

79-83
湍动流化床中的气体返混

张秀成 张小平

(西北大学化工系, 710069, 西安太白北路1号; 第一作者 43岁, 男, 讲师)

摘要 在内径 200 mm, 高 5 500 mm 的流化床实验装置上, 用氧气点源示踪、均时取样的方法, 对湍动流化床中的气体返混进行了测定。实验结果表明湍动床存在着明显的轴向返混, 轴向扩散系数与气速有关。用拟均相一维扩散模型进行处理, 线性回归法求取模型参数, 并将轴向扩散系数进行关联, 可得到相应的关联式。

关键词 流化; 轴向返混; 湍流; 轴向扩散系数

分类号 TQ051.1

流化床返混

气固流化床反应器中气体的返混程度直接影响反应器的效率, 特别对于需达到高转化率和高选择性的非零级快速反应更为明显。但对流化床中气体返混现象的研究中, 大多把注意力放在鼓泡床和快速床, 而对工业上常用的湍动流化床的研究却很少, 而且各研究者的结论也常不一致^[1]。产生这种情况除因湍动流化床中气固相的流动规律过于复杂外, 各人所采用的实验方法不同也是主要原因之一。虽然大多研究者采用注入示踪气体, 检测浓度分布的方法研究流化床中气相返混的规律, 但如文献 2 指出的那样: 示踪气的注入方式、取样方法等都能影响示踪气体浓度分布的规律。为此, 采用一种简单的示踪实验方法, 用于检测流化床内的流动规律和传质过程, 取得较为满意的结果^[1]。我们在文献 1 的基础上, 对其方法进行改进, 采用氧气作为示踪气, 气相色谱分析仪检测床内氧气浓度分布的方法, 用以研究湍动流化床中的气体返混规律, 并为进一步研究湍动流化床中的传质过程提供了可靠的实验数据。

1 实验装置与实验方法

1.1 实验装置

实验在直径为 200 mm, 高为 5 500 mm 的有机玻璃制成的流化床中进行, 实验装置和流程如图 1 所示。气体分布板为多孔筛板, 开孔率为 2%, 分布板上覆盖有尼龙滤布两层, 用以防止颗粒下漏。

实验采用氧气作为示踪气体, 其优点是和流化气体的物性相近, 不需考虑二者因物性差别所产生的影响。当流化床达到稳定操作后, 示踪气体连续恒定地向床内释放(下喷), 释放点位于床中心轴线上, 离气体分布板的距离为 1 040 mm。在释放点的下方布置 5 个取样探头, 各探头径向位置可随意改变。在实验中共测定了 4 个径向位置的浓度, 探头内径为 1 mm。

实验用的流化颗粒为 Fcc 催化剂($d_p = 77.6 \mu\text{m}$, $\rho_p = 1 565 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 粒径小于 45 μm 的细粉的质量分率为 10%), 空气作为流化气体。

1.2 示踪气体的释放和取样

在湍动流化床内, 由于气泡相和乳化相之间存在着激烈地混合, 当示踪气体逆着流化气体的方向注入床层后, 一部分进入泡相, 另一部分进入乳相。进入泡相的部分将随气泡上升, 并在床面爆破而排放到

自由空间;进入乳化相的另一部分示踪气则随乳化相中的流化颗粒一起运动,从而起到示踪床内乳化相运动的作用。

示踪气的样品可能来自乳化相、泡相或气泡晕。但在这样的示踪条件下,可认为样品气体主要来自乳化相。因为在一般情况下,泡相气体的速度远大于乳化相中气体的速度,因而泡相气体在取样点处的停留时间很短,被取样管抽取的概率很小。另一方面,从上升的气泡相的压力场分布可知^[4],气泡相内部的压力低于乳化相内部的压力,在取样时,乳化相中的气体更容易被取样管抽取。出于以上考虑,我们在实验中采用了相同的取样时间(2 s)和相同的间隔时间(5 min),因取样时间很短,从而使样品气体来自泡相的概率更小,更能代表乳化相内气体的浓度。为了消除取样的随机性,每一测样点取样 10 次以上,进行分析后取其平均值。

1.3 气样分析

气样中氧气的浓度由国产 102 G 型气相色谱分析仪测定,氮气作为分析用载气。由于采用了定常态示踪实验方法,可以不考虑 Fcc 颗粒对氧气的吸附作用。

1.4 操作条件

实验中选取的流化速度分别为 $0.392, 0.588, 0.784, 1.078 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,按文献 5 推荐的公式计算,实验所用的 Fcc 颗粒由鼓泡区向湍流区的转变速度约为 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,脱离湍流区的速度约为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,故实验选取的流化速度皆在湍动流化区内。

2 实验结果与分析

2.1 床内示踪气浓度的轴径向分布

图 2~5 为不同流化速度下床内示踪气沿轴径向的浓度分布。图中的浓度坐标以 C/C_0 表示。由于用氧气作为示踪气,流化气体(空气)自身就含有大约 21% 的氧气,故浓度坐标中的 C 表示取样点处氧气的真实浓度与流化气体中原有的氧气浓度之差,同理, C_0 表示稀相空间中氧气平均浓度与流化气体原有氧气浓度之差。由图中可以看出,在各轴向位置上,示踪气都呈现出中心浓度低、壁面浓度高的径向分布。由于实验中示踪气逆流方向注入床内,而且又只能进入乳化相,所以图中这种浓度分布说明湍动流化床中存在着乳化相的总体循环运动,即流化床中心区的乳化相作向上运动,当到达床面附近时,乳化相则沿着壁面向下运动,产生乳化相的回流。由于乳化相的这种回流,示踪气在壁面产生积累,从而导致壁面的示踪气浓度高于中心区。

从图中还可以看出,在气速较低时,床中心位置上($r/R=0$)的示踪气浓度都略高于相邻径向位置上($r/R=0.3$)的浓度,即在床中心区存在一定的轴向返混。这说明在以乳化相向上流动为主的中心区,还存在着少量的向下沉降的乳化相团聚体^[9],这种下降的团聚体将示踪气体夹带到床层底部,出现了中心区的返混现象。当流化速度较高时,由于中心区的乳化相具有较高的动能,可以减少向下沉降的乳化相团聚体的生成,中心区的返混也就相应减少。

2.2 气体轴向返混模型

从图 2~5 还可以看出,湍动流化床轴径向浓度分布要比鼓泡床相对简单。这是因为在湍流床中,气泡连续不断地聚并与破碎,造成床内两相特性减弱,从而使湍流床的床层更趋于均匀一致。因此,可以近似地将气体的返混过程处理为拟均相的扩散方程,其返混程度以轴向扩散系数表示。

模型的基本假设为:

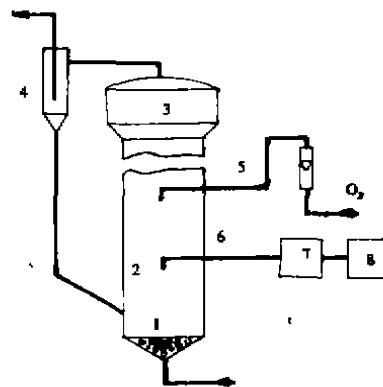


图 1 实验装置示意图

- 1 分布板 2 流化床 3 扩大段 4 旋风分离器
5 示踪气 6 取样管 7 色谱仪 8 计算机

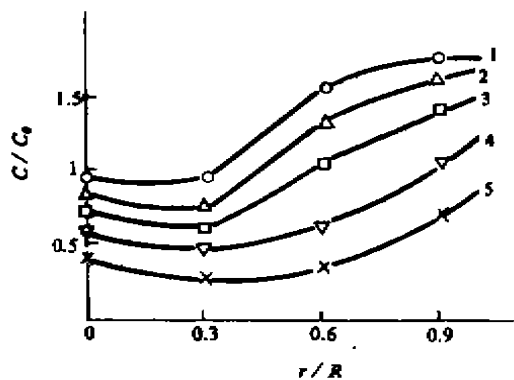


图 2 $u=0.392 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的轴径向浓度分布
1 90 mm 2 190 mm 3 290 mm
4 490 mm 5 690 mm

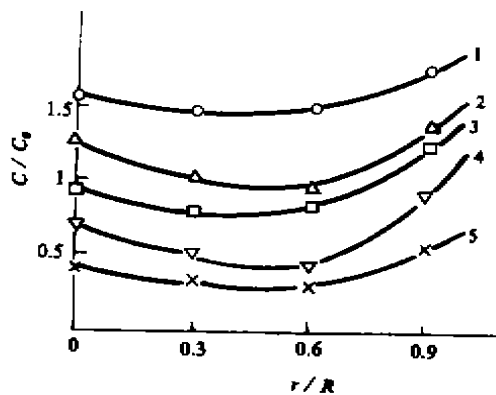


图 3 $u=0.588 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的轴径向浓度分布
1 90 mm 2 190 mm 3 290 mm
4 490 mm 5 690 mm

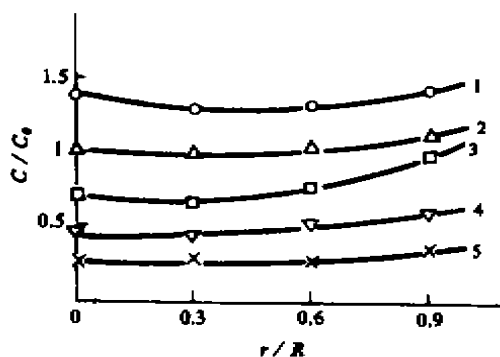


图 4 $u=0.784 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的轴径向浓度分布
1 90 mm 2 190 mm 3 290 mm
4 490 mm 5 690 mm

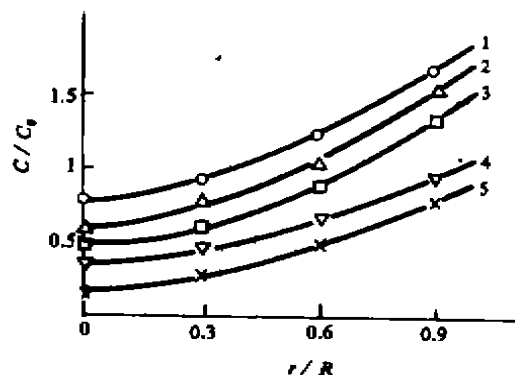


图 5 $u=1.078 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的轴径向浓度分布
1 90 mm 2 190 mm 3 290 mm
4 490 mm 5 690 mm

- (1) 床内气速沿径向分布均匀, 即流化床层可以按拟均相处理。
- (2) 仅在轴向上存在着总体流动。
- (3) 在流化床内, 由于气体的轴向扩散系数比径向扩散系数大 2~3 个数量级^[6], 故可以不考虑径向的分散作用。

根据以上假设, 可将床层内的返混现象用一维轴向扩散模型来描述, 即:

$$E_a \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} = \frac{u}{\bar{\epsilon}} \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (1)$$

式中 E_a 为轴向扩散系数; u 为表观流化速度; $\bar{\epsilon}$ 为床层的平均空隙率。根据实验条件, 式(1)的边界条件为:

$$\begin{aligned} Z = 0 \text{ 时, } C &= C_0, \\ Z = -\infty \text{ 时, } C &= 0, \end{aligned}$$

积分上式, 可得到方程解为:

$$\ln \frac{C}{C_0} = \frac{u}{\bar{\epsilon}} \cdot \frac{1}{E_a} \cdot Z \quad (2)$$

因假设中忽略了径向的扩散作用,故可将同一轴向位置的各径向浓度取平均值,代入式(2),则得到:

$$\ln \frac{\bar{C}}{C_0} = \frac{u}{\bar{\epsilon}} \cdot \frac{1}{E_a} \cdot Z. \quad (3)$$

由式(3)可知, $\ln \frac{\bar{C}}{C_0}$ 对 Z 的关系为一直线,其斜率为 $u/(\bar{\epsilon} \cdot E_a)$,可通过各轴向位置的 $\ln \frac{\bar{C}}{C_0}$ 值对 Z 进行线性回归求出。因为式中的表观流化速度 u 为已知数,所以只要求出床层内的平均空隙 $\bar{\epsilon}$,即可计算出轴向扩散系数 E_a 。

文献 7 在本文所用的流化床中测定了床层的平均空隙率,并得到 $\bar{\epsilon}$ 和表观流化气速 u 的关系如下:

$$\bar{\epsilon} = 0.55 + 0.21u \quad (4)$$

将各气速下 $\bar{\epsilon}$ 的值代入式(3)中,通过线性回归求出各气速下的轴向扩散系数 E_a ,其计算结果以及相应的 Peclet 数和其倒数的值均见下表:

附表 模型参数的计算结果

$u/m \cdot s^{-1}$	0.392	0.588	0.784	1.078
$E_a/m^2 \cdot s^{-1}$	0.374	0.514	0.619	0.783
Pe	1.780	1.817	1.895	1.898
$1/Pe$	0.562	0.550	0.528	0.527

其中,Peclet 数的定义为:

$$Pe = \frac{uL}{\bar{\epsilon}E_a}, \quad (5)$$

式中, L 为静床高度,根据实验条件, $L=1.070$ m。

将附表中的计算结果进行回归,可得到轴向扩散系数 E_a 与表观流化气速 u 的关系为:

$$E_a = 0.74312 u^{0.725}. \quad (6)$$

由以上结果可以看出,轴向扩散系数 E_a 随气速增加而增大,这表明随着流化气速的增加,流化床内气相湍动程度增大,并使床内处于激烈的湍动混合状态,这与文献 6 采用停留时间分布的方法所测定的结果基本一致。从 Pe 数的计算结果来看,在实验范围内,其倒数 $1/Pe$ 的值约等于 0.55,并且基本上为一常数。通常认为,当 $1/Pe < 0.01$ 时,实际反应器中气体的流型可作为平推流处理。因此,对于湍动流化床来说,无论是气泡相还是乳化相,都存在着明显的返混现象。

3 结 论

3.1 采用逆向点源示踪技术和均时取样方法,可以采用氧气作为示踪剂测定湍动流化床中的气体返混情况,可以不考虑示踪气与流化气物性差异的影响。

3.2 实验结果表明床内乳化相存在着中心向上,沿壁面下降的主体循环流动,在床中心区还存在着气相的返混现象,但返混程度随气速增大而减弱。

3.3 湍动流化床内 $1/Pe$ 的值约为 0.55,远大于 0.01,因此,床内的气相流动规律明显地偏离平推流。

符号说明

C 为床内示踪气的实际浓度与流化气原有浓度之差, mol%; C_0 为稀相空间中示踪气的平均浓度与流化气原有浓度之差, mol%; E_a 为轴向气体扩散系数, $m^2 \cdot s^{-1}$; L 为床层高度, m; r 为径向位置, m; R 为流化床半径, m; Z 为轴向位置, m; $\bar{\epsilon}$ 为床层平均空隙率, %; Pe 为 Peclet 数

参 考 文 献

- 1 Jinghai Li, Herbert Weinstein. An experimental comparison of gas backmixing in fluidized beds across the regime spectrum. C. E. S., 1989, 44(8): 1697~1705
- 2 Yerushalmi. Gas Fluidization Technology. Ed. by Geldart. D. New York: John Wiley & Sons, 1986
- 3 白丁荣, 金涌, 俞芷青. 循环流化床内颗粒的加速作用及气固两相的动量交换. 化学反应工程与工艺, 1991, 7(3): 260~265
- 4 白丁荣, 金涌, 俞芷青. 循环流态化(I), 气-固流动规律. 化学反应工程与工艺, 1992, 8(1): 116~125
- 5 蔡平, 金涌, 俞芷青等. 鼓泡流态化向湍流流态化过渡的判别. 化工学报, 1986, 37(4): 391
- 6 李佑楚, 吴培. 快速流化床中气体轴向混合特性. 化工学报, 1991, 42(5): 541~547
- 7 李俊. 细颗粒 FCC 湍流流化床流体力学性能研究, [硕士论文]. 西安: 西北大学化工系, 1992

Backmixing in a Turbulent Fluidized Bed

Zhang Xiucheng Zhang Xiaoping

(Department of Chemical Engineering, Northwest University, 710069, Xi'an)

Abstract The extent of axial gas backmixing for turbulent fluidization in a fluidized bed testing unit of 200 mm inside diameter and 5 500 mm height were measured using continuous injection of a oxygen tracer. Experimental results indicate that the extents of axial gas backmixing are related the gas velocity. As a result, a generalized correlations of the gas dispersion coefficient is obtained.

Key words fluidized beds; gas backmixing; turbulent; gas dispersion coefficient

• 学术动态 •

美国《化学文摘》和它的索引

美国《化学文摘》(Chemical Abstracts)简称《CA》,创刊于1907年。由美国化学学会编辑出版,1956年美国化学学会下属的化学文摘服务社(CAS)接替了这项工作,1969年CAS兼并了具有140年历史的德国《化学文摘》,使《CA》成为世界上最有权威的化学、化工方面的检索刊物。

《CA》在初创时,年收录期刊396种,摘录11 847篇论文和专利,几乎一半是德国的成果。目前《CA》摘录了全世界150多个国家和地区的15 000余种科技期刊,专利资料和其他出版物。涉及的语种达56种之多。它摘录的出版物大多为化学化工专业刊物,对于天文、生物、医学、物理、农业、冶金、轻工等领域的研究成果也进行有选择的摘录。其收录原则为:新的情报和与化学化工有关的文献。为保障《CA》质量,CAS常年从国内外聘请大批有专业知识和有经验的文摘员,对来自世界各地的化学出版物进行筛选。《CA》对文献以报道性为主,重点摘录文献中报道的新物质,新反应、新的工艺与设备、已知物质的新性质、新来源及新用途、研究的目的和结果与结论。所称它收录了全世界化学、化工文献总量的98%,自述是“世界化学文献的钥匙。”目前年报道量已逾50万篇。

《CA》所摘录的资料,除了期刊和专利资料外,还对与之有关的会议文献、研究报告、图书、视听资料、学位论文、寄存手稿等进行摘录。寄存手稿主要来自前苏联科技情报所;学位论文直接从美国大学缩微品公司出版的《国际学位论文文摘》中选摘,它所报道的资料半数以上为当年出版物,其余为近5年的出版资料。所有资料按分类进行编排,每一类目下划分为4大块:①期刊、会议录、技术报告、档案资料、