

文章编号: 1000-5013( 2009)02-0175-04

# 活性炭纤维脱除气态污染物反应器的阻力

王 晓 明 , 许 绿 丝

( 华侨大学 化工学院, 福建 泉州 362021 )

摘要: 以粘胶基活性炭纤维( ACF )反应器为研究对象, 探讨 ACF 用量、放置方式和气体流速对反应器内阻力的影响. 结果表明, 阻力随着气体流速和 ACF 堆积密度的增加而增大, 其增加量随着流速的增加而减小. 同样的床层高度, ACF 水平顺气流放置比垂直分层放置的阻力小; 而要达到同样的脱除效果, 颗粒状活性炭反应器的阻力要大于 ACF 反应器 3~4 倍. 建立反应器阻力数学模型, 确定各种不同布置方式的阻力系数. 通过模型的计算值与实测值比较可以发现, 床层高度不宜超过 1.5 m, 且 ACF 不宜塞紧, 每片 ACF 毡间应留一定的间隙.

关键词: 活性炭纤维; 反应器; 阻力; 数学模型; 布置方式; 堆积密度

中图分类号: TQ 052.502

文献标识码: A

活性炭纤维( ACF )作为一种新型的炭质催化吸附材料, 较以往的颗粒状活性炭( GAC )、粉状活性炭, 拥有更优越的吸附和脱附再生性能<sup>[1]</sup>. 从 20 世纪 60 年代起, 国外已开始研制 ACF, 近年来, 国内外将其用于烟气净化, 已取得了一些成果. 根据入口烟气参数及所要达到的脱除效率要求确定吸附剂用量后, 反应器压力损失是另一个必须考虑的重要因素. 压力损失计算的目的是确定反应器形状和断面尺寸, 以及系统的压力损失, 并由系统的总风量和总压力损失选择适当的风机和电机. 反应器的压力损失与反应器内 ACF 的布置有关, 而不同的布置将影响净化效果. 因此, 对压力损失直接关系到系统的可行性和经济性. 本文对反应器内 ACF 的不同布置方式的阻力进行了相关测试, 与 GAC 的阻力进行了比较, 并建立反应器阻力计算的数学模型.

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

实验采用粘胶基活性炭纤维毡( ACF, 江苏南通苏通碳纤维有限公司), XKB-201 颗粒活性炭( GAC, 广西西陇化工厂); 反应器尺寸为 30 mm × 28 mm × 72 mm. 反应器中所用 ACF 分成 10 片, 每片大小约为 28 mm × 70 mm, 每片平均质量为 0.396 g, ACF 的自然松开厚度为 3.5 mm. 由于实际运行时所用的流速一般在 0.1~0.5 m · s<sup>-1</sup><sup>[2]</sup>, 故试验采用的流量为 0.4~4.0 m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup>.

### 1.2 实验方法

实验装置及流程, 如图 1 所示.

1.2.1 ACF 顺气流放置 将样品 ACF 顺气流方向等距离放置在反应器内, 其堆积密度和空隙率如表 1 所示. 表 1 中,  $n$  为片数,  $\rho$  为堆积密度,  $\eta$  为床层空隙率. 改变入口气体流量, 测试不同 ACF 用量时反应器内的阻力( 经修正后 ).

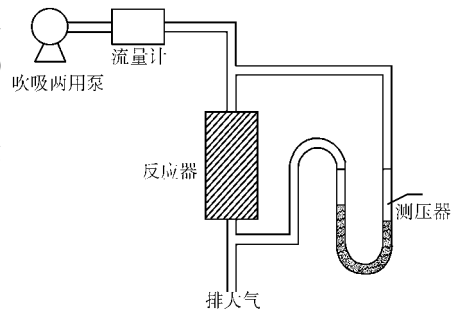


图 1 阻力测定实验装置图

Fig. 1 Setup diagram for resistance measurement

收稿日期: 2008-01-03

通信作者: 许绿丝( 1963- ), 女, 教授, 主要从事大气污染物控制的研究. E-mail: xulvsi0505@126.com.

基金项目: 福建省科技重大专项( 2005HZ033 ); 华侨大学科研基金资助项目( 05Y0003 )

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.2.2 ACF 垂直气流放置 将每片 ACF 折叠成 2 层,与气流方向垂直布置.改变入口气体流量,分别测得对应流量的阻力(经修正后).

1.2.3 GAC 反应器 在反应器中放置

53 cm<sup>3</sup> 的 GAC 颗粒,两端各放一片 ACF 作为防漏装置. GAC 颗粒的堆积密度为 270 kg · m<sup>-3</sup>,空隙率 0.5. 调整入口气体流量,测试气流从上往下吹时 GAC 床层的阻力.

2 结果与讨论

GAC 与各 10 片的 ACF 顺流、垂直放置的阻力(修正后)比较,结果如图 2 所示. 从图 2 可知,阻力(*p*)随着流速(*v*)和堆积密度的增加而增大,其增加量随着流速的增加而减小. 当 ACF 垂直布置时,气流需要从纤维的孔内通过;而当 ACF 顺流布置时,气流可以从纤维的间隙中通过.

同样的床层高度,ACF 在反应器内顺流放置比垂直放置的阻力要小. 顺流放置有利于吸附的稀酸液体顺纤维走向向下流出. 当 ACF 顺流放置,片层间留有间隙时,可减小阻力;相应地,其堆积密度也降低,反应器体积增加,不利于吸附. 取消片层间隙能使吸附效率提高,却使阻力增大,不利于节约电耗. ACF 垂直放置时,气流需穿过活性炭纤维毡,吸附效果好,但阻力太大,对脱附液的流出不利. 同样,床层高度堆满的活性炭颗粒的阻力与 ACF 的基本相近.

3 阻力计算的数学模型

根据实验数据可以看出,阻力与流速呈二次曲线关系. 流体流过固定床所产生的压力降,与颗粒大小、流体速度、流体的物理性质、床层空隙率及床高等有关. 颗粒催化剂固定床的床层压降,一般根据欧根公式<sup>[3]</sup>计算,即

- Δ*p* / *L* = *f<sub>m</sub>* ·  $\frac{\rho_0 v_0^2}{d_{vs}}$  ·  $(\frac{1-\epsilon_0}{\epsilon_0^3})$  = (1.75+ 150  $\frac{\mu(1-\epsilon_0)}{v_0 d_{vs} \rho_0}$ ) ·  $\frac{\rho_0 v_0^2}{d_{vs}}$  ·  $(\frac{1-\epsilon_0}{\epsilon_0^3})$ . (1)

式(1)中,Δ*p* 为床层阻力(Pa);*L* 为床高(m),*v*<sub>0</sub> 为空床流速(m · s<sup>-1</sup>);μ 为气体粘度(Pa · s);ρ<sub>0</sub> 为气体密度(kg · m<sup>-3</sup>);ε<sub>0</sub> 为空床孔隙率 ε<sub>0</sub>= 1- ρ<sub>0</sub>/ρ<sub>p</sub>,而 ρ<sub>0</sub> 为床层密度(kg · m<sup>-3</sup>);ρ 为 ACF 纤维表观密度(kg · m<sup>-3</sup>);*d<sub>vs</sub>* 为颗粒的比表面积相当直径(m). 由于反应器的直径比 ACF 纤维直径大得多,可不考虑壁效应,直接用将 *d<sub>vs</sub>* = 6*V<sub>p</sub>*/*S<sub>p</sub>* = 6(1- ε<sub>0</sub>)/ρ<sub>0</sub>*a* 代入公式. 其中,*a* 为单位质量吸附剂的外表面积(m<sup>2</sup> · g<sup>-1</sup>). 修正阻力系数 *f<sub>m</sub>* = 1.75+ 150  $\frac{\mu(1-\epsilon_0)}{v_0 d_{vs} \rho_0}$  = 1.75+  $\frac{150}{Re_m}$ , 而修正雷诺数 *Re<sub>m</sub>* =  $\frac{d_{vs} v_0 \rho_0}{\mu} \frac{1}{1-\epsilon_0}$ .

取试验及实际应用中的流速范围,将所计算的*f<sub>m</sub>* 与实际测得阻力推算的*f<sub>m</sub>*<sup>'</sup> 进行比较,可以发现 ACF 的*f<sub>m</sub>* 值比*f<sub>m</sub>*<sup>'</sup> 值大,而 GAC 的*f<sub>m</sub>* 值比*f<sub>m</sub>*<sup>'</sup> 小得多.

由于修正阻力系数计算值中的 150 与 1.75 是根据实验数据<sup>[4]</sup> 得出的,对固体颗粒比较适用. 因此,对本实验得到的*f<sub>m</sub>* 与 1/*Re<sub>m</sub>* 进行作图,如图 3 所示. 从图 3 可以发现,*f<sub>m</sub>* 与 1/*Re<sub>m</sub>* 呈线性关系,尤其在流速小于 1 m · s<sup>-1</sup> 时更为明显. 作一元线性回归,即 *f<sub>m</sub>* = *a*+ *b*  $\frac{1}{Re_m}$ , 其计算结果如表 2 所示.

通过对表 2 中数据的分析,对于 ACF 垂直放置,其阻力系数为

*f<sub>m</sub>* = *a*+ *b*  $\frac{1}{Re_m}$  = 5+ 32  $\frac{1}{Re_m}$ . (2)

对于 ACF 顺流放置,每片之间没有留间隙的反应床(即 8~ 10 片),其阻力系数为

*f<sub>m</sub>* = *a*+ *b*  $\frac{1}{Re_m}$  = 4+ 27  $\frac{1}{Re_m}$ . (3)

表 1 顺流布置方案的 ACF

Tab. 1 ACF laid parallel to the direction of flow

<i>n</i>	5	6	7	8	9	10
ρ <sub>1</sub> /kg · m <sup>-3</sup>	33.8	40.8	47.6	54.3	61.1	67.2
η/%	95.83	94.98	94.14	93.32	92.48	91.73

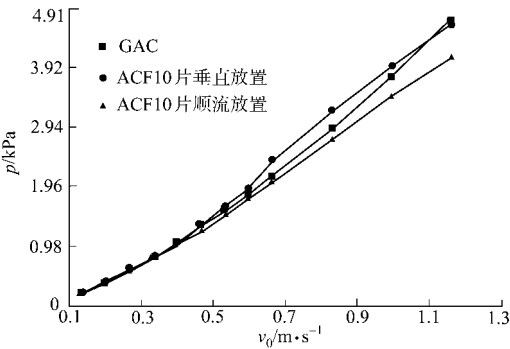


图 2 几种工况的阻力比较

Fig. 2 Resistance comparison of several conditions

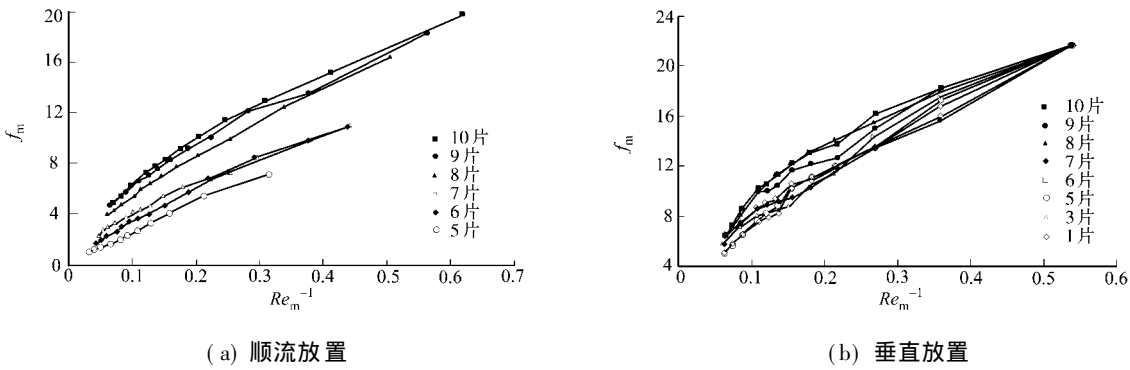


图 3  $f_m$  与  $1/Re_m$  关系曲线

Fig. 3 Relation curve of  $f_m$  and  $1/Re_m$

表 2 反应器阻力系数回归计算结果

Tab. 2 Regression results

数据	ACF 垂直放置					ACF 顺流放置						GAC
	1 片	3 片	6 片	8 片	10 片	5 片	6 片	7 片	8 片	9 片	10 片	
$a$	5. 0	4. 20	4. 00	6. 50	6. 50	0. 32	0. 95	1. 90	4. 00	3. 60	4. 00	25. 00
$b$	31. 80	34. 50	34. 10	31. 00	31. 00	23. 00	24. 60	22. 00	28. 00	27. 00	27. 00	4 400. 00
$Re_m$	0. 996	0. 992	0. 991	0. 970	0. 969	0. 996	0. 997	0. 992	0. 886	0. 991	0. 989	0. 940

对于 ACF 顺流放置, 每片之间留有间隙的反应床(小于 7 片), 此时阻力系数相对较小. 阻力系数是由两部分组成, 前一项代表流体在床层的孔道中扩大、缩小、再分布等引起的动力损失阻力系数; 后一项代表流体与颗粒表面之间的摩擦引起的粘滞损失阻力系数;  $b$  取相同的数值, 而  $a$  根据间隙大小不同取不同的数值. 由于有间隙存在时, 部分气流会从间隙中流走, 其阻力损失下降,  $a$  与间隙成反比, 有

$$f_m = a + b \frac{1}{Re_m} = \frac{0.8}{d_e} + 32 \frac{1}{Re_m}.$$
 (4)

式(4)中,  $d_e$  为两片 ACF 之间的间隙(m). 将计算值与实际测试值比较, 如图 4 所示. 从图 4 中可以发现, 在流速小于  $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的范围内, 计算值与实际值拟合得较好. GAC 的阻力系数公式为

$$f_m = a + b \frac{1}{Re_m} = 25 + 4\,400 \frac{1}{Re_m}.$$
 (5)

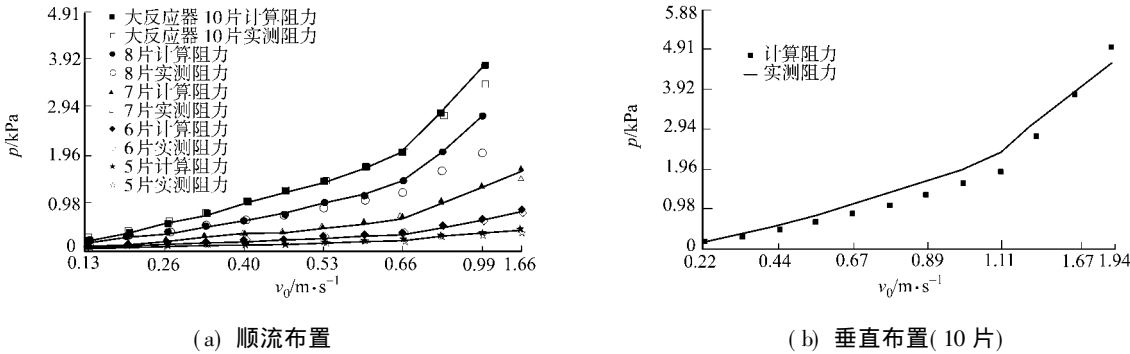


图 4 ACF 布置模型计算值与实测值比较

Fig. 4 Comparison of the model value and experimental data of ACF layout

由此可知, 式(5)与式(1)相差很大. 实验所用 GAC 粒度不均匀, 有一些小颗粒, 使空隙率降低, 实测值比计算值大几十倍. 为了防止 GAC 泄漏和被气流吹走, 两端还需设置防漏装置, 这也增加了 GAC 的阻力. GAC, ACF 的动态吸附量分别为  $6.9, 114.6\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ , 如表 3 所示. 表 3 中,  $\sigma$  为比表面积,  $a$  为单位质量的外表面积,  $Q_1, Q_2$  分别为吸附量和脱附量.

表 3 GAC 和 ACF 吸附和脱附性能比较<sup>[56]</sup>

Tab. 3 Comparison of the adsorption and desorption capability to GAC and ACF

吸附剂	$\sigma/\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	$a/\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	$Q_1/\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$Q_2/\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
GAC	600~ 1600	0. 002~ 0. 005	6. 90	6. 12
ACF	1 000~ 2 000	0. 500~ 2. 000	114. 60	114. 36

由表 3 可知, 同等质量 ACF 的

吸附量是 GAC 的 16 倍多, 而 GAC 的堆积密度则是 ACF 的 6~10 倍. 因此, 要达到同样的吸附量, GAC 的床层体积应是 ACF 床层的 2 倍以上. 如果反应器截面积相同, 则 GAC 床要比 ACF 床高 1 倍; 如果考虑传质阻力的影响, GAC 要比 ACF 床体积增加 3~4 倍, 且阻力也要大 3~4 倍. 使用粘胶基 ACF 材料, 如果放置合理, 选择合适的堆积密度, 可以减小反应器内的阻力, 从而提高了风机和电机的利用率, 体现了经济性. 由于活性炭纤维毡成蜂窝状, 纤维丝直径较细, 因此, 即使本身空隙率较大, 阻力仍然很大.

## 4 结 论

通过实验数据拟合, 建立了 ACF 反应器的阻力数学模型, 得到以下 3 点主要结论. (1) 阻力随流速和堆积密度的增加而增大, 阻力增加量随流速增加而减小; 阻力系数与流速的倒数成线性关系. (2) 同样的床层高度和堆积密度, ACF 在反应器里顺流放置比垂直放置的阻力要小; 而同样的床层高度堆满 GAC 的阻力与 ACF 的基本相近. 要达到同样的吸附效果, GAC 反应器的阻力要大于 ACF 反应器 3~4 倍. (3) 采用阻力数学模型计算 ACF 反应器床层的阻力, 在实际流速范围内准确度较高. 为满足风机选型, 床层高度不宜超过 1.5 m, 且 ACF 不宜塞紧, 每片 ACF 毡之间要保留一定的间隙, 间隙过大会影响吸附. 一般情况下, ACF 毡之间保留的间隙为 0.5~1.0 mm.

### 参考文献:

- [1] VIVEKANAND G, RITESH A, NISHITH V. Removal of  $\text{SO}_2$  by activated carbon fibers in the presence of  $\text{O}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$  [J]. Carbon, 2006, 44: 46-60.
- [2] 谢裕坛, 金一中. 活性炭固定床操作参数的优化[J]. 环境污染与防治, 2002, 24(5): 265-267.
- [3] 陈敏恒, 丛德滋, 方图南. 化工原理[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [4] 北川浩, 铃木谦一郎. 吸附的基础与设计[M]. 鹿政理, 译. 北京: 化学工业出版社, 1983.
- [5] 许绿丝. 改性处理活性炭纤维吸附氧化脱除  $\text{SO}_2/\text{NO}_x/\text{Hg}$  的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [6] 刘 义, 曹子栋, 王 盛. 活性炭纤维与柱状活性炭用于烟气脱硫的对比试验[J]. 西安交通大学学报: 自然科学版, 2002, 36(7): 701-704.

## Research of the Resistance of ACF Reactor Used in Air Pollution Control

WANG Xiao-ming, XU Lù-si

(College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** The article took the viscose rayon activated carbon fiber (ACF) reactor used in air pollution control as the research object. The reactor resistance affected by the amount and the laid way of ACF, and the flow speed was studied. The results indicated that the resistance added up with the increase of the flow speed and the bulk density. The increase rate of the reactor resistance decreased with the increase of flow speed. As the same height of the reactor, the resistance of reactor with ACF laid parallelly to flow was smaller than that of the reactor with AFC laid vertically to flow. In order to achieve the same removal effect, the resistance of the granular activated carbon (GAC) reactor was 3~4 times higher than that of the ACF reactor. Through the established resistance mathematical model of the reactor, the resistance coefficients under the different arrangements were discovered. Comparition was made between the values of model calculation and experimental data, it was found that the height of the reactor should be controlled less than 1.5 m. Moreover, certain gaps between the ACF felts are favorable.

**Keywords:** activated carbon fiber; reactor; resistance; mathematical model; layout model; bulk density

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 陈国华)