

中华人民共和国能源行业标准

NB/T 10127—2018

代替 JB/T 10440—2004

大型煤粉锅炉炉膛及燃烧器性能设计规范

Performance design standard for furnaces and burners of large-capacity
pulverized-coal-fired boilers

2018-12-25 发布

2019-05-01 实施



国家能源局 发布

国家能源局

公告

2018 年 第 16 号

依据《国家能源局关于印发〈能源领域行业标准化管理办法（试行）〉及实施细则的通知》（国能局科技〔2009〕52号）有关规定，经审查，国家能源局批准《光伏发电工程地质勘察规范》等 204 项行业标准，其中能源标准（NB）32 项、电力标准（DL）172 项，现予以发布。

附件：行业标准目录

二〇一八年十二月二十五日

[illegible]

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 一般要求	2
5 设计条件	2
6 燃烧方式的选择	3
7 炉膛有效容积的确定方法	4
8 炉膛热力特性参数及燃烧器设计参数的选择	9
9 与炉膛及燃烧器设计有关的其他要求	18
10 锅炉燃烧性能评价	23
附录 A (规范性附录) 煤的着火稳定性指数 R_W 及燃尽特性指数 R_J 的确定	26
附录 B (规范性附录) 煤灰的结渣特性指数 R_z 的确定	30
附录 C (规范性附录) 煤粉在最上排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心到屏下缘平均停留时间 τ 的计算	32
附录 D (资料性附录) 卫燃带修正系数 ζ 的计算	33
附录 E (资料性附录) 降低 NO_x 生成浓度的措施	34
附录 F (资料性附录) 切向燃烧锅炉下炉膛水冷壁污染系数 ζ_x 值的选择	36
附录 G (资料性附录) 不同煤质条件下推荐的磨煤机及制粉系统类型	37
附录 H (资料性附录) 煤质特性、炉膛热力特性参数及燃烧器设计参数对 q_4 的影响	38
附录 I (资料性附录) 燃烧器区域结渣的预防措施	39
附录 J (资料性附录) 水冷壁外壁高温腐蚀的预防措施	40

前 言

本标准按 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。
本标准代替 JB/T 10440—2004《大型煤粉锅炉炉膛及燃烧器性能设计规范》。

本标准与 JB/T 10440—2004 相比，主要技术变化如下：

- 增加了“一般要求”“设计条件”两章内容；
- 将原第 5 章“炉膛有效容积的确定及炉膛热力特性参数计算式”进行拆分，各自成章；
- 修改了原表 2“切向燃烧方式炉膛热力特性参数（BMCR 工况）的推荐范围”中 600MW 机组部分内容，增加 1 000MW 机组内容；
- 修改了原表 3“配直吹式制粉系统的切向燃烧方式燃烧器工况参数（BMCR 工况）的推荐范围”中 600MW 机组部分内容，增加 1 000MW 机组内容；
- 修改了原表 6“对冲燃烧方式炉膛热力特性参数（BMCR 工况）的推荐范围”中 600MW 机组部分内容，增加 1 000MW 机组内容；
- 修改了原表 7“配直吹式制粉系统的对冲燃烧方式燃烧器工况参数（BMCR 工况）的推荐范围”中 600MW 机组部分内容，增加 1 000MW 机组内容；
- 修改了原表 9“W 型火焰燃烧方式炉膛热力特性参数工况参数（BMCR 工况）的推荐范围”中 300MW 机组部分内容，增加 600MW 机组内容；
- 将原表 10“W 型火焰燃烧方式双旋风筒分离式燃燃器工况参数（BMCR 工况）的推荐范围”、表 11“W 型火焰燃烧方式双调风旋流式燃燃器工况参数（BMCR 工况）的推荐范围”合并为表 10“配直吹式制粉系统的 W 型火焰燃烧锅炉燃烧器配风参数（BMCR 工况）的推荐范围”，修改了原表 10、表 11 中 300MW 机组部分内容，增加 600MW 机组内容。

本标准由全国锅炉压力容器标准化技术委员会（SAC/TC 262）提出并归口。

本标准起草单位：上海普华煤燃烧技术研究中心、上海发电设备成套设计研究院有限责任公司、哈尔滨锅炉厂有限责任公司、上海锅炉厂有限公司、东方电气集团东方锅炉股份有限公司、北京巴布科克·威尔科克斯有限公司、武汉锅炉股份有限公司、无锡华光锅炉股份有限公司、西安热工研究院有限公司、哈尔滨电站设备成套设计研究所有限公司、清华大学、哈尔滨工业大学、西安交通大学、华中科技大学。

本标准主要起草人：施鸿飞、胡仁德、陈端雨、张彦军、张建文、张山鹰、韩振杰、吴华栋、毛军华、吕俊复、张海、孙绍增、陈秀彬、王月明、于德亭、车得福、郑楚光。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

- JB/T 10440—2004。

大型煤粉锅炉炉膛及燃烧器性能设计规范

1 范围

1.1 本标准规定了大型煤粉锅炉燃烧方式，炉膛有效容积的确定方法，炉膛热力特性参数及燃烧器设计参数的选择，炉膛及燃烧器设计性能的评价指标以及与选型设计有关的其他要求。

1.2 本标准适用于配 300MW 等级及以上容量发电机组（最大连续蒸发量 1 000t/h 等级及以上）的大型煤粉锅炉炉膛及燃烧器性能设计，发电机组容量小于 300MW 的煤粉锅炉也可参照使用。本标准不适用于增压燃烧锅炉、旋风燃烧锅炉及液态排渣煤粉锅炉。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 211	煤中全水分的测定方法
GB/T 212	煤的工业分析方法
GB/T 213	煤的发热量测定方法
GB/T 214	煤中全硫的测定方法
GB/T 219	煤灰熔融性的测定方法
GB/T 476	煤中碳和氢的测定方法
GB/T 1574	煤灰成分分析方法
GB/T 2565	煤的可磨性指数测定方法 哈德格罗夫法
GB/T 2900.48—2008	电工名词术语 锅炉
GB/T 3715	煤质及煤分析有关术语
GB/T 10184	电站锅炉性能试验规程
GB/T 16507	水管锅炉
GB/T 34348	电站锅炉技术条件
TSG G0001	锅炉安全技术监察规程
TSG G0002	锅炉节能技术监督管理规程

3 术语和定义

GB/T 2900.48 和 GB/T 3715 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。为了便于使用，以下重复列出了其中的某些术语和定义。

3.1

炉膛有效容积 V effective furnace volume

炉膛边界范围以内进行燃料燃烧及有效辐射换热过程的空间的几何容积。

[GB/T 2900.48—2008，定义 4.3.25]

3.2

煤的着火稳定性指数 R_w coal flammability index

表征煤的着火稳定难易程度。

3.3

煤的燃尽特性指数 R_j coal burnout index

表征煤的燃尽难易程度。

3.4

煤灰的结渣特性指数 R_z coal slagging index

表征煤灰的结渣倾向。

3.5

锅炉最低不投辅助燃料稳燃负荷率 BMLR boiler minimum stable load ratio without auxiliary fuel support

在设计煤种和合同规定条件下，锅炉不投辅助燃料助燃的最低稳定燃烧负荷与锅炉最大连续负荷（BMCR）之比。

4 一般要求

4.1 炉膛及燃烧器的安全技术要求应符合 TSG G0001 的规定。

4.2 炉膛及燃烧器的节能基本要求应符合 TSG G0002 的规定。

4.3 炉膛及燃烧器的性能设计应符合 GB/T 16507 及 GB/T 34348 的要求，满足锅炉性能与运行需要。

4.4 炉膛的布置、燃烧的方式应与锅炉用煤煤质特性相适应，并综合考虑着火稳定、燃烧完全、防沾污、防结渣、防腐蚀、防磨损、低污染物排放等因素。

4.5 炉膛设计应保证炉膛空气动力场良好，炉膛出口烟气温度场均匀，炉膛出口同一标高烟道两侧对称点间的烟温偏差不宜超过 50℃。

4.6 炉膛和燃烧器的设计应保证锅炉用煤具有较高的燃尽率、较低的不投辅助燃料稳燃负荷率。

5 设计条件

一般包括但不限于如下内容：

a) 锅炉参数。

b) 锅炉用煤的煤质资料（包括设计煤种的煤质资料和校核煤种的煤质资料），至少应包括如下项目：

1) 锅炉用煤的名称、产地，如果是混合煤，除获取混合煤的煤质资料外，还应获取各掺混煤的煤质资料及掺混比例；

2) 煤的工业分析结果；

3) 煤的元素分析结果；

4) 煤的发热值测量结果；

5) 煤灰分析结果；

6) 煤的可磨性指数测定结果。

c) 着火稳定性指数 R_w 和煤的燃尽特性指数 R_j 应按附录 A 的方法测定。

- d) 煤灰的结渣特性指数 R_z 应按附录 B 的方法确定。
- e) 相关的气象条件, 主要指锅炉建设地的年平均大气压力 (或建设地的海拔高度) 及相应的大气温度等。
- f) 预计运行方式 (包括带基本负荷或调峰运行等)。
- g) 设计制造技术标准。

6 燃烧方式的选择

6.1 燃烧方式的选择主要依据煤质特性。煤质特性依据 GB/T 211、GB/T 212、GB/T 213、GB/T 214、GB/T 219、GB/T 476、GB/T 1574 和 GB/T 2565, 并按附录 A、附录 B 所给出的专项测试结果确定。

6.2 煤的着火稳定性宜采用煤的着火稳定性指数 R_w 来表征。由附录 A 确定的 R_w 判定着火难易程度的划分界限为:

- $R_w < 4.02$, 极难着火煤种;
- $4.02 \leq R_w < 4.67$, 难着火煤种;
- $4.67 \leq R_w < 5.00$, 中等着火煤种;
- $5.00 \leq R_w < 5.59$, 易着火煤种;
- $R_w \geq 5.59$, 极易着火煤种。

R_w 的高低与煤中的干燥无灰基挥发分 V_{daf} 有一定关系, 当无条件取得 R_w 的试验值, 而又要使用以 R_w 为参数的计算式和图表时, 可用 V_{daf} 估算 R_w , 但对灰分 (A_{ar}) 大于 35% 或水分 (M_{ar}) 大于 40% 的煤种, 则应根据估算 R_w 确定的着火稳定性界限相应地降低一级, 如把易着火煤种降为中等着火煤种。

根据 30 多台大容量锅炉炉前煤数据, R_w 与 V_{daf} 的拟合关系式如式 (1) 所示:

$$R_w = 3.59 + 0.054 V_{daf} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- R_w ——煤的着火稳定性指数;
- V_{daf} ——干燥无灰基挥发分, %。

6.3 煤的燃尽难易程度由煤的燃尽特性指数 R_j 来表征。由附录 A 确定的 R_j 判定燃尽程度的划分界限为:

- $R_j < 2.5$, 极难燃尽煤种;
- $2.5 \leq R_j < 3.0$, 难燃尽煤种;
- $3.0 \leq R_j < 4.4$, 中等燃尽煤种;
- $4.4 \leq R_j < 5.29$, 易燃尽煤种;
- $R_j \geq 5.29$, 极易燃尽煤种。

6.4 煤灰的结渣倾向由煤灰的结渣特性指数 R_z 来表征。由附录 B 确定的 R_z 判定结渣倾向的划分界限为:

- $R_z < 1.5$, 不易结渣煤种;
- $1.5 \leq R_z < 2.5$, 中等结渣煤种;
- $R_z \geq 2.5$, 严重结渣煤种。

6.5 煤粉锅炉燃烧方式及制粉系统的选择如下：

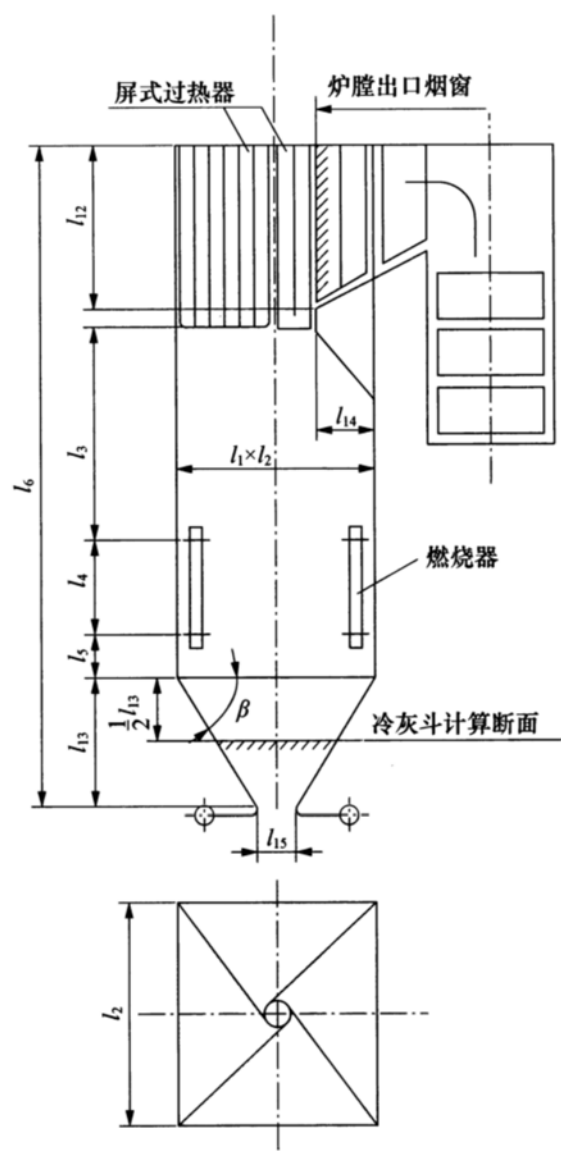
- a) 极易着火煤种 ($R_w \geq 5.59$ 或 $V_{daf} \geq 37\%$ 的褐煤) 宜采用切向燃烧或对冲燃烧方式, 采用直吹式制粉系统。当入炉褐煤的收到基水分 $M_{ar} \geq 30\%$ 时, 从干燥和防爆需要考虑, 宜采用抽炉烟干燥的风扇磨煤机直吹式制粉系统; 但对于入炉煤收到基水分 $M_{ar} < 35\%$ 、低位发热量 $Q_{net,ar} > 10\text{MJ/kg}$ 的褐煤, 也可采用中速磨煤机, 并采用较高的热风温度 ($\geq 380^\circ\text{C}$) 或采用其他保证制粉系统干燥出力的措施。
- b) 易着火煤种及中等着火煤种 ($4.67 \leq R_w < 5.59$ 或 $20\% \leq V_{daf} < 37\%$ 的烟煤), 宜采用切向燃烧或对冲燃烧方式, 采用直吹式制粉系统, 当煤的磨损性很强时, 应采用钢球磨直吹式系统。
- c) 难着火煤种 ($4.24 \leq R_w < 4.67$ 或 $12\% \leq V_{daf} < 20\%$ 的贫煤), 宜采用切向燃烧或对冲燃烧方式, 采用钢球磨煤机中间储仓式制粉系统热风送粉、双进双出钢球磨煤机直吹式制粉系统或中速磨煤机直吹式制粉系统 (当采用中速磨煤机时, 宜配用回转式分离器)。
- d) 难着火煤种 ($4.02 \leq R_w < 4.24$ 或 $8\% \leq V_{daf} < 12\%$ 的煤种), 当要求较强的调峰带低负荷能力、较高的燃烧效率或煤灰具有中等以上结渣倾向时, 宜采用 W 型火焰燃烧方式, 经过技术经济比较, 也可采用切向或对冲燃烧方式。
- e) 极难着火煤种 ($R_w < 4.02$ 或 $V_{daf} < 8\%$, 或 $R_J < 2.5$ 的无烟煤), 宜采用 W 型火焰燃烧方式; 宜配钢球磨煤机中间储仓式热风送粉制粉系统、双进双出钢球磨煤机直吹式系统或高温热风置换的半直吹式制粉系统。
- f) 对于易爆煤种, 选择制粉系统时应考虑必要的防爆措施。

7 炉膛有效容积的确定方法

7.1 对于切向燃烧锅炉炉膛出口烟窗截面, 一般规定为炉膛后墙折焰角尖端垂直向上直至顶棚管形成的假想平面, 如图 1 所示。如果布置在上述假想平面以内 (即炉膛侧) 的屏式受热面横向间距 $\leq 457\text{mm}$, 则该屏区应从炉膛有效容积中扣除; 对于对冲燃烧锅炉及 W 型火焰燃烧锅炉横向间距 $> 457\text{mm}$ 的屏式受热面, 一般超出折焰角尖端垂直向上的平面, 如图 2、图 3 所示, 则炉膛出口烟窗可以沿水平烟道向后移至出现受热面横向间距 $\leq 457\text{mm}$ 的截面, 但是不能超出后墙水冷壁 (对于 W 型锅炉指上炉膛后墙水冷壁) 延伸的平面; 对于塔式布置锅炉炉膛出口烟窗为沿烟气行程遇到的受热面水平方向管间横向间距 $\leq 457\text{mm}$ 的第一排管子中心线构成的水平假想平面, 如图 4 所示。

7.2 炉膛冷灰斗区有效容积只计上半高度, 下半高度是死滞区, 不计入炉膛有效容积。

7.3 炉膛截面积按水冷壁管中心线所围成的矩形平面计算, 当设计带有较大的切角 (炉膛切角小直角边长 $l_{11} > \sqrt{l_1 l_2} / 10$, 对于 W 型锅炉则为 $l_{11} > \sqrt{l_8 l_2} / 10$) 时, 如图 3 所示, 则其炉膛有效容积应按切角壁面包裹的实际体积计算。



注：图示的切向燃烧锅炉的后竖井为单烟道布置，也有用双烟道平行挡板调温的切向燃烧锅炉。

图 1 切向燃烧锅炉炉膛结构尺寸示意图

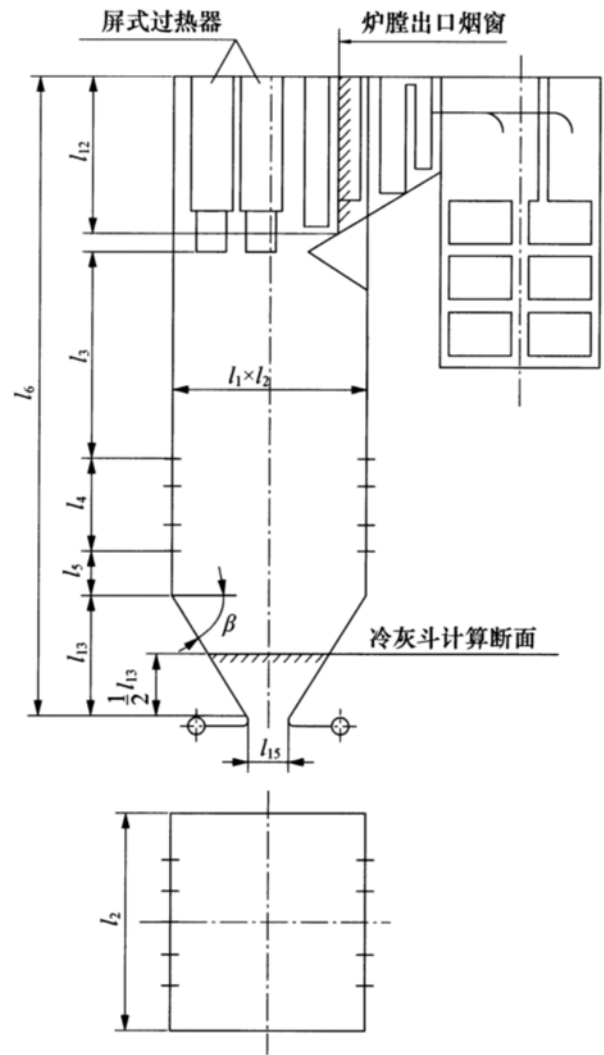


图2 对冲燃烧锅炉炉膛结构尺寸示意图

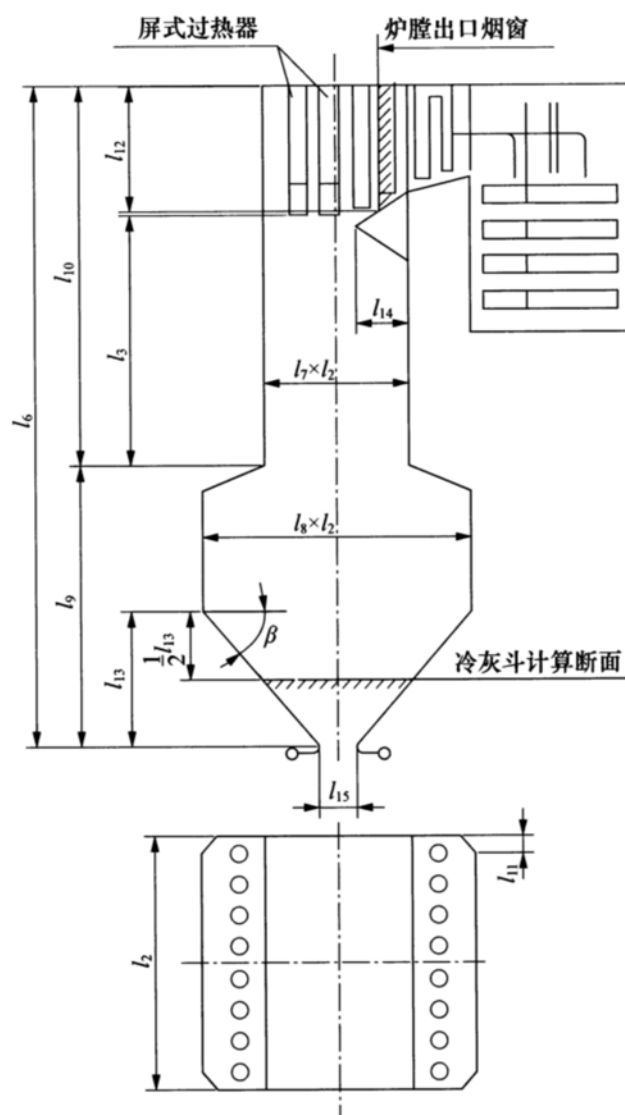
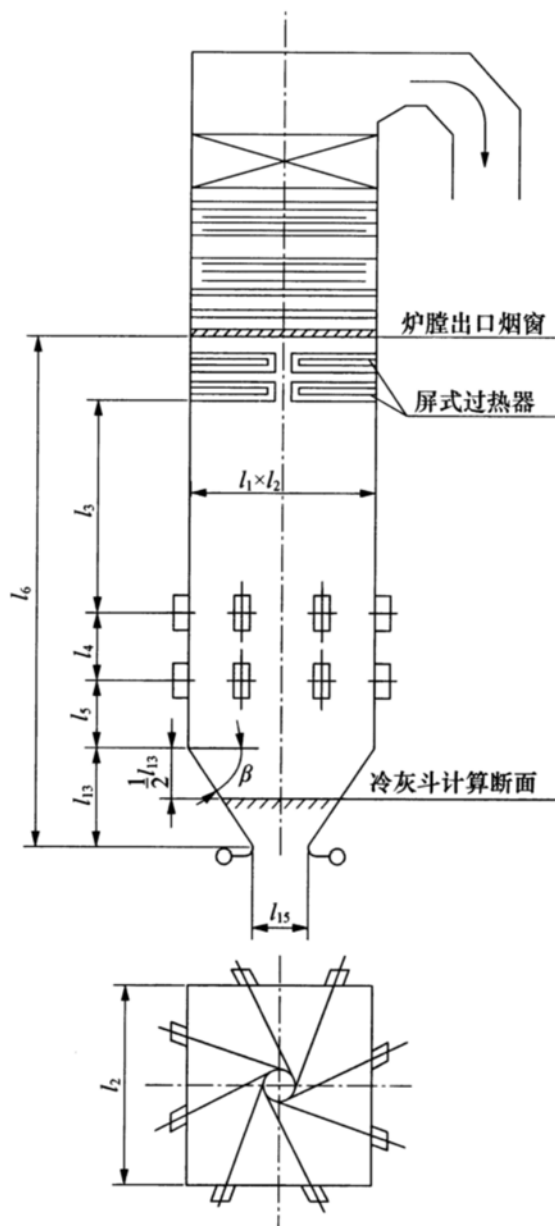


图3 W型火焰燃烧锅炉炉膛结构尺寸示意图



注：图示的塔式炉为切向燃烧方式，另外，也有对冲燃烧及 W 型燃烧方式的塔式炉。

图 4 塔式布置锅炉炉膛结构尺寸示意图

注：图 1~图 4 中符号说明如下：

l_1 ——炉膛深度，前后墙水冷壁管中心线间的距离，m；

l_2 ——炉膛宽度，左右墙水冷壁管中心线间的距离，m；

l_3 ——对于切向及对冲燃烧锅炉为燃烧器最上排一次风喷嘴中心线（对燃用无烟煤的切向燃烧锅炉采用中间储仓式热风送粉系统，如三次风喷嘴布置在一次风喷嘴中心标高以上时，则为最上排三次风喷嘴）至屏最下排管中心线的距离，m；对于塔式布置锅炉为最上排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心线至炉内水平管最下排管中心线的距离，m；对于 W 型火焰燃烧锅炉为从拱顶上折点到折焰角尖端或屏底的垂直距离，m；

l_4 ——最上排一次风喷嘴或三次风喷嘴（参见 l_3 说明）至最下排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心线间的距离，m；

l_5 ——最下排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心线至冷灰斗拐点间的距离，m；

- l_6 ——炉膛高度，指从炉底排渣口至炉膛顶棚管中心线间的距离；对于塔式布置锅炉，指从炉底排渣口至炉膛出口水平烟窗最下排管子中心线间的距离，m；
- l_7 ——W 型火焰燃烧锅炉上炉膛深度，m；
- l_8 ——W 型火焰燃烧锅炉下炉膛深度，m；
- l_9 ——W 型火焰燃烧锅炉下炉膛高度，从炉底排渣口至拱顶上折角顶点的距离，m；
- l_{10} ——W 型火焰燃烧锅炉上炉膛高度，从拱顶上折角顶点至炉膛顶棚管中心线的距离，m；
- l_{11} ——炉膛切角小直角边长，m；
- l_{12} ——炉膛出口烟窗高度，m；
- l_{13} ——炉膛冷灰斗拐点至炉底排渣口间的距离，m；
- l_{14} ——折焰角深度，折焰角顶端至后墙水冷壁管中心线间的距离，m；
- l_{15} ——排渣口净深度，冷灰斗底部出口的水平净间距，m；
- β ——冷灰斗斜坡与水平面所成角度，(°)。

8 炉膛热力特性参数及燃烧器设计参数的选择

8.1 主要炉膛热力特性参数计算

8.1.1 炉膛容积热负荷 q_v

炉膛容积热负荷 q_v 计算式见式 (2)：

$$q_v = N_r / V \quad \text{..... (2)}$$

式中：

q_v ——炉膛容积热负荷，kW/m³；

V ——炉膛有效容积，m³；

N_r ——锅炉输入热功率，kW。本标准中是指在锅炉最大连续出力 (BMCR) 工况下锅炉设计计算煤耗量 B_j 与设计煤收到基低位发热量 $Q_{\text{net,ar}}$ 的乘积，见式 (3)：

$$N_r = B_j Q_{\text{net,ar}} \quad \text{..... (3)}$$

式中：

$Q_{\text{net,ar}}$ ——煤的收到基低位发热量，kJ/kg；

B_j ——锅炉设计计算煤耗量，kg/s。计算方法见式 (4)：

$$B_j = B (1 - q_4 / 100) \quad \text{..... (4)}$$

式中：

B ——锅炉设计煤耗量，kg/s；

q_4 ——固体未完全燃烧热损失，%。

8.1.2 煤粉平均停留时间 τ

从燃烧特性去选取炉膛容积热负荷主要是控制煤粉在炉内的停留时间 (以烟气平均停留时间 τ 替代)，本标准认定煤粉平均停留时间为最上排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心至屏下缘的这段停留时间 τ 。 τ 的计算方法见附录 C。

8.1.3 炉膛截面热负荷 q_F

炉膛截面热负荷 q_F 按式 (5) 进行计算：

$$q_F = \frac{N_r}{1000F} \quad \text{..... (5)}$$

式中：

q_F ——炉膛截面热负荷，MW/m²；

F ——炉膛截面积，m²。除有较大的切角（见 7.3）外，按式（6）计算；对于 W 型火焰燃烧锅炉应取下炉膛截面积，按式（7）进行计算：

$$F = l_1 \times l_2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$F = l_8 \times l_2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

l_1 ——炉膛深度，前后墙水冷壁管中心线间的距离，m；

l_2 ——炉膛宽度，左右墙水冷壁管中心线间的距离，m；

l_8 ——W 型火焰燃烧锅炉下炉膛深度，m。

8.1.4 燃烧器区壁面热负荷 q_{Hr}

燃烧器区壁面热负荷 q_{Hr} 按式（8）进行计算：

$$q_{Hr} = \frac{N_r}{1\,000\,F_{Hr}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中：

q_{Hr} ——燃烧器区壁面热负荷，MW/m²；

F_{Hr} ——最上排、最下排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心线间距离外加 3m 所包围的炉膛围带面积，m²，计算公式见式（9）：

$$F_{Hr} = 2(l_1 + l_2) \times (l_4 + 3) \times \zeta \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中：

l_4 ——最上排一次风喷嘴或三次风喷嘴（参见 l_3 说明）至最下排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心线间的距离，m；

ζ ——卫燃带修正系数，计算公式见式（10），推导参见附录 D。

$$\zeta = 1 - \frac{0.535\,F_w}{2(l_1 + l_2)(l_4 + 3)} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中：

F_w ——卫燃带面积，m²。

W 型火焰燃烧方式锅炉不计算燃烧器区壁面热负荷。

8.1.5 塔式布置锅炉的相关要求

不论切向、对冲或 W 型燃烧方式都可采用塔式布置，除炉膛出口烟窗需要特殊定义外（见第 7 章），其余的热力特性参数及燃烧器设计参数选择，均决定于其选用的燃烧方式。

8.2 切向燃烧方式炉膛热力特性参数及燃烧器设计参数的选择

8.2.1 热力特性参数的选取原则如下：

- 热力参数的选取可根据多台已投运的锅炉设计数据采用类比法进行确定；
- 机组容量、煤着火燃尽特性及煤灰结渣倾向对炉膛热力特性参数值的影响趋势见表 1；
- 炉膛容积热负荷的选取要适中。热负荷过高会影响燃尽，并导致炉膛出口烟温过高，以致受热面局部结渣；热负荷过低，则会使辐射与对流受热面分配失衡，甚至省煤器受热面趋近于零，这不仅增加锅炉制造成本，也不利于锅炉运行性能；
- q_F 与 q_{Hr} 共同构成主燃烧区燃烧强度，因此，在其中某一参数（如 q_F ）为一定时，为了提高

燃烧稳定性,可提高 q_{Hr} 值;

- e) 各一次风喷嘴中心线间的平均距离与单只一次风喷嘴输入热功率有关。热功率增加,其平均距离应增大;
- f) 对于采用热炉烟干燥制粉系统低温燃烧的褐煤锅炉,最上排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心线至屏下缘距离的煤粉平均停留时间选取既要保证充分燃尽,又要考虑由于燃烧温度低所造成的辐射受热面积增加的问题;
- g) 对于切向燃烧方式配中间储仓式制粉系统,应考虑三次风引入炉膛的位置,采取加强煤粉燃尽和降低 NO_x 排放的措施。

表1 机组容量、煤着火、燃尽特性及煤灰结渣倾向对炉膛热力特性参数的影响趋势

项 目	炉膛热力特性参数影响趋势				
	q_v	q_F	q_{Hr}	l_3	τ
机组容量 \uparrow	\downarrow	\uparrow	—	—	—
煤的着火性能 \downarrow	—	\uparrow	\uparrow	—	—
煤的燃尽性能 \downarrow	\downarrow	\uparrow	\uparrow	\uparrow	\uparrow
煤灰结渣倾向 \uparrow	\downarrow	\downarrow	\downarrow	\uparrow	\uparrow

8.2.2 配直吹式制粉系统的切向燃烧方式炉膛热力特性参数(BMCR工况)推荐范围见表2。

表2 配直吹式制粉系统的切向燃烧方式炉膛热力特性参数(BMCR工况)的推荐范围

项 目	符号	单位	煤 种	炉膛热力特性参数（BMCR 工况）推荐值		
				300MW 等级	600MW 等级	1 000MW 等级
炉膛容积热负荷	q_v	kW/m^3	无烟煤/贫煤	85~116	80~95	70~80
			烟煤	90~118	80~105	70~90
			褐煤	75~90	70~80	(60~70)
炉膛截面热负荷	q_F	MW/m^2	无烟煤/贫煤	4.5~5.2	4.6~5.3	4.6~5.5
			烟煤	3.8~5.1	4.2~5.4	4.5~5.5
			褐煤	3.5~4.3	3.7~4.5	(4.0~4.8)
燃烧器区 壁面热负荷	q_{Hr}	MW/m^2	无烟煤/贫煤	1.4~2.2	1.8~2.0	1.5~2.2
			烟煤	1.1~2.1	1.3~2.1	1.2~2.1
			褐煤	1.0~1.5	1.1~1.6	(1.1~1.6)
最上排一次风喷嘴或 三次风喷嘴中心至屏 下缘距离	l_3	m	无烟煤/贫煤	17~21.5	20~24	22~28
			烟煤	16~20	17~22	20~28
			褐煤	18~24	22~25	(22~26)
最上排一次风喷嘴或 三次风喷嘴中心至屏 下缘停留时间	τ	s	无烟煤/贫煤	1.8~2.3	1.9~2.5	2.1~2.6
			烟煤	1.6~2.2	1.6~2.3	2.3~2.8
			褐煤	2.0~2.6	2.2~2.8	(2.2~3.0)
注 1：距离 l_3 、停留时间 τ 以及容积热负荷 q_v 未考虑低气压的影响，修正方式见 9.14。						
注 2：无烟煤/贫煤指 $R_W < 4.67$ （ $V_{\text{daf}} < 20\%$ ）的煤种。						
注 3：烟煤指 $4.67 \leq R_W < 5.59$ （ $20\% \leq V_{\text{daf}} < 37\%$ ）的煤种。						
注 4：褐煤指 $R_W \geq 5.59$ （ $V_{\text{daf}} \geq 37\%$ ）的煤种。						
注 5：无烟煤/贫煤的 q_{Hr} 未考虑卫燃带修正系数。						
注 6：表中括号内数据均为参考值。						

8.2.3 配直吹式制粉系统的切向燃烧方式直流式燃烧器设计参数(BMCR工况)的推荐范围见表3；
配中间储仓式制粉系统的切向燃烧方式直流式燃烧器设计参数(BMCR工况)的推荐范围见表4。

表3 配直吹式制粉系统的切向燃烧方式直流式燃烧器设计参数(BMCR工况)的推荐范围

项 目	单 位	煤 种		燃烧器设计参数（BMCR 工况）推荐值		
				300MW 等级	600MW 等级	1 000MW 等级
一次风喷嘴只数	只	无烟煤/贫煤		16~24	20~24	32~48
		烟煤		16~24	20~24	32~48
		褐煤	风扇磨系统	12~28	16~32	—
			中速磨系统	18~28	24~32	—
一次风喷嘴层数	层	无烟煤/贫煤		4~6	5~6	单火球 8~12
		烟煤		4~6	5~6	双火球 4~6
		褐煤	风扇磨系统	2~3	2~8	—
			中速磨系统	5~7	3~8	—
一次风风粉混合物 温度	℃	无烟煤/贫煤		90~130	85~130	85~130
		烟煤		70~100	70~100	70~100
		褐煤	风扇磨系统	100~180 ^a	100~180 ^a	—
			中速磨系统	60~70	60~70	—
一次风率	%	无烟煤/贫煤		14~25	14~25	14~25
		烟煤		18~25	18~30	18~30
		褐煤	风扇磨系统	25~35	25~35	—
			中速磨系统	15~25	25~35	—
一次风速度	m/s	无烟煤/贫煤		20~24	22~26	22~26
		烟煤		22~30	20~32	20~32
		褐煤		16~22	14 ^b ~25	—
二次风温度	℃	无烟煤/贫煤		350~380	340~380	340~380
		烟煤		300~360	300~360	300~360
		褐煤		300~350	300~350	—
二次风率 ^c	%	无烟煤/贫煤		75~86	74~86	74~86
		烟煤		75~82	67~82	67~82
		褐煤		75~85	65~80	—
二次风速度	m/s	无烟煤/贫煤		40~48	42~56	42~56
		烟煤		45~52	40~58	40~60
		褐煤		45~55	45~56	—
炉膛出口过量空气 系数		无烟煤/贫煤		1.18~1.25	1.18~1.25	1.18~1.25
		烟煤		1.15~1.20	1.15~1.20	1.15~1.20
		褐煤		1.14~1.20	1.14~1.20	—
^a 收到基水分 M_{ar} 低于 50% 时，上限推荐值取 160℃。						
^b 收到基水分 M_{ar} 低于 50% 时，下限推荐值取 16m/s。						
^c 应考虑备用燃烧器停用时冷却用风风率。						

表 4 配中间储仓式制粉系统的切向燃烧方式直流式燃烧器设计参数（BMCR 工况）的推荐范围

项 目	单 位	煤 种	燃烧器设计参数（BMCR 工况） 推荐值（300MW 等级）
一次风喷嘴只数	只	无烟煤/贫煤	16~20
		烟煤	16~24
		劣质烟煤 ^a	16~24
一次风喷嘴层数	层	无烟煤/贫煤	4~5
		烟煤	4~6
		劣质烟煤	4~6
一次风风粉混合物温度 ^b	℃	无烟煤/贫煤	200~260 ^c
		烟煤	70~100
		劣质烟煤	100~200 ^d
一次风率	%	无烟煤/贫煤	12~22
		烟煤	25~33
		劣质烟煤	16~27
一次风速度	m/s	无烟煤/贫煤	20~28
		烟煤	25~30
		劣质烟煤	22~27
二次风温度	℃	无烟煤/贫煤	320~380
		烟煤	300~360
		劣质烟煤	310~360
二次风率	%	无烟煤/贫煤	53~72
		烟煤	67~75
		劣质烟煤	53~85
二次风速度	m/s	无烟煤/贫煤	40~50
		烟煤	45~52
		劣质烟煤	40~50
三次风率	%	无烟煤/贫煤	16~22
		烟煤	0
		劣质烟煤	16~26
三次风速度	m/s	无烟煤/贫煤	50~60
		烟煤	—
		劣质烟煤	50~60
三次风温度	℃	无烟煤/贫煤	70~130
		烟煤	—
		劣质烟煤	70~130
炉膛出口过量空气系数		无烟煤/贫煤	1.25
		烟煤	1.2~1.25
		劣质烟煤	1.2~1.25

^a 烟煤灰分 $A_{ad} > 40\%$ 、 $Q_{net,ar} < 16.7\text{MJ/kg}$ 或 $A_{ad} > 32\%$ 的洗中煤可定为劣质烟煤。

^b 一次风风粉混合物温度选择时应考虑磨煤机出口允许最高温度。

^c 200℃~260℃用于热风送粉系统，当用三次风送粉时，贫煤一次风风粉混合物温度约为 130℃。

^d 当用于热风送粉时可取 200℃。

8.2.4 选择切向燃烧方式直流式燃烧器设计参数时应遵从以下原则：

- a) 单只一次风喷嘴最大允许热功率的选取与炉膛截面积及煤灰熔融特性温度有关。炉膛截面积增加，则单只一次风喷嘴最大允许热功率可增加；煤灰熔融特性温度升高，则单只一次风喷嘴最大允许热功率可增加。单只一次风喷嘴热功率增大，则一次风喷嘴数量减少，层数减少；
- b) HP、RP、MPS 型磨煤机直吹式制粉系统均需要有备用磨煤机，因而均需有一次风喷嘴备用层；双进双出钢球磨煤机一般不设备用磨煤机，也不设备用一次风喷嘴；风扇磨煤机需要备用 1 角或 2 角燃烧器；中间储仓式制粉系统一般不设备用一次风喷嘴；
- c) 机组容量、煤的特性对燃烧器设计参数的影响趋势见表 5；
- d) 各次风率均以扣除炉膛漏风和火检探头冷却风后的风量为 100% 进行计算；
- e) 对于高水分褐煤抽高温炉烟干燥时，其一次风率应降低；对灰熔融特性温度低而发热量高的褐煤采用低温燃烧时，为防止结渣，一次风速应高些，二次风温应低些。

注：本标准所指的是常规的直流式燃烧器，配风结构特殊的新型燃烧器可不受本标准限制。

表 5 机组容量、煤的特性对燃烧器设计参数的影响趋势

项 目	设计参数影响趋势						
	一次风粉混合物温度/℃	一次风率/%	一次风速/(m/s)	二次风温/℃	二次风率/%	二次风速/(m/s)	煤粉细度 $R_{90}/\%$
机组容量 ↑	—	—	↑	—	—	↑	—
煤的着火性能 ↓	↑	↓	↓	↑	↑	—	↓
煤的燃尽性能 ↓	↑	↓	↓	↑	↑	—	↓
煤灰的结渣倾向 ↑	—	↑	↑	—	↓	↑	↓

8.3 对冲燃烧方式炉膛热力特性参数及燃烧器设计参数的选择

8.3.1 对冲燃烧方式炉膛热力特性参数（BMCR 工况）的推荐范围见表 6。其确定原则与切向燃烧方式基本相同，见 8.2.1 及 8.2.4。

表 6 配直吹式制粉系统的对冲燃烧方式炉膛热力特性参数（BMCR 工况）的推荐范围

项 目	符号	单 位	煤 种	炉膛热力特性参数（BMCR 工况）推荐值		
				300MW 等级	600MW 等级	1 000MW 等级
炉膛容积热负荷	q_v	kW/m^3	无烟煤/贫煤	90~120	80~95	75~90
			烟煤	95~125	80~105	70~90
			褐煤	80~100	75~90	(65~80)
炉膛截面热负荷	q_F	MW/m^2	无烟煤/贫煤	4.2~5.2	4.3~5.3	4.5~5.5
			烟煤	3.6~5.0	4.1~5.0	4.3~5.1
			褐煤	3.2~4.4	3.8~4.6	(4.0~4.7)
燃烧器区壁面热负荷	q_{Hr}	MW/m^2	无烟煤/贫煤	1.1~1.8	1.3~2.0	1.4~2.2
			烟煤	1.1~1.7	1.1~1.8	1.1~1.8
			褐煤	1.0~1.5	1.0~1.6	(1.0~1.7)

表 6（续）

项 目	符号	单 位	煤 种	炉膛热力特性参数（BMCR 工况）推荐值		
				300MW 等级	600MW 等级	1 000MW 等级
最上排一次风 喷嘴或三次风 喷嘴中心至屏 下缘距离	l_3	m	无烟煤/贫煤	15~20	18~29	22~30
			烟煤	14~18	19~28	22~30
			褐煤	16~22	20~24	(22~26)
最上排一次风 喷嘴或三次风 喷嘴中心至屏 下缘停留时间	τ	s	无烟煤/贫煤	1.6~2.2	1.9~2.7	2.1~2.6
			烟煤	1.5~2.0	1.9~3.0	1.9~3.0
			褐煤	2.0~2.5	2.0~2.6	(2.0~2.6)
注 1：距离 l_3 、停留时间 τ 以及容积热负荷 q_v 未考虑低气压的影响，修正方式见 9.14。 注 2：无烟煤/贫煤指 $R_W < 4.67$ ($V_{daf} < 20\%$) 的煤种。 注 3：烟煤指 $4.67 \leq R_W < 5.59$ ($20\% \leq V_{daf} < 37\%$) 的煤种。 注 4：褐煤指 $R_W \geq 5.59$ ($V_{daf} \geq 37\%$) 的煤种。 注 5：无烟煤/贫煤的 q_{Hr} 未考虑卫燃带修正系数。 注 6：表中括号内数据均为参考值。						

8.3.2 配直吹式制粉系统的对冲燃烧方式燃烧器设计参数（BMCR 工况）的推荐范围见表 7；配中间储仓式制粉系统的对冲燃烧方式燃烧器设计参数（BMCR 工况）的推荐范围见表 8。

表 7 配直吹式制粉系统的对冲燃烧方式燃烧器设计参数（BMCR 工况）的推荐范围

项 目	单 位	煤 种	燃烧器设计参数（BMCR 工况）推荐值		
			300MW 等级	600MW 等级	1 000MW 等级
燃烧器只数	只	无烟煤/贫煤	16~24	24~36	36~48
		烟煤	16~32	24~36	36~48
		褐煤	20~24	24~36	(48~56)
前后墙燃烧器总层数	层	无烟煤/贫煤	4~6	6~8	6~8
		烟煤	4~6	6~8	6~8
		褐煤	5~6	5~7	(6~7)
一次风风粉混合物温度	℃	无烟煤/贫煤	90~130	80~130	80~130
		烟煤	70~100	70~100	70~100
		褐煤	60~70	60~70	(60~70)
一次风率	%	无烟煤/贫煤	16~25	16~25	16~25
		烟煤	16~25	18~30	18~30
		褐煤	25~35	25~35	(25~35)
一次风速度	m/s	无烟煤/贫煤	14~20	15~25	15~25
		烟煤	16~28	17~28	17~28
		褐煤	17~25	17~25	(17~25)
二次风温度	℃	无烟煤/贫煤	320~380	320~380	320~380
		烟煤	300~360	300~350	300~350
		褐煤	300~380	300~380	(300~380)

表 7 (续)

项 目	单 位	煤 种	燃烧器设计参数（BMCR 工况）推荐值		
			300MW 等级	600MW 等级	1 000MW 等级
二次风率 ^a	%	无烟煤/贫煤	78～82	78～82	78～82
		烟煤	71～80	72～81	72～81
		褐煤	65～75	65～75	（65～75）
二次风内环风速度	m/s	无烟煤/贫煤	16～22	18～35	18～35
		烟煤	16～26	18～35	18～35
		褐煤	15～26	15～26	（15～26）
二次风外环风速度	m/s	无烟煤/贫煤	28～44	27～48	27～48
		烟煤	28～42	26～45	26～45
		褐煤	26～40	26～40	（26～40）
炉膛出口过量空气系数		无烟煤/贫煤	1.18～1.25	1.18～1.25	1.18～1.25
		烟煤	1.14～1.20	1.14～1.20	1.14～1.20
		褐煤	1.14～1.20	1.14～1.20	（1.14～1.20）
^a 应考虑备用燃烧器停用时冷却用风风率。					

表 8 配中间储仓式制粉系统 (热风送粉) 的对冲燃烧方式
燃烧器设计参数 (BMCR 工况) 的推荐范围

项 目	单 位	煤 种	燃烧器设计参数 (BMCR 工况) 推荐值	
			300MW 等级	600MW 等级
燃烧器只数	只	无烟煤/贫煤	20~32	36~48
燃烧器层数	层	无烟煤/贫煤	3~4	3~4
一次风粉混合物温度	℃	无烟煤/贫煤	200~240	200~240
一次风率	%	无烟煤/贫煤	12~18	12~18
一次风速度	m/s	无烟煤/贫煤	14~18	14~18
二次风温度	℃	无烟煤/贫煤	320~380	320~380
二次风率	%	无烟煤/贫煤	60~78	60~78
二次风内环风速度	m/s	无烟煤/贫煤	16~22	16~22
二次风外环风速度	m/s	无烟煤/贫煤	28~42	28~42
三次风温度	℃	无烟煤/贫煤	70~130	70~130
三次风率	%	无烟煤/贫煤	14~18	14~18
三次风速度	m/s	无烟煤/贫煤	22~28	22~28
炉膛出口过量空气系数		无烟煤/贫煤	1.21~1.25	1.20~1.25

8.4 W 型火焰燃烧方式炉膛热力特性参数及燃烧器设计参数选择

8.4.1 W 型火焰燃烧方式炉膛热力特性参数（BMCR 工况）的推荐范围见表 9。

表 9 W 型火焰燃烧方式炉膛热力特性参数（BMCR 工况）的推荐范围

项 目	符 号	单 位	炉膛热力特性参数（BMCR 工况）推荐值	
			300MW 等级	600MW 等级
全炉膛容积热负荷	q_v	kW/m^3	90~115	75~95
下炉膛容积热负荷	q_{vx}	kW/m^3	190~240	170~230
下炉膛截面热负荷	q_{Fx}	MW/m^2	2.2~3.0	2.5~3.1
上/下炉膛深度比	l_7/l_8		0.5~0.6	0.5~0.7
燃尽区高度	l_3	m	12~20	15~23

8.4.2 W 型火焰燃烧方式炉膛热力特性参数的选取原则如下：

- 保证燃料在下炉膛着火容易且基本燃尽，在低负荷不投辅助燃料助燃时燃烧稳定；
- 上/下炉膛深度比 l_7/l_8 宜大于 0.5，以使前后拱 U 型火焰射流尽量避免相互干扰；
- 前后拱上靠近侧墙的燃烧器一次风喷嘴中心线应与侧墙保持适当距离，以免火焰冲刷侧墙水冷壁或卫燃带；
- 下冲煤粉气流不冲刷冷灰斗壁面，不发生短路，火焰能得到均衡而充分的发展，保证能形成良好的 W 型火焰；
- 根据煤质着火燃尽特性和结渣倾向，合理布置下炉膛卫燃带。

8.4.3 W 型火焰燃烧方式燃烧器的设计原则如下：

- 燃烧器沿炉宽均匀布置，如采用直吹式制粉系统，要特别注意磨煤机与燃烧器的匹配关系，在停投任何一台磨煤机时，炉膛输入热量沿炉膛宽度尽量均匀分布；
- 燃烧器一、二次风率、风速选取适当，保证煤粉在下炉膛内基本燃尽，且能形成较好的 W 型火焰；
- 燃烧器二次风宜采用适合无烟煤的分级配风方式；
- 当采用中间储仓式制粉系统时，三次风喷嘴的布置位置要离开主煤粉气流适当距离，不致影响煤粉的着火和稳定燃烧。

8.4.4 燃烧器设计参数与制粉系统及燃烧器的型式有关。目前国内电站 W 型火焰燃烧锅炉采用的制粉系统有直吹式和中间储仓式热风送粉两种，燃烧器型式主要有双调风旋流式、双旋风分离式、浓缩型双调风旋流式及直流狭缝式等几种。根据国内生产 300MW、600MW 级发电机组 W 型火焰燃烧锅炉的设计经验，给出这些燃烧器配风参数（BMCR 工况）的推荐范围，见表 10。

表 10 配直吹式制粉系统的 W 型火焰燃烧锅炉燃烧器配风参数 (BMCR 工况) 的推荐范围

项 目		燃烧器配风参数 (BMCR 工况) 推荐值							
		300MW 等级				600MW 等级			
燃烧器型式		双调风 旋流式	浓缩型 双调风 旋流式	双旋风 分离式	直流 狭缝式	浓缩型 双调风 旋流式	双旋风 分离式	双旋风分离式 带一次风预热	直流 狭缝式
主喷嘴数量		16	16	16~24	24~36	24	24~36	36	32~48
风率/%	一次风	16~25	7~10	7~15	15~23	7~11	7~15	8~10	15~23
	拱上 二次风	50~65	53~69	20~35	25~50	53~67	20~35	20~22	35~60
	拱下 二次风	12~26	12~26	50~65	10~35	12~26	50~65	55~58	10~30
	稀相 一次风	8~13	7~10	7~10	8~15	7~11	7~10	8~10	8~15
风温/℃	一次风 风粉混 合物	130~200	110~150	90~150	90~150	110~150	90~150	110~150	90~150
	二次风	330~390	330~390	340~400	340~400	330~390	340~400	340~400	340~400
风速/(m/s)	一次风	18~24	18~24	10~25	9~16	18~24	10~25	20~25	9~16
	拱上 二次风 内环	18~26	18~26	30~40	30~40	18~26	30~40	20~25 (OFA 中心)	30~40
	拱上 二次风 外环	35~41	35~41	—	30~40	35~41	—	36~46 (OFA 环向)	30~40
	拱下 二次风	37~43	37~51	8~16	20~40	37~51	8~16	8~16	20~40
	稀相 一次风	20~28	20~28	10~25	10~20	20~28	10~25	20~25	10~20
炉膛出口 过量空气系数		1.2~1.25							

9 与炉膛及燃烧器设计有关的其他要求

9.1 对设计煤种和校核煤种的要求

在进行炉膛设计选型之前,应对设计煤种煤质分析数据(包括元素分析和发热量等数据)做必要的检验与核算,并考虑锅炉投运后煤质可能的变化幅度。设计煤种和校核煤种的关系是以设计煤种为主,兼顾校核煤种。校核煤种与设计煤种应为同一大类煤种。

燃用的校核煤种或实际燃用煤种的煤质特性相对于设计煤种煤质特性的偏离在表 11 规定的范围内,应保证锅炉达到额定设计出力及额定工况下锅炉出口蒸汽参数值。

表 11 保证锅炉额定出力及出口蒸汽参数允许的煤质变化范围

煤 种	干燥无灰基挥发分 V_{daf} 的偏差值/%	收到基灰分 A_{ar} 的偏差值/%	收到基水分 M_{ar} 的偏差值/%	收到基低位发热量 $Q_{net,ar}$ 的偏差值/%	灰熔点
无烟煤	-1	±4	±3	±10	变形温度 DT 允许低 50℃； 软化温度 ST 允许偏 差为-8%
贫煤	-2	±5	±3	±10	
低挥发分烟煤	±5	±5	±4	±10	
高挥发分烟煤	±5	±5 -10	±4	±10	
褐煤	—	±5	±5	±7	
注 1：表中挥发分、灰分、水分及变形温度 DT 为设计值的绝对偏差；发热量、软化温度 ST 为以设计值的相对偏差。					
注 2：除了上述直接影响选择的几种煤质变化范围以外，对煤的含 S 量变化范围、煤的可磨性指数变化范围、煤的磨损指数变化范围等，也应加以注意，对可磨性指数和磨损指数设计数值较高的煤种，应有两个以上分析数据。					

9.2 炉膛高度及出口温度的选取原则

选取炉膛高度时既要保证煤粉充分燃尽，又要考虑传热的要求。炉膛出口烟气温度与煤质特性、锅炉输入热功率、炉膛容积及形状、炉膛辐射受热面积、水冷壁污染系数及火焰中心高度等因素有关。为防止炉膛出口区域受热面结渣，在锅炉额定负荷时，应使出口烟气温度降低到煤灰变形温度 DT 以下 50℃~100℃；若煤灰软化温度 ST 与变形温度 DT 之差小于或等于 50℃，则炉膛出口烟气温度应降低到煤灰软化温度 ST 以下 100℃~150℃。

9.3 最下排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心线至冷灰斗拐点的距离 l_5 的选取原则

最下排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心线至冷灰斗拐点的距离 l_5 的选取，要考虑为下半部分燃烧器进入的燃料提供一个燃烧空间，特别是直流式燃烧器，下摆时不能使火焰冲刷灰斗斜坡，造成水冷壁结渣或过烧、爆管。

对于切向燃烧方式锅炉，此距离（ l_5 ）与炉膛截面尺寸（ $l_{16} = (\text{宽} + \text{深}) / 2$ ）有关，300MW 级锅炉 l_5 一般在 3.5m~5.0m 之间；600MW 级锅炉 l_5 一般在 4.5m~5.5m 之间，遇有强结渣煤时取高值。当采用摆动式燃烧器时一般 l_5 不宜小于按式（11）求得的尺寸；对冲燃烧方式锅炉，当锅炉容量增大时，可增加炉膛宽度，故 l_5 值一般取 2.4m~3.6m，遇有结渣强的煤种可取高值。

$$l_5 = 0.213 l_{16} + 1.48 \dots\dots\dots (11)$$

式中：

l_5 ——最下排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心线至冷灰斗拐点间的距离，m；

l_{16} ——炉膛截面尺寸，m。

另外，由于受下列情况影响，而无法减小 l_5 值：

- a) 对于多数燃料，特别是易结渣煤种，需要在最下排燃烧器至冷灰斗之间布置一层吹灰器；
- b) 对于风扇磨煤机，由于机体本身比较高，磨煤机上部又需布置分离器、分配器、膨胀节等；
- c) 双进双出钢球磨煤机分离器有时不放置在磨煤机上，煤粉管道标高被抬高，最下排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心线标高只好抬高，距离 l_5 则相应加大。

9.4 切向燃烧方式炉膛截面的宽/深比 (l_2/l_1) 的选取

炉膛截面的宽/深比 (l_2/l_1) 应尽量趋近 1, 且不宜超过 1.20。

9.5 冷灰斗倾角 β 的选取

冷灰斗的倾角 β 一般采用 $50^\circ \sim 55^\circ$, 对于燃用结渣倾向强的煤种采用 55° 。

9.6 降低 NO_x 生成浓度的措施

降低燃烧氮氧化物 (NO_x) 生成浓度的措施参见附录 E。

9.7 对炉膛及燃烧器设计布置的要求

炉膛及燃烧器设计布置时应采取措施, 减少炉膛出口截面的烟温及烟量分布不均匀性。各种燃烧方式都应避免煤粉火焰冲刷水冷壁, 以防止结渣、高温腐蚀和造成水冷壁管内传热恶化。

9.8 混煤的燃烧特性

燃用混煤时应注意分析被混煤种的燃烧特性。一般有以下规律: 混煤的着火及燃烧稳定性趋近于易燃煤的着火特性, 难燃煤中掺烧部分易燃煤种会提高燃烧稳定性; 混煤的燃尽性趋近于难燃煤种, 难燃煤种掺烧易燃煤种不会使燃尽特性显著改善, 甚至不利于充分燃尽。

结渣煤种掺烧不结渣煤种一般会使结渣减轻, 但有时两种不结渣煤种混烧时反而产生结渣。燃用混煤时应采取措施, 达到均匀混合。对直吹式系统也可采用不同磨煤机供不同煤种, 即不同层燃烧器燃用不同煤种的混煤措施。

9.9 切向燃烧锅炉下炉膛水冷壁污染系数 ζ_x 的选取

炉膛水冷壁污染程度直接影响下炉膛 (指分隔屏屏底标高以下部分炉膛) 出口烟气温度 ϑ_x' , 在计算下炉膛出口烟气温度 ϑ_x' 时, 由制造厂根据设计燃料在已有电厂的运行和设计经验选取污染系数 ζ_x , 当无燃用经验时, 可参照附录 F 选取。

9.10 磨煤机出口允许的最高温度

磨煤机出口允许的最高温度 t_{M2} 见表 12。

表 12 磨煤机出口允许最高温度

制粉系统形式	磨煤机出口允许的最高温度 $t_{M2}/^{\circ}\text{C}$	
	用空气干燥	用烟气和空气混合干燥
风扇磨煤机直吹式（分离器后）	燃用褐煤、页岩煤时约为 100	约为 180
钢球磨煤机储仓式（磨煤机后）	燃用贫煤时为 100~130,燃用烟煤时为 70~90, 燃用褐煤时为 60~70	燃用褐煤时约为 90, 燃用烟煤时约为 120
双进双出钢球磨煤机直吹式（磨煤机后）	燃用贫煤时为 100~130, 燃用烟煤时为 70~90, 燃用褐煤时为 60~70	—
中速磨煤机直吹式（分离器后）	当 $V_{\text{daf}} < 40\%$ 时, $t_{M2} = [(82 - V_{\text{daf}})5 / 3] \pm 5$; 当 $V_{\text{daf}} \geq 40\%$ 时, $t_{M2} = 60 \sim 70$	
注：燃用混煤时可允许按 t_{M2} 较低的相应煤种取值。		

9.11 燃烧器设计对磨煤机及制粉系统的要求

9.11.1 对于采用直吹式制粉系统的锅炉, 每台磨煤机分别只向某一层或二层 (某一角) 燃烧器供粉。此时磨煤机和燃烧器的出力和布置应满足:

- 锅炉 BMCR 工况下允许一台磨煤机停运, 煤粉产量够用, 且煤粉细度正常;
- 无论投入哪几台磨煤机运行, 都应保证沿炉膛宽度方向煤粉及风量分配连续、稳定、均匀。

同层燃烧器之间以及各并列管道之间的风量偏差应在 $-5\%\sim+5\%$ 之内；煤粉量偏差对于中间储仓式系统应在 $-5\%\sim+5\%$ 之内，对于中速磨煤机直吹式系统应在 $-10\%\sim+10\%$ 之内。

9.11.2 磨煤机及制粉系统的选择参见附录 G。

9.11.3 磨煤机计算出力的备用裕量应适宜，既要考虑最差煤质条件下满足锅炉满负荷燃煤量需要，也要考虑锅炉燃烧的一次风率或三次风率处于合理范围内：

- a) 对于直吹式制粉系统，在磨制设计煤种时，除备用外的磨煤机总出力应不小于锅炉最大连续蒸发量时燃煤消耗量的 110%；
- b) 对于钢球磨中间储仓式制粉系统，每台锅炉装设的磨煤机计算总出力(在最佳钢球装载量下)按设计煤种应不小于锅炉最大连续蒸发量时所需煤耗量的 115%。

9.11.4 控制制粉系统的漏风系数 K_{le} ，对于钢球磨煤机直吹式系统 $K_{le}\leq 0.25$ ；对于钢球磨煤机中间储仓系统 $K_{le}\leq 0.3$ ；对于风扇磨煤机带烟气下降管 $K_{le}\leq 0.3$ 。

9.11.5 锅炉在两台磨煤机运行时燃烧器一次风/煤比仍应保证稳定燃烧，沿炉膛宽度煤粉及风量分配仍能基本均匀。

9.12 火焰检测及炉膛安全监控系统 (FSSS) 的配备

为了锅炉运行安全，特别是为达到低负荷稳定燃烧，锅炉应配备可靠的火焰检测装置及可靠的炉膛安全监控系统 (FSSS)，以适应于低负荷运行的燃烧器控制。

9.13 煤粉细度的选取

煤粉细度的选取可参考该煤在已有电厂的运行经验，在无运行经验时可按式 (12) 计算：

$$R_{90} = 0.5nV_{daf} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中：

R_{90} ——煤粉细度，%；

n ——煤粉的均匀性系数；

V_{daf} ——煤的干燥无灰基挥发分，%。

注：一般情况下，配离心式分离器的制粉设备， $n\approx 1.1$ ；配双流惯性式分离器的制粉设备， $n\approx 1.0$ ；配单流惯性式的制粉设备， $n\approx 0.8$ ；配旋转式分离器的制粉设备， $n\approx 1.2$ 。

当燃用褐煤及油页岩时，煤粉细度 $R_{90}=35\%\sim 50\%$ (挥发分高时取大值，挥发分低时取小值)。

9.14 高海拔地区的锅炉设计

9.14.1 炉膛设计

高海拔地区炉膛气压降低、煤粉在炉内的停留时间减少，影响燃尽，设计时可参考已有电厂的运行经验：在海拔 500m~800m 时，煤粉在炉内所减少的停留时间对燃烧的影响轻微，对于一般烟煤可不增加炉膛燃尽区的容积，而采取其他一些强化燃尽的措施。对于燃用无烟煤/贫煤及低灰熔融点温度的煤种，除采取强化燃尽及防渣措施外，必要时可增加少许炉膛燃尽区容积，以弥补压力降低所减少的停留时间。

对海拔大于 800m 的地区除采取强化燃尽及防渣措施外，应根据煤种及实际运行经验，参考压力降低的幅度，增加炉膛燃尽区的容积。

原则上炉膛燃尽区 (最上排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心截面到屏下缘截面间) 的容积应增加为 V_d ，计算方法如式 (13) 所示：

$$V_d = V_m \cdot \frac{p_B}{p_d} \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中:

V_d ——高海拔地区炉膛燃尽区应取用的容积, m^3 ;

V_m ——一般地区炉膛燃尽区容积 ($V_m = l_1 \times l_2 \times l_3$), m^3 ;

p_B ——一般地区的大气压力, kPa ;

p_d ——高海拔地区的大气压力, kPa 。

压力 p_d (kPa) 与海拔 H (m) 的关系如式 (14) 所示:

$$p_d = 101.32 (1 - 0.022\ 57H / 1\ 000)^{5.256} \dots\dots\dots (14)$$

式中:

H ——海拔, m 。

根据式 (14) 绘制的 p_d 与 H 相关图见图 5。

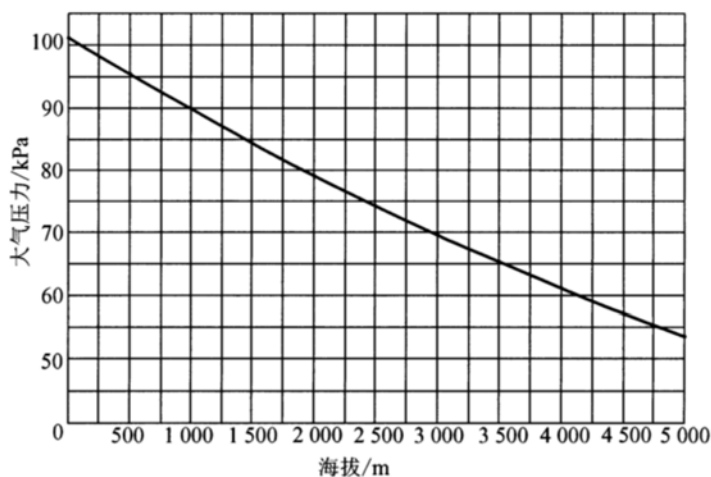


图 5 大气压力与海拔的相关图

对于压力降低幅度较大的锅炉设计, 在增加炉膛的容积时, 应在增加炉膛高度的同时, 适当增加炉膛截面积, 避免因气压降低而过多地增加烟气在炉内的上升速度, 影响燃烧稳定性。但考虑到增加炉膛截面积会降低炉膛截面热负荷, 从而降低主燃烧区温度, 影响燃尽, 故建议在可能条件下, 再适当减小最上排、最下排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心距离, 以增加燃烧器区壁面热负荷, 从而不使主燃烧区温度降低过多。

压力降低对燃烧本身及传热也都有不同程度的负面影响, 特别是对于贫煤、无烟煤影响较大。当海拔大于 $800\text{m} \sim 1\ 000\text{m}$ 时应采取提高燃烧性能的措施, 参见附录 H。

9.14.2 燃烧器设计

高海拔地区燃烧器出口截面的流动状况也发生变化, 设计时应维持空气质量流量相等, 即满足式 (15):

$$\rho_d F_d W_d = \rho_B F_B W_B \dots\dots\dots (15)$$

式中:

ρ_d ——当地 (高海拔地区) 地面空气密度, kg/m^3 ;

F_d ——当地（高海拔地区）的燃烧器喷口截面积， m^2 ；

W_d ——当地（高海拔地区）燃烧器出口风速， m/s ；

ρ_B ——一般地区空气密度， kg/m^3 ；

F_B ——一般地区的燃烧器喷口截面积， m^2 ；

W_B ——一般地区的燃烧器出口风速， m/s 。

当高海拔地区的煤粉质量 m 、气体温度 T 与一般地区相同时，则空气密度与大气压力成正比，式（15）可改写为式（16）：

$$p_d F_d W_d = p_B F_B W_B \quad \dots\dots\dots (16)$$

高海拔地区燃烧器出口风速不宜作较大变化。当取用与一般地区相同的风速时，则高海拔地区燃烧器出口的截面积应随压力的降低而增大，如式（17）所示：

$$F_d = F_B \cdot \frac{p_B}{p_d} \quad \dots\dots\dots (17)$$

如果较大改动燃烧器出口截面有困难，也可根据燃料挥发分高低，在不严重影响炉内动力场条件的情况下，适当提高一次风速度。其提高范围为：当地（高海拔地区）一次风速度 W_{d1} 为一般地区时一次风速度 W_{B1} 的 1.03 倍～1.08 倍，前者适用于低挥发分煤种，后者适用于高挥发分煤种。风速确定后再按质量流量相等计算式（16），重新计算当地（高海拔地区）的燃烧器一次风喷口面积 F_{d1} 。

9.15 炉膛结渣、水冷壁高温腐蚀的预防

炉膛及燃烧器设计时要有预防炉膛结渣和水冷壁高温腐蚀的措施。具体要求分别参见附录 I 和附录 J。

10 锅炉燃烧性能评价

10.1 锅炉燃烧性能评价的主要内容

锅炉燃烧性能评价的主要内容包括锅炉燃烧效率、最低不投辅助燃料稳燃负荷率（BMLR）和污染物的排放控制等。

10.2 锅炉燃烧效率的确定

锅炉燃烧效率按式（18）计算：

$$\eta_r = 100 - (q_3 + q_4) \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中：

η_r ——锅炉燃烧效率，%；

q_3 ——气体未完全燃烧热损失率，%；

q_3 、 q_4 的确定按 GB/T 10184 执行。

对于大容量锅炉也可按以下原则确定： q_3 可取为 0， q_4 的取值范围见表 13 及图 6。炉膛热力参数、燃烧器设计参数对 q_4 的影响见附录 H。

表 13 根据煤质特性 (R_W 、 V_{daf} 、 A_{ar}) 推荐的 q_4 取值范围

灰分 A_{ar}	燃烧方式	固体未完全燃烧热损失 $q_4/\%$						
		着火稳定性指数 R_W ($V_{daf}/\%$)						褐煤
		3.86~4.02 (5~8)	4.02~4.24 (8~12)	4.24~4.40 (12~15)	4.40~4.67 (15~20)	4.67~5.21 (20~30)	5.21~5.75 (30~40)	
低灰分 $A_{ar} \leq 10\%$	切向、对冲	—	1.6~1.35	1.35~1.2	1.2~0.9	0.9~0.55	0.55~0.4	—
	W 型火焰	1.9~1.55	1.55~1.1	—	—	—	—	—
中等灰分 $20\% \leq A_{ar} \leq 30\%$	切向、对冲	—	3.4~1.8	2.9~1.55	2.6~1.2	2.1~0.75	1.45~0.5	1.2~0.4
	W 型火焰	4.5~2.3	3.4~1.5	—	—	—	—	—
高灰分 $A_{ar} \geq 35\%$	切向、对冲	—	4.2~3.5	3.5~3.1	3.1~2.4	2.4~1.6	1.6~1.2	1.2~1.0
	W 型火焰	5.3~4.3	4.2~3.3	—	—	—	—	—

注 1：对于灰分在 10%~20% 及 30%~35% 范围的 q_4 可从图 6 中查找其相应范围值。
注 2：表中的 q_4 值是按收到基低位发热量计算的。

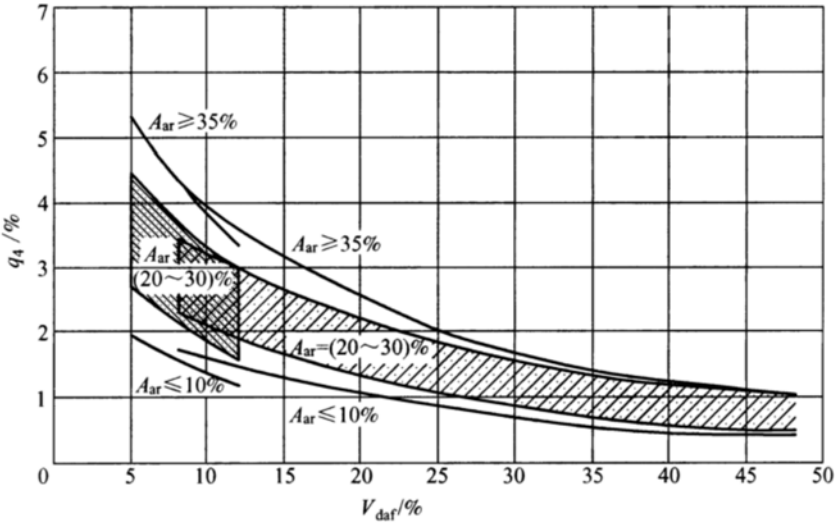


图 6 根据煤质特性 (V_{daf} 及 A_{ar}) 推荐的 q_4 取值范围

锅炉热效率测定中，固体未完全燃烧热损失按式 (19) 计算：

$$q_4 = 33.7 \times 10^3 \frac{A_{ar}}{Q_{net,ar}} \left[\alpha_{fh} \left(\frac{C_{fh}}{100 - C_{fh}} \right) + \alpha_{lz} \left(\frac{C_{lz}}{100 - C_{lz}} \right) \right] \dots\dots\dots (19)$$

式中：
 33.7×10^3 ——灰中含 C 的近似发热量，kJ/kg；
 A_{ar} ——入炉煤收到基灰分，%；
 C_{fh} 、 C_{lz} ——飞灰和炉渣中的含 C 量，%；
 α_{fh} 、 α_{lz} ——飞灰和炉渣中的灰分份额 ($\alpha_{fh} + \alpha_{lz} = 1$)。

10.3 锅炉最低不投辅助燃料稳燃负荷率（BMLR）的确定

以锅炉的最低不投辅助燃料稳燃负荷率试验值作为锅炉最低不投辅助燃料稳燃负荷率。

各种燃烧方式的锅炉最低不投辅助燃料稳燃负荷率（BMLR）与燃料特性（ R_W 或 V_{daf} ）值的关系推荐如表 14 所示。

BMLR 除与煤质特性有关外，还与燃烧方式，炉膛热力参数，燃烧器设计型式、数量，磨煤机特性、台数，煤粉细度以及制粉系统与锅炉的匹配有关。

表 14 各种燃烧方式的锅炉最低不投辅助燃料稳燃负荷率（BMLR）推荐值

燃烧方式	着火稳定性指数 $R_W/(V_{daf}/\%)$						褐煤
	< 4.02 (< 8)	4.02~4.24 (8~12)	4.24~4.67 (12~20)	4.67~4.94 (20~25)	4.94~5.21 (25~30)	5.21~5.75 (30~40)	
切向、对冲	—	65~55	56~45	46~40	42~35	35~30	50~35 ^a
W 型火焰	55~45	50~42	—	—	—	—	—
^a 褐煤部分高值指高水分褐煤经抽炉烟干燥制粉系统后的取值。							

10.4 原始氮氧化物的排放控制

锅炉原始氮氧化物的排放按 GB/T 34348 的要求执行。

附录 A
(规范性附录)

煤的着火稳定性指数 R_W 及燃尽特性指数 R_J 的确定

A.1 煤的着火稳定性指数 R_W

着火温度是一个系统温度。规范条件下测定煤粉着火温度可用来比较煤粉气流的着火性能。另一方面，考虑到在实际燃烧装置中，煤粉的着火热来源于系统本身，即煤粉是被煤粉燃烧所产生的热量通过一定形式的回流而点燃的，因此，仅由着火温度一项指标来预测实际燃烧装置中的火焰稳定性是不全面的，还应考虑其他一些反映煤粉着火后的燃烧特性的影响，如最大燃烧反应速率 (W_{1max}) 及其相应的温度 (T_{1max}) 等。由浅坩锅热天平 (如 TGS-2 型热天平) 测得的燃烧特性曲线见图 A.1，特征指数见表 A.1。

注：热天平试验条件：吹扫气体 N_2 为 0.78mL/s；反应气体 O_2 为 3.1mL/s；加热速率为 40℃/min；样品量 10mg (可燃质)；样品粒度 < 74 μ m。

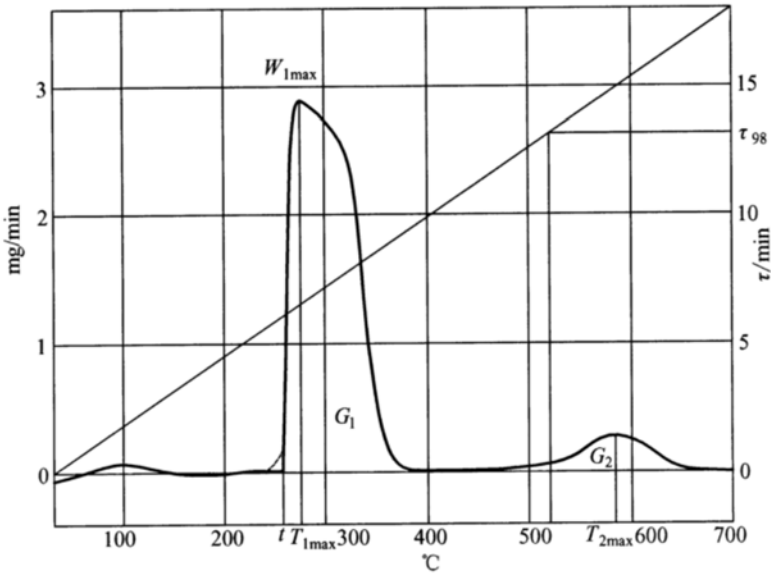


图 A.1 某烟煤煤样燃烧特性曲线

表 A.1 煤的燃烧和燃尽热分析曲线特征指数

特征指数	$t/^\circ\text{C}$	$W_{1max}/(\text{mg}/\text{min})$	$T_{1max}/^\circ\text{C}$	$T_{2max}/^\circ\text{C}$	G_1/mg	G_2/mg	τ_{98}/min	τ'_{98}/min
指数值举例	251	2.83	282	577	9.36	0.64	13.75	2.75
注： t ——着火温度， $^\circ\text{C}$ ； W_{1max} ——易燃峰的最大燃烧速率， mg/min ； T_{1max} ——易燃峰的最大燃烧速率所对应的温度， $^\circ\text{C}$ ； T_{2max} ——难燃峰的最大燃烧速率所对应的温度， $^\circ\text{C}$ ； G_1 ——易燃峰下烧掉的燃料量， mg ； G_2 ——难燃峰下烧掉的燃料量， mg ； τ_{98} ——烧掉 98% 燃料量所需的时间， min ； τ'_{98} ——烧掉 98% 煤焦量所需的时间， min 。								

图 A.1 为试验煤样的微商热重曲线，即所谓的燃烧特性曲线（DTG）。DTG 以曲线形式描述了煤粉试样在加热过程中水分蒸发、挥发分析出、着火燃烧及燃尽整个过程的质量变化速率。曲线在 100℃ 左右出现的小峰为水分析出峰，到达一定温度时煤样开始剧烈反应——着火，曲线陡然升高。取 DTG 曲线上相应拐点（或外推始点）对应的温度为着火温度 t 。随着温度升高而相继出现的两个峰，则分别表示挥发分和焦炭中易燃部分、焦炭中难燃部分这两部分的燃烧过程。燃烧峰的位置反映了燃烧进行过程相应的温度，出现晚说明燃烧所需温度区域高，峰顶高说明反应剧烈，峰下的面积则表示试样在相应温度区域反应消耗的可燃质数量。

对多种煤进行分析，按等效离散度相等的原理所确定的各特性指标在综合判断体系中的权数得出着火稳定性指数 R_W ，见式（A.1）：

$$R_W = \frac{560}{t} + \frac{650}{T_{1\max}} + 0.27W_{1\max} \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

t ——着火温度，℃；

$T_{1\max}$ ——易燃峰的最大燃烧速率所对应的温度，℃；

$W_{1\max}$ ——易燃峰的最大燃烧速率，mg/min。

A.2 煤的燃尽特性指数 R_J

煤的燃尽特性指数 R_J 同样由浅坩锅热天平（如 TGS-2 型热天平）测定，对此除燃烧特性曲线外，还需要煤焦燃尽曲线（见图 A.2）。

注：煤焦燃尽特性试验条件：煤粉试样在 900℃ 加热 7min，除去挥发分来制取焦炭，并粉碎粒度小于 74μm 作为试样。温度在 700℃ 以前仪器通入 N_2 ，700℃ 以后将反应气体切换为 O_2 ，使 10mg 焦炭（可燃质）在 700℃ 恒温条件下燃尽，图 A.2 中的燃尽时间 τ_{98} 是在 700℃ 条件下烧掉 98% 焦炭所需的时间。

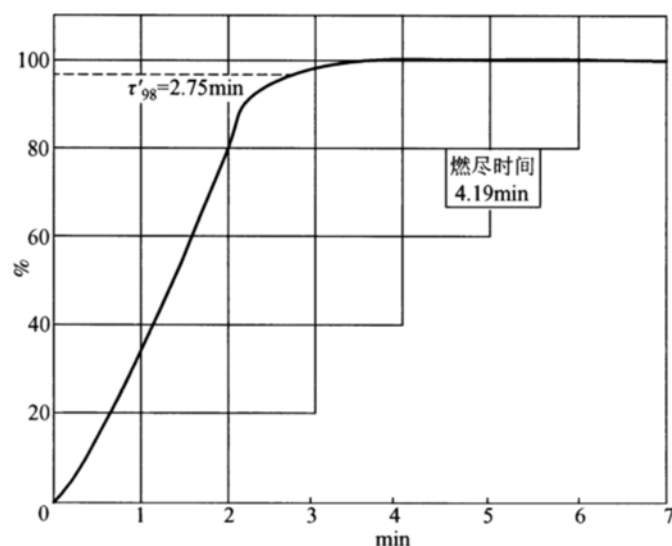


图 A.2 某烟煤煤焦燃尽曲线

表征煤粉燃尽特性指数的有：燃烧特性曲线中难燃峰下烧掉的燃料量（ G_2 ），难燃峰最大反应速率对应的温度（ $T_{2\max}$ ），以及烧掉 98% 燃料量所需的时间（ τ_{98} ）。显然，仅仅用 τ_{98} 来预测实际燃烧装置可能达到的燃烧效率也会有较大的局限性，应综合考虑 G_2 和 $T_{2\max}$ ，以及燃尽试验中

的煤焦燃尽时间 τ'_{98} 的影响。对多种煤进行分析,采用等效离散度相等的原理确定各指标的权数,通过式 (A.2) 计算出煤粉的燃尽特性指数 R_J :

$$R_J = \frac{10}{a'A' + b'B' + c'C' + d'D'} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:
 $A'、B'、C'、D'$ —— $G_2、T_{2max}、\tau_{98}、\tau'_{98}$ 各特征指标应得的燃尽等级数,见表 A.2;
 $a'、b'、c'、d'$ ——系数,分别为 $G_2、T_{2max}、\tau_{98}、\tau'_{98}$ 各指标所占的权数。

表 A.2 各特征指标划定的燃尽等级

燃尽等级	燃尽性能	难燃峰下烧掉的 燃料量 G_2/mg	难燃峰顶时 温度 $T_{2max}/^\circ\text{C}$	煤粉燃尽 时间 τ_{98}/min	煤焦燃尽 时间 τ'_{98}/min
1	极易燃尽	≤ 0.6	≤ 520	≤ 14	≤ 2.5
2	易燃尽	$0.6\sim 1.2$	$520\sim 580$	$14\sim 15$	$2.5\sim 3.5$
3	中等燃尽	$1.2\sim 1.8$	$580\sim 640$	$15\sim 16$	$3.5\sim 4.5$
4	难燃尽	$1.8\sim 2.4$	$640\sim 700$	$16\sim 17$	$4.5\sim 5.5$
5	极难燃尽	> 2.4	> 700	> 17	> 5.5
权数		0.33	0.26	0.14	0.27

由一些电厂燃用的炉前煤热分析结果计算出的 $R_W、R_J$ 值、由灰熔融特征温度及灰成分计算出的煤灰的结渣特性指数 R_z 值及部分煤质数据列于表 A.3。

表 A.3 一些 300MW 级以上电厂实际燃用的炉前煤的 $R_W、R_J、R_z$ 数据

电厂名称	设计煤种	实际燃用煤种	煤 质 特 性			计 算 数 据		
			$V_{\text{daf}}/\%$	$A_{\text{ar}}/\%$	$Q_{\text{net,ar}}/(\text{MJ/kg})$	R_W	R_J	R_z
阳逻	晋东南混煤	山西、河南、陕西等地混煤	13.9	22.06	22.69	4.69	3.07	1.1
汉川	晋东南潞安贫煤	河南产地煤	16.58	29.22	20.28	4.52	6.54	1.06
黄台	埠村贫煤	西山、埠村贫煤	20.27	30.66	22.21	4.91	3.4	1.1
石洞口一厂	山西贫煤	晋东南无烟煤、大同混煤	18.79	20.25	26.88	4.6	3.28	1.31
渭河	铜川、焦平混煤	接近设计煤种	19.15	32.26	19.39	4.82	3.97	0.87
珞璜	松藻无烟煤	同设计煤种	13.96	24.29	21.77	4.76	4.29	2.32
上安	寿阳、阳泉混煤	晋中贫煤	14.03	21.93	23.94	4.78	3.34	0.99
马鞍山	晋东南混煤	同设计煤种	12.35	17.91	27.5	4.33	3.51	1.16
青山	贫混煤	接近设计煤种	18.10	24.75	23.42	4.81	4.72	1.15
石门	阳沁 + 黄陵	省内外无烟煤、贫煤	16.17	21.16	25.94	4.73	3.41	1.01
南京	山西长治贫煤	接近设计煤种	13.66	16.41	26.93	4.3	2.72	1.08
青岛	晋中贫煤	接近设计煤种	18.78	30.02	21.63	4.71	5.21	1.16

表 A.3 (续)

电厂名称	设计煤种	实际燃用煤种	煤 质 特 性			计 算 数 据		
			$V_{daf}/\%$	$A_{ar}/\%$	$Q_{net,ar}/(MJ/kg)$	R_w	R_j	R_z
彭城	徐州混煤	接近设计煤种	24.39	28.59	21.03	4.97	4.42	0.85
利港	雁北混煤	接近设计煤种	33.63	14.79	23.81	5.54	6.29	1.36
外高桥	东胜神木晋北混煤	神木、大同、兖州煤	34.01	8.67	23.3	5.48	5.38	2.72
沙岭子		大同、内蒙矿煤	29.48	13.31	24.32	5.3	5.38	1.63
台州	晋北烟煤	北仑港、秦皇岛进口煤	29.74	10.4	26.47	5.3	5.38	2.04
首阳山	义马新安混煤	义马与地方矿煤	33.9	24.89	19.66	5.73	3.86	1.56
哈三	鹤岗	鹤岗、双鸭山煤	40.04	20.64	22.49	5.84	5.21	1.96
达旗	东胜万利川煤	当地小窑煤	48.96	9.71	19.26	6.1	10.0	5.09
珠江	东胜神府	同设计	29.87	13.98	22.21	5.8	4.69	3.24
沙角 A	山西雁北煤	大同煤	34.83	24.84	20.01	5.99	6.54	0.77
石横	山东肥城烟煤	山西晋中、太原、山东肥城煤	30.10	19.75	23.67	5.40	5.18	1.66
大连	晋北烟煤	晋北烟煤	34.71	18.7	22.24	5.42	3.74	1.00
邹县	唐村南屯丁村混煤	兴隆庄、鲍店、南屯煤	40.56	20.71	21.86	5.56	5.02	1.61
洛河	淮南混烟煤	淮南、山西烟煤	23.72	28.71	21.16	5.30	4.42	0.96
南通	晋北烟煤	大同、神木、东胜、平顶山、徐淮煤	33.11	10.03	22.93	6.23	5.59	2.20
大坝	灵武矿烟煤	接近设计煤种	28.79	17.17	20.83	5.35	2.96	1.76
石洞口二厂	东胜—神木煤	设计煤种掺三河尖、黄陵、大同煤	35.11	5.76	23.8	6.03	6.54	2.94
平圩	淮南烟煤	同设计	35.32	27.19	22.54	5.91	4.42	1.00
双辽	霍林河褐煤	同设计	48.55	26.09	11.95	6.23	6.29	1.57
阳宗海	凤鸣村褐煤	凤鸣、可保、宜良煤	55.84	15.62	11.04	6.69	10.0	2.39

附录 B

(规范性附录)

煤灰的结渣特性指数 R_z 的确定

判别煤灰的结渣特性有许多方法，如灰熔融性、灰成分、灰高温黏度、热显微镜观测、重力筛分煤灰偏析、热平衡相图等。其中制造部门设计锅炉时经常容易得到的是灰熔融性、灰成分资料。

为提高灰熔融特征温度、灰成分各判别指数预报的准确程度，曾对国内近 250 个煤种（其中无烟煤 44 种，贫煤、烟煤 169 种，褐煤 37 种）的灰渣特性资料，移植国外结渣特性判别指数，引用了最优分割数学模型，对我国动力用煤灰的结渣特性指数判别界限进行了重新划分，给出了适合我国煤种具体情况的结渣特性指数判别界限，其中软化温度 ST 的准确率可达 80% 以上。

对 70 个煤种（其中无烟煤 21 种，烟煤、贫煤 21 种，褐煤 28 种）应用最优分割结果与普华煤燃烧技术开发中心所组织的电厂调研结果现场运行锅炉的实际结渣情况进行对照，得出了各判别指数的判别界线和准确率的统计值，见表 B.1。

表 B.1 各种结渣倾向判别指数的判别界线和准确率

判 别 指 数	结 渣 程 度			准确率/%	权 值
	轻 微	中 等	严 重		
ST/℃	> 1 390	1 390~1 260	< 1 260	83	0.30
B/A	< 0.206	0.206~0.4	> 0.4	69	0.24
G	> 78.8	78.8~66.1	< 66.1	67	0.24
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	< 1.87	1.87~2.65	> 2.65	61	0.22
综合判别指数 R_z	$R_z \leq 1.5$ 为轻微	1.5 < R_z < 1.75 为中偏轻 1.75 ≤ R_z ≤ 2.25 为中等 2.25 < R_z < 2.5 为中偏重	$R_z \geq 2.5$ 为严重	90	—

B/A 和 G 分别按式 (B.1) 和式 (B.2) 计算得到：

$$B/A = \frac{w_{\text{CaO}} + w_{\text{MgO}} + w_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + w_{\text{Na}_2\text{O}} + w_{\text{K}_2\text{O}}}{w_{\text{SiO}_2} + w_{\text{Al}_2\text{O}_3} + w_{\text{TiO}_2}} \dots\dots\dots (\text{B.1})$$

$$G = \frac{100 \times w_{\text{SiO}_2}}{w_{\text{SiO}_2} + w_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + w_{\text{CaO}} + w_{\text{MgO}}} \dots\dots\dots (\text{B.2})$$

式中：

B/A——碱酸比，指煤灰中碱性氧化物成分 (B) 的质量分数总和与酸性氧化物成分的质量分数总和 (A) 之比值；

w_{CaO} ——煤灰中氧化钙的质量分数，%；

w_{MgO} ——煤灰中氧化镁的质量分数，%；

$w_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ ——煤灰中三氧化二铁的质量分数，%；

$w_{\text{Na}_2\text{O}}$ ——煤灰中氧化钠的质量分数，%；

$w_{\text{K}_2\text{O}}$ ——煤灰中氧化钾的质量分数，%；

w_{SiO_2} ——煤灰中二氧化硅的质量分数，%；

$w_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ ——煤灰中三氧化二铝的质量分数，%；

w_{TiO_2} ——煤灰中二氧化钛的质量分数，%；

G ——硅比。

从表 B.1 中 ST 、 B/A 、 G 、 $w_{\text{SiO}_2}/w_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 四个指数，并根据各指数的预报准确率，采用加权平均的方法，给出了统一的评分判别标准，构成了新的煤灰结渣特性综合判别指数 R_z ，见式（B.3）：

$$R_z = 1.24 (B/A) + 0.28 (w_{\text{SiO}_2}/w_{\text{Al}_2\text{O}_3}) - 0.0023 ST - 0.016G + 5.42 \dots\dots\dots (\text{B.3})$$

式中：

ST ——软化温度，℃。

为了进一步验证所建立综合判别指数 R_z 的预报准确率，首先对参与建立 R_z 指数的 70 个煤种的实际运行特性进行了验证，结果表明，综合判别指数 R_z 的准确率可达 90%。

附 录 C

(规范性附录)

煤粉在最上排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心到屏下缘平均停留时间 τ 的计算

煤粉在炉内的平均停留时间为最上排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心标高至屏下缘这段停留时间。进入屏区以后由于温度降低，氧量减少，一般不再考虑燃烧影响。

假定煤粉与烟气同步，炉内烟气充满良好，则煤粉在炉内的平均停留时间的计算公式见式 (C.1)：

$$\tau = l_3 / W_y \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

τ ——煤粉在最上排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心到屏下缘的平均停留时间，s；

l_3 ——燃烧器最上排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心至屏下缘距离，m；

W_y ——烟气在炉内的平均上升速度，m/s。其计算见式 (C.2)：

$$W_y = \frac{B_j V_y}{l_1 l_2} \times \frac{273 + \vartheta_{pj}}{273} \times \frac{101.325}{p} \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

B_j ——锅炉计算燃料消耗量，kg/s；

V_y ——标准状态下单位质量燃料燃烧产生的烟气体积，m³/kg；

p ——当地的大气压力，kPa；

ϑ_{pj} ——烟气平均温度，℃。其计算见式 (C.3)：

$$\vartheta_{pj} = 0.925 \sqrt{\vartheta'' \times \vartheta_a} \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

式中：

ϑ'' ——炉膛出口温度，℃；

ϑ_a ——理论燃烧温度，℃。

附录 D

(资料性附录)

卫燃带修正系数 ζ 的计算

D.1 按国外采用的锅炉计算方法,光管水冷壁污染系数 $\zeta_g = 0.35 \sim 0.55$; 卫燃带污染系数 $\zeta_w = 0.2$ 。本计算中把光管水冷壁的 ζ_g 取为 1, 则按比例有卫燃带时: $\zeta_w = 0.2/(0.35 \sim 0.55) = 0.57 \sim 0.36$, 平均 $\zeta_w = 0.465$ 。

D.2 当有卫燃带时, 对燃烧器区壁面积的修正和修正系数的选取按式 (D.1) 至式 (D.4) 推导。

取计算区域为最上排、最下排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心线距离外加 3m 所围成的围带, 其面积按式 (D.1) 计算:

$$F_{\text{Hr}} = 2(l_1 + l_2) \times (l_4 + 3) \quad \text{..... (D.1)}$$

$$F_{\text{Hr}} \zeta = F_w \times \zeta_w + [2(l_1 + l_2) \times (l_4 + 3) - F_w] \times 1 \quad \text{..... (D.2)}$$

$$\zeta = \frac{F_w \times \zeta_w + 2(l_1 + l_2)(l_4 + 3) - F_w}{F_{\text{Hr}}} = \frac{2(l_1 + l_2)(l_4 + 3) - F_w(1 - \zeta_w)}{F_{\text{Hr}}} \quad \text{..... (D.3)}$$

令 $\zeta_w = 0.465$, 则卫燃带修正系数 ζ 计算公式转化为式 (D.4):

$$\zeta = \frac{2(l_1 + l_2)(l_4 + 3) - 0.535F_w}{F_{\text{Hr}}} = 1 - \frac{0.535F_w}{2(l_1 + l_2)(l_4 + 3)} \quad \text{..... (D.4)}$$

式中:

ζ_w ——卫燃带污染系数。

附 录 E
(资料性附录)
降低 NO_x 生成浓度的措施

E.1 化石燃料燃烧中, NO_x 有三种生成机理。第一种为热力型, 由烟气中的氮与氧在高温下反应生成, 其生成浓度与气体温度、气体在高温区停留时间以及氧的分压有关; 第二种为燃料型, 由燃料中的有机氮氧化生成, 其生成量与氮的含量及存在形式有关, 尤其与火焰中氧浓度关系密切, 燃料与空气的混合过程也对其有显著影响; 第三种为快速型, 多由燃料烃基化合物在欠氧火焰中与氧反应生成氰化物, 其中一部分转化为 NO_x, 快速型反应生成的 NO_x 浓度只占很小的比例。三种类型 NO_x 生成标准状况下质量浓度与炉温的关系见图 E.1。

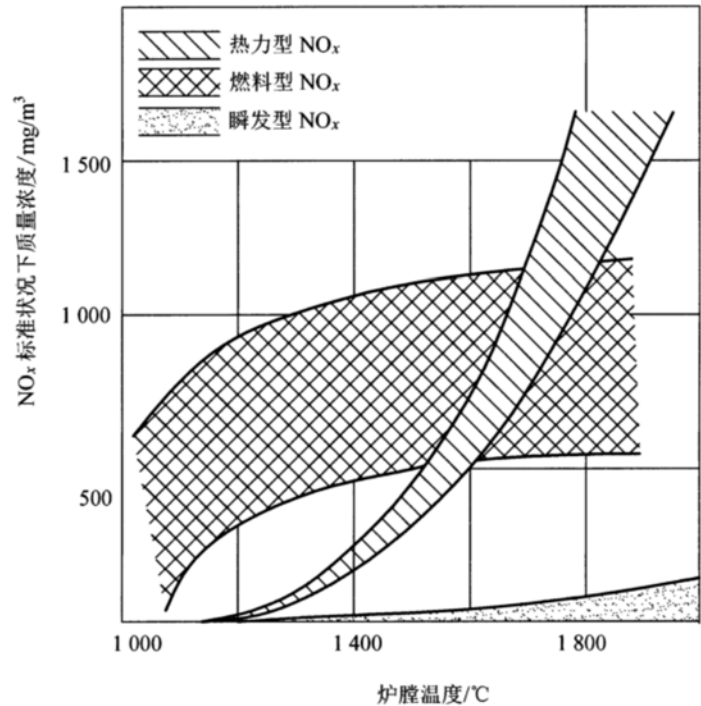


图 E.1 煤粉锅炉各类型 NO_x 的生成浓度与炉膛温度的一般关系

E.2 降低 NO_x 的要点是抑制 NO_x 的生成, 并创造条件使已生成的 NO_x 被还原成 N₂。对于煤粉炉燃烧温度大都在 1 500℃ 以下, 只有当温度超过 1 600℃ 时, 热力型才占到总量的 25%~30%, 而快速型仅占 5%, 故主要是控制燃料型 NO_x。降低 NO_x 的措施如下:

E.2.1 降低燃烧区氧浓度:

- a) 采用浓淡燃烧措施, 使燃烧器出口流场中煤粉浓度有合理的浓淡分布。
- b) 采用空气分级送入措施:
 - 1) 对于切向燃烧方式可分为:
 - 垂直方向的分级: 在燃烧器上部设置燃尽风 (OFA);

——水平方向的分级：将二次风偏离一次风一定角度送入炉膛。

2) 对于对冲燃烧方式采用双调风型旋流燃烧器。

3) 对于 W 型燃烧方式可采用拱上拱下分级配风。

E. 2. 2 燃料分级

- a) 对于切向燃烧方式见图 E.2，图中二次燃料只能用油或气，以便于燃尽；
- b) 对于对冲燃烧旋流式燃烧器见图 E.3。

E. 2. 3 降低火焰温度

- a) 降低空气预热器出口热风温度；
- b) 燃烧器处烟气再循环；
- c) 把大火焰改成多股小火焰。

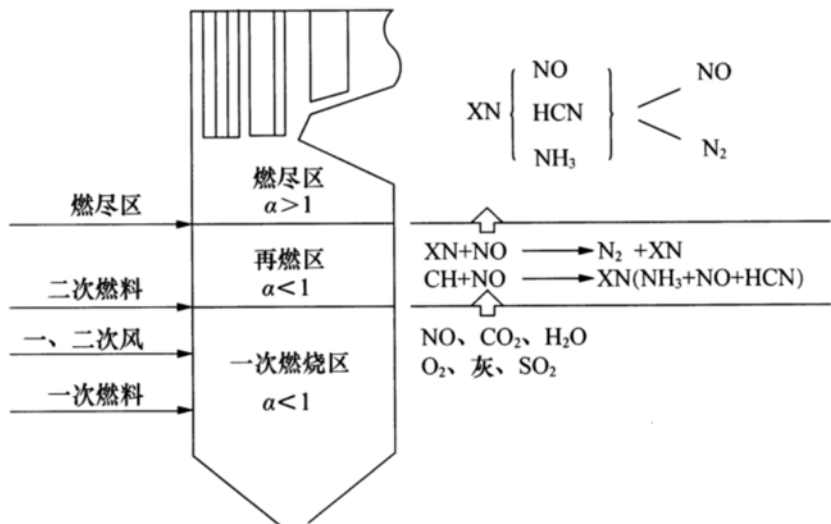
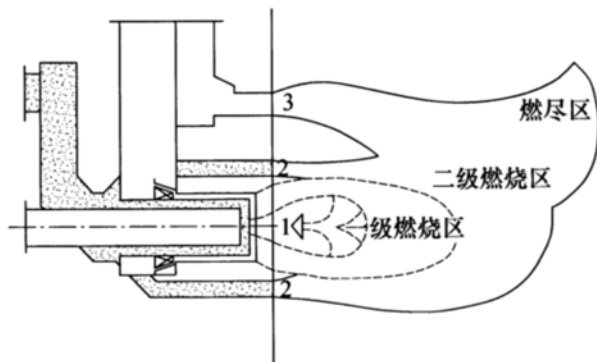


图 E. 2 切向燃烧方式燃料分级燃烧原理示意图



注：1——过量空气系数略小于 1 的一次燃料喷嘴；2——过量空气系数远小于 1 的二次燃料喷嘴；
3——完全燃烧所需空气的 OFA 喷嘴

图 E. 3 对冲燃烧方式低 NO_x 燃烧器示意图

附 录 F

(资料性附录)

切向燃烧锅炉下炉膛水冷壁污染系数 ζ_x 值的选择

炉膛水冷壁污染系数 ζ_x 的计算见式 (F.1) :

$$\zeta_x = 0.4(R_z - 1) \quad \dots\dots\dots (F.1)$$

当污染系数 $\zeta_x \leq 0.1$ 时, 沾污轻微, 按干净炉膛计算; 当污染系数 $\zeta_x \geq 1$ 时, 沾污严重, 按沾污炉膛计算; 当 $0.1 < \zeta_x < 1$ 时, 下炉膛烟气出口温度按式 (F.2) 计算:

$$\vartheta_x' = \vartheta_g + \zeta_x(\vartheta_z - \vartheta_g) \quad \dots\dots\dots (F.2)$$

式中:

ϑ_x' ——下炉膛出口烟气温度, $^{\circ}\text{C}$;

ϑ_g ——按干净炉膛计算出的下炉膛出口温度, $^{\circ}\text{C}$;

ϑ_z ——按沾污炉膛计算出的下炉膛出口温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

式 (F.1) 中的煤灰结渣指数 R_z 未考虑软化温度 ST 与变形温度 DT 之间温差的影响, 当 ST 与 DT 的差值较小时, 可适当增加由 R_z 计算出的 ζ_x 值。

附 录 G

(资料性附录)

不同煤质条件下推荐的磨煤机及制粉系统类型

磨煤机及制粉系统的选择与煤的挥发分 V_{daf} 、着火稳定性指数 R_w 、冲刷磨损指数 K_e 及水分 M_f 有关, 推荐见表 G.1。

表 G.1 磨煤机及制粉系统的类型选择

煤 种	煤 质 特 性				磨煤机及制粉系统
	$V_{daf}/\%$	R_w	K_e	$M_f/\%$	
无烟煤	<10	<4.13	不限	≤ 15	钢球磨煤机中间储仓热风送粉系统、双进双出钢球磨煤机直吹式或半直吹式系统
贫煤	10~15	<4.24	不限	≤ 15	同无烟煤
	15~20	>4.24	>5.0	≤ 15	双进双出钢球磨煤机直吹式系统
		>4.24	≤ 5.0	≤ 15	中速磨煤机直吹式系统
烟煤	20~37	>4.67	≤ 5.0	≤ 15	中速磨煤机直吹式系统
		>4.67	>5.0	≤ 15	双进双出钢球磨煤机直吹式系统
劣质烟煤	20~37	<5.0	不限	≤ 15	双进双出钢球磨煤机直吹式系统
		>5.0	≤ 5.0	≤ 15	中速磨煤机直吹式系统
褐煤	>37	>5.59	≤ 3.5	≤ 19	中速磨煤机直吹式系统
		>5.59	≤ 3.5	>19	三介质或二介质干燥风扇磨煤机直吹式系统

注： $M_f=100\left(M_{ar}-M_{ad}\right) /\left(100-M_{ad}\right)$ 。

附录 H

(资料性附录)

煤质特性、炉膛热力特性参数及燃烧器设计参数对 q_4 的影响

H.1 煤质特性的影响

常规分析中主要根据煤的 V_{daf} 、 A_{ar} 以及 $Q_{net,ar}$ 等来判别煤质特性。 V_{daf} 高易于着火稳燃, A_{ar} 高则不利于燃尽, 在 V_{daf} 相同条件下 $Q_{net,ar}$ 高有利于着火燃尽。由于 V_{daf} 中的成分不同, 相同的 V_{daf} 值的煤发热量有高有低, 特别是对于低 V_{daf} 煤种影响明显, 因此有条件时, 应做热天平分析, 求得 R_W 、 R_J 指数, 对 R_W 、 R_J 低的煤种应在炉膛及燃烧器设计上采取加强燃烧的措施。

H.2 炉膛热力参数的影响

炉膛对煤粉燃尽的影响表现在空气动力场及温度场。

良好的空气动力场有利于煤的着火、充分混合和具有良好的炉膛充满度, 使煤粉在炉内有较长的燃烧路程和燃尽时间。

为了取得较高的燃尽度, 在煤灰结渣倾向不很强时, 应采用较高的截面热负荷 q_F 及燃烧器区壁面热负荷 q_{Hr} 。 q_F 及 q_{Hr} 高, 则火焰中心温度水平高, 有利于加快燃烧速率。在正常的炉膛充满度条件下, 最上排一次风喷嘴或三次风喷嘴中心至屏下缘的距离 l_3 长, 可增加煤粉在炉内最小的停留时间, 有利于燃尽, 特别是对于 V_{daf} 较低的煤种尤为重要。

H.3 燃烧器设计参数的影响

燃烧器设计参数包括风率、风速、风温及煤粉细度等。高的风温和较细的煤粉有利于燃尽。一次风率和风速大, 不利于着火, 但适当增加一次风率和风速有利于形成良好的空气动力场和煤粉的燃尽。

附 录 I

(资料性附录)

燃烧器区域结渣的预防措施

I.1 总则

对于易结渣煤种，应在燃烧设备设计上采取相应的防渣措施。形成结渣的因素，除煤灰本身特性外，主要是烟气温度、烟气流场和烟气成分。要确保气流在靠近炉壁及受热面时，其温度可降到灰熔融特征温度以下，不能形成较强的还原性气氛，气流不能直接冲刷炉壁。

I.2 煤灰本身的结渣特性

由 R_z 进行判别，见附录 B，当 $R_z > 1.75$ 时即应引起注意，了解该煤在已有电厂的运行情况和设计上的防渣措施，加以借鉴。

I.3 影响炉内烟气温度的因素

影响炉内烟气温度场的因素除煤的发热量外，主要是炉膛截面热负荷 q_F 和燃烧器区壁面热负荷 q_{Hr} 。当发现有严重结渣倾向时，除考虑降低 q_F 及 q_{Hr} 外，也应在烟气流场方面采取措施。

I.4 烟气流场的影响（切向燃烧方式）

烟气流场在切向燃烧方式中主要表现在实际切圆直径 d_{sj} 的大小。如果 d_{sj} 偏大，则火焰容易贴壁，易引起结渣。

影响实际切圆直径 d_{sj} 的主要因素有：

a) 一、二次风射流动量

动量大，则射流不易偏斜，通常加大风速对防止气流贴壁有利。

b) 假想切圆直径

假想切圆直径偏大将导致实际切圆直径 d_{sj} 增大。

c) 燃烧器的布置及结构合理性

若燃烧器布置不合理，则射流在其两侧压力差的作用下易产生偏斜，压差越大，偏斜越大；燃烧器高宽比增加，则射流易偏斜；此外燃烧器各层之间以及一、二次风喷口之间间距小，射流两侧补气条件差，则会使气流偏斜加大。

d) 炉膛截面形状设计的合理性

当炉膛宽深比 (l_2/l_1) 大于 1.2~1.35 时，射流两侧补气条件差别大，气流容易偏斜严重；当炉膛截面带有大切角时，则偏斜减小。

I.5 吹灰器的选用及布置

选用合适的吹灰器及合理布置，对预防炉膛结渣具有重要作用。对于一般结渣特性的燃料，可用蒸汽吹灰器；对于严重结渣，而且渣质疏松的燃料可采用水力吹灰器，并合理布置。

附 录 J
(资料性附录)

水冷壁外壁高温腐蚀的预防措施

J.1 造成水冷壁外壁高温腐蚀的主要原因是：

- a) 燃料中 S 含量较高 ($S_{ar} \geq 1$)；
- b) 煤粉气流冲刷水冷壁管；
- c) 水冷壁壁温较高；
- d) 局部地区严重缺氧。

J.2 解决水冷壁外壁高温腐蚀的措施与防渣措施相似，此外采用贴壁风消除近壁缺氧条件也是积极有效的措施，还可采用耐腐蚀材料、喷涂工艺等以减缓腐蚀过程。

中华人民共和国能源行业标准
大型煤粉锅炉炉膛及燃烧器性能设计规范

NB/T 10127—2018

*

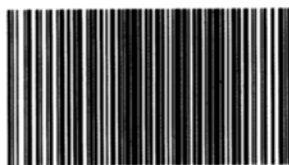
新华出版社出版发行
(北京石景山区京原路8号 邮编: 100043)

新华书店经销
三河市文阁印刷有限公司
版权专有 不得翻印

开本 880×1230 1/16 印张 2.75 字数 42 千字
2019 年 4 月第 1 版 2019 年 4 月第 1 次印刷

*

书号: 155166·76 定价: 40.00 元



NB/T 10127—2018