rho_\infty^n \exp\left(-\frac{E}{RT_\infty}\right)} = \left(\frac{Qw_\infty E}{\rho_\infty c_v RT_\infty^2}\right)^{-1} \quad (1-16)$$

由式 (1-16) 可以看出，可燃混合物如果有低的容积比热容 c_v ，高的燃烧发热量 Q ，高的反应速率 $W_{i,\infty}$ 则着火延迟期就短，否则就长。从式 (1-16) 中表面看： E 高， T_∞ 高，则 τ 降低，但是它们与反应速率中的 E ， T_∞ 相比，其影响数量级要小的很多，所以 E 高， T_∞ 高时， τ_1 要升高。

将式 (1-16) 画成图 1-9 中的曲线，曲线 I、II、III、IV、V 代表发热量 Q 和初始温度 T_∞ 逐渐升高的结果。当反应温度升高到 T_c 的时候出现一个拐点，即热着火点，相应的时间也就是着火延迟期 τ_{yc} 。

如果初温还要高一些，温度上升曲线就如图 1-9 中的曲线 IV，孕育时间就缩短一些。如果初温很高，已超过 T_c ，那么温度上升曲线就如图 1-9 中的曲线 V，拐点消失，而且曲线上凹，延迟期将更短。

四、锅炉燃烧室中的着火与熄火

锅炉燃烧室内的着火过程与上述密闭空间中的可燃物着火过程有所不同。锅炉燃烧室虽有一定的空间，但是因为连续不断地供应燃料和氧化剂，在空间中反应物质的浓度可以看成是不随时间的变化而变化的。锅炉燃烧室内的气体是流动的，各组分在燃烧室内部都有一定的停留时间。由于混合过程和化学反应也需要一定时间，因而可燃物燃烧在燃烧室内可能完全燃烧，也可能不完全燃烧，即具有一定的燃烧完全系数。

实际上，锅炉燃烧室内的工作条件是复杂的。为便于理论研究，假定一个简化模型，假定锅炉燃烧室为绝热的，着火过程和燃烧过程均为绝热过程。此外，假定燃烧室内的温度、浓度、压力（常压）等参数的平均值与出口参数是相同的，即设为零维模型。

（一）均相可燃混合物着火燃烧的热量平衡

假设连续进入燃烧室的可燃混合物的初始温度为 T_0 ，浓度为 C_0 ；燃烧产物连续由燃烧室流出，其温度为 T ，没有燃尽的可燃混合物的浓度为 C ；可燃混合物在燃烧室内的停留时间为 τ_1 ，完全燃烧反应所需要的时间为 τ_2 。

为方便起见，取无因次量

$$\varphi = 1 - \frac{C}{C_0} \quad (1-17)$$

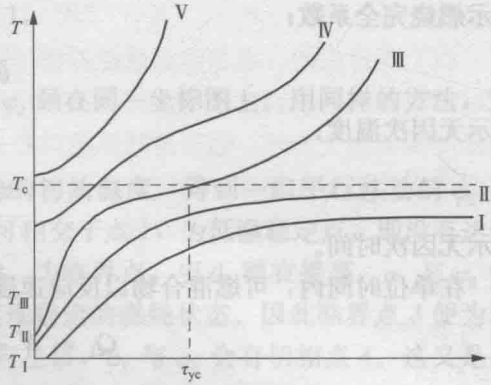


图 1-9 着火延迟期示意



表示燃烧完全系数；

$$\theta = \frac{RT}{E} \quad (1-18)$$

表示无因次温度；

$$\tau_{12} = \frac{\tau_1}{\tau_2} \quad (1-19)$$

表示无因次时间。

在单位时间内，可燃混合物以反应速度 W 所放出的热量 Q_1 为

$$Q_1 = W \cdot q = \frac{C_0 - C}{\tau_1} \cdot q \quad (1-20)$$

式中 q ——可燃混合物的发热量。

同时，按式 (1-1) 也可写为

$$Q_1 = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot C \cdot q \quad (1-21)$$

此处假设反应为一级反应，近似地 $k_0 \approx 1/\tau_2$ ，则

$$Q_1 = \frac{1}{\tau_2} \cdot e^{-1/\theta} \cdot C \cdot q \quad (1-22)$$

令式 (1-20) 和式 (1-22) 相等，整理后可得

$$\varphi = \tau_{12} \cdot e^{-1/\theta} (1 - \varphi) \quad (1-23)$$

由式 (1-23) 得到 φ 值记为 φ_1 ，则

$$\varphi_1 = \frac{1}{1 + \frac{e^{1/\theta}}{\tau_{12}}} \quad (1-24)$$

φ_1 称为发热曲线。

另外，在绝热燃烧室中， Q_1 将全部转为燃烧产物的热量。燃烧产物热量的增加为

$$Q_2 = \frac{c_p}{\tau_1} (T - T_0) \quad (1-25)$$

令式 (1-25) 和式 (1-20) 相等，则

$$\frac{C_0 - C}{\tau_1} \cdot q = \frac{c_p}{\tau_1} (T - T_0) \quad (1-26)$$

由式 (1-26) 求得 φ 值记为 φ_2 ，则

$$\varphi_2 = \frac{c_p}{qC_0} \cdot \frac{E}{R} (\theta - \theta_0) = \frac{1}{\nu} (Q - Q_0) \quad (1-27)$$

φ_2 称为散热曲线。

其中

$$\nu = \frac{RqC_0}{Ec_p}$$

这里 φ_1 、 φ_2 和式 (1-1)、式 (1-3) 有相似的概念。 φ_1 相当于反应放出的热量， φ_2 相当于散失的热量， θ 相当于温度。

可以用 φ - θ 坐标来表明燃烧室的燃烧热力条件。 φ_1 与 θ 的关系为超越函数关系，当可燃混合物的性质一定时，为一直线关系。

实际上，稳定工况的燃烧室中，必须达到热量平衡，即 $Q_1 = Q_2$ 、 $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ 。燃烧室中有一个稳定的 φ 值，该 φ 值的稳定水平反映燃烧状态。如 φ 值很小，则可能未达到着火状

态； φ 值越大，说明燃烧强度越大。 φ 的最大值为 1。

(二) 稳定状态和临界状态

为了确定锅炉燃烧室的稳定水平，可将 φ_1 和 φ_2 画在同一坐标图上。用同样的方法，还可以研究燃烧室着火和熄火的临界条件。

如图 1-10 所示， φ_1 不变，而改变可燃混合物的初始温度，得到一组平行移动的 φ_2 曲线。由图 1-10 可以看出，当 θ_0 很低时， φ_1 与 φ_2 可相交于点 1，为低温稳定点，即没有达到着火。如果提高 θ_0 ，则会使 φ_1 与 φ_2 有一个切点 3，为临界点，当 θ_0 稍有提高， φ_1 与 φ_2 便会相交于点 5。点 5 是一个高温稳定点，在该点实现稳定的燃烧状态。因此临界点 3 便为着火点。如在燃烧状态下降低初始温度， φ_2 曲线便向左移， φ_1 与 φ_2 会有切相点 4。这又是一个临界点，低于点 4，过程便立即下降稳定在低温稳定点 1。因此，临界点 4 为熄灭点。

由此可知，燃烧室内着火或熄灭的临界条件是 $\varphi_1 = \varphi_2$ 、 $\frac{d\varphi_1}{d\theta} = \frac{d\varphi_2}{d\theta}$ ，据此可以分析燃烧室的着火临界条件与燃烧稳定水平与各因素之间的关系。

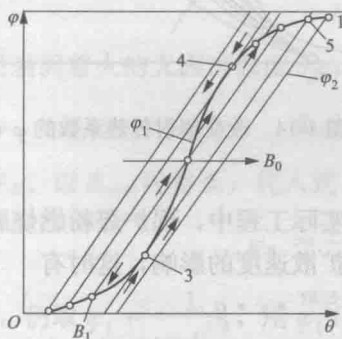


图 1-10 改变初始温度的 φ - θ 图

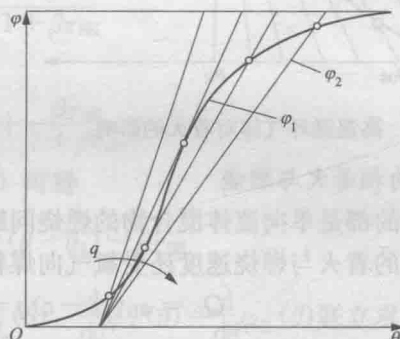


图 1-11 改变可燃混合物发热量的 φ - θ 图

混合物初始温度对着火的影响见图 1-10，由图可以看出：提高混合物的预热（初始）温度，有利于实现混合物的着火。并在着火后，过程可以稳定在较高水平，即温度较高，燃烧完全系数较大。

可燃混合物发热量的影响见图 1-11。发热量 q 变化时， φ_2 的斜率变化。 q 越大， $d\varphi/d\theta$ 越小，这将有利益于着火，并使过程稳定在较高水平。

τ_{12} 的影响见图 1-12， τ_{12} 变化时， φ_1 将变化； τ_{12} 越长， φ_1 越向左移动。所以按绝热过程来说，增加燃烧产物在燃烧室内的逗留时间，或者加快反应速度，都可使过程的稳定水平提高。

另外，使高温燃烧产物循环加入到初始混合物中，将会使 φ_2 改变。一般情况下，会提高混合物的初始温度，同时降低混合物的发热量，即提高 θ_0 ，且增加 $d\varphi/d\theta$ 值。图 1-13 表示高温的完全燃烧的循环气体对着火过程的影响。图中 a 表示循环倍数（循环气体与可燃混合物量之比）， a 值越大，越有利于实现着火。所以向火焰根部加入高温循环气体，是提高燃烧稳定性的有

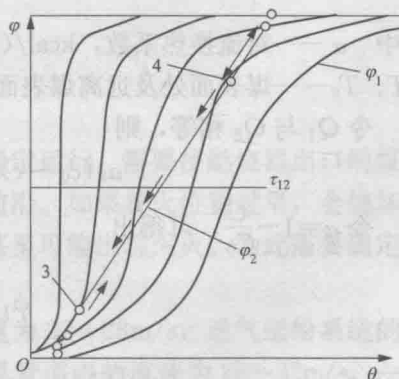


图 1-12 改变 τ_{12} 的 φ - θ 图



效措施之一。

以上所讨论的，都是假定燃烧过程是绝热的。如果不是绝热的，即当存在外部热交换过程时，则散热曲线要复杂得多。如火焰向外有辐射传热时，散热曲线将不再是直线。图 1-14 表示有辐射热交换时，辐射传热系数对着火的影响。由图 1-14 可知， σ 越大，着火越困难，过程稳定的水平也越低。所以存在强烈冷却的燃烧室，可燃物不易着火，但容易熄灭，或者温度和燃烧完全系数的水平较低。

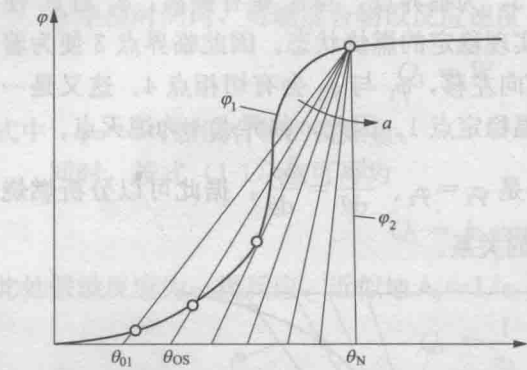


图 1-13 高温循环气体对着火的影响

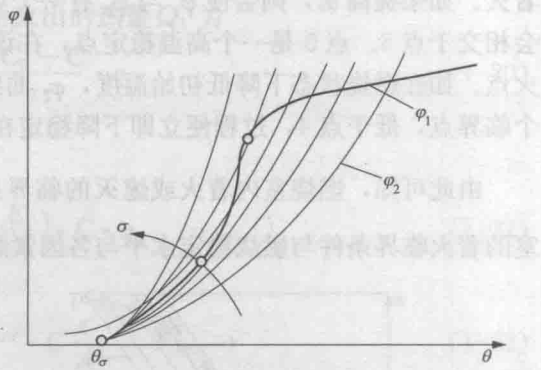


图 1-14 改变辐射传热系数的 $\varphi-\theta$ 图

(三) 非均相着火与燃烧

前面讨论的都是单向流体混合物的燃烧问题，在实际工程中，锅炉煤粉燃烧属于非均相燃烧。因此它的着火与燃烧速度还受氧气向煤粉表面扩散速度的影响，这时有

$$Q_1 = \alpha_B(c_0 - c)q = K_0 e^{-E/KT} \cdot c \cdot q \tag{1-28}$$

其中

$$\alpha_B = 2D_B/d$$

式中 Q_1 ——单位表面上每单位时间内放出的热量；

α_B ——空气扩散交换系数，m/s；

D_B ——煤表面扩散系数；

d ——煤粉颗粒直径；

q ——每单位容积反应气体的反应热效应。

设 Q_{II} 为每单位时间从煤的单位表面上所导走的热量，则

$$Q_{II} = \alpha(T - T_0) \tag{1-29}$$

式中 α ——对流换热系数，kcal/(m² · s · °C)；

T 、 T_0 ——煤表面处及远离煤表面处的气体温度。

令 Q_1 与 Q_{II} 相等，则

$$\alpha_B(c_0 - c)q = K_0 e^{-K/KT} c \cdot q = \alpha(T - T_0)$$

令 $\varphi = 1 - \frac{C}{C_0}$ ，可得出

$$\varphi_I = \frac{\tau_{BK}}{\tau_{BK} + e^{1/\theta}} = \frac{1}{1 + \frac{e^{1/\theta}}{\tau_{BK}}} \tag{1-30}$$

$$\varphi_{II} = \frac{1}{\nu}(\theta - \theta_0) \tag{1-31}$$

其中

$$\nu = \frac{RqC_0}{EC_p}$$

$$\tau_{BK} = \frac{\tau_B}{\tau_K} = \frac{k_0}{\alpha_B}$$

式中 ν ——表面反应发热量。

比较式 (1-30)、式 (1-31) 与式 (1-24)、式 (1-27) 可以看出, 对于非均相反应的放热与散热公式形式上与均相相同, 所不同的是以 τ_{BK} 代替了 τ_{12} 。

按式 (1-30)、式 (1-31) 计算煤的着火温度 θ 时会发现, 煤粉的直径越小, 着火温度越高, 与实际锅炉运行情况相反。原因是实际炉膛不是绝热的, 有辐射及对流 (卷吸的热烟气) 热量加入。外来的热量与煤粉直径 d 的关系呈正比, 而且影响大于绝热时的散热量, 故应考虑外来的加热量才行。

(四) 考虑外来加热量时的着火热

在非均相着火并有外来加热量时, 会使混合物的无因次折算发热量 $\nu_{\text{折合}}$ 降低

$$\nu_{\text{折合}} = \frac{\nu}{1 + \beta\tau_{BK}} \quad (1-32)$$

并且使煤粉表面着火的无因次温度 $\theta_{0\text{折合}}$ 降低

$$\theta_{0\text{折合}} = \theta_0 + \frac{\beta\tau_{BK}}{1 + \beta\tau_{BK}}\nu \quad (1-33)$$

以 $\nu_{\text{折合}}$ 代替 ν , 以 $\theta_{0\text{折合}}$ 代替 θ_0 , 代入式 (1-31) 可得

$$\varphi_{II} = \frac{1 + \beta\tau_{BK}}{\nu}(\theta - \theta_0) - \beta\tau_{BK} \quad (1-34)$$

而 φ_I 不变, 仍取 $\varphi_I = \frac{1}{1 + \frac{e^{1/\theta}}{\tau_{BK}}}$, 用 $\varphi_I(\theta) = \varphi_{II}(\theta)$, $\frac{d}{d\theta}\varphi_I(\theta) = \frac{d}{d\theta}\varphi_{II}(\theta)$ 联立求解, 即可求出

煤粉气流的着火温度 θ 。

其中

$$\beta = \frac{a_1}{c_p k_0}$$

$$\tau_{BK} = \frac{k_0}{\alpha_B}$$

$$\alpha_B = \frac{2D_B}{d}$$

式中 α_1 ——传热系数。

五、火焰传播速度

在实际炉膛燃烧过程中, 为了使煤粉燃烧器安全、稳定运行, 需要使燃烧器出口的煤粉气流混合物 (即一次风) 有一个合适的着火位置或着火前沿。如果着火位置过早, 会烧坏燃烧器喷口; 着火位置过晚, 则不利于锅炉燃烧的稳定, 甚至可能出现灭火。为此需要确定合适的一次风速或一次风率。

□ 一般情况下, 直吹式制粉系统的一次风管道内的流速为 22~28m/s, 乏气送粉系统的一次风管道内的流速为 22~28m/s, 热风送粉系统的一次风管道内的流速为 28~32m/s。一次风速 (一次风率) 的大小, 除了与制粉系统的形式有关以外, 还与实际燃用的煤种关系密切。



当燃烧器出口的一次风速与火焰传播速度相等时,火焰就在该处稳定下来,而这一速度就是运行人员需要并且维持的一次风速,因此要研究火焰传播速度 u 。

锅炉燃烧中的火焰是属于湍流火焰,但为了研究方便,首先要考虑层流的火焰传播速度 u_{CL} 。

层流火焰传播速度 u_{CL} 可表示为

$$u_{CL} = \sqrt{\frac{a}{\rho c_p} \cdot \frac{2QW}{(T_a - T_0)^2} \cdot \frac{RT_a^2}{E}} \quad (1-35)$$

其中 $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$

$$W = h_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_a}\right) \cdot C^n$$

式中 a ——气体导温系数;
 λ ——气体导热系数;
 ρ ——气体密度;
 Q ——可燃混合物的反应热;
 W ——反应速度;
 T_a ——反应的理论燃烧温度;
 T_0 ——可燃混合物初温;
 E ——燃料活化能;
 R ——通用气体常数;
 h_0 ——燃料反应频率因子;
 C ——混合物初始浓度。

由式 (1-35) 可知,层流火焰传播速度随初温 T_0 的增加而增加,随火焰温度 T_a 的增加而增加,而其中最重要的是气体导温系数 a 和反应速度 W 。

湍流火焰传播速度的变化规律与层流状态不一样。大标尺强湍流动下的火焰传播速度 u_t 为

$$u_t \approx 4.3 \frac{W'}{\sqrt{\ln\left(1 + \frac{W'}{u_{CL}}\right)}} \quad (1-36)$$

式中 W' ——湍流脉动速度。

有学者进一步研究给出如下的湍流火焰传播速度:

大尺度弱湍流时

$$u_t = u_{CL} + W' \quad (1-37)$$

大尺度强湍流时

$$u_t = u_{CL} + \sqrt{2u_{CL} \cdot W'} \quad (1-38)$$

实际燃烧设备中的气流一般都处于湍流状态。实验证明:湍流火焰的传播速度要比层流时大得多,可超过 200cm/s,而层流火焰传播速度一般不超过 100cm/s。由于一次风自喷口喷出后马上扩散,周界的风速要逐渐下降。当与火焰传播速度相等时稳定着火,所以一次风出口速度总是大于火焰传播速度,否则会发生回火而烧损燃烧器事故,具体数值由经验

确定。

第二节 提高锅炉着火及燃烧稳定性

火力发电厂锅炉运行的好坏,直接决定了整个机组的运行经济性。锅炉及其附属系统结构和运行工况复杂,是火力发电厂中问题集中、事故多发、对机组可用率影响最大的设备。锅炉燃烧系统是锅炉系统中最重要的部分,锅炉燃烧状态的好坏直接影响电厂的经济效益,燃烧的稳定性直接影响锅炉的安全性,锅炉稳定、持续的燃烧是关系到燃烧系统安全性的重要因素,对锅炉的安全、经济运行有着重要的影响。当前,我国电站锅炉使用混煤情况非常普遍,这给锅炉的设计和运行带来了更大的困难。

锅炉燃烧的稳定性既反映了锅炉着火的难易程度,又体现了着火后的燃烧状况。合理的燃烧工况应该是迅速地着火、快速而稳定地火焰传播、强烈地燃烧和充分地燃尽。着火阶段是整个燃烧阶段的关键,要使燃烧能在较短时间内完成,必须要强化着火过程,保证着火过程稳定而迅速地进行。稳定着火是燃烧过程的良好开端,而充分燃烧且燃尽是提高锅炉经济性的关键。保证燃料在炉膛内完全燃烧的条件,一是着火要及时稳定,二是要控制燃烧速度并使燃料在炉内有足够的燃烧时间和停留时间。

从之前的分析可以看出,影响燃煤锅炉(粉炉)着火稳定性的主要因素有:

1. 燃料特性

燃料特性对燃煤锅炉的稳定燃烧影响很大。例如,无烟煤的活化能高,挥发分低,不易着火;而褐煤则相反,活化能低,挥发分高,容易着火及稳定燃烧(水分过高者除外);煤质变差,煤粉气流着火推迟,煤粉在炉内燃烧时间缩短。煤的热值低、灰分高又使炉膛烟气温度降低,造成燃烧不稳定、不完全,甚至灭火。燃料特性中对着火过程影响最大的是挥发分,挥发分低,煤粉气流的着火温度升高、着火热增大;原煤水分增大时,着火热随之增大,同时由于一部分燃烧热消耗在加热水分并使其气化和过热上,降低了炉内烟气温度,对着火不利。

2. 煤粉浓度

一定的煤粉浓度对锅炉的着火稳定性也起着重要的作用,煤粉浓度是煤粉气流着火最主要的影响因素,煤粉浓度的改变直接影响着火温度和着火热的变化。煤粉浓度增加,着火温度显著降低,着火温度降到某一值后不再继续降低,而是有一定程度的升高,即存在一个对应最小着火温度的最佳煤粉浓度,且挥发分含量越高的煤,最佳煤粉浓度越小。煤粉浓度降低时,煤粉空气混合物所需着火热较少,且少于供给的热量,因此足以很快将煤粉气流加热至着火的临界状态,煤粉颗粒必定发生着火。但由于煤粉浓度低,放出的热量少,故燃烧不强烈,无法形成连续的火焰,向外散热较大,温度水平较低。随着煤粉浓度的不断增加,所需着火热量增多,且不断接近供给的热量,因而燃烧放热逐渐加强,温度水平不断提高。当增加到某一煤粉浓度时,着火热恰好等于供给热,此时放热量最大,温度水平相对最高,着火燃烧最稳定。如果煤粉浓度高于此值,所需着火热大于着火区域所能提供的热量,着火推迟,温度降低。

3. 混合物初温

提高混合物的初始温度,减少了把煤粉气流加热到着火温度所需的热量,加快了着火,