

循环流化床燃烧技术的研究展望

于 龙¹, 吕俊复², 王智微³, 岳光溪²

(1. 哈尔滨锅炉厂有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 清华大学热能工程系, 北京 100084; 3. 国电热工研究院, 陕西 西安 710032)

摘 要: 提出了目前循环流化床燃烧技术主要研究方向, 对煤种多样性的燃烧效率、超临界参数条件下的水循环、大床截面条件下的颗粒和气体在气固两相流中的扩散、循环流化床条件下的污染物排放及脱除、边壁区流动问题等进行阐述, 以期对循环流化床燃烧技术的发展有所帮助。

关 键 词: 循环流化床; 锅炉; 研究展望

中图分类号: TK222

文献标识码: A

1 引 言

我国在 20 世纪 80 年代初期开始研究开发循环流化床燃烧技术, 与西方国家不同的是, 我国发展循环流化床燃烧技术的主要动力是劣质煤应用。近年来, 我国环境排放标准日益严格, 极大地推动了循环流化床燃烧技术的推广和发展, 循环流化床锅炉数量和单台容量逐年增加。据不完全统计, 现有近千台 35~460 t/h CFB 蒸汽锅炉和热水锅炉在运行、安装、制造或订货。

但是循环流化床锅炉的容量尚不足以满足电力生产的需要, 容量比较小, 最大的为 300 MW, 参数目前还在亚临界以下, 高参数以高压和超高压为主。这种燃烧技术本身决定了发电效率的提

高只能通过提高蒸汽参数和循环效率的途径来实现。因此, 容量大型化以及高参数化是循环流化床燃烧技术的发展方向, 但在容量大型化和高参数化过程中, 尚存在一些问题需要研究。

2 设计及放大设计理论

循环流化床锅炉内的流动、燃烧、传热和污染物排放等过程非常复杂, 目前几乎不可能对这些复杂的过程全部进行模型化。许多研究者对循环流化床的放大问题进行了研究^[1], Glicksman、Horio 等人根据连续方程、动量方程、边界条件和 Ergun 方程, 基于许多假设得到了循环流化床模型化的无因次数组, 这些相似准则在不同尺度的模型上进行了验证^[2~3]。但相似准则仅仅与循环流化床流体动力特性的相似, 是针对多相流动过程提出的。

颗粒的停留时间不仅受燃烧室高度的影响, 还受风速、壁面效应等的影响。燃烧室高度会对气体和固体颗粒在炉内的停留时间产生影响, 从而对脱硫、CO 排放、燃烧效率等产生影响。但燃烧室高度受到尾部烟道高度的限制, 燃烧室高度较低不利于燃烧, 但如果混合较好并采用高效率的分离器, 则可得到弥补。

目前对炉内物料平衡的计算甚至有较大的欠缺, 例如对循环量计算及飞灰份额计算有误; 一些情况下对传热系数的计算结果偏差较大; 对燃烧过程和热量释放规律研究不够; 对分离器的性能没有确切可信的数据, 如 d_{50} 的数据差别较大, 有的 d_{50} 按 $10 \mu\text{m}$ 考虑, 商业宣传中为 $15 \sim 20 \mu\text{m}$, 有资料表明在 $40 \sim 70 \mu\text{m}$ ^[4]。

多年来, 我国循环流化床锅炉设计多采用鼓泡床的经验, 没有认识到鼓泡床和循环流化床在气固两相流状态上的差异, 简单地认为鼓泡床加上分离器就构成了循环流化床, 错误地沿用了鼓泡流化床的许多概念, 如飞灰再循环的循环倍率等。循环流化床锅炉的设计思想应基于对整体特性的研究分析, 将各部分特性有机地联系起来, 如流动、燃烧、传热、物料平衡等。循环流化床最重要的概念是物料平衡, 它是循环流化床运行能否正常的关键。物料平衡涉及到分离器、底排灰、回送系统以及物料特性等循环流化床物料循环系统的性能。

循环流化床燃烧室中的流动特性既不是快速流态化, 也不仅仅是扬析夹带, 而是处于二者之间的过渡状态。空间具有一定物料浓度, 部分区域出现成团, 但远

收稿日期: 2003-10-30; 修订日期: 2004-02-26

基金项目: 国家 863 基金资助项目(2002AA529100); 国家“十五”攻关项目(2001H301A03)

作者简介: 于 龙(1964-)男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨锅炉厂有限责任公司高级工程师。

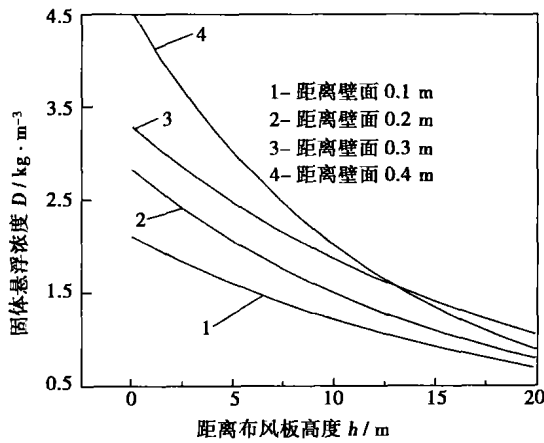


图1 炉膛不同位置物料浓度分布

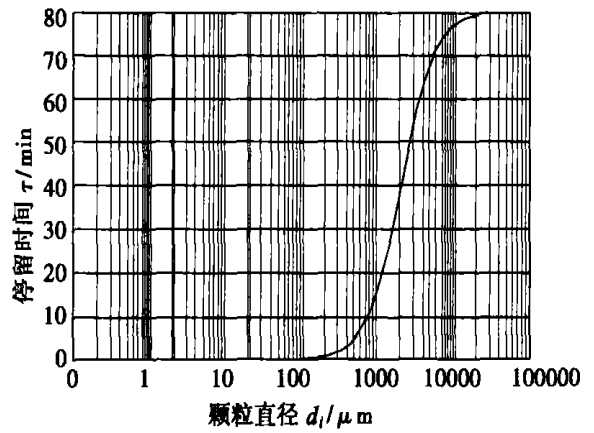


图2 颗粒排出时间随粒径的关系

未达到快速床中的成团程度。空隙率沿轴向和径向分布不均,在床横截面内也不一致,如图1所示^[5]。

固体物料在循环系统内的流动特性对传热、燃烧和脱硫都有直接的影响,进而对整个锅炉的运行性能也有重要的影响。而物料平衡理论正是描述固体物料在循环系统内的运动规律以及实现办法。循环流化床锅炉在运行中要保证一定的循环量,这就对分离器的设计提出了要求。床压降直接反映了炉内的物料量,在一定的来料粒度分布下,直接反映了循环量的大小,因此选择合理的床压降是十分必要的。

燃料特性对循环流化床的影响可以从燃烧特性和物料平衡两方面来考虑。从燃烧角度来说,燃料的挥发份和固定碳含量、粒度的影响是主要的;从物料平衡角度来说,燃料的成灰和磨耗特性对循环流化床锅炉的设计有较大的影响。

燃料的热量释放规律将直接影响燃烧室内的受热面布置情况以及燃烧效率。燃料的磨耗性能对炉膛内部的灰颗粒粒度分布有影响。由于磨耗作用产生的细颗

粒的粒径很小,一般小于分离器所能保证的 d_{99} ,因此分离器很难将它们全部分离下来。所以对于易磨的燃料,如果仅以燃料本身的灰分来做为循环物料,那将会有相当多的细颗粒以飞灰的形式损失掉,不利于高流率循环的形成,因而需要添加一部分补充床料来维持炉内循环物料正常的粒度分布。根据图2所示的颗粒停留时间^[6],可以计算出不同粒径的灰粒由于磨耗产生的质量迁移,从而了解物料平衡的结果。

定态设计提出了综合上述过程的设计方法,认为循环流化床锅炉正常运行的基本条件是燃烧室内存在一个合理的固体物料浓度分布。这个固体物料浓度分布是循环流化床内气固两相流动的宏观体现,而浓度分布对燃烧、传热等具有重大的不可或缺的意义。这个浓度分布的状态对锅炉的性能表现至关重要,是循环流化床锅炉的根本。循环流化床锅炉设计时,应该选定一个满负荷下的固定状态,对锅炉进行结构参数的设计。在这个固定的状态下,锅炉的循环量应该是固定的,根据这个循环量和锅炉所要求达到的额定参数,通过调节锅炉的

结构参数,一、二次风比例等运行参数,使设计的锅炉达到要求的参数和效率。定态设计所确定的态需要通过一定的手段来达到,如分离器效率、回送性能、提升段速度等结构性能以及成灰特性等燃料性能来实现。在宏观上,这个确定的态又表现为床存量、床质量等。定态设计的依据可以归结到循环量上,用循环量这个参数从整体上来代表这个状态。循环量定义为单位时间内循环物料的质量流率^[7]。

3 超临界CFB的水循环问题

超临界蒸汽循环可以提高热效率、减少排放。循环流化床技术具有燃料的灵活性、低的排放等优点。超临界循环流化床锅炉便是结合二者的优势,成为一种高效低污染燃煤发电技术。

循环流化床锅炉炉膛的热流要比煤粉炉中低得多^[8];循环流化床锅炉炉墙上的沉积物与煤粉炉相比非常清洁,水冷壁发生传热恶化的情况大幅减少;循环流化床锅炉最高热流出现在炉膛底部,并随着炉高增加而逐渐减小,而工质温度恰恰相反,因此温度

最低的工质恰好在最高热流处,这种特性使水冷壁面发生传热恶化的几率小得多。因此,循环流化床锅炉比煤粉炉更适合采用超临界参数。由于燃烧室内热负荷低,有可能以相对简单的垂直管一次上升构成燃烧室受热面,而且低质量流率带来的低阻力降可能使其在低负荷亚临界区具有自然循环性质^[9]。原则上循环流化床及超临界均是成熟技术,二者的结合相对技术风险和技术难度不大。

超临界循环流化床锅炉的一个重点是要掌握循环流化床燃烧侧传热系数的分布规律及随负荷变化规律^[10]。经过多年的研究积累,在大量的循环流化床锅炉上做了深入的热态测试及理论分析工作,所得到的数据已经可以应用到工业设计中^[11]。研究发现,水冷壁出口工质最高温度偏差发生在MCR工况时,在60% MCR负荷范围内,水冷壁流动及传热稳定,无DNB发生,水冷壁可采用安全的无中间集箱的垂直管。但在更大床截面条件下热负荷的分布规律以及更低质量流率的水循环问题有待于更多的研究。

4 循环流化床燃烧效率问题

煤粒在流化床内的燃烧经历了加热和烘干、挥发份析出及其燃烧、膨胀和一次破裂、焦炭燃烧、二次破裂和磨耗几个连续阶段。在循环流化床锅炉中,由于物料在离开炉膛出口后经气固分离和回送装置送回床层,为炭颗粒的燃烧提供良好的条件。但在国内,许多燃烧低挥发份、低活性煤的循环流化床锅炉的实际飞灰含碳量很高,大大超过预测和设

计值。单颗粒等径缩核模型计算发现,焦炭粒子的燃尽时间随粒径变化曲线呈峰值特征,40~50 μm的颗粒相对难燃尽^[12]。燃料本身燃烧反应活性对飞灰含碳量有重要影响^[13],不同煤种对应的飞灰含碳量分布有差异^[14]。较高的床层温度及炉膛高度无疑有助于降低飞灰含碳量^[15]。

大量的实验室研究和现场测试工作表明,影响循环流化床燃烧效率的因素有几个方面,其中最主要的是原煤的性质,因为设备本身决定了颗粒的停留时间,如图2所示;燃料本身的反应活性决定了本征反应速率,而燃烧过程中碳的晶格会发生石墨化的排列重组^[16],焦炭的反应性下降,图3描述了燃烧过程中温度对焦炭反应性降低的影响。在循环流化床燃烧温度下,经过10~30 min的停留时间,焦炭明显失活。对较细的煤颗粒而言,由于停留时间不够,不会明显失活,所以非活性组分来源于在炉膛中停留时间较长的大焦炭颗粒,并且由于大颗粒的温度比炉膛温度还要高50~200℃,这就使反应性下降程度更大。这一现象已被XRD测量所证实。事实上,焦炭颗粒的碎裂特性对循环流化床锅炉的飞灰可燃质含量的影响很大^[18],而煤颗粒的碎裂特性在很大程度上取决于煤的成份、颗粒大小、颗粒形状和温度。较大焦炭颗粒在炉膛中较长的停留时间在提高燃烧效率的同时,颗粒磨

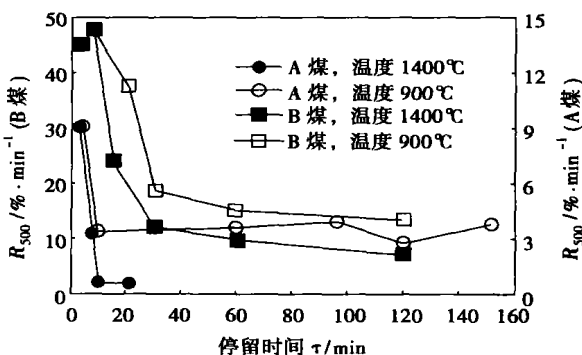


图3 不同温度下焦炭失活

耗产生的活性非常低的细小碳颗粒,对这部分来自大颗粒磨耗形成的晶格化程度较高活性较低的碳,即使再增加其在循环流化床内停留时间,燃尽仍有难度,因此一次燃尽度决定了机械未完全燃烧损失。这是大量的改善分离器效率以减少飞灰可燃物含量的效果实际上比较有限的原因。

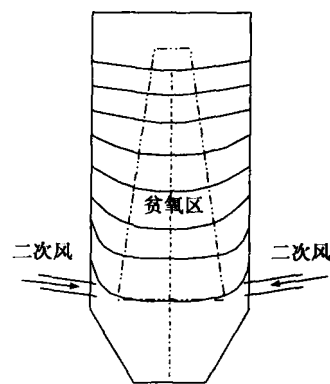


图4 循环流化床锅炉中的贫氧核心区

影响循环流化床锅炉燃烧效率的另一个重要的因素是气固混合。对锅炉截面进行的氧浓度测量显示,炉膛二次风上部有一个如图4所示的贫氧核心区^[17],显然这是由于二次风的穿透扩散效果不佳而使氧气不能到达炉膛中部的结果,这对于核心区细颗粒的燃烧产生了负面影响,因此循环流化床锅炉中的气体扩散问题

非常重要。

5 循环流化床内混合问题

循环流化床锅炉中的给煤、回灰、给石灰石和二次风等均均为单相物质在气固两相流中扩散过程。混合不充分将导致反应物的分布不均和局部反应条件的不同。随着容量的增加,床面积增大,每个给料(风)点流量增加,这种情况更加突出。

5.1 气体的扩散

在循环流化床中,造成气体混合的主要原因是,气体自身存在的径向速度分布所造成的分散;沿床中心稀薄区向上和沿床边壁密区向下的颗粒的不均匀引起的气体扩散;颗粒团的不断形成和解体引起气体的交换或流动造成气体的混合。气体的混合程度可以用纵向扩散系数和径向扩散系数来描述。

已有的气体混合研究大多数采用非吸收性的气体为示踪气体。示踪气体一般采用瞬时注入或某函数注入,在注入点的下游测量气体的停留时间分布,以此确定用来描述流动方向气体扩散性能的有效混合系数 D_g 。返混实验可以更详细的描述气体纵向混合现象。在返混实验中,示踪气体按局部点源注入或在提升管壁处注入,在注入点的上游测量气体的停留时间分布,发现由停留时间分布导出的 D_g 随速度的增加而减少,并随颗粒质量流率的增加而增加^[19];返混在湍流状态以上将大幅度降低,并且近壁区气体通过对流沿流动的反方向扩散混合^[20]。

横向气体扩散一般采用在中心线连续地注入示踪气体,并在

下游测量局部的气体浓度。多数研究集中在稀相区进行^[21],而对于密相区内气体的扩散研究的还很少^[22]。密相区内气体横向扩散的研究还很不完善,结论相互矛盾,需要进一步地深入研究。

5.2 颗粒的扩散

在循环流化床中,颗粒会聚集成颗粒团,颗粒团在床内上下运动,形成固体颗粒在轴向的返混;固体颗粒还会在床内径向运动,形成固体颗粒的径向混合。在循环流化床的密相区,其流态类似于鼓泡床,特别是在宽筛分的循环流化床的密相区,床内气泡的运动会造成颗粒在轴向和径向的混合。由于循环流化床颗粒的混合是一个非常复杂的现象,目前的研究工作很少。

颗粒在循环流化床内的轴向混合,主要是由于颗粒聚集沿床层轴向滑落,以及在边壁区颗粒向下流动所造成的。由于实验所用设备、运行条件和实验方法的差异,因此所测得的轴向扩散系数差别很大,甚至存在数量级的差别,尚未出现普遍适用的计算公式。一般认为,颗粒轴向扩散系数受颗粒循环速率的影响较小。在颗粒入口区,颗粒的混合与颗粒性质无关^[23]。

颗粒的径向混合主要是由于气固流动径向的不均匀性及中心相对稀薄区与边壁密区之间的粒子交换所造成的。Van Zoonen 认为稀相区内颗粒的径向扩散系数与气体扩散系数具有同一数量级^[24],认为颗粒径向扩散系数为 $D_{sr} = 30 \pm 10 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。在床存量一定的情况下,发现流化风速对横向扩散系数影响不大,而增加床料量将导致横向扩散系数的增大^[25]。

6 流动问题

循环流化床锅炉与其它锅炉的根本区别在于其炉内有大量的固体物料在循环。循环物料无论对床内的燃烧还是传热都有极大影响。研究表明,物料对传热的影响主要是近壁区,而近壁区物料浓度是贴壁下降流的表现,其大小反映了内循环量。因此了解近壁区的物料浓度具有重要的意义。

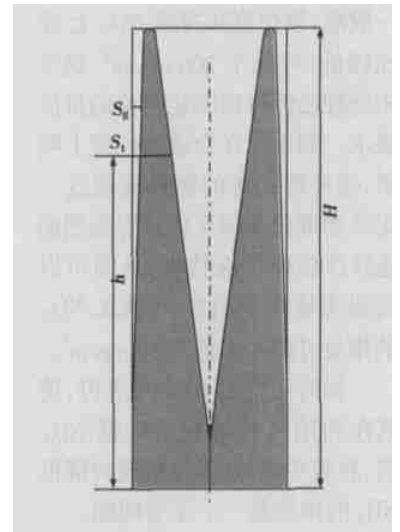


图5 双环模型

近壁区浓度很高的物料发生随机的团聚现象,很难比较合理地进行数学描述,而采用环核模型。通常假设中间是上升流,固体物料浓度较低;边壁区的浓度较高,是下降流^[26],即为固体边界层。人们发现物料边界层距离壁面有一层气体边界层,但气体边界层的厚度较小^[27],距离壁面在5 mm左右,而固体边界层厚度与床体当量直径、床雷诺数、床高及所在的距离布风板高度有关。测量表明,燃烧室中实际上存在着双区,可以描述图5所示的双环模型,其中气体边界层的厚度

S_g 、固体边界层 S_t 分别为^[28]：

$$S_g = \begin{cases} 0 & h \leq 5 \text{ m} \\ 0.004(h-4) & h > 5 \text{ m} \end{cases}$$

$$\frac{S_t}{D_t} = 0.49Re^{-0.23} \left(\frac{H}{D_t}\right)^{0.20} \times$$

$$\left(\frac{H-h}{H}\right)^{0.88}$$

但是容量放大之后, 边界层的描述需要做进一步的研究。

7 污染物排放

循环流化床中分级送风低温燃烧, 有效地抑制 NO_x 的生成。一般地, 锅炉直接排放 NO_x 已经比较低, 可低于 200 mg/m^3 , 烟气未处理已经可以满足严格的排放要求。如果能在合适的位置上喷氨, 循环流化床的循环灰使这一无外加催化剂的反应具有强烈的选择性催化反应特性, 从而可以实现无催化剂消耗的 SCR, NO_x 的排放可进一步低于 50 mg/m^3 。

如何调整循环灰的成份, 使其在利用氨气或尿素降低 NO_x 后, 在较少 NO_x 排放的同时降低 NH_3 的排放是一个主要问题。

无疑, 循环流化床锅炉中添加石灰石, 在燃烧过程中同时脱硫, 可以有效地降低 SO_x 排放, 低成本满足 SO_x 排放要求。但是, 一般 Ca/S 比较高, 远高于湿法烟气脱硫的情况, 增加了运行成本。如何降低 Ca/S 比, 进一步提高脱硫效率是该技术面临的一个重要问题。

氧化亚氮 (N_2O) 能破坏臭氧层, 是一种温室效应气体, N_2O 对全球变暖的温室效应有 20% 的贡献。近年来燃烧过程中 N_2O 的排放引起重视。 N_2O 的稳定性使之成为大气中含量居第二的含氮物质。由于常规的燃烧设备中 N_2O 的排放值很低, 过去对由化

石燃料燃烧产生的 N_2O 问题重视不够, 至今世界上各国还没有关于 N_2O 排放的控制标准。但随着社会的发展, 逐渐引起人们对 N_2O 的重视。

煤中氮官能团的变迁取决于热解条件的苛刻程度^[29]。HCN 是高温下最重要的含氮热解产物; 而 NH_3 是低温下最重要的含氮热解产物。在燃烧过程中, 随着煤颗粒温度的升高, 煤中的小分子结构析出, HCN 和 NH_3 从煤中释放出来, 最终生成 NO 、 N_2O 和 N_2 。但氮向 N_2O 转化的机理目前还不清晰, 研究者在大量实验研究的基础上提出了多种不同的观点。Winter 等人提出了 HCN 在焦炭氮转化中的重要作用, HCN 的均相反应途径是主要来源^[30]。Sarofim 等发现氧气对焦炭氮向 N_2O 的转化是必需的, 根据实验结果认为 N_2O 是非均相反应的结果^[30]。De Soete 在后来的研究中修正了自己以前的观点而赞同 N_2O 非均相生成机理, 并提出 (—CNO) 是中间物质的看法^[32]。进一步的研究表明, 在焦炭燃烧过程中 HCN 的氧化反应是焦炭氮向 N_2O 转化的一条途径, NO 与焦炭表面的多相反应也是 N_2O 的一条生成途径。HCN 的析出是焦炭燃烧过程中进一步脱挥发份的结果, 当焦炭脱挥发分过程结束后, N_2O 来源于 NO 和焦炭表面的气固非均相反应^[33]。

煤中氮的含量和氮存在的形式和结构随着煤种的不同而存在差异, 从而影响 N_2O 的生成; 温度对控制氧化亚氮的生成有决定性的影响, 低于 $850 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度对氧化亚氮生成是非常适宜的。温度的影响主要体现在它会改变

N_2O 和 NO_x 的比例, 而这样改变燃烧温度从根本上不会减少氮氧化物排放量的总数, 只会促进氮氧化物之间的转化。当温度升高时, 氧化亚氮的浓度首先会升高, 并随着温度的进一步升高而下降, 这是氧化亚氮生成和分解两个反应过程同时进行的结果。焦炭表面的氧化亚氮非均相反应相比较而言不是非常显著, 颗粒表面的反应受气体扩散的控制, 反应生成的氧化亚氮和焦炭没有足够的接触时间。燃烧温度对氧化亚氮排放的影响如图 6 所示。

应该注意到作为脱硫剂的石灰石对氧化亚氮的分解和 HCN 向 NH_3 的转化有催化作用, 使挥发份氮和焦炭氮向 NO_x 转化, 但总的氮氧化物量并没有显著变化。

8 分离器放大及外置换热器

低成本的绝热圆形旋风分离器是大型循环流化床锅炉的最佳选择之一。随着容量放大, 分离器的数量和直径将会增加。目前用于循环流化床锅炉的旋风分离器最大直径已经超过 10 m ^[34], 直径在此范围内均无大的风险。

容量超过 600 MW 的亚临界 CFB 以及参数为超临界时, 外置换热床是必需的设备, 因此换热床在更大容量的循环流化床锅炉研制中应给予重视。外置换热器的应用将会有效地调节床温, 但要注意到换热床的使用条件^[35]。

9 整体数学模型描述动态过程及仿真

如前所述, 循环流化床锅炉作为一种大型复杂动力设备, 其

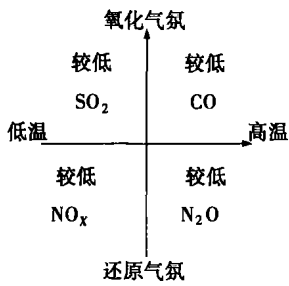


图6 条件对 N_2O 生成的影响

内部过程包括燃烧、气固两相流动、传热和各种复杂化学反应等,其内在规律尚不被人们完全了解,因此在循环流化床锅炉的研究、开发尤其是大型化研究中,数学模型必然成为一种不可缺的研究方法和工具。

数学模型研究的目的是研究影响循环流化床最终性能的各种影响因素,并建立这些影响因素与外观性能参数间的作用关系,从而获得一个能够研究和试验各种设计结构和尺寸、各种运行条件以及不同部件性能条件下循环流化床性能的有力工具。

静态数学模型研究在一定的运行条件下,达到稳定运行时,循环流化床的性能表现为稳定工作状态,称为稳态工作点。稳态工作点与时间变化无关,仅同流化床本身特性以及运行条件有关。静态数学模型一般用于设计方案的比较和改进以及放大设计的性能预测。动态数学模型研究的则是在运行条件发生变化时,性能随时间的变化过程,亦即由一个稳态点向下一个稳态点变化的过渡过程,其目的在于寻找各种扰动条件下,性能动态变化的规律,从而为控制策略的确定以及控制系统的研制打下基础。此外,用于操作人员培训的实时仿真装置的研制也离不开动态数学模型。

10 结束语

综上所述,目前循环流化床燃烧技术已经比较成熟,但仍然存在问题需要进一步研究,如中国煤种多样性问题的燃烧效率问题、超临界参数条件下的水循环问题、大床截面条件下的颗粒和气体在气固两相流中的扩散问题、循环流化床条件下的污染物排放及脱除问题和边壁区流动问题等。这些问题的深入研究将推进循环流化床燃烧技术的完善和发展。

参考文献:

- [1] MOE T A, MANN M D, HENDERSON A K, et al. Pilot scale CFBC systems: A valuable tool for design and permitting [A]. In: Avidan A A, ed. Proc 4th Int Conf CFB [C]. USA: Pennsylvania, ASME Press, 1993: 116—122.
- [2] GLICKSMAN L R, HYRE M, WEST-PHALEN D. Verification of scaling relations for circulating fluidized beds [A]. In: Rubow L N, Commonwealth G, eds. Proc 4th Int Conf CFB [C]. USA: San Diego, ASME Press, 1993: 69—70.
- [3] HORIO M. Hydrodynamics of circulating fluidization: present status and research needs [A]. In: Basu P, Large J F, eds. Proc 1st Int Conf CFB [C]. Oxford: Pergamon Press, 1991: 3—14.
- [4] DIET P W. Collection efficiency of cyclone separators [J]. *AIChE*, 1981, 27 (6): 125—176.
- [5] 张建胜, 吕俊复, 金晓钟, 等. 75 t/h 水冷方型分离循环流化床燃烧室浓度分布 [J]. 清华大学学报, 1998, 38(5): 11—14.
- [6] BURS J M, LAFANECHERE L, JESTIN L. Basic design studies for a 600 MW FBC boiler (270 bar, $2 \times 600^\circ\text{C}$) [A]. In: Robert B R, ed. Proc of the 15th Int Conf CFB [C], Georgia: Savannah, 1999: 16—19.

- [7] ZHANG JIANGSHENG, LU JUNFU, YUE GUANGXI, et al. Investigation on the circulating fluidized bed boiler Design [A]. Proc of CCC on Boiler Technology [C], Beijing, 2002: 34—37.
- [8] KEFER V. Critical heat flux (CHF) and post-CHF heat transfer in horizontal and inclined evaporator tubes [J]. *Int J Multiphase Flow*, 1989, 15 (3): 385—392.
- [9] SKOWYRA R S, CZARNECKI T S, SUN C Y, et al. Design of a supercritical sliding pressure circulating bed boiler with vertical water walls [A]. In: Rubow L N, ed. Proc 13th Int Conf on FBC [C], New York: ASME Press, 1995: 17—25.
- [10] 辛建, 吕俊复, 岳光溪, 等. 发展超临界循环流化床的讨论 [J]. 热能动力工程, 2002, 17(4): 344—348.
- [11] JIN X, LU J, ZHANG J. Experimental investigation on heat transfer in industrial-scale circulating fluidized bed boilers [A]. In: Werther J, ed. Proc 6th Int Conf of CFB [C]. New York: ASME, 1999: 356—361.
- [12] 郑恰余, 刘信刚, 金燕. 循环流化床锅炉燃烧室内焦炭粒子燃烧特性的研究 [J]. 工程热物理论, 1995, 16 (1): 106—110.
- [13] LI YONG, YUE GUANGXI, LU JUNFU, et al. An investigation of carbon loss of boilers burning hard coals [A]. In: Donald W G, Donald L B, eds. Proc 16th Int Conf FBC [C], Nevada: ASME, 2001.
- [14] DALLAS W T, IQBAL A. An update of operating experiences burning petroleum coke in a utility scale CFB the NISCO cogeneration project [A]. In: Preto F D S, ed. Proc 14th Int Conf FBC [C]. Vancouver, ASME, 1997: 57—70.
- [15] 王智微, 张岩丰, 张彦军. 循环流化床锅炉燃料适应性的研究分析 [J]. 锅炉制造, 2002, 1: 1—3.
- [16] SENNECA O, RUSSO P, SALATINO P, et al. The relevance of thermal annealing to the evolution of coal char gasification reactivity [J]. *Carbon*, 1997, 35 (1): 141—151.
- [17] JIN X, LU J, YUE G. Gas concentration profiles in the furnace of large CFB boilers with water-cooled square separator

- [A]. In: Cai R. ed. **Proc 1st Int Conf Engineering Thermophysics** [C], Beijing, 1999, 286—275.
- [18] XIN JIAN, LU JUNFU, LU JILING, et al. Fragmentation behavior of the large particle during coal combustion [J]. **Journal of Basic Science and Engineering**, 2002, 10(2):182—189.
- [19] LI J, WU P. A study on axial gas mixing in a circulating fluidized bed [A]. In: Basu P, Large J F, eds. **Proc of the 2nd Int Conf on CFB** [C]. Oxford: Pergamon Press, 1988; 444—446.
- [20] WERTHER J, HARTGE E U. Radial gas mixing in the upper dilute core of a circulating fluidized bed [J]. **Powder Technology**, 1992, 70:293—301.
- [21] KRUSE M. A two-dimensional model for gas mixing in the upper dilute zone of a circulating fluidized bed [J]. **The Can Jour of Chem Eng**, 1995, 73: 620—634.
- [22] GAYAN P, DIEGO L F, ADANEZ J. Radial gas mixing in a circulating fluidized bed [J]. **Power Technology**, 1997, 94: 163—171.
- [23] ADAMS C K. Gas mixing in fast fluidized beds [A]. In: Basu P, Large J F, eds. **Proc of 2nd Int Conf on CFB** [C]. Oxford: Pergamon Press, 1988; 384—395.
- [24] RHODES M J, ZHOU S, HIRAMA T, et al. Effects of operating conditions on longitudinal solids mixing in a circulating fluidized bed riser [J]. **AIChE**, 1991, 37(10):1450—1458.
- [25] YANG HAI RUI, LU JUNFU, LIU QI-NG, et al. Lateral solids Mixing in the dense bed of CFB Boiler [J]. **Journal of Chem Eng**, 2002, 10(4): 490—493.
- [26] HARTGE E U, RENSNER D, WERTHER J. Solid concentration and velocity patterns in circulating fluidized beds [A]. In: Pasu P, Large J F, eds. **Proc 2nd Int Conf CFB** [C], Oxford: Pergamon Press, 1998; 165—180.
- [27] LECKNER B, GOLRIZ M R, ZHANG W, et al. Boundary layer-first measurement in the 12 MW research plant in Chalmers University [A]. In: Anthony E J, ed. **Proc 10th Int Conf FBC** [C], Montreal: ASME, 1991; 771—776.
- [28] JAMES MAITLAND, YORAM SCHAKER. Design of the 200 MW tonghae thermal power plant circulating fluidized bed steam generator [A]. In: Preto F D S, ed. **Proc 14th Int Conf FBC** [C], New York: ASME, 1997. 191—196.
- [29] 吕俊复, 张建胜, 郭庆杰, 等. 循环流化床锅炉燃烧室边界层的实验研究 [J]. **热能动力工程**, 2001, 16(1): 20—22.
- [30] MOLINA A, EDDINGS E G. Char nitrogen conversion: Implications to emissions from coal-fired utility boilers [J]. **Prog Energy Combust Sci**, 2000, 26: 507—531.
- [31] WINTER F, WARTH C, LOFFLER G, et al. The NO and N₂O formation mechanism during devolatilization and char comb under fluidized-bed conditions [A]. **Twenty sixth Symp (Int) on Comb Pitt** [C]. PA: The Comb Inst, 1996. 3325—3334.
- [32] GOEL S, ZHANG B, SAROFIM A. NO and N₂O formation during char combustion: Is it HCN or surface attached nitrogen [J]. **Combustion and Flame**, 1996, 104:213—217.
- [33] DE SOETE, CROSET E, RICHARD J R. Heterogeneous formation of nitrous oxide from char-bound nitrogen [J]. **Combustion and Flame**, 1999, 117: 140—154.
- [34] REN W, LU J, YUE G. Effect of char preparation temperature on the evolution of nitrogen-containing species during char oxidation at fluidized bed conditions [A]. In: Gaulk M X, ed. **Proc 7th Int Conf CFB** [C]. Canada: 2002. 773—780.
- [35] LASKAWIEC J, KRZYWOSZYNSKI W, WALKOWIAK R. Design and operation experience of 230 MW CFB boilers at tur-ow power plant in poland [A]. In: Robert B R, ed. **Proc 15th Int Conf FBC** [C], New York: ASME, 1999. 122—134.

磨削加工涡轮零件的新方法

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2003年5月号报道,美国伊利诺伊州布达莱市 Abrasive-Form (磨削成形)公司开发了外源滑移进给磨削加工新方法。它是一种用于诸如压气机、涡轮叶片等大批量生产涡轮零件的加工过程。

利用滑移进给磨削达到的表面光洁度优于普通磨削方法得到的光洁度,并且此过程不会留下毛刺。

滑移进给磨削加工的优点是:由于滑移进给过程能保持十分严格的公差,而改进了零件的质量;因为零件是在硬化后磨削,所以在热处理时消除了零件的变形;由于过程保留了轻微的残余压缩应力而提高了抗疲劳性,缩短了从订货到交货之间的时间;可应用于任何材料,如钢、硬质合金和陶瓷。本方法是磨削加工叶片叶身和叶片榫头的理想方法。

(吉桂明 供稿)

复杂反应流自适应化学理论计算的研究现状 = **The Present Status of Research on an Adaptive Chemistry (AdapChem) Concept for Calculating Complex Reaction Flows** [刊, 汉] / QIAO Yu, XU Ming-hou (National Key Laboratory of Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), Pisi Lu (Department of Chemical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Ave., Cambridge, MA 02139), // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2004, 19(4). — 331~335.

Professor Green of the Department of Chemical Engineering under the Massachusetts Institute of Technology has proposed an adaptive chemistry (AdapChem) concept, under which by the use of a consistent splitting method conservation equations can be divided into two organic parts, namely, a chemical equation and a flow equation. Depending on different reaction conditions, the above method makes it possible to perform in-domain numerical simulations of non-complex detailed and elementary reaction models by using a multitude of simplified chemical reaction models. As a result, an effective approach is provided for avoiding the loss of efficiency under the condition of retaining chemical precision. However, to further improve AdapChem, it is necessary to introduce a radiation model, which has not been taken into account previously. In this connection, the authors have employed a discrete coordinate method. The simulation results of a CH₄/air flame have shown that with the radiation model being incorporated the graphical expression of calculation results did not undergo significant changes and there was also a rational reduction in temperatures. **Key words:** adaptive chemistry, consistent splitting method, simplified model, discrete coordinate method.

循环流化床燃烧技术的研究展望 = **Prospective Research Progress of Combustion Technology for Circulating Fluidized Beds** [刊, 汉] / YU Long (Harbin Boiler Works Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150040), LU Jun-fu, YUE Guang-xi (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), WANG Zhi-wei (National Thermal Power Research Institute, Xi'an, China, Post Code: 710032) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2004, 19(4). — 336~342.

Some major issues currently receiving focused attention are addressed, which are mainly concerned with the further development of circulating fluidized-bed combustion technology. They include: combustion efficiency achievable when burning various ranks of coal, water circulation during operations with supercritical parameters, the diffusion of particles and gases in gas-solid dual-phase flows under the condition of large bed sections, emissions of NO_x and SO₂ and their control, flow problems near side-wall zones, etc. **Key words:** circulating fluidized bed, boiler, prospective research progress.

应用全息谱技术诊断热变形不均匀引起的振动故障 = **Vibration Failures Due to the Non-uniform Thermal Deformation Diagnosed by the Use of Hologram Spectral Techniques** [刊, 汉] / LIU Shi, QU Liang-sheng (Intelligent Instrumentation and Monitoring-diagnosis Research Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2004, 19(4). — 343~346.

When a traditional method based on FFT (Fast Fourier Transformation) frequency spectrum analysis is used, it is very difficult to effectively differentiate between the thermal effects-induced serious vibration problems and rotor loss-of-balance failures occurring in a turbogenerator. With the help of a rotor model built by the authors the difference between the above two types of problem and failure is analyzed from a theoretical viewpoint. Meanwhile, these failures were identified and differentiated by making use of hologram differential spectrum technology and an initial-phase point analysis method. Specific cases in engineering applications have verified the effectiveness of the above-mentioned method. **Key words:** vibration, failure diagnosis, hologram differential spectrum.

超临界汽轮机再热第一级叶片固粒冲蚀特性的数值分析 = **Numerical Analysis of the Erosion Characteristics of Solid Particles in the First Reheat Stage Blades of a Supercritical Steam Turbine** [刊, 汉] / DAI Liping, YU Mao-zheng, WANG Xian-gang, et al (National Key Laboratory of Multi-phase Flows in Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2004, 19(4). — 347~350.

The three-dimensional motion characteristics of solid particles in the first reheat stage of a supercritical steam turbine were