

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.03.012

# ZnO 和 CuO 混合纳米颗粒在添加 FCC 粗颗粒的流态化及聚团碰撞与破碎过程研究

徐 宝, 周 涛, 罗传宝, 张金霞, 范百林

(中南大学 化学化工学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 研究混合纳米 ZnO 和 CuO 颗粒添加 3 种不同粒径 FCC 粗颗粒 (催化裂化催化剂) 的流化行为, 用高速摄像机观察流化现象并对聚团碰撞与破碎过程、聚团成分进行分析。结果表明, 添加 FCC 粗颗粒可显著改善纳米颗粒的流化性能, FCC3 对纳米颗粒流化性能的改善效果比 FCC1 或 FCC2 更明显; 且随着 FCC 粗颗粒添加量的增加, 纳米颗粒流化行为的改善效果越好, 体系的混合均匀程度是影响混合纳米 ZnO 和 CuO 流化性能的重要因素。

**关键词:** 纳米颗粒; 粗颗粒; 流态化; 聚团; 团聚与破碎

中图分类号: TQ021.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2016)03-0063-08

## Research on the Agglomeration Collision and Fragmentation Process in a Fluidized Bed of ZnO and CuO Composite Nanoparticles Added with FCC Coarse Particles

XU Bao, ZHOU Tao, LUO Chuanbao, ZHANG Jinxia, FAN Bailin

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

**Abstract:** A research has been conducted on the fluidization behaviors of ZnO and CuO composite nanoparticles, added with FCC coarse particles of three different particle sizes (catalytic cracking catalysts). An observation of the whole fluidization process, with the aid of a high-speed camera, has been made for a detailed analysis of the agglomeration collision and fragmentation, and agglomeration components as well. The results show that the fluidization performance of the composite nanoparticles can be improved significantly with the addition of FCC coarse particles. Moreover, compared with the other two kinds of coarse particles FCC2 or FCC1, a more significant effect can be achieved with the addition of FCC3 in the process. With the increase of the addition amount of FCC coarse particles, the improvement of the fluidization performance of the composite nanoparticles becomes more obvious. Thus, it can be concluded that the mixing uniformity of nanoparticles is an important factor that influence the fluidization performance of ZnO and CuO composite nanoparticles.

**Keywords:** nanoparticles; coarse particles; fluidization; agglomeration; agglomeration fragmentation

## 0 引言

纳米颗粒具有尺寸小、比表面积大等特殊性质,

在各种工业应用领域 (如食品、塑料、颜料、化妆品和催化剂等领域) 中受到越来越广泛的关注<sup>[1-5]</sup>。作为催化剂的混合纳米颗粒, 可提高某些物质的选

收稿日期: 2016-03-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (21376269)

作者简介: 徐 宝 (1990-), 女, 湖南岳阳人, 中南大学硕士生, 主要研究方向为纳米颗粒流态化, E-mail: 1247520744@qq.com

通信作者: 周 涛 (1963-), 男, 湖南常德人, 中南大学教授, 博士生导师, 主要从事纳米材料, 超微细颗粒的制备和表面改性, 多相流与流态化技术方面的研究, E-mail: zhoutao@csu.edu.cn

择性。比如,  $\text{SnO}_2$  掺杂少量  $\text{CeO}$  作为催化剂可以提高对  $\text{CO}$  的选择性,  $\text{SnO}_2$  掺杂少量  $\text{ZrO}$  作为催化剂可以提高对  $\text{H}_2\text{S}$  气体的选择性。然而, 纳米颗粒具有很强的内部作用力和静电力, 颗粒之间会相互团聚<sup>[6]</sup>, 纳米颗粒在流化过程中容易形成活塞和沟流等不正常流化现象, 极大地阻碍了流化技术的广泛应用。纳米颗粒流化性能差会阻碍其作为催化剂的应用, 纳米颗粒混合均匀是拓宽这些应用的关键。

现有的研究中, 纳米颗粒流化性能主要通过 2 种方式进行改善: 一是添加粗颗粒改变聚团结构; 二是聚团碰撞与破碎阻止聚团增长。为此, 研究者采用不同的方法改善纳米颗粒的流化性能, 如: 磁场流化床<sup>[7-8]</sup>、声场辅助流化床<sup>[9-10]</sup>、振动流化床<sup>[11-13]</sup>、添加粗颗粒<sup>[14]</sup>等。与其他方法相比, 添加粗颗粒因其不需要额外添加辅助设备, 更易于实现。许多研究者探讨了添加粗颗粒对纳米颗粒流化行为的影响<sup>[15-16]</sup>。本课题组早前的研究表明, 流化聚团并不是由单一成分组成, 并提出聚团核-壳结构模型, 然而对聚团中各组分含量和聚团形成的动态过程并未探究。

本文研究了混合  $\text{ZnO}$  与  $\text{CuO}$  纳米颗粒体系添加 FCC 粗颗粒的流化行为, 并采用高速摄像机观察聚团碰撞与破碎过程。聚团成分分析表明, 混合纳米颗粒与 FCC 粗颗粒在流化过程中相互混合。通过黏性力分析得出添加 FCC 粗颗粒改善了混合纳米颗粒流化性能的结论。

## 1 实验部分

实验采用宽 40 mm、高 700 mm 的二维树脂玻璃流化床, 以便观察实验现象。在实验中, 使用烧结多孔板作为气体分布器, 使用硅胶干燥器干燥压缩空气, 使用转子流量计控制表观气体流速。纳米颗粒的流化效果通过测量床层膨胀 ( $H/H_0$ ) 与床层压降 ( $\Delta p$ ) 来表征。所有实验均在室温与常压下进行, 实验装置图及实验所用主要设备如图 1、表 1 所示。

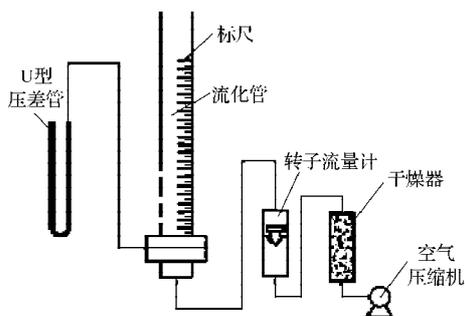


图 1 实验装置原理图

Fig. 1 A schematic diagram of the experimental apparatus

表 1 主要设备信息

Table 1 An information table of the main equipment

仪器设备	规格型号	生产厂家
转子流量计	LZB-6	浙江余姚工业自动化仪表厂
流化床	宽 40 mm, 高 700 mm	湖南大学教育科技发展有限公司
空气压缩机	ZB-0.1/8	台州市奥突斯工贸有限公司
U 型压力计	冀字: 30260139	河北武强县红星仪表厂
干燥箱	202-3 型	上海市实验仪器总厂
电感耦合等离子体发射光谱仪	PE5300DV	PerkinElmer 股份有限公司
高速摄像机	VT-9000	日本基恩士公司

实验原料为  $\text{ZnO}$  和  $\text{CuO}$  纳米颗粒, 颗粒基本物理性质如表 2 所示。实验过程中添加的 FCC 粗颗粒是一种多组分混合物, 其主要成分为三氧化二铝和二氧化硅, 并含有极少量的三氧化二铁、氧化二钠和氧化二钾。根据粒径, 课题组使用不同规格的标准筛将 FCC 颗粒分为 3 种类型: FCC1、FCC2 和 FCC3。FCC 粗颗粒的部分物理性质如表 3 所示。对  $w(\text{ZnO}) : w(\text{CuO}) = 9:1, 8:2$  和  $7:3$  不同质量分数的  $\text{ZnO}$  和  $\text{CuO}$  混合纳米颗粒进行流态化实验, 再以  $w(\text{ZnO}) : w(\text{CuO}) = 9:1$  固定比例的混合纳米颗粒为研究对象, 向体系中添加质量分数分别为 10%、20%、30% 和 40% 的 3 种不同粒径 FCC 粗颗粒, 实验过程中用高速摄像机观察聚团碰撞与破碎过程。FCC 颗粒、 $\text{ZnO}$  和  $\text{CuO}$  纳米颗粒在加入到流化列管前进行混合。不同质量分数的纳米颗粒以 40 mm 的固定高度加入到流化床中 (纳米颗粒在实验前干燥 2 h)。

表 2 纳米颗粒部分物理性质

Table 2 Physical properties of nanoparticles

颗粒	颜色	形状	尺寸/nm	松堆密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	原生密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
ZnO	白色	球形	30	375	5 600
CuO	黑色	球形	40	790	7 980

表 3 FCC 粗颗粒部分物理性质

Table 3 Physical properties of added FCC coarse particles

粗颗粒	粒径/ $\mu\text{m}$	松堆密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	原生密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
FCC1	90~109	814	976
FCC2	61~89	828	993
FCC3	38~60	850	1 020

在床层流化稳定后, 采用自然流出的方法分别从床层上部和中部进行取样。每个样品均取 0.1 g, 在加热和搅拌的条件下用 5 mol/L 的硫酸溶液溶解。将溶液稀释到适宜浓度后, 用电感耦合等离子体发射光谱分析聚团各成分浓度。

## 2 结果与讨论

课题组从床层膨胀与压降、聚团成分分析和聚团碰撞与破碎过程3个方面进行分析,并通过聚团黏性力分析和高速摄像机对试验中的现象进行分析和解释。

### 2.1 混合纳米颗粒流化行为

首先对ZnO与CuO混合纳米颗粒未添加FCC粗颗粒的情况进行流化实验,从实验中观测到:混合纳米颗粒在床层上部形成鼓泡流化,床层底部未流化并有大量聚团沉积,这种现象称为死床或固定床;当表观气速较高时,床层出现较多沟流与鼓泡。因此可得,ZnO与CuO混合纳米颗粒在未添加FCC粗颗粒的情况下的流化质量较差。图2为ZnO和CuO混合纳米颗粒的床层压降与床层膨胀曲线。由图可知:床层压降波动剧烈,气速较大时压降才能达到平稳,说明体系的最小流化气速较高;床层膨胀率低,且随着表观气速增加,床层膨胀率缓慢增加。

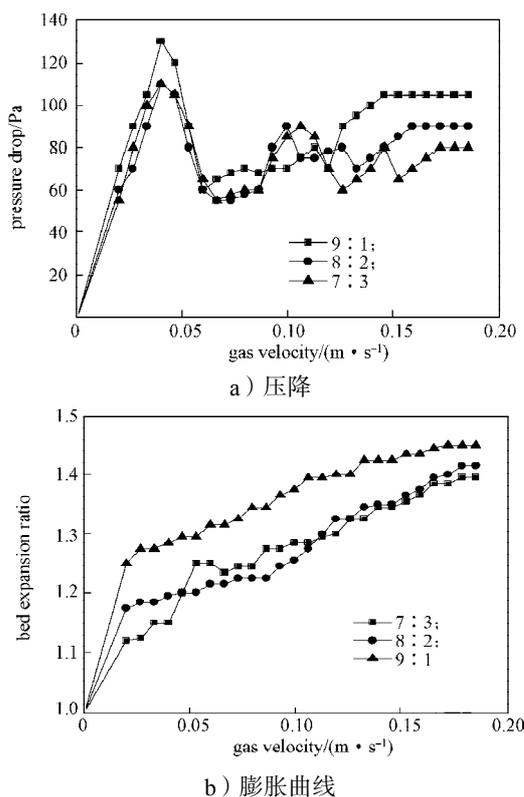


图2  $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})=9:1, 8:2$  和  $7:3$  时床层压降与膨胀曲线  
Fig. 2 A curve graph of bed pressure drop and expansion with mass ratios of  $9:1, 8:2$  and  $7:3$  between ZnO and CuO particles

当 $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})=9:1$ 的混合纳米颗粒添加FCC粗颗粒后,混合纳米颗粒的流化性能得到改善。床层底部不流化区域减少并且颗粒粘附流化管壁的现象得到改善。图3~5为 $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})=9:1$ 时添加不同粒径FCC粗颗粒的床层压降和床层膨胀曲线。

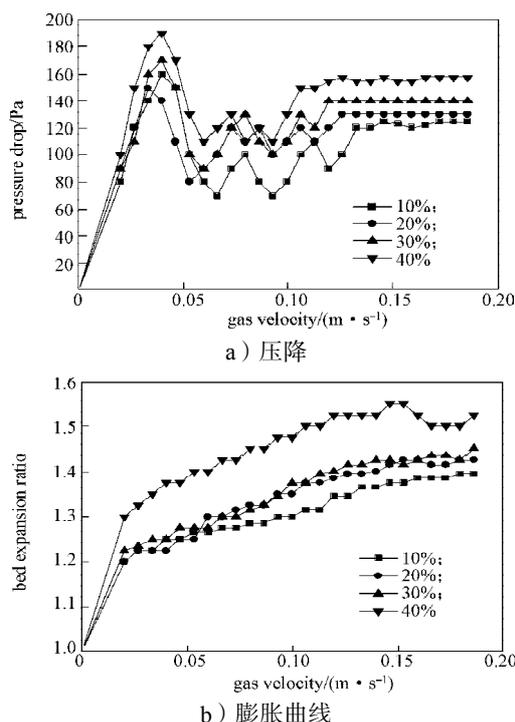


图3  $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})=9:1$ 时FCC1粗颗粒添加质量分数为10%, 20%, 30%, 40%的床层压降与床层膨胀曲线

Fig. 3 A curve graph of bed pressure drop and expansion of composite nanoparticles added with FCC1 coarse particles while  $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})=9:1$ , with the addition amount of FCC1 being 10%, 20%, 30% and 40%, respectively

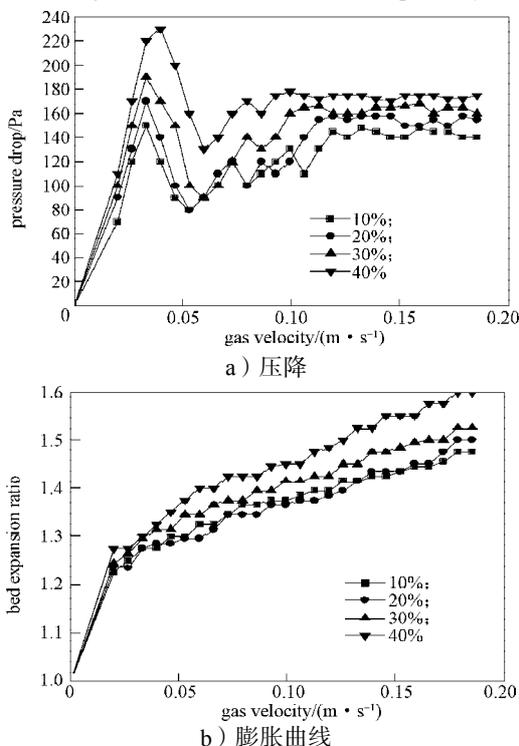


图4  $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})=9:1$ 时FCC2粗颗粒添加质量分数为10%, 20%, 30%, 40%的床层压降曲线与床层膨胀曲线

Fig. 4 A curve graph of bed pressure drop and expansion of composite nanoparticles added with FCC2 coarse particles while  $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})=9:1$ , with the addition amount of FCC2 being 10%, 20%, 30% and 40%, respectively

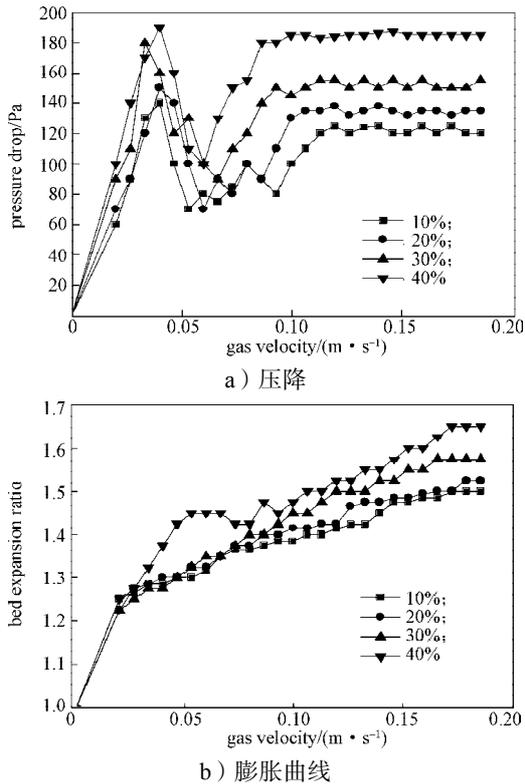


图5  $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})=9:1$  时 FCC3 粗颗粒的添加质量分数为 10%、20%、30%、40% 的床层压降曲线与床层膨胀曲线  
 Fig. 5 A curve graph of bed pressure drop and expansion of composite nanoparticles added with FCC3 coarse particles while  $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})=9:1$ , with the addition amount of FCC1 being 10%, 20%, 30% and 40%, respectively

由图 3~5 可知：添加不同粒径 FCC 粗颗粒对混合纳米颗粒的流化行为有不同的影响。当同一类型的 FCC 粗颗粒添加量越多，对混合纳米颗粒的流化行为改善效果越好。例如，不添加 FCC 粗颗粒时混合纳米颗粒的最小流化气速为 0.153 m/s。而当 FCC3 的添加质量分数分别为 10%、20%、30% 和 40% 时，最小流化气速降低到 0.113、0.110、0.093 和 0.086 m/s。对于 FCC1 和 FCC2，当添加质量分数分别为 10%、20%、30% 和 40% 时，最小流化气速降低到 0.119、0.113、0.110、0.930 m/s 和 0.130、0.126、0.119、0.110 m/s。从以上实验结果可得，添加 FCC 粗颗粒可以改善混合纳米颗粒的流化性能。添加 FCC3 颗粒对混合纳米颗粒流化性能的改善比添加 FCC1 和 FCC2 好，这是因为 FCC3 颗粒粒径小、比表面积大，因此它能够使更多的纳米颗粒粘附在它的表面，从而形成核-壳结构的聚团。核-壳结构聚团比混合纳米颗粒聚团更重，因而可以获得更大的动能，更容易破碎<sup>[17]</sup>。由以上分析可知，FCC 颗粒的尺寸越小越有利于混合纳米颗粒流化质量的提高。

2.2 聚团成分分析

图6为 $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})$ 分别为9:1, 8:2, 7:3时的聚团

成分图。从图 6 可知，床层上部  $w(\text{ZnO})$  和  $w(\text{CuO})$  与床层中部几乎相同。当  $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})=7:3$  时，聚团中 CuO 的含量比  $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})=8:2$  或 9:1 时多。聚团中 CuO 含量越多，则体系的流化效果越差。这是因为，纳米 CuO 颗粒的原生密度比纳米 ZnO 颗粒原生密度大，并且纳米 ZnO 是多孔结构（如图 7 所示），而 CuO 结构光滑紧密（如图 8 所示）。因此，对相同尺寸的聚团，CuO 质量分数越大聚团越重，聚团流化时需要更大的流体曳力。

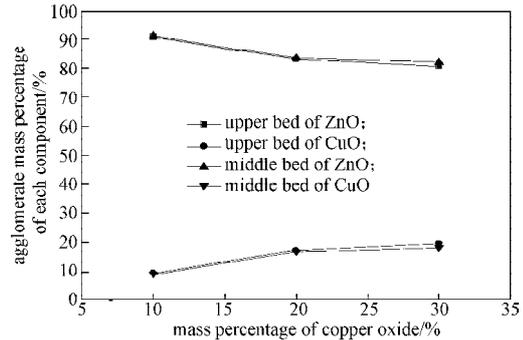


图 6  $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})$  为 9:1, 8:2, 7:3 时，纳米 ZnO 与 CuO 的聚团成分

Fig. 6 Agglomeration component analysis diagram of ZnO and CuO binary nanoparticles with the mass ratio being 9:1, 8:2, 7:3, respectively

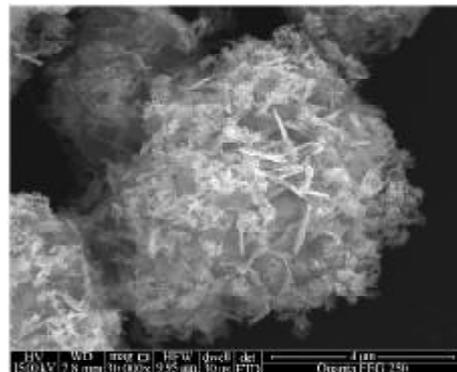


图 7 纳米 ZnO 扫描电镜图

Fig. 7 SEM image of primary ZnO particles

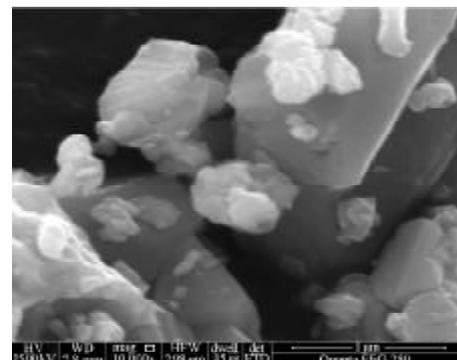


图 8 纳米 CuO 扫描电镜图

Fig. 8 SEM image of primary CuO particles

FCC 粗颗粒与混合纳米颗粒在流化过程中相互

碰撞形成新的聚团结构,聚团中各组分含量也会改变。图9~11为添加3种FCC粗颗粒后床层上部与中部聚团成分图。由图可知,随着FCC粗颗粒添加量的增加,各聚团中ZnO含量均逐渐减少,FCC含量均逐渐增加。实验条件相同时,床层上部聚团中FCC含量多于床层中部。在FCC添加量相同时,聚团中FCC3含量大于FCC1或FCC2的。当添加FCC粗颗粒粒径相同时,随着添加量的增大,聚团中FCC含量也增加。然而,不论是在床层上部还是床层中部,CuO的含量基本不变。这是因为,在流化过程中纳米CuO颗粒与ZnO聚团发生碰撞并吸附在ZnO聚团表面,从而形成如图12所示的聚团结构。然而,CuO物料密度较大,仅小尺寸的CuO颗粒能够在床层上部与中部流化。因此,床层上部和床层中部CuO与ZnO纳米聚团碰撞的几率相差不大,碰撞后形成的聚团结构中的CuO以吸附在ZnO聚团表面形式存在,因此床层上部与床层中部CuO的含量基本不变。聚团中FCC粗颗粒的含量越多,则混合纳米颗粒的流化性能越好。这是因为FCC粗颗粒属于微米级颗粒,其颗粒尺寸大,表面粗糙,对纳米颗粒聚团起到类似分割的作用,可使混合纳米颗粒聚团破碎。破碎后的纳米颗粒包覆在FCC粗颗粒表面,这会使纳米颗粒之间的黏性力大大减小<sup>[18]</sup>。

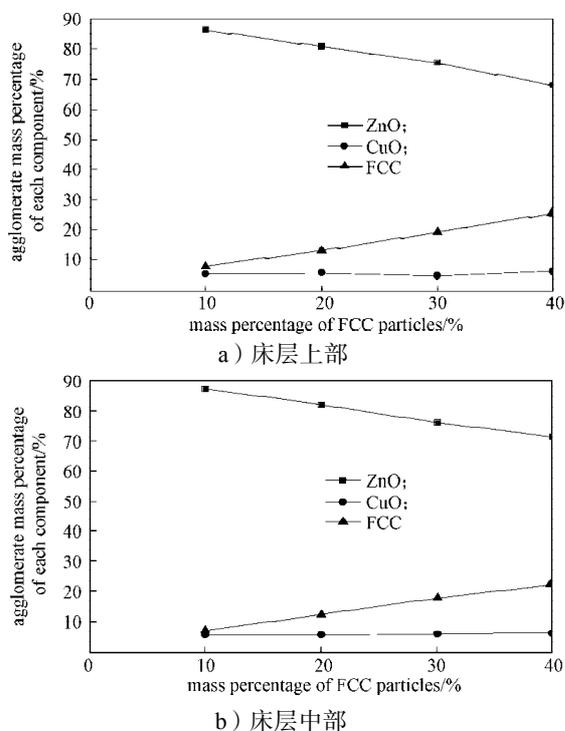


图9  $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})=9:1$ 时FCC1粗颗粒的添加质量分数为10%、20%、30%、40%的床层不同位置聚团成分  
Fig. 9 A component analysis diagram of agglomeration added with FCC1 while  $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})=9:1$ , with the addition amount of FCC1 being 10%, 20%, 30% and 40%, respectively

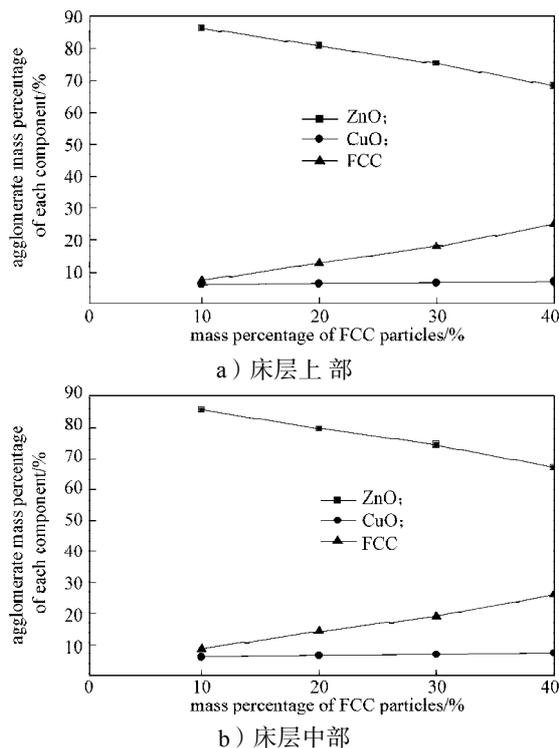


图10  $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})=9:1$ 时FCC2粗颗粒的添加质量分数为10%、20%、30%、40%的床层不同位置聚团成分  
Fig. 10 A component analysis diagram of agglomeration added with FCC1 while  $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})=9:1$ , with the addition amount of FCC2 being 10%, 20%, 30% and 40%, respectively

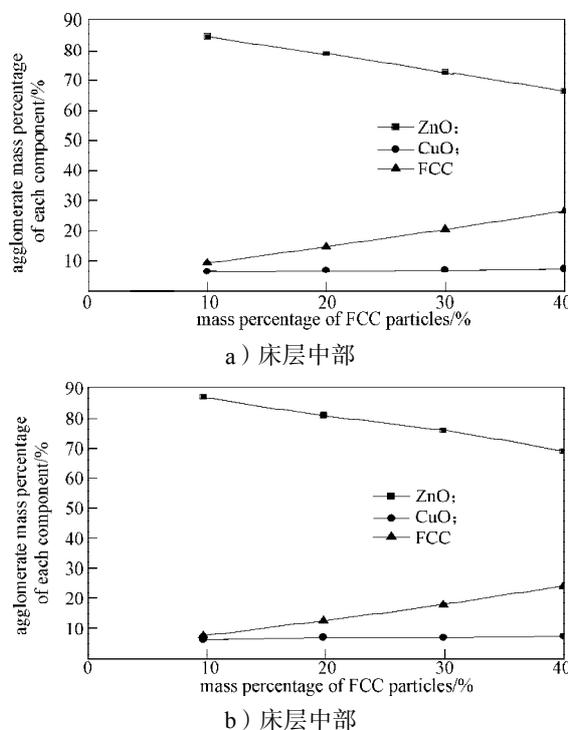


图11  $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})=9:1$ 时FCC3粗颗粒的添加质量分数为10%、20%、30%、40%的床层不同位置聚团成分  
Fig. 11 A component analysis diagram of agglomeration added with FCC1 while  $w(\text{ZnO}):w(\text{CuO})=9:1$ , with the addition amount of FCC3 being 10%, 20%, 30% and 40%, respectively

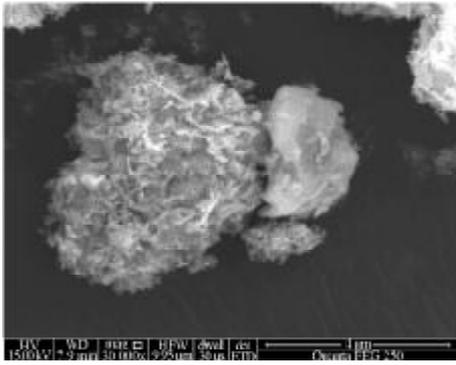


图 12 添加 FCC 粗颗粒后纳米颗粒聚团扫描电镜图

Fig. 12 SEM image of binary nanoparticle agglomeration with FCC coarse particles added

### 2.3 聚团黏性力分析

添加 FCC 粗颗粒可以改善混合纳米颗粒的流态化性能，这可通过聚团黏性力分析进行解释。

纳米颗粒以聚团形式流化，当未添加 FCC 粗颗粒时，颗粒之间的接触仅仅是混合纳米颗粒聚团之间的接触。混合纳米颗粒聚团之间的范德华力可用下式计算：

$$F = \frac{H}{12\delta^2} \cdot \frac{d_{a1}d_{a2}}{(d_{a1} + d_{a2})} \quad (1)$$

式中： $F$  为聚团间的范德华力；

$\delta$  为 2 种混合纳米聚团间的间距；

$H$  为 Hamaker 常数；

$d_{a1}, d_{a2}$  为聚团直径。

因为  $d_{a1}, d_{a2}$  不能准确确定，因此用平均聚团直径  $d_a$  代替  $d_{a1}, d_{a2}$ ，则式 (1) 可简化为：

$$F = \frac{Hd_a}{24\delta^2} \quad (2)$$

添加 FCC 粗颗粒后，纳米颗粒粘附在 FCC 粗颗粒表面，形成核-壳结构。此时颗粒之间的接触变为 FCC 粗颗粒与混合纳米颗粒之间的接触，黏性力可用以下公式计算得到：

$$F_f = \frac{H_f}{12\delta_f^2} \cdot \frac{d_1d_f}{(d_1 + d_f)} = \frac{H_f d_1}{12\delta_f^2}, d_1 \ll d_f \quad (3)$$

式中： $F_f$  为添加 FCC 粗颗粒后的范德华力；

$H_f$  为 Hamaker 常数；

$d_1$  为纳米颗粒粒径；

$d_f$  为 FCC 粗颗粒粒径；

$\delta_f$  为 FCC 粗颗粒与纳米颗粒之间的间距。

由于  $H$  和  $H_f$  在数量级上相等，因此可以近似地认为  $H \approx H_f$ ，同样， $\delta \approx \delta_f$ 。由式 (3) 与式 (2) 相比可得：

$$\frac{F_f}{F} = \frac{H_f}{H} \cdot \frac{\delta^2}{\delta_f^2} \cdot \frac{2d_1}{d_a} \quad (4)$$

由于  $d_1$  为纳米尺寸， $d_a$  为微米尺寸，因此  $2d_1/d_a \ll 1$ ，

这表明添加粗颗粒后形成的核-壳结构聚团黏性力大大降低。由于  $F_f$  远小于  $F$ ，流化时聚团碰撞后粘结在一起的可能性大大减小。因此，添加粗颗粒后纳米颗粒的流化性能显著改善。

在流态化过程中，FCC 粗颗粒被纳米颗粒包覆，因此聚团中 FCC 粗颗粒的质量分数越高说明被包覆的 FCC 越多。FCC 的被包覆率定义为：

$$\text{被包覆率} = w(\text{FCC})/w(\text{ZnO})。$$

床层上部与中部 FCC 粗颗粒的被包覆率列于表 5~6。

表 5 床层上部 FCC 粗颗粒被包覆率

Table 5 The clad ratio of the FCC coarse particles in the upper part of bed %

FCC 粗颗粒添加 质量分数	被包覆率		
	FCC1	FCC2	FCC3
10	9.08	9.71	10.81
20	16.28	17.72	18.30
30	25.72	25.48	27.89
40	37.47	38.52	39.80

表 6 床层中部 FCC 粗颗粒被包覆率

Table 6 The clad ratio of the FCC coarse particles in the middle part of bed %

FCC 粗颗粒添加 质量分数	被包覆率		
	FCC1	FCC2	FCC3
10	8.21	8.25	8.59
20	14.94	15.21	15.98
30	23.47	23.10	23.83
40	31.47	34.50	36.62

由表 5~6 可知，被混合纳米颗粒包覆的 FCC 粗颗粒的含量随着 FCC 粗颗粒添加量的增加而逐渐增加。FCC 粗颗粒与混合纳米颗粒接触时会被纳米颗粒粘附，使混合纳米颗粒聚团之间的接触减少。根据上述分析，聚团间的黏性力会减小。当 FCC 粗颗粒被包覆率很低时，聚团之间的接触基本上都是混合纳米颗粒聚团的接触；当包覆率增加时，聚团在接触过程中总存在 FCC 颗粒，从而减小了聚团之间的黏性力<sup>[19]</sup>。

### 2.4 聚团团聚与破碎分析

纳米颗粒是以聚团的形式进行流化，聚团的形状和尺寸等对纳米颗粒流化行为有较大影响。一些研究者对聚团的结构及聚团大小等进行了研究，但对于聚团形成的动态过程却少有报道。根据已有文献报道<sup>[20]</sup>，聚团碰撞后有 3 种现象：分离、团聚或者破碎。研究组用高速摄像机观察并拍摄纳米混合颗粒在流化过程中聚团碰撞与破碎过程，图 13 是聚团碰撞的过程图。由图 13a 可知，2 个聚团斜向碰撞然后在相反的方向分离。分离后的 2 个聚团其中 1 个向

上运动,另外1个向下运动。2个聚团分离后,新聚团的重力、流体曳力和应力也随之改变,新聚团结构逐渐变成紧密球形结构。如图13b所示,运动方向相同的1个大聚团与1个小聚团相互碰撞。聚团之间较大的黏性力使2个聚团紧紧地团聚在一起。在团聚过程中,聚团尺寸逐渐减小形成球形结构。从图13c观察到,一个大聚团和一个小聚团在水平方向上碰撞并团聚在一起,随后又破碎成3个小聚团。2个聚团碰撞后形成的大聚团为长链结构,而长链在收缩过程中会增加聚团的外部应力,从而导致长链在应力最弱的点破碎分离<sup>[21]</sup>。同样,在碰撞过程中存在如图13d所示的现象,1个大聚团在流化过程中既不与其他聚团碰撞团聚,也不破碎分离,聚团结构由大而疏松逐渐变成紧密的接近于球形的结构,聚团的孔隙度变小。这4种现象是纳米颗粒流化过程中最常见的情形。此外,小颗粒吸附在大聚团上,当聚团与聚团之间发生碰撞与分离时,小颗粒不会与聚团分离。综上所述,大聚团中包含许多原始颗粒或者小聚团,当2个聚团相互碰撞时,聚团结构会重排或者形成长链结构,从而产生更大的外部应力使聚团破碎。但是,小颗粒没有重排的可能和能力。总之,在纳米颗粒流化过程中,无论聚团碰撞后团聚在一起还是分离或破碎,其结果都是使聚团结构逐渐变成紧密的球形结构,并减小聚团尺寸。聚团尺寸越小,纳米颗粒的流化效果越好。因此,聚团结构越接近球形越有利于纳米颗粒流化。

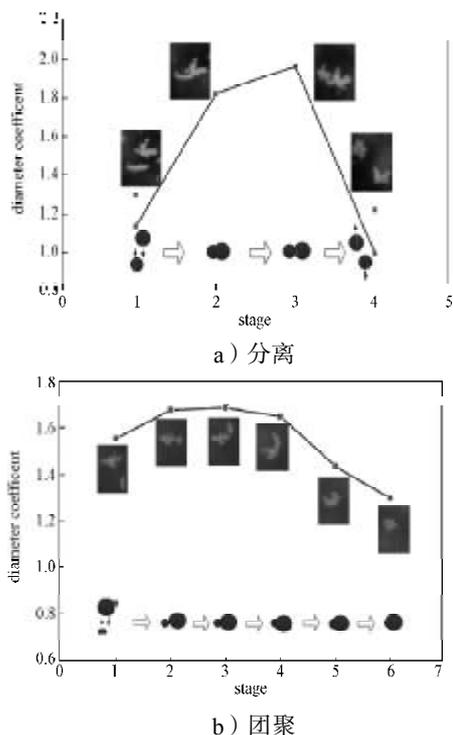


图13 聚团碰撞过程图

Fig. 13 Process graphs of agglomeration collision

### 3 结语

ZnO和CuO混合纳米颗粒的流化性能随着FCC粗颗粒的添加逐渐得到改善。当ZnO与CuO混合纳米颗粒的质量分数之比为9:1时,FCC粗颗粒的最佳添加质量分数为40%。FCC3颗粒对混合纳米颗粒流化效果的改善效果最好,在流化过程中FCC粗颗粒被纳米颗粒粘附,显著减小了聚团黏性力,聚团碰撞与破碎使聚团尺寸减小并形成紧密的聚团结构。

该工作的创新性是在二维流化床中研究了混合纳米ZnO与CuO添加FCC粗颗粒的流化行为,并分析了流化后聚团各组分含量,通过计算聚团间的范德华力解释混合纳米颗粒流化行为改善的原因;采用高速摄像机观察了混合纳米颗粒在流化过程中的动态碰撞过程,得出聚团碰撞与破碎中的4种基本过程。

#### 参考文献:

- [1] OMMEN J R V, VALVERDE J M, PFEFFER R. Fluidization of Nanopowders: A Review[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2012, 14(3): 1-29.
- [2] MIAO Q, WANG C, WU C, et al. Fluidization of Sawdust in a Cold Model Circulating Fluidized Bed: Experimental Study[J]. Chemical Engineering Journal,

- 2011, 167(1): 335-341.
- [3] 宋晓岚, 杨振华, 邱冠国, 等. 纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的制备及其悬浮液的分散稳定[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2003, 34(5): 484-488.
- SONG Xiaolan, YANG Zhenhua, QIU Guanguo, et al. Synthesis of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Nanoparticles and Dispersion and Stability for Its Suspension[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2003, 34(5): 484-488.
- [4] LIANG X Z, DUAN H, ZHOU T, et al. Fluidization Behavior of Binary Mixtures of Nanoparticles in Vibro-Fluidized Bed[J]. Advanced Power Technology, 2014, 25(1): 236-243.
- [5] BRENNAN W, JACOBSON M, BOOK G, et al. Development of a Triboelectric Procedure for the Measurement of Mixing and Drying in a Vibrated Fluidized Bed[J]. Powder Technology, 2008, 181(2): 178-185.
- [6] ZHU C, YU Q, DAVE R N, et al. Gas Fluidization Characteristics of Nanoparticle Agglomerates[J]. Aiche Journal, 2005, 51(2): 426-439.
- [7] ZHOU L, DIAO R L, ZHOU T, 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.
- [8] ZENG P, ZHOU T, YANG J. Behavior of Mixtures of Nano-Particles in Magnetically Assisted Fluidized Bed[J]. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification, 2008, 47(1): 101-108.
- [9] 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.
- [10] SI C D, GUO Q J. Fluidization Characteristics of Binary Mixtures of Biomass and Quartz Sand in an Acoustic Fluidized Bed[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008, 47(23): 9773-9782.
- [11] XU C B, ZHU J. Parametric Study of Fine Particle Fluidization Under Mechanical Vibration[J]. Powder Technology, 2006, 161(2): 135-144.
- [12] 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 & Technology, 2010, 33(3): 388-394.
- [13] MEILI L, DALEFFE R, FREIRE J. Fluid Dynamics of Fluidized and Vibro-Fluidized Beds Operating with Geldart C Particles[J]. Chemical Engineering & Technology, 2012, 35(9): 1649-1656.
- [14] ZHOU T, LI H Z. Effects of Adding Different Size Particles on Fluidization of Cohesive Particles[J]. Powder Technology, 1999, 102(3): 215-220.
- [15] 周涛, 段昊, 唐文江, 等. 混合纳米  $\text{SiO}_2$  和纳米  $\text{TiO}_2$  颗粒在添加 FCC 的流态化研究[J]. 湖南工业大学学报, 2014, 28(4): 1-7.
- ZHOU Tao, DUAN Hao, TANG Wengjiang, et al. Fluidization Behavior of Mixed  $\text{SiO}_2$  and  $\text{TiO}_2$  Nanoparticles with FCC Particles[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2014, 28(4): 1-7.
- [16] AJBAR A, ALHUMAZI K, ASIF M. Improvement of the Fluidizability of Cohesive Powders Through Mixing with Small Proportions of Group A Particles[J]. Candian Journal of Chemical Engineering, 2005, 83(6): 930-943.
- [17] DUAN Hao, LIANG Xizhen, ZHOU Tao, et al. Fluidization of Mixed  $\text{SiO}_2$  and  $\text{ZnO}$  Nanoparticles by Adding Coarse Particles[J]. Powder Technology, 2014, 267(1/2): 315-321.
- [18] EI R W, SHANG H, KLAUSNER J F, et al. A Contact Model for the Effect of Particle Coating on Improving the Flowability of Cohesive Powders[J]. Kona, 1997, 15: 132-141.
- [19] YANG J, SLIVA A, BANERJEE A, et al. Dry Particle Coating for Improving the Flowability of Cohesive Powder[J]. Powder Technology, 2005, 158(1/2/3): 21-33.
- [20] 周涛. 粘性颗粒聚团流态化及应用[M]. 北京: 化工工业出版社, 2008: 28-37.
- ZHOU Tao. Agglomerating Fluidization of Cohesive Particles[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 28-37.
- [21] SALAMEH S, SCHOLZ R, JIN W S, et al. Contact Behavior of Size Fractionated  $\text{TiO}_2$  Nanoparticle Agglomerates and Aggregates[J]. Powder Technology, 2014, 256: 345-351.

(责任编辑: 申剑)

