

开发循环流化床锅炉的新型分离器

何佩敖

(哈尔滨电站设备成套设计研究所)

〔摘要〕 本文提出了循环流化床新型分离器的设想与建议,以便开发新型的分离器,以取代庞大的旋风分离器。

关键词 循环流化床锅炉 分离器

1 前言

循环流化床锅炉由于具有能用劣质燃料、污染物排放量低等优点已越来越受到世界各国的重视。作为循环流化床锅炉的主要部件——分离器对锅炉燃烧效率的好坏、循环倍率的大小、锅炉蒸汽参数和出力的高低起着至关重要的作用。目前国外循环流化床

锅炉的主要制造厂家(如德国的 Lurgi 公司,芬兰的 Ahlstrom 公司)的特点之一是采用高、大的旋风分离器。这类分离器的效率极高,可以达到 99% 以上。但是,随着锅炉容量的增加,旋风分离器的直径显著增大。Ahlstrom 公司 Pyroflow 型随循环流化床锅炉(CFB)容量的增加,旋风分离器直径的增大情况见表 1。

表 1 Pyroflow CFB 炉旋风分离器直径随锅炉容量增加情况

厂名	启动年份	锅炉出力 (当量电功率, MW)	炉膛尺寸 (深×宽, m)	旋风筒 (数量×直径)
试验台	1976	0.5	0.65(直径)	1×1.5
Phlava	1979	5	3×3	1×4
Kaattua	1981	20	4×7	2×4
Colorado Ute	1987	110	7×7*	2×7
Kajani	1989	80	7×14	2×7
Seinajoki	1990	125	7×20	3×7
Nova Scotia	1993	165	7.5×18	2×8

* —— 双炉膛

收稿日期 1993-03-15

本文联系人 何佩敖 男 58 高级工程师 150040 哈尔滨市动力区旭升街 9 号

由表 1 可见,一台电功率 110 MW 的 CFB 炉,其单只分离器直径达 7 m。Lurgi 公司和美国燃烧工程公司(CE)合作设计的 500 MW CFB 炉方案的旋风筒直径达 9.15 m。这样庞大的高温旋风筒要求用的厚度为 300 多毫米的耐火防磨层和 100 多毫米的绝热层会使锅炉热惯性剧增,冷态启动时间增长(一般要 10 多小时以上),负荷变化速度慢。较大直径的旋风分离器不仅尺寸大(与炉膛本身不相上下),而且结构复杂笨重、造价高、流阻大、运行能耗大(旋风筒阻力一般大于 1 400 Pa)、分离效率亦会变差(因为灰粒的分离速度与气流的平均旋转半径即旋风筒的半径成反比),还会给制造、现场安装、吊挂或支承、布置、运行检修、维护等带来一系列问题。高温旋风分离器如不采用外置式换热器,而是采用 Cirofluid 型利用循环物料来有效地调节锅炉负荷和炉床温度,所需的循环倍率就很高(如分离效率 > 0.98 以上,则要求循环倍率 $R > 49$),受热面磨损问题更为突出。由于上述的缺点,许多锅炉制造厂家和研究者都在大力研究开发各种新型的气固分离器,积极寻求一种新型、高效率、低阻力、结构简单、布置紧凑的分离器来取代旋风分离器。

2 炉内槽型分离器

2.1 德国 Bohn 教授与 Steinmuller 公司、Essen 大学合作共同研制出一种惯性式斜向槽型分离器,成功地运用在一台 52 t/h(过热汽温 480℃,汽压 7.4 MPa) CFB 炉上。气固两相流经槽型分离器结构与图 1 相同,这种斜向 45° 倾斜的槽式分离器分三排布置在炉膛上部,材料用 Eng Cr800 或硬质 Ni-Cr 钢材。对含尘气流而言,每一个阻力元件都是一个分离器,三排分离器总的效率可达 90% 以上(粒子负荷为 12 kg/kg(烟气))。如炉膛越瘦

越高,其重力分离的作用越大,炉膛本身的重力分离效率可达 30%。如炉膛高度低于 3~4 m,则炉膛内几乎无重力分离的作用,因为这时气流还处于紊流状态。

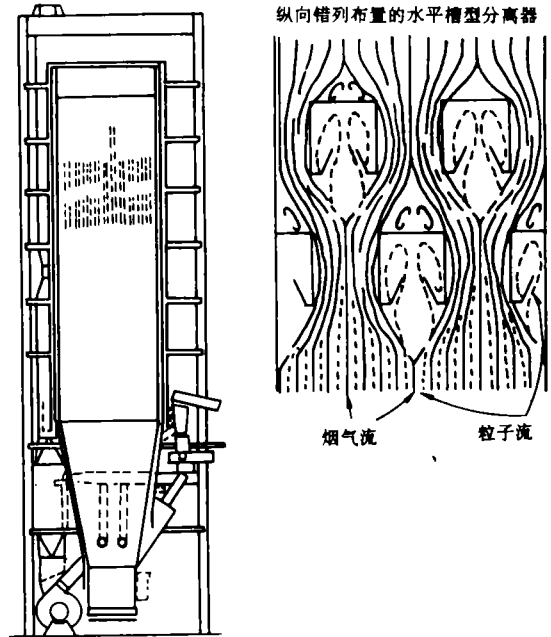


图 1 德国 CFB 炉采用的一种新型固体粒子惯性分离器

2.2 作者认为,上述的这种布置方式有如下缺点:

2.2.1 斜向槽型分离器只是单侧向后墙倾斜,被分离下来的物料将全部向后墙流下,将使靠近后墙局部区域的固体粒子浓度过大。造成整个床面上粒子浓度分布不均;

2.2.2 后墙水冷壁磨损严重。

2.3 为了改进上述设计,德国又将斜向槽型分离器改为纵向错列布置的水平槽型分离器^[1],布置在一台已投运的 CFB 炉的主床上部(图 1)。

这种槽型分离器也可以设计成为水冷夹

层式,采用 $\delta = 6 \sim 8$ 碳钢钢板拼焊而成。这样就不必要用耐热合金钢。在分离器迎风面应采取一些防磨措施(如作表面渗碳处理,或焊一层防磨盖板等)。

3 “锚型”平面流惯性分离器

瑞典 Studsvik 型迷宫碰撞式分离器结构新颖、布置紧凑、阻力效低,用它可以取代庞大的旋风分离器,因而引起人们较大的关注。它布置在过热器水平烟道区段,有 4~7 排垂直错列槽钢,槽钢材料用耐热合金钢。据悉:1989 年投运的最大容量为 100 t/h CFB 炉,1990 年还有一台热功率为 180 MW 的 CFB 炉投运。此种型式的 CFB 炉的燃烧效率为(97.5~99)%,燃料粒度允许小于 25 mm。为了取代旋风分离器,寻求较简单的低阻力、高效的分离器,我国也相继开发了一些新型的装置在过热器区段的平面流惯性分离器:如清华大学的“S”型碳化硅分离器;东方锅炉工业公司与西安交大合作研制的半圆形分离器等^[9]。可是根据一些使用单位反映,实际分离器效率并不高((50~60)%)。这是因为分离器效率较高的炉床上部的第一级惯性分离器或是向下 180°转弯多的惯性分离器已经将大部分的粗颗粒分离下来,留给第二级惯性分离器捕捉细颗粒的效率自然要低一些;另一方面,也可能是第二级惯性分离器的某些设计参数和结构选用不当,如东方锅炉工业公司在 65 t/h CFB 炉采用的不锈钢半圆形分离器对灰粒的捕捉率不高。原因之一是流线轨迹不理想,估计“二次携带”也较大,循环倍率也不高(只有 10~18)。而清华大学的“S”型分离器的分离效率可能比半圆形的分离器要高,因为气体流经 S 型分离器时作大转角旋转,固体颗粒作最接近直线的惯性运动,其加速能量亦不高,设计选用的循环倍率和烟速也较高。但是,上述的这两种平面流分离器都

存在着同样的问题:即都要占据一个水平烟道空间,使过热器布置不方便;而且,随着锅炉容量和烟气体积的增加,过热器区段烟气通道高度也要相应增大(对 20 MW 的 Π 型 CFB 炉,烟道高度约为 2.5~4.0 m;对 50~165 MW 的 Π 型 CFB 炉,水平对流烟道高度可能增大至 4~6 m 以上),这样,会导至垂直布置的惯性分离器下部烟气流对上部分离出来的灰粒的“二次携带”问题更加突出。半圆形钢管如过长,钢性不够,在高温下(~850℃)还可能发生弯曲、扭转与变形问题。“S”型碳化硅分离器如叠加过高,稳定性就会愈差,载荷也较重,整个碳化硅组件的支承和膨胀问题都较难处理。而且碳化硅材料价格也较昂贵。鉴于以上所述的种种问题,作者提出了一种新型结构——“锚型”平面流惯性分离器(图 3),其特点如下:

3.1 可将一部分对流过热器与“锚型”平面流惯性分离器合二为一。将这部分圆管过热器改为鳍片管,在鳍片的两端焊上两个半圆形钢管,呈“锚型”螃蟹状。鳍片管过热器和普通圆形过热器管束一样,既可参与对烟气的对流传热,又可作为分离器的固定支承,从而使“锚型”分离器有较强的“钢性”,变形较小;

3.2 因为“锚型”分离元件与鳍片管过热器是一个整体,吊挂在炉顶上,能向下自由膨胀。另外也不需要象“S”型平面流分离器或半圆形分离器那样需要专门在水平烟道上留出相当大的一个空间来布置“平面流分离器”。这样,可使 CFB 炉布置紧凑,结构简单,可靠。

但是,这种改进结构也并不理想,因为迎向来自主床下部气流的第一排水平槽型分离器捕获到的灰粒在靠其本身的重力作用向下返回炉床时,其中的一部分灰粒又有可能被来自主床下部的上升气流重新携带至第二排分离器。依次类推,第二排分离器捕获到的一部分灰粒又可能被重新携带至第三排……。

而且,这种改造的水平槽型分离器只能用于炉膛截面尺寸较小的中等容量的 CFB 炉上,随着锅炉容量的增加,炉膛尺寸加大(如 420 t/h CFB 炉的双炉膛截面尺寸为 7.3×7.0 m),槽型分离器较长,在 $\sim 850^\circ\text{C}$ 高温烟气中,没有支承固定的长条型槽钢就可能会扭转、弯曲和变形,使流线不能正对分离器开口位置,降低了分离效率。

3.3 为了避免上述的斜向槽式分离器和水平槽型分离器的缺点,作者提出了一种新型的“伞型”惯性分离器(图 2),其特点如下:

3.3.1 “伞型”斜向槽布置方式,可将捕获的灰粒沿着斜向槽流向前后墙,再均匀地撒到主床上部,气流“二次携带”较少,分离效果较佳。

3.3.2 曾经考虑过用前后墙水冷壁管拉成“伞型”状作为支承管,但要用很多三通管,结构也较为复杂。“伞型”管如被磨穿,对锅炉运行影响较大。后来采用 $\Phi 60 \times 6$ 的单独从炉外引入炉膛的鳍片管排作为支承结构,焊在

槽型分离器背面,可防止条型槽钢在高温下的扭转,弯曲和变形,还可以起到冷却保护作用。管内的循环水可以引自省煤器入口前的分支管,出口端接入汽包水侧;也可以引用化学除盐水,出口端接到电厂的除氧器循环水系统中,作为一个单独的循环回路。在设计时要保证管内水流速不小于 0.5 m/s ,炉膛热力计算时应考虑到这部分管排的吸热量。

3.3.3 分离器虽然布置在主床上部 $\sim 850^\circ\text{C}$ 的稀相区,仍会受到灰粒的碰撞和反弹而冲蚀磨损,特别是分离器入口磨损较为严重。建议槽钢材料选用 Ni-Cr 合金钢,再作表面渗碳处理,可将硬度提高到 $61 \sim 67 \text{ HRC}$ 。也可以在槽钢分离器迎风面的易磨损部位用高铬合金焊条铺焊高抗磨的合金复层,这也是一种经济有效的措施。因为在新设计中采用了水冷鳍片管排加强了槽钢分离器的支承固定,对槽钢选用以上材料和表面处理就行,不必要选用昂贵的硬质合金材料。

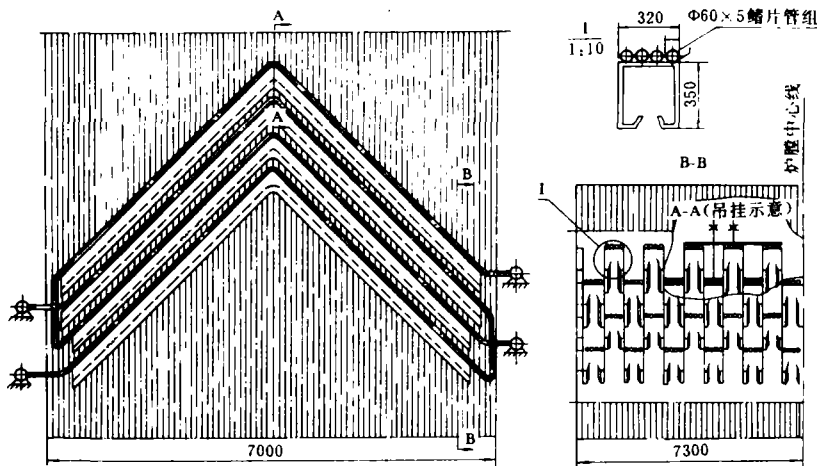


图 2 “伞型”惯性槽式分离器结构示意图

3.3.4 在“伞型”惯性分离器顶部设有吊杆,同一排每三个槽型分离器分为一个吊挂组,如以炉膛深×宽为 7000×7300 mm 计,则在炉膛深度方向每一排可分为 4 个吊挂组。该炉的“伞型”分离器只吊挂最上面的两排,共有 8 个吊挂点。吊杆材料可选用耐高温的 $\Phi 42$ 的 30CrMoA 合金钢,外部用 $\Phi 60 \times 6$ 的防磨套管保护。吊杆固定在炉顶上部,在每个吊杆上部可加装蝶型弹簧来吸收各吊杆的热胀差值。此外,在弯曲部份的鳍片管全部采用 $\Phi 60 \times 5$ 的光管,便于弯制和消除积灰。

(大于 30 kg/m^3),炉膛上部烟速应不低于 8 m/s ,可捕集 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 以上的灰粒。预计四排错列的槽型分离器的分离效率可达(50~85)%以上,阻力较小($\Delta P < 400 \text{ Pa}$)。

3.4 鳍片管过热器采用七排错列布置方式,与一般顺列布置的对流过热器相比,传热效果较好;

3.5 “锚型”分离器有较佳的流线,预计它的捕捉率较高,“二次携带”也会减轻。惯性分离器的试验表明,当粒子浓度较高,烟速大时,粒子靠惯性撞击分离器的效果较好。表 2 列出 Babcock & Wilcox 公司设计的有 U 型管束惯性分离器的 CFB 炉的一些设计数据。

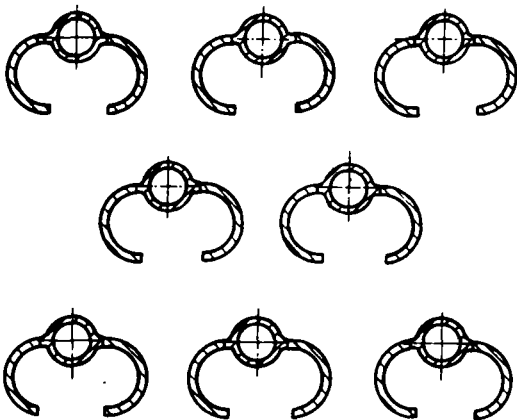


图 3 “锚型”平面流惯性分离器

对于气固两相流绕过这种“伞型”惯性分离器时,当颗粒相是稀相区,用拉格朗日法考察颗粒的运动,而用欧拉法考察气相运动是最合适的⁽²⁾。用上述的理论计算可以得出不同尺寸颗粒的运动轨迹,小尺寸颗粒由于其惯性较小易受气流的影响而绕过槽型分离器,没有与槽钢发生碰撞;大尺寸颗粒和来流速度具有惯性较大、动量也大、碰撞频率会更高。因此,这种“伞型”槽型分离器,较适合于高循环倍率(大于 25~30)的 CFB 炉,要求炉床上部分分离器入口前的固体粒子浓度较高

表 2

炉膛	平均烟速(m/s)	7.5
	平均浓度(kg/m ³)	33.6
吸热量分配	炉膛(%)	55
	分离器(%)	2
	外部换热器(%)	
	后部烟道(%)	43
循环倍率*		43.1
分离器	型式	U型管束
	数量	7排

注: * 循环倍率取决于燃料和石灰石特性,循环倍率定义:平均循环物料除以平均给料量

对“锚型”平面流惯性分离器而言,在入口前也应选用较高的循环倍率、较高的粒子浓度和较大的烟速。选用 7 排鳍片管错列布置方式。预计这种新型分离器的分离效率不会低于 70%。

从最近资料⁽²⁾获悉:一台装有旋风分离器的 CFB 炉已装于美国伊利诺斯州的 Lauhoff Grain 工地(图 4),该炉就是用 U 型

槽钢梁惯性分离器取代了旋风分离器。这也是当今国外CFB炉发展趋势之一。它与作者提出的“锚型”惯性分离器的指导思想相吻合。

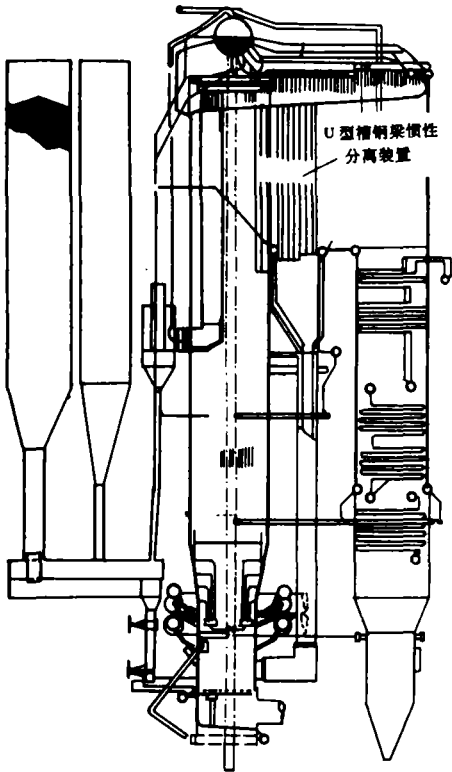


图4 有U型槽钢梁惯性分离装置的CFB燃煤锅炉

4 水平旋涡和百叶窗相结合的新型分离器

本设计的指导思想是在CFB上采用高

循环倍率(25~35)、高流化速度(5~10 m/s)、力求最先在主床上部的高温稀相区(~850℃)用“伞型”惯性分离器(惯性力和重力作用),除去一部分高浓度的粗颗粒飞灰(大于20~50 μm以上),增强主床内固体粒子的内循环、提高床内介质的热交换和燃烧效率^[4]。待炉内热烟气流经高温辐射式过热器后,再用布置在炉膛出口后水平烟道区内的“锚型”惯性分离器除去剩余的一部分粗颗粒飞灰(20~50 μm以上)。较为保守的情况估计:假定第一级惯性分离器的分离效率 $\eta_1 = 0.5$,第二级惯性分离器的分离效率 $\eta_2 = 0.45$,则经过为两级串联布置的惯性分离器之后,分离效率 η_{1+2} 可能达到 ~0.72。然后,再在转向室布置水平旋涡和百叶窗相结合的分分离器。可以利用转向室水平旋涡作用,依靠离心力要比单纯利用惯性力或重力对灰粒具有更大的捕集分离能力,它能分离出更细小的灰粒(能捕集10~50 μm灰粒),加上随后布置在中温区的百叶窗入口处的烟气粘度较低,烟气流通截面又缩小,提高烟速更加有利于提高百叶窗分离器的效率,可以用它捕捉剩余在烟气中的中、细颗粒飞灰。假定第三级水平旋涡和百叶窗相结合的分分离器效率为0.38,则总的分离效率 $\eta_{1+2+3} = \eta_1 + (1 - \eta_1) \cdot \eta_2 + (1 - \eta_1 \cdot \eta_2) \cdot \eta_3 = 0.725 + (1 - 0.5 \times 0.45) \times 0.38 = 100\%$ 。三级串联分离器的总阻力估计约为1000 Pa。

如设计参数合适,CFB炉主床上部稀相区布置的三排斜向槽型惯性分离器效率就可达85%。“锚型”平面流惯性分离器的效率估计也可达75%。如这两级串联的惯性分离器总效率 $\eta_{1+2} = 0.96$ 。这样,就不再需要再串联布置第三级水平旋涡和百叶窗相结合的分分离器。较细的飞灰则由锅炉尾部的除尘效率高达99%以上的电器除尘器或布袋除尘器捕捉,使CFB炉简化结构,减少阻力损失。

如需要布置水平旋涡和百叶窗相结合的

新型分离器,则烟气流经转向室水平旋涡分离的效率取决于旋流数 S

$$S = \frac{\pi \cdot A \cdot D}{a \cdot b}$$

式中: A —— 偏心距
 D —— 中心筒直径
 a, b —— 烟气通口截面的宽度和长度

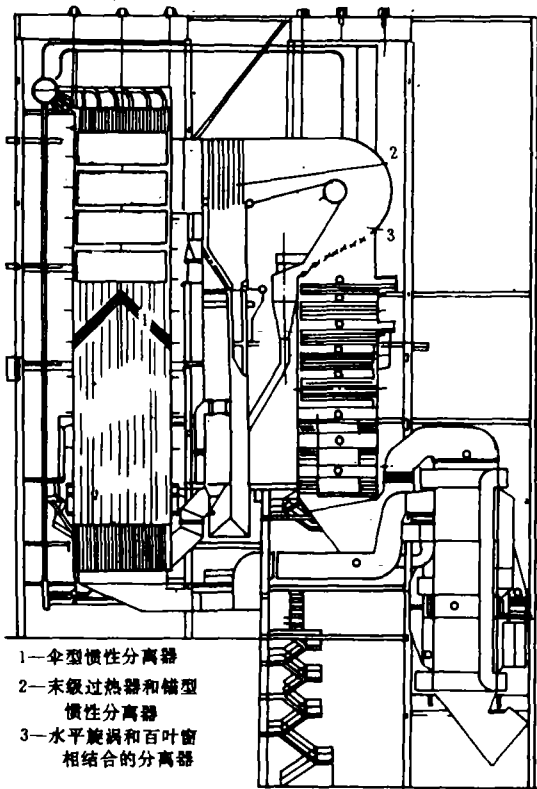


图 5 用三级新型分离器取代旋风分离器改造 420 t/h CFB 炉示意图

最佳旋流数 S 应通过试验决定。用上述的三种新型分离器取代旋风分离器改造 Colorado Ute 电厂 Pyroflow 型 CFB420 t/h 炉示

意图见图 5⁽⁶⁾。百叶窗的结构参数见图 6。

影响百叶窗工作性能的主要参数有:集灰棚的组装倾角 α , 叶片的倾角 β , 平叶片的宽度 L 和叶片之间的间距 P 。最佳结构参数⁽⁶⁾: $L/b = 0.4, P/L = 0.6, \alpha = 22^\circ, \beta = 10^\circ$ (见图 6)。烟气清洁程度取决于烟气在百叶窗窄缝中速度 W_1 对百叶窗入口处烟速 W 的比值, 可用 $W_1/W \approx 1.25$ 来校核 P/L 及 L/b 值。进入吸烟窄缝的烟气量占总烟气量的(5~7)%, 进入小型旋风分离器的入口烟速不小于 18 m/s。烟气净化率 $\eta(\%)$ 决定于百叶窗集尘效率 $\eta_{\text{百}}(\%)$ 和小型旋风分离器的效率 $\eta_{\text{旋}}(\%)$, 即

$$\eta = \frac{1}{100} \eta_{\text{百}} \cdot \eta_{\text{旋}}, \%$$

百叶窗阻力系数 $\xi \approx 2.0$, 阻力 $\approx 250 \sim 500 \text{ Pa}$ 。

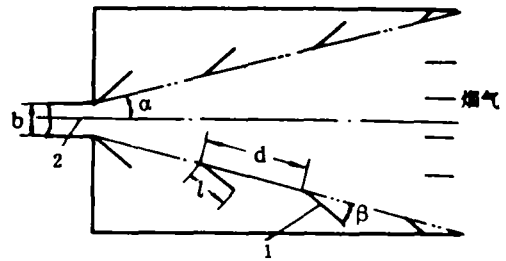


图 6 立式百叶窗集灰棚的结构参数
 1—百叶窗 2—烟气出口

5 结论

1、本文首次提出了取代庞大的旋风分离器的三级串联布置分离器的设想方案。开发结构新颖, 布置紧凑的新型高效低阻力的“伞型”分离器、“锚型”惯性分离器以及水平旋涡和百叶窗相结合的新型分离器。“伞型”分离器设置有水冷鳍片管作为固定支承, 可将捕

捉到的灰粒沿前、后墙再返回到下部主床,使整个床面的返回粒子浓度分布较均匀,提高炉内的传质与传热和燃烧效率,减少“二次携带”。“锚型”惯性分离器可与鳍片管对流过热器合而为一,组成为一个整体部件,不需要专门为在水平烟道布置分离器而单独占据空间位置。而且,条型的“锚型”分离器与过热器连在一起,吊挂和向下自由膨胀比较方便,刚性也较强,可以防止分离器在高温下变形、扭转和弯曲。锚型的流线也较佳,分离效果较好。水平旋涡和百叶窗相结合的新型分离器则是利用离心分离和惯性分离相结合的方法捕捉剩余的一部分中、细颗粒飞灰,预计这种三级串联布置的总的分离效率可达100%,总阻力估计在1000 Pa左右。

2、如经过试验调整,前两级串联的惯性分离器总的分离效率已过0.96,就不需要串联布置第三级水平旋涡和百叶窗相结合的分分离器。烟气中较细的飞灰则由锅炉尾部的除尘效率高达99%以上的电气除尘器或布袋

除尘器来捕捉,使CFB炉结构简化,阻力损失减少。

3、本文提出的上述三种新型分离器,希望能通过试验台和工业性试验后在大型CFB炉上推广应用;为淘汰庞大的旋风分离器、开发我国新颖的第三代CFB炉高效率、低阻力的新型分离器作出有益的探索。

参 考 文 献

- 1 Jason Makansi. Special Report. Fluidized-Bed Boilers. Power. 1991, (3), 15-21
- 2 樊建人. 循环流化床内灰粒子冲击管子磨损的研究. 动力工程, 1990, (3), 21-27
- 3 何佩放. 我国循环流化床锅炉技术的发展及展望. 电站系统工程, 1989, (4), 1-19
- 4 何佩放. 开发我国循环流化床锅炉的燃烧技术. 热能动力工程, 1992, 7(3), 140-146
- 5 Nucila Paves Way for Utility Application of CFB Technology. Power, 1988, (4), 39-41
- 6 胡荫平等. 立式百叶窗集尘效果的冷态模化试验研究. 动力工程, 1992, (1), 44-49

发展趋势

高温高效重型机

据“Gas Turbine World” The 1992-93 Handbook 报道,新一代高温重型工业燃气轮机的订货日益增加,一些已被安装投入商业运行。

这些重型燃机以简单循环工作时,额定功率下的效率高于36%;在以多压、再热联合循环动力装置形式工作时,其纯热效率可高达55%或更高值。这些大型机组涡轮进口温度约为1260℃,现在正推进到1288~

1299℃。例如,GE Schenectady 和法国的EGT SA公司正在研制MS9301FA型燃气轮机,在以天然气做燃料、涡轮进口温度为1288℃、排气温度为589℃时,其ISO条件下的额定功率为226.5 MW。Siemens KWU公司最新的V84.3 60-Hz燃机的额定功率为152 MW,热耗率为9970 KJ/(kW·h),或者热效率为36.1%,该燃机设计的涡轮进口温度为1300℃。(学奥 供稿)

**JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL
ENERGY AND POWER**
1993 Vol. 8 No. 5

CONTENTS

- (227) **The Research and Development of a New Type of Separator for a Circulating Fluidized Bed Boiler** He Peiao (*Harbin Power Plant Equipment Design Institute*)

The author has come up with some innovative ideas and proposals for developing a new type of separator for a circulating fluidized bed boiler. The proposed separator can be employed to replace a bulky cyclone separator currently in use. **Key words:** *circulating fluidized bed boiler, separator*

- (235) **A study on Solid Material Circulation in Circulating Fluidized Beds** Qiu Kuarong, Li Qiang (*Chinese University of Mining and Technology*)

This paper presents the results of a study on solid material circulation in circulating fluidized beds. Given are the research findings on such a variety of issues as the pressure drop of inside-standpipe negative pressure-difference mobile bed, flow resistance characteristics and gas-solid mass ratio of a U-valve. The relevant relationships have been determined with the design and checking calculation method for the circulation system being proposed. **Key words:** *circulating fluidized bed, solid material circulation*

- (239) **An Experimental Study of Flue Gas Flow Resistance in the Converging-Diverging Duct of a Cast-Iron Sectional Boiler** Wang Xiqing, Zheng Ying (*Harbin Institute of Technology*); Wu Zhigang, Qiu Yinong (*Boiler and Pressure Vessel Inspection Agency of Harbin City Labor Bureau*); Xu Keqin (*Harbin Small-Size Boiler Works*); Qiu Fuzhi, Yao Guangyu (*Harbin Foundry General Works*)

Based on the results of experimental analyses the authors have ascertained the relationship governing the variation of flue gas flow resistance in the converging-diverging duct of a cast-iron sectional boiler with Reynolds number and duct length. The Reynolds number ranges from 15000 to 50000 and the boiler section width from 150 to 220 mm. The above findings are applicable to various types of cast-iron sectional boilers currently manufactured in China. **Key words:** *converging-diverging duct, cast-iron sectional boiler, flue gas flow, structural design*

- (242) **The Design and Construction of a Circulating Fluidized Bed Boiler Furnace Lining** Ma Shuqi (*Beijing Boiler Works*)

The paper deals with the furnace lining of a circulating fluidized bed boiler from the aspects of