

用磁稳流化床过滤含尘气体的实验研究*

归柯庭 鄧育红 叶 茂 施明恒

(东南大学动力工程系, 南京 210018 E-mail: mhshi @ seu.edu.cn)

摘要 研究磁场强度、气体表观流速比、铁磁性颗粒平均粒径、床层厚度、粉尘在滤料中的积累等因素对除尘效率的影响。结果表明, 在磁稳状态, 磁稳流化床的过滤效率大于 99%, 且随床层厚度的增加和铁磁颗粒粒径的减小而增大。另一方面, 随着床内粉尘的积累, 磁稳流化床将退出磁稳状态, 使过滤效率下降。退出磁稳状态的临界饱和点粉尘量与磁场强度有关, 当磁场强度为 4300 A/m, 临界饱和点粉尘与铁磁颗粒的质量百分比约为 6.7%。

关键词 空气过滤, 磁稳流化床, 磁场, 过滤效率。

Experimental Investigation of Aerosol Filtration in a Magnetically Stabilized Fluidized Bed

Gui Keting Zhi Yuhong Ye Mao Shi Mingheng

(Dept. of Power Engineering, Southeast University, Nanjing 210018 E-mail: mhshi @ seu.edu.cn)

Abstract The effects of some factors, such as magnetic intensity, superficial velocity ratio, particle average diameter, bed height and accumulated amount of aerosol within bed on the collection efficiency were studied. the experimental results showed that the collection efficiency of the magnetically stabilized fluidized bed filter was over 99%, and increased with raising the bed height and decreasing the diameter of the magnetic particles. On the other hand, the magnetically stabilized fluidized bed would get out of the stable state with the accumulation of the aerosol in the bed and decrease the collection efficiency. The amount of aerosol in the marginal saturation point was proportional to the magnetic intensity. When the magnetic intensity was 4300 A/m, the mass ratio of aerosol vers magnetic particles in the marginal saturation point was approximately 6.7%.

Keywords gas filtration, magnetically stabilized fluidized bed, magnetic field, efficiency of filtration.

由于颗粒床过滤器具有耐高温、耐腐蚀、耐磨损等独特优点, 已在工业上得到广泛的应用。但是, 传统的固定床颗粒层过滤器不能连续运行。为使颗粒床过滤器能连续运行, 可用流化床代替固定床, 而且流化后流通截面增加, 使处理含尘气体的能力增大。但是, 流化床过滤器容易产生气泡, 气泡中的气体因得不到过滤而降低了除尘效率。若能抑制流化床中的气泡, 则能加强流化床内的气固接触, 克服普通流化床过滤器效率低的缺陷, 又能实现连续运行。在外加磁场作用下, 铁磁介质的气固流化床可消除气泡, 工作在无气泡的散式流化状态, 称之为磁稳流

化床^[1,2]。所以, 将磁稳流化床用作过滤器的新型除尘设备有着良好的应用前景^[3]。

1 实验

1.1 实验设备

磁稳流化床(见图 1)由一个直径为 100mm, 高为 700mm 的有机玻璃筒体构成, 底部为气体分布板, 上面敷以孔径为 0.33mm 的

* 国家自然科学基金资助项目 (Project Supported by National Natural Science Foundation of China): 59478021
归柯庭: 男, 41 岁, 硕士, 副教授
收稿日期: 1998-04-20

铜丝网. 分布板下部为一个内径 180mm 的混合室和一个内径 100mm 的缓冲段. 外加磁场由环绕在流化床和缓冲段四周的螺旋线圈产生, 线圈用直径 1mm 的聚脂漆包线绕制, 总匝数为 6000 匝, 高度为 400mm, 按照右手螺旋法则, 该线圈产生的磁场方向与流化床轴线平行, 即与流动方向一致, 为最易获得稳定流化的方向^[4]. 静止床层高度 100mm 左右, 线圈高度大于流化床高度, 可使流化床处于线圈中部磁力线比较均匀的区域. 螺旋线圈中的电流由一直流稳压电源提供, 通过改变稳压电源的输出电流可改变床中的磁场强度. 磁场强度用 CT₃ 毫特斯拉计测量. 床内铁磁性颗粒采用铸铁颗粒. 平均粒径为 0.375mm—0.800mm. 实验用粉尘为经过筛分的电厂灰, 粒径小于 30 μ m.

发尘器为一可变速的转盘, 盘上刻出多个不同半径的同心环形凹槽, 槽中加入粉尘. 引风机开启后, 吸尘管吸走槽中的粉尘, 改变转速或改变加料槽半径, 都能改变发尘量. 采样器用滤纸收集粉尘. 通过调节采样回路中的阀门开度, 可使采样回路中的流速与总管路流速相等, 实现等速采样.

1.2 实验过程

如图 1 示, 引风机开启后, 空气经消声器、空气过滤器进入实验装置并分成二路: 一路经吸尘管加入灰尘后进入磁稳流化床, 一路则经阀门 9 旁路进入风机. 粉尘经吸尘管进入试验装置后, 在预混室内与空气混合, 经阀门 10 进入混合室与空气进一步混合后在磁稳流化床过滤器内被去除. 除去粉尘的空气被采样器收集样品检验除尘效果, 后经布袋除尘器进一步过滤并由转子流量计测出流量后, 由引风机排出. 调节阀门 9、阀门 10, 可改变进入磁稳流化床的气体流量.

实验研究了 4 种铁磁性颗粒平均粒径 $\bar{d}_c$ 、4 种床层厚度 h 下的过滤效率 η 随磁场强度 H 、气体表观流比 u/u_{mf} 的变化. $\bar{d}_c$ 、 h 的具体数值如表 1 所示. 加入流化床的粉尘浓度为 10g/m³. 每更换一次不同粒径的铁磁性颗粒, 先做流态化特性试验, 以决定临界流化速度 u_{mf} , 同

样, 变换表观流速, 要测量流化床中的空隙率波动, 以观察床层何时进入磁稳流化状态^[5].

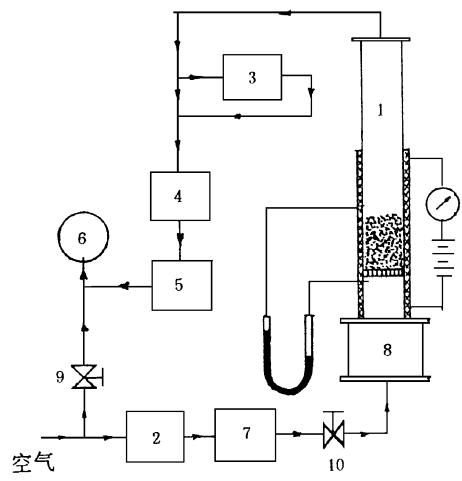


图 1 实验装置示意图

1. 磁稳流化床本体 2. 发尘器 3. 采样器 4. 布袋除尘器
5. 转子流量计 6. 引风机 7. 预混室 8. 混合室
9、10. 阀门

表 1 磁稳流化床过滤空气实验中的 $\bar{d}_c$ 和 h

序号	$\bar{d}_c / \text{mm}$	h / mm
1	0.375	80
2	0.505	100
3	0.630	110
4	0.800	120

2 实验结果与讨论

2.1 磁场强度对过滤效率的影响

图 2 示出 4 种表观流速比下 η 与 H 间的关系. 由图 2 可见, 随着 H 的增加, η 先是慢慢增加, 当场强接近 3000A/m 左右, η 急剧增加, 超过 99%. 这是因为, 未加磁场时, 流化床内存在气泡, 一部分含尘气体由气泡夹带通过床层未得到过滤, 从而降低了 η . 所以普通流化床的 η 较低. 随着 H 的增加, 床内气泡逐渐减少, η 有所增加, 但由于刚开始气泡减少十分缓慢, 故 η 的增加也非常缓慢. 只是到了临界磁稳流化区附近, 床内气泡急剧减少, 很快随着 H 的增加而消失, 进入磁稳流化状态. 故可见到 η 有一个急剧增加的区域. 此后, 再增加 H , 虽然 η 有所增加, 但变化十分微弱. 这完全证实了影响流

化床 η 的主要因素是床内存在气泡. 在本实验中, 达到磁稳状态, 线圈功耗小于 50W. 可见, 获得磁稳流化床的功耗并不大.

2.2 气体表观流速对过滤效率的影响

图 2 中 4 条曲线分别对应了表观流速比 u/u_{mf} 为 1.5、1.8、2.1、2.4 这 4 种流速. 流速越低, η 越高. 但在磁稳状态, 差别较小, 而且流速越高, 进入磁稳状态所需的 H 也越高. 这是因为, 在普通流化床中超过临界流速以外的气体主要以气泡的形式通过床层. 流速越高, 气泡越多, η 就越低, 且高、低流速的效率差别较大. 在达到临界磁稳状态以前, 磁稳流化床中流速和 η 的关系也是如此. 一旦进入磁稳状态, 床内气泡已消失, 由气泡引起的 η 的差别已不存在, η 之间的微小差别仅由流速本身不同产生. 另一方面, 正是因为高流速下, 普通流化床内的气泡较多, 故消除气泡所需的 H 也高^[4].

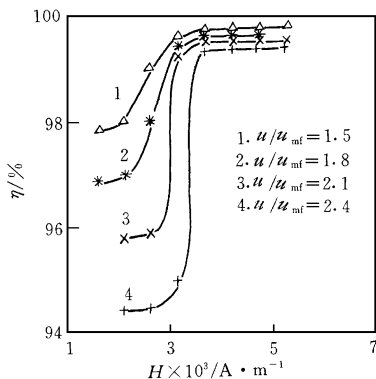


图 2 过滤效率随磁场强度的变化

$\bar{d}_c = 0.375\text{mm}$ $h = 110\text{mm}$

2.3 床层厚度对过滤效率的影响

从图 3 可知, 随着 h 增大, η 逐渐增加. 但图 3 中 1、2、3 三条曲线靠得很近, 而曲线 4 则离得较远. 可见当静止床层厚度 h 增大到 100mm 后, 增加 h 对提高过滤效率的作用已不明显, 而在此之前, 增加 h 则能提高 η . 由于增加 h 势必增大床层压降, 增大动力损失, 为降低设备能耗, h 不宜选得过厚, 选床层效率增量变小的转折点 $h = 100\text{mm}$ 为宜.

2.4 铁磁颗粒粒径对 η 的影响

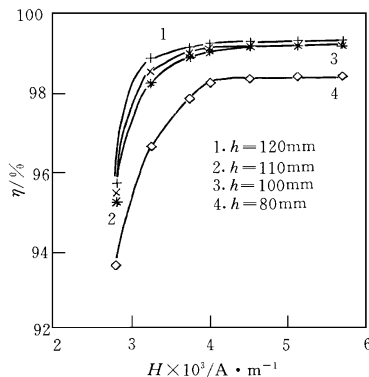


图 3 床层厚度对过滤效率的影响

$\bar{d}_c = 0.63\text{mm}$ $u/u_{mf} = 1.5$

由图 4 可见, 在磁稳状态下, 4 种粒径下的磁稳流化床都呈现很高的 η . 当平均粒径 $\bar{d}_c$ 小于 0.6mm 时, η 的差别基本不存在.

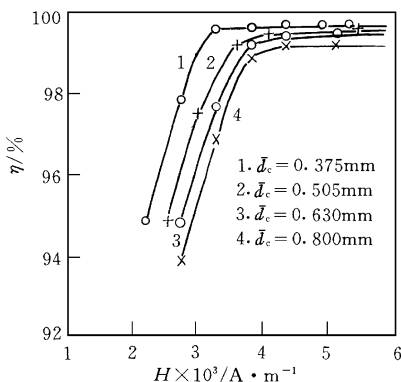


图 4 铁磁颗粒粒径对过滤效率的影响

$h = 100\text{mm}$ $u/u_{mf} = 1.8$

而增加铁磁颗粒的 $\bar{d}_c$, 则能提高 u_{mf} , 对一定的 u/u_{mf} 而言, 能提高 u , 这对减小设备、降低初投资都有益. 另一方面, 若 u 已定, 则提高 u_{mf} , 能降低 u/u_{mf} , 这对提高 η 也是有利的. 综合上述各因素, 铁磁滤料的 $\bar{d}_c$, 选择 0.65mm 左右是比较恰当的.

2.5 床内粉尘积累对过滤效率的影响

磁稳流态化是床内铁磁性颗粒在外加磁场作用下磁化后, 各颗粒的分子磁矩沿着磁力线方向整齐排列, 使颗粒间产生内聚力, 从而消除气泡获得. 而粉尘作为非铁磁性材料, 它在床内的积累, 势必减弱铁磁颗粒间的内聚力, 最终使

床内产生气泡,脱离磁稳状态.一旦脱离磁稳状态,流化床的 η 就大大下降,图5示出了床内粉尘积累对 η 的影响.由图5可知,流化床的 η 随着床内粉尘积累而下降,开始比较缓慢,然后到达一临界饱和点,超过此点 η 就急剧下降.因此可以认为在临界饱和点以前,床层还处在无气泡的磁稳流化状态,超过该点,床层就进入鼓泡状态.而这一临界点,则与 H 有关.对于 $H = 4302\text{A/m}$,图5中显示,临界饱和点粉尘量 $m_c = 216\text{g}$.对 $H = 5120\text{A/m}$,则 $m_c = 284\text{g}$,由此可确定床内滤料的更新率.假定被过滤气体的含尘浓度为 10g/m^3 ,气体表观流速 1m/s ,为确保床层处在磁稳状态,当 $H = 4300\text{A/m}$ 时,选择床层含尘量 210g ,则每 min 更新2%的滤料即可,而提高 H 则可减少滤料的更新率.

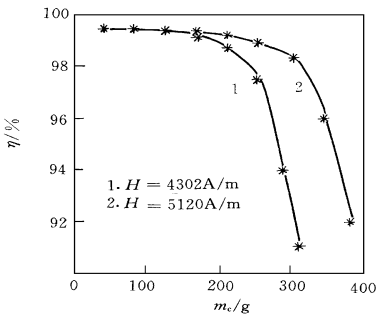


图5 床内粉尘积累对过滤效率的影响
 $h = 100\text{mm}$ $u/u_{mf} = 1.8$ $d_c = 0.630\text{mm}$

3 结论

(1) 在磁稳状态, 铁磁颗粒流化床的 η 大于

99%, 且随 H 的增加而增加, 随表观流速的增加而减小, 但变化都很小. 而一旦脱离磁稳状态, 由于床内气泡的出现, η 就大大下降.

(2) 磁稳流化床的 η 随 h 增加而增加, 随 d_c 减小而增大. 当 h 增加到 100mm , 或 d_c 减少到 0.63mm , 这种作用则不明显. 为减小床层压降、加大过滤流速, 可选择 h 为 100mm 左右, d_c 为 0.65mm 左右为宜.

(3) 随着床内粉尘的积累, 磁稳流化床将退出磁稳状态, 进入鼓泡流化状态, 从而使 η 大大下降. 使磁稳流化床退出磁稳状态的临界饱和点粉尘量与 H 有关. 由临界饱和点可确定床内滤料的更新率.

致谢 本工作得到东南大学热能工程研究所王式民教授大力帮助, 特表衷心感谢.

参 考 文 献

- 1 Rosensweig R E. Fluidization: hydrodynamic stabilization with a magnetic field. Science, 1979, **204**(1): 57
- 2 Liu Y A, Hamby R K, Colberg R D. Fundamental and practical developments of magnetofluidized beds: a review. Powder Technol., 1991, **64**(1): 3
- 3 Geuzens P, Thoenes D. Magnetically stabilized fluidization. Chem. Eng. Commun., 1988, **67**: 217
- 4 Rosensweig R E. Magnetic stabilization of the state of uniform fluidization. Ind. Eng. Chem. Fundam., 1979, **18**(3): 260
- 5 归柯庭, 王荣年. 用空隙率波动信号确定磁流化床的临界转换点. 化工学报, 1994, **45**(5): 489