

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.04.001

混合纳米 SiO₂ 和纳米 TiO₂ 颗粒在 添加 FCC 的流态化研究

周涛, 段昊, 唐文江, 王建, 陈永斌

(中南大学 化学化工学院, 湖南 长沙, 410083)

摘要: 混合纳米颗粒作为催化剂已经被应用于各工业领域。然而由于纳米颗粒的流态化性能较差, 需要研究改善混合纳米颗粒流态化性能的方法。现阶段, 国内外的研究大多集中在对单一纳米颗粒添加组分的流态化与混合纳米颗粒在外力场中的流态化, 对混合颗粒添加组分的流态化未见报道。试验研究了纳米 SiO₂ 和纳米 TiO₂ 的混合组分在添加 3 种不同的 FCC 颗粒的流态化, 为研究混合组分流化床中颗粒的碰撞、团聚和破碎机制提供实验基础。研究发现单纯的混合纳米颗粒难以流态化, 添加 FCC 颗粒后其流态化性能有所提高, FCC 颗粒对混合纳米颗粒流化性能的改善能力与其粒径和添加量有关。另外 FCC2 和 FCC3 颗粒对混合纳米颗粒的流化性能改善能力优于 FCC1 颗粒。相同添加量下, 纯的 SiO₂ 流化性能最好, 其余按由好到坏的顺序分别是 $w(\text{SiO}_2): w(\text{TiO}_2)=7:3$, $w(\text{SiO}_2): w(\text{TiO}_2)=5:5$, $w(\text{SiO}_2): w(\text{TiO}_2)=3:7$ 以及纯的 TiO₂ 纳米颗粒。

关键词: 混合纳米颗粒; 流态化; FCC; 添加颗粒

中图分类号: TQ021.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)04-0001-07

Fluidization Behavior of Mixed SiO₂ and TiO₂ Nanoparticles with FCC Particles

Zhou Tao, Duan Hao, Tang Wenjiang, Wang Jian, Chen Yongbin

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Hybrid nanoparticles as catalyst are applied in various industrial fields. However, nano particle fluidization performance is poor, it is needed to study the improving method. At present, the research at home and abroad focuses mostly on fluidization of single nanoparticles by adding coarse particles and the fluidization of mixed nanoparticles in extra force fields, and there is no report about fluidization of mixed nanoparticles with adding particles. Investigated the fluidization behavior of the mixture of SiO₂ and TiO₂ nanoparticles by adding 3 kinds of FCC coarse particles, and provided experimental basis for studying the mechanism of crashing, agglomerating and breaking among mixed nanoparticles. Found that the simple hybrid nanoparticles were difficult to be fluidized, and with adding coarse FCC particles, the fluidization behavior were obviously improved. The improving fluidization behavior of hybrid nanoparticles is related to the size and adding amount of FCC particles. In addition the fluidization effect of adding FCC2 and FCC3 coarse particles is better than that of adding FCC1 coarse particles. Under the same amount adding, the fluidization of pure SiO₂ is best and the fluidization sequence from good to bad is $w(\text{SiO}_2): w(\text{TiO}_2)=7:3$, $w(\text{SiO}_2): w(\text{TiO}_2)=5:5$, $w(\text{SiO}_2): w(\text{TiO}_2)=3:7$ and pure TiO₂ nanoparticles.

Keywords: mixed nanoparticles; fluidization; FCC; adding particles

收稿日期: 2014-02-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21376269)

作者简介: 周涛(1963-), 男, 湖南常德人, 中南大学教授, 博士生导师, 主要从事多相流与流态化技术, 纳米材料, 超微细颗粒的造粒和表面改性的研究, E-mail: zhou tao@csu.edu.cn

0 引言

纳米颗粒具有独特的化学、光电学性质,在工业中受到广泛的重视。但是纳米颗粒具有高的粘性力,颗粒极易形成大的聚团。因此,开发能大量应用纳米颗粒并且尽量降低团聚的技术要求越发明显。目前,国内外研究者普遍认为流态化技术在此领域具有很大潜力。

至今已有较多科研工作者对纳米颗粒的流态化进行过研究^[1-5]。然而,纳米颗粒属于 Geldart C 类颗粒,在这样的尺度下,不能忽略颗粒间的范德华力、静电力等,而颗粒往往倾向于形成聚团以降低表面能。因此,纳米颗粒在流化床中常常难以流化,表现为活塞、沟流等现象。但是,进一步试验发现,纳米颗粒可以在一定风速下实现流态化,从而不能根据颗粒的初始属性来预测其流态化质量。事实上,由于颗粒间的作用力,在气固流化床中,纳米颗粒以更大尺度的多孔聚团存在^[6-7]。因此,影响纳米颗粒在气固流化床中流化质量的主要因素是其聚团性质(大小、密度等)而不是颗粒的原生性质。试验还发现,纳米颗粒在气固流化床中的流态化表现主要分为2种形式:聚团散式流态化(agglomerate particulate fluidization, APF)和聚团聚式流态化(agglomerate bubbling fluidization, ABF),其中 APF 相较于 ABF 具有较大的床层膨胀和较低的最小流化速率。

对改善纳米颗粒流态化的方法包括外力场法和颗粒设计^[8-10]。外力场法包括加入磁场^[11-12],声场^[13-14]和振动场^[15-17]。颗粒设计主要为添加流化效果较好的大颗粒,与外力场法相比,其优势主要在于不需要增加额外的设备,可以在现有体系下实现。在纳米颗粒流化床中添加粗颗粒后,粗颗粒随纳米颗粒一同流化,降低了流化床中颗粒间的粘性力,从而改善了纳米颗粒的流态化。目前,对使用添加颗粒的方法改性单组份纳米颗粒的流态化性能已有一定研究^[18],但是还很难发现对于纳米颗粒混合物的研究。本试验主要研究二元混合纳米组分在添加粗颗粒后的流态化。

1 试验

试验中选择空气为气体介质,经鼓风机进入硅胶干燥塔,干燥后经过转子流量计进入流化床。使用转子流量计调节风速,测量床层在不同风速下的床层压降和床层高度。流化床为有机玻璃材质,内径 40 mm,高 700 mm。表观风速由转子流量计调节,调节范围为 0~0.133 m/s。床层压降采用 U 形管压差计

测量,床层高度由流化床上的标尺读取。床层膨胀比为对应表观风速下的床层高度与初始的静床层高度的比值。由于测量点密集,最小流化速度近似取床层压降稳定不变时的第一个测量点的表观风速,分辨率为 0.004 4 m/s。试验环境均为室温、常压。实验装置图及主要设备信息见图 1,表 1。

试验物料采用纳米 SiO₂ 和纳米 TiO₂,试验所用纳米颗粒的部分物理性质数据见表 2。添加的惰性大颗粒选择流化催化裂化催化剂(fluid catalytic cracking, FCC)颗粒,并且筛分出 3 种不同粒度范围的 FCC 颗粒: FCC1, FCC2 和 FCC3,其粒径分布范围和松堆密度见表 3。试验中,选用的 2 种纳米颗粒按质量比混合,混合组分选择 3:7, 5:5 和 7:3。添加 FCC 颗粒量以 FCC 的质量与混合纳米颗粒的质量比值计,添加 FCC 颗粒的比例选择 0.15, 0.3 和 0.45。为了尽可能降低水分对试验结果的影响,所用物料在试验之前在 95 °C 下干燥 2 h。试验中,控制物料在流化床中的初始床高为 80 mm,并使初始时流化床高径比(h_0/D)为 2。流化性能采用床层压降(Δp)曲线和床层膨胀(H/H_0)曲线表征。并用 R-Z (Richardson-Zaki) 方程评价散式流态化程度。

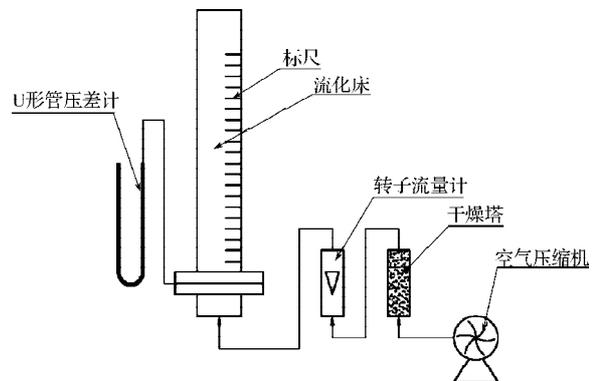


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

表 1 主要设备信息

Table 1 The main equipment information

装置	规格	生产厂家
流化床	自制,内径 $D=40$ mm	湖南大学仪器加工厂
转子流量计	LZB-6	浙江余姚工业自动化仪表厂
U 形管压差计	冀字: 30260139	河北武强县红星仪表厂
空气压缩机	WM-2A	天津市医疗器材厂

表 2 纳米颗粒的部分物理性质

Table 2 Properties of nanoparticles

纳米颗粒	颜色	形貌	原生粒径 / nm	松堆密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	原生密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
SiO ₂	白色	球形	30	108	2 560
TiO ₂	白色	球形	10	276	4 000

表3 添加FCC颗粒的大小和密度

Table 3 Size and density of adding FCC particles

名称	粒径范围/ μm	松堆密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
FCC1	90~109	814
FCC2	61~90	828
FCC3	38~61	850

2 结果与讨论

2.1 混合纳米颗粒的流态化

图2为纳米颗粒及其混合物的床层压降曲线和床层膨胀曲线。

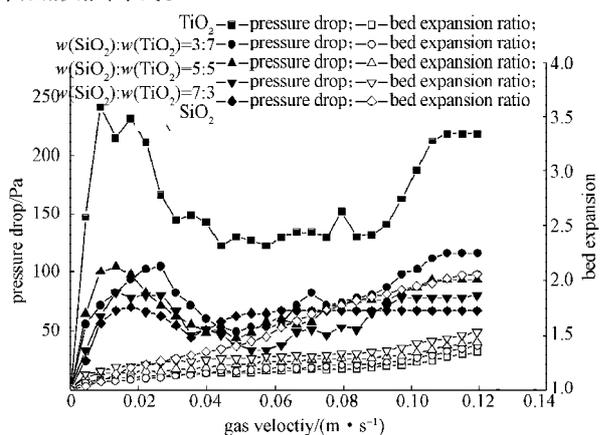


图2 不添加FCC时混合纳米颗粒的床层膨胀曲线和床层压降曲线

Fig. 2 Bed expansion and pressure drop curves of mixed nanoparticles without adding FCC particles

单组分的纳米颗粒在流化床中通常难以流化,试验所用物料中纳米SiO₂在较大流速时能在一定程度上实现流态化,但低流速下表现为沟流和喷泉,难以流态化。纳米TiO₂较SiO₂的原生粒径更小,松堆密度更大,因此颗粒间的粘性力超过纳米SiO₂颗粒。试验中表现为非常难以流化,低流速以活塞和沟流为主,仅仅在高流速下能形成部分流态化。纳米SiO₂和纳米TiO₂颗粒的混合物流态化性能介于两个纯组分之间,实际表现为更接近纯的纳米TiO₂。另外,各组分随着纳米SiO₂颗粒含量的增加而好转,但与纳米SiO₂颗粒比较仍然存在较大差距。纳米SiO₂的质量分数分别为100%, 70%, 50%, 30%和0时,各组分的最小流化速率分别是0.061 9, 0.097 3, 0.097 3, 0.106 0和0.500 0 m/s,最大流速下的床层膨胀比分别为2.06, 1.53, 1.44, 1.40和1.34。另外,在对混合组分进行试验时,观察到混合组分存在分层流态化现象:下部表现为固定床,随着流速的增加而降低;上部表现为流化床,随流速的增加分别出现沟流、喷泉、鼓泡和腾涌等现象。可能的原因是纯组分的纳米SiO₂和纳米TiO₂的松堆密度(如表2所示)和流态化性能差异

较大,较轻的纳米SiO₂在较低流速下容易移动至床层上部被流化,较重的纳米TiO₂在下部难以流化形成固定床,伴随有严重的沟流,并且可以观察到3 mm以上的大聚团。随着流速的提高,下层固定床高度逐渐变小,但在试验所用最高流速下也不完全消失。

另外,从图2中可以看出床层压降曲线大部分呈现两头高中间低的形状。在低流速下,床层中颗粒层以活塞的形式被气体推高,床层压降迅速增大;活塞破碎后,床层产生类似细小的裂缝沟流,这些气体通道对气体的阻力较大,从而使压降难以下降;继续增大气速,床层中沟流直径逐渐变大,对气体阻力降低,压降下降明显;流速增大至流化时,颗粒以分散的方式悬浮在气流中,颗粒所受气体曳力与重力平衡,床层压降回升至接近低流速时的水平。由床层膨胀曲线可以看到,低流速下,由于活塞、沟流等现象,颗粒以聚集形式存在,从而床层膨胀难以增加;增大气速至最下流化速率附近,由于颗粒陆续流态化,床层膨胀拓展明显;继续增大气速,流化床以腾涌床为主,床层膨胀增大减慢。

2.2 混合纳米颗粒添加FCC颗粒后的流态化

添加FCC对混合纳米颗粒的流态化具有一定的改善作用。图3~9为不同混合比例的纳米SiO₂和纳米TiO₂混合纳米颗粒在分别添加不同FCC颗粒的床层压降曲线和床层膨胀曲线。

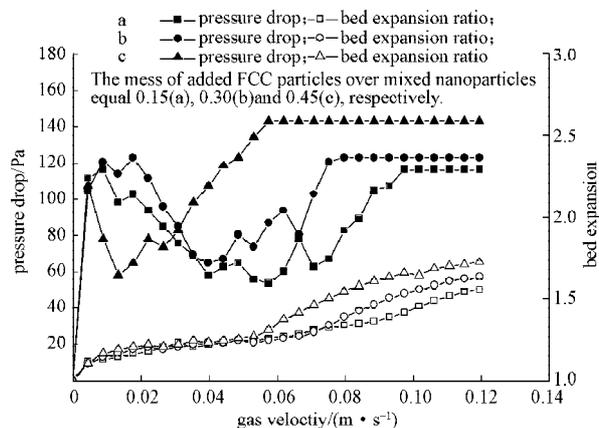


图3 $w(\text{SiO}_2):w(\text{TiO}_2)=5:5$ 时,添加FCC1颗粒后的床层膨胀曲线和床层压降曲线

Fig. 3 Bed expansion and pressure drop curves of mixed nanoparticles of $w(\text{SiO}_2):w(\text{TiO}_2)=5:5$ with adding FCC1 particles

由图3可以看到,纳米SiO₂含量越多,体系的流态化越好;添加的FCC颗粒越多,对混合纳米颗粒的流态化的改善就越明显,主要表现为降低最小流化速率和增加床层膨胀比。3种FCC颗粒的主要区别在于粒径的大小不同,添加最大的FCC1颗粒对体系的流态化改善作用差于FCC2和FCC3颗粒。以纳米

SiO₂ 与纳米 TiO₂ 颗粒质量比为 5:5, 添加 FCC1 颗粒与纳米颗粒质量比分别为 0.15, 0.30, 0.45 时为例, 其最小流化速率下降至 0.097 3, 0.075 2 和 0.057 5 m/s, 床层膨胀比拓展至 1.56, 1.64 和 1.73 (见图 3)。

另外, w(SiO₂):w(TiO₂)=7:3 时, 分别添加质量比为 0.15, 0.30 和 0.45 的 FCC1 颗粒, 最小流化速率下降为 0.088 4, 0.057 5 和 0.048 6 m/s, 床层膨胀比增至 1.69, 1.73 和 1.85。w(SiO₂):w(TiO₂)=3:7 时, 分别添加质量比为 0.15, 0.30 和 0.45 的 FCC1 颗粒, 最小流化速率下降为 0.097 3, 0.084 0 和 0.075 2 m/s, 床层膨胀比增至 1.60, 1.73 和 1.76。

FCC2 与 FCC3 颗粒对混合纳米颗粒的影响能力相近, 但仍然表现出差异。在纳米 SiO₂ 含量较多 w(SiO₂):w(TiO₂)=7:3 的混合纳米颗粒中添加 FCC3 的流化效果优于添加 FCC2 的流化情况 (如图 4~5 所示)。

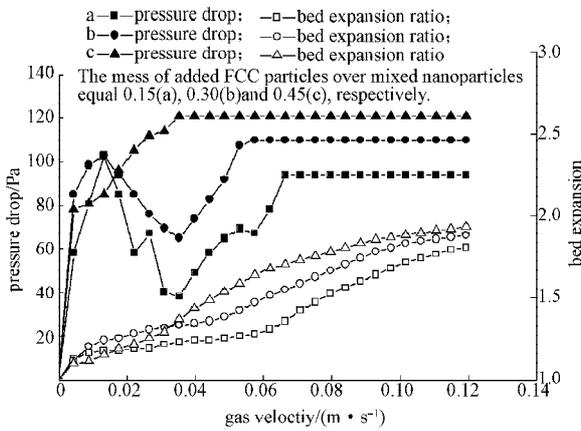


图 4 w(SiO₂):w(TiO₂)=7:3 时, 添加 FCC2 颗粒后的床层膨胀曲线和床层压降曲线

Fig. 4 Bed expansion and pressure drop curves of mixed nanoparticles of w(SiO₂):w(TiO₂)=7:3 with adding FCC2 particles

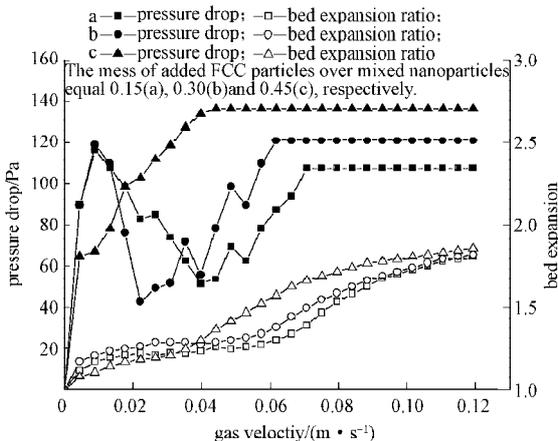


图 5 w(SiO₂):w(TiO₂)=7:3 时, 添加 FCC3 颗粒后的床层膨胀曲线和床层压降曲线

Fig. 5 Bed expansion and pressure drop curves of mixed nanoparticles of w(SiO₂):w(TiO₂)=7:3 with adding FCC3 particles

在此混合纳米颗粒中添加 FCC3 颗粒比分别为 0.15, 0.3 和 0.45 时, 最小流化速率为 0.053 1, 0.039 8

和 0.022 1 m/s; 而添加 FCC2 颗粒时 3 种添加比的最小流化速率为 0.066 3, 0.053 1 和 0.035 4 m/s。FCC3 的这种优势在 w(SiO₂):w(TiO₂)=5:5 表现的并不明显, 可以认为这时 FCC2 和 FCC3 两种颗粒对纳米颗粒流态化的改善能力相当 (图 6~7)。

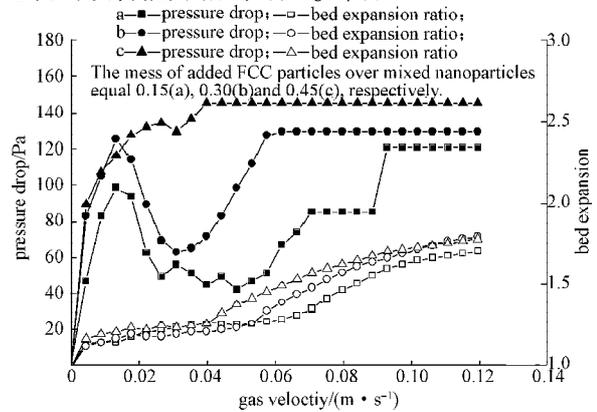


图 6 w(SiO₂):w(TiO₂)=5:5 时, 添加 FCC2 颗粒后的床层膨胀曲线和床层压降曲线

Fig. 6 Bed expansion and pressure drop curves of mixed nanoparticles of w(SiO₂):w(TiO₂)=5:5 with adding FCC2 particles

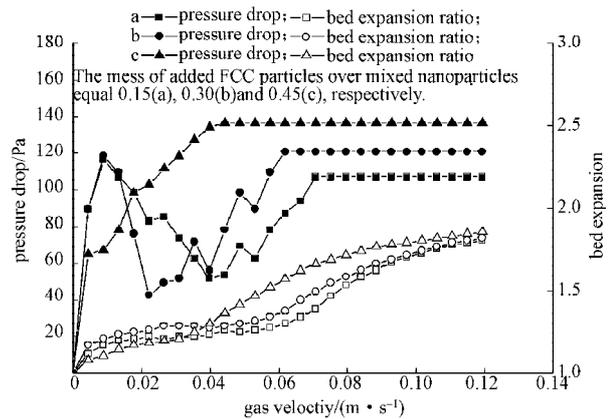


图 7 w(SiO₂):w(TiO₂)=5:5 时, 添加 FCC3 颗粒后的床层膨胀曲线和床层压降曲线

Fig. 7 Bed expansion and pressure drop curves of mixed nanoparticles of w(SiO₂):w(TiO₂)=5:5 with adding FCC3 particles

添加 FCC 颗粒比分别为 0.15, 0.3 和 0.45 时, 该组分的混合纳米颗粒的最小流化速率分别下降到 0.070 7, 0.057 5 和 0.039 8 m/s (添加 FCC2) 以及 0.070 7, 0.061 9 和 0.039 8 m/s (添加 FCC3)。w(SiO₂):w(TiO₂)=3:7 时, FCC2 颗粒对混合纳米颗粒的流态化性能改善作用超过了 FCC3 颗粒的改善作用 (如图 8~9)。

该混合纳米颗粒在添加比例为 0.15, 0.30 和 0.45 的 FCC2 颗粒后, 最小流化速率分别为 0.079 6, 0.061 9 和 0.044 2 m/s。而添加相同比例的 FCC3 颗粒, 体系的最小流化速率只下降至 0.084 0, 0.066 3 和 0.053 1 m/s, 大于相同添加量下添加 FCC2 颗粒的值。这一结果可能的原因与分层流化类似, 纳米 TiO₂ 较重, 颗粒较小,

粘性力较纳米SiO₂大。破碎纳米TiO₂的聚团需要更大的动能,对添加颗粒来说,更大的FCC2颗粒更容易获取较大的动能,从而破碎纳米TiO₂聚团的能力更强。添加大颗粒改善纳米颗粒流态化的另一机制是大颗粒作为核心进入纳米颗粒聚团,因此需要更大的比表面积。FCC1颗粒的比表面积较小,可能是导致其对纳米颗粒流态化性能改善不如FCC2和FCC3颗粒的主要原因。另外,由图3~9还可看出,添加的FCC颗粒越小,流化床的床层膨胀比越大,可能的原因是小的FCC颗粒与SiO₂在一起易形成散式流态化,从而大大增加床层膨胀比。最后,还可看到,添加FCC颗粒的比例在0.30后能够有明显的改善;但从0.30增加到0.45后,流化性能改善减缓,最终结果与添加比为0.30较为接近。可以认为,添加FCC颗粒的比例为0.30是一个较合理的选择。

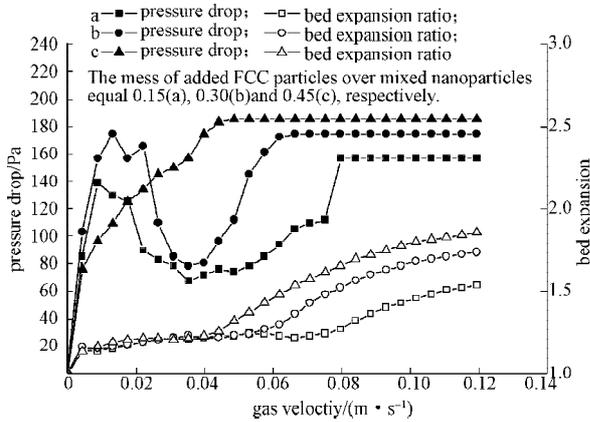


图8 $w(\text{SiO}_2):w(\text{TiO}_2)=3:7$ 时,添加FCC2颗粒后的床层膨胀曲线和床层压降曲线

Fig. 8 Bed expansion and pressure drop curves of mixed nanoparticles of $w(\text{SiO}_2):w(\text{TiO}_2)=3:7$ with adding FCC2 particles

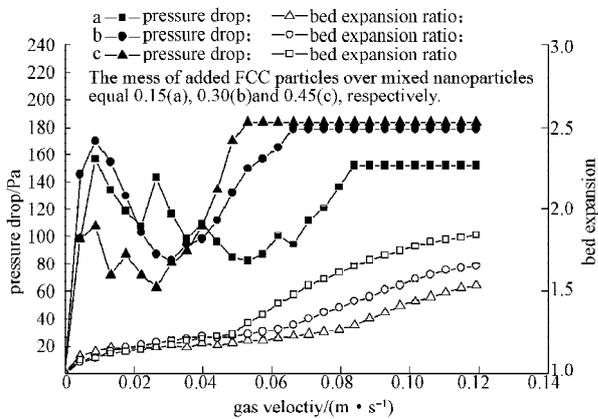


图9 $w(\text{SiO}_2):w(\text{TiO}_2)=3:7$ 时,添加FCC3颗粒后的床层膨胀曲线和床层压降曲线

Fig. 9 Bed expansion and pressure drop curves of mixed nanoparticles of $w(\text{SiO}_2):w(\text{TiO}_2)=3:7$ with adding FCC3 particles

2.3 散式流态化分析

R-Z方程开始用来评价固液流化床体系的流化性能^[19-20],后经试验证明气固流化床同样适用于此方程^[2,21-22]。R-Z方程为

$$U_g = U_t \varepsilon_g^n \quad (1)$$

式中: U_g 为表观气速;

U_t 为末端气速;

ε_g 是床层孔隙率;

n 是R-Z指数,由颗粒和床层的性质决定。

对式(1)等号两边取对数,可得

$$\lg U_g = \lg U_t + n \lg \varepsilon_g \quad (2)$$

用此式进行回归分析可以求出 U_t 和 n 。

由质量守恒可以得到 ε_g 和初始床层气含率 ε_{g0} 的关系为

$$\varepsilon_g = 1 - \frac{H_0}{H} (1 - \varepsilon_{g0}), \quad (3)$$

式中: H_0 为床层的初始(气速为0)高度;

H 为所用气速下的床层高度。

本试验中,纳米SiO₂的初始床层气含率取0.22,纳米TiO₂的初始床层气含率取0.18。

混合纳米颗粒由于是按照质量比混合,因此初始床层气含率近似地取两组份以质量含量为权重的加权平均数,即70% SiO₂, 50% SiO₂和30% SiO₂分别为0.21, 0.20和0.19。另外,大颗粒FCC的松堆密度大,气含率低,所以加入FCC后初始气含率有所降低。按照质量含量取加权平均数后,近似地认为加入FCC质量比为0和0.15时,初始气含率取混合纳米颗粒的气含率,而当加入FCC质量比为0.30和0.45时,在混合纳米颗粒初始气含率上减去0.10,即0.20(70% SiO₂), 0.19(50% SiO₂)和0.18(30% SiO₂)。

图10~12为不添加粗颗粒和分别添加比例为0.45的FCC2和FCC3颗粒的 $\lg U_g - \lg \varepsilon_g$ 图。

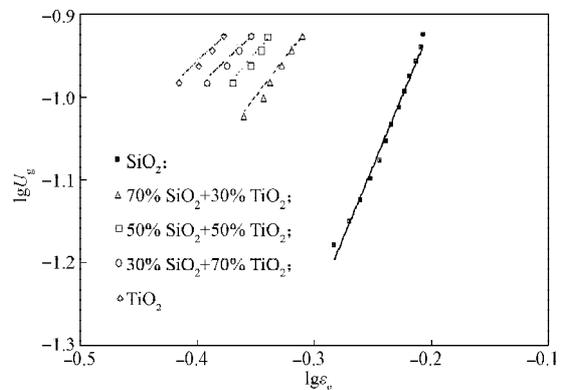


图10 不同组分混合颗粒不添加FCC时的 $\lg U_g - \lg \varepsilon_g$ 图

Fig. 10 The $\lg U_g - \lg \varepsilon_g$ diagram of different mixed particles without FCC

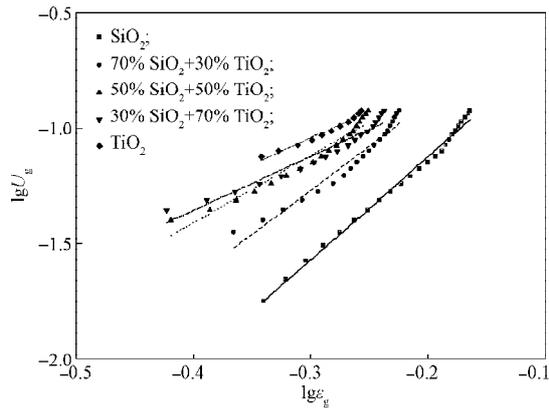


图 11 不同组分混合颗粒添加质量比为 0.45 的 FCC2 时的 $\lg U_g - \lg \varepsilon_g$ 图

Fig. 11 The $\lg U_g - \lg \varepsilon_g$ diagram of different mixed particles with adding FCC2 of mass ratio 0.45

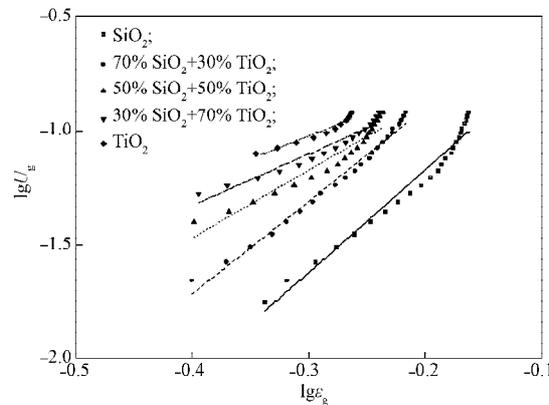


图 12 不同组分混合颗粒添加质量比为 0.45 的 FCC3 时的 $\lg U_g - \lg \varepsilon_g$ 图

Fig. 12 The $\lg U_g - \lg \varepsilon_g$ diagram of different mixed particles with adding FCC3 of mass ratio 0.45

从图 10~12 可以看出, $\lg U_g$ 和 $\lg \varepsilon_g$ 呈线性关系, 线性相关系数均大于 0.95。而且, 随着纳米 SiO_2 颗粒含量的增加, 指数 n 更大; 添加 FCC2 或者 FCC3 后指数 n 更大。各混合组分的 n 值见表 4。有学者^[23]认为 n 值在 4.65 附近表示散式流态化程度较好。可以看到, 纳米 SiO_2 更接近散式流态化, 在添加 FCC 颗粒后可以较好地流态化。混合纳米颗粒在不添加 FCC 时流化性能均不理想。不同组分的混合纳米颗粒在添加 FCC2 和 FCC3 颗粒, 且添加比为 0.30 和 0.45 时, 能够较大程度地改善流化性能。如 $w(\text{SiO}_2):w(\text{TiO}_2)=7:3$ 时, 添加比例为 0.45 的 FCC2 颗粒或 FCC3 颗粒可以达到比较接近散式流化的效果, 流化性能改善明显。

3 结语

混合纳米 SiO_2 和纳米 TiO_2 颗粒的流态化性能介于两个纯组分之间, 更接近流化性能更差的纳米 TiO_2 颗粒, 并且完全流化之前存在分层流化现象。添加 3 种 FCC 颗粒都能改善纳米颗粒的流态化性能, 但是 FCC1 颗粒的改善能力弱于 FCC2 和 FCC3。FCC2 颗粒更适用于流化纳米 TiO_2 或纳米 TiO_2 为主要组分的流化床, 而 FCC3 更适合于改善较轻的纳米 SiO_2 或纳米 SiO_2 为主要组分的床层。FCC 的添加比为需要大于 0.30, 并且添加比为 0.45 时流化性能和添加比为 0.30 时不能拉开差距。因此添加比为 0.3 是兼顾经济和效果的较佳选择。

表 4 不同组分添加不同 FCC 颗粒后的 n 值

Table 4 The n values for different mixed particles by adding different FCC particles

混合颗粒组份	FCC1 颗粒与纳米颗粒质量比				FCC2 颗粒与纳米颗粒质量比			FCC3 颗粒与纳米颗粒质量比		
	0	0.15	0.30	0.45	0.15	0.30	0.45	0.15	0.30	0.45
SiO_2	3.194 9	3.320 2	3.466 5	4.021 0	2.927 7	3.642 8	4.471 0	3.230 0	4.355 9	4.470 2
70% SiO_2 +30% TiO_2	1.862 7	1.957 9	2.622 0	3.270 3	2.044 1	3.021 0	3.814 5	2.210 0	3.275 3	4.043 4
50% SiO_2 +50% TiO_2	1.655 8	1.845 8	2.014 0	2.429 3	2.056 7	2.399 4	2.900 5	2.015 0	2.402 3	2.936 9
30% SiO_2 +70% TiO_2	1.343 3	1.509 4	1.810 5	2.318 1	1.639 0	2.000 6	2.323 8	1.613 8	2.006 7	2.239 3
TiO_2	1.327 4	1.464 6	1.720 5	2.022 0	1.608 1	1.871 6	2.296 6	1.478 2	1.729 2	2.011 0

参考文献:

- [1] Wang Y, Gu G, Wei F, et al. Fluidization and Agglomerate Structure of SiO_2 Nanoparticles [J]. Powder Technol, 2002, 124 (1/2): 152-159.
- [2] Zhu C, Yu Q, Dave R N. Gas Fluidization Characteristics of Nanoparticle Agglomerates[J]. AIChE Journal, 2005, 51 (2): 426-439.
- [3] 王 垚, 金 涌, 魏 飞, 等. 原生纳米级颗粒的聚团散式流态化[J]. 化工学报, 2002, 53 (4): 344-348. Wang Yao, Jin Yong, Wei Fei, et al. Agglomerate

- Particulate Fluidization of Primary Nanoparticles[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2002, 53 (4): 344-348.
- [4] 王 垚, 金 涌, 魏 飞, 等. 纳米级 SiO_2 颗粒流化床的塌落行为[J]. 化工学报, 2001, 52(11): 957-961. Wang Yao, Jin Yong, Wei Fei, et al. Bed Collapse Behavior of SiO_2 Nanoparticles [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering. 2001, 52(11): 957-961.
- [5] 王 垚, 金 涌, 魏 飞, 等. 纳米级 SiO_2 聚团散式流化中聚团参数及曳力系数[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(45): 32-35.

- Wang Yao, Jin Yong, Wei Fei, et al. Agglomeration Parameters and Drag Coefficients in Agglomerate Particulate Fluidization of SiO₂ Nanoparticles[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology Edition, 2001, 41(45): 32-35.
- [6] King M, Liang X, Carney C S, et al. Atomic Layer Deposition of UV-Absorbing ZnO Films on SiO₂ and TiO₂ Nanoparticles Using a Fluidized Bed Reactor[J]. Advanced Functional Materials, 2008, 18(4): 607-615.
- [7] Scheffe R, Frances A, King D, et al. Atomic Layer Deposition of Iron(III) Oxide on Zirconia Nanoparticles in a Fluidized Bed Reactor Using Ferrocene and Oxygen[J]. Thin Solid Films, 2009, 517(6): 1874-1879.
- [8] Dutta A, Dullea L V. Effects of External Vibration and the Addition of Fibers on the Fluidization of a Fine Powder[J]. AIChE Symp. Ser., 1991, 87: 38-46.
- [9] Liu Y, Kimura S. Fluidization and Entrainment of Difficult-to-Fluidize Fine Powder Mixed with Easy-to-Fluidize Large Particles[J]. Powder Technology, 1993, 75(2): 189-196.
- [10] Wang Z. Fluidization of Fine Particles and Effects of Additive Particles[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 1995.
- [11] Zhou Li, Diao Runli, Zhou Tao, et al. Characteristics of Non-Magnetic Nanoparticles in Magnetically Fluidized Bed by Adding Coarse Magnets[J]. Journal of Century South University Technology, 2011, 18(5): 1383-1388.
- [12] Zeng P, Zhou T, Yang J. Behavior of Mixtures of Nanoparticles in Magnetically Assisted Fluidized Bed[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2008, 47(1): 101-108.
- [13] Zhu J, Kaliyaperumal S, Barghi S, et al. Effects of Acoustic Vibration on Nano and Sub-Micron Powders Fluidization[J]. Powder Technology, 2011, 210(2): 143-149.
- [14] Ammendola P, Chirone R, Raganati F. Fluidization of Binary Mixtures of Nanoparticles Under the Effect of Acoustic Fields[J]. Advanced Powder Technology, 2011, 22(2): 174-183.
- [15] Xu C B, Zhu J. Parametric Study of Fine Particle Fluidization Under Mechanical Vibration[J]. Powder Technology, 2006, 161(2): 135-144.
- [16] Wang H, Zhou T, Yang J S, et al. Model for Calculation of Agglomerate Sizes of Nanoparticles in a Vibro-Fluidized Bed[J]. Chemical Engineering and Technology, 2010, 33(3): 388-394.
- [17] Meili L, Daleffe R, Freire J. Fluid Dynamics of Fluidized and Vibrofluidized Beds Operating with Geldart C Particles [J]. Chemical Engineering and Technology, 2012, 35(9): 1649-1656.
- [18] Zhou T, Li H Z. Effects of Adding Different Size Particles on Fluidization of Cohesive Particles[J]. Powder Technology, 1999, 102(3): 215-220.
- [19] Hakim L F, Portman J L, Casper M D, et al. Aggregation Behavior of Nanoparticles in Fluidized Beds[J]. Powder Technology, 2005, 160(3): 149-160.
- [20] Chauoki J, Chavarie C, Klvana D. Effect of Interparticle Forces on the Hydrodynamic Behaviour of Fluidized Aerogels[J]. Powder Technology, 1985, 43(2): 117-125.
- [21] Yang J, Zhou T, Song L. Agglomerating Vibro-Fluidization Behavior of Nanoparticles[J]. Advanced Powder Technology, 2009, 20(2): 158-163.
- [22] Valverde J M, Castellanos A. Fluidization of Nanoparticles: a Modified Richardson Zaki Law[J]. AIChE Journal, 2006, 52(2): 838-842.
- [23] Geldart D, Wong A C Y. Fluidization of Powders Showing Degrees of Cohesiveness: I. Bed Expansion[J]. Chemical Engineering Science, 1984, 39(10): 1481-1488.

(责任编辑: 申 剑)

