



中华人民共和国机械行业标准

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

2004-03-12 发布

2004-08-01 实施

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

目 次

前言	IV
引言	V
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 燃烧方式的选择	3
5 炉膛有效容积的确定及炉膛热力特性参数计算式	4
5.1 炉膛有效容积的确定方法	4
5.2 主要炉膛热力特性参数计算式	6
6 切向燃烧方式炉膛热力特性参数及燃烧器工况参数的选择	8
6.1 热力特性参数的选取原则	8
6.2 切向燃烧方式炉膛热力特性参数(BMCR 工况)推荐范围	8
6.3 塔式布置锅炉的炉膛热力特性及燃烧器工况参数选择	8
6.4 切向燃烧方式直流式燃烧器工况参数(BMCR 工况)的选择	8
7 对冲燃烧方式炉膛热力特性参数及燃烧器工况参数的选择	11
7.1 对冲燃烧方式炉膛热力特性参数(BMCR 工况)的选择	11
7.2 对冲燃烧方式燃烧器工况参数(BMCR 工况)的选择	11
8 W 型火焰燃烧方式炉膛热力特性参数及燃烧器工况参数选择	12
8.1 W 型火焰燃烧方式炉膛热力特性参数(BMCR 工况)的选择	12
8.2 W 型火焰燃烧方式炉膛热力特性参数的选取原则	13
8.3 W 型火焰燃烧方式燃烧器的设计原则	13
8.4 W 型火焰燃烧方式燃烧器及其工况参数(BMCR 工况)的选择	13
9 与炉膛及燃烧器设计有关的共性要求	13
9.1 对设计煤种和校核煤种的要求	13
9.2 炉膛高度及出口温度的选取原则	14
9.3 下排一次风喷嘴中心至冷灰斗拐点的距离 l_5 的选取原则	15
9.4 切向燃烧方式炉膛截面的宽/深比 (l_2/l_1) 的选取	15
9.5 冷灰斗倾角 β 的选取	15
9.6 降低 NO_x 生成浓度的措施	15
9.7 对炉膛及燃烧器设计布置的要求	15
9.8 混煤的燃烧特性	15
9.9 切向燃烧锅炉下炉膛水冷壁污染系数 ζ_x 的选取	15
9.10 燃烧器一次风出口温度选择需考虑的因素	16
9.11 燃烧设备设计对磨煤机及制粉系统的要求	16
9.12 火焰检测及炉膛安全监控系统(FSSS)的配备	16
9.13 煤粉细度的选取	16
9.14 高原地区的锅炉设计	17
9.15 防止炉膛结渣、防止水冷壁高温腐蚀	18
10 大型煤粉锅炉燃烧性能保证值的确定	18

10.1 锅炉燃烧性能保证的内容	18
10.2 锅炉燃烧效率的确定	18
10.3 锅炉最低不投油稳燃负荷率 (<i>BMLR</i>) 的确定	19
10.4 燃烧烟气 NO_x 排放浓度限值	20
附录 A (资料性附录) 煤的着火稳定性指数 R_w 及燃尽特性指数 R_f 的确定	21
A.1 煤的着火稳定性指数 R_w	21
A.2 煤的燃尽特性指数 R_f	22
附录 B (资料性附录) 煤灰的结渣特性指数 R_z 的确定	24
附录 C (资料性附录) 煤粉在上排一次风喷嘴 (或上排三次风喷嘴) 中心到屏下缘平均停留时间 τ 的计算	25
附录 D (资料性附录) 卫燃带修正系数 ζ 的推导	26
附录 E (资料性附录) 降低 NO_x 生成浓度的措施	26
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	28
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	28
附录 H (资料性附录) 煤质特性、炉膛热力特性参数及燃烧器工况参数对 q_4 的影响	29
H.1 煤质特性的影响	29
H.2 炉膛热力参数的影响	29
H.3 燃烧器工况参数的影响	29
附录 I (资料性附录) 防止燃烧器区域结渣的措施	29
I.1 总则	29
I.2 煤灰本身的结渣特性	29
I.3 影响炉内烟气温度的因素	29
I.4 烟气流场的影响 (切向燃烧方式)	30
I.5 吹灰器的选用及布置	30
附录 J (资料性附录) 防止水冷壁外壁高温腐蚀的措施	30
图 1 切向燃烧锅炉炉膛结构尺寸示意图	4
图 2 对冲燃烧锅炉炉膛结构尺寸示意图	5
图 3 W 型火焰燃烧锅炉炉膛结构尺寸示意图	5
图 4 塔式布置锅炉炉膛结构尺寸示意图	6
图 5 大气压力与海拔的相关图	17
图 6 根据煤质特性 (V_{daf} 及 A_{ar}) 推荐的 q_4 取值范围	19
图 A.1 某烟煤煤样燃烧特性曲线	21
图 A.2 某烟煤煤焦燃尽曲线	22
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	27
图 E.2 切向燃烧方式燃料分级燃烧原理示意图	27
图 E.3 对冲燃烧方式低 NO_x 燃烧器示意图	27
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	8
表 2 切向燃烧方式炉膛热力特性参数 (<i>BMCR</i> 工况) 的推荐范围	9
表 3 配直吹式制粉系统的切向燃烧方式燃烧器工况参数 (<i>BMCR</i> 工况) 的推荐范围	9
表 4 配中间储仓式制粉系统的切向燃烧方式燃烧器工况参数 (<i>BMCR</i> 工况) 的推荐范围	10
表 5 机组容量、煤的特性对燃烧器工况参数的影响趋势	11
表 6 对冲燃烧方式炉膛热力特性参数 (<i>BMCR</i> 工况) 的推荐范围	11
表 7 配直吹式制粉系统的对冲燃烧方式燃烧器工况参数 (<i>BMCR</i> 工况) 的推荐范围	12

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工况参数(BMCR 工况)的推荐范围	12
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	13
表 10	W 型火焰燃烧方式双旋风筒分离式燃烧器工况参数(BMCR 工况)的推荐范围	14
表 11	W 型火焰燃烧方式双调风旋流式燃烧器的工况参数(BMCR 工况)的推荐范围	14
表 12	保证锅炉额定出力及出口蒸汽参数允许的煤质变化范围	15
表 13	磨煤机出口允许的最高温度	16
表 14	根据煤质特性 (R_w 、 V_{daf} 、 A_{ar}) 推荐的 q_4 取值范围	19
表 15	各型燃烧方式的锅炉最低不投油稳燃负荷率(BMLR)推荐值	20
表 A.1	煤的燃烧和燃尽热分析曲线特征指数	21
表 A.2	各特征指标标定的燃尽等级	23
表 A.3	一些 300MW 级以上电厂实际燃用的炉前煤的 R_w 、 R_1 、 R_2 数据	23
表 B.1	各种结渣倾向判别指数的判别界线和准确率	24
表 G.1	磨煤机及制粉系统的类型选择	28

前 言

本标准为首次发布。

本标准的附录 A、附录 B、附录 C、附录 D、附录 E、附录 F、附录 G、附录 H、附录 I、附录 J 为资料性附录。

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国锅炉标准化技术委员会（CSBTS/TC73）归口。

本标准起草单位：哈尔滨普华煤燃烧技术开发中心、哈尔滨锅炉厂有限责任公司、上海锅炉厂股份有限公司、东方锅炉（集团）股份有限公司、北京巴布科克·威尔科克斯有限公司、武汉锅炉集团有限公司。

本标准主要起草人：谢毓麟、陈春元、侯栋岐、张加安、张琦恩、韩 宾、霍锁善、邬兆春、曹荫钰、郑文学、胡仁德。

引 言

我国主要电站锅炉制造厂家已有近半个世纪的设计制造经验,能够生产燃用国内各类燃料所需的电站锅炉设备,在适应中国国情方面有许多独到的特点。20世纪80年代初,又陆续引进了一些国外公司技术,经过消化吸收和进一步优化,可以说从设计制造技术上已经达到了世界先进水平。锅炉实际运行情况表明,绝大多数锅炉机组具有良好的性能,但也有部分锅炉机组不尽完善,因此,有必要总结锅炉设计运行经验,形成中国统一的设计规范,以指导机械行业大型锅炉燃烧设备的性能设计,同时为用户提供选型参考。

大型煤粉锅炉

炉膛及燃烧器性能设计规范

1 范围

本标准规定了大型煤粉锅炉燃烧方式的选择、炉膛主要尺寸的选择、燃烧器设计工况参数的选择、设计性能保证值确定，以及与炉膛和燃烧器选型设计有关的共性要求。

本标准适用于大型煤粉锅炉（配300MW级及以上容量发电机组）炉膛及燃烧器性能设计，容量小于300MW的煤粉锅炉也可以参照使用。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

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

- GB/T 212 煤的工业分析方法（GB/T 212—2001，eqv ISO 11722: 1999）
- GB/T 213 煤的发热量测定方法（GB/T 213—1996，eqv ISO 1928: 1995）
- GB/T 219 煤灰熔融性的测定方法（GB/T 219—1996，eqv ISO 540:1993）
- GB/T 476 煤的元素分析方法（GB/T 476—2001，eqv ISO 625: 1996）
- GB/T 1574 煤灰成分分析方法
- GB/T 2900.48 电工名词术语 固定式锅炉
- GB/T 3715 煤质及煤分析有关术语（GB/T 3715—1996，eqv ISO 1213-2: 1995）
- GB/T 10184 电站锅炉性能试验规程
- GB 13223 火电厂大气污染物排放标准
- DL 435 火电厂煤粉锅炉燃烧室防爆规程

3 术语和定义

GB/T 2900.48 和 GB/T 3715 确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

煤粉锅炉燃烧方式 firing modes of pulverized-coal-fired boiler

由煤粉燃烧器布置在炉膛的不同位置而构成的锅炉燃烧方式。

注：现代煤粉锅炉一般有切向燃烧方式、前后墙对冲燃烧方式和W型火焰燃烧方式。

3.2

W型火焰燃烧方式 W-flame firing mode

将直流或弱旋流式煤粉燃烧器布置在炉膛前部墙炉拱上，使火焰先向下流动，再返回向上，形成W状火焰的燃烧方式。

3.3

炉膛及燃烧器性能设计 performance design of furnaces and burners

为达到良好的燃烧性能，合理选择锅炉燃烧方式、炉膛主要热力特性参数、结构尺寸及燃烧器工况参数等，不包括材料、附件等选用及施工细节。

注：燃烧性能主要包括着火稳定性、燃尽性、防渣性能、防水冷壁高温腐蚀、低污染性能以及降低炉膛出口残余旋流等。

3.4

直吹式制粉系统 direct-fired coal pulverization system

将从磨煤机（中速磨煤机、风扇磨煤机或双进双出钢球磨煤机）引出的气、粉混合物作为一次风，直接通过燃烧器喷入炉膛燃烧的制粉系统。

注：为提高入炉一次风温，在粗粉分离器后的一次风管路上装设细粉分离器及锁气器，从而可以利用高温热风来置换废干燥剂作为入炉一次风的系统称为半直吹式制粉系统。

3.5

中间储仓式制粉系统 coal pulverization system with pulverized coal bunker

从磨煤机（一般为钢球磨煤机）引出的气、粉混合物通入细粉分离器，将约 90% 的煤粉分离到煤粉仓，然后再用给粉机分别注入相应的一次风管（或乏气风管），输送到燃烧器组织燃烧的制粉系统。

注：用制粉乏气输送煤粉的称为乏气送粉系统，用空气预热器出来的热风携带给粉机下来的煤粉的称为热风送粉系统。

3.6

炉膛有效容积 effective furnace volume

实施煤粉悬浮燃烧及传热的空间，并用以计算炉膛容积热负荷的容积部分。

3.7

煤的着火稳定性指数 coal flammability index
 R_w

表征煤的着火稳定难易程度，由浅坩锅热天平（如 TGS-2 型热天平）测得燃烧特性曲线特征值后经计算求得（见附录 A）。

3.8

煤的燃尽特性指数 coal burnout index
 R_j

表征煤的燃尽难易程度，由浅坩锅热天平（如 TGS-2 型热天平）测得燃烧特性曲线和煤焦燃尽速率曲线，取特征值经计算求得（见附录 A）。

3.9

煤的结渣特性指数 coal slagging index
 R_z

表征煤灰的结渣倾向， R_z 与煤灰熔融性及煤灰成分有关（见附录 B）。

3.10

锅炉最低不投油稳燃负荷率 boiler minimum stable load ratio without auxiliary support
 $BMLR$

在设计煤种和合同规定条件下，锅炉不投油助燃的最低稳定燃烧负荷与锅炉最大连续负荷（ $BMCRC$ ）之比。即：

$$BMLR = \frac{\text{不投油助燃的最低稳燃负荷}}{\text{锅炉最大连续负荷 (BMCRC)}} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

注：每台煤粉锅炉都可能具有 3 个不同定义的最低不投油稳燃负荷率数值，即：

——设计保证值：锅炉制造厂保证的数值；

——试验值：在设计煤种及正常工况条件下经持续 4 h—6 h 稳定运行（无局部灭火及炉膛压力大幅度波动现象）试验可达到的最低数值；

——可供调度值：考虑到日常入炉煤质波动及设备状态和控制水平、火焰检测系统的可靠性等条件后由业主规定的可供负荷调度用的实际运行数值。

3.11

氮氧化物（ NO_x ）生成浓度 primary NO_x concentration

锅炉排出于烟气中含有的初始 NO_x 浓度, NO_x 是 NO_2 、 NO 和其他微量氮氧化物的总称。

4 燃烧方式的选择

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

4.2 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:

- $R_w < 4.02$: 为极难着火煤种;
- $4.02 \leq R_w < 4.67$: 为难着火煤种;
- $4.67 \leq R_w < 5.00$: 为中等着火煤种;
- $5.00 \leq R_w < 5.59$: 为易着火煤种;
- $R_w \geq 5.59$: 为极易着火煤种。

R_w 的高低与煤中的干燥无灰挥发分 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的降低一级, 如易着火煤种降为中等着火煤种。

据 30 多台大容量锅炉炉前煤数据 R_w 与 V_{daf} 的拟合关系式如下:

$$R_w = 3.59 + 0.054V_{\text{daf}} \dots\dots\dots (2)$$

4.3 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:

- $R_j < 2.5$: 为极难燃尽煤种;
- $2.5 \leq R_j < 3.0$: 为难燃尽煤种;
- $3.0 \leq R_j < 4.4$: 为中等燃尽煤种;
- $4.4 \leq R_j < 5.29$: 为易燃尽煤种;
- $R_j \geq 5.29$: 为极易燃尽煤种。

4.4 煤灰的结渣倾向由煤的结渣特性指数 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:

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

4.5 设计者可根据业主义向, 并结合本单位积累的经验, 按下述原则选择煤粉锅炉燃烧方式:

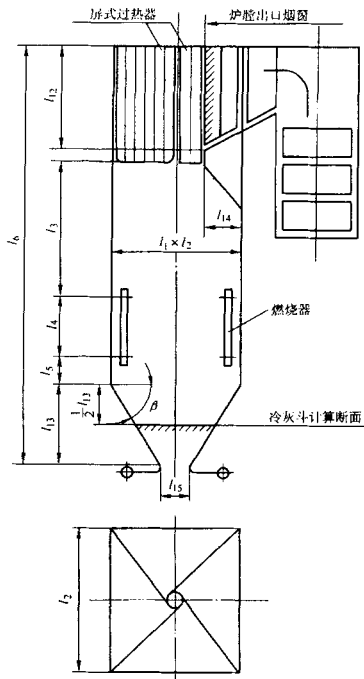
- a) 极易着火煤种 ($R_w \geq 5.59$ 或 $V_{\text{daf}} \geq 37\%$ 的褐煤) 宜采用切向燃烧或对冲燃烧, 采用直吹式制粉系统。当入炉煤的收到基水分 $M_{\text{ar}} \geq 30\%$ 时, 从干燥和防爆需要考虑, 宜采用抽炉烟干燥的风扇磨煤机直吹式制粉系统; 但对于入炉煤收到基水分 $M_{\text{ar}} < 35\%$ 、低位发热量 $Q_{\text{net,v,ar}} > 10 \text{ MJ/kg}$ 的褐煤, 也可采用中速磨煤机, 并采用较高的热风温度 ($\geq 380^\circ\text{C}$)。
- b) 易着火煤种及中等着火煤种 ($R_w \geq 4.67$ 或 $V_{\text{daf}} \geq 20\%$ 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, 也可采用钢球磨煤机中间储仓乏气送粉系统。
- c) 难着火煤种中 $4.24 \leq R_w < 4.67$ 或 $12\% \leq V_{\text{daf}} < 20\%$ 的贫煤, 一般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) 难着火煤种中 $4.02 \leq R_w < 4.24$ 或 $8\% \leq V_{\text{daf}} < 12\%$ 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, 宜优先采用 W 型火焰燃烧方式, 否则可采用切向或对冲燃烧方式。
- e) 极难着火煤种中 $R_w < 4.02$ 或 $V_{\text{daf}} < 8\%$, 或 $R_j < 2.5$ 的无烟煤, 宜采用 W 型火焰燃烧方式, 可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。

5 炉膛有效容积的确定及炉膛热力特性参数计算式

5.1 炉膛有效容积的确定方法

应按下述三项原则计算炉膛有效容积:

- a) 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。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如果 ≤ 457 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 mm 的屏式受热面, 一般超出折焰角尖端垂直向上的平面 (见图 2、图 3), 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 ≤ 457 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; 对于塔式锅炉炉膛出口烟窗为一水平假想平面, 在该平面向下的受热面管束, 其水平方向管子中心线间距均应大于 457 mm, 如图 4 所示。
- b) 炉膛冷灰斗区有效容积只计上半高度, 认为下半高度是死滞区, 不计在炉膛有效容积内。
- c) 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 (小直角边 $l_{11} > \sqrt{l_1 l_2} / 10$, 对于 W 型锅炉则为 $\sqrt{l_6 l_2}$) 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炉型。

图 1 切向燃烧锅炉炉膛结构尺寸示意图

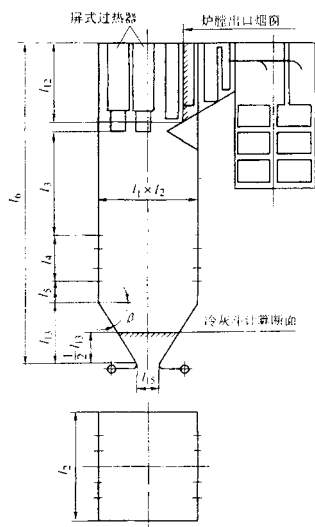


图2 对冲燃烧锅炉炉膛结构尺寸示意图

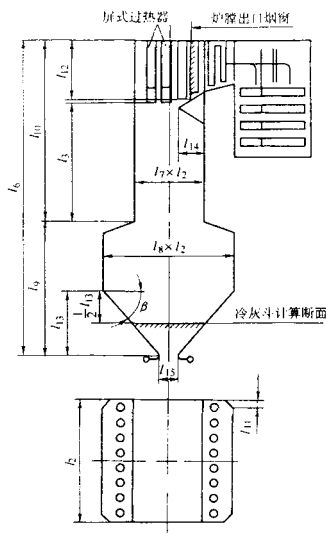
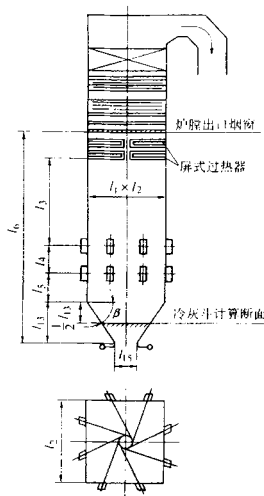


图3 W型火焰燃烧锅炉炉膛结构尺寸示意图



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，单位为m；
- l_2 ——炉膛宽度，左右墙水冷壁管中心线间的距离，单位为m；
- l_3 ——对于切向及对冲燃烧锅炉为燃烧器最上一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，而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，单位为m；对于塔式布置锅炉为最上一排一次风喷嘴（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，单位为m；
- l_4 ——最上一排一次风喷嘴（或三次风喷嘴，参见 l_3 说明）至最下排一次风喷嘴中心线间的距离，单位为m；
- l_5 ——最下排一次风喷嘴中心线至冷灰斗拐点间的距离，单位为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，单位为m；
- l_7 ——W型火焰燃烧锅炉上炉膛深度，单位为m；
- l_8 ——W型火焰燃烧锅炉下炉膛深度，单位为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，单位为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，单位为m；
- l_{11} ——炉膛切角小直角边长，单位为m；
- l_{12} ——炉膛出口烟窗高度，单位为m；
- l_{13} ——炉膛冷灰斗拐点至炉底排渣口间的距离，单位为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，单位为m；
- l_{15} ——排渣口净深度，冷灰斗底部出口的水平净间距，单位为m；
- β ——冷灰斗斜坡与水平面所成角度，单位为度。

5.2 主要炉膛热力特性参数计算式

5.2.1 炉膛容积热负荷 q_v

炉膛容积热负荷 q_v 计算式如下:

$$q_v = N_r / V \dots\dots\dots (3)$$

式中:

q_v ——炉膛容积热负荷, 单位为 kW/m^3 ;

N_r ——锅炉输入热功率, 单位为 kW ;

V ——炉膛有效容积, 单位为 m^3 。

注: 本标准中锅炉输入热功率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 $Q_{\text{net,v,ar}}$ 的乘积, 即:

$$N_r = B_j Q_{\text{net,v,ar}} \dots\dots\dots (4)$$

$$B_j = B (1 - q_d / 100) \dots\dots\dots (5)$$

式中:

B_j ——锅炉设计计算煤耗量, 单位为 kg/s ;

B ——锅炉设计煤耗量, 单位为 kg/s ;

q_d ——固体未完全燃烧热损失, %;

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

5.2.2 上排一次风喷嘴 (或上排乏气喷嘴) 中心标高到屏下缘的煤粉平均停留时间 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 (以烟气的平均停留时间替代), 本标准认定煤粉的有效燃烧时间为上排一次风喷嘴 (或上排乏气喷嘴) 中心至屏下缘的这段停留时间 τ 。 τ 的计算方法参见附录 C。

5.2.3 炉膛截面热负荷 q_F

炉膛截面热负荷 q_F 计算式如下:

$$q_F = \frac{N_r}{1\,000F} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

q_F ——炉膛截面热负荷, 单位为 MW/m^2 ;

F ——炉膛截面积, 单位为 m^2 。除有较大的切角外, 按下式计算:

$$F = l_1 \times l_2 \dots\dots\dots (7)$$

对于 W 型火焰燃烧锅炉应取用下炉膛截面积 $l_0 \times l_2$ 。

5.2.4 燃烧器区壁面热负荷 q_{Hr}

燃烧器区壁面热负荷 q_{Hr} 计算式如下:

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

式中:

q_{Hr} ——燃烧器区壁面热负荷, 单位为 MW/m^2 。

F_{Hr} ——上、下一次风喷嘴中心线间距离外加 3 m 所包围的炉膛围带面积, 单位为 m^2 。 F_{Hr} 的计算公式如下:

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

式中:

ζ ——卫燃带修正系数。 ζ 的计算公式 (推导参见附录 D) 如下:

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

式中:

F_w ——卫燃带面积, 单位为 m^2 。

W 型火焰燃烧方式锅炉不计算燃烧器区壁面热负荷。

5.2.5 炉膛辐射受热面热负荷 q_H

炉膛辐射受热面热负荷 q_H 计算式如下：

$$q_H = \frac{N_r}{1000 F_H} \dots\dots\dots (11)$$

式中：

q_H ——炉膛辐射受热面热负荷，单位为 MW/m²；

F_H ——炉膛有效辐射受热面积，单位为 m²。在此面积的计算中，冷灰斗面积是从冷灰斗底部开始。

另外后墙面积计算包括炉膛出口窗面积。 F_H 的计算公式如下：

$$F_H = F_{H1} + F_{H2} + 2F_{H3} + F_{H4} + F_{H5} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

F_{H1} ——横向节距大于 457 mm 的屏的面积(当单片屏间距与管径比不大于 1.5 时，按单片屏的两面投影计算；当单片屏间距与管径比大于 1.5 时，按单片屏管子的外表面积计算)，单位为 m²。

6 切向燃烧方式炉膛热力特性参数及燃烧器工况参数的选择

6.1 热力特性参数的选取原则

- a) 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；
- b) 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；
- c) 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；
- d) q_F 与 q_H 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_H 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，上一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，要慎重考虑三次风（乏气）引入炉膛的位置，要采取必要的加强煤粉燃尽的措施。

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

名 称	q_v	q_F	q_H	l_3	τ
机组容量	↓	↑	↓	—	—
煤的着火性能	—	↑	↑	—	—
煤的燃尽性能	↓	↑	↑	—	↑
煤灰结渣倾向	↑	↓	↓	↑	↑

6.2 切向燃烧方式炉膛热力特性参数(BMCR 工况)推荐范围

切向燃烧方式炉膛热力特性参数(BMCR 工况)推荐范围见表 2。

6.3 塔式布置锅炉的炉膛热力特性及燃烧器工况参数选择

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 5.1)，其余的热力特性参数及燃烧器工况参数选择，均决定于其选用的燃烧方式。

6.4 切向燃烧方式直流式燃烧器工况参数(BMCR 工况)的选择

6.4.1 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。

6.4.2 配直吹式制粉系统的切向燃烧方式直流式燃烧器工况参数(BMCR 工况)的推荐范围见表 3。

6.4.3 配中间储仓式制粉系统的切向燃烧方式直流式燃烧器工况参数(BMCR 工况)的推荐范围见表 4

6.4.4 选择切向燃烧方式直流式燃烧器工况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。

表2 切向燃烧方式炉膛热力特性参数(BMCR 工况)的推荐范围

机组容量等级		300MW	600MW
炉膛容积热负荷 q_v kW/m ³	低 V_{daf} 煤	85~116	(82~102)
	烟煤	90~118	85~105
	褐煤	75~90	60~80
炉膛截面热负荷 q_F MW/m ²	低 V_{daf} 煤	4.5~5.2	(4.6~5.4)
	烟煤	3.8~5.1	4.4~5.2
	褐煤	3.3~4.0	3.6~4.5
燃烧器区壁面热负荷 q_{hw} MW/m ²	低 V_{daf} 煤	1.4~2.2	(1.6~2.2)
	烟煤	1.1~2.1	1.3~2.2
	褐煤	1.0~1.5	1.0~1.6
炉膛辐射受热面热负荷 q_{H1} MW/m ²	低 V_{daf} 煤	0.18~0.26	(0.20~0.28)
	烟煤	0.16~0.25	0.18~0.26
	褐煤	0.15~0.24	0.18~0.25
上排一次风喷嘴(或上排三次风喷嘴)中心至屏下缘距离 l_3 m	低 V_{daf} 煤	17~21.5	(19~23)
	烟煤	16~20	18~22
	褐煤	18~24	20~25
上排一次风喷嘴(或上排三次风喷嘴)中心至屏下缘烟气平均停留时间 τ s	低 V_{daf} 煤	1.8~2.3	(1.8~2.4)
	烟煤	1.6~2.2	1.6~2.3
	褐煤	2.0~2.6	2.0~2.8

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。
 注2: 低 V_{daf} 煤指 $R_w < 4.67$ ($V_{daf} < 20\%$) 的无烟煤、贫煤煤种。
 注3: 烟煤指 $R_w \geq 4.67$ ($V_{daf} \geq 20\%$) 的烟煤煤种。
 注4: 褐煤指 $R_w \geq 5.59$ ($V_{daf} \geq 37\%$) 的褐煤煤种。
 注5: 表中括号内数值均为参考值。
 注6: 低 V_{daf} 煤的 q_{hw} 未考虑卫燃带修正系数。

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

机组容量等级		300MW	600MW
一次风喷嘴只数	低 V_{daf} 煤	16~24	20~24
	烟煤	16~24	20~24
	褐煤	18~28	24~32
一次风喷嘴层数	低 V_{daf} 煤	4~6	5~6
	烟煤	4~6	5~6
	褐煤	3 ^a (5~7) ^b	3 ^a (6~8) ^b
一次风温度 °C	低 V_{daf} 煤	90~130	90~130
	烟煤	70~100	70~100
	褐煤	80~180 ^c	80~180 ^c
一次风率 %	低 V_{daf} 煤	14~25	14~25
	烟煤	18~25	18~25
	褐煤	15~25	20~35
一次风速度 m/s	低 V_{daf} 煤	20~24	22~26
	烟煤	22~30	24~32
	褐煤	16~22	18~25
二次风温度 °C	低 V_{daf} 煤	350~380	350~380
	烟煤	300~360	300~360
	褐煤	300~320	290~380

表 3 (续)

机组容量等级		300MW	600MW
二次风率 %	低 V_{daf} 煤	75~86	75~86
	烟 煤	75~82	75~82
	褐 煤	75~85	65~80
二次风速度 m/s	低 V_{daf} 煤	40~48	42~50
	烟 煤	45~52	46~56
	褐 煤	45~55	46~56
炉膛出口过量空气系数	低 V_{daf} 煤	1.2~1.25	1.2~1.25
	烟 煤	1.2~1.25	1.2~1.25
	褐 煤	1.2~1.25	1.2~1.25
^a 风扇磨系统。 ^b 中速磨系统有备用层。 ^c 上限用于烟气空气混合物作干燥剂, 当仅用空气作干燥剂时取用 80℃~120℃。			

表 4 配中间储仓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

机组容量等级		300MW
一次风喷嘴只数	低 V_{daf} 煤	16~24
	烟 煤	16~24
	劣质烟煤 ^a	16~24
一次风喷嘴层数	低 V_{daf} 煤	4~5
	烟 煤	4~6
	劣质烟煤	4~6
一次风温度 ℃	低 V_{daf} 煤	200~260 ^b
	烟 煤	70~100
	劣质烟煤	100~160 ^c
一次风率 %	低 V_{daf} 煤	12~22
	烟 煤	25~33
	劣质烟煤	16~27
一次风速度 m/s	低 V_{daf} 煤	20~28
	烟 煤	25~30
	劣质烟煤	22~27
二次风温度 ℃	低 V_{daf} 煤	320~380
	烟 煤	300~360
	劣质烟煤	310~360
二次风率 %	低 V_{daf} 煤	53~72
	烟 煤	67~75
	劣质烟煤	53~85
二次风速度 m/s	低 V_{daf} 煤	40~50
	烟 煤	45~52
	劣质烟煤	40~50
三次风率 %	低 V_{daf} 煤	16~22
	烟 煤	0
	劣质烟煤	16~26
三次风速度 m/s	低 V_{daf} 煤	50~60
	烟 煤	—
	劣质烟煤	50~60
三次风温度 ℃	低 V_{daf} 煤	70~130
	烟 煤	—
	劣质烟煤	70~130
炉膛出口过量空气系数	低 V_{daf} 煤	1.25
	烟 煤	1.2~1.25
	劣质烟煤	1.2~1.25
^a 当烟煤灰分 $A_{ad} > 40\%$ 、 $Q_{net,v,ar} < 16.7 \text{ MJ/kg}$ 或 $A_{ad} > 32\%$ 的洗中煤可定为劣质烟煤; ^b 200℃~260℃用于热风送粉系统, 当用乏气送粉时, 贫煤一次风温度约为 130℃; ^c 当用于热风送粉时可取 200℃。		

- 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 1~2 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、煤的特性对燃烧器工况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。

表 5 机组容量、煤的特性对燃烧器工况参数的影响趋势

名称	一次风温 ℃	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 ↑		↑	↑		↓	↑	↓

7 对冲燃烧方式炉膛热力特性参数及燃烧器工况参数的选择

7.1 对冲燃烧方式炉膛热力特性参数(BMCR 工况)的选择

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。参见 6.1 及 6.4.4。

表 6 对冲燃烧方式炉膛热力特性参数(BMCR 工况)的推荐范围

机组容量等级		300MW	600MW
炉膛容积热负荷 q_v kW/m ³	低 V_{daf} 煤	90~120	(85~105)
	烟煤	95~125	90~115
	褐煤	80~100	75~90
炉膛截面热负荷 q_F MW/m ²	低 V_{daf} 煤	4.2~5.2	(4.6~5.4)
	烟煤	3.6~5.0	3.8~5.2
	褐煤	3.2~4.5	(3.5~4.8)
燃烧器区壁面热负荷 q_{hr} MW/m ²	低 V_{daf} 煤	1.1~1.8	(1.2~2.1)
	烟煤	1.1~1.7	1.2~2.0
	褐煤	1.0~1.5	1.4~1.8
炉膛辐射受热面热负荷 q_{H1} MW/m ²	低 V_{daf} 煤	0.18~0.26	(0.20~0.28)
	烟煤	0.16~0.25	0.18~0.26
	褐煤	0.16~0.25	0.18~0.26
上排一次风喷嘴中心 至屏下缘距离 l_1 m	低 V_{daf} 煤	15~20	(18~23)
	烟煤	14~18	18~22
	褐煤	16~22	(18~24)
上排一次风喷嘴中心 至屏下缘停留时间 τ s	低 V_{daf} 煤	1.6~2.2	(1.7~2.3)
	烟煤	1.5~2.0	1.5~2.2
	褐煤	2.0~2.5	2.0~2.6

注 1: 低 V_{daf} 煤指 $R_{90} < 4.67$ ($V_{daf} < 20\%$) 的无烟煤、贫煤种。
注 2: 烟煤指 $R_{90} \geq 4.67$ ($V_{daf} \geq 20\%$) 的烟煤种。
注 3: 褐煤指 $R_{90} \geq 5.59$ ($V_{daf} \geq 37\%$) 的褐煤种。
注 4: 距离 l_1 、停留时间 τ 以及容积热负荷 q_v 未考虑低气压的影响。
注 5: 表中括号内数值为参考值。

7.2 对冲燃烧方式燃烧器工况参数(BMCR 工况)的选择

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)的推荐范围见表 7。

配中间储仓式制粉系统的对冲燃烧方式燃烧器工况参数(BMCR 工况)的推荐范围见表 8。

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

机组容量等级		300MW	600MW
燃烧器只数	低 V_{daf} 煤	16~24	24~36
	烟煤	16~32	24~48
燃烧器层数	低 V_{daf} 煤	2~4	2~4
	烟煤	2~4	2~4
一次风温度 $^{\circ}\text{C}$	低 V_{daf} 煤	150~200 ^a	150~200 ^a
	烟煤	70~100	70~100
一次风率 %	低 V_{daf} 煤	16~25	16~25
	烟煤	16~25	16~25
一次风速度 m/s	低 V_{daf} 煤	14~20	14~20
	烟煤	14~24	14~24
二次风温度 $^{\circ}\text{C}$	低 V_{daf} 煤	320~380	320~380
	烟煤	300~360	300~360
二次风率 %	低 V_{daf} 煤	58~72	58~72
	烟煤	71~80 ^c	71~80 ^c
乏气风率 ^b %	低 V_{daf} 煤	8~13	8~13
	烟煤	—	—
二次风内环风速度 m/s	低 V_{daf} 煤	16~22	16~22
	烟煤	16~26	16~26
二次风外环风速度 m/s	低 V_{daf} 煤	28~44	28~44
	烟煤	28~42	28~42
炉膛出口过量空气系数	低 V_{daf} 煤	1.2~1.25	1.2~1.25
	烟煤	1.16~1.25	1.16~1.25

^a 150℃~200℃用于一次风置换型燃烧器, 否则采用90℃~130℃。
^b 指经过一次风置换型双调风燃烧器后的浓相乏气风率。
^c 备用燃烧器停用时冷却用风风率(约为4%)未计在内。

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工况参数(BMCR 工况)的推荐范围

机组容量等级		300MW	600MW
燃烧器只数 只	低 V_{daf} 煤	20~32	36~48
燃烧器层数 层	低 V_{daf} 煤	3~4	3~4
一次风温度 $^{\circ}\text{C}$	低 V_{daf} 煤	200~240	200~240
一次风率 %	低 V_{daf} 煤	12~18	12~18
一次风速度 m/s	低 V_{daf} 煤	14~18	14~18
二次风温度 $^{\circ}\text{C}$	低 V_{daf} 煤	320~380	320~380
二次风率 %	低 V_{daf} 煤	60~78	60~78
二次风内环风速度 m/s	低 V_{daf} 煤	16~22	16~22
二次风外环风速度 m/s	低 V_{daf} 煤	28~42	28~42
三次风温度 $^{\circ}\text{C}$	低 V_{daf} 煤	70~130	70~130
三次风率 %	低 V_{daf} 煤	14~18	14~18
三次风速度 m/s	低 V_{daf} 煤	22~28	22~28
炉膛出口过量空气系数	低 V_{daf} 煤	1.2~1.25	1.2~1.25

8 W 型火焰燃烧方式炉膛热力特性参数及燃烧器工况参数选择

8.1 W 型火焰燃烧方式炉膛热力特性参数(BMCR 工况)的选择

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

锅炉容量等级	300MW
全炉膛容积热负荷 q_v kW/m^3	90~115
下炉膛容积热负荷 q_{vx} kW/m^3	190~240
下炉膛截面热负荷 q_{fx} MW/m^2	1.9~3.0
全炉膛辐射受热面热负荷 q_H MW/m^2	0.2~0.35
上/下炉膛深度比 l_1/l_2	0.5~0.6

8.2 W 型火焰燃烧方式炉膛热力特性参数的选取原则

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, 在低负荷不投油助燃时燃烧稳定;
- 上/下炉膛深度比 l_1/l_2 宜大于 0.5, 以使前后拱 U 形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。

8.3 W 型火焰燃烧方式燃烧器的设计原则

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 W 型火焰燃烧方式燃烧器及其工况参数(BMCR 工况)的选择

燃烧器工况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, 燃烧器型式有双旋风筒分离式、双调风旋流式及直流狭缝式几种。根据国内生产 300MW 级 W 型火焰燃烧锅炉的设计经验对前两种燃烧器型式作如下推荐:

表 10 为 W 型火焰燃烧方式双旋风筒分离式燃烧器工况参数(BMCR 工况)的推荐范围;

表 11 为 W 型火焰燃烧方式双调风旋流式燃烧器工况参数(BMCR 工况)的推荐范围。

9 与炉膛及燃烧器设计有关的共性要求

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, 并分析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 12 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 10 W 型火焰燃烧方式双旋风筒分离式燃烧器工况参数(BMCR 工况)的推荐范围

机组容量等级	300MW	
	直吹式	中间储仓式
制粉系统型式	直吹式	中间储仓式
前后拱燃烧器总数	20~32	20~36
一次风温度 °C	90~120	110~180
一次风率 %	10~20	15~23
一次风速度 m/s	10~25	13~25
二次风温度 °C	300~360	300~360
顶部二次风率 %	20~30	20~30
顶部二次风速度 m/s	10~30	10~30
前后墙对冲二次风率 %	50~65	40~60
前后墙对冲二次风速度 m/s	8~16	8~16
三次风温度 °C	—	90~130
三次风率 %	—	15~23
三次风速度 m/s	—	25~35
炉膛出口过量空气系数	1.25~1.3	1.25~1.3

表 11 W 型火焰燃烧方式双调风旋流式燃烧器的工况参数(BMCR 工况)的推荐范围

机组容量等级	300MW	
	直吹式	中间储仓式(热风送粉)
制粉系统型式	直吹式	中间储仓式(热风送粉)
磨煤机型号	双进双出钢球磨煤机	普通钢球磨煤机
燃烧器型式	一次风置换双调风	着火增强型双调风
前后拱燃烧器总数	16~18	16~18
一次风温度 °C	130~200	200~260
一次风率 %	16~25	12~18
一次风速度 m/s	18~24	18~24
淡相或三次风(制粉乏气)风率 %	8~12.5	14~20
淡相或三次风(制粉乏气)速度 m/s	20~28	20~28
拱上二次风率 %	50~65	50~65
内拱上二次风速度 m/s	18~26	18~26
外拱上二次风速度 m/s	35~41	35~41
分级二次风率 %	12~20	12~20
分级二次风速度 m/s	37~43	37~43
炉膛出口过量空气系数	1.22~1.25	1.22~1.25

注：除表中两种配置外，还有直吹式双进双出钢球磨煤机浓缩型燃烧器，上述诸燃烧器均可在喷口端部装设稳燃环。

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°C ~ 100°C ；若煤灰软化温度 ST 与变形温度 DT 之差小于等于 50°C ，则炉膛出口烟气温度应降低到煤灰软化温度 ST 以下 100°C ~ 150°C 。

表 12 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} %		收到基灰分 A_{ar} %	收到基低位发热量 $Q_{net,v,ar}$ kJ/kg	
	设计值	偏差值	偏差值	设计值	偏差值
无烟煤	8~12	±1	±4	≥20 800	±1 670
贫煤	12~20	±2	±5	≥20 800	±1 670
低挥发分烟煤	20~30	±5	+5 -10	≥16 700	±1 400
高挥发分烟煤	>30	±5	+5 -10	≥16 700	±1 400
褐煤	>37		±5	≥12 500	+1 000 -500

注 1: 干燥无灰基挥发分小于 8% 的无烟煤, 煤质允许变化范围另行商定。
注 2: 表中各种煤, 当其对应的收到基低位发热量低于表中所列数值时, 其允许偏差值可适当调整。
注 3: 当灰的变形温度 DT 下降 (比设计煤) 时, 固态排渣炉仍应不严重结渣。

9.3 下排一次风喷嘴中心至冷灰斗拐点的距离 l_5 的选取原则

下排一次风喷嘴中心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, 300 MW 级锅炉 l_5 一般在 3.5 m~5.0 m 之间; 600 MW 级锅炉 l_5 一般在 4.5 m~5.5 m 之间, 遇有强结渣煤时取高值。当采用摆动式燃烧器时一般不宜小于按 $l_5 = 0.213 l_{16} + 1.48$ 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 2.4 m~3.6 m, 遇有结渣强的煤种可取高值。

另外, 由于受下列情况影响, 而无法减小 l_5 值:

- 对于多数燃料, 特别是易结渣煤种, 需要在下排燃烧器至冷灰斗之间布置一层吹灰器时;
- 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;
- 双进双出钢球磨煤机分离器有时不座在磨煤机上, 煤粉管道标高被抬高, 下一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, 而不宜超过 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 NO_x 生成浓度的措施见附录 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靠近易燃煤的着火特性, 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, 难燃煤中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 切向燃烧锅炉炉下炉膛水冷壁污染系数 ζ_s 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_s^* , 在计算下炉膛出口烟气温度 θ_s^* 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_s , 当无燃用经验时, 可参考附录 F 选取。

9.10 燃烧器一次风出口温度选择需考虑的因素

DL 435 规定的磨煤机出口允许最高温度(见表 13)可供选择燃烧器一次风出口温度时参考。

表 13 磨煤机出口允许的最高温度

磨煤机类型	用空气作干燥剂	用烟气空气混合物作干燥剂
风扇磨煤机(直吹式制粉系统, 在粗粉分离器后的温度)	贫煤: $\approx 150^{\circ}\text{C}$ 烟煤: $\approx 130^{\circ}\text{C}$ 褐煤和页岩: $\approx 100^{\circ}\text{C}$	烟煤、褐煤、页岩: $180^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$
钢球磨煤机(中储式制粉系统, 在磨煤机出口的温度)	贫煤: $\approx 130^{\circ}\text{C}$ 烟煤、褐煤: $\approx 70^{\circ}\text{C}$	烟煤: $\approx 120^{\circ}\text{C}$ 褐煤: $\approx 90^{\circ}\text{C}$
中速磨煤机(直吹式制粉系统, 在分离器后的温度)	当干燥无灰基挥发分 $V_{\text{daf}}=12\% \sim 40\%$ 时: $120^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$	
注: 采用热风送粉时, 对非易燃性的燃料($V_{\text{daf}} < 10\%$), 热风温度可适当提高; 对易着火的燃料, 如烟煤时, 热风温度的选定应使燃烧器入口处气粉混合物的温度不超过 160°C ; 对褐煤、气粉混合物温度不应超过 100°C ; 特殊情况应通过试验确定。		

9.11 燃烧设备设计对磨煤机及制粉系统的要求)

燃烧设备设计对磨煤机及制粉系统的要求如下:

- a) 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:
 - 1) 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;
 - 2) 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;
- b) 磨煤机及制粉系统的选择参见附录 G;
- c) 磨煤机计算出力的备用裕量应该适宜, 既要考虑最差煤质条件下满足锅炉满负荷燃煤需要, 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:
 - 1) 对于直吹式制粉系统, 在磨设计煤种时, 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 $115\% \sim 125\%$, 当煤质较差时取上限;
 - 2) 对于钢球磨中间储仓式制粉系统, 每台锅炉设置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 $115\% \sim 120\%$ 。
- d) 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 $K_{\text{le}} \leq 0.25$; 对于钢球磨煤机中间储仓系统 $K_{\text{le}} \leq 0.3$; 对于风扇磨煤机带烟气下降管 $K_{\text{le}} \leq 0.3$ 。
- e) 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; 至少有相邻两台磨煤机投运, 其中一台出力要求大于 50% 。

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下式选取:

对于 $V_{\text{daf}} \geq 12\%$ 的贫煤和烟煤:

$$R_{90} = 4 + 0.5nV_{\text{daf}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

对于 $V_{\text{daf}} < 12\%$ 的贫煤:

$$R_{90} = 2 + 0.5nV_{\text{daf}} \quad \dots\dots\dots (14)$$

对于 $V_{\text{daf}} < 10\%$ 的无烟煤:

$$R_{90} = 0.5nV_{\text{daf}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

式中:

n ——煤粉的均匀性系数。

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

当燃用劣质烟煤时按下式选取:

$$R_{90} = 5 + 0.35V_{daf} \dots\dots\dots(16)$$

当燃用褐煤及油页岩时, 煤粉细度为:

$R_{90} = 35\% \sim 50\%$ (挥发分高时取大值, 挥发分低时取小值), $R_{1000} < 1\% \sim 3\%$ 。

9.14 高原地区的锅炉设计

9.14.1 高原地区炉膛设计

由于高原地区炉膛气压降低、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 500 m ~ 800 m 时, 煤粉在炉内所减少的停留时间对燃烧的影响轻微, 特别是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。至于燃用低 V_{daf} 煤种及低灰熔融温度的煤种, 除采取强化燃尽及防渣措施外, 必要时可少许增加炉膛燃尽区容积, 以弥补压力降低所减少的停留时间。

对海拔大于 800 m 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 (上一次风喷嘴中心截面到屏下缘截面间) 的容积应增加为 V_d :

$$V_d = V_m \cdot \frac{p_B}{p_d} \dots\dots\dots(17)$$

式中:

V_d ——高原地区炉膛燃尽区应采取用的容积, 单位为 m^3 ;

V_m ——平原地区炉膛燃尽区容积, $V_m = l_1 \times l_2 \times l_3$, 单位为 m^3 ;

p_B ——平原地区的大气压力, 单位为 kPa;

p_d ——高原地区的大气压力, 单位为 kPa。

压力 p_d (kPa) 与海拔 H (m) 的关系可按下式计算:

$$p_d = 101.32(1 - 0.02257H/1000)^{5.256} \dots\dots\dots(18)$$

根据式 (18) 绘制的 p_d 与 H 相关图见图 5。

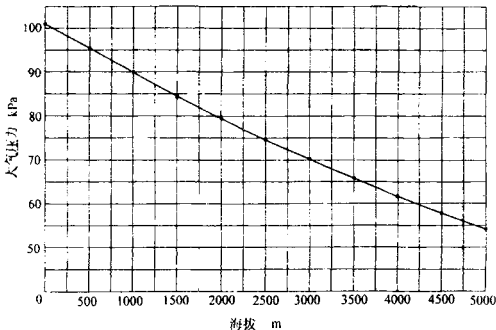


图 5 大气压力与海拔的相关图

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, 以免因气压降低, 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,再适当减小上一次风喷嘴中心距离,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 m~1000 m 以上时应采取提高燃烧性能的措施,见附录 H。

9.14.2 高原地区燃烧器设计

高原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

$$\rho_d F_d W_d = \rho_B F_B W_B \dots\dots\dots (19)$$

式中:

- ρ_d ——当地(高原地区)地面空气密度,单位为 kg/m^3 ;
- F_d ——当地(高原地区)的燃烧器喷口截面积,单位为 m^2 ;
- W_d ——当地(高原地区)燃烧器出口风速,单位为 m/s ;
- ρ_B ——平原地区空气密度,单位为 kg/m^3 ;
- F_B ——平原地区的燃烧器喷口截面积,单位为 m^2 ;
- W_B ——平原地区的燃烧器出口风速,单位为 m/s 。

当高原地区的煤粉质量 m 、气体温度 T 与平原地区相同时,则空气密度与大气压力呈正比例变化,式(19)可改写如下式:

$$p_d F_d W_d = p_B F_B W_B \dots\dots\dots (20)$$

式中:

- p_B ——平原地区的大气压力,单位为 kPa ;
- p_d ——当地(高原地区)的大气压力,单位为 kPa 。

高原地区燃烧器出口风速一般不宜作较大变化。当取用与平原地区相同的风速时,则高原地区燃烧器出口的截面积应随压力成反比增加,见下式:

$$F_d = F_B \cdot \frac{p_B}{p_d} \dots\dots\dots (21)$$

如果较大改动燃烧器出口截面有困难时,也可根据燃料挥发分高低,在不严重影响炉内动力场条件下,适当提高一次风速度。其提高范围为:当地(高原地区)一次风速度 W_{d1} 为平原地区时一次风速度 W_{B1} 的 1.03~1.08 倍,前者适于低挥发分煤种,后者适于高挥发分煤种。风速确定后再按质量流量相等计算式(20),重新计算当地(高原地区)的燃烧器一次风喷口面积 F_{d1} 。

9.15 防止炉膛结渣、防止水冷壁高温腐蚀

防止炉膛结渣、防止水冷壁高温腐蚀措施分别参见附录 I、J。

10 大型煤粉锅炉燃烧性能保证值的确定

10.1 锅炉燃烧性能保证的内容

锅炉燃烧性能保证包括锅炉燃烧效率、最低不投油稳燃负荷率(BMLR)以及 NO_x 排放浓度限值等。

10.2 锅炉燃烧效率的确定

锅炉燃烧效率的确定可参照 GB/T 10184 进行。

锅炉燃烧效率反映在可燃气体未完全燃烧热损失 q_3 和固体未完全燃烧热损失 q_4 上。对于大容量锅炉 q_3 可取为 0,对 q_4 的取值范围,见表 14 及图 6。炉膛热参数、燃烧器工况参数对 q_4 的影响可参阅附录 H。

锅炉热效率测定中,固体未完全燃烧热损失按下式计算:

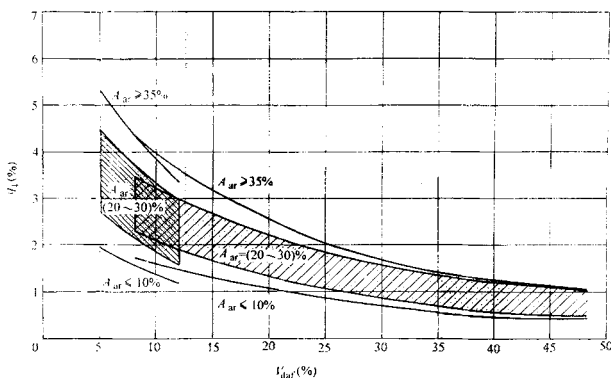
$$q_4 = 33.7 \times 10^3 \frac{A_{gr}}{Q_{net,v,gr}} [a_{th} (\frac{C_{th}}{100 - C_{th}}) + a_{lz} (\frac{C_{lz}}{100 - C_{lz}})] \dots\dots\dots (22)$$

表 14 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						
		$(V_{daf}, \%)$						
		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)	褐煤
低灰分 $A_{ar} \leq 10\%$	切向、对冲 燃烧		1.6~1.35	1.35~1.2	1.2~0.9	0.9~0.55	0.55~0.4	
	W型火焰 燃烧	1.9~1.55	1.55~1.1					
中等灰分 $20\% \leq A_{ar} \leq 30\%$	切向、对冲 燃烧		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 燃烧	4.5~2.3	3.4~1.5					
高灰分 $A_{ar} \geq 35\%$	切向、对冲 燃烧		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 燃烧	5.3~4.3	4.2~3.3					

注1: 对于灰分在10%~20%及30%~35%的范围 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

式中:

q_4 ——固体未完全燃烧热损失, %;

33.7×10^3 ——灰中含碳的近似发热量, 单位为 kJ/kg;

A_{ar} ——入炉煤收到基灰分, %;

$Q_{net,v,ar}$ ——入炉煤收到基低位发热量, 单位为 kJ/kg;

C_{fh} 、 C_{lz} ——灰灰和炉渣中的含碳量, %;

a_{fh} 、 a_{lz} ——灰灰和炉渣中的灰分份数。它们之间的关系为: $a_{fh} + a_{lz} = 1$ 。

10.3 锅炉最低不投油稳燃负荷率 (BMLR) 的确定

以锅炉的最低不投油稳燃负荷率试验值作为锅炉最低不投油稳燃负荷率。

各型燃烧方式的锅炉最低不投油稳燃负荷率 (BMLR) 与燃料特性 (R_w 或 V_{daf}) 值的关系推荐如表 15。

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 15 各型燃烧方式的锅炉最低不投油稳燃负荷率(BMLR)推荐值

燃烧方式	锅炉最低不投油稳燃负荷率 BMLR, %						
	着火稳定性指数 R_w						
	$(V_{air}, \%)$						
	<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)	褐煤
切向、对冲燃烧	—	65~55	56~45	46~40	42~35	35~30	50*~35
W型火焰燃烧	55~45	50~42	—	—	—		

* 褐煤部分高值用高水分抽炉烟干燥制粉系统。

10.4 燃烧烟气 NO_x 排放浓度限值

各种燃烧方式的锅炉 NO_x 最高排放浓度 (折算到烟气含氧量 O₂ = 6 % 时的干烟气 NO_x 数值) 应符合 GB 13223 所规定的排放限值。在没有 NO_x 脱除装置时, 燃烧过程中生成的 NO_x 量即为排放的 NO_x 量。NO_x 生成浓度与燃烧工况及燃料含氮量有关, 实测的 NO 及 NO₂ 体积浓度可按下式换算为规定条件以 NO₂ 计算的质量浓度:

$$C_{NO_x} = \left(\frac{21-6}{21-O_2} \right) \times [2.05(C'_{NO} + C'_{NO_2})] \dots\dots\dots (23)$$

式中:

C_{NO_x} —— 在规定条件下 NO_x 的质量浓度, 单位为 mg/m³ (O₂ = 6 %);

C'_{NO} —— 实测干烟气的 NO 体积浓度, 单位为 μL/L;

C'_{NO_2} —— 实测干烟气的 NO₂ 体积浓度, 单位为 μL/L;

O₂ —— 实测干烟气的含氧量, %。

只测量 NO 的体积浓度 C'_{NO} 时, 可改用下式计算:

$$C_{NO_x} = \left(\frac{21-6}{21-O_2} \right) \times \left(\frac{2.05}{0.95} \right) \cdot C'_{NO} = \frac{32.4}{21-O_2} \cdot C'_{NO} \dots\dots\dots (24)$$

附录 A
(资料性附录)

煤的着火稳定性指数 R_w 及燃尽特性指数 R_i 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以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,还必须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 , 0.78 mL/s; 反应气体 O_2 , 3.1 mL/s; 加热速率 $40^\circ C/min$; 样品量 10 mg (可燃质); 样品粒度: $<74 \mu m$ 。

表 A.1 煤的燃烧和燃尽热分析曲线特征指数

特征指数	t °C	W_{1max} mg/min	T_{1max} °C	T_{2max} °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: 表中符号说明:

- t ——着火温度, 单位为 $^\circ C$;
- W_{1max} ——易燃峰的最大燃烧速率, 单位为 mg/min ;
- T_{1max} ——易燃峰的最大燃烧速率所对应的温度, 单位为 $^\circ C$;
- T_{2max} ——难燃峰的最大燃烧速率所对应的温度, 单位为 $^\circ C$;
- G_1 ——易燃峰下烧掉的燃料量, 单位为 mg ;
- G_2 ——难燃峰下烧掉的燃料量, 单位为 mg ;
- τ_{98} ——烧掉 98% 燃料量所需的时间, 单位为 min ;
- τ'_{98} ——烧掉 98% 煤焦量所需的时间, 单位为 min 。

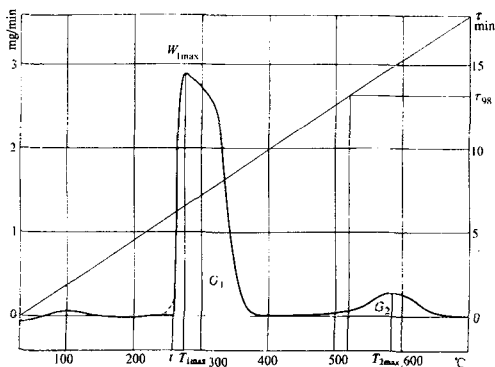


图 A.1 某烟煤煤样燃烧特性曲线

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 $100^\circ C$

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，峰顶高说明反映剧烈，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的多少。

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 如下：

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

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 74 μm 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 10 mg 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。

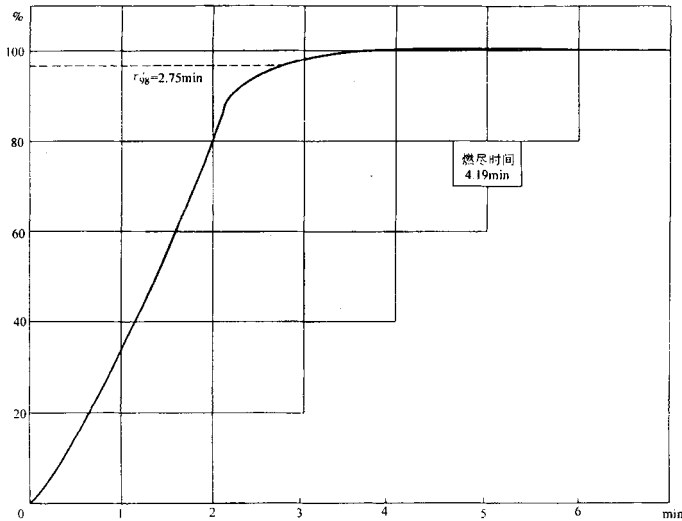


图 A.2 某烟煤煤焦燃尽曲线

表征煤粉燃尽特征指数的有：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_{2max})，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，必须综合考虑 G_2 和 T_{2max} ，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，计算出煤粉的燃尽特性指数 R_j 为：

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

式中:

A' 、 B' 、 C' 、 D' ——分别为 G_2 、 $T_{2\max}$ 、 τ_{98} 、 τ'_{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 、 $T_{2\max}$ 、 τ_{98} 、 τ'_{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 $T_{2\max}$ °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	0.6~1.2	520~580	14~15	2.5~3.5
3	中等燃尽	1.2~1.8	580~640	15~16	3.5~4.5
4	难燃尽	1.8~2.4	640~700	16~17	4.5~5.5
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 值及由灰熔融特征温度及灰成分计算出的煤灰结渣特性指数 R_z 值列于表 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	实际燃用煤种的 V_{daf} 、 A_w 、 $Q_{net, var}$ 、 R_w 、 R_j 、 R_z					
			V_{daf} %	A_w %	$Q_{net, var}$ 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	埭村贫煤	西山、埭村贫煤	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
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	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	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

表 A.3 (续)

电厂名称	设计煤种	实际燃用煤种	实际燃用煤种的 V_{daf} 、 A_{ar} 、 $Q_{net,v,ar}$ 、 R_w 、 R_j 、 R_z					
			V_{daf} %	A_{ar} %	$Q_{net,v,ar}$ MJ/kg	R_w	R_j	R_z
沙角 A	山西雁北煤	大同	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	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

(资料性附录)

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、灰高温粘度、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，得到了各判别指数的判别界限和准确率的统计值，见表B.1。

表 B.1 各种结渣倾向判别指数的判别界限和准确率

判别指数	结渣程度			准确率 %	权值
	轻微	中等	严重		
ST ℃	>1390	1390~1260	<1260	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_2O_3	<1.87	1.87~2.65	>2.65	61	0.22
综合判别指数 R_z	$R_z \leq 1.5$ 轻微	$1.5 < R_z < 1.75$ 为中偏轻 $1.75 \leq R_z < 2.25$ 为中等 $2.25 < R_z < 2.5$ 为中偏重	$R_z \geq 2.5$ 严重	90	—

表B.1中:

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

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

从表B.1中ST、B/A、G、SiO₂/Al₂O₃四个指数,并根据各指数的预报准确率,采用加权平均的方法,给出了一个统一的评分判别标准,构成了一个新的煤灰结渣特性综合判别指数R₂:

$$R_2 = 1.24 (B/A) + 0.28 (\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - 0.0023ST - 0.019G + 5.42 \dots\dots\dots (\text{B.3})$$

为了进一步验证所建立综合判别指数R₂的预报准确率,首先对参与建立R₂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R₂的准确率可达到90%。

另外,还利用了哈尔滨普华煤燃烧技术开发中心于1989年调研所得到的26种炉前煤质及其他特性资料,对照现场实际运行情况进行了R₂值计算验证,结果也表明:R₂值的准确率可达90%。

附录 C

(资料性附录)

煤粉在上排一次风喷嘴(或上排三次风喷嘴)中心到屏下缘平均停留时间τ的计算

煤粉在炉内的有效停留时间为上排一次风喷嘴(或上排三次风喷嘴)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如下:

$$\tau = l_3 / W_y \dots\dots\dots (\text{C.1})$$

式中:

τ——煤粉在上排一次风喷嘴(或上排三次风喷嘴)中心到屏下缘的平均停留时间,单位为s;

l₃——燃烧器上排一次风喷嘴(或上排三次风喷嘴)中心至屏下缘距离,单位为m;

W_y——烟气在炉内的平均上升速度,单位为m/s。其计算式如下:

$$W_y = \frac{B_j V_y}{l_1 l_2} \times \frac{273 + \vartheta_{pl}}{273} \times \frac{101.325}{P} \dots\dots\dots (\text{C.2})$$

式中:

B_j——锅炉计算燃料消耗量,单位为kg/s;

V_y——烟气体积由计算求得,单位为m³/kg(标准状态);

l₁、l₂——炉膛截面的深度与宽度,单位为m;

P——当地的大气压力,单位为kPa;

ϑ_{pl}——烟气平均温度,单位为℃。其计算式如下:

$$\vartheta_{pl} = 0.925 \sqrt{\vartheta^* \times \vartheta_a} \dots\dots\dots (\text{C.3})$$

式中:

ϑ*——炉膛出口温度,单位为℃;

ϑ_a——理论燃烧温度,单位为℃。

附录 D
(资料性附录)

卫燃带修正系数 ζ 的推导

D.1 按前苏联1973年版《锅炉机组热力计算标准方法》，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：

$$\zeta_w = 0.2/(0.35 \sim 0.55) = 0.57 \sim 0.36, \text{ 平均 } \zeta_w = 0.465.$$

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下式推导：

取计算区域为上下排一次风喷嘴中心（当有三次风喷嘴时，为上排三次风喷嘴中心至下排一次风喷嘴中心）标高距离外加3m所围成的围带，其面积：

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

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

$$\text{令 } \zeta_w = 0.465, \text{ 则 } \zeta = \frac{2(l_1 + l_2)(l_4 + 3) - 0.535F_w}{F_{\text{Hr}}} = 1 - \frac{0.535F_w}{2(l_1 + l_2)(l_4 + 3)} \dots\dots\dots (D.1)$$

附录 E
(资料性附录)

降低 NO_x 生成浓度的措施

化石燃料燃烧中， NO_x 有三种生成机理。第一种为热型型，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，是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；第三种为瞬发型，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 ，瞬发型反应生成的 NO_x 浓度只占很小的比例。三种类型 NO_x 生成浓度与炉温的关系见图E.1。

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 N_2 。对于煤粉炉燃烧温度大都在 1500°C 以下，只有当温度超过 1600°C 时，热型型才占到总量的25%~30%；而瞬发型仅占5%，故主要是控制燃料型 NO_x 。降低 NO_x 的措施如下：

a) 降低燃烧区氧浓度

1) 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。

2) 采用空气分级送入措施

——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。

——对于对冲燃烧方式采用双调风型旋流燃烧器：

——对于W型燃烧方式可采用拱上拱下分级配风。

b) 燃料分级

1) 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；

- 2) 对于对冲燃烧旋流式燃烧器见图E.3。
- c) 降低火焰温度
- 1) 降低空气预热器出口热风温度；
 - 2) 燃烧器处烟气再循环，此法不仅能降低局部峰值温度，也使氧浓度降低；
 - 3) 把大火焰改成多股小火焰。

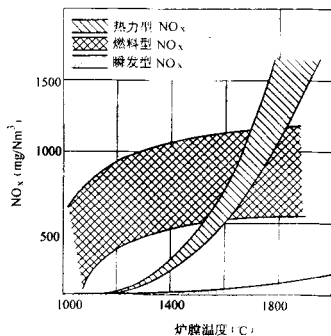


图 E.1 煤粉锅炉各类型 NO_x 的生成浓度与炉膛温度的一般关系

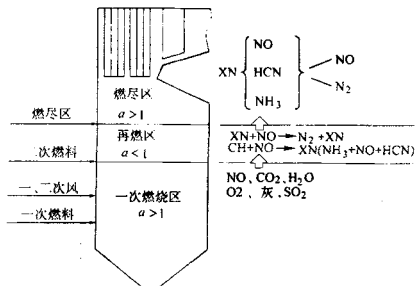


图 E.2 切向燃烧方式燃料分级燃烧原理示意图

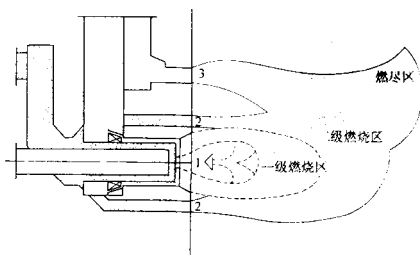


图 E.3 对冲燃烧方式低 NO_x 燃烧器示意图

- 1——过量空气系数略小于1的一次燃料喷嘴；
- 2——过量空气大大大于1的二次燃料喷嘴；
- 3——完全燃烧所需空气的OFA喷嘴。

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 值的计算式如下:

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

式中:

 R_z ——煤灰结渣特性指数, 见附录 B 中的公式 (B.3)。

在污染系数 $\zeta_x \leq 0.1$ 时, 沾污轻微, 按干净炉膛计算; 在污染系数 $\zeta_x \geq 1$ 时, 沾污严重, 按沾污炉膛计算; 当 $0.1 < \zeta_x < 1$ 时, 按下式计算:

$$\vartheta_x^* = \vartheta_g + \zeta_x (\vartheta_z - \vartheta_g) \dots \dots \dots (F.2)$$

式中:

 ϑ_x^* ——下炉膛出口烟气温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$; ϑ_g ——按干净炉膛计算出的下炉膛出口温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$; ϑ_z ——按沾污炉膛计算出的下炉膛出口温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

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。

水冷壁的污染除与煤质有关外, 还与炉膛设计有关, 采取有效的防止结渣的措施, 可在一定程度上减轻污染, 降低污染系数 ζ_x 。

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_w 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	V_{daf} %	R_w	K_e	M_w %	磨煤机及制粉系统
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系统
贫煤	10~20	<4.24	不限	≤ 15	同无烟煤
		>4.24	不限	≤ 15	钢球磨煤机中间储仓热风送粉系统
		>4.24	≤ 5.0	≤ 15	中速磨煤机直吹式系统
烟煤	20~37	>4.67	≤ 5.0	$\leq 15^a$	中速磨煤机直吹式系统
		>4.67	>5.0	$\leq 15^a$	双进双出钢球磨煤机直吹式系统
劣质烟煤	20~37	<5.0	不限	$\leq 15^a$	同贫煤
		>5.0	≤ 5.0	$\leq 15^a$	中速磨煤机直吹式系统
		>5.59	≤ 5.0	$\leq 20 \sim 35$	中速磨煤机直吹式系统
褐煤	>37	>5.59	≤ 3.5	>20~50	三介质或二介质干燥风扇 磨煤机直吹式系统

^a 对高水分烟煤为外在水分 $M_t = 100 (M_w - M_{ad}) / (100 - M_{ad})$ 。

附录 H (资料性附录)

煤质特性、炉膛热力特性参数及燃烧器工况参数对 q_a 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 $Q_{\text{net,v,ar}}$ 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 $Q_{\text{net,v,ar}}$ 高有利于着火燃尽。由于 V_{daf} 中的成分不同, 相同的 V_{daf} 值的煤炭热量有高低, 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是很强时, 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, 上排一次风喷嘴中心至屏下缘的距离 l_3 长, 则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 燃烧器工况参数的影响

燃烧器工况参数包括风率、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)

防止燃烧器区域结渣的措施

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_s 进行判别, 见附录 B, 当 $R_s > 1.75$ 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。

1.4 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_{qj} 的大小。如果 d_{qj} 偏大，则火焰容易贴壁，易引起结渣。

影响实际切圆直径 d_{qj} 的主要因素有：

- a) 一、二次风射流动量大，则射流不宜偏斜，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_{qj} 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。

1.5 吹灰器的选用及布置

选用合适的吹灰器及合理布置，对防止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)

防止水冷壁外壁高温腐蚀的措施

造成水冷壁外壁高温腐蚀的主要原因是：

- a) 燃料中硫含量较高（ $S_w \geq 1$ ）；
- 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。

解决水冷壁外壁高温腐蚀的措施与防护措施相似，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、喷镀工艺等以减缓腐蚀过程。