

内置过滤元件流化床的最小流化速度

张世红, 刘德昌, 郑楚光

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要:以新型流化床颗粒层过滤器为应用对象,对内置过滤元件的流化床最小流化速度进行了实验研究。实验发现,过滤元件浸入料层的有效面积越大,最小流化速度越大。通过定义元件浸入料层有效面积与床截面之比的无因次数,回归得到了内置过滤元件流化床最小流化速度的经验表达式,为过滤器的进一步研究奠定了基础。

关键词:最小流化速度;内置过滤元件流化床

中图分类号: O351.2 文献标识码: A

1 前言

新型流化床颗粒层过滤器是以整体煤气化联合循环(IGCC)发电、增压流化床联合循环(PFBC-CC)发电等高效、清洁的燃煤能源转换系统为应用背景的新型高温煤气净化设备。它的特点是不需要像陶瓷过滤器那样周期性的反吹清灰,避免在运行中过滤元件交替受到不同方向的热应力作用,从而延长了过滤元件的使用寿命^[1~2]。

Mei等人^[1]在实验室内建立了一个二维新型流化床颗粒层过滤器的实验台,对过滤器的流化特性、阻力特性进行了初步研究,发现过滤元件浸入料层会使颗粒的最小流化速度增大,轻质物料比重质物料能在元件表面形成更厚、更均匀的滤饼,因而具有更好的过滤效果,经过滤的清洁气流中含量极少的平均粒径在 $1.5\ \mu\text{m}$ 左右^[1~2]微细尘粒。张世红等人对该过滤器最小流化速度进行了定性分析,证实了Mei等人的实验结论^[3],并发现过滤器阻力随流化床操作气速的增大而升高^[4],在用黄砂做床料时,过滤后的清洁气流中颗粒平均粒径小于 $5\ \mu\text{m}$ ^[5~7]。

最小流化速度是设计新型流化床颗粒层过滤器、确定运行操作范围的关键参数。在新型流化床

颗粒层过滤器中,过滤元件浸入料层,床料的最小流化速度不能用常规最小流化速度的关联式计算。本文在实验研究的基础上,利用有广泛适用范围的Saxena & Vogel经验关系式,通过定义元件浸入料层有效面积与床截面之比的无因次数,回归得到内置过滤元件流化床最小流化速度的经验表达式,为过滤器的进一步研究奠定基础。

2 实验研究

实验台架结构与尺寸、实验物料见文献[3]。为了阅读方便,在这里简而述之。流化床截面为 $150\ \text{mm}\times 140\ \text{mm}$,高 $1\ 000\ \text{mm}$,前后壁为薄钢板制成,左右壁为优质透明玻璃,便于观察和实验测量。元件的支撑管为铜管,有效高度 $800\ \text{mm}$,从下至上,表面开有 $\Phi 2$ 、 $\Phi 5$ 、 $\Phi 8\ \text{mm}$ 的小孔,开孔率约 31% 。元件上端连 $\Phi 108\ \text{mm}$ 管,该管表面攻丝,与流化床上盖板相连,以调节过滤元件浸入料层的深度。

实验物料为黄砂,比重 $2\ 500\ \text{kg}/\text{m}^3$,堆积比重 $1\ 300\ \text{kg}/\text{m}^3$,粒径小于 $0.6\ \text{mm}$,平均粒径 $0.345\ \text{mm}$ 。

实验时,风量由玻璃转子流量计给出,并用阀门控制风量的变化,“U”型压力计测 $97\ \text{mm}$ 高料层压降。

3 实验结果与讨论

3.1 最小流化速度

通常将床层从固定床转变到流化状态(或称沸腾状态)时接布风板面积计算的空气流速称为最小流化速度 u_{mf} 。最小流化速度与固体颗粒特性(粒

收稿日期: 2001-12-28; 修订日期: 2002-02-05

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(985072)

作者简介: 张世红(1966-),男,湖北保康人,华中科技大学副教授,博士。

径、密度、球形度)、流体介质特性(密度、粘度)等有关,是颗粒和流体内在特性的表现。

对于均匀粒度颗粒, Ergun 根据流态化时固定床层压降等于床层重量,得到下面计算最小流化速度的公式:

$$Ar = 2C_1 Re_{mf} / C_2 + Re_{mf}^2 / C_2 \quad (1)$$

式中: Ar 为阿基米德数, $Ar = \frac{g(\Phi d_{pi})^3}{v_k^2} \times \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g}$;

Re 为雷诺数; C_1 、 C_2 为常数。重新整理上式可得:

$$Re_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1 \quad (2)$$

其中:

$$C_1 = \frac{85.71(1 - \epsilon_{mf})}{\Phi}, C_2 = \frac{\Phi \epsilon_{mf}^3}{1.75} \quad (3)$$

如表 1 所示,不同研究者在用空气作流化介质时,得到的 C_1 、 C_2 相差不大,其中 Saxena 与 Vogel 在 1997 年综合了半径为 0.152 m、高 0.91 m 的流化床的实验结果。他们的实验条件为:空气作流化介质、颗粒尺寸 650~704 μm 、密度 1 900~2 460 kg/m^3 、球形度 0.73~0.98、风帽型布风板、床温 18~427 $^\circ\text{C}$ 、床压 101~808 kPa 的实验数据,得到 $C_1 = 25.28$, $C_2 = 0.0571$ 。Basu 等人在半径 0.304 8 m、高 0.102~12.7 m 的流化床上,用粒径 50~2 870 μm 、密度 2 560~3 924 kg/m^3 、球形度 0.63~0.73 的颗粒作床料、空气— CO_2 或 N_2 — H_2 作流化介质,证实了 Saxena 与 Vogel 关联式的实用性。由此可见, Saxena 与 Vogel 的关联式对较大的颗粒密度变化范围、中低温、常压或增压、气体作流化介质的场合都能适用。因而,在下面的研究中,以 Saxena 与 Vogel 的关联式作为回归带内置过滤元件流化床最小的流化速度的基础。

表 1 式(1)中的 C_1 、 C_2 值

研究者	C_1	C_2	研究者	C_1	C_2
Wen—Yu	33.7	0.040 8	Thonglmp	31.6	0.042 5
Bourgeois	25.46	0.038 4	Zheng	18.75	0.031 3
Saxena	25.28	0.057 1	Nakamura	33.95	0.046
Basu	25.25	0.065 1	Lucas	32.1	0.057 1
Richardson	25.7	0.036 5	Lucas	29.5	0.035 7
Grace	27.2	0.040 8	Adanez	25.18	0.037 3

3.2 实验结果

从实验观察和图 1 实验结果发现,带内置过滤元件流化床床层压降随流化床操作气速变化有如下特征。

(1) 在达到最小流化速度之前,床体处于固定床阶段,床层表面没有波动,空气从颗粒间空隙通过,床层压降随操作气速的增加而增大,同时可见有少量的微细粒子从床层中逃逸,进入床上部空间。这些逃逸的粒子只有粒径大于 120 目部分被过滤元件表面的筛网阻截,滞留在过滤元件上,构成过滤元件颗粒层最初的一部分,但大部分粒子都从过滤元件穿过,进入引风管道。在固定床阶段,浸入床层的过滤元件表面已有粒子聚集。在接近最小流化速度阶段,床层已有轻微膨胀,这是聚式流态化的表现。

(2) 在达到最小流化速度时,床层发生明显膨胀,床层压降达到最大值。对比图 1 中(a)、(b)、(c)、(d)各图,过滤元件的浸入料层对最小流化速度有明显的影响,过滤元件浸入料层的深度越大(即 H_{U-D} 越小),过滤元件根数越多,最小流化速度就越大。表现在(b)、(c)、(d)图中各工况的最小流化速度都大于图(a)中过滤元件没有浸入料层的最小流化速度,且在过滤元件一定时,有

$$Re_{mf}(H_{U-D} = 120 \text{ mm}) < Re_{mf}(H_{U-D} = 90 \text{ mm}) < Re_{mf}(H_{U-D} = 60 \text{ mm}) \quad (4)$$

这表明,过滤元件的浸入,会使一部分空气从过滤元件浸入料层部分逃逸,而失去对床层颗粒的曳力作用,导致最小流化速度增大。过滤元件根数越多、浸入料层愈深,从过滤元件中逃逸的空气量就越大,相应使床层颗粒达到最小流化状态所需要的空气量就增加越多。

(3) 当操作气速大于最小流化速度时,实验可见床内有气泡生成,超过最小流化空气量所需的空气都以气泡的形式通过床层,导致床层膨胀,床层压降波动。根据气泡运动理论,随着操作气速升高,气泡尺寸和产生的频率逐渐增大,床层膨胀加剧,压降波动加大。气泡在床面破裂时,其顶部和尾涡中的颗粒则被抛向流化床上部空间。其中部分较细颗粒被吸附在过滤元件上,形成对微细颗粒都能起过滤作用的颗粒层,其它颗粒大多回落床层,参加下一轮循环。

在没有床料循环补充时,由于床层膨胀和部分细颗粒被过滤元件吸附,造成床层颗粒密度下降,单位床层高度压降降低。从图 1 中可以发现,过滤元件浸入床层,会使流化后床层压降降低的幅度加大。当过滤元件数目一定时,元件浸入料层越深(H_{U-D} 越小),床层压降的降低值越大。当元件浸入料层深度一定时,元件数目越多,床层压降的降低值也越大。

3.3 内置过滤元件流化床最小流化速度

实验中颗粒平均粒径 $\bar{d}_p = 0.345 \text{ mm}$, 空气运动粘度 $\nu_k = 15.11 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (20 °C 时), 颗粒密度 $\rho_s = 2554 \text{ kg/m}^3$, 空气密度 $\rho_g = 1.2054 \text{ kg/m}^3$ (20 °C 时), 砂平均球形度 $\varphi = 0.75$ 。用 Saxena 和 Vogel 的经验关系式计算, 得 $u_{mf} = 0.10 \text{ m/s}$, 与图 1(a) $u_{mf} = 0.11 \text{ m/s}$ 比较, 可见 Saxena 与 Vogel 的经验关系式与本实验结果基本一致, 记 $U_{mf}^0 = 0.11 \text{ m/s}$ 。在实验中, 料层压降达到最大时的操作气速即为最小流化速度。

将过滤元件的加入对最小流化速度的影响程度归纳为过滤元件浸入静止料层有效面积的函数。用 C_u 表示过滤元件浸入料层有效面积的无因次数, 即

$$C_u = \frac{\pi d_u h \eta n}{F_b}$$

其中: d_u — 过滤元件直径, m;

h — 过滤元件浸入静止料层深度,

$h = H_0 - H_{U-D}$, m;

η — 过滤元件开孔率;

n — 过滤元件根数;

F_b — 流化床横截面积, m^2 。

将图 1 中各工况对应的最小流化速度列于表 2。

可见, 最小流化速度与过滤元件浸入床层的有效表面积有较好的线性变化关系, 就好象过滤元件浸入料层增加了流化床横截面积一样。将这种线性关系整理为无因次形式, 示于图 2。采用最小二乘法对实验点进行回归, 得到

$$\frac{U_{mf}}{U_{mf}^0} = 2.2807 C_u + 0.9557 \quad (6)$$

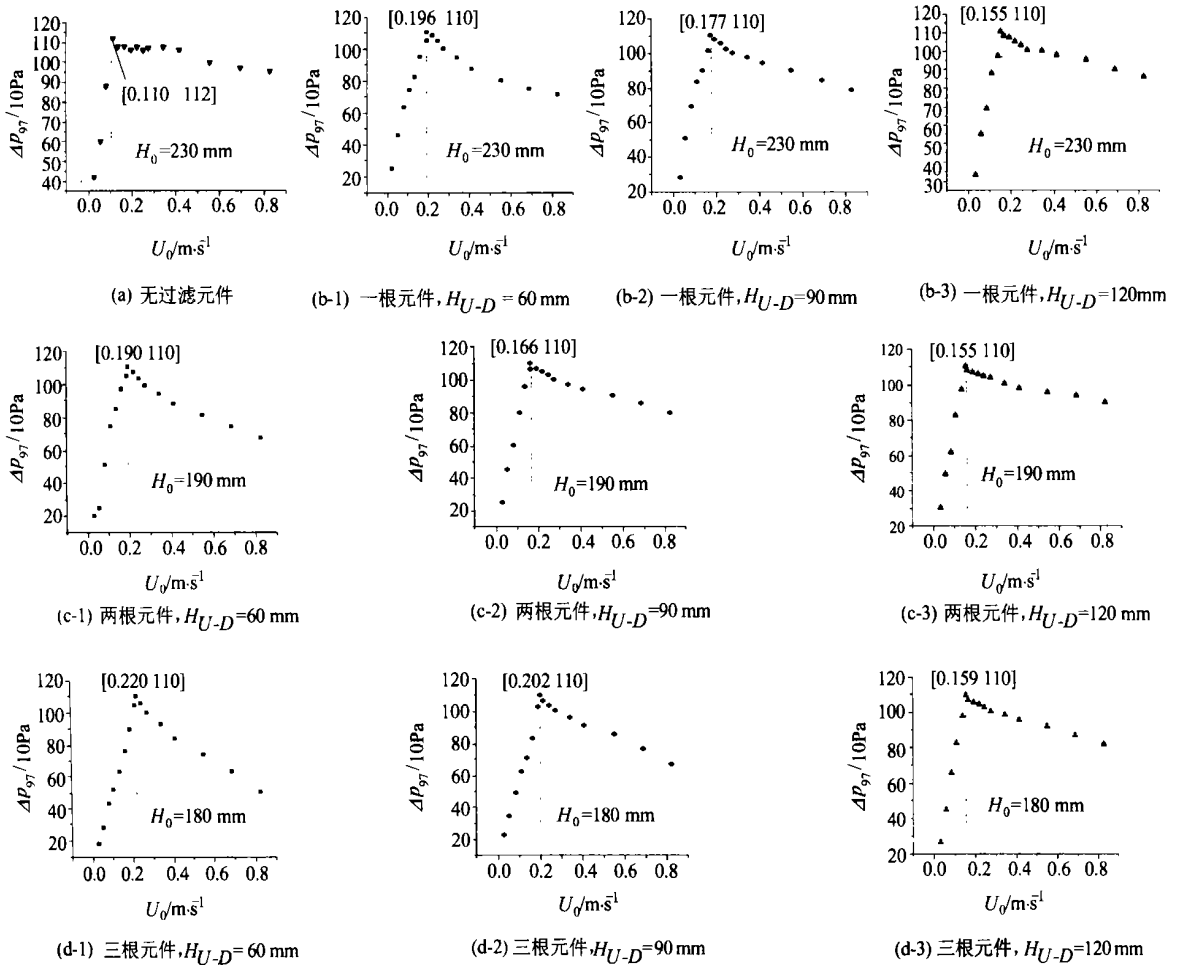


图 1 97 mm 高料层压降随流化床操作气速的变化

表 2 实验测得各工况最小流化速度

实验工况	无	一根	二根	一根	二根	二根	二根	三根	三根	三根
		$H_{U-D} = 60$	$H_{U-D} = 90$	$H_{U-D} = 120$	$H_{U-D} = 60$	$H_{U-D} = 90$	$H_{U-D} = 120$	$H_{U-D} = 60$	$H_{U-D} = 90$	$H_{U-D} = 120$
C_u	0	0.340 1	0.280 1	0.220 1	0.352 7	0.271 3	0.189 9	0.488 4	0.366 3	0.244 2
u_{mf}	0.110	0.196	0.177	0.155	0.198	0.166	0.153	0.226	0.202	0.159

这样,带内置过滤元件的流化床最小流化速度可以表达为下述无因次形式:

$$Re_{mf} = (2.2807 \frac{\pi d_u h \eta n}{F_b} + 0.9557) \times (\sqrt{25.28^2 + 0.057Ar} - 25.28) \quad (7)$$

用平均偏差 E_1 来评价式(7)预报的精度,即:

$$E_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Re_{mf \text{ exp } i} - Re_{mf \text{ cal } i}|}{Re_{mf \text{ exp } i}} \times 100\% = 4.97\% \quad (8)$$

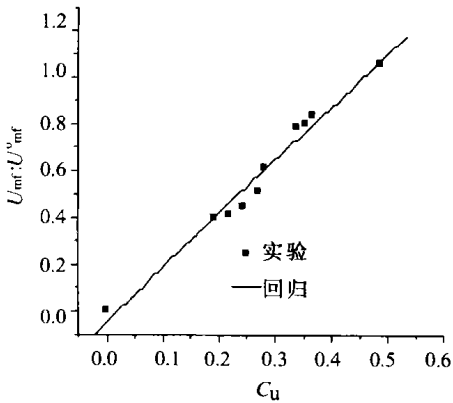


图 2 最小流化速度随 C_u 的变化

通过定义过滤元件浸入料层面积的无因次数,得到了带内置过滤元件流化床最小流化速度的表达式(7),很好地刻画了过滤元件浸入

流化床对最小流化速度的影响,为过滤器的进一步研究和应用奠定了基础。

参考文献:

[1] JOSEPH S MEI, PAUL C YUE, JOHN S HALOW. Fluidized bed filtration for particulate cleanup[J]. **Fluidized Bed Combustion**, 1993, 2: 1351-1358.

[2] JOSEPH S MEI, PAUL C YUE, JOHN S HALOW. Granular filtration in fluidized bed [J]. **Proceedings of the 12th International Conference on Fluidized Bed Combustion**, 1995, 423-430.

[3] 张世红, 刘德昌, 林志杰. 新型流化床颗粒层过滤器流化特性的研究[J]. **中国电机工程学报**, 1997, 17(4): 282-285.

[4] 张世红, 刘德昌. 新型流化床颗粒层过滤器阻力特性的研究[J]. **燃烧科学与技术**, 1997, 3(3): 248-252.

[5] ZHANG SHIHONG. Research on the properties of a novel granular fluidized-bed filter. Adelaide International Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing [J]. **The Australian Research Journal**, 1997, 7(3/4): 375-386.

[6] 张世红, 刘德昌. 新型流化床颗粒层过滤器过滤性能的研究[J]. **中国电机工程学报**, 1999, 19(7): 53-56.

[7] 马必中, 张世红, 刘德昌. 带有内置过滤元件流化床床内颗粒浓度分布的实验研究[J]. **中国电机工程学报**, 2001, 21(8): 47-50.

[8] 张世红. 新型流化床颗粒层过滤器的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2001.

(辉 编 辑)

(上接第 594 页)

为 2.0~5.0 的情况下,只要控制合适的燃烧温度, SO_2 排放浓度能降到 1200 mg/m^3 以下。

(3)流化床锅炉燃烧高硫石油焦时,燃烧温度和过量氧量对 NO_x 的排放有很大的影响。在选择流化床燃烧高硫石油焦时,脱硫剂的加入量、燃烧温度和过量氧量等运行参数应同时考虑脱硫和脱硝的要求。

*文中 mg/m^3 均为 mg/Nm^3 。

参考文献:

[1] 刘德昌. 流化床燃烧技术的工业应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

[2] 岑可法, 倪明江. 循环流化床锅炉理论与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

[3] 沈伯雄. 石油焦燃烧特性的综合试验研究和模拟[D]. 武汉: 华中理工大学, 2000.

[4] 刘德昌, 陈汉平, 吴正舜, 等. 烧石油焦循环流化床锅炉的研究[J]. **热电技术**, 2001(4): 7-13.

[5] ANTHONY E J, TALBOT R E, JIA L. Agglomeration and fouling in three industrial petroleum coke fired CFBC boilers due to carbonation and sulfation[J]. **Energy & Fuels**, 2000, 14: 1021-1027.

(辉 编 辑)

“W” Flame Boiler [刊, 汉] / MIAO Chang-xin, LIU Zhi-chao (Shandong Electric Power Research Institute, Jinan, China, Post Code: 250002) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 599 ~ 602, 631
Presented are the design features and combustion characteristics of a W-flame boiler designed and manufactured by British MBEL Co. and installed at Heze Power Plant. In connection with the commissioning test results expounded and analyzed are the air distribution of burners, the characteristics of fuel burn-out and NO_x and SO₂ emissions. In addition, there existed a whole range of problems, such as the poor mixing of combustion-air distribution in a parallel-flow field at a later stage, the slag formation on a lower furnace refractory-belt, and the excessive amount of NO_x emissions. To deal with these problems, the authors have made some preliminary recommendations to alleviate them. **Key words:** W-flame boiler, design features, combustion characteristics, proposals for improvement

内置过滤元件流化床的最小流化速度= Minimum Fluidizing Speed of a Fluidized Bed with Built-in Filtration Elements [刊, 汉] / ZHANG Shi-hong, LIU De-chang, ZHENG Chu-guang (National Key Laboratory of Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 603 ~ 606

With a novel fluidized-bed granular filter (FBGF) serving as an object of application an experimental investigation was conducted of the minimum fluidizing speed of a fluidized bed with built-in filtration elements. It has been discovered by the investigation that the greater the effective area of immersed material layer of the filtration element, the greater the minimum fluidizing speed. In this regard a dimensionless magnitude has been defined as the ratio between the following two items: the effective surface area of a filtration element immersed in the bed material, and the fluidized bed cross-section area. And, by means of regression obtained was an empirical expression of the minimum fluidizing speed of a fluidized bed with built-in filtration elements. This has laid a solid basis for the further study of a fluidized-bed granular filter. **Key words:** minimum fluidizing speed, fluidized bed with built-in filtration elements, granular filter

连续转子轴承系统的非线性动力学行为研究= Research on the Nonlinear Dynamic Behavior of a Continuous Rotor-bearing System [刊, 汉] / JING Jian-ping, SUN Yi, XIA Song-bo (School of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), LI Jian-zhao (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 607 ~ 610

By using a finite element method a nonlinear continuous rotor-bearing system model has been set up for a rotor-bearing system. With the use of respectively a direct integration method and modality synthesis method the rotor nonlinear dynamic behavior under unbalanced conditions was analyzed. The results of comparison of the above two methods indicate that the direct integration method is more effective for solving nonlinear vibration problems. The rotor-bearing system was analyzed by using a simple discrete method. The results of the analysis are quite different from those obtained under the finite-element analysis method. The results of the latter method show that the dynamic response of a rotor-bearing system is of a typical oil-whip process with its nonlinear dynamic-motion behavior being of a Hopf bifurcation form. **Key words:** continuous rotor system, nonlinearity, finite element, oil whip

多股流板翅式换热器温度交叉的数值分析= Numerical Analysis of the Temperature Crossover of a Multi-stream Plate-fin Heat Exchanger [刊, 汉] / LU Hong-bo, CUI Guo-min, LI Mei-ling (Research Institute of Thermal Energy Engineering under the Shanghai University of Science & Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 611 ~ 613

With a parallel multi-stream plate-fin heat exchanger serving as a target of study the authors have presented an energy equation for both the fluid and fins of the said heat exchanger, taking into account the bypass effect of the fins. A numerical solution is conducted of the energy equation under the conditions of changing the fluid parameters and flow modes of