

二次风分布对 CFB 锅炉炉内气固混合及燃烧的影响

王正阳, 秦 明, 孙绍增, 秦裕琨

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 对于循环流化床锅炉, 通常是将总风量分为一次风和二次风来控制燃烧过程的进行, 而大型循环流化床锅炉又进一步将二次风沿炉膛高度方向分为若干层并分布在燃烧室四面墙上来加强对燃烧过程的控制。首先介绍了横向二次风射流对促进循环流化床锅炉气固混合及煤燃烧的作用。在一台燃烧低挥发分煤的循环流化床锅炉上进行的实验, 分析炉内流场对该锅炉不同供风模式下二次风在炉内分布情况的影响。在此基础上考察二次风在炉内不同的分配方式对煤的燃尽和炉内温度场的影响。实验结果表明, 通过二次风优化可以加强炉内气固混合, 促进气体和燃料的扩散, 提高燃烧低挥发分煤的 CFB 锅炉燃烧效率。

关 键 词: 循环流化床锅炉; 二次风分布; 炉内气体与燃料的混合; 炉内燃烧

中图分类号: TK224 文献标识码: A

引 言

循环流化床燃烧技术是当今煤的清洁利用中的重要技术之一, 在处理高硫煤或劣质煤上有着明显的优势。在循环流化床锅炉中, 通常利用空气分级将给风分为一次风(Primary Air, PA)和二次风(Secondary Air, SA)。二次风在 CFB 锅炉中具有控制 NO_x 生成的作用^[1], 除此之外, 更重要的是对燃烧过程进行控制, 为补充炉内燃料燃烧所需空气, 加强物料与空气的掺混, 控制炉内床温和物料的内循环量等^[2~3]。

对于横向二次风射流, 其在进入炉内过程中受到主流流场的影响, 而主流流场也因射流的进入发生一系列的变化。二次风射流作为一个横亘在主流前方运动的障碍物, 在射流、主流和壁面的共同作用下, 流场会同时存在卷吸、绕流、掺混和分离等流动现象, 产生各种复杂的涡旋结构^[4], 这些涡旋结构在气固反应系统中起到加强反应物混合和提高反应速度的作用。

目前, 大部分的锅炉燃烧的都是一些劣质煤, 加

上燃烧调整工作的不足, 这些锅炉燃烧效果往往较差^[5]。对于一台给定的 CFB 锅炉, 如果给煤性质一定, 那么对于锅炉的燃烧调整则主要针对如何加强燃料和给风在燃烧过程的扩散与混合。虽然高的过量空气系数有利于煤燃烧, 但是它会增加锅炉的排烟热损失和风机的耗能。因此, 在不增加总风量的情况下, 卿山等人进行了一、二次风量比例对煤燃烧的影响^[6]。而大型 CFB 锅炉的二次风往往沿高度方向分成若干层, 并分布在炉膛底部的四面墙上。本研究内容则主要针对在一次风量保持不变的情况下, 分析炉内流场对该锅炉二次风在炉内分布情况的影响, 并在此基础上分析沿高度方向上二次风量的分配以及前后墙二次风量的分配等对炉内气固混合和低挥发分煤燃烧情况的影响。

1 实验介绍

1.1 实验所用循环流化床锅炉

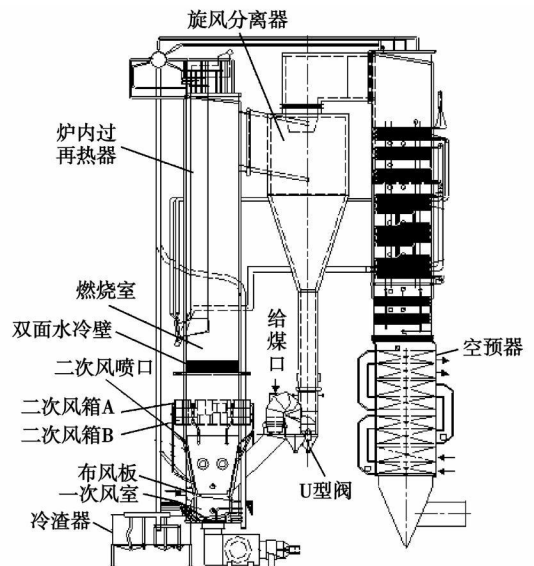


图 1 实验的某电厂 440 t/h CFB 锅炉示意图

收稿日期: 2008-02-25; 修订日期: 2008-12-07

基金项目: 国家科技支撑计划子课题基金资助项目(2006BAA03B01-07)

作者简介: 王正阳(1980-)男, 福建龙岩人, 哈尔滨工业大学博士研究生

实验的某电厂 440 t/h 超高压 CFB 锅炉提升管部分高度为 39.219 m, 上部直段截面为 13.160 m×6.680 m, 炉膛总高为 34.097 m, 下部采用前后墙倾斜布置(74°), 锅炉呈现上大下小的结构, 下部高度为 5.012 m, 四面墙均布置有耐火耐磨材料, 并开若干个孔作为二次风喷口, 如图 1 所示。双面水冷壁将炉膛从 11.68 m(距布风板)到炉膛顶部分成两个独立的烟气通道, 然后烟气分别进入两个旋风分离器中。锅炉给煤采用在 4 个回料管中燃煤回灰混合给入, 燃煤在入炉前预先混合床料, 提前升温干燥, 并在床料的携带下更快地扩散到床面上。锅炉布风板采用倾斜布置, 排渣口设在前墙。

锅炉额定出力下设计总风量为 380 km³, 表 1 为锅炉具体风量分配情况。给风折算到炉膛空截面平均流速为 5.38 m/s(按 930 °C 炉膛温度)。这些给风主要由一次风量和二次风量构成(设计风温均为 230 °C), 其中一次风率约为 43%。

表 1 CFB 锅炉 ECR 工况的风量分配

	ECR 工况风量 / km ³ ·h ⁻¹
一次风	160
回料阀风量 *	6
给煤密封风 *	36
油燃烧器冷却风量	18
总二次风(total SA)	160
总风量	380

* 一回料阀风量和给煤密封风都从设置在后墙上的回灰管进入炉内, 油燃烧器冷却风量从两侧墙给入。这些风量也都来自二次风空预器, 但因为这部分风量一般保持稳定, 未在本文的调整范围之内, 故本文所述的二次风不包括它们。

1.2 本实验循环流化床锅炉的二次风情况

图 2 是本实验 CFB 锅炉二次风在炉内的布置情况。二次风喷口通过缩口结构以提高风速, 其直径为 263 mm, 倾斜向下布置(30°)。上、中、下三层二次风口中心分别距炉膛布风板 4.932、2.932 和 0.932 m, 各层分别布置若干个二次风喷口。其中, 上二次风由风箱 A 提供, 而中下二次风则来自同一个风箱——风箱 B。

肖显斌、蒋敏华等人报道了大型循环流化床锅炉炉膛中心区域氧浓度低^[5,7], 而壁面则为富氧区的现象。这种氧浓度分布表明二次风射流并没有穿透并扩散到炉膛中央部位, 这显然要影响到炉膛中央区域细的焦炭粒子的燃烧。CFB 锅炉中的二次风穿透性较差除了同其射流速度不足有关外, 还同主流中较浓的气固流场有关。

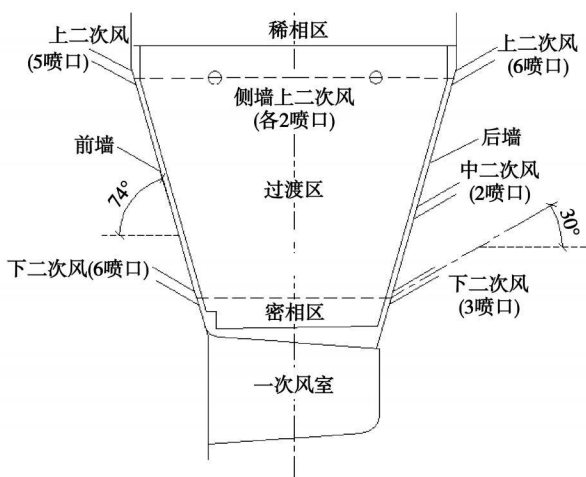


图 2 锅炉二次风布置示意图

图 3 为本实验中的一组床压分布。从图中可以看出, 床压(表示一定的床存量)在炉膛底部迅速的衰减, 而在炉内其它大部分区域则变化缓慢。通过床压分布可以利用以下公式近似计算床内轴向颗粒体积份额(ϵ_s)分布^[8], 如图 4 所示。

$$\epsilon_s = \frac{\Delta P}{\Delta h (\rho_s - \rho_g) g} \quad (1)$$

式中: ΔP — Δh 高度(m)的床压降, Pa; ρ_s 、 ρ_g —颗粒和气体的密度, kg/m³。

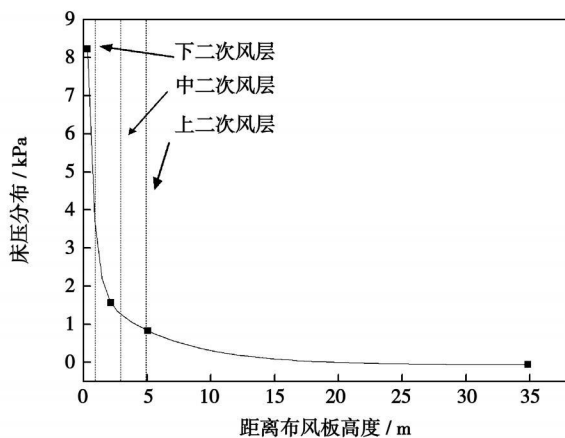


图 3 炉内床压分布

从图 4 可以看出, 炉内呈现上稀下浓的固体分布状态, 下层二次风出口截面颗粒体积平均份额在 25% 左右, 中层二次风则为 5%, 上层约为 1%。而在局部区域, 如前面所述, 回料和给煤都从后墙上靠近中下二次风的回料管给入, 由于燃料和回料的扩散速度是有限的, 所以在床底部后墙区域物料比较集中。本实验通过安装在炉前的二次风管上的测速

装置对二次风喷口速度进行测量。

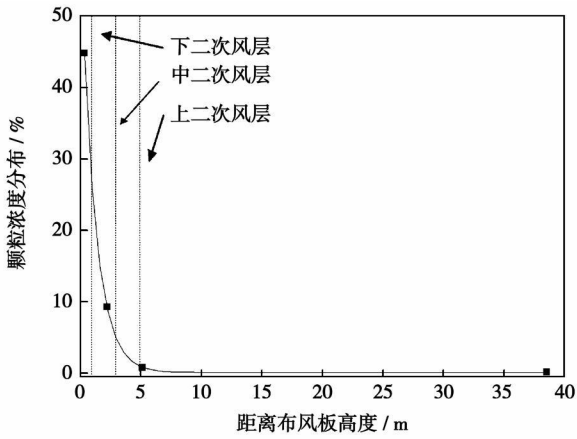


图 4 颗粒沿炉高方向的体积份额分布

图 5 是当所有二次风风门开度全开时来自同一个风箱 B 的中二次风和下二次风速度分布情况, 在冷态床内无物料的情况下风速基本上是均匀的, 但在实际运行工况下, 前后墙风量在二次风出口环境物料分布不均的情况下风速分布却是不均的, 在风门全开的情況下风速情况为后墙中二次风 > 前墙下二次风速 > 后墙下二次风速。

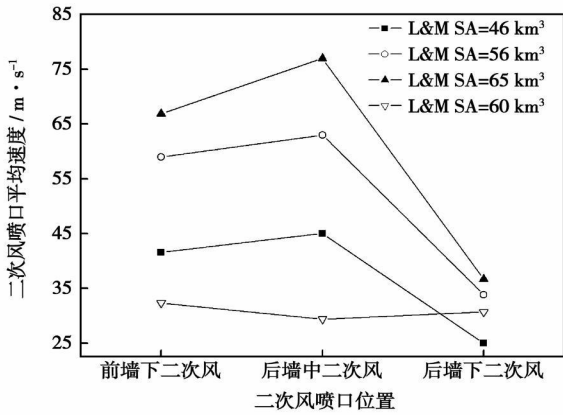


图 5 不同中下(L&M)二次风量时的二次风速度分布(中下二次风量=60 km³ 为冷态无床料工况, 其它为正常运行工况)

当锅炉来自风箱 B 风量保持不变时(56 km³/h), 逐渐关小前墙下二次风门的开度, 可以发现风量由前墙喷口向后墙喷口转移, 如图 6 所示, 首先是后墙中二次风(出口颗粒浓度较低)随之增加, 接着由于风速增加而使管道阻力提高, 风量逐渐稳定下来。而后墙下二次风开始变化较小, 直到前墙下二次风风门开度关小到较小的程度, 风量才较大幅度的转移到后墙下二次风处。

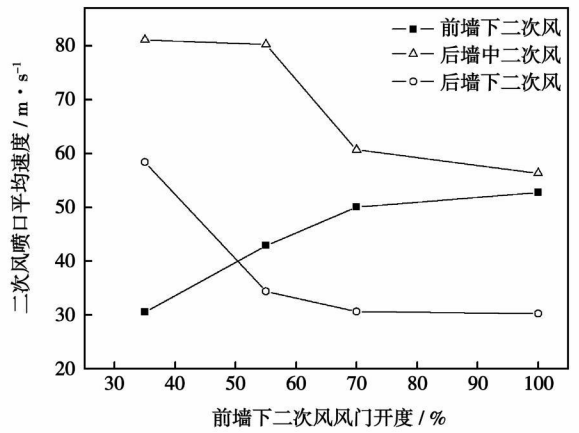


图 6 不同前墙下二次风风门开度二次风速度分布(中下二次风量=56 km³)

2 实验结果及分析

本文的研究内容主要包括在一次风量保持不变的基础上, 考察沿高度方向上二次风量的分配以及前后墙二次风量的分配等对炉内气固混合和低挥发分煤燃烧情况的影响。需要说明的是, 实验工况没有进行脱硫, 所以实验中床温偏离了最佳脱硫温度区间。各实验除调整参数外, 其它参数尽可能保持不变。由于试验煤质的变化, 不同的调整实验其参数有所不同, 如表 2 所示。

表 2 实验用煤的工业分析及元素分析(空气干燥基)

	E11 ~ E13	F11 ~ F13
水分 / %	1.04	1.46
灰分 / %	21.09	27.86
挥发分 / %	12.69	11.70
固定碳 / %	65.18	59.26
低位发热量 / MJ·kg ⁻¹	24.78	22.08
碳 / %	70.67	60.58
氢 / %	3.03	3.00
硫 / %	0.34	1.82
氮 / %	1.26	1.01
氧 / %	2.57	4.27

锅炉沿高度方向的温度分布通过安装在各测量层上的若干测量点进行测量和平均计算, 如表 3 所示。飞灰含碳量则利用烧失法获得。通过安装在二次风管上的测速装置对二次风喷口速度进行测量计算, 本文中的密相区底部指的是下层二次风以下的炉内区域, 密相区上部指的是下层二次风到中层二

次风之间的区域, 中层二次风到上层二次风间为过渡区, 上层二次风以上为稀相区。

表 3 锅炉炉内温度测量点

测量层	测量区域	测量点数	测量点高度/m
1	密相区底部温度	8	0.536
2	密相区上部温度	6	2.201
3	底部稀相区温度	6	5
4	炉膛出口温度	4	34.855
5	分离器出口温度	4	41.004

2.1 高度方向上二次风量分配对煤燃烧及床内温度场分布的影响

本实验保持一次风量稳定(160~164 km³/h), 调整沿高度方向上的上中下二次风风量分配, 共包括 3 个工况(均为满负荷工况), 其上二次风率(等于上二次风量/总二次风量)分别为 50.6% (E11)、58.9% (E12)和 66.5% (E13)。总二次风量为 155~160 km³/h。试验结果表明, 随着上二次风率的提高, 锅炉飞灰含碳量随之降低, 如图 7 所示。

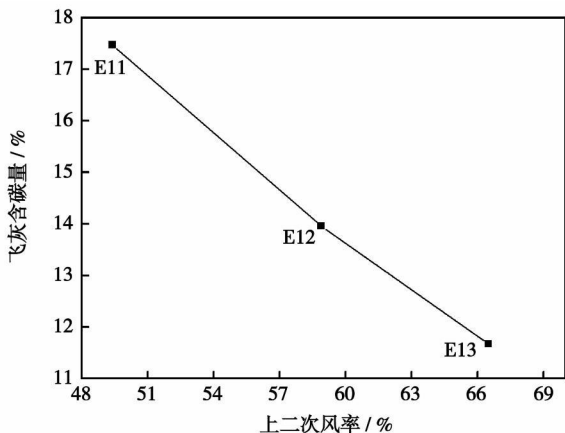


图 7 不同的上二次风率对飞灰含碳量的影响

上二次风率的改变对燃烧的作用可以通过以下几点来说明:

首先, 炉膛底部区域自身由于气泡的上行和爆裂存在着强烈的气固混合和质量交换, 底部二次风由于出口浓度较高, 其在促进主流的扰动和混合上的作用相对较小。而随着炉膛高度的增加, 颗粒浓度急剧减小, 流动也迅速的趋向稳定。通过对横向射流的分析我们知道, 二次风射流在进入炉内的过程中与主流发生强烈的作用, 产生各种复杂的涡旋结构, 扰动逐渐趋向稳定的流场, 加速反应物的扩散和混合, 这对于提高主流中的反应速率是有利的。本实验中, 由于上二次风出口颗粒浓度较低, 增加的

上二次风可以更加深入地进入到炉膛中央区域, 同炉膛中央区域的上行气固流发生作用, 这对于加强炉膛中央区域的气固扰动与混合进而对煤的燃烧将起到促进作用。

其次, 低的下部风速有利于减少密相区向上扬析的粒子(包括那些细的焦炭粒子)的数量, 进而增加了燃料在炉内的停留时间。而在稀相区中, 相对更少的燃料粒子与更多的空气进行反应, 这无疑对于本实验中燃烧的低挥发分煤特别是那些过细的煤粒和焦炭的燃烧是有利的。

最后, 空气的分布也直接影响到炉内床温的分布, 如图 8 所示。当中下二次风量降低时, 床层底部床温(测点 1)增加, 然后随着更多的煤粒开始燃烧释放热量, 工况 E11 和 E12 都出现温度升高, 但 E13 (最高的上二次风率)则变化不大。表明在处于还原性气氛的密相燃烧区, 二次风的减少对燃烧产生抑制, 具体在温度变化图中表现为测点 1~2 间的温升随着中下二次风的减少而降低。当更多的空气被从上二次风口加入, 3 个工况在测点 2~3 温度均呈下降趋势, 上二次风量最大的工况 E13 降温最大。对于工况 E11, E12, 随着燃烧反应的减弱和热量的释放床温呈不断衰减状态(测点 3~4)。但是对于 E13, 在密相区和过渡区中受限的燃烧反应在高速的上二次风射入之后得到大大加强, 床温随之上升。较高的上部区域床温有利于焦炭粒子在占炉膛容积 90% 以上的稀相区的燃烧。中下二次风降低而减少的扬析粒子可能造成上部参与换热的颗粒浓度降低, 但是稀相区燃烧程度增强而提高了中上部区域的温度, 弥补了颗粒减少造成的换热系数的降低。

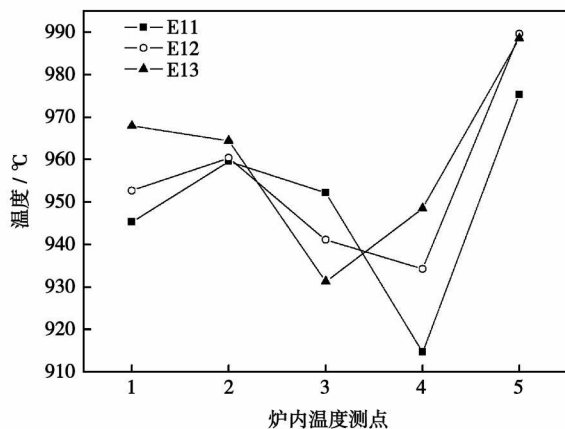


图 8 上二次风率对炉内温度分布的影响

2.2 前后墙二次风量的分配对煤燃烧及床内温度场分布的影响

从图 6 可以看出, 在实际运行工况下, 由于炉内颗粒浓度分布不均, 前后墙风量在后墙局部浓度较高的情况下风速分布是不均的。从对大颗粒燃料的扩散作用角度上看, 后墙下二次风作用更大。因为它离回料口更近, 而回料是下倾进入密相区的, 但后墙下二次风速较低, 其出口颗粒浓度又较大, 所以其影响相对有限。对于挥发分和部分离开密相区较细的煤粒和焦炭粒子的扩散, 则中二次风作用比较显著。正如所知, 燃料的扩散是影响燃料燃烧和防止结焦的重要因素。如果燃料的扩散加快, 良好的气固混合状态更快达到, 那么就可以提高燃料的燃尽和防止结焦事故的发生。

实验对前墙下二次风设置了 3 个风门开度, 如图 9 所示, 即 100% (F11)、70% (F12) 和 55% (F13), 其它二次风如前墙上二次风和后墙二次风开度等都保持为 100%。实验显示飞灰含碳量随前墙风门开度的减小先减小而逐渐降低。实验中, 前墙下二次风风门开度变小后, 系统二次风的分布发生了变化, 如表 4 所示。这说明由于前墙下二次风开度降低使得后墙二次风速尤其是后墙中二次风速得到提高, 更高速度的后墙二次风使燃料的扩散得到增强, 如图 6 所示。另一方面, 因为排渣口设置在前墙, 密相区中整体物料是由后墙向前墙扩散的, 那么减少的前墙下二次风量正好有利于这种扩散。当燃料在床内分布更加均匀之后, 床内燃烧空间的利用率得到提高, 因此促进了焦炭的燃尽。从燃烧效果及对二次风系统的影响看, 风门开度不宜再继续减小, 因为一方面前墙侧的燃料燃烧也需要相应的风量; 另一方面由于风门的关小, 整个二次风系统的阻力增加, 使得当风门开度由 55% 继续降低后, 风机的出力下降, 因此减少了总风量, 这对燃烧是不利的。

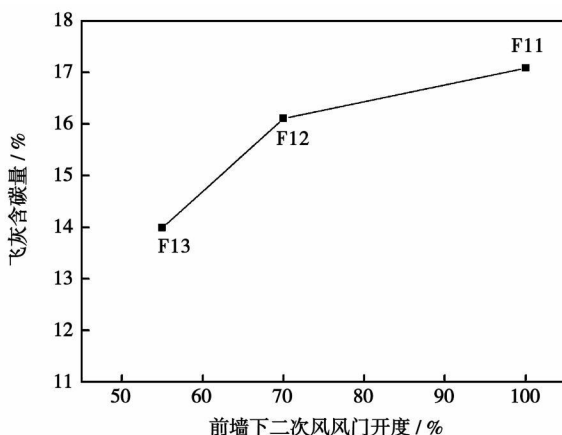


图 9 不同前墙下二次风风门开度下飞灰含碳量

表 4 工况 F11、F12、F13 的风量分配 (km³/h)

	F11	F12	F13
一次风	156	155	158
上二次风	98	99	100
前墙下二次风	46	41	34
后墙中下二次风	28	31	36
其它风量	58	57	57
锅炉总风量	386	383	385

图 10 为风量分布调整后系统温度的变化。底部床层温度随着前墙风量的减少有所升高。随着煤粒的燃烧, 在密相区上部区域 3 个工况又达到相近的温度。沿着炉膛高度方向风量配比的变化对炉内燃烧逐渐产生了影响。随着更多的风量被分配到炉膛后部区域, 燃烧更加充分, 进而上二次风加入引起的测点 2~3 间的温降呈减少趋势。且 F13 这种较高的床温一直保持到炉膛出口, 即工况 F13 在炉内的平均温度最高, 这对于充分利用炉膛燃烧空间, 提高燃烧效率是有利的。

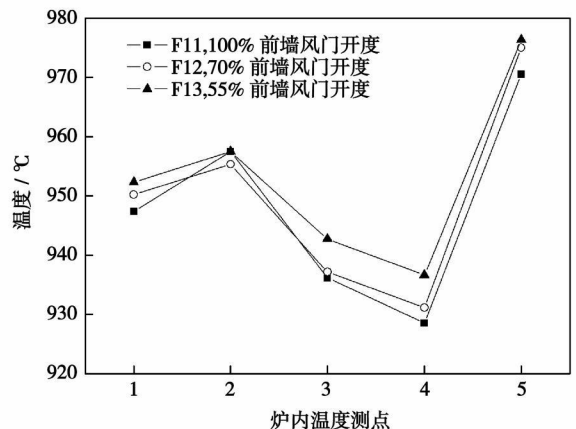


图 10 工况 F11、F12、F13 的炉内温度分布

3 结论

讨论了二次风射流对气固混合和煤的燃烧的作用, 在一台燃烧低挥发分煤的循环流化床锅炉上进行的实验, 分析炉内流场对二次风在炉内分布情况的影响, 并在此基础上考察二次风在炉内不同的分配方式对煤的燃尽和炉内温度场的影响。通过分析有如下结论:

(1) 空气—燃料在炉内的混合情况是影响 CFB 锅炉燃料燃尽性的重要因素, 而二次风射流对于提高气固混合有着明显的作用。根据炉内气固浓度的

分布,在不改变锅炉结构和不增加系统总风量的情况下,通过二次风量的调整可以使炉内气固混合不好和燃尽效果差的状况得到改善。

(2) CFB 锅炉炉内气固分布使得在原有给风方式下各二次风射流风量分布不均,所以需要通过二次风优化来适应炉内燃料和氧气的分布。

(3) 试验中,高的上二次风速有利于增加上二次风射流的穿透性,并提高炉膛中上部燃烧反应的湍流度。同时新的温度场也有利于燃料的燃尽。这些调整使得炉膛中上部燃烧空间得到更充分的利用。这些可以在总的二次风量不变的情况下,通过适当调整上中下二次风的比例来实现。

(4) 试验中,后墙侧高的二次风速有利于促进来自后墙的燃料的扩散,因此也有利于空气—燃料的混合及焦炭的燃尽。这些可以在总的二次风量不变的情况下,通过适当调整前后墙间的风量配比来实现。

对于 CFB 锅炉中的二次风特性的研究还有许多工作需要进行,比如密相区中的二次风射流的穿透性和扩散特性等。进一步的研究有助于我们更好地理解 CFB 锅炉的流动特性,这些工作将对今后设计 CFB 锅炉和进行燃烧优化起到借鉴作用。

参考文献:

- [1] LECKNER B. Fluidized bed combustion: mixing and pollutant limitation[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1998, 24(1): 31—61.
- [2] ERSOY L E, GOLRIZ M R, KOKSAL M, et al. Circulating fluidized bed hydrodynamics with air staging: an experimental study [J]. Powder Technology, 2004, 145(1): 25—33.
- [3] KIM J H, SHAKOURZADEH K. Analysis and modeling of solid flow in a closed loop circulating fluidized bed with secondary air injection[J]. Powder Technology, 2000, 111(3): 179—185.
- [4] NEW T H, LIM T T, LUO S C. A flow field study of an elliptic jet in cross flow using DPIV technique [J]. Experiments in Fluids, 2004, 36(4): 604—618.
- [5] XIAO XIANBIN, YANG HAIRUI, ZHANG HAI, et al. Research on carbon content in fly ash from circulating fluidized bed boilers [J]. Energy and Fuels, 2005, 19(4): 1520—1525.
- [6] 卿 山, 王 华, 青 莹. 降低循环流化床锅炉飞灰含碳量的工业实验研究[J]. 发电设备, 2005, 19(5): 278—280.
- [7] 蒋敏华, 孙献斌. 大型循环流化床锅炉的开发研制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(23): 1—6.
- [8] SCHLICHTHAERLE P, WERTHER J. Axial pressure profiles and solids concentration distribution in the CFB bottom zone[J]. Chem Eng Sci, 1999, 54(22): 5485—5493.

(编辑 滨)

新技术、新工艺

汽轮机末级工作叶片的侵蚀

据《Электрические Станции》2007 年 4 月号报道,哈尔科夫汽轮机厂生产的几台 300 MW 功率的 K-300-240 型汽轮机低压缸末级工作叶片进汽边在运行过程中出现严重的侵蚀磨损,俄罗斯动力工程领域的一些研究所和火电站的科技人员对造成侵蚀破坏的原因、机理以及防止这种破坏的方法进行了探讨并发表了一些文章。

针对俄罗斯中央锅炉涡轮机研究所和斯大夫洛巴列斯克发电厂科研人员的论述,全俄热工研究所的学者提出了一些不同的看法,作了进一步的探讨和分析。

汽轮机末级工作叶片进汽边被侵蚀是至今尚未解决的问题。

首先,应该认为改进除湿系统,其中包括内部通路汽水分离,制定并采用新的表面强化方法,以及同时修复已破坏叶片的表面是朝向降低进汽边侵蚀发展强度的主要措施。

收集并分析有关各种类型汽轮机叶片装置侵蚀发展的案例,为具体热电站运行工况提供有价值资料。

(吉桂明 供稿)

废热锅炉污垢热阻实时预测研究= **Research on the Real-time Prediction of the Fouling Resistance of a Waste Heat Boiler**[刊, 汉]/ FENG Dian-yi, FAN Jia (College of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou, China, Post Code: 120001), SUN Shou-ren (Jinzhou Petrochemical Corporation, Jinzhou, China, Post Code: 121000)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 196 ~ 199

Analyzed was the use of a heat transfer coefficient method-based fouling resistance prediction model for the real-time monitoring of the fouling resistance of a synthetic ammonia waste-heat boiler. It has been found that within the allowable variation range of operating parameters, the theoretical error of the model in question is around 36%, and the total prediction error, about 48% if the measurement error is taken into account. The model was improved after correcting the error resulting from a change of the convection heat transfer resistance. A fouling resistance real-time monitoring device was designed based on the improved model. Practical applications show that in the case of the fouling thermal resistance reaching its design value, the prediction error is less than 15%, thus making it possible to eliminate the theoretical error of the model mentioned earlier and meet engineering accuracy requirements. **Key words:** waste heat boiler, fouling resistance, prediction model, real-time monitoring

四角切圆燃煤锅炉低 NO_x 燃烧优化研究= **Optimization Study of Low NO_x Combustion in a Tangentially and Corner-fired Coal-burning Boiler**[刊, 汉]/ ZHOU Jian-xin, QIU Xiao-zhi, SI Feng-qi, et al (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 200 ~ 204

By making use of the test data of boiler combustion characteristics, established was a model for NO_x emissions of a tangentially and corner-fired coal-burning boiler based on supportive vector regressions (SVR). Through a training and verification and after a comparison with neural network models, it has been found that the SVR-based model is more suitable for small specimen learning as the number of hot-state test conditions of the boiler is relatively small. The accuracy of the model can meet the practical requirements of engineering projects, thus making it possible to predict more accurately the NO_x emission characteristics of an utility boiler under different operating conditions. On the basis of establishing the model mentioned earlier, in combination with the genetic algorithm for an overall optimization search and with the operating and regulating parameters of the boiler serving as independent variables of the optimization target function, an optimization search was performed of NO_x emissions, and the optimal operating parameters were obtained under a concrete operating condition. **Key words:** combustion, nitrogen oxide, supportive vector machine, regression, genetic algorithm

二次风分布对CFB 锅炉炉内气固混合及燃烧的影响= **Influence of Secondary Air Distribution on the Gas-solid Mixing and Combustion Condition in a CFB (Circulating Fluidized Bed) Boiler Furnace**[刊, 汉]/ WANG Zheng-yang, QIN Ming, SUN Shao-zeng, et al (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 205 ~ 210

For a CFB (circulating fluidized bed) boiler, its total air quantity is usually divided into a primary air flow and a secondary one to facilitate the control of combustion process, while for a large-sized CFB boiler, the secondary air flow is further divided into several layers along the furnace height and distributed on the four sidewalls of the furnace to strengthen combustion process control. First, the authors have described the role played by a transverse secondary-air jet flow in promoting the gas-solid mixing and coal combustion in the CFB boiler. Then, through an experiment performed on a CFB boiler burning low volatile coals, the influence of in-furnace flow field on the secondary air distribution in the furnace of the boiler under various air supply modes was analyzed. On this basis, the influence of different distribution modes of the secondary air on the coal burn-off and in-furnace temperature field was also investigated. The test results show that through an optimization of the secondary air, the in-furnace gas-solid mixing can be strengthened, and the diffusion of gas

and fuel, promoted, thus enhancing the combustion efficiency of the CFB boiler burning low-volatile coals. **Key words:** CFB (circulating fluidized bed) boiler, secondary air distribution, mixing of gas and fuel in a furnace, boiler combustion condition

电厂送粉系统煤粉浓度和速度的在线测量技术研究 = **Study of the Technology of On-line Pulverized-coal Concentration and Velocity Measurement for Power Plant Pulverized-coal Conveyance Systems** [刊, 汉] / SUN Meng, LEI Jing (Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080), LIU Shi, LI Zhi-hong (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2009, 24(2). — 211 ~ 215

The accurate measurement of pulverized coal concentration in each air pipe and its guidance role for regulation during a combustion process are very important to the safe and cost-effective operation of a boiler. By using capacitance tomography, tested and studied were the concentration and velocity of solids conveyed by a dilute-phase pneumatic force at a normal temperature. To overcome the impact of the nonuniformity of the sensitive field of a capacitance sensor on image formation, a cyclone separator was set up in the test system. The role of the cyclone separator is to concentrate the solid particles mainly in the wall-surface zone with the electrodes of the sensor being located on the straight pipe of the separator. The concentration distribution was obtained by using a single-layer 8-pole capacitance sensor and adopting a pre-iterative image reconstruction algorithm. An analysis of the probability and frequency spectrum characteristics of flows at the upstream and downstream of the cyclone separator has verified that the flows can meet relevant requirements for capacitance measurement. In this connection, the axial velocity was obtained by measuring relevant capacitance signals from the poles in the upper and lower layers, and the tangential velocity was ascertained by measuring the relevant capacitance signals from a pair of adjacent poles in the same layer of the sensor. The measurement and contrast analysis of the volume fraction, axial and tangential velocity in the pipe section have proven that the method under discussion can ensure reliable measurement results. **Key words:** capacitance tomography, pulverized coal concentration, volume fraction, velocity measurement, gas-solid two-phase flow

非预混燃烧中喷嘴结构布局影响火焰长度的变化 = **Influence of Nozzle Structure Layout on the Change of Flame Length in a Non-premixed Combustion Process** [刊, 汉] / XU Qiong-hui, ZHAN Jie-min (Department of Applied Mechanics and Engineering, Zhongshan University, Guangzhou, China, Post Code: 510275) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2009, 24(2). — 216 ~ 221

Verified was the reliability of numerical methods on the study of turbulent combustion. Under the condition of the gas flow rate and the total area of spouts being kept unchanged, by adjusting the number and spacing of spouts, several burner spout layout versions were determined. The influence of the number and spacing of spouts on the flame length in a non-premixed combustion process was discussed. It is believed that the change in the number and spacing of the spouts will cause not only a change of the air and gas mixing degree but also make the disturbance degrees between various gas streams different. Hence, the spout layout should be properly adjusted to change the burner flame configuration and temperature distribution and make the high-temperature combustion zone more centralized, thus enhancing the thermal efficiency of a gas-fired boiler. **Key words:** non-premixed combustion, number of spouts, spout spacing, flame length

空冷机组协调控制系统鲁棒性分析 = **Robustness Analysis of a Coordinated Control System for Air-cooled Units** [刊, 汉] / TIAN Liang, LIU Xin-ping, LIU Ji-zhen (Automation Department, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2009, 24(2). — 222 ~