

磁稳流化床除尘装置的设计与验证

王迎慧, 归柯庭, 施明恒

(东南大学 洁净煤电发电及燃烧技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 介绍了一种磁稳流化床除尘装置的设计方法, 特别就装置关键部件的设计重点做了说明; 同时对影响该装置除尘效率的主要因素进行了实验验证, 实验结果表明, 保持除尘装置处于磁稳状态是获得高效除尘的关键; 床层高度、气体表现流速比等也对除尘效率有一定的影响。

关 键 词: 磁稳流化床; 除尘; 颗粒再生; 除尘效率

中图分类号: X701.2 文献标识码: A

1 前 言

煤炭作为我国的主要能源, 每年大约有 80% 以上直接用于燃烧, 燃煤释放的大量污染物, 特别是细微尘粒对环境的影响最为普遍, 因而备受重视。传统的除尘设备如旋风分离器对于粒径小于 $5 \mu\text{m}$ 的尘粒分离效率很低, 常用于含尘气体的预处理; 湿式文氏管虽然净化细微尘粒的效率很高, 但设备压降大, 且会造成二次污染, 其适用范围必然受到限制; 静电除尘器是目前燃煤电厂广泛采用的除尘设备, 但其初投资大, 且对于某些尘粒(粉尘比电阻低于 10^4 或高于 10^{11}) 处理效果不佳。而磁稳流化床兼有颗粒床和流化床两者的优点, 是一种新型的高效除尘装置。它利用外加磁场有效地抑制了流化床内气泡的产生, 加强了气固接触, 既克服了颗粒床不能连续运行的弊病, 又克服了流化床因床内大量气泡、沟流等为粉尘提供通道而使除尘效率下降的缺陷, 具有气固接触好、过滤效率高; 流通截面大、床层压降小; 颗粒更新方便、设备简单, 适合连续运行的特点。为此, 国内外许多学者都做了大量的研究, 可多数研究还停留在实验室阶段, 设计过于简单, 离工业应用很远^[1~3]。本文则着眼于工业应用, 就其关键部件的设计提出了具体的优化措施, 并得到了很好的验证。

2 磁稳流化床除尘机理

图 1 为颗粒床(a)和磁稳流化床(b)的示意图。从图 1(b)中可看到, 流化床内的磁性颗粒在外加均匀磁场的作用下沿磁力线整齐排列, 这有效地扼制了床内气泡的生成、长大^[3,4], 使床内气固两相呈现稳定的散式流化状态, 类似于膨胀的颗粒床。磁稳流化床具有与颗粒床类似的除尘机理: 床内的磁性颗粒依靠惯性碰撞、拦截、布朗扩散、重力沉降以及静电等短程效应实行对粉尘的捕集分离, 其中前 3 种短程效应在除尘中占主要地位^[6]。不同粒径的粉尘在不同的流速下, 这 3 种短程效应的作用是不同的。对于粉尘粒径大、气流流速高的情况, 除尘以惯性碰撞为主, 如图 2(a)。当流线上的尘粒与捕集体的距离小于或等于尘粒半径 $d_p/2$, 尘粒将被拦截, 如图 2(b)。而当粉尘粒径小于 $1 \mu\text{m}$ 且气流流速低时, 对粉尘捕集起主导作用的则为布朗扩散。文献[7]采用类似于颗粒床的分析方法, 得出了一种计算磁稳流化床除尘器总除尘效率的表达式:

$$\eta = 1 - \exp\left[-\frac{3}{2d_0}\left(1 - \left(\frac{2\rho_p U}{3H^2}\right)^{\frac{1}{6}}\right)\eta_h\right] \quad (1)$$

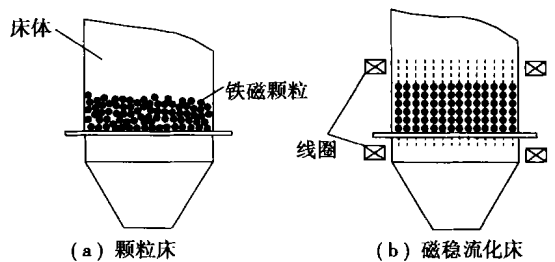


图 1 磁稳流化床和颗粒床的对比示意图

收稿日期: 2002-11-20; 修订日期: 2003-01-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50176009); 国家重点基础研究发展规划基金资助项目(G20000263)

作者简介: 王迎慧(1968-)男, 江苏兴化人, 东南大学博士研究生。

式中: η —除尘总效率; d_0 —滤料颗粒粒径; ρ_p —滤料颗粒密度; U —气体表观流速; H —磁场强度; h —静止床层厚度; η_i —为单个捕集体的综合捕集效率。

由式(1)可以看出: 除尘效率随床层厚度、磁场强度的增加而增加, 随气体表观流速的增加而减小。

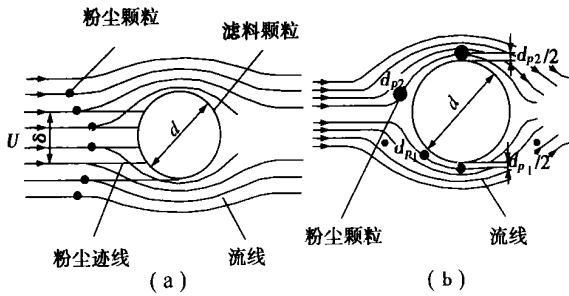


图 2 磁稳流化床除尘机理示意图

3 磁稳流化床除尘装置的设计

3.1 外加磁场分布方式的改进

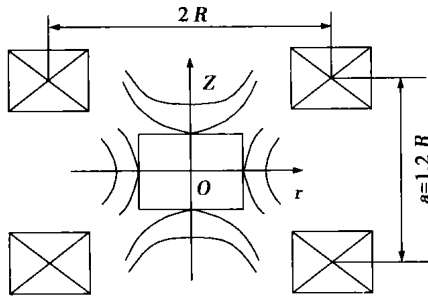


图 3 线圈空间位置示意图

在最初 Rosensweig 的研究中, 外加磁场是用通电螺线管的方式获得的, 后来研究则表明: 采用 Helmholtz 线圈获得外加磁场的方案更加方便、可行^[1-2,4]。而本文则采用改进的 Helmholtz 线圈, 使线圈中心距离由 $a = R$ 增大为 $a = 1.2R$ (R 为线圈半径, 见图 3), 扩大了磁场的均匀分布区域(图 3 中的矩形区域), 进一步改善了床内气固两相的流化特性。本文实验中取磁场分布的均匀性误差小于 10%, 测得采用改进的 Helmholtz 线圈, 可以使均匀磁场区域扩大 15% 左右。磁场分布的均匀性误差 ϵ 可由式(2)表示:

$$\epsilon = \frac{H(r, z) - H(o)}{H(o)} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中: $H(r, z)$ —坐标 (r, z) 处的磁场强度; $H(o)$ —原点 o 处的磁场强度。

3.2 流化床本体的设计

加大床体直径 D , 不仅可以减小速度分布的壁面效应, 使床内气流速度分布更趋于一致, 而且可以增加单位时间内处理含尘气体的能力。本设计中床体直径 D 为 0.5 m, 空床流通截面积约为 0.2 m^2 , 取气体表观流速为 3 m/s, 则每小时处理含尘气体的能力高于 2000 m^3 (标准立方米), 因而该装置具有一定的实际应用价值。

改进布风板的设计(见图 4), 布风板由花板与风帽构成。为避免其对床层内的磁场带来干扰, 花板用 8 mm 厚的铜板制成, 花板上的铜质风帽呈正三角形排列, 风帽采用锥形侧孔结构。这种结构的布风板, 可以对流经布风板的气流产生一定的阻力, 不仅在布风板上获得均匀的气流速度分布, 提高床内气固两相的流化质量^[8], 而且可以避免因粉尘堆积而导致入口风道堵塞, 维持了流化床层的稳定, 保证了磁稳流化床的稳定运行。

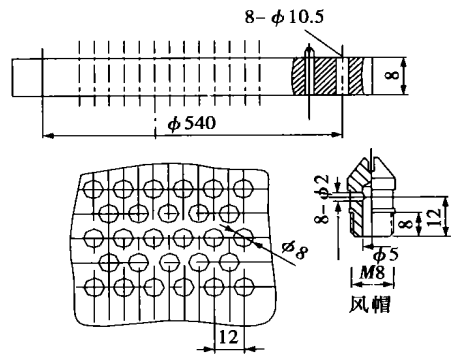


图 4 布风板结构简图

3.3 颗粒再生器的设计

由于床内粉尘的不断堆积, 床内的磁性颗粒对粉尘的捕集作用会越来越弱, 因而需对床内的颗粒进行更新, 从而

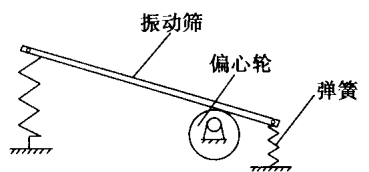


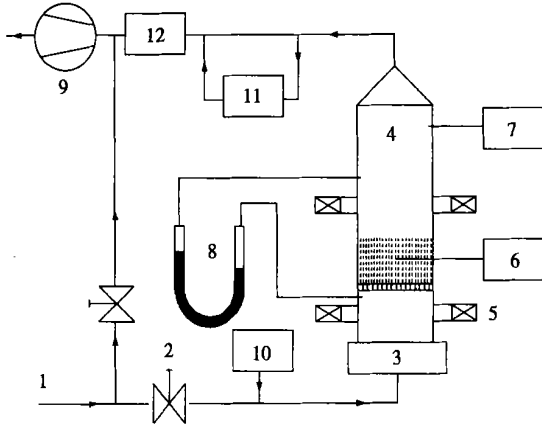
图 5 颗粒再生器主体机构示意图

实现该除尘装置运行的高效、连续。为此, 设计了专用的颗粒再生器。其主体部分为机械振动筛(如图 5)。鉴于床内的磁性颗粒处于流化状态, 具有良好的流体特性, 可以将床内少部分颗粒引出, 送入振动筛, 粘有粉尘的颗粒经不停的振动, 粉尘被剥落, 下滑到灰仓中, 清洁后的颗粒经压缩空气送回床内实现再生。磁性颗粒的再生率由入口含尘浓度及单位时间内处理的气量决定。

4 实验研究

4.1 实验设备及实验过程

磁稳流化床除尘实验系统见图 6。主要由磁场发生器、流化床本体、测量、采样系统和动力等部分组成。磁场发生器由改进的 Helmholtz 线圈和直流稳压电源组成, 改变线圈的供电电流可获得不同的磁场强度。流化床本体直径为 0.5 m, 高 1.2 m 的不锈钢柱体。实验用磁性颗粒的平均粒径 d_p 为 0.63 mm, 粉尘为电厂粉煤灰, 每次实验前做筛分, 并根据粒径分布分成 12 组。表 1 中仅列出其中 2 个样本的粒径分布。实验结果发现, 在其它实验条件相同的情况下, 磁稳流化床对各组粉煤灰的清除效果基本相同。



1—管道; 2—阀门; 3—混合室; 4—流化床; 5—线圈;
6—高斯计; 7—测速仪; 8—压力计; 9—风机; 10—发生器;
11—采样器; 12—布袋除尘器

图 6 磁稳流化床除尘实验系统示意图

实验首先在无磁场的情况下做床内气固两相的流态化实验, 得到 $U-\Delta p$ 曲线图, 确定出颗粒的起始流化速度 U_{mf} 。实验还需验证磁场强度 H 、床层厚度 h 、气体表观流速比 U/U_{mf} 等与除尘效率 η 的关系以及使用颗粒再生器的运行效果。

表 1 电厂粉煤灰的粒径分布

粒径/ μm	< 1	1~10	10~20	20~30	30~40	40~70	> 70
质量百分比/%	1.5	28.7	25.1	12.9	9.5	11.5	10.8
	3.1	32.4	27.5	11.2	12.0	7.6	6.2

4.2 实验结果与讨论

图 7(a) 所示为静止床层高度 $h = 120 \text{ mm}$, $U/U_{mf} = 1.5$ 条件下磁场强度与除尘效率之间的关系。

由图可见, 磁场强度高于 4000 A/m 时, 除尘效率明显增高, 这是因为磁场强度低于 4000 A/m 时, 床内气固两相处于鼓泡流化状态, 由于大量气泡的存在, 为粉尘提供了通道, 粉尘避开了颗粒的捕集, 除尘效果很差; 而当磁场强度高于 4000 A/m 时, 床内气固两相在外加磁场的的作用下, 进入稳定的散式流化状态(该状态对应的磁场强度被称为临界磁场强度), 使得除尘效果明显上升(高于 95%)。可以发现, 当床内气固两相进入磁稳流化状态, 进一步加大磁场强度, 除尘效率有一定程度的提高, 但是作用越来越小, 所以一味增大磁场强度以提高除尘效率并不可取。因为磁场强度越强, 线圈的功耗就越大, 一般运行时, 建议取临界稳定磁场强度的 1.2 倍左右。

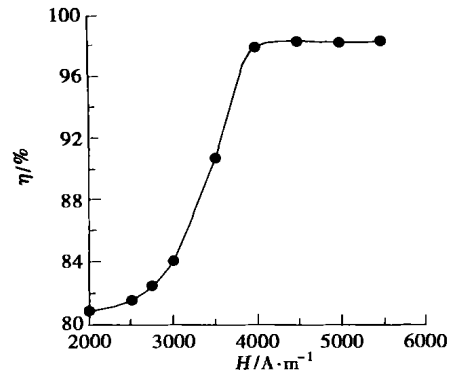


图 7 (a) 除尘效率与磁场强度的关系

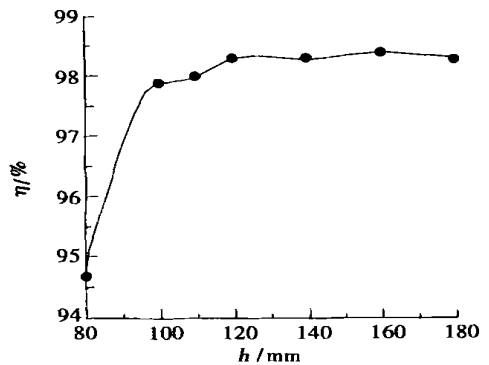


图 7 (b) 除尘效率与床层厚度的关系

图 7(b) 表示了外加磁场强度 $H = 4500 \text{ A/m}$, $U/U_{mf} = 1.5$ 时除尘效率随静止床层厚度的变化曲线。由图中看出, 在磁稳状态下, 床层高度增加, 除尘效率也增加, 但是 $\partial\eta/\partial h$ 随 h 的增加而不断减小。当床层厚度大于 160 mm 时, 再增加床层厚度对提高除尘效率作用已不明显。由于增加床层高度势必增大气流流过床层的压降, 动力损耗增大, 通常取 $h =$

100 ~ 160 mm.

图7(c)所示为 $h = 110$ mm, 外加磁场强度 $H = 4500$ A/m时, 气体表观流速比与除尘效率之间的变化规律。从图中可看出: 除尘效率随气体表观流速比的增大呈下降的趋势, 特别当超过2.2时, 除尘效率急剧下降。这是因为随 U/U_{mf} 的增大, 床内气固两相又脱离了磁稳流化状态, 进入不稳定的鼓泡流化状态, 导致除尘效率明显下降。为使床内气固两相恢复磁稳流化状态, 只有加大磁场强度。考虑磁稳流化床单位时间内处理含尘气量的能力, 取 $U/U_{mf} = 1.5 \sim 2.0$ 。

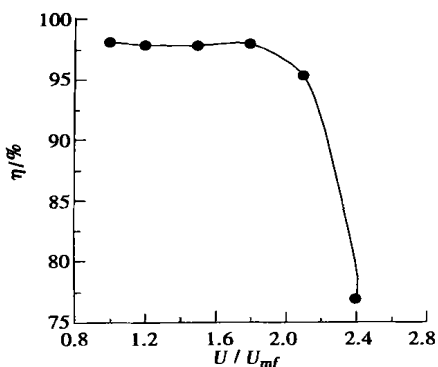


图7(c) 除尘效率与表观流速比的关系

图7(d)说明了 $H = 4500$ A/m, $U/U_{mf} = 1.6$, 床层厚度 $h = 120$ mm的实验工况下, 采用颗粒再生器(图中 \triangle 所示)与未采用颗粒再生器(图中 \blacksquare 所示)时除尘效率与时间的变化比较。实验中含尘气体入口浓度为 12 g/m³, 颗粒再生率为 75 g/min。容易看出, 颗粒未再生前, 除尘效率 η 在95%以上的连续运行时间不足60 h, 而采用颗粒再生器的磁稳流化床, 其除尘效率可长时间维持在95%以上, 从而实现了除尘装置的连续、高效运行。

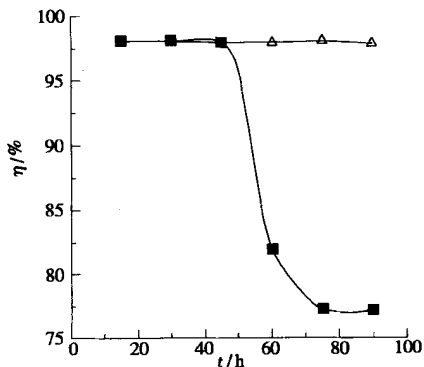


图7(d) 除尘效率与时间关系的比较

通过上述实验结果分析发现: 实验结果基本与表达式(1)的结论一致。除尘效率随磁场强度的加大而有所提高, 但一旦流化床进入磁稳状态后, 递增梯度逐渐减小; 除尘效率随床层厚度的增加而增加, 但递增幅度越来越不明显, 除尘效率与气体表观流速比呈反比关系, 特别当气体表观流速比增加到一定值时, 流化床脱离磁稳状态, 致使除尘效率急剧下降。

5 结 论

(1) 本文所设计的磁稳流化床, 其优化方案可靠、可行, 能获得良好的散式流化效果, 对细微尘粒有很好的清除效果。经实验结果分析得出: 在磁稳状态下, 该除尘装置具有很高的除尘效率(高于95%), 而一旦脱离了磁稳状态, 除尘效率明显下降。

(2) 本文实验验证了床层厚度、磁场强度、气体表观流速比等对磁稳流化床除尘装置除尘效率的影响, 得出与表达式(1)基本一致的结论。

(3) 利用颗粒再生器能有效地实现颗粒的清洗、再生; 初步分析了磁稳除尘装置连续、高效运行的条件, 为工业设计提供了依据。

参考文献:

- [1] RINCON J. Removal of fine particles in a magnetically stabilized fluidized filter[J]. *Separation Science and Technology*, 1993, 28(6): 1241-1252.
- [2] COHEN A H, TIEN CHI. Aerosol filtration in a magnetically stabilized fluidized bed[J]. *Powder Technology*, 1991, 64: 147-158.
- [3] ROSENSWEIG R E. Magnetic stabilization of the states of uniform fluidization[J]. *Science*, 1979, 204: 57-59.
- [4] RHODES M J. Use of magnetic fluidized bed in studying geHart group B to A transition[J]. *Chemical Engineering Science* 2001, 56: 5429-5436.
- [5] 归柯庭, 施明恒. 磁场对气泡的湮灭作用[J]. *应用科学学报*, 1999, 17(3): 349-354.
- [6] 陈明绍. 除尘技术的基本理论及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.
- [7] 归柯庭, 鄧育红. 磁稳流化床空气过滤器特性研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2000, 6(2): 135-139.
- [8] 岑可法. 循环流化床锅炉理论设计与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

(何静芳 编辑)

The operating principle and causes of damage of a honeycomb ceramic regenerator during high-temperature air combustion are described. By using an algebraic Reynolds-stress model and a revised speed-pressure coupled algorithm SIMPLEC a coupling of fluid flow and heat exchange process in the regenerator was implemented. With the help of a finite-element analysis method a numerical study of the stress variation law at the cellular-hole wall-surface of the honeycomb ceramic regenerator was performed. On the basis of calculation results operating parameters were improved on. It has been found that a very frequent switching-over of the process of heat accumulation and release will subject the cellular-hole wall-surface alternately to tension and extrusion stresses. The greater the fluid flow speed, the greater will be the variation of stresses. The shorter the direction-change time, the greater will be the influence of the stress alternating effect. A proper lowering of the load of burner nozzles and a prolongation of the direction-change time of a four-way valve will be conducive to increasing the service life of the regenerator. The calculation results can serve as a basis for the structural design of the regenerator and the optimization of the operating parameters. **Key words:** high-temperature air combustion, honeycomb ceramic regenerator, stress, fatigue failure, finite element

等离子发生器燃烧流场的数值模拟 = Numerical Simulation of the Combustion Flow Field in a Plasma Generator [刊, 汉] / ZHANG Ming-chang, LIU Min, CHEN Xiao-hong, et al (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 66~68, 80
The numerical simulation of a combustion flow field in a plasma generator was performed with the use of an eddy-breakage combustion model, a $k-\epsilon$ two-equation turbulence model and a SIMPLEC algorithm. As a result, a diagram was obtained, which shows the distribution of temperature fields, pressure fields and such parameters as turbulence pulsation kinetic-energy and its average dissipation rate, etc. **Key words:** plasma generator, numerical simulation, combustion, turbulence model, flow field

磁稳流化床除尘装置的设计与验证 = Design and Experimental Verification of a Dust Removal Device for a Magnetically Stabilized Fluidized Bed [刊, 汉] / WANG Ying-hui, GUI Ke-ting, SHI Ming-heng (Education Ministry Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 69~72
The design method of a dust removal device for a magnetically stabilized fluidized bed is presented with a focus on the description of key component design. Meanwhile, an experimental verification was conducted of the major factors having an impact on the dust removal efficiency. The results of the experiments indicate that keeping the dust removal device in a magnetically stabilized state is a key factor for achieving high dust-removal efficiency. Other factors, such as bed layer thickness, gas apparent flow-speed ratio, etc also exert some influence on the dust removal efficiency. **Key words:** magnetically stabilized fluidized bed, dust removal, particle regeneration, dust removal efficiency

高温空气发生器冷态实验研究 = Cold-state Experimental Research of a High-temperature Air Generator [刊, 汉] / CAO Xiao-ling, WENG Yi-wu, LIU Yong-wen (Institute of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030), JIANG Shao-jian (Institute of Energy & Power Engineering under the Zhongnan University, Changsha, China, Post Code: 410083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 73~76

The necessity for developing a high-temperature air gasification system for biomass is expounded. For the research of high-temperature air gasification from biomass the authors have developed a key component, a high-temperature air generator experimental device, on which cold-state experiments were carried out. The results of the experiments indicate that the generator is capable of a normal and stable operation under cold-state experimental conditions. It is also possible to conduct further a hot-state experimental study. Through a cold-end regulation a divided flow of the high-temperature air can be realized. The flow rate and pressure at the outlet of the divided flow will gradually increase with an increase in the opening degree of a forced draft fan and a decrease in the opening degree of a fume exhaust fan. The quantity of high-