

高原地区锅炉炉膛特征参数修正方法

刘家利¹, 张东旭², 但汉鼎², 李玉衡², 王桂芳¹, 方顺利¹

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 青海黄河水电公司西宁发电分公司, 青海 西宁 810000)

摘要:为了科学选取高原地区煤粉锅炉的炉膛特征参数, 保证高原地区机组锅炉的安全和高效运行, 以国内高原地区投运并获得优良燃烧稳定性和燃烧经济性的660 MW大容量高参数超超临界机组锅炉为样本锅炉, 研究了大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则修订后不同海拔下的锅炉炉膛特征参数, 并结合大型煤粉锅炉炉膛设计特点, 提出了高原地区锅炉炉膛特征参数修正新原则。按照新方法修订后的炉膛断面热负荷、炉膛燃尽高度及煤粉在炉内停留时间增加, 锅炉为瘦高炉型, 更有利于高原地区锅炉的稳燃和燃尽, 且炉膛容积降低, 有利于降低锅炉设备成本。

关键词:高原地区; 锅炉; 炉膛; 特征参数; 修正

中图分类号: TK229.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2018)05-0090-07

Correction methods of boiler characteristic parameters in high altitude area

LIU Jiali¹, ZHANG Dongxu², DAN Handing², LI Yuheng², WANG Guifang¹, FANG Shunli¹

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Qinghai Xining Power Branch of Huanghe Hydropower, Xining 810000, China)

Abstract: In order to scientifically and reasonably select the furnace characteristic parameters of pulverized coal boilers in high altitude area and ensure the safe and efficient operation of boiler, the 660 MW large capacity and high parameter super supercritical boiler, which was firstly put into operation in the plateau area and obtained good combustion stability and combustion economy, was used as a sample boiler in this paper. The characteristic parameters of boiler revised according to the guide on selection of furnace characteristic parameters for large pulverized coal fired boiler at different altitudes were studied. Combined with the current design features of large pulverized coal boiler, a new revision principle was proposed. According to the new principle, the furnace cross-section heat release rate, the burn-out height of furnace and the pulverized coal residence time in the furnace are increased. The boiler is a lean blast type, which is more conducive to the combustion and burnout of the boilers in the plateau area. Further, the furnace volume is reduced, which is beneficial to reduce the boiler cost.

Key words: high altitude area; boiler; furnace; characteristic parameters; revision

0 引 言

煤样的着火、燃尽以及结渣等燃烧性能是锅炉设计的基础和依据。在高原条件下, 由于 O_2 分压降低, 煤样的着火和燃尽性能变差, 而结渣性能没有明显变化^[1-2], 因此高原地区锅炉设计应适当考虑增加稳燃和燃尽的措施。如果高原地区锅炉设计不合理, 易引起锅炉灭火、飞灰和大渣含碳量高、排烟温

度高、厂用电率高等影响锅炉安全和经济运行的问题^[3-7]。袁颖等^[8]给出了高原地区锅炉炉膛特征参数的修正原则, 并于2002版《大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则》(本文简称“炉膛选型导则”)中明确了高原地区锅炉炉膛特征参数的修正方法^[9]。

近20年, 我国大容量高参数机组迅猛发展, 机组容量扩大, 蒸汽参数等级提高, 同样容量的机组, 在相同负荷下需要的燃煤输入热量降低。另外, 为

收稿日期: 2018-04-26; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.18042602

基金项目: 2015年度山西省科技重大专项(MD2015-03)

作者简介: 刘家利(1976—), 女, 四川新都人, 高级工程师, 从事燃煤特性与锅炉设备匹配性的研究。E-mail: liujiali@tpri.com.cn

引用格式: 刘家利, 张东旭, 但汉鼎, 等. 高原地区锅炉炉膛特征参数修正方法[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(5): 90-96, 102.

LIU Jiali, ZHANG Dongxu, DAN Handing, et al. Correction methods of boiler characteristic parameters in high altitude area[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(5): 90-96, 102.

了保证机组在低 NO_x 燃烧条件下的燃烧经济性,大容量机组多选用了较大的炉膛容积,即较小的炉膛特征参数。因此,2015 版《大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则》对平原地区锅炉炉膛特征参数选取进行了修正,但高原地区炉膛特征参数修正原则仍沿用 2002 版,可能会导致炉膛容积增加过多,同时当海拔达到一定高度时会给锅炉设计带来困难。范文斌等^[10]提出焦炭的燃烧控制整个燃烧过程,在高原条件下,焦炭的燃尽时间增加。基于上述理论,黄必重等^[11]指出,为了达到与平原地区相同的煤粉燃尽度,高原地区锅炉需提高煤粉在炉内的停留时间。张洪岩等^[12]提出高原地区锅炉轮廓修正主要是提高燃尽高度。李东鹏等^[13]也提出适当增加炉膛断面,将燃尽高度提高更多,不仅可保证煤粉在炉内燃尽,还可降低炉膛容积,节约锅炉初期投资成本。

随着大气压力降低和烟气体积膨胀,炉膛内烟气流速增加,炉膛断面若不进行合理修正,保证煤粉在炉内停留时间的情况下,将导致炉膛高度增加过多。因此,非常有必要提出优化的高原地区锅炉炉膛特征参数修正方法。本文通过考查高海拔条件对煤粉着火、燃尽、结渣性能的影响以及烟气膨胀对锅炉炉膛尺寸及受热面设计的影响,提出了切圆燃烧锅炉在高海拔条件下的热负荷参数修订新方法。按照新方法,锅炉为瘦高炉型,炉膛燃尽高度及煤粉在炉内停留时间增加,更有利于高原地区锅炉的稳燃和燃尽,且炉膛容积降低,有利于降低锅炉设备成本。

1 炉膛结构及用途

以四角切圆 II 型煤粉锅炉为样本锅炉,锅炉炉膛轮廓尺寸如图 1 所示。图 1 中, H 为炉膛高度,II 形炉是从炉底排渣喉口至炉膛顶棚管中心线间距离; W 为炉膛宽度,左右侧墙水冷壁管中心线间距离; D 为炉膛深度,前后墙水冷壁管中心线间距离; h_1 为 II 形炉为最上排燃烧器煤粉喷口与屏式过热器最下缘管中心线间的垂直距离; h_2 为最上排燃烧器煤粉喷口(或乏气喷口)与最下排燃烧器煤粉喷口中心线之间的垂直距离; h_3 为最下排燃烧器煤粉喷口中心线与冷灰斗上折点的垂直距离; h_4 为屏底到顶棚管的垂直距离; h_5 为冷灰斗高度; h_6 为最上层燃烧器中心距折焰角下折点垂直距离; d_2 为排渣喉口净深度; β 为冷灰斗斜坡与水平面夹角; α 为折焰角下倾角。

根据炉膛容积位置和作用不同,将炉膛容积分

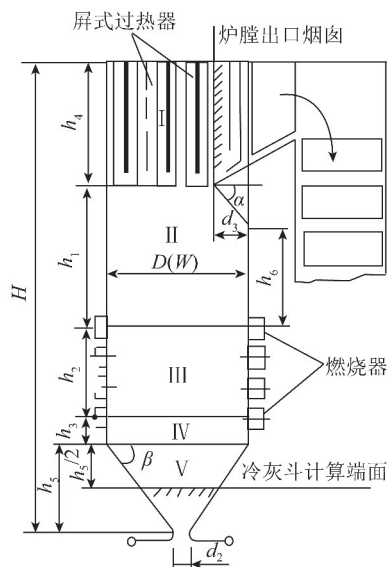


图 1 炉膛轮廓尺寸示意

Fig. 1 Schematic diagram of furnace profile

为 5 部分:① I 为屏过区域,布置高温过热器和高温再热器,保证过热器和再热器的辐射吸热量;② II 为锅炉燃尽区域,布置燃尽风喷口,保证煤粉在炉内的停留时间,达到良好的燃烧效率,缓解屏区结渣,降低 NO_x 生成浓度;③ III 为锅炉的燃烧器区域,布置燃烧器,考虑稳燃和防结渣;④ IV 在最下层燃烧器和冷灰斗之间,主要考虑大渣的燃尽和冷却,对于易结渣煤种,为防止冷灰斗结渣,需选用较大的 h_3 值;⑤ V 为冷灰斗区域,用于冷却和排出灰渣,冷灰斗斜坡与水平面倾角为 $50^\circ \sim 55^\circ$ 。

2 炉膛选型导则对高原地区锅炉炉膛特征参数的修正

在炉膛选型导则中推荐了标准大气压 (101.3 kPa) 下的炉膛热负荷特性参数,一般认为适用于海拔不超过 500 m (较难着火煤及中等着火煤) 或 700 m (较易着火煤) 的平原地区,否则炉膛热负荷特性参数值、炉膛轮廓尺寸应进行相应修正。

2.1 炉膛容积热负荷修正

平原地区选定的炉膛容积热负荷上限值为 q_v , 则高原地区 (海拔高于 500 (较难着火煤及中等着火煤) ~ 700 m (较易着火煤),下同) 的炉膛容积热负荷按燃烧产物等停留时间的原则修正为

$$q_{vC} = q_v (P/P_0) \quad (1)$$

其中, q_{vC} 为高原地区炉膛容积热负荷上限值, kW/m^3 ; P 为当地常年平均大气压, kPa ; P_0 为参比大气压,取 98 (较难着火煤及中等着火煤) ~ 96 kPa

(较易着火煤)。式(1)说明高原地区锅炉炉膛有效容积至少是平原地区锅炉的 P_0/P 倍。

2.2 炉膛断面热负荷修正

炉膛断面热负荷的修正为

$$q_{FG} = q_F (P/P_0)^{2/3} \quad (2)$$

其中, q_{FG} 为高原地区炉膛断面热负荷可用值, MW/m^2 ; q_F 为平原地区选定的炉膛断面热负荷可用值, MW/m^2 。对于切向燃烧和墙式燃烧锅炉,若 $P/P_0 > 0.96$, q_F 不做修正。

2.3 烧器区壁面热负荷修正

按相关标准选定平原地区燃烧器区壁面热负荷上限值为 q_B , 则高原地区仍沿用平原地区选定值。

2.4 炉膛燃尽区容积热负荷修正

炉膛燃尽区热负荷上限值采取与炉膛容积热负荷相同的处理方法, 即

$$q_{mG} = q_m (P/P_0) \quad (3)$$

式中, q_{mG} 为高原地区炉膛燃尽区容积热负荷上限值, kW/m^3 ; q_m 为按标准选定的炉膛燃尽区容积热负荷上限值, kW/m^3 。

2.5 炉膛燃尽区高度修正

对于切向燃烧及墙式燃烧锅炉, 如采用炉膛燃尽区高度 h_1 做炉膛选型轮廓特征参数之一, 则高原地区的锅炉 h_{1G} 取值修正为

$$h_{1G} = h_1 (P/P_0)^{-1/3} \quad (4)$$

其中, h_{1G} 为高原地区炉膛燃尽区高度, m ; h_1 为按标准条件选定的炉膛燃尽区高度, m 。 h_1 增加, 表示煤粉颗粒的燃尽时间加长, 并使炉膛出口烟温降低, 防止炉膛出口处受热面结渣。

2.6 其他参数修正

大气压降低, 燃烧器一、二次风出口参数(风率、风温、风速及旋流强度比)一般不变(除非由于

一次风粉管道的修正计算影响一次风率变化)。为此, 原则上, 一、二次风喷口面积按 (P_0/P) 比率放大, 相应的燃烧器喷口尺寸和燃烧器结构尺寸按 $(P_0/P)^{1/2}$ 比率放大, 独立布置的空气喷口(二、三次风及乏气喷口)亦然。

3 现有修正方法存在的问题

3.1 660 MW 高海拔机组锅炉炉膛特征参数分析

国家电力投资集团西宁分公司(以下简称“西宁火电”) $2 \times 660 \text{ MW}$ 机组是目前国内高原地区已投运机组中容量最大、蒸汽等级参数最高且运行性能最为优良的机组, 本文以该机组为样机锅炉, 分析高原地区锅炉炉膛特征参数的修正原则。

西宁火电厂海拔 2445 m , 大气压为 75.20 kPa 。锅炉设计煤(鱼卡煤)的煤质参数和锅炉炉膛热负荷设计参数以及实际用煤煤质参数和运行参数见表1。炉膛特征参数根据实际用煤的煤质参数、燃煤量以及炉膛几何尺寸计算得出。煤粉在炉内的停留时间计算方法参照文献[14]。高原地区锅炉选取合适的炉膛特征参数和煤粉在炉内的停留时间, 可获得与平原地区相同优良的燃烧性能, 也为高原地区锅炉炉膛特征参数的优选提供了依据。

3.2 不同海拔下 660 MW 高原机组炉膛特征参数的推导

表2为不同海拔高度对应的炉膛特征参数, 按照锅炉炉膛选型导则规定的高原地区炉膛特征参数修订原则推导出不同海拔下的锅炉炉膛热负荷。

3.2.1 断面热负荷的修正

由表2可见, 将该实际锅炉炉膛特征参数反推至平原地区(海拔高度 700 m), 锅炉炉膛断面热负荷为 $5.277 \text{ MW}/\text{m}^2$, 而炉膛选型导则规定对于着火

表1 660 MW 机组锅炉燃煤及炉膛特征参数

Table 1 Coal character and furnace characteristic parameters for 660 MW boiler

项目	负荷/ MW	M_1 / %	A_{ar} / %	V_{daf} / %	$Q_{net,ar}$ / ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	理论燃烧 温度/ $^{\circ}\text{C}$	燃煤量/ ($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	固体未完全燃 烧热损失 q_4 /%	修正后排 烟温度/ $^{\circ}\text{C}$	锅炉效 率/%	燃煤输入热 量/($\text{GJ} \cdot \text{h}^{-1}$)
设计参数	660	14.50	23.39	43.38	17.560	1760	326.67	0.70	122	94.18	5696
实际运行	660	14.38	15.96	36.20	21.645	1950	285.20	0.51	113	94.23	6142
项目	炉膛过剩 空气系数	q_v / ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-3}$)	q_F / ($\text{MW} \cdot \text{m}^{-2}$)	q_{mG} / ($\text{MW} \cdot \text{m}^{-2}$)	烟气在炉内上升 速度 v /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	煤粉在炉内停 留时间 τ /s	炉膛 宽/m	炉膛 深/m	h_2 / m	h_1 / m	炉膛总体 积 V/m^3
设计参数	1.20	69.81	4.242	1.544	10.29	2.15	19.824	18.816	10.258	23.484	22665
实际运行	1.12	75.27	4.574	1.665	11.34	2.07					

表2 海拔高度对660 MW机组炉膛特征参数的影响

Table 2 Effect of altitude on furnace characteristic parameters for 660 MW boiler

海拔高度/m	对应大气压力/kPa	$q_V / (\text{kW} \cdot \text{m}^{-3})$	$q_F / (\text{MW} \cdot \text{m}^{-2})$	$q_B / (\text{MW} \cdot \text{m}^{-2})$	h_2 / m	h_1 / m	炉膛总体积 V/m^3	炉膛平均温度 $\theta_p / ^\circ\text{C}$	烟气在炉内上升速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	煤粉在炉内停留时间/s
700	93.17	96.11	5.277	1.665	11.241	21.865	18 293	1 331	10.61	2.06
1 500	84.54	87.21	4.946	1.665	10.788	22.585	20 160	1 327	10.94	2.07
2 445	75.20	77.57	4.574	1.665	10.26	23.484	22 665	1 323	11.34	2.07
3 500	65.77	67.85	4.184	1.665	9.682	24.556	25 913	1 319	11.83	2.08
4 500	57.75	59.57	3.836	1.665	9.144	25.645	29 514	1 314	12.32	2.08

温度小于700℃的600 MW级Ⅱ型锅炉,平原地区该参数最高可用值为5.0 MW/m²。因此,若根据炉膛选型导则规定的高原地区锅炉炉膛特征参数修正原则,可能导致高原地区炉膛断面过大,尤其是对于严重结渣煤种。

3.2.2 高原地区燃烧器区壁面热负荷的修正

根据炉膛选型导则规定,高原地区锅炉选取了与平原地区相同的燃烧器区壁面热负荷。高原条件下,煤样的着火性能变差,因此高原地区锅炉应适当提高燃烧器区壁面热负荷以提高锅炉的燃烧稳定性。另一方面,由于高原地区断面热负荷降低,炉膛断面尺寸增加,即使燃烧器区壁面热负荷不变, h_2 减少。

此外,根据炉膛选型导则规定,燃烧器喷口含二次风喷口需按照 $(P_0/P)^{1/2}$ 比例放大,也将影响燃烧器间距。按照西宁火电660 MW锅炉燃烧器的设计特点,燃烧器之间的总间隔(燃烧器高度 h_2 扣除中间的一次风喷口和二次风喷口高度总和)为1.2 m左右。当海拔高到一定程度时,需降低燃烧器区壁面热负荷以满足燃烧器喷口设计和布置。对于有严重结渣倾向的煤种,为了防止燃烧器区结渣,一般选取较小的燃烧器区壁面热负荷参数,即拉开燃烧器间距。相对于四角切圆燃烧锅炉和前后墙对冲锅炉,由于燃烧器层数少,上下层燃烧器间隔大,在高原地区可适当提高燃烧器区壁面热负荷。

3.2.3 燃尽高度 h_1 的修正

根据炉膛选型导则规定,结合炉膛断面热负荷修正,高原地区 h_1 的修正最终保证了煤粉在炉内的停留时间与平原地区地区接近。煤粉在炉内的停留时间是影响煤粉燃尽的关键因素之一,在高原地区,低气压导致煤样燃尽性能变差,因此应适当增加煤粉在炉内的停留时间,以保证煤粉的燃尽性能。另外,不同燃烧性能煤种的燃尽性能受海拔高度的影

响不同,通常情况下,燃烧性能优良的煤种受影响程度小于燃烧性能较差的煤种。对于燃烧性能优良但具有严重结渣倾向的煤种,应考虑采用足够的燃尽高度作为有效的防渣措施之一,高原条件下可不必过多考虑增加煤粉在炉内的停留时间。因此,燃尽高度的修正应充分考虑煤种燃烧性能及其在平原地区的锅炉设计特点。

3.2.4 容积热负荷的修正

根据炉膛选型导则高原地区锅炉热负荷参数修订原则,炉膛宽、深和高度需同比例增加,由于燃烧器距离 h_2 降低, h_1 及 h_5 和炉膛宽、深同比例增加,则要求 h_4+h_3 的增加幅度更大。 h_3 主要是保证灰渣的燃尽以及防止冷灰斗的结渣,可不必升高,则 h_4 需增加较多,而 h_4 能满足受热面布置即可,因此结合截面热负荷,容积热负荷尚有优化的空间。

4 高原地区热负荷参数修正新方法

4.1 高原地区热负荷修正新方法

根据前述分析,高原地区锅炉的热负荷参数的选取应综合考虑海拔、原煤燃烧性能、平原地区锅炉设计特点、烟气流速及煤粉在炉内的停留时间,为此,本文提出优化的高原地区锅炉炉膛特征参数修正方法。

修订原则如下:①高海拔条件下煤样的燃烧性能变差,采取更高的截面热负荷有利于保证煤样的稳燃,但是高海拔条件下烟气体积膨胀,烟气流速升高,为了将烟气流速控制在合理范围内,需增加炉膛断面,即降低炉膛断面热负荷,因此为了保证锅炉的稳燃和燃尽,应尽量降低断面热负荷下降幅度;②燃烧器区壁面热负荷应适当增加或不变,当海拔高到一定程度需降低该参数以满足燃烧器设计需求;③ h_3 保持不变;④适当提高燃尽高度 h_1 和 h_4 ,结合炉膛断面尺寸,保证煤粉在炉内的停留时间

增加或不变,而屏区空间满足受热面布置即可。具体修正方法见表3。表3中, $k_1 = -0.1325 \left(\frac{P_0}{P}\right)^2 - 0.3118 \frac{P_0}{P} + 0.2787$, $k_2 = -0.6536 \ln \frac{P_0}{P} + 0.1618$, $k_3 = -0.1443 \left(\frac{P_0}{P}\right)^2 + 0.0751 \frac{P_0}{P} + 0.77$, $k_4 = -0.4337 \left(\frac{P_0}{P}\right)^2 + 0.6591 \frac{P_0}{P} - 0.8094$ 。

4.2 高原地区热负荷修正新方法的优点

以燃烧性能优良的平原地区660 MW烟煤机组为例,考虑低结渣和严重结渣2种情况,具体炉膛特征参数参见表4。按照表3中的修正方法进行了炉膛特征参数的计算,并将新方法的计算结果和炉膛选型导则的计算结果进行比较,图2为2种计算方法得出的断面热负荷、燃烧器区壁面热负荷、燃尽高度、炉膛容积热负荷、煤粉在炉内停留时间、炉膛内烟气流速、炉膛容积、炉膛折算高度及炉膛高宽比的

表3 高原地区四角切圆660 MW机组锅炉炉膛特征参数的修正

Table 3 Revision of furnace characteristic parameters in high altitude area for 660 MW four angle tangential circle combustion boiler

参数	结渣性能	海拔高度/m	修正公式
q_{FC}	低—中	不限	$q_{FC} = q_F (P_0/P)^{k_1}$
	高—严重	不限	$q_{FC} = q_F (P_0/P)^{-0.4}$
q_{BC}	低—中	≤ 2500	$q_{BC} = q_B$
		> 2500	$q_{BC} = q_B (P_0/P)^{k_2}$
	高—严重	不限	$q_{BC} = q_B$
h_{1C}	低—中	不限	$h_{1C} = h_1 (P_0/P)^{k_3}$
	高—严重	不限	$h_{1C} = h_1 (P_0/P)^{0.433}$
q_{VC}	低—中	不限	$q_{VC} = q_V (P_0/P)^{k_4}$
	高—严重	不限	$q_{VC} = q_V (P_0/P)^{-0.66}$

计算结果,图中“新修订”和“导则”分别表示按照新方法和炉膛选型导则修正方法得出的计算结果。

表4 平原地区典型660 MW机组锅炉炉膛特征参数

Table 4 Furnace characteristic parameters of typical 660 MW in plain area

煤种	海拔/ m	大气压 力/kPa	燃煤输入热 量/(GJ·h ⁻¹)	q_V / (kW·m ⁻³)	q_F / (MW·m ⁻²)	q_B / (MW·m ⁻²)	h_2 / m	h_1 / m	炉膛总 体积/m ³	烟气在炉内上升 速度 v /(m·s ⁻¹)	煤粉在炉内 停留时间/s
低结渣	700	93.17	6142	87.00	5.0	1.6	11.426	21	19610	10.27	2.05
严重结渣	700	91.37	6142	73.77	4.5	1.5	11.599	23	23128	9.18	2.51

炉膛折算高度 $H_z = V/F$, 炉膛高宽比 $HW = H_z/W_z$, 其中, V 为炉膛体积, 按照 DL/T 831—2002《大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则》计算得到, m^3 ; F 为炉膛断面面积, $F = WD, m^2$; W_z 为折算炉膛深度, $W_z = F^{1/2}, m$ 。HW 反映了炉膛的形状特性, 该值越大, 表明炉膛为瘦高型。

由图2(a)可见,2个煤种的断面热负荷均随海拔升高而降低,且新方法修正后的断面热负荷高于导则修订结果。对于严重结渣煤种,由于在平原地区已考虑选取较小的断面热负荷作为有效的防渣措施,炉膛烟气流速较低,随海拔升高,选取较低的断面热负荷降低幅度,仍可保证炉膛内的烟气流速。

由图2(b)可见,按照导则修订结果,海拔高度对燃烧器区壁面热负荷无影响,新修订方法充分考虑了煤种结渣特性、海拔高度以及燃烧器设计特点对燃烧器区壁面热负荷的影响。对于严重结渣煤种,由于平原地区锅炉已考虑选取较小的燃

烧器区壁面热负荷,即更高的燃烧器高度作为有效的防渣措施,随着海拔的增加,炉膛断面增加,燃烧器高度进一步降低仍可满足燃烧器布置要求。而对于低结渣煤种,由于炉膛断面和燃烧器高度均较小,当海拔高度在一定范围内时,燃烧器区壁面热负荷保持不变可满足燃烧器布置要求,而当海拔高到一定程度时,由于燃烧器布置要求需降低燃烧器区壁面热负荷。

由图2(c)可见,2个煤种的燃尽高度均随海拔的升高而下降,且按照新方法修正后的燃尽高度高于导则修订结果,低结渣煤种随海拔升高,燃尽高度增加幅度更大。一方面是新方法修订后的炉膛断面更小,烟气流速相对较高;另一方面,高海拔条件下煤粉的燃尽性能变差,需要更高的煤粉在炉内的停留时间保证煤粉的燃尽。对于严重结渣煤种,由于平原地区锅炉已考虑选取较高的燃尽高度作为有效的防渣措施,燃尽高度的增幅可适当降低。

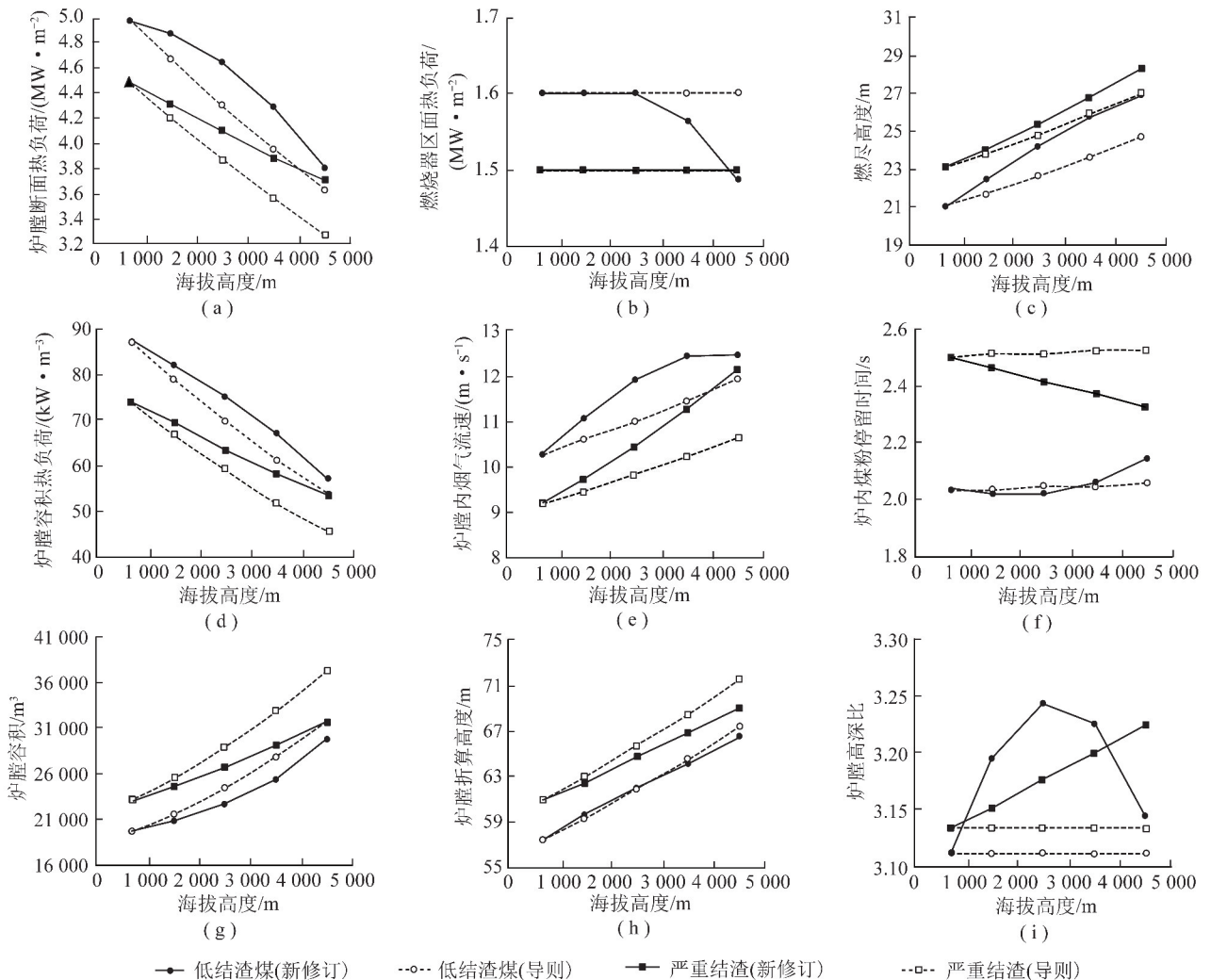


图2 炉膛断面热负荷、燃烧器区壁面热负荷、燃尽高度、炉膛容积热负荷、烟气流速、停留时间、炉膛容积、炉膛折算高度、炉膛高深比修正结果

Fig. 2 Comparison of the furnace cross-section heat release rate revision, burner zone wall heat release rate, furnace burn-out height, furnace volume heat release, flue gas velocity, pulverized coal residence time in furnace, furnace volume, furnace height, ratio of the furnace height and depth results

由图2(d)可见,2个煤种的炉膛容积热负荷均随海拔的升高而下降,且按照新修订方法修正后的炉膛容积热负荷高于导则修订结果,也即按照新修订方法,可采用更小的炉膛容积,节约锅炉成本。另外,由于结渣煤种选取更低的容积热负荷作为有效的防渣措施,随着海拔升高,炉膛容积热负荷可考虑更低的降低幅度,仍可保证煤粉在炉内的燃尽。

由图2(e)可知,2个煤种炉膛内的烟气流速均随海拔的升高而升高,且按照新修订方法修正后的烟气流速高于导则修订结果,该参数主要受炉膛断面尺寸影响,采用更高的烟气流速有利于降低炉膛断面尺寸。由于严重结渣煤种平原地区的烟气流速已较低,因此随着海拔升高可选取更高的增幅,仍可

保证烟气流速在正常范围内。

由图2(f)可见,按照导则修订结果,2个煤种的煤粉在炉内的停留时间基本保持不变。按照新修订方法,平原条件下低结渣煤种的煤粉在炉内的停留时间低于严重结渣煤种,因此在高海拔条件下,应适当增加煤粉在炉内的停留时间;而对于严重结渣煤种,平原地区锅炉设计已考虑足够的煤粉在炉内的停留时间,在高原条件下保持不变或小幅降低,仍可获得优良的燃尽性能。

由图2(g)可见,2个煤种的炉膛容积随海拔升高而升高,且按照新方法修正后的炉膛容积低于导则修订结果,采用更小的炉膛容积有利于降低锅炉制造成本。

由图2(h)可见,2个煤种的炉膛折算高度随海拔升高而增加,且新方法修订后的炉膛折算高度增加幅度较导则偏高,炉膛为瘦高型,有利于高原条件下煤样的稳燃和燃尽。

由图2(i)可见,按照导则修订后的炉膛高深比不变,即炉型不变,而新方法更多地考虑煤样结渣性能、原锅炉设计特点及海拔高度的影响。根据新修订原则,对于低结渣煤种,随着海拔的升高,炉膛高深比增加,即采用瘦高炉型可保证高海拔条件下煤样的稳燃和燃尽,而当海拔高到一定程度时,为了保证炉膛内的烟气流速在规定范围,须增加炉膛断面,因此炉膛高深比有所降低。

相对于炉膛选型导则修正结果,新修正方法确定的高原地区锅炉的特点有:①考虑了煤种燃烧性能差异带来的对炉膛特征参数选取的影响。②炉膛断面热负荷下降幅度较低,即更高的断面热负荷有利于保证高原地区锅炉的燃烧稳定性。③在保证燃烧器合理设计和布置的条件下尽量增加燃烧器区壁面热负荷或保持不变,而当海拔高到一定程度时,必要时可适当降低燃烧器区壁面热负荷以满足燃烧器设计要求。④按照新方法修正后的炉型为瘦高型,更有利于高原地区煤粉锅炉的稳燃和燃尽。

4.3 其他参数

平原地区不同燃烧性能煤种的锅炉炉膛特征参数有较大偏差,且着火和燃尽性能受海拔高度的影响程度也不同,为了给高原地区新建机组提供最准确的设计参数,建议燃煤进行高原燃烧性能测试。

对于平原地区煤粉气流着火温度 $>650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的燃烧性能中等偏差的煤种,不建议在海拔3000 m以上的地区燃用,此时煤样的着火性能变差,且锅炉热负荷参数较低,可能产生灭火、飞灰含碳量升高等问题,需采用敷设卫燃带等强化燃烧的方法,且卫燃带敷设面积较平原地区偏多。

5 结 论

1)充分考虑煤种燃烧性能差异以及海拔高度对锅炉设计的影响,提出了新的高原地区锅炉炉膛特征参数修正方法。

2)与炉膛选型导则规定的高原地区炉膛特征参数修订结果比较,按照新方法修订后的炉膛断面热负荷、炉膛燃尽高度及煤粉在炉内停留时间增加,

锅炉为瘦高炉型,有利于高原地区锅炉的稳燃和燃尽,且炉膛容积降低,有利于降低锅炉设备成本。

参考文献(References):

- [1] 刘立军,张喜来,刘家利.高原对煤粉燃烧特性的影响研究[J].洁净煤技术,2016,22(5):21-24.
LIU Lijun,ZHANG Xilai,LIU Jiali. Effect of high altitude on combustion characteristics of pulverized coal[J]. Clean Coal Technology,2016,22(5):21-24.
- [2] 刘峰.高原低压煤粉燃烧特性的热重实验研究[D].武汉:华中科技大学,2009:23-24.
- [3] 任晓军,王景龙.唐湖电厂锅炉频繁灭火原因分析及对策[J].青海电力,2013,32(3):59-63.
REN Xiaojun,WANG Jinglong. Analysis on the frequent out-fire failure of the boiler in the tanghu power plant and countermeasure[J]. Qinghai Electric Power,2013,32(3):59-63.
- [4] 王文忠.高原地区发电厂中储式燃煤锅炉的燃烧特点及其的优化燃烧调整研究[J].科技传播,2013(10):165-166.
WANG Wenzhong. Study of combustion characteristics and the optimization of combustion adjustment for power plant at high altitude[J]. Public Communication of Science & Technology,2013(10):165-166.
- [5] 黄海川.桥头铝电420 t/h锅炉性能试验研究[J].青海电力,2005,24(1):13-16.
HUANG Haichuan. 420 t/h boiler performance test's research of Qiaotou Aluminium & Electric Power Co. Ltd[J]. Qinghai Electric Power,2005,24(1):13-16.
- [6] 李东鹏,刘利军,方顺利,等.高原地区烟煤锅炉设计与运行状况分析[J].工业加热,2016,45(3):38-41.
LI Dongpeng,LIU Lijun,FANG Shunli, et al. Design and operating characteristics of bituminous coal boiler at high altitudes areas[J]. Industrial Heating,2016,45(3):38-41.
- [7] 韩兵,权永家,马润生.高原地区工业锅炉节能状况分析[J].青海电力,2014,33(2):18-20.
HAN Bing,QUAN Yongjia,MA Runsheng. Analysis on energy saving of industrial boilers in high altitude area[J]. Qinghai Electric Power,2014,33(2):18-20.
- [8] 袁颖,姚伟,相大光,等.高原对煤粉燃烧炉膛的影响[J].热力发电,2000,29(4):16-20.
YUAN Ying,YAO Wei,XIANG Daguang, et al. Effects of high altitude on pulverized coal boiler furnace[J]. Thermal Power Generation,2000,29(4):16-20.
- [9] 国家能源局.大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则:DL/T 831—2002[S].北京:中国电力出版社,2002.
- [10] 范文斌,王宁,蒋群.高原小型燃煤锅炉设计[J].工业锅炉,2008(1):29-30.
FAN Wenbing,WANG Ning,JIANG Qun. Design of low-capacity coal-fired boiler in plateau area[J]. Industrial Boiler,2008(1):29-30.

(下转第102页)

- LIU Honggang, BAI Shaolin. Comparison and analytical study on NO_x emission from various W-shaped flame boilers in service[J]. Thermal Power Generation, 2007, 36(3): 1-4.
- [8] 许传凯. 低挥发分煤的燃烧与“W”型火焰锅炉若干问题研究[J]. 中国电力, 2004, 37(7): 37-40.
- XU Chuankai. Several problems with the combustion of low-volatile coal and W-flame boiler[J]. Electric Power, 2004, 37(7): 37-40.
- [9] 苏宏亮, 阎维平, 高正阳, 等. 350 MW 机组 W 火焰锅炉燃烧优化试验与性能预测[J]. 热力发电, 2014, 43(3): 30-36.
- SU Hongliang, YAN Weiping, GAO Zhengyang. Combustion optimization test and performance prediction for a 350 MW unit W-flame boiler[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(3): 30-36.
- [10] 苗长信, 王建伟, 车刚. 600 MW “W” 火焰锅炉降低 NO_x 的调试分析[J]. 山东电力技术, 2004(2): 6-9, 22.
- MIAO Changxin, WANG Jianwei, CHE Gang. The commissioning analysis on NO_x reduction in 600 MW W-flame boiler[J]. Shandong Electric Power, 2004(2): 6-9, 22.
- [11] 刘武成. 我国“W”型火焰拱式燃烧炉的运行和改进方向的探讨[C]//动力工程学会锅炉专委会大型锅炉运行性能研讨会文集. 2002.
- [12] MARK T K. The release of nitrogen oxides during char combustion[J]. Fuel, 1997, 76(6): 457-473.
- [13] 徐旭常, 吕俊复, 张海. 燃烧理论与燃烧设备[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [14] 徐旭常, 周力行. 燃烧技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [15] 车得福. 煤氮热变迁与氮氧化物生成[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2013.
- [16] 曹欣玉, 牛志刚, 应凌俏, 等. 无烟煤燃料氮的热解析出规律[J]. 燃料化学学报, 2003, 31(6): 538-542.
- CAO Xinyu, NIU Zhigang, YING Lingqiao, et al. Releasing of fuel-nitrogen during blind coal pyrolysis[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2003, 31(6): 538-542.
- [17] 程芳琴. 低热值煤燃烧污染控制技术及原理[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [18] 李振山, 张志, 陈登高. 煤粉燃烧中 NO_x 的预测、模型开发及 Fluent 实现[J]. 煤炭学报, 2016, 41(10): 2426-2433.
- LI Zhenshan, ZHANG Zhi, CHEN Denggao. Prediction of NO_x during pulverized coal combustion; Model development and its implementation with Fluent[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(10): 2426-2433.
- [19] 张山鹰, 谢佳, 周武, 等. 一种“W”火焰锅炉燃烧设备: CN201220097451.8[P]. 2012-10-24.
- [20] 朱哮水, 戴维葆. 2 种超临界 W 火焰锅炉技术特点比较[J]. 热力发电, 2014, 43(1): 11-14, 25.
- ZHU Xiaoshui, DAI Weibao. Technical features comparison of two supercritical unit W flame boilers[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(1): 11-14, 25.
- [21] 刘鹏远, 张海, 申浩树, 等. W 火焰锅炉无烟煤煤粉气流着火特性[J]. 煤炭学报, 2016, 41(10): 2466-2472.
- LIU Pengyuan, ZHANG Hai, SHEN Haoshu, et al. Anthracite ignition characteristics in an arch-fired boiler with slot burners[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(10): 2466-2472.

(上接第96页)

- [11] 黄必重, 郝宝乾. 哈锅高原、高灰分烟煤 660 MW 超临界锅炉的设计[J]. 锅炉制造, 2011(2): 6-10.
- HUANG Bizhong, HAO Baoqian. HBC's design of the 660 MW supercritical high-ash-bituminous fired boiler with high elevation[J]. Boiler Manufacturing, 2011(2): 6-10.
- [12] 张洪岩, 刘瑞凤. 高原地区对锅炉设计的影响[J]. 锅炉制造, 2011(3): 28-29.
- ZHANG Hongyan, LIU Ruifeng. Influence of height above sea level to design of the boiler[J]. Boiler Manufacturing, 2011(3): 28-29.
- [13] 李东鹏, 刘利军, 刘家利, 等. 高原地区 660 MW 机组锅炉热负荷参数选取[J]. 热力发电, 2016, 45(4): 111-115.
- LI Dongpeng, LIU Lijun, LIU Jiali, et al. Selection of heat load parameter for 660 MW unit boiler in high-altitude areas[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(4): 111-115.
- [14] 王品刚, 赵毅, 许定峰. 屏区结渣防治措施的探讨[J]. 神华科技, 2010, 8(6): 41-45.
- WANG Pingang, ZHAO Yi, XU Dingfeng. The discussion on the measures of the prevention of slagging[J]. Shenhua Science Technology, 2010, 8(6): 41-45.